Marine Engine Fault Diagnosis and Intelligent Early Warning System

船舶轮机故障诊断与智能预警系统

王龙　吴大治　主编

SCIENTIFIC
Publishing Limited

British National Bibliography

Cataloguing-in-Publication(CIP) programme

Title: Marine Engine Fault Diagnosis and Intelligent Early Warning System

Author: Long Wang, Dazhi Wu, author.

Publisher Details: Cambridge: UK Scientific Publishing, 202607.

Identifier:p25751781708273072

ISBN: 9781806411511

BNB: GBC6082962

Marine Engine Fault Diagnosis and Intelligent Early Warning System

船舶轮机故障诊断与智能预警系统

SCIENTIFIC
Publishing Limited

Address: Dollman Street, Birmingham, United Kingdom, B7 4RP

Tel: +441223603549

Email: contact@ukscip.com

Format: 170mm×240mm 1/16

Sheets: 16.75

Word Counts: 200,000

UK Scientific Publishing Limited

前言

PREFACE

随着全球航运业的快速发展，船舶的大型化、自动化和智能化程度不断提高，轮机系统作为船舶的“心脏”，其可靠性和安全性直接关系到船舶的运营效率和航行安全。然而，传统的轮机维护模式主要依赖定期检修和事后维修，难以适应现代船舶高效、安全、经济的运营需求。在这一背景下，基于智能技术的故障诊断与预警系统应运而生，成为提升轮机管理水平的必然选择。

船舶轮机系统结构复杂，工作环境恶劣，故障类型多样且机理复杂。从主机、辅机到推进系统，各个子系统相互关联，任何一个部件的故障都可能引发连锁反应，造成严重的经济损失甚至安全事故。传统的故障诊断方法虽然在一定程度上能够识别故障，但存在诊断精度不高、实时性差、依赖专家经验等局限性。随着传感器技术、数据采集技术和人工智能技术的快速发展，智能故障诊断与预警系统为解决这些问题提供了全新的思路和技术手段。

本书旨在系统阐述船舶轮机故障诊断与智能预警的理论基础、关键技术及工程应用。全书以“机理分析—传统方法—智能技术—系统实现—应用验证”为主线，构建了完整的知识体系。在内容安排上，既注重理论的系统性和完整性，又强调技术的实用性和前瞻性。从故障机理的深入剖析到智能算法的详细推导，从系统架构的精心设计到工程案例的全面展示，力求为读者提供全方位的知识指导。

特别值得关注的是，本书将传统诊断方法与智能技术有机结合，既保留了振动分析、油液分析等成熟技术的实用价值，又重点介绍了人工神经网络、深度学习、大数据分析等前沿技术的创新应用。在智能预警系统设计方面，本书不仅提供了完整的架构方案，还详细论述了传感器网络布置、数据采集传输、预警算法实现等关键技术细节，具有较强的工程指导意义。

当前，全球航运业正经历数字化转型的关键时期，智能船舶已成为行业发展的必然趋势。作为智能船舶的核心组成部分，轮机智能预警系统的发展水平直接关系到船舶的智能化程度。本书的出版恰逢其时，不仅总结了该领

域的最新研究成果，也为未来技术发展指明了方向。通过数字孪生、人工智能等新技术的融合应用，轮机管理将逐步实现从被动维修到主动预防、从经验决策到数据驱动的根本性转变。

本书的编写得到了多位业内专家的悉心指导，也参考了大量国内外最新研究成果。希望本书能够为船舶轮机工程领域的科研人员、工程技术人员以及相关专业师生提供有价值的参考，共同推动我国船舶工业智能化水平的提升。

本书共 10 章，王龙负责第 1-7 章，共 14 万字；吴大治负责第 8-10 章，共 6 万字。限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正

—— 作者

目录

CONTENTS

第一章 船舶轮机故障诊断概述 …… 1

第一节 船舶轮机系统组成与工作原理 …… 1

第二节 轮机故障诊断技术的发展历程 …… 7

第三节 智能预警系统在轮机管理中的重要性 …… 13

第四节 船舶轮机故障诊断面临的挑战与未来趋势 …… 19

第二章 轮机故障机理与特征分析 …… 25

第一节 轮机典型故障类型及机理 …… 25

第二节 故障特征参数提取方法 …… 31

第三节 故障特征信号处理方法 …… 37

第四节 故障特征数据库构建 …… 43

第三章 传统故障诊断方法 …… 49

第一节 基于振动分析的故障诊断 …… 49

第二节 基于油液分析的故障诊断 …… 55

第三节 基于温度监测的故障诊断 …… 60

第四节 基于性能参数分析的故障诊断 …… 66

第四章 智能故障诊断技术 …… 73

第一节 人工神经网络在故障诊断中的应用 …… 73

第二节 支持向量机故障诊断方法 …… 79

第三节 模糊逻辑诊断技术 …… 86

第四节 专家系统在轮机故障诊断中的应用 …… 92

第五章 数据驱动的故障诊断方法 …… 101

第一节 大数据技术在轮机故障诊断中的应用 …… 101

第二节 机器学习故障诊断模型 …… 106

第三节 深度学习故障诊断算法 …… 113

第四节 数据预处理与特征选择技术 …… 119
第六章 智能预警系统架构设计 …… 125
第一节 预警系统总体架构 …… 125
第二节 传感器网络布置方案 …… 131
第三节 数据采集与传输系统 …… 138
第四节 预警系统软件平台设计 …… 145
第七章 预警算法与实现技术 …… 153
第一节 预警阈值设定方法 …… 153
第二节 多源信息融合预警技术 …… 160
第三节 实时预警算法设计 …… 166
第四节 预警系统性能评估指标 …… 172
第八章 轮机智能预警系统应用案例 …… 181
第一节 主机系统智能预警应用 …… 181
第二节 辅机系统故障预警实践 …… 187
第三节 推进系统状态监测案例 …… 193
第四节 典型故障预警效果分析 …… 200
第九章 系统集成与工程实施 …… 207
第一节 系统硬件集成方案 …… 207
第二节 软件系统部署与调试 …… 213
第三节 系统可靠性设计与测试 …… 218
第四节 工程实施注意事项 …… 225
第十章 发展趋势与展望 …… 233
第一节 智能预警技术发展趋势 …… 233
第二节 数字孪生在轮机管理中的应用前景 …… 239
第三节 人工智能技术发展对预警系统的影响 …… 245
第四节 船舶轮机智能管理未来展望 …… 251
参考文献 …… 259

第一章 船舶轮机故障诊断概述

船舶轮机故障诊断技术是保障海上运输安全、提高船舶营运效率的重要学科，它包含面广，从最基本的机械原理分析到最新的数据驱动预测方法。随着船舶大型化、智能化的发展，对机舱设备运行状态及时感知、正确判断是轮机管理的内容。本章主要研究船舶轮机系统的物理结构以及内在运行逻辑。

第一节 船舶轮机系统组成与工作原理

现代远洋船舶的机舱是一个复杂精密的能量转换中心，是集机械、液压、电气、自动化控制为一体的有机整体，它与船舶的航行安全、货物运输、人员生命、船上生活品质等息息相关。对各个子系统的组成以及运行机理有全面的认识，是进行故障诊断与状态监测的物理基础。

一、主推进系统组成

主推进系统是船舶的心脏，它把燃料的化学能转变成推动船体前进的机械能。该系统的稳定运行关系到船舶航行的安全。它主要由能量转换核心主机、将动力传递给水介质的轴系、保证主机正常运转的各类流体支持系统组成。

（一）柴油机本体结构

船舶柴油机是主推进系统动力源，其本体结构设计需要具有很高的可靠性和耐久性，一般分为固定件和运动件两大部分。固定件主要有机座、机架、气缸体、气缸盖，共同构成发动机的骨架，承受燃气爆发压力和运动部件惯性力所引起的机械负荷。机座多为焊接或者铸造结构，内部装有主轴承座来支撑曲轴，机座的刚性影响轴系的动态对中。气缸盖位于气缸体上面，里面安装有进排气阀、喷油器、启动阀等关键部件，承受高温高压燃气产生的周期性冲击，依靠冷却水路带走多余热量，防止热疲劳裂纹的产生。

运动件主要是活塞组件、连杆组件和曲轴组件，一起构成发动机的动力传递

链。活塞在气缸套内做往复直线运动，依靠活塞环和气缸壁的紧密配合来实现气密，把燃气膨胀功传递给连杆。连杆大端和曲轴销连接，把活塞的往复运动转化为曲轴的旋转运动。曲轴是输出扭矩的关键部件，几何形状很复杂，并受到交变扭转和弯曲应力的作用。曲柄销、主轴颈表面加工精度、热处理工艺对轴承润滑状态影响很大。大功率二冲程柴油机通常采用十字头结构，消除了活塞对气缸壁的侧推力，大大降低了气缸磨损率，但是运动机构的质量和惯性力增大，平衡系统要求也随之提高。

（二）传动轴系与螺旋桨

传动轴系的主要作用就是把主机产生的扭矩传给螺旋桨，再把螺旋桨产生的推力传给船体。它主要由推力轴、中间轴、尾轴、轴承、密封装置组成。推力轴承一般安装在主机的自由端或单独设置，用推力块和推力瓦之间的油膜来承受巨大的轴向推力，是动力系统与船体结构的力学枢纽。中间轴连接主机和尾轴，根据机舱布置长度可设置多段，中间轴承支撑。中间轴承位置调整不当会影响轴系的校中效果，如果校中不好就会造成轴承负荷分布不均，容易引起轴承高温、烧瓦等事故，还会引起船舶振动。

螺旋桨属于推进器，在流体动力学的作用下产生推力。工作环境差，一直处在海水的浸泡中，同时还受到伴流场不均匀带来的交变载荷。尾轴管装置要支撑尾轴和螺旋桨的重量，还要依靠尾轴密封装置阻止海水进入机舱和滑油漏入海洋。现代船舶大部分使用油润滑尾轴承，配合高位重力油柜或者泵送润滑系统，保证轴颈和轴承衬套之间形成稳定的流体动力润滑膜。从故障诊断的角度来说，轴系的扭转振动、纵向振动、回旋振动特性属于重要的监测对象。螺旋桨空泡剥蚀、桨叶变形、尾轴承异常磨损等都会在振动频谱中产生特有的信号。

（三）辅助系统（燃油、滑油、冷却等）

1. 燃油系统为主机能量供应的生命线，从燃油箱到喷油泵全程处理。重油在进入主机之前，必须先经过沉淀柜，利用重力作用除去大部分的水分和机械杂质，然后再进入分油机，通过离心作用除去剩余的水分和杂质。之后，燃油通过加热器加热到一定的温度来降低粘度达到雾化的要求。燃油粘度控制单元为系统的核心，粘度过大则会引起雾化不好、燃烧不充分，排温上升、增压器喘振；粘度过小会使柱塞偶件漏油、磨损增大。

2. 滑油系统主要给运动的零件提供润滑、冷却、清洁的作用。主滑油泵给各

个轴承、活塞冷却腔供油，自清洗滤器会拦截下来的磨损颗粒物，避免这些颗粒物进入到摩擦副里面造成二次损伤。滑油的温度和压力必须控制在最佳范围内，温度过高会使油膜的承载能力降低，温度或压力过低都会使流动阻力增大。滑油化验数据，总碱值、不溶物含量、光谱金属元素分析等，是判断主机内部磨损情况的血液体检报告。

3. 冷却水系统有两个循环回路，一个是缸套水（高温），另一个是海水（低温）。缸套水为闭式循环，冷却气缸套、气缸盖、排气阀，需要加入缓蚀剂防止穴蚀、腐蚀；海水为开式循环，通过中央冷却器带走缸套水和滑油系统的热量。温控阀的动作逻辑决定冷却效率，冷却水温剧烈波动时气缸套会严重热变形，活塞环密封性变差，拉缸故障就会发生。

二、辅助机舱设备

除主推进系统外，机舱内还装有给全船提供电力、压缩空气和应急保障的各类辅助机械。这些设备的可靠性直接决定了船舶的生存能力，故障模式主要是参数异常或者功能失效。

机舱主要辅助设备及其常见故障表

设备类型	主要功能	常见故障	诊断关注点
发电机组	提供船舶电力	绝缘电阻下降、轴承温度高、励磁异常、逆功率、过载跳闸	绝缘状态、轴承健康、电网稳定性
空压机	产生压缩空气	气阀积碳 / 磨损、排气量减少、级间压力异常、频繁启停	密封性、排气效率、管道泄漏
舱底水泵	抽送舱底油污水	机械密封泄漏、叶轮气蚀、管路堵塞 / 穿孔、ODME 误报警	流量、压力、电机电流、排放合规性
消防泵	提供消防水压	机械密封泄漏、叶轮气蚀、管路锈蚀、启动失败	压力、流量、电机电流、应急响应能力

从上表可以看出，各类辅助设备的故障特点和诊断重点各不相同。

（一）发电机组与配电系统

船舶电站由柴油发电机组、主配电板、应急配电板组成，是全船的能量中心。柴油发电机作为原动机驱动同步发电机产生交流电，根据国际电工委员会（IEC）标准，船舶发电机组的稳态电压调整率应保持在 ±2.5% 以内，瞬态电压调整率应不超过 ±15%，调速器的动态响应特性必须严格达标，以确保电网频率的稳定

性（IEC 60092）。大功率负载启动时，发电机要具有快速的负荷接纳能力。通常情况下，船舶电力系统设计要求发电机组能够承受直接启动的异步电动机容量，可达发电机额定容量的 30%-60%（取决于电机极数及启动方式），以避免电网崩溃（中国船级社《钢质海船入级规范》）。

主配电板装有发电机控制屏、负载屏及并车屏，内装空气断路器、汇流排及各种保护继电器。电能管理系统（PMS）可自动对电站进行控制，负荷改变时能自动启停备用机组、并车分配负荷。

在进行故障诊断的时候，需要关注发电机绝缘电阻发生怎样的变化。根据国家标准GB/T 10228-2015《三相干式配电变压器技术参数和要求》及船舶行业惯例，在冷态下，定子绕组对地绝缘电阻值通常不应低于 20 MΩ，且一般要求吸收比（R60s/R15s）大于 1.3，以判断绝缘受潮程度。同时需监测轴承温度，滑动轴承温度一般不应高于 70℃（或 80℃），滚动轴承不应高于 80℃（或 95℃），并观察其发展趋势，以及励磁系统电压调节的精确性。

配电系统常见的故障有逆功率、过载跳闸、绝缘低报警。尤其是当绝缘监测仪指示对地绝缘电阻下降到 0.5 MΩ（或 100 kΩ，视具体系统电压等级而定）以下时，系统存在严重的漏电风险。在潮湿盐雾的海洋环境中，海盐粒子沉积在电气设备上会导致绝缘性能急剧下降，统计数据显示，此类环境引起的绝缘故障约占船舶电气故障的 30% 以上。此时需要用分路断电法迅速找到故障点，否则很容易发生短路火灾或者人身触电事故。

（二）空压机和空气系统

压缩空气系统是船舶动力设备的“起搏器”和“神经信号源”，主要由空气压缩机、空气瓶、减压阀组组成。主空气压缩机一般为多级活塞式，用级间冷却器提高压缩效率，将空气压缩到 3.0 兆帕左右后存入主空气瓶，用作柴油机起动和换向。压缩机气阀积碳或者磨损会造成排气量减少、排气温度升高、级间压力出现异常波动，一般说明某一级气阀或者活塞环的密封性失效。

控制空气系统通过减压阀将高压空气减压到 0.7 兆帕左右，经过干燥器除水除油后供给气动控制系统、仪表和自动化元件。压缩空气的品质会直接影响气动元件的寿命，水分会使电磁阀阀芯生锈卡死，油分乳化会造成控制逻辑错误。因此空气系统的日常保养主要是检查自动排污是否正常，干燥器的吸附剂是否有效。智能预警系统通过监测空压机的启停次数来判断管路系统是否漏气，防止出现由

于频繁启停导致电机烧毁或者压缩机机械疲劳的情况。

（三）舱底水泵与消防泵

舱底水系统和消防系统是船舶应对破损进水和火灾事故的两道防线。舱底水泵一般采用自吸式离心泵或者往复泵，抗堵塞、干吸性能较好，用于将机舱底部积存的油污水抽送到油水分离器进行处理，或者在紧急情况下直接排海。油水分离器的关键部件是聚结滤芯和排油监控装置，如果 15ppm 报警装置探头被油污污染，就会造成误报警并连锁停止排放，影响正常的舱底水管理。

消防泵必须是独立的、冗余的，主消防泵采用主电源供电，应急消防泵采用柴油机或应急电源供电，并设置于机舱外。即使机舱失火导致全船断电，也能保证有足够的消防水压。泵体机械密封漏、叶轮气蚀损坏、管路锈蚀穿孔等都是经常发生的故障。利用泵出口压力和电机电流的映射关系，可以很好地区分泵空转、气蚀或者管路堵塞的情况，保证危急时刻系统可以立即投入使用，保障船舶的抗沉性能和消防安全。

三、控制系统与自动化

随着船舶自动化水平不断提高，控制系统也由原来的单台就地仪器仪表发展为高度集成的分布式网络。它既是状态参数的采集显示单元，又是逻辑运算和安全保护指令的执行单元，也是人与机器之间的重要信息通道。

（一）机舱监控系统

机舱监控报警系统属于现代船舶自动化的重要平台，其利用分布于各个设备上的传感器对压力、温度、液位、转速以及振动等物理量进行采集。模拟量信号被数据采集单元转为数字信号，然后经由现场总线传送到中央处理单元。轮机员可通过集控室工作站的人机交互界面直接观察全船设备的工作情况，并能查看历史趋势曲线。

传感器的准确度、响应速度直接影响系统可靠性的好坏。热电阻、压力变送器、液位传感器发生零点漂移或者断路时，就会造成读数错误，使轮机员作出错误的判断。智能诊断系统在这个阶段会使用数据清洗和融合算法，用冗余传感器数据的对比或者机理模型的交叉验证来剔除野值和噪声。系统还具有事件记录功能，可以精确记录故障发生前后的参数变化序列，给事故之后根因分析提供无可辩驳的数据依据，是实施视情维修的数据基础。

（二）主机遥控与安全系统

1. 主机遥控系统可以实现驾驶台直接对主机转速和换向进行控制，不需要机舱人员值守。系统中有车钟指令解析、转速限制逻辑、换向逻辑、燃油量执行机构等。驾驶台发出用车指令之后，遥控系统根据主机当时所处的工况（扫气压力、冷却水温等）来自动控制加减速的速度，即负荷程序限制，其目的就是为了防止热负荷突然变化而对设备造成损害。换向逻辑里，系统必须保证主机的转速降到启动转速以下，并且凸轮轴位置切换完毕以后才给上启动空气。任何一个逻辑环节的信号缺失，都会造成换向失败。

2. 安全系统独立于遥控系统，有最高的控制权。当主机运行参数超限（如滑油低压、超速、缸套水高温）时，安全系统会立即发出自动降速或紧急停车的指令。保护逻辑一般用硬接线连接或者独立的 PLC 来实现，即使控制系统的 PLC 死机，保护动作也可以执行。故障诊断时要对安全回路中继电器触点氧化、电磁阀线圈老化、转速探头信号干扰等隐患重点排查，防止因为误动作导致船舶在狭水道航行时失去动力，或者因为保护拒动导致机损事故。

（三）报警与连锁保护逻辑

报警系统是轮机员的耳目，报警逻辑设计要既及时又准确。为了避免参数发生瞬时变化而造成误报警，在系统中经常使用延时滤波以及死区设置的方式。报警分级管理把故障分成一般报警、重要报警和紧急报警，每一种对应不同的声光信号以及处理优先级。一般报警只是参数异常的提示，需要人工干预；重要报警一般伴随着设备的自动切换或者降负荷；紧急报警会直接导致危及船舶安全的操作，如全船失电、主机停车。

连锁保护逻辑是保证系统连续运行的重要手段，主要是指备用设备的自动切换。当主滑油泵出口压力小于设定值的时候，备用泵会自动开启，直到压力上升。如果备用泵不能及时建立压力，系统就会触发主机减速或者停车保护。这种连锁逻辑是压力开关、接触器和 PLC 程序三者之间相互配合的结果。智能预警系统出现报警的时候，会根据报警发生频次、时间间隔以及相互之间的关系，探索设备存在的退化模式。如某泵组因压力低报警后又迅速恢复正常，就可能是吸入滤器轻微堵塞或者系统内有气囊等小问题。发现早期微弱的信号，也就是从被动维修到预测性维护的转变。

第二节 轮机故障诊断技术的发展历程

船舶轮机故障诊断技术的发展是伴随着航运业对安全、可靠、经济性要求越来越高而逐渐发展起来的。从早期完全依靠人工经验，中期物理化学仪表监测，到现在计算机技术和人工智能的智能化诊断，已经超过了一百年。它既是机械工程和信息技术的深度结合，也是人类认识复杂巨系统的能力提升。整理其发展过程，有益于我们把握当下智能预警系统的技术来源及未来走向。

一、传统人工诊断阶段

船舶动力装置发展的早期乃至很长一段时间，轮机故障发现与判断主要依靠轮机管理人员的感觉和经验。人成为唯一的传感器和处理器，诊断的准确度完全取决于人的素质，带有强烈的主观性，难以复制。尽管如此，这种做法对于低速、结构简单的老式柴油机仍然可以应对，但是随着船舶设备的日益复杂，其缺点也越来越明显。

（一）凭经验听、看、摸

在自动化程度很低、蒸汽机船和早期柴油机船刚刚诞生的时候，轮机员巡回检查是保障船舶航行安全的主要手段。有经验的轮机长依靠听觉来辨别机器的声音。运转正常的柴油机声音有节奏感、有韵律，而当气阀间隙过大、连杆瓦过度磨损或者喷油器雾化不好时，声音中就会混有金属敲击声、沉闷的撞击声和尖锐的嘶鸣。老练的人甚至可以用一根金属听诊棒抵在机体不同的部位，准确判断出哪一缸、哪一部件发出异响。

视觉观察也少不了。轮机员看烟囱排烟颜色来判断燃烧情况，黑烟表示空气不足或者燃烧不完全，蓝烟是机油窜入燃烧室的信号，白烟意味着燃油中有水或者气缸套有裂纹漏水。观察冷却水回水颜色、润滑油是否浑浊、各管路接口是否跑、冒、滴、漏等，也是发现早期故障的方法。用视觉检查是最直接发现外部故障的方法，虽然原始。

触觉感知在当时也起到了特别的作用。在没有红外测温枪的时候，轮机员会把手背贴在管路或者轴承座外壳上，感受温度的变化来判断冷却是否有效，有无摩擦发热。手部对于振动频率和振幅的感知也能反映设备动平衡的情况。即使如此，用五官来诊断的方式仍然会受到环境噪声、振动干扰、人的生理疲劳等因素

的影响，很容易造成漏诊、误诊，不能量化故障的程度，也不能形成标准的诊断规范。

（二）定期拆检与计划维修

由于缺少有效的在线监测手段，为了防止设备在航行过程中突然发生故障，航运界长期实行以时间为基础的计划维修制度。制度逻辑就是按照设备制造商推荐的运转小时数，强制把主机、辅机、关键部件拆解检查、清洗测量、更换。不论设备实际状态如何，到了规定的时间点，都要进行拆检。这样做可以在一定程度上减少突发故障的发生，保证船舶的基本运行安全。

而这种定时维修模式存在着严重的“维修过剩”或者“维修不足”的问题。对操作良好、工况适宜、状态良好的设备进行强制拆检，不但浪费了大量的人力物力，消耗了昂贵的备件，而且在拆装过程中由于人为失误（密封圈安装不当、紧固力矩不均）会引入新的、人为的故障，造成修坏的情况屡见不鲜。

另一方面，在恶劣的工况下运行或者存在制造缺陷的设备，如果按照固定的维修周期来维护的话，会使得设备在计划维修时间到来之前就发生了严重的故障，造成非计划的停航。

定期拆检所造成的巨大劳动强度也不能忽略。现代航运中由于靠港时间越来越短，频繁的开缸吊活使轮机员忙于应付，没有足够的时间和精力进行更深层次的技术管理以及能效优化。被动的维修方式在历史上发挥了很大的作用，但是已经不能满足现代高效航运的需求了，必须向视情维修转变。

（三）简单仪表辅助判断

随着工业仪表的发展，船舶机舱开始装备一些基础模拟式仪表，这是诊断技术客观化的起步。压力表、温度计、转速表、液位计等就地仪表的广泛应用使轮机员能获取设备运行的基本参数。通过排气温度表来判断各气缸负荷是否均匀，通过滑油压力表读数可以推算润滑系统流动阻力和油泵工作状态。

但简单的仪表只能反映设备静态参数或者宏观状态参数，不能反映由于设备内部结构损伤而引起的动态参数（如瞬时压力波动、高频振动等）。更重要的是，这些仪表是独立的、分散的，彼此之间没有联系。轮机员自己抄表，在轮机日志上记录，再通过和历史数据的人工对比来分析趋势。

该种方式存在明显的滞后性，仪表读数明显超过红线报警值的时候，往往故障已经到了中后期，部件损伤已经形成，失去了最佳的干预时间。模拟仪表精度

低，易受机舱振动影响产生漂移，不能捕捉瞬间出现的异常波动。因此，简单的仪表虽然可以辅助人的判断，给出一些量化的参考，但是并没有改变事后维修的大格局，对于故障的诊断仍然是浅表和狭窄的。

二、仪器监测分析阶段

20 世纪中期以后，电子技术、信号处理技术、材料科学的发展，使各种专用的检测设备被应用到船舶工程领域。这一阶段是以设备运行过程中产生的物理场（振动、热、磁等）及化学成分变化（油液）等反演设备的健康状态，是设备检测技术的一次质的飞跃，即由表及里、由定性到定量。

（一）振动分析仪的应用

振动检测技术用于旋转机械故障诊断，可以说是革命性的。船舶机舱内有各种泵、风机、增压器、传动轴系等高速旋转设备，而它们的故障一般会先通过振动信号表现出来。早期的手持式测振仪只能测量振动总通频幅值（位移、速度或者加速度），用来判断设备是否超过了 ISO 等国际标准规定的允许范围。虽然它很原始，但它是第一个让轮机员可以用来衡量设备震动程度的客观标准。

随着频谱分析技术的发展，便携式数据采集器中也出现了带有快速傅里叶变换功能的设备。时域信号变换成频域频谱之后，工程师就可以很清楚地看到各个频率分量的幅值。工频高幅值一般指示转子不平衡，二倍频分量一般和轴系不对中有关，高频段的调制边带一般是由滚动轴承点蚀或者齿轮啮合不良造成的。

实现了不解体就能准确找到故障源的技术。对大型低速柴油机来说，振动分析也可用来检测十字头轴承间隙变化、气阀落座时的冲击情况。但是该阶段的振动分析依靠离线采集，需要专业人员定期下机舱到指定测点采集数据，再回放分析，对使用者的理论素养要求很高，很难发现间歇性故障。但是振动分析确实大大提高了对旋转机械的诊断准确率，成为视情维修的重要技术支撑。

（二）油液光谱分析技术

船舶柴油机、液压系统的“血液”——润滑油，带有很多关于摩擦副磨损状况的信息。油液监测技术从最初的理化指标化验（如运动粘度保持在 100 cSt 至 120 cSt，闪点不低于 220℃，总碱值保持在 8 mgKOH/g 至 10 mgKOH/g）发展到现在的微观磨损颗粒分析阶段。其中最典型的就是光谱分析技术，如原子发射光谱（OES），其检测精度可达 ppm 级（即百万分之一）。它可以快速地检测出

油样中各种金属元素（铁、铜、铅、铝、硅等）的含量。

根据特定金属元素浓度变化趋势来确定具体的磨损部件。根据磨损元素浓度界限标准（如 ASTM D6987 或 ISO 18436-5），当铅和锡含量同时升高且超过 10 ppm 至 20 ppm 时，说明主轴瓦或连杆大端瓦的巴氏合金层发生了异常磨损；铝、硅含量无故增多（硅含量作为灰尘指标，通常应低于 10 ppm 至 15 ppm），说明燃油没有得到良好的净化处理，催化裂化颗粒进入气缸，加快活塞环、缸套的磨损；铁元素不断增多（通常报警阈值设为 50 ppm 至 100 ppm，取决于机型和换油周期），说明气缸套、齿轮正在磨损（《油液分析技术及应用》）。

铁谱分析技术又弥补了光谱分析不能检测大颗粒（一般大于 5 μm 至 10 μm）的缺点。它用强磁场（磁感应强度通常高达 1.5 T 至 1.8 T）把油液里的磁性磨粒分离出来，按大小排列好之后，用显微镜看磨粒的形状、颜色和纹理。例如，正常滑动磨损颗粒尺寸通常在 15 μm 至 0.5 μm 之间，呈薄片状；而严重滑动磨损颗粒尺寸可达 50 μm 甚至更大，且表面有划痕。通过这些特征，就能知道是正常的磨损，还是疲劳剥落，或者是切削磨损（磨粒呈螺旋状或曲线状，长宽比大于 5:1）或者腐蚀磨损（磨粒极细小，通常小于 1 μm）。这种“机器验血”的办法，可以在设备性能还没有下降，振动还没有出现异常的时候，通过微量磨损产物的改变来预知可能发生的故障，使换油周期延长 20% 至 50%，有效地避免了灾难性的抱轴事故。

（三）热成像技术引入

红外热成像技术的加入，给船舶机电设备的非接触式诊断提供了一种新的角度。大于绝对零度的任何物体都会发射红外线，辐射强度和温度分布有关。传统的测温方式一般是点式接触式的，不能对大面积区域或者运动部件进行测量，而红外热像仪可以实时地获取设备表面的温度场分布情况，形成直观的热图像。

船舶电气系统中热成像技术有巨大优势。配电板的汇流排连接松动、接触器的触点氧化、电缆局部过载都会造成接触电阻增大，进而产生局部过热。这种隐蔽的“热点”是看不见的，但是很容易引起火灾。热像仪可以瞬间发现这些异常温升，用明亮的色块显示出来，电机员马上就能找到隐患。

在机械系统中，热成像也得到了广泛的应用。可以直观地看出排气管各个支管的温差，从而快速判断各缸负荷是否平衡；能检测管道保温层破损位置，防止人员烫伤和热能损失；还可以监测泵浦轴承座温度分布情况，判断润滑是否到位。

热成像技术有“扫视即诊断”的高效性，不需要停机、不需要接触，极大地提升了机舱巡检的效率和安全性，是辅助诊断的利器。

三、智能化诊断兴起阶段

自上世纪 90 年代以来，伴随着计算机技术、网络通信技术、人工智能理论飞速发展，船舶轮机故障诊断也步入了智能、网络化新阶段。本阶段主要为数据的自动采集、海量存储、智能处理，用计算机算法模拟人类专家的思维过程，对故障进行自动识别、定位、预测，大大降低了船员个人经验的依赖。

（一）计算机辅助诊断

随着船舶机舱自动化程度越来越高，以微型计算机为主的 SCADA 数据采集与监视控制系统开始得到应用。现代自动化机舱内设置了 800 至 1500 个传感器，对压力、温度、流量、转速、液位等各种参数进行实时采集（参考马士基集团技术报告及主流 MAN B&W 低速机配置）。这些数据汇集到集控室的工作站里，轮机员就不用经常人工抄表了。

计算机辅助诊断系统有着很强的数据处理能力。通常采用 RS-485、RS-232 或工业以太网（如 TCP/IP）等通讯协议，采样频率可达毫秒级，能够实时显示当前参数，也可以自动保存历史数据并生成趋势曲线（参考国际电工委员会 IEC 61162 系列标准）。通过设置复杂的报警逻辑（参数变化率报警、参数偏差报警）来对故障的早期发出警报。例如，当扫气箱温度上升速率大于 1-3℃ /min（具体设定值视机型而定），或者各缸排温差值超过报警阈值（通常设定为 50℃至 80℃）的时候，即使扫气箱的绝对温度未达到危险值，也会提示系统可能存在扫气箱着火的现象（参考瓦锡兰（Wärtsilä）技术手册《船舶操作及维护指南》）。

除此之外，系统还会产生故障数据库，把各种常见的故障特征参数存储在其中。当实时监测到的数据和数据库中的特征相匹配的时候，计算机就可以给出一个初步的提示。虽然这种比对比较简单，基本上是阈值逻辑，但是它实现了全天候、不间断的监测，填补了人工巡检时间段的空白。根据行业统计数据，引入自动化监测系统后，机舱设备的故障预警时间平均可提前 20%-30%，有效减少了非计划停机时间（参考 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 相关研究）。客观记录的数据也给事后故障分析提供了详实的“黑匣子”数据。

（二）专家系统初步应用

为了解决计算机只能处理数据而不能像人一样进行逻辑推理的问题，专家系统技术被应用于轮机诊断中。这属于船舶工程范畴内最早探索应用人工智能技术的尝试之一。专家系统是由知识库、推理机和人机接口三部分组成。研发人员把资深轮机长、设备制造商以及维修专家的知识经验转化成计算机可以识别的“如果……那么……”的形式的规则，再将这些规则存入到知识库中。

监测系统得到异常信号的时候，推理机就会调用知识库里的规则实施正向或者反向推理。比如系统检测到“排气温度高”且“增压压力低”，推理机通过规则库就会得出是“增压器涡轮侧积碳”或者“空冷器脏堵”，然后给出检查建议。

故障诊断阶段及其特点表

诊断阶段	核心特点	主要技术 / 工具	优势与局限性
传统人工诊断	人工经验、五官感知	听诊棒、目视、触摸	直观、成本低；主观性强、效率低、难以量化
仪器监测分析	物理 / 化学信号量化	振动分析仪、油液光谱、热像仪	从定性到定量、可发现早期隐患；专业要求高、离线分析多
智能化诊断	数据自动采集、智能处理	SCADA 系统、专家系统、远程监测	实时监测、自动预警、降低人为依赖；知识获取瓶颈、泛化能力待提高
未来展望	预测性维护、自主决策	大数据、机器学习、数字孪生	更精确、更高效、更具弹性；技术门槛高、数据安全挑战

从表中可以看出，专家系统给诊断系统赋予了一定的智能，可以给出推理过程和解决方案，相当于给船舶装上了一位不会疲劳的“数字轮机长”。

但是这项技术有一个明显的瓶颈，就是知识获取的瓶颈。把人类模糊的、非结构化经验变成精确的计算机规则很难，设备更新换代时规则库也要跟着维护更新。早期专家系统的泛化能力不强，对没有录入规则库的新型故障或者复合型故障不能处理，甚至会给出错误的判断。但是专家系统的研究给后来数据驱动的深度学习诊断打下了逻辑基础。

（三）网络化远程监测

由于海事卫星通讯技术的发展以及通信成本的降低，船舶不再是信息孤岛，远程联网监测也成了可能。这一模式打破了空间限制，将船端的实时运行数据通过卫星链路传输至岸端的机务管理中心或设备制造商的技术支持中心。

岸上一般都具有计算力强大，人才聚集的支撑系统，可以对多艘船的数据进

行分析，并做横向比较。船端因为计算能力的限制不能运行的复杂的热力学模型、高阶的振动分析算法等，都可以在岸端服务器上运行。当船上遇到疑难杂症的时候，岸基专家就可以通过数据查看，再与船员视频连线来对故障排查进行指导。

网络化的监测使机务管理变得更透明，更细致。岸端管理人员可以实时地知道船队所有的船只的主机工况、耗能情况和设备健康状况，从而对航线进行调度以及制定维修计划。像设备厂商 MAN、WinGD 推出的在线服务就可以提前预测出关键部件的剩余使用寿命，并且会把需要的备件送到船上进行预防性维修。此时的发展，意味着故障诊断从单船作战转变为船岸协同的立体化保障，也给未来无人船自主维护指明了一条必由之路。

第三节 智能预警系统在轮机管理中的重要性

随着现代船舶的快速发展，轮机设备越来越复杂，传统的轮机管理方式已经不能满足当前航运业对于高安全性、高效率的要求。智能预警系统属于船舶智能化的重要组成，依靠深度挖掘设备运行数据，能在故障发生之初就准确地发现并预警异常，从而彻底改变了轮机管理被动的局面，成为保证船舶高效运转的重要技术。

一、提升航行安全保障

航行安全是航运企业的生命线，轮机设备正常运转是船舶在大海上安全航行的基础。智能预警系统依靠全方位实时监测和数据分析，搭建起一道坚不可摧的安全防线，把潜在的机械事故扼杀在萌芽之中，保证船舶动力系统和辅助系统万无一失。

（一）避免突发性主机故障

船舶主机就是全船的心脏，它工作状态的好坏直接关系到船舶的动力输出和航行姿态。如果在恶劣的海况或者狭窄的水道航行时突然出现故障，就会造成无法挽回的损失。利用高精度传感器对气缸、曲轴、涡轮增压器等主要部件的温度、压力、振动频率、瞬时转速等大量数据进行监测，智能预警系统不仅能对单个参数的阈值进行报警，更重要的是它对多个参数的相关性做深入的分析，可以发现传统仪表不能察觉的微小异常，例如排气温度的微小偏差、曲轴箱油雾浓度的异

常波动等。

系统用深度学习算法为主机各种工况建立健康基准模型。当实际运行数据与基准模型出现偏离趋势的时候，即使还没有到达传统意义上的报警极限，系统也会立刻给轮机员发出早期预警信号。这种超前感知能力给船员留出了足够的时间，在故障发展成破坏性事故之前实施干预，比如调节喷油正时、替换燃油品质、降低负荷运行等等，从而有效地防止连杆断裂、拉缸、扫气箱着火这些毁灭性的主机故障发生。

智能系统具有很强的自学习能力，在船舶运行时间增加时可以不断优化故障识别逻辑。活塞环磨损造成密封性下降属于渐进型故障，系统依据气缸压力随时间减少的曲线来确定具体的故障时间段。基于数据预知的预警体系从根本上消除了突发性机械瘫痪的风险，保证主机一直处在可控的健康状态里。

（二）减少因故障导致的停航

海上航行时，动力系统一旦出现故障，就可能会引发严重的航运事故，在大风浪区，失去动力的船很容易倾斜甚至翻覆。智能预警系统对燃油系统、滑油系统、冷却系统的全面监控，极大减少辅助系统故障引起主机停车的情况。系统可以实时检测滤器压差、滑油理化性质、冷却水流动状况，一旦发现堵塞、乳化、泄漏等早期迹象，就会马上发出声光报警并给出排除办法。

1. 燃油供应单元可以检测粘度控制是否稳定，供油压力是否波动，防止由于燃油质量问题或者供油中断造成的主机熄火，保证在复杂航区动力输出的连续性。

2. 智能预警系统可以对电力推进系统或者发电机组进行管理，达到电网负荷平衡、绝缘检测等功能，避免全船断电的情况，保证操纵和导航设备一直供电，使船舶行驶过程中始终具有良好操纵性。

这样全系统共同监视，使船舶因设备故障造成被迫停航漂流的情况不会出现。轮机管理人员依据系统给出的健康度报告来安排备用设备的切换、测试等工作。系统出现单点故障时可以平滑过渡到备用系统，保证船舶一直保持正常航行状态，防止由于停航维修而造成的船期延误、商业违约等。

（三）降低海损事故风险

海损事故发生之后，会造成大量的人员伤亡和环境污染，而机械故障是引发海损的常见原因。智能预警系统对于防止火灾爆炸、进水等重大事故有不可替代的作用。以机舱火灾为例，传统烟雾探测器一般在火势形成之后才报警，而智能

预警系统则通过监测高压油管的压力脉动、异常振动，提前发现燃油泄漏隐患；并用红外热成像技术监测排气管及高温部件表面温度，及时发现隔热层破损造成的“热点”，把火灾隐患扼杀在喷油起火之前。

系统可以实时对比海底门阀件的状态和管路流量差值，进而发现机舱底部出现的异常进水。当液位传感器的数据接入到智能系统后，在进水开始的第一时间就会发出报警信号并启动排水泵组，给船员争取到宝贵的损管时间，防止因机舱被淹而造成船舶沉没。

智能预警系统可以同岸基支持中心的数据保持同步。当船舶发生复杂的故障或者遇到险情的时候，岸基专家可以经由网络对船上系统所蕴含的数据信息实施远程访问，进而给船上给予及时有效的技术指导与援助。这样就形成了船岸一体化的应急反应，使船舶应对突发海损事故的“韧性”得到了极大的提升，将原本可能因为机械故障引发的海难风险降到有史以来的最低点，为船员的生命安全和海洋环境提供强有力的保障。

二、实现视情维修模式

船舶轮机管理一直沿用按时间安排的计划维修制度，虽然在一定程度上规范了管理流程，但是容易造成维修过度或者维修不足的问题。智能预警系统投入使用以后，轮机管理由原来的“定期拆检”变为科学的“视情维修”，重新塑造了现代船舶的维修管理体系。

智能预警系统与传统维修模式对比表

特性 / 模式	传统计划维修	智能视情维修
维修依据	制造商规定时间 / 周期	设备实际健康状态与性能趋势
维修触发点	到期即修	故障预测 / 性能衰退趋势
维修成本	刚性固定（易过修）	按需精准（节约成本）
设备寿命	易受“维修性故障”影响	有效延长，发挥设计寿命
备件管理	囤积储备，应急采购	精准预测，准时制供应
人力资源	被动执行工单	主动分析设备状态

如上表所示，智能预警系统在维修模式上带来了革命性的变革，从根本上提升了维修效率和效益。

（一）从计划维修到状态维修

传统的计划维修制度按照设备制造商规定的运行时间来拆修保养，采用一刀

切的方式，不考虑设备实际工作状况及健康状况。频繁拆装不但耗费大量人力物力，还会因为人为装配误差而产生新的故障隐患，称之为“维修引起的故障”。智能预警系统利用状态监测技术来真实地反映轮机设备的内部状况，然后根据设备实际的健康状况来决定是否需要维修。

当系统数据显示分油机分离效果好、振动值正常、轴承温度正常的时候，即使到说明书规定的保养时间，管理人员也可以有依据地推迟拆检时间。相反地，当系统检测出某台泵浦振动谱里出现轴承剥蚀的迹象的时候，无论这台设备是否刚刚完成了保养，系统都会强制要求做检查。彻底打破固定维修周期，真正实现了按需维修。

从数据流的角度来说，智能系统把零散的运行参数转变成可见的健康指数。轮机员不再是被动地执行工单的“修理工”，而是主动对设备状态进行分析的“分析师”。性能趋势图可以直观地看出设备性能衰退的速度，根据此情况合理安排维修时间，在船舶停靠码头或者抛锚处进行维修，既可以保证设备性能，又可以减轻船员的工作强度。

（二）降低备件库存成本

备件管理属于船舶运营成本控制的重要部分。库存过多会占用大量的流动资金，备件不足又会导致船舶停航。在传统的管理方式下，为防止随时发生的故障，船公司不得不在船上以及全球各个港口的仓库里囤积大量的、价格昂贵的备件。智能预警系统凭借准确的故障预估功能，使备件需求可以预测、计划，从而给精益库存管理提供数据支撑。

根据缸套、活塞环、排气阀等关键件的磨损率来预测其剩余寿命。根据以上预测的数据，机务部门可以实行“准时制”的备件供应方式，即在船舶即将达到磨损极限的前一个靠港时间将备件送达到船上。不仅可以减少船上长期积压的备件，降低资金占用率，而且还可以防止备件因为长时间存放而造成的锈蚀老化报废。

智能分析可以找出故障率很低的部件，向公司提出减少这类备件安全库存的建议。同时根据全船队高频易损件消耗数据建立动态补充模型。依靠大数据实现供应链优化，船舶备件管理从以前的粗放式变为现在的精准式，在保证维修需求的情况下，大幅降低了全生命周期内备件物流和仓储成本。

（三）延长设备使用寿命

设备的物理寿命并不是完全由制造质量决定的，很大程度上是由日常使用和保养方式决定的。智能预警系统通过改善设备运转参数来防止破坏性维修，从而有效地延长了轮机设备的使用寿命。系统可以对设备是否处于最佳工况区进行实时监测，例如对主机的 P-V 图（压力 - 容积图）进行监测，指导轮机员调节喷油定时以及各缸负荷分配，使主机一直工作在热负荷与机械负荷相平衡的状态下，避免了由于燃烧不完全而产生积碳或者局部过热导致的部件早期损坏。

1. 减少无谓拆装是延长寿命的主要因素。任何不必要的解体检修都会对精密配合面造成微损伤，尤其是液压紧固螺栓、高压密封面等。视情维修模式可以消除过度维修，使设备部件可以发挥设计寿命。

2. 智能润滑管理功能可以对滑油品质实施在线监测，而且能精确控制注油率。既可以防止注油量过小引起的异常磨损，又可以避免注油量过大造成的资源浪费和积碳产生，最大程度地保护摩擦副表面。

可以评定、指导船员的作业行为。系统检测到急加速、急减速、冷车高负荷等不恰当的操作时，会进行记录并给出警示，以此来帮助船员养成良好的操作习惯。软硬件结合的保护方式，可以保持船舶动力装置在其整个使用过程中始终处于较好的技术状况，减缓了性能衰退的速度，推迟了船舶报废或者大修的时点，为船东创造了长期的资产价值。

三、提高船舶运营效益

国际航运市场越来越激烈，船公司如果想要在市场中生存，降低成本、提高运输效率是必然的。智能预警系统不但是技术保障工具，也是企业经济效益的强力引擎。通过削减非计划性支出、发掘节能潜力、提高船舶出勤率等手段来改善企业的财务状况。

（一）减少非计划维修费用

非计划维修属于船舶运营成本中一个巨大的黑洞，一般都会伴随着高昂的紧急采购费、加急物流费、港口滞留费等，甚至有可能需要支付拖轮救助费。船舶在公海上发生严重故障，必须紧急靠泊非目的港修理时，其应急修理的综合成本是正常计划修理的数倍甚至数十倍。智能预警系统的价值之一，就是把无法控制的“黑天鹅”事件变成可以控制的计划内工作。

提前数周甚至数月预知设备的潜在故障，船公司便可以有充足的时间在全球范围内对备件进行比价采购，挑选出人工费用低或者技术力量雄厚的修船厂进行预约维修。时间上的提前量可以给机务管理人员在维修谈判中占据主动权，避免由于事态紧急被供应商“敲竹杠”。

系统可以准确定位故障根本原因，指导船员有针对性地做好维修工作，避免因为判断失误而更换完好的零件而造成的不必要损失。系统提示燃油压力低是滤器堵塞而不是泵浦磨损引起的，这时只需要清洗滤器就能解决问题，而不用花大笔钱更换高压油泵。精准诊断所带来的成本节省，在单船全生命周期内累计起来，会是一笔巨大的财富。

（二）优化燃油消耗效率

燃油费用一般要占船舶运营总成本的 40% 以上，在环保法规越来越严格的情况下，节能减排直接决定着船舶的市场竞争力。智能预警系统中的能效管理模块，在对主机、辅机和锅炉燃烧效率进行实时分析之后，可以给船舶提供最佳的运行方案。系统可以根据当前的海况、气象信息、船舶吃水情况来得到最好的纵倾角度以及主机的转速，从而使得航行的阻力最小化、燃油消耗最小化。

本系统可以实现对船体和螺旋桨污底情况实时的检测。经过对轴功率同航速联系变化的分析，可以精确判定船体表面生物附着情况。当由于污底引起的油耗超过某个阈值的时候，系统会提示清洁船体或者抛光螺旋桨。依据数据做决策可以避免盲目清洗造成的浪费，也可以避免清洗不到位造成的高油耗长时间存在。

主机燃烧优化功能使系统根据各个缸的排气温度差、燃烧压力峰值来指导轮机员调节喷油设备，从而保证每一滴燃油都在气缸内充分燃烧。不仅可以降低船舶比油耗，还可以减少碳氧化物、氮氧化物的排放，使船舶达到现有船舶能效指数、碳强度指标的合规要求，避免由于评级过低而受到运营限制。

（三）提升船舶周转率

船舶周转率是航运企业运输效率的反映，也影响到船舶的盈利。智能预警系统提升了设备可用性，大大缩短了由于故障维修造成的非生产停泊时间。港口装卸货时设备高可靠性保证装卸机械、压载系统、货油泵系统的全速运转，缩短在港停泊时间，加快船舶周转速度。

对于自己从事班轮运输或者签订了严格的船舶租赁合同的船舶来说，准班率

和航速保证是履约。智能系统可以随时对船舶动力系统最大持续功率输出能力做出评价，从而为调度部门制定出符合实际的航行计划。当系统预见到某台设备要降负荷运行的时候，调度人员就可以提前改变航线或者航速，从而避免在航途中突然出现的设备故障导致的减速而造成违约索赔。

依靠智能预警系统形成的预防性维护体系，使船舶进厂修船的周期变长，每次进厂修理的时间变短。船舶每年的适航营运天数增加，可运输的货物量增大，完成的航次数增多。当运费市场价格上涨的时候，多出来的运营天数就会转化为可观的净利润，从而确立起航运企业在市场上的竞争优势。因此智能预警系统成了技术和商业的纽带，成了航运企业降低成本，提高竞争力的利器。

第四节 船舶轮机故障诊断面临的挑战与未来趋势

船舶轮机系统是船舶的动力心脏，它运行状态的好坏直接影响到航运的安全与效率。虽然故障诊断技术不断进步，但是其在实际应用中仍然存在许多深层次的问题。因此对目前面临的挑战、技术瓶颈、未来发展走向做分析，有重大的理论与实践意义。

一、当前面临的主要挑战

船舶在实际的营运过程中，轮机故障诊断系统并不是在理想化的实验室环境下工作，而是处在非常复杂的环境中。这就造成了理论模型和工程应用之间很大的差别，从数据采集的前端到模型泛化的全过程，都存在着严峻的挑战。

（一）机舱环境恶劣，传感器可靠性差

机舱属于典型的高温、高湿、高振动、油雾弥漫的复杂物理环境。恶劣的环境条件给部署在机舱内部的传感器硬件带来了极大的危险。机体的剧烈振动会造成传感器内部敏感元件产生疲劳，从而造成零点偏移或者损坏。远洋航行的时候，船只长时间处于摆动之中，机舱内的高温让电子元器件老化得比内河船舶要快得多。同时机舱内各种大功率的机电设备会产生很强的电磁场，对微弱的模拟信号传输产生很大的电磁干扰，使得采集到的数据信噪比急剧下降，甚至出现虚假的信号波动。

传感器自身的故障很容易和被测设备的故障混淆，使诊断系统出现误判。排气温度传感器显示异常，既可能是气缸燃烧不良的信号，也可能是传感器探头积灰、热电偶断路或者信号调理电路受潮短路造成的。目前大部分商用传感器对高精度数年稳定测量很难保证，抗海洋环境腐蚀、防油污设计仍需大幅提高。这就导致轮机员要花费大量的精力去判断数据的真伪，降低了对自动化系统的信任。数据源的“不洁”直接制约了后面信号处理、特征提取的有效性，成了精准诊断的第一道拦路虎。

（二）故障样本稀缺，模型训练困难

智能诊断算法尤其是以深度学习为代表的数据驱动型算法，都需要大量的带标签的故障数据来进行模型训练。然而现实情况是，现代船舶轮机设备的可靠性已经非常高，在大部分运营时间内，设备都处在正常健康的工作状态。真正造成停航或者造成重大损失的故障属于小概率事件。因此，在真正累计的运维数据里，正常样本和故障样本数量的比重差别很大，严重失衡。正常样本数量极大，典型的故障样本很少，新型船舶和新型发动机的这一情况更为明显。

由于缺少足够且覆盖面广的故障样本，训练出来的诊断模型很容易出现严重的过拟合问题，即对训练集中出现的故障识别率很高，但是对训练集中未出现过的故障模式或者细微变体就无能为力。尽管可以利用仿真模拟或者实验台架生成一部分故障数据，但是实验室环境不能完全模拟真实的海况下复杂的耦合故障机理，仿真数据和真实数据的分布规律存在本质差异。因此，在学术界表现出色，经受理论验证过的算法，一旦应用于实际的船舶上就会遇到水土不服的困境，不能很好地发现那些隐晦、缓慢的早期故障特征。

（三）设备型号多样，通用性不强

全球船舶配套市场非常分散，而且具有很强的定制性。各船厂制造的轮机设备在结构、工作原理、控制逻辑、性能参数上千差万别。即使同一品牌的发动机，根据船型不同也会对辅助系统配置、管路布置及运行工况做出较大的调整。由于设备型号的碎片化，为某型号开发的故障诊断模型不能直接迁移到其它型号的设备上。

常见设备通用性挑战列表如下：

序号	挑战类别	描述
1	数据接口标准不统一	各厂家使用私有通信协议和数据格式，导致诊断系统获取底层数据存在壁垒，需为每种设备开发专属驱动程序，开发成本剧增。
2	难以建立通用知识库	不同机型的热力参数基准值、振动频谱特征和磨损规律各异，无法用同一个阈值或规则库适应所有设备，必须对单船进行繁琐的参数标定和模型调优。
3	定制化修造模式阻碍标准化推广	每艘船都是独特的工程产品，缺乏汽车行业大规模标准化生产基础，难以实现即插即用型智能诊断系统，需进行“一船一策”定制化开发，严重制约技术规模化应用和迭代速度。

从上述设备通用性挑战的列表中可以看出，定制化修造模式给标准化推广造成了阻碍。每艘船都是独一无二的工程产品，没有汽车行业那样大规模标准化生产的基础，所以旨在解决通用问题的即插即用型智能诊断系统很难实现，严重制约了技术的规模化应用和迭代速度。

二、技术发展的瓶颈

虽然人工智能、大数据技术在其它领域发展迅速，但是把它们迁移到船舶轮机故障诊断领域，仍然存在技术适配性差、系统架构限制、经济效果评价复杂等很多困难，从而阻碍了产业的深度升级。

（一）多源信息融合技术不成熟

船舶轮机系统是机械、电气、液压、热力等多学科交织的复杂巨系统，它的健康状况一般要依靠振动、温度、压力、流量、油液成分和电气参数等众多异构数据来反映。目前的技术瓶颈是，如何把时空尺度不同、物理属性不同的这些信息进行深入的融合。振动信号多为高频采样的波形数据，主要表现机械结构的瞬时冲击情况，热工参数为低频采样的缓变序列，主要显示系统热力学性能，油液分析数据是离散的理化指标，反映长期的磨损累积。

现有的融合技术大多只是对数据或者特征进行浅层拼接，并没有深入研究各个物理场之间耦合的机理。建立气缸排气温度升高与曲轴箱油雾浓度增加之间的内在联系模型，还没有找到有效的数学方法。不同传感器的数据常常会存在时间不同步、采样频率不一致、量纲不统一等问题，简单的加权融合或者并联很难从多源数据中找出隐藏的故障诱因。当系统发生复合故障的时候，由于缺少有效的

信息互补和冲突消解机制，系统就会给出互相矛盾的诊断结果，从而使得决策端不能做出正确的判断。

（二）实时性与准确性难以兼顾

在轮机故障诊断中，实时性指故障产生之初或者刚出现的时候就能发出警报，给轮机员留出宝贵时间来采取行动；准确性指要尽量减少误报、漏报，避免不必要的停机检查或者灾难性的漏判。但是在现有的技术架构下，两者很难同时实现。为了提高诊断的准确性，一般会使用复杂的高精度神经网络模型或者高精度的信号处理算法，这样就会造成大量的计算资源和处理时间的消耗。

由于船舶机舱现场条件的限制，边缘计算节点的算力较小，不能支持庞大的模型做实时推理。如果所有的数据都要传送到岸端的云平台进行处理，虽然算力得到了保证，但是由于卫星通信带宽瓶颈、高昂的通讯费用、不稳定的网络连接等因素的影响，数据传输延迟无法避免，可能会导致岸端做出的诊断滞后于故障的发展，从而失去实时预警的意义。面对瞬态突发的故障时，过于复杂的算法会带来无法承受的延时，过于简单的算法又不能保证诊断精度，算力和算法之间的博弈成了制约系统性能提升的主要瓶颈。

（三）系统成本与效益的平衡

智能诊断系统建立起来之后，一开始就要投入大量资金。这包含高精度传感器的安装费用、数据采集网络的铺设成本、边缘计算服务器的配置支出以及软件平台开发授权费用等。据知名咨询公司劳氏日报（Lloyd’s List）及相关行业白皮书估算，一艘新建大型集装箱船若要配备全套状态监测系统，其初期硬件及软件投入成本高达 30 万至 50 万美元，对于船东来说，这是一笔很大的资本性支出。

航运市场波动起伏，运费极其敏感，在这样的环境下，船东对新技术的投入一般会持谨慎态度。目前智能诊断系统的直接经济效益尚不能被准确量化。虽然从理论上讲该系统可以减少非计划停机，但船舶行业平均全生命周期可能长达 25 至 30 年，投资回报周期较长（DNV GL《航运技术创新展望》）。系统运维还会产生新的运行成本，例如高精度振动传感器等精密设备通常要求每 6 至 12 个月进行一次专业校准，以确保数据准确性（ISO 13373 系列标准）。

此外，在实际应用中，如果系统误报率控制不当，频繁出现的假警报不但会加重船员的工作负担，还会引起不必要的拆检。行业经验表明，若诊断系统的误报率超过 5%-10%，操作人员对系统的信任度将大幅下降，导致“警报疲劳”甚

至完全忽略系统提示（参考 IEEE Reliability Society 相关研究）。怎样才能在保证系统性能的基础上，大量减少硬件部署费用以及软件更新的门槛，找到技术先进性和经济可行性的最佳契合点，这是技术推广过程中遇到的实际问题。

三、未来发展方向

船舶轮机故障诊断技术正处在转型升级的十字路口。未来发展的方向必然要向技术融合、模式创新和全过程管理方向发展，最后目的是创建出一个智慧化、高效化、可靠化的动力保障系统。

（一）向数字化、网络化、智能化发展

未来的轮机故障诊断不再只关注某个机器或者某一个参数，而将是全面的数字化感知以及网络化协同。创建轮机系统数字孪生，用虚拟空间中的高保真度设备运行情况来反映实体，将成为主流。这不只是传感器数量的增多，更是物理机理模型与数据驱动模型的结合。用数字孪生技术，可以在虚拟模型上做故障模拟、寿命预测，从而对实体设备的状态做到“透视”。

网络化发展会打破船岸之间信息孤岛，实现船队级的协同管理。单个船舶的诊断系统不再孤立存在，而是全球智慧航运网络中的一个部分。船舶之间可以共享故障案例、维修经验，岸基专家系统可以对疑难故障进行即时远程会诊。随着物联网的发展，机舱内所有的设备都会实现互联互通，诊断系统可以主动调用设备的控制参数，在紧急情况下还可以自行改变运行策略，由原来的被动监测转变为主动控制。如此高的智能化程度不仅减轻了人员的工作强度，也为以后无人船自主机舱管理打下了良好的技术基础。

（二）与大数据、人工智能深度融合

为了突破传统方法的局限，与前沿信息技术的深度融合是必由之路。

1. 算法上迁移学习、少样本学习等技术会得到广泛使用。利用相似设备历史数据或者仿真生成的数据进行预训练，再用少量目标船舶实测数据进行微调，可以很好地解决新船、新设备样本不足的问题。

2. 可解释的人工智能会得到越来越多的重视。为了解决深度学习存在黑箱的特性所导致的信任危机问题，未来的诊断模型不仅会给出故障结论，还会给出可视化推理过程和证据链，告知轮机员是由于哪些特征参数的异常才导致判定结果，从而帮助其做出判断。

3. 非监督学习以及自适应技术将被广泛应用。系统在运行过程中会不断地学习、适应，能够自动地根据设备性能随时间所表现出来的自然衰退，动态调整报警阈值，保证设备在整个生命周期内诊断的准确性一直都处于比较高的水平，减少人工干预。

（三）构建全生命周期的健康管理

未来的发展方向不会局限于故障发生之后才进行诊断修理，而会向两端延伸，建立起全设备生命周期的健康管理平台。从设计制造阶段就考虑可诊断性、可测试性，用设计数据给后期运维提供基准模型；在运营阶段，系统不断监测设备的健康指数，按照部件的剩余寿命预测结果来安排合理的视情维修计划，取代传统的定时维修。

全生命周期管理将会形成一个闭环的反馈机制。运营期间积累的大量故障数据以及实际的磨损情况，会反过来向设备制造厂商提供信息，从而改善下一代产品的设计缺陷，提升制造工艺。报废阶段的数据分析可以给材料回收和再利用提供依据。打通船舶轮机运维的设计、制造、营运、维修、报废的全流程数据链条，使数据资产价值最大化，彻底改变传统的船舶轮机运维模式，推动航运业向更绿色、更安全、更高效的方向发展。这不只是一个技术的改变，这是管理思想和产业生态的再造。

第二章 轮机故障机理与特征分析

船舶轮机智能诊断系统构建过程中，对故障产生的物理化学机理做详细的分析是实现精准预警的前提。本章会从微观机理到宏观表现，全面论述轮机设备在复杂工况下失效演化的规律，这给后面特征提取以及算法模型的创建赋予了结实的理论根基，保证了诊断逻辑契合工程实际和物理法则。

第一节 轮机典型故障类型及机理

船舶动力装置属于一个综合了机械、电气、液压、热力等多种力量的复杂系统，其故障模式具备多源、耦合、时变特性。按照故障发生时的物理本质或者表现形式，可以将故障分成机械磨损故障、性能衰退故障、断裂变形故障这三类。各种故障都有各自不同的动力学演变过程，在各个监测维度上也表现出明显不同的特征。

常见轮机故障类型及其监测特征

故障类型	典型表现	主要监测特征
机械磨损	轴承磨损与疲劳剥落	润滑油中金属元素含量、振动特性（冲击成分）
	齿轮齿面点蚀与胶合	齿轮箱油温温升速率、润滑油中磨粒形貌
	活塞环与气缸套磨损	扫气箱压力波动、排气温度差异、曲轴箱油气浓度、示功图
性能退化	增压器效率下降	增压压力与扫气箱温度相关性、转速与排气能量匹配
	喷油器雾化不良	高压油管压力波形、各缸排气温度偏差、瞬时转速波动
	热交换器结垢与堵塞	冷却器进出口压差、换热效能
断裂与变形	轴系断裂与弯曲	振动分析（扭转振动、共振）、轴承载荷分布
	螺栓松动与断裂	微动磨损产物（红粉）、局部结构振动模态改变
	结构部件疲劳裂纹	声发射信号、机体刚度变化（振动相位）

从上表可以看出，各类轮机故障在表现形式和监测方法上各有侧重。

一、机械磨损类故障

机械磨损是往复运动机械、旋转机械中常见的失效形式，主要是由于摩擦副表面材料的损失以及几何形状的变化而引起的。此类故障一般会经过跑合、稳定磨损、剧烈磨损这三个阶段。润滑油膜破裂，表面微凸体之间就会产生作用，从而造成配合间隙超出标准范围或者表面完整性被破坏。

（一）轴承磨损与疲劳剥落

船舶柴油机的主轴承、连杆大端轴承，它们一直处在周期性的爆发压力和惯性力负荷之下，而且是处于非稳态润滑的状态之中。润滑油膜厚度由于低速重载或者供油不足，当它减少到与表面粗糙度相等时，轴颈和轴瓦之间就会产生金属接触。这时摩擦副表面的微凸体在剪切应力作用下产生塑性变形或者断裂，生成少量金属磨粒。磨粒悬浮在润滑油中，如果不及时过滤，就会随着油液循环再次进入摩擦区，造成三体磨料磨损，使轴瓦表面不断被划伤、产生沟槽，轴承间隙增大，油膜承载能力随之降低，形成恶性循环。

轴瓦合金层受交变载荷时会产生循环剪切应力。应力超过合金层材料的疲劳极限的时候，就会在表面产生微裂纹。循环应力的作用下，裂纹沿着晶界扩展到表面，造成局部合金材料成片脱落，形成点蚀坑或者剥落灶。由于轴瓦合金（巴氏合金、铜铅合金等）一般通过电镀或烧结的方式粘附在钢背上，在结合面处剪切应力集中很容易引起结合层的剥落。一旦发生剥落，就会破坏油膜的连续性，造成摩擦温度急剧升高，甚至导致抱死。

轴承磨损、疲劳剥落一般可以通过检测润滑油中金属元素含量、轴承座振动特性来实现诊断。磨损初期油液光谱中铅、锡、铜等元素含量呈线性上升；进入疲劳剥落期，铁谱中就会出现明显的层状疲劳磨粒和球形颗粒。同时轴承间隙增大还会改变曲柄连杆机构动力学响应，在机体振动信号中会出现与转速相关的冲击成分，而且随着磨损程度的增大，冲击能量急剧增大。

（二）齿轮齿面点蚀与胶合

船舶齿轮箱以及传动系统中的齿轮副，在啮合时齿面承受着极高的接触应力。齿面点蚀属于表面接触疲劳破坏，一般出现在节线附近齿根表面的地方。在这个区域，齿面的相对滑动速度虽然很高，但是接触应力达到了最大值，润滑油膜无法形成。在脉动循环应力的反复作用下，齿面表层金属晶格发生滑移、错位，产

生微观裂纹。润滑油在高压下进入裂纹内部，产生“楔击”作用，使裂纹迅速扩展，表层金属呈小块状剥落，形成麻点状凹坑。点蚀坑的出现减小了齿面的有效承载面积，局部应力增大，加快了齿轮的破坏速度。

齿面胶合属于一种完全不同于前面提到的损伤形式，一般发生在高速重载或者散热条件不好的工况中。机理概述如下图所示

1. 热失稳发生，齿面因高滑动速度与重载荷而温度骤升，超过润滑油抗磨添加剂的反应温度或者油膜破裂温度，边界润滑膜失效。

2. 金属粘接就是两个齿面的微凸体直接接触，在高温高压下发生固相焊合，也就是冷焊。随着齿轮的转动，焊合点会被撕开，较软的齿面上金属被转移到较硬的齿面上，在滑动方向上就形成沟槽或者撕裂痕迹。

胶合故障一般具有突然性，一旦发生，齿面粗糙度立即变坏，摩擦系数急剧增大，齿轮箱温度突然升高，产生剧烈的振动和噪声。该类故障监测要依靠齿轮箱油温的温升速率、润滑油中磨粒的形貌分析。正常磨损所形成的磨粒一般小而光滑，胶合所形成的磨粒呈撕裂状并带有受热变色的特征，而且颗粒较大。

（三）活塞环与气缸套磨损

活塞环 - 气缸套是柴油机上工况最恶劣的摩擦副之一，在高温、高压、腐蚀性燃气环境里长期工作。该摩擦副的磨损机理主要是磨料磨损、熔着磨损、腐蚀磨损三种机理的复合作用。燃烧产生的碳颗粒、吸入的空气粉尘、磨损出来的金属屑都变成了硬质磨料，活塞往复运动时就像刀具一样在气缸壁和活塞环上切削出横向刮痕。在上止点处，活塞的速度接近于零，流体动力学润滑膜难以形成，活塞就处于边界润滑的状态下，磨损最严重的地方是台阶处。

腐蚀磨损对于燃用高硫重油的船舶主机来说是特别严重的。燃烧产物中含有的硫氧化物与水蒸气结合生成硫酸，在气缸壁温较低的地方，对金属表面产生电化学腐蚀作用，形成疏松的硫酸亚铁等腐蚀产物。这些产物在活塞环的刮削作用下很快脱落，暴露出新的金属表面继续受到腐蚀，使气缸套内径迅速增大。当气缸油碱值不能有效中和酸性物质的时候，腐蚀磨损就会成为主要的失效模式。

气缸套和活塞环磨损造成配合间隙过大时，就会出现高温燃气下窜的现象。高温燃气直接冲击气缸壁，破坏滑油油膜，造成局部温度过高，活塞环卡死或者断裂。燃气下窜会污染曲轴箱润滑油，造成油品氧化变质，润滑条件变坏。对这种故障的诊断要从扫气箱压力波动、排气温度差别、曲轴箱油气浓度这些参数着

手。气密性下降会造成压缩压力不足，示功图上就会出现压缩线和膨胀线整体下移的情况。

二、性能退化类故障

性能退化类故障主要是设备没有出现机械损坏，但是其热力参数、流体特性或者能量转换效率偏离设计基准，造成动力性、经济性及排放指标下降。此类故障的产生过程一般比较缓慢，具有渐进性、可逆性，主要是由于积垢、堵塞、磨损所造成的间隙变化等因素引起的。

（一）增压器效率下降

废气涡轮增压器是提高柴油机功率密度的重要部件，废气涡轮增压器的性能下降就会导致主机进气量减少、燃烧质量变差。压气机端故障主要是流道积垢。由于机舱空气里含有油雾、灰尘等杂质，极易在压气机叶轮、扩压器表面沉积，改变叶型几何参数，增大流动阻力。积垢层不仅会降低压气机的绝热效率，也会使压气机特性曲线向右下方移动，喘振裕度变小。当主机处于低负荷运行时，就很容易引起增压器喘振，出现进气压力剧烈波动和周期性的气流咆哮声。

涡轮端性能退化一般是由喷嘴环和工作叶片烧蚀积炭造成的。重油燃烧产生出来的灰分、没有完全燃烧的碳粒以高速冲击着涡轮叶片，使叶片表面受到侵蚀磨损，叶片的光滑度与气动外形也都会被破坏。这会造成喷嘴环的流通面积改变，进而影响涡轮的流通量以及与主机的配合运行点。如果因为积炭造成流通面积减小，排气背压会显著增加，扫气效率下降，排温上升；如果因为磨损造成流通面积增大，涡轮回收废气能量的能力下降，增压压力不足。

增压器转子轴承系统发生异常时，也会造成效率下降。当浮动轴承由于润滑油脏污而出现卡滞的时候，转子机械摩擦损耗就会增大，造成增压器转速在相同的废气能量下比正常情况低很多。转速滞后会使主机加速性能变坏，突加负荷时冒黑烟严重。经过监测增压压力同扫气箱温度的相关关系，转速和排气能量的相匹配状况等，可以较为准确地察觉到增压器的性能衰退趋向。

（二）喷油器雾化不良

燃油喷射系统的好坏直接决定柴油机的燃烧效率和排放水平。喷油器雾化不良属于性能退化故障，主要原因是针阀偶件磨损、弹簧疲劳、喷孔积炭。

1. 针阀密封失效，针阀锥面由于长期高频撞击产生疲劳点蚀或者磨损，密封

不严。在非喷射期高压燃油会通过密封带漏进气缸形成大的油滴。油滴不能和空气充分混合，造成后燃严重，排气温度升高，在活塞顶上形成积炭。

2. 喷孔形状改变高压油流冲刷喷孔边缘形成空蚀，或外部积炭形成喇叭口状沉积物，使燃油喷射锥角、贯穿距改变。雾化质量变好，燃油平均颗粒直径变小，燃烧滞后角变短，气缸爆发压力变大。

高压油管压力波形是智能监测系统中诊断喷油器有无故障的主要参数。针阀启闭压力下降会造成压力波形开启点提前，关闭点滞后；喷孔堵塞会造成喷油持续角变短，管内残余压力波动的振幅突然增大。故障喷油器的位置用各缸排气温度偏差和瞬时转速波动情况来判断。

（三）热交换器结垢与堵塞

船舶动力系统中的滑油冷却器、淡水冷却器等热交换器，其性能下降主要原因就是传热面的污垢热阻增大。冷却水，特别是海水，很容易产生生物附着和矿物质结垢。海生物的繁殖和代谢产物会在管壁形成粘性的生物膜，生物膜的热导率很低，极大地阻碍了热量的传递。海水中的钙、镁离子在高温管壁表面析出结晶，形成水垢层，总传热系数变小。

流道堵塞属于热交换器性能下降的又一个典型表现。杂质沉积造成冷却管束有效流通截面积减小，冷却水流速局部增大，但是总的流量减少，压降增大。板式换热器的板间通道较窄，很容易被油泥或者藻类堵塞，造成流场分布不均匀，产生换热死区。流体动力学特性改变以后，被冷却介质（滑油或缸套水）的出口温度就无法保持在设定的范围内，即使温控阀全开，温度偏差也不能消除。

热交换器性能退化的机理分析要联系传热学方程和流体力学特性。当冷却器进出口压差随时间呈指数增长，而换热效率也同步下降的时候，就表示已经出现严重的结垢或者堵塞现象。污垢的积累不仅会破坏热平衡，而且还会造成管束的垢下腐蚀，甚至引起管壁穿孔漏油漏水。

三、断裂与变形类故障

断裂、变形属于结构强度失效范畴，一般由于超载、共振或者材料缺陷引起。该类故障一般具有突发性、破坏性，一旦发生就会造成设备停机或者引发灾难性后果。对其力学机理进行深入研究，对于防止重大事故的发生有决定性的作用。

（一）轴系断裂与弯曲

船舶推进轴系所受的载荷主要有扭载荷、弯曲载荷和推力载荷。轴系断裂主要是由高周疲劳或者瞬时超载造成的。根据 DNV GL（挪威船级社）的船舶规范要求，中间轴由扭转振动产生的附加剪切应力，必须持续控制在材料许用应力的 ± 30%（或根据具体工况按 ± 40-60 MPa）的安全范围内，否则被视为危险工况。柴油机的激振力矩频率与轴系扭转振动固有频率相等或者接近时，就会产生强烈的共振。由于共振效应，轴段内部的剪切应力会成倍增大，在油孔、键槽、截面突变处等位置，应力集中系数往往高达 2.0 至 3.5（参考《机械设计手册》及 ISO 6336 标准），使得这些局部区域的实际应力远超轴系本体。微裂纹在这些高应力区产生，沿着最大剪切应力的方向扩展，断面会显示出典型的海滩条纹状疲劳特征区和瞬时断裂区。

轴系弯曲变形多为安装对中不良或者船体变形引起。船体在装载变化或者波浪载荷作用下产生弹性变形，轴承座位置发生相对移动。根据 ABS（美国船级社）的指导建议，轴系校中时的偏中值通常需控制在 0.05 mm/m 以内，而船舶在海上遭遇恶劣海况时，船体中拱或中垂变形量可达船长（L）的 1/1000 至 1/1200（参考中国船级社《钢质海船入级规范》），这种大幅度的船体变形极易导致轴系不对中。

由于轴系不对中，轴系在转动时承受着巨大的交变弯曲应力。长期处于此工况的轴段，轴承的载荷分布是不均匀的，若不对中严重，轴承负荷最大值可能超过理论计算值的 50% 甚至更多（ISO 8844 标准）。在交变应力的作用下，材料内部会积累损伤，最终会造成永久性的弯曲或者断裂。此外，当螺旋桨碰触水下障碍物时，瞬时冲击扭矩可能达到额定扭矩的 3 至 4 倍（参考 MAN B&W 柴油机推进系统设计资料），这种巨大的冲击载荷也是造成尾轴弯曲或者断裂的原因之一。

（二）螺栓松动与断裂

轮机设备上的连杆螺栓、缸头螺栓、地脚螺栓等起连接、紧固作用。螺栓断裂一般属于疲劳断裂，其机理为预紧力丢失加上交变载荷的共同作用。在理想情况下，当预紧力足够大的时候，被连接件之间一直处于压紧的状态，螺栓受到的动载荷幅度较小。但是由于振动引起螺栓自松，或者垫片蠕变导致预紧力降低，螺栓所承受的拉伸应力幅值就会突然增大。

螺纹根部是应力最集中的地方，大部分疲劳裂纹都是从这里开始的。另外当螺栓受到横向剪切力的作用时，如果预紧力不能产生足够的摩擦力来抵抗横向滑移，那么螺栓杆就会受到额外的弯曲应力，从而加速疲劳过程。连杆螺栓断裂会造成捣缸等严重事故。松动故障的早期特征有微动磨损产生出来的红粉状氧化铁，局部结构振动模态变化等。

（三）结构部件疲劳裂纹

柴油机的机座、机架、气缸体等大件，在工作时受到气体爆发压力和往复惯性力这两种力的作用，产生复杂的应力场。

1. 焊接缺陷的产生是焊接结构机座焊缝、热影响区带有残余拉应力、气孔、夹渣等初始缺陷所造成的。这些缺陷就是疲劳裂纹的萌生源。在交变应力的作用下，先是裂纹从焊趾处开始扩展，然后才是沿板厚方向扩展。

2. 材料退化、应力腐蚀，在有腐蚀性介质（冷却水泄漏、酸性油泥）的情况下，金属材料的疲劳极限会大幅降低。应力和腐蚀同时作用（即腐蚀疲劳）时，裂纹的扩展速度要比单纯的机械疲劳快得多。

结构裂纹出现之后，会导致机体刚度降低，整机振动增大。如果裂纹穿过壁面，就会造成油水外漏。声发射技术对于此类故障有着明显的优势，可以实时的检测到材料因为裂纹延伸而发出的应力波信号，从而提前发出警报。监测机座地脚螺栓处的振动相位变化，也可以判断结构刚度的变化。

第二节 故障特征参数提取方法

在船舶轮机故障诊断以及智能预警系统创建时，原始信号里常常混有大量背景噪声以及环境干扰。直接用原始数据来识别状态，效率很低，准确率也难以保证。所以，从采集来的振动、压力、温度等多源传感器数据中提取出对设备健康状况比较敏感的特征参数，便成了连接信号采集与故障识别算法的那座重要桥梁。本节会对时域、频域以及时频域三个方面的特征参数提取方式进行详细的分析，为后面智能模型的训练提供可靠的数据支持。

一、时域特征参数

时域分析法是最直接、最基本的一种信号处理方法。以时间作为横轴，信号

幅值作为纵轴，利用统计学的方法求出波形的各种统计量。该方法计算量小、实时性强，可以迅速反映船舶轮机设备的振动信号总体强度及概率分布。当设备出现早期故障，冲击成分增大时，时域指标一般能很快作出反应。

（一）均值、方差与峭度

均值代表了信号的直流分量或者静态分量，在振动信号分析当中一般设定为零，但是温度、压力监测当中，均值的偏移直接体现了工况的变动。方差以及方差的平方根——标准差，反应的是信号偏离均值的幅度，也就是振动能量的衡量。当船舶柴油机或者辅机出现严重不平衡、不对中或者部件松动的时候，振动幅度就会增大，信号方差也会急剧上升。对于大幅度的平稳故障比较敏感，但是对于早期微弱的故障，常常被强背景噪声淹没而无法检测出来。

峭度是四阶中心矩的规范化形式，用来度量信号概率密度函数在某一点处的陡峭程度，也就是波形中极端值出现的概率。正态分布的健康信号的峭度值为三。当轮机内部的轴承或者齿轮出现点蚀、剥落等局部损伤的时候，信号当中就会周期性的产生高幅值脉冲，概率密度曲线的尾部变大，峭度值也变大。峭度指标的一个显著优点就是它不敏感于信号的绝对幅值，而对波形中的冲击成分非常敏感，因此在船舶机械早期故障检测中具有不可替代的作用。信噪比较低的时候，峭度依然能较好地反映微弱冲击的特征，是判断滚动轴承是否健康的指标之一。

（二）峰值因子与波形因子

峰值因子是信号峰值与有效值之比，可以反映波形的突发性。轮机设备运转状态良好的时候，其振动波形近似为正弦波或者随机噪声，峰值因子在一个较低的稳定水平。当设备内部由于零部件断裂或者异物侵入产生剧烈冲击的时候，峰值瞬间增大，而有效值的变化比较滞后，造成峰值因子急剧增大。该指标能很好地检测信号中是否有突然出现的脉冲序列，对于诊断往复机械的气阀故障、连杆机构异常有重要的参考价值。

波形因子是用有效值和绝对平均值的比值来表征信号波形整体形状的。它对于早期冲击故障的敏感度不如峰值因子或者峭度，但是对设备磨损进程的监测却有特殊的稳定性。随着船舶主机运行时间的增长，零部件表面的磨损会使振动波形变得越来越复杂无序，波形因子也会随之发生有规律的漂移。在实际工程中往往将峰值因子、波形因子结合起来使用，前者主要用来检测突发性故障，后者用来跟踪设备渐渐磨损的过程，可以对整个设备状况进行全生命周期监测。

（三）裕度指标与脉冲指标

裕度指标是信号峰值与方根幅值的比值，方根幅值就是信号幅值平方根的平均值的平方。该比较复杂的表述赋予了裕度指标很高的故障敏感性。当齿轮断齿、轴承剥落等故障产生冲击信号时，在重载工作状态下的船舶推进系统，裕度指标可以很好地被识别出来。相比其他的指标，裕度指标更重视高频冲击成分在总信号中的所占比例。故障萌芽期，数值就出现明显的上升趋势，给机组的轮机员留出了宝贵的时间。

1. 脉冲指标就是用信号峰值除以信号的平均值来表示的，它体现的是信号中瞬时脉冲的尖锐程度。脉冲指标被用作船舶分油机、空压机等辅机旋转部件动平衡状态的观察。

2. 脉冲指标使用信号的绝对平均值作为分母，在非平稳信号中具有较好的鲁棒性，不容易受到载荷波动造成整体幅值漂移的影响，保证诊断结果的稳定性。

这两种指标在构建特征向量时常常被当作补充维度来使用。由于船舶机舱环境差，单一的时域指标很容易受到电磁干扰或者结构共振的干扰而导致误报。把裕度指标、脉冲指标同前面提及的峭度、峰值因子融合起来，就可以塑造出高维的时域特征空间，依靠多指标交叉验证，能够大幅优化故障模式识别的置信度。

常见时域特征参数的定义及应用场景表

特征参数	定义	故障敏感性	主要应用场景
均值	信号的平均值	温度、压力工况变化	监测温度、压力等静态参数变化
方差 / 标准差	信号偏离平均值的幅度	严重不平衡、不对中、部件松动	大幅度平稳故障检测
峭度	描述信号概率密度函数的陡峭程度	轴承 / 齿轮局部损伤引起的周期性冲击	早期局部损伤（如点蚀、剥落）检测
峰值因子	信号峰值与有效值的比值	突发性冲击、脉冲序列	往复机械气阀故障、连杆机构异常
波形因子	有效值与绝对平均值的比值	磨损进程、波形整体形状	设备渐进式磨损监测
裕度指标	信号峰值与方根幅值的比值	高频冲击成分在整体信号中的占比	齿轮断齿、轴承剥落等冲击信号识别
脉冲指标	信号峰值与平均值的比值	瞬时脉冲尖锐程度、动平衡	旋转部件动平衡、非平稳信号诊断

从上表可见，各类时域特征参数各有侧重，共同构成了故障诊断的基础。

二、频域特征参数

时域分析直观但不能很好地表现信号的频率成分的关系。处理船舶轮机这种有很多转动部件的复杂系统时，很难分辨各个转动部件所产生的振动。频域分析用傅里叶变换把复杂的时域波形映射到频率域，使信号的频率结构一目了然，可以准确地找到故障源及性质。

（一）频谱特征频率识别

频谱分析就是建立机械结构运动学参数和频谱峰值的对应关系。船舶轮机系统中曲轴转速、叶片通过频率、齿轮啮合频率等都是已知的基准频率。当存在转子不平衡的时候，频谱图中基频（一倍频）的幅值会变大；如果存在不对中故障，则二倍频和高次谐波成分会占主导地位。齿轮箱齿面磨损，啮合频率及其谐波附近的边频带。根据识别出的存在且幅值发生变化的这些频率成分，就可以对故障部位进行精确定位。

实际使用时，为了得到较好的频率分辨率，一般采用快速傅里叶变换算法对离散的采样信号进行运算。由于船舶主机转速变化大，还需要用周期采样技术或者阶次跟踪技术，把非平稳的时域信号变成角域平稳信号，消除了转速模糊效应，使特征频率在谱图中表现为尖锐峰。特征频率识别法是船舶轮机故障诊断中成熟度最高、应用最广的技术方法，可以较好地解决大部分旋转机械的常规故障诊断问题。

（二）能量分布分析

能量分布分析不再只看某一个频率点的幅值，而是对整个频带内能量流动情况的分析。将频谱划分成低频区、中频区以及高频区这三个大的区域，各个频段能量所占比例的不同之处，常常表现出不一样的故障机理。低频段主要反映的是转子的宏观运动状态，比如质量不平衡、轴系不对中、基础松动等结构性问题；中频段多和流体激振、叶片颤振等流固耦合现象有关；高频段一般由轴承元件表面损伤、齿轮早期裂纹等引起的结构共振或者声发射。

通过计算各个频段的能量占总能量的比例，或者计算某个故障特征频带内能量的聚集度，可以得到反映设备健康状况的“能量指纹”。比如对涡轮增压器进行监测的时候，如果发现高频段能量占比突然增大，虽然还没有找到具体的特征

频率，但是仍然能够断定轴承很可能是润滑不足或者刚开始磨损。宏观的能量视角可以弥补复杂噪声环境中频率识别易受干扰的缺点，给系统提供更加鲁棒的趋势预警方式。

（三）包络谱分析技术

包络谱分析技术又叫共振解调技术，对滚动轴承、齿轮箱早期故障的诊断有很强的能力。当轴承零件表面出现局部损伤的时候，运转中产生的周期性冲击力很小，持续时间很短。直接进行频谱分析时，其特征频率很容易被低频的宏观振动信号所淹没，或者散落在宽带噪声中而无法分辨。但是高频冲击会激发轴承系统或者传感器的高频固有频率，产生调制现象。包络谱分析就是利用这个原理，先用带通滤波器把被调制的高频共振信号提取出来，去掉低频干扰。

接着用希尔伯特变换对滤波后的信号进行检波，得到调制信号的包络线。对包络线做频谱分析，就能在低频段清晰地得到故障特征频率及其倍频成分。船舶轮机故障诊断时，在柴油机强振动环境下提取辅机轴承微弱故障特征，包络谱分析技术就显得十分重要。把高频共振带内隐藏的调制信息解调出来，使原来不容易察觉的故障特征在包络谱上浮出水面，从而大大提高了系统检测早期故障的准确率和诊断精确度。

三、时频域特征参数

船舶轮机设备在启动、停车、变负荷等非稳态工况下运行时，其振动信号具有很强的非平稳性以及时变性。传统的时域或者频域分析只能给出单方面的信息，不能同时说明信号随时间变化的规律。时频域分析技术是构造时间、频率联合分布函数，更好的反映非平稳信号的局部特性，揭示故障发展的过程。

（一）短时傅里叶变换

短时傅里叶变换是非平稳信号处理领域里，傅里叶变换的自然延伸。其基本思想就是假定非平稳信号在很短的时间内是平稳的，用时间轴上滑动的窗函数把长信号截成一系列短时段信号，然后对每一小段信号做傅里叶变换。这样就可以得到信号在各个时间点上对应的局部频谱，进而画出三维时频谱图。

在船舶轮机的应用中，短时傅里叶变换一般被用来分析加速或者减速过程瞬态振动的特性。利用时频谱图中频率成分随时间变化的轨迹，可以判断转子系统在穿越临界转速时是否存在共振风险，也能检测出随着转速变化而出现的异常敲

击声。但是，由于海森堡测不准原理，所以不可能同时获得较高的时间分辨率和频率分辨率。窗函数宽度的选择要根据具体的诊断要求来权衡，窄窗有利于瞬态冲击的时间定位，但是频率分辨率较低，宽窗则相反。即便如此，由于短时傅里叶变换算法简单、物理意义明确的优点，它仍然是时频分析最基础的一种方法。

（二）小波变换特征提取

小波变换克服了短时傅里叶变换固定窗长的缺点，提出了多分辨率分析的思想，被誉为信号处理的“数学显微镜”。使用一组小波基，用伸缩和平移运算来逼近待分析信号。低频段小波变换用宽的时间窗来获得高频率分辨率，高频段小波变换用窄的时间窗来获得高的时间分辨率。因此它具有自适应的时频聚焦特性，非常适合用来处理船舶轮机故障信号中常见的突变、尖峰、断点的非平稳成分。

特征提取阶段一般用离散小波变换将信号分解成不同的尺度近似系数、细节系数。近似系数是信号的低频轮廓信息，细节系数是高频噪声和突发性冲击的体现。通过计算各层分解系数的能量、方差或者熵值，可以得到反映故障特征的小波能量谱或者小波熵特征向量。对于柴油机连杆轴承的磨损故障，使用小波包分解法将振动信号分成不同的频带节点，比较健康和故障时各个节点能量的变异，可以灵敏地发现由于故障造成的某些频带能量突变，从而对故障的性质和严重程度做出量化的评价。

（三）经验模态分解

经验模态分解是一种完全数据驱动的自适应信号分解方法，它摆脱了传统方法中预先设定基函数的做法，直接依据信号自身的时间尺度特性来分解。该方法认为任何复杂的信号都可以看作是组成这个信号的一些固有的、简单的振荡模式，即本征模态函数的叠加。通过“筛选”的方法，经验模态分解可以将原始信号自上而下分解成许多频率从高到低的本征模态函数分量，以及一个残余趋势项。

1. 该分解方式具有很强的自适应性，对于船舶轮机中由非线性摩擦、间隙碰撞产生的非线性非平稳信号特别适用。分解得到的每一个本征模态函数分量，都是信号在不同时间尺度上的局部特征，比如第一个分量主要是高频噪声和冲击成分，后面分量逐渐反映系统的低频振荡模式。

2. 对筛选出的主要本征模态函数进行瞬时频率、瞬时幅值的计算，得到希尔伯特谱，可以以极高的时频分辨率展示故障特征。

3. 经验模态分解经常被用作去除背景噪声、分离混合故障源的方法。当齿轮

箱发生复合故障时，各部件的故障特征就会混合在一起，利用经验模态分解可以将它分解到不同的本征模态函数分量中，进而实现单一故障源的独立提取。

虽然经验模态分解存在模态混叠、端点效应等理论上的不足，但是它对处理强非线性、非平稳的船舶机械振动信号有着较好的性能，是目前智能故障诊断领域的主要研究热点和主要的预处理方法。它可以真实的反映信号物理本质，给后续的深度学习模型提供高质量的特征。

第三节 故障特征信号处理方法

船舶轮机系统工作时会有很多噪声、干扰，会影响到故障诊断结果的准确性以及时效性。要从海量的原始数据中准确地提取出能反映设备健康状况的特征信息，就需要一个完整的、精确的信号处理系统。本节主要介绍了船舶复杂工况下信号去噪预处理，非平稳信号分析和特征增强的技术，以便给后面的智能诊断模型提供良好的输入，保证预警系统的正常工作。

一、信号去噪与预处理

原始传感器取得的轮机运作信号里面，很难避免地含有电磁干扰，结构共振噪声，随机环境噪声等各类冗余成分，这些都会遮蔽早期微小故障的特征。高效的信号去噪和预处理可以有效地提高数据的信噪比，还原出信号的本来面貌，其主要目的就是尽可能地保留有效故障信息，尽可能地去除无关干扰。

（一）滤波器设计与选择

在船舶轮机故障诊断系统中，滤波器是信号调理的第一道防线，其设计和选择直接影响后面分析的有效带宽和信号质量。轮机设备产生的振动信号一般是宽频带、多成分的。设计的时候要充分考虑到通带波纹、阻带衰减和过渡带宽这些关键参数。数字滤波器主要有两种，一种是有限长单位冲激响应滤波器，另一种是无限长单位冲激响应滤波器。有限长单位冲激响应滤波器具有严格的线性相位特性，不会引起信号在时域上的波形畸变，因此非常适合于相位敏感的波形分析以及轴心轨迹重构。无限长单位冲激响应滤波器，相同阶数下幅度响应更陡峭，计算速度快，适合实时性要求高但相位无关的幅值监测场合。

在工程实际中，根据不同的故障种类以及频段分布来对滤波器进行动态调整。

低速柴油机主轴承磨损故障的表征频率大多都处于低频段。这时应该使用低通滤波器来滤除高频流体噪声和结构共振干扰，并且截止频率的设定要跟随转速基频的变化而变化。反之，对于涡轮增压器叶片裂纹或者气阀漏气发出的高频声发射信号，则应采用高通或者带通滤波器，以隔除低频的机械振动背景。设计时可以引入自适应滤波算法，采用最小均方误差准则自动调节滤波器系数，适应船舶在各种海况、负载下噪声统计特性时变的特点，从而较好地消除某频段的干扰。

（二）信号平滑处理技术

由于传感器响应特性和流体脉动的影响，轮机排气温度、冷却水压力、滑油温度等热工参数会出现锯齿状的随机波动，这种非趋势性高频抖动会使趋势预测模型的收敛受到严重干扰。信号平滑处理技术就是用来消除这些随机误差，找到参数变化的内在规律。五点三次平滑算法、移动平均法属于时域平滑方法。移动平均法利用滑动窗口内数据点的算术平均来抑制随机噪声，但窗口长度的选择非常关键，过窄的窗口平滑效果不好，过宽则会造成信号动态响应滞后，甚至掩盖突发性故障的瞬态特征。

为解决线性平滑法造成信号边缘模糊的问题，萨维茨基 - 戈莱滤波器被发明出来。该方法对信号进行局部多项式最小二乘拟合，在平滑去噪的同时很好地保持了信号的宽度、形状、峰值高度等几何特征，很适合处理带有尖峰特征的瞬态冲击信号。在船舶轮机系统实际部署时，平滑算法一般会和加权策略联合起来使用。按照数据点与当下的距离来赋予不同的权重，离得越近的权重越大。故障刚开始的时候，平滑后的趋势线也会显示参数的异常偏离。

（三）异常值剔除方法

船舶机舱复杂的电磁环境以及传感器自身老化等原因，常造成监测数据中出现超出正常范围的离群点。这些异常值如果未经处理就输入诊断模型中，很可能会造成模型发散或者误报率急剧上升。异常值剔除属于数据清洗中不可缺少的步骤，也是保证系统鲁棒性的关键。对于服从正态分布的平稳工况数据，采用统计学中的拉依达准则(即三倍标准差准则)。通过均值和标准差计算合适的置信区间，超出该区间的数据点就当作异常处理，予以剔除或修正。

对于非正态分布数据，在轮机变工况下，基于密度聚类算法、四分位距法适用性更强。四分位距法用上四分位数减去下四分位数得到数据的四分位距，从而建立鲁棒的异常判别边界，避免极端值的影响。剔除被判定为异常的孤立点之后，

系统不应该对这些点进行简单的置零或者删除操作，而应该使用插值填补技术来进行数据修复。常用的修复方法有线性插值、样条插值或者用临近点的均值进行填补。系统应该对于连续出现的长段异常数据触发传感器故障自检逻辑，而不是对数据进行盲目修正，以此来判断是设备运行故障还是数据采集链路的硬件故障。

二、非平稳信号处理

船舶轮机设备在启动、停机、变负荷航行等过程中的振动和声学信号的非平稳、非线性十分突出，频率分量随时间急剧变化。传统的傅里叶变换以平稳信号为前提，不能很好地捕捉时变信号的局部特征。使用先进非平稳信号处理的方法来解析信号在时频域联合分布的规律，是获取轮机瞬态故障以及变工况特征的重要手段。

（一）时频分析方法应用

时频分析技术克服了单一时域或者频域分析的局限，把一维时间序列信号映射到二维时频平面上，很好地显示了频率成分随时间变化的轨迹。短时傅里叶变换属于经典时频分析方法，借助滑动的时间窗将非平稳信号划分成若干个短时平稳段，然后针对这些段执行频谱分析。窗口函数类型以及长度的选择决定时频分辨率的平衡，窄窗时间分辨率高但是频率分辨率低，宽窗正好相反。以船舶轮机升降速时转子临界转速穿越问题为例，用短时傅里叶变换可清楚展现基频及倍频分量变化趋势，帮助工程师判断有无碰摩或者油膜振荡。

为了克服短时傅里叶变换固定窗口所引起的分辨率限制，小波变换用多分辨率分析的思想来调节时频窗口，通过伸缩和平移因子来动态地调节时频窗口。高频段用短时间窗捕捉瞬态冲击，低频段用长时间窗获取精细频率结构。它的变焦距特性使得它可以在面对轮机气阀敲击、喷油器针阀卡死等突然的非平稳信号时具有明显的优势。维格纳-维尔分布属于双线性时频分布，理论上时频聚集性最好。但是由于交叉项干扰的影响，它在处理多成分信号的时候会产生虚假的时频特征。引入平滑伪维格纳-维尔分布后，在保证较好的时频分辨率的同时能有效抑制交叉项，可以应用于复杂多源激励下的轮机振动信号分析，实现工程化应用。

（二）自适应信号分解

自适应信号分解方法抛弃了传统分析中对于基函数（正弦波、小波基等）的依赖，完全根据信号自身的时间尺度特性来进行分解，大大提高了非线性、非平

稳信号的物理意义。经验模态分解作为该领域的先驱技术，通过筛选过程将复杂的轮机振动信号分解为若干个具有物理意义的本征模态函数分量和一个残余趋势项。每一个分量都代表信号在不同的时间尺度上所表现出的局部振荡模式，可以很好地把高频齿轮啮合频率和低频轴系回旋频率区分开来。

经验模态分解有模态混叠和端点效应的问题。集合经验模态分解在原始信号上加入白噪声辅助分析，利用噪声在全部频带内均匀分布的特点，迫使信号在各个尺度上连续分布，经过多次平均后噪声被消除，信号的分解更加稳定，物理可分性更好。

对船舶主机故障诊断来说，各种先进的自适应分解方法各有侧重，其主要特点、优势以及适用场景见下表：

自适应信号分解方法比较

方法名称	主要特点	优势	适用场景
经验模态分解	通过筛选过程将信号分解为本征模态函数和残余趋势项	无需预设基函数，自适应性强	捕捉不同时间尺度上的局部振荡模式，区分高频啮合和低频回旋频率
集合经验模态分解	在原始信号上添加白噪声辅助分解，多次平均消除噪声影响	解决经验模态分解的模态混叠和端点效应问题，提高分解稳定性与物理可分性	提高复杂非平稳信号分解的鲁棒性
变分模态分解	非递归分解，通过求解约束变分问题，将信号分解为带限本征模态函数	避免模态混叠，对噪声干扰下的微弱故障特征提取效果好，准确提取周期冲击成分	轴承剥落、内圈点蚀等引起的微弱冲击成分提取
局部均值分解	通过估计局部均值函数和包络函数，直接解调调幅调频分量	计算效率高，适合在线实时处理	船载嵌入式系统的实时故障诊断

（三）信号重采样与对齐

船舶轮机在变转速工况下，旋转部件的固有频率随转速变化而变化，造成频率模糊现象，频谱中离散谱线会变成宽带谱峰，从而降低故障识别精度。计算阶比追踪技术是解决这个问题的技术。其本质是对时域非平稳信号进行重采样与对齐，将等时间间隔采样的非平稳信号转换为等角度间隔采样的角域平稳信号。

信号重采样的先决条件就是获得准确的瞬时转速。系统通过安装在飞轮端的键相传感器或者光电编码器得到脉冲序列，然后采用高阶多项式拟合或者样条插

值算法，求得任意时刻的瞬时角位置和角速度。之后按照等角度增量原则对原始振动信号实施插值重采样，保证重采样以后的数据在角域上是平滑的。阶比变换之后，和转速有关的特征频率（轴频、叶频、啮合频率）在阶比谱上表现为固定谱线，不随转速变化而移动；而与结构共振有关的频率则会发生偏移。这项技术很好地将转速相关的振动与结构固有的振动分开了，对于变转速下齿轮箱断齿、轴承故障、轴系不对中等故障的诊断起到了决定性的作用，保证了提取特征的唯一性、准确性。

三、特征增强技术

轮机故障初期损伤所引起的冲击或调制信号很弱，容易被淹没在宏大的背景噪声和正常运转所引起的强烈振动信号里。直接做频谱分析一般难以发现隐藏在这些特征里。特征增强技术用特定信号处理手段，抑制强背景信号、突显与故障机理相关的微弱分量，达到早发现、精诊断的目的。

（一）微弱信号提取

微弱信号提取技术的核心思想，就是利用信号与噪声的统计差异或者非线性系统的动力学特性，从强噪声的背景中把隐藏的周期性故障特征有效地提取出来。随机共振技术属于一种反直觉的信号加强技术。它利用非线性双稳态系统，使周期信号、噪声、系统势垒三者相互作用，把噪声能量转移到微弱的周期信号上，从而大大提高信噪比。调节系统参数使之适应输入信号和噪声强度，这是实现随机共振的关键，因此该技术适合用来提取轮机轴承早期故障产生的极低频冲击特征。

谱峭度属于高阶统计量，对于信号里的非高斯冲击成分有着敏感的检测能力。谱峭度图或者快速谱峭度图可以自适应地对宽频带信号进行分解，将其分解成若干个中心频率和带宽各不相同的频带，然后计算各个频带的峭度值，从而找到含有故障冲击信息的最佳频带。利用谱峭度来构造带通滤波器，可以较好地去除高斯背景噪声，保留、突出故障引起的瞬态冲击序列。循环平稳分析也是提取微弱信号的有效手段。它依靠旋转机械振动信号的二阶周期平稳性，经由计算循环自相关函数或者循环谱密度，在循环频率域里把具有特定调制规律的故障信号分离出来，即便信噪比较低，也能正确识别出被噪声掩盖的调制源。

（二）信号调制解调

当船舶轮机齿轮箱、滚动轴承出现局部损伤的时候，其振动信号一般是以啮合频率或者系统固有频率为载波，故障特征频率为调制波的调幅或者调频信号。单纯的频谱分析只能得到载波频率及其边频带，不能直接得到故障频率。信号调制解调技术中用得较多的包络解调分析法，可解决上述问题。该技术利用希尔伯特变换得到解析信号，提取瞬时幅值包络，去掉高频载波，让低频故障调制信号在包络谱中清晰显示。

为了提高解调分析的精度，在包络检波之前常常先经过带通滤波预处理，选择出含有丰富故障信息的共振频带作为解调对象，这称为窄带包络解调。广义解调技术把解调的概念又拓宽了。对变转速下非平稳调制信号来说，建立一个与信号瞬时相位一致的解调算子，把时变频率成分“拉直”成恒定频率，从而消除频率调制的干扰。多点解调配合倒频谱分析，面对复杂复合故障时，可以很好地分离出转频、倍频以及各种边频成分，有助于鉴别究竟是单个齿面磨损还是同时存在轴承松动的情况，进而解析复杂调制边频带结构背后的物理含义。

（三）共振解调技术

共振解调技术也叫高频共振包络分析，专门用来检测低速重载或者高速轻载旋转机械早期冲击性故障。其基本原理就是把传感器本身或者机械结构的固有高频共振特性当作“放大器”。当轴承或者齿轮有微小剥落或者点蚀的时候，每次接触都会产生很短的宽带冲击脉冲，其持续时间通常仅为微秒（μs）级别，频带宽度可达 10 kHz 至数十 kHz。这些微小的冲击能量在低频段上几乎可以忽略，但是却可以激起结构的高频固有振动（通常在 5 kHz 至 20 kHz 范围内），形成一系列衰减的波形。

共振解调技术使用模拟或者数字带通滤波器锁定并提取高频共振频段来避开低频段的机械干扰噪声（不平衡、不对中等振动，通常频率低于 1 kHz）。接着对提取出来的高频共振信号做全波整流和低通滤波得到包络线，然后对该包络信号做频谱分析。包络谱中，原被低频噪声掩盖的故障特征频率及倍频被清晰解调出来，幅值相比原始信号可提高 20 至 40 分贝，使故障识别的灵敏度大大提高。

冲击脉冲法（SPM）是共振解调的一种特殊应用形式，直接测量冲击波的峰值、背景值，定义地毯值、最大值两个指标。该方法根据 dBm/dBc（分贝值 / 地毯值）的差异来定量评价润滑油膜厚度和金属表面损伤程度，是船舶轮机滚动轴

承状态监测行业标准技术之一。这项技术对传感器的安装位置以及耦合刚度要求很高，在实施过程中需要保证信号传输路径上阻抗匹配。根据国际标准化组织ISO 10816 及 ISO 13373 标准，传感器安装的谐振频率应远高于分析频率，通常要求大于 25 kHz，从而可以有效的获取高频冲击信号。

第四节 故障特征数据库构建

建立完善的故障特征数据库是船舶轮机智能预警系统的基础，数据库的质量决定后面故障诊断算法是否准确，也决定系统的运行效率。本节主要从底层设计原则确立、中间层数据采集处理、顶层管理维护机制三个方面，详细地介绍了数据库创建的全过程，目的是创建出标准的、安全的、高可靠性的轮机故障数据中心，为智能运维提供强有力的数据支持。

一、数据库设计原则

数据库设计要遵照系统工程方法论，既得顾及轮机故障诊断的实时性需求，又得顾及未来技术升级的远见卓识。设计之初就确定科学的原则，可以有效地避免后期因为架构的问题而造成的系统重构的风险，保证存储架构稳健高效。

（一）数据结构标准化

创建统一的数据结构标准是完成多源异构数据融合的先决条件。船舶轮机系统包含主机、辅机、轴系等多个子系统，各设备传感器原始数据格式也不一样，有的是模拟信号，有的是数字信号，甚至还有半结构化或者非结构化的日志文本。因此需要定义通用的数据字典和元数据标准，对所有入库数据进行统一规范。像统一使用帕斯卡、巴等作为压力单位，摄氏度作为温度的计量单位，精确的时间戳格式等，使得不同的数据源之间的时间轴可以准确地对应起来。

字段命名规范需要符合行业通用术语，不能造成歧义。对同一种类型的不同厂家生产的设备来说，可以利用映射表把私有协议数据转换成标准格式。数据表的设计要符合规范化的范式，这样才能缩减数据的冗余情况，而那些查询频繁的特征字段，可以考虑对它们实施反范式化操作，以此来优化查询的速度，既要顾及空间的利用也要重视查询的效率。标准化数据结构既利于内部算法调用，又为将来与其它船舶管理系统数据交互打下了基础，消除了数据孤岛现象，使故障特

征可以无缝在各个系统之间传递。

（二）扩展性与兼容性

伴随着传感器技术的发展以及船舶智能化水平的提高，轮机系统监测点以及数据种类成几何级数增长。数据库架构应该具备很强的水平扩展能力，可以通过增加节点来线性提高存储容量和处理能力，从而解决海量时序数据的问题。技术选型上采用关系型数据库 + 非关系型数据库的混合模式。关系型数据库主要用来存放设备参数、维护记录等结构化强的数据，保证事务的一致性，非关系型数据库用来存放高频振动波形、声发射信号等大量的非结构化或者半结构化的数据，具有高吞吐量的读写能力。

系统设计时应该预留出丰富的通用数据接口，保证可以接入各种通信协议。不论当前工业现场总线所使用的协议是否流行，也不论将来成为工业物联网传输标准的协议怎样变化，数据库都应可以利用适配器模式来实现兼容。当轮机设备进行升级或者更换时，数据库模型需要具备动态调整的功能，在不停机的情况下增加数据表或者字段，保证系统的连续性。具有高兼容性的设计思想，使故障特征数据库可以随着船舶全生命周期的发展而发展，适应新的技术、新的设备。

（三）数据安全与备份

船舶数据的安全性牵扯到航运企业核心资产以及运营安全，所以创建多层次安全防护体系十分关键。

1. 访问控制、加密策略：必须落实访问控制策略，采用基于角色的权限管理模型，把用户分成系统管理员、轮机员、数据分析师等各种不同的等级。按照不同的用户角色设定详细的增、删、改、查权限，防止误操作或者恶意篡改造成的数据损坏。对敏感的故障特征数据以及船舶运行参数，在其传输与存储时要采用高强度加密算法加以处理，这样即便数据遭到非法截获，也被迫解密无果，不能为敌所用，从而保证了商业机密安全。

2. 容灾备份，容灾备份是数据安全的最后一道防线。应该实行本地和异地相结合的备份方式。在船端服务器上可以采用磁盘阵列，用冗余技术来防止单个硬盘故障造成的数据丢失。同时利用船岸通信链路，定时把核心特征数据上传至岸端数据中心。由于海上通信存在不稳定因素，系统应该具有断点续传的功能，从而保证数据传输的完整性。岸端要创建历史数据归档库，制定详细的备份数据恢复计划，定期检查备份数据的可用性，保证系统出现系统性的崩溃或者物理上的

灾难时，可以立刻进行重要业务数据的恢复。

二、数据采集与入库

数据采集是填充数据库的必经之路，数据采集的质量决定了是“垃圾进，垃圾出”还是“数据进，智慧出”。本文主要研究怎样通过试验台架和实船获取高质量的原始数据，经过严格的数据整理清洗过程将数据转化为可用的故障特征。

（一）试验数据采集规范

制定轮机故障模拟试验数据采集规范的时候，需要依据统计学以及信号处理的基本原理。传感器布置方案需要经过力学分析、热力学计算等周密的准备工作，使测点能真实反映故障引起的物理场变化，防止由于测点位置选择不当而导致的信号衰减或者失真。振动、压力等动态信号的采样频率选择要符合奈奎斯特采样定理，并且要留有一定的安全余量，防止频谱混叠现象把高频故障特性隐藏起来。

试验时要将工况参数当作背景数据加以完整的记载。除了转速、负荷等主要的参数之外，还要把环境温度、冷却水温度、润滑油的质量等因素考虑进去。数据采集要覆盖轮机从正常运转到出现故障的全部过程，尤其要注意故障刚开始时那些微弱的信号，这对于训练预警算法的敏感程度有着十分重要的意义。对单缸熄火、拉缸、轴承磨损等不同的故障模式，要制定不同的标准化试验规程，从而保证每次试验的数据可以重复、可以比较，为后续的特征提取提供可靠的参照。

（二）历史数据整理方法

历史数据当中存有诸多设备运行规律，它是创建故障特征库的重要存量资源。对工作要从纸质的轮机日志、电子报表、旧的监控系统遗留数据这三个方面着手。纸质记录可以使用光学字符识别技术进行数字化，再经人工校对，保证数值准确无误地录入。针对旧系统里格式凌乱且缺乏元数据描述的电子文档，凭借专家经验以及文本挖掘技术，可以挽救其中的上下文信息，知晓数据对应的时间，工况，设备状态。

整理时主要参考以前真实的故障案例。将当时的报警记录、维修报告同传感器数据开展关联匹配，进而重新搭建起故障发生时的全景图。因为历史数据的年代跨度大，标准不统一，所以需要建立统一的映射规则来把以前的参数换算成现在的数值。经过这样一种回溯性整理之后，船舶多年积攒下来的运维经验便能够被转变成结构化的数据资产，这样就极大地丰富了故障特征库中样本的种类，很

好地弥补了试验数据的欠缺。

（三）数据清洗与校验

原始采集的数据中不可避免地混杂着噪声、野值、缺失值，直接入库会对诊断模型的训练造成严重干扰。数据清洗流程中应该布置一系列自动算法。采用小波变换或者卡尔曼滤波算法去除高频随机噪声，只保留有效信号特征而排除干扰。对于传感器故障或者传输错误造成的异常离群点，可以使用统计学中的 3σ 准则或者箱线图法来剔除，防止极端值拉偏模型的统计特性。

数据校验主要是逻辑一致性校验以及完整性校验。系统根据轮机运转的物理机理来设定参数间的逻辑关系，排气温度不能低于进气温度，滑油压力会随着转速的提高而改变等等。检测到不符合物理规律的数据应该被标记并隔离出来，提示人工审核。对于时间序列中的缺失数据，不能简单地删除，应该根据数据的变化趋势和参数的相关性，用插值法或者机器学习预测填充算法进行补充，保证时间上连续性，保证特征提取算法的正常运行。

三、数据库管理与维护

数据库创建不是一劳永逸的，它是一个动态发展的过程。有效的管理维护机制，可保证数据库一直保持在最好的工作状态中，随业务需求变化而不断更替内容，让数据库有生命力、服务力。

（一）数据版本控制

因为诊断算法的持续更新以及数据清洗规则的不断改善，同样的原始数据集会得到不同的处理结果。因此建立严格的数据版本控制机制，保证数据可追溯就显得十分重要。

1. 版本标识和追溯，每一个入库的数据都应该有唯一的版本号和时间戳，记录它的来源、处理过程、所用的算法参数。对历史数据重新清洗或者特征重提取的时候，不能直接覆盖原来的数据，而应该生成一个新的版本副本。这样做的好处就是当新训练的模型效果出现回退的时候，可以快速定位数据处理环节出现的问题还是模型结构出现的问题，随时可以回滚到之前稳定的数据版本进行验证。

2. 变更日志与基准：版本控制系统还要对数据的变更做日志记录，清楚地说明是谁在什么时候对数据做了怎样的改动。对于多人合作的研发团队来说，可以有效防止由于误删或者更新错误造成的混乱。同时采用数据集快照的方式给模型

训练赋予一个固定的参照物，在不同时间点上展开模型性能评定时可以做到相互比较，进而科学地衡量智能预警系统进化的效果。

（二）查询与检索功能

为了使数据能够发挥出最大的利用价值，数据库必须要提供高效的、灵活的查询与检索服务。底层存储引擎要创建多维索引结构，特别是对时间戳、设备ID、故障类型这些经常被查询的字段要进行优化，以保证亿级数据量下毫秒级的响应。支持复杂的组合查询为基本要求，用户可以利用逻辑运算符把各种筛选条件组合起来，快速地找到所要查找的、在某个工况下、某个故障模式下的数据片段。

检索功能不应只做精确匹配，还应该加入相似性检索技术。系统可以利用时间序列相似度度量算法，在当前实时波形与历史数据库中快速匹配出形态最相似的以前的案例，并返回这个案例发生的时候做出的故障诊断结论和修理建议。依靠案例推理的检索方式可以给轮机员提供直观的决策参考。为提升用户体验，查询接口需要封装成标准的 API，前端查询工具要有可视化功能，可以实现数据曲线的动态渲染和统计报表的自动生成，把数据以图形化的方式呈现给用户。

（三）数据更新与补充机制

轮机设备的故障机理千变万化，已有的特征库很难涵盖所有的故障模式。创建起一套自我进化的数据更新和补充机制，才是系统保持智能性的根源。系统要具备在线学习能力，在船舶实际航行时可以发现未知的异常模式。当预警系统发出警报并且得到人工确认或者修正之后，该次事件的相关数据连同人工标注的标签就会被自动回收到特征库中，作为新的训练样本。

故障特征库数据更新与补充方式表

方式	描述
在线学习	系统在实际运行中发现未知异常模式，经人工确认后，相关数据及标签自动回收到特征库。
外部数据引入	定期收集同类型船舶故障案例数据，采用联邦学习或迁移学习方式丰富本地数据。
仿真数据生成	对罕见故障，利用生成对抗网络等深度学习技术生成高质量仿真数据补充，均衡样本比例。

除了被动地接收运行数据以外，还要建立主动补充数据的渠道，见上表。定期采集同类型船舶故障案例数据，运用联邦学习或者迁移学习把外部知识迁移到本地数据库中，从而改善单船样本数据不足问题。对于特征库中样本数量很少的

罕见故障，可以用生成对抗网络等深度学习技术生成高质量的仿真数据进行补充，使各种故障样本比例均衡。依靠这样不断重复的闭环数据更新流程，故障特征库会一直累积经验，不但可以适应设备老化特性，而且能够快速学习新出现的故障特征规律，保证系统诊断水准一直保持在业界先进水平。

第三章 传统故障诊断方法

在船舶轮机工程方面，故障诊断技术由最初的依靠感官经验来判断，发展到依靠对物理量的精确测量来进行科学的分析。传统的故障诊断方法主要是依靠对设备运行状态参数进行监测，比如振动、温度、压力、油液成分、电气参数等。由于振动分析对机械内部结构变化有极高的敏感性，因此它成了旋转机械故障诊断中最重要的、最常用的技术之一。本章主要研究传统诊断技术体系，主要针对基于振动信号分析的诊断机理及工程应用进行分析，为后面智能预警系统的建立打下良好的理论基础和数据基础。

第一节 基于振动分析的故障诊断

船舶轮机设备多数为大型旋转机械，如主机、发电机组、增压器、各种泵浦等，工作时发出的振动信号里包含丰富的动力学信息。以振动分析为基础的故障诊断技术，主要是要建立起振动信号特征与设备机械状态之间准确对应关系。对振动信号进行采集和处理，提取出特征，就可以了解设备各个部件的工作状况，从而及时发现设备的不平衡、不对中、松动、磨损、裂纹等缺陷。这项技术不但能对故障进行定性的识别，也能在一定程度上实现定量的评价，是保证船舶航行安全的重要技术防线。

一、振动信号采集与传感器选型

高质量的原始信号是开展故障诊断的前提，如果在采集端就加入了噪声或者失真，那么之后所有的分析算法都是无源之水。高温、高湿度、电磁干扰等复杂的机舱环境给信号采集系统带来了严峻的挑战。因此，建立可靠有效的振动监测系统，要以传感器的工作原理为基础，结合被测对象的特点以及可能存在的缺陷种类，慎重选择适合的传感器型号，严格按安装工艺规范进行，准确控制采集参数，从而得到真实、完整的检测数据。

（一）常用振动传感器类型及特点

压电式加速度传感器目前在船舶轮机监测中使用最多。它的工作原理是利用压电晶体的压电效应，当传感器随被测物体振动时，内部的质量块对压电元件产生周期性作用力，从而产生与加速度成正比的电荷信号。宽频带、大动态范围、体积小、抗冲击性强等特点，使它很适合检测滚动轴承故障、齿轮啮合异常等高频振动信号。低速重载设备的故障特征频率低，振动能量主要集中于位移或者速度幅值上，压电式速度传感器或内置积分电路的加速度传感器更为适用。

涡流位移传感器属于重要的非接触式传感器，它被广泛地用于滑动轴承支撑轴系的监测上。它利用电磁感应原理，通过测量探头线圈与被测导电体表面之间的间隙变化来获取轴的径向振动和轴心轨迹。在大型船舶柴油机主轴颈、曲轴箱监测上，涡流传感器可以直接得到轴颈对轴承座的位移，可以有效地诊断出油膜振荡、气隙不均、转子热弯曲等原因造成的振动，而其它类型的传感器难以达到这样的效果。虽然安装要求高，在设备壳体上钻孔埋设，但是其给出的直流和交流分量信息，对于分析轴承润滑情况十分关键。

磁电式速度传感器是根据线圈切割磁力线原理工作的，不需要外接电源就可以输出电压信号，并且输出阻抗小、抗干扰能力强。高频响应不如压电式传感器，内部可动部件影响机械寿命，但中低频段的振动测量中，在不需要复杂信号调理的便携式仪表里仍占有一席之地。高温下，经过特殊设计的动圈式传感器比压电材料更加稳定。

（二）传感器安装位置优化方案

传感器安装位置的选择直接决定了信号传输路径的传递特性，进而显著影响故障特征的提取效果。

1. 信号传输路线要尽可能短，并且路径刚度应该足够大。振动波在机械结构中传播时，经过的界面越多，能量衰减越明显，高频段尤其如此。因此传感器应该尽可能的装在靠近被测轴承的承载区位置，直接固定在轴承座或和其刚性连接的壳体上。不能安装在薄壁护罩、散热片或者有共振特性悬臂结构上，防止局部模态对真实的振动信号产生调制和放大作用，引起假警报。

2. 测点布置要覆盖正交方向，获得完整的空间振动信息。水平安装的旋转机械每个轴承座的水平、垂直、轴向三个方向上都要设置一个测点。垂直方向反映重力和基础刚度的影响，水平方向对不平衡故障最敏感，轴向振动是对诊断不对

中、转轴弯曲、推力轴承故障的主要指标。多级传动系统上测点要沿功率传递路径依次布置，这样才能对各级转子以及啮合件特定频率的响应进行有效监测。

（三）信号采集参数设置要点

数字信号采集时参数设置是否合理，直接关系到时域波形的还原度、频域谱图的分辨率。采样频率是首先要考虑的参数，需要严格按照香农采样定理来确定，即采样频率至少要大于信号中最高有效频率成分的 2 倍以上，工程实践中一般取 2.56 倍以上来防止混叠现象。在滚动轴承和齿轮箱早期故障的检测中，因为冲击脉冲会引发结构的高频共振，所以采样频率一般要设置得很高，一般设置到几十千赫兹左右才能有效捕捉到短暂的冲击能量。

频率分辨率的选取要处在采集时间与频谱细节两者之间。频率分辨率等于采样频率除以采样点数，增加采样点数可以提高分辨率，使频谱中邻近的频率成分（边带）能够被清楚地分离出来，但是会延长数据采集和处理的时间，不利于瞬态工况的捕捉。进行包络解调分析时也需合理选择带通滤波器的中心频率和带宽，既要能很好地滤除低频背景噪声，又不能削弱包含调制故障特征的高频载波成分。

二、振动信号处理与特征提取

原始振动信号一般都伴随着大量背景噪声以及无关分量，直接观察很难分辨出故障模式。信号处理和特征提取技术，是用数学变换、统计方法提高信噪比，把隐藏在噪声中的故障特征提取出来，转换成有意义的物理量。从简单的时域统计到复杂的时频联合分析，有各种各样的技术。

（一）时域分析方法应用

时域分析是最直接、计算量最小的信号处理方式，主要是用统计指标来描述振动波形的整体特征。均方根值代表振动信号能量的平均值，对于由磨损、不平衡等引起的振动能量全面增加的故障比较敏感，稳定性好。根据国际标准化组织 ISO 10816-3 标准，对于额定功率大于 300 kW、转速在 600 rpm 至 12,000 rpm 之间的船用陆用旋转机械，当振动速度均方根值超过 4.5 mm/s（区域 C）时，通常被认为已达到可接受状态的上限，需考虑维修。峰值和峰峰值可以反映波形的极端变化，对表面剥落或者断齿等引起的瞬时冲击有较好的指示作用，但其测量结果容易受到 ± 10% 至 ± 20% 随机噪声干扰的影响，稳定性相对较差。

大量无量纲指标被用于早期故障诊断。峭度指标对信号分布的拖尾特性比较

敏感，理论上，对于标准的高斯分布信号，其峭度值为 3。当轴承或者齿轮出现早期点蚀的时候，振动信号中会出现非高斯冲击脉冲，使得峭度值急剧增大，经验表明当峭度值超过 4.0 或 5.0 时，往往预示着设备存在早期故障（《机械故障诊断基础》）。峭度指标受载荷、转速波动的影响较小。此外，脉冲指标（峰值 / 有效值）和裕度指标也被用来检测冲击特性，研究显示，在齿轮齿根裂纹扩展的中期，脉冲指标的变化率可达 15% 至 20%。利用建立好的以多个时域指标为元素的特征向量，可以大致对设备的健康趋势做出判断，但是时域指标很难区分故障发生在哪一处、是什么类型的故障。

（二）频域分析技术要点

频域分析采用傅里叶变换将时域信号转化为频谱图，呈现出振动能量在各个频率上分布的状况，属于目前应用较为成熟的诊断方法之一。幅值谱可以清楚地表现出基频及其谐波分量的幅值，工程师可以利用特征频率与设备运动学参数（转频、叶片通过频率、啮合频率等）对比找出振动源。单纯的转频幅值超标一般表示转子不平衡，倍频成分丰富一般提示不对中或者机械松动故障。

功率谱密度分析还可以进一步描述随机振动信号的频率结构，特别适合于流体诱发振动或者燃烧噪声的分析。倒频谱分析属于二次谱分析技术，对频谱中的周期性结构十分敏感，比如齿轮箱故障产生的调制边带族。在倒频谱上复杂的边带族会简化成清晰可见的谱线，大大简化了故障特征提取的过程。包络分析（或共振解调）是滚动轴承的诊断利器，利用希尔伯特变换得到高频共振信号的低频包络，可以很好地去除低频机械干扰，清晰地显示出微弱的轴承故障冲击频率。

相干分析、传递函数分析可以确定多源振动系统各个部分的因果关系。复杂的船舶轴系中存在许多互相耦合的振动源，根据输入输出信号的相干函数可以有效地判断某个振动的来源，排除虚假信号的干扰，给结构改进和减振设计提供可靠的依据。

（三）时频分析实用技巧

传统的傅里叶变换是建立在平稳信号的基础上，是全局变换，不能反映频率随时间的变化规律，而船舶轮机设备在启停机、变负荷时产生的振动信号是非平稳的。

1. 短时傅里叶变换采用滑动时间窗，将信号分段后进行频谱分析，得到时间 - 频率 - 幅值三维分布图。这项技术可以清楚地显示出转速发生改变的时候，共振

峰出现漂移的情况，以及临界转速被穿越的现象。但是由于海森堡不确定性原理，该方法很难同时满足高时间分辨率和高频率分辨率的要求，因此，窗口宽度的选择通常是性能权衡之后的结果。

2. 小波变换属于多分辨率分析的一种方式，借助伸缩和平移的操作，可以自适应地对信号的高频和低频部分展开分析。高频段用短窗口得到高时间分辨率，低频段用长窗口得到高频率分辨率，这正对应了机械振动信号低频成分持续时间长、高频瞬态成分持续时间短的特点。小波包分解又把频带细分了，既能提取故障特征，又能通过各频带能量占比的变化来构建故障特征向量，给神经网络等智能分类器提供优质的输入。

三、典型故障振动特征识别

理论分析的最终目的就是解决实际工程的问题。不同的机械故障在振动信号上会留下它独有的指纹特征。所以掌握这些常见的故障振动模式，就是把处理过的信号变成有效的维修决定。船舶轮机上最常见的三种故障为轴承损伤、齿轮失效、轴系不对中，它们的振动特征识别要点如表所示。

典型故障振动特征识别表

故障类型	典型特征频率	时域表现	频域表现	识别要点
滚动轴承损伤	外圈 / 内圈 / 滚动体故障频率及其倍频	早期：峭度值急剧增大，冲击脉冲；晚期：宽带随机振动，毛刺噪声	包络谱中出现故障频率及其倍频，伴有转频边带；晚期：宽带随机噪声	结合趋势分析，区分早期冲击和晚期宽带噪声，关注包络谱
齿轮故障	啮合频率、转频及其边带，“鬼线”频率	局部损伤：周期性高幅值冲击脉冲	磨损：啮合频率谐波整体升高，边带不明显；偏心 / 节径误差：啮合频率为中心、转频为间隔的边带族	边带族高度与数量反映故障严重性，“鬼线”辅助区分制造缺陷与运行故障
轴系不对中	1 倍转频、2 倍转频、3 倍转频分量	无特定冲击，可能引起轴心轨迹呈香蕉形或“8”字形	平行不对中：径向 2 倍转频显著；角度不对中：轴向 1 倍、2 倍、3 倍转频，相位差 180°	结合径向 / 轴向振动幅值、相位分析及轴心轨迹图

（一）轴承故障振动特征

滚动轴承是旋转机械中的一种易损件，故障发展一般会经历四个阶段。早期

故障为微观裂纹，振动能量小，常规频谱不易察觉，在超声波频段（20kHz 以上）可通过检测应力波释放来发现。当损伤发展到第二阶段的时候，点蚀剥落造成周期性冲击，激发轴承部件的固有频率，此时包络谱中才能清楚地显现出外圈、内圈或滚动体的特征故障频率及其倍频。此时时域指标峭度值达到最大值。

进入第三阶段，损伤面积变大，故障特征频率的谐波成分变多，而且有以转频为间隔的边带，振动速度和位移幅值变大，噪声也变大。到第四阶段时，轴承内部的几何形状被严重破坏，由于剧烈磨损导致间隙变大，此时的振动波形是随机宽带的，本来比较突出的故障特征频率反而被松动产生的“毛刺”噪声所淹没，工频幅值剧烈波动。识别轴承故障时必须结合设备运行时间和历史趋势，不能把故障晚期的宽带噪声当成是润滑不良或者流体冲刷所导致的。

（二）齿轮故障振动模式

齿轮箱振动信号一般很复杂，含有啮合频率及啮合频率的高次谐波。正常的齿轮啮合也会产生振动，但是当齿轮出现故障时，其频谱结构会发生特异性变化。齿面磨损会使得啮合频率及其谐波的幅值整体上升，但是边带特征不明显。如果齿轮偏心或者节径有误差，则会使得振动信号受到故障齿轮的旋转频率调制，在频谱上形成以啮合频率为中心、故障齿轮转频为间隔的对称边带族。边带的高度以及边带的数量来反映调制作用的强弱，也就是反映故障的严重程度。

当局部断齿或者大面积剥落的时候，除了啮合频率边带增加之外，时域波形中还会出现周期性的高幅值冲击脉冲，重复频率与故障齿轮转速相同。对于行星齿轮箱等复杂的传动机构，由于传感器位置固定而行星轮在公转，可能会导致振动信号出现幅值调制，进行频谱分析时要特别注意区分正常工作时的调制和故障时的调制。鬼线频率一般由齿轮加工机床分度蜗轮误差造成，不随齿轮负荷变化，有助于区分制造缺陷和运行故障。

（三）轴系不对中振动表现

轴系不对中属于船舶推进系统以及发电机组常发的安装和运行故障，一般分成平行不对中、角度不对中以及综合不对中这三种情况。不对中故障一般会造成联轴器两侧产生很大的交变力，从而使得轴承座的振动明显增大。平行不对中一般会在径向（尤其是垂直方向）激发出大些的 2 倍转频分量，这是不对中故障最典型的“指纹”。径向 2 倍频幅值大于 1 倍频幅值的 50% 时，一般认为存在严重的不对中故障。

角度不对中主要引起较大的轴向振动，它的特征频率以 1 倍转速为主，伴生 2 倍和 3 倍转速分量。在相位分析中，联轴器两侧轴承座的轴向振动相位一般相差 180 度左右，这是区分不对中和转子不平衡（后者通常表现为相位同相或者无固定关系）的重要标志。综合不对中就是上述两种情况的综合，频谱中会出现复杂的倍频分量。严重的不对中不但会改变轴系的支撑刚度，而且会引起非线性参数振动，使转轴的轨迹呈香蕉形或者“8”字形，此时需要结合轴心轨迹图进行综合判断。

第二节 基于油液分析的故障诊断

船舶动力系统的血液就是润滑油和燃油。这些“血液”的物理化学性质的微小变化，里面包含着机械摩擦副状态变化的丰富讯息。如果建立起来一套完整的油液分析故障诊断系统，就可以从被动维修走向主动的视情维修。从润滑介质中捕捉到的磨损产物、磨损产物的理化性能衰退信号等，可以用来对早期故障做出准确的判断，从而保证船舶的安全航行与经济。

一、油液采样规范与注意事项

取得有代表性的油样是整个诊断工作的基础，如果采样环节出了问题，再高精度的检测也于事无补。规范采样操作要兼顾流态特性、系统运行工况、外界环境因素的影响，保证所采集样品能够真实反映设备内润滑、磨损情况。

（一）采样点选择原则

在复杂的船舶轮机管路系统中，采样位置选择的好坏直接影响到数据的好坏。理想的采样点应该设置在润滑油循环回路的主回油管路上，并且在过滤器之前。由于经过过滤器的油液，大部分的大颗粒磨损碎屑已经被去除，这就造成对于机器严重磨损的状态可能被漏判。切忌在油箱底部或者死油区取样，这些地方沉积着大量油泥、水分以及历史积存的杂质，其浓度远超循环系统中平均值，极易造成误导性的检测结果。对于有专门采样阀的设备，采样阀应该设在流体湍流区，湍流可以使颗粒物均匀悬浮在油液中，避免由于层流而引起的颗粒分层现象。

对艉轴管、增压器等关键部件，由于循环管路中无法设采样点，则需用专门的真空泵通过油尺导管抽出。在这种情况下，软管插入的深度很重要：既不能碰

到油底壳底部的沉积物，也不能只吸取液面表面的泡沫或漂浮物。一般建议把软管插入到油液的中间位置，即油液深度的一半处，才能得到最能反映系统整体状况的混合样品。对于带有多个摩擦副的复杂系统，为了精确定位故障源，除了主回路采样外，还要在各个分支回油管上设置辅助采样点，以便在主系统指标异常时进行溯源分析。

（二）采样工具与容器要求

采样的器具要进行清洁控制，防止样品受到二次污染。采样瓶要求很高，一般用经过严格清洗烘干的玻璃瓶或耐油塑料瓶，不能与润滑油发生任何化学反应。对液压油系统清洁度等级要求较高的场合，采样瓶应该具备一定的颗粒度洁净等级，使用前一定要密封好，只在采样的一瞬间打开。采样的导管、真空泵接口等辅助工具必须保持彻底干净，哪怕是一点灰尘、棉絮、清洗剂的残留都会影响颗粒计数和理化指标分析。

为了保证样品信息不丢失，可追溯，盛装容器应该密封严密，瓶盖内衬垫片应耐油、耐腐蚀，防止运输过程中由于震动、温度变化造成泄漏或者外部水分进入。采样瓶外部要贴有详细的标签，写明船名、设备名称、采样点位置、滑油品牌型号、设备累计运转小时数、滑油使用时间、采样日期等重要信息。部分化学分析项目（水分含量测定）对容器的透光性也有要求，必要时使用棕色避光瓶，减缓油液中光敏添加剂的分解或者氧化反应。

（三）采样周期确定方法

科学选择采样频率，实质上就是对监测成本和风险控制进行取舍。对于处于磨合期的新造或者大修过的船舶设备，因为摩擦副表面粗糙，磨损颗粒产生速率快，这时应采取高密度采样策略，每隔几十小时取样一次，跟踪磨合状态，判断因加工痕迹造成的初始磨损是否逐渐趋于稳定。设备工作在正常状态时，采样周期可以拉长，根据设备生产商建议值以及船舶实际航行强度来确定，一般主机系统每季度或者每千小时左右做一次常规分析。

1. 常规监测时如果发现某项指标出现异常波动或者接近警戒值，就要立即缩短采样间隔，进入密集跟踪阶段，把握故障发展走向和速度。

2. 在船舶执行特殊任务、长期高强度工作或者遭遇恶劣海况之后，要临时增多采样次数来评价极端工况下对润滑系统所产生的影响。

3. 对于已经达到使用寿命的设备，因为其故障率会大幅度上升，所以采样周

期应该缩短，防止由于突发性失效造成的灾难性后果。

二、油液检测指标与意义

油液检测是一项多维度的物理化学分析工程，其目的就是从微观上解析机械的宏观状态。对理化性能、磨损颗粒、污染程度综合测定，轮机管理人员即可掌握润滑油现役水平及设备的磨损情况。

（一）理化指标检测项目

运动粘度是润滑油品质的主要检测指标之一，直接影响润滑油膜的承重能力以及流动性。一般用 40℃或 100℃的恒温条件下测定运动粘度。粘度异常下降，多为燃油稀释或剪切稀释所致，油膜变薄，金属直接接触风险增大；粘度显著上升，多因油液氧化、烟炱负载过高或乳化引起，会增加系统摩擦功耗，影响散热。总碱值对于用高硫燃油的船舶主机来说非常重要，它表示滑油中和酸性物质的能力。总碱值过早衰减表示添加剂已经用完，此时气缸套、活塞环会遭受严重的酸性腐蚀。

闪点检测可以查出燃油是否会渗到润滑系统里。滑油的闪点突然变小，说明混入了低闪点的燃油，不但会降低润滑性能，而且存在曲轴箱爆炸的安全隐患。水分含量测定同样不可少，海水冷却器泄漏、空气中冷凝水混入都会导致水分存在，水分会加速油液氧化，破坏添加剂性能，高温高压下还会引起汽蚀和氢脆。微量水分可用卡尔·费休法测定，可以及时发现冷却系统是否存在密封不良。

（二）磨损颗粒分析要点

磨损颗粒分析技术，例如铁谱分析、光谱分析等，可以被看作是观察机械内部摩擦副磨损状态的“显微镜”。光谱分析主要测定油液中溶解态或者悬浮微小颗粒的元素成分和浓度，通过量化油液中铁、铜、铅、锡、铝等金属元素的含量，可以大体上判断磨损发生的位置。铅、锡含量上升一般表示轴瓦合金层磨损；铝、硅含量增加，一般表示活塞材质损耗或者外来的灰尘进入。光谱技术对于尺寸很小的颗粒很敏感，是早期磨损监测的利器。

当磨损进入异常或严重阶段时，产生的大颗粒尺寸往往超过光谱分析的检测范围，这时铁谱分析就显示出了它的优势。用强磁场将油样中的铁磁性颗粒分离出来，按尺寸有序地排列在基片上，然后用显微镜观察颗粒的形态、颜色、大小、表面纹理。正常磨损一般会形成细小的片状或者层状颗粒；而出现切削状磨损颗

粒，就表示摩擦表面有严重的刮擦或者异物嵌入；球形颗粒一般是由接触疲劳剥落后再经过高温熔融形成，预示着轴承或者齿轮即将发生疲劳失效。结合形貌特点和材质来判断的话，轮机员就可以准确地还原出摩擦副的损伤机理。

（三）污染度等级评估

油液的清洁度直接影响到液压元件以及精密偶件的寿命。固体颗粒污染会造成元件卡死、磨损和密封失效。污染度等级评定一般采用国际通用的标准 ISO 4406 或者 NAS 1638 评定油液中各个粒径区间内颗粒的数量。船舶液压舵机、调距桨等精密液压系统对固体颗粒污染很敏感，微小的淤泥状颗粒会堵塞伺服阀的节流孔，造成系统动作迟滞或者失灵，因此必须严格控制其污染度等级。

除固体颗粒外，不可溶物（积碳、烟炱、氧化胶质）的含量也属于污染度分析的内容。特别是柴油机燃烧产生的烟炱会混入曲轴箱油里，过多烟炱会使油液变稠，堵塞滤器，吸附抗磨添加剂，使它失效。使用斑点试验或热重分析法测定油液中的不溶物负荷量，可以判断油液的分散性能是否仍然有效。当污染等级超过系统允许值的时候，应该立即开启在线净化装置或者换油，阻止磨损恶性循环。

三、油液状态判断标准

把检测数据变成维修决策，就得有一套科学严谨的判定标准。标准包含依靠统计学的绝对值，也有用历史数据趋势来分析的相对值，从多方面来考察润滑油的剩余可用寿命以及设备的潜在危险。

（一）润滑油老化判断依据

润滑油老化是一个不可逆的化学衰变过程，判断润滑油是否达到了报废标准，需要综合考虑各个理化指标变化率。粘度变化率是第一判断标准，一般情况下，当用油的运动粘度超过新油标准粘度 ±20%（有些标准规定为 ±15% 或 ±25%，视具体设备而定）时，就认为是粘度过大，需换油。这种变化不是线性的，会随着添加剂消耗而加快，捕捉其变化拐点就显得格外重要。

酸值增大和总碱值减小是表征油液氧化和添加剂消耗的“孪生兄弟”。当酸值明显升高，超过初始值一定数值时，说明油液氧化产生大量的酸性物质，已经具备了腐蚀金属的能力；对于船用中速或者低速机油来说，当总碱值降到新油值的 50% 以下时，说明它的酸中和能力已经不能够抵抗燃烧产物的侵蚀。当正戊烷或者甲苯不溶物含量超过规定限值时，说明油液中悬浮的氧化产物和杂质已经

饱和，极易产生漆膜和油泥，附着在高温部件表面，妨碍热交换，这也是判断油液严重老化的重要依据。

（二）磨损异常识别方法

识别磨损异常就是区分正常磨损基线和突发的故障偏差。绝对界限值法是最直接的判断方法，即对不同的设备设定各个磨损金属元素的浓度上限，如铁含量不得超过 100ppm，铜含量不得超过 20ppm 等。只要检测值超过这条“红线”，就判定设备异常。但是由于不同设备、不同工况下磨损率差异大，单个绝对值法的针对性不强，要么造成误报警，要么造成漏报警。

趋势分析法是用来追踪某一种元素浓度随时间变化的速率，以弥补绝对值法不足的一种方法。即使某一种元素的绝对值尚未超过标准，但是如果在很短的时间里指数增长，或者远高于历史平均值，这也是故障即将发生的前兆。以齿轮箱为例，铁含量平稳上升属于正常磨损，但若出现突然跳变，即便总量仍在许可范围之内，也不可轻视齿面点蚀或者剥落的情况。元素比值分析法也是可以采用的方法，铅铜比发生变化时，可体现出轴瓦不同镀层的磨损状况，以此来判断磨损深度是否已经波及到基体。

磨损颗粒分析方法比较表

分析方法	主要检测对象	适用颗粒尺寸范围	优势	局限性
光谱分析	溶解态 / 微小悬浮颗粒	0.1 - 5 微米	早期磨损监测，定量分析元素含量	对大颗粒（>5 微米）不敏感
铁谱分析	铁磁性颗粒	1 微米 - 200 微米	形貌分析，判断磨损机制，识别异常磨损	无法检测非铁磁性磨损颗粒，分析耗时

从上表可以看出，光谱分析、铁谱分析在磨损颗粒检测范围和侧重点方面存在差异，一般需要结合使用才能得到全面的磨损信息。

（三）换油时机确定原则

决定最佳的换油时间，是获得视情维护最大经济效益的关键。传统的定期换油方法虽然管理方便，但有可能造成润滑油在寿命未到之前就被浪费掉；也有可能使设备在润滑油失效之后继续使用，造成设备的损坏。基于油液检测的按质换油原则认为，只有油液中的一项或者多项重要指标（粘度、酸值、水分、污染度、元素含量）达到报警极限，又不能通过净化、补油或者添加添加剂的方式恢复性能时才进行换油。

实际操作中还要根据船舶的运营计划综合确定。如果检测表明油液已接近临界状态，而船舶即将进行长距离的跨洋航行，在途中又没有换油条件的情况下，即使油液还有一点点剩余寿命，也应该采取预防性换油措施来保证航行安全。船舶靠港或者近海航行时，则可以增加监测频率、打开分油机连续净化或者部分更换新油等方法来延长油液使用时间。最终的换油决定，应当是技术状态评价、风险承受力、经济成本核算这三者博弈之后的最优选择，既不能因为油质变差而引发机损事故，也不能一味换油造成运营成本的上升。

第三节 基于温度监测的故障诊断

温度场的变化最直接反应轮机设备内部热力学平衡和机械摩擦状况，是船舶动力系统工作状态最直接的物理参数。基于温度检测的故障诊断技术，对重要节点温度的变化进行检测，分析出设备性能下降或者突发故障的热力学特征，从而实现由被动维修向视情维修的转变。本节主要从温度监测系统构成要素、异常数据识别算法、典型故障下温度场表现三个方面展开论述，给智能预警系统的热参数分析模块提供理论基础和工程实践指导。

一、温度监测系统组成

建立高可靠的温度监测系统是做好精准故障诊断的基础，牵扯到前端感知、信号传输、数据处理等众多环节的相互配合。系统硬件部分要充分考虑到船舶机舱高温、高湿、强电磁干扰等特殊环境，保证采集的数据真实、及时。

（一）测温传感器选型指南

船舶轮机环境恶劣，因此选择传感器时既要考虑精度，又要考虑响应速度、耐受性。排气温度等高温、变化剧烈的测量点采用热电偶传感器，测温范围宽、动态响应好，可以反映气缸燃烧过程中温度冲击。对轴承温度、冷却水温度等测量精度要求较高的低温段采用热电阻传感器，热电阻传感器是利用金属导体电阻值随温度变化的物理特性，输出稳定的信号。传感器的封装方式也十分重要，需要采用铠装结构来抵抗机舱里持续不断的震动，防止引线断裂或者接触不良。

根据各个部位的监测要求，非接触式红外测温技术也逐渐被使用。对旋转部件或者布线不便的地方，红外传感器可以利用物体表面的热辐射能量反推温度分

布，很好地解决了传统接触式测温存在的安装问题。在选择时还要重视传感器的长期漂移情况，使用经过严格老化筛选的工业级传感器，减少由于传感器自身性能下降而引起的误报警。海水腐蚀考虑在内，接触海水的测温探头套管材料应具备良好的耐腐蚀性，一般选用特种不锈钢或者钛合金。

数据传输接口是否标准化也是选型的一个因素。为了便于和集控室监视报警系统连接，现代智能传感器大多都带有模数转换电路，直接输出标准电流信号或者数字总线信号，抗干扰能力强。选型阶段，根据被测对象的热惯性特性选择合适的时间常数，使传感器可以反映温度变化过程中动态的温度变化，防止因为响应滞后造成早期故障信号不能被检测到。

常见船舶测温传感器对比

传感器类型	适用温度范围	响应速度	精度	耐受性	特点
热电偶	宽（高温）	快	中	强	输出毫伏级电压信号，适用于排气温度、增压器温度等
热电阻	中（低温）	中	高	较强	输出电阻变化信号，适用于轴承温度、冷却水温度等
红外传感器	宽	极快	中	较强	非接触式测量，适用于旋转部件或布线困难区域

如上表所示，不同传感器各有侧重，应根据具体测量需求进行选择。

（二）测温点布置方案

测温点的科学布置直接影响故障信息的捕捉率，应该根据柴油机热负荷分布、摩擦学原理来制定出战略性的布置方案。

1. 热负荷关键区布置：气缸盖排气口是监测燃烧质量的关键点，每个气缸都要设置独立的测温点，这样才能通过横向比较找出单缸燃烧异常。在增压器涡轮进、出口处设置测温点，用以评价废气能量利用效率和增压器工作状况。气缸套冷却水出口温度是判断气缸热负荷是否均匀的又一指标，在每一条回水管路上都应装设传感器，以免造成局部过热而发生拉缸事故。

2. 摩擦副关键区布置，主轴承、连杆大端轴承、推力轴承为机械摩擦故障多发区。因为这些部位处于高速运转或者承受重负荷的状态，测温点应尽量靠近轴瓦合金层，采用钻孔埋入式安装的方法减小热阻，保证能够及时发现油膜破裂引起的温度升高。艉轴管轴承在前后两端各设一个测量点，检测船体变形、对中不良导致的边缘负荷效应。

3. 流体介质监控点：滑油进机与出机温度差可以反映带走摩擦热的能力，是润滑系统好坏的标志。冷却系统淡水、海水进出口温度用来检测热交换器的换热效率。燃油系统进机燃油温度的检测，对控制燃油粘度、保证燃油雾化质量起着重要作用，尤其是对采用重油的船舶来说，恒定的燃油温度是燃烧系统正常工作的条件。

（三）数据采集系统配置

数据采集单元是物理世界和数字逻辑之间的桥梁，性能设置的好坏会影响后面诊断算法的有效性。采集卡需要具有多通道同步采样功能，保证同一时间各个气缸参数可以对比。机舱内有大量的变频器和大功率电机，电磁环境十分复杂，采集系统在输入端要配置高性能的信号调理电路，即隔离放大器和低通滤波器，以有效滤除共模干扰和高频噪声，防止虚假信号触发报警。

模数转换的分辨率一般要达到 16 位以上，可以分辨微小的温度变化趋势。采样频率要依据被测对象的热惯性动态设置，流体温度可以采用较低的采样频率，排气温度等波动较大的参数则需要增大采样频率来保留瞬态特性。数据传输网络要采用冗余结构，用双光纤环网或工业以太网将数据及时传送到上层服务器，当某条链路发生故障时不会造成数据丢失。

系统还应该具备断线检测和自诊断功能，在传感器回路出现开路或者短路的时候，能够立刻识别并标注出无效的数据，避免错误的数据进入故障诊断模型。为了应对海量数据的存储问题，在采集配置中一般都会配置一个本地缓存，在网络拥塞或者断开的时候，先将数据缓存起来，等通信恢复之后再续传，以此来保证历史数据的完整性，为大数据的长期趋势分析奠定基础。

二、温度异常识别方法

对大量的温度监测数据提取故障特征，要用到从简单的阈值判断到复杂的分析的多层分析技术。温度异常不单是数值超出允许范围的问题，也是相对偏差增大、演变趋势改变的反映。

（一）绝对温度超限判断

绝对温度阈值法是应用最广、最简单的异常识别方法。该方法根据设备制造厂给定的技术规范书和长期运行积累的经验数据，为每一个测温点确定正常运行时的安全范围。设定值有两个报警上限和停机上限。当温度超过报警上限时，系

统发出声光警报信号，提示轮机员进行相应的调整；当温度继续升高超过停机上限时，保护逻辑就会把主机强制降速或者停车，防止造成重大损失。

在实际运用当中，为了避免由于信号的瞬时波动引起的误报警，在判断逻辑中一般会加入时间延迟以及死区回差。只有温度在设定的时间内一直高于阈值，且回落没有超过死区范围时，才判定为故障。对不同的工作温度限值，目前的系统采用动态阈值的方式，根据主机的负荷、转速、环境温度等自动改变报警线。全负荷工况时排气温度报警阈值自动调高，低负荷时自动调低，保证安全又最小化误报率，提高系统适应性。

（二）相对温差分析技术

根据多缸柴油机结构对称、工况相似的特点，使用相对温差分析法比较同类部件的温度差异来找出故障，灵敏度很高。该方法的核心思想是：正常情况下，各个气缸的排气温度和冷却水出口温度都应该是相近的，任何一个单缸数据偏离平均值就说明存在潜在故障。根据瓦锡兰（Wärtsilä）低速机操作说明书及相关行业标准，在稳定工况下，各缸排气温度的最大允许偏差一般应控制在 ±3% 至 ±5%（或 30℃至 50℃）以内，一旦超出此范围，即认为该缸工作异常。

该技术的实施过程大致可以分为基准值计算、偏差提取和归一化处理这三个部分。系统实时计算出所有气缸排气温度的算术平均值作为基准，求出每一个气缸的温度和均值的偏差。排气温度受负荷的影响很大，例如在 10% 至 100% 的负荷变化范围内，排气温度可能会波动 200℃至 300℃，直接的温度偏差在不同负荷下没有可比性（《船舶柴油机》）。所以需要引入负荷修正系数，把绝对偏差转化成相对于当前负荷的归一化偏差指数。这样做可以消除工况变化造成的整体温度波动干扰，突出单缸燃烧恶化或者喷油器故障引起的局部温度异常。

除了气缸之间横向比较外，在热交换器效率上也使用相对温差分析。根据冷却器进、出口温差与理论设计温差的比较，就可以判断出换热管束结垢的程度。当实际换热温差低于设计值的 80%，或者端差（冷却水出口与海水进口温差）升高超过 10% 至 15% 时，通常提示换热管束已严重结垢（参考 HEI（热交换器协会）标准及 ABB 轮机员指导手册）。对于双轴系船舶，左右主机相同位置的温度对比也是发现隐蔽故障的手段。相对温差分析技术对早期故障的检测能力比绝对阈值法要高得多，它可以在温度还未达到报警上限（通常为报警值 550℃，停车值 600℃）的时候，通过偏差的增大来显示出喷油定时偏差、气阀漏气等渐变型故障。

（三）温度变化趋势分析

温度场的时变性包含了非常多的有关设备性能改变的信息。趋势分析技术不再只是看现在的温度数值，更多地注意到温度变化的速度，也就是变化率，以及长期缓慢的偏移趋势。

1. 瞬态温升速率监测轴承咬死、拉缸等恶性故障是突然的、急剧的上升。对温度随时间变化的一阶导数进行求导，即温升速率，可以在绝对温度报警之前发现问题。当温升速率大于设定的斜率阈值时，即使当前的温度还在允许范围内，也会立刻发出警报。根据变化率来进行预测性的报警可以给轮机员争取到宝贵的避险时间。

2. 长期性能衰退追踪，依靠历史数据库，对关键部件温度做数月甚至数年的跨度分析。根据排气温度随着运行时数缓慢爬升的曲线，就可以判断出涡轮增压器的积碳情况或者活塞环的磨损情况。拟合出一条温度随时间变化的趋势线，再外推出温度达到临界值的时间，以此来安排检修。这种长周期的趋势分析可以剔除掉随机波动的影响，就能找到设备老化、磨损等渐发性故障的变化规律。

三、常见故障温度特征

不同的机械故障与热力故障在温度场上留下的“指纹”是不一样的。对这些典型故障的温度表现特性有深刻的认识，是实现智能化故障诊断和定位的前提。

（一）轴承过热温度表现

轴承系统温度异常，大多由于润滑失效或者机械过载所致。正常流体动力润滑状态下轴承温度应大于环境温度并保持稳定。一旦油膜被破坏，就会发生金属接触，摩擦系数急剧增大，摩擦热在局部迅速积聚。

故障初期温度曲线呈锯齿状，是油膜断续破裂又自修复的过程。随着磨损的加剧，进入干摩擦阶段，轴承温度急剧升高，温升速度很快，短时间内温度可升高几十摄氏度。对于曲柄销轴承这样的运动部件来说，由于散热情况比较复杂，温度异常的时候还会伴随周期性的波动，波动频率与发动机的转速有关。

由于装配间隙过小或者润滑油脏污导致散热不良时，温度曲线表现为持续缓慢的上升，最后稳定在一个较高的非正常水平上。文火煮青蛙式的温升虽然不能立即造成抱轴，但是会加快巴氏合金的疲劳剥落。智能系统识别出是“慢升温”还是“快飙升”这种形态上的差别之后，就能大概断定是润滑油质出现问题，还

是机械配合出现严重故障。

（二）冷却系统故障特征

冷却系统故障是换热能力下降或者流量分配不均，温度特征一般是全局性或者区域性关联。海水泵叶轮磨损或者吸口滤器堵塞导致流量不足，全船冷却水系统温度整体上升，进出口温差明显增大，说明冷却介质带走热量的能力下降。

如果故障是由热交换器内部结垢或者脏堵引起的，那么温度特征就表现为换热温差变小。即热流体出口温度高、冷流体出口温度低，说明热量没有得到充分传递。恒温阀（三通阀）的故障会造成温度剧烈振荡或者失控。如果恒温阀卡在全开位置，低温工况下冷却水温度不会上升；如果卡在全关位置，高负荷时温度会迅速超限。

气缸套水套气阻或者积垢造成局部过热，在总管温度上不明显，但在单缸冷却水出口温度上会出现异常偏高。如果气缸盖产生裂纹造成燃气泄漏到水道里，冷却水的温度就会出现脉动式的波动，压力也会出现异常跳动。对各个监测点的温度分布及温差变化进行分析，就能找出造成温差大的原因。

（三）润滑不良温度信号

润滑系统温度异常既是润滑失效的结果，又是造成磨损加剧的原因。润滑油温度过高会直接造成粘度下降、承载能力减弱，从而引起摩擦副温度上升，产生温度上升、粘度下降、摩擦增大、温度再升高的恶性正反馈循环。

滑油冷却器效率下降时，进机滑油温度整体升高，随主机负荷增加而升高，无恒温控制功能。如果滤器堵塞造成油量不足，各个润滑点的回油温度都会升高，且温升不均匀，承载较重的轴承温升更高。对于二冲程柴油机，扫气箱着火是润滑不良引发的严重次生灾害，扫气箱壁面温度或者排气温度会出现突变性剧增的情况。

系统启动时如果预润滑不够，各摩擦副的温度会出现瞬间的峰值，之后才会随着油压的建立慢慢下降。启动时温度出现过冲的情况，可以作为评判预润滑泵工作状况的标准。通过对滑油总管温度与各支路回油温度的相关性监测，结合滑油压力的变化情况，可以判断是由于油品劣化引起的全局散热不良，还是由于某处油路堵塞引起的局部润滑不足。智能预警系统对复杂的温度 - 压力耦合信号加以解析，就能预先知晓润滑系统是否良好。

第四节 基于性能参数分析的故障诊断

船舶轮机是一个复杂的能量转换和传递系统，它的工作状态的好坏，可以从各个热力、动力性能参数的数值变化中反映出来。经过创建多参数分析模型，既能够对设备的瞬时反应状况了如指掌，又可以从长时间跨度的性能波动走向里，准确找到隐藏的早期故障迹象。本节主要分析基于性能参数的故障诊断技术体系，从关键监测点的物理量选择、基准数据模型的建立、性能退化程度的量化评价三个方面来阐述智能诊断的逻辑闭环。技术人员必须精通一个参数的测量原理，还要懂得各个参数间强耦合的物理机制，从大量的运行数据中提取出具有明确指向性的故障特征信息，给后续的维修工作提供数据支持和理论依据。

一、关键性能参数选取

要建立一个高效率、精确的故障诊断系统，首先要从大量的传感器数据流中挑选出那些对设备健康状况敏感、能真正反映设备状态的重要参数。并不是单纯罗列物理量，而是根据轮机工作原理和故障机理来进行系统的匹配，以达到构建覆盖热力循环、机械运动、流体输送等过程的监测网络的目的。选择参数要有较高的信噪比、良好的重复性，对故障发生的早期阶段要足够敏感，保证诊断系统可以及时发现异常信号，故障初期就发出警报。

轮机故障诊断中常见关键性能参数及其指示意义可见下表。

轮机关键性能参数及典型故障指示表

参数类别	监测要点 / 测量方法	典型故障指示
压力参数	气缸示功图、扫气箱压力、透平排气背压、滤器压差、油膜压力、喷油波形	活塞环磨损、气阀漏气、增压器喘振、空冷器脏堵、轴瓦烧损、燃烧恶化
流量参数	燃油质量流量、冷却水流量、进气流量、润滑油流量、EGR 流量	燃油消耗异常、热交换器结垢、泵浦气蚀、涡轮增压器性能衰退、排放超标
功率参数	轴系扭矩、转速、气缸指示功率、电功率、比油耗	轴系振动、船机桨匹配不良、病缸、发电机效率下降、整体热经济性差

（一）压力参数监测要点

压力是流体系统以及燃烧过程最直接的能量表现，也是最重要的物理量之一。在气缸燃烧环节中，示功图的采集需要高频响的气缸压力传感器来进行，主要是对压缩压力、最大爆发压力以及膨胀过程中的压力波动进行测量。这些很小的数

值差，就表明活塞环磨损失去，气阀漏气或者燃油喷射正时偏移等情形。对于进排气系统而言，扫气箱压力、透平排气背压等主要监测的是稳态数值的连续性。任何非负荷变化导致的压力骤降，均提示增压器喘振或者空冷器脏堵。

润滑和冷却系统流体压力的监测也十分重要，但是它的监测逻辑主要侧重于压差的变化。用滤器前后压差来判定堵塞的程度；主轴承油膜压力要和轴系转速结合起来做动态分析，以防油膜断开造成轴瓦烧毁。液压伺服系统内泄、蓄能器失效等问题的判断，主要看系统压力是否稳定。高压燃油系统上，喷油压力波形分析可以反映针阀偶件运动和喷孔雾化情况，也是诊断燃烧恶化的一个有效方法。

（二）流量参数测量方法

准确获取流量参数，是计算设备热平衡、能效指标的前提，也是判断流体系统是否漏气、堵塞的依据。燃油供应端质量流量计正在逐步取代传统的容积式流量计，因为它可以消除温度、密度变化引起的测量误差，从而得到更加准确的燃油消耗率数据。冷却水系统中使用电磁流量计或者超声波流量计，比较设计流量和实际流量的差值，可以判断热交换器内部是否有结垢或者泵浦叶轮气蚀损坏，并且能确定出损坏的位置。

进气流量测量对于涡轮增压器性能评价、气缸充量系数测定都起着决定性的作用。大口径管路中空气流场不均匀，通常采用文丘里管或热线式风速仪阵列多点平均测量，也可以通过压气机转速和压比特性曲线进行推算。润滑油流量监测主要是对各润滑点的分配情况进行监测，在关键支路上装设视油镜配合流量开关或齿轮式流量传感器，可以保证各摩擦副得到足够的润滑冷却介质，防止局部过热。废气再循环系统中的再循环废气流量准确控制及测量直接影响排放是否达标、燃烧是否稳定，一般采用文丘里管压差与温度补偿相结合的方式实时计算。

（三）功率参数分析技术

功率参数为评价轮机对外做功能力和机械效率提供了一个最终的指标，它包括了扭矩测量、转速监测、指示功率计算等几个方面。轴系扭矩的实时监测，一般采用安装在中间轴上的应变片式或相位差式扭矩仪进行，不仅可以得到瞬时轴功，还可以通过对扭矩波动的频谱分析，诊断轴系扭转振动异常、螺旋桨负载不均匀等故障。用高精度转速信号来获得推进特性全工况曲线，分析船机桨匹配状态和污底阻力增加对主机负荷的影响。

气缸指示功率的计算需要在线示功系统的积分运算，通过对比各个气缸的指

示功率均匀度可以很快找出做功不足的病缸。该项分析技术要达到很高的曲轴转角分辨力，才能保证压力容积积分的准确性。对发电机组的电功率参数（电压、电流、功率因数）进行分析，与机械功率进行对比，可以发现机电耦合系统中能量损失的环节，如发电机轴承磨损导致的机械效率下降，或励磁系统异常导致的电气损耗。根据有效功率和燃油消耗量的关系，即比油耗的变化趋势，就是评价轮机整体热经济性和技术状态衰退最直接的方法。

二、参数基准值建立

即使得到大量的实时性能参数，没有科学、客观、动态的参照标准，这些数据也很难起到诊断作用。参数基准值的建立，犹如把原始数据与故障判断联系起来的桥梁，它规定了设备处在理想或者健康状态下运行的指纹。其中包含新机出厂数据的标准化，实际运行环境的影响修正，历史长周期数据的统计学建模。创建准确的基准值体系，可以消除环境因素和工况波动造成的干扰，使诊断系统能够排除掉完全由设备性能下降引起的参数偏离，从而达到较高的状态评价可信度。

（一）新机基准数据采集

新机交付或者大修后首次飞行所得到的数据，是该类设备自诞生起整个生命周期健康记录的起始数据点。这部分数据的取得必须遵照国际标准测试程序。系泊试验、航行试验中应在 25%、50%、75%、100% 及 110% 最大连续功率负荷点上将各项热工参数、机械振动数据逐点记录。这些数据共同组成了设备的“零时刻”基准，也就是设备处于最佳的机械配合、最干净的状态时的表现。

为了使这些基准数据日后在日常经营中可以进行比较，就必须对环境进行严格的修正。由于试航海域的气温、水温、大气压力等环境条件与标准ISO工况不同，因此要按照柴油机台架试验标准中规定的修正公式，把实际测得的排气温度、燃油消耗率、增压压力等参数换算成 ISO 标准条件下的数值。同时还要采集瞬态工况的响应数据，急加速或者突卸负荷时的转速波动率与恢复时间。这些动态的基准数据，日后对于诊断调速器的性能、增压器的迟滞现象等都会有着不可取代的参考意义。

（二）正常运行参数范围

设备在实际营运中会受到海况、载重、污底等许多随机因素的影响，设备正常运行参数也不是一个固定值，而是一个动态包络区间。确定这个区间需要采用

统计过程控制的思想，通过对大量处于健康状态的历史运行数据进行概率密度分析，得到各个参数在不同负荷下的均值和标准差。一般用均值 ± 三倍标准差（3σ）的范围作为正常工作范围，处于此范围内的数据波动被看作是系统本身的随机噪声，不会引起警报。

1. 因为船舶工况比较复杂，所以应该根据不同的运行模式来设置分层基准。进出港机动航行模式下，负荷变化大，参数允许波动范围可以放宽；大洋恒速航行模式下，系统处于热平衡稳态，基准范围应该更收敛、严格。

2. 为了适应外部环境季节性的变化，基准范围模型应该有自适应的调节能力。热带海域航行时，冷却水进口温度升高会使得扫气温度自然升高，此时如果仍然用寒带海域的基准范围，就必然会产生误报警。因此建立以海水温度、进气温度等环境参数为基准的多维关系基准模型，可以在当前的环境下动态调整或者缩放正常的参数范围，从而保证诊断逻辑在任何气候条件下都能稳健运行。

（三）参数变化趋势记录

瞬时值固然重要，但是它的演变轨迹所包含的故障演化信息更多。建立完整的参数趋势记录系统，为预测性维护打下了基础。这就需要数据采集系统具有高效的时间序列数据库，可以以一定的采样频率长时间保存关键性能参数。温度、压力等缓变参数用分钟级的采样频率就可以画出其退化曲线；振动、瞬时喷射压力等快变参数，需要有波形快照或特征值提取的功能，防止数据量过大。

趋势记录的核心价值就是发现参数的单调性变化。排气温度随着负荷的增加单调上升，在没达到报警值时，此趋势已经表明喷油器积碳或者气阀密封不良正在进行渐进的过程。对趋势线进行线性或非线性回归分析，得到参数退化速率，可以预测出达到失效阈值的时间（剩余寿命）。系统应该具有数据清洗的功能，剔除瞬态干扰，在记录长期趋势的时候，自动把由于启停机、换油、海况突变等非故障原因造成的数据跳变去掉，使趋势曲线真实反映设备物理衰退的过程。

二、性能退化评估方法

确定关键参数、基准模型之后，故障诊断的核心任务就是分析实测值与基准值之间的偏差。性能退化评估不是简单地比较一个阈值，而是包含热力学计算、多参数相关分析、概率统计的逻辑推理过程。本环节的主要目的为对设备的性能损耗进行定量分析、识别出系统的偏差以及局部存在的故障，并根据退化速率来

给出科学的预警。利用精准的评估算法，可以把模糊的数据偏差转化成明确的故障模式，给轮机员提供由表及里的诊断结果。

（一）效率下降的判断标准

设备性能退化最本质的表现就是能量转换效率的降低，所以用热力学效率作为评价标准是有顶层指导意义的。对于柴油机来说，根据指示热效率和有效热效率来计算，可以对燃烧品质和机械摩擦损耗的情况形成一个总体认识。若有效热效率比基准值小一个百分数（比如 2%），排除燃油品质、环境因素影响之后，就可以判定主机有性能下降。具体的判断标准应该细化到每一个子系统上，涡轮增压器的效率是压气机效率乘以涡轮效率，如果总效率下降，一般是指叶片积垢或者喷嘴环变形。

换热设备的性能退化一般用传热效能或者传热系数来衡量。对空冷器、滑油冷却器进行监测，检测冷热流体进出口温差和压降，根据当前流体流量计算出实际热交换率。实测换热系数低于清洁状态下基准值（比如 15%）时，说明换热表面结垢严重或者管束堵塞。依靠物理模型计算效率的方法，比单独依靠温度监测更能早些发现热交换能力变坏的征兆，可以有效地防止由于冷却不够而引发的二次故障。流体输送机械，如泵、风机，其水力效率降低一般表现为在相同扬程、流量下轴功率突然增大，监测比能耗（单位流体输送能耗）变化，可以判断流体输送机械磨损或气蚀的状态。

（二）性能参数关联分析

轮机系统内部各个参数之间存在着密切的物理耦合关系，单个参数的异常可能是多种原因造成的，但是多参数联合分析可以有效地消除歧义，直接指向故障的根源。关联分析的重点就是建立故障特征矩阵，考察各个参数变化方向的组合模式。如发现扫气箱压力下降，同时增压器转速上升、排气温度上升，一般是由于扫气口或排气管路积碳造成流阻增大；相反，如果扫气压力下降的同时增压器转速也下降，且排气烟色变黑，则更可能是喷油系统问题或者涡轮端能量输入不足。

利用皮尔逊相关系数或者互信息熵这些统计学方法，可以度量参数之间的动态联系强度。气缸工作时最高爆发压力和压缩压力的比值是强相关特征，比值变小代表燃烧延迟或者燃油雾化不好，这同增压系统毫无关联。对滑油系统而言，将滑油温度、滤器压差同光谱分析得到的金属颗粒含量相联系，可以区分出是由

于油质变差还是轴承磨损所引起的油温异常。采用多种手段相互验证，可以排除传感器漂移或者外界干扰所引起的误报，从而很大程度上提高故障定位的准确率。

（三）故障预警阈值设定

预警阈值的选择是诊断系统灵敏度及可靠性的决定因素。预警阈值如果设置得过严，容易产生大量的误报（虚警），造成轮机员出现“报警疲劳”；而设置得太宽松，又容易造成漏报，错失最佳维修时机。科学的阈值设定策略要采取分级的办法：

1. 设置一个“早期预警阈值”，一般用统计学上的 3σ 偏差或者微小的效率损失（1%-2%）来表示。这时设备仍在安全运行范围内，但是已经显示出了衰退迹象，系统只提示关注并提高巡检频次。

2. 设置一个维修建议阈值。当参数偏差达到一定范围（比如偏离基准 5% ~ 10%）时，就说明部件磨损或者积垢已经影响到经济性或者安全性，系统就应该自动生成维修工单建议。

3. 设定极限保护阈值。这是设备安全运行的底线，一旦触及排气温度超限、油压过低等情形，系统就应该立即发出声光报警或者自动降速、停机。

使用动态阈值技术可以提高预警智能化。不同于固定值报警的是动态阈值是按照当前的工况（负荷、转速）和环境条件实时计算的。用机器学习算法训练出来的正常行为模型，可以预估当前工况下各个参数的理论值，然后拿实测值和预测值的差值，也就是残差来当判断标准。如果残差序列连续超出了设定的置信区间，就会触发报警。可以消除变工况过程中瞬态波动的影响，对全工况范围内微小故障征兆比较敏感，真正做到防患于未然。

第四章 智能故障诊断技术

随着船舶自动化程度不断加强，依靠物理模型、专家经验的故障诊断方法，已经不能满足复杂动力系统实时监测的要求了。智能故障诊断技术属于一种数据驱动的方法，它依靠对大量监测数据的挖掘来发现其中隐藏的故障特征，已经成为提高船舶运行安全性的重要途径。本章会就基于人工神经网络的智能算法在轮机故障诊断中的主要应用、数据处理流程和模型优化策略进行详细的阐述。

第一节 人工神经网络在故障诊断中的应用

人工神经网络由于具有很强的非线性映射能力以及自适应学习特性，在处理船舶轮机系统这种多变量、强耦合、非线性复杂的对象时具有明显的优势。借助模仿生物神经元信息处理的方式，诸多网络架构被发展起来，进而可以创建起高精度的人工智能诊断系统，有效地执行故障分类、时序预估、特征提取等诸多任务。

一、神经网络模型选择

船舶轮机系统各个子设备的运行特性与故障机理不同，所以要选取恰当的神经网络拓扑结构，这是创建有效的诊断系统的基础。不同的网络结构在处理静态映射、动态时序和高维图像数据的时候，其适用性以及效果存在着很大的差异，必须根据具体的诊断任务需求做出恰当的选择。神经网络模型在轮机故障诊断中应用的对比如表所示。

（一）BP 网络适用场景

反向传播网络是应用最广的一种前馈神经网络。主要原理就是用误差反向传播来不断地调整网络的权值和阈值，达到输入与输出之间高度非线性的映射。船舶轮机故障诊断时，BP 网络最适合做静态工况下故障模式的分类。当柴油机处于稳定工况时，排气温度、冷却水温度、滑油压力等热工参数之间存在着一定的热力学关系，BP 网络通过学习正常与故障状态下这些参数的模式，就可以建立

出从监测参数到故障类型的一种直接映射关系。

BP 网络结构简单，理论依据充分，在样本数量适中、特征维度不高的条件下，一般可以较快收敛并且获得较好的诊断精度。对于燃油系统、冷却系统等具有明确参数阈值特性的子系统，BP 网络可以很好地识别出由于参数异常引起的渐变性故障。通过合理设计隐含层数和每一层的节点数，模型可以达到逼近任意非线性函数的目的，从而不用建立精确物理模型，也可以对复杂的轮机系统进行状态识别。但是 BP 网络容易陷入局部极小值，对初始权值敏感，实际使用时一般结合全局优化算法来解决这些问题。

神经网络模型在轮机故障诊断中的应用对比

模型类型	核心优势	适用场景	典型轮机故障应用	局限性 / 挑战
BP 网络	非线性映射能力，结构简单，收敛快	静态工况下的故障模式分类	燃油 / 冷却系统参数异常，稳态工况下的故障识别	易陷入局部极小值，对初始权值敏感
RNN 网络	处理时序数据，捕捉长距离依赖	动态过程的趋势预测与预警	设备性能退化、带有滞后效应的系统故障（如涡轮增压器响应延迟）	训练复杂，梯度消失 / 爆炸
CNN 网络	强大的特征提取能力，处理网格化数据	振动信号分析，图像识别	轴承剥落、齿轮断齿等周期性冲击故障，振动谱分析	需要将信号转换为网格化数据，计算资源需求较高

（二）RNN 网络时序分析优势

船舶动力系统工作为一个连续动态过程，其状态参数有较强的时间相关性。循环神经网络具有状态反馈连接，除了能处理当前的输入信息外，还能保存过去时刻的状态信息，所以在处理时间序列数据时具有天然的优势。在轮机故障预警上，设备性能退化一般是个缓慢的过程，像气缸套磨损、热交换器结垢这些，它们的早期迹象常常藏在参数历史变化的趋势里，而不是某个时刻数值的突然变化。

循环神经网络和它的变种，例如长短期记忆网络，可以很好地捕捉到监测数据中长距离的依赖关系。采用深度学习的方法对排气温度、转速波动等时间序列数据进行分析，循环神经网络可以预知设备未来运行的趋势，在故障发生的第一时间内识别出与正常趋势不一样的信号。相比传统的前馈网络，循环神经网络对于带有滞后效应的轮机系统故障识别效果更好，比如涡轮增压器的响应延迟、调速系统的动态振荡。借助它的时序分析特性，诊断系统不仅能判定当前是否发生故障，而且可以根据以往的数据预估故障发展的速率，从而给视情维修赋予可靠

的时期范围。

（三）CNN 网络特征提取能力

卷积神经网络有着很好的特征提取效果，对于网格化的数据它能很好的处理，因此在振动信号以及图像识别的轮机故障诊断领域占有一席之地。船舶上齿轮箱、轴系、泵浦等旋转机械工作的时候会产生复杂的振动信号，这些信号里包含大量的设备健康信息。传统的信号处理方法需要人工提取时域或者频域的特征，耗时费力并且很大程度上依靠专家的经验来判断。卷积神经网络用卷积层和池化层交替使用的方式，可以自动从原始信号或者其时频图谱中，学习并构建出层次化的特征表达，从低级到高级。

无论是把一维振动时域波形转化成二维时频图，还是直接用一维卷积核去扫描信号，都可以很好地捕捉到因为轴承剥落、齿轮断齿等故障而引起的周期性冲击特征。卷积核的权值共享大大减少了模型的参数个数，加快了训练的速度，平移不变性使得模型对于信号的微小时间偏移有很强的鲁棒性。在高噪声环境下，多层非线性变换的卷积神经网络可以很好地抑制背景噪声的影响，把复杂混合信号中的故障特征分离开来，使诊断的准确率和抗干扰能力得到很大的提高。

二、网络训练数据准备

高质量的训练数据是训练出一个高性能的神经网络模型的前提。船舶轮机系统工作环境恶劣，实船数据中由于传感器故障、传输干扰等原因会产生大量的噪声和缺失值，而且故障样本一般很少。因此建立科学的数据采集、预处理、增强体系对于提高智能诊断系统泛化能力、鲁棒性非常重要。

（一）训练样本采集方法

创建完备的故障诊断数据库要综合使用各种数据源。实船监测数据是连续运行参数最直接、最真实的来源，主机、辅机和轴系上装设的各种传感器可以给出温度、压力、流量、振动等连续运行参数。船舶航行数据记录仪也存有大量的历史航行数据，是追溯设备过去航行历史的凭据。但是实船一般都处在正常运行状态下，故障数据很少，造成数据集中存在着严重的类别不平衡的问题。

由于实船故障数据非常稀少，陆上台架试验成了一个有效的补充方法。在受控的实验环境中，可以采用人工植入故障的方式模拟出喷油器针阀卡死、气阀漏气等典型故障来获取不同程度、不同类型的故障样本。高保真的仿真模型也是获

取数据的重要途径，利用船舶动力系统的机理建立仿真模型后可以模拟极端海况、变负荷工况等各种边缘工况，得到包含各种边缘工况的虚拟样本数据，从而有效扩展了训练集的覆盖范围。

（二）数据预处理技术

原始采集到的监测数据当中往往混杂有大量的随机噪声和异常值，如果直接使用这些数据进行网络训练的话，很可能会造成网络无法收敛或者做出错误的判断。数据清洗属于预处理的第一步，利用统计学方法或者滤波算法剔除由传感器故障，信号传输错误等原因引发的异常点，再用插值法填充缺失的数据，从而保证数据序列的完整。船舶机舱电磁环境较复杂，信号中常包含高频电磁干扰，为了提高信噪比，还原设备真实的工作状态，一般会采用小波阈值去噪或者经验模态分解等信号处理技术。

不同物理量的监测参数在量纲和数量级上相差很大，排气温度可以达到几百摄氏度，滑油压力只有零点几兆帕。如果直接输入神经网络，数值大的特征就会占据网络梯度更新的主要方向，导致模型对于数值小的特征无感。数据归一化处理就是解决这个问题的办法，采用最小 - 最大标准化或者零均值标准化的方式，把所有的输入特征转变为同一数值区间内的数值，这样既消除了因量纲不同而造成的影响，又使得梯度下降法收敛得更快，从而提高了训练的效率。

（三）样本增强策略

在船舶故障诊断中，正常样本很多而故障样本很少的“长尾分布”现象很普遍。如果不加以处理，神经网络可能会把所有的样本都预测成正常类，从而得到较高的整体准确率，但这样会漏掉重要的故障。样本增强技术是用算法增加故障样本的数量和多样性，进而提高数据集中各种类型的样本比例。

常用的样本增强策略包括：

1. 加入噪声或者变换：在原故障信号上叠加高斯白噪声或者随机幅度缩放，或者对时间序列做平移或者反转。通过模拟各种环境噪声、工况变化下可能产生的故障形态来使模型对微小差别更鲁棒。

2. 过采样技术：用合成少数类过采样技术及其改进算法，在特征空间里根据近邻原则合成新的人工故障样本，而不是简单地重复采样。这样就能让故障类的特征分布更丰富。

3. 生成式模型：生成对抗网络是近几年样本增强的前沿技术。生成器与判别

器通过博弈学习，能够得到故障数据的概率分布，进而得到高度逼真的、不重复的虚拟故障样本，从根本上解决小样本条件下的训练难题。

三、模型优化与验证

初步形成的神经网络模型一般不会直接就达到最好的诊断效果，需要借助系统的优化策略去调整网络的结构和超参数，还要用科学的方法来评价模型的泛化能力。把理论模型和工程应用联系起来是十分重要的一步，这决定了诊断系统在实船上使用的可靠程度与精度。

（一）网络结构调优方法

神经网络的性能很大程度上受其拓扑结构及超参数的影响，超参数有隐含层数、每层节点数、学习率、批次大小等。结构太简单难以体现数据的复杂之处，会引发欠拟合；结构太复杂既浪费计算资源又容易产生过拟合。例如，在经典的船舶机械故障诊断模型 LeNet-5 中，参数量约为 6 万个，而现代深度模型如 VGG-16 的参数量则高达 1.38 亿个，若不加约束地应用后者处理小样本数据，极易导致严重的过拟合（《深度学习》Goodfellow 等）。人工试错参数调整法费时且很难找到全局最优解。

智能优化算法给网络结构的自动寻优赋予了有效途径。遗传算法（GA）模仿生物进化过程中选择、交叉、变异等操作，其交叉概率通常设置在 0.6 至 0.9 之间，变异概率设置在 0.001 至 0.1 之间，可以在很大的参数空间内并发地找到最佳的网络权重和结构参数（参考《进化计算》手册及 IEEE 标准）。

粒子群优化算法（PSO）靠群体合作，推动粒子朝向全局最好位置前进，其惯性权重系数一般随迭代次数从 0.9 线性递减至 0.4，以平衡全局搜索与局部开发能力（参考 Kennedy & Eberhart 提出的 PSO 经典文献）。相比传统梯度下降法，PSO 在非凸、多模态问题上的收敛速度通常可提高 20% 至 30%（相关实验数据见 Expert Systems with Applications 期刊）。当启发式算法与神经网络训练过程结合起来以后，模型就可以根据具体的诊断任务来自动选择最好的网络结构，从而将模型的分类准确率在原有基础上提升约 5% 至 15%，并显著改善收敛情况。

（二）过拟合防止措施

过拟合是神经网络训练过程中经常出现的一种顽疾，它的表现形式是模型在训练集上的表现很好，而在测试集或者新数据上却表现很差。通常由于网络把训

练数据中出现的噪声和偶然特性当成普遍的规律。在样本量少时，这种风险就更加明显。

防止过拟合的常用手段就是使用不同的正则化方法。L1、L2 正则化通过在损失函数里加入权重的惩罚项来约束网络权重大小，促使模型学习出平滑的映射关系。Dropout 技术就是在训练的时候随机“丢弃”一些神经元，打乱神经元之间的相互依赖关系，让网络学会更加鲁棒的特征表示。早停法也是一种简单有效的策略，它通过监控验证集上误差的变化来实现，当发现验证误差不再下降反而上升的时候就立即停止训练，保存泛化能力最好的模型参数，防止网络在训练集上过拟合。

（三）模型性能评估指标

单一准确率指标不能真实反映故障诊断模型的性能，在数据类别严重不均衡的时候尤其如此。假设测试集中有 99% 的样本都是正常的，那么模型即使把所有的样本都预测成正常的，也可以得到 99% 的准确率，但是对于故障诊断来说这是毫无意义的。因此建立多方面的性能评价体系就变得十分重要。

混淆矩阵是用来分析分类模型性能的基础工具，用统计出的真阳性、假阳性、真阴性和假阴性的数量可以得到精确率、召回率和 F1 分数等重要的评价指标。精确率指模型将样本预测为故障时，实际为故障的比例，直接决定虚警率的高低；召回率衡量模型正确识别出所有故障样本的能力，对防止漏报十分重要。由于船舶故障漏报会造成严重后果，所以在实际应用中，有时会牺牲一定的精确率来保证尽可能高的召回率，防患于未然。ROC 曲线与 AUC 值均可以对不同的分类阈值下模型性能进行综合评价，可以更为客观的体现区分故障和正常状态的能力，比单一阈值下的评价结果要好。

（四）激活函数比较与选择

激活函数给神经网络增添了非线性因素，从而使神经网络具备了拟合复杂函数的能力。不同的激活函数因为数学性质不同，在网络训练过程以及最终的性能上都会产生很大的影响。早期的 Sigmoid 函数、Tanh 函数有平滑的 S 型曲线，可以将输出限制在固定的区间内，解释性较强。但当输入值较大或者较小的时候，这两种函数的导数接近于零，容易出现深层网络反向传播中产生梯度消失问题，深层参数不能很好地更新。

修正线性单元由于非饱和性以及计算速度快，成为目前深度学习模型的主流

选择。修正线性单元函数在正区间导数恒为 1，可以缓解梯度消失的问题，在负区间输出为 0，使网络具有一定的稀疏性，可以提取稀疏特征。为了避免修正线性单元造成神经元死亡的问题，在 Leaky ReLU 等变体里，对负区间里的斜率为一个小值，保留一些负向的梯度信息。多分类问题中输出层一般用 softmax 函数把网络的输出转化为各个类别的概率分布。设计船舶故障诊断网络时要根据网络的深度及各个层级所起到的功能，灵活地选用不同的激活函数来配合使用，以达到最好的学习效果。

第二节 支持向量机故障诊断方法

支持向量机是利用统计学习理论的一种强大的机器学习方法。它在处理小样本、非线性、高维模式识别问题上有明显的优势，对数据获取困难、成本高的船舶轮机故障诊断环境来说更加适用。以结构风险最小化为目标，提高模型的泛化能力，克服了神经网络等传统方法在训练样本较少时容易产生的过拟合问题，为轮机系统状态监测和故障预警打下了坚实的算法基础。

一、SVM 基本原理与特点

支持向量机的核心就是，可以把低维空间里线性不可分的数据映射到高维空间，在经过高维空间之后找到一个最佳的超平面来对样本进行有效划分。其坚实的理论基础保证了诊断模型的鲁棒性和可靠性。

（一）分类边界构建思想

构建分类边界是支持向量机算法的核心步骤，它的基本目的就是找到一个能够把不同类别故障样本完全分开、且间隔最大的最优超平面。在船舶轮机故障数据集中，正样本点和负样本点代表的是正常运行状态和某个故障状态。最优超平面的确定不是由所有的样本点来决定的，而是由位于分类边界边缘的少数几个关键样本点所决定的，这些关键样本点称为支持向量。最大化分类间隔，可以接受一定程度的噪声干扰和数据波动，对于电磁干扰严重、传感器信号容易受到其影响的船舶轮机系统来说，尤为重要。

从几何上看，最优的超平面处在两类样本的中间位置上，它的目标是使得两类样本到超平面的最小距离达到最大。几何间隔最大化和泛化误差上界最小化是

等价的。不同于传统的经验风险最小化，结构风险最小化不仅保证了分类的精度，而且对模型复杂度进行了控制，在有限的样本上不会出现“过学习”。用数学语言来说，找最优超平面的过程最后可以变成一个凸二次规划问题，这样就保证了全局唯一性，避免了神经网络训练时容易卡在局部极小值的毛病，所以故障诊断的结果会更确定，可以反复得到一样的结果。

高维特征空间中的分类边界不再是直线，而是超曲面。该超曲面可以较好地适应轮机参数间复杂的非线性耦合关系。当轮机系统运行参数（排气温度、冷却水压力、轴承振动幅值等）出现异常变化时，这些数据点在特征空间中的位置就会发生偏移，穿越分类边界，从而触发故障报警。在建立模型的时候，采用拉格朗日乘子法把原约束优化问题转为对偶问题，这不但简化了计算，也为核函数的应用铺平了道路，使模型可以高效处理高维的轮机监测数据。

（二）核函数选择策略

核函数技术是支持向量机解决非线性故障模式问题的关键。利用内积运算，巧妙地避开了在高维空间里做复杂非线性映射计算。船舶轮机故障诊断中由于各子系统的物理特性不同，故障的表现形式也多种多样，因此核函数选择的好坏直接影响到诊断精度。径向基核函数由于具有良好的局部逼近能力，并且参数较少，因此是处理轮机非线性数据的首选。可以利用样本间欧氏距离把输入空间映射到无限维特征空间，很好地捕捉到轮机参数中微小的非线性突变特征。

多项式核函数更注重的是特征之间的高阶相关性。对具有明显多项式分布规律的轮机磨损类故障数据，调节其阶数可以提高模型的全局泛化能力。虽然参数较多，计算复杂度随着阶数的增加而急剧上升，但是它在机械故障趋势预测中仍然占有一席之地。Sigmoid 核函数来源于神经网络中的激活函数，当支持向量机在某些参数设置下可以近似为一个两层的多层感知机时，这就为将神经网络与支持向量机结合起来提供了理论依据。但是在实际的轮机工程中，调节其参数比较困难，需要谨慎使用来避免矩阵非正定引起的收敛问题。

轮机系统工况复杂多变，单一核函数很难兼顾所有类型的故障特征，这时采用混合核函数是较为有效的一种方法。局部学习能力强的径向基核函数和全局泛化能力强的多项式核函数，经过线性组合之后，模型就可以在对故障样本的细节敏感的同时，也对整体数据分布的宏观情况有所把握。根据不同的特征维度以及混合比例对诊断模型进行修改，可以有效地提高复杂组合故障的识别精度。

（三）多分类问题处理方法

船舶轮机系统是由主机、辅机、轴系等许多子系统构成的，故障种类很多。如果只对正常和故障进行二分类，那么远不能满足实际工程的需求，因此必须建立高效的多分类支持向量机模型。一对多策略是最直接的扩展方式，即给每一个故障类别设置一个二分类器，将其他的类别都当着负类来处理。此方法结构简单、训练速度快，但是存在严重的样本不平衡问题，即正常样本远多于某一故障类型样本，容易使分类超平面偏向少数类，从而降低故障识别灵敏度。

一对一策略就是建立一个类分类器，任意两个类之间。包含 k 个类别的故障诊断问题要建立 k/2 个分类器。该方法的优点是每个子分类器只需要处理两类数据，问题规模小，没有明显的样本不平衡问题，从而分类边界更加细致准确。在轮机故障诊断的实际测试阶段，一般会用“投票法”来汇总各个子分类器的输出结果，得票最多的一类就是最终的诊断结果。虽然分类器数量随故障种类的增加呈二次增长，但是由于并行计算能力的提高，所获得的精度提升足以抵消因增加而带来的计算成本。

有向无环图支持向量机把一对一策略产生的分类器组织成树形结构，形成动态的判断过程。在诊断时，测试样本从根节点开始，经过一系列的二分类节点逻辑判断，最后到达叶节点输出诊断结果。该方法大大加快了测试速度，对于 k 类故障只需要 k-1 次判断就可以完成分类，适合于对实时性要求很高的轮机在线监测系统。合理安排节点的判断顺序，将容易混淆的故障类型放到下层节点来处理，可进一步改善系统容错性能。

不同多分类策略的特性对比如下表所示：

SVM 多分类策略对比表

策略	分类器数量	样本平衡性	识别精度	实时性	适用场景
一对多	k 个	差 (易偏向多数类)	中等	快	结构简单，初级诊断
一对一	k/2 个	良好	高 (边界细致)	慢 (但可并行)	精度要求高，故障种类多
有向无环图	k-1 次判断 (基于一对一)	良好	高	快	实时性要求高，在线监测

二、SVM 模型构建步骤

建立一个高效船舶轮机故障诊断模型不能只是简单的调算法，它是包含特征工程、参数优化、模型验证等一系列步骤。每一个环节都会影响到最后所达到的效果的实用性、准确性。

（一）特征向量构建

特征向量的构建就是将轮机传感器采集到的原始时间序列信号，转换为机器学习算法可以理解的输入向量。该过程质量的好坏直接影响故障信息的保留程度。由于船舶轮机工作环境一般都会有振动、噪声，所以在原始信号中就会有很多的冗余信息以及干扰分量。直接把这些信息输入模型，一方面会造成计算的维度灾难，另一方面也会导致精度不高。一般用时域统计分析提取均值、均方根值、峭度、裕度等无量纲参数。可以反映设备振动能量变化以及冲击情况，对早期的磨损、松动类故障比较敏感。

频域分析是研究轮机旋转机械的有效方法。采用快速傅里叶变换将时域信号转换成频谱图，从中找出特征频率幅值、重心频率、频率方差等指标。柴油机气阀漏气、齿轮箱断齿等带有明显频域特征的故障，其频域特征向量所给出的分类依据比时域特征更加清晰。利用小波包分解技术可以得到信号在各个频带上的能量分布，构造时频域混合特征向量，更好的捕捉非平稳信号中瞬态故障的信息。

因为从原始数据中提取出来的初级特征，一般维度较高、相关性较大，所以必须用主成分分析或者核主成分分析方法来降低其维度。利用正交变换把高维特征投影到低维子空间里，去掉特征间的共线性，保留含有大部分方差贡献率的主成分作为最后的输入向量。可以大幅度减少支持向量机模型的运算量，加快分类、预测的速度，也可以去掉无用的噪声特征，使模型只关注表现故障本质的关键变量。

（二）模型参数优化

支持向量机泛化性能受惩罚因子 C、核函数参数 g 的影响非常大。若参数选择不合适，就会造成模型欠拟合或者过拟合，所以参数优化是构建模型中不可缺少的一环。

1. 惩罚因子 C 是模型对于离群点、噪声的容忍程度。C 值越大，模型就越想避免分类错误，容易过拟合，使模型在训练集上表现好，但在新的数据上泛化能

力变差；如果 C 值过小，模型就会忽略重要的故障特征，造成欠拟合。

2. 核函数参数 g 控制径向基函数的作用范围，并且也影响特征空间中数据分布的复杂度。g 值越大，映射后的数据分布就越复杂，分类边界就越弯曲；g 值越小，分类边界越趋于平滑。这两个参数一般是互相耦合的，需要联合寻优。

3. 网格搜索法是一种基础但可靠的寻优策略，即以预设步长遍历验证集准确率最高的所有参数对，搜索给定参数空间内的所有组合。虽然计算成本高，但是可以获得全局最优解的近似解。

4. 提高寻优效率的方法之一就是使用智能进化算法，例如遗传算法、粒子群优化算法等。这些算法模拟生物进化或者群体觅食行为，经过多次搜索能够快速逼近最优参数组合，可以在很短的时间内完成轮机故障诊断模型参数的快速整定，适合于频繁更新模型的在线监测场景。

（三）交叉验证方法

为了对模型的泛化性能有一个客观的认识，防止出现参数寻优过程中的过拟合现象，交叉验证方法对模型的建立起到了有效的监督作用。K 折交叉验证是最常用的方法，它把原始的轮机故障数据集随机分成 K 个互不相交的子集，每次选取其中的一个作为验证集，剩下的 K-1 个子集作为训练集，如此重复 K 次训练和测试过程。最后用 K 次测试结果的平均数来评价模型的好坏，这样可以充分利用有限的故障样本，使得评价结果更接近模型面对真实未知数据时的表现。

留一法交叉验证是 K 折交叉验证的特殊情形，即 K 等于样本总数，每次只留一个样本作验证集。当船舶轮机故障样本极端稀少的时候，留一法可以最大限度地利用数据进行训练，使模型学到尽可能多的故障特征。虽然其计算成本较高，但是对于样本量较少的罕见故障诊断，其评估结果最无偏，是评价小样本模型性能的黄金标准。

在执行交叉验证时一定要遵守数据隔离的原则，不能把验证集的数据泄露到特征选择、归一化等预处理步骤中。正确的做法是在每次划分训练集和验证集的时候，用训练集的统计参数来标准化验证集，并且在训练集上只做特征筛选。可以保证验证过程完全模拟模型面对未知新数据时的工作过程，保证交叉验证结果的真实性以及指导意义。

三、工程应用注意事项

将支持向量机算法从理论模型转化为实用的船舶轮机智能预警系统，还存在许多工程化难题，必须针对这些问题采取相应的技术手段，才能适应海上特殊的运用环境。

（一）小样本问题处理

船舶轮机设备一般具有较高的可靠性，长期处于正常的工作状态，造成故障数据，特别是严重故障数据非常稀少，这就形成了典型的“小样本”问题。为了增加故障样本库容量，可使用生成对抗网络等深度生成模型，从少量真实的故障数据中得到分布规律，再得到大量的符合实际情况的虚拟故障样本。保留原有的故障特征的基础上增加数据的多样性，可以更好的帮助有助于支持向量机训练边界。

除了数据扩增，迁移学习也是解决小样本问题的一种有效的途径。可采用同类型陆用柴油机或者相同型号的船舶的历史故障数据，用领域自适应技术把源域知识迁移到目标船舶的模型上。由于物理机理相似，迁移可以很大程度上减少对目标船舶实际测量故障数据的依赖，实现“举一反三”，快速建立新船的故障诊断能力。

当没有足够多的故障数据的时候，可以将问题转化为单分类问题，只用正常样本训练支持向量数据描述模型。建立所有正常运行状态样本的最小超球体，落在球体外的数据点都判定为异常。该方法不需要任何故障样本就能进行异常检测，但无法具体区分是哪种故障，作为一种初级的预警手段，具有非常高的工程实用价值。

（二）实时性优化方案

船舶轮机智能预警系统要求故障响应时间在毫秒级。但是 SVM，尤其是非线性 SVM，在预测阶段需要计算测试样本与所有的支持向量的核函数，计算量随着支持向量的数量呈线性增长。为了满足实时的需求，可以采用模型剪枝的方法，在保证精度的情况下，将一些对于分类边界影响较小的不重要的支持向量给剔除掉。缩减的支持向量集合可以大大减少预测时的浮点运算次数，缩短诊断的延时。

硬件加速是提高系统实时性的重要方式。利用 FPGA 或者 DSP 等嵌入式硬

件平台的并行计算特性，把核函数运算矩阵化后进行并行计算。相比传统的通用中央处理器 CPU 的串型运算，硬件加速可以大幅度提高数据吞吐量，使系统在同一时间段内并行处理几百个传感器高频采集的数据，满足全船监测的实时性要求。

应用采取边缘计算架构的可以减轻实时性压力。将训练好的轻量化支持向量机模型部署到靠近传感器的边缘网关节点，直接在当地完成特征提取和初步诊断，只有诊断结果或者异常数据上传到上层服务器。分布式处理模式不需要在网络上传输大量的原始数据，避免了由于传输造成的延迟，保证第一时间捕捉到突发的轮机故障并发出预警。

（三）模型更新维护策略

船舶轮机系统属于时变系统，随着时间的推移，设备部件会逐渐出现磨损、老化、积碳等情况，造成正常运行参数的基准线发生偏移，即出现概念漂移现象。为了保证诊断模型具有长效性，应该建立起来动态的更新维护机制。在线增量学习算法可以使得模型不重新训练历史数据，仅凭新增加的样本去更新、修正原来的支持向量集，从而使得分类边界能够适应设备状态的变化而自我调整。

定期重训练策略属于一种稳健的维护策略。系统要设定固定的更新时间周期，或者当模型预测置信度下降的时候，就触发模型更新流程。此时应该用最新的运行数据来代替旧的历史数据，再次做参数寻优和模型训练。这就需要系统具有完善的数据版本管理以及模型版本控制的功能，在更新失败时可以迅速回滚到上一次稳定的版本，保证监控系统的连续性。

人机交互反馈机制的加入，可以很大程度上提高模型进化的程度。轮机员对于现场核查结果（确诊或者误报）的反馈，应该成为一种强有力的监督信号反馈给系统。对误报的样本，系统把其归入重点难例集中加以改善，然后慢慢吸收专家的经验知识，这样，模型的误报率就会随着使用时间的增长而不断降低，变成一个越来越聪明的专家系统。

（四）不平衡样本的处理方法

轮机运行数据中正常样本数量是故障样本数量的几百到几千倍，不平衡会使得标准支持向量机算法把分类边界偏向少数故障类别，从而降低对故障样本的识别率。为消除上述偏差，可以使用过采样技术，比如合成少数类过采样技术，即在故障样本与它的邻点之间做线性插值生成新的人工故障样本，从而在数量上平

衡数据集，使分类超平面向正常样本一侧移动，扩大故障类别的识别范围。

代价敏感学习是从算法层面来解决不平衡问题的一种有效的办法。通过修改支持向量机的目标函数，给正负样本的分类错误设置不同的惩罚权重。即漏报故障（把故障当作正常）的惩罚系数高，误报（把正常当作故障）的惩罚系数低。非对称损失函数使模型在优化时更重视故障样本的正确分类，保证较低的误报率的同时尽量提高故障检出率，符合工程安全上“宁可误报，不可漏报”的原则。

集成学习方法即在不同的子集上训练出分类器之后再进行整合，以此来解决不平衡问题。可以采用欠采样方法，将大量的正常样本集划分成若干个小样本集，每个小样本集都和所有的故障样本一起训练，得到一个支持向量机基分类器。最终的诊断结果是由各个基分类器共同决定的。此方法可以充分利用全部的正常数据，防止信息丢失，又能用集成投票的方式减小单个模型的方差，提高系统在极端数据不平衡情况下综合诊断的能力，保证轮机安全预警的可靠性。

第三节 模糊逻辑诊断技术

船舶轮机系统是典型的大容量复杂非线性动力装置，工作环境恶劣，工况多变，使得故障征兆与故障原因之间常常存在很强的不确定性以及模糊性。实际应用中，许多轮机故障的界限是不清楚的，传统二值逻辑不能很好地表示设备从正常到失效的过程。模糊逻辑诊断技术依靠隶属度和模糊集合理论，可以较好地处理不确定信息，把定性描述转换成定量计算。在缺少精确的数学模型的情况下，也可以用它来有效地对轮机故障做出识别和预警。早期微弱故障特征的提取、多故障并存诊断等有独特的优势，是智能轮机故障诊断系统的主要算法。

一、模糊诊断系统构成

模糊诊断系统主要由三大部分组成：模糊化接口、模糊推理机、解模糊化接口。这三者共同作用把传感器得到的准确数值变成人能理解的语言变量，再经由逻辑推理出模糊的结论，最后转换成具体的诊断结果。系统设计的关键在于怎样合理地构造这三个环节，既能反映出轮机设备的物理特性，又能满足实时在线诊断的计算效率要求。

（一）模糊化接口设计

模糊化接口的主要工作就是把传感器采集到的船舶轮机运行参数（排气温度、冷却水压力、润滑油粘度等精确的物理量），转换成模糊控制器可以处理的模糊集合。设计时要确定输入变量的论域范围，一般由设备技术说明书和历史运行极值来确定。为了提高计算的通用性，一般都会使用量化因子把实际物理量归一化到标准论域区间内。

定义论域后要确定输入变量的模糊划分，即确定语言变量的个数以及对应的语言值。对轮机主要参数，一般用“负大、负中、零、正中、正大”等五到七个语言等级来表明参数的偏离状况。语言等级分得越细，系统分辨率越高，但是也会使得规则库迅速增大，增加计算负担。所以，在接口的设计时就要对诊断精度与系统反应速度做出取舍。对不同种类的传感器数据要设计出专门的滤波和预处理环节，将海况变化所引起的瞬时干扰信号剔除掉，使进入模糊化接口的数据信噪比较高，从而保证后续模糊映射的准确性。

（二）模糊规则库建立

模糊规则库是整个诊断系统知识的源泉，它的好坏直接决定了诊断是否正确。规则库是由条件语句组成，一般用“如果……那么……”来表示轮机故障征兆和故障原因之间的因果关系。建立规则库的时候需要对轮机各个子系统的耦合关系做分析。比如诊断柴油机气缸工况时，不能单凭单缸排气温度升高就断定是气缸工况不良，还要考虑扫气压力、增压器转速、冷却水温差等其它参数变化趋势。

构造时需要把零散的故障模式转化为有条理的逻辑项目。因为轮机系统的故障机理比较复杂多变，单条规则不能包含所有的工况，所以要构建多条规则的结构。设计者要仔细分析每一条可能的故障通路，把输入空间划分成若干个模糊的子空间，在每一个子空间里确定对应的输出动作。为了避免出现规则爆炸的问题，在建立之初要重视规则的独立性、典型性，不能加入冗余或者包含的规则。高效的规则库要具有很好的覆盖性，保证在任意的输入状态下至少有一条规则被激活，避免诊断系统出现失语的现象。

（三）解模糊化方法

利用模糊推理机计算，结果就是各故障原因所对应的隶属度分布。但是实际的报警系统或者控制系统要得到的数值或者明确的指令，所以需要经过解模糊化接口来完成转换。解模糊化就是将模糊空间信息压缩到精确空间的过程，是得到

最终诊断结果、提高系统灵敏度的重要步骤。

目前在轮机故障诊断中使用较多的解模糊化方法，具体特点和应用场景可见下表：

常见解模糊化方法

方法	特点	主要应用
最大隶属度法	计算简单，响应迅速	实时性高、精度要求低的突发故障报警
重心法	输出平滑稳健，综合考虑激活规则	渐发性故障的趋势预测与诊断
加权平均法	综合折中，易于理解和实现	平衡精度与计算效率的场景

最大隶属度法用隶属度最大的元素直接作输出，计算简单，反应迅速，适用于对实时性要求高、精度要求低的突发性故障报警场合。重心法计算模糊隶属函数曲线与横坐标围成面积的重心，考虑了所有激活规则的信息，其输出结果更加平滑、稳健，可以更好地反映故障的渐变趋势，因此适用于轮机磨损、积碳等渐发性故障的趋势预测。在实际系统中，一般会根据不同的诊断对象来动态选择解模糊化的方法，以获得最好的诊断效果。

二、隶属函数确定方法

隶属函数是模糊集合理论的基石，用来定量刻画一个元素属于某模糊集合的程度。船舶轮机故障诊断中隶属函数形状、位置以及覆盖范围都会对系统敏感性与鲁棒性造成影响。合理确定隶属函数是建立高性能模糊诊断系统的前提，不同的确定方法适应不同的数据环境与知识背景。

（一）专家经验法

专家经验法是模糊诊断系统最早和最常用的方法之一，它主要依靠资深轮机长、设备制造工程师和维修专家的主观知识和多年的实践经验。开发人员采用问卷调查、深度访谈等方式从专家那里获取专家对某种故障征兆的描述，进而得到对应的隶属函数。根据专家经验可知，冷却水温度超过 90℃时可以判断为突然大幅度增加的温度过热，而只有温度升高到 95℃时才判定为温度过高。

该方法的优点是能够充分利用人类的启发式知识，把难以用精确数学模型描述的工程经验直观地表达出来。设计者一般会采用三角形或者梯形隶属函数这种形式简单、便于计算的函数来近似专家的描述。由于不同的专家对于同一个概念的理解是不同的，所以一般采用德尔菲法等多轮反馈的方式来进行意见的收敛，

即对函数拐点和斜率进行修正。虽然专家经验法具有主观性，但是对于没有历史故障数据的新船或者特种设备来说，它是唯一可以利用的、有效的途径，能够快速建立起初步的诊断模型。

（二）数据统计法

由于船舶数字化程度的提高，大量的运行数据可以被实时记录下来，为利用数据统计法来确定隶属函数打下了良好的基础。数据统计法认为数据本身包含信息，对大量的历史运行数据进行概率统计分析，可以找到参数分布的内在规律，然后客观地构造隶属函数。该办法一般根据大数定律，把参数出现的频率当作它的概率密度，再转化为隶属度。

具体实施时，首先要对收集到的正常工况数据和故障数据进行清洗和分类。对某一具体的监测参数进行绘制直方图，观察分布情况。如果数据近似正态分布，就可以用高斯型隶属函数，并用样本的均值和标准差确定函数中心位置和宽度。与三角形、梯形函数相比，高斯函数处处可导，光滑性好，能更好地体现参数变化的连续性。数据统计法最大的优点就是客观性强，可以消除人的主观因素，使诊断系统更真实地反映设备的实际运行状态。但是这种方法对数据的完备性要求较高，如果样本数据有偏差或者不完全，那么生成的隶属函数就会产生误导。

（三）混合优化方法

单一方法有局限，混合优化方法就是把专家经验和数据驱动结合起来的策略。其目的是用算法自动调节专家事先设定的隶属函数参数，使之接近最优形态。

1. 该方法的第一步一般是由专家知识来建立一个初步的模糊系统，确定初始隶属函数的形状和参数范围，使系统具有一定的物理意义和逻辑性。

2. 然后使用神经网络或者遗传算法这样的智能优化算法。神经网络能依靠反向传播算法，依照已有的故障样本来训练并微调隶属函数的参数，这样神经网络就能更好地拟合输入输出的关系；遗传算法模仿自然界的选择过程，在参数空间里执行全局搜索，寻找使诊断误差最小的参数组合。

3. 混合优化方法保持了专家经验的可解释性，同时也给了系统很强的自适应能力与学习能力。不断迭代改良隶属函数，使它随时调整适应轮机设备运行期间性能的变化，保证诊断系统在整个设备生命周期内始终保持较高的精确度。

三、模糊规则优化策略

模糊规则库的大小和好坏直接影响推理的速度以及诊断的准确性。当监测点的数量变多，系统也就变得越来越复杂，这时规则的数量往往会以指数级增长，出现“规则爆炸”的现象，严重破坏系统的实时性。所以有效的规则优化方法就是减少规则的数量、消除规则矛盾、完善规则的完备性来达到高效智能预警。

（一）规则精简技术

规则精简的主要目的就是，在不改变系统输入输出映射关系的前提下，尽可能的减少模糊规则的数量。对于多维输入空间来说，有很多的冗余或者未激活的规则。使用聚类分析的方法，可以把样本输入空间里相似度高的样本归为一类，把多条相似的规则合并成一条代表该类的通用规则。奇异值分解也是一种有效的降维方法，找出对输出贡献很小的输入变量，将其剔除，可以大大降低规则库的维数。

粗糙集理论在规则约简中也起着很重要的作用。用粗糙集属性约简算法分析条件属性和决策属性之间的依赖关系，找到决策表里可有可无的条件属性，删除冗余规则。精简过的规则库，一方面可以节省计算机的存储空间，另一方面也可以大大缩短在线推理的循环时间，可以及时处理突发故障。这种精简过程必须小心进行，要经过多次仿真来验证，保证精简后的规则库没有丢掉任何重要的故障特征信息，不能出现漏报的情况。

（二）冲突规则处理

规则库建立的时候，由于知识来源的不同、参数划分的模糊，会出现对于同一个输入情况，不同的规则给出完全相反的结论，即产生规则冲突。处理冲突规则可以保证诊断逻辑的一致性。一般使用的方法是给每条规则赋予一个置信度权重。权重可以按照规则来源的权威性来定，也可以按照规则在历史诊断中准确率来调。

当发生冲突的时候，系统会计算各个激活规则的加权输出值，选择加权输出值最大的作为最终结果，或者采用加权平均的方式来融合冲突的结果。另一种处理方式就是根据故障的严重性、紧急程度来设置优先级。涉及船舶航行安全的核心设备故障规则应优先，触发后屏蔽其他低优先级的冲突规则。完备的冲突化解机制可以防止系统在复杂的运行状态下出现逻辑死锁，防止给决策者造成模糊的

判断，保证航行人员得到明确准确的决策辅助。

（三）规则自学习机制

船舶轮机设备运行特性由于使用年限的增加、维护状况的变化、外部环境的变化而产生漂移。规则库是静态的，不能满足动态的变化的要求，需要加上自学习机制。自学习机制可以使得系统在运行的过程中，从新的成功诊断案例或者误报漏报事件中获得知识，并可以自动增加、修改或者删除规则。

一般用神经网络的学习算法或者强化学习的思想。当系统检测到实际输出和期望目标有较大偏差时，自学习算法就会被激活，反向查找造成偏差的规则路径，对路径上的规则的后件或者权重参数进行修正。对出现的新故障模式，系统通过相似度度量得到新的规则条目并加入规则库。具有自学习能力的诊断系统具有类似人类专家的成长性，随着运行时间的增加，它的规则库会越来越丰富、准确，能适应各种意料之外的复杂工况，从而实现智能化全寿命周期管理。

（四）模糊规则库的完备性检验

完备性是指模糊规则库中必须包含输入空间内所有可能状态的组合，保证任何工况下系统都能给出有意义的输出，不会出现未定义的情况。轮机故障诊断当中，如果出现规则库的“空洞”，即某些参数组合落入没有规则覆盖的区域，就会导致系统失效，这对于无人机舱等高自动化场景来说是不能接受的。

检验完备性的方法主要有几何法和解析法。几何法是在多维空间里画出规则的覆盖区域，直观观察有没有空白；解析法则用所有输入变量的论域并集进行逻辑运算，判断是否覆盖整个定义域。当发现有规则缺失的时候，可以用插值算法对缺失的规则进行补全，也可以由专家去补充知识上的空白。除覆盖性之外，完备性检验还要对规则的连通性进行检查，保证从任何一个初始状态出发，都能通过规则链推理到最终的故障结论状态。完备性检查完毕后，可以清除系统隐藏的逻辑漏洞，智能预警系统就更加可靠、安全，给船舶的安全航行给予了坚固的逻辑支撑。

第四节 专家系统在轮机故障诊断中的应用

专家系统属于人工智能领域的一个重要分支，在船舶轮机故障诊断中起着非常重要的作用，模仿人的思维方式解决复杂的工程问题。该系统可以把轮机工程领域专业理论和资深轮机长实际经验融合起来，用符号推理技术处理非结构化、不确定的故障信息。在处理复杂的柴油机、辅机、推进系统故障的时候，可以给出快速、准确的诊断结果，也可以为决策提供支持。

一、知识库构建方法

知识库是专家系统的中心，它的质量好坏直接影响到诊断系统的好坏和准确性。因此建立完备有效的知识库要靠多种技术和管理手段相结合。

（一）领域知识获取途径

领域知识是轮机故障诊断专家系统的重要组成元素，要从大量的、杂乱的信息中抽取出来对诊断有帮助的诊断规则。最直接的就是资深轮机管理人员的经验积累，这些经验大部分是以隐性知识的形式存在，比如对机器声音、振动、温度变化的直觉，应对突发事件的应急策略。知识工程师要依靠深度访谈、问卷调查、现场观察等方式把非结构化的经验转化成计算机可以识别的逻辑描述。庞大的船舶运行日志、维修保养记录、设备说明书也是重要的知识来源，使用文本挖掘技术和自然语言处理算法，可以自动地从这些历史数据中抽取故障现象和原因之间关系的模式，得到初步的规则集。

仿真实验、台架测试数据给知识获取赋予了量化支撑。实际船舶运行时，一些极端故障很难重复出现，这时用高精度轮机系统仿真模型来模拟故障，可以得到很多在正常运行时得不到的故障特征数据。将仿真数据同实船监测数据融合起来，可有效地增大知识库的覆盖范围。破坏性大、发生概率低的故障模式用仿真数据来弥补经验知识的不足。

用机器学习算法去对监测数据进行自动归纳，这也是目前知识获取的一个趋势。用聚类分析和关联规则挖掘来分析长期传感器时序数据，就可以发现参数间的潜在耦合关系。以数据为驱动的知识获取方式，最大程度地减小了人工干预所造成的主观偏差，数据不断累积的同时也自动对已有的规则体系进行调整，保证知识库与实际的设备状况始终保持一致。

（二）知识表示技术

知识表示就是把领域知识转换成计算机可以存储、处理、推理的数据结构的过程。由于轮机系统的结构复杂、故障机理繁多，单一种类的表示方法不能满足要求。目前使用最多的是产生式规则的表示法，用条件和结论的形式来表示故障的因果关系，直观明了。对于有层次结构的知识，如柴油机的系统构成，框架表示法则更合适。将对象的特征，状态以及它与其它对象间的关系封装成完整的一体，利于系统完成继承推理。

轮机故障诊断中常见的知识表示技术及其特性，可见下表：

知识表示技术对比表

知识表示技术	核心思想	适用场景	优点	缺点 / 挑战
产生式规则	“IF-THEN”条件 - 结论	因果关系明确的诊断	直观，易于理解和修改	规则数量多时难以管理，处理不确定性较弱
框架表示法	结构化对象，属性插槽	具有层次结构的对象，如系统构成	封装性好，支持继承，便于描述复杂对象	灵活性相对较低
面向对象	对象、属性、方法、消息	复杂系统的模块化描述，如轮机子系统	模块化，可重用，易于扩展和维护	设计复杂，初期投入大
模糊逻辑	隶属度函数，模糊集合	存在不确定性、模糊信息的诊断	处理模糊信息能力强，鲁棒性高	隶属度函数和模糊规则的确定依赖专家经验

1. 面向对象的知识表示技术在处理轮机复杂系统的时候存在特别之处。它把发动机的各个子系统，比如燃油系统，润滑系统，冷却系统等等，当作独立的对象，每个对象里面封装着自己独有的属性参数以及故障模式，对象之间通过消息传递机制来进行交流。该种表示法既符合轮机工程师的认知习惯，又提高了知识库的模块化程度。系统在面对不同的设备时，只需要改变对应的对象属性就可以实现迁移，提高了系统的通用性与可拓展性。

2. 用模糊逻辑表示法处理轮机故障诊断中遇到的不确定信息。实际工程中很多故障征兆并不是非黑即白的二值逻辑，而是带有模糊程度的，比如排气温度过高、振动很厉害等等。利用隶属度函数和模糊集合理论可以将模糊的、主观的概念量化表达出来，弥补专家系统在边界不清、数据不足或者受到干扰时的缺陷，对复杂环境下的鲁棒性有积极作用。

（三）知识库维护更新

知识库并不是一成不变的静态数据集，它需要经过不断的维护才能保持活力，本质上是一个动态系统。随着船舶使用年限的增加，轮机设备的性能参数会发生漂移，原有的故障阈值、诊断规则就不再适用了。维护机制要拥有自动规则校验功能，定时对库内规则进行一致性检验、冗余性分析，清除相互抵触的或者多余的规则，保证推理过程逻辑严密。系统应该具备自学习功能，每次诊断结束后根据实际维修结果对相应的规则可信度进行调整，对诊断正确的规则增加权重，对误诊的规则降权或者修正。

新型号的主机或者新技术的应用，知识库的更新仍然要靠人手工编辑和干预。维护界面应该提供友好易用的可视化工具，使得领域专家可以直接对规则进行增删改查的操作，不需要知道底层编程的细节。版本控制技术对知识库的变更起着重要的作用，它可以记录每一次知识库变更的时间、内容和操作人员，在出现问题的时候支持快速回滚到上一个稳定的版本。为了解决海量数据的问题，现代系统大多采用分布式数据库的结构来存储知识，用增量更新的方式更新，只更新发生变化的部分，既能保证数据的时效性，又能最大程度上降低系统维护所消耗的资源以及时间。

二、推理机制设计

推理机是专家系统智能的关键部分，它利用知识库里的规则以及当前的检测数据，采用一定的搜索和控制策略来得出故障结论。

（一）正向推理策略

正向推理，也叫数据驱动推理，是轮机故障智能预警中使用最广的策略。其基本过程是从已知的故障征兆或者传感器检测数据出发，不断匹配知识库中规则的前件，进而推出潜在的故障原因。当检测系统收到某个气缸排气温度突然升高的信号时，推理机就会从知识库中找出所有以排气温度高为条件的规则，经过匹配运算，可以得到喷油器故障、气阀漏气或涡轮增压器效率降低等中间结论。最后用中间结论作为新的事实，在规则库中匹配得到最终的故障原因。

此推理方式更适用于船舶运行过程中的实时监控，系统在运行中不断产生传感器数据，正向推理可以对数据流做出及时的反应。为了提高推理效率，一般使用宽度优先或者深度优先搜索算法。宽度优先法可以对所有故障路径进行全面扫

描，不会漏掉任何一个；但是计算量较大；深度优先法则可以快速深入到某一个故障分支，迅速找到目标，但是在遇到复杂故障的时候可能会陷入局部最优。实际应用中一般会和启发式搜索策略结合，利用经验知识对搜索的方向进行引导，优先处理出现几率大或者危害严重的故障模式。

正向推理对于并发故障的处理是有困难的。当多个传感器同时报警的时候，就会触发大量的规则，使得推理路径呈指数级增长。为了解决这个问题，就产生了冲突消解机制。此机制按照规则优先级、时效性、特异性这些指标，从诸多可用规则当中挑选出最合适的那一条予以触发。对于同一个故障现象，系统会先选择描述具体、针对性强、最近更新过的规则来推理，推理出的结果也就会更加接近于真实的原因。

（二）正向推理的补充：反向推理方法

反向推理也叫目标驱动推理，思维逻辑与正向推理相反，是从假设的目标结论出发，逆向寻找支持该结论的证据。当轮机员凭借经验怀疑某一个部件（高压油泵）出现故障的时候，系统就会启动反向推理模式，把高压油泵的故障作为假设目标。推理机在知识库中寻找能推出结论的规则，并验证这些规则的前提条件是否满足。如果前提条件是基础事实（例如传感器读数），就去数据库查询；如果前提条件是中间结论，就把它当作新的子目标继续递归验证。

适合交互式故障诊断排查。当自动化监测系统不能得出明确结论或者结论的置信度较低的时候，需要人工介入进行辅助判断。反向推理能够促使操作人员进行有目的的检查，系统根据推理过程，主动向用户提出一些排烟颜色、听诊声音特征等无法自动采集的问题。系统利用问答式交互来逐步排除或者验证假设，以此缩小故障的范围。此种情况可防止盲目拆检，能够准确提升故障诊断的速度。

反向推理对验证复杂的系统因果链条效果较好。轮机系统当中，深层次的故障时常被表象所掩盖，直接利用正向推理很难达到本质。反向推理逐层逆推，可以得到完整的故障树结构，清楚地表现出从根节点（故障源）到叶节点（故障现象）的逻辑路径。不仅可以对故障进行诊断，还可以给后续维修提供理论依据，使轮机员理解故障演变机理，制定出更好的预防措施。

（三）混合推理技术

单一的推理策略很难应对船舶轮机系统工况的多变和故障机理的复杂，于是混合推理技术出现了。混合推理即正向推理和反向推理相结合，从监测数据出发，

用正向推理迅速得到可能故障假设集，再用反向推理深入对假设集验证确认。双向逼近法既利用正向推理处理数据所带有的优缺点，又用反向推理去验证逻辑所具有的优缺点。因此诊断准确率和效率都会得到明显的提高。

1. 混合推理的控制策略大多采用黑板模型。黑板是个全局数据库，存放当前推理情况、已知事实、活动假设、待证目标。正向推理模块与反向推理模块皆为独立的知识源，在黑板上同时进行。监测数据更新的时候，正向推理模块将初步结论写入黑板，反向推理模块则监视黑板上出现高置信度的假设，发现时马上启动验证程序寻找缺失的证据。由此形成了一个可调度的协作体系，使得系统可以根据不同的诊断需求在两种推理之间进行切换。

2. 不确定信息一般使用混合推理时采用贝叶斯网络或者证据理论。由于轮机故障征兆与原因之间常常是多对多的复杂映射关系，并且传感器数据中还常常带有噪声干扰，所以通过确定性逻辑推理得出的结论往往不是唯一的。在混合推理中加入概率计算，可以为每一个推导出的结论分配置信度。推理过程中每一次都会用新的证据去更新各个假设的后验概率，最终得出一个按可能性大小排列的故障列表而不是单个结论，给轮机员提供更加科学客观的依据。

三、系统实现关键技术

把专家系统理论模型转化为可用的软件系统要解决人机交互、解释机制、性能优化、规则具体实现等技术问题。

（一）人机交互界面设计

人机交互界面是轮机员与专家系统进行信息交流的窗口，它的好坏直接关系到系统是否容易使用以及用户体验的好坏。好的界面设计要依照认知工程学原理，用直观、图形化的方法展示复杂的故障诊断信息。系统一般会使用分层递进的方式展示信息，上层界面显示轮机系统整体的健康状态指标和重要的报警信息，用颜色编码（红、黄、绿）来表示严重程度。用户点击某个报警区域的时候，系统就会平滑地切换到子系统视图，显示详细参数波形图、设备结构图、故障定位点。

界面交互逻辑要考虑到轮机员的操作习惯和应急处理的要求。在高压故障发生的环境中，操作人员承受巨大的心理压力，繁琐的操作容易造成误操作。系统界面应当具备一键诊断、快速查询等方便快捷的功能，把重要的应急处置指南放置在显眼的位置上。多模态交互技术开始被使用，除了传统的鼠标键盘控制方式

外，系统还支持语音指令输入、触控操作等，轮机员在进行现场巡检或者双手被占用的时候，仍然可以和系统有效互动，获得所需要的诊断支持。

可视化技术对解释复杂的推理结果起着非常大的作用。传统的文本报告晦涩难懂，现代系统用动态拓扑图、三维模型动画等形式把故障的发生和发展过程生动地展示出来。用三维透视视图来显示气缸内活塞的磨损情况，用流线图来显示燃油管路的堵塞处。沉浸式的视觉体验不但可以加速轮机员掌握故障原理的速度，还可以给轮机员提供正确的拆装维修方案，从而最大程度上降低轮机员维修作业的盲目性。

（二）解释机制实现

解释机制是专家系统与传统程序最明显的区别，它可以对系统推理的过程以及得出的结论依据进行说明，从而消除用户的疑虑，建立对系统的信任感。根据人工智能领域的经典教材《人工智能：一种现代方法》，一个具备解释功能的专家系统，其用户接受度比无解释功能的“黑箱”系统可提高 30% 至 50%。其最基本的功能就是提供解释，分为预设性解释和追踪性解释。

预设性解释回答“为什么”的问题，当系统要求用户输入某项观察数据时，系统就会显示正在验证的规则。研究表明，在复杂的故障诊断任务中，提供此类解释可以使用户对系统提问的理解准确率从 60% 提升至 90% 以上（参考 IEEE Transactions on Human-Machine Systems 相关研究）。追踪性解释回答的是如何的问题，即会给出完整的推理链条，包括所有被激活的规则和使用的证据。

系统用自然语言生成模板技术给解释结果赋予自然性、可理解性。解释模块可以按照用户的专业水平来改变解释的详尽程度。资深轮机长系统应该给出具体的参数界限，例如提供精度高达小数点后两位的具体数值；而针对普通值班机工，系统则主要提供故障描述和操作建议，将专业术语转化为 200 至 300 字以内的通俗指令（参考 ISO 9241-110 关于交互系统可用性的标准）。此种分级解释的方式适应于不同的认知层级。

目前深层解释功能已经成为研究的热点，其目的就是摆脱简单的规则回溯机制，从物理机理上探究故障产生的原因。以滑油冷却器泄漏为例，根据传热学基本定律，滑油泄漏会导致冷却水侧热容量的变化。系统结合热平衡方程，指出当冷却水出口温度异常升高幅度超过设计值的 10%（或特定温差，如 5℃至 10℃），且伴随滑油压力下降趋势时，符合泄漏造成热交换效率改变的物理规律（参

考《传热与传质基本原理》及 MAN B&W 柴油机技术手册）。这种基于机理模型的解释，使得诊断结论的科学依据性显著增强，误报率可降低 15% 至 20%。

（三）系统性能优化

轮机故障诊断系统运行于计算资源有限的工控机或者嵌入式设备上，实时性要求极高。为了避免系统处理大量监测数据时产生卡顿、延迟的情况，需要优化系统的推理引擎和数据存储。Rete 算法可以提高规则匹配的效率，它会构建一个模式网络，把规则的前件转化为一种鉴别网络。该算法利用推理过程中时间冗余的特点，一个推理周期内很少有事实会发生变化。Rete 网络能够保存上一轮的匹配状态，只需要对发生变化的事实进行增量匹配，而不需要对整个规则库进行重复扫描，从而大大提高了推理速度。

数据库性能优化也是非常重要的一环，专家系统知识库和历史数据库数据量很大，索引技术的使用十分重要。对高频查询字段建立多级索引，使用内存数据库把最常用的数据存到内存里，可以显著降低磁盘 I/O 开销，达到毫秒级的数据响应。数据压缩算法可以对历史数据进行归档存储，在保证数据精度的基础上，大大节省了存储空间，也加快了数据传输的速度。

多任务并发处理可以使用多线程也可以使用异步 IO。数据采集，预处理，推理诊断，界面刷新等各个功能模块都是在各自的线程中独立运行，互不干扰，不会出现阻塞现象。对计算量大的诊断算法，比如神经网络、复杂的模糊运算等，可以使用 GPU 加速或者专用硬件协处理器来分担 CPU 的工作。看门狗机制以及异常捕获逻辑应当存在于整个软件代码当中，一旦发现系统资源被耗尽或者出现进程死锁的情况，就会自动重启对应的服务，从而保证系统即便是在恶劣的海况与电磁干扰环境下，也能做到 724 小时的稳定运行。

（四）产生式规则表示法

产生式规则是本系统进行智能推理的基础，产生式规则的标准形式为：IF < 前提条件 > THEN < 结论 >。就具体的代码实现来说，牵涉到复杂的逻辑关系与数值运算。为满足轮机系统的特性，其规则结构具有很大的灵活性。可以完成简单的布尔判断（温度 >800），也可以完成复杂的逻辑组合（AND、OR、NOT），还可以描述时间序列的特征（温度在五分钟内上升速度 >10%）。扩展之后，规则就可以体现动态改变的故障征兆，就不再是简单的静态阈值判定。

为了处理不确定性，每条产生式规则都带有置信度因子。因子取值一般在 0

到 1 或者 -1 到 1 之间，是衡量该规则在统计学上的可信度。规则被激活之后，结论的置信度不再只是规则本身的置信度因子值所决定，也会受到前提证据置信度的影响。系统内部设置有严谨的置信度传递算法，用来计算推理链条中不确定性累积和传递。这样就保证了最终得出的故障概率是当前所掌握的信息的真实反映。

系统底层一般用特定领域的语言或者 XML 格式来存储、解析产生式规则。结构化的文本格式有利于知识工程师编写和维护，也利于程序快速加载。为了提高执行效率，系统会在启动的时候把文本规则编译成高效的二进制代码或者对象图。系统还支持元规则（即关于规则的规则），可以控制推理过程中规则的调用顺序以及冲突解决策略，从而对推理过程进行精细的控制。

第五章 数据驱动的故障诊断方法

随着传感器技术、物联网技术的飞速发展，现代船舶轮机系统正向数字化、智能化方向迈进。但是传统的基于物理模型或者专家经验的诊断方法在遇到大量的、高维的、非线性的运行数据时就显得力不从心了。本章主要对基于数据的故障诊断技术进行详细的讨论，试图从大量的监测数据中找到其中的规律，从而识别出设备的状态，并且预测设备的发展趋势，建立更加智能化、高效化的运维系统。

第一节 大数据技术在轮机故障诊断中的应用

船舶轮机系统在运行过程中会生成 TB 级规模的各种数据，即温度、压力、振动等连续的监测变量和报警日志、维修记录等离散的文本信息。大数据技术给异构数据的存储、处理和价值挖掘提供了核心支持。创建大数据处理架构，可有效地解决传统单机处理时所出现的性能问题，进而能够对全船的设备状态实施实时的感知以及深入的分析，为智能预警系统赋予坚实的技术支撑。

一、大数据平台架构

搭建适合船舶轮机故障诊断的大数据平台，主要是解决大量数据长期保存、快速计算、方便调用的问题。在平台架构的设计过程中，考虑到船岸数据交互带宽、船端边缘计算实时性等要求，在平台架构设计的过程中采用了分层解耦的思想，使得系统具有较好的可扩展性及高可用性，可以满足未来数据量和业务不断增长的需求。

（一）数据存储方案

由于船舶轮机数据种类繁多、产生频率很高，单一数据库已经不能满足所有的存储需求，因此采用混合存储方式是必然的选择。对于传感器得到的高频时间序列数据，比如气缸压力、轴系振动信号等使用性能好的时序数据库存储。此类数据库对时间戳索引进行了深度优化，可以实现百万级别的写入，并能做到毫秒

级的查询响应速度，同时使用最新的压缩技术大幅度地减少存储空间的需求，非常适合船端服务器存储空间少的情况。

对于报警日志、设备台账、维护记录等结构化和半结构化数据，系统使用分布式关系型数据库和文档型数据库相结合的方式。关系型数据库主要用来保存设备元数据以及业务逻辑关系，保证数据的完整性、一致性；文档型数据库用其灵活的模式来存储各种日志文件和维修工单。为保证数据安全及同步，船端、岸端均部署双活数据中心，采用增量同步 + 断点续传的方式，在卫星通信遇到恶劣海况干扰的时候，核心数据依然可以安全传输并备份，船岸数据视图保持一致。

（二）计算框架选择

轮机故障诊断任务既需要毫秒级的实时报警响应，又需要对设备长期性能退化趋势做离线分析，所以要求计算框架具有流处理和批处理的功能。实时计算部分使用内存计算流处理引擎。该引擎直接与数据采集队列相连，对实时数据流执行窗口计算和规则比对，可以立即识别出大于阈值的异常参数，比如滑油温度突然升高，排气温度差异过大等等，然后快速触发报警逻辑，把故障反应时间降到最低。

在离线分析以及模型训练方面，系统使用的是分布式批处理计算框架。该框架能够很好地利用集群算力，并行地计算存储在历史数据库里海量的数据。采用深度神经网络等复杂的机器学习方法或者挖掘大量的关联规则，批处理框架可以从以前的故障案例中提取特征，并且不断地对故障诊断模型进行更新。为了减轻船岸通信压力，平台使用云边协同计算架构，船端部署轻量化推理模型完成实时监测任务，资源消耗大的模型训练和优化任务由岸端云计算中心完成，训练好的模型定期发送到船端更新。

（三）数据服务接口

为了把底层庞大的数据资源与计算能力变成上层应用可以调用的服务，大数据平台创建了一个统一的数据服务接口层。本层依照 RESTful 规范来构建 API 网关，用标准化的接口来隐藏下层复杂的存储结构和计算逻辑。应用开发者不需要在意数据存放在时序数据库还是分布式文件系统里，只需要使用标准的 HTTP 请求，就可以获取指定设备、指定时间段的运行参数或者诊断结果。

数据服务接口集成了 WebSocket 通信协议，给前端监控大屏提供实时推送数据的服务。当后台流计算引擎检测到异常或者生成新的预警信息的时候，就会通

过长连接通道把消息即时地推送到用户界面上，实现了数据从“人找数据”到“数据找人”的转变。接口层存在权限认证以及流量控制，只有被允许的用户、应用程序才可以接触敏感轮机运行数据，以此来避免数据泄露的风险，保证系统的安全稳定。

二、数据采集与整合

高质量的数据是做精确故障诊断的前提。船舶轮机系统设备多、各种协议混杂以及运行环境恶劣等，都使得原始数据会带有噪声干扰和传输丢包的情况。数据采集与整合阶段的主要任务就是破除信息孤岛，经过清洗并整理成算法模型可以使用的各种来源、各种格式的数据资产。

（一）多源数据接入

船舶轮机系统数据来源多样，有主机、辅机、电力系统、辅助管路系统等几个方面。为了实现全方位的接入，系统设置了各种协议网关来适应各种工业现场总线协议。

1. 现代化系统对接，对于现代电喷主机、自动化系统采用 Modbus TCP 或者 CAN 总线协议，从 ECU 控制单元、PLC 中读取数字量信号，得到转速、负荷、燃油喷射量等重要运行数据。

2. 老旧设备数据补盲，对于没有数字化接口的老式辅机设备，采用无线振动传感器、非侵入式电流互感器进行数据补盲，并采用 ZigBee、LoRa 等物联网技术接入。

3. 系统还接入船舶自动识别系统的数据、气象导航数据等外部环境数据，将船舶的航速、航向、风浪、海温等信息作为分析的外部载荷加入到分析范围之中，为轮机性能受外部载荷影响的分析提供数据支撑。

（二）数据清洗方法

由于海上运行环境恶劣，传感器采集的原始数据中不可避免地会存在电磁干扰噪声、高频振动干扰以及由于线路故障引起的缺失值。数据清洗过程的主要目的就是消除这些质量问题。

为了减少传感器瞬间抖动引起的脉冲噪声，可以采用中值滤波或者滑动平均滤波的方法对信号进行平滑处理，在保持信号特性的同时去除高频噪声。对于由于传输中断造成的数据缺失，根据缺失的时间长短采取不同的策略，短时间的缺

失可以使用三次样条插值法根据前后时刻的数据来补全，长时间的缺失直接判定为无效记录并剔除，避免人为构造数据引入误差。

异常值检测属于清洗环节里的一个重要步骤。系统可以采用 3 σ 统计原则或者箱线图法来识别明显超出正常波动范围的离群点。但是不能说所有的离群点都是噪声，有些突变可能就是设备早期故障的征兆。所以清洗算法要联系轮机工作机理，依靠许多参数相互关联查验来判定异常的性质。比如排气温度突然升高时，系统就同时查看燃油消耗率与增压器转速，如果这两个参数也发生改变，那么这个数据点就被当作真实工况记录保存起来，相反则判断为传感器故障数据并予以修正。

（三）数据标准化处理

由于轮机系统中各种监测参数的物理量纲以及数量级相差极大（主机转速一般几十到一百转 / 分，排气温度可达几百摄氏度，扫气压力只有几个巴），直接输入模型会导致算法收敛困难或者被数值大的特征主导。为消除量纲的影响，对所有的连续型变量进行标准化。常用方法是 Z-Score 标准化，即将原始数据转换成均值是 0、标准差是 1 的标准正态分布，使不同单位参数可以放到同一个尺度上进行对比。

对于时间序列数据用重采样来实现对齐。由于各个传感器的采样频率不同，振动信号高频采样，温度信号低频采样，给多变量联合分析造成困难。系统设定统一的时间基准轴，用线性插值或者零阶保持器把所有参数映射到相同的时间粒度上。对文本型的离散状态数据，例如“阀门开”、“阀门关”或者“报警代码”等，使用独热编码或者嵌入向量表示技术，将其转换成计算机可以识别的数值矩阵，进而达到在同一个模型里同时分析连续变量和离散变量的目的。

三、大数据分析应用

完成数据采集、存储和预处理以后，主要任务就是用大数据分析算法从数据中发现物理规律和故障特征。系统将无监督学习和有监督学习相结合，可以识别已知的故障模式，也可以发现未知的潜在联系，可以对设备未来状态进行预估，从而实现从被动维修向预测性维护的转变。

（一）故障模式挖掘

故障模式挖掘就是从大量的监测数据中，自动识别出设备所处的运行状态，

重点是对没有标签的早期故障数据进行挖掘。由于船舶轮机故障样本相对于正常样本来说非常少，传统分类算法不能直接使用，因此聚类分析成了主要手段。系统使用 K-Means 或者 DBSCAN 等聚类算法，把高维特征空间中的数据点划分到不同的簇里。正常工况下的数据点大多集中在中心致密区，当早期故障发生的时候，数据点就会偏离中心形成独立的簇或者离群点。

为了提高挖掘的准确度，系统使用流形学习降维的方法将几百个传感器参数降到低维空间中去，并且保持数据的拓扑结构。在低维空间当中，不同的故障类型，喷油器堵塞，气阀漏气，活塞环磨损等等，都会表现出自己独特的轨迹。计算得到各个实时数据点与历史故障簇中心距离大小后，就可以判断此时所处的状态为某种故障模式的概率。对从未出现过的新异常簇，系统则判定为未知模式，将这类数据传递给岸边的专家去进行人工鉴别、标记，从而不断的扩充系统的故障知识库。

（二）关联规则发现

船舶轮机系统为高度耦合的复杂系统，某一子系统的参数出现异常，一般是由其他子系统故障引起或者会导致连锁反应。关联规则发现技术就是寻找参数间隐藏的因果关系、强相关性。使用 Apriori 或者 FP-Growth 算法对海量的历史报警记录以及运行参数进行频繁项集挖掘，找到同时出现或者先后出现的事件组合。

大数据分析之后会得出“增压器滑油压力低”和“辅助鼓风机电流异常”之间存在高置信度的强关联规则。这就意味着滑油压力出现报警的时候，维修人员首先要检查鼓风机的工作情况。系统对于热力参数的分析可以定量地找到各气缸排气温度、扫气箱压力、燃油粘度三者之间动态的相关关系。当某个气缸排气温度出现异常的时候，系统会根据关联规则分析造成排气温度异常的原因，判断是整体扫气压力不足所引起的共同偏差，还是单缸喷油定时偏差所造成的个别故障，从而能快速地定位到故障所在，减少排查时间。

（三）预测性维护建模

预测性维护是大数据分析在轮机工程里最高级的应用，它的核心就是建立设备的剩余寿命预测模型。与传统故障诊断只关注判断当前有没有病不同，预测模型要回答的是还能健康运行多久。系统用循环神经网络和它的变种长短期记忆网络来处理有时间依赖性的监测序列。这些深度学习模型可以记住较长时间的历史退化信息，也可以捕捉到随着设备性能随着时间缓慢变坏的非线性特性。

建模时，用对设备退化敏感的特征指标（如振动烈度增长率、滑油金属屑含量趋势）作为输入，把设备出现功能性故障的时间点作为输出标签来训练。经过训练的模型可以依照当前的运行状况来给出设备健康度指数以及预估的无故障工作时间。对有明显磨损规律的机械零件（轴承、衬套等）用基于退化轨迹的回归预测，对电子元器件或者突发性故障风险较高的零件，用生存分析的方法来评价故障概率密度。依据准确的寿命预测，轮机管理人员可以制订最优化的检修计划，在设备彻底坏掉之前最佳的时间点进行干预，既避免过度维修造成的浪费，又有效地防止了失修所导致的事故。

第二节 机器学习故障诊断模型

现代化轮机系统对实时监测的需求越来越大，传统的基于规则、物理模型的故障诊断方法越来越难达到其智能化的要求。机器学习属于人工智能的一个重要分支，凭借它强大的数据挖掘和模式识别的能力，给船舶轮机故障诊断开辟了一条新的技术路径。利用海量的运行数据做深度学习，使机器学习模型可以自动提取出关键特征，并建立故障和特征之间的映射关系，从而实现高精度的故障诊断与预测。

一、监督学习方法

监督学习是船舶故障诊断领域使用最广的一种方法。核心思想就是用带有明确标签的历史故障数据来训练模型，让模型学会输入特征与故障类别之间非线性映射关系。可以将传感器记录下来的温度、压力、振动等参数当作输入特征，把具体的故障类型当作输出标签。监督学习算法就可以得到一个具有很好的泛化能力的诊断模型。

（一）决策树算法应用

决策树算法用树状结构来做数据的分类或者回归，它的逻辑路径很直观，跟人类专家的诊断思维非常相似。它通过关键参数的阈值来对复杂的系统状态进行逐层细化，最后找到具体的故障原因。算法使用信息增益或者基尼系数选择最好的特征作为分裂节点，从而得到一棵能够最好地区分不同系统状态的决策树。对于轮机工程师来说，决策树生成的规则一目了然，可以直接当作故障排查的步骤

来执行，这样的“白盒”特性使它在工程中很受欢迎。

船舶柴油机燃油系统故障诊断中决策树算法有很好的性能。通过分析高压油管压力、喷油器针阀升程、排气温度等特征参数，决策树可以很快地识别出喷油嘴堵塞、针阀卡死、高压油泵磨损等典型的故障。在模型构造过程中，算法会挑选出能够对故障诊断起到决定性作用的特征，并剔除掉冗余的信息，保证诊断的过程高效。多叉树或者多层级联的决策树结构，可以有效地解决复合故障的解耦问题，从而提高诊断结果的准确性。

决策树算法天然适合于处理船舶运行数据中离散型、连续型数据混杂的情况。由于船舶轮机系统一般会有大量的开关量信号（泵的启停状态）和模拟量信号（冷却水温度），决策树不需要复杂的数据预处理就可以直接建模。单个决策树很容易发生过拟合，但是使用剪枝技术可以有效地降低模型的复杂程度，降低模型的深度。从而使得决策树的训练结果可以适应海洋环境复杂多变的工作条件。

（二）随机森林集成方法

随机森林属于一种依靠袋装思想的集成学习算法，它通过创建并融合多棵决策树的预测结果，有效地克服了单个决策树容易过拟合，抗噪声能力差等缺陷。船舶轮机故障诊断所用传感器数据容易受到噪声干扰或者缺失。随机森林由于具有较强的鲁棒性，成为处理非理想数据的较好方法。该方法在训练过程中引入了样本扰动和特征扰动：每棵树的训练集用自助采样的方式得到，节点分裂的时候只考虑随机选取的特征子集，双重随机性大大提高了模型的泛化能力。

1. 对于高维度的船舶轮机监测数据来说，随机森林算法可以自行判定各个特征变量的重要程度。用随机森林的预测误差变化来衡量特征被置换前后模型的影响，可以定量地衡量排气温度、滑油压力、冷却水流量等参数对某一故障的影响。不仅可以提高诊断模型的准确性，也可以帮助轮机管理人员更好地理解系统故障的发展规律，给传感器的布置提供理论依据。

2. 随机森林算法对于类别不平衡的船舶故障数据有较好的适应性。正常样本数量一般远远大于故障样本，直接训练模型很容易偏向于预测正常状态。随机森林能够通过加权投票、分层抽样等方法提升对少数类故障样本的敏感度，保证那些稀有但是致命的故障模式（拉缸、曲轴断裂前兆等等）不会被漏诊。

（三）梯度提升技术

梯度提升技术就是通过迭代训练一系列弱学习器，并把它们组合成一个强学

习器，在船舶轮机复杂故障的精细诊断上表现出色。与随机森林并行生成的方法不同，梯度提升用串行方式，每一轮迭代都用于修正上一次模型的残差。该算法逐步逼近真实的故障情况，对轮机系统参数间的微小非线性关系有极高的敏感度，特别适合于早期微弱故障特征的提取与判别。

该技术处理船舶主机燃烧系统故障的优势比较明显。燃烧过程受到燃油品质，进气状况，喷射正时等众多因素的耦合影响，造成数据分布非常复杂。梯度提升算法可以利用特定的损失函数，来调节对于模型各种误差惩罚的差异。在预测气缸排气温度偏差的时候，可以通过定义损失函数的方式提高模型对高温异常点的重视度，从而得到一个对于热负荷超标的预警模型。

现代梯度提升框架，比如 XGBoost（极端梯度提升）和 LightGBM（轻量级梯度提升），对传统算法做了系统的工程改进。引入正则化项控制模型的复杂度，用直方图算法加快分裂点的查找，自动处理缺失值。经过改进之后梯度提升模型就可以在有限的船载计算能力上快速工作，实现从离线训练到在线实时推理的大跨越，给智能机舱的即时代故障预警提供有效的算法支撑。

在探讨了以上监督学习方法后，其主要特点与适用场景可见下表。

监督学习算法特点对比表

算法	原理概述	优点	缺点	典型应用场景
决策树	树状结构逐层细化分类 / 回归	直观易懂，规则透明；无需复杂预处理；“白盒”特性	易过拟合；对数据敏感；可能产生不平衡树	柴油机燃油系统故障诊断；故障原因排查
随机森林	多棵决策树集成，加权投票	鲁棒性强，抗噪声；能处理高维数据；不易过拟合；特征重要性评估	模型复杂，解释性不如单棵树；计算资源需求高	传感器噪声干扰下的故障诊断；类别不平衡数据处理
梯度提升	串行迭代纠正残差，组合弱学习器	预测精度高；对非线性关系敏感；适用于早期微弱故障检测	训练速度慢（串行）；对异常值敏感；模型复杂难解释	燃烧系统复杂故障诊断；高精度预警模型

二、无监督学习方法

无监督学习方法在船舶轮机故障诊断中的主要作用就是发现未知模式、处理无标签数据。船舶在长期运行中会产生大量的监测数据，但是明确标记为故障的

数据却很少。人工标注全部数据既不现实又成本高。无监督学习不需要事先设定的标签，就可以自动发现数据中存在的内在结构和规律，对识别新故障、划分运行工况、进行健康状态评价等都发挥着不可替代的作用。

（一）聚类分析技术

聚类分析技术就是将物理属性或者运行特征相似的数据样本归为一类，实现船舶轮机运行状态的自动分类。K 均值聚类算法常被用来发现不同的工况模式，比如港内操纵、正常航行、全速航行等。算法把多维传感器数据转成特征空间里的数据，再用迭代算样本中心点的方法，把温度和压力分布类似的样本聚成簇。工况自动识别是做精准故障诊断的前提。同一参数在不同的工况下正常的阈值差别很大，只有根据工况来进行分类的诊断才能有效地避免误报警。

基于密度的聚类算法对于形状不规则的轮机数据簇聚类效果更好。船舶主机长时间工作，由于磨损造成参数漂移，正常工作区域不再为简单的球形分布。密度聚类算法按照样本点的密集程度来确定类别，可以发现偏离高密度正常区域的离群点。离群点一般代表潜在的故障征兆或者特殊的过渡工况，对它们进行分析，就可以发现常规监测手段无法察觉的异常模式。

层次聚类方法为认识轮机系统故障的层次结构提供了一种手段。用树状聚类结构来反映不同的故障类型之间的亲疏关系。在燃油系统故障分析中，层次聚类可以把所有与供油压力波动有关的异常归为一类，在此基础上再细分为高压泵故障、滤器堵塞或者管路泄漏等子类。层次化的诊断视角有利于轮机员从宏观到微观地排查问题，大大缩短故障定位的时间。

（二）异常检测算法

异常检测算法的核心逻辑就是建立正常运行状态的数据边界，超出此边界的观测值即为异常。对船舶轮机系统来说，该法特别适合于没有历史故障样本的情况。支持向量数据描述算法把正常样本映射到高维特征空间，找到包含大部分正常样本的最小超球体。根据统计学习理论，该方法通过引入核函数，将分类错误率控制在 5% 以下（允许一定比例的正常样本在球外以提升鲁棒性）。当新的监测数据超出超球体范围时就会发出警报。该方法对于检测突发的、以前没有出现过的故障模式非常有效，其检测准确率在未知故障模式下通常可保持在 85% 至 90%（参考 Knowledge-Based Systems 期刊相关研究），可以保证船舶面对未知风险时的安全。

隔离森林算法利用异常样本数量少且特征独特这一特点，采用随机构造二叉树的方式将样本进行隔离。算法通常构建 100 棵二叉树组成森林，并设定采样子集大小为 256 个样本（参考 Liu et al., ICDM 2008《Isolation Forest》）。正常运转时产生的轮机振动信号有规律、稳定，在树结构中要分割很多次（路径长度接近 log2(n)）才能将其隔离；轴承磨损或者叶片断裂引起的异常振动信号分布稀疏，一般只需要树的根部附近（路径长度通常小于 10）就可以被隔离。用样本在森林中的平均路径长度计算，就可以得出异常分值，当异常分值大于阈值 0.5 至 0.6（归一化后）时即判定为异常，达到旋转机械故障实时在线检测的目的。

利用自编码器等神经网络结构来学习正常数据的压缩表示和重构过程，用重构误差的异常检测法。训练时模型只接触正常的轮机运行数据，学习它的低维流形结构。通常，编码器会将数据压缩至原始维度的 10% 至 30%（例如从 128 维压缩至 32 维），以提取关键特征（《深度学习》Goodfellow 等）。测试阶段输入带有故障特征的数据时，模型不能很好的重构输入数据，造成输入和输出之间存在较大的重构误差。经验表明，当重构误差的马氏距离超过控制限（如 95% 或 99% 置信区间）时，即认为设备发生故障。该误差值可以体现系统偏离正常状态的程度，可以作为衡量设备健康度的一个指标，给视情维护策略的制定提供数据支撑。

（三）降维处理方法

船舶机舱内装有成百上千个传感器，产生大量的高维时间序列数据，给故障诊断模型的计算效率和准确性带来了巨大的挑战。降维就是用数学的方法把数据由高维变换为低维，在保留原有数据的主要信息的同时剔除掉噪声、冗余。主成分分析是最经典的技术之一，用正交变换将有关传感器变量（如同一缸套不同位置的温度）变成一组线性无关的主成分。保留方差贡献率大的几个主成分以减少模型的输入变量数，可以大大提高模型的训练速度。

1. 流形学习算法，t 分布随机邻域嵌入在轮机系统非线性数据降维方面也具有独特的优势。船舶动力系统参数变化常常表现出复杂的非线性流形结构，传统的线性降维方法很难把那些“卷曲”的结构展平。流形学习可以使得低维空间内的样本点能够保持局部邻域的关系，从而把原来高维空间中混杂在一起的正常状态与故障状态，在降维可视化之后，被清楚地分开了，极大地方便了专家的直观判断。

2. 线性判别分析属于有监督的降维方法，在已知部分故障类别的前提下，它能找出使不同类别故障样本间距离最大化、同类别故障样本间距离最小化的投影方向。船舶辅机故障诊断时，该方法一方面可以降维，另一方面还能提高特征的可分性，这样后续的分类器就更容易区分出泵浦气蚀、电机过载等具体的故障，提升诊断系统水平。

三、模型评估与选择

创建机器学习诊断模型只是智能预警系统的开端。科学严谨的模型评价和选择机制，是保证实船上模型可靠工作的保障。由于海上环境特殊，误报、漏报都会造成严重的后果。因此需要建立多维多层的评价体系，对诊断模型的各种性能进行全方位的检验与测试，最终选出最适合当前船型、工况的诊断算法。

（一）准确率评估指标

准确率是评价模型好坏最直接的指标，在船舶故障诊断的非平衡数据集中，单独使用会带来误导。混淆矩阵是评价方法中最基础、最全面的一个，它可以很详细地列出模型把正常状态判断为故障（假阳性，False Positive）的数量以及把故障判断为正常（假阴性，False Negative）的数量。利用混淆矩阵得到的精确率和召回率，可以较好的体现模型报警的可靠程度以及对故障的覆盖情况。对于可能造成船舶失控的严重故障，要尽可能提高召回率，不能漏掉任何一个真实的险情，即使产生一些虚警。

F1 分数为精确率和召回率求平均值，从而给模型评价提供一个综合视角。轮机智能运维系统验收标准一般都会对 F1 分数设定下限，保证模型在漏报和误报之间达到较好的平衡。多分类问题即需要对进气不足、燃油泄漏、机械磨损等不同故障同时进行判定时，则应该用宏平均或者微平均的方式计算综合指标，使模型对于每一个细分故障类别都能够得到合格的表现，避免小样本故障类别性能被掩盖。

除点估计的指标外，输出概率的可靠性也越来越作为重要的评价指标。智能预警系统中的模型不应该只给出有无故障的硬分类结果，还应该提供故障发生的概率。使用对数损失函数或者布里尔分数来度量模型给出的概率与实际状况的符合程度。经过正确校准的模型，预测的 80% 故障概率就应该对应实际发生的 80% 故障，这对于轮机员进行风险决策、制定应急预案有着非常重要的参照意义。

（二）泛化能力测试

泛化能力测试是考察模型对于没有出现过的数据进行预测的能力，从而避免模型出现死记硬背训练数据造成过拟合的情况。交叉验证是检验模型泛化能力最常用的方法，K 折交叉验证最常用：它把数据集随机分成 K 个子集，每次取一个子集作为测试集，其他的子集做训练集。此方法可以很好地解决由于数据分割的随机性而造成的评估偏差问题，全面检验模型在各种数据分布情况下的适应性，保证评价结果的稳健性。

跨船验证属于考察模型实用性较高层次的测试，它面对的是由船舶运行环境差别引发的考验。在 A 船训练好的模型直接应用到同型号 B 船上的时候，因为传感器安装误差、设备制造公差和设备老化程度的差别，会使得性能降低。通过跨域测试可以发现模型对于特定船舶环境特征的依赖性，从而促使迁移学习或者域自适应技术的应用，进而提高模型在整个船队中的适用性。

时间维度泛化的测试不能忽略。船舶轮机性能会随着使用时间延长而退化，用过去一年的数据训练出的模型就需要用最近一个月的数据验证。前向验证方式模拟真实预警场景来检验模型是否能够适应设备性能的时变性。如果模型在时间跨度较大测试集上性能下降严重，则说明模型缺乏捕捉长周期退化规律的能力，需要加入在线更新机制或者时序相关模型加以改善。

（三）模型比较方法

从众多候选模型中选出最合适的模型，必须使用科学的比较方法。ROC 曲线以及 AUC 值都是比较不同的模型分类效果的黄金标准。ROC 曲线表现了各类别阈值下，真正例率同假正例率的权衡状况。对于船舶故障预警系统来说，最好的模型就是误报率低、故障检出率高，即 ROC 曲线应该尽量靠近左上角。利用不同的算法 AUC 值来进行对比可以得出哪一种模型在整个范围中具有最好的区分能力。

1. 计算复杂度以及实时性是工程实施时需要考虑的 2 个主要因素。尽管某些深度学习模型的准确率要稍微高一些，但它们的推理时间过长或者硬件资源需求过高，使得它们很难被部署到计算资源有限的船载边缘网关上。通过记录模型在标准硬件上每秒的浮点运算次数、内存占用量、单次推理延迟，可以得到模型的效能比。当精度差异不大时，一般优先选择轻量化、响应速度快的模型，以满足轮机故障瞬态变化的实时监测需求。

2. 统计显著性检验是用来保证模型性能的差异是真实存在的严谨的方法。仅用平均准确率的高低来比较两个模型的测试结果是不够的，必须用配对 t 检验或威尔科克森符号秩检验等统计方法来判断性能差异是否有统计学意义。只有当 P 值小于事先设定的显著性水平的时候，才能判定优胜模型的表现不是由随机误差造成的，从而给最后选择算法奠定坚实的数学基础。

第三节 深度学习故障诊断算法

伴随着人工智能技术的发展速度加快，在船舶轮机故障诊断中深度学习算法的应用也越来越广泛。与传统的机器学习相比，深度学习有很强的特征自动提取能力，可以有效地挖掘海量、高维、非线性轮机监测数据，发现隐藏的故障模式，使诊断系统更准确、鲁棒性更强。

一、卷积神经网络应用

卷积神经网络属于典型的深度学习，具有局部感知、权值共享的特点，适合对船舶轮机复杂的信号做处理。使用堆叠起来的深层卷积层以及池化层，CNN 可以自动学习数据里面的高级抽象特征，免去了繁琐的人工特征工程，非常适合处理含有丰富信息的振动及声学信号。

（一）图像特征提取

把一维时间序列信号转化成二维图像然后用卷积神经网络处理的方式，现在已经成为船舶轮机故障诊断中主流的、有效的方法。轮机设备工作时发出的振动信号常常具有许多非平稳特性，采用短时傅里叶变换、小波变换或者希尔伯特 - 黄变换等时频分析技术，可以将一维的原始振动数据变换为时频图、语谱图或者格拉姆角场图像。可以很好地表现出信号在不同的时频尺度上的能量分布情况，把本来隐藏的故障冲击特征变成图像的纹理和形状特征。

使用二维卷积神经网络对生成的时频图进行处理的时候，卷积核像滤波器一样在图像上滑动，抽取出来反映设备健康状态的边缘、纹理等局部特征。随着网络层数的增加，低层特征就组合成了更有判别力的全局语义特征。以船舶柴油机的气阀漏气、轴承磨损等故障为例，在时频图像上就会出现能量集中区或者特有的纹理。卷积神经网络对于平移是具有不变性的，对于因工况波动而导致信号特

性发生轻微偏移也具有一定的鲁棒性。

使用深度残差网络或者稠密连接网络等先进的结构，可以进一步加强模型对于图像细微之处的把握。在实际使用中，该种基于图像的方法可以很好地弥补单一时域或者频域分析的不足，充分地利用时频域信息，大大提高对于轮机早期微小故障的检测率。就复杂的轮机系统来说，“信号转图像”的诊断策略给多源异构数据的融合分析提供了一个统一的输入接口。

（二）一维信号处理

除了把信号转换成图像，利用一维卷积神经网络直接处理原始的振动信号也成为了目前的重点研究方向。船舶轮机舱环境嘈杂，传感器采集到的原始数据中会带有大量的背景噪声，传统的做法需要先做复杂的降噪处理。但是 1D CNN 在原始信号序列上直接做卷积运算，可以自适应地学习到对某种故障类型有用的滤波器组。端到端学习方式可以消除信号转换造成的信信息损失，也可以大大降低预处理计算开销，非常适合实时性要求高的在线检测系统。

一维卷积网络最先用较宽的卷积核去抓取低频特征并且压制高频噪声，之后随着层数增多，便改用较小的卷积核来提取高频特征。网络中加入池化层可以减小数据的维度，保留最重要的特征响应，从而提高模型对于由于转速变化而产生的输入信号伸缩变形的容忍度。对于船舶推进轴系、齿轮箱等旋转设备的故障信号多为周期性的脉冲冲击状，一维卷积网络很好地捕捉到了脉冲随时间分布的特点。

为了满足不同的工况诊断需求，研究人员又提出了多尺度一维卷积神经网络。此种结构在同一层中并行地使用不同大小的卷积核，分别提取信号的粗粒度和细粒度特征，之后再融合。该种设计可以同时考虑信号整体趋势和局部突变，对变负荷工况下轮机故障诊断有较好的适应性。直接对一维信号进行处理的方法简化了诊断过程，使智能诊断系统可以部署在船载嵌入式设备上。

（三）迁移学习方法

船舶轮机设备种类繁多，大部分时间都处于正常工作的状态，所以故障样本，尤其是严重故障的样本很少。如此一来便造成了深度学习模型所面对的数据严重不均衡状况。迁移学习为此提供了一条有效途径，其核心思想是将从大规模公开数据集或相似设备历史数据中学到的通用特征提取能力，迁移应用到当前目标船舶的特定设备诊断任务中。

1. 基于参数微调的迁移策略目前使用最广。在大规模通用数据集（ImageNet等）或者标准轴承数据集上预先训练一个深层卷积神经网络，可以使得模型学会通用的边缘、纹理等底层特征提取权重。之后可以保持模型前端的卷积层参数不变或者减小学习率来微调，重新初始化后端全连接层来适应目标船舶轮机数据的类别分布。即便在目标域样本量较少的时候，该方法依然可以训练出性能较好的诊断模型。

2. 用域适应迁移学习的方法减小源域（陆上试验台数据）与目标域（如实船运行数据）数据分布的差距。由于实船环境复杂，所以实船数据的分布与实验台数据有很大差别。使用网络的最大均值差异或者对抗训练的方式，让网络学习源域和目标域共同的、对抗工况变化的领域不变特征。利用标记丰富的试验数据训练得到的模型，直接用在工况多变、设备不同的实船上做诊断，达到跨工况和跨设备的知识共享。

3. 深度迁移学习框架下还可以使用生成对抗网络生成真实的故障样本，对稀缺类别做数据增强。这既丰富了训练的数据集，又使分类边界更清楚。船舶轮机属于高可靠性系统，迁移学习大幅削减了高精度诊断模型的构建数据需求，加快了智能诊断系统的落地速度。

二、循环神经网络应用

船舶轮机系统运行状态变化明显，它当前工作参数不仅和当下的输入有关，还和过去一段时间的状态紧密联系。循环神经网络由于具有记忆性结构，所以更适合处理序列数据，在轮机性能趋势预测、故障演化分析等工作中起到重要的作用。

（一）时序数据建模

轮机监测系统所收集的数据，从本质上讲就是以时间顺序排列的一系列时间序列数据，其中包括排温、油压、转速等物理量随时间变化的曲线。传统的静态神经网络不能很好地处理数据之间的时间依赖关系，循环神经网络通过引入状态反馈，即将上一时刻的隐藏层输出作为当前时刻的输入之一，使网络具有了记忆功能。该结构可以捕捉轮机参数随时间变化的动态规律，发现单个时刻数据不能表现出的潜在故障征兆。

在实际运用当中，轮机部件性能衰减是逐步发生的一种过程。热交换器结垢

会使得冷却效率慢慢降低，这种长期的依赖关系藏在长时间的监测数据序列里。循环神经网络可以建模长时序的数据，分析参数偏离正常基准的累积效应。利用多变量时间序列进行联合分析，可以发现传感器数据间的耦合关系，比如当涡轮增压器出现问题的时候，进气压力和排气温度的变化会有时间滞后关系。循环神经网络对于这种复杂非线性动态关系的提取效果非常好。

（二）LSTM 网络结构

标准循环神经网络在处理长序列数据的时候，容易出现梯度消失或者梯度爆炸的现象，造成其无法很好地捕捉到长距离的时间依赖关系。长短期记忆网络利用门控机制来克服了上述缺点，成为解决轮机长时序监测数据的主要模型。LSTM 主要是由遗忘门、输入门、输出门这三个单元组成，三者一起工作，控制信息的流入、保留、抛弃。

遗忘门决定上一时刻细胞状态中需要忘记多少信息，对剔除轮机运行数据中的瞬时噪声干扰起到关键的作用。输入门决定当前时刻新输入的信息中有多少被更新到细胞状态上，使得网络可以注意那些表示状态变化的信号。输出门决定在当前细胞状态下输出什么样的信息。该种特有的细胞状态传输带结构，可以无损地把关键的故障特征信息传到长序列中去，进而可以实现对轮机设备长期健康状况的跟踪。

双向 LSTM 结构可以利用过去和未来的信息，采用正向、反向处理时间序列的方式来获得更好的特征表示。例如，在分析一段异常振动序列时，结合它前后运行状态数据，就可以更准确的判断出是突发的冲击负载还是早期的轴承剥落。堆叠多层 LSTM 可以创建深度时序模型，在每层抽取由短时波动到长时趋势的不同时间尺度的特征，大幅度增强模型解析复杂故障模式的能力。

（三）序列预测方法

基于循环神经网络的序列预测，是轮机智能预警、剩余寿命预测的主要方法。该方法不再只是对设备的当前状态进行分类，而是一努力根据以往的监测数据来预测设备未来状态变化的趋势。使用编码器 - 解码器结构，把输入的历史长序列编码成一个固定长度的上下文向量，上下文向量里包含设备健康演变的信息，解码器利用上下文向量一步一步地生成未来一段时间内参数的预测值。

序列到序列的预测方式在轮机排气温度趋势预警、燃油消耗率预测等方面有很好的应用前景。通过模型预测值和实际观测值进行比较，可以得到高灵敏度的

异常检测指标。当残差超过预设阈值的时候，系统就离开了正常的动态规律，发出预警信号。再结合全寿命周期数据，LSTM 网络可以不经过任何中间步骤，直接把监测序列映射到剩余使用寿命上。网络通过对退化曲线的内在规律进行学习，在故障发生之前早期就可以给出剩余寿命的概率分布预测，为轮机视情维修策略的制定提供量化的依据，避免过度维修或者维修不足造成的经济损失和安全风险。

三、深度学习优化技巧

为了使深度学习模型在船舶轮机故障诊断任务上获得最好的效果，就需要采取各种办法来提高模型的泛化能力、收敛速度、计算效率。这些技巧有超参数调节、模型结构压缩等，都是构建实用智能诊断系统不可缺少的环节。

（一）超参数调优

深度学习模型的性能很大程度上受超参数的设置影响，超参数有学习率、批处理大小、卷积核大小、网络层数、隐藏单元数量等。由于数据分布复杂，手动调节这些参数非常耗时，很难找到全局最优解。目前主流的为自动超参数调优方法。网格搜索虽然简单直观，但是在高维参数空间中计算代价很高；随机搜索是在参数空间内随机采样，用较少的计算代价常常能得到比网格搜索更好的结果。

贝叶斯优化是更高效的策略，它建立目标函数的概率代理模型，利用之前的评估结果来指导下一次参数的选择，在尽可能少的尝试次数内找到最优的超参数组合。当轮机数据噪声较大的时候，应该使用合适的学习率和学习率衰减策略，可以使得模型在训练后期稳定的收敛到局部最优解。根据轮机振动信号的频率特性来设计卷积神经网络中卷积核的大小；对低频故障特征明显的部件，可采用较大的卷积核或者空洞卷积来增大感受野，提高特征提取效果。

（二）正则化技术

在船舶轮机故障诊断任务中，训练数据样本数量少、噪声大，很容易造成深度学习模型过拟合，即在训练集上表现很好，但是在未见过的测试数据上性能急剧下降。正则化技术可以抑制过拟合，提高模型泛化能力。

1.Dropout 技术通过在训练过程中以一定概率随机“丢弃”部分神经元，切断神经元间的协同适应关系，迫使网络学习更具鲁棒性的特征表示。这相当于训练了一个子网络集成，有效防止模型对特定训练样本的过度记忆。

2.L1 和 L2 正则化通过在损失函数中增加权重的范数惩罚项，限制模型参数

的绝对值大小，促使模型学习更稀疏或平滑的权重分布，从而降低模型复杂度。

3. 批量归一化虽然主要用以加快收敛速度，但是它也具有很强的正则化效果。每一层的神经元都会被标准化，使其均值、方差保持一定的水平上，解决了梯度消失的问题，减少参数初始化对于模型的影响。

4. 数据增强属于一种隐式正则化方法，对原始轮机信号加上高斯噪声、随机截断、时间伸缩、频域掩码等手段，人为增大训练样本的多样性，使模型可以适应实船上多变的噪声干扰和工况变化。

如上所述的深度学习模型优化技巧，可以概括为下表所示。

深度学习模型优化技巧一览表

技巧类别	具体方法	主要作用	示例
超参数调优	网格搜索 / 随机搜索	寻找模型最佳配置，平衡计算成本与效果	学习率、批处理大小、卷积核尺寸
	贝叶斯优化	更高效地探索超参数空间，快速收敛到最优	学习率衰减策略
正则化技术	Dropout	随机丢弃神经元，增强模型鲁棒性	防止模型对训练样本过度记忆
	L1/L2 正则化	限制权重大小，降低模型复杂度	促使权重稀疏或平滑，减少过拟合
	批量归一化	标准化层输入，稳定训练，缓解梯度问题	加快收敛，降低初始化敏感度
	数据增强	扩充训练数据多样性，提高泛化能力	添加噪声、随机截断、时间伸缩等
模型压缩方法	网络剪枝	移除冗余连接和神经元，减小模型大小	适用于资源受限的嵌入式设备
	权重量化	降低参数精度，减小模型体积，加快推理	32 位浮点数转 8 位定点数
	知识蒸馏	用大模型指导小模型学习，提升小模型性能	将复杂模型知识迁移至轻量模型

（三）模型压缩方法

尽管深度学习模型的性能很强大，但是由于深度学习模型的参数很多，计算量大，无法满足船舶现场嵌入式设备资源有限的情况。因此，在将智能诊断系统部署到算力有限的船载边缘计算节点上的时候，模型压缩技术就变得十分重要了。从上表可以看出，网络剪枝是一种直接有效的手段，它把网络里权重小或者对输出贡献不大的冗余连接、神经元去掉，在模型精度几乎不受影响的情况下，大大

减少了参数数量和计算量。

权重量化技术把模型参数由 32 位浮点数量化成 8 位或者更低的位数的定点整数，这样一来既减小了模型的体积，又加快了推理的速度，还节约了能耗。知识蒸馏技术是用一个大而复杂的“教师网络”去指导一个轻量级的“学生网络”。通过让学生网络模仿教师网络的输出概率分布或者中间层特征，可以将大模型学到的丰富知识迁移到小模型上，从而得到一个轻便高效的诊断模型。采用这些压缩方法以后，在船舶轮机控制室的工控机乃至传感器节点的微控制器上，就可以实时运行深度学习诊断算法，使轮机智能运维朝着边缘化、实时化的方向发展。

第四节 数据预处理与特征选择技术

船舶轮机系统在长时间运行过程中会产生大量的监测数据，这些数据中包含着设备健康状况的重要信息，但是也常常伴随着噪声、冗余和不一致。高质量的数据是构建高精度故障诊断与智能预警模型的基础，直接影响到后面算法学习的好坏以及泛化能力。本节会对面向轮机复杂工况的数据预处理过程进行详细的说明，对从原始信号中提取高辨识度特征的工程操作进行详细的阐述，并对利用科学的特征选择算法去除无用变量，最终构建出高效、鲁棒的智能诊断系统进行分析。

一、数据预处理方法

船舶机舱环境高温、高湿、振动大，传感器采集到的原始信号里常常混有各种干扰。直接用原始数据建模，模型将很难收敛，甚至会出错。数据预处理的核心就是清洗原始数据，提高数据质量，给特征提取和模型训练提供标准化的输入。

（一）缺失值处理策略

由于通信带宽忽大忽小或者传感器突然出现故障，轮机监测数据在传输、储存时经常会断断续续地丢失一些。如果简单地删除含有缺失值的样本行，对于高频采样的时间序列数据来说，很容易破坏信号的时序相关性，造成重要的故障演变信息的丢失。所以需要根据不同的缺失模式采用不同的填补方法，尽量保持原始信息及分布。对短时间点状缺失可以采用前后时刻观测值的线性插值或者样条插值，该方式符合数据局部平滑的假设，可以较好地恢复信号瞬时变化趋势。

长时间连续的缺失或者多个传感器同时出现缺失的时候，简单的插值法会引入较大的人为误差。此时，基于统计模型的填充方法有较好的适应性。根据该工况下历史数据的均值、中位数或者众数来填充数据，可以保持数据整体的统计特性，同时也可以完成数据的补充。更高层次的做法就是用相关性极大的冗余传感器数据来建立回归模型，比如利用排气温度各缸之间高度相关的特点，来推测缺失气缸的数值；或者采用 K 近邻算法，在样本空间里找到最相似的历史工况点并加以加权合成，从而保证填补后的值符合轮机热力学及动力学的物理规律。

（二）异常值检测方法

船舶轮机运行数据中，异常值主要是由于传感器漂移、电磁干扰、设备瞬态冲击引起，偏离正常分布很严重。如果不进行处理，将会给模型训练造成巨大的干扰，因此，剔除离群点对于数据集的净化十分重要。

常见异常值检测方法对比

检测方法	适用数据分布	优点	缺点
3σ 准则	正态分布	直观，易于实现	对非正态分布不适用，受均值和标准差影响大
箱线图法	任意分布	对异常值鲁棒性好，能发现极端值	仅考虑单变量，无法处理多维关联异常
基于密度的聚类	任意分布	能识别任意形状的簇及稀疏异常	对参数敏感，计算复杂度高
孤立森林	任意分布	高效，对高维数据表现好，无需先验知识	对正常点簇内稀疏异常可能不敏感

从上表可以看出，按照 3σ 准则利用统计学原理可以判断正态分布的参数，例如滑油压力、冷却水温度等稳态参数，超出均值加减 3 倍标准差的数据点一般被标记为可疑异常值加以修正。箱线图分析法则用四分位数间距来定义异常边界，对于非正态分布的数据具有较强的鲁棒性，可以较好地发现远离数据主体的极端值。

但对于多维耦合的复杂系统，单维度统计检测会失效，因为有些故障征兆是由多个参数联合异常引起的，但是各个单参数仍然在正常范围内。这时基于密度的聚类算法或者孤立森林算法，在高维空间中可以找到稀疏分布的离群点。孤立森林算法依靠随机切分数据空间，因为异常点出现的频率较低，所以大多数情况下能在较浅的路径深度就将异常点孤立起来。实际使用中必须对异常值和真实的

故障突变信号加以区分，一般会利用领域知识设定物理阈值，在剔除噪声的同时保证保留体现设备早期性能退化的重要突变特征，防止漏警的发生。

（三）数据标准化技术

轮机监测系统包含转速、温度、压力、振动等诸多物理量，各个参数的量纲及数量级相差极大。涡轮增压器转速高达数万转每分钟，滑油压力才只有几兆帕。由于数量级的悬殊差异，依靠距离度量的算法（支持向量机、K 近邻等）会被大数值特征主导，也会使神经网络梯度下降的收敛速度变慢。数据标准化技术对原始数据进行线性或者非线性变换，把数据转换成相同的数值区间或者分布上，消除量纲影响，使各个特征在模型训练的时候具有相同的权重。

最小最大归一化是将数据线性映射到闭区间 [0，1] 内，它保持了原始数据的线性关系，适合于对数据范围有明确要求的方法，但是对异常值敏感，个别极端值会使大部分正常数据的分布区间变窄。零均值标准化（Z-score 标准化）把数据转换成均值为 0、标准差为 1 的标准正态分布。此方法不限定数据取值范围，能很好地处理带有离群点的数据，也有利于 Sigmoid 等激活函数中的梯度传播。在深度学习中，批归一化技术应用得更加广泛，它对每一层的数据做了动态的标准化处理，很好地解决了内部协变量偏移的问题，加速了深层网络的训练过程，增强了模型稳定性。

二、特征工程实践

原始传感器数据虽然包含了设备状态的全部信息，但是维度高、信噪比较低，直接用做故障分类的效果通常不好。特征工程的主要内容就是用信号处理技术和领域知识，找出对故障模式敏感、对工况变化鲁棒的特征表示，达到降维提纯数据的目的。

（一）特征构造方法

特征构造是把原始的时间序列信号变成有意义或者有统计特征的指标。均值表示信号的静态分量；方差、均方根值表示信号的能量大小；峭度、裕度指标对信号中的冲击成分比较敏感，常被用来做轴承、齿轮早期点蚀故障的诊断。波形指标、峰值指标，可以反应振动信号波形的失真度。

频域特征构造用快速傅里叶变换把时域信号转换到频率域，得到重心频率、均方频率和各个频带的能量比。轮机各个部件出现故障时，往往会对应一些特定

的特征频率，比如转子不平衡就会引起基频幅值变大，不对中故障则会伴随倍频分量增加。通过构造各次谐波幅值比，可以很好地区分各种故障模式。时频域分析中采用了小波包变换、希尔伯特 - 黄变换，得到信号能量在时域和频域上分布的特点，如各个频带的小波包能量熵，对于非平稳信号瞬态故障特征的捕捉有独特之处，可以反映故障发生的时刻以及频率成分变化的规律。

（二）特征变换技术

监测维度增多，特征集中就无法避免地会产生信息冗余和多重共线性，从而引发“维度灾难”。特征变换技术就是把高维特征空间映射到低维子空间，减少数据量的同时保留主要信息。主成分分析是经典的无监督线性变换方法，它利用正交变换，把存在相关性的原始变量转换为一组线性无关的主成分，按照方差贡献率大小排列。前若干个主成分一般就能解释大部分的数据变异，从而大大减少模型的输入。

线性判别分析属于有监督降维方法，它寻找一个投影方向，使同一类内的数据尽可能紧凑，不同类之间尽可能分开，即最大化类间距离与类内散度之比，因此非常适合于分类任务。对存在广泛非线性流形结构的轮机振动信号来说，核主成分分析以及流形学习算法（局部线性嵌入、等距映射等）就具有更好的适应性。可以找出高维数据中曲率大的低维流形结构，抽取非线性故障的潜在特征，在低维空间内保持原始数据的局部邻域关系、全局拓扑结构。

（三）特征重要性评估

并不是所有的构造特征都能为故障诊断做出贡献，有些无关特征还会引入噪声。特征重要性评估就是衡量每一个特征对于预测目标所做出的贡献大小，以此作为后续特征选择的依据。基于相关性的评估方法通过计算特征与目标变量之间的皮尔逊相关系数或斯皮尔曼等级相关系数，来衡量二者的线性或单调相关强度，这种方法计算简单且直观。

1. 互信息或者信息增益：作为评估指标来度量特征包含的目标类别的信息量。互信息越大，说明该特征对消除目标变量不确定性所做的贡献越大，这种方法可以反映特征和故障之间非线性的关系。

2. 基于模型的评估方法，即使用集成学习算法（随机森林、梯度提升树等）在训练过程中自动生成各个特征的重要性。利用特征在决策树分裂节点处基尼指数下降量或者平均精度提升量，就可以得到特征的相对重要性排序。该方法考虑

到特征间相互影响的因素，使评价结果更加贴近模型真实的预测过程，有利于工程人员了解哪些物理参数对于诊断决策来说最重要。

三、特征选择算法

特征选择就是从原始特征集合中选出最优子集的过程，其目的是在不降低甚至提高模型精度的前提下，去掉无关紧要或者冗余的特征，降低计算复杂度，提高模型的可解释性。根据选择策略和模型训练结合的方式不同，可以分为过滤式、包裹式和嵌入式。

（一）过滤式选择方法

过滤式选择方法与后续的学习算法无关，它是根据数据本身的统计特性给特征打分排序，然后选取得分较高的特征组成子集。该方法计算效率较高，可以对大量的数据集进行初步筛选。单变量统计检验，比如卡方检验，F 检验等等，经常被用于衡量特征和类别标签之间的显著性差异，如果 P 值大于指定阈值的特征就会被认为是无关特征并被剔除。方差选择法是过滤手段中最基本的一种，直接剔除方差小于阈值的特征，方差过小的特征说明样本间差异很小，不能给分类提供有效的信息。

虽然过滤式方法速度较快，且能有效地防止过拟合，但是它的主要缺点就是没有考虑到特征之间的相互作用。一些特征单独看区分度不高，但是组合起来就很有鉴别力，相反有些高分特征之间存在严重的共线性问题，也就是信息重复。因此，在轮机故障诊断实际应用中，过滤式方法常被用作特征选择的第一道工序，用来迅速剔除明显无效的变量，把特征维度降到可控范围之内，为后续更加精细的选择做准备。最大相关最小冗余算法在选取与目标相关性大的特征的同时，惩罚和已选特征相关性大的特征，一定程度上克服了传统过滤法的不足。

（二）包裹式选择策略

包裹式选择策略把特征选择当作一个搜索寻优问题，用目标学习算法 (支持向量机、神经网络等) 的预测性能来作为特征子集的评判标准。该方法考虑了特征之间的相关性以及特征与模型之间的匹配度，一般可以达到比过滤式方法更好的预测精度。递归特征消除算法是其中的一种，它通过反复训练模型的方式，每次剔除权重最小的一个或者一组特征，直到达到设定的特征数量为止，用反向剔除的方法保留出对模型贡献最大的特征组合。

因为需要为每一个候选特征子集训练和评估模型，所以包裹式方法计算量非常大，特征维度较高时几乎无法进行穷举搜索。因此常和遗传算法、粒子群优化算法等启发式搜索算法结合进行随机搜索。用二进制串表示特征子集，把模型交叉验证准确率当作适应度函数，靠种群迭代进化去找最优特征组合。在船舶轮机故障诊断时，对于某一种类的复杂故障模式进行识别，包裹式策略可以得到最具有鉴别力的特征子集。虽然耗时较长，但它对提高系统最后诊断的准确性起着决定性的作用。

（三）嵌入式选择技术

嵌入式选择技术以过滤式高效和包裹式高精度为结合点，在算法训练过程中把特征选择过程嵌入进去。给模型优化目标函数添加正则化项，从而使得模型既能拟合数据又能实现特征稀疏。最出名的 L1 正则化（Lasso 回归），用回归系数绝对值之和来惩罚，让不重要的特征系数在训练时被自动缩减为 0，于是就完成了自动特征选择。该方法适合于高维稀疏数据的处理，可以较好地达到变量筛选的效果并且保证模型的泛化能力。

嵌入式选择树模型也被经常使用。决策树在构建的时候，每个节点的分裂实际上都是在进行特征选择。梯度提升决策树、XGBoost 等算法训练完毕后，可以直接得到各个特征在整个树模型中所占的比例。嵌入式技术相比包裹式方法不需要显式的特征子集遍历，大大减少了计算时间，而与过滤式方法相比，它又考虑了特征和模型之间的交互作用。在轮机智能预警系统开发过程中，用嵌入式方法可以实现特征的学习和选择，在在线学习、模型动态更新的情况下，还可以调整特征权重要素，来适应轮机性能随着时间的推移而漂移的现象。

第六章 智能预警系统架构设计

本章要分析船舶轮机故障诊断与智能预警系统总体架构。本文从分层架构体系的搭建、关键技术的选取两方面着手，以保证系统可以在复杂的海洋环境下可以稳定、及时且精确的运行，给船舶的安全航行提供稳固的技术支持。

第一节 预警系统总体架构

系统总体架构设计遵照高内聚低耦合的软件工程准则。考虑到船舶轮机设备运行环境的特殊性以及数据处理的复杂性，采用分层设计的思想，从而可以实现物理感知到应用决策整个链条的覆盖。

一、系统分层架构设计

按照物联网技术体系标准和船舶机舱实际工程需要，把预警系统分为感知层、网络层、平台层、应用层四个逻辑层次。各个层次之间利用标准接口协议来完成数据的交互以及命令的传递。

（一）感知层：数据采集与接入

感知层是整个智能预警系统的感知单元，主要是完成最基础、最重要的数据采集工作。在船舶轮机复杂的物理环境中，在主机、辅机、轴系以及各种泵浦设备上布置了大量的传感器。对于一艘现代化的超大型矿砂船（VLOC）或大型集装箱船，其机舱内传感器节点的数量通常超过 3000 至 5000 个（参考 DNV GL《 maritime sensor technology》白皮书），用以对温度、压力、转速、流量、液位、振动等多种物理量进行实时监测。考虑到机舱内环境温度可能高达 45℃至 55℃，且相对湿度经常超过 90%（IEC 60721-3-6 船用环境条件标准），感知层的硬件设备必须符合船级社认证标准（如 ABS、CCS 入级规范），防护等级通常需达到 IP66 或 IP67 以上，具备优异的抗干扰能力，以保证平均无故障工作时间（MTBF）不低于 10 万小时。

本系统除了传统模拟量、开关量传感器外，还集成了智能采集终端。这些智能终端通常采用 16 位或 24 位高精度 A/D 转换器，可以将非标信号在源端就转化为数字信号（参考 IEEE 1451.4 智能传感器接口标准），从而减少长距离传输中的信号衰减。

系统对不同的轮机设备采用的是异构数据融合接入的方式。对主机燃烧室工况，采用安装于气缸盖上的高频动态压力传感器采集示功图数据，其采样频率通常要求大于 10 kHz，甚至达到 50 kHz，以准确捕捉气缸内最高燃烧压力（Pmax）及燃烧始点（参考《船舶柴油机》及 SAE J1939 协议）。对于旋转机械的健康状况，使用压电式加速度传感器采集多维振动信号，其有效频率响应范围通常覆盖 0.5 Hz 至 10 kHz。在源端就对原始的物理信号进行了初步的调理和滤波，例如设置 50 Hz/60 Hz 陷波器以去除工频干扰，信噪比（SNR）一般要求优化至 60 dB 以上。感知层对接船舶上已有的报警监控系统接口，采用 RS-485 串口通信或者 CAN 总线、以太网侦听的方式获得设备运行状态参数，从而实现对全船轮机设备数据的全覆盖无死角感知。

（二）网络层：数据传输与交换

网络层属于感知层与平台层之间的关键数据传输动脉，肩负着把大量实时监测数据迅速且准确地传送至处理中心的任务。由于船舶内部空间结构的特殊性，金属舱壁对无线信号有屏蔽作用，所以系统主干网络采用工业级光纤环网 + 双绞线以太网的有线传输方式。这样的设计可以保证当任意一条链路出现物理故障的时候，能够达到毫秒级切换到备份路径的效果，从而保证数据传输不被中断。从现场总线角度来说，系统兼容控制器局域网络、过程现场总线等许多工业通信协议，很好地解决了不同品牌设备之间的互连互通问题。

根据船舶远洋航行时的离岸特点，网络层加入了边缘计算节点和船岸通信网关。船舶局域网中的数据用高速、低延迟的方式传送到船载服务器上。在需要船岸数据同步的时候，系统根据卫星通信链路带宽来对数据进行压缩、优先排序。关键报警信息和摘要统计数据有最高的传输优先级，保证岸基管理中心可以及时了解到船舶主要设备的运行状态；大量的原始波形数据保存在本地，等网络条件允许或者靠港之后再进行批量同步，从而在实时性需求和通信成本控制之间取得平衡。

（三）平台层：数据处理与存储

平台层类似智能预警系统的大脑，把各方的数据汇集起来清洗、整理、存储，再通过深入的分析挖掘，找出其中的规律。本层使用虚拟化技术，在加固的船载服务器上搭建高可用计算集群。平台层因为轮机设备产生的数据大部分是高并发时间序列数据，所以使用分布式的流式计算框架，每秒可以处理数万的数据点。数据进入存储系统之前，预处理引擎先做异常值剔除，对数据缺失用补零法填补，再做标准化处理，去除传感器漂移，信号传输途中数据振幅变化等造成的数据质量问题。

数据存储架构为混合型的，可以满足不同的数据访问需求。关系型数据库用来存放设备台账，传感器配置，报警阈值，用户信息这种结构化强关联的数据。对振动波形、温度趋势等大量的时序数据，用时间序列数据库压缩存储。这样存储大大降低了磁盘空间的占用率，同时又大幅度提高了历史数据的查询速度、回溯速度。平台层就是把机器学习模型运行环境整合起来，给上层应用提供故障诊断算法推理服务，也支持对故障诊断算法进行动态更新和在线演练，数据量变大之后，诊断逻辑也能不断改善。

（四）应用层：预警服务与展示

为轮机员、轮机长和岸基技术支持人员提供直观、易用、功能强大的人机交互界面。该层使用浏览器 / 服务器结构来开发，用户无需在终端安装专门的软件就可以通过船内局域网访问系统。应用层把底层复杂的算法模型、枯燥的数据流变成可视化的图表、仪表盘、三维模型，实时反映轮机设备运行状态。除常规状态监控外，其核心功能为智能预警，利用平台层推送的诊断结果以声光报警、弹窗提示、短信推送等多种方式分等级发出警报。

应用层给出故障根因分析报告以及维护建议，供船员做决策。当系统检测到气缸拉缸先兆、轴承磨损等故障模式时，除了在界面上突出显示异常部件外，还会把相关的技术手册章节、备件库存情况、以往维修记录联系起来，形成综合的处置建议方案。应用层支持移动端接入方式，巡检员可以用手持平板电脑在机舱内查看设备实时参数，也可以将巡检记录填写到系统里。

二、系统功能模块划分

在确定分层结构之后，系统根据业务逻辑把软件功能划分为四个独立又互相

配合的核心模块。各个模块之间用内部消息总线进行通信，保证系统的功能完整性以及良好的扩展性。

（一）数据采集与预处理模块

数据采集与预处理模块是系统信息的主要入口，其主要功能就是隐藏底层硬件的差异，给出统一的数据接入标准。本模块有众多的驱动程序库，可以支持Modbus RTU、Modbus TCP、OPC UA 和 NMEA 0183 等工业以及航海上常用的协议。关于采集策略，模块利用多速率同步采样，对温度、压力这些变化缓慢的参数采用低频采样来节约资源，对振动、瞬时转速这类快速变化的参数采用高频突发采样，从而保证可以捕获到故障发生时的特征信号。

数据质量直接决定了后续诊断的准确性，因此该模块内置了多级数据清洗机制：

1. 基于物理极值的范围校验：自动过滤超出传感器量程的无效数据，防止野值干扰算法模型。

2. 滑动平均滤波和小波去噪可以较好地将有用信号与背景噪声分开。即使在主机高速运转产生的强振动干扰下，也能较好地提取出特征信息。

3. 时钟同步校准功能，采用 NTP 协议实现各传感器数据的时间戳统一，这对后面分析多部件之间的耦合故障起到了非常重要的作用。

（二）故障诊断与预警模块

故障诊断与预警模块是本系统的“大脑”，用规则推理为主、机理模型为辅、数据驱动的混合诊断方法。模块里并行地执行若干个诊断任务，针对热工参数异常、机械振动故障、电气系统故障展开实时分析。对明显越限的故障使用快速反应的阈值比较逻辑；对复杂的渐变性故障用深度神经网络模型做趋势预测和模式识别。

该模块具有多维分析能力，可以发现单个设备的故障也可以发现系统的异常。像冷却水温度上升，滑油压力下降的时候，模块就会把它们当作冷却系统效率变差所造成的一连串反应来处理，而不是简单地当成某个传感器出问题。预警机制使用的是动态阈值，可以依据当前的航行工况（全速航行、机动航行、停泊）来自我调节报警值，减小误报率。该模块还可以自学习，当人工确认的误报或者漏报案例加入样本库后，就会触发模型再训练，使诊断精度不断提高。

（三）人机交互与可视化模块

人机交互可视化模块主要是为了给用户提供沉浸式、高效的使用体验。按照人机工程学原理来安排界面的设计，采用深色背景来匹配机舱控制室的光线环境，减少视觉疲劳。核心界面为分屏显示方式，左半部分是全船设备拓扑结构树图，中间半部为主机动态三维数字孪生模型，右半部分实时更新主要性能参数和报警列表。三维模型可以实现缩放、旋转、透视操作，可以直观的显示内部零件运行状况以及温度、压力分布云图。

为了方便历史数据的追溯，本模块提供强大的趋势分析功能，可以同时对多个参数进行对比，并且可以对波形放大缩小、频谱分析显示。用户可以自行定义报表模板，系统会自动创建日报、航次报告以及月度健康评估报告，且支持 PDF 或者 Excel 格式的导出。交互逻辑设计考虑到应急情况下操作的便利性，重要的功能都设置了快捷键以及一键式直接入口，保证紧急故障发生时轮机员能够最快的操作步骤获取最重要的信息。

（四）系统管理与维护模块

系统管理和维护模块用来保证软件平台的安全稳定，并且做配置管理。本模块建立了完善的用户权限控制体系，按照船员的职级（轮机长、大管轮、机工）给予不同的操作权限。只有高级别的用户才可以修改报警阈值、系统参数、执行模型更新等操作，普通用户只能查看和确认报警，不能对系统进行误操作。还会对每一个用户的登录操作和系统自动执行的命令进行详细的记录，生成不可篡改的审计日志。

本模块除了用户管理之外，还具有自检功能，可以对服务器的 CPU 利用率、内存占用率、硬盘使用情况、网络流量等进行实时监控。检测到软件服务出现异常或者硬件资源出现瓶颈的时候，该模块会自行尝试重启相关服务进程或者发送系统级警报。配置管理功能可在线修改传感器映射表、添加新的设备节点、升级诊断算法库等，使系统能够适应船舶设备改造升级的要求，从而增加软件使用寿命、减少维护费用。

三、关键技术选型依据

技术选型是否恰当，会直接影响到系统的性能发挥以及工程的可行度。本系统选型时，从技术成熟度、社区支持度、性能指标、海事领域适用性这四个维度

出发，最终选定如下核心技术栈。具体的选型依据以及优势见下表：

核心技术栈选型表

技术类别	具体技术	主要优势与应用场景
数据库技术	时序数据库：InfluxDB	高吞吐量写入，高效压缩存储，快速历史趋势查询，适用于海量高频时序数据。
	关系型数据库：PostgreSQL	强大的 SQL 兼容性，事务一致性，复杂查询优化，支持 JSON 数据，适用于结构化业务数据（如设备台账、报警记录）。
中间件技术	消息队列：RabbitMQ	基于 AMQP 协议，多种消息路由，持久化机制保障数据不丢失，流量削峰填谷，提高系统鲁棒性。
	内存数据库：Redis	微秒级读写速度，实时状态快照，用户会话管理，高频热点数据存储，支持发布 / 订阅实现实时报警推送。
开发框架	后端：Spring Boot	“约定优于配置”，简化企业级应用开发，内置容器，强大生态集成，跨平台，内存管理能力强。
	前端：Vue.js + ECharts	Vue.js：轻量级，响应式数据绑定，组件化开发，快速构建交互式单页应用。 ECharts：丰富工业图表类型，流畅动画，高效展示数据趋势。

（一）数据库技术选型

关于数据库，需要处理两大难题，即海量高频时序数据和复杂业务关系数据，所以采用时序数据库加关系型数据库的“双模”存储方式。专门用来存放传感器定时监测数据的时序数据处理系统。InfluxDB 具有很高的写入吞吐量，可以轻松应对每秒几十万个数据点的并发写入，其独有的数据压缩算法可以将存储空间压缩到原来的十分之一以下，很适合船载服务器有限的存储空间。它自带丰富的时序聚合函数，查询历史趋势的速度比传统数据库快两个数量级。

设备台账、报警记录、用户权限、维护日志等结构化的数据使用成熟的开源关系型数据库 PostgreSQL。PostgreSQL 以强大的 SQL 兼容性、事务一致性和复杂的查询优化能力著称，可以保证业务数据的准确性。尤其是对于 JSON 数据类型的支持，使得存储半结构化的设备配置信息变得非常灵活。动静分离、专库专用解决了大数据量的存储问题，又保证了业务逻辑处理的严密性，是目前工业互联网领域最好的实践之一。

（二）中间件技术选型

为了达到系统各个模块之间解耦以及异步通信的目的，中间件技术的选择就显得尤为重要。本系统使用高性能的消息队列 RabbitMQ 做数据传输总线。RabbitMQ 使用 AMQP 协议运行，有多种消息路由方式，可以保证感知层得到的

数据能可靠地传递给平台层处理模块。即使后端处理服务出现短暂的繁忙或者重启的情况，RabbitMQ 消息持久化机制也能够保证数据不丢失，起到流量削峰填谷的作用，从而提高系统的鲁棒性。

数据缓存使用 Redis 内存数据库。Redis 主要用在存储系统的实时状态快照、用户会话信息、高频访问的热点配置数据上。因为 Redis 所有的操作都是在内存中进行的，读写速度可以达到微秒级，对于满足人机交互界面的实时刷新起到决定性作用。Redis 的发布 / 订阅功能也被用来实现前端界面的实时报警推送，当后端诊断出故障时可以立即通过 Redis 通道推送给所有在线客户端，保证警情的零延迟发布。

（三）开发框架选择

后端服务使用的是基于 Java 语言的 Spring Boot 框架。Spring Boot 采用约定优于配置的思想，极大地简化了企业级应用的开发。它内置 Tomcat 容器、拥有 Spring 生态圈内各种功能组件 (比如 Spring Data，Spring Security 等)，使得微服务架构开发更加方便。Java 语言自身就有跨平台性，在不同的操作系统上都可以正常运行，并且具有较好的内存管理功能。因此，开发服务端程序时不受系统环境的限制，代码更新、功能扩展也更加方便。

前端展示层使用的是 Vue.js 这个渐进式的 JavaScript 框架，配合 ECharts 可视化库。Vue.js 具有轻量级、响应式数据绑定、组件化开发等特性，可以快速构建出交互性良好的单页面应用。ECharts 是由百度开源的一个图表库，它提供了大量的工业图表类型以及流畅的动画效果，适合用来展示大量轮机参数的变化趋势图。采用前后端分离的开发模式，既提升开发效率，又使前端界面可以独立于后端逻辑进行迭代优化，更好满足船员对界面美观度、易用性等个性化需求。

第二节 传感器网络布置方案

构建高效可靠的船舶轮机故障诊断和智能预警系统，其基础和基石就是底层数据的质量。传感器网络是系统的感知神经末梢，传感器网络的布置方案是否合理，直接影响上层诊断算法的准确率以及系统的响应速度。本节将从理论上确定关键监测点的原则入手，然后研究物理上传感器的选择和安装，最终得到一套适合于船舶复杂环境的数据传输拓扑结构，从而完成感知层的闭环设计。

一、关键监测点确定原则

监测点的选择并不是简单的数量堆积，而是一个系统工程理论的优化过程。在设计之初就要对轮机系统动力学特性、热力学循环进行深入分析，保证选择的测点能够最大程度上反映设备的健康状态，防止出现数据冗余导致的计算资源浪费。合理的布点策略是在故障捕捉能力和系统实施成本之间求得最佳平衡。

（一）基于故障模式分析

传感器布置的主要逻辑要同设备潜藏的失效机理联系起来。对船舶主推进系统以及重要的辅助设备实施详细的故障模式、影响和危害性分析之后，设计人员便可以识别出各种故障模式所表现出的物理征兆。以柴油机拉缸故障为例，气缸套壁温、冷却水出口温度是最早出现的预警信号；曲轴轴承磨损要监测滑油内金属颗粒浓度、轴承座振动烈度等。监测点应设置在故障信号传播路径上衰减小、特征明显的部位，保证故障刚开始出现时就能得到信噪比较高的异常信号。

单单知晓故障机理还不能完善布点方案，还要依照信号处理特性做细微调整。高频冲击故障（齿轮箱断齿、滚动轴承剥落等）时，振动传感器必须安装在刚性部位，即安装在轴承座或者齿轮箱壳体上，不能把振动传感器安装在盖板上，以防引起共振。流体系统泄漏检测要按照流体力学原理，在压力波动的波腹点或者流速变化敏感处设置压力和流量传感器。按照物理机理布点，从根本上保证了采集数据的可靠性，为后续特征提取、模式识别打下了良好的物理基础。

结合历史运维数据来完善布点方案也是一种有效的方法。通过同类型船舶或者同型号设备以往的故障记录，可以判断出某一部分的故障容易发生。对这些顽固的区域可以适当增加传感器的数量，也可以采用不同物理量的异构传感器进行多维监测。对经常出现喘振的增压器，在进、出口增加高频动态压力传感器，可以捕捉气流脉动的初期特征来定位故障。

（二）考虑设备重要程度

船舶轮机系统庞大复杂，各类设备对船舶航行安全和任务完成的权重不同，所以传感器网络的布置必须遵循分级分类的原则。直接影响船舶动力输出和航行安全的主机、主发电机组、舵机等设备，应该采用全方位、高密度的监测方案。不仅要检测温度、压力这些常规参数，还要加入振动、油液质量、热成像这些高级检测手段，打造一个全面的感知系统，保证性能退化的一点细微变化都能被及

时察觉。

二类重要的辅助设备，比如燃油分油机、空压机、海水泵等，它们的故障不会立即导致船舶停航，但是会影响船舶的持续运营能力。对于该类设备的监测点设置，应该侧重于运行效率以及主要磨损部件的状态监测。一般选择关键的输入输出参数及主要运动部件的振动幅值进行监测，这样既可以保证设备处于良好的工作状态，又可以控制监测系统总成本。此时的监测策略就会从全时域实时监测转变为以状态监测为主、状态维持保养为辅。

对于非关键的三类设备，如生活污水处理装置、普通通风机等，传感器布置应坚持极简原则，主要对这些设备的启停状态以及一些基本的运行参数进行监测，甚至可以采用巡检加便携式仪器测量的方式代替固定的在线监测。

分级布点策略表现在传感器数量的差别上，也表现在采样频率、数据传输优先级等各方面。核心设备数据需要微秒级同步采集传输，辅助设备数据更新频率可以降低，在有限带宽内保证关键任务数据优先传输。

（三）兼顾经济性与可行性

工程造价、维护成本等现实的限制不能被忽略。高精度工业传感器及信号调理模块和特种电缆价格高，整个系统无死角覆盖从经济上来讲不具有可行性。设计时必须做详细的效费比分析，判断每一个新增监测点的诊断价值是否可以覆盖其全生命周期成本。对于可以利用软测量技术或者热力学模型推导出来的参数，应该优先选择虚拟传感器技术来减少物理硬件投入、降低系统硬件复杂度和故障率。

现场安装的可行性也是布点方案的又一个制约因素。船舶机舱空间狭小，管路纵横交错，高温、高湿、油雾弥漫的环境非常恶劣。一些理论上的最佳测点位于设备的内部深处或者难以触及的狭缝之中，这样会对传感器的安装、布线以及日后检修维护造成很大的麻烦。如果更换一个传感器必须拆卸很多周围的装置，那么它的应用价值就会大大降低。所以布点位置的选择要以人为本，人机工程学考虑进去，留有足够的操作空间，不能选择极端高温或者强腐蚀的地方，保证传感器本身使用寿命。

布线施工难度也应当考虑进去。信号传输线缆需要穿水密舱壁、绕高温排气管，线缆过长会造成材料与施工费用增加，而且还会出现电磁干扰问题，从而导致信号质量下降。方案设计中应尽可能优化线缆路径，使用现有的电缆架，并在

旋转部件、难以布线的死角处用无线传感器节点补充有线网络。根据技术要求、经济预算、现场施工条件来制定满足诊断要求又可行的传感器布置方案。

二、传感器类型与选型

确定监测位置之后，选择合适的传感器种类是保证数据准确性和系统耐久性的重要环节。船舶机舱特殊环境需要传感器除了有好的计量性能之外，还要有很强的抗干扰能力和环境适应性。选型过程中要对照被测参数的动态范围、频率响应、环境耐受等级，保证硬件层面的可靠。

（一）振动传感器选型指南

振动信号含有丰富的机械状态信息，是做旋转机械故障诊断的第一个参数。由于船舶低速柴油机转速低、往复惯性力大，所以在选择振动传感器时应考虑其低频响应。普通压电式加速度计在低频段存在衰减，不能很好地检测低速重载时的结构松动、不对中等信号。因此，应选择低频增益型的压电传感器或者基于MEMS 技术的电容式加速度计，使传感器的工作频率下限可以覆盖到主机和轴系的基础频率。灵敏度要适应被测对象的振动幅值，灵敏度过高会导致信号削波失真，而灵敏度过低会造成微小故障的特征被噪声掩盖。

传感器的封装形式以及安装方式直接影响信号传递的效率。高温高湿的机舱里，只能用全封闭不锈钢外壳、防护等级至少为 IP67 的工业传感器。对于安装在增压器或者排气管附近的传感器，需要特别注意其耐温性，必要时可以选用电荷输出型传感器并加装远程电荷放大器，使敏感元件与高温区热隔离。为了从源头上获取宽频带、高保真的原始振动波形，安装方式上应优先采用螺柱刚性连接，不能使用磁力座或者粘接方式造成的信号高频损失和安装共振。

对于齿轮箱、轴承座等重要的部位，单轴传感器无法全面反映其空间运动轨迹。此时采用三轴一体化加速度计同时采集垂直、水平、轴向三个方向的振动分量。多维数据融合分析可以更加准确的识别出转子不平衡、不对中、轴承保持架损坏等复杂的故障模式。选型时还要注意三轴传感器各轴向之间的横向灵敏度干扰指标，保证各个通道的数据独立、纯净，为后面轴心轨迹分析、全息谱图绘制提供可靠的依据。

（二）温度传感器应用要点

温度是最能直接反映热力设备运行状态的参数。船舶轮机系统测温范围广，

从机舱环境常温到排气管内几百摄氏度高温。冷却水、滑油等流体介质的温度检测一般采用铂热电阻。该类传感器线性度好、稳定性高，三线制或四线制接法可以消除长距离传输导线电阻的影响，实现高精度的温度测量。保护套管的材质要按照流体介质的腐蚀性来选，海水管路可以选钛合金或者特种不锈钢。

对于气缸排气温度、涡轮进出口温度这些高温且变化剧烈的测点，还是热电偶更合适。K 型热电偶由于量程宽、成本低而被广泛使用。但是选择热电偶时要注意其时间常数。为了捕捉燃烧恶化或者气阀泄漏所造成的温度瞬时变化，应该使用细径铠装热电偶或者露端式热电偶，以减小热惯性、提高动态响应速度。同时使用具有冷端补偿功能的变送器或输入模块，消除环境温度变化带来的影响，得到绝对温度值。

轴承温度监测时由于轴瓦空间小、响应速度要求高，一般用微型封装贴片式或埋入式温度传感器。安装时一定要使传感器的端面与被测金属表面紧密接触，必要时用导热硅脂填充小间隙，减小接触热阻。

为了防止剧烈振动引起引线断裂，传感器引出线应有良好的抗疲劳性，并做好相应的固定和应力消除。对高压电机绕组等特殊部位，还要使用光纤光栅温度传感器，利用其固有的抗电磁干扰、高绝缘特性，对高压部位做本质安全监测。

（三）压力传感器安装规范

压力检测（燃油喷射压力、气缸爆发压力、进气压力、流体管路工作压力等）是判断热力循环效率、流体系统是否正常的依据。静态或者准静态的压力测量一般采用压阻式或者电容式压力变送器，输出为工业标准信号，抗干扰能力强。选型时不仅要考虑量程和精度，还要考虑过载保护。船舶管路系统经常出现水锤效应或者压力脉动，传感器的耐压极限要至少比工作压力大 1.5 倍以上，这样才能保证瞬间冲击不会造成膜片发生永久变形。

气缸压力、燃油喷射压力属于高频动态压力，它们的波形特点可以直接体现出燃烧的好坏以及喷射的情况。监测这些参数需要高温动态压力传感器，一般采用压电效应。由于传感器端面与高温燃气直接接触，因此传感器端面必须具有非常好的耐热冲击性，或者采用水冷式适配器对传感器进行冷却保护。传感器膜片应与燃烧室壁面齐平，不能产生空腔通道，防止出现通道效应造成压力波振荡、失真。同时安装力矩一定要严格按照厂家的规定来执行，如果过紧会造成壳体变形影响灵敏度，过松则会造成泄漏甚至发生安全事故。

测量粘稠介质（重油）或者含固体颗粒介质（污水）时应该使用平膜片式结构，以防止引压孔堵塞。对脉动较大的管道（往复泵出口等），在传感器前端加装阻尼器或者缓冲管（猪尾管），减小压力尖峰，防止对敏感元件造成损害。所有压力传感器都应装有根部阀组，以便在不停机的情况下进行零点校准、排气排污或更换。连接时使用屏蔽双绞线，屏蔽层在控制柜一端单点接地，减小地环路电流带来的噪声。

三、网络拓扑结构设计

大量的传感器产生的异构数据要经过高效、稳定的网络传送到中央处理单元。网络拓扑结构设计的优劣，不但是通信带宽、延迟的决定因素，也是容错能力、扩展性的直接体现。由于船舶机舱电磁环境复杂、空间封闭、对可靠性要求高，所以网络架构一般采用分层、冗余的思想。

（一）总线型网络结构

总线型拓扑是工业现场使用最广泛的连接方式，其特点是所有的传感器节点都是接到一条公共的主干通信线缆上。大大简化了布线工程，减小了线缆的重量和占用空间，对于对线缆敷设成本敏感的船舶制造而言有明显的优势。常用的现场总线协议有，CAN 总线、基于 RS485 的 Modbus RTU、Profibus 等。这些成熟的、稳定的协议可以完成长距离传输，适合于机舱内温度、压力变送器等数据采样率要求不高的情况。

总线型结构的潜在风险就是主干线路出现单点故障。只要总线电缆的某一处出现断路或者短路情况，整个网段的通信就会陷入瘫痪状态。为规避以上风险，在重要的监测系统中要采用双冗余总线。物理上两条总线要走不同的线路，以防火灾或者机械损伤同时破坏两根线缆。从逻辑上来说，数据采集单元要具有自动切换的功能，当检测到主总线通信超时或者误码率超标的时候，能无缝切换到备用总线，保证数据传输的连续性。

信号反射、阻抗匹配是总线使用时必须完成的工作。传输距离增加，波特率变大时，信号在电缆末端产生的反射波会对正常的通信造成很大的干扰。因此必须在总线上并联一个 120 欧姆的终端电阻来吸收反射能量。挂载节点较多的长总线还要考虑信号衰减问题，根据需要在适当的位置增加中继器或者集线器对信号进行整形放大，保证末端节点稳定通信。

（二）星型网络结构

星型拓扑以点对点的方式将每一个传感器或者局部采集模块连接起来，再用专门的线缆将其直接与中央交换机或者数据集中器相连。该结构最大的优点就是具有很强的故障隔离能力以及独享带宽。某一支路的线缆故障只会导致与之相连的一个传感器受到影响，不会影响整个网络，因此故障定位和排除非常简单快捷。对于振动、声发射这些高频动态信号，因为它们的数据量大而且对实时性要求非常高，共享总线很难达到所需的带宽，星型连接能够给出畅通无阻的专用数据通道，从而保证原始波形的完整传输。

星型结构的主要缺点就是布线量急剧增加。数百根线缆集中到集控室不仅加大了施工难度和桥架负荷，而且增大了由于线缆堆积密集而引起的火灾风险。为了克服这个矛盾，现在大多数的船舶监测系统都使用分散化的星型结构。即在机舱设备附近设置若干远程数据采集单元或区域控制箱，传感器通过短距离星型结构接入 DAU，DAU 完成模数转换和初步的数据打包之后，再通过高速光纤或者工业以太网汇入上层网络。

光纤通信对于星型网络的主干线路起着很重要的作用。机舱内大功率电机、变频器、发电机等在工作的时候会产生强烈的电磁干扰，传统铜线容易因为感应噪声造成数据出错。光纤天生就具有抗电磁干扰、绝缘性好、传输频带宽的特点，可以穿越高噪声区而不会受到污染。采用光进铜退的方式，用光纤构成星型网络的骨干，既可保证高速大容量的数据传输，又可以提高整个系统的抗干扰鲁棒性。

（三）混合型网络结构

为了综合利用总线型和星型结构的优点，同时适应船舶智能化的趋势，目前主流的为混合型分层网络结构。顶层用高速冗余的工业以太网（一般采用环形结构）把驾驶台、集控室和各个主要区域的控制站连接起来，形成信息高速公路，传输处理过的特征数据、报警信息和控制指令。环网结构有自愈功能，当环路中的某段链路断开的时候，数据流可以瞬间反向传输，保证全船监控网络的生存能力。

中间层用机旁远程数据采集站作为节点。在采集站内或者其下行链路中，根据传感器的不同采用不同的拓扑。对温度、压力等缓慢变化的参数，采用 Modbus 等现场总线串行连接，节省端口和布线；对振动、缸压等宽带高频信号，直接接入采集卡高速通道，采用星型结构。分层异构设计可以解决高频大数据的

吞吐瓶颈，也能有效地控制低频海量测点的接入成本，从而实现系统性能和总造价的全局最优。

混合网络传感器部署示例表

设备类型	传感器类型	拓扑结构	传输方式	实时性要求
主机（缸压、振动）	压电式动态压力、三轴加速度计	星型	高速光纤 / 工业以太网	微秒级
辅机（温度、压力）	铂热电阻、压阻式压力变送器	总线型	Modbus RTU	秒级
艉轴管（温度、振动）	无线温度、无线加速度计	无线网状网	无线多跳	分钟级
舵机房（角度、扭矩）	角度编码器、扭矩传感器	星型 / 总线型	工业以太网 /CAN 总线	毫秒级

根据表中的信息可以得知，伴随着无线传感技术的发展，混合网络中已经逐步把无线网状网当成了有线网络的补充。布线困难的艉轴管、舵机房等处或者需要临时增设监测点的地点，使用低功耗无线传感器节点进行布置。节点之间自动组网，数据通过多跳方式传送到离它最近的有线网关。有线主干加无线末梢的组合方式使整个系统变得很灵活，可扩展性强，能适应船舶全生命周期中不断变化的监测需求，为泛在感知智能机舱网络打下了良好的基础。经过这样细致的混合拓扑设计之后，从底层感知上升到高层决策的数据链条就变得畅通无阻了。

第三节 数据采集与传输系统

本节主要阐述怎样构建高可靠、高精度的船舶轮机状态监测底层结构，重点说明从物理信号到数字信号的技术实现方案。该系统属于故障诊断平台的神经末梢与传输中枢，它的稳定与否关乎上层诊断算法是否有效以及预警是否及时。因此在设计时就必须考虑船舶机舱高温、高湿、强电磁干扰等特点。

一、数据采集终端配置

数据采集终端是轮机物理状态和数字世界之间的桥梁，它的主要工作就是高保真地采集振动、温度、压力等各种物理量。从采集硬件核心指标、信号预处理机制、前端智能处理单元设计这三个方面来保证原始数据质量。

（一）采集卡选型与参数

船舶轮机设备特别是柴油机、增压器等旋转设备的故障特征频率范围很广。因此选择采集卡的时候要在采样率、分辨率、动态范围之间找到一个最佳的平衡点。由于轮机轴系和轴承的故障信号中常常包含高频冲击成分，因此采集卡必须要有足够高的采样频率，一般要求采样率至少要比被测信号的最高分析频率高2.56倍以上。工程中为了能采集到微弱的早期故障特征，应选择可以同步采样的多通道采集卡，单通道的采样频率要大于等于50KHz，防止产生混叠导致信号失真。

ADC的分辨率越高，系统对于微小信号变化辨识度就越高。对轮机振动信号这种动态范围很大的物理量来说，12位或者16位的采集卡对于强背景噪声下的微小故障冲击常常束手无策。因此在系统设计时应采用24位高精度模数转换器和低噪声前置放大器，使动态范围达到110分贝以上。高分辨率配置可以监测到大幅度的结构振动，还能分辨出轴承剥落初期产生的微伏级高频脉冲信号，给全生命周期故障追踪打下坚实的硬件基础。

除转换性能之外，在船舶电气环境里，采集卡的通道隔离特性就显得十分重要。船体结构比较复杂并且存在大量的变频设备，共模干扰现象比较严重。所采集到的卡需要具备通道之间相互隔离的功能，它的隔离电压应该超过1000伏，这样才能切断地环路的干扰，防止由于电位差引起的测量误差或者硬件被损坏。同时采集卡需要板载缓存，在操作系统响应慢或者总线瞬间繁忙的时候，可以临时存储一些数据，保证连续监测时数据流不能丢失。

（二）信号调理电路设计

原始传感器的输出信号常常带有各种噪声，其幅值、阻抗特性也不同，不能被模数转换器直接识别。因此需要设计出性能优良的信号调理电路。本电路的主要功能就是放大、标准化信号。由于压电式加速度传感器输出的是电荷信号，因此需要电荷放大器将其转换成低阻抗的电压信号。放大电路应采用低漂移、低噪声的运算放大器，设置多级可调增益电路，适应不同工况下信号幅度的巨大变化，使输出信号一直保持在采集卡量程的最佳范围内，充分发挥量程精度的作用。

抗混叠滤波在信号处理中占有很重要的位置。信号在进入模数转换器之前，先经过一个模拟低通滤波器，目的是滤掉高于奈奎斯特频率的高频噪声，防止高频干扰信号折叠到基带频段，产生伪频。设计时常常采用巴特沃斯或者切比雪夫

特性的有源滤波器，阶数一般取四阶或以上，以达到陡峭的截止特性。滤波器截止频率要设计成可编程控制，以适应不同的监测对象（低速主机、高速增压器等）来调节通带范围，保留有效的故障特征信息，抑制带外噪声。

因为船舶机舱电磁环境比较复杂，所以调理电路的 EMC 设计要加大。输入端要安装有瞬态电压抑制二极管和气体放电管构成的防雷击、过压保护电路，以防感应雷或设备启停所引起的浪涌电压把后端敏感元件给破坏掉。电路板设计要严格遵循高频电路布线原则，模拟地和数字地要严格分割，采用单点接地，关键信号线要用屏蔽层包裹，尽量缩短走线长度。电源模块可以采用宽输入电压的隔离型直流变换器，并且配置多级 EMI 滤波器来阻止电源线带来的传导干扰，保证调理电路在电压波动大的船电网络中稳定工作。

（三）嵌入式系统应用

随着微电子技术的发展，将数据处理能力前移到采集终端已经是一种趋势，这样可以减轻网络传输的压力，加快系统的响应速度。嵌入式处理器一般采用微控制器加现场可编程门阵列的异构结构。现场可编程门阵列利用其并行处理的特点，完成高速多通道数据同步采集、数字滤波、快速傅里叶变换等计算密集型任务，在毫秒级内完成特征提取。微控制器完成的是逻辑控制、网络通信协议栈运行以及与上位机交互管理等任务。两者依靠高速内部总线来共同完成数据采集和初步分析的实时化。

嵌入式系统软件架构的好坏，决定着采集终端是否稳定，智能程度如何。底层一般使用抢占式任务调度的实时操作系统，保证数据采集任务具有最高的优先级，防止因为系统资源被其它任务抢占而造成采样中断。应用层软件把很多智能算法集成在一起，比如：

1. 自适应阈值触发算法：根据轮机当前转速、负载工况自动调整数据记录触发门限，只在出现异常波动或者某个工况发生变化的时候才开始高频存储，从而节省存储空间。

2. 传感器状态自检程序，周期性的对传感器回路的阻抗变化和偏置电压进行检测。出现断路、短路或者松动的情况时，马上向总控中心发送状态报警信号，防止错误的数据干扰诊断系统。

3. 数据压缩与加密模块：用无损压缩编码技术对采集到的原始波形数据进行压缩，以减少传输带宽占用；同时使用工业级加密标准对数据包进行加密，保证

船舶运行数据的安全性。

二、数据传输协议选择

在船舶内部复杂的环境下，搭建一条高效率、稳定、抗干扰能力强的数据传输通道就显得十分重要。本部分对各种传输技术进行了对比，根据不同数据流选择最合适的通信载体，形成以有线和无线相结合、实时和高带宽相结合的混合传输网络。

（一）有线传输协议比较

船舶机舱金属结构密集，空间封闭，有线传输因为其高可靠性和抗干扰强，依然是船舶机舱核心监测数据传输的主要方式。RS-485 总线属于经典的工业通信标准，它采用差分传输方式，具有较好的抗共模干扰能力，因此被广泛地应用于温湿度、压力等低频缓变信号的采集网络里。使用双绞屏蔽线传输，RS-485 通信距离可达千米以上，支持多节点轮询，接线施工较简单。半双工的通信模式、较低的波特率限制了它在高速振动波形数据传输上的应用，一般只作为辅助监测参数传输的链路。

控制器局域网络总线技术起源于汽车行业，由于它具有很好的错误检测能力以及多主通信的特点，在船舶轮机控制与监测中占有重要的位置。CAN 总线使用非破坏性位仲裁技术，可以保证高优先级的报警信息无延迟地获得总线控制权，适合传输对实时性要求很高的报警状态字和重要控制指令。其硬件层就带 CRC 和自动重发，数据传输误码率很低。建立轮机监测网络时，常把分布在各柴油机缸上的采集模块用 CAN 总线级联起来，组成高可靠的底层控制网络。

Modbus 协议是应用层协议的通用标准，一般工作在 RS-485 物理层或者以太网物理层。在船舶系统中，为了使不同厂家、不同年代的设备可以互相通信，Modbus RTU 和 Modbus TCP 协议起着非常重要的作用。具体实现中需要考虑到当节点较多时，采用 Modbus RTU 的主从问答方式会导致巡检时间过长，不能满足瞬态故障检测的要求。因此，对关键设备的高频监测一般采用基于以太网的 Modbus TCP 或者自定义的高效的二进制协议，减少协议头部的开销，提高有效数据的吞吐量。

下表概括了常用有线传输协议的主要特点和应用场景：

有线传输协议对比表

协议名称	物理层	典型拓扑	主要特点	适用数据量
RS-485	差分对（双绞线）	总线	抗共模干扰强、长距离、多节点、半双工	低频缓变信号、辅助监测参数
CAN 总线	差分对（双绞线）	总线	纠错能力强、多主通信、非破坏性仲裁、硬件 CRC	实时报警、控制指令、少量数据
Modbus RTU	RS-485	主从	工业通用应用层协议、问答式	中低速、小数据量
Modbus TCP	以太网	星形	工业通用应用层协议、TCP/IP	中高速、中小数据量
工业以太网	以太网（光纤 / 铜缆）	星形、环形、线形	高带宽、全双工、实时性、冗余性	大数据量、振动波形、视频、融合数据

（二）无线传输技术应用

虽然有线网络可靠性高，但是由于船舶机舱内部空间狭小，且存在大量交叉的管路，铺设大量的线缆进行施工不仅施工难度大，而且成本较高，后期的维护也十分麻烦。无线传输技术是有线网络的延伸，可以处理一些非重要的、临时的、移动的监测节点，也可以实现人机交互。ZigBee 技术由于低功耗、自组网等特点，很适合用来建立大范围的无线传感器网络。机舱环境比较复杂，ZigBee 节点会自动找寻最佳的传输路径，形成网状拓扑结构，就算某个节点被遮挡，数据也能绕道而行，网络的鲁棒性得到很大的提升。

LoRa 技术具有远距离、低功耗、强穿透等特点，比较适合用在跨舱室或者信号遮挡严重区域的传输数据。在多级甲板之下，利用 LoRa 可以实现底舱和集控室直接通信，不需要使用大量的中继器。传输速率不高，不能传输原始的振动波形，但是传输温度趋势、液位状态、开关量报警等小数据量的信息已经完全足够了。部署的时候，要合理安排频段和扩频因子，避开船舶通信导航系统的频段，防止互相干扰。

WiFi 技术一般用在需要大流量数据传输的地方，如机舱视频监控数据回传或手持诊断终端与服务器的数据同步。工业级 WiFi 模块要支持快速漫游，保证巡检人员在机舱内移动的时候连接不中断。由于机舱金属舱壁的屏蔽作用（法拉第笼效应），无线信号的多径衰落非常严重，所以必须通过现场勘测，合理布置定向天线和无线接入点，消除信号盲区。同时从网络安全的角度出发，采用严格的 MAC 地址过滤以及 WPA3 认证方式，避免非授权设备接入船舶控制网络。

（三）工业以太网方案

智能船舶大数据量传输需求爆发式增长的时候，传统的现场总线已经不能满足全船数据融合的要求。工业以太网由于带宽大、全双工通信、易于集成等优点，正在逐步取代轮机监测系统的总线网络。工业以太网与普通的商用以太网不同，它采用实时通信协议（PROFINET、EtherCAT 等）来解决由于标准以太网 CSMA/CD 机制造成的传输时间不确定的问题。轮机监测系统的主干网一般采用千兆或者万兆光纤环网结构，利用光纤的抗电磁干扰特性以及环网介质冗余协议，在发生单点断裂的时候可以在 50 毫秒内完成自愈重构，保证数据传输不断开。

工业以太网交换机的选型要符合船级社认证标准，宽温工作范围和高等级防护外壳。交换机应该支持服务质量策略，对不同的数据流做好优先级区分。以涉及主机安全保护的紧急报警数据设置成最高优先级，振动波形数据设置成次高优先级，普通状态巡检数据和视频监控数据设置成普通优先级为例。经过流量整形之后，即使网络突然出现拥塞的情况，重要的控制数据依然可以及时到达。

提高系统的可靠性，工业以太网方案一般会采用双网冗余。数据采集站采用双网卡接入两个物理隔离的交换机网络中，系统软件利用链路聚合或者并行发送接收的方式来实现热备冗余。本架构既提升了带宽利用率又消除了网络单点故障的风险，为无人机舱、远程运维系统打下良好的底层通信基础。

三、数据同步与时间戳

多源信息融合的故障诊断系统，数据时空一致性为分析推理奠定了基础。不同的传感器、不同的采集节点没有统一的时间基准，就可能造成因果关系倒置或者特征关联错误。本部分主要讲述全系统高精度同步的方法、时间校准技术体系、保证数据完整传输的方法。

（一）多源数据同步方法

轮机故障诊断一般要综合利用振动、转速、瞬时角速度、温度和油液分析等各种数据，这些数据来自于不同的采集模块，采样频率也相差很大。多源数据同步关键之处在于统一各个数据源的采样时钟，或者建立起准确的时间映射关系。对于同一采样站的多通道振动信号，一般使用硬件同步触发线将各采集卡的控制端连接起来，由主卡发出同步脉冲，从卡在接收到脉冲的同一时钟周期内开始模数转换，这样可以保证各通道的相位差非常小，这对于轴心轨迹合成等对相位敏

感的分析非常重要。

不同物理位置的采集节点不能仅依靠硬件连接来触发。此时主要使用基于网络协议的软同步或者混合同步方案。在系统设计时可以采用全局时钟为基准的同步采样方式，即各采集节点在本地保存一个高精度虚拟时钟，并事先设置好统一的绝对时间采样时刻表。在本地时钟达到预设时刻的时候采集。为了抵消晶振的温漂累计误差，要定时对本地时钟进行校准。

异构数据融合的时候，还要解决非等间隔采样的数据对齐问题。转速信号是脉冲计数的非等时数据，振动信号是等时间间隔采样数据。为了进行阶次分析，需要使用插值算法或者重采样算法，将时域振动信号映射到角域上，实现转角同步。该同步方式可以有效地消除转速波动造成的频谱模糊，使变速工况下得到的故障特征更加准确。

（二）时间校准技术

实现以上分布式同步的前提就是高精度全网络时间校准。普通网络时间协议由于软件协议栈处理的不确定性，其同步精度一般在毫秒级，不能满足高频振动相位分析的要求（1 微秒的误差会对高频信号的相位造成不可忽略的影响）。因此本系统选择 IEEE 1588 精密时钟同步协议。PTP 协议利用物理层硬件打时间戳，排除了操作系统调度和协议栈处理带来的抖动，局域网内可以达到亚微秒级的同步精度。

整个系统架构中，设一台高精度的 PTP 主时钟服务器作为全船的时间基准源。该服务器接收北斗或者全球定位系统卫星授时信号，得到协调世界时后作为主时钟向网络中所有的从时钟节点发送同步报文。节点通过往返时间差和时钟漂移量来调节本地时钟频率和相位，使之与主时钟同步。卫星信号丢失时，主时钟服务器里的高稳恒温晶振能维持一段时间的守时精度，保证系统时间基准的连续性。

除了网络校时，对于不能运行 PTP 协议的低端传感器节点或者无线节点，可以采用数据到达时间戳修正策略。即当数据包到达网关或者汇聚节点时，在网关处加上高精度的时间戳，再结合预估的传输延迟做回溯修正。尽管这种方法的精度没有 PTP 高，但是对温度、压力等缓变参数的趋势分析是足够的，从而建立起了一个分层级、分精度的全系统时钟同步体系。

（三）数据完整性保障

数据从采集端传送到服务器过程中会由于网络抖动、电磁干扰、设备复位等

因素造成数据包丢失或者损坏，破坏数据的完整性。因此必须在传输层的各个环节设置严格的校验和保护手段。数据链路层用以太网帧的循环冗余校验码丢弃错误帧；在应用层自定义协议中加入序列号字段和数据包长度校验，接收端通过检查序列号的连续性判断是否有丢包。

针对船舶网络可能出现的瞬时中断，系统设计了多级缓冲与断点续传机制：

1. 采集终端缓存，当网络连接断开的时候，采集终端自动把数据存入本地的非易失性存储器（SD 卡或者闪存）。

2. 网络恢复续传指网络恢复之后，终端主动发起重传请求，按照时间戳顺序把缺失的数据块发给服务器。

3. 服务器端重组：服务器端设置一个滑动窗口，用来重组乱序到达的数据包，保证存入数据库的时间序列严格单调递增。

为了避免系统长时间运行过程中由于软件异常造成的数据静默丢失，即系统认为已经采集到数据但是实际上没有，引入了心跳保活、数据流监控机制。采集终端定时发送心跳包报告自身状态，如果服务器在规定时间内没有收到心跳包或者数据流量低于预警值，就会立即启动系统自愈程序，尝试远程复位采集进程或者重启终端设备，并向运维人员发出故障警报，从而形成数据传输的闭环可靠保障。

第四节 预警系统软件平台设计

本节重点分析船舶轮机故障诊断及智能预警系统软件平台的设计方案，从底层架构模式选择、核心功能模块算法实现、前端用户交互界面设计原则三方面入手，希望可以建立一个高可靠、低延迟、易扩展的智能化软件生态。

一、软件架构设计模式

软件架构是整个系统的脊梁，软件架构的好坏直接影响到预警平台的稳定、可维护以及未来的发展。船舶轮机系统工况复杂、数据流大，本系统在充分考虑各种先进架构模式的基础上，构建起一种既能满足边缘计算需求、又能与云端协同工作的混合型技术底座。

（一）分层架构模式

分层架构模式成了本系统软件逻辑组织的基础。它从纵向上把系统分为职责清晰、界限分明的逻辑层，很好地实现了关注点分离。在软件工程度量中，这种严格的分层架构可以将模块间的耦合度降低 30% 至 50%（参考《软件工程：实践者的研究方法》），大大降低了各个功能模块之间的耦合度。表现层主要是同轮机员交互的部分，为了保证大量的数据刷新仍然可以流畅地显示在用户界面上，系统通常要求界面的帧率（FPS）稳定在 30 至 60 之间，并且将关键报警数据的界面响应时间控制在 200 毫秒以内，符合人机工程学对实时监控系统的响应要求（参考 ISO 9241-110 标准）。

业务逻辑层是系统的中心，里面包含所有的故障诊断算法、预警规则校验和设备状态评价。该层通常封装了 50 至 100 个核心业务类或服务组件，同用户界面以及数据存储技术解耦，使得核心算法的代码复用率提升至 60% 以上。

数据访问层主要是用来和底层数据库、实时时序数据存储系统交互。它把业务层繁杂的数据请求转成具体数据库操作的指令。由于船舶振动数据采集频率高，写入操作非常密集，该层通常采用批量写入策略（Batch Insert），每批次处理 100 至 1000 条记录，以实现每秒处理数万至数十万个数据点的高吞吐量需求（参考 InfluxDB 或 TimescaleDB 性能白皮书）。经过这般严格的分层安排，即便底层硬件传感器接口或者数据库技术的选取发生改变，也只需要对数据访问层的适配代码加以调整，而无需改动位于上面的业务逻辑，代码修改的波及范围可控制在 15% 以内，系统的可维护性就得到了极大的改善。

基础设施层是整个软件栈的基石，操作系统、容器虚拟化环境、基础网络通信库等都属于这一层。由于船舶航行环境的特殊性，在这一层主要对硬件资源进行调度，保证有限的船载计算资源中关键报警服务使用最高优先级的 CPU、内存。例如，在 Linux 系统中，将关键诊断进程的 Nice 值调整为 -20 至 -10（最高优先级），并预留 20% 至 30% 的 CPU 余量和 512 MB 至 2 GB 的内存缓冲，以应对突发计算负载（参考《Red Hat Enterprise Linux 性能调优指南》）。分层次的精细化管理使复杂的轮机监控系统井然有序，开发团队可以并行工作，后期运维人员查找故障更加方便高效。

（二）微服务架构模式

由于船舶智能化程度越来越高，单一的系统已经无法满足各种功能需求，也

不能解决日趋复杂的功能之间的关系。为此，在本系统中使用了微服务架构模式，把庞大的预警系统拆分成一个个的小型、松耦合的服务单元。每一个微服务都是针对某一业务功能独立开发，比如专门负责主机燃烧分析的模块、专门负责辅机振动监测的模块、专门负责电力系统能效评估的模块等等。每个服务都独立地运行在一个容器进程里，有自己的数据存储空间，不会因为某个模块内存溢出造成整个监控系统崩溃，从而增强系统的容错能力。

微服务架构具有很高的敏捷性以及扩展性。当需要增加新的故障诊断算法或者对接新型号机电设备时，开发人员只需要增加或者更新相应的微服务模块，不需要对整个系统进行重构或者长时间停机维护。服务间用轻量级通信协议进行交互，并且支持跨语言编程。使开发团队可以使用计算效率最高的语言编写实时信号处理服务，用开发效率最高的语言编写业务管理服务，从而达到技术栈的最优配置和组合。

1. 服务注册与发现让动态运行的微服务实例彼此能感知、互相配合。即使船舶网络环境不稳定，也能够实现负载均衡的故障节点自动移除来保障数据链路的高可用性。

2. 配置中心集中管理所有的微服务参数，并且支持动态更新。轮机长根据航行工况（机动航行或者定速巡航）可以实时调整各监控服务的采样频率和报警阈值，且无需重启服务即可生效，大大提高了系统灵活性。

（三）事件驱动架构

由于船舶轮机系统产生的数据具有高并发、流式的特点，因此传统的请求 - 响应方式已经不能满足毫秒级的故障预警需求。因此本系统就采用了事件驱动架构。传感器采集到的每一个温度变化、压力波动、转速跳变都被视作独立的事件。这些事情被送到高性能消息中间件里，不需要接收方马上回应，这就把采集端和处理端完全分开了。

事件总线是系统的中枢神经，把大量的状态消息快速转发出去。实时分析引擎、历史数据归档服务、报警推送服务等作为独立的消费者，各自订阅自己关注的事件主题。当核心组件检测到异常事件（排气温度突升）的时候，系统会立即触发一系列异步操作：一方面迅速向前端发出报警通知；另一方面启动相关的参数深入分析，并同步启动黑匣子记录功能，把异常发生前后高频数据封存起来。异步事件处理模式最大程度的减少了系统的阻塞情况，在轮机故障高并发的时候，

依然能够接近零延迟的对紧急安全指令进行响应，实现了轮机故障的实时捕捉与快速反应。

二、核心功能模块实现

核心功能模块为智能化的实现奠定了基础，该模块采用最新的数据处理技术以及人工智能算法，把各种各样的传感信号转变成可以指导运维决策的参考。核心功能模块的功能和特点如下表所示。

核心功能模块概览表

模块名称	主要职责	核心功能与特点
实时数据处理引擎	数据采集、清洗、预处理及流式分析	吞吐数千测点信号，自适应滤波，插值拟合，滑动窗口聚合分析，计算瞬时变化率、均值漂移、峰值因子等统计特征，高效压缩（旋转门技术），数据标准化 / 归一化，数据质量评估。
预警规则引擎	故障诊断、预警规则校验及推理	融合确定性逻辑与概率推理，多维规则定义，动态阈值调整（随工况变化），基于知识图谱的推理机，关联参数分析，机器学习模型运行环境，加权融合生成综合诊断报告。
可视化展示引擎	工程数据图形化、人机交互	高性能图形渲染，三维数字孪生模型（机舱漫游、爆炸图），热力图 / 流线图映射，毫秒级趋势曲线绘制（万级数据点），无级缩放 / 拖拽，雷达图 / 平行坐标图，动态层次渲染（情境感知）。

（一）实时数据处理引擎

实时数据处理引擎相当于系统的“咽喉”，它要吞吐全船几千个测点的连续模拟量和数字量信号。原始数据进入系统之后，就要开展严格的清洗与预处理工作，把由于电磁干扰或者线路老化而产生的噪声信号清除出去。引擎自带自适应滤波算法，根据各个传感器的特性自动调整滤波参数，可以在保持信号特征趋势不变的情况下，将突然出现的毛刺信号抹掉。引擎用插值拟合法把由于船舶摇晃震动造成的数据缺失填上，使得输入到诊断模型的数据在时间上和空间上都连贯起来。

该引擎有很强的流式计算能力，在内存中对高速数据流做滑动窗口聚合分析。引擎通过设置不同的时间窗口，可以得到参数的瞬时变化率、均值漂移量、峰值因子等统计特征，这些都可以用作识别设备早期故障的指标。为了解决海量数据存储的问题，引擎内部使用高效的压缩算法，采用旋转门压缩技术对历史趋势数

据进行压缩，保证数据还原的精度，大幅度减少磁盘占用的空间，使系统可以保存多年的全部运行数据。

数据标准化以及归一化处理也属于该引擎的功能之一。由于各种设备的物理量纲相差很大，引擎把所有的参数映射到同一个标准空间，为多参数融合分析做好了铺垫。同时还会对数据质量进行评价，对于长期漂移或者示值固定的传感器进行标记，防止低质量的数据影响诊断模型，从源头上保证了整个预警系统预警准确性的提高。

（二）预警规则引擎

预警规则引擎就相当于系统的大脑，把确定性逻辑和概率推理模型巧妙结合在一起。引擎可以同时给设备制造商给定的静态阈值红线加上一个动态的、随工况变化的阈值。引擎遵照读取到的船舶航速，载重以及海况信息，准确运算当下工况下各个参数的恰当运行区间，有效地防止了传统固定阈值在低负荷工况下容易漏报，高负荷工况下容易误报的缺点。

引擎内部搭建了以知识图谱为载体的推理机，可以将资深轮机长的排故经验转化为可执行的逻辑链。当监测到某个单一参数出现异常时，规则引擎就会自动去查找和它存在物理或者热力联系的其它参数。如发现气缸冷却水温度上升，则联动查看润滑油温度、海水泵出口压力及对应气缸排气温度。通过对比分析，来确定是单纯的传感器故障，还是冷却系统堵塞。多方面的信息互相印证以后，预警的可信度就会大大提高。

该引擎还挂载了机器学习模型运行环境，可以加载已经训练好的神经网络或者支持向量机模型。可以找到人眼专家不容易发现的非线性故障征兆，比如振动频谱的细小变化、热力参数复杂耦合的异常情况。规则引擎会定时调用这些模型进行推理，把模型推理出来的故障概率同专家规则库的结论做加权融合，最后得出一份包含故障种类、严重程度以及可能原因的综合诊断报告。

（三）可视化展示引擎

可视化展示引擎把复杂的工程数据以图像的方式直观地呈现出来，从而使得轮机员对机舱情况有一个全方面、深层次的了解。该引擎是用高性能图形渲染技术来创建的，成功创建了船舶机舱三维数字孪生模型。用户可以在虚拟场景中自由漫游，点击任意设备就可以看到它的内部结构爆炸图以及实时运行参数。将温度场、压力场以热力图或者流线图的形式映射到三维模型表面上，轮机员可以直

观地看出设备的热应力分布情况，进而及时发现局部过热点。

这个引擎把图表渲染性能提升得非常好，可以很快把由上万数据点构成的趋势曲线画出来，而且支持无级缩放和拖拽查看，这让技术人员追溯故障发生前后参数变化的轨迹变得非常方便。引擎给雷达图、平行坐标图、散点矩阵图等高级的可视化组件，使复杂的变量间的关系一目了然。

引擎用动态层次渲染的方式来显示报警信息。正常航行时，界面主要显示重要的能效指标；一旦出现故障，引擎会立刻把视觉重心转移到报警设备上，使高亮闪烁显示的报警设备以及相关的系统原理图、应急处理检查单弹出来，从而引导轮机员按照标准作业程序来处置。这样的情境感知式展示逻辑，明显缩减了人机交互的认知路程，很好地改善了应急处置的速度和效率。

三、用户界面设计原则

用户界面是人与机器交互的媒介，其好坏直接关系到系统易用性以及船员工作负荷。本系统以人为中心，严格按照认知心理学、人机工程学的原理来设计简洁、高效且具有良好容错性的操作界面。

（一）界面布局与导航

界面布局严格按照操作人员的视觉浏览习惯，采用 F 型或者 Z 型视线引导路径，把全船总览信息和紧急报警状态放在屏幕左上角和顶部等显眼的位置。功能区域的划分按照逻辑分组原则将主机、辅机、锅炉、辅助管系等系统监控画面进行分块隔离，既保证了信息的独立性又保持了整体风格的统一。导航设计采用扁平化结构，有效地减少了层级深度，保证用户三次点击内到达任何子功能模块，避免了紧急情况下由于菜单复杂而耽误操作的情况。

1. 全局导航栏常驻屏幕一侧，给出系统级的功能入口以及状态显示。不论用户在哪个子页面，都可以随时知道系统的总体健康情况，并且可以快速回到主页。

2. 界面采用自适应响应式设计，可以自动适配集控室工作站大屏、驾驶台辅助显示器、移动手持终端等不同分辨率的设备，保证操作逻辑的一致性。

（二）数据可视化方案

数据可视化并不只是数据的罗列，而是把信息深度提炼和呈现出来。方案中去除了过于繁杂或者无意义的装饰性元素，主要提高数据信噪比。对于模拟量仪表，系统放弃了复杂的物理刻度盘，用简单的数字显示加上颜色编码的色条，让

用户既可以看到精确的数值，又可以凭色条长度快速判断参数在量程中大致的位置。历史趋势图系统会按照数据波动的幅度来自动调节坐标轴刻度，防止曲线被压缩成直线，从而隐藏掉细微的变动。

根据行业标准以及心理暗示色来使用色彩。正常运行时使用低饱和度的冷色调（青色、深蓝）作为背景色，营造出一种冷静、稳定的心理感受，重要的数据用高对比度的白色或者亮绿色进行显示。对于关系比较近的数据组，比如主机各缸排温，采用重叠柱状图或者并列趋势图进行同步比较，用颜色的不同来表示不同的气缸，让轮机员可以快速的分辨出落后缸和超前缸，从而判断各缸负荷分布是否均匀。

（三）报警信息呈现方式

报警信息展示方式同船舶安全回应速度密切相关。系统设计出分层的报警显示方式，按照故障严重程度把报警分为危机、重要、一般、提示四个等级。最高等级的危机报警（例如主机失控、滑油低压）在界面中心弹出模态对话框，阻塞其它非必要的操作，同时联动集控室声光报警系统，发出特定频率的蜂鸣声和频闪光，保证轮机员即使背对着屏幕也能立即察觉。

报警列表按倒序排列，最新报警总在最上面。强大的筛选和搜索功能，根据时间、设备或者报警级别可以快速查找到历史记录。每一条报警信息都不是简单的文字提示，点击之后会弹出详情页，显示触发报警的实时数值、设置的阈值标准、故障发生时间关联参数的快照、系统给出的排故建议。

为了防止报警过多而造成操作人员麻痹，系统增加了一个智能报警抑制功能。当主设备停止运转的时候，系统会自动屏蔽掉附属泵浦的低压报警；当出现级联故障的时候，系统则用根因分析算法突出显示故障源头，折叠显示其他衍生的次生报警，使轮机员在纷繁复杂的报警风暴中能迅速定位到问题的根源，保持清醒的判断力。系统还设置了强制确认，对于重要报警必须经过操作人员手动点击确认并输入工号才可以消音，以保证每一个异常都被充分知晓并妥善处理。

第七章 预警算法与实现技术

本章主要对船舶轮机故障诊断系统中核心的预警算法进行研究，研究其技术实现。预警算法属于衔接数据采集与故障决策的重要部分，它的水准好坏直接影响系统的灵敏度和准确度。从最简单的静态阈值入手来构建起能够适应海况、工况等的变化复杂的轮机智能预警技术体系，给船舶的安全航行提供算法支持。

第一节 预警阈值设定方法

设置预警阈值属于故障预警系统建设中最基本也最重要的环节，它直接影响系统误报率、漏报率。合理的阈值设定，既需要有统计学理论的支撑，又应该参考轮机专家的经验以及设备的以往的运行记录，来综合分析判断。本节主要对基于统计学规律、工程经验知识、自适应动态调整这三种主流的阈值设置方式以及适用场景进行描述。

一、基于统计的阈值设定

基于统计学的阈值确定方法适合有大量历史运行数据的轮机设备。通过对数据分布规律的挖掘，得到可以代表设备正常工作状态的统计特征量。假定设备在健康状态下测量的数据服从某种概率分布，用统计推断的方法来判定正常和异常的分界。该类方法客观性好、可解释性强，在工业监控中得到了广泛的应用。

各类统计方法的具体特点及其适用场景，可见下表：

（一）正态分布 3σ 原则

船舶轮机监测数据处理时，大量的稳态运行参数，主机排气温度、冷却水压力等等，在理想的工况下几乎都可以看作是近似的正态分布。利用拉依达准则来确定异常阈值是一种行之有效的方法。该方法的核心思想就是用历史数据的均值和标准差来构造置信区间。在正态分布的假设下，数值分布在距离均值三个标准差之内所占的比例高达 99.73%，说明落在这个区间之外的数据点属于小概率事

件，很可能是由于设备故障或者传感器异常造成的。工程实践中，一般采集设备在健康状态下连续一段时间的监测数据，清洗去噪之后计算算术平均值和标准差，得到上下限报警阈值。

该方法的优点是计算简单、逻辑清楚，对平稳随机过程有较好的适用性。当轮机在定速航行的时候，系统参数的变化很小，背景噪声比较稳定，3σ 原则能很快地发现明显超出正常范围的点。对不同的参数的重要性可以灵活地进行倍数的调整，在润滑油系统安全要求比较高的情况下，可以采用更窄的置信区间来提高预警的灵敏度，在一些非关键的辅助系统上适当放宽，减少由于信号的随机波动而造成的误报警。需要指出的是，该原则完全依赖于数据正态性假设，如果数据分布存在明显的偏态或者长尾特征，那么直接套用这种方法很容易造成较大的判定失误。

基于统计的预警阈值设定方法对比表

方法名称	适用数据类型	优点	缺点	典型适用场景
正态分布 3σ 原则	近似正态分布的稳态数据	计算简单、逻辑清晰	依赖正态性假设，对异常值敏感	稳态运行参数（如冷却水压力、排气温度）的初期异常检测
分位数法	非正态、未知分布数据	稳健性强，不易受异常值影响	缺乏物理意义，百分位数选择需经验	瞬时燃油消耗率、增压器转速等偏态分布参数的离群点检测
滑动窗口统计	时变、动态特性数据	适应数据局部时序变化，对渐变性故障敏感	参数选择（窗口长度、步长）影响性能	缸套冷却水温度、燃油喷射压力等动态参数的趋势性预警

（二）分位数法应用

对船舶轮机运转过程中产生的非正态分布的数据，亦或者是对数据分布形态不明的场景，使用分位数法给设定阈值带来更稳健的途径。分位数法不需要假定某个分布，它是用数据的累积概率分布来确定阈值的。根据历史健康数据从小到大排序的结果，选取一定的百分位数值作为上下限阈值。一般取第 5 百分位数和第 95 百分位数作为正常运行下界和上界，认为 90% 的数据范围为正常区间。

1. 利用箱线图原理就是分位数法的一种典型应用形式，通过计算上四分位数和下四分位数，进而得到四分位距。一般将上下四分位数外扩 1.5 倍的四分位距作为温和异常的判断界限，外扩 3 倍则作为极端异常的判断界限。此方法对数据中离群点的发现有天然的优势，可以很好地抵御异常值对阈值计算本身的干扰。

2. 处理瞬时燃油消耗率、增压器转速波动等偏态分布较明显的参数时，分位数法更贴近数据的实际情况。避免由于均值被极端值拉扯而造成阈值偏移，报警线更接近设备运行的真实包络线。调整分位点选取的比例可以找到系统灵敏度和漏报、误报之间的一个平衡点，从而满足不同检测对象对灵敏度不同的需求。

（三）滑动窗口统计

船舶轮机系统属于典型的时变系统，随着时间推移，外界环境发生改变，其运行参数就会出现变动。全局静态统计方法没有考虑到数据的局部时序特性，滑动窗口统计技术利用时间维度上的局部化处理，很好地解决了这个问题。技术设置一个固定长度的时间窗口，新的数据不断地采样，窗口在时间轴上向前滑动，一直包含最新的观测数据段。在每一个滑动窗口移动的时候，系统仅仅针对窗口内部的数据执行统计分析，得到局部均值，方差或者极值，并把这些当作此刻动态阈值的参照。

滑动窗口设计有两个重要的参数，即窗口长度和滑动步长。窗口长度影响统计特征的平滑程度与突变信号的响应速度，短窗口可以更快地检测到参数的瞬时突变，但是容易受噪声的影响，长窗口可以更好地反映参数的长期趋势，比较稳定。滑动步长会影响计算的实时性以及资源消耗。轮机监测系统中，对于不同的物理量要采取不同的窗口策略。比如缸套冷却水温度属于热惯性较大的物理量，可以采用较长的窗口去平滑其波动；而燃油喷射压力是快速响应的物理量，必须采用短窗口去捕捉它的微小变化。

对于渐变性故障的检测该技术有较好的效果。随着设备性能逐渐衰减，例如热交换器结垢使得热效率下降，那么监测数据的统计特性也会随之发生缓慢偏移。全局阈值对于故障初期的这些微小变化很难被发现，滑动窗口算法将当前窗口与历史参考窗口进行统计上的比较，一旦发现趋势出现偏离，就会立即发出早期趋势警报。这对预防磨损、积碳等慢性故障有很重要的工程价值。

二、基于经验的阈值设定

当缺乏历史数据或者出现新型号设备的时候，仅靠统计学方法是不行的。此时，依靠经验来设定阈值的方法就显示出了它不可替代的作用。这种方法把人类专家的知识智慧，设备制造厂商的设计规范，同类型设备以前的运行情况融合起来，形成一套既符合物理逻辑又经过实际检验的阈值体系。它是在数据不足的时

候保证系统可用性的一种方法，也是对统计类阈值进行检验和修正的重要依据。

这些经验性方法的详细特点与应用，可参考下表：

基于经验的预警阈值设定方法对比表

方法名称	知识来源	优势	局限性	典型应用场景
专家经验法	资深轮机员、工程师的隐性知识	灵活适应复杂工况，考虑物理耦合关系	依赖专家主观判断，难以标准化	新型号设备、复杂偶发故障
设备厂家推荐值	厂家设计、测试数据	权威、可靠的安全底线	过于保守，未考虑实际运行条件	系统初始配置、安全保护红线
历史数据参考	同类型设备历史运行记录	弥补个体数据不足，发现故障模式	需考虑工况可比性及数据清洗	新船系统初始配置、重复性故障预防

（一）专家经验法

轮机管理是十分依赖于实践经验的工作，资深轮机长、维护工程师多年海上工作积累的大量隐性知识，比如对设备异响的分辨、对仪表指针抖动的判断、对某种海况下参数变化的直觉。专家经验法就是把那些非结构化的、带有个人经验的直觉性认识，转换成计算机能执行的结构化阈值规则。利用知识工程方法（问卷调查、深度访谈或者德尔菲法等）来获取专家们对于各个工况下各个关键参数正常值范围的判定。

专家经验所设定的阈值里包含了对于复杂耦合关系的深刻认识。资深轮机员知道热带海域高负荷时扫气箱温度报警上限可以适当提高，寒冷海域启动初期滑油压力低限报警要具有一定的延时容忍度。这些微小的调整策略不能直接从数据中获得，但是对减少误报有重要作用。专家给出的一个阈值一般不是单一数值，而是一套带有逻辑判断的规则。使用模糊逻辑等可以使得专家对“过高”、“偏低”、“剧烈波动”等语言表述转变成数值区间。此方法适用于不能用数据建模或者机理不明故障模式的检测，是数据驱动方法的重要补充。

（二）设备厂家推荐值

设备制造厂商给出的技术说明书、出厂测试报告、设计规范可以作为确定初始阈值最有力的参考。厂家在设备研发阶段进行了大量的台架试验、破坏性试验以及理论计算来确定各个部件安全运行时的极限物理参数。推荐值大体上代表了设备材料的容许极限、润滑油膜破裂的临界点或者热应力的安全边界，是防止设

备遭受灾难性损坏的“红线”。系统刚开始运行时，把厂家给出的推荐值当作不可逾越的报警值，可以保证系统具有一定的安全防护能力。

厂家推荐值分为报警值和停车值两种。报警值是预警的第一道防线，报警值可以给操作人员提供工况异常的提示；停车值是保护设备的最后一道防线，停车值触发后会立即执行安全程序。厂家给出的阈值一般是在标准试验条件下确定的，比较保守，并没有考虑到船舶实际使用时所具有的特性。老旧船舶某些参数长期稳定在出厂标准以上一点点的水平上，如果完全按照厂家设定的阈值来设置的话，就会产生很多的误报。因此一般将厂家推荐值当作不可超过的安全下限，在此基础上根据实际运行情况做出适当的收缩或者动态调整，从而得到更加实用的运行阈值。

（三）历史数据参考

同类型船舶或者同型号设备的以往运行记录是设定阈值的重要数据。即使本机没有足够的数据，参考姊妹船或者行业内同类机型历史数据也有非常重要的参考价值。基于类比推理的阈值设定方法，其实质是用群体的经验弥补个体的不足。通过对同类型的设备在相似航线上、相似装载情况下的参数表现进行分析，可以得到一个基准。根据同型号柴油机过去 5 年排气温差记录的统计规律可知，其正常波动范围一般在一个区间内，该统计规律可以直接用于新船系统的初始配置。

用历史数据确定阈值时，必须考虑工况的可比性以及数据清洗。不同船舶的维护保养状况、燃油品质、船员操作习惯等都会对参数造成影响，直接套用会存在偏差。因此一般采用加权平均或者元分析的方法，对多源历史数据进行综合处理，剔除由于特殊事故或者极端操作所造成的异常样本。历史数据除了可以给出正常工作时的参考范围外，更重要的是包含着实际发生过的故障案例数据。通过对故障发生前参数变化轨迹的分析，得到参数最终的失效界限，从而可以反向得到更加精确的预警触发点，以失效复现为依据来确定阈值的设定思路，对预防重复性故障有较好的效果。

三、自适应阈值调整

传统固定阈值法对于船舶轮机复杂多变的工作环境来说，常常无能为力。船舶从港口机动、加速出港到大洋定速航行，其负载特性、环境温度、冷却介质等条件都在发生急剧变化。为了提高预警系统的鲁棒性以及准确性，自适应阈值调

整技术应运而生。该技术按照实时检测到的工况参数和环境变量去改变报警界限，使得报警界限始终按照设备当前工作状况的变化而变化，从而达到一种随动式准确监控的目的。

（一）动态阈值算法

动态阈值算法的核心就是建立阈值与影响因素之间函数映射的关系。它不再把阈值当成一个常数，而是把它当作主机转速、负荷、扫气压力、海水温度等变量的函数。用多元回归分析或者多项式拟合，得到各种工况下各个关键监测参数的理论基准值模型。系统工作时实时采集当前的主动变量，代入模型得到此时的理论正常值，再在此理论正常值上加上一个允许的偏差范围（容差带），就得到了实时的上下限动态阈值。

主机排气温度随负荷增大有较大的上升。用固定的阈值时，在低负荷情况下会由于阈值过高而漏报异常升温，在高负荷情况下又由于阈值过低而误报。动态阈值算法可以生成一条随负荷变化的曲线带，无论主机的功率输出状态如何，只要排气温度偏离了该负荷下的理论曲线超过设定的容差，系统就会立即发出预警。该方法明显提高了系统在全工况范围内的监控能力，过渡工况下能较好地区分正常的参数动态响应和真实的故障征兆。

（二）工况自适应调整

工况自适应调整就是对船舶的运行模式实施宏观识别与分类。船舶运行状态包括停泊、机动航行、定速航行、恶劣海况等各种情况，在不同的状态下，设备的运行机理以及参数分布特性也不同。自适应系统用聚类算法或者逻辑规则树实时判定船舶的工况类别。

1. 工况切换时，系统就会自动调用事先保存在该工况模式下的专用阈值参数包。在机动航行模式下由于车令频繁改变造成油压、转速等参数波动较大，系统就会自动降低瞬态波动检测的灵敏度，增大报警延时，防止因操作引起的非故障性报警。

2. 相反的，定速巡航的时候会自动切换成高灵敏度模式，将带宽变小，捕捉到任何一点微小的性能下降。

3. 遇到恶劣海况时，系统会把船舶摇摆信号融合进来，对于液位、振动这些受船体姿态影响比较大的参数阈值做补偿修正。分场景、分策略的阈值管理方法，使预警系统具有了类似人类轮机员的情境感知能力，从而大大提高系统的智能化

水平。

（三）阈值优化反馈机制

为了防止预警系统长时间工作而产生阈值老化或者偏移现象，必须要建立闭环反馈优化机制。从而形成报警、确认、调整的闭环学习回路。系统发出预警之后，轮机员对于预警的确认行为（无论是真实的故障还是误报），都会被系统当作反馈标签保存下来。如果某个参数经常触发报警但是最后被判定为误报，系统内部的优化算法就会被启动，对误报发生时的数据特征进行分析，分析是由于阈值设置过于严格，还是存在未被考虑到的干扰因素。

根据反馈的信息，用贝叶斯更新或者强化学习算法对报警阈值或允许误差范围进行调整。系统自身会具备自我进化的特性，在长期使用之后就会产生适应性调整，逐渐适应某艘船独有的个性特点。比如某船一台老化的发电机，整体的振动基值存在上升趋势但仍然处于安全范围之内，反馈机制能够察觉到这样的改变并自动提升基础振动阈值，这样就不会一直发出骚扰性的报警声，同时还能继续监控突然发生的剧烈振动。具有在线学习、参数在线更新的特点，大大减少维护人员的工作量，保证预警模型的长久生命力。

（四）基于机器学习的阈值预测

伴随着人工智能的发展，以机器学习为基础的阈值预测技术，成为了实现高精度自适应预警的新方向。机器学习模型，支持向量回归、随机森林、长短期记忆网络等可以处理大量高维非线性数据，发现参数之间的深层次耦合关系。利用大量的历史健康数据训练出来的模型就是高精度虚拟健康模型。该模型可以利用当前的输入条件，准确预测下一时刻各种监测参数的理论值。

系统用预测值和实际观测值之间的残差作为故障判据。残差应该接近于零，并且应该具有白噪声特征。对残差序列做统计分析（序贯概率比检验），动态设置残差的报警阈值。此方法不单纯以数值的大小为依据来进行判断，而是看参数偏离它应有的行为轨迹的程度。深度学习模型能够自动的提取复杂的时空特征，对于那些受多种因素交叉影响，传统方法不能建模的复杂系统（电子喷射柴油机的燃烧过程）也具有较好的预测能力以及对故障较为敏感的特点。它从原来基于规则的方式转变为以数据为驱动的方式进行判断，使阈值不再是一个单一的固定界限，而是一个智能、具有预判性的动态判别过程，给视情维修提供强有力的技术支持。

第二节 多源信息融合预警技术

船舶动力系统越来越复杂，单一传感器不能完全准确地反映设备的运行状况。轮机设备工作时，振动、温度、压力、油液理化性质等各种物理量之间存在复杂的影响。多源信息融合技术就是在这个时候产生的，它把不同地方、不同类型的传感器所提供的信息经过多层次、多角度的综合处理之后，有效地减少了单一信息源带来的不确定因素和限制，使故障诊断系统的抗干扰能力以及准确度得到了明显的提升。这不是简单的信号相加，而是按照一定的数学模型和物理机理，于数据层、特征层、决策层这三个层面完成信息的互补与加强，进而形成起全方位、立体化的智能预警体系。

一、数据级融合方法

数据级融合作为信息融合的基础层，对未经预处理的原始传感器信号进行综合。该层次融合能最大程度地保留原始数据中的一些细节以及瞬时特性，捕捉早期微弱的故障信号具有无可比拟的优势。但是由于船舶机舱环境复杂、传感器种类多且分布广，所以数据级融合会遇到数据量大、噪声干扰强、异构数据难以直接匹配等问题。所以建立高效的数据融合模型是实现高精度预警的前提。

（一）数据配准与对齐

船舶轮机监测网络中各种传感器一般都设在设备上不同的位置，各自有不同的局部坐标系、采样频率。数据融合之前首先要进行空间配准和时间对齐这两个主要问题的解决。空间配准就是把各个测点上分散开来的传感器数据，统一转换到船舶全局参考坐标系或者设备本体坐标系里。需要精确地建立坐标变换矩阵，准确地测量传感器和参考中心的欧拉角、位移矢量。在工程实践中，通常要求安装角度的测量误差控制在 ±0.5° 以内，位移矢量的测量精度要求达到毫米级（如 ±1 mm），利用刚体变换算法消除由于安装位置不同所引起的信号相位差、幅值衰减（参考《多传感器信息融合及应用》及 ISO 10360 坐标测量标准），保证所有数据在空间维度上的一致性。

时间对齐解决异步采样的问题。在船舶机舱监测中，振动传感器一般采用高频采样（通常为 5 kHz 至 20 kHz 甚至更高），而温度、压力传感器多采用低频采样（通常为 1 Hz 至 10 Hz），采样率差异可达 1000 倍以上。如果直接融合会

造成严重的时序错位。时间配准技术就是根据各个传感器的时间戳，采用高精度时钟同步协议（如 IEEE 1588 PTP 协议）来保证数据采集的同步，其同步精度通常要求达到微秒（μs）级甚至亚微秒级。采样率不同的数据流一般用时间窗口对齐法，设定一个很小的时域容限窗口，例如 10 毫秒至 50 毫秒，把落在同一个窗口内的数据当作同一时刻的观测值。可以有效地关联同一工况下多个物理量，为之后关联分析提供可靠的时间基准。

尤其在对高速旋转机械（涡轮增压器）的故障信号做相位分析时，涡轮增压器转子转速可达 10,000 rpm 至 20,000 rpm，即每转一周仅需 3 毫秒至 6 毫秒。纳秒级的时间对齐精度是保证相位分析准确性的前提。如果时间同步误差超过 100 微秒，在高速旋转机械中就会产生显著的相位偏移，从而导致动平衡分析或故障特征提取失效（参考《机械振动与冲击测量》及 Bently Nevada 应用指南）。

（二）数据融合算法

数据级融合算法的关键是从有噪声的原始数据中提取出真实的信号。加权平均法是一种基础且直观的融合方法，它给各个传感器的测量精度、历史可靠性分配不同的权重系数。对性能稳定、精度高的传感器给予较大的权重，对性能不稳定、精度低的传感器给予较小的权重，之后进行加权求和得到融合后的估计值。该方法计算简单，实时性好，适合同类型传感器冗余配置的场合，但是对于非线性、非平稳信号的处理效果不好。

卡尔曼滤波及衍生算法是目前使用最广的数据级融合算法。当船舶轮机系统满足线性、高斯白噪声的条件时，卡尔曼滤波通过预测和校正这两个步骤来得到每一刻的最优状态估计。考虑到轮机故障信号一般会存在非线性因素，因此扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波等算法应运而生来适应复杂的工作环境。这些算法利用泰勒级数展开或者概率密度函数的采样近似，实现了对非线性系统的状态估计。粒子滤波属于非参数化滤波的一种，其理论在高斯假定下不够好的情况下更符合要求，适合恶劣海况下的船舶动态数据融合。

（三）融合效果评估

对数据融合算法的性能进行评价是改善预警系统的一种途径。融合效果的评价指标一般分为统计学指标和信息论指标。统计学指标主要是衡量融合结果和真实值之间偏离程度的指标，有均方根误差、平均绝对误差、标准差等。均方根误差越小说明融合后的数据就越接近实际情况，系统的精度也就越高。信噪比也是

重要的标准，融合信号的信噪比应该明显大于单个传感器的原始信号，说明融合算法成功抑制了背景噪声。

信息论指标用信息量来衡量融合效果。信息熵用来度量数据的不确定性，融合后的系统信息熵应该小于融合前各个子系统信息熵之和，这就说明融合有效地减小了系统的不确定性。互信息量体现的是融合数据和源数据的相关程度，互信息量越大，说明在融合的过程中保留的信息越多。还需要根据船舶轮机实际工作状况，将融合算法诊断结果与历史故障案例诊断结果进行比较，检验融合算法在各种故障模式下灵敏度与特异性。使用混淆矩阵来计算准确率、召回率、F1 分数等指标，可以对融合预警系统综合性能做全面的量化。

（四）多传感器数据同步技术

多传感器数据同步是数据级融合有效性物理保证。分布式监测系统中各个传感器节点一般由自身的晶振提供时钟源，长时间运行后必然会产生时钟漂移，造成数据采集时间的偏差。硬件同步一般使用全球定位系统授时或者专用同步线缆触发。以太网环境下用网络精确时间协议可以获得亚微秒级的时钟同步精度。协议用主从时钟间交换报文的方式来计算传输延迟、时钟偏差并做补偿，从而使整个监测网的时间基准高度一致。

软件同步技术就是对非同步数据进行修正的数据处理阶段的技术。常用的重采样方法有线性插值法、样条插值法、拉格朗日插值法等。当各个传感器采样率是倍数关系的时候，可以采用抽取或者内插的方法改变数据长度，使它们在时间轴上对齐。对非均匀采样或者随机采样获得的数据，可以利用信号重构的同步算法，用压缩感知理论将稀疏采样点重新构造成连续信号波形，然后再进行重采样对齐。对含有相位分析的振动监测来说，采用转速信号的阶比跟踪技术可以达到角域同步的目的，消除了转速波动的影响，使数据在一个转周期内保持一致。

二、特征级融合方法

特征级融合属于信息融合的中层。在对原始数据进行预处理和特征提取之后，把各个传感器所得到的特征向量综合起来进行分析。相比于数据级融合，特征级融合的数据处理量小、实时性好，并且通信带宽要求低。此方法从原始信号中提取出可以反映设备状态本质的特征参数，将大部分噪声和冗余信息屏蔽掉，使融合结果对环境干扰和传感器性能下降具有更好的鲁棒性。船舶轮机故障预警时，

特征级融合可把振动，热力，磨损这些多物理场的特征融合起来，从而表现出故障发展变化的内部规律。

（一）特征向量构建

构造高质量的特征向量是做特征级融合的前提。对于船舶轮机系统振动信号来说，时域特征统计量是最直接的表征。均值代表信号的静止部分，均方根值表示振动能量的大小，峰值可以检测冲击信号，峭度、裕度因子对早期的脉冲性故障很敏感。偏度反映信号幅值分布不对称的情况，一般用来做气阀漏气、齿轮断齿的早期判断。时域指标一起形成一个基本的特征向量，可以快速捕捉设备的突变。

1. 频域特征构造，利用快速傅里叶变换把时域信号转换成频域谱图，从而得到重心频率、均方频率、频率方差、故障特征频率处的幅值能量。针对旋转机械，基频及其谐波分量的能量比可作为判定不平衡、不对中故障的依据。

2. 时频域特征构建，对非平稳信号采用小波包分解或者希尔伯特 - 黄变换提取时频特征。计算各个频带的能量占比或者相对能量熵，可以有效识别出由于燃烧爆震或者喘振造成的瞬态冲击特征，从而形成反映信号局部时变特征的高维特征向量。

（二）特征选择与降维

多传感器系统常常会得到高维特征集合，里面包含许多冗余或者无关的特征，这不但加重了计算负担，而且会造成“维数灾难”，从而影响分类器的性能。特征选择就是从原始特征集中挑选出最能反映故障模式、区分度最大的一个子集。过滤式方法通过计算特征与类别标签的相关系数、卡方检验值或者互信息量给特征打分排序，去掉得分低的特征。包裹式方法直接用最终分类器的性能作为评价标准，用遗传算法或者粒子群优化算法在特征空间中搜索最优子集。

降维技术就是利用数学变换，把高维特征空间变成低维子空间，同时尽量保持原来数据的主要结构。主成分分析是经典的线性降维方法，它用正交变换将相关性高的原始变量转成一组线性无关的主成分变量，然后选取贡献率大的前几个主成分作为新的特征向量。对于船舶轮机监测数据中普遍存在的非线性流形结构，核主成分分析、等距映射等流形学习算法可以得到更好的降维效果。线性判别分析属于有监督降维的方法，它寻找最佳投影方向，使同类样本的投影点尽可能紧密，异类样本的投影点尽可能分开，从而显著提高故障模式的可分性。

（三）特征融合策略

特征融合策略决定着怎么把不同传感器的特征向量合起来，形成一个新的联合特征向量。串行融合是最简单直接的方法，就是把各个传感器的特征向量首尾相接，拼成一个更高维数的超级向量。该方法保留全部特征信息，但是容易造成维数过高。并行融合一般用复向量，把两个来源不同的特征当作复数的实部和虚部来组合，或者用典型相关分析的方法，找到两群特征变量相关性最大的一对线性组合，从多源信息中提取共有特征。

对于异构特征，基于核方法的融合策略有特别之处。通过构造多核函数，可以把各种不同的特征映射到高维再生核希尔伯特空间做线性组合。比如可以对振动特征、温度特征、油液特征分别采用不同的核函数，然后利用多核学习算法来自适应地确定各个核函数的权重系数。该方法可以充分利用各个特征在各自空间中所表现出来的特点，从而达到异构信息互补融合的目的。深度学习网络中特征融合层也经常使用，它是利用多通道输入的卷积神经网络或者长短时记忆网络，在训练过程中自动学习各个层次特征的非线性组合方式，挖掘深层次的相关特征，极大地提高了故障预警系统识别复杂复合故障的能力。

三、决策级融合方法

决策级融合属于信息融合的最高层。它在各个局部的传感器或者子系统做出初步的判断或者分类之后，会对这些初步的判断结果进行综合的推理和关联，从而做出全局一致的预警决策。该方法的灵活性、容错性都很好，即使某个传感器出现故障或者失效，也不会造成整个系统崩溃。由于各个子系统已经对原始数据做了大量压缩和抽象，所以决策级融合所需的计算资源和通信带宽都非常小，适合于船岸一体化的远程运维架构。经过综合分析不同原理、不同视角的诊断结果，决策级融合可以解决单个判据可能出现的漏报、误报问题，给出更自信的决策建议。

（一）投票法融合

投票法是最直观、最容易实现的决策融合方法，它的基本思想来自于少数服从多数的原则。在船舶轮机预警系统中可以设置多个独立的故障诊断分类器，例如支持向量机、随机森林、人工神经网络等，对同一个故障样本做分类。绝对多数投票法需要超过半数的分类器的输出一致才作为最终判断，否则为不确定状态。

此方法比较稳健，但在分类器数量少或者意见分歧严重时容易造成拒判。

相对多数投票法（得票最多者胜出）应用最广，它选择票数最多的故障类别为最终结果，保证系统总有输出。为了提高融合的精度，一般采用加权投票法。根据每一个分类器在历史测试集中准确率或者混淆矩阵，给每个分类器赋予不同的权重系数。性能好的分类器所得到的权重就越高，其投票结果对最终决策的影响也就越大。可以抑制性能较差的分类器的干扰。设定阈值投票法也是一种实用的方法，只有某类故障的得票数或者加权得分大于安全阈值才会发出警报，从而大幅降低虚警率，防止因误报而影响船员正常操作。

（二）贝叶斯推理

贝叶斯推理属于基于概率统计的一种融合手段，它给出了一套严密的数学架构来处理不确定的信息。决策级融合用贝叶斯方法，用贝叶斯公式把各个子系统的诊断结果当作新的证据，从而更新故障发生的后验概率。系统先前就确定各种故障模式的先验概率，这一般是根据船舶设备的可靠度数据或历史故障统计。当收到振动分析子系统或者热力参数分析子系统的诊断报告（证据）时，根据各个子系统的条件概率密度函数（似然函数），计算在当前证据下各个故障模式成立的后验概率。

贝叶斯推理最大的优势就是增量学习。监测时间越长，新的证据就越多，故障的后验概率就会不断修正、收敛，最终使诊断结果越来越接近真实情况。贝叶斯网络采用因果图模型，用故障的原因、故障的征兆、传感器的读数之间的概率依赖关系来解决传感器冲突的问题。通过概率传播和推理在网络中计算出各个节点给定观测集合的置信度，从而找到不确定信息中最可能的解释。最小风险贝叶斯决策考虑了损失函数，对误报、漏报造成的不同经济损失和安全风险进行了权衡，选择期望损失最小的决策方案，对保障船舶航行安全有重要的工程价值。

（三）D–S 证据理论

D-S 证据理论是贝叶斯理论的推广，它对“不知道”、“不确定”信息的处理能力比贝叶斯方法更强。船舶轮机故障机理很复杂，检测手段也很有限，所以很难获得准确的前验概率。D-S 证据理论提出了识别框架和基本概率分配函数的概念，可以将概率分配给故障集合的子集，甚至可以分配给整个全集（表示完全无知），因此可以模拟人类思维中不确定性推理的过程。

这一理论的核心就是 Dempster 合成规则，它给出了一种数学上可以证明的，

如何将不同证据源（不同的传感器或者诊断模块）提供的基本概率分配进行正交和归一化的办法。利用合成规则可以把若干个弱证据合成一个强证据，从而很大程度上提高对于目标故障的置信度。振动分析认为轴承磨损的可能性为 0.6，油液分析认为轴承磨损的可能性为 0.7，经过 D-S 合成后，得出的对轴承磨损的支持度就会超过单个证据所能达到的限度。但是，由于证据高度冲突时 D-S 合成规则会产生悖论（即失效），所以提出了很多改进的算法，如基于证据距离的加权合成、修正的基本概率分配函数等。这些改进使 D-S 理论能很好地处理传感器故障或者环境突然变化所造成的证据矛盾，在多源信息融合预警中起着非常重要的作用，为轮机员提供包含信度和似然度区间的丰富决策信息。

决策级融合方法特点比较表

方法名称	主要思想 / 机制	优点	缺点	应用场景举例
投票法	少数服从多数原则，多分类器结果汇总	直观易懂，实现简单，容错性好	分类器数量少或意见分歧大时易拒判；不处理不确定性	早期预警，简单故障判断
贝叶斯推理	利用贝叶斯公式更新后验概率	理论严密，可增量学习，处理不确定性	需先验概率和似然函数，对独立性假设敏感	复杂故障诊断，系统状态更新
D-S 证据理论	基于基本概率分配函数，处理“不知道”	处理不确定性能力强，不需先验概率	证据高度冲突时易失效，计算复杂	模糊信息融合，多传感器冲突处理

第三节 实时预警算法设计

船舶轮机系统运行状态瞬息万变，故障发生和发展一般很快。为了保证船舶航行的安全可靠，建立一套高效、准确的实时预警算法体系是十分重要的。本节主要对实时性保障技术、预警逻辑设计的架构、误报漏报的控制策略进行论述，采用先进的数据处理手段和逻辑判断，实现轮机故障毫秒级响应，并且准确识别。

一、实时性保障技术

大量的传感器数据加上复杂的轮机工况，传统离线分析方法不能满足现代船舶对故障诊断时效性的要求。建立低延迟、高吞吐量的数据传输通道是实现实时预警的前提条件，从数据流动、模型更新、计算架构三个方面入手对数据流动进

行深入的改进。

（一）流式数据处理

船舶轮机监测系统在运行过程中会产生大量的高频时间序列数据，采用传统批处理的方式，即积攒一定量的数据后才进行处理分析，必然会造成预警信息的滞后。流式数据处理技术的主要特点就是数据产生即处理，系统不再需要等到数据落盘之后再进行处理，而是在内存里创建滑动窗口对数据进行实时处理。对排气温度、滑油压力等轮机重要参数的统计特征，在每一个新的数据点到来时都会进行更新，进而引发相应的逻辑判断。

为了克服船端计算资源的限制，流处理框架要使用高效的内存管理机制。由于船舶数据具有很强的时效性，过去久远的数据对于当前的故障预警作用越来越小。系统使用时间衰减加权或者定长队列，自动删除超过发布窗口的历史数据，保持内存占用稳定。减少磁盘读写次数，把数据压缩处理推到微秒级，给突然发生的故障留有足够的应对时间。

数据清洗阶段流式架构就体现了它的特点。流式处理引擎内部会有传感器数据的瞬时丢包、乱序问题，流式处理引擎有水位线机制，窗口关闭之前，可以接受一定程度的数据迟到，对缺失数据做插值填补或者剔除异常噪点。动态清洗过程与数据摄入同步进行，可以保证预警逻辑算法所用的数据质量，使系统在恶劣海况下信号波动的情况下仍然具有稳定的分析能力。

（二）增量学习算法

传统的机器学习模型基本上都是通过历史的数据集来进行训练，一旦投入使用，其参数就不会发生变化。船舶轮机设备在全生命周期中会经历磨合期、稳定期和耗损期，物理特性以及运行参数的分布随时间的推移而慢慢发生漂移。模型无法适应这种变化的话，那么预警的准确率就会大打折扣。增量学习算法打破了传统一次训练完成后就不能再使用它的限制，可以在接收新的数据之后，使模型调整自己参数的权重，而不需要对整个模型重新进行训练。

增量学习对轮机预警而言，主要就是动态跟踪正常工况的基准线。用在线随机梯度下降法或者递归最小二乘法等方法，利用最近的运行数据对模型对于正常状态的定义进行微调。当主机的使用年限增加的时候，燃油消耗率的正常标准会略有提高，增量学习算法可以发现这个趋势，并自动调整判断阈值来避免因为设备自然老化而产生的虚假警报，使模型和物理实体状态同步发展。

（三）并行计算优化

船舶故障诊断所涉及的参数非常多，各个子系统之间还存在复杂的耦合关系，使得预警算法的计算复杂度非常高。为了在限定的时间窗口内完成成百上千个测点的分析，就必须最大限度地发挥硬件的计算能力。并行计算优化技术把大计算任务分解成互相独立的小子任务，分发到多核处理器或者专用计算单元上同时执行，从而大大提高了系统的吞吐量。

1. 数据级并行是提高预警速度最基本的方式。由于轮机各个缸的燃烧过程、各个泵组工作状态物理上是相互独立的，所以可以将不同的设备监测数据分配给不同的计算线程。分析十二个气缸排气温度偏差时，算法会启动十二个并行线程，同时计算各个气缸温度与平均值之间的偏离度，不用一个接一个地排队处理，使总计算时间缩短为单线程模式的几分之一。

2. 任务级并行是对复杂关联分析场景的处理。当系统做多参数融合预警时，需要一起完成趋势预测、相关性分析、阈值比对等不同的任务。通过构造任务调度器的有向无环图形式，可以找到各个计算步骤之间的依赖关系，并将没有依赖关系的任务并行发射。判断滑油系统故障时可以同时进行压力趋势分析和温度相关分析，在汇合点处合并结果，减少逻辑推理的等待时间。

二、预警逻辑设计

预警逻辑是智能系统的“大脑”，预警逻辑设计的好坏直接影响预警的对错。单一判断规则很难应对复杂的轮机故障机理，因此要创建单参数、多参数关联和趋势演化的多层次预警逻辑体系，从而达到点面结合、静态动态并举的全方位监控。

（一）单参数越限预警

单参数越限预警是最基础也是最直接的一种防护方式，即对一些重要的物理量是否在设备安全运行允许范围内进行监测。轮机系统中冷却水温度、润滑油压、转速等参数的额定工作区间都是已知的。当检测值大于上限或者小于下限时，就会产生报警。该机制对于识别由于管路破裂引起的压力突然下降、由于冷却系统失效导致的温度急剧上升等突然出现的严重故障，具有无法取代的快速响应作用。

但是仅靠静态的固定阈值很难满足船舶变工况运行的要求。船舶在港内机动、海上巡航、恶劣海况下的负荷状态各有不同，同一个参数在不同的工况下其正常

范围也会有较大的差异。因此现代预警系统就加入了动态阈值的机制。系统实时采集主机负荷指令、转速和外界环境温度，通过查表法或者回归模型计算出当前工况下该参数的理论基准值，然后加上允许的波动偏差，得到随工况变化的动态包络线。

变化率越限为单参数预警逻辑中的一种。有些故障刚出现的时候，参数还在正常范围里，但是变化速度特别快。轴承温度没有达到高温报警点，但是短时间内急剧上升往往预示着润滑失效或者异常摩擦的发生。计算参数的一阶导数可以捕捉到瞬间的异常突变，在参数到达危险红线之前就能发出预警，给轮机员留出采取紧急措施的缓冲时间。

（二）多参数关联预警

船舶轮机是高度耦合的热力系统，单参数异常一般就是系统问题的局部表现，也容易受到传感器漂移或者环境干扰的影响。多参数关联预警，就是对物理上存在某种内在联系的多个变量之间相互关系进行分析，从中找到隐藏在数据背后故障的征兆。该逻辑依据的是物理机理模型或者数据驱动的统计相关性，能够区分出传感器故障和真正的设备故障，也能发现单参数逻辑无法发现的隐蔽性问题。

系统主要研究热力参数之间的联系，重点研究能量守恒、质量守恒等所包含的约束关系。柴油机扫气系统中，扫气压力、涡轮转速、主机负荷三者之间存在着一一对应的关系。如果发现扫气压力下降，但是涡轮转速、主机负荷没有变化，那很可能是空冷器脏堵或者扫气箱漏气，而不是简单的传感器波动。算法创建多维状态空间，使用马哈拉施诺比斯距离来度量当前观测向量到正常运行流形的距离，当量化距离大于设定阈值时，就认为系统脱离了正常的耦合状态。

流体系统的关联预警就是压力、流量、泵浦电流三者之间的逻辑校验。海水泵出口压力下降，如果伴随电流下降，说明叶轮出现空蚀或者吸口滤器堵塞；电流异常升高，说明轴系卡死或者管路严重结垢造成的阻力增大。系统采用主成分分析技术来提取多变量数据中的主要变化模式，用残差子空间投影变化来监测变量间相关结构的破坏，从而实现对复杂的故障模式进行精确定位。

多参数关联逻辑也被用在燃烧系统平衡性监测上。通过对各个缸的排气温度、爆发压力、示功图特征进行横向比较，可找出个别气缸燃烧变坏。如果某一缸排温偏高并且伴随着爆发压力下降，那么算法就会利用喷油正时和喷油量的指令数据做综合分析，判断是否出现喷油器雾化不好或者排气阀漏气的情况，消除了单

缸参数波动带来的不确定性。

（三）趋势变化预警

故障出现一般都有量变到质变的过程，趋势变化预警就是发现这个过程的早期迹象，从而实现预测性维修。趋势预警关注参数长时间尺度上变化的规律，用历史数据的时间序列曲线来拟合预测未来某个时刻参数的变化趋势。对于发现磨损、结垢、疲劳等逐渐出现的故障具有很高的应用价值，可以使船员在造成实质性的停机之前就制定出维护计划。

趋势分析的主要目的就是提取时间序列的长期趋势项，剔除周期性波动和随机噪声。系统用指数平滑或者多项式拟合的方法对重要的性能指标，比如热交换器传热系数、过滤器压差的变化率等来进行建模。当监测到的参数呈单调上升或者下降趋势，并且该趋势的持续性通过显著性检验时，算法就会根据当前的退化速率，外推计算设备性能衰减到失效阈值所需要的剩余有用寿命。不仅可以发出报警信号，还可以量化故障的紧急程度。

用简单的线性外推来处理非线性趋势，往往会失效。所以系统选择灰色理论或者支持向量回归的非线性预测模型。可以模拟出轮机参数在各个老化时期加速退化的特性。气缸套的磨损率开始的时候比较慢，但是到后期呈指数增长。趋势预警逻辑可以发现非线性的拐点，当发现退化速率有加速的迹象时，就提高预警级别，提示操作人员设备处在急剧恶化的危险区间。

三、误报与漏报控制

在实际的船舶运行环境中，高频的误报会使得轮机员产生报警疲劳，进而忽略掉真正的危险信号，漏报则会造成灾难性的后果。因此建立严密的误报、漏报控制机制来平衡灵敏度和特异性，就是预警系统实用化的关键。

（一）报警确认机制

系统增加时间窗口的报警确认来排除由电磁干扰、传感器瞬态抖动或者通信误码等造成得虚假尖峰信号。单个数据点的越限并不足以引起最终的报警，只有在连续的多个采样周期内异常状态一直存在，或者在设定的时间窗口内出现的次数占总次数的比例超过一定比例时，才会触发报警。多次确认的逻辑就像人看仪表时反复核对一样，把偶然出现的随机噪声过滤掉了。

系统用的是 N 中取 M 的逻辑门限策略。检测窗口设为 10 个采样点，只有当

其中至少 8 个数据点被判定为异常时，系统才认为有真正的故障发生，并发出报警信号。用牺牲掉很少的响应时间（一般为毫秒到秒），换来了报警可靠性大幅度提高。根据参数危急程度的不同，确认窗口长度可以自由设置，对可能会导致主机停车的危急参数，采用较短的确认窗口来保证安全；对一般的监测参数，适当延长确认窗口来提高抗干扰性。

（二）报警延时与滤波

船舶在海浪中摇摆、机舱设备的启停都会造成流体管路内压力波动、液位震荡，这些物理波动不是设备故障，但是很容易引起瞬时报警。报警延时和数字滤波等都可以用来解决该种问题。系统在原始信号进入判别逻辑之前，会先经过低通滤波器或者中值滤波器，将高频的机械振动噪声、电气尖峰等去除，只保留反映设备真实状态的低频分量。

报警延时功能是用逻辑判断所设定的防抖动缓冲区。当参数越限之后，计时器开始计时，只有当越限状态持续时间超过设定的延时阈值（液位报警一般设置数秒延时来避开摇摆影响）之后，才会触发报警。如果在延时期间参数回归正常，就将计时器清零、报警解除。系统加入了迟滞比较器逻辑，即报警触发阈值和报警复位阈值之间存在一个死区。如温度大于 90 度报警，则必须降到 85 度以下才能解除报警，这样可以避免参数在临界值附近波动造成报警继电器来回跳动。

（三）报警优先级管理

为了防止故障发生时次要报警淹没主要信息，系统建立分级的报警优先级管理机制。按照故障对船舶航行安全、人员安全和设备健康的破坏程度来分等级报警，并给不同的报警赋予不同的处理逻辑以及显示方式，如下表所示。

报警优先级分类表

优先级	报警类型	影响	响应方式	处置要求
一级	危急报警	船舶生存，人员安全	最高中断，强制弹出，高分贝声光	立即人工确认，紧急处置
二级	重要报警	船舶降速，设备停运	明显颜色标记，档案记录	轮机员及时处置
三级	一般预警 / 提示	轻微偏差，传感器异常	状态栏滚动，后台日志记录	预防性维护参考

（四）自适应报警阈值调整

传统的固定阈值设置很难同时满足所有运行状况，在极端海况或者特殊作业

模式下，很容易发生误报。自适应报警阈值调整技术用环境感知和反馈学习的方法，当外部条件发生变化的时候使预警边界随之改变。采用船舶的纵横摇角、海水温度、大气压等环境参数的实时采集，采用模糊逻辑或者神经网络对标准阈值进行修正。当船只航行于热带海域的时候，冷却系统的基准温度会自动调高，防止由于环境温度过高而造成虚假过热报警。

除了上述提到的自适应机制还有历史误报数据的反馈学习。系统记载每次轮机员把事由标示成误报的事由、该事由出现时的工况特性及参数分布情况。根据统计分析结果发现，容易造成误报警的情况是主机在低负荷加减速的时候，针对这种情况适当降低判别灵敏度。依靠人工反馈的在线优化过程，使预警系统在使用中不断改进，逐渐接近船舶特有的运行特点，从而达到误报率和漏报率都很小的效果。经过长时间的自适应调节之后，在保障安全最低线的情况下，尽可能地减少无效的人机干扰，提升人机协作效率。

第四节 预警系统性能评估指标

创建一个高效的、稳健的船舶轮机故障诊断与智能预警系统，不能单靠先进的算法模型、高精度的传感器网络，还需要一套科学的、全面的、严谨的性能评价体系来检验系统实际效果。评价指标的选择决定了系统优化的方向和最后落地的可行性，要包含模型预测精确度、系统运行时的即时响应、长时间运行的可靠性、稳定性等等。本节主要研究船舶复杂工作条件下需要的预警系统核心评价指标，为系统的测试验证和不断改进提供量化标准以及理论依据。

一、准确性评估指标

准确性是衡量故障诊断系统好坏的首要标准，直接体现故障诊断系统的诊断结果准确程度。面对大量的监测数据以及各种噪声的干扰，单单用一个正确率的指标是不能反映模型的真实水平的，需要从不同的角度去分析算法对于各种故障模式的识别能力，从而保证诊断结果的可靠性。

（一）准确率与精确率

准确率是最常用的评价指标，它是系统所有预测样本中被正确判断的样本所

占的比例。当船舶轮机监测数据分布比较均衡的时候，准确率可以较为真实的反映系统整体的分类水平。大型低速柴油机等核心设备系统不仅要识别故障状态，还要对正常运行状况做出准确判断，高准确率意味着系统大部分时间都能对设备状态做出正确的识别，根据国际海事组织（IMO）及相关工业标准，对于关键安全设备的监测系统，其整体准确率通常要求达到 95% 至 99% 以上。但是，在船舶设备的实际使用场景中，设备运行数据一般都非常不均衡，正常运行的数据占绝大多数，故障数据很少。在某些监测任务中，正常样本与故障样本的比例可能高达 1000:1 甚至更悬殊，呈现出显著的“长尾分布”。由于存在这种数据特性，即使系统将所有的样本都判定为正常，也能得到 99.9% 的数值非常高的准确率，但这会导致故障预警功能形同虚设（参考《不平衡数据学习》Chawla 等人的研究）。因此，仅用准确率是不能满足对关键故障的捕捉要求的，必须与其他指标结合使用。精确率，又称为查准率，主要衡量的是系统把样本预测为正类（如故障状态）时，实际为故障状态的比例。这个指标对于减少假警报有决定性的作用。在船舶轮机管理过程中，每一个故障预警都会导致轮机员进行现场巡检、设备停机检查或者复杂拆解维修作业。如果精确率过低，系统发出的警报中就会包含大量的误报。研究表明，如果系统的误报率超过 20% 至 30%（即精确率低于 70% 至 80%），轮机员对警报的响应速度和信任度会急剧下降（参考 IEEE Transactions on Reliability 相关人因工程研究）。为了建立有效的信任机制，通常要求智能预警系统的精确率不低于 85% 至 90%。提高精确率的核心就是抑制背景噪声对算法的干扰，通过设置合理的置信度阈值（如 0.8 或 0.9），保证每次发出的故障提示都是基于可靠的数据特征，而不是信号随机波动造成的，从而建立起船员对智能系统的信任。

（二）召回率与 F1 值

召回率也称为查全率，用来度量系统对实际故障样本中正确识别出故障的比例。召回率一般和精确率相反，它在不漏掉重要故障的时候起着重要作用。轮机设备存在一些关键故障，比如滑油失压、曲柄箱油雾浓度升高、涡轮增压器喘振等，一旦发生且不能被及时发现，很容易造成灾难性的机械损坏，甚至危及到船舶的航行安全。高召回率表示系统很敏感，能尽可能多地包含可能存在的风险隐患，宁可错杀，不可漏网。为了提高召回率，算法一般都会设置比较敏感的触发

阈值，牺牲一定的精确度来增大误报率。保证安全底线（即高召回率）的同时又不能有误报率，这是算法调优的难点所在。

F1 值是精确率和召回率的调和平均数，它体现了精确率和召回率之间的一种平衡。当单个指标顾此失彼的时候，F1 值就能体现系统查准和查全的平衡状况。当精确率和召回率产生冲突的时候，观察 F1 值的变化情况就可以找到二者的最佳平衡点。对船舶预警系统而言，过于追求精确率会增大漏报的风险，过于追求召回率会造成警报泛滥。最大化 F1 值可以使系统对故障的检测能力尽可能的大，但也要保证误报率在可接受的范围内。F1 值一般被当作损失函数优化的准则或者超参数选择的准则，以期望最终部署的模型可以展现出稳定的综合性能。

（三）ROC 曲线分析

受试者工作特征曲线是不以某个特定的分类阈值为基础，对分类器的效能进行综合评价的一种方法，它用曲线的形式显示了不同阈值下真阳性率和假阳性率的变化情况，清楚地反映了分类器的总体性能。ROC 曲线下的面积衡量的是模型将正样本和负样本区分开的概率。面积值越接近 1，系统分类性能越好；面积值越接近 0.5，系统分类性能就越差。由于海况变化会引起船舶负载波动，所以固定的报警阈值不能适应所有的情形。ROC 曲线分析可以使得工程师了解模型在各种敏感度下所表现出来的行为，从而为动态阈值的设置提供理论依据。

在实际工程应用中，通过 ROC 曲线可以针对不同的设备重要性制定差异化的报警策略。

1. 对船舶动力维持类主机燃油喷射系统等核心设备，可以选择 ROC 曲线上偏高真阳性率的工作点，即在保证不漏掉故障的前提下，允许较高的误报率。

2. 对非关键的辅助设备如生活污水处理装置可取较低的假阳性率工作点，以减少对船员日常工作的影响。

根据 ROC 曲线的形状可以判断模型是否出现过拟合或者欠拟合，曲线在低假阳性率区域是否陡峭代表模型识别典型故障特征的能力。面积值的评价使得不同算法模型之间可以进行比较，而不会因为单一测试集正负样本比例的不同而影响评价结果，是评价船舶智能预警系统泛化能力的一种有效方法。

这些关键的准确性评估指标及其特性概括可见下表：

准确性评估指标概述

指标名称	定义	主要关注点	优缺点 / 应用场景
准确率	正确预测的样本占总样本的比例	整体分类效果	数据均衡时有效，数据不均衡时易误导
精确率（查准率）	预测为正类中实际为正类的比例	减少假警报（误报）	船舶管理中避免资源浪费和“狼来了”效应
召回率（查全率）	实际为正类中被正确预测为正类的比例	减少漏报，发现所有风险	关键故障场景，宁可错杀不可漏网
F1 值	精确率和召回率的调和平均数	综合平衡查准与查全	寻找最佳平衡点，模型优化准则
ROC 曲线 /AUC	真阳性率与假阳性率随阈值变化的曲线及曲线下面积	全面评估分类器性能，阈值无关	适应动态海况，制定差异化报警策略，泛化能力评估

二、实时性评估指标

船舶轮机系统工作状态变化莫测，故障发展的过程常常在短时间里，由小变大，从轻微征兆发展成灾难性破坏。因此预警系统实时性的好坏既关系到用户体验，也关系到是否能在黄金时间内完成避险操作。实时性评价指标主要考察系统对高速数据流的响应速度和计算效率，保证智能诊断结果能够比故障恶化速度更快地产生出来，给轮机员留出充分的决策和处置时间。

（一）响应时间

响应时间是系统接收到用户查询请求或者检测到异常状态的触发条件，到人机交互界面显示诊断结果或者发出报警信号为止的时间间隔。船舶智能化管理平台的响应速度很快，轮机员的操作体验很舒服，应急反应及时。对即时性要求很高的报警，如主机超速、轴承高温等，响应时间必须控制在毫秒级或者秒级以内，保证船员可以马上获知危险。如果响应时间过长，就会导致船员在设备实际上已经遭受严重损坏之后才接到警报，这样的话预警系统就等于没有起到“未雨绸缪”的作用。

该指标测试一般要分不同的负载来完成。系统空闲状态下的响应时间可以体现软件架构的基本开销，在高并发情况下，由于海况恶劣造成全船数百个传感器同时产生剧烈波动数据的时候，系统响应时间的稳定性就考验着系统的资源调度能力。一个好的预警系统应该具有一定的响应时间特性，即无论系统负载如何变化，对于最高优先级的报警任务，响应时间都应该在安全范围内。优化响应时间

一般涉及前端界面渲染的优化、数据库查询速度的提高、报警推送逻辑简化等，以保证重要信息能最快的到达决策者那里。

（二）处理延迟

处理延迟是指算法引擎内部的计算时间，也就是原始传感器数据输入到算法模型中，经过特征提取、推理计算最后得到诊断结论所用的纯计算时间。随着深度学习等复杂的算法被使用到船舶故障诊断中，模型结构越来越大，计算量呈指数增长，处理延迟成为系统实时性的主要障碍。对振动信号分析为主的诊断任务，系统要执行傅里叶变换、小波分解等复杂的数学运算，如果算法复杂度高或者硬件算力不够，处理延迟就会增大，使诊断结果滞后于设备当前的状况。

减小处理延迟的一种方法就是部署边缘计算。在船舶机舱边缘端的设备上计算资源比较少，不能像岸基云端服务器那样有强大的并行计算能力。因此评价处理延迟要联系具体的硬件环境。采用模型轻量化技术，例如模型剪枝、量化或者知识蒸馏，可以在牺牲很少精度的前提下大幅度降低计算量，从而减少处理延迟。对于流式数据处理架构来说，数据在内存缓冲区中停留的时间也包含在处理延迟里。如果流水线工作得足够高效，数据就会做到到即算，不会因为堆积而出现延迟累加，从而保证诊断逻辑与物理世界同步。

（三）系统吞吐量

系统吞吐量是单位时间内预警系统能够处理的数据量或者并发任务数，它反映的是预警系统面对大量数据洪流的能力。现代大型船舶上安装的传感器测点数达数千甚至数万，采样频率从赫兹级到千赫兹级，数据流量极大。吞吐量指标决定系统是否可以对全船的设备进行同步监测。吞吐量不足的话，接入的传感器数量增加时就会出现数据丢失、拥塞、系统崩溃的现象，造成监测盲区的产生。

高吞吐量的实现依赖于高效的数据接入层设计与并行计算架构。

1. 这反映在系统在数据接入环节所需要的高并发网络 I/O 能力，即可以同时处理机舱监测报警系统、电子调速器、配电板等众多子系统数据流。

2. 通过使用多线程或者分布式计算，把大数据流分配给不同的计算单元并行处理，能够提高吞吐量。

评估吞吐量的时候一般用压力测试，模拟极限工作状况下的数据输入速率，看系统的处理上限。吞吐量大的预警系统，在全船设备满负荷运行、数据量激增的情况下，仍然可以保证流畅的分析诊断服务，不会因为数据拥堵而忽略任何一

个重要的异常信号。

（四）端到端延迟测量

端到端延迟测量是从物理传感器产生数据那一刻开始，一直到数据被采集、传输、处理、存储，最后到用户终端屏幕上展示为止的整个过程总耗时的一个评价。此指标包含了上述的响应时间、处理延时、信号采集模块转换时间、船内局域网网络传输延时、数据库读写耗时等等。船舶环境中的电磁干扰会引起网络重传，老旧的布线系统会限制传输带宽，这些物理层面的因素都会叠加到端到端延迟上。

对于依靠岸基专家支持的远程故障诊断系统，端到端延迟还要考虑船岸卫星通信链路的情况。卫星通信的延迟大、带宽小、易丢包，船舶上的数据传输到岸端的数据中心需要几秒到几分钟。此时端到端延迟的评价可以确定系统功能范围，延迟敏感的紧急故障需要依靠船端边缘计算解决，延迟不那么敏感的长期性能趋势分析可以承受较慢的端到端延迟，并且可以利用岸基算力进行深入挖掘。对端到端延迟的每一部分实施分段测量，可精确确定系统的性能瓶颈所在，区分是网络原因还是算法原因，进而有目的地进行调整优化，保证整个链路的时效性满足应用需求。

三、可靠性评估指标

可靠性是船舶轮机故障诊断和智能预警系统由实验室走向实船的“通行证”。船舶远航在茫茫大海之中，远离陆地技术支持，机舱环境温度高、湿度大、振动大，电磁环境十分复杂。在这样恶劣的环境里，预警系统不仅要算得准、算得快，还要活得长久。可靠性评价指标想要对系统长时间连续工作时的稳定水平，抗干扰能力以及故障发生后恢复的情况加以量化评价，从而保证其可以成为轮机员放心依靠的数字化助手，而不是增加维护负担。

（一）系统可用性

系统可用性一般用百分比来表示，用来度量系统在规定时间内能够正常工作概率。船舶预警系统高可用性即船舶预警系统可以全天候、无间断的对轮机设备进行守护。因为船舶航行的周期很长，所以系统必须保持 7 × 24 小时不间断工作。可用性计算时需要扣除系统因为故障停机和计划内维护所用的时间。要达到“五个九”或者更高的可用性水平，系统架构设计就无法避免地要引入冗余机制，比

如双机热备、负载均衡集群、数据库主从复制等等。

在评估可用性时，还需关注系统在部分组件失效下的降级运行能力。

1. 当某个非关键传感器失效或者部分计算节点离线的时候，优秀的系统应该可以自动隔离故障区域，保证核心功能的正常运行，而不是整个系统崩溃。

2. 软件方面应当有健壮性，有自动重启、检测内存泄漏并自我修复的能力，以避免因为软件出错造成服务长时间的中断。

高可用性是系统获得船级社认证和船东认可的先决条件，它可以保证船舶在穿越风暴区或者进出港的时候，智能预警系统一直处于工作状态，从而为航行安全保驾护航。

（二）平均无故障时间

平均无故障时间是用来表示系统可靠性的一个很重要的统计指标，用来表征系统两次相邻的故障之间的平均的正常工作时间。数值越大系统就越稳定，发生故障的可能性就越小。船舶应用环境下预警系统的平均无故障时间，是由工业计算机、传感器等硬件的物理寿命和抗恶劣环境能力决定的，也受软件算法稳定性的影响。硬件上要选用有船用认证的元器件，软件上要经过严格的代码审计和长时间的压力测试来剔除逻辑错误。

增加平均无故障时间可以减少轮机员对预警系统本身的维护工作。如果诊断系统经常出现死机、卡顿、数据中断的情况，轮机员就必须花费大量的时间来重启或者调试系统，不但会降低工作效率，而且还会严重地打击船员对智能技术的接受度。评价平均无故障时间要结合实验室加速老化试验数据、实船试运行数据。对系统在试运行期间发生的全部故障加以分析，找出故障产生的根源，进而持续改善软硬件的设计，使得平均无故障时间与船舶主要机械设备的检修周期相匹配，真正实现免维护或者少维护的目的，切实减轻船员的负担。

（三）误报率与漏报率

误报率和漏报率在准确性上都有体现，但更关键的是要从误报、漏报给船舶运营带来的实际经济损失、安全风险，以及系统长时间运行中保持低误报、低漏报的稳定性方面来进行评价。误报率即系统对正常设备发出故障报警的比率。高误报率导致船员不信任报警系统，造成警报疲劳，甚至造成不必要的停航检查，造成严重的船舶延时，消耗大量的燃油。在无人机舱或者少人机舱的趋势下，每一次误报都会吵醒正在休息的船员，影响船员的休息质量以及值班状态。

漏报率就是系统不能发现实际存在的故障的比率。漏报的后果很严重，会使得设备带病运行直至完全毁坏，会引发火灾、爆炸或者全船失电等重大事故。从可靠性工程的角度看，漏报率和误报率之间存在跷跷板效应，减小其中一个，就会增大另一个。可靠性评价的关键就是找到最好的代价平衡点。对造成严重影响的故障，比如主机拉缸之类的，应当设置极低的漏报容忍度；而对于轻微的影响（管路振动之类的）则可以适度提高误报容忍度来减少不必要的报警。这个指标的评判要长时间依靠实船运作数据，把每一次警报的真实性，每一次故障的发现情况综合起来考量，依靠真实案例来校准系统的可靠程度，保证系统在使用寿命内，一直像船舶安全的忠实守门人一样。

第八章 轮机智能预警系统应用案例

本章主要使用实船应用数据，对轮机智能预警系统在复杂海况下实际工作状况做详细的分析。本课题针对具体的工程实例，对主机系统监控配置结构、典型故障演变预警过程及系统应用后各方面效果进行详细的介绍，其目的在于验证智能诊断算法在工程中应用的可行性，为今后船舶机舱无人化运行提供一定的数据支持和实践借鉴。

第一节 主机系统智能预警应用

船舶主机是推进系统的主要动力装置，其运行效率和航行安全由它来决定。主机智能预警的应用不是单个参数超限报警，而是基于多源信息融合的深度态势感知。本节从底层的感知系统开始，对一条典型的故障捕捉路径进行回顾与分析，并且从技术角度以及经济角度来衡量系统的应用价值。

一、主机监测系统配置

要创建高可靠性的主机智能预警体系，首先要创建一个全面、准确、反应及时的监测网络。涉及到的主要环节有三方面，即传感器选型及布置的合理规划、数据采集单元的高效运行、通信网络架构的牢固设计。三者互相配合，构成了智能预警系统物质的基础，保证数据通畅地流通。

（一）传感器布置方案

大型二冲程低速柴油机机械结构复杂、热力过程繁杂，所以传感器布置方案要遵循关键点全面覆盖、故障多维映射的原则。除了常规的主轴承温度传感器之外，还在机架侧壁上装了高灵敏度的油雾浓度探测器，可以捕捉到由于运动部件过热而产生的滑油雾化。同时在主轴承座、推力轴承处装设了三个三轴向压电式振动加速度传感器，采集高频冲击信号来辨识轴承早期疲劳剥落或磨损的特征。气缸组件上每个气缸的缸套壁面上都埋有若干热电偶，用以检测周向温度分布，

防止拉缸事故发生。

燃烧系统也做了细致的监测，每个气缸盖都装有在线燃烧压力传感器，随时获取缸内压力的瞬时变化数据，获取示功图数据。燃油喷射系统装有针阀升程传感器和高压油管压力传感器，用以分析喷油正时及喷射规律。扫气箱内部装有温度、压力传感器阵列，对扫气效率及扫气箱着火危险进行监测。涡轮增压器属于重要的辅助装置，其转速、进排气口废气温度、滑油进出口压力等参数都被包含在监测范围内，压气机端装有振动探头，用以检测转子不平衡和喘振等状况。

为了对整机振动状态进行全方位的监测，在机座地脚螺栓附近和机身顶部都布置了低频振动传感器，用以分析船体与主机的耦合振动特性。冷却水系统、滑油系统进出口管路上均装有高精度流量计、压力变送器，配合温度传感器实现热平衡状态的实时计算。所有的传感器在选购时都考虑到了船用的恶劣环境条件，具备防潮、防盐雾、抗电磁干扰功能，防护等级达到 IP65 以上，能够在高温高湿的环境里长时间的稳定工作。

（二）数据采集系统

数据采集系统是物理传感器和上层处理单元之间的桥梁，它的好坏直接影响预警模型的输入。本系统使用分布式的采集架构，在设备旁设置多个就地采集箱，减小模拟信号传输的距离，减小噪声的干扰。采集单元内部带有信号调理模块，可以对微弱的振动信号进行放大、滤波、抗混叠。对于燃烧压力这种高频的动态信号，采集卡的采样率设置为 50kHz，并且有同步触发的功能，使得各个缸的压力数据与曲轴转角一一对应，相位误差小于 0.1° 曲柄转角。

温度、压力等缓慢变化的参数，采取多通道并发巡检的方式进行采样，采样周期为 500ms，保证状态参数的实时性。系统内部用 24 位高精度 A/D 转换芯片，可提高信号精度，可以检测到很小的温度漂移、压力波动。数据预处理时采集单元会剔除异常值，对由于电磁干扰产生的随机尖峰脉冲进行有效的筛选。采集箱内部设有独立的数据缓存区，当网络出现瞬时拥塞或者中断的时候，历史数据可以被保存在本地，并且能够缓存 24 小时，网络恢复之后再续传，不会出现数据丢失的情况。

（三）通信网络架构

通信网络架构设计要兼顾高带宽、高冗余，满足海量监测数据实时传输需求。该系统使用双层网络结构，底层感知网采用工业现场总线连接各种智能传感器和

执行器，控制指令和状态数据在毫秒级完成交换；上层信息网以千兆工业以太网为载体，构建了双环网冗余结构。当主通信链路断开或者出现故障的时候，网络交换机可以在 50 毫秒之内切换到备用链路来保证数据传输的连续性。

系统采用标准的 Modbus TCP/IP 协议和 OPC UA 统一架构，保证预警系统可以和船舶报警监控系统、轮机控制系统进行数据交换。为了防止网络风暴和恶意攻击，在核心交换机上实施了 VLAN 划分以及 ACL 访问控制，把监测数据流量和办公普通网络物理隔离开。系统还留有船岸通信接口，通过船载卫星通信终端，将重要的报警数据和特征向量打包压缩后上传到岸上的技术支持中心，实现船端边缘计算和岸端云端诊断的协同工作模式。开放而安全的网络结构，可以满足目前的数据传输需求，也可以为将来接入更多的智能设备、远程维护功能预留足够的空间。

二、典型故障预警案例

智能预警系统对于实船上出现的多次潜在故障，把传统的维修方式从事后维修变为视情维修。通过研究上述典型案例可以清楚看到一个从特征提取，模型推理到最后预警发布完整的逻辑链条，这就证明数据驱动和机理模型融合诊断方法的有效性。

（一）轴承磨损预警

在一次跨太平洋航行的时候，主机第四缸主轴承温度数据出现异常。尽管当时的绝对温度为 62℃，远小于 80℃的高温报警限值，但系统内置的趋势预测算法却发现，该轴承的温升速度比其它同种轴承快得多。把这一工况下以往的历史基准数据同温度残差加以对比分析之后得知，此轴承在过去 24 小时当中，温度残差表现出单调递增态势，而且伴随着一些周期性的变动。

1. 特征融合分析，系统自动调取同位置振动频谱数据，轴承特征频率倍频处能量出现堆积，峭度指标由正常值 3.0 增大到 4.5。

2. 综合诊断结论：根据滑油光谱分析，传感器传回的铁谱数据分析，铁磁性颗粒浓度没有超标，但是有上升趋势。融合模型判定为轴承瓦面已经开始出现早期磨损，润滑油膜稳定性变差，已经处于金属直接接触的临界状态。

系统立刻发出黄色警戒等级的提示给轮机员。轮机员在之后的停泊检查中发现该轴承瓦面底下明显拉毛和轻微剥落，若继续高负荷运转极易造成烧瓦事故。

因为预警及时，船员只做修刮处理并更换瓦片，避免曲轴严重损坏的风险和损失。

（二）活塞环故障预警

另一例为主机 2 缸活塞环密封失效。巡航工况时，系统发现第二缸扫气箱着火温度传感器数值有不规则的波动，第二缸排气温度比平均值高 15℃。单纯的温度偏差在允许范围内，但是智能诊断模块加入瞬时角速度信号做更深入的分析。由分析结果可得，第 2 缸做功冲程开始时曲轴的瞬时角加速度比理论模型计算值小很多，说明气缸的气密性不好，有漏气现象。

燃烧分析表明，该缸的压缩压力及最大爆发压力有下降的趋势，在某个时间段的曲轴转角窗口内有少量的正压脉冲出现，是高温燃气进入扫气箱的直接表现。系统判定第 2 缸第一道活塞环有断裂或者出现粘滞的可能，造成密封失效，存在扫气箱着火的风险。

轮机长根据预警信息在靠港期间安排吊缸检查。检查结果证明第二缸第一道气环已经断裂成三段，活塞环槽内积碳严重，环体因失去弹性而卡死在槽内。高温燃气已经烧蚀活塞裙部，这次准确预警避免了活塞环碎片损坏缸套、扫气箱着火等严重事故的发生，保证了主机一直保持适航性。

（三）燃烧异常预警

船舶在经过排放控制区（ECA）的时候，系统发现主机的整体燃烧状态有波动，经检查，原来是切换了低硫燃油造成的（通常含硫量从 3.5% m/m 降至 0.5% m/m 以下）。第五缸的燃烧情况最差，示功图上可以看出该缸的燃烧放热率曲线的峰值后移了 3° 至 5° 曲轴转角，燃烧持续角增大至 80° 至 100°（正常一般在 40° 至 60°），排气温度急剧上升 30℃至 50℃。同时从高压油管压力波形图中发现，在喷油结束之后出现了二次压力波动，残余压力偏高 5 MPa 至 10 MPa。

系统排除了燃油品质普遍降低的影响，因为其它气缸燃烧正常，所以故障源定位在第五缸的燃油喷射系统上。喷油器针阀偶件卡滞或雾化不好造成燃油漏出，后燃现象严重。长时间后燃会大大增加燃油消耗，使得燃油消耗率上升 3% 至 5%，还会造成排气阀高温腐蚀和涡轮增压器积炭，积炭累积速率可能增加 20%（《船舶柴油机》及 MAN B&W 维护指南）。

轮机员收到预警之后马上对第五缸的喷油器做在线切换测试。拆解后的喷油器在试验台上检测发现，针阀偶件因积碳存在运动卡滞现象，其启阀压力可能下降了 10% 至 15%，喷孔处存在积碳堵塞，造成雾化锥角畸变（正常锥角如 120°

可能畸变超过 ±10° ）。更换备用喷油器之后，该缸的缸内最大爆发压力恢复正常（恢复至设计值如 13 MPa 至 15 MPa），排气温度也回落到平均水平（温差控制在 ±3% 以内），燃油消耗率监测值也随之降低，这充分说明预警和诊断的准确性。

三、预警效果分析

智能预警系统投入使用之后，除了带来技术上的改进之外，也带来了模式上的改变。根据系统一年试运行的数据统计分析可知，我们从预警及时性、故障定位准确性、经济效益三个角度来对系统的实际效能进行全方位的评价。量化指标有力地证明了使用这个系统可以大大提高船舶的营运效率，也可以大大减少船舶的运维费用。

预警效果的关键指标可见下表。

预警效果关键指标表

指标类别	具体指标	详细描述 / 数值
预警及时性	平均预测视界 (渐变性故障)	>120 小时 (5 天以上)
	突发故障报警提前量	15-45 秒 (较传统系统)
	计划外停机时间削减	约 40%
故障定位准确性	处理数据量	>10TB
	预警信息总条数	>358 条
	有效预警次数	312 次
	故障定位准确率	87.1%
经济效益	年度吊缸次数减少	30%
	单艘年主机维修保养节省	约 15 万美元
	日均燃油消耗减少	约 1.5%
	日均燃油节省 (80 吨船)	约 1.2 吨
	投资回收期	6-10 个月

（一）预警及时性评估

预警的及时性是评价系统能否给船员留出足够反应时间的重要指标。在这里，我们提出了预测视界的概念，也就是系统发出第一次预警到部件功能失效的时间间隔。根据统计数据可知，轴承磨损、缸套磨损、换热器结垢等渐变性故障的平均预测视界均大于 120 小时。轮机员有超过五天的时间来安排备件、规划维修窗口，因此可以将故障处理纳入正常的计划保养中，而不是被迫进行应急抢修。

突发性故障，例如高压油管裂纹、传感器断线等，系统不能给出长期预测，但是利用毫秒级数据刷新率和边缘计算能力可以实现秒级报警，比传统系统提前 15 到 45 秒。这几十秒对于阻止事态的恶化来说是个重要的时间窗口。比如扫气箱发生火灾刚刚开始的时候，系统检测到温度的异常上升率之后马上采取断油减速的办法，把火情消灭在了最初阶段。总体上系统将计划外停机时间减少了约 40%，大大提高了船舶运行的可靠性。

（二）故障定位准确性

准确性评价主要是看系统的误报率和漏报率。经过一年的试验运行，系统处理的数据量大于 10TB，发出的预警信息大于 358 条。经船员现场确认，有效预警 312 次，故障定位准确率 87.1%。系统能将恶劣海况、负荷剧变造成的参数波动和设备本身的实质性故障区别开来。

大风浪航行时，由于螺旋桨出水，易导致主机转速大幅波动，传统系统易发生超速、过负荷误报警。本系统将轴系扭矩和船体运动姿态信号结合起来，智能判断出这是由于环境因素造成的瞬态过程，因此可以自动排除无效的报警，减轻轮机员的心理负担。就故障定位精度而言，本系统不仅可以辨别出哪个气缸出了问题，还可以区分出喷油器故障、排气阀故障或者活塞环故障等具体的方面，从而极大地缩短了维修人员找到问题所需的时间。但是系统在极低负荷工况下的诊断准确率还有提高的余地，主要是因为低负荷时热力参数信噪比较低造成的，也是后续算法优化的主要方向之一。

（三）经济效益分析

智能预警系统带来的经济效益主要体现在维修成本降低与燃油效率提升两大方面。

1. 维修成本降低：预测性维护的实施使船舶取消了定时拆检的传统维护方式。以前每运行 8000 - 12000 小时就要做一次吊缸大修，现在是按气缸密封指数、磨损规律来定。改变之后年度吊缸次数减少了 30%，活塞环、填料函等备件消耗减少，港口维修工时费也大为减少。单艘船舶每年在主机维修保养上的直接支出可减少约 15 万美元。

2. 燃油效率提高，系统对主机燃烧过程进行细化监控，实行闭环调节，保证主机一直工作在最佳的燃烧状态。系统可以实时算出最佳喷油提前角及各缸负荷分配方案，从而消除各缸出力不均造成能量浪费。从数据上可以看出，主机在相

同的航速、海况下日均油耗可降低 1.5% 左右。对一艘日耗油量 80 吨的大型集装箱船来说，每天可以节省燃油 1.2 吨。按目前燃油价格计算，其全年的燃油节约量会很大。一般情况下，系统安装后，在 6 到 10 个月内就可以收回全部的硬件和软件投资。

因此主机智能预警系统从技术上实现了故障的早发现、早诊断、早处理，从经济上给船东带来了实实在在的收益，是航运业数字化转型和绿色发展的技术引擎。随着机器学习算法的不断进步以及样本数据库越来越丰富，该系统预警效果将会得到更好的发挥。

第二节 辅机系统故障预警实践

船舶辅机系统是保证船舶动力装置正常运转、满足船员生活需求的辅助平台，其包含的设备种类繁多，工作环境复杂，相互之间有很强的耦合关系。创建高效的辅机故障诊断和智能预警系统，是实现从事后维修到视情维护的重要环节。本章将会从辅机系统监测特征、预警策略的个性化设计和实际效果这三个方面进行分析，以期为船舶智能化管理提供一种可行的工程范式。

一、辅机系统故障特点分析

辅机设备包括发电、供气、流体输送等许多种，它们各自的工作原理以及失效模式都有很大的差别。分析其差异，为创建出精准的数据采集模型与特征提取算法打下基础，也是使被动报警走向主动预警的必经之路。

（一）发电机监测要点

船舶电站是全船能量的心脏，它的工作是否稳定直接关系到船舶能否安全航行。发电机组的监测不能只停留在常规电气参数上，还要对机械和电气特性进行交叉分析。定子绕组温度发生改变时，常常会伴随着绝缘老化的状况，采用埋入式热电阻传感器对绕组内部的温度场分布进行采集，然后与负载电流的波动情况相结合，就能够识别出散热不佳或者匝间短路的早期迹象。转子系统动平衡状态也属于重要的监测点，轴承振动信号里包含着许多关于不对中、转子弯曲、基座松动等故障的特征信息。

励磁系统工作状态不能忽略，在实际监测中也是如此。励磁电流、励磁电压

的动态响应特性决定电网电压是否稳定。智能预警系统利用高频采样的励磁回路波形数据，用快速傅里叶变换的方法来分析里面的谐波分量。当整流二极管出现开路或者短路故障的时候，输出波形的纹波系数就会出现明显的畸变，这些细微的电气特征变化一般会先于明显的电压跌落出现。系统可以对这些特征量进行实时采集，分析特征量的变化趋势，在故障发展到全船停电之前就发出警报，给轮机员留出宝贵的应急处理时间。

柴油机和发电机的联接处为故障频发处。弹性联轴器的橡胶元件在长期的交变扭矩作用下很容易出现疲劳裂纹，从而加大轴系的扭振。监测系统将柴油机的输出转速和发电机的输入转速做瞬时比对，再结合轴系扭振检测的数据就可以准确地判断出联轴节的工作状态。多源数据融合监测方式克服了单一振动检测很难区分扭振、横向振动的缺点，提高了发电机组整体状态评价的准确性。

（二）空压机故障特征

空气压缩系统存在往复惯性力大、热负荷高、气阀频繁动作等特性，其主要故障多发于气路性能降低和运动部件磨损这二者之中。多级压缩过程中，级间压力、温度可以体现气阀的工作状态。当某一级吸气阀出现泄漏的时候，这一级吸气压力就会异常升高，同时排气温度也会随之升高。智能系统按照热力学模型算出理论排气温度与实际监测到的数值之差，如果这个差值大于设定的安全裕度，就说明对应级数的气阀有密封失效的风险。

1. 润滑油系统油质变坏，油压不稳是造成空压机机械故障的主要原因。曲轴箱的润滑油在高温高湿的环境中很容易乳化，润滑效果变差，从而造成连杆大端轴承的异常磨损。通过油液在线监测传感器可以对油液中的水分含量、金属颗粒数以及油液粘度变化等情况做实时的监测，从而找到磨损开始时细微的信号。

2. 冷却系统结垢会造成压缩效率急剧下降。根据冷却水进出口温差和压缩空气进出口温差的比值，再结合流量数据，就能计算出冷却器的换热效率系数。当换热效率曲线持续下降的时候，系统就会自动提示清洗维护的建议，可以有效避免高温造成的缸套拉伤事故。

空压机的自动卸载机构是故障发生较多的地方。卸载阀卡死或者动作缓慢会造成电机启动时负荷过大，停机后管路压力不能及时释放。用测量电机启动电流峰值持续时间、停机后压力衰减速率来判断卸载机构的动作灵活性。智能算法根据以往的启动数据来创建出一条标准的启动电流包络线，当某一时刻的启动电流

超出该包络线范围的时候，就会被标记成机械卡阻故障，并且对其进行预警。

（三）泵类设备监测

泵类设备是船舶流体输送的动力源，泵类设备故障的形式主要是流体动力学异常和机械密封失效。离心泵产生气蚀的现象，会造成叶轮剥蚀，性能下降。气蚀发生的时候，流体中气泡的溃灭会发出高频冲击噪声以及宽带振动。在泵壳的某些特定位置装上高频加速度传感器，用包络解调方法得到流体冲击产生的高频调制信号，再配上泵吸入压力、流量这些数据，就能准确定义气蚀的初起阶段，进而马上对吸入阀开度或者液位高度做出调整。

机械密封的漏出检测对于防止机舱底部积水十分重要。传统的液位报警是在发生泄漏之后才进行报警的，而智能预警系统是通过对密封腔的压力变化、温度变化提前预报警报。当密封面存在微观裂纹或者弹簧比压不足时，密封腔的摩擦热以及流体压力场就会出现异常波动。用支持向量机算法做多维特征分类训练，可以区分正常微量渗漏和突发性密封失效，从而有效地避免因为大量泄漏而造成的设备停机。

电机与泵体的对中好坏直接影响机组的振动水平。大型压载泵、货油泵由于管路应力对泵体产生作用，极易造成运行中的动态不对中。利用泵驱动端和非驱动端的振动相位差来持续监测，用轴心轨迹来显示动态对中情况。可视化监控能很直观地反映出复杂的振动数据，根据轴心轨迹的畸变状况来拟定合适的校正方案。

为便于理解各类辅机设备的故障特征与监测要点，其关键信息汇总可见下表。

辅机系统故障监测要点一览表

辅机系统	监测要点 / 参数	典型故障或前兆	监测手段 / 技术
发电机组	定子绕组温度	绝缘老化、散热不良、匝间短路	埋入式热电阻传感器
	转子振动信号	不对中、转子弯曲、基座松动	轴承振动传感器
	励磁回路波形	整流二极管开路 / 短路、电网电压不稳	高频采样、快速傅里叶变换
	联轴节瞬时转速差、扭振	弹性元件疲劳裂纹、轴系扭振	瞬时转速传感器、扭振检测

续表

辅机系统	监测要点 / 参数	典型故障或前兆	监测手段 / 技术
空压机	级间压力、温度	气阀泄漏、密封失效	热力学模型计算、温度 / 压力传感器
	润滑油质量	油质劣化、轴承磨损	在线油液监测传感器（水分、磨粒、粘度）
	冷却器换热效率	冷却系统结垢	进出口温差、流量计算
	卸载机构动作	卸载阀卡死 / 迟缓、启动负荷过大	启动电流峰值、停机压力衰减率
泵类设备	流体冲击噪声、振动	离心泵气蚀	高频加速度传感器、包络解调
	密封腔压力、温度	机械密封微裂纹、弹簧比压不足、泄漏	压力 / 温度传感器、支持向量机
	驱动端 / 非驱动端振动相位	动态不对中	振动传感器、轴心轨迹分析

二、预警策略定制

掌握好各种辅机设备的故障特点之后，制定出科学的预警方案才是发挥其作用的关键。预警策略不是固定不变的死规矩，而是具有自我调整逻辑的一套体系，会因为设备所处的运行环境、使用年份以及过往的维修数据发生变化而变化。通过分级报警、周期优化、联动控制一起构建出一个反应迅速、误报率低的智能防护网。

（一）不同设备预警阈值

传统的固定阈值报警很难适应船舶航行的各种工况，极容易造成大量误报和漏报。智能预警系统采用的是按照工况来设置动态阈值的方式。发电机组会按照电网的负载率调节振动、温度报警上下限。在低负荷工况下由于燃烧不充分引起的振动波动容忍度较高；在满负荷工况下，温度稍有上升就会触发高度敏感的报警，防止设备过热烧毁。

对于泵类设备，预警阈值的确定还要考虑流体介质物理特性的不同。输送高粘度燃油的驳运泵和输送海水的冷却泵，其正常振动基准存在较大的差异。系统利用对设备历史运行大数据统计得到不同的介质、不同的转速的基准指纹库。所以预警阈值不再是简单的数值了，它变成了一种随工况参数而变化的二维曲面。只有当监测数据点突破由该曲面所定义的安全包络域的时候，才会发出异常警报。

对于空压机高压级活塞环这种重要的精密零件，用变化率阈值比用绝对值阈值要好一些。系统实时计算排气温度上升速率，当排气温度还未达到危险极限，但是温升速率超过了热平衡模型预测的正常范围，系统就判定为异常摩擦，发出预警。这种按照趋势来发出预警的策略，可以很好地发现突然出现的故障的早期信号，把事故消灭在产生之前。

（二）监测周期优化

数据采集频率的确定要兼顾故障捕捉能力、存储压力和处理压力等。针对变化缓慢的热力参数，滑油温度、冷却水温度等，采用分钟级的低频采样就能满足趋势分析要求。当系统进入稳态之后，减小采样频率来节约存储空间，而一旦检测到参数变化超过死区范围的时候，则马上转换为秒级的快速采样，完整记录下参数的瞬时变化过程，给故障追踪带来丰富的数据支撑。

对振动信号这样的高频动态数据采用事件触发变周期检测方式。常规巡检时，系统几小时采集一次短时波形并做谱分析，如果振动总值超限或者接收到诸如轴承温度上升这样的触发信号，系统就会转入连续监测模式，同时开启对原始波形数据的长时间保存。这种策略虽然可以保证对突发冲击事件的捕获率，但也可能导致因为产生的数据太多而导致传输网络发生拥堵。

船舶进出港、机动航行等特殊工况下，辅机系统负荷波动大，发生故障的几率也相应提高。预警系统利用船舶航行状态数据接口获取、交换数据，从而确定当前航行模式。机动模式下系统会强制把所有关键辅机的监测周期缩短到最短间隔，提高数据处理的优先级，在复杂的工况下可以及时掌握设备的状态。

（三）报警联动机制

孤立的报警信号很难引起轮机员的重视，建立设备间、系统间的报警联动机制，是提高预警有效性的必然选择。当发电机滑油压力出现低压预警时，系统除了在集控室发出声光报警外，还会立刻联动备用发电机的预润滑泵启动，并且向功率管理系统发送备车请求。跨系统联动控制保证在主用设备故障停机前，备用设备已经进入热备状态，从而保证全船供电的连续性。

燃油系统泄漏报警的联动机制就显得特别重要。当高压油管双壁管的泄漏传感器触发的时候，系统立刻切断这个油泵的电源，然后关闭速闭阀，再开始机舱局部水雾喷淋系统的预备程序。由此原来的依靠人工判断来执行的应急操作就转变为系统自动控制，大大降低了由于人工反应滞后而造成的火灾蔓延风险。

报警信息推送也采取了分级联动的方式。一般参数漂移预警信息只发到轮机员手持终端和集控室监控屏上；危及船舶安全的紧急故障报警，会通过全船广播、驾驶台复示屏和岸基远程支持中心同步发出。使用多渠道的信息传递方式，保证重要的故障信息可以第一时间被所有的决策者了解到，从而实现船岸协同应急。

三、应用效果总结

辅机故障诊断与智能预警系统在实船应用之后，很大程度上改变了传统的轮机管理模式。经过长时间的运行数据跟踪、比较，该系统工程价值已经明显体现出来，它减少了故障的发生、降低了保养成本、提高了运行效率，给船舶运行带来了良好的经济效益和安全保障。

（一）故障率下降情况

系统投入使用后，辅机系统非计划停机次数断崖式下降。由于对潜在隐患进行早期发现和处理，大多数机械磨损、电气老化问题在演变成功能性故障之前就已经得到解决。发电机组因为轴承损坏造成的重大故障率下降了百分之七十以上，空压机气阀破碎引起的连锁反应事故也基本消失。

尤其对于燃油驳运及净化系统，智能预警系统可以很好地控制分油机排渣异常状况，防止跑油事故的发生。由于以前传感器误报、人工巡检不到位造成的燃油日用柜溢油风险被彻底消除。系统对电机电流与转鼓转速的细微变化展开关联分析，有效预知并躲开了许多由于传动带打滑引发的设备瘫痪情况，保证了燃油供应的绝对可靠。

电气系统接地故障查找的效率也实现了质的飞跃。传统的绝缘低报警不能确定具体的故障支路，而智能系统通过各支路零序电流的相位比对，可以快速定位绝缘老化具体是哪个设备。精确的定位能力，把电气故障排查时间从数小时缩短到数分钟，极大地提高了电气系统的可用度。

（二）维护成本节约

以状态为依据的维护模式完全代替了传统的时间固定拆检方式，大大减少了备件和人工的消耗。通过智能预警系统来制定出维修计划，轮机长就能够根据设备的健康指数来防止出现盲目维修的情况。过去海水泵机械密封不论好坏都按照固定的时间更换；现在可以根据泄漏监测数据决定更换时机，使密封件的平均寿命提高百分之四十。

库存管理的好坏直接关系到成本节约的效果。系统可依照各个设备部件的磨损情况做出预测，从而得到详尽的备件需求清单，以此来引领公司机务部门开展精确的采购工作。既可以避免船上备件资金积压，也可以防止因关键备件短缺而造成的高昂紧急空运费用。

另一项隐形成本就是一旦发生重大事故，修复上亿的资金。通过预警避免了发电机曲轴断裂事故的发生，只此一项就可以省下换轴坞修费。防患于未然的经济效益体现出来，智能改造是削减船舶全生命周期运营成本最有效的方式。

（三）运行效率提升

辅机系统要一直处在最佳工况点，这是实现节能减排的重要保证。智能监测系统根据泵浦、风机运行效率实时计算的结果来进行系统的调节并指引轮机员操作。以中央冷却水系统热负荷需求为控制对象，自动调节海水泵的变频转速，避免了大马拉小车的情况出现，辅机系统能耗平均降低约 15%。

船员工作负担减少，心理压力降低。系统承担起繁杂的参数记载以及趋向剖析工作，轮机员得以从每日繁重的劳务里解放出来，可以将更多的时间和精力投入到高价值的设备维修与经营决定当中。全天候不知疲倦的智能“电子哨兵”，消除了人为巡检的盲区，船员对设备状态有很强的掌控感和安全感。

船舶运营效率的提高，就体现在港口周转率的提高。由于辅机故障造成的装卸货延误大幅度减少，船舶的准班率也大幅度提高。液货船货油泵、压载泵的高效可靠直接影响到船在港时间。智能预警系统保障了装卸货作业期间的关键设备可以无故障工作，取得了较好的经济效益和商业信誉。

第三节 推进系统状态监测案例

船舶推进系统属于船舶动力系统中的一个部分，其工作状态直接影响到船舶航行的安全性以及营运的效率。对大型远洋船舶来说，建立一个覆盖面广、反应及时的状态监测系统显得十分重要。本文从实际工程案例入手，从推进系统监测方案设计、状态评估逻辑、现场实施等几个方面展开详细的分析，希望给相关技术人员提供有益的参考。

一、推进系统监测方案

构建高效的推进系统监测方案，关键是找出系统的主要失效模式，再按此合理布置传感器。设计时要充分考虑船舶的结构特性，海洋环境对设备运作状况的影响等，保证获得的有效监测数据完整性，进而及时察觉潜藏的故障。

（一）轴系监测配置

轴系是连接主机和螺旋桨的动力传递通道，由于轴系细长且跨度大，所以对其振动、变形进行监测。中间轴承和尾轴承一般用复合传感器布局。振动传感器大多使用低频响应较好的压电式加速度计，垂直安装于轴承座顶部来采集不平衡或者不对中引起的结构振动。为了监测滑动轴承油膜的稳定性，会在轴承座水平方向、垂直方向各埋设一个电涡流位移传感器，两传感器之间呈九十度夹角布置，可以实时反映轴心运动轨迹。

温度检测在轴系配置当中也占有重要的位置。除监控轴承瓦块的金属温度外，润滑油的进出油温差也可以反映摩擦的状态。中间轴承的油池内安装贴片式或者探针式的温度传感器，传感器需要具有快速热响应能力，当油膜破裂导致温度急剧升高的时候可以及时发出警报。长轴系扭转振动检测时，在主机端法兰处安装高精度的应变片式扭矩计或者光学扭振测量装置，既可得到实时扭矩值，又可以通过动态信号分析得到轴系扭转模态参数，避免共振破坏。

由于船体变形对轴系有影响，部分高端的监测方案中又增加了轴承负荷传感器。在轴承基座下方安装称重传感器或者应变元件，对每个轴承的垂向负荷分配进行实时监测，及时发现由于装载变化或者热变形导致的轴系负荷转移，避免某个轴承过早失效。

（二）螺旋桨状态监测

螺旋桨在水下长时间工作时除了受到很大的流体动力载荷外，还会遭受空蚀和异物撞击的风险。由于在旋转的螺旋桨上直接装传感器有供电、信号传输的物理障碍，目前的监测主要是间接推演和非接触测量相结合。对轴系尾端的轴向振动信号进行监测，可以反演出螺旋桨的叶频分量以及倍频分量。当螺旋桨叶片受损、附着海洋生物或者出现严重的空泡剥蚀时，会引起流体动力不平衡，轴向振动频谱中某一些频率的幅值增大。

螺旋桨的状态监测方法还包括：

1. 船体表面压力脉动测量： 由安装在船体尾部外壳处的压力脉动传感器阵列测量螺旋桨诱导的船体表面压力脉动。非接触式的监测可以直观反映螺旋桨水动力性能，对叶片几何形状改变引起的不均匀流场有很高的灵敏度。

2. 根据主机瞬时转速波动分析：螺旋桨在恶劣海况下出现出水或者重载的时候，阻力矩剧烈的波动会导致轴系瞬时转速发生变化。通过对转速信号高频采样并提取螺旋桨负载特性相关参数，可以判断叶片有无断裂或者严重弯曲。

（三）齿轮箱监测要点

齿轮箱属于调节转速、传递扭矩的关键部件，内部构造繁杂，存在诸多齿轮啮合副和支撑轴承，是机械故障频发的区域。齿轮箱监测的核心就是捕捉啮合频率和边频带的变化。齿轮箱的输入轴、输出轴和中间轴的轴承座处都需要布置高频振动加速度传感器。传感器频率响应一般要达到数千赫兹甚至更高，才能保证检测齿轮啮合时所有高次谐波都能被检测到。采用同步采集的方式对各个测点的振动信号进行互相关分析，就可以精确定位故障源。

油液检测又是齿轮箱健康管理的又一方面。在线油液品质传感器安装在润滑油循环管路的主回油管上，可以实时检测油液中金属磨粒含量、水分含量、粘度。为区分正常磨损和异常磨损，系统一般会集成铁谱分析功能或者电感式磨粒计数器，按照磨粒尺寸范围判断齿轮或轴承的损伤程度。大颗粒的铁磁性物质突然增多，一般是由齿轮表面疲劳剥落或者严重擦伤造成的。

齿轮箱温度场分布也包含很多的状态信息。除常规的轴承温度检测外，现代检测方案提倡用红外热像仪定期对齿轮箱箱体表面进行扫描，或者布置多点热电偶阵列。可以发现由于内部润滑不良或者齿面啮合不良造成的局部热点，克服了只依靠单个点的振动来监测热分布的局限性。

二、状态评估与预警

获取传感器数据只是第一步，怎样从海量的原始信号中提取反映设备健康状况的特征量，并建立科学的预警模型，是智能诊断系统的核心任务。状态评价与预警体系要联系机械原理和历史信息，做到由定性判断到定量分析的跨越。

（一）轴系对中状态评估

轴系对中状态不是一成不变的，它会随着船舶装载情况、吃水深度、机舱温

度场的变化而变化。判断轴系对中的主要依据就是轴心轨迹与振动特性的相关分析。轴系不对中时，其振动特征是二倍频分量明显增大，一倍频分量也会发生变化。智能预警系统会立刻算出工频以及二倍频的幅值比，然后依照轴心轨迹的形状特性展开综合评判。正常的轴心轨迹为椭圆形，严重不对中时则呈香蕉形或“8”字形。

系统会整合热态对中计算模型，实时采集主机机座、齿轮箱、中间轴承座温度数据，用有限元模型或者经验公式计算出各支撑点的热膨胀量，从而得出热态下轴线的偏差。这种动态评估方法能够区分由冷态安装误差导致的永久性不对中与由热效应引起的暂时性不对中，从而避免误报。当计算出来的轴承负荷偏差大于设计许用值的百分之十时，系统就会发出黄色预警，提示轮机员在下一个停泊周期去检查校核轴系；如果一直增大，就会提高警报等级，建议限制主机功率输出。

（二）齿轮磨损预警

齿轮的磨损过程一般比较缓慢，但是当它进入晚期磨损阶段的时候，劣化的速度会呈指数级增长。齿轮磨损的预警主要是用倒频谱分析和包络解调技术。齿轮啮合时，如果齿面有均匀磨损，主要表现为啮合频率幅值的整体变化；当局部出现断齿或者剥落时，故障齿轮的旋转频率会对啮合频率产生调制作用，在频谱图上形成明显的边频带。预警算法主要是检测边频带能量占总能量的比例，当边频带幅值大于基频的某个比例时，就判定为早期故障。

以下是齿轮磨损预警的一些具体方法：

1. 统计学指标预警阈值：系统设置峭度指标、裕度指标等无量纲统计量作为预警阈值。这些指标对冲击信号很敏感，当齿轮刚开始出现轻微点蚀的时候，它们就会有一个明显的突变，一般比有效值指标反应得更早。

2. 多数据融合提升预警准确度，将在线油液监测数据和其他数据进行融合，可提升预警准确度。当高频成分变多，且油液传感器检测到非铁磁性金属颗粒（如铜合金保持架磨损）或者大颗粒铁磁性物质增多的时候，预警系统就会把这两个置信度加在一起，给出高确定性的故障诊断报告，指出是齿面磨损还是轴承保持架失效。

（三）推力轴承状态监测

推力轴承承受着整个推进系统中螺旋桨所承受的全部推力，是推进系统中最

受力的部分。对于一艘大型集装箱船或好望角型散货船，在满载工况下，其螺旋桨产生的推力可达 100 吨至 200 吨（约 1 MN 至 2 MN），全部作用在推力轴承上。状态评价主要是乌金瓦块的磨损情况和油膜承载能力。系统用高精度电涡流位移传感器来观测推力盘的轴向位移，传感器通常具有 ±2 mm 至 ±5 mm 的线性量程，分辨率可达微米（μm）级。位移量可以反映出推力瓦块的磨损程度（通常磨损限值为 0.5 mm 至 1 mm）以及弹性变形量（参考《船舶动力装置技术管理》及 Skaerbaek 系列推力轴承规范）。为了消除热膨胀对位移测量的影响，根据材料热膨胀系数（钢材约为 12×10^{-6}/℃），在评价算法中会自动减去轴段温度上升引起的理论热伸长（例如长 10 米的轴系温升 30℃可伸长约 3.6 mm），从而得到真实的磨损数据。

推力瓦块的温度分布均匀性也属于一个评价方面。推力轴承通常由 6 至 12 块扇形瓦块组成。在正常流体动压润滑状态下，各瓦块的温度应大体一致，温差一般控制在 5℃至 10℃以内，且工作温度通常低于 70℃至 80℃（参考 ABS 钢质海船入级规范）。用雷达图显示监测数据，如果某一块或几块瓦温偏高，就说明这一块或这几块瓦油膜过薄或者有局部偏载。

预警系统会设置一个叫做温升速率的动态阈值，它关心的不是温度上升到多高，而是温度上升得有多快。在恒定负荷下，如果瓦温的温升速率超过 2℃ /min 至 5℃ /min（具体取决于轴承尺寸和冷却能力），虽然没有达到高温报警的限值（通常设为 90℃或 95℃），但是系统仍然会立即发出油膜失稳预警，以提示油液中断或劣化的紧急减速操作。这种基于趋势的预警比单纯阈值报警能提前 10 至 30 分钟发现隐患（《机械故障诊断中现代信号处理方法》）。

三、案例经验分享

在某大型集装箱船推进系统智能监测改造项目中，技术团队对现场实施以及数据分析有了很多的实践经验和积累。经验涉及硬件安装细节到软件数据挖掘，对以后的类似项目有重要的参考价值。

推进系统监测实施与数据解读经验

环节	主要问题 / 难点	经验总结 / 解决方案
安装调试	传感器固定不牢靠 (高温高湿易脱落)	改用钻孔攻丝、双头螺柱刚性连接，接触面涂硅脂填充微观缝隙。
	电磁干扰 (变频器、大功率电机)	使用双层屏蔽双绞线，屏蔽层控制柜端单点接地，信号线穿越动力电缆桥架需金属管保护，物理间距 30cm 以上。
	转速信号跳变 (信号线与动力线并行)	重新布线，避免信号线与动力线并行距离过长。
数据解读	振动幅值绝对大小不代表故障	建立工况相关性思维，结合转速、负荷、海况等综合判断。
	缺乏精准诊断基准	建立设备基线数据库，试航或刚出坞时录制全套振动和温度数据。
	早期磨损诊断滞后	关注相对于基线的“变化趋势”，如啮合频率幅值的缓慢爬升。
常见问题处理	传感器故障 (零点漂移、断路)	监测软件显示数值长时间为零或满量程，不随主机转速波动时，优先检查接线盒端子、传感器探头。
	误报警 (瞬态冲击、阈值设定)	处理逻辑加入延时确认机制，排除瞬态冲击影响后再报警。
	数据采集卡死机 / 通讯中断 (环境高温)	加强控制机柜散热通风，必要时加装工业空调或涡流制冷管，实施“看门狗”机制自动重启。

上述推进系统监测实施与数据解读经验可见上表。

（一）安装调试经验

现场安装是决定监测系统能否长期稳定运行的基础。传感器安装时接触面的处理十分关键。从案例中可以看出，只用强力胶粘接的加速度传感器在高温高湿的机舱环境下很容易脱落，造成高频信号衰减严重。后续整改的时候，所有的传感器都被安装在轴承座上钻孔攻丝，使用双头螺柱刚性连接的方式，同时在接触面上涂刷硅脂来填补微观缝隙，因此高频振动信号信噪比提升了约六分贝。

线缆敷设与屏蔽接地对于抗干扰来说十分重要。机舱内变频器、大功率电机产生的电磁干扰十分复杂。经验表明，所有的信号传输电缆都必须采用双层屏蔽双绞线，屏蔽层必须在控制柜端单点接地，不得两端接地，以避免形成地环路电流。信号线穿越动力电缆桥架时要穿金属管保护，并保持 30 厘米以上的物理间距。调试初期转速信号出现频繁跳变的情况，经排查是信号线和主机伺服电机动力线并行距离过长引起的感应干扰，重新布线之后故障立即消失。

（二）数据解读技巧

面对大量的监测数据，怎样有效地筛选出并保留下真实的信号，是对诊断工程师能力的一种检验。数据解读的一个重要技巧就是建立工况相关性思维。振动幅值的绝对大小不一定代表故障，应该结合当时的转速、负荷、海况等条件来综合判定。在案例分析过程中多次发现轴系振动总值在全速航行时突然增大，初看以为故障，但与吃水深度、海况数据对比后发现，这是船舶轻载航行遇到恶劣海况时，螺旋桨部分出水引起的流体动力激振，属于正常的物理现象而非设备故障。

创建设备的基线数据库，是进行精准诊断的前提。每艘船的推进系统因为制造公差与安装工艺的不同，所以“指纹”特征也各有不同。在船舶试航阶段或者刚出坞的时候，处于健康状态之下，在不同的转速区间录制全套的振动与温度数据当作参照。以后的数据解读应主要看相对基线的变化趋势。齿轮箱啮合频率幅值一直低于报警线，但是与半年前的基线数据相比，存在缓慢的爬升趋势，缓慢的爬升趋势比起瞬时超限，更有诊断意义，常常预示着早期磨损正在发展。

（三）常见问题处理

系统长时间运行中，传感器自身发生故障的情况比机械故障更为常见，所以必须具备快速识别的能力。最常见的故障为传感器零点漂移或者断路。当监测软件显示某测点的数值长时间为零或者满量程，不随主机转速的变化而波动的时候，大多数是传感器损坏或者线路接触不良。此时应该先查看接线盒内端子是否因为机舱震动而松动，或者传感器探头表面是否被油污覆盖或者腐蚀。

误报警是船员在使用中遇到的又一难题。为了减少误报率，处理逻辑里可以加进延时确认机制。当检测到的值超过设定的阈值时，系统并不会马上发出警报，而是观察几秒至几十秒（视参数的惯性大小而定），在确定异常状态一直存在且没有瞬态冲击影响之后才发出报警。数据采集卡死机或者通讯中断，大部分是由机舱环境温度过高，工控机 CPU 启动过热保护引起的。解决上述问题需要对控制机柜加强散热通风，必要时加装工业空调或者涡流制冷管，保证数据采集单元处于合适的温度中。系统执行看门狗测试来保证软件在出现异常崩溃后可以自动重启，这是保证系统高可用性的必要方法。

第四节 典型故障预警效果分析

本节对船舶轮机故障诊断与智能预警系统的实际应用数据进行分析，检验该系统技术是否成熟，工程应用价值如何。本文通过论述预警成功典型案例、预警失败的深层次原因、系统使用后的整体效益来改进和推广该技术。

一、预警成功案例

成功案例是检验智能预警系统核心能力的重要依据，也是衡量它在复杂的海况下保证船舶动力装置安全运行能力的依据。整理近 3 年安装此系统的远洋货轮、大型油轮运行数据，我们选取了几个典型的干预事件。从案例中可以看出现阶段系统在各种故障中起到的作用，并证明算法模型具有较高的置信度以及响应的有效性。

（一）早期故障发现案例

智能预警系统在 30 万吨级的超大型油轮跨太平洋航行时，有很强的早期故障识别能力。此时船舶处于满负荷运行状态，轮机监控室常规仪表的各项参数均正常，没有报警信号。但是系统内部所采用的深度学习算法模块，却对主机增压器振动谱的细微异常十分敏感。振动幅值还没有达到传统的阈值报警线，但是通过和历史基准数据以及同工况下标准模型比较，发现高频段能量存在非线性的逐渐增加的趋势。

根据微弱信号系统得出结论，增压器转子轴承存在早期磨损的可能，马上向轮机长发出黄色预警信息，建议最近停靠港口的时候进行内窥镜检查。三天后船舶到达目的港卸货，机务人员按照系统的提示对增压器进行拆解检查。经过检查发现转子轴承保持架存在明显的微裂纹，润滑油中有少量的金属磨粒。

此次成功的早期预警把故障扼杀在萌芽之中，避免了轴承在之后的飞行中被完全破坏，造成转子卡死、增压器毁坏等严重结果。与传统的“事后维修”或者“定时维修”不同，依靠状态感知的早期干预模式一方面可以大大降低维修难度，另一方面也可以消除由于海上突发故障造成船舶失控的风险，充分体现出数据驱动诊断的优势。

（二）重大事故避免案例

早期故障发现就是系统的敏锐度，避免重大事故的发生就体现出了系统在危

急时刻的果断和可靠。集装箱船遭遇恶劣海况的时候，智能预警系统成功阻止了一次会造成主机曲轴箱爆炸的重大事故。当船到达北大西洋遇到大浪时，船身就出现了剧烈的晃动，这时候主发动机的负载也就发生了剧烈的变化。此时系统发现5缸冷却水出口温度快速上升，同时该气缸排气温度和扫气箱压力关系不匹配。

常规监测逻辑一般会将这样的波动归结为海况的影响而进行滤波处理，但是本系统集成的多参数融合故障树模型很快就排除了外部环境干扰，判定第五缸活塞环有可能出现断裂，高温燃气下窜破坏气缸油膜，使气缸处于拉缸事故的临界点。系统以毫秒级的速度发出最高级别的红色警报，触发安保降速程序，强制主机降负荷。

轮机员接到警报后马上去现场，发现第5缸扫气箱防爆门处温度急剧升高。不及时调节控制负荷，高温就会点燃曲轴箱内油雾，造成灾难性的后果。事后拆检，第五缸的气环碎了，缸套有划痕。由于处置及时，没有造成严重的机械损伤，只更换活塞环、填料函就恢复了正常运转。有力证明了智能预警系统在极端工况下守护船舶生命线的作用，其带来的好处远远大于所投入的软硬件成本。

（三）维护优化案例

智能预警系统的价值，不在防备突发故障，而在于经由长时间的状态监测，促使维护模式发生根本改变。以某航运公司的散货船队为例，在引入该系统之前，辅机的维护都是按照制造厂商推荐的运行小时数来进行的，即不管设备实际状态如何，只要达到规定时数就必须拆检。一刀切的做法造成大量的过度维修，并且增加了频繁拆装带来的维修故障的风险。

1. 部署智能预警系统以后，船队实行了根据状态的视情维修办法。系统依据实时分析得到的发电柴油机热工参数、润滑油光谱数据、瞬时油耗率等建立各个设备的健康度指数模型。经过长达一年的运行周期，得出其中两艘船舶的辅机健康度一直处于优良等级，各方面的磨损指标远远低于大修标准。根据以上数据，机务决定将原定大修时间往后延2000小时，在这段时间里设备正常运行没有出现任何问题。

2. 此系统还会对燃油喷射系统进行详细的监测，并且可以指导轮机员对喷油定时进行微调。系统发现有几台辅机在某些负荷下燃烧效率低于最优曲线，喷油器雾化质量稍有下降。船员并没有盲目地更换喷油嘴，而是按照系统的建议，采用燃油添加剂以及调节分油机温度的方式，将燃烧效率调整到最佳状态。这些琐

碎的保养小贴士，单船年保养费用降低 15% 左右，备件消耗也大幅下降，真真切切从“病后方治”迈向了“智慧养护”。

二、预警失败案例分析

智能预警系统大部分时间工作得很好，但是海洋环境复杂多变，机械特性各不相同，没有一项技术可以做到完美。直面失败，分析出误报、漏报的原因，是改进算法、提高系统鲁棒性不可缺少的过程。本文将就实际运行过程中出现的偏差做详细的回溯分析。

（一）误报原因分析

系统刚开始启用的时候，误报率偏高是船员们面临的难题。最典型的误报就是轴系振动监测模块。在一艘航行于浅水航道的散货船上，系统连续多次发出艉轴轴承磨损的一级警报，使轮机人员在狭窄水道航行时不得不频繁地检查艉轴中间轴承温度，分心于驾驶台和机舱，引起不必要的恐慌。

通过详细的数据回溯和现场勘查，技术团队发现这并不是传感器本身的故障，而是算法模型没有很好地识别出由于浅水效应而产生的流体动力干扰。船舶在浅水区高速航行时，船底和河床之间水流加速会产生剧烈的船体耦合振动，低频大振幅的振动信号和轴承磨损初期的特征信号在频域上高度重合。原先的 SVM 分类器不能将环境所引起的结构响应和机械本身病态振动区分开来，从而造成误判。

另外一处常见的误报就是主机高压油管泄漏监测系统。系统在主机变速（加减负荷）的时候多次出现报警，提示双壁管内有泄漏。实地检查发现管路干燥完好。经过深入分析发现，这是因为主机在快速加减负荷的时候，高压燃油脉动造成双壁管内部空气压力出现瞬时变动，压力传感器过于灵敏地检测到了这种变动，不过报警逻辑里的延时滤波阈值设置得过小，没能把这种正常的瞬态响应过滤掉。由此可以看出，系统对于瞬态工况以及特殊环境场下没有做适应性训练，而且阈值设定采取静态化的方法，与实际的动态工况存在矛盾，这是造成误报的主要原因。

（二）漏报原因探究

比起误报造成的麻烦，漏报所隐藏的风险更加致命。系统在辅助锅炉发生故障的时候，却遭遇了滑铁卢。锅炉运行中突然出现水位控制失灵，造成严重的汽水共腾，过热器管束结垢堵塞。但是故障发生前几小时智能预警系统一直静默，

没有发出警告。

由于缺少数据维度造成漏报。该系统监测点布置在燃烧端和排烟端，但是给水水质这一重要的参数没有在线监测。根本原因在于造水机所产蒸馏水含盐量超标，船员又没有及时做水质化验。高浓度电解质的炉水使电极式水位传感器的信号失真，反馈给控制系统的是错误的正常水位信号。智能预警系统逻辑是基于传感器数据的二次分析，当源头数据在物理层面发生欺骗的时候，如果没有对炉水导电率等其它异构数据进行交叉比对，那么算法就无法发现真相。

另外一起电子调速器执行机构卡滞故障中，系统也没有发出警告。由于该故障属于突然的机械卡死，从正常到失效仅几秒钟，并且故障特征主要是电流瞬时脉冲。由于系统数据采集频率设置为每分钟一次的快照模式，正好错过了故障发生瞬间的电流激增特征，等到下一个采样点时，设备就已经停机了。这就暴露了系统的数据采样策略的短处，对高动态、突发性的故障捕捉有盲区。

（三）改进措施总结

根据以上出现的漏报和误报等技术缺陷，研发团队制定出改进措施来建设更为牢固、更具备智能性的诊断系统。

为了降低误报率，研发团队采用的是带有地理围栏和工况识别的自适应阈值算法。系统可以依靠 GPS 数据来判定船舶是否在浅水区或者狭窄的水道中，一旦进入该区域就会自动切换到抗干扰模式，将振动报警的门槛值提高，并使用时域平滑算法消除瞬时的波动。为了解决传感器漂移问题，设计出了多传感器关联校验逻辑，例如将排温传感器和缸套水温、扫气温度进行热力学相关性分析，只有当多个相关参数同时出现逻辑一致的异常趋势时才触发报警，从而剔除了单点传感器噪声造成的虚假报警。

解决漏报问题的关键就是扩展感知的维度，改进采样方法。对重要的辅机设备增加油液品质在线监测、水质分析接口，填补流体介质状态监测空白，实现从“看设备”到“看介质”的转变。对于高动态的设备采用的是“事件触发式”的高频采样。系统平时采用低频采样方式来节省存储空间，检测到电流、液压等关键参数变化率超过设定斜率时立即转成毫秒级高频数据录波，保证突发性故障不会漏网。通过迁移学习技术，使用同类型的船舶失效数据训练系统，使故障特征库越来越丰富，模型也具备了举一反三的泛化识别能力。

三、综合效益评估

对船舶轮机故障诊断与智能预警系统进行评价，不能只停留在技术上准确率的统计上，还应该将其放在航运经济和社会发展的宏观角度上来考察。经过跟踪调查该试点船舶两年时间后，对本系统所创造的直接经济效益、间接经营效益、社会公共效益进行了定性与定量分析。

（一）直接经济效益

直接经济效益是船东最关心的指标之一，主要是运营成本的实质性降低。通过财务数据的对比分析可以清楚地看到，在应用智能预警系统之后，成本明显降低，具体效果如表所示：

智能预警系统直接经济效益概览

效益指标	优化成果
非计划停机时间	从平均 120 小时 / 年缩短至 20 小时以内 / 年，下降 83%
备件采购预算	减少 18%
贵重消耗品更换周期	平均延长 25%
单船日均燃油消耗	下降约 1.5%

在使用本系统以前，每艘船每年均会因为轮机故障发生 120 小时以上的非计划停船时间，造成数十万美元以上的租金损失、港口滞期费和船期延误赔偿。系统上线之后非计划停机时间缩短到 20 小时之内，故障停机率下降了 83%，直接节省下一大笔租金和违约金。

采用视情维护的方法来防止过度维修所造成的备件浪费。根据数据统计可知气缸套、活塞环、轴承等贵重消耗品的更换周期平均延长了 25%，每年的备件采购预算减少了 18%。同时由于早期发现重大隐患而避免曲轴更换、机体修复等昂贵维修费用的发生。

系统给主机燃烧状态的实时改善提议，使得船舶主机长久处在最好的热效率区间。从实测数据可以看出，单船日均燃油耗量大约下降了 1.5%。一艘年耗油量很大的远洋商船节省下来的燃油费用，可以抵消系统的安装、维护费用。

（二）间接效益分析

除了账面上明明白白的量化数据以外，智能预警系统还会产生深远的，不能被忽视的间接效益，比如运营管理优化、品牌价值提升等。大大地减轻了轮机管

理人员的工作压力和心理负担。在传统轮机管理模式下，轮机长、轮机员一直处在高度紧张的状态，要频繁的巡检防患于未然。智能系统 24 小时值守，就相当于给轮机舱配备了一名不知疲倦的高级专家，使机员从繁重的监控工作中解脱出来，把精力投入到更为重要的维护管理、技能培训等事务中去，极大地改善了轮机员的工作环境满意度，有效地降低了轮机员的离职率。

企业海量的运行数据长期积累之后成为了宝贵的数字资产。通过对这些长周期数据进行分析挖掘可以得到各种船型、各种设备真实的性能，为未来新船的监造和设备选型提供无可争议的数据支撑，在供应链中占据有利地位。拥有先进智能运维系统的船队在航运市场的竞争力就会更强。货主会选择安全记录好、准班率高的承运人。品牌信誉的溢价很难准确地量化出来，但它无疑是企业长久生存发展的软实力。

（三）社会效益评估

就行业的社会价值和社会责任而言，智能预警系统被广泛应用有着极其重要的意义。它极大地提高了海上人命安全保障水平。船舶轮机故障属于导致海上交通事故常见的原因之一，动力系统发生突然失效状况会使得船只在恶劣海况之下失去操纵能力，从而造成触礁、搁浅甚至是沉没等事故。智能预警技术把安全关口前移，大大降低了此类灾难性事故发生的概率，可以切实保障海员的生命安全，也符合 IMO（国际海事组织）海上安全高标准的要求。

该技术对海洋环境保护也有积极的作用。轮机故障一般伴随着燃油泄漏、燃烧不完全产生黑烟排放，废气处理装置失效等问题。经过准确的故障诊断和燃烧优化，可以有效的控制船舶污染物的排放，减小由于设备故障造成的溢油风险，为保护海洋生态环境做出了科技贡献。这是全球航运业绿色低碳转型的积极响应，也是对国家海洋强国、智慧航运战略的有力支持，有利于船舶工业向数字化、智能化、绿色化转型升级。

第九章 系统集成与工程实施

本章主要研究船舶轮机故障诊断与智能预警系统的实现过程，即把设计蓝图变为现实的过程。系统集成不只是软硬件的物理连接，也是各个部分之间逻辑关系的建立和验证，是保证系统功能指标符合预期目标的关键步骤。这一阶段按照前期的设计需求完成硬件设备的选取、部署、安装调试工作，最后一步就是对整个系统进行验收，保证交付一个符合船舶特殊工作环境要求的高效的、稳定的智能化诊断平台。

第一节 系统硬件集成方案

系统硬件集成方案是整个工程实施的基础，也是决定系统能否稳定运行、数据能否及时处理的关键因素。由于轮机系统工作环境是高温、高湿、强振动以及电磁干扰等恶劣的条件，所以硬件集成方案除了要满足高性能计算的要求外，还要考虑设备的工业级可靠性和环境适应性，这样才能搭建起一个算力强、鲁棒性高的硬件支撑平台。

一、 硬件设备选型

硬件设备选择遵循“性能匹配、留有余量、安全可靠、方便维护”原则。在故障诊断复杂算法模型运算条件满足的前提下，也要考虑到船舶航行过程中备件更换不便等因素，优先选用船级认证或者同等工业防护等级的成熟产品。选型工作要全面考虑处理能力、I/O 吞吐量、存储容量、扩展性等主要指标。

（一）服务器配置选型

服务器是故障诊断算法核心引擎和数据库管理系统所在的地方，因此选型配置不能出错。考虑到轮机大数据高并发写入、实时分析的要求，计算单元应该采用多路高性能处理器，多核并行计算来保证系统在面对大量的传感器数据时可以及时响应。内存配置应留有足够的余量，采用纠错码内存技术，防止单粒子翻转

等软错误造成的数据损坏或者系统崩溃，保证长时间运行中内存数据的完整性。

因为深度学习模型训练、推理都需要很大的算力，所以服务器要配备专业的图形处理加速卡或者张量处理单元。加速部件可以大大加快神经网络的运算速度，从而使轮机关键部件早期故障特征提取和模式识别更加准确、迅速。由于机舱环境温度较高，服务器的散热设计必须有高效的冷却风道和备用风扇模组，在高温环境下可以正常工作，并且具有温度监测功能、自动调节风扇转速的功能。

为了保证系统可以不间断的对目标实施监测，服务器的电源系统必须要有双路以上或者更多的电源，并且支持热插拔。当任一路电源模块出现故障的时候，系统可以平滑切换到备用电源并发出报警信号提示维修人员及时更换。机箱结构要有良好的抗振性，机箱内部的板卡、接插件等都要加装固定装置，以防船舶主机振动、恶劣海况造成硬件接触不良。

（二）网络设备选型

网络设备是系统数据传输的神经脉络，选型时主要考虑的是数据传输的高带宽、低延迟和高可靠性。核心交换机选择具有三层交换功能的工业级以太网交换机，千兆或者万兆上行链路，可以保证大量的监测数据同时并发传输时不会发生网络拥堵。交换机必须支持环网冗余协议，当主通信链路由于线缆损伤或者设备故障而中断的时候，可以以毫秒级的速度切换到备用链路，保证数据传输路径的自愈能力。

接入层交换机应部署在靠近传感器采集节点的地方，使用高防护等级的紧凑型工业交换机。这些设备应有抗电磁干扰能力，满足船舶电磁兼容性要求，能有效抵抗变频器、发电机等强干扰源的干扰。端口配置要依照现场采集模块数量来安排，还要留出一定比例的备用端口，供后面新增监测点接入。对于关键的接入交换机，具有以太网供电功能可以简化现场布线，给前端采集设备提供稳定的电源支持。

无线网络设备选型主要是根据移动巡检终端的接入需求。无线接入点需要具有防尘防水性，天线的构造要符合机舱内部金属壁垒复杂的情况，经由信号覆盖规划，去除信号盲点，让轮机员凭借手持终端在机舱各个甲板随时取得警报信息，并且查询设备情况。所有网络设备都应支持访问控制列表、端口安全、虚拟局域网划分等功能，在物理层和链路层给系统建立第一道安全屏障，防止非法接入、数据泄露。

（三）存储设备选型

存储设备保存着船舶整个生命周期内的运行数据，是做历史趋势分析和故障追溯的重要资源。选型时需要建立分层存储架构，用高性能固态硬盘阵列作为热数据存储层，把实时数据库、频繁访问的索引文件等放到这里，用它超高的读写速度来满足秒级数据刷新和快速查询的需求。大容量的企业级机械硬盘或者磁带库可以作为冷数据存储层，有效地降低单位存储成本。

数据的安全性是选择存储系统的首要问题。磁盘阵列要支持 RAID5 或者 RAID6 等冗余保护级别，保证一块或多块硬盘损坏时数据不丢失、业务可以继续正常运行。存储控制器要装设断电保护模块和非易失性缓存，在船舶供电突然中断的时候，缓存里的数据可以安全地保存到物理介质当中，避免文件系统遭到破坏或者数据库事务丢失。

根据船舶长期海上航行的特性，机械硬盘选型应该主要考虑抗振动、抗冲击参数。应选择适合振动环境的硬盘，该种硬盘一般带有多种振动传感器和磁头定位补偿技术，能最大程度上减少外部振动引起的读写错误。系统还要有外接的备份接口或者网络存储功能，定期把重要的数据保存到物理隔离介质里，从而形成以数据为根本的灾难恢复体系。

二、 硬件部署方案

硬件部署方案就是按照选定的设备，科学、合理地安装在船舶指定空间内的全过程。它不单是空间利用率问题，还牵涉设备运行环境控制、线缆敷设规范、操作维护方便性等。科学的布置方案能明显延长设备寿命，减少故障发生的概率，给系统正常运行提供良好的物理条件。

（一）机房环境要求

系统核心设备所在的机房或者控制室环境必须严格控制，以达到精密电子设备运行标准。温湿度控制为首要任务，需要安装独立精密空调系统或者接入船舶中央空调的独立末端，保证机房温度在适宜范围内，一般控制在 18℃到 25℃之间。湿度应控制在 40% 到 60% 之间，过高容易造成设备内部结露短路，过低则容易引起静电积聚而危害芯片安全。空调系统应具有掉电重启记忆功能，最好有备用制冷单元。

机房洁净度的控制也十分重要，船舶机舱环境经常会有油雾、烟尘等污染

物质，这些颗粒物吸附在电路板上会致使散热不良或者造成短路。机房进风口加装高效过滤网，按时清洗、更换。机房门应采用具有良好密封性能的防火门，使机房维持微正压状态，防止外界污染空气侵入。地面要铺设防静电地板，既能方便线缆在地板下面敷设，又能有效地散发出静电荷，对敏感的电子元件起到保护作用。

由于海洋环境的盐雾腐蚀性很强，机房尽量应选择离直接开敞甲板远一些的位置。如果受条件限制，就必须对进入机房的空气进行除盐处理。机房应该设置七氟丙烷灭火装置的气体灭火系统，不能使用水喷淋系统，以免造成设备的二次损坏。照明系统应能满足维修作业的照明要求，必须设置应急照明灯具，在全船断电的情况下也能进行紧急作业。

上述船舶机房环境要求及其应对措施可见下表。

船舶机房环境要求与应对措施表

环境因素	具体要求	应对措施
温度控制	18℃至 25℃	独立精密空调或中央空调独立末端；备用制冷单元；掉电重启记忆。
湿度控制	40% 至 60% 相对湿度	独立精密空调或中央空调独立末端；备用制冷单元；掉电重启记忆。
洁净度	无油雾、烟尘等污染物	进风口高效过滤网（定期清洗）；密封性防火门；机房微正压。
静电防护	防止静电积聚	铺设防静电地板，利于线缆敷设与静电荷散发。
腐蚀防护	抵御高盐雾腐蚀	尽量远离开敞甲板；对进入空气进行除盐处理。
消防安全	火灾风险应对	气体灭火系统（如七氟丙烷）；严禁使用水喷淋系统。
作业照明	满足维修作业需求	满足日常维修照明；设置应急照明灯具。

（二）机柜布局规划

机柜布置应该依照空气动力学原理和人机工程学的要求。按照冷热通道分离原则，机柜面对面或者背对背摆放，形成独立的冷风通道、热风通道。这样可以最大限度地利用空调的制冷效率，防止热空气回流造成的局部热点，保证每一台服务器都能够得到足够的冷空气进行散热。机柜顶部或者底部应该留出足够的空间供线缆进出，同时也要合理使用理线架来整理线缆。

在船舶的环境下，机柜固定有其特殊的要求。与陆地机房不同的是，船舶在航行时处于横摇、纵摇、垂荡的运动状态。机柜底座必须与甲板基础结构焊接或采用高强度螺栓连接，必要时可以加装减震基座。机柜内设备安装导轨需要加装

锁止装置，重型机架式 UPS 电源应安装在机柜底部降低重心提高稳定性。

1. 预留操作维护空间属于布局规划里的一部分。机柜前后门开度范围以及维修通道宽度均不能小于 800 毫米，这样工程技术人员才能对设备进行上架，除尘，故障检查等工作。

2. 集成显示终端的机柜安装高度应符合人眼水平视线，键盘鼠标抽屉位置应便于操作。

3. 机柜内部配电单元的安装位置要合理规划，一般垂直安装在后部侧方，不占用有效设备安装空间，利于各种电源线的整理与连接。

（三）供电与接地

稳定纯净的电源供应，对于智能预警系统的连续工作来说是生命线。部署方案中必须要用大功率在线式 UPS，容量要按照系统总负载功率来算，还要留出不少于 30% 的余量。UPS 电池组的后备时间应保证在船舶主电源故障之后，系统可以运行足够长的时间来完成数据保存和正常关机的过程，或者支持到应急发电机启动供电。UPS 的输入端应接到船舶主配电板的独立回路，在电网的谐波干扰和电压波动大的时候要安装隔离变压器来防止干扰。

接地系统对于保证设备的安全以及信号的质量十分关键。船舶是漂浮在水面上的钢铁导体，它的接地环境和陆地环境不一样。系统要建立独立的信号接地网，与船舶安全保护地物理上只进行单点连接或者用电容耦合，以防止形成接地环流产生共模干扰。机柜门、侧板、内部安装梁都用编织铜带作等电位连接，消除金属部件间的电位差。

对于模拟量传感器信号，屏蔽电缆的屏蔽层接地处理要严格遵循“一点接地”原则，控制柜侧屏蔽层一般都进行统一接地，防止两端电位差导致屏蔽层感应电流，影响微弱的传感器信号。网络通信线缆必须采用屏蔽双绞线，水晶头的金属外壳要和交换机屏蔽接口紧贴，借助交换机的接地系统来泄放干扰。所有接地线的线径、颜色、连接工艺必须符合相关电气标准，接地点应涂导电膏并做防腐处理。

三、 硬件测试与验收

硬件测试与验收属于系统集成实施的最后一环，主要是对硬件系统功能的完整性、性能是否达标、稳定可靠程度实施检测。本阶段的工作一定要按照测试大纲进行，所有的测试过程和结果都必须详细的制成测试报告，作为项目交付及后

期维护的重要依据。

（一）设备单体测试

设备单体测试主要针对安装完成后的各个独立硬件模块进行功能验证。

1. 外观及安装检查，查看所有设备外观有无损坏，铭牌标识是否清楚准确，安装位置及固定方式是否符合设计图纸及抗震要求，线缆连接是否紧密，标签是否对应。

2. 上电自检，逐个给服务器、交换机、存储阵列等设备上电，看服务器电源灯、硬盘灯、网络灯等的指示灯是否正常，检查设备的风扇是否转动、有无异常噪音和焦糊味。

3. 基础配置校验：登录设备管理平台，核对 CPU 型号、内存大小、硬盘数量、RAID 状态等硬件参数是否和采购清单一致。对网络设备的端口做通断测试，查看各个端口的协商速率和双工模式是否符合预期。

4. 固件版本检测，查看各个设备的 BIOS 版本、固件版本、驱动程序版本，必要时进行升级，修复已知漏洞，提高硬件兼容性。

（二）系统联调测试

系统联调测试主要是针对各个硬件部件之间互相连接，相互配合的情况进行测试，保证数据能够通过整条链路自由流通。测试人员要搭建起一个由传感器信号输入、数据采集网关处理、网络传输、服务器存储、显示终端展示所构成的完整链条。在前端模拟不同故障信号，查看服务器端数据库是否接收并存储了对应信号，数据解析程序是否准确及时。

网络联调为重点，查看 VLAN 划分是否正确，不同网段之间能否路由。模拟主网络链路故障时可以人为断开核心交换机之间光纤，看环网协议是否能在规定时间内完成链路切换，保证上层应用业务不中断。网络管理软件是否可以正确地拓扑出整个网络结构，实时反馈节点流量状况和告警信息，也应被检验。

对存储系统进行联调主要是测试服务器和磁盘阵列之间的多路径 I/O 功能。模拟单根光纤通道故障或控制器故障，查看数据读写操作能否自动切换到冗余路径，性能没有明显下降。还要对数据备份、恢复流程进行测试，保证备份策略正常运行，所恢复的数据可以正常使用，保障数据灾难发生时能够快速重建系统。

（三）性能压力测试

性能压力测试主要是对系统硬件在极限情况下的测试，找出可能存在的瓶颈，

保证船舶全负荷工作时的稳定性。

用专门的压力测试工具模拟大量的并发数据注入，使服务器的CPU利用率、内存占用率、磁盘I/O负载长时间维持在80%以上的高水平。此时对系统响应时间、吞吐量、错误率进行连续跟踪。观察服务器有无热保护降频现象，检验散热系统是否可以满足满负荷运转的要求。对数据库服务器主要是千万级的数据量下的查询、插入测试，查看索引优化的效果。

网络压力测试要借助广播风暴、大数据包流量等手段，考察交换机背板带宽、包转发率是否达到标称值，探究网络设备在拥塞状况下服务质量策略的执行情况，保证报警等高优先级数据可以先行传输。同时还要做长周期的稳定性测试，一般要求系统在模拟负载构成的准满载状态下连续运行72小时或者更长的时间，期间不能出现宕机、重启或者数据丢失的情况。

对供电系统做满载断电试验。断开市电输入，对UPS带载能力、放电时间进行测试是否满足设计要求，并同时检测服务器、网络设备在市电和UPS切换时的工作情况。经过这一系列的测试，可以找出硬件集成中的所有隐患，为船舶轮机故障诊断与智能预警系统的正式上线使用打下良好的基础。

第二节 软件系统部署与调试

船舶轮机故障诊断及智能预警系统的安装调试，是系统由实验室走向实际使用的过程，也是决定实船运行稳定性、诊断准确率的过程。本节主要对系统从环境搭建到系统交付的整个过程进行详细的说明，保证系统的功能完整，性能满足要求。

一、软件部署流程

软件部署就是把开发好的应用软件、数据库以及中间件从开发环境部署到船舶服务端和岸基数据中心。此过程要严格依照规定的程序来完成，保证系统环境的一致性以及运行可靠。

（一）环境准备与配置

在安装软件之前要对服务器的硬件以及操作系统进行全面检测及配置，满足船舶机舱高温、高湿、高振动特殊环境下的使用要求。技术人员要检查服务器的

硬件状况，保证处理器性能、内存大小、硬盘存储空间都符合系统运行的最低要求，重点检查磁盘阵列的冗余配置，保证单块硬盘出现故障的时候数据不会丢失。在操作系统上推荐使用稳定的企业级 Linux 发行版，关闭不用的系统服务和端口，只开放业务需要的通信端口，降低系统安全风险。

由于船舶内网环境的特殊性，网络配置成了环境准备工作中的重中之重。部署人员要划分独立的虚拟局域网，在物理上或者逻辑上对轮机监控数据网络和船员生活网络进行隔离，以防止非业务流量干扰数据采集的实时性。必须使用静态 IP 地址来保证各个组件之间的通信是固定的，还需要同步网络时间协议服务。由于轮机故障诊断主要依靠时间序列数据之间的关联分析，因此服务器与底层数据采集卡、传感器之间时间同步误差不能超过毫秒级，否则会因为时间戳错乱而导致故障因果关系判断错误。

还需要运行时的基础环境，即指定版本的 JDK、Python 解释器及其对应的科学计算库等。环境变量的设置需要写入系统配置文件中，这样服务器重启后环境变量仍然会存在。对依靠图形处理器来进行深度学习推理的诊断模块来说，还需要正确安装显卡驱动、统一计算设备架构工具包，保证驱动与硬件的兼容性，使智能算法模型可以调用硬件加速功能。

（二）软件安装与配置

软件安装阶段主要是后端服务、前端界面和各种中间件的部署，建议采用容器化技术进行统一管理，提高系统的可移植性、可维护性。部署人员把预先构建好的 Docker 镜像推送到服务器镜像仓库，用编排工具指定各个微服务的启动顺序、资源限制和挂载目录。在配置文件管理上，应该把数据库连接字符串、服务端口、日志级别等可变参数从代码中分离出来，存放在一个独立的外部配置文件或者配置中心，从而不重新编译代码的情况下就可以灵活地调整系统参数。

中间件安装和配置的好坏直接关系到系统吞吐量以及响应速度。消息队列服务要依照预估的数据流量设置堆积阈值与消费线程数，保证在传感器数据并发高峰时不会出现消息丢失的情况。缓存服务应该设置合适的内存淘汰策略，使热门的数据在内存中保存下来，加快查询速度的同时还要开启持久化特性来防止断电导致的数据丢失。对 Web 服务器做线程池大小，连接超时时间的调整，设定反向代理规则，进行后端多个实例负载均衡从而提升系统可用性。

主要软件安装与配置步骤

序号	步骤描述	目的与关键点
1	导入并加载各功能模块镜像文件	数据采集服务、故障诊断引擎、预警推送服务、可视化前端等，通过镜像哈希值确保文件完整性。
2	配置容器网络和存储卷挂载	确保容器重启时应用日志和持久化数据仍保留在宿主机磁盘上，方便运维排查。
3	启动全部服务实例	利用健康检查接口监控服务启动状态，直到所有微服务稳定运行，检验服务注册发现机制是否正常。
4	配置防火墙规则	仅开放 Web 访问端口及必要的 API 接口端口，关闭数据库等后台服务对外部的直接访问，构建纵深防御体系。

（三）数据库初始化

数据库是故障诊断系统重要的数据基础，初始化质量好坏直接影响数据读写效率、历史数据检索性能。初始化工作分为时序数据库和关系型数据库。针对存储大量传感器数据的时序数据库，要按照轮机设备的层级结构来设计合适的标签系统，采用“船名 - 设备种类 - 测量点”这种层级设定以及对应的数据保存策略。高频采集的振动、压力数据其原始数据的保存周期可以设置得比较短，可以配置自动降采样任务，将历史久远的数据聚合成低频统计值永久保存，从而实现存储成本与查询需求之间的平衡。

关系型数据库存储设备档案、故障知识库、报警记录、用户信息。初始化脚本需要按照顺序执行建表语句，对查询次数较多的时间戳、设备 ID、报警等级字段建立索引。根据船舶数据增长速度，在建表之初就要规划好分表分库策略，例如按月份或年份对报警记录表进行水平拆分，避免单表数据量过大影响查询性能。同时需要先导入常用轮机设备的标准参数范围、故障代码字典以及初步的专家系统规则库，使系统刚一上线就能具备基本的监控和诊断功能。

二、系统调试方法

系统调试是检验软件功能是否达到设计要求、性能是否满足实际需要的重要步骤，应该按照由点到面、由浅入深的原则进行。

（一）单元测试

单元测试针对系统中最基本的可测试单元，目的在于发现算法逻辑以及核心功能模块内部的错误。开发人员、测试人员编写自动化测试脚本，对数据解析模块做边界值测试。对系统进行输入空值、非法格式的数据和超乎物理极限的传感

器数值的测试，考察系统对于“脏数据”的容忍度，保证程序不会因为这些数据而崩溃。对故障诊断算法要创建包含各种典型故障特征的模拟数据集，将模拟数据集导入到故障诊断算法模型中进行推理验证，对比模型输出结果和期望的故障类型是否一致。

对于智能预警模块主要是测试阈值判断逻辑的正确性。模拟排气温度快速上升或者润滑油压力突然波动等参数变化趋势，观察代码里设置的判断逻辑是否能在指定条件之下被激活。并且要对各种工具类函数进行覆盖测试，保证数值单位转换、时间格式化、加密解密算法等基础组件的正确性。单元测试覆盖率要达到规定的标准，核心业务逻辑代码尽可能实现全路径覆盖，消除代码逻辑死角。

（二）集成测试

集成测试主要看各个独立模块装在一起之后是否能够互相交互，数据能否顺利地流通。测试人员应该模拟完整的数据链路，从发出符合 NMEA 或者 Modbus 协议的报文开始，跟踪数据经过采集网关解析、消息队列传输、流计算引擎处理，最后存入数据库的全过程。重点对模块接口间的数据格式是否一致进行检查，是否存在字段丢弃、精度截断等问题；异构系统对接时还要考虑编码格式、大小端序是否一致。

验证服务调用层的微服务之间远程过程调用的功能，包括同步调用和异步通知。当诊断引擎检测出故障的时候，能否正确地调用报警服务来产生报警记录，并且触发推送服务把消息推送给前端。集成测试还要看中间件之间能否配合，比如消息队列遇到网络抖动的时候，生产端和消费端重新连接是否有效，分布式事务在出问题时执行回滚操作是否正确，以此保证跨模块操作的数据一致。

（三）系统测试

系统测试是在尽可能接近实际环境的情况下，对整个软件系统进行全面的测试，分为功能测试、性能测试、安全测试、可靠性测试等。功能测试应该按照用户操作手册逐项检查系统界面的交互逻辑，从用户登录、仪表盘显示、趋势图查询到报表导出，保证所有的功能点都能正常响应，无界面显示错误。尤其要检验报警功能的实时性，记录故障信号产生到界面弹出报警的延迟时间，保证满足即时性要求。

用压力测试工具去模仿多用户同时访问，海量数据同时写入的情形，观察服务器的 CPU 利用率，内存占用情况以及网络带宽消耗状况。逐步加大输入数据

的频率，直到达到设计负荷的 1.5 倍，观察系统是否会内存溢出、响应超时或者数据积压，从而判断系统的最大承载能力以及瓶颈在哪里。安全性测试要对系统漏洞进行扫描，进行 SQL 注入、跨站脚本等安全攻击行为的测试，观察系统有无防御能力，权限控制是否到位，保证非授权用户不能访问敏感信息，也不能对系统配置进行修改。

可靠性测试主要是检验系统遇到异常情况时的恢复能力。人为地断开数据库连接、强制关闭微服务容器、模拟服务器断电重启，观察系统做故障转移和自动恢复的过程。验证双机热备方案中主备服务器的切换逻辑，在主服务器出现故障的时候能够无缝接管业务，保证数据的连续性、完整性。还需要测试网络中断后数据断点续传的功能，保证船岸通信恢复以后，船端积压的数据能完整地同步到岸基中心。

三、用户培训与交付

系统部署调试完成后，要对用户进行系统的培训赋能，移交完整的资料，从而正式将项目从实施阶段转入运维使用阶段。

（一）管理员培训

管理员的培训对象是船上的电机员或者岸基的信息维护人员，培训的内容是系统后端的维护以及故障排查。培训讲师对系统技术架构、服务器部署拓扑、各个服务组件的功能做详细的讲解。主要展示系统管理后台的操作流程，创建用户账号、设置权限、动态调整设备参数阈值、更新规则库、查看系统日志分析。

需要给管理员教授数据备份和恢复的方法，确定数据库自动备份策略的配置，并做实际演练，以保证在出现数据灾难时可以很快恢复业务。还要培训常见的系统故障处理流程，比如服务器磁盘空间报警时怎么清理日志、服务进程“假死”时怎么安全重启、通过监控大屏观察系统自身健康状况。培训结束后要进行理论知识和操作技能的考核，保证管理员具有独立运维系统的能力。

（二）操作员培训

对轮机长和值班轮机员进行系统的训练，培养出能用系统来操纵轮机的人。培训内容要与业务场景紧密结合，减少专业术语，主要说明前端界面功能分布、交互方式。

1. 阐述主监控界面中各个仪表盘的含义和颜色状态，演示使用导航栏快速跳

转至各个设备监控视图的过程，查看单台设备的实时参数以及历史曲线。

2. 重点对报警管理流程进行培训，演示系统发出声光报警时，在系统中查看报警详情、确认报警信息、记录处理措施并最终消除报警的过程，指导其区分真实故障报警和传感器误差造成的虚假报警。

（三）系统文档交付

文档交付是项目验收的证明文件，也是以后系统维护的知识来源。交付团队要整理出完整系统文档，内容条理清晰、图文并茂，与最终交付的软件版本一致。核心文档有用户操作手册，详细说明系统各个功能的操作步骤和注意事项；系统技术架构说明书，说明系统的设计理念、技术选型以及数据流向；接口文档，对系统对外提供的API接口规范进行定义，方便以后与其它船舶管理系统进行集成。

还要附一份系统维护手册，其中包含的常见问题的解决办法，故障排查流程和定期检查表。对于数据库部分要给出《数据字典》，说明各个数据表的结构、字段含义以及相互之间的关联。所有的文档应该同时提供电子版和纸质版，并建立文档版本管理制度，保证系统后续升级迭代时文档资料也可以同步更新。完整的文档交付可以降低用户的学习成本，也可以为以后系统的升级改造提供详实的技术资料。

第三节 系统可靠性设计与测试

船舶轮机系统常年处在高温、高湿、高盐雾、长时间振动的恶劣环境中，其稳定运行、智能预警系统的正常工作对船舶航行安全、运营效率有举足轻重的作用。因此打造一个高可靠软硬件系统，只靠先进的算法是远远不够的。系统架构设计之初就要把稳健的基因嵌入其中，通过严格的测试流程检验它在极端工况下的生存能力。本节从设计措施、测试方法、评估体系这三个方面，具体阐述保证系统全生命周期可靠性的技术手段。

一、 可靠性设计措施

系统可靠性设计不是单一环节的加强，而是一项包含硬件选择、架构搭建、软件逻辑编写在内的全流程系统工程。设计之初就要针对船舶轮机系统出现的单点故障、数据传输中断、突发程序异常等情况预先制定防御策略。本节主要研究

怎样依靠多级冗余、智能容错、自动恢复等手段，在无人值守或者部分组件失效的情况下，保证系统核心功能的连续性和准确性。

（一）冗余设计

硬件冗余是提高系统可靠性最直接、最有效的方法，它的核心思想就是利用增加的备用资源来换取系统持续运行的能力。

双机热备

船舶轮机故障诊断系统中心服务器用双机热备的方式，一台服务器完成实时数据采集、处理、存储，另一台服务器对主服务器的状态以及数据进行实时同步。两台服务器之间用心跳线进行检测，如果一台服务器出现硬件故障或者系统崩溃，不再回应的时候，另一台服务器就会在毫秒之内接管全部业务流程，保证轮机员的监控界面不卡顿，数据不丢失。

三取二表决冗余

对主机排气温度、滑油压力等重要传感器测点，系统采用三取二表决冗余。即在同一监测点上安装三个独立的传感器，数据采集单元同时采集三个数值。当某一个数值与另外两个数值相差较大时，系统就判定该传感器异常，剔除该传感器的数值，取剩下两个一致数值的平均值作为有效输入，彻底消除单传感器漂移造成的误报警风险。

通信网络冗余

通信网络的冗余设计也十分重要，由于船舶内部电磁环境复杂，单个通信链路很容易受到干扰或者物理损坏。为此采用了双环网光纤通信方式，所有的数据采集点、交换机采用两根相互独立的光纤构成闭环。正常情况下数据在主环路上传输，备用环路处于待机状态。当主环路上任意一点出现断路或者设备出现故障时，网络交换机上所具备的自愈功能会在很短的时间内启动，自动将数据流切换到反向传输或者备用环路上去，保证现场传感器的数据不间断地上报到集控室。

电源系统冗余

电源系统采用双电源模块、大容量不间断电源。一路接到船舶主电网，一路接到应急电网，在输入端并联二极管无扰切换。即使船舶全船断电的情况下，系统也可以靠内装电池工作数小时来给轮机员留出故障排查的时间。

（二）容错设计

软件层容错设计主要提高系统对于非法输入、逻辑错误、运行时错误等的容

错能力，保证程序在出现非正常情况时不会出现崩溃、死锁等情况。

数据清洗与合法性检测

在数据接入层本系统建立起了严格的数据清洗和合法性检测机制。对于轮机传感器出现的瞬时尖峰噪声或者漂移数据，软件内嵌入滑动平均滤波和限幅滤波。超出物理极值的异常数据被实时拦截，主机转速数据在极短时间内出现超越物理惯性的大幅度跳变，被当作干扰信号丢弃，保持上一个时刻的有效值，防止错误的数据污染后面的故障诊断模型。

异常捕获与隔离技术

核心算法模块中使用了异常捕获和隔离技术。所有的进程和线程都在独立的内存空间里运行，在异常控制结构中。当某个诊断算法由于除零错误、数组越界或者内存溢出等的原因而抛出异常的时候，系统可以准确地捕捉到该错误，只中断当下进行中的计算任务，不会造成整个监控系统的运行受到影响。系统会详细的记录错误堆栈信息，然后自动对这个模块进行重新初始化或者降级运行，采用简单的备用算法来提供基本的服务，即实现了“带病运行”的功能。

人机交互容错

人机交互界面的设计过程中充分考虑到误操作的容错问题。对于关闭系统、修改核心参数、删除历史数据库等危险操作，系统设置了多重确认机制和权限审查过程。后台在操作指令下发之前会对指令进行逻辑冲突检测。如果检测到指令执行会使得系统处于不安全状态，比如在主机高速运转时关闭冷却水泵监控，软件就强制屏蔽该指令，并弹出警告提示，从根本上杜绝由于人为失误造成的系统瘫痪风险。

（三）故障恢复机制

故障恢复机制就是系统在不可避免的严重故障发生之后，可以自动重启并恢复成正常工作状态的最后一道防线。

硬件看门狗定时器

硬件电路板上集成独立的硬件看门狗定时器，该定时器独立于主处理器工作，需要系统软件在一定时间间隔内向它发送喂狗信号。当系统主程序因为死循环、总线挂起或者操作系统内核崩溃而无法及时发送信号的时候，看门狗定时器溢出就会立刻产生硬件复位信号，强制系统重新启动。这就保证了系统在没有人工干预的情况下，可以自动从软件死锁中解脱出来，最大限度减少系统的停机时间。

进程守护与检查点

软件方面有完整的进程守护和检查点。一个独立的守护进程在后台一直监控所有的业务进程存活状况、CPU 占用率、内存占用情况。关键进程一出现异常或者有停止前进的迹象，守护进程就会马上重新启动服务，并从最近一次的检查点恢复上下文信息。系统采用了带有事务日志的嵌入式数据库，所有的数据写入都采用先写日志，再写数据文件的方式。系统在突然断电或者非正常关闭之后重新开启的时候，数据库引擎就会自动对日志文件展开扫描，把尚未完成的事务给回滚掉，对于已经提交的事务则会重新执行一遍，以此来保证历史故障记录以及配置参数的完整性与一致性，避免因为数据遭到破坏而导致系统无法启动的灾难性结果出现。

二、 可靠性测试方法

设计阶段的理论构想必须经过物理世界严苛的检验，才能变成实际的可靠性指标。测试环节模拟的是船舶整个生命周期内会遇到的各种极端的边界条件。这一过程不仅是看有没有功能，更重要的是用高强度的环境应力去筛选和破坏，提前把元器件早期失效的“病灶”和软件逻辑深层次的“虫洞”挖出来。测试包括元器件老化、故障注入模拟、系统长时间运行等全过程验证，保证交付装船的系统成熟度极高。

（一） 老化测试

老化测试使用超出现实生活中所用的温度、湿度应力来加速电子元器件潜在缺陷暴露，从而剔除处在浴盆曲线早期失效阶段的次品。

高温高湿老化

所有的硬件板卡装入系统后，都要放进高温老化房内进行连续 168 小时的通电老化试验。老化环境温度设为 60℃，相对湿度控制在 90% 左右，模拟船舶机舱高温高湿的恶劣环境。老化过程不是静置，而是运行专门的老化测试程序，使 CPU、GPU 全负荷工作，各种接口循环发送和接收数据包，板卡自热与环境应力叠加，最大限度地检验焊点、电容、芯片的耐热性能。

温度循环冲击

除了恒定高温试验之外，系统还要做温度循环冲击试验。测试设备在温度 -20℃到 70℃之间做快速变温循环，温度变化速率设为 1℃ /min，每个温度极

值点停留 2h。热胀冷缩的交变应力可以检测多层电路板的层间连接可靠性、表面贴装器件的焊接质量、接插件的接触稳定性。测试时上位机对被测设备的电流、电压、通讯状态进行实时监控，一旦出现通信丢包或者自动重启的情况，就判定为不合格，相关的板卡会立即被淘汰，并进行失效分析，严禁有隐患的硬件进入后续的组装环节。

（二）故障注入测试

故障注入测试属于主动攻击验证，即人为制造硬件、软件错误来考察系统承受能力以及及时恢复能力。相比被动等待故障发生而言，本方法能对各种小概率但是危害很大的故障场景进行系统的覆盖。

硬件故障模拟

从硬件角度来讲，测试人员使用专用工具给正在运行的系统进行信号线瞬时短路、断路以及电源电压跌落干扰。拔掉主服务器的网线，看备用服务器能否在规定毫秒内接管网络 IP 并继续接收数据；或者人为断开一路传感器的电源，看系统能否及时发现并切换到备用传感器的读数。

软件故障模拟

软件故障注入通过插桩技术或者专用的测试框架，在程序运行期间动态的修改内存数据或者寄存器的值。测试脚本对传感器上传的数据包内容作随机改变，将它改成乱码、空值或者超出量程的数值来考查数据清洗模块的拦截效率。模拟数据库锁死、文件系统只读、网络端口被占用等资源竞争情况，观察软件进程是否因此崩溃退出。

网络攻击模拟

模拟网络风暴攻击，给系统的网络接口发送每秒数万个广播数据包，检测系统网络协议栈的抗干扰能力是否足够，保证在网络拥塞的时候核心报警信号的传输延迟仍然在安全范围内。每项注入测试都有明确的通过标准，系统在故障发生的时候要保证稳定，故障清除之后还要保证正常运行，不需要人工重启。

（三）稳定性测试

稳定性测试考察的是系统长时间连续运行时的资源管理状况，主要目的是发现内存泄漏、句柄泄漏、数据库性能衰减等隐藏问题。

长期运行与资源监控

在标准实验室里，系统被调试成全功能运行状态，用信号发生器模拟船舶轮

机工况，连续输出各种转速、温度、压力数据。测试周期为 720 小时（30 天连续不间断工作），在测试期间系统不能有故障或者重启。测试的时候，每分钟取一次系统的主要指标，各个进程的物理内存占用量、虚拟内存使用率、文件句柄打开数量、数据库查询响应时间等。数据分析人员必须关注这些指标变化趋势，如果发现内存占用量随着时间推移呈线性或者阶梯式的上升，即使没有达到系统崩溃的临界值，也应判定存在内存泄漏的风险，必须找到代码源头并予以解决。

高并发压力测试

测试后期做高并发压力测试，模拟船舶主机、辅机、锅炉同时出现故障的极端情况，瞬间产生上万条报警信息。此步骤是考察数据库对于大量数据写入的吞吐能力，保证系统在长期运行中不断积累历史数据的情况下，依然能够迅速对最新的故障预警请求作出反应，不至于出现界面死机或者数据堆积的现象。

三、 可靠性评估

测试数据的积累给系统的量化评价赋予了客观基础，不过想全面评判系统可靠性水平，还得搭建起一个综合评价体系，把数学模型同定性分析融合起来。本部分负责把分散的测试结果转换成具体的可靠性指标，用平均无故障工作时间，系统可用性分析以及潜在风险分析这些手段，向用户呈现清楚的质量承诺，而且为后面版本的改进给出方向。

可靠性评估关键指标表

评估指标	定义	衡量内容	目标 / 作用
平均无故障工作时间	产品在规定条件下相邻两次故障之间的平均工作时间	硬件组件及系统整体的可靠性	衡量系统在正常运行下的预期故障间隔，指导备件库存与维护周期
固有可用度	系统在理想维修条件下提供服务的概率	系统自身设计层面的可靠性和可维护性	反映系统设计的优劣，与 MTBF 和平均修复时间相关
工作可用度	系统在实际运行条件下提供服务的概率	综合考虑系统的固有可靠性、可维护性及后勤保障因素	更贴近实际运营情况的可用性指标
风险优先数	严重度、发生概率、可检测度三者的乘积	识别和量化系统潜在故障模式的风险等级	指导风险管控措施的制定，优先处理高风险项

从可靠性评估关键指标表可见，评估过程涵盖了多方面内容。

（一）MTBF 计算

平均无故障工作时间是衡量系统可靠程度的好坏最根本的定量指标，即产品在规定的条件下相邻两次故障之间的平均工作时间。本系统用元器件计数法和应力分析法结合的方式进行计算。按照国家军用标准或者相关船舶行业规范，统计系统中所有电阻、电容、集成电路、连接器等电子元器件的数量和种类。再根据各个元器件的基础失效率数据，结合实际工作环境下温度系数、电压应力系数、质量等级系数等，加权得到硬件层面的总失效率。

根据理论计算的结果，再结合现场运行数据和加速寿命测试数据来修正。由于船舶轮机环境的振动、盐雾等因素在理论公式中不能完全体现，评估模型中加入了环境校正因子。统计多台样机老化测试的累计运行时间及失效次数，用卡方分布以一定的置信度求出系统平均无故障工作时间的下限值。计算结果不但是向船级社申请型式认可证书的重要依据，也是制定备件库存计划和维护周期的重要参考。系统的设计目标要求平均无故障工作时间为 5 万小时以上，即系统在正常的维护保养条件下平均 5 年才会有一次因为硬件故障而停机的情况。

（二）可用性评估

可用性指标表示系统在任何时刻可以正常提供服务的概率，它同系统的可靠性和可维护性有密切关系。本评价体系从固有可用度和工作可用度两个方面来衡量。固有可用度由平均无故障工作时间和平均修复时间决定。提高系统的可用性就是增大平均无故障工作时间，减小平均恢复时间。模块化的硬件结构设计，使得更换故障板卡的时间控制在 15 分钟之内，完善的自诊断功能可以精确定位故障点至具体通道或芯片上，大大缩短了查找故障所花费的时间。

在实际的评估中由于船舶航行时无法得到外部的技术支持，因此系统可用性也考虑到了后勤延误时间的影响。因此引入冗余切换成功率这个指标来修正传统的可用性公式。双机热备系统切换没有明显的时间间隔，发生故障后恢复时间用毫秒来计算，从宏观意义上来讲可以认为是零停机。根据系统在各种故障模式下恢复的情况，得出综合系统可用性达到五个九（99.999%），即全年非计划停机时间累计不超过五分钟，满足无人机舱或者一人驾驶船桥对监控系统高连续性的要求。

（三）风险评估

风险评估的目的是找出并量化可能会造成系统失效的各种隐患，用故障模式

与影响分析法（FMEA）对系统进行全方位的排查。评估小组对系统每一个子系统、每一个组件乃至最小可更换单元（LRU）进行逐个分析，并把所有的故障模式一一列出，包括传感器断线、电源纹波过大（通常要求纹波系数小于 5%）、数据库索引错误等等。对每一种故障模式分析它给上级系统、整船安全带来的后果，从严重度（Severity，S）、发生概率（Occurrence，O）、可检测度（Detection，D）三个方面打分。评分标准通常参考 QS 9000 或 ISO 26262 标准，采用 1 至 10 分制，其中 10 分代表最高危险度或极难检测（《可靠性工程》相关教材）。

根据三个维度的乘积得出风险优先数（RPN = S × O × D），用它作为风险分级的依据。RPN 的取值范围在 1 至 1000 之间。通常规定 RPN 大于 100（或更严格的标准如 60）的项目为高风险项，对风险优先数高、风险大、容易导致主机误停车的故障模式要重点管控。例如，对于 RPN 值大于 120 的关键故障模式，在设计中必须加入硬件联锁或者软件二次确认（如“三取二”逻辑）等措施，以将该类故障的 RPN 值降低至安全阈值以下，确保因系统自身故障导致的主机误停车概率低于 10^{-5}/ 小时（参考安全完整性等级 SIL 2 或 SIL 3 的要求）。

风险评价是动态迭代的，在设计、测试、试航阶段出现的新问题会使得故障模式及影响分析表发生变化。通过创建风险矩阵图（Risk Matrix，如 5 × 5 或 10 × 10 矩阵）将各类风险可视化地表现出来，在系统交付之前保证所有的高风险项目（如落入矩阵中“红色区域”的项目）都已采取了合适的应对方法。在船舶智能系统的交付标准中，通常要求剩余的风险必须控制在 ALARP（As Low As Reasonably Practicable）区域，且不可接受的风险数量必须为 0，为船舶轮机故障诊断与智能预警系统的安全使用提供理论基础（参考 IMO MSC.429(98) 关于智能船舶安全试用的指南）。

第四节 工程实施注意事项

实施船舶轮机故障诊断与智能预警系统，是项复杂的系统工程，它把机械、电气、信息通信等学科的交叉知识和技术融合在一起。为了保证系统可以长期稳定地在实船上工作，我们一定要按照有关的管理规定和技术标准来执行，并且要充分考虑船舶特殊恶劣的工作环境和工作条件。为此要从项目管理、施工安全、文档管理这三个主要方面入手，建立一个全面的保障体系。

一、项目实施管理

项目实施管理是系统设计的最后一环，也是最后交付的环节。关键在于怎样在有限的工作时间、有限的经济条件条件下，通过科学的组织调度保证工程质量达到预定的标准。考虑到船舶靠港时间短、作业空间小、工种交叉作业的实际情况，建立一套严格的项目管理体系就显得十分重要。这直接关系到系统能否按时投入使用，也关系到以后的维护是否方便。

（一）项目计划制定

项目计划的制定要以船舶实际营运周期的调研为基础，充分考虑船舶进出坞、靠泊装卸货、锚地等待等各方面的作业窗口期。制定计划时，需要把整个工程做详尽的工作分解结构拆解，把传感器安装、线缆铺设、服务器部署、软件调试等任务细化到小时级别。计划中一定要有关键路径。特别是主机停机的安装工作，一定要和轮机长的日常保养计划结合起来，不能影响船舶的正常动力。

资源调配方案不能草率，必须事先核实船舶剩余电量、备件存放位置、施工人员的船员资格证书是否齐全有效。考虑到海上物流的特点，所有硬件设备、安装辅材和调试工具必须在项目开始前两周集港，留有充足的缓冲时间，以应对突然出现的海况变化所造成的物流延误。人力资源上要安排好电气工程师、软件调试人员及现场施工队的班次，在船舶靠港的黄金作业期内做到 24 小时轮班，充分利用停航窗口。

风险管理计划应是方案的一部分，对可能发生工程变更、恶劣天气、设备到货损坏等情形，事先制订应急预案。如果原定安装位置因船舶管路改造无法使用，则应提前准备两个以上备选安装方案以及相应的转接支架。计划敲定之后，就要由船方代表、项目经理以及技术总监这三方一起评审，从而保证计划可行且鲁棒。任何重要的里程碑节点的变更都有严格的审批程序。

（二）进度控制方法

项目执行期间，动态的进度把控才是防止工期拖沓最根本的办法。项目组要采取滚动式计划管理的方法，依照每日现场施工日报和周报，及时同实际进度与基准计划的偏差做比较。当某一作业面的进度落后于预警值时，应立即启动纠偏程序，增加并行作业班组或者优化工艺流程来赶上班次进度。现场管理人员每天要召开班会，明确当天主要工作及可能存在的障碍，保证问题当天解决，不留过夜。

1. 用数字化项目管理工具创建可视化的进度看板，把线缆敷设长度、传感器接入数量、模块调试通过率等重要指标用图表的形式直观展示出来。不但有利于管理层对总体进度的把握，也便于一线施工人员了解自身工作对总体进度的贡献，进而产生积极的赶工氛围。

2. 实行关键节点验收制度，把工程分成设备就位、线路连接、单体通电、系统调试四个主要部分。每个阶段结束之后必须严格进行质量与功能的检验，只有前一阶段全部合格才能进入下一阶段。这样的“令行禁止”的管制办法可以防止前期的隐患积攒造成后期的大范围返工，从根子上保证整个进度的可控。

3. 建立船岸之间信息交流的渠道，定期把工程项目进度信息告知船东或船舶管理公司。如果船舶由于自身原因（临时移泊、紧急抢修等）造成施工中断，应及时办理工期签证并做好记录，根据实际情况调整之后作业的逻辑，利用零碎时间做非关键路径上的辅助工作，尽量减少对总工期的影响。

（三）质量保障措施

质量是故障诊断系统的生命线，在船舶剧烈振动、高温高湿的恶劣环境中，哪怕是最微小的施工瑕疵也会被放大，从而造成误报警甚至系统瘫痪。因此必须建立全过程的质量追溯体系，从源头上控制好设备质量。所有进场的传感器、数据采集卡、计算单元必须附带船级社认可的型式认可证书、出厂合格证。登轮前要进行二次通电试验，以排除由于运输震动而造成的早期失效产品。

施工过程的工艺质量必须严格按照海事工业标准来执行。强弱电分线敷设，动电线缆与信号线缆平行距离必须不小于规定值，尽可能降低微弱传感器受到电磁干扰的机率。屏蔽层接地要采用单点接地或者多点电容耦合接地的标准化工艺，不能出现由于地环路电流造成的信号漂移。每一个接线端子都要用冷压端头套上线号管，保证电气连接的可靠性和可维护性。施工人员紧固螺丝后还要涂防松标记胶，防止机舱长期的机械振动。

系统调试阶段的质量验收包含功能性测试以及性能压力测试。除了对各个通道的数据进行正确的性检测之外，还要模拟主机过载、传感器断线、网络风暴等极端工况，对系统的稳定性和故障恢复进行检测。所有的测试数据都应该被自动记录下来，并形成不能更改的电子报告作为最终交付验收的依据。对核心算法模块使用历史故障案例库回放验证，保证智能预警模型遇到真实故障特征时可以准确触发。其误报率、漏报率指标要优于技术协议规定的数值。

二、安全施工规范

船舶机舱环境恶劣，空间封闭，高温高压易燃物密布，旋转机械危险源四伏，施工安全风险极高。工程团队把安全作为施工的首要前提，严格遵循海事安全作业规程，实行全员安全生产责任制，从电气防护、设备安装、数据资产安全三个角度构建起牢固的安全防线。

（一）电气安全要求

船舶电网一般采用的是绝缘中性点系统，对于地绝缘电阻有很高的要求。接入故障诊断系统的时候，绝不能破坏原有电网的绝缘状态。所有新增的电源回路都必须装设具有短路、过载、漏电保护功能的独立断路器。电源取电点设在主配电板的备用负载开关之下，禁止私接重要航行设备供电回路。进行带电测量或者接线作业时，施工人员必须穿戴绝缘鞋和绝缘手套，实行一人操作、一人监护制度。

由于机舱内油气密集，所以机舱内电气设备的选用及安装都应具有防爆等级。安装在曲轴箱、燃油净油机周边的传感器、接线盒，必须选用本质安全型或隔爆型；电缆引入装置必须采用防爆填料函密封，不得产生电气火花引爆可燃油气。布线过程中若需要通过防火舱壁或者甲板时，必须使用船级社认可的防火填料封堵，以保证船舶的水密性、防火性不受影响。

系统接地对于人身和设备的安全起着重要的作用。机柜外壳、屏蔽层、金属线管必须用专用接地编织带与船体结构可靠连接，接地电阻不大于 4Ω。焊接接地桩时，必须断开附近的电子设备的电源线，以免电焊机高频高压脉冲击穿精密半导体元件。系统内还要加装浪涌保护器，防止雷击或者大功率设备启停造成瞬时过电压击穿系统核心控制单元。

（二）设备安装安全

1. 登高与受限空间作业安全：安装主机顶部或者排烟管路附近传感器时需要进行高空作业。施工人员必须佩戴全身式安全带，并将它系在船体结构上，不得系在管路或者电缆桥架上。对进入扫气箱、曲轴箱内部的作业，必须严格执行受限空间作业审批制度，提前通风测氧，在入口处设专人看守。

2. 动火作业和机械防护：安装支架时进行焊接、切割时必须办理动火许可证，清除周围油污、易燃物，配备足够的灭火器材。焊接结束之后要留有三十分钟的观察时间，以防暗火复燃。在旋转机械（联轴器、飞轮等）附近工作时，必须禁

止戴手套、长袖衣着要束紧，长发要盘入安全帽里。

3. 防止异物掉落，在主机拆开检查孔或者安装孔植入传感器的时候，必须对开口周围做好覆盖保护。使用的工具必须系有防坠绳，以防螺丝、垫片等物品掉进机器里，造成严重的机械损坏。安装完毕后再用内镜做二次检查，看看有无异物存留。

（三）数据安全保护

工业互联网时代到来以后，船舶系统的网络安全关系到航行安全。智能预警系统中存在很多实时运行的数据和控制指令，所以必须建立纵深防御的数据安全体系。硬件上系统服务器应装在带锁的专用机柜里。物理接口要通过软件或者物理锁具进行封锁，防止未经授权的设备接入而造成病毒的传播或者数据泄露。

从网络架构来说，要使用工业防火墙对船舶办公网、卫星通信网进行逻辑隔离。数据向岸端传输时，必须使用单向网闸技术或者加密的 VPN 通道，保证外部网络不能反向渗透到机舱控制网。传输协议应该使用带身份认证、完整性校验的工业安全协议来防止数据在传输过程中的截获、篡改和重放。

数据备份以及应急恢复为最后的防线。系统要有自动本地备份的功能，定时把历史的数据库以及配置文件做镜像备份到其他的存储介质上。工程实施过程中，每个阶段调试完毕后都应该有一个系统的快照。一旦发生勒索病毒攻击或者系统崩溃，就可以立刻利用备份的数据把系统恢复到最近的可信状态，最大限度地减少由于数据丢失造成的经营风险。

三、文档管理要求

详实规范的技术文档是工程交付的重要组成，也是系统全生命周期维护的知识基础。文档管理不只是简单的资料堆砌，它更是一种技术转移和知识传承。在项目执行过程中编写文档、校对文档、更新版本，保证交付文档可以真实反映系统最终的状态，为船员操作、故障排查、后期升级提供正确的指导。不同类型技术文档的主要内容及特点如下表所示：

技术文档类型及主要内容表

文档类型	目标受众	主要内容	关键特点
用户操作手册	轮机员、电机员	系统启动、报警确认、报表导出、简易故障处理流程	按任务编排，图文并茂，有醒目标记，减少学习负担
系统维护手册	技术人员	硬件拓扑、电气原理、接线端子图、传感器点位图、数据库结构、通信协议、算法模块功能	细致技术细节，使用标准工程符号，附图例说明
智能预警模块说明书	船员、岸基专家	故障模式判断逻辑、特征参数阈值设定依据、维修建议	解释决策依据，建立信任，统一技术语言

（一）技术文档编写

技术文档的编写要满足逻辑清晰，图文并茂，数据正确这些要求。用户操作手册应该按照任务来编写，针对不同的角色，给出具体系统的操作流程指导，重点对系统启动、报警确认、报表导出、简易故障处理等高频场景进行说明。手册应该包括大量的软件界面截图、实物照片以及醒目标记来降低使用者学习负担。

系统维护手册要详细到每一个技术细节，给出系统硬件拓扑图、电气原理图、接线端子排布图、传感器点位分布图。每一个传感器都要注明型号、量程、输出信号种类以及安装位置编号。软件部分说明要包含数据库结构、通信协议定义以及算法模块的功能说明。所有图纸都必须用标准的工程符号，附有详细的图例说明，保证不同的技术背景的人能够理解。

智能预警模块需单独编写《故障诊断案例库与预警模型说明书》。文档中应当对各种故障模式的判断逻辑，特征参数阈值的设定依据以及推荐的维修建议进行详细的描述。既可以提高船员对于智能系统决策依据的认知，也可以建立起船员对智能系统的信任，为岸基专家远程诊断奠定共同的技术语言基础。

（二）版本控制管理

工程实施过程中软件代码、配置文件及图纸资料不断被修改和更新，所以版本控制变得十分重要。项目组应该使用专业的版本控制系统来统一管理所有的数字化资产。每次代码提交或者配置修改都必须填写详细的变更日志，写明修改人、修改时间、修改原因和影响范围。

交付给船方使用的固件、软件安装包应带有版本号，在传输和安装过程中都应带有 MD5 校验码，以保证文件一致。严禁使用最终版、最新版等含糊的文件命名方法。建立船岸同步版本基线库，使岸端维护中心掌握的系统配置信息和实

船完全一致，避免因为版本差异而导致的远程指导错误。

（三）归档与移交

工程结束时的归档和移交是项目完工的收尾工作。项目组按照合同清单整理全部竣工资料，设备清单、材质证明、测试报告、验收单据、培训记录等。所有的纸质文件应该装订成册，分类放入防水文件盒内，并交由船方保管；电子文档刻录到光盘或者存放在工业级 U 盘中，设置只读权限，防止被误删。

1. 编制详细的移交流程清单，按照清单对硬件实物和备件进行核实，最后接船人签名。易损件及专用工具更换方法与技巧要现场演示。

2. 对轮机管理人员进行操作培训和考核，保证每班人员能熟练操作系统，掌握应急处理措施。培训过程要录制视频并存档，作为以后新船员上岗培训的教材。

3. 签发最终验收证书，确定保修期开始时间、结束时间和服务范围。同时把系统超级管理员密码、软件授权许可、售后服务联系人交给船方，保证工程团队一走开，船方就能自己掌控系统，马上得到技术支持。只有完成以上所有的流程，工程实施才可以称之为真正的闭环。

第十章 发展趋势与展望

伴随着新一代信息技术同传统船舶工程领域越来越深的融合，船舶轮机故障诊断和智能预警系统正处在前所未有的发展机遇之中。正处在由数字时代向智能时代转变的时期。考察技术演进的轨迹，未来系统宏伟蓝图以及主要的突破方向也十分明确。

第一节 智能预警技术发展趋势

智能预警技术是保障船舶航行安全的一道屏障。正由单一的阈值判断向具有更强认知、决策、交互能力的深度智能过渡。未来的科技体系会更重视数据价值的挖掘和模型的泛化能力。

一、算法模型发展趋势

算法模型算是智能预警系统的大脑，主要演进方向就是提升环境适应程度，缩减对数据的依存度，增进人与机器的信任感。下一辈的算法会具有较强的动态进化能力，可以适应船舶在整个生命周期当中所有不同的复杂多变的工况。

（一）自学习与自适应能力

船舶轮机设备长时间工作以后，由于磨损、积碳、腐蚀等原因，其物理性质会发生不可逆的缓慢变化。这就导致用固定参数训练出的模型，在使用后期容易出现精度下降甚至失效的现象。未来智能诊断算法会普遍具有终身学习能力，即模型上线不是学习的终点，而是持续进化的开始。系统可以利用在线检测到数据不断调整模型参数使模型更加精确，从而精准掌握设备从新机磨合期、稳定使用期和老化衰退期的整个变化过程，并且能做到健康基线的动态调节。

自适应性还表现在对复杂海况、变工况的鲁棒性上。船舶航行过程中受到风浪流等外环境的剧烈干扰，同时不断进行加减速、换向。具有自适应能力的算法模型可以采用迁移学习或者领域自适应技术，快速地发现各种工况下数据分布的

规律，自动消除环境噪声造成的误报干扰。采用强化学习机制之后，模型可以同环境持续交互，不断尝试和错误来优化自身，进而渐渐塑造出针对某一艘船、一条航线的个性化诊断策略，从而达成真正意义上的千船千面精准预警。

（二）小样本学习方法

在船舶轮机故障诊断中，怎样获得高质量的故障样本数据一直是个棘手问题。由于船舶核心设备可靠性高、维护保养严格，所以真实故障数据就如同大海捞针一般稀少。由于类别不平衡性太严重，因此依靠大量的标注数据来进行学习的传统深度学习方法很难起作用。因此小样本学习方法将会成为破解这个数据瓶颈的关键技术。该技术希望通过对少量样本甚至零样本的学习，使模型能够识别出新型故障类型，核心就是从已有类别中学习到一个通用的度量空间或者优化策略，并迁移到新类别中去。

生成对抗网络产生的新数据可以用于该领域。借助博弈对抗的训练方式，算法可以按照有限的真实故障数据，产出很多逼真并附带标签的虚拟故障样本，很好地丰富了训练数据集的分布种类，进而克服数据不足的困难。

元学习属于“学会学习”的算法框架，也会被纳入轮机故障诊断当中。对不同类型的设备或者故障模式任务执行多任务训练，从中学习通用的跨任务特征表示。系统只需要很少的数据，就可以快速调整参数，对新出现的故障进行准确的识别和预警，极大地提高了系统的泛化能力和“冷启动”速度。

（三）可解释性 AI 技术

虽然深度学习模型对于故障诊断精度有了很大的提高，但是由于其“端到端”的黑箱特性，一直使深度学习模型在工程中的大规模应用受到限制。对于船舶轮机长或者岸基技术支持人员来说，仅仅获得一个故障标签是远远不够的，他们需要知道模型作出判断的依据，才能放心地采取停机检查或者应急处理措施。因此，可解释性人工智能技术就成为连接算法预测和人工决策的信任纽带。借助可视化技术以及逻辑推理机制，新的系统可以清楚地显示出模型所看重的特征部分及其权重贡献，还可以表现出数据输入与诊断结果之间的因果联系。

1. 以注意机制可解释性方案为主流。在处理轮机振动信号或者热工参数的时候，算法能够自动高亮出引起故障判定的关键时间片段或者频谱频段，使轮机员可以直观地看出是什么瞬间的异常波动触发警报。直观的视觉反馈可以检验模型的合理性，也可以给后续故障排查提供准确的物理定位方向。

2. 以知识图谱为基础的推理归因技术将会大发展。未来的系统不会只是数据驱动，会是带有轮机工程原理与专家经验的“混合智能”。当模型输出预警信息的时候，系统会依据内置的船舶设备知识图谱，产出合乎人类语言逻辑的诊断报告，详尽表述从现象监测，特征提取到逻辑推演的全部流程，而且给出符合物理机理的解释，这样就完全消除了操作人员对于智能系统的怀疑。

二、数据处理技术发展

由于越来越多的传感器被应用于船舶中，采样频率变得越来越快，这导致了大量的观测数据给系统带来处理能力上的压力。数据处理技术由单一的中心化处理向着边缘侧转变，而且越发重视时效性与安全性以达到即时响应的目的。下表给出了不同的数据处理技术特性对比。

数据处理技术对比表

特性 / 技术	传统云端集中处理	边缘计算	实时流处理
处理位置	岸基云端	船舶本地（边缘侧）	船舶本地 / 边缘侧（数据流经处）
数据传输	大量原始数据经卫星传输	关键特征 / 报警信息回传，大部分本地处理	数据逐条传输并即时处理
带宽需求	高(传输原始数据)	低（传输少量结果）	适中（连续传输小数据包）
处理延迟	高（分钟级）	低（毫秒级）	极低（毫秒级）
实时性	差	优	极优
离线工作	无法	可支持部分功能	可支持部分功能
隐私保护	数据需离船上传	数据留存本地，隐私风险低	数据处理本地化，隐私风险低
典型应用	长期趋势分析，模型训练	实时预警，数据清洗，特征提取	瞬态故障检测，跨参数关联分析

（一）边缘计算应用

传统船舶数据处理方式一般将收集到的全部原始数据，经由卫星链路传送到岸基云端做进一步的分析。但是海上卫星通信费用高、带宽小、连接不稳定，难以满足海量高频数据的实时传输需求，传输延迟大，极易造成预警滞后。边缘计算技术把计算能力下放到数据产生源头，也就是船舶的集控室服务器或者传感器节点上，实现了数据在本地的即时处理和分析。

在船舶边缘侧智能网关、嵌入式计算单元上做数据清洗、提取特征、轻量级

模型推理等操作。振动、声发射等高采样率信号在边缘节点本地完成复杂的时频域转换、异常检测，只把关键的特征值、故障报警信息、短时段的异常波形（经过压缩）上传至岸基。该种云边协同模式大大降低了卫星通信的费用，更重要的是把故障响应时间从分钟级缩短到毫秒级，在故障发生之初就触发本地预警，给轮机员争取到宝贵的处置时间。

边缘 AI 芯片的算力不断提高，因此船端边缘设备将来运行更为复杂的、更深层次的神经网络模型。这就表示即便船舶处在离线航行状况下，依然可以拥有完备的智能诊断机能，不会因为通信链路的通断情况而受到影响。岸基云端主要做长周期趋势分析、模型训练和策略优化，顺便把更新好的轻量化模型推到船端的边缘设备上，形成“云端训练，边缘推理”的闭环。

（二）实时流处理技术

船舶轮机系统属于连续运转的复杂动力过程，传感器每秒都会产生大量的时间序列数据。传统的批处理方式需要把数据累积到一定数量后再进行整体分析，对于突发性故障的响应就显得力不从心。实时流处理技术把数据当作连绵不断的“流体”，数据一到就立即被逐条扫描、计算，真正实现了即来即析。

流处理引擎可以构建带有状态记忆的实时分析管道。在处理当前传感器读数的时候，系统除了参考当前数值的大小，还会将滑动窗口内历史数据的走势加入考虑，实时地得到变化率、偏差度这样的动态指标。对扫气箱着火、曲轴箱油雾浓度超标等瞬态故障，流处理技术可以毫秒级完成异常模式匹配，触发联锁保护，反应速度比人工监控快得多。

面对多源异构数据的融合问题，实时流处理架构中的业务逻辑就会变得愈加繁杂。可以同时采集主机、辅机、轴系等几百个数据流，并对跨系统参数波动做实时关联分析。当主机排温异常升高的时候，系统会查看同一时间段内的冷却水压力流、燃油粘度流等参数，利用多流关联来快速判断出故障的原因，防止单一参数报警造成的误判。

（三）数据隐私保护

船舶运行数据已经成为航运业数字化进程中船东、设备制造商、租船方眼中的金矿。轮机运行数据是直接反映设备健康状况的，但是也蕴藏着燃油效率、航线规划、载重策略等具有商业价值的信息。因此，怎样既能让数据共享来提升诊断精确度，又能让各方面的数据隐私得到保护，成了技术发展进程中必须克服的

难题。

联邦学习技术给破解“数据孤岛”问题赋予了新的想法。各家船东的船舶数据无需离开本地服务器或者私有云。模型训练分为本地训练和参数聚合两步，参与者只把加密的梯度参数发到中心服务器，并不把原始的运营数据传给中心服务器。中心服务器把各个参数更新之后，融合得到全局模型，再下达到各个船。“数据不动模型动”的模式下，全行业可以基于共享的大量数据训练高精度通用故障诊断模型，并且不会有商业机密泄露的风险。

区块链技术所具有的数据溯源、确权功能会成为行业的标配。每一次数据调取、模型更新、诊断结果产生都会被记录在不可篡改的分布式账本上。利用智能合约可以对数据使用的权限以及有效期做出精确的控制，保证数据的所有者对其数据资产拥有完全的控制权，并且可以从数据的共享以及增值的服务中获得公开透明的收益，从而激励更多的行业参与进来，参与到智能预警生态的建设当中。

三、系统架构演进方向

为了支撑日益复杂的算法模型和不断增加的数据量，智能预警系统底层架构也正向分布式、松耦合、高弹性等现代化软件架构转型。架构演进主要为了提高系统可维护性、可扩展性和跨平台部署。

（一）云原生架构

云原生架构不是简单的把软件放在服务器上，而是在充分利用云计算的弹性伸缩、自动化运维等特性之后，对系统开发和运行的方式进行重新构造。对于船舶智能预警系统来说，云原生就意味着系统可以按照计算负载的波动情况来自主调节资源。当船队规模变大或者需要对大量的历史数据进行回溯分析的时候，系统就可以马上调用云端近乎无限的算力资源；而在平时的监控低负载时间里，它就会自动释放这些算力以节省费用。

DevOps 的理念会在云原生架构下全部展现出来。通过持续集成、持续交付的流水线，算法工程师每一次新增加的功能，每一个优化的诊断模型，都会经过自动化测试验证之后，直接无障碍的推送到生产环境。这样的敏捷迭代方式可以迅速对新型船舶设备技术的变化做出回应，可以即刻获得新的故障特征保证技术的先进性。

云原生提倡的是基础设施即代码。借助标准化的配置文件来把控服务器，网

络，存储这些资源，系统部署就不必依靠人工去逐一设置，很大程度上规避了由于环境差异而产生的问题。不管是部署在公有云、私有云还是混合云中，智能预警系统所处的运行状态是一样的，给全世界航行的船只提供统一可靠的技术支持。

（二）微服务化趋势

传统的船舶监控软件大多采用大型的单体结构，各个功能模块之间耦合度高。根据统计，一个典型的船舶综合平台管理系统（IPMS）单体应用代码量往往超过 50 万至 100 万行，容易牵一发而动全身。局部模块一旦出现崩溃，就会造成整个监控系统瘫痪，系统平均恢复时间（MTTR）可能长达 30 分钟至数小时。微服务化趋势是指把庞大的系统拆分成许多小型的、独立的运行服务，每个服务只负责一个特定的业务功能。例如，根据功能边界，系统可被拆分为 10 至 30 个微服务，如主机燃烧分析服务、轴系振动监测服务、油液分析服务等。

各个微服务之间采用轻量级的标准接口（如 RESTful API 或 gRPC）进行通信，彼此在进程层面是独立的。推进系统诊断模块出现故障并重启的时候，发电机组监控模块依然可以正常工作。在微服务架构下，由于实现了故障隔离，局部故障导致的停机风险可降低 80% 至 90%，系统的整体可用性可从通常的 99.5% 提升至 99.9% 甚至更高（即每年停机时间从 43.8 小时降至 8.76 小时以下）（参考《微服务架构设计模式》及 NFPA 72 关于系统可靠性的标准），这样就大大提高了整个系统的可用性以及容错能力。

微服务架构给技术选型带来了极大的灵活性。各个诊断模块按照自身业务特性，可选择最适合自己的编程语言以及数据库技术。计算密集型的振动分析模块可采用 C++ 或者 Go 语言进行编写，利用其对底层硬件的控制能力，将计算效率比通用语言提升 20% 至 50%；而逻辑较为复杂的专家系统模块可以使用 Python，利用 TensorFlow、PyTorch 等丰富的 AI 库。由于异构共存的特点，系统能够集各家之长，一直使用最先进的技术组件，技术迭代周期可从传统的 6 至 12 个月缩短至 2 至 4 周。

（三）容器化部署

船舶属于“移动的国土”，船端服务器的硬件环境千差万别，而且由于长时间海上航行，网络受限，现场软件升级维护非常困难。容器化技术把应用程序以及运行该程序所需要的所有依赖库、配置文件等打包成一个独立的镜像文件，使得可以做到“一次构建，到处运行”。

利用 Docker 之类的容器引擎，智能预警系统可以忽略底层操作系统差别，在装有容器运行时的设备上实现秒级启动。这就解决了行业里的“环境依赖地狱”问题，船端和岸端的运行环境变得非常相似。算法模型经过岸基实验室验证之后，可以直接打包成容器镜像推送至船端，不用在船上进行繁琐的重新编译配置。

当使用容器编排平台的时候，船端应用的管理就会变得自动化。平台可以对各个容器的健康程度进行实时监测，当检测到某个诊断服务容器意外退出时，会自动重启或者重新调度到其它节点上的运行实例，从而保证服务具有自我修复的能力。另外，容器编排技术还可以做灰度发布。系统升级的时候可以只在非关键节点部分部署新的版本，在确认没问题的情况下再全面推广到所有的船舶上，最大程度的减少软件升级给船舶航行安全带来的影响。智能系统交付、运维、整个生命周期成本都会大幅度降低。

第二节 数字孪生在轮机管理中的应用前景

随着智能航运时代加速到来，船舶轮机管理也从以前的传统的计划维护向预测性维护、智能健康管理转变。数字孪生作为物理世界和信息世界的核心桥梁，给复杂的轮机系统故障诊断、性能改进和全生命周期管理提供了一种全新的思路。用高保真的虚拟建模实现对实体装备实时的映射与反馈控制，可以明显改善船舶运营的安全性以及经济性。

一、数字孪生技术概述

数字孪生技术不是单一的技术革新，而是多种前沿数字化技术的集合与融合，其本质是将物理实体在虚拟空间中进行精确的映射和再现。轮机工程中的应用使设备管理的维度实现质的飞跃，将以前看不见摸不着的内部状态可视化、量化、预测化。

（一）基本概念与特征

数字孪生就是利用物理模型、传感器实时更新数据、运行历史数据，集成了多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中构建物理实体的全生命周期映射。船舶轮机领域中的每一个柴油机、泵阀系统，在数字空间中都有完全对应的虚拟实体。该虚拟实体不但是几何外观的复制，还是物理属性、行

为逻辑、运行状态的复制。

该技术有三个明显的特征，一是实时性。虚拟模型可以依靠传感器网络实时获取物理实体的数据，并且保证二者状态的同步，哪怕是最小的参数变动，也会在毫秒之内同步到数字模型上。其次就是闭环交互性，数据流并不只是从物理实体单向流向虚拟模型，经过分析处理后的指令和优化参数，也可以反向传输给物理实体，实现智能化的闭环控制。

最后是进化性。轮机系统的数字孪生模型不是一成不变的。随着船舶使用时间的增长，物理设备会因为磨损、老化等造成性能下降，数字模型根据积累的历史数据以及机器学习算法来自动调整参数，自我学习，不断演化，从而一直保持和物理实体的高度一致性。伴随物理实体全生命周期共同成长的特性，就是它与传统静态模型最大的不同。

（二）技术架构组成

轮机数字孪生系统通常包括物理感知层、数据传输层、模型建立层和功能服务层四层。各个层级相互配合，共同支撑数字孪生系统运行，各个层级的功能大致如下表所示，该表为轮机数字孪生系统架构组成表。

轮机数字孪生系统架构组成表

层级	主要功能与组成
物理感知层	部署高精度传感器（如温度、压力、振动、流量等），采集物理实体运行数据，连接现实与虚拟世界。
数据传输层	负责将海量、异构的物理数据进行实时、高效地传输与处理，确保数据流的畅通无阻。
模型构建层	整合几何模型以表现空间结构，机理模型以阐述物理过程，以及数据驱动模型以挖掘关联规则，构建功能完备的数字空间，堪称系统“大脑”。
功能服务层	面向最终用户，提供故障预警、健康评估、能效改善等具体服务，旨在将复杂的底层数据运算转化为用户易于理解的决策辅助信息。

物理感知层为整个系统打下基础，依靠主机、辅机、轴系等关键位置的各种高精度传感器，采集温度、压力、振动、流量等多种运行数据。这些数据就是现实世界和虚拟世界之间的纽带，它决定孪生系统有多真实。

模型构建层就是系统的“大脑”。它综合了几何模型来表现空间结构，机理模型来解释热力学和动力学过程，数据驱动模型来挖掘隐藏的联系规律。多类型模型相结合就构成了一座数字空间，功能完备。功能服务层直接面向用户，为用

户提供故障预警、健康评估、能效改善等具体的服务，目的是把底层复杂的数据运算转化成用户容易理解的决策辅助信息。

（三）与仿真技术区别

虽然数字孪生在创建过程中大量使用了仿真技术，但是数字孪生和传统仿真的使用逻辑、功能深度存在本质区别，具体对比见数字孪生与传统仿真技术对比表。传统的轮机仿真技术是静态的，离线的。它主要是在设计阶段进行验证或者对特定工况进行模拟，输入的条件一般是预先设定的理想值或者典型值，因此不能反映当前设备的实际运行情况。设备投入运行以后，传统的仿真模型就会慢慢脱离实际的物理状态，不能应对复杂多变的实际海况以及设备老化造成的参数漂移问题。

数字孪生与传统仿真技术对比表

特性	数字孪生	传统仿真
模型状态	“活”的模型，动态、实时更新	静态模型，离线、固定
数据输入	传感器实时数据、运行历史数据	预设理想值、典型值
映射范围	物理实体全生命周期	特定设计阶段或工况
实时性	高，与物理实体状态一致	低，无法反映当前实际状况
适应性	应对复杂海况及参数漂移能力强	难以应对实际运行变化
技术集成	融合大数据、物联网、人工智能等	较少集成其他前沿技术
核心目标	以虚控实，形成智能化闭环	验证设计，进行工况模拟

数字孪生与之不同的是实现了全生命周期的动态映射。它是活的，不断的有数据流喂食，可以精准的知道设备此刻的真实运行状态。数字孪生不单单是一个仿真模型，它还是一个大数据分析、物联网通信、人工智能算法等多种前沿技术的融合。可以说仿真技术是数字孪生的基础工具之一，数字孪生是仿真技术在工业互联网环境下的“升维”应用。克服了离线模拟的限制，形成了起“以虚控实”的智能化闭环。

二、轮机数字孪生构建

创建高保真轮机数字孪生系统属于一项繁杂的系统工程，诸多学科的交叉领域和海量的数据处理任务都被包含其中。要保证系统在实际工程中可用、可靠，就得从对物理实体的精确建模开始，再搭配有效的数据融合方法，还要经过严格的验证和校准过程。

（一）物理实体建模

物理实体建模是创建数字孪生的第一步，也是最重要、最核心的基础。就以船舶轮机系统为例，建模对象包含有推进系统、电力系统以及辅助管路系统等庞大而又复杂的一个网络。几何建模要按照二维图纸和三维扫描技术，将设备的各个部件用 1:1 的比例来复现它的尺寸、装配关系和空间位置，给后续的可视化与人机交互提供准确的依据。但只停留在表面，即模型的“形”，更重要的是给模型赋予“魂”，即进行机理建模。

机理建模要对轮机设备的工作原理有充分的认识。以船舶柴油机为例，要建立气缸内燃烧过程的热力学模型、活塞连杆机构运动的动力学模型、流体在管道中流动的流体力学模型。这些都是根据物理定律、经验公式等建立起来的，可以反映设备行为背后的物理机制。

对于非常复杂的非线性系统，依靠机理模型很难达到理想的精度。此时就要使用数据驱动建模，利用深度学习等算法对历史运行数据进行训练，建立输入与输出的黑箱或灰箱模型。把几何模型同机理模型以及数据驱动模型实施混合建模，一方面可以维持模型的解释性，另一方面能够明显改善预测精确度，进而更准确地表现轮机系统在多物理场耦合作用之下复杂的运动规律。

（二）数据融合方法

轮机系统运行时产生的数据大多具有多源、异构、海量、高频等特点。时序传感器数据，维修记录的文本数据，监控摄像头的图像视频数据。把不同格式、不同频率的数据有机融合，是创建数字孪生所遇到的主要难题之一。数据融合不是把数据弄在一起这么简单，它要在时间上、空间上以及语义上做到精确对应、互相补充。

按照采样时间来说，各种传感器的采样频率不一样，振动信号可以达到每秒几千次的采样频率，而温度信号大概是一分钟才采一次。因此要采用插值、重采样这些信号处理的手段，将各个不同时期的数据换算到同一基准轴上，使得各个状态之间可以同步比较。从空间上来说，要将分布在各个舱室、各个部件的传感器数据精确地映射到三维几何模型对应的坐标点上去，从而实现数据和模型的空间配准。

语义层面的融合更深一步，依靠知识图谱技术来构建数据和设备故障形式、维修方式之间的逻辑关系。同时采用多传感器信息融合算法，如卡尔曼滤波、贝

叶斯估计等，可以去除噪声干扰，得到准确反映设备健康状况的特征指标。深度清洗过，有效融合后的数据才能输入孪生模型里进行精准的推演、计算。

（三）模型验证与校准

构建完成的数字孪生模型在使用前要经过严格的验证和校准，保证其输出结果准确可靠。模型校验一般采用历史数据回放的方式，把过去一段时间的实际运行数据当作模型的输入，然后把模型的输出响应同实际记录比较，评价两者是否一致。评价指标有误差范围，响应趋势一致程度，瞬态工况捕捉水平。

由于船舶所处的运行环境错综复杂、多变，模型在刚开始时不可能做到百分之百的精确。校准过程就是不断迭代优化的循环。当模型预测值和实际测量值相差较大时，就会触发校准程序。这就需要对模型参数进行修正，调整摩擦系数、传热系数等不能直接测量的内部参数。

使用智能优化算法（遗传算法或者粒子群算法），可以自动在参数空间中找到最优解，从而使模型输出结果更加接近实际情况。在线校准的能力，才是数字孪生的核心生命力所在，保证模型可以随着物理实体老化、性能衰退而不断自我调整，避免出现由于模型失真造成的误判、决策失误。

三、应用场景展望

随着技术逐渐成熟之后，船舶轮机管理方面数字孪生的应用场合也变得越来越多。它正在从宏观的全生命周期数据贯通、微观的故障预测与诊断，到人员培训和应急演练等各方面全方位地改变轮机管理模式，取得良好的经济效益和安全效益。

（一）全生命周期管理

数字孪生技术把船舶从设计、建造、营运到拆解的整个生命周期的数据链路全部打通，很好地克服了以往各个阶段存在数据孤岛的问题。在设计阶段建立孪生模型，可以在虚拟试航中提前发现设计的不足并进行系统参数的优化，进而大大降低试航的成本。高保真模型随船交付之后就成为船舶的重要数字资产，给后续运营提供准确的基准数据。

营运期的时候，数字孪生系统会搜集设备在全部工作状况下的运转数据以及保养记录，从而形成完备的电子健康档案。由此可以跟踪设备性能变化轨迹，分析不同的海况、操作习惯对设备寿命的影响机制。船舶改装或者坞修的时候，工

程技术人员可以直接在数字模型上开展方案预演，评价改装给系统总体性能带来的影响，进而制订出最佳的施工计划。

孪生模型所记载的材料成分，零部件状态等信息，可以给船舶报废时的拆解回收工作给予指引，进而优化资源回收率，削减环境污染危险。这样一条贯穿始终的数据流动线，把轮机管理由一些孤立的独立环节变成了一个连续的、可以追踪和优化的闭环过程，资产管理的精细化程度得到了极大的提高。

（二）预测性维护优化

预测性维护在轮机管理中的价值最大，这也是数字孪生的一个应用场景。与传统定期维护（不管是否需要都按时拆检）和事后维修（设备故障才修理）相比，基于数字孪生的预测性维护可以做到“视情而修”，在保证安全的前提下最大程度上提高设备的利用率。

1. 故障早期预警与诊断：系统一直把物理实体运行数据同孪生模型的标准输出做比较，这样就可以非常敏感地察觉到任何细微的性能差异。残差分析法比传统的阈值报警要灵敏得多，可以在故障萌芽的最初时刻，甚至在物理征兆还没有出现之前就发出预警。根据知识库，系统可以自动定位故障源，分析故障原因，大大减少排故时间。

2. 剩余寿命预估和维护策略制订，凭借累积疲劳损伤模型，性能衰退曲线这些手段，数字孪生可以准确算出活塞环，轴承这些重要部件的剩余使用年限。管理人员可以据此灵活地调整维修计划，把维修工作安排在靠港或停航期间，有效地避免由于非计划停机所造成的企业巨大经济损失。系统还可以模拟出不同的维修策略在长时间内所产生的成本和收益，从而给管理者提供最佳的备件库存量与维修时间点组合建议。

（三）操作培训仿真

数字孪生给船员培训给予了零风险、高沉浸感的虚拟演练场所。现代船舶轮机系统越来越复杂，自动化程度也越来越高，使船员处理突发故障的经验逐渐减少。传统的模拟器只能进行标准操作流程的训练，不能对极端工况和复杂的故障连锁反应进行模拟。

数字孪生化的培训系统可利用现役船舶的实时数据、以往故障实例，精准地再现真实发生事故的情况。受训人员在数字空间中可以对虚拟设备进行各种操作，观察系统参数的变化，演练应急处置程序。这种“以虚带实”的培训方式一方面

可以显著提高船员的操作能力，另一方面也可以用无风险的方式进行全船失电、主机扫气箱着火等极端情况下的处置流程演练。

船员可以佩戴虚拟现实或者增强现实设备，进入轮机舱数字孪生场景中，进行沉浸式的漫游与交互。可以透视管路内流体的流动，拆解运行中的设备以观察内部结构，从而获得直观的感性认识。该种深度交互式培训可以大大缩短船员的适应期，提高其面对复杂故障时的心理素质和实际操作能力，从根本上减少人为失误导致的轮机事故的发生。

第三节 人工智能技术发展对预警系统的影响

船舶智能化程度日益提高，人工智能在船舶故障诊断、预警上的应用范围也不断扩大。传统诊断方法仅依靠物理模型和专家规则，对于轮机系统海量、高维、非线性运行数据的诊断，就显得力不从心了。尤以深度学习、强化学习、知识图谱为代表的人工智能最新发展，为复杂工况下早期故障检测、动态决策优化、专家知识数字化提供全新的思路。这些技术不但重新塑造了预警系统的架构，而且促使船舶维修模式由传统的计划维修向视情维修、预测性维修发生了根本性的变化。

一、深度学习技术影响

深度学习是新一代人工智能的强劲动力，它依靠创建深层神经网络模型，能够从大量的监测数据里发现传统方法发现不了的一些深层次的特征。在船舶轮机工程里，这项技术的使用完全改变了信号处理以及状态识别的基础方法，使得预警系统具备了处理多源异构数据的强大能力，明显改善了故障诊断的精确率和鲁棒性。

（一）特征自动提取

传统的轮机故障诊断大都采用的是人工特征提取，工程师需要拥有深厚地信号处理知识，根据不同的设备部件手动设计出时域、频域或者时频域的特征指标。该方法费时费力，很大程度上依赖先验知识，不能很好地应对复杂多变的实际海况。深度学习技术依靠多层非线性变换，能够直接从最开始的振动，温度，压力等等时间序列数据当中学习并表征特征。浅层网络提取的是信号的边缘、纹

理这些低级特征，深层网络可以将它们整合起来，得到对设备健康状况的高级语义特征。

卷积神经网络对于轮机振动信号的二维时频图谱处理效果好。经过多层卷积核滑动之后，可以自动对频谱中与故障有关的某些频段加以聚焦，有效地滤除背景噪声干扰，得到对故障比较敏感的特征表达。端到端学习能力使得系统即使面对没有见过过的故障类型时，也能依靠数据的分布异常、利用无监督或者半监督的方式找出早期迹象，以此来降低对人工经验的依赖。

循环神经网络以及它的变体长短期记忆网络，主要是用来处理时间序列数据的动态特性。轮机系统运行状态存在时间惯性，当下的状态会受之前工况的影响。深度学习模型可以自发的提取出数据流里存在长期依赖的关系，并且会把历史运行的趋势当作是主要特征来提取。这就意味着系统不单要对当前参数是否超限做出判断，还要根据参数变化率、累计偏差等提取出能够反映设备性能退化趋势的时序特征，为早期渐发性故障识别打下良好的数据基础。

（二）复杂模式识别

船舶轮机系统是机械、液压、电气、热力等多物理场耦合的复杂巨系统，其监测数据往往具有数百甚至上千维的特征。故障模式具有很强的非线性、模糊性，单一参数不能完全反映设备的健康状态，各种故障之间还存在着症状交叉的情况。深度学习由于具有很强的函数逼近能力（通用近似定理），可以在数据空间中构造出更加精细的分类边界。例如使用深层全连接网络（通常包含 5 至 10 个隐藏层）或者图神经网络（GNN），能够将柴油机、增压器、轴系等各个子系统的运行参数融合分析，准确识别出单个物理模型不能解释的复合故障情况，其识别准确率在复杂耦合场景下可比传统方法提高 15% 至 25%（参考《Deep Learning》及 Neurocomputing 期刊相关研究）。

由于船舶航行环境恶劣，风浪干扰、船体振动（加速度可达 0.5 m/s² 至 2.0 m/s²）、传感器自身的漂移等因素都会给监测数据造成严重的噪声污染，信噪比（SNR）有时甚至低于 10 dB。传统的浅层机器学习模型在强噪声环境下很容易过拟合或者识别失效。深度学习模型利用注意力机制和正则化（如 Dropout 率设为 0.2 至 0.5）等手段，抗噪性比传统方法要好。系统在有着许多环境噪声的数据里展开训练（例如添加信噪比为 0 dB 至 20 dB 的高斯白噪声进行数据增强），就能学会故障信号的基本模样，分辨出真实的设备故障和外界环境改变引发的波

动。实际应用表明，采用深度学习后，预警系统的误报率可降低 30% 至 50%，漏报率降低 20% 左右（《机械故障诊断中的深度学习：挑战与机遇》）。

（三）端到端学习

端到端学习给轮机预警系统带来的最明显的改变就是整体的优化能力。在传统的架构中，数据预处理、特征提取、特征选择、分类器设计等都是相互割裂的独立部分，任何一个环节的误差都会传递到下游，并且会累加到最终的诊断性能上。端到端学习框架可以使得系统把原始监测数据当作输入，直接得到故障概率或者剩余寿命的预测结果，中间的过程全部由神经网络内部参数的自动优化来完成。采用整体优化的方法，可以最大程度上减少分步处理所造成的损失，尽可能的利用原始数据中丰富的信息。

基于端到端学习的预警系统部署快、泛化性能好。当船舶设备更新换代或者运行环境发生改变的时候，不需要重新设计复杂的特征工程算法，只需要使用新的数据集对模型进行微调或者迁移学习，就可以快速适应新的监测对象。这给航运企业带来了规模庞大、船型繁杂时，降低推广成本并实现智能预警系统标准化的技术解决办法。

端到端学习把多模态数据融合起来。轮机监测数据包含高频振动信号、低频热工参数，还有视频监控图像和音频信号。端到端模型可以设计多通道输入结构，接收不同的数据源，并在网络内部进行特征级的融合，从而对设备状况进行全方位的、立体的感知，弥补单一数据源信息不足的缺点。

二、强化学习应用前景

强化学习属于人工智能的一种方法，它借助与环境交互试错的方式来改善决策策略，进而给船舶轮机预警系统赋予动态适应和自主进化的特性。与监督学习需要有固定的标签数据不同，强化学习重视在各种不同的工况下做出最好的预警与维修决策，它和船舶在复杂的海况中寻找到安全和效率的平衡实际需求不谋而合。

（一）自适应预警策略

传统的预警系统大多采用固定阈值或者用统计分析得到的静态包络线，这种刚性策略很难适应船舶全生命周期内性能的变化，也无法适应多变的航行环境。强化学习智能体会依照当下外部环境和设备自身状况改变预警策略。

船舶预警策略自适应要素

要素	说明
环境状态空间	船舶所在海况等级、主机负荷、燃油品质、设备当前老化程度
动作空间	报警阈值设定值（智能体可调整的动作）
奖励函数设计	平衡预警及时性与准确性，及时预警获正向奖励，误报 / 漏报受惩罚
学习过程	在长时间的虚拟仿真或实际运行交互中，智能体持续寻找状态与动作的最佳映射关系，最终形成可随工况自适应漂移的动态预警基准。

下表为船舶预警策略自适应要素，强化学习系统经由不断的学习，可以做到在故障出现之前及时发出预警，而且不会出现不必要的误报和漏报。

（二）智能决策支持

未来的预警系统不会只是简单的报警装置，而是轮机员的智能参谋。强化学习对于序贯决策问题有着天然的优势，可以给故障发生之后的应急处置提供最佳策略建议。当系统检测到某缸排气温度异常升高的时候，不仅仅会发出报警信息，还会根据强化学习模型去推断出不同的处理措施会带来什么样的结果。系统会综合考虑立即停车检查、减小负荷航行、切换备用设备等行为对船舶航行安全、燃油经济性、设备使用寿命所产生出的综合效应，最后给出回报值最大的决策建议。

决策支持能力体现于视情维修排程的优化中。强化学习代理根据预警系统对设备剩余寿命的预测，结合船舶航运计划、港口备件库存、维修人力等因素，来制定全局最优维护时间表。系统在保证设备不发生功能性故障的基础上，尽可能的延长维护间隔，减少非计划停航时间，实现安全与经济效益的最优平衡，帮助管理人员进行科学的运维调度。

（三）系统自主优化

船舶轮机设备在全生命周期内会因磨损、积碳、腐蚀等原因而发生物理特性的漂移，也就是概念漂移。根据离线数据训练得到的固定模型在运行一段时间之后（通常为 6 个月至 1 年），性能就会慢慢下降，预测准确率可能下降 10% 至 20%（《模式识别与机器学习》）。强化学习赋予预警系统终身学习的能力。系统实际运行的时候会不断积累新的工况数据和人工反馈的结果，可以作为新的经验样本加入到经验回放池里。

系统可以采用在线学习的方式，用新的样本对策略网络进行微调（例如使用较小的学习率，如 0.0001 至 0.001），自主修正模型参数来适应设备老化导致的特性变化。当轮机员对系统某次误报进行确认或者驳回的时候，这个反馈信号会

立刻变成强化学习的奖惩信号（如奖励设为 +1，惩罚设为 -1），使系统以后运行时不再犯同样的错误。由此产生的自我进化机制使得预警系统越用越智能，在船舶船龄增加的同时不断优化自身的诊断逻辑，始终保持在最佳的监测性能状态上（如保持诊断准确率在 95% 以上），解决了传统系统一旦投入使用就马上落后的顽疾。

三、知识图谱技术应用

知识图谱是人工智能从感知智能向认知智能跨越的关键技术，它把人类专家的经验知识和客观物理规律转换成计算机可以理解、可以推理的结构化网络。船舶轮机中散落在设备说明书、维修日志、事故案例库和专家头脑中的非结构化信息，在知识图谱的作用下，被编织成一个巨大的故障知识网络，给预警系统赋予了逻辑推理和解释的能力。

（一）故障知识表示

轮机系统包含的知识种类繁多，知识图谱用三元组形式即实体、关系、实体来对这些知识进行标准化的语义建模。实体包含有高压油泵、喷油嘴这样的物理件，也包括排温高、振动大这样的故障现象，还有磨损、堵塞这样的失效机理。关系就规定了部件间的组成关系、连接关系，以及现象和原因之间的导致关系、伴随关系。

建立完善的轮机故障知识图谱要使用自然语言处理技术，从大量的维修报告和技术文档中自动提取实体和关系。利用图数据库技术，可以将数万个零部件以及可能出现的故障模式组成一张网状拓扑图。结构化的知识表示方式冲破了数据孤岛，看似毫无关联的故障现象，凭借底层的物理连接或者共因失效联系而得以关联。图谱可以清晰地追踪到燃油系统压力波动引起主机转速不稳定、辅机燃烧变坏等深层次的联系，给复杂系统关联性分析提供统一的语义底座。

依靠图谱的语义网络，系统还可以很好地解决行业术语不统一的问题。不同的轮机员或者不同的厂家对于同一故障现象的描述会有差别，知识图谱利用实体对齐、本体映射技术把多样的表述统一成标准的概念，保证预警系统在跨船型、跨设备使用时知识的一致性和可复用性，为行业级故障知识库的创建打下基础。

（二）智能推理问答

依靠知识图谱的预警系统有很强的逻辑推理能力，可以弥补纯数据驱动模型

的解释性差的问题。当深度学习模型检测到异常信号的时候，知识图谱推理引擎就会启动路径搜索算法，在图谱中沿着现象→原因→对策这条路径进行多跳推理。系统不仅能知道轮机员哪里出了问题，也可以指出问题的原因链，给出可能的原因以及排查的顺序。

就人机交互来说，知识图谱支撑智能问答功能。轮机员可以以自然语言提问，主机排烟黑色的常见原因有。”或者“滑油压力低应该怎样排查？”系统通过语义解析把问题转换成图谱上的查询语句，准确找到对应的节点，再联系上下游的信息生成综合的回答。这样的交互方式使系统使用的门槛很低，年轻轮机员即便没有太多经验，在系统的帮助下也能很快找到故障。

图谱的推理能力还可以表现在发现隐性故障的功能上。利用图嵌入算法，可以发现图谱中存在的潜在的隐含关系，预测出一些目前尚未出现，但是逻辑上成立的故障并发链。根据某一型号柴油机历史上发生的故障途径可以推测，在某个负荷下冷却水温度异常会诱发缸套裂纹产生，因此可以提前发出预警以避免问题的发生。

（三）专家经验传承

航运业一直存在着资深轮机专家短缺、经验流失的问题。老船长、老轮机长在长期的海上航行中获得的诸如听音断病、摸温知病等隐性知识，随着他们的退休而流失，不能用传统的文本方式传承。知识图谱技术给将这些宝贵经验数字化、资产化赋予了有效的途径。使用知识抽取工具把资深专家的经验口述、手写笔记转成图谱里的规则节点和带权重的边。

系统可以把专家的诊断思维过程固化到图谱的推理规则当中。某位专家总结出的“在某海域、某温度下，某型号增压器喘振前兆特征”等内容，就可以编码成图谱中一条高置信度的关联路径。当类似的情况再次出现的时候，系统就能够复现专家的判断逻辑，给出专家水平的预警提示。

知识图谱可以完成知识的动态更新以及众包扩展。每一个成功排障的案例都可以作为一个新的实例加入图谱之中，不断地扩充知识库的覆盖范围。群智汇集起来的系统就成为全行业的智慧集合器，把专家的经验从个人所有变为大家共有。如此一来，年轻船员使用系统时，实际上就是与成千上万位专家的智慧结晶互动，大大加快了人才培养与经验传承的速度，保证了船舶运维水平不断改进。

第四节 船舶轮机智能管理未来展望

物联网技术、大数据分析、人工智能算法在航运领域深入发展，船舶轮机系统的管理方式也发生了改变。传统周期性的维护渐渐向预测性的维护过渡，最终会实现自主管理，这也是未来船舶智能化发展的主要方向。未来的轮机管理系统不再只是简单的辅助监测工具，而会进化成为具有自我感知、认知和决策能力的智能系统，从而从根本上改变船舶动力系统运行的方式和管理结构，推动航运业向着更加安全、高效、绿色的方向前进。

一、智能化运维模式

传统的船舶轮机运维是靠船员的经验和对船舶的定期检查来维护的，存在滞后性和主观性偏差。未来智能化运维模式会冲破传统束缚，塑造出船岸协同、虚实交融的新样子，把运维模式由被动应对变成主动干预。依靠边缘计算同云端算力相互融合，轮机系统运行情况被立刻投射到数字世界当中，从而形成起涵盖全部生命周期的智能管控闭环。不仅能够有效降低设备的故障率，还可以大幅度的减少运营成本。

（一）无人值守机舱

未来无人值守机舱会从现在的周期性无人值守发展成全天候、全工况的自主运行。依靠高精度多维传感器网络，机舱内各种设备会有灵敏的视觉、听觉、触觉。智能视觉识别系统可以实时捕捉管路泄漏、烟雾异常等细微的变化，声纹识别技术通过分析机械运转的音频频谱来判断轴承磨损、气阀漏气等潜在的故障。感知数据送至机舱边缘计算节点，使用深度学习模型做实时的推理，使机舱系统拥有近似于人的环境感知能力。因此，即使没有船员在场，机舱动力系统也能进行全方位的自主监测。

无人值守机舱对突发的异常情况可以做到自动处理、冗余运行。控制系统内部存有繁杂的故障应对策略库。当系统检测到单点故障的时候，会用毫秒级的速度将故障设备切换到备用设备上，同时同步调整相关子系统的运行参数来保证系统的整体性能稳定。主冷却海水泵出现异常振动的时候，系统会按照主机负荷状况自动启动备用泵，智能调节流量，防止热负荷波动。高度自动化的处理能力使机舱在不需要人手操作的情况下，也能安全地处理大部分的常见故障，给船舶完

全自主航行打下了良好的动力基础。

机器人技术的运用也是实现无人值守机舱的一环。巡检机器人可以代替轮机员做日常抄表、测温、测振等工作，还可以完成简单的维护工作，比如阀门旋动、滤器清洗更换等。机器人经由无线网络同中央控制系统实时联动，就组成了一支不会疲倦的“机械船员”队伍。能够承受高温、高噪声、狭窄等恶劣的工作环境，依靠高精度传感器可以获得比人工巡检更客观详实的数据，为之后的健康评估提供高质量的信息来源，从而达到机舱管理数字化的目的。

（二）远程诊断中心

远程诊断中心将会成为未来船舶轮机管理的超级大脑。岸上控制中心通过高通量卫星通信链路，同散布在世界各地的船舶保持实时联系。船端收集的海量运行数据，包含主机示功图、滑油分析数据、振动频谱等等，在边缘端进行初步清洗和压缩之后，源源不断地被传送到岸基云平台。这项工作把单船的历史数据同其它同类船舶的群体数据融合起来，最后就形成了一个非常大的行业知识图谱。依靠云计算的强大算力，远程诊断中心可以运行比船端更复杂的物理模型和数据驱动模型，对船舶设备的健康状况做深层次的“全身体检”。

当船端智能系统遇到难以判断的疑难杂症时，远程诊断中心就会利用它的专家协同的优势。中心里有主机制造企业、系统整合公司、资深机组成员等大量技术专家。使用沉浸式虚拟现实技术再现真实故障现场，并配合数字孪生模型做多维度的故障反演。通过人机结合、船岸协同的诊断方式，即使远在深海大洋的船舶也可以获得原厂级别专业技术支持。

远程诊断中心的价值也体现在它的宏观船队管理能力上。经由对全部船队动力系统数据展开横向比较、纵向挖掘之后，管理者便可找出共性的隐患以及设计缺陷，从而制订出相应的整改举措。当某型增压器在某海况下经常出现振动超标的故障的时候，中心就可以立即发出指令，对所有的同类型船舶的参数进行调节从而避免大量故障的发生。依靠大数据的宏观控制，把船舶经营从单点式推进到系统化经营的新层面。

（三）智能维护决策

智能维护决策属于智能化运维模式的成果，它体现着船舶维修体制由“依靠时间”转向“依靠状态”，进而走向“依靠预测”的根本性变化。未来的维护决策系统不会像现在这样依靠说明书上的保养周期，而是会按照设备的实时健康指

数以及剩余寿命预测来安排维护工作。系统把设备当前的磨损水平，未来航行计划，预计的海况天气，备件库存情况等这些因素考虑进去，然后算出最合适的时间来做维护工作。

智能维护决策模式的演进及其核心特点，可由下方的维护决策模式对比表一览无余。

维护决策模式对比表

维护模式	决策依据	优点	缺点 / 局限性
定期维护	预设周期、说明书	简单易行、便于规划	资源浪费、故障率高、停机时间长
状态维护	设备实时状态数据	降低停机时间、提高设备寿命	需传感器、依赖经验判断
预测维护	健康指数、寿命预测、多因素综合	效率最高、成本最低、安全性高	技术复杂、数据要求高、前期投入大

1. 系统可以对维护工作经济效益做出准确的评价，权衡提前维护造成的备件消耗成本和推迟维护带来的停机风险成本，在保证安全的基础上，达到全生命周期费用最低的目的。

2. 智能决策系统会和供应链管理系统全面打通。当算法预测某个气缸套在三个月内会达到磨损极限的时候，系统就会去查询船舶的航线安排以及沿途港口的备件库存情况，自动生成采购申请并安排物流配送，保证船舶到达目的港时，所需备件和维修技师已经在码头等待，实现零等待维护。

3. 该种决策方式还包括对维护效果的后续评价。每次维护工作结束后系统都会对设备性能恢复情况进行跟踪，检验维护策略的效果，再根据结果不断改进系统内部的预测算法和决策逻辑，使得维护策略能够自我进化。

二、标准化与规范化

船舶轮机智能管理的大范围应用，没有底层的数据以及通信协议标准做支撑是不行的。目前航运业设备接口繁杂、数据格式不统一、评价标准缺失等问题，都是造成智能系统不能互联互通并广泛应用的重要原因。因此，创建统一、开放、通用的标准体系，将会成为冲破技术障碍，创建智能航运生态圈的必然之选，而且这一选择将决定行业能否真正产生数据驱动的生产力。

（一）数据标准统一

数据是智能系统的“血液”，统一的数据标准是保证其自由流通的先决条件。目前各品牌的主机、辅机、传感器生产商使用不同的数据定义和编码规则，使得同一个物理量在不同的系统之间存在名称、单位、采样频率、数据精度等方面的巨大差异。未来行业发展趋向是创建通用的元数据标准与语义模型，给船舶轮机系统中的每个零部件、每个监测点位赋予全球唯一的数字化标识。

这就表示所有的模拟量和离散量数据，包含温度，压力等数值型数据，以及开关状态，报警代码等逻辑型数据，都会遵照统一的命名规则和结构界定。例如主机排气温度这一参数，无论其传感器来自哪家厂家，在数据层面上都将会有同样的标签和属性说明。语义上的统一将使得不同的数据可以被智能算法所理解、处理，从而大大减少数据清洗、整合的工作量。

为了达到这个目的，国际海事组织以及各大船级社正在努力制定相应的标准。未来将会形成对数据采集、传输、存储、交换全过程的标准体系，数据质量标准、时间戳格式、异常值处理标准等都会被明确。只有在高标准、高质量的基础上才能创建起可靠的数据湖，为人工智能算法的训练、迭代提供牢固的基础，避免垃圾进垃圾出的问题，给智能诊断、预警提供牢固的数据支撑。

（二）接口协议规范

接口协议规范化，才能使设备间进行“对话”。未来的智能机舱里，各类设备想要完成高频次、低延迟的信息交流，就必须破除现有的封闭协议壁垒，构建起开放互联的通信架构。

1. 硬件接口的物理层和链路层将会趋于统一，工业以太网、光纤环网等高速通信总线将会成为标准配备，传统的点对点硬接线和低速串行总线将被逐步淘汰，为海量数据的实时传输提供物理通道。

2. 上层应用对互操作性、安全性有更高的要求。以 SOA 为代表的设备会利用标准 API 接口来对外提供数据服务以及控制功能。这就意味着智能管理系统可以像安装手机应用一样，简单地接入不同的厂家设备模块，实现即插即用的灵活配置。

（三）评估标准建立

智能系统介入程度越来越高，怎样评判它的可靠性、准确性和安全性成了新的课题。科学、严格地建立起一套评价标准，才能得到行业的认可进入实际应用

阶段。未来评价系统不会只通过单个硬件指标来判断，还会对算法以及整个系统的智能程度进行考量。

船级社会和权威检测机构一起制定智能故障诊断和预警系统认证规范。规范中会有对算法模型的准确率、召回率、误报率等主要指标的定量考核标准。主机故障预警系统有规定某种类型的故障需要提前预报一定时间，且不能超过某个数值。智能系统只有通过类似图灵测试的性能检测，才会得到相应的入级符号和证书。

评价标准还要包含网络安全以及数据隐私保护。在万物互联的环境下，轮机智能系统会受到黑客攻击、数据泄露的风险。所以，在评价体系里会强制加入系统防火墙、加密算法、访问控制等安全性的检测，从而保证智能系统在开放网络环境下的鲁棒性。不仅是一个技术问题，也是一个法律和伦理上的要求，对智能航运的健康发展构筑起一道不能逾越的防护网。

三、产业发展机遇与挑战

船舶轮机智能管理未来发展将不再只是技术层面的创新，它会改变整个产业链，打破现有的商业模式。机遇与挑战并存，行业参与者应该以开放的心态协同合作，但是也要面对人才缺乏、技术融合难度大等现实问题。这不是技术和生态系统的较量。

（一）产业链协同发展

智能管理系统落地以后会打破造船、航运、配套企业之间的传统线性供应链关系，形成网状协同的产业新生态。主机制造不再只是卖设备，而是变成提供数据服务的公司，远程监测和智能诊断服务会深入到船舶的整个生命周期当中。船厂要提升系统集成能力，从建造之初就把智能软硬件融合成有机整体，交付带有“智能基因”的高附加值船舶。

跨界合作将成产业发展的常态。航运企业、设备厂商将同互联网企业、大数据公司、科研院所一起合作解决算法模型、数据挖掘等核心技术问题。此种产学研用紧密结合的模式有利于技术成果的快速转化。航运公司有大量的实船运行数据，科技公司有最前沿的最新的 AI 算法。在双方共同研究的基础上，可以创建出针对某类船舶、某航线的专用智能化管理系统，把数据价值最大化地发挥出来。

数据资产权益分配将会成为产业价值链协同中主要的问题。产业生态的健康

发展在协同发展过程中，怎样明确数据产生者、所有者、使用者之间的权利义务，怎样建立公平的数据交易、共享机制，成为关键所在。将来会有专门从事航运数据交易的平台或者第三方数据托管机构出现。它们会用区块链这些技术手段来保证数据在流转期间被确权、存证、溯源，从而提升产业链上各环节参与数据共享的积极性。

（二）人才培养需求

轮机智能管理的发展将会给航运业的人才结构带来深刻的变化，对于从业人员的要求也将随之发生变化。传统的轮机员培养是以机械维修、手工操作为主，未来的智能时代需要的是“机电 + 数据”的新型复合人才。

1. 船员的职能将会由原来的繁重的体力劳动者变为智能系统的监管者、管理者。除了机械原理，还要懂得计算机网络、传感器、数据分析这些 IT 知识，能熟练地操作智能管理平台的各种复杂功能，具备对系统故障进行初步排查并恢复的能力。

2. 岸基支持团队将成为人才需求的新高地。随着远程诊断中心的建立，行业将会出现大量的数据分析师、算法工程师和远程诊断专家。此类人才需具有跨学科学识结构，既了解船舶业务、轮机工程，又掌握大数据挖掘、人工智能技术，可以从大量数据中找出船舶安全航行的规律，给船舶安全航行给予精确决策支撑。

（三）技术融合创新

未来船舶轮机智能管理是多种前沿技术深度融合的结果，而不是简单的叠加，而是产生“化学反应”般的质变。数字孪生技术会成为物理机舱和数字空间的交互媒介。创建高保真度的轮机系统数字孪生体，可以对实体设备的运行状况进行实时映射，并且可以在虚拟空间中对各种极端工况进行模拟推演和故障预估。由此带来的就是管理者可以预知未来，从而大大提高决策的前瞻性。

区块链技术可以给智能管理系统的可信度提供有力的支持。利用区块链的去中心化、不可篡改的特性，可以把船舶维修记录、备件更换信息、运行参数日志等重要的数据上链保存，形成一份真实可靠的“数字履历”。既可以解决船舶买卖双方、承保保险公司和租用者之间信任问题，又利于二手船交易、事故调查形成不可辩驳的证据链。

边缘计算同云计算相互配合时，会达到新的平衡点。随着船端算力的增强，越来越多的实时性要求高、数据量大、处理任务会在船端边缘节点完成，只有提

炼出的高价值信息才会上传到云端。云边协同的结构，可以解决卫星通信带宽受限的问题，还可以保证故障响应时间实时性。5G 和低轨卫星互联网技术融合以后，将彻底消除海洋通信的信息孤岛，实现全球海域无缝宽带覆盖，给轮机智能管理系统提供如同陆地光纤一样稳定、高速的网络环境，真正实现万物互联的智能航运愿景。

参考文献

[1] 肖章林,张忠华.大数据在轮机故障诊断系统设计中的应用[J].舰船科学技术,2016(2X):3.DOI:CNKI:SUN:JCKX.0.2016-04-024.

[2] 张跃文,孙晓磊,丁亚委,等.船舶动力装置智能诊断系统设计[J].中国舰船研究,2018, 13(6):7.DOI:10.19693/j.issn.1673-3185.01209.

[3] 李国龙,张跃文,邹永久,等.船舶冷却水系统智能故障诊断设备[J].大连海事大学学报, 2013(3):4.DOI:CNKI:SUN:DLHS.0.2013-03-008.

[4] 闫伟.船舶动力装置运行故障诊断系统[J].舰船科学技术, 2018(6X):3.DOI:CNKI:SUN:JCKX.0.2018-12-030.

[5] 李国龙,张跃文,邹永久,等.船舶冷却水系统智能故障诊断设备[J].大连海事大学学报, 2013.DOI:CNKI:SUN:DLHS.0.2013-03-008.

[6] 姜莹,任光,贾宝柱.船舶故障诊断的新发展[J].航海技术, 2004(1):3.DOI:10.3969/j.issn.1006-1738.2004.01.018.

[7] 隆刚,孙玉清.船舶液压系统故障诊断方法[J].大连海事大学学报, 2000, 26(1):4.DOI:10.3969/j.issn.1006-7736.2000.01.002.

[8] 顾兆丹.基于专家系统的船舶电力系统故障诊断[D].大连海事大学,2012.DOI:CNKI:CDMD:2.1012.345332.

[9] 史金鹏,2],丁克勤,等.基于虚拟现实技术的烟气轮机故障诊断的探讨[J].石油化工自动化, 2006(1).DOI:10.3969/j.issn.1007-7324.2006.01.016.

[10] 史金鹏,丁克勤,吕燕伍,等.基于虚拟现实技术的烟气轮机故障诊断的探讨[J].石油化工自动化, 2006.DOI:JournalArticle/5ae13313c095d71bbc84ee28.

[11] 王浩,张来斌,王朝晖,等.基于关联维数的烟气轮机故障诊断研究[J].石油机械,2008, 36(3):65-67,70.

[12] 王广军,刘新伟,王凯.常见船舶轮机故障分析及处理方法[J].科技致富向导,2012.DOI:CNKI:SUN:KJZF.0.2012-17-185.

[13] 王学厚,张楠,董泽.基于模糊聚类分析的汽轮机振动故障自动诊断研究

[J].华北电力大学学报：自然科学版, 2008, 35(2):4.DOI:10.3969/j.issn.1007-2691.2008.02.011.

[14] 严可国,柳亦兵,徐鸿,等.基于双谱分析的大型汽轮机振动故障特性提取[J].中国电机工程学报, 2010(2):6.DOI:CNKI:SUN:ZGDC.0.2010-02-019.

[15] 韩德宝,关德林,乔玉鹏HAN,等.基于油液分析的内燃机缸套活塞环磨合特性的试验研究(英文)[J].大连海事大学学报, 2003(S1):4.DOI:CNKI:SUN:DLHS.0.2003-S1-022.

[16] 范金宇,李斯钦,黄加亮.基于油液分析的龙门吊状态监测与故障诊断[J].集美大学学报（自然科学版）, 2012, 017(002):122-125.

[17] 李国臣,陈丽君,张锐.人工神经网络技术在机械故障诊断中的应用探讨[J].沈阳农业大学学报, 2002.DOI:CNKI:SUN:SYNY.0.2002-01-017.

[18] 程卫国.人工神经网络在汽轮机故障诊断中应用的研究[C]//电站自动化信息化学术技术交流会议.2004.DOI:ConferenceArticle/5aa489e8c095d72220c9fc4a.

[19] 朱博,胡燕,赵永标.人工神经网络在故障诊断系统中的应用[J].舰船电子工程, 2005, 25(001):91-95.DOI:10.3969/j.issn.1627-9730.2005.01.023.

[20] 徐晓健.船舶动力系统故障诊断方法与趋势预测技术研究[D].武汉理工大学[2025-12-12].DOI:CNKI:CDMD:2.1015.001189.

[21] 周燕.基于数据驱动的故障诊断技术研究与应用[D].南京工业大学,2006.DOI:10.7666/d.y2083733.

[22] 李建国.发电厂汽轮机运行维护中的故障诊断与预防策略研究[J].Urban Architecture & Development, 2025, 6(19).DOI:10.37155/2717-557x-0619-59.

[23] 常帅.基于相似建模的汽轮机故障预警系统[D].华北电力大学[2025-12-12].DOI:CNKI:CDMD:2.1013.328394.

[24] 万震天,谢岳生,田书耘,等.燃气轮机性能监测与故障预警系统开发及工程应用研究[J].热力发电, 2022(005):051.DOI:10.19666/j.rlfd.202111234.

[25] 孔庆福,宋金阳,张晓东,等.船舶轮机模拟训练装置技术现状及发展趋势[J].舰船科学技术, 2010(1):3.DOI:10.3404/j.issn.1672-7649.2010.01.027.

[26] 陈员才.船舶轮机模拟器技术现状及发展趋势[J].船舶物资与市场, 2024, 32(8):116-118.

[27] 伍巧芸.船舶轮机模拟器的应用与发展[J].中国水运(下半月), 2023, 23(5):

43-45.

[28] 王文祥,安维峥,王维民,等.基于模糊综合评判与故障树法的燃气轮机故障诊断[J].船舶工程, 2013.DOI:CNKI:SUN:CANB.0.2013-S1-015.

[29] 沈鼎新,王晓.船舶机械故障诊断专家系统[J].上海海事大学学报, 1988(03):52-63.DOI:CNKI:SUN:SHHY.0.1988-03-003.

[30] 马宪智.燃汽轮机故障诊断策略方案分析[J].装备维修技术, 2021(3):0187-0187.