

作者简介



乔兵克, 出生于 1987 年 2 月, 男, 汉族, 河北巨鹿人, 中共党员, 全日制本科学历, 河北理工大学通信工程专业毕业。2010 年参加工作, 曾从事电子元器件封装设计和研究, 现从事飞机飞行控制系统调试和维修, 现任海山实业发展总公司飞机维修电子工程师, 参与多种型号飞机飞行控制系统调试、维修等技术方案的编制。

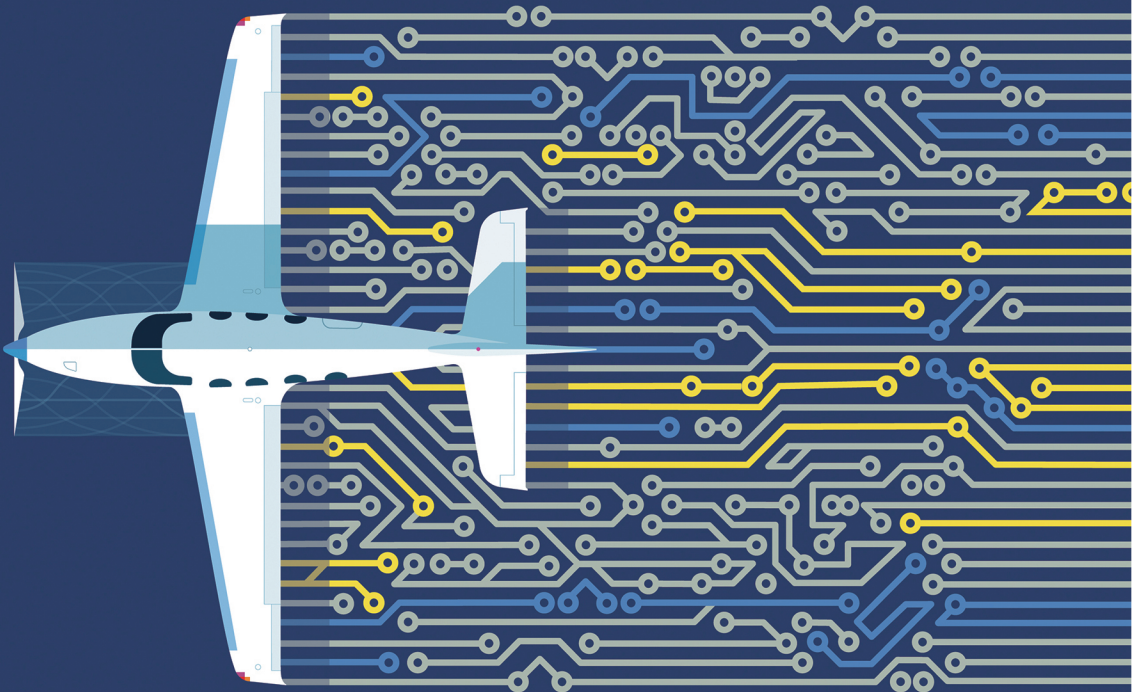
航空电子传感器技术的研究与应用
Research and Application of Avionics Sensor Technology

贾彦荣 徐满亮 乔兵克 主编



Research and Application of
Avionics Sensor Technology
航空电子传感器技术的研究与应用

贾彦荣 徐满亮 乔兵克 主编



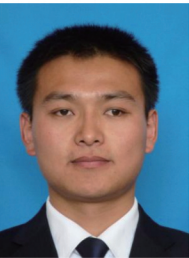
PRICE: £ 49. 00



作者简介



贾彦荣, 出生于 1982 年 2 月, 男, 汉族, 大专学历, 飞机机载设备与仪表专业, 2005 年参加工作, 从事飞机仪表的技术研究工作, 主要研究方向是飞机仪表传感器技术研究, 可维护性等。在工作期间, 关注专业领域内出现的新技术, 新业务, 新设备, 并深入学习研究。主持实用新型专利一种从机箱内取出电路板的工具、一种热敏电阻值端口转换装置等。



徐满亮, 出生于 1985 年 11 月, 男, 汉族, 大专学历, 飞机机载设备与仪表专业, 2005 年参加工作, 从事飞机仪表的技术研究工作, 主要研究方向是飞机仪表传感器技术研究, 可维护性等。在工作期间, 关注专业领域内出现的新技术, 新业务, 新设备, 并深入学习研究。主持实用新型专利一种从机箱内取出电路板的工具、一种热敏电阻值端口转换装置等。

Research and Application of Avionics Sensor Technology

航空电子传感器技术的研究与应用

贾彦荣 徐满亮 乔兵克 主编

British National Bibliography

Cataloguing-in-Publication(CIP) programme

Title: Research and Application of Avionics Sensor Technology

Author: Yanrong Jia, author; Manliang Xu, author; Bingke Qiao, author.

Publisher Details: Cambridge: UK Scientific Publishing, 2025.

Identifier: p21461754564216304

ISBN: 9781918021264

BNB: GBC593313



Research and Application of Avionics Sensor Technology 航空电子传感器技术的研究与应用



Address: 69 Aberdeen Avenue. Cambridge United Kingdom CB2 8DL

Tel: +441223603549

Email: contact@ukscip.com

Format: 170mm×240mm 1/16

Sheets: 14.75

Word Counts: 200,000

UK Scientific Publishing Limited

编委会

EDITORIAL BOARD

主 编

贾彦荣	海山实业发展总公司
徐满亮	海山实业发展总公司
乔兵克	海山实业发展总公司

副主编

李玉晓	海山实业发展总公司
-----	-----------

作者简介

AUTHOR INTRODUCTION



李玉晓，出生于 1983 年 3 月，男，汉族，工硕，飞机飞行控制系统专业，2007 年参加工作，从事飞机飞行控制系统的技术研究工作，主要研究方向是飞机飞行控制系统调试及产品的维修性技术研究等。在工作期间，完成多个机型产品的维修模式研究，并持续学习、创新系统维修模式。主持实用新型专利一种飞行器驾驶杆总成地面联试平台。

内容简介

ABSTRACT



航空电子传感器技术是航空科学领域中的一个重要方面。传感器是一种能够将物理量转化为电信号输出的设备。在飞机上，传感器通过检测气流、温度、湿度、压力等参数，提供给飞行控制系统和仪表显示系统所需要的数据，从而实现对飞行状态的准确监测和控制。传感器为航空航天工程提供了可靠的数据支持，提高了飞行安全性和任务执行的效率。传感器技术的不断发展和创新，不仅推动了航空科学领域的进步，还为航空工业的发展奠定了坚实的基础。基于此，本书从航空电子系统研究、航空电子传感器发展、航空电子传感器技术、飞机飞行控制系统等方面阐述航空电子传感器技术的有关内容。

前言

PREFACE



传感器在航空航天中的应用可以追溯到飞行器的控制系统。飞行器的控制系统需要实时监测飞行状态和环境变量，以便进行准确的控制和调整。传感器可以测量飞行器的姿态、速度、加速度等参数，为自动驾驶和飞行控制提供准确的数据。例如，陀螺仪传感器可以测量飞行器的姿态角，加速度传感器可以测量飞行器的加速度，气压传感器可以测量飞行器的高度和气压等。这些传感器的应用可以实现飞行器的自动控制、平稳飞行和精确定位。

航空电子传感器是一种能够将航空器内部和外部的物理量转变成电信号的设备，一般由传感元件和信号处理电路组成。不同的传感元件可以根据测量物理量的不同，采用不同的工作原理。常见的航空电子传感器包括温度传感器、压力传感器、气流传感器、加速度传感器、陀螺传感器等。下面，我们以常用的压力传感器为例，介绍其基本原理和工作流程。

航空电子压力传感器是一种基于压电效应或容积变化原理的传感器。其基本原理是：当物体受到外部压力的作用时，会产生应变或变形。这时，传感器内部的压电片或弹性膜片就会发生形变，形变会导致电荷的分裂与重组，从而在传感器两端产生电势差。信号处理电路通过运算放大，将电势差转换成电压、电流或频率等可供航空器系统使用的数字信号。

航空电子传感器技术不断发展，使得传感器的测量精度、响应速度和可靠性不断提高。这为飞机的精准控制和安全运行提供了坚实的保证。航空电子传感器技术可以应用于航空器的多个领域。其中，对于“飞行性能监测和范畴”方面，航空电子传感器技术的应用涉及飞行高度、速度、方向、角度、加速度、温度、压力以及湿度等参数的监控和记录。通过实时采集、处理和反馈这些数据，飞行

控制系统可以对飞机的状态和性能进行实时监测和调整，从而提高飞机的飞行性能和安全水平。

此外，航空电子传感器技术还广泛应用于航空工业中的飞机发动机监控领域。通过实时采集发动机内部各种参数的数据，如温度、压力、振动、转速等，并对这些数据进行处理和分析，对发动机的性能进行实时监测和调整，从而保证了发动机的安全运行和寿命的延长。航空电子传感器技术还应用于飞机导航、导弹制导、电子干扰以及火箭发射等领域。

随着信息技术和智能化技术的迅速发展，航空电子传感器技术也在不断创新和发展。预计未来，航空电子传感器技术将越来越多地应用于气象探测、风切变探测、天线雷达等领域。同时，随着未来数字化技术的进一步发展，航空电子传感器技术将不断走向智能化和自动化，为航空工业的发展和改革提供更加完善的技术支持。

航空电子传感器技术的不断发展和创新，不仅推动了航空科学领域的进步，还为航空工业的发展奠定了坚实的基础。预计未来，随着信息技术和智能化技术的不断发展，航空电子传感器技术将迎来更加广阔的应用前景和发展机会。

飞机上的传感器多不胜数，每个传感器都在它们的岗位上默默地奉献着，没有重要与不重要的区别，它们都是保证飞机安全飞行的保证。在现代工业生产尤其是自动化生产过程中，要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，使设备工作在正常状态或最佳状态，并使产品达到最好的质量。因此可以说，没有众多的优良的传感器，现代化生产也就失去了基础。

除了飞机制造领域，传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程，甚至文物保护等等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说，从茫茫的太空，到浩瀚的海洋，以至各种复杂的工程系统，几乎每一个现代化项目，都离不开各种各样的传感器。

本书共分为四章，第一章为航空电子系统研究，包括航空电子系统概述、飞行管理系统、飞行控制系统和通信与导航系统；第二章为航空电子传感器发展，包括航空传感器种类、航空传感器故障检测诊断、航空传感器竞争格局、航空传感器主要企业及产品和航空传感器的发展趋势；第三章为航空电子传感器技术，包括航空传感器故障诊断、航空传感器性能评价和电子传感器技术在航天领域的

应用；第四章为飞机飞行控制系统，包括飞行控制系统分类、自动飞行控制系统、飞行控制系统调试和飞行控制系统维修。

本书由贾彦荣、徐满亮、乔兵克担任主编，李玉晓担任副主编。其中，贾彦荣负责第一章的编写，共计 5 万字；徐满亮负责第二章的编写，共计 5 万字；乔兵克负责第三章的编写，共计 5 万字；李玉晓负责第四章的编写，共计 5 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。

编 者

2024 年 11 月

目录

CONTENTS



第一章 航空电子系统研究	1
第一节 航空电子系统概述	1
第二节 飞行管理系统	17
第三节 飞行控制系统	31
第四节 通信与导航系统	46
第二章 航空电子传感器发展	57
第一节 航空传感器种类	57
第二节 航空传感器故障检测诊断	67
第三节 航空传感器竞争格局	69
第四节 航空传感器主要企业及产品	81
第五节 航空传感器的发展趋势	93
第三章 航空电子传感器技术	111
第一节 航空传感器故障诊断	111
第二节 航空传感器性能评价	131
第三节 电子传感器技术在航天领域的应用	145
第四章 飞机飞行控制系统	167
第一节 飞行控制系统分类	167
第二节 自动飞行控制系统	168
第三节 飞行控制系统调试	180
第四节 飞行控制系统维修	202
参考文献	219

第一章 航空电子系统研究

第一节 航空电子系统概述

一、航空电子系统的安全性诊断技术

由于航空电子系统具有电子化和集成化的特点，导致其出现的故障类型十分复杂，并且对于单一的故障在短时间内无法做出精准定位，促使航空电子系统安全性诊断越来越专业化，增加了航空公司的诊断与维护成本。基于此，研究高效的航空电子系统安全性诊断技术，不仅有利于节约成本，还有利于提升诊断质量与效率。

（一）航空电子系统基本构成

航空电子系统中的各模块是一个复杂的整体，但同时它们之间又具有独立性，以此来满足不同飞机电子系统占比的需求。因此，飞机中的电子系统内部结构错综复杂，但是航空电子系统为满足飞机的不同飞行高度和角度需要，其中的各项功能大同小异。航空电子系统主要包括：任务管理系统、飞行管理系统、核心处理系统、飞行系统、机载维护系统以及综合显示系统等。因此，航空电子系统在飞机中具有重要作用，可以有效提升航空电子系统的安全性与可靠性。但是，随着计算机信息技术的不断发展，航空电子系统中的硬件设备日益复杂，使得航空电子系统维修成本较高。如果飞行过程中各项监测数据反映出问题，维修人员就要根据监测的数据，针对性地进行检测与维修。目前，基于飞行数据的航空电子系统安全性检测方式正在逐渐代替传统的检测维修方式。

（二）航空电子系统安全性诊断面临的问题

1. 特征参数不易获取

特征参数具有直观性和简单性，可以为航空电子系统故障检测提供较大便利，并能够在相关机械系统中大范围应用。不过在航空电子系统中，获取飞机的各项数据参数有一定难度，导致特征参数在航空电子系统中无法发挥最大作用。例如，特征参数在 PHM 机械系统中应用时，正常情况下可以直接找到潜在故障，随后

通过相应的推理算法,对潜在故障进行研究与分析。但是,如果飞机出现磨损严重或者振动信号改变的情况,航空电子系统中的特征参数就无法找到相应的故障参数,导致无法通过信息检测参数对飞机中的设备进行有效预测。因此,经常出现飞机发生突发性故障,但是特征参数无法第一时间预测的情况。目前,随着半导体技术的快速发展,航空电子系统中电路发生故障的概率非常大。针对电路故障,Impact 航空公司提出了多种参数的预测方法,该方法实用性较高,并且检测过程十分便利。

2. 故障模型建立困难

相关调查研究表明,航空电子系统经常出现的故障往往是多种因素共同作用的结果。因此,维修人员想要准确判断航空电子系统出现的故障,就要将多种因素对航空电子系统造成的故障损伤进行系统深入的分析,继而建立完善的航空电子系统故障模型,并针对各类损伤数据进行研究,继而找出多种因素之间的关联性,随后再判断多种因素叠加在一起会产生多重的损伤程度。但是,现阶段航空电子系统影响因素错综复杂,导致故障模型建立困难,无法准确地根据模型对航空电子中的潜在故障进行判断。

(三) 航空电子系统的安全性诊断技术

1. 利用监测特征参数法监管

自从空客 A320 系列使用的电子系统成功后,航空电子系统相关设备在航空业中的使用率非常高。但是,目前最先进的航空电子系统是空客 A380 飞机和波音 787 型飞机中的电子系统,该电子系统将传统的功能全部统一在综合机电系统下,促使飞机在飞行过程中,只要出现细微的变化,运行状态就会被影响。例如,波音 737MAX 发生事故的主要原因就是航空电子系统检测到故障后,飞机的控制系统处理方式缺少合理性,继而引发飞机失控。基于此,应该定期维护与检修飞机的安全性控制系统,不断完善相关电子设备,并充分利用航空和电子系统的优势,对飞机的特征参数进行实时监控,继而检测出潜在故障。但是,需要注意的是,这种特征参数检测方法会产生海量数据信息,维修人员需要在海量数据信息中挑选有效的数据信息,随后通过预测算法的方式对故障进行检测,并且由于航空电子系统的结构和功能有一定差异性,获得特征参数的数据信息就会呈现多样化。但是,想要改变这种方式,就要将无线传感器和 GPS 定位相结合。例如,某航空公司将飞机中的无线传感器和 GPS 定位机二者结合,形成了一个精准的

无线接收系统，然后利用加速实验就可以提取飞机中的各项参数，有助于维修人员快速开展工作，利用提取后的精准数据信息就可以对飞机航空电子系统进行精准评估。

2. 传统的安全性检测维修方案

随着飞机中各项电子设备不断更新，航空公司需要控制飞行的稳定性，早期的飞机结构相对简单，导致飞机发生故障的概率非常高，并且飞机中各项电子设备的功能会随着年限的增加而持续下降。传统飞机的维修和故障检测技术水平相对较低，主要是通过工作人员对飞机进行维护与检测，并且工作人员只能有效解决飞机表面故障。飞机故障主要是通过失效率的时间进行判断，传统的检测方式中，维护人员只能通过机械检测的方式应对飞机出现的故障。与此同时，维护人员针对特殊的故障问题缺少有效的解决方法，继而导致飞机经常出现失控的问题。但是，现阶段航空电子系统逐渐集成化和复杂化，新型材料在航空业中的应用范围也越来越广泛，传统的飞机维修与检测方式已经无法满足航空电子系统的检测要求。从大部分故障分析来看，故障发生原因也越来越复杂。基于此，航空业应该基于大数据技术，针对航空电子系统中的潜在故障进行评估与分析，继而提前发现问题，并及时解决问题。

3. 故障诊断专家系统

故障诊断专家系统主要是在航空领域形成对应的专业知识库和工程经验，并且该故障诊断系统可以定期对飞机信息进行自动检测，促使采集的参数和结构形成综合的知识库，再进行一系列分析，最终精准定位航空电子系统故障。航空电子系统故障诊断专家系统的最大优势就是普通的维护人员也可以解决高难度的故障问题，降低维修人员的门槛。其中，航空电子系统故障诊断专家系统主要包括知识库、推理机、信息采集以及人机接口。航空电子系统的故障诊断专家系统主要分为地面故障诊断专家系统和机载故障诊断专家系统两个部分。地面故障诊断专家系统主要是通过人机接口对地面进行诊断，再由地面诊断设备负责数据录入、故障分析等，然后在知识库中显示结果。机载故障诊断专家系统主要通过本地专家知识库进行故障分析，并将分析后的结果送往机载显示设备。机载显示设备主要具有显示和自动检测功能，地面故障诊断系统主要具有信息采集功能，主要对航空电子系统中的各项硬件进行测试。

4. 多控制面伪逆技术

飞机运行时经常会面临未知的故障,正常情况下,处理故障的方式都是模块系统重新启动,就可以解决运行中出现的故障。如果飞机表面发生严重损伤,模块系统就会无法重新启动,导致飞机在运行中可能会失去控制,降低飞机的运行性能和稳定性。基于此,多控制面伪逆技术可以有效解决损伤严重问题,因为多控制面伪逆技术作为冗余设计法,当飞机表面出现异常或者长时间无法启动某种功能时,多控制面伪逆技术就可以自动反馈调节,并且对飞机局部系统进行重新构造。在飞机局部系统重新构造的过程中,其可以保证航空电子系统中各项功能不受影响,促使飞机保持原本的运行状态。另外,多控制面伪逆技术还具有局部模式切换的功能,在飞机出现故障时,可以无缝衔接切换其他模式。

5. 数据采集和传感器技术

航空电子系统中的 PHM 数据主要是通过传感技术采集而来的,传感技术可以对海量的数据信息进行精准采集,并且还可以保证 PHM 系统正常运行。基于此,航空业针对传感技术的精准性和带宽提出了更高的要求,只有保证传统技术的精准性和带宽,才能保证 PHM 系统的稳定运行。与此同时,航空电子系统的故障错综复杂,PHM 系统在监控各项数据参数的过程中,需要使用大量的数据进行运算,还要对电子系统内其他参数进行检测。因此,其他参数也要配备传感器,这导致航空电子系统中存在大量的传感器,如果没有及时安装,航空电子系统就会无法正常运行。

6. 解析冗余诊断技术

飞机在某些状态下,故障隐患可能不会影响飞机运行,但是一旦飞机切换另一种状态,潜在的隐患问题就会立即暴露出来。例如,飞机在降落和起飞过程中出现安全隐患问题,这个阶段属于人工驾驶阶段,在这个阶段可以由飞行员自行操控信号解决,这样对飞机的影响也较小。针对巡航阶段,飞机的飞行属于自动驾驶模式,简单来讲,就是飞机在一定高度保持平直飞行,如果这个环节出现振动故障,那对飞机的运行状态就会产生较大影响,降低飞行的舒适度,甚至还会影响飞机的安全。飞机之所以检测到振动故障,主要是因为传感器的结构和气动弹性发生故障,飞机表面结构弹性因外部气动力的压力而产生较大振动频率,并且飞机在这个时间始终保持飞行,继而引发飞机表面出现振动故障。解析冗余诊断技术主要就是将飞机的传感器和飞机表面进行对比,判断飞机出现故障的真实

情况，继而利用该项技术的优势，精准地对故障进行针对性调整。

综上所述，航空电子系统安全性主要聚焦在设计环节，利用监测特征参数法监管、传统的安全性检测维修方案、故障诊断专家系统、多控制面伪逆技术、数据采集和传感器技术、解析冗余诊断技术等航空电子系统的安全性诊断技术都可以很好地解决航空电子系统安全故障问题。高效的航空电子系统安全性诊断技术，不仅可以节约成本，还可以提升诊断质量与效率，并对飞机飞行起到很好的保护作用。同时，航空业应该针对飞机电子系统可能出现的故障，提前进行评估与诊断，继而做出针对性的调整，有助于提升飞机的安全性。

二、航空电子系统未来发展

近年来，全球多国的军工企业都在着手新一代战斗机的研究，美国正在进行的项目有下一代空中主宰（NGDA）和空中主宰 AOS（未来空战平台）。纵观新一代战机的概念方案，航电系统架构设计显得尤为突出。在新的态势下，下一代战斗机的发展趋势便是配合各种无人平台作战，并通过提高无人机的智能化水平和开放式的系统架构来提升无人平台的自主度。

三层面分析法可以让人们对颠覆性创新有更深入的认识，更好地在现在和未来之间作出判断，从而明确创新过程。通过它可以权衡好航空电子系统当前稳定的应用效益和创新发展之间的关系，找到可以使航空电子系统保持最大作战环境应用效益的创新方向。同时创新探索过程中会出现“创造性破坏”的创新形式，因此选择三层面分析法来解决以上问题。随着下一代战机关键技术的不断突破，美国提出了系统簇（FoS）的概念，并相继开展了传感器开放式系统架构（SOSA）、开放式任务系统（OMS）、联合通用架构（JCA）等项目，用于开发下一代航空电子系统。由于美国技术领先，同时众多国家在下一代战机的研制中均采用与FoS相似的概念，使得FoS在全世界范围内最具代表性。伴随着人工智能技术的不断成熟，未来无人机的航电系统必然高度智能和自主化，会带来相应的伦理和安全问题，目前正在推进的智能汽车和智能机器人已带来一定程度的伦理与法律方面的挑战，未来航电系统作为人工智能杀伤性武器，必然会引起社会的高度关注。人工智能杀伤性武器目前无相关法律涉及，也很少有学者从未来的角度来论述人工智能杀伤性武器。

（一）三层面分析法

三层面分析法提供了一个构建面向未来的合理且连贯的创新活动方法论；它不仅是一种规划工具，还提供了一个有价值的发展观点；它假设了所有的企业、技术和理论都会经历从诞生、成熟和衰落的过程，这些过程是相互迭代和转换的，这种假设为3个层次阶段活动提供了一个基础。面向未来的三层面分析法所介绍的3个层面周期不是短短的几周或者几个月。

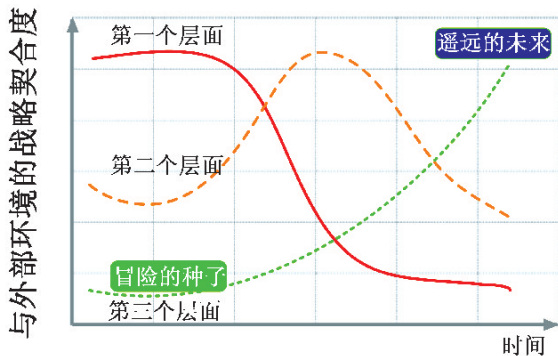


图 1-1 三层面分析法示意图

这3个层面随着时间的推进而不断变化，在不同的行业层面，所对应的时间跨度不同。重要的不是时间长短，而是3个结构层变化过程的不同。三层面分析法描述的3个层面是同时工作的，忽视其中任何一个都会影响增长的持续性，它让未来变得更加清晰和可预测，这就可以更好地阐明一致连贯的创新和颠覆性的变革等概念。图1-1中，第一个层面对应的核心业务已经成熟，其作用效果正在衰退，第二个层面对应的创新业务在不断成熟，二者之间相互转换；第三个层面所对应的业务更能适应环境的变化，创造更大的实用价值。因此，可以通过三层面分析法来探索事物发展的本质，领略超越当下专注的创新模式。

第一个层面在当前阶段是占主导地位的，它包含了对一个行业或领域的思考，与外部环境的战略契合度极高，作用效果明显，但随着环境的变化，可能使其契合度降低、影响力减弱。作为第一个层面的行业领域要保持自身的竞争力及持续的战略效率，就必须不断提升自己的核心业务，激发潜力，来维持自身与环境的契合度；但是这种改进所获得的回报是有限的，根据当前的数据资料可以估算出其潜力，因此这种改进所带来的影响并不持久，只是人们的认知暂时没有改变。

随着它的环境契合度降低,战略效率变差,当出现一种更能适应环境变化的新概念业务,人们的视线就会转移到新业务上来,这时第一个层面核心业务的主流优势将不复存在。为了让业务的回报满足预期、更好地适应环境,就必须开展这种新概念的业务,保证行业领域的战略效率。这时,第一个层面的核心业务将正式进入衰退期,其主导地位会被替代。

第二个层面是最复杂的,它需要在现有的创新和未来的可能重要创新之间做出抉择,因此它是一个中间阶段,这时可能会陷入几种思维陷阱:过于关注现状,以牺牲长期的发展换取短期利益;创新点过多,无法辨别每个创新点的价值和影响。做出的调整无法得到验证,领域中会出现保守和激进两派,此时需要确定愿景如何变化,并不断调整,最终塑造出可以适应第三个层面的举措。第二个层面的创新主要包括持续性创新和颠覆性创新,人们总是习惯地将现在与过去相比。这导致在创新的道路上摆脱不了第一个层面,又由于选择新方向风险大,导致在选择新业务时,过于考虑第一个层面。如果在前者基础上成功扩展了新的创新,保持了行业领域的战略效益,这就形成了持续性创新。此外,如果之前实验选择的新业务成功适应外部环境并得到支持,达到相当的战略效益,这就形成了颠覆性创新,为第三个层面打下基础。

第三个层面是一种探索性的未来,所做的改变是实际做一些新模式、新概念的业务实验,这些新的项目须具有前景,才可减少上层决策管理者施加的阻力。在此层面的选项很多,在开展项目时必须慎重,要明确这些项目在将来演变成第二层面和第一层面业务的可能性。虽然现在有很多线索显示这些新项目在未来会怎样,鉴于当前的回报,上层决策管理者往往会将它推迟,甚至边缘化。

综上,这是一个能让模糊的未来更加清晰,指导人们发现新的创新方向,并在正确的时间做出改变,做好资源分配的框架。通过3个层面的分析,管理者能更好地把控创新方向,通过3个层面的共同推进,项目才可得到长期持续的高战略效率。在关键时刻必须考虑当前业务能否适应环境变化,必须终止一些过时的业务,开展新的核心业务来支撑后续发展。在行业领域中必须确保发展的举措和行为具有积极意义,才能不断获得增量的资源。三层面分析法能让人分辨两种创新,一种是改变了前往终点的方式,另一种是开创出一条新的道路,这就对应了持续性创新和颠覆性创新,这两种创新同时存在于第二层面;在寻找新方向时,三层面分析法能让辩论的过程变得更加顺畅;任何领域的长期发展都必须同时考

虑 3 个层面的影响,每个层面的战略契合度都随时间而变化。不同层面的业务是在不断转变的,过程中会推陈出新,可以为后续发展提供宝贵经验。使用三层面分析法可以促成一个行业领域现在和未来之间的对话,清晰明确其创新方向,让人们善于从 3 个视界层面来分析问题。

(二) 用三层面分析法分析航空电子系统的未来

对现阶段的航空电子系统研究进行分析,虽然提出了下一代分布式航空电子系统,并开展多个相关项目,提出了不少关键技术,但是目前大多数都是概念,只有少数技术被验证,也未确定出具体的航电系统能力,开发还处于初步验证阶段,未形成统一观点;为更好地探索未来航空电子系统发展,找出其创新方向,解决当前这种模糊的探索,可使用三层面分析法对其进行分析。为了后续更好、更深入的讨论,提出了最具颠覆性的观点:在第三个层面中,这种无人机的航空电子系统将被重点发展,并承担主要作战任务,取代当前有人机航空电子系统在作战中的主导作用,并研究第一个层面中主导航空电子系统(有人机航空电子系统)会被提出的第三个层面中主导航空电子系统(无人的高度自主的航空电子系统)所替代的各种影响因素。

1. 有人机航空电子系统发挥主要作用,无人机航空电子系统作用初显(第一个层面)

(1) 航电系统的发展

20 世纪 40 ~ 60 年代,第一批航电系统采用分立式结构。每个功能都对应独立的电子设备,造成飞行员操作过程复杂,最重要的是在空间和重量上给飞机设计增加难度。到 20 世纪 70 ~ 80 年代,联合式航电架构被推出。各个子系统不再独立工作,通过总线使它们之间可以进行一定的数据交互。20 世纪 80 年代初,进一步提出了综合式航电系统架构。进一步地集成模块化,最显著的就是外场可替换单元(LRU),在机务维修时可以直接更换。此外,加入了新的总线提升了数据传输能力,典型的有光纤和 FC 等。20 世纪末,综合模块化航电(IMA)架构被提出,主要应用于 F-35 战机。

从 20 世纪末至今,这一代航电系统主要采用开放式体系架构,具有标准化、通用化等特点。这种综合模块化系统摒弃了传统的分系统概念,各种功能都同时存在于每个模块中,这样就进一步简化了系统的构成。此外,系统软件具有可重构性,因其通用性高适应各种软件,大幅减少研制费用。这种架构由于通用性高,

在战时机务维护时可缩短检测和维修时间,从而缩短战机出动间隔时间。随着系统智能度提高,态势感知能力和系统的辅助决策能力大幅度提升。但是这些创新都是基于前人的基础而不断推进的,并没有一次性选择一条新的完全不同的道路,只是对之前系统的改进,因此以上都是基于第一个层面的持续创新。20世纪30~90年代,无人机发展缓慢,先后的RQ-2和RQ-5的航电系统只是简单的计算机,因此未提出像有人机一样的子系统,主要用于侦察或监视敌方目标。21世纪初,无人机航电系统被赋予各项新任务,新任务包含多个子任务,因此,航电系统需要用到多套电子设备,并开始形成子系统,该航电系统类似于20世纪70~80年代的有人机,而这类无人机的代表是捕食者。从2005年至今,“全球鹰”RQ-4B、“捕食者”MQ-9和X-47B等无人机频繁亮相,这一类无人机采用的是综合航空化电子系统,其功能多样化已经与有人机不相上下。

近20年,随着航电系统的综合化和通用化,同有人机一样,无人机智能化也在不断提高,尤其是最近的几次战争,无人机在作战体系中的地位举足轻重。我国的无人机开发步伐并未落后于西方国家,国产的“大疆”“彩虹”“翼龙”等系列无人机产品物美价廉,在国际无人机市场上占据了一席之地。我军也已将无人机运用到各种战场环境中。在飞机发展的过程中,航电系统的地位越来越重要,其先进性影响着飞机的整体性能。随着在战场中承担越来越多的复杂任务,无人机在某方面的用途可能还优于有人机,因此无人机的航电系统发展逐渐被重视。虽然无人机航电系统可以承担几乎所有的空战任务,但是目前这影响不了第一个层面有人机航空电子系统的地位和创新。

(2) 无人机航电系统取代有人机航电系统的呼声

随着无人机在关键技术上的突破,这种预测有人机的航电系统会被替代的呼声越来越高;同时,从人这个因素出发,飞机很多技术参数无法继续提升,这就让人们难以相信第一个层面系统战略效益的持久性,造成这种呼声的主要原因如下所述。

首先,飞机的研发周期很长,纵观美国的这几代战机的研发时间在不断增加,造成了研究资金成倍上涨。作为其核心部件的航空电子系统,由于其功能不断丰富,功能间无明显界限,导致集成度不断提高,所面临战场空间的复杂化也使得其获得和处理的态势共享信息爆炸式增长,这些都导致其设计的成本和难度不断提升。美国下一代战机方案需要花费让国防支出不可承受,这会大幅减少下一

代战机的数量，严重影响创新第一个层面系统的动力，且创新的环境适应性得不到保证。有战争就有战损，这种情况下难以招架敌方大规模廉价飞行物的进攻，除非新技术已变得成熟廉价，这样才可平衡数量上的劣势。

其次，随着战场态势信息量的剧增，需要高速可靠稳定的信息互联技术来支撑。高速大容量传输需要更高的频率，但是频率提高会造成衰减的加剧，从而需要发射大功率信号。飞机的电磁兼容设计如果存在问题会影响航电系统的正常工作，甚至对飞行员生命健康造成影响。大功率信号的发射需要瞬时大容量的供电，这就增加了电源系统设计难度。这种复杂的战场环境还包括复杂电磁环境，信息化战争以来各国都开始大力发展电子战能力，这就对有四代战机的隐身能力形成压制，尤其是大型的压制性干扰会使飞行员致盲，这就非常考验四代战机航电系统的抗干扰能力。随着干扰样式的创新和干扰技术的突破，四代战机开始无处遁形，其隐身优势变得微乎其微。无人机航电系统关键技术一直在创新突破，它会在作战任务中承担越来越大的效力。最终的愿景是被第三个层面无人机高度自主的航电系统完全替代。

2. 有人机和无人机航空电子系统之间的创新和协同作用（第二个层面）

通过第二个层面可以清晰地看到为实现第三个层面这个目标过程中所进行的不断创新和改变，这也是它的价值体现。近些年来，无人机航电系统的关键技术不断突破，新的航空作战概念也不断被提出。多数是在有人机航电系统基础上开展一个新的创新点，维持了整个系统的环境适应性，这可以认为是持续性的改进创新，因此这是一个中间时期，最终的目标是为第三个层面找到道路。

近些年，无人机被广泛应用，其航电系统也承担起了各类空战任务，从航电架构、冗余设计到总线技术上都有了很大的突破。“全球鹰”无人机是美国最先进的战略无人侦察机，其最新的航电架构大幅地提高了飞机的整体作战效能。最新的航电双冗余设计和四代战机的航电设计殊途同归，都提高了装备的可靠性。随后的改进型提升了一半的载荷能力，这要大大归功于其航电系统的进一步综合化数字化，多出的载荷对于整个飞机的作战性能具有战略意义。同时还进一步统一了接口标准，增加了航电系统的可重配置能力，因此提高了航电系统的通用性，然而这种航电架构未被大规模使用和列装部队。从近些年看，美国用的主力仍是U-2，它使用的航电系统仍是上一代的，最直接的原因可能是高昂造价，在当前状态下此新型航电系统还不可代替有人系统。另一款先进无人机，是在2011年

2月首飞的X-47B,其机载设备多样,决定它能承担多项空战任务,采用了先进的航电互联技术简化了系统的结构,这与四代战机的航电架构类似,另一方面也保证了信息流的可靠传递,且有利于整个系统的升级换代。X-47B最突出的部分是它的多余度的核心处理机,这项技术进一步提高了飞机航电系统的可靠性,在整个联合作战流程中,它作为作战单元,与其他单元互联和协同执行任务的关键技术都很成熟,因此美军对X-47B的航电设计期望值很高。不管怎样,美军对于无人机航电系统的推进是不间断的,在无人机航电的自主度、通信能力、编队协同能力和互操作性等方面一直寻求突破。

分布式航电。最近,随着分布式作战、多域战、云协同、云存储、分布式杀伤链等概念的提出,下一代的分布式航电也逐渐开始研究。为了适应相对的体系化作战需求,在这种新形势下的作战管控和编队协同技术研究被提上日程。分布式作战概念的核心思想就是将高价值性能装备的功能分解到多数廉价、功能单一的小平台上,再通过小平台的协同合作形成高价值平台的能力,最终完成作战任务。因此,在航电系统间的高速可靠互联是态势共享和互操作的基础;除此之外就是各个作战端的航电智能化和自主决策能力的提升。分布式作战主要就是通过这种有人无人协同的作战方式,实现多平台航电的态势信息共享、战场重构和资源配置能力,最终实现在分布广域的战场空间形成作战能力的聚合,并且能在具体的小的战场空间发挥这种体系的优势。

跨平台资源调度。若要满足分布式作战需求,多平台的分布式航电系统就必须具备跨平台资源调度和共享、按需求对航电功能配置及具备作战网络重构的能力。因此这种情况下,每架飞机的航电系统不可再用节点这个概念去描述它,这时每个作战端都是资源,这就体现了分布式作战的去中心化。与此同时,信息描述的规范化和通信协议的一致性也很重要。在这种新的分布式多平台航电的概念中,平台航电和体系是相辅相成的,平台是基础,体系能让平台发挥更好的作战效能。又进一步提出了作战云网络,这与现行的大数据技术相像,将所有的战场资源汇总,通过软件管理快速提供给各个作战端。最重要的是给协同作战概念带来了巨大的冲击,传统模式都是有人机编队协同,而如今的协同对象变得多样化。

蜂群作战。与其相对应的就是蜂群作战概念,蜂群作战从各个方面都与分布式作战形式相符,因此它属于分布式作战范畴。相关的无人机平台技术主要涉及X-58A项目、飞行导弹挂架概念和“小精灵”的投放回收技术等。与主流高价值

平台相比,蜂群作战的每个无人机航电平台研发成本相对较低。但这些创新并未摆脱有人机航电平台的主要作用,只是在其基础上开辟了一个新的创新点,来提高整体系统的作战效能,因此应被理解为持续性创新,即使它向第三个层面更迈进了一步。2014 年美国又提出第 3 次抵消战略,认为人工智能技术是提升无人系统作战应用的重中之重,主要通过这些先进技术和新的作战概念来保持美国的军事优势。提到智能化,就避不开无人系统自主性的讨论。

自主性。自主性是人工智能(AI)深度应用于武器装备而产生的名词,相关的概念还有信任度、自治度、鲁棒性、人机权限等,这些都是影响 AI 装备投入使用的主要方面。自我决策指导是自主性的表现,而这些功能都是航电系统承担的,因此需讨论航电系统的自主性。与自主性相对的就是人的决策和分析,区分航电系统的自主程度,需要分析人的操作时间占比。目前,主要的半自主航电系统飞行员操作时间占比大约为 20% 左右,全自主的航电系统,飞行员操作占比低于 5%。在与此相关的无人机集群作战概念中,由于当前技术并不成熟,这种无人机群协同作战的 AI 武器一旦失控所造成的后果无法想象,飞行员对 AI 系统的信任度并不高。因此,集群中的指挥飞机应当是半自主的,并且对整个体系的操作时间不应超过对单架飞机的操作时间。另外,AI 武器的自主性所带来的伦理问题也无法忽视,这种武器应用于战争之后到底可不可以有效识别各类目标,如何将这种伦理道德体系建立在 AI 技术上,当前已有不少专家学者研究表示要在算法和程序上形成伦理规则。AI 给军事领域带来的创新是颠覆性的,世界军事强国不会停止对它的研究,由此可知,AI 武器评估机制的建立和创新变得尤为重要和急迫。如何将 AI 规范化这也是第二个层面中的一个尝试。因此目前无完全自主的无人航电系统存在,四代机航电系统仍需飞行员参与大量决策,下一代航电系统的进一步综合化、智能化可以提高现有航电系统的决策级别,使操作人员在更高层次进行决策,降低操作时间占比。

智能作战。此外就是智能作战概念的提出,美军计划在 2035 年之前,形成智能化作战体系。通过 AI 技术可以提高航电系统性能,这也是第二个层面的创新。一方面研究无人航电系统在空中协同任务中如何形成自己的作战概念体系,探讨机器学习相关软件的开发和相应的架构设计;另一方面是智能作战的关键技术,群体智能需要航电系统具有可靠的网络支撑、情报信息的快速处理融合、数据链的标准化、协同打击技术、快速重构抗打击等能力。人机混合智能需要测试飞行

员对系统的信任度，并且要求在航电系统上开发能辅助飞行员决策的软件。为提高包以德环（OODA）的效能，将分布式作战多平台航电的指挥控制与 AI 相结合，大幅缩短决策时间。2017 年，美国基于提升航电系统情报信息处理速度的目的成立算法战“跨智能队伍”；2019 年 2 月，美国陆军提出“先进瞄准和致命性自动化系统”，旨在提高 AI 平台战场对目标的识别能力。AI 与多平台分布式的航电系统相结合，带来的作战效能提升是显著的，即使存在不确定性，也阻挡不了各国研发的步伐。

由三层面分析法可知，第二个层面的改变并不都具有积极意义，有的是较小的促进，有的是颠覆性的改变，但有的会让人们对未来的把握更迷茫。以上不论是无人机航电系统的改进、分布式多平台航电系统的提出，还是航电系统与 AI 结合，这些运用三层面分析法来进行分析的都属于第二个层面的创新，可以将它们都归为对有人机航电系统的扩展，但是下一代航电系统的最终目标是第三个层面对应的系统，不应继续以第一个层面系统为基础，而应处于一个复杂的多平台体系。有人机的航电系统继续发挥重要作用，主要承担强对抗，在战斗形式上会搭配不同自主度的无人机航电系统协同作战，并通过系统网络进行作战指挥。以上提到的第三个层面的构想过于基础，只是在技术推动层面顺势而为，相对于第一个层面系统创新的破坏性较小。不论高层决策管理者从政治、经济角度考虑，还是民众从 AI 伦理角度考虑，都不会持较大反对意见，因此这种创新受到的阻碍程度不高。

综上所述，依旧在复杂的多平台系统共存和体系化作战基础上，这种无人的高度自主的航电系统承担战场对抗任务，并在作战中发挥主要作用，这种第三个层面形式相对于第一个层面的创新更具颠覆性。从美国研制的几款新型无人机看，其航电系统一方面应用大量有人机航电系统的成熟技术，另一方面加速 AI 技术的融入，因此这种无人的高度自主的航电系统在未来战场发挥的超高战略效益是被认可的。在这种第三个层面的形式中，航电系统仍然处于人机混合智能阶段，只是人类参与操作的时间占比会进一步地降低，AI 的权限将更大；同时，操作员的决策层面是空前的，更像是从当事者变为监督者。

3. 无人的高度自主的航电系统在作战中发挥主要作用（第三个层面）

有人机的航电系统和无人机的航电系统共同发挥作用的局面将长期存在。一方面随着时间的推移会产生质变效果从而打破这种局面，另一方面就是用当前显

著的外力来改变这种状况，从而形成无人机的高度自主的航电系统替代有人机航电系统在战场上发挥主导作用的局面。如果只是当前的相关技术已经成熟并且得到验证，这解决不了高层决策管理者和民众从政治、经济、文化各方面对第三个层面的创新进行抵制，这种阻碍会降低人们对第三个层面系统的认可。因此讨论使无人机航电系统在作战中发挥主要作用的驱动因素，通常由各种需求和关键技术发展共同推动。

（1）无人机自身发展需求推动

从发展的角度来看，无人机航电系统会朝着提高无人机作战效能方向去发展，其综合化和可靠性一定不断提高。在这种多平台的体系化系统中，承担指挥决策的无人机航电平台必须具有高性能、稳定性好，并且具有经济优势。要适应未来这种全域多维度的快速变化的复杂战场，一方面要可以承担复杂危险作战任务，另一方面要有数量优势，因此，这种无人的高度自主的航电系统更符合要求。为了满足这种快速变化复杂的战场环境，航电平台的无人化可以摒弃例如高温、高压、高加速度、强辐射等人类极限。飞机的很多器件可以提升级别，从而提升飞机性能；航电系统舍弃了人类生命保障系统，其供电可以更持久；在执行危险任务时克服了飞行员自身心理斗争，更利于无人机任务的完成。现代战场瞬息万变，战机稍纵即逝，AI 技术将使航电系统信息处理决策的全流程更高效，提高 OODA 环效能。面对复杂强干扰电磁环境，这种高度自主的航电平台对人的依赖度降低，减少了指挥机构和作战平台之间的数据链传输，可以提升平台的隐蔽性。数量优势是为了适应未来多域的分布式作战形式，形成这种作战终端的分布聚能，提升数量的关键就是低成本。这种无人的高度自主的航电系统，由于减少了人类生命保障系统和人机操作子系统，大幅降低了飞机的研制成本。其主导作用和高高度自主化，将飞行员从决策中解放出来，因此飞行员的决策高度是空前的；同时，飞行员可以通过地面模拟系统进行训练，大大降低了飞行员的培养成本，也减少了使用飞机所造成的损耗。

（2）军事需求推动

自 2008 年起，美国为了确保其在全球的领导力，在亚太地区推出了“亚太再平衡战略”，加大亚太地区军事投入，严重影响我国周边形势安全，因此形成了近些年来中美军事博弈，而 AI 技术对于军事创新有颠覆性推动作用。如果率先研发出高度自主的无人机航电平台，将可能改变当前空战局面。目前中美两

国是技术创新最多的国家，这对第二个层面的创新具有很大的激励作用。

从美国空军及其国防部官员的讲话以及推出的一系列项目可以看出，美军装备正向无人化发展，最终无人机航电平台会承担高难度任务，达到降低研发成本和减少作战伤亡的目的，这是未来战争的趋势。随着无人机蜂群技术的推出，让大量廉价无人机承担敌防区内打击任务，大幅减少了作战伤亡，保障了飞行员生命安全，并且减少飞行员的工作，优化整个空战的人力配置。第一个层面的系统面临的高昂研制费用，让美国国防经费支出已无法满足其批量生产，这会失去数量上的优势。无人机航电平台的低成本使得无人机航电系统可以快速更新换代，美军近几年也推出了快速部署计划，将原先这种跨代研制的多个性能共同提升的方式改为一次只升级一项性能的方式，缩短研制周期，以达到装备快速生产和部署的目的。同时开展了多项军民融合项目，进一步降低技术成本。如果第三个层面的系统被一些国家掌握，这对于那些还处于第一个层面阶段的国家是非常不利的，处于这两层面的国家发生冲突，战争肯定是非对称性的。

从军事贸易的角度来看，处于第三个层面的国家开始批量生产新系统，这对处于第一个层面的国家军工企业打击也是致命的，虽然美国等西方国家对军事落后国家实施技术封锁，继续出口这种有人航电飞机，有意维持其传统军工企业，但是我国的无人机得到国际市场的认可，已打破了这种垄断。虽然目前无人武器无使用的法律依据，全球不少国家以其不完全可控的缘由，呼吁法律禁止其发展，但是在全球军事竞争的大背景下，这种第三个层面的系统具有很高的应用前景。人们在政治、经济、文化上的抵制不可能完全阻碍其发展，所起作用有限。

（3）关键技术发展推动

随着 AI 技术、分布式作战管理、协同作战、微电子技术等推进，未来无人机航电系统在综合性和技术复杂性上可能不比强性能、高价值的有人作战平台差；首先，更先进的 AI 算法会提升航电系统自主度，因为未来体系态势信息是海量的，包括指挥机构与平台的通信以及平台间的信息共享，信息的获取、处理、组织、提炼必须通过先进的 AI 算法和多核技术来实现，单靠人力无法完成决策，这是自主度提升的原因，因此 AI 技术是提升未来无人机航电系统的关键。这种多平台的分布式航电系统完成群体协同作战必须有可靠稳定的多机协同任务网络支持，同时具备自适应容错机制，这样才可确保体系作战的效能最优。

这些年提出的认知无线电、认知雷达、认知电子战率先应用于武器系统，导

致武器越来越精确，这都要归功于先进的 AI 算法，使这些制导武器智能化水平显著提高。这些武器在发射之前需要寻求人类指示，但是发射之后的过程武器几乎是完全自主的，它可以自主识别敌方目标并进行打击，能有效抵制敌方干扰。这可以看作是航电平台完全自主的先行，因此航电系统不是一开始就是完全自主的，这也是高层决策管理者和民众从政治、经济、文化各方面对这类创新进行抵制的结果，使之变化的周期变长。其实在未来战场的强干扰环境下，无人机的远程控制难以保障，因此，最终的目标是发展这种完全自主的航电系统，在这个阶段人类的决策是任务级甚至是战术级的，无人机完全可以自行决策和打击。这种状况下要求以上相关技术都产生巨大推进力，那时的战场环境是极度复杂和瞬息变化的，人类难以把控这种战场从而做出决策，因此需要 AI 来实现控制和决策。然而实现这一场面，需要航电系统更多的颠覆性创新技术。第三个层面的产生只是发生在遥远未来的一个假设，如果它演变到第一个层面阶段，那它一定是应用于极度危险的战场或者人类难以理解的战场，这时需要完全自主的航电系统来降低任务风险。由此可知，没有绝对自主，未来很长一段时间内人类仍会处于决策循环中，并执行重要决策。由此可知，第三个层面系统将立足于人机混合智能技术，而产生高于第一个层面系统的战略效益。

AI 技术面临的最大难题是安全性问题，其解释性和安全性技术是取得人类信任的关键，人们需要理解 AI 算法的内在逻辑。目前的技术还无法确定神经算法全部的内在工作机理，一旦出现错误，难以准确分析出原因。因此，源于社会各方面的抵制会一直存在，可能抵制的影响会随着各项技术成熟而逐渐减弱，但是它在一定程度上决定了第三个层面系统的配备。由此可知，人类对机器的掌控是第三个层面系统出现的关键因素，人类必须被设定到无人机航电系统的决策循环中去，这样才可有效降低那些抵制的影响。以上分析出的第三个层面系统形成的推动因素及其设想也存在部分不合理之处。

首先，无人机航电系统是不断发展创新的，要适应未来这种全域多维度的快速变化的复杂战场，AI 技术和高可靠稳定的网络技术必不可少。这些关键技术的研发和应用不应该大幅增加系统的研发成本和研制周期，最终超过有人机航电系统的研制成本，如果用无人机航电系统承担作战任务被实践证明成本很高，一定会进一步验证其可行性。目前缺少验证无人机航电系统的实验场地，难以对其进行全流程的作战演练，来确定其实际的作战效能。

其次,要思考军事高层决策管理者的意愿,其可能阻止不了发展大趋势,但是可以推迟第三个层面系统出现的进度,甚至会边缘化该议题,同时应考虑来自社会的舆论能否左右高层决策管理者的想法。和平发展是当今世界的主题,这将阻碍国家间的军备竞赛,降低国家的军费支出,造成相关军事项目推进缓慢。军事高层决策管理者中的保守和激进两派的斗争也会对第三个层面系统的发展产生影响,如果保守派占主导地位,第三个层面系统实现的可能性将会降低;如果激进派占主导地位,那么从第三个层面演变到第一个层面的周期将大大缩短。两方实际的斗争非常复杂,涉及多方面因素,在意见上难以达成共识,这都将降低该设想实现的可行性。

最后, AI 等先进技术应用于无人机航电平台真的比应用于有人机航电平台的作战效能高吗?不出意外的话,欧美推出的下一代仍是有人机航电平台,而目前 AI 等先进技术大多处于概念阶段,技术合理性并未得到验证。与此同时一些关键技术存在瓶颈,无法预测何时可应用于装备,这就需要考虑三层面转变周期的时间跨度,在这里无法给设想的第三个层面系统一个明确的周期跨度。从第二个层面可以看出,无人机航电系统的相关技术都在不断创新,但是每一项技术的推进都可能会受到各方的抵制,有的甚至会直接被终止,这也会增加第三个层面设想实现的难度。总而言之,这些先进前沿的技术不确定性过强,所造成的各方面影响会直接令人质疑此处设想的合理性。

第二节 飞行管理系统

一、飞行管理系统介绍

(一) 飞行管理系统(FMC)组成和基本功用

1. 飞行管理系统(FLIGHT MANAGEMENT SYS)由五个分系统组成:

(1) 飞行控制系统(DFCS)

包括自动驾驶(A/P)和飞行指引(F/D),其核心为两台飞行控制计算机,该系统用于自动飞行控制(FCC)和飞行指引。

(2) 自动油门系统(A/T)

其核心是一台自动油门计算机和两台发动机油门操纵的伺服机构, A/T 提供

从起飞到着陆全飞行过程的油门控制。

（3）飞行管理计算机系统（FMCS）

其核心是一台飞行管理计算机 FMC 和两台控制显示组件 CDU，它用于从起飞到进近的几乎全部飞行过程的横向（LATERAL）剖面 and 纵向（VERTICAL）剖面的飞行管理。

（3）惯性基准系统（IRUS）

其核心为两台惯导基准组件 IRU，其主要功用为提供飞机的姿态基准和定位参数，也可用于飞机自备、远距导航。

（5）电子飞行仪表系统（EFIS）

33A 和 34N 型飞机装备的是电子飞行仪表系统，3T0 型飞机装备的还是旧式的机械式仪表。由于飞行仪表的电子化，逐渐淘汰老式的机械式仪表，而电子飞行仪表必须有相应的字符，符号等图形信号发生器，以提供阴极射线管 CRT 或液晶 LCD 显示。EFIS 就是起这个作用的电子式飞行仪表显示系统，它主要包括两台符号发生器（EFIS SG）和两套姿态指引仪（EADI）、两套水平状态指示器（EHSI）。

2. 飞行管理系统的基本作用：

这套系统技术先进，设备量大，承担的任务多，其中最根本的功用是：

（1）实现飞行的自动化，大大减轻了飞行员的工作负担，减少人为操作所不可避免的差错和失误。

（2）实现飞行全程的优化：

起飞阶段（TO）—根据飞机的全重和环境温度提供最佳目标推力。

爬升降段（CLB）—提供最佳爬升剖面：包括爬升点，阶段爬升的设置，目标推力和目标空速的设定。

巡航（CRZ）—提供最佳高度和巡航速度，以及大圆航线和导航系统的选择和自动调谐。

下降阶段（DSE）—提供下降顶点，目标下降速度和分段，以充分利用飞机高度下降所得到的动能，并以最佳的高度，速度和距离转入进近阶段。

进近（APP）—确定飞机在五边进近基准点时的高度、空速和距离。

飞行的优化不仅得到最合理的飞行路径，节省燃油和飞行时间，而且飞机机体的损耗率最少。

3. 实现自动着陆

由于有两套自动驾驶通道，具有余度通道，借助仪表着陆系统可实现Ⅱ类气象标准的自动着陆（决断高度 50 英尺，跑道能见距离 700 英尺）和自动复飞。

（二）FMC 控制飞行过程工作概述

飞行过程可归纳为正常程序和辅助正常程序

（1）正常程序

所谓正常程序就是自动飞行的标准程序，可分为如下七个飞行阶段：

①起飞 TAKE OFF

在完成起飞前准备后，只要按压 TO/GA 开关，即开始起飞程序，此时推力杆自动前进到起飞目标 N1 值，当飞机滑跑达到 60 节时，F/D 指令杆提供俯仰指令，起飞后 400 英尺 RA 高度以上，A/P 衔接，同时选择 L NAV（水平导航）和 V NAV（垂直导航）方式，当此二方式衔接有效时，则飞机纳入 FMC 的飞行控制，完全按照 FMC 计划的航路和飞行剖面自动飞行。

②爬升 CLIMB

在 CLB 阶段，FMC 控制 A/P 和 A/T，可有四种爬升方案供选用：最经济；最快爬升速率；最大爬升角以及选定的空速。一般如无特定要求选“经济方式”。另外还有“N1 减推力方式”可供选用，在飞机轻负荷又飞行条件好的情况下，通过输入假定温度以得到减推力 N1 值，这样省油和延长发动机的使用寿命。如无人超控，FMC 还自动遵守高度低于 10000 英尺，空速不超过 250 节的限制（这是防止噪音污染的规定）。

③改平 LEVEL OFF

飞机爬高达到 FMC 高度，在 FMC 控制下，飞机会自动平稳过渡到在预选高度平飞状态，速度也随之调整，使飞行保持最优化。

④巡航 CRUIZE

巡航阶段占据飞行的大部分时间和里程，经济性考虑占第一位，飞行高度和飞行速度的最优配合是获得最佳经济性的决定因素。

因此 FMC 连续计算最佳高度和速度，预测燃油余量和到达时间。并根据导航数据库信息，自动选择并自动调谐地面的导航台，飞机沿预选航路一直飞行到截获 APP 为止。

⑤下降 DSE

过早或过晚的下降不仅对燃油消耗的经济性，而且对正确转入 APP 阶段都有重要影响，所以 FMC 计算出最佳的下降顶点。在 VNAV 方式时，如飞行员已在 MCP 上选择了一个低的高度。则飞机将自动从下降顶点开始下降，下降高度和速度限制（包括 10000 英尺，250 节限制）会自动遵守。

⑥进近 APP

进近时，如两个通道都衔接在 A/P 方式，此时飞机交由 LOC 和 G/S 引导，FMC 使命结束。

⑦复飞 GA

按压 TO/GA 开关，当飞机在空中状态就进入复飞方式，此时推力手柄自动移动到 GA 目标推力位置，并保持 N1 限制值，而 A/P 和 F/D 则保持航向，并使机头上仰 15°（GA 状态）

（2）辅助正常程序

辅助正常程序是一种半自动的飞程序，飞行员可在任何时候选用，它的不同之处在于：

升降方式：可选用高度层改变（LVL CHG），垂直速度（V/S）和人工驾驶盘操纵（CWS）等三种方式中的一种。

改平与巡航方式均使用 MCP 速度为基准。

进近时：只可使用单通道的 A/P 或 F/D，不可自动着陆。在 LOC 和 G/S 引导作人工着陆。

复飞：只 F/D 提供复飞指令，人工复飞。如 A/P 衔接，此时它自动脱开。

（三）飞行管理计算机系统

（1）飞行管理计算机系统部件的安装位置

FMCS 跳开关——在 P18-2 和 P6-1 板

FMC——在 E1-2 架

DAA——在 E1-2 架

CDU——在 P9 板

燃油加法器——在副驾驶侧壁板上

N1 指示器和推力方式告示牌——在发动机主参数显示器上

DFCS 方式控制面板——在 P7 板

FMC 数据转录组件和数据库装载组件——在 P18 板旁边

(2) 功用

飞行管理计算机系统 (FMC) 根据预先选择的航路和性能数据要求, 同飞行中飞机上的传感器向计算机提供的实际导航和性能数据进行计算比较, 然后发出指令控制自动飞行控制系统 (DFCS)、自动油门 (A/T), 以最经济、最合理的速度和巡航高度引导飞机全程飞行。

FMC 系统还为飞行员提供杰普逊航图, 以及对无线电导航系统进行自动调谐。能大大减轻飞行员的工作负担, 并以最佳性能来管理飞机飞行。

(3) 飞行管理计算机 (FMC)

FMC 由三台微处理器、电源组件组成。计算机的电路按功能被分配在几块相互独立的电路板上, 三台微处理器在结构上是相互独立的, 所以一个部件丧失功能不会影响其他部件的工作。计算机内部采取 ARINC 600 进行数据联系。

FMC 用 115VAC 单相交流电, 由供电组件供电。

FMC 能同时处理 28 条 ARINC429 输入和 14 条 ARINC429 输出数据。所有的输出都是相对独立的, 一部分的故障不会影响其他部分的输出。

FMC 根据输入的各种数字和离散数据, 以及来自性能数据库和导航数据库的数据进行性能数据、导航数据、引导数据处理和计算, 然后用 ARINC 429 向相应的系统发出指令。

FMC 计算机内装自检设备。FMC 的自检分为工作监控和电源接通自检两种。正常工作时, 不管在空中还是地面, 一直不断对设备进行自测试。它能对 FMC、CDU 以及与 FMC 接口的各种传感器系统和部件进行连续监控。自检不仅能对计算机的硬件设备进行检查, 还能对微处理器指令以及数据库软件进行比较检查。

(四) FMC 的控制和显示

FMC 是通过 CDU 进行控制, CDU 是 FMC 进行人机联系的一个重要部件。FMC 包括两台 CDU, 各 CDU 都能独立工作, 共同控制 FMC 的工作。可以用任一台 CDU 输入系统数据。

1. CDU 的组成

CDU 由键盘、阴极射线管 (CRT)、微处理器、接收来自 FMC 信息的接收器、控制字符产生和显示的内部控制器、高低压电源等。

2. CDU 的显示屏

CDU 的前面板上部是一个 5 英寸的 CRT 屏幕，其上粘贴一块玻璃光线过滤器。CRT 的数据区域共 14 行，每行 24 个字符，这些字符都由 FMC 控制。

显示屏上的第一行为标题行。它显示该页的标题。其中前面 5 个字符位置是数据状态显示。只有少数几个与飞行计划有关的显示页上，该数据状态才有显示。该处显示分两种方式，即实行（ACT）方式或修改（MOD）方式。它表明当时飞行计划是已实施了，还是对原来的飞行计划进行的修改。若该区空白，则表明显示信息还没有实施或并不是与飞行计划有关的页面。接下来的 14 个字符位置是标题组，用以识别所显示页面的内容，第一行最后剩下的 5 个字符位置留作页码和分页面显示。

显示屏的最后一行是暂存行。它暂时存放并显示人工用键盘输入的数据以便审核或修改，确认无误。也可用于行之间数据交换、调出时的暂时存放，以及显示故障信息，操作警告和提醒信息等。

显示屏中间的 12 行为数据显示区域，显示飞行的各工作数据，飞行动态，可供选择的数据信息清单，自检信息等。

3. 字母、数字键

CDU 前面板的下半部是字母、数字键，包括 26 个方形字母键和 10 个圆形数字键，以及删除键（DEL）、清除键（CLR）、撇号键（/）、小数点键（.）和符号改变键（+/-）。字母数字键提供操作者用来向系统输入数据。例如：输入方式所必需的原始数据和航路点代码、坐标等，也可用来对飞行计划进行修改。所有通过字母 / 数字键输入的内容首先出现在暂存行。在暂存行可以用 CLR 键对内容进行编辑和清除，轻触一下 CLR 键，将清除暂存行最后一个字符，若按住保持 1 秒，就清除整个暂存行内的信息。

字母 / 数字键中还有三个键有较特殊用途：撇号（/）键用来把不同类型数据分开，用来进行多重可变数据输入的地方，如规定爬高速度可使用目标空速和马赫数（300/780）。小数点键用于小数点数据输入，正负号键输入数据号。

4. 飞行方式和功能键

屏幕下面是 13 个方式 / 功能键。它代表飞机在飞行中的最大工作能力。在飞行前利用这些键可使飞行员作飞行计划。起飞后使用这些键监控飞机各阶段的飞行方式和当前飞行状态。

(1) 飞行阶段键 (FLIGHT PHASE KEYS)

飞行方式键包括爬升 (CLB)、巡航 (CRZ)、下降 (DES) 三个键。

爬升键 (CLB)。显示当时的或备用的爬升方式,以供飞行员进行航段选择检查,也可以输入爬升顶点的高度作为空速 / 高度限制值。

巡航键 (CRZ)。显示当时的或备用的巡航方式。供飞行员进行航段选择和检查,提供最佳巡航高度,分段爬升和进入紊流时所适用的目标 N1 值的显示。

下降键 (DES)。显示当时或备用的下降方式,以供飞行员进行航段选择和检查,也可输入下降顶点高度,它与机场规定的速度 / 高度限制有关。还提供飞行航迹角 (EPA),垂直速度 (V/S) 和垂直方位信息 (VERTICAL BEARING)。

(2) 功能键

起始 / 基准键 (INIT/REF)。用来进入 FMC 起始数据页,基准数据页和维护页。

直飞 / 切入键 (DIR/INTC)。供飞行员选择直飞某个航路点或在某个选定的航路点切入预选航道。

N1 限制键 (N1 LIMIT)。人工输入发动机 N1 限制值,也可用来选择减推力 N1 限制值。

航路键 (RTE)。用来进入航路 (RTE) 页,航路页用来调出航路计划数据,显示和输入航路数据到 FMC 去。

航段键 (LEGS)。显示整个飞行计划中每个航段的详细数据,包括横向和纵向剖面的航向、距离、高度和速度等,也能接受操作者输入的航段数据。

航路点键 (FIX)。显示当前位置到某个预先输入的特定航路点的距离和方位。

离场 / 进近键 (DEP/APP)。用来进入离场 / 进场页,用于选择起飞或目的地机场的跑道数据和离场进场程序。

等待键 (HOLD)。用于在指定的航路点作等待飞行时,等待航线的制定。

进程键 (PROG)。用于显示当前飞行状态信息,例如预计到达时间,到下个航路点时的剩余燃油量,无线电导航设备的调谐状态,风向、风速和航迹误差等。

执行键 (EXEC)。用于把 FMC 显示的数据结合进现行的飞行计划。即可用来使现行飞行计划生效,修改现行的飞行计划,修改现行的引导方式,也可在现行的飞行计划、引导方式和数据库上插入数据,只有在执行键上的矩形框亮后,执行键才起作用。

（3）页选键

页选键前页（PREV PAGE）和下页（NEXT PAGE）两键，大多数的显示页上有两页以上，页数和页号在右上角显示，如表示总共有两页，本页是第一页。可以用这两个键进行翻页，每个页选键是循环连续的。用前页键翻到该页面的第一页后，再按前页键会翻到该页面的最后一页，反之若用下页键则从该页面的最后一页翻到第一页。

（4）暂存行和行选键

所有人工输入的数据首先在暂存行显示。在暂存行，输入的数据可用来核实是否正确，必要时还可以用编辑。按压行选键，那么暂存行内有效的数据便会转入与该行选键相对应的数据行内。原来在该行的数据被清除。暂存行也再次空白。若暂存行空白，按行选键，可以把与该行选键相对应的数据复制到暂存行。若在数据区与行选键对应的数据行内不是可复制的数据，而是可供选择的一些页面标题，此时按相应的行选键，就显示该标题的页面。

行选键共 12 个，分布在显示屏两侧，每侧各 6 个，它们和数据显示区的第 3、5、7、9、11、13 行对齐，数据输入并不是随便哪一行都可以，仅仅是那些允许或要求输入该数据，且有显示符提示生效的那些行。

行选键的功能是有限制的。在许多页面，大多数行的内容既不能选择，也不能输入，更不能被删除。至于在哪些页面上哪些行有选择、输入的功能完全由软件控制，以免在误操作下输入错误数据或把需要的数据无意删除。

（5）删除键

删除键用来删除数据行的数据，即数据如被行选到数据行以后。暂存行空白时，按 DEL 键，在暂存行内出现删除“DELETE”字，然后按下需要删除数据行所对应的行选键，那行的数据就被删除。“DELETE”字也消失，系统具有防止操作者误操作的功能，即对不能删除的数据，DEL 键不起作用，每删除一个参数，DEL 都得按一次。

（6）指示灯

CDU 的前面板上的四个指示灯，两个用作 FMC 提醒，它们是信息灯（MSG）和故障灯（FAIL）。信息灯是白色，亮时提醒操作者在显示屏上有提醒信息。故障灯是琥珀色，当 FMC 中的 BITE 探测出有任何系统故障时，则故障灯就亮。

5. 电源

CDU 采用 115V, 400HZ 单相交流电, 控制板的照明用 5V 交流, 指示灯用 5/2.5V 直流。

6. 输入 / 输出

CDU 有两个 ARINC429 数字输入通道, 一个 ARINC429 数字输出通道。所有输入 CDU 的数据都被格式化信息组的组成形式, 信息组有一个起始字。一个或多个中间字和一个结束字组成。所有的控制和显示数据都包含在这些信息组中。CDU 以每 60MS 一个数据信息的速率向计算机传送数据。

7. 内部监控器

在正常工作状态下, CDU 能不断对自己内部线路和软件进行自检。检查项目包括存储程序, 电源, CDU 显示和逻辑线路, CRT 的水平和垂直扫描同步脉冲的正确性, 以及 FMC 对 CDU 数据刷新速率是否正确, ARINC429 输入 / 输出数据接收、发送是否正确。若自检中发现故障, 则显示空白。

8. 维护实践

CDU 故障灯 (FAIL) 和信息灯 (MSG) 和执行键 (EXEC) 都可把螺丝卸下更换灯泡。整个键盘也可能通过卸下 6 个螺丝和后面的接头进行更换。所有按键功能及显示元件都可以在 FMC BITE 中进行检测。

CRT 不要长时间放在高亮度。

注: 此件是静电敏感器件, 触摸、更换、拆装时必须遵守静电防护规定。

(五) FMC 导航数据库的装载

1. 安装导航数据装载机

FMC 导航数据装载机从 P18—1 的数据传输接头获得 115V400HZ 电源, 也通过这个接头向 FMC 传输导航数据库的数据。

2. 安装导航数据库

将数据装载机电源开关放在“ON”位。

插入磁盘。

装上磁盘后装载机上 RDY 灯亮 3 秒。

然后 PROG 灯亮 3 秒。

当 RDY、PROG 灯稳定后, 表示数据装载机正在自动进行导航数据装载。CDU 上有“LOAD IN PROGRESS”装载正在进行。

若“CHNG”灯亮，表示导航数据不止一张软盘，换上软盘后继续装载。当数据装载完毕后，RDY 和 PROG 灯灭，COMP 灯亮。CDU 上有“LOAD COMPLETE”装载完毕字样。

按 EJECT 按钮，取出磁盘。关掉数据装载机电源。

3. 数据装载中的故障显示

若出现故障，CDU 显示“LOAD LAIURE”和“DATA LOAD INOP”，并且装载机上 XFER、P/W、HRDW 灯亮。

CDU 上将显示以下几个提示词

CHECK DBL OR INTERFACE 检查接口

NDB EXCEEDS MCIMEMORY 导航数据库数据太多，超出了数据库的储存能力。

RESET COUNT EXCEEDS 表示装载机装载 5 次不正确。

CHECK MEDIA 表示数据不明，检查磁盘。

4. 新数据的验证

在 CDU 上调出 IDENT 页

证实 IDENT 页上的导航数据库件号正确。

证实导航数据库在有效日期内。

因 34N 型飞机的 FMC 有两部，因此还要完成两部计算机的交互传输。

（六）FMC 自检

FMC 的系统自检内容很多，在特设的培训手册中有详细的介绍，这里只介绍与本专业关系最密切的内容。

1. 测试过程中传感器页的查看

在进行电子行业的通电检查过程中，需要检查 FMC 的传感器页面，具体步骤如图：

下图给出的是 34N 型飞机的步骤图，与此相比，3T0 和 33A 飞机只有一部 FMC，因此第三步是直接进入 FMC BITE 页面。然后按 3L 键即可进入传感器页面。

2. 飞行中故障的查看

每次飞行后，都需要查看飞行中是否有故障，在排故过程中，也需要调阅。

二、行管理系统的导航功能

飞行管理系统作为大型客机中的一个重要的航电系统，现代化的飞行管理系统实现将航迹预测、制导、性能优化以及导航等诸多的功能实现集成，对航空器在进行飞行当中作出轨迹参考、性能参数优化以及根据航迹与导航数据实现对飞机航行中实现引导，对航空器中的诸多的航电系统具有的功能和作用进行组织、综合与协调，同时在飞机飞行全程中能够确保非航空器能够始终能够按照飞行计划进行飞行，辅助飞行员顺利进行起飞与着陆，对飞机开展自动飞行过程中进行有效的管理、操纵与监视。

飞行管理系统即 FMS，其主要由众多的计算机、执行机构、传感器、无线电导航系统、电子警告组件、控制板以及电子显示仪表等共同构成，目前最为典型的一种 FMS 主要有四个主要的系统，即飞行管理计算机系统（FMCS）、自动飞行指引系统（AFCS）、自动油门系统（A/T）与传感器系统。上述四个系统间既能够实现独立运行，又可以将其通过不同形式进行组合形成不同的工作模式，最为核心的部分为 FMCS。FMS 可以依照飞机当时的所处位置、航线、目的地、导航台位置以及相关性能参数等实现对飞机的航速、升降速度航向、下降与阶梯爬高等命令进行确定，使飞机实现全面的自动导航功能，进而使飞机能够始终处于最佳的降落与飞行状态下。

（一）关于飞行管理系统功能架构与接口方面的研究

赵东伟年对飞行管理系统中的架构与接口作出了深入的研究，关于综合导航功能方面得到了如下的研究成果。综合导航功能能够具有如下的具体功能，第一，多源导航传感器信息综合，其能够对 ADS/IRS、VOR/DME 与 GPS 等传感器进行信息融合，并根据上述信息对飞机位置、航向、航速等作出计算。第二，RNP 导航，根据所有的导航传感器传输的数据信息，对系统实际中的导航性能作出计算，同时和理论上的导航性能作出比对，从而有效地验证导航系统实时的运行状态，并利用显示系统将有关数据加以显示。第三，导航模式管理，具有非常良好的人机交互界面，可以根据用户的设定与故障设定实现对传感器组合形式进行选择。

（二）关于飞行管理系统中的水平导航方面的研究

学者马航帅，王丹，孙晓敏等人在企业研究中，通过其所学相关知识，对飞

行管理系统中的水平导航方面展开了研究。上述学者在研究中指出,在飞行管理系统中,水平导航是尤为重要的,马航帅认为位置计算是实现飞行管理导航的重要基础。从某种角度而言,飞机在飞行过程中对指令的发布尤为重要,对计算机程序的信号进行位置计算,能够充分实现对无线电导航接收机内信息的接受,从而实现对飞行管理系统中水平导航的研究。此外,上述学者在研究中也指出,无线电导航位置修正也是实现飞行管理系统水平导航发展的重要因素,通过对无线电导航的位置修正,能够通过该飞行管理计算机,充分实现对飞机位置信号和航向等相关信息的接收,从而在上述信息的基础上实现对飞机的水平导航工作。

(三) 关于 IRS 位置信号与无线电导航位置修正方面的研究

魏志强和王超曾在研究中指出,FMC 会根据 IRS 飞机当时山城是位置信号、航向以及速度数据等内容作为基础的导航数据,这主要是由于 IRS 的基本传感器是由 3 个激光陀螺以及 3 个加速度计组成,因此其与飞机之间的固定并无相对位移,可以充分感受到飞机机身内的轴向加速度以及绕轴向所产生的转动量,其所产生的信号均会传输到 IRS 的计算机当中,通过反复的运算和分析,最终可以得出输出基本航向的姿态信号。在此过程中,校准工作只可以在地面进行,同时应当确保飞机保持在静止的状态,通过此时对飞机轴向加速度的测量,将使加速度计感受到地球重力所产生的加速度,以此来对飞机当前的初始姿态进行分析。在进行校准的过程中,激光陀螺可进行检测的范围只局限于飞机在地球自转运动中所产生的位移,而根据其所检测的自转速度大小,可以进一步分析出飞机所处的位置。

飞机管理系统作为航空器中的一个重要的组成部分,随着我国经济实力的快速提升,人们乘坐飞机出行的机会也在逐年的增加,人们对于航空安全也愈发的重视,将飞行管理系统中的导航功能应用在飞行器中能够很好的保证航行安全。

三、民用飞机飞行管理系统试飞评估关键技术

就目前来看,相较于国外来说,我国民用飞机在开发、研制以及试飞技术等方面还处于落后地位,对于民用飞机试飞来说,不同民用飞机机型应当适应各自试飞评估技术规范。为了促进我国民用飞机的发展,应当积极研究民用飞机飞行管理系统试飞评估关键技术。

（一）民用飞机飞行管理系统试飞评估试验程序设计

民用飞机飞行管理系统试飞评估试验程序设计主要包括以下几个方面：①在试飞过程中，对自动驾驶仪以及飞机指引系统利用；②以加载性能参数和试验航路为基础，完成试飞前的准备工作；③在试飞过程中，对所有告示和 FMC 信息进行监视；④在试飞过程中，对 LVAN 以及 VNAV 原始数据进行监视，并达到 FAA 资讯通精度；⑤在试飞过程中，构建经纬度、航路点到飞行轨迹、飞行轨迹到航路点等，以此来对横向试飞计划进行修订；⑥在试飞过程中，构建飞行计划和数据库中的航路，以此为基础对直接到航路点、航路点拦截、航路点进程等横向飞行计划进行修订；⑦在试飞过程中，对中空平飞高度进行改变，重复计算下降点顶点，在开始下降前，对 VNAV 飞行计划进行修订，在高度下降之后，对中空平飞高度改变，重复计算航路；⑧在下降过程中，从 MCP 对较高或较低的垂直速度进行选择，使飞机偏离计算航路，FMC 请求纠偏控制，或请求油门系统增加推力，在返回计算航路之后，重新进行 VNAV，此过程中，FMC 不应当产生错误信息或中断信息；⑨以 FM 指南为基础，当逐渐下降比 VNAV 航路平面低的时候，从数据库中下载并使用逐级下降 VOR 进近，当逐渐向江穿越 VNAV 航路平面的时候，从数据库中下载并使用逐级下降 VOR 进近；⑩对外部数据输入进行切换，切换到 FMS 时进行效应观察，单一 FMC 进行失效处理，对故障效应进行观察。

（二）民用飞机飞行管理系统试飞验证项

在试飞的过程中，需要对交联部件的正确性进行评估验证，评估重点主要包括飞行管理计算机、自动油门系统接口以及自动驾驶仪等，大部分的民用飞机试飞评估试验都需要将这三个部分进行交联评估验证，根据飞行管理系统，其主要的功能评估验证项目有以下几个方面：①对制定飞行计划的评估验证；②对导航以及导航系统的自动调谐进行评估验证；③对制导的评估验证；④对性能管理的评估和验证；⑤对数据显示以及数据控制功能的评估验证；⑥对发动机功率状态进行计算、评估和验证。

（三）制定飞行计划

在民用飞机试飞评估试验过程中，需要对飞机飞行前准备程序、飞行计划以及 IRS 初始对准等进行演示，之后制定合理的飞行计划：①在飞行前对识别（IDENT）页进行记录，对构形及程序进行核实和记录，如果有需要，应当对数

据库资料进行更新,通过 CDU 进行 IRS 初始对准,通过惯性导航系统显示装置来保证至少初始对准一次,对 FMC 的位置参考页上经纬度进行核实,保证经纬度的准确性;②飞行之前,在真实时间选择 RTE 组合一个详细计划,使用公司航线和人工引入的航线来演示、实施计划;③对现行的飞行计划进行调整,保证跟踪一条航迹的不连续性,保证“对准”飞行,切入航路一段,对性能工作模式进行改变。

(四) 导航和横向指导

在民用飞机飞行的过程中,主要有三种导航模式:①主导航模式:主要包括测距设备和惯性基准系统;②次导航模式 1:主要包括测距设备、伏尔和惯性基准系统;③次导航模式 2,只用惯性基准系统。在飞行过程中,需要根据地面导航台可利用情况以及导航接收机有效性来选择导航模式。需要对航路途中导航以及终端导航进行验证,以便与评估考核,主要验证内容包括导航的精度验证、导航台自动选择完整性的验证以及飞行管理计算机系统性能的验证。

(五) 性能管理和垂直制导

性能管理针对飞机飞行垂直剖面,以飞行计划和空中交通管制范围为基础,充分发挥民用飞机性能,在飞机爬高、巡航及下降过程中,对最佳高度剖面及速度剖面进行预测,利用飞行控制系统来垂直制导,确定节约油量、降低成本的最佳飞行轨迹。

1. 垂直导航爬升

进行垂直导航爬升试验,在跟踪飞机管理计算系统计算速度和驾驶员引入速度时,进行试验,爬升的过程中,对速度变化引入,持续到平飞段,以此来对高度捕获特性进行演示。对不同成本指标值进行演示,通常要接通飞行指引仪、自动油门和自动驾驶仪。

2. 垂直导航下降

在航迹下降的过程中,通过升降舵李来对速度变化进行调节,从而进行垂直导航下降的评估和验证,以选定的经济速度和人工操纵速度为基础进行演示,包括经济航迹和人工操纵航迹,在没有特殊要求下,保证自动驾驶仪、自动油门系统以及飞行指引仪的接通状态。

第三节 飞行控制系统

一、基于飞行控制系统的飞行安全风险评估

在航空领域中，飞行安全风险评估是一个至关重要的过程，旨在通过综合分析和监测飞行操作的各个方面，识别并管理可能导致事故的风险。随着航空技术不断发展以及飞行环境的日趋复杂，飞行安全风险评估的必要性愈发显著，它不仅要应对由先进飞行控制系统带来的新型技术挑战，还要兼顾操作失误、环境因素等多维度风险源。国际航空组织和各国航空管理部门已经普遍认可飞行安全风险评估对于提高飞行安全标准的重要性，将其作为预防事故发生的关键手段。这一过程不单是对潜在安全威胁的被动响应，而更多地发挥着主动预防的作用，力图通过前瞻性分析预见并解决问题，以保障航空器在多变的飞行条件下能安全运行。因此，飞行安全风险评估的实践要求高度的科学性和精确性，并且随着航空业的发展和技术的更新，这一领域亟需不断地创新和进步。

（一）飞行控制系统概述

飞行控制系统是实现飞机自动稳定和操纵的核心系统，由多个相互协调的子系统组成，包括飞行控制计算机、各种飞行状态感知设备、执行机构和人机界面等。飞行控制计算机是整个系统的核心部件，采用双冗余或三冗余的结构，以提高系统的可靠性。计算机系统由传感器信号调理模块、数字化转换模块、中央处理模块、控制法则库模块、任务管理模块、信号输出模块等组成。其中，中央处理模块整合各飞行参数，根据存储在控制法则库中的控制算法，运算出飞机的操纵控制量，并由信号输出模块发送至执行机构。感知设备主要包括空速测量系统、高度测量系统、姿态测量系统等。空速系统使用空速探头、动压传感器等设备测量飞机的空速参数；高度系统使用气压计、雷达高度表等设备测量飞机的高度和爬升率；姿态系统使用陀螺仪、水平仪等设备测量飞机的俯仰角、横滚角、偏航角等姿态参数。这些采集到的模拟量信号经过放大、滤波和采样保持后转化为数字信号，通过数据总线发送到飞行控制计算机。执行机构由各舵面执行机构和发动机推力执行机构组成，它们接收计算机的控制信号，驱动相应的升降舵、方向舵、副翼、发动机等进行飞行操纵。舵面执行机构采用电气-液压复合驱动方式，由电动执行机构提供动力，通过液压传动装置带动舵面。发动机推力执行机构则

直接控制发动机的推力输出。人机界面由显示器、控制器和操纵杆等组成，通过按钮、踏板、拨杆等的控制指令，或者通过直接操纵杆控制飞机。同时，它也能实时显示飞机的各项状态参数，以便飞行员监视系统的工作状态。

（二）飞行控制系统安全风险

1. 软件安全风险

在飞行控制系统中，软件负责执行多种复杂任务，从导航到飞行动态管理。软件缺陷，无论是编程错误、逻辑失误还是设计上的不足，都可能导致系统失效。这些缺陷可能在软件开发过程中遗漏，或是在系统升级时引入。它们会导致从轻微的数据不准确到严重的系统崩溃等一系列问题，增加飞行过程中出现故障的可能性。更新和升级软件时可能会遇到兼容性问题，尤其是在集成第三方应用或执行系统更新时。不兼容可能导致预料之外的系统行为，例如数据丢失或错误地执行命令。这些问题可能不易预测，并且在复杂的系统交互中才显现，给飞行操作增添了不确定性。安全漏洞则为飞行控制系统带来外部威胁，黑客或恶意软件可能通过这些漏洞操纵或破坏系统功能。这种风险在近年来尤其突出，因为飞行控制系统变得更加数字化和网络化。一旦遭受攻击，可能会导致失去对飞行器的控制，或者使关键的飞行安全系统失效。随着技术的快速发展，软件老化成为一个日益严峻的问题。旧的软件可能无法有效地与新的硬件或技术标准交互。这种不兼容可能导致系统功能降低或完全失效，使飞机无法利用最新的安全特性和性能提升。这些软件安全风险各有其特点，但共同点在于它们都可能导致飞行控制系统的不稳定和不可靠，增加飞行事故的风险。因此，识别和管理这些风险对于确保飞行操作的安全性至关重要。

2. 硬件安全风险

飞行控制系统的硬件组成部分是确保飞行器能够安全完成任务的关键。随着飞行器的不断使用，硬件部件的老化和磨损成为不可避免的问题。关键组件的性能退化，尤其是在高应力环境中，可能导致突发故障，进而影响飞行器的操作安全性。例如，传感器失准可能导致错误的飞行数据反馈，引发错误的操控决策。制造缺陷是硬件风险的另一方面。尽管现代制造技术已经非常先进，但微小的缺陷或材料不均仍有可能在制造过程中引入。这些问题可能在初始阶段不明显，但在经过重复的压力循环后，可能导致部件性能下降或突然故障，这在关键飞行阶段尤为危险。电磁干扰是现代飞行控制系统中一个日益关注的问题。飞行控制系

统依赖于精密的电子设备来执行其功能，而这些设备可能对外部电磁场敏感。强烈的电磁活动，如雷暴或人为电磁干扰，能够扰乱飞行控制系统的正常运作，可能导致临时性或永久性的设备损坏。供电问题对于飞行控制系统的稳定运作同样至关重要。不稳定的电源供应或电池性能问题可能会在不适当的时候导致飞行控制系统断电，从而使飞行器失去控制。供电中断可能导致重要数据丢失或控制系统重置，这在复杂飞行操作中可能造成灾难性的后果。综上所述，硬件安全风险对飞行安全构成直接威胁。飞行控制系统的硬件故障可能导致飞行器操作异常，甚至完全失控，进而危及飞机上的人员和货物安全。因此，对于飞行器的持续维护、精确的故障诊断以及及时的部件更换是确保飞行安全不可或缺的措施。

3. 人为因素风险

人为因素在飞行安全中扮演着至关重要的角色。操作错误是造成飞行事故的主要原因之一。飞行员在高压的工作环境下需要做出快速准确的决策，任何误操作或判断失误都可能引发连锁反应，导致严重的后果。例如，对飞行控制系统的不当操作可能会导致航向偏离、高度变化或速度调整错误，这些都可能危及飞机的安全。维护失误也是飞行安全的一个关键因素。飞行控制系统的性能和可靠性在很大程度上依赖于规范的维护程序。如果维修工作中出现疏忽，比如错误安装部件、不当的配置调整或忽视了某些重要的检查步骤，都可能导致系统故障，甚至在不经意间引入新的安全隐患。培训不足是另一项重要的人为风险源。飞行员和维护人员若未能接受充分的培训，可能不理解飞行控制系统的复杂性或缺乏处理突发情况的能力。这种缺陷会影响他们正确使用或维护系统的能力，增加发生操作错误的可能性。例如，对飞行控制系统的新更新或升级缺乏充分理解，可能导致飞行员在关键时刻无法有效响应。沟通失败是飞行操作中不可忽视的风险。飞行员、空中交通管制员和地面支持人员必须通过准确无误的沟通协同工作，确保飞行任务的顺利进行。沟通障碍可能源于语言不清、术语混淆或信息传递不完整，这些都可能导致误解，从而引发操作不当或对紧急情况反应不足。在分析人为因素对飞行安全的影响时，应认识到这些风险是可预防的。通过增强飞行员和维护人员的培训、改进沟通技巧以及采用更为严格的操作和维护协议，可以大幅降低人为错误的发生概率。此外，使用先进的模拟器和持续的教育项目，可以确保人员在面对飞行控制系统的复杂情况时，能够做出更为精确和合理的操作决策。

4. 环境因素风险

环境因素风险在飞行安全评估中占据核心地位，因为飞行器在运行过程中不断与外部环境相互作用。极端气候条件对飞行控制系统构成严峻挑战。以强风为例，它可能导致飞行器偏离预定航线，迫使飞行控制系统进行更为频繁和剧烈的调整，从而加速组件磨损。冰雹和雷电不仅威胁飞行安全，还可能直接损坏外部传感器和导航系统。温度波动对飞行器的影响亦不容忽视。极端低温可能导致材料脆化，影响电子设备的可靠性，而高温可能导致部件过热甚至故障。材料的热扩散和收缩过程可能引起间隙变化，影响组件的精确配合和功能。振动与冲击是飞行过程中的常见现象。起飞和着陆阶段的冲击力可能超出飞行控制系统设计的阈值，导致结构损伤或敏感部件故障。持续的振动亦可能导致螺栓松动或连接件断裂，损害系统的结构完整性。电离层干扰作为一种较少被提及的风险，其影响不容低估。太阳活动导致的电离层变化可能干扰无线电信号，影响飞行器的通信和导航能力，尤其是对于依赖卫星导航的现代飞行器。通过对极端气象、温度波动、机械振动和电离层干扰等多种风险因素的综合考量，可见环境对飞行安全的影响是多方面且复杂的。有效应对这些风险需要飞行控制系统具备高度的适应性和鲁棒性，同时也需要飞行员能够对这些环境因素有充分的认知和准备。只有这样，才能确保飞行任务在面临环境挑战时的安全性和成功率。

（三）基于飞行控制系统安全风险评估方法

1. 软件安全评估方法

在航空领域，飞行控制系统软件的安全性至关重要，因此采用综合严格的评估方法对其进行全面的安全保障是不容忽视的。这一评估过程从需求分析与定义开始，确保所有安全关键需求被明确，并建立起相对应的安全性能标准。这是构建安全软件的基石，因为只有明确了所需达成的安全目标，才能在接下来的设计和开发过程中有针对性地实施安全措施。设计审查阶段则是确保软件架构能够满足既定安全需求的关键环节。在这一阶段，专家团队对软件设计进行深入分析，审查相关文档，以确保在设计阶段就已经考虑并规避了所有潜在的安全问题。通过这种预防性的安全设计审查，可以在软件开发的早期阶段就发现和修正潜在的安全缺陷。代码分析是软件安全评估中的一个技术驱动环节，涵盖了静态和动态分析两个方面。静态代码分析是不运行代码的情况下检查程序源代码的过程，它能够发现安全漏洞、程序错误以及不遵守编码标准的情况。动态代码分析则是在

代码运行时进行,用以发现那些只有在程序执行特定操作时才会暴露的问题,如内存泄漏、竞态条件等。随后,测试与验证环节通过多种测试手段来确保软件的各个部分都能按预期工作,并且在相互协作时保持高度的安全性。单元测试关注于单一组件的功能正确性,集成测试确保这些组件能安全地互相通信,而系统测试则从宏观角度评估整个软件系统的安全性。风险评估与缓解是识别和处理软件缺陷的过程,目的是理解缺陷对系统安全构成的具体风险,并开发出相应的缓解措施。这一环节要求对风险进行定量分析,以便更加精确地确定缓解策略的优先级和效果。最终,在软件认证与审计阶段,软件需符合特定的行业标准,如航空行业的 DO178C,这是软件安全性能的一种官方认可。软件还需要定期接受安全审计,以确保在其生命周期的各个阶段都维持必要的安全标准。

通过这样一系列层层深入、环环相扣的评估方法,软件安全评估确保飞行控制系统在设计、开发、部署和维护的各个环节都能达到最高的安全标准,最终实现旨在保障飞机和乘客安全的目标。这种方法论不仅适用于飞行控制系统,也为其他需要高安全性软件系统的开发和评估提供了行之有效的模式。

2. 硬件安全评估方法

在硬件安全评估的过程中,专业团队通过一系列系统的步骤来确保硬件设计的可靠性和安全性。这一评估过程起始于硬件设计审查阶段,评估人员会仔细检查硬件设计,以确保其包含了必要的冗余和容错机制,并能够在预期的环境条件下正常运作。接下来,通过故障模式与影响分析,评估者能够评估每个硬件组件在故障情况下对整个系统安全性的影响,这一分析有助于识别系统中的潜在单点故障,并为这些问题制定相应的缓解策略。紧随其后的是故障树分析(FTA),这一分析通过构建故障树模型,详尽地分析不同故障路径和它们对系统整体安全性的影响,同时计算故障发生的概率,这一步骤对于整体系统的可靠性评估至关重要。加速寿命测试是通过在模拟的极端工作条件下测试硬件,以快速揭示潜在的设计或制造缺陷,从而验证硬件的可靠性。这些测试通常采用高温、高湿、震动和其他应力条件,旨在加速硬件老化过程,以便在短时间内观察到可能的故障模式。最后,安全认证阶段是硬件评估的收尾环节,硬件产品需要符合特定的行业安全标准,例如航空电子领域的 RTCA DO-254 标准。这一阶段确保硬件设计和制造过程遵循了所有必要的安全要求和指导原则。通过如此严格的硬件安全评估方法,可以确保硬件在设计和制造阶段就达到了高安全性的要求,为最终用户

提供了可靠性高、风险低的产品。这种评估流程不仅可以应用于航空领域，还适用于任何需要高度安全保证的硬件产品开发。

3. 人机环境综合评估方法

人机环境综合评估方法是一个多维度的评估体系，旨在全面考量操作员在使用飞行控制系统时的交互效果及环境因素对系统性能的影响。首先，人因工程分析关注于操作员的任务流程和用户界面设计，以减少操作失误并评估工作负荷以避免疲劳相关的安全隐患。其次，模拟和评估通过飞行模拟器测试飞行员与飞行控制系统的交互，以及在多变情况和应急场景下的反应效率和系统性能。环境影响评估则考虑温度、湿度、振动和电磁干扰等因素，对飞行控制系统在这些变化条件下的性能进行细致检验。同时，培训和程序评估确保飞行员及维护人员接收到适当的培训，以保证飞行控制系统的正确使用和维护，并定期更新培训内容以适应新技术和操作经验。安全文化和组织行为评估则聚焦于组织决策中的安全文化，以及行为模式对于安全操作和持续改进的支持。最后，通过对历史事故和事故数据的深入分析，可以识别出人机环境交互中的潜在安全问题，并利用这些数据来指导飞行控制系统设计和操作程序的改进。这一综合评估方法不仅提升了飞行控制系统的实际应用安全，而且促进了整个航空组织安全管理水平的提升。

二、自动飞行控制系统人机交互设计优化

人为差错是威胁航空安全最主要的因素，飞机机组在飞行过程中的不正当决策和操作行为大部分是由于飞行机组与飞机及自动飞行控制系统之间不良的人机交互导致。因此，提高飞行安全、减少飞行事故的最有效方法就是对驾驶舱中人机交互功能设计进行研究，指导飞机驾驶舱人机交互界面的设计，提供更加有效的人机功能分配策略，帮助飞行机组更好地完成与飞机系统的交互，使系统人机交互功能高效、显示合理、逻辑清晰，最大限度将信息准确地传递给飞行员，使决策和操纵过程最佳化，减少飞行机组的不正当决策和操作行为，提高飞机安全性。综上所述，自动飞行控制系统人机交互设计优化研究对于提高飞行安全有极其重要的意义。

（一）功能原理

自动飞行控制系统能够协助飞行员完成大多数的飞行任务。从爬升、巡航、下降，再到进近，自动飞行控制系统都有参与，在整个飞行过程中扮演的角色越

来越重要。自动驾驶仪系统用于稳定飞机沿三轴的角运动,稳定飞行高度,按给定的航向和倾斜指令转弯,按预定的航迹控制飞机自动飞行。驾驶仪系统由俯仰、倾斜和航向三个控制回路组成,分别通过三个电动操纵舵机来控制飞机的升降舵面、副翼舵面、方向舵面,当自动飞行控制系统接通后,综合飞控计算机根据传感器感受的飞机飞行状态信号和来自自动飞行控制系统操纵部件的操纵或控制模态信号,进行控制律解算,然后将控制信号发送至舵回路,通过驱动相应电动操纵舵机链轮旋转来带动相应舵面偏转,以达到控制飞机三个舵面的目的,完成自动驾驶控制的功能。

（二）人机交互常用显控部件功能

人机交互,从广义上理解就是用户体验,通过人与机器之间的互动连接进行信息的交流和传达。飞行员与自动飞行控制系统的人机交互主要通过显控部件完成,飞行员通过显示画面和显控部件掌握飞机飞行状态,然后根据需求通过显控部件输入控制指令,之后自动飞行控制系统按照控制指令控制飞机飞行。自动飞行控制系统的显控部件主要包括自动飞行控制板、驾驶指引操纵台、操纵手柄和设备电源开关等,飞行员主要通过查看显示画面和操纵这些显控部件来完成与自动飞行控制系统间的人机交互,针对显示画面人机交互的优化可以通过更改软件来实现,因此针对自动飞行控制系统人机交互设计优化研究主要围绕这些显控部件来进行深入研究。自动飞行控制板布置在左驾驶员仪表板上,供左驾驶员操作,是自动飞行控制系统的显示控制部件,用于自动飞行控制系统电源的接通/断开、工作状态和余度信息指示,设置垂直速度的预选值以及飞机自动转弯时坡度选择,进行指示灯亮度的调整等。驾驶指引操纵台布置在中央仪表板上方,供左、右驾驶员操作,是自动飞行控制系统的显示控制部件,设置了多个带灯按钮开关,用于自动飞行控制系统的模态选择。操纵手柄布置在左操纵台上,供左驾驶员操作,是自动飞行控制系统的操纵控制部件,用于发送自动飞行控制系统接通信号,俯仰、转弯开关信号及操纵量信号,改平信号,改出倾斜信号等。设备电源开关布置在中央仪表板左上方,供左驾驶员操作,主要用于设备和系统的接通和断开。

（三）自动飞行控制系统人机交互研究

自动飞行控制系统的显控部件主要有自动飞行控制板、驾驶指引操纵台、操纵手柄和设备电源开关,分别安装在驾驶舱的不同位置,仅驾驶指引操纵台可供左、右驾驶员操作,其余的显控部件仅供左驾驶员操纵。鉴于人机交互模式会对

飞行安全产生影响,通常高效的人机交互行为应该尽量以单资源通道为基础。因此,可以参考现代先进民用飞机座舱,考虑对自动飞行控制系统的主要显控部件进行综合集成设计,从而提高自动飞行控制系统的人机功效。目前,自动飞行控制系统的指示灯是通过自动飞行控制系统的自动飞行控制板进行统一调光,可以通过对自动飞行控制系统的指示灯控制设计进行优化,来达到驾驶员一键实现驾驶舱指示灯的灯检和调光功能,不仅可以简化自动飞行控制系统内部线路交联,而且可以有效地减轻飞行员负担,提高人机功效。自动飞行控制系统显示与告警是自动飞行控制系统的重要功能,是飞行机组人员与自动飞行控制系统进行人机交互行为的重要渠道,主要用于反馈自动飞行控制系统工作状态、故障、功能失效或非正常条件的警示,提示飞行员采取相应的处置,避免故障态下的不当操作损伤飞机甚至危及飞行安全。可以考虑通过对自动飞行控制系统的显控部件故障监控进行优化,从而提高自动飞行控制系统的人机功效。综上所述,自动飞行控制系统可以通过对显控部件进行集成设计、指示灯控制设计、显控部件故障监控设计三方面进行优化,来提高自动飞行控制系统的人机功效。

(四) 自动飞行控制系统人机交互设计优化

1. 自动飞行控制系统显控部件集成设计优化

自动飞行控制系统的显控部件集成设计可以考虑设计一个显控部件,集成和简化自动飞行控制板、驾驶指引操纵台、操纵手柄、设备电源开关的功能,位置布局可以放在中央仪表板上方正中央,供左、右驾驶员操作。集成后的显控部件可以参考现代先进民用飞机座舱面板设计,使面板布局简洁合理,驾驶员操纵便利,功能完善。集成后的显控部件对原四个显控部件的离散量和模拟量接口进行集成优化,可以考虑将模拟量接口改为数字量接口,由软件完成逻辑转换、故障监控等功能,这样可以大大减少产品的外部接口数量,简化机上线路交联,使产品的维护修理也更加方便。集成后的显控部件可以参考现代先进民用飞机或国内外军机设计,对自动飞行控制板、驾驶指引操纵台、操纵手柄、设备电源开关的功能进行集成融合设计。集成后的显控部件可以实现自动飞行控制系统电源的接通/断开、飞机垂直速度的预选、飞机自动转弯坡度的选择、自动驾驶仪模态的选择等。集成后的显控部件具备的功能增多,为了保证产品的可靠运行,通过对系统的安全性和可靠性进行计算评估,考虑采用双余度或多余度架构来提高产品的安全性和可靠性。

2. 自动飞行控制系统指示灯控制优化

目前,自动飞行控制系统的指示灯是通过自动飞行控制系统的自动飞行控制板进行统一调光,可以通过对自动飞行控制系统的指示灯控制设计进行优化,来达到驾驶员一键实现驾驶舱指示灯的灯检和调光功能,不仅可以简化自动飞行控制系统内部线路交联,而且可以有效地减轻飞行员负担,提高人机功效。自动飞行控制系统的指示灯设计可以考虑和驾驶舱调光控制系统进行融合,来实现驾驶舱指示灯统一调光和灯检的功能。由于自动飞行控制系统的指示灯较多,且作为主要状态指示部件,根据安全性和可靠性需求考虑进行余度设计。在进行自动飞行控制系统的指示灯和驾驶舱调光控制系统融合设计时,需要明确交联信号和设计相关的具体内容。尤其要注意,在自动飞行控制系统内部设计时,一方面要考虑评估外电路可能输入的信号对系统的影响,设计保护措施,另一方面也要考虑评估自动飞行控制系统的内部信号对外电路的影响,设计相关保护措施。

3. 自动飞行控制系统显控部件故障监控设计优化

驾驶指引操纵台上设置有多个带灯按钮开关,用于驾驶员进行自动飞行控制系统的模态选择。各模态开关信号、指示灯信号和综合飞控计算机交联为模拟量,均采用硬线连接,综合飞控计算机采集到模态开关信号有效后,通过另一路硬线发送指示灯点亮/熄灭信号给驾驶指引操纵台。由于驾驶指引操纵台上模态开关较多,因此需要更多的硬线与综合飞控计算机交联,如果出现按钮开关或指示灯故障,需要进行针对性排故障工作来准确定位故障。针对上述情况,可以考虑将模拟量接口改为数字量接口,各模态选择开关信号通过 HB6096 总线发送给综合飞控计算机,然后,综合飞控计算机通过 HB6096 总线发送点亮/熄灭指令控制指示灯点亮/熄灭。这样,不仅简化了线路连接,最重要的是可以由软件完成按钮开关或指示灯故障监控的功能。自动飞行控制板上的开关信号、指示灯信号和综合飞控计算机交联为模拟量,均采用硬线连接,综合飞控计算机采集到开关信号有效后,通过另一路硬线发送给指示灯点亮/熄灭信号给自动飞行控制板。自动飞行控制板功能的优化可以参考驾驶指引操纵台模态开关和指示灯的优化方式,此外还可以考虑将自动飞行控制板上工作状态和余度信息由指示灯表示的方式,改为由软件实现画面显示。集成后的显控部件可以根据可靠性和安全性要求,决定采用双余度或多余度架构设计,并增加软件控制功能对指示灯点亮/熄灭状态进行故障监控,必要时进行告警设计,避免模态或状态指示灯与画面显示不一

致时，由飞行员判断的工作变为系统自动判断，减轻了飞行员负担，提高了自动飞行控制系统的人机功效。

三、无人机飞行控制系统若干关键技术

无人机技术在日常运用过程中所发挥的优势较为突出，各个研发部门加强了对无人机飞行控制系统的科学研究，为无人机技术的稳定运行提供诸多的保障。在此背景下强化关键技术研究有助于优化无人机飞行控制系统的运行模式，减少突发问题的发生，全面提高无人机技术的利用效果。

（一）无人机飞行控制系统的运行原理

无人机的飞行控制系统是由多个组件构成的，包括传感器、数据处理器、操纵系统和电力系统。这些不同的组件共同协作，让无人机在空中飞行并完成任务。传感器是无人机的眼睛和耳朵，通过传感器，无人机可以感受周围的环境信息，包括气流、高度、姿态和方向等。对于任何一款无人机来说，传感器的选择都是至关重要的，它们必须可靠、精确、稳定 and 智能，才能帮助无人机在复杂的飞行环境中稳定飞行。数据处理器是无人机的大脑，它的作用是将传感器收集到的数据进行处理，然后输出控制指令给操纵系统。数据处理器必须具备高效的计算能力和稳定的运算速度，以确保无人机在高速运动和复杂环境中安全飞行。操纵系统是无人机的手和脚，它接收来自数据处理器控制指令，并通过电力系统来控制无人机的运动。操纵系统分为两个部分，一个是飞行控制器，它是无人机的核心控制单元，用来控制无人机的姿态和高度；另一个是导航控制器，它用来控制无人机的航向和速度。电力系统是无人机的动力源，一般使用电池或燃油驱动。电力系统的设计和使用对无人机的飞行时间和可靠性有着至关重要的影响。

（二）无人机飞行控制系统的应用价值

在当今科技飞速发展的时代，无人机已经成为了不可替代的一种空中工具，在各个领域都有广泛而深远的应用。它们可以在无人操控的情况下完成各种任务，如地质勘探、环境监测、军事侦察和灾难救援等。然而，这些工作的实现离不开无人机飞行控制系统的应用，它是无人机最核心的一项技术，也是无人机的灵魂所在。掌握先进的无人机飞行控制技术，能够使无人机更加智能化、精准化、高效化，从而提升无人机的应用价值。无人机飞行控制系统能够实现无人机的自主起飞、自主降落、自主导航等多种能力，在各种复杂的环境下保持稳定，避免碰

撞和摔毁。通过与其他设备的联动，无人机飞行控制系统可以完成更为复杂的操作，例如自动巡航、任务规划和实时监控等。在工业领域，无人机的应用已经越来越广泛。农业杀虫、植保、灌溉等都可以借助无人机实现，节约人力、提高效率，同时更加高效地保障粮食产量。在海洋资源开发中，无人机可以用于海洋环境监测、鱼群调查等，为海洋生态保护和渔业管理提供了有效的技术手段。在建筑领域，无人机可以进行建筑勘测，利用高精度三维地图，帮助设计师更好地规划建筑。此外，无人机飞行控制系统在公共安全、军事防务方面也有着重要的应用。在反恐、反毒等任务中，无人机可以帮助扫描危险区域，掌握情报，提升作战效率。在警务领域，无人机可以用于巡逻、监控等，提高现场警力的有效利用程度，提高警务工作的效率。

（三）无人机飞行控制系统若干技术

1. 干扰观测器

干扰观测器是无人机飞行控制系统中的一种重要部件，它的主要作用是监测周围环境中可能产生的各种干扰，例如强风、温度变化、气压变化等等。一旦发现周围环境发生变化，干扰观测器就会立即调整无人机的飞行姿态和速度，以保证无人机飞行的安全和稳定。干扰观测器并不是一个简单的装置，它由多个传感器和控制模块组成。这些传感器可以不断地监测无人机周围的环境，包括重力、磁场、空气压力、温度、湿度等等。当这些环境参数发生变化时，干扰观测器会自动调整无人机的飞行参数，使其能够更好地适应新的环境。在恶劣的天气条件下，干扰观测器的作用就更加明显，它可以大大提高无人机的飞行稳定性和安全性。干扰观测器的研制并不是一项容易的任务，它需要工程师们进行大量的设计和优化。首先，工程师们需要选择合适的传感器来监测周围环境，这需要对传感器的性能和工作原理进行深入研究。其次，工程师们还需要设计合理的控制算法，以便能够快速准确地调整无人机的飞行参数。最后，工程师们还需要对干扰观测器进行多次实验和测试，以确保其能够稳定可靠地运行。

2. 视频监测系统

视频监测系统以其强大的功能和高效的性能，带来了许多便利和实际应用。它通过高清晰度的视频监测，为用户提供了一种全新的视觉体验，同时也为许多领域的应用提供了强大的支持。作为无人机飞行控制系统中的重要组成部分，视频监测系统不仅能够对无人机的飞行进行实时监控，还可以对周围环境进行精确

的观察和记录。这种高精度、高效率的监测系统，不仅满足了用户对无人机飞行时的全面监控需求，也为航拍、测绘、环境监测等实际应用提供了有效的技术支持。随着无人机技术的不断进步和应用范围的扩大，视频监测系统日益发挥着重要作用。它可以通过数据分析等手段，针对不同的应用场景，提供更加针对性的数据信息和技术支持，为各行各业提供更加便利、高效的服务。然而，视频监测系统也面临着一些挑战和问题。例如，在对无人机飞行进行监测时，需要保证信号传输的稳定性和实时性，避免出现信号丢失或传输延迟等问题。此外，对于一些环境比较恶劣的应用场景，如高温、低温、高海拔等，视频监测系统也需要具备对应的适应性和稳定性。不过，这种技术挑战也能够激发人类的创造力和创新能力。随着无人机技术的不断发展，视频监测系统也将日趋完善和智能化，为各类应用提供更加精准、高效、可靠的技术支持。

3. 滤波器

在无人机飞行控制系统中，滤波器被广泛应用于信号处理和数据传输之中，起着至关重要的作用。简单来说，滤波器就是一种专门用来处理信号的电子设备，它能够通过一系列的技术手段将输入信号经过处理后输出，从而实现对信号的滤波、去噪和增强等效果。就如同我们生活中常用的水过滤器一样，滤波器通过不同的滤波器类型和参数设置，能够过滤掉不需要的信号，从而让我们获取到更加精准、稳定和清晰的信号。在无人机飞行控制系统中，无论是控制指令、传感器数据、通讯信号还是影像图像等，都需要通过滤波器处理后才能得到更为可靠的结果。特别是在高速飞行和极端环境下，更需要滤波器的帮助来保障系统的稳定性和安全性。根据不同的滤波要求，滤波器还可以分为许多类型，如低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器等。其中，低通滤波器最为常见，其作用是去除高频噪声信号，使得输出信号更加平滑稳定。而带通滤波器则可以保留一定频率范围内的信号，其他频率范围的信号则被滤除，从而在保留有效信号的同时去除噪声干扰，提高信号质量和精度。

4. 数据平台

数据平台是指在无人机飞行过程中所产生的各种数据信息被收集、存储、处理、分析的一个中心化平台。其主要作用在于为无人机的飞行控制提供全面、准确的数据信息支撑，从而提高飞行安全性、飞行质量和飞行效率。数据平台在无人机飞行控制系统中扮演着非常重要的角色。它能够帮助控制单元实时获取无人

机的位置、速度、高度、飞行路线等重要数据，这些数据能够帮助控制单元制定出更为精准的控制策略。同时，数据平台还能够记录下无人机的历史数据，这些数据可以用于分析无人机的飞行轨迹、检测故障、预测故障可能性等，从而提高飞行安全性。数据平台还能够协助控制单元对无人机进行实时控制。通过收集无人机的实时数据，数据平台可以对无人机进行实时的跟踪和控制。当无人机出现问题时，控制单元可以通过数据平台的信息，迅速做出反应并采取应对措施。这种实时控制方式不仅提高了无人机的安全性，而且还能够减少对用户的损失。数据平台还能够为无人机的研发提供支持。通过收集和分析无人机的数据，研发人员可以更加深入地了解无人机的飞行规律和技术特点。这样，无人机的研发人员就能够更快地找到无人机的的问题，提高无人机的性能，同时也能够为未来的无人机研发提供参考。

无人机的飞行控制中，需要涉及多个方面的数据信息。比如，无人机的状态数据、传感器数据、航迹数据、气象数据、地图数据等。这些数据信息的收集、存储、处理和分析需要依托于数据平台。在数据平台的实现中，需要将无人机所产生的各种数据信息进行采集，并将其存储到数据平台中。在存储的过程中，需要确保数据的完整性、准确性和安全性。同时，需要对数据进行分类、分析、加工、挖掘，找出其中的规律和关系，为飞行控制提供科学的依据和决策支持。数据平台的实现需要依托于多种技术手段。比如，需要采用云计算、大数据、人工智能等技术手段来实现数据的集中存储和处理。同时，还需要采用一些先进的算法和模型来完成数据挖掘和分析。

在无人机中配合着飞行控制系统能够促进飞行模式的完善性，保证无人机能够在预定轨迹内高质量地完成当前的工作任务。因此相关技术人员需要加强对无人机飞行控制系统的科学优化，贯彻落实因地制宜的工作原则，根据飞行控制系统的使用需求以及在实际工作中暴露的问题提出科学的创新方案，以此来改善无人机的性能。

四、北斗导航在无人机飞行控制系统中的应用

随着我国科学技术水平的不断提高，越来越多的无人机出现在人们的日常工作生活之中，因此如何提升无人机飞行精度和有效地监管规范民用无人机的使用已经成为当前时代发展过程之中必须解决的一个重点问题。我国自主研发的北斗

导航系统的出现对于提升无人机飞行精度，提升无人机控制系统的效率有着积极地促进作用，因此，主要分析研究的就是北斗导航系统在无人机飞行控制系统的应用特点。

（一）北斗导航系统以及无人机概念以及特点

北斗导航系统是当今世界上最为成熟的导航系统之一，它是由我国自主研发的全球卫星导航系统，北斗卫星导航系统由空间段、地面段和用户段三部分组成，可在全球范围内全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠定位、导航、授时服务，并具有短报文通信能力，已经初步具备区域导航、定位和授时能力。北斗导航系统对于提升全球的卫星导航和提升我国国防力量有着重要的意义。无人机具有机动、灵活、安全、有效等四个突出的特点，广泛应用于测绘、管道巡检、电力线路巡检、林业防火、灾情评估、应急通信、军事侦察等领域。无人机的应用对于提升人类探索自然环境，勘测未知地区有着重要的意义，但是在无人机应用的过程之中有一个问题一直以来都是需要解决的，那就是提升无人机的飞行系统的控制能力，保证飞行精度，提升数据监测传输能力。我国以前使用的是 GPS 导航定位系统，但是其由于不是我国完全自主研发且没有供其使用的完善的差分系统设施，极大地限制了我国无人机事业和国防科技力量的发展，因此我国在不断地研发卫星导航系统，即北斗导航系统。

（二）北斗导航系统在无人机飞行控制系统中的应用现状

无人机飞行控制系统中最为重要的两个部分就是无人机飞行的控制和无人机飞行的管理。飞行控制主要是能够使无人机按照预定的状态进行飞行，按照预先设定的航线和速度来飞行，飞行控制主要是保证无人机飞行的精度。飞行的管理主要是能够使无人机处理相关的数据信息，在飞行过程之中一旦遇到一些突发情况能够迅速地进行处理，飞行管理主要保证无人机飞行的数据的采集与处理。北斗导航系统应用在无人机飞行控制系统之中对于提升这两个方面都有重要的意义，北斗导航系统在无人机飞行控制系统中实际主要应用在以下几个方面。

1. 精确导航

北斗导航系统应用在无人机飞行控制系统中最为重要的一个应用就是为无人机飞行提供准确的实时信息，这样能够极大地提升无人机飞行的精度，达到精确导航的目的。北斗导航系统能够保证无人机按照预先设计的规划的航线来进行飞行，使无人机能够在规定的时间飞行到规定的地点，并且北斗导航系统还可以精

确的规划航线，这样能够极大地提升无人机飞行的精度。北斗导航系统能够在无人机在飞行的过程之中发挥其最为基础的导航特性，控制无人机飞行的速度和方向，使其完成飞行任务。

2. 信息处理

北斗导航系统应用在无人机飞行控制系统中可以有效地提升无人机的信息处理效率和质量，这样能够让地面操作人员能够实时的与无人机进行信息交流，提升无人机监测的准确性。北斗导航系统应用在无人机飞行控制系统之中能够使无人机按照地面指令来进行空中监测，并且使所监测的信息能够实时的传输到地面控制中心，这样极大的提升了地面控制中心信息数据处理的速度和效率。北斗导航系统最为重要的一个特点就是短报文能力出众，无人机能够利用这一特点在复杂的环境之中进行有效的环境监测，在信号不好的地段能够有效地实现双向通信，保证信息数据处理的时效性。例如，无人机利用北斗导航系统可以参与抢险救灾，可以把发生事故的地段坐标信息，周围环境信息传输到后方，这样对于提升抢险救灾的效率有着重要的意义。

3. 突发情况处理

无人机能够极大地提升人类对于环境的监测能力，它对于提升人类探索与发现自然的能力，但是在无人机飞行过程之中不可避免地会遇见一些突发情况，北斗导航系统应用在无人机飞行控制系统之中能够极大地提升无人机对于突发情况的处理能力，这样既能够保证无人机飞行的安全，还能够极大地提升无人机对于环境监测的质量。一旦无人机遇见突发情况需要进行紧急迫降时，可以利用北斗导航系统发送特定的指令来让其迫降，并且发送位置坐标，这对于后期无人机的回收和维修有着重要的意义。

4. 飞行监管

无人机飞行控制系统中应用北斗导航系统一个重要的功能就是能够极大地提升对于无人机飞行监管的能力，这样能够极大地提升无人机飞行的实时监管效率。北斗导航系统应用在无人机飞行控制系统之中可以使得地面人员能够对于无人机飞行状态实时监控，对于无人机飞行的各种各样的参数的监管能够及时的调整无人机的飞行状态，能够及时且精确的调整飞行的航线保证无人机飞行的安全。飞行监管的另一个重要的意义就是保证我国领空领土的安全，能够有效地解决无人机乱飞的现象，提升我国领空管理的能力。

（三）北斗导航系统在无人机中应用展望

北斗导航系统应用在无人机飞行控制系统之中对于我国无人机事业的发展有着积极的推动作用，可以使得无人机能够更好地为我国现代化建设事业服务，为我国现代化建设提供源源不断的动力。北斗导航系统与无人机的结合能够很好的完成电力石油管道巡线作业，既能够极大地提升巡线作业的效率，对于出现问题的线路能够及时的处理，同时还能够节约成本。无人机还可以应用在农业之中，提升病虫害的处理能力。北斗导航系统应用在警用无人机之中不仅仅能够有效地提升警察的办事效率，而且对于我国反恐事业的发展也有着重要的意义。

总而言之，北斗导航系统对于提升无人机的飞行精度，提升信息处理能力有着重要的意义，同时还能够对于无人机飞行状态进行有效的监管，保证无人机飞行的安全。

第四节 通信与导航系统

一、基于 DSP 的航空电子通信系统

随着航空事业的快速发展，对科学技术水平有着更高的要求。通信系统作为航空事业发展的必要基础设施，对其施以先进的科学手段，有助于推动航空事业的快速发展。基于 DSP 的航空电子通信系统，其性能具有优越性，可以满足航空事业发展的需要。对此，针对该系统进行总体设计、硬件设计、软件设计的分析具有必要性。

（一）航空电子通信系统的总体设计

要合理设计航空电子通信系统，应包括硬件设计、软件设计、调试等环节，只有确保各环节设计的有效性，才能充分发挥 DSP 技术为指导的航空电子通信系统的积极作用。首先，硬件是系统的物理载体，能够确保系统正常运行。如若硬件设计不够合理，则阻碍系统运行。其次，软件也是系统的重要组成部分，在系统运行中占据重要的地位和发挥积极作用。软件能够发送指令，以达到控制硬件的目的，同时可以使硬件适应于更为复杂的网络环境中。最后，对 DSP 技术指导下的航空电子通信系统进行调试具有必要性，可以检测系统软硬件是否能够合理运行。

（二）航空电子通信系统的软硬件设计

1. 硬件设计

系统硬件设计中，可从 DSP 控制模块、总线通信模块、数据通信模块以及上位机与下位机通信模块等方面着手。在 DSP 可控制模块方面，由于其在构成上主要以功能单元、DSP 芯片为主，所以芯片的选用极为重要，应尽可能保证其功能较为强大且能满足低功耗要求，这样在功能单元作用下，数据通信、数据处理以及数据存储都可实现。在总线通信模块方面，以 ARINC429 模块为例，其在构成上主要以发送器、接收器为主，设计中仅需保证做好数据并串转换与串并转换，便能满足该模块设计要求。对于数据通信模块，可考虑将主控制器选择 FT3150 收发器，其兼有数据采集、接收与传送等功能。实际设计中，可考虑将 LONWORKS 模块引入，可使整个模块性能得以提高。

2. 软件设计

（1）软件设计的总要求

软件设计也是 DSP 技术的航空电子通信系统中最为重要的环节，只有确保该设计的有效性，才能充分发挥系统实时性、可靠性、可维护性的作用，对推动航空事业发展发挥着积极的作用。第一，基于 DSP 技术的航空电子通信系统软件设计应具备实时性的特点，使相关人员能够及时从系统中获取相关信息，并在最短时间内，开展系列处理工作。第二，基于 DSP 技术的航空电子通信系统软件设计应具备可靠性的特点，确保系统安全稳定运行。如果系统运行中，出现一系列故障，则相关人员可以采取积极的应对策略，以及时修复该系统，避免系统运行异常而造成的不良影响。第三，基于 DSP 技术的航空电子通信系统软件设计应具备可维护性的特点。由于航空电子通信系统对技术水平有着较高的要求，因而其结构比较严密，设备精密，能够满足完善系统的实际需求。

（2）模块划分在软件中的体现

设计航空电子通信系统相关软件的过程中，应从两方面内容入手，即设计上位机和下位机软件。在对前者软件进行设计的过程中，主要目的是通过设计从而有效管理不同种类的数据，促使智能纠错在系统当中得以实现；而后者在设计过程中包含了多项内容，如数据总线通信子程序和主程序等，它们被作为执行软件应用于上位机软件当中。设计过程中，具体的措施是促使设计方法体现出模块化。划分主模块的过程中，可以包含通讯、初始化、控制及处理数据四个模块。

（三）航空电子通信系统的调试

要想保障电子通信系统能够充分发挥自身的作用，必须对其软硬件系统进行不断的调试，保障通信系统的安全运行，电子通讯系统中的 DSP 系统自身具有复杂的系统结构，要想在使用过程中，充分发挥出 DSP 系统的作用，必须运用高效的方法，实现对系统的调试。JTAG 在执行过程中，按照相关的标准去执行，保障各项工作的顺利进行。该系统在调试过程中主要分为电路板裸板检测、通电前检测和电源输出检测等环节。在调试中，应促进软硬件工程的结合，保障软件语法和机构的合理性和准确性，避免调试工作中可能出现的问题，快速地排除故障，对出现的原因进行分析。

电子通信系统作为推动航空事业发展的重要基础设施，加强 DSP 技术的应用，能够提升航空电子通信系统的性能。但是，要充分发挥 DSP 技术在航空电子通信系统中的积极作用，相关人员必须对其加以反复调试和有效维护，以提升该系统的智能化水平，使其运行更具可靠性，为航空事业发展提供稳定性因素。

二、飞行通信质量与效率的提升

随着航空飞行任务量的不断增加，对机场通信系统的要求也越来越高。若机场通信系统无法满足越来越多的飞行需求，就会影响到飞行的效率与流量。因此，应当采取一定措施，对通信质量与效率进行提升，以大大增强飞行通信能力，确保飞行安全。

（一）通信系统保障概述

机场的通信系统一般由内话系统、超短波通信系统、短波通信系统，以及单台套超短波应急电台等组成。随着飞行任务的不断增多，对超短波电台的数量要求也在不断上升。同时短波通信一直担负着超视距通信以及超短波失联下的应急通信唯一手段，具有无可替代的重要性。内话系统可实现超短波系统、短波通信系统的全面接入，以其通信覆盖广、稳定性高、操作简易等优点现已逐渐成为管制人员主用的指挥设备，在飞行中发挥了重要作用。此外，目前对设备的维护一般分为月维护以及半年维护。通过维护，对设备的相关技术指标进行测量，以便及时确认设备状态，落实其工作情况。但对常发故障经常未进行系统性的梳理与总结，或是针对该故障点进行特别性的维护，多为反复“故障-维修—故障-维修”循环模式。因此，可建立一套全面细致的维护维修管理系统，对常发故障原因进

行归纳与总结，并进行计划维修需求分析，制定预防性维护方案。另一方面，大幅提高通信专业技术人员业务能力、增强人员自主维修能力也是很有必要的。

（二）通信质量的改进措施及效能优化提升

1. 通信系统方面

对超短波通信系统、短波通信系统和内话系统进行升级，提高系统冗余度，保证通信的可靠性与稳定性。

2. 设备维护维修管理方面

针对设备自身情况，可建立一套功能完善、安全高效的设备维护维修管理系统。以设备台账为基础数据，以工作单执行为业务主线，以设备故障管理为主要手段，将所关注的所有设备信息记录保存在系统中，推动设备的安全管理及长效运行。

（1）通过设备台账的定义进行有效管理

在设备维护维修管理系统中，建立有效的设备台账，记录包括设备的基本信息以及在使用过程中所发生的成本、维修记录、故障记录、位置变化等。通过对设备基本情况的把握，使技术人员从根本上掌握设备的运行状况，并能够及时准确地获得有效信息，以进行设备运行维护的决策。

（2）建立工单管理

为了确保设备故障及其维修信息的全面性，工单管理能够发挥重要的作用。无论是普通的故障报告，还是紧急抢修，或者计划性的维护，其所有信息都应该保证完整的记录在工单中，包括所需人员的技能、工具、计划的工作时间、实际发生的工时等；同时，通过对维修员工技能和工作量的分析，将维修计划有效地实施下去。

（3）进行及时、合理的备件供应

备件储备状况是在故障停机情况下决定停机时间长短的重要因素。因此，维护维修系统中可将备件管理和维修工作统一考虑，并对历史故障率及备件消耗数据进行分析，提出一个安全、经济的备件库存建议，在保证及时准确的供应故障备件的前提下，尽可能降低不必要的库存量。

（4）建立预防性维护方案

如果将设备的维修分为计划性维修和失效性维修两种，那么提高设备运营可靠性的重要手段之一，就是提高计划性对失效性的比例。维护维修系统通过对所

有设备的计划维修需求分析,制定维修日程和方案,使得每项计划性维修及时、到位地得到实施,以此提高设备的可靠性并延长设备的使用寿命,确保设备的正常运行率。

(5) 建立完整的故障管理系统

将不同类型设备的所有可能发生的故障情况归纳汇总在同一个体系中,包括故障现象、任何一种现象所有可能发生的原因,以及任何一种故障原因可能的解决措施,以提高故障历史数据分析的质量,使其对设备维修过程发挥更大的作用,从另一个侧面帮助提高设备的可靠性。

3. 技术人员管理方面

针对当前通信技术人员能力不足、紧缺、断层等情况,应当建立完整的人才培养计划,大力加强专业技术能力的提升,针对不同型号通信设备进行深入研究,提高自主维修能力,并增加人员配置,以满足飞行任务的需要。同时,开展一专多能人才的培养,合理调配其他有通信设备上岗证的人员,也可在一定程度上缓解人员短缺的局面,确保飞行任务的顺利进行。

三、飞行导航系统的信息化升级对飞行方向决策的影响

近年来,随着航空技术的快速发展,飞行导航系统的信息化升级已成为航空界的热门话题。这一升级不仅可以大幅提升飞行导航系统的性能和功能,更对飞行方向决策产生了深远的影响。业内专家在其研究中指出:“飞行导航系统的信息化升级为飞行员提供了更高精度、更实时的导航数据,有效地改善了飞行方向决策的可靠性和准确性。”这一观点凸显出信息化升级在飞行方向决策中的重要作用。此外,研究结果还表明,信息化升级使得飞行员能够更好地优化飞行航迹,避免了不必要的转弯和消耗,提升了飞行效率。因此,飞行导航系统的信息化升级不仅使飞行员的工作更加便捷和高效,同时也提升了飞行安全性。

(一) 飞行导航系统的信息化升级概述

1. 信息化升级的定义和特点

信息化升级是指在原有飞行导航系统的基础上,通过数字化、网络化、智能化等手段,将系统的功能和性能进行全面提升和改进的过程。它逐渐取代传统的机械化、简单化的导航方式,使飞行导航系统具备更高的准确性、自动化程度和智能化水平。此外,传统的导航方式主要依赖人工操作和机械设备,而信息化升

级则通过数字化技术，将导航数据、航空资料等信息进行数字化处理，提高数据的准确性和可处理性。信息化升级也使得导航系统可以与其他系统进行连接，如与航班管理系统、气象系统等进行数据交换和信息共享，实现更高效、更精准的导航服务。信息化升级还可以通过引入人工智能、机器学习等技术，使导航系统具备智能分析、决策和预测能力，提供更精细化的导航方案，提高飞行安全性。

2. 飞行导航系统信息化升级的目标和原因

飞行导航系统信息化升级的目标主要包括，信息化升级可以引入更先进的设备和技术，提高导航系统的准确性和稳定性，减少人为因素对导航的影响，进一步增加飞行安全性。信息化升级还可以实现导航数据的实时更新和预测，提供更准确、更及时的导航信息，帮助飞机选择最优的航线和飞行策略，提高飞行效率。此外，也能够通过自动化和智能化技术，减少人力投入和操作成本，提高系统的运行效率，降低航空公司运营成本。另外，随着航空业的快速发展，航空公司之间的竞争越来越激烈，因此提高飞行导航系统的功能和性能，可以为航空公司带来竞争优势。同时，科技也在不断进步，信息化已经成为现代社会的发展趋势，飞行导航系统也需要跟上时代的步伐，引入更先进的技术和工具。最后，飞行安全也一直是航空业的重要关注点，信息化升级可以提高导航系统的准确性和稳定性，进一步提高飞行安全性。

3. 信息化升级所涉及的技术和工具

信息化升级涉及的技术和工具有很多，主要包括：卫星导航系统，如全球定位系统（GPS）、伽利略卫星导航系统等，提供高精度的导航数据；航空数据库，包括航空资料、航线资料、机场资料等，通过数字化和网络化的方式进行管理和更新；航空电子地图，即使用数字化技术将地图和航空数据进行集成，提供准确的导航信息；飞行显示系统，通过智能化显示设备，将导航信息以图形化或虚拟现实的方式展示给飞行员；人工智能技术，如机器学习、深度学习等，通过分析大量数据，提供智能化的导航决策和预测能力。

（二）飞行方向决策的重要性和影响因素

1. 飞行方向决策的定义和目标

飞行方向决策是指在飞行计划中确定最佳的航线路径和飞行方向的过程。其目标是为了确保飞行安全、提高飞行效率和保证航班的准点性。飞行方向决策需要综合考虑航空器的能力、天气条件、航空交通管制、飞行时间、燃油消耗等因

素来选取最合适的飞行方向。

2. 飞行方向决策的影响因素

天气是影响飞行方向决策的重要因素之一。气象条件如低云、大风、雷雨等不利于飞行的天气现象都需要考虑，航班计划和飞行方向会根据天气情况进行调整，选择更安全、稳定的路径。航空交通管制则是飞行方向决策的另一个重要因素。航空公司需要根据航班计划、飞机的起降时间、航空交通管制区域等因素来选择合适的飞行方向，与其他航班进行协调，避免冲突和延误。此外，安全是飞行方向决策的首要考虑因素。飞行方向决策需要进行安全和风险评估，如考虑地形、飞行防区、雷暴活动、冰雹等潜在风险，并采取相应的措施进行规避，确保航班的安全性。

3. 飞行方向决策的重要性

飞行方向决策对飞行顺利进行具有重要的影响。首先，选择合适的飞行方向能够最大程度地确保飞行的安全性。通过综合考虑天气情况、航空交通管制和飞行安全风险等因素，选择安全的飞行路径可以减少事故和意外的发生。其次，飞行方向决策还可以提高飞行效率和减少航程时间。通过选择适当的航线路径，避免不必要的绕行和迂回，飞行距离可以缩短，节省燃料消耗，并使航班准点率得到提高。此外，飞行方向决策还能够减轻航空交通压力，提高空中交通的流畅程度，为其他航班提供更好的服务。

4. 其他影响飞行方向决策的因素

除了天气、航空交通管制和飞行安全等因素之外，还有一些其他因素也会影响飞行方向决策。其中之一是航空公司的经济考虑。航空公司需要考虑航线的经济性，比如油费成本、机组人员的工时和休息时间等，以便决策最佳的飞行方向。另外，飞行方向决策还受到航空器的性能和航路高度等因素的影响。不同的飞机性能适合不同的飞行方向，而航路高度的选择也会对飞行方向产生影响。此外，航班运营需求、航路容量和航空公司的运营策略等因素也可能对飞行方向决策产生影响。

(三) 信息化升级对飞行方向决策的影响

1. 提升飞行导航系统的准确性和实时性

信息化升级可以提升飞行导航系统的准确性。使用全球卫星导航系统(GNSS)可以提供飞行器的准确位置信息。传统的导航系统依赖于地面测量的无线电导航

信标,这种方法存在误差,并且在某些地区可能不可用。而 GNSS 系统则通过卫星提供的信号来定位,准确性更高。例如,电子飞行包可以提供实时的导航数据和导航图像,帮助飞行员更直观地了解飞行路径和飞行参数的变化情况。其次,信息化升级还可以提升飞行导航系统的实时性。比如机载数据链通信系统是一种通过无线通信技术实现飞机与地面通信的系统。它能实现飞机与地面的交通管制、航空公司运营中心、气象部门等进行实时的数据传输和交流。飞行员可以通过数据链与地面交通管制进行直接沟通,接收航线调整、航路更改、高度变更等飞行指令。这种实时的通信可以减少误解和不必要的延误,确保飞行员能够准确获取并执行相关指令。此外在飞行中,通过数据链,飞行员可以实时获取最新的导航数据,包括航路和航段规划、位置点、航向等信息。这样,飞行员可以根据实时的导航数据进行飞行计划调整,确保航行路径的准确性和安全性。另外,通过数据链,飞行员可以实时获取最新的气象信息,包括风速、风向、能见度、降雨等数据,以及雷暴、大风、积冰等气象预警信息。这样,飞行员可以根据实时的气象数据做出相应的飞行方向决策,避开恶劣天气区域,确保飞行的安全性。

2. 提高决策支持和可视化能力

信息化升级引入先进的数据分析和模拟工具,例如飞行管理计算机(FMC)和电子飞行包。这些工具可以收集、存储和分析各种飞行相关的数据,如气象数据、飞机性能数据和飞行历史数据。飞行员可以利用这些工具进行数据分析,进一步了解飞行环境的变化趋势、飞行性能的优化等,从而做出更全面的决策。同时,导航系统可以提供航线规划和飞行路径优化的功能,飞行员可以利用导航系统中的航段规划和飞行参数设定,通过模拟工具优化飞行路径,并分析不同方案的效果。例如,飞行员可以通过模拟工具评估在不同高度和速度条件下的燃油消耗、飞行时间等,从而选择最佳的飞行方案。其次,信息化升级还可以通过可视化显示航线和飞行参数来提高飞行导航系统的可视化能力。导航系统可以将航线和飞行参数以图形化的方式显示在导航显示屏上。通过这种可视化方式,飞行员可以直观地了解飞行路径、转弯点、高度和速度等飞行参数的变化情况。这种可视化显示能够帮助飞行员更清晰地理解飞行计划,进而能够在飞行过程中更好地掌握飞行方向,做出更合理的飞行方向决策。

3. 优化航路规划和飞行效率

通过信息化升级,飞行导航系统可以利用先进的算法和自动化技术,自动选

择最佳的航线和高空飞行层次。导航系统可以考虑多个因素，如飞行距离、航空公司政策、风向和风速等，以确定最佳的航线。它还可以根据实时的天气条件和流量状况，为飞行员提供实时的航线选择建议。此外，电子飞行包可以提供实时的燃料效率和经济计算，帮助飞行员优化航路规划和节省燃料消耗。其次，信息化升级可以实时计算飞行过程中的燃料效率，并为飞行员提供实时的燃料效率和经济计算。例如，导航系统可以根据飞机性能数据和航路参数，计算航路经济性指标，包括燃料成本、航空公司成本和运营成本等。飞行员可以根据这些计算结果，选择经济性较高的航线和飞行方案，进一步提高飞行效率和节省燃料消耗。同时，系统还可以评估不同航线和飞行方案的经济性，包括燃料成本、航空公司成本和运营成本等。这些实时的燃料和经济计算可以帮助飞行员评估不同航线和飞行方案的经济效益，并做出优化航路规划的决策。飞行员可以根据这些计算结果，选择经济性较高的航线和飞行方案，进一步提高飞行效率和节省燃料消耗。

4. 加强安全管理和风险控制

通过信息化升级，导航系统可以提供实时风险评估和决策支持。系统可以实时监测飞行环境的变化，如雷暴、降雨、颠簸等，并分析这些风险对飞行的影响。系统还可以监测飞机的状态，如发动机运转情况、燃油消耗情况、飞行姿态等。基于这些实时的监测数据，电子飞行包可以提供实时的风险评估和决策支持，帮助飞行员监测飞行环境和飞机状态，及时发现潜在的风险，并采取相应的措施，加强飞行的安全管理和风险控制。其次，信息化升级可以引入自动监测系统，实时监测飞行环境和飞机状态，加强安全管理和风险控制。例如，飞机上可以安装传感器和监测设备，如气象雷达、地形警告系统、发动机监控系统等，用于监测飞行环境和飞机状态的变化。当系统检测到异常情况时，可以自动发出警报，并采取相应的措施，如更改航向、激活备用系统，以确保飞行的安全性。通过自动监测系统的引入，导航系统能够更及时发现和处理潜在的风险，有效强化安全管理和风险控制。同时，它还可以监测飞机的各种参数和指标，如机械状态、燃油消耗、飞行姿态等。当系统检测到异常情况时，它可以自动发出警报，并采取相应的措施，如调整飞行方向、修改航线等，以确保飞行的安全性。通过自动监测系统的引入，导航系统能够更及时地发现和潜在的风险，有效强化安全管理和风险控制。

5. 提供智能化决策辅助功能

信息化升级可以引入智能化决策辅助功能，帮助飞行员做出更准确、更智能的飞行方向决策。通过数据分析和模拟工具，导航系统可以根据飞行员的需求和航空公司的运营策略，提供智能化的飞行方向建议。系统可以通过算法和模型，分析不同的飞行因素和约束条件，如燃油消耗、时间限制、航空公司优先等，从而确定最佳的飞行方向。同时，系统还可以根据实时的飞行数据和环境数据，调整飞行方向建议，以适应不同的飞行情况和需求变化。此外，信息化升级还可以引入人工智能和机器学习算法，进一步提高飞行导航系统的智能化决策辅助功能。通过对大量的飞行数据和环境数据进行学习和分析，系统可以根据历史数据和趋势，预测未来的飞行情况和变化趋势，从而提供更准确、更智能的飞行方向建议。飞行员可以根据系统提供的智能化决策辅助功能，结合自己的经验和判断，做出更合理、更科学的飞行方向决策。总体来说，信息化升级对飞行方向决策的影响主要体现在提升导航系统的准确性和实时性、提高决策支持和可视化能力、优化航路规划和飞行效率、加强安全管理和风险控制，以及提供智能化决策辅助功能等方面。这有助于提高飞行方向决策的准确性和效率，进一步提升飞行的安全性和运行效能。同时，信息化升级也为飞行员提供了更全面、更直观的决策支持，使他们能够更好地应对复杂多变的飞行环境，做出更合理、更科学的飞行方向决策。

综上所述，信息化升级提升了导航系统的准确性和实时性，通过卫星导航系统、航空数据库和航空电子地图等技术手段，为飞行员提供了更精确、全面的导航信息。此外，通过先进的数据分析和模拟工具以及可视化显示航线和飞行参数，为飞行员提供更全面、直观的决策支持。信息化升级也优化了航路规划和飞行效率，自动选择最佳航线和高空飞行层次减少飞行时间和燃料消耗，实时燃料效率和经济计算帮助飞行员做出经济性更高的航线选择。最后，信息化升级加强了飞行导航系统的安全管理和风险控制，提供实时风险评估和决策支持，自动监测飞行环境和飞机状态，确保飞行的安全性。

第二章 航空电子传感器发展

第一节 航空传感器种类

航空机载传感器包括五大类，全球市场规模达 30 亿美元。根据航空产业网，航空传感器广泛应用于各类航空器的各大系统，机载传感器根据其所处的飞机系统和功能，可大体分为航行驾驶传感器、导航传感器、动力装置传感器、辅助传感器、任务传感器五大类。航空传感器按种类按原理分，包括压力传感器、温度传感器、加速度计、流量传感器、位移和位置传感器等 10 余类。航空产业网估算全球航空机载传感器规模约为 30 亿美元。

一、空速管

空速管是由 18 世纪法国工程师 H. 皮托发明的，所以又名“皮托管”，它是一种通过测量气流动压来得出空速的装置。飞机飞行时空气迎面吹过来流入皮托管中，在管子的后部就可以感受到流入空气的全部压力，我们把这个压力称之为“全压”。全压由空气因流动产生的“动压”以及空气本身的压力“静压”组成，即：全压 = 动压 + 静压。要知道空气的流动速度，光测得全压是不够的，我们得知道动压，但是动压很难直接测量，不过我们可以根据前面的那个公式，只需再测量到静压，用全压减去静压就可以得到动压了。因此，这里就需要另外一个传感器来帮忙了，那就是“静压孔”。

空速管也被称作皮托管、总压管、总静压管，是飞机上最重要的感应器之一。它能够测量周边气流的总压（也称全压）和静压，并将数据传送给飞机的大气数据计算机和飞行仪表装置。空速管这种航空装置主要是用来测量飞行速度和高度的，同时还兼具其他迎角和侧滑角等多种功能。飞机能够飞上天，依靠的是流过机翼表面的高速气流产生的压力差，气流与飞机相对速度的大小是升力的决定性因素之一。这个相对速度叫做“空速”，是飞行的重要参数，知道这个参数才能知道当前的升力、阻力等数据，进而可靠地操纵飞行器。空速管承担的就是

测量空速的重要工作。为了确保飞行安全,有的飞机还分别安装有应急总压管和应急静压孔,供空速管发生故障时使用,应急静压孔通常开在机身侧面的蒙皮上。空速管测量飞机速度的原理是这样的,当飞机向前飞行时,气流便冲进空速管,在管子末端的感应器会感受到气流的冲击力量,即动压。飞机飞得越快,动压就越大。如果将空气静止时的压力即静压和动压相比就可以知道冲进来的空气有多快,也就是飞机飞得有多快。

空速管结构:空速管由两个套在一起的细管组成,一个与外界连通,获得当前环境的气压;一个直直地迎着风,感知气流吹来造成的总压。两个细管间的压力差造成膜盒变形或液柱高差,就能具象地指示出当前的空速。

空速管为什么要加热?在飞行中,为了防止空速管的总压和静压孔被冰堵塞,需要对空速管进行电加热。一般飞机上的空速管都有电加温装置就是为了防止空速管结冰,空速管加热可以防止和消除积冰,管内装有电阻加热器并有排水孔。注意,只有在必要时,在地面不必要地打开空速管加热器可能会导致空速管过热,从而导致损坏/故障的程度。为了避免液态水进入全压和静压管,一方面在空速管内部设计了两处排水孔,另一方面把空速管内部的全压和静压引管抬高设计。这样液态水很难通过全压和静压管路进入到大气数据计算机、气压高度表、空速表和升降速度表等航空电子设备内部。

空速管误加热危害之一:造成工作人员的烫伤。空速管在加热时,温度可在30秒内上升到 100°C 到 200°C ,此时如有工作人员在加热的空速管周围进行工作,稍有不慎皮肤的裸露部分接触到了空速管,则会造成皮肤较为严重的烫伤。

空速管误加热危害之二:造成皮托管的堵塞。由于飞机在航后以及定检期间会安装上空速管套,若工作中造成空速管加热且未摘除空速管套,空速管会很快烧焦,待冷却后则可能造成:空速管烧焦残留物堵塞空速管进气口,导致飞机飞行中无法探测空速;空速管烧焦残留物堵塞空速管的排水口,导致飞机无法排水,积水则有可能造成空速有很大误差或者探测不到空速。

空速管误加热危害防范:严格按照空速管技术操作手册,在接通空速管加热电源之前,摘除空速管保护套或空速管适配器(皮托管夹具);皮托管加热时,远离皮托管加热区域。

空速管总压口和静压孔堵塞或遮挡。在地面上停放的飞机,如果没装空速管保护套,会有沙尘蚊虫进入,造成全压管管口部分堵塞或者全部堵塞。当飞机爬

升后,随着外界静压的减小,由于总压压力不变,维持当地的地面场压,空速传感器(差压传感器)压力大于外部压力,空速表有速度指示,随着飞行高度增加,指示空速将继续增大;当高度上升到某一高度后,空速指示将超过最大使用速度,此时飞机警告系统将会激发超速警告信号,给飞行员超速的错误提示。飞机起飞前需要检查空速管总压口和静压孔,确保不会被堵塞。

加热型空速管排水孔堵塞。在空速管内除了装有加热装置外,还设计了排水孔,该排水孔可以将进入管内的雨水、冷凝水排出管外,以及被空速管加热电阻装置融化积冰的冰水排出管外。当空速管排水孔被异物堵塞,管内会有水分残留,残留的水分会影响气流在管内的流动特性,进而影响到管底精密压力传感器到的压力。如果进水量过多,将在管路的U型部位积水,堵塞气流通道,精密压力传感器的压力误差将显著增大。

空速管加热器失效。为防止空速管积冰,空速管内都装有加热电阻和排水孔。飞机在高空飞行时,受“垂直温度递减率”影响,海拔每升高1000m,气温降低6℃,当飞机到达一定高度,随着外界大气温度降低,飞机进入覆冰区,如果此时空速管加温装置失效,湿冷气流会凝结在空速管管口,空速管总压管口和静压孔将会被覆冰堵塞。空速管积冰,导致进入空速管的气流减少,在管子末端的精密压力传感器会感受到气流的冲击力量减少,即产生误差,使得空速表失效或者失真。空速表是重要的驾驶领航仪表,空速表失效或者失真会使飞行员失去判断飞行状态的依据,飞机可能已经进入危险状态而飞行员却无法觉察。如果因此而给自动驾驶系统提供了错误信息,就会出现非指令性的飞行状态。

空速管检查维护工作。空速管是非常重要的飞行导航测量传感器,但由于探测所需,安装位置又必须暴露在机身外部,因此要特别重视对其保养维护。飞机飞行前都要特别注意对其外观检查,管口有无异物;飞机落地后及时将空速管保护套装上,防止蚊虫钻入;经常检查排水孔有无堵塞,及时放掉沉淀槽内的积水;定检时,要拆下空速管对其进行吹洗,防止尘土沉积,并通电测试防冰加温系统是否工作良好。

工作人员务必时刻牢记皮托管加热的相关知识,避免工作中出现的空速管部件损失以及人员受伤。

空速是重要的飞行参数之一,因而空速管是飞机上重要的传感器之一,一般飞机上都安装了2组以上的空速管来保证安全冗余。空速管上有排水孔并且拥有

加热功能防止空速管因积水或结冰而堵塞。平时飞机停场时，空速管都要戴上保护套来防止昆虫或杂物堵塞，飞行前须取下保护套。保护套上系有一根红色飘带用以醒目提示。如果空速管出现故障、结冰阻塞或者未摘下保护套，无法显示出正确的飞行速度读数，情况严重的会造成机毁人亡的重大事故。

2009年6月，法国航空的一架空客 A330-200 客机由巴西里约热内卢飞往法国巴黎，飞机在飞行途中由于空速管结冰导致空速显示异常，最终因飞行员误判误操作致使飞机坠毁在大西洋，机上 228 人无人幸免。

2018年7月，马来西亚航空一架空客 A330-300 客机从澳大利亚布里斯班飞往马来西亚吉隆坡，飞机起飞后飞行员发现空速显示异常，然后立即请求返航，最后飞机平安返回布里斯班机场。事后调查发现，飞机空速显示异常竟是因为空速管保护套未取下，飞机“戴套”飞行所致。

这里要说明的是，空速管测得的空速被称为“指示空速”或者叫“表速”，它是按海平面标准大气条件下空速与动压的关系换算得来的，并不是飞机的真实空速即“真空速”。但就是指示空速却是飞行员安全操作飞机的依据。

二、静压孔

静压孔顾名思义也就是测量“静压”的传感器，所谓静压你可以把它理解为飞机所处周围环境的空气“静止”时的压力，也就是飞机所处位置的大气压力。

静压孔一般位于机身前段的侧下方，这个位置不容易受到气流的干扰。空气从这里缓慢流入孔内，由压力传感器测出飞机所处位置的大气压力也就是“静压”。同样为了保证安全冗余度，飞机上设置了多组静压孔，即便其中一个失效，其余的静压孔还是能可靠提供大气压力数据的。

前面提到飞机的空速得有动压换算得出，而 $\text{动压} = \text{全压} - \text{静压}$ ，全压由空速管测出，静压则由静压孔测出，有了这两个数据之后，就能知道气流的动压，因而就能得出飞机飞行的空速了。

静压孔除了提供计算空速需要的静压参数之外，还有一个功能就是测量飞机飞行的高度。我们知道大气压力会随着海拔的升高而降低，并且存在定量关系。因此当静压孔在给空速表提供静压参数的同时，它所测得的大气压力换算成海拔后显示在高度表上，飞行员就能知道飞机飞行的高度了。

以前飞机的静压孔没有孔塞，清洁飞机时需要用胶布贴住来保护。1996年，

秘鲁航空一名机场维修人员请病假让另一位普通修理工代办，修理工在清洗一架波音 757 机身的时候为了防止污水流入用透明胶布把静压孔给封住了，清洗完毕忘记把胶布给揭掉。飞机起飞后由于静压系统堵住无法提供速度和高度，最终引起了一系列的问题，并且由于机长和塔台的错误引导导致飞机坠海，70 人丧生！秘鲁航空也因此不久后破产。

静压孔堵塞对仪表的影响：

空速表。空速表是一种以静压孔为基础的仪表，通过静压孔测量大气静压，进而计算飞机的空速。当静压孔被堵塞时，空速表将无法正确测量空速，导致飞行员误判飞行速度，从而可能导致飞机偏离预定航线或失速坠毁。

高度表。高度表同样依赖于静压孔，通过测量静压来计算飞机的高度。如果静压孔被堵塞，高度表将无法正确测量高度，导致飞行员误判飞行高度，也可能导致飞机偏离预定航线或高度不准确，从而造成事故。

空调系统。飞机上的空调系统同样需要通过静压孔来测量空气压力，从而调整舱内气压和温度。如果静压孔被堵塞，空调系统将无法正常工作，可能导致舱内气压和温度过高或过低，影响飞行员和乘客的正常操作和健康。

滑行速度指示器。飞机在地面上滑行时需要滑行速度指示器来控制速度，而滑行速度指示器同样需要静压孔来测量大气压力，从而计算滑行速度。当静压孔被堵塞时，滑行速度指示器将无法正常工作，导致飞行员无法正确掌控飞机的滑行速度和方向。

三、迎角传感器

迎传感器（Angle Attack Sensor），简称 AOA 传感器，在航空领域中扮演着至关重要的角色。它是一种用于测量飞机迎角的仪器，对于飞行员掌握飞机状态和飞行安全至关重要。迎角是指飞机翼弦与气流之间的夹角，若这一角度过大会造成机翼失去升力，从而导致飞机进入失速状态。因而迎角是重要的飞行参数之一，飞行员必须使飞机在一定的迎角范围内飞行。现代绝大多数民航飞机还有失速警告系统，当实际迎角接近临界迎角而使飞机有失速的危险时，失速警告系统即发出各种形式的告警信号，而迎角传感器则为失速警告系统提供数据支撑。迎角传感器一般安装在飞机侧面靠近机头的位置，可分为风标式和零压式两种。

风标式迎角传感器是由一个具有对称剖面的翼型叶片和角度变换器组成，它

具有构造简单、体积小的优点。但是风标易受微小扰动的影响，安装位置的影响也很大，在高速飞机上要找到气流比较平稳的部位是非常困难的。

压差归零式迎角传感器探头上有对称的两对进气槽迎着气流。当飞机迎角不变时，每对气槽感受到的气流气压是相等的。当飞机迎角发生变化时，使其中一对气槽感受到的气压增加，另一对的气压减小，这两个气压通过互不相同的气道作用到桨叶的正反叶面上，其合力产生一个与迎角变化反向相反的气动反馈力矩，使探头组件转动，直至两对气槽的对称平面与气流方向平行，两对气槽的压力重新相等为止。同时，探头组件的电刷相对于电位计有一个相应的角位移，从而输出与迎角变化成比例的电压信号。目前广泛运用于各种飞机，优点是误差小、工作稳定。

2018年10月，印尼狮航一架机龄还不满半年的波音737MAX8客机从雅加达飞往邦加槟港，飞机在起飞后约十分钟坠毁在机场旁的爪哇海之中，机上189人无人生还。尽管到目前为止事故的最终调查报告还未发布，但从目前所掌握的证据来看这次事故的原因很可能与迎角传感器维护不当有关。

迎角传感器广泛用于飞机、船舶、又或者一些高速运动的科研实验中。在飞机方面，它的主要应用是测量飞行器的速度、高度和密度等参数。在一些高速运动科研实验中，迎角传感器也能够对高速飞行器的参数进行测量，以达到保证实验效果的目的。

除此之外，迎角传感器还被广泛应用于飞机的飞行控制系统中。在飞行中通过迎角传感器获得的飞行参数，可以被飞行控制系统用于计算飞机的稳定曲线，从而引导飞机进行平稳的飞行。迎角传感器还可用于飞机自动驾驶系统中，通过测量飞机的迎角来帮助自动驾驶系统准确掌握飞机的位置和飞行方向。

迎角传感器作为飞机中的重要飞行仪器，对于飞行员掌握飞机的迎角状态和飞行安全起着决定性的作用。它提供了关键的迎角数据，让飞行员能够及时了解飞机的飞行状态，从而采取适当的操纵和调整，确保飞机保持安全和稳定。然而，迎角传感器也存在一些挑战和风险。由于迎角传感器通常位于飞机机头处，容易受到飞机表面结冰、污染或损坏等因素的影响。这可能导致迎角传感器数据的误差，进而对飞行员提供的迎角数据产生不准确的反馈，对飞行安全构成潜在威胁。因此，航空公司和飞机制造商都高度重视迎角传感器的检查、维护和故障排除。

四、侧滑角传感器

所谓的“侧滑”是指飞机对称面与相对气流方向不一致的飞行，侧滑角你可以把它理解为空速方向和飞机中轴线垂直方向的夹角。侧滑是由于存在侧风或者飞行中飞机对称面偏离飞行轨迹而造成的，从操纵上讲主要是蹬方向舵过大所造成，就好比高速行驶中的汽车驾驶员猛打方向盘会造成汽车侧滑一样。飞机侧滑角传感器一般安装在机头部位，其原理和风标式迎角传感器类似。

由风标、支撑轴、轴承和精密电位计（或霍尔传感器或 RVDT 传感器）组成。风向标通过轴承传动，与精密电位计连接在一起。当传感器安装上飞机上时，飞机周围的侧滑角方向气流带动传感器上风标转动，通过轴承传动，使精密电位计就输出一个与侧滑角气流角度成比例的电信号。电位计输出的电信号大小就是侧滑角和迎角的大小。安装在飞机上，对飞机进行侧滑角和攻角的测量，确定飞行器的飞行状态时，避免飞机失速和坠机风险。

安装在飞行器上的侧滑角和攻角传感器需要定期校准，用校准夹具测量传感器偏差。侧滑角和攻角传感器校准夹具提供安装在空速管上与风标对齐的目测刻度尺，以便校准侧滑角和攻角传感器的风标叶片。迎角传感器（AOA， α ，也叫攻角，攻角传感器）和侧滑角传感器（AOS， β ）。迎角传感器是测量飞机迎角的装置，又称攻角传感器。迎角大小与飞机的升力和阻力密切相关。迎角信号可直接指示，供驾驶员观察。

五、大气总温探测器

大气总温传感器通常安装在翼尖、垂尾顶部、机头侧面或其他气流不易受到扰动的地方。总温传感器其实就是一个用来测量温度的装置，但是它测得的数据并非飞机周围环境大气的真实温度，而是“总温”。

总温是空气以绝热过程完全静止时，它的动能将转化为内能时反映出来的温度。飞机飞行时，空气相对飞机运动，但空气遇到总温传感器探头时，会因为受到阻滞而相对流速降低到零，在这个过程中空气受到压缩，动能转换为热能并且局部温度会升高，这个温度称为总温。因此总温传感器测得的温度会比飞机周围大气环境的温度要高。例如，飞机在 10000 米高空以 0.8 马赫速度巡航时，外界大气约为 -60°C ，而总温传感器的测得的读数就约为 -30°C 。

测得总温后,计算机可以计算出外界大气的真实温度,也就是“静温”。除此之外,计算机还可以根据总温以及指示空速计算出飞机的真实空速。

大气总温传感器测量飞行器大气总温 TAT 的装置,又称阻滞温度传感器。大气总温信号可供大气数据计算机作解算大气静温 SAT、真实空速 TAS 等参数用。大气总温信号还可直接用于指示,它反映飞机某些部位上构件可能达到的温度。大气总温传感器通常安装在翼尖、垂尾顶部、机头侧面或其他气流不易受到扰动的地方。

大气总温是从温度传感器上得到的温度读数。然而,由于飞机的速度,探测器处的空气被压缩,因此比实际的“静止”空气更热。大气数据计算机计算出这个误差,从 TAT 中减去它,并生成实际的外部大气温度 OAT (与 SAT 相同)。

大气静温是指静止大气中的温度。航空器在飞行中由于气流迎面奔向机体,机身外部的任何测温探头只能测得大气总温,无法测得大气静温。大气总温中含有气流到达停滞点上速度骤降为 0 时其动能转化为热能而形成的温升。航空器上的大气静温表必须通过计算,减去这种以速度为函数的温升后才能得出大气静温值。近代飞机上通常由大气数据计算机进行计算后输出大气静温的数据。

现代飞机需要测量大气温度,以便输入大气数据计算机 ADC 和其他系统。大气静态温度,或 SAT,是飞机飞行时未受干扰大气的温度。由于飞机速度的动能,在更高的速度下,当动能在温度传感器处转化为热量时,测得的温度高于大气静温 SAT。大气总温度(TAT)是通过 100% 的流动动能转换可达到的最高大气温度。对于较低空速(高达 0.4 马赫)的飞行条件,外部大气温度传感器可测量温度,因为此时 SAT 和 TAT 之间的差异很小。应对飞机系统进行误差分析,以确定外部大气温度 OAT 是否适合飞机飞行包线。如果需要更高的精度或高于 0.4 马赫的飞行速度,请考虑使用大气总温传感器。

外部大气温度传感器 OAT 是为直升机和其他低至中等空速飞行器(如无人机 UAV 和通用航空飞机)开发的,在这些飞行器中,不需要高速性能和全天候能力的大气总温传感器 TAT 探头。外部大气温度传感器 OAT 为高性能大气总温传感器 TAT 探头和低精度浸没温度传感器探头提供了一个经济实惠的替代品,而这些探头以前是低至中等空速飞行器可行的选择。外部大气温度 OAT 和大气静温 SAT 在一般情况下,都认为是等同的。

六、防结冰探测器

飞机结冰会导致飞机操稳品质下降,影响飞行安全。目前绝大多数民航客机出厂时都有配备防结冰传感器。防结冰传感器一般位于机头部位,垂直于机头蒙皮安装。防结冰探测器通以交流电,并以一定频率振动。当飞机进入结冰条件,探头开始结冰时,探头的震动频率会随结冰质量的增加而下降,当下降到设定值时会发出结冰警告,并自动接通机翼和发动机整流罩的防除冰系统,但自动防冰一般仅在飞机离地后才能工作。

飞机在结冰条件下飞行时,为保证飞行安全,驾驶员必须在飞机临界表面形成危险量的结冰前使飞机飞离结冰区,或者及时启动结冰防护系统,确保临界表面不会积聚危险量的冰。因此获得正确的结冰探测信号,指示机组人员开启防除冰系统非常关键。结冰探测器用于探测飞机结冰,当飞机进入结冰气象条件,或者飞机关键部位结冰厚度达到一定程度时,发出报警信号,机组人员据此开启飞机防除冰系统,降低飞机在结冰条件下失事的可能性。结冰探测器研究至今,结冰探测原理已发展到十几种,包括视觉观察、障碍式、压差式、潜热式、微波式、超声脉冲回波、光学折射、红外线、热流等,这些原理有些已经应用于各种结冰探测的系统中,有些还处于研究阶段。

(一) 结冰探测原理

1. 视觉提示

在白天情况下,一种最简单的探测结冰条件的方法是飞行员关注在风挡玻璃的非防护区域如风挡雨刷上的冰积聚,飞行机组可以从视觉观察推断出结冰速率信息。对于夜间的结冰探测,通常采取照明方式提示冰积聚。通常情况下照明灯光会透过风挡玻璃,但不会引起飞行员的注意;当出现结冰时,照明灯光会分散,指示冰积聚。

2. 潜热

利用潜热原理的结冰探测器有两种方式来指示出现结冰。第一种是使用通过电阻元件的周期电流脉冲来加热探针。如果探针上有冰积聚,那么在温度上升时将会暂停在 0°C (32°F),电子设备会感应并指示这种情况。第二种方式是通过测量维持探针在预定温度所需的功率来提供结冰条件指示。由水滴的撞击会引起功率增加,从而表明飞行环境中存在水;在空气总温(TAT)低于 10°C (50°F)

时,可能会遇到结冰条件。

3. 振动

利用振动原理的探测器一般用于探测冰积聚,探测表面结冰时对探测器有三种影响:(1)结冰质量增加导致共振频率降低;(2)结冰硬度增加使得共振频率增加;(3)阻尼增加使得振幅减小。当前广泛使用的结冰探测器普遍采用轴向振动的圆柱探针作为传感器,结冰探测器的探针通常垂直于气流,当探针表面出现冰层时,随着冰积聚质量的增加,其轴向固有频率会产生偏移,使谐振频率也产生偏移,从而输出结冰信号。这种结冰探测器采用侵入式安装,即感应元件位于表面之外。运用这种原理的结冰探测器能够探测和测量厚度从 0.13mm 到 12.7mm 的结冰。目前这种结冰探测器是在运输类飞机上运用最广泛的探测器,具有强度高、可靠性好、性能稳定等特点。MD-80、B-747、B-767 和 A380 等飞机安装的均为这种原理的结冰探测器。

4. 电磁束干扰

电磁束干扰原理是利用位于探测器的软管一侧的电磁束源和软管另一侧的传感器来探测结冰。当在软管上出现结冰时,电磁信号被中断,电子单元感应到传感器信号的中断从而指示结冰,可利用多种传感器的组合来探测结冰,如可见光、红外线、激光和核束等。目前已经研制了一种基于电磁束干扰原理的针对直升机的先进结冰严重程度指示系统,此系统监测旋翼转速,振动等级,发动机扭矩,燃油量,静压和动压,空气温度和液态水含量。机组手动输入乘客数量,货物质量和飞机结构参数,机载计算机处理数据并提供结冰程度和飞机性能异常的指示。

5. 光学折射

光学折射探测结冰的原理是感应从积聚的冰上折射出的光。探测器侵入气流之中并且密封,利用光束来监测探针上的任何物质的不透明度和光学折射率。传感器探针是光学分光计和光学开关的集成,探针非透明度的变化表现为霜冰,折射率的变化表现为明冰。传感器所激发的光的波长对于人眼是不可见的,因此不能当作任何的导航灯。利用光学折射原理的结冰探测器可安装在任何类型的航空器上,只要其具有足够的空速来防止水在光学部件上积聚。

(二) 结冰探测器安装

飞机结冰探测除了采用合适的结冰探测器外,还应将结冰探测器安装在合适的位置,以便遇到结冰条件时,结冰探测器的感应元件要能够及时有效地探测结

冰。为确定结冰探测器的安装位置,可通过建立飞机的三维模型,运用计算流体力学进行外部流场分析,得出飞机周围的流动形式,初步选定结冰探测器的安装位置,并对候选的传感器位置在不同的攻角、空速、侧滑角和结冰飞行批准的飞机构型下进行流场和附面层厚度分析。理论分析之后,需要做试验进行验证。结冰探测器的验证包括测定的自然结冰条件下的飞行试验和试验室试验。自然结冰飞行试验应当在规定的结冰环境和要求的飞机构型及飞机状态下表明结冰探测器执行预定的功能,如飞行试验期间没有找到符合适航规定的结冰条件进行试验,可以使用试验室试验(如冰风洞试验或结冰喷水机试验)来表明结冰探测器能够及时有效探测结冰。

目前,结冰探测器在理论研究方面发展迅速,各种新型结冰探测方法的研究和开发都具备了一定的理论基础。在选用结冰探测器时,飞机应根据具体外形、气动特性、飞行环境等特点采用合适的结冰探测器,安装在合适的探测位置。运输类飞机可采用目前运输类飞机广泛使用的振动原理的结冰探测器,旋翼类飞机可采用电磁束干扰原理的结冰探测器。新型结冰探测器也可应用于其他相关行业,具有很好的研发前景和应用价值。

第二节 航空传感器故障检测诊断

随着科技的不断发展,飞行器的使用范围也越来越广泛。然而,飞行器可能会出现各种各样的故障,从而导致飞行器不能顺利地完成任务。其中,飞行器传感器故障是比较常见的问题之一。

一、飞行器传感器故障的类型

飞行器传感器故障通常分为以下几类:

传感器失效或偏差过大:这种情况通常是传感器本身出现了故障,或者是传感器和其他系统之间存在差异。

传感器通讯失效:这种情况通常是由于传感器与数据采集系统之间的通讯被中断导致的。

传感器信号过载或欠载:这种情况通常是由于传感器信号过强或过弱导致的。

传感器信号干扰:这种情况通常是由于其他设备或系统对传感器信号的干扰

造成的。

二、飞行器传感器故障检测方法

针对以上几种传感器故障类型，可以采用以下方法进行检测：

检查传感器本身是否有损坏。

检查传感器与其他系统之间的差异是否正常。

检查传感器与数据采集系统之间的通讯是否正常。

检查传感器信号是否过载或欠载。

检查是否存在其他设备或系统对传感器信号的干扰。

三、飞行器传感器故障诊断方法

如果检测到飞行器传感器存在故障，可以考虑采用以下诊断方法：

面向对象的故障诊断方法：将传感器视为一个对象，通过检查与该对象相关的特征以及该特征是否与另一个特征存在差异来诊断故障。

神经网络故障诊断方法：该方法使用神经网络模型对传感器信号进行分析，并将已知故障模式与该模型进行匹配来诊断故障。

模型预测故障诊断方法：该方法通过分析传感器与其他系统之间交互的模型来预测故障。

统计分析故障诊断方法：该方法通过分析数据的统计特征来诊断故障。

飞行器传感器故障是飞行器常见的问题之一，对于故障的检测和诊断可以采用多种方法来完成。但是，准确的故障诊断需要结合专业知识和实际应用经验，因此，飞行器传感器故障诊断需要依靠专业人员的技术和经验来完成，才能确保飞行器系统的安全和稳定。

第三节 航空传感器竞争格局

据航空产业网统计，全球航空传感器企业约 150 家。从地理分布看，美国的航空传感器企业数量最多，全球占比达到七成以上；其次是英国、法国、德国等国家，中国在航空传感器市场方面还处于初级发展阶段，专用航空传感器制造商较少，产品份额在全球市场占比较小。

一、传感器行业世界竞争格局

全球传感器市场规模不断增长，北美地区占据主要地位。2022 年全球传感器市场规模达到 2048.0 亿美元，预计 2032 年将达到 5086.4 亿美元。中国市场方面，2022 年中国传感器市场规模为 3096.9 亿元人民币，2019-2022 年均复合增长率为 12.26%。

（一）传感器行业发展现状

销售情况：中国传感器市场中，压力传感器是单一市场规模最大的细分领域，销售额达到 588.6 亿元；图像传感器排名第二，销售额为 413.4 亿元；位置传感器排名第三，销售额为 321.1 亿元。此外，流量、生物、运动、距离、温湿度、射频、气体等传感器也在市场中排名靠前。

产量：虽然中国智能传感器的国产化率已经达到了 75% 以上，但从全球智能传感器的产量结构来看，中国产出占比仅 10%，其余产量主要集中在美国、德国和日本。

（二）国家及地方政策分析

近年来，国家相继推出一系列产业政策，有力推动了传感器行业的发展。例如，广州市发布了《广州市推动物联网产业高质量发展行动计划（2024—2028 年）》和《关于支持广州市智能传感器产业高质量发展的若干措施》，旨在推动物联网和智能传感器产业的发展。广东省和广州市还联合发布了《广州（增城）智能传感器产业园发展规划（2024—2035）》，计划到 2030 年实现智能传感器全产业链条集聚，累计集聚重点企业 100 家，规划智能传感器产业规模超 600 亿元；到 2035 年，形成千亿级智能传感器产业集群。

此外，随着新材料、新工艺、新技术的不断涌现和应用，传感器的性能将得到进一步提升，应用领域也将不断拓展和创新。国家“双碳”战略的推进以及对

环境和健康的日益重视也带动了气体传感器等细分领域的增长。

（三）传感器行业竞争分析

1. 优势：

传感器行业的优势主要体现在其作为物联网、人工智能等新一代信息技术产业的核心元器件，具有广泛的应用领域和巨大的市场潜力。随着技术的不断进步，传感器的精度、稳定性、可靠性等性能得到显著提升，进一步增强了其市场竞争力。

2. 对手及相关企业

全球传感器市场竞争激烈，主要竞争对手包括博世（Bosch）、村田制作所（Murata）、意法半导体（STMicroelectronics）等国际知名企业。这些企业在传感器领域拥有深厚的技术积累和市场经验，占据了较大的市场份额。

在中国市场，奥迪威等国内企业也展现出强大的竞争力。奥迪威凭借其在超声波传感和压电陶瓷技术方面的核心优势，在智能家居、智能水表、汽车雷达等领域取得了显著成果。同时，国内传感器行业重点企业如华工科技、歌尔股份、汉威科技等也在不断发展壮大，积极参与国际竞争。

3. 重点企业情况分析：

博世：作为全球最大的传感器制造商之一，博世在汽车 MEMS 传感器领域占据重要市场份额，并凭借在汽车市场的深厚积累和在工业物联网领域的开拓，有望继续主导汽车传感器市场。

村田制作所：在电子元件和传感器市场中占据重要地位，尤其是陶瓷电容器、惯性传感器和加速度计领域。村田传感器凭借其小型化和高精度广泛应用于智能手机、可穿戴设备等。

意法半导体：主要在工业自动化和物联网（IoT）应用中占据领先地位，其 MEMS 传感器在运动检测和环境监测等方面具有广泛的应用。同时，意法半导体还结合传感器和微控制器，打造集成度更高的解决方案，广泛应用于 IoT 设备、工业监控和医疗设备领域。

奥迪威：在中国市场中的份额不断增长，特别是其超声波传感器在智能家居、智能水表、汽车雷达等领域的应用显著。奥迪威的技术核心在于超声波传感和压电陶瓷技术，产品技术性价比较高，吸引了对价格敏感的客户群。

（四）传感器行业发展趋势预测

高精度与微型化：随着制造技术的不断进步，传感器将朝着更高精度、更小

体积的方向发展，以满足更广泛的应用需求。

智能化与网络化：智能传感器通过集成人工智能算法和数据处理技术，能够自主完成数据采集、处理、分析和决策等任务。同时，借助无线网络技术，智能传感器可以实现数据的远程传输和实时监控。

新材料与新工艺：纳米技术、生物技术、光电技术等新兴技术的应用将为传感器行业带来新的发展机遇。

新兴领域应用不断拓展：传感器在医疗、农业、环境监测、自动驾驶汽车等新兴领域的应用也在不断扩大。

（五）传感器行业前景

市场需求和趋势：随着物联网、智能制造等新兴技术的快速发展，传感器市场需求持续增长。特别是在智能家居、工业自动化、汽车电子等领域，传感器已成为不可或缺的核心元器件。未来，随着智慧城市和物联网技术的推广，传感器市场需求将进一步扩大。

市场上的竞争对手和市场份额：全球传感器市场竞争格局相对稳定，但也在不断变化。国际知名企业如博世、村田制作所、意法半导体等凭借深厚的技术积累和市场经验占据较大市场份额。同时，国内企业如奥迪威、华工科技、歌尔股份等也在不断发展壮大，积极参与国际竞争。未来，随着技术的不断进步和应用领域的不断拓展，市场竞争将更加激烈。

（六）传感器行业目前存在问题及痛点分析

技术差距：国内传感器生产企业起步较晚，技术水平与世界先进水平存在一定差距。这导致国内高端传感器市场主要依赖于进口产品。

产业化问题：传感器的产业化进程相对缓慢，缺乏龙头企业带动整个行业的发展。同时，国内传感器企业数量众多但过于分散，难以形成规模效应。

基础研究薄弱：新原理、新材料的开发几乎停滞不前，企业对传感器的理论研究缺乏长期投入。这导致国内传感器产品在创新性和竞争力方面相对较弱。

人才短缺：高端人才匮乏是制约国内传感器行业发展的关键因素之一。缺乏具有国际视野和创新能力的高端人才，导致在研发和创新方面始终滞后于国际先进水平。

二、中国航空传感器行业市场现状

（一）市场现状分析

1. 市场规模及增长速度

近年来，中国航空传感器市场呈现出持续扩大的趋势，这主要得益于航空工业的迅猛发展和技术的不断进步。据最新行业数据显示，2023 年中国航空传感器市场规模已达到数千亿元的规模，且预计未来几年内将以稳定的年均增长率持续扩大。在市场规模方面，航空传感器的需求与日俱增，特别是在商用航空、军用航空以及新兴的无人机领域。随着国内航空器数量的不断攀升，航空传感器作为确保飞行安全和提高飞行效率的关键部件，其重要性日益凸显。因此，各大航空公司及飞机制造商对高品质航空传感器的需求也随之增加，推动了市场规模的持续扩大。在增长速度方面，受益于国内航空技术的不断提升和创新能力的增强，航空传感器市场的增长动力十足。尤其是随着新一代航空器的研发和应用，对传感器性能的要求越来越高，这促使传感器技术不断更新换代，以适应市场需求。

2. 市场需求分析

在深入剖析中国航空传感器市场的需求时，我们不难发现其增长动力主要来源于商用航空、军用航空以及新兴领域等多个方面。就商用航空而言，国内市场的持续扩张与消费升级趋势共同推动了航空传感器需求的日益增长。随着航空公司对飞行安全、性能优化及乘客舒适度等标准的不断提升，航空传感器在商用领域的应用愈发广泛。这一趋势不仅体现在传感器数量的增加，更体现在传感器技术水平和功能的全面升级。军用航空领域对航空传感器的需求同样表现出强劲的增长势头。国防建设的加强以及军事技术的不断进步，对军用航空器的传感器提出了更高的性能、精度和可靠性要求。这促使军用航空传感器市场具备巨大的发展潜力，成为行业发展的重要推动力。与此同时，新兴领域的崛起也为航空传感器市场注入了新的活力。无人机、卫星通信等领域的快速发展，对传感器的轻量化、小型化、智能化等特性提出了更为迫切的需求。这些新兴领域不仅拓展了航空传感器的应用领域，更推动了传感器技术的不断创新与进步。中国航空传感器市场的需求呈现出多元化、高标准的发展态势。无论是商用航空的市场扩张、军用航空的技术升级，还是新兴领域的崛起，都为航空传感器行业提供了广阔的发展空间与机遇。

3. 市场主要参与者

在中国航空传感器市场，国内外企业均扮演着重要角色，共同构建了激烈的市场竞争格局。国内航空传感器企业在近年来展现出了显著的技术创新和产品研发能力。这些企业通过不断的技术突破，成功打破了国外技术的垄断，逐渐在国内外市场上占据了一席之地。它们的优势在于对本土市场的深入了解，能够快速响应市场需求，并提供定制化的解决方案。同时，国内企业在成本控制方面也表现出色，使得其产品具有较高的性价比。与此同时，国外航空传感器企业凭借其先进的技术、知名的品牌以及成熟的市场渠道，长期在中国市场中占据领先地位。这些企业拥有丰富的行业经验和深厚的技术积累，能够提供高品质的产品和优质的服务。然而，随着国内企业的快速崛起，国外企业也感受到了前所未有的竞争压力。当前，中国航空传感器市场的竞争格局正处于动态变化之中。国内企业通过持续的技术创新和市场拓展，正逐渐缩小与国外企业的差距。而国外企业为了保持其市场地位，也在不断加大在中国的投资和研发力度。可以预见，在未来几年内，中国航空传感器市场的竞争将更加激烈，国内外企业之间的较量将更加精彩。这种竞争态势不仅有助于推动整个行业的技术进步，也将为消费者带来更多优质的选择。

（二）竞争格局分析

1. 市场竞争态势

技术创新驱动方面，随着航空技术的不断进步，对传感器的精度、可靠性等性能要求也越来越高。为满足市场需求，中国航空传感器企业纷纷加大研发投入，推动产品技术升级。通过引进先进技术、优化设计方案、提升制造工艺等措施，不断提高传感器的性能和质量。这些技术创新不仅增强了企业的核心竞争力，也为航空领域的发展提供了有力支持。多元化竞争格局方面，中国航空传感器市场上既有国际知名品牌的激烈竞争，也有国内新兴企业的快速崛起。这些企业通过差异化竞争策略，在特定领域或细分市场占据一定份额。国际品牌凭借其技术成熟度和品牌影响力，在市场上占据重要地位；而国内新兴企业则凭借灵活的市场策略和快速响应能力，不断拓展市场份额。这种多元化的竞争格局有助于推动行业的技术进步和产品创新。产业链整合加速方面，随着市场竞争的加剧，中国航空传感器企业意识到单纯依靠自身力量难以应对市场挑战。因此，越来越多的企业开始寻求上下游合作，实现资源共享、优势互补。通过与原材料供应商、零部

件制造商、系统集成商等建立紧密的合作关系，共同应对市场变化和技术挑战。这种产业链整合不仅有助于降低企业运营成本，还能提高整体竞争力和市场响应速度。

2. 主要企业及产品分析

在航空传感器领域，几家具有显著影响力的企业凭借其技术实力与产品优势，稳固了市场领先地位。这些企业的发展历程彰显了持续的创新精神和深厚的行业积淀，成为了行业发展的风向标。率为科技（重庆）有限责任公司便是其中的佼佼者。作为北京航空航天大学的技术成果转化企业，率为科技继承了北航在光纤陀螺技术方面的领先优势。公司的核心产品——光纤陀螺仪，是惯性导航系统的关键部件，其高精度与高稳定性在航空领域具有不可替代的作用。率为科技的光纤陀螺仪不仅在国内市场占有一席之地，更在国际市场上展现出强劲的竞争力，为公司创造了百亿元的产值。另一家值得关注的企业是星硕传感。该企业专注于高端气体传感器的研发与应用，其产品在工商业及家庭安全测控领域具有广泛应用。星硕传感的气体传感器以其高精度、高响应速度和高稳定性而著称，能够有效监测和预警各种潜在的安全风险。在航空领域，气体传感器的性能直接关系到飞行安全，星硕传感的产品因此受到了业界的广泛认可。

这些领先企业的产品不仅具备高精度、高可靠性等基本特点，更重要的是它们能够满足航空领域对传感器的特殊需求。例如，在极端环境下的稳定性、长时间工作的耐久性等方面，这些产品都展现出了显著的优势。同时，企业在新产品的研发和技术专利的申请方面也取得了丰硕的成果，为保持市场竞争优势奠定了坚实基础

3. 市场份额分布及变化趋势

在深入探讨中国航空传感器市场时，市场份额的分布情况及其变化趋势成为了剖析市场竞争格局的关键切入点。当前，该市场呈现出国内外企业共同参与的多元化竞争格局。国内企业在政策的扶持及自身技术积累的推动下，逐渐在市场中占据一席之地，尤其是在新一代战机、运输机和无人机的配套传感器领域，实现了显著的突破与进展。而国外企业则凭借其深厚的技术积淀和品牌优势，在高端市场仍保持着相当的竞争力。

观察各细分市场的份额分布，可以发现，随着航空航天技术的不断进步，高可靠性传感器及传感器网络系统的需求日益凸显。这促使了相关细分市场的快速

发展，并吸引了众多企业的积极布局。特别是在低空经济产业的崛起背景下，低空飞行器配套传感器市场成为了新的增长点，其市场份额呈现出稳步上升的趋势。

市场份额的变化趋势方面，国内企业在不断的技术创新和市场拓展中，逐渐扩大了其市场份额。而国外企业虽然面临着激烈的竞争压力，但凭借其强大的研发实力和市场运作能力，依然市场中保持着重要地位。同时，新进入者凭借其灵活的市场策略和创新能力，也在市场中展现出不俗的表现，进一步加剧了市场竞争的激烈程度。

影响市场份额变化的因素众多，其中技术创新无疑是关键因素之一。随着传感器技术的不断进步，谁能率先掌握核心技术并将其转化为市场竞争力，谁就能在市场份额的争夺中占据先机。市场需求的变化、政策法规的调整以及国际贸易环境的波动等，也对市场份额的分布和变化产生了深远的影响。

（三）技术发展与创新

1. 技术现状及进展

中国航空传感器行业经过多年的发展，已经形成了较为完善的技术体系，并呈现出多样化的传感器类型。目前，行业内已广泛涵盖了温度传感器、压力传感器、加速度传感器、位移传感器等多种类型。这些传感器在航空器的各个系统中发挥着至关重要的作用，如监测飞行状态、控制发动机运行、保障机载设备安全等。每一种传感器都针对特定的应用场景进行了优化设计，以确保其能够在复杂的航空环境中稳定、准确地工作。

近年来，国内企业在航空传感器领域的技术创新能力得到了显著提升。通过加大研发投入、引进先进技术、加强产学研合作等多种措施，企业成功推出了一系列具有自主知识产权的高性能传感器产品。这些产品在精度、可靠性、耐环境性等方面均达到了国际先进水平，为中国航空工业的快速发展提供了有力的技术支撑。特别是在一些关键技术和核心产品上，国内企业已经具备了与国际知名企业竞争的實力。

与此同时，制造工艺的优化也为国内航空传感器行业的发展带来了新的机遇。随着新材料、新工艺的不断涌现，以及智能制造技术的广泛应用，航空传感器的制造效率和产品质量得到了大幅提升。这不仅降低了生产成本，提高了市场竞争力，还为航空器的安全飞行和性能优化提供了更为可靠的保障。可以预见，在未来一段时间内，中国航空传感器行业将继续保持快速发展的势头，为全球航空工

业的进步贡献更多的中国力量。

行业还在不断探索新的技术方向和应用领域。例如，近期某公司在激光传感器方向进行了重要投资，这标志着激光传感器技术在航空领域的应用将进一步得到拓展。激光传感器以其高精度、高速度和高分辨率的特点，在航空测量、导航、避障等方面具有广阔的应用前景。

2. 技术创新动态

在航空传感器领域，技术创新的步伐正日益加快，呈现出新型传感器技术不断涌现、跨界融合创新日趋活跃以及研发投入持续加大的态势。

新型传感器技术的涌现，为航空传感器行业的发展注入了新的活力。以光纤传感器为例，自 20 世纪 70 年代以来，随着光纤通信技术的革命性发展，光纤传感测量技术也迅速崛起。如今，它已经在交通安全、能源环保、航天航空等多个领域得到广泛应用，显示出其强大的生命力和广阔的市场前景。光纤传感器以其高灵敏度、低功耗和强抗干扰能力等特点，在航空传感器领域占据了重要地位，为行业的技术进步和性能提升做出了显著贡献。

与此同时，跨界融合创新正成为推动航空传感器技术发展的新引擎。随着物联网、人工智能等前沿技术的快速发展，航空传感器技术与其他领域的交叉融合日益频繁。这种跨界创新不仅拓展了航空传感器的应用范围，还为其在更多复杂和极端环境下的应用提供了可能。通过与其他技术的深度融合，航空传感器在智能化、网络化等方面取得了显著进展，为行业的转型升级提供了有力支撑。面对激烈的市场竞争和技术变革的压力，企业纷纷加大研发投入，通过引进高端人才、加强产学研合作等方式，推动技术创新和产业升级。这种投入的增加不仅体现在研发资金的投入上，更体现在研发团队的壮大和研发能力的提升上。通过持续不断的创新努力，国内企业在航空传感器领域正逐步缩小与国际先进水平的差距，展现出强大的发展潜力和后劲。

3. 技术发展趋势及影响

在技术革新的推动下，航空传感器领域正迎来前所未有的发展机遇。其技术发展趋势不仅关乎传感器本身的性能提升，更对整个航空产业的未来走向产生深远影响。

传感器的小型化与低功耗趋势正日益凸显。随着材料科学和微电子技术的不断进步，航空传感器在保持甚至提高性能的同时，其体积和重量正在不断减小，

功耗也在不断降低。这种发展趋势不仅有助于减轻航空器的负载，提高其机动性和燃油经济性，还能为航空器设计提供更多的灵活性和空间。

高精度与高可靠性已成为航空传感器发展的核心要求。航空器的安全飞行和性能优化离不开传感器的精确测量和稳定工作。随着传感器制造工艺和校准技术的不断完善，航空传感器的测量精度和稳定性得到了显著提升，为航空器的安全运行提供了有力保障。

智能化和网络化是航空传感器技术发展的重要方向。借助先进的算法和强大的数据处理能力，航空传感器能够实时监测航空器的各种状态参数，并进行智能分析和决策。同时，通过网络化技术，传感器数据可以实时传输到地面控制中心或其他航空器上，实现远程监控和协同作业，极大提高了航空器的运营效率和安全性。

产业链协同发展对航空传感器行业至关重要。在全球经济一体化的大背景下，航空传感器行业的发展已不再是孤立的行为。通过加强上下游企业间的合作与交流，共同推动技术创新和产业升级，有助于形成更加完善和有竞争力的产业链体系。这种协同发展模式不仅能够提升整个行业的创新能力和市场响应速度，还能有效降低生产成本，提高产品质量和服务水平。

（三）行业政策环境分析

1. 国家相关政策法规

在推动航空传感器产业的发展方面，国家已经出台了一系列具有针对性的政策法规。这些政策不仅覆盖了财政补贴、税收优惠等经济激励措施，还包含了研发资助等技术支持手段，旨在构建一个全方位、多层次的产业扶持体系。通过这些政策的实施，国家鼓励相关企业加大在航空传感器领域的研发投入，提升自主创新能力，从而推动整个产业的持续健康发展。

在军民融合发展战略的指引下，航空传感器作为军民两用技术的关键领域，其重要性日益凸显。国家通过制定和实施一系列军民融合相关政策，为航空传感器产业的进一步发展注入了新的动力。这些政策不仅促进了军民技术之间的双向转移与共享，还为相关企业提供了更广阔的市场空间和更多的发展机遇。

同时，知识产权保护也是国家政策法规关注的重点之一。为了保障航空传感器企业的技术创新成果和产品研发投入能够得到合理的回报，国家加大了对知识产权的保护力度。通过完善相关法律法规和执法机制，国家为航空传感器产业的

技术创新和产品研发提供了坚实的法律保障，有效维护了市场的公平竞争秩序，促进了行业的长远发展。

2. 行业标准与监管要求

在航空传感器领域，行业标准的对接、产品质量与安全标准的执行，以及环保可持续发展标准的实施，共同构成了该行业发展的基石。

我国航空传感器行业正致力于与国际标准的全面对接。通过引进国际先进标准，结合国内实际情况进行消化吸收，再创新提升，形成符合我国航空工业特点的标准体系。这不仅有助于提升我国航空传感器的产品质量和技术水平，更是增强国际竞争力、融入全球航空产业链的关键步骤。

产品质量与安全是航空传感器行业的生命线。监管部门对此提出了极为严格的要求，从设计研发到生产制造，再到测试验证，每一环节都必须确保产品的安全性和可靠性。特别是在航空领域，传感器的作用至关重要，其性能直接关系到飞行安全，因此绝不容许有任何疏漏。

随着全球环保意识的日益增强，航空传感器行业也面临着新的挑战和机遇。行业对传感器的环保性能和可持续发展能力提出了更高的要求，推动企业不断创新，研发出更加绿色、低碳的产品。这不仅是响应全球环保号召的举措，更是企业实现长远发展的必由之路。

3. 政策环境对行业的影响

在政策环境的积极影响下，航空传感器行业迎来了重要的发展机遇。国家相关政策的支持不仅为行业的技术创新和产业升级提供了坚实后盾，还推动了整个行业向更加高端化、智能化的方向迈进。这种支持体现在多个方面，例如对研发投入的税收优惠、对创新项目的资金支持等，这些都极大地激发了企业的创新活力，促进了新技术的研发和应用。

同时，政策环境的优化也为航空传感器行业拓展市场应用领域创造了更多可能性。随着无人机、民用航空等领域的迅猛发展，传感器在这些领域的应用需求也日益增长。政策的引导和市场的拉动共同作用，使得航空传感器行业得以快速渗透到这些新兴市场中，从而实现了行业自身的持续扩张和发展。

值得注意的是，随着市场竞争的不断加剧和政策环境的动态变化，航空传感器行业也面临着整合与并购的加速趋势。在这一过程中，优质资源将得到更加合理地配置，市场格局也将进一步优化。这种整合与并购不仅有助于提升整个行业

的竞争力和抗风险能力，还将推动行业走向更加健康、可持续的发展道路。综上所述，政策环境在促进航空传感器行业技术创新、市场拓展以及行业整合等方面都发挥了至关重要的作用。

（三）市场机遇与挑战

1. 市场发展机遇

在航空传感器领域，当前的市场环境正孕育着前所未有的发展机遇。技术创新成为推动产业升级的核心动力，新型传感器技术如光纤传感器、微纳传感器以及智能传感器等不断涌现，为航空传感器行业带来技术革新与性能提升的契机。这些技术以其高灵敏度、低功耗及强抗干扰能力，显著增强了航空器的安全性能与整体表现。

与此同时，市场需求的持续增长也为航空传感器行业提供了广阔的发展空间。全球航空业的迅猛进步，特别是民用航空和无人机市场的快速拓展，导致对航空传感器的需求不断攀升。随着航空器对传感器性能要求的日益提高，高端航空传感器市场的需求更显旺盛，这为行业内的企业提供了更多的市场机会。中国政府对航空工业发展的高度重视，通过实施一系列扶持政策，并增加对航空传感器研发与生产的资金投入，为行业创造了优越的发展环境和必要的资金保障。这种政策与资金的双重支持，无疑将推动航空传感器行业迎来更加辉煌的发展前景。

2. 市场面临挑战

在航空传感器行业，市场参与者正面临着多方面的挑战。这些挑战不仅来自技术领域的激烈竞争，还源于全球供应链体系的复杂性和不确定性，以及市场需求的持续变化。

技术壁垒与竞争压力是航空传感器行业企业不得不面对的现实。该行业技术门槛较高，要求企业具备强大的研发实力和创新能力。然而，与国际先进水平相比，国内企业在某些关键技术领域仍存在差距。例如，虽然国内已有重庆大学等机构在压电四维力/力矩传感器方面取得进展，但整体而言，技术创新的步伐仍需加快以应对国际竞争。

供应链的安全与稳定性对航空传感器行业至关重要。全球供应链体系日趋复杂，受多种因素影响，如贸易政策变动、地缘政治紧张局势等，这些都可能对供应链造成潜在威胁。企业需要密切关注国际形势变化，并采取有效措施确保供应链的可靠性，以防范外部风险。

市场需求的多样化和不确定性也给航空传感器行业带来了挑战。随着航空技术的不断进步和全球市场的快速发展，客户对传感器的需求日益多样化。这就要求企业必须具备敏锐的市场洞察力和灵活的生产调整能力，以便及时捕捉市场机遇并满足客户需求。同时，企业还需关注新兴技术的涌现，如人工智能、物联网等，这些技术将为航空传感器行业带来新的发展机遇，但同时也要求企业不断更新产品和技术以适应市场变化。

3. 行业发展趋势预测

在深入分析航空传感器行业的现状基础上，结合技术革新、产业链动态及全球可持续发展趋势，可以预测该行业未来将迎来若干重要的发展方向。

技术融合与创新将成为核心驱动力。随着物联网、大数据、人工智能等前沿技术的不断突破，航空传感器行业将迎来技术融合与创新的高潮。传感器将不再是单一的数据采集工具，而是成为智能化、网络化的数据节点，能够实时处理、分析并传输信息。例如，通过激光传感器与高级算法的结合，可以为航空领域提供更为精准的环境感知与决策支持，抒微智能等科技型企业已经在这一领域展开积极探索。

产业链协同发展将进一步加强。面对日益复杂多变的市场需求，航空传感器行业的上下游企业将更加注重协同合作。原材料供应商将致力于提供更高性能、更环保的材料，传感器制造商则将专注于产品的精细化、智能化制造，而下游应用企业则将提出更为具体、个性化的需求。这种全产业链的协同发展模式，将有助于提升整个行业的竞争力和市场响应速度。

绿色低碳与可持续发展将成为行业共识。在全球应对气候变化、推动绿色发展的背景下，航空传感器行业也将积极响应，加大在绿色材料、节能减排技术等方面的研发力度。通过采用环保材料、优化产品设计、提高能源利用效率等措施，行业将努力实现绿色低碳发展，为全球的可持续发展做出积极贡献。

未来航空传感器行业将在技术融合与创新、产业链协同发展以及绿色低碳与可持续发展等方面取得显著进展，为航空领域的持续繁荣注入新的活力。

第四节 航空传感器主要企业及产品

一、高华科技

（一）行业概况

传感器在航空航天领域应用广泛。在飞行控制系统中，可以监测飞行器的姿态、高度与速度；在环境监测方面，能感知温度、气压和湿度等，为飞行器安全飞行提供关键数据。除高华科技外，国内航空航天领域传感器行业的民营企业还有青岛智腾微电子，体制内有武汉中航传感技术、航天南洋（浙江）科技等。

（二）高华科技

高华科技成立于 2000 年，位于南京经济技术开发区，专注于高可靠性传感器和传感器网络系统的研发设计以及生产销售，拥有专利超 150 项。李维平，高华科技创始人兼董事长。本科毕业后，在中国兵器工业集团公司第二一四研究所担任高级工程师，2000 年辞职并创立高华科技。高华科技主要产品为各类压力、加速度、温湿度、位移等传感器，以及通过软件算法将上述传感器集成为传感器网络系统。

除军工和民用装备制造领域的公司之外，高华科技与中科宇航、星河动力、零壹空间、星际荣耀、东方空间等商业航天公司也建立了合作关系。其核心产品参与并圆满完成了载人航天工程、探月工程、北斗工程、空间站建设工程等重点工程配套任务。

2024 年 10 月 30 日，长征二号 F 遥十九运载火箭托举神舟十九号载人飞船在酒泉卫星发射中心点火升空，高华科技助力神舟十九号发射任务圆满成功。

高华科技是一家专注于高可靠性传感器及其网络系统的研发、设计、生产和销售的高科技企业。公司致力于为客户提供高品质、高性能的传感器产品，其应用领域广泛，涵盖了航天、航空、轨道交通、机械装备、冶金和能源等多个重要行业。凭借其在技术上的不断创新和卓越表现，高华科技在行业内赢得了良好的声誉。

高华科技的营业收入持续攀升，这一成就主要归功于航空航天行业的蓬勃发展，铁路投资的增加，以及客流量的逐步恢复等积极因素。这些因素共同促进了公司产品需求的增长。

至于净利润的减少，这主要是由于公司不断致力于芯片、传感器件以及传感器网络系统的研发，扩大了研发团队规模，提高了研发人员的薪酬，并且启动了新的研发项目，加大了对高华研发能力建设项目的投资力度，从而导致研发费用总额上升。在报告期内，公司的研发投入达到了 4653.65 万元，同比增长了 45.80%，已完成激光测距传感器、矿用无线压力传感器、高压共轨压力传感器、高铁动车组双通道制动压力传感器，以及航天发动机地面数据采集系统、船用无线环境监测系统、二代胎压检测系统等新产品的研制工作。此外，公司基于谨慎性和一贯性原则，增加了信用减值损失和资产减值损失的计提。尽管净利润有所下降，但通过这些举措，公司进一步加强了其核心竞争力，并为未来的持续发展打下了坚实的基础。

在报告期内，公司还不断发挥资本市场的产业投资并购优势，着眼战略布局，推进投资布局。公司对外投资了私募股权基金——邦盛赢新二号创投，参股投资了南京抒微智能科技有限公司，一家致力于高性价比激光传感器技术开发及其应用解决方案产业化的公司，不断丰富传感器门类。并分别在苏州和北京设立了全资子公司，专注于传感器芯片、调理电路和新型传感器的研发，不断夯实企业的核心竞争力。

业内分析人士指出，高华科技已经成为高可靠性传感器及其网络系统的核心供应商，相关产品已经在航天长征系列、新一代战斗机、运输机以及无人机等多种飞行器上得到了广泛应用。随着低空经济和商业航天领域的迅猛发展，高华科技正迎来前所未有的广阔发展前景。

在低空经济领域，压力传感器、温度传感器、激光传感器、视觉传感器以及惯性测量单元（IMU）等，是低空飞行器不可或缺的关键组件，主要用于飞行器的状态监测和导航控制，确保飞行器能够安全、准确地完成任务。在航空领域长期的、专业的配套供应经验，将使高华科技未来在低空经济感知器件和系统的市场竞争中占据领先地位。

在商业航天领域，高华科技生产的高可靠性宇航级传感器能够在极端恶劣和严酷的环境下长期稳定地工作。过去十几年间，这些传感器在长征系列火箭上建立了坚实的基础，并赢得了良好的应用声誉，如今已在中科宇航、星河动力、东方空间、星际荣耀、零壹空间等商业航天的头部企业实现应用，使公司在商业航天领域的技术领先地位及市场占有率得以进一步提升。随着应用场景的不断丰富，

高华科技的产品在地面测试设备、火箭发动机、火箭遥测系统、发射车、发射箱以及发射场等配套领域取得了显著的进展。

同时，在高铁轨交领域，伴随 2023 年后铁路出行需求的显著提升以及高铁动车的智能化水平的进一步提升，公司既有产品配套数量显著增长，同时深度参与高铁动车组牵引、制动等关键系统的传感器国产化项目，对接数十款传感器产品的国产化替代；在机械装备领域，针对智慧矿山和无人开采带来的蓬勃需求，公司进一步加大与行业龙头企业的战略合作，不断丰富综采工作面、综掘工作面配套传感器件的种类和配套数量，提升装备智能化水平。

展望未来，高华科技表明，通过内生研发和外部并购的发展策略，将不断拓展其传感器产品线，力求在全球智能化浪潮中占据有利的竞争地位。

二、青岛智腾微电子

青岛智腾微电子有限公司成立于 2002 年，国家高新技术企业，专注于厚膜混合集成电路、高端传感器、电源模块、惯导系统核心组件等产品的设计研发和生产制造，能够提供元器件、板级电路、电单机等全国产化解决方案，拥有从芯片设计、模块封装、系统集成的自主可控和工程化能力。

青岛智腾微电子有限公司荣获“全国硬科技企业”“山东省瞪羚企业”“山东省专精特新企业”等多项荣誉称号，承建“青岛市惯性导航技术创新中心”“青岛市高精度智能传感工程研究中心”“青岛市高温厚膜集成电路企业技术中心”，以及“青岛市高温半导体重点实验室”“青岛市高温定向传感器创新应用实验室”。

近年来，智腾微电子坚持以科技创新为引领，不断发力市场开拓，连续四年保持收入和利润高速增长，市场估值翻十倍达 16.2 亿元，走出了一条具有智腾特色的高质量发展之路。企业自主研发生产的各类健康监测和故障诊断类传感器、加速度传感器、定向传感器、定位导航系统、分布式光纤传感器等系列产品，覆盖多种智能化场景，可广泛应用于智能驾驶、机器人等领域。凭借超高温、超低温、高精度等技术优势，智腾微电子与国家航空航天多家重点单位建立了长期稳定的合作关系，产品出口海外十几个国家。

公司拥有独立产业园，科研生产场地 20000 m²，设有微电子净化车间、传感器净化车间、SMT 车间、电装车间、机加工中心和自动化试验中心等，具备多品类高精度传感器、变换器及集成电路的生产和试验能力。其中，传感技术及微

电子技术领域的中高端生产研制设备 1000 余台（套），包括 MCM 厚膜混合集成电路生产线、SMT 自动化生产线以及自动化测试标定等专业生产条件。

未来，智腾将围绕遥测、惯性、极端环境等应用领域，充分发挥“超高温、超低温、高精度、高可靠性”技术核心优势，为国防装备提供全国产化研、产一体解决方案，坚持“诚信、专注、创新、共赢”的企业价值观，打造精工品质的民族品牌。

（一）NVS910 组合导航系统

NVS910 是可靠的固态惯性与卫星导航组合测量单元。内置三轴硅陀螺仪、三轴硅加速度计，卫星导航模块，并经过三轴转台精密校准以满足不同条件下的性能需求。可输出实时、准确的载体姿态、位置、速度和时间戳。

振动环境下良好的性能

精确校准陀螺仪的零点、零点温度系数、灵敏度、灵敏度温度系数、正交性误差和加速度效应，加速度计的零点、零点温度系数、灵敏度、灵敏度温度系数和正交性误差

高性能卫星导航模块

200Hz 捷联解算，高速采样保证运动细节的计算，抑制混叠，提高信噪比
数据包速率最高 200Hz，RS422 接口

低功耗：典型 0.12A(5V)

（二）IVS900 惯性测量单元

IVS900 是可靠的固态惯性测量单元。内置三轴硅陀螺仪、三轴硅加速度计，并经过三轴转台精密校准以满足不同条件下的性能需求。可输出实时、准确的载体姿态和传感器数据。

震动环境下良好的性能

精确校准陀螺仪的零点、零点温度系数、灵敏度、灵敏度温度系数、正交性误差和加速度效应，加速度计的零点、零点温度系数、灵敏度、灵敏度温度系数和正交性误差

200Hz 快速计算，高速采样保证运动细节的计算，抑制混叠，提高信噪比
数据包速率最高 200Hz，RS422 接口 /RS232 接口

低功耗：典型 0.12A(5V)

三、WOODWARD

Woodward, Inc. 伍德沃德（证券代码：WWD）是全球领先的能源转换和控制解决方案的设计者、制造商和服务提供商，服务于航空航天和工业设备市场。公司独创的流体能量控制、燃烧控制、电能控制、运动控制系统将有助于为客户提供提供的设备更洁净、更可靠、更节能。

（一）业务分部

公司的产品与服务主要分为两个业务板块：航空航天（Aerospace）和工业（Industrial）。

在航空航天板块，伍德沃德的产品和系统优化了商业、商务和军用飞机、导弹和武器、地面车辆和其他设备的性能。这些产品包括燃料泵、计量单元、执行器、空气阀门、特殊阀门、燃油喷嘴和推力反向器执行系统等，用于涡轮发动机和吊舱，以及飞行甲板控制、执行器、伺服控制、电机和传感器等，用于飞机。此外，公司还为军用和商用飞机提供支持，包括为下一代飞机开发新技术。

在工业板块，伍德沃德的系统和产品提高了燃气轮机和蒸汽轮机、往复式发动机、压缩机、发电机组和其他与能源相关的工业设备的性能。这些产品包括执行器、阀门、泵、燃油喷射系统、点火系统、控制系统、电子设备和传感器等。公司还提供工业燃气轮机和往复式发动机的维修、维护、更换和其他服务。

伍德沃德的客户群包括领先的原始设备制造商（OEMs）和他们产品的最终用户。公司通过提供高性能、可靠、低排放的能源控制产品，帮助客户提高效率、减少运营成本，并满足严格的环境和安全标准。通过与客户紧密合作，伍德沃德能够为他们提供定制化的解决方案，以满足航空航天和工业市场中的特定需求。

（二）寻址市场

1. 航空航天市场：

商业航空：随着全球航空旅行需求的增长，新型节能和低排放飞机的需求上升，这推动了对高效航空发动机和相关控制系统的需求。

国防航空：全球安全形势和国防预算的变化影响着军用飞机、导弹和武器系统的销售。伍德沃德为固定翼和旋翼飞机、地面车辆等提供推进和控制系统。

通用航空和公务航空：这部分市场包括各种小型和中型飞机，对高效、可靠的航空燃料和控制系统有持续需求。

2. 工业市场：

电力生成：涉及燃气轮机、蒸汽轮机和往复式发动机等设备，用于发电和分配电力。

交通运输：包括用于船舶、机车和商用及军用车辆的控制系统。

石油和天然气：全球对能源的需求推动了对高效燃烧系统和相关设备的需求，尤其是在石油和天然气的勘探、生产和运输领域。

工业设备：涉及为各种工业应用提供能源转换和控制解决方案，如压缩机、泵和其他机械设备。

随着全球航空乘客流量恢复到接近疫情前水平，商业 OEM 和售后市场的销售额增长，以及对新一代飞机的需求增加，这些都表明航空航天市场有显著的增长潜力。同样，工业市场对于提高能效和减少排放的需求也在不断增长，特别是在电力生成和石油天然气领域。

（三）竞争优势

技术创新：伍德沃德持续投入研发，推动新技术的开发，如更高效的燃料系统、先进的燃烧控制技术和电子控制系统。公司的技术不仅满足了现有市场的需求，还为未来航空航天和工业设备的性能提升提供了解决方案。

产品组合：伍德沃德提供广泛的产品和系统，包括燃料和空气管理、燃烧、电子控制、执行机构和传感器等，这些产品服务于从商业航空到工业应用的多个领域。这种多样化的产品组合使伍德沃德能够满足不同客户的需求，并在多个市场领域实现增长。

行业知识和客户关系：伍德沃德在航空航天和工业领域拥有深厚的行业知识，这使得公司能够深刻理解客户的需求并提供定制化解决方案。公司与客户建立了长期的合作关系，这有助于维持稳定的市场份额并推动持续的销售增长。

全球业务布局：伍德沃德在全球范围内拥有生产和组装设施，这不仅增强了公司的供应链管理能力和使其能够更好地服务于国际客户，并快速响应市场变化。

知识产权和专利：公司持有多项专利和知识产权，这些无形资产为伍德沃德的产品和技术提供了法律保护，防止竞争对手模仿，增强了公司的市场独特性。

品牌和声誉：伍德沃德作为能源转换和控制解决方案的全球领导者，拥有良好的品牌声誉。公司的品牌和市场地位有助于吸引新客户，并与现有客户建立信

任关系。

技术专长、广泛的产品组合、全球化的运营网络以及与关键客户的深厚合作关系等等因素结合在一起，为 Woodward 提供了相对于竞争对手的优势，使其能够保持市场领先地位，并对抗市场波动和竞争压力。然而，像所有公司一样，Woodward 也面临着技术变革、市场需求变化和全球经济波动等挑战，这些都可能影响其长期的竞争地位。因此，Woodward 需要持续专注于技术创新、市场扩展和运营效率，以维持和加强其市场地位。

（四）业绩表现

收入增长：公司在 2023 年实现了 29.14 亿美元的净销售额，比 2022 年的 23.82 亿美元增长了 22%，恢复到疫情前水平。这一增长主要得益于航空航天和工业两大业务板块的强劲表现，特别是在商业航空发动机和相关控制系统的需求增加。

利润提升：2023 年的净利润为 2.323 亿美元，较 2022 年的 1.717 亿美元增长了 35%。调整后的净利润（非美国通用会计准则）为 2.585 亿美元，较上年的 1.738 亿美元增长了 48%。

每股收益增长：2023 年的稀释每股收益（EPS）为 3.78 美元，高于 2022 年的 2.71 美元。调整后的稀释每股收益（非美国通用会计准则）为 4.21 美元，较上年的 2.75 美元有显著提升。

自由现金流：2023 年的自由现金流（经营活动产生的现金流净额减去资本支出）为 2.304 亿美元，较 2022 年的 1.408 亿美元有所增长。

资本回报：公司在 2023 年通过股息和股票回购向股东返还了 1.77 亿美元，体现了对股东价值的重视。

2024Q1，收入为 7.87 亿美元，同比增长 27%。每股收益和调整后每股收益分别为 1.46 美元和 1.45 美元，相比之下，上一期的每股收益和调整后每股收益为 0.49 美元。其中：航空航天部门的销售额为 4.61 亿美元，相比之下上一期为 3.96 亿美元，增长了 16%。商用 OEM 和售后市场销售分别增长了 23% 和 9%，这主要得益于 OEM 生产率的提高，国内外客运流量的持续增长，飞机使用率的提升以及价格实现。由于地面车辆组件和制导武器的增加，国防 OEM 销售在本季度增长了 4%。国防售后市场销售增长了 45%。工业部门在销售和收益上都创下了历史新高。2024 财年第一季度，工业部门的销售额为 3.26 亿美元，相比之下上

一期为 2.23 亿美元，增长了 46%。所有细分市场都因为更高的销量和价格实现而增长，其中运输增长了 96%，发电增长了 20%，石油和天然气增长了 2%。

2024 财年指引更新：净销售额预计为 31.5 亿美元和 33 亿美元，自由现金流将在 3 亿美元至 3.5 亿美元之间（对应的 P/FCF 在 30 倍以上，估值偏高）。预计资本支出仍约为 1 亿美元。调整后的每股收益预计在 5 美元至 5.40 美元之间。

（四）主要产品

液压放大器内的 WOODWARD EG-3P 执行器能将电控制信号转化为转动输出，再经液力放大，控制伺服位置输出。液压放大器适用于执行机构驱动力相对较大的汽轮机或大型发动机。

伍德沃德 WOODWARD TG 调速器是内含独立油源、机械液压有差式调速器，适用于不需同步（等速）方式运行的小型蒸汽透平。

伍德沃德 WOODWARD PG-PL 调速器广泛应用于各种类型的柴油机、气体发动机和蒸汽透平的转速控制、驱动泵及压缩机等。

伍德沃德 WOODWARD PGPL 执行器应用于燃气发动机或蒸汽轮机上，可替换 PGPL、PGL、PGD 型调速器，而不需要改变原 PG 型驱动连杆机构。这就为电调改造提供了方便。

伍德沃德 WOODWARD 电流压力转换器（CPC）为控制蒸汽阀、燃料阀和 / 或相应的伺服机构而设计，它将 4-20mA 控制信号线性成比例地转换为油压输出。CPC 可与许多电控装置匹配使用，如 WOODWARD MicroNet 或 505 系列控制器等。它适用于压力型伺服系统或单作用动力缸。CPC 也适用于旧机改造项目。

伍德沃德 Woodward TG-13 和 TG-17 是机械液压有差式调速器，用来控制汽轮机 - 这种不需同步（等速）方式运行的地方。TG-13 和 TG-17 调速器输出轴的最大旋转角度为 40 °。从空载到满载推荐的转角行程为调速器全行程的 2/3。WOODWARD TG-13E 和 TG-17E 电液执行器均自备独立油源，适用于需要无差调速、负荷分配或其他功能的蒸汽透平，并与 WOODWARD 所有的电子控制器及附件兼容。

伍德沃德 WOODWARD 伺服位置控制器（SPC）是一个伺服阀驱动器，它接受来自系统控制器的 DeviceNet 或 4-20mA 位置指令信号，并能精确定位比例型或积分型伺服阀。SPC 能够满足蒸汽透平或燃气透平燃料控制阀所要求的控制精度、响应性和冗余性的要求。

伍德沃德 Woodward ProTech®203 超速保护系统通过监测三路独立的磁阻发讯器 (MPU) 来的信号, 为蒸汽轮机、燃气轮机或其他原动机提供超速保护。特别是对于高转速 (>10000 rpm) 时机械超速保护装置已变得不可靠的情况下, 可使用 ProTech 203 替代。用于检测实际转速的传感器通常就是 woodward 磁阻式转速传感器 (MPU)。

伍德沃德 Woodward 5009 容错控制器专为要求高可靠性的关键汽轮机控制而设计。它可配置为纯凝、背压或单抽/补汽等透平应用。5009 的 CPU 和 I/O (TMR) 均为三冗余形式, 以满足工业透平市场对可靠性的要求。500 为现地可编程模式, 采用菜单式软件指引工程师根据发电或机械驱动的应用进行编程。5009 可独立工作或与工厂 DCS 结合使用。

伍德沃德 woodward505/505E(9907-162, 9907-164, 9907-165, 9907-167) 数字式控制器可用于控制工业汽轮机、小电网涡轮发电机或透平膨胀机。

伍德沃德 woodward2301A 控制器 9905 系列应用于柴油机、汽油机、汽轮机或燃气机等驱动的发电机组的速度及负荷分配控制。2310ALSSC 控制器可以工作在恶劣环境下。

伍德沃德 woodward 2301D-ST 基于微处理器控制, 内部软件专门为单阀蒸汽轮机控制而设计。为方便控制器的换型, 2301D-ST 的接线端口的排列布置与 2301A 一类的控制器基本一致。2301D-ST 控制器可完成小型蒸汽轮机系统的核心控制。其内部的应用软件为现场可编程形式, 以适应不同的配置需要。由于功能的增强, 2301D-ST 的输入/输出端口比 2301A 的多, 并且配备了一个通讯串口, 大大方便了控制器与 PLC 或 DCS 集散控制系统之间的通讯。

伍德沃德 woodward2301D 和 2301D-EC 是基于微处理器控制, 其功能与 2301ALSSC 相同: 负载分配和速度控制。计算机通过 9 针串口插头 (RS232 口) 与 2301D 和 2301D-EC 控制器相连。

四、Scaime

SCAIME 公司是一家在称重传感器和工业测量领域具有世界的公司, 其技术专长和产品高品质得到了广泛认可。SCAIME 的服务和物流有效地支持了其在全球的产品范围, 通过附属公司、合作伙伴和专业经销商的网络在 40 多个国家进行业务。

SCAIME 的总部设在法国阿讷马斯，拥有 4300 平方米的设施，包括销售及市场推广服务、研发部和装配生产线专用应变计、称重传感器制造的楼面面积。其现代化设备包括洁净室、气候室、激光焊接机器人和并列校准手段，确保了高质量的生产和灵活的现代设置，能够提供具有竞争力的质量和价格比的产品。

SCAIME 持续创新的解决方案能够满足客户多方面的需求，是称重、力、扭矩、压力及位移测量领域中的佼佼者。无论是单位交付还是大型系列，SCAIME 都能提供高质量的产品和服务

产品范围：SCAIME 的产品范围广泛，包括显示器、传感器、扭力计、引伸计、力传感器、位置传感器以及压力或物位传感器等。其主要产品型号包括 ATM-6B-10V-1-2ACB-05-CON 传感器、ALCJB-1、ALCJB-3、ALCJB-6 接线盒、AG20C3SH5EF 称重传感器、SB30*2000 张力传感器、CMJ-CEB BOITER 0-10V 放大器以及 F60 × 50 C3 5E、IPA50 编码器和 DR2-5NM 扭矩传感器等。

产品介绍：法国 Scaime BEF-F-5Kg 是一款单点式称重传感器，产品采用铝合金材质，防护等级 IP65，具有一定的防水防湿功能，抗过载能力强，压向承载，最大秤台尺寸：150 x 150mm，量程可选：3Kg，5Kg，具有稳定性好、易安装，精度高等特点，广泛应用于台秤，平台秤，包装秤，配料系统等，良好的产品性能受到广大客户的认可。SCAIME 是全球工业称重和工业测量领域中之，持续创新的解决方案满足各种工业需要，例如：化工、食品饮料、冶金、航空航天、医药、包装或者是土木建设。依托于世感公司的产品质量和专业技能，我们提供全系列称重和测量解决方案：显示仪表、数据采集系统、称重传感器、应变计和光纤传感器等。弯剪梁传感器满足于称重产品在生产和运输所有部件的需要。性传感器适用于多型传感器衡器，也获得了贸易交易和防爆（ATEX）的资格认证。传感器可在不同的材料、保护等级、精度等级、高性能供应和安全的工业称重应用。

法国 Scaime AK12 C3 CH 12e 是一款单点式称重传感器，产品采用不锈钢材质，防护等级 IP68，密封焊接，抗过载能力强，压向承载，最大秤台尺寸：420 x 420mm，量程可选：6，12，30，60，120，300kg，具有稳定性好、易安装，精度高等特点，广泛应用于计价秤、包装秤、过程称重设备等，良好的产品性能受到广大客户的认可。SCAIME 是全球工业称重和工业测量领域中之，持续创新的解决方案满足各种工业需要，例如：化工、食品饮料、冶金、航空航天、医药、包装或者是土木建设。依托于世感公司的产品质量和专业技能，我们提供全系列

称重和测量解决方案：显示仪表、数据采集系统、称重传感器、应变计和光纤传感器等。弯剪梁传感器满足于称重产品在生产和运输所有部件的需要。性传感器适用于多型传感器衡器，也获得了贸易交易和防爆（ATEX）的资格认证。传感器可在不同的材料、保护等级、精度等级、高性能供应和安全的工业称重应用。

法国 Scaime F60X20 C6 CH 10e TR 是一款波纹管式称重传感器，产品采用不锈钢材质，防护等级 IP68，焊接密封技术，抗过载能力强，压向承载，量程可选：5，10，20，50，100，200，300，500Kg，具有稳定性好、易安装，精度高等特点，广泛应用于包装秤、搅拌站、皮带秤等，且非常适用于加工、食品和制药应用中的恶劣环境，良好的产品性能受到广大客户的认可。SCAIME 是全球工业称重和工业测量领域中之，持续创新的解决方案满足各种工业需要，例如：化工、食品饮料、冶金、航空航天、医药、包装或者是土木建设。依托于世感公司的产品质量和专业技能，我们提供全系列称重和测量解决方案：显示仪表、数据采集系统、称重传感器、应变计和光纤传感器等。弯剪梁传感器满足于称重产品在生产和运输所有部件的需要。性传感器适用于多型传感器衡器，也获得了贸易交易和防爆（ATEX）的资格认证。传感器可在不同的材料、保护等级、精度等级、高性能供应和安全的工业称重应用。

五、阿美特克

AMETEK 公司是精密、可编程电源及电子负载领域的全球领先者，其研发中心位于美国加利福尼亚州的美丽城市圣地亚哥。该部门的产品在多个领域扮演着关键角色，涵盖了研发、自动测试设备（ATE）、过程控制、电源总线模拟和电源调节，为不同行业提供了卓越的性能解决方案。作为阿美特克有限公司的一部分，可编程电源事业部是由 California Instruments 公司和 Xantrex 公司的可编程电源部门成功合并而成的，这一举措加强了阿美特克在电子设备制造业的领先地位。以强大的技术研发实力和全球市场影响力著称，阿美特克的年销售额超过 25 亿美元，充分证明了其在该行业的强劲实力和市场竞争力。

阿美特克 2024 年第三季度的销售额为 17.1 亿美元，较 2023 年第三季度增长了 5%。营业利润增加了 2%，达 4.459 亿美元，营业利润率达 26.1%。本季度的经营现金流达到创纪录的 4.872 亿美元，较去年同期增长了 3%，自由现金流与净收入的转换率为 135%。

根据通用会计准则（GAAP），第三季度每股摊薄收益为 1.47 美元。调整后的每股收益为创纪录的 1.66 美元，较 2023 年第三季度增长了 1%。调整后的收益包括每股摊薄后、税后的收购相关无形资产摊销费用 0.20 美元。

阿美特克董事长兼首席执行官 David A.Zapico 表示：“阿美特克第三季度取得了出色的业绩，订单实现了两位数的增长，卓越的运营表现，强劲的现金流，盈利超出预期。我们在应对短期宏观的不确定性方面表现出色，并确保我们的业务在极具吸引力的市场中实现长期增长。此外，我们很高兴地宣布收购 Virtek Vision，这与我们先进计量仪器业务非常契合。”

“阿美特克在第三季度的卓越表现突显了我们成功应对经济周期，并持续交付出色业绩的能力。阿美特克增长模型的实力和灵活性，结合有吸引力的利基市场覆盖和强劲的资产负债表，使我们在长期内实现可持续增长阿美特克在第三季度表现超出预期，突显了阿美特克增长模型的优势以及我们在不确定的市场环境中的抗风险能力。我们拥有高度差异化的优秀业务组合，并对我们的战略和长期增长前景充满信心。” Zapico 先生表示。

“对于 2024 年，我们仍然预计整体销售将比 2023 年增长 5% 至 7%。调整后的摊薄每股收益预计在 6.77 美元至 6.82 美元之间，较上年增长 6% 至 7%。相对于我们之前预期的每股摊薄收益 6.70 美元至 6.80 美元的指导范围有所提高。”他补充道。

“2024 年第四季度的整体销售额预计将比去年同期增长中间个位数。第四季度调整后的每股摊薄收益预计在 1.81 美元至 1.86 美元之间，较 2023 年第四季度增长 8% 至 11%，” Zapico 先生最后总结道。

第五节 航空传感器的发展趋势

一、现代航天传感器技术发展趋势

传感器作为获取自然和生产领域中各类信息的主要途径与手段,已经成为国防建设、工业转型升级以及保障和提高人民生活质量等必不可少的基础核心技术和装备。我国“十三五”规划中明确把传感器技术列为国家战略发展的重点;工信部发布的《智能传感器产业三年行动指南(2017—2019年)》提出要推动基于MEMS工艺的新型智能传感器设计技术的研发,提升MEMS传感器集成化水平,探索研发具备信息获取、存储、处理、传输、免标定、自补偿、自诊断、自决策等功能的智能传感器,推动传感器由传统的分立器件向先进的数字化、网络化、集成化以及应用创新方向快速发展。目前,在国家政策的支持下,国内传感器市场持续快速增长。我国传感器产业与国外相比,仍然存在较大的差距。目前在国际传感器市场上始终保持领先地位的是美、德、日、俄等发达国家。在这些传统发达国家,传感器获得了非常广泛的应用,许多传感器企业都实现了年产千万只以上的规模化生产。相比之下,中国传感器公司年产量超过100万只的都寥寥无几,特别是对于高、精、尖的传感器产品,几乎全部受制于国外品牌。传感器产业的落后造成当前国家重大装备所需要的高端传感器和智能化仪器仪表很大程度上长期依赖进口;而涉及国家重大型号工程所需的敏感芯片和传感器产品,国外一直采取严格的限制和禁运措施,尤其是近些年以来,形势更为严峻。航天传感器作为军用特种传感器的一个重要分支,因其独特性,从20世纪60年代开始,各研究部门就一直致力于自主研发,并形成了一系列具有自主知识产权的技术成果,因此系统分析航天传感器技术发展的趋势,对于突破我国传感器产业发展瓶颈和提升自主保障能力具有重要意义。

(一) 航天型号中的传感器应用

先进航天装备发展的一个重要特征是信息化和智能化,其核心技术是传感技术、通信技术和计算机技术。传感器位于信息采集的最前沿,其发展已越来越受到各国的重视。美国国防部早在2003年“国防技术领域计划”中就已经将传感器与电子设备、战场空间环境等一并作为十一个重点发展对象之一,并系统性持续投入充足资源支撑和推进新型传感器技术从原理就绪度到实用就绪度的实现,

确保美国在军用传感器领域始终保持全球领先水平，并不断巩固其引领能力。德国一直视军用传感器为优先发展技术，英、法、日等国对传感器的研究投资也逐年上升。2003 年美国《技术评论》评出对世界产生深远影响的十大新兴技术，由美国军方提出并发展的无线传感器网络技术被列为二十一世纪十大新兴技术之首。

传感器作为航天器的“感官”和“神经”，遍布航天器的各个关键部位，是确保测得出、测得准、预测对、诊断灵，保障任务成功率的有效手段。例如，运载火箭中的控制系统、动力系统、推进剂利用系统、附加系统、遥测系统，载人飞行器中的故障检测与诊断系统、舱内环境控制与生命保障系统、逃逸救生系统、航天员舱外活动支持系统和再入式登陆系统等，都离不开传感器对航天器各关键部位工作状态的准确检测。载人航天器舱内密闭空间由于在轨环境的特殊性，在轨舱内环境监测传感器对于航天员安全就至关重要。美国国际空间站就是依靠高灵敏传感器的火灾预警，多次成功避免了国际空间站火灾悲剧的发生。在航天器二次变轨的过程中，需要为航天器提供用于改变飞行方向推进力，高精度压力传感器用于测量燃料罐压力，是控制点火、开启变轨飞行的关键器件，一旦传感器的测量精度超差或者失效，将直接导致变轨失败。2010 年，俄罗斯质子-M 火箭发射 3 颗 GLONASS-M 导航卫星，因燃料水平传感器超差导致加注燃料过量，使火箭“头部”重量超标，从而导致火箭飞行末期达到速度不够，未能正确入轨致使 3 颗导航卫星全部葬身于太平洋中。可见，传感器对于航天装备而言，地位重要，作用关键。

国内外航天飞行器的各大系统中，无一例外，都大量使用各种类型的传感器。例如，美国的航天飞机使用的传感器数量超过 3500 只。欧空局的 Ariane 5 火箭上，在研制试验阶段使用传感器数量 435 只，通常一次飞行测量参数达 570 个，一次技术飞行测量参数达 1100 个。我国航天任务中也大量使用各种类型的传感器，例如载人运载火箭中，单发使用传感器、变换器数量达到 600 余只，而新一代大型运载火箭单发使用传感器、变送器数量更是超过了 1600 只。但通过与美国航天型号比较分析，可以看出我国对于遥测传感器的用量需求还有大幅的增长空间。

经过以北京遥测技术研究所为代表的国内科研院所长达 60 年的共同努力，国内航天传感器经历了由仿制到自制、由少品种到多品种、由结构型到复合型、由低准确度到高准确度的发展历程，较好地满足了我国快速发展的各重点航天型

号的测量需求,并逐步制定一系列的规范和标准,形成了各类航天特色鲜明的特种传感器产品系列,涵盖了压力、温度、液位、过载、振动、冲击、角速率、位移、流量、烧蚀、噪声、湿度、应变、风速、气体、辐射等测量参数。特别是近年来,在国家超高密度航天型号任务的牵引下,我国下一代航天传感器技术在新型 MEMS 智能传感器技术、极限环境特种传感器技术、高性能光学传感系统技术、无线传感网络技术方面取得了众多具有国际先进水平的成果,可为各类航天型号任务提供更全面、更精确的测量服务。目前,传感器技术已经进入到一个飞速发展的时代,现代意义上的传感器已经不再如过去一般仅仅能够敏感被测对象的单一信息,而是集多参数信息测量、融合分析处理和高速传输于一体的多学科产物。在国内科研团队的团结协作和不懈努力下,我国下一代航天传感器正朝着微型化、芯片化、智能化和网络化等世界前沿方向快速发展,必将为我国航天强国的建设做出更大的贡献。

(二) 典型航天传感器技术介绍

1. 压力传感器

现代压力传感器技术发展以 1954 年史密斯(C.S.Smith)发现硅与锗的压阻效应为重要标志,历经 20 世纪 50 年代将应变电阻片粘贴在金属薄膜上的简易压阻传感器技术,60 年代利用硅扩散技术直接把应变电阻扩散在晶面上硅杯加工工艺技术,70 年代应用硅的各向异性的腐蚀技术发展而成的可以适应大规模生产的自动控制硅膜厚度的硅各向异性加工技术,直至 20 世纪末利用纳米技术进行微纳机械加工的先进工艺技术。到目前为止,阻式压力传感器是应用最为广泛、市场份额最大、技术最成熟、性能最稳定、性价比最高的一类传感器。

在高精度压力测量方面,谐振式压力传感器比起压阻式等其他原理的压力传感器具有更高的准确稳定性,是高精度压力测量技术的发展热点。目前硅谐振式压力传感器和石英谐振式压力传感器都具有非常优异的测量准确度、长期稳定性以及环境适应性,随着深反应离子刻蚀技术、高可靠键合技术、高可靠整机封装等关键工艺技术水平提升,谐振式压力传感器的测量误差可控制在 0.01%FS 以内,如美国 GE 公司的 RPS8000 系列硅谐振压力传感器,以及美国 Paroscientific 公司的 3000 系列石英谐振压力传感器等。目前北京遥测技术研究所研制的高精度石英压力传感器误差已经小于 0.01%FS,硅谐振压力传感器误差小于 0.02%FS,分别应用于航天发动机压力系统测试以及深空探测等重点领域。

基于微机械加工制备的 SiC 压力传感器,可用于航空航天型号的高温压力参数测量,一直是国内外航天军工传感器研制单位的研究热点。十二五期间,北京遥测技术研究所完成了第一代 SiC 高温压力传感器的研制,并成功完成多次飞行试验测试,具备 800℃以上高温压力测量能力,与当时的国际水平基本相当。

在动压测量方面,美国 PCB 公司生产的动态压力传感器响应速度快、幅值和频率范围较宽。主要应用爆炸零件测试、爆炸冲击波检测。借助微电子技术的发展,PCB 公司最早于 70 年代已将电压前置放大器制成微型电路并植入压电传感器,即 ICP 压电传感器。因其具有低阻输出特性,所以可采用普通的双芯电缆实现传感器与后端采集设备的长距离连接,且传感器的灵敏度不受连接电缆长度的影响,甚至可适用于潮湿环境下的测试,而且每个测量通道成本远低于传统电荷型的测量产品。

自 20 世纪 60 年代以来,我国就开始爆炸冲击波测量技术的研究工作。从 80 年代至今,国内的北理工、南理工、航天一院某所、兵器某所、中北大学等多家单位均对冲击波超压测试系统进行了研究和开发,并相继取得了一定的成果。目前,我国在武器毁伤威力场测量和新型发动机动态压力测量领域,对具有宽响应频带、高固有频率和极快响应速度等优异性能的动态压力传感器有着迫切的需求。北京遥测技术研究所所在爆破冲击测量需求的牵引下,已完成冲击波超压传感器工程产品的研制工作,其灵敏度为 0.06pC/kPa、固有频率为 450kHz,综合性能能达到国外同类尖端产品水平。

2. 温度及热流传感器

温度传感器使用范围广泛、数量众多。它的技术发展历程可分为三个阶段:分离式、模拟集成式和数字式。目前正在向网络化、智能化的方向发展。从温度敏感原理来看,薄膜材料技术的发展使得薄膜热电偶温度传感器得到越来越广泛的应用。早在 1993 年,弗吉尼亚理工大学的 Diller 教授率先展开了薄膜热电堆热流传感器设计、加工工艺进行了研究,于 2003 年与 Vatec 公司合作生产 HFM6/7/8 系列薄膜热电堆热流传感器商用产品。产品共 5 个系列,工作温度 300 ~ 850℃,有 E 型和 S 型两种类型,可测量 10kW/m² 以上的热流。NASA 格林研究中心早在 2005 年已经加工出了耐高温的薄膜型热流传感器,有多种结构类型,可应用于风洞或叶片表面的热流测试,工作温度高达 1000℃。图 5 NASA 格林研究中心的薄膜热电堆式热流传感器为满足极限环境下的温度测量需求,美

国宇航局 Lewis 研究中心在超高温合金、SiC, Si_3N_4 , Al_2O_3 陶瓷等不同耐高温材料的衬底上, 采用溅射工艺沉积微米级的 Pt, Pt-Rh13, Pd-Cr14 等薄膜, 形成热电偶两极, 据报道, 其研制的该类型高温薄膜温度传感器测温可达到 1100°C , 且实现了误差在 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 范围内的指标。

2013 年, Otto J.Gregory 等人开展进一步研究, 将溅射方法制备的 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ 薄膜热电偶同 S 型、K 型和 Pt/Pd 薄膜热电偶进行比对, 认为 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ 薄膜热电偶应用于 1000°C 以上有氧环境, 比 S 型和 K 型热电偶性质更加稳定, 其热电势相对金属薄膜热电偶具有量级上的提高, 而且具有更高的塞贝克系数和更优良的化学稳定性。国内, 北京遥测技术研究所研制的薄膜热电堆热流传感器已经完成多次飞行试验验证, 工作温度达到 600°C 。

3. 高精度微机械陀螺

自 1987 年, 美国 Draper 实验室研制出世界上第一款微机械陀螺, 微机械陀螺一直是国内外重点支持的研究领域, 由于小体积、低成本、低功耗、高可靠性、适宜大批量生产的特点, 并且随着 MEMS 工艺技术发展, 目前多种结构形式的微机械陀螺仪已达到战术级水平, 并形成了完善的产品体系, 取代部分传统机械陀螺和光学陀螺, 大量应用至军事国防和航空航天领域, 而一些新结构或者新原理的微陀螺, 已经完成样机研制, 具备导航级准确度的水平和潜力。

(1) 战术级微机械陀螺

战术级精度微机械陀螺目前已有一系列成熟产品, 包含石英微陀螺和硅微陀螺两大类, 目前石英音叉微陀螺的性能居于已产品化的微陀螺的最前列。早在 1994 年, 美国 Systron Donner 公司研制的石英音叉陀螺就先后在宇航员太空行走的无缆绳背包稳定控制系统, 旅居者号和探路者号火星车的辅助定向系统等宇航领域应用。近几年, 石英音叉陀螺产品的全工作环境零偏稳定性已经突破达到 $0.5 \sim 1(^{\circ})/\text{h}$, 大量应用在美海军 MK54, MK48 制导鱼雷和 JDAM 航空制导炸弹等领域。“十五”期间, 国内开始石英 MEMS 陀螺的研究, 其中, 北京遥测技术研究所已建立完整石英 MEMS 工艺线、惯性实验室, 突破了石英音叉陀螺工艺加工、结构优化、噪声控制等技术, 并完成多工况状态下的飞行验证及多型号小批量应用。目前产品性能常温零偏稳定性优于 $5(^{\circ})/\text{h}$, 全温零偏稳定性优于 $10(^{\circ})/\text{h}$, 先后用于纳卫星姿态测量、远程火箭弹和航空炸弹的导航制导等。

(2) 导航级微机械陀螺

2010 年 1 月, 为应对未来战略对抗中的“导航战”, 美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 启动了名为 Micro-PNT 的研究专项, 其技术体系如图 9 所示, 其目标是通过研发同时兼具高性能自主导航、高精度定位、高精度授时功能的系统, 来替代现役的卫星导航系统, 其核心研究内容是研制零偏稳定性优于 $0.01(^{\circ})/\text{h}$ 的高性能微机械陀螺。包含微速率积分陀螺 (MRIG) 项目和导航级集成微陀螺 (NGIMG) 项目, 分别重点支持新原理微陀螺和新工艺新材料微陀螺的研究和开发。目前国际上最为重视微半球谐振陀螺、碟形谐振陀螺、微型核磁共振原子陀螺等, 代表了微机械陀螺技术最新发展趋势。

在微半球谐振陀螺方面, 目前攻关重点是采用金刚石、石英、玻璃合金等高性能新材料, 开发下一代三维微制造工艺, 以制备超高精度的微半球谐振元件。目前, 国外已经完成较高性能实验室样机的研制, 如 2017 年密歇根大学研制的微半球谐振陀螺 (BRG) 样机的零位稳定性达到 $0.039(^{\circ})/\text{s}$; 国内国防科技大学、中北大学、中国电科 26 所等单位处于谐振半球微工艺技术攻关阶段, 与国外先进水平还有一定差距。

在碟形谐振陀螺方面, 代表产品是嵌套环式振动微陀螺, 采用单晶硅 (或熔融石英) 的深刻蚀制备工艺, 可实现批量制造, 并且具有较好的漂移及噪声特性。2014 年, 波音公司的碟形谐振陀螺样机, 零偏稳定性小于 $0.01(^{\circ})/\text{h}$ 。目前美国 SIM 公司 (JPL、波音联合团队) 推出的 SIM-SRG 系列陀螺和 SIM500 惯组产品, 陀螺精度已经达到导航级, 零位稳定性最优达到 $0.003(^{\circ})/\text{h}$, 是目前零位稳定性最优的微陀螺产品。国内国防科大和兵器 214 所联合开展 DRG 的设计及加工工艺研究, 先后解决了高灵敏度谐振器结构设计、高深宽比深刻蚀、静电修调、频率匹配等关键技术, 目前实验室样机陀螺的角度随机游走已经达到 $0.08(^{\circ})/\text{h}$ 。磁共振陀螺的研发, 该陀螺的原理是利用原子核在磁场中的陀螺式自旋来实现高精度指向, 其核心技术是如何采用 MEMS 工艺技术制备出高精度的核磁共振腔。早在 2013 年 10 月, 美国 Northrop Grumman 公司就公布了一种微型核磁共振陀螺样机, 陀螺零位稳定性达到 $0.02(^{\circ})/\text{h}$, 是目前世界上体积最小的导航级核磁共振陀螺, 已在“猎户星座”和 T—6B 飞机进行了独立测试, 并开始装备空军。目前国内航天 33 所等单位已经突破了小型化磁共振气室、无磁电加热

片、三维异型线圈等设计加工问题，完成了体积小于 50cm³（原子气室体积仅为 4mm × 4mm × 4mm），零偏稳定性优于 1(°)/h 的小型化样机。

4. 气体传感器

针对密闭半密闭空间的气体检测应用需求，国内外开发了多种有毒有害气体传感器产品。美国喷气推进实验室（JPL）采用电子鼻监测实时连续环境空气质量。电子鼻功耗低，对化合物响应范围宽，且维护、校准和分析所需时间短，能定性定量分析 0.01 ~ 10000ppm 内的气体。JPL 用其确认并分析化合物 24h 太空船最大运行浓度，若化合物浓度达到危险浓度时提供早期预警。欧洲航空局（ESA）开发的 ANITA 是与 NASA 合作用于监测空气质量的重要交互手段。该系统在 STS118 发射任务中作为 NASAISS 医疗项目（ISSMP）交付于约翰逊航天中心（JSC）。ANITA 可在线监测和量化 30 多种除 CO₂ 和水气外的亚 ppm 浓度极限下的痕量气体。ANITA 能够测量的气体下限为 10-d 最高运行浓度（SMAC）水平的 10%，在 10-dSMAC 与 6hSMAC 间的探测误差优于 10%。

NASA 与 Rice 大学开展光声光谱法测量痕量气体研究，用于载人航天器早期火灾探测。采用 1.53 μm 的 DFB 半导体激光器作为光源，用石英音叉作为声敏检测元件，采用共振式光声池，大幅度提高检测灵敏度，有效抑制干扰信号。光声池采用半导体激光器蝶形封装外壳制作而成，整个气池体积小于 1cm³。应用单个光源，通过电流调制实现对 NH₃，HCN，C₂H₂ 的光谱影响测试，输出的信号采用谐波原理检测，并对其交叉敏感特性以及长期稳定性进行了测试。最终每种气体在积分时间小于 1min 的情况下能实现亚 ppm 浓度的检测。美国 Vista 光电公司为 NASA 研制了基于近红外半导体激光器的光声光谱法气体传感器样机，可以选择性地探测 HF-HCl-HCN-CO 和 NH₃，探测水平与 180 天飞船最大运行浓度（SMAC）相关。

我国神舟系列飞行器上使用过电化学以及气相色谱的气体分析仪，相关单位利用小型化四级杆质谱仪测量气体成分进行了研究。北京遥测技术研究所依托载人航天工程牵引，完成了基于光声光谱技术的小体积、低功耗、轻质量的多组分痕量舱内有害气体分析仪的研制，能实现 30 种 ppb 级痕量气体的在线检测，具有工作寿命长、免维护、宽范围、抗相互干扰能力强、不中毒等优点。在公共安全、大气环境监测、工业现场安全监测、医疗诊断等领域具有极佳的推广价值。

5. 光纤传感器

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代末兴起的一项技术,现已与光纤通信并驾齐驱。光纤传感器因其尺寸小、重量轻、抗电磁干扰性强、抗腐蚀性好、灵敏度高、动态范围宽、便于组网等显著优点,而一直备受青睐。采用不同敏感原理的光纤传感器可以实现温度、应力、应变、压力、磁场、振动、位移、声音等多达 70 种参数的测量。北京遥测技术研究所在特种光纤传感技术领域已开展多年研究,并在高温光纤温度测量、光纤压力测量、光纤应变测量等领域取得了重大突破。实现了我国首套应用于航天型号飞行试验的光纤传感系统、高温应变测量系统的工程应用,先后承担了运载火箭、火星气象测量仪等多项重要型号工程光纤传感载荷研制任务。

6. 无源无线传感器

面向航天发动机的健康状态监测和推进剂的高效率利用的需求,对应变、温度、压力、振动等多种参量进行同时监测,即实现多参数复合集成测量,并与微执行器结合形成控制闭环测控系统是非常必要的。这也是目前国际上军用特种传感器的主要发展趋势。未来重点发展方向则是与无线传感网络技术、人工智能技术结合,使传感器发展成自适应、自学习的智能传感网络。

在无线无源 LC 高温压力传感器方面,根据烧结温度的不同可分为两种技术路线:低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fire Ceramic, LTCC)和高温共烧陶瓷(High Temperature Co-fire Ceramic, HTCC)。1998 年,乔治亚理工学院 Mark G.Allen 研究团队首次成功研制了基于 LTCC 技术的 LC 谐振型无源高温压力传感器,稳定工作温度达到了 450℃,该团队 2009 年又采用 HTCC 技术将工作温度提升到了 600℃。瑞典 Uppsala 大学的 Sturesson P 等人利用 HTCC 材料和后烧铂浆料制作感压结构和电感线圈,将传感器的温度进一步提高到 1000℃,但 1000℃时传感器的 Q 值降低到 3 以下,谐振点检测难度大。国内,中北大学在共烧陶瓷领域研究较为深入,2014 年报导了基于 HTCC 方案的传感器,工作温度达到 800℃,测压上限为 200kPa,非线性度为 7%,处于国内领先水平。在无线无源 SAW 高温温度传感器方面,欧美等国家的研究已相当深入,成果比较突出。美国 Environetix 公司研制的基于 LGS 晶体的高温 SAW 温度传感器(EVHT-100),并成功应用于涡轮发动机的温度测试。其性能指标如下:测温范围为 150 ~ 900℃,测量误差小于等于 10℃,时漂特性小于等于 1℃/150h,

寿命小于等于 500h，支持无线传输及阵列组网。国内还有中科院声学所、上海交通大学、电子科大等单位开展了 SAW 温度、压力传感器方面的研究，但主要集中在常温段或温度传感器方面，高温压力传感器的研究国内相关报道较少。

总体上说，航天传感器技术呈现以下发展态势：第一，传统航天传感器技术仍具有旺盛的生命力一些成熟定型的传感器技术，如：应变式、压阻式、压电式及热电式等传感器已有数十年的应用历史，现仍在各型号中广泛使用。第二，MEMS 传感器正在进入成熟期 MEMS 传感器固有的微型化、小重量、低功耗、低成本、集成化等优势，特别适合航天飞行器应用。目前，MEMS 传感器正在进入成熟期，已经有越来越多的 MEMS 传感器进入航天测控领域。第三，总线传感器和无线传感器网络技术已经成为航天传感器的趋势传感器数字化、智能化是现代传感器技术的发展方向，总线技术在型号上的应用已经开展。另一方面为了减少航天测量系统的布线、降低电缆重量、提高测量的灵活性，无线传感器技术近年来得到了迅猛发展。

航天传感器未来发展方向可归纳如下：第一，向高性能方向发展在当前超高密度发射任务背景下，各航天型号对传感器性能的要求在持续提高，有必要研制出一批具有灵敏度高、准确度高、响应速度快的新型传感器技术和产品，确保航天任务 100% 成功。第二，向高环境适应性方向发展因航天型号的特殊性，研究能够耐受恶劣热学环境和力学环境的高可靠特种传感器将是永久性的方向。大部分军用传感器的工作范围都在 $-50 \sim 85^{\circ}\text{C}$ ，而某些新型号航天器，如临近空间飞行器、氢氧发动机等型号对传感器的工作温度有更高或更低的要求，因此发展新型材料（如 SiC，SiCN 等特种陶瓷）的传感器将具有很好的应用前景。第三，向微型化、芯片化、智能化方向发展以往传统的传感器由于重量、体积、功耗都相对比较大，其应用空间越来越小。许多新型号航天器都对传感器提出了更严格的体积、重量、功耗限制和更高的免标定、自诊断和多参量数据融合等智能化要求，为此，必须采用新材料、新原理和新工艺，将传感器向微型化、芯片化、智能化方向发展。

二、微机械技术在航天传感器技术中的运用

（一）微机械技术分析

利用微制造技术生产出的微型机构、传感器以及控制电路等、通信信号整合

为一体的器件就称为微机械。微机械技术是一项系统性的技术，其不拘泥包括微机械技术、微电子技术，同时还涵盖了数学、光学、量子力学、电子学、仿生学等众多学科。从产品的角度来看，微机械技术指的是利用微制造技术所制造的微机械，包括集成性器件、系统等等。微机械技术以现代科学技术为基础，其属于纳米科学技术的范畴，是二十一世纪一项重要的技术，其在航空航天、国防、通信等各个领域都有着重要的作用。

（二）微机械技术在航天传感器技术中的运用优势

微型化、智能化。当前，航天武器型号呈现出机动性、小型化的发展趋势，例如小卫星、子弹头测控系统等，这就要求航天传感器更加微型化、智能化，采用传统技术制造的航天传感器重量较大（一般在 50g ~ 100g 之间），要想实现其体积和重量的减小势必会影响传感器的性能。此外，航天传感器的智能化发展符合航天型号的发展需求和型号故障、安全检测的需求。微机械技术能够有效实现航天传感器的智能化、微型化需求，打破了传统技术制造传感器的限制和弊端。

性价比高。微机械技术制造的产品性能十分优良，在制造航天微传感器的过程中，能够实现多元件批量化生产，这就有效实现了传感器制造的经济性。相较于传统技术制造的传感器来说，微传感器价格要低很多，当前，国外就已经出现了许多物美价廉的军用航天微传感器，且其市场推广效果良好。

可靠性高。在制造航天传感器的过程中，一些敏感元件至关重要，传统技术在制造这些敏感元件主要通过手工操作，这就难免会出现一些人工失误，使得传感器一些关键元件的可靠性不高。利用微机械技术能够实现关键元件的批量生产，各项制造参数十分准确、稳定，有效提升了航天传感器的性能稳定性和可靠性。

（三）微机械技术在航天传感器中运用的技术

后工序工艺技术。航天微传感器后工序工艺技术主要包括两个方面：①穿线及密封技术：穿线及密封是织造航天微传感器的关键步骤，也是关键技术，其对于提升航天微传感器的性能、成品率以及降低成本等方面都有着重要的作用。在穿线及密封的过程中，涉及两种穿线方法，一种是横向穿线方法，首先利用掺杂多晶硅做出外引线，之后对其进行高温处理，温度一般设置为 1100℃，在高温状态下，磷硅玻璃会流动从而将表面填平，之后对多晶硅和钝化层淀积，将引线孔开出，从而实现静电封接，通过横向穿线法能够将横向引线造成的不平整进行填平处理，另外一种则是纵向穿线法，在封接之前，用电火花开出引线孔，之后

进行封接，用蒸镀并将欧姆接触电极刻出来，利用导电胶连接外引线，从而实现引线和密封；②真空密封：在真空环境下，静电封接很容易出现真空放电的问题，这就给真空密封带来了一定的难度，在封接之后难以达到真空要求。

加工工艺技术。首先是深腐蚀加工工艺技术，传统的腐蚀方法有着一定局限性，容易出现侧向腐蚀的问题，难以实现深度腐蚀，在航天传感器的制造过程中，垂直壁的腐蚀深度要求达到 $10\mu\text{m}$ 以上，这就需要依赖于深腐蚀加工工艺技术。当前主要的深腐蚀加工工艺技术主要有 X 紫外线光敏聚酰亚胺技术和等离子刻蚀垂直深槽技术，首先需要制作电镀磨具，之后对金属结构进行电镀。第二是表面加工技术，将硅片作为衬底，将多晶硅层制作成微机械结构，这就能够实现将集成电路和传感器在一个基片上进行制作，制作出的成品质量较小，且体积较小，制作成本较低，经济性良好。第三是体加工技术，相较于表面加工技术来说，体加工技术更加复杂，体加工技术能够保证机械性能良好，因此，在航天速度传感器的制造中，体加工技术应用广泛。

三、低空经济传感器

低空经济是指在垂直高度 1000 米以下、根据实际需要延伸至不超过 3000 米的低空空域范围内，以垂直起降型飞机和无人驾驶航空器为载体，以载人、载货及其他作业等多场景低空飞行活动为牵引，带动相关领域融合发展的综合性经济业态。

作为一个全新的产业形态，低空经济勾画出一个全新的产业链架构。4 月初，工信部等四部门联合印发《通用航空装备创新应用实施方案（2024—2030 年）》，其中明确提到，精准定位、感知避障、自主飞行、无缝通信与监视、数字导航、智能化空域管理、低空智联网体系是产业关键技术，应急、物流、交通、娱乐消费、农林巡检则是五大重点应用场景。

5G-A 带来的通感一体对于发展低空经济至关重要，今天的重点开始转移到传感器上，这是实现无人机、直升机和 eVTOL（电动垂直起落飞行器）等低空航空器重要的元器件之一。

（一）低空飞行器里的传感器需求

低空飞行器主要面向应急、物流、交通、娱乐消费、农林巡检五大场景，这些场景中有大量的传感器需求，比如气象监测、遥感航拍、物品运输等，另外为

了能更好地控制低空飞行器的飞行，也需要大量的传感器。

5G-A 带来的通感一体技术简单理解就是，基于现有的移动通信基站实现通信，然后借助雷达的感知能力对低空飞行器进行追踪。这里面雷达虽然不属于传感器的范畴，不过定位确实是一个很大的传感器需求。

我们比较熟知的定位是 GPS。作为全球定位系统，GPS 可以提供飞行器的位置信息和速度信息，是目前定位技术中最为先进和最为精确的一种。在低空飞行器自主导航系统中，GPS 是用于确定飞行器位置、导航和航迹规划的基本传感器。它提供全球定位信息，帮助无人机在三维空间中准确定位。

除了 GPS，在低空飞行器的自主导航系统中用到的传感器包括惯性测量单元（IMU）、视觉传感器、毫米波雷达、激光雷达（LiDAR）、超声波雷达、红外传感器、气压计、磁力计和电子气象仪等。

对于低空飞行器来说，自主导航系统感知三维信息非常关键。虽然 GPS 能够获取经度、纬度和高度，不过有时候 GPS 会受到干扰，于是飞行器上就需要一种组合的传感器体系用于确认飞行器的姿态。IMU 便能够利用飞行器的姿态、加速度和角速度等信息来推测其位置和速度，算是 GPS 定位的一种补充。

不过，往往 IMU 确认的位置容易受到积分漂移、温度、制造工艺等方面的影响，产生一些测量的偏差。因此，在 IMU 起作用时，视觉传感器和雷达的融合系统在导航中的权重会更高，保障飞行器的安全飞行。

在低空飞行器的自主导航系统中，视觉传感器包括摄像头、红外相机和其他光学传感器，主要用于视觉导航、避障和实时图像捕捉；激光雷达可用于生成高分辨率的地形地图，进行三维地图构建、避障和环境感知；超声波雷达可用于近距离障碍物检测，帮助飞行器提高低高度时的安全性。

和无人机一样，预计光流传感器将会是低空飞行器的重要传感器。光流传感器是一种基于光学原理的传感器，它可以通过感知光线的变化来实现精准位置控制。举一个简单的例子，光流传感器在不同的高度向左位移同样的距离，相同物体在光流传感器相机视野中向右位移的距离是不同的。那么，光流传感器通过运动物体在成像平面上的像素运动的瞬时速度，从而计算出物体的运动信息以及高度。

同时，为了保持飞行器时刻处于正常的姿态，各种陀螺仪、加速度计和磁力计的用量也很大。这里面，陀螺仪能监测三轴的角速度，角度信息的变化能用来

维持无人机稳定并防止晃动，陀螺仪对飞行器对抗风力也有非常大的帮助；加速度计能够测出飞行器在 XYZ 三轴方向所承受的加速力，确保飞行器在静止和运动时接受到的动力输出是正确的，加速度计还可以用来监测无人机所承受的震动。另外，为了降低载人飞行器的噪声，MEMS 麦克风的应用也会非常广泛。

用到如此多的传感器，那么这些传感器是否会具备一些共同点呢？在产品特性方面，稳定、精确和低功耗将是低空飞行器对传感器的统一要求。稳定和精确都很好理解，我们简单说一下低功耗，低空飞行器主要采用电动的方式进行驱动，能量来源于电池，为了获得足够远的续航，各个零部件都要有低功耗的要求。另外，部分传感器还需要有联网功能，以及能够抵御严苛的环境挑战。

（二）国际传感器大厂仍占主动

有人说，低空飞行机就是“传感器飞上天”，或者将低空飞行器称为“会飞行的传感器”，这些说法都有一定的道理，确实低空经济将是传感器领域巨大的发展机遇，带来很多全新的需求。当前，无论是政策还是产业都非常关注。传感器企业需要为通用航空器提供包括温度、压力、加速度、流量、位置等在内的各种类型传感器。

有业者曾说，打造低空飞行器本质上就是打造一架飞机。那么，在通用航空传感器的供应上，由于对传感器品质和性能有很高的要求，国际传感器大厂有很大的竞争优势。比如，霍尼韦尔提供的通用航空航天接近传感器 (GAPS) 系列，这款传感器传统 ECKO（涡流杀振荡器）拓扑的改良技术，一直是航空航天应用中的标配技术。在通用航空市场，霍尼韦尔拥有丰富的传感、开关和装配方案。

在通用航空的压力传感器方面也很有名，主要应用场景包括辅助动力装置、液压传感器高压密封表压和绝压、推进 / 发动机、环境控制系统、电子压力开关和组合 / 双联。

在 IMU 和陀螺仪的供应上，也是 TDK、ADI、ST、博世和霍尼韦尔等国际厂商处于性能领先的位置。在 MEMS 加速度计方面，博世、ST、NXP、ADI 和村田的产品都很有优势。在低空飞行器市场，国内整体还面临着高端传感器缺失的问题。

不过，为了响应万亿规模的低空经济发展，国产传感器也已经有所谋划。2009 年，国家就专门发文要在全国内推广应用国产低空无人飞行器航测遥感系统，主要承担单位基本是各科研院所。目前，国内也拥有安培龙、芯动联科、

奥比中光等传感器厂商, 皖科、海凌科、智芯等传感器模组厂商, 以及豪恩汽电、星纵物联、博感科技等传感器方案商。不过, 目前国产传感器在低空飞行器方面尚未形成完整的供应链。

传感器是低空飞行器的“眼睛”和“耳朵”, 负责收集外部环境的信息。在万亿级别的低空经济市场, 对传感器有巨大的需求量, 尤其是飞行姿态保持和自主导航方面, 传感器更是不可或缺的器件。不过, 在通用航空传感器方面, 国产传感器目前的竞争力还比较弱, 主要由国际厂商把持这一市场, 和其他高端传感器市场情况类似。当然, 国内传感器在低空飞行器领域的布局并非空白, 也已经有了一些进展。

四、新型航空传感器快速处理方法

随着国内外新型航空传感器快速发展, 如三线扫描式的 ADS40、80 系统、宽幅 SWDC、UCD、DMC 数字相机在我国开始大范围使用, 现有的航空遥感数据生产采用单机、串行的生产作业模式人工干预量大, 软件智能化程度低, 严重束缚了数码航空影像高效、快速处理, 更难以满足突发事件应急响应和多种航空遥感应用发展的需求。因此, 在现阶段对获取的高分辨率航空影数据如何实现快速处理仍然是一个亟待解决的瓶颈问题。

(一) 海量航空遥感并行快速处理技术

新型航空传感器由于获取信息速度快、几何分辨率高, 其处理的数据量呈几何倍增, 需要有效地解决海量航空遥感影像数据的多级并行处理机制、海量航空遥感影像的自动空中三角测量、POS 辅助的海量遥感影像无 (稀少) 控制方位参数精化、大尺度三维地形信息精确提取、大区域大比例尺数字影像图智能镶嵌及海量航空遥感数据自动化处理质量控制等关键技术, 实现海量航空遥感快速处理的自动化、并行化和智能化。

形成并行计算体系和开放式体系结构。研发多机、多核的两级并行处理算法, 通过最优化理论和多级优化算法, 对任务队列进行了高效合理的自动管理与分配; 利用 GPU 实现了对影像处理过程的硬件加速, 实现了持续或者近似 100% 地利用所有计算机、所有 CPU 从而使生产效率最大化。采用共享资源池的分布式调度模式, 如图 1 所示。集群计算机作为计算资源, 磁盘阵列作为存储资源, 二者共同构成资源池, 可以为网络中分布的工作站所共享。服务器集群则用于管理构

成共享资源池的各种资源,并对网络中分布的工作站提供必要的资源申请和目录查询等各种服务。

系统根据自动化处理与人工编辑作业相分离的设计原则,将测绘生产中自动化算法设计成基于网络的并行处理程序。将处理对象分解为影像、模型、航带等,鉴于遥感影像的海量数据特点,任务分解时需要合理选择并行处理粒度,尽量避免由于网络结点间大数据传输引起的系统效率下降。确定并行处理的任务粒度后,建立整个处理任务的任务列表达到系统负载均衡。曝光点获取的在物理存储上互相独立的单幅影像,匹配的并行计算应以各立体像对和航带为单元,对测区影像的匹配任务进行并行计算的子任务划分每台刀片服务器为一个计算节点,各计算节点同时对各单航带影像进行航带内的匹配和转点。搜索应遵循以下原则:①扩大匹配的搜索范围,以确保同名点位于搜索范围内。②物体表面连续光滑的假设在宏观上不成立,应保证所有目标点匹配之间的独立性,即每个目标点的搜索范围应均等。③在大范围搜索情况下,为了提高匹配的速度,保证匹配的成功率和可靠性,应采用基于多级金字塔影像和由粗到细的匹配策略。④几何约束条件与局部连续光滑约束条件依然是必要的。线阵影像的物理存储是以条带为单元,即一个条带的影像存储在一个大的文件中。如一个航带的三线阵影像包括前视、下视和后视3个条带的影像数据,各视的条带数据分别独立存储在一个大文件中。因此三线阵影像空三自动匹配的并行计算必须先将三线阵影像在逻辑上划分为若干块,然后以逻辑块作为子任务发送给集群计算机的多个计算节点进行并行匹配。

三维地形信息快速提取。多特征匹配使数字表面模型可以更好地反映地形地貌特征,匹配算法在传统特征点匹配的基础上增加了直线和曲线特征(用来表示地形特征线,如道路、山脊和建筑物边缘等)的匹配。将传统的特征点整体松弛匹配也扩展为点、线特征的混合松弛匹配。除此以外,在点、线混合松弛过程中,三角网是一种非常高效的数据结构用于确定某个匹配点邻域中的松弛点。为了提高匹配的成功率,同时抑制误匹配率,除了最高一级金字塔影像以外,其余每一级金字塔影像(包含原始影像)匹配时都要根据上一级金字塔影像的匹配结果和影像的纹理特征对匹配参数进行自适应的调节。其中匹配参数包括影像相关窗口的大小、物方搜索范围、相关系数阈值以及特征点提取格网的大小等等。例如对于平坦地形,相应的物方搜索范围就需要小一些,而特征点提取格网则可以适当大一些;又例如影像上纹理特征比较匮乏的区域(水域或阴影区域),就应当适

当增大相关窗口和提高相关系数阈值等。

正射影像制作。正射影像制作中常用的遥感影像匀光处理包括补偿法和滤波法。补偿法中可以通过数学模型模拟,也可以通过低通滤波的方式来反映影像亮度变化,然后再对影像不同部分进行不同程度的补偿,从而获得亮度、反差均匀的影像。对于 DMC、ADS40 等特定相机拍摄影像,使用相应的数学模型模拟相机成像造成的不均匀光照现象;对于其他情况的不均匀光照,目前常用传统光学晒印中的 MASK 匀光,使用低通滤波结果模拟影像亮度变化。滤波法中常用的是 Wallis 滤波器,将影像局部均值和方差调整至给定的均值和方差,使影像不同位置处的灰度均值和灰度方差具有近似相等的数值,以达到匀光效果。快速镶嵌技术以 BBI 文件的小块为基本镶嵌单元,寻找每一小块与单幅正射影像中心点(或者影像的摄站坐标)的最小距离,以最小距离所对应的单幅正射影像作为该小块的纹理填充源进行快速填充,该方法实际上与基于 Voronoi 图的镶嵌方法类似。给出镶嵌线的初始位置,然后再人工修改镶嵌线以避免穿过房屋、树木等高出地面的地物或者灰度差异大的区域。目前数码航空影像已经成为航测生产最主要的数据来源,其高重叠度、大比例尺特征大大增加了正射影像镶嵌处理的工作量。可以利用蚁群算法来实现镶嵌线的自动检测。

(二) 航空摄影实时在线处理技术

面向航空遥感系统快速发展及实时信息提取的需求,解决航空遥感数据实时检测与监控关键技术,研究数码航摄仪与定位定向系统集成、实时定位与测姿参数解算、数字影像图实时拼接、航空遥感影像几何与色彩质量评定等技术,建立机上实时检测与处理,服务于航空遥感质量保障、快速响应、实时监控与指挥决策等应用。

机上航空传感器位置姿态实时解算技术。研究机上航空遥感快速处理硬件集成技术,通过国产自主航空数码相机及 POS 系统集成技术,实现机上数据处理设备的快速通信与调度,利用机上实时处理硬件平台,实现机上 GPS 摄站坐标数据的高精度实时处理,IMU 姿态数据实时解算与输出。主要包括信息采集、时间同步、坐标转换、IMU 和 GPS 数据实时联合解算、外方位元素内插与改正等主要环节。

航空遥感影像几何质量实时评定。在航空影像数据采集过程中,由于天气和飞行计划等因素的影响,可能存在漏拍、影像重叠度不够、旋偏角过大等情况,

如能在飞行过程中实时计算出航摄漏洞区域,指导实时补飞,则可以大幅节省数据获取成本。采用影像所对应的外方位元素来计算相关的数据,根据规范要求的最小航向、旁向重叠度、各条航带的航偏角等参数,对航摄区域数据进行质量评定和分级,对几何质量不合格地区的信息进行综合分析,为制定最优航摄补拍方案提供数据。航空遥感影像几何质量实时评定首先读入航摄遥感影像以及解算的定位定姿的数据。为保证实时处理的需要,采用通过实时解算得到的定位定姿的数据来计算重叠度、旋偏角、航线弯曲度。首先通过外方位元素角元素将倾斜影像置平,然后根据外方位线元素确定置平后的水平影像的缩放参数,以上两步可以合为一步完成以降低系统处理的时间,通过统计相邻影像重叠的像素数来计算相邻影像的重叠度,确定整个区域的重叠度图。

航空遥感影像色彩质量实时评定。航空摄影影像的质量关系到内业数据处理的效率与成果质量,影像数据模糊会导致空三精度与立体测图精度下降,颜色质量差导致 DOM 制作过程中编辑工作量大,DOM 成果观感差。航空摄影时应保证影像内容清晰、亮度对比度适中、色调饱和、无大面积阴影区域、无云与云影等,同时还应保证相邻影像之间的色调基本一致。需要研究确定描述影像质量的定性与定量指标(包括信息熵、信噪比、均值方差、平均梯度、灰度动态范围、亮度空间分布均匀度与颜色空间分布均匀度等)、阴影检测与云量实时估计等算法。通过对阴影特性进行分析,选取能够有效检测阴影的特征组合,改进了 Otsu 阈值算法,可以自动获取各特征的合适阈值,实现阴影的自动检测,并提出了改进的 Wallis 滤波阴影补偿策略,突出阴影区域的地物信息。实验结果表明,该检测算法简单有效,精度和适用范围均得到有效提高,阴影补偿效果明显,真实再现了被阴影遮蔽的地物细节。

全景影像图实时拼接技术。全景影像图与正射影像不同,它是原始影像的直接拼接结果,无需地面控制点和数字表面模型等已知数据,也无需正射纠正。尽管快速拼接图不是基于严格的共线方程正射纠正生成,也没有考虑地形起伏的影响,相邻影像在拼接线附近会存在一定的接边误差,但具有很强的实时性,完全满足测区整体现状评估、土地利用现状调查、自然灾害快速响应、外业控制点设计与布设等方面的要求。研究航空相机与定位定向系统的高精度集成方法,对位置和姿态参数进行实时计算与坐标转换,采用机上实时处理平台对各影像进行实时镶嵌,实现数字影像图的在线拼接。处理过程中首先读入预处理后的航摄遥感

影像、预先设计的航线计划信息以及对应的定位定姿数据；根据航摄计划中的测区信息及全景影像图的比例尺计算出拼接图大小。待解算出当前影像的外方位元素后，根据外方位元素和影像 4 个角点的影像坐标按共线条件方程解算出该张影像在全景图像中的覆盖范围，然后根据共线条件方程和原始影像的灰度信息得到全景图该范围内的每一像素的颜色值，在此过程中检查拼接图上每一像素的重叠度。按照该方法生成全景图实质上是利用外方位角元素组成的旋转矩阵将倾斜影像变换为水平影像，然后根据外方位线元素平移缩放影像至全景图中正确的位置。

新型航空传感器快速处理必须依赖并行计算、信息化和高度智能化，其结果必将引起生产方式变革和生产效率大幅度提高；航空影像进行几何质量、遮挡损失、色彩质量等方面的在线评定可以调整航摄策略，实现高质量影像的准确获取及满足应急的需要。

第三章 航空电子传感器技术

第一节 航空传感器故障诊断

一、民用飞机飞控系统传感器故障诊断

故障诊断是指在系统运行过程中能够发现故障的发生和获得故障的信息，具体包含故障检测和故障隔离两个关键部分。随着自动化技术和信息技术的发展，故障诊断技术被广泛应用于航空航天领域，在多种不同类型的飞行平台上得到实现，有效提升了飞行器的可靠性，保证了飞行任务的安全执行。飞行控制系统是现代飞行器的关键系统之一，传感器是飞行控制系统实现反馈控制的重要环节。为了保证民用飞机的安全性和适航性达到要求，在设计上需要对关键传感器进行物理冗余，通过对不同源信息进行比较、投票、加权、平均、监控保护和切换等处理来判断和定位传感器故障，以保证信号安全。例如，波音 777 使用的大气数据惯性基准系统，包含容错大气数据和惯性参考单元，以及备用大气数据和惯性参考单元，备用部分可以形成重要数据的非相似备份。除了传统硬件冗余方式，非硬件冗余方式也受到广泛关注。典型的非硬件冗余的故障诊断技术包含解析余度和信息余度。随着控制理论和计算机技术的发展，工业界和学术界均在积极探索利用软件方式来实现故障诊断和容错。

（一）传感器故障模式和设计考虑

民用飞机飞控系统一般包括陀螺仪、加速度计、大气数据系统中控制用传感器、北斗、GPS 等传感装置。典型传感器的故障表征形式包含失效故障、短路故障、恒偏差故障、漂移故障和精度损伤故障。上述故障可以分为两种类型：一种是与原信号有关，是在原有信号的基础之上出现对系统影响较大的误差、畸变或干扰，如恒偏差、精度损伤、噪声等；另一种是与原有信号完全无关的故障，如传感器失效、短路等。二者相比，保持原信号信息的故障信号诊断更为困难，故障信号在正确信号中的占比也会对诊断的效果造成影响，弱小、慢变的故障信号误报和漏报的概率也会更大，需要更高的检测精度和速度。

对于民用飞机来说,关键传感器故障的诊断需要同时考虑安全性和经济性两方面。一方面,民用飞机的设计和运行首先要满足安全性和适航性要求。以运输类飞机为例,从 CCAR25.1309 条款规定可以看出,对于执行关键功能的飞控系统传感器来说,必须尽可能地降低各类故障对操纵的影响,将单一传感器的失效概率降为极不可能,满足航空器“失效—安全”的设计理念。这就要求系统具备一定的故障诊断和容错能力,及时发现和处理故障,确保反馈飞机状态信号的正确性,保证飞机的飞行安全。另一方面,轻量化是未来民用航空器发展的重要方向之一,是主流民用飞机厂商的重点研制生产目标。轻量化设计不仅可以从经济上为航空公司节省成本、扩大收益,而且是实现绿色环保、降低污染物排放的重要途径。从设计角度考虑,除了对飞机结构和材料有着更高的要求以外,机载设备的配置和使用也要同时兼顾安全性和实用性。对于一般的冗余方法来说,双余度可以检测到故障的产生,但难以判断具体的故障信息;三余度和四余度技术可以定位故障传感器位置,但经济成本和设计代价较大,对于多故障同时发生的状况也较难诊断。由此可以看出,现有飞机的关键传感器硬件余度方法可以满足 CCAR25.1309 条款要求,但多余度的设计也给重量和成本带来一定的负担。可见发展非硬件冗余方式具有一定的潜力。

(二) 基于模型方法研究现状

基于模型方法具有简单实用、物理概念性强等优点,工业界和学术界都在探索利用“软”余度来替代传统的物理硬件余度,在满足航空器的安全性要求的同时,提升飞机经济性。现有型号中,空客 A380 和 A350 利用基于模型方法诊断飞控作动器中的非指令信号故障,并通过局方适航审定。国内外学者围绕基于模型方法对传感器故障诊断开展了广泛的研究,典型的算法有 Kalman 滤波器(KF)、未知输入观测器、滑模变结构方法、LPV 滤波器、鲁棒控制等。

学者们利用滤波与估计的方式来预测系统状态,诊断传感器中出现的故障。KIYAK 设计了未知输入观测器,利用产生的残差探测和隔离故障,并应用于大型客机的作动器和传感器故障检测;DELOZA 等建立了高阶滑模微分器对状态进行预测,诊断波音 747 迎角传感器出现的故障,并且算法在 Simona 模拟器上得到了验证;OSSMANN 等设计了基于 LPV 故障探测滤波器,用于诊断飞机迎角传感器出现的漂移、噪声和振荡等故障,仿真结果表明所设计的系统具有鲁棒性;ALWI 等也在鲁棒 LPV 方法的基础上,设计了滑模观测器来抑制模型不确

定性对传感器故障诊断带来的影响；ALCALAY 等设计了基于自适应扩展卡尔曼滤波算法（EKF）的“虚拟传感器”，用于在线估计飞机纵向运动参数，以避免单一传感器故障对飞行造成影响；HENRY 等分别设计了两种滤波器进行比较，其一是对故障信号 H 范数的最优估计，其二是基于 H/H_* 算法的混合滤波器，实现对故障的敏感性增强和降低未知输入信号带来的影响；BERDJAG 等专门针对飞机中惯性系统出现的非指令振荡信号，利用谐波滤波器来对故障进行诊断；RAFI 等考虑强发动机喘振影响飞机速度传感器测量精度的情况，设计了基于观测器的诊断算法来平滑速度信号，最终在 CJ-144 飞机的试飞实验中得到验证；JOSHI 等利用增广状态来认定传感器偏置故障的充分必要条件；ZAHED 等利用 EKF 设计了迎角与空速的“虚拟传感器”，加强信号的可靠性，增强控制品质；胡锐等基于模糊逻辑和平均加权思想，设计出了一种随陀螺误差累积时间变化的自适应故障检测算法，并通过多种传感器重构故障信号。

传统的基于模型方法存在着动力学建模不精确和对非线性处理过于简化的弊端，尤其在处理复杂的气动力和力矩上较明显。许多学者为了回避这个问题，提出了利用基于非故障机载传感器信息建立的运动学模型来对故障进行诊断。VANEYKEREN 等基于 EKF 算法，利用运动学模型解析余度诊断波音 747 中大气数据传感器（Air Data Sensors, ADS）出现的故障；LU 等在此基础之上设计了二阶自适应 EKF 算法，基于运动学模型实现了对惯性测量单元中偏航角速率故障信号的诊断，最后利用真实飞行数据表明了二阶自适应 EKF 算法具有强鲁棒性。

针对控制系统中可能出现的多故障情况，LU 等同时考虑了作动器故障和传感器故障，针对航姿参考系统和 ADS 故障，设计了包含故障诊断系统和重构系统的飞行容错控制系统，这种设计打破了传感器故障诊断以作动器正确运动为前提的假设，为系统赋予更强的鲁棒性；BOŠKOVIĆ 等在考虑作动器故障和发动机慢变故障的基础之上，又引入了 ADS 失效故障，基于此设计了基于自适应方法和状态观测器的“虚拟传感器”，并给出了系统稳定证明；董文瀚等也针对大型运输机同时考虑了作动器故障和传感器故障，设计了基于神经网络的扩张观测器来实现系统的故障诊断与容错。

（三）基于信息方法研究现状

基于信息方法（数据驱动方法和基于信号的方法）是利用过去和现在信号中

包含的信息来判断故障是否存在的一种故障诊断手段。基于信息的核心思想是利用储存数据和其他各类传感器数据进行信息综合来判断信号是否在正确范围内,典型方法有信号处理、粗糙集、多元统计分析、信息融合、人工免疫、专家系统、智能学习算法等。各国学者从 20 世纪 80 年代开始就围绕这一思路开展对于飞机传感器的故障诊断研究。HANDELMAN 等在解析冗余度的基础上,通过建立基于规则的专家系统来增强对于传感器故障的监测能力;OOSTEROM 等针对小型商务机的冗余传感器系统,研究了基于模糊逻辑的传感器信息综合系统,抑制单一传感器故障,并设计了“虚拟传感器”辅助投票,诊断二冗余度传感器的故障信息;OSSMANN 等利用基于模型和基于信息的复合诊断方式检测和定位大型商务机的迎角传感器,其中,基于信息方法主要应用了离散傅里叶分析和特征检测技术;张玉等基于飞控系统传感器故障产生的突变成分,通过小波包对原始信号进行分解,提取特征作为神经网络的训练数据;宁东方等结合遗传算法和小波变换,设计了针对飞控传感器 3 种不同故障的自适应诊断算法。

神经网络一直是基于信息方法的热门算法之一,许多学者的故障诊断研究都是基于神经网络开展的。WAN 等提出了基于 RBF 神经网络的在线学习传感器故障诊断算法,同时在结构内引入内嵌滤波器增强对传感器故障的敏感程度,降低对噪声和干扰的敏感性;李刚等提出改进的经验模态分解—排列熵算法,对固有模态信号进行重构,以此为训练样本,建立概率神经网络模型预测陀螺故障。虽然现阶段已有学者对此进行了初步研究,但理论研究和实际应用都还有很大的空间待挖掘。

除神经网络以外,也有学者不断探索新的机器学习方法在传感器故障诊断上的应用,其中,支持向量机(SVM)凭借优异的分类性能受到多学者的关注。胡良谋等提出了基于最小二乘 SVM 的飞控系统故障诊断方法,在保证诊断精度的同时,对于学习的速度也有所提升;吴学钊等采用自适应局域均值分解提取电传飞控传感器故障的特征值,基于 SVM 方法对故障进行分类;尹伟等研究了基于差分交叉验证的 SVM 飞控系统传感器故障诊断算法,仿真结果表明,算法的分类效果在故障分类上具有一定的优势。除上述研究之外,化永朝等综述了可诊断性的概念,并分别从定性模型、定量模型和数据驱动 3 个角度对该概念进行解释,为航空器故障诊断提供了一种新思路。

（四）当前面临问题及未来发展趋势

1. 当前面临问题

随着飞机各系统的复杂度不断提高，机载先进传感器的种类也在不断增多，造成冗余技术复杂性提升。例如在冗余中要考虑到空间隔离、非相似信号和时间同步等问题。复杂系统的非预期故障或多故障组合的检测与隔离也是当前的技术难点之一。因此，在飞机的设计上，需要对机载设备的配置进行全局分析，结合先进方法，保证设计能覆盖所有指标。从故障诊断算法角度来说，虽然可以从软件上解决飞控系统传感器故障诊断问题，为航空器带来成本上的优势，但软件的故障诊断始终无法从安全性角度充分表明其符合适航规章要求。一方面，从理论上无法充分表明符合性，其设计需求、稳定性判据等都与传统的算法有很大的区别。现阶段，故障诊断技术也围绕着越来越多的学习算法展开，但学习算法展现出的大量不确定性（如给定相同的输入时在不同学习阶段可能输出不同结果）是现有适航审定条款和常用符合性方法无法覆盖的。因此，如何表明先进算法设计的安全性始终是技术推广至应用的“鸿沟”。另一方面，现阶段仍缺乏大量的实际飞行数据，不能用充分的试验来暴露问题，为适航审定积累信心。除上述问题外，各类不同算法虽然在理论证明和仿真试验中表现出具有一定程度的先进性和鲁棒性，但实际上也会面临依赖模型精度、设计和计算过程复杂、无法直接与物理概念挂钩等缺点。

2. 未来发展趋势

硬件与软件复合冗余方式。传统的硬件冗余方法可以带来充分的安全性，已有多型号飞机通过适航审定并持续安全运行。软件方法可以在不增加额外设备的前提下，实现对飞控系统中故障的检测和分析。但现有大部分软件方法还较难表明其安全性达到适航要求，先进方法在飞机上的应用还需要在适航符合性方面加强。两种方法各有优缺点，现阶段复合冗余方式更为合适。利用硬件冗余加强安全性，满足适航要求；同时，利用软件冗余提升故障诊断性能，增加试飞数据，可以为下一步适航审定提供支撑。

多传感器的信息融合带来安全性的提升。现阶段机载传感器种类和数量不断增多，可以实现对多种飞机运动信息精确测量。飞机的传感器信息处理也在朝着综合化与交互化的方向发展。现阶段信息交互与信息融合是计算机和自动化技术发展的重要方向之一。下一步可以基于此技术，探索将其应用于某一类型传感器

失效的情况下，利用其他多种类型传感器的信息融合，重构出高置信、高可靠的故障信号源（虚拟传感器），抑制故障传感器对飞机稳定与操纵的影响，提升飞机的安全性。

二、风传感器故障检测与诊断

风是大气中温度和压力不同导致空气对流形成的。风是影响飞行安全的主要气象要素之一，影响飞机起降的滑跑距离、航线飞行以及侧风时起落。飞机航向与侧风存在一定角度，才能使飞机不致偏离跑道，当侧风风速超过一定速度时，则不能起降。风切变容易造成飞行事故，严重影响飞行安全。洛阳机场是集航班运输生产任务和民用航空教学训练同场飞行机场，飞行训练使用的机型较小，对天气条件要求更高，春季和秋季大风经常严重影响飞行计划实施；因此，准确测量风数据是非常重要的。洛阳机场测风设备是 08 跑道和 26 跑道上气象自动观测系统（AWOS）中风向风速传感器（WAA151/WAV151）。

（一）风传感器

1. 风传感器组成

风传感器分为两部分：风速传感器和风向传感器。风速传感器包括 WAA151 风速传感器和 WT501 风变送器。风向传感器包括 WAV151 风向传感器和 WT501 风变送器。风向风速传感器安装在距离跑道中心线 130m（左/右）、高度 10m 的同一个风杆上，风杆顶端配有避雷针，采集的数据通过电缆接入自动气象站，再由自动气象站通过通信线路送到 AWOS 服务器上。风传感器内有一个额定功率 10W 的加热元件，在温度低于 4℃时热动开关开启，加热元件工作，确保寒冷天气时轴承不冻结。

2. 风传感器工作原理

风向风速传感器（WAA151/WAV151）为机械转动式传感器，感应距离地面 11m 处的空气速度和方向，感应的风数据经光电转换、数字量化、时间平均、存储等处理后，由通信线路传到室内的 MCU111 通信单元上，MCU111 负责外场传感器的数据采集以及与中央处理器（CDU）之间的数据交换，CDU 将处理好的数据经光纤传送到东、西塔台和调度室等用户终端，用户可以随时查看实时风气象数据。

（1）风速传感器 WAA151

洛阳机场风速测量使用的是 VAISALA 公司生产的光电式风速计，测量范围： $0 \sim 75\text{m/s}$ ($0 \sim 260\text{km/h}$)；准确度： $\pm 0.1\text{m/s}$ ($\text{风速} < 10\text{m/s}$)， $\pm 0.1\text{m/s}$ ($10\text{m/s} \leq \text{风速} \leq 75\text{m/s}$)。图 2 为风速传感器结构图。风杯凹面迎风时承受风压最大，凸面迎风时，由于风的绕流作用使其所受风压较小，这种压力差使得风杯向凸面方向旋转。风感应器内，连接转动轴的锯齿形圆盘在光耦发光二极管与光敏三极管之间转动，锯齿形圆盘上有 14 个齿，每个齿代表 0 状态，每个切口代表 1 状态。当齿盘随轴转动时，发光管 LED 发射的光束被齿盘上的齿度切割，光敏三极管输出脉冲，脉冲数正比于风速。风速越大，风杯压力差也越大，转动越快，根据风杯转速可测得相应风速。

（2）风向传感器 WAV151

风向测量使用的也是 VAISALA 公司生产的光电式风向标，测量范围： $0^\circ \sim 360^\circ$ ($\text{风速 } 0.3 \sim 75\text{m/s}$)，最小识别方位： 5.63° 。图 3 为风向传感器结构图。气象上将风向的力分解为垂直于尾翼平面的力及与尾翼平面平行的力，平行力对尾翼不产生作用，而垂直尾翼的力产生力矩，使风向标围绕垂直轴转动。正对风向时，尾翼两面受力相等，转动力矩为零，风向标达到稳定状态，此时风向标头部所指方向即为风的来向，即风向。在风向传感器内，当风标随风旋转时，带动主轴及码盘一起旋转，产生 6 位格雷码脉冲，每变化 5.63° ，格雷码变化 1 次。脉冲由光电三极管接收，经电路整形后输出，风向数据也随之变化 1 次。格雷码相邻码道只有 1 位码发生变化，可有效地避免二进制编码两个码道不同步而产生的误码。

（二）常见故障分析

因风向风速传感器安装在 10m 高的风杆顶端，一般情况下无法开展日常维护，平时巡检中要特别注意观察风杯和风向标转动是否灵活、平稳。冬季低温，当湿度很大时容易结冰，设备巡检时尤其要多观察风传感器是否有冻结现象。洛阳机场每年大雪天气都会出现风传感器的轴承因温度低被冻结，但加热元件功率低，不能使轴承积冰融化，导致采集不到风数据。新的气象自动观测系统针对风传感器这个缺陷进行了改良和完善。

1. 风速传感器故障

（1）故障现象

自动观测服务器的显示风速为 0m/s 或者风速示值和气象遥测系统采集的风

速值有明显偏差。

(2) 故障分析与排除

先检查电源供电是否正常,电缆是否松动、老化、开裂或被鼠咬;检查通信线路是否正常;如果都正常,在冬季检查轴承是否被冻结,此类故障有可能是由于环境污染传感器里的轴承引起的,也有可能是由于堵塞转动部件和静止部件之间的缝隙引起的。发生此类情况需要拆卸传感器,进行清洗。传感器是非常精密的仪器,在拆卸时要严格按设计图逐步进行拆卸和安装。在拆卸过程中发现轴承磨损,应更换轴承;4)若上述检查都正常,则判断传感器电路发生故障,更换传感器。

2. 风向传感器故障

(1) 故障现象

自动观测服务器的风向示值一直不变或者风向示值和气象遥测系统采集的风速有明显偏差。

(2) 故障分析与排除

1)检查方法和上述风速传感器相同;手动转动风向传感器,显示的方位跳变,则说明有个别的红外发光二极管发生故障,检查维修;若上述检查都正常,带电测量风向传感器,若有故障,更换传感器。

由于风传感器安装在 10m 高的风杆上,日常维护是通过感应示值和到现场目测判断其工作是否正常;所以,加强巡视对于传感器的维护十分重要。大部分的故障都是传感器里的轴承磨损造成的。在极端天气过后,比如大雪天气,必须加强外场设备的巡检次数。雪天容易造成轴承冻结,导致风无测量数据,冰雹天气,可能会对风杯造成一定的损坏。所以在风传感器维修中首先要保持思路清晰,逐步排除故障,便于及时发现故障点,及时排除。

三、无人机飞控系统故障诊断技术

无人机作为新兴技术,在军事、民用、农业等多个领域有着广泛的应用,尤其是军事领域,它的研究和应用给军事作战带来了重大的改变,使军队的作战能力得到了极大的提升。然而,随着无人机的大量应用,无人机发生事故的频率也迅速增加,据数据统计,它发生的事故大约 31% 是由于人为因素,而约 59% 是由于设备故障导致的,其余的是由环境因素所导致。其中,无人机飞控系统一般

包括传感器、执行机构和机载计算机三大部分，是最容易发生故障的系统。无人机飞控系统的作用相当于人类的大脑，能够对无人机飞行姿态和运动参数进行实时控制。因此，飞控系统的健康是无人机可靠安全的重要保证。无人机的故障诊断技术是指在无人机系统出现故障时，利用各种测量手段，对故障造成的影响进行量化分析，以确定故障的类型、位置和原因，并给出有效的维修方案，以解决故障问题。近年来，海内外的学者对无人机飞控系统的故障诊断技术进行大量研究，旨在通过深入分析无人机的故障原因，为无人机的安全和可靠性提供保障，并且能够有效地降低故障维修和更换的成本。

从 2010 至 2022 年期间与无人机故障诊断相关的大量文献来看，学者针对无人机故障诊断技术研究稳中有进，总体上呈现递增趋势。特别是 2016 年后一直保持较大的递增趋势，表明世界范围内无人机故障诊断技术研究已经引起众多学者的广泛关注，意味着无人机故障诊断技术具有重要研究价值。由于政府对无人机研究的大力支持以及各研究机构对无人机故障诊断技术的研究投入，使得无人机故障诊断技术得到大大提升。例如，在无人机传感器的故障研究中，神经网络法被许多学者在无人机传感器故障诊断的研究方面广泛应用，将神经网络法应用于无人机传感器的故障诊断，避免了复杂数学模型的建立。而在执行机构的故障研究中，深度自编码器和优化的卡尔曼滤波器等应用最为广泛，这两种方法的使用提高了故障诊断的精确度以及适应噪声的能力。

（一）无人机故障机理分析

自 20 世纪末起，无人机系统的故障检测与诊断技术开始步入了理论与实际应用的发展，几十年来，学者提出了大量的方法并逐渐得到完善。由于繁琐的非线性系统需求持续在增加，不断有学者相继提出了一些新的理论知识和方法，优化这些能够满足系统可靠性、实时性和稳定性要求的方法一直以来都是学者们关注的重点。由于无人机系统复杂多样导致无人机的故障种类繁多。无人机飞控系统故障按部件分为传感器故障、执行机构故障以及其他部件故障。

1. 无人机传感器故障

无人机是典型的多传感器系统，包括全球定位系统（GPS）、陀螺仪、加速度计、空速管、风传感器等。传感器故障对于在反馈控制下运行的系统具有灾难性的后果，为了实现精确的控制，传感器必须是可靠的。在无人机应用中，迫切需要开发一种具有可重构能力的飞行控制系统，来诊断传感器的故障，并应用于

针对故障模式设计的控制算法。在工程中常见的传感器故障类型有偏差故障、开路故障、断路故障、周期性故障以及漂移故障。偏差故障是指在一定时间后,传感器的测量结果与被测参数的真实值之间会出现一个恒定的误差。开路故障是指在一定时间后,传感器的测量输出值为一恒定值。短路故障是指在一定时间后,传感器的测量输出值归置为零。周期性故障是指在一定时间后,传感器的测量输出值叠加某一频率的信号。漂移故障是指在一定时间后,传感器的测量输出值以某一速率偏移原信号。

2. 无人机执行机构故障

无人机的执行机构是飞行控制信号的直接执行者,它们负责接收和处理来自机载传感器和飞行控制系统的指令,并将其转化为有效的飞行控制信号,从而实现飞行控制功能。由于频繁的任务执行和环境干扰,无人机执行器通常会遇到各种故障,导致效率降低以及电路和机械的损坏。执行机构故障可以分为部分失效、完全失效和失控。部分失效指电机电压发生损失但电机处于可控状态,效果和电机正常运转但旋翼发生损伤一样;完全失效指电机电压为零或与电机共轴的旋翼直接卡死,此时的升力和力矩都为零;失控是指电机转速突然达到最大且无法调速而失去控制。

(二) 无人机传感器故障诊断

传感器广泛用于获取信息和信号,特别是在环境监测中,尽早识别传感器故障是故障诊断的最重要方面,以确保数据的准确性和可靠性。传感器故障诊断是提高整个故障诊断系统可靠性的重要途径。在复杂环境中,传感器性能下降的原因有多种。对于传感器故障的早期诊断,主要的解决方案是使用多个传感器同时测量同一参数,并将测量结果中的偏差视为故障。这种方法通常是有效的,但过度使用传感器不仅会增加成本,还会使系统更加复杂。传感器的故障类型可分为硬件和软件两大类。硬件故障:在硬件设计中可能由于设备中的任何组件失效、电气或机械失效、人为错误、环境问题或其他设备问题导致传感器发生故障。通常可以通过在设计中添加冗余机制来减少此风险。软件故障:由于软件系统可能出现错误而导致传感器失效。例如,当传感器与数据处理和控制系统没有正确通信时,就可能导致数据丢失或异常值。通常对于无人机传感器的故障诊断,有基于知识、基于模型、基于信号处理、硬件冗余和解析冗余等方法。近年来,基于神经网络法的故障诊断方法在无人机传感器故障诊断领域得到了广泛应用。

1. 基于知识的传感器故障诊断

近年来, 计算机技术的发展为故障诊断技术提供了新的理论基础。由于不同故障类型的复杂性, 许多复杂的控制系统很难获得准确的数学模型。为此, 学者们提出了一种基于知识的故障诊断方法, 此方法使用专家系统来定位和诊断传感器故障, 不需要定量数学模型, 并且可以在系统的推理引擎中分析模糊逻辑关系和现有历史数据。历史故障信息和专业知识用于诊断传感器是否有故障, 该方法具有自学习能力和较高的容错能力, 在非线性系统的故障诊断中具有优势。使用专家系统的故障诊断方法基于传感器的故障信息和知识。整个系统包括三个主要部分: 知识库、规则库和推理机制。利用知识规则和推理机制来分析传感器的工作状态, 系统的工作过程如下: 用户提取需要诊断的传感器的测量值, 通过人机界面输入已知的故障现象, 然后诊断系统根据现有规则为不确定推理选择合适的推理步骤。在推理过程中, 系统不断与用户交互, 询问是否存在其他故障, 最后识别出所有可能的故障。根据推理机的不同, 基于知识的传感器故障诊断方法可分为基于规则的诊断专家系统和基于模糊推理的诊断专家系统。

在无人机传感器故障诊断领域, 传统的基于规则的人工智能专家系统逐渐被基于模糊逻辑的神经网络专家系统所取代。Sun 等开发了数据驱动的自适应神经元模糊推理系统 (ANFIS), 用于导航传感器的故障检测。该方法提供了快速故障检测的能力, 但其误报率相对较高。随后, Wang 等采用模糊故障诊断方法, 建立通用的故障诊断系统, 提高了故障的准确性并减少误报的数量。由于复杂流程工业过程知识类型多样且含有多种不确定性, 袁杰等针对这些问题提出一种基于 D-S 融合的混合知识系统故障诊断方法, 通过融合多个专家知识系统的结论, 提高了不确定性系统故障诊断的正确率。无人机飞控系统故障诊断专家系统的知识获取方式主要来源于飞控知识工程师, 知识工程师通过对知识的产生式表示, 并按照系统设计的数据格式将产生式规则存入专家系统, 通过对数据的核验判断知识的准确性, 并将知识存入数据库中。基于知识的方法可以根据各故障与故障征兆之间的联系, 直接对系统故障进行判定, 其优点在于知识易于增加和删除。但该方法只能在已有的知识范围内进行故障检测, 并且获取新知识困难, 因为系统在运行过程后期不能创造知识。

2. 基于模型的传感器故障诊断

在基于模型的方法中, 应用动态过程模型对输入和输出信号进行分析。模型

系统的信号与实际系统的信号之间的差异定义为“残差”，残余信号中存在丰富的故障信息，可以根据适当的决策函数或决策规则诊断故障。这是最早的故障检测方法，其原理是检测模型系统中的行为是否与实际系统中的行为一致。该方法常与故障估计法配合使用，构建传感器故障诊断过程，通过建立模型并选择决策函数（或规则），将残差的评估函数与所选阈值函数进行比较，检测到变化并判断传感器系统的故障。这是一种重要且具有挑战性的方法，至今仍然很流行

Hansen 等工作涉及空速传感器的故障诊断，该方法基于自适应观测器来产生分析冗余并创建残差，该技术使用模拟以及无人机空速传感器的实际数据进行了测试，虽确保了非常低的误报率，但同时对于真实故障的检测概率并不高。针对低检测率的问题，Lopez-Estrada 等设计了一个 LPV 鲁棒观测器来诊断四旋翼飞行器的传感器故障。同时创建了一个观测器库，它生成的一组残差中每个残差仅受一个故障影响，降低了故障检测的外界干扰影响，保证了误报率的同时使故障被有效地隔离与检测，但该技术对于在容错控制方面的问题并未得到解决。此后，又有 Saied 等提出了一种利用扁平系统的微分平坦度特性提供分析冗余的方案。这种方法能够提供传感器故障诊断所需的残差以及多旋翼无人机的执行器，但该方法主要针对单个传感器故障进行检测并诊断。Berriri 等通过改进奇偶校验空间法研究了基于小型固定翼无人机电驱动传感器的故障诊断，为二阶系统设计了一种快速简单的传感器故障诊断算法，最终算法的简单性使得执行时间更短，传导中的资源消耗更少。

总的来说，上述技术大多考虑单个传感器发生的故障，改进奇偶校验技术的理论知识比较成熟，大多通过仿真进行验证，并且以应用这种方法不需要考虑其他部件所发生的故障，使得传感器的故障诊断更加准确。最新的基于模型的诊断方法在算法检测的灵敏度和实用性方面仍存在问题。实际工作对象的许多非线性动力学不容易建模。在许多实际应用中，很难获得能够完全匹配传感器行为过程的模型。但模型的不匹配可能会导致较大的残差信号，这些局限性使得基于实时控制系统动态模型的故障检测方法难以开发和应用。

3. 基于信号处理的传感器故障诊断

基于信号的方法是通过小波变换和信息融合等方法分析可测信号，提取和处理测量时程或其相应频谱的特征，以检测故障。许瑞振针对机载传感器的工作特性进行分析，提出了一种多源信息优选与卡尔曼滤波相结合的信息融合方法。设

计了一种带限制条件的自适应滤波算法,提高了滤波估计精度。Li 等利用小波分析提取数据的频域特征,再用神经网络对信号对其进行诊断,在此基础上,用单个传感器信号的数据进行自我诊断,提出一种联合信息诊断方法,该方法能够有效诊断多传感器系统中传感器的故障。张伟鹏等对传感器系统输入输出信号做连续小波变换,提出一种基于小波变换的方法对传感器进行故障诊断,该方法具有简单、快速、依赖系统模型程度低、诊断效果好的优点。小波分析在实际生活中应用得较为广泛,有研究针对这一技术做出了有效的验证,该方法在各个领域的故障检测方面效果都非常明显,这也使得近年来在这一技术上投入的研究有所增加。

4. 基于硬件冗余法的传感器故障诊断

硬件冗余法是用 3 只以上的同类传感器测量同一个系统参数以多数表决原则识别故障传感器。其优点在于原理简单、鲁棒性强、不需要抽象的数学模型、检测速度较快;缺点在于设备复杂,所需设备较多且具有较高的硬件成本和维护费用。多数基于硬件冗余法的多传感器故障诊断的研究中,在不确定性方面并没有得到很好地解决。Jiang 等将函数交点的纵坐标作为基本概率赋值,但由于对模型方差信息的考虑不足,不足以表达故障模型中的不确定信息。Song 等利用测试数据与训练数据生成的高斯分布模型之间的关系来确定基本概率赋值,而当传感器数据波动较大时,使用单个测量数据作为测试数据可能无法解决不确定性。直到后来, Jiang 等提出的一种基于多传感器数据融合的故障诊断方法,采用 Dempster Shafer (D-S) 证据理论对不确定性进行建模,将实验模型与故障模型的交集区域变换为一组基本概率赋值,通过电机转子的 Iris 数据集和实际测量数据对所提方法进行了测试,验证了所提方法的有效性,才使得这一问题得到解决。使用硬件冗余可以使传感器故障检测、分离和诊断方法的性能得到提高,使检测阈值减小,以增加诊断概率。这种方法对于大型飞机是合理的,但并不总是适用于小型无人机,因为硬件冗余通常不能满足无人机的尺寸、重量和功率 (SWAP) 限制。

5. 基于解析冗余方法的传感器故障诊断

解析冗余方法依赖于发动机数学模型的准确性。在发动机的保养周期中,不可避免地会出现发动机性能恶化,导致与机型不匹配的情况。解析冗余法具有较强的实效性和深厚的理论基础,可分为基于数学模型和基于多传感器的两种形

式。Qiu 等利用卡尔曼滤波构建了变循环发动机的自适应模型,基于此构建了解析冗余逻辑策略,并引入了阈值的动态自适应计算,有效提高了传感器故障诊断的可靠性和解析冗余的准确性。Lunze 等提出了一种推导可诊断系统的分析冗余关系的方法,描述了一种新方法,将结构图中包含的导数约束替换为表示状态变量和输出的导数的一系列方程,从而得到残差的解析表达式。基于这两者的研究,Youn 等提出了一种模型辅助多旋翼无人机合成空速估计的新方法,同时提出并评估了两种新型滤波器(无迹卡尔曼滤波器和互补滤波器),准确估计了空速,验证了其分析冗余的有效性。由于传统方法大多获取的参数总是包含不确定性,甚至会随着时间的推移而变化,Lim 等提出一种利用深度学习和无迹卡尔曼滤波(UKF)实现分析冗余的新型合成空速估计方法,解决了多旋翼无人机参数不确定性问题。上述的分析性冗余法是特征识别的定性方法,所讨论的对象是一个比较平稳的过程,一般用于分析传感器的增益变化故障。但是,由于对象的复杂性和不确定性因素的存在,这类诊断方法所导出结论的准确性较低,即故障误报率较高。因此,这类方法往往作为诊断系统设计中的一种辅助诊断方法。

6. 基于神经网络法的传感器故障诊断

随着神经网络的发展,人工神经网络具有自适应能力、泛化能力、非线性映射能力和高度并行处理能力等特性,并逐渐应用于无人机传感器的故障诊断中。利用神经网络构造故障观测器和预测器,可实现对无人机传感器故障的识别和诊断。2017 年,Zhang 等提出了一种名为“具有宽第一层核的深度卷积神经网络”(WDCNN)的新模型,通过 AdaBN 的简单域自适应方法提高了模型的域适应能力,该模型解决了目前 CNN 应用于故障诊断的准确率不高的问题,提高了正常信号的分类精度。但该方法中使用的数据集是完全平衡的,而在实践中,并非所有数据集都是平衡的。2020 年,Gao 等基于卷积神经网络(CNN)的数据驱动方法针对多旋翼无人机(UAV)中与温度相关的传感器故障进行分类。同时,设计了一个多尺度 CNN,解决了非均匀采样问题。其提出的一种改进的自适应学习率优化方法,通过使用卡尔曼滤波(KF)在小数据集上有效地训练网络,从而加速损失收敛,实现了较高的故障识别精度,在小批量训练上提高了损失收敛性和鲁棒性。2021 年,Han 等提出了一种用于实时小目标检测的深度轻量级卷积神经网络方法以及两种新的学习速率策略,提高了检测精度并实现了实时检测。2022 年,Wang 等提出了一种新的具有幂指数学习率的 Adam 优化器来控制

CNN 方法的迭代方向和步长,解决了网络参数更新过程中由于学习率固定值引起的局部极小、超调或振荡问题。2023 年,Zhang 等设计了一个神经网络参数反演模型(PIMNN)来重建移动点源的轨迹,解决了有限孔径内数据采集带来的信息丢失问题,并且该方法对噪声具有一定的鲁棒性,能够通过神经网络构建轨迹预测模型(TPMNN)来预测移动点源的轨迹。

上述改进的 CNN 网络和传统的方法进行比较,提高了数据集的识别精度,与以往的方法 LeNet-5、LSTM、SVM 以及 BPNN 相比,该方法可以更准确地诊断出故障类型的故障数据。基于神经网络的传感器故障诊断过程中,根据输出向量维数的特征和故障数量确定网络结构和相应的激活函数,使用故障样本对网络进行训练,通过反复调整学习率、惯性因子和其他参数,网络不断改进,直到达到最终精度。

(三) 无人机执行机构故障诊断

执行机构是负责控制无人机的关键机电部件,可能发生的故障会导致飞行问题,进而可能导致无人机坠毁,并可能造成灾难和平民伤害。因此,执行器故障的诊断至关重要,需要开发适当的方法。执行机构故障是多旋翼无人机的典型故障,主要包括电机卡死故障和电机失效故障。许多学者针对多旋翼无人机的故障问题进行了研究,并提出了下面的一些故障诊断方法。

1. 基于观测器的执行机构故障诊断

基于观测器的方法具有设计简单灵活且易获得较强鲁棒性特点,广泛应用于无人机执行机构和传感器的故障诊断。

在利用线性无人机动力学构建的故障检测算法方面,Guzman-Rabasa 等针对四旋翼无人机提出了一种时变但线性的观测器,并为其配备了一个简单的查找表来诊断故障。Ye 等开发了一个观测器来估计完整状态和执行器偏置故障。由此产生的观测器需要辅助增益来处理未知的不确定性和执行器故障。即使线性观测器在工作点周围产生了令人满意的估计值,但由于非线性状态离这些工作点较远,估计值的准确性也会相应降低。随后,有 Tutsoy 等通过仅考虑四旋翼无人机不确定的旋转动力学来开发一个降阶的 Thau 观测器,仿真结果表明该方法产生的估计误差较小。

Song 等提出一种基于扩展状态观测器(ESO)和(DF)的故障诊断定位方案,实现了四旋翼无人机执行机构的故障诊断和定位。He 等提出一种基于线性扩展

状态观测器 (LESO) 的故障估计算法, 提高了四旋翼无人机故障诊断的收敛速度以及仿真估计精度。Yin 等开发了一种故障诊断方法, 使用间隔观测器对垂直起降无人机编队中的执行器故障进行诊断, 在此方案中, 可以创建残差和阈值, 在一个垂直起降的编队中进行的 MATLAB 仿真证明了所提方法的性能。与之前的工作一样, Li 等的工作仅对一架参与编队的固定翼无人机进行执行器故障诊断, 该方法涉及未知输入观测器和分布式故障检测技术, 通过在 MATLAB 环境中的仿真对所提出的架构进行了评估。Ma 等将传感器和执行器的故障都考虑在内, 应用了自适应观测器进行四旋翼无人机的故障估计, 建立了容错故障调节控制方案, 仿真和实际飞行都证明了该方法的有效性。Boss 等基于多模型、多扩展高增益观测器 (EHGO) 的输出反馈控制策略, 研究了一种六旋翼无人机的飞行中执行机构故障诊断技术, 提高了执行机构在飞行过程中都会发生的故障的识别速度和精确度。

到目前为止描述的故障诊断方法均是在不考虑影响系统的干扰下进行的, 但 EHGO 中明确地包含干扰, 并且可以根据干扰水平区分干扰和执行器故障。该研究中不仅保证了稳定性, 而且提供了关于什么程度的干扰可以与执行器故障区分开来的见解, 以及在故障和切换模型之间可以经过多少时间, 然后才有可能失去控制。该研究的模拟实验显示执行器的故障在飞行后不到 2s 就被错误地检测到。原则上, EKF 可以通过干扰模型来增强, 以改善这种性能, 但是这需要一个预期干扰的模型。而 EHGO 可以适应各种动力学未知的干扰, 因此, 根据飞行条件, 考虑故障恢复策略中的干扰是一个极其重要的因素。基于观测器的无人机执行机构故障诊断技术是一种利用传感器数据对执行机构的故障进行高精度检测和诊断的方法。该方法能够准确地判断执行机构的工作状态是否正常, 具有较高的可靠性和稳定性, 但如果传感器损坏或者无法正常工作, 该方法就不能正常工作, 而且对于微小的故障可能无法准确诊断。相比传统的故障检测和诊断方法, 该技术不需要增加额外的硬件设备和人力投入, 有着相对更低的成本。该技术的算法需要经过有效的训练和调整, 以确保检测和诊断的精度; 同时, 若算法不合适, 可能会导致误判或漏判。

2. 基于滤波器的执行机构故障诊断

近年来, 序贯估计取得的可喜成果使其成为在线建模和模型 - 参考控制的重要研究方向, 用于非线性系统的最著名的序贯估计方法之一是扩展卡尔曼滤波。

Zhong 等工作介绍了四旋翼飞行器在存在外部中断的情况下的综合执行器故障诊断方案,更具体地说,作者开发了一种自适应三态卡尔曼滤波器,除了诊断执行器故障外,即使外部干扰影响无人机,它也能够评估幅度。仿真结果表明了所提方法的可靠性,并在各种故障场景下验证了该方法的有效性。Hajiyev 等对系统模型进行了额外的更改,并提出了具有多系统噪声尺度因子 (MSNSF) 的算法。鉴于执行器表面故障在无人机的数学模型中产生加性变化,该方法可用于执行器表面故障诊断,仿真证明了该方法在诊断固定翼无人机执行器表面故障方面的有效性。Hasan 等引入一种线性卡尔曼滤波器,以诊断多旋翼无人机上的故障执行器。仿真分析表明,所提出的程序可以在合理的精度范围内诊断出有故障的执行器。Qi 等提出了一种能够适应噪声统计特性的新型滤波方法 (卡尔曼滤波器 KFbased adaptive UKF),提高了适应噪声统计特性的能力。并针对两种不同自适应 UKF 算法对过程噪声统计变化的估计精度进行了测试。当噪声信息在 5s 时发生变化时,由于违反了最优条件,UKF 无法产生最优估计。另一方面,自适应情况下的估计误差很快被克服,并且几乎与之前的大小相同。由于 UKF 在卡尔曼滤波器的框架内,它只能在对系统建模的某些假设下获得良好的性能。然而,在实践中,这些假设通常不满足,滤波器的性能可能与其理论性能相比严重下降甚至发散。当发生故障或损坏时,这种情况会更糟。为了避免这些问题,学者应用自适应机制来自动调整过滤器参数,以适应先前知识不足的真实统计数据。

Caliskan 等提出了一种检测和隔离卡尔曼滤波 (KF) 创新序列均值的无人机传感器故障的方法,实现了针对传感器和执行器故障的重新配置飞行控制。Gao 等提出了一种基于扩展卡尔曼滤波 (EKF) 和多模型自适应估计 (MMAE) 的执行器故障检测与诊断 (FDD) 方法,实现了在多旋翼无人机不增加任何传感器的情况下执行器故障诊断的准确性和有效性。多模型自适应估计是检测执行器或传感器故障的常用方法。但该方法的计算非常大,可以隔离的故障有限。特别是对于卡死的故障,滤波器仅在预设工作状态附近才具有高效率。此外, MMAE 方法中使用的卡尔曼滤波器大多适用于描述线性微分方程,而对于大多数实际应用,倾转旋翼无人机的动力学大多用非线性微分方程来描述。基于滤波器的无人机执行机构故障诊断技术是一种常见的故障诊断方法。该技术可以对无人机执行机构进行实时监测,并且在发生故障时,能够快速给出故障警告信号。不需要额外

的硬件设备支持,并且可以轻松地与现有的传感器系统集成,因此具有广泛的应用前景。但该技术需要先知道故障信号的频率范围或特征,因此在某些情况下如果没有先验知识,则难以准确地进行故障的诊断。

3. 基于数据驱动的执行机构故障诊断

用于无人机故障诊断的一种流行的方法是基于数据(数据驱动,基于知识)。近年来,这种使用大型数据集的特定类别的分析冗余方法越来越受欢迎,这可能是由于用于处理数据、检测模式和进行分类的工具和有效算法越来越强大。

数据驱动的方法直接利用设备运行状态下的监测数据进行故障诊断,可有效解决无人机结构复杂和任务场景不确定特性下的系统建模难题以及专家先验知识不足问题。张懋石基于数据的方式和深度学习的理论知识,提出了航空发动机气路部件和无人机执行器故障诊断方法,通过加入降噪自编码网络,提高了无人机故障诊断网络模型的鲁棒性以及准确性。李炜等提出栈式降噪自编码(stacked denoising autoencoder, SDA)的故障诊断方法,提高了执行器的故障类型判断的准确性和可靠性,并有效提升了四旋翼无人机的安全可靠。深度学习可以通过深度网络来挖掘原始数据中的信息,从而提高系统的可靠性和准确性,近年来在齿轮箱、风电、轨道交通等诸多行业中得到了广泛的应用,并获得了较好的结果。可以预知,利用深度学习技术对无人机进行智能化故障诊断的研究将取得丰硕成果。基于数据驱动的方法不依赖系统的先验知识,通过挖掘监测信号中的隐藏信息确定系统运行状态进行故障诊断,是目前较为实用的诊断技术。然而现有的基于数据驱动的方法往往基于深度神经网络,其依赖深度的网络结构,运算低效且结构复杂,而宽度学习(broad learning system, BLS)可有效避免上述问题。李润泽等结合统计模型和改进的宽度学习进行故障检测与诊断研究,提出一种基于数据驱动的多旋翼无人机集群的故障检测与诊断方法,采用一种改进 BLS 模型,实现了准确快速的故障诊断。基于宽度学习的诊断方法作为数据驱动方法的最新研究成果,其应用范围已初步延伸到无人机故障诊断方面。

(四) 无人机飞控系统故障诊断应用

大多数故障诊断技术都还停留在理论阶段,只在仿真平台中进行一系列实验,大多数研究者声称他们的方法可以实现积极的结果,但缺乏实际的工程应用验证,由于实际应用过程中存在诸多不确定因素,这些方法的有效性有待进一步验证。

但国内外在航空飞行领域并不缺乏故障诊断技术的成熟应用案例;然而,涉

及技术和商业机密，很少向外公开。例如基于神经网络的方法成功解决了“旅行者 1 号”通讯系统的故障诊断研究以及国产某歼型飞机的结构故障诊断应用、空中送货无人机的故障诊断应用、冗余与容错技术在民机飞行控制系统中的应用、MQ-9B 正在配备的 GA-ASI 开辟的检测和幸免 (DAA) 系统在故障诊断中的应用、型号为 Skydio2 的无人机配备了具有自动故障检测功能的先进自主飞行系统等。以及在某些研究中对相应的无人机故障诊断技术进行的实际飞行测试，如 Bronz 等通过对小型固定翼无人机在实际飞行条件下，记录的 11 份飞行日志，采用支持向量机算法对飞行器在正常飞行阶段和故障阶段的行为进行分类。Zhang 等将其提出的一种基于混合深域自适应 BiLSTM 网络和 Hampel 滤波器 (HDBNH)，同样用于这种固定翼无人机的故障诊断，通过在该无人机真实的飞行数据中进行测试来验证该方法的有效性。孙城在完成所构建神经网络模型结构和参数的保存以及软件平台中模型的构建情况下，将其研究的深度学习 1D-CNN 模型用于无人机执行器系统故障诊断的方法应用到自己构建的正常的和执行器故障的 pixhawk 六旋翼无人机中。

这些实际应用展示了无人飞行器故障诊断技术在解决飞行器故障和危险情况方面的重要性，它们帮助提高飞行器的安全性，保护人员和财产免受潜在风险的威胁。无论是哪种无人机飞控系统故障诊断技术，都需要严格结合实际飞行数据进行测试和验证，来评估无人机飞控系统故障诊断技术的可靠性和准确性，同时也有助于推动无人机技术的进一步发展。

（五）挑战与展望

1. 面临的挑战

在无人机故障诊断领域，目前国内外的研究热点主要集中在基于人工智能的故障诊断方法，其次是无人机的故障建模方法及智能控制方法。其中，基于人工智能的无人机故障诊断主要包含数据驱动的推理和决策、专家系统以及神经网络等方法。此外，在数据驱动和专家系统方面还包括机器学习方法、基于小波分析的方法、人工神经网络以及贝叶斯网络等技术。目前，随着无人机故障诊断领域研究技术不断成熟，对于人工智能算法的应用已经比较广泛，但目前在对无人机进行故障诊断时仍然存在以下几个问题。

无人机系统复杂。无人机系统的复杂性主要来自其涉及多个子系统和组件，例如传感器、控制器、执行器、通信设备等，并且它们之间相互交互，形成了一

个高度耦合的整体系统。无人机的这种复杂系统通常会产生大量的数据，包括传感器数据、飞行记录、故障报告等等。如何从这些数据中快速准确地检测到异常和故障，并排除假阳性和噪声干扰，是一个具有挑战性的问题。

无人机飞行环境复杂。无人机在飞行过程中需要依靠遥控器或 GPS 等设备进行通信与定位，在复杂环境中飞行时周围存在大量的物体和电磁波等干扰源，建筑物、地形起伏等因素可能会导致信号丢失，这些干扰会对无人机的传感器数据造成影响，使得无人机不能及时接收到指令或者位置信息，从而导致诊断出现偏差或误判。

目前对无人机系统故障诊断研究成果较多，但在实际工程应用中仍存在较大难度。目前国内外在对无人机系统进行故障诊断时多采用离线实验、基于模型仿真等手段，而对现场飞行测试、地面实验条件下无人机系统中实际运行产生的数据比较少，因此对无人机系统进行测试验证时要与实际飞行测试相结合，以提高仿真模拟结果与真实数据之间的一致性。

2. 发展方向与趋势

无人机的故障诊断技术在实际工程应用中有重要作用，已经成为无人机系统研制及飞行安全的重要保障。未来无人机故障诊断技术的发展方向与趋势主要包括以下几个方面：

不完备信息下的无人机数据挖掘与建模技术：通过小样本构建分布框架，并使用深度学习网络模型来获得与原始样本分布规律相同的孪生样本，从而实现数据的扩展和多样性提升。此外，该方法还借助人工智能算法如深度迁移学习和增量学习等，解决无人机故障数据不足和单一场景标签不足情况下的冷启动问题，提高无人机故障诊断和预测建模的准确性和泛化能力。

构建无人机多源数据融合故障知识库：无人机故障诊断需要融合多源数据，获取和处理飞行状态信息，并分析、预测和决策系统的运行状况。传统的人工分析方法可能会导致数据漏测或误判等问题，从而影响无人机的运行效率与安全。因此，未来可以通过深度学习从多个域中抽取特征并拟合对应关系，实现对无人机故障的智能辨识与预报，这将是一项具有重要意义的研究课题。

传感器技术的创新：无人机飞行过程中所涉及的各种传感器技术也在不断发展升级，例如气象传感器、视觉传感器等。这些传感器的升级可以提高无人机飞行安全性和运行效率，进而提高故障诊断的准确性。

自主修复的应用：自我修复的飞行控制系统是战斗机、先进的无人驾驶飞行器和其他飞机的未来发展方向。伴随着对智能控制不断深入的研究，智能自修复技术，包括智能故障诊断和智能重构控制的设计，将是这一领域研究的热点问题。

云端飞控技术：随着无人机飞控系统智能化硬件水平的提高，具有自主控制能力的无人机飞控系统将实现场景的态势感知与模糊记忆学习能力，同时硬件之间的兼容的交互控制将逐渐处于主导地位并实现无人机硬件系统的协同作业。在通信保持畅通的情况下，实现无人机自主控制，也可减轻操作员的工作负荷，实现智能自主控制，从而提高作业效能。

加强对深度学习在无人机故障诊断中应用的研究：传统故障诊断技术难以满足无人机高可靠性和安全性要求，而深度学习算法具有强大的多层非线性特征学习能力，能够自动学习高维输入数据中的有用特征，实现更高的故障诊断精度。目前，基于深度学习的智能诊断成果显著，深度学习在无人机故障诊断方面的应用也初见成效。

大数据驱动的无人机飞控系统故障诊断技术：大数据驱动的无人机飞控系统故障诊断技术利用无人机飞行数据，快速发现并解决飞控系统故障，提高无人机的安全性和稳定性。该技术帮助无人机操作员及时发现和解决飞控系统问题，并有助于推广无人机应用，是未来无人机领域的重要方向。

第二节 航空传感器性能评价

一、机载低空多光谱传感器性能评价

新型无人机遥感是卫星及有人机遥感的重要补充，无人机载低空多光谱作为一项新型对地观测技术，可以获取目标地物的多光谱特征、纹理特征和准确的地理空间位置，能够量化反演地物重要物理量。借助机载平台的高机动、全天候、精细观测的特点，能够快速获取满足行业应用需求的地物参数和属性信息，在自然生态资源反演、生物多样性监测、农情信息分析、灾害监测等领域发挥重要作用。传感器检定在机载低空多光谱遥感信息量化中具有重要作用，通过实验或物理模型将遥感信息与地学参量联系起来，可定量反演或推算某些地学或生物学的参量。由于机载多光谱传感器集成了全新的多光谱探测体制和操作机理，其响

应特性复杂,需检定参数较多。新型机载多光谱传感器产品在感光元件、波段数、分光方式、光谱分辨率、空间分辨率及重量上均与传统航天传感器存在较大区别,加之室外低空环境下大气变化复杂和机载平台稳定性较差等问题导致传统基于航天遥感传感器的性能评价方法不完全适用于新型低空多光谱传感器。标准支撑方面,当前研究机构和厂商之间的检定技术存在着检定指标不明确、检定环境无参考、检定方法不规范、结果评价不统一等问题。新型机载低空遥感传感器检定相关标准存在着发布时间较长、针对性不足、可参考性不强等问题,严重制约着机载低空多光谱遥感应用行业的规范运行。

(一) 多光谱传感器检定研究分析

遥感传感器检定是在特定环境和必要的辅助设施支撑下,对其自身响应性能参数进行质量及鲁棒性检定和验证的一系列过程。低空多光谱传感器检定过程主要涉及检定指标确定、检定环境构建、检定方法实施、检定结果评价等关键技术。

1. 检定指标

相关学者依照不同的检定设施和检定方法,对传感器的各项核心性能评价均进行了一定的探索,涵盖了几何、光谱、辐射等多项性能。几何检定是对传感器的几何性能进行评估,至关重要的因素为内外方位元素。内方位元素包含传感器摄影中心点的像平面坐标和焦距;外方位元素表示传感器成像时刻的姿态和位置,一般在传感器实际作业过程中检定,包含角元素和线元素。此外,由于传感器自身制造工艺以及使用过程中环境的影响,使得传感器自身还包含一定的成像畸变,导致输出图像中像点相对于其理论真实位置产生错误定位。按照畸变形状可分为桶形畸变和枕形畸变,依据误差的影响分布可分为径向畸变和切向畸变。光谱检定主要通过测定传感器在每个波长处接收到辐亮度与入射辐亮度的比值得到传感器光谱响应函数。主要检定参数是中心波长和带宽,中心波长反映多光谱传感器响应中心,带宽反映多光谱传感器的光谱分辨率,带宽为仪器在达到 50% 光谱响应时的波段宽度。此外,可在室外开展传感器飞行状态下的光谱定标,将定标结果与室内进行比对,评价传感器的中心波长偏移和带宽变化。辐射检定是确定传感器所接受辐射量与输出信号之间的对应关系,从而将无物理意义的数字响应值转换为具有物理意义的辐射量,为遥感定量化反演提供基础。传感器辐射性能评价指标包括响应范围和信噪比、相对辐射性能(均匀性、暗电流、稳定性、重复性)、绝对辐射性能(绝对辐射定标系数、线性度)。

2. 检定环境

传感器检定的前提是精准的标准溯源,从高精度的初级标准出发,采用严密的标准传递和精度控制手段,实现标准的传递。通过数学模型,建立传感器几何、光谱、辐射性能与高等级标准之间的关系,完成传感器性能的评定。科学检定环境的构建是保证标准溯源准确性的重要保障。低空机载多光谱传感器检定环境按地点可分实验室检定环境和室外检定环境。

室内几何定标一般通过建立精密控制点与传感器像素之间映射关系的方式,反演传感器几何性能参数,从而恢复传感器几何姿态,量测得到目标点的精确地理位置。根据控制点的空间结构,可以将几何靶标分为一维靶标、二维靶标和三维靶标。光谱检定通常可以将宽带光源发出的辐射输入到单色仪中,经准直镜和平行光管产生带宽极窄的单色平行光,记录不同单色光输入状态下传感器的响应特性,经高斯拟合得到传感器的光谱响应曲线。同时,也有相关机构建立了基于气体发射辐射灯、掺杂稀土元素漫反射板法的检定设备,这些设备结构简单、操作方便,但无法检定带宽。因此,实验室内一般选用单色仪加准直镜和平行光管的装置进行多光谱传感器光谱性能的精确检定。辐射检定最终都需要溯源到一个辐射初级标准,包括标准辐射源和标准探测器两种可溯源装置。基于标准辐射源的标准传递链将黑体作为初级基准,采用从辐射源向辐射源的传递方法,基于标准辐射源的传递方法有标准漫射板传递法和积分球传递法。基于低温绝对辐射计和陷阱探测器的高精度辐射标准以及传递链的建立,以低温绝对辐射计和高质量的硅光电二极管为基础,基于标准探测器法的辐射传递链将各级标准的不确定度降低了1~2个数量级。

室外综合检定环境建设方面,早期检测场通常由大型研究机构牵头建设,如美国的白沙(White Sand)实验场,法国的马赛 La Crau 检测场,澳大利亚的珀斯、埃尔斯岩几何与辐射检校场。这些实验场可面向各类型星载传感器提供检测与验证服务。我国已在敦煌建设有国家级辐射校正场,为中巴资源卫星、环境系列卫星、风云系列卫星提供高质量的检定服务。青海湖检测场适用于国内外热红外卫星传感器在轨辐射定标。嵩山定标场则适用于无人机低空遥感的室外定标。此外,在内蒙古建立有辐射及真实性验证场地,适用于不同传感器的高、低反射率目标真实性检验。然而,这些场地大多服务于星载或高空机载传感器,在气象观测、地表覆盖、地物多样性等方面的建设尺度、评价标准、分析依据等并不适用于低

空传感器,因此面向新型低空测绘传感器的检定需求,还需进行有针对性的场地和设施建设。具体而言,需要建立高精度分级地面控制点网,几何靶标的材质、大小、形状需要针对不同定标精度需求进行组合。同时,需要针对低空复杂大气环境,构建精细的大气辐射传输模型,得到室外真实场景下辐射散射特性。布设不同反射率的靶标作为标准辐射亮度参考值,精确测定地面参考靶标的辐射亮度,结合室外精细大气辐射传输模型,得到传感器入瞳处精确的辐射亮度。进一步地,建立传感器入瞳辐亮度与数字响应值之间的对应关系,实现多光谱传感器的辐射定标。由于室内外检定设备昂贵以及传统检定方位参考性不足的原因,导致室内外检定结果关联性很弱,无法达到室内外检定结果的互补作用。因此,需要针对低空多光谱传感器的特点,建立室内外一体化的综合检定环境,在此基础上,研究室内外一体化的检定方法,完成多光谱传感器性能综合评价。

3. 检定方法

新型低空多光谱传感器多采用消费级互补金属氧化物半导体(CMOS)作为感光元件,CMOS每个有源像素单元(Active Pixel Schematic, APS)上集成了光电二极管、有源放大器和模拟开关,可独立进行电信号转换,使得CMOS成像传感器的响应特性非常复杂。需要在航天遥感传感器检定方法的基础上,提出针对轻小型CMOS成像传感器特点的检定方法。

(1) 几何检定方法

几何检定方面,目前的方法包括三种:传统检定方法、基于主动视觉的检定方法和自标定方法。传统方法包括空间后方交会法、直接线性变化(DLT)法、Tsai法等。基于主动视觉的相机检定方法是指“已知传感器某些运动信息”下的检定方法。自标定方法是指不需要标定块,仅依靠多幅影像对应点之间直接关系进行检定的过程。虽然借助精密仪器可以实现相机内方位元素和成像畸变的精确检定,但是实验室几何检定方法中不能充分顾及实际飞行作业条件对相机内方位元素的影响,因此还需要采用室外检定的方法获取传感器在真实作业环境下的几何性能参数。这种方法要求在有一定地形起伏的区域内布设大量地面控制点,用待测传感器获取场地的影像,根据空间后方交会或区域网平差方法求解定标参数并分析其残余误差,室外检定方法更符合实际的条件,可以对室内检定结果进行补充。

（2）光谱检定方法

在光谱检定方面，国内外已有的光谱定标方法包括气体发射辐射灯法、掺杂稀土元素漫反射板定标法以及单色仪加平行光管。而在室外光谱定标方面，晏磊等于2012年提出了室外场景下基于辐亮度匹配的光谱定标方法；Barry等利用大气吸收线与参考数据进行比较分析得到每个光谱通道所对应的中心波长；Guanter等提出利用大气吸收特征进行成像光谱仪光谱通道中心波长偏移量检测算法；Robert等利用反射率反演的方法对星载高光谱传感器光谱通道中心波长和带宽进行了在轨定标，并分析了传感器中心波长的弯曲效应。

（3）辐射检定方法

在传感器的辐射性能确定方面，已有的室内检定方法包括基于标准辐照度灯的方法、积分球法、平行光定标方法和基于标准探测器的漫反射板定标法。在室外辐射检定方面，已有的方法包括反射率基法、辐照度基法、辐射亮度基法。针对特定的辐射检定需求，国内学者邓磊还自行设计一种由黑白无纺布组成的高精度、低成本双靶标，并利用子带经验线性（SEL）辐射定标方法进行无人机遥感的辐射定标；Wang等利用自主设计的标定靶，采用分波段进行校正的方法，对受云层阴影影响的高光谱图像进行了有效的辐射校正，Yaakob等采用含有热敏元件和未有热敏元件的上升水流法对多光谱传感器实现了绝对辐射定标。

4. 结果评价

检定结果评价是检定模型可靠性的重要保障，机载低空多光谱传感器检定结果评价包括不确定度评价、真实性检验和一致性检测。

（1）不确定度评价

多光谱传感器检定实施过程中，标准源需要经过链路中多个环节的传输和转换，每个环节均具有不确定性，不确定性误差经过积累，导致传感器检定结果与理论计算结果不一致。由检定环境系统的内部偏差和测量模型的不稳定性所造成的不确定度需要通过数学模型进行探讨和量化，并对模型中影响因素进行调整和优化，得到不确定度最优评价模型，提高检定结果的准确性和可靠性。低空多光谱传感器室内检定不确定度的评价建立在全面分析各检定环节作用因素的基础上，从低空多光谱传感器的探测原理出发，结合实验室检定的各设备的功能和操作特性，分析得出主要的作用因素包含：光谱辐照度标准的不确定度、漫反射标准白板、标准辐亮度复现不确定度、标准辐亮度测量不确定度、积分球光源测量

的不确定度、积分球光源的不确定度。室外传感检定同样存在标准传递链路的构建与测量,在不同环节上同样存在不确定度,尤其在外场环境下,地理环境因素变化,仪器测量的不稳定性也会增加,会直接影响到外场检定结果的可靠性。场地绝对辐射定标中,影响定标的因素有很多,如地面反射率测量误差、大气气溶胶参数测量误差和辐射传输模型误差等。

(2) 真实性检验

真实性检验的目的是通过独立方法评价待检遥感产品与客观实际的吻合程度。主要是针对数值型和类别型遥感产品,借助直接检验法和间接检验法验证遥感产品的测量值、时空分布趋势、特征及相关关系与参考对象之间的吻合程度。一致性程度评价指标包括准确度评价指标和不确定度分析评价指标。常用的准确度评价指标包括:平均误差、相对误差、相关系数、误差矩阵、总体分类精度、Kappa 系数;不确定度分析评价指标包括:标准差、方差、协方差、标准不确定度、不确定度的 A 类评定、不确定度的 B 类评定、合成标准不确定度、扩展标准不确定度。针对机载低空多光谱传感器检定结果的真实性验证通常采用直接验证法和交叉验证法。直接验证法通过构建地方大气模型和获取典型地物光谱数据,构建大气修正函数和地物光谱库,将低空多光谱传感器反演的地物光谱曲线与实际光谱数据进行比对,验证传感器光谱辐射检定结果。交叉验证法则通过其他精度可靠的多光谱遥感影像反演地物光谱曲线,利用同化处理模型对交叉验证数据进行同化处理,最终对检定的结果进行交叉验证。

(3) 一致性检测

多光谱传感器一致性检测是指单传感器多次测量值之间、多传感器之间,以及不同检测机构之间检定方法的吻合程度,对于传感器检定方法的可复现性和检定结果的科学性至关重要。

单传感器检定结果一致性检测。单传感器检定结果一致性检测是指多光谱遥感传感器辐射、几何多次测量值之间的吻合程度。辐射一致性可采用稳定性和重复性作为衡量指标,几何一致性可采用平均重投影误差作为衡量指标。

多传感器性能一致性检测。多传感器性能一致性检测是指对多传感器集成系统对于同种类型测量值之间的吻合程度,主要包括多传感器辐射一致性和几何一致性。辐射一致性表示在相同观测条件下,多传感器集成系统辐射测量值多次结果之间的吻合程度,可采用反射率相关性和反射率相对中误差作为衡量指标。几

何一致性表示多传感器集成系统几何测量值多次结果之间的吻合程度，可采用平均标定误差作为衡量指标。

国内外相关机构检定内容一致性检测。国内外相关机构检定内容一致性检测主要通过和国内外先进实验室的检定方法、流程、指标及结果一致性进行比较，掌握所研制检定技术方法对传感器探测性能评价的全面性、准确性和应用可行性。比对的实施模型按传递标准传递路线的形式划分为移动地点比对模型和固定地点比对模型。比对的内容包括指标比对、步骤比对和结果比对。以各个参比实验室量值的算术平均值作为参考值，以等效度和归一化标准差对比对结果的一致性进行评价。单个参比实验室测量结果的等效度指该实验室的测量结果与参考值之差，多个参比实验室之间的等效度指多个实验室的测量结果之差。归一化标准差是等效度与其不确定度之比。

（二）标准化建议

根据测绘标准体系（2017 修订版），目前亟待制修订的标准包括无人机遥感系统检测和多光谱遥感数据获取、处理和生产方面。国家地理信息标准体系（2017 修订稿）中纳入了亟需制定的遥感影像传感器定标与验证类、无人机低空遥感监测的传感器一致性检测类等标准。现行国家标准中，摄影测量与遥感标准有 120 多项，检验与测试类标准的总数约占 19%，且仅限于遥感数据成果的质量检验及传统测绘仪器的测试。与光学成像传感器相关标准仅有国家军用标准中面向星载遥感监测应用的《航天遥感传感器可见光波段至短波红外波段辐射定标方法》等 5 项标准，但难以满足新型低空光学传感器检定需求，针对新型低空多光谱遥感传感器的性能评价体系和检定方法还处于空白，亟待补充完善。因此，面向当前无人机低空遥感应用标准可参考性不足的问题，针对国家测绘地理信息标准体系中亟需补充的标准，通过技术研究、标准研究、推广验证、宣传贯彻等方式提升新型无人机载低空多光谱遥感传感器检定技术的标准化水平。同时紧跟国际标准化进展，通过国际地理标准化组织中国对口单位完成新型测绘传感器检定与验证国际标准的制定。

自然资源监管正发生着重重大变革，而具备衔接天地观测特点的低空多光谱传感器具备高机动、高效率的特点，可实现物理要素和空间属性的衔接，十分适合自然生态资源的定量反演和监测。但在该传感器关键的性能评价方面，还未有明晰的核心性能评价体系和相应标准支撑，严重制约着行业的发展。为规范新型低

空遥感应用市场的有序运行,可从检定环境、检定方法、结果评价、标准支撑等方面进行提升。开展有针对性的调研和研究,紧跟国内外相关技术的发展,推进机载低空多光谱传感器检定标准化建设。

二、航空传感器性能评价研究

在航空领域,为保证飞机正确安全地飞行并完成各种复杂的任务,必须在飞机的关键部位和不同的机载设备系统中安装相应的传感器,在一架现代飞机上安装的各种传感器数量多达几百个甚至上千个。传感器除了直接安装在飞机上用来保证飞机安全飞行外,还被广泛应用在飞机结构强度试验、风洞试验、发动机试验等各类地面试验以及飞行试验中,用以完成一些飞机特殊参数的测量,这些传感器统称为航空传感器。

我国航空传感器发展历程虽短,但近年来国内航空传感器行业发展迅速,正在逐步缩短与国外的差距。随着新材料、新工艺、新技术在航空领域的广泛应用,航空传感器呈现出微型化、集成化、智能化、网络化的发展趋势。航空传感器作为航空测试系统五大基本单元中的变量转换单元,用以测量飞机、各种辅助装置和任务设备的压力、温度、加速度、速度、位移等重要参数,其性能好坏将直接影响航空飞行器的使用寿命和飞行安全、航空产品地面试验以及飞行试验的准确性、可靠性。由于航空传感器品类繁多,技术要求高,大量的航空传感器又常常工作在高温、高空、剧烈震动的恶劣环境下,因此需要采用有效的方法对航空传感器的性能进行评价,保证传感器在工作环境下测量数据的准确性。

(一) 存在问题

随着航空技术的不断突破,航空飞行器正逐步进入高温、高空、高速的新发展阶段,很多航空传感器需要工作在剧烈震动、高温、高压、腐蚀性等极端恶劣的实际工作环境中,这给传感器的使用带来了巨大的问题与挑战。例如,位于飞行器发动机中的压力传感器常常需要工作在不稳定并且温度范围在 $600\sim 1800^{\circ}\text{C}$ 的气流环境中,而脉冲爆震发动机燃烧室内部环境温度更是高达 1000°C 以上。由于气流接触到了燃烧室,因此压力传感器对气压的检测起到了控制气体和燃料混合物的重要作用,一旦压力传感器测试数据不准确,将会大大增加飞行器失控的风险。

现代航空发动机结构越来越复杂,发动机在工作过程中容易出现气动性能不

稳定现象,为了维持发动机的正常工作,在飞机上配备了防喘系统。作为防喘系统的关键组成部件,喘振差压传感器通过测量压气机出口的总压与静压之差,结合其他相关参数用于综合判断发动机的工作状态,因此,喘振差压传感器测量数据的准确与否,直接关系到发动机能否正常工作,一旦出现问题可能造成严重后果。喘振差压传感器由于安装在发动机外壳上,其实际工作条件往往处于高温、剧烈震动等极为恶劣的环境下。目前对喘振传感器的性能校准普遍只能进行实验室标准条件下的动静态校准,缺少对喘振差压传感器在实际工作状态下性能的准确评价方法及测量结果的分析,因此很难判断喘振传感器在实际工作环境中的性能好坏。

在国外航空飞行中,曾出现过由于传感器测量数据不准确发生的惨痛事故。在2019年初发生的埃塞俄比亚航空公司飞机失事中,坠机航班的黑匣子数据显示,波音737Max飞机上的攻角传感器错误地激活了机上的自动系统,推断由此引发了坠机事件。相关研究也表明如果机上的攻角传感器周围有水,那么当飞机飞行到一定高度时,可能因为高空寒冷环境结冰而导致传感器的性能受到影响甚至发生故障,当飞机遇到鸟类撞击时,该传感器也发生过数据错误的情况。由此可见,航空传感器在复杂的实际工作环境中时,其性能可能发生变化甚至产生失效,传感器在实验室条件下的性能评价方法不能满足其在实际工况下的使用要求。

目前,对于航空传感器在实验室条件下的常规计量校准及性能评价手段已基本成熟,对航空传感器的性能评价大多集中在实验室条件下的性能校准测试、环境适应性试验、可靠性试验和电磁兼容试验,缺少传感器在实际复杂工作环境下的性能评价方法。设计人员在对传感器进行选型、验收、使用过程中没有相应的参考标准和评价方法,无法判断航空传感器在实际工作环境下测量数据的准确性、稳定性和可靠性,会给飞机的安全正确飞行带来很大风险。

(二) 国内研究现状

国内对于实际工作环境下航空传感器性能评价方法的研究还处于起步阶段,大多集中在进行模拟实际工作环境下的校准装置研制及采用一定的技术对传感器的某些敏感环境应力进行性能补偿,没有形成完整的传感器性能评价体系。

1. 模拟实际工作环境的校准装置研制

当传感器的性能受环境因子影响明显(如温度、湿度、气压、振动等),传感器在实际工作环境下的校准性能则不同于实验室条件下的常规校准,在实验

室常规校准的基础上还需要进行环境影响因子的模拟,通过将环境模拟技术与测量校准技术相结合,实现模拟实际工作环境校准装置的研制。典型的模拟实际工作环境校准系统一般由环境模拟装置、环境参数控制系统和被测传感器校准系统组成。

环境模拟装置用于模拟单参数或多参数工作环境条件,环境参数控制系统用于保证环境因素的精度和稳定性,将被测传感器放置在模拟环境条件下,通过配套的校准系统来实现传感器的性能评价。

根据力传感器需要使用在高温、低温等恶劣环境的情况,北京航天计量测试技术研究所的高炳涛等人通过进行力发生装置、高低温发生装置及连接工装设计,研制了一套模拟高低温条件下的力传感器性能校准装置,实现了在 $-80 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 温度条件下、力值范围为 $10 \sim 1000\text{kN}$ 力传感器的校准,有效地解决了力传感器在高低温条件下的性能评价问题。

惯性加速度计是现代航空技术中武器装备系统导航定位、制导控制、姿态测量等应用中的重要组成部分,其实际工作环境往往为温度、湿度、气压、噪声、振动等复杂环境,为此各研究机构、高校都在积极开展加速度计在多参数复合环境下的校准技术研究。中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所的董雪明等人开展了高速率大 g 值惯性系统校准技术研究,在离心机上安装可以在水平和垂直两个方向旋转的高速转台,完成了加速度、速度复合校准装置的研制;董雪明等人又以离心机为主体,复合了振动台、温控试验装置以及气压装置,完成了加速度、振动、温度、高度复合的校准装置研制。董雪明还与北京航空航天大学关伟等人将一种由离心机和振动台组成的复合系统引入到加速度计校准领域,利用离心-振动系统复现由恒定值加速度和正弦加速度组成的复合加速度,成功研制了离心-振动系统的复合校准装置,其校准恒定值加速度最高可达 $40g$,正弦加速度频率范围是 $20 \sim 2000\text{Hz}$ 。

压力传感器在航空领域应用广泛,包括飞行数据系统、环境与舱压、机身中的液压系统、发动机与辅助电源设备等。大量的压力传感器(比如安装在航空发动机内的压力传感器)是在高温、高压、高热流、剧烈振动等极为苛刻的条件下工作的。为了实现光纤压力传感器在高温微小压力环境下的性能评价,航天科技集团公司四院四十四所的王梦楠等人设计了一套基于高低温试验装置和上位机人机软件的校准实验系统,可用于在地面实验室进行传感器实际测压环境的模拟,

实验结果表明了该校准实验系统的稳定性与可靠性。

目前,实际工作环境下的传感器校准装置研制尚未覆盖全部传感器参数,且有些测量系统及计量校准装置由于其校准原理、校准技术、校准软件和方法等方面原因,在所涉及的变化环境或极限环境下,不再具备优良的适应性以及测量准确度,该类测量系统及计量校准装置不适于作为模拟实际恶劣环境的校准装置或难度较大。因此,开展模拟实际工作环境的传感器校准装置研制具有局限性,仅能满足部分传感器、部分参数、部分环境因素下的性能评价需求。

2. 传感器性能补偿技术

有些航空传感器,在实际使用过程中已经发现某些环境因素会对其性能产生影响。大量传感器的敏感元件采用金属或半导体材料,由于金属和半导体材料对温度变化具有固有的敏感特性,因此,当环境温度变化时,传感器的初始零点和输出灵敏度会产生温度漂移。为了削弱外部环境因素对传感器的性能影响,人们开展了对传感器的补偿技术研究,其中,较为常见的是温度补偿。

对应变式传感器和压阻式传感器进行温度补偿主要采用硬件补偿和软件补偿方法。硬件补偿包括桥臂并联电阻法,桥臂热敏电阻补偿法,桥外串并联热敏电阻补偿法等。硬件补偿通常根据高低温环境下传感器的测试数据,选择对应的温度补偿元件,对传感器的初始零点和输出灵敏度漂移进行补偿。常见的软件补偿方法有插值法、最小二乘法拟合、BP神经网络算法等。软件补偿是以测温元件采集的实时环境温度为依据,将传感器的零点、灵敏度与温度变化的算法集成到高速运算的单片机里,实现传感器的实时温度补偿。采用硬件修正无法进行复杂算法补偿并且补偿电路也容易受电磁环境等的影响,相比之下,软件补偿方法精度高,应用范围广,调试简单,因此成为传感器温度补偿的常用方法。

应变式天平是一种测力传感器,可用于进行航空发动机矢量喷管六分量测力,对航空发动机矢量喷管进行性能试验时,由于燃烧室的热传递和热辐射,会给应变天平带来温度的影响。重庆大学的湛海华采用具有温度自补偿功能的应变计和在测量桥路上串联补偿电阻相结合的方法对应变式天平进行温度补偿,保证天平性能的稳定性。

东华大学的张倩等人采用差分进化算法优化BP神经网络的算法,对压阻式压力传感器进行温度补偿,改善BP神经网络在通过训练得到权值和阈值时易陷入局部极小的问题,有效降低温度对压阻式压力传感器的影响。南京航空航天大

学的蒋文亮等人以 FPGA 为核心,搭建了压力传感器的硬件构架,采用二维线性插值算法对压力进行补偿与修正,消除因工作温度环境参数发生变化而引起的信号漂移,满足航空发动机全权限数字系统对压力传感器的测量精度和温度环境实用性要求。电子科技大学的欧阳承曦设计了数字传感信号调理方案和模拟传感信号调理方案两种温度补偿方案,并在硬件补偿的基础上集成了软件补偿的方法,实现了在 $-55 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 的宽温度范围内对硅压阻式压力传感器的高精度温度补偿。

为了减小实际工作环境对航空传感器性能的影响,传感器的设计研制单位针对传感器的敏感环境应力采取了有效的补偿方法,如常见的温度补偿,并给出了一定的校准曲线,一定程度上提高和改善传感器的技术性能和应用范围,有利于传感器的优化设计。但该种补偿方式,尤其是对多环境因素影响采取的补偿方式,还不能全面、准确地描述环境因素对被测传感器性能的综合性、动态性影响,因此要加强这方面的研究。另外,也可以从新材料、新结构方向出发,开展新型传感器的开发研制,比如蓝宝石高温压力传感器和高温压电振动传感器,增强传感器环境适应性,解决传感器性能易受环境影响的问题。

(三) 国外研究现状

与国内相比,国外在环境模拟技术领域的研究起步早、发展快,形成了比较完善的系统。环境模拟设备和试验技术已经由单参数模拟发展为多参数模拟,从静态模拟发展为动态模拟,从产品试验发展为人机系统环境试验,并且实现了与多门学科和多项技术(比如计量)相关理论和方法的结合。

在 20 世纪 60 年代,美国国家航空和宇宙航行局就已经研发出较为成熟的综合试验系统,用于模拟飞行器发射阶段的复合环境。该试验系统采用振动模拟设备、噪声模拟设备和气压模拟设备提供环境因素,通过与大型离心机舱有机组合,实现了线加速度在振动、噪声、气压复杂环境下的性能测试。美国 Wyle 实验室在 20 世纪 80 年代研制的温度、高度、振动、加速度试验设备,最大加速度可达 50g ,振动台推力为 4199kN ,频率范围为 $10 \sim 2000\text{Hz}$,主要用于进行低气压环境下工作的航空电子装置和其他电子装置的验收试验。

随着综合环境试验设备研制工作的日渐成熟,某些发达国家已经具备进行综合性环境试验设备的商业化生产能力。法国 Actidyne 公司生产的离心-振动试验系统,可产生 $5\text{g} \sim 80\text{g}$ 的加速度,加速度准确度为 $\pm 1\text{g}$,振动台标准推力为 48kN ,用于开展惯性器件的加速度、振动复合校准。

风洞天平是气动力试验中最基础、最重要的测力装置,在高超声速风洞进行气动力试验的过程中,试验气流温度通常较高,在试验有效时间内,天平的环境温度最高可达到 $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 。针对天平的温度效应,美国的 NASA 兰利研究中心针对其高超声速风洞

特种通气天平,开展了含有温度和压力影响天平校准方法的研究。他们通过在单矢量校准台上增加给被校准天平加热和模拟通气压力的辅助装置,对天平校准方法进行优化,实现了在稳态温度和天平空腔中施加压力影响下的天平校准装置研制,是天平校准技术的一个新发展。

除校准装置的研制以外,国外的传感器生产厂家在传感器产品的性能评价研究方面也更为深入。国内加速度传感器的出厂报告一般只提供产品的量程、频率响应、灵敏度和使用温度范围等性能参数,而国外同类产品的出厂报告,如丹麦 B&K 公司生产的 4384 型加速度计,不仅提供基本性能参数,还提供加速度计对环境因素的敏感特性,包括瞬态温场灵敏度、电磁灵敏度、噪声灵敏度、应变灵敏度,在 $-74 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 温度范围内还给出了加速度计灵敏度偏差量。国外的传感器生产厂家对于传感器在环境因素影响下的性能评价给予了关注和重视,且已经拥有进行环境因素对传感器性能影响的定量分析方法和手段。

(四) 发展趋势

目前,国内在模拟实际工作环境的传感器校准装置研制及传感器性能补偿技术研究方面已经取得了多方面的进展,但仍然存在一定的局限性。结合国内外航空传感器的性能评价研究现状,未来,可以从以下几个方向出发进行传感器在实际工作环境下的性能评价方法研究。

1. 环境模拟技术与测量校准技术的充分结合

开展实际工作环境下的传感器性能评价需要根据传感器的实际工作条件(比如高低温、湿热、低气压、加速度、振动、冲击等),充分利用环境模拟试验技术和测量校准技术,开展传感器在不同环境应力条件下的性能校准测试,从而评价不同环境应力对传感器测量结果的影响。国内开展环境模拟试验的主力军是北京航空航天大学、信息产业部电子第五研究所、中国航空工业集团公司 301 所等单位,而测量校准技术的主要研究机构是计量校准实验室。这就要求开展环境模拟技术研究与开展测量校准技术研究的高校、机构积极寻求合作,将两种技术充分结合,共同为航空传感器在实际工作环境下的性能评价研究做出努力。中国航

空工业集团公司北京长城计量测试技术所一直从事长、热、力、惯性、电等专业化校准技术研究及校准装置研制,并且建成拥有振动、高低温、低气压、冲击、盐雾、淋雨等环境试验模拟设备的环境检测实验室,计量所充分发挥自身优势,已经在加速度、流量、压力、力值、电量等参数上实现了温度、湿度、振动环境条件下的计量校准与检测能力。

2. 采用理论分析与模拟试验相结合的方法

通常的传感器性能测试是把传感器当作一个黑匣子,通过给定不同输入量,测试其输出量,经过数据分析得到传感器输入输出关系。这种方法能直观地测试出不同环境应力下传感器的性能变化,但是对于有些航空传感器,由于受到技术条件等多方面因素限制,还没有实现自主研制,对于传感器的研究仍然停留在初级阶段,对传感器的结构、工作原理缺少深入的理论分析,对传感器在实际工作环境下测量性能的影响程度及影响机理也缺乏数据支持和系统研究。因此,需要从分析传感器的结构及工作机理出发,将复杂的传感器结构进行简化,利用有限元分析方法等数值分析方法对传感器或其元件进行建模仿真,通过对模型施加不同环境应力,从理论上分析传感器测量性能的变化规律及变化原因。一方面,利用仿真软件可以在不破坏传感器的情况下实现对各种环境应力(包括极限环境)的模拟,通过理论分析排除非影响因素,甄选出对传感器性能产生影响的环境应力,找到某一类传感器的本质特征和规律,节约研究成本。另一方面,真实环境的模拟试验结果可以对仿真模型进行修正,优化模型结构,验证并完善理论分析结果。采用理论分析与模拟试验相结合的方法可以达到理论与试验相互支撑、相互补充的效果。

3. 建立航空传感器数据库

将航空传感器按照发动机、机载系统、地面及空中试验等不同用途进行分类梳理,掌握不同部位传感器的性能指标要求及使用环境条件。当积累大量的传感器理论研究经验和试验数据后,在对某一类传感器进行综合性能评价时,可以将相似结构或相同工作原理的其他传感器的研究结果作为参考依据,对传感器敏感环境应力的快速识别和其性能受环境影响趋势的预判提供有力支撑,大大缩短分析时间,节约人力物力成本,为航空传感器数据库的建立提供依据,并为飞机设计人员进行传感器选型、设计、验收和使用时提供技术支持。

随着航空装备制造业的不断升级,对航空传感器的需求也大幅度增加,大

量的航空传感器投入实际的复杂环境中使用,给传感器性能评价技术带来了新的挑战。

第三节 电子传感器技术在航天领域的应用

一、无线传感器网络技术及其在航空电子系统中的应用

下一代作战飞机将向智能化方向发展,作战飞机的机载网络传输的信息也将由控制、状态结果与简单的数据信息需求向高品质图像、传感器数据、语音、控制信息等多综合信息方向发展。其中飞机内部使用航空数据总线连接航电、飞控、机电、火控等分系统,担任传输各种不同类型数据的绝大多数任务。随着作战需求变化和技术发展,基于有缆的信息交互方式表现出不足,一方面增加了飞机重量和设计复杂度,另一方面安全性差,防护层破裂、导线折断容易造成安全事故,对后期的维护造成不便。综合上述分析,机载网络的无缆化、智能化是未来的发展方向之一。无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)作为传感技术、嵌入式计算技术、无线通信技术和分布式信息处理技术发展结合的产物,具有小型化、低功耗、布线少、安装方便等特点,能够很好地解决现有网络中存在的电缆重量大、布线困难、灵活性差等实际问题,为航空电子系统提供了一种全新的信息获取与处理手段。由于无线传感器网络技术在各个领域对实时性、可靠性、成本以及功耗的需求不同,因此技术发展的路线和研究方向存在较大差异。

(一) 无线传感器网络技术国内外发展情况

目前,美国、欧盟、ITU等开展了航空无线传感器网络技术研究,并在硬件开发、仿真验证和标准制定等多个方面取得成果。由工程和物理科学研究委员会(EPSRC)资助的无线互连和主动控制系统(Wireless Interconnectivity and Control of Active Systems, WICAS)项目首次提出了WICAS体系结构,将无线传感器网络应用于飞机机翼主动流动控制。整个网络系统由应用层、传输层、路由层、媒体访问层以及物理层共同构成,应用层负责网络的拓扑管理,采用聚类策略来定位网络中的变化,同时配有睡眠/唤醒调度,以确保可靠性和能效。路由层负责使用单跳或多跳通过最佳节能路由将数据传输到目的地。由于无线介质传统上是有噪声的,因此媒体访问层能够减少冲突以增加网络的寿命。物理层使

用了一种新型调制和解调技术负责使用特定载波频率传输数据。该项目旨在将协议设计为跨层解决方案，其中每一层都试图在实现能量效率的同时实现所需的 QoS，为未来飞机创建先进的神经网络系统。

国际电信联盟组织 ITU-R 在 WAIC(Wireless Avionics Intra-Communication) 项目研究了 4.2~4.4GHz 频段无线系统与机载系统的适配性分析。研究表明 WAIC 系统能够与无线电导航设备、卫通设备共享该频段。该项目旨在实现飞机驾驶舱与机翼、发动机、客(货)舱等重要部位的通信，是一个封闭的无线通信系统。项目针对飞机的组成，给出了舱内、舱外设备之间无线网络、有线网络混合组网的拓扑结构，包括舱外机身、机翼、起落架、座舱内部以及设备舱内部等均部署了无线网关节点，允许附近区域的无线节点接入，并通过有线网络接入中央数据服务器。机组人员可借助这些安装在飞机不同位置的无线传感器，更加方便地监视和掌控飞机各部位的运行情况。WAIC 对比了传统飞机通信系统和自身系统中的无线应用。传统飞机无线通信主要应用在高频、甚高频、卫通等安全相关系统、乘客舱等安全无系统。WAIC 系统无线通信主要应用在传感器、作动器以及为有线通信冗余备份等安全相关系统。WAIC 被定义为面向未来新一代航空器的安全系统，但目前该项目相关技术尚未成熟。

Demo 等人开发了一种微型腐蚀监测智能传感器网络，以支持飞机健康管理的诊断和预测。该项目基于 IEEE1451.X 智能传感器开放式架构的超低功耗无线嵌入式腐蚀监测系统的开发。系统能够监测、记录和分析来自环境和腐蚀性传感器的数据，以便进行飞机健康管理。该项目提出了由传感器接口模块(TIM)和网络应用处理器(NCAP)组成的标准网络架构，从而简化系统集成。这种低功耗的飞机腐蚀和健康监测方法非常适合能量收集技术集成，形成一个独立的，自我维持的无线传感器网络。由欧盟委员会支持的 Flite-Wise 项目完成开发了自动无线传感器节点，可以连接传感器，如声音或压力。由于使用了嵌入式能量收集装置，该平台可以长期持续在旋转叶片上进行空中监测。该装置是一个圆形贴片，设计用于飞机蒙皮，其最大厚度将低于 3mm。它由超薄电池供电，可通过电感耦合进行无线充电，无线充电功能有助于减小贴片传感器的厚度，并简化其维护。在同步方面，属于同一网络的任何两个节点之间的最大时间戳错误将低于 100 μ s。该项目利用现有的，经过验证的硬件和软件构建集成的自主无线系统，并将其与强大的高性能网络、能量收集、传感器接口和数据管理领域的创新概念

相结合,满足了高可靠、强实时的航空应用需求。

美国空军在佛罗里达埃格林空军基地开启了“先进微型遥测系统”(Advanced Subminiature Telemetry System, ASMT)的研究,旨在研制一种用于飞行试验监测的无线传感器网络系统。该项目的主要重点是开发灵活的模块化数据采集和遥测系统,在空对地遥测中引入了许多先进功能,包括智能双向链路,提供实时测试控制和对不利链路条件作出反应降低误码率。美国宇航局兰利研究中心组织的 Flyby-Wireless(FBW)联盟采用无线传感器技术在波音 757 飞机的主起落架上完成了一种可适应性飞机健康监测体系的验证实验。

从公开发表的技术文献来看,国内针对航空领域的无线传感器网络技术的研究成果较少,目前仍处于起步阶段。在一份我国未来 20 年预见技术的调查报告中,信息领域 157 项技术课题中有 7 项与 WSN 直接相关。2006 年初发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》为信息技术定义了 3 个前沿方向,其中 2 个与 WSN 的研究直接相关,即智能感知技术和自组织网络技术。此外,国内高校及科研院所针对该领域也开展研究,例如南京航空航天大学智能材料和结构航空重点实验室,开展了基于飞机强度测试系统的无线传感器网络设计和评价技术研究,开发了多点系统,用于飞机起落架静态测试的演示验证,极大地降低了系统成本。

(二) 存在的挑战

1. 电磁干扰

飞机内部和表面布置大量的雷达系统、通信设备和各种传感器,这些设备处于相同频段,工作频点重叠交叉,由于在通带中的信号都是以相同方式进入,所以对于中频通带来说信号是无法过滤避免的,这会导致机载设备的有效发射信号和杂谐波信号出现相互抑制、交叉调制等现象。无线传感器网络受到其他异构通信系统的交叉干扰,极可能造成通信吞吐量降低,重传时延增加,网络拓扑频繁变化等现象,因此如何保证无线传感器网络在复杂电磁环境中的可靠传输,是需要迫切解决的问题之一。

2. 安全威胁

由于无线通信的传输介质相比有线通信存在着更多的安全性问题,需要防止监测数据被盗取和获取伪造的监测信息。面向航空电子系统应用的无线传感器网络和一般的网络安全都是要解决机密性、点到点的消息认证、完整性鉴别等问题。

可以结合开放式系统互联模型,通过分层的方式采取多种不同的安全策略来构建一个安全、保密的异构网络端到端数据传输通道,保障机载无线传感器网络的通信安全。

3. 硬件资源

在现有的技术上,我们只能通过不断地改进算法,使用不同的协议等方法使传感器节点变得更加高效,能耗更加合理。随着技术的发展,传统的数据采集及处理方式也将遇到新技术,即智能在线数据采集处理技术的挑战。相关的预先研究表明,动态能源管理系统和基于监测的低功耗管理系统可以使无线传感器网络变得更加智能化、高效化。这也是未来无线传感器网络的改进方向之一。

4. 能量受限

机载无线传感器网络受到能源限制,大多数无线传感器节点需要由电池供电。在实际应用中,无线传感器节点高密度部署于飞机上,其工作能耗的总和较大,大量更换电池和电源供电都是不切实际的。因此能量限制对延长网络寿命来说是一个关键挑战。

5. 时间同步

在飞机上部署了大量无线传感器节点,这些节点采用的内部晶振、处理器、收发单元等大多是低成本的,数据采集精度低。由于受机载恶劣环境影响,使得这些部件产生参数漂移从而导致节点间时钟产生偏差,当大量数据传输时会因此导致网络拥塞,同步质量下降以及功耗较高,当传输较小的数据量时可能会降低数据分析的准确性并增加网络延迟。数据传输量,同步和网络质量以及功耗之间的权衡算法需要进一步探索。

(三) 面向航空电子系统的无线网络架构

机载无线传感器网络可以用于机载安全关键系统的健康监控,在设计无线传感器节点的部署方案时,采用异构分级模式,在飞机机电或任务子系统的相应区域内形成一个或多个簇群,簇群中的簇头与簇内节点间组建集群拓扑,利用簇头节点实现对簇内数据监测传感器节点的管理,并完成节点间实时分层转发功能,提高数据投递效率。由于机载环境下无线传感器节点的处理能力、无线带宽、电池容量等资源十分有限,难以处理和传输较大的数据流,簇头节点容易过早衰竭,采用数据融合技术,减小网络通信量,以延长网络生存时间,提高系统工作性能。

根据航空电子系统的特点,无线传感器网络系统由感知层、网络层和接入层

三部分组成,感知层通过各种传感器装置完成前端数据采集,实现对机舱等目标环境的感知和控制。网络层由通信节点和路由节点组成,节点间组成自组织、多跳的无线传感器网络,实现机载网络的无线传输及路由。接入层网关与机载主干网络连接,负责主干网的数据接入和协议转换,实时监测感知外部的请求信息,同时配有网关数据库、安保协议等。

飞机在使用过程中,我们可以通过已布置的各类传感器实时监测各类数据信息,如座舱环控信息、起落架状态信息、发动机参数等。这些不同类别的数据通过无线传感器网络传输到远程数据接口单元(RDIU)进行采集和基本的预处理,随后这些有效数据集通过航空电子总线,经由交换机转发到机载系统;机载系统发出的指令再通过航空电子总线传输到RDIU,最终传递给前端各类传感器,执行相应任务。无线传感器网络作为RDIU与各系统之间数据传输的桥梁,为航空电子系统提供了一种全新的信息获取与处理方式。

与传统的机载网络相比,无线传感器网络技术具有小型化、低功耗、布线少、安装方便等优点。随着航空信息系统向智能化、分布式方向发展,无线传感器网络技术集网络化测量、采集、传输于一体,是未来航电系统设计的方向之一。目前国外军事领域,特别是航空领域,已经有不少成功的研究案例,充分证明了无线传感器网络技术在航空电子系统中的应用优势。我国应当大力开展无线传感器网络相关技术领域的研究,从而实现机载网络智能化、集成化、无缆化等性能的倍速提升。

二、光纤传感器技术在直升机试飞测试中的应用

直升机试飞测试是直升机研发和制造过程中的关键环节,其旨在对直升机在各种飞行条件下的性能和安全性进行验证。目前的试飞测试方法主要依赖传统传感器,如压力传感器、温度传感器和加速度传感器等,来获得直升机在飞行过程中的关键参数,例如结构变形、温度分布和振动情况等等。然而,传统传感器存在一些局限性,如安装复杂、精度不高、易受干扰等,这限制了直升机试飞测试的继续发展。在此背景下,光纤传感器技术成为一种有潜力的解决方案。然而,光纤传感器技术在直升机试飞测试中的应用情况和挑战如何,仍然需要进行深入的研究和探讨。

（一）光纤传感器技术的概述

1. 光纤传感器技术的定义和原理

光纤传感器技术是一种以光纤为传感元件，通过对光的传播、干涉、散射、反射等特性变化的测量和分析，实现对物理量、化学成分、环境参数等的测量和监测的技术。光信号在光纤传输过程中容易被外界环境条件所影响，如压力、温度、电磁场等外界环境因素的变化将引起光波波长、光强、相位、频率等参数的改变。因此，如果能够对这些光波参数的改变进行精确地检测，就可以推算出使这些光波参数发生变化的各个物理量的大小，于是便产生了光纤传感技术。光纤传感器就是根据这些光波参数随外界条件的改变关系来检测各相应物理量的大小。光纤传感器的构成包括光源、入射光纤、光调制器、出射光纤、光探测器及解调器。其基本原理是：光源产生的光信号通过入射光纤进入光调制器，光信号在调制器内受到被测参量的影响而被调制，被调制的光信号通过出射光纤进入光探测器，再经过解调器解调推算得到被测参量的大小。

2. 光纤传感器的分类

根据测量原理和工作方式的不同，可以将光纤传感器分为以下几种类型：

光纤光栅传感器：利用光纤中的光栅结构对光信号进行测量，通过测量光栅中波长的偏移量来获取被测参数的信息，如温度、应变、压力等。

光纤干涉传感器：利用光纤中的干涉现象进行测量，通过测量光的相位差或干涉图案的变化来获取被测参数的信息，如位移、压力、湿度等。

光纤散射传感器：利用光纤中的散射现象进行测量，通过测量光的散射强度、时间延迟或相位来获取被测参数的信息，如温度、压力、流速等。

光纤吸收传感器：利用光纤中的吸收现象进行测量，通过测量光的吸收强度或波长变化来获取被测参数的信息，如气体浓度、化学物质浓度等。

这些不同类型的光纤传感器在不同的应用领域和测量需求下有着各自的优势和适用性。根据具体的应用场景和测量要求，可以选择合适的光纤传感器来进行测量和监测。

3. 光纤传感器的优势

光纤传感器相较于传统传感器具有以下几点优势：

高灵敏度：光纤传感器可以利用光纤的特性进行高灵敏度的测量，能够检测微小的变化和细微的信号，适用于对灵敏度要求较高的应用场景。

抗干扰性强：光纤传感器的信号传输是基于光的传播，不会受到电磁干扰的影响，适用于电磁环境复杂的应用场景。

长距离传输：光纤传感器可以实现长距离的信号传输，光纤在传输过程中的损耗和信号衰减较小，适用于需要长距离传输的应用场景。

分布式监测：光纤传感器可以将传感器分布在整个光纤上，实现对光纤全程的连续监测，适用于需要对大范围区域进行监测的应用场景。

多参数测量：光纤传感器可以通过改变传感器结构，实现对多个参数的同时测量，提高测量效率，适用于需要同时对多个参数进行测量的应用场景。

小型化和便携性：光纤传感器可以通过微型化技术实现小型化和便携性，适用于需要在狭小空间或移动环境中进行测量的应用场景。

高温和高压环境适应性：光纤传感器可以采用耐高温和耐高压的材料制作，能够在高温和高压环境下正常工作，适用于特殊环境下的测量需求。

3. 光纤传感器的应用领域

光纤传感器广泛应用于以下领域：

工业制造：应用于监测和控制生产过程中的温度、压力、应变等参数，实现工艺优化和质量控制。

医疗健康：应用于生物医学检测、体内 / 体外生理参数监测等方面，如心率、血压、呼吸等。

环境监测：应用于大气、水质、土壤等环境参数的监测与分析，以及环境污染监测和预警。

安全监测：应用于结构健康监测、火灾预警、气体泄漏检测等安全领域。

能源领域：应用于油气勘探、矿井安全监测、新能源资源监测等方面。

交通运输：应用于智能交通系统、道路监测等领域，实现交通状况的实时监测和数据传输。

（二）直升机试飞测试的重要性

1. 直升机试飞测试的定义和目的

直升机试飞测试是指对新研发或改进的直升机通过一系列系统性的飞行测试，从而进行全面评估和验证的过程。直升机试飞测试的目的是验证直升机的设计和制造质量，评估其飞行性能和安全性能，确保其符合适航要求。直升机试飞测试是直升机研发和制造过程中的关键环节，对于保证直升机的安全性和性能达

到预期目标具有关键作用。直升机试飞测试通常由经验丰富的试飞员和工程师团队完成，他们会利用专业的试飞程序和试飞计划来进行各项测试和评估。通过直升机试飞测试，可以及时发现并解决可能存在的技术问题和风险，为直升机的进一步改进和制造提供重要的参考依据。此外，直升机试飞测试还为飞行员提供了熟悉和掌握新型直升机的机会，以确保他们在实际操作中能够充分发挥其性能。总之，直升机试飞测试是直升机研发和制造过程中不可或缺的重要环节，它为确保直升机的安全性和性能提供了必要的保障。

2. 直升机试飞测试中的关键参数和数据收集

在直升机试飞测试中，需要收集和评估的关键参数主要包括以下几个方面：

飞行性能：包括最大速度、最大升限、爬升率、航程、续航时间等。

操纵性和稳定性：包括操纵响应、操纵力和操纵性能的评估。

飞行品质：包括飞行平稳性、飞行舒适性和飞行安全性的评估。

发动机性能：包括发动机的推力、燃油消耗、温度和压力等参数的评估。

系统功能：包括航电系统、机械系统和控制系统的功能和性能评估。

为了收集这些关键参数，试飞测试通常会通过各种传感器和数据采集系统来记录和分析直升机的各项性能指标。

3. 传统传感器技术的局限性和挑战

传统传感器技术在直升机试飞测试中存在一些局限性和挑战，主要包括以下几个方面：

空间限制：直升机试飞测试空间有限，而传统传感器的体积和重量较大，不便于在直升机上布置和安装。

信号干扰：直升机试飞测试过程中存在大量的机械振动和电磁干扰，会对传感器的测量精度和稳定性造成影响。

数据处理和分析：传统传感器采集到的数据量较大，需要进行复杂的处理和分析，存在一定的时间和人力成本。

可靠性和耐久性：直升机试飞测试是一项高风险的任务，传统传感器可能面临在恶劣环境下的可靠性和耐久性挑战。

为了克服这些挑战，需要不断发展和应用新型的传感器技术，如光纤传感器、纳米传感器和无线传感器网络等，以提高试飞测试的效率和准确性，并确保直升机的安全性和性能达到设计要求。

（三）光纤传感器技术在直升机试飞测试中的应用

1. 光纤传感器技术在直升机结构监测中的应用

光纤传感器技术在直升机结构监测中的应用可以分为两个方面，即在直升机桨叶监测和在直升机机身监测中的应用。

光纤传感器技术在直升机桨叶监测中的应用。直升机桨叶作为直升机旋翼系统的核心部件，其结构健康状态对直升机的飞行性能和安全性有着重要影响。光纤传感器技术可以通过在桨叶表面布置光纤传感器，实时监测桨叶的变形、温度和振动等参数，从而对桨叶的结构健康状态进行评估。这种监测手段具有高精度、高灵敏度和实时性强的特点，可以提前发现桨叶的结构损伤和疲劳裂纹等隐患，为直升机的维修和保养提供重要依据。

直升机机身作为支撑和连接各个部件的主要结构，其结构健康状态的监测同样重要。光纤传感器技术可以通过在机身表面布置光纤传感器，实时监测机身的应力、变形和振动等参数，从而对机身的结构健康状态和承载能力进行评估。这种监测手段可以帮助识别机身的结构疲劳和损伤，提前预警可能导致事故的隐患，为直升机的安全运行提供保障。

光纤传感器技术在直升机性能测试中的应用。光纤传感器技术在直升机性能测试中的应用主要包括在直升机动力系统测试和在直升机操纵系统测试中的应用。

光纤传感器技术在直升机动力系统测试中的应用。直升机动力系统是直升机正常运行的关键，其性能测试对直升机的飞行安全和性能评估至关重要。光纤传感器技术可以通过在直升机动力系统布置光纤传感器，对直升机动力系统的压力、温度和振动等参数进行监测，实时获取动力系统的工作状态。这种监测手段可以提供直升机动力系统的实时性能数据，帮助工程师评估动力系统的稳定性和可靠性，为动力系统的改进和优化提供依据。

光纤传感器技术在直升机操纵系统测试中的应用。直升机操纵系统是直升机飞行控制的核心，其性能测试对直升机的操纵稳定性和飞行安全至关重要。光纤传感器技术可以通过在直升机操纵系统布置光纤传感器，对直升机操纵系统的力、位移和应变等参数进行监测，实时获取操纵系统的工作状态。这种监测手段可以提供直升机操纵系统的实时性能数据，帮助工程师评估操纵系统的稳定性和可靠性，为操纵系统的改进和优化提供依据。

2. 光纤传感器技术在直升机试飞测试中面临的挑战

光纤传感器技术在直升机试飞测试中面临的挑战主要包括以下几个方面：

直升机试飞测试环境的复杂性。直升机试飞测试通常在恶劣的环境条件下进行，如高温、高寒、高湿度和强烈的振动等。这些环境因素对光纤传感器的性能和稳定性提出了极高的要求，需要光纤传感器能够在极端条件下正常工作并保持精确的测量结果。

直升机结构的复杂性和多样性。直升机由许多不同的部件和系统组成，每个部件和系统都需要被监测和评估。然而，由于直升机结构的复杂性和多样性，如何选择合适的光纤传感器并将其应用于不同的部位和系统成了一个挑战。

数据处理和分析的复杂性。光纤传感器获得的数据量较大，需要相应的数据处理和分析手段。工程师需要掌握专业的光学知识和信号处理知识，从而有效地提取和分析数据，并得出准确的结论。

较高的成本和维护难度。光纤传感器的制造和安装成本较高，同时需要定期进行维护和校准，以确保传感器的性能和稳定性。这增加了试飞测试的成本和工作量，需要维护人员具备专业知识和经验。

（四）光纤传感器技术在直升机试飞测试中的发展方向

为了应对光纤传感器技术在直升机试飞测试中面临的挑战，需要在以下方面继续发展：改进光纤传感器的设计和制造工艺，提高其在恶劣环境下的稳定性和可靠性。针对直升机的结构特点和试飞测试需求，开发适用于不同部位和系统的光纤传感器，并进行精确的校准。研究和开发高效的数据处理和分析算法，以实现试飞测试数据的快速处理和准确评估。提高光纤传感器制造和安装的经济性，培养专业队伍，提高相关人员的专业能力和技能水平。

光纤传感器技术在直升机试飞测试中具有重要的应用价值。光纤传感器具有高精度、多参数、分布式和实时监测的能力，能够为直升机试飞测试提供准确、可靠和全面的数据支持。通过光纤传感器技术，可以实现对直升机飞行参数、结构应变、环境参数等的监测，帮助评估直升机的性能和安全性。同时，光纤传感器技术还可以实时监测直升机的状态和性能，及时发现故障并进行诊断，提高试飞测试的效率和安全性。光纤传感器技术在直升机试飞测试未来的发展中具有巨大的潜力。随着科学技术的不断创新和进步，光纤传感器的灵敏度、精度和可靠性将得到进一步提高。分布式光纤传感器、光纤光栅传感器和光纤惯性传感器等

新型传感器技术的发展将进一步拓展光纤传感器技术在直升机试飞测试中的应用领域。同时,光纤传感器技术还有望应用于直升机的其他领域,如飞行控制、导航定位和智能飞行系统等,为直升机技术的发展和改进提供支持和保障。通过不断创新和进步,光纤传感器技术将为直升机试飞测试提供更加准确、可靠和高效的数据支持,并为直升机技术的发展和改进做出贡献。

三、军用直升机传感器技术的应用及趋势

军用直升机由于具备垂直起落、空中悬停和定点回转等固定翼飞机所不具备的特性,在需要高机动性的低空作战领域具有十分重要的作用。而各类传感器为军用直升机提供各类机内机外参数,在直升机状态监测和飞行控制中至关重要。

(一) 军用直升机功能传感器

军用直升机的传感器可以分为功能传感器和飞控传感器两大类。功能传感器主要是测量各种机体运行参数和飞行状态参数,主要有压力传感器、温度传感器和其他传感器。飞控传感器主要用于增稳装置、自动驾驶仪或自动飞行控制系统,主要用来获取驾驶员的指令输出,检测直升机舵机的运行状态。

1. 压力传感器

压力是重要的流体力学参数,与直升机飞行有关的流体主要有燃油、液压油、空气、滑油等,压力的测量涉及发动机系统、燃油系统、滑油系统、液压系统、环控系统、大气数据系统、大气航姿基准系统等多项系统。因此在所有直升机传感器中,压力传感器使用量最大。发动机扭矩传感器属于一种压力传感器,通过发动机内的工作滑油在线测量扭矩压力,从而转换得到扭矩进而实现对发动机功率的监测。发动机和传动系统中有工作滑油,为发动机和传动系统各个部件提供润滑和冷却,滑油压力传感器用于测量工作滑油的压力,常常安装在滑油流经的管路或者滑油腔内部。燃油压力传感器通常安装在燃油流经的管路上,常和燃油流量传感器搭配使用,为燃油系统工作压力和流量的稳定提供监控保障。直升机的液压系统是直升机控制动作的主要保障,液压传感器用于测量液压系统内液压油的工作压力。液压传感器安装在液压油流经的管路或液压油腔内部。气压传感器用于测量直升机外界环境的大气压力和压力变化。其中静压传感器获取的数据可以经处理得到直升机的飞行高度信息,空速传感器通过测量外部气流的总压与静压之差可以获得直升机相对大气的运动速度。环控系统压力传感器是指测量封

闭座舱内的环境压力，该传感器为环控系统执行其他预定功能提供依据。

2. 温度传感器

温度是另一项重要的物性参数，与直升机飞行有关的温度参数主要涉及发动机系统、辅助动力系统、滑油系统、防火系统、环控系统、大气数据系统等。发动机排气温度传感器安装在发动机的涡轮和尾喷处，用于测量这些位置的排气温度，从而实现对发动机工作状态的在线检测。滑油温度传感器安装在滑油流经的管路或者滑油腔内部，用于检测工作滑油的温度，避免滑油过热。气温传感器，气温传感器包括测量外界大气温度的传感器，测量座舱内温度的座舱温度传感器，此外还有测量货舱、行李舱、电子设备舱内温度的传感器。气温传感器不仅为保证座舱气温舒适提供依据，还监控机内各舱是否发生超温起火事故。火警探测器主要安装于发动机和辅助动力系统，用于测量动力装置的工作温度，发动机和辅助动力装置舱内是否失火。

3. 其他传感器

为了实现军用直升机对除压力和温度之外的状态参数进行监测，直升机还装备有大量的传感器。例如磁航向传感器可以指示直升机当前航向相对地磁北极的偏角，常和惯导系统配套使用。转速传感器主要用于发动机和旋翼系统，旋翼转速传感器，用于监控主旋翼轴的最大和最小转速，并提供报警功能。发动机用的转速传感器用于监控发动机燃气涡轮的转速和自由涡轮的转速。液位传感器主要用于燃油系统、滑油系统和液压系统，以便监控燃料余量以及滑油箱和液压油箱的液位。载荷传感器通常安装在右横向线系伺服机构上，会在直升机达到它的可操纵极限时及时反馈给飞行员。角位移传感器安装在武器挂架上，用于测量挂架角度位置信号以便于武器发射。流量传感器实时监测流经燃油输送管道的燃油流量，实现对耗油率的测量。

4. 军用直升机功能传感器的发展趋势

经过技术迭代和发展，军用直升机功能传感器主要朝着微型化、高精度以及高可靠方向发展。以压力传感器和温度传感器为例，传统的压力传感器多采用膜盒式压力传感器，膜盒式结构的压力传感器机械部件较多，使其工作可靠性和稳定性较低，体积较大，同时精度不高，使用寿命短。随着直升机技术的更新换代，直升机的构成和使用环境越来越复杂，对机载测试设备的技术要求与日俱增，传统的膜盒式压力传感器很难适应新型直升机机载测试的要求。目前直升机的压力

传感器正在大量应用压阻式传感器,压阻式传感器的原理为单晶硅压阻效应,即在硅受到压力作用时,其电阻率随之发生变化。压阻式传感器将单晶硅膜片和电阻条采用集成电路工艺制作为一体式硅压阻芯片,然后将此芯片封装在传感器外壳中,具有很高的集成度和可靠性,相比膜盒式压力传感器缩小了体积。压阻式传感器还具有精度高、灵敏度高、动态响应快、稳定性好、便于批产的特点。压阻式传感器的这些优点使其在军用直升机技术更新迭代时被越来越多地应用。

在温度传感器的选择上,也经历了由热电偶式温度传感器发展为热电阻式温度传感器的过程。传统军用直升机大量装备热电偶式温度传感器,热电偶式温度传感器测温范围宽,测量准确方便,但也存在测温灵敏度不高,容易受到外界信号干扰,也容易受到前置放大器温漂的影响,因此较难跟踪微小的温度变化。目前直升机的温度传感器正在大量应用热电阻式传感器,特别是精度较高的 Pt 电阻温度传感器。Pt 电阻温度传感器除了温度精度较高的优点,还具有长期稳定性较好,抗氧化与抗时效误差效果好等优点,广泛应用于中低温区的温度测量。可以看到,目前军用直升机功能传感器的发展趋势大致有以下几个方向:微型化,航空传感器的微型化可以带来诸多好处,减小了体积和重量,功耗降低,安装方便对周围器件影响较小。集成化,传感器多采用集成封装的形式,提高了可靠性和易用性。数字智能化,以利于信号的统一传输处理,同时实现故障自诊断、故障隔离等功能,提高整个测试系统的动态特性和整体性能。

(二) 军用直升机飞控传感器

从直升机诞生以来,其驾驶操纵和飞行控制历经了机械操纵、机械操纵加装增稳装置或自动驾驶仪、电传飞行控制系统等多个阶段,并正在向着光传飞行控制系统发展。军用直升机飞控传感器主要是位移传感器,主要安装在驾驶杆、脚蹬和直升机舵机等位置,分别用来测量驾驶员操作指令和舵机当前的作动位置。随着军用直升机飞行控制系统由增稳控制到电传飞控到光传飞控的发展,军用直升机位移传感器也由电磁传感器向光学传感器发展。

1. 电磁式位移传感器

第一代军用直升机的特征为以小功率活塞式发动机提供动力,同时操纵采用传统机械杆系操纵系统,代表机型为米-4 和贝尔-47。飞行员通过对总距杆、脚蹬、周期变距杆、拉杆等操纵部件实现对直升机飞行姿态的控制。从 20 世纪四、五十年代开始,直升机开始采用涡轴发动机同时在操纵方面开始装备控制增

稳系统,如美国的 H-13、UH-1、S-58 和法国的“云雀”等。20 世纪 60 年代到 20 世纪 70 年代初的直升机,大多采用模拟式自动驾驶仪,如美国的 AH-1G、S-61、贝尔-214 和法国的“超黄蜂”“海豚”等。20 世纪 70 年代中期到 20 世纪 80 年代的直升机,大多采用数字式自动飞行控制系统,如美国的贝尔-412、CH-47D、S-70、AH-64 和法国的“超美洲豹”、英国的 EH-101 等。军用直升机从开始装备控制增稳系统开始,就开始用到位移传感器,目前直升机上应用最广泛的位移传感器为电磁式位移传感器。电磁式位移传感器主要安装于总距杆、脚踏、周期变距杆等处,称为驾驶员传感器。同时在直升机舵机中也装有电磁式位移传感器,用以监测驾驶员操作指令的执行情况。

电磁式位移传感器多采用差动结构,因此电磁式位移传感器又称为差动式位移传感器,分为线位移传感器和角位移传感器。现以线位移传感器为例说明其原理,差动式线位移传感器,实际上是一个交流变压器,有激磁绕组和输出绕组两个绕组,激磁绕组流过交变电流后,在绕组空间产生交变磁场。因为激磁和输出之间存在互感,所以在输出绕组中感应出一个与动铁心直线位移成比例的电信号。输出绕组两个线圈是反接的,头接头或尾接尾,因此,当动铁心在两个输出线圈中间时,两个输出线圈的感应电压互相抵消。如果动铁心向一个方向移动,输出电压与动铁心的直线位移成比例增加;如果动铁心从中位向另一个方向移动,输出电压仍然与动铁心的直线位移成比例增加,但相位相反。

电磁式位移传感器有以下的特点:结构简单,整个结构没有活动电触点,因此工作稳定可靠、寿命长,尤其适合应用在航空领域。灵敏度和分辨率较高,应用于军用直升机的电磁式位移传感器最高能测出微米级别的位移变化。传感器的输出信号强,一般每毫米的位移可对应数百毫伏的输出。线性度和可重复性都比较好,在一定位移范围内,电磁式位移传感器的非线性误差可以达到 0.1% 量级,并且复现性很好。

但是电磁式位移传感器也有一定的不足,其频率响应较低,不适宜用于快速动态监控场合。同时相对于更先进的光学位移传感器,电磁式位移传感器精度不够高。最重要的是,电磁式位移传感器由于其原理和构造,在信号测量和传输过程中,容易受外界电磁干扰造成误差,对于低空飞行的军用直升机更是如此。

2. 光学位移传感器

从六、70 年代以来,直升机先进飞行控制系统的研究得到西方各国的高度

重视,并向电传和光传飞行控制的方向发展。美国先后进行了“战术飞机制导系统”(TAGS)、“重型运输直升机”(HLH)、“先进数字/光传控制系统”(ADOCS)等项目研究计划。军用直升机低空、低速、前沿纵深使用的作战环境使之较其他飞机更易遭受电磁干扰、核辐射等的影响。因此,在直升机上发展光传飞控系统也较其他飞机更为迫切。实际上,国外光传飞控系统也首先是在直升机上发展并使用的。实现光传飞控系统首先要研制开发用于直升机光传飞控系统的关键部件,主要包括光背板计算机、光学位移传感器、具备光接口的通用接口适配计算机等,光位移传感器用于采集驾驶员周期杆、总距杆和脚蹬的操纵位移,具有十分重要的作用。

光学位移传感器一般是变栅距光栅位移传感器或称波长编码光位移传感器,变栅距光栅位移传感器是一种以波长为输出信号特征的光位移传感器,它利用变栅距光栅的带通滤波功能,通过测算输出光中心波长来解算位移。变栅距光栅是变栅距光栅位移传感器的核心部件,具有理想光栅的光位移传感器输出的波长与传感器的位移成正比。光位移传感器与传统的电磁式位移传感器相比,首先大幅度改善了位移传感器的抗干扰性能。其次进一步小型化、轻量化,更易于与其他零部件配套。同时光位移传感器提高了精度和灵敏性,受外界条件影响较小,可以在较恶劣环境下稳定运行,尤其工作温度范围较传统传感器大为拓宽。光位移传感器具有十分乐观可行的应用前景,但是在应用推广过程中也存在一些问题,比如数据采集、传输及处理过程中耗费时间较长,难以满足飞机控制系统要求的100Hz以上的响应频率,同时光位移传感器在光源稳定性上也存在一定问题,最后还存在工艺误差和测试误差非线性难以补偿的问题。这些问题在目前都限制着军用直升机尤其是我国军用直升机大规模应用光位移传感器。

3. 军用直升机飞行控制传感器的发展趋势

直升机光传飞控系统在外国已经经过三十多年的研究和发展,1984年,第一套数字式光传飞控系统在UH-60A直升机上进行了成功的试飞。2002年1月,欧洲直升机公司装有光传飞行控制系统的一架EC-135直升机进行了首飞,目前已完成取证试飞。光传飞行控制技术是继电传飞控技术后的又一技术跨越,其本质在于实现飞行控制系统的“光化”,既继承了电传技术的系统技术优势,又在对抗恶劣电磁环境、提高信息化和智能化等方面取得重大进步,从而大大改善了飞机的操纵品质,提高了飞行控制系统的可靠性、生存性。

我国的直升机光传飞控系统研究晚于西方发达国家近二十年,通过研究和技术沉淀,在光传飞控系统涉及的关键技术上均有一定的技术积累,为光传飞控系统的工程化实现打下了一定基础。但是对于适用于恶劣环境下的机载光学传感器、光总线、光背板计算机,以及适用于光传系统的作动器等方面还需要进行更深入的研究。目前我国还不能实现直升机光传飞控系统的工程化应用。虽然我国距离直升机光传飞控系统的工程化应用还有一段距离,但是在光学传感器方面的技术成熟度高于整个光传飞控系统的成熟度,除了用于飞控系统的光位移传感器已经得到了试飞验证,国内还能够生产多种类型的状态传感器,例如光学电流传感器和光学压力传感器等。针对现代军事装备高可靠性、高性能的要求,以及空间电磁环境日益恶劣的现状,采用光传操纵系统代替或部分代替电传操纵系统将是飞机飞行操纵系统发展的必然趋势,更是国防军事设备的广泛需求。相信随着我国国防科技工业的进步,各种光学传感器将逐渐替代老式传感器,成为军用直升机“千里眼、顺风耳、听诊器”。

四、航天医学保障中的生物传感器技术

(一) 基于侧向层析法与干化学法的生物传感器

侧向层析法,是指待检测液体样本流经预置敏感干物质材料的条带后呈现一定光学反馈的检测方法,可用于检测包括蛋白质、核酸及其他生物化合物在内的大部分生物标志物。干化学方法则是依赖于浸渍了特定分析物的测试垫,当测试垫与分析样品接触后其颜色或其他物理性质将会改变。侧向层析法与干化学方法都具有精确灵敏、所需样品量少、成本低廉、分析快速、性能稳固、可长期保存、操作简便等优点,常被用于资源贫乏或非实验室环境的定性或半定量检测,因而可以考虑应用于航空航天环境中生物传感器的制备。

特殊的航空航天环境要求生物传感器具有高精度、小型化、耐恶劣环境等基本功能,而基于侧向层析或干化学法的生物传感装置有许多能应用于航空航天环境的检测潜能。

首先,传感器灵敏度的保证是基于侧向层析法基于抗原与抗体间高特异性反应,或适配体针对特定目标物的高特异性识别原理,通过标记分析物或识别元件来实现其高灵敏度和高选择性。

其次是传感器稳定性的保证,例如 Lin 等人的研究开发了一种提高侧向层析

技术稳定性的方法,通过用聚乙二醇修饰金纳米颗粒表面的策略,减少纳米颗粒的非选择性吸附,使其具有更好的生物相容性,与常规侧向层析试纸相比,这种新型侧向层析装置的稳定性和灵敏度都有显著提高,且这种方式适用于任何大多数目标检测分子。而在干化学法中,检测所需的特定分析物是提前干燥并固定在载体上,通过直接添加样品来开始测定,Hagren 等人的研究表明,干化学检测试剂盒在保证检测信号正常输出的情况下,在 -20°C 条件下可稳定保存至少 6 个月,在室温下可储存 4 个月。除却灵敏度与稳定性外,由于涉及液体的转移和混合,因此微重力环境中样品制备非常困难,而以纸质条带或测试垫为载体的侧向层析技术与干化学技术只需直接将样品点在检测平台上,样品再通过毛细管力在检测平台的各个部位流动层析,减少微重力环境的影响。

最后,基于侧向层析的试纸条技术具有与智能手机相匹配并集成的特点,Beshay 等人研发的智能光学系统(Intelligent Optical Systems, IOS)正在实现将侧向免疫层析检测技术集成至定制的手机读卡器中,以便实现定量检测血清中心脏和肝功能相关生物标志物的含量,理想状态是通过智能手机的后置摄像头即可实现对于试纸条的检测,并利用手机程序进行分析处理,而 Xiao 等人则是依靠智能手机的环境光传感器,利用该传感器检测试纸条上检测线的透射光强度,透射光强度随检测线上的金纳米颗粒浓度而变化,结果显示与传统图像分析方法的结果具有良好的一致性。这类智能设备与传感器的结合将使实验操作更加简单友好,提高工作效率,极大程度上节省了空间环境中机组人员的实验时间。

目前国内关于微重力或航空航天环境下应用侧向层析法检测人体相关生物标志物的实验较少,多见于国外的报道,如 Roda 等人在模拟载人飞行火星计划的实验中利用侧向免疫层析技术测定机组人员的粪便钙卫蛋白含量,在模拟任务期间机组人员的蛋白检测结果均由阴性过渡到阳性。此外,在非航天环境下利用侧向免疫层析技术检测人体各器官相关疾病的生物标志物的临床研究较多,如 Byzova 等人针对心肌相关疾病所设计的免疫层析试纸,采用金纳米颗粒分别标记心肌钙蛋白 I、脂肪酸结合蛋白以及 C 反应蛋白以联合检测三种心肌标志物;Liu 等人利用基于荧光微球的侧向层析免疫试纸条法,通过选择生物层中具有最小平衡解离常数的抗体优化检测体系的各种参数来筛选针骨碱性磷酸酶的抗体,以期实现针对该骨代谢相关标志物的高灵敏定量检测。Preechakasedkit 等人使用基于金纳米颗粒的免疫层析试纸条检测人体血清中的伤寒沙门菌,检测限低至

$1.14 \times 10^5 \text{CFU/mL}$, 检测时间只需 15 分钟, 此生物传感器有希望为并未远离大型诊所的低资源环境提供临床服务。

总体上, 侧向层析技术与干化学技术应用于航空航天环境的传感器技术具有许多优势, 例如灵敏、特异、稳定、可以与智能设备集成等等。然而, 这两种技术也存在一些局限, 例如肉眼获得的颜色反应结果大多数只是定性而不是定量的, 如需实现更精确的定量分析还需要读取吸光度等物理参数, 这个问题可以考虑通过使用平板扫描仪或电荷耦合器件 CCD 照相机和专用软件结合测量光学性质, 但测量时间和成本也会相应增加; 从实际应用角度看, 侧向层析技术的另一个缺点是样品必须始终处于液态, 需要具有足够的粘度以流过硝化纤维素的多孔, 由于检测区域的限制, 较高浓度的分析物在流经放置受体 (例如抗体, 酶, 蛋白质等) 的表面处可能发生饱和现象, 从而产生错误的显色反应, 这种情况下, 可能需要进行样品预处理或预稀释; 另外, 可以考虑微流控芯片技术与侧向流动、干化学技术相结合的形式, 微流控技术具有设备小型化、高度集成、可分区操作等优势, 是很好的有限空间检测平台; 除此之外, 还可以考虑检测设备的可重复使用性方向上的探索。期待未来在航空航天领域生物检测领域里, 侧向层析法和干化学技术能在航天人员的生命健康监测工作中发挥出其潜能和优势。

(二) 基于电化学法的生物传感器

电化学生物传感器由具有分子识别功能的固定化生物敏感膜和将生化反应信号转化为电信号的信号转换部分组成, 结合了电分析方法的灵敏性与生物组分的固有生物选择性。电化学生物传感器具有操作简单、成本低、灵敏度高、特异性好、稳定性强等特点, 此外, 样本量需求小和检测仪器的便携性也是电化学检测技术的优点。

目前, 已有一款电化学传感器产品 i-STAT 分析仪 (美国 Abbot 公司) 已实际服役于 ISS 以及 NASA 的实际在轨任务中, 它是一款便携化的临床血液分析仪 (Portable Clinical Blood Analyzer, PCBA), 其最初用于航天飞机任务中, 可用于测量血液临床参数, 如碱度, 二氧化碳分压, 电解质, 葡萄糖和血细胞比容等, 这个分析仪基于电化学分析检测技术, 可以在短时间内提供结果, 且其所需的分析样本较少 (少于 $100 \mu\text{L}$), 然而其主要缺点是保质期有限。基于电化学生物传感装置有许多能应用于航空航天环境检测的潜能。传感器的生物识别部分基于抗原抗体的特异反应, 或适配体与目标物的特异结合, 以及电化学物理传感

器的高灵敏度,前者是传感器高选择性的基础,后者是高灵敏度的保证。同时电化学生物传感器也能够实现集成化、体外实时监测,例如 He 等的工作,他们开发了一种基于适配体的无标记微流体生物传感器,用于血管升压素的检测,微型微流体生物传感器可连续监测不同的加压素水平,具有良好的便携性,可作为一种即时诊断工具,适用于无标准医疗基础设施环境。另外,也有一些学者研究了在某些情况下可重复使用的电化学生物传感器,例如 Hong 等人的工作,他们通过集成热响应聚合物改变电极表面功能,最终实现界面结构的可切换和可逆过程,并且所开发的方法可以作为一个平台检测多种癌症生物标志物,因为感测界面的再生和去除容易受温度控制,从而使免疫传感器能够在重复实验中测量电化学响应。在资源空间有限的航空航天环境中,检测平台的可重复使用性是效率极高的一项功能。

针对与航天医学保障相关的生物标志物,电化学生物传感器已表现出了良好的检测能力。对于心血管疾病相关标志物,NASA 的艾姆斯研究中心(NASA's Ames Research Center)报道了一种无标记生物传感器,由 Periyakaruppan 等人构建,利用电化学阻抗谱和循环伏安法技术,使用碳纳米纤维纳米电极阵列对心肌钙蛋白 I 进行定量检测,检测限达到 0.2 ng/mL。Zhang 等人利用金纳米颗粒掺杂的共价有机骨架和电子介体甲苯胺蓝作为信号放大标签,设计了用于定量检测心肌钙蛋白 I 的超灵敏夹心型电化学免疫传感器,该方法的线性范围为 0.5~10.0 ng/mL,检测限为 0.17 pg/mL。对于骨代谢疾病相关标志物,Khashayar 等人将相应的抗体固定在金纳米颗粒修饰的金电极上,用于电化学测量骨钙素,该传感器可在 5 分钟能实现对骨钙素的定量检测,检测限为 0.65 ng/mL,线性范围为 2.5~90 ng/mL。Kim 等人设计了基于膜的微波介导的电化学免疫测定进行高灵敏度和多重体外检测骨质疏松相关的生化标志物检测。Serafin 等人制备多壁碳纳米管修饰的玻碳电极,利用过氧化物酶标记的多克隆抗体,设计夹心型电流免疫传感器检测胰岛素样生长因子 1,线性范围为 0.5-1000 pg/mL,检测限为 0.25 pg/mL。对于神经-内分泌疾病相关标志物,Kameya 等人创建了一种基于大肠杆菌的果糖胺-6-激酶的电化学传感器,可以直接对完整的糖化白蛋白做出反应,检测范围在 20~100 μ M。对于消化与泌尿系统疾病相关标志物,Thuy 等人制作了一种基于选择性渗透聚合物层改性的微型生物传感器,用于检测丙氨酸氨基转移酶,该生物传感器的响应时间为 5 秒,检测范围为 10~900 U/L,检测限为 8.48 U/L。

Hsueh 等人通过检测门冬氨酸氨基转移酶介导的反应中酶促产生的过氧化氢, 确定门冬氨酸氨基转移酶浓度, 该生物传感器能够检测 $0\sim 0.89\ \mu\text{g/mL}$ 的门冬氨酸氨基转移酶。

近年来, 电化学免疫传感器由于其高灵敏性、高选择性、易便携性越来越受到重视, 且其可以同时检测多目标分子和设备小型化都是非常有利的。电化学传感技术最大的优势即灵敏度高, 但也因灵敏度高导致可测量的范围较窄, 且电化学系统易受外界干扰, 因此系统稳定性较差。此外, 纳米材料由于能够促进电子转移, 增加电化学信号, 提供的粗糙表面有助于生物元件与电极表面的紧密连接, 因此在电化学生物传感器性能优化的道路上有着极其重要的作用。期待其能够从纳米材料的方向上继续改进性能, 在航空航天生物检测领域中发挥一定的作用。

(三) 基于核酸方法的生物传感器

目前地面常用的基于核酸的标志物检测技术一般包括核酸扩增技术、核酸提取检测技术、核酸测序技术以及核酸适配体等相关技术。在空间应用中, 基于核酸方法的检测具有快速、应用范围广等优势。

(四) 基于芯片技术的生物传感器

芯片实验室 (Lab-on-a-chip, LOC) 是一种将一个或几个实验室功能集成在一个只有毫米到厘米级别的集成电路 (通常称为“芯片”) 上的设备, 以实现自动化和高通量筛选。芯片实验室设备是微机电系统 (microelectromechanical systems, MEMS) 装置的一个子集, 有时也被称为“微型全分析系统” (micro total analysis systems, μTAS)。由于芯片实验室具备操作自动化、尺寸小型化、功能集成化等特点, 将其应用在航天医学保障中有得天独厚的优势。

(五) 植入式生物传感器

植入式生物传感器是指一种小型且可植入机体内部的新型生物传感器, 通过实时连续检测特定的生物标志物或生物代谢物, 以此来持续监测人体的某些生理或病理指标, 从而达到早期诊断、预防等目的。植入式生物传感器具有快速、便捷等特点, 而且在仪器的重量、体积、存储条件和功耗等方面实现了较小的资源消耗, 因此, 在航天医学中具有很重要的应用前景。植入式生物传感器在航天医学上应用具有很多的优势。首先, 在航天医学中, 航天员必须拥有对医疗程序的很大自主权, 而植入式生物传感器能够在无需患者或者医务人员的干预下获取重要的生理参数, 这也使植入式生物传感器成为下一代健康检测设备中最具有前途

的方法之一。其次，因为空间站或者航天器的空间资源是极其宝贵的，所以航天医学要求检测设备的尺寸需要尽可能地小，而植入式生物传感器能够直接植入宇航员体内，无需占用额外的空间。最后，植入式生物传感器能够实时连续监测人体重要的生理或病理指标，这也为航天员提供了更具参考意义的数据信息。

基于以上的优势，植入式生物传感器在航天医学上有巨大的发展潜力。然而，植入式生物传感器自身也存在一定的缺陷。第一是异物反应和生物相容性的问题，对于这个问题，人们也一直探寻更好的方法去解决这些问题，譬如使用生物相容性材料；第二是传感器能量来源问题，研究人员也针对该问题提出了无线感应供电、生物燃料电池、压电纳米发电机等解决方案，目前已经有相应的应用产品，如 Glucowizzard™ 植入式生物传感器，且有研究提议其用于监测宇航员的血糖。尽管植入式生物传感器在航天医学上的应用还处于早期阶段，但还是可以预见其巨大的发展潜力。未来，首要解决的是植入式生物传感器的寿命问题，宇航员长期在轨周期长，而目前植入式生物传感器的寿命普遍较短。其次，目前多数关于植入式生物传感器的研究主要集中在血糖的测量，而针对多元化的标志物检测，植入式传感器尚无可实现多指标检测的应用。综上，植入式生物传感器将在航天医学乃至人类生活的方方面面发挥重要的作用。

第四章 飞机飞行控制系统

第一节 飞行控制系统分类

飞行控制系统（Flight Control System, FCS）是飞行器中的一种重要系统，负责控制飞行器的姿态和飞行路径。这个系统通过接收飞行员的输入或机载电脑的自动控制信号，来控制飞行器各部分的移动，如机翼的升降舵、副翼、方向舵等。

飞行控制系统可以分为以下几种类型：

机械飞行控制系统：这是最早的飞行控制系统，它通过机械连接（如拉杆和缆线）将飞行员的操纵杆和脚蹬与飞行器的控制面连接起来。当飞行员移动操纵杆或踩脚蹬时，机械连接将这些移动转换为控制面的移动。

液压飞行控制系统：随着飞行器的增大和速度的提高，机械飞行控制系统无法满足需求，于是出现了液压飞行控制系统。它通过液压泵和液压缸将飞行员的操作转换为控制面的移动。这种系统的优点是力量大，反应快，但需要复杂的液压系统。

电子飞行控制系统：这种系统也被称为“电传操纵”，它通过电线将飞行员的操作传递给飞行器的控制面。电子飞行控制系统可以减轻飞行员的工作量，并且可以通过计算机进行自动控制。其中最先进的是飞行包线保护系统，它可以防止飞行员进行可能导致飞行器失控的操作。

自动飞行控制系统：这种系统包括自动驾驶仪和飞行管理系统，它可以自动地控制飞行器的航向、高度和速度。自动驾驶仪可以接收飞行员或飞行管理系统的指令，然后生成控制信号来驱动飞行器的控制面。

无人驾驶飞行控制系统：在无人驾驶航空器（如无人机）中，飞行控制系统更加复杂，它需要接收地面控制站的指令，同时还要处理来自各种传感器（如GPS、陀螺仪、加速度计等）的信息，以保持飞行器的稳定飞行。

飞行控制系统是航空航天技术的重要组成部分，不断地发展和改进使得飞行更加安全和高效。

第二节 自动飞行控制系统

一、自动飞行控制系统介绍

自动飞行控制系统是一种由计算机控制的系统，能够在飞行过程中自动控制飞机的飞行。它使用一系列传感器和计算机算法来监控飞机的状态，并根据预先设定的参数和指令来控制飞机的航向、姿态、速度和高度等参数。自动飞行控制系统具有提高飞行安全性、减少驾驶员工作负荷、提高飞行效率等优点，已经成为现代民航飞机的标配。

飞行管理系统是自动飞行控制系统的核心部分，它由飞行计算机、导航仪、航向仪、加速度仪等系统组件构成。它通过获取飞机的位置、航向、速度、高度等信息，并根据预设的航线和飞行计划，计算出飞机应采取的飞行参数和指令。飞行管理系统还可以根据空中交通管制和气象条件等变化，自动调整飞机的航线和高度，以保持安全和舒适的飞行状态。

电子持续应急系统是自动飞行控制系统的关键组成部分，它用来监控和检测系统或设备的故障，并采取相应的措施来解决问题。例如，当飞机遇到重大故障或异常情况时，电子持续应急系统会发出警报，并通过自动调整飞机的姿态和航线来确保飞行安全。

电动副翼控制系统是一种用来控制飞机舵面的机械或电力装置。它通过电动机或电动液压泵等驱动设备，实现对飞机副翼的精确控制。电动副翼控制系统可以帮助飞机保持稳定的飞行姿态，在飞行过程中自动调整机翼的倾斜角度，以实现平稳的飞行。

自动飞行控制系统在实际飞行中发挥着重要的作用。它可以减轻飞行员的工作负荷，使其能够更专注于监控飞行状态和处理突发情况。它还可以增加飞行的安全性，通过计算机算法和传感器的准确性来减少人为误差，并及时做出针对飞机状态的调整。自动飞行控制系统还可以提高飞行效率，通过优化飞机的航线和高度，减少飞机的燃料消耗和飞行时间。

总之，自动飞行控制系统是现代民航飞机的重要组成部分，它通过计算机控制和监控飞机的飞行状态，实现自动化的飞行控制。它具有提高飞行安全性、减轻飞行员工作负荷、提高飞行效率等优点，已经成为现代民航飞机必备的装备。

随着科技的发展和创新,自动飞行控制系统将不断完善和提升,为飞行安全和效率带来更大的贡献。

二、民用飞机自动飞行控制系统

(一) 发展历程

民用飞机的自动飞行控制技术的发展大概经历了3个阶段。

第一个阶段。60年代以电子式或模拟式自动驾驶仪为主,采用模拟式计算机、伺服舵机,控制信号都为模拟信号,如波音707、波音727等飞机。

第二个阶段。80年代至90年代以数字式自动飞行控制系统为主,分布式的系统架构得到广泛应用,如波音737、波音747,空客A310、空客A300等。

第三个阶段。以主飞控系统为电传操纵飞控系统的自动飞行控制系统,自动飞行控制系统、主飞控系统高度综合,在硬件上只保留自动飞行控制板供驾驶员进行功能模式的选择。自动飞行控制软件与其他系统共用硬件平台,自动飞行系统实现了更深度的集成,如波音787、空客A380、空客A350、巴西航空工业ERJ-170/190、中国商飞C919飞机等。

(二) 各种自动驾驶的架构

1. B737NG 飞机的自动驾驶系统

B737NG飞机的自动驾驶系统是一款典型的非电传操纵自动驾驶系统,该系统采用机械助力操纵系统,两套驾驶盘/脚蹬为主的操纵输入,通过钢索滑轮传递操纵指令,通过液压作动器驱动主要舵面(包括副翼、方向舵、升降舵、前缘缝翼和扰流板),飞行控制计算机(FCC)计算的横滚通道的控制指令传送给副翼液压伺服作动器,作动副翼,实现横滚指令;俯仰通道的控制指令传送给升降舵液压伺服作动器,作动升降舵,实现俯仰指令。

2. 中国商飞 C919 飞机

中国商飞C919飞机是采用电传操纵的自动飞行系统,电传飞行控制系统,概括来说,就是将驾驶员发起的操纵命令转换成电信号,同时和运动传感器上的反馈信号进行综合,再通过主飞控计算机的处理,将处理结果经电缆发送至各个控制面的作动器上,从而实现全权限操控的一种“电信号系统+控制增稳”的飞行操纵系统。中国商飞C919飞机的自动飞行系统特点是基于综合模块化航电系统(IMA)的架构理念设计,增强了系统的可维护性和可配置性,改善了设

备体积、重量、功耗表现等。

（三）自动飞行控制系统的未来

电传操纵 FBW(fly by wire) 系统可以减轻操纵系统的重量, 节省设计和安装时间, 提高飞行操纵系统的可靠性和生存性。但电磁干扰和雷击是潜在危险, 这对电气设备的可靠性存在很大的威胁。另外, 电传操纵系统使用电缆的绝缘层是由易燃品制成, 一旦铜线由绝缘层破损处外露, 便可能引起短路造成电线走火, 存在安全隐患。

现在的飞机更多地采用复合材料, 使得飞机对电磁波的屏蔽越来越小, 为了提高抗电磁干扰能力, 于是提出光传操作系统。光传操作系统 (fly by light) 主要是采用光纤代替电缆作为信号传输媒介, 把电信号转换为光信号。同长度的光纤要比电线轻得多。据有关统计使用光纤比使用电线可以使大型客机减少 454 kg 的自身重量。

光传操作系统技术相当先进但又尚不成熟, 存在一定的可靠度和制造上的困难。比如: 零件费用高昂、光纤弯折易致信号损失、传输系统的辐射二极管易失灵等。但由于其几乎不受电磁干扰、重量轻、数据可靠等方面优点, 光传操作系统技术毫无疑问将是飞机自动飞行操纵系统未来发展方向。

三、低空经济中的飞控系统

飞控系统承担航迹规划、姿态控制和飞行增稳等核心功能。飞行控制系统 (Flight Control System) 简称飞控系统, 是用以全部或部分地代替飞行员控制和稳定飞机的运动, 并能改善飞行品质的反馈控制系统。除具有自动驾驶仪的功能外, 飞控系统还可改善飞机的操纵性和安定性, 实现航迹控制、自动领航、自动着陆、地形跟随、自动控制机动飞行中机翼载荷分布、自动瞄准和编队飞行等功能。飞控系统几乎与所有机载系统都存在数据交联, 同时运行安全关键的复杂控制算法, 因此是 eVTOL 中最为关键的系统之一。

传统民航客机的飞控系统由飞行增稳控制的内回路和控制航迹、姿态的外回路组成。前者为主飞行控制系统 (PFCS), 后者为自动飞行控制系统 (AFCS), 分工上: 主飞行控制系统中, 飞行增稳控制是最重要的功能, 其主要目的是通过增稳或控制增稳控制律, 调节飞机纵向短周期模态、横航向滚转和荷兰滚模态特性。此外, 主飞行控制系统还具备飞行包线保护功能, 可以对速度、过载、姿态

和角速率等控制指令进行限幅，实现边界限制来提高飞行安全性和可靠性。

自动飞行控制系统一般包括自动驾驶仪(AP)、飞行指引(FD)和自动油门(A/THR)，在三者的联合工作下可实现对飞机的速度、高度、姿态和航向、航迹的控制。

电传操纵技术成熟推动 eVTOL 出现。飞行控制早期采用机械式传动系统，通过机械结构实现操纵指令的传输和反馈。但随着飞机尺寸、飞行速度等性能表现提升，机械式操纵的难度愈发显著。电传操纵(Fly-by-wire, FBW)系统使用电子信号代替机械传动，通过飞控计算机对各个舵面发出控制指令，FBW 的出现彻底解决了操作指令传输距离和失真的问题，并且极大节省了空间和重量，成为当前的主流飞控系统。面对 eVTOL 数量庞大且复杂的作动机构，FBW 技术也可实现精准的操纵控制，是 eVTOL 出现的重要技术推动力。

(一) 飞控计算机是核心部件，多余度技术提升系统可靠性和安全性

飞控系统包括传感器、飞控计算机、作动器和控制显示四大子系统。电传飞控系统经过了多代的迭代发展，其组成一般可以分为四个子系统，包括计算机子系统、作动子系统、传感器子系统和控制显示子系统（无人机该功能由地面站完成）。

电传飞控系统工作时：驾驶员的操纵指令通过数据总线发送到飞控计算机，同时飞控计算机也接收来自惯导和大气数据传感器等传感器的姿态、角速度、加速度和大气数据等信号；飞控计算机对接收的信号进行循环冗余校验、完整性校验和信号表决后，用于控制律的计算，并将作动指令发送到航机控制电子器件；航机控制电子器件控制对应的舵机 / 舵面运动，实现飞行控制。

余度技术提高飞控系统可靠性和安全性。运输类飞机上的设备、系统及安装（包括飞控系统），其灾难性事故概率需低于 10^{-9} / 飞行小时。而单系统的飞控可靠性有限，最多可以做到灾难性事故率小于 10^{-5} / 飞行小时，为了进一步提高系统的可靠性，就需要通过增加冗余，即构建多余度的飞控系统，并在不同飞控计算机之间建立内部数据交互和投票机制。此外，建立异构的多余度飞控计算机可以进一步降低整套系统的故障率。

计算机子系统是飞控系统的控制计算核心，内部采用模块化设计。飞控系统的计算机子系统主要完成如下四项功能：多余度供电的二次处理和转换；系统控制、调度、容错及控制律计算；外部接口信号的调制解调处理；伺服控制、伺服

控制律计算及伺服驱动。当飞控系统采用多余度同步实时工作设计时,计算机子系统被赋予的功能将更多。考虑到计算机机箱及板卡板载面积限制,计算机子系统在硬件实现上通常采用功能模块的形式存在,包括:电源处理模块(PS 模块)、CPU 模块、I/O 模块和伺服控制模块。

全部功能模块集中于机箱内,通过总线通信形成电传飞控系统。功能模块是计算机子系统的核心,不同功能模块可通过机箱内的高速总线通信,或可通过机箱外的低速总线通信,将集成了功能模块的机箱之间进行多余度配置,便可形成集中式的电传飞控系统。

传感器子系统需通过信号表决提高信号的可用性和完整性。硬件层面,传感器子系统中通常包括杆/脚蹬指令、加速度计、三轴角速率计、迎角/侧滑角、动压/静压/总温计及组合惯导等装置。架构层面,虽然目前很多传感器通过内部监控方法(电压/电流监控、频率监控等)识别“无效”数据,但仍有 5%-10% 的漏检率,因此电传飞控系统通常通过传感器余度配置,提高信号可用性和完整性,即通过设计外部监控器对多余度传感器进行表决(传感器余度管理),以进一步隔离错误传感器信号,避免对飞机产生不良影响。

作动器子系统采用分布式布局保证系统可靠性。作动器子系统包括舵机和电机,分别操纵副翼、升降舵、方向舵等舵面,和螺旋桨等旋翼。为保证作动器的可用性和完整性,通常采用分布式布局。对于舵机,从失效概率推算,单侧舵面应具备 2 个舵机,可采用主-主或主-备的设计方式;对于电机,为保证单个或多个电机故障后仍然具备起降或悬停的能力,通常采用 6、8、12、16 个旋翼电机,并提供 1.5-2.0 倍的拉力冗余。对于电机和舵机,均需设计监控器对工作状态进行监测,核心都是保证飞控系统的安全性和可靠性。

(二) SVO 是有人驾驶 eVTOL 重要方向,自主飞行通往 UAM 终极形态

简化飞行操纵(SVO)是有人驾驶 eVTOL 的重要发展方向,飞控系统价值量有望提升。SVO 是指能为飞行员或操纵员降低执行飞行相关任务复杂度并且同时能提升安全性的飞行系统、界面、操作和训练方式。目前许多主机厂在第一代 eVTOL 的飞机设计上采用了有驾驶员的方案,但面对气动效应复杂的旋翼与固定翼状态之间的过渡阶段,飞行员很难像自动控制系统一样做到每秒数百次以上精密调整各个动力单元与气动舵面来保证飞机的稳定可控,因此使用飞控软件在部分操作上代替飞行员对实现 SVO 至关重要。

但相应地 SVO 对于 eVTOL 飞行包线等运行要求更为严格, 因此对于飞控系统功能、架构、安全性等方面也提出更高要求, SVO 趋势下飞控价值量有望提升。

UAM 下半场关键推动力在于自主化和智能化, 自主飞行飞控系统是通往 UAM 最终形态的钥匙。飞机自主化的飞行实现路径是“电传系统 - 自动飞行 - 自主飞行”, 首先通过电传系统实现所有操纵信号数字化, 随后建立自动飞行的能力(即飞行操纵程序化), 最后再通过建立视觉感知和决策能力实现自主飞行。SVO 的本质是在某些复杂操作上, 用软件替代飞行员手动操纵, 相当于“半自动”, 目前许多主机厂在第一代 eVTOL 的飞机设计上采用了有驾驶员的方案, 因此 SVO 变成了至关重要的要求。但是业界一致认为未来的 eVTOL 应该是“无人”的, 即自主的。因此, 为降低 eVTOL 运营成本(主要是驾驶员的成本), 满足更大规模的低空飞行市场, 能够实现飞行自主化的飞控系统是远期的终极发展目标。

自动飞行实现有赖于飞行控制系统和飞行管理系统相配合。自动飞行目前已是传统民航飞机的必备功能, 为降低驾驶门槛、减少运营成本、提高飞行安全性, 未来 3 ~ 5 年内首批完成适航取证并投入运营的 eVTOL 也都应具备该功能。自动飞行功能的实现, 需要通过飞行管理系统(FMS)和飞行控制系统(FCS)共同完成——FMS 发挥飞行计划管理、综合导航、性能计算、航迹预测和飞行引导等功能, 与自动飞行控制和自动油门系统交联, 提供自动飞行能力, 并有效提高飞行安全性和经济性。

自动飞行趋势推动 FCS 和 FMS 设计向综合化发展。传统民航客机的硬件分布上, 飞行管理系统一般驻留在综合模块化航电平台(IMA)中, 而飞行控制系统一般集成在独立的多冗余飞行控制模块(FCM)中。而在 eVTOL 上, 出于简化操作、轻量化、集成化和经济性的考虑, 可参考民机综合化航电和汽车域控制器的发展趋势, 将飞管系统从 IMA 中剥离出来, 与飞控系统共同集成在飞行控制模块, 对 eVTOL 自动飞行功能进行综合化设计。此外, 综合化趋势也将更好地适应未来 eVTOL 从自动飞行升级到完全自主飞行。汽车巨头入局有望以汽车电子先进技术赋能飞控行业发展。汽车电子领域控制器将原本需要多个 ECU 实现的核心功能集成, 再加上数据交互的标准化接口, 极大降低车载电子系统的开发和制造成本。当前航空电子和汽车电子均正从分布式联合架构向综合集成式架构转变, 随着众多汽车厂商布局 eVTOL, 他们在带动汽车、航空上下游供应链

发展的同时,也会积极尝试成熟的汽车电子先进技术如智能座舱、自动驾驶等在 eVTOL 上的应用和优化,推动飞控行业发展。

(三) 无人机飞控安全性要求和技术难度较低,主机厂多进行飞控自研

微、小、轻型无人机飞控系统无需适航认证。与 eVTOL 飞控系统功能类似,无人机(特指微、小、轻型无人机)的飞控系统是无人机完成起飞、空中飞行、执行任务、返场回收等整个飞行过程的核心系统。与 eVTOL 飞控系统差别在于,从事微型、轻型、小型民用无人驾驶航空器系统的设计、生产、进口、飞行、维修以及组装、拼装活动,无需取得适航许可。因此,无人机飞控系统在安全性要求和技术复杂性上相较 eVTOL 飞控均大幅放松无人机飞控系统硬件部分由机载和地面站两部分组成。以多旋翼无人机的飞控硬件为例,机载部分主要由主控制器、从控制器、各传感器和无线数传(Air 端)组成。传感器获取的信息分别通过不同的通信接口发送给控制器,控制器通过串口连接无线数传模块,实现与地面的信息交互。地面站部分主要由地面站、无线数传(地面端)和遥控器组成。

四、典型民机电传飞控系统架构

飞控系统作为现代民用客机的关键系统,其正常工作与否直接关系到整个飞机的安全性、可靠性以及航班运营的经济性。整个民用飞机飞控系统经历过多个发展阶段:从早期的单纯机械操控到增稳与控制增稳系统,再发展到当前的电传飞控系统。整个系统由纯机械式控制发展到结合液压助力及功率作动器的控制系统,演变到基于模拟电子的飞控系统,再发展到全权限的数控电传飞控系统。其中机械配液压助力系统的典型代表为波音公司开发的 B707 客机的飞控系统,装配有模拟电子飞控计算机的典型机型有空客 A300、波音 B727/B737Classic/B747、洛克希德 L1011、麦道 DC9/DC10、图-144 以及协和飞机等,基于电传飞控系统的典型客机有空客 A320/A330/A350/A380、波音 B777/B787 等。纵观整个飞控系统发展过程,系统的安全性与可靠性不断提高,同时整个飞控系统向着集成化、综合化、智能化的方向发展。

(一) 民机飞控系统的基本功能和组成

1. 民机飞控系统的基本功能

现代民机飞行控制系统可以定义为将飞行员的飞行控制指令传递到飞机相应的操纵舵面实现对飞机的姿态/模态等控制的系统。典型的民机飞行控制功

能主要是稳定和控制飞机的刚体运动，解决飞机的稳定性和操纵性问题。飞行控制系统通常分为人工飞行控制系统和自动飞行控制系统。按照 ATA100（Air Transportation Administration，航空运输协会）对飞机内部系统分类的编排，人工飞行控制系统属于 ATA100-27 章节，自动飞行控制系统归属 ATA100-22 章节，人工飞行控制系统又分为主飞行控制系统和高升力飞行控制系统。其中主飞行控制系统通过驾驶侧杆或驾驶盘等感知驾驶员的指令，经过控制律计算，指令作动器动作，控制副翼、升降舵、方向舵、扰流板、水平安定面等舵面运动，最终实现飞机的横滚、俯仰、偏航控制及配平；高升力飞行控制系统通过襟缝翼手柄感知驾驶员指令，经计算机计算，指令作动器动作，调节襟翼、缝翼的位置，最终实现增加飞机在起飞、降落过程中的升力。自动飞行控制系统通过飞行模式控制面板感知驾驶员指令，经过控制律计算，使得飞机能够按设定的航向、航迹、速度以及高度飞行。

2. 民机飞控系统的主要组成

通常而言，现代飞行控制系统中包括控制与显示装置、传感器装置、计算机装置、作动器和自检装置以及专有的信息传输链和接口，形成了一条闭环反馈回路。类似地，现代民机飞控系统各子系统也囊括了显示告警、计算、作动、传感等模块。主飞行控制系统主要包括控制显示装置、飞行控制计算机、伺服作动装置、直接模式运动传感器等；高升力系统主要由襟缝翼控制计算机、襟缝翼操纵杆、襟缝翼驱动装置、襟缝翼驱动装置等组成；自动飞行控制系统是由控制系统来代替驾驶员操纵，其核心就是自动飞行控制计算机。

（二）国内外典型民机飞控系统介绍

1. A320 客机

空客飞机作为大型民用电传飞机的代表，推出过多个机型，从早期的 A320、A330、A340 到最新的 A350 和 A380，最为经典的是 A320 系列。A320 系列飞机是空客公司研制生产的 150 座级单通道双发中短程干线客机，包括 A320、A321、A319、A318、A320NEO 等。空客 A320 系列客机的整体尺寸与波音 737 系列客机相当，其两侧机翼上布置有一对副翼、五对扰流板以及前缘缝翼、后缘襟翼等增升装置，尾翼布置有一块水平安定面、一对升降舵和一块方向舵。A320 客机作为世界上第一架应用电传飞控系统的民用大型客机，具有以下设计特点：飞控系统采用了先进的控制律进行全时间控制，保留了常规系统良好的特

性；在驾驶舱创新性地引入被动侧杆，替代传统的驾驶盘，它是世界上第一架采用侧杆控制的电传控制系统的民机；空客飞控系统的设计理念为尽可能简化飞行员的驾驶操纵，降低人工操纵的工作负荷，转而由飞控计算机来实现控制，所以飞控计算机是系统的核心，通过处理飞行员的输入，经过控制律计算后输出飞控作动器的控制指令；此外，空客飞机的飞控系统在俯仰和滚转轴向设计有包线保护功能，计算机可以阻止飞行员进行超越飞行包线的操纵；空客 A320 飞控系统在水平安定面和方向舵控制中均设计了机械装置，作为终极备份系统的一部分。

A320 飞控系统由 9 台计算机和相应的作动器组成，包括 2 个升降舵副翼计算机（ELAC），控制副翼、升降舵和水平安定面作动器；3 个扰流板和升降舵计算机（SEC），控制所有扰流板作动器，同时也作为升降舵和水平安定面控制的备份；2 个飞行增稳计算机（FAC），提供偏航阻尼、配平和行程限制功能；2 台襟缝翼计算机（SFCC）专门用来处理襟翼和缝翼的控制。A320 飞行控制系统设计有三种控制模式：正常控制模式、降级控制模式、直接控制模式。其中，正常控制模式包括实现基本的三轴控制、飞行包线保护控制等功能，当出现故障时，整个系统将自动降级为降级控制模式。当 A320 的部分飞控计算机失效后，系统将按照既有的逻辑进行故障重构，当所有飞控计算机失效后，终极备份启用，飞行员可通过脚蹬直接控制方向舵，通过平尾人工配平手轮实现水平安定面控制，为飞机提供一定的俯仰和偏航控制能力，直到电传飞控系统重新启动。

2.B777 客机

美国波音公司作为历史最为悠久的民机主制造商，其主要的系列机型有 B707、B727、B737、B747、B777、B787，其中 B777 是一款由波音研制的中远程双发宽体客机。B777 系列飞机包括 777-200、777-200ER、777-200LR、777-300、777-300ER、777F、777X 等，其飞控系统采用了较为传统的外型布局，两侧机翼上布置了一对外侧副翼、一对襟副翼、七对扰流板以及前缘缝翼、后缘襟翼等增升装置，尾翼布置了一块水平安定面、一对升降舵和一块方向舵。作为波音公司第一款采用电传飞行操控系统的飞机，B777 的电传飞控系统具有以下设计特点：控制面采用先进的控制律进行全时间控制，同时改进了控制特性，保留了常规系统的良好特性，进一步提高了可靠性和维修性；在设计中采用了包线保护设计，在系统的余度设计中采用了“主-主”设计理念。B777 飞控系统主要由以下部件构成：3 余度主飞行控制计算机 PFC、4 余度作动器控制电子装置

ACE、动力控制单元 PCU、驾驶杆 / 盘、脚蹬、ARINC629 总线等。其中 ACE 是一种模拟设备，其功能是与飞行员控制传感器接口，并以模拟伺服回路控制作动器。ACE 将驾驶员控制器位置和舵面位置信号转换为数字量，然后通过 ARINC629 总线传给 PFC，PFC 的主要作用是将系统采集到的大气数据以及各类传感器的输入信号进行处理并结合预先写入 PFC 中的控制律，基于位置反馈信号计算舵面指令，将舵面指令通过 ARINC629 总线回传给 ACE，由 ACE 转换成模拟信号，用来控制作动器。B777 的飞控系统有正常模式、次级模式和直接模式三种控制模式，驾驶员可通过直接模式开关实现模式切换。B777 依然保留了一套机械控制机构，以控制水平安定面和两对多功能扰流板作为整个飞控系统的终极备份。

（三）飞控系统技术热点问题

现代民机电传飞控系统作为一个高复杂度的系统需要实现多项关键功能，整个飞控系统研发过程涉及系统工程、软件工程、电子电气工程、机械工程等多个工程，此外，严苛的安全性需求也给飞控系统的工程研制提出了不少挑战。国内外的民机主要承制商以及飞控系统供应商在电传飞控系统的研发中投入了大量的成本去解决技术难点，国外飞机主制造商以及系统供应商凭借其多年的工程经验已经攻克了诸多技术难点，这部分已经被攻克的技术难点也都受到专门的知识产权保护。

1. 系统技术热点

民机飞控系统的架构设计受安全性需求、功能需求、成本、重量等诸多条件的约束，而安全性需求始终是民机研发首先要考虑的需求，在系统层级，主要通过独立性、非相似设计以及完整性监控等三个方面来提高整个系统的安全性。通过系统设计确保在系统内不同通道电气、物理以及功能上的彼此独立，防止故障的蔓延；系统设计过程中要求同一功能的冗余单元采取两种或多种控制方式；对于执行复杂逻辑运算的飞控计算机，设计监控通道以实现对指令的完整监控。目前主流的先进民机飞控系统普遍采用了无机械备份的全权限电传飞控系统，但当所有的计算机均发生故障而失效时，如何才能确保飞控系统仍然实现对飞机安全稳定的控制？目前，在工程实践上的一种解决思路是在原有的飞控系统架构上添加一套额外的、能够实现最小可接受控制能力的系统作为终极备份系统。但是如何保证终极备份系统在需要掌握控制权限时可以快速接权安全操控，又要在处于

备份等待的过程中不能影响或干扰原主控系统功能的正常使用，是目前业内的研究热点之一。

2. 基于模型的系统开发技术

飞控系统作为一个具有数十个功能的大系统，其中某些功能的丧失或者错误的执行都会直接导致灾难级事件的发生，所以这些功能都具有最高的安全性等级。此外，这些功能还涉及多个外部交联系统，其综合系统架构往往比较复杂，主要体现在多个系统的集成工作量庞大、多系统接口的数量巨大、多系统协同工作的逻辑复杂。传统的系统工程设计主要是基于设计文档和制图的方法开展，文档的非形式化特征使得不同的工程设计人员会对文档形式的设计方案产生理解偏差，增加了不同系统成员之间协同工作的沟通成本。随着产品设计的不断深入，实际设计与设计文档之间的同步会耗费大量的时间和人力成本，甚至也会增加设计差错出现的概率。针对上述问题，基于模式的系统工程开发方法将提供一个解决途径，通过统一的系统建模语言对复杂的飞控系统开展建模，将不同专业领域的描述集中到完整的系统中，这样就最大程度地减少了在需求定义阶段对需求理解的歧义，在设计开发到样机实现再到验证的后续阶段，整个研发过程中，以模型为数据传递的介质，如此便提高了研发效率。目前的工程实践中，基于模型的系统工程与传统基于文档的设计并存，基于模型的系统工程方法只是应用于一些简单系统中，如何将基于模型的系统工程方法合理应用于复杂的飞控系统研发活动中？另外，SysML 作为一门系统建模语言，其本身的学习难度不小，如何能够通过优化建模语言来实现更为形式化的建模，都是目前研究的热点。

3. 形式化软件验证技术

飞控系统飞控计算机、作动控制计算机中存在着大量的机载软件，是实现飞控控制律计算的重要核心。软件的质量和可靠性相比硬件更低，更易发生故障，此类故障会对飞机的运营安全产生很大的负面影响，甚至造成灾难性后果。2009 年，法航空客 A330 客机由于空速传感器发生故障，飞控系统发出了错误的爬升指令，飞控系统的机载软件中未设置爬升升限高度，最终导致了坠机事故。所以，进一步提高飞控机载软件代码的安全性和可靠性，愈发成为提高民机飞控系统安全性的关键所在。虽然 DO-178 制定了严格的软件开发和验证流程，但传统的软件验证手段如测试、模拟及仿真，究其本质，都是在力求寻找软件的 BUG，而被测的软件是否有 BUG 是无法证明的，因此难以完全保证软件代码的

可靠性和安全。业内近来开始使用的软件形式化验证方法通过严格的数学语义进行推演,可从逻辑上证明软件是没有 BUG 的。然而目前基于形式化的软件验证技术大部分还处在理论层面上,如何将理论研究的成果更好地应用于飞控系统软件验证工程,也是当前业内关心的技术热点。

4. 适航技术

民机适航取证是确保大型客机满足按公众要求制定的、可接受的最低安全标准的管理和技术实现过程。民机产品在研制过程中包含了设计、制造和验证等活动,而针对每项开展的活动,申请人都需要用客观记录反映活动真实发生的详实可靠的数据来表明所研制民机产品以及系统对适航规章的符合性。对于运输类飞机,现行有效的适航标准是 CCAR25R4、CCAR25R4 中的条款,涵盖了对于不同设计特征飞机和预期使用条件的飞机适航要求。因此,在确定审定基础时,需根据飞机的设计特点和预期使用条件梳理合适的适航条款。但是,鉴于适航条款制定之时的技术现状、对于安全性理解程度以及由于适航标准不可能穷尽也不可能预见所有可能的情况,适航标准本身就存在一定的局限性,所以适航标准制定本身也是当前业内研究的热点之一。此外,目前民机飞控系统的设计已经完全由机械式转向了电传飞控系统,如此便出现了许多新的设计特征,包括驾驶舱内侧杆技术、阵风缓解和颤振抑制等主动控制技术、飞行包线保护技术等,大量新技术的使用也给申请人开展适航符合性验证活动带来了诸多挑战,而如何制定匹配当前技术成熟度的民机电传系统的适航条款符合性验证路径也是当前研究的热点。

随着人工智能技术、先进控制理论、微电子集成电路等技术的迅猛发展,现代民机飞控系统也在向着系统重量进一步降低、功能更强大、性能更优的方向不断优化。目前广泛使用的电传飞控系统也存在着一些弱点:首先,设计本身存在高增益的问题,而高增益很容易诱发振荡;其次,电信号在传输过程中容易受到电磁干扰;再者,为保证电传系统的可靠性,设计通常都会采用余度技术及自检测技术,这两种技术的引入会使得系统的复杂度提高。而光传飞控系统为解决上述问题提供了一种思路,光传飞控是利用光导纤维数据传输技术,在飞控控制操纵器件、飞行控制计算机和飞行控制伺服作动器之间传输控制指令和传感器信号,用以代替电传飞控系统。光传飞控系统相比电传飞控系统可以有效防止电磁干扰,此外,光传飞控系统 also 具有良好的抗腐蚀性和优良的故障隔离能力。目

前,光传飞控系统已经应用于国外的军机型号中,后续,在其技术的安全性和可靠性水平进一步提高后,可以作为先进民机飞控的重要发展方向。

第三节 飞行控制系统调试

一、四旋翼无人机调试

(一) 飞控系统调试

飞控系统是无人机的大脑,主要负责无人机的姿态稳定、飞行控制等功能。在调试过程中,需要进行以下设置和测试:

飞行参数设置:根据无人机的参数进行PID等参数的设置,以调整飞行稳定性。

遥控器通道设置:将遥控器的通道设置与飞控系统匹配,确保无人机能够正确响应遥控器指令。

电机油门响应测试:通过调节油门,测试电机转动是否平稳、响应是否灵敏等。

姿态校准:调试过程中,需要对飞控系统进行姿态校准,确保无人机姿态正确。

(二) 电机和电调调试

电机和电调是影响无人机飞行的关键因素。在调试过程中,需要进行以下设置和测试:

电机旋转方向测试:通过遥控器控制四旋翼无人机,检查电机旋转方向是否正确。

电机和电调匹配测试:将每个电机和电调匹配,确保无人机飞行稳定。

电机推力测试:测试每个电机的推力,并进行相应参数的调整。

(三) 传感器调试

传感器是无人机关键的定位和姿态检测设备,对无人机的飞行非常重要。在调试过程中,需要进行以下设置和测试:

加速度计校准测试:通过校准加速度计,确保无人机姿态稳定。

罗盘校准测试:通过校准罗盘,确保无人机能够准确识别方向。

高度计测试:测试无人机取得高度的准确性。

（四）遥控器调试

遥控器是操作无人机的关键设备，调试时需要确保遥控器通道与飞控系统控制相匹配。

综上所述，四旋翼无人机调试的主要对象包括飞控系统、电机和电调、传感器、遥控器等。只有经过正确的调试过程，才能保证无人机的飞行稳定和安全。

二、无人机组装调试实验室技术

无人机（Unmanned Aerial Vehicle，简称 UAV）技术的迅速发展推动了航模和无人机爱好者的日益增加。为了确保无人机的安全飞行和性能优化，正确的组装和调试是至关重要的。

（一）机架与电机组装

准备工作：选择合适的无人机机架、电机、电调及配套的螺丝和配件。

电机安装：根据机架设计，将电机固定在机架上，确保电机轴与机架平面垂直。

电调连接：将电调与电机连接，注意区分电机的转动方向和电调的对应端口。

电调与电池连接：根据电调参数，选择合适的电池，并使用正确的极性连接电调和电池。

（二）飞控系统安装

飞控板安装：将飞控板固定在机架中央，确保安装稳固且不影响其他部件。

传感器校准：使用飞控板配套的软件进行传感器校准，包括加速度计、陀螺仪等。

接收机安装：将接收机固定在机架合适位置，确保信号接收稳定。

（三）遥控器绑定

打开遥控器和接收机电源，确保二者进入配对模式。

根据遥控器和接收机的操作说明，完成遥控器和接收机的配对操作。

验证绑定：通过遥控器操作，检查无人机是否能正确响应。

（四）电源管理

电池管理：选择合适的锂电池，注意电池容量、电压和放电率等参数。

电池安装：将电池安装在机架上，确保电池固定牢固且不会因振动而移位。

电源分配：根据各部件的电源需求，使用适当的电源分配板或电线进行电源分配。

（五）系统调试

飞行模式设置：根据实际需求，设置无人机的飞行模式，如定高、定位、自主飞行等。

电机测试：在无风环境下，测试电机是否正常工作，是否有异响或震动过大现象。

遥控器信号测试：测试遥控器与无人机之间的信号传输是否稳定，是否有干扰或丢失信号现象。

飞行测试：在安全环境下进行飞行测试，检查无人机的飞行性能、稳定性和操控性。

（六）螺旋桨安装

螺旋桨分类：根据无人机的旋转方向选择合适的螺旋桨，包括正反螺旋桨。

螺旋桨安装：将螺旋桨固定在电机轴上，确保螺旋桨安装牢固且不会因振动而脱落。

螺旋桨平衡：使用螺旋桨平衡器检查螺旋桨是否平衡，避免飞行中因螺旋桨不平衡导致的问题。

（七）常见问题处理

电机不转：检查电机与电调连接是否正确，电机是否损坏，电调是否工作正常。

遥控器无响应：检查遥控器电池是否充满电，遥控器与接收机是否成功配对，信号传输是否稳定。

飞行不稳定：检查螺旋桨是否安装正确，电机是否平衡，飞控系统是否校准正确。

电源故障：检查电池是否损坏，电源分配是否合理，电线是否接触良好。

三、飞行控制系统测试技术体系架构

飞行控制系统（以下简称“飞控系统”）作为航空器中最复杂、最关键的系统之一，起到保证飞行器操纵性和稳定性、提高完成任务能力与飞行品质、增强飞行安全和减轻驾驶员负担的作用，是整个飞行器的大脑。飞控系统测试技术涉及飞控系统产品设计过程中的测试、试验过程中的测试、生产过程中的测试、飞行过程中的测试和地面维护保障过程中的测试，是取得飞控系统产品定性或定量信息的一种基本途径和方法。我国在役的军用飞机涵盖了从第二代到第四代机型，

伴随的飞控系统从机械操纵系统、增稳与控制增稳系统、电传操纵系统逐渐向飞行管理系统发展。这个过程中，与之相适应的测试环境从第一代基于仪器仪表的功能测试箱，到第二代系统综合试验柜，再发展到第三代双网络实时测试环境，可以基本满足飞控系统研发和批产阶段的测试验证要求。

国内的飞控系统测试技术一直是随着飞控系统型号研制来开展工作，根据型号验证需要进行测试，测试技术未能从顶层和整体加以考虑，尚未形成体系化发展和引领局面。没有体系引导的测试技术研究工作不仅与飞控系统的发展需求不相匹配，也无法对飞控系统研制能力的提高起到有效的推动作用。目前，国内各大主机机构、科研院所和高校关于飞控系统测试技术体系的研究尚属空白。由于没有体系的引导，飞控系统测试仍然是跟随型号和验证计划进行。国外的各大飞机制造商，例如洛克希德、空客、波音等公司都建立了各自的民用或军用航空器测试技术体系，然而由于技术封锁和涉及机密，无法直接被我国科研人员获取和参考。公开的文献大多是关于自动测试系统、自动测试语言、典型飞机的机载测试系统架构，以及飞机地面试验测试内容介绍的，没有系统的关于测试技术体系的相关资料。

测试技术是一项大而全的集合，如果飞控系统测试技术体系架构可以建立，将为相关验证所需的测试技术梳理出清晰的脉络，从而起到测试牵引和助推飞控系统研制的作用。然而，构建飞控系统测试技术体系是一项复杂的工程。从飞控系统分类看，有机械操纵系统、增稳与控制增稳系统、电传操纵系统、光传操纵系统；从适配飞机的种类看，有固定翼飞机、旋翼飞机、无人机、轰运飞机等；从飞机的用途看，有军机和民机；从作战任务看，有不同型号不同任务类型的飞机。每一种飞机上的飞控系统组成都不相同，飞控系统的设计都不相同，飞控系统测试验证的需求都不相同。而飞控系统本身就有功能多、性能指标严格、交联关系复杂、信号种类繁多的特点。因此，对不同飞控系统测试技术进行梳理、归纳，构建统一的飞控系统测试技术体系架构，将是一项复杂、庞大且烦琐的工作。近些年来，国内虽然没有直接关于飞控系统测试技术体系的研究，但是已经有研究机构开始有计划、有重点地逐步开展航空器测试技术体系的归纳和研究，并提出了一些研究思路和体系构建方法，为航空器具体产品的测试技术体系构建提供了规范化的指导。

（一）飞控系统测试技术体系架构分析

测试技术和测试对象是强相关的，研究测试技术体系不能脱离测试对象凭空想象，一定是以某一典型产品为对象，研究其测试关键技术和发展路线，通过分析、提炼、归纳，形成典型产品的测试技术体系。建立飞控系统测试技术体系是一项复杂的分析过程，需要从5个方面进行分析。

①从飞控系统的功能角度分析。飞机按类别可划分为：固定翼飞机、旋翼飞机、轰运类飞机、无人机等。基于在研的各类飞机飞控系统研制情况，飞行控制系统根据功能类别可大致划分为：传感器分系统、计算机分系统、伺服作动分系统等，不同机型的飞控系统组成不完全相同，具体机型需要具体分析，但是从大的功能上可按上述类别进行划分。②从飞控系统试验角度分析。在研飞控系统试验按照大类可分为：部件试验、子系统试验、系统综合试验、鉴定试验、铁鸟试验、机上地面试验、飞行试验等。每类试验又包含若干子类 and 不同试验项目。③从飞控系统试验对测试的需求角度分析。飞控系统各类试验开展都需要若干测试技术支撑。例如要进行计算机接口测试，就要对计算机进行供电，对进入计算机的信号进行仿真，对计算机输出信号进行采集和分析；要进行故障注入试验，就要对不同互联系统之间的信号进行断开和接通。通过梳理相关试验对测试的需求，就形成了飞控系统试验对测试的需求，包括信号类型、范围、采样速率、测试精度要求、测试环境需求等。④从测试技术自身发展现状分析。飞控系统测试技术以通用测试技术为基础，可以梳理出来相关的为满足在研及未来型号需求的现有测试技术、方法和手段，以及测试技术遵循的标准和规范，按照技术类型形成各条技术脉络。⑤从测试技术发展趋势分析。飞控系统架构逐渐从集中式控制架构到分布式控制架构发展，从飞控系统向飞管系统发展，架构变化、试验方法变化必然会引起测试技术的变化。另外，测试技术本身发展变化对飞控系统验证也起到了推动作用。梳理出来的各条测试技术，抛开具体测试对象，从其自身维度看，也存在进一步发展的方向路线。

（二）飞控系统测试技术体系构建

基于上述分析，拟以飞控系统功能划分为出发点，遵循系统功能层、试验需求层、测试技术实现层、测试技术验证层、标准规范层、测试技术产品层的分类方式，分析并构建飞控系统测试技术体系架构。系统功能层将飞控系统按照功能划分为若干分系统，各分系统又包含了子系统、部件等。为验证各系统及部件的

功能和性能,提出验证需求,通过部件试验、系统试验、系统集成试验、鉴定试验、铁鸟试验、机上地面试验等进行验证。梳理这些试验,需求颗粒度从大到小、逐级分解,最终形成各条功能测试需求、性能测试需求以及不同测试参数种类和测试原理方法,构成了试验需求层。试验需求层对所需测试技术提出直接需求。测试技术实现层以通用测试技术为基础,全面梳理不同飞控系统测试所需的共性测试技术,按照单点测试技术和系统测试技术两个层次构建测试技术实现层框架。测试技术实现层一方面支撑系统试验的开展,另一方面,从测试技术自身发展的角度对系统验证提出新的要求。测试技术验证层根据测试技术实现层归纳出来的测试技术种类,形成满足测试技术开发、测试产品研制和应用需求的测试技术验证能力平台。测试技术产品层以测试技术实现层中物化的测试设备结合试验需求层对测试产品的要求形成飞控系统专用的测试设备产品。标准规范层向上对试验需求层中涉及的试验方法提出要求和约束,对测试技术实现层中的测试方法提出要求和约束,向下结合产品研制工艺,共同形成产品研制规范,用于指导和规范测试技术产品层中的产品研制。系统功能层、试验需求层、测试技术实现层、测试技术验证层、标准规范层和测试技术产品层之间相互关联,共同构成了飞控系统测试技术体系架构。

(三) 飞控系统测试技术体系层次分析

1. 系统功能层

以某型民用飞机的数字型电传飞控系统为例,飞控系统根据功能可分为座舱操纵系统、主飞控电子系统和伺服作动系统。各个外场可更换单元(Line Replaceable Unit, LRU)的功能通过不同形式组合形成飞控系统的各项功能需求,例如俯仰/偏航基本控制功能、人工/自动配平功能、迎角保护及告警功能、过载保护及告警功能、发动机失效补偿功能等。针对飞控系统的各项功能,对每条功能进行充分验证。需要说明的是,军用飞机和民用飞机在使用环境、任务需求、安全性要求等方面有所不同。军用飞机的首要关注点是完成任务的能力,技术指标以作战性能为第一;民用飞机的首要关注点是安全性、经济性和舒适性。因此,二者飞控系统的组成也不尽相同。但从功能大类上划分,军机和民机飞控系统类似,即可分为传感器分系统、计算机分系统、伺服作动分系统和控显分系统。

2. 试验需求层

试验需求层需要验证飞控系统的各项功能,覆盖从部件到系统的各个层次。

按照部件、子系统、系统、全机的层次,分别要开展部件试验、子系统试验、系统集成试验、鉴定试验、铁鸟试验、机上地面试验和飞行试验。各阶段试验都要对功能、性能和逻辑控制进行充分验证。以飞控系统集成试验为例,为验证系统设计的各项功能。每类试验都包含了非常多的测试项,在此不能逐一列出。各试验项目对验证所需的测试技术进一步提出明确的需求,包括信号的适配、断联、隔离、仿真、切换、采集、解析、监控、交互等需求,包括软件的组成需求、各个软件实现的功能需求、性能需求和逻辑控制需求等。

3. 测试技术实现层

测试技术实现层以通用测试技术为基础,按照单点测试技术和系统测试技术两个层次构建测试技术实现层框架。单点测试技术以信号激励、数据采集、数据处理和数据交换等技术为划分依据确定测试单元技术谱系。系统测试技术通过各项单点测试技术的综合集成,以系统结构设计技术、接口适配技术、测试软件设计技术、自动化测试技术、诊断测试技术、智能测试技术等为划分依据确定系统测试技术谱系。

为了便于说明,可以按三级结构对测试技术进行划分,实际上还可继续划分第四层、第五层等,每项技术的实现包含了诸多实现方法、理论的支撑。例如,在第三层中,实时通信技术又包括了反射内存网技术、DDS 实时网络技术、RTX 实时操作系统技术、QNX 实时操作系统技术、LabviewRT 操作系统技术等。数据分析技术包括了数字滤波法、时域分析法、频域分析法、小波分析法等实现方法;而其中的频域分析法包括最大熵谱分析法、自回归模型谱估计法、谐波分析法和最大似然法等。数据挖掘技术包括了人工神经网络、遗传算法、决策树和粗糙集等实现方法。总线传输技术包括了 USB 总线、PCI 总线、PXI 总线、PXI-E 总线、CPCI 总线等传输技术。进一步,根据总线应用类别可以分为: ARINC429 总线、ARINC664 总线、MIL-STD-1553B 总线、1394B 总线、CAN 总线等。测试技术实现层一方面支撑系统试验的开展,另一方面,测试技术自身的发展对系统验证的完善也起到有效推进作用。例如自动断连、切换以及脚本技术的发展和实现支持在闭环试验中以时间线为顺序,较为精确地模拟飞机在地面或空中不同时刻的操作或注入故障对飞机的影响,提升试验验证的准确性;诊断测试技术和智能测试技术的发展将有效推动故障预测与健康管理技术从理论研究向实际应用的跨越转变。

4. 测试技术验证层

测试技术验证层对测试技术实现层中各项技术在投入应用前对其功能、性能、成熟度等通过搭建不同的能力平台进行测试验证。例如,要验证 1394B 总线通信技术,首先要进行硬件平台搭建,需要一到两台工控机、两块 1394B 仿真板卡以及测试线缆完成拓扑连接。其次,要熟悉 1394B 总线协议,包括寻址、协议层划分、传输方式、工作时序、帧格式等。最后,进行软件编码。这些构成了验证 1394B 总线通信技术的测试验证平台,通过搭建的测试技术验证平台完成对该项测试技术所涉及的功能性能指标的验证。不同的测试技术验证方法不完全一致,有的需要搭建简单的硬件平台,软硬件结合验证;有的仅需要通过软件平台方式进行验证。不管是哪种验证方式,各项测试技术从理论到实际应用前都需要经过测试平台的验证。

5. 测试技术产品层

测试技术产品层以测试技术实现层中物化的测试设备,结合试验需求层对测试产品的要求,形成覆盖需求的飞控系统专用测试设备产品。被测飞控系统根据产品研发的不同阶段接入不同的测试设备,以此来验证飞控系统设计的各项功能、性能和逻辑。测试产品谱系按照模块级测试产品、系统级测试产品和综合级测试产品为框架进行构建。

模块级测试产品以测试技术实现层中各项通用测试技术的组合为基础,通过测试技术验证层平台进行验证,物化形成模块级产品,包括信号适配模块、信号处理模块、电源控制模块等。各模块级产品通过软硬件综合,形成面向不同对象的系统级测试产品,包括面向综合验证的系统试验平台、面向批产的敏捷交付平台、面向质量和适航的鉴定试验平台、面向专项技术验证的小型验证平台、面向外场维护的便携试验设备等。

目前,飞机的导航、制导与控制(Guidance Navigation Control, GNC)系统正在向 GNC3(Guidance Navigation Control Computation Communication)系统逐渐转变,面向未来飞控系统的发展,测试技术也正朝着自动化、网络化、智能化的方向发展。逐步实现基于网络的远程测试平台,测试数据、资源的共享,远距离诊断和维护平台,依据专家知识和人工智能技术形成的自主决策和判断的智能测试系统,以及基于物联网的自主保障信息系统等,为飞控系统智能测试和保障提供重要支撑。

6. 标准规范层

标准规范层对构成测试技术体系的各层级进行约束,包括了以下3个概念。

①试验标准。试验标准是由行业标准、内部标准和经过审批的任务书、设计方案、技术规范等组成的试验大纲,对试验需求层中各项试验需求实现的方法提出要求和约束。②技术规范。技术规范包括了测试技术实现层中各项测试技术在实现过程中所遵循的软硬件标准,既包括国标、国军标、国际标准,也包括内部的标准和规范。③产品研制规范。试验标准、技术规范,以及产品研制工艺三者结合,共同形成满足飞控系统测试验证的产品研制规范,用于指导和规范测试技术产品层中的产品研制。

从国内外航空测试技术研究现状出发,以飞控系统为对象,从几个方面分析了飞控系统测试技术,最后基于层次化结构构建了飞控系统测试技术体系架构,并详细说明了各层次所包含的内容和各层次间的关系,填补了国内飞控系统测试技术体系架构研究的空白,为飞控系统测试技术的研究提供了一定的理论支撑。

四、飞机飞控作动系统电静液作动技术

20世纪80年代欧美地区的一些国家进行了大量电静液作动器(Electro-Hydraulic Actuator, EHA)作动系统原理样机试飞验证,表明EHA作动方案具有一系列优点。目前,EHA作动技术已成功应用于美国F-35战斗机与空客A380客机主控舵面的控制中。

与传统液压作动技术相比,EHA作动技术拥有诸多优势,主要体现在以下4个方面。①EHA供电系统与中央计算机连接,供电系统发生故障后能立即重新布局,具有容错能力,有用电少、发热少、部件磨损小、可靠性高等工作特点。②由于简化了外部供油回路,使用EHA作动系统,在机身和机翼中无需设置复杂的高压液压管道,不存在液压油泄漏、污染等问题,飞机局部受损后生存力更强。③EHA作动系统中微处理器具有很强的机内检测能力,降低了对地面设备和维护人员的要求,可以减轻甚至取消传统液压系统必需的诸如更换油滤、重新加注液压油、液压系统排气等外场定期维护工作。④EHA作动系统按需用电,舵面负载轻时很少甚至不从机载发电机取电,减轻了飞机发动机负载和燃油消耗,极大地节省了燃油消耗,减轻起飞质量和飞机的冷却负担。采用EHA作动系统后,无需从发动机引气,提高了发动机的工作效率,使得相同推力需求的发动机体积

更小、质量更轻,同时飞行控制、刹车、冷却功能均得到改善。EHA 作动系统效率高,飞机的出动架次率高,所需装备的飞机数量可减少,飞机的生产费用、发展费用和寿命期费用也将降低。

可见,EHA 电传作动技术的应用可以彻底取消传统飞机上的液压系统,彻底根除飞机液压系统的“跑冒滴漏”问题,从而提升飞机整机的可靠性。同时与传统液压作动系统相比,采用 EHA 驱动系统控制主舵面可以有效地实现飞机整机的能量管理,因此高性能电作动技术可以简化系统结构,优化资源配置,提高能源利用效率、功重比、可靠性、测试性和维护性,降低全寿命成本。另外,EHA 作动技术本身具有电传作动能力,符合未来多电 / 全电战机的发展需求,因此其已成为未来先进飞机机载作动系统的发展方向。

(一) 电静液作动器的国外发展现状

空中客车公司相继推出了 A380、A350XWB 多电客机,而波音公司也研制了 B787 多电客机与之抗衡,这些飞机均采用了目前世界多电飞机技术研制成果,以多电、混合飞控作动功率源分布,传统 FBW 液压伺服控制和以 EHA 为主的电力作动器并存为特点,瞄准了宽体客机应用市场。从 20 世纪 90 年代开始,得益于电磁技术、数字信号处理技术、大功率伺服技术的进步,电静液作动系统迎来了工程样机研制和试飞的高峰。国外 EHA 作动技术的发展经历了技术研究探索、工程样机研制和型号服役装备 3 个阶段。1996 年,卢卡斯公司在爱德华美国空军基地用 IAP 取代 C-141 飞机副翼上传统的液压作动器,完成 20h 的试飞,并进行了可靠性飞行验证。1998 年,卢卡斯公司又设计了 EHA 在 C-141 副翼上完成近 1000h 的飞行试验。20 世纪 90 年代,美国 EHA 已接近实际应用水平。1991 年 12 月,Parker 公司研制的 EHA 作动器在 C-130 飞机上完成了空中试飞并取得满意效果。

试飞验证的成功证明了以 EHA 为代表的电作动系统已能满足现代型号主控舵面电作动的应用需求,对 EHA 作动系统在现代飞机上进行大量研制和装备的时代已经到来。传统液压作动器研制厂商纷纷加入 EHA 的研制行列,美国的 Parker、Moog 公司,欧洲的 Lucas、Liebherr、Goodrich 研制了不同的 EHA 并在飞机上实现了试飞验证,并提高自身 EHA 技术成熟度,为型号大批量应用奠定了基础。Parker 公司承担了 JSF 飞机的方向舵、襟副翼 EHA 的研制任务,采用电气三余度、机械液压双余度配置,使用正弦波直流无刷电机和定量泵驱动双腔

串列作动筒的技术方案,作动器最大输出力 15.5t;Parker 公司最终承担了 F-35 主飞行控制舵面 EHA 的研制任务。Moog 公司先后在 F-15 飞机平尾、F-18 飞机平尾装备其研制的 EHA 进行试飞,也使用了正弦波电机+定量泵的 EHA 方案;试飞的成功提升了 Moog 公司的技术成熟度,使 Moog 公司与 Parker 公司共同承担了 F-35 飞机主控舵面 EHA 的研制工作。欧洲的 Liebherr 公司在 2001 年就自行研制了大飞机用 EHA 样机,并最终在欧洲主导研制的 A380 飞机、A400M 飞机上承担了 EHA 的研制任务。进入 21 世纪后,空客公司率先推出了 A380 多电客机,采用 EHA 与传统液压作动器共同驱动飞控主控舵面,在 A380 技术基础上,相继推出了 A400M 军用运输机、A350XWB 多电宽体客机,投入装备运营。

1. 空客 A380 EHA 作动系统

A380 飞机采用了一种双体系结构的飞行控制系统,即把用于备份系统的 EHA 作动器与主动控制的常规电传液压伺服作动器结合起来,形成 4 套独立的主飞行控制系统。其中 2 套系统采用传统的以液压为动力的作动系统,另外 2 套以电为动力,装备用于操纵面的 EHA 作动系统。这是经典的 2H/2E 飞控能源配置结构,理论上这 4 套系统中的任何一套都可以用来对飞机进行控制,这使 A380 飞机的飞行控制在系统独立性和余度上都达到了前所未有的水平。

A380 飞机在副翼使用 4 台 EHA,升降舵使用 4 台 EHA 与传统液压作动器构成非相似余度。方向舵、扰流板分别使用 4 台电备份液压作动器(EBHA)驱动,使用电作动构成应急备份操纵。缝翼、水平安定面利用电驱动的伺服电机与液压驱动的液压马达综合后驱动舵面运动。A380 两侧的水平安定面上各有 2 个独立的升降舵。各升降舵都有 1 个液压作动器和 1 个 EHA。同样地,还有 2 个独立的方向舵,每个方向舵使用 2 个 EBHA。空客 A380 升降舵 EHA 与传统液压作动器如图 3 所示。EBHA 在正常模式下是以液压为动力,在备份模式下以电力为动力。A380 每个机翼有 3 个副翼,各副翼通过 2 个作动器来偏转。内侧和中间的副翼采用 1 个液压作动器和 1 个 EHA 作动器,而外侧副翼采用 2 个液压作动器。扰流板(每个机翼有 8 个)作动器是以液压为动力的。然而,各侧机翼上均有 2 个扰流板作动器,均是以电力作为备份动力的 EBHA。空客 A380 装备的副翼 EHA、升降舵 EHA 与传统液压作动器主要性能指标一致,方向舵、扰流板 EBHA 除速度外,其他指标与传统液压作动器一致。

电静液作动器中 2 个背对背单向阀允许蓄能器补充液压管路中的液流损失。

2 个减压安全阀保护作动筒、安装结构、舵面等,避免因异常而产生过压或变形。模态转换阀可隔离作动筒与泵的连接,在系统故障时,可将作动器切换至阻尼旁通工作模式。作动筒内部安装 LVDT 传感器,测量作动筒位移。电机内部装有 RVDT,测量电机转子的角位移和速度。电机绕组内部集成温度传感器,对电机绕组工作温度进行实时监控。EHA 集成作动筒两腔压差传感器,对作动器工作压力进行监控。设计补油电磁阀通过机载液压系统对 EHA 内部封闭的液压油进行补充,满足民机超长服役期对 EHA 液压泄漏的苛刻要求。模态转换阀直接驱动电磁阀,同时集成 LVDT 对模态转换阀工作状态进行监控,确保作动器工作模态切换。

当作动器正常工作时,模态转换电磁阀(Solenoid Valve, SOV)通电,推动模态选择阀至正常工作模态。飞控计算机的舵机控制信号经大功率控制器伺服放大,驱动正弦波直流无刷伺服电机带动液压泵转动,液压泵分配负载流量,经过模态选择阀,作用于作动筒的两腔,推动作动筒运动。在伺服电机及作动筒上分别装有旋转变压器、LVDT,形成内外回路的闭环控制。

当 EHA 作动系统发生故障,SOV 断电,模态选择阀将进行转换,使得作动器在阻尼旁通模态下工作。EBHA 正常工作时与传统液压作动器完全相同。机载油源提供的液压油通过电液伺服阀(EHSV)控制后,经过液压模态转换阀驱动液压作动筒运动。液压系统故障后,EBHA 切换至 EHA 工作模态,伺服电机通电工作,带动液压泵运转,液压泵输出的高压油经由电气模态转换阀分配至液压作动筒。与其他舵面驱动作动器相同,EBHA 也可在阻尼旁通模态下工作。空客在飞控作动系统中坚持主动/备用作动器布局为基础的原则,A380 选择的多电结构使用 EHA 作为备用作动器,主动作动器仍然采用常规的液压伺服控制。这种布局方式使 A380 飞机具有以下优点:①非相似功率源提供舵面动力。②提高了任务可靠性(生存力),有 4 个动力供给系统,而不是 3 个;从 3 个动力系统对副翼和升降舵供电,对每个 EBHA 独立供电,当发生液压系统故障时不会造成全部失效。③整机能耗降低。④简化机上能源布局。但与普通电液伺服作动器(EHSA)相比,EHA、EBHA 作动器的结构更为复杂。

2. 空客 A350XWB EHA 作动系统

A350XWB 飞机沿用传统液压作动器与电静液作动器汇合应用的组合形式,在升降舵使用 2 台 EHSA、2 台 EHA,方向舵使用 2 台 EHSA、1 台 EHA,扰流

板使用 8 台 EHSA、4 台 EBHA，内侧副翼使用 2 台 EHSA、2 台 EHA，外侧副翼使用 4 台 EHSA，装备电机驱动的水平安定面作动器。缝翼采用电机驱动，翼尖采用减速板电驱动。多电架构的采用，使 A350XWB 飞控系统减轻了质量，获得了高可靠性和低维护成本，竞争力明显提升。

3. 波音 787 机载电作动系统

波音公司 2004 年启动了波音 787 飞机的研制，首次使用机电作动器（Elect-Mechanical Actuator，EMA）进行飞行控制，使飞机获得了空前的性能。波音 787 作动系统采用传统液压作动器与机电作动器组合驱动，包括用于副翼、襟副翼，内、外阻流板，升降舵和方向舵的带远程闭环电子设备的传统液压作动器，水平安定面、中间扰流板采用的机电伺服作动器。波音 787 在 $DC \pm 270V$ 电源转换部件、EMA 伺服电机控制器中使用液冷进行散热，提高了作动器的功率重量比。

4. 国外飞控电作动系统发展趋势

空客 A380、A350XWB 和波音 787 是世界多电客机的代表，其技术水平引领了世界多电客机及其采用的飞控电作动技术的发展，具有以下发展趋势。多电客机技术成熟，多电飞机研制普遍化。实际上 20 世纪 90 年代欧美在军机、民机领域开展的多轮飞控电作动技术验证，为其应用积累了丰富的工程经验，解决了制约飞控电作动系统应用的高效发电、配电网络，EHA/EMA 高速伺服电机、高可靠大功率控制器设计等关键技术，提高了关键部件的技术成熟度，带来了新世纪国外多电飞机技术的普遍应用，从军机到民机的大量应用也证明了目前飞控电作动技术已能满足飞控系统的苛刻要求，电作动系统大量装机应用的时代已经到来。EHA/EMA 在飞控系统占的占比越来越大。目前 A380、A350XWB 使用的 EHA、EBHA 完成了一半的飞控舵面操纵任务，军机 F-35 更是全部主控舵面使用 EHA 完成操纵，赛峰集团提出了 Electric Wing 的验证计划，完成 A320 飞机全部主控舵面 EMA 操纵的飞行验证。在飞控作动领域，目前正处在传统液压作动被电作动汇合应用逐步替代的阶段，随着设计技术及使用经验的积累，EHA/EMA 全部替换掉传统液压作动器的时机即将到来。

机载电源系统、液压系统体系已完成升级换代。机载电源系统已从传统的 115V/400Hz 定频发电过渡到了 230V 变频发电，取消了传动的控制系统设计部件，提高了电源系统的功率重量比，发电功率更是从 A380 飞机的 600kW 提高到了 B787 的 1MW；液压系统普遍采用 35MPa 的压力体系，摒弃了 21MPa、28MPa

的传统液压供压体系。飞控电作动系统技术方案基本确定。EHA 配置在副翼、升降舵、方向舵等主控制舵面，与传统液压作动器配合共同驱动飞机气动舵面。EMA 大多配置在襟翼、缝翼、扰流板等辅助操纵舵面和起落架收放、推力矢量控制、刹车制动器等短时工作的机载操纵部件上。EHA 具体实现方案基本固化，纷纷使用伺服电机 + 定量泵的技术方案，利用伺服电机的速度控制实现液压作动筒的速度控制，伺服电机的换向实现液压作动筒的换向，电机采用反电势为正弦波的永磁同步电机，液压泵多采用高速微型定量柱塞泵。

（二）电静液作动器的国内发展现状

国内机载电作动系统理论研究方面以北京航空航天大学最为活跃，其在电作动器的方案分析、控制理论研究、余度设计、直流无刷电机和电机控制器设计等方面做了很多理论及初步试验工作。工程技术实践方面，西安飞行自动控制研究所、南京液压机电中心、西安庆安集团有限公司和航天运载火箭技术研究院第 18 研究所都进行了大量的原理研制及实验工作。

北航的沙南生等根据文献并结合自身研究现状提出了电作动系统的研究目标：对飞行控制舵面，战斗机的每个作动器最大功率为 $35 \sim 50\text{kW}$ ，民用飞机舵面的典型功率为 3kW 。其中，电机转速应高达 10000r/min ，其输出力矩应满足在 1000r/min 时为 $50\text{N} \cdot \text{m}$ ；若采用电静液作动器，液压泵转速应达到 10000r/min ，其排量为 $1 \sim 10\text{mL/r}$ ，电源为 $\text{DC}270\text{V}$ 。就动态指标而言，电作动器应满足负载为 $0.5\% \sim 5\%$ 时，响应频率为 $5 \sim 30\text{Hz}$ ，另外空载速度、负载速度等指标必须满足当前液压作动系统作动筒能达到的指标。

西安飞行自动控制研究所实现了大功率 EHA/EMA 从无到有，从试验研究到工程试飞的突破，取得了较快的发展。经历了技术探索阶段、原理样机研制阶段、工程样机研制阶段。2005 年完成了首台 EHA 原理样机的研制，实现了 EHA 工程样机从无到有；2008 年研制了首台 EBHA 工程样机，验证了 EBHA 控制方法；2009 年进行了首台机械液压双余度 EHA 原理样机的研制，积累了余度 EHA 设计经验；2013 年完成了某项目 EHA 伺服作动系统的研制，并随载机首飞成功；2014 年完成了电气四余度 EHA 原理样机的研制，积累了 EHA 余度管理设计经验；同年研制出 28kW 大功率 EHA 原理样机。经过十多年的不断探索，形成从单通道到双余度、四余度，从定量泵到自适应变量泵，从 EHA 到 EBHA 较为完整的产品谱系，可提供电静液伺服作动系统整套解决方案，并处于国内领先地位。

2015 年西安飞行自动控制研究所针对大型民机飞控系统电功率作动的需求,开展大功率电静液作动器研究,完成副翼电作动器原型样机设计、生产和测试工作,进行远程控制单元、电机控制器和电功率作动器的集成,完成大型民机电作动系统架构权衡研究,为 EHA 作动技术在大型民机型号上的应用提供支撑。

受长期测绘仿制、体制机制、工业基础等多方面因素影响制约,国内的电作动系统技术一直在低水平徘徊,许多关键技术尚未完全掌握。我国关于 EHA 作动器的研制,虽在前期进行了大量工作,但仅在个别问题上有所突破,还没有形成完整多电飞机所需的 EHA 作动系统工程解决方案和工程产品,无法满足目前启动的多电宽体客机、多电中型四代机等型号的研制需求,以 EHA 作动技术为代表的电作动系统技术已成为制约我国多电飞机技术发展的瓶颈。

(三) EHA 功率电传作动系统的关键技术

电作动系统技术是继直接驱动阀式作动技术之后的关键作动技术。然而,第五代战机隐身、高速等特征要求机载系统具有更强的散热能力,定向能武器的采用要求机载系统能够提供更高的能量。远程作战飞机、无人机作战飞机和高超声速飞行器对机载作动系统的功重比提出了更高的要求。长航时无人机、远程作战飞机要求机载系统可靠性大幅度提升。大型运输机对机载系统安全性、通用性和可靠性等提出了跨越式要求。同时,这些装备共同的要求还包括机载系统具有更高的系统效率和更强的维护保障能力。以上装备性能需求均对 EHA 作动技术的应用与发展提出了更高要求,因此需进一步改进 EHA 作动系统结构,并提升其可靠性、功重比、运动精度、效能、温控性能以及故障容错能力,成为制约 EHA 作动技术发展的主要技术难点。而围绕上述技术瓶颈,EHA 功率电传作动系统需要突破的关键技术包括以下几点内容。

1. 高效大功率伺服控制器技术

(1) 宽温度范围内,高压大功率驱动电路的工程实现

目前,大功率电机的功率驱动级拓扑结构基本都采用三相逆变桥,可用于该拓扑结构的功率元件大概有两大类:驱动芯片+逆变桥、智能功率模块 IPM。前者硬件拓扑结构略为复杂,硬件开销大,而且布局布线对信号质量及驱动性能有较大影响;后者集成度高、可靠性高,但温度范围为 $-25 \sim 85^{\circ}\text{C}$,不能进行工程化应用。且两类拓扑架构的元器件都需要借助国外元器件厂商,国内暂无厂家能提供满足要求的元器件。三相逆变桥拓扑的功率驱动电路如何工程化实现并进行

高可靠的工作,是目前需要研究的关键技术之一。而实现宽温度范围下高压大功率驱动电路设计,需重点突破如下内容。

高性能驱动电路拓扑结构设计。EHA 作动系统在全工况、大负载作用下,需实现正向电动、正向制动、反向电动和反向制动 4 个状态。在制动状态下,大功率电机为发电状态,会产生泵升电压,叠加在直流母线上,会对直流母线侧的元器件造成高压损坏的威胁,同时有可能污染电网。将泵升能量快速有效地通过泄放通道泄放掉是提升驱动电路性能的关键,应在电路拓扑结构设计中重点考虑。

高可靠大功率驱动逆变技术。逆变技术就是将直流电转变为交流电,逆变电路分为无源逆变和有源逆变两类。将直流电转变为交流电,直接向非电源负载供电的逆变电路称为无源逆变电路;将直流电转变为交流电,向交流电源反馈能量的逆变电路称为有源逆变电路。无源逆变电路和有源逆变电路的根本区别在于其进行 DC/AC 变换的目的不同,无源逆变电路的变换目的是给负载提供交流电源,有源逆变电路的变换目的是将直流电源的能量反馈至交流电源。而为了给大功率电机供电,应重点突破基于无源逆变电路的高可靠大功率驱动逆变技术。

大功率控制器热设计技术研究。控制器在驱动大功率作动器工作时,自身的热损耗也比较严重,将引起控制器内部温度上升。由于高温对大多数电子元器件会产生严重的影响,会导致电子元器件失效,进而引起整个设备的失效。过应力(即电、热或机械应力)容易使元器件过早失效。因此,需基于热分析、热计算手段,实现控制器元器件选用,完成机上冷板传导散热、箱体散热、导热板传热等散热方案设计。

(2) 伺服控制器的小型化和散热设计技术

对于越来越多的分布式大功率伺服控制器和作动器远程控制架构,需要对伺服控制器进行小型化设计。但针对大功率 EHA 控制,较大的工作电流和发热损耗将带来散热要求和小型化设计的矛盾。需研究如何提高控制器的工作效率和散热能力,实现一定程度上的小型化设计。

(3) 高压大功率工况下的强弱电电磁兼容问题

DC270V 的高工作电压和不低于 50kW 的输出功率必将产生强电磁干扰。在这种环境下,数字伺服控制电路容易受到电磁干扰而出现系统工作不稳定、不可靠的情况,同时对强电信号也需要通过隔离检测、采集后进行闭环反馈。

2. 高速大功率高功重比电机技术

大功率、高功率/重量比电机是电作动系统的驱动部件,电机的功率重量比以及输出特性直接影响电作动系统的整体效能。因此大功率高重量比直流无刷电机的电磁结构的优化方案,高性能绕组成型方案,高性能新材料的利用,电磁和流体的稳态与暂态热场的分析,电机铁耗、机损、磁钢内涡流损耗分析和低电感驱动控制技术都是研究重点。

(1) 高功重比电机设计技术

高功重比电机高性能的体现在于电磁、流体、热以及性能、体积、质量等综合权衡后所需要达到的最优结果,因此在设计时需要进行以下5个方面的技术研究。

高性能材料应用研究。进行更高磁能级的硬磁材料应用以及更低损耗的软磁材料应用研究,以提高电机整体性能、降低损耗、提升效率和功重比。

电磁架构技术研究。研究基于 Halbach 电磁架构下电机理论和数学模型的构建。这种构型无法从现有商业化设计软件中找寻,需要从最基本的麦克斯韦电磁场理论出发,推导出新型电磁结构下性能的解析计算方法。

电磁性能与损耗的仿真计算。在奠定电机理论计算模型后,需要进行电磁仿真以验证电机理论计算的正确性。而对于该磁场结构,无法进行平面化仿真,因此要进行精确的模拟仿真,必须构建正确的立体场仿真模型。在此模型下,进行电机电磁场的模拟仿真,验证解析计算的正确性,同时进一步指导电机结构的优化设计。

暂态流体、电磁场、热场综合分析技术研究。通过分析影响机械功率输出的敏感因素,并进行优化分析,完成全数学电磁、热、流体综合建模。

电机磁、热、机械结构一体化设计。在上述研究的基础上,进行电机磁、热、机械结构一体化电机设计研究。高功率密度电机内部电磁场能量密度很高,电机漏磁、齿槽效应、磁滞涡流效应、饱和效应、温升问题等尤其突出,而且随着中频逆变电源的采用,逆变器输出谐波分量的存在使得电机内部电磁场分布更加复杂,这些因素都影响着电机的性能品质。因此必须关注热产生机理,在此基础上重点研究其分析方法,最终指导电磁机的结构设计。另外对机械功能输出影响因素进行分析,论证电感电阻等电气指标、磁密分布的电磁指标、磁结构尺寸指标等,避免出现大功率电动机机械特性偏软的现象,最终达到高性能、小体积、小

质量的目标。

(2) 高功重比电机工艺实现技术

对有限空间内承受更高电负荷的绕线方式进行探索。为了使电负荷达到高效能,绕组所能占用的空间十分有限,特别是需要参与电磁感应的有效绕组部分,其体积大小更是受到严格限制,而在这狭小的空间内,需要探索最佳的绕线排布方式使得其能承受的电负荷最大,同时使得其产热分布更加均匀,避免热累积。对绕组定型灌封材料和工艺的研究。在绕组成型工艺完成后,绕组的定型至关重要。绕组在承受各种类型电磁力的同时还需要承受热量的冲击,因此灌封材料必须兼具良导热、高强度、强绝缘等特性,这对材料提出了较高的要求。为此,需要对绕组定型材料和工艺进行摸索研究,为未来电机功率密度的进一步提高提供支撑。

3. 大功率高精度电机控制策略

功率电传作动器需要具备高动态、高功重比、高空载速度等特点,为了最大限度地提高电作动器的性能,控制策略方面将重点研究永磁同步电机电流环无差拍控制技术、最大转矩电流比控制策略和弱磁增速控制策略。为了满足功率电传作动器的高可靠需求,对永磁同步电机重要信息进行故障监控与容错控制策略研究。

(1) 永磁同步电机电流环无差拍控制策略

在永磁同步电机数字控制系统中,电流控制环的主要作用是在确保稳定的前提下,提高系统的动静态性能,使电机的实际电流矢量能够跟随参考电流矢量。无差拍控制可以最大限度地提高永磁同步电机电流环的动态性能,然而该方法提高动态性能的同时却牺牲了系统的稳定裕度,因此采用无差拍控制策略后,对系统稳定裕度的分析势在必行。通过改进无差拍控制的策略,寻找一种新型的无差拍控制方法,牺牲控制系统的少许动态性能,提高系统的稳定裕度,进而使伺服系统同时满足动态性能要求和稳定裕度指标。电机电阻会随电机工作温度的变化而变化,电机定子电感会随电机绕组电流的变化而变化。而无差拍控制是一种基于模型的控制方法,参数的变化势必对系统的控制精度和稳定性带来严重影响,研究一种消除参数变化对无差拍控制策略的影响的方法势在必行。查找表法是一种简单、有效的办法,然而如何准确获得电机电阻随温度的变化曲线,定子 dq 轴电感随 dq 轴电流变化的曲线,即电机离线参数测量也是研究的关键问题之一。

（2）永磁同步电机弱磁增速控制策略

随着电机转速不断升高，当转速达到额定转速时，电机端电压达到逆变器所提供的极限电压，电机将无法继续升高转速。为进一步提高电机转速，只有通过调节定子电流，即增加直轴电流分量，同时减小交轴电流分量来实现弱磁升速。为最大限度地利用逆变器容量，在弱磁区控制电流矢量时需沿着电流极限圆逆时针向下旋转。弱磁控制技术可以充分利用控制器和电机的容量，拓宽电机空载和轻载时的转速范围，为满足电作动器最大空载速度和高动态响应的要求提供有力支撑。

弱磁控制算法主要分为以下几类：公式计算法弱磁控制、查表法弱磁控制、梯度下降法弱磁控制和负直轴电流补偿法弱磁控制等。公式计算法原理简单，但该方法是一种基于模型的弱磁控制算法，因此其对电机参数变化较为敏感，电机参数的变化可能会导致电流环控制器积分饱和，从而使电机控制失控；而且弱磁控制的电压不能超过逆变器输出正六边形电压边界内切圆，因此逆变器的直流母线电压没有被充分利用。直轴负电流补偿法是在最大转矩电流比（Maximum Torque Per Ampere, MTPA）控制策略的基础上增加电压闭环，最大电压矢量和逆变器指令电压矢量的差值经 PI 控制器调节产生电流矢量角补偿量，通过调整电流矢量角实现电机的弱磁控制。该方法利用 MTPA 控制的策略得到电流矢量角，在一定程度上减弱了电机参数的变化对弱磁控制的影响，然而最大电压也只能设置在逆变器输出电压边界正六边形内切圆内，与公式计算法相比，直流电压利用率并没有得到提高。该方法存在电压外环，不会出现电流环控制器积分饱和导致电机失控的现象，因此其稳定裕度较高。梯度下降法弱磁控制同样是在 MTPA 控制的基础上将逆变器实际输出电压与逆变器实际电压作差，然后将该差值按照最速梯度下降的原则求解电流矢量角的补偿量，通过调整电流矢量角实现电机的弱磁控制。该方法的优点在于可充分利用逆变器的直流母线电压，然而需要额外设置电压传感器以检测逆变器的输出电压值。不同的弱磁控制方法具备不同的优势，如何根据该项目的技术指标设计一种既简单又便于实现，对电机参数变化不敏感，稳定裕度大，同时能满足项目对电机最大速度要求的方法是该部分的研究重点。

4. 高可靠高速液压泵设计技术

液压泵是电静液作动器的关键部件，如同“心脏”一般为作动器提供液压力

力、流量,驱动作动筒及负载运动。随着战机高速大机动的作战需求的提升以及舵机的输出力和速度指标的不断提高,液压泵只有向高速、高压、长寿命方向发展,才能提高 EHA 的功重比、可靠性和动态性能,满足工程应用要求。目前航空液压泵压力多为 21MPa/28MPa,转速在万转以下。为了提高功重比,液压柱塞泵将实现额定压力 35MPa,转速在万转以上,并且做到小型化插装式设计,这给液压泵的密封、耐压、耐磨等特性以及精密加工制造提出了很大挑战。同时为了减少体积、质量,双系统 EHA 中有一个系统采用了非对称腔作动筒,为了匹配不同的流量需求,该系统必须研制专用非对称排量的高速液压泵。面对上述关键技术及难点,需开展液压泵高速摩擦副油膜特性的研究、高速摩擦副的油膜润滑和摩擦磨损机理研究以及非对称泵配流设计研究,突破插装泵一体化结构设计、非对称流量泵配流设计、核心零件配合副的高精加工/成型、高速重载摩擦副的配对材料选择、摩擦副油膜润滑特性分析和宽温范围全性能试验验证等关键技术。

5.EHA 监控器的设计

EHA 作动器与传统的液压作动器存在较大差异,因此监控器的种类也与液压作动器存在本质区别。EHA 作动器的监控器主要包括:

电压监控器:主要用于监控控制器的一次侧和二次侧电压,包括控制器 28V 输入电压,15V、-15V、3.3V、7V1.8kHz 交流激磁电压,7V10kHz 交流激磁电压等。

母线电压监控:主要监测控制器直流母线电压是否故障。

作动器指令表决监控:监控 3 个通道的指令是否一致。

指令电流比较监控:当两个液压系统均正常工作时,在作动器力均衡控制策略的作用下,两个电机的输出扭矩基本相当,该监控器用于监控作动器各自通道的电流指令是否故障。

旋转变压器监控:用于监控电机测速链路内是否发生故障。

绝缘栅双极晶体管(IGBT)基极驱动电路监控:用于监控 IGBT 基极驱动电路是否存在欠压等故障。

电机相电流监控:用于监控电机电流传感器是否发生故障。

电机温度监控:检测电机工作温度。

油液温度监控:监控作动器油液温度,油液温度过低,作动器的黏滞阻尼过大,会影响作动器正常工作。

在线电流监控:用于监控电机的电流环是否处在闭环状态,电机是否可控。

SOV 电流模型监控：监控 SOV 的工作状态是否正常。

作动器速度转换模型监控：主要用于监控电机—泵—液压油—作动筒之间的传递关系是否正常，该监控器在压力传感器正常工作的情况下，也能监控出作动器的过载问题。

电机泵模型监控：主要监控电机和液压泵的状态是否正常，当电机或柱塞泵存在较为严重的机械卡阻情况，该监控器将报故。

压力传感器监控：监控压力传感器是否正常工作。

蓄能器液位位置监控：测试蓄能器的液位，当蓄能器内的液位过低或者过高时，该监控器报故障。

（四）对 EHA 作动技术未来发展的动向展望

上述 EHA 作动系统关键技术主要对标现有战机的技术要求，而对于新时期的空战装备，特别是新一代（第六代）战机，目前各国给出的方案均为无尾翼或小尾翼的机身一体的超扁平结构，同时具有超音速飞行、超远距离巡航、超高灵活机动、无人化自主作战、高智能化程度等全新能力，这对 EHA 作动技术的发展又提出了全新要求，主要体现在以下几个方面。

1.EHA 作动系统的集成化 / 轻量化设计技术

下一代战机翼的机身一体的扁平化结构特点，以及飞机在超高速、长距离巡航过程中对能耗的限制，要求 EHA 作动系统具有小型化、轻量化、结构紧凑、高功重比等特点，这对 EHA 作动系统结构设计提出了较高的挑战。通过选择轻量化材料，基于最小包络准则，开展电液伺服阀、功能阀、壳体、筒体、电机与泵的一体化设计；并在满足工作能力要求的情况下简化传统结构；同时结合 3D 打印作动器设计技术以及大流量、小体积、快速响应 2D 伺服阀技术等；实现 EHA 作动系统轻量化、小型化，以及工作效能及功重比的提升，以满足新一代战机的结构特点与飞行要求。

2.EHA 作动系统余度管理与容错控制技术

为提升 EHA 作动系统的整体可靠性，广泛采用了机械、电气、控制余度设计准则，通过作动系统的软硬件备份实现故障的可靠容错。然而，多余度通道同时工作时易产生相互影响，例如对于具有两个相互串联的液压缸和活塞杆的双余度作动系统，两个独立的液压系统同时供油时易发生活塞杆输出的力纷争现象，从而严重影响作动系统的工作效果。因此，需要研究 EHA 作动系统的余度管理

技术,攻克启动逻辑、模态转换保持逻辑等电作动系统特有难题,确保多余度间协同工作。进一步,引入作动系统状态监控与故障检测技术,实时监控作动器工作状态,并在某通道故障后迅速完成重构,完成故障容错控制,保证 EHA 作动系统的高可靠性。

3. 功率电传 EHA 作动系统能量传输与匹配运行技术

功率电传 EHA 作动系统的主要控制形式为伺服电机控制变量或定量液压泵,通过容积调节伺服驱动作动系统。其主要特征是内嵌静液传动机构,但目前主要面临动态特性差、功率密度低、热效应严重和余度配置困难等问题,低动态特性是制约电静液作动器在飞行器中广泛应用的主要因素之一。因此,需要对电静液作动器各环节固有频率特性和功率需求进行分析,揭示电机泵组固有频率低和高频输出功率不足的主要决定因素,特别是解释容积伺服控制多变量输入、强非线性、动态特性与负载耦合严重、功率匹配约束控制等内在机理,优化 EHA 作动系统的能量传输与匹配运行能力。

4. 大功率 EHA 热管理技术

随着多电、全电等航空技术的不断应用,促使机载飞控电子必须向大功率方向发展,以满足现有的、未来的航空技术对飞控电子的功能性能要求,EHA 作动系统也不例外。然而,大功率 EHA 作动系统工作时将产生大量热量,例如质量为 10kg 的 50kW 级以上的大功率 EHA 作动系统,即使逆变效率达到 90%,其热功率依然达到 5kW 的量级,其功率密度高达 500W/kg,直接影响控制器与作动器的工作安全性。因此,必须根据各种机上安装的环境条件,提出针对性的热管理方案,解决 EHA 控制器的散热问题,保证设备的可靠工作。

5. 智能化 EHA 作动技术

随着数字伺服技术的日益成熟,智能控制策略、智能故障检测和健康管理技术的发展,智能 EHA 作动系统将成为未来机载作动系统的发展方向。相对传统机载作动系统的伺服作动器,智能作动器将以余度数字伺服技术为基础,采用智能补偿算法和控制策略提高作动器的性能,降低作动器的各种固有非线性对其性能的影响。同时,由于数字控制可以采用智能故障诊断技术实现作动器的故障定位隔离,采用重构等技术可以实现作动器电气通道的智能容错,因此,作动系统智能化将显著提高飞机的可靠性、安全性及维护性,成为作动技术重点发展的方向之一。

为简化传统飞机的冗杂液压系统,多电/全电航空技术在近几年得到了迅猛发展,而EHA电传作动技术凭借其高效率、低泄漏、高可靠、长寿命等一系列特点,必将在未来飞机中得到广泛应用。就调研情况来看,目前EHA作动技术主要注重功率、运行速度和故障检测能力的提升,以满足现阶段飞机的高速灵活机动要求,因此目前国内外学者主要围绕大功率EHA作动器及其关键部组件开展研究。而下一代战机的高超音速、远距离作战、长时间巡航、高灵活机动、超高灵活机动、无人化自主作战、高智能化程度、超扁平结构等性能特点,对EHA作动系统整体结构轻量化、小型化、整体可靠性和智能化程度提升等提出了全新技术要求,具体体现在以下5个方面。①EHA作动系统的集成化/轻量化设计技术。②EHA作动系统余度管理与容错控制技术。③功率电传EHA作动系统能量传输与匹配运行。④大功率EHA热管理技术。⑤智能化EHA作动技术。相信随着上述关键技术的不断攻克,EHA作动系统性能将不断提升,用于下一代战机也只是时间问题。

目前,在国外电传伺服作动领域,EHA作动技术已成功应用于军机与民机中,而国内对EHA作动技术的研究起步较晚,尚处于原理样机验证阶段,限制其上机应用的挑战来自各个方面,特别是材料的研究、工艺的提升、技术的创新等方面。但国内多家研究所和高校正在不断努力突破EHA作动系统研制中的各项关键技术。相信在不远的将来,我国的飞机也能用上自主研发的先进EHA作动技术。

第四节 飞行控制系统维修

一、无人机飞控系统配电线路巡检抗干扰的关键策略

目前,我国配电线路的巡视工作面临着巨大的压力,传统的巡视方法有其不足之处,即要对每一条线路进行精确的监测,不仅工作量大且效率低,经常会在日常工作中出现失误。无人机技术的兴起和发展,为配电线路巡检开辟了一条新的道路,其优点显著,是目前配电线路巡检的主要手段。且在高速发展的社会经济作用下,电力网络的规模迅速扩大,已遍布全国各地,偏远山区等地区均已开通电力。配电线路环境复杂,受气候、山川、河流等环境因素的影响,远距离超高压配电线路和设备容易出现破损、老化等现象,对电力传输造成安全隐患。要

确保电力系统的安全、稳定运行，必须对配电线路进行定期监控，掌握其工作状态，及时发现和排除安全隐患。由于受地理、气候、环境等多种因素的影响，常规的人工巡检存在着一定的“盲区”，因此，必须采用高效、智能的新举措。

（一）智能无人机巡检系统

在市场需求推动下，智能无人机巡检系统应运而生，它具有操作简单、反应迅速、载荷丰富、任务范围广泛、对环境要求低、自主飞行等显著特点。这是由于配电线路的绝缘子小、金具小及靠近居民区等，尽管其塔杆高度并不高，但其飞行的难度要比输电线路大得多。在视频监控过程中，由于配电线路自身的特点，在巡检过程中需要获取更加细节化的图片信息，因此无人机需要与对方离得更近，为此也对相关巡检技术提出了更高的要求。

（二）无人机巡检系统抗干扰

无人机巡检系统抗干扰以智能无人机巡检系统为基础，主要包括电路板布线设计、抗高频信号干扰设计、接地设计，以及强电保护设计等内容。电路板布线元件设计及排列是邻近器件间的耦合，适当的布线设计可以降低不必要的干扰。基于无人机巡检系统抗干扰，一是将器件的电压、电流大小与器件类型（如数字器件、模拟器件高频器件、低频器件）进行划分，然后将电路板上的高频、中频和低频线路实行区分。二是在元器件的配置上，充分考虑到噪声、抗干扰等因素，采用最小的碱基分布参数。同时，合理地划分了模拟信号、数字信号和噪声源（时钟发生器、晶振）。此外，板面印刷线材的排列除要遵循了“3-W”“45°角轨迹”等基本原则，还要适当地设置插孔，利用插孔把导线拉出，以保证板面的布线均匀、美观，并增加电源线以保证线路的供电。通过选用合适的接地方式，可以有效地解决抗干扰问题。该巡检系统抗干扰采用多点接地方式、低频率信号采用单点接地方式，并在电路板上镀铜，将电路板的空白区变为公用区，从而增强抗干扰性。飞控系统在高电压环境下工作，因此对其进行强电流保护非常重要。通过光耦隔离了飞控系统的马达控制信号，使得它在高电流条件下不会对巡检系统产生任何影响。

（三）无人机飞控系统抗干扰在配电线路巡检中的优势

1. 技术优势

无人机既无人驾驶飞机的简称，其飞控系统抗干扰可以通过远程控制装置和内部控制程序进行抗干扰调节，这种装置不能用于载人，一般用于农业、航空摄影、

测绘等领域,其技术优势主要表现为:由于无人机的透镜性能较好,在飞行时可以获取到目标区域的详细影像,特别是在低空飞行时,得到的影像更为清楚,因而可以得到大量的数据;无人机起降灵活,不需要太多的环境,可以在狭窄的空间里进行快速地起飞,同时也可以满足野外作业的需要;随着5G技术的迅速发展,无人机可以对配电线路进行更高效地采集,并将数据及时传输到客户端,便于用户对线路状况进行统一监测。

2. 满足配电线路巡检需求

通过采用无人机飞控系统抗干扰关键技术,可以克服以往人工巡检的缺点,使无人机能够较好地适应配电线路巡检的需求,其优势主要表现:

无人机巡检不会受到任何环境的影响。通过对配电系统中的绝缘子、导地线等相关元件进行多角度、近距离的观察,获取详细的影像数据,可以有效地防止输电线路的安全隐患。与传统的方法相比,这种方法不受地形条件的制约,既可以减少常规巡检中的安全隐患,又可以大大提高作业效率。

不会受到天气的影响。在恶劣的天气条件下,常规的人工监测方式难以进行,而在无人机技术及飞控系统抗干扰技术的帮助下,这个问题得到了极大的改善,在降雨、降雪等气候条件下,无人机能够正常工作,但在某些特定的天气条件下,传统的手工操作难以进行。另外,在炎热的天气里,人工巡逻队的工作效率较低,因此无人机巡检系统能够极大降低人工巡检难度,并提高工作效率。

便于携带,工作效率高。由于传统的作业方式,不同地区使用的仪器设备有很大差别,因此在一次线路巡视时,工作人员要携带大量的仪器和设备,这给有关工作的开展造成了一定的困难。然而,由于无人机重量轻、体积小,便于携带,可以为工作人员节约大量的时间,且其数据的准确率和传统人工检测相同。

(四) 无人机巡检系统抗干扰测距分类和选择

超声波测距、红外测距、激光测距、微波测距、毫米波雷达测距、电磁场测距等,是目前比较常用的测距方式。测距原理对红外测距的应用范围产生限制,激光测距抗干扰能力较弱,而超声波测距虽然简单、抗干扰能力强,但一次测距距离短,不宜应用于无人机避障。微波、毫米波雷达除具有很好的抗干扰性和方向性外,还具有较高的长程测距能力,其测距范围可达几百米,测量精度可达毫米,但是毫米波雷达比微波雷达更易于实现微型化,因此毫米波雷达在无人机抗干扰系统的研制上具有优势。

另外,针对配电线路巡检无人机对目标配电线路的特点,提出了一种基于电磁场检测的新的测距技术。这种测量方式的特点是随着配电线路的临近,尤其适用于电力巡线无人机在配电线路上巡逻时,对配电线路进行保护。毫米波工作在微波与光之间,且波长范围在 $1 \sim 10\text{mm}$ 。因二者具备优势:其带宽范围为 $(26.5 \sim 300)\text{GHz}$,是直流-微波总带宽的10倍;光束较窄,能在较短距离内,对于较小的目标或较清楚地看到其细节;传播受到天气的影响较小,可以被视为具有全天的特征。为了满足电线周边磁场的测量精度、稳定性、重量、抗干扰等诸多要求,高精度电磁场探测传感器/系统可以根据不同的工作范围和工作环境,选用多种类型的电磁探测设备进行组合。

(五) 无人机飞控系统配电线路巡检抗干扰关键策略

1. 强化巡检抗干扰安全性

由于其工作环境是在高电流条件下进行的,在特定的飞行环境下,对其控制系统进行了严格的安全设计。如完美的防护罩可以阻止外界的辐射进入系统,同时也可以阻止系统的干扰能量向外辐射,防护罩必须完整,必要的缝隙、通风孔、电缆孔等必须进行适当的防护,并且要有一个可靠的接地。合理的接地系统可以起到很好的抗干扰作用,小信号、大信号、干扰线路应尽量隔离接地,尽量减小接地电阻。适当的滤波技术可以有效地滤掉高阶谐波,并适当地选取滤波器的通频带,使漏电流损失最小。限幅技术可以对非工作水平进行限制,限幅水平应该在工作水平以上,且应该是双向的。选择合适的接线和接线方式,如有需要,可以采用光缆替代长缆。在距引线 5m 的地方,全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的搜索次数没有明显的干扰,搜索次数均在18个以上。在试验期间,遥控通信链路正常,数传通信链路运行良好,通信无明显干扰。为保证无人驾驶飞机正常运行,应采取下列抗干扰措施:

常规的无人飞行器飞行控制系统依靠地磁传感器获取飞行器的航向角度,在有电线的带电情况下,很容易被干扰,从而导致飞行器的姿态漂移。为了实现无人驾驶飞机的带电飞行,必须将磁力传感器和双天线差分全球定位系统(global positioning system, GPS)测姿结合起来,从而确定无人机的航向角度。

为保证飞行控制系统符合带电作业的安全要求,飞行控制系统根据EMC的要求,在机舱的内壁铺设导电涂料,具有良好的防护效果,能有效地防止静电、电磁辐射等干扰。飞控系统与其他子系统之间的电连接使用航空插头,并使用屏

蔽电缆进行连接,各子系统的主要电路板均为 DC- 直流电源,并与周边信号进行光电隔离,因此电路板均喷涂三防涂料,具有绝缘、防潮、防漏电、防振动、防灰尘、防腐蚀等功能。

2. 采用毫米波雷达测距

测距传感器的距离传感信号通过预处理模块,将模拟信号转换成数字信号,再将周围的环境信息以通信方式进行封装,并通过通信接口向飞行控制系统发送数据。飞行控制的应急避障模块主要负责对周围环境的信息进行分析和计算,并确定避障的正确路径,然后向无人机的功率系统发出控制信号,完成规避。

信号处理:由于无人机在探测配电线路时,飞行高度很低,采用毫米波雷达探测导线、地线等较小的目标时,地面上的存在所产生的回波会产生很大的干扰,因此必须对其进行降噪处理。利用 A/D 变换器件将测距传感器所探测到的模拟信号转化为数字信号,采用信号处理技术对强干扰信号进行有效的抑制,并对有效检测信号进行放大,消除干扰,从而提高了 MR 检测的准确性。在某次巡视中用毫米波雷达测得了一段距离,并将其转换为与起飞的地面高度。结果表明,毫米波雷达测距在精度上与 GPS 相近,精度高,稳定性好。

3. 采用电磁场测距

按照麦克斯韦电磁原理,电线周边的电磁场会在附近形成一个强大的电磁场。我国的传输频率是 50Hz,它所发出的电磁波是一种波长在 6000km 以上的超低频(工频),电线附近的电场、磁场是有规律分布的。利用机载电磁场探测传感器探测到的电磁场强度和方向,可以得到无人机与电线之间的距离,从而确定无人机是否有潜在的危险,这就是电磁测距的主要目标。无人机巡视线路时,必须与线路保持一定的安全距离,在这个距离内,电磁场的强度会大幅度降低,而且无人机的体积比工频电磁波要小得多,它的电磁辐射能量也很低,因此必须采用高精度的探测器。在超高压线路 20m 以内,无人飞行器的磁场方向会出现间断的扰动;在超高压线路 10m 以内,无人飞行器的磁场方向会发生很大的干扰。利用双差分 GPS 技术对无人机的航向跟踪结果表明,双差分 GPS 技术对无人机的航向性能有较好的影响,该技术实现了无人飞行器在 5m 外的航向不受明显的干扰,其性能与 30m 以上的情况相符合。在距离超高压带电线路 5m 的情况下,无人机姿态传感器的姿态测量状况良好,未受到严重的干扰,在悬空试验中,5min 的姿态测量结果和 30m 外的姿态稳定性相当,不存在明显干扰。

（六）系统试验环节及结果

1. 试验采用方法

（1）振动试验

采用仪器对无人机机身振动频谱进行分析，使用专用振动台对其进行仿真，然后在振动台上安装信号采集模块，检测其工作情况。

（2）仿真试验

利用实验室、配电线路训练场地等环境，对监测过程中遇到的干扰因素进行静态仿真，检测信号采集模块能否检测到导线、树木等，并对其进行检测。通过在诸如交通工具等动态运动对象上安装信号获取模块，测量指定的线路、树木等障碍物，以验证其在动态状态下的可视化程度。

2. 结果分析

根据上述飞控系统抗干扰对策与试验环节开展实际测量工作，测试效果显示：

利用无人机飞控巡检抗干扰系统可以顺利开展测距，信号采集模块具备较高的测距准确度，能够在 30 ~ 100m 范围内探测到毫米以下的障碍物，能够较好避免导线、树木等障碍物的影响。

在距配电线路 5m 处，信号采集模块的搜索次数未显示出明显的干扰，具备良好的抗干扰效果。

仿真试验中，毫米波雷达测距在精度上与 GPS 相近，精度高，稳定性好。

电磁场测距中，超高压带线电线 5m 处，无人机机载气压高度仪的姿态测量状况良好，与双差分 GPS 的测量结果基本吻合，不存在明显的干扰。此外由于其工作环境的特殊性，以及作为整个避障系统的关键部件，必须具有较高的可靠性和较强的抗振动能力、高实时性。通过对周围环境的分析，可以在短时间内确定是否要进行抗干扰，从而实现整体路线的规划。

综上所述，利用数学方法对配电线路的电场强度进行了数值检测，从而使雷达、红外、超声波、激光避碰等技术应用于一体，通过优化避障系统的组合，既能保证无人机的负重，能保证图像的准确性，又能更精确地进行抗干扰，达到自主起降、超视距测控、自主避障、自主巡逻的效果，是电网监控、监控手段的重要创新。

二、直升机飞控系统供电故障

随着现代科技水平在不断进步,相对应现代武器的功能及性能也在不断增强,直升机的各项飞行性能及机动性也在不断提高。这就要求直升机的飞控系统有着更强大的性能。为了提升直升机飞行性能、品质以及机动性,必然要求直升机的飞行控制系统由机械式过渡到电传式。而电传式的飞行控制系统,区别于机械式的飞行控制系统,电传飞控系统是通过电信号来控制的直升机,当飞控系统因失去了供电导致无法工作,将直接导致飞行员失去对直升机的控制,同时飞行控制系统也失去了对直升机的自动驾驶功能。因此飞控系统对电源余度的要求变得极为严苛。目前常见的电传飞控系统不仅通过全机电气系统供电,同时会自身配置供电子系统,以提升系统的可靠性。整流控制盒是飞控供电子系统中的关键设备,起着供电控制单元的作用,对飞控系统的电源进行整流、配置及保护的作用,因此成为电传飞控系统的一个关键设备。电传飞控系统常采用分离式供电系统。

(一) 蓄电池供电失效的故障树分析

根据蓄电池供电失效的故障逻辑,以蓄电池无法为飞控系统供电为顶事件,建立故障树,见图 4-1。

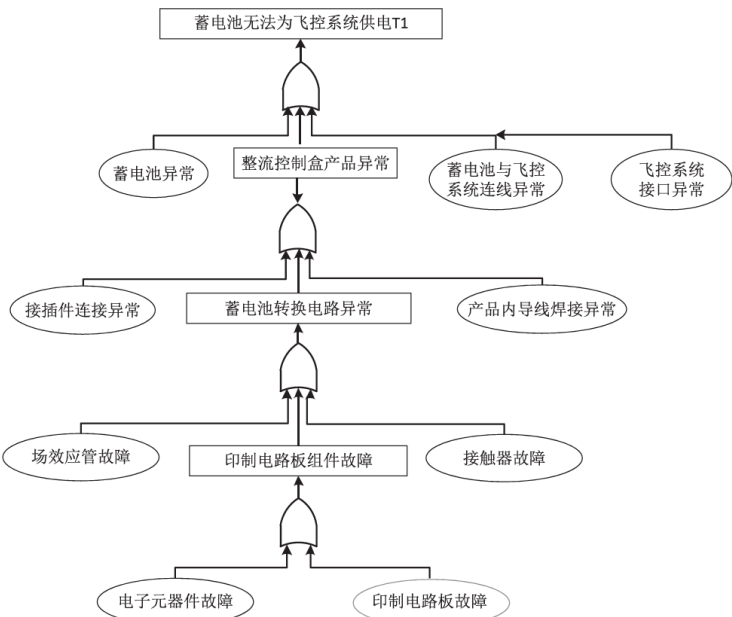


图 4-1 蓄电池供电功能丧失故障树

针对蓄电池丧失对飞控系统供电故障,开展故障模式影响及危害性分析,是对所实现系统进行安全性评估的有效方法,是证明系统设计满足安全性要求的有效手段。其基本思想是梳理供电子系统内每一项元件的故障模式,自底向上地分析其失效后对上一级功能模块的影响,继而分析功能模块失效后对上一级功能模块的影响,直至分析至对系统功能的影响。同时按照其所影响到的系统功能失效后的危害度,即可以定义出每一种元件的故障模式对系统的影响层级和危害度。

针对蓄电池对飞控系统供电的供电子系统,蓄电池故障、蓄电池与飞控系统连线断开、飞控系统供电接口断开是第一层级的底事件。第二层级的底事件,对整流控制盒的接插件需连接正常,因此在维护手册等内容,工艺以及机务对直升机飞控系统的定时检查中应包括,检查产品插座应无松动、缩针、异物等现象,用手轻微拉扯插座接线,无脱落、焊接不牢等现象。产品内导线焊接情况,在出现异常时,利用数字万用表检测导线电气连接关系,产品内导线与电器零件的安装焊接和线束整理绑扎均应满足工艺文件要求。第三层级及第四层级,分析整流控制盒中蓄电池转换电路,包含内部场效应管、接触器、印制组件上所有电子元器件以及印制板组件电气通路。场效应管工作无异常,无失效击穿现象。接触器的主触点、辅助触点常闭/常开均为断开状态,接触器线圈电阻符合设计要求,接触器励磁线圈之间加+28VDC,接触器应该正常工作。印制组件上所有电阻、电容、二极管、三极管、运算放大电路和逻辑门电路等电子元器件的功能性能应正常。印制电路板上的电气通路中焊点饱满、焊接质量良好,无虚焊现象。

开展故障模式影响分析,能够最终得到电传飞控系统内部任一故障模式对系统的影响及危害度。飞控系统属于直升机的关键系统,飞控系统失效会严重影响直升机的飞行安全,因此单一故障模式直接影响飞行安全的情况是不允许存在的,多次组合故障可能影响飞行安全,但其发生的概率应该限制在可控的范围之内。由于蓄电池电源系统故障造成飞控直流电供电失效的概率经理论计算为 1.29×10^{-6} ,供电系统的失效概率经理论的可靠性计算为 2.08×10^{-14} ,因此可以判断该供电系统导致飞控断电是极为不可能事件。针对蓄电池对飞控系统供电的子系统,根据实际试验环境中使用情况分析,接触器失效属于常见故障,下文针对接触器失效进行重点研究分析。

（二）整流控制盒接触器失效分析

1. 蓄电池控制功能与接触器关联工作原理

机上蓄电池供电系统通过整流控制盒给飞控配电。正常工作状态下, 蓄电池电压进入整流控制盒产品后, 送入印制板组件插头座 XS3 的 8# 针, 由二极管 V1 与其余三余度电源经或门电路表决后, 通过印制板组件插头座 X3 的 5# 针给接触器 JQ-91F 的线圈“+”供电, 当机上飞控应急供电开关闭合或整流控制盒逻辑控制电路控制场效应管 V13 导通时, 接触器闭合, 蓄电池给飞控系统供电。

2. 接触器工作原理

直流接触器的线圈为双绕组设计, 线圈由绕组 (R1) 和绕组 (R2) 两个绕组组成, R1 为启动绕组, R1 和 R2 串联后为保持绕组。在初始状态时, R2 被启动触点短路, 线圈电路中只有启动绕组 R1 (阻值为 $5.5\Omega \pm 10\%$), 此时线圈可产生较大的电磁吸力使接触器动作, 接触器动作后, 启动触点断开, R1 和 R2 串联成保持绕组工作 (阻值为 $140\Omega \pm 10\%$), 接触器保持在低功耗状态工作。直流接触器动作机构原理: 线圈加电后, 衔铁在电磁系统产生的电磁吸力作用下, 带动衔铁部分运动。从而带动连接在传动杆上的动簧片运动, 实现主触点的接通, 静合辅助触点断开, 动合辅助触点接通, 同时推动块推动启动触点上的拉力片, 启动触点断开, 接触器在低功耗状态下工作。线圈断电后, 在电磁系统内部的反力压簧和超程压簧的共同作用下, 衔铁复位, 实现主触点的断开, 动合辅助触点断开, 静合辅助触点复位接通, 从而实现一个开断动作。

3. 故障机理

地面正常通电时, 机舱驾驶人员手动闭合飞控应急供电控制开关, 接触器线圈启动触点不能正常断开, 接触器线圈长时间工作在启动电流下温度骤升, 超过接触器线圈熔点烧蚀熔断引起接触器主、辅触点与接触器罩壳之间短路, 引起印制板组件逻辑控制单元印制条烧断。接触器为大电流启动, 小电流保持的工作模式: 即接触器启动时只有小阻值的启动线圈 (线圈电阻为 5.5Ω) 接入线圈回路中, 启动电流较大, 接触器动作后, 启动触点 (线圈转换触点) 断开, 保持线圈 (线圈电阻为 134.5Ω) 串联接入线圈回路中, 使得样品以较小的电流维持触点吸合的状态。根据接触器的工作原理, 结合实际使用情况, 接触器失效由于启动触点不能断开 (长时接通), 导致启动线圈长时间通过大电流, 造成线圈长时间过热而烧毁。由于各个零件装配后存在公差累积, 接触器磁路系统装配后, 部分接

触器需要对启动触点复原簧片进行调整,使启动触点的机械参数满足设计要求。

查接触器工艺文件,直流接触器的磁路系统装配后要求对启动触点的机械参数进行调整,要求先用校正钳夹持距离复原簧片端部 6mm 处,折弯角度为 ($100^{\circ} \sim 120^{\circ}$),然后测试接触器的启动触点断开间隙为 0.45mm ~ 0.6mm,触点压力为 0.7N ~ 1.2N。在调校过程中存在操作差异,可能出现个别接触器角度和位置调校不当的可能,当调校角度 160° 以上、距离复原簧片端部大于 6mm (靠近铆点) 时,由于复原簧片端部距离铆点更远,根据力矩计算公式,复原簧片端部受到的力变小,此时复原簧片端部距离弯折点的距离也变大,导致复原簧片弯折点应力释放时间更久。正常调校接触器通过工序后应力已全部释放,但调校角度 160° 以上、距离复原簧片端部大于 6mm (靠近铆点) 的接触器由于在厂内的试验条件下难以完全释放,在厂内无法有效剔除。在后续的使用过程中由于应力完全释放,动簧片恢复到初始位置,使得推动块到拉力片的距离变大,接触器动作后,推动块不能够将启动触点推开。接触器处于启动大电流状态,线圈温升短时间内急剧升高,远高于接触器的正常温升,线圈漆包线漆层熔化,漆包线之间绝缘性能下降甚至无绝缘,匝间短路后加电测试线圈匝数变少,线圈加电后无法提供足够电磁吸力使接触器动作,若继续保持大电流状态,接触器温升持续升高,则会出现焊锡熔化以及引出线熔断的现象。

4. 接触器失效故障结论

通过上述分析及排查,直流接触器加电不动作的原因有复原簧片调校不规范,个别接触器复原簧片调校位置靠近铆点,调校角度偏大,导致复原簧片调校应力释放恢复到原来位置,动簧片也跟着回复到调校前位置,由于推动点上移,衔铁运动到位时推动块与拉力片接触变形较小或未接触,接触器线圈启动触点不能正常断开。接触器长时间处于启动大电流状态,线圈温升短时间内急剧升高,远高于接触器正常温升,线圈漆包线漆层熔化,漆包线之间绝缘性能下降甚至无绝缘,匝间短路后加电测试线圈匝数变少,线圈加电无法提供足够电磁吸力使接触器动作。烧断整流控制盒逻辑控制单元控制回路印制条,使得整流控制盒蓄电池控制功能丧失,最终蓄电池无法对飞控系统进行供电。

5. 纠正措施

针对失效接触器的故障分析情况,采取如下措施:复原簧片和动簧片铆装前通过夹具一次整形,装配后保证接触器各项参数,若出现参数不合格的部件直接

做报废处理,调校工序只允许微调动簧片,不能调校复原簧片;对复原簧片一次整形折弯角度和折弯位置增加 100% 检验要求,保证折弯位置距离复原簧片端部 (6 ± 0.3) mm、折弯角度为 $(110 \pm 10)^\circ$,若发现不合格零件及时剔除,同时在装罩前镜检过程中也需要对该位置进行检验,保证不出现漏检等情况;对接触器装配相关操作人员和检验人员进行相关培训,重点针对接触器相关零件装配、调校工序中的操作细节以及检验要求的规定,要求严格按照接触器工艺文件执行,不能违规操作,增强操作人员质量意识。

三、电传飞控系统飞行前自检报故状态下的放飞策略

目前,某型直升机电传飞控系统飞行前自检检测(PBIT)报故后,按照飞行手册的规定,直升机不允许起飞执行任务,故障排除后方可放飞。这种方式可最大限度地保证放飞的安全性,确保装备和人员安全;但一定程度上影响了直升机的出勤率,特别是在战时或紧急情况下,甚至会限制装备的能力发挥,影响战局的发展。而实际上,为了保证直升机的任务可靠性,电传飞控系统具备冗余架构,系统的大部分故障模式并不会影响飞行品质,绝大部分故障模式并不会影响飞行安全。因此,电传飞控系统 PBIT 报故并非意味着直升机绝对不能起飞。面向战时环境,有必要对电传飞控系统报故情况下的放飞策略进行探讨,在保证飞行安全的前提下,充分利用完好功能完成特定任务,发挥装备的最大能力。

(一) 电传飞控系统安全性设计及故障模式影响

1. 基于安全性指标的系统架构

任一型飞机在设计初期,飞机总体设计会向电传飞控系统下发系统的安全性设计指标要求,即因为电传系统发生故障而造成灾难性事件发生的概率不能大于某一规定值。战斗机电传飞控系统的安全性指标一般为 $10E-7$,而大型运输机的安全性指标一般为 $10E-9$ 。电传飞控系统的设计者需要根据这一指标来确定电传飞控系统基本架构,包括系统冗余配置和关键核心部件配置,例如飞控计算机、伺服控制器、舵机、传感器等,以及核心部件之间的交联关系。目前,根据电传飞控系统各部件能够达到的基本可靠性水平,要达到系统安全性指标,电传飞控系统一般需要具备四冗余架构。

以飞控计算机为例,在工程上,构成飞控计算机所采用的基本器件均具有一定的失效概率(一般在 $10E-9 \sim 10E-5$ 次/小时),这决定了典型的飞控计算机

失效概率一般在 $10E-4 \sim 10E-3$ 次 / 小时, 如果系统为单余度配置, 则显然无法满足电传飞控系统安全性指标小于 $10E-7$ 的要求。在 20 世纪 80 年代初期, 经过大量的理论研究人员和工程技术人员的合作, 很好地解决了这个问题。其基本工程方法是采用余度构架, 通过表决、监控技术容忍故障、检测故障、隔离故障, 重构系统。对于典型的四余度系统设计, 发生任意的二次故障不影响任务的完成。对故障模型的理论探讨认为, 表决策略的探讨应形式化, 证明了余度构架对于提升系统任务可靠性的有效性。对电传飞控系统进行余度架构设计, 使得系统能够容忍任意二次故障而不影响飞行任务。实际上, 从各类飞机的实际飞行数据也能总结出, 在绝大多数情况下, 电传飞控系统在空申报故后, 往往可以凭借其系统的冗余设计而保证飞机安全返航。

2. 功能危害性分析

功能危害性分析是指系统地、全面地按层次检查系统的各种功能, 识别各种功能失效状态, 分析这些功能失效状态对相关系统、人员等方面的各种潜在影响, 以确定这些功能失效可能产生或促使诱发产生的潜在危险及其后果, 并根据严酷程度确定危险的严重性等级。对于电传飞控系统而言, 功能危害性分析需要对系统所提供的每一项功能(例如纵向、横航向控制功能)在各个飞行阶段(例如滑跑、爬升、巡航、下降、着陆等)发生失效后, 对飞行操纵的影响进行分析。根据影响程度确定其严重性等级, 并根据系统的安全性指标要求, 确定该功能失效的概率要求。一般而言, 功能失效对系统的危害度可以划分为灾难的、严重的、轻度的、轻微的、无安全影响五个等级。针对不同危害性的功能模式, 系统对其发生失效概率的要求是不同的。例如, 以某型机为例, 丧失升降舵的俯仰控制功能, 在飞行的任意阶段, 其危害度均为灾难性的, 产生该功能失效的故障模式的发生概率必须小于 $10E-8$ 。而丧失航向配平位置指示功能, 在飞行的任意阶段, 其危害度均为轻微的(该功能危险项不影响飞行安全, 仅会导致驾驶员不能了解航向配平状态, 需谨慎使用航向配平, 增加了驾驶员的工作负担), 而对产生该功能失效的故障模式的发生概率在系统级并未做出强制性要求。通过功能危害性分析可以看到, 电传飞控系统中各项功能失效对系统的危害性是存在区别的, 部分功能的失效不会影响飞行安全。

3. 故障模式影响及危害性分析

针对电传飞控系统, 开展故障模式影响及危害性分析, 是对所实现系统进行

安全性评估的有效方法,是证明系统设计满足安全性要求的有效手段。其基本思想是梳理系统内每一项元件的故障模式,自底向上地分析其失效后对上一级功能模块的影响,继而分析功能模块失效后对更上一级功能模块的影响,直至分析至对系统功能的影响。同时,按照其所影响到的系统功能失效后的危害度,即可以定义出每一种元件的故障模式对系统的影响层级和危害度。

例如,单台飞控计算机内部模拟量采集功能板的电源模块失效,会导致该功能板的所有功能失效,即单余度飞控计算机的模拟量采集输入无效,但不会影响该计算机内部其他功能板的功能,也不会影响其他三个余度飞控计算机的所有功能。因此,对于整个电传飞控系统而言,该电源模块的失效并不会影响电传飞控系统的任何功能。该故障模式对系统的危害度影响可定义为无影响或者轻微影响(如果部分非关键模拟量的输入配置为单余度,则会导致系统层面该功能受到影响,但这种余度配置的功能必须为不影响飞行安全的功能)。而如果单余度飞控计算机内部电源板的二次电源模块失效,则会导致该余度计算机所有功能失效,但不会影响其他三个余度飞控计算机的所有功能,最终导致整个四余度电传飞控系统降级的三余度系统。因此对于整个电传飞控系统而言,该电源模块的失效仅会造成系统降级,而不会影响电传飞控系统的任何功能,该故障模式对系统的危害度影响可定义为轻微影响。开展故障模式影响分析,能够最终得到电传飞控系统内部任一故障模式对系统的影响及危害度。从对多型直升机的故障模式影响分析的结果来看,单一故障模式直接影响飞行安全的情况是不允许存在的,而多次组合故障虽然可能影响飞行安全,但其发生的概率均被限制在可接受的范围之内。

(二) 电传飞控系统飞行前故障检测机理

为了确保能够及时有效地发现并隔离故障,电传飞控系统设计了机内自检测功能,能够对影响系统功能的各个部件和互联链路进行测试,确认其功能的完好性和有效性。当检测到系统存在故障时,能够通过故障代码指示故障发生的部位以及对系统功能的影响及严重程度。系统自检测利用飞行控制系统内部具有自检功能的硬件和软件来完成对机载设备的检测;对机载设备某特定模态下输出数据的采集结果与这一模态下的期望值进行比较,若一致则认为正常,若不一致则向外申报故障。系统自检测的组成包括硬件和软件两部分:硬件包括为被测系统及部件设置的用于检测、激励、故障监控、逻辑和数据存储的线路和装置,以及用于机内自检测控制和显示的设备;软件包括完成自检测的启动、运行、控制、退

出以及系统部件完好性判别和故障申报、记录等模块。

电传飞控系统采用多种自检测方式,一般而言,主要包括加电自检测(PUBIT)、飞行前自检测(PBIT)、飞行中自检测(IFBIT)和维护自检测(MBIT)。其中加电自检测在系统上电的时候自动执行,检测内容为飞控计算机核心功能的检测,如CPU、存储器、定时器、看门狗、内总线、电源、软件版本等基本功能的检测。加电自检测报故表明飞行控制系统的底层支持功能失效。飞行中自检测在周期任务中执行,检测系统基本功能、高级功能的完好性。IFBIT故障在综显“飞行员故障清单PFL”中有相对详细的申报,并在飞控操纵台上通过1~4级状态指示灯来表征故障的严重程度。对于飞行中自检测中申报的故障,在飞行手册中有明确的处置措施。维护自检测的用途主要为故障排查、定位、定检、软件升级等,为地勤人员使用,一般不作为放飞的凭据。飞行前自检测是在地面上进行的一系列自动测试,用来检测系统的飞行前状态,以保证系统完好性满足飞行状态。PBIT是飞行员检查飞控系统完好性的主要手段。通过飞行前自检测,能够有效识别出电传飞控系统存在的故障,隔离出故障发生部位,对更换、维修故障部件起到指导性作用。

以某型机为例,飞行前自检测的测试内容包含了电源、接口电路、内总线、逻辑电路、伺服系统、模拟备份电路、惯性测量组件、飞控操纵台等。具体包括:①背板总线测试;②离散输出信号链测试;③离散输入信号链测试;④模拟输入信号链测试;⑤系统电源测试;⑥通道故障逻辑测试;⑦伺服系统测试;⑧惯性测量组件测试;⑨EFCS控制律测试;⑩飞控操纵台测试; 珞珈蓄电池接入逻辑测试。上述测试囊括了飞行控制系统全部组成部件,包括飞控操纵台、飞控计算机、舵机、惯性测量组件、配电盒,以及外部供电的测试。

(三) 飞行前自检测报故情况下的放飞策略

和平时期,为确保飞行足够安全,“不带故障放飞”是一种基于安全至上的理念的可行做法。但在战时环境下,当遇到紧急飞行任务而系统飞行前自检测报故的情况,则需要决策是否可以带故障放飞。飞行前自检测报出的故障,大部分是不影响飞行安全的,但也存在极低概率的组合故障的情况可能会影响飞行安全。因此,针对不同的机型,需要针对性地开展故障影响分析并提前设计安全放飞策略,使得紧急情况下,系统可以自行决策或者仅需要飞行员稍加判断即可决策是否可以放飞。飞行前自检测报故情况下放飞策略的制定应基于对所发生故障对系

统的影响的分析,可以从系统任务可靠性及功能完整性两方面着手。任务可靠性指系统成功完成既定任务的概率,取决于单余度系统的基本可靠性和余度配置,余度等级越高,任务可靠性越高,反之亦然。而功能完整性指系统功能的完备性,主要取决于构成系统各个部件和组件的功能是否正常。若系统内影响飞行安全的功能损失,则整个飞控系统失效。

1. 故障影响系统任务可靠性情况下的放飞策略

(1) 单一或多个故障造成单余度功能损失或余度降级

由于电传飞控系统从设计上极力避免了单点故障的存在,因此绝大多数情况下,系统不会因为单一故障而造成系统功能损失或影响飞行安全。从影响危害度来看,单一故障将导致其所在余度的部分功能丧失,而其对余度系统最严酷的影响是系统余度降级一次。

以飞控计算机为例,某些单一故障会导致其所在余度飞控计算机的某些功能失效。该类典型故障主要包括:①单余度计算机模拟量输入采集失效;②单余度计算机离散量输入输出失效;③单余度计算机总线接口失效;④单余度计算机伺服子系统失效。发生以上单一故障时,故障余度计算机的部分功能丧失,但系统余度不会降级。而某些单一故障会导致其所在余度飞控计算机的全部功能失效,最终导致系统余度降级。该类典型故障主要包括:①单余度计算机一次或二次电源失效;②单余度计算机处理器模块失效;③单余度计算机通道故障逻辑失效;④单余度计算机通道间交叉互传功能失效;⑤单余度计算机通道间同步功能失效。

发生以上单一故障时,故障余度计算机的所有功能丧失或者无法与其他正常余度计算机构成余度关系,造成系统余度降级一次。图3电传飞控计算机子系统余度配置示意图当多个故障均发生在同一个余度时,多为关联故障,其产生有可能由同一个源头引起。例如系统内飞行控制计算机的二次电源 $\pm 15\text{V}$ 若失效,将导致该计算机内的所有使用到 $\pm 15\text{V}$ 电源的功能模块故障,例如模拟量信号采集、ARINC429总线信号故障等。当多个故障发生在同一个余度但没有关联关系,也仅会造成该余度部分甚至全部功能的丧失,最多造成余度降级一次。因此,如果PBIT报出了多个故障,但所有故障都指向同一个余度,那么其产生的影响也最多为系统余度降级一次,不会对系统的功能和安全性造成影响,应该允许放飞。结合电传飞控系统余度设计架构来看,若飞行前自检检测报出单一故障,最多会造成系统降级一次,因此可认为单一故障不会影响飞行安全,应允许放飞。

（2）多个故障造成系统余度多次降级

当多个故障发生在不同余度，有可能会造成系统余度多次降级，要视情分析其对系统安全性的影响。按照故障对系统余度降级的影响程度，将故障的严重程度依次划分为 1、2、3、4 级。总体而言，当系统两个通道故障（状态为 2）的情况下，主飞控系统仍能保持正常的功能。在主飞控系统三次故障的情况下，可使用模拟备份实现直升机的基本操纵。从任务可靠性的角度考虑，当数字系统从四余度降级为三余度甚至两余度时，其任务可靠性依然可以维持在相对较高水平，对飞行任务不会造成过大的影响。而如果 PBIT 出现三次故障，系统进入模拟备份模态，该情况下起飞后系统仅能支持一次故障工作，二次故障后直升机则将无法控制，此时系统的任务可靠性相对较低。因此，PBIT 三次故障情况下的放飞决策需要慎重。在极端情况下，例如虽然 PBIT 三次故障，系统转入模拟备份，但是如果立即起飞就意味着整个任务的失败或将造成人员牺牲等不可接受的损失，则该种情况下也应该允许放飞。

2. 故障影响系统功能完整性情况下的放飞策略

当飞行前自检测报出故障导致系统某项功能丧失（所有余度）时，应根据具体所丧失的功能对飞行安全是否造成影响来谨慎评估是否可以放飞。以某型直升机为例，其电传飞控系统具有基本操纵、姿态保持、航迹控制等功能。其中基本操纵功能为电传系统核心功能，该功能损失意味着飞行员将无法操纵直升机。而姿态保持、航迹控制等功能为重要辅助功能，主要是为了减轻飞行员的操纵压力，提升操纵体验。以上几种功能分别需要不同的系统资源来实现。基本操纵功能需要杆位移传感器、惯性测量组件的角速率、模拟输入信号链的角速率部分、EFCS/CPU、主尾桨伺服系统、平尾伺服系统功能正常。姿态保持功能除了前述系统外还需要惯性测量组件的姿态角、总线 429 输入功能正常。航迹控制功能如高度、速度、航迹保持功能需要飞行控制系统接口电路更高的完好性，同时也需要外部传感器功能正常。

当系统发生的故障导致基本操纵等影响飞行安全的功能丧失时，应不能予以放飞。例如所有余度杆位移传感器信号采集丧失，或者所有余度主、尾桨伺服系统功能丧失等。当系统发生的故障导致姿态保持或者航迹控制等辅助功能丧失时，应视情允许放飞，例如：所有余度无线电高度信号链报故时，无线电高度保持功能丧失，但是飞行系统基本功能不受影响，飞行员操纵负担增加，但不影响飞行

安全；或者所有余度并联舵机伺服故障，但不影响基本功能及飞行安全，仅增加飞行员的负担。总之，当飞行前自检测报出的故障可以导致飞控系统安全关键功能丧失时，应不予以放飞。反之，当飞行前自检测报出的故障仅导致飞控系统非关键功能丧失时，应结合飞行员和飞行环境的实际情况确定是否予以放飞。

3. 故障情况下放飞策略的实现机制

针对故障情况下的放飞策略，如果在飞行前自检测报故之后需要飞行员通过手动查阅飞行手册的方式来决策是否放飞，将大大影响放飞决策的效率，战时环境下甚至有可能因此贻误战机。因此，可以在电传飞控系统设计相应的硬件和软件功能来实现对故障及故障影响的自动判断，并向飞行员提供相应的决策信息。为了实现该功能，可在飞控计算机中增加健康管理模块，对系统故障信息进行搜集和诊断，通过一系列放飞辅助决策算法，对是否能够在故障情况下放飞给出建议，并将结果显示在操纵台显示界面上。飞行员通过观察显示结果，并综合考虑实际飞行环境后决策是否放飞。

电传飞控系统具备冗余架构设计以保证其安全性指标满足要求，通过功能危险分析、故障模式影响及危害度分析等过程，可以确定不同故障模式对电传飞控系统功能的危害性影响。面向战时环境，当电传飞控系统飞行前自检测报故时，不应一概不允许放飞，应当根据所报故障对系统安全性、可靠性、飞行任务的影响，综合决策是否放飞。

参考文献

- [1] 曹庆年,晋军茹,孟开元.航空电子数据总线技术研究综述[J].电脑知识与技术,2022,18(09):1-2+5.
- [2] 陈宣文,黄晖,戴小氏.MBSE在航空飞行控制系统的应用研究[J].航空工程进展,2024,15(02):152-165.
- [3] 段海军,张峰.航空电子系统平台故障诊断技术的研究[J].航空计算技术,2022,52(03):100-104.
- [4] 范超,韩忠,赵琳.航空电子系统的云存储技术研究[J].电光与控制,2022,29(03):69-74+80.
- [5] 付华,刘文桐.民航APU航空传感器故障诊断系统[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2017,36(11):1195-1198.
- [6] 拱艳禹,张华杰.航空电子系统中的安全诊断技术分析[J].电子技术,2024,53(05):134-135.
- [7] 管庭筠,张睿,刘程.典型民机电传飞控系统架构分析[J].机电信息,2024,(19):75-80.
- [8] 海樱,李程,商一奇.航空传感器性能评价研究现状及发展趋势[J].计测技术,2020,40(02):1-6.
- [9] 黄俊,张正勇,方学立.基于系统工程的航空电子系统深度综合化需求分析与评估方法[J].航空电子技术,2024,55(01):1-8.
- [10] 霍立平,江志东,王守权,等.联合式航空电子系统全数字仿真设计与实现[J].航空计算技术,2023,53(06):105-109+114.
- [11] 李欣.北斗系统在民用航空的应用前景与实施策略[J].卫星应用,2021,(12):58-62.
- [12] 李忠智,马金毅,艾剑良,等.拟VGG16网络的航空传感器故障检测分类[J].航空学报,2023,44(S1):59-68.
- [13] 刘斐.飞机电子系统发展对维护工作的价值[J].设备管理与维修,2022,(12):67-69.

- [14] 刘青春,周庆,李兵飞,等.开放式航空电子系统架构标准研究与实践[J].航空标准化与质量,2022,(04):1-5.
- [15] 刘文桐.APU航空传感器性能分析与故障诊断系统研究[D].辽宁工程技术大学,2016.
- [16] 吕惠君,杨潇.航空电子系统综合显示处理技术的发展之路[J].中国航班,2021(3):96-97.
- [17] 马驰,张国群,孙俊格,等.基于深度强化学习的综合电子系统重构方法[J].空天防御,2024,7(01):63-70.
- [18] 马时平,齐韬,李兵飞.三层面分析法探究航空电子系统未来发展[J].电光与控制,2023,30(01):69-77.
- [19] 彭鑫乾,王越,祝冠宇.军用直升机航空电子产品系统可靠性提高方法及应用[J].现代电子技术,2023,46(08):118-122.
- [20] 齐文亮,王婉人,杨雨薇,等.航空电子设备喷雾冷却技术研究进展[J].科技导报,2022,40(05):95-104.
- [21] 饶明波,孙杉,孔松波,等.某型飞机电传飞控系统排故方法研究及案例应用[J].教练机,2024,(03):21-26.
- [22] 任彬.航空电子系统故障预测及健康管理探究[J].中国航务周刊,2022,(08):65-67.
- [23] 任鑫欣,王晨昱.航空电子传感器故障识别及报警系统设计[J].今日制造与升级,2020,(Z2):47-48.
- [24] 万幼川,郑顺义,柯涛.新型航空传感器快速处理方法探讨[J].地理空间信息,2016,14(12):1-3+10+7.
- [25] 王焕宇.飞机机电控制系统测试及数据处理研究[J].航空精密制造技术,2022,58(05):41-43.
- [26] 王坤翔,梁海生,王铜练.人工智能在直升机航空电子系统中的应用[J].中国军转民,2024,(20):28-29.
- [27] 王雷涛,朱静,凤翔丽,等.虚拟传感器的开发与应用[J].电脑知识与技术,2019,15(04):261-262+269.
- [28] 王乾,郑党党,佟瑞庭,等.基于MBSE的民机飞行控制系统架构设计[J].系统工程与电子技术,2024,46(09):3050-3059.
- [29] 王兴华,王军强,牛振中,等.无人机综合模块化航空电子体系架构技术研究[J].航空计算技术,2021,51(05):92-96.
- [30] 王志强.航空电子系统的安全性诊断技术探讨[J].南方农机,2023,54(07):156-158.

- [31] 吴海燕.综合化航空电子系统中信号处理模块的健康管理方法[J].电子设计工程,2024,32(01):35-38+43.
- [32] 严龙,朱国锋,曲国远,等.航空电子系统核心处理平台架构发展研究[J].航空电子技术,2021,52(03):23-29.
- [33] 杨昌霖.面向航空电子产品的电子装联工艺设计系统开发[J].现代信息技术,2024,8(12):85-90+95.
- [34] 游蕊,白雪琪.航空电子通信系统关键技术问题的浅析[J].科技风,2024,(22):65-67.
- [35] 袁伟,赵奎,许国福.航空发动机控制系统电子器件纳米涂层应用研究[J].航空动力,2024,(05):71-74.
- [36] 岳宁博,刘亚飞.新技术在航电系统中的布局[J].电子测试,2022,36(05):94-96.
- [37] 张春华.基于航空遥感图像灾害区域定位系统设计[J].计算机测量与控制,2022,30(01):239-245.
- [38] 张达,高君宇,丁腾欢,等.基于时序二维化的航空传感器故障检测[J].西北工业大学学报,2023,41(06):1033-1043.
- [39] 张贵明,包勇.航空电子系统的安全性诊断技术分析[J].中国科技信息,2022,(15):36-38.
- [40] 张国臣.航空电子系统的自动化测试应用[J].中国航务周刊,2021,(43):64-65.
- [41] 张浩松,梁晓琳,王议卫,等.四轴智能无人机飞行控制系统设计[J].大众科技,2024,26(04):18-22.
- [42] 张起睿,曲卡尔.模块化开放式航空电子系统架构标准研究[J].航空电子技术,2022,53(02):19-26.
- [43] 张寻梦.PHM技术在飞行器飞控系统中的应用[J].设备管理与维修,2024,(12):82-85.
- [44] 张芝莹.无人机飞控系统状态监测与异常检测技术研究[D].西安工业大学,2024.
- [45] 赵永库,陈晓刚.分布式航电系统架构研究[J].微电子学与计算机,2022,39(07):86-93.
- [46] 郑晓飞,郭创,姚斌,等.基于深度学习的航空传感器故障诊断方法[J].计算机工程,2017,43(07):281-287.
- [47] 朱志强,王世奎,李成文,等.综合化航电系统中统一网络技术分析[J].航空计算技术,2022,52(03):125-129.

