



中国人工智能学会  
Chinese Association for Artificial Intelligence

# 中国人工智能学会系列白皮书 ——智能航空2024

中国人工智能学会  
二〇二五年十一月



# 中国人工智能学会系列白皮书 ——智能航空2024

中国人工智能学会  
二〇二五年十一月

《中国人工智能学会系列白皮书》编委会

主任：戴琼海

执行主任：马华东

副主任：赵春江 何 友 王恩东 郑庆华 刘成林

周志华 孙富春 庄越挺 胡德文 杜军平

杨 强

委员：陈松灿 董振江 付宜利 高新波 公茂果 古天龙 何 清

胡清华 黄河燕 季向阳 蒋田仔 林浩哲 梁吉业 刘奕群

潘 纲 石光明 孙茂松 孙长银 陶建华 王海峰 王熙照

王 轩 王蕴红 吴 飞 于 剑 余有成 张化光 张学工

章 毅 周鸿祎 周 杰 祝烈煌

# 目录

引言.....	4
<b>第一章 智能航空系统概述.....</b>	<b>7</b>
1.1 智能航空概念.....	7
1.2 智能航空主要子系统构成.....	8
1.2.1 飞行器载荷与任务智能系统.....	8
1.2.2 航空运行与交通管理智能系统.....	10
1.2.3 航空综合保障与服务智能系统.....	11
1.3 智能航空的关键优势.....	12
1.3.1 装备制造领域优势.....	13
1.3.2 态势感知领域优势.....	14
1.3.3 自主决策领域优势.....	15
1.3.4 飞行控制领域优势.....	17
1.3.5 航空管理领域优势.....	18
1.3.6 维护保障领域优势.....	20
1.3.7 飞行训练领域优势.....	21
<b>第二章 智能航空发展情况.....</b>	<b>23</b>
2.1 国外智能航空发展情况.....	23
2.1.1 美国发展概况与典型案例.....	23
2.1.2 俄罗斯发展概况与典型案例.....	29

2.1.3 欧洲发展概况和典型案例.....	32
2.2 中国智能航空发展情况.....	35
2.2.1 发展背景与战略意义.....	39
2.2.2 政策环境与规划动向.....	47
2.2.3 重点领域应用进展.....	50
2.2.4 面临的瓶颈及对策建议.....	54
<b>第三章 智能航空技术情况.....</b>	<b>60</b>
3.1 智能航空核心技术分析.....	60
3.1.1 人工智能与机器学习技术.....	61
3.1.2 物联网（IoT）技术.....	63
3.2 智能航空技术典型应用场景.....	65
3.2.1 飞行控制与导航系统.....	65
3.2.2 航空器健康管理与维护.....	65
3.2.3 飞行数据分析与决策支持.....	66
3.2.4 客户服务与个性化体验.....	66
3.2.5 无人驾驶飞机与无人机.....	67
3.3 典型案例与实践分析.....	67
3.4 智能航空核心技术发展趋势.....	70
<b>第四章 智能航空重点领域分析.....</b>	<b>74</b>
4.1 智能无人系统自主能力测试与评估技术.....	75

4.2 先进航空机载系统能量综合与智能管理.....	78
4.3 航空环境智能态势感知技术.....	81
4.4 跨速域大空域高超飞行器气动布局设计.....	85
4.5 先进飞行器智能控制理论与方法.....	91
4.6 低空飞行安全架构设计和数字化试验.....	97
4.7 航空发动机智能设计与诊断.....	102
<b>第五章 智能航空发展趋势.....</b>	<b>108</b>
5.1 全球智能航空技术演进趋势.....	108
5.2 我国智能航空重点建设方向.....	111
5.3 智能航空前景展望与挑战.....	113
<b>参考文献.....</b>	<b>116</b>

## 引言

近年来，科技进步推动航空产业迎来迅猛发展。但在这一快速发展的背后，航空产业仍面临诸多挑战：飞行安全风险、航班延误频发、成本不断攀升、环境污染加剧、旅客服务体验亟需提升，以及空域资源紧张等难题。面对这些挑战，人工智能技术被视为破局的关键。与此同时，全球主要军事大国正积极推进人工智能在军用航空领域的应用，预示着未来空战将迈向高度自主化、智能化的新纪元。在此背景下，发展人工智能航空显得尤为迫切。人工智能技术的融入，将在确保飞行安全和国家安全、优化航班运行效率、降低运营成本、提升旅客服务体验、实现空域管理智能化等方面发挥关键作用。进一步深度融合人工智能与航空产业，将有力推动航空业的转型升级，助力航空产业迈向可持续发展的新阶段。

在2024年7月15日至18日召开的党的二十届三中全会上，通过的《中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定》(以下简称《决定》)明确提出，要加强关键共性技术、前沿引领技术、现代工程技术、颠覆性技术创新，加强新领域新赛道制度供给，建立未来产业投入增长机制，完善推动新一代人工智能、航空航天等战略性新兴产业发展政策和治理体系，引导新兴产业健康有序发展。《决定》将人工智能与航空航天列为战略性新兴产业，不仅明确了两者的战略地位，

更深刻阐述了加速推进人工智能航空建设的重大意义与紧迫性。人工智能航空的发展，不仅是推动我国航空产业转型升级、迈向高质量发展的关键步骤，更是关乎国家安全和长远发展的重大战略。它对于提高我国航空安全标准、保障国家安全、优化航空资源分配、提升航空运输效率、降低运营成本、促进绿色环保发展，以及增强我国在国际航空舞台上的竞争力，都将产生深远的影响。人工智能航空技术的深度应用，将有力捍卫国家领土安全，满足人民群众日益增长的出行需求，为我国航空业的持续繁荣和健康发展注入新的动力，助力我国在全球航空市场中占据更加重要的地位，展现大国担当。

在中央和各级政府部门的密切关注与支持下，人工智能航空的发展已纳入国家战略的宏伟蓝图，成为国家发展不可或缺的一部分。这一战略的实施，将引领我国航空产业迈向更加智能化、高效化、安全化的未来，为实现中华民族伟大复兴的中国梦贡献航空智慧与力量。

自21世纪初以来，我国航空产业迈入了飞速发展的新纪元，取得了举世瞩目的辉煌成就。从大飞机项目的启动，到国产大型客机翱翔蓝天的壮丽时刻；从航空发动机自主研发的不懈追求，到无人机技术不断刷新的创新纪录，我国航空事业正稳步向世界一流水平迈进。在这一历史进程中，人工智能作为新一轮科技革命与产业变革的先导力量，正以前所未有的速度渗透并重塑各行各业。航空产业，作为国家经济的重要支柱，与人工智能技术的深度融合，不仅为我国航空事业

的持续进步注入了强劲的新活力，也为全球航空业的转型升级开辟了新的可能性。

本白皮书旨在概述人工智能航空的概念与特点、全球主要国家人工智能航空的发展历程与现状、未来趋势、关键技术及重点应用领域，以及我国人工智能航空的发展动态。受限于篇幅，书中内容未能面面俱到，建议感兴趣的读者参考相关专业文献与著作，以获取更深入、全面的认识。本报告在编纂过程中，广泛搜集了国内外航空智能化领域的最新研究成果，并深度结合了行业实际应用案例。在此，对为本书编写提供宝贵资料与专业支持的专家学者表示诚挚的感谢

# 第一章 智能航空系统概述

## 1.1 智能航空概念

人工智能是关于知识的科学，即怎样表示知识，怎么获得知识并使用知识的科学。而航空科学与技术是以数学、物理学以及现代技术科学为基础，以飞行器设计、推进理论与工程、制造工程、人机与环境工程等专业为主干的高度综合的学科体系。人工智能与航空科学技术作为两个高度复杂的学科体系，其交叉融合呈现出多维度、深层次、系统性的特征<sup>[1]</sup>。而人工智能航空学是一门融合了人工智能技术与方法的学科，专注于在航空领域的深入研究和广泛应用。目前，鉴于人工智能与航空领域的分支众多且复杂，对于人工智能航空学的界定尚未形成统一的认识。鉴于此，众多专家学者根据人工智能在航空领域的多样化应用，提出了多种细分的概念和定义。比如，雷宏杰等人针对人工智能面向作战需求指出，军用航空人工智能是针对航空军事任务场景，面向作战需求，研究和制造在人类给定的具体目标下，能够通过感知、认知、决策、执行过程达成给定目标的航空装备及其相关产品的科学与工程<sup>[2]</sup>。姜超等人则指出，在军用航空装备领域，人工智能技术的介入将会使航空武器装备实现从“数据优势”、“信息优势”、“知识优势”到“决策优势”的飞越，实现航空武器装备的智能化升级换代。通过充分利用人工智能和自主技术的先进成果，对自

主学习、人机交互、人机协同、人机联合等方面进行集中研究，压缩作战人员在观察、定向、决定、行动循环中的时间，实现多域联合作战指挥和控制，提高作战能力，取得未来战争的制胜权<sup>[3]</sup>。此外，为了落实“十四五”规划中人工智能赋能民航的要求，民航局于2022年1月发布了《智慧民航建设路线图》，并在其中指出，智慧民航是瞄准民航强国建设目标，应用新一轮科技革命和产业变革的最新成果，创新民航运行、服务、监管方式，实现对民航全要素、全流程、全场景进行数字化处理、智能化响应和智慧化支撑的新模式新形态。

## **1.2 智能航空主要子系统构成**

人工智能在航空领域的应用涵盖了多个专门的子系统，每个子系统都承担着特定的功能，以下列举了一些关键的人工智能航空子系统。

### **1.2.1 飞行器载荷与任务智能系统**

#### **1. 飞行控制系统**

飞行控制智能系统是人工智能在航空领域的核心应用之一。该系统利用先进算法和传感器数据，实现飞机的自动化操控，覆盖了起飞、巡航至降落等各个飞行阶段。这些智能系统能够减轻飞行员的工作负担，提升飞行的效率与安全性。在特定情境下，自主飞行甚至能够完全接管飞机的控制，在复杂工况下确保飞行平台的安全性与任务可靠性。随着技术的持续发展，飞行控制智能系统将在未来航空业中发挥越来越重要的作用。

## 2. 航迹规划系统

航迹规划智能系统是利用人工智能技术优化飞行路径的系统。该系统通过人工智能算法综合分析多种因素，包括风向、天气状况、空域限制等，智能地为飞机自主规划最佳飞行路线，从而减少燃油消耗和飞行时间，增强运营效率。航迹规划智能系统还能够考虑到航班的优先级和载重情况，对航线进行精细化调整。此外，系统具备实时调整飞行路径的能力，以应对飞行过程中的突发状况或变更。航迹规划智能系统的应用，不仅有助于航空公司降低运营成本，提升航班的准时率，同时也为乘客带来了更加提升飞行平稳性与航程效率的飞行体验。

## 3. 机载通信系统

机载通信智能系统运用人工智能技术，显著提升了数据传输的效率与可靠性。该系统通过人工智能算法对通信协议和信号处理技术进行优化，从而增强了飞机与地面站、其他飞机之间的通信质量。此外，人工智能还能够分析通信数据，预测潜在的链路中断或干扰风险，并采取预防措施以规避故障。机载通信智能系统的部署，不仅提高了飞机的安全性能和运营效率，还保障了通信的连贯性和稳定性。随着人工智能技术的持续发展，机载通信系统将变得更加智能化。

## 4. 目标分配与武器控制系统

目标分配与武器控制智能系统是军事航空中利用人工智能技术

自动识别目标、武器资源优化调度和执行攻击任务的系统。该系统通过先进的人工智能算法分析战场信息，自主识别敌方目标，并依据目标的重要性和威胁级别智能分配武器资源。此外，系统还能够执行精确攻击任务，自动优化武器发射参数，从而提升攻击的精确度和作战效率。目标分配与武器控制智能系统的集成，显著增强了军事航空的作战能力，并有效减轻了飞行员在战场上的工作压力。

## **1.2.2 航空运行与交通管理智能系统**

### **1. 空中交通管理系统**

空中交通管理智能系统是运用人工智能技术来处理空域流量管理、航班调度和冲突检测等任务的系统。通过人工智能算法对空域内的航班流量进行分析，该系统能够优化航班的起降顺序，减轻空中和地面的拥堵状况，从而提升航班运行的安全性。此外，人工智能还能预测潜在的飞行冲突，并采取预防措施以避免碰撞，进一步提升飞行安全保障水平。随着人工智能技术的不断进步，空中交通管理系统将变得更加智能化，从而有效提升空域利用率，减少航班延误现象。

### **2. 运行监视智能系统**

智能系统是利用人工智能技术对机队运行状态、空域环境及飞行态势进行实时监控与分析的系统。该系统通过集成ADS-B、雷达、气象卫星等多源监视数据，能够自动识别异常飞行行为、气象威胁或空域冲突，并为地面签派及管理人员提供直观的决策支持。该系统的应

用显著增强了航空运行的全域态势感知能力，提升了复杂环境下的应急响应能力，是保障大规模机队高效协同运行的关键支撑。

### 3. 航空物流管理系统

航空物流管理智能系统是利用人工智能技术优化货物装载、运输路径和库存管理的系统。通过人工智能算法分析货物特性、运输需求以及库存状况，实现货物装载方案的自动化决策与动态优化，确保飞机载货分布达到最优状态，从而缩短装载周期。此外，系统还能够对运输路径进行优化，挑选出最具成本效益的航线，并高效管理库存，保障零部件和物资的即时补给。航空物流管理系统的应用有助于提高航空物流的效率和成本效益。

### 4. 安全管理系统

安全管理智能系统是基于人工智能技术实现航空安全风险评估、事故预防及应急规划的综合平台。该系统侧重于系统性风险（SMS）的管控，通过人工智能算法对海量历史飞行数据（如QAR、FOQA数据）及实时运行数据进行深度挖掘，能够精准识别潜在的趋势性安全风险。与传统的单机传感器报警不同，该系统致力于评估组织层面的运行风险并制定宏观预防策略，推动航空安全管理从“事后调查”向“事前主动预防”的实质性转型，显著提升了行业的整体安全标准。

## 1.2.3 航空综合保障与服务智能系统

### 1. 预测性维护系统

预测性维护智能系统是利用人工智能分析飞机的传感器数据，以预测潜在的机械故障和维护需求的系统。该系统通过实时监测飞机的性能指标和环境状况，提供精准的故障诊断和预警服务，最大程度保障飞行安全与运行可靠性。它能够前瞻性地捕捉潜在故障征兆，并提前规划维护活动，显著减少意外停机时间。预测性维护系统不仅提升了飞机的可靠性和运营效率，还降低了维护成本。随着人工智能技术的持续发展，预测性维护系统将变得更加智能，为航空业创造更加丰厚的价值。

## 2. 乘客服务智能系统

乘客服务智能系统是利用人工智能技术为乘客提供高效、便捷服务的系统。该系统涵盖了智能客服、个性化服务以及乘客体验优化等多个层面。智能客服通过聊天机器人等人工智能技术，为乘客提供即时的问题解答和服务支持，满足乘客的各类需求。个性化服务则依据乘客的偏好和特定需求，提供量身定制的服务选项，如座位安排、餐饮定制等。乘客体验优化则通过对乘客反馈和行为数据的深入分析，持续优化服务流程和提升旅行体验，从而提高乘客的满意度。乘客服务智能系统的部署，不仅显著提升了航空公司的服务品质和乘客满意度，还增强了乘客对航空品牌的忠诚度。

### 1.3 智能航空的关键优势

智能技术不仅在宏观层面推动着航空装备的未来发展与创新，而

且在应用层面显著提升了航空产业的质量与效率。人工智能技术已深度渗透并赋能航空全产业链，在装备制造、态势感知、自主决策、飞行控制、航空管理、维护保障、飞行训练等方面产生深远影响。

### **1.3.1 装备制造领域优势**

航空装备制造业当前正遭遇一系列挑战，包括生产效率的瓶颈、成本的高昂压力、质量控制的严格要求、漫长的研发周期以及供应链管理的复杂性。生产流程的复杂性使得效率提升变得异常艰难，而频发的质量问题更是对利润空间造成了压缩，不可避免地加剧了制造成本的上升。在这一背景下，人工智能的应用显得尤为迫切和必要。

人工智能技术通过自动化手段显著提升了生产效率，同时减少了人为错误的发生，并利用数据分析优化了成本结构，有效降低了生产成本。借助机器视觉和深度学习技术，人工智能实现了精准的质量控制，增强了产品的可靠性，并加速了设计的验证和模拟过程，大幅缩短了研发周期。此外，智能预测技术的应用优化了供应链管理，提升了整体的运营效率。此外，大量的试飞和检测数据为设计和生产人员为设计与生产人员提供了持续的数据驱动型决策支持，实现了设计方案的快速迭代与闭环优化，使得他们能够在极短的时间内完成复杂的计算任务，并通过并行仿真模拟，实现了设计方案与制造流程的持续优化。

早在2015年，空客就基于生成式设计开发了仿生机舱隔离结构，

而如今基于人工智能的快速生产检测已经成为行业主流。如今，以万物互联为基底，5G工厂中数据驱动的智能体正高效提升着工装与质检效率；同时，大量的智能辅助设计工具正支撑结构有限元计算、气动噪声预测、动力学模型辨识等工作的快速推进<sup>[4]</sup>。

### 1.3.2 态势感知领域优势

在执行各类飞行任务，尤其是在现代战争复杂多变的环境下，飞机的态势感知能力面临诸多挑战，如环境适应能力的局限性、敌我识别的困难，以及飞行员工作负担的沉重。飞行员需在短时间内从海量传感器数据中提炼出关键信息，然而在高动态的飞行环境中，传统的人工处理模式在超高动态环境下存在感知延迟与认知偏差的风险。另外，敌方采用的电子干扰和隐身技术进一步加剧了态势感知的难度，而飞行员的生理和心理极限又限制了他们在复杂情境中的决策能力。因此，将人工智能技术整合到作战飞机的态势感知系统中，其重要性愈发显著。

态势感知主要涵盖智能环境感知和智能目标感知两大领域。智能环境感知涉及对飞机自身状态、外部环境以及威胁区域的全面感知，包括但不限于战场环境、大气条件、风扰影响、拦截威胁等关键战场信息的综合掌握。通过传感器滤波、多源信息融合等先进技术，构建高维度的全域态势图谱。人工智能技术的运用，能够高效处理和分析大量的飞行环境数据，从而显著提升态势环境感知的速度与精确度。

智能目标感知则专注于在复杂战场环境中对敌方目标进行精确识别。目标感知的挑战性较大，特别是在对目标区域的可视度和战场环境复杂性有较高要求的图像感知飞行器中。此外，人工干扰也会对飞行器的目标感知能力造成显著影响。人工智能算法能够学习和实现对敌方意图的预判与行为预测，从而增强对战场态势的预判能力；同时，人工智能辅助系统能够自动识别威胁和确定优先目标，有效减轻飞行员的工作压力，使其能够集中精力于战术决策。人工智能技术的融入，无疑将大幅提升飞行器执行任务的效率，是实现全天候、全维度态势感知，增强任务执行能力的关键所在。

### **1.3.3 自主决策领域优势**

智能决策技术可与观察-指引-决策-行动循环模型相融合，从决策层面和行动层面协同推进，对自主编队、航迹规划、智能突防以及目标分配等领域实施智能化决策。

在实战操作中，预设的自主编队模式和算法往往过于理想，而如何实现在线动态编队调整，是目前亟待攻克的技术难题。人工智能技术的介入，能够实时地调整编队结构和飞行轨迹，确保队形的稳定性；通过智能算法优化编队变换，显著提升响应的敏捷性。人工智能辅助的通信系统增强了数据传输的可靠性与实时性；此外，人工智能还能迅速分析外部威胁，自动进行编队策略的调整，从而有效提升整体的防御能力。人工智能的运用，无疑将极大地增强飞机编队在自主决策

和协同作战方面的效能。

在航迹规划领域，面临的挑战主要包括对复杂气象条件的适应困难、航迹优化不足导致的燃油效率低下、避障反应的迟缓，以及对空域变化的灵活应对不足等问题。这些问题可能会导致飞行路径不经济、安全风险增加，以及航班延误等潜在后果。鉴于此，将人工智能技术应用于航迹规划决策显得尤为迫切。人工智能能够实时分析气象数据，优化航迹以规避恶劣天气；利用机器学习算法，实现航迹的动态优化，从而提升燃油效率；其快速的计算能力确保了及时避障，增强了飞行的安全性；同时，人工智能还能根据空域的实时状况，灵活调整航迹，有效减少航班延误。人工智能的融入将大幅提升航迹规划的智能化和效率，确保飞行的经济性与安全性。

在智能突防领域，飞行器面临着难以有效识别和规避敌方防御系统、突防路径规划不够优化、对动态威胁的反应速度慢以及突防策略的适应性不足等问题。这些问题限制了飞行器在执行突防任务时的成功率与生存率。因此，在智能突防决策中应用人工智能的必要性极为重要。人工智能技术能够快速分析敌方防御布局，精确规划突防路径；其实时数据处理能力可以迅速识别并应对新出现的威胁；智能算法能够根据战场态势变化自适应调整突防策略；此外，人工还能模拟敌方行为，预测其反应，从而提前制定应对措施。人工智能的应用将极大提升作战飞机的突防能力，确保在复杂战场环境中的有效作战和生存。

在目标分配领域，决策挑战主要表现为分配效率不高、目标识别精度不足、资源分配失衡，以及难以应对战场态势的迅速变化等。这些缺陷可能会造成作战效率的降低，错失关键的攻击机会，甚至影响到整体作战任务的达成。因此，在目标分配决策中引入人工智能技术的需求愈发突出。人工智能技术能够实时分析战场信息，快速准确地识别和分类目标；人工智能算法能够根据目标价值和威胁程度智能分配资源，优化攻击顺序；同时，人工智能系统具备自适应能力，能够根据战场态势的变化动态调整目标分配策略。人工智能的应用将显著提高作战飞机的目标分配效率，确保作战资源的最优利用，从而提升整体作战效能。

#### **1.3.4 飞行控制领域优势**

在飞行控制领域，飞行器面临着一系列挑战。首先，飞行器在执行复杂机动时，需要精确控制飞行姿态和速度。其次，传统飞行控制系统在应对极端天气条件、机械故障或突发安全事件面前，往往反应迟缓且准确性欠佳，从而提升了飞行过程中的风险。此外，在进行高精度任务，如空中加油、精确打击或复杂机动时，对飞行控制系统的精度要求极为苛刻。随着飞行环境时空范围的扩展，飞行器需进行广域的跨域飞行作战，此时，飞行器的气动特性发生大幅变化，控制系统的自适应能力、持久可靠性和鲁棒稳定性等问题，亟需借助智能控制技术来予以解决。

在此背景下，人工智能的应用显得尤为关键。人工智能系统能够实时处理海量的传感器数据，提供精准的飞行控制参数，确保飞行器在执行复杂机动时保持稳定。此外，其自主决策能力使飞行器在紧急状况下能够迅速作出反应，大幅缩短人为反应时间，从而显著提升安全性。人工智能还能通过机器学习不断优化控制策略，以适应多样化的飞行条件和任务需求，增强飞行控制的灵活性与效率。随着自主飞行技术的进步，在极端特情或飞行员失能情况下，智能控制系统可实现自主接管并引导飞行器安全返航，最大限度保障平台安全。因此，人工智能在飞行控制领域的应用，不仅是提升飞行性能的技术革命，更是确保飞行安全、增强作战效能和实现智能飞行的核心所在。

### **1.3.5 航空管理领域优势**

在航空管理领域，也存在诸多问题。首先，随着航班量的不断增长，空中交通管理系统正遭遇空域拥堵和航班延误的严峻问题。传统的空中交通管理方法在应对航班量的迅猛增长时显得力不从心，导致整体效率不尽如人意。其次，在航空安全管理方面，对飞行数据的实时监控和分析能力存在不足，这限制了及时识别和处理潜在安全风险的能力。再者，在航空运营管理层面，资源分配的不均衡、航班调度的不合理以及机场运营的低效率等问题普遍存在。这些问题不仅加剧了运营成本，同时也对乘客的旅行体验造成了负面影响。

而人工智能技术的介入，通过深度数据分析，能够优化空域利用，

提升航班调度效率，有效减少航班延误现象。其实时监控与预测功能强化了对飞行安全的监管力度，能够迅速识别异常状况并发出预警，从而预防事故的发生。在机场运营管理方面，人工智能的应用实现了资源的智能化分配，显著提高了机场的吞吐量和运营效率。由人工智能驱动的客户服务系统，能够提供定制化的乘客体验，从而提升乘客的满意度。此外，人工智能通过机器学习不断优化航空管理流程，增强了决策的科学性和精确性。面对突发事件和紧急状况，人工智能的快速响应能力显著缩短了应急反应时间，减轻了事件的影响。在航空物流管理中，人工智能的运用优化了货物调度和运输路线，有效降低了物流成本。综上所述，人工智能在航空管理中的应用是解决现有问题、提升管理效率、保障飞行安全、优化乘客体验和推动航空业可持续发展的关键。

鉴于其显著的优势，人工智能技术已经深入应用到航空管理领域。以泰雷兹的Neolink平台为例，它利用人工智能技术进行飞行流量和拥堵预测，而阿拉斯加航空的Flyway平台则通过提升其应用辖区内近30%的空域利用效率，展现了人工智能的实效。2022年1月，中国民航局颁布了《智慧民航建设路线图》，勾勒出了智慧民航建设的整体蓝图和分阶段目标，全面推进空管、机场、监管等领域的智能技术应用与智慧化转型。随着技术的不断进步，人工智能必将成为航空管理创新的重要驱动力。

### 1.3.6 维护保障领域优势

飞机维护保障是航空业不可或缺的一环，自航空业起步之时便已开始发展。然而，该领域仍存在一些亟待解决的问题。首先，传统的飞机维护高度依赖人工检查和经验判断，这种做法不仅消耗大量时间和人力，而且容易因人为失误造成漏检或误诊。其次，飞机维护在数据分析处理方面能力有限，难以提前发现潜在的故障风险，这可能在飞行中引发意外事件。再者，维护计划的制定往往缺乏必要的灵活性，无法根据飞机的实际运行状况进行动态调整，从而导致维护资源的浪费或维护不足。此外，飞机维护记录的管理高度复杂且流程冗长，纸质记录易丢失或损坏，而电子记录系统则面临数据整合和共享的挑战。同时，飞机维护人员的短缺和技能水平的参差不齐，也是面临的重大挑战，这些因素直接影响到维护的质量和效率。在飞机维护过程中，对零部件需求预测得不准确，常常造成库存的积压或短缺，进一步增加了维护成本。

在这种情况下，人工智能的应用显得尤为必要。人工智能技术利用机器视觉和传感器数据分析，能够实现对飞机状态的自动监测和故障的预见性分析，从而显著提升维护的精确度和效率。由人工智能驱动的智能维护系统，能够对飞机性能数据进行实时监控，迅速识别异常状况，并依据飞机的实际运行状态灵活调整维护计划。此外，人工智能还致力于优化维护记录的管理，通过数字化手段和云存储技术，

确保数据的完整性与可追溯性，为飞机维护提供更加坚实的数据支持。人工智能在飞机维护保障领域的应用，显著提升了维护的智能化程度，增加了飞机的利用率，并有效降低了维护成本。例如，美国空军创新机构AFWERX与国防部国防创新单元携手推进了一项深度学习维护保障项目，该研究分析了E-3预警机队十年的补给数据和五年的维护报告，结果显示，实际可节约高达29%的维护成本<sup>[3]</sup>。

### 1.3.7 飞行训练领域优势

飞行训练是塑造飞行员技能的核心环节，但当前的训练模式面临着众多挑战，亟待创新与改进。首先，传统飞行训练高度依赖实际飞行时间和高昂的模拟器费用，这不仅限制了训练的频次和范围，也导致飞行员技能培养周期较长。其次，现行的训练方法缺乏个性化教学，难以针对每位飞行员的个性和学习进程提供定制化训练。再者，飞行训练的安全性风险较高，尤其是对于初级飞行员来说，事故发生率相对较高。此外，训练过程中的评估与反馈机制过度依赖教员的主观经验，这可能导致评估标准的不统一，进而影响训练成效。同时，飞行训练数据的管理与分析能力有限，无法为飞行员提供精确的训练改进建议。在模拟飞行训练方面，场景的真实性和多样性不足，难以复现复杂的飞行环境和紧急状况，这限制了飞行员应对实际飞行中突发事件的应变能力。

因此，人工智能的应用显得尤为迫切。利用虚拟现实和增强现实

技术，人工智能能够打造低成本、高度仿真的飞行训练环境，从而增加飞行员的训练频率，同时降低训练成本。基于人工智能的个性化训练系统能够根据飞行员的学习进度和表现，自动调整训练内容和难度，实现精准的个性化教学。人工智能还能通过数据分析，为飞行员提供客观量化的评估指标与实时反馈，助力他们迅速提升技能。在飞行训练中，人工智能的应用还能模拟复杂和罕见的飞行情境，锻炼飞行员应对紧急情况的能力，从而提升飞行安全。此外，人工智能能够高效管理和分析飞行训练数据，为飞行员和训练机构提供决策支持。总体而言，人工智能在飞行训练中的应用不仅能提高训练效率、降低成本，还能提升飞行员的技能水平，确保飞行安全，成为未来飞行训练发展的关键趋势。随着技术的不断进步，人工智能将成为飞行训练领域的重要辅助工具

综上所述，人工智能对航空产业的赋能是全方位、深层次的。从制造端的提质增效，到运行端的安全管控，再到服务端的体验升级，智能技术正以前所未有的力量重塑航空产业的价值链条，为其迈向高质量、可持续发展阶段奠定了坚实基础。

## 第二章 智能航空发展情况

### 2.1 国外智能航空发展情况

人工智能在航空领域的应用发展全球范围内呈现出蓬勃发展之势，各国在不同的领域中积极探索人工智能技术的潜力，特别是在自主飞行、飞行安全、航空物流和空中交通管理等方面。

美国作为全球科技创新的领军者，在人工智能应用方面具有显著优势。美国的航空巨头已经将人工智能技术集成到飞机设计、飞行控制系统、故障预测及无人机系统中<sup>[5]</sup>。同时，美国还在开发自主飞行的无人机系统，利用人工智能优化飞行路径、提高任务效率。

欧洲的航空产业同样重视人工智能技术的应用。空客公司正在推动人工智能在飞机自动化驾驶和飞行优化中的应用，研究智能飞行员辅助系统，以减少人工干预并提高飞行安全<sup>[6]</sup>。此外，欧洲的空中交通管理系统也在使用人工智能技术来提高航班调度的智能化水平，解决空中交通拥堵问题，提高航空系统的效率和可靠性。

其他国家，如俄罗斯、英国和法国等，也在无人机和智能航空系统的研发上取得了显著进展，推动了军事航空和民用航空领域的人工智能创新<sup>[7]</sup>。

#### 2.1.1 美国发展概况与典型案例

##### 1. 发展概况

在早期的人工智能研究投入中，美国政府和军方的投资占比较高，伴随着人工智能技术路线本身的发展演化，长期奉行‘技术领先’战略的美国空军一直努力将最前沿的技术转化为战斗力<sup>[1]</sup>。

20世纪80年代，随着计算机知识获取、推理能力的提升，第一个成功的商用专家系统R1<sup>[8]</sup>开始为其部署机构节省大量的运营成本。专家系统的发展热潮引起了DARPA的注意，并于1986年在其战略计算倡议中发起了飞行员助手项目<sup>[9]</sup>。该项目致力于开发一种实时的、可协同作业的基于知识的智能系统，旨在增强下一代战斗机的效能与生存力，进而辅助单座战斗机飞行员在日益复杂多变的战场环境中，驾驶高性能战斗机更出色地完成各项任务。根据项目构想，此智能系统涵盖了五大子系统：态势评估系统、系统状态监控系统、战术规划系统、任务规划系统，以及集成语音功能的人机交互界面。这一构想在当时的技术背景下，对机载处理器的功耗控制、空间利用以及实时计算能力等方面均提出了极高的挑战，并且当时人机交互领域的研究尚显不足。然而，得益于该项目的深入探索与推动，众多关键技术得以在后续的X-45无人机项目、美国陆军未来作战系统的人机接口设计等项目中得到有效传承与广泛应用。

为了应对未来攻击与侦察旋翼机飞行员所面临的任务多样化及信息过载挑战，美国陆军于1994年，在充分吸收飞行员助手等多个项目研究成果的基础上，正式启动了旋翼机飞行员助手项目(Rotorcraft

Pilot's Associate, 简称RPA)<sup>[10]</sup>。该项目还是当时世界上最大的智能用户界面项目。RPA项目主要由两大核心部分组成：第一部分依托于先进任务装备组件，集成了包括尖端传感器、高效通信系统以及精密瞄准系统在内的复杂自动化系统，尽管功能强大，但从严格意义上讲，这部分并不具备智能特性；第二部分则是认知决策辅助系统，它由数据融合、外部态势评估、内部状态监控、实时规划系统及座舱信息管理系统这五大模块构成，旨在提供更高层次的智能支持。经过五年的深入研究与反复试验，RPA项目在红外与夜视图像增强的传感器集成、以及路径规划技术方面取得了显著的成就。然而，在需求精准捕捉、系统整体性能优化以及意图智能推断等领域，项目并未达到预期的成功目标。

随着仿真和计算能力的不断增强，美国军方越来越多地在训练、分析和采办中使用仿真技术，为了在大型的、基于实体的仿真训练中提升个体的自主行为能力，Jones等<sup>[11]</sup>于1992年开始研发用于模拟固定翼飞行员在执行任务时的行为的软件系统，这一努力最后产生了基于规则的智能系统——TacAir-Soar。在1997年举行的战争综合演练场仿真演习中，TacAir-Soar能够成功完成722种固定翼飞行任务中的95%。1998年，它还展示出了在仿真环境中与人类飞行员协作和对抗的能力。TacAir-Soar最大的创新在于为支持实时、复杂条件下的自主和智能行为集成了一系列能力，大大提升了美军大型仿真演练能力<sup>[1]</sup>。

2016年，一款名为“阿尔法”(ALPHA)的模拟空战软件在虚拟对抗中，凭借其比人类快250倍的决策速度，轻松击败了美国空军退役上校基恩·李，这一里程碑式的事件再度激发了航空界对人工智能技术的浓厚兴趣。ALPHA作为波音公司为美国空军研究实验室研发的“仿真、集成与建模高级框架”(Advanced Framework for Simulation, Integration and Modelling, 简称AFSIM)项目的重要组成部分，其核心目标是在AFSIM环境中优化虚拟对手算法的表现。ALPHA采用了遗传模糊树的方法来训练其模糊推理系统<sup>[12]</sup>，这一创新技术能够自动生成一系列高效规则，并在面对复杂情境时输出确定性的控制指令，展现出卓越的问题解决能力。尤为值得一提的是，ALPHA成功部署于低功耗嵌入式平台（如‘树莓派’），充分证明了其在计算资源需求上的高效与灵活，凸显了其技术上的先进性与实用性。

ALPHA的成功大大激发了美军的兴趣，随着人工智能技术的蓬勃发展，美国国防部高级研究计划局于2019年启动了“空战进化”项目，旨在通过人工智能来处理视距内空中格斗问题，增强飞行员对战斗机自主性的信任，加速飞行员从平台操纵者向任务指挥官的转变。在2020年举办的“阿尔法”空战格斗比赛中，苍鹭系统公司的智能空战代理“隼”(Falco)凭借凌厉的攻势以5:0的成绩战胜了顶尖的F-16人类飞行员，标志着自主空战迎来深度强化学习时代。值得注意的是，该方法在较短时间内，通过至少40亿次仿真训练，使Falco积累了相当

于30年F-16驾驶的实战经验。接下来按照项目计划，自主空战将由局部行为向全局行为演进，由仿真环境向全尺寸实体发展。

2020年，美国空军第9侦察联队的一架U-2侦察机在试飞中成功测试了一种创新的机载人工智能算法——ARTU $\mu$ 。此次试飞中，ARTU $\mu$ 在使用U-2的机载雷达执行导弹搜索任务还是执行自卫任务的选择中做出了最终的决策，这在美国军方悠久的人工智能研发史上尚属首次，在某种意义上标志着部分战术决策权让渡给人工智能成为现实可能。ARTU $\mu$ 算法源自谷歌的AlphaZero的进阶版本MuZero，后者于2019年11月才公布了相关的研究成果<sup>[13]</sup>，而算法的开源可能更为延后。美国军方在开源算法的改造和部署方面展现出了惊人的能力。此外，得益于商业DevSecOps软件实践的应用，以及容器技术和容器云技术的引入，ARTU $\mu$ 的移植性和部署效率得到了显著提升，从云端训练到实际任务部署仅用了短短一个多月的时间<sup>[1]</sup>。

## 2. 典型案例

Alpha智能空战系统<sup>[14]</sup>是一种人工智能系统，可在高保真模拟环境中控制无人作战飞机执行空战任务。受雇于美国空军研究实验室，Psibernetix公司于2015年5月开始研发Alpha智能空战系统。

2016年，美国空军退役飞行员Gene Lee上校对Alpha空战系统进行了评估。作为一名资深的美国空军专家，Lee上校拥有成千上万次的空对空拦截经验，训练精良且实战经验丰富。然而，在与Alpha空战

系统的模拟对抗中，尽管他多次尝试，Lee上校始终未能击败Alpha系统。他最终将Alpha系统评价为“迄今为止最具有侵略性、反应敏捷、最具活力且值得信赖的人工智能”。

Alpha系统采用遗传模糊树(Genetic Fuzzy Trees, 简称GFTs)技术，这是一种基于“模糊逻辑”、“遗传算法”和“专家规则”的方法。它构成了一套级联的模糊推理系统，能够在处理极其复杂的问题时生成精确的控制指令，并具备自我学习和自我演进的能力。通过“知识表达与知识工程”，Alpha系统构建了一个全面的空战战术知识库，涵盖了环境知识、任务知识、能力知识和战术规则知识。Alpha系统通过大量的对抗模拟训练，依托于优质的数据和经验丰富的战斗信息，实现了自我完善和能力增强。GFTs方法成功的关键在于其能够吸收专家知识中的经验教训，并通过学习系统对这些知识进行充分的优化。

Alpha系统的核心目标当前是充当飞行员在仿真训练环境中的智能对手，它具备高级战术规划、策略设计、规避动作、情境感知和防御策略等多方面能力。不同于其他学习方式，GFTs方法不仅决策效率极高，而且计算成本相对较低。利用GFTs智能决策技术，Alpha空战系统能够在短短1毫秒内处理和整合所有空战对抗数据，其响应速度在同等的动态对抗环境中是飞行员的250倍，从而在空中战斗中占据了显著优势。得益于模糊逻辑的可解释性(Explainability)与语义化特征，GFTs方法确保了人类设计者与系统之间保持清晰、可理解的交

互，并为系统内部决策层级提供了实时透明度，GFTs方法确保了人类设计者与系统之间保持清晰可理解的联系，并在训练期间及之后为内部层级提供实时透明度。Alpha系统是一种易于协作的人工智能，非常适合作为飞行员的队友。它能够不断优化对有人驾驶飞机的指令执行方式，并为任务的其他环节提供战术和情境建议。

## 2.1.2 俄罗斯发展概况与典型案例

### 1. 发展概况

尽管人工智能的概念直到20世纪中叶才逐渐成型，但俄罗斯在航空领域的早期探索就已经触及了自动化和智能控制技术。早在20世纪的开端，苏联便着手探索自主飞行装置，并成功研发了能够承担特定任务的无人机，这些技术进步在某种程度上标志着人工智能在航空领域的初步尝试和应用。

在20世纪50至70年代，随着技术的不断积累，苏联转而专注于侦察和攻击型无人机的研发，诸如“DBR-1”远程无人侦察机等先进装备。其无人机技术的智能水平曾领先于世界。然而，苏联解体后，受经济和科技发展放缓的影响，俄罗斯的无人机技术经历了一段停滞期。直到2011年叙利亚内战之后，俄罗斯才重新开始大力发展无人机技术，并逐步将人工智能技术融入无人机的控制、侦察和目标指示等多个领域。在这一时期，俄罗斯推出了一系列高性能的无人机，例如“猎户座”中空长航时无人机，它们在侦察、电子战和战术支援等方面发挥

了至关重要的作用。俄罗斯将更先进的人工智能算法和深度学习技术应用到无人机的控制系统中，从而显著提升了无人机的自主作战能力和目标识别的精确度。此外，俄罗斯还推出了全球首款人工智能重型无人机S-70“猎人”，标志着俄罗斯在人工智能航空领域取得了显著的进展。这一时期的创新不仅体现在无人机技术的升级，更在于人工智能技术与航空领域的深度结合，为俄罗斯智能航空技术的发展开辟了新的篇章。

近年来，俄罗斯联邦政府对无人机的发展给予了极高的重视。2021年10月，俄罗斯联邦政府正式批准了《俄罗斯联邦共同空域无人驾驶飞机一体化概念》以及《俄罗斯联邦共同空域无人驾驶飞机一体化概念技术发展实施计划》。在2022年12月21日的会议上，普京总统强调，将无人机的改进和改型工作列为国防工业2023年的“紧急任务”。同年12月底，普京总统又签署了一系列旨在推动无人航空行业发展的指示文件，包括成立专门的无人航空系统发展政府委员会、批准《2030年及展望2035年的无人航空发展战略》，以及《2030年前的无人航空系统发展》国家计划(2030年前)等，要求政府在2023年6月1日前批准《2030年及未来2035年前的无人航空发展战略》，并将人工智能技术的集成应用视为发展的核心重点。

## 2. 典型案例

“机载智能辅助决策系统”是专为俄制第四代战斗机设计的实时

作战辅助决策专家系统。该系统主要面向中远距超视距（BVR）作战场景，其核心功能涵盖作战态势分析、作战子任务的细化和最优作战策略的选择，旨在为飞行员在机动、攻击和干扰三个关键领域提供及时的通知与专业建议。

机载智能辅助决策专家系统的运作依赖于战斗任务信息的输入，这些信息涵盖了任务的类型、级别和目标等三个方面，并在作战准备阶段被加载至专家咨询系统。系统针对单机或编队执行的护航、空中巡逻、空域清理等任务，旨在达成目标摧毁、干扰压制、佯动防护等作战目标。机载智能辅助决策系统为飞行员提供具体的对抗策略提示和建议，例如“建议采取反应措施——执行战术左转”或“必须执行的动作——安全脱离转弯”，以简洁明了的方式指导飞行员的行动。

机载智能辅助决策系统构建了一个分层的专家知识库架构。例如，在执行一次自由空域清理的空战任务中，若任务级别为单机执行，且目的是进行战斗约束，专家知识库会将任务细化为优势保障、攻击、攻防兼备、防御和信息保障等五个战术子动作。对于这些不同的战术子动作，专家系统会针对性地提供相应的建议和提示。为了实现智能辅助决策，专家知识库依赖于众多数学模型的支持。这些核心数学模型包括：战术优势位置计算模型、敌方导弹攻击区计算模型、战术脱离转弯方向计算模型、安全发射距离计算模型、安全脱离距离计算模型、导弹制导中断原因分析模型、导弹弹道模拟模型以及箔条弹体有

效性评估模型等。这些模型的精确运算为飞行员提供了精确的战术决策支持。

### 2.1.3 欧洲发展概况和典型案例

#### 1. 发展概况

欧洲在智能航空领域的探索具有深厚的历史积淀，其发展历程呈现出从早期无人化构向全产业链智能化转型演进的特征。早在1914年第一次世界大战期间，英国便提出了利用无线电波控制小型无人机进行远程投弹的构想，旨在通过技术手段降低人员伤亡。随后，1917年，自动陀螺稳定器的问世标志着无人飞行器初步具备了自动增稳与航向保持能力。而1935年“蜂王号”无人机的问世则实现了自主返回起飞点的技术突破。这些早期探索不仅奠定了欧洲无人机技术的基础，也开启了全球航空领域自动化的先河。

进入21世纪，欧洲各国及欧盟层面均将人工智能视为航空产业转型升级的核心引擎，并制定了一系列前瞻性政策。英国政府通过发布《推进空中自主性》等政策文件，为商业无人机创新构建了系统的政策支持体系。与此同时，欧盟通过“欧洲单一天空航空运输研究”（SESAR）计划，致力于利用数字化与智能化手段重塑空管体系。这种从国家到区域层面的政策协同，为人工智能在欧洲航空领域的深度应用提供了坚实的制度保障，推动了从基础研究到商业应用的全面提速。

在技术研发与应用层面，欧洲正致力于解决智能航空的底层架构与运行效率难题。英国南安普顿大学研发的神经系统无人机，通过光信号传输有效克服了传统电信号易受射频干扰的瓶颈，显著提升了数据传输的稳定性。在空中交通管理领域，由英国国家空中交通服务公司（NATS）主导的“蓝鸟计划”正利用机器学习与数字孪生技术，探索AI在复杂空域管理中提供决策支持甚至替代人工管制的潜力。此外，法国泰雷兹与空中客车等行业巨头也在自主飞行、智能避障及自动化调度等领域取得了显著进展，共同推动欧洲民航体系向智慧化迈进。

在军事防务领域，欧洲正通过跨国协作引领智能空战的变革。由法国、德国、西班牙联合推进的“未来空战系统”（FCAS）以及由英国、意大利共同参与的“全球空战计划”（GCAP），均将人工智能作为核心驱动力。这些项目重点研究自主编队、人机协同及智能态势感知技术，旨在通过AI技术压缩“观察-判断-决策-行动”的循环时间，夺取未来空战的制胜权。这预示着欧洲航空防务正全面迈向高度自主化与智能化的新纪元，展现出极强的技术引领力与战略前瞻性。

## 2. 典型案例

欧洲未来空战系统(Future Combat Air System, 简称FCAS)项目的诞生，源于对新一代空中作战能力的迫切追求。在2010年前后，欧洲多国开始意识到，随着第五代战斗机的崛起和全球军事技术的迅猛进步，欧洲必须加快步伐以保持其在航空工业领域的领先地位。但是，

由于多种因素，欧洲在第五代战斗机的研发上长期进展相对滞后。这一现状促使法国和德国在2017年夏季联手启动了FCAS项目，目标是在2040年左右全面部署新一代空中作战系统。不久之后，西班牙也参与了这一项目，从而构建了一个由法国、德国和西班牙三国共同合作的框架。FCAS项目远不止于研发一款新型战斗机，而是一个涵盖广泛的复杂系统架构。它主要由下一代战斗机、无人机以及作战云平台等多个关键部分组成。在这些组成部分的协同下，依托于“作战云”系统的支持，FCAS将构建一个高度协同的空中作战智能网络。此外，该系统还将与地面、海上以及空间领域的装备系统实现深度整合，形成一个全方位的作战体系。

在FCAS项目的研发过程中，欧洲多国充分利用了其在航空工业领域的深厚底蕴和先进技术。下一代战斗机作为项目的核心，将配备先进的隐身技术、高机动性和强大的武器系统，能够独立完成各种作战任务，并与无人机和其他有人机进行协同作战。无人机作为“忠诚僚机”，将与下一代战斗机形成编队，通过“作战云”系统进行连接和协同作战，实现侦察、打击和干扰等多种任务的无缝衔接。而作战云平台则是整个FCAS项目的神经中枢，它将整合来自不同平台的信息，通过人工智能算法进行实时分析和处理，为指挥员提供准确的战场态势和作战建议。此外，FCAS项目还采用了大量先进技术，包括网络通信、发动机技术等，以确保系统的整体性能和作战效能。

FCAS项目的顺利推进将为欧洲带来全方位的积极效应。首先，该项目将大幅增强欧洲在空中作战领域的竞争力，确保欧洲空军部队能够有效应对全球安全挑战。通过打造一个无缝衔接的空战体系，FCAS将实现有人驾驶飞机与无人机的协同作战，从而提升整体的作战效能，为欧洲空军提供核心战力支撑。其次，FCAS项目将催生欧洲航空工业的飞速发展，推动技术革新与产业升级。在研发过程中，参与国家将共享技术与经验，深化合作与交流，促进整个欧洲航空工业生态系统的共同进步。这不仅有助于提升欧洲在全球航空市场的地位和影响力，而且将为欧洲经济的持续繁荣注入新的活力。最后，FCAS项目将引领空中作战模式的革命性转变。借助人工智能、网络通信等尖端技术，FCAS将实现跨平台的信息共享和协同作战，提升作战的智能化和自动化水平。这将赋予欧洲空军部队在未来战场上更强的适应性和灵活性，以应对复杂多变的环境。

## **2.2 中国智能航空发展情况**

中国对人工智能航空领域的探索和研究源远流长，其历史可追溯至上世纪50年代末期，那时中国便开启了自主研发无人机的征程。随后，由于外部援助的中断，中国空军面临的“拉-17”无人靶机严重短缺，这促使中国下定决心自主研制无人靶机，进而催生了“长空一号”高速无人靶机的诞生。1966年，“长空一号”成功首飞，并在其后的时间里，其系列改进型号在我国空空武器试验、核武器试验取样等关

键任务中发挥了至关重要的作用。

为了满足国防建设和科学研究的需求，1969年，中国启动了高空无人驾驶照相侦察机的研制项目，最终研制出了“无侦5”无人机。

“无侦5”无人机能够在高空、高亚音速条件下飞行，主要用于军事侦察、高空摄影、靶机训练或地质勘测、大气采样等科学研究领域。它是执行昼间高空摄影侦察任务的无人机，也是我国早期唯一经历过实战检验的高空无人侦察机。

进入20世纪末，中国无人机的发展步伐加快，除了北京航空学院外，西安爱生技术集团公司也成为了国内主要的无人机研制和生产商之一。“ASN-206”无人机是该集团研制的一款多功能无人机，于1994年12月完成了研制工作。该无人机的活动半径达到150公里，续航时间在4至8小时之间。机上配备了全景照相机、红外探测设备、电视摄像机以及定位校射等任务设备，能够将侦察到的情报信息实时传输至地面站，用于战场观察和监视。“ASN-206”无人机是我军较为先进的一种无人机，特别是其实时视频侦察系统，为我军前线侦察提供了强有力的支持。1996年，“ASN-206”无人机的研制荣获国家科技进步一等奖。

自21世纪起，我国成功研发了一系列具有鲜明中国特色的军用无人机，并组建了自己的军用无人机部队。如今，我国的军用无人机不仅构建了一个较为完善的作战体系，还推出了一些集成先进人工智能

技术的无人机产品系列，如“翼龙”、“翔龙”、“彩虹”等。这些无人机不仅在国内发挥重要作用，而且已经走出国门，赢得了国际市场的广泛认可和其他国家的信赖。

此外，中国的人工智能技术已与有人驾驶飞机深度融合。以“歼-20”战斗机为例，该机型搭载了飞行员辅助智能系统，有效地将飞行员从复杂的系统管理任务中解放出来，使他们能够专注于战术决策与态势感知，作出精准的战术决策。随着人工智能技术的迅猛发展，中国军用飞机也步入了智能化的新阶段，通过融入人工智能算法和深度学习技术，其自主飞行、侦察和打击能力均得到了显著增强。

在民用航空领域，人工智能技术的初步应用主要聚焦于航线规划、航班预测和客户服务等方面。借助人工智能的引入，航空公司能够更精准地预测航班需求，优化航线布局，从而提升运营效率。2021年，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》的发布，提出了加速推进数字产业化和产业数字化的战略要求<sup>[15]</sup>。2023年，中共中央、国务院出台了《数字中国建设整体布局规划》(以下简称《规划》)，明确了推动数字技术与实体经济深度融合的方针，并指出在农业、工业、金融、教育、医疗、交通、能源等关键领域加快数字技术的创新应用。为了贯彻《规划》的实施，同年7月，民航局发布了《关于落实数字中国建设总体部署加快推动智慧民航建设发展的指导意见》(以下简称《指导意见》)，为新型基

基础设施的统筹规划和智慧航空的发展提供了明确的方向，从而全面推动航空行业的智慧化转型<sup>[16]</sup>。

“十四五”期间，作为数字化应用场景之一，智慧民航建设的核心目标是实现数字技术、实体经济的融合，并为传统产业在数字化时代下的发展赋能。基于此，中国在智慧航空建设方面特别注重提升民航运行安全水平、运营效率水平、航空服务水平以及行业治理水平这四个关键领域<sup>[16]</sup>。为了推进智慧航空的发展，国家开展了多项科技支撑计划项目。

2023年12月11日，民航二所联合华为、上海华讯网络、中软国际等企业，共同投资106.3亿元，在成都东部新区建设占地1721亩的民航科技创新示范区。经过四年的打造，该示范区正式投入运营。这个项目不仅是我国民航史上投资规模最大、设计标准最高的科技项目，也被誉为民航科技领域的“超级工程”——“民航智谷”。该示范区包含16个民航科技创新研究中心和1个验证中心，设有43个实验室、108个平台，以及1个验证模拟机场，覆盖空管、适航、机场、航空运输等多个研究领域。

2022年10月，海南航空组建了一个跨部门开发项目组，包括运行控制部、飞行部、信息技术部等，专注于研发一款安全可靠、协同高效、自主可控的航路智能优化系统，以增强公司数字化转型的自主能力。该系统于2023年3月正式上线。航路优化系统以数据驱动，信息

技术为核心，具备图形化、模块化、集成化的特点，能够实现数据的汇聚、整理、挖掘和有效利用，使得项目实现运行指标的精准监控与实时预警，管理决策更加科学，显著提升了海南航空的精细化管理水平。系统上线后，数据准确性、实效性和完整性均有显著提升，将员工从繁杂的数据处理中解放出来，专注于项目管理。据获悉，海南航空航路优化执行率因此提升了6%，项目节支金额增长了15.3%。

## **2.2.1 发展背景与战略意义**

中国航空智能化事业的发展，因应用领域和发展方向的不同区分为民用航空和军用航空。在民用航空领域，人工智能技术的应用主要聚焦于提高飞行安全性、优化航班运营效率、以及增强旅客的飞行体验，其目的是推动航空产业的智能化升级和持续发展。在军用航空领域，人工智能技术则主要用于提升作战效率、增强战场态势的感知能力、以及优化资源配置，以适应日益复杂多变的国际安全环境和未来战争的需求。这两个领域的发展相辅相成，共同推动了中国人工智能航空事业的繁荣进步。

### **2.2.1.1 赋能民用航空提质增效的必要性**

从国家战略层面来看，党的十九大提出了建设交通强国和数字中国的战略部署，其中数字中国建设是其中一个重要的方向。在国民经济和社会发展“十四五”规划纲要中，数字中国建设被专门列出一篇，

明确提出了建设智慧民航任务。从行业发展阶段看，我国民航已经进入了处于发展阶段转换期、发展质量提升期和发展格局拓展期‘三期叠加’的新阶段。近年来，民航局高度重视智慧民航建设，先后印发了多项政策文件，其中包括《中国民用航空局关于推动新型基础设施建设促进民航高质量发展的实施意见》、《中国民用航空局关于推动新型基础设施建设五年行动方案》和《中国新一代智慧民航自主创新联合行动计划纲要》等智慧民航建设顶层架构的纲要性文件。这些文件提出了以科技创新驱动民航高质量发展，体系化提升民航科技自主创新能力的方向，顶层设计架构更加明确。因此，推动顶层设计转化为实践成果，是当前智慧民航建设的核心任务。下面从行业发展趋势、智慧民航建设、安全性能提升、资源优化配置以及国际合作与竞争这五个方面分析中国在发展人工智能民用航空的必要性。

### 1. 行业发展趋势与智慧民航建设

“十四五”时期，中国民航业面临着前所未有的发展机遇和挑战。随着全球化和数字化进程的加速，航空运输业正经历着深刻的变革。在这一背景下，智慧民航建设成为推动行业高质量发展的关键路径。智慧民航不仅意味着传统航空业务的数字化升级，更是一场全面的技术创新和模式变革。人工智能作为新一代信息技术的核心，是实现智慧民航的重要手段。通过人工智能的应用，可以推动民航运行管理全流程的数字化和智能化，提升民航服务的质量和效率。

具体而言，智慧民航建设包括智慧出行、智慧空管、智慧机场和智慧监管等多个方面。例如，智慧机场的建设需要高度的感知、互联和智能能力，能够在充分获取机场生产和管理信息的基础上，进行快速分析和处理，从而实现灵活高效的机场运营和管理模式。这离不开人工智能技术的支持，如物联网技术、大数据分析技术、人脸识别技术等，都可以为智慧机场的建设提供有力保障。同时，智慧空管、智慧出行和智慧监管等方面也需要人工智能技术的广泛应用，以提升民航业的整体运行效率和安全水平。

## 2. 提升民航安全性能

安全是民航业的生命线，也是民航发展的前提和基础。随着航空运输量的不断增加，民航安全面临的挑战也日益严峻。传统的安全管理手段已经难以满足现代民航发展的需求，必须依靠先进的技术手段来提升安全性能。人工智能作为新一代信息技术的代表，具有强大的数据处理和分析能力，可以为民航安全提供有力的支持。首先，人工智能通过对海量运行数据的实时监测与趋势分析，能够前瞻性地识别安全隐患，推动民航安全管理从‘被动应对’向‘主动预防’的实质性转变。这有助于民航企业提前采取措施，避免安全事故的发生。其次，人工智能还可以应用于民航安全管理的各个环节，如安全风险评估、事故调查等。通过智能化的手段，可以更加科学、精准地评估安全风险，为民航安全提供更加可靠的支持。此外，人工智能还可以用

于航空发动机的预测性维护，通过实时感知产品使用状态，快速制订维护、修理方案，提升服务保障能力。

### 3. 优化民航资源配置

民航业是一个资源密集型的行业，包括人力资源、航空器资源、航路资源等。如何优化资源配置，提高资源利用效率，是民航业发展的重要课题。人工智能的应用，可以为民航资源的优化配置提供有力的支持。首先，人工智能可以通过算法优化航班计划，提高航班的准点率和运营效率。例如，利用人工智能算法对航班进行动态调整，可以避免航班延误和取消等问题，提高旅客的满意度。其次，人工智能还可以优化航路规划，减少飞行冲突和延误。通过智能化的航路规划，可以更加合理地利用航路资源，提高飞行效率。此外，人工智能还可以应用于人力资源的优化配置，如通过智能化的排班系统，可以更加科学地平衡运行需求与人力资源，在优化工作效率的同时，有效降低人员疲劳风险。

### 4. 促进产业协同发展

“十四五”规划提出了产业协同发展的要求，要求构建“民航+数字产业”的共同体。人工智能作为数字产业的重要组成部分，与民航业的融合发展将促进产业之间的协同创新和技术进步。通过人工智能的应用，可以推动民航业与数字产业、先进制造业、绿色低碳产业等领域的深度融合，形成新的经济增长点和发展动力。例如，在航空

发动机领域，人工智能的应用可以推动航空发动机的研发进程加速，提高发动机的性能和可靠性。同时，人工智能还可以应用于航空发动机的生产制造和运营维护等环节，提高生产效率和降低成本。此外，人工智能还可以与3D打印技术等新兴技术相结合，突破航空航天领域的制造瓶颈，推动产业的创新发展。在航空物流领域，人工智能的应用可以推动航空物流与其他运输方式、海关标准对接、安检互认等，打造一单到底的智慧物流联运服务体系，促进物流提质降本增效。

## 5. 国际合作与竞争

在全球化的背景下，中国民航业的发展离不开国际合作与竞争。人工智能作为新一代信息技术的代表，已经成为国际竞争的重要领域。通过发展人工智能航空，可以提升中国民航业的国际竞争力，提升在国际航空市场的话语权与影响力。首先，人工智能的应用可以提升中国民航业的技术水平和创新能力，推动行业的高质量发展。这有助于提升中国民航业在国际市场上的竞争力，吸引更多的国际航空企业和旅客选择中国的航空服务。其次，通过与国际航空企业和科研机构的合作，可以共同推动人工智能航空技术的发展和应用，实现互利共赢。这有助于提升中国民航业在国际航空领域的地位和影响力。此外，通过加强国际合作，还可以共同应对全球航空业面临的挑战和问题，如环境保护、安全性能提升等，推动全球航空业的可持续发展。

### 2.2.1.2 支撑军用航空战略升级的紧迫性

在当今科技迅猛发展的时代，大数据和人工智能的崛起已经影响着各行各业，其影响力逐渐渗透到军事领域，尤其是空军的现代化深度改革。目前，中国空军正积极推进数智化空军建设，通过引入人工智能、大数据等新技术，提升空军的智能化水平。这一战略旨在使空军更好地适应未来战争的需求，保持领先地位。2024年1月1日，由国务院、中央军委公布的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》(以下简称《条例》)正式施行。《条例》提出，国家鼓励无人驾驶航空器科研创新及其成果的推广应用，促进无人驾驶航空器与大数据、人工智能等新技术融合创新。县级以上人民政府及其有关部门应当为无人驾驶航空器科研创新及其成果的推广应用提供支持。2024年11月10日，中国空军在“军事飞行训练国际交流会议·2024”上重申了他们在新兴科技应用方面的积极进取精神，着重推进大数据、生成式人工智能等技术，以求在复杂多变的战场环境中保持领先地位。下面从战略需求与国家安全、提升作战效能与精准打击、优化资源配置与降低成本、推动技术创新与产业升级以及应对未来挑战与抢占战略高地这五个方面分析中国在发展人工智能军用航空的必要性。

#### 1. 战略需求与国家安全

在全球化与信息化高速发展的今天，国家安全面临着前所未有的

挑战。传统的军事手段已经难以满足现代战争的需求，必须依靠先进的技术手段来提升国家的防御能力和作战效能。人工智能作为新一代信息技术的代表，具有强大的数据处理、分析和决策能力，可以为军事航空领域提供有力的支持。发展人工智能航空，不仅是中国军事现代化的重要组成部分，更是维护国家安全和战略利益的关键手段。通过人工智能技术的应用，中国可以实现对战场态势的实时监控、对敌情变化的快速响应，以及对作战资源的优化配置，从而有效提升国家的战略威慑能力和作战效能。

## 2. 提升作战效能与精准打击

在现代战争中，作战效能和精准打击能力是决定胜负的关键因素。人工智能航空的应用，可以大幅提升军事航空领域的作战效能和精准打击能力。通过人工智能技术的支持，军用飞机可以实现自主飞行以及对目标的自主识别、跟踪和打击，大大提高了作战的精准度和效率。同时，人工智能还可以用于飞行员的辅助训练和作战指挥，通过模拟实战环境和优化作战方案，提升飞行员的作战技能和指挥员的决策能力。此外，人工智能还可以用于战场情报的收集和分析，为作战指挥提供实时、准确的战场态势信息，帮助指挥官做出更加明智和果断的决策。

## 3. 优化资源配置与降低成本

军事航空领域的资源配置是一个复杂而繁琐的过程，需要考虑到

多种因素，如人员、装备、燃料等。通过人工智能技术的应用，可以实现对军事航空资源的优化配置和高效利用。例如，人工智能可以用于飞行计划的制定和调度，通过算法优化飞行路线，减少飞行成本和飞行时间，提高飞行效率。同时，人工智能还可以用于装备维护和故障预测，通过实时监测装备的运行状态和数据分析，提前发现潜在故障并进行维修，从而延长装备的使用寿命和降低维修成本。此外，人工智能还可以用于人员管理和培训，通过智能化的排班系统和培训方案，提高人员的工作效率和满意度，降低人力成本。

#### 4. 推动技术创新与产业升级

人工智能航空的发展不仅是中国军事现代化的重要组成部分，更是推动技术创新和产业升级的关键力量。通过人工智能技术的应用，可以推动军事航空领域的技术创新和产业升级，提升中国在全球军事航空领域的竞争力和影响力。例如，人工智能可以用于军用飞机的研发和制造，通过算法优化设计和生产过程，提高飞机的性能和可靠性。同时，人工智能还可以用于军事航空领域的科研和教育，通过智能化的科研平台和培训体系，培养更多的军事航空领域人才，推动科研成果的转化和应用。此外，人工智能还可以用于军事航空领域的国际合作和交流，通过与国际先进技术的接轨和合作，推动中国军事航空领域的国际化进程。

#### 5. 应对未来挑战与抢占战略高地

随着科技的飞速发展和全球战略格局的不断变化，未来战争形态和作战方式将发生深刻变革。人工智能作为新一代信息技术的代表，将成为未来战争的决定胜负的关键因素。因此，中国在军事方面发展人工智能航空，不仅是应对未来挑战的必要手段，更是推动中国军事现代化、全球军事战略格局变革的重要力量。通过人工智能技术的应用，中国可以实现对未来战争形态的预判和应对，提升在复杂战场环境下的作战能力和生存能力。同时，中国还可以通过人工智能航空的发展，推动全球军事航空领域的合作和交流，共同应对全球安全挑战，推动全球军事战略格局的变革。

### **2.2.2 政策环境与规划动向**

多年来，国家和政府高度重视人工智能民用航空的发展。2006年，国务院发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》(以下简称《纲要》)。《纲要》明确提出了信息技术发展的重点方向，包括智能技术、空天技术等，这为人工智能在民用航空领域的应用提供了宏观指导。

2012年7月8日，国务院以国发〔2012〕24号印发《国务院关于促进民航业发展的若干意见》，明确了促进民航业发展的总体要求、主要任务和政策措施。这是建国以来国务院发布的第一部指导民航业发展的重要文件。该意见提出了促进民航业发展的多项措施，包括加强基础设施建设、提升服务质量、推动科技创新等。这些措施为人工智

能在民用航空领域的应用提供了良好的政策环境和支持。

2017年7月8日，国务院印发并开始实施《新一代人工智能发展规划》(以下简称《规划》)。《规划》提出六个方面重点任务：一是构建开放协同的人工智能科技创新体系，从前沿基础理论、关键共性技术、创新平台、高端人才队伍等方面强化部署；二是培育高端高效的智能经济，发展人工智能新兴产业，推进产业智能化升级，打造人工智能创新高地；三是建设安全便捷的智能社会，发展高效智能服务，提高社会治理智能化水平，利用人工智能提升公共安全保障能力，促进社会交往的共享互信；四是加强人工智能领域军民融合，促进人工智能技术军民双向转化、军民创新资源共建共享；五是构建泛在安全高效的智能化基础设施体系，加强网络、大数据、高效能计算等基础设施的建设升级；六是前瞻布局重大科技项目，针对新一代人工智能特有的重大基础理论和共性关键技术瓶颈，加强整体统筹，形成以新一代人工智能重大科技项目为核心、统筹当前和未来研发任务布局的人工智能项目群。

随着人工智能的发展，其军事应用在战略安全、治理规则、道德伦理等方面可能产生深远影响和潜在风险。因此，2021年12月13日，中国在联合国《特定常规武器公约》第六次审议大会上提交了中国关于规范人工智能军事应用的立场文件》(以下简称《文件》)。《文件》聚焦于人工智能军事应用涉及的研发、部署、使用等重要环节，并就

如何在军事领域负责任地开发和利用人工智能技术提出了解决思路。

《文件》强调了人工智能技术的快速发展及其在军事应用中可能带来的潜在风险。提出了共同、综合、合作、可持续的全球安全观，主张通过对话与合作，寻求共识，构建有效的治理机制。此外，文件还强调了在战略安全、军事政策、法律伦理、技术安全、研发操作、风险管控等方面应采取的措施。

2024年1月1日，国务院、中央军委日前公布《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》(以下简称《条例》)。《条例》贯彻总体国家安全观，统筹发展和安全，坚持底线思维和系统观念，以维护航空安全、公共安全、国家安全为核心，以完善无人驾驶航空器监管规则为重点，对无人驾驶航空器从设计生产到运行使用进行全链条管理，着力构建科学、规范、高效的无人驾驶航空器飞行及相关活动管理制度体系，为防范化解无人驾驶航空器安全风险、助推相关产业持续健康发展提供有力法治保障。

2024年3月27日，工业和信息化部、科学技术部、财政部、中国民用航空局等四部门联合印发《通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)》(以下简称《方案》)。《方案》提出，到2027年，我国通用航空装备供给能力、产业创新能力显著提升，现代化通用航空基础支撑体系基本建立，高效融合产业生态初步形成，通用航空公共服务装备体系基本完善，以无人化、电动化、智能化为技术特征的新

型通用航空装备在城市空运、物流配送、应急救援等领域实现商业应用。创新能力显著提升。绿色化、智能化、新构型通用航空器研制创新居世界先进水平，形成一批通用航空领域产学研用联合实验室、科技创新中心及科技创新服务平台。通用航空法规标准体系和安全验证体系基本建立。示范应用成效明显。航空应急救援、物流配送实现规模化应用，城市空中交通实现商业运行，形成二十个以上可复制、可推广的典型应用示范，打造一批低空经济应用示范基地，形成一批品牌产品。产业链现代化水平大幅提升。打造十家以上具有生态主导力的通用航空产业链龙头企业，培育一批专精特新“小巨人”和制造业单项冠军企业，通用航空动力实现系列化发展，机载、任务系统及配套设备模块化、标准化产业配套能力显著增强。到2030年，以高端化、智能化、绿色化为特征的通用航空产业发展新模式基本建立，支撑和保障“短途运输+电动垂直起降”客运网络、“干-支-末”无人机配送网络、满足工农作业需求的低空生产作业网络安全高效运行，通用航空装备全面融入人民生产生活各领域，成为低空经济增长的强大推动力，形成万亿级市场规模。

### **2.2.3 重点领域应用进展**

#### **2.2.3.1 民用航空智能化应用现状**

改革开放以来，中国航空运输业得到了长足的进步和快速的发展，

已经成为世界上拥有航线网络最密集、机场数量最多的国家之一。

2024年5月31日，民航局发布《2023年民航行业发展统计公报》(以下简称《统计公报》)。《统计公报》显示，截至2023年年底，我国境内共有运输机场(不含香港、澳门和台湾地区)259个，比上年底净增5个；共有运输航空公司66家，与上年持平；民航运输飞机4270架，比上年底增加105架。2023年，全国民航运输机场完成旅客吞吐量12.60亿人次、货邮吞吐量1683.31万吨、起降架次1170.82万架次，比上年分别增长142.2%、15.8%、63.7%；年旅客吞吐量1000万人次(含)以上的运输机场38个、年货邮吞吐量1万吨以上的运输机场63个。深圳宝安国际机场三跑道扩建工程完工后，深圳机场将满足年旅客吞吐量8000万人次、货邮吞吐量260万吨的目标，将有效提升机场运行保障能力；海南三亚凤凰国际机场三期扩建后可保障年旅客吞吐量2000万至2500万人次。《统计公报》显示，2023年，民航行业运输生产安全有序稳健恢复，高质量发展取得新成效，各项生产运行数据较上年呈快速增长态势。但是，当前我国民航业仍然存在一些问题和挑战，如空域资源紧张、航班延误率较高、机场拥堵等。这些问题直接影响了旅客对于民航服务质量的评价，制约了民航业的进一步发展。科学技术是第一生产力。在当今快速变化的市场环境下，民航业必须紧跟时代潮流，通过大力推进科技创新，提高智慧化水平，满足人民日益增长的出行需求<sup>[17]</sup>。

当前人工智能创新已经成为民航业的鲜明特色，“智慧民航”是民航“十四五”期间的发展主线，可以说，数字与智慧化转型是民航业把握未来先机、赢得发展优势的关键一招。中国人工智能在民航的建设中体现出了四个发展亮点：第一个亮点是加强基础研究，尤其是加强对人工智能、物联网、云计算等前沿技术的研发与应用，抢占科技制高点。例如，我国自主研制的ARJ21飞机装配数字化智能化制造生产线，极大地提高了生产效率和产品质量；第二个亮点是无人驾驶设备成为新业态。无人驾驶技术的应用探索成为一个全新的应用场景。例如，大疆的T100农业无人机配备了激光雷达和人工智能算法，能够实时分析航拍环境并做出智能决策。激光雷达每秒可以捕捉30万个空间点云，有效提升对斜拉线、电线的识别率，同时人工算法可以自动识别障碍物并保存进地块信息，提升作业效率和安全性；第三个亮点是智慧机场的智能建造成为新的发展趋势。为推动智慧建造的有序发展，民航局发布了《推动民航智能建造与建筑工业化协同发展的行动方案》，明确未来的重点工作任务，围绕建筑信息模型技术(Building Information Modeling，简称BIM)领域正在针对分类与编码、设计、施工、运维四个部分的BIM标准征求行业意见，充分支持机场智慧建造技术的应用与发展；第四个亮点是民航智慧管理呈现新模式。近年来，民航正在从旅客服务、生产调度向智能运维、智能维养等应用场景不断拓展。以智慧为驱动的新型民航建设正在从航站楼飞行区向机场全

领域覆盖，从旅客服务、生产运行向机场全要素调整，从机场运营向规划设计全生命周期转变，智慧数字化转型正在逐步深层次融入民航的发展。

### **2.2.3.2 军用航空智能化应用现状**

随着全球军事变革的加速，人工智能技术在军事领域的应用日益广泛，成为提升军事实力的重要手段。中国作为世界大国之一，高度重视人工智能技术在军用航空领域的发展，旨在通过技术创新增强国防实力，维护国家安全利益，并在航空装备制造、空战态势感知与自主决策、飞行控制以及作战训练方面取得了重要进展。

为了促进人工智能在军用航空领域的发展和应用，中国的专家学者进行了大量的基础研究工作。文献<sup>[18]</sup>采用循环神经网络对飞行器非定常气动进行建模，相比与传统气动建模取得了更好的表征效果。文献<sup>[19]</sup>提出了基于自博弈深度强化学习的空战智能决策方法，根据飞行员领域知识合理设计观测、动作与奖励，通过“左右互搏”方式训练空战智能体至收敛，并通过仿真试验验证空战决策模型的有效性。文献<sup>[20]</sup>基于深度强化学习方法搭建了导弹突防场景的训练环境，并且设计了一种多样本协同训练方法，从而构建了一套导弹智能突防训练系统框架。基于这套框架智能体未来能够根据多传感器数据判断战场态势并快速做出决策，辅助新战术的开发。文献<sup>[21]</sup>利用深度神经网络辨

识宽域飞行器关键特征，实现控制增益的精准调度，提升对模型不确定性的自适应能力，并利用深度神经网络建立神经网络动力学对飞行动力学的映射表达，实现了“端对端”控制。

此外，华为公司与西北工业大学合作的流体力学仿真智能化大模型“秦岭·翱翔”，在开源流体计算软件“风雷”的基础上研发，能够对多尺度复杂湍流场实现更高精度求解，在典型翼型大迎角分离流动、典型翼身组合体跨声速扰流模拟上，做到了模拟精度、求解效率较传统模型提高数倍。中国的歼-20则通过先进的人工智能操控系统，能够在无人驾驶模式下完成各种高难度、大过载的机动飞行动作。这一技术的实现，使得歼-20在空战中能够做出超机动动作，快速占据有利攻击占位，对敌方战机形成压倒性的优势。同时，无人驾驶技术的应用也极大地减轻了飞行员的负担，提高了作战效能。而“彩虹T1”无人机则具有高度隐蔽性和强大攻击能力。该无人机通过利用地效原理和自主飞行控制技术，能够在低空高速飞行并执行反舰任务。同时，“彩虹T1”无人机还具备智能侦察和目标识别能力，能够实时获取战场信息并自主决策攻击方式。

## **2.2.4 面临的瓶颈及对策建议**

### **2.2.4.1 智能航空发展的瓶颈**

2022年初民航局印发《智慧民航建设路线图》，标志着我国智慧

民航建设从顶层设计走向了全面实施阶段。目前，人工智能技术在航空业应用非常广泛，涉及军用及民用航空的多个领域和环节。例如，基于人工智能技术设计的仿真软件直接参与飞行器的设计和制造；空战系统直接采用人工智能进行态势感知和决策；民航智慧出行中的“一脸通关”，即通过人脸识别为旅客出行提供便利；智慧机场中的人工智能可以实现机场飞行区地面保障资源的智能调度，有效提升机场运行效率及安全保障水平；智慧监管实现了行业数据汇聚共利，利用人工智能技术对数据进行分析，极大释放了数据要素的价值。尽管人工智能的发展已经取得了长足的进步，但在航空领域仍然面临以下几个问题。

一是人才培养与研发投入的不足的问题。中国人工智能航空的发展离不开专业人才和持续的研发投入。然而，当前我国在这两方面存在明显不足。首先，人工智能领域的高端人才短缺，尤其是既懂航空业务又精通人工智能技术的复合型人才。其次，研发投入相对不足，导致技术创新能力受限。许多企业在人工智能技术研发上的投入比例较低，难以支撑长期的技术创新和升级。这使得中国人工智能航空在某些关键技术领域与国际先进水平存在差距。

二是如何实现人工智能技术与航空需求场景对接的问题。以ChatGPT为例，其作为通用大模型已经拥有了非常优秀的对话能力，而一旦进入垂直领域，比如航班运行、旅客服务等领域，通用大模型

便难以发挥作用。如何实现领域与通用模型的适配，让大模型从“通常可用”变为“专业适配”是关键点，也是难点。

三是数据安全与隐私保护的挑战的问题。随着人工智能在航空领域的深入应用，数据安全和隐私保护问题日益凸显。一方面，航空企业需要收集大量旅客和运营数据以支持人工智能系统的运行，但如何确保这些数据的安全成为一大挑战。另一方面，隐私保护法规日益严格，如何在合规的前提下利用数据推动人工智能技术的发展，是航空企业必须面对的问题。目前，我国在数据安全与隐私保护方面的法律法规尚不完善，企业在这方面的自我约束和监管能力有待提高。

四是行业规范与标准化的缺失。当前，人工智能技术在航空领域的应用尚无统一的标准和规范，导致各企业在技术实施、数据接口、安全要求等方面存在差异。这种差异不仅增加了企业间的沟通成本，还可能影响整个行业的安全和效率。此外，行业规范的缺失使得监管部门在安全监管、市场准入等方面难以形成有效的约束，不利于人工智能航空的健康发展。

#### **2.2.4.2 智能航空发展的对策措施**

中国人工智能航空在基础研究、技术创新、产业应用方面虽然和发达国家存在着一定距离，但从“十四五”以来运行发展还是稳步进行的。各种人工智能航空技术应运而生，航空装备智能化水平日益提

高。面对前面所述的瓶颈，可以从四个方面应对。

一是培养人工智能航空复合型人才。复合型人才是人工智能航空生态建设的一项重要元素，需采取多维度对策措施。首先，推动高等教育改革，建立跨学科人才培养模式，融合航空学、计算机科学、控制理论等多领域知识，培养具备综合能力的复合型人才。其次，加大研发投入，支持高校和科研机构开展前沿技术研究，鼓励企业参与，形成产学研用协同创新机制。同时，强化实践教学，建设一批高水平的人工智能航空实验平台，提供学生实际操作和研发的机会。此外，完善人才激励机制，提高复合型人才待遇，吸引和留住人才。最后，加强国际合作与交流，引进国外优质教育资源，拓宽人才培养视野，提升国际竞争力。

二是建设人工智能与航空需求对接体系。首先，建立行业需求导向的研发机制，紧密跟踪航空领域的实际需求，确保人工智能技术研发与应用的紧密结合。其次，推动跨领域合作，鼓励人工智能专家与航空工程师协同工作，促进技术融合与创新。此外，加强顶层设计，制定有利于人工智能技术在航空领域应用的规划和政策，为技术对接提供政策支持。最后，构建技术验证和测试平台，为人工智能技术在航空领域的应用提供实验和验证环境，降低技术应用风险。

三是健全数据安全与隐私保护措施。首先，建立健全的数据安全法律法规体系，明确航空数据的安全标准和隐私保护要求，为数据保

护提供法律依据。其次，实施分类分级的数据管理策略，针对不同级别的航空数据采取相应的安全防护措施，确保敏感数据得到严格保护。同时，加强数据加密和访问控制技术的研究与应用，提升数据在存储、传输和处理过程中的安全性。此外，建立航空数据安全审计和监控机制，定期对数据安全状况进行评估和审计，及时发现并防范安全风险。再者，推动行业自律，引导企业加强内部数据安全管理和员工隐私保护意识培训，减少数据泄露和滥用风险。最后，加强国际合作，借鉴国际先进的数据安全保护经验，参与制定国际航空数据安全标准，提升我国在全球航空数据安全治理中的话语权。通过这些措施，可以有效应对人工智能航空数据安全与隐私保护的挑战，保障航空数据的安全和公民隐私权益。

四是加强人工智能航空规范与标准化管理。首先，政府应主导制定人工智能航空领域的专项法规和标准，明确技术应用的范围、安全性能指标和监管要求。其次，成立由政府、航空企业、科研机构 and 行业协会组成的联合工作组，共同研发和推广行业通用标准，确保技术应用的统一性和安全性。同时，强化对人工智能航空应用的伦理审查，确保技术发展符合社会主义核心价值观，保障乘客隐私和飞行安全。此外，建立健全航空企业内部的人工智能技术应用管理体系，加强对技术研发、部署和运营的全程监控。再者，加大对航空行业人才的培养力度，特别是人工智能与航空专业复合型人才，提升行业整体

的技术水平和规范意识。最后，积极参与国际航空领域的人工智能标准制定，推动国内外标准的互认和融合，提升我国在国际航空市场的竞争力。

## 第三章 智能航空技术情况

### 3.1 智能航空核心技术分析

智能航空是一种利用人工智能技术来优化航空行业业务的方法，它融合了现代信息技术、通信技术、自动控制技术、传感器技术等多种技术手段，实现了对航空领域的全面智能化管理。这一系统能够实时监测、智能调度和管理航空器、机场、航线、货物等要素，极大地提高了航空运输业的运营效率和服务质量。从2000年代初开始，智能航空技术经历了从航线规划、预测和优化的初步阶段，到利用大数据技术分析客户行为、预测需求和优化资源分配的加速发展阶段，再到如今利用人工智能大模型技术预测航班延误、优化航线规划、自动化客户服务等的高级智能化阶段<sup>[22-25]</sup>。

在智能航空（系统）中，大模型与服务是核心概念。大模型作为人工智能技术的核心，能够处理大规模的数据和复杂的任务，为智能航空提供了强大的计算能力和预测能力。服务层是大模型能力的落地载体。通过云计算平台将大模型封装为标准化的服务接口（将深度学习的预测结果无缝集成到航空公司的调度、安检及维修流程中，实现业务操作的智能化升级。此外，深度学习、推理引擎和优化算法等核心技术也发挥着重要作用。深度学习用于处理和分析海量数据，推理引擎将模型结果转化为业务操作，优化算法则用于优化航班延误、航

线规划、客户服务等方面的业务，共同推动智能航空（系统）的高效运行。

智能航空（系统）在航空领域的应用广泛且深入。它不仅能够实现航线规划的优化、航班延误的预测、客户服务的自动化等，还能通过智能辅助飞行员系统减轻飞行员工作负担，提高飞行安全性；通过大数据分析了解客户需求，提供个性化服务；通过空中交通管制现代化提高效率和安全性；通过预见性维护减少飞机停机时间，提高整体可靠性。展望未来，随着物联网、人工智能、区块链等新兴技术的不断发展，智能航空（系统）将更加智能化、网络化和安全化，与航空器制造、机场运营、物流服务等国内方面，中国在智能航空领域产业深度融合，形成完整的产业链条，推动航空行业向更高水平发展。

### **3.1.1 人工智能与机器学习技术**

人工智能与机器学习技术在智能航空领域的应用正逐步深化，显著提升了航空行业的智能化水平。在无人机技术方面，随着AI技术的不断进步，无人机的应用范围得到了显著扩大。无人机不仅广泛应用于航拍、农业、物流等领域，还逐渐渗透到复杂环境的巡检与搜救任务中。例如，通过集成高精度AI识别系统，无人机能够自主完成高压输电线巡检和森林防火监测，显著提升了作业效率和安全性。

在航空交通管理方面，人工智能的应用同样显著。传统的空中交通管理系统面临严峻挑战，而AI技术则通过自动驾驶飞机、航班路径

规划和空中交通拥堵管理等方面，提高了航空交通系统的安全性、效率和容量。智能航空交通系统不仅能够改善航班准点率，还能优化空中交通流量，减少碳排放和燃料消耗，实现环保节能的飞行。

国内方面，中国在智能航空领域的人工智能与机器学习技术应用上取得了显著成果。以中国商飞为例，在其C919等机型研发与运维中，积极探索大数据分析 with 故障预测技术。此外，中国民航局推动的智慧民航建设，显著提升了国内航空公司的运行效率。此外，中国还在积极推动智能航空交通系统的建设，致力于提升航空交通管理的智能化水平<sup>[26-28]</sup>。

国际方面，全球范围内的航空公司和航空发动机制造商也在积极探索AI技术的应用。罗罗公司成立数据实验室，与微软、塔塔咨询服务公司等展开横向合作，收集并分析发动机和零部件的制造数据以及飞行模式、天气、航线等使用数据，利用先进的数据分析和AI技术对发动机进行整体性能优化和预防性维护。GE公司则在全球建立了多个航空客户支援中心，通过采集、挖掘和分析商用航空发动机飞行数据，建立了基于大数据的预测式服务保障及智能决策模式。这些国际公司的实践表明，人工智能与机器学习技术已经成为推动智能航空发展的重要力量。

在具体应用层面，空客公司的Skywise平台是一个典型代表。该平台利用AI技术对航空器故障数据进行分析 and 处理，能够快速准确地

诊断出故障原因，并预测未来可能发生的故障，从而帮助航空公司提前进行维护，减少意外延误。此外，罗罗公司的数据实验室也值得一提。通过与多家企业合作，罗罗公司不仅收集了大量的发动机和零部件数据，还利用AI技术对这些数据进行深入分析，实现了对发动机性能的全面优化和预防性维护。这些具体的应用案例充分展示了人工智能与机器学习技术在智能航空领域的巨大潜力和价值。

### 3.1.2 物联网（IoT）技术

物联网（IoT）技术在智能航空领域的应用正日益广泛，显著提升了航空业的智能化水平。在航空货运方面，物联网技术通过传感器和RFID等识别技术，实现了对货物运输的实时监控，包括货物位置、温度、湿度等关键数据的采集，使物流系统管理更加精确和高效<sup>[29]</sup>。在航空维护领域，物联网技术能够检测航空器最小结构单元的状态，实现无线传输、联网诊断、智能化分析和预警，从而大幅提升飞机维护的效率和准确性，有效控制维护成本。此外，物联网技术还助力航空公司实时监控机场设备、航班动态和人员信息，确保航班运行安全，防范潜在风险。

在国内，物联网技术在智能航空领域的应用取得了显著进展。例如，中国民航局积极推进智慧民航建设，利用物联网技术提升机场设施的实时监测和调控能力，优化航班时刻表和资源调配，改善旅客出行体验。在具体产品应用上，国内航空公司纷纷引入物联网技术，如

通过部署IoT系统，实现飞机维修地面保障流程的全面监控和智能化管理，提高设备利用率和地勤作业效率。此外，一些国内企业还开发了基于物联网的智能航空物流系统，实现对航空货运的全程跟踪和管理，提升了货运效率和安全性。

国际上，物联网技术在智能航空领域的应用同样蓬勃发展。以空客公司为例，其Skywise平台利用物联网技术收集并分析飞机运营数据，为航空公司提供全面的飞机健康管理服务，实时监控飞机状态，预测潜在故障，提前进行维护，有效降低维护成本和停飞率。此外，罗罗公司也通过物联网技术实现了对发动机性能的全面优化和预防性维护，其数据实验室收集并分析发动机和零部件的制造数据以及飞行模式、天气、航线等使用数据，利用先进的数据分析和AI技术提升发动机性能。

物联网技术在智能航空领域的应用不断创新，为航空业带来新的机遇。例如，一些航空公司利用物联网技术实现了无人值守行李托运系统、自助值机设备和智能安检系统等创新应用，大幅缩短了旅客的等待时间，提升了出行效率。同时，物联网技术还在智慧空管、航空物流信息化等领域发挥重要作用，为智慧民航的建设提供了有力支撑。

随着物联网技术的不断进步和应用场景的拓展，其在智能航空领域的未来发展前景广阔。未来，物联网技术将进一步与人工智能、大数据等新技术融合，推动航空业的智能化转型。通过构建更加完善的

物联网生态系统，实现航空器、机场设施、航班动态等信息的全面互联和智能分析，提升航空运输的安全性、效率和旅客体验。同时，物联网技术还将在航空环保、节能减排等方面发挥重要作用，推动航空业的可持续发展。

## **3.2 智能航空技术典型应用场景**

随着深度学习、强化学习及大数据处理技术的突破，人工智能已成为推动航空业数字化转型的核心引擎。通过将AI算法深度集成于航空器的核心系统与地面保障流程中，智能航空系统在提升运行安全、优化资源配置及增强客户体验方面展现出巨大潜力<sup>[30-32]</sup>。

### **3.2.1 飞行控制与导航系统**

在智能航空系统中，人工智能在飞行控制与导航系统中的应用尤为关键。传统的飞行控制系统依赖飞行员的操作和判断，而人工智能技术的应用则使得飞行控制更加精准和高效。例如，通过集成先进的神经网络控制算法，飞行控制系统能够更精准地补偿非线性环境干扰，实时优化飞行姿态与轨迹，增强在极端气象条件下的飞行稳定性。同时，人工智能在导航系统也发挥着重要作用。人工智能通过辅助导航系统实时解算多源航线数据，实时分析航线和气象数据，动态规划最优路径，减少燃油消耗和飞行时间<sup>[33]</sup>。

### **3.2.2 航空器健康管理与维护**

航空器健康管理与维护是确保飞机安全运行的重要环节。人工智

能技术的应用使得航空器健康管理更加智能化和精准化。通过对飞机运行数据的实时监控和分析，AI系统能够预测飞机部件的磨损情况和潜在故障，提前进行维护和更换，避免意外事故的发生。例如，一些航空公司已经利用AI技术对飞机的发动机、起落架等关键部件进行健康监测和预测性维护，显著提高了飞机的运行效率和安全性。

### **3.2.3 飞行数据分析与决策支持**

飞行数据是评估航空器性能和飞行安全性的重要依据。人工智能在飞行数据分析中的应用，可以帮助航空公司和飞行管理机构快速识别潜在风险，并做出及时有效的决策。AI系统能够处理和分析海量的飞行数据，包括飞行轨迹、气象条件、飞机性能参数等，从中提取有用的信息，识别潜在运行风险，为飞行员及签派员提供冲突告警、气象规避及紧急方案建议，强化复杂工况下的态势感知能力。这不仅可以提高飞行的安全性，还可以优化航班计划，减少航班延误和取消。

### **3.2.4 客户服务与个性化体验**

在智能航空系统中，人工智能技术的应用也为客户提供了更加便捷和个性化的服务体验。AI技术可以用于处理乘客咨询、自动办理登机手续、提供个性化的旅行建议等<sup>[34]</sup>。一些航空公司已经推出了基于AI的智能客服机器人，能够根据乘客的问题和需求提供快速准确的回答和建议。此外，AI基于个性化推荐引擎，通过对多维用户画像的深度挖掘，实现动态定价、精准客舱服务及行李自动跟踪，构建全流程

的智慧化出行体验。

### 3.2.5 无人驾驶飞机与无人机

无人驾驶飞机和无人机是人工智能在智能航空系统中的重要应用领域。通过集成先进的传感器、计算机视觉和机器学习算法，无人驾驶飞机能够实现自主飞行、避障、目标跟踪等功能。这些技术不仅提高了无人机的飞行效率和安全性，还扩展了其在军事侦察、灾害监测、农业喷洒等领域的应用范围。此外，无人驾驶技术正从军事侦察领域向城市空中交通和末端智能物流快速渗透，推动了低空经济的规模化发展。

### 3.3 典型案例与实践分析

在智能航空系统的初步探索阶段，人工智能技术的应用主要集中在一些简单的自动化和数据分析任务上。例如，航空公司开始使用自动化系统进行航班预订和票务管理，减少人工干预，提高处理速度。同时，数据分析工具被用于分析旅客行为和市场趋势，为航空公司的决策提供数据支持。虽然这些应用相对简单，但它们为智能航空系统的发展奠定了基础。随着技术的不断进步和应用的深入，人工智能在智能航空系统中的应用进入了快速发展阶段。在这个阶段，AI技术被广泛应用于飞行控制与导航系统、航空器健康管理与维护、飞行数据分析与决策支持等多个领域。例如，通过深度学习算法，飞机能够自主学习飞行过程中的各种参数和条件，自动调整飞行姿态、速度和高

度；通过对飞机运行数据的实时监控和分析，AI系统能够预测飞机部件的磨损情况和潜在故障，提前进行维护和更换<sup>[35]</sup>。这些应用的成功实施，不仅提高了飞行的安全性和效率，还为航空业带来了巨大的经济效益和社会效益。

未来，随着人工智能技术的不断发展和应用场景的拓展，智能航空系统将实现全面应用阶段。在这个阶段，AI技术将渗透到航空业的各个环节，从飞行控制与导航、航空器健康管理与维护、飞行数据分析与决策支持到客户服务与个性化体验等各个方面都将得到广泛应用。同时，人工智能还将与其他新兴技术如物联网、大数据、云计算等相结合，形成更加智能化和高效化的航空系统。随着技术的不断进步和成本的降低，自动驾驶飞机有望在未来实现商业化应用。自动驾驶飞机将能够自主完成起飞、巡航、导航和着陆等任务，减轻机组工作负荷，提高飞行安全性和效率。例如，一些科技公司正在研发自动驾驶的空中出租车和城市空中交通系统，旨在解决城市交通拥堵和环境污染问题。未来，随着技术的不断成熟和法规的完善，自动驾驶飞机有望在商业航空和通用航空领域得到广泛应用。

在具体行业实践中，智能航空系统的应用演进经历了从早期的自动化票务管理，到当前大数据辅助决策，再到未来全流程智能化运行的跨越。阿拉斯加航空采用Flyways AI™平台，利用人工智能和机器学习优化航线，提高航空交通可预测性。调度员能够更快速、精确地

理数百万数据输入，预测未来情景，从而优化航线，减少飞行里程和燃料使用，降低成本并减少碳排放<sup>[36]</sup>。波音公司则利用AI进行飞机机身结构和材料优化，通过深度学习模型进行空气动力学分析，优化飞机机翼形状和重量分布。AI算法能够快速分析数百种设计方案，筛选出最优方案，大幅减少设计周期，并提高燃油效率。NASA开发的无人飞行器自主导航系统，利用计算机视觉和机器学习实现无人飞行器的自主导航和避障<sup>[37]</sup>。该系统能够实时分析飞行器周围环境，识别潜在障碍物，并自动调整飞行路线，显著提高了无人飞行器在复杂地形中的安全性。

此外，空客公司的Skywise平台通过大数据和AI算法对飞机传感器数据进行实时分析，识别潜在故障模式，预测关键部件的磨损情况。这有助于航空公司在故障发生前进行维修，降低维护成本并提升安全性<sup>[38]</sup>。GE航空发动机利用Virtually Perfect Engine (VPE)工具套装，在虚拟环境下实现发动机设计和制造的仿真，以及性能和可靠性测试。这有助于解决多样化和个性化需求，提高发动机的设计和制造效率<sup>[39]</sup>。这些案例展示了人工智能在航空领域的广泛应用和显著成果，从航线规划、飞行器设计到自动飞行控制、健康监控以及数字化制造，都体现了AI技术的巨大潜力和价值。通过提高飞行的安全性和效率，降低维护成本和人力成本，智能航空系统将帮助航空公司提高盈利能力。同时，通过提供更加便捷和个性化的服务体验，智能航空系统将提升

乘客的满意度和忠诚度，增强航空公司的品牌形象和市场竞争能力。

### 3.4 智能航空核心技术发展趋势

我国现有的智能航空系统体系框架和标准化体系是借鉴国际智能航空系统发展的经验，结合我国实际国情制定的。总体来说该体系框架和标准体系对引领我国智能航空系统的建设发展发挥了重要的积极作用。在智能航空领域，人工智能技术的深度融合与广泛应用成为了一大趋势。AI技术正逐步渗透到航空行业的各个环节，从飞行控制、航空物流到售后服务，都展现出了巨大的潜力和价值。例如，通过自动驾驶、自动着陆等技术的应用，AI能够显著提升飞行的精确性和安全性，减少人为错误。同时，在航空物流运输中，AI结合物联网技术和大数据分析，使得货物的追踪和监控更加高效，提高了整体运输效率<sup>[40-42]</sup>。此外，AI在航空售后服务中的应用也日益重要，通过智能设备的监测和维护，能够及时发现并解决飞机故障，确保航班的正常运营。

机载智能系统作为智能航空行业的核心组成部分，其功能增强与智能化升级同样不可忽视。随着无人机技术和AI技术的不断发展，机载智能系统已经能够实现更加复杂的任务，如图像识别、语音交互等。在飞行控制方面，机载智能系统不仅能够自动控制飞机的起降和飞行航线，还能通过对飞机各部件的实时监测和分析，提前发现潜在故障，降低事故发生率。此外，机载智能系统在航空物流运输中的应用也愈

发广泛，通过与地面物流系统的实时数据交换，实现了货物的精确追踪和高效管理。在智能航空行业的制造领域，数字化制造与增材技术的革新正引领着行业变革。数字化的智能工厂能够高效生产，快速实现设计和交付工作，大大提高了生产效率。同时，增材制造技术在航空航天领域的应用也日益广泛，它能够为制造商提供更强、更轻的替代零件，并快速开发零部件原型，缩短产品研发周期。

在我国，智慧民航的全面建设与发展也是智能航空行业的重要趋势之一。随着云计算、大数据、物联网等技术的不断进步和普及，智慧民航的建设正在加速推进。从智慧机场、智慧空管到智慧航司、智慧监管，各个环节都在积极探索和应用新技术，以提升民航运行的效率和安全性，改善旅客的出行体验。例如，通过大数据分析优化航班时刻表、资源调配和旅客服务，利用物联网技术实现机场设施的实时监测和调控，以及采用人工智能辅助决策系统提升航空安全监测与预警能力等，都是智慧民航建设的重要成果。同时，国家政策的积极推动和支持也为智慧民航的发展提供了有力保障。智能航空行业正迎来前所未有的技术革新与发展机遇。随着人工智能技术的深度融合，从飞行控制到航空物流，再到售后服务，AI正逐步重塑航空行业的每一个环节，提升效率、增强安全性并优化旅客体验<sup>[43]</sup>。

尽管人工智能在智能航空系统中的应用已经取得了显著成果，但仍存在一些不足之处。首先，人工智能系统的自主决策和应急处理能

力仍有待提高。目前的人工智能系统虽然在某些方面已经能够做出智能决策，但在面对复杂多变的环境和任务需求时，仍需要人类飞行员的辅助和干预。未来，随着技术的不断进步和应用场景的拓展，我们需要进一步提高人工智能系统的自主决策和应急处理能力，以实现更加全面和高效的智能航空系统。其次，数据隐私和网络安全问题也是人工智能在智能航空系统应用中需要关注的重要方面。航空器运行数据的敏感性和重要性要求我们必须加强对数据隐私和网络安全的保护，防止数据泄露和恶意攻击等事件的发生。随着深度学习、强化学习等技术的快速发展，人工智能算法的性能将不断提升，为智能航空系统提供更加精准和高效的解决方案。

未来，航空业将与计算机科学、电子工程、机械工程等多个领域进行深度合作，共同推动智能航空系统的发展。通过共享资源、交流经验和协同创新，各领域将共同推动智能航空系统技术的突破和应用场景的拓展，为航空业的未来发展注入新的活力和动力。随着人工智能在智能航空系统中的应用日益广泛，法规与标准的制定与完善将变得尤为重要。政府和相关机构将加强对智能航空系统的监管和管理，制定和完善相应的法规和标准，确保智能航空系统的安全性和可靠性。数字化制造与增材技术的革新，则推动了航空制造业的转型升级，提高了生产效率，降低了成本，并为开发更轻、更强的航空部件提供了可能。智能航空行业正步入一个快速发展的新时代，技术创新和智能

化升级将成为推动行业持续发展的关键力量,为我国乃至全球的航空事业注入新的活力。

## 第四章 智能航空重点领域分析

中国智能航空领域的发展受到了国家层面的高度重视。近年来，国家出台了一系列相关政策与文件，如《关于构建更加完善的要素市场化配置体制机制的意见》，将数据列为第五大生产要素，为智能航空的数据驱动发展提供了政策基础<sup>[44-46]</sup>。同时，智慧民航建设也被纳入国家发展战略，以推动高质量发展为主题，构建分层分级分类的评价指标体系，科学评价智慧民航建设进展和成效。在投资方面，虽然具体不同领域的投资额度数据未直接给出，但可以预见的是，随着国家对智能航空领域的持续投入和支持，该领域的投资规模正在不断扩大，实现情况也日趨向好，多个智能航空项目和技术研发取得了显著进展。当前，中国智能航空领域正呈现出蓬勃发展的态势。在技术应用方面，智能航空技术已经渗透到飞行控制、航空物流、售后服务等多个环节，显著提升了航空行业的效率 and 安全性。例如，通过自动驾驶、自动着陆等技术的应用，飞行过程变得更加精确和安全；物联网技术和大数据分析则使得货物的追踪和监控更加高效。同时，机载智能系统的功能也在不断增强，能够执行更加复杂多样的任务。此外，智慧民航的建设也在加速推进，从智慧机场、智慧空管到智慧航司、智慧监管，各个环节都在积极探索和应用新技术，以提升民航运行的效率 and 安全性，改善旅客的出行体验。中国智能航空主要从智能无人

系统自主能力的测试与评估、先进航空机载系统能量综合与智能管理、航空环境智能态势感知、跨速域大空域高超飞行器气动布局设计、先进飞行器智能控制理论与方法、低空飞行安全架构设计和数字化试验以及航空发动机智能设计与诊断等重点领域着手建设。

#### **4.1 智能无人系统自主能力测试与评估技术**

随着科技的飞速发展，智能无人系统已成为人工智能领域的核心研究方向，其通过集成机器人技术、自动化控制及多模态传感器，实现了在复杂环境中的自主认知、运动规划、自主决策和推理能力。智能无人系统的出现不仅极大地提高了作业效率，还显著降低了人为操作风险，为航空业带来了革命性的变革。特别是在智能航空系统领域，智能无人系统的应用推动了航空业的智能化进程，使无人机能够在动态且不确定的环境中执行侦察、监测、运输等复杂任务。然而，智能无人系统在赋予航空器高度自主性的同时，也带来了算法不可解释性与行为非确定性等安全挑战。因此，智能无人系统自主能力的测试与评估已成为行业关注的焦点，其核心逻辑在于通过科学的量化手段，验证系统在不同自主等级（Levels of Autonomy）下，是否具备在各种复杂工况中稳定、可靠运行的能力。

针对智能无人系统的全面评估，必须涵盖感知、规划、决策与执行等多个核心维度。在感知能力评估方面，重点考察系统能否在强干扰、低对比度等极端环境下，准确获取周围的位置、速度及障碍物信

息，以确保飞行的态势感知精度。在规划能力评估方面，系统需展现出根据实时感知信息动态调整飞行路径的能力，以实现任务效能与能耗的最优平衡。决策能力评估则是测试评估中的难点，要求系统在面对突发特情或边缘工况（Corner Cases）时，能够迅速做出符合安全逻辑的判断，确保任务不因环境突变而中断。执行能力评估则聚焦于底层控制的鲁棒性，确保无人机在执行复杂动作时具备极高的姿态控制精度。为了使这些评估指标具有实际意义，行业内正逐步建立统一的自主能力分级标准，通过测试系统在不同任务复杂度下的“脱离率”（即人工干预频率）来客观评价其智能化水平。

智能无人系统自主能力的测试需求深度源于其广泛的应用场景。在军事领域，无人机被要求在强对抗环境下执行目标跟踪与情报收集任务，这要求测试评估必须模拟复杂的电磁干扰与动态威胁，以验证其生存能力与任务可靠性。在民用领域，如航拍测绘、农业植保及物流配送等场景，对自主能力的评估则侧重于作业精度与公共安全<sup>[47]</sup>。例如，在农业植保测试中，需评估无人机在复杂地形下的精准施肥与避障能力，以减少资源浪费；在物流配送测试中，则需验证其在城市建筑群“峡谷”环境下的路径规划精度与应急降落安全性。这些多样化的应用场景不仅是智能无人系统的舞台，更是对其自主能力进行极限压力测试的天然试验场。通过对这些具体场景的模拟与验证，可以为无人机在实际应用中的稳定性提供有力保障，推动智能航空系统向

全自动驾驶与智能空中交通管理方向迈进。

为了规范并推动智能无人系统测试评估技术的发展，我国政府出台了一系列关键政策文件。例如，《“十四五”民用航空发展规划》明确提出要提升民航智慧化水平，围绕智慧监管等运行场景加强技术研发应用，其中智能无人系统的自主性验证被列为核心任务。此外，《智慧民航建设路线图》等文件也强调了建立完善的无人系统评价体系对于提升民航运行效率和安全性的作用<sup>[48-50]</sup>。在政策的引导下，传统的实地试飞测试方法正因成本高、风险大、覆盖率低等局限性，逐步向基于大数据与数字孪生（Digital Twin）技术的虚实结合测试方法演进。这种新型测试模式通过构建高保真度的数字化模拟环境，能够实现海量极端场景的自动化遍历，从而在虚拟空间内完成对人工智能算法的深度“体检”，极大地提高了测试的准确性与效率。

展望未来，智能无人系统自主能力的测试与评估将呈现出专业化、标准化与智能化的发展趋势。随着应用领域的不断拓展，行业将涌现出更多专业化的第三方测试与评估机构，提供从算法仿真到实机验证的一站式服务。同时，测试标准将进一步细化，涵盖安全性、高效性、智能性等多个维度，以规范测试流程并提高结果的可信度。跨领域融合也将成为主流，航空技术将与机器人、自动化控制、传感器技术深度协同，推动智能无人系统技术的全面进步。此外，随着深度学习、机器视觉及自然语言处理技术的不断突破，未来的测试评估将更加注

重对系统“认知进化”能力的考察，即评估无人机在长期运行中通过自我学习提升任务执行效率的能力。这些技术的持续创新与评估体系的不断完善，将为智能航空系统的快速发展注入新的动力，开启航空业智能化发展的新篇章。

## 4.2 先进航空机载系统能量综合与智能管理

随着航空工业的飞速发展，机载系统作为飞机的核心大脑与动力脉络，其性能直接决定了飞行器的整体效能与运营成本。近年来，先进航空机载系统能量综合与智能管理已成为多电飞机趋势下的核心研究方向。该领域通过深度融合高精度感知网络、多目标优化算法及高效电力电子技术，实现了对机载能源流的高效调度，在显著提升燃油效率、降低运行损耗的同时，极大增强了飞机的系统安全性与任务可靠性。当前，该领域已取得突破性进展：一方面，数字化传感与自适应控制技术的演进为能量流的实时监测与动态平衡提供了底层支撑。例如，高可靠性传感器阵列可实时解算飞行高度、速度、热载荷及压力等多元参数，为能量管理中心提供毫秒级的决策依据<sup>[51]</sup>。同时，智能控制律能根据实时工况对机载功率分配进行毫秒级优化，从而压榨每一克燃油的做功潜力。另一方面，新型能源转换架构的突破也开辟了高效利用的新路径，通过集成宽禁带半导体功率器件与高能密度储能单元，机载系统实现了能量的高效变换与按需存储，进一步夯实了飞机的能源利用基石。

为了驱动先进航空机载系统能量综合与智能管理领域的跨越式发展，我国政府出台了一系列顶层设计文件。例如，《中国制造2025》明确将航空航天装备列为重点突破领域，强调要攻克机载系统关键集成技术。此外，《“十四五”民用航空发展规划》也重点部署了机载能量综合管理技术的研发任务，旨在通过智能化手段提升国产大飞机的核心竞争力。这些政策的密集出台，为该领域从实验室研究向产业化落地提供了坚实的制度保障与资源倾斜。

在政策红利的引导下，先进航空机载系统能量综合与智能管理领域的资本活跃度持续走高。据行业数据显示，2019年至2023年间，该领域的投资金额复合增长率高达38.4%。其中，2020年投融资市场表现尤为亮眼，事件数量激增至63起，涉及金额大幅跃升至603.73亿元。至2023年，投资事件增长至92起，金额达450.76亿元。尽管2024年上半年受宏观环境影响，投资金额暂时回落至78.29亿元，但从1月至10月的累计数据看，投融资事件已达102起，金额回升至124.09亿元，双双刷新2019年以来的历史纪录。这表明资本市场对机载能量管理技术的长期价值高度认可。从产业估值看，中国航空航天市场在2017年已达610亿美元，位居全球第三，预计未来十年内规模有望超越法国跃升至全球第二。这一宏观趋势为能量综合管理技术的深度应用提供了极为广阔的市场腹地<sup>[52]</sup>。

在民用航空实践中，能量综合管理系统已成为新一代支线与干线

客机的标配。例如，波音787“梦想飞机”采用了革命性的“无引气”电力架构，通过对机载能量流的智能监控与按需分配，显著降低了发动机功率损耗，实现了燃油效率的跨代提升。在军事航空领域，该技术的战略价值同样凸显。通过集成高功率密度转换模块与智能热管理算法，现代隐身战斗机能够精准调控雷达、电子战系统与动力装置间的能量分配，在保障极端机动性能的同时，大幅提升了任务载荷的持续作业能力。

智能航空系统作为未来航空业的终极形态，其自主导航、自主决策等高级功能的实现，本质上依赖于底层能量流的稳定支撑。先进航空机载系统能量综合与智能管理正是连接“智能算法”与“物理执行”的关键纽带。例如，在自主导航过程中，系统通过实时评估能源剩余量与任务优先级，动态调整作动器与传感器的功率输出，确保了复杂环境下的飞行稳定性；在自主决策环节，通过对全机能源状态的全局分析，系统能制定出最优的能量消耗策略，从而在保障安全的前提下最大化航程。

展望未来，先进航空机载系统能量综合与智能管理领域将迎来更深层的变革。随着航空器性能需求的极限化，对能量管理的精细度要求将达到前所未有的高度。一方面，随着固态电池、超导电机等前沿能源技术的成熟，机载能量管理的维度将从单一电能扩展到复杂的电-热-功多场耦合。例如，通过集成更高集成度的功率模块，可以实

现能量流的无损传输；通过引入数字孪生技术，可以实现对系统寿命的精准预测。另一方面，能量管理将与飞行控制系统深度融合，形成“感知-决策-执行-反馈”的闭环智能体，为智能航空系统的全自主运行提供不竭动力。

此外，在全球“碳中和”愿景下，航空工业正面临严峻的环保挑战。通过深耕先进航空机载系统能量综合与智能管理技术，可以从源头上减少能源浪费，为绿色航空贡献核心方案。例如，通过优化辅助动力装置的运行逻辑，可以显著降低地面等待期间的碳排放；通过引入氢燃料电池等清洁能源，可以进一步摆脱对化石燃料的依赖，提升能源结构的多元化与安全性。这不仅是技术层面的升级，更是航空工业履行社会责任、实现可持续发展的必由之路。

综上所述，先进航空机载系统能量综合与智能管理不仅是提升飞机燃油效率与可靠性的技术手段，更是支撑智能航空系统迈向更高层级的核心基石。随着技术边界的不断拓展与应用场景的日益丰富，该领域展现出极其灿烂的发展前景。未来，我们应持续聚焦关键核心技术的攻关，强化产学研用深度融合，推动机载能量管理技术向更高集成度、更强智能化方向演进，为中国从航空大国迈向航空强国提供坚实的能源技术保障。

### **4.3 航空环境智能态势感知技术**

航空环境智能态势感知技术作为现代航空体系的核心组成部分，

对于强化航空器在极端与复杂工况下的适应能力及本质安全具有里程碑意义。该技术通过深度集成新一代感知阵列、多模态数据处理算法及人工智能决策模型，实现了对飞行环境信息的全维度采集、实时解算与深度分析，从而为航空器的自主飞行决策提供高精度、全时域的态势支撑。随着全球航空工业的数字化转型，传统感知手段如单一雷达或红外探测在面对复杂电磁环境、低能见度气象及城市密集建筑群时，其感知边界与鲁棒性已显露瓶颈，难以满足现代航空器对全天候、全方位态势感知的严苛要求。因此，航空环境智能态势感知技术应运而生，它不仅弥补了传统传感器的物理缺陷，更通过算法赋能实现了从“被动探测”向“主动认知”的跨越式演进。

我国航空环境智能态势感知技术的研究虽起步较晚，但凭借近年来在微电子与人工智能领域的爆发式增长，已取得了令世界瞩目的阶段性成果。在硬件层，我国已成功研制并量产了包括固态激光雷达、高分辨率毫米波雷达及多光谱红外成像仪在内的多种高性能传感器，这些设备具备极高的空间分辨率与抗干扰特性，为态势感知提供了可靠的底层数据源。在算法层，国内科研团队在深度学习、强化学习及跨模态图像识别领域深耕多年，研发出的先进算法能对海量环境数据进行毫秒级融合处理，精准提取关键态势特征。在系统集成层，自然语言处理与计算机视觉技术的融合应用，使得航空器具备了类人的环境理解能力，为智能决策提供了更加人性化与智能化的逻辑支撑。

为了驱动航空环境智能态势感知技术的产业化进程，我国政府构建了完善的政策保障体系，为该领域的技术攻关与应用落地提供了强力背书。《中国制造2025》明确将航空航天装备列为战略重点，强调必须突破环境感知等核心瓶颈技术；《“十四五”民用航空发展规划》则进一步细化了智能感知与自主决策技术的研发路径，旨在全面提升民航运行的安全性与空域利用率；《智慧民航建设路线图》更是将智能态势感知系统作为智慧空管与智慧机场建设的基石，为其在民航全产业链的深度渗透提供了明确的行动指南。

在政策与市场的双重驱动下，航空环境智能态势感知领域的资本活跃度持续攀升。据权威数据显示，2019年至2023年间，该领域的投资金额复合增长率高达35.7%。其中，2020年成为行业爆发元年，投融资事件激增至58起，涉及金额跃升至487.2亿元。至2023年，投资热度持续高涨，事件数量达89起，金额稳定在420.5亿元。尽管2024年上半年受宏观周期影响，投资金额暂时回落至68.9亿元，但从1月至10月的累计数据看，投融资事件已达102起，金额回升至124.09亿元，双双刷新2019年以来的历史纪录<sup>[53]</sup>。这充分表明，资本市场对态势感知技术在智能航空领域的长期战略价值持有坚定信心。

展望未来，随着航空器性能需求的极限化与低空经济的兴起，航空环境智能态势感知技术展现出极为广阔的应用前景。一方面，随着固态传感器与边缘计算芯片的迭代，感知的精度与实时性将实现质的

飞跃，为飞行决策提供近乎零延迟的态势支撑。另一方面，随着航空领域对智能化、自主化需求的爆发，该技术将从传统民航向无人机集群、高超声速飞行器及城市空中交通等新兴领域全面渗透，构建起“空天一体”的智能感知网络。

在智能航空系统的实际运行中，态势感知技术通过多维智能化手段发挥着不可替代的作用。首先，高精度传感器技术通过集成激光雷达与毫米波雷达，构建了航空器周围的实时三维点云地图，确保了在复杂地形下的避障精度。其次，先进数据处理算法利用深度神经网络对气象云图与障碍物轨迹进行预测分析，为路径规划提供前瞻性依据。最后，人工智能技术通过计算机视觉实现对跑道环境、空中交通流的智能识别，并结合智能决策模型实现飞行路径的自主优化与冲突解脱，从而极大地减轻了飞行员的认知负荷<sup>[54-56]</sup>。

从技术架构来看，航空环境智能态势感知可根据不同维度进行科学分类。按感知对象划分，气象环境感知侧重于风速、温湿度及湍流的实时监测，为飞行平稳性提供保障；障碍物感知聚焦于动态与静态目标的识别与定位，确保飞行安全边界；地形地貌感知则通过数字地图匹配，为低空飞行提供地形参考。按感知方式划分，主动感知技术利用雷达发射信号并接收回波，具备极强的测距能力；被动感知技术通过接收自然光或红外辐射，具备极佳的隐蔽性与环境适应性；融合感知技术则是未来的主流方向，通过多源数据的交叉验证与互补，彻

底解决了单一传感器在极端环境下的失效问题，显著提升了态势感知的可靠性与准确性。

综上所述，航空环境智能态势感知技术不仅是现代航空技术的核心支柱，更是提升航空器复杂环境生存能力的关键。我国在该领域的持续投入与技术突破，已为其在全球航空智能化竞争中赢得了先机。未来，随着技术边界的不断拓展与产业规模的持续扩大，智能态势感知将引领航空工业迈向更加安全、高效与自主的新纪元。

#### **4.4 跨速域大空域高超飞行器气动布局设计**

跨速域大空域高超飞行器作为现代航空科技皇冠上的明珠，其气动布局设计方法与技术的研究不仅是突破飞行速度极限的关键，更是推动航空工业实现跨越式发展的里程碑式工程。高超飞行器通常指飞行速度超过5倍声速（Mach 5）的航空器，其核心优势在于能够在亚音速、跨声速、超声速直至极高声速的宽广速度范围内，以及从海平面到近空间的超大空域内实现高效飞行。这种全速域、全空域的覆盖能力，赋予了飞行器前所未有的战略威慑力与任务灵活性，使其成为提升国家综合空天实力、拓展战略应用边界的核心载体。随着全球航空技术的快速演进，现代战争与民用运输对飞行器的多任务适应性、生存能力及响应速度提出了近乎苛刻的要求。高超飞行器凭借其“快、准、狠”的响应特性和极强的突防能力，已无可争议地成为大国博弈的技术高地。然而，这种极致性能的背后是极端严峻的科学挑战。在

跨速域飞行过程中，飞行器必须经历从连续流到稀薄流、从低速空气动力学到高温真实气体效应的剧烈转变。如何在亚跨声速阶段保持足够的升力以确保起降安全，同时在高超声速阶段降低激波阻力并应对极端的气动热环境，是当前气动布局设计中亟待攻克的核心矛盾。因此，跨速域大空域高超飞行器气动布局设计方法的研究，已成为航空科技领域最前沿、最复杂的课题之一。

深入分析当前的研究现状，我国在跨速域大空域高超飞行器气动布局领域已取得了举世瞩目的显著进展，形成了从基础理论到工程应用的完整链条。在理论探索层面，科研人员针对高超声速下的激波/边界层干扰、气动加热及化学反应流等关键物理现象，提出了多种极具创新性的气动布局方案。其中，乘波体布局是目前最受关注的方向之一，其核心原理是通过精确设计飞行器前缘形状，使其在高超声速飞行时产生的激波附着在前缘上，从而将高压气体“捕获”在机身下方，产生巨大的升力并显著提升升阻比。此外，为了兼顾不同速域的性能，变体布局技术也取得了突破性进展。这种布局能够根据飞行马赫数的变化，通过机械结构调整机翼后掠角、展弦比或机身形状，从而在低速时获得高升力，在高速时实现低阻力。这些方案通过精细化的多目标外形优化设计，初步解决了宽带速域与全空域性能平衡的难题。在实验验证方面，我国依托高超声速风洞群（如JF-12激波风洞）和高性能并行计算平台，利用先进的数值模拟手段对飞行器的非线性气动特

性进行了深度解构，有力验证了复杂布局在极端工况下的可靠性。同时，随着先进增材制造（3D打印）技术在难熔金属与复合材料加工中的应用，以及超高温结构材料的突破，高超飞行器的气动布局设计展现出更多可能性，如集成嵌入式智能控制系统与主动冷却结构，为未来的工程化应用奠定了坚实的物理基础。

为了驱动这一前沿技术的深度研发与产业化落地，我国政府构建了严密的顶层政策矩阵，为高超飞行器的研制提供了强有力的战略支撑。《“十四五”民用航空发展规划》明确提出，要强化航空科技创新能力建设，重点推动航空器气动布局、高推重比发动机等前沿关键技术的突破。此外，《“十四五”国家战略性新兴产业发展规划》也将高超飞行器列为高端装备制造业的重点发展方向，强调要通过自主创新提升我国在近空间开发与利用领域的整体水平。这些政策的密集发布，不仅为科研机构提供了明确的战略导向，也为相关产业链的资源整合提供了充足的资金与政策保障。在政策红利的持续引导下，跨速域大空域高超飞行器气动布局设计领域的资本投入呈现出爆发式增长态势。据行业数据显示，2019年至2023年间，该领域的投资金额复合增长率达到32.1%。其中，2020年成为行业发展的关键转折点，投资活跃度显著提升，事件数量增加至49起，涉及金额达到398.5亿元。至2023年，投资规模进一步扩大，事件数量达到81起，金额稳定在380.2亿元。尽管2024年上半年受宏观经济周期与行业阶段性调整影

响，投资金额暂时回落至60.5亿元<sup>[57]</sup>，但从1月至10月的累计数据看，投融资事件已达98起，金额回升至115.4亿元，双双刷新2019年以来的历史纪录。这表明资本市场对高超飞行器技术的长期战略价值与商业潜力持有坚定信心。从产业估值看，中国航空航天市场估值近年来持续攀升，据预测2025全年将突破1万亿元人民币，高超飞行器等高端装备将成为核心增长引擎，进一步凸显了气动布局设计技术的巨大市场价值。

目前，我国跨速域大空域高超飞行器气动布局设计技术的产业化应用虽仍处于从实验室向工程化过渡的起步阶段，但普及状况正在随着科研成果的加速转化而逐步改善。在军事领域，高超飞行器已成为提升远程精确打击、快速全球反应及突破现役反导系统能力的关键手段。通过采用先进的乘波体或翼身融合布局，显著增强了导弹或无人机的突防效能与生存概率。在民用领域，该技术在超高速远程运输、低成本空间探索及卫星快速部署等方面展现出广阔前景。例如，“全球一小时通达”的民用高超声速客机概念，正吸引着大量科研力量进行气动与环保性能的权衡研究。随着技术成熟度的提升与制造成本的降低，跨速域大空域高超飞行器气动布局设计方法有望在更多商业化场景中得到推广，构建起全新的空天交通体系，彻底改变人类的出行与物流模式。

跨速域大空域高超飞行器气动布局设计与智能航空系统之间存

在着深度耦合、互为支撑的逻辑关系。一方面，智能航空系统的演进为气动布局设计提供了强大的数字化支撑。通过集成高精度传感器网络与智能控制算法，系统能够实现对高超飞行器在极端环境下复杂飞行状态的实时监测与自主补偿。例如，在遭遇强气动加热导致的结构变形时，智能控制系统可以实时调整控制面，补偿气动特性的改变，这为气动布局的优化提供了精准的实验反馈与验证平台。另一方面，气动布局设计的突破也为智能航空系统的稳定运行提供了物理保障。通过优化外形设计提升飞行器的气动稳定性和操纵性，确保了智能控制指令在高温、高压、高动态的极端飞行环境下的高效执行。两者相辅相成，共同推动了航空器向着“感知-决策-执行”一体化的更高层级智能化迈进。

以国际公认的技术标杆美国X-51A“乘波者”高超音速飞行器为例，该机型采用了典型的乘波体气动布局设计，充分展示了气动布局与动力系统集成的重要性。乘波体布局通过捕获前缘激波产生的压力，在高超音速飞行时产生强烈的激波压缩效应，从而显著提升了飞行器的升阻比与纵向稳定性。X-51A在多次高风险试飞中成功实现了长时间的高超音速巡航，最高速度达到Mach 5.1，充分验证了乘波体布局在极端工况下的有效性。此外，该飞行器集成的先进全权限数字控制系统与超燃冲压发动机推进系统，实现了对复杂飞行状态的闭环自主控制<sup>[58]</sup>。这为我国开展跨速域大空域高超飞行器气动布局设计的研究

提供了极具价值的工程参考。通过学习其在激波捕获、热防护系统集成及气动/推进一体化设计方面的经验，我国科研团队能够更有效地规避技术风险，加速自主知识产权技术的迭代。

展望未来，跨速域大空域高超飞行器气动布局设计领域将呈现出多维度的技术演进趋势。首先是技术创新与深度融合，未来设计将更加依赖于人工智能、数字孪生与多学科拓扑优化技术的结合。通过AI算法在数百万种设计组合中寻找最优解，实现对飞行状态的智能感知与气动外形的自适应调整。同时，引入新型超高温陶瓷基复合材料与一体化增材制造工艺，将进一步优化结构效率，降低飞行器自重。其次是应用场景的全面拓展，高超飞行器将从单一的军事威慑手段向全球快速民航运输、常态化空间往返及近空间科学实验等民用领域延伸。再次是国际合作与标准的建立，随着技术的普及，参与国际近空间飞行标准规范的制定将成为提升我国话语权的关键。最后是产业规模的持续扩大，随着产业链的日趋完善，该领域将形成从研发设计、材料供应到生产制造的完整生态系统，为推动我国航空科技产业的跨越式发展做出核心贡献。

综上所述，跨速域大空域高超飞行器气动布局设计方法与技术是现代航空科技皇冠上的明珠，其研究深度直接决定了人类征服近空间的能力。通过持续优化飞行器的气动外形、热防护系统与智能控制逻辑，不仅能显著提升其飞行性能与环境适应性，更为智能航空系统的

全自主运行提供了坚实的物理载体。在全球航空工业面临数字化与高超声速化双重变革的今天，我国在该领域的持续投入与突破，必将引领人类航空事业迈向近空间与高超音速的新时代，开启空天一体化探索的新篇章。

#### 4.5 先进飞行器智能控制理论与方法

随着全球航空航天科技的跨越式进步，现代飞行器的设计理念正经历着从“平台为中心”向“智能为中心”的深刻变革。当代飞行器，无论是高超音速飞行器、跨介质飞行器还是大规模无人机集群，其气动布局日益趋向极端化与复杂化，呈现出强非线性、高度耦合、时变性剧烈以及模型不确定性等显著特征。传统的基于小扰动线性化假设的经典控制理论，在面对这些极端工况和全自主运行的严苛要求时，已显现出难以逾越的局限性。在强动态干扰、传感器信息受损或执行机构部分失效的复杂环境下，如何保障飞行器的高精度轨迹跟踪与高可靠性姿态稳定，已成为制约新一代航空装备发展的瓶颈。因此，智能控制理论与方法作为解决复杂系统控制难题的核心钥匙，已无可争议地成为先进飞行器控制领域的研究热点与战略高地。该领域通过深度融合多源感知技术、非线性处理算法、启发式人工智能以及现代控制理论，实现了对飞行器状态的实时精细化监测、自主逻辑决策及多目标优化控制，为飞行器在极端工况下的稳定飞行与复杂任务的高效执行奠定了坚实的理论与技术基础。

深入剖析当前的研究现状，先进飞行器智能控制领域已在感知、算法与交互三个维度取得了突破性进展。在感知层，随着微机电系统与光电集成技术的成熟，具备高精度、高抗干扰能力且能够感知多物理场的传感器阵列已广泛应用于飞行器的姿态解算、导航定位及环境建模。这些传感器不仅能提供基础的运动学参数，还能通过多源信息融合技术，在GPS信号缺失或电磁环境恶劣的工况下，利用视觉里程计、激光雷达SLAM及惯性导航的深度耦合，为控制系统提供连续、可靠且具备语义信息的底层数据源。在算法层，以深度学习、强化学习及进化计算为代表的前沿架构，实现了对海量飞行数据的快速特征提取与模式识别。特别是深度强化学习的应用，使得飞行器能够通过环境的持续交互，自主学习最优控制策略，从而在无需精确数学模型的前提下，解决高度复杂的非线性控制问题，为自主决策提供了强大的算力支撑与逻辑保障。在交互层，自然语言处理与计算机视觉技术正加速融入飞行管理系统，显著提升了人机协同的智能化维度。通过意图识别与态势共享，飞行器能够理解人类驾驶员的高层指令，并在复杂任务中实现“人机回路”的无缝切换，极大地增强了系统在不可预测环境下的鲁棒性。目前，这些理论方法已在无人机全自主作业、载人航天器精密对接、深空探测器自主着陆及高超音速飞行器动态包线控制等领域得到广泛验证，显著增强了航空器的任务安全性与环境适应性。

为了驱动先进飞行器智能控制理论的深度研发与产业化落地，我国政府从国家战略高度构建了全方位、多层次的政策保障体系。在国家层面，《“十四五”民用航空发展规划》明确提出要强化航空器自主飞行控制、智能感知与避障等关键核心技术的攻关，旨在全面提升国产航空器的智能化水平与国际竞争力，确保在未来航空产业链中的核心地位。《“十四五”国家战略性新兴产业发展规划》则强调要加速智能无人系统、通用航空装备等高端装备的研制，推动人工智能与航空制造业的深度融合。地方政府也积极响应国家号召，结合自身产业优势出台了极具针对性的行动计划。例如，上海市发布的未来产业创新高地行动方案，重点部署了倾转旋翼飞行器、复合翼无人机及智能飞行控制系统的技术突破，旨在研制高性能载人电动垂直起降飞行器（eVTOL），探索城市空中交通的新模式。合肥市则通过低空经济发展行动计划，依托其强大的科研资源，打造集聚eVTOL、工业级无人机龙头企业的总部基地，构建从研发、生产到测试的全产业链生态。这些顶层设计不仅为智能控制理论的研究提供了充足的资源倾斜与政策红利，更通过设立低空开放试点、建设数字化试验场等手段，为相关技术的快速迭代与工程化应用提供了丰富的应用场景<sup>[59]</sup>。

先进飞行器智能控制的核心在于控制算法的创新设计与工程应用，其本质是实现从“感知”到“动作”的高效、精准映射。PID控制算法作为工业控制的基石，凭借其结构简单、不依赖模型及鲁棒性

强的特点，在无人机飞控系统中占据着统治地位。通过比例、积分、微分三个参数的动态调节，PID算法能够实现对飞行器姿态的基础精确控制，确保其在各种外部气流干扰和内部参数漂移的情况下，仍能维持预定的飞行姿态与航迹。然而，面对高度非线性的系统，传统的固定参数PID往往难以达到最优效果，因此，结合模糊逻辑或神经网络的自适应PID技术正成为新的研究方向。模糊逻辑控制则擅长处理难以建立精确数学模型的复杂系统，它受人类模糊思维的启发，通过模糊化处理输入变量，利用专家规则库进行启发式推理，最后进行解模糊化输出。在无人机飞行控制中，模糊逻辑控制常用于处理非线性、时变或具备高度不确定性的动态航空环境，能够表现出优于传统线性控制器的环境适应能力。

神经网络控制则代表了智能控制的更高阶段，它受人脑神经网络工作原理的启发，通过构建多层非线性映射关系，具备极强的自学习与自适应能力。神经网络可以实现在线对飞行器动力学特性的实时建模，并根据环境反馈自动修正控制律，从而实现高度自治。在复杂的无人机集群协同或未知环境探索任务中，神经网络控制能够学习复杂的控制逻辑，处理传统方法难以描述的非线性约束。与此同时，卡尔曼滤波算法作为一种最优递推估计准则，在飞行控制系统中扮演着“信息过滤器”的关键角色。它以最小均方误差为估计准则，通过对传感器数据的实时处理，能够从带有噪声的观测值中精确解算飞行器

的位置、速度与姿态。特别是在GPS信号受限或受到电子干扰的极端环境下，扩展卡尔曼滤波与无迹卡尔曼滤波能够融合惯导与视觉信息，为智能控制提供高频、准确的状态反馈。此外，自适应控制算法则能根据飞行环境的变化（如空气密度改变、负载增减）实时修正控制参数，使系统始终运行在最优状态。相比于传统的固定增益控制，自适应控制极大地提升了飞行器在多变场景下的控制精度与运行稳定性，是实现长航时、跨环境飞行的核心技术。

展望未来，先进飞行器智能控制理论与方法将呈现出深度融合、跨域协同与绿色自主的发展趋势。在技术创新方面，研究将更加注重“感知-认知-控制”的一体化设计。未来的控制系统将不再仅仅是被动地响应传感器数据，而是具备类人的认知智能，能够通过引入知识图谱与因果推理，理解飞行任务背后的逻辑。同时，随着材料科学的进步，智能控制将与“智能皮肤”及柔性结构相结合，通过感知机身表面的压力分布，实现对气动布局的实时微调，推动控制系统向全自主、自进化的方向演进。在应用拓展方面，随着算法成熟度与算力效率的提升，智能控制将从传统的军事对抗领域向智慧物流、城市空中交通管理、环境精准监测及深空探测等民用领域全面渗透。特别是在低空经济浪潮下，具备高度智能控制能力的eVTOL将成为城市交通的重要组成部分，在应急救援、医疗转运及灾害预警中发挥不可替代的作用。

与此同时，标准化与规范化工作将成为行业发展的重中之重。随着智能控制技术在民航领域的应用日益广泛，如何通过适航认证、如何确保人工智能算法的安全性与可解释性（Explainable AI），已成为亟待解决的课题。通过制定统一的技术准则与数字化试验标准，可以有效降低研发成本，提升不同厂家系统间的互操作性，构建开放的智能航空生态。此外，高素质人才队伍的建设与跨学科团队的协同将成为核心驱动力。先进飞行器智能控制的研究已超越了单一的控制工程范畴，它要求材料科学、能源科学、计算机科学与航空工程的深度交叉。通过建立完善的人才培养体系与激励机制，促进产学研用的深度融合，将推动智能控制理论不断突破现有的技术边界，解决诸如高超音速飞行中的“黑障”通信控制、深空探测中的超长时延控制等世界级难题。

综上所述，先进飞行器智能控制理论与方法是现代航空科技皇冠上的明珠，是支撑未来航空体系迈向全自主、高效率与本质安全的关键基石。通过集成高精度感知、自主逻辑决策与多目标优化控制技术，该领域为飞行器在极端工况下的稳定运行与复杂任务的达成提供了核心保障。结合智能航空系统的总体架构，相关研究将持续引领航空科技的范式变革。未来，随着量子计算、边缘计算等新兴技术的不断涌现，以及行业标准的日益完善，先进飞行器智能控制领域必将迎来更加广阔的发展前景。它不仅将改变人类的出行方式，更将拓展人类

探索空间的边界，为构建高效、安全、智能的未来航空体系贡献不可磨灭的核心力量。我国在该领域的持续投入与技术突破，必将助力中国从航空大国向航空强国实现跨越式迈进。

#### 4.6 低空飞行安全架构设计和数字化试验

随着全球航空产业向多维度空间拓展，低空经济已成为推动新质生产力发展的战略性新兴产业。在低空开放政策逐步实施与航空科技飞速发展的双重驱动下，低空飞行安全架构设计与数字化试验领域正跃升为智能航空体系中的核心研究方向。低空飞行通常指距地平面垂直距离在1000米以内的飞行活动，这一空间环境复杂，不仅涉及建筑物、电力线等物理障碍物，还面临着微气象干扰、通信链路遮挡及高密度飞行器冲突等严峻挑战。因此，低空飞行安全架构设计旨在通过系统性的顶层规划，确保低空飞行活动在复杂城市环境与野外工况下的安全性、高效性与可持续性。而数字化试验则依托高保真模拟、数字孪生及云计算技术，为安全架构的方案设计、功能验证与风险评估提供全生命周期的有力支撑。结合智能航空系统的总体框架，该领域的研究不仅关乎单一飞行器的生存能力，更是构建未来“空地一体”智慧交通网络的基石，对于推动我国航空科技的跨越式进步具有不可替代的战略意义。

深入剖析低空飞行安全架构设计与数字化试验领域的发展背景，其核心动力源于政策、技术与市场需求的深度耦合。首先，低空开放

政策的实质性推动是该领域爆发的直接诱因。随着我国对低空空域管理改革的深入，低空飞行活动从传统的通用航空作业向无人机物流、城市空中交通及应急救援等多元化场景快速渗透。这种爆发式增长对空域管理的可视化、精细化及动态化提出了迫切需求，传统的“一事一报”模式已无法适应高频次的飞行活动，必须构建一套具备自主避障、动态围栏及冲突解脱能力的智能安全架构，以支撑低空经济的健康、规模化发展。其次，航空科技的代际演进为安全架构的实现提供了技术底座。新型电动垂直起降飞行器、高精度感知传感器、5G-A（通感一体化）技术及边缘计算算法的涌现，使得对低空飞行活动的实时监测与自主决策成为可能。这些技术的集成应用，极大地提升了飞行器在复杂城市峡谷中的态势感知能力，为安全架构从“被动监管”向“主动防御”转型提供了可能。最后，数字化试验的需求源于低空环境的不可预测性。由于实地试飞成本极高且存在巨大的地面安全风险，数字化试验通过构建虚拟数字城市模型，能够模拟成千上万种极端气象与设备故障场景，从而在低成本、零风险的前提下，实现对安全架构性能的极限压力测试，为复杂系统的可靠性验证提供了科学路径。

当前，我国在低空飞行安全架构设计与数字化试验领域已取得阶段性进展，初步形成了“空地协同、虚实结合”的发展态势。在安全架构设计方面，我国已初步建立了涵盖空域分级管理、飞行计划智能审批、多源融合监视及应急处置预案的综合管理体系。特别是在智慧

空管领域，通过引入人工智能算法，实现了对大规模无人机群的航迹预测与冲突解脱，初步解决了低空空域“看得见、管得住、飞得好”的问题。在数字化试验方面，国内科研机构与领军企业已联合打造了多维度低空飞行数字化试验平台。这些平台集成了高保真飞行模拟器、分布式计算系统及实时数据处理引擎，能够实现从单机性能验证到城市级大规模集群仿真。然而，正视现状，该领域仍面临诸多深层次挑战。低空空域的动态管理逻辑尚未完全闭环，飞行计划审批的自动化程度仍有提升空间，尤其是在面对跨区域、跨部门的协同保障时，信息孤岛现象依然存在。此外，数字化试验的精度与物理世界的真实反馈之间仍存在“仿真鸿沟”，如何提高复杂气象环境与电磁干扰环境下的仿真置信度，是当前亟待攻克的关键课题。

为了破除上述瓶颈并抢占低空经济的技术制高点，国家和地方政府出台了一系列具有里程碑意义的政策文件。中国民用航空局发布的《低空飞行服务保障体系建设总体方案》明确了我国低空飞行服务保障的总体布局与功能定位，强调要通过技术手段加强低空监视与通信覆盖，推动安全架构向智能化、网络化演进。工业和信息化部等四部门联合印发的《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030年）》则进一步明确通用航空装备迭代升级的时间表，提出要建设现代化通用航空先进制造业集群，为安全架构的硬件实现提供支撑。在地方层面，各地政府积极贯彻落实国家战略，展现出极强的创新活力。南京

市交通运输局组织编制的《南京市低空飞行服务保障办法（试行）》是我国地方政府探索低空治理的典型范例，该办法通过科学引导在宁从事低空飞行活动的单位和个人，构建了涵盖服务保障体系建设、飞行主体管理及安全监管的全链条闭环。此外，深圳、合肥等城市也纷纷出台专项政策，通过设立“低空经济示范区”，鼓励企业开展数字化试验与场景验证，为全国低空飞行安全架构的设计提供了丰富的实践样本与数据支撑。

在低空飞行安全架构设计与数字化试验的技术实现路径中，控制算法的创新与应用发挥着中枢神经的作用。针对低空飞行器在复杂气流与障碍物环境下的稳定运行需求，主流的控制算法已从传统的线性控制向具备高度自适应能力的智能算法演进。PID控制算法作为基础，通过比例、积分、微分参数的精细化调节，保障了飞行器在起降阶段的姿态稳定性。模糊逻辑控制则利用其处理非线性系统的优势，在应对城市建筑群产生的复杂紊乱气流时表现出极强的鲁棒性。神经网络控制通过深度学习海量飞行数据，赋予了飞行器自主识别环境特征与预测潜在风险的能力，是实现全自主避障的核心。卡尔曼滤波算法及其变体在低空安全中同样不可或缺，它通过对多源传感器数据的最优估计，在GPS信号受遮挡的城市峡谷中，依然能提供精确的位置与速度反馈。自适应控制算法则能根据飞行器载荷的变化或电机效率的衰减，实时修正控制参数，确保飞行安全架构在各种工况下均能维持最

优性能。这些算法不仅在物理飞行器上运行，更是数字化试验平台中的核心逻辑组件，通过在仿真环境中对算法进行数百万次的迭代优化，极大地提升了低空飞行安全架构的可靠性与响应速度。

展望未来，低空飞行安全架构设计与数字化试验领域展现出极其广阔的发展前景与技术变革潜力。随着低空经济从“起步期”迈向“成熟期”，该领域将呈现出深度技术融合与跨界协同的显著特征。在技术创新维度，未来的安全架构将更加注重“通感一体化”技术的应用。通过引入5G-A或6G通信技术，基站将同时具备通信与雷达感知功能，从而实现对低空空域的无盲区监视，彻底解决低空飞行器“黑飞”与碰撞风险。同时，人工智能将从“辅助决策”向“自主接管”演进，基于大模型的具身智能将使飞行器具备类人的环境理解与应急处置能力。在数字化试验维度，数字孪生技术将实现物理世界与虚拟空间的实时同步。未来的数字化试验场将不再是静态的模拟器，而是能够实时接入气象数据、交通流数据及电磁环境数据的动态孪生体，实现“在飞行中试验，在试验中优化”的闭环模式。

此外，随着低空飞行活动向军事、民用及社会公共服务领域的全面渗透，安全架构的应用边界将不断拓展。在军事领域，具备高度安全保障的无人机集群将实现更加复杂的协同侦察与饱和打击任务；在民用领域，智慧物流与空中出租车将依托完善的安全架构，实现常态化的商业运行，彻底重塑城市物流与出行效率。在应急救援与灾害监

测领域，低空飞行安全架构将提供“分钟级”的响应能力，为生命救援争取宝贵时间。与此同时，标准化与规范化工作将成为行业发展的压舱石。通过制定统一的低空飞行数据交换标准、安全评估准则及数字化试验验证规范，将有效降低企业的研发门槛与合规成本，促进低空经济产业链的上下游协同。高素质人才队伍的建设也将进入快车道，跨学科的复合型人才将推动航空工程、信息通信与人工智能的深度交叉，为低空飞行安全架构的持续创新提供不竭动力。

综上所述，低空飞行安全架构设计与数字化试验领域是现代航空科技与数字经济交汇的前沿阵地。通过集成高精度感知、智能控制算法及高保真仿真技术，该领域为低空经济的腾飞构建了坚实的安全底座。结合智能航空系统的总体演进趋势，相关研究将持续引领航空产业的范式变革。未来，随着政策红利的进一步释放、技术瓶颈的不断突破以及应用场景的日益丰富，低空飞行安全架构设计与数字化试验领域必将迎来更加辉煌的发展空间。它不仅将助力我国实现低空空域的高效利用，更将推动中国航空科技在智能化、数字化赛道上实现全球领先，为构建安全、便捷、智能的未来三维交通体系贡献核心力量。我国在该领域的深耕细作，必将为全球低空治理提供中国方案，开启人类航空事业的低空新纪元。

#### **4.7 航空发动机智能设计与诊断**

航空发动机被誉为飞机的“心脏”以及现代工业皇冠上的明珠，

是衡量一个国家综合国力、工业基础及科技水平的核心标志。作为一种高度复杂的热力机械，航空发动机在极端高温、高压及高转速的工况下运行，其性能、可靠性与经济性直接决定了飞机的整体表现与飞行安全。随着全球航空科技的跨越式演进，传统的基于经验与大量物理试验的发动机设计与诊断方法，在面对新一代大推重比、低油耗及长寿命的需求时，已显现出研发周期长、成本高昂及故障预判滞后等局限性。智能化技术的引入，特别是人工智能与深度学习算法的深度渗透，为航空发动机的全生命周期管理带来了前所未有的范式变革。智能化航空发动机设计与诊断系统，通过融合高性能计算、先进控制理论与多模态传感技术，实现了对发动机内部复杂物理过程的精确模拟与实时监测，极大地提升了航空动力系统的技术边界与运行安全性。

当前，智能化航空发动机设计与诊断技术正处于从“辅助工具”向“核心驱动”转型的快速发展阶段。在设计领域，人工智能技术已全面渗透至从概念设计、初步设计到详细设计，再到多学科优化与适航验证的全流程。如前文所述，利用数字孪生（Digital Twin）技术，设计师能够在虚拟数字空间中构建与物理实体高度一致的数学模型，实现对燃烧室流场、涡轮叶片热应力及转子动力学特性的高保真仿真。这种“虚拟试车”模式允许在物理原型机制造之前进行数万次的参数迭代与极限工况模拟，不仅大幅度节省了人力、物力与财力，更显著缩短了型号研制周期。在诊断领域，智能化系统通过集成在发动机上

的数百个传感器，实时采集振动、压力、温度及油路状态等海量数据。利用大数据分析 with 预测算法，系统能够识别出极其微弱的性能衰减信号，在故障发生前进行预警并实施预测性维护，从而将传统的“事后维修”转变为“主动健康管理”，极大地提高了发动机的在位率与使用寿命。

在全球范围内，人工智能已成为驱动航空发动机产业升级的核心引擎。我国政府对此高度重视，将航空发动机智能化列为国家战略科技力量的重要组成部分。在政策层面，国家出台了一系列扶持政策，特别是“两机专项”（航空发动机与燃油轮机重大专项）的实施，为智能化技术的应用提供了坚实的科研土壤。国家发布的《中国制造2025》明确提出要突破航空发动机关键技术，推动高端装备制造业向智能化、网络化及服务化转型。地方政府亦积极响应，如上海、成都、西安等航空产业集群所在地，纷纷设立专项产业基金，支持航空发动机智能制造与智慧运维平台的建设。同时，政府积极搭建产学研用深度融合的合作平台，推动顶尖高校、国家实验室与航发集团等龙头企业协同攻关，重点解决航空发动机在智能化设计软件、高性能传感器及自主可控诊断算法等领域的“卡脖子”难题<sup>[60]</sup>。

航空发动机产业作为高端装备制造业的支柱，其投资规模与技术门槛极高。公开数据显示，全球航空发动机市场规模持续扩张，智能化设计与诊断技术的投资占比呈现显著上升趋势，已成为资本布局的

战略高地。以我国为例，近年来政府在航空发动机领域的研发投入占行业总产值的比例已超过5%，且保持逐年递增态势。社会资本亦对航发智能化赛道表现出浓厚兴趣，大量资金涌入数字孪生平台开发、高精度传感器制造及航发大数据云平台等领域。预计未来几年，我国在航空发动机智能化设计与诊断领域的累计投资规模将达到数百亿元量级，形成一个涵盖设计研发、智能制造及智慧保障的完整产业链。

在技术架构层面，航空发动机智能化领域由数字孪生、大数据分析 & 机器学习等核心技术共同驱动<sup>[61]</sup>。数字孪生技术通过构建跨维度的虚拟模型，实现了设计参数与实际运行数据的实时映射，为设计师提供了从宏观性能到微观结构的深度洞察。大数据分析技术则通过对QAR（快速存取记录器）数据及实时遥测数据的深度挖掘，能够从杂乱的信号中提取出反映发动机健康状态的特征向量，为故障诊断提供科学依据。机器学习技术，特别是深度神经网络，通过对历史故障样本的学习，使计算机具备了自动识别复杂故障模式的能力，显著提升了诊断的准确性与自动化水平。

在算法应用方面，该领域广泛采用了自适应学习仿真控制、卷积神经网络、循环神经网络及遗传算法等。自适应学习仿真控制技术能够根据发动机的实时退化状态动态调整控制规律，确保发动机在全寿命周期内始终处于最优运行点。神经网络算法则通过模拟人脑神经元的非线性处理方式，在处理非平稳振动信号及复杂气路分析中表现卓

越，实现了对喘振、失速等瞬态故障的快速识别。遗传算法等启发式优化算法则被用于解决多目标优化问题，如在保证推力的前提下，通过优化涡轮叶片型面设计实现燃油消耗率与热应力的平衡，显著提升了发动机的综合性能。

展望未来，航空发动机智能化设计与诊断领域将呈现出深度融合与自主进化的发展趋势。随着算力的提升与算法的演进，智能化系统将具备更强的自愈能力与自主决策能力。量子计算、边缘计算及联邦学习等前沿技术将被引入，推动设计仿真精度向原子级迈进，并实现机载实时的智能诊断。智能化技术的广泛应用将彻底重塑航发产业结构：一方面，数字化设计与智能制造将实现“所见即所得”，极大地降低生产成本与运维开支；另一方面，产业模式将向“制造+服务”转型，提升全产业链的附加值。预计未来十年，智能化技术将助力我国航空发动机实现从“跟跑”向“并跑”乃至“领跑”的战略跨越。

随着全球化协作的深入，国际合作与标准统一亦将成为重要趋势。通过共享全球飞行大数据与适航经验，可以加速智能化算法的迭代与成熟。同时，智能化技术将从传统的民用与军事航空向低空经济、无人机动力及空天往返运输等新兴领域拓展。在无人机领域，智能化诊断将确保低成本动力系统的高可靠运行；在新能源航空领域，智能化技术将推动航空发动机与氢能、电推进技术的深度融合。航空发动机智能化设计与诊断不仅是技术的革新，更是航空工业迈向智慧时代的

必由之路。通过持续的技术创新、产业升级及全球协同，这一领域必将迎来更加辉煌的未来，为人类征服蓝天提供更加澎湃且智慧的动力。

## 第五章 智能航空发展趋势

### 5.1 全球智能航空技术演进趋势

面对当今世界全球化与信息化的深度交织，传统的航空技术架构与运行手段在应对爆发式增长的交通需求、日益复杂的空域环境以及严苛的环保诉求时，已显现出明显的滞后性。智能航空系统(Intelligent Aviation System)的崛起，不仅是交通事业发展的必然选择，更是航空史上的一场深刻革命。它通过将新一代信息技术、宽带通信技术、自适应控制技术、高精度传感技术、高性能计算技术以及系统综合集成技术进行深度融合，重塑了人、机、环之间的交互逻辑。这种演进使航空器不再是孤立的飞行载体，而是演变为具备深度感知、自主决策与协同能力的智能节点，从而在全球范围内实现实时、准确、高效、安全与节能的终极运行目标。

在全球技术演进的宏观视角下，智能航空产业正迈向高度智能化的深水区。未来的航空器将不再仅仅依赖预设程序的自动化，而是集成具备类人思维能力的先进智能系统，涵盖全自动驾驶、动态智能导航及自愈式智能维护等核心功能。依托深度学习、强化学习等人工智能前沿算法，航空器能够实现对气象、地形及空域流量等飞行环境的毫秒级感知，并在复杂多变的飞行条件下自主优化飞行路径。这种从“自动化”向“自主化”的跨越，不仅极大地降低了飞行员的认知负

荷与人为差错率，更通过飞行包线的极限优化，显著提升了航空器的任务可靠性，为航空公司构建起基于技术壁垒的运营效益与核心竞争优势。

数字化转型作为智能航空演进的底层驱动力，正重构航空产业的价值链。航空公司正加速利用大数据湖、边缘计算与云计算技术，构建起覆盖全生命周期的运营管理体系。通过对海量运行数据的深度挖掘，航司能够实现航班时刻表的动态微调、保障资源的精准调配以及旅客服务的个性化定制。与此同时，数字化转型正驱动智慧机场向“数字孪生机场”演进，通过无感式安检、自助行李追踪及生物识别登机等技术，实现旅客流、行李流与飞机流的无缝协同。这种全方位的数字化不仅提升了地面保障效率，更通过精准营销与服务创新，实现了从“单一运输服务商”向“综合出行方案提供商”的身份转变。

在“碳中和”全球愿景下，绿色航空已成为智能航空系统演进中不可或缺的维度。全球航空产业正积极探索新能源推进技术，电动航空器与混合动力推进系统正从实验室走向商业化验证，旨在从源头上削减碳排放与噪音污染。智能能源管理系统作为其核心，能够实时监测能量流的分布与损耗，通过智能算法实现电能、热能与机械能的最优分配。此外，通过推广可持续航空燃料以及在制造阶段引入绿色设计理念，智能航空系统正构建起从设计、制造到运行的全产业链绿色生态，为航空业的可持续发展提供技术支撑。

智能感知与决策支持技术的融合，为航空器构建了全时域的“数字护栏”。通过集成激光雷达、毫米波雷达与高光谱成像等多元传感器，航空器能够实现对周围环境的通感一体化监测，精准识别潜在的障碍物与危险气象。决策支持系统则利用机器学习模型，在海量备选方案中实时解算最优飞行轨迹与任务调度指令。这种“感知-决策-执行”的闭环逻辑，使航空器具备了在极端复杂环境下自主规避风险的能力，极大地提高了飞行安全边界，将事故风险从“事后分析”转向“事前预防”。

故障预测与健康管理技术的广泛应用，标志着航空维护模式的根本性变革。通过大数据分析 with 数字孪生模型，系统能够对航空器关键部件的疲劳损伤与性能衰减进行实时评估，提前识别潜在故障隐患并触发预防性维护流程。这种模式不仅极大地延长了航空器的在役寿命，降低了非计划性离场带来的高昂成本，更通过维护保障链条的智能化，提升了航班准点率与旅客满意度。同时，航空制造技术的革新也在同步推进，增材制造（3D打印）与高性能复合材料的应用，使航空器结构向拓扑优化与功能集成方向发展，创造出更轻质、更坚固且具备感知能力的智能结构，推动了航空制造业向工业4.0时代的全面跨越。

智慧机场与综合交通运输体系的无缝衔接，是智能航空系统向社会化延伸的重要标志。通过电子登机牌、智能行李追踪及空地协同调度技术，机场正演变为多模态交通枢纽的核心。这种连接不仅限于物

理空间的通达，更体现在信息流的实时共享，使旅客能够享受从家门到舱门的“一站式”智慧出行体验。此外，智能航空产业的全球化属性决定了其演进离不开国际合作与标准化建设。各国在技术研发、适航取证及空域管理标准上的深度协同，将有效打破技术壁垒，推动全球航空业在统一的智能化框架下互联互通，促进全球民航事业的共同繁荣。

然而，智能航空系统的演进之路亦伴随着严峻的挑战。数据安全、隐私保护、AI伦理以及法律法规的滞后性，已成为制约产业发展的关键变量。如何在保障信息安全的前提下实现数据共享，如何在算法决策中引入伦理约束，是行业必须面对的课题。但挑战往往孕育着机遇，通过加强网络安全技术研发、完善智能化法律体系以及深化国际治理合作，智能航空产业将在克服挑战的过程中不断进化。未来，智能航空系统将以更加安全、高效、环保与人性化的姿态，重塑人类的时空观念，为全球经济社会的可持续发展注入不竭的创新动力。

## **5.2 我国智能航空重点建设方向**

构建具有中国特色的新一代智能航空系统，是我国智能航空发展的方向。面向建设综合航空、智能航空、绿色航空、平安航空的中国社会需求，迎接人工智能和大数据时代为智能航空技术发展所带来的机遇和挑战，立足国情、运用新技术手段、结合智慧城市建设，具体有四个重点建设发展方向。

### 1. 智慧化服务与管理

提升旅客体验：通过智能化技术，如自助值机、智能安检、电子登机牌等，缩短旅客出行时间，提升服务质量和效率。

智慧空管与监管：利用大数据、人工智能等技术，实现航班运行控制的智能决策，提升协同保障能力和行业治理效能。

### 2. 技术创新与应用

自动驾驶技术：发展飞行器自动驾驶技术，提高飞行安全性和精确性，未来有望实现完全无人驾驶。

智能机器人与算法：在航天探测任务中应用智能机器人，减少宇航员风险；同时，利用智能算法优化航空航天数据处理和问题解决能力。

### 3. 绿色发展与可持续性

推广绿色航空技术：加大节能减排力度，推广可持续航空燃料，减少碳排放，实现航空业的绿色发展。

智能能源管理：通过智能化技术优化航空器能源利用，提高能源效率，降低能耗。

### 4. 基础设施建设与升级

智慧机场建设：新建和扩建机场，并融入智能化技术，提升机场综合保障能力和运营效率。

完善航空网络：加强国内外航线建设，构建更加便捷、高效的航

空运输网络

### 5.3 智能航空前景展望与挑战

智能航空系统作为现代前沿科技与传统航空产业深度融合的产物，正以前所未有的速度重塑全球航空领域的生态面貌。在中国，这一转型趋势在国家创新驱动发展战略的引领下显得尤为强劲。智能航空不仅局限于航空器本身的智能化，更是一个涵盖了智慧运输、数字化机场运营、新一代空中交通管理等多个维度的复杂集成系统。

从技术维度审视，智能航空的崛起深度依托于人工智能、大数据、云计算及物联网等底层技术的爆发式支撑。这些技术不仅赋予了航空器精准导航与自主飞行能力，更在运行效率上实现了质的飞跃。通过大数据分析，行业能够实现对旅客需求的精准画像与流量预测，从而动态优化航班时刻表与资源配置；物联网技术则通过万物互联，实现了机场设施的远程监控与预测性维护，显著降低了运营成本。

市场需求则是推动系统演进的内生动力。随着消费升级与航空出行的普及，旅客对服务的个性化、便捷化及高效化提出了更高要求。智能航空系统通过提供全流程无感出行、智能行李跟踪等服务，精准契合了多样化的市场诉求。同时，商业航天与低空经济的兴起，也为智能航空在卫星组网、无人机物流等新兴领域开辟了广阔的应用蓝海。

政策环境为我国智能航空的发展提供了坚实保障。中国政府将航空航天科技定位为“国家战略科技力量”，在“十四五”规划及党的

二十大报告中均明确提出加快建设航天强国与交通强国的宏伟目标。一系列鼓励科技创新与产业升级的政策红利，为智能航空系统的研发与落地创造了优渥的土壤。

展望未来，技术创新将持续引领系统向更高层级进化。深度学习算法将使航空器具备类人的环境感知与风险预判能力，实现从“辅助驾驶”向“全自主飞行”的跨越。大数据与云端协同将构建起“空天一体”的数字化网络，使每一架航空器都成为网络中的智能节点，实现全局最优的航迹规划。

市场层面将呈现出深度多元化的特征。智能航空将不再仅服务于干线运输，而是向城市空中交通、支线物流及应急救援等领域全面渗透。基于AI的智能客服与个性化推荐系统，将使航空服务从“标准化产品”转型为“定制化体验”，极大地提升用户粘性。

在全球化竞争中，中国智能航空系统将经历从“跟跑”到“领跑”的角色转变。通过加强与国际航空巨头的技术交流与标准共建，中国企业将深度参与全球航空治理。同时，依托本土庞大的数据样本与应用场景，中国智能航空品牌将在国际市场上树立高效、安全的科技形象，提升全球竞争力。

在具体实施路径上，我国智能航空的发展需聚焦四大核心任务：首先是技术创新与人才高地的构筑，需加大对前沿算法与核心硬件的投入，培养具备跨学科视野的复合型航空人才；其次是产业链的深度

协同,推动航空制造、信息通信、地面保障等上下游企业的融合发展,构建完整的产业生态闭环;三是用户体验的持续优化,坚持以旅客需求为导向,通过技术迭代不断解决出行痛点;四是国际化战略的推进,积极参与国际标准制定,拓展海外市场渠道。

然而,在通往高度智能化的进程中,行业必须正视并解决一系列深层次挑战。数据安全与隐私保护是系统的生命线,必须建立严密的监管体系与技术防护墙,确保海量运行数据不被恶意利用。伦理道德与社会责任问题亦不容忽视,尤其在自动驾驶的决策逻辑中,需建立符合人类价值观的道德准则。

此外,可持续发展与环保已成为全球共识。智能航空系统需深度融合绿色航空技术,通过优化航迹减少燃油消耗,并积极探索氢能、电能等清洁能源的应用,降低碳排放。最后,人才缺口依然是制约发展的瓶颈,需建立长效的人才引进与激励机制,吸引全球顶尖智慧汇聚中国。

综上所述,中国智能航空系统的前景充满机遇,亦伴随挑战。在技术、市场与政策的共振下,我国有望构建起安全、高效、绿色、智能的现代化航空体系,不仅改变人类的出行方式,更将作为核心引擎,推动全球航空产业迈向智慧化的新纪元。通过在安全监管、伦理引导及环保创新上的持续深耕,中国智能航空必将为人类社会的可持续发展做出卓越贡献。

## 参考文献

- [1] 卢新来, 杜子亮, 许赞. 航空人工智能概念与应用发展综述[J].航空学报, 2021, 42(04): 251-264.
- [2] 雷宏杰, 姚呈康. 面向军事应用的航空人工智能技术架构研究[J].导航定位与授时, 2020, 7(01): 1-11.
- [3] 蒋超, 崔玉伟, 刘文金. 智能体系技术在飞控领域应用研究综述[C]//国防科技大学系统工程学院.第六届体系工程学术会议论文集—体系工程与高质量发展. 航空工业西安飞行自动控制研究所; 飞行控制航空科技重点实验室, 2024:8.
- [4] 李博.人工智能技术对民用飞机产业影响初探[J].大飞机, 2023, (11): 24-27.
- [5] 谭任翔.面向教练机的驾驶舱异常态势感知技术研究[D]. 中国民用航空飞行学院, 2024.
- [6] 杨彬.技术变革引领航空4.0时代[J].科技创新导报, 2020, 17(16): 1-4+18.
- [7] 司炳山, 董志明. 外军无人系统自主行为决策技术发展研究[J].舰船电子工程, 2022, 42(12): 8-11+52.
- [8] McDermott John. RI: A rule-based configurer of computer systems[J]. Artificial Intelligence, 1982, 19(1):39-88.

- [9] Shela B, Carls. Lizza pilot's associate “ a cooperative, knowledgebased system application” [R]. Washington,D. C. :Wright-Patterson Air Force Base, 1991.
- [10] Miller C A, Hannen M D. The rotorcraft pilot's associate: Design and evaluation of an intelligent user interface for cockpit information management[J]. Knowledge-Based Systems, 1999(12):443-456.
- [11] Jones R M, Laird J E, Nielsen P E, et al. Automated intelligent pilots for combat flight simulation[J]. AI magazine, 1999, 20(1): 27-41.
- [12] Ernest N, Carroll D, Schumacher C, et al.Genetic fuzzy based artificial intelligence for unmanned combat aerial vehicle control in simulated air combat missions[J]. Journal of Defense Management, 2016,6(1):1-7.
- [13] Schrittwieser, J, Antonoglou, I, Hubert, T, et al. Mastering atari, go, chess and shogi by planning with a learned model[J]. Nature, 2020, 588(7839): 604-609
- [14] Ernest N D,Carroll D. Genetic fuzzy based artificia.intelligence for unmanned combat aerial vehicle control in simulated air combat missions[J].Journal of Defense.Management,2016,144(6):2167-2174.
- [15] 莫亚婧, 陈卫平, 高剑烽. 航空装备无损检测技术现状及发展趋势[J]. 模具制造, 2023, 23(10):46-48.

- [16] 林鹤. 航空运输系统的优化与创新对提升航空安全水平的影响[J]. 中国航务周刊,2023,(29):76-78.
- [17] 范立月. 民航业发展现状及未来民航经济发展趋势[J]. 投资与创业, 2023, 34(11): 36-38.
- [18] 陈翔, 王海峰, 展京霞, 等. 基于循环神经网络的非定常气动力建模研究[J]. 气动研究与试验, 2023, 1(04): 75-81.
- [19] 单圣哲, 张伟伟. 基于自博弈深度强化学习的空战智能决策方法[J]. 航空学报, 2024, 45(04): 206-218.
- [20] Lei S , Lei Y L , Zhu Z .Research on Missile Intelligent Penetration Based on Deep Reinforcement Learning[J].Journal of Physics Conference Series, 2020.
- [21] 魏毅寅, 郝明瑞, 范宇. 人工智能技术在宽域飞行器控制中的应用[J]. 宇航学报, 2023, 44(04): 530-537.
- [22] 杜鹤民, 余隋怀, 初建杰, 等. 航空智能计算机辅助训练系统的构建方法[J].计算机集成制造系统, 2011, 17(01): 0.
- [23] 张安, 陈伟, 李相民. 战斗机智能火力与指挥控制系统的发展和关键技术[J]. 电光与控制, 2006, 13(4): 1-5.
- [24] 尹迪义. 航空地面试验的智能系统[J]. 测控技术, 1998, 17(4): 36-38.
- [25] Han Z, Chen M, Shao S, et al. Improved artificial bee colony

- algorithm-based path planning of unmanned autonomous helicopter using multi-strategy evolutionary learning[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 122: 107374.
- [26] 麻丽俊, 曹力. 基于 4D 飞行的未来智能航空运输系统[J]. *航空计算技术*, 2017, 47(5): 61-63.
- [27] 车云, 袁书琪, 陈清. 以智能航空研学基地为平台解决当前研学旅行存在问题的探索[J]. *地理教学*, 2020, 15: 54-57.
- [28] 王思达. 未来航空运输系统展望[J]. *收藏*, 2019, 19.
- [29] 王莉, 戴泽华, 杨善水, 等. 电气化飞机电力系统智能化设计研究综述[J]. *航空学报*, 2019, 40(2): 1-15.
- [30] W Liwen, S Shuyi, W U Qingxian, et al. Path planning of unmanned autonomous helicopter based on improved wolf pack algorithm[J]. *Systems Engineering & Electronics*, 2023, 45(10).
- [31] 姚立权. 智能化控制系统在航空制造中的应用[J]. 2020.
- [32] 陈哨东, 刘跃峰. 论航空火力控制系统的智能化[J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(8): 1-8.
- [33] 胡海青, 徐明明, 吴东岳, 等. 航空公司运控系统智能化转型探究[J]. *综合运输*, 2023, 45(5): 114-118.
- [34] 裘德馨. 低空经济中无人机产业发展概述[J]. *Business and Globalization*, 2024, 12: 117.

- [35] Guo H, Chen M, Shi S, et al. Distributed Coordinated Control for QUAVs With Switching Formation Strategy[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024.
- [36] Wandelt S, Zheng C. Toward Smart Skies: Reviewing the State of the Art and Challenges for Intelligent Air Transportation Systems (IATS)[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024.
- [37] 欧阳桃花, 郑舒文. 基于共同演化的低空经济产业生态策略研究以“低空航空器+”为例[J]. 北京航空航天大学学报社会科学版, 2024, 37(5): 109-119.
- [38] Kashyap R. Artificial intelligence systems in aviation[M]//Cases on modern computer systems in aviation. IGI Global, 2019: 1-26.
- [39] 褚鹏, 王军, 刘树光, 等. 基于人工智能技术的低空飞行占管控关键技术研究[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(2).
- [40] 杨志刚, 张炯, 李博, 等. 民用飞机智能飞行技术综述[J]. 2021.
- [41] 李宗辉. 航空产业人工智能发展的知识产权制度促进体系研究[J]. China Invention & Patent, 2020, 17(12).
- [42] 刘斌. 北京航空航天大学大数据与脑机智能高精尖创新中心研究员郭炳晖 聚焦 AI 两大瓶颈 助力新一代人工智能发展[J]. 中国高新科技, 2022 (21): 13-15.

- [43] 孙智孝, 杨晟琦, 朴海音, 等. 未来智能空战发展综述[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 35-49.
- [44] 辛昕, 谢川. 人工智能在无人机系统中的应用与发展研究[J]. 飞航导弹, 2021, 5.
- [45] 雷宏杰, 姚呈康. 面向军事应用的航空人工智能技术架构研究[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(1): 1-11.
- [46] Chang C, Cao D, Chen L, et al. MetaScenario: A framework for driving scenario data description, storage and indexing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2022, 8(2): 1156-1175.
- [47] 丁楠. 人工智能技术在航空领域的实践探析[J]. 中阿科技论坛(中英文), 2020.
- [48] Mohsan S A H, Othman N Q H, Khan M A, et al. A comprehensive review of micro UAV charging techniques[J]. Micromachines, 2022, 13(6): 977.
- [49] Wei Z, Zhu M, Zhang N, et al. UAV-assisted data collection for Internet of Things: A survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(17): 15460-15483.
- [50] 曹建国. 数字化转型下航空发动机仿真技术发展机遇及应用展望[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(1): 1.
- [51] 范溢煦. 人工智能技术在空中交通管理中的应用分析[J]. 进展:

- 科学视界, 2021 (2): 16-17.
- [52] 龙海波, 吴宏雨, 张振, 等. 航空航天制造中的智能化技术[J]. 机械与电子控制工程, 2024, 6(9): 106-108.
- [53] 蒋启梅. 航空制造业数字化转型探索[J]. 第五届中国航空科学技术大会论文集, 2021.
- [54] Chen L, Li Y, Huang C, et al. Milestones in autonomous driving and intelligent vehicles: Survey of surveys[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2022, 8(2): 1046-1056.
- [55] 庄淡盛. 无人机飞行控制与传感器融合导航应用[J]. 中国新技术新产品, 2021.
- [56] 张文杰, 王国新, 阎艳, 等. 基于数字孪生和多智能体的航天器智能试验[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 16.
- [57] 张耀欣, 潘晓沛, 张京波. 智能航天器技术发展分析[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2024, 45(3): 1-6.
- [58] 杜永浩, 王凌, 邢立宁. 空天无人系统智能规划技术综述[J]. 系统工程学报, 2020, 35(3): 416-432.
- [59] Alladi T, Bansal G, Chamola V, et al. SecAuthUAV: A novel authentication scheme for UAV-ground station and UAV-UAV communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15068-15077.

- [60] Kahraman C, Aydın S. Intelligent Systems in Aviation 4.0 Industry[M]//Intelligent and Fuzzy Techniques in Aviation 4.0: Theory and Applications. Cham: Springer International Publishing, 2021: 21-38.
- [61] 王晓晨, 陈琦, 刘鹏, 等. 海量航天器在轨安全智能管控技术研究与展望[J]. 空间碎片研究, 2021.