

新能源新构型低空装备 安全技术体系报告 (2024 版)



低空产业联盟
LOW-ALTITUDE INDUSTRY ALLIANCE

低空产业联盟

2024 年 11 月

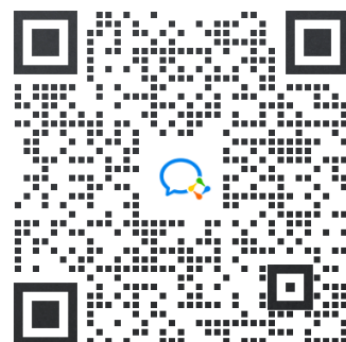
免责声明：

1. 本内容非原报告内容；
2. 报告来源互联网公开数据；如侵权请联系客服微信，第一时间清理；
3. 报告仅限社群个人学习，如需它用请联系版权方；
4. 如有其他疑问请联系微信



行业报告资源群

1. 进群福利：进群即领万份行业研究、管理方案及其他学习资源，直接打包下载
2. 每日分享：6份行研精选报告、3个行业主题
3. 报告查找：群里直接咨询，免费协助查找
4. 严禁广告：仅限行业报告交流，禁止一切无关信息



微信扫码，长期有效

知识星球 行业与管理资源

专业知识社群：每月分享8000+份行业研究报告、商业计划、市场研究、企业运营及咨询管理方案等，涵盖科技、金融、教育、互联网、房地产、生物制药、医疗健康等；已成为投资、产业研究、企业运营、价值传播等工作助手。



微信扫码，行研无忧

编委会

主 任

张利国

副主任

刘法旺 程文渊 刘薇薇

编 委（按姓氏拼音排序）

陈 宝 邓文亮 董耀聪 冯振宇 黄 兵

黄子健 李 艺 李 毅 李悦立 金 伟

刘栋良 刘延利 祁圣君 权 威 邵书义

宋 磊 田 野 王景霖 吴敬涛 吴欣龙

徐 冉 闫淑辉 杨党团 杨 光 叶宵宇

张 桐 张旺旺 张 欣 张泽京 赵 爽

郑德智

核心编制单位

北京理工大学

工业和信息化部装备工业发展中心

中国民航科学技术研究院

中国航空工业发展研究中心

工业和信息化部电子第五研究所

中国信息通信研究院

北京航空航天大学

西北工业大学

南京航空航天大学

中国飞机强度研究所
中国飞行试验研究院
中国航空工业集团公司上海航空测控技术研究所
中国航空工业集团公司西安飞机设计研究所
中国航空工业集团气动院
中国航空综合技术研究所
中国民航大学
中国有研国联汽车动力电池研究院
卧龙电气驱动集团股份有限公司
北京普安信科技有限公司

参与编制单位（按拼音排序）

北京北航天宇长鹰无人机科技有限公司
北京卫蓝新能源科技股份有限公司
航天时代飞鹏有限公司
零重力飞机工业（合肥）有限公司
上海峰飞航空科技有限公司
上海时的科技有限公司
上海沃兰特航空技术有限责任公司
上海御风未来航空科技有限公司
沃飞长空科技（成都）有限公司
中航（成都）无人机系统股份有限公司

目 录

1 编制概要	1
1.1 编制说明	1
1.2 研究目的	1
1.3 研究范畴	4
1.3.1 新能源新构型低空装备定义与分类	4
1.3.2 安全与验证技术定义和分类	5
2 编制背景	7
2.1 低空装备安全运行是低空经济发展的重要前提	7
2.2 低空装备安全技术是民用航空体系变革的关键因素	7
2.3 低空装备安全发展面临机遇与挑战并存的复杂局面	8
3 低空装备安全性设计技术	9
3.1 低空装备安全性气动设计技术	9
3.2 材料、结构及强度的安全性设计技术	10
3.3 动力及能源系统的安全设计技术	12
3.4 低空装备飞行控制系统的安全设计技术	13
3.5 低空装备感知系统及执行机构的安全性设计技术	15
3.6 实时传输数据链路系统的安全性设计技术	16
4 低空装备安全性的验证技术	18
4.1 气动布局和总体安全性验证技术与验证平台	18
4.2 材料与结构的安全性验证技术与验证平台	19

4.3 动力与能源系统的安全性验证技术与验证平台	21
4.4 飞行控制系统安全性验证技术与验证平台	23
4.5 感知系统安全性验证技术与验证平台	25
4.6 实时传输数据链路系统的安全性验证技术与验证平台	25
4.7 无人驾驶航空器系统的遥控站安全性验证技术与验证平台	27
4.8 低空装备安全性飞行验证与评估技术	28
5 低空装备运行的安全支持技术	31
5.1 低空装备运行中的维修性与安全技术	31
5.2 低空装备健康管理系统技术	32
5.3 低空装备面向安全使用的支持技术	33
6 发展建议	35



1 编制概要

1.1 编制说明

本技术体系是根据我国低空产业发展的实际需要，由低空产业联盟低空装备安全技术委员会组织国内航空领域科研院所、高校、企业、民航机构等单位专家共同研究撰写，编制过程中得到了低空产业联盟内 200 余家成员单位的指导与支持。

（1）本报告以国内外学术研究、技术应用为基础，科学、客观地进行论证总结，旨在为行业提供技术支撑和发展建议；

（2）本报告从低空装备本体安全、人员安全、环境安全等维度，围绕低空装备全寿命周期分析论证安全技术体系架构；

（3）本报告着重参考了现有的国内外适航审定技术规范，所论证的技术体系包含但不限于现有的适航审定技术内容；

（4）本技术体系将根据新能源新构型低空装备安全技术研究及应用的进展进行动态更新，此次发布的为 2024 版本。

1.2 研究目的

为解决以新能源新构型为代表的低空装备在发展过程中面临的主要安全隐患，本报告结合低空装备全寿命周期中的各项研制维保流程，构建低空装备安全技术体系并分析其

中涉及的关键技术，介绍相关技术在新能源新构型低空装备上的应用情况及发展趋势，最后针对我国低空装备安全技术体系发展提出建议，旨在为相关领域的研究者提供参考与借鉴，研究架构如下图所示。



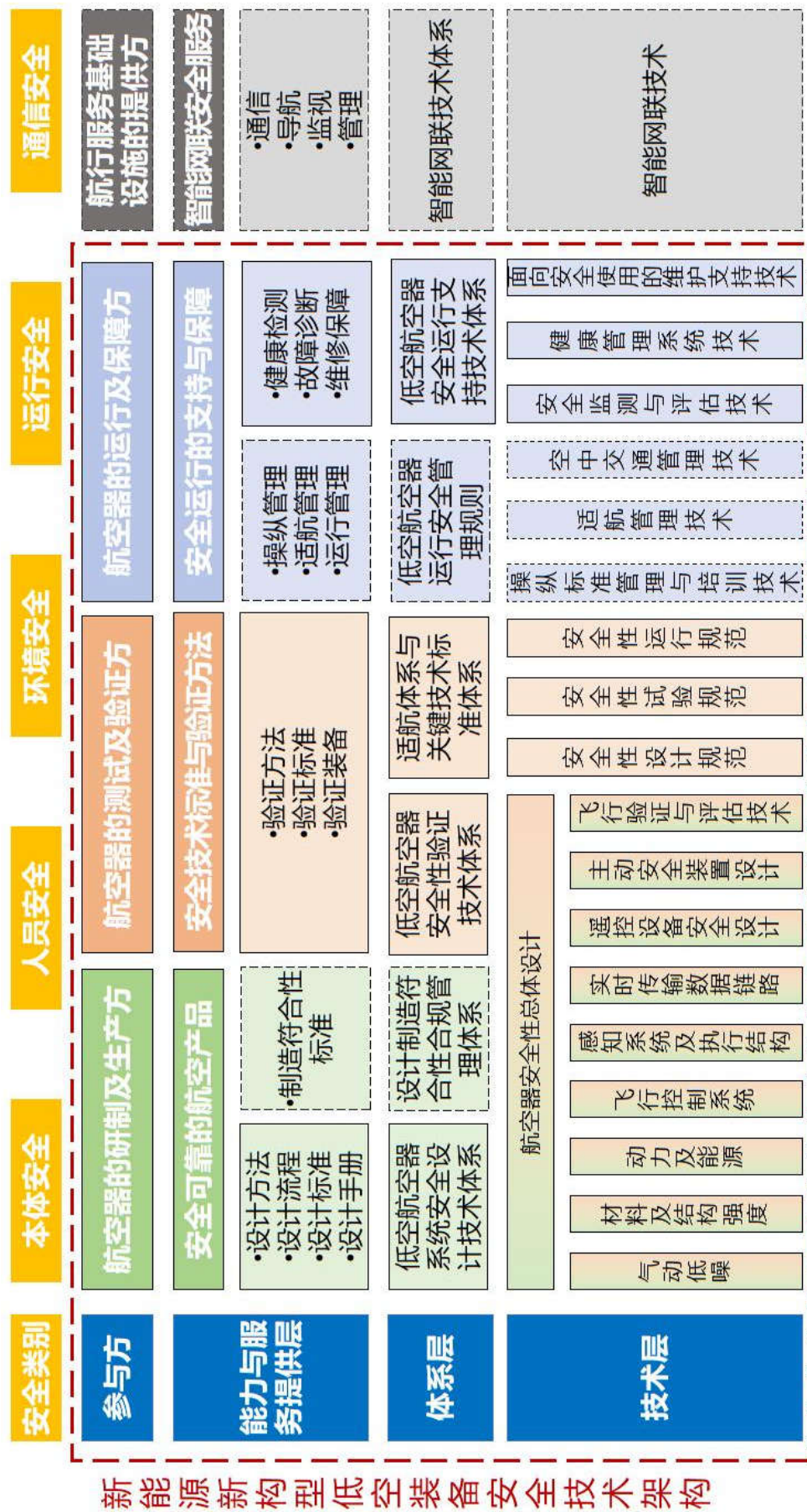


图 1 低空装备安全技术体系研究报告架构示意图

1.3 研究范畴

1.3.1 新能源新构型低空装备定义与分类

新能源新构型低空装备的定义：本报告中的低空装备主要是指在低空空域（通常指真高 3000 米以下所包含的空域）飞行的航空器，按动力来源区分包括传统燃油动力、纯电力、氢能源动力以及混合动力等类型；按构型区分包括固定翼、多旋翼、复合翼等构型。其中传统能源及常规构型低空装备的相关安全技术已相对成熟，不在本研究内重复讨论，因此本文后续中低空装备的描述均特指除传统能源及常规构型外的低空装备，即新能源新构型低空装备，如下图所示。

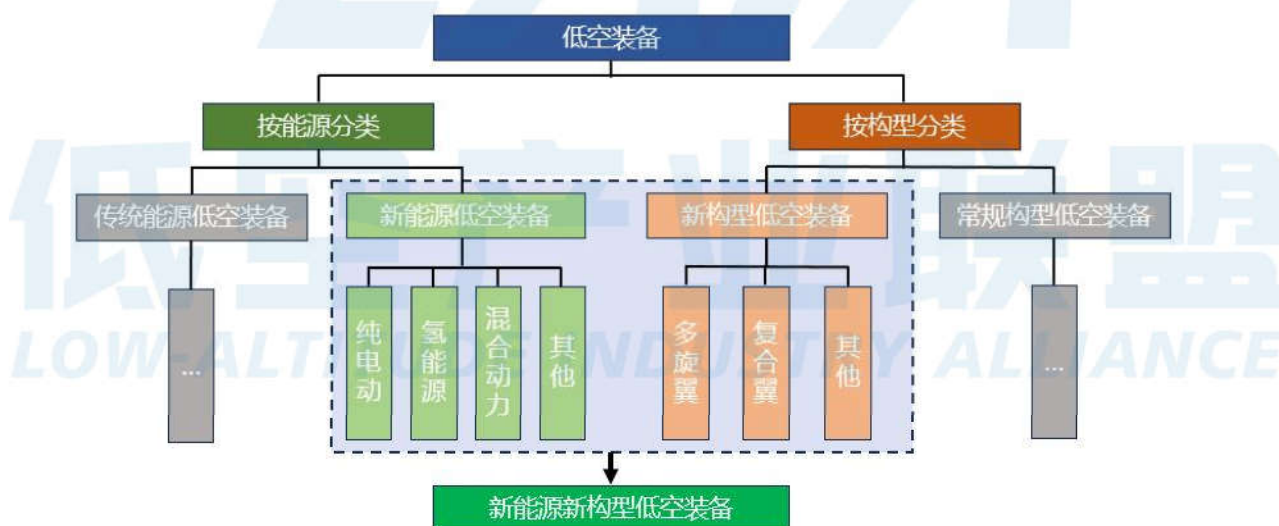


图 2 低空装备的主要构型分类及其定义示意图

对于新能源新构型低空装备，本研究主要聚焦于具备如下能源及构型特征的低空装备。其中主要包括：

按能源分类：（1）纯电动飞行器是指采用电力作为唯一动力来源的飞行器，这类飞行器通过电池储存的电驱动电

动机来产生推力或升力。(2) 氢动力飞行器是指以氢能作为主要动力源, 通过氢燃料电池或氢涡轮发动机等技术将氢气的化学能转化为机械能, 从而驱动飞行器飞行的航空器。(3) 混合动力飞行器是指结合了多种动力源(如燃油发动机和电动机)的飞行器, 这类飞行器利用能源管理系统来协同这些动力源以提供飞行所需的推力或升力。

按构型分类: (1) 多旋翼: 指具有三个及以上分布式推进旋翼系统的无机翼飞行器。推进系统仅提供垂直升力, 横向推力通过推进系统俯仰轴上的总推力差产生。(2) 复合翼: 指具有三个及以上的分布式旋翼推进系统的有机翼飞行器, 采用互相独立的推进系统分别提供垂直升力和前向动力。

1.3.2 安全与验证技术定义和分类

低空装备安全技术的定义: 保障低空装备在运行过程中本体安全、人员安全、环境安全等而采取的一系列技术手段和措施。此类技术的主要目标是确保低空装备能够安全、稳定、可靠地运行, 减少或避免使用过程中可能发生的事故、故障及损失等风险。

根据低空装备的全寿命周期过程将低空装备安全技术分为: 研发设计、试验验证、生产制造、运行与保障四个部分。其中生产制造过程中可能造成的安全风险主要依靠设计制造符合性规范及质量合规管理来控制, 暂不列在本研究讨论范围内, 具体分类及关键技术如下图所示。

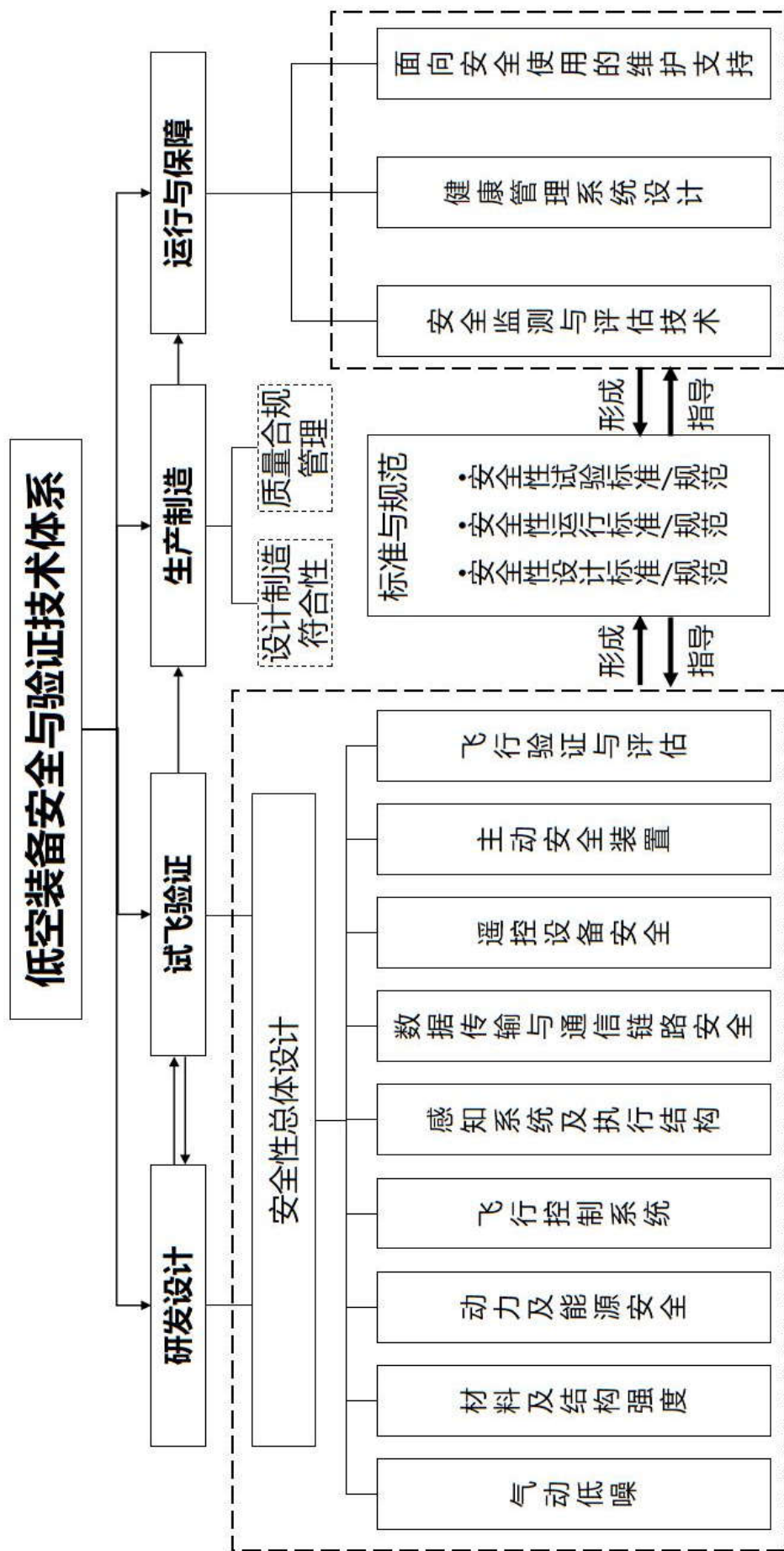


图 3 低空装备安全技术架构及分类示意图

2 编制背景

2.1 低空装备安全运行是低空经济发展的重要前提

《国家综合立体交通网规划纲要》明确提出，将发展低空经济视为国家战略性新兴产业之一。近年来，低空经济市场规模迅速扩大，截至 2023 年底，国内现有实名登记的无人驾驶航空器 126.7 万架，同比增加 32.2%。根据《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030 年）》预测，到 2030 年，我国通用航空装备将全面融入人民生活各领域，形成万亿级市场规模。低空装备的安全运行是保障低空经济高质量可持续发展的必要保障，低空装备产业的高速发展对包括本体安全、人员安全、运行安全、通信安全以及环境安全等关键因素的低空装备体系安全水平提出了较高的要求。为确保低空装备产业发展和运行服务的安全有序，强化低空装备安全技术能力，需重点研究低空装备的研制、验证、运行与维护保障等环节的安全性技术，建立健全的安全技术体系，提高低空装备的整体安全性能。

2.2 低空装备安全技术是民用航空体系变革的关键因素

近年来，作为世界航空业先进水平的代表，美国和欧洲均高度重视低空装备安全技术的研究。美国国家航空航天局（NASA）联合美国联邦航空管理局（FAA）率先提出“先进空中交通”（AAM）以及“城市空中交通”（UAM）作为其民用航空领域的主要发展建设规划，其关键要素之一便是低空装备安全设计与验证技术，包括电推进系统、电池系统、

飞行控制系统以及自动化驾驶系统。欧洲航空安全局(EASA)也在推动低空装备的安全验证技术研发，提出了“安全性评估框架”，旨在为新型低空装备的设计和运营提供系统性的安全标准，强调了对低空装备进行全面的风险评估和测试，确保其能在各类复杂场景下安全运行。总的来说，在未来民用航空领域，低空装备安全技术将在保障低空飞行安全、引领民用航空体系变革等方面发挥重要的作用。

2.3 低空装备安全发展面临机遇与挑战并存的复杂局面

低空装备产业作为新质生产力的重要支撑载体，其安全发展正步入一个机遇与挑战并存的复杂局面。随着政策制定和市场需求的不断增加，低空装备产业的投入与研发力度同步增强，为其安全发展提供了必要条件。然而，伴随机遇而来的，是一系列亟待解决的安全挑战。复杂的应用场景、庞大的设备数量对于低空装备的本体安全、人员安全、运行安全、通信安全及环境安全等安全性提出了极高的要求。因此，低空装备的结构与气动、动力和能源、飞行控制系统、通信链路等领域关键技术均需进一步突破，以确保其在各种环境和紧急情况下都能安全运作。

3 低空装备安全性设计技术

3.1 低空装备安全性气动设计技术

低空装备应用场景复杂，需要兼顾垂直起降、高速飞行等任务剖面，囊括了传统旋翼、固定翼飞机和 eVTOL 等设计内容，亟需开展综合考虑抗风性、复杂气象环境适应性、绿色低噪声特性的高安全性气动（低噪）设计技术研究。具体路线图如下：

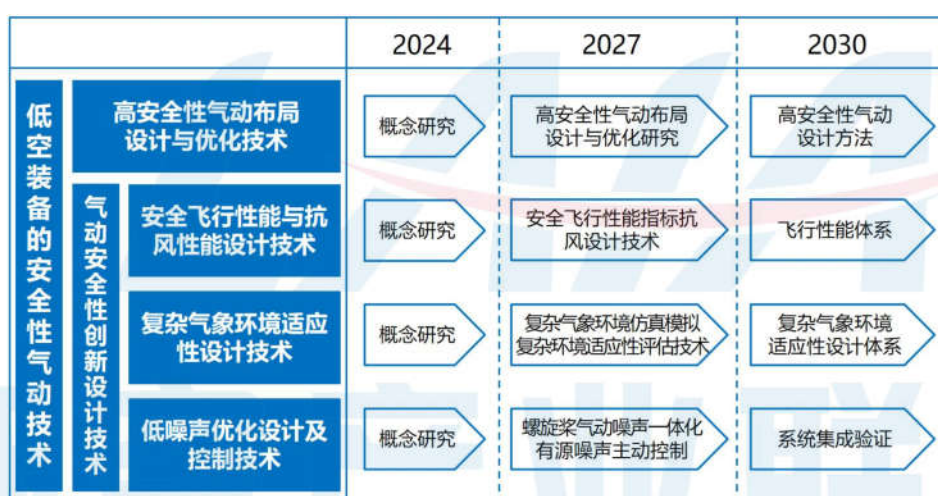


图 4 低空装备安全性气动（低噪）设计技术

（1）低空装备高安全性气动布局设计与优化技术。针对低空装备构型种类多、运行环境复杂、安全性要求高等特点，开展以高安全性为强约束的气动布局设计及优化研究，突破过渡状态气动干扰分析、满足多构型需求的气动布局参数优化等关键技术。

（2）低空装备安全飞行性能与抗风性能设计技术。针对低空装备运行空域安全敏感性高、飞行任务复杂多样、易受环境风扰动等特点，开展以高冗余度设计为要求的安全飞

行性能与抗风设计技术研究，建立复杂飞行环境下低空装备性能体系。

（3）低空装备复杂气象环境适应性设计技术。开展典型应用场景复杂气象环境特性研究、复杂气象环境仿真模拟技术研究以及低空装备复杂气象环境适应性评估技术研究等工作，建立低空装备复杂气象环境适应性设计体系。

（4）低空装备低噪声优化设计及控制技术。针对低空装备旋翼系统气动噪声问题，开展低噪声旋翼设计技术研究，基于低噪声旋翼设计方法，从动力系统源头上改善低空装备噪声水平，开展有源噪声主动控制技术研究，研制舱内噪声主动控制系统。

3.2 材料、结构及强度的安全性设计技术

现有材料、结构、强度设计技术对低空装备的适用性不足，亟需相关设计标准与规范的扩充与更新，其相关关键技术路线图如下：

		2024	2027	2030
材料 结构及强度的 安全性设计技术	低成本结构材料设计开发		程序编制	材料鉴定与入库
	结构安全设计	功能一体化结构优化设计	设计与优化	设计手册
		结构冲击安全性与成员防护设计	方案设计	设计手册
		结构震颤安全设计	方案设计	设计手册
		电动飞机适坠性设计	方案设计	设计手册
	噪音振动抑制技术		仿真与试验	设计手册
	可靠性技术	气候环境适应性设计	仿真与试验	设计手册
		长寿命可靠性结构设计	仿真与试验	设计手册
	轻量化、可变体结构设计		试验验证	设计手册

图 5 材料、结构及强度的安全性设计技术

（1）低成本结构材料设计开发。针对低空装备复合材料应用需求，研发复合材料性能数据共享程序，建立基础数据库，降低研发成本。并开展复合材料结构承载储能一体化技术研究，解决结构储能复合材料储能密度和承载性能难以兼顾的难题，提高飞行器结构效率。

（2）结构安全设计。针对低空装备的复杂构型，开展颤振安全设计技术研究，包括颤振分析、结构优化以及颤振抑制与控制技术，确保飞行安全。此外，针对飞行汽车等低空装备，开展结构冲击安全性设计与乘员防护技术研究，形成设计规范，为抗冲击设计提供基础支撑。同时，开展基于整机吸能策略的电动飞机适坠性设计，确保城市空中交通运行场景下载人低空无人驾驶装备的适坠性安全。

（3）噪声抑制技术。通过采用主动噪声控制、振动传递路径优化、吸声隔声材料铺设、声振超材料及多功能一体化结构设计等多种方法，可显著降低低空装备的噪声与振动水平，提高低空装备的使用安全性和乘坐舒适性。

（4）可靠性设计。针对低空装备结构系统的腐蚀、磨损和疲劳等问题，开展长寿命高可靠性设计技术研究，确保飞行器的长期稳定运行。此外，针对旋翼飞机等低空装备，开展轻量化/智能化/自适应起落架设计技术研究，建立起落架轻量化设计技术体系，提高起落架的品质和性能。

（5）轻量化可变体结构设计。针对当前低空装备新型高效结构发展需求，开展超轻分布式变形的高效低空装备新

型结构设计技术研究，突破关键技术，建立可变体结构设计技术体系，为低空装备的创新设计提供有力支撑。

3.3 动力及能源系统的安全设计技术

动力及能源技术是决定低空无人驾驶装备载荷、航程和安全性的关键因素，涉及电机、舵机等驱动器，电能、氢能等能源系统以及螺旋桨、旋翼等动力构件，其关键技术路线图如下：

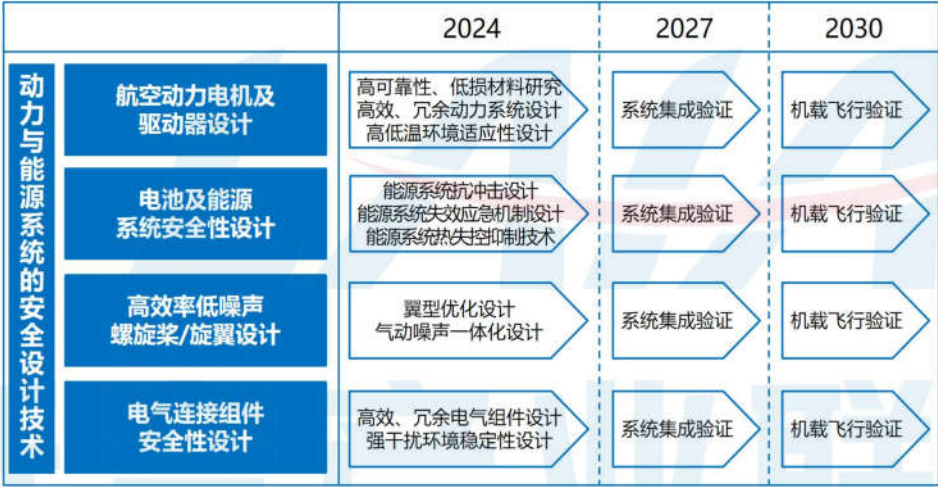


图 6 低空装备动力及能源系统的安全设计技术发展路线图

（1）航空动力电机及驱动器设计。在电机设计方面，采用高绝缘耐压、高可靠性材料及高效冷却系统，结合电磁兼容与容错设计，确保电机在复杂环境中安全稳定。驱动器设计强调冗余、故障检测与隔离、全面自检、热管理及电磁兼容，保障飞行器可靠运行。

（2）电池及能源系统安全性设计。电池系统同样采用冗余设计，配备故障检测与隔离、热管理、电磁兼容、软件安全验证及紧急供电系统等，确保安全运营。氢能源系统则

关注高压储氢容器的设计与安全性评估，建立面向氢能源低空装备的储氢容器设计方法、建模分析工具及安全性评估方法，并形成工艺验证样件，为氢能源低空装备的安全储氢提供技术基础。

（3）高效率低噪声螺旋桨/旋翼设计技术。针对新能源新构型低空装备，开展螺旋桨/旋翼动力装置的气动声学优化设计，形成高效率、低噪声动力装置气动方案，结合复合材料结构优化设计，形成高安全性轻质动力装置结构方案，满足总体性能对动力装置的要求。

（4）电气连接组件的安全性设计。电气连接组件的安全性设计涵盖冗余设计、绝缘保护、屏蔽设计、防水防尘、热管理、应力消除及快速故障检测与隔离等技术，确保电气连接组件在严苛条件下的可靠性和安全性。

3.4 低空装备飞行控制系统的安全设计技术

飞行控制系统是低空装备关键的组成部分，能够确保低空状态在各种飞行状态下的安全性和可靠性，低空装备的飞行控制系统的设计是确保飞行安全与性能的基础。下图为低空装备飞行控制系统的安全设计技术发展路线图。

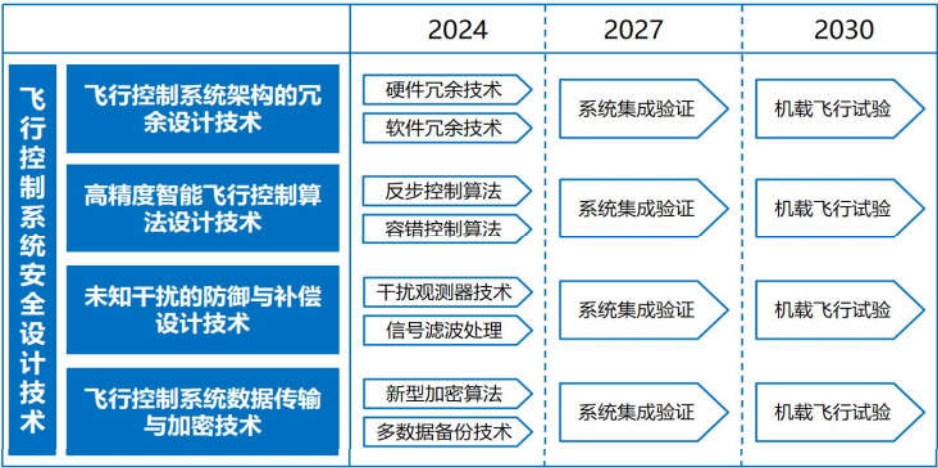


图 7 低空装备飞行控制系统的安全设计技术发展路线图

（1）飞行控制系统架构的冗余设计技术。结合智能容错控制策略，深入分析低空装备在复杂动态环境下的飞行特性，利用智能飞行控制算法动态调整飞行姿态和动力分配输出，实现安全、高效、精准的飞行控制。

（2）高精度智能飞行控制算法设计技术。针对复杂动态环境下的低空装备，需要设计高精度智能飞行控制算法，动态调整飞行姿态和动力分配，确保低空装备按照指定航迹飞行。此外，结合智能容错控制策略，以应对部分飞行控制系统失效情况下的安全飞行需求。

（3）未知干扰的防御与补偿设计技术。深入探究内部干扰/外部风、复杂气象以及电磁干扰的影响，集成高精度传感器和先进的干扰抑制/补偿算法，提高飞行控制系统的适应性和鲁棒性，并研发具有强抗电磁干扰能力的控制系统，以保证飞行指令的准确执行。

（4）飞行控制系统数据传输与加密技术。加密处理飞

行过程中的关键数据，并设计数据备份与恢复机制，确保飞行数据的连续性和可用性，实时监测飞行数据，提升飞行控制系统的安全性和可靠性。

3.5 低空装备感知系统及执行机构的安全性设计技术

针对低空装备的主动式、被动式、外部环境与数据安全，亟需对低空装备感知系统及执行机构安全性设计技术开展体系性布局。具体路线图如下：

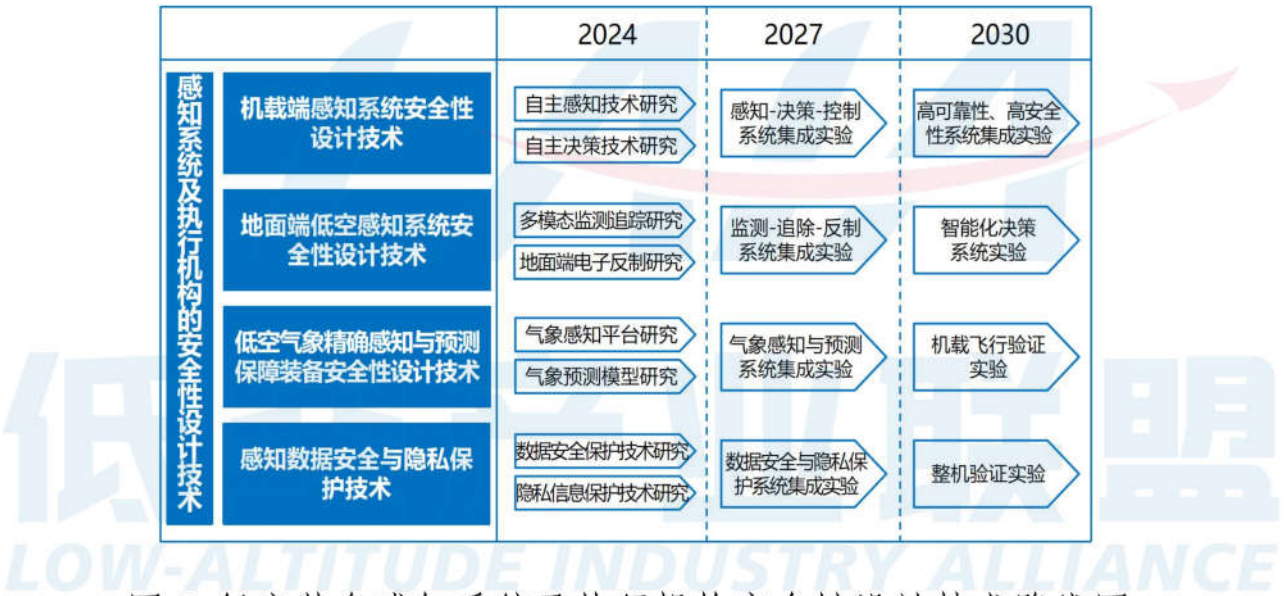


图 8 低空装备感知系统及执行机构安全性设计技术路线图

（1）机载端感知系统安全性设计技术。在软件和硬件层面共同设计故障检测预案，并针对不同故障类型设计安全保障机制；开展障碍物感知技术、灵敏避障技术研究；设计应急预案和保护机制，例如配备降落伞。

（2）地面端低空感知系统安全性设计技术。针对非法、未授权或“黑飞”等低空空域的安全和有序管理问题带来的重大隐患，地面端低空感知系统需承担全天候的监测、识别、

跟踪和预警任务，确保低空空域的安全与有序管理。

（3）低空气象精确感知与预测保障装备安全性设计技术。低空气象条件的短时骤变易引发安全事故，需开展气象感知和预测保障装备等技术研究，实现低空气象的精准感知，确保低空装备在复杂的低空气象环境下稳定工作。

（4）数据安全与隐私保护技术。低空装备采集的涉及个人隐私的数据应采取技术措施进行保护；使用声掩蔽技术发射人耳可听频段内的干扰信号，保护语音隐私。此外需要通过设置访问权限、进行数据追踪等对数据的访问和使用进行控制和管理。

3.6 实时传输数据链路系统的安全性设计技术

低空装备通过无线电（4G、5G 等）、卫星通信等方式建立实时通信链路传输数据，完成飞行调度、飞行控制、起降落等核心动作，其安全性对于低空无人机驾驶装备的飞行安全和任务执行至关重要。下图为实时传输数据链路系统的安全性设计技术发展路线图。

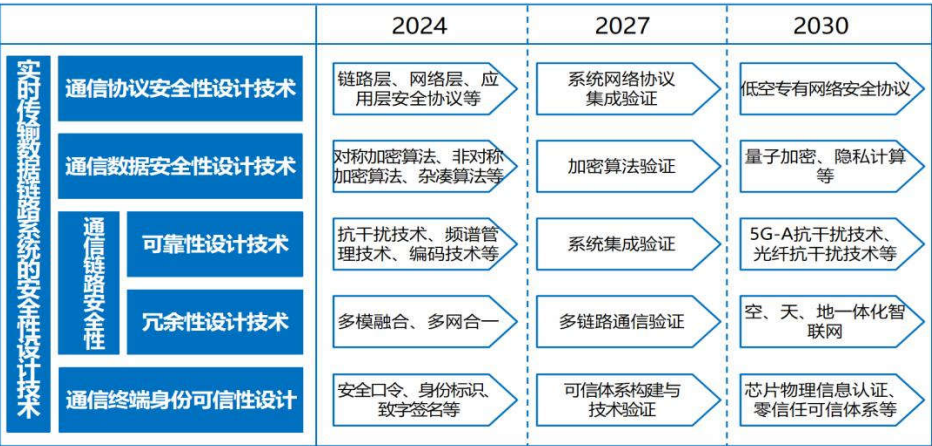


图 9 实时传输数据链路系统的安全性设计技术路线图

（1）通信协议安全性设计技术。低空装备在运行时有大量数据在通信网中流转，应采用安全的通信协议保障其数据链路的安全性。通过信道加密、完整性检查等方式，防止数据在传输过程中被窃听、篡改和伪造。

（2）通信数据安全性设计技术。低空装备内存在大量数据，其中可能存在个人隐私、重要地理、飞行控制信息等敏感数据，需采用加密技术实现增强性保护，以确保敏感数据在传输过程中的安全。

（3）通信链路安全性设计技术。通信链路安全性设计技术包括可靠性和冗余性设计技术。可靠性设计技术保障通信链路的稳定运行，避免低空装备飞行过程中的信号或数据丢失。单一通信链路遭到干扰和破坏时，冗余性设计技术可以保障低空装备安全飞行和飞行调度。

（4）通信终端身份可信性设计。低空装备未来势必与互联网逐步连接，其网络边界也将变得越来越模糊，应增加身份鉴别与访问控制机制，确保通信链路的建立是真实、可信、合法的，从而有效防范非法访问和攻击。

4 低空装备安全性的验证技术

4.1 气动布局和总体安全性验证技术与验证平台

探究大型实验装备前沿基础交叉学科实验理论，发展气动-环境、气动-噪声、气动-自由飞、整机-电磁环境等多学科交叉的实验验证技术，围绕复杂环境综合模拟大型风洞、沙尘模拟环境风洞、噪声测试与航迹优化试验场以及电磁环境效应等综合试验条件扩展进行基础设备能力建设，提升低空装备气动布局和总体安全性验证技术水平，支撑科技创新和低空装备研发，总体路线如下图：

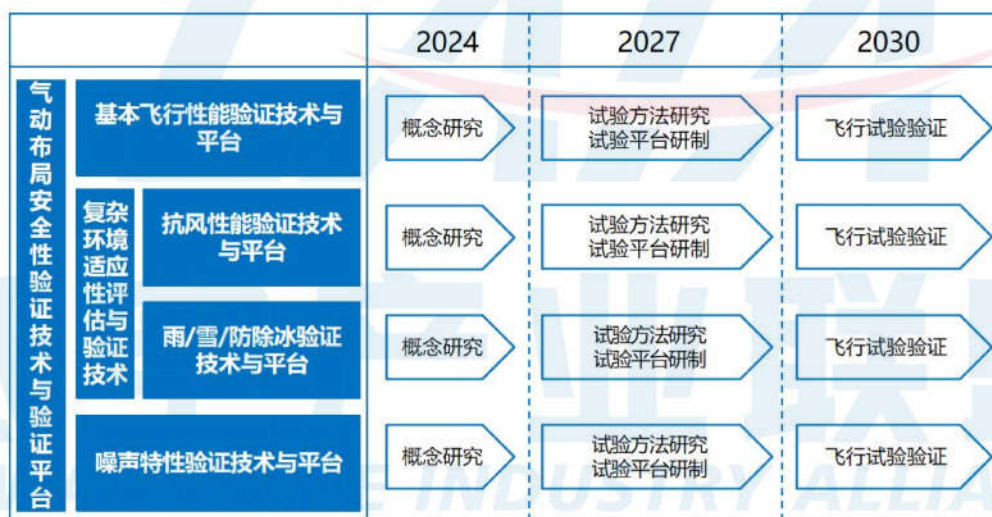


图 10 气动布局和总体安全性验证技术与验证平台发展路线图

（1）基本飞行性能验证技术与平台。对多旋翼、倾转旋翼、复合翼等新构型低空装备气动布局的基本气动特性、飞行性能等进行试验验证，获取气动力特性、舵效、载荷等试验数据，验证飞行速度、重量、高度、航程、操纵性等性能。验证平台主要包括风洞、自由飞试验场及配套试验系统

等。

(2) 复杂环境适应性评估与验证技术。针对低空装备抗风、抗结冰特性验证需求，开展气候适应性评估与验证技术研究；针对低空装备电磁兼容需求，开展低空装备复杂电磁环境验证技术研究。建立低空装备地面复杂环境试验方法和验证平台。主要包括：侧风和突风环境适应性评估验证、地面冻雨结冰试验技术、电磁环境效应验证技术等。验证平台：风洞、全机气候实验室、电磁环境测评实验室。

(3) 噪声特性验证技术与平台。对多旋翼、倾转旋翼、复合翼等新构型低空装备环境噪声、舱内噪声水平进行试验验证，获取城市应用场景下环境噪声、舱内噪声等试验数据，验证降噪设计、环境噪声等性能。验证平台主要包括航空声学风洞、飞行试验场及配套试验系统等。

4.2 材料与结构的安全性验证技术与验证平台

针对低空装备结构安全性、乘员舒适性、低空域环境友好性的高要求，开展面向人机安全与环境友好考核的结构安全性、耐久性验证评价体系构建。开展面向结构/储能系统抗冲击坠撞性能、乘员冲击保护性能、环境适应性、振动/噪声舒适性的评价测试平台研制，形成不同运营场景下针对不同考核指标的测试标准和试验规范，支撑低空装备人机安全性与舒适性综合评价。

		2024	2027	2030
材料与结构的安全性验证技术与平台	快速成型结构强度验证	强度性能评估	试验验证平台	综合评价
	一体化结构振动强度评估与验证	设计与优化	振动试验平台	试验验证
	碰撞坠撞安全试验	碰撞安全评价与试验	仿真与试验	优化与验证
		结构坠撞与乘员安全性	坠撞试验平台	综合评定
	疲劳与可靠性验证	复杂气候适应性验证	环境试验平台	效能评估
		新结构/新工艺疲劳寿命	试验验证	强度评估
		虚实融合强度试验	试验-模型关联	快速评估

图 11 材料与结构的安全性验证技术与验证平台发展路线图

（1）快速成型复合材料结构强度评估与验证技术。针对快速低成本的多功能复合材料结构大量应用给强度评估与验证带来挑战，建立面向快速成型复合材料复杂结构强度评估与验证方法，主要包括：低成本工艺下材料力学性能表征、材料静强度/损伤容限分析与评价、低成本快速修复与评估、复杂结构部件强度分析与验证。验证平台：复合材料结构强度试验平台。

（2）飞机/储能一体化结构振动强度评估与验证技术。针对未来电动飞机结构、储能结构一体化的安全性评估需求，开展一体化结构的动力学问题和振动强度评估与验证技术研究，为飞机一体化结构设计和验证提供重要支撑。主要包括：一体化结构振动阻尼变化规律，振动传递特性规律及模型，一体化结构振动疲劳寿命分析试验方法等。验证平台主要为振动试验平台。

（3）低空装备碰撞/坠撞安全性评价与试验方法。针对

无人机碰撞安全性问题，构建面向无人机运营场景的碰撞安全评价方法，建立无人机碰撞安全性验证、分析、优化设计及评价体系。针对低空新能源飞行器适坠性与乘员保护安全评定需求，建立适坠性试验标准规范，构建整机垂直-水平耦合坠撞试验技术、座椅乘员及约束系统冲击试验技术、虚实融合整机适坠性与乘员保护综合评定等。验证平台：水平冲击试验台、整机坠撞试验平台。

（4）低空装备结构系统疲劳可靠性评估与验证技术。

围绕低空装备研制与适航取证的结构系统疲劳可靠性评估与验证技术需求，开展飞行载荷环境数据统计分析、载荷/环境谱编制、新材料/新结构疲劳可靠性评估、复杂载荷环境疲劳可靠性验证等关键技术研究，形成相关技术标准规范，为低空装备安全性与高可靠性提供技术支撑。

4.3 动力与能源系统的安全性验证技术与验证平台

无人机动力与能源系统的安全性验证工作主要围绕提升系统在复杂飞行条件下的稳定性和可靠性展开，重点针对动力系统的故障检测、能量管理以及电池热失控防护等方面。主要可以划分为传统发动机系统安全性验证技术装备、电推进系统安全性验证技术装备与氢能源安全性验证技术装备三方面，技术路线图如下所示：

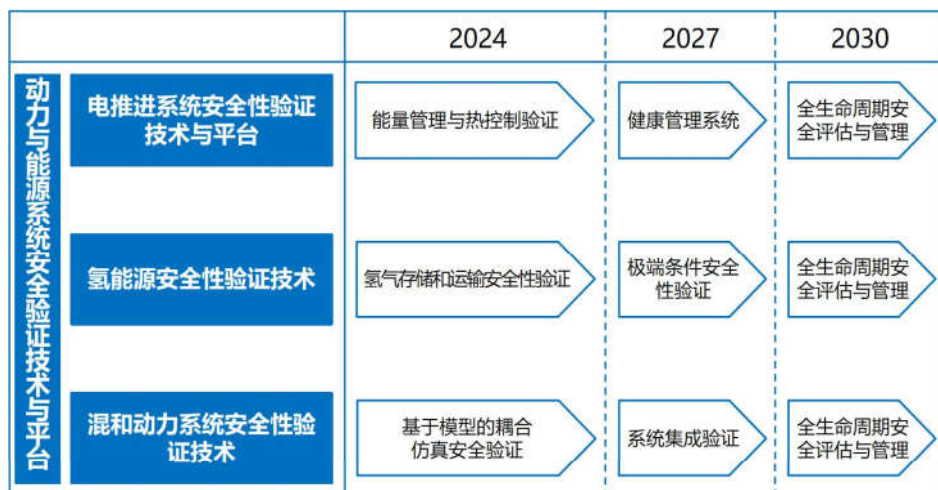


图 12 动力与能源系统的安全性验证技术与验证平台发展路线图

（1）电推进系统安全性验证技术与平台。 中型无人机系统可依据《中型民用无人驾驶航空器系统适航标准（试行）》进行规范，电推进系统通过试验室台架验证性能。大型无人机适用《电推进系统专用条件编制指南》，测试内容包括功率、温度、防火等。需进一步构建电推进系统的可靠性验证技术、动力冗余及故障诊断机制，完善地面测试平台建设，提升系统安全性。

（2）氢能源安全性验证技术。 针对高压气罐和液态贮箱强度评估验证需求，相关结构强度评估与验证技术主要包括：纤维缠绕复合材料储氢容器跨尺度建模分析方法、复合材料储氢容器力学性能及安全性试验评估方法、液氢贮箱综合性能快速评估系统开发等。验证平台：氢能复合材料结构强度试验平台。

（3）混和动力系统安全性验证技术。 混和动力系统安全性验证技术主要包括：储能系统结构抗冲击仿真技术、储

能系统抗冲击结构设计、典型储能结构抗冲击试验技术等。
验证平台：冲击试验台。

4.4 飞行控制系统安全性验证技术与验证平台

飞控系统是低空装备的核心控制系统，负责实现飞行器的航迹规划、姿态控制和飞行增稳等关键功能。针对低空装备飞行控制系统，开展飞控系统安全性分析方法、电子软硬件适航验证技术、执行机构的功能可靠性、安全性验证技术与智能飞控系统安全性验证技术与平台研究。

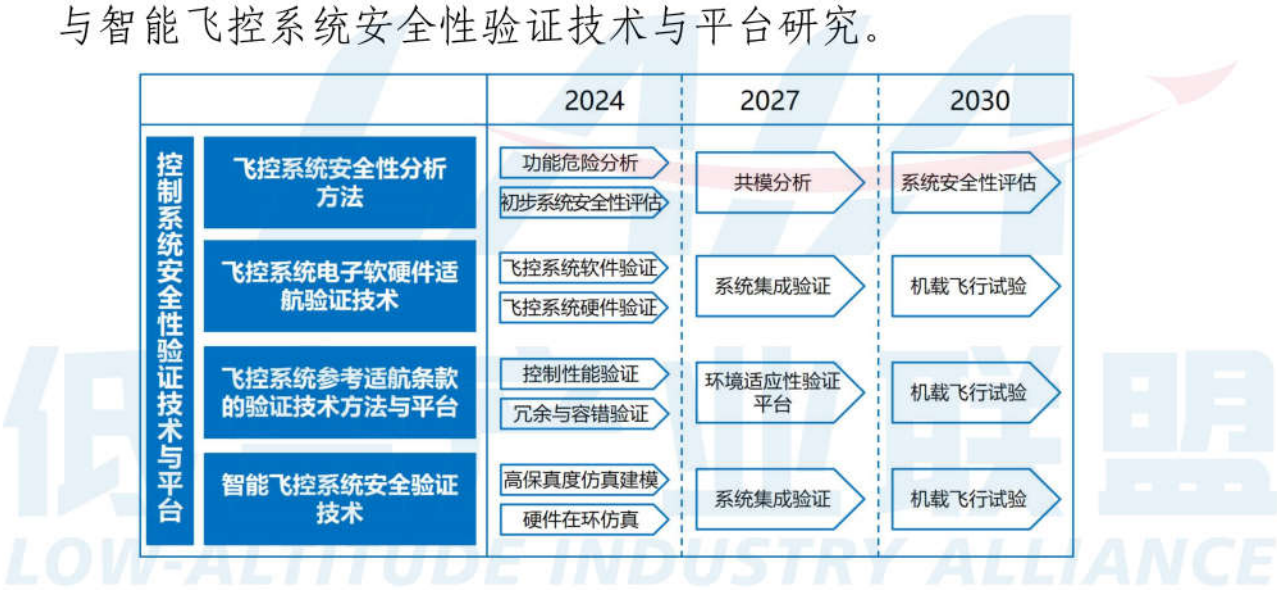


图 13 飞行控制系统安全性验证技术与验证平台发展路线图

（1）飞控系统安全性分析方法。飞控系统安全性分析与验证遵循 SAE ARP 4761 方法，通过双 V 流程实现安全性需求的分解与验证。主要步骤包括功能危险分析、初步系统安全性评估、共模分析等。由于飞控系统状态复杂，容错机制多样，需进一步研究现有设计与测试流程中的安全性试验需求与方法，确保各阶段设计验证的有效性，提升安全性并降低研制成本。

（2）飞控系统电子软硬件适航验证技术。飞控系统电子硬件验证包括代码验证、逻辑等效性测试、板级集成测试、覆盖率分析及时序验证，可依据 DO-254 标准进行分析和测试。飞控系统软件功能涵盖硬件资源管理、操作系统、任务与接口管理、传感器数据处理、余度管理、控制模态与率计算、故障告警等。软件安全性验证依据 DO-178 及 ASTM F3153-15 标准进行分析和测试。

（3）智能飞控系统安全验证技术。随着新构型低空装备的发展，飞控系统朝着高算力、智能化和高度集成化方向发展，集成传感器融合、路径规划、故障诊断、智能控制及 AI 算法模块，实现实时分析和决策。需建设高保真仿真建模能力，模拟复杂环境、气象、动态障碍物和地形影响，采用硬件在环仿真验证核心算法的安全性与可靠性，包括智能控制、模态转换、多源数据融合、路径规划和深度学习，确保飞控系统的可靠性和安全性。

（4）执行机构的功能可靠性、安全性验证技术与平台。无人机执行机构包括电机、舵机和传动机构，影响飞行姿态与任务执行效果。安全性验证通过长时间、高强度测试评估其疲劳极限、寿命及在极端环境（高温、低温、沙尘等）下的性能。通过容错控制与冗余设计，搭建验证平台，模拟多种任务与环境，分析故障并验证容错策略，确保执行机构的稳定性与可靠性。

4.5 感知系统安全性验证技术与验证平台

感知系统通过多传感器融合、抗干扰测试及容错机制，确保无人机在复杂环境中的感知与响应能力。验证平台包括复杂环境仿真平台、传感器测试系统。

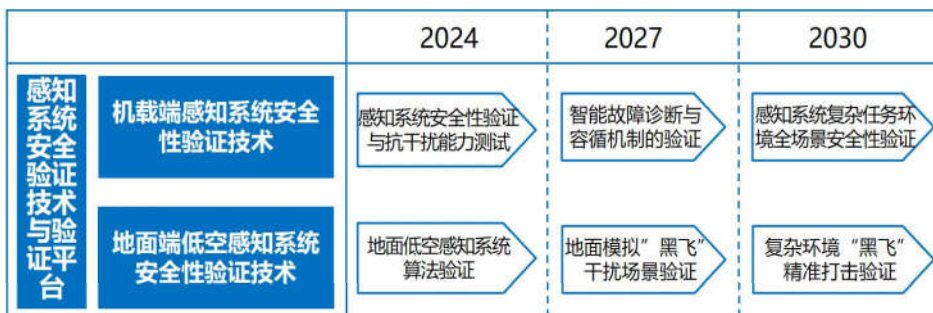


图 14 感知系统与执行机构安全性验证技术与验证平台发展路线图

（1）机载端感知系统安全性验证技术。低空装备机载感知系统由传感器、算法和数据组成，功能可靠性验证包括三方面：硬件可靠性、数据质量和算法可靠性。验证采用实景测试与仿真结合，并通过故障注入评估系统性能与安全性。

（2）地面端低空感知系统安全性验证技术。为确保地面端低空装备感知系统的安全可靠，需开展系统测试，包括场景模拟与实地测试。首先，进行 TDOA（差分定位）系统标准校准，验证测量精度。通过仿真测试验证算法的准确性和故障处理能力。在城市环境实地测试，评估复杂干扰下的定位精度，并优化算法，减少误报漏报，提升性能与安全性。

4.6 实时传输数据链路系统的安全性验证技术与验证平台

低空无人驾驶设备数据链路是完成任务的关键，包含上

行、下行和中继链路，传输过程涉及编码、调制、发射和接收。目前，数据链路频繁遭受攻击，带来重大安全风险。需开展认证、加密、抗干扰、访问控制及协议安全性验证技术，并配备相应验证平台。具体路线图如下：

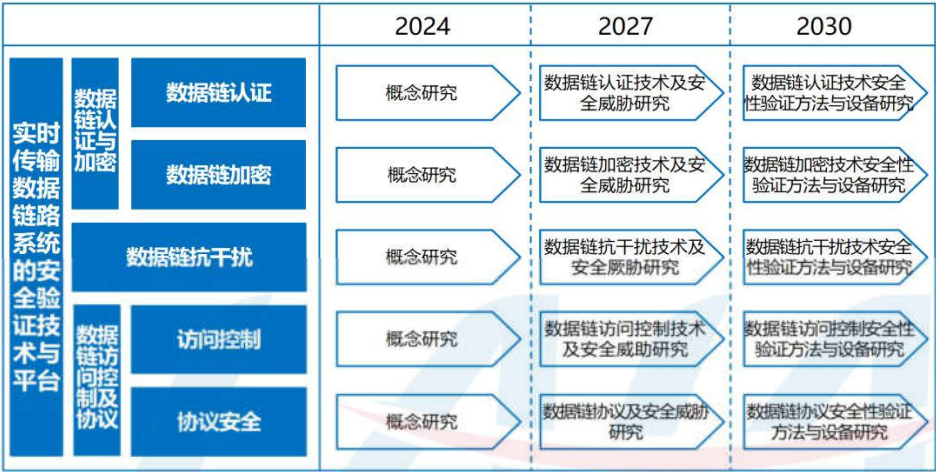


图 15 实时传输数据链路系统的安全性验证技术与验证平台发展路线图

（1）实时传输数据链加密技术的安全性验证技术与验证平台。低空无人驾驶装备的实时传输数据链涵盖指挥与控制、空中交通管制、感知规避链路，使用 UHF、L、C 波段及蜂窝、卫星和 Ad hoc 网络。无线传输易遭监听和攻击，导致信息泄露。为保障安全，采用对称、非对称、混合加密和量子密钥技术。目前加密验证方法包括机密性、完整性、密钥管理和攻击检查，需针对无人设备实时数据链特点制定系统化标准，构建专门的加密验证方法与平台。

（2）实时传输数据链抗干扰技术的安全性验证技术与验证平台。抗干扰技术至关重要包括跳频通信、扩频通信、MIMO 系统、抗干扰天线、智能干扰抑制和协作通信等，保

障通信安全并提升任务成功率。同时，反无人机技术也不断发展，主要采用声波干扰、信号干扰、黑客攻击、激光武器和无线电控制等手段应对非法无人机威胁。

（3）实时传输数据链访问控制技术的安全性验证技术与验证平台。低空无人驾驶装备面临黑客攻击风险，数据链访问控制需确保授权用户访问，防止 DoS 攻击、数据篡改与注入攻击，保障指令合法性。访问控制与加密、认证协同提升通信安全性，同时适应无人机的计算和能源限制，确保高可用性与可靠性。

4.7 无人驾驶航空器系统的遥控站安全性验证技术与验证平台

无人驾驶航空器遥控台（站）在控制、显示及互联中扮演重要角色。为确保系统安全性与可靠性，遥控台设计需符合严格标准，如数据显示刷新率、数据记录完整性及硬件环境适应性。同时，遥控台作为地面节点，与监管平台互通，实现飞行数据实时传输，需开展网络安全、基线安全、安全保障和数据安全的评估与验证。具体路线图如下：

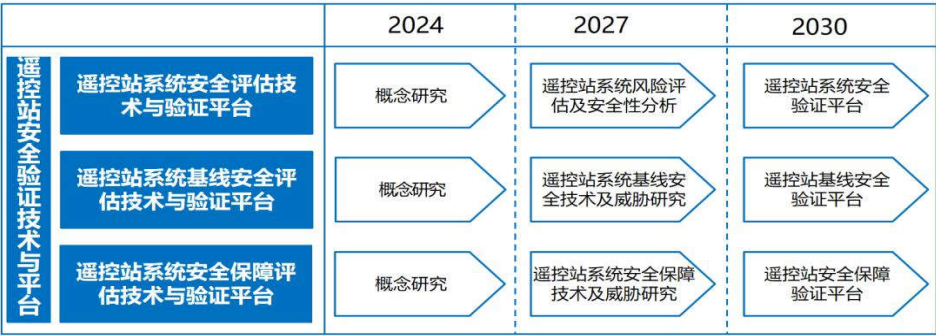


图 16 无人驾驶航空器系统的遥控站安全性验证技术与验证平台
发展路线图

（1）无人驾驶航空器系统遥控站系统安全评估技术与验证平台。无人驾驶航空器系统的遥控站作为核心控制节点，若遭受黑客攻击，可能导致飞行控制丧失、数据泄露或无人机被劫持。其面临软件漏洞、病毒等威胁。为保障安全，需采用信息安全评估方法，如风险评估、合规性评估、渗透测试、漏洞扫描、安全审计和应急响应评估，识别潜在威胁、发现漏洞、模拟攻击，提升安全性与应急能力。

（2）无人驾驶航空器系统遥控站系统基线安全评估技术与验证平台。无人驾驶航空器系统遥控站的基线安全评估对于保障飞行安全、风险识别与缓解、符合法规及提高系统可靠性至关重要。基线评估包括风险评估、合规检查、安全措施实施和持续改进。目前，遥控站系统主要借用通用应用系统的方法，缺乏针对无人驾驶业务特点的评估技术。因此，需构建面向遥控站的基线评估技术与平台。

（3）无人驾驶航空器系统遥控站系统安全保障评估技术与验证平台。无人驾驶航空器系统遥控站的安全保障依赖多层防护，包括防火墙、IDS/IPS、SIEM、NAC 和 Web 应用防火墙等网络安全技术，辅以物理安全措施如门禁和监控，构建综合防护体系。需构建基于 AI 的实时威胁检测、自适应响应机制和持续监控的应用层安全技术。

4.8 低空装备安全性飞行验证与评估技术

低空装备安全性飞行验证技术可分为低空装备飞行平台安全性飞行验证、低空装备数据链路安全性飞行验证、低

空装备遥控站安全性飞行验证、低空装备综合能力验证、复杂环境下低空装备安全性飞行验证。具体路线图如下：

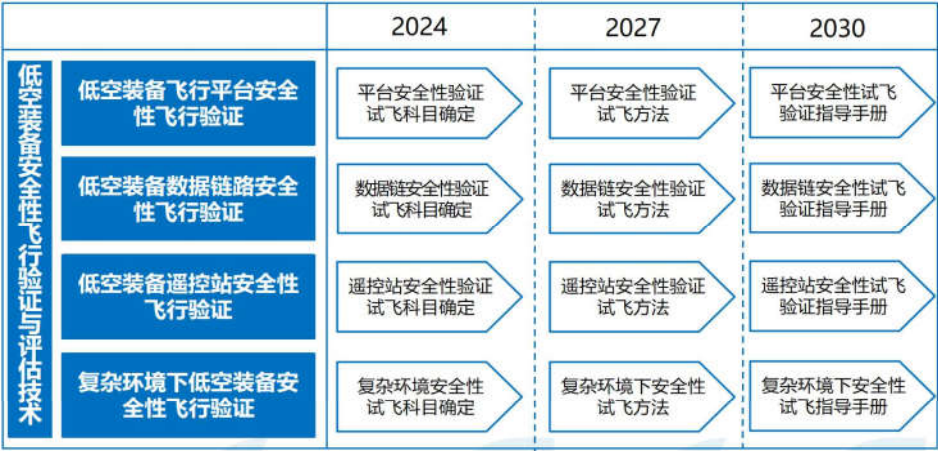


图 17 低空装备安全性飞行验证与评估技术发展路线图

（1）低空装备飞行平台安全性飞行验证。基于适航符合性验证条款开展影响低空装备飞行平台安全性的飞行性能、操稳特性、飞控系统、导航系统、机电系统等系统的飞行验证方法研究，同时对典型场景下低空装备失效模式与保护策略进行分析，提出对应的飞行试验方法及评价准则，编制低空装备飞行平台安全性飞行验证指南与标准。

（2）低空装备数据链路安全性飞行验证。分析数据链路在典型应用场景中的安全风险因素，开展低空装备数据链路安全性飞行验证技术研究，重点突破数据链路抵御干扰、防止数据泄露、确保数据传输的完整性和准确性的验证技术，评估数据链路的抗干扰能力、验证数据加密技术、验证数据链路的完整性保护机制。模拟各种可能的飞行条件和干扰场景，全面评估数据链路的安全性能和可靠性。

（3）低空装备遥控站安全性飞行验证。分析国内外遥

控站适航符合性验证相关条款，开展遥控站功能性能验证方法研究，包括遥控站响应特性、控制精度、稳定性、电磁兼容性、隐私保护等相关验证内容。尤其要针对遥控站在长时间使用和复杂环境下的稳定性的验证方法，突破一控多机、一机多控、控制权转移、遥控站失效、控制站完整性等验证方法。

（4）复杂环境下低空装备安全性飞行验证。主要通过
对低空装备在不同环境条件下的综合表现，包括风速、风向、
温度、湿度等天气条件以及地形和电磁环境等条件下的功能
性能，从而确定低空装备的适用范围和限制条件。包括在复
杂飞行条件下的导航能力、避障能力以及飞行稳定性、动力
系统的性能和可靠性、通信系统的抗干扰能力、信号强度和
稳定性、结构的完整性等综合性能。

5 低空装备运行的安全支持技术

5.1 低空装备运行中的维修性与安全技术

低空装备在运行阶段面临诸多安全隐患，为提升低空装备的安全性能，亟需加强实时状态监测、故障预警以及维修保障能力，从系统工程角度出发，形成安全运行支持技术图谱，引导相关技术研究。具体路线图如下：

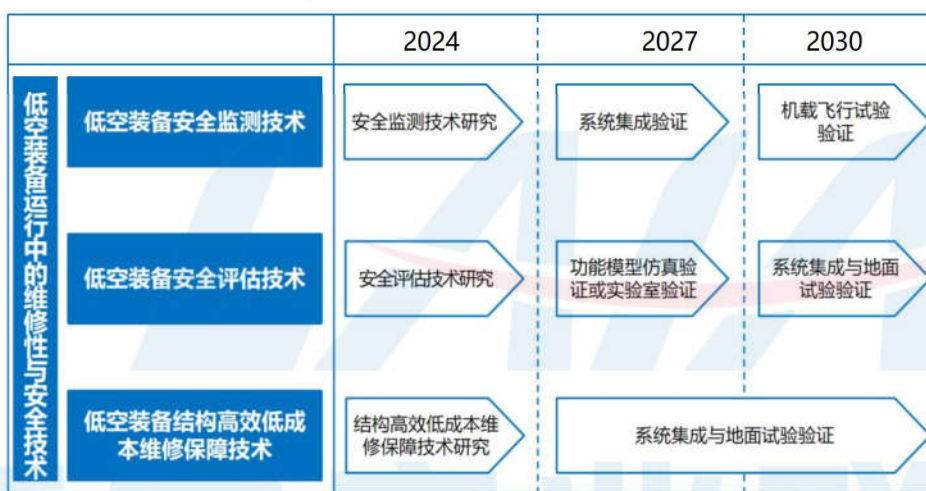


图 18 低空装备安全检测与评估技术发展路线图

（1）低空装备安全监测技术。分析关联参数及获取方式，开发机载独立监测装置，实现安全监测数据的获取与发送，并结合地空数据链实现运行过程的安全监测。

（2）低空装备安全评估技术。收集、筛选故障事件，识别安全风险，构建安全评估方法模型，形成安全评估指标体系，并制定高风险故障的原因调查和改正措施，以准确评估低空装备的当前安全状态。

（3）低空装备结构高效低成本维修保障技术。开展结构损伤的快速检测、高效评估与低成本维修技术研究，建立相应的维修保障技术体系，确保低空装备的安全与经济性。

5.2 低空装备健康管理技术

低空装备健康管理系统集成感知、监控、预警、分析及大数据管理等技术，通过机载监测装置全域监测数据，经空地数据链实时下传至地面数据中心。具体路线图如下：

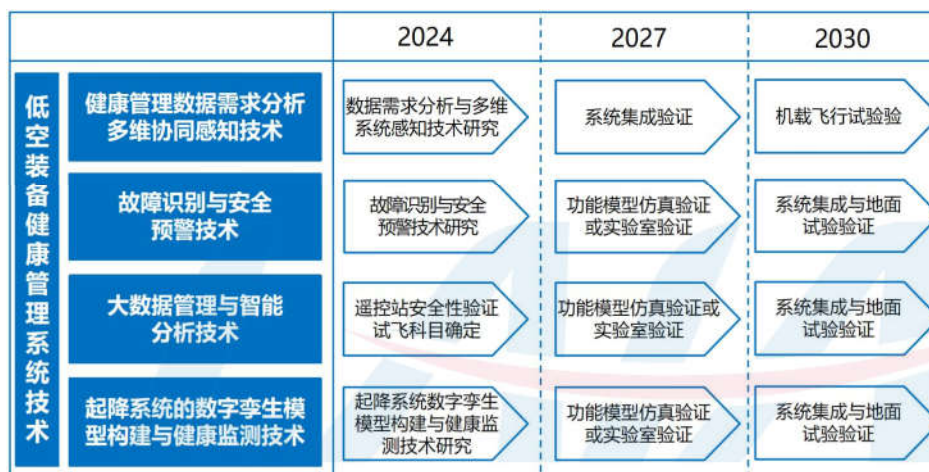


图 19 低空装备健康管理技术路线发展路线图

（1）健康管理数据需求分析多维协同感知技术。通过机载自测试和传感器信息，实现对装备状态和使用工况的全面感知，确保安全监测数据的准确性与可靠性。

（2）故障识别与安全预警技术。利用数据预处理和模式识别，对低空装备的运行状态进行实时监测，能够准确定位和识别飞行安全相关故障，支持预警机制的触发，提升飞行安全保障。

（3）大数据管理与智能分析技术。通过建立低空装备的大数据中心和数据共享网络，应用深度学习与机器学习，持续生成健康管理核心功能模型，增强对装备故障和潜在风险的识别与预测能力。

(4) 通勤飞机起降系统的数字孪生模型构建与健康监测技术。构建通勤飞机起降系统数字孪生模型，实时模拟监测健康状态，提高设计与验证效率，跟踪全生命周期状态，增强安全可靠。

5.3 低空装备面向安全使用的支持技术

低空装备维护支持技术旨在全面分析健康与管理信息，结合外部信息源与数字化手段，为低空装备的安全使用和维修提供决策支持。具体路线图如下：

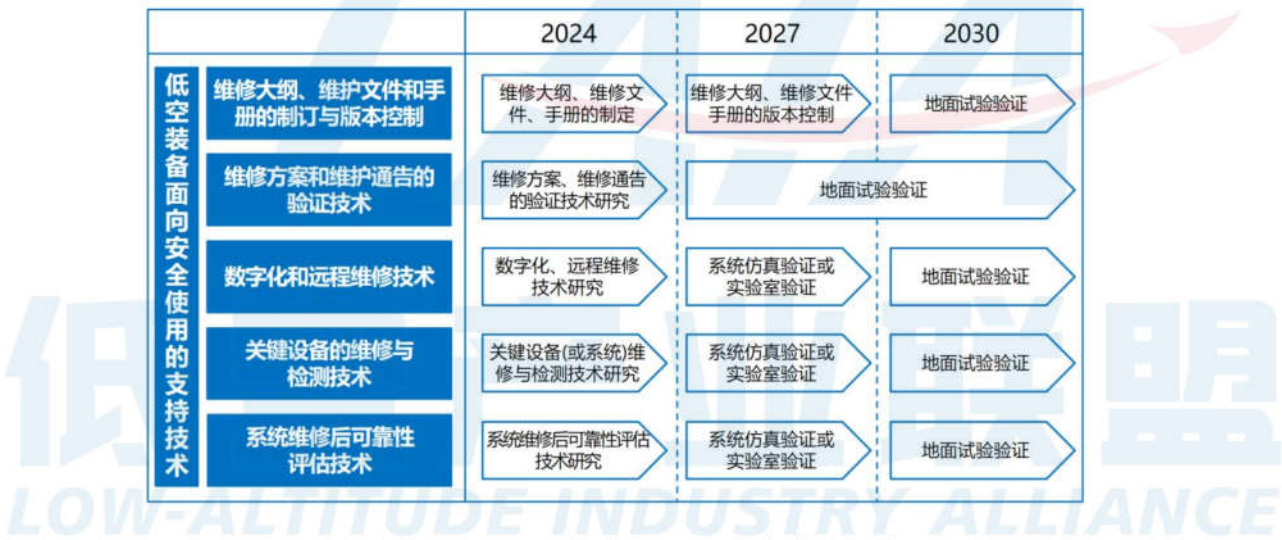


图 20 低空装备面向安全使用的维修技术发展路线图

(1) 低空装备维修大纲、维护文件和手册的制订与版本控制。基于结构损伤容限分析、系统安全性分析和 MSG-3 逻辑决断方法，确保适航性限制和维修要求的准确性。

(2) 维修方案和维护通告的验证技术。关注维修方案、工艺和工具的准确性与有效性，确保重大修理改装的安全性。

(3) 数字化和远程维修技术。通过建立装备的数字化模型，提供可视化支持，并利用信息通信技术、人工智能和

物联网实现远程诊断和维护管理，提升维修效率和安全性。

（4）关键设备的维修与检测技术。强调对能源、动力、飞控等关键系统的深入了解和故障分析，确保快速拆卸、原位维修及准确检测，以提高维修的一致性和可靠性。

（5）系统修后可靠性评估技术。评估低空装备经过维修后的性能，涵盖数据收集、功能性测试和可靠性建模等，确保装备在复杂环境中的安全性和作业执行能力，从而延长使用寿命并降低故障率。



低空产业联盟
LOW-ALTITUDE INDUSTRY ALLIANCE

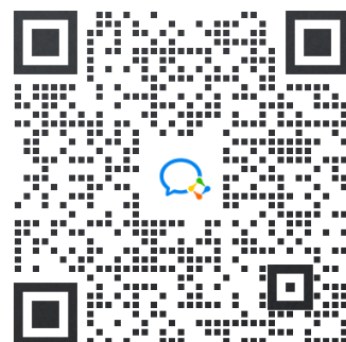
免责声明：

1. 本内容非原报告内容；
2. 报告来源互联网公开数据；如侵权请联系客服微信，第一时间清理；
3. 报告仅限社群个人学习，如需它用请联系版权方；
4. 如有其他疑问请联系微信



行业报告资源群

1. 进群福利：进群即领万份行业研究、管理方案及其他学习资源，直接打包下载
2. 每日分享：6份行研精选报告、3个行业主题
3. 报告查找：群里直接咨询，免费协助查找
4. 严禁广告：仅限行业报告交流，禁止一切无关信息



微信扫码，长期有效

知识星球 行业与管理资源

专业知识社群：每月分享8000+份行业研究报告、商业计划、市场研究、企业运营及咨询管理方案等，涵盖科技、金融、教育、互联网、房地产、生物制药、医疗健康等；已成为投资、产业研究、企业运营、价值传播等工作助手。



微信扫码，行研无忧

6 发展建议

新能源新构型低空装备是低空产业发展的核心，其安全性对于低空经济健康、良性、快速发展至关重要。本文系统介绍了新能源新构型低空装备安全技术体系的研究范围、基本概念及主题框架，致力于为行业提供技术支撑，为了有效推动该项工作的健康、持续发展，特提出如下建议。

一是建立最广泛、紧密的安全技术体系研究联合体。在低空产业联盟的倡导下，开展跨行业、跨组织、跨地区的安全技术体系联合研究，共同参与安全技术的研究及相关标准的制定。

二是加快健全低空装备安全设计标准规范和研究成果推广应用。面向行业发展需求，基于实证加快推动先进适用安全技术创新成果转化形成标准，同步推进试验验证能力建设，形成开放共享的标准并加快成果的推广应用。

三是加强统筹协调，加快建设低空装备安全检测认证机构。以相关技术标准与验证体系为基础，支持采取“央地共建”等模式加快建成一个权威性的专业化建设、市场化运营、开放式服务的低空装备安全检测与认证服务机构，支撑低空装备产业健康可持续发展。