

# 低空安全天网工程的发展与探讨

王浩<sup>1</sup>, 冯登超<sup>2</sup>, 王亦楠<sup>3</sup>, 杜振坤<sup>4</sup>

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 山东警察学院 警用无人机战训研究中心, 济南 250200;

3. 国务院发展研究中心, 北京 100010;

4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100000)

**摘要:** 为了贯彻落实总体国家安全观, 开展了低空安全天网工程的跨学科综合研究; 对低空安全天网工程的总体构架进行了探索, 阐述了低空安全天网工程相关的卫星互联网服务技术、北斗导航与地基增强定位系统、低空通信网络保障技术、低空飞行器设计与适航管理、低空空域环境保护以及低空安全管理的法律法规需求, 分析了低空飞行器在飞行前、飞行过程中和飞行结束等三类飞行状态中的飞行流量监测方法, 设计了低空安全走廊与航路网规划方案, 研究了低空空域的飞行器管理目标、管理方法以及低空安全管理系统的总体架构, 讨论了低空飞行事故征候与处置方法, 提出了低空安全天网的原型试验场及其软硬件平台建设思路, 明确了运营与管理系统的部署、通信数据安全等方面的建设需求, 制定了低空安全天网工程的验收程序和考核指标, 剖析了低空安全教育与加强低空人才培养的重要性, 对于保障低空产业链的安全有序发展具有积极的推动作用。

**关键词:** 低空安全走廊; 无人机系统; 天网工程; 数据安全; 低空安全管理; 低空安全教育

## Development and Discussion of Low Altitude Safety Skynet Project

WANG Hao<sup>1</sup>, FENG Dengchao<sup>2</sup>, WANG Yinan<sup>3</sup>, DU Zhenkun<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Watershed Water Cycle Simulation and Regulation, Beijing 100038, China;

2. Police UAS Combat Training Research Center, Shandong Police College, Jinan 250200, China;

3. Development Research Centre of the State Council, Beijing 100010, China;

4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100000, China)

**Abstract:** In order to implement the overall national security concept, interdisciplinary comprehensive research on the low altitude safety skynet project was carried out. The overall framework of the low altitude safety skynet project was explored. It was expounded that the national satellite internet service technology, the Beidou navigation and ground-based enhanced positioning system, the low altitude communication network support technology, the low altitude aircraft design and airworthiness management, the low altitude airspace environmental protection and legal and regulatory requirements of low altitude safety management related to low altitude safety skynet project. The flight flow monitoring methods of low altitude aircraft were analyzed in three flight states: before flight, during flight and the end of flight. The route planning scheme of low altitude safety corridor was designed, and the aircraft management objectives, the management methods and overall structure of low altitude safety management system in low altitude airspace were studied. The symptoms and treatment methods of low altitude flight accidents were discussed. The idea of the prototype test site construction of low altitude safety skynet and the software and hardware platform were put forward. The construction requirements of operation and management system deployment and communication data security were defined, and the acceptance procedures and assessment indicators of the low altitude safety skynet project were formulated. The importance of low altitude safety education and strengthening low altitude personnel training was analyzed. The construction of low altitude safety skynet project played a positive role in promoting the safe and orderly development of low altitude industrial chain.

**Keywords:** low altitude safety corridor; unmanned aircraft system; skynet project; data security; low altitude safety management; low altitude safety education

收稿日期: 2022-05-21; 修回日期: 2022-05-23。

基金项目: 山东警察学院科研培育专项基金项目(YKYPYZX202201)。

作者简介: 王浩(1953-), 男, 北京人, 博士, 中国工程院院士, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任, 主要从事流域水循环与低空信息化等多个领域的基础方向的研究。

王亦楠(1971-), 女, 河北唐山人, 博士, 研究员, 主要从事能源安全、水安全与低空安全方向的研究。

杜振坤(1964-), 男, 河北滦南人, 教授级高工, 主要从事智能建造、新技术与新材料开发, 咨询和项目管理等方向的研究。

通讯作者: 冯登超(1977-), 男, 四川西充人, 博士, 副教授, 主要从事低空安全管理与警用无人机应用方向的研究。

引用格式: 王浩, 冯登超, 王亦楠, 等. 低空安全天网工程的发展与探讨[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 1-10.

## 0 引言

无人机技术的飞速发展和广泛应用,深刻改变着战争形态,影响着世界政治经济局势,改变着人类的生产生活。如何应对无人机时代的来临,与时俱进开展低空安全研究,发展低空安全产业,不仅决定着国家安全,还影响着经济社会可持续发展的全局,已是当前激烈国际竞争下的战略要地之一。

我国的“总体国家安全观”包括11个方面,即政治安全、国土安全、军事安全、经济安全、文化安全、社会安全、科技安全、信息安全、生态安全、资源安全和核安全。低空安全涉及国家安全的所有领域。无人机时代的来临,给每个安全领域都创造了新的机遇,也提出了新的挑战。

2020年,亚美尼亚和阿塞拜疆的军事冲突中,阿塞拜疆投入多架无人机单向杀伤对方的地面装甲目标。2021年,土耳其出动多架察打一体无人机对叙利亚空袭,摧毁了叙利亚多个地面目标。2022年,俄乌军事冲突中,无人机在战术层面展示了强大的侦察监视能力。在未来战争中,如果作为防御一方拥有更多的先进无人机,具备完整的低空防御系统,对方如果缺乏先进的防空手段和电子战能力,其陆军和坦克集群就会受到降维打击,战争的态势和走向会完全不同。

我国奉行防御性国防政策,低空安全天网工程,作为一种国防防御战略的全新思路,完全契合这一基本政策。

低空安全天网工程不但是一个军事战略防御工程,具有加强国防建设的重要作用,更是一项维护社会秩序、保证人民安全、发展低空经济的创新工程。

低空安全天网工程是一个以低空空域为基地,由无人机和飞行器监管、监视、预警与识别系统、拦截系统以及指挥、控制和通讯系统组成的立体数字化系统工程。

世界各国都在进行低空安全研究,中国在这一领域的研究处于领先地位<sup>[1]</sup>,低空安全天网工程的概念和理论由中国学者率先提出。通过低空安全天网工程的实施,将带动一批诸如无人机、低空监管、雷达监测、激光、微电子、计算机、物联网等技术组成的高技术群的发展,并进一步促进在经济、军事、科学技术等方面的自主创新研究。

低空空域作为一种天然的资源,如同土地、河流和海洋一样,是一个国家自然资源的重要组成部分,具有稀缺性<sup>[2]</sup>。低空空域的特殊性是指其虽然可以重复利用,但仍属于流量资源,对其利用必须是即时的,并且可以通过科学管理提高低空空域资源的利用率。随着低空产业的迅速崛起,低空空域资源的稀缺性、重要性已经被越来越多的人所认可,将固定的、有限的、处于闲置状态的低空空域资源转化为能创造市场价值的经济资源已经成为世界各国的共识。

2019年11月,美国纽约州宣布建成了全美首条无人驾驶飞机测试走廊。2019年,美国低空产业创造了2470亿美元的经济贡献,提供了约120万个就业岗位。2022年,

美国众议院批准2.25亿美元无人机巡检/无人机低空交通专项基金,用于无人机运营和空中交通配套设施建设,拟定从2024年开始无人机低空交通运营。美国企业航空联盟表示,如果低空交通运营和后续技术航空服务供应商得到支持,将有潜力创造近30万个就业岗位,到2035年,每年创造1150亿美元的企业产值。在无人机运营发展的同时,为了确保低空安全,2022年4月,美国白宫网站发布《国内反无人机系统国家行动》,用于指导美国国内机构应对本土日益严峻的低空安全威胁。2022年5月,德国政府划拨8600万欧元资助低空空交通计划项目,用于保障低空运营。为了应对低空安全问题,2018年至今,德国交通部和警察局等联合开展了无人机防御系统研发。

在市场和政策的双轮驱动下,我国的低空产业得到快速发展,特别是民用无人机产业发展迅猛,处于全球领先地位<sup>[3]</sup>。2020年,全球无人机产业规模94亿美元,我国无人机产业规模约75.8亿美元。截至2021年,我国有人驾驶航空器飞行118.2万小时;无人机运营企业1.27万家,实时飞行约3.86亿架次,飞行时长月1668.9万小时;警用航空中,警用直升机发展到近百架,警用无人机超过1万架。为了保障低空产业的安全有序发展,我国学者和科研工作者先后低空安全领域开展了一系列的探索研究工作。2015年,我国首次提出了低空安全走廊框架<sup>[4]</sup>,先后开展了多项有关低空安全走廊的理论研究和探索工作<sup>[5]</sup>,召开了低空安全产业峰会等学术研讨会,建立了低空安全走廊相关研究机构,出版了《目标防护与低空安全》专刊、《低空安全走廊理论与应用》等科教书籍。2017年,中国科学院地理所与民航局及企业联合开展了低空公共航路规划研究<sup>[6]</sup>。2017年云南警官学院成立了无人驾驶航空器管理及应用协同创新中心,开展低空安全实战应用。2017年,中国人民公安大学成立中国低空安全研究中心,开展了低空安全的法律法规研究。2019年,南京航空航天大学人文社科学院开展了低空空域管理改革的法理研究。2020年,南京多基观测技术研究院成立了低空安全走廊研究中心,开展低空安全走廊技术和应用探索。2021年,中国电科集团开始打造低空安全走廊,服务低空经济发展。2022年,山东管理学院建立了人工智能与低空安全走廊产业研究所,开展低空安全产业研究。中国人民警察大学、铁道警察学院、南京森林警察学院、山东警察学院等探索了警用无人机与低空安全管理相关的人才培养机制。航天神舟飞行器有限公司、四川九洲空管公司、中急管科技公司等企业等企业开展了低空安全管理与反制系统研制工作。各军兵种实现了低空安全防御和低空巡查、军事打击一体化的作战用途。2022年,国务院印发《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》,提出了优化航路航线网络、加强军民航空管理基础设施建设的建议,为低空安全天网工程建设提供了政策保障。2022年,国务院印发《“十四五”国家安全生产规划》,提出加强无人机管控,防范化解重大安全风险,为低空安全天网工程建设注

入了动力。

在十四五国民经济建设中,开展低空安全天网工程,建设覆盖低空空域、具备过滤功能的低空天网,过滤各类非法入侵的飞行器等低空威胁,将保障我国低空空域的安全运营。同时,结合低空安全天网工程,建设一批军民两用的低空停机坪和通航机场、低空飞行机队、机务维修与机务保障力量,可以有效填补军用机场网络的空白,有利于隔离敌对势力的空中入侵,加强国防交通运输能力、增强低空后备人才储备、辅助军队完成军事任务,在国防和军事领域发挥特殊作用。

以下将结合我国低空空域发展现状和特点,探索低空安全天网工程的总体架构。

### 1 总体架构

基于我国低空产业发展与低空安全管理的现状,探索了低空安全天网工程的构建方法。

低空安全天网工程的总体架构如图 1 所示。由图 1 可知,低空安全天网工程的总体架构包括工程建设需求、核心技术体系、原型试验场建设、应用场景示范、人才培养体系、验收与考核等内容。

低空安全天网工程建设需求包括国产卫星互联网、飞行器导航性能、低空通信网络<sup>[7]</sup>、飞行器设计与管理、低空空域环境保护、低空法律法规需求<sup>[8]</sup>等内容。核心技术体系包括低空飞行流量管理、低空安全走廊与航路网规划<sup>[9-10]</sup>、北斗导航与地基增强系统、基于广播自动相关监视(ADS-B, automatic dependent surveillance broadcast)的低空监视网络、数据安全保障机制、航天遥感与航空遥感技术<sup>[11-12]</sup>、低空安全防范技术<sup>[13]</sup>以及飞行事故征候、事故调查与处置等。其中,低空安全防范部分,突破了传统的无人机反制思路的局限性,结合低空安全运营的需求,探索低空安全防范策略,避免了无人机反制可能引起的低空次生灾害。

原型试验场建设,包括试验场分类、软硬件平台建设及系统部署方案。在应用场景示范中,包括低空交通运营场景以及低空安全管理场景。其中,在试验场的测试中,增加了数据传输安全与存储安全测试环节,确保低空安全天网工程中的数据安全。

低空安全教育与人培养体系搭建,包括低空安全科普教育与人才培养。其中,低空安全科普教育包括科普基地的低空安全宣传方式以及科普教材开发。低空安全人才培养机制包括院校人才培养与行业级人才培养机制的探索,重点讨论了产学研结合的人才培养策略。

低空安全天网工程的验收与考核,包括验收程序和考核指标。其中,验收程序重点介绍了验收步骤,在考核指标部分,探讨了主要的考核指标要求。

以下,将结合低空安全天网工程的总体架构,分别介绍低空安全天网工程的主要特征与建设要素。

#### 1.1 主要特征

低空安全天网工程,是以低空空域的日常运营、生产、

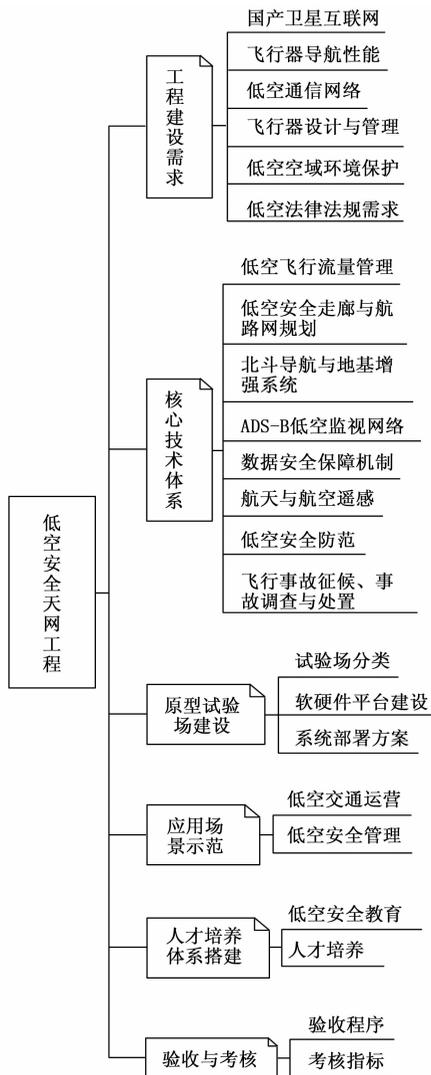


图 1 总体架构

生活及安全保障作为主要发展目标,呈现立体性、区域性、融合性、广泛性等特点。

1) 立体性:低空空域是指垂直范围真高 3 000 米(含)以下的活动空间,它将人类的经济活动由地面向空中延伸、由平面经济向立体经济转变,形成三维空间的立体经济形态。低空安全天网工程,是在三维空间的立体经济形态背景下开展的低空基础设施建设。

2) 区域性:低空安全天网工程建设,采用分布式路网建设,类似地面公路建设,具有小规模、小范围、分散性等特点,呈现出明显的地域性和区域性特征,对地区经济发展产生带动效应的同时,也受当地环境条件的影响和制约。

3) 融合性:低空安全天网工程的主要作用除了军事应用、警务应用、海关缉私和通用航空等低空交通运输及多样化行业应用服务,还包括低空安全管理服务。

4) 广泛性:低空安全天网中的运行主体、飞行器种类以及应用行业具有广泛性。低空运行主体包括企事业单位,

政府机关、公民个人等；低空飞行器种类具有广泛性，包括飞行汽车、飞行背包、固定翼无人机、多旋翼无人机、无人直升机、动力伞、三角翼、热气球、飞艇等各类有人驾驶航空器和无人驾驶航空器；低空运行行业包括军用航空、警用航空、低空交通、低空公共服务和管理、低空旅游、低空物流、低空电力巡线、低空体育运动、低空安全防范、农业植保、低空环境监测等。

## 1.2 建设要素

低空安全天网工程的建设，需要遵循低空主权和数据主权原则，坚持我国低空安全与信息化发展并重的建设思路。

从全球地沿格局分析，我国疆域广阔，周边分布国家数量较多。随着无人机技术的发展，传统的陆地巡控方式已经不再适应新形势的边境安全防控需求，急需构建具有边境低空防护功能的低空安全天网。

从中华民族复兴的历史使命分析，我国是最早发明了飞行器（风筝）的国家，万户飞天等故事以及当前我国航空事业工作者的工作积累为构建低空安全天网积累了宝贵的经验。

从空间安全分析，无人机在突破低空防护，精准打击军事目标的作用越来越明显，低空安全是现代化战争成败的焦点，构建低空安全天网具有重要的军事意义。从低空安全体系分析，低空安全体系包括了低空法律法规建设、飞行器安全保障、低空道路建设、低空运营保障环境建设、低空安全防控管理等，构建低空安全天网将是低空安全领域的重要组成部分。

从低空安全天网的技术实现方式分析，现有的低空基础设施已经逐步完善，低空管理技术日趋成熟，无人机反制设备的研究与应用也日趋完善<sup>[14]</sup>。开展低空安全天网工程建设，具备现实的可行性。

低空安全天网工程的建设要素如图 2 所示。

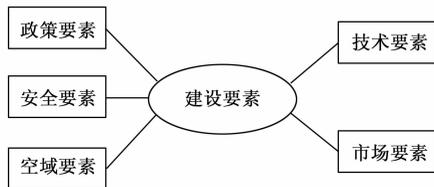


图 2 建设要素

由图 2 可知，低空安全天网工程的建设要素主要包括政策要素、安全要素、空域要素、技术要素和市场要素。以下将分别介绍上述建设要素。

1) 政策要素：低空安全天网工程，除了中央政府的正常经费扶持，地方政府在加强低空安全产业市场培育、政府购买低空服务、优化低空营商环境等方面将更多发挥作用。

2) 安全要素：低空安全天网工程，要以数据主权为原则，安全运营为底线。既要充分保障空防安全的基础上保

证飞行安全和公共安全，也要遵循安全发展客观规律，结合国情合理确定安全指标，合理制定相关政策，科学把握发展与安全的关系。在低空安全天网工程建设中，可以探索建立低空安全等级保护制度，低空运营产品和服务安全制度、关键信息基础设施运行安全保护制度、低空安全风险评估制度、威胁低空安全事件应急预案制度、低空安全监测和信息通报制度、用户信息保护制度、关键信息基础设施重要数据境内保存制度。

3) 空域要素：低空空域是低空安全天网工程建设的关键要素。低空安全天网的关键是低空空域的安全和高效使用。如何发挥飞行器运营部门和政府在低空空域管理中的角色和作用，减轻部队空管压力，提高空域使用效率，是低空安全天网建设的关键。

4) 技术要素：低空安全天网工程建设，需要多方技术做支撑。我国民用无人机产业，基于技术上的国产化优势，在全球占据领先地位。有人机依赖进口的现象较为明显，需要在技术上补短板，实现高效协调发展。除了硬件技术，人工智能和数字孪生技术等技术，是低空安全天网工程建设的重要技术保障。

5) 市场要素：开展低空安全天网工程建设，是发展低空产业的根本保障。我国低空空域开发，呈现无人机市场蓬勃发展的局面。除了大力发展警用航空、政务服务、应急救援<sup>[15]</sup>、低空旅游以外，需要要积极鼓励消费类低空发展<sup>[16]</sup>，激发市场潜力。低空安全天网工程建设，将为无人机市场发展提供有力的保障。

## 2 核心技术体系

### 2.1 飞行流量管理

低空飞行流量管理是低空安全天网工程中的一项关键技术，包括飞行流量管理运营机构建设和低空交通秩序建设两部分。

在低空交通秩序方面，需要科学规划低空空域结构，建立有序的空中交通秩序，在可接受的空中交通安全水平前提下，最大限度地增加低空飞行流量。低空飞行流量管理，是结合低空飞行器在飞行前、飞行中、飞行后三个阶段进行飞行流量管理，包括低空空域容量增加和低空交通流量调整。

在飞行流量管理机构方面，需要建立低空飞行流量管理机构和运营中心，包括全国低空飞行流量管理部门、地区飞行流量管理部门、低空运营企业运控中心，如图 3 所示。

由图 3 可知，全国低空飞行流量管理中心，包括通信交互、态势显示、规划审定等内容。区域低空飞行流量管理部门的功能包括通信交互、监视预测、协同建模、协同推理。低空运营企业运控中心的功能包括通信交互、态势显示和协同转换。

在低空飞行流量管理中，侧重于在信息协同和共享模式下，对飞行流量管理复杂决策过程建模，探索低空飞行流量管理部门、飞行器运营企业的协同流量管理策略，改

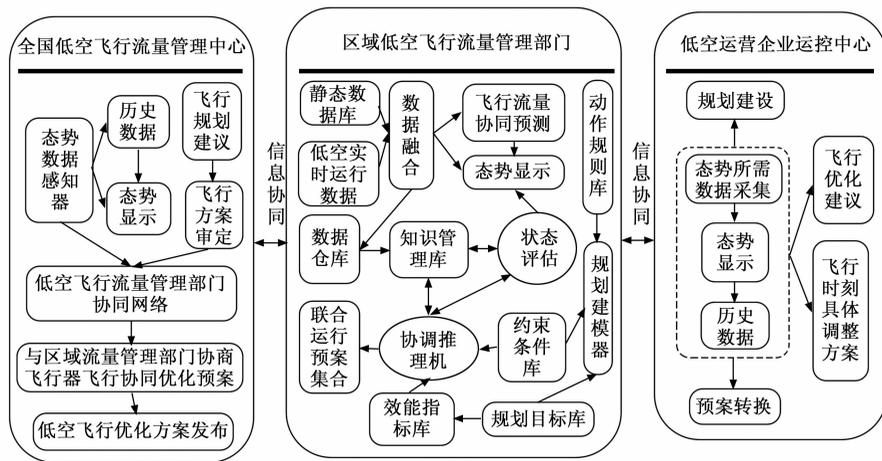


图3 低空飞行流量管理机制

进运行模式,提高低空运营系统的局部运行效率。

此外,低空空域容量、飞行流量具有动态性和随机性<sup>[17]</sup>,现有飞行流量管理机制下,若航路拥堵发生时,所属区域飞行流量管理部门需要承担主要协调工作,制定并发布特定的流量管理措施,调整航路容量、流量匹配情况,保障飞行器的安全、有序通行。低空飞行流量管理的核心思想是控制拥堵航路的飞行流量,匹配当前空域的低空航路流量。因此,可以应用数字孪生技术,构建与实际空域环境接近的虚拟与显示交互仿真平台,进行实时飞行流量监测。

## 2.2 飞行器实时控制

飞行器低空实时控制,是指飞行器低空协同运行,可以在保障飞行器低空安全运行、减少管制员工作负荷的同时,实现飞行器自适应运行调整,提高飞行器在低空安全走廊中的航路利用率,改进航路流量管理方案的执行效率<sup>[12]</sup>。

现有雷达管制条件下,通常由管制员利用雷达监视飞行器的运行,确定飞行器的位置,辨认飞行器的类型和号码,调整飞行器间隔。低空飞行器安装了ADS-B、空地数据链等载荷,将会定期对外发送自身的状态参数,接收其它飞行器发送的广播信息,通过动态信息的交互实现对周围空中交通态势的详细了解。此外,结合人工智能和大数据技术,未来飞行器将具备自动间隔调整的能力,自主避让雷暴等恶劣天气,降低尾流间隔标准,在保障空域系统安全运行的同时,自动调整飞行间隔,降低冲突发生概率、提高航路吞吐量,从运行层面提升低空运行效率。

## 2.3 低空安全走廊与航路规划

随着低空飞行器数量的增加,同一区域同一高度的低空飞行器发生碰撞的风险将会大大增加。借鉴地面道路修建和地面交通建设的思想,开展低空安全天网建设,结合低空安全走廊理论,修建低空高速公路,安装虚拟红绿灯,设定低空交通规则,是确保无人机在低空空域有序、高效和安全运营的重要内容,也是我国低空空域资源精细化开

发和利用的重要基础设施建设。

低空环境复杂,限制低空飞行器安全飞行的自然要素或人文地理要素较多<sup>[18]</sup>。因此,在低空航路建设中,需要充分利用低空气象数据、移动基站分布数据、停机坪或机场位置等各类静态数据和动态数据<sup>[19]</sup>,融合已有的公路网、水运网、移动基站分布,利用地面基础设施,逐级优化航路及网络结构,构建低空高速公路网络。

为了保障低空飞行活动的安全,需要结合实地调查,在低空高速公路中进行飞行区域环境的真实性检验和精度校正,沿航路测试信号覆盖情况和飞行器的通信能力<sup>[20]</sup>,监测通信链路参数<sup>[21]</sup>、局部气候环境建模精度以及城市建筑、道路交通、市政基础设施、地形、电网高塔等各种地理信息的准确度等。

## 2.4 国产卫星互联网监视技术

低空安全天网工程的空域监视中,采用国产卫星组网技术可以提供全球覆盖的一体化、冗余备份的飞行应用,增强低空空域中飞行器的通信、导航和监视的精度,实现空中情报信息的主动服务。

国产卫星组网监视,包括通信卫星网络、北斗卫星导航与地基增强网络、遥感卫星网络、星载ADS-B监视组网等。它能够为用户提供关于低空飞行器飞行位置、天气、低空飞行流量等低空交通状况的实时综合性信息,使用户能够通过具备一体化运营功能的低空安全天网,发现和监测异常情况的出现,及时调整低空安全走廊中的各级航路,在确保飞行安全的情况下增加低空空域容量和使用效率。

低轨卫星通信网络由卫星广播分发子网、宽带卫星通信子网、综合业务子网、控制分系统和加密分系统组成。运用低轨通信卫星网络,可以有效保障飞行器间及飞行器与地面端的通信。

北斗导航系统由空间子系统、地面监控子系统和用户子系统组成。北斗增强系统包括地基增强系统与星基增强系统。运用北斗卫星导航与北斗增强系统网络,可以确定运动物体在海平面和地平面的位置,进行二维定位,还可以对低空飞行器进行导航,确定飞行器的三维位置。飞行器安装北斗高精度接收机,通过地面基准站网,利用卫星、移动通信、数字广播等播发手段,在服务区域内可提供分米级和厘米级实时高精度导航定位服务<sup>[22]</sup>。

遥感卫星网络,是已发射的各类遥感系列卫星提供的遥感数据服务。通过卫星遥感技术<sup>[23]</sup>,可以获得低空运营区域的大尺度地形地貌数据<sup>[24-25]</sup>,实现对地观测,辅助飞行验证、功能验证、测图精度验证等。

星载ADS-B监视组网,是通过卫星搭载高灵敏度

ADS-B 接收机,接收地面航空器信号,并转发到地面站进行分析、处理,从而实现覆盖区域内的低空目标进行监控的目的。星载 ADS-B 系统包括机载 ADS-B 信号发射机、低轨卫星和地面站三部分构成。星载 ADS-B 系统是低空空管数据链的重要内容。通过星载 ADS-B,低空数据链可以不受地域限制,接收飞行器的机载 ADS-B 数据,实现对飞行全过程的监视与服务,保障飞行安全,减少飞行费用,提高飞行效率和服务水平。因此,星载 ADS-B 能够用于低空军事目标的监控与侦察、低空交通管理、应急搜救、低空物流监控等。

## 2.5 低空安全防范

为了确保低空空域的安全运营,需要制订低空安全探测感知及反制设备联网接入标准体系,建设省、市低空安全防范联网平台,实现对已建和未来新建系统和设备的全面安全规范接入管理,实现感知数据的融合共享;在低空安全天网工程中开展空间安全大脑建设,用大数据实现辖区空间安全的融合感知及预警预测,与省、市城市大脑无缝对接,服务城市立体化安全防控和城市应急管理体系,构建城市多层次、全天候、立体化防控体系。提升城市管理、风险监测、应急处置等各领域精细化治理水平,促进实现社会治理的现代化。

低空安全防范体系架构包括基础设施层、数据层、支撑层、应用层、展示层、用户层。基础设施层,包括计算资源、数据库存储和操作系统,兼容目前主流服务器及硬件资源。数据层主要包括地理信息数据、无人机数据、民航数据、气象数据、法律法规库、预案库、案例库、风险目标库等。支撑层包括数据总线、空间安全信息承载平台、资源交换共享服务平台,用于接入融合底层数据、外部数据、设备数据等,同时提供一套完整的对上层应用提供可视化<sup>[26]</sup>、流程、逻辑进行支撑辅助的服务。应用层包括无人机管理应用系统、空间安全管控子系统、低空态势感知系统<sup>[27]</sup>、运维服务系统等。展示层包括 Web 端、大屏幕、手机 App 等。

## 2.6 飞行事故征候与处置

低空飞行事故征候,是指在低空安全数字化天网中的飞行器在飞行中发生的严重危及飞行安全,但尚未构成飞行事故的事件。飞行问题是指在低空飞行中发生的危及飞行安全,但尚未构成低空飞行事故征候的事件。当发生低空飞行事故征候或低空飞行问题时,应当查明原因、落实责任后,才能继续飞行。

在低空飞行事故调查时,要求坚持实事求是的原则,深入调查,广泛搜集飞行事故相关材料,客观、公正、全面地做出结论,提出预防事故的措施建议。

低空飞行事故的调查内容包括事故地点的经纬度及标高数据、飞行参数记录、空地通话录音(有人驾驶飞行器)、一次雷达数据记录、空管雷达数据记录、机载告警信息记录、飞行实施传输监控系统数据等。

在低空飞行事故处理中,需要客观记录事故调查工作

中获得的各类数据和资料,分析事故原因,支持事故暴露的问题和教训,提出预防同类事故和改进工作的措施意见。

## 2.7 低空安全教育与人才培养

在低空安全天网工程建设中,除了低空运营平台及飞行器监测与管控设施软硬件建设,还需要加强低空安全的科普和教育工作。

在学校开展低空安全教育,是在校大学生获取低空安全知识的最主要渠道,可以采取各类线上线下活动开展低空安全宣传教育,举办低空安全讲座、培训、征文、知识竞赛等校园活动,把对学生的自我教育、自我管理、自我服务延伸至低空安全教育中。

在低空安全教育的社会公益层面,可以借助官方微信、微博、网站、广播、校报、宣传栏、橱窗等渠道,广泛开展低空安全意识和防护技能方面的各类公益宣传教育,鼓励朋辈互育、个人自育,推动朋辈互育、个人自育与学校教育的有机协同,形成整合效应。同时,要强化网上互动交流,为大众开辟线上答疑渠道,提高低空安全宣传教育内容对大众的吸引力,使得人们自觉养成遵守低空安全规则的习惯。

在低空专业人才培养方面,需要成立专门人才培养团队,撰写低空安全人才培养规划及具体方案,进一步完善各类规章标准,加快拟定标准制定计划,形成制定程序和阶段性目标。同时,在人才培养中,要求加快低空安全专业人员培训,不断提高专业人员的质量和素质。

国内普通高校、职业学院及低空相关行业培训机构,是培养低空安全专业人才的中坚力量。为满足低空产业发展的人才需求缺口,院校需要关注低空人才供需市场对人才质量的新变化,创新人才培养模式,完善学科结构,坚持理论与实践并重<sup>[28]</sup>,以提高低空运营专业服务水平 and 创新能力为核心。

行业外院校是培养低空安全专业人才的有力补充力量。为了低空产业可持续发展,必须建立一套适应并能促进中国低空发展的、区别于运输航空的人才培养机制,实现低空安全人才的社会化培养。同时,还要进一步加强校企联合,通过加强产学研合作教育,积极鼓励通用航空企业参与到专业院校的专业设置和课程建设以及标准确定,将高职院校作为企业后备技能人才的资源库,从而打造全方位、多层次、专业化、国际化的高素质低空产业人才队伍。

## 3 原型试验场建设

低空安全天网工程的落地应用,需要建设具有典型地形、地势、地貌、地沿和气候的原型试验场。

结合试验场对飞行器的环境适应性要求,试验场可以按照所处海拔高度分为四类试验场:平原型试验场、高原型试验场、丘陵型试验场、盆地型试验场,如图 4 所示。

平原型试验场:将海拔高度在 0~200 m 的地势平坦、面积广阔的陆地设定为低平原试验场,海拔高度在 200~500 m 的势平坦、面积广阔的陆地选定为高原平试验场。

高原型试验场:将海拔高度在 500 m 以上,面积广大,

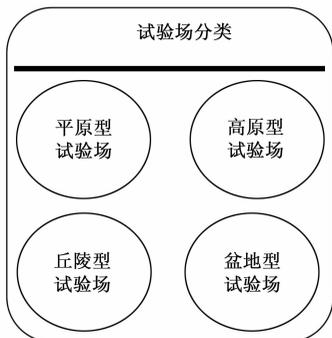


图 4 试验场分类

地形开阔, 周边以明显的陡坡为界, 比较完整的大面积隆起地区, 选定为高原型试验场。

丘陵型试验场: 将海拔高度在 500 m 以下, 相对高度在 100 m 以下, 地势起伏、坡度缓和的地区, 选定为丘陵型试验场。

盆地型试验场: 将低于周围山地相对凹下的地表形态的陆地, 选定为盆地型试验场。

### 3.1 软件平台构建

试验场的软件平台功能包括低空安全管理系统、低空安全防控系统、低空安全态势感知系统。

试验场的低空飞行器是采用无人机作为主要飞行器, 无人机低空安全管理系统功能如图 5 所示。

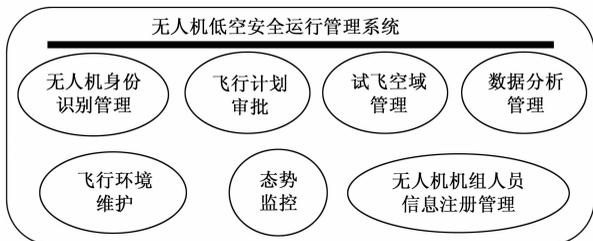


图 5 无人机低空安全管理系统

由图 5 可知, 无人机低空安全运行管理系统包括身份标识管理、飞行计划审批、飞行环境维护、态势监控、数据分析管理及无人机操作人员信息管理模块。

无人机低空安全运行管理系统, 需要覆盖从数据采集到数据展示的全过程, 支持公有云部署和私有云部署, 通过数据中心的海量数据存储和大型数据运算能力, 实现系统的稳定运行和管理。系统应具备支持多种云平台能力、不同子系统数据接入能力、不同数据通信协议处理能力和多元异构数据管理能力<sup>[29]</sup>。

低空安全防控系统如图 6 所示。低空安全防控系统包括管控目标管理、低空安全监测、智能预警、指挥调度、智能预案、智能综合分析研判、知识库等模块。

低空安全态势感知系统如图 7 所示。低空安全态势感知系统包括区域管控、监测预警、案事件展示、指挥调度、综合分析、专题报告。

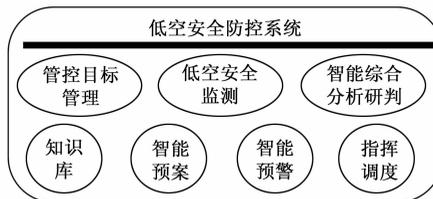


图 6 低空安全防控系统

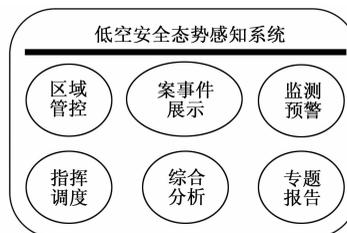


图 7 低空安全态势感知系统

### 3.2 系统部署方案

低空安全运营管理系统依托空地测控网、地面公共网和专网专线, 构建空地一体化基础网络环境, 集成部署数据中心、应用系统, 实现数据信息的快速采集和无缝传输。各系统节点对数据负载进行分析预测, 提供对应的负载平衡和安全防御措施。部署主要从业务数据的获取出发, 通过一套完备的硬件设备部署, 实现数据的安全可靠传输, 数据通过筛选过滤后送入专网进行实时展示, 实现数据的综合管控。整个部署包含硬件组成、网络传输系统、业务数据内容和应急保障。综合管理中心部署涵盖从硬件到数据到展示的每一维度, 展示内容包括了基础地理信息数据, 在基础数据的基础上, 增加多种数据内容的分析结果<sup>[30-31]</sup>, 增加综合管控和计划审批的模块, 为提高管控能力提供支撑。在部署优先级上需要先部署基础数据, 而后再完成其它增值数据的部署, 保证部署工作开展的稳定性和服务内容的完整性。

低空安全管控系统与各探测、跟踪、拦截设备采用统一的网络接口, 可根据低空布防区域的实际地形地势, 选择合适设备灵活组网, 网络依靠自建专网的形式构建, 减少防御网对其他网络和设备的影响, 提高网络安全性和稳定性。针对大范围或复杂环境, 也可划分多个防御区域, 各区域独立组网并形成探测打击网, 实现无死角全方位探测拦截。系统对外通过专网接入政府、公安、上级监管系统实现消息报送和情报共享。

由低空安全管控系统的拓扑图可知, 基于无线电探测设备和无线电全向干扰设备的低空目标防御系统, 可以通过专网、内网、4G/5G 移动通信网, 开展边缘计算及安全边界分析, 通过云平台进行数据处理和存储<sup>[32]</sup>, 最终将无人机低空防控数据和低空态势等发送到展示终端。

### 3.3 数据安全

在低空安全天网工程建设中, 需要综合考虑数据的整体安全, 包括设备接入安全、遥测遥控数据及视频数据安全

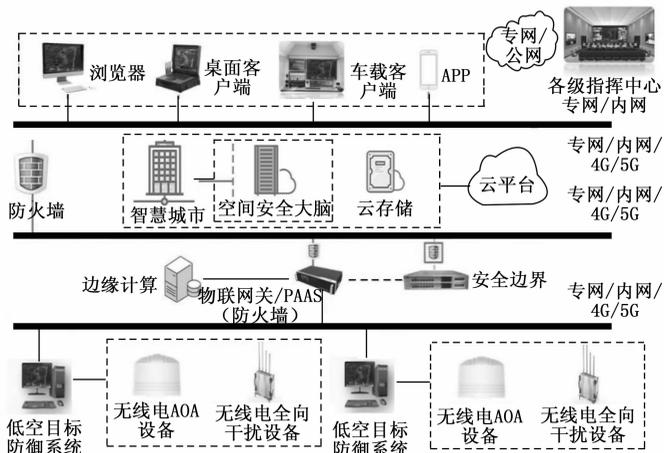


图8 低空安全管控部署拓扑图

全传输、边界接入安全、存储数据保护、图像及视频数据应用权限保护等。

### 3.3.1 数据信息安全与安全网关构建

为了保障各类传感器的视频、图像和感知数据能够安全顺利地由互联网进入业务专网，以及系统发出的各类控制指令和管理文件能够安全受控地传送到制定用户或设备，需要按照信息安全等级防护的要求，基于安全技术类标准、安全检测类标准和安全管理制度等安全标准体系和管理制度，在安全管理组织和安全管理中心等人员组织保障的安全运行管理基础保障下，在数据汇集的互联网和用户业务专网之间部署综合数据交换网关，建设安全、受控的数据摆渡节点，安全接入来自各个分节点在线系统的数据信息，并可以对传输的数据进行协调管理，资源调度。综合数据交换网关主要解决具有不同通信规程、不同数据交换格式、不同来源数据和不同安全接入方式的系统接入专网系统的问题，即对接入专网的系统和数据接口采用的通信规程、数据交换格式和加密等级，网系安全等级，系统接入方式进行研究、抽象、分类，建立一体化接口描述标准，对各种接口过程进行分析和标识，形成网络安全体系的接口过程规范。

### 3.3.2 量子保密通信设计

遥测遥控数据及视频数据是低空运营平台的重要数据。在数据传输过程中，可以采用量子保密通信技术。量子保密通信设计，包括低空遥测遥控数据及视频数据加密传输、基于量子随机数的传输安全保障。在低空飞行器视频传输专网的纵向边界部署量子网络密码机，保证纵向数据加密传输，下级数据通过量子网络密码机进行数据的加密，视频数据以密文形式通过网络传输到上级平台，在上级平台部署量子网络密码机用于数据解密，确保了视频数据纵向的安全传输，防止数据被窃取和篡改，保证了数据的完整性。

### 3.3.3 导航数据安全性设计

导航系统的数据安全性是低空飞行安全的重要指标。北斗导航系统是我国自主研发、自主建设、自主发展、

独立运行的全球卫星导航系统。因此，可以通过北斗导航系统的短报文通信功能与飞行控制系统之间建立上行、下行数据传输通道，对无人机进行监控、管理，同时对无人机管理工作进行立法规范。

## 3.4 试验场建设

在低空安全天网工程的试验场建设中，可以结合已有的地面试车场基础设施，运用数字孪生技术，建设具有规划设计、建造集成、环境测试、运营管理功能的性能验证测试场。试验场将以低空智能驾驶测试、低空运营管理、功能认证为主要目标。

### 3.4.1 试验场规划

在试验场规划设计中，包括低空航路规划、低空飞行测试路径规划、低空运营场景设计、高精度定位数据系统及低空智能网联设施布置。

在低空建造运维中，包括低空安全天网试验场智能设施、低空智能交通系统。在低空测试技术中，包括低空测试评价平台、测试设备研究、测试环境仿真。在低空运控平台中，采用智慧低空路网、低空通信网、低空定位网三网融合，构建基于大数据的低空交通信息服务、低空交通流量调度、低空交通安全管理，设计基于自主飞行器和低空智慧交通的多样化低空出行场景，包括飞行汽车、智能停车场、飞行器自动充电桩等居民体验项目。

### 3.4.2 场景应用模型验证

在低空安全试验场中，需要构建图像识别算法模型库、波形分析算法模型库、文本分析算法模型库、声纹识别算法模型库、舆情模型库、气象数据库的基础算法模型，针对图像识别、微波分析、声纹识别及语音分析等不同场景，在人工智能平台上设计不同的场景应用，并把低空运营场景抽象化，为具体业务提供场景化应用支撑，提升设计、开发、训练和搭建等效率。

### 3.4.3 场景示范

在试验场的应用场景搭建中，可以采用可视化技术，模拟构建辖区空域无人机监控场景、无人机行业应用检测场景、重大活动全域低空安保场景、异常及违法行为检测场景。

1) 辖区空域无人机态势监控。在试验场中，通过系统联网数据共享，采用试验数据，进行一张图可视化融合分析，实现辖区范围内无人机飞行分布的全域可视化监管，一张图展示辖区风险点分布及风险点的无人机分布态势。

2) 无人机行业应用监测。在试验场中，对无人机的正常应用审批管理数据进行融合，监测无人机行业应用的分布和属性，为无人机应用区域做净空管理，避免黑飞无人机影响正常无人机应用作业。

3) 重大活动全域低空安保。在试验场中，建设低空防控监测设备的联网共享机制，能够在辖区低空构建一张无人机监管网络，模拟活动面积大、人群聚集的大型活动，为其提供全域低空安全服务。

4) 异常及违法行为监测。在试验场中，对于低空无人

机的一些异常行为,如夜间起飞、定线飞行等,可以通过数据的长期积累分析,安排警力专项处理,将一些违法违规事件及时处理,避免突发恶性恐怖事件。

未来,在低空安全天网工程的试验区,将形成集低空自动驾驶与有人驾驶飞行器运营基础设施研发测试、检测验证、示范运营为一体的低空产业生态链聚集基地。

## 4 验收程序与考核指标

低空安全天网工程的验收程序与考核指标是保证天网工程投入生产应用的重要保障。

### 4.1 验收程序

为了确保低空安全天网工程的建设达到有关要求和标准,并能正常投入运行,必须开展工程验收工作。

验收前提条件包括各个分系统全部初验合格,通过软件确认测试评审,系统建设和数据处理符合信息安全的要求;硬件平台经过加电测试,状态正常;外购的数据库、中间件、应用软件和开发工具符合知识产权相关政策法规要求;技术文档和验收资料完备等。

在项目验收过程中,需要严格按照验收方案对软硬件平台、低空安全天网工程中的异构网络集成效果、飞行场地环境评测、系统文档资料进行全面的测试和验收。项目验收完毕,对低空安全天网工程的系统设计、建设质量、设备质量、软件运行情况等做出全面的评价,得出结论性意见。

低空安全天网工程的验收程序包括初验、终验两个阶段。系统安装、调试达到技术规范书规定的指标并开通业务后,可进行验收测试。根据技术规范书的有关规定进行修改和补充,形成验收文件,作为验收依据。

系统经过三个月试运行期,所有性能指标达到技术要求的时候,可以进行最终验收。最终验收过程中,要求对低空安全天网工程进行综合测试和评估,包括试验场的基础设施、气象条件、电磁环境、飞行器的低空环境适应性,以及各子系统之间的数据安全。特别指出,低空安全天网中的运营数据,需要具备实时上报和本地存储双重机制。

### 4.2 考核指标

低空安全天网工程的考核指标,包括试验场基础设施、软件管理平台系统、硬件设施、安全运营及非法入侵防御性能等。

在试验场基础设施考核中,要求对试验场周边的低空空域安全性测试评估、电磁环境侦察、设施设备的用电安全及硬件布局科学性等进行综合考量。

在软件管理平台考核中,要求对低空飞行器运营管理平台和低空威胁探测与防御平台的综合服务性能进行综合考核,包括网络安全测试。

在硬件设施考核中,要求对无线电探测定位分系统、雷达探测分系统、无线电测向探测分系统、光电跟踪分系统、导航诱引分系统、无线电干扰反制分系统、ADS-B分

系统、无线电协议破解及精准打击分系统以及便携式低空侦测设备进行综合考核。

在低空安全运营考核中,要求设定不同的低空空域环境,对飞行器的低空交通网络布局、低空路由规划性能、飞行自动监控、飞行器自动控制性能等指标进行考核。

在低空非法入侵防御性能考核中,需要考核低空入侵响应时间,对低空安全管控预定的入侵目标进行探测、识别、定位、跟踪,引导光电跟踪系统进行录像取证,结合低空安全运营软件平台进行综合研判,引导导航诱引分系统或无线电干扰分系统对非法目标进行处置,确保低空安全运营。

## 5 前景展望

低空安全天网工程是国家低空强国的战略基石,是国家低空安全治理的解决之道,也是国家低空安全的战略支撑点。低空安全天网工程建设,将为国民经济发展提供新动力,推动区域经济的立体化发展,打造区域经济新的增长点,优化我国当前区域经济布局,促进区域协调发展,为社会公共服务提供新手段,为区域经济发展提供新空间,有效支撑政府的低空治理能力和低空治理体系现代化建设,为国防安全事业发展提供新支撑。

随着低空产业的发展和技术的不断进步,低空安全天网工程在国民经济发展中主要呈现五大发展趋势。

1) 通航产业将成为低空安全天网工程的重要业务支撑。在民用有人机和无人机产业规模不断扩大的同时,警用、海关和相关军用低空产业规模不断增加。通航产业在低空产业中具有重要的地位,是低空安全天网工程的重要业务支撑。

2) 低空安全天网工程在公共应用领域将得到突出体现。以政府为主导的各类低空飞行公共管理和服务的场景将越来越多,范围将越来越大,对于低空安全天网工程的细化任务需求将会更加明显。

3) 低空消费类经济活动将在低空安全产业中呈现出普及化趋势,是低空安全天网工程的重要承载目标。随着人们生活水平的不断提升,多样化低空消费类需求将不断涌现,低空安全产业应用会逐步融入到百姓的日常生活中。

4) 各类发展要素将聚集助力低空安全天网工程建设,加快低空安全产业发展。在市场根本要素的拉动和技术支撑要素的推动下,与低空经济发展相关的空域环境要素、政策环境要素、安全环境要素都将向人们预期的方向改善和完善,更好地服务低空安全产业建设大局。

5) 无人机安全运营将逐步成为低空安全天网工程的重要保障目标,无人机产业将成为低空安全产业生态链的主导产业。无人机对有人机的替代程度越来越高,对各行各业的渗透程度越来越广,对人们的生产生活方式的帮助也越来越大。随着无人机应用场景的快速增多,无人机在低空安全产业发展中的主导作用将越来越明显。

然而,低空安全天网工程建设中,需要适应绿色低碳转型发展要求。“十四五”时期,国际国内资源环境约束将更加强化,国家环保标准将继续提高,环保执法将趋于严格,提升低空产业的绿色化发展水平迫在眉睫。当前,我国低空安全产业应用和需求尚未饱和,在低空安全天网工程建设中,需要超前谋划和布局清洁能源、低空噪声环境过滤等绿色环保措施,满足低空安全产业发展需要。

此外,在我国重要的基础设施、敏感区域,如机场、电站、油库、车站及码头等,当前已经自行设置了低空局部防护网,但是较为分散,没有统一标准,各自为政。低空安全天网,需要尝试将这些低空局部防护网统一起来,建立统筹规划的低空信息化框架,搭建资源共享的信息化体系,形成灵活的配置扩展能力,构筑统一的低空安全防护体系,减少重复建设。

## 6 结束语

低空空域是宝贵的战略资源,世界各国都高度重视对低空空域资源的开发和应用。当前,建设创新引领、协同发展的低空产业体系已经成为各国低空产业发展的主要方向。低空产业的高质量发展对低空安全要素供给和低空空域的政策生态提出了更高要求。低空安全天网工程是保障低空产业健康发展的重要基础设施建设任务。

总之,低空安全天网工程,将营造低空安全运营环境,创造信息传播新渠道,开辟生产生活新空间,建立低空经济发展新引擎,构筑低空文化繁荣新载体,创建社会治理新平台,实现空地运行新纽带,拓宽国家主权新空间。

### 参考文献:

- [1] 冯登超. 低空安全与无人机系统导论 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2019.
- [2] 冯登超. 低空安全走廊理论与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- [3] 冯登超, 齐 霞. 无人机组装调试与检修 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [4] 冯登超, 袁晓辉. 低空空域安全告警航图可视化研究进展 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29 (3): 305-316.
- [5] 冯登超. 基于激光点云数据的无人驾驶航空器系统空中走廊构建 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 133-141.
- [6] 廖小罕, 许 浩. 无人机运行监管技术发展与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [7] 张 兰, 冯登超, 武 壮, 等. 水声对抗环境下的异构网络性能研究 [J]. 北华航天工业学院学报, 2015, 25 (4): 7-11.
- [8] 高志宏. 低空空域管理改革的法理研究 [M]. 北京: 法律出版社, 2019.
- [9] 冯登超, 秦焕禹, 曾 湧, 等. 基于三维可视化空中走廊体系的城市低空空域航图绘制研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32 (4): 58-64.
- [10] 冯登超. 面向低空安全三维数字化空中走廊体系的飞行器交通管理平台构建 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (12): 137-140, 161.

- [11] 黄世存, 吴海平, 冯登超. 高分一号多光谱高分相机全色图像正射精度验证与分析 [J]. 遥感信息, 2015, 30 (2): 85-88.
- [12] 冯登超, 秦焕禹, 杨晓冬, 等. 基于资源三号卫星影像的秸秆焚烧火点监测研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29 (4): 616-621.
- [13] 庞 峰, 冯登超. 警用无人系统与低空安全防范初探 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (7): 205-208, 213.
- [14] 车 颖, 冯登超, 齐 霞. 对无人机反制系统加强监管的思考 [J]. 公安教育, 2020 (1): 44-47.
- [15] 吴 鸿, 冯登超. 基于四旋翼飞行器的低空空域智能搜救系统设计 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 35 (1): 74-79.
- [16] 冯登超, 袁晓辉. 低空安全走廊及应急管理可视化研究进展 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30 (4): 493-505.
- [17] 叶博嘉. 基于多 Agent 的空中交通协同流量管理研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [18] 冯登超. 面向低空安全的三维空中走廊可视化研究综述 [J]. 电子测量技术, 2018, 41 (9): 2-9.
- [19] 徐晨晨. 基于遥感数据和地理信息技术的无人机低空公共航路网规划与构建 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [20] 冯登超, 李奥伟, 周 鹏, 等. 浅析 Android 系统在低空安全监管数据移动显示平台的通信方式 [J]. 电子测量技术, 2018, 41 (9): 126-130.
- [21] 冯登超, 梁力水, 刘建强, 等. 无人机低空告警监视系统结构设计探索 [J]. 电子测量技术, 2018, 41 (9): 141-145.
- [22] 王永龙, 孙东辉, 冯登超, 等. 移动目标重复轨迹的可视化技术 [J]. 电子测量技术, 2014, 37 (9): 53-55, 59.
- [23] 冯登超, 秦焕禹, 曾 湧. 基于 3S 技术的低空空域告警航图可视化匹配设计初探 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34 (6): 50-53.
- [24] 冯登超, 陈 刚, 肖楷乐, 等. 遥感图像的几何精校正研究 [J]. 国外电子测量技术, 2012, 31 (5): 41-43, 73.
- [25] 冯登超, 陈 刚, 吴新颖, 等. 纹理特征提取的不变矩探讨 [J]. 国外电子测量技术, 2012, 31 (4): 57-59.
- [26] 孙东辉, 鞠秀亮, 冯登超, 等. 基于 FAST 检测器和 SURF 描述子的聚合图像人脸识别 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 35 (1): 94-98.
- [27] 王 鑫, 王向军, 冯登超, 等. 特征一致红外弱小目标匹配与定位研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30 (9): 1405-1410.
- [28] 冯登超, 杜鹏飞, 沈惠雅, 等. 应用型大学研究生数字图像处理课程教学改革探索 [J]. 北华航天工业学院学报, 2019, 29 (1): 42-44.
- [29] 张 兰, 冯登超, 王晓宁, 等. 低空领域下的异构网络性能研究 [J]. 电子测量技术, 2018, 41 (9): 131-134.
- [30] 史健芳, 王 哲, 冯登超. 基于矩特征及支持向量机的图像识别 [J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19 (15): 88-91.
- [31] 冯登超. 测量不确定度在多元数据处理的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23 (S1): 46-50.
- [32] 冯登超, 杨兆选. 基于小波包最优基的图像压缩算法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21 (3): 20-22.