

## 【航空管理与安全研究】

## 我国低空经济发展现状、安全挑战及运营对策

——以通用航空为例

乔善勋

(河南工业贸易职业学院 信息工程学院, 河南 郑州 450053)

**摘要:**低空经济是产业发展新赛道、经济增长新引擎,具有广阔的发展前景,能够有效推动产业结构升级,促进就业,改善民生。针对我国低空经济发展存在空域管理不完善、技术水平有待提升、安全监管不足等问题,从微观视角出发,以低空经济的主体产业通用航空的应用和安全风险为切入点,借鉴其他国家的发展经验,进行细分领域分析和跨学科交叉研究,为通用航空的安全运营提供新的视角和方法。

**关键词:**低空经济;通用航空;产业融合;安全;运营

**中图分类号:** F 562.3 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2024.02.010

党的二十届三中全会《决定》明确提出发展通用航空和低空经济,<sup>[1]</sup>体现了党中央对我国经济发展新动能的深刻认识和战略布局。低空经济是指以各种有人驾驶和无人驾驶航空器的各类低空飞行活动为主导,以制造、飞行、保障和综合服务四大产业为主的经济形态,具有广阔的发展前景。中国低空经济发展研究报告显示,2023 年我国低空经济规模达 5 059.5 亿元,增速为 33.8%。乐观预计,到 2026 年其规模有望突破万亿。<sup>[2]</sup>现阶段的低空经济研究主要集中于宏观政策与产业发展层面,本文从微观视角出发,以低空经济的主体产业通用航空的应用和安全风险为切入点,进行细分领域分析和跨学科交叉研究,借鉴其他国家好的经验和做法,为我国低空经济发展提供智力支持。

## 一、我国通用航空的发展现状

通用航空是低空经济的重要载体。2016

年,我国将通用航空列为国家战略性新兴产业,出台了一系列政策措施,通用航空产业呈现出蓬勃发展的态势。数据显示,截至 2023 年底,与 2015 年相比,我国注册通航企业、运营航空器以及年均飞行小时等核心指标均实现了 1.7 倍以上的增长。<sup>[2]</sup>除了传统的通航作业,无人机作为一种新兴业态,在物流、农业、影视等多个领域展现出广阔的应用前景。通用机场数量的显著增加为通航产业的发展提供了坚实的硬件基础。

### (一)通航产业“重制造,轻应用”

我国通用航空相比先进国家而言发展起步较晚,但近 10 年呈不断增长态势。2023 年民航行业发展统计公报显示,我国有 690 家通用航空企业,注册航空器总数为 3 303 架(其中 1 398 架为教练机),449 座通航机场,通用航空飞行小时从 2013 年的 59.1 万小时增长至 2023 年的 137.1 万小时,年平均增长率约为 8.45%;截至 2023 年底,全行业拥有 19 825 家无人机通用航

收稿日期:2024-05-16

基金项目:河南省社科联调研课题“河南重点培育通用航空新兴产业发展对策研究”(2021021)

作者简介:乔善勋(1990—),男,河南杞县人,讲师,工程硕士,主要从事航空安全、航空产业研究。

E-mail:625228434@qq.com

空企业,无人机拥有者注册用户 92.9 万个,无人机驾驶员执照 19.44 万本,同比增长 27.2%;注册无人机一共 126.7 万架,同比增长 32.2%;无人机累计飞行 2 311 万小时,同比增长 11.8%。<sup>[3]</sup>2023 年 10 月,中国民航局颁发首张无人驾驶电动垂直起降航空器(eVTOL)的型号合格证(TC)<sup>[4]</sup>,意味着无人机进入载人时代。与此同时,通航市场“重制造,轻应用”问题明显,航空器制造业务收入占比达到 90%,而飞行服务和保障业务收入占比仅 10%。在低空活动中,飞行培训、生产作业、非经营性作业、载客类占全部飞行小时的 98.52%,私人飞行、空中游览等消费类服务的飞行仅占 1.48%,远远低于全球通用航空飞行中低空旅游占 50%左右的国际平均水平。<sup>[5]</sup>

## (二)无人驾驶航空器带来安全新挑战

当前,通用航空拓展了更多的应用场景,例如无人机驾驶航空器(UAV)的应用、活动空域纳入低空、从偏远郊外转移至人口密集的城市,这些积极变化带来了新的安全挑战。UAV 高度依赖自动驾驶技术,但该技术目前仍不成熟,故障率较高,在紧急情况下需要操作员及时接管飞行器。美国国防部的分析报告显示,无人机系统的失效概率远高于传统飞行器,例如在军用无人机领域,无人机系统的失效概率是 F-16 战斗机的 50 倍,是通航飞行器的 100 倍,是商业航班的 1 万倍。<sup>[6]</sup>多起无人机闯入净空保护区导致航班延误事件,也凸显了无人机快速增长所带来的安全隐患。因为无人机闯入机场净空保护区,轻则干扰飞行员视线和雷达系统,增加飞行风险;重则导致机场关闭,影响航班正常运行,造成巨大经济损失。如果无人机与民航客机发生碰撞,极可能造成机毁人亡的严重后果。

无人机与有人驾驶航空器的融合飞行已成为当前航空安全面临的一大挑战。我国民航局虽已为 eVTOL 航空器 EH216-S 颁发型号合格证,但对该型飞行器的运行环境做出了诸多限制,例如禁止在恶劣天气条件下(雨、雪、雷暴、结冰、沙尘暴、大雾等)飞行,仅限于昼间且在隔离空域内飞行,并要求在人口稀少地区、机组视线范围内运行,且禁止水上操作。这些限制凸显了监管部门对飞行安全的高度重视。但是,提升其

安全性还需要多方共同努力,需要相关企业持续加强自动驾驶技术的研发,为飞行安全提供更多支撑;需要加强对操作人员的培训,使其具备应对突发事件的能力;需要建立完善的维护保养体系,定期对飞行器进行检查维修,并积极参与空中交通管理系统的建设;需要加强公众宣传教育,提高公众对无人机技术的认知和接受度,为其商业化运营奠定基础。

## 二、通用航空发展的国外经验

通用航空业对经济的影响主要体现在就业、劳动收入、产出和增加值等方面,它不仅直接带动了飞机及零部件制造、飞行运营、维护等领域的就业,而且还间接促进了服务业、批发零售业、金融保险业等相关产业的发展。此外,通用航空还为居民提供了便捷的出行方式,并对旅游业产生了积极影响。美国是全球通用航空经济最发达的国家,拥有约 19 507 个机场,其中私人机场 14 332 个,5 175 个公共机场可为通用航空提供服务。<sup>[7]</sup>2018 年美国制造的通用航空飞机出货量约 3 000 架,销售额为 122 亿美元(约合人民币 881 亿元)。通航制造业为美国创造了 10.55 万个工作岗位,其中整机制造有 3.19 万人,零部件制造业有 7.36 万人,劳动收入 110 亿美元(约合人民币 796 亿元),人均 10.43 万美元(约合人民币 75.56 万元)。此外还有 16.8 万人从事与通航飞行运行和维护直接相关的工作,包括飞行培训、不定期航空运输、航空游览等,劳动收入 145 亿美元(约合人民币 1 047 亿元),人均 8.62 万美元(约合人民币 62.4 万元)。<sup>[8]</sup>美国交通部数据显示,2018 年美国拥有 211 749 架通用飞机,占全球通用飞机总量的 60%以上,通航飞行时间超过 2 550 万小时,其中私人飞行和空中的士就占 1 200 万小时。<sup>[9]</sup>

通用航空为美国服务业提供了 42.1 万个工作岗位,为 GDP 贡献 250 亿美元(约合人民币 1 806 亿元)。其中,为批发和零售提供了 8.8 万个工作岗位,为 GDP 贡献 80 亿美元(约合人民币 578 亿元);为金融和保险提供了 8.8 万个工作岗位,为 GDP 贡献 170 亿美元(约合人民币 1 228 亿元)。<sup>[8]</sup>每年约有 1.2 亿旅客乘坐通用航空飞行器出行,他们在目的地城市购买商品和服

务,可能产生酒店房间、餐饮和纪念品费用,这些旅行支出为通航服务的社区提供了额外的经济效益。NEXA Advisors的一项研究显示,一架公务机就能带来约250万美元(约合人民币1800万元)的增量经济效益,使用公务机的标准普尔500强公司的收入增长比不使用公务机的公司高出23%。<sup>[10]</sup>与此同时,美国拥有全球最大的直升机紧急医疗服务市场,医疗救援直升机每年运送40万名患者。<sup>[10]</sup>

与之相比,我国通航产业无论是基础设施还是发展水平都有很大提升空间。在基础设施方面,机场不仅数量上和通航先进国家差距较大,空间分布也不合理。西部和北部省份地广人稀,人均通航机场数量远超全国平均水平,适合开展通航作业。经济发达的东部、南部省份低空消费潜力巨大,但人均通航机场却相对偏少,导致低空基础设施和低空消费的错配。从产业发展水平来看,我国通用航空产业起步较晚,核心技术相对薄弱。通用航空发动机、整机等关键技术尚未完全突破,通航制造业主要集中在无人机领域,形成了“强无人机,弱有人机”的产业格局。同时,我国通用航空人才队伍建设滞后,高素质的管理人才、技术人才和飞行员等专业人才较为匮乏。市场需求不足也是制约我国通航产业发展的重要因素。由于缺乏相关的知识和飞行体验,公众对通用航空的安全性、舒适性等方面存在一定疑虑,消费意愿普遍不强。

### 三、发展通用航空需要注意的安全问题

低空飞行活动因其灵活性和便捷性,在现代社会中发挥着越来越重要的作用。然而,低空飞行也伴随着一定的安全风险。一旦发生航空事故,不仅会造成人员伤亡和财产损失,还会严重打击公众的航空出行信心,进而影响整个行业的发展。例如,1977年美国纽约航空971/972号航班事故,直接终结了美国纽约摩天大楼屋顶直升机摆渡时代。<sup>[11]</sup>

#### (一)通用航空和商业运输航空的安全性差异

美国联邦航空管理局(FAA)曾指出,通用航空安全是当今世界范围内尚未解决的重大挑战之一。受飞行员培训和经验、飞行环境、飞行

员失误和决策等因素的影响,通用航空的事故率远高于运输航空。2019年,国际定期航班的致命事故率为0.018次/10万飞行小时,而美国通用航空的致命事故率高达0.9次/10万飞行小时,是前者的50倍!<sup>[12-13]</sup>在1995年至2021年,美国通航事故导致的死亡人数为13653人。数据显示,私人飞行事故是导致死亡的主要原因,占总死亡人数的68.6%(9369人),远高于商用通航事故的7.1%(966人)。<sup>[13]</sup>研究表明,通用航空事故的发生率远高于摩托车等高风险活动。若以每10万架飞机或每10万辆摩托车为单位进行统计,通用航空死亡率是摩托车死亡率的10倍以上。<sup>[14]</sup>通过半个多世纪的努力,美国大幅降低了通用航空事故率。从20世纪60年代的每10万小时36.5次锐减至2021年的4.4次,降幅高达87.95%;致命事故率也从3.3次大幅下降至0.8次,降幅约为75.76%。<sup>[13]</sup>

商业运输航空的事故相对较少。究其原因,一是商业运输航空受到民航监管机构的严格监管,有着严格的安全、维护和运营标准;二是航空公司大力投资有助于降低事故风险的技术和设备,例如先进的气象雷达系统和冗余飞行控制系统;三是运输航空的飞行员经过严格的培训,必须满足严格的经验要求才能载客;四是运输航空的航班通常在管制空域内运行,空中交通管制提供飞机之间的引导和间隔。国际航空运输协会(IATA)的安全报告显示,2023年是航空旅行最安全的一年,每126万次航班才发生一次事故。这意味着如果一个人每天乘坐飞机,平均需要103239年才会遭遇一次致命事故。<sup>[15]</sup>

#### (二)导致通用航空事故率高的原因

通航事故原因复杂多样,但主要集中在飞行员失误、动力装置故障、飞行中失控和地面失控等方面。其中,飞行中失控(LoC)是导致通航致命事故的最主要原因,有60%的事故原因是飞行员意外飞入仪表气象条件(IMC)。<sup>[16]</sup>着陆阶段是通航飞行中最危险的阶段,虽然致命事故率相对较低,但因着陆事故导致的飞机损坏和保险费用上涨却不容忽视。相比之下,起飞阶段的事故率虽然仅为降落阶段的1/3,致命率却高出20倍以上。失速和尾旋是导致起飞阶段致命事故的主要原因,且起飞和爬升阶段的失速事件显著

高于下降和进近阶段。值得注意的是,超过一半与天气相关事故的飞行员持有商业或 ATP 证书,表明天气条件对飞行事故的影响与飞行员的个人经验没有太大关系。在着陆事故中,失控、偏出跑道、失速和硬着陆等是常见原因。跑道污染虽然也会导致事故,但其比例相对较小。

人为因素是导致通用航空发生事故的主要原因。数据显示,高达 69.1% 的通用航空事故是由飞行员的失误所引发,这表明飞行员的知识水平、培训情况、判断能力以及决策能力与事故发生之间存在着密切的关联。<sup>[16]</sup> 飞行员失误率居高不下,凸显了加强飞行员全生命周期培训、完善安全管理体系、提升飞行员安全意识等方面的迫切性。因此航空业需要通过不断加大培训力度、改进飞机设计和技术以及推广安全文化来解决这一难题,以减少因飞行员失误导致的事故数量。

#### 四、通用航空发展的安全运营实践路径

随着通用航空的蓬勃发展和先进空中交通(AAM)的引入,航空系统的复杂性与动态性显著增加,航空安全面临前所未有的挑战。国际民航组织(ICAO)的安全管理手册(SMM)将航空安全的发展描述为技术时代、人的因素时代、组织机构时代和总系统时代<sup>[17]</sup>四个阶段。这四个阶段反映了航空安全理念的不断演变,也为我们应对新挑战提供了重要指引。为应对这一挑战,本文提出“总系统时代的‘人-机-环境’胜任力安全管理模型”<sup>[18-19]</sup>(见图 1),旨在打破传统航空安全管理的局限,从总系统层面综合考虑人、机、环境等多重因素,构建更加全面、高效的航空安全保障体系。

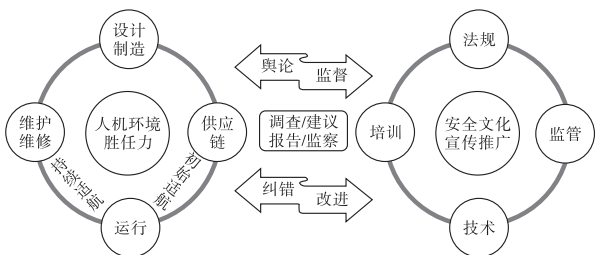


图 1 总系统时代的“人-机-环境”胜任力安全模型

总系统时代的“人-机-环境”胜任力安全模型强调在航空系统全生命周期中,通过建立健全

的法律法规体系、完善监管机制、持续开展培训和技术革新、建立独立的事故调查机制、强化安全文化和全面的科普宣传,形成闭环的安全管理体系,以实现航空系统的整体安全绩效。它不仅适用于传统航空,更适用于通用航空的安全运营,为提升航空安全提供了新的视角和方法。

#### (一)从技术到总系统时代:关键在于提升人的安全意识和能力

航空安全事关生命财产,必须以专业态度对待。1995—2021 年美国通航私人飞行和商业飞行致命事故显示,以每 10 万飞行小时死亡率衡量,私人飞行事故的致死率(2.98)是商业通航飞行(0.32)的 9.3 倍。<sup>[13]</sup> 在总系统时代航空安全管理中,人扮演着至关重要的角色。人不仅是航空系统的核心要素,也是影响航空安全的最关键变量。人的行为和决策受到多重因素的影响。一方面,个体能力、态度等主观因素起着决定性作用;另一方面,机器性能、环境条件、系统规则和组织文化等客观因素也会对人的行为产生显著影响。因此,在航空安全管理中,加强对人的管理和培训,提升人的安全意识和能力,是提高航空安全水平的重中之重。在通用航空蓬勃发展的初期阶段,加强航空专业人才的安全教育显得尤为迫切。笔者建议将航空安全课程作为航空专业教育的“开学第一课”,并贯穿于全生命周期的教育体系中。通过理论教学与实践训练相结合的方式,培养学生系统全面的航空安全意识和突发事件应急处理能力,为其未来的航空职业生涯奠定坚实的基础。

#### (二)构建国家航空安全管理体系

随着低空经济的迅猛发展,传统的航空安全管理模式已经难以满足时代发展的需求。总系统时代航空安全管理需要更加注重预防性,主动应对安全风险,加强国家在一级安全管理层面发挥的作用。这就要求航空业建立和实施一个有效的安全管理体系,从安全政策、安全风险、安全保障、安全宣传等四个方面着手,以实现航空系统的持续安全改进。同时还需要加强航空安全的教育和科普,提升航空业和社会的安全意识和信心,增进航空业和社会的参与和支持。这就要求航空业利用各种媒介和渠道,向航空业和社会传播普及航空安全的知识和信息,强调整体

安全绩效概念。

### (三)持续完善相关法律,强化低空安全监管

2021年《中华人民共和国民用航空法》第六次修正,2023年发布的《国家空域基础分类方法》和2024年生效的《民用无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》,这些为我国低空经济的发展提供了重要的法律基础。然而,随着无人机技术的高速发展和低空经济的迅猛扩张,现行法律法规在协调多部门监管、明确新业态法律地位和监管要求等方面仍存在不足。一方面,部分法律法规过于严苛,制约了低空经济的创新活力。另一方面存在法律空白,无法有效应对新业态所带来的挑战。为提升我国通用航空安全水平,亟须建立健全的国家级低空空域安全监管体系,完善相关法律法规和技术标准。强化低空飞行安全执法,严厉打击违规飞行行为。

### (四)加快空域管理体制改革,构建全域低空飞行安全保障体系

当前,低空经济正处于蓬勃发展初期,产业顶层设计尚不完善。亟须加快空域管理体制改革,以提升空域资源利用效率。具体而言,应建立健全低空空域开放共享机制,明确不同高度空域的用途划分与管理方式。绘制全国低空目视航图,标注障碍物、禁飞区、管制区,为目视飞行提供基础参考。科学划定低空飞行安全区域和禁飞区域,制定飞行区域负面清单,明确飞行边

界。同时,积极推进低空空域的垂直分割与共享,统筹协调各类飞行活动。此外,还应简化低空飞行审批流程,提高审批效率,为低空经济发展营造良好的政策环境。总之,建立低空飞行器运行管理体系,制定科学规范的飞行标准和程序,加强飞行活动监管,确保飞行安全。

加强低空飞行保障体系建设,包括建立全国的低空气象预报系统、低空飞行器的低空风切变预警系统和空中防撞系统,扩充低空飞行场地、优化其布局,建设完善的低空导航通信系统以提升飞行安全性,完善维修保养基地以保障飞行器运行可靠性。同时,推进低空信息化建设,打造统一的低空飞行数据库。

### (五)培育低空运营服务体系,增强人才培养和政策宣传

培育多元化的低空飞行器运营服务企业,提供涵盖飞行器租赁、维修、保养、培训等全生命周期服务的产业链。积极探索低空飞行器与交通、旅游、农业、应急救援等领域的融合应用,挖掘低空经济的潜在价值,拓展产业发展空间。

强化人才队伍建设,加大对低空飞行相关专业人才的培养力度,并引进高层次人才。同时通过大力宣传,提升社会各界对低空经济发展重要性的认识。加强政策解读,引导企业和社会资本积极参与低空经济的投资与发展。营造良好的市场环境,推动低空经济健康有序发展。

### 参考文献:

- [1]新华网. 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[EB/OL]. (2024-07-21)[2024-08-10]. <http://www.news.cn/politics/20240721/cec09ea2bde840dfb99331c48ab5523a/c.html>.
- [2]段芳媛,王婧. 2023年中国低空经济规模超过5000亿元[EB/OL]. (2024-04-02)[2024-05-10]. [http://www.news.cn/2024-04/02/c\\_1212348383.htm](http://www.news.cn/2024-04/02/c_1212348383.htm).
- [3]中国民用航空局. 2023年民航行业发展统计公报[EB/OL]. (2024-05-31)[2024-08-10]. [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202405/t20240531\\_224333.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202405/t20240531_224333.html).
- [4]肖敏. 全球首证颁发无人机进入载人时代[EB/OL]. (2023-10-23)[2024-04-20]. [http://www.caacnews.com.cn/1/tbtj\\_/202310/t20231023\\_1371434.html](http://www.caacnews.com.cn/1/tbtj_/202310/t20231023_1371434.html).
- [5]张新生,郑琼洁. 发展低空消费新业态的现实困境与实践进路[J]. 南京邮电大学学报(社会科学版), 2024(3):1-10.
- [6]王颖,王谋,印春峰. 中国低空经济发展热现象下的冷思考[J]. 中国工程咨询, 2024(3):48-52.
- [7]Federal Aviation Administration. Air Traffic by the Numbers[EB/OL]. (2023-04)[2024-05-10]. [https://www.faa.gov/air\\_traffic/by\\_the\\_numbers/media/Air\\_Traffic\\_by\\_the\\_Numbers\\_2023.pdf](https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers/media/Air_Traffic_by_the_Numbers_2023.pdf).
- [8]PWC. Contribution of General Aviation to the US Economy in 2018. PricewaterhouseCoopers study[EB/OL]. (2020-02-19)[2024-05-10]. <https://nbaa.org/wp-content/uploads/advocacy/legislative-and-regulatory-issues/business-aviation-essential/General-Aviation-Contribution-to-the-US-Economy-20200219.pdf>.

- [9]National Air and Space Museum. What is General Aviation[EB/OL]. [2024-05-10]. <https://airandspace.si.edu/explore/stories/what-general-aviation>.
- [10]Molly McMillin. New Study Shows General Aviation's Economic Impact On U. S. States[EB/OL]. (2023-06-20)[2024-05-10]. <https://aviationweek.com/business-aviation/airports-fbos-suppliers/new-study-shows-general-aviations-economic-impact-us>.
- [11]Alex Dobuzinskis. Factbox: History of helicopter crashes in New York[EB/OL]. (2019-06-11)[2024-05-10]. <https://www.reuters.com/article/idUSKCN1TB2LB/>.
- [12]DAVID MCHUGH. Global air crash deaths fall by more than half in 2019[EB/OL]. (2020-01-02)[2024-05-10]. <https://apnews.com/international-news-general-news-7fd04cf4936c2338e08bf5abcd20d6f>.
- [13]Bureau of Transportation Statistics. General Aviation Profile[EB/OL]. [2024-05-10]. <https://www.bts.gov/content/general-aviation-profile>.
- [14]SOBIERALSKI J B. The cost of general aviation accidents in the United States[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013(47):19-27.
- [15]International Air Transport Association. 2023 Safest Year for Flying By Several Parameters[EB/OL]. (2024-2-28)[2024-05-10]. <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-02-28-01/>.
- [16]Pilot Institute. Why Do Aircraft Crash-Aviation Accident Statistics Revealed[EB/OL]. (2023-2-26)[2024-05-10]. <https://pilotinstitute.com/aviation-accident-causes/>.
- [17]国际民航组织. 安全指导材料[EB/OL]. [2024-05-10]. <https://www.icao.int/safety/SafetyManagement/Pages/GuidanceMaterial.aspx>.
- [18]乔善勋. 航空安全中人为因素分析模型分析研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2020(1):43-46.
- [19]刘传健. 危机情境下民航飞行员心理胜任特征模型的构建与验证[J]. 民航学报, 2021(5):1-7.

## The Current Status, Security Challenges and Operational Countermeasures of China's Low-Altitude Economy

—A Case Study of General Aviation

QIAO Shanxun

(School of Information Engineering, Henan Industry and Trade Vocational College, Zhengzhou 450053, China)

**Abstract:** Low-altitude economy is a new track for industrial development and a new engine for economic growth with broad prospects for development, which can effectively promote industrial structure upgrading, employment and improve people's livelihoods. The development of China's low-altitude economy faces problems such as incomplete airspace management, the need for improvement in technological level and insufficient safety supervision, etc. Currently, research on low-altitude economy mainly focuses on macro policies and industrial development. Starting from a micro perspective, taking the application and safety risks of general aviation and the main industry of low-altitude economy as the entry point and drawing on the development experience of other countries, this paper conducts segmented field analysis and interdisciplinary research and summarizes universal laws.

**Keywords:** low-altitude economy; general aviation; industrial integration; safety; operation countermeasures

(责任编辑:周新颜)

**引用格式** 乔善勋. 我国低空经济发展现状、安全挑战及运营对策:以通用航空为例[J]. 山东航空学院学报, 2024, 41(2): 79-84. QIAO Shanxun. The Current Status, Security Challenges and Operational Countermeasures of China's Low-Altitude Economy: A Case Study of General Aviation[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2024, 41(2): 79-84.