

基于PDCA模型的低空飞行空管工作分析： 飞行特点、安全风险、应对措施

李冰洁

中国民用航空西北地区空中交通管理局，陕西 西安

收稿日期：2026年4月24日；录用日期：2026年7月2日；发布日期：2026年7月14日

摘 要

近年来，低空飞行航空器的飞行总量、产品类型等呈爆发式增长趋势，取得的社会效益很显著，但是在空中交通管理方面的工作统筹及落地较少。本文从“人、机、环、管”等方面，梳理分析低空飞行风险因素，归纳总结空中交通管理工作在人员管理、基础设施建设、专业设备配置等方面的风险因素，提出下一步工作计划。选取华山景区低空物流无人机运输项目，基于PDCA循环理论，制定了工作计划、设定了KPIs指标值，结合实际运行数据进行了目标值检查，并开展了优化迭代工作，实现了低空飞行工作的闭环管理。本文提出的PDCA循环与低空飞行试点项目相结合的持续改进机制，为进一步提升低空飞行空管保障能力提供工作思路，为逐步消除低空飞行安全风险因素提供理论参考。

关键词

低空飞行，空中交通管理，安全风险因素，PDCA循环，华山景区，无人机物流

Analysis of Air Traffic Control for Low-Altitude Flight Operations Based on the PDCA Model: Flight Characteristics, Safety Risks, and Countermeasures

Bingjie Li

Northwest Air Traffic Management Bureau, CAAC, Xi'an Shaanxi

Received: April 24, 2026; accepted: July 2, 2026; published: July 14, 2026

Abstract

In recent years, the total flight volume and product types of low-altitude flight aircraft have shown an explosive growth trend, achieving significant social benefits. However, there has been relatively little systematic planning and implementation in terms of air traffic management. This paper analyzes the risk factors of low-altitude flights from the perspectives of “human, equipment, environment, and management,” summarizes the risk factors in air traffic management work in areas such as personnel management, infrastructure construction, and specialized equipment configuration, and proposes next-step work plans. The Huashan Scenic Area low-altitude logistics drone transport project is selected as a case study. Based on the PDCA cycle theory, a work plan is formulated, KPIs target values are set, target inspections are conducted using actual operational data, and optimization and iteration efforts are carried out, achieving closed-loop management of low-altitude flight operations. The continuous improvement mechanism proposed in this paper, which integrates the PDCA cycle with low-altitude flight pilot projects, provides operational ideas for further enhancing air traffic control support capabilities for low-altitude flights and offers theoretical references for gradually eliminating safety risk factors in low-altitude flight operations.

Keywords

Low-Altitude Flight, Air Traffic Management, Safety Risk Factors, PDCA Cycle, Huashan Scenic Area, Drone Logistics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

低空经济作为国家战略性新兴产业，在低空空域逐步开放、无人机技术兴起等多方面利好因素的支持下，产业蓬勃高速发展。低空飞行航空器在抢险救灾、资源勘探、农业发展、环境治理等方面做出了重大贡献，高效利用了空域资源，提高了生产效能，发挥了地面机械和人工作业不可替代的作用，社会效益十分显著。然而，要实现低空飞行航空器的常态化、高频率、多场景、全融合的运行，助力未来城市立体交通体系建设，实现低空经济产业质的飞跃，中国乃至全球都面临诸多挑战。空中交通管理行业目前作为公共运输航空器飞行安全的重要保障部分，如何进一步在低空飞行领域，发挥好安全保障职能，需从管理制度完善、人员能力提升、基础设施建设、飞行计划管理等多方面考虑制定针对性工作措施，逐步消除安全风险因素，提升安全保障能力，进而助力低空经济稳步高效发展。

2. 低空经济概述及低空飞行航空器特点

2.1. 低空经济概述

低空是指距正下方地平面垂直距离 1000 米以内的飞行区域(根据不同地区特点和实际需要可延伸至 3000 米以内的空域)。低空经济是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牵引，辐射带动相关领域融合发展的综合性经济形态。低空经济主要由低空制造产业、低空飞行产业、低空保障产业和综合服务产业构成。其中，低空保障产业是指为空域安全和低空飞行提供服务保障的各类产业，主要包括低空空域管控系统、通用机场、无人机飞行信息系统以及通信、导航、气象、油料、维修等相关产业[1]。

2.2. 低空飞行航空器分类及特点

近年来，无人机产业兴起，低空飞行航空器种类增多、飞行灵活性和便捷性大幅提高、使用主体由企事业单位扩充至个人用户，低空飞行航空器类别及主要飞行特点[1]如表 1 所示：

Table 1. Classification and characteristics of low-altitude flight aircraft
表 1. 低空飞行航空器分类及特点

低空飞行航空器类别	飞行高度	飞行特点
传统固定翼飞机	3000 米以下	飞行速度快，航程远，能源效率高，但需要跑道起降，对场地要求高。
无人机	120 米以下(消费级/小物流) 120~300 米(工业级)	无人员搭载，智能化程度高，成本相对较低，是目前应用最广泛的低空航空器
电动垂直起降飞行器(eVTOL)	300~1000 米(载人)	电动化、垂直起降，未来城市立体交通的核心产品。
直升机	120~1000 米	可垂直起降与悬停，技术成熟，载重能力强，但采购和运营成本高，机械结构复杂。

低空飞行航空器与公共运输航空器相比，飞行高度低、灵活度高、密度大、频次多。据统计，2025 年全国实名登记的无人机总数已突破 328 万架，全年累计飞行时长达到 4530 万小时，同比增长 70%。由此可见，中国低空飞行总量已进入爆发式增长模式。

2.3. 低空飞行发展现状及存在的风险因素

低空飞行作为当前全球主流产业，商业价值和社会效益显著。国际上，无人驾驶航空器交通管理(UTM)和欧洲 U-space 是现阶段低空空管领域的两大主流研究体系。UTM 体系[2]核心理念是构建一个“基于社区的、协作式的”无人机交通管理系统。基于低空飞行航空器数量大、密度高特点，传统“一对一”管制模式无法适应的问题，UTM 强调了分布式架构——不依赖 FAA 的集中指挥，通过数字化服务由第三方服务商提供信息交换和协调服务，利用自动化和信息化手段实现航空器的“自助式”管理，该体系的一个关键机制是 LAANC——低空授权与通知能力，它实现了无人机在管制空域(400 英尺以下)飞行的近实时授权，将传统数周甚至数月的审批流程缩短至秒级。U-space [3]是欧洲提出的低空空管框架，由欧盟委员会通过立法推行，核心理念是“安全、高效地实现高密度无人机交通”，特别是为超视距飞行(BVLOS)、夜间飞行和人口稠密区上空的复杂无人机运营提供监管保障。UTM 侧重“协同、信息化、可扩展”的技术实现路径，U-space 强调“监管、标准化、分阶段实施”的法律法规框架。

国内外各位专家学者有关低空空域交通管理开展了系统架构设计、技术标准和法规框架等多项研究。如：文献 4 系统梳理和比较了全球主要国家和地区在无人机空管融合领域政策与技术路径，指出如何安全、高效地将无人机纳入空域是全球民航监管机构面临的共同挑战，揭示了不同地区在政府角色定位和融合路径上的差异，综览了各方共同面临的技术难题，包括：探测与避让(DAA)、指挥、控制与通信(C2)，以及基于人工智能的导航技术等[4]。文献 5 采用基于智能体的快速建模仿真方法，以罗马尼亚的克拉约瓦国际机场(LRBC)为研究场景，提取了真实的无人机飞行记录以及欧洲空中航行安全组织(EUROCONTROL)提供的 Base of Aircraft Data (BADA)飞机性能数据库，仿真模拟了大规模的真实无人机飞行(涵盖管制空域与非管制空域)与有人航空飞行同时运行场景，系统性地从飞行程序优化、空域设计重构、管制员能力评估、自动化需求识别等方面分析了融合运行所需的条件，探索在现有系统改动最小的前提下，于民用塔台管制区内安全融合有人与无人航空的可行方案[5]。文献 6 归纳了无人机在交通管

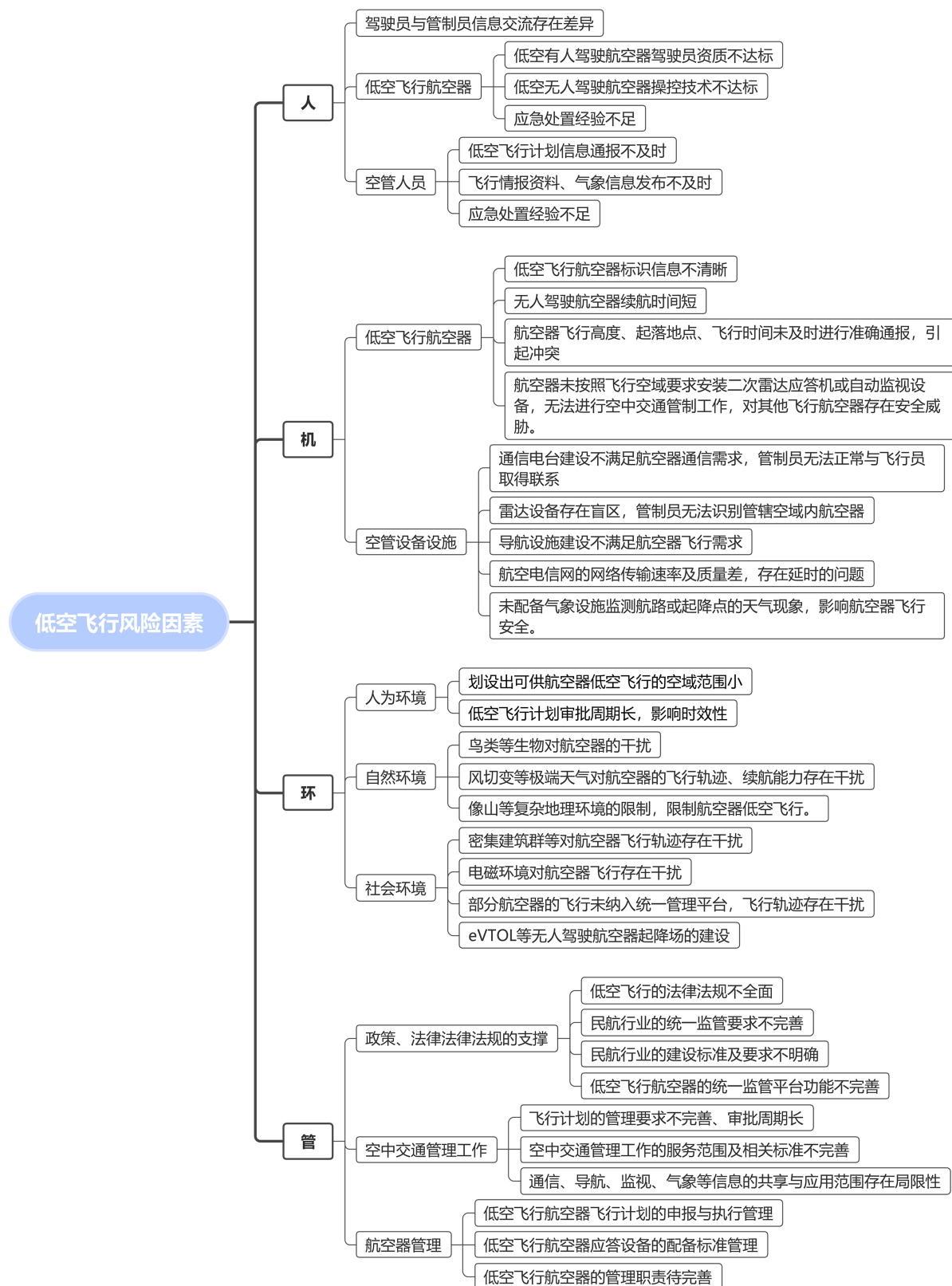


Figure 1. Risk factors of low-altitude flight
图 1. 低空飞行风险因素

理中的多元化角色,从设备技术层面、法规与空域管理层面、社会经济层面等阐述了无人机发展过程中面临的挑战,提出了前瞻性的研究方向,如无人机交通管理(UTM)系统的开发及应用、机载实时目标检测等人工智能技术的融合及应用、无人机续航能力的提升、多无人机协同技术的应用等[6]。文献7以日本低空产业为系统性案例,通过深入剖析其在低空产业(特别是无人机领域)的战略布局与实践经验,提出要制定统一的低空经济发展战略,整合跨部门(民航、工信、军方)协调机制;要联合攻关无人机长续航、高载重、eVTOL(电动垂直起降飞行器)等核心技术难题;要根据不同风险级别实施差异化的空域开放与准入政策,强化对低空飞行活动的全流程动态监测与风险预警[7]。文献8系统梳理了低空空域管理和先进空中交通(AAM)的技术发展脉络,涵盖通信导航监视(CNS)系统、人工智能应用、人机协同、空域设计等关键技术环节,指出当前研究正从“能否飞”向“如何安全高效地飞”转型,提出迈向多域交通管理(MDTM)的整合性方法,为平滑演进至未来AAM商业化运营场景的动态、自适应、人机协同的低空空域管理体系提供系统性框架[8]。文献9借鉴UTM发展经验,基于分布式决策、实时空域协商及风险弹性管理三大设计原则,结合中国低空空域管理实际需求和中国北斗卫星导航系统(BDS)的技术优势,提出了一套“分层、分类、分域、网格化”的UTM解决方案,创新性地设计了以“八卦图”为核心的“管道化”立体航线网络[9]。文献10分析了中国低空经济发展的现状、问题与对策,指出了当前低空空管体系的基础设施薄弱、标准规范不统一、跨部门协同机制不完善等突出问题[10]。文献11聚焦于高密度、约束性强的城市低空空域中的冲突检测与解决(CD&R)问题,设计了一种交通流容量战略优化方法,旨在增强对飞行计划偏差的鲁棒性,更好地配合战术CD&R机动,填补了“战略-战术”两级解冲突之间的衔接空白,为高密度无人机运行提供了更鲁棒的安全保障方案[11]。Unifly与Nexova将网络安全工程嵌入UTM系统核心架构,为UTM系统构建了协调的保护框架(Protection Profile),开发了Unifly平台的安全目标(Security Target),建立了支持重复攻击模拟、KPIs评估和监管可审计证据生成的测试平台[12]。

参照国内外低空飞行发展趋势,依据表1所示低空飞行航空器飞行特点,本文从“人、机、环、管”等方面分析了低空飞行产业目前面临的问题及风险因素[13],具体如图1所示。

3. 空中交通管理工作概述及在低空领域内的应用

空中交通管理工作(以下简称“空管工作”)包括空中交通服务、空中交通流量管理和空域管理。中国的空域根据使用性质和管制要求划分为管制空域、监视空域和报告空域[14],具体管理要求及用途如表2所示:

Table 2. Classification and functions of airspace in China
表 2. 中国空域类型及用途

空域类型	定义特征	管理要求	用途
管制空域	航空器流量大或对空防安全至关重要的区域,如机场附近、航路。飞行活动受最严格管制。	必须事先申请并获得批准,接受空中交通管制服务的全程监视与指挥。	运输航空航路、繁忙机场进近区、重要终端区。
监视空域	飞行量适中,需要掌握航空器动态但无需全程管制的区域。是目前低空开放的主要类型。	需要报备飞行计划,空管部门进行监视并提供飞行情报服务,但不给常规机动进行指挥。	低空飞行主要区域,通用航空活动密集区。
报告空域	飞行量较小的区域,航空器可相对自由飞行。	航空器起飞前需报告飞行计划,空中无需持续通信,但需遵守相关法规。	飞行量少的通用航空训练、作业区域。

空中交通管理部门主要职责为：针对管制空域内的航空器(常为公共运输航空器)，基于雷达设备或目视等方式实时监控航空器飞行轨迹，通过气象雷达设备监测航路及起落机场的天气，利用地空通信设备“一对一”交流飞行信息，由空中交通管制员对航空器发布指令和许可，配备合理的飞行间隔，保障航空器飞行安全。据统计，2025 年民航空管系统共保障各类飞行 647.4 万班次，日均保障 17,737 班，同比增长 4.7%，创历史新高。

空中交通管理工作从业务上可大致分为空中交通管制、空中流量管理、飞行情报发布、通信导航监视、天气现象监测等，如图 2 所示：

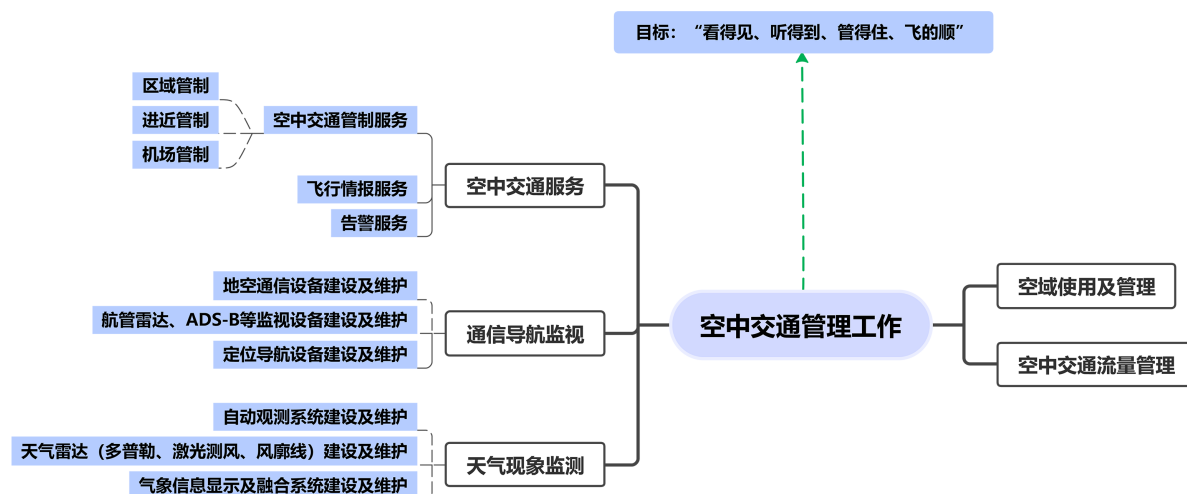


Figure 2. Air traffic management work

图 2. 空中交通管理工作

空中交通管理工作的目标可概括为：“看得见、听得到、管得住、飞的顺”。低空经济发展背景下，空管工作的首要任务是加基础设施建设，筑牢低空飞行根基，方能实现低空飞行产业的高效、畅通[15][16]。结合低空飞行过程中存在的风险因素，空中交通管理工作制定针对性工作计划如图 3 所示：

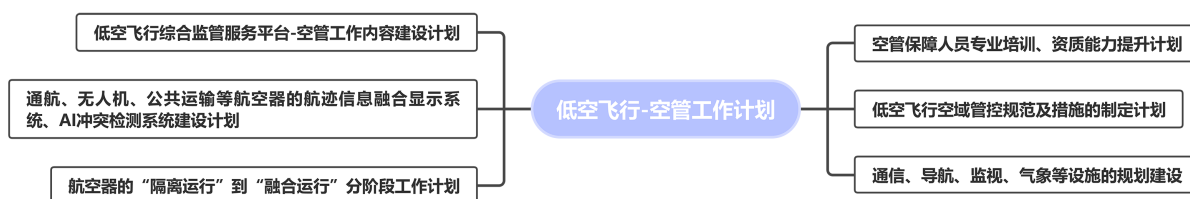


Figure 3. Work plan for low-altitude flight air traffic control

图 3. 低空飞行空管工作计划

低空飞行航空器因其飞行高度低，地面障碍物对飞行的干扰较多，空管通信导航设施的建设、天气监测设备的配置是重要保障要素。规划项目建设可基于低空飞行需求、流量、密度、高度等的分析，针对飞行频次较多、需求较大的地区，首先开展基础设施的建设工作，确保航空器能“看得见、听得到”。

低空飞行航空器像无人机等设施较高灵活性、较低入门槛的特点，驾驶员或操作员的水平会存在一定的差异，若今后要实现“融合飞行”模式，民航行业规范、人员资质认证、飞行计划审批、航空器飞行准入标准等都需要分类监管、分阶段完善，同时，配合完善无人驾驶航空器管理系统，在融合空域内逐步试点开展无人驾驶与有人驾驶航空器的空中交通管理工作，确保航空器能“管得住、飞的顺”。

现阶段,低空飞行航空器与公共运输航空器根据空域划分要求,实行“隔离运行”模式,低空飞行航空器主要在监视或报告空域范围内进行活动,可无需全程接受空中交通管制服务。

在全球低空经济大规模发展的推动下,结合国内外低空飞行发展趋势,低空经济背景下的空管工作方向也需考虑从“一对一”的指令式管制,向“大规模、分层级、自动化”的“低空空域交通管理(UATM)”或“无人驾驶航空器交通管理(UTM)”体系演进,空域的使用也需从“固定划设”向“分层、分类、分时”的动态灵活空域使用机制转变[17]。作为一名民航空管工作者,本文将基于 PDCA 循环模型与具体运行数据相结合的研究方式,开展空管工作流程的闭环优化分析。

4. 基于 PDCA 模型的低空飞行空管工作分析——以华山景区低空物流无人机项目为例

PDCA, 又称戴明环, 是一个持续改进的四步管理模型。PDCA 认为所有工作都应遵循一个循环: 计划(Plan) → 实施(Do) → 检查(Check) → 处理(Act), 并通过不断旋转这个循环, 实现水平的维持、问题的解决和绩效的阶梯式提升。

空管行业的首要工作原则是“安全”, 面对爆发式增长的低空飞行局面, 在确保运行安全及效率的前提下, PDCA 模型提供了一种持续改进、动态适应的系统化管理框架; 同时也提供了一种“谋定而后动”的工作思维。低空空管工作的适应性改变非一朝一夕完成, 须持续迭代优化, 中国低空经济才能行稳致远。

本文结合华山景区低空物流无人机项目, 基于 PDCA 模型分析研究低空飞行空管工作及今后的优化方向, 工作阶段示意如图 4 所示。

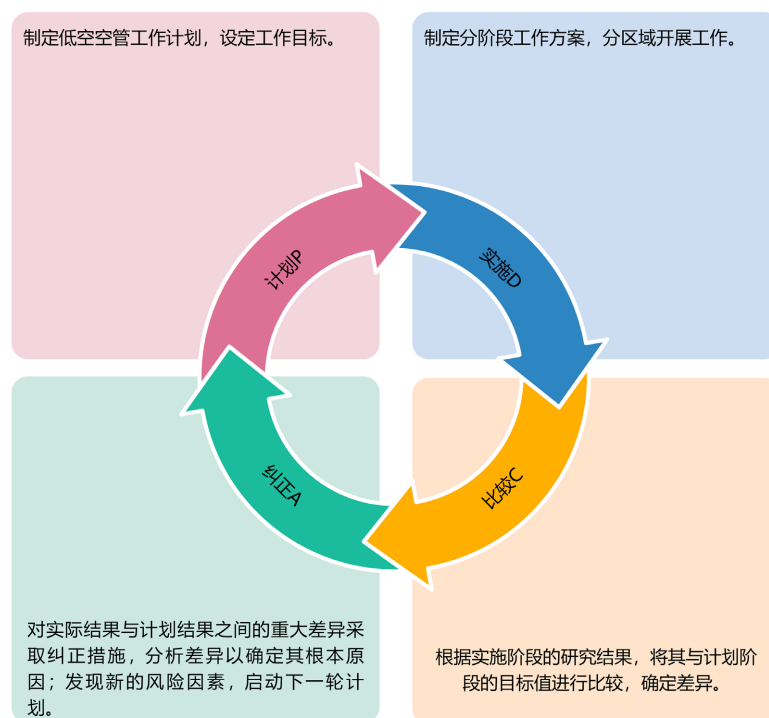


Figure 4. Stages of low-altitude air traffic control work under the PDCA model

图 4. PDCA 模型下低空空管工作阶段

目前, 中国已在浙江、广东、四川等省市开展低空飞行试点工作。陕西也已在华山景区、西安城区开展了低空飞行试点工作, 本文选取华山景区基于“无人机 + 索道”模式的低空物流配送工作的运行情

况开展 PDCA 循环分析。

4.1. 华山景区低空物流配送项目背景及运行现状

1) 项目背景

华山以“奇险天下第一山”著称，山体陡峭、峡谷纵横，核心景区与游客集散点分布在海拔千米以上的山间。传统物资运输依赖人力和索道两种方式，人力运输的体力消耗大、效率低，索道运输的站点局限、建设成本高。同时，景区运营面临着物资转运时效性差、成本高，重型基础设施更换运输难度大的问题。这些痛点及难点问题催生了利用无人机技术解决山区物流难题的需求，基于此，陕西省于 2024 年启动了华山景区低空物流配送项目，该项目作为陕西省低空经济发展的标杆性试点项目，现已实现“上行-下行”两条航线的常态化运营，并入选交通运输部《低空交通运输应用场景典型案例》¹进行全国范围内推广。该项目破解了高海拔山区物资运输瓶颈，显著提高了运输效率，高效发挥了无人机灵活配送“最后一公里”的优势，与现有索道系统形成了优势互补，构建了更高效的山岳景区立体物流网络，建立了“物资送上山，垃圾带下山”的绿色闭环运输模式，落实了可持续发展理念。

2) 运行现状

该项目在华山游客中心与北峰、西峰两个补给点之间，利用六旋翼物流无人机实现应急药品、物资，景区垃圾、基础设施材料等运输。划设 3 条固定航路(A 线：游客中心→北峰；B 线：北峰→西峰；C 线：西峰→游客中心)，航点间隔 200 米加密；无人机运行模式为地面控制站(GCS)统一规划，4G+ 数传双链路备份，自主飞行，异常时切换人工接管。

因华山景区的地形为 V 型峡谷、陡峭崖壁(海拔高差达 1100 米)，飞行空域复杂，存在 GPS 信号多路径效应，部分航路点信号遮盖率达 15%、天气现象多变(突发横风可达 12 m/s、团雾致能见度 <200 米)、山脉限制航空器飞行轨迹、景区内电磁环境差(4G/5G 基站覆盖存在盲区、北峰背坡区域信号强度低于 -110 dBm，数据链丢包率骤升)等诸多问题。本文综合分析了华山景区无人机开展物流运输过程中存在的问题，制定了工作计划及目标，对照检查了实际运行与目标值的差异，并提出了迭代优化方案。

4.2. 基于风险矩阵的风险识别与优先级排序(Plan 阶段)

为做好华山景区低空物流无人机运输工作，由政府监管部门、景区、空管部门、无人机企业等成立了工作专班，建立工作协调机制。根据华山景区地理环境及运行特点，识别风险因素，评估风险因素发生后造成的后果，划设风险等级，建立风险矩阵，制定工作方案，将“人、机、环、管”等四维风险控制至可接受水平，从而实现景区的高效运行。

其中，风险因素的可能性、严重性等级标准及风险因素评估结果分别如表 3~6 所示：

Table 3. Criteria for likelihood level classification of risk factors

表 3. 风险因素可能性等级划设标准

等级	描述	发生概率	定性说明
5	极高	>10%	几乎每次任务都可能发生
4	高	5%~10%	较频繁发生，日常运行常见
3	中	1%~5%	偶发，需关注
2	低	0.1%~1%	较少发生，但不排除
1	极低	<0.1%	罕见，仅在极端条件下发生

¹<https://www.zgjtqx.org.cn/upload/202511/1763602045403.pdf>

Table 4. Criteria for severity level classification of risk factors
表 4. 风险严重性等级划设标准

等级	描述	安全影响	运行影响
5	灾难性	人员重伤/死亡，航空器坠毁	系统长期停运
4	严重	航空器严重受损，紧急迫降	任务取消，线路停运数日
3	中等	任务中止/返航，设备轻微受损	单次任务失败
2	轻度	运行效率下降，需人工干预	短暂延误，可恢复
1	可忽略	记录事件但无实际影响	无影响

Table 5. Risk level classification criteria and control requirements
表 5. 风险等级划分标准及管控要求

风险等级	风险值范围(可能性 × 严重性)	管控要求
高风险	16~25	最高优先级，立即整改
中风险	8~15	限期管控，制定改进计划
低风险	2~7	保持监控，持续优化
可接受	1	无需特殊管控

Table 6. Risk factor assessment form for the Huashan UAV low-altitude logistics transportation project
表 6. 华山无人机低空物流运输项目风险因素评估表

风险编号	所属维度	风险事件	可能性(L)	严重性(S)	风险值 (R = L × S)	风险等级
R1	人	人工干预响应延迟	2	3	6	低风险
R2	人	人员资质培训不足	2	2	4	低风险
R3	机	GPS 信号干扰	3	2	6	低风险
R4	机	北峰背坡信号盲区，通信链路中断	4	3	12	中风险
R5	机	电池/动力故障	1	5	5	低风险
R6	环	天气现象突变	2	3	6	低风险
R7	环	强风姿态失稳	3	4	12	中风险
R8	管	航线接近/冲突	2	4	8	中风险
R9	管	空域申报协调周期长	2	2	4	低风险

对照风险因素评估结果可形成风险矩阵如图 5 所示，后续可根据情况随时完善补充。

针对矩阵中概率较大的几个因素：① 北峰背坡信号盲区，通信链路中断；② A/C 航线交汇点冲突；③ 无人机强风适应性不足等问题；制定了改进计划，如增设 5G 微基站解决监视信号盲区覆盖问题；修改航路航线解决交汇点冲突问题；升级飞控算法稳定飞行航迹等。

4.3. 试点实施工作(Do 阶段)

结合 2025 年 6 月至 12 月已开展的 1586 架次飞行任务，本文量化验证了图 2 中识别的“人、机、环、管”四维风险因素，根据实际运行情况开展针对性优化工作。主要如下。

人：因人员操控能力问题，在发生人工接管 57 次中，平均响应时间 28 秒(目标值 ≤15 秒)，其中 22 次因延迟造成航线偏离大于 50 米。

机：因无人机通信盲区问题，发生通信链路中断 116 次(占 7.3%架次)，其中 82 次中断时长超过 10 秒，触发飞控自动返航。

环：因极端天气现象问题，当风速超过 10 m/s 时，无人机偏航角误差均值达 12.3° (安全阈值为 5°)，发生 3 次触及安全边界。

管：因空中交通航路航线规划管理问题，在三条固定航路的交汇点，共记录到 18 次航空器间距小于 50 米的接近事件，其中 2 次间距不足 20 米，暴露出航路设计的潜在冲突风险。

对照景区无人机低空飞行过程中的量化安全风险，项目专班制定了改进方案，设定了改进目标并予以实施，执行结果如下。

人：针对人员操控水平参差不齐的问题，加强人员培训工作，组织专题案例分析会议，归纳总结各类异常飞行情况，提升人员操作能力。

机：针对设备通信盲区的问题，增设了 2 个 5G 微基站，使北峰背坡参考信号接收功率(RSRP)提升至 -85 dBm。

环：针对强风干扰等极端天气影响飞行轨迹的问题，升级了飞控固件，引入实时风速修正系数，增强横风补偿策略。

管：针对航线冲突的问题，重新规划了航路航线，将 A 线与 C 线在交汇点处由平面交叉改为立体交叉，垂直间距调整为 30 米；重新编排飞行班次。

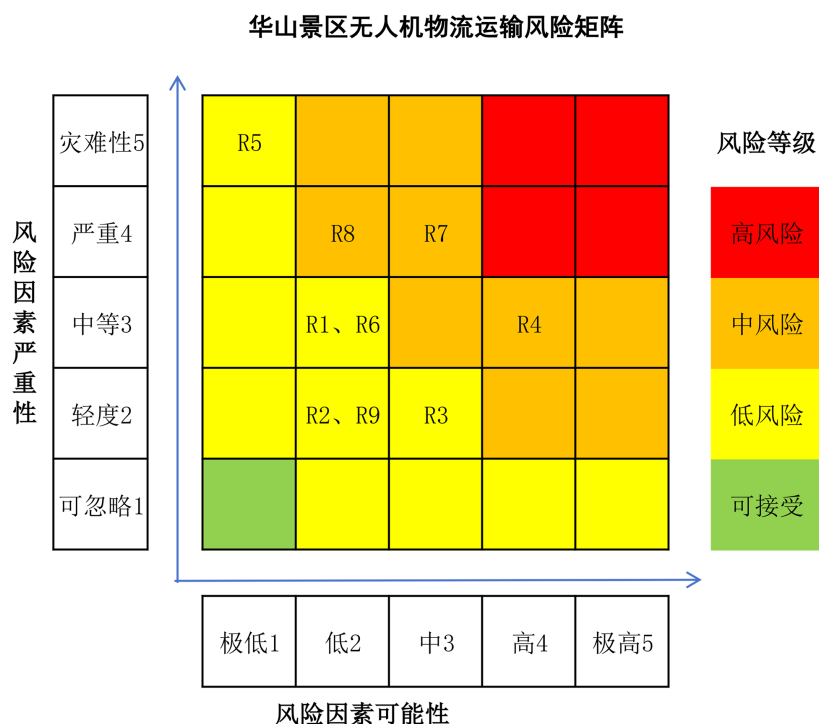


Figure 5. Risk matrix for UAV logistics transportation in the Huashan scenic area
图 5. 华山景区无人机物流运输风险矩阵

4.4. 基于 KPIs 的运行结果量化评估(Check 阶段)

为检验改进措施的有效性，本文建立了一套可测量的关键绩效指标(KPIs)。结合指标值对 2026 年 1 月至 3 月实施改进后的 380 架次运行数据进行了对照检查，结果如表 7 所示。

Table 7. Key Performance Indicators (KPIs) for the Huashan Scenic Area low-altitude logistics drone transport project
表 7. 华山景区低空物流无人机运输项目工作 KPIs

KPIs	基线(改进前)	改进后(实测)	阈值	是否达标
人工干预请求率(次/100 架次)	3.59	1.84	≤2%	是
通信中断率(次/100 架次)	7.3	3.2	≤5%	是
强风偏航误差(风速 > 10 m/s)	12.3°	4.7°	≤5°	是
航线接近风险(<50 米次数/总架次)	1.13%	0.26%	≤0.5%	是

检查结果表明，四项核心 KPIs 均已达到预设目标。同时，检查也发现了新的问题：新增的 5G 微基站导致西峰节点整体功耗上升 12%，备用电池更换周期缩短。

4.5. 下一轮迭代优化(Act 阶段)

基于实施阶段的改进优化、检查阶段的对照检查，以及识别出新的运行风险，需开启 PDCA 的下一轮循环，同时，需着手将有效举措标准化，启动行业规范的编制工作；并将立体交叉航路设计纳入航线规划标准作业程序(SOP)。

针对基站功耗上升新问题，设定“将备用电池更换周期从 7 天延长至 14 天”的工作目标，在基站加装太阳能辅助供电模块，增加功率储能。

4.6. 低空空管工作的持续改进机制

为持续做好低空空管工作从“计划制定”到“效能提升”的闭环管理，须建立常态化的运行监控与动态改进机制。以实际数据为驱动，以运行风险为核心，贯穿低空空管运行工作的全过程。

第一，建立风险源管控机制。

低空空管风险登记册是监控工作的基础。该登记册不仅包含初始识别的“人、机、环、管”四维风险，还需依据运行数据与外部环境变化，安排专人负责实施动态更新。其中包含 3 方面工作：

(1) 数据采集：依托通信导航监视设备、气象观测系统及无人机自动相关监视(ADS-B)等，实时监控飞行密度、通信链路质量、气象条件、人工干预频率等关键运行数据。

(2) 风险识别与入库：设定风险阈值，当监测数据触发预设阈值(如通信中断率 > 5%、偏航误差 > 5°)或出现新型不正常事件(如新发现的信号盲区、航线接近事件等)，立即启动风险识别程序，评估风险等级(高/中/低)，并录入风险登记册，明确责任人与管控时限。

(3) 风险趋势分析：定期对登记册中的风险数据进行统计分析，识别高频风险与潜在趋势，建立监控机制，优化改进方案。

第二，完善工作专班职能。

低空飞行工作的安全运行离不开各方的支持，持续完善沟通协调机制，才能实现风险降级或转移等效果，优化方向主要如下：

(1) 优化工作协调机制

工作专班可按照通信、气象、无人机设备运维等划分专业小组，根据运行情况灵活调整工作会议时间及频次，若遇天气复杂或客流量较大的节点，可增加会议频次，及时掌握风险因素，及时避免不安全事件的发生。

(2) 完善工作复盘机制

基于风险登记册与运行数据，定期对低空空管工作进行系统性评估，对比实际运行 KPIs 与预设目

标, 审查风险管控措施的有效性, 评估现有资源与能力是否适应飞行活动的发展需求; 根据评估结论, 启动 PDCA 的“处理(Act)”阶段, 对未达标 KPIs 或新增风险, 立即制定针对性改进措施, 并纳入下一阶段的改进计划; 对系统性问题或战略目标差距, 修订年度工作计划、设施建设规划或人员培训方案, 并相应调整风险登记册中的长期风险项, 进行持续监控。

综合上述“计划-执行-检查-处理”的 PDCA 循环模型的完整闭环分析, 华山景区低空物流无人机运输项目不仅验证了 PDCA 循环在低空空管工作中的有效性, 同时形成了一个可动态更新的风险管理数据库, 为后续低空空管工作的精细化迭代提供了有力的理论依据。

5. 结论

低空经济的发展旨在构建一个“安全、有序、高效、便捷、智能”的天空经济体系。本文分析低空飞行全过程风险因素, 梳理低空飞行空中交通管理工作, 基于 PDCA 循环模型研究了华山景区低空物流无人机运输试点项目的运行现状, 通过制定工作计划, 制定改进措施, 验证了运用量化 KPIs 和闭环管理机制能够有效降低“人、机、环、管”等四维风险, 为 PDCA 模型从理论框架转化为动态、可执行的低空飞行空中交通管理工具提供了实践范例。本文为提升低空飞行管理工作精细化水平, 提高空管安全保障能力提供了工作方向, 为低空经济稳步高效发展提供了相关理论支撑。

参考文献

- [1] 周志民, 韩志科, 周苏, 等. 低空经济导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2026: 37-56.
- [2] Federal Aviation Administration (2020) Concept of Operations for UAS Traffic Management (UTM) ConOps V2.0. FAA.
- [3] European Commission (2021) Regulation (EU) 2021/664 of the European Parliament and of the Council of 22 April 2021 on a Regulatory Framework for U-Space. *Official Journal of the European Union*, **176**, 1-12. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/664/oj/eng
- [4] Aposporis, P. (2024) A Review of Global and Regional Frameworks for the Integration of an Unmanned Aircraft System in Air Traffic Management. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, **24**, Article 101064. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101064>
- [5] Spiridon, I. and Fuiorea, I. (2025) Increasing Air Traffic Management Efficiency by Integrating Manned Aviation with Unmanned Aviation at Civilian Air Traffic Control Tower. *Incas Bulletin*, **17**, 221-228. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2025.17.4.18>
- [6] Teoh, J., Lim, Z.X., Chan, Y.H., Kabir, A.S. and Yap, K.M. (2026) Recent Advancements, Challenges, and Future Directions of Integrating Drones in Smart City Traffic Management: A Systematic Review. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, **2026**, Article 7869329. <https://doi.org/10.1155/jece/7869329>
- [7] 赵胜川. 日本低空产业发展及其对我国的启示——以无人机应用为例[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2026, 25(1): 77-88.
- [8] Pongsakornsathien, N., Safwat, N.E., Xie, Y., Gardi, A. and Sabatini, R. (2025) Advances in Low-Altitude Airspace Management for Uncrewed Aircraft and Advanced Air Mobility. *Progress in Aerospace Sciences*, **154**, Article 101085. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2025.101085>
- [9] 贾永楠. 低空空域无人系统交通管理方案初探[J]. 航空学报, 2025, 46(11): 114-140.
- [10] 廖小罕, 徐晨晨, 叶虎平. 中国低空经济发展现状、问题与对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(3): 456-465.
- [11] Badea, C.A., Ellerbroek, J., Vidosavljević, A. and Hoekstra, J. (2025) Resilient Conflict Detection and Resolution for High-Uncertainty Constrained Urban Airspace Operations. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, **34**, Article 101700. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101700>
- [12] Unifly (2026) Unifly Completes ESA NAVISP Secure UTM 2 Phase I, Advancing Cyber-Resilient U-Space Operations. <https://www.unifly.acro/unifly-completes-esa-navisp-secureutm-2-phase-i-advancing-cyber-resilient-u-space-operations/3/>
- [13] 张学军, 李诚龙, 张志远, 等. 低空航行系统实时风险管理能力构建: 概念、挑战与技术[J]. 航空学报, 2025, 46(11): 8-34.

- [14] 中国民用航空局空中交通管理局. 民航空管系统低空飞行服务人员基础培训教程[M]. 北京: 中国民航出版社, 2025: 68-103.
- [15] 郑键. 空管在低空经济发展中的现状、挑战及推进措施[J]. 民航管理, 2025(10): 69-72.
- [16] 闫涛, 李杰, 张波, 等. 民航空管安全与专业融合发展的思考[J]. 民航管理, 2024(1): 47-50.
- [17] 何志凯, 舒振杰, 王晓华, 等. 无人机空中交通管理体系架构研究[J]. 标准科学, 2025(1): 82-87+108.