

无人机集群飞行表演安全规范 白皮书

Safety Specifications for Drone Swarm Flight Performances
White Paper



序 言

过去数年，“低空经济”多次被写进政府工作报告，其从“战略性新兴产业”跃迁为“新兴支柱产业”，正加速成为全球技术竞争的新赛道。与此同时，无人机集群飞行表演不断在城市夜空、文旅新业态、公共文化服务、商业传播及国际交流等场景中快速渗透，成为从单点技术展示迈向城市数字体验的重要窗口。尤其是随着行业规模持续扩张、应用场景密度不断增大以及公众关注度显著提升，无人机表演已远超单纯的艺术创新范畴，成为关乎安全、文化传播、产业链协同与国家形象的重要组成部分。在此背景下，构建成熟、可靠、面向未来的无人机安全运行体系，已成为行业走向高质量发展的关键前提。

作为全球领先的无人机集群系统供应商，深圳大漠大智控技术有限公司（简称“大漠大”）正全力推动无人机集群飞行表演行业从“视觉创新”向“城市级数字公共服务能力”转变。本书的撰写与持续更新，既是大漠大面向这一发展阶段的责任担当，也是行业迈向成熟规范发展所必需的基础性支撑工作。

在行业建立与体系化设施完善的重要时期，大漠大基于大量实践积累与技术演进趋势，推动无人机集群飞行表演迈入安全化、自动化、智能化、网络化协同发展的新阶段。安全化，意味着风控逻辑从单场单点防控，向全链路、全场景、全过程的系统治理升级；自动化，作为应对大规模运维、降低边



际成本与规避人为风险的核心基础,为产业规模化铺路;智能化,利用人工智能感知、智能补点、飞行态势分析等技术,实现复杂场景下的实时决策与自适应调整;网络化,则让跨区域协同、云端调度与多场景联动成为可能。四大方向相互促进、有机联动,不仅为低空经济规模化运营与无人机集群飞行表演规范化发展确立了关键框架,也意味着安全管理必须由“单点控制”上升为“体系化治理”,以支撑长期、高频、跨区域的常态化运行,这正是安全规范更新的理念基础,也是适配行业新发展阶段的需求锚点。

2025年,大漠大紧扣安全表演的原则,围绕安全体系与工程化能力建设,对产品架构和运行实践进行了全面迭代,并在长期实践中以安全为基准,形成了一套可验证、可复制、可规模化推广的行业样本。

大漠大的 V4 自动化无人机集群系统,作为全球首款实现“机巢式自动快充+全程自动化表演”的商业化应用产品,引领无人机集群飞行表演系统进入了“无限续飞”新纪元;配合软硬件全面升级,其安全可靠已达到接近 99.999% 的超高水准。大漠大的 L3 自动化无人机集群系统则通过烟花挂载等差异化能力,为城市庆典、文旅演艺提供了更适配的高性价比方案。而车载无人机表演系统的推出,则实现了行业突破性跨越,首次将无人机集群飞行表演从固定场地拓展至移动空间,实现“随停随飞、随行随演”的新型流动式低空基建模式,为大型活动预案、安全巡查与文化传播拓展了全新应用维度。

在持续高强度、突破性的科研创新中,大漠大以技术迭代应对气象、电磁、地形与城市运行的复杂性,通过真实场景的压力测试不断打磨系统可靠性,推动无人机集群飞行表演从单次活动形态逐渐转变为城市数字文化供给和公共活动运营的重要组成部分。

从 2024 年深圳国庆假期全城市综合营销——“天空之城 大有可能”万架无人机表演所沉淀的“深圳经验”,到 2025 年全球最大规模的无人机集群常态化驻场表演——重庆常态化展演形成的“重庆模式”,大漠大以安全保障、技术创新与生态合作为三大核心要素,全方位、系统性地推动行业向



更高层级迈进。其产品与服务已销往全球 50 多个国家和地区,文旅和主题公园表演市场份额占比达 60%。凭借工程化验证支撑的稳定表现,大漠大得到了业界权威机构、文旅场景运营方与专业同行的高度认可,也为安全规范的升级提供了坚实的数据基础与实践依据。

在无人机集群表演从“新兴技术”升级为“公共服务能力”的进程中,大漠大既是行业开拓者,也是行业标准制定的核心推动者。依托对飞行系统工程、安全治理逻辑及低空经济运行规律的长期深耕,大漠大为行业安全体系构建提供了示范样本,其积累的实践经验与形成的方法体系,更成为本书持续完善的核心支撑。

随着新版《无人机集群飞行表演安全规范》的出版,我们相信,无人机集群飞行表演行业将拥有更加清晰的安全根基和专业框架,在支撑低空经济新场景建设、保障公共安全、提升国际竞争力与推动行业长期健康发展等方面将发挥更关键的作用,助力行业迈向安全、有序、可持续、高质量发展的新阶段。

欧洲科学院院士
世界无人机大会主席

2025 年 11 月



第 2 版前言

近年来,随着航空航天技术、无线通信技术与集群控制技术的深度融合,无人机集群飞行表演行业迎来了爆发式发展。从早期数十架无人机的简单阵型变换,到如今上万架无人机协同演绎的“空中画卷”,无人机集群飞行表演已成为文旅演出、重大庆典、商业活动等场景中极具视觉冲击力的新型艺术表演形式,不仅丰富了大众的文化生活,更成为展现城市形象、传递品牌价值的重要载体。

行业规模的快速扩张与技术应用的不断突破,也对安全管理提出了更高要求。无人机集群飞行表演涉及场地规划、剧本设计、环境监测、通信保障、设备管理和应急处置等多个环节,任何一个环节的疏漏都可能引发安全风险。建立科学、系统、可落地的安全规范,不仅能为每场表演的顺利实施与完美呈现提供保障,并有效守护人员与财产安全,还可以推动行业在规范框架内实现可持续发展。

作为无人机集群表演领域的先行者与技术引领者,截至目前,深圳大漠大智控技术有限公司(简称“大漠大”)已成功完成超 2 万场无人机集群飞行表演,累计执飞架次超 5 000 万架,积累了不同场景、不同规模、不同气候条件下的丰富实操经验。在长期的实践中,大漠大团队直面行业技术痛点,围绕无人机硬件性能、通信稳定性、定位精度、协同控制等核心领域持续攻关,实现了多项关键技术突破,为大规模集群表演提供了更可靠的硬件支撑。

大漠大自主研发的 V4 无人机系统,不仅仅优化了电池续航、抗干扰与应急响应能力,增加了降落伞安全防护机制,更开创性地推出集群式机巢充电功能,无人机可实现即降即充,无需更换电池即可持续保持满电备飞状态,大幅提升了表演筹备效率与系统安全等级。



为进一步规范无人机集群飞行表演的安全标准,推动行业从“经验驱动”向“标准引领”转型,大漠大基于自身积累的万架级表演实践经验与核心技术成果,组织技术专家、安全管理人员与一线操作人员共同撰写本书。本书涵盖无人机集群飞行表演全流程,明确了各环节的安全要求与操作标准,并以大漠大的 V4 无人机系统为参照,提出了详尽的安全操作指导和技术指标规定,力求为行业从业者提供更加科学、实用的安全指引。

本书由刘汉斌、邓江华、王亚玲、邓涛、朱慧、朱喆然、刘晓萍、刘笑语、任家、余畅朝、吴远飞、吴智鹏、何振川、李浩、陈炳道、陈明侠、闵锐、贾恒祥、黄星、龚政、梁晓飞、靳中维、覃海群、管慧泽、滕国际共同撰写完成。

本书中的安全规范经过上万场无人机表演项目的验证,已成为大漠大团队全员恪守的飞行准则,保障了每一次正式表演的安全与完美。在撰写本书的过程中,笔者参考了相关文献,在此向其作者致以诚挚感谢。期望通过本书的出版,为无人机集群飞行表演行业乃至整个无人机产业的健康发展贡献一份力量。

鉴于笔者水平有限,书中难免存在疏漏与不妥之处,恳请行业同仁及广大读者不吝指正。

著 者

2025 年 11 月



第 1 版前言

2017年7月,深圳大漠大飞行表演执行团队在珠海长隆海洋王国开始国内第一个无人机集群飞行驻场常态化表演,《无人机集群飞行表演安全规范》开始萌芽,经过4年5000多场商业飞行表演实践的不断探索总结,形成了今天的版本。

纸上得来终觉浅,是非经过不知难。团队刚开始进驻珠海长隆海洋王国时,经历了严峻的考验。珠海长隆海洋王国是国际化高水平管理的全球知名主题公园,对我们的飞行表演提出了高标准要求,每次必须卡准起飞时间以确保与音乐的严格对准,对起风、下雨的飞行气象标准必须要求给出量化指标,核心就是尽一切可能保证为游客提供精彩演出,同时为了严格确保每一名游客的人身安全,要求飞行表演执行团队设置应急预案和应急降落点。珠海长隆海洋王国在安保方案上给予了全力配合,对于表演中每一架出现故障的飞机,必须进行实时记录并做出故障报告,要求找出具体原因以保证下一次演出更加安全、完美。这些管理标准要求我们必须追溯每一个影响飞行表演安全的细节要素,甚至包括对工作现场的环境整洁、飞行人员的饮食起居及行为举止都做了规范的要求。

可以说正是珠海长隆海洋王国的驻场表演催生了这一规范的建立和完善,如果这一飞行表演安全规范不在其他飞行表演项目中推广验证,就不可能成为我们执行团队都执行的飞行规范,也就不可能确保我们每一次正式



商演的零失误。规范刚开始在公司的单次表演中推行时,大家都为执行细节极其烦琐而抵触,幸好公司负责人有着 10 多年有人驾驶飞机的通用航空管理经验,坚决要求以通用航空的管理标准来管理每一次无人机集群表演,并要求公司的每一个单次表演项目和主题公园驻场项目严格遵守这一规范标准,对在每一次飞行中出现的故障现象都要严格记录,并要求研发和技术部门给出原因和解决方案,正是这一增强回路的不断正向循环迭代,使得我们《无人机集群飞行表演安全规范》和我们的产品不断完善,规范成为每一名执行人员的日常工作习惯,确保了表演工作的圆满顺利,使我们从必然王国走向自由王国。

实践出真知,规范出效果。今天我们将这一企业规范出版,分享给无人机集群表演和无人机服务行业的同行,为推动无人机集群表演行业和无人机产业的健康发展做一些有益的事。

本书分为 15 章,从飞机、锂电池、数据链、电磁环境、气象环境、飞行场地、人员培训、表演流程和法律法规等方面给出了具体规定,由深圳大漠大智控技术有限公司撰写完成。

笔者对珠海长隆海洋王国表示由衷的敬意,也向本书参考文献的各位作者表示诚挚的谢意。

由于水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请同行专家和广大读者予以指正。

著 者

2021 年 9 月



目 录

第 1 章 无人机集群表演系统简介	1
1.1 系统组成	1
1.2 系统通信链路	4
1.3 飞行表演流程	5
1.4 飞行表演团队的人员分工	12
第 2 章 无人机集群表演安全概述	14
2.1 核心评价指标	14
2.2 核心安全风险分析	15
2.3 安全规范声明	16
第 3 章 政策法规与飞行安全	18
3.1 行业政策概述	18
3.2 监管体系建立	19
3.3 地方政策与区域监管实践	20
3.4 合规飞行的核心要求	22
第 4 章 质量管控与飞行安全	23
4.1 质量管控全流程	23
4.2 质量管控核心措施	24



第 5 章 人员培训与飞行安全	26
5.1 对项目总指挥的要求	26
5.2 对地面站操作员的要求	27
5.3 对飞手的要求	29
5.4 对地勤人员的要求	30
5.5 外场服务纪律	30
第 6 章 场地规划与飞行安全	31
6.1 场地规划基本要求	31
6.2 场地规划详细要求	32
第 7 章 剧本设计与飞行安全	34
7.1 软件安全保障机制	34
7.2 剧本管理规定	36
第 8 章 气象监测与飞行安全	37
8.1 气温监测	37
8.2 气压监测	38
8.3 风速监测	38
8.4 降水监测	40
8.5 大气密度监测	41
第 9 章 电磁环境监测与飞行安全	42
9.1 电磁环境干扰基础	42
9.2 电磁环境检测流程与方法	44
9.3 现场干扰规避策略	44
9.4 核心设备电磁环境监测	45
9.5 特定频段与设备电磁监测	47
9.6 无人机表演场景专项电磁监测	49



第 10 章 通信链路	与飞行安全	51
10.1	定位信息通信链路备份	51
10.2	Wi-Fi 专网无线数据链优势	55
10.3	通信链路异常的响应机制	57
第 11 章 无人机间距、速度	与飞行安全	59
11.1	最小间距与导航定位精度	59
11.2	飞行间距与飞行速度	63
11.3	间距、速度与空气动力学要素	64
第 12 章 电池/电源管理	与飞行安全	65
12.1	使用管理	65
12.2	储存运输管理	67
12.3	维护保养管理	68
12.4	废弃处置管理	70
12.5	应急管理	70
第 13 章 维护保养	与飞行安全	72
13.1	飞行前维护	72
13.2	飞行后维护	73
13.3	定期维护	74
13.4	特种维护	77
第 14 章 飞行日志管理	与飞行安全	78
14.1	环境检测	78
14.2	故障诊断	80
14.3	迭代升级	85
第 15 章 飞行应急方案	与飞行安全	86
15.1	安全应急响应机制	86



15.2 应急设备及应急人员	88
15.3 集群飞行救机	90
15.4 集群飞行应急演练	91
第 16 章 飞行场景与飞行安全	95
16.1 文旅表演	95
16.2 大型活动表演	96
16.3 商业广告表演	96
16.4 特殊飞行场景	97
第 17 章 飞行安全与行业发展	98
附录	100
附录 1 大漠大无人机产品介绍	100
附录 2 大漠大集群飞行表演场景实例	102
参考文献	111



第 1 章

无人机集群表演系统简介

无人机集群飞行表演是一种基于高精度定位与智能集群控制技术的先进表演形式,通过地面控制平台对多架无人机进行集中调度和路径规划,以实现无人机复杂的空中动态造型与灯光变换。无人机集群飞行表演系统通常集成实时动态(Real-Time Kinematic, RTK)差分定位、多机通信及避障算法,能够确保机群在飞行过程中保持稳定队形,并通过无线通信技术实现实时指令传输与动作同步。

近年来,随着技术的持续发展,无人机集群飞行表演系统在规模控制和表演形式上不断突破,可实现上万架无人机同步飞行,呈现更复杂、灵活的立体视觉效果。如今,该系统已广泛应用于大型活动开闭幕式、城市夜景营造和品牌推广等场景,以极具科技感与视觉冲击力的方式呈现艺术内容,不仅革新了传统庆典艺术表现形式,也成为推动文旅经济与科技融合的重要载体。

本章以大漠大智控技术有限公司自主研发的 V4 无人机系统为例,依次从无人机系统组成、系统通信链路、无人机集群飞行表演流程和飞行表演团队的人员分工,进行详细阐述。

1.1 系统组成

1. 从软、硬件维度划分 V4 无人机系统

(1) 硬件系统。硬件包括四旋翼轻型无人机、飞机箱、遥控器、移动电源、移动电源充电器、接入点(Access Point, AP)、交换机、差分基站、电台、笔记本电脑、便携不间断电源、频谱仪、风速仪、对讲机、卷尺、雨布等。V4 硬件系统如图 1-1 所示。



图 1-1 V4 硬件系统

(2)软件系统。软件系统包括嵌入式飞控系统、地面站控制软件、剧本编辑器软件(见图 1-2)。

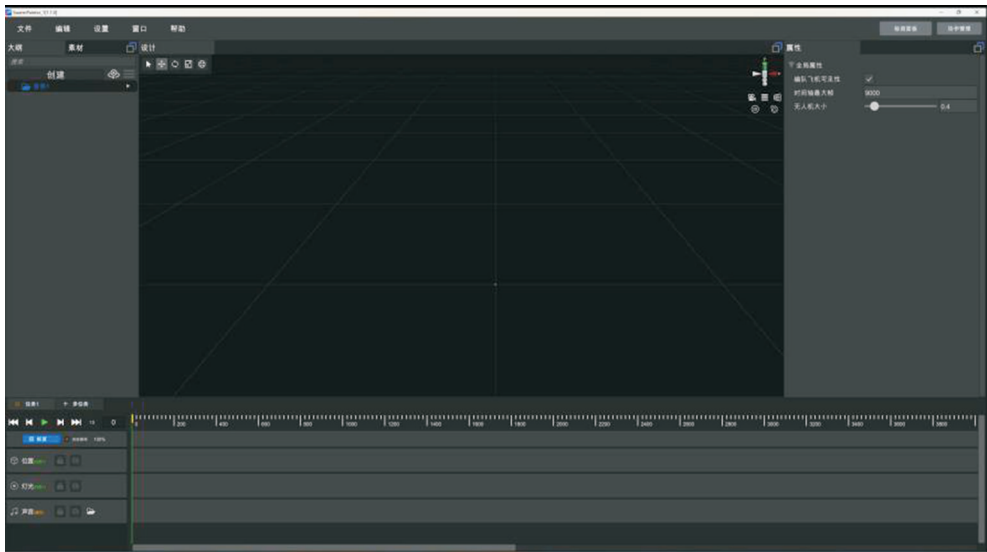


图 1-2 剧本编辑器软件界面



2. 按照功能属性划分 V4 无人机系统

(1) 飞机设备。飞机设备包括 V4 无人机(含嵌入式飞控系统)、飞机箱(见图 1-3)、遥控器。



图 1-3 飞机箱(内含无人机)

- (2) 电源设备。电源设备包括移动电源、移动电源充电器。
- (3) 网络设备。网络设备包括无线接入点(AP)、交换机。
- (4) 差分设备。差分设备包括差分基站、电台。
- (5) 地面站设备。地面站设备包括笔记本电脑、地面站控制软件。
- (6) 剧本设计软件。即剧本编辑器软件。
- (7) 辅助设备。辅助设备包括便携不间断电源(Uninterruptible Power Supply, UPS)、频谱仪、风速仪、对讲机、卷尺、雨布、电源插排等。

1.2 系统通信链路

无人机集群飞行表演系统的各产品之间通过有线或者无线方式连接,其通信链路图如图 1-4 所示。

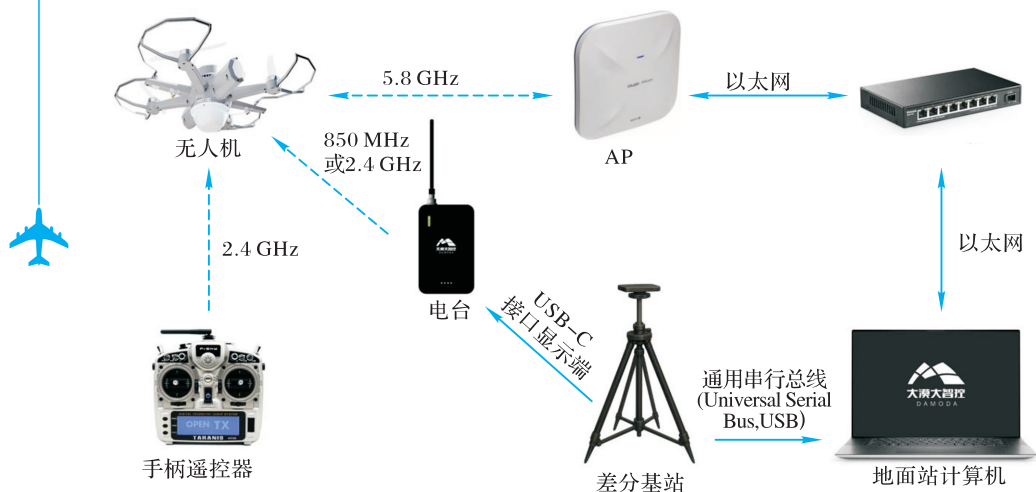


图 1-4 系统通信链路图

无人机与遥控器通过 2.4 GHz 频段通信,在无人机表演发生异常时需要使用遥控器救机,以减少事故损失。差分基站通过电台与无人机通信,无人机与电台的通信频段为 850 MHz 或 2.4 GHz,电台与基站通过基站定制线连接。利用基站和无人机之间的实时动态载波相位差分技术,系统对无人机全球定位系统(Global Positioning System,GPS)信号进行实时校正,从而使无人机的定位精确到毫米级别。AP 通过 5.8 GHz 频段与无人机通信,同时通过以太网与装有地面站的电脑连接。建立此通信链路主要是为了在地面站实时观察无人机状态。一旦发现无人机状态异常,飞手可以及时救机。差分基站通过基站定制线将 RTK 信号传递给地面站,地面站会将接收到的 RTK 信号通过 AP 传递给无人机,防止由于无人机与差分基站通信链路出现问题导致出现表演失败。

1.3 飞行表演流程

无人机集群飞行表演现已形成明确的流程规范,按逻辑顺序介绍如下。

1. 场地勘测

现场确认场地面积、地面环境,明确无人机起降点、飞行航线、表演区域及观众区域范围。同步评估电磁环境、通信信道及干扰源,划定设备存储及电池充电区域。由于仿真环境与真实场景可能存在偏差,所以在场地勘测时需要重点核查高



层建筑遮挡情况、卫星信号接收质量及通信信道现状。

在场地勘测完成后,勘测人员需要编制场地勘测报告,绘制场地规划示意图(见图1-5),详细标注表演区域的宽、高参数及周边高楼、道路等关键要素。

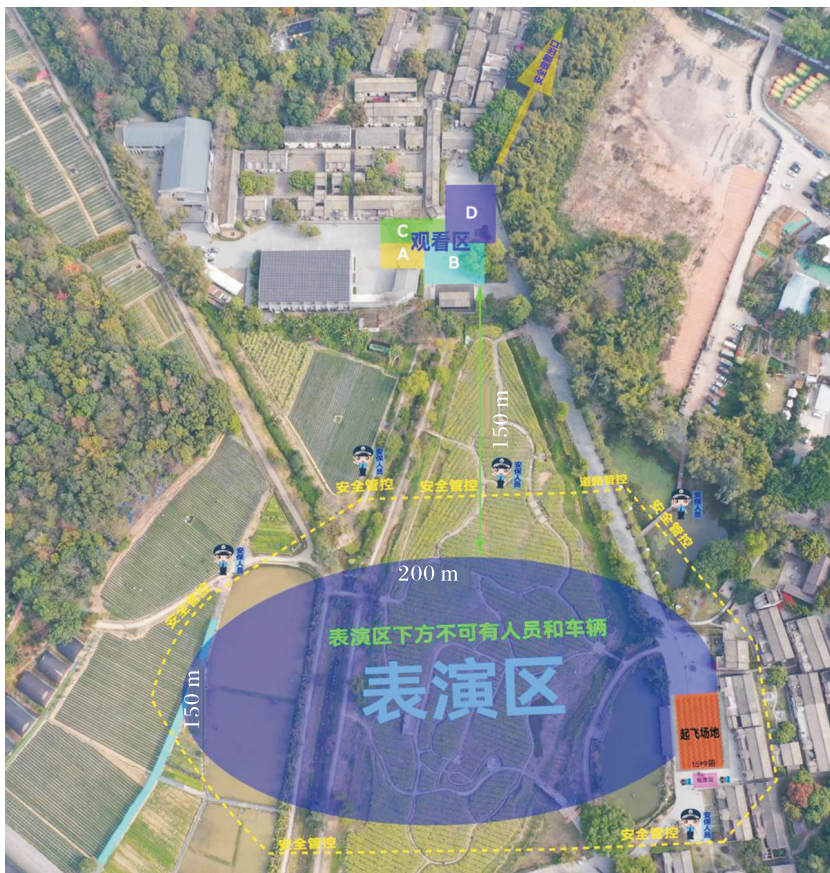


图1-5 场地规划示意图

2. 合同签署

无人机集群飞行表演方与表演需求方客户开展商业洽谈,达成共识后签署商业合同。

3. 空域申请

按照当地有关法规,提前向空军申请对应空域的飞行权限。须取得空军的空域批准函(见图1-6)后才可开展飞行表演。



中国人民解放军南部战区空军参谋部航管处函

参航函〔2025〕1360号

关于划设临时空域供深圳大漠大智控技术公司在深圳部分地区开展无人机编队表演飞行的函

深圳大漠大智控技术有限公司：

函悉。经研究，同意在深圳盐田区大梅沙海滨公园及南山区人才公园划设临时空域，供你公司开展无人机编队表演飞行使用。有关事项明确如下：

一、使用航空器

DMD-M400W 无人机 1500 架 (DMD-M400W)，DMD-M400W 无人机 1000 架 (DMD-M400W)。

二、飞行时间

2025 年 9 月 16 日至 2025 年 9 月 22 日。

三、起降场地

1. 大梅沙海滨公园 N22°35'40"E114°18'8"；
2. 南山区人才公园 N22°30'51"E113°56'31"。

四、空域范围

1. 以大梅沙海滨公园 N22°35'40"E114°18'8" 为中心，半径 0.5 公里范围内，真高 180 米以下。
2. 以南山区人才公园 N22°30'51"E113°56'31" 为中心，半径 0.5 公里范围内，真高 180 米以下。

图 1-6 空域批准函

在申请空域时，需要提供以下材料：

- (1) 申请函；
- (2) 无人机产品说明书；
- (3) 参与飞行表演的无人机的设备序列号 (Serial Number, SN) 和登记编号 (在民航实名制登记系统中注册登记的编号)；
- (4) 单位资质证明文件，包括营业执照、企业法人身份证、民用无人驾驶航空器运营合格证；
- (5) 操控者资质证明文件，包括飞手和地面站操作员的中国民用航空局 (Civil Aviation Administration of China, CAAC) 资格证书、身份证和由无人机研制方颁发的培训合格证；



(6)飞行作业范围图。

4. 艺术设计与剧本制作

由设计部门完成艺术设计与剧本制作。艺术设计环节涵盖表演画面的文字脚本设计、平面美术设计、三维(Three-Dimensional, 3D)建模和 3D 动画视频制作,设计人员先将客户需要的每一帧表演画面都制作为点阵图(见图 1-7),再以点阵动画视频呈现,从而实现所见即所得。

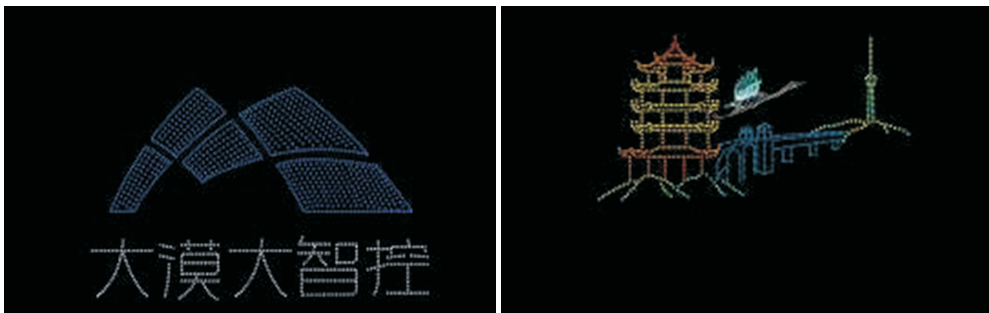


图 1-7 剧本平面设计图

在设计完成后,利用剧本编辑器软件完成飞行表演剧本制作及飞行路径预规划。

5. 商业保险购买

飞行表演团队需要购买第三方意外责任险、表演设备财产险及执行人员意外险,同时落实相关安全保障措施。

6. 安保方案制定与公安报备

制定表演当天的安保方案与应急预案,并向当地公安等治安部门进行活动报备。在向当地公安进行报备时需要提供以下材料:

- (1)无人机产品说明书;
- (2)参与飞行表演的无人机的设备序列号(Serial Number, SN)和登记编号(在民航实名制登记系统中注册登记的编号);
- (3)单位资质证明文件,包括营业执照、企业法人身份证、民用无人驾驶航空器运营合格证;
- (4)操控者资质证明文件,包括飞手和地面站操作员的 CAAC 资格证书、身份证和由无人机研制方颁发的培训合格证;



- (5) 飞行作业范围图；
- (6) 空域批准函；
- (7) 飞行表演画面的图案及文字内容说明或国企/事业单位授权委托书；
- (8) 飞行表演的商业保险凭证；
- (9) 飞行表演活动流程说明、现场安保方案、突发事件应急预案；
- (10) 飞行保障安全责任主体承诺书；
- (11) 执行团队安全演练和安全教育说明书；
- (12) 飞行表演场地使用证明或场地租赁合同或场地授权书；
- (13) 公安机关派员情况说明或专业安保合同书；
- (14) “低慢小”航空器飞行活动书面申请书。

7. 设备运输与现场检查

飞行表演团队须按照发货清单清点设备,执行单机飞行检查,包括飞行控制系统、电动机、电调、螺旋桨、接收机、惯性测量单元、GPS、磁罗盘等的检查。将设备装箱,安全运输到表演地点。设备到达现场图如图 1-8 所示。



图 1-8 设备到达现场图

在设备到达表演地点之后,须对所有设备进行检查,确保设备数量准确、质量



完好,确保无人机固件为最新版本。此外,还应及时修理异常无人机或使用备用机进行替换,并做好记录,禁止使用状态异常的无人机进行飞行表演。同时,应检查所有设备电池,确保电量充足。如果无人机纬度跨越过大,那么还需要在设备运输至表演现场后对无人机进行悬停测试,并对测试不通过的无人机进行磁罗盘校准。

8. 场地布置

相关人员做好不同区域的安全围挡,避免无关人员及车辆进入起飞场地,可同时做好安保措施。使用围栏、警戒带等设施将地面站电脑围蔽,避免外界因素干扰。为避免雨水淋湿设备,每场表演前都应预备好雨布,存放在起飞区域旁侧。若场地条件欠佳,则应在地面铺设雨布。

9. 气象和电磁环境监测

飞行表演团队须检测环境信号,确保起飞场地不存在无人机通信频段的干扰,同时持续监测天气、信道环境和电离层活跃等级数据,并做好相应准备。

10. 无人机摆放与充电

飞行表演团队须按规定将飞机箱摆放在起飞区域,将移动电源插入飞机箱,为无人机充电。

11. 其他设备安装与部署

飞行表演团队须进行网络设备和差分设备架设与调试。

12. 设备参数的检查与设置

飞行表演团队须检查无人机和移动电源是否正常上线地面站。设备在上线后,可在地面站查看其状态,读取并设置参数信息。若有异常设备,则对其进行调试或更换。

13. 表演剧本加载与设置

在地面站进行原点设置、剧本及起降灯光文件的加载和偏移设置等。

14. 小架次边框测试验证

在正式表演前,可选择几架处于剧本极限位置的无人机进行飞行表演,测试飞行路线和表演画面是否正常,通信链路是否稳定。同时可与航拍进行配合,以测试拍摄角度及拍摄高度是否合理。

15. 表演的前期设置与检查

飞行表演团队须设置正式飞行表演的无人机映射与表演时间,完成剧本预览和传输,进行集群检查与设置。同时,须对照前期检查表(见图 1-9)逐项检查并签字确认。



前期检查表			
日期:		项目负责人助理:	
序号	工作内容	工作要求	负责人签字
1	开工前会议,人员分工	1. 强调注意事项,特别是安全问题; 2. 人员分工(充电,空域,天气,飞机检查)	
2	所有设备数量检查	按照清单核对,注意正常准备雨布	
3	安全区域设定	做好安全区域的围挡(起飞场地及飞行路径),不允许无关人员及车辆进入	
4	所有设备充电检查	飞机电池、电台电池、遥控器电池、基站电池、头灯、对讲机、UPS	
5	准备备用设备	飞机 5%、电池 20%、AP+1、网线+1、基站+1、电台+1、基站三脚架+1	
6	飞机摆放	1. 飞机严格按照剧本第一帧摆放; 2. 注意保护飞机箱,如场地情况不好则用雨布垫着; 3. 注意机头方向及红外线接收位置,方便开机及飞手救机(箱子上做标记,打开即可); 4. 检查飞机上盖是否盖牢; 5. 检查桨叶是否完整; 6. 检查限位杆是否打开; 7. 二维码检查	
7	地面站及网络设备架设	1. 注意 AP 及电台朝向,特别注意稳固防风处理; 2. 注意地面站防雨及防断电,围挡防干扰	
8	AP 连接检查	对应 AP 的飞机各开机一台确定连接	
9	基站及电台连接检查	基站开机平滑并查看数据,确认基站正常。并检查基站双链路正常	
10	电磁环境检查	1 575 MHz 检查,2.4 GHz/5.8 GHz 信道检查,902~928 MHz 频谱仪检查(拍照发群里)	
11	天气检查	查看天气预报,找高处测量风速	
12	检查对讲机	调整可用的频率,并分发	
13	检查剧本	预览剧本,检查表演方向、起飞地点是否正确,检查起飞第一帧与最后一帧是否一致	
14	空域报备	根据空军要求按时间报备	
15	工作环境检查	设备摆放整齐,工作环境整洁,并拍照发到群里	

图 1-9 前期检查表



16. 正式表演开始

各负责人在确认具备飞行条件并在集群放飞清单(见图 1-10)上签字后,由总指挥进行最后的确认,发布起飞指令,进行正式飞行表演。

集群放飞清单			
日期:		项目负责人助理:	
序号	工作内容	工作要求	负责人签字
1	天气检查	查看天气预报,每 20 分钟汇报风速在群里,如遇风速较大,每 5 分钟汇报一次(风速要求 8 m/s)	
2	遥控器检查	确保所有飞机连接到遥控器,包括备用机,并用遥控器测试切换飞行模式	
3	地面站录屏开启	地面站录屏开启,并存入电脑,录屏文件可两周清理一次	
4	地面站检查	1. 所有飞机参数、传感器正常,且上线稳定; 2. GPS 星数大于 20(和芯星通大于 30),且处于差分状态; 3. 电池电压大于 16.3 V; 4. 预览最小间距不得低于 1.5 m,低于 1.5 m 不允许起飞; 5. 全部检查通过	
5	解锁测试	地面站全部解锁,检查所有飞机是否正常解锁,是否有桨叶打到箱子或桨保护罩	
6	GPS 录屏	起飞前 10 分钟开始录屏,直到飞行结束	
7	现场录像	使用手机等设备对飞行表演全过程进行录像,可一周清理一次	
8	空域报备	起飞前空域报告	
9	人员就位按时起飞	注意不要所有人围在地面站周围,分配好各自负责区域。所有条件达到要求方可起飞	
10	少架次测试	边框测试,注意检查信号和风速	
11	飞行现场维护	无关人员不得进入安全区域,地面站操作台保护,地面设备保护	
12	飞行紧急情况处理	地面站与飞手配合救机,处理异常情况	
13	飞机落地检查	挑出异常飞机检测,如需要,下载航行日志给技术支持人员。落地空域报告	
14	设备清点收纳	将电池卸下,所有设备回收仓库,并清点数量	
15	填写集群飞行报告	填写集群飞行报告并发到群里供领导查阅	
16	仓库整理及简短总结会	设备放置整齐,总结本次飞行经验及不足	
17	5S 清洁,仓库断电	拍照发到群里	

图 1-10 集群放飞清单



17. 飞行中的安全监控

(1)使用地面站软件实时监控飞行数据,包括电池电量、GPS 信号强度、飞行高度、飞行速度等。若有异常,则应及时采取相关措施。

(2)须确保各无人机之间保持足够的安全距离,并及时调整飞行队形,防止碰撞。

(3)确保场地内没有无关人员进入。

(4)若出现无人机失联、偏离航道、飞行速度异常、卡尔曼滤波器错误(Error KF,EKF)报警等问题,则应及时采取应急措施,完成救机。

18. 表演效果评估

飞行表演结束后,相关人员需要填写演出报告,对表演结果进行如实记录,记录内容包含是否准时起飞、图形完美率、故障无人机返航情况等。

19. 设备收纳与运输

飞行表演团队须对设备进行有序分类并装箱存放,将设备运输回存储地。

20. 飞行日志记录与分析

对于故障无人机,相关人员需要将问题登记在项目反馈表内,并将相关日志发送至总部技术支持中心,供技术支持人员进行故障诊断。

对于常态化驻场表演,相关负责人需要统计和汇总每月的飞行情况。

21. 飞行后维护保养

检查无人机和相关设备的状态,进行必要的维护保养与故障维修,以确保设备性能为最佳状态,以保障下一次飞行安全。

1.4 飞行表演团队的人员分工

为保障飞行表演流程的顺畅与规范,对飞行团队所有执行人员都需要明确其角色划分,角色划分涵盖项目执行总指挥、地面站操作员、飞手及地勤。各角色的具体工作内容如下。

(1)项目执行总指挥:汇总现场信息,负责整场表演的规划与决策、统筹现场安



全管理及应急预案实施,协调表演全过程。

(2)地面站操作员:对飞行表演进行3D仿真检查,在地面站指挥表演流程,实时监控飞行状态,若出现异常,则立即发出应急指令。

(3)飞手:根据地面站操作员的指令,完成无人机状态观察与检查,在接到应急指令后,须对故障无人机执行手动救机操作。

(4)地勤:负责无人机的摆放与收纳、电池充电及其他辅助检查工作。



第 2 章

无人机集群表演安全概述

2.1 核心评价指标

无人机集群飞行表演产品隶属于航空产品范畴,安全性是其设计、生产及使用环节的核心要素。在航空航天系统的评估体系中,可靠性聚焦于设备故障概率,安全性则侧重于飞行器失事概率。国际权威机构数据显示,中国民航近 10 年运输航空百万架次重大事故率仅为 0.023,约为同期世界平均水平的 1/7。中国民航凭借可持续的系统性安全管理制度、运行及监控体系,达到了国际领先的航空安全水平。民航飞机失事的原因主要有飞机设备故障、人为操作失误、气象环境影响以及人为蓄意破坏等极端情形。从历史数据来看,航空和航天系统的故障中,超 60% 的安全事故与人为因素相关,约 10% 与环境因素相关,约 30% 与设备故障相关。这些失事原因对于提升无人机集群表演的安全性具有重大参考价值。

在实际的无人机飞行表演中,具备高精度控制能力的技术领先型集群飞行表演系统,不仅需要保障系统安全,还需要兼顾观众体验与艺术呈现。这类高精度控制的无人机集群表演,需要满足以下三项关键指标。

- (1) 准时起飞率:无人机集群需要实现 100% 准时起飞。
- (2) 图形完美率:演出画面的图形完美率需要达到 99.9% 及以上。
- (3) 设备可靠性:进行飞行表演的无人机可靠度须趋于 99.999%。



2.2 核心安全风险分析

1. 设备可靠性风险

设备可靠性是无人机集群飞行表演成功的基础,直接关系到表演安全性、艺术效果及公共信任度。为保障设备可靠性,应从以下三个关键维度入手。

(1) 电池安全管控:重点监测电池过充、过热及老化状态,杜绝因电池故障引发空中停机风险。

(2) 通信链路保障:构建 2.4 GHz/5 GHz/850 MHz 三链路备份体系,同步预防无线电频段冲突,确保信号传输稳定、无中断。

(3) 硬件故障防控:建立电动机、GPS 模块、螺旋桨等核心部件的故障率统计与溯源机制,相关责任人应通过检测与复盘,降低硬件失效概率。

2. 环境因素风险

环境因素是影响无人机集群飞行表演的关键变量,处理不当可能导致表演失败或引发安全事故,主要涵盖以下四类场景。

(1) 气象环境:重点关注风速、雨量、雷电、能见度等指标,明确恶劣天气下的停飞标准。

(2) 电磁环境:排查第五代移动通信技术(5G)基站、高压输电线、微波雷达等电磁干扰源,提前规划飞行航线和飞行时间,以避免信号干扰。

(3) 地理环境:针对滨水、高楼密集、植被茂密区域等特殊地形,制定差异化飞行路线与应急避险方案。

(4) 人为干扰环境:防范激光照射、非法监测、恶意反制等人为因素,建立现场干扰预警与快速处置机制。

表演前需要提前预判相关风险,并做好相关应急部署,防止因为环境因素造成飞行事故。

3. 人为操作风险

针对人为操作风险,首先需要划分具体的责任方,确保每一处风险都有对应的

责任人跟进,见表 2-1。

表 2-1 具体的责任方及其责任

责任方	责任
大漠大团队	设备点检、人员资质审查、集群表演软件安全审计、演出区域划分、现场表演执行、应急预案制定与执行、空域申请
主办方	场地许可审批、公安报备、观众疏散方案制定
安保部门	现场硬隔离设置、紧急救援通道预留、人群管控
监管部门	飞行计划合规性审查、事故调查权责
保险机构	第三者责任险覆盖

为降低和避免人为操作失误带来的风险,大漠大构建了多重安全应急响应机制;严格进行飞手资质审核,建立规范的人员培训与考核机制;定期召开质量安全会议,强化全员安全意识;规范划分演出区域、设置观众隔离区;定期开展应急演练,提升全员应急反应能力。

2.3 安全规范声明

大漠大的无人机集群飞行表演系统不仅在产品上融入可靠性设计理念(如关键部件热备份),还在飞行表演全流程中实施规范化管理,将人员、设备及环境的评测与检查纳入固定监测流程。为满足上述三项核心评价指标,切实降低核心安全风险,杜绝风险隐患,大漠大针对无人机集群飞行表演制定了以下八点安全规范声明。

(1)合规飞行要求:各责任方必须严格遵守国家及地区相关空域管理法规,在未经申报审批的情况下,严禁开展任何飞行表演活动。

(2)操作人员资质要求:执行无人机集群飞行表演的人员须通过严格认证和培训考核。未取得 CAAC 证书,或未通过深圳大漠大智控技术有限公司培训并获合格证书者,严禁操作大漠大的无人机集群飞行表演系统。

(3)人员禁入区域:在无人机集群飞行表演过程中,禁止任何人员进入无人机起飞、降落、表演及往返轨迹正下方及周边 15 m 范围的区域。

(4)飞行环境限制:在无人机集群飞行表演前与飞行过程中,必须对飞行表演



的场地环境、电磁环境及气象环境进行实时监测与安全评估。禁止在超出飞行规范的场地条件、恶劣气象(如大风、雨雪、极端温度、雷电等)或复杂电磁环境(如GPS信号严重干扰、卫星信号接收质量差、通信信道受强干扰等)下进行飞行表演。

(5)操作人员管理:操作人员在饮酒、服药、身体不适(如头晕、乏力、恶心等)或精神状态不佳时,严禁操作无人机集群飞行表演系统。

(6)操作执行规范:操作人员必须严格遵循本安全规范的所有规定及相关的产品使用说明,避免因安全意识薄弱或操作不当导致设备损坏、人员伤害及第三方财产损失。

(7)维护保养要求:操作人员应严格按照本安全规范的规定对无人机集群飞行表演的无人机、辅助设备及关键模块进行例行维护和检查。

(8)应急处置要求:在正式飞行表演前,执行无人机集群飞行表演的人员必须针对表演过程中可能出现的意外及突发情况制定应急预案并开展应急演练,演练内容包括飞行工程师手动接管故障无人机等关键突发情况。



第 3 章

政策法规与飞行安全

3.1 行业政策概述

从国家战略层面看,航空产业作为战略性新兴产业,始终是政策扶持的重点。早在 2010 年,国家便出台《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》,将航空产业纳入战略性新兴产业范畴,为其长远发展锚定方向。2013 年发布的《民用航空工业中长期发展规划(2013—2020 年)》,进一步细化航空产业发展目标,有力地推动了航空产业的跨越式发展。

低空经济作为其延伸新业态,近年来也被提升至国家战略高度,成为政策扶持核心。2010 年,国务院、中央军委印发《关于深化我国低空空域管理改革的意见》,确定了深化低空空域管理改革的总体目标、阶段步骤和主要任务。2021 年发布的《国家综合立体交通网规划纲要》将“低空经济”概念写入国家规划,开启了低空经济在国家战略层面布局的新纪元。2023 年,中央经济工作会议提出打造生物制造、商业航天、低空经济等若干战略性新兴产业,将低空经济提升到新的战略高度。

2024 年被广泛称为“低空经济元年”,这一年,这项作为新质生产力典型代表的产业迎来了从政策顶层设计到实践落地的关键转折。2024 年 3 月,《政府工作报告》首次将低空经济列为“新增长引擎”;同年 7 月,党的二十届三中全会通过《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》,明确提出发展低空经济。2024 年 12 月,国家发展和改革委员会低空经济发展司正式亮相,专门负责拟订产业发展战略与中长期规划,标志着我国低空经济进入快速培育阶段,预计到 2035 年其市场规模将突破 3.5 万亿元。



2025年,我国低空经济发展继续迎来多重标志性突破。《政府工作报告》再次提及低空经济产业,提出深入推进低空经济等新兴产业安全健康发展。2025年7月22日,人力资源和社会保障部发布第七批新职业,“无人机群飞行规划员”成功入选,为产业发展提供了人才支撑。在2025年10月公布的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》中,低空经济首次被列为战略性新兴产业重点方向。这一系列部署不仅深化了低空经济产业的国家级定位高度,也为其快速发展提供了更有利的政策支持。

近年来,国家持续出台政策大力扶持低空经济产业,重点培育民用无人机领域发展,不仅仅进一步释放了无人机应用市场的增长潜力,拓展了下游应用场景(其中包括无人机集群表演),更助力了经济结构的转型升级,培育了新的低空经济增长点。在市场需求持续扩容与产品性价比显著提升的双重驱动下,我国无人机集群飞行表演市场驶入发展快车道

3.2 监管体系建立

我国无人机管理涉及多部门协同:民用航空局负责运行与运营管理,工业和信息化部主管生产制造,商务部及海关总署监管进出口,市场监督管理局负责产品认证与监督。另有行业协会(如中国无人机产业联盟、深圳无人机协会)负责行业自律。

随着无人机的普及,法律与监管体系的滞后导致“黑飞”问题凸显,无人机未经许可闯入敏感区域、意外坠落、干扰民航、碰撞高层建筑、侵犯公民隐私等问题时有发生,造成了较为恶劣的社会影响。加强无人机的监管成为行业健康发展的必然要求。

近10年来,国家以“强化监管、完善标准”为主轴,多部门联合发力,相继出台了一系列有关无人机管理及应用的法律法规与通知公告,推动行业进入强监管时代。

2016年,民航局发布《民用无人驾驶航空器系统空中交通管理办法》,从空域安全角度构建监管框架,明确规定民用无人驾驶航空器须在专门分配的隔离空域飞行。

2017年发布的《民用无人驾驶航空器实名制登记管理规定》要求250g以上无人机强制实名登记,同年发布的《关于促进和规范民用无人机制造业发展的指导意见

见》提出“建立完善标准体系”“推进管控平台建设”等目标。

2019年,民航局发布《轻小无人机运行规定(征求意见稿)》征求社会意见,以规范轻小无人机操作。

2020年,工业和信息化部发布《民用无人机生产制造管理办法(征求意见稿)》,聚焦无人机生产环节的安全性与合规性,面向社会公开征求意见。

2021年,《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》被纳入国务院立法计划,标志行业立法取得突破性进展。

2023年发布的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》(于2024年1月1日起正式施行),作为我国首部专门针对无人机的行政法规,首次从生产制造、空域管理、飞行安全到市场应用全链条构建监管框架,明确了各环节的管理部门和相关职责,填补了我国无人机管理法规空白。

2023年,我国主导制定的三项无人机国际标准(ISO 5286、ISO 5312、ISO 5332)正式发布,涵盖飞行性能测试、安全评估及环境适应性验证等关键技术领域,标志着我国在无人机标准化领域的国际话语权显著提升。市场监管总局发布《民用无人驾驶航空器系统安全要求》(GB 42590—2023),作为我国首部民用无人机强制性国家标准,明确了电子围栏、远程识别、应急处置等17项核心安全指标,从产品设计源头筑牢安全底线。

2024年发布的《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》细化了无人机生产准入、运行规范及空域管理要求。

2025年,多部门联合起草并发布《中华人民共和国民用航空法(修订草案)》,向社会公众征求意见。草案将低空经济发展需求纳入空域划分考量,为无人机空域使用提供更高层级的法律保障。

2025年6月,第十四届全国人大常委会第十六次会议表决通过了新修订的《中华人民共和国治安管理处罚法》(于2026年1月1日起正式施行),明确将无人机“黑飞”行为列为妨害公共安全的行为,并予以相应处罚。

这些政策法规层层递进,推动我国无人机产业从“规模扩张”向“质量提升”转型,逐步构建起全链条监管体系,为低空经济发展注入核心动能。

3.3 地方政策与区域监管实践

为推动无人机行业规范、健康、可持续发展,各地积极响应国家政策,制定差异化监管实施细则,强化企业合规经营主体责任,明确禁飞区域,推进信息实名登记,



严厉打击“黑飞”等违法行为。

2017年,四川省发布《民用无人驾驶航空器安全管理暂行规定》,要求相关部门明确机场净空保护区及无人机禁飞区域范围,要求生产企业安装禁飞芯片,并建立军地协同监管机制。

2017年,无锡市发布《民用无人驾驶航空器管理办法》,要求民用无人机持有人、民用无人机驾驶员登录民用无人机管理服务系统进行信息登记,划定禁飞区域并明确禁止行为。

2017年湖北省印发《湖北省无人驾驶航空器专项整治联防联控工作实施方案》,提出加强空域统筹管理,明确无人驾驶航空器禁飞区域。

2019年,浙江省发布《无人驾驶航空器公共安全管理规定》,要求无人机实名登记、飞行前提前报备,并赋予公安机关在一定条件下对违反规定的无人驾驶航空器采取强制措施的权利。

2023年,重庆市发布《民用无人驾驶航空器公共安全管理办法》,要求公安、经济信息等部门依托民用无人驾驶航空器综合管理服务平台依法采集的民用无人驾驶航空器有关信息,与国家无人驾驶航空器一体化综合监管服务平台实现信息共享,加强公共安全动态监管。

2023年,天津市发布《关于加强2023年全国“两会”期间天津地区“低慢小”航空器管理工作的通告》,规定两会期间全域禁飞无人机,并将“穿越机”纳入管控范围。

2023年,湖南省发布首个省级《无人机应用服务通用规范》,从设施设备、服务要求、信息管理、质量控制等12个维度,构建无人机应用服务规范标准。

2024年,武汉市发布《民用无人驾驶航空器安全管理暂行办法》(自2025年3月1日起施行),划设适飞与管制空域,要求无人机实行实名登记,规范操作无人驾驶航空器的行为准则。

作为“无人机之都”,深圳市在无人机监管体系构建与法规政策制定等领域成效显著。2018年,深圳率先探索监管创新,推出无人机综合监管平台及试点方案。该平台是我国首个实现军航、民航与地方政府三方联合管理的无人机监管系统,可实现飞行计划快速申请、安全评估与实时监控。2018年深圳发布《深圳地区无人机飞行管理实施办法(暂行)》,对无人机分类、生产销售、驾驶员资质、飞行空域划设与申请、飞行运行规范及责任处置等进行了全面规定。2019年《深圳市民用微型无人机管理暂行办法》实施,从生产销售、飞行管理、法律责任三方面明确规范

微型无人机管理。

3.4 合规飞行的核心要求

合规是安全飞行的前提,也是行业可持续发展的基础。依据国家及地方政策,无人机集群飞行需要严格遵守以下要求:

- (1)禁止在未获得许可的情况下,在禁飞区域和禁飞时间内飞行;
- (2)飞行前应严格执行实名登记、空域申请、计划报备等流程;
- (3)操作人员须具备合法资质,且严格遵循设备操作规范。

任何违反上述要求的飞行均属于“黑飞”行为,不仅会产生人身与财产安全隐患,还将面临相应的法律处罚。



第 4 章

质量管控与飞行安全

大漠大坚持“每一场飞行零疏忽、每一处细节严把控”的质量管控原则,将安全表演视作公司生命线贯穿始终——设立首席飞行安全官统筹安全工作,每周召开质量安全会议,通过全流程质量管控,全面保障设备与人员安全。

4.1 质量管控全流程

大漠大以 ISO9001 质量管理体系为基础框架,融合集成产品开发(Integrated Product Development, IPD)模式的全流程协同理念,构建覆盖产品全生命周期的闭环质量管控体系。基于标准化流程和跨部门协同机制,规范研发、生产、执行和售后各环节操作,实现质量问题快速响应与迭代优化,为无人机集群表演的安全与稳定提供系统化保障。

1. 研发端质量管控

在研发端筑牢安全性设计理念,坚持打造安全可靠的无人机操作系统。建立严格的测试、评审体系和产品成熟度市场发布规则,从源头把控技术安全与产品稳定性。

2. 生产端质量管控

在生产端建立完善的产品质量管理规范,对生产来料和模块进行严格的质量检验和一致性监测,对设备实施专业安全测试与寿命管理。开展全员消防安全教育,规避生产环节的安全隐患。

3. 执行端质量管控

在执行端树立“每一次飞行表演都是一次产品严格测试”的理念,将飞行故障数据实时反馈至研发端,通过版本迭代提升产品可靠性。为每场飞行表演建立专属数据档案,通过案例总结、案例教学形成文档记录,供全体执行人员学习。定期对飞行表演执行人员开展技能考核,坚持“合格上岗”原则。建立安全飞行考核与奖罚制度,强化全员安全飞行意识。

4. 售后端质量管控

在售后端定期开展业务能力培训与考核。针对各岗位制定明确的工作要求与详细操作规范,确保人员能力匹配岗位要求。严格规范产品售后技术培训,要求学员完成理论考试、实践操作,并在大漠大工厂表演基地完成为期一个月的驻场实践培训。对合作伙伴购买设备后的表演过程,开展日常安全监管。

4.2 质量管控核心措施

质量管控的核心措施包含三个方面:依托安全标准确保技术安全底线,开展全流程测试验证以提前规避质量风险,以及通过持续动态监控实现实时预警。

1. 技术安全底线

- (1) 合规性要求:相关各方应严格遵循相关政策和法规的要求。
- (2) 通信安全保障:系统采用加密通信协议,防止指令传输被干扰或篡改。采用 RTK 辅助定位技术,将传统卫星定位的米级误差降低至毫米级。
- (3) 物理应急机制:若无人机定位丢失、触发电子围栏、航点错误或电量过低,则会启动应急降落程序,避免设备失控。

2. 全流程测试验证

- (1) 三维仿真预演:利用路径检测和剧本 3D 仿真技术,提前排查无人机集群飞行轨迹与灯光问题。
- (2) 低空实飞测试:按照不同集群规模分批次开展压力测试,进行小架次边框测试,验证系统安全性与可靠性。
- (3) 冗余设计保障:在设计时建立多重通信链路备份、关键设备备份与主要人员备份机制。设置自动补位功能,且备用无人机数量不低于 3%,避免单台设备故



障影响空中演出画面的完整性。

3. 持续动态监控体系

(1) 双控中心布局:构建地面站主控台与飞手应急救机协同模式,实现表演操控与突发处置的双向协同。

(2) 动态数据看板:在地面站实时监测无人机的定位偏移、电池电量和信号强度等信息,若有异常情况则应即时预警。

(3) 公安联动机制:同步现场人流热力图,一旦超出安全阈值,立即暂停表演,保障现场秩序和人员安全。



第 5 章

人员培训与飞行安全

无人机集群飞行表演安全需要全员参与共建,并对产品研发、测试、生产、技术服务、飞行表演、市场营销等相关人员,开展严格的安全意识管理与专项培训。

5.1 对项目总指挥的要求

无人机集群飞行表演项目总指挥的核心工作包括:综合现场整体情况规划表演时间与人员安排,评估飞行风险并制定规避方案,确保表演顺利推进。在无人机集群表演中,项目总指挥拥有最高决策权,现场执行人员必须无条件服从其安排,按要求落实各项工作,保障表演正常进行。

项目总指挥是无人机集群飞行表演的核心决策中枢,需要具备技术统筹、风险预判、应急决断等多维能力。每位项目总指挥都需要拥有丰富的基层飞行表演经验和故障排查能力,具备 1 000 架级无人机集群飞行表演的独立操作能力,熟知完整飞行逻辑并具有亲身参与表演全流程的经历。对项目总指挥的具体要求如下。

1. 核心能力要求

(1)技术洞察能力:了解集群通信协议、定位算法、动力冗余等核心技术,精预判设备极限(如低温环境下电池放电曲线偏移量)。

(2)应急决策能力:坚守原则底线,具备冷静果断的临场决断能力。参照美国联邦航空管理局航空应急标准,能够在 8 s 内启动三级响应,建立“决策树”模型。

(3)跨域协调能力:能同步协调公安、消防、医疗、空管等多部门资源,对关键接



口人员实行清单化管理(含备用联络通道)。

(4)艺术审美能力:在安全与艺术表现之间找到平衡(如风速超限时动态简化图案),并完成飞行安全审查。

(5)法律风控能力:核查空域审批漏洞,解读保险条款(明确设备损坏、第三者责任划分),规避法律风险。

2. 指挥流程关键点控制

(1)预演阶段:完成仿真测试与分批次压力测试,提前排查潜在问题。

(2)执行阶段:严格对照表演时间轴,精准下达各环节指挥指令。

(3)应急接管阶段:依据系统安全方案,做好系统自动接管与手动接管双重准备,在应急预案中明确优先级排序,始终将人员安全放在首位。

3. 资源调配与责任边界

(1)签署《权力责任确认书》,明确“可承受风险”边界(如单机坠落概率须低于0.01%)。

(2)不同资源类型的指挥权限见表5-1。

表5-1 不同资源类型的指挥权限

资源类型	指挥权限	越权风险
无人机集群	最高控制权(含紧急断电)	误触发返航导致表演中断
安保力量	一级响应调度权(≤50人)	超权限调动涉嫌违法
空域使用权	严格按民航局批复时空范围	超时飞行面临资质吊销处罚

5.2 对地面站操作员的要求

地面站操作员是无人机集群飞行表演的核心人员,需要具备技术操作、实时监控、应急响应等复合能力。地面站操作员必须具备冷静处理问题的能力,熟练掌握安全飞行规范,独立操控地面站时长超过100h,且通过模拟集群表演考核,并取得大漠大认证资格授权后方可上岗。对地面站操作员的具体要求如下。

1. 上岗考核标准

(1)理论考核:参加飞行理论与操作方法考核,须达到90分合格线,地面站模

拟飞行如图 5-1 所示。

(2)实操考核:参加现场实操考核,模拟单架以及多架无人机飞行中的多种异常场景,包括扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter,EKF)故障、遥控器失联、低电、地面站失联、无人机大幅偏移等,须达到 90 分合格线。

(3)实飞训练:通过以上考核后,地面站操作员需要参与实飞训练,由经验丰富的员工现场监督,在完成 3 次 500 架次以上的完美飞行后,方可正式上岗。



图 5-1 地面站模拟飞行

2. 能力持续提升要求

(1)季度考核:通过模拟器开展极端场景测试(如电磁风暴、GPS 失效等),参与手动操控比赛,检验规范操作熟练度。

(2)实战演练:参与夜间集群飞行应急处理、200 架以上无人机集群通信中断处置等实战演练,强化突发状况应对能力。

(3)项目复盘:每月开展项目复盘,输出事故分析报告。

(4)技术追踪:每季度汇总、分析技术需求,学习并掌握新型防干扰技术,确保技术能力与行业发展同步。



5.3 对飞手的要求

无人机集群飞行表演的飞手,是保障飞行安全的直接责任人,需要具备远超单机飞行的专业技术素养与协同操控能力。为确保飞手能力达标,公司提供专属场地供其练习,并全程记录练习时长。对飞手的具体要求如下。

(1) 飞手须持有国家认可的 CAAC 证书或同等资质证书。

(2) 飞手须完成至少 3 个月的飞行副手历练,实际飞行时长累计达 200 h。

(3) 飞手须参与“单机飞行”与“集群救机”专项考核,且分别在白天和夜间飞行场景模拟中通过实操检验。具体的飞手考核科目见表 5-2。

表 5-2 飞手考核科目

序号	科目内容	内 容	标 准
1	四位悬停	对尾悬停 对头悬停 对左悬停 对右悬停	垂直高度 2 m,悬停范围半径不得超过 0.5 m,上、下浮动高差不得大于 0.5 m,悬停时长为 5 s
2	四位矩形	机头朝内飞行(左侧) 机头朝内飞行(右侧) 机头朝外飞行(左侧) 机头朝外飞行(右侧)	速度一致,航线匀速,旋转点不错舵,转向精准,浮动及高差小于 0.5 m
3	刷锅飞行	机头朝内飞行(左/右侧,择一方向); 机头朝外飞行(右/左侧,择一方向)	以中心点为轴心,半径 3 m,匀速且无卡涩,上下浮动高差不得大于 0.5 m
4	水平 8 字	5 m 高度飞行(单侧即可)	7 个定位点,起点为中心点,刷锅匀速且均匀,刷锅航迹圆润且无卡顿,与各定位点误差不得超过 1 m,上下浮动高差不得大于 0.5 m
5	夜晚集群救机	选 10 架无人机飞行剧本,并挑选其中 3 架无人机在剧本结束前的任意时间内模拟 EKF 故障和飞手救机(须在 3 min 内完成)	所有故障模拟的无人机必须正常降落至起飞场地,且无人机无损伤

5.4 对地勤人员的要求

地勤人员不仅负责无人机的搬运与摆放、锂电池的充电与筛选、设备健康状态巡检等工作,还承担着现场管控、应急支援等关键任务,其工作质量直接决定表演的完成与事故发生率。地勤人员需要具备良好的思想素质与吃苦耐劳的工作作风,树立消防安全意识,熟练掌握 5S 管理,即整理(Seiri)、整顿(Seiton)、清扫(Seiso)、清洁(Seiketsu)、修养(Shitsuke)的要求,保持工作现场规范、有序。

5.5 外场服务纪律

大漠大针对飞行执行团队(包括项目总指挥、地面站操作员、飞手、地勤人员及其他所属大漠大的外场工作人员)制定了外场服务十大纪律。

- (1)一切行动听指挥,严格服从项目总指挥的工作安排。
- (2)工作期间一律穿着工装。
- (3)严禁在工作场所内进行(打游戏等)与工作无关的活动。
- (4)严禁在工作场所内吸烟,严禁在工作期间饮酒。
- (5)飞行表演活动结束后,应主动清理现场垃圾,保持环境卫生。
- (6)严禁与他人发生冲突,自觉遵守公共秩序和道德规范,对客户、游客应尊重有礼。
- (7)严禁私自租车驾驶,注重人身安全,倡导优先选择公共交通出行。
- (8)飞行执行人员在工作中需主动发挥团队协作精神,严禁作风懒散、对同事的忙碌袖手旁观。
- (9)强化安全意识,正确使用灭火器、防火毯,须做到人走电断,并按要求保存冷烟花等危险产品。
- (10)爱惜公司财产,重点做好防雨、防水、防火、防偷防盗等防护工作。



第 6 章

场地规划与飞行安全

飞行表演场地规划的合理性,直接影响无人机集群表演的飞行安全与艺术效果。在进行场地规划时,应严格遵守场地规划要求,确保规划方案合规且适配。场地规划是否合理,最终应以场地勘测人员的测试结果为准。

6.1 场地规划基本要求

完整的飞行表演场地包括起飞区域、表演区域、观众区域和可选的电池区域。在明确表演位置与规模后,应派出现场勘测人员对场地的适飞情况进行勘查和测试。勘测人员应明确起飞区域、表演区域和观众区域的范围,确定飞行路径,并合理划分无人机地面摆放区域以及地面站电脑、网络设备、差分设备等的摆放区域。如果需要在同一地点连续举办多场表演,那么还需要预留好设备存储和充电的区域。在场地勘测完成后,应填写《场地勘测报告》。场地勘测结果示意图如图 6-1 所示。

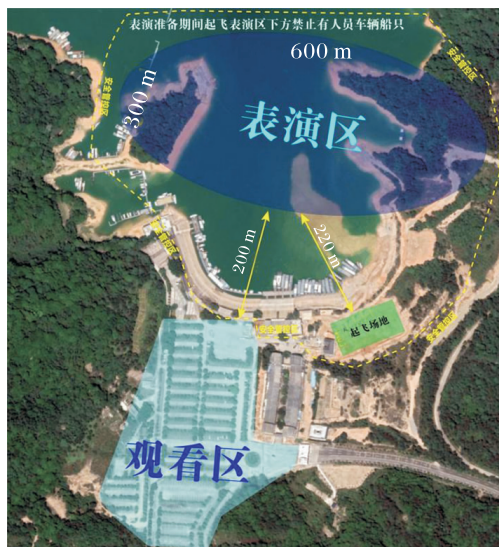



图 6-1 场地勘测结果示意图

6.2 场地规划详细要求

1. 整体环境要求



(1)场地的海拔高度应低于 5 000 m。高海拔环境会导致空气动力效率下降,影响飞行稳定性。

(2)场地环境温度不得低于-20 ℃或高于 50 ℃。

2. 起飞区域要求

(1)起飞区域应优先选择平地或地面平整区域。

(2)起飞场地需要保持相对空旷,场地外 5 m 范围内遮挡物的高度应低于 10 m。

(3)起飞场地需要设有安全围栏等物理隔离措施,防止游客及非工作人员进入。

(4)起飞区域与表演区域的水平距离需要控制在 300 m 及 300 m 以内。

(5)起飞场地面积可按以下标准估算:总面积=0.5 m×0.5 m×表演无人机数量。

(6)起飞场地周边需要避开强磁场干扰源,包括但不限于高压线、变电站、大型钢架结构、大型发电及供电设备、大功率雷达、大功率电台及信号发射塔等高频设备。

(7)起飞区域不得存在大功率(5.8 GHz)Wi-Fi 干扰信号和电台所使用频段的干扰信号。

3. 表演区域要求

(1)表演区域应远离人群聚集处。

(2)确保表演区域正下方没有人流和车流经过。

(3)表演区域不得存在大功率(5.8 GHz)Wi-Fi 干扰信号和电台所使用频段的干扰信号。

4. 观众区域要求

(1)观众区域严禁设置在距离起飞区域及所有飞行路线垂直投影区域外 50 m



的范围内。

(2) 观众区域与表演区域之间应无明显障碍物遮挡。

5. 飞行路径要求

(1) 所有无人机飞行路径的上方不得有任何遮挡物。

(2) 所有无人机飞行路径垂直投影外 15 m 范围内的区域,须保持无人员、无车辆状态。



第 7 章

剧本设计与飞行安全

若使用存在安全隐患的剧本,则可能造成严重的财产损失或人身伤害。大漠大提供的剧本编辑器软件和地面站软件可以加载表演地点的环境地图,利用剧本 3D 仿真对表演剧本进行检查,可在技术层面实现多重剧本安全保障。同时,大漠大制定了严格的剧本管理规定,覆盖剧本设计与使用全流程,以最大限度规避剧本因素对飞行安全的不利影响。

7.1 软件安全保障机制

在艺术设计编程阶段,剧本编辑器软件可以检测集群内无人机碰撞(见图 7-1)和超速等风险,还可结合表演场地的地形、地貌特征,模拟规避建筑物的飞行路径,提前规划所有无人机的完整飞行轨迹。通过剧本 3D 仿真,剧本编辑器软件可以直观呈现每架无人机的实时位置信息和飞行轨迹。剧本编辑器还可以实现飞行画面 3D 建模(见图 7-2),让剧本呈现的效果更加生动,以便于提前发现剧本潜在问题。

在正式表演前的准备阶段,无人机飞行集群需要通过地面站软件加载剧本文件开展 3D 仿真。地面站软件剧本 3D 仿真画面如图 7-3 所示。地面站可精准掌握每架无人机的飞行状态,同步模拟无人机飞行表演轨迹和演出画面。在完成剧本 3D 仿真效果预览并确认无误后,才可以进行剧本传输等后续步骤,从而有效规避了“无人机撞楼”“机位摆放错误”“航向设计错误”等低级失误,最大程度保障了飞行安全。



7.2 剧本管理规定

严格规范飞行剧本管理,对确保无人机集群飞行表演安全具有至关重要的意义。大漠大围绕无人机剧本的制作、导出和使用制定了以下严格规定。

(1)在设计剧本前应明确飞行表演的高度区间,防止因飞行高度过低导致无人机与地面障碍物发生碰撞,或因飞行高度过高而违反相关的飞行管理条例。

(2)设计剧本前应明确剧本飞行表演的区域范围,严禁超出预设的表演区域。

(3)剧本设定的起飞高度,应比周围建筑物、树木高出至少 10 m。

(4)明确每架无人机在剧本中的位置、飞行速度和飞行轨迹。注意计算每架无人机的起飞和着陆时间,确保所有无人机的飞行动作协调。

(5)当无人机的任意朝向速度高于限定值的 107% 时,无法导出剧本。例如, DMD-M400W-V4 无人机的合速度不得超过 8.56 m/s,水平速度不得超过 7.49 m/s,上升速度不得超过 4.81 m/s,下降速度不得超过 3.74 m/s,水平加速度不得超过 6.42 m/s²,垂直加速度不得超过 4.28 m/s²。

(6)剧本导入地面站完成映射后,地面站预览剧本时检测的安全距离不应小于 1.3 m。

(7)严禁使用非原厂提供的插件所制作的剧本,否则可能导致飞行异常(事故)。



第 8 章

气象监测与飞行安全

随着我国低空域范围逐步开放以及无人机行业的蓬勃发展,构建完善的低空飞行安全气象保障体系已成为当前重要的研究方向。考虑到我国低空环境具有复杂多变的特点,为确保低空飞行的安全性与可靠性,需从多维度对关键气象信息进行全面监测。

参照民用航空局相关管理办法,无人机表演作为低空域飞行活动,须执行严格的检测标准与管控措施,配备专业的风速仪开展气象检测工作。在气象检测实践中常用的核心气象要素包括气温、气压、风速、降水和大气密度。

8.1 气温监测

高温与低温环境都会影响无人机传感器功能组件的正常运行,导致飞行效率降低,甚至直接威胁飞行安全。

无人机电动机运转产生升力时会产生大量热量,高温环境会阻碍热量散发,导致电动机过热,极端情况下甚至可能融化零部件与线缆,引发设备故障。低温环境会显著降低电池活性与供电效率,导致无人机飞行时间较常温环境大幅缩短,极易出现突发掉电引发电动机停转等危险情况。因此,须禁止无人机在超高温或超低温环境下飞行。以 DMD-M400W-V4 无人机为例,当气温达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下或高于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,则停止开展集群飞行表演。

若需要在炎热天气($30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$)下飞行,则应严格控制单次飞行时长,且两次飞行的间隔期间,必须让无人机充分冷却。在低温环境($-20\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)下开展飞行表演时,需要重点关注以下问题,以保障设备稳定与飞行安全。



(1)相关负责人应提前根据低温续航的变化调整飞行规划(如适当降低飞行速度、缩短单次飞行时间等),避免因电量不足引发意外。

(2)相关负责人提前对电池采取针对性保暖措施(如使用电暖气预热、为电池配备暖宝宝等),将电池温度升至 0°C 以上。表演前40 min让无人机进入待机工作状态,使设备通过自身运行进一步升温。起飞前3~5 min让无人机点亮白灯进行电池预热。建议将电池温度维持在 20°C 以上再开始飞行。

(3)严禁使用低电量无人机执行飞行表演任务,从源头规避因电量不足引发的坠机风险。

(4)表演全程应密切监测电池状态,避免无人机因电量不足无法完成表演和安全降落,发生坠机等风险。地面站软件可实时显示每架无人机的电池电压,便于全程追踪每架无人机的电压动态。以DMD-M400W-V4无人机为例,若电池电压降至12.8 V,则表明电池剩余容量已不足,此时无人机会自动返航,地面站操作员需要重点关注该临界值。

8.2 气压监测

无人机在高空飞行时,通常通过测量大气压力获取飞行高度数值,该高度被称为气压高度。气压高度会因环境气压变化(如不同区域、不同海拔的气压差异)产生数值偏差,导致无人机实际飞行高度与显示高度不符,引发高度误判,从而导致无人机碰撞或触地。因此,气压高度校准尤为必要。

在高海拔飞行场景,所有无人机都需要采用标准大气压校准气压高度表,确保同一空域飞行的无人机拥有统一的高度基准。在低高度飞行场景(如起飞、降落阶段),由于各地气压处于动态变化中,所以需要使用时当地实时修正气压来校准高度表,使显示高度与当地实际地形高度一致。

8.3 风速监测

在大风环境下,无人机为维持稳定姿态与既定飞行轨迹,会额外消耗电量以对抗风力干扰,这将导致无人机续航时间缩短,同时其飞行稳定性也会大幅下降。而风速本身具有瞬时多变的特性,这进一步为无人机飞行增加了不确定性,对飞行安全构成了潜在威胁。若飞行过程中现场最大风速超过无人机的额定最大抗风速度,则应立即停止表演,否则可能引发失控风险。



此外,近地面风速与空中风速存在显著差异。在多数场景下,风速遵循“随高度升高而增大”的规律,近地面区域因受高楼、山体等障碍物的影响,风速通常远小于空中风速。在大气近地层,若地形平坦,理论上风速随高度增加呈对数规律递增。但在实际环境中,受气象条件、地面建筑物和植被等因素影响,风速与风向的垂直分布会呈现复杂变化。

因此,风速监测需要贯穿无人机飞行表演项目的全流程。在飞行表演前,相关负责人应通过当地官方气象平台提前查询表演当天的气象数据,在确认无强风、季风等极端风力干扰后才可开展飞行表演。自正式起飞前 1 h 起,应启动不间断风速监测,同时重点关注高空与地面的风速差值,并实时向项目总指挥通报风速情况。以 DMD-M400W-V4 无人机为例,当周边制高点风速达到 7.5 m/s 及以上或空中 100 m/200 m/300 m 处风速达到 12 m/s 及以上(数据以地面站显示为准)时,应立即停止无人机集群飞行表演。

若在非固定场所飞行,则应先采用手持式风速仪(见图 8-1)在场地内地势最高、无遮挡的位置进行测风,其次将无人机飞至空中不同高度(分别选取剧本无人机高度的高、中、低三个位置),然后在地面站右上角查看无人机测得的风速信息。



图 8-1 手持式风速仪

若在相对固定的场所(如常态化驻场表演场地)飞行,则可部署高空专业风速报警仪(见图 8-2),以实现不同高度风速的自动化监测与风险预警。

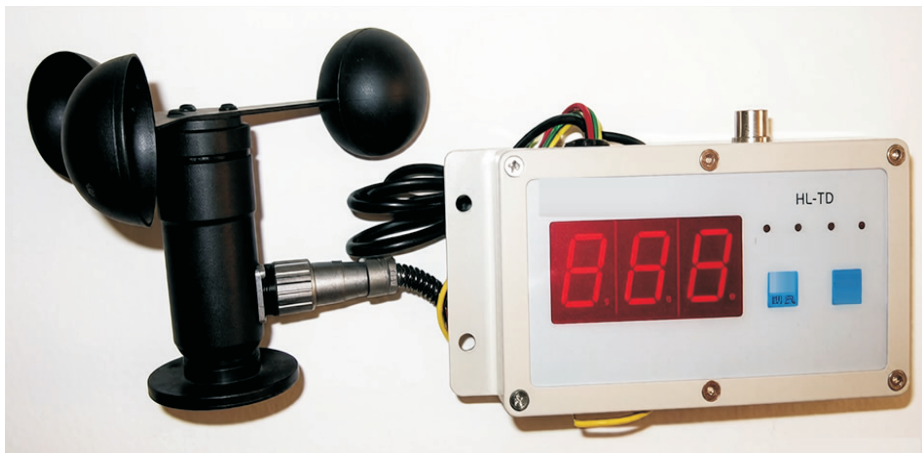


图 8-2 高空专业风速报警仪

8.4 降水监测

空气湿度指空气中水分子的含量。空气湿度过高及各类降水天气,都可能干扰无人机的正常运行。当空气湿度值接近 1(即接近饱和状态)时需要重点警惕,此时即便无降雨,无人机表面也会凝结大量水汽。而无人机作为精密电子产品,一旦有水汽渗入,其内部的电子元器件就极可能遭到腐蚀,引发无人机故障。

因此,在无人机日常维护保养中,尤其要做好干燥除湿工作,预防水汽对设备的损害。在飞行表演前,应提前查询表演当天的天气情况,避开雨、雪、雾、雷电等不宜飞行的天气。在飞行执行阶段,应密切监测天气动态,并在起飞场地准备好雨布和防雨仓库。例如,可在起飞场地附近搭建临时防雨帐篷(见图 8-3),以便降雨前快速将无人机及其配套设备转运至帐篷内,最大程度降低设备受潮风险,减少损失。



图 8-3 搭建的临时防雨帐篷

若遭遇突发降雨,则应立即操作无人机返航,使用雨布遮盖无人机(见图 8-4)和配套设备,避免雨水直接接触设备核心部件。

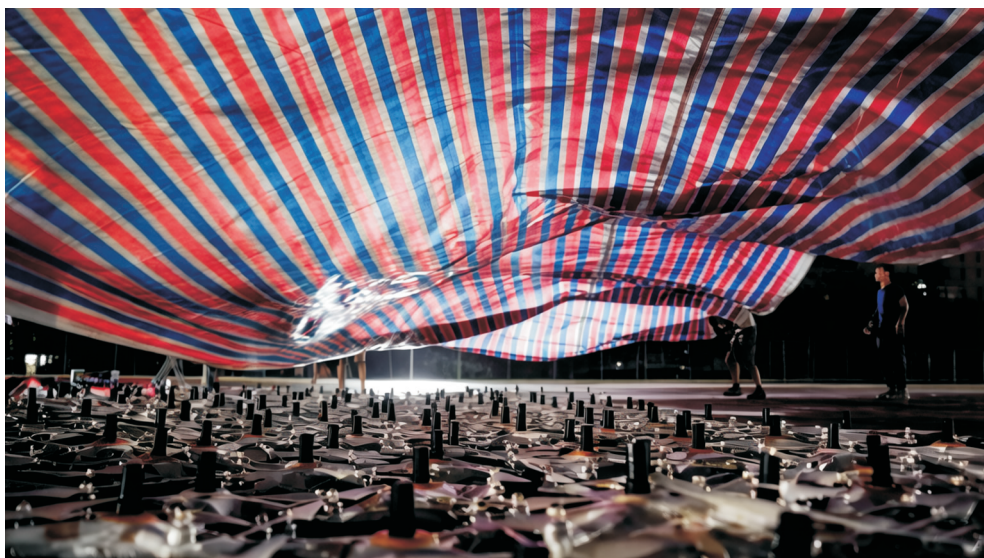


图 8-4 雨布遮盖无人机

8.5 大气密度监测

随着海拔高度升高,空气密度随之减小。空气密度下降会导致螺旋桨升力减弱,为维持正常飞行姿态,电动机需要驱动螺旋桨大幅提升转速,造成无人机耗电量增加,续航时间大幅缩短。因此,应对高海拔区域开展的集群飞行表演实施一定限制。

例如,DMD-M400W-V4无人机的最高起飞海拔高度为5 000 m。若飞行所在区域的海拔低于最高起飞海拔高度但高于2 000 m,则必须提前开展小架次飞行测试,通过实际飞行数据确定该海拔下的续航时间变化,为正式表演的飞行规划提供可靠依据。



第 9 章

电磁环境监测与飞行安全

电磁环境监测是保障无人机集群稳定运行的关键环节,其目标是识别干扰源、评估环境质量、规避电磁风险,为各类无线设备的安全工作奠定基础。以下内容将围绕无线电磁环境干扰基础、现场监测方法与技术、核心设备参数展开,同时聚焦特定频段设备监测及无人机表演场景专项监测,为实际电磁环境监测工作提供标准化指引。

9.1 电磁环境干扰基础

1. 电磁环境下的干扰种类

无人机飞行表演面临的电磁干扰种类繁多,根据干扰源特性可分为自然干扰和人为干扰两大类。自然干扰主要来源于大气雷电放电、太阳辐射和宇宙噪声等自然现象,而人为干扰则来自各种电子设备和无线电发射装置。深入了解这些干扰特性对于设计有效的抗干扰措施至关重要。

在自然干扰源中,雷电放电是最显著的干扰因素。雷暴天气产生的电磁脉冲频段广泛,从几千赫兹到几百兆赫兹,能够严重干扰无人机导航和通信系统。即使远在数十千米外的雷暴活动,其电磁脉冲仍可能影响无人机操作。太阳辐射干扰则主要影响卫星导航系统,特别是在太阳活动剧烈的年份,电离层扰动会导致 GPS 定位精度下降和信号失锁。

人为干扰更为复杂多样,其可能源自表演场地周边的广播电视发射塔、移动通信基站、雷达系统、工业设备以及观众携带的电子设备等。人为干扰主要如下。



- (1)同信道干扰:非法发射机使用与无人机系统相同的频率造成的干扰。
- (2)邻信道干扰:相邻频率发射机的带外泄漏或调制产物落入接收频带。
- (3)互调干扰:多个信号在非线性器件中混合产生新频率成分造成的干扰。
- (4)阻塞干扰:强干扰信号使接收机前端过载,导致灵敏度下降或完全失效。

无人机系统内部也会产生自干扰,包括多个无人机发射机之间的相互干扰、机载电子设备(如电机控制器)对导航接收机的干扰以及电源系统和数字电路产生的宽带噪声干扰。

针对这些干扰,表演前必须进行全面电磁环境监测,识别潜在干扰源并评估其影响程度。监测应覆盖从直流到微波的宽频段,并特别关注无人机操作频段及其谐波频率。无人机表演常见的干扰类型、特征及缓解措施可参见表9-1。

表9-1 无人机表演常见的干扰类型、特征及缓解措施

干扰类型	典型来源	影响频段	特征	缓解措施
同信道干扰	其他发射设备	操作频段内	持续窄带	频谱监测、频率规避
邻信道干扰	邻近通信系统	操作频段附近	持续宽带	滤波器、频带隔离
互调干扰	多个发射机组合	非线性产物	间歇性	线性化设计、频率规划
阻塞干扰	大功率雷达、广播	宽频段	高强度	带通滤波器
自干扰	机载电子设备	基频和谐波	系统相关	屏蔽、滤波、物理隔离

2. 无线电干扰分析和优化的重要理论工具

如同牛顿三大定律构建起力学的基础体系,1948年,香农(Claude Elwood Shannon)在《通信的数学理论》(*Mathematical Theory of Communication*)一文中提出的香农定理,也奠定了信息论的理论基础。其中香农第二定理更是现代通信技术发展的核心支柱。

该定理指出,在噪声与信号独立的高斯白噪信道中,假设信号的功率为 S (单位: W),噪声功率为 N (单位: W),信道通频带宽为 W (单位: Hz),则该信道的信道容量 C (单位: bit/s)可通过公式 $C=W \times \log_2\left(1+\frac{S}{N}\right)$ 计算得出。这就是香农信道容量公式。从公式中可以看出,在给定信噪比(S/N)与带宽(W)的条件下,任何通信系统的传输速率都无法突破此极限。由该公式可得出以下结论:

- (1)提高信道的信噪比或增加信道的带宽 W 都可以增加信道容量。
- (2)当信道中噪声功率 N 无穷趋于0时,信道容量 C 趋于无限大。也就是说,无干扰信道的信道容量可以为无穷大。

(3)当信道容量 C 一定时,带宽 W 与信噪比 S/N 之间可以互换,即减小带宽 W ,同时提高信噪比 S/N ,可以维持原信道容量。

(4)当信噪比 S/N 一定时,增加带宽 W 可以增大信道容量。但当噪声为高斯白噪声(实际的通信系统背景噪声大多为高斯白噪声)时,增加带宽 W 的同时会造成信噪比 S/N 下降,因此,无限增大带宽 W 并不能无限增加信道容量,最终信道容量 C 只会趋近于一个有限值。



9.2 电磁环境检测流程与方法

标准的电磁环境监测流程如下:

(1)在前期准备阶段,需要收集场地基本信息(地理位置、周边设施);查询当地无线电管理机构公布的频率使用情况;制订详细的检测计划。

(2)在现场检测阶段,需要在表演区域选择多个检测点;在不同时间段重复检测;记录所有检测数据(如时间、位置、信号等参数)。

(3)在数据分析阶段,需要生成频谱使用情况报告;识别潜在干扰源和风险点;制定频率使用建议和规避方案。

开展电磁环境检测需要配备便携式频谱分析仪(见图 9-1),其需要具备实时频谱显示功能,且能够记录最高位数数据、全向监测天线、定向监测天线以及环境参数记录工具。现场检测通常采用的方法为:使用便携式频谱分析仪开展全频段扫描(扫描范围覆盖 400 MHz~6 GHz),其中重点监测卫星发射频段(1 100~1 600 MHz)与无人机操作频段(850 MHz、2.4 GHz、5.8 GHz),同步记录各频段的背景噪声电平、干扰信号特征及出现规律,并生成实时频谱图以直观显示频率使用情况。



图 9-1 便携式频谱分析仪

9.3 现场干扰规避策略

根据电磁环境检测结果可精准识别干扰信号。常见的干扰信号类型包括连续波干扰(表现为窄带高幅度信号,通常来源于固定发射设备)、脉冲干扰(表现为周期性短时脉冲,可能来源于雷达或工业设备)、宽带噪声(表现为频谱宽泛的噪声信号,通常来源于电器设备)以及间歇性干扰(表现为不规则出现的信号,可能来源于



移动发射源)。

在干扰信号识别完成后,可采用幅度比较法(使用定向天线测量信号强度变化)与移动监测法(在车辆或无人机平台上进行移动监测)来对干扰源进行定位。

基于干扰识别结果进行频率选择与优化,具体方法可参考现场频率选择决策矩阵(见表9-2)。

表9-2 现场频率选择决策矩阵

干扰类型	干扰强度	推荐应对措施	效果预期
窄带干扰	低(-90 dBm 以上)	避开受影响频点	效果显著
窄带干扰	高(-80 dBm 以上)	切换至备用频段	效果显著
宽带干扰	低	选择干扰最小频段	效果一般
宽带干扰	高	找到干扰源,协调关闭	必须采取
间歇性干扰	任何强度	实时监测+自动规避	效果良好

针对工业设备干扰,可与设备使用者协商临时关闭干扰源;若为民用设备干扰,则可通过现场广播要求观众配合;若遇未知干扰源,则应记录其特征并向无线电管理部门报告;若出现恶意干扰,则需要立即启动应急预案并报告相关部门。

9.4 核心设备电磁环境监测

大漠大无人机集群飞行表演系统的核心设备的通信频段规划如下:无人机与地面站之间通过 5.8 GHz 频段电磁波实现通信;无人机与手柄遥控器之间通过 2.4 GHz 频段电磁波完成通信;无人机与差分基站的信号传输则采用 850 MHz 或 2.4 GHz 频段;此外,总指挥与飞手、地勤及相关人员的通话对讲机,其工作频率范围为 435.137 5~436.137 5 MHz。为保障飞行安全,需要使用便携式频谱分析仪对核心设备涉及的通信频段展开细致检测与分析。

1. 手柄遥控器

飞行表演中无人机发生故障时,飞手可使用手柄遥控器(见图9-2)接管故障无人机。遥控器采用 2.4 GHz 频段进行通信,工作模式为单工模式,发射功率达 0.1 W(对应 20 dBm),频率范围覆盖 2 400~2 483.5 MHz。在遥控器使用过程中,需要重点对 2.4 GHz 频段的 Wi-Fi 信号进行专项检



图9-2 手柄遥控器

测,以避免频率冲突。若检测发现存在信道干扰,则需要及时协调相关方避开干扰信道,确保遥控器通信稳定。

2. 差分基站

大漠大采用 850 MHz 频段电台广播差分基站信息,在无人机集群表演过程中,需要重点采集该频段数传电台的频率使用情况,排查是否存在干扰,且需要在集群无人机上电前与上电后分别进行检测。在检测时应结合当前所用频率进行干扰判断,若发现干扰问题,则需要及时更换频率以保障 RTK 信号传输稳定。相关 RTK 信号频率检测图如图 9-3 所示。

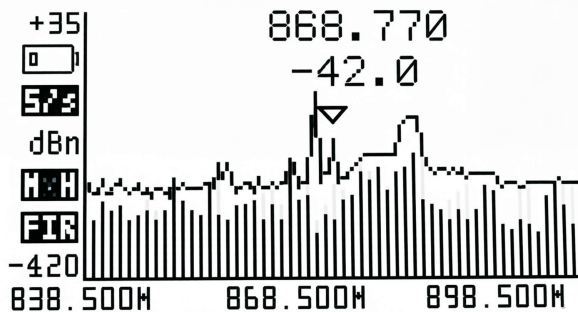


图 9-3 RTK 信号频率检测图

3. 对讲机

在飞行表演现场,对讲机作为地面工作人员间的核心语音通信工具,其电磁兼容性直接关系到无人机系统的稳定性。对讲机发射的大功率射频信号,尤其当工作频率接近无人机操作频段时,极易对无人机导航与通信系统产生干扰。对讲机常用工作频段为特高频频段(400~470 MHz)或甚高频频段(136~174 MHz),发射功率覆盖 0.5~5 W 甚至更高,不同功率与频段的组合,使干扰风险存在差异。为最大程度规避对讲机对无人机系统的干扰,保障飞行表演安全,大漠大针对现场对讲机使用制定了如下严格的管理措施:

- (1) 确保对讲机工作频率远离无人机关键频段(如 GPS L1 频段、遥控频段);
- (2) 使用最小必要功率,避免不必要的高功率发射;
- (3) 保持对讲机与无人机天线系统的安全距离。

在飞行表演前,表演团队需要对所有拟使用的对讲机设备开展干扰测试,重点评估其对无人机系统的干扰程度,据此建立“批准使用设备清单”,仅允许经测试验



证无干扰风险的对讲机型号进入现场使用。同时,现场需要指定频谱监测员,通过专业设备实时监测对讲机的发射频率、功率等参数,确保其运行状态完全符合电磁安全规范,避免对无人机导航与通信系统造成干扰。

9.5 特定频段与设备电磁监测

1. 大功率 Wi-Fi 通信基站监测

在采用大功率远距离 Wi-Fi 进行通信的场景中,在每次无人机飞行前,需先对 Wi-Fi 接入点(AP)的信道进行配置,确保将其设置在无干扰的通信信道上。该操作必须在每次飞行前严格执行,其直接关系到 Wi-Fi 通信链路的稳定性。

常用的 2.4 GHz Wi-Fi 频段共划分有 14 个信道(其中第 14 信道通常不投入使用),每个信道的有效宽度为 20 MHz,且相邻信道间设有 2 MHz 的强制隔离频带(类似公路隔离带,避免信号直接干扰)。具体来看:中心频率为 2 412 MHz 的 1 信道,其频率覆盖范围为 2 401~2 423 MHz;中心频率为 2 484 MHz 的 14 信道,频率范围则为 2 473~2 495 MHz。

2.4 GHz Wi-Fi 信道如图 9-4 所示,在这些信道中,1、6、11 三个信道的频谱完全无交叠(每个信道实际占用带宽为 22 MHz,含有效宽度与隔离频带),其他信道之间均存在不同程度的频谱重叠。此外,若设备硬件支持,除 1、6、11 这一组互不干扰的信道外,还可选用 2、7、12,3、8、13,4、9、14 这三组信道,每组内的三个信道同样具备频谱无交叠、互不干扰的特性。

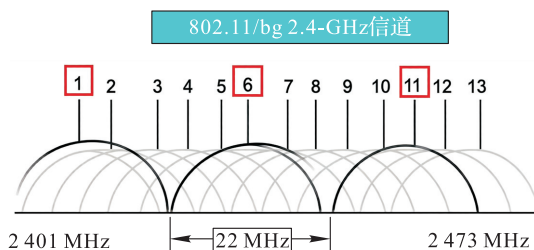


图 9-4 2.4 GHz Wi-Fi 信道

DMD-M400W-V4 无人机支持通过 5.8 GHz Wi-Fi 实现网络通信,同时大漠大专用的 AP 设备可配置选择国家/地区,其内置程序会依据当地无线电法律法规自动调整可用频率。例如:在中国,5.8 GHz 频段仅支持 149、153、157、161、165 这 5 个信道,且信道可支持两组 40 MHz 捆绑或一组 80 MHz 捆绑;而部分国家在

不进行频段捆绑时,还可使用 36、40、44、48、52、56、60、64 等来扩展 Wi-Fi 信道。

可使用专业软件完成 Wi-Fi 信道检查,信道检测界面如图 9-5 所示。无人机集群所使用的 Wi-Fi 名称分别为“dev_d50”“dev_d51”“dev_d52”“dev_d53”,对应使用的 Wi-Fi 信道为 56、60、149、161。在操作时需要确保每个信道不受其他用户信号干扰,若检测到干扰信号,则应及时协调避开干扰以保障通信稳定。

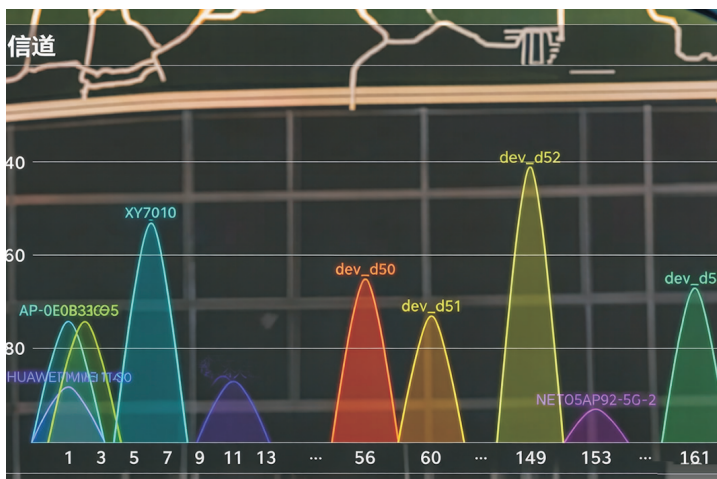


图 9-5 信道检测界面

2. 卫星定位信号监测

大漠大的无人机集群飞行表演系统支持三星定位,具备较强的抗干扰能力,该系统在集群飞行前需要锁定 12 颗及其以上的卫星方可启动飞行程序。在表演过程中,需要使用频谱仪对 GPS 信号的干扰情况进行实时监测。GPS 频率监测图如图 9-6 所示。

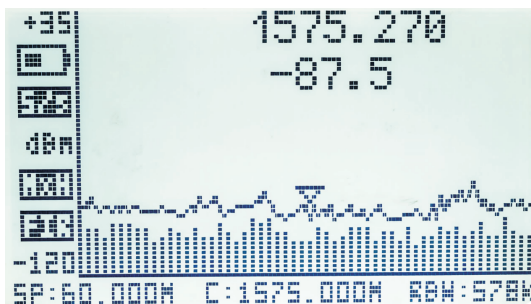


图 9-6 GPS 频率监测图



在选择表演区域时应尽量避开城市高层建筑周边或四周有建筑物遮挡的环境,此类区域的卫星信号易被严重遮挡,可能导致无人机定位精度下降,进而增加碰撞的风险。在实际情况中,除需开展卫星收星测试外,还需要对差分广播信号的有效性进行判断,确保无人机在起飞、降落及表演的全过程中,通信基站与无人机之间保持视距无遮挡,以保障定位与通信信号稳定。

9.6 无人机表演场景专项电磁监测

1. 地球磁场扰动监测

受太阳风等天体活动的影响,当太阳风携带的高速等离子体云冲击地球磁场时,会使地球磁场发生压缩变形,进而引发地球磁场的剧烈扰动,这一现象即为地磁暴。作为重要的灾害性空间天气事件,地磁暴会对地面电力系统、通信系统及卫星姿态等产生显著干扰,其预报工作由中国科学院国家空间科学中心负责,且有明确的分级警报标准:当全球磁场指数(K_p)(取值范围为0~9)超过5时,发布黄色警报;当其超过7时,发布橙色警报;当其达到9时,发布红色警报。

在无人机集群表演场景中:当 K_p 小于4时,无人机可正常开展表演;若 K_p 超出该范围,则需要警惕地磁爆带来的影响。

2. 地磁检测

无人机通常使用磁力计作为航向传感器,测量地球磁场方向来确定机头朝向。然而,表演环境中存在的人工磁干扰源(如钢结构建筑、地下管道、电力设施等)会扭曲本地磁场,导致航向测量误差,进而影响飞行控制和集群协同;一些临时结构(如金属舞台、大型显示屏等)可能引起磁场畸变;电力电缆和变压器产生的交流磁场也可能干扰磁力计测量。典型磁干扰源及对无人机磁力计的影响见表9-3。

表9-3 典型磁干扰源及对无人机磁力计的影响

干扰源类型	磁场畸变特征	影响范围	缓解措施
钢结构建筑	静态偏差,强度可达背景场的10%	数十米	避开、校准补偿
地下金属管道	局部异常,梯度大	几米到十几米	测绘避开
电力电缆	50/60 Hz 交变场,强度不定	数米	保持距离、滤波
变压器变电站	强静态和交变场	数十米	绝对避开
车辆和设备	临时性干扰	数米	清场管理



现代无人机集群系统采用主动式地磁干扰识别机制,通过无人机自身传感器实时检测地磁环境异常,将异常状态信息同步回传至地面站,为地面人员提供预警支持与决策依据。无人机在起飞后,会通过提升高度(通常为几米至几十米)完成磁罗盘重置,消除起飞阶段可能存在的局部地磁干扰残留,以确保后续定位精度。在正式飞行表演开始前,需要先开展少架次无人机测试,在确认地磁环境无异常、设备运行稳定后,再正式启动表演。

3. 电离层活跃度检测

电离层是距离地面 60~1 000 km 的大气层,该区域内的气体分子受太阳辐射作用发生电离,其活跃度受多种因素影响,包括以 11 年为一个周期的太阳活动周期(直接影响电离层电离程度)、昼夜变化(白天电离程度显著高于夜间)、季节变化(夏季电离层活动通常比冬季强烈)、地理纬度(极地和赤道地区的电离层特性差异显著)以及太阳突发事件(如耀斑、日冕物质抛射等)。

当电离层活跃度异常时,其会对无人机所依赖的全球导航卫星系统产生多方面影响,具体表现为:信号延迟导致卫星信号传播时间计算误差;定位漂移产生慢变的位置偏差(通常可达数米);周跳增加影响载波相位测量,并导致 RTK 定位困难;信号闪烁引起信号强度和相位的快速随机波动;增强的信号反射导致测量误差。

为应对这些影响,需要执行完整的监测流程:在表演前需要提前 24 h 开始持续监测电离层活动,同时分析历史同期电离层活动数据、查询空间天气预报信息、评估电离层活动对表演的潜在影响;在表演过程中要实时监测电离层情况,记录异常事件及发生时间,为现场决策提供支持信息。此外,需要预先制定应急预案,并确保各环节通信的畅通,以保障无人机表演安全。



第 10 章

通信链路 & 飞行安全

10.1 定位信息通信链路备份

无人机飞行表演系统的定位信息通信链路是确保飞行安全的核心组成部分。由于表演环境通常充满复杂的电磁干扰因素,单一通信链路极易受到干扰而导致定位信息丢失或失真,进而引发飞行安全事故。所以,建立多重通信链路备份机制至关重要。备份系统应采用异构多重冗余设计,即通过不同技术体制、不同频段和不同传输路径的通信方式构建互补型链路网络,确保在某一链路失效时其他链路能够无缝接管通信任务。

1. 卫星定位系统通信链路备份

现代无人机集群表演系统通常配备多重 GPS - GLONASS - BDS - Galileo 定位系统,通过接收多星座卫星信号提高定位精度和可靠性,利用不同卫星导航系统的主要频段与频率和特点(见表 10 - 1)实现冗余备份。

表 10 - 1 全球主要卫星导航系统的主要频段与频率和特点

导航系统	所属国家/地区	主要频段与频率/MHz	民用信号特点
全球定位系统 (GPS)	美国	L1: 1 575.42 L2: 1 227.60 L5: 1 176.45	技术成熟,全球覆盖性好, 应用生态广泛

续表

导航系统	所属国家/地区	主要频段与频率/MHz	民用信号特点
北斗(BDS)	中国	B1I: 1 561.098 B1C: 1 575.42 B2a: 1 176.45 B2b: 1 207.14 B3I: 1 268.52	全球首创三频信号,区域增强信号强,具备短报文通信等特色服务
格洛纳斯(GLONASS)	俄罗斯	L1: $1\ 602 + 0.5\ 625 \times k$ (k 为信道号) L2: $1\ 246 + 0.4\ 375 \times k$ (k 为信道号)	频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA) + 码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)混合多址,高纬度地区覆盖性能优
伽利略(Galileo)	欧洲	E1: 1 575.42 E5a: 1 176.45 E5b: 1 207.14 E6: 1 278.75	民用主导,设计精度高,提供开放式服务和商业认证服务

大漠大的无人机集群系统配备了支持多导航系统(GPS、BDS、GLONASS、Galileo)联合定位的接收机,并同步实现通信链路备份,具有以下显著优势。

(1)显著增加可见卫星数:在多系统支持下,接收机可同时追踪的卫星数量大幅增加(常常可达30颗以上)。更多的可用卫星改善了空间几何分布(降低DOP值),直接提高了定位精度和可靠性。在城市峡谷、密集树林等遮挡严重的表演环境,多系统可以有效减少定位盲区。

(2)增强抗干扰与容错能力:不同系统工作于相同或相近频段,但调制方式、多址方式和信号结构不同。若某一个系统受到特定频率的干扰、维护或人为关闭(如GPS降低民用精度),其他系统可作为备份继续提供定位服务,极大地提升了导航系统的鲁棒性和生存能力。

(3)提升定位精度和收敛速度:多频点信号(如BDS的三频、GPS的L1/L5)允许接收机使用更精确的模型估算和消除电离层延迟误差(双频/三频电离层修正)。多系统提供更多观测值,有助于加快载波相位模糊度的固定,提高实时动态差分(RTK)和精密单点定位(PPP)的初始化速度和精度。特别是在电离层活动剧烈时



期,多频率多系统优势更为明显。

(4)提高系统完整性和可靠性:通过多系统信号的交叉验证,接收机可以更好地进行自主完好性监测(Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM),能够更快地识别并排除故障卫星的信号,降低使用错误位置信息的风险,对于安全性要求极高的无人机集群表演至关重要。

此外,大漠大无人机的定位导航模块支持固件升级,并同步建立了相应的模块升级管理和验证流程。这种升级能力至关重要,原因如下。

(1)适应导航系统的持续演进:各大全球导航卫星系统都在不断升级和现代化。例如,北斗系统正从北斗二号向北斗三号过渡,增加 B1C、B2A 等新信号。GPS 正在部署新一代的 III 系列卫星,增强信号强度并提高了质量。只有可升级的定位模块,才能通过更新星历/年历解码算法、新信号解析能力来支持这些新的信号和服务,从而获取更好的定位性能。

(2)获取算法优化带来的性能提升:接收机的定位精度、抗干扰能力、冷启动速度等不仅仅依赖于硬件,更与基带处理算法、滤波算法、多路径抑制算法、电离层/对流层误差模型等软件算法密切相关。芯片厂商会持续优化算法。例如,采用固件升级,可以优化 GPS+GLONASS 双星基站的兼容性。无人机无须更换硬件即可享受这些算法进步带来的红利。

(3)修复潜在缺陷与提升安全性:如同任何复杂系统,定位接收机的固件可能存在未知的缺陷或漏洞。定期升级可以修复这些潜在问题,提升系统安全性和稳定性。此外,升级还可以应对新的欺骗或干扰手段,并利用增强认证和防欺骗算法来提升导航能力。

(4)匹配无人机集群系统的新需求:无人机表演技术的发展将会对定位导航提出新的要求,如更高的输出频率(100 Hz RTK)、更低的延迟、支持新的差分数据格式或与其他传感器(视觉、激光雷达、惯性传感器)进行更深度的融合。可升级的定位模块为未来满足这些新需求提供了可能。

2. 辅助定位系统通信备份

实时动态定位(Real-Time Kinematic, RTK)是一种基于载波相位观测量的高精度卫星导航定位技术,通过基准站与流动站(无人机)之间的实时差分处理,将传统卫星定位的米级误差降低至毫米级。RTK 技术通过消除卫星钟差、接收机钟



差、电离层和对流层延迟等公共误差,显著提升了定位精度,是无人机集群表演中实现精准集群飞行的核心技术。

在无人机表演系统中,RTK 辅助定位链路通常由基准站、数据通信链路和机载 RTK 接收机三类组件构成,其中:基准站固定于已知坐标点,负责实时观测卫星数据并生成差分校正信息;数据通信链路承担将差分校正数据从基准站传输至无人机集群的任务;机载 RTK 接收机能同时接收卫星信号及差分校正数据,进而完成高精度定位解算。

RTK 技术的核心优势在于兼具高精度与实时性,但该技术高度依赖稳定可靠的通信链路来传输差分数据,一旦通信中断,无人机的定位精度会迅速退化至标准单点定位水平(存在米级误差),因此必须设计冗余通信链路,以保障差分数据的连续传输,确保无人机表演过程中的定位稳定性。

在典型的无人机 RTK 系统通信链路备份方案中:主要链路采用 800~900 MHz 频段的长距离、低速率通信,该频段具备强抗干扰能力与良好穿透性,可满足常规场景下差分数据的稳定传输;备份链路选用基于 2.4 GHz 或 5.8 GHz 频段的数字扩频通信,能提供高带宽数据传输能力,作为主链路故障时的核心替代;根据需求还可配置可选链路,即采用 LTE/5G 公共移动网络,并通过专用网络接入技术保障数据传输安全。不同通信链路理想状态下的性能参数可见表 10-2。

表 10-2 通信链路性能参数

链路类型	工作频段	带宽能力	有效距离	抗干扰能力
主链路	800~900 MHz	低(2 MHz 以下)	5~10 km	强
备份链路	2.4 GHz/5.8 GHz	高(20 MHz+)	1~3 km	中等
可选链路	LTE/5G 公众频段	可变	取决于网络覆盖	高

无人机 RTK 系统通信链路备份方案还需要设计自动决策的链路切换机制,对各通信链路的信号强度、误码率、延迟等参数进行实时评估。当主链路质量低于预设阈值时,自动切换至备份链路,且所有链路的运行状态需要实时可视化显示在控制界面上,便于操作人员实时监控与辅助决策。

为确保高精度定位服务的连续性,除通信链路备份外,还需对 RTK 基准站本身实施物理级冗余备份,该物理备份方案采用“N+1”热备份架构,即 N 个主用基准站至少配备 1 个备用基准站,且备用站保持实时同步运行,可在主站发生故障时



无缝接管工作。

主用与备用基准站需保持一定距离(建议大于 100 m),分别部署在不同高度位置,避免二者同时受到局部干扰(如雷电、电力故障)或物理破坏,同时各基准站需采用独立供电线路,并配备不同的不间断电源(Uninterruptible Power System, UPS),且备用站的 UPS 续航时间应长于主用站,以确保主供电中断后备用站仍能持续工作。所有基准站需要接入同一 GNSS 授时系统,实现纳秒级时间同步,保障时间基准统一,同时主备基站需精确测量同一坐标点,或通过长时间静态观测解算获取精确的相对位置关系,以此确保差分数据的一致性,并进一步保障定位服务稳定。

部署多个基准站构建网络,可为定位终端提供更可靠、精确的差分校正服务。相比单基准站,多差分基站系统具备显著优势:在覆盖范围上,单基站覆盖半径通常小于 2 km,而网络 RTK 可将覆盖范围扩展至整个城市区域(50~100 km);在精度表现上,多站数据融合能有效减少因与基准站距离产生的误差梯度,实现区域内一致性毫米级精度;在容错能力上,当单一基站发生故障时,系统可自动切换至邻近基站,保障差分校正服务不中断。

在实际飞行表演场景中,飞行团队会在起飞场地周边部署 2~3 个 RTK 基准站,形成三角网格。若主站信号受场地电磁干扰等因素影响,则系统能自动切换至备用站,避免定位信号中断。同时,系统借助数据融合算法优化定位精度,通过卡尔曼滤波或加权平均算法对多站差分数据进行融合处理,进一步降低单点数据误差,提升无人机定位的精度与可靠性。

10.2 Wi-Fi 专网无线数据链优势

在超大规模的无人机集群飞行表演中,无线数据链路的性能直接决定了整个系统的可靠性与表现效果。以下将分析万架级别无人机表演对通信网络的极端要求,系统阐述采用远距离 Wi-Fi 专网相较于公共移动网络的综合优势。

1. 超大规模无人机集群表演的网络需求

万架次级别的无人机协同表演对通信系统的要求极为严苛,已远超常规物联网应用范畴,首要体现在对海量终端接入能力的高需求上:单平方千米内需要同时

接入 10 000 多个终端,表演过程中要同步维持数万个实时双向数据流,且每架无人机都需配备独立互联网协议(IP)地址与专用数据通道;同时,系统需要在分钟级别内完成所有无人机的网络注册与认证,传统移动网络的附着过程因耗时较长,无法满足这一时效要求。



此外,通信系统还需满足极低延迟与高同步精度、超高可靠性保障的核心需求:在延迟与同步方面,控制指令的端到端传输延迟必须足够小,以确保无人机能及时接收指令并做出反馈,同时要避免随机延迟抖动,实现关键控制指令的确定性传输;在可靠性与抗干扰方面,控制指令的丢包率需控制在极低水平,表演期间网络可用性要维持在高位,且即便在复杂电磁环境下,仍需保障通信的稳定,避免外部干扰影响无人机协同表演效果。

2. 5.8 GHz 频段能力与挑战分析

5.8 GHz 频段(5 725~5 850 MHz)属于 ISM 免许可频段,拥有 125 MHz 的可用频谱资源,其信道划分与特性见表 10-3。

表 10-3 5.8 GHz 频段信道划分与特性

信道编号	中心频率/MHz	带宽选项/MHz	最大有效全向辐射功率/dBm	适用场景
149	5 745	20/40/80	33	基础覆盖
153	5 765	20/40/80	33	基础覆盖
157	5 785	20/40/80	33	核心覆盖
161	5 805	20/40/80	33	核心覆盖
165	5 825	20/40/80	33	边缘覆盖

5.8 GHz 频段虽为无线通信提供了灵活的频段选择,但在万架次级无人机协同表演的应用场景中,仍面临显著挑战:一是频谱资源紧张,易出现频段拥堵问题;二是覆盖范围有限,5.8 GHz 信号传播损耗较大,其自由空间路径损耗比 2.4 GHz 高约 7 dB,导致单基站覆盖范围受限;三是穿透能力不足,信号对建筑物、植被等障碍物的穿透效果较差,需要通过密集部署基站来弥补覆盖短板;四是多径效应显著,在城市环境中信号易受反射、折射影响,多径衰落问题突出,影响通信稳定性。

3. 远距离 Wi-Fi 专网相对于公网的优势

在超大规模无人机表演场景中,采用远距离 Wi-Fi 专网相比 5G 公共移动网



络,在性能保障、安全性与可靠性及成本控制方面具备显著优势(见表 10-4)。

专网能为每架无人机分配专属时频资源,确保传输延迟的确定性,有效规避公共移动网络中常见的随机延迟抖动,且所有频谱资源专供无人机系统使用,不存在与公众用户竞争资源的情况,可保障带宽稳定可靠。

专网与互联网的物理隔离,可从根源上降低远程网络攻击和数据泄露风险,控制指令与状态信息通过专用网络传输,进一步提升了数据安全性。

专网一次投入后可长期使用,能避免向运营商支付高昂的流量费用,尤其适合频繁开展大型表演的场景,且可根据具体需求优化网络参数、定制设备,还能实时监控网络状态与每个无人机的连接质量,快速定位并解决网络问题,提升管理效率。

此外,远距离 Wi-Fi 专网在部署灵活性上的优势也十分突出。其基站采用一体化设计,支持快速安装与配置,仅需要数小时就能完成表演区域的网络覆盖,满足无人机表演对场地网络搭建的时效需求。还可以根据参与表演的无人机数量灵活增加基站密度,实现系统容量的线性提升,确保无人机数量在大幅增加时,网络仍能稳定支撑表演需求。

表 10-4 远距离 Wi-Fi 专网与 5G 公共移动网络性能对比

性能指标	远距离 Wi-Fi 专网	5G 公共移动网络	优势比较
连接密度	10 000+终端/km ²	5 000~10 000 终端/km ²	专网胜出
传输延迟	5~15 ms	20~100 ms(可能抖动)	专网明显优势
上行带宽	100+Mb/s(专用)	共享,实际可用不确定	专网确定性高
数据安全	物理隔离+加密	逻辑隔离,依赖虚拟专用网络	专网更安全
成本控制	一次投资,无月费	按流量收费,成本高	专网长期优势
定制化程度	深度定制	标准服务,有限定制	专网灵活性强

10.3 通信链路异常的响应机制

1. 状态监控网络异常

现代无人机集群表演系统采用“预存储剧本与状态监控相分离”的通信架构,所有表演剧本(包含精确航点、动作指令、时序安排等)均提前下载至各无人机内置

存储器。这一设计使表演过程完全不依赖于持续的通信链路,可大幅增强系统可靠性与抗干扰能力。无线通信网络仅承担状态监控职能,实时传输无人机位置、姿态、电池状态及电动机工作参数等数据。

当状态监控网络发生异常时,表演剧本继续按预定时序执行,不受监控网络状态影响。系统会自动尝试恢复连接,并将重要状态数据在本地缓存,待连接恢复后重传。同时,操作人员可通过备用方式获取系统关键信息。若网络严重异常,则可启用备用通信链路。

2. 定位系统异常

当辅助定位系统异常时,系统会自动切换至冗余基站。若长时间存在异常,则系统会降级至卫星定位模式。若仍无法定位,则使用惯性测量单元数据进行航位推算补偿,通过多传感器融合定位确保无人机平稳降落。

当核心定位系统异常时:若卫星信号质量下降,则自动优化卫星星座选择;若可见卫星数不足,则启用多系统融合定位。若发生严重异常,则执行应急预案,操作无人机集群降落或返航。

3. 多系统协同异常

系统通过多传感器数据融合准确识别异常根源,在地面站界面实时显示通信质量、无人机状态及异常警报等信息。通过区分通信异常、定位异常、外部干扰与设备故障等异常原因,地面站操作员可快速评估异常影响范围,并按照安全应急响应预案采取分级处置措施。



第 11 章

无人机间距、速度与飞行安全

随着导航定位技术的持续发展,集群飞行表演的无人机最小间距不断缩小,无人机表演的图案分辨率与视觉精美度也随之不断提升。同时,无人机飞行控制技术稳步升级,推动集群飞行速度不断加快,不仅让表演节奏更富灵动变化,更显著增强了视觉层面的冲击感与感染力。不过,艺术美感与技术安全始终是一对矛盾的统一体,二者既相互制约,又共同决定表演的最终呈现效果。因此,未来需要实现艺术美感与安全稳定的有机融合,在规范中找到两者的平衡点。

为确保飞行表演安全,在表演前需要确定无人机飞行表演的最小间距与最大速度。飞行表演的最小间距并非固定值,而是与卫星导航定位精度、无人机飞行速度、飞行环境的温度与湿度及风速、机身风阻特性、锂电池能量损耗速率等多个变量直接相关。因此,每一次飞行表演前都需结合实际条件(如环境参数、设备状态)确定适配的机身间距与飞行速度挡位,进而确定当前条件下的安全表演最小间距与最大速度。

11.1 最小间距与导航定位精度

稳定、精准的定位系统是无人机实现正常飞行的重要前提。当前,室外无人机集群飞行表演所采用的定位导航方式主要有普通 GPS 导航定位模式和高精度 RTK 实时差分定位模式。

1. 普通 GPS 导航定位模式

在普通 GPS 导航定位模式下,无人机的定位精度误差呈现“圆形分布”特征:



以理论定位点为圆心,误差范围形成一个半径为 2.5 m 的圆形区域。也就是说,采用普通 GPS 定位的无人机从固定起飞点升空,在表演结束后返航降落时,降落点与起飞点的偏差会控制在“以起飞点为圆心、半径为 2.5 m”的圆形范围内。这一误差数值已通过大漠大多次集群飞行实试验证,具备实际参考意义。若需确保无人机在普通 GPS 定位状态下不发生碰撞,经测算,其理论最小机间距为 5.54 m。从安全角度出发,建议实际飞行表演的最小机间距大于 6 m。

2. 高精度 RTK 实时差分定位模式

大漠大针对高精度 RTK 实时差分定位模式下的无人机定位精度开展了严格测试——以集群中每架无人机的起飞点为基准参考点,待表演结束完成返航后,精准测量降落点与起飞点的偏差距离,并形成系统统计数据。以 DMD_M400W_V4 无人机的测试结果为例,在对 190 架无人机的起飞与降落点的间距进行统计后发现,无人机的位置偏移量集中在 0~50 mm 之间,且 90% 的无人机偏移量控制在 20 mm 以内,其典型测量数据可见表 11-1。由此可见,该模式下无人机的定位误差范围,是以理论定位点为中心、半径仅 0.05 m 的圆形区域。

表 11-1 RTK 实时差分定位模式下的无人机定位误差典型测量数据

序号	单位	偏移	序号	单位	偏移	序号	单位	偏移
1	mm	20	66	mm	40	131	mm	15
2	mm	10	67	mm	5	132	mm	15
3	mm	15	68	mm	10	133	mm	16
4	mm	17	69	mm	15	134	mm	10
5	mm	10	70	mm	15	135	mm	31
6	mm	10	71	mm	40	136	mm	5
7	mm	15	72	mm	20	137	mm	6
8	mm	15	73	mm	10	138	mm	15
9	mm	5	74	mm	40	139	mm	4
10	mm	15	75	mm	20	140	mm	2
11	mm	20	76	mm	10	141	mm	11
12	mm	5	77	mm	15	142	mm	0
13	mm	15	78	mm	15	143	mm	5
14	mm	10	79	mm	10	144	mm	0
15	cm	18	80	mm	15	145	mm	2



续表

序号	单位	偏移	序号	单位	偏移	序号	单位	偏移
16	mm	0	81	mm	5	146	mm	20
17	mm	0	82	mm	15	147	mm	13
18	mm	5	83	mm	15	148	mm	11
19	mm	4	84	mm	5	149	mm	4
20	mm	15	85	mm	0	150	mm	20
21	mm	10	86	mm	5	151	mm	10
22	mm	10	87	mm	5	152	mm	10
23	mm	15	88	mm	5	153	mm	3
24	mm	10	89	mm	15	154	mm	1
25	mm	15	90	mm	10	155	mm	2
26	mm	18	91	mm	10	156	mm	12
27	mm	15	92	mm	15	157	mm	3
28	mm	8	93	mm	15	158	mm	14
29	mm	10	94	mm	10	159	mm	19
30	mm	10	95	mm	5	160	mm	0
31	mm	15	96	mm	15	161	mm	14
32	mm	5	97	mm	15	162	mm	0
33	mm	10	98	mm	15	163	mm	3
34	mm	4	99	mm	15	164	mm	10
35	mm	15	100	mm	10	165	mm	25
36	mm	20	101	mm	10	166	mm	0
37	mm	25	102	mm	10	167	mm	0
38	mm	4	103	mm	15	168	mm	10
39	mm	6	104	mm	5	169	mm	0
40	mm	20	105	mm	0	170	mm	10
41	mm	18	106	mm	5	171	mm	7
42	mm	5	107	mm	0	172	mm	4
43	mm	0	108	mm	10	173	mm	3
44	mm	20	109	mm	10	174	mm	5

续表

序号	单位	偏移	序号	单位	偏移	序号	单位	偏移
45	mm	3	110	mm	15	175	mm	5
46	mm	10	111	mm	10	176	mm	6
47	mm	10	112	mm	5	177	mm	10
48	mm	10	113	mm	10	178	mm	10
49	mm	20	114	mm	15	179	mm	8
50	mm	0	115	mm	15	180	mm	2
51	mm	0	116	mm	10	181	mm	5
52	mm	5	117	mm	10	182	mm	2
53	mm	15	118	mm	15	183	mm	1
54	mm	20	119	mm	0	184	mm	11
55	mm	20	120	mm	10	185	mm	18
56	mm	20	121	mm	15	186	mm	2
57	mm	20	122	mm	10	187	mm	2
58	mm	45	123	mm	5	188	mm	0
59	mm	15	124	mm	0	189	mm	8
60	mm	10	125	mm	10	190	mm	19
61	mm	10	126	mm	50			
62	mm	10	127	mm	50			
63	mm	0	128	mm	10			
64	mm	40	129	mm	15			
65	mm	0	130	mm	10			

在不考虑其他干扰因素的前提下,采用高精度 RTK 实时差分定位模式的无人机,其飞行表演的最小安全间距主要由两大因素决定:一是无人机导航定位系统中 RTK 模块的定位精度上限;二是无人机自身的动力学尺寸(具体包含机身轴距与螺旋桨旋转平面直径)。以 DMD-M400W-V4 无人机为例,其螺旋桨旋转平面直径为 510 mm。结合 RTK 定位误差圆(半径 0.05 m)进行综合测算,无人机安全表演的理论最小间距为 1.51 m。建议在 RTK 定位模式下执行飞行表演时,无人机的最小安全间距需大于 1.5 m。

当无人机集群表演过程中通信受到干扰,导致差分基站广播信号出现丢包时,集群内的无人机将脱离正常 RTK 定位状态,进入 RTK 浮动解模式。此时无人机



的定位误差范围会扩大,具体表现为以理论定位点为圆心、半径为 1.5 m 的圆形区域。为确保无人机在进入 RTK 浮动解模式时不发生碰撞,经测算,无人机安全表演的理论最小间距为 3.54 m。为进一步提升安全冗余,建议在实际执行时,需将该场景下无人机间的最小安全间距设定为大于 4 m。

综上所述,在只考虑导航定位精度、不考虑其他干扰因素的前提下,无人机集群飞行表演的最小间距可明确如下

- (1)采用普通 GPS 定位的集群无人机,飞行最小间距建议大于 6 m。
- (2)采用 GPS/RTK 定位,但不具备 RTK 差分广播多链路备份的集群无人机,飞行最小间距建议大于 4 m。
- (3)采用 GPS/RTK 定位,且具备 RTK 差分广播多链路备份的集群无人机,飞行最小间距建议大于 1.5 m。

11.2 飞行间距与飞行速度

大漠大的 DMD - M400W - V3 无人机额定的最大飞行表演速度为 8 m/s, DMD - M400W - V4 无人机额定的最大飞行表演速度为 10 m/s。这一速度差异主要由以下几个因素共同决定。

- (1)无人机的动力学特征参数,包括机身质量、转动惯量、螺旋桨动力、空气阻力及适配的海拔高度等。
- (2)飞控硬件性能,如传感器的精度、传感器的温漂特性、中央处理器的数据处理速度。
- (3)飞行控制算法的优化程度。类似于“加速度大且制动灵活的汽车”,设计优良的无人机具有更加出色的操纵性,因此在相同的飞行间距条件下,可维持更高的飞行表演速度。

此外,在实际飞行表演中,仍有多重因素会限制或影响安全飞行的最大速度。例如,当表演现场风速过大时,不仅会导致无人机空气阻力急剧变化,改变其动力学特征参数,还会延长飞行控制的调整时间、降低调整响应速度。又如,当环境温度过高或过低时,会直接影响传感器精度,进而扩大导航定位的误差范围,间接制约飞行速度上限。

因此,在特殊场景下,需灵活调整无人机表演的飞行速度或间距,以确保飞行表演的安全与稳定。比如在高海拔地区表演时,空气稀薄会导致螺旋桨空气动力急剧下降,无人机的加速、减速、转向响应速度会明显变慢,此时应适当增加飞行间

距,给每架无人机预留更大的容错空间,这样,即使出现小幅的姿态漂移或响应延迟,也不会发生碰撞。再比如,当现场风速增大时,无人机容易出现小幅的位置漂移,此时也可以适当增加无人机的飞行间距,抵消无人机飞行稳定性下降所造成的影响。



11.3 间距、速度与空气动力学要素

首先需明确空气阻力的动力学概念,其核心计算公式为

$$F = \frac{1}{2}C\rho SV^2$$

式中: C 为空气阻力系数,通常通过实验获取,与无人机的特征迎风面积、机体表面光滑度及整体形状有关; ρ 为空气密度,主要受气温与海拔的影响,海拔越高、温度越低,空气密度越小; S 为无人机迎风面积; V 为无人机与空气的相对运动速度。

由上述公式可得出关键结论:在正常飞行状态下,空气阻力大小与空气阻力系数(C)、迎风面积(S)成正比,与飞行速度(V)的二次方成正比。当无人机处于小间距(如间距小于 2 m)且密集阵列的飞行场景时,集群内各无人机之间会相互产生空气扰动,这种扰动会为无人机附加额外空气阻力,导致其动力学特征参数发生显著改变——最直接的表现是锂电池耗电量和无人机能耗大幅增加。结合“阻力功率损耗=阻力×速度”的关系式可进一步推导:由于空气阻力与速度二次方成正比,则阻力功率损耗(即单位时间耗电量)与速度的三次方成正比,这意味着飞行速度的小幅提升,会引发锂电池耗电量的大幅增长。

因此,在低温环境下表演时,需特别强调“降低飞行速度”或“加大无人机间距”:前者可通过减少速度的三次方关联的能耗,直接延长电池续航;后者能规避密集阵列的附加空气阻力,间接降低耗电量。这一方法已在多次低温飞行表演实践中得到验证,可有效兼顾飞行时长与飞行安全。



第 12 章

电池/电源管理与飞行安全

无人机锂电池及电源设备若使用不当,则极易引发设备故障,严重时可能造成财产损失甚至人身伤害。实行严格规范的电池与电源管理,是保障无人机集群飞行表演安全的关键。因此,大漠大要求仓库责任人与飞行项目负责人共同承担电池/电源管理工作,并对无人机锂电池及电源设备的使用、储存运输、维护保养、废弃处理等制定了明确且严格的操作规定(注:以下规定中对于温度、电压、时间、次数等具体数据的要求,均以大漠大 V4 无人机集群系统的无人机电池和移动电源为例)。

12.1 使用管理

1. 无人机锂电池使用规定

严禁私自拆卸和更换无人机的内置电池,否则可能引发无人机故障。严禁以任何方式拆解电池,或用尖利物体刺破机身外壳接触到电池,否则可能导致电池着火甚至爆炸。若电池出现故障,则需将无人机整机返厂维修。

严禁将电池投入火中或放入微波炉、压力锅等设备中,避免引发电池燃烧和爆炸。

电池内部的液体具有强腐蚀性,若发生漏液,则需立即远离漏液电池。若内部液体溅射到皮肤或眼睛,则应第一时间用清水冲洗干净,并立即就医处理。

严禁将无人机电池浸入水中或弄湿,严禁在雨中或长时间在潮湿环境下执行飞行表演任务。电池内部在接触水分后可能发生分解反应,进而引发自燃甚至

爆炸。

严禁用导线或其他金属物体接触无人机充电接口的正极和负极,防止造成短路,引发电池故障或电池起火等安全事故。电池在充电时严禁反接无人机充电接口的正极和负极,反接会导致电池异常充电,可能引发电池过热、起火或爆炸。

若无人机或飞机箱机槽的充电接口处存在污物,则需用干布擦拭干净,否则会导致接触不良,造成能量损耗或无法正常充电。

电池正常电压范围为 14.4~16.8 V。飞行前需通过地面站检测电池电压和电芯压差,严禁使用电压超出正常范围或压差大于 0.03 V 的电池执行飞行任务。若电芯压差大于 0.03 V,则需先将电池充满电再静置一夜,即可自动平衡压差。若电芯压差大于 0.15 V,则表明电池已严重损坏,严禁对该电池进行充电操作。

若无人机电池出现低电量报警,则应立即停止飞行。低电量状态下继续飞行可能造成电池损坏或者引发坠机等飞行事故。

无人机电池放电需要在 $-10\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度范围内进行,充电需要在 $0\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度范围内进行。若放电温度高于 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或充电温度高于 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,则可能引发电池着火、爆炸。若放电温度低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,电池性能则将严重衰减。严禁将无人机电池置于阳光直射环境,或放入温度可能高于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的密闭车厢内,避免高温损坏电池。

在极寒环境(低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,严禁执行飞行表演。在低温环境($-20\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)下使用无人机时,需采取保暖措施对电池进行预热,确保电池温度升至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,并在正式表演前,让无人机在地面将螺旋桨低速空转 $1\sim 2\text{ min}$,进一步为电池预热,避免飞行时电池瞬时供电不足。

2. 移动电源使用规定

严禁使用非原厂提供的移动电源为无人机充电或使用非原装充电器为移动电源充电,否则可能引发飞行故障。

严禁将移动电源投入火中或放入微波炉、压力锅等设备中,严禁以任何方式拆解移动电源,或用尖利物体刺破移动电源外壳,避免引发电源燃烧和爆炸。

移动电源内部液体具有强腐蚀性,若发生漏液,则应立即远离漏液电源。若液体溅射到皮肤或眼睛,则应第一时间用清水冲洗干净,并立即就医处理。

严禁在雨中或长时间在潮湿环境下使用移动电源,严禁让移动电源接触任何液体。电源内部接触水分后可能发生分解反应,进而引发自燃甚至爆炸。严禁在强静电或强磁场环境中使用移动电源,此类环境会导致电源保护板失灵,进而造成



充电失败。

在使用移动电源时,遵循“先充先用”原则。在使用前先检查移动电源外观,严禁使用鼓包、漏液、变形或破损的移动电源。严禁在移动电源上放置重物,防止其受压损坏。严禁用导线或其他金属物体接触电源的正、负极,防止造成短路,引发电源故障或安全事故。

在将移动电源插入飞机箱电源仓或将其从电源仓拔出前,需要确保移动电源指示灯处于关闭状态,确保充电接口处无破损、变形和进水痕迹。若充电接口处存在污物,则需要用干布擦拭干净,否则会导致接触不良,造成能量损耗或无法正常充电。禁止在雨中拔插移动电源,否则可能损坏充电接口或因进水导致接口短路。

移动电源的正常电压范围为 16.8~25.2 V,可通过地面站检测移动电源的电压和电芯压差。若电压超出正常范围,则须严禁使用该移动电源进行充、放电操作。若电芯压差大于 0.3 V,则应将该移动电源充满电再静置一夜,即可自动平衡压差。

移动电源的放电需在 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度范围内进行,充电需要在 $0\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度范围内进行,其中 $22\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为最佳充电温度,该温度区间可大幅提升充电效率。若放电温度高于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或充电温度高于 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,则可能引发移动电源着火、爆炸;若放电温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,则移动电源性能将严重衰减。严禁将移动电源置于阳光直射环境,或放入温度可能高于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的密闭车厢内,避免高温损坏电源。

移动电源在充电时,必须使用 220 V 10 A 规格的已通过中国强制认证(China Compulsory Certification, CCC)的电源插座。建议选用符合标准的三口八孔插排,每个插排最多可同时连接四个充电器,且单个充电器仅能为一个移动电源充电,单个插排的总功率不得超过 2.5 kW。

在移动电源充电期间,充电器和移动电源底部需铺设原厂指定的防火毯,设备周围严禁放置易燃、可燃物品,且充电过程中必须安排人员现场看管,做好应急准备以防意外发生。移动电源充满后,需要检查并确认其电压正常。人员离开前务必断开充电器电源,并将移动电源放入专用的移动电源箱中。

12.2 储存运输管理

1. 电池/电源储存要求

严禁在热源、火源、阳光直射区域、密闭车厢内以及易燃易爆品或危险品周边存放设备。严禁将电池及移动电源与眼镜、手表、金属饰品等金属物体一同储存,



防止金属物体接触电源正、负极造成短路。

存储移动电源的仓库应安装二级防火门,配备烟雾报警器,并配置石棉毯、火钳、消防沙、灭火器等灭火器材。仓库应实行 24 h 值班制度,仓管人员需要具备较强的消防意识,定期参与灭火器使用、应急疏散等消防演练,提升其应急处置能力。

存储环境内需要配备良好的排风系统和湿度调节系统,确保温度和湿度稳定且通风良好。无人机电池及移动电源的最佳存储温度为 15~30 ℃,严禁将其存储在温度超过 45 ℃或低于-5 ℃的环境中。存储环境应配备良好的排风系统,确保空气流通、温度稳定。存储环境还应保持干燥,并具备湿度控制能力,避免设备长时间处于极端湿度(相对湿度高于 95%或低于 40%)环境。

移动电源应存储在专用的移动电源箱内,避免设备损坏或安全隐患。当临时存放移动电源时,禁止将其堆叠放置。

对电池/电源的充放电情况分门别类标注日期,以便于识别储存过久的电池电源,同时明确各批次电池/电源的保养周期。

为有效延长电池电源使用寿命,若无人机电池超过 7 天不使用,则需要先放电至 14.8~15.4 V 再进行存放;若移动电源超过 7 天不使用,则需要先放电至 22.2~23.1 V 再进行存放。当无人机电池超过 1 天不使用时,会自动进入休眠模式。严禁将电池及移动电源在彻底放电后长时间存储,避免其因过度放电进入不可逆损伤状态,导致电芯损坏而无法正常使用。

2. 电池/电源运输要求

在运输移动电源时应使用专用的移动电源箱,并做好防撞填充措施(如使用缓冲泡沫、气泡膜等),确保运输过程中移动电源不受外力撞击。严禁运输存在破损的移动电源,且待运输的移动电源的电量不得高于 30%,以降低移动电源在运输过程中的安全风险。

严禁将电池及移动电源与眼镜、手表、金属饰品等金属物体一同运输,防止金属物体接触电源正、负极造成短路。

12.3 维护保养管理

在每次飞行表演结束后,应使用干净软布清洁无人机和移动电源外壳,去除灰尘和污渍,尤其要清理所有充电接口处的灰尘、污渍和水珠。严禁使用酒精或其他可燃剂清洁电池和移动电源。



在设备正常使用的情况下,为确保无人机及移动电源运行时可以达到最佳状态,同时保障飞行安全,当设备充、放电循环次数达到 50 次或未使用时长达到 3 个月时,应对无人机的电池及移动电源进行维护保养。具体操作流程如下。

1. 检查电池和移动电源外观

若电池和移动电源外观存在明显破损、鼓包或漏液现象(见图 12-1),则应立即停止使用并更换电池和移动电源。



图 12-1 移动电源外观损坏

2. 检查无人机电池循环次数

若无人机电池的循环次数在 0~150 次,则该无人机可以按照正常流程表演。若循环次数在 151~220 次,则需要做好标记,该无人机表演时长应在正常表演时间(15 min)的基础上减去 3 min。若循环次数达到 221 次,则需要做好标记,该无人机只能用于测试,不可用于正式飞行表演。若循环次数达到 300 次,则不建议继续使用。

3. 将移动电源放入飞机箱给无人机充电

检查移动电源是否能正常充电,检查无人机电池的压差是否小于 0.03 V,移动电源的压差是否小于 0.3 V。若电池及移动电源压差异常,且在进行两次完整充、放电操作后仍无法恢复正常,则应立即停止使用。

4. 对无人机电池和移动电源执行充、放电操作

对无人机电池和移动电源执行一次完整的充、放电操作。



12.4 废弃处置管理

1. 电池/电源损坏判定标准

- (1)外观判定:外观出现明显鼓胀、外壳破损、液体泄漏或结构变形现象。
- (2)电压判定:非高压电池的单体电芯电压不低于 4.2 V 或低于 2.8 V,或电芯间压差高于 0.15 V。
- (3)内阻判定:利用专用设备检测,若电源内阻为无穷大(无法检测出数值),或内阻达到初始内阻的 3 倍及以上,则已损坏。
- (4)容量判定:以 1C 倍率连续放电两次,每次放电容量均低于电源标称容量的 70%。
- (5)充电异常判定:在相同充电条件下,连续三次充电过程中均出现电压低于设定的低电阈值。

2. 电池/电源废弃处置规定

符合以上任一标准的电池或移动电源,可判定为损坏。已判定为损坏的电池电源应立即停止使用,并按以下流程处理:废弃电池及电源需要先彻底放电,再放入指定的电池回收箱;电池属于危险化学品,严禁投入普通生活垃圾箱,在处置时必须严格遵循当地关于电池回收与弃置的法律法规;当电池/电源因接口损坏无法完成彻底放电时,不得将其直接放入电池回收箱,需要联系专业的电池回收公司对其进行回收处理。

12.5 应急管理

1. 电池/电源起火应急处置流程

电池或移动电源在充电状态发生起火时,首先应切断设备电源,随后用石棉手套或火钳迅速将燃烧的电池或移动电源转移至空旷地面或消防沙桶中,避免火势蔓延至其他设备。然后使用针对电池火灾的 D 类灭火器或水基型灭火器对准火焰根部持续喷射,直至明火熄灭。若无灭火器,则使用石棉毯完全盖住地面上燃烧的电池或移动电源,再将消防沙掩埋至石棉毯上,通过多层隔绝空气的方式,使火苗完全熄灭。



2. 灭火注意事项

石棉手套、石棉毯、灭火器等消防器材需要提前存放于充电区域内,便于快速取用。

若电池或移动电源起火,则应使用 D 类灭火器(金属火灾专用)或水基型灭火器(需要标注“适用于电池火灾”)灭火,此类介质能覆盖电池表面隔绝氧气,同时可缓慢降温,避免复燃。

不要直接使用干粉灭火器和二氧化碳灭火器灭火。干粉对锂电池及周边设备有极大的腐蚀作用,且会污染现场空间。此外,普通干粉灭火器虽能暂时压制明火,但无法有效冷却电池内部,极易复燃。二氧化碳灭火器虽无空间污染与设备腐蚀问题,但仅能对火苗起到瞬间抑制作用,无法彻底灭火,且可能导致电池骤冷开裂,引发电解液泄漏。

灭火人员应尽量佩戴防毒面具或医用口罩,避免吸入电池燃烧所释放的一氧化碳、氟化氢等有毒气体。



第 13 章

维护保养与飞行安全

对设备进行维护保养可以延长设备的使用寿命、提高设备的安全性和可靠性，以确保无人机表演顺利进行。在每次飞行表演前后，都应对设备进行维护保养。此外，应定期检查所有设备及重要部件，确认其外观无破损、功能运行正常。在设备遭遇恶劣天气(如暴雨、沙尘、低温等)或外物撞击等特殊情况后，还需要实行额外的维护保养措施。

13.1 飞行前维护

常规的飞行前维护能够排查出大多数可直接观察到的设备问题，例如，螺旋桨残缺/破损、电机座松动移位、灯罩开裂、机身保护罩破损等。飞行前的维护操作较为简单，包括设备检查(见表 13-1)与简单零件更换，不涉及复杂组合件的拆解更换。通过这些操作，维护人员可提前发现并排除潜在隐患，防止无人机在飞行中出现功能性故障，确保其在飞行表演前达到预设的安全运行状态，为集群飞行的稳定性与安全性奠定基础。

表 13-1 飞行前检查表

检查项	预期结果
网络设备 与差分设备	(1)电量充足； (2)指示灯显示正常； (3)设备连接与调试完成后，无人机可以进入差分固定解状态，可以在地面站正常开启差分信号转发



续表

检查项	预期结果
无人机	(1) 无人机数量、摆放位置和机头朝向正确； (2) 机身所有螺丝紧固，保护罩、机壳、螺旋桨、降落伞上盖等部件固定牢靠； (3) 桨叶不存在弯折、破损、裂缝(含细微裂纹)等损伤； (4) 启动电动机，不存在异响； (5) 可以正常进行遥控器对频； (6) 指示灯显示正常； (7) 电量充足
地面站	(1) 已用警戒带等围蔽地面站电脑，防止无关人员靠近； (2) 无人机和移动电源可以正常上线地面站(若有设备存在异常，则进行替换或删除)； (3) 地面站主界面无报警和异常提醒
雨布	外观无破损
其他设备	电量充足，功能完好

13.2 飞行后维护

在每次飞行表演结束后，飞行团队都会对设备开展飞行后维护，包括设备清洁、设备电压及电量检查和充、放电功能检查，并将故障无人机的飞行日志回传给技术支持中心进行故障诊断。飞行后维护图如图 13-1 所示。



图 13-1 飞行后维护图



13.3 定期维护

为确保无人机持续处于最佳运行状态并排除安全隐患,大漠大明确规定,当无人机连续飞行累计时长超过 50 h 或累计飞行周期达到 30 天时,必须执行一次定期维护,对设备进行清洁、测试和检查,设备预期维护结果见表 13-2。

表 13-2 设备预期维护结果

检查项	预期维护结果
无人机外观	(1)机身编号、文字、二维码等标识清晰可见,无明显脏污; (2)机身所有螺丝紧固,保护罩、机壳、螺旋桨、降落伞上盖等部件固定牢靠; (3)机身结构无裂纹、无破损; (4)散热孔正常通气,无破损; (5)无人机充电接口完整且无破损,无明显脏污
无人机螺旋桨	(1)桨叶不存在弯折、破损、裂缝(含细微裂纹)等损伤; (2)启动无人机电动机并让无人机停留在地面,在无人机 1 m 以外的区域观察螺旋桨,各螺旋桨转动过程中未出现“双层虚影”(即“双桨”现象)
无人机电动机	(1)电动机转子无松动; (2)在不安装螺旋桨的前提下启动电动机,其不存在异响,电动机转子边缘及电机轴在转动过程中不存在偏心晃动,且电动机整体振动幅度较小; (3)电动机壳下方的缝隙间距均匀(说明电机壳未变形); (4)电机下方的螺丝紧固、无松动,电动机周边的塑料部件无裂缝、无磨损痕迹
无人机传感器	(1)成功校准无人机磁罗盘、加速度计和电调; (2)遥控器可以正常操控无人机; (3)无人机正常上线地面站,地面站没有无人机相关的报警,地面站显示的无人机高度和实际高度之差不超过 0.1 m
无人机指示灯和表演灯	(1)无人机指示灯正常工作; (2)无人机在连接地面站后,控制其亮红灯、蓝灯以及绿灯,表演灯可以精准响应指令,且颜色显示准确、无偏差



续表

检查项	预期维护结果
飞机箱	(1)箱体无破损、裂缝或变形,表面无明显脏污; (2)箱口边缘互相吻合,搭扣可以正常扣住和打开; (3)飞机箱充电接口完整无破损,无明显脏污; (4)移动电源可以通过飞机箱给无人机正常充电
手柄遥控器	(1)外壳无破损、裂缝或变形,表面无明显脏污; (2)飞行模式拨键正常、自返键正常、油门锁正常; (3)遥控器可以正常对频; (4)手柄遥控器可以正常遥控无人机,且电量正常
移动电源	(1)可以正常开/关机; (2)移动电源数码管不显示错误提示码; (3)可以正常上线地面站,地面站没有移动电源相关的报警; (4)移动电源可以通过飞机箱给无人机正常充电
移动电源充电器	(1)接口及外表面无老化及破损迹象; (2)充电器可以为移动电源正常充电
移动电源箱	(1)箱体无破损、无裂缝,表面无明显脏污; (2)箱口边缘互相吻合,搭扣可以正常扣住和打开
地面站计算机	(1)电源适配器可以正常为计算机充电; (2)计算机可以正常开机和使用; (3)鼠标可以正常使用
地面站软件	(1)地面站可以正常启动; (2)无人机和移动电源可以正常上线; (3)可以正常开启差分转发,无报错提醒
无线接入点 (AP)	(1)可以正常开机,指示灯显示正常; (2)无人机和移动电源可以正常上线地面站
AP 三角架	(1)外观结构完整; (2)支架功能正常,强度足够,伸缩顺滑
交换机	(1)指示灯显示正常; (2)无人机和移动电源可以正常上线地面站
网线	外观完整无破损,水晶头正常可用



续表

检查项	预期维护结果
基站	(1) 按键功能正常且无卡键现象； (2) 可以正常开机，指示灯和状态灯显示正常； (3) 无人机在上线地面站后，开启差分转发，差分转发速率稳定不低于 500 B/S 至少 30 min
基站三角架	(1) 外观结构完整； (2) 支架功能正常，强度足够，收缩顺滑
基站三角架基座	(1) 外观结构完整； (2) 支架功能正常，强度足够，收缩顺滑
蘑菇头天线	(1) 外观完整无破损； (2) 配合其他设备使用时功能正常
基站定制线	(1) 外观完整无破损，表面干净； (2) 连接设备后可以正常传输数据
电台	(1) 按键功能正常且无卡键现象； (2) 可以正常开机，指示灯和状态灯显示正常； (3) 无人机在上线地面站后，至少维持差分固定解状态 30 min； (4) 当无人机距地面高度大于 300 m 时，依然稳定处于差分固定解状态，地面站持续显示差分/电台信号质量好
电台天线	(1) 外观完整无破损，表面干净； (2) 内螺 SMA 内针正常； (3) 无人机飞行过程中差分信号稳定
电台三脚架	(1) 外观结构完整； (2) 支架功能正常，强度足够，收缩顺滑
频谱仪	(1) 可以正常开机，指示灯显示正常； (2) 按键功能正常且无卡键现象
对讲机	(1) 可以正常开机，显示清晰； (2) 按键功能正常且无卡键现象
风速仪	(1) 可以正常开机，显示清晰； (2) 按键功能正常且无卡键现象
雨布	(1) 外观完整无破损、无老化现象，具备防水能力； (2) 松紧带可正常使用



13.4 特种维护

若无人机遇到以下特殊情况,则需要在飞行结束后进行特种维护:在飞行时剧烈颠簸,采用不恰当方式着陆或着陆动作猛烈的情况;高速飞行中因外物冲击、碰撞导致损伤的情况;因潮湿或其他因素造成部件腐蚀;遭遇突发大雨等异常天气导致机身进水的情况;在多灰尘、砂砾等恶劣环境中飞行的情况。特种维护的具体步骤如下。

(1)若无人机及配套设备进水,则首先应对设备断电,其次使用吹风机将水分吹出,然后在干燥环境下静置至少1天或在开启除湿模式的空调房内静置至少12 h,直至完全没有水分残留。若无人机及配套设备进尘,则用吹风机将灰尘吹出。

(2)检查无人机外观是否有损伤。若无法修复,则联系技术支持人员进行售后处理。

(3)检查电动机是否有灰尘等异物附着。若有,则用吹风机清理干净。

(4)在以上问题都已解决的情况下,进行单机测试。

1)将无人机切换至姿态模式,用大舵量飞行检测无人机各项基础性能是否完好。

2)将无人机切换至定点模式,操控无人机向各个方向飞行,检查飞行状态是否稳定。

3)让无人机在空中悬停,在地面站操作无人机返航,检查无人机是否降落在起飞位置,以检验其返航功能及定位精度。

(5)在单机测试通过后,进行集群测试,让无人机进行极限剧本飞行。若集群测试通过,则可继续用于飞行表演。



第 14 章

飞行日志管理与飞行安全

集群飞行表演日志包含无人机日志和地面站日志。无人机日志记录无人机的飞行状态以及各传感器的数据,自动存储在无人机黑匣子内;地面站日志记录地面站操作员的操作步骤以及集群飞行的整体状态,自动存储在地面站电脑。

在飞行任务执行过程中,仅通过无人机外观无法判断其是否运行正常,且仅依据无人机异常现象也难以精准定位故障部件。此时需要结合集群飞行表演日志,核查无人机各项运行参数是否达标、飞行环境是否满足安全条件。因此,飞行日志的管理对集群飞行的安全至关重要。飞行日志主要在以下场合使用。

(1)环境检测:对于环境复杂的场地,可使用单架无人机进行飞行测试,并通过分析飞行日志,判断场地是否适合开展飞行表演。

(2)故障诊断:对于飞行表演过程中出现问题的无人机,可结合日志分析故障原因,快速锁定问题关键点,便于后续对无人机进行维修。

(3)迭代升级:根据飞行日志体现的设备软/硬件问题,进行硬件和软件版本升级。

14.1 环境检测

无人机集群飞行表演需要大量通信设备协同工作,但此类设备质量与体积较大,在勘测飞行场地时不便于携带至现场。因此,需要通过单架无人机执行环境监测飞行任务,并结合飞行日志数据,确认当前场地是否满足集群飞行条件。在环境监测过程中,若发现飞行场地存在不符合飞行要求的情况,操作人员则需立即暂停



飞行计划,并依据日志中记录的具体数据(如信号强度、风速、卫星接收数量等)制定针对性改进方案,方案包括调整飞行表演时间、更换无干扰的飞行场地等。以下为大漠大飞行表演场地勘测的飞行日志分析实例。

1. 收星环境检测

为确保飞行安全,大漠大明确要求 DMD - M400W - V4 无人机飞行的实际卫星接收数量应大于 30 颗。以大漠大 2025 年某项目场地勘测时单架无人机的飞行日志为例(见图 14 - 1):在日志分析软件中勾选“GPS0>snum”选项后,图中横坐标代表日志数据记录条数,纵坐标代表有效收星数量。从图中数据可清晰看出,在整个飞行过程中,无人机实际收星数量均稳定高于 30 颗,完全满足集群飞行的卫星接收环境要求。

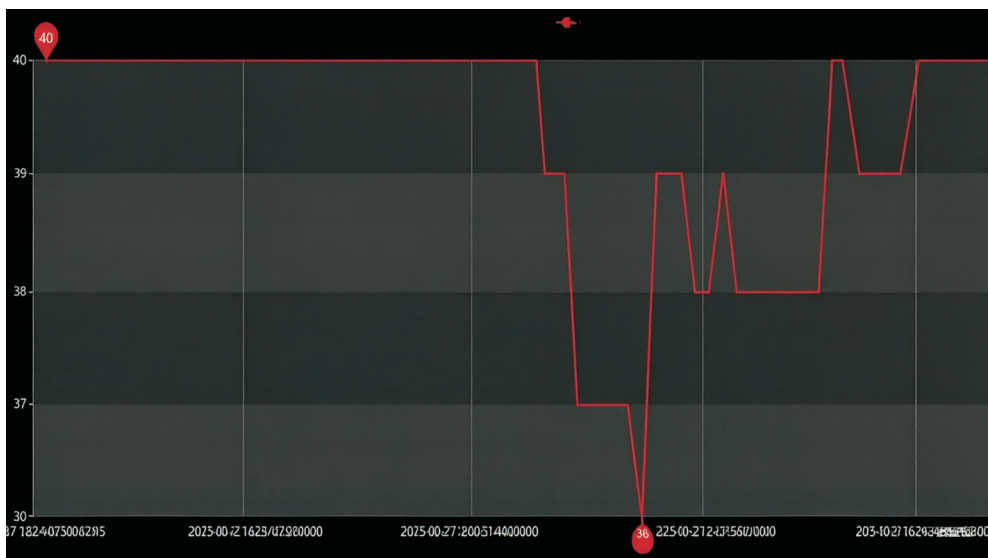


图 14 - 1 无人机勘测日志“GPS0>snum”选项

2. 卫星信号干扰检测

为避免卫星信号干扰影响无人机集群飞行的稳定性与安全性,在飞行场地勘测时,需在飞行区域周边选取 8 个角落点位,进行卫星信号干扰检测。以大漠大 2025 年某项目场地勘测时单架无人机的飞行日志为例(见图 14 - 2):在日志分析软件中勾选“SIG0>jam”选项,图中横坐标代表日志数据记录条数,纵坐标代表信号干扰值。经反复测试验证,当该监测数值 ≥ 255 时,表明场地存在较强的卫星信

号干扰;而从图 14-2 的数据可清晰看出,本次勘测中无人机监测数值均未达到干扰阈值,即飞行区域未受到明显的信号干扰。

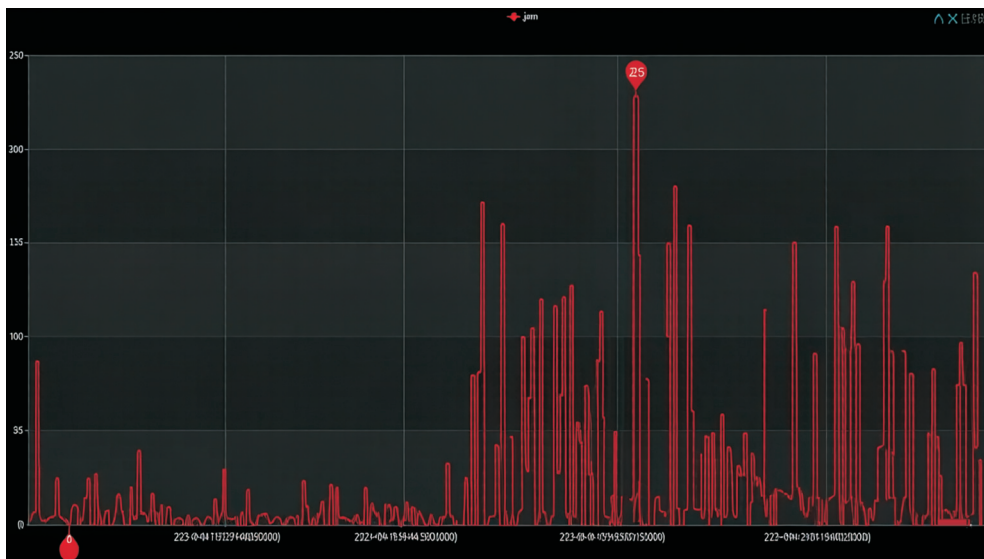


图 14-2 无人机勘测日志“SIG0>jam”选项

14.2 故障诊断

无人机集群飞行的核心安全准则之一是“拒绝异常无人机升空”,仔细排查和处理每一架异常无人机存在的问题,是大漠大保障飞行安全的关键方法。在集群飞行场景中,单架无人机的异常可能引发连锁反应,对整体飞行表演的安全与稳定造成重大影响,因此,大漠大制定了一系列严格的故障诊断管控措施。

首先,系统会实时监测无人机的核心运行参数(如电池电量、GPS 搜星数量、差分信号状态等),一旦参数超出安全阈值或出现异常波动,系统将立即触发报警机制,通知现场相关人员处理。其次,针对已触发报警的异常无人机,大漠大会组织专业技术团队开展全面故障排查,确保精准定位故障点,同时借助先进的故障诊断设备与技术手段,提升排查效率与准确性。此外,为了使集群飞行表演更加规范与安全,大漠大专门设立技术支持中心,并构建了标准化的集群飞行故障反馈流程(流程示意图见图 14-3)。流程中每一环节都有专人负责,对每一架异常无人机的故障现象、排查过程、处理结果进行全程记录,并持续追踪闭环情况,确保所有问题



均得到妥善解决。其中,通过无人机日志或地面站日志进行故障诊断的具体方法如下。

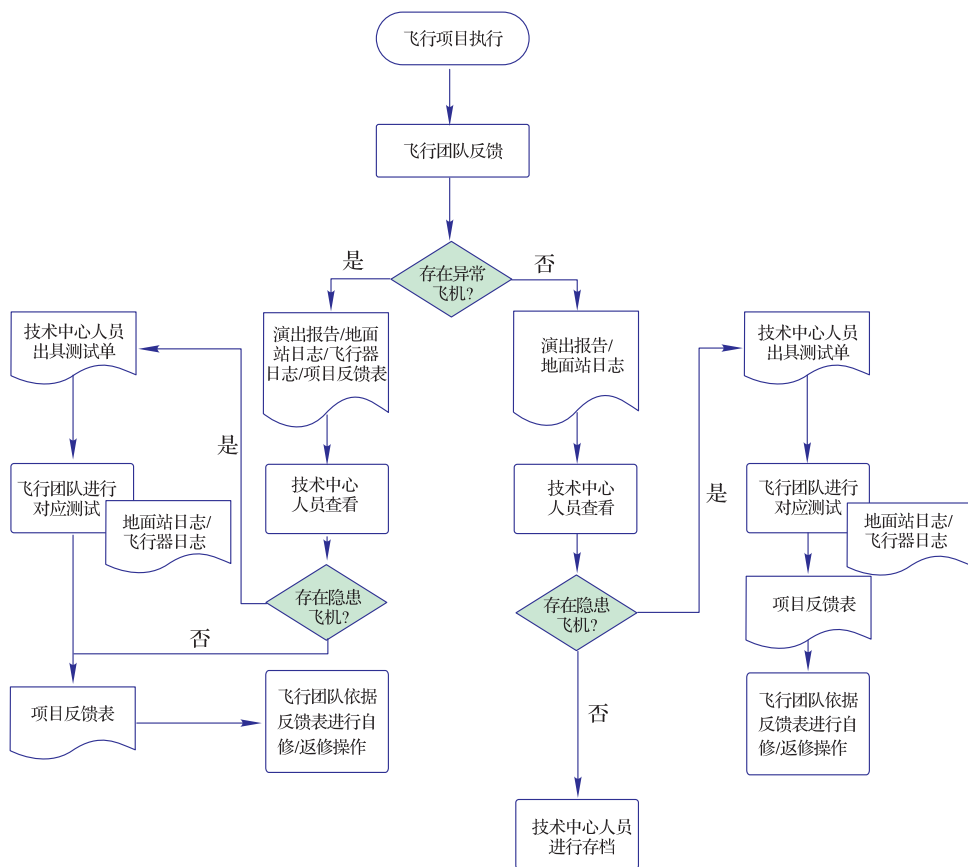


图 14-3 集群飞行故障反馈流程示意图

1. 通过无人机日志诊断无人机故障

无人机飞行日志会完整记录从电动机解锁到电动机上锁的全飞行时段内,无人机的实时飞行状态(如飞行姿态、速度、高度)及各传感器(如 GPS、气压计、磁罗盘)的运行数据。通过分析这些日志数据,可精准诊断无人机异常的具体原因。主要有以下两种日志分析方式。

(1)直接在日志分析软件中导入无人机的 LOG 文件,软件会自动对日志数据进行解析,并输出故障原因。无人机日志解析结果如图 14-4 所示,通过软件解析结果可清晰判断,无人机异常是由 GPS 故障引发的。

(2)手动查看无人机的事件(event,EVT)记录(见图 14-5),该记录包含四纵栏核心信息,从左至右依次代表记录类别、记录时间(以电机解锁时刻为起始点,单位为毫秒)、事件编号、参数值。其中,事件编号与参数值的具体含义可参照图 14-6 的补充说明,该表格同样包含四纵栏,分别对应事件编号、具体事件内容、参数值、对应模式。



图 14-4 无人机日志解析结果

记录类别	记录时间/ms	事件编号	参数值
EVT	2 186 194	38	1
EVT	2 187 895	38	2
EVT	2 187 897	38	2
EVT	2 190 122	36	1
EVT	2 406 751	16	0
EVT	2 410 751	17	0

图 14-5 无人机的 EVT 记录



事件编号	具体事件内容	参数值 (对应的 event 为 4、5)	对应模式
0	解锁请求	0	姿态
1	上锁请求	2	定高
2	解锁成功	干	G
3	上锁成功	5	悬停
4	切模式请求	6	返航
5	切模式成功	9	降落
6	开始记 log		
7	停止记 log		
8	进入电机急停状态		
9	退出电机急停状态		
10	地面站失联		
11	地面站重新连上		
12	故障:地面站失联		
13	故障解除:地面站失联		
14	故障:EKF		
15	故障解除:EKF		
16	遥控器失联		
17	遥控器恢复		
18	故障:遥控器失联		
19	故障解除:遥控器失联		
20	故障:低电		
21	故障解除:低电		
22	故障:lppc 工作异常		
23	故障解除:lppc 工作异常		
24	故障:触发围栏		
25	故障解除:触发围栏		
26	故障:航点无效		
27	故障解除:航点无效		
28	起飞		
29	着陆		
30	烟花或撒花启动		
31	烟花或撒花关闭		
32	IMU 停止工作		
33	气压计停止工作		
34	磁罗盘停止工作		
35	GPS 停止工作		
36	电压监测停止工作		
37	BNO 模块停止工作		
38	航点缓存异常		
39	定时器事件触发		
40	收到地面站开始表演指令		
41	重置航向		
42	延迟解锁指令		
43	摄像头停止工作		
44	故障:too far		
45	故障:位置控制稳定误差		
46	UWB 停止工作		
47	故障:剧本播放失败		
48	故障:起飞失败		
49	收到实时灯光指令		
50	故障:坠落		
51	故障:IMU 异常		
52	故障解除:IMU 异常		

图 14-6 事件编号与对应的参数值



结合无人机记录的事件数据,可对无人机故障或异常情况开展进一步诊断。由于无人机涉及的部件类型繁多,此处不逐一列举,仅以“电池低电”这一常见场景为例进行说明。大漠大飞行表演团队结合无人机动力系统的运行特性,经反复测试与实践验证,最终确定将 DMD - M400W - V4 无人机电池的低电电压阈值设定为 12.8 V。在无人机飞行过程中,若电池电压降至 12.8 V 以下,将自动触发低电返航机制。查看飞行日志,可清晰追溯无人机电池的电压随飞行时间的动态变化过程(见图 14-7),这不仅能直观验证低电返航机制的触发时机是否符合设定,也为后续分析电池续航能力、优化低电判据提供了精准的数据支撑。



图 14-7 无人机电池的电压随飞行时间的动态变化过程

2. 通过地面站日志诊断无人机故障

为高效处置无人机异常情况,大漠大将无人机异常划分为若干类别。在集群飞行过程中,只要无人机出现异常,地面站都会实时触发警报,并同步记录异常发生的时间、参数及具体现象。

针对不同类别的异常,大漠大制定了不同的处理流程与解决方案。例如,对于电池电量低或信号弱等轻度异常,地面站会提醒操作人员及时更换电池或检查信号源,以快速恢复无人机的稳定运行。而对于传感器故障或机械损坏等较为严重的异常,则需要专业技术人员进行深入检测和分析,制定针对性的修复方案,以避免对后续飞行造成安全隐患。通过明确的分类、标准化的处理流程和针对性的解



决方案,大漠大能够高效地解决无人机在飞行表演过程中出现的各种问题,确保了集群飞行的安全性和稳定性。

地面站日志具备自动记录功能,其自地面站软件启动时开始记录,直至地面站软件关闭后停止。日志会完整地记录地面站操作员的操作指令、无人机的异常情况以及异常发生时的无人机位置和具体时间。以文本文件格式打开地面站日志,可查看每架无人机的异常情况和无人机集群飞行的全流程状态。

14.3 迭代升级

在项目执行期间,技术支持中心人员会持续对各项目的演出报告和飞行日志进行存档与梳理。其通过总结过往案例、积累实战经验,不断优化集群飞行表演的呈现质量与运行稳定性。大漠大将每一场飞行表演均视作一次正式的技术检验,针对表演中出现的各类问题,从软件算法优化、硬件设备升级等维度来制定改进方案并落地执行,逐步增强整套集群飞行系统的稳定性。



第 15 章

飞行应急方案与飞行安全

集群飞行作为一项复杂的系统工程,其稳定性保障难度会随着集群中无人机数量的增加呈指数级上升。在整个飞行过程中,任何一个环节出现纰漏都可能导致飞行任务失败,进而造成不可估量的损失。为提升集群飞行的安全与稳定性,大漠大团队从建立安全应急响应机制、配备应急设备及应急人员、规范集群飞行救机操作和开展集群飞行应急演练这四个方面入手,制定了完善的飞行应急方案。

15.1 安全应急响应机制

针对集群表演场景,大漠大构建了七级安全应急响应机制,明确了不同等级险情的处置流程和责任划分,确保在突发情况时能够快速响应、高效处置。

1. 第一级应急处置:杜绝故障无人机升空

在无人机起飞前,地面飞手需要完成全流程预检:检查所有电池电量及性能参数;检查所有无人机螺旋桨、电动机;检查地面站报警和异常提醒;检查飞控系统。若发现故障无人机,集群管理软件则将自动执行替换操作或将其从集群序列中剔除,从源头避免故障设备进入飞行环节。地面保障人员检查无人机如图 15-1 所示。

2. 第二级应急处置:气象超限即时暂停飞行

在表演前和表演过程中,需要持续监测风力、雨量等气象参数。基于 DMD-M400W-V4 无人机集群 8 m/s 的抗风阈值,当实测空中风速超过该值或 24 h 累计雨量大于 10 mm 时,项目总指挥应立即下达飞行暂停指令。待气象条件恢复至安全范围后,才可以重启飞行表演流程。



图 15-1 地面保障人员检查无人机

3. 第三级应急处置:电磁干扰规避与备份启动

采用无线频谱分析仪对地面站通信链路、RTK 定位链路、遥控器信号链路及 GPS 信道实施实时监测。在表演前 30 min,可重新配置信道参数以规避已识别的干扰源。若表演期间突发通信链路干扰,系统则将自动启用无线通信三链路冗余备份,并触发在线/离线软件热切换机制,确保表演进程不受影响。

4. 第四级应急处置:无人机自动返航

当集群内无人机出现触发电子围栏、航点错误或电压过低等异常情况时,飞控系统 will 触发相应告警并启动返航程序。该无人机会自动关闭灯光、退出表演,并自动完成返航着陆。

5. 第五级应急处置:故障无人机手动回收

在前期场地勘测阶段需要规划专用应急降落点,并确保其远离人群密集区。当无人机出现 GPS 信号丢失、传感器失效等故障时,地面飞手可通过手动接管功能将故障设备引导至应急降落点。

6. 第六级应急处置:电子围栏管控与碰撞应急开伞

采用预设电子围栏划定安全飞行区域的方式,强制无人机飞行航线避开人群聚集区。当无人机接近围栏边界时,系统会自动执行返航指令。若发生空中碰撞或其他不可返航的紧急情况,无人机则将在预设高度自动开启降落伞,便于地面人员回收,同时可降低设备损毁程度。



7. 第七级应急处置:全局表演中止与批量回收

当表演过程中出现恶意干扰或大规模无人机异常,且判定已不具备继续表演条件时,可通过地面站执行全局暂停指令,批量选择具备有效定位信号的无人机进行集体返航。然后通过地面站将定位丢失的无人机切换至手动模式,由飞手分组控制降落。此环节需要重点关注周边环境动态,根据现场实际情况灵活调整处置策略。

15.2 应急设备及应急人员

为应对各类特殊情况,在项目执行过程中,应对关键设备进行备份,避免因设备故障导致整体飞行受影响;同时,还需要指定专门的应急响应人员,确保应急指令能够及时传达和执行。

1. 应急设备配置

应急设备配置应遵循分级备份逻辑:无人机和移动电源按执行总量的 3% 进行储备,通信系统则主要执行全链路备份策略(即额外配置一整套)。该备份比例已经过大漠大上千个飞行表演项目的验证,具备实操可行性。应急设备清单及所需备份量见表 15-1。

表 15-1 应急设备清单及所需备份量

设备名称	单位	备份量
DMD M400W-V4 无人机	架	$N \times 0.03$
移动电源	个	$N \times 0.03$
移动电源充电器	个	1
手柄遥控器	个	1
遥控器高频头	个	1



续表

设备名称	单位	备份量
红外遥控器	个	1
AP	个	1
AP 天线	根	1
AP 三脚架	个	1
基站套装	套	1
电台	个	1
电台天线	根	1
风速仪	个	1
手持频谱分析仪	个	1
交换机	套	1
长网线(20 m)	条	1
短网线(50 m)	条	1
地面站计算机	台	1
公牛长线缆插排(50 m)	个	1
公牛短线缆插排(3 m)	个	1
UPS 电源	个	1

注：N 代表执行项目的无人机架次。当计算结果为整数时，直接按该数值配置备份[如在 300 架次任务中，按照无人机备份量计算公式 $N \times 0.03$ ，计算出无人机备份量为 $300 \times 3\% = 9$ (架)]；若结果为非整数，则需要进一取整处理(如在 50 架次任务中，按照无人机备份量计算公式 $N \times 0.03$ ，计算出无人机备份量为 $50 \times 3\% = 1.5$ ，进一取整后为 2，则需要配备 2 架备用无人机)。

2. 应急人员梯队建设

项目团队需要建立关键岗位双岗制：总指挥岗位需要明确指定一名应急替补人员，在总指挥无法履职时立即接替其统筹调度职能；其他操作岗位(如地面站操作员、飞手、空管协调等)均需要配置对应替补人员，确保岗位空缺时所有流程可以无缝衔接。

3. 应急设备全生命周期管理

为确保应急设备时刻处于就绪状态，应执行全流程管控：在设备发货前，应完



成应急设备功能检测；在正式表演前的飞行测试阶段，应将应急设备纳入全系统联调，验证其与主设备的兼容性及切换响应速度；在正式飞行表演过程中，应急设备应与主设备同步完成安装与调试，处于热备状态，确保在突发情况下可迅速切换；在表演结束后，将应急设备分类收纳至专用设备箱，记录其使用状态，并做好相关维护保养。

15.3 集群飞行救机

在集群飞行过程中，统一救机操作流程、明确操作要点，可以提高救机成功率，最大限度减少损失。当无人机出现异常时，常规救机流程为飞手接管异常无人机并将其引导至应急降落点。在实际操作中，尽管无人机集群时刻处于飞手远程监控范围，且无人机持续按预设航线运动，但飞手的操作响应仍可能存在延迟，从而导致其错失最佳救机窗口。对此，大漠大在地面站软件中设置了专用反馈机制，将系统异常数据实时传输至地面站操作员，为飞手救机提供协同支撑。

地面站软件界面下方采用分类可视化方式呈现异常信息，明确标记故障无人机身份证标识号及其异常类别，并同步显示无人机 GPS 接收卫星数量、运动状态及离地高度等关键参数。

在应急救机过程中，地面站操作员与飞手的指令一致性是规避风险的核心前提——矛盾操作可能导致无人机轨迹冲突，显著提升撞机概率。为规范操作流程，大漠大制定了标准化救机方案，当单架无人机出现异常时，需要严格遵循无人机异常情况处理方案(见表 15-2)的操作指引。

表 15-2 无人机异常情况处理方案

无人机异常现象	地面站异常提醒类别	可能原因	处理方案
无人机指示灯红灯快闪	B	电池低电量	无人机自动返航
无人机指示灯红灯快闪	F	触发电子围栏	无人机自动返航
无人机指示灯红灯快闪	W	剧本航点错误	无人机自动返航
无人机指示灯红灯常亮,且无人机下坠	C	空中发生碰撞	飞手使用遥控器将无人机降落到应急降落点(无人机下坠达到一定高度会自动开启降落伞)



续表

无人机异常现象	地面站异常提醒类别	可能原因	处理方案
无人机与航点偏离太远,但不存在晃动	T	空中大风	地面站操作员将无人机切换到返航模式
无人机与航点存在固定距离,但不存在晃动	S	差分信号通信中断	地面站操作员将无人机切换到返航模式
无人机指示灯为绿色或青色	视图同步颜色	定位模块受到轻微干扰	地面站操作员将无人机切换到返航模式
无人机指示灯为蓝色	视图同步颜色	定位模块受到严重干扰	飞手使用遥控器将无人机降落到应急降落点
无人机在空中停止飞行/划圈/自动降落晃动	E	磁罗盘异常	飞手使用遥控器将无人机降落到应急降落点

从人员管控角度,单名飞手的最大监控负载为3 000架无人机。当同一飞手的监控范围内出现多架异常无人机时,飞手需要优先控制异常设备脱离无人机集群,将其引导至安全空域悬停。地面站操作员则依据表15-2的规范,配合飞手完成后续处置。若发生大面积无人机异常(超单组监控阈值或影响了整体集群稳定性),地面站操作员则应立即启动表演暂停程序,并按照预设的应急响应机制执行分级处置。

15.4 集群飞行应急演练

为提升团队在集群飞行表演中处理突发情况的能力,大漠大定期组织飞行团队进行应急方案演练,通过模拟集群飞行时可能出现的各类异常情况,让团队成员熟悉应急处置流程,提升团队的协同配合能力,确保在实际突发情况时能够沉着应对、有效处置。以下列举了大漠大的典型应急演练场景。

1. 飞行表演中突发恶劣天气的应对

2025年,在大漠大的训练场开展了该场景的应急演练,模拟了飞行表演过程

中突发大雨的情况,旨在训练全员快速反应,进行人员对无人机及相关配套设备的防雨保护演练。参与人员包括地面站操作员、无人机飞手及地勤人员,共计100人。

演练当天,一部分人员迅速用防雨布有序遮盖无人机,防止设备受潮,其余人员则将配套设备妥善装入专用防水设备箱,避免设备损坏。此次演练实现了财产零损失,为应对突发恶劣天气积累了宝贵的实践经验。图15-2为在此次演练中,用雨布完成无人机遮盖的照片。



图 15-2 雨布遮盖无人机

2. 集群表演中无人机异常时的规范救机

2024年某月某日,在深圳春茧体育馆测试场地进行了该场景的演练,主要模拟了夜间飞行表演时飞手接管故障无人机的情况。参与人员为全部飞手及地面站操作员,共计30人。

演练过程中,重点训练了飞手和地面站操作员在无人机出现异常情况时的协同配合能力,以规范救机操作。为确保演练质量,公司安排专业人员进行现场监督考核,并对参与人员的救机操作进行打分,以此检验训练效果,提升团队的应急处置技能。图15-3为此次演练中无人机故障时,飞手摇控无人机返回地面的照片。



图 15-3 无人机故障时,飞手摇控无人机返回地面

3. 大规模无人机异常情况下停止演出的操作

2024年,在沈阳冬季测试场地开展了该场景下的应急演练,模拟了当大批无人机出现异常时,通过地面站停止演出的操作流程,涉及的异常情况包括触发电子围栏、差分通信中断、定位模块受干扰等。参与人员为全部飞手及地面站操作员,共计30人。

此次演练让团队成员熟悉了无人机大规模出现异常情况下的应急处置步骤,提升了团队应对此类突发状况的能力。图15-4为大批无人机出现异常时地面站主界面报警区域的照片,图15-5为地面站操作员终止表演后,无人机返航的照片。



图 15-4 地面站主界面报警区域



图 15 - 5 表演终止后无人机返航



第 16 章

飞行场景与飞行安全

随着技术的不断发展和应用场景的不断扩大,无人机集群飞行表演呈现出多样化的飞行特点与安全挑战。以下将围绕文旅表演、大型活动表演和商业广告表演等场景,探讨无人机集群表演的飞行安全。

16.1 文旅表演

无人机文旅表演主要指为促进旅游业和文化传播而设计的无人机表演,通常结合当地文化元素,成为城市名片的一部分。例如,重庆的无人机文旅表演融入了“火锅”“黄葛树”“辣椒”等巴渝文化元素,不仅吸引了大量游客,还实现了城市景观的数字化升级。2024年深圳在国庆期间连续7天的无人机表演也带来了显著的文化效益,周边商圈人流量同比增长117%。

无人机文旅表演多在户外开放空间进行,为应对变化的气候条件,无人机需要具备较强的抗风、防水能力,现场执行人员应特别注意实时风速、温度等环境因素的变化。此外,文旅表演观众众多,安全隔离和现场安保至关重要。飞行团队需要提前规划安全警戒带,部署安保人员,并制定好应急方案、完成应急演练。

在无人机文旅表演实践中,大漠大率先开创了无人机常态化驻场演出的全新形式,在固定地点(如主题乐园、城市地标、特色景区)定期进行无人机集群表演,打破了单次展演的局限。例如,由大漠大提供技术支持的“光影重庆”项目,是目前全球最大规模的无人机集群常态化驻场表演项目,自2025年4月19日开启常态化展演至2025年6月中旬,累计已吸引现场观众超360万人次,线上直播观看达10亿人次,相关图文、短视频的全网总曝光量已突破100亿,并于2026年“两会”(中华人民共



和国全国人民代表大会和中国人民政治协商会议)期间写入政府工作报告。

大漠大的无人机常态化驻场表演采用先进的现代化系统,具有较高的自动化水平和稳定的运营流程。例如,大漠大的第四代“无人机集群表演系统”,无人机从飞机箱中自动起飞,表演后自动返回收纳,并实现回巢自动充电、随时满电备飞,定位精度可达到毫米级。这减少了人工干预,降低了人为错误的风险,大大提高了表演安全性。集群所有无人机均配备有降落伞,在无人机故障或意外坠落的情况下,降落伞会在预设高度自动开启,以保障设备与人员的安全。

在表演前,飞行团队需要向民航部门进行空域报备,并设立电子围栏防止无人机飞出安全区域。由于常态化驻场表演场地固定,空域申请和电子围栏设置通常无需重复进行。此外,飞行团队需要根据常态化表演的间隔情况,制订合理的设备维护计划,包括电池管理、无人机状态检查以及通信设备的测试。依托高效的安全管理流程,在各大驻场表演中,大漠大仅需 1~4 名技术人员和若干地勤志愿者,即可完成 300~5 000 架无人机的表演。

16.2 大型活动表演

大型活动如春晚、吉尼斯、世博会等,通常需要大规模、高精度的无人机表演以提升活动影响力。这类表演具有较高的曝光度,对安全性和稳定性的要求极为严格,须与气象局、无线电管理局、公安部门等紧密配合。

在大型活动的正式表演前通常需经过多次彩排和测试。例如,深圳大漠大在挑战吉尼斯纪录前进行了 3~6 次试飞,解决了通信数据传输相关的关键技术问题,确保了正式表演顺利、圆满进行。

为应对设备故障或信号干扰,大型活动表演通常采用冗余设计,如采用多条通信链路(5G 局域网、电台广播、2.4G)备份、配置应急设备和应急人员等。

表演期间,地面站操作员和飞手实时监控每架无人机的状态,一旦发生异常,则操作无人机完成补位或紧急降落。

16.3 商业广告表演

无人机商业广告表演是为品牌推广或产品发布定制的无人机表演,通常强调创意性和传播效果。无人机集群可以组成品牌标志或产品形状,通过社交媒体传播获得千万级别的曝光量。2019 年,大漠大在印度为宝莱坞电影发布会进行了无



人机表演,开启了商业广告的国际应用。

商业广告需要快速响应客户需求,从设计到部署时间较短。团队需要在保证安全的前提下高效完成场地勘测、空域报备和剧本设计等必要环节。

商业表演多在城市中心或商圈进行,因此需要应对 GPS 信号干扰、电磁干扰等问题。飞行团队通常会提前探测干扰源,并采用自组局域网避免频段冲突。

商业表演注重成本控制,但飞行安全始终是不可动摇的核心底线。大漠大新一代的无人机集群表演系统采用智能收纳箱和自动化充电技术,不仅仅显著降低了人力成本,更从根源上提升了安全可靠。

16.4 特殊飞行场景

无人机特殊飞行表演场景包括超大架次表演、超长时长表演以及混合飞行表演。其中,混合飞行表演包括无人机与烟花、灯光等混合表演,或不同型号的无人机组合飞行完成表演。这些特殊场景不仅需要突破技术极限,也需要应对独特的安全挑战。

在超大架次飞行表演中,万架以上无人机的稳定通信是最大挑战。大漠大通过压缩数据量和升级通信设备,将数据传输时间从 2 h 缩短至 10 min,确保了超大架次表演的可行性。

无人机单次飞行表演时长受电池续航限制,通常在 15~20 min 内。大漠大新一代无人机采用内置电池和机巢式自动快充系统,实现“1 次布场,无限续飞”,解决了超长时间飞行的续航安全问题。在实际飞行表演中,必须对电池的充/放电状态、参数指标等进行严格把控,确保动力系统稳定、可靠。

在混合飞行场景中,无人机可与烟花、彩烟或灯光秀结合。例如,大漠大的烟花机可搭载烟花进行飞行表演,此类项目需要额外注意烟花的存储运输安全和烟花机之间的安全飞行距离,并需要做好观众安全防护措施。如果是不同型号的无人机组合飞行,那么需要结合现场情况提前规划各机型专属摆放区域,且在表演剧本中明确不同机型的摆放区域,并结合机型参数完成任务规划;现场执行人员则需要按照剧本预设,将无人机分类摆放到指定区域,并为其配置对应的飞行参数,以确保飞行任务安全、正确执行。



第 17 章

飞行安全与行业发展

无人机集群飞行表演作为文旅展演、商业宣传、庆典仪式等场景的新兴载体，凭借其震撼的视觉效果、灵活的创意表达，已成为文化与科技融合的重要符号。无人机集群表演市场规模持续扩大，而飞行安全始终是行业发展的关键制约因素——从空域违规飞行引发的空管风险，到设备故障导致的坠机事故，再到人员操作失误造成的财产损失，每一起安全事件不仅会削弱市场信任，更可能触发监管政策收紧，为行业发展蒙上阴影。

事实上，安全与发展并非对立关系。一方面，飞行安全是无人机集群表演行业发展的基础。完善的安全规范能够有效规避风险，减少事故发生率，进而增强品牌方、场地方及公众对无人机集群表演的接受度，为行业发展开辟空间。另一方面，行业发展也推动着安全体系不断升级。随着行业规模扩大，表演场景从空旷场地向复杂城市环境延伸，无人机数量从数百架向数万架突破。在这一过程中，行业对技术创新的需求倒逼安全能力升级，不仅提升了单场表演的安全冗余，也推动了行业安全标准的迭代。

当前，无人机集群表演行业正处于从“野蛮生长”向“规范发展”转型的关键期，《无人机集群飞行表演安全规范》的推出具有重大的现实意义。只有将安全理念深度融入行业发展全流程，才能推动无人机集群表演真正成为文化与科技融合的标杆产业，在合规与创新中迈向更高质量的发展阶段。

作为国内大型无人机集群表演领域的开创者，深圳大漠大智控技术有限公司在安全管理领域树立了行业标杆。依托自主研发的全系列核心产品，大漠大以飞



行表演的高安全性和强稳定性享誉业界。截至 2025 年 10 月,大漠大已在全国超 100 家主题公园与文旅景区开展常态化驻场表演,业务版图覆盖全球超 100 座城市,累计执行飞行架次突破 5 000 万,完美完成飞行表演超两万场,累积观看量超 500 亿。截至 2026 年,大漠大 7 次荣登央视春晚舞台,6 次打破吉尼斯世界纪录,赢得了业界同行的广泛赞誉。这份精彩背后,不仅仅凝聚着大漠大全体员工夜以继日的钻研与付出,离不开各岗位工作人员的全流程紧密协作,更根植于对行业规范的严格遵守与深度践行。



附录

附录 1 大漠大无人机产品介绍

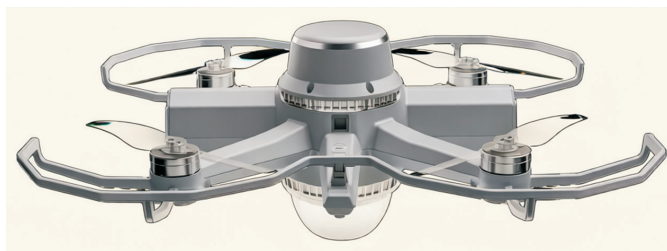


图 1 DMD - M400W - V4 无人机

表 1 DMD - M400W - V4 无人机性能参数

项目	性能参数
无人机尺寸	308 mm×308 mm×124 mm
质量	565 g
机巢容量	30 架
最大通信范围	2 km
表演最大风速	5 级风
最大巡航速度	10 m/s(集群表演速度)
飞行最小间距	1.4 m(极限情况可达 1.2 m)
集群最长表演时间	15 min



续表

项目	性能参数
充电方式	降落归位,即降即充,集中式机巢充电
最大演出灯光功率	24 W
LED 色彩	RGBW 全色域升级
定位方式	(GPS+BDS+GLONASS) & RTK 升级
工作环境温度	-20~50 ℃ (若低于 0 ℃,则需要预热处理)
复飞间隔时长	40~60 min (自动充电,无需更换电池)
安全保障	自动降落伞保护
防水性能	IP54



图 2 DMD - M400W - L3 烟花机

表 2 DMD - M400W - L3 烟花机性能参数

项目	性能参数
无人机尺寸	320 mm×320 mm×115 mm
质量	530 g(不含烟花)
烟花挂载	有(需要单独购买配件,载重约 80 g)
机巢容量(一箱)	10 架
电池安装方式	手动按压式更换电池
电池容量	3 000 mA · h(可拓展至 5 000 mA · h)
最大通信范围	电台:1 km;遥控器:1 km;Wi-Fi:500 m
表演最大风速	5 级风
最大表演速度	10 m/s

续表

项目	性能参数
飞行最小间距	1.4 m(极限情况可达 1.2 m)
集群最长表演时间	空载:15 min;负载 80 g 烟花:8~12 min
最大演出灯光功率	24 W
定位方式	(GPS+BDS+GLONASS)&RTK
工作环境温度	-15~45 ℃(若低于 0 ℃则需要预加热处理)
复飞间隔时长	≥40 min(人工更换电池)
防水性能	IP44

附录 2 大漠大集群飞行表演场景实例

作为全球领先的无人机集群系统设备供应商,深圳大漠大智控技术有限公司始终走在行业前沿。自成立以来,大漠大为全球观众呈现了无数场精彩纷呈的无人机集群飞行表演,收获了广大客户的高度认可,留下了一系列兼具技术突破与艺术价值的经典飞行案例。

2019—2026 年,大漠大 7 次荣登央视春晚,持续刷新春晚无人机表演纪录。2025 年除夕夜,大漠大携 3 000 架无人机闪耀央视春晚重庆分会场(见图 3),另有 2 025 架无人机在无锡的太湖鼋头渚惊艳升空(见图 4),共同为海内外观众打造了一场震撼人心的新春视觉盛宴。



图 3 2025 年春晚重庆分会场舞台记录



图 4 2025 年春晚无锡分会场舞台记录

2020 年 9 月,3 000 多架大漠大无人机同时升空,点亮珠海夜空(见图 5)。此次表演刷新了“最多无人机同时飞行”的吉尼斯世界纪录,以 3 051 架的规模,打破此前由美、俄无人机团队共同保持的 2 200 架无人机同时表演纪录。



图 5 2020 年大漠大无人机刷新吉尼斯世界纪录表演画面

2021年零点时刻,大漠大在深圳湾春茧体育中心海之门打造的无人机表演,随浙江卫视跨年晚会走进千万家庭。当新年钟声划破夜空时,主持人向全球观众隆重推介“世界无人机之都”深圳市南山区。待烟花绽放落幕,无人机集群变换图案,将“每个人都了不起!”的新年金句定格夜空(见图6),为跨年时刻注入别样仪式感。



图6 浙江卫视跨年晚会无人机飞行表演画面

2022年8月4日七夕节,2022架无人机在央视七夕晚会上组成大型集群,共同演绎了“中国式浪漫”。无人机集群在夜空中呼啸而起,伴随着光影的变换,呈现出“诗中韵”“画中游”“礼中意”“乐中情”等具有中国传统文化气息的表演画面。这场表演展现了七夕节的浪漫情怀,为观众带来了视觉盛宴,也得到了央视节目组的充分认可。

2023年9月,“宝可梦中国无人机首秀”在深圳湾体育中心上空启幕(见图8)——大漠大以夜空为幕、1500架无人机为笔,为宝可梦卡牌大师赛深圳站打造了一场专属光影秀。大漠大团队从“媒体形式性价比、观众共鸣打卡、传播裂变”等维度深度构思,通过反复精细化打磨实现创新突破,最终呈现圆满效果。该案例不仅获得了行业大咖的高度认可,更斩获“第九届金场景营销大奖——灯光与景观



类金奖”。



图7 2022年央视七夕晚会无人机飞行表演画面



图8 2023年“宝可梦中国无人机首秀”表演画面

2024年9月,以“天空之城 大有可为”为主题的深圳无人机国庆启幕大秀在深圳湾公园上空华丽绽放(见图9)。10 197架无人机同时升空,不仅以震撼规模为市民游客带来顶级视觉享受,更首创万架无人机表演吉尼斯世界纪录——一举斩获“单台电脑

控制最多无人机同时升空”和“最多无人机组成的空中图案”两项吉尼斯称号。这场表演被外交部副部长向全球推介,彰显了中国科技表演的国际影响力。



图9 2023年深圳“天空之城 大有可能”主题吉尼斯世界纪录无人机飞行表演画面

2024年10月1日—7日晚,为热烈庆祝中华人民共和国成立75周年,大漠大携手深圳市人民政府,在全城掀起一场万架无人机表演狂欢。这场表演结合深圳独特的城市风貌与发展特色,以国际、文化、科技、创新、活力为主题,连续7天在福田、罗湖、龙华、龙岗、大鹏这五个区域接力上演(见图10)。此次活动充分彰显了深圳“文旅+低空+科技”深度融合的独特魅力。



图10 2024年深圳五区国庆节万架无人机飞行表演现场



2024年11月,宝马 MINI COOPER 燃油版震撼上市,大漠大携手品牌方,在新车发布会上开创性采用“多点位动态互动”的演绎形式,为大众带来一场令人瞩目的科技与激情盛宴。大漠大团队在极为紧迫的筹备周期内突破技术限制,以1700架无人机表演“制霸”夜空。在近500辆 MINI COOPER 齐聚的麻涌赛道上,上千架无人机在夜空中铺展出由地面延伸至高空的梦幻赛道(见图11),与场内舞动飞驰的 MINI 车队完美呼应,共同诠释了品牌对速度的执着和对驾驶热爱的坚守,让现场观众沉浸在独有的激情氛围中,为 MINI COOPER 燃油版上市铭刻下难以磨灭的高光时刻。



图11 “宝马 MINI COOPER 燃油版上市发布会”无人机飞行表演画面

2025年2月14日情人节夜晚,维多利亚港夜空化身舞台,迎来香港首个可口可乐无人机表演。在12幕精彩绝伦的光影汇演中,大漠大的600架无人机化身经典瓶装可口可乐(见图12)、鱼蛋烧卖、打边炉、举杯同庆等温馨图案,勾起人们与亲朋好友饮乐相聚的美好往昔。无人机还变幻出“福”“绽放祝福年在一起”等美好字句,为远在他乡的祖国同胞们送上真挚祝福,将活动氛围推向高潮。

2025年元宵节的夜晚,在大漠大3100架无人机的演绎下,海口的夜空化作流动的光影画卷。无人机用灯光勾勒出“东坡文化节”“洗夫人文化节”“虎舞闹花灯”“琼台福地”“老爸茶·海口巴士”“海口号帆船”等极具海南特色的文化符号元素(见图13),将海口深厚的历史底蕴与蓬勃的城市活力融入夜空之中。表演采用双集群交互呈现的方式,两组无人机集群彼此配合、交替展现,为现场观众带来了一

场精彩绝伦的空中视觉盛宴，也让海口湾的元宵夜成为城市独特的文化记忆。



图 12 2025 年香港“可口可乐”主题无人机飞行表演画面



图 13 2025 年海口元宵节无人机飞行表演画面

2025 年 4 月，全球最大规模的无人机集群常态化驻场表演项目——“光影重庆”盛大启动（见图 14），迅速成为文旅行业的闪耀标杆，其以创新之姿推动了重庆旅游文化、城市宣传及经济发展。自项目开展至 2025 年 6 月中旬，官方数据显示：



现场观众累计超 360 万人次,线上直播观看量达 10 亿人次,相关图文、短视频的全网曝光量突破 100 亿;南滨路沿线餐饮日均上座率超 70%,江景主题酒店入住率提升至 80%以上,两江四岸核心区夜间消费规模同比增幅达 45%,入境过夜游客量同比激增达 608%。“光影重庆”表演项目极大提升了重庆在全国乃至全球的知名度,成功推动重庆跻身 2025 年全国城市海外网络传播力第 4 位,同时也在拉动消费、促进经济增长等方面起到了关键作用,助力重庆在 2025 年上半年荣膺“消费第一城”称号。至 2026 年 1 月,该表演项目已累计吸引全球 1 000 万观众到现场观看,海外传播量超 3 亿人次,成为重庆夜间文旅极具辨识度的“新名片”,并于 2026 年写入政府工作报告。



图 14 2025 年重庆常态化无人机飞行表演画面

2025 年 6 月,11787 架无人机以双集群飞行的形式从重庆弹子石广场腾空而起——“最多无人机组成的空中图案”这一吉尼斯世界纪录称号于重庆夜空刷新(见图 15)。大漠大以“山水、人文、生活、都市”为脉络,精心设计了《山水之城》《山茶花开》《黄葛情深》《时尚之都》《活力之城》等七大篇章,打造出世界级的山水人文光影景观,立体式呈现了重庆建设成果与未来展望,让世界看见新重庆、新科技与新未来。

2025 年 7 月,11 198 架无人机以“万里挑一,星河入湖”为主题,如星辰般排列于河源市东源县万绿湖景区上空。大漠大第六次打破吉尼斯世界纪录,再度刷新“最多无人机同时飞行”吉尼斯纪录(见图 16)。“鱼跃龙门·开湖献礼”“厨王争霸·鲜鱼幻宴”“生态长卷·青山绿水 30 年”“碧波生花·花神巡游”“星河织锦·龙凤

贺寿”等主题接连在夜空中演绎,向世界展示出河源的文化底蕴,也展示了大漠大作为无人机表演领域领航者的实力与风采。



图 15 2025 年重庆吉尼斯世界纪录无人机飞行表演现场



图 16 2025 年河源吉尼斯世界纪录无人机飞行表演画面



参 考 文 献

- [1]深圳市无人机行业协会. 多旋翼无人机系统安全性分析规范: T/SZUAVIA 010—2019[S]. 深圳: 深圳市无人机行业协会, 2019.
- [2]杨金才, 庞伟, 刘立峰. 2015—2016 中国无人机行业发展报告[R]. 深圳: 中国公共安全杂志社, 2016.
- [3]宋建堂. 无人机法律法规与安全飞行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [4]谢辉. 无人机应用基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2019.
- [5]王新民, 王晓燕, 肖塍. 无人机集群飞行技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015.
- [6]丁文锐, 黄文乾. 无人机数据链抗干扰技术发展综述[J]. 电子技术应用, 2016, 42(10): 6—10.
- [7]孙毅. 无人机驾驶员航空知识手册[M]. 北京: 中国民航出版社, 2014.
- [8]符长青, 曹兵. 多旋翼无人机技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [9]王建平, 余根坚, 李晓颖, 等. 无线网络技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [10]章澄昌. 飞行气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [11]谢绍斌. 频谱管理与监测[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.