

无人机机库控制系统中关键指令失真问题的应对措施

苟玉虎

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要 在复杂通信环境与多任务高频调度条件下, 无人机机库控制系统中的关键控制指令易发生失真问题。本文围绕关键指令失真现象, 从类型特征、多源诱因及系统影响路径等方面展开分析, 构建端到端的指令完整性保障机制, 并提出链路冗余、协议纠错与调度重构等多层级应对策略, 以期提升无人机机库控制系统在复杂运行环境下的可靠性与容错能力提供技术参考。

关键词 无人机; 机库控制系统; 通信链路; 指令失真

中图分类号: TP274; V279

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.004

0 引言

随着集群化、自主化无人机系统在城市巡检、应急保障与基础设施运维中的加速应用, 地面无人机机库逐渐由传统“停放单元”转变为集成调度控制、自动起降、自主充电等功能的智能作业平台^[1]。在该体系下, 机库控制系统通过通信链路实时下发起降、舱门联动与航迹调度等指令, 实现对无人机全生命周期的集中管理与协同控制。然而, 在城市高密度通信、无线干扰复杂与任务并发背景下, 关键指令在传输与执行中易发生丢失、延迟或误码, 进而引发作业偏差、路径冲突及系统响应异常^[2]。现有方案多聚焦链路增强或静态编码优化, 缺乏面向高耦合控制链的系统性防护与动态适配能力, 难以支撑高频复杂任务模式下的稳定指令交互。基于此, 本文以机库控制系统中的关键指令失真为核心, 系统识别其多源诱因与链路脆弱环节, 分析对系统运行的影响路径, 构建具备端到端完整性保障能力的分层应对策略, 为复杂环境下的稳定控制提供参考。

1 指令失真的主要类型与核心诱因

在无人机机库控制系统中, 关键控制指令在生成、编码、传输、解析及执行等环节均可能发生失真, 表现形式复杂且多样。常见类型包括: 指令丢失, 主要源于链路瞬断或缓冲溢出; 指令延迟, 多发于网络拥塞、任务冲突场景; 误码现象则涉及CRC校验失败或位反转错误, 通常由电磁干扰、射频噪声或硬件失配引起,

跳频通信或长链中继环境下尤为严重。异常指令响应表现为系统在信道污染或逻辑冲突中误执行非法命令, 而在多任务调度中, 冗余指令与覆盖冲突常导致行为不可预期。这些失真类型具有明显的阶段性、并发性与交叉影响特征。从诱因角度看, 指令失真由链路层、协议层与控制系统层多维因素交叠引发^[3]。链路层问题包括信号反射、电磁干扰与带宽动态波动; 协议层表现为报文格式不统一、握手机制缺失、解析规则不兼容; 控制系统层则涉及模块耦合弱、缓冲策略缺失与调度系统响应滞后, 易在任务切换时引发逻辑漂移与状态错位。此外, 部分系统安全机制薄弱, 未配置指令级身份认证与追溯路径, 亦使非法或伪造指令得以触发响应流程, 构成潜在风险源。

2 指令失真引发的系统性影响路径

2.1 关键任务阶段的链路依赖性与控制风险

无人机机库控制系统在起飞、舱门控制、姿态初始化等关键任务阶段对链路指令的完整性、实时性与确定性高度依赖。例如: 起飞阶段的指令链包括地锁释放、姿态初稳、功率上升与起落架收束等联动序列, 任一环节指令延迟或失配, 均可能引发推进-控制解耦, 导致升力不足或起飞失稳。舱门控制依赖高频率、低误码率的PWM或CAN总线信号, 若失真发生于反馈前, 舱门可能停留在中间状态, 影响风场稳定或造成物理干涉。姿态初始化需融合惯性导航与GPS数据, 若初始指令遭遇伪码、丢包或误码, 可能引发坐标系

作者简介: 苟玉虎 (1985-), 男, 博士, 工程师, 研究方向: 无人机导航定位、通信与信息系统等。

基准漂移，影响后续航迹规划与路径生成。部分系统在冷启动期间链路自适应尚未完成，控制调度已启动，易使指令链运行于未验证的通信通道，加剧“先激活后握手”的结构性链路风险，成为系统控制脆弱面的典型诱因。

2.2 多机协同下的控制冲突与同步失效

多架无人机编队协同飞行时，各节点依赖主控模块下发的高频广播指令与双向确认信号维持时间同步、路径分布与负载协同^[4]。若某节点因指令失真产生状态误报，将破坏系统内部目标一致性，导致其他节点基于错误信息调整路径或迁移任务。在缺乏状态验证机制的系统中，该类误判易被视为有效响应，触发队形收缩、交叉航线或避障机制误启动，弱信号环境下尤为频繁。此外，部分集群依赖 GPS 信号进行全局时钟同步，在城市峡谷、山地地形或强干扰区域，时钟基准频繁波动，易使节点间响应延迟出现非线性偏差，表现为同一指令在不同节点上动作次序错乱。在系统层面，控制链路带宽有限，若某节点因数据堆积或重传压力导致链路阻塞，其他节点有效指令亦可能滞后或丢弃，引发指令优先级错序与链路挤压。若任务调度模块未构建全局视图下的控制流感知机制，该类失真将被放大至系统维度，演变为队形失稳与任务协同失败。

2.3 高动态任务切换过程中的指令不一致性风险

无人机系统在执行侦察、打击、监控、返航等多任务序列时，常需高频动态切换，由多个子系统协同响应组合指令。此阶段若发生失真，风险传导与故障链生成效应尤为显著。例如：任务切换指令在链路中篡改或失序，可能导致部分模块提前执行目标态，其

他模块仍停留在原任务，形成逻辑“双轨”问题。飞控模块进入降落流程而导航子系统仍处目标搜索状态，将引发能量分配与控制策略冲突。系统通常依赖缓冲队列、状态机驱动与锁机制实现任务收敛，若无状态标记与互斥逻辑，易导致指令冗余与竞争。部分系统采用滞后确认机制，通过多轮反馈确认切换，但对链路稳定性要求极高，易因延迟致状态漂移。若任务突发中断或优先级变化，而控制系统未设置动态权重机制，次级任务指令可能覆盖主任务路径，破坏既有调度结构。

2.4 案例复盘与系统性风险归类建模

在工程实践中，无人机集群作业异常常源于关键指令失真引发的控制链级联效应。例如：在某城市巡检中，通信模块受干扰致起飞指令延迟，调度逻辑与飞控状态失配；在复杂地形作业中，历史状态未清空致路径指令附带旧标识，解析异常。综合案例可将此类风险归为链路脆弱型、逻辑错配型与调度冲突型，并构建“诱因—路径—节点—后果”四维模型进行结构化归类（见表 1）。

3 面向失真治理的多层级策略机制

3.1 指令完整性验证机制设计

为降低无人机机库中关键控制指令在生成、传输、解析环节中的失真概率，必须构建端到端的完整性验证机制。在指令生成端，需引入签名认证机制，以唯一性控制哈希摘要绑定指令包体内容，防止数据篡改与非法插包。在传输链路中，应采用多重 CRC 冗余校验结构，避免传统单字节低容错率校验方式对短帧误码的识别缺失；在部分中继网络上，还应配合使用 Merkle

表 1 控制指令失真典型案例风险路径建模

案例编号	应用场景	诱因类型	涉及模块	风险路径类型	任务阶段	具体后果表现
C1	城市巡防	通信链路干扰	通信模块 + 飞控单元	链路脆弱型	起飞准备	起飞授权指令延迟触发，姿态失稳
C2	山区搜索任务	缓存机制失控	任务调度模块 + 导航模块	调度冲突型	路径切换	前一任务 ID 未清除，目标定位错误
C3	编队飞行	状态反馈延迟	主控节点 + 多机导航模块	同步失配型	协同路径执行	航线重合、路径交叉，避障系统误触发
C4	多任务模式切换	指令顺序错乱	飞控模块 + 执行控制模块	控制逻辑错配型	任务模式切换	飞控执行返航，武器系统仍处激活状态
C5	城市立体侦察	协议不兼容	控制器 + 接收端解码模块	协议适配失败型	状态确认反馈	接收到异常指令，错误响应非法操作链路

Tree 结构校验以保障长链路连续完整性。接收端需具备双向确认反馈机制,即每条控制指令均需由无人机端返回状态响应帧,携带确认码与执行标志字段,并在未收到确认帧的设定时间窗口内自动触发重发逻辑。在缓存架构上,还应增设指令序号校验字段与回滚标识位,支持指令链断点恢复及状态追溯机制,以防止链路不稳定引发的状态跳跃。对高优先级指令,可采用加权确认机制,要求多维确认字段同时满足才可进入执行流程,提升高风险场景下指令响应的可靠性。

3.2 控制链路的冗余与容错机制设计

针对机库控制链路在不同作业环境下可能遭遇的突发干扰、中断失联与带宽衰减等问题,需部署具备层级结构与动态切换能力的链路冗余体系。在物理链路层,应采用主副链路并行布设,主链路选用 5G 或 UWB 高速通信,副链路采用 LoRa 或 433 MHz 低速信道作为容灾通道,二者由接口模块内置的状态切换单元实现即时绑定^[5]。在通信协议层,应为关键指令设计链路选择权重模型,依据 SNR、丢包率与时延波动动态调节优先级,通过阈值触发机制切换指令路径。部分系统还可引入 FEC 前向纠错编码机制,在主链中嵌入可恢复的数据冗余块,提升在字节丢失场景下的完整性恢复能力。对于关键控制任务,应部署链路心跳监测模块,定期采样质量指标并输出稳定性评估结果,作为策略切换依据,从而实现任务全过程中的链路动态适配。

3.3 通信协议的纠错与适配机制优化

无人机机库控制系统广泛采用多类型协议栈构建任务调度链路,面对复杂环境下的协议兼容冲突与误码传输风险,需强化底层协议纠错机制与适配逻辑优化^[6]。建议在现有协议栈中嵌入 Reed-Solomon 编码或 Turbo 码结构,实现字节级纠错,提升抗噪能力与容错阈值。针对协议转换接口中的字段偏移、状态误读等问题,应引入多协议适配中间件,结合字段映射、格式标准化与动态适配模块,保障指令结构无损转译。对采用 HTTP、MQTT 等非实时协议封装的系统,建议引入协议速率自适应机制,按链路负载与帧大小动态调整包传速率与确认窗口时长,缓解拥塞下的阻滞风险。同时,应配置超时异常响应逻辑,若确认窗口内未完成协议对接,则立即调用容错路径或备份通道。在高风险控制阶段,应采用协议绑定机制,将核心命令独立于常规控制信道,实现关键指令路径的隔离防护,降低协议栈冲突下的失控概率。

3.4 指令调度的优先级控制与异常重构机制

在多任务并行背景下,指令调度模块需同时应对实时性、优先级、互斥性及资源竞争等多重约束,一旦调度逻辑遭遇失真,易引发系统性故障链。建议构建基于优先级映射表的调度机制,将各控制指令绑定至任务权重、状态等级与资源占用系数三元组,构成调度节点属性模型,并借助控制器匹配实时资源图进行路径分发。对冲突指令应设互斥标识位与状态锁定位,确保状态转换过程不被次级任务干扰。在异常指令或状态漂移情形下,可启用控制逻辑重构机制,以缓存指令集为输入,结合当前状态机阶段重建依赖链,剔除无效指令,生成最简路径执行链。同时,应构建指令回滚框架,以任务中断点为参考,判断指令是否处于非收敛状态,若触发异常窗口,则清空缓冲、重置权重并退级指令路径。在存在人工干预与系统自适应并行控制源时,还需引入动态权重调节机制,构建权重切换曲线,保障主控调度分配稳定。

4 结束语

无人机机库作为集群化作业的重要支撑平台,其控制系统需在复杂通信环境与高并发调度条件下保持稳定运行。本文围绕关键控制指令失真问题,系统梳理其类型构成与诱发机制,识别控制链路中的脆弱环节与典型风险场景,并构建涵盖指令完整性验证、链路容错、协议适配与调度控制的多层级应对机制。相关研究成果可为无人机机库控制系统在复杂运行环境中的可靠运行提供技术参考,进而为后续面向规模化应用的系统设计与优化提供工程支撑。

参考文献:

- [1] 张钧,熊隆友.无人机库自动巡检系统行业应用现状[J].中国科技信息,2023(24):135-137.
- [2] 贾展鹏,王永璞,杨博文,等.智能化无人机库技术应用可行性研究[J].内蒙古石油化工,2024,50(07):77-81.
- [3] 项昌乐,徐彬,唐寿星,等.特种无人机创新应用与关键技术发展研究[J].中国工程科学,2025,27(02):62-72.
- [4] 武文强,范晨晨,吴志贺,等.无人机集群协同控制发展现状与关键技术[J].智能制造,2025(04):38-49.
- [5] 毛开,朱秋明,雷泰雅,等.面向无人机通信的无线信道测量系统研究综述[J].电波科学学报,2025,40(05):812-826.
- [6] 丁旭辉,卢琦,张园园,等.面向低空经济的通信技术综述[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2025,57(06):1026-1045.