

基于功能共振分析法的电动垂直起降飞行器运行安全风险评估

王翔雁

沈阳航空航天大学民用航空学院 辽宁沈阳 110000

摘要: 随着航空航天技术的快速发展,电动垂直起降飞行器(eVTOL)作为一种新型的空中交通工具,正逐渐成为未来城市空中交通的重要组成部分。电动垂直起降飞行器因其高效、灵活和环境友好等优点,在缓解地面交通拥挤的同时,在应急救援和物流运输等方面具有广阔的应用前景。然而,eVTOL作为一种新型飞行器,其运行安全性是不可忽视的。飞行器的动力系统复杂,飞行环境多变,电子设备高度集成,给飞行器的安全运行提出新的挑战。因此,如何对电动垂直起降飞行器的安全风险进行科学有效的评估,是保障电动垂直起降飞行器健康发展的重要课题。

关键词: 功能共振分析法; 电动垂直起降飞行器; 运行安全风险评估

飞行安全性是电动垂直起降飞行器能否走向实用化的关键因素。航空领域中,任何微小的安全隐患都有可能造成灾难性的后果,因此,开展电动垂直起降飞行器安全风险评估具有重要意义。功能共振分析方法是一种系统的风险分析方法,它可以从多个维度识别并评估系统的风险因子,为电动垂直起降飞行器的安全运行提供强有力的保障。在此基础上,深入剖析电动垂直起降飞行器在设计、制造、运行及维护过程中可能出现的安全隐患,以便及早采取预防措施。

一、基于功能共振分析法的电动垂直起降飞行器运行安全风险评估

(一) 明确飞行器核心功能与交互关系

采用功能共振分析法对电动垂直起降飞机运行安全性风险进行评估,对其核心功能模块及其功能模块之间的相互作用关系进行梳理。电动垂直起降飞行器是一种复杂的系统,它包含动力、飞行控制、电池、起降、导航等多个功能模块,它们之间的协同工作是保证飞行安全的重要保证。在评估过程中,需要明确各个功能模块所扮演的角色,如动力系统提供飞行所需的动力,飞行控制系统控制飞行姿态和轨迹,以及电池提供动力等^[1]。在此基础上,对各模块之间的交互逻辑进行了分析,如飞行控制系统需要实时接收动力系统的输出功率和蓄电池的剩余电量,从而对飞行参数进行调整。起落架动作的执行需要与飞行控制系统指令的精确同步。在明确功能边界和相互作用关系的基础上,为后续的功能共振风险识别奠定基础,避免因功能划分不明确而造成的风险评估

漏判。

(二) 识别功能偏差与共振风险源

进一步识别各模块可能发生的功能偏差和共振风险源,功能谐振本质上是各功能模块间微小偏差的叠加,使系统整体性能超过安全阈值。在电动垂直起降飞行器中,由于电机负载的波动,动力系统可能出现功率输出偏差、电池系统温度变化引起电源电压波动、飞行控制系统噪声等因素导致姿态控制偏差等问题。然而,当这三种情况同时发生时,系统的输出偏差和电源电压的波动将使飞行控制变得更加困难,造成姿态偏差增大、功能谐振,甚至引发飞行姿态失稳。在评估过程中,需要结合飞机垂直起降、悬停和高速飞行等实际作业场景,对各阶段功能偏离的诱发因素进行分析,精确定位可能发生共振的危险源。

(三) 构建风险等级划分标准

为定量评估功能共振风险对运营安全性的影响,需要建立科学的风险分级标准,这是风险评估在实际应用中的重要环节。划分标准需要综合考虑功能偏离的叠加程度、发生共振风险的可能性和可能产生的后果。风险程度可以分为低、中、高和高4个级别,低风险意味着只有一个功能模块发生轻微的偏离,不会产生共振,不会对飞行安全产生明显的影响。中风险表明两个相关的功能模块发生了偏差,出现了较小的共振现象,但是可以用系统的冗余机制来缓解^[2]。高风险意味着三个或更多的核心功能模块发生故障,谐振风险明显,可能引起系统性能恶化,影响飞行稳定性。极高风险意味着多个

模块间的偏差已经严重叠加，谐振效应已经超过了系统的容错能力，可能导致坠机、失控等重大事故。在划分时，要考虑到电动垂直起降飞机的安全性要求，并参照航空领域的相关安全规范，保证分级的合理性和实用性。

（四）验证评估结果与完善流程

在风险辨识和分级完成后，需要利用实际运行数据和仿真试验对评价结果进行验证，并改进评价流程，提高后续风险评价的可信度。需要收集电动垂直起降飞机飞行试验数据，提取各功能模块参数变化曲线，分析评估过程中是否存在谐振风险，若验证结果与评估结果相符，则验证模型有效性。利用模拟平台对不同风险情景进行仿真，如模拟电池电压波动和功率偏差等，观察系统是否发生谐振，验证风险分级的合理性。在验证结果的基础上，如发现功能交互关系遗漏、风险来源识别不完整等问题，及时修正评价框架，对相关功能模块进行补充，优化风险分级标准，形成“评价-验证-改进”的闭环过程，确保函数共振分析方法能够持续、准确地评价飞行器在用安全风险。

二、基于功能共振分析法的电动垂直起降飞行器运行安全风险优化

（一）优化功能模块参数管控技术

针对功能共振分析法识别出的功能偏差风险，优化功能模块参数管控技术是首要的风险优化手段，以功能模块参数控制为核心，通过对各模块关键参数的精确控制，降低偏差发生的概率，从源头上减少谐振风险。针对电动垂直起降飞行器动力电池系统中电源电压波动这一重要影响因素，利用电池智能管理系统（BMS）对电池参数进行实时监测，并利用自适应算法对其进行动态调整^[3]。当电池温度升高可能引起电压波动时，BMS会自动启动散热装置，使电池组温度保持在25℃~35℃之间；同时采用平衡充电技术，保证单体电池的电压偏差在50 mV以内，避免了单体电压不一致引起的整体供电波动。

针对动力系统输出功率偏大的问题，通过引入偏差补偿模块，实现对电机速度、转矩等参数与预设值之间的偏差进行实时监控，一旦偏差大于5%，则自动调节输出电流，实现功率的校正。在此基础上，将参数滤波技术引入飞控系统，利用卡尔曼滤波算法对传感器获取的姿态数据进行处理，滤除噪声干扰，使姿态偏差小于0.5°。通过对电池、电源、飞行控制等核心模块参数控制技术的优化，将各模块功能偏差控制在一个很小的

范围内，即使有微小的偏差，也很难形成叠加谐振，大大降低了运行安全风险。在实际应用中，需要根据飞行器不同飞行阶段的参数需求，动态调整控制阈值，如垂直起降阶段对功率稳定度要求较高的飞行器，可降低功率输出的偏差阈值至3%，以进一步提高系统参数的稳定性。

（二）构建多系统协同优化机制

可采用基于函数共振分析方法，揭示模块间相互作用风险，建立多系统协同优化机制，强化模块之间信息交互和协同控制，避免偏差叠加，形成谐振。针对电动垂直起降飞行器“控-电-导航”协同不足的问题，构建分布式协同控制平台，实现多个系统间的数据实时共享和指令同步。该平台采用CAN/Ethernet总线混合通讯结构，飞行控制系统每隔10 ms向动力导航系统发送一次空控指令，动力系统对功率输出状态进行实时反馈，导航系统对位置和速度信息进行同步传输，保证各个系统之间的数据传输延时在20 ms以内，消除信息延迟造成的协同偏差。在协同控制策略方面，利用模型预测控制方法，对未来500 ms内各系统的运行状态进行预测，提前调整控制指令^[4]。例如，在预测飞机进入侧风区时，会提前向飞行控制系统发送风速警告，飞行控制系统相应地调整姿态控制命令，并同步向动力系统发出功率调节请求，以保证功率输出和姿态控制协调响应，避免侧风引起的姿态偏差和功率输出偏差的叠加。此外，还可以引入故障交叉补偿机制，当系统发生微小偏差时，系统会自动调整相关参数，如电池系统电压波动较小时，系统会自动降低5%输出功率，降低对飞行控制系统的影响。采用基于多系统协同优化机理，使各模块由“独立控制”转变为“协同响应”，有效抑制偏差叠加，降低功能谐振风险，确保复杂运行环境下飞行器安全运行^[5]。

（三）完善动态监测与预警技术

针对功能共振风险的动态特征，可通过对系统运行状态的实时监测，提前识别共振趋势，为风险处置赢得时间。在电动垂直起降飞行器上部署多维监控网络，在动力系统关键部位（如电机、电池组、飞行控制等）安装振动、温度、电压、电流等传感器，以5毫秒一次的方式进行数据采集，形成覆盖整个系统的监测网络。利用边缘计算节点对监测数据进行实时处理，利用滑动窗算法对近百毫秒内各模块参数的变化趋势进行分析，判断是否存在功能共振现象，即多个模块参数同时偏离正常范围。

预警系统根据参数的偏差程度和叠加次数设置三个预警阈值：第一级预警与两个非核心模块的偏差较小，系统只向地面控制台发送提示信息；第二级预警对应的是2个核心模块或者3个非核心模块的偏差，除了地面警报之外，飞机会自动启动参数校正程序；当有三个或更多的核心模组脱离时，系统会立即启动紧急反应，如自动降低高度，进入安全空域^[6]。利用卫星通讯将预警信息实时传送到地面指挥中心，并通过驾驶舱显示终端向驾驶员发出声光警报。为提高预警精度，可以引入机器学习算法，根据历史运行数据和故障案例对预警模型进行训练，持续优化偏差辨识和共振趋势判定精度，实现预警误报率小于1%。采用动态监测和预警技术，在功能共振形成早期进行干预，避免风险进一步扩大，显著提高飞行器的安全运行水平。

（四）优化人员操作与培训技术

针对人员操作偏差和系统功能偏差叠加诱发谐振风险，优化驾驶员作业训练技术，提高驾驶员状态感知能力和应急处置能力，是风险优化的关键环节。本项目针对电动垂直起降飞行器驾驶员需要同时监测多个系统状态、操作复杂度高的问题，研究基于虚拟现实（VR）技术的虚拟现实仿真训练系统，模拟电池电压波动叠加功率偏差、飞行姿态偏差等多种功能偏离和谐振风险场景。在训练过程中，采用情景难度递进的方法，使飞行员由单一偏差处理逐渐过渡至多偏差叠加谐振风险，熟练掌握系统预警信号和应急作业流程^[7]。

在实际操作辅助中，座舱显示系统采用多信息融合接口，以图形化的方式对各个系统的关键参数进行集中显示，如功率、电池电压、姿态角的变化趋势用不同颜色的曲线实时显示，当参数发生偏差时，相应的曲线会自动闪烁提示，帮助驾驶员迅速发现异常情况^[8]。同时，系统可以引入操作诱导功能，当驾驶员发现驾驶员操作可能加剧偏差时，如功率波动导致姿态过高等，系统将采用语音提示和操纵杆力反馈相结合的方式进行干预，指导驾驶员做出合理的操作。在此基础上，本项目还将定期组织飞行员开展实战演练，模拟极端天气、系统故障等情景下的共振风险处理，检验飞行员的应变能力和操作精度，并将评估结果与资格认证相结合，确保飞行

员能够有效应对谐振风险。在此基础上，从人员操作和训练两个方面进行优化，降低人为操纵误差，避免与系统功能偏差叠加，进一步降低电动垂直起降飞行器运行安全风险。

结束语

综上所述，基于功能共振分析法的电动垂直起降飞行器运行安全风险评估，可为电动垂直起降飞行器在轨运行安全风险评估提供科学依据，而且可以有效降低运行过程中的安全风险，保证人身财产安全。未来，随着电动垂直起降飞行器技术的不断进步与应用场景的扩展，其运营安全风险评估也将向智能化、精细化方向发展。应密切关注国内外航空技术发展动态，不断优化评价方法与工具，为保障电动垂直起降飞行器的安全运营，促进城市航空交通的可持续发展做出贡献。

参考文献

- [1] 李荣, 张冰, 唐青青, 胡婷婷, 李柳杰. 全球电动垂直起降飞行器领域专利格局分析[J]. 科技和产业, 2025, 25 (08): 248-253.
- [2] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报, 2024, 45 (05): 55-77.
- [3] Okado Michihito. 未来出行新范式——eVTOL 电动垂直起降飞行器设计[J]. 工业设计, 2023, (11): 12.
- [4] 张博雅. 电动垂直起降飞行器专利技术分析[J]. 中国科技信息, 2023, (16): 35-38.
- [5] 王锋, 杨金洋, 佟刚, 丁一宁. 无人电动垂直起降飞行器在未来城市空中交通中的发展[J]. 河南科技, 2021, 40 (11): 82-85.
- [6] 穆作栋, 袁成. 美国空军敏捷至上电动垂直起降飞行器项目分析[J]. 飞航导弹, 2021, (02): 59-63+75.
- [7] 武丽雯, 余华键, 姚绍文, 等. 低空互联网中低空飞行器全生命周期安全风险评估方法: CN202311243294.6 [P]. CN117314161A [2025-09-30].
- [8] 杨潘, 李军, 刘骏, 等. 一种低空互联网中飞行器全生命周期安全风险评估方法和系统: 202510386617 [P] [2025-09-30].