

直升机地面共振特性的试飞测试与安全评估

朱泓旭 闫 军

航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 黑龙江 哈尔滨 150060

【摘要】：针对民用运输类直升机地面共振试飞测试存在工况覆盖不全、数据判定缺乏量化标准、试飞安全管控体系不完善等技术短板，以 CCAR29 适航规章要求为核心主线，开展试飞问题识别、安全评估方案搭建、现场安全管控落地全链条技术研究。通过精准划定临界评估工况、构建量化振动数据评估标准、建立减振部件故障分级规则形成完整评估体系，配套设备前置校验、实时操作约束、险情分层处置全套落地管控手段，整套技术体系可规范共振试飞全流程，为民用直升机地面共振适航验证提供标准化技术支撑。

【关键词】：地面共振；试飞测试；安全评估；适航审定；风险管控

DOI:10.12417/3041-0630.26.11.021

直升机地面共振会在地面试车、滑行阶段诱发剧烈耦合振动，严重时引发桨叶损毁、整机倾覆等恶性事故，是民用运输类直升机 CCAR-29 适航审定的核心考核项。现阶段国内型号共振试飞工作多依托传统经验开展，动力学临界工况筛选、振动量化评判、现场安全防护缺乏统一成套技术体系，测试数据一致性与合规性难以保障。为完善地面共振试飞全流程技术规范，本文从试飞现存技术短板切入，搭建量化安全评估框架，配套落地全流程安全管控措施，形成一套适配国内民机适航取证的共振试飞技术体系，为同类旋翼航空器动力学试验提供实操参考。

1 直升机地面共振试飞测试现存问题识别

直升机地面共振试飞测试依托旋翼摆振模态与机体起落架耦合动力学规律开展全工况振动采集工作，当前整套测试流程存在多维度技术短板制约适航审定数据有效性。动力学仿真筛选临界状态阶段，模型输入参数仅依托标准设计数值完成计算，未充分纳入阻尼器长期使用性能衰减、高低温环境阻尼偏移、轮胎胎压损耗带来的模态偏移量，仿真锁定的危险工况与真机实际易失稳构型存在偏差，造成试飞激励工况覆盖范围缺失。整机振动信号采集环节，测点布设仅覆盖机身主结构点位，忽略弹性轴承、缓冲支柱接头等减振核心部件动态响应数据采集，振动时域、频域数据无法完整还原共振耦合演化全过程^[1]。试飞安全判定依托人工观测振动表象完成分级，未建立量化阻尼比阈值判定标准，单一减振部件失效、轮胎局部亏气等故障工况下的振动响应数据缺少独立评估通道，获取的测试数据难以直接支撑 CCAR29 条款符合性审查工作，降低型号适航验证数据复用价值，也无法为同类型运输类直升机共振测试流程优化提供标准化技术依据。

2 直升机地面共振试飞测试安全评估方案搭建

2.1 划定地面共振试飞临界评估工况

临界评估工况的划定依托旋翼机体耦合动力学模型完成多参数耦合迭代计算，以整机重量区间、全机转动惯量数值、旋翼转速区间作为基础计算变量，同步录入旋翼阻尼器性能衰减区间、起落架缓冲支柱压力变化范围、轮胎胎压浮动区间完成多轮模态耦合求解。计算过程提取摆振后退模态对应的失稳边界，将计算得出的高风险构型设置为试飞核心评估工况，同步叠加硬质混凝土场地、草地软质场地、斜坡着陆界面等不同地面支撑条件，叠加飞控增稳系统通断两种工作状态完成工况扩充，所有计算流程遵循保守化计算准则，输出的工况清单可直接匹配 CCAR29 适航条款验证要求，形成可复制的临界工况筛选技术路径，为各类运输类直升机共振试飞工况规划提供标准化技术参照。

2.2 确立地面共振振动数据评估标准

振动数据评估标准以模态阻尼比、振动幅值变化速率、频率耦合偏移量三类量化指标作为核心判定依据，针对机身滚转、偏航、俯仰机体模态与旋翼摆振模态的耦合信号划分独立数值区间。采集的振动时域信号完成快速傅里叶变换处理后提取对应模态阻尼数值，设置稳定裕度数值下限作为基础判定门槛，同步区分正常阻尼状态、阻尼性能衰减状态、减振部件失效状态三套独立数据阈值体系，标准体系完整覆盖试飞全流程采集数据类型，量化指标可直接对接适航审查数据提交规范，消除人工目视判断振动状态带来的主观偏差，为共振试验数据合规性审查提供统一量化判定依据。

2.3 建立地面共振故障分级评估规则

故障分级评估规则围绕减振系统单一部件失效模式搭建分层判定逻辑，划分旋翼阻尼器性能劣化、轮胎局部扁平、主起落架缓冲支柱压力衰减三类典型故障维度，依据各类故障工

况下模态阻尼比下降幅度完成层级划分。每一层级匹配对应振动响应特征区间,同步绑定对应试飞处置约束条件,规则体系融合动力学仿真失效工况计算结果与真机极限故障试验采集数据,形成故障风险与振动特征一一对应的完整数据库,分级体系能够精准识别试飞过程中共振失稳演化程度,填补适航验证中减振部件故障工况量化评估空白,为民用直升机共振试飞风险分级管控提供统一技术标尺^[2]。见图1。

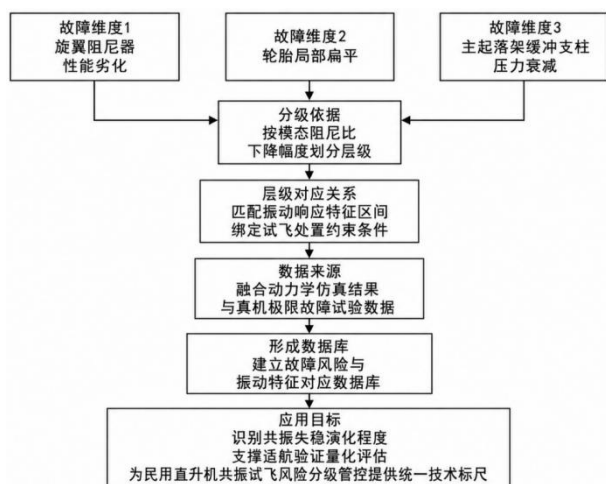


图1 减振系统故障分级评估规则流程

3 直升机地面共振试飞安全管控措施落地

3.1 落实地面共振试飞前期设备检查流程

整套检查流程覆盖振动采集硬件、旋翼减振组件、起落架支撑结构三类核心装置,振动采集设备完成传感器校准、传输线路阻抗检测与存储模块容量校验,校准基准数值匹配动力学模态采集精度要求。旋翼阻尼器开展高低温性能抽样检测,记录阻尼输出曲线波动范围,弹性轴承外观形变与刚度参数同步录入检测台账。起落架系统完成缓冲支柱腔压标定、轮胎胎压精准测量,前轮偏转机构与刹车管路密封性开展加压静置测试,全部检测数据形成标准化纸质与电子存档文件,完整留存部件初始性能参数,检测体系可直接适配CCAR29适航验证前置审查规范,形成通用化试飞前置设备校验技术范式,为同类机型共振试飞设备质控提供标准化执行模板。

参考文献:

- [1] 吴靖,刘湘一,宋山松.基于激振试验的直升机机体当量参数计算分析[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2025,57(2):259-265.
- [2] 刘佳璐,谷波.直升机地面共振机理及研究进展[J].中国科技信息,2025,(7):14-17.
- [3] 马小艳,陈浩,程起有,等.民用运输类直升机地面共振适航审定技术[J].直升机技术,2025,(3):40-44+62.

3.2 规范地面共振试飞实时操作管控手段

试飞全程操作管控依托数字化参数监测平台实现全流程约束,平台同步采集旋翼转速、总距操纵位移、机身多点位振动实时数值,设定模态阻尼比预警阈值完成后台持续监测。旋翼激励操作严格依照临界工况清单控制激励频率与幅值增量,飞控增稳系统切换、机轮偏转角度调整、场地切换等操作设置固定操作间隔,操作动作对应实时数据同步归档存储^[3]。全部操作动作设置数值边界约束,杜绝超转速、超大幅值激励等违规操作行为,标准化操作管控体系消除人为操作差异带来的测试数据偏差,构建统一可控的试飞操作执行标准,为民用运输直升机共振试飞过程管控提供可复用技术规范。

3.3 制定地面共振突发险情应急处置流程

处置流程以振动模态阻尼比持续下降作为险情触发判定依据,依据故障分级评估规则匹配分层处置动作,监测系统捕捉到振荡发散趋势后同步锁定旋翼转速调节区间,同步限制总距杆操纵增量,切断加剧模态耦合的操作输入。场地滑行类险情执行刹车锁止、机轮回正固定操作,同步切断发动机动力输出抑制旋翼摆振能量持续输入,整套处置动作设置固定时序逻辑,配套机身振动数据同步抓拍存储机制留存险情全过程信号。流程融合多款民用直升机共振故障试验数据完成优化,形成适配轮式起落架机型的标准化险情处置逻辑,填补试飞极端工况下规范化处置技术空白,为各型号试飞安全预案编制提供完整技术参考。

4 结语

地面共振试飞整套评估与管控体系可完整匹配CCAR29适航条款验证需求,针对试飞过程中工况筛选、数据评判、现场安全三类核心技术难点形成成套落地方法。临界工况划定、量化评估标准与故障分级规则能够消除传统人工判定带来的数据偏差,前置设备校验、实时操作约束、险情处置流程可全程规避试飞失稳风险。整套技术路径兼顾动力学仿真精度与真机试验安全性,能够直接应用于各类运输类直升机适航验证工作,为旋翼航空器地面动力学试验标准化推进提供可行技术支撑。