

机载电源系统故障隐患预判与维修管控思路探析

许晓彬

北京飞机维修工程有限公司重庆分公司 重庆 401120

摘要：机载电源系统为飞机所有用电设备提供稳定可靠的电能，其故障隐患直接威胁飞行安全。本文从系统架构与故障模式出发，系统分析了机载电源系统常见的故障隐患类型，包括发电机本体故障、调压保护电路失效、蓄电池性能衰减及配电线路老化等。在此基础上，提出了基于状态监测与数据驱动的故障隐患预判方法，涵盖特征参数提取、阈值设定及趋势预测模型。进一步从全寿命周期视角，探讨了维修管控体系的构建思路，包括视情维修策略、健康状态评估、备件优化及信息化管理平台。研究表明，从“事后修理”向“预知维修”转变，能够显著提升机载电源系统的任务可靠性与维修经济性。本文为航空装备电源系统的维修保障提供理论参考。

关键词：机载电源系统；故障预判；隐患识别；维修管控；视情维修

引言

机载电源系统是飞机的重要组成部分，承担着将发动机机械能转换为电能并分配给全机各用电系统的任务。其工作环境恶劣（高温、振动、电磁干扰），且要求高功率密度、高可靠性及长寿命。随着多电/全电飞机技术的发展，用电负载大幅增加，电源系统的关键性进一步提升。一旦电源系统发生故障，轻则导致部分仪表或设备失效，重则引发飞行控制系统断电、通讯中断甚至坠机事故。因此，对机载电源系统故障隐患进行早期预判，并建立科学的维修管控体系，是保障飞行安全和降低全寿命周期成本的核心课题。当前，机载电源系统的维护主要依赖于定时检修和故障后更换。这种方式存在“维修不足”或“维修过剩”的双重弊端，且难以发现潜伏性故障。近年来，状态监控与健康管理技术逐渐应用于航空领域，为电源系统的故障预判提供了新的技术路径。

1 机载电源系统故障隐患类型与特征

1.1 系统组成与工作模式

典型机载电源系统包括主电源（发动机驱动发电机）、辅助电源（APU 发电机或冲压空气涡轮）、应急电源（蓄电池）及二次电源（变压整流器、逆变器、直流变换器）。配电系统由汇流条、接触器、固态功率控制器及电缆网络构成。工作模式包括地面启动、起飞爬升、巡航、进近着陆及应急状态。不同工作模式下负载特性差异显著，故障隐患的表现形式也有所不同。

1.2 发电机本体隐患

发电机是电源系统的核心，其故障隐患主要包括：

转子绕组匝间短路，由绝缘老化、振动磨损引起，初期表现为励磁电流异常增大和温度升高；定子绕组绝缘劣化，导致相间或对地绝缘电阻下降，易诱发相间短路；旋转整流器二极管失效（断路或击穿），引起励磁电流波动及输出电压不稳；轴承磨损，导致转子偏心，产生机械振动及气隙不均，进而引发电磁振动与噪声增加。上述隐患若及时发现，可能在数分钟至数十分钟内演变为发电机失效。

1.3 调压与保护电路隐患

调压器（如晶体管式或数字式调压器）负责维持发电机输出电压恒定。其隐患包括：电压采样电路漂移（导致输出电压偏高或偏低）、功率管老化（导通压降增大，发热加剧）、保护电路阈值偏移（过压或欠压保护动作异常）^[1]。此外，反流保护继电器触点烧蚀或粘连，可能导致蓄电池反向向发电机放电，烧毁发电机绕组。差动保护电路中的电流互感器饱和或接线错误，则可能引起保护误动或拒动。

1.4 蓄电池隐患

机载蓄电池主要用于发动机启动及应急供电。常见隐患有：单体电池容量衰减，表现为端电压下降快、内阻增大；热失控，尤其在镍镉电池中，由过充电引起温度正反馈，严重时导致壳体爆裂；漏液，电解液腐蚀周围结构及连接件；连接条松动或腐蚀，引起接触电阻增大，大电流放电时发热甚至熔断。蓄电池的隐患发展相对缓慢，但突发失效概率不容忽视。

1.5 配电线路与连接件隐患

配电电缆及连接器长期受振动、温度循环及潮湿

环境影响, 隐患包括: 导线绝缘层龟裂、磨损, 引起漏电或短路; 端子压接处腐蚀或松动, 形成局部过热斑点; 汇流条固定螺栓松动, 导致接触电阻波动, 可能引起电压瞬降或电弧。配电线路隐患往往隐蔽性强, 常规目视检查难以发现, 需要借助红外热像或接触电阻检测手段。

2 故障隐患预判方法

2.1 基于状态监测的特征参数体系

要实现故障隐患的早期预判, 必须建立完整的特征参数监测体系。对于发电机, 监测参数包括: 输出电压/电流/频率、励磁电压/电流、三相电流不平衡度、定子绕组绝缘电阻、轴承振动加速度及温度(绕组、轴承、整流器)。对于调压器, 监测参考电压源输出、功率管驱动占空比及结温。对于蓄电池, 监测单体电压、端电压、充放电电流、内部温度及内阻。对于配电线路, 监测关键节点的压降、绝缘电阻及局部放电信号。上述参数通过机载参数采集系统或便携式地面测试设备获取, 采样频率应根据参数变化速率设定(电压电流每秒 10 次, 温度每分钟 1 次, 绝缘电阻每飞行起落 1 次)。

2.2 阈值设定与趋势分析

预判的核心是将监测值与阈值比较并分析其变化趋势。阈值可分为静态阈值(绝对值)与动态阈值(相对变化率)。静态阈值依据设备技术规范或历史故障统计数据确定。例如, 发电机输出电压稳定范围通常为 $115 \pm 5\text{V}$ (400Hz 交流系统) 或 $28 \pm 2\text{V}$ (直流系统)。动态阈值则考虑同一设备不同时间点的差值, 例如绕组温度在 10 分钟内上升超过 15°C 可视为异常趋势。趋势分析采用移动平均法、指数平滑法或线性回归法提取特征序列的斜率。当斜率超过设定门限(如绝缘电阻每周下降超过 10%) 时, 发出隐患预警^[2]。对于周期性波动的参数(如振动烈度), 应采用频谱分析提取特定频率成分的幅值变化趋势(如轴承故障特征频率边带幅值增长)。

2.3 基于数据驱动的预判模型

单纯阈值加趋势的方法难以捕捉多参数耦合下的早期故障特征。可引入数据驱动的预判模型: 神经网络模型, 以历史正常数据训练自编码器, 实时监测重构误差, 当误差超过阈值时识别为异常状态; 支持向量机, 利用故障样本(不点名具体案例但指代类型)训练分类器, 实现隐患类型的初步判别; 隐马尔可夫模型, 用于描述电源系统健康状态的退化过程, 通过观测序列概率估计当前处于何种退化阶段。模型输入特征向量可包括

电压纹波系数、谐波含量(总谐波畸变率)、励磁电流波动方差等二次特征。模型输出为隐患等级(正常、注意、警告、危险)及可能故障模式。需要强调的是, 模型训练应基于足够数量的历史数据, 并定期更新以适应设备个体差异。

2.4 机载与地面相结合的预判流程

故障隐患预判采用“机载实时告警+地面深度分析”的分级模式。机载部分: 电源系统控制器实时监测关键参数(电压、电流、励磁), 发现越限或突变时立即向飞机中央维护系统发送故障代码及时间戳, 并可能触发驾驶舱告警(咨询级或警告级)。地面部分: 飞机落地后, 维修人员通过地面支持设备下载飞行过程中的电源系统详细数据(毫秒级记录), 结合飞机维修历史, 运行前述数据驱动模型进行深度预判, 输出隐患部件的剩余寿命预测及维修建议。该流程实现了从“飞行中告警”到“落地后精准排故”的衔接, 避免盲目换件或漏检。

3 维修管控体系构建

3.1 维修策略: 从定时到视情

传统机载电源系统维修采用定时检修(如每 500 飞行小时更换电刷、每 2 年更换蓄电池)。这种策略难以适应个体差异——状态良好的部件被过早更换造成浪费, 而劣化较快的部件又可能在检修周期内发生故障。应转向基于状态的视情维修(CBM)。具体做法: 根据健康状态评估结果(健康指数 $H \in [0, 1]$), 划分维修决策区间: $H \geq 0.8$ 为绿色区(继续使用, 例行监测), $0.6 \leq H < 0.8$ 为黄色区(安排近期检查或局部修理), $0.4 \leq H < 0.6$ 为橙色区(制定更换计划, 在 N 个飞行循环内执行), $H < 0.4$ 为红色区(立即停飞更换)^[3]。维修间隔不再固定, 而是动态调整。对于发电机等旋转部件, 可引入剩余寿命预测模型(如基于维纳过程或粒子滤波), 将预测的剩余寿命与下次定检时间比较, 决定是否提前维修。

3.2 健康状态综合评估方法

健康状态评估需融合多源信息: 在线监测数据、离线检测数据(绝缘电阻、蓄电池内阻)、维修历史数据及同类部件统计数据。采用层次分析法(AHP)确定各子系统的权重(如发电机权重 0.5, 调压器 0.2, 蓄电池 0.2, 配电 0.1)。每个子系统的健康度由若干特征参数隶属度函数加权计算得到。隶属度函数可设计为降半梯形或 S 型, 例如绝缘电阻 R_{ins} : 当 $R_{ins} \geq 100\text{M}\Omega$ 时隶属度 1, $50 \sim 100\text{M}\Omega$ 时线性插值, $< 50\text{M}\Omega$ 时隶属度 0。最终系统整体健康度 $H = \sum(\text{子系统健康度} \times \text{权重})$ 。评估结

果以雷达图或仪表盘形式呈现,辅助维修决策。

3.3 备件与器材管控优化

维修管控不仅包括技术决策,还需统筹备件供应。基于故障预判结果,可以提前采购或调配即将失效的部件,避免因缺件导致飞机停场。建立备件需求预测模型:根据健康评估输出的“橙色区”部件清单及剩余寿命分布,计算未来M天内的更换需求量。采用泊松分布或指数平滑法预测。对高价件(如发电机、蓄电池组)实施单件管理,跟踪每台件的履历与健康状态;对通用件(如继电器、二极管)设置安全库存。同时,建立与维修计划联动的器材消耗预警机制——当某型备件库存低于安全阈值且对应设备的健康状态低于0.5时,自动生成采购建议。

3.4 维修信息化管理平台

依托航空维修管理信息系统,扩展电源系统专项模块。该模块应具备以下功能:数据接入层,自动采集机载下载数据、地面测试数据及人工录入的检查结果;预判分析层,运行第二章所述模型,输出隐患列表及健康趋势图;决策支持层,生成维修工卡建议、备件需求单及维修计划调整建议;闭环反馈层,记录实际维修结果(解体检查发现、更换部件、故障原因),用于修正预判模型的参数。平台支持移动终端访问,维修人员可在现场查询当前电源系统的健康状态及历史预警记录^[4]。平台还应具备数据挖掘功能,定期统计各类隐患的出现频率、平均剩余寿命等,为改进设计或修订维修大纲提供依据。

4 实施难点与应对策略

4.1 数据获取与质量保障

故障预判依赖高质量的数据。当前部分老旧飞机未配备完善的机载监测传感器,地面测试设备自动化程度低。应对策略:在航电系统升级时加装非侵入式传感器(霍尔效应电流传感器、振动加速度贴片);对无法加装的,通过便携式测试仪定期采集关键参数(如绝缘电阻、蓄电池内阻)。数据质量方面,建立数据校验规则(范围检查、速率检查、一致性检查),剔除明显的粗大误差。缺失数据采用插值或历史均值填充,但需标记不确定性。

4.2 模型泛化能力与适应性

不同机型、不同使用环境的电源系统,其故障演化规律存在差异。一套预判模型难以适用于所有场景。应

对策略:采用迁移学习或在线学习框架。基模型在大量历史数据上预训练,部署到具体机队后,利用该机队的前若干次维修反馈数据微调模型参数。此外,设计自适应阈值机制——阈值不是固定值,而是根据近期数据分布的分位数动态调整(如取最近100组数据的95%分位数作为预警线)。对于罕见故障模式,引入主动学习策略,由专家标注少量典型样本后快速更新模型。

4.3 组织协同与人员培训

实施预判式维修管控需要维修管理人员、数据分析人员及一线机械师的协同。传统维修文化以“换件”为主,缺乏基于数据的决策习惯。应对措施:制定《机载电源系统健康管理操作手册》,明确各部门职责;对维修管理人员进行数据分析基础培训(理解健康指数、剩余寿命等概念);设置“电源系统状态管理工程师”岗位,负责预判结果审核与维修计划协调。同时,将预判准确率、非计划更换率等指标纳入绩效考核,引导行为转变。

5 结语

机载电源系统故障早期发现与管控对飞行安全至关重要。本文分析了发电机、调压电路等典型隐患,提出基于阈值、趋势及数据驱动的故障预判方法,构建了以视情维修为核心、健康评估为纽带、信息平台为支撑的管控体系及闭环联动机制。研究表明,实现预知维修需突破单一阈值局限,建立多参数融合健康模型;维修计划应与预判动态耦合,并依托闭环反馈知识库持续优化。尽管面临数据质量、模型泛化及组织协同等挑战,但可通过传感器加装、自适应学习和人员培训逐步化解。该框架为航空维修数字化转型提供理论参考,推动机载电源系统维修从“被动响应”向“主动预控”转变,对提升保障效能、降低全寿命周期成本具有重要实践价值。

参考文献

- [1] 张建民,刘卫国,陈昊.航空交流电源系统故障诊断与健康管理技术综述[J].航空学报,2021,42(6):624-132.
- [2] 王永,李忠海,赵玉龙.基于深度自编码器的飞机发电机早期故障预警方法[J].北京航空航天大学学报,2020,46(8):1567-1575.
- [3] 马骏,孙树栋,周华.机载蓄电池健康状态评估与剩余寿命预测研究[J].电源技术,2022,46(2):189-193.
- [4] 刘伟,李志远.机载电源系统维修信息管理平台设计与实现[J].计算机测量与控制,2020,28(7):183-187.