

航空电气系统绝缘性能检测与修复技术探讨

赵迪 李会

凌云科技集团有限责任公司 湖北 武汉 430040

摘要: 航空电气系统绝缘性能关乎飞行安全,其运行面临复杂电磁环境与极端工况,绝缘材料易老化失效。本文深入探讨绝缘性能检测技术,涵盖传统与新型方法,对比分析其适用性;同时研究绝缘故障修复技术,包括传统与新型修复手段及效果评估。此外,还提出基于状态的维护策略、智能监测系统设计思路,以及标准化与安全性规范,为保障航空电气系统绝缘性能提供全面参考。

关键词: 航空电气系统;绝缘性能检测;修复技术

引言: 航空电气系统作为飞机的“神经与血液”,其绝缘性能是保障飞行安全、维持系统稳定运行的核心要素。然而,航空环境特有的强电磁干扰、极端温度变化、剧烈振动及高湿盐雾等恶劣条件,加速了绝缘材料的老化与失效,导致短路、击穿等故障频发。因此,如何通过高效精准的检测技术实现绝缘状态实时评估,并依托先进修复技术延长绝缘寿命,成为航空电气领域亟待解决的关键问题。

1 航空电气系统绝缘性能基础理论

1.1 航空电气系统组成与工作特点

(1) 高压直流/交流系统结构:航空电气系统高压架构以直流270V、交流115V/400Hz为核心,涵盖发电、配电、用电及储能模块。直流系统采用分布式配电模式,包含发电机、整流装置、蓄电池组及直流负载接口,通过汇流条实现功率分配;交流系统则由恒频或变频发电机、变压器、逆变器组成,适配航空发动机、航电设备等不同负载需求,系统结构呈现模块化、集成化特征,确保供电可靠性。(2) 复杂电磁环境与极端工况:航空电气系统运行于强电磁干扰环境,雷达、通信设备等会产生电磁辐射,易引发绝缘电磁老化。同时,飞行器面临剧烈振动、宽温域(-55℃~125℃)波动及高湿度、盐雾等极端工况,振动会导致绝缘材料与导体连接松动、产生微裂纹,温度循环加速绝缘材料热氧化降解,恶劣环境进一步加剧绝缘性能劣化。

1.2 绝缘材料性能与失效机理

(1) 常用绝缘材料:航空领域主流绝缘材料包括聚酰亚胺、环氧树脂、硅橡胶等。聚酰亚胺具有优异的耐高温(长期使用温度达200℃以上)和耐辐射性能,广泛应用于电机绕组绝缘;环氧树脂绝缘强度高、粘接性好,常用于配电装置封装;硅橡胶具备良好的弹性和耐候性,适用于极端温度环境下的密封绝缘。(2) 绝缘老化因素:绝

缘失效的核心诱因包括电老化、热老化、机械应力及环境侵蚀。电老化由局部放电、电晕等引发,会破坏材料分子结构;热老化源于温度升高导致的材料氧化裂解;机械应力来自振动、冲击等,造成材料疲劳破损;环境侵蚀则通过湿度、盐雾、化学介质等加速绝缘材料溶胀、腐蚀,多因素耦合作用下绝缘性能逐步衰减直至失效^[1]。

2 航空电气系统绝缘性能检测技术

2.1 传统检测方法

(1) 绝缘电阻测试法:通过兆欧表向被测绝缘部件施加直流高压,测量绝缘电阻值判断绝缘状态。该方法操作简便、成本低廉,能快速筛查绝缘严重劣化或破损故障,是航空电气系统绝缘检测的基础手段,但无法识别早期轻微老化缺陷,且易受环境湿度、温度影响,检测结果存在一定局限性。(2) 介质损耗角正切值测量法:基于绝缘材料在交流电场中的能量损耗特性,通过测量介质损耗角正切值($\tan\delta$)评估绝缘老化程度。 $\tan\delta$ 增大通常意味着绝缘内部存在极化异常或局部缺陷,该方法对绝缘热老化、受潮等故障敏感性较高,适用于电机绕组、电容等关键部件检测,但需专业精密仪器,现场测试易受电磁干扰影响精度。(3) 局部放电检测法:高频脉冲电流法通过检测局部放电产生的脉冲电流信号,定位放电位置与强度;超声波法则捕捉放电伴随的超声波信号,实现非接触检测。两种方法能有效识别绝缘内部空隙、裂纹等早期缺陷,为绝缘劣化预警提供依据,但高频脉冲电流法易受电网干扰,超声波法检测范围有限,需结合使用提升可靠性。

2.2 新型检测技术

(1) 基于红外热成像的无损检测技术:利用红外热像仪捕捉绝缘部件因缺陷导致的局部发热差异,形成热成像图直观呈现故障位置。该技术为非接触式检测,可实现大面积快速筛查,适用于电缆敷设、配电装置等复

杂结构的在线检测,能识别绝缘破损、接触不良等故障,但受环境温度、遮挡物影响,对微小缺陷识别精度不足。(2)频域反射法(FDR)与时域反射法(TDR):FDR通过分析不同频率信号在绝缘介质中的反射特性,判断绝缘缺陷类型与程度;TDR则利用阶跃脉冲信号的反射波形成定位故障点。两种方法定位精度高,能实现绝缘缺陷的定量分析,适用于电缆绝缘检测,其中TDR更适用于故障快速定位,FDR对早期绝缘老化的识别更具优势^[2]。(3)人工智能与大数据驱动故障预测技术:整合多维度检测数据(绝缘参数、工况数据),通过机器学习算法构建故障预测模型,实现绝缘状态的精准评估与故障预判。该技术突破传统检测的滞后性,能提前预警潜在故障,为维护决策提供数据支撑,但依赖海量数据积累,模型训练与优化需结合航空工况持续完善。

2.3 检测技术的对比与适用性分析

(1)不同工况下的技术选型:在线检测优先选用红外热成像、TDR/FDR等非接触、不中断系统运行的技术,适配飞行间隙或运行中的状态监测;离线检测可采用绝缘电阻测试、介质损耗角测量等方法,结合精密仪器实现深度检测,适用于定期维护或故障排查阶段。(2)检测精度与效率的权衡:传统检测方法效率高、成本低,但精度有限,适用于初步筛查;新型检测技术精度更高,能识别早期缺陷,但部分技术(如AI驱动预测技术)操作复杂、成本较高。实际应用中需根据检测需求权衡,采用“初步筛查+精准定位”的组合模式,在保证检测效果的同时提升作业效率。

3 航空电气系统绝缘故障修复技术

3.1 绝缘故障类型与定位方法

(1)短路、击穿、爬电等故障模式:短路故障多由绝缘层破损导致导体直接接触,引发电流骤增,易损坏电气设备;绝缘击穿是绝缘材料在强电场作用下丧失绝缘性能,形成导电通道,分为电击穿、热击穿等类型,多由材料老化或过电压引发;爬电则是沿绝缘表面的局部放电现象,常因绝缘表面脏污、受潮导致,长期发展会引发绝缘失效。三种故障均会严重影响系统供电安全,需快速识别处置。(2)基于阻抗测量的故障定位技术:通过测量故障点前后的阻抗变化定位故障位置,核心原理是绝缘故障会导致局部阻抗显著下降,利用阻抗分析仪施加特定频率信号,分析信号反射与衰减特性,精准锁定故障区域。该技术操作简便、定位精度高,适用于电缆、绕组等典型绝缘结构,可配合时域反射法提升定位效率,为后续修复提供精准方位指引^[3]。

3.2 传统修复技术

(1)绝缘材料更换与重新包扎:针对绝缘层严重破损、老化的部件,拆除失效绝缘层,更换聚酰亚胺薄膜、环氧树脂套管等适配的航空级绝缘材料,按规范重新包扎固定。该技术修复彻底、可靠性高,是航空电气系统绝缘修复的基础方法,适用于电机绕组、电缆接头等关键部位,但施工周期长,需专业人员操作,且部分复杂结构更换难度较大。(2)局部修补工艺:对于局部微小破损、爬电痕迹等轻度故障,采用绝缘涂料、硅橡胶喷剂等材料进行局部涂覆或喷涂。涂覆工艺适用于平面或简单曲面,通过刷涂形成均匀绝缘层;喷涂工艺适配复杂结构,可实现快速覆盖。两种工艺操作灵活、成本低、效率高,能快速恢复局部绝缘性能,但修复效果依赖施工环境,长期稳定性弱于整体更换。

3.3 新型修复技术

(1)自修复绝缘材料:微胶囊技术将修复剂封装于微胶囊中,嵌入绝缘材料,当绝缘破损时胶囊破裂,修复剂自动溢出固化,填补缺陷;形状记忆聚合物则在外界刺激(热、光)下恢复原始绝缘形态,实现自主修复。两种技术可实现故障的实时自主修复,大幅提升系统可靠性,适用于难以人工检修的部位,但目前材料成本较高,大规模应用受限。(2)激光熔覆与3D打印修复技术:激光熔覆利用高能激光将绝缘粉末材料熔覆于故障表面,形成致密绝缘层;3D打印则通过逐层堆积绝缘材料,精准修复复杂形状的绝缘结构。两种技术修复精度高、结合强度好,可适配个性化修复需求,尤其适用于精密电气部件,但设备投入大,对操作技术要求严苛,修复效率相对较低^[4]。(3)纳米复合材料增强修复技术:将纳米粒子(如纳米SiO₂、纳米Al₂O₃)添加到传统绝缘修复材料中,提升修复层的绝缘强度、耐高温性和抗老化性能。该技术可强化修复效果,延长绝缘使用寿命,适配航空极端工况,且兼容性强,可与传统涂覆、包扎工艺结合使用,是现有修复技术的重要升级方向,目前已在部分航空电气部件修复中试点应用。

3.4 修复效果评估方法

(1)电气性能测试:耐压试验通过施加规定高压,检验修复后绝缘层的耐压能力,判断是否存在潜在缺陷;局部放电检测则监测修复区域是否存在局部放电信号,评估绝缘内部完整性。两种测试可快速验证修复后的核心电气性能,是修复效果评估的基础环节,需严格按照航空电气标准执行。(2)长期稳定性验证:通过模拟航空极端工况(高温、高湿、强振动)开展加速老化试验,监测修复层在长期应力作用下的性能衰减情况。结合老化过程中的绝缘电阻、介质损耗等参数变化,预判修复部

位的使用寿命。该方法可弥补短期电气测试的局限性，确保修复效果满足航空电气系统的长期可靠运行要求。

4 航空电气系统绝缘性能维护策略优化

4.1 基于状态的维护(CBM)策略

(1) 检测数据驱动的维护周期优化：突破传统固定周期维护的局限性，通过整合绝缘电阻、局部放电、介质损耗等多维度检测数据，建立数据与绝缘状态的映射关系。利用统计分析模型识别绝缘性能劣化趋势，针对不同劣化阶段动态调整维护周期——对性能稳定的部件延长维护间隔，对劣化加速的部件缩短周期并优先检修。该模式可减少无效维护作业，降低维护成本，同时避免因过度维护影响系统正常运行。(2) 剩余寿命预测模型构建：基于绝缘材料老化机理，融合检测数据、工况参数(温度、振动、湿度)构建剩余寿命预测模型。采用机器学习算法(如支持向量机、神经网络)训练模型，实现对绝缘剩余寿命的精准预判。模型需结合航空极端工况特性持续迭代优化，为维护决策提供量化依据，提前规划备件更换、修复作业，避免突发绝缘故障导致的飞行风险。

4.2 智能监测系统设计

(1) 传感器网络与物联网集成：构建分布式传感器网络，在电缆接头、电机绕组、配电装置等关键绝缘部位部署微型绝缘传感器、温度传感器、振动传感器。通过物联网技术实现传感器数据的实时采集与传输，形成全链路绝缘状态感知体系。传感器选型需满足航空轻量化、抗电磁干扰、耐高温等要求，网络布局兼顾检测覆盖全面性与安装便捷性。(2) 边缘计算与云端数据分析平台：采用“边缘+云端”协同架构，边缘节点对采集的实时数据进行预处理，过滤冗余信息、识别异常信号，降低数据传输压力；云端平台负责海量数据的深度分析、模型训练与维护决策生成。平台具备数据可视化、故障预警、维护计划推送等功能，支持多终端访问，实现绝缘维护的智能化、远程化管理，提升维护响应效率^[5]。

4.3 标准化与安全性规范

(1) 航空适航标准对绝缘性能的要求：严格遵循FAA(美国联邦航空管理局)、EASA(欧洲航空安全局)等权威机构的适航标准，明确绝缘材料选型、性能测试、维护周期的强制性要求。例如，FAA的AC25.863-1标准对电气系统绝缘的耐极端环境性能、故障容错能力提出具体指标；EASA的CS-25规范要求绝缘维护需通过符合性验证，确保维护后系统满足飞行安全底线。(2) 修复工艺的标准化流程与质量控制：制定绝缘修复全流程标准，涵盖故障定位、材料选型、施工操作、术后检测等关键环节。明确不同修复技术(如更换包扎、涂覆修补、3D打印修复)的操作规范、工艺参数及人员资质要求；建立质量控制体系，对修复材料的进场检验、施工过程的工序验收、修复后的性能测试实施全链条管控，确保修复质量一致性与可靠性，避免因工艺不规范导致二次故障。

结束语

航空电气系统绝缘性能的检测与修复是保障飞行安全的关键环节。通过综合运用传统与新型检测技术，可实现对绝缘状态的精准评估与早期预警；结合材料创新与智能修复手段，能有效延长绝缘寿命、提升系统可靠性。未来，随着人工智能、物联网等技术的深度融合，航空电气绝缘维护将向智能化、预测性方向发展，为航空工业的高质量发展提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1]王小明.航空电气系统绝缘检测技术研究[J].电气应用,2022,41(3):45-48
- [2]李强.航空电气设备绝缘修复技术探讨[J].电子世界,2021,(12):123-125
- [3]张伟.航空电气系统绝缘性能评估与维护策略研究[J].电子技术与软件工程,2023,(5):98-100
- [4]李凯,何琦.航空电气系统绝缘故障分析[J].建筑技术科学,2024,(4):73-75.
- [5]李文贵,杨威,罗峰.航空电气系统绝缘性能检测与修复技术探讨[J].中国科技信息,2025,(4):84-85.