

# 航空电子产品维修中的静电防护

李 凯 王根生

中国南方航空工程技术公司新疆基地 新疆 乌鲁木齐 830016

**摘要:** 航空电子产品维修中, 静电防护至关重要。静电放电可致器件永久失效或隐性损伤, 影响飞行安全。防护需从管理、技术、环境三方面着手: 建立规范防护体制, 使用防静电材料与工具; 控制温湿度, 利用离子风机中和静电; 明确划分防静电区域, 严格操作流程。通过全员培训、定期检测与持续改进, 构建全生命周期静电防护体系, 降低静电危害, 提升航空电子产品维修质量与可靠性。

**关键词:** 航空电子产品; 维修; 静电防护

引言: 在航空电子技术飞速发展的当下, 航空电子产品以高集成度、高灵敏度及复杂环境适应性为特征, 但其对静电(ESD)的脆弱性成为维修保障的重大挑战。静电放电可在毫秒间引发器件硬击穿或隐性损伤, 导致系统故障甚至危及飞行安全。本文聚焦航空电子产品维修中的静电防护, 系统分析静电产生机理与危害模式, 探讨防护技术体系与实践路径, 为提升维修质量与航空安全提供理论支撑与实践指导。

## 1 航空电子产品静电危害机理分析

### 1.1 静电的产生与积累

(1) 常见静电产生机制主要包括摩擦起电和感应起电。摩擦起电是最普遍的形式, 两种不同介电常数的物质相互摩擦时, 电子会发生转移, 使一种物质带正电、另一种带负电; 感应起电则是带电体靠近导体时, 导体内部电荷重新分布, 形成等量异号电荷, 虽未直接接触却能产生静电。此外, 剥离起电、传导起电也在部分场景中存在。(2) 航空维修环境中的静电来源集中在人体、工具和工作台。人体活动时, 衣物与皮肤摩擦可积累数千至上万伏静电; 维修工具如螺丝刀、镊子等与器件、包装接触摩擦, 会携带静电; 工作台表面材质若为绝缘材料(如普通塑料), 易吸附灰尘并积累静电, 且不易导散, 形成持续静电隐患。

### 1.2 静电放电(ESD)的破坏模式

(1) 硬击穿是最严重的破坏, 静电放电产生的瞬时大电流和高电压, 会直接烧毁器件内部的PN结、金属连线等核心结构, 导致器件永久性失效, 无法恢复正常工作, 直接影响设备运行。(2) 软损伤具有隐蔽性, 静电放电能量未达到硬击穿阈值, 但会造成器件内部细微损伤, 导致其潜在性能退化、工作稳定性下降, 或缩短使用寿命, 在航空复杂工况下易突发故障。(3) 电磁干扰(EMI)会影响航空电子系统整体运行, 静电放电瞬间会

产生高频电磁脉冲, 干扰雷达、导航、通信等敏感系统的信号传输, 引发系统误判、信号失真, 严重时危及飞行安全<sup>[1]</sup>。

### 1.3 航空电子产品的静电敏感特性

(1) 典型器件的ESD敏感度分为不同等级: 集成电路(尤其是CMOS电路)、传感器、存储器等属于高敏感器件, 部分器件静电敏感度阈值低于100V, 轻微静电放电即可造成损伤; 功率器件等敏感度相对较低, 但仍需严格防护。(2) 航空电子设备与民用电子产品的防护差异显著: 航空设备需适应高空、低温、强辐射等恶劣环境, 静电防护要求更高, 需具备抗瞬时强静电、长效防护能力; 民用产品主要针对日常环境, 防护标准较低, 且无需考虑极端工况下的静电稳定性。

## 2 航空电子产品维修中的静电防护技术体系

### 2.1 基础防护原则

(1) 防静电区域(EPA)的规划与建设需符合航空维修标准, 明确划分核心防护区、过渡区和非防护区, 核心区用于器件拆装、检测等关键操作, 需铺设防静电地面、安装防静电屏蔽帘, 严禁无关人员进入; 过渡区用于人员、工具的静电释放与检测, 设置接地桩、静电检测仪; 区域内张贴明显标识, 配备专用防护器材, 定期对区域防护性能进行检测校准, 确保静电导散、屏蔽效果达标。(2) 静电防护的“三要素”(接地、屏蔽、中和)是防护体系的核心。接地是最基础的防护手段, 通过可靠接地将人体、设备、工具上的静电及时导散至大地, 避免积累; 屏蔽用于隔离外部静电场, 采用防静电屏蔽材料包裹敏感器件、搭建屏蔽空间, 防止外部静电感应产生危害; 中和针对绝缘材料无法接地导散的静电, 通过离子发生器等设备产生正负离子, 中和物体表面的静电电荷, 消除静电隐患。

### 2.2 关键防护技术

### 2.2.1 人体静电防护

(1) 防静电腕带、工作服、鞋袜需选用符合航空标准的专用产品,腕带选用可调节式导电腕带,与人体皮肤紧密接触,另一端可靠接地,每日上岗前需检测腕带导通性能;工作服、鞋袜采用导电纤维材质,避免穿戴化纤衣物,防止摩擦起电,工作服需全程穿戴,不得随意脱下;定期对防护用品进行检测,更换老化、失效产品。(2) 人体接地电阻需严格遵循航空维修规范,控制在 $1\text{M}\Omega$ 以内,接地线路需独立铺设,不得与其他电力线路共用,避免接地不良导致静电积累;维修人员上岗前需通过静电检测仪检测人体接地电阻,不合格者不得进入防静电区域开展操作<sup>[2]</sup>。

### 2.2.2 设备与工具防护

(1) 防静电工作台需具备良好的导电性能,台面铺设防静电橡胶垫,橡胶垫可靠接地,台面不得放置绝缘物品;器件包装材料选用防静电屏蔽袋、防静电周转箱,严禁使用普通塑料、泡沫等绝缘包装,包装材料需具备一定的抗静电时效,防止器件在包装、周转过程中积累静电。(2) 防静电工具(如电烙铁、吸锡器)需符合专用设计规范,电烙铁选用防静电恒温电烙铁,烙铁头需可靠接地,避免焊接过程中静电通过烙铁传递至器件;吸锡器、螺丝刀等工具采用导电材质制成,表面进行防静电处理,使用前需检测其静电导散性能,确保工具自身不携带静电,不引发静电放电。

### 2.2.3 环境控制技术

(1) 温湿度对静电积累影响显著,温度过高、湿度过低时,物体表面电阻增大,静电不易导散,易大量积累;航空电子产品维修环境的温湿度需控制在标准范围,温度保持在 $18\sim 25^\circ\text{C}$ ,相对湿度控制在 $45\%\sim 65\%$ ,通过空调、加湿器等设备实现精准调控,每日定时检测并记录温湿度数据,及时调整设备运行参数。(2) 离子风机、静电消除器用于中和环境中的静电,离子风机主要用于防静电工作台上方,持续产生正负离子,中和器件、工具表面的静电,适用于器件拆装、检测等关键操作工位;静电消除器用于防静电区域整体空间,针对绝缘材料表面的静电进行中和,尤其适用于包装材料、绝缘工具等无法接地的物品,确保区域内整体静电水平达标<sup>[3]</sup>。

## 2.3 维修流程中的静电防护规范

(1) 器件拆装、运输、存储的防护操作要点明确,拆装时需在防静电工作台上进行,操作人员穿戴齐全防护用品,使用专用防静电工具,避免用手直接接触器件引脚;运输过程中,器件需放入防静电包装内,避免碰撞摩擦产生静电,运输工具需具备防静电性能;存储时,

器件需放置在防静电周转箱或专用存储柜中,远离高压设备、化纤物品等静电污染源,定期检查存储环境的静电防护性能<sup>[4]</sup>。(2) 建立完善的维修记录与ESD事件追溯机制,维修人员需详细记录每一批次器件的维修时间、操作人、防护措施落实情况;若发生静电放电(ESD)事件,需立即停止操作,记录事件发生的时间、地点、操作环节、受损器件情况,分析事件原因,采取针对性的整改措施;所有记录需妥善留存,便于后续追溯、核查,持续优化静电防护体系。

## 3 航空电子产品维修场景下的静电防护案例分析

### 3.1 典型维修场景模拟

(1) 机载计算机主板维修中的ESD风险点主要集中在三个环节:一是主板拆装时,操作人员未规范佩戴防静电腕带,手部静电直接接触CMOS集成电路引脚,易引发软损伤;二是维修台面未铺设合格防静电橡胶垫,主板放置时与台面摩擦积累静电,且无法及时导散;三是维修工具未做防静电处理,电烙铁未接地,焊接过程中静电通过烙铁头传递至主板核心器件,增加硬击穿风险。(2) 航电设备调试阶段的静电干扰问题突出:调试环境温度湿度未控制在标准范围,干燥环境导致调试仪器外壳积累静电,产生高频电磁脉冲;调试线缆与敏感器件接触时,静电放电引发信号干扰,导致导航模块数据失真、通信链路中断,调试人员易误判为设备本身故障,延误维修进度。

### 3.2 防护技术应用效果评估

(1) 接地系统电阻测试数据对比:应用规范接地技术前,人体接地电阻平均值为 $1.8\text{M}\Omega$ ,超出 $1\text{M}\Omega$ 的控制标准,设备接地电阻平均值为 $2.2\text{M}\Omega$ ;优化接地系统、规范接地线路铺设后,人体接地电阻平均值降至 $0.6\text{M}\Omega$ ,设备接地电阻平均值降至 $0.8\text{M}\Omega$ ,均符合航空维修静电防护标准,静电导散效果显著提升。(2) 防静电材料使用前后的器件故障率统计:未使用专用防静电材料时,机载计算机主板维修器件故障率为 $3.2\%$ ,主要为静电引发的器件软损伤和硬击穿;全面使用防静电腕带、屏蔽包装、工作台垫等材料后,器件故障率降至 $0.4\%$ ,防护效果提升 $87.5\%$ ,有效降低了维修成本和器件损耗。

### 3.3 常见问题与改进措施

(1) 维修人员防护意识不足的解决方案:建立分层培训体系,定期开展静电危害、防护技术和操作规范培训,结合典型ESD故障案例强化警示;实行上岗前静电防护操作考核,考核不合格者不得开展维修作业;在防静电区域张贴警示标识,设置专人监督检查,将防护措施落实情况纳入维修人员绩效考核,倒逼意识提升。(2)

老旧机型维修中的静电防护兼容性挑战：老旧机型设计时未充分考虑静电防护，部分设备无专用接地接口，与现有防静电设备兼容性差；改进措施为加装专用接地转接装置，适配老旧机型接口，确保接地可靠；对老旧设备外壳进行防静电涂层处理，减少静电积累；针对老旧器件敏感度差异，定制专用防静电包装和防护工具，兼顾兼容性与防护效果，避免因防护不当引发故障。

#### 4 航空电子产品维修中静电防护技术的未来发展趋势

##### 4.1 新材料与智能监测技术的应用

(1) 纳米导电材料在防静电包装中的创新应用成为重要方向。传统防静电包装存在防护时效短、导电性能不均等问题，纳米导电材料（如纳米碳管、纳米银粉）可与包装基材融合，制成轻薄、柔韧且导电性能优异的防静电包装材料，不仅能高效导散静电，还能提升包装的防潮、防辐射性能，适配小型化、高精度航电器件的存储与运输需求，同时可降低包装材料损耗，实现绿色环保。(2) 实时静电监测系统的开发聚焦物联网传感器技术的集成应用。通过在防静电区域、工作台、维修工具上安装物联网静电传感器，可实时采集静电电压、接地电阻等关键数据，通过无线传输至监控终端，实现静电隐患的实时预警、数据溯源与远程监控；当静电参数超出标准范围时，系统自动发出报警信号，提醒工作人员及时处置，替代传统人工检测模式，提升防护的智能化水平与可靠性。

##### 4.2 维修模式变革对静电防护的影响

(1) 模块化维修与现场快速更换（LRU）模式，对静电防护的便捷性、高效性提出更高要求。该模式下，维修人员需在现场快速拆装、更换航电模块，传统复杂的防护流程难以适配，未来将研发便携式、一体化防静电工具套装，简化防护操作步骤；同时优化模块包装设计，集成内置防静电结构，确保模块在现场运输、拆装过程中全程处于有效防护状态，兼顾维修效率与防护效果<sup>[5]</sup>。(2) 无人机维修场景的兴起，催生轻量化、便携化静电防护方案。无人机航电器件体积小、敏感度高，且维修多在户外现场开展，无法依托固定的防静电区域，未来将研发轻量化防静电工作服、便携式离子风机、可折叠

防静电工作台等产品，适配户外无固定电源、空间狭窄的维修场景，同时优化防护材料的便携性与耐用性，满足无人机野外维修的静电防护需求。

##### 4.3 标准化与适航认证的协同发展

(1) 适航规章对静电防护的要求持续更新，以CCAR-43部为代表的国内适航规章，将进一步细化航电维修静电防护的操作标准、检测要求，明确新型航电器件、维修模式的防护规范，强化静电防护措施强制性与可操作性；同时结合新型防护技术的应用，补充新材料、智能监测设备的适航认证要求，确保防护技术与适航标准同步升级。(2) 国际标准与国内规范的互认机制逐步完善。目前国内外航空静电防护标准存在一定差异，未来将加强国际协作，推动我国静电防护标准与国际标准（如IEC、SAE相关标准）的对接与互认，简化跨境航空维修的合规性审核流程；同时结合我国航空维修行业特点，优化国内规范，形成“国际接轨、贴合国情”的标准化体系，提升我国航空维修静电防护的国际化水平。

##### 结束语

航空电子产品维修中的静电防护，是保障飞行安全与设备可靠性的重要防线。通过科学解析静电危害机理、构建多层次防护技术体系，并强化人员培训与流程管控，可有效降低静电风险。未来，随着新材料、智能监测技术及模块化维修模式的发展，静电防护将向智能化、精准化方向演进，为航空电子系统的全生命周期维护提供更强支撑，助力航空事业安全、高效发展。

##### 参考文献

- [1]李翔宇.航空电子设备维修中静电危害及防护措施探讨[J].科技资讯,2023,21(01):89-92.
- [2]蒋成刚.航空电子设备维修中静电危害及防护措施[J].中国航务周刊,2021,(42):58-59.
- [3]王作天.航空电子产品维修中的静电防护[J].电子技术与软件工程,2020,(05):237-238.
- [4]杨乐.航空电子设备维修中静电的危害及防护措施分析[J].科技风,2020,(06):253-255.
- [5]姜鹏.航空电子设备维修中静电危害及防护措施探析[J].中国设备工程,2025,(04):53-55.