

电子装配静电防护（ESD）设计与测试方法研究

兰书财

南昌技师学院 江西南昌 330038

摘要：静电放电俗称ESD，是电子装配过程中影响产品可靠性稳定性的核心隐患，对应的防护设计和科学测试，是保障电子设备长期稳定运行，降低失效风险的关键环节，研究覆盖电子装配全流程，梳理电子装配ESD防护的核心设计原则，整理不同的技术实现路径，分析不同装配场景下防护设计需要满足的要求，整理ESD测试的重要标准、测试方式、实际操作中的注意事项，讨论当前ESD设计测试环节存在的核心问题，提出对应调整方向，支撑电子装配领域ESD防护设计优化，规范测试方法应用，辅助提高电子装配产品的抗静电性能，强化产品市场竞争力，同时为江西电子信息产业链完善、产业集群提质及“1269”行动计划落地提供技术支持。

关键词：电子装配；静电防护（ESD）；防护设计；测试方法；抗静电性能

引言

电子技术持续向高密度微型化高频化方向发展，电子元器件的静电敏感度持续提高，静电放电可引发元器件损坏电路功能紊乱产品寿命缩短，这类问题出现频率不断增加，直接约束电子装配产品的质量可靠性，电子装配从开始到结束，包括元器件存储转运焊接组装调试等多个环节。当前，江西电子信息产业已成为全省首个万亿级产业集群，形成了以南昌、吉安、赣州、九江等为重镇的产业链布局，《江西省制造业重点产业链现代化建设“1269”行动计划（2023-2026年）》明确将电子信息作为重点培育的先进制造业集群，着力推动产业延链补链强链。因此，系统开展电子装配ESD防护设计与测试方法的综述研究，明确核心技术要点与优化路径，不仅对于推动电子装配行业高质量发展、降低静电相关失效损失具有重要的理论与实践意义，更能助力江西电子信息产业链提质增效，支撑“1269”行动计划落地见效。

一、电子装配ESD防护设计核心理论与原则

（一）电子装配ESD产生机制与危害特性

电子装配环节中，静电生成途径包括摩擦、感应、传导三类，生成强度受装配材料自身特性、作业环境条件、现场操作流程影响，摩擦起电多出现在元器件和包装材料、工装夹具发生接触分离时，感应起电多发生在带电体靠近静电敏感元器件时，传导起电依靠导体直接传递静电荷，三类生成方式可以单独作用，也可共同作用，引发静电积累，干扰电路信号，严重放电可击穿半

导体器件绝缘层。

（二）电子装配ESD防护设计核心原则

电子装配领域的ESD防护设计，需遵从“源头控制、过程阻断、快速泄放、分级防护”四项核心原则，完成全流程全方位静电管控，源头控制围绕减少静电生成展开，优化材料选择，规范操作流程，可以从根本上降低静电积累的可能性，过程阻断聚焦切断静电传导路径，采用屏蔽隔离类设计，防止静电荷传递到静电敏感元器件。快速泄放依靠搭建低阻抗接地系统，将已经积累的静电荷及时导入大地，规避电荷聚集引发放电问题。

（三）电子装配ESD防护设计的核心要素

电子装配ESD防护设计的核心要素分为三个部分，分别是材料选型、结构设计、接地设计，三者相互配合，搭建出完整的防护模式，材料选型环节，优先选用抗静电、导电类材料，避开易积累电荷的普通绝缘材料，生产或设计中必须用到绝缘材料时，要完成防静电改性处理，结构设计方面，重点把控屏蔽性能、绝缘间距两项指标，依靠合理布局降低静电耦合，消除尖端结构引发的静电荷聚集。

二、电子装配全流程ESD防护设计关键技术

（一）元器件存储与转运环节ESD防护设计

电子装配环节中，ESD防护的首要工作围绕元器件的存储和转运展开，防护工作的核心，是避免元器件进入装配工序前受到静电损伤，存储环境要配置防静电存储柜，也要放置防静电周转箱，阻隔元器件接触容易积累静电的材料，同步调整环境的温度与湿度，控制静电

生成, 转运阶段, 元器件为了用防静电包装材料, 比如金属化屏蔽袋、导电泡沫都符合使用要求, 包装材料的表面电阻率需要满足对应规范, 阻断静电荷穿过包装后作用于元器件本身。对静电敏感度较高的元器件, 要分开存放, 分开转运, 放置防静电缓冲材料, 规避转运过程中摩擦、碰撞生成静电, 操作人员要穿戴符合规范的防静电装备, 完成转运全流程的静电管控。

(二) 焊接与组装环节ESD防护设计

焊接和组装是电子装配环节中静电产生频率最高的部分, 防护设计围绕操作环境、工装设备、操作规范三个方向展开, 操作环境要铺设防静电地板和防静电工作台, 工作台加装接地垫, 保证操作区域内的静电可及时排出, 焊接设备使用接地烙铁, 烙铁头要定期检测接地性能, 防止焊接阶段静电通过烙铁转移到元器件内部。组装环节, 工装夹具选用导电类或者抗静电材料, 避免夹具和元器件、PCB板之间相互摩擦生成静电, 操作人员严格穿戴防静电手环、防静电服、防静电鞋, 手环和接地系统保持稳定连接, 保证人体携带的静电可及时排出。

(三) PCB板装配ESD防护设计

PCB板是电子装配的核心载体, 它的ESD防护设计直接关系到整个产品的抗静电性能, PCB板布局要遵从“敏感元件远离静电入口”的原则, 把IC、晶振等静电敏感元件布置在远离设备边缘和接口的位置, 不让这些元件直接暴露在静电放电区域, 接口位置预先留出ESD保护器件的专用区域, 保证保护器件贴近引脚, 缩短走线长度, 提高防护效率。布线阶段, 高速信号线不能长距离裸露, 可采用地线包围或屏蔽层设计, 避开锐角走线, 减少静电荷积累, 多层板设计中, 可将接地层安排在电源层相邻位置, 借助层间电容抑制静电耦合, PCB板可增设大面积接地铜箔或地层, 缩短回流路径阻抗, 在敏感元件周边设置接地过孔, 提高静电泄放效率。

(四) 成品调试与包装环节ESD防护设计

成品调试环节的ESD防护, 核心是避免调试过程中静电干扰、损坏成品电路, 调试设备要接地, 调试工具选防静电类型, 调试人员也要维持防静电状态, 防止调试过程产生的静电影响产品功能, 成品包装环节也要延续防静电管控, 成品要装入防静电包装材料, 外部纸箱标注防静电标识。包装过程不要让成品和包装材料发生剧烈摩擦, 管控包装环境内的静电极性和强度, 高精密度电子成品, 包装完成后要做静电检测, 确认成品处于包装状态时不会受到静电危害, 同时标注防静电警示, 为

后续存储、运输环节的静电防护作出指引。

三、电子装配ESD测试方法与标准规范

(一) 电子装配ESD测试核心标准体系

电子装配ESD测试需要遵循统一的标准规范, 保证测试结果具备科学性准确性和可比性, 当前, 国际通行标准包括IEC 61000-4-2静电放电抗扰度测试、ANSI/ESD S20.20静电放电控制方案建立标准, 国内应用的标准以GB/T 17626.2-2018静电放电抗扰度试验为主, 这份标准等效采用IEC 61000-4-2: 2018版本内容, 划定电子装配ESD测试的方法等级环境要求等核心内容。不同类型的电子装配产品, 对应设有专项测试标准, 包括元器件静电敏感度测试, 包装材料防静电性能测试, 装配环境静电测试等内容, 最终搭建出完整的标准模式, 给ESD测试划出明确的执行框架。

(二) 电子装配ESD核心测试方法

电子装配领域的ESD测试包括两类核心测试类别, 分别为接触放电测试和空气放电测试, 装配环境静电测试、元器件静电敏感度测试、防护器件性能测试等, 多作为辅助测试方法存在, 接触放电测试面向带有金属外壳、导电表面的电子装配产品和元器件进行, 测试时由放电枪直接接触被测对象, 施加静电放电, 观测被测对象的功能状态, 判断它的抗静电能力。测试过程中, 需严格控制放电电压、放电极性、放电次数, 保证不同样品测试条件一致, 空气放电测试面向带有绝缘材料表面、非导电表面的被测对象, 测试时放电枪与被测对象之间预留一定距离, 依靠空气击穿产生电弧完成静电放电施加, 还原实际应用场景中人体接触产品时产生静电放电的状态, 重点完成产品外壳防静电屏蔽性能的评估。

(三) 电子装配ESD测试实操要点与质量控制

ESD测试实际操作的质量, 直接关联测试结果的可靠程度, 实操环节需要重点管控三个部分, 分别为测试环境、测试设备和测试操作, 测试环境要严格符合标准设定的要求, 管控温湿度数值、电源稳定状态、接地效果, 排除环境因素对测试结果的干扰, 测试设备要定期完成校准, 覆盖ESD模拟器、示波器、电阻率测试仪等品类, 保证设备性能匹配测试标准, 测试数据精准可靠。测试操作环节, 操作人员要熟悉测试标准和设备操作规范, 准确设置测试参数, 合理选定测试位置, 保证每一个测试点的测试条件保持统一, 测试过程中实时监控被测对象的功能状态, 详细记录测试数据和异常情况, 排除操作失误引发的结果偏差, 测试结束后, 要整理分析

测试数据，整理出完整的测试报告，支撑防护设计的优化工作。

四、电子装配ESD设计与测试的现存问题及优化方向

（一）电子装配ESD设计与测试现存核心问题

现阶段电子装配领域进行ESD设计与测试工作，依然存在四项核心问题，第一项为防护设计缺少对应匹配方案，部分生产企业直接沿用统一防护策略，未结合元器件静电敏感度装配场景风险等级调整设计内容，防护强度达不到要求或是超出实际需求，产品可靠性受影响，设计成本也会上升。第二项为全流程防护管控存在空白，部分生产企业只把注意力放在组装焊接等核心环节的ESD防护上，元器件存储转运成品包装等环节的静电管控未得到足够重视，元器件会在非核心环节受到静电损伤，第三项为测试方法落地不符合规范，部分生产企业未严格依照标准要求进行测试，测试参数设置存在偏差，测试位置选择不合理，测试设备也没有按周期完成校准，测试结果脱离实际情况，无法准确呈现产品抗静电性能。第四项为防护技术和测试技术融合程度不足，设计阶段没有提前纳入测试相关需求，测试环节发现的问题无法第一时间传递回设计端，设计优化进度放缓，无法建立“设计-测试-优化”闭环管理模式。尤其对于江西电子信息产业集群内的中小配套企业，上述问题更为突出，一定程度上制约了产业链整体抗风险能力和产品竞争力，与“1269”行动计划中先进制造业集群提质升级的要求存在差距。

（二）电子装配ESD设计与测试优化方向

结合电子装配技术发展趋势，梳理出四项优化方向，回应前文梳理出的问题，第一项为建立差异化防护设计模式，结合元器件静电敏感度测试结果和装配场景风险评估内容，制定分级防护策略，对材料选型、结构设计、接地设计做出调整，平衡防护效果与成本投入，让防护设计更具针对性与科学性。第二项为完善全流程静电管控机制，把ESD防护覆盖到元器件存储、转运、焊接、组装、调试、包装等各个环节，为每一环节设定静电防护规范，强化过程管理，避免静电防控出现遗漏，第三项为规范ESD测试方法应用，严格遵循国内外相关标

标准要求，定期校准测试设备，规范测试操作流程，梳理分析测试数据，保证测试结果精准可靠，结合产品自身特点调整测试方案，压缩测试用时。第四项为推动防护技术测试技术融合，在设计阶段纳入测试需求，建立设计测试优化闭环管理模式，测试过程发现的问题可第一时间传回设计环节，让防护设计得到持续调整，同步进行新型防护材料和测试技术的研发应用，拉高电子装配ESD防护和测试的整体水平。针对江西电子信息产业链发展需求，上述优化方向可精准对接“1269”行动计划中电子信息先进制造业集群建设要求，助力南昌、吉安、赣州等产业阵地的企业补齐技术短板，推动产业链延链补链强链，提升产业集群整体质量效益。

结论

电子装配ESD防护设计与测试，是保障电子产品质量可靠性的核心环节，技术水平直接关联电子装配行业的发展质量，研究梳理电子装配ESD防护设计的核心理论，整理全流程涉及的关键技术，理清ESD测试的标准模式，归纳核心方法与实操要点，剖析当前领域内存在的核心问题，指明优化方向。补全现有标准模式，推动ESD防护设计与测试向标准化智能化方向发展，支撑电子装配产品实现更高质量发展。

参考文献

- [1] 刘尚合, 马贵蕾, 满梦华, 等. 电磁防护仿生研究进展[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1750-1762.
- [2] 陈豪, 刘其凤, 李永明, 等. 一种强电磁设备低频辐射特性等效建模方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5354-5368.
- [3] 王华清, 黄道春, 双明镜, 等. 基于一体化电磁骚扰传导模型的开关柜微机保护装置电磁干扰滤波器设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3280-3290.
- [4] 毋召锋, 徐延林, 刘培国, 等. 电磁防护技术发展综述与展望[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(4): 1-13.
- [5] 孔晓涵, 张雅娜, 吴嘉敏, 等. 基于低频表面超材料的超低场磁共振成像信噪比增强方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 3917-3927.