

浅析电缆装配可靠性

刘淑燕

陕西烽火通信集团有限公司 陕西 宝鸡 721006

摘要：随着电力、电子及航空航天等领域的快速发展，电缆在军事领域与民用通讯领域的应用较多，电子设备对电缆连接技术和可靠性要求也越来越高。电缆装配是电缆可靠性中的一个重要部分，直接影响到电子产品整机和系统的可靠性。本文系统探讨电缆装配可靠性，阐述其定义、指标、影响因素、测试评估方法及质量控制措施。明确可靠性涵盖规定条件、时间和预定功能三要素，MTBF、失效率等为关键量化指标；深入分析设计、材料、工艺及管理等因素的影响因素；提出常规性能测试、强化测试与在线监测结合的评估体系；构建从设计优化、工艺管控到供应链管理以及人员监督的全流程质量控制策略。

关键词：电缆；冷剥；热剥；手工焊接；压接

引言：电子设备中，电子设备系统、分系统之间的电气连接由导线或电缆来实现，电缆在军事领域与民用通讯领域的应用较多，主要作用是用于实现信号传输以及设备间的电能传输，保障各种电子装备工作性能，因此电缆的可靠性越来越重要。电缆装配是电缆可靠性中的一个重要部分，如果装配质量有问题，出现诸如：接地线断路，电缆电连接器插针与插针、插针与外壳短路/断路、电连接器接触对接触不良或端接部分虚焊/压接不到位等故障现象，严重影响到电子产品整机和系统的可靠性。本文从可靠性基础理论出发，剖析影响因素，提出测试评估方法与质量控制措施，旨在为电缆装配可靠性提升提供全面解决方案，推动行业技术发展。

以下从几个方面阐述了电缆装配中影响质量可靠性的装配工艺和因素。

1 电缆可靠性的定义与指标

电缆可靠性是指在规定的条件下和规定的时间内，电缆系统完成其预定功能的能力。这一定义包含以下三个关键要素：规定条件、规定时间和预定功能。（1）规定条件涵盖了电缆运行的物理环境（如温度、湿度、振动、电磁干扰等）、电气环境（电压、电流、频率等）以及安装工艺条件（装配流程、工具使用规范等）。

（2）规定时间。明确了可靠性的时效性，根据应用场景不同，时间要求差异显著，如核电站电缆需满足数十年的长期稳定运行，而临时施工用电缆仅需保障短期作业需求。（3）预定功能则包含电气性能（电能传输、信号传导）、机械性能（抗拉伸、弯曲）和环境防护性能（防水、防腐蚀）等多维度要求。电缆可靠性是系统性概念，不仅依赖电缆本体质量，更与电缆线与连接器匹配程度、端头处理、连接方式、等装配环节紧密相

关，任何一个环节的失效都可能导致整个电缆系统功能丧失。

2 电缆装配可靠性的影响因素

2.1 设计因素

电缆选型直接决定电缆基础可靠性。选型时，电气参数（电压等级、载流量、绝缘电阻）与机械参数（拉力强度）若不匹配实际工况，将引发过载、结构损伤等问题。路径规划中，布线设计不合理会使电缆承受额外应力，未考虑电磁兼容则可能导致信号干扰。接头与端子的结构设计影响电气连接稳定性：接触面积不足、压力不均会增大接触电阻；密封结构缺陷易引入外界杂质，降低绝缘性能。

2.1.1 电缆线外径与电连接器尾部附件结构尺寸匹配

一般来说，排除操作人员因素，电缆线与电连接器或端子孔径匹配装配的电缆可靠性是最高的。电连接器的尾部附件尺寸规格是按照一定规格的电缆线设计的，选择匹配的电缆线，则电连接器的尾部附件自然装配到位，电缆线无损伤，操作轻松，性能稳定，不但能很好的满足系统使用要求，且可靠性高。

2.1.2 电缆线外径大于/小于电连接器尾部附件结构尺寸

在电缆电气设计中，当电缆线外径无法匹配到相应规格的电连接器尾部附件，大于或小于电连接器尾部附件结构尺寸，装配时需采取一些非规范的方法，这些操作需减少或增加电缆体积，表面上看是一举多得的好事，但实际降低了电缆质量及可靠性：当电缆线外径大于电连接器结构尺寸时，需将电缆护套剥掉，导线上外加棉线或外套热缩，依据不同情况而选择，保证压板将电缆压紧。随着工作时间的推移，装配的电缆传输大电

流时容易造成短路现象,同时操作不当,极易造成电连接器尾部附件应力积存,降低电缆耐疲劳强度,易在力学环境条件下产生疲劳断裂;电缆线外径小于电连接器结构尺寸时,将电缆护套轴向刨开,焊接端子时将护套向外翻转,焊接后再将护套翻回来,剪掉部分护套,并外套热缩套管,增加厚度保证电缆压紧,若电缆未压紧,则导致焊点受力,使用过程中电缆出现断路现象。

2.1.3 材料与器件因素

电缆本体材料性能是电缆可靠性的物质基础。绝缘材料的介电强度、介质损耗角正切值直接影响电气绝缘性能,耐温等级不足会加速材料老化,耐候性差则导致护套龟裂、剥落。导体材料的电导率与抗氧化性,决定电能传输效率与长期稳定性。辅助器件质量同样关键,连接器的插拔寿命、耐磨性影响连接持久性;固定夹具机械强度不足会导致电缆松动;密封胶、填充物的耐老化性与粘结强度不达标,将削弱防护能力。

2.2 工艺因素

压接工艺中,压力过大损伤导体、过小导致接触不良;焊接温度与时间控制不当会造成虚焊、脱焊;电缆敷设时弯曲过度或扭曲,破坏内部结构。施工环境条件亦不容忽视,高温高湿加速绝缘受潮与金属氧化,粉尘环境污染电缆表面影响密封效果。操作人员技能水平与责任心至关重要,非标准化操作易引发线芯错位、接线错误、紧固件未拧紧等装配缺陷,为系统运行埋下隐患。

2.2.1 剥线工艺

a) 冷剥

冷剥工艺使用剥线钳工具或剥线设备,剥线钳与设备均采用金属刀头剥除电缆线外皮或绝缘层,操作中必须根据电缆线剥皮外径选择对应尺寸的刀头,若剥线钳或设备的精度低,则剥除过程中会损伤或损坏电缆线金属层或内导体,降低电缆线强度。由于电缆线外皮及绝缘层的尺寸公差范围大,一致性差,冷剥操作中不可避免的会损伤电缆线的金属屏蔽层或内导体,降低电缆线电气强度,可靠性低。因此电缆线的绝缘皮剥除中不建议使用冷剥工艺。

b) 热剥

热剥工艺主要有手动热剥钳或激光剥线设备:热剥钳通过加热使刀头达到一定的温度剥除电缆线的绝缘层,若电缆线的绝缘层耐高温,剥除时需等待较长时间,难免出现剥线端口毛糙,且剥线尺寸较长时,不可避免出现拉扯现象,有可能会损伤屏蔽层或内导体;激光剥线设备主要利用激光的热分解效应或破坏分子链效应,对需要剥除的电缆线进行加工,剥线时不与线材接

触,无加工应力,不会扯断内导体,且剥线干净、无残留、无损伤,操作简单,速度快,效率高,剥线尺寸精度高,大批量的剥线工序激光剥线设备效率更高。

2.2.2 电缆线与连接器装配工艺

电缆线与连接器的常见装配工艺主要为手工焊接和压接。常规连接器大多采用手工焊接工艺,小型化电缆线或大多航空电缆线采用压接工艺。

a) 焊接型

焊接型连接器的接线端子是与连接器为一体,其接线端子多为杯状形式。电缆装配采用手工焊接工艺时,要求电缆线的引线插到连接器杯底,并且焊接结束后在每个端子连接处套绝缘套管,防止端子之间短路。手工焊接型连接器需要人工采用电烙铁对每个插针焊接,优点是简便易操作、易维修,缺点是需要技能较高的人员进行焊接,才能保证每个焊点满足工艺要求,且人工操作难免出现虚焊现象。

b) 压接型

压接是指在自然环境下,采用压接工具或设备使一种金属(导线中的芯线)与被连接的金属件(插头座中的插针/孔的压接端)发生变形而形成金属组织的一体化的一种工艺方法。压接型连接器的线端子与连接器分离,通过插针或插孔的插入成为一体,这些接线端子通过压接工具与导线紧密压接在一起。压接型连接器利用压接工具或设备能够一次将所有插针压接到位,成本低,质量易控制,可靠性高,生产效率高。缺点是插针/孔只能压接一次,维修不方便。

3 电缆装配可靠性的测试

3.1 常规性能测试

常规性能测试通过对电气、机械及物理特性的检测,判断其是否满足设计标准。(1)在电气性能测试方面,绝缘电阻测试通过高压绝缘电阻测试仪,检测电缆绝缘层的电阻值,判断其绝缘性能是否符合要求;耐压测试则施加高于额定电压的测试电压,观察电缆是否出现击穿或飞弧现象,评估电缆绝缘层的耐受能力;导通性测试利用万用表或专用导通测试仪,检查电缆线芯连接是否正常,避免断路或短路问题。(2)机械性能测试。主要针对电缆的结构完整性与连接强度。拉伸测试模拟电缆在受力情况下的承载能力,验证导体与绝缘层的结合稳定性;弯曲测试通过反复弯折电缆,检测其抗疲劳性能;端子拉力测试则评估接头与端子间的连接牢固程度,确保在振动、冲击等工况下不发生松动。(3)物理性能测试。包括尺寸测量、外观检查等,确保电缆及装配部件的规格符合设计图纸要求,排除因加工误差

或装配缺陷导致的可靠性隐患。

3.2 可靠性强化测试

可靠性强化测试旨在加速暴露电缆装配的潜在缺陷,通过模拟极端环境与工况,评估其在超出正常使用条件下的可靠性水平。(1)高温老化试验将电缆置于高温环境箱中,以高于实际运行温度的条件加速材料老化过程,监测绝缘电阻、机械强度等性能指标的变化,评估电缆的耐温寿命;振动试验通过振动台模拟运输或运行过程中的振动环境,检测电缆连接部位的稳定性,发现因振动导致的松动、磨损等问题;湿热循环试验结合高温高湿环境与温度骤变,模拟复杂气候条件,评估电缆的防水、防潮及抗热胀冷缩性能。(2)盐雾试验针对沿海或高湿度环境应用的电缆,通过喷洒盐雾模拟腐蚀环境,检测电缆护套与金属部件的耐腐蚀能力;紫外老化试验则模拟户外紫外线辐射,评估材料的耐候性,观察绝缘层与护套是否出现龟裂、变色等老化现象。这些测试方法能够有效预测电缆在特殊环境下的可靠性表现。

4 提升电缆装可靠性的质量控制措施

4.1 设计阶段的可靠性优化措施

设计是保障电缆装配可靠性的源头环节,需从参数匹配、结构设计等方面进行系统性优化。通过以下科学规划与精准设计,可规避后期装配及运行中的潜在风险,为可靠性奠定基础。(1)精准电缆与连接器的选型及路径规划。建立电气参数与机械参数的双重匹配标准,是确保电缆满足使用要求的核心。依据电压等级、载流量、环境温度等条件,构建数学计算模型,精准确定电缆规格。结合敷设空间与受力情况,运用有限元分析方法模拟电缆在不同工况下的应力分布,优化路径布局,规避应力集中区域。(2)电缆线与连接器结构强化设计。电缆线与连接器作为电缆系统的关键连接部件,其结构设计直接影响电气连接可靠性。采用多触点、曲面接触设计,可有效提升接头导电面积与压力均匀性,降低接触电阻。电缆端头可增加密封措施,并采用冗余设计,增强防水防尘性能,提升机械连接强度。

4.2 工艺过程的标准化控制体系

装配工艺是将设计转化为实际产品的关键环节,标准化控制是确保工艺一致性和可靠性的核心手段。通过以下参数精准管控与流程标准化,可有效减少人为因素和随机误差对装配质量的影响。(1)装配工艺参数精准管控。制定涵盖压接、焊接等环节的工艺参数标准是工

艺控制的基础。明确压力、温度、时间等核心参数的取值范围与公差要求,

4.3 供应链与器件的质量管控

供应链管理是保障电缆可靠性的物质基础,需从以下源头把控材料与器件质量。通过严格筛选供应商和完善检验机制,确保进入装配环节的所有部件符合质量要求。(1)材料与器件筛选机制。制定严格的供应商准入标准是供应链管理的首要任务。必要时要求电缆、绝缘材料、连接器等关键部件供应商提供第三方检测报告与可靠性验证数据,从资质审核层面确保供应商具备稳定供货能力。(2)入厂检验与性能抽检。设置多层次入厂检验流程,对原材料进行全面检测。从外观检查、尺寸测量到电气性能测试,确保每批次材料符合设计要求。

4.4 管理与监督体系的完善

管理与监督是保障质量控制措施有效执行的关键,需通过以下人员培训和监督机制建设,提升全员质量意识和执行能力。(1)人员技能培训与考核。建立分层次培训体系是提升人员素质的核心路径。针对操作人员开展基础装配技能培训与工艺标准考核,确保其掌握规范操作流程;对技术人员进行可靠性设计、失效分析等专项培训,提升技术能力,全面提升人员质量意识与操作水平。(2)质量监督与持续改进。构建巡检、抽检、全检相结合的监督体系,对装配过程进行实时监控,针对性地优化设计与工艺方案,形成PDCA循环,推动质量持续改进^[3]。

结束语

电缆装配可靠性受多因素交互影响,需从多维度协同优化。通过明确可靠性定义与指标,精准识别设计、材料、工艺及管理环节的关键影响因素,采用科学的测试评估方法,实施全流程质量控制措施,可显著提升电缆装配质量。随着应用场景的拓展与技术革新,电缆装配可靠性研究仍面临新挑战。

参考文献

- [1]王璐璐,郭宇娟,董薇,等.电缆组件可视化装配技术研究[J].科技视界,2024,14(28):118-120.
- [2]杨庆.总线电缆组件装配技术研究[J].科学与信息化,2019(19):115-116.
- [3]韩广银,顾文杰,纪云飞,等.射频电缆组件装配工艺分析[J].机电元件,2019,39(4):22-24.