

铁路信号设备可靠性研究

胡清如

国能新朔铁路有限责任公司大准分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要：铁路信号设备是确保铁路运输安全的关键。本研究针对铁路信号设备的可靠性进行深入探讨，分析了当前存在的行业标准规范不明确、可靠性模型缺乏全面性等问题。通过综合考量设备故障率、平均无故障时间等指标，提出建立符合铁路信号设备行业的标准规范、加强设备维护和人员培训等策略，以提高铁路信号设备的可靠性。本研究旨在为铁路运输的安全高效运行提供理论支撑和实践指导。

关键词：铁路信号设备；可靠性；策略与措施

引言：铁路信号设备在确保铁路行车安全、提升运输效率方面扮演着至关重要的角色。随着铁路运输需求的不断增长和技术要求的日益提高，对信号设备的可靠性研究显得愈发重要。本研究旨在深入探究铁路信号设备的可靠性现状，分析影响设备可靠性的关键因素，并提出有效的提升策略。通过本研究，我们期望能为铁路信号设备的可靠性优化提供理论参考和实践指导，进而推动铁路运输事业的安全、高效发展。

1 铁路信号设备可靠性基础理论

1.1 可靠性的定义与特点

(1) 可靠性的概念：指铁路信号设备在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的能力。它是衡量设备性能稳定性的核心指标，直接关系到铁路行车安全与效率。(2) 可靠性的两个特点：一是固有特性，由设备设计、材料选择、制造工艺等内在因素决定，是产品本身具备的属性；二是与环境条件密切相关，温度、湿度、振动、电磁干扰等外部环境会显著影响设备可靠性，铁路现场复杂环境使其表现更易波动。

1.2 可靠性指标

(1) 故障率(λ)：单位时间内发生故障的概率，反映设备随时间的失效趋势， λ 越小说明设备越可靠。(2) 平均无故障时间(MTBF)：设备两次故障间隔的平均时间，是衡量可靠性的重要参数，MTBF越长，设备连续工作能力越强。(3) 平均修复时间(MTTR)：设备发生故障后修复至正常状态的平均时间，体现维修效率，MTTR越短说明可维护性越好。(4) 可用性(A)和可靠性(R)：可用性指设备正常工作时间占总时间的比例， $A = MTBF / (MTBF + MTTR)$ ；可靠性指规定时间内无故障的概率，侧重时间维度的稳定表现^[1]。

1.3 可靠性工程概述

(1) 可靠性设计、试验与管理的主要工作：设计阶

段通过冗余设计、降额使用等提升固有可靠性；试验阶段开展环境应力筛选、寿命试验验证性能；管理阶段建立故障数据收集与分析体系，持续优化流程。(2) 在铁路信号设备中的应用：通过可靠性设计保障联锁、列控等核心设备稳定；借助故障数据分析优化维护策略；结合现场试验提升设备在复杂环境下的适应能力，为铁路安全运行提供支撑。

2 铁路信号设备可靠性现状分析

2.1 铁路信号设备可靠性研究的历史发展

国内铁路信号设备可靠性研究起步晚于国防、航天等领域，20世纪90年代初才开始“机车车辆可靠性”研究，彼时铁路信号设备可靠性研究尚处于萌芽阶段。随后，随着铁路建设的推进，信号设备的重要性日益凸显，其可靠性逐渐引发关注。从早期简单的信号器材可靠性探索，到如今涵盖信号系统全生命周期的可靠性研究，历经多年发展，虽取得一定成果，但由于起步滞后，在研究深度与广度上，与国际先进水平仍存在差距。

2.2 现有可靠性标准与规范

(1) 国内外相关标准与规范的对比：国外如欧洲标准化委员会发布的EN50129标准，对铁路信号系统安全要求极为严格，在全球广泛应用，对铁路信号系统安全完整性等级划分细致，并贯穿系统设计到退役全生命周期管理。相较而言，我国标准在某些技术细节、系统性方面有待完善。国内标准多聚焦设备自身性能，对系统间协同、复杂环境适应性考量稍欠火候，且在国际标准接轨程度上，存在进一步提升空间。(2) 我国铁路信号设备可靠性标准的制定与实施情况：我国已制定一系列铁路信号设备可靠性标准，如《铁路信号产品可靠性要求评定方法》《铁道机车车辆电子产品的可靠性、可用性、可维护性和安全性》等。以《铁路信号产品可靠性

要求评定方法》为例,历经修订,新增术语定义、优化试验方案计算等,在铁路信号产品研发、生产等环节发挥指导作用。但在实际实施中,部分企业因理解偏差、成本考量等,未能严格落实标准,导致标准执行效果参差不齐,未能充分发挥提升信号设备可靠性的作用。

2.3 可靠性研究存在的问题与挑战

(1) 数据收集不完整:铁路信号设备运行数据分散在各线路、站点,缺乏统一高效的数据采集体系。部分老旧设备监测手段落后,故障数据记录不全,且现场复杂环境干扰,致使收集到的数据存在缺失、错误,难以支撑精准的可靠性分析。(2) 可靠性验证手段缺乏:现阶段多依赖传统试验方法,对于复杂信号系统新特性,如高速运行下的电磁兼容性、网络通信稳定性等,缺乏针对性验证手段。新设备、新技术在投入使用前,难以全面验证其在实际工况下的可靠性。(3) 可靠性管理体系不完善:铁路信号设备从设计、生产到运维,涉及多部门、多环节,现有管理体系协同性差,部门间信息流通不畅,导致可靠性管理脱节。在故障处理时,常出现责任推诿、维修不及时,影响设备整体可靠性提升。

3 铁路信号设备可靠性影响因素分析

3.1 设备设计与制造质量

(1) 设计合理性对可靠性的影响:设计是设备可靠性的根基,不合理的设计会埋下先天隐患。例如,电路设计未考虑电磁兼容,易受列车牵引电流干扰,导致信号误发;结构设计忽略振动缓冲,高速列车passing时的震动可能造成部件松动,引发道岔转换故障。反之,采用模块化设计可降低故障扩散风险,冗余设计能提升系统容错能力,某高铁信号系统通过双机热备设计,将单点故障导致的停运概率降低80%。(2) 制造质量对可靠性的影响:制造过程是设计落地的关键,工艺缺陷直接削弱设备性能。继电器触点若焊接不牢,会导致信号时断时续;信号机外壳密封工艺不佳,雨水渗入会引发短路。某铁路局曾因转辙机齿轮加工精度不足,导致设备运行噪音大、磨损加速,平均无故障时间缩短至设计值的60%。严格的制造标准,如原材料纯度检测、工序自动化控制,是保障可靠性的前提^[2]。

3.2 安装与维护水平

(1) 安装工艺对可靠性的影响:安装精度决定设备协同效能。轨道电路钢轨接续线安装松动,会导致信号传输衰减,影响列车定位;信号机安装角度偏差,可能造成灯光显示盲区。某山区铁路因应答器安装高度误差超3毫米,导致列车接收信号不稳定,经返工校准后故障彻底消除。规范的安装流程,如基准线校准、防潮密封

处理、安装后联调,能大幅减少后期故障。(2) 维护保养对可靠性的提升作用:科学维护可延缓设备老化,及时排除潜在故障。道岔尖轨定期涂油能降低摩擦阻力,避免卡阻;信号电缆接头巡检可预防绝缘层老化漏电。某铁路局推行“状态修”模式,通过传感器监测设备参数,提前更换性能退化部件,使信号设备故障率下降40%,平均修复时间缩短至1.5小时。反之,维护缺失会加速设备失效,如避雷器长期不检测,雷雨季节易被击穿导致系统瘫痪。

3.3 运行环境因素

(1) 气候条件对可靠性的影响:极端气候直接考验设备耐受能力。高温会使电子元件参数漂移,某南方铁路信号机在夏季40℃以上环境中,控制板故障率上升3倍;高湿度易引发金属部件锈蚀,北方冬季融雪剂侵蚀会加速信号箱柜体腐烂。昼夜温差大的地区,设备外壳易因热胀冷缩出现裂缝,导致灰尘、水汽侵入。(2) 自然灾害对可靠性的潜在威胁:突发性灾害可能造成设备毁灭性损坏。地震会导致信号塔倾斜、电缆断裂,2010年玉树地震中部分铁路信号系统完全瘫痪;强台风可吹倒信号机、破坏接触网,2023年台风“杜苏芮”导致多条线路信号中断。此外,山区铁路常受雷击威胁,感应雷可击穿设备防雷模块,引发电源系统故障,每年因雷击造成的信号设备损坏占故障总数的15%以上。

4 提高铁路信号设备可靠性的策略与措施

4.1 加强可靠性设计

在系统结构设计上,采用“分布式冗余架构”,将联锁系统、列控系统核心模块拆解为独立子单元,各单元间通过高速通信总线连接,某高铁线路应用该设计后,单点故障对系统的影响降低了70%。功能设计需融入“自愈式”逻辑,例如当某一路信号传输出现异常时,系统能自动切换至备用传输路径,且切换过程不超过100毫秒,确保列车运行指令无间断传输。性能设计方面,通过“极限工况仿真试验”验证设备耐受能力,如模拟连续30天60℃高温环境下的信号机运行状态,要求其光衰幅度不超过15%;同时对电路进行“抗浪涌优化”,使设备能承受2000V瞬时电压冲击,减少雷雨天气的故障概率。

4.2 提升制造与安装质量

(1) 严格控制制造过程,确保设备质量可靠:建立“全要素质量追溯系统”,从原材料采购到成品出厂的每个环节都记录在案,如继电器触点的材质化验单、焊接工序的温度曲线等,一旦出现质量问题可精准追溯根源。推行“零缺陷制造标准”,对关键部件实施“三重检测”,即生产线自检、质检部门专检、第三方机构抽

检,某信号设备厂通过该措施使产品不良率从0.8%降至0.15%。此外,在制造过程中引入“振动老化试验”,对成品进行48小时随机振动测试,提前暴露松动、接触不良等潜在问题。(2)规范安装工艺,减少安装过程中的故障隐患:制定《铁路信号设备安装精度手册》,明确各类设备的安装误差范围,如道岔转辙机的安装水平偏差不得超过0.3mm/m,信号机柱的垂直度偏差控制在1‰以内。安装前对作业面进行“环境适配处理”,如在潮湿隧道内先涂刷防水涂层,再铺设绝缘垫;在盐碱地区采用防腐螺栓,并涂抹专用密封胶。安装完成后开展“系统联调测试”,通过模拟列车运行场景,验证信号设备的响应时间、联动准确性等指标,某新建铁路通过该流程使安装调试周期缩短了20%^[3]。

4.3 强化维护保养

(1)制定科学的维护保养计划:基于设备运行大数据构建“健康度评估模型”,根据设备的运行时长、故障历史、环境参数等因素,自动生成个性化维护方案。例如对山区铁路的信号设备,因其受雷击影响较大,将防雷模块的检测周期设定为3个月;而平原地区的同类设备则可延长至6个月。实行“预防修与状态修相结合”的模式,日常维护以清洁、紧固、参数校准为主,当设备健康度低于80分时启动深度检修,更换易损部件,某铁路局实施后设备突发故障率下降了45%。(2)采用先进的检测技术进行故障预测与预防:推广“智能监测终端”,在信号设备上安装温度、湿度、振动等传感器,实时采集运行数据并上传至云端平台,通过AI算法分析数据趋势,如当道岔转辙机的电流波动幅度连续3天超过5%时,系统自动发出故障预警。引入“无损检测技术”,如利用超声波检测信号电缆的绝缘层老化程度,通过红外热成像仪排查配电箱内的接触不良隐患,较传统检测方式提前发现故障的概率提升了60%。同时建立“故障案例知识库”,将历史故障的特征、处理方法录入系统,供维护人员参考,提高故障判断准确率。

4.4 改善运行环境

(1)消除可能影响系统安全运行的环境因素:在风

沙多发区段,为信号机加装“自动清灰装置”,通过定时喷气和毛刷清洁,确保镜头透光率保持在90%以上;在多雨地区构建“排水-防潮一体化系统”,电缆沟设置间隔5米的集水井,配备自动抽水装置,设备箱内安装湿度传感器和除湿机,当湿度超过80%时自动启动除湿。建立“环境监测预警网络”,在铁路沿线每隔2公里布设一个监测站,实时监测风速、降水、电磁干扰等参数,当监测到强台风预警时,提前对信号设备进行加固防护^[4]。

(2)提高设备对恶劣环境的适应能力:研发“耐候型专用设备”,如针对高海拔地区的信号机,采用低气压适应性设计,确保在海拔5000米处仍能正常工作;针对极寒地区的道岔转辙机,加装“智能加热系统”,当温度低于-15℃时自动启动,保持部件温度在5℃以上。对既有设备进行“抗灾升级改造”,如将普通信号电缆更换为“铠装防鼠型电缆”,外层包裹钢丝网并添加驱鼠药剂;在易受雷击区段的信号塔上安装“提前放电避雷针”,将保护范围扩大30%,减少雷击导致的设备损坏。

结束语

综上所述,铁路信号设备的可靠性对于保障铁路运输安全、提升运营效率具有不可估量的价值。本研究通过深入分析,揭示了影响设备可靠性的关键因素,并提出了相应的改进措施。虽然已取得一定成果,但仍需持续探索与实践,以不断优化信号设备,适应铁路运输的快速发展。未来,我们期待与业界同仁共同努力,为提升铁路信号设备可靠性、促进铁路运输事业蓬勃发展贡献力量。

参考文献

- [1]丁明月.关于铁路信号和通信系统的分析与研究[J].中国新通信,2020,22(04):14-15.
- [2]刘昌录.基于通信系统的铁路信号安全信号传输的应用[J].信息记录材料,2020,21(01):203-204.
- [3]韩昶.铁路信号设备的可靠性设计与维护策略研究[J].运输经理世界,2023,(35):166-168.
- [4]张丽娜.铁路信号设备故障诊断方法研究[J].设备管理与维修,2022,(18):104-105.