

铁路客车电伴热装置可靠性分析

罗立超

济南铁路局济南车辆段 山东 济南 250000

摘要：铁路客车电伴热装置是低温环境下保障车辆给排水、通风等系统正常运行的关键设备，其可靠性直接关系到列车行车安全与运营效率。本文围绕铁路客车电伴热装置可靠性展开研究，阐述了其组成与工作原理。通过FMEA、FTA、可靠性框图等方法，分析装置故障模式与成因，发现设计缺陷、制造材料问题及运维环境因素是主要诱因。针对这些问题，从设计优化、制造材料改进、运维策略优化三方面提出改进措施，如强化功率匹配、采用车规级元件、建立全生命周期监测体系等。研究为提升铁路客车电伴热装置可靠性提供了系统性解决方案，对保障列车低温环境下安全运行具有实际意义。

关键词：铁路客车；电伴热装置；可靠性分析方法；改进措施

引言：当前铁路客车电伴热装置在实际应用中常因故障导致管路冻堵、设备损坏等问题，影响铁路运输稳定性。本文基于装置组成与工作原理，运用多种可靠性分析方法，深入探究故障原因，针对性提出改进措施。通过系统研究，旨在明确影响装置可靠性的关键因素，构建科学的可靠性提升体系，为铁路客车电伴热装置的设计、制造与运维提供理论支持和实践指导。

1 铁路客车电伴热装置组成与工作原理

1.1 装置整体结构与核心组件

铁路客车电伴热装置是保障车辆低温环境下正常运行的关键系统，其整体结构以“加热-控制-保护”为核心逻辑，由以下加热元件、温控系统、电源模块、保护装置及辅助连接件组成。（1）加热元件是装置的核心执行部件，采用自限温发热电缆或恒功率加热带，通过紧贴被加热体（如水管、风管、水箱）实现热量传递。自限温电缆具有温度自调节特性，可根据环境温度自动改变电阻，避免局部过热；恒功率加热带则通过稳定输出功率确保加热效果均匀，适用于需精准控温的场景。（2）温控系统负责温度监测与调节，由温度传感器（如Pt100铂电阻）、控制器（PLC或专用温控模块）组成。传感器实时采集被加热体表面温度及环境温度，控制器根据预设阈值触发加热或停止指令，形成闭环控制。（3）电源模块承担供电转换功能，将列车110V直流电源转换为加热元件所需的安全电压（通常为24V），并具备过压、欠压保护能力。（4）保护装置包括过热保护器、漏电断路器和熔断器，当系统出现超温、漏电或短路时，可快速切断电源，防止故障扩大。（5）辅助连接件则涵盖接线端子、绝缘套管和固定卡具，确保装置在列车振动环境下的电气连接可靠性与机械稳定性。

1.2 工作原理

电伴热装置的工作原理基于焦耳定律，即电流通过导体时产生的热量与电流平方、电阻及通电时间成正比。系统启动后，电源模块输出稳定电压，加热元件通电发热，通过热传导、对流和辐射将热量传递至被加热体，使其温度维持在设定范围（通常为5-25℃）。温控逻辑采用分级调节机制：当传感器检测到被加热体温度低于下限阈值（如5℃）时，控制器输出加热信号，装置满功率运行；温度达到上限阈值（如20℃）时，加热回路断开；若环境温度骤降导致温度波动，系统通过脉冲调功方式调节加热功率，避免频繁启停^[1]。

2 铁路客车电伴热装置可靠性分析方法

2.1 故障模式与影响分析（FMEA）

故障模式与影响分析（FMEA）通过系统梳理产品可能出现的故障模式，评估其对系统功能的影响程度，从而识别潜在风险点。该方法的核心流程包括以下故障模式识别、影响分析、风险评估三个环节。

2.1.1 故障模式识别

依据装置的结构组成与工作原理，对各组件（如加热元件、温控器、电源模块等）可能发生的故障类型进行逐一列举。识别过程需结合历史故障数据、设计文档及类似产品的失效案例，确保覆盖所有潜在的故障表现形式，包括显性故障（如加热失效）和隐性故障（如温控精度漂移）。

2.1.2 影响分析

明确每个故障模式发生时，是否导致局部功能丧失或整体系统失效，以及是否引发连锁反应（如某一加热段失效是否导致相邻管路结冰）。分析需分层进行，从组件级故障逐步推演至系统级影响，建立故障传播路径。

2.1.3 风险评估

通过量化指标实现,通常采用风险优先数(RPN)作为评估依据。RPN由严重度(S)、发生度(O)、探测度(D)三个参数乘积计算得出,其中严重度衡量故障后果的严重程度(如安全事故、功能失效、性能下降),发生度反映故障出现的概率,探测度表示故障被检测到的难易程度。

2.2 故障树分析(FTA)

故障树分析(FTA)是以系统的“顶事件”(即不希望发生的关键故障,如电伴热系统完全失效)为起点,通过构建逻辑关系图(故障树),逐层追溯导致顶事件发生的所有可能原因(中间事件与底事件),最终定位故障根源。顶事件的定义要具有明确性和针对性,需结合系统功能需求与安全目标确定,避免范围过宽或过窄。例如,针对电伴热装置,顶事件可定义为“加热功能持续失效”或“过热保护误动作导致系统停机”。故障树的构建是FTA的核心环节,要通过逻辑门(如与门、或门、异或门)连接各事件。与门表示所有输入事件同时发生时,输出事件才会发生;或门表示任一输入事件发生即可导致输出事件发生。构建过程中,需明确各事件间的因果关系,确保逻辑链完整,避免遗漏关键环节。底事件通常为不可再分解的基础故障(如元件损坏、线路短路),要基于实际故障数据或经验确定其发生概率。

故障树建成后,需通过定性与定量分析评估系统可靠性。定性分析主要通过求解最小割集实现,最小割集是导致顶事件发生的最低限度的底事件组合,割集数量越少、包含的底事件越少,说明该路径导致顶事件发生的可能性越高,可据此识别系统的薄弱环节。定量分析则通过底事件的失效概率计算顶事件的发生概率,需结合元件可靠性数据与逻辑门的概率运算规则(如与门对应概率乘积,或门对应概率和),最终得到顶事件的可靠度指标。

2.3 可靠性框图与网络分析法

可靠性框图(RBD)是一种通过图形化方式表示系统各组件可靠性逻辑关系的分析方法,以组件的可靠度为基础,计算系统整体可靠度。串联结构中,所有组件必须正常工作,系统才能正常运行,其系统可靠度为各组件可靠度的乘积;并联结构中,至少一个组件正常工作,系统即可维持功能,其系统可靠度为1减去各组件不可靠度的乘积。对于复杂系统,还可采用混联结构(如串并联、并串联)或表决结构(如k/n表决,即n个组件中至少k个正常工作),以更准确地反映实际的冗余设计或

功能依赖关系。

网络分析法是可靠性框图的扩展形式,适用于组件间存在复杂依赖关系(如共享资源、负载转移)的系统。通过构建可靠性网络模型,将组件视为节点,组件间的功能关系视为边,利用图论与概率理论计算系统可靠度。网络分析法可处理动态可靠性问题,如组件故障后的负载重新分配对系统可靠性的影响,更贴近电伴热装置在实际运行中可能面临的复杂工况。

2.4 加速寿命试验与统计分析方法

加速寿命试验(ALT)是一种通过强化环境应力缩短产品寿命试验周期,快速评估产品可靠性的方法。其核心原理是基于应力与寿命的关系模型(如阿伦尼乌斯模型、逆幂律模型),将加速条件下的试验数据外推至正常使用条件下的寿命特征参数。在试验设计阶段,需确定加速应力类型与水平。对于电伴热装置,常见的加速应力包括温度、振动、电压。应力水平的选择需避免引入新的故障模式,通常通过预试验确定应力范围。试验样本量需根据统计精度要求确定,样本量越大,试验结果的可信度越高,但成本也相应增加。

试验过程中,需记录每个样本的失效时间,并对数据进行统计分析。常用的寿命分布模型包括指数分布、威布尔分布、对数正态分布。通过参数估计确定分布模型的参数,进而计算产品的平均寿命(MTBF)、可靠度函数、故障率函数等可靠性指标^[2]。

3 铁路客车电伴热装置故障原因分析

3.1 设计层面因素

功率匹配失衡会引发核心故障,如加热元件功率与被加热体热负荷不匹配,可能导致局部过热烧毁或加热效率不足。防护等级设计不合理埋下隐患,若IP防护等级低于列车运行环境要求,雨雪、粉尘侵入内部元件,会造成短路或绝缘性能下降。冗余设计缺失会放大单点故障影响,例如温控系统未设备用传感器,主传感器失效将导致温度失控。结构布局缺陷也可能加剧故障风险,如加热带缠绕间距不均引发热量分布失衡,管路拐角处加热元件未做柔性处理则易因振动疲劳断裂。

3.2 制造与材料因素

元件选型不当是常见问题,采用民用级而非车规级加热元件,其耐温、耐振动性能无法满足铁路环境要求,易出现早期失效。焊接工艺缺陷会导致线路接触不良,如接线端子虚焊可能引发局部电阻过大,造成发热异常甚至断路。材料性能不足同样引发故障,绝缘层选用耐老化性能差的橡胶材料,长期受高低温交替影响会开裂,导致漏电风险;发热芯体电阻丝材质纯度不足,

会加速氧化断裂,缩短使用寿命。

3.3 运维与环境因素

安装误差会破坏系统稳定性,如加热带与管路贴合不紧密形成空气间隙,会降低热传导效率并引发局部过热;固定卡具过紧则挤压加热元件,导致内部线路损伤。列车运行环境的复合应力会加速老化,持续振动使接线端子松动、线路疲劳;高寒地区低温冻融循环导致元件脆化,潮湿环境加剧金属部件腐蚀。定期检测缺失会使潜在故障累积,如未及时清理加热元件表面积尘油污,会影响散热并引发过热保护误动作。

4 铁路客车电伴热装置可靠性改进措施

4.1 设计优化措施

4.1.1 设计优化措施如下:

(1) 强化功率匹配设计

通过热力学仿真计算被加热体在极端环境下的热负荷需求,确定加热元件功率参数,确保功率输出与热损耗动态平衡。提升防护等级标准,核心部件采用IP67及以上防护设计,接线端子加装密封胶圈,控制器外壳采用一体化注塑成型,阻断水汽与粉尘侵入路径。

(2) 增加系统冗余配置

温控回路采用“主-备”双传感器设计,当主传感器失效时自动切换至备用通道;关键加热段设置独立回路,单个回路故障不影响整体系统运行。优化结构布局,加热带采用等间距缠绕工艺,管路拐角处选用柔性加热元件并预留伸缩余量,减少振动应力集中。

引入智能控制算法,通过模糊PID控制实现温度精准调节,避免频繁启停导致的元件疲劳;开发故障自诊断模块,实时监测电流、电压及温度参数,通过特征值分析提前预警潜在故障。

4.2 制造与材料改进措施

4.2.1 制造与材料改进措施具体如下:

(1) 实施元件选型标准化

制定车规级元件技术规范,加热元件需通过-50℃至125℃高低温循环试验、10g加速度振动试验及1000小时老化试验;电源模块采用宽电压输入设计(85V-160V),适应列车电网波动。

(2) 规范制造工艺流程

焊接工序采用激光焊接技术,确保接线端子导电电阻 $\leq 5\text{m}\Omega$;加热元件与被加热体的贴合采用导热硅胶层固定,导热系数不低于 $1.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。建立工艺质量追溯体系,关键工序加装在线检测设备,记录焊接温度、压

力等参数,实现全流程数据可追溯。

(3) 升级材料性能指标

绝缘层选用耐候性硅橡胶材料,氧指数 ≥ 30 ,抗臭氧老化性能达到GB/T7762标准0级;发热芯体采用高纯度镍铬合金丝,直径偏差控制在 $\pm 0.02\text{mm}$,确保电阻值稳定性。

4.3 运维策略优化措施

4.3.1 运维策略优化措施如下:

(1) 制定精细化安装规范

明确加热带缠绕张力(控制在5-8N)、固定卡具间距($\leq 300\text{mm}$)及绝缘电阻测试标准(安装后 $\geq 100\text{M}\Omega$);安装过程采用专用工装定位,避免人工操作误差。

(2) 建立全生命周期监测体系

在关键部位植入无线温度传感器,通过列车网络系统实时传输数据;制定分级维护计划,日常检查重点关注加热带表面温度偏差($\leq \pm 3^\circ\text{C}$),季度检测包含绝缘电阻、接地电阻及回路通断性测试。

(3) 优化环境适应性维护

高寒地区车辆每半年进行一次加热元件密封性检测,潮湿地区增加电路防潮涂层处理;建立故障数据库,通过统计分析确定高频故障部位,针对性改进维护方案。

(4) 开展运维人员专项培训

内容涵盖装置原理、故障判断及标准化操作流程,考核合格后方可上岗;配备专用检测仪器,如便携式热像仪、回路阻抗测试仪,提升故障定位精度^[3]。

结束语:本文通过对铁路客车电伴热装置的系统性分析,明确了其组成、工作原理及可靠性影响因素,提出的设计优化、制造改进和运维策略等措施,可有效提升装置可靠性。研究成果为解决装置实际运行中的故障问题提供了可行方案。但研究未涉及不同车型装置可靠性差异分析,且部分改进措施的长期效果需进一步验证。

参考文献

- [1]张冠男,齐凯文,于沛峻,邵鸣和,林超.自限温电伴热座椅在轨道车辆上的应用研究[J].铁道车辆,2024,62(2):55-58.
- [2]张平,张健,范自斌,等.铁路客车电伴热装置可靠性分析[J].铁道运营技术,2022,28(2):23-25.
- [3]杨雪涛.铁路客车常见设备故障分析[J].运输经理世界,2024(25):156-158.