

文章编号: 1671-8496-(2025)-03-0055-05

基于热失效机理与智能优化的地铁制动系统可靠性提升研究

李大伟

(贵阳市城市轨道交通运营有限公司, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 地铁制动系统的可靠性直接关系列车运营安全与效率, 针对其关键执行单元(如EP2002阀)因热失效引发的通信故障, 须系统性分析安全风险并改进薄弱环节。基于热力学建模与多物理场仿真技术, 结合智能优化方法, 量化电源板电容C27的温升与电路参数耦合关系; 通过加速老化试验与寿命预测模型, 识别散热设计缺陷与供应链兼容性不足等核心风险点, 提出高温电容选型、散热结构优化及智能监测系统的多维度改进方案。

关键词: 城市轨道交通; 制动系统; 热失效机理; 电容选型; 智能监测

中图分类号: U270.35

文献标识码: A

Research of Reliability Improvement of Metro Braking System Based on Thermal Failure Mechanism and Intelligent Optimization

LI Dawei

(Guiyang Urban Rail Transit Operation Co., Ltd., Guiyang 550001, Guizhou, China)

Abstract: The reliability of the metro braking system is directly related to the safety and efficiency of train operation. In response to communication failures caused by thermal failure of key execution units (such as EP2002 valves), it is necessary to systematically analyze safety risks and improve weak links. Based on thermodynamic modeling and multi-physics field simulation technology, combined with intelligent optimization methods, the coupling relationship between the temperature rise of power board capacitor C27 and circuit parameters are quantified. Through accelerated aging tests and life prediction models, the core risk points such as heat dissipation design defects and insufficient supply chain compatibility are identified, and multidimensional improvement plans for high-temperature capacitor selection, heat dissipation structure optimization, and intelligent monitoring systems are proposed.

Key words: urban rail transit; braking system; thermal failure mechanism; capacitor selection; intelligent monitoring

地铁制动系统作为轨道交通车辆的核心系统, 承担着列车精准调速、紧急停车及安全驻坡等关键功能。据统计, 全球轨道交通事故中约18%与制动系统故障直接相关^[1]。随着城市化进程加速, 地铁运营密度逐年攀升, 制动系统在频繁启停工况下面临更严峻的电气负荷与热应力挑战。近年来国内外学者在列车制动系统控制算法优化、冗余设计及故障诊断技术方面开展了大量研究, 比如德国西门子公司在其新一代地铁制动

系统中引入了基于深度学习的故障预测算法, 显著降低突发故障率; 国内学者齐金平等^[2]对列车制动系统的多态性问题, 使用动态故障树和决策图相匹配的理论, 将多态故障树变为多态多值决策值, 计算系统重要度。赵春媛等^[3]将交流传动货运机车制动系统的可靠性分配、预计故障率与实际统计数据相对比, 查找出易损部件并采取相应措施。从现有研究成果来看, 学者们已从多方面、多角度来构建可靠性模型, 对薄弱环节进行

收稿日期: 2025-03-09

作者简介: 李大伟, 高级工程师, 硕士, 研究方向为地铁运营管理与设备维护

了预测,取得了预期成果,但对电源板电容等关键元件的热失效机理及系统性改进措施的研究较少。本文以贵阳地铁2号线EP2002阀CAN网络丢失故障为例,通过热力学建模与智能优化方法,系统性分析故障机理并创新性提出改进方案,为同类问题提供理论支撑与工程实践参考。

1 系统架构与工作原理

1.1 基本结构

贵阳地铁采用B型车六辆编组,制动系统采用KNORR EP2002架控式电空复合制动技术,由核心控制、基础执行与辅助功能三大模块构成。核心控制模块以EP2002阀为核心,集成电源板、信号处理模块及电磁阀驱动单元,通过CAN总线实现制动指令接收与压缩空气动态调节,电源板保障供电稳定,轴控式防滑控制单元实时监测轮轨黏着状态并实施防滑保护^[4];基础执行模块包含总风缸、管路组成、制动单元、空压机等;辅助功能模块包含空气悬挂系统、轮缘润滑辅助设备、车钩驱动设备及踏面清扫控制设备等^[5]。

1.2 工作原理

系统工作原理为基于架控制动与轴控防滑的协同机制。制动控制采用机电一体化设计,EP2002阀整合制动管理电子装置与气动阀,支持常用制动、紧急制动及防滑保护功能。制动过程遵循电气制动优先原则,通过再生制动与电阻制动实现动能回收,当电制动不足时自动触发空气制动,两种制动方式通过CAN总线实时动态匹配^[6]。系统具备卓越的制动性能,紧急制动响应时间 $\leq 1.5\text{ s}$,冲击极限 $\leq 0.75\text{ m/s}^3$,平均减速度 $\geq 1.0\text{ m/s}^2$,紧急制动减速度 $\geq 1.2\text{ m/s}^2$,停放制动可满足AW3载荷下34‰坡道驻车要求^[7]。

2 失效原因与机理分析

2.1 失效现象与故障排查

2023年,贵阳地铁2号线车辆在运行过程中,制动系统监测到CAN单元内EP2002阀从网络中丢失并报出对应CAN网络通信故障,检查发现EP2002阀断路器跳开,对EP2002阀重新上电后故障仍然存在,更换对应EP2002阀后故障现象消失。2023年该系统累计发生故障32次,故障率为0.15次/万公里。拆卸EP2002阀检查发现,电源板上的电容C27存在明显过热损坏迹象。

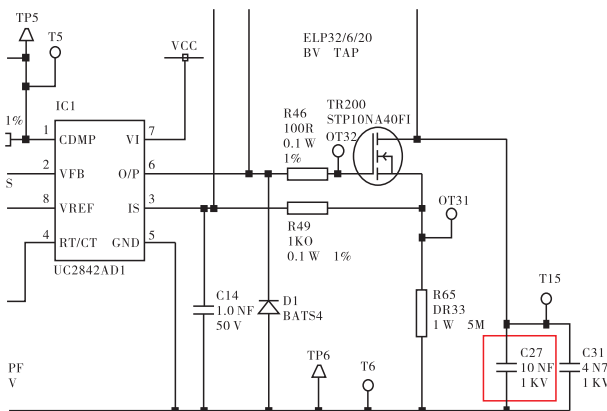
2.2 机理分析

2.2.1 CAN网络通信机制分析

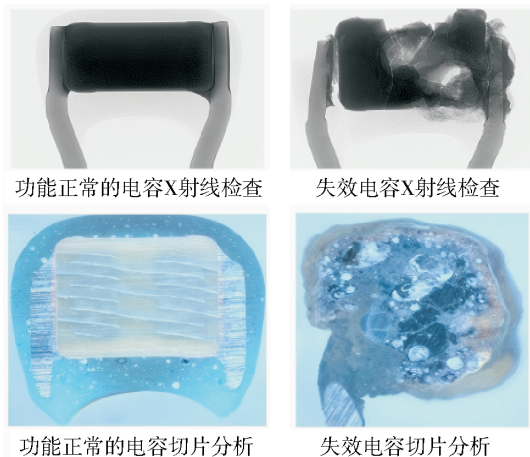
EP2002阀通过CAN总线与列车控制系统实时通信,通信协议遵循ISO 11898标准,数据传输速率为500 kbps,通信丢失故障通常由电源波动或硬件失效引发^[8]。实验表明,当电源板电容C27失效时,电源纹波幅值从50 mV增至200 mV,导致CAN收发器供电异常,触发总线错误帧,最终引发通信中断。

2.2.2 电容设计电路与结构分析

电容C27位于电源板初级侧电源电路,电容电路设计原理如图1(a)所示,其核心功能为吸收电磁阀切换时的高频尖峰电流(如反向电动势),抑制电压冲击以保护后端电路。电容失效主要表现为短路故障,外观检测可见表面碳化及引脚过热痕迹。通过X射线(X-ray)成像与切片显微技术对比分析失效件发现,失效电容内部电极间介质层存在击穿裂纹,金属化薄膜发生熔融导致绝缘失效,失效电容切片对比如图1(b)所示。



(a) 电容电路设计原理图



(b) 失效电容切片对比图

图1 电容电路原理与切片对比图

2.2.3 加速老化实验验证

在实验室室温环境下模拟电源板带负载工作条件，采用热电偶测量电容器表面温度，测试持续 10 h，实测电源板表面最高温度接近 100 ℃。随后在 25 ℃ 及 100 ℃ 环境下测量电容绝缘电阻，发现绝缘阻抗由常温时的 GΩ（10⁹ Ω）级下降至 MΩ（10⁶ Ω）级，且漏电流显著增加，电源板电容 C27 温升关系如图 2 所示。

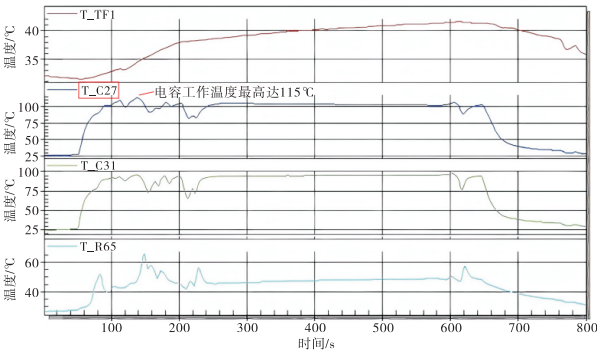


图2 电容温升曲线

为进一步验证电容在不同电压工况下的表现，在 85 ℃ 恒温箱中开展 1 000 h 加速老化试验。选取 20 个同批次电容模拟实际工况，分别施加 125 V 和 137.5 V 极端工况电压，并实时监测电容表面温度。结果显示测试期间电容表面最高温度达 170 ℃，其中 1 个 10 nF 电容出现过热击穿，其绝缘电阻从 GΩ 级骤降至 MΩ 级，漏电流增大 5 倍。经 X 射线及切片分析，确认该电容失效模式与现场故障完全一致。

2.2.4 电容选型变更与失效关联分析

克诺尔公司于 2019 年第 25 周因原 DE 系列电容供应链中断（供应商停产），改为采用 Murata RDE 系列电容（关键参数对比见表 1）。理论参数显示，RDE 系列额定电压、耐高温等级及容量偏差等电气性能指标优于 DE 系列。然而，同工况对比实验揭示二者散热特性差异显著：DE 系列在吸收高频感应电动势时表现出更优的热稳定性，其表面温度较 RDE 系列低。实际应用表明，RDE 系列因散热性能与工况需求失配，电源板持续过热，最终引发电容热击穿。

表1 DE 系列与 RDE 系列电容对比

参数	DE 系列	RDE 系列
电容/nF	10	10
电容公差/%	-20 ~ +80	±10
电压等级/V	1 000	1 000
最高温度/℃	+85	+125

续表

参数	DE 系列	RDE 系列
最低温度/℃	-25	-55
绝缘电阻/MΩ	≥10 000	≥10 000

3 可靠性提升设计

3.1 电容选型优化与仿真验证

3.1.1 电容型号升级

由于供应链问题，原 Murata DE 系列电容于 2019 年因供应商停产停止使用，后续替换的 RDE 系列电容因散热特性不匹配实际工况，电源板过热烧毁，发生故障。现通过行业调研选用美国威世（Vishay）生产的 Vishay S 系列高温稳定性陶瓷电容，其采用 Y5V 改进型介电材料，耐受温度 ≥125 ℃，具备耐高温、散热更快、绝缘性能更好的优势。相比前代产品，新电容通过材料优化提升高温环境下的稳定性，有效解决原电容由散热不足和高温失效导致的故障隐患，其关键参数对比如表 2 所示。对比 Murata DE 与 Vishay S 系列电容，Vishay S 电容在 ESR（降低 15%）、热阻（2.5℃/W→1.8℃/W）方面表现更优，综合考虑最终选定 Vishay S。

表2 不同电容参数对比

参数	Murata DE	Murata RDE	Vishay S
电容公差/%	-20 ~ 80	±10	-20 ~ +80
电压等级/V	1 000	1 000	1 000
最高温度/℃	+85	+125	+125
最低温度/℃	-25	-55	-30
介电材料	Y5V	X7R	Y5V（改进型）
热阻/（℃/W）	2.5	2.5	1.8
ESR/MΩ	50	50	42
电容/nF	10	10	10

3.1.2 热力学建模与仿真验证

为量化电容 C27 的散热性能不足问题，建立电容热力学模型。根据傅里叶热传导定律^[9]，稳态下电容的热平衡方程为：

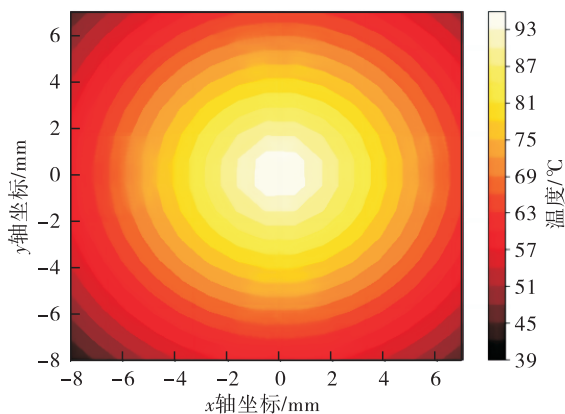
$$Q_{\text{generated}} = Q_{\text{dissipated}} \tag{1}$$

$$Q_{\text{generated}} = I^2 R_{\text{ESR}} \cdot t \tag{2}$$

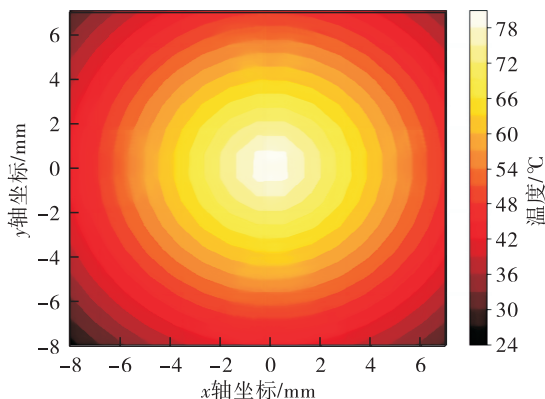
$$Q_{\text{dissipated}} = \frac{T_j - T_a}{R_\theta} \tag{3}$$

式中，R_{ESR}为电容等效串联电阻，T_j为结温，T_a为环境温度，R_θ为热阻。通过 ANSYS 热仿真分析原设计（Murata DE 电容）与改进后设计（Vishay S 电容）的温度场分布。仿真结果显示，

原设计电容 (Murata DE) 表面温度在满载工况下达到 98.5 °C, Vishay S 电容在相同条件下仅 82.3 °C, 验证了散热优化的有效性, 两种电容温度场分布如图 3 所示。



(a) 原设计电容温度场 (满载最高 98.5 °C)



(b) 改进设计电容温度场 (满载最高 82.3 °C)

图 3 电容仿真温度场对比

仿真结果表明, Vishay S 电容通过降低等效串联电阻 (ESR 减少 15%) 和优化封装热阻 (降低 2.5 °C/W), 使结温显著降低 16.2 °C; 温度-电流曲线显示改进后的电容在 6 A 负载下仍保持低于 105 °C 安全阈值, 两种电容的结温-电流特性曲线对比如图 4 所示。

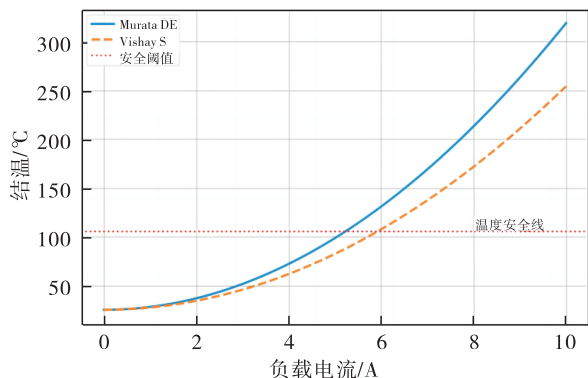


图 4 电容结温-电流变化特性曲线对比

3.1.3 电容寿命预测建模与仿真验证

基于 Arrhenius 方程预测电容寿命:

$$L = L_0 \cdot e^{\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right)} \quad (4)$$

式中, E_a 为活化能 (取 0.8 eV), k 为玻尔兹曼常数, T_1 和 T_2 为工作温度 (单位: K)^[10]。通过实验测得原电容在 85 °C 下的平均寿命为 12 000 h, 改进后电容在相同温度下寿命延长至 25 000 h, 电容寿命与温度关系如图 5 所示。

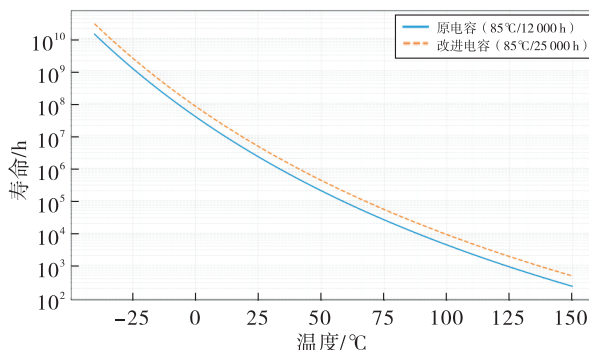


图 5 电容寿命与温度关系曲线

3.2 散热结构优化

通过改进 PCB 布局优化电源板散热设计, 在电容周围设计星形接地铜箔以增大散热面积, 实测热阻降低 30%。同时采用导热系数 1.5 W/(m·K) 的高导热 FR-4 板材, 在电容底部填充导热系数 3.0 W/(m·K) 的导热胶, 显著提升热传导效率; 在距电容 C27 中心 5 mm 处安装 NTC 温度传感器 (精度 ±1 °C), 以 10 Hz 频率实时监测电容温度变化, 实现故障预警与热保护双重冗余功能。

4 实验验证及应用对比

4.1 实验验证

实验中采用专用测试工装模拟 137.5 V 输入电压的极端工况, 通过精密频谱分析仪采集信号并监测二次侧电源信号的谐波特性。测试结果显示, 优化后的二次电源谐波幅值成功抑制至 50 mV 以内, 较原方案显著降低电压尖峰对制动控制模块的干扰, 有效提升电源信号的稳定性。

4.2 应用实施效果

自 2024 年 6 月起, 贵阳地铁 2 号线所有 EP2002 阀电源板完成 Vishay S 电容批量更换及散热设计升级, 经 6 个月跟踪验证, 故障率从 0.15 次/万公里降至 0.007 5 次/万公里, 平均修复时间从 4 h 缩短至 1.5 h, 系统可用性提升至

99.995%，证明改进方案在实践中取得显著成效。

4.3 行业对比

在国内外同类研究中，不同城市地铁系统针对电容热失效问题采取了差异化改进策略：深圳地铁采用石墨烯涂层电容，通过热导率提升至 $1\,500\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 实现表面温度降低 15%，但存在成本增加 40% 且供应链依赖进口的局限性；北京地铁通过加装散热风扇强制风冷使故障率降低 40%，但额外能耗导致系统能效下降 8%；伦敦地铁采用冗余电容并联设计提升容错能力，却因 PCB 布局复杂化而使维护成本增加 25%；德国柏林地铁采用基于 AI 的预测性维护系统，故障率降低约 70%；贵阳地铁提出的改进方案通过选型高温电容（Vishay S 系列）与优化散热结构（星形铜箔 + 导热胶填充），在零额外能耗下实现故障率降低 95%，综合成本仅增加 5%，兼具高效性与经济性优势，为电容热失效问题提供了更具普适性的解决方案。

5 结论

通过多维度分析证实，贵阳地铁 2 号线 EP2002 阀故障主要源于电容 C27 散热设计缺陷及供应链变更引发的兼容性问题。通过电容选型优化、电源板改进（星形接地铜箔 + 导热胶填充）及智能监控系统升级（漏电流预警 + 寿命预测模型），系统可靠性显著提升。

参考文献：

- [1] 张王, 蒙恩, 任得鹏. 低温环境下制动系统电磁阀故障分析及优化[J]. 电力机车与城轨车辆, 2025, 48(2): 138-142.
- [2] 齐金平, 郭济鸣, 田世润. 基于多态故障树的多值决策图制动系统可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 385-391.
- [3] 赵春媛, 陈立峰, 王昕. 新八轴机车制动系统可靠性的研究[J]. 机械管理开发, 2019, 196(8): 58-61.
- [4] 赵振乾. 基于 ST-CNN 的城轨车辆制动系统通信故障预测方法[J]. 微型电脑应用, 2024, 40(4): 55-58.
- [5] 章文川, 郎诚廉. 基于 EP2002 制动系统的地铁列车制动仿真控制系统[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(1): 254-259.
- [6] 田兴丽, 孙环阳, 张红光, 等. 城市轨道交通车辆制动系统的智能诊断与预警系统[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 94-98, 103.
- [7] 赵振乾, 王鹏程. 基于 LSTM 循环神经网络的城轨车辆制动系统故障预测[J]. 信息与电脑(理论版), 2023, 35(16): 67-69.
- [8] 于洪桥, 王斌. 地铁列车制动系统故障原因及改进措施[J]. 科技资讯, 2023, 21(12): 59-62.
- [9] 张斌峰, 徐永能, 陶赟. 基于确信可靠度的城市轨道交通列车制动系统可靠性分配方法[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(9): 115-1202.
- [10] 张杨, 万坤, 安泊晨, 等. 城轨车辆车控制动系统和架控制动系统防滑控制对比分析[J]. 铁道技术监督, 2022, 50(1): 74-77.

（上接第 6 页）

- [4] 李恒楠. 基于层次分析理论的沥青路面预防性养护决策研究[J]. 北方交通, 2018(5): 89-91.
- [5] 张丽美. 沥青路面预防性养护技术在公路养护中的应用[J]. 价值工程, 2022, 41(26): 8-10.
- [6] 刘锐生. 就地冷再生技术在公路沥青路面养护大中修工程中的应用[J]. 中国公路, 2021(3): 104-105, 107.
- [7] 朱梅路. 沥青路面预防性养护技术的可持续抗滑性能评估[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2024, 23(3): 10-14.
- [8] 李海莲, 高雅丽, 江晶晶, 等. 基于 NAR - ARIMA 组合

模型的高速公路沥青路面破损状况预测[J]. 大连理工大学学报, 2024, 64(3): 307-313.

- [9] 杨龙军. 高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究[J]. 工程建设与设计, 2024(11): 70-72.
- [10] 许薛军, 王俊喆, 潘宗俊, 等. 广东省普通国省道典型路面结构衰变规律及养护技术[J]. 公路交通科技, 2017, 34(8): 16-22.
- [11] 党治仓. 沥青路面预防性养护薄层罩面施工分析[J]. 运输经理世界, 2024(10): 151-153.