某客车动力电池以旧换新后整车电控电压及温升匹配研究

王双娥，钟雄武，肖 飞，贺 荣，雷代良，王 焯
（中车时代电动汽车股份有限公司，湖南 株洲 412007）

摘 要：针对新能源客车动力电池以旧换新过程中，新动力电池与老化电控系统因电气特性不匹配引发的故障问题，本文系统分析了新动力电池与运行8年以上老化电控的参数差异，并通过台架测试定位故障根源，提出针对性的工程化改进策略，最后进行实车测试验证。结果表明，电控老化导致的散热不足是制约新旧部件电压参数匹配的关键因素；通过改善电控散热、降低发热的工程改进可有效解决电压与温升的匹配问题。本文为新能源客车动力电池以旧换新过程中的电压参数匹配、温升控制、故障排查及效能提升提供了技术支撑与工程参考。

关键词：新能源汽车；动力电池；电压匹配设计；温升研究
中图分类号：U469.72 **文献标志码**：A **DOI**：10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.05.004

Research on Voltage and Temperature-rise Matching Between Power Battery and Vehicle Electronic Control System After Battery Replacement in a Certain Type of Bus

WANG Shuang'e, ZHONG Xiongwu, XIAO Fei, HE Rong, LEI Dailiang, WANG Chao
(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: To address the fault problem caused by the electrical characteristic mismatch between new power batteries and aged electronic control systems during the battery replacement of new energy buses, this paper systematically analyzes the parameter differences between new power batteries and motor controllers aged over 8 years in operation, locates the root cause of the fault through bench tests, proposes targeted engineering improvement strategies, and verifies them through real-vehicle tests. The results show that insufficient heat dissipation due to electronic control aging is a key constraint on voltage parameter matching between new and old components; engineering improvements that enhance electronic control heat dissipation and reduce heat generation can effectively address voltage parameter matching and temperature-rise control. The results provide technical support and an engineering reference for voltage parameter matching, temperature-rise control, fault troubleshooting, and efficiency improvement in battery replacement for new energy buses.

Key words: new energy vehicle; power battery; voltage matching design; temperature rise study

在“双碳”战略与新型城镇化驱动下，新能源客车成为公共交通绿色转型的核心载体，动力电池作为其核心动力源，是车辆稳定运营的“生命线”。当前，首批新能源客车的动力电池多数已进入衰减期，存在容量下降、能效降低等问题，甚至带来安全隐患，正成为制约产业高质量发展的瓶颈。国家已出台多项政策支持动力电池以旧换新，并给予定额补贴。然而在实践中，以旧换新易因新动力电池与老化电控系统特性不匹配而引发故障[1]，如某批车辆额定电压从直流460 V升至600 V（本文后续所述电压均为直流电压）后，出现批量电控绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT）烧毁故障。目前，行业内相关系统性研究较为匮乏。基于此，本文结合实际案例，围绕电压参数匹配问题，分析其特性差异与故障成因，提出并验证改进策略，为以旧换新工作的规范落地提供参考。

收稿日期：2026-02-23。
第一作者：王双娥（1987—），女，硕士，高级工程师，主要从事新能源整车电气研发工作。E-mail：420120121335@crrcgc.cc。

1　新电池与老化电控系统的特性差异分析

1.1　新动力电池的电压特性

磷酸铁锂新动力电池与运行 8 年、健康状态(State of Health，SOH)降至 75%的老旧动力电池的关键电压特性参数见表 1。

表 1　新旧动力电池电压特性参数

参数项目	新电池	旧电池
单体内阻/mΩ	0.8～1.2	1.5～2.5
模组内阻/mΩ	12～18	25～40
10 C 脉冲压降/V	0.15～0.25	0.35～0.60
开路电压/V	3.25～3.35	3.20～3.30(衰减后)
工作电压范围/V	2.50～3.65	2.80～3.55(受限)

由表 1 可知，新旧电池在电阻、电压稳定性等方面存在显著差异。新电池的核心优势是低内阻与高电压稳定性[2-3]，其电压特性可概括为两点：一是负载突变时电压波动小、响应快，这对电控系统的电压采样速率提出了更高要求。二是极化电压低，相同端电压下大电流放电时，恒功率输出电流更大，这要求电控系统具备更高的电流控制精度。若控制精度不足，则易引发电流过载。

1.2　老化电控的电压特性

运行 8 年以上的电控受器件老化、环境侵蚀等因素影响，其电气性能与控制精度发生显著劣化，核心老化特征集中在电压采样链路、功率器件及控制算法三个方面[4-5]，具体如下：

1）电压采样链路漂移。高压分压电阻网络老化导致阻值漂移±(2%～5%)，在 600 V 系统中，总电压采样误差可达±(10～20) V。运算放大器零点漂移导致单体电压检测误差由初始±5 mV 增至±15 mV。模数转换器芯片参考电压漂移导致测量误差增大，低温环境下该问题更为突出。采样滤波电容老化造成电阻电容时间常数变化，电压采样延迟增加 20～50 ms，影响了电控系统的电压监测精度与响应速度。

2）功率器件特性劣化。IGBT 作为电控系统的核心功率器件，老化后导通压降由初始 2.0 V 增至 2.4～2.8 V(增幅 20%～40%)。开关损耗显著增加，器件结温裕量减小，需通过降低开关频率或限制输出电流来维持正常运行。驱动电路老化导致门极电压波动增大，IGBT 开关一致性变差。此外，长期运行导致 IGBT 导热硅脂减少，散热特性大幅下降，易形成局部热堆积。

3）控制算法及保护逻辑不完善。早期电控系统采用单一电流环控制策略，输出电流随直流母线电压升高而升高，缺乏电压电流协同控制机制。过流保护仅依赖硬件保护，无软件分级保护策略，对瞬时过载的应对能力较弱，易导致功率器件因瞬时应力过大而损坏[6]。

1.3　电压不匹配类型及风险机理

新动力电池与老化电控系统的电压特性不匹配，会引发过压、欠压等一系列风险，最终导致电控系统故障，各类风险的作用机理如下[7-8]：

1）过压风险。过压分为两种情况：一是超出电控硬件使用范围(如三相输出峰值门极电压超过其额定值 1 200 V)，此时会导致电控硬件过压损坏，匹配中需降低电池额定电压；二是超出电控软件设定范围，但未超出硬件使用范围，此时可通过调整电控软件参数进行适配。

2）欠压风险。欠压分为两种情况：一是当动力电池放电终止电压低于电控系统硬件使用范围下限，或电压瞬时跌落超出电控系统耐受范围时，会导致电机输出功率不足或停机，匹配中需选用额定电压更高的电池，以保证电池全 SOC 区间内均可满足要求；二是当电压低于电控软件设定范围下限，但仍在电控硬件使用范围时，系统会自动触发停机保护，影响行车安全，匹配中可通过调整电控软件参数进行适配。

3）额定电压升高虽未超出电控硬件及软件范围，但仍可能引发问题。原因包括：新电池内阻变小、电控器件老化、早期控制逻辑不完善等。其中，电控器件老化主要表现为电控中 IGBT 导热硅脂减少、散热特性变差，热量无法及时散出，形成局部热堆积，导致 IGBT 结温持续升高。最终导致电控发热量增加，致使电控无法长时间或大功率运行。本文主要针对此种情况进行详细研究，匹配中可通过调整电控参数、优化热管理策略等措施加以解决[9]。

2　故障排查及原因分析

2.1　故障排查

本次故障主要体现为电控内 IGBT 损坏。该器件损坏可能由以下原因引起：电控内 IGBT 本身老化损坏、电控过压、过温，或因电机老化导致运行异常。下面针对以上原因依次进行排查。

1）为排查 IGBT 损坏是否为产品本身老化引起，针对运行 8 年的 IGBT 开展了外观、电特性、超声波扫

描、内部观察、铝线拉力测试及动特性测试等[10]。测试结果未见明显的功率特性恶化现象，表明 IGBT 老化并非导致本次故障的主要因素。

2）为排查 IGBT 损坏是否由过压引起，对老化电控开展了不同额定电压下的三相输出峰值门极电压测试。测试结果表明，电压在 600 V 和 700 V 时，峰值门极电压分别为 744 V 与 840 V，均未超标。

3）为明确额定电压变化对电控系统散热特性的影响，分别在 460 V、600 V 额定电压下开展老化电控额定工况与峰值工况温升测试，测试过程中将冷却系统水流量控制在 14.8~15.2 L/min，确保冷却条件一致性。结果如图 1 至图 4 所示。两种额定电压下，电控温升趋势基本一致，均呈现“前期快速升温、后期趋于热平衡”的特征；但随着额定电压升高，控制器整体损耗与温升水平显著上升，且三相温度差异略有增大。在额定工况下，460 V 平台控制器平衡温度约 66.6 ℃，600 V 平台约 68.6 ℃，温升相差约 2 ℃；在峰值工况下，460 V 平台控制器最高温度约 85.0 ℃，600 V 平台约 90.0 ℃，温升相差约 5 ℃。值得注意的是，无论何种额定电压、何种工况，U 相 IGBT 温度始终为三相最高，热应力相对更为突出，这与后续拆解发现的 U 相 IGBT 失效最为明显的现象高度吻合。

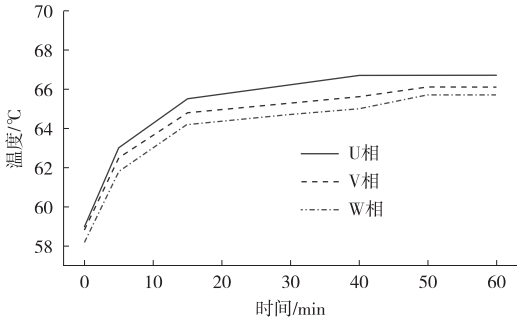


图 1　460 V 额定工况 IGBT 三相温升曲线

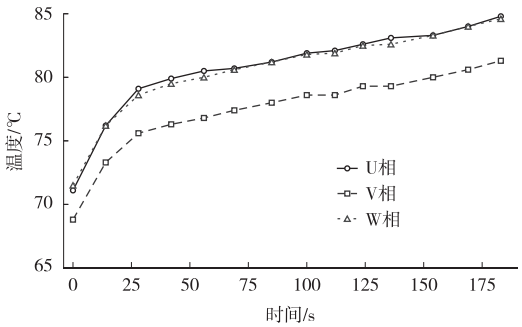


图 2　460 V 峰值工况 IGBT 三相温升曲线

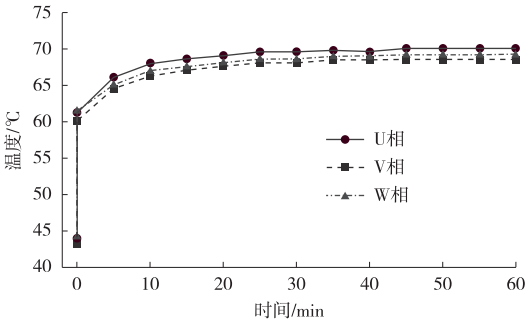


图 3　600 V 额定工况 IGBT 三相温升曲线

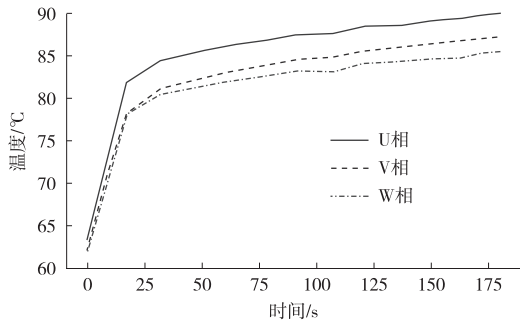
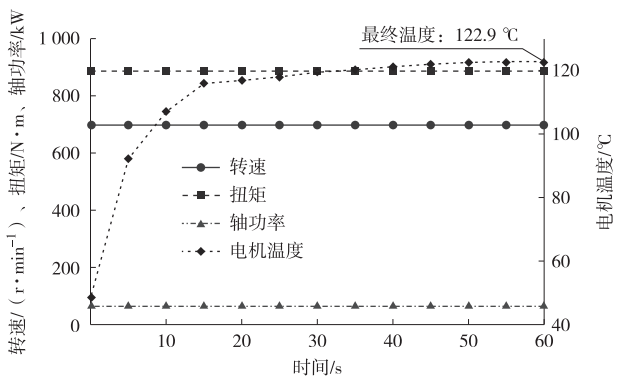
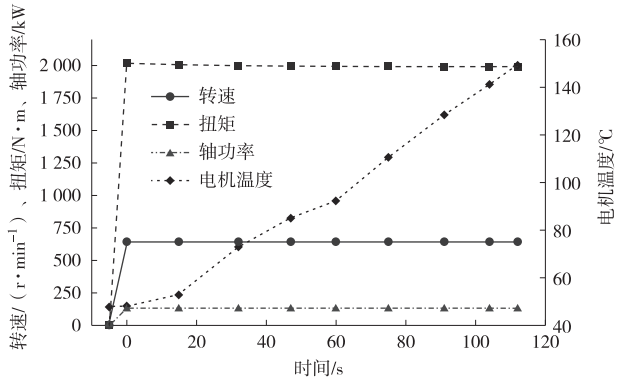


图 4　600 V 峰值工况 IGBT 三相温升曲线

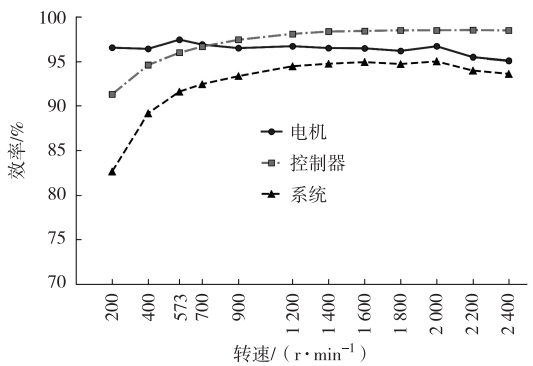
4）为验证电机老化及运行异常是否为本次 IGBT 批量烧毁故障的诱因，对运行 8 年的驱动电机开展了台架测试，重点检测其转矩输出、效率及热稳定性。测试结果如图 5 所示，该驱动电机可稳定输出约 700 N·m 的持续转矩，短时可输出约 2 000 N·m 的峰值转矩，完全满足新能源客车持续运营和短时大负载（如起步、爬坡）工况需求；电机及系统效率在大部分工况下稳定在 95%~98%，仅在峰值扭矩及卸扭等极端动态工况下出现短暂下降，且效率可快速恢复，这符合驱动电机系统的损耗特性。以上结果表明，老化电机的动力输出、效率表现及热稳定性基本符合设计要求，并非本次故障的诱因。



（a）额定工况运行特性曲线



（b）峰值工况运行特性曲线



（c）系统效率曲线

图 5　老化电机额定与峰值工况测试曲线

2.2　故障原因分析

结合上述测试结果及故障拆解分析，明确本次 IGBT 批量烧毁故障的核心根源如下：动力电池更换后，母线电压由 460 V 提升至 600 V，虽未超出原电控系统 350~720 V 的宽电压设计范围，但 IGBT 的开关损耗随母线电压升高呈近似线性增长，导通损耗随起步峰值电流增大及器件结温升高而相应增加，导致 IGBT 整体损耗增加，产生的热量较 460 V 平台明显增多。

对于导热硅脂充足、散热正常的电控系统而言，新增损耗产生的热量可通过散热系统及时散出，不会产生热堆积。但该批车辆的老化电控系统中，IGBT 导热硅脂已因长期运行而显著减少，散热效率大幅下降，600 V 平台下损耗增加进一步加剧了热堆积，导致 IGBT 结温升高速度加快、峰值温度升高、器件可靠性下降，在长期反复的起步峰值工况下，最终引发 U 相 IGBT 批量烧毁。加之老化电控系统电压采样漂移、控制算法不完善，进一步放大了故障发生的概率，导致故障集中爆发。

3　改进策略及验证

针对本次故障的核心原因（IGBT 导热硅脂减少、散热不足，叠加额定电压升高后损耗增加、电控系统采样与控制精度不足），本文结合新能源客车动力电池以旧换新的工程实际，在不更换电控系统、控制公交企业改造成本的前提下，制定针对性工程化改进策略，聚焦散热优化、控制策略完善及参数标定，以延长老化电控系统使用寿命，确保在 600 V 额定电压下可靠运行[11]。

3.1　具体改进措施

1）优化 IGBT 散热系统。拆解老化电控系统 IGBT 模块，清理残留的导热硅脂，重新均匀涂抹足量的导热硅脂，填满 IGBT 芯片与散热基板之间的所有缝隙，以降低接触热阻，提升散热效率；同时清理散热基板表面灰尘、油污等杂质，保证散热基板清洁，提升散热可靠性。

2）完善电控系统保护逻辑。在原有硬件保护的基础上，新增过流软件分级保护策略，根据电流过载程度设定不同的保护阈值，实现“预警-降额-停机”三级保护，减少对电控硬件的累积损伤；优化电压电流协同控制算法，修正电压采样漂移误差，抑制输出电流随额定电压升高而过度增大，确保电流输出稳定，避免 IGBT 过载[12]。

3）优化散热控制策略。对电控系统的散热系统进行优化设计，调整水冷、风冷装置的启动及关闭逻辑，提前介入开启散热（将散热启动阈值降低 5 ℃），延长散热系统运行时间，确保 IGBT 产生的热量及时散出，避免热堆积；同时定期检查散热管路，确保水流量稳定在 14.8~15.2 L/min，无堵塞、泄漏现象。

4）合理限流标定。在满足客车正常运营工况需求的前提下，对电机电控系统进行合理限流处理，降低起步峰值电流对 IGBT 的热应力，减少电控系统热堆积，平衡车辆动力性能与电控系统可靠性。

3.2　改进效果验证

本文对该批车辆电控系统实施上述改进措施后，随即开展了台架测试与实际运营验证，以检验改进策略的有效性。台架测试结果表明，在 600 V 额定电压下，额定工况时控制器平衡温度降至 65 ℃，较改进前降低 3.6 ℃；峰值工况时 IGBT 最高温度降至 83.5 ℃，较改进前降低 6.5 ℃；三相温度差异控制在 2 ℃

以内,IGBT 结温处于安全范围。详细数据见表 2。

表 2 改进前后温升数据 ℃

工况类型	改进前温度	改进后温度	温度降幅
额定工况	68.6	65.0	3.6
峰值工况	90.0	83.5	6.5

在实际运营验证中,改装车辆接受了 1 个月的常态化运营测试,累计测试整车起步工况 1 000 次以上。测试期间车辆未出现 IGBT 烧毁及其他电控系统故障,电机输出功率、续航能力均满足运营需求,单位公里电耗较改进前有所降低。结果表明,改进措施有效解决了散热不足的问题,同时实现了老化电控系统与新动力电池 600 V 额定电压的稳定匹配,达到了预期改进目标。

4 结束语

本文通过特性分析与测试,揭示了新能源客车电池以旧换新后 IGBT 烧毁的机理:新电池高电压敏感特性与老化电控性能劣化形成适配矛盾,导致 IGBT 损耗增大、散热恶化,峰值结温超限引发热击穿。试验表明,采用散热优化、软件分级保护及限流标定的综合方案,无需更换整套电控即可有效抑制温升、减少损耗,且成本较低、工程可实施性较强。本研究为在役电控延寿改造与故障排查提供了支撑。然而,不同老化电控的电压适配阈值差异显著,且行业相关量化标准尚属空白,后续将开展量化匹配试验,形成可推广的技术规范。

参考文献:

[1] 夏军,王芳. 电动汽车动力电池系统安全分析与设计[M]. 北京: 科学出版社,2016:45-48.

[2] 曾其权,张淑兴. 磷酸铁锂电池老化研究探讨[J]. 电器与能效管理技术,2023(5): 65-71.

[3] 刘进程,娄岗,钟雄武,等. 磷酸铁锂动力电池过充安全特性试验研究[J]. 客车技术与研究,2022,44(4): 52-55.

[4] 张军,张犁,成瑜. IGBT 模块寿命评估研究综述[J]. 电工技术学报,2021,36(12): 2560-2575.

[5] 胡伟,温旭辉,刘钧. 电动汽车电机驱动系统寿命模型[J]. 电机与控制学报,2008,12(6):670-674.

[6] 王佳羽,来星呈,齐会莎,等. 纯电动客车驱动系统匹配设计与性能仿真分析[J]. 客车技术与研究,2024,46 (4):15-18.

[7] 李军求,孙逢春,张承宁,等. BFC6100-EV 电动大客车动力传动系统参数设计[J]. 北京理工大学学报, 2004,24(4):311-314.

[8] GB/T 40032.2—2025 电动汽车换电安全要求 第 2 部分: 商用车辆[S].

[9] 尚小辉. 一种增程式电动客车增程器控制方案[J]. 客车技术与研究,2024,46(6):23-27.

[10] 常桂钦,罗海辉,方超,等. 散热底板对 IGBT 模块功率循环老化寿命的影响[J]. 电工技术学报,2024, 39(8): 2485-2495.

[11] 汪帆,王坤俊,周欢,等. 纯电动轻型客车高集成度动力系统方案设计优化[J]. 客车技术与研究,2023,45(2):25-27.

[12] 陈龙华,李洪林,杨汉立,等. 基于 CAN 总线纯电动汽车的整车控制器[J]. 计算机科学, 2022, 49(6A): 802-807.