

插电混动客车主发电机异常烧损故障分析与系统优化

蔡京城, 薛文嘉, 任田良, 娄智军, 徐嘉俊, 张家喻, 王琛, 王海波

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:某插电混动客车在运行约 49 000 km 后出现主发电机异常烧损故障。本文通过故障拆解、理论分析与试验测试, 诊断出根本原因并制定对应的解决方案。故障件分析表明, 烧损集中于定子绕组与整流桥。通过对连接可靠性、短路可能性及负载分配的逐项排查, 确认故障根本原因为整车供电系统中 DC/DC 转换器输出电压设定偏低, 导致负载功率分配严重失衡, 主发电机长期处于高负荷运行状态。基于此, 提出将 DC/DC 输出电压提升至 27.4 V 的优化方案。实测结果表明, 该方案可使主发电机稳态工作电流下降 40% 以上, 确保其在极限工况下仍低于额定供电能力, 有效消除了烧损风险。

关键词:插电混动客车; 主发电机; 烧损故障; 负载分配; DC/DC 转换器; 系统优化

中图分类号:U469.7; U472.4 **文献标志码:**A **DOI:**10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.03.008

Analysis of Abnormal Burnout Fault of the Main Generator and System Optimization for Plug-in Hybrid Electric Buses

CAI Jingcheng, XUE Wenjia, REN Tianliang, LOU Zhijun, XU Jiajun, ZHANG Jiayu, WANG Chen, WANG Haibo

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: A plug-in hybrid electric bus exhibits abnormal burnout failure of the main generator after operating approximately 49 000 km. This paper diagnoses the root cause and develops corresponding solutions through fault disassembly, theoretical analysis, and experimental testing. Fault component analysis reveals that the burning primarily occurs on the stator winding and the rectifier bridge. By systematically checking the connection reliability, short circuit possibility, and load distribution, the paper identifies the root cause as the DC/DC converter's output voltage setting being too low in the vehicle's power supply system, which causes a serious imbalance in load power distribution and keeps the main generator in a high-load state for a long period. Based on this, the paper proposes an optimization plan to raise the DC/DC output voltage to 27.4 V. Test results demonstrate that this plan reduces the main generator's steady-state operating current by over 40%, ensuring it remains below the rated supply capacity even under extreme conditions, thus effectively eliminating the burning risk.

Key words: plug-in hybrid bus; main generator; burnout fault; load distribution; DC/DC converter; system optimization

随着客车在智能化、舒适化与低碳化方向的持续升级, 其电气化程度不断深化, 车载用电设备数量与功率需求急剧攀升, 对整车供电系统的功率容量、运行可靠性及电压质量构成了严峻挑战^[1]。在插电混动客车供电架构中, 主发电机作为核心动力源, 其输出能力直接决定了电气系统的可用功率上限, 并与变压器共同维持着整车供电网络的基础电压稳定, 对保

障全车用电设备正常工作至关重要^[2]。

重庆地区因多山、桥隧相连且道路坡度大, 对客车的爬坡与动力性能提出了更高要求, 故而批量引入了扭矩更大的插电混动客车^[3]。但在实际运营中, 售后反馈称, 某批次车辆在运行里程达 49 000 km 后发电机出现异常烧损, 严重威胁车辆运营安全。

本文以此批次故障为研究对象, 遵循从现象到本

收稿日期: 2025-10-16。

基金项目: 湖南省重点领域研发计划基金资助项目(2022GK2068); 湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目(2021JJ50053)。

第一作者: 蔡京城(1999—), 男, 助理工程师, 主要从事客车电气系统架构设计工作。E-mail: caijingcheng.cy@crrecg.cc。

质的分析路径,通过原理分析、硬件拆解、试验测试与方案验证,系统性地诊断发动机的故障原因,并提出有效的优化整改措施,以期为后续车型的供电系统设计提供理论与实证依据^[4]。

1 故障现象与原因分析

1.1 故障现象

现场检查发现,故障发电机外壳存在局部氧化与软化现象。拆解后发现,其内部定子绕组、转子绕组及整流桥均存在严重烧灼痕迹,元器件因高温老化而失效,具体烧损形貌如图 1 所示。该故障在同批次多辆车上均有出现,具有明显的批次性特征。

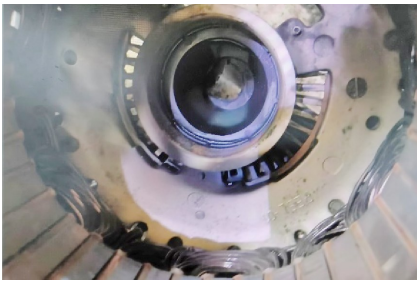


图 1 主发电机烧损

该批次车辆采用爪极式发电机,其主要由转子、定子、整流桥、调压器及冷却风扇构成,额定输出电压为 (28.5 ± 0.25) V。该发电机工作原理如下:发动机驱动转子旋转,直流励磁电流通过滑环激励爪形磁极产生旋转磁场,切割定子三相绕组感应出交流电,随后经 6 只二极管组成的整流桥转换为直流电输出;调压器通过监测输出电压,动态调节励磁电流以维持电压稳定^[5]。

1.2 故障原因分析与排查

基于烧损形貌,可能的原因包括:连接系统不可靠;负载或连接系统短路;主发电机长期高负荷运行^[6]。针对以上 3 种可能,下文将进行逐一排查。

1.2.1 连接系统可靠性检查

在断电状态下,对主发电机周围的连接系统进行可靠性排查。排查对象涵盖接线端子、固定螺栓及连接线束;排查方式包括使用力矩扳手进行扭矩校验及对线束进行拉力测试。排查结果表明,所有螺栓扭矩均达到 $12\text{ N}\cdot\text{m}$,且发电机、散热风扇、接线盒及空调等重要部件的线束连接牢固,未发现松动现象。因此,可以判定绕组周围的连接系统符合可靠性要求,从而排除因连接系统不可靠导致接触不良,进而引发主发电机烧损的可能性^[7]。

1.2.2 短路测试

在整车上电工况下,使用万用表蜂鸣挡对绕组周边电气部件进行短路测试。测试过程中,万用表未发出蜂鸣提示音,表明电路正常,无短路现象。因此,可以排除因连接系统短路导致主发电机烧损的可能性。

1.2.3 负载工况测试

对电气系统进行实测,发现主发电机输出电流高达 180 A(超出正常值 18%),而 DC/DC 输出电流仅为 100 A(低于正常值 40%)。功率分配分析表明,主发电机承担了整车总负载约 81%的功率,而 DC/DC 仅承担 19%,负载分配严重失衡。此不均衡工况已持续运行两年以上,是导致主发电机长期过热并最终烧损的直接原因^[8]。

2 负载失衡根本原因分析

负载分配不合理是导致发电设备损坏的常见原因,其典型表现为过压或过流引发大量热能,导致元器件内部温度过高而损坏(俗称“烧毁”)^[9-10]。常见的影响因素有以下 3 点:①主发电机接入的负载过多;②电路连接方式有误或电能分配不合理;③DC/DC 电压输出过低。为确定本次故障的原因,需对上述 3 种可能因素进行逐一排查。

2.1 主发电机接入负载过多

根据该批次客车全生命周期管理文件,可得到整车低压供电系统主回路图(图 2)。由图可知,主发电机确实接入了大量负载,其具体功率见表 1。

表 1 整车负载功率表

W

参数	数值
整车低压部件回路总功率	10 500
动力系统低压电路板总功率	110
模块、配电盒总功率	62
整车热管理系统总功率	4 300
整车灯光信号系统总功率	647
持续工作用电器总功率	836
非持续工作用电器总功率	1 712

为验证负载过多是否为故障主因,进行了负载转移模拟,即将原来由主发电机供电的部分负载转移至 DC/DC 转换器。调整后,主发电机输出电流有所下降,DC/DC 输出电流相应上升,但二者仍与正常值存在较大差距。由此可基本排除因主发电机接入负载过多而导致其烧损的可能性。

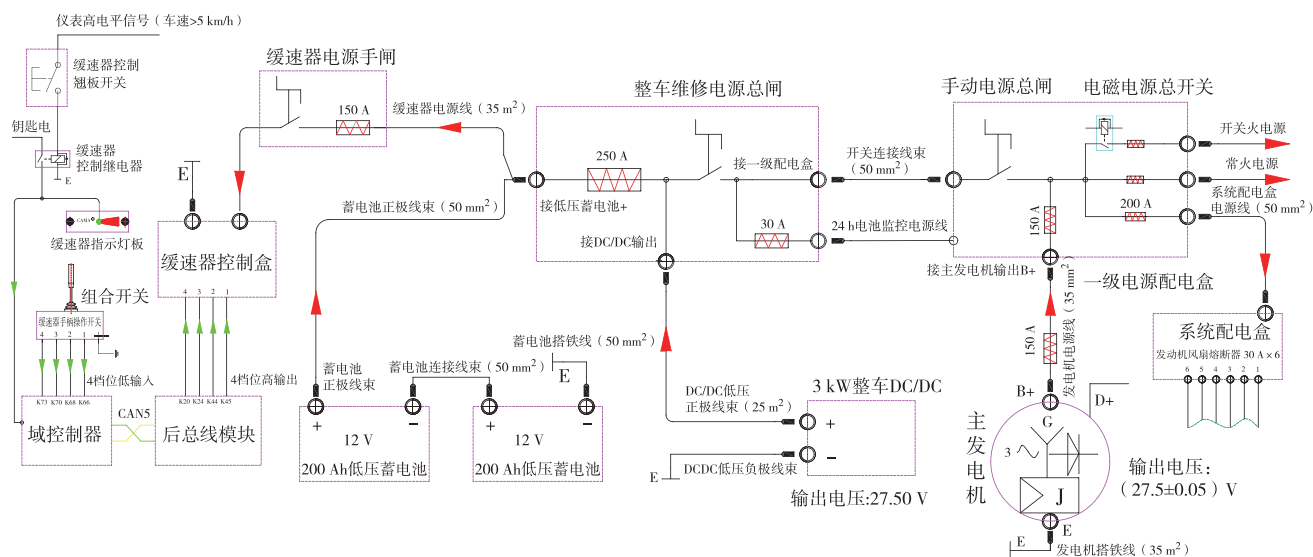


图2 整车低压供电系统主回路图

2.2 电路连接与电能分配设计错误

经对相关电气设计图纸进行复核,确认其电路连接与电能分配设计合理。因此,可排除因设计错误导致主发电机烧损的可能性。

2.3 DC/DC 电压输出过低

DC/DC 模块的理论输出电压为 27.5 V,而主发电机调压器设定值为 27.25 V,两者存在 0.25 V 的电压差。在并联供电系统中,输出特性较“硬”的电源会承担更多负载。为验证此影响,通过程序将 DC/DC 输出电压提升至 28.2 V。测试结果显示,主发电机电流显著下降,DC/DC 电流相应上升,系统恢复均衡。因此确认 DC/DC 输出电压初始设定值偏低,是导致负载分配严重偏向主发电机的根本原因。

主发电机的输出特性较“硬”,当总负载电流增大时,主发电机的电压下降幅度有限,这会导致主发电机输出电流显著增加,存在过载烧毁风险。而 DC/DC 的输出特性较“软”,在总负载电流增大时,其输出电压下降相对明显,从而 DC/DC 电流变化不大。为此需要提高 DC/DC 输出电压,使 DC/DC 承担更多的负载,以减小主发电机的负载电流。

3 解决方案与验证测试

3.1 解决方案

针对上述根本原因,本文提出并验证了以下 3 种解决方案:

1) 更换烧损发电机并恢复原设计接线状态。测试发现,此方案虽能缓解主发电机负担,但其输出电流与额定状态仍存在较大差距。

2) 更新空调控制程序,优化其启停逻辑。测试表明,该优化仅能部分缓解负载,但与额定状态仍存在较大差距。

3) 调整整车 DC/DC 控制软件,提升其输出电压。将 DC/DC 输出电压设定为 27.4 V,旨在补偿线路损耗,确保系统电压维持在发电机调压器设定值 (27.25 V) 的允许偏差范围内。设置试验组 (开启全部整车负载进行测试) 及 8 个对照组,用于模拟整车在不同负载下的电流输出。DC/DC 输出电压设置为 27.5 V 与 27.4 V 时的测试结果见表 2。

表2 DC/DC 输出电压设置为 27.5 V 与 27.4 V 时的测试结果

测试分组	DC/DC		发电机		DC/DC	
	输出电流/A		输出电流/A		分担比例/%	
	27.4 V	27.5 V	27.4 V	27.5 V	27.4 V	27.5 V
试验组	113.5	126	66.5	55	63.1	69.6
对照组 1	103	116	62	51	62.4	69.5
对照组 2	97	110	59	47	62.2	70.1
对照组 3	92.5	105	57.5	40	61.7	72.4
对照组 4	88.5	98.5	54.5	38.5	61.9	71.9
对照组 5	84	94	52	34	61.8	73.4
对照组 6	81	90	50	32	61.8	73.8
对照组 7	75.5	85	48	31	61.1	73.3
对照组 8	70.5	80	44.5	29	61.3	73.4

由表 2 可知,输出电压设为 27.5 V 时,DC/DC

的负载电流分担比例为 69.5%~73.8%;设为 27.4 V 时,DC/DC 负载电流分担比例为 61.1%~63.1%。测试结果表明,将 DC/DC 输出电压设定为 27.4 V 时,系统负载分配更优。这一设定也与 27.25 V 的发电机调压器设定值相匹配,有助于优化系统整体性能。

3.2 极限工况验证测试

为验证 DC/DC 调压策略在整车负载全开且发电机怠速的极限工况下是否仍然有效,本文首先在发动机怠速、驾驶区开关全部开启(电池水泵未工作)的基准工况下,对优化后的 VCU 风扇控制软件进行测试,测得整车最大负载电流为 216 A。当将 DC/DC 输出电流限值设定为 114 A 时,发电机输出电流相应增至 102 A,该值仍在发电机特性曲线允许的极限范围内。此次软件优化使风扇负载降低了约 27 A,避免了发电机长期处于高负载工况。

在此基础上,为全面评估该调压策略,本文进一步选取 3 种典型发动机工况,测试在不同电气负载(8 个风扇)控制逻辑下的整车最大负载电流。通过分析发电机与 DC/DC 的负载电流分担比例,最终评判发电机是否存在高负载工况。

1) 在发动机转速≥900 r/min 的工况下,依据表 3 中的电气负载控制状态进行测试。实测整车最大负载电流约为 212 A。此时,负载电流分配存在两种情况:①DC/DC 输出 114 A,发电机输出 98 A;②DC/DC 输出 131 A,发电机输出 81 A(蓄电池处于满电状态)。由于发电机额定电流输出能力≥130 A,在此工况下,发电机已完全脱离高负载工况。

表 3 整车电气负载控制说明和测试结果
(发动机转速≥900 r/min)

电气部件	控制说明	负载电流/A
驾驶区电气开关	全部开启	≈85
2 个电机风扇	95%最高占空比	≤35
2 个中冷器风扇	85%最高占空比	≤26
2 个水冷风扇(一组)	65%最高占空比	≤33
2 个水冷风扇(二组)	65%最高占空比	≤33

2) 在发动机怠速工况(转速 625 r/min)下,依据表 4 中的电气负载控制状态进行测试。实测整车最大负载电流约为 187 A(其中 DC/DC 输出 113.5 A,发电机输出 73.5 A,蓄电池处于满电状态)。由于发电机额定电流输出能力为 102 A,在此工况下,发电机已完全脱离高负载工况。

表 4 整车电气负载控制说明和测试结果
(发动机怠速 625 r/min)

电气部件	控制说明	负载电流/A
驾驶区电气开关	全部开启	≈85
2 个电机风扇	95%最高占空比	≤35
2 个中冷器风扇	85%最高占空比	≤26
2 个水冷风扇(一组)	65%最高占空比	≤33
2 个水冷风扇(二组)	30%最高占空比	≤8

3) 在发动机熄火状态下,依据表 5 中的电气负载控制状态进行测试。实测整车最大负载电流约为 124 A。此时发电机停机无输出,DC/DC 的输出电流在 114~131 A 范围内,蓄电池最大放电电流为 10 A。测试数据表明,电压调节系统在该工况下能够维持电能的动态平衡。

表 5 整车电气负载控制说明和测试结果(发动机熄火状态)

电气部件	控制说明	负载电流/A
驾驶区电气开关	全部开启	≈85
2 个电机风扇	95%最高占空比	≤35
2 个中冷器风扇	55%最高占空比	1.8
2 个水冷风扇(一组)	保持 10%占空比	2.2
2 个水冷风扇(二组)	0%(强制停机)	0

测试结果表明,在整车最大负载电流达 216 A 的极限工况下,实测发电机输出电流为 102 A。该值低于 168J 型发电机在 700 r/min 工况下的额定供电能力(110 A),证明在此极限工况下,发电机未发生过载,已远离其过载风险区,且 DC/DC 调压策略有效。

此外,在稳态工况下,主发电机的工作负载电流较整改前下降 40%以上,进一步证明了该策略对降低发动机常规负载、提升系统效率有显著效果。

3.3 实车验证

通过对比上述 3 项解决方案的实施效果可知,调整整车 DC/DC 控制软件以提升其输出电压的方案表现最优,该方案可使供电电路的电流峰值与电压峰值最大限度贴近额定参数。因此,将此方案作为最终技术方案,并在样车上完成实施。经 3 个月试运行跟踪,车辆运行状态稳定,原故障未再复现,充分证实了方案的工程有效性。

4 结束语

本文通过系统分析,揭示了某插电式混合动力客

车主发电机批量烧损机理: 直接原因为主发电机长期高负载运行导致热积累与绝缘劣化; 根本原因在于供电系统中 DC/DC 变换器与主发电机输出电压不匹配, 导致并联负载失衡。为此, 提出将 DC/DC 输出电压优化至 27.4 V 的方案, 从根源上解决负载不均问题。经实车验证, 该方案可靠有效, 已纳入标准化设计并应用于后续车型, 显著提升了供电系统稳定性与寿命, 为同类车型设计优化及故障预防提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 严程健, 夏靖武, 杨兆银. 混合动力城市客车交流发电模块的改进设计[J]. 客车技术与研究, 2014, 36(1): 30-33.
- [2] 杨万里, 徐小兵, 范鹏飞, 等. 浅谈纯电动客车动力电池系统安全技术[J]. 客车技术与研究, 2020, 42(4): 39-41.
- [3] 安藤裕隆, 刘丽杰. HC85 系列车混合动力系统优化及环境负荷降低效果[J]. 国外铁道机车与动车, 2025(4): 21-

24.

- [4] 马富强, 强强, 杨军, 等. 发电机组并机控制器故障分析及解决方案[J]. 内燃机与配件, 2025(13): 80-82.
- [5] 亢超星, 庞强, 赵倩. 内燃机车柴油机扭振对同步发电机可靠性的影响[J]. 电机技术, 2025(3): 6-9.
- [6] 陈龙, 丛培鹏, 曾云峰, 等. 低恒速工况下主发电机励磁涌流控制方法研究[J]. 自动化仪表, 2025, 46(6): 87-91.
- [7] 魏延辉, 高朝晖, 王爽, 等. 基于参数辨识的航空无刷交流发电机仿真模型的建立[J]. 航空科学技术, 2025, 36(2): 83-90.
- [8] 石耀民. 油电增程式混合动力客车发动机转速异常问题研究[J]. 城市公共交通, 2024(10): 34-40.
- [9] 刘永豹. 涡轮增压发动机高速旋转状态失衡振动故障诊断系统[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(10): 9-16.
- [10] 周付明, 刘武强, 杨小强, 等. 基于精细化改进多尺度快速样本熵的旋转机械故障诊断方法研究[J]. 机械强度, 2023, 45(1): 1-8.

(上接第 44 页)

模技术结合了基于 Patch 的 Transformer 时序模块, 可学习整个网络的时间模式并动态更新站点之间的空间关系, 从而更真实地描述公共交通网络的变化特征。通过预测时间模式和动态依赖关系的变化来预测公交客流。基于真实交通网络数据的实验结果表明, GraphTST 在预测准确性方面优于传统的主流基准模型(如 CNN-1D、Transformer、Informer)。消融实验验证了每个模块设计的合理性, 并进一步证明了全局特征嵌入和动态图结构在提高预测效果方面的重要作用。未来, 可引入实时天气状况、交通状况、特殊事件等外部因素, 实现多源信息的集成建模, 以推动 GraphTST 的实际应用(如在线公交调度系统), 从而提升公交运营的智能性与准确性。

参考文献:

- [1] 2024 年交通运输行业发展统计公报[R]. 2024. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202506/t20250610_4170228.html.
- [2] 张宇希. 基于 LSTM 模型的城市公交客流预测研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2024: 32-56.
- [3] 张鹏祯. 基于机器学习的公交客流预测方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023: 30-47.
- [4] 赵彬. 基于 GCN-LSTM 的短时公交客流预测模型研究

[D]. 广州: 广东工业大学, 2022: 26-35.

- [5] 王宇阳. 基于时空图卷积的城市公交站点客流预测研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022: 29-44.
- [6] Wu Zonghan, Pan Shirui, Long Guodong, et al. Graph WaveNet for deep spatial-temporal graph modeling[C]//Proceedings of the Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-19). Macao: International Joint Conferences on Artificial Intelligence, 2019: 1907-1913.
- [7] Nie Yuqi, Nguyen N H, Sinthong P, et al. A time series is worth 64 words: long-term forecasting with transformers[C]//The Eleventh International Conference on Learning Representations, 2023: 1-24. <https://www.alphaxiv.org/abs/2211.14730>.
- [8] Liu Guojin, Yin Zhenzhi, Jia Yunjian, et al. Passenger flow estimation based on convolutional neural network in public transportation system[J]. Knowledge-Based Systems, 2017(123): 102-115.
- [9] Yue Min, Ma Shuxin. LSTM-based transformer for transfer passenger flow forecasting between transportation integrated hubs in urban agglomeration[J]. Applied Sciences, 2023, 13(1): 637.
- [10] Li Dekui, Du Shubo, Hou Yuru. Long-term passenger flow forecasting for rail transit based on complex networks and informer[J]. Sensors, 2024, 24(21): 6894.