

基于故障树与数据流分析的新能源汽车 高压配电故障诊断研究

谢紫莹¹, 陆小宁², 李嘉妍¹, 黄厚桑¹, 梁巍¹, 蓝勇飞¹, 林绪东¹, 吴诗林¹, 班璐^{1*}

¹南宁学院交通运输学院, 广西 南宁

²南宁链融供应链集团有限责任公司, 广西 南宁

收稿日期: 2025年5月25日; 录用日期: 2025年6月18日; 发布日期: 2025年6月25日

摘 要

新能源汽车作为我国战略性新兴产业发展迅速, 但其高压配电系统的开发、调试与维护存在较高难度和危险性, 故障诊断技术研究尤为关键。本文以某型号帝豪电动汽车为研究对象, 通过文献调研与案例分析, 系统剖析高压配电系统的结构组成与工作原理, 梳理高压无法上电、高压互锁等典型故障类型及成因。采用数据流分析、故障树分析(FTA)等多维度诊断方法, 结合优先级排查策略, 构建涵盖高压互锁、动力系统、驱动电机系统的故障检修体系, 并通过实际案例验证诊断策略的有效性。研究成果可降低电动汽车维护与研发成本, 提升车辆动力性与安全性, 为新能源汽车行业的安全发展提供技术支撑, 为汽车企业创造经济效益。

关键词

电动汽车, 高压配电系统, 高压互锁, 故障诊断, 检修

Research on High Voltage Distribution Fault Diagnosis of New Energy Vehicles Based on Fault Tree and Data Flow Analysis

Ziying Xie¹, Xiaoning Lu², Jiayan Li¹, Houshen Huang¹, Wei Liang¹, Yongfei Lan¹,
Xudong Lin¹, Shilin Wu¹, Lu Ban^{1*}

¹College of Traffic and Transportation, Nanning University, Nanning Guangxi

²Nanning Lianrong Supply Chain Group Co., Ltd., Nanning Guangxi

Received: May 25, 2025; accepted: June 18, 2025; published: June 25, 2025

*通讯作者。

文章引用: 谢紫莹, 陆小宁, 李嘉妍, 黄厚桑, 梁巍, 蓝勇飞, 林绪东, 吴诗林, 班璐. 基于故障树与数据流分析的新能源汽车高压配电故障诊断研究[J]. 输配电工程与技术, 2025, 13(2): 13-20. DOI: 10.12677/tdet.2025.132002

Abstract

As a strategic emerging industry in China, new energy vehicles have achieved rapid development. Nevertheless, the development, commissioning, and maintenance of their high-voltage power distribution systems involve considerable complexity and potential risks, rendering research on fault diagnosis technology particularly critical. Taking a specific model of Emgrand electric vehicle as the research subject, this paper systematically analyzes the structural composition and operating principles of the high-voltage power distribution system through literature review and case studies, and summarizes typical fault types and their causes, such as high-voltage power-on failure and high-voltage interlock (HVIL) malfunctions. By adopting multi-dimensional diagnostic approaches, including data flow analysis and Fault Tree Analysis (FTA), combined with a priority-based troubleshooting strategy, a comprehensive fault maintenance system covering high-voltage interlock, power system, and drive motor system is constructed. The effectiveness of the proposed diagnostic strategy is validated through practical cases. The research findings can reduce the maintenance and R&D costs of electric vehicles, enhance their power performance and safety, provide technical support for the safe development of the new energy vehicle industry, and generate economic benefits for automotive enterprises.

Keywords

Electric Vehicle, High Voltage Distribution System, High-Voltage Interlock, Fault Diagnosis, Maintenance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

新能源汽车作为我国战略性新兴产业，近年来快速发展，但电动汽车高压配电系统在开发、调试和维护中存在困难与危险性，因此对其故障诊断技术的研究具有重要意义。高压互锁系统是一种用于防止电动车辆配电系统发生故障的故障诊断技术，也被称为“危险电压互锁电路”。电动汽车高压互锁系统的启停方式都有一定的差异性。另外，通过高压互锁信号，可以对新能源汽车的各个高压元件进行远程控制，在保证高压元件全部与高压互锁信号相连的情况下，车辆就可以和高压电源进行连接。这样的做法有效预防电路系统的故障，大大地提高了电动汽车的安全性。本文以帝豪某型号为研究对象，通过分析高压配电系统的结构原理、常见故障案例及高压上电控制策略，结合流程图、故障树等形式解析高低压无法上电、高压互锁等典型故障，旨在为实车故障诊断与维修提供技术参考，降低维护成本，提升安全性与经济性。

相关研究综述：近年来，国内外学者针对电动汽车高压系统故障诊断展开了多维度研究。在基于模型的诊断方法领域，国外学者通过建立高压配电系统的等效电路模型，利用状态观测器对比模型预测值与实际测量值的偏差，实现绝缘故障定位，但该方法对模型精度依赖较高，复杂工况下适应性不足。我国汽车故障诊断技术起步比国外晚。上世纪 90 年代，才研发出自主的汽车外诊断系统和解码器。21 世纪以来，我国很多科研院所都在对汽车故障进行了大量的研究，并将其推向了高速发展的时期。目前，国内的电力机车故障诊断系统分为局部诊断和远程诊断两大类。它是指利用无线传输技术，实时监测、分

析故障信息,从而达到远程在线诊断的目的,在多故障耦合场景下诊断准确率有待提升。本研究在充分吸收现有成果的基础上,侧重于故障树分析(FTA)与数据流分析的工程化融合给维修技术提供参考价值。

2. 新能源汽车高压配电作用

高压配电系统是电动汽车上的一套能量传递部件组织集成的统称,其主要结构包括:动力电池、驱动电机、电机控制器等(见图 1)。高压配电系统的工作原理是将动力电池的高压电合理地分配给电动汽车上的各个用电设备,如驱动电机、PTC 加热器、DC/DC 转换器、电动空调压缩机等,在给用电设备供电的同时,还能将交流、直流充电接口的高压电流提供给动力电池充电[1],为动力电池充电。

市面上常见的电动汽车的高压配电系统一般由分线盒(有时也称为高压配电单元或高压电器盒)、直流和交流充电接口、电动空调压缩机线束、高压配电线束、电机二相线等组成[2]。

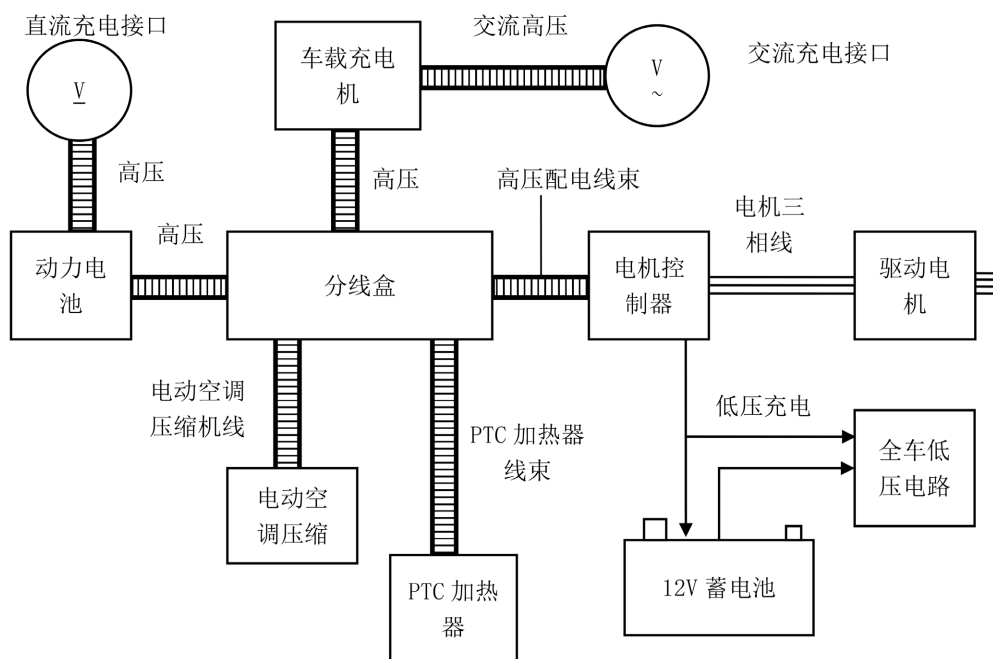


Figure 1. Schematic diagram of the high-voltage power distribution system in electric vehicles
图 1. 电动汽车高压配电系统组成示意图

3. 处理对策

高压配电系统的工作原理核心在于实现电能的高效分配与安全管理。该系统首先将动力电池的高压电合理分配给驱动电机、PTC 加热器、DC/DC 转换器等高压用电设备,同时将交流/直流充电接口的输入电流引导至动力电池完成充电过程,形成完整的能量流动闭环。为确保安全运行,系统通过高压互锁(HVIL)回路实时监测所有高压连接器的完整性,一旦检测到异常立即禁止上电。同时采用预充电回路避免容性负载上电冲击,并配备绝缘监测功能防止漏电风险,从而构建多层次的安全防护体系(见图 2)。

3.1. 分级安全保护机制

系统根据故障严重程度实施分级处理:轻微故障(如单体电压偏低、电源温度略高)进行预警提示;一般故障(如总电压异常、SOC 较低)限制部分功能并报警;严重故障(如绝缘失效、电压过高/过低)立即切断高压电,强制车辆下电,确保人员安全。

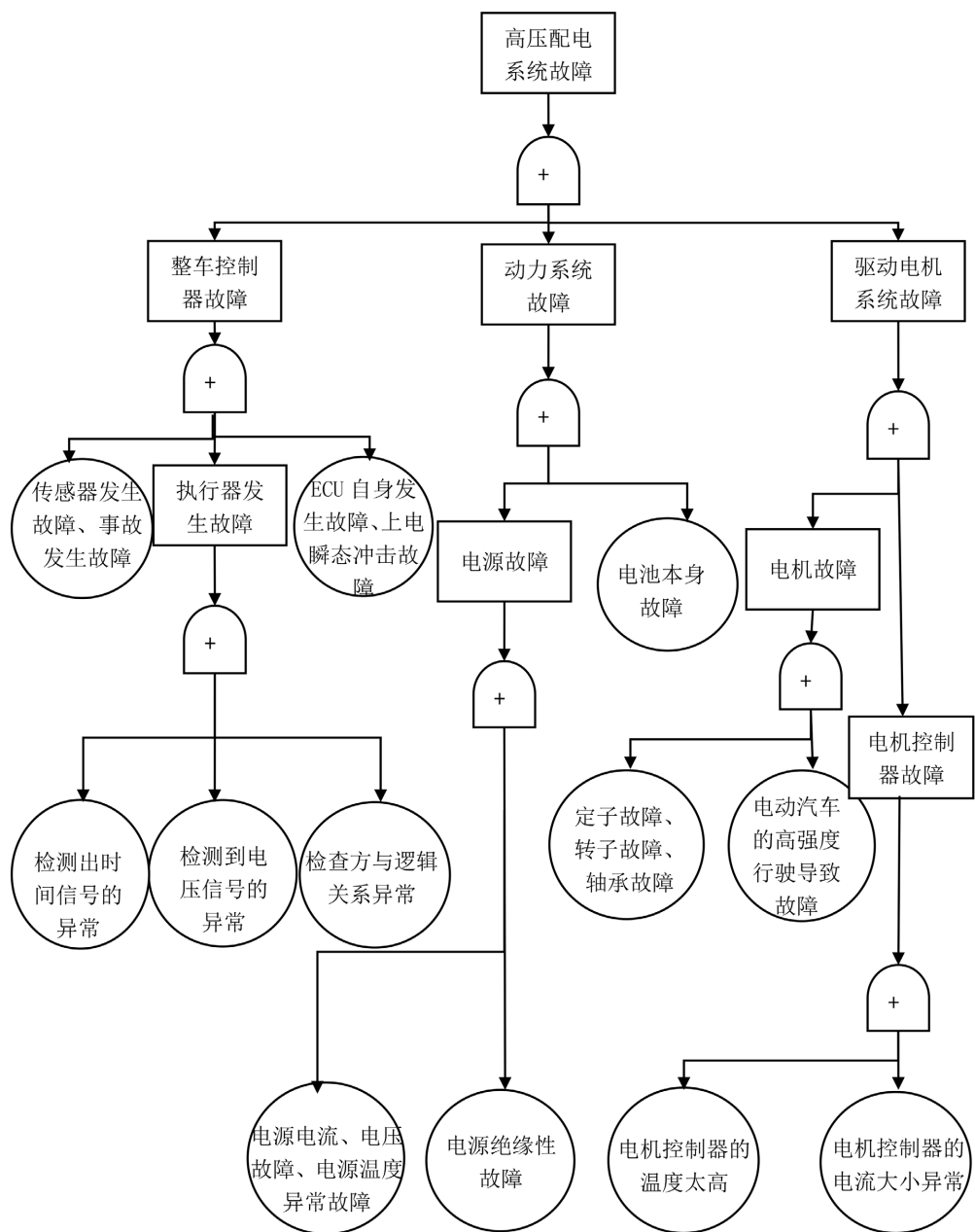


Figure 2. Fault tree of high-voltage power distribution system
图 2. 高压配电系统故障树

3.2. 高压互锁(HVIL)回路完整性监测

采用低压信号实时监测高压回路连接状态(包括线束、接插件及高压部件盖板)。当检测到 HVIL 回路断路或短路时,系统禁止高压上电,并通过诊断仪读取特定故障码(如 P1C4096),结合示波器波形分析(如 12 V 基准信号异常)和万用表电阻测量定位故障点。

3.3. 多维度故障诊断方法

(1) 数据流分析: 通过 CAN 总线获取电机转速、踏板开度、温度等数据,采用数值分析、时间分析、

因果分析及关联分析判断传感器或执行器异常。

(2) **故障树分析(FTA):** 采用逻辑树形图系统分析高压上电失败等故障的根源, 覆盖高压互锁、电源系统、驱动系统等多因素。

(3) **关键部件优先级排查:** 依次检查熔断器、继电器(如主正/负接触器、预充继电器)、高压线束连接器及控制器电源线路(如 MCU 的+B 供电线路)。通过测量电压、电阻及信号波形(如标准方波与实测波形对比)确认故障部件。

3.4. 严格的安全操作规范

检修前必须切断高压电源(操作手动维修开关), 并对工具设备进行绝缘检测。故障排除后需清除故障码, 并进行高压系统自检确认无异常后方可重新上电。

案例一: 高压互锁故障(线路断路)

故障树分析: 顶事件“高压无法上电”的直接原因之一是“高压互锁回路断路”。其下级事件包括: VCU 自身故障、HVIL 信号输出线断路、各高压部件接口虚接/断路、HVIL 信号输入线断路。

故障现象

低压充电结束后, CAN 总线进行了信息的交流, 从而实现了电力防盗的确认。同时, 检测 VCU 是否收到了刹车信号, 检查高压互锁状态, 然后 BMS 对电池进行检测, PEU 的自我检查, BMS 对接触器进行了关闭, 并进行了高压上电。踩刹车启动车辆, “READY”灯未点亮, 高压上电失败; 同时, “OK”和“READY”两个字出现, 表示电源已满[3]。仪表显示正常, 但挡位无法切换至 D/R 挡; 电池主正、主负继电器不工作; 通过诊断仪读取到故障码 P1C4096 (高压互锁失效)。

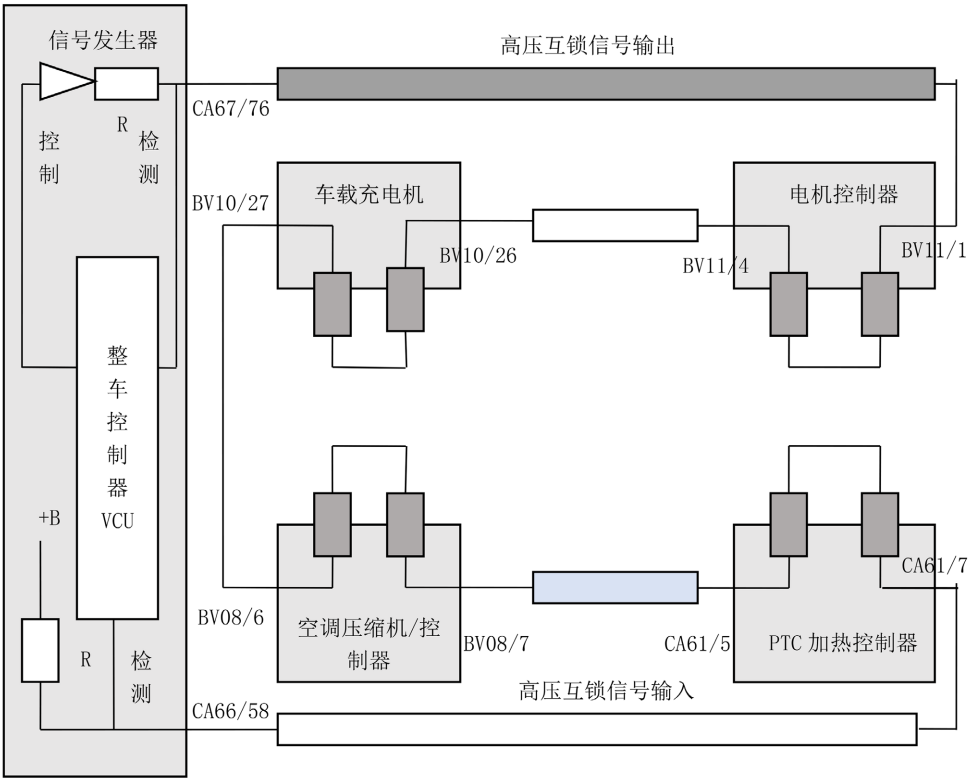


Figure 3. High voltage interlock circuit diagram
图 3. 高压互锁电路图

故障诊断与排除

高压互锁指的是用低压信号对电动车上的高压母线的各个分支进行检测，其中包括整个系统电路，导线，连接器，DC/DC，电机控制器，高压盒和保护罩[4] (见图 3)。从低压上电系统原理图了解到，低压不能上电故障原因为钥匙故障、点火开关本体和线路故障、BCM 本体和电源故障、IG 继电器本体和线路故障等[5]采用二分法对高压互锁检测线路进行分段检测，缩短测量时间：当测量点电压为 12 V 时，表明 VCU 与 CA67/76 之间存在断开，通过对线路断开的实例，对其进行了故障的检测和诊断。踩下刹车踏板，启动点火开关，完成高压上电，“ready”灯不能正常点亮，蓄电池、整车系统故障、右驻车灯、ECO 等正常工作状态，电池主正、主负继电器不工作、高压不充电、刹车踏板高度响应正常，挡位不能转换到 D、R。把点火开关放到打开的位置，然后把 DTC 读出来。读出全部的故障代码，并输入下列代码：PIC4096，高压互锁失效；高压互锁输出信号 PIC8E04 [6]。

故障的产生主要有：汽车控制系统 VCU 与电机控制器、车载充电器、空调压缩机、PTC 加热器等高压联锁线路的断路、虚接、短路等故障。对 VCU 的高电压联锁 CA67/76 进行了测试。因此，在联锁线上会有一个断开的情形，或 VCU 内部有问题。所以，原因有：高压联锁线断了；或 VCU 本身的硬件或软件的错误。对输入电压互锁线的各个端子进行了测试，结果表明 BV10/26 端的波形是一条幅度接近+B 的直线，BV11/4 是一条具有 3.3 V 的方波，这表明了车载充电电动机 BV10/26 到电动机控制器 BV11/4 线路的断开[7]。最后通过电阻测量确定故障点。

案例二：电机控制器电源故障

故障现象

高压上电失败，仪表上蓄电池、EPB、ESC 故障报警灯均点亮；挡位可在 P 与 N 之间切换，但无法切换至 D/R 挡；刹车真空泵不工作；VCU 读取到“无法与电机控制器通信”故障码，且无法进入电机控制器[8]。

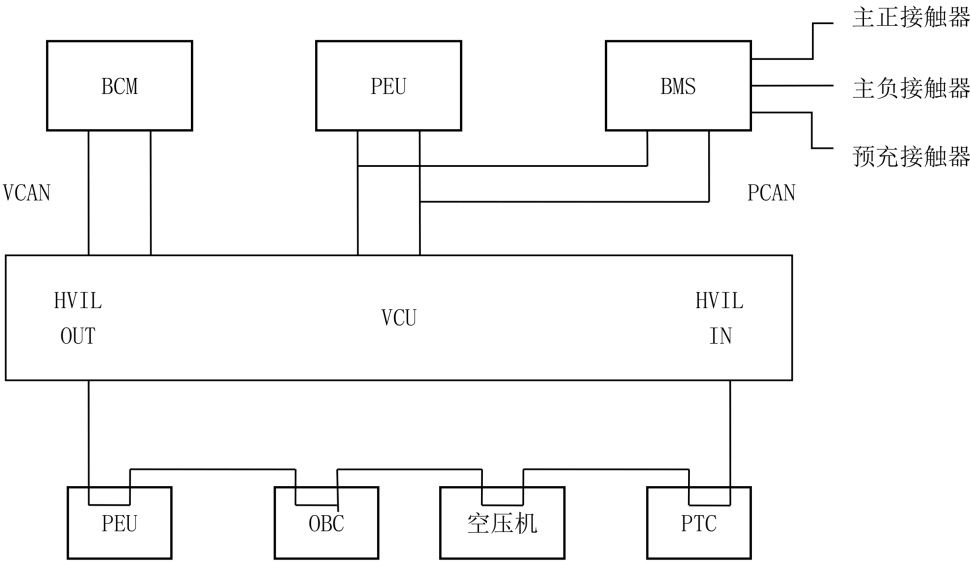


Figure 4. Schematic diagram of high-voltage power on system
图 4. 高压上电系统原理图

故障诊断与排除

在车辆处于静止状态时，车辆控制装置禁止车辆的启动及运转[9]。根据故障树，“无法与 MCU 通

信”的可能原因包括：MCU 供电故障、MCU 搭铁故障、CAN 总线故障、MCU 自身损坏。首先检查最基本的电源。查阅电路图，MCU 的主电源由 IG2 继电器经 EF32 保险丝供给，见图 4。开启点火开关，用万用表测量 MCU 主电源端子(BV11/26)对地电压。标准值应为蓄电池电压(+B，约 12 V)。实测值为 0 V，初步判定电源线路故障。测量 EF32 保险丝输入端电压，为+B，正常。测量输出端电压，为 0 V。因此判定 EF32 保险丝熔断或与其与 MCU BV11/26 端子间的线路断路。进一步检查，发现该段导线(EF32~MCU BV11/26)因磨损而被切断。

案例三：驱动系统通信故障

故障现象

高压上电失败，仪表显示驱动系统故障[10]；VCU 读取到“无法与电机控制器通信”故障码；车辆无法正常进入驱动状态。

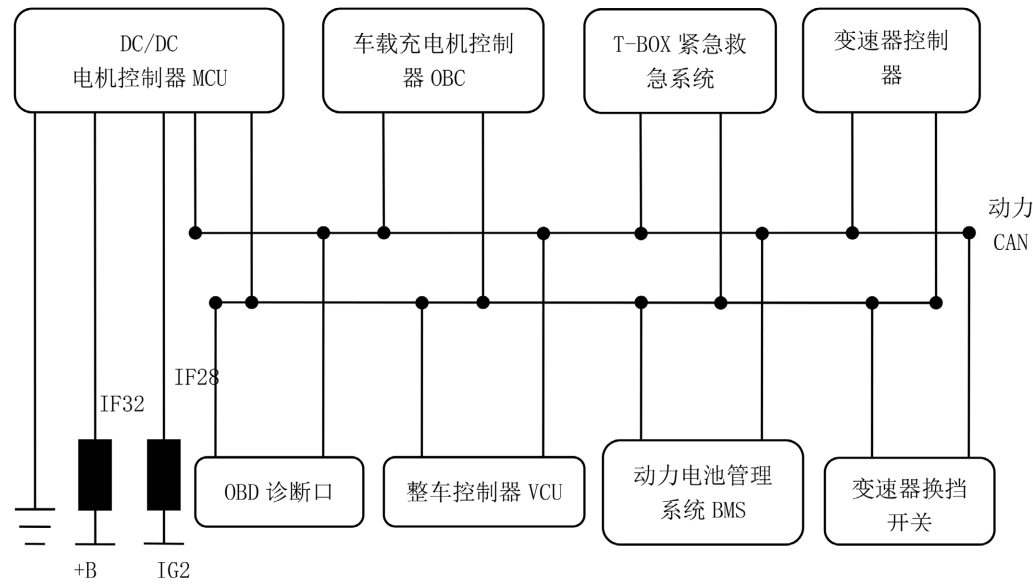


Figure 5. Drive battery system
图 5. 驱动电池系统

故障诊断与排除

首先重复案例二的电源检查步骤。测量 MCU 相关供电端子电压，均正常，排除供电问题。检查 CAN 总线物理层：测量动力 CAN 总线(CAN-H 与 CAN-L)之间的终端电阻，标准阻值约为 60 Ω (两个 120 Ω 终端电阻并联)，见图 5。实测阻值正常，初步排除总线断路/短路。使用示波器检测 CAN 信号波形(数据流分析的物理层验证)。标准波形应为两条相位相反的差分信号。实测发现波形幅值异常且存在严重失真。根据故障树，CAN 总线故障可能源于任一节点。依次断开各 CAN 节点(如变速器控制器 TCU、车载充电机 OBC 等)，每次断开后观察波形变化。当断开电机控制器(MCU)节点时，CAN 波形恢复正常。由此判定 MCU 内部 CAN 通信模块故障，其异常拉低了整条总线电平。高压上电成功，故障排除。

4. 结语

在全球能源短缺与环境污染双重约束下，电动汽车作为交通运输领域向清洁化、低碳化转型的核心载体，其产业发展已成为各国汽车工业升级的战略方向。与传统内燃机汽车相比，电动汽车动力系统架构呈现显著特殊性：以动力电池为核心储能单元，驱动电机系统为动力输出终端，整车控制系统则承担

行驶安全保障与能量优化分配的核心功能，而电机控制器、电动空调压缩机、DC/DC 转换器、驱动电机及 PTC 加热器等关键部件均属于高压用电设备，此类部件及关联线路的故障模式与故障机理具有高压系统特有的复杂性，因此开展电动汽车高压配电系统故障检修技术研究具有重要工程意义。本文梳理的高压配电系统故障诊断流程、典型故障检修方案及安全操作规范，通过故障树诊断法可为新能源电动汽车高压配电系统的运维实践提供直接技术支撑，同时也为同平台或同类型电动汽车高压配电系统故障诊断体系的优化完善提供理论参考与工程借鉴。希望本研究成果能助力提升新能源汽车高压系统的运维效率与可靠性，保障车辆行驶安全，进而为我国新能源汽车产业的高质量发展提供技术赋能。

基金项目

无阈制动-缓冲式制动能量回收(202511549042)纯电农用拖拉机动力电池系统设计研究(2025HX054)。

参考文献

- [1] 刘亮. 纯电动汽车交流充电系统的检修[J]. 装备维修技术, 2020(2): 6.
- [2] 麦鹏. 电动汽车高压配电系统故障诊断与排除方法研究[J]. 汽车实用技术, 2019(10): 53-54.
- [3] 梁力艳. 北汽新能源 EX360 纯电动汽车高压无法供电案例分析[J]. 时代汽车, 2020(24): 104-105.
- [4] 沈同春. 新能源汽车高压互锁系统的原理及故障诊断技术研究[J]. 时代汽车, 2021(3): 91-92.
- [5] 秦航, 邹鹏君. 新能源汽车电动化系统故障维修方法分析[J]. 大众标准化, 2019(18): 143-144.
- [6] 刘浩. 新能源汽车高压互锁系统回路组成及故障诊断[J]. 汽车维修技师, 2021(3): 123-124.
- [7] 周葳. 帝豪 EV450 新能源汽车高压互锁故障解析[J]. 汽车维修技师, 2022(2): 132.
- [8] Ruan, S., Ma, Y., Yang, N., Xiang, C. and Li, X. (2022) Real-Time Energy-Saving Control for HEVs in Car-Following Scenario with a Double Explicit MPC Approach. *Energy*, **247**, Article ID: 123265.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123265>
- [9] 韩明祖. 新能源汽车故障及维修关键技术探究[J]. 时代汽车, 2019(17): 147-148.
- [10] 徐晓东, 樊玖林. 新能源汽车高压系统故障及维修技术研究[J]. 汽车实用技术, 2020(1): 30-32.