新能源汽车高压系统绝缘安全试验方法及安全操作应用

王殿学 贾雨

（安徽江淮汽车集团股份有限公司，合肥 230000）

摘要：为研究新能源汽车高压系统的试验方法和问题的定位分析，从设备级和整车级2个层面研究了新能源汽车的高压电安全问题，分析了现有的新能源汽车高压电安全法规、标准以及技术现状，对新能源汽车的高压绝缘状态及相应的防护措施进行分析，包括高压绝缘系统的测试和监控系统的原理和测试方法。开发了一套高压电安全分析、防护及设计的方案和测试解决方案，可对新能源汽车的各个运行场景进行遍历验证，实现系统安全阈值超标问题的准确定位和操作过程安全性验证，简化问题定位难度。

关键词：新能源汽车 系统安全 安全操作 运行场景

中图分类号：U467.1 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250204

Insulation Safety Test Methods for High-Voltage System of New Energy Vehicles and Safety Operation Research

Wang Dianxue, Jia Yu

(Anhui Jianghuai Automobile Group Co., Ltd., Heifei 230000)

Abstract: To study the testing methods and issue diagnosis of high-voltage systems in new energy vehicles, this paper examines high-voltage electrical safety from two levels: equipment-level and vehicle-level and analyzes existing the high-voltage electrical safety regulations, standards, and the current technological status of new energy vehicles. The study also investigates the high-voltage insulation condition of new energy vehicles and corresponding protective measures, including the principles and testing methods of high-voltage insulation systems and monitoring systems. Finally, comprehensive solution for high-voltage electrical safety analysis, protection, design, and testing has been developed. This solution can perform exhaustive verification across various operating scenarios of new energy vehicles, enabling precise identification of system safety threshold violations and validation of operational safety, thereby simplifying the difficulty of issue diagnosis.

Key words: New energy vehicles, System safety, Safe operation, Operating scenarios

1 前言

新能源电动车辆包括纯电动汽车（Electric Vehicle，EV）和混合动力汽车（Hybrid Electric Vehicle，HEV）[1]。根据中国乘联会数据，现阶段新能源汽车销售占比已超过50%，其高压系统的安全性越来越受到用户的重视，本文从电动汽车安全测试角度出发，研究国内外测试方法的局限性和后续优化方向。

行业内已有高压电安全的相关标准，如GB 18384—2020《电动汽车安全要求》、ISO 6469《电动道路车辆（Electric Road Vehicles，ERVs）使用安全》。新能源电动汽车在开发过程中已对系统安全进行了针对性设计，GB 18384—2020中涵盖了

作者简介：王殿学（1987—），男，学士学位，工程师，研究方向为汽车测试。

参考文献引用格式：

王殿学，贾雨. 新能源汽车高压系统绝缘安全试验方法及安全操作应用[J]. 汽车工艺与材料，2026(2): 44-49.

WANG D X, JIA Y. Insulation Safety Test Methods for High-Voltage System of New Energy Vehicles and Safety Operation Research[J]. Automobile Technology & Material, 2026(2): 44-49.

第5条测试工程师防护的要求和第6条中试验方法的阐述。其中,对试验方法阐述不够明确,场景覆盖不够全面;在6.2.3绝缘监测功能验证试验中,仅规定了当测试值在整车最小绝缘电阻值附近时,整车出现声光报警后判定为达标,测试值和声光报警对应关系描述笼统。主机厂需细化该要求进行针对性验证。同时,ISO 6469中要求的工况没有明确,如车辆静止状态的绝缘监控特性、行驶状态下的绝缘监控特性、充电状态下的绝缘监控特性等,主要问题有:

a. 仅规定通过测量电压值计算绝缘电阻测试方法,但未明确测试点选择原则(如优先选高压负载直流侧)、测试工况(如车辆振动、温湿度变化条件下的测试要求)、故障诊断阈值分级(如预警值、临界值)。

b. 标准要求整车需具备绝缘监测功能,但未规定具体实现方式(如周期性检测频率、数据上报机制),导致不同方案差异大,兼容性差。

c. 缺少对交直流混合系统、充电桩交互场景的测试要求,易引发误报。

现有的测试方法和研究成果存在耗时长或覆盖场景不足的问题。本文开发了一套针对高压系统安全的测试方法,与国家标准相结合,细化评价过程,增加用户典型场景的评价,包括车辆的静放、充电过程、涉水过程等,确保车辆使用全周期的安全,同时研究了测试过程中测试工程师的安全防护。

2　研究方法

2.1　测试原理

纯电动汽车与混动汽车的高压原理图相似[2],如图1所示,包含电池包及电池管理系统(Battery Management System,BMS)控制器、主正继电器、主负继电器、直流转换器、交直流充电机、电机控制器以及其他高压部件,所有高压部件均通过高压线束连接。车辆高压系统出现安全问题的根本原因是线束或者高压部件绝缘不良。当出现以上故障时,绝缘电阻值会出现异常,通过整车绝缘监测程序上报整车控制器(Vehicle Dynamics Controller,VDC),VDC下发故障码[3],最终体现为仪表的声光报警,提醒用户维修或远离车辆。测试通常以用户模式为牵引,采取分级测试、分级报警的方式,过程中对比实际产生的故障电阻值与整车经过计算映射的电阻值,从而判定预警信号的及时性和有效性。

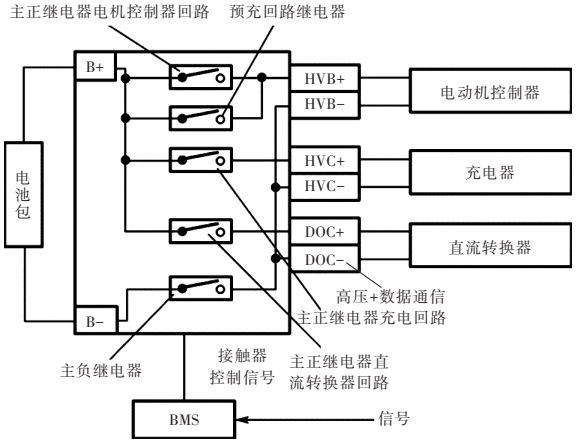


图1　新能源汽车高压电气原理

2.2　测试流程

系统安全的验证思路如下:首先,判断用户的使用场景,包括车辆静止状态、行驶状态、涉水状态、充电状态。对这些状态注入不同等级的故障电阻,然后对比解析系统的映射值与真实值,判定车辆应急状态的合理性同时,高压测试全过程同步关注测试工程师的人身安全。

2.3　测试场景

2.3.1　车辆静止状态下的绝缘电阻监测试验

车辆静止状态下的绝缘电阻监测试验流程如下。

a. 测试样车整车绝缘电阻R_i,详见GB 18384—2020中6.2.1节测试方法,并满足该标准中5.1.4.1节绝缘电阻的要求。

b. 按照GB 18384—2020中6.2.1中的方法,采用万用表测试并记录较小测量电压所在的车载可充电储能系统(Rechargeable Energy Storage System,REESS)高压侧,如图2所示。

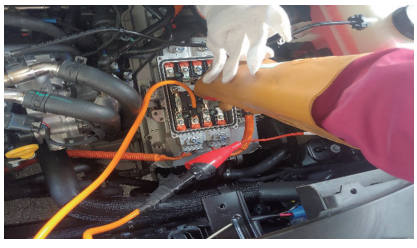


图2　高压采集

c. 按照被测车辆的操作流程进入可行驶模式。

d. 将安规综合分析仪并联在测量电压较小的REESS高压侧与车身地之间，试验原理如图3所示[4]。高压线束接线方式如图4所示，当开始测量时，将安规综合分析仪的电阻值设置为最大值。

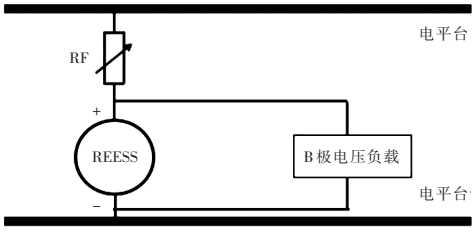


图3 试验原理



图4 试验仪器布置

e. 若最小绝缘电阻要求为100 Ω/V，则将安规综合分析仪阻值减小至目标值R_x，R_x计算如下[5]：

$$1/[1/(95U_{REESS})-1/R]<R_x<1/[1/(100U_{REESS})-1/R] \quad (1)$$

式中：U_{REESS}为电池包当前总电压，R为整车绝缘电阻。

若最小绝缘电阻要求为500 Ω/V，则将安规综合分析仪的阻值减小至目标值R_y，R_y计算如下[1]：

$$1/[1/(475U_{REESS})-1/R]<R_y<1/[1/(500U_{REESS})-1/R] \quad (2)$$

f. 观察车辆绝缘失效报警装置是否有声光报警，记录绝缘电阻值达到目标值到触发车辆声光报警的时间，试验结果如图5所示。



图5 某车型试验结果

g. 记录整车CAN总线数据绝缘电阻值。

在上述流程e中，GB 18384—2020中没有对故障阻值进行渐进性设置环节，设置该流程的目的是：由设备最大阻值开始，保证测试工程师的安全；当阻值逐渐靠近整车绝缘监控的第1个阈值时，可定制化考察该阈值下的车辆决策逻辑，分级考察绝缘监控性能；根据实际注入值与整车的映射阻值形成对应关系，通过统计对比分析可考察映射值的真实性。

在上述流程f中，GB 18384—2020没有对故障阻值进行渐进性设置，一般来说，主机厂会定义分级判定逻辑，如：阻值到达100 Ω/V的5倍时，BMS会出现1级故障报警，该故障会出现灯光报警，持续20 s，仅提示不执行动作；当阻值到达3倍时，BMS会出现2级故障报警，执行声音和灯光同时报警，持续10 s；当阻值到达1倍时，BMS会出现3级故障报警，执行声音和灯光同时报警的同时，在1 s内切断高压回路，断开主正、主负继电器，从而保障测试工程师的安全。在切断高压回路后，整车高压系统的电压应满足GB 18384—2020 5.1.3.3节中“在高压连接器分开之后，连接器中带电部分的电压能在1 s内降低到不大于30 V(AC)(rms)且不大于60V(DC)”的要求，如图6所示。

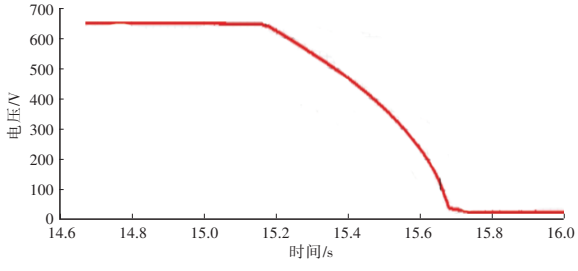


图6 某车型BMS 3级故障时高压系统电压曲线

在流程g中，增加了整车控制器局域网(Controller Area Network，CAN)总线数据的采集和数据库容器(Database Container，DBC)的解析[6]，GB 18384—2020中没有对该内容的描述。整车数据的采集作业考虑了两方面的因素：一是与实际注入的故障电阻数据进行对比，分析在不同阶段时，实际数据与整车映射数据的差异是否满足使用要求；二是以整车映射的数据为参考，识别是否

在规定的时间内到达时间值,当到达该值时,识别BMS对应的动作是否执行到位。

2.3.2　车辆行驶状态下的绝缘电阻监测

按照2.3.1节中车辆静止状态步骤a～步骤c进行测试,保持车速≥5 km/h;将安规综合分析仪的阻值减小到第一目标值R_1(由设计文件规定故障报警等级确定),观察车辆绝缘失效报警装置是否有明显的声光报警,并记录故障等级以及CAN总线数据报警信息;记录由目标值R_1到车辆出现声音和光报警的时间;记录整车CAN总线数据绝缘电阻值;依次将阻值减小到第二绝缘电阻目标值R_2、第三绝缘电阻目标值R_3,并记录上述数据。

2.3.3　车辆涉水状态下的绝缘电阻监测

按照2.3.1节中车辆静止状态步骤a～步骤c进行测试,并保持车速≥5 km/h;设置水深分别为10 cm、20 cm、30 cm、40 cm(40 cm的深度参考DB31/T 634—2020《电动乘用车运行安全和维护保障技术规范》中的判定标准),将安规综合分析仪的阻值减小到第一目标值R_1,观察车辆绝缘失效报警装置是否有明显的声光报警,并记录故障等级以及车辆CAN总线数据报警信息;记录由达到目标值R_1到触发车辆声音和光报警的时间;记录整车CAN总线数据绝缘电阻值;依次将阻值减小到R_2、R_3,并记录上述数据。

2.3.4　车辆充电状态下的绝缘电阻监测

按照2.3.1节中车辆静止状态步骤a～步骤c流程进行测试,先将车辆连接至快充桩,等待车辆完成充电流程后,将安规综合分析仪的阻值减小到第一目标值R_1,观察车辆充电状态及充电桩状态并记录总线信息,观察车辆绝缘失效报警装置是否有明显的声和光报警,并记录故障等级以及CAN总线数据车辆报警信息,记录由设置至目标值R_1到车辆声和光报警的时间,记录整车CAN总线数据绝缘电阻值。依次调节安规综合分析仪阻值减小至R_2、R_3,重复开展不同等级(如规范定义的一级、二级、三级故障)下的场景,并记录过程数据。将车辆连接至7 kW交流充电桩,重复上述步骤,并记录过程数据。将车辆连接至11 kW交流充电桩(GB/T 18487.1—2023《电动汽车传导充电系统 第1部分:通用要求》中的Mode 3),重复上述步骤进行测试,并记录过程数据。若车辆具备其他充电方式,也需同步测试。

若车辆绝缘电阻监测装置能够持续或者间歇地检测车辆的绝缘电阻值,则认为满足安全要求。当该绝缘电阻值小于设计规定的阈值时,应通过一个明显的信号(如声或光信号)提醒驾驶员,设计规定的阈值不应低于GB 18384—2020中5.1.4.1节的要求。当车辆静止、行驶、充电时,绝缘电阻监测装置的报警时间、整车的故障等级、总线数据以及车辆的应急反应需符合设计文件要求。

3　测试验证

3.1　测试车辆及设备

选择某车型进行验证,测试所需设备如表1所示。

表1　测试设备

设备名称	参数类型	参数描述
高压采集仪	电压范围/精度	±1 000 V/±1 V
	电流范围/精度	±200 A/±(0.3% rdg+0.01% FS)
	温度范围/℃	−50～130
绝缘监控仪	电阻挡位	5挡
	切换方式	自动切换
	测量通道/个	8

3.2　测试工况

场景设置为静态和动态工况。

3.3　测试过程

测试过程中采集的整车数据信息如图7所示。由图7可知,在设置相应绝缘阻值时,经过合理的延迟时间,整车有下高压动作,证明该车在出现绝缘故障时可有效识别并进行正确动作。

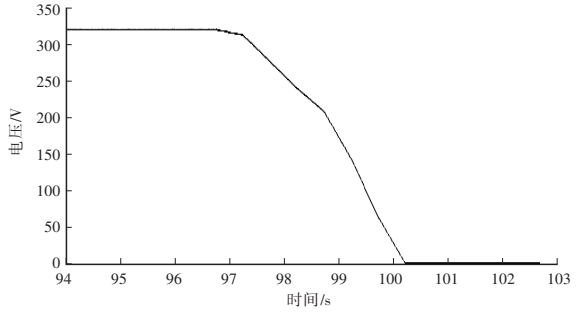


图7　整车数据曲线

通过数据采集仪测量高压系统母线电压，其与整车数据保持一致，如图8所示。

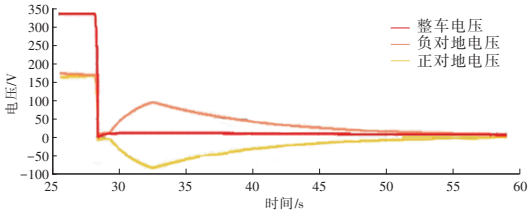


图8 整车数据曲线

整车绝缘故障下，汽车仪表出现的报警装置如图9所示。



图9 仪表报警图示

3.4 验证结果

根据上述试验方法获得的数据如表2所示，在国家标准的基础上根据企业定义的状态，其最终结果满足技术要求。

表2 工况测试结果

工况	评价要求		试验结果		结论
	绝缘等级	状态描述	试验电阻/kΩ	状态描述	
静态	一级绝缘故障	(1 000±100) kΩ声光报警	1 100	声光报警	合格
	二级绝缘故障	(800±100) kΩ急促声光报警	810	急促声光报警	合格
	三级绝缘故障	(400±50) kΩ整车下高压	405	整车下高压	合格
动态	一级绝缘故障	(1 000±100) kΩ声光报警、不限速	1 050	声光报警，不限速	合格
	二级绝缘故障	(800±100) kΩ急促声光报警、30 km/h限速	820	急促声光报警、限速	合格
	三级绝缘故障	(400±50) kΩ 10 km/h降速至0 km/h并下高压	410	降速并下高压	合格

4 安全操作规程

在电动汽车上存在高压电，为保证驾驶和维修、测试的安全，必须进行严格的电气防护。防护的措施主要有：独立的高压线束回路、等电位线、接地线束、互锁点、维修开关、主动放电、被动放电、绝缘监控等。

汽车高压电安全测试涉及高电压系统(60 V以上)，存在触电、短路、电弧等高风险，需严格遵守安全规范。

基于新能源汽车供配电系统类型，整理出高压系统测试流程。

4.1 测试前准备

a. 资质要求：经过高压安全培训并持有相关证件的测试工程师才准许相关操作(如电工证、高压作业证等)。

b. 工具与装备：严格使用符合CAT III/CAT IV等级的绝缘工具(如万用表、示波器)。穿戴个人防护装备：佩戴绝缘手套(满足1 000 V以上防护需求，需定期检测，防电弧服、绝缘鞋、护目镜(防电弧)。

c. 环境检查：试验前确保测试区域干燥、通风，无易燃物，温、湿度满足测试要求。设置警示标识(如“高压危险”、“非相关测试工程师禁止靠近”)隔离非相关测试工程师。

d. 车辆准备：断开低压蓄电池负极并等待5 min以上(满足被动放电时间，确保高压系统放电完成)。使用万用表验证高压母线电压降至安全范围(B级电压最小值为60 V DC、30 V AC)。

e. 整车绝缘电阻阈值验证数据：正式开始试验前，需对车辆基础值进行测试，包括整车绝缘性能和电位均衡阈值。整车高压系统绝缘电阻最低要求为≥500 Ω/V(如400 V系统需≥200 kΩ)。充电接口绝缘电阻：直流充电插座≥500 Ω/V，交流充电插座同等要求。BMS实时采集绝缘阻值，响应时间<100 ms。快充过程：监测绝缘阻值波动范围≤±5%，低温环境(−40 ℃)绝缘阻值衰减率≤20%。电位均衡验证数据，外露导电部件间电阻≤0.1 Ω(测试电流≥0.2 A，持续5 s)，连接点压降<50 mV。

4.2 测试中的操作规范

a. 防触电措施：遵循“单手操作”原则，禁止双手同时接触不同电位部件，禁止佩戴金属饰品或

穿潮湿衣物。

b. 防短路与电弧:测试前确认探头/夹子绝缘完好,使用不低于1 000 V的高压绝缘胶带包裹,避免误触相邻端子。数采等相关设备无破损。上电前检查线路连接,避免反接或接地短路。

c. 动态测试要点:高压上电时,测试工程师远离高压部件(如电机、电缆)。监测绝缘电阻,阻值需≥500 Ω/V,400 V系统要求高于200 kΩ,使用隔离电源供电(避免共地干扰)。检查线束、设备与车辆运动副,禁止出现干涉现象。

4.3 测试后处理

a. 关闭高压电源,等待不低于5 min。

b. 断开测试设备。

c. 再次验证母线电压不低于60 V DC/30 V AC。

4.4 故障处理

如发现绝缘故障、漏电等异常,立即断电并标记故障点。禁止擅自维修高压部件(需及时反馈并妥善处理)。

4.5 应急处理

a. 触电救援:立即切断电源(使用紧急断电按钮或拔除手动维修开关(Manual Service Disconnect,MSD)),用绝缘救援钩移开受害者,禁止徒手触碰,拨打急救电话,实施胸外按压(按需)。

b. 火灾处理:使用D类专用灭火器或大量水灭火(需完全断电后)。

5 结束语

本文开发了设备级和整车级新能源电动车辆高压系统安全的测试方法和安全操作规程,并对该类车辆进行实际测试验证,可补充GB 18384—2020《电动汽车安全要求》、ISO 6469《电动道路车辆使用安全》中关于高压绝缘监控项目中未涉及的技术指标和操作细节,明确了客户使用场景,包括车辆停止、充电过程、行驶过程、整车涉水,实现了高压系统安全检测的验证。同时对测试过程测试工程师的安全防护进行研究,包括高压系统触电原理、测试穿戴工具等,可有效减少或者规避对测试测试工程师的人身危害。

参考文献:

[1] Determination of the Aromatic Hydrocarbon Content of New Mineral Insulating Oils: IEC 60590[S/OL]. (1977-01-01) [2025-08-08]. https://standards. globalspec. com/std/837745/iec-60590.

[2] 刘桃. 新能源汽车电控系统故障诊断技术研究[J]. 汽车测试报告, 2024(1): 37-39.

[3] 刘晓翠. 新能源汽车智能化驱动系统设计与控制策略研究[J]. 汽车测试报告, 2024(8): 44-46.

[4] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车碰撞后安全要求: GB/T 31498—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[5] 全国汽车标准化技术委员会电动车辆分会. 电动汽车安全要求: GB 18384—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[6] 余文宾. 基于混合储能的新能源汽车能量管理策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.

AT&M