电动汽车高压部件间电位均衡检测等效替代法研究及其应用价值

俞炳良

浙江吉润汽车有限公司宁波杭州湾分公司　浙江宁波　315300

摘要：提出了一套针对电动汽车高压部件之间电位均衡检测的等效替代方法。该方法主要由三个等效替代条件（步骤）组成，分别从相隔最短距离、可同时触碰路径和单体检测（高压部件与电平台）时检测接地回路接地点选择等进行逐级分析和评估。等效替代法的思考逻辑遵循当前法规对于电动汽车高压部件电位均衡目的的要求，并基于电位均衡检测的技术原理，在确保产品高压安全品质的基础上，降低设备及人工投入，优化电动汽车装配工艺，提高生产效率。

关键词：电动汽车；电位均衡；检测；等效替代

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2025.06.001

电动汽车的电位均衡，是用于防护与B级电压（最大工作电压U，60V（DC）＜U≤1500V（DC）或30V（AC）（rms）＜U≤1000（AC）（rms）[1]）电路直接接触的外露可导电部分，在电气故障（如绝缘失效等）等情况下异常带电时的人员安全。

对已经装配至车身的电动汽车高压部件进行电位均衡检测，是满足当前法规对于电动汽车安全要求的必须条件，同时也是进一步确保电动汽车产品高压安全品质的关键工序。

电位均衡要求与检测

1.电位均衡要求

例如，可导电外壳和遮拦，应连接到电平台（轿车时为车身，下同），且满足以下要求[1]：

1）外露可导电部分与电平台间的连接阻抗应不大于0.1Ω。

2）电位均衡通路中，任意两个可以同时被人触碰到的外露可导电部分，即距离不大于2.5m的两个可导

电部分间电阻应不大于0.2Ω。

2.电位均衡检测方法

（1）高压部件与电平台　将电阻测试仪的两个探针分别连接高压部件外露的可导电外壳及电平台，如图1所示。增大测试电流到至少0.2A，检测所得即为该高压部件与电平台之间的连接阻抗。

（2）高压部件与高压部件　将电阻测试仪的两个探针分别连接两个高压部件的外露可导电外壳，如图2所示。增加测试电流到至少0.2A，检测所得即为这两个高压部件间的连接阻抗。

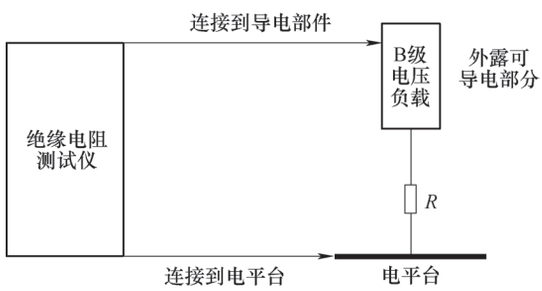


图1　高压部件与电平台检测

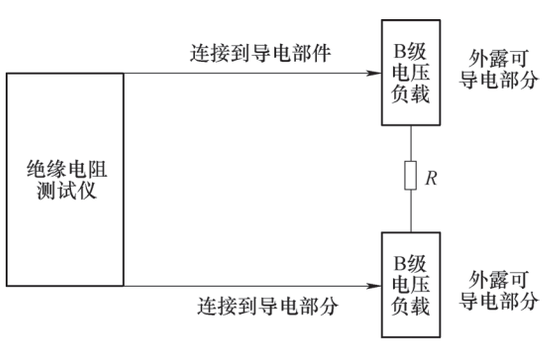


图2　高压部件与高压部件检测

电动汽车电位均衡检测需求

1.电动汽车高压负载（部件）

常规的电动汽车设计，为满足能量存储、转换、输入及输出、车辆驱动及附属功能的需求，一般设计有6种高压负载（本文以6种高压负载且以前驱配置为例，进行检测需求及等效检测的计算和评估，实际以具体车型设计和配置会略有差异），具体如下。

1）用于能量存储的动力电池。

2）用于车内部能量转换的DC-DC。

3）用于车内/外能量转换的车载充电机。

4）用于车辆驱动的驱动电动机（前和/或后）及其控制模块。

5）用于车载空调（制冷）的电动压缩机。

6）用于车载空调（制热）的PTC。

2.检测需求（次数）

按前述电位均衡要求1）中的定义，高压部件与电平台电位均衡的检测需求为6次，分别是：①动力电池与电平台；②DC-DC与电平台；③车载充电机与电平台；④驱动电动机与电平台；⑤电动压缩机与电平台；⑥PTC与电平台。

按前述电位均衡要求2）中的定义，高压部件与高压部件间的电位均衡检测需求为15次，分别为：⑦动力电池与DC-DC；⑧动力电池与车载充电机；⑨动力电池与驱动电动机；⑩动力电池与电动压缩机；⑪动力电池与PTC；⑫DC-DC与车载充电机；⑬DC-DC与驱动电动机；⑭DC-DC与电动压缩机；⑮DC-DC与PTC；⑯车载充电机与驱动电动机；⑰车载充电机与电动压缩机；⑱车载充电机与PTC；⑲驱动电动机与电动压缩机；⑳驱动电动机与PTC；㉑电动压缩机与PTC。如图3所示。

电平台	动力电池	DC-DC	车载充电机	电动机	电动压缩机	PTC
① 动力电池	/	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
② DC-DC	/	/	⑫	⑬	⑭	⑮
③ 车载充电机	/	/	/	⑯	⑰	⑱
④ 电动机	/	/	/	/	⑲	⑳
⑤ 电动压缩机	/	/	/	/	/	㉑
⑥ PTC	/	/	/	/	/	/

图3　检测需求

高压部件间电位均衡检测等效替代法

1.前提条件

1）以被分析车型设计的所有零件均装配的车辆状态作为分析判断的基础。

2）所有高压部件与电平台的电位均衡已完成检测。

2.判断条件一（步骤一）

装配状态，判断两高压部件（例：高压部件A和高

压部件B）相隔最短距离是否大于2.5m。

（1）思考依据　遵循GB18384—2020《电动汽车安全要求》[1]（下同）中对高压部件间电位均衡的定义，即：电位均衡通路中，任意两个可以同时被人触碰到的外露可导电部分，即距离不大于2.5m的两个可导电部分间电阻应不大于0.2Ω[1]。

基于电动汽车电位均衡为防护人员安全的目的，且参考普遍的生理现象，即一个人伸展双臂后两手指间距大致与其身高相当，而2.5m的限值几乎囊括了人类身高的极限。所以法规将2.5m作为标准限制可满足普遍要求。

（2）分析方法　同步工程阶段，以三维数据测量方式，测量被分析的两个高压部件在装配后状态下，外露可导电部分间的最短间隔距离。

实物阶段，以实车测量的方式，测量被分析的两个高压部件在装配后状态下，外露可导电部分间的最短同时触碰距离。

以上述两个测量值中的较大值与2.5m进行比较。

（3）判断　逐个测量⑦～㉑。测量值大于2.5m，则不进行A与B的高压部件间电位均衡检测。某车型（前）驱动电动机与高压模块在三维数据下的测量结果如图4所示。测量值≤2.5m，则继续步骤二。

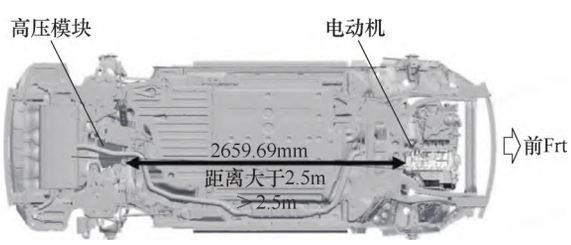


图4　三维数据距离测量

3.判断条件二（步骤二）

整车状态，判断两高压部件是否可以被同时触碰到，即是否具备触碰路径。

（1）思考逻辑　遵循GB18384—2020用以保护车辆在正常使用情况下的人员安全的原则。

车辆正常使用是依据车辆产品OEM提供者基于产品设计意图交付给最终产品用户时的车辆状态为基础上，车辆设计的功能使用、性能实现过程。

鉴于上述，对“车辆正常使用状态”定义如下：车辆设计意图及功能范围内的工况视为车辆正常使用状态，如引擎盖、车门、后盖开启/关闭及其过程状态，如座椅前后可调整角度范围所处的位置、靠背折叠/翻倒及其过程状态，如车门、天窗玻璃打开/关闭及其过程状态等。

相对的，非设计意图或功能降低、失效的工况为非正常使用状态，如车辆在生产线被装配的全过程，如车辆的返工/返修状态，如零件被拆卸、移除或损坏的状态等。

（2）分析方法　同步工程阶段，以人机工程模拟的方式，评估被分析车型所有零件已装配状态下，车辆正常使用状态下，同时触碰A与B的路径可行性，即触碰路径是否被零件遮挡，或路径中是否存在无法被人手/手臂通过的点位，评估应考虑所有可能的方向和角度，如从发动机舱上部和从发动机舱底部等，并将评估为因遮挡或无法通过的路径识别为潜在路径。

注意，此处人机工程模拟的目标结果与同步工程的人机模拟的目标结果是相对（反向）的，即目标是分析得出无法满足要求的点位（无法通过表示不具备同时触碰路径，即分析所希望的）。

实物阶段，以实车验证的方式，验证A与B在车辆正常使用状态下的同时触碰可能，并重点验证上述潜在路径的实际状态。

（3）判断　逐个验证（按判断条件一中判断后的输入项）。验证并确认为无法同时触碰的路径所涉及的高压部件，则不进行其间的电位均衡检测。某车型动力电池与驱动电动机之间的不可触碰路径的评估如图5所示。该案例中，被分析车型由于设计有发动机底部护板，护板遮蔽了发动机舱底部所有区域。且底部护板作为该车型的设计意图，应是被安装且不是“车

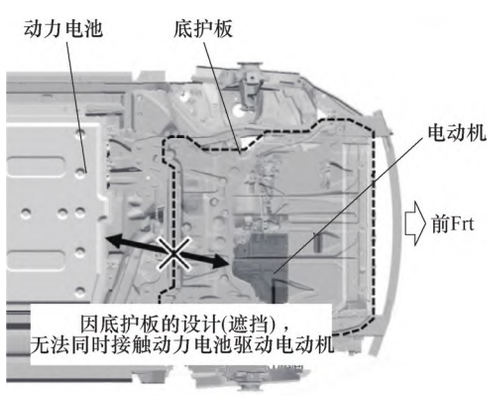


图5　触碰路径数据评估

辆正常使用状态”下允许被打开或拆除的，故此状态下，该车型不具备人同时触碰动力电池与驱动电动机的路径。验证为存在可被同时触碰的路径可能时，继续步骤三。

4.判断条件三（步骤三）

被分析的高压部件，在其与电平台点位均衡检测时，判断设备检测接地回路的接地点是否一致。

（1）思考逻辑　被分析的高压部件与电平台电位均衡检测合格，表明由高压部件的外露可导电部分、电平台及检测回路（电平台）接地点所形成的电位均衡通路，连接阻抗满足不大于0.1Ω的要求。如图6所示，即R_A不大于0.1Ω，R_B不大于0.1Ω。为便于说明，将两次检测放置在一张图中展示（见图7）。

当*A*与电平台检测、*B*与电平台检测，而检测接地回路的接地点为同一点时（即$P_A=P_B$），则由A的外露

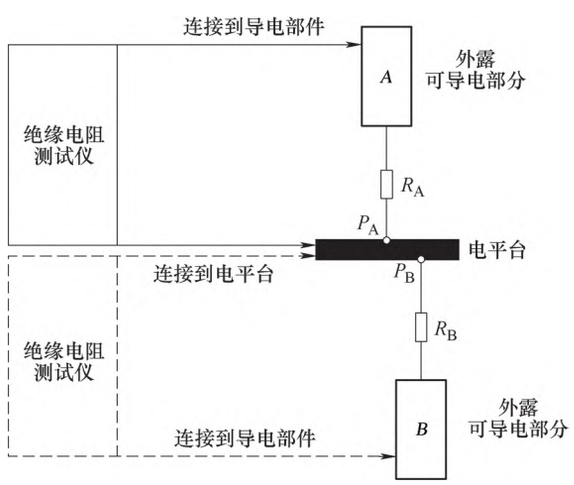


图6　高压部件与电平台检测

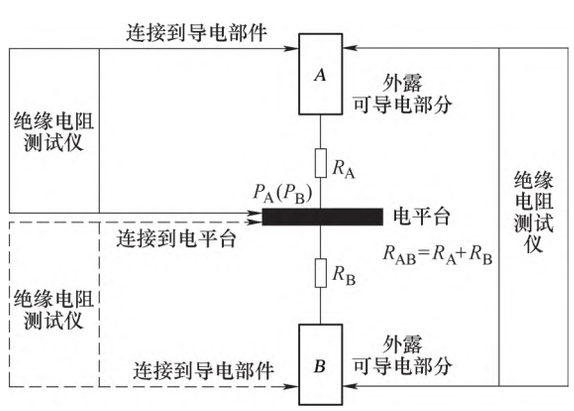


图7　同接地点等效替代

可导电部分、接地点、B的外露可导电部分所形成的电位均衡通路，即*A*与*B*可导电部分间的电位均衡通路，也就是*A*与*B*外露可导电部分间的连接电阻。在R_A和R_B合格的前提下，R_{AB}即为R_A与R_A的和，即R_{AB}不大于0.2Ω，符合要求。及R_{AB}使用R_A和R_B的检测值进行等效替代。

（2）分析方法　通过同步工程及实车验证，确定量产的终版工艺各高压部件间电位均衡检测接地回路的接地点的设定。

（3）判断　逐个验证（按判断条件二中判断后的输入项）。规划为与电平台检测时检测接地回路选择同一个接地点的两个高压部件，不进行实际检测，进行等效替代。否则需规划并实施检测工序，以实际测量的方式获得*A*与*B*间的连接电阻。

5.等效替代法流程

基于以上三个步骤及三个步骤的判断条件，形成流程如图8所示。

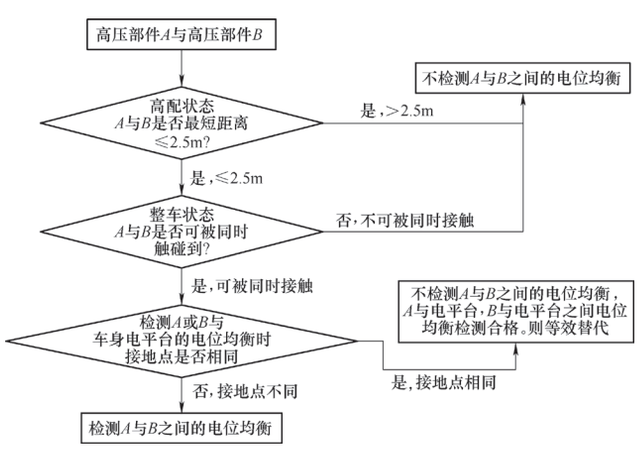


图8　流程

结语

（1）检测工艺规划　按车辆在流水线装配工艺及工序的进行，为实现检测作业的可达性，同时避免高压部件被其它零件覆盖或遮挡，高压部件与电平台的电位均衡检测通常分成两个工位，一个为高工位，即车辆被举升，可检测安装于车辆底部的高压部件，如动力电池、驱动电动机等；一个为低工位，即车辆处于落地高度，可检测安装车辆发动机舱、乘客舱及后备箱中的高压部件，如空调压缩机、PTC等。高压部件

间的电位均衡检测，也将包含上述两种线体高度工位的使用。

（2）制造成本　基于本文作者所在公司的检测工艺数据，检测一次电位均衡的操作时间（含设备探针取放、检测及结果判断等）约为10s。本文按此数据参考进行计算评估。

（3）价值提升机会　即使在步骤一和步骤二中所有15次（⑦～㉑）检测需求均无法满足不检测条件，但在选择一个可共用于高、低检测工位的电平台接地点时，实际该共用接地点可通过产品设计或工艺选择实现，车身纵梁在车辆结构上的位置使得其在高工位和低工位均能提供适合人机工程可达性的高度，则该15次检测需求均可进行等效替代。

按60JPH节拍计算，15次检测作业的工时约为150s，按需要两个工位检测排布，并去除每次检测10s中的单个工位重复设备探针取放时间（按3s计算），则检测工时预计（可节省）为111s。即111s对应的人工成本和两台检测设备的固定资产投入可进行优化降低。

参考文献：

[1] 中华人民共和国工业和信息化部.GB 18384—2020 电动汽车安全要求[S].北京：中国标准出版社，2020.

（上接第29页）

同时存在海外布局较少的问题。在未来一段时间，驾驶员状态监测仍然是研发重点，随着近年人工智能的爆发式发展，基于脑机接口的智能驾驶技术与人工智能的进一步结合，或将成为一个热门的发展方向，此外随着BCI技术的不断成熟，脑控与智驾协同作业以及全脑控驾驶必将成为研发的另一个重要方向。

参考文献：

[1] Jacques J.Vidal. Toward Direct Brain-Computer Communication [J]. Annual review of Biophysics and Bioengineering，1973.

[2] 何庆华，彭承琳，吴宝明. 脑机接口技术研究方法[J]. 重庆大学学报（自然科学版），2002.

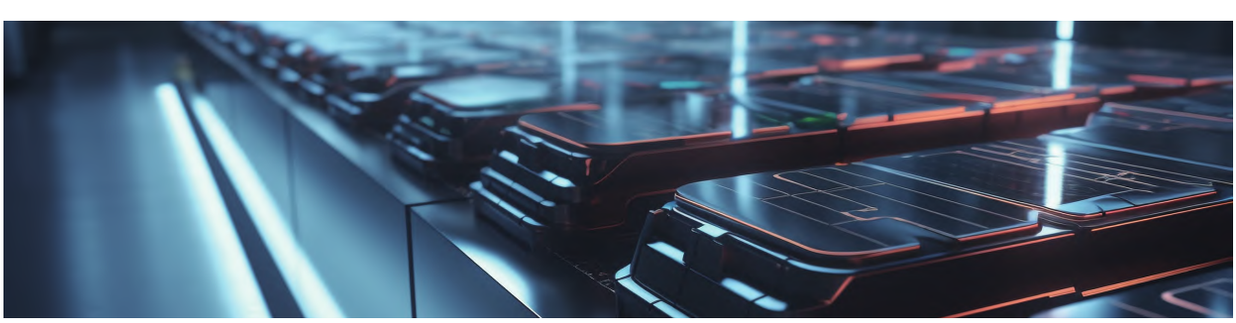
[3] 王行愚，金晶，张宇，等. 脑控: 基于脑-机接口的人机融合控制[J]. 自动化学报，2013.

[4] 徐昕，贺汉根，蔡自兴，等. 车辆智能驾驶技术的研究前沿与展望[C].2009中国自动化大会暨两化融合高峰会议论文集. 2009.

[5] Meiring GAM，Myburgh HC. A review of intelligent driving style analysis systems and related artificial intelligence algorithms[J]. Sensors. 2015（12）.

[6] Chin-Teng Lin，Yu-Chieh Chen，Teng-Yi Huang，et al. Development of wireless brain computer interface with embedded multitask scheduling and its application on real-time driver's drowsiness detection and warning[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering，2008（5）.

[7] Daniel G¨ohring，David Latotzky，Miao Wang，and Ra'ul Rojas. Semi-autonomous Car Control Using brain computer interfaces[J]. Springer，2013.

[8] Enrique Tomás Martínez Beltrán，Mario Quiles Pérez，Sergio López Bernal，Gregorio Martínez Pérez，Alberto Huertas Celdrán.SAFECAR：A Brain–Computer Interface and intelligent framework to detect drivers' distractions[J].Expert Systems with Applications，2022.

[9] 马天旗. 专利分析：检索、可视化与报告撰写[M].第2版.北京：知识产权出版社，2021.