

电动汽车绝缘电阻精确测量方法研究与验证

于洋, 吕惠, 黄俊芳
Yu Yang, Lü Hui, Huang Junfang

(中国汽车技术研究中心, 天津 300000)

摘要: 随着电动汽车的推广和普及, 电动汽车的安全问题日益凸显, 高压系统的绝缘安全更是受到企业和消费者的特别重视。分析现行法规中电动车绝缘电阻测试方法及测试中的主要问题, 针对现行方法无法准确测量绝缘电阻的一类车辆, 提出精确测量车辆绝缘电阻的双表笔测试法, 并组织测试试验, 验证方法的准确性, 为该方法的普及并写入测试标准做技术支撑。

关键词: 电动汽车; 电安全; 绝缘电阻

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

DOI: 10.14175/j.issn.1002-4581.2018.06.013

0 引言

随着环境和能源问题的日益加剧, 电动汽车以其环境友好的特点, 成为世界各国研发的热点。而电动汽车的能源系统和动力系统与传统车完全不同, 能源和动力系统高电压的特点使电动汽车的高压绝缘性能成为关键。从目前的电动车电压平台上看, 乘用车大多在 300 V 左右, 客车货车大多在 500~600 V, 远远超过人体的安全电压, 这就需要车辆具有可靠的绝缘性能以保证乘员的人身安全; 因此, 衡量电动汽车绝缘性能的绝缘电阻值测试就成为新能源车辆电安全测试的重点^[1]。现行的国内外车辆电安全测试标准主要有 GB/T 18384.3—2015《电动汽车安全要求》, ISO 6469—3—2011《Electrically Propelled Road Vehicles Safety Specifications》和 ECE R100《Uniform Provisions Concerning the Approval of Battery Electric Vehicles with Regard to Specific Requirements for the Construction and Functional Safety》, 在这些标准法规中都有对电动车辆绝缘电阻测试的要求, 且测试方法主要参照 ECE R100 的试验方法。

基金项目: 国家科技攻关计划(典型插电/增程式混合动力系统关键技术测试评价, 2016YFB0101401)。

《北京汽车》2018.No.6

1 绝缘电阻测试及计算方法

现行法规 ECE R100 和 GB/T18384.3—2015 中对车辆的绝缘电阻测试方法基本一致, 分为车载可充电储能系统的测试和 B 级电压回路绝缘电阻测试, 二者都是针对车辆在有电池输出供电的情况下测试绝缘电阻。

如图 1 所示, 定义 REESS 正负极两个端子对地的电压分别为 U_1 和 U_1' , 其中 $U_1 > U_1'$; U_1 和 U_1' 对应的绝缘电阻分别为 R_{i1} 和 R_{i2} , 根据欧姆定律可知回路中电阻大的分压也大, 即 $R_{i1} > R_{i2}$ 。在标准中将 R_{i1} 和 R_{i2} 中电阻较小的定义为绝缘电阻, 所以 R_{i2} 为所求的绝缘电阻 R_i 。在测量 REESS 的

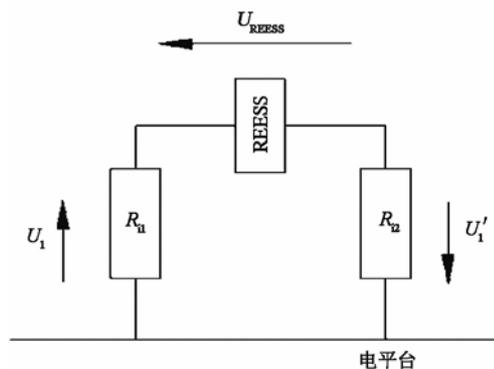


图 1 U_1 和 U_1' 的测量

绝缘电阻时，首先测量 U_1 和 U_1' ，然后在 U_1 一侧并联一个已知电阻 R_0 ，如图 2 所示，再分别测量图 2 中的 U_2 和 U_2' 。

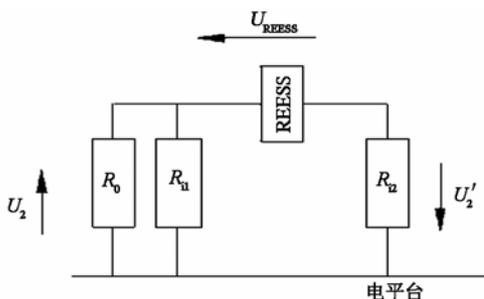


图 2 添加测量电阻 R_0 ，测量 U_2 和 U_2'

利用欧姆定律分别列出关于图 1 和图 2 的两个方程

$$R_{i1}/R_{i2}=U_1/U_1' \quad (1)$$

$$1/(1/R_0+1/R_{i1})/R_{i2}=U_2/U_2' \quad (2)$$

解式 (1) 和式 (2) 组成的方程组即可得出标准中绝缘电阻计算式

$$R_i=R_0 \times (U_2'/U_2-U_1'/U_1) \quad (3)$$

$$U_2'=U_1+U_1'-U_2 \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 中即可得到标准中另一个绝缘电阻计算式

$$R_i=R_0 \times (U_1-U_2)/U_2 \times (1+U_1'/U_1) \quad (5)$$

按照上述步骤，测试时只需要 1 个万用表（或其他电压测试设备）和 1 个已知电阻 R_0 来分别测出 U_1 、 U_1' 、 U_2 、 U_2' ，就可以算出新能源汽车 REESS 或整个 B 级电压电路的绝缘电阻的方法，叫做单表笔法。

利用单表笔法测量，在测量高压回路与电底盘间电压时电压值一直变小，即使数值很小电压依旧存在下降趋势。根据 GB/T 18384.1—2015 中“试验用的伏特表或测量设备的内阻应不小于 $10 \text{ M}\Omega^{[2]}$ ”，提出测试绝缘电阻时应测试设备的内阻。如果电动汽车的绝缘电阻远远小于测试设备的内阻，则单表笔法的测试是合理的。因为测试时先后并联在绝缘电阻 R_{i1} 和 R_{i2} 上的同一测试设备内阻是大到可以忽略的，对 R_{i1} 和 R_{i2} 在回路中的分压不会造成影响。测量出的电压值也就是绝缘电阻 R_{i1} 和 R_{i2} 在回路中实际分得的电压值，将测量结果直接代入公式计算是正确的。但是如果电动汽车 REESS 和整个 B 级电压电路的绝缘电阻与万用表的内阻在一个数量级，也就是兆欧级别，再用单表笔法测量出来的电压值就会受到测试设备内阻

影响，所测得电压不再是绝缘电阻 R_{i1} 和 R_{i2} 在回路中实际分得的电压，也就不是公式中所定义的电压值，不能再用标准中公式计算。

以测量 U_1' 和 U_2' 为例，如图 3、图 4 所示，此时测量出的电压是绝缘电阻 R_{i2} 与测试设备内阻 R_v 并联后在回路中分得的电压，与标准中定义的 U_1' 和 U_2' 不同。

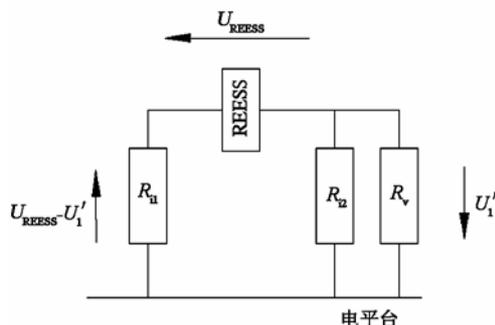


图 3 单表笔法测量 U_1' 的等效电路图

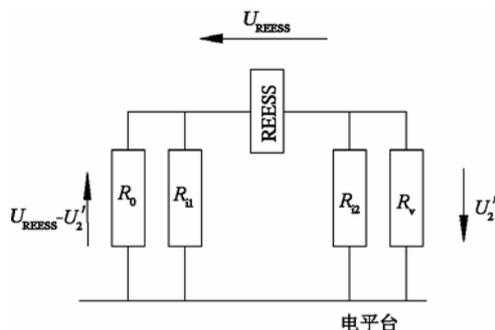


图 4 单表笔法测量 U_2' 的等效电路图

在已知测试设备内阻的情况下，依然可以根据式 (6)、式 (7) 求得绝缘电阻。

$$U_1'/(U_{\text{REESS}}-U_1')=1/(1/R_v+1/R_{i2})/R_{i1} \quad (6)$$

$$(1/R_0+1/R_{i1})/(1/R_{i2}+1/R_v)=U_2'/(U_{\text{REESS}}-U_2') \quad (7)$$

式中， R_v 为电压测试设备内阻。

目前市场上的电动汽车中，其绝缘电阻大多在兆欧级别，电压测试设备的内阻影响电压的测量^[3]，所以单表笔法无法满足高绝缘等级车辆的绝缘电阻测试要求。

2 绝缘电阻测试新方法—双表笔法

基于以上分析提出一种新的测试电动汽车绝缘电阻的方法—双表笔法。与单表笔法相比，双表笔法使用两个电压测试设备同时测量正负极对电平台的电压^[4]。

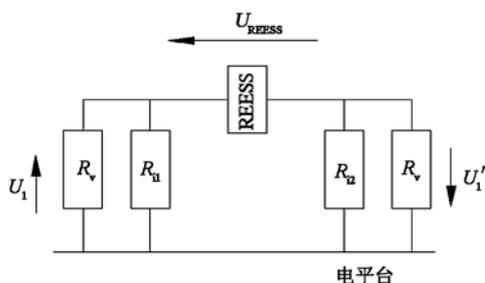


图 5 双表笔法测量 U_1 、 U_1' 的等效电路图

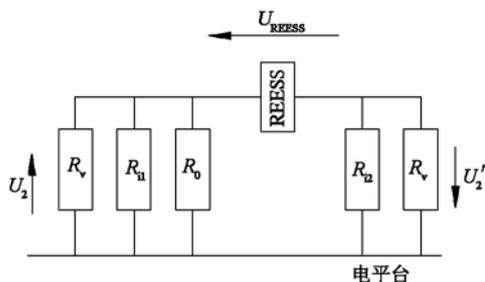


图 6 双表笔法测量 U_2 、 U_2' 的等效电路图

如图 5、图 6 所示，双表笔法是用两个电压测试设备同时测量 U_1 、 U_1' ，并已知电阻 R_0 后再同时测量 U_2 、 U_2' 。这样的测量方式得出的电压值在本质上是绝缘电阻 R_{i1} 、 R_{i2} 与电压测试设备的内阻并联后在回路中的分压，与实际绝缘电阻 R_{i1} 、 R_{i2} 在回路中的分压不同，双表笔法在公式推导和计算过程中考虑了电压测试设备的内阻，将两个电压测试设备的内阻分别和正负端子对电平台的绝缘电阻并联看成是一个整体，如图 7、图 8 所示。

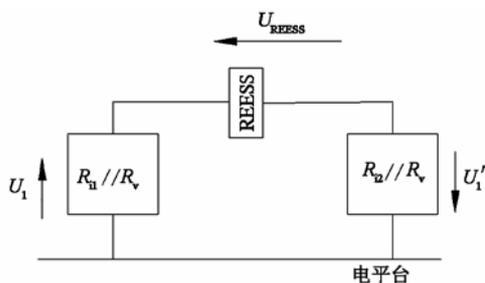


图 7 双表笔法将绝缘电阻和设备内阻看成整体

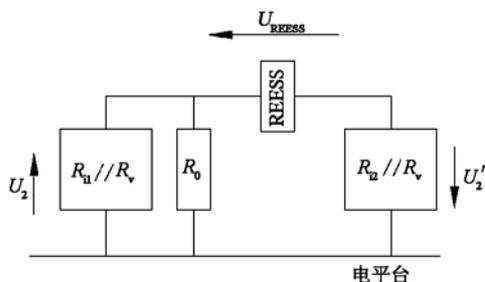


图 8 双表笔法并联参考电阻

将双表笔法测得的 U_1 、 U_1' 、 U_2 、 U_2' 和 R_0 分别代入式 (3)，此时计算出的电阻值 R 是绝缘电阻 R_i 和电压测试设备电阻 R_v 并联后的整体阻值。即

$$R = R_0 \times (U_2' / U_2 - U_1' / U_1) \quad (8)$$

$$R = R_0 \times (U_1 - U_2) / U_2 \times (1 + U_1' / U_1) \quad (9)$$

$$1/R = 1/R_i + 1/R_v \quad (10)$$

通过式 (8) 或式 (9) 计算出 R 后再通过并联电阻式 (10) 可计算出 R_i 。这种绝缘电阻的双表笔法考虑了测试设备内阻对测试的影响，且在实际测试过程中解决了电压不稳，压值下降的问题。

3 双表笔测试方法验证实例

采用国内某纯电动乘用车一辆，在汽车试验场进行涉水后绝缘电阻单、双表笔的实际比对测试。当天的试验条件：气温 8°C ，气压 100.8 kPa ，风速 1.5 m/s ，车辆初始 SOC100%。车辆在空载状态下以 5 km/h 的速度在水深为 300 mm 的涉水池中连续行驶 5 min 后进行绝缘电阻的检测和计算，测试结果见表 1。

表 1 测试结果

测试方法	$U_{\text{REESS}}/\text{V}$	U_1/V	U_1'/V	U_2/V
单表笔法	378	150	149.6	74
双表笔法	378	191.0	186.7	104.2
测试方法	U_2'/V	$R_0/\text{M}\Omega$	R_i/Ω	
单表笔法	—	2	11 016.3	
双表笔法	273.7	2	13 020.6	

从表 1 中可以看出，使用单表笔法的测试结果 U_1 与 U_1' 的和为 299.6 V 与总电压 $U_{\text{REESS}}378\text{ V}$ 相差太大，不符合基本的回路分压定律。使用双表笔法测试 U_1 与 U_1' 的和为 376.7 V 接近总电压，结果符合合理预期，表明双表笔法的理论分析的正确性^[5]。

关于 R_0 的取值，GB/T 18384.1—2015 中的推荐值是 $100\sim 500\Omega/\text{V}$ 。这个范围与绝缘电阻和电压测试设备内阻兆欧级别相差较大， R_0 取值太小会使计算误差变大。用双表笔法对 R_0 分别取 $1\text{ M}\Omega$ 、 $2\text{ M}\Omega$ 、 $5\text{ M}\Omega$ 测试上述车辆的绝缘电阻，测试结果见表 2。

表 2 不同参考电阻 R_0 的绝缘电阻双表笔法测试结果

U_{RESS}/V	U_1/V	U_1'/V	U_2/V	U_2'/V	$R_0/M\Omega$	R_i/Ω
378	191.0	186.7	72.4	305.5	1	12 691.9
378	191.0	186.7	104.2	273.7	2	13 020.6
378	191.0	186.7	145	233.1	5	12 168.2

由测试结果看出,测量的重复性、一致性很好,测试结果与参考电阻 R_0 的阻值选取没有太大关系,但在计算中发现电压测量值小数点后的波动对最终绝缘电阻的结果影响很大,但小数位波动一般不会影响绝缘电阻的量级,虽然对测得的数值会有一些影响,但对兆欧级别的绝缘电阻是可接受的。

4 结 论

分析了现行法规中电动车绝缘电阻测试方法,推导了标准法规中的计算过程,提出在实际测试中有些车辆的高压回路正负极与电底盘间的

电压值较小或波动较大,影响测试结果。针对这一现象分析了原因,提出精确测量车辆绝缘电阻的双表笔测试法,从理论上推导该方法的计算过程,在实车测试中验证了方法的准确性,为该方法的普及并写入测试标准提供技术支持。

参考文献

- [1]王文伟,毕荣华. 电动汽车技术基础[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [2]电动汽车 安全要求 第3部分:人员触电防护:GB/T 18384.1—2015[S].
- [3]邹国荣,程明.电动汽车制造技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [4]黄勇,陈全世,陈伏虎. 电动汽车电气绝缘检测方法的研究[J]. 仪器仪表与检测, 2005(4): 93-95.
- [5]朱建新,郑荣良,卓斌,等. 电动汽车高压电安全诊断与控制策略的研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(4): 308-312.

收稿日期:2018-09-29

(上接第13页)

可读性可以通过计算一个给定的显示文本或符号可以被用户看见的最大距离的方法来测量,通过输入观察目标大小、反射系数、亮度、到驾驶员眼点的距离、背景的反射系数、亮度、背景到眼点距离、照明光源强度及其到观察目标的距离等,根据 Blackwell 的视觉临界模型判断目标物是否可辨识^{[4]262-265}。

除了上述比较传统的方法,用 OPTIS 软件也可以对可读性进行分析,而且更加直观、精确、方便和快捷。

另外,用实物模型进行验证也是一种比较可靠的方法,针对某车型,做出安全带未系提示装置显示屏,并安装好,邀请不同身材、不同性别的驾驶员进行实车主观评估,判断后排乘员安全带未系提示装置可见性与可读性是否满足要求,同时也判断驾驶员查看内后视镜时内后视野是否会被安全带未系提示装置遮挡。经过实物验证,后排乘员安全带未系提示装置可见性与可读性满足要求,即后排乘员可以看见和识别安全带未系提示装置符号,驾驶员内后视野也未被遮挡,验证了研究方法的可行性。

5 结 论

研究如何用 RAMSIS 工具进行分析,解决工程实

际中遇到的关于驾驶员间接视野以及可见性、可读性方面的问题,避免因后期更改设计带来的高额成本,为后续车辆开发提供经验和理论指导。在新车开发过程中,类似的问题经常遇到,也为这些问题的研究提供了一定的参考。但是也存在不足之处,对后排乘员可读性校核时,没能进行深入的理论分析;另外,在车辆开发的最前期,应对目标市场用户群体身材尺寸进行调研,以便人机工程分析,在此只以3种有代表性的人体为例进行分析,不够全面。

研究表明,安全带未系提示装置可以非常有效地降低事故伤亡率,越来越多的新车上会装有乘员安全带未系提示装置。

参考文献

- [1]杜子学,温吾凡. 汽车人机工程学[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [2]机动车辆后视镜的性能和安装要求:GB 15084—2006[S].
- [3]任金东. 汽车人机工程学[M]. 北京:北京大学出版社, 2010.
- [4]Vivek D. Bhise. Ergonomics in the Automotive Design Process [M]. London: CRC Press, Taylor and Francis, 2011.

收稿日期:2018-08-10