

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2020.11.007

本文引用格式:赵鹤鸣,贾晋,吴小珊,等.电动汽车动力屏蔽线的表面转移阻抗仿真与分析[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(11):50-56.

Citation format: ZHAO Heming, JIA Jin, WU Xiaoshan, et al. Simulation and Analysis of Surface Transfer Impedance of Electric Vehicle Power Cables[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(11): 50-56.

电动汽车动力屏蔽线的表面转移阻抗仿真与分析

赵鹤鸣^{1,3}, 贾晋^{1,3}, 吴小珊^{2,3}, 龙云^{1,3}, 安素芹^{1,3}

(1. 重庆理工大学 车辆工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆大学 汽车工程学院, 重庆 401331;
3. 重庆清研理工电子技术有限公司, 重庆 401329)

摘 要:通过解析法详细论述了计算编织型动力屏蔽线的表面转移阻抗值。在此基础上,进一步分析了转移阻抗特性曲线的构成;考虑双层屏蔽线缆(编织带与铝箔)对屏蔽层直流电阻和小孔电感的影响,提出了计算电动汽车的动力屏蔽线(双层屏蔽)转移阻抗值的解析式优化模型;最后,介绍了三同轴法的测试原理及流程,对比测试值与仿真值,优化模型在各频段的计算误差率均低于15%,验证了该模型的正确性。

关键词:电动汽车;动力线缆;转移阻抗;双层屏蔽

中图分类号:U469.72 文献标识码:A 文章编号:1674-8425(2020)11-0050-07

Simulation and Analysis of Surface Transfer Impedance of Electric Vehicle Power Cables

ZHAO Heming^{1,3}, JIA Jin^{1,3}, WU Xiaoshan^{2,3}, LONG Yun^{1,3}, AN Suqin^{1,3}

(1. College of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. School of Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 401331, China;
3. Chongqing Qingyan Ligong Electronic Technology Co., Ltd., Chongqing 401329, China)

Abstract: In this paper, the calculation method is discussed in detail which calculates the surface transfer impedance of braided dynamic shielding wire by analytical method. On this basis, the composition of the transfer impedance characteristic curve is further analyzed. Considering the effect of the double-shielded cable (braided tape and aluminum foil) on the DC resistance and small-hole inductance of the shield layer, an analytical optimization model is proposed for the EVs' transfer impedance value of power shielded cables (double-shielded). Finally, the test principle and procedure of the triaxial method are introduced. Comparing the test value and the simulation value, the error rate of the optimization model is less than 15% in each frequency band, which verifies the

收稿日期:2020-03-25

基金项目:重庆市研究生科研创新项目(CYS19313);重庆市科技产业类重大主题专项重点研发项目(cstc2018jssz-cyztzxX0007);重庆理工大学科研启动基金项目(2019ZD59)

作者简介:赵鹤鸣,男,硕士研究生,主要从事汽车电磁兼容技术研究,E-mail:751913823@qq.com;通讯作者 贾晋,男,博士,高级工程师,主要从事汽车电磁兼容、汽车电子电气可靠性、信号完整性、电磁场算法等相关领域的研究,E-mail:jjajin@cqcti.com。

correctness of the model and has certain engineering application value.

Key words: electric car; power cable; transfer impedance; double shield

屏蔽效能差的动力屏蔽线缆通常会导致电动汽车整车电磁场发射水平超标,无法通过 GB/T 18387 标准测试 (0.15 ~ 30 MHz)。目前我国还没有制定出关于测试电动汽车动力线缆屏蔽效能的标准。如何有效地评估与测试动力线缆的屏蔽效能是线缆供应商以及整车厂关注的工程难题,可以通过仿真途径进行研究。现在电动汽车上的高压动力线缆通常采用的是双层屏蔽,所谓双层屏蔽是指内屏蔽层采用镀锡铜丝编织层,外屏蔽层采用铝塑复合带(铝箔)包裹。国外的学者 Vance、Tyni、Demoulin 等根据电磁场理论,对单层编织线缆模型进行了转移阻抗值的公式推导,可以有效地仿真对应参数的单层编织线缆的转移阻抗值。然而这些经典的解析式并未考虑到双层屏蔽对结果的影响,基于此,本研究通过设置合理的参数提出优化模型。

1 表面转移阻抗

表面转移阻抗^[2]是表征动力线缆屏蔽性能的特征参数,转移阻抗越低证明线缆的屏蔽性能越好,其电磁抗扰能力越强。其定义为单位长度的线缆中有电流流过屏蔽层时在芯线和屏蔽层间形成的感应电压(如图 1 所示),即编织层上轴向电压变化率与轴向电流之比,其计算公式可以表达为

$$Z_T = \frac{1}{I_0} \frac{\partial V}{\partial z} \quad (1)$$

式中: I_0 表示编织层外表面流过的电流; $\frac{\partial V}{\partial z}$ 表示芯线与屏蔽层所组成的均匀传输线单位长度上的电压有效值; z 表示线缆轴向方向;图 1 中的 l 表示线缆长度。

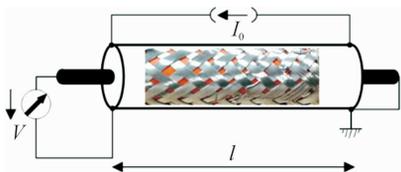


图 1 转移阻抗示意图

2 转移阻抗解析式

通常电动汽车上采用的高压动力线缆属于编织型屏蔽线缆(如图 2 所示),因此可以通过线缆编织层的结构参数和电磁场理论来建立转移阻抗的解析式模型。本节中主要介绍适用于单层屏蔽的 Vance、Tyni、Demoulin 3 种编织型屏蔽线缆解析式模型,并通过对比得出 Demoulin 模型计算精度更高,故选用该单层屏蔽模型。接着,进行转移阻抗特性曲线分析,根据频率范围把转移阻抗曲线划分 4 个区域,提出每个区域的主要影响成分。在此基础上,发现双层屏蔽线缆中铝箔对直流电阻和小孔电感项的影响,最终提出了双层屏蔽线缆的优化模型。



图 2 屏蔽线缆结构示意图

解析法可以有效分析屏蔽线缆参数化对转移阻抗的影响。关于解析式模型的输入参数,可以通过 7 个参数来描述线缆编织层的结构特性:编织层内直径 D_0 ;每根编织线的直径 d ;编织层上一圈包含的编织束股数 C ;每股编织束中的导线根数 N ;编织角度 α ;编织层的电导率 σ ;编织层的磁导率 μ 。获得这些参数后就可以对屏蔽线缆的转移阻抗值进行仿真,编织层的结构参数如图 3 所示。

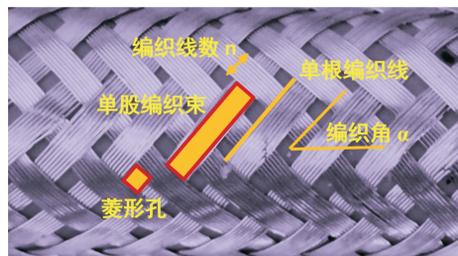


图 3 编织层的结构参数示意图

2.1 经典单层屏蔽模型

2.1.1 Vance 模型

Vance 深入研究了辐射到线缆编织层上时的低频特性,其编织层转移阻抗的解析模型(式(2))包含 2 部分,一部分(Z_d)表示通过金属编织层的电磁波的扩散,另一部分($j\omega L_{h1}$)表示通过编织层的磁场的泄漏。

$$Z_{T_Vance} = Z_d + j\omega L_{h1} \quad (2)$$

式中: Z_d 表示散射阻抗; L_{h1} 表示小孔电感,其中散射阻抗受金属编织层的直流电阻和电磁波通过圆柱形编织层壁的扩散共同影响。Vance E F 等^[3]提出了目前应用最广的散射阻抗 Z_d 表达式:

$$Z_d = R_0 \frac{(1+j)d/\delta}{\sinh[(1+j)d/\delta]} \quad (3)$$

式中: R_0 表示单位长度的直流电阻; δ 表示集肤深度; m 表示菱形孔的极化率; $D_M = D_0 + 2d$ 表示编织层外径。

$$R_0 = \frac{4}{\pi d^2 N C \sigma \cos \alpha} \quad (4)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (5)$$

$$L_{h1} = \frac{\mu m}{2\pi^2 D_M^2} \quad (6)$$

2.1.2 Tyni 模型

Vance 模型只提出了散射阻抗和小孔电感,没有考虑编织电感,所以仅适合于计算编织层投影覆盖率低的线缆。Tyni 改进了 Vance 小孔电感的表达式(见式(8)),并引入了编织电感部分 L_{h2} (见式(11)),使其在计算高和低投影覆盖率电缆转移阻抗时的精度优于 Vance 耦合理论。编织电感是由于编织层的编织结构导致内部编织层和外部编织层之间的磁通链引起的^[4]。在 $\alpha > 45^\circ$ 时为正;在 $\alpha < 45^\circ$ 时为负,取负号是因为此时编织带上电流产生的磁场与原磁场方向相反;若 $\alpha = 45^\circ$,则由于编织层的编织特性引起的电感为零。当 $\alpha < 45^\circ$,可以使用以下简化模型:

$$Z_{T_Tyni | \alpha < 45^\circ} = Z_d + j\omega(L_{h2} - L_{h1}) \quad (7)$$

$$L_{h2} = \frac{2\mu C}{\pi \cos \alpha} \left[\frac{b}{\pi D_M} \right]^2 \exp\left[\frac{-\pi d}{b} - 2\alpha\right] \quad (8)$$

$$b = \frac{2\pi D_m \cos \alpha}{2} - Nd \quad (9)$$

$$h = \frac{2d}{1 + \frac{b}{d}} \quad (10)$$

式中: b 表示相邻编织束之间的距离; h 表示 2 个交叉编织束之间的距离

$$L_{b1} = \frac{\mu h}{4\pi D_M} (1 - \tan^2 \alpha) \quad (11)$$

2.1.3 Demoulin 模型

Demoulin 在现有研究的基础上提出式(12)的解析模型,进一步考虑了额外波动效应^[5]。额外波动效应是在高频情况下,编织网内、外层编织束间的磁场引起的涡旋电流效应,从而产生额外的衰减,导致在高频范围内的转移阻抗值有所减小,该分量可以通过屏蔽层上的切向电场引起的涡流来描述,与 $\sqrt{\omega}$ 成正比。

$$Z_{T_Demoulin | \alpha < 45^\circ} = Z_d + j\omega(L_{h2} - L_{b1}) + k\sqrt{\omega}e^{+j\frac{\pi}{4}} \quad (12)$$

式中:

$$k = -\frac{1.16}{N C d} \cdot \arctan \frac{N}{3} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha\right) \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}} \quad (13)$$

2.1.4 单层屏蔽模型的对比较证

文献[6-7]中给出的 3 组线缆样品参数,如表 1 所示,其中 3 组线缆的编织层内直径 D_0 均为 2.95 mm,编织线的直径 d 均为 0.15 mm。

表 1 编织线缆样品参数

	线缆 1	线缆 2	线缆 3
编织束股数 C	16	16	16
每股的导线数 N	6	6	6
编织节距 p/mm	22	23	33
覆盖率 $K/\%$	95	93	85

表 2 在 10 MHz 时 Z_T 的测量值与各模型计算值

Z_T 值/ $(\text{m}\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	线缆 1	线缆 2	线缆 3
测试值	130	122	58
Vance 模型	46	51	65
Tyni 模型	155	142	83
Demoulin 模型	133	115	63

表3 在 10 MHz 时各模型的计算误差率

误差率/%	线缆 1	线缆 2	线缆 3
Vance 模型	64.62	58.2	12.07
Tyni 模型	19.23	16.39	43.10
Demoulin 模型	2.31	5.74	8.62

将上述线缆结构参数作为输入条件,使用各模型进行仿真计算并与测试值做比较。通过表 2 可知:在 10 MHz 时,3 种单层屏蔽模型中 Demoulin 模型的 Z_T 计算值更加接近实际测试值^[8-10]。从表 3 可知:Demoulin 模型的计算误差率是最低的,拟合效果较好。线缆 1 的误差率为 2.31%,线缆 2 的误差率为 5.74%,线缆 3 的误差率为 8.62%。所以最终选择 Demoulin 模型进行双层屏蔽优化模型的分析。

2.2 转移阻抗特征曲线分析

对于动力屏蔽线缆,可以通过 RLC 电参数来搭建等效电路,如图 4 所示,其中电感参数 L 主要由芯线导体的电感 L_c 、屏蔽层的电感 L_s 和两者之间的互感 M_{cs} 组成,除此之外,编织层上还要考虑小孔电感和编织电感 $L_{hd\&b}$ 的影响。电阻参数 R 主要由内部导体的电阻 R_c 和屏蔽层的电阻 R_s 组成,电阻受集肤效应影响随频率变化,集肤效应会影响线缆的屏蔽效能和谐振频率处的阻抗值。电容参数 C 由芯线和屏蔽层之间的电容 C_{cs} 组成。对于转移阻抗值主要是由感性耦合对其产生影响,所以要关注这些电参数对动力线缆转移阻抗的影响^[11]。

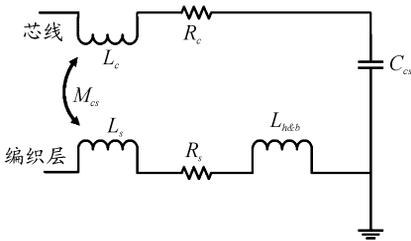
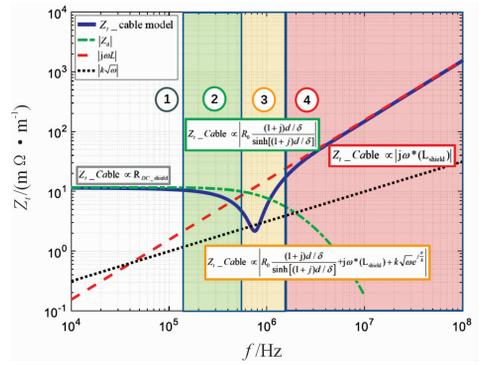


图4 屏蔽线缆等效电路示意图

对屏蔽线缆转移阻抗模型 Z_T 曲线的构成进行分析,如图 5 所示。图中的虚线为影响转移阻抗值的几项关键分量,分别有 Z_d 、 $j\omega L$ 和 $k\sqrt{\omega}$,图中实线为包含各个分量的转移阻抗曲线。

图5 Z_T 曲线构成分析示意图

在区域 1 (灰色)内,小于 150 kHz 低频情况下,编织屏蔽层中的电流密度均匀分布,转移阻抗与屏蔽层的直流电阻值 R 大致相同。在区域 2 (绿色)内,转移阻抗主要由散射阻抗 Z_d 决定。这是因为随着频率的增加,屏蔽层中的电流密度变得不均匀,由于集肤效应,集肤深度按频率的平方根减小, Z_T 值减小。在区域 3 (黄色)内 1 MHz 附近,转移阻抗值由散射阻抗 Z_d 、小孔电感 $j\omega L_h$ 、编织电感 $j\omega L_b$ 和额外波动衰减 $k\sqrt{\omega e^{+\pi/4}}$ 共同决定,产生明显的拐点现象,这是因为随着频率的进一步增加,编织层上的菱形孔导致的磁场泄漏程度加强,小孔电感成分增加。而编织层中两两相交的编织束编进、编出会引起磁通量的切割,也产生感应电动势,形成编织电感,从而转移阻抗值增加。在高频情况下,编织网内、外层编织束间的磁场会引起涡流效应,又会产生额外的衰减。在区域 4 (红色)内大于 2 MHz,主要由小孔电感和编织电感决定,随着频率的不断增加转移阻抗值不断变大^[12]。

2.3 双层屏蔽优化模型

在区域 1 (灰色)小于 150 kHz 的情况下,转移阻抗主要由直流电阻决定。而目前电动汽车上的高压动力线缆通常采用双层屏蔽,屏蔽层除了内层的镀锡铜丝编织网,外层还包裹了一层铝塑复合带(铝箔),所以对于被测动力线缆还需考虑在低频时铝箔的直流电阻对转移阻抗值的影响。

由于双层屏蔽线缆在屏蔽层外侧附加了一层铝箔,与单层屏蔽相比,内侧的菱形孔被铝箔遮盖,可以有效地避免磁场通过小孔发生泄漏,此时小孔电感效应大大降低,可以忽略不计(图 6)。故会对

图5中区域4(红色)的高频部分的小孔电感项产生影响,转移阻抗理论上会减小。



图6 单层屏蔽线缆(左)和双层屏蔽线缆(右)

综上所述,针对双层屏蔽动力线缆提出线缆解析式的优化模型,该优化模型是在 Demoulin 线缆模型的基础上,附加铝箔的直流电阻和消除小孔电感项2个方面因素对转移阻抗值的影响。

$$Z_{L_{\text{optimization}} | \alpha < 45^\circ} = Z'_d - j\omega L_{b1} + k\sqrt{\omega e^{+j\frac{\pi}{4}}} \quad (14)$$

$$Z'_d = R' \frac{(1+j)d/\delta}{\sinh[(1+j)d/\delta]} \quad (15)$$

$$R' = R_0 + R_{Al} \quad (16)$$

式中 R_{Al} 表示铝箔每米的直流电阻值。

对于铝箔附加的直流电阻值可以通过 Q3D 软件建立铝箔层模型进行数值分析计算提取电阻值。如图7所示,假设该铝箔模型为理想状态具有均匀的厚度,厚度设为 0.1 mm,可以任取其中一截进行计算,为了减小计算量长度设为 100 mm,通过计算得到被测线缆中的铝箔的直流电阻 0.005 Ω/m 。

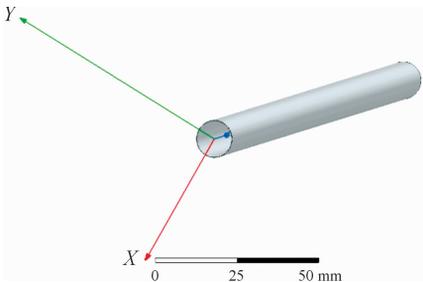


图7 铝箔 Q3D 计算模型示意图

图8为输入相同线缆结构参数的单层屏蔽模型与双层屏蔽优化模型的仿真结果。从图中可以看出:优化模型的低频直流电阻部分的转移阻抗值有所增大,而高频电感部分的转移阻抗值大大降低。说明包裹铝箔的双层屏蔽线缆可以有效地提高高频段的线缆屏蔽效能^[13-14],电动汽车上的高压动力线缆采用双层屏蔽其抗外部电磁干扰能

力更优。

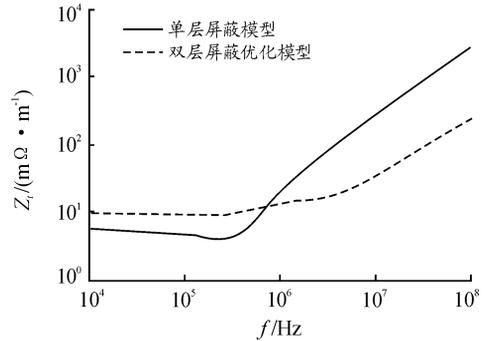


图8 单层屏蔽模型与双层屏蔽优化模型仿真值对比

3 三同轴法测试与对比验证

3.1 三同轴法测试

三同轴法是把被测线缆放置于同轴的无铁磁性的良导体管中进行测量的方法,即线缆芯线内导体、线缆屏蔽层和同轴的良导体管三者构成的测试装置。三同轴法可以将复杂的电磁耦合机理用直接测量的电路参数来表征(将影响屏蔽效能的电磁场用表面电流和表面电荷等效代替),适合非对称线缆以及不同尺寸和结构复杂连接器测试,测试结果可重复性好。主要有2种路径连接方式:①由近端芯线注入信号,远端测试管处接收耦合信号,A、B方法采用该方式;②由远端测试管注入信号,芯线处接收耦合信号,C方法采用该方式^[15]。

考虑测试稳定性和易操作性,本次测试采用三同轴B方法,参考测试标准:IEC62153-4-3-2013^[16]。具体测试用设备见图9,测试流程见图10。图11为三同轴B方法测试原理示意图。

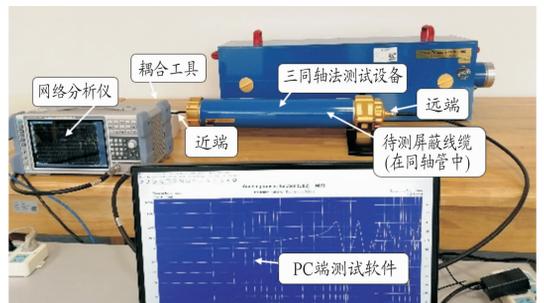


图9 动力线缆测试布置实物图

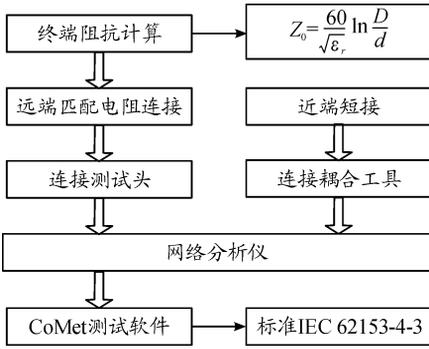
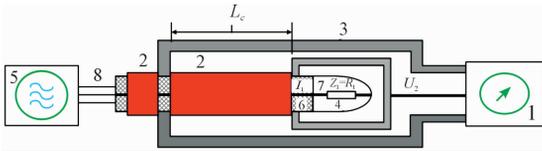


图10 动力线缆测试流程框图



1. 网络分析仪或者接收机; 2. 线缆绝缘套管; 3. 测试套管;
4. 终端阻抗 R_1 ; 5. 信号发生器; 6. 线缆屏蔽层; 7. 测试芯线;
8. 测试连接线; L_c . 线缆耦合长度

图11 三同轴B方法测试原理示意图

三同轴B方法转移阻抗值计算公式为

$$Z_t = \frac{R_1 + Z_0}{2 \cdot L_c} \cdot 10^{-\left\{ \frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}}}{20} \right\}} \quad (17)$$

式中: $a_{\text{meas}} = 20 \log_{10}(S_{21})$ 表示测量的衰减损耗; a_{cal} 表示校准时测量的复合损耗; Z_0 表示信号发生器和接收机的阻抗, 通常为 50Ω ; L_c 表示被测线缆耦合长度; R_1 表示终端阻抗。

本研究选用的测试样品为电动汽车双层屏蔽动力线缆, 基本结构参数如下: 编织层内直径 D_0 为 10.3 mm , 编织线的直径 d 为 0.15 mm , 编织束股数 C 为 24 , 每股编织束中的导线根数 N 为 8 。

3.2 对比验证

测试中线缆样品的耦合长度为 0.5 m , 采用三同轴B方法时其测试截止频率为 50 MHz (最大可测到 50 MHz)。如图12所示, 图中样品线缆的测试值在 50 MHz 时产生谐振点, 转移阻抗曲线趋势发生变化。通过对比双层屏蔽优化模型的仿真值和样品线缆实际测试值可知: 该仿真有很好的拟合效果。

通过表4数据可以看出: 在去除小孔电感和考虑加入铝箔直流电阻后, 优化模型在各频点的仿真计算值与实际测试值很接近。

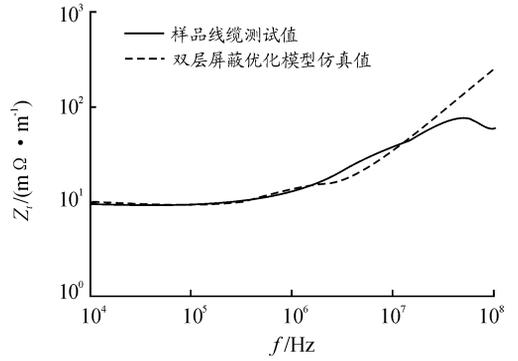


图12 仿真值和测试值

表4 优化模型与样品测试值

频率/ MHz	测试值/ ($\text{m}\Omega \cdot \text{m}^{-1}$)	优化模型/ ($\text{m}\Omega \cdot \text{m}^{-1}$)	误差率/ %
0.15	9.74	9.53	2.16
1	12.72	13.61	7.00
2	17.04	15.53	8.86
10	37.52	36.83	1.84
20	54.94	61.09	11.19
30	68.37	78.14	14.29

在 150 kHz 和 10 MHz 频点时, 误差率分别为 2.16% 和 1.84% , 低于 3% ; 在 1 MHz 和 2 MHz 频点时, 误差率分别为 7.00% 和 8.86% , 低于 9% ; 在 20 MHz 和 30 MHz 时, 误差率分别为 11.19% 和 14.29% , 低于 15% (参考大众标准要求, 主要考虑屏蔽线缆在 2 MHz 和 30 MHz 时的转移阻抗值), 由此验证了该双层屏蔽优化模型的正确性。

4 结论

1) 详细论述了3种经典的编织型单层屏蔽线缆的表面转移阻抗解析式, 对比分析后可知 Demoulin 模型有更高的计算精度。

2) 附加铝箔的双层屏蔽线缆与单层屏蔽线缆相比, 直流电阻和小孔电感项均有变化。

3) 基于 Demoulin 模型进一步提出了双层屏蔽动力线缆的优化模型。

4) 采用三同轴B方法对样品线缆进行表面转移阻抗的测试, 经过仿真值与测试值的对比, 其有很好的拟合效果, 验证了该双层屏蔽优化模型的正

确性。该研究可为电动汽车动力屏蔽线缆计算表面转移阻抗的仿真模型改进提供参考。

参考文献:

- [1] 柳海明,吴艳艳,张广玉,等. 电动汽车用动力线缆电气性能及试验方法综述[J]. 汽车电器,2018(7):10-13.
- [2] MARCONI, KENEDY, ANDRADE, et al. Evaluation of surface transfer impedance of coaxial cables [J]. IEEE Latin America Transactions, 2020, 18(3): 598-603.
- [3] VANCE E F. Shielding effectiveness of braided-wire shields [J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 1975, 17(2): 71-77.
- [4] TYNI M. The transfer impedance of coaxial cables with braided conductors [C]//Proc EMC Symp Wroclaw, Poland; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1976.
- [5] DEMOULIN B, DEGAUQUE P. Shielding effectiveness of braids with high optical coverage [C]//Proceedings of the International Symposium on EMC. Zurich; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1981.
- [6] 杨佩铭. 电力系统屏蔽电缆转移阻抗的计算与测量方法研究[D]. 保定:华北电力大学,2006.
- [7] 王小铃. 屏蔽电缆转移阻抗的测量与仿真方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [8] SCHIPPERS H, VERPOORTE J. Uncertainties in transfer impedance calculations [C]//2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC). Spain; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016.
- [9] VERPOORTE J, SCHIPPERS H, ROTGERINK J H. Advanced models for the transfer impedance of metal braids in cable harnesses [C]//2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC). Singapore; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.
- [10] FREI S, MUSHTAQ A, HERMES K, et al. Current distribution in shielded cable-connector systems for power transmission in electric vehicles [C]//2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC). Singapore; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.
- [11] WEBER S, GUTTOWSKI S, HOENE E, et al. EMI coupling from automotive traction systems [C]//2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Turkey; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.
- [12] MUSHTAQ A, FREI S. Alternate methods for transfer impedance measurements of shielded HV-cables and HV-cable-connector systems for EV and HEV [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2016, 26(4): 359-366.
- [13] MORA N, RACHIDI F, PELISSOU P, et al. An improved formula for the transfer impedance of two-layer braided cable shields [J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(3): 607-610.
- [14] XIAO P, DU P A, ZHANG B. An analytical method for radiated electromagnetic and shielding effectiveness of braided coaxial cable [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 61(1): 1-7.
- [15] KIM H, JANG T. Comparison of measurement results on the transfer impedance of a coaxial cable [C]//2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Seoul; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017.
- [16] IEC 62153-4-3, Edition 2.0 2013-10. Metallic communication cable test methods-Part 4-3: Electromagnetic compatibility (EMC)-Surface transfer impedance-Triaxial method[S].

(责任编辑 符有梅)