

电线电缆

WIRE & CABLE

主办单位:上海电缆研究所有限公司
1958年创刊, 线缆行业学术交流平台

- 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
- 中国期刊全文数据库全文收录期刊
- 中文科技期刊数据库(全文版)收录期刊
- CACJ中国应用型入库期刊



ISSN 1672-6901
CN 31-1392/TM



网址: jwc.cwc.net.cn
邮箱: wirecable@secr.com
电话: 021-5117 9609

编织屏蔽电缆转移阻抗及屏蔽效能的研究

刘浩 陈其工 方昊虹

Research on Transfer Impedance and Shielding Efficiency of Braided Shielded Cables

LIU Hao, CHEN Qigong, FANG Haohong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.20255023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

混合编织屏蔽工艺在电缆设计和制造中的应用

Application of Hybrid Braid Technology in Cable Design and Manufacture

电线电缆. 2021, 64(4): 44-46 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2021.04.013>

典型船用变频电缆电磁屏蔽效能试验方法研究及验证分析

Research and Verification Analysis on Test Method of Electromagnetic Shielding Effectiveness of Typical Ships Variable Frequency Cables

电线电缆. 2023, 66(3): 36-39 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202303008>

复合脐带缆中电力电缆对信号电缆的电磁干扰与屏蔽分析

Electromagnetic Interference and Shielding Analysis of Power Cables with Signal Cables in Composite Umbilical Cable

电线电缆. 2020, 63(4): 1-3,8 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2020.04.001>

单相高温超导电缆屏蔽层电流仿真及实验研究

Simulation and Experimental Study of Screening Current of Single Phase High Temperature Superconducting Cable

电线电缆. 2020, 63(1): 14-18 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2020.01.010>

新型石墨烯改性电磁屏蔽硅橡胶材料的制备、性能与机理研究

Study on Preparation Property and Mechanism of Novel Graphene Modified Electromagnetic Shielding Silicone Rubber Material

电线电缆. 2023, 66(2): 16-20,24 <https://doi.org/10.16105/j.dxdl.1672-6901.202302005>

GB/T 36763—2018《电磁屏蔽用硫化橡胶通用技术要求》解析

Analysis of GB/T 36763—2018 General Requirements for Electromagnetic Shielding Elastomer

电线电缆. 2020, 63(6): 1-4,7 <https://doi.org/10.16105/j.cnki.dxdl.2020.06.001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



刘浩, 陈其工, 方昊虹. 编织屏蔽电缆转移阻抗及屏蔽效能的研究 [J]. 电线电缆, xxxx, x(x): xx-xx.

LIU H, CHEN Q G, FANG H H. Research on transfer impedance and shielding efficiency of braided shielded cables[J]. Wire & Cable, xxxx, x(x): xx-xx.

DOI: 10.16105/j.dxdl.1672-6901.20255023

编织屏蔽电缆转移阻抗及屏蔽效能的研究

刘 浩¹, 陈其工¹, 方昊虹¹

(1. 安徽工程大学电气工程学院, 芜湖 24100)

摘 要: 在总结编织屏蔽电缆转移阻抗的计算理论和数学模型的基础上, 探讨了编织参数对转移阻抗的具体影响, 给出了编织角度、编织锭数以及编织面积与转移阻抗之间的变化规律。为了将理论应用于实际工程, 并验证理论分析的准确性, 采用了电磁场仿真技术对编织屏蔽电缆的性能进行了仿真分析。最后, 为了确保仿真结果的可靠性, 利用吸收钳测试方法对编织屏蔽电缆进行了实物测试。测试结果证实了仿真分析的准确性与有效性, 从而为编织屏蔽电缆的设计提供了一定的科学依据和实践指导。

关键词: 编织屏蔽; 转移阻抗; 编织参数; 电磁场; 仿真; 吸收钳法

中图分类号: TN97

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(XXXX)00-XXXX-XX

0 引 言

随着电子工业技术的迅猛发展, 电子元器件的高度集成化为设备的小型化和高效集成创造了必要条件, 但同时也引发了局部空间内的电磁干扰问题。这一问题的实质在于电磁场的耦合, 这种耦合主要表现为辐射耦合和传导耦合两种形式^[1]。针对传导耦合导致的电磁干扰问题, 通常采用铁磁性滤波元件隔离电路中的杂波及非预定频谱成分, 从而达到抑制传导耦合干扰的目的。对于辐射耦合问题, 则通常采用高导电性能的金属材料或高导电金属与铁磁性金属复合结构, 切断电磁干扰的耦合路径, 达到抑制辐射耦合干扰的目的^[2]。编织屏蔽套凭借卓越的抗电磁干扰性能以及安装便捷、敷设灵活的优势, 在全球装备制造业中赢得了高度的认可与广泛应用。其中, 转移阻抗作为衡量编织屏蔽电缆内部对外部电磁干扰抵御能力以及电缆外部对内部信号传输影响的关键物理指标^[3], 具有重要的意义。

过往的研究对编织屏蔽电缆转移阻抗进行了深入的理论探讨。VANCE^[4]推导了编织屏蔽电缆的散射阻抗和小孔耦合电感的数学模型, 揭示了屏蔽特性随着编织角、编织覆盖率以及其他编织参数变化的趋势。TYNI^[5]在总结 Vance 模型的基础上, 提出了一种新的转移阻抗数学模

型, 通过与实测值的对比验证了模型的准确性。KLEY^[6]基于对耦合机制的定性分析, 提出了一种新的针对单层编织屏蔽电缆耦合参数的近似公式。

对于编织屏蔽电缆转移阻抗已有了大量的理论研究, 但对于细化金属丝直径提高编织屏蔽电缆轻柔性以及细化金属丝直径对其屏蔽性能影响的研究较少。因此, 文章在对编织屏蔽电缆转移阻抗的数学模型进行分析与总结的基础上, 利用电磁场仿真技术, 对屏蔽电缆进行了仿真分析, 探究了编织参数对转移阻抗与电缆屏蔽衰减影响的一般性规律, 并着重探究了细化编织丝直径对电缆转移阻抗的影响。最后通过对电缆的实物测试, 验证了仿真结果的准确性与有效性, 为屏蔽电缆的设计提供了一定的参考依据。

1 转移阻抗的数学模型

编织屏蔽套的转移阻抗主要用于表征电磁场对屏蔽电缆的电磁耦合能力, 转移阻抗越小, 表明电屏蔽电缆对电磁场的耦合能力越弱, 屏蔽效能越高。转移阻抗定义为单位长度上有单位电流流过屏蔽层时, 在电缆芯线与屏蔽层之间形成的开路电压。

$$Z_T = \frac{I \, dV}{I_0 \, dz} \Big|_{z=0} \quad (1)$$

式中: Z_T 为表征编织屏蔽层的转移阻抗; I_0 为屏蔽层中流动的总电流; I 为内导体的电流; dV/dz

为由该电流沿屏蔽层及其所包围导体构成的传输线所产生的开路电压变化率; z 为线缆轴向方向。

电缆屏蔽效能定义为芯线电流不变条件下,电缆有无屏蔽层时空间某点处的场强比值。

$$SE = 20 \lg \frac{E_1}{E_2} \quad (2)$$

式中: SE 为编织屏蔽电缆的屏蔽效能; E_1 为无屏蔽层时的场强; E_2 为有屏蔽层时的场强。

屏蔽电缆屏蔽效能与转移阻抗的关系可以表示为:

$$SE = 20 \lg \left(\frac{R_s + j\omega L}{Z_T} \right) \quad (3)$$

式中: R_s 为线缆屏蔽层的单位电阻; L 为屏蔽层的单位对地电感从式(3)可以看出,屏蔽电缆的屏蔽效能和转移阻抗是密切相关的,转移阻抗越小,屏蔽效能越好,因此转移阻抗可以在一定程度上表征屏蔽效能^[7]。

编织屏蔽电缆的转移阻抗精确计算公式是基于对时变电磁场作用于电缆屏蔽层上的电磁耦合机制进行深入分析,并结合电磁场理论推导出。在实际情况下,当外部时变电磁场辐射到

屏蔽层上,由于编织结构可能存在的间隙和不连续性,电磁波会在屏蔽层表面及内部发生散射、透射以及绕射等复杂的相互作用。根据这些物理现象和电磁场传播规律,一般的用于计算编织屏蔽电缆转移阻抗的公式为:

$$Z_T = Z_d + j\omega(M_h + M_b) + M_e \quad (4)$$

式中: Z_d 为屏蔽层上由感应电流散射产生的散射阻抗,描述了瞬态电磁场在辐射至屏蔽层时的低频响应特性; M_h 为屏蔽层上小孔耦合效应所产生的孔电感,与电磁波通过孔洞结构时的耦合强度有关; M_b 为编织束在穿插编织过程中切割编织层间隙磁力线所引起的编织电感,表示了编织结构对电磁场传播的影响; M_e 为涡电流效应所产生的附加电感,其大小与切向电场作用于编织屏蔽层时诱发的涡电流路径阻抗相关。

编织屏蔽转移阻抗可以使用以下五个编织参数计算:编织锭数 C ;每锭根数 N ;编织丝的直径 d ;编织节距 p ;编织前的电缆直径 D_0 。编织屏蔽的平面展开如图1所示。有了这些参数就可以得到编织同轴电缆的转移阻抗。

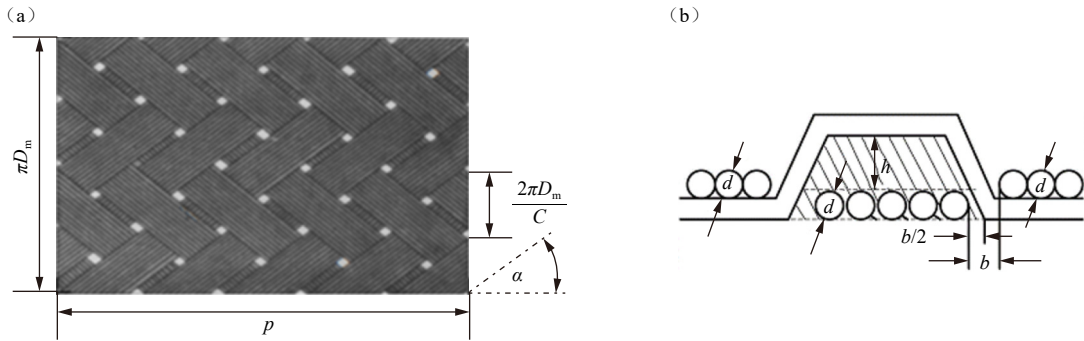


图1 编织屏蔽套的平面展开图:(a)编织屏蔽层的展开图;(b)外编织层交叉区域图

Fig.1 Flat unfolded view of a braided shield: (a) Unfolded view of a braided shield; (b) The area between the inner and outer braid layers at the crossover

1.1 散射阻抗

VANCE E F等^[4]耦合理论提出的散射阻抗计算公式,精确地描述了瞬态电磁场辐射至编织屏蔽层上的频域特性。该理论目前在业界应用广泛,并且其计算精度相对较高,是公认的较为准确的计算方法之一。因此,散射阻抗计算式使用 Vance 模型的计算公式:

$$Z_d \approx \frac{4}{\pi d^2 N C \alpha \cos \alpha} \frac{(1+j)d/\delta}{\sinh((1+j)d/\delta)} \quad (5)$$

趋肤深度 δ 表示为

$$\delta = \frac{l}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (6)$$

式中: σ 为编织材料电导率; μ 为编织材料的磁导率, f 为频率。

编织角度 α 计算式为

$$\alpha = \arctan \frac{\pi D_m}{p} \quad (7)$$

式中: D_m 为编织后的电缆直径, $D_m = D_0 + 2d + h$,其中 h 表示2个相交叉编织束之间的距离。

1.2 小孔电感

Tyni 在 Vance 原始模型的基础之上,对描述由外部电磁场导致的编织层内部孔洞电感 M_h 的表达式进行了精细化改进^[5],以更准确地模拟这种电磁场穿透效应。然而,在高频范围时,该理

论计算出的孔洞电感值通常高于实测值, 并且两者之间的差异有时会明显增大。这是由于当作用于编织层上的瞬态电磁场频率增加至某一阈值时, 透入编织结构内部的高频率电磁波在遇到具有曲率变化的编织网时所遭遇的衰减效应变得不容忽视。针对这一现象, 文献^[9]在 Tyni 优化后的孔电感模型上进行了进一步分析和修正, 引入了一个 0.875 的校正因子来改善高频段的预测准确性。经过修正后的孔电感 M_h 的计算式为

$$M_h = 0.875 \frac{2\mu_0 C}{\pi \cos \alpha} \left(\frac{b}{\pi D_m} \right)^2 e^{\left(-\frac{\pi d}{b} - 2\alpha \right)} \quad (8)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; b 为相邻编织束间的距离。

相邻编织束间距离 b 的计算式为

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

1.3 编织电感

Tyni 的理论工作精确定义了编织结构电感 M_b 的数学表达式, 它详细描述了由于内外编织层在交叉区域间磁通耦合所引起的电缆内部与外部电磁场之间的相互作用。因此, 在处理高或低编织密度的电缆时, 相较于 Vance 模型, Tyni 的数学模型显示出更高的精确度。但是在计算编织密度较优的编织层电感时, Tyni 的理论模型不是十分精确。不过, 在文献^[8]中提出的编织电感计算公式表现出了对各种编织电缆情况下的准确性。编织电感 M_b 的表达式为

当 $\alpha < \pi/4$ 时

$$M_b = \frac{-\mu_0 \left(Ndh + \left(b - \frac{bh}{d} \right) \frac{h+d}{2} + B \right) A}{2\pi CD_m \cos \alpha} \quad (10)$$

式中: 取负号是因为编织带上电流产生的磁场与原磁场方向相反。

当 $\alpha > \pi/4$ 时

$$M_b = \frac{\mu_0 \left(Ndh + \left(b - \frac{bh}{d} \right) \frac{h+d}{2} + B \right) A}{2\pi CD_m \cos \alpha} \quad (11)$$

式中: $B = N \left(d^2 - \frac{\pi d^2}{4} \right)$; $A = (\sqrt{v} + 1)^2 \cos(2\alpha)$; 编织束间距离 $h = \frac{2d}{1 + b/d}$; 编织屏蔽套单位长度上的小孔数 $v = \frac{2\pi D_m \sin \alpha \cos \alpha}{N^2 d^2} F^2$; 单向编织面积 $F = \frac{C Nd}{2\pi D_m \cos \alpha}$; 编织密度 $K = 2F - F^2$ 。

1.4 附加电感

在高频瞬态电磁场作用下, 编织网结构内部对外部场响应的复杂性增加, 尤其是内外层编织束之间因磁场相互作用而产生的涡电流效应导致了额外的衰减, 这一衰减在高频条件下变得不

可忽视。因此, 在计算转移阻抗时必须考虑由涡电流引起的这部分额外衰减效应。这部分效应等同于编织网上切向电场作用下产生的涡电流, 其中电场强度与屏蔽层中传导的电流以及涡电流路径上的电阻成正比, 而该电阻又直接取决于内层编织束的材料表面电导率。因此, 在转移阻抗计算模型中, 引入了附加电感项^[9], 以更准确地反映高频条件下涡电流对编织屏蔽电缆转移阻抗的影响。附加电感 M_e 的计算式为

$$M_e = -\frac{1.16}{C Nd} \arctan \frac{N}{3} \sin \left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha \right) \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}} e^{\frac{\pi}{4}} \quad (12)$$

2 屏蔽线缆转移阻抗仿真验证

转移阻抗计算公式的推导往往需要对复杂的编织结构进行简化, 这可能导致计算结果与实际情况存在一定的偏差, 而利用电磁场仿真软件进行仿真能够精确模拟这些复杂结构。为了验证屏蔽电缆转移阻抗计算模型的有效性和精确度, 以及评估屏蔽层对于电磁能量传输抑制的效果^[10], 采用国际电工委员会标准 IEC 62153-4 方法 B 中描述的三同轴测试方案, 利用 CST 仿真软件对屏蔽线缆的转移阻抗进行仿真。根据三同轴 B 方法的测试原理搭建仿真模型, 建模总体思路图 2 所示

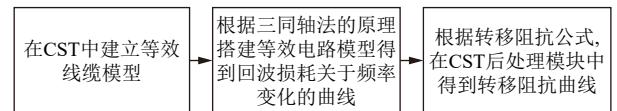


图2 总体仿真思路

Fig.2 Overall simulation concept

该测试配置的具体模型和等效电路模型如图 3 和图 4 所示。其中屏蔽线缆选用 RG58 同轴线, 线缆长度为 1 m。

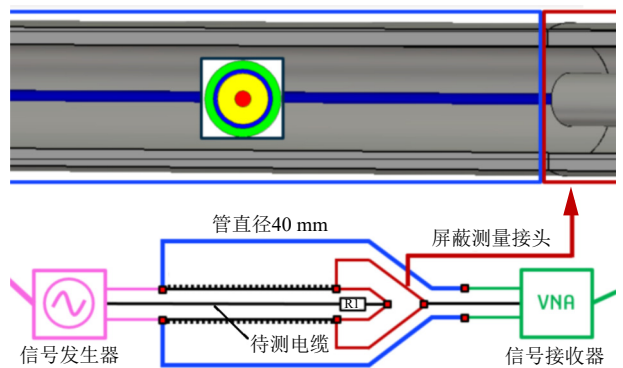


图3 IEC 62153-4 方法 B 测试标准

Fig.3 IEC method B testing standards

三同轴 B 方法转移阻抗计算公式为

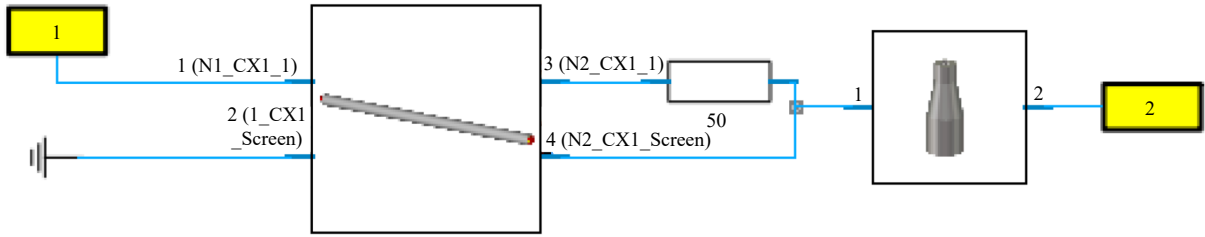


图 4 等效电路模型

Fig.4 Equivalent circuit model

$$Z_T = \frac{R_l + Z_0}{2L_c} 10^{-(a_{meas} - a_{cal})} \quad (13)$$

式中: $a_{meas} = 20 \log_{10}(S_{21})$ 表示测量过程中的衰减; S_{21} 表示回波损耗; a_{cal} 表示校准时测量的复合损耗, 仿真情况下该项为 0; 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_l 表示终端阻抗。

仿真结束后在 CST 数据后处理模块, 根据公式(13)转移阻抗与各个参数的关系即可得到仿真结果。图 5 展示了随着频率变化, 电磁仿真计算与数学模型预测的转移阻抗对比曲线, 其中所采用的编织结构参数为: $C=16$ 、 $N=4$ 、 $d=0.15 \text{ mm}$ 、 $D_0=2 \text{ mm}$ 和 $\alpha=26^\circ$ 。从图形数据可以看出, 在频率在 10 MHz 以下, 通过电磁仿真方法得到的转移阻抗与基于数学模型计算的结果基本一致, 两者吻合度较高。当频率超过 10 MHz 后, 数学模型计算出的转移阻抗数值相较于电磁仿真的结果偏大, 这可能反映了在高频条件下数学模型简化带来的偏差或电磁场复杂性未被完全考虑的特点。

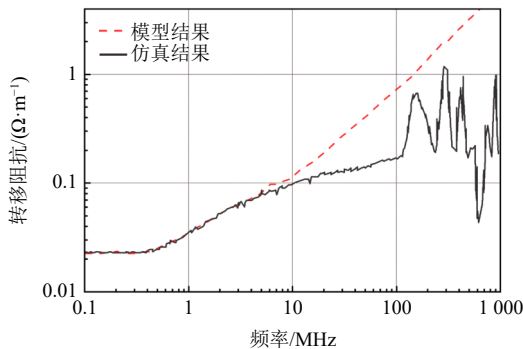


图 5 计算模型与仿真结果对比图

Fig.5 Comparison chart of computational model and simulation results

3 编织参数与转移阻抗的关系

为了探究编织参数与转移阻抗之间的内在关系, 通过调整编织参数设置, 获取了不同编织条件下的转移阻抗数

据。图 6 表示随着频率变化, 不同编织角度下转移阻抗的变化趋势, 其中编织结构参数: $C=16$ 、 $N=6$ 、 $d=0.12 \text{ mm}$ 和 $D_0=2.95 \text{ mm}$ 。在低频段, 转移阻抗随着编织角度的增加而增加是由散射阻抗的增加导致的, 而在高频段, 当编织角度小于 45° 时, 编织电感和小孔电感符号相反, 二者相互抵消一部分, 所以转移阻抗较小, 当编织角度大于 45° 后, 编织电感和小孔电感符号相同, 因此转移阻抗随编织角度增加的趋势变得显著。这一现象说明了为什么在工程实践中, 通常将电缆屏蔽层的编织角度控制在 45° 以下。

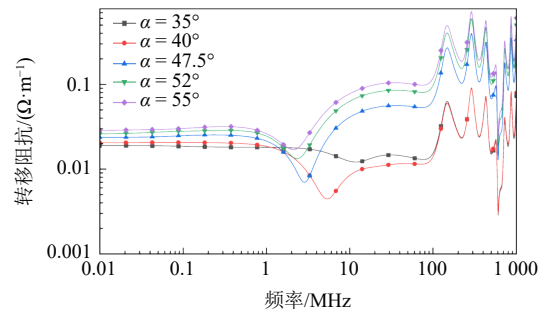


图 6 转移阻抗与编织角度的关系

Fig.6 The relationship between transfer impedance and braiding angle

图 7 揭示了随着频率变化, 不同编织匝数对转移阻抗的影响情况, 其中所采用的编织结构参数为: $N=8$ 、 $d=0.15 \text{ mm}$ 、 $\alpha=30.7^\circ$ 和 $K=95\%$ 。从图中可见, 随着编织匝数的增多, 屏蔽层转移阻抗呈现出明显的下降趋势, 这是因为散射阻抗、编织电感、附加电感都在随之减小。在实际生产应用中, 编织机所提供的编织匝数是有限定范围的, 通常包括以下几种规格: 16、24、32、36、48、64 和 72 匝。选择适宜的编织匝数需结合编织对象, 即编织套的直径及所需的屏蔽效能进行综合考量, 以确保编织出的屏蔽层既能满足结构强度要求, 又能实现理想的电磁屏蔽效果。

图 8 展示了随着频率变化, 每匝编织导线根数对转移阻抗的影响趋势, 其中所采用的编织结

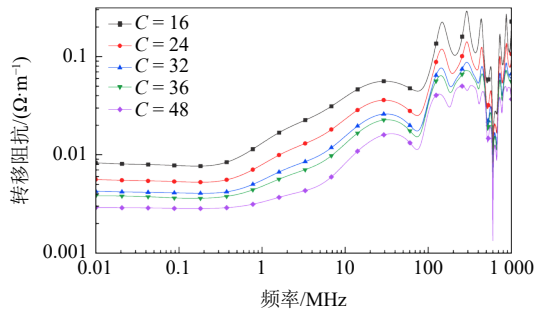


图7 转移阻抗与编织锭数的关系

Fig.7 The relationship between transfer impedance and the number of braiding bobbins

构参数设定为: $C=16$ 、 $\alpha=50^\circ$ 、 $d=0.12$ mm 和 $K=96\%$ 。转移阻抗的值在低频段以散射阻抗为主, 而随着频率的增加, 电感项逐渐占据主导地位。通过观察转移阻抗的计算公式, 可以很容易看出散射阻抗与每锭编织导线根数呈反比, 因此低频段转移阻抗随 N 的增加而减小; 在高频段, 虽然单独增加每锭导线根数会令编织电感增加, 但是由于编织屏蔽层内径的增加, 小孔电感和编织电感的值总体上是呈下降趋势的。因此从图中可以观察到转移阻抗随着每锭导线数的增加以及编织层内径的增大而不断减小。

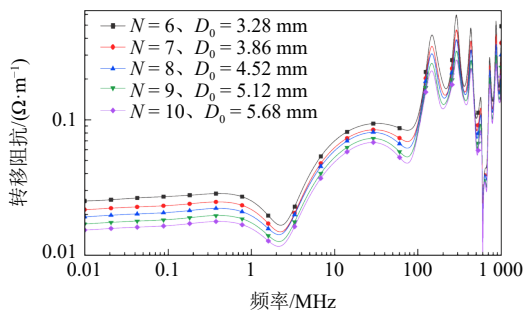


图8 转移阻抗与每锭根数的关系

Fig.8 The relationship between transfer impedance and number of wires per bobbin

电线电缆在使用和运输过程中不可避免的需要被弯曲, 细化编织导线直径能够很好的实现编织屏蔽电缆编织结构均匀化、稳定化和轻量化的需求。为了探究细化编织丝直径对屏蔽电缆转移阻抗的影响, 对不同编织导线直径情况下的电缆进行了仿真, 仿真结果如图9所示, 其中所采用的编织结构参数设定为: $C=16$ 、 $\alpha=26^\circ$ 、 $D_0=2.95$ mm、 $K=87\%$ 。从图中可以观察到, 随着编织丝直径的减小, 屏蔽层在高频段的转移阻抗呈现显著下降的趋势, 低频段则不断增大。低频段是因为散射阻抗的增加而导致的, 而在高频段, 转移阻抗的大小主要取决电感项, 随 d 的减

小及 N 的增加, 小孔电感幅值增大, 但编织电感幅值不断减小且编织电感占据主导, 又因为二者符号相反, 因此总的转移阻抗呈减小的趋势。

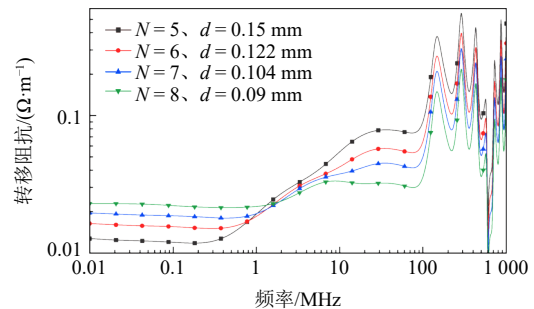


图9 转移阻抗与编织线直径的关系

Fig.9 The relationship between transfer impedance and diameter of braided wires

4 仿真验证与测试对比

在实际工程应用中, 通常使用屏蔽效能来衡量电缆屏蔽性能。因此, 在评估和设计电缆时, 工程师通常会关注并优化其屏蔽效能指标而非转移阻抗值。图10展示了吸收钳法测试的原理性示意图, 在吸收钳法测试过程中, 信号从被测电缆注入, 通过比较注入信号与功率吸收钳检测到的由屏蔽层泄漏的信号得受试电缆的屏蔽衰减。为了有效地抑制不必要的共模噪声和吸收反射回来的屏蔽层表面电流, 通常会配合使用铁氧体吸收器, 该器件常见为铁氧体环状结构, 能够吸收并衰减这些反射波。与此同时, 测试中采用表面电流变换器(或称为功率探头), 其功能是精确地检测并转换沿电缆表面传播的那部分能量, 从而实现对表面波功率的量化测量, 进而评估电缆的屏蔽效能^[11]。

图11展示了在不同频率条件下, 电缆屏蔽效能的解析计算模型、CST 仿真与实验测试数据的对比结果。其中, 对于规格型号为 HTLPNQ 的 2~4 mm 织屏蔽套样品, 采用的编织结构参数为: $C=16$ 、 $N=4$ 、 $d=0.15$ mm、 $D_0=2$ mm 和 $\alpha=30^\circ$ 。从图中可以观察到, 解析计算得到的电缆屏蔽效能低频段(100 MHz 以内)与实测值较为吻合, 而在高频段, 特别是频率超过 300 MHz 后, 解析计算结果普遍低于实际测量值, 这主要是由于转移阻抗数学模型的值在高频条件下高于实际值导致的。在高频段, 屏蔽电缆的电磁场分布和传输特性会变得十分复杂, 计算公式可能无法准确描述这些现象; 采用 CST 软件仿真得到的电缆屏蔽效能数值在较低频率(小于 100 MHz)范围内

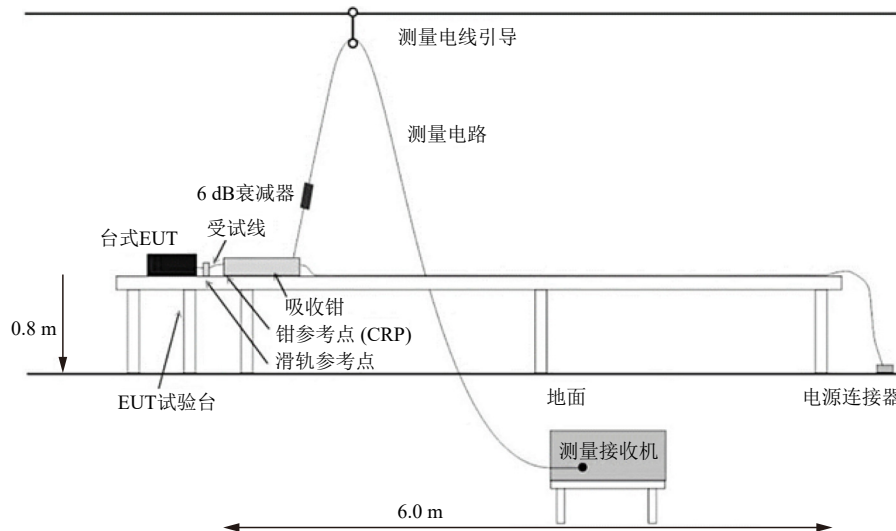


图 10 吸收钳法测试示意图

Fig.10 Schematic diagram of absorption clamp testing method

高于实际测试结果,这可能反映了仿真模型在处理低频效应时的某些简化或近似所带来的差异。当频率超过 100 MHz 后,仿真结果与实测数据之间的差距显著减小,两者表现出较高的吻合度,表明在高频区域仿真模型能较好地模拟实际情况。

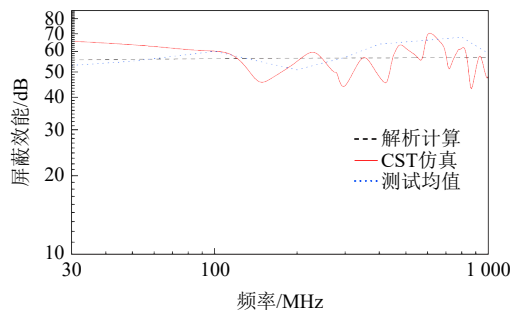


图 11 规格型号为 HTLPNQ 的同轴电缆屏蔽效能解析计算、仿真与实测结果对比

Fig.11 A Comparison chart of the analytical calculation, simulation and experimental results of shielding effectiveness for coaxial cables with specification model HTLPNQ.

5 结 论

本文总结了编织屏蔽电缆转移阻抗的数学模型,探究了编织参数对转移阻抗的影响,仿真分析了屏蔽电缆的屏蔽效能,利用吸收钳测试方法,对电缆进行了实物测试,验证了仿真结果的准确性与可靠性。得到如下结论:

1)对转移阻抗的计算模型进行了论述,总结得到一种较为准确的计算转移阻抗的方法。

2)根据三同轴方法 B 的原理搭建了仿真模

型,通过仿真实验分析了转移阻抗与编织参数的一些关系,总结了转移阻抗随编织角度,编织锭数,每锭编织导线数和编织导线直径变化的一般规律。

3)将屏蔽电缆转移阻抗仿真结果与解析计算结果进行对比,发现二者在 10 MHz 以内十分接近,超过 10 MHz 差距逐渐增大。

4)采用功率吸收钳法对样品线缆进行屏蔽效能的测试,将解析计算、CST 仿真与实测结果进行比较,验证了仿真的有效性。

参考文献 References

- [1] PAUL C R. 电磁兼容导论 [M]. 闻映红,译. 2 版. 北京:人民邮电出版社, 2007.
PAUL C R. Introduction to electromagnetic compatibility [M]. Translated by Weng Y H, 2nd ed. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2007.
- [2] 王守三. 电磁兼容设计与测试实用技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
WANG S S. Techniques for electromagnetic compatibility design and testing[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [3] WESTON D A. 电磁兼容原理与应用 [M]. 杨自佑,王守三,译. 2 版. 北京:机械工业出版社, 2015.
WESTON D A. Principles and applications of electromagnetic compatibility[M]. Translated by Yang Z Y and Wang S S. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [4] VANCE E F. Shielding effectiveness of braided-wire shields[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1975, EMC-17(2): 71-77.
- [5] TYNI M. The transfer impedance of coaxial cables with

- braided outer conductor[C]. Proc. 3rd Int. Symp. Electromagnetic Compatibility, Wroclaw, Poland, 1976: 410-419.
- [6] KLEY T. Optimized single-braided cable shields[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, 35(1): 1-9.
- [7] 王添文, 李子森, 王欢, 等. 屏蔽电缆屏蔽效能与转移阻抗关系研究 [J]. *安全与电磁兼容*, 2015(1): 60-63.
WANG T W, LI Z S, WANG H, et al. Studying the relationship between shielding effectiveness[J]. *Safety & EMC*, 2015(1): 60-63.
- [8] 马晖, 葛景滂, 王惠明, 等. 编织型同轴电缆的编织层参数与屏蔽特性的研究 [J]. *电线电缆*, 1994(4): 2-6.
MA H, GE J P, WANG H M, et al. Research on the braid layer parameters and shielding characteristics of braided coaxial cable[J]. *Wire & Cable*, 1994(4): 2-6.
- [9] XIAOLING W, CHAO L, HAO D, et al. An improved model for the transfer impedance calculations of braided coaxial cables[C]//Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. 2012: 1078-1081.
- [10] 肖珺, 杨阳, 杨硕, 等. 飞机电气线路互联系统仿真及试验验证技术 [J]. *飞机设计*, 2022, 42(4): 61-65.
XIAO J, YANG Y, YANG S, et al. Simulation and test verification technology of aircraft electrical line interconnection system[J]. *Aircraft Design*, 2022, 42(4): 61-65.
- [11] 王晶晶. 照明设备电磁辐射骚扰电波暗室法与吸收钳测量法的关系研究 [J]. *厦门科技*, 2018(4): 45-52.
WANG J J. Research on the relationship between the electromagnetic radiation interference measurement of lighting equipment by anechoic chamber method and absorption clamp method[J]. *Xiamen Science and Technology*, 2018(4): 45-52.

收稿日期: 2025-01-21

修回日期: 2025-02-27

作者简介: 刘浩 LIU Hao

1998—, 男, 在读研究生

研究方向为线缆电磁兼容(线缆串扰、编织同轴电缆转移阻抗与屏蔽效能等)

E-mail: 1827165219@qq.com

陈其工 CHEN Qigong (通信作者)

1961—, 男, 教授

研究方向为线缆电磁兼容(线缆串扰、编织同轴电缆转移阻抗与屏蔽效能等)

E-mail: qgchen@ahpu.edu.cn

Research on Transfer Impedance and Shielding Efficiency of Braided Shielded Cables

LIU Hao¹, CHEN Qigong¹, FANG Haohong¹

(1. Anhui Polytechnic, University College of Electrical Engineering Wu Hu 24100, China)

Abstract: Upon summarizing the computational theories and mathematical models of transfer impedance in braided shielded cables, this study explored the specific effects of braiding parameters on transfer impedance. It provided the changing patterns between braiding angle, number of braiding bobbins, and braiding area with transfer impedance. In order to apply theory to practical engineering and validate the accuracy of theoretical analysis, electromagnetic field simulation technology was employed for performance analysis of braided shielded cables. Finally, to ensure the reliability of simulation results, a physical test on braided shielded cables was conducted using the absorption clamp testing method. The test outcomes confirmed the accuracy and effectiveness of the simulation analysis, thus providing a certain scientific basis and practical guidance for the design of braided shielded cables.

Key words: braided shielding; transfer impedance; braiding parameters; electromagnetic field; simulation; absorption clamp testing method