

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108343

高速列车屏蔽线转移阻抗与屏蔽效能研究

胡小龙 李常贤

(1.大连交通大学自动化与电气工程学院 大连 116028; 2.大连交通大学轨道交通装备
国家地方联合工程研究中心 大连 116028)

摘要: 针对高速动车组屏蔽线缆受电磁干扰问题,在单层屏蔽转移阻抗解析法模型的基础上,考虑双层屏蔽对屏蔽层直流阻抗和小孔电感的影响,提出用于计算高速动车组屏蔽线缆转移阻抗的双层屏蔽解析法优化模型。同时结合传输线与屏蔽效能理论,推导屏蔽效能与转移阻抗的定量关系,以及芯线受到传导干扰后的理论数学模型。最后,以某动车组屏蔽线缆为研究对象进行建模仿真,分析线缆受扰情况,对比 CST 仿真值与计算值,验证了本文所提优化模型的正确性。优化模型在各频段的计算误差均值低于 10%,验证了优化模型的有效性。揭示了高速动车组屏蔽线缆的受扰机理。

关键词: 转移阻抗;屏蔽效能;双层屏蔽;传输线理论;电磁兼容

中图分类号: TM 248 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

The research on the surface transfer impedance and shielding effectiveness of high-speed railway shielded cable

Hu Xiaolong Li Changxian

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center for Rail Transit Equipment, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Aiming at the problem of electromagnetic interference in the shielded cables of high-speed railway. On the basis of the analytical model of single-shielded transfer impedance. Considering the effect of the double-shielded on the DC impedance and small-hole inductance of the shielded layer, an analytical optimization model is proposed for the shielded cables of high-speed railway. Combined with the theory of transmission line and shielding efficiency, the quantitative relationship between shielding efficiency and transfer impedance is proposed, and the theoretical mathematical model of core wire subjected to conduction interference is given. Finally, the shielded cable of high-speed railway is taken as the research object for modeling and simulation, in order to analyze the disturbance situation of the cable. Comparing the simulation value and the calculated value, which verifies the correctness of the model. The error rate of the optimization model is less than 10%, which verifies the effectiveness of the model. The disturbance mechanism of shielded cable of high-speed railway is revealed.

Keywords: transfer impedance; shielding effectiveness(SE); double shield; transmission line theory; electromagnetic compatibility

0 引言

高速动车组内电磁环境恶劣,实时以太网在内的车载通信设备受电磁干扰影响导致设备死机、重启、丢包等现象频频发生^[1]。屏蔽效能与转移阻抗都是表征线缆屏蔽性能的重要参数,可用于分析和解决复杂电子系统中信号传输的兼容问题^[2]。

线缆转移阻抗的计算方法有数值法和解析法。数值法计算精度高,但消耗资源多,计算时间长,对建模的准确性

有很高的要求,对于结构较为复杂的屏蔽线缆转移阻抗求解,可借助电磁场仿真软件进行仿真分析^[3],特别是众多用于进行电磁场数值计算分析的商用工具不断更新发展,应用数值分析方法建立电磁兼容的求解模型也逐渐成熟,其中在国内外电磁场研究领域应用较为广泛的算法包括:有限元法^[4](finite element method, FEM)、时域有限差分法^[5](finite difference time domain, FDTD)、矩量法^[6](method of moment, MoM)、多导体传输线法(transmission line matrix method, TLM)、物理光学法

收稿日期:2021-11-15

(physical optics, PO)等。国外许多研究电磁算法的大型公司开发了一系列的电磁场仿真^[7],例如美国的 ANSYS 和德国的 CST 等。电磁场仿真分析工具是以电磁场数值分析及其优化算法为基础,每种软件都保持其特点和一定的局限性。Vance^[8]作为解析法的代表人物,提出了最为经典的编织型屏蔽线缆转移阻抗计算模型。Tyni^[9]在 Vance^[8]的基础上引入了编织电感。Demoulin 等^[10]、Kley^[11]、Sali^[12]都在前人的基础上做出了不同程度修改。1993年,西安交通大学马晖等在文献[13]中参考文献[14]提出的电磁耦合机理,详细推导了计算编织层转移阻抗的解析表达式。2005年华北电力大学杨佩铭在文献[15]中比较各种转移阻抗解析式模型,从而得到一个整体较为有效的解析法模型。2011年王添文等^[16]结合转移阻抗解析法模型,比较编织参数对转移阻抗的影响。2012年,哈尔滨工业大学王小铃^[17]借助三维电磁场有限元分析软件,提出了编织曲率对转移阻抗模型进行修正。2018年,高铭均^[18]进一步分析了编织层不同结构参数对线缆转移阻抗的影响,将转移阻抗计算的修正模型利用时域混合算法进行数值分析,研究结果表明其计算精度得到显著提高。但上述模型并未考虑到双层屏蔽对转移阻抗的影响^[19]。

本文结合高速动车组屏蔽线缆电磁干扰问题,对转移阻抗与屏蔽效能的关系进行深入研究,提出双层屏蔽线缆转移阻抗解析法优化模型,并利用 CST 电磁仿真软件对优化模型进行仿真验证。揭示了双层屏蔽线缆的受扰机理。

1 屏蔽线缆转移阻抗分析

高速动车组上采用的千兆以太网线缆属于双层屏蔽型线缆,外屏蔽层为编织网,内屏蔽层为铝箔。因此可在编织型屏蔽线缆转移阻抗解析法模型的基础上,进行优化,提出双层屏蔽线缆的转移阻抗解析法优化模型。转移阻抗定义为单位长度上单位电流沿屏蔽层和屏蔽层所包围的导体形成的开路电压与屏蔽层上感应电流的比值:

$$Z_T = \frac{1}{I_0} \frac{dV}{dZ} \quad (1)$$

式中: I_0 表示屏蔽层电流, $\frac{dV}{dZ}$ 表示芯线和屏蔽层所组成的传输线在单位长度上的电压有效值, Z 表示线缆轴向方向。

D 为编织层外径, d 为每根金属丝的直径, C 为编织层编织股数, N 为每个编织束所包含的金属丝根数, σ 为编织层的电导率, μ 为编织层的磁导率, α 为编织角。编织层结构参数如图 1 所示。

1.1 单层屏蔽模型

Vance^[8]利用编织线参数和小孔径电磁耦合理论,提出了散射阻抗的解析法模型,表达式如下:

$$Z_{T_Vance} = Z_d + j\omega L_{h2} \quad (2)$$

式中: Z_d 为散射阻抗, $j\omega L_{h2}$ 为小孔电感。文献[8]提出了

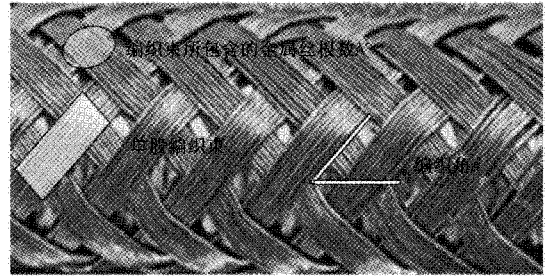


图1 编织层结构参数

目前应用广泛、计算较为准确的 Z_d 计算公式:

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

式中: R_0 为单位长度的直流电阻, δ 为趋肤深度。

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

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

式中: f 为频率, μ 为编织层磁导率, σ 为编织层的电导率。

Tyni^[9]在 Vance^[8]的基础上改进了小孔电感表达式,并引入编织电感 L_b , 提高了 Vance 解析法模型的计算精度。

$$Z_{T_Tyni} = \begin{cases} Z_d + j\omega(L_{h2} - L_b), & \alpha < 45^\circ \\ Z_d + j\omega(L_{h2} + L_b), & \alpha > 45^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中: L_{h2} 为改进后的小孔电感表达式:

$$L_{h2} = \frac{2\mu c}{\pi \cos \alpha} \left(\frac{b}{\pi D}\right)^2 e^{-\frac{\pi}{\sigma} 2a} \quad (7)$$

$$L_b = \frac{\mu h}{4\pi D} (1 - \tan^2 \alpha) \quad (8)$$

其中, b 为相邻编织束之间的距离, h 为两个相交编织束间的距离。

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

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

Demoulin 等^[10]在 Tyni^[9]的基础上引入了额外波动效应这一重要参数,该参数可通过编织网上切向电场产生的涡流来表示,与 $\sqrt{\omega}$ 成正比。

$$Z_{T_Demoulin} = \begin{cases} Z_d + j\omega(L_{h2} - L_b) + \xi \sqrt{\omega} e^{j\frac{\pi}{4}}, & \alpha < 45^\circ \\ Z_d + j\omega(L_{h2} + L_b) + \xi \sqrt{\omega} e^{j\frac{\pi}{4}}, & \alpha > 45^\circ \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$\xi = -\frac{1.16}{NCd} \cdot \arctan \frac{N}{3} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha\right) \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}} \quad (12)$$

1.2 双层屏蔽优化模型

本文在 Demoulin 模型的基础上引入铝箔的阻抗计算公式,由于编织网的菱形小孔被铝箔遮挡,有效避免电磁波

通过小孔发生散射,因此在双层屏蔽优化模型计算中忽略小孔电感,在编织电感方面参考马晖提出的改进计算公式 L_{bl}^{20-21} ,提出了双层屏蔽线缆解析法优化模型。

$$Z_{Tdouble} = \begin{cases} Z'_d - j\omega L_{bl} + \xi\sqrt{\omega} e^{j\frac{\pi}{4}}, & \alpha < 45^\circ \\ Z'_d + j\omega L_{bl} + \xi\sqrt{\omega} e^{j\frac{\pi}{4}}, & \alpha > 45^\circ \end{cases} \quad (13)$$

$$Z'_d = \frac{Z_d Z_{al}}{Z_d + Z_{al}} \quad (14)$$

式中: Z_{al} 为铝箔单位长度的直流阻抗, Z_d 为编织层单位长度散射阻抗。

定义 x, y 分别为屏蔽层的内外半径,文献[22]提出了薄壁管状屏蔽层转移阻抗理论计算公式:

$$Z_{al} = R_{al} \frac{(1+j)d_0/\delta_0}{\sinh[(1+j)d_0/\delta_0]} \quad (15)$$

式中: R_{al} 为单位长度的直流电阻, σ_0 为该屏蔽层材料电导率, δ_0 为该屏蔽层材料趋肤深度, d_0 为该屏蔽层厚度: $d_0 = y - x$ 。

$$R_{al} = \frac{1}{2\pi\sigma_0 x d_0} \quad (16)$$

$$\delta_0 = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma_0}} \quad (17)$$

式中: μ_0 为该屏蔽层材料磁导率。

将式(3)、(15)代入式(19),并令 $G = (1+j)d/\delta, H = (1+j)d_0/\delta_0$,可得:

$$Z_d Z_{al} = \frac{GHR_0 R_{al}}{\sinh(G) \cdot \sinh(H)} \quad (18)$$

$$Z_d + Z_{al} = \frac{GR_0 \sinh(H) + HR_{al} \sinh(G)}{\sinh(G) \cdot \sinh(H)} \quad (19)$$

$$Z'_d = \frac{GHR_0 R_{al}}{GR_0 \sinh(H) + HR_{al} \sinh(G)} \quad (20)$$

整理可得:

$$Z'_d = \frac{2R_0 R_{al}}{[GR_0 \sinh(H) + HR_{al} \sinh(G)]} \cdot \frac{dd_0}{\delta\delta_0} \quad (21)$$

编织电感 L_{bl} 表达式为^[20-21]:

$$L_{bl} = \frac{\mu \left[Ndh \left| \left(b - \frac{bh}{d} \right) \frac{h+d}{2} N \left(d^2 - \frac{\pi d^2}{4} \right) \right| \cdot [(\sqrt{\lambda} + 1)^2] \cos 2\alpha}{2\pi C(D-h) \cos \alpha} \quad (22)$$

式中: λ 为编织网单位长度上的菱形小孔数。

$$\lambda = \frac{2\pi D \sin \alpha \cos \alpha}{N^2 d^2} F^2 \quad (23)$$

式中: F 为单向编织覆盖率。

$$F = \frac{CNd}{2\pi D \cos \alpha} \quad (24)$$

2 屏蔽线缆的屏蔽效能分析

屏蔽效能是反应线缆外部电场与线缆内部电场的耦合关系,是衡量线缆屏蔽层抗干扰能力的重要指标,是直接表征屏蔽效果的主要参数。

如图 2 所示为屏蔽线缆连接示意图,其中屏蔽线缆一端连接源端设备,另一端连接负载设备^[23]。由于屏蔽层上存在大量的编织网孔,芯线产生的电磁场可以穿过这些屏蔽层孔向外辐射。

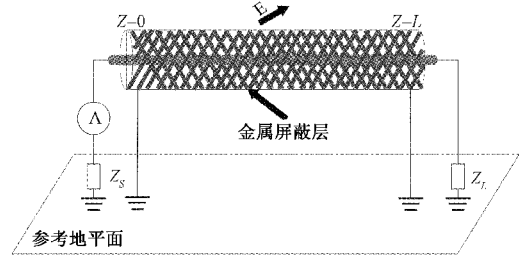


图 2 屏蔽线缆连接示意图

根据图 2 可得^[24]:

$$E_1 = K_1 I(0) \quad (25)$$

$$E_2 = K_1 I_3 + K_2 I(0) \quad (26)$$

式中: E_1 为无屏蔽层时的电场强度, E_2 为加屏蔽层后的电场强度, K_1 为共模辐射参数, K_2 为差模辐射参数, $I(0)$ 为芯线电流, I_3 为屏蔽层外表面电流。

根据屏蔽效能定义可得:

$$SE = 20 \lg \frac{E_1}{E_2} \quad (27)$$

可改写为:

$$SE = 20 \lg \frac{E_1}{E_2} \approx 20 \lg \frac{K_1 I(0)}{K_1 I_3 + K_2 I(0)} \approx 20 \lg \frac{K_1 I(0)}{K_1 I_3} \approx 20 \lg \frac{I(0)}{I_3} \quad (28)$$

差模辐射回路面积小,差模电流大小相同方向相反,导致 K_2 较小;共模辐射回路面积大,导致 K_1 较大,因此可将 $K_2 I(0)$ 忽略。

根据传输线理论,内导体传输线上每一点的电流值可写为:

$$I(z) = I(0) \cosh \gamma z - \frac{U(0)}{I(0)} \sinh \gamma z \quad (29)$$

每点电流在外屏蔽层产生的纵向电压为:

$$d\tau = I(z) Z_{Tdouble} dz \quad (30)$$

式中: $Z_{Tdouble}$ 为双层屏蔽线缆解析法优化模型。

每点纵向电压在屏蔽层感应的电流可写为:

$$dI_1(z) = \frac{d\tau}{Z_{\lambda 1} + Z_{\lambda 2}} \quad (31)$$

其中,

$Z_{\lambda 1} = Z_c \tanh(\gamma_1 z), Z_{\lambda 2} = Z_c \tanh[\gamma_1(l-z)], Z_c$ 为外回路特性阻抗, γ_1 为外回路传输常数。

将式(30)代入式(31)可得:

$$dI_1(z) = \frac{I(z) Z_{Tdouble} dz}{Z_{\lambda 1} + Z_{\lambda 2}} = I(z) Z_{Tdouble} \cdot \frac{\cosh \gamma_1 z \cosh \gamma_1(l-z)}{Z_c \sinh \gamma_1 l} dz \quad (32)$$

屏蔽层上每点的左视电压可写为:

$$dV_1(z) = dI_1(z)Z_{\lambda_1} =$$

$$\frac{I(z)Z_{Tdouble} \cosh \gamma_1 z \cosh \gamma_1 (l-z)}{Z_c \sinh \gamma_1 l} \cdot Z_c \tanh(\gamma_1 z) dz \quad (33)$$

整理得:

$$dV_1(z) = I(z)Z_{Tdouble} \cdot \frac{\sinh \gamma_1 z \cosh \gamma_1 (l-z)}{\sinh \gamma_1 l} dz \quad (34)$$

屏蔽层外表面每点电流可写为:

$$dI_2(z) = dI_1(z) \cosh \gamma_1 z - \frac{dV_1(z)}{Z_c} \sinh \gamma_1 z \quad (35)$$

将式(32)、(34)代入(35)可得:

$$dI_2(z) = \left[\frac{I(z)Z_{Tdouble}}{Z_c} \cdot \frac{(\cosh \gamma_1 z)^2 \cosh \gamma_1 (l-z)}{\sinh \gamma_1 l} - \frac{I(z)Z_{Tdouble}}{Z_c} \cdot \frac{(\sinh \gamma_1 z)^2 \cosh \gamma_1 (l-z)}{\sinh \gamma_1 l} \right] dz \quad (36)$$

整理得:

$$dI_2(z) = \left[\frac{I(z)Z_{Tdouble}}{Z_c} \cdot \frac{\cosh \gamma_1 (l-z)}{\sinh \gamma_1 l} \right] dz \quad (37)$$

将屏蔽层外表面每点的电流值 $dI_2(z)$ 进行积分, 可得屏蔽层外表面总电流值:

$$I_3 = \int_0^l dI_2(z) = \int_0^l \frac{I(z)Z_{Tdouble}}{Z_c} \cdot \frac{\cosh \gamma_1 (l-z)}{\sinh \gamma_1 l} dz \quad (38)$$

将式(29)代入式(38)可得:

$$I_3 = \int_0^l \frac{Z_{Tdouble}}{Z_c} \cdot \frac{\cosh \gamma_1 (l-z)}{\sinh \gamma_1 l} \cdot \left(I(0) \cosh \gamma z - \frac{U(0)}{I(0)} \sinh \gamma z \right) dz \quad (39)$$

当屏蔽线缆长度远小于波长时, $\gamma_1 l$ 趋近于 0, 此时 $\sinh \gamma_1 l \approx \gamma_1 l$, $\cosh \gamma_1 l \approx 1$, 式(39)可简化为:

$$I_3 = \frac{Z_{Tdouble}}{Z_c \gamma_1 l} \int_0^l (\cosh \gamma_1 z - \gamma_1 l \sinh \gamma z) \cdot [I(0) \cosh \gamma z - Z_0 \sinh \gamma z] dz \quad (40)$$

对式(40)求解可得:

$$I_3 = \frac{Z_{Tdouble} I(0)}{Z_c \gamma_1 l} = \frac{Z_{Tdouble} I(0)}{\sqrt{\frac{R_s + j\omega L_1}{j\omega C_1}} \sqrt{(R_s + j\omega L_1)(j\omega C_1)}} =$$

$$\frac{Z_{Tdouble} I(0)}{R_s + j\omega L_1} \quad (41)$$

其中, R_s 为屏蔽层单位电阻, C_1 为屏蔽层单位长度对地电容, L_1 为屏蔽层单位长度对地电感表达为^[25]:

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D_0}{y} \right) \quad (42)$$

其中, D_0 为外屏蔽层内径。

结合式(28)、(41)可推导得转移阻抗与屏蔽效能的关系如下:

$$SE = 20 \lg \frac{I(0)}{I_3} = 20 \lg \frac{R_s + j\omega L_1}{Z_{Tdouble}} \quad (43)$$

3 仿真实验

3.1 对比验证

为验证本文理论推导的正确性, 本文采用电磁仿真软件 CST Cable Studio 工作室, 仿真模型参照图 2, 在 CST 中建立长度为 2 m 距离参考地面为 50 mm 的百兆以太网屏蔽线。芯线激励源频率范围 0~80 MHz, 幅值为 1 A。芯线两端负载阻抗 Z_S 和 Z_L 均设置为 50Ω ^[26]。电场观测点位置距离线缆 100 mm 处。表 1 所示为用于数值计算的线缆参数, 其中编织层电导率为 2.564×10^7 S/m, 铝箔电导率为 3.7×10^7 S/m, 相对磁导率均为 1。电路连接如图 3 和 4 所示。

表 1 数值计算线缆参数

线缆参数	取值
N	8
C	16
α	27
D/mm	4.2
y/mm	2.07
x/mm	2.05

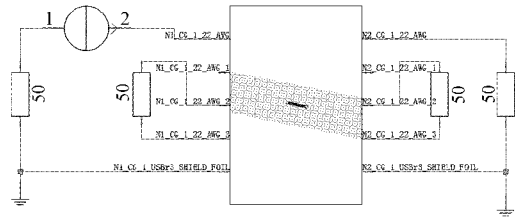


图 3 有屏蔽层线缆电路连接

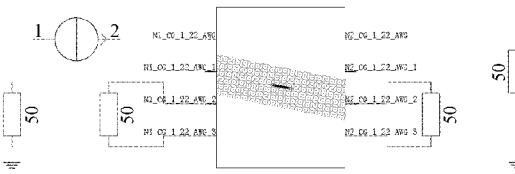


图 4 无屏蔽层线缆电路连接

图 5 所示为式(43)与 CST 仿真的屏蔽效能对比结果, 线缆参数如表 1 所示, 其中虚线为本文计算结果, 实线为 CST 仿真结果。由图 5 可看出, 本文方法与 CST 仿真结果在某些频段处存在一定的偏差但基本吻合, 进而验证了本文提出的双层屏蔽线缆转移阻抗解析法优化模型的正确性。

3.2 屏蔽层参数对线缆屏蔽效能的影响

式(43)定量描述了屏蔽效能与转移阻抗的关系, 利用该式可分析屏蔽层参数对屏蔽效能的影响。不同编织角对应的屏蔽效能曲线如图 6 所示, 其中编织角分别取值 22° 、 27° 、 32° 、 37° 、 42° 和 47° 。

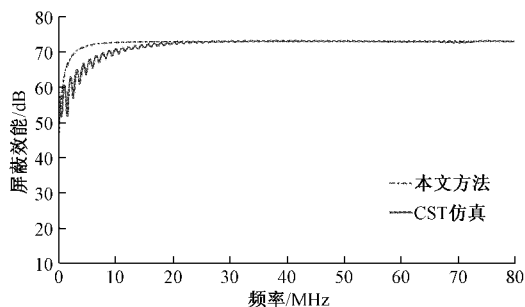


图 5 屏蔽效能理论计算与仿真对比

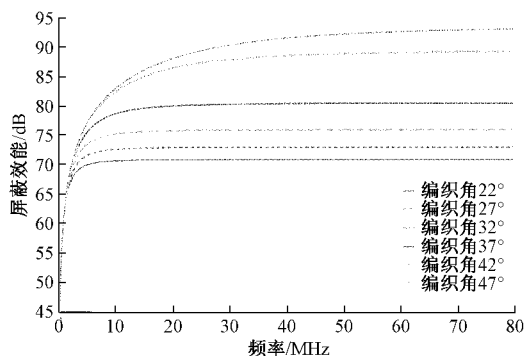


图 6 不同编织角对应的屏蔽效能曲线

由图 6 可以看出，在一定角度变化范围内，屏蔽效能随编织角度的增大而增大。编织角影响了编织层的编织覆盖率^[2]，编织角在一定范围内的增大使得相应编织覆盖率增大，即编织密度增大，由编织层造成的电磁场泄漏就相应减少。

4 实时以太网传导干扰

为验证优化模型在实际工程中的应用，以某动车组屏蔽线缆为研究对象，在列车静态重联工况下频繁合主断，用示波器对 ETBN 设备的以太网信号波形进行监测，在现场测试中发现百兆以太网通信板卡发生 LINKDOWN 现象，导致 ETBN 异常初运行问题，且在 55~58 MHz 频段下受电磁干扰影响严重。

本文采用 CST DESIGN STUDIO 工作室进行及联仿真，搭建完整的百兆以太网物理层模型，其中连接器与屏蔽双绞线均按照实际装车要求，分别在 CST MICROWAVE STUDIO 和 CST CABLE STUDIO 工作室进行建模。在双绞线屏蔽层加入 GB/T 24338.4-2018 规定的传导骚扰干扰信号，干扰信号参数如表 2 所示。整体仿真连接图如图 7 所示。

表 2 干扰信号参数

信号调制类型	信号频率	载波频率	信号幅值
AM	1 kHz	55~58 MHz	10 V _{rms}

根据式(43)可计算屏蔽层耦合到芯线上的电流值为：

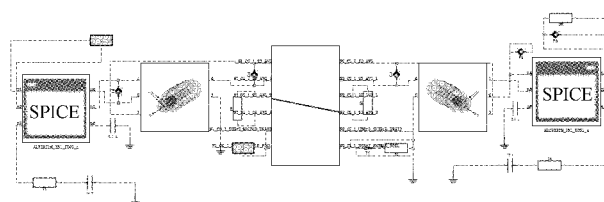


图 7 百兆以太网物理层仿真连接图

$$I_5 = \frac{I_4}{10^{\frac{SE}{20}}} \quad (44)$$

其中， I_4 为干扰信号电流， I_5 为耦合到芯线上的电流。受到干扰后，芯线上的电压表达式为：

$$U = I_5 R_{in} + U_{origin} \quad (45)$$

其中， R_{in} 为芯线输入电阻值， U_{origin} 为以太网 PHY 芯片激励电压。

图 8 所示为式(45)与 CST 仿真的对比结果，其中虚线为本文计算结果，实线为 CST 仿真结果。本文方法与 CST 仿真结果基本吻合，由表 3 可知各频段的误差均值低于 10%，进而验证了本文所提优化模型在实际工程中运用的有效性。由于 CST 仿真时间过长，借助该优化模型并结合线缆参数，可在短时间内对线缆受扰情况进行快速分析。

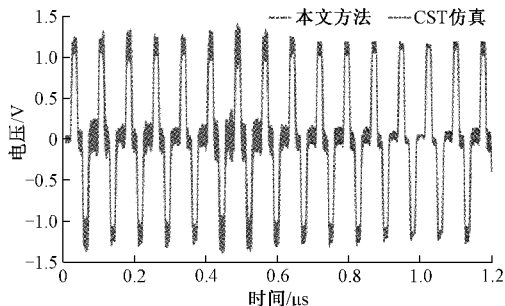


图 8 本文方法与 CST 仿真结果对比

表 3 优化模型与仿真值

时间/μs	仿真值/V	优化模型/V	误差率/%
0.30	-1.10	-1.14	3.6
0.45	-1.25	-1.13	9.6
0.50	0.22	0.21	4.5
0.60	-1.25	-1.19	4.8
0.75	-1.17	-1.07	8.5
0.80	1.11	1.13	1.8
1.00	0.04	0.04	0

5 结 论

本文在经典转移阻抗解析法模型的基础上，考虑双层屏蔽对屏蔽层直流阻抗和小孔电感的影响，提出双层屏蔽解析法优化模型。结合传输线与屏蔽效能理论，推导屏蔽效能与转移阻抗的定量关系，以及芯线受到传导干扰后的

理论数学模型。最后,以某动车组屏蔽线缆为研究对象,利用 CST 仿真软件进行建模仿真,分析线缆受扰情况,对比仿真值与计算值,验证优化模型的正确性。优化模型在各频段的计算误差均值低于 10%,验证优化模型的有效性,揭示了屏蔽线缆的受扰机理。对于今后的工作重点,将重点探索百兆以太网物理层芯片级 EMC 特性,进一步研究其失效机理和受扰情况。

参考文献

- [1] 罗静雯,杜平安,任丹,等.一种基于 BLT 方程的孔缝箱体屏蔽效能计算方法[J].物理学报,2015,64(1):62-69.
- [2] 肖培,李佳维,邱永峰,等.编织参数对电缆屏蔽效能影响理论分析与数值仿真[C].2020 年全国微波毫米波会议论文集(下册),2020:414-417.
- [3] 赵鹤鸣.电动汽车高压屏蔽线缆与连接器的屏蔽效能研究[D].重庆:重庆理工大学,2020.
- [4] 张轩,万书亭,刘荣海,等.电缆主绝缘缺陷电场数值分析[J].云南电力技术,2015,43(3):105-109.
- [5] VINCENT M, KLINGLER M, RIAH Z, et al. A method to overcome the load connection restrictions in the combined MoM/MTL approach[C]. 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC 2016, 2016:565-570.
- [6] LUO J, JIAN W, XIA Y. A hybrid method for EMI effect simulation of cable-interconnect network[C]. 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium(ACES), 2017:1-2.
- [7] 肖卫东,潘涵.国外电磁兼容仿真软件发展概述[J].装备环境工程,2010,7(2):55-60.
- [8] VANCE, F E. Shielding effectiveness of braided-wire shields [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,1975,17(2):71-77.
- [9] TYNI M. The transfer impedance of coaxial cables with braided conductors[C]. Proc EMC Symp Wroclaw, 1976:410-419.
- [10] DEMOULIN B,DEGAUQUE P, CAUTERMAN M. Shielding effectiveness of braids with high optical coverage [C]. Proceedingsof the International Symposium on EMC,1981:491-495.
- [11] KLEY T. Optimized single-braided cable shields[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993,35(1):1-9.
- [12] SALI S. An improved model for the transfer impedance calculation of braided coaxial cables [J]. IEEE Trans. On EMC, 1991,33(2):139-143.
- [13] 马晖,葛景滂,吴锴,等.编织型同轴电缆转移阻抗的研究[J].电线电缆,1993(6):2-8.
- [14] 杨佩铭,卢铁兵,齐磊,等.编织型屏蔽电缆转移阻抗的计算[C].电工理论与新技术学术年会论文集,2005:326-329.
- [15] 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.
- [16] 王添文,郭艳辉,丁永平,等.屏蔽电缆屏蔽编织优化分析[J].安全与电磁兼容,2011(6):12-14.
- [17] 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.
- [18] 高铭均.屏蔽电缆电磁干扰分析与滤波防护研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [19] 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.
- [20] WANG X, LIU C, DING H, 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.
- [21] 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), 2018:881-886.
- [22] 李晓璐.飞机线缆屏蔽层破损对屏蔽效能影响的研究[D].天津:中国民航大学,2020.
- [23] XIAO P, DU P, ZHANG B. An analytical method for radiated electromagnetic and shielding effectiveness of braided coaxial cable [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(1):121-127.
- [24] 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.
- [25] MORA N, RACHIDI F, PELISSOU P, et al. An improved formula for the transfer impedance of two-layer braided cable shields[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015,57(3):607-610.
- [26] 肖培.机电设备互连线缆电磁干扰建模及计算方法研究[D].成都:电子科技大学,2015.

作者简介

胡小龙,硕士研究生,主要研究方向为实时以太网与无线通信物理层电磁兼容。

E-mail:13504080896@163.com

李常贤,工学博士,教授,主要研究方向为列车网络控制技术、列车与变流器电磁兼容技术。

E-mail:lichangxianzju@163.com