

降低电缆内导线间串扰电压的优化方法¹

刘 刚 杨伟杰 钟顺时

(上海大学 上海 201800)

摘 要 本文根据分布参数传输线理论导出了电缆内平行多导线间串扰电压的传递函数矩阵表达式;构造了导线间串扰电压最小的优化目标函数;利用可变多面体算法进行了优化设计;根据计算结果提出了降低串扰电压的新方法。计算结果与已有的实验结果吻合。

关键词 电缆, 电磁干扰, 传输线理论, 优化

中图分类号 TN813

1 引 言

对电磁干扰 (EMI) 和电磁兼容 (EMC) 的研究能有效地降低电气电子设备,特别是航空、舰船、雷达、通信等系统中存在的各种不利于系统稳定工作的干扰,所以这些研究在近十几年中得到了迅速的发展。在各种电气电子设备中,多导线组成的电缆得到广泛的应用,而来自传导耦合的干扰严重地影响着设备的可靠性,故电缆内导线间的串扰问题一直是最基本的,也是最迫切需要解决的课题。文献中已先后给出了 (2+1) 系统平行传输线耦合模型^[1-3], (2+1) 系统有耗传输线模型^[4], (2+1) 系统斜线传输线模型^[5] 等。但这些文献均限于对电压传递函数的分析和计算,并未研究优化设计方法。为此本文首先根据传输线理论导出了 $(n+1)$ 系统平行无耗传输线间电磁耦合的电压传递函数的矩阵方程,然后构造了最小电磁耦合串扰电压的优化目标函数,利用可变多面体优化方法进行了优化设计。得出对工程设计有一定指导意义的结果。特别是考虑到串扰电压随负载阻抗的变化较灵敏,对负载阻抗进行了优化设计,并根据优化结果,提出使用负电阻来降低串扰电压的建议。据此已研制了 EMC 的分析和优化设计的计算机软件。

2 理论模型

常见的电缆工作方式如图 1 所示。一根长为 L 的多导线电缆,在它的 0 端和 L 端各连接一有源网络,由于电缆内导线间存在电磁耦合,因此将会在电缆的 0 端和 L 端产生一串扰电压。当串扰电压超过一定值时,就将影响两端网络内电子设备的正常工作。图 1 所示电缆的等效电路图如图 2 所示。它由一段 $(N+1)$ 导体传输线和两个附加的 N 端口网络组成。设 $(N+1)$ 导体传输线由 N 根电流导线和一根参考导线构成。传输线上传播 TEM 波。两个附加的 N 端口网络内的端阻抗参数和源电压参数为已知。由于多导线系统是线

¹ 1994-01-17 收到, 1994-06-28 定稿

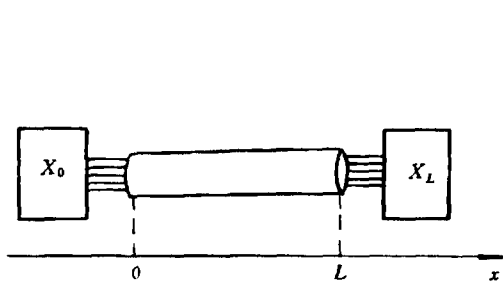


图 1 电缆的工作状态

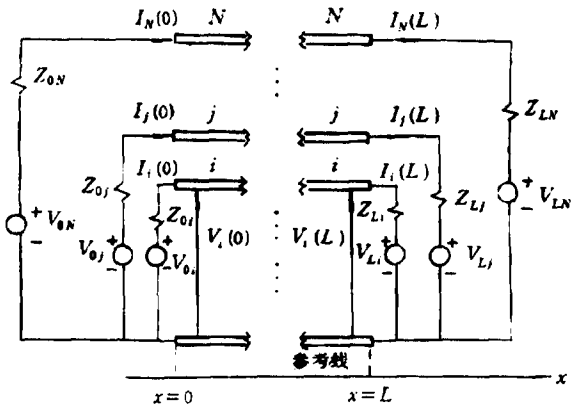


图 2 多导线电缆的等效电路图

性的，故满足叠加原理。参见图 2，我们定义第 i 线和参考线构成发射电路；第 j 线和参考线构成寄生电路；其余 $(N-2)$ 根线和参考线构成寄生电路；则可得到接收电路 0 端和 L 端上接收的峰值电压为

$$V_j(0) = \int_{f_L}^{f_H} \left\{ \sum_{i=1}^N [G_{0i}(f) \cdot T_{0ij}(f) + G_{Li}(f) \cdot T_{Lij}(f)] \right\} \cdot P_{0j}(f) df \quad (\text{V}), \quad (1)$$

$$V_j(L) = \int_{f_L}^{f_H} \left\{ \sum_{i=1}^N [G_{0i}(f) \cdot S_{0ij}(f) + G_{Li}(f) \cdot S_{Lij}(f)] \right\} \cdot P_{Lj}(f) df \quad (\text{V}), \quad (2)$$

式中 f_L 和 f_H 分别为研究的工作频带下限和上限； $V_j(0)$ 和 $V_j(L)$ 是电路对频谱密度函数的峰值响应，频谱密度函数的所有频谱成份都是同相的，因此 (1) 和 (2) 式的计算值是假设接收电路处于最坏情况的结果，它是一种保守的算法； $G_{0i}(f)$ 和 $G_{Li}(f)$ 分别是发射电路 0 端和 L 端上载有电压源 V_{0i} 和 V_{Li} 输出的傅里叶频谱值； $T_{0ij}(f)$ ， $T_{Lij}(f)$ ， $S_{0ij}(f)$ 和 $S_{Lij}(f)$ 分别是电压传递函数矩阵 $[T_0]$ ， $[T_L]$ ， $[S_0]$ 和 $[S_L]$ 中的元素，它们的物理意义如下： $T_{0ij}(f)$ 表示从发射电路 i 的 0 端到接收电路 j 的 0 端的电压传递函数值， $T_{Lij}(f)$ 是从发射电路 i 的 L 端到接收电路 j 的 0 端的电压传递函数值， $S_{0ij}(f)$ 是从发射电路 i 的 0 端到接收电路 j 的 L 端电压传递函数值， $S_{Lij}(f)$ 是从发射电路 i 的 L 端到接收电路 j 的 L 端的电压传递函数值； $P_{0j}(f)$ 和 $P_{Lj}(f)$ 分别是接收电路 j 的 0 端和 L 端频率响应的电压传递函数值。

电压传递函数矩阵通常是电缆的长度、横截面尺寸以及端接网络阻抗的函数。根据传输线的理论，我们导出了电缆内导线间串扰电压的传递函数矩阵表达式如下：

$$[T_0] = [I] - [Z_0][A]^{-1}[B], \quad (3)$$

$$[T_L] = -[Z_0][A]^{-1}, \quad (4)$$

$$[S_0] = [Z_L][\Phi_{21}] + [Z_L][F][A]^{-1}[B], \quad (5)$$

$$[S_L] = [I] - [Z_L][F][A]^{-1}, \quad (6)$$

式中 $[I]$ 为 N 阶单位方阵, $[A]$, $[B]$, $[F]$ 为 N 阶方阵工作单元, 它们的表达式为

$$[A] = [Z_L][\Phi_{22}] - [Z_L][\Phi_{21}][Z_0] - [\Phi_{12}] + [\Phi_{11}][Z_0], \quad (7)$$

$$[B] = [\Phi_{11}] - [Z_L][\Phi_{21}], \quad (8)$$

$$[F] = [\Phi_{22}] - [\Phi_{21}][Z_0]. \quad (9)$$

$[Z_0]$ 和 $[Z_L]$ 为电缆两端连接的 N 端口网络的阻抗矩阵, 以 diag 表示对角方阵, 有

$$[Z_0] = \text{diag}(Z_{01}, Z_{02}, \dots, Z_{0i}, \dots, Z_{0N}), \quad (10)$$

$$[Z_L] = \text{diag}(Z_{L1}, Z_{L2}, \dots, Z_{Li}, \dots, Z_{LN}). \quad (11)$$

$[\Phi_{11}]$, $[\Phi_{12}]$, $[\Phi_{21}]$ 和 $[\Phi_{22}]$ 是 $N \times N$ 阶反传输参数矩阵:

$$[\Phi_{11}] = \cos(\beta L) \cdot [I], \quad (12)$$

$$[\Phi_{12}] = -jv \sin(\beta L) \cdot [l], \quad (13)$$

$$[\Phi_{21}] = -jv \sin(\beta L) \cdot [c], \quad (14)$$

$$[\Phi_{22}] = \cos(\beta L) \cdot [I]. \quad (15)$$

式中 β 是相位常数, v 是相速度。 $[l]$ 和 $[c]$ 分别为电感和电容的 N 阶方阵。分析以上各式可见, 电缆两端的峰值电压不仅与电压源函数有关, 而且还与电缆的几何结构以及端接网络的阻抗参数有关。通常, 电缆的尺寸和型号是固定的, 或者是选择范围较小, 但端接网络的阻抗参数较易变更, 且峰值电压是端接网络阻抗参数的灵敏函数。为此我们提出对端接网络阻抗参数进行优化选择, 以便降低电缆内导线间的串扰电压, 使得整个系统处于兼容的正常工作状态。为了便于计算机计算, 需将 (1) 和 (2) 式离散化。取频率点间隔为 Δf_k , 可得

$$\begin{aligned} V_j(0) &= \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{i=1}^N [G_{0i}(f_k) \cdot T_{0ij}(f_k) + G_{Li}(f_k) \cdot T_{Lij}(f_k)] \right\} \cdot P_{0j}(f_k) \cdot \Delta f_k \\ &= \sum_{k=1}^K V_j(0, f_k, [Z_0], [Z_L]), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_j(L) &= \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{i=1}^N [G_{0i}(f_k) \cdot S_{0ij}(f_k) + G_{Li}(f_k) \cdot S_{Lij}(f_k)] \right\} \cdot P_{Lj}(f_k) \cdot \Delta f_k \\ &= \sum_{k=1}^K V_j(L, f_k, [Z_0], [Z_L]). \end{aligned} \quad (17)$$

在工程设计中, 通常要求 $V_j(0/L)$ (代表 $V_j(0)$ 或 $V_j(L)$) 在频带 $[f_L, f_H]$ 内接近某个目标函数 $V_{cj}(f)$, 所以我们构造以下优化目标函数:

$$[\min \delta | \delta] = \sum_{k=1}^K [V_j(0/L, f_k, [Z_0], [Z_L]) - V_{cj}(f_k)]^2. \quad (18)$$

通过改变端接网络的阻抗矩阵 $[Z_0]$ 和 $[Z_L]$ 的参数值, 可使 δ 达到最小值。我们采用可变多面体优化方法寻找多元目标函数 δ 的极小值, 使 $V_j(0/L, f_k, [Z_0], [Z_L])$ 逼近 $V_{cj}(f_k)$, 这时电缆内导线间的串扰电压也最低。

3 数值结果

根据上节的理论模型, 我们已研制了 EMC 计算机软件, 并已利用这一软件计算了一些电缆内导线间电磁耦合干扰的实例。

图 3 给出了一个 (2+1) 系统的结构示意图。该系统的两根导线离地面高度 $h_G = h_R = 20\text{mm}$, 两导线间距为 20mm , 导线半径为 0.4mm , 导线总长度为 4705mm , 发射电路 G 线上 0 端施加一单位正弦信号电压源。图 4 给出了两组不同阻抗参数所对应的导线 0 端电压传递函数的计算值和实验值。图中曲线①对应于第 1 组阻抗参数 ($Z_{LG} = 100\text{k}\Omega$, $Z_{0R} = 50\Omega$, $Z_{LR} = 1\Omega$), 曲线②对应于第 2 组阻抗参数 ($Z_{LG} = 1\Omega$, $Z_{0R} = 1\Omega$, $Z_{LR} = 1\Omega$)。由图可见, 两组计算值和实测值均吻合一致。

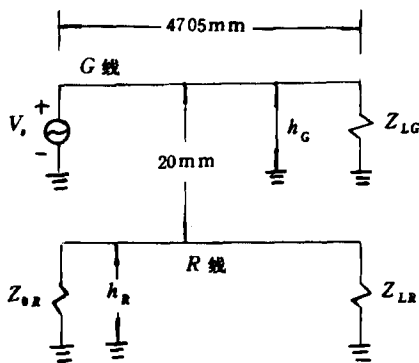


图 3 (2+1) 系统的结构示意图

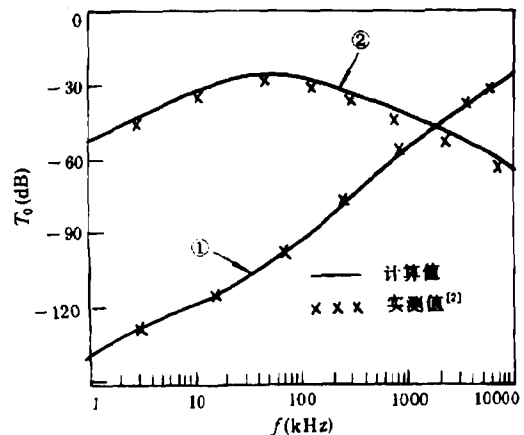


图 4 (2+1) 系统导线 0 端电压传递函数值

分析图 4 可知, 当电缆导线的几何结构相同, 而端接网络的阻抗参数不同时, 其电压传递函数的幅频特性差异很大。由此可见: 电缆端接网络阻抗参数对导线间的电磁耦合值具有较大影响。

图 5 给出了一个 (25+1) 系统的串扰电压的计算值和实测值。该系统实际上是一个由 25 根导线构成的电缆, 它的有关参数见文献 [6]。图中给出的结果是在第 25 号线的 0 端加单位正弦信号电压源时, 在第 14 号线的 0 端接收的电压值。图中符号 I 表示测量结果的范围。由图可见, 计算值与实测值吻合很好。

图 6 给出了一个 (2+1) 系统的优化计算结果。(2+1) 系统的结构参数见图 3, 优化目标函数为 R 线上 0 端接收的电压值 (串扰电压) 小于 60dB , 研究的频带为 $[1\text{kHz}, 10\text{MHz}]$, 其中 Z_{0R} , Z_{LR} , Z_{LG} 三阻抗为优化时的自变量。它们的初始值分别选为 300Ω , 75Ω , 100Ω 。经过优化计算后, Z_{0R} , Z_{LR} , Z_{LG} 分别为 -1.3Ω , 140Ω , 250Ω 。用优化后的阻抗计

算的串扰电压值如图 6 实线所示；图中虚线是阻抗为初始值时串扰电压的计算结果。由图 6 可见，优化后的串扰电压比优化前下降了约 44dB，且串扰电压值均在 -60dB 以下，达到了优化目标。

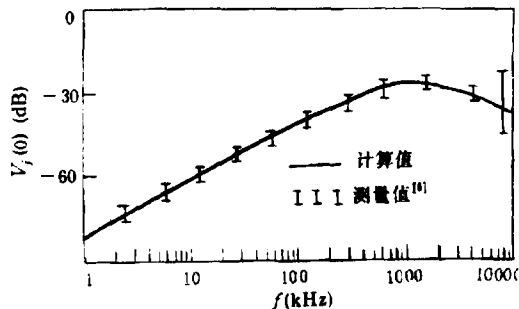


图 5 (25+1) 系统的串扰电压值

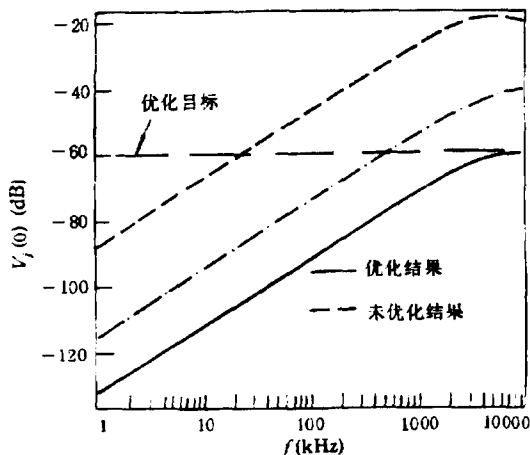


图 6 (2+1) 系统的优化计算结果

分析优化后的结果可知，在有些情况下，当端接网络阻抗存在一个负电阻时，导线间的串扰电压最小。该负电阻可利用非线性电阻元件来实现。若系统设计中不宜采用负电阻，选用一个小的正电阻来代替负电阻，也可得到串扰电压较低的结果。例如，上例中我们将负电阻 $Z_{OR} = -1.3\Omega$ 换成 $Z_{OR} = 10\Omega$ ，其它参数不变，这时计算的串扰电压值用点划线画在图 6 中。可见，这时的串扰电压值介于优化后和未优化的结果之间，且在 $[1 \sim 800\text{kHz}]$ 内低于 -60dB。

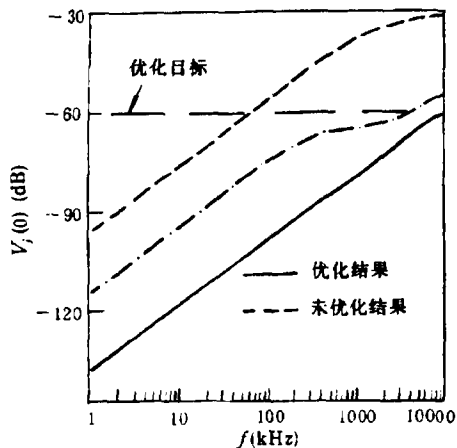


图 7 (4+1) 系统的优化计算结果

图 7 给出了一个 (4+1) 系统的优化计算结果，图中实线为优化后计算结果，虚线为未优化的计算结果，点划线为优化后将负电阻用一个小的正电阻替换后的计算结果。比较图 6 和图 7 可知，二者计算结果相类似，优化后串扰电压都明显下降。结果表明，采用本文所述的优化方法，通过调整端接网络阻抗参数，可有效地降低导线间的串扰电压。且在优化设计过程中，可根据实际需要来选择优化的目标函数和参与优化的阻抗参数。

4 结 论

本文详细地研究了电缆内导线间的串扰电压。导出了电缆内导线间电磁耦合电压传递函数的矩阵表达式，建立了电缆内导线间串扰电压最小的一种优化方法；算值已得到了实验的验证。

本文还讨论了电缆端接网络的阻抗参数对电压传递函数的影响，指出阻抗参数的变化对电压传递函数影响较大。因此在工程设计中，可通过优选阻抗参数，达到降低电缆内导线间串扰电压的目的。在优化计算中，还发现在某些情况下，当阻抗矩阵中某些电阻为负值时，电缆内导线间的串扰电压最低，这说明可在系统工程设计中，采用有源器件来实现负阻，从而降低电缆内导线间的串扰电压。实验表明，可使小的正电阻代替负阻，优化后的其它参数保持不变，也可使串扰电压得到明显的降低。

参 考 文 献

- [1] Paul C R. IEEE Trans. on EMC, 1978, EMC-20(1): 216-222.
- [2] Paul C R. IEEE Trans. on EMC, 1982, EMC-24(3): 335-343.
- [3] Paul C R. IEEE Trans. on EMC, 1992, EMC-34(3): 315-319.
- [4] Olsen R G. IEEE Trans. on EMC, 1984, EMC-26(2):79-83.
- [5] Kami Y, Sato R. IEEE Trans. on EMC, 1986, EMC-28(4):204-209.
- [6] Paul C R. Sensitivity of Crosstalk to Variations in Wire Position in Cable Bundles. IEEE International Electromagnetic Compatibility Symposium Record. Atlanta, Georgia, U S A: 1987, 459-463.

THE OPTIMIZATION METHOD FOR REDUCING CROSSTALK IN MULTI-CONDUCTOR CABLE

Liu Gang Yang Weijie Zhong Shunshi

(Shanghai University, Shanghai 201800)

Abstract Based on transmission line theory, the voltage transfer ratio function matrixes are derived for the multi-conductor cable system. Then an optimising object function for reducing crosstalk in the multi-conductor cable is established. The nonlinear programming is applied to optimize the terminal impedance load. According to the optimization results, a new method for reducing crosstalk is presented. Theoretical results are in good agreement with experimental ones.

Key words Cables, Crosstalk, Transmission line theory, Optimization

刘 刚： 男， 1961 年生， 博士， 从事电磁场与微波技术专业的研究与教学。

杨伟杰： 男， 1972 年生， 助理工程师， 从事通信工程专业的研究与开发。

钟顺时： 男， 1939 年生， 教授， 博士生导师， 从事电子学与通信学科的教学与科研。