



一种不确定性捆扎线束电磁耦合效应的广义等效建模方法

肖培 李佳维 贺佳港 李锦新 刘柱 李高升

A generalized simplified modeling method for electromagnetic coupling effects of uncertainty strapping cable harness

Xiao Pei Li Jia-Wei He Jia-Gang Li Jin-Xin Liu Zhu Li Gao-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 100702 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201723

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201723>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大气边界层模式中随机参数的反演与不确定性分析

Retrieval and uncertainty analysis of stochastic parameter in atmospheric boundary layer model

物理学报. 2018, 67(19): 199201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181014>

脉冲激光四象限探测器测角不确定性统计分布

Angle measurement uncertainty statistical distribution of pulsed laser quadrant photodetector

物理学报. 2017, 66(1): 012901 <https://doi.org/10.7498/aps.66.012901>

有耗介质层上多导体传输线的电磁耦合时域分析方法

Time domain hybrid method for coupling analysis of multi-conductor transmission lines on the lossy dielectric layer excited by ambient wave

物理学报. 2020, 69(6): 060701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191214>

多个量子节点确定性纠缠的建立

Deterministic quantum entanglement among multiple quantum nodes

物理学报. 2019, 68(3): 034202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181614>

抽样法与灵敏度法 k_{eff} 不确定度量化

Uncertainty quantification in the calculation of k_{eff} using sensitivity and stochastic sampling method

物理学报. 2017, 66(1): 012801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.012801>

一种基于广义Duffing振子的水中弱目标检测方法

A method of detecting underwater weak target based on generalized Duffing oscillator

物理学报. 2017, 66(12): 124302 <https://doi.org/10.7498/aps.66.124302>

一种不确定性捆扎线束电磁耦合效应的广义等效建模方法*

肖培¹⁾ 李佳维¹⁾ 贺佳港¹⁾ 李锦新²⁾ 刘柱¹⁾ 李高升^{1)†}

1) (湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

2) (湖南大学信息科学与工程学院, 长沙 410082)

(2020 年 10 月 16 日收到; 2020 年 12 月 18 日收到修改稿)

线束在实际布线过程中存在空间布局特性, 其芯线数目大、空间任意弯曲以及位置不确定等特点给线束耦合干扰的建模与分析带来了挑战. 不确定性全线束模型耦合干扰的数值仿真对计算能力提出了更高要求, 甚至无法进行有效计算. 因此, 本文提出了不确定性捆扎弧形线束电磁耦合效应的广义简化建模方法, 考虑了捆扎线束内导线相对位置的不确定性. 基于高斯分布和样条插值方法, 建立了不确定性捆扎线束内导线的位置, 根据多导体传输线理论确立了等效线束的几何截面结构参数, 通过圆弧和正弦捆扎线束数值算例验证了本文方法的有效性.

关键词: 线束, 电磁耦合效应, 不确定性捆扎, 广义等效建模方法

PACS: 07.05.Tp, 41.20.Jb, 41.90.+e

DOI: 10.7498/aps.70.20201723

1 引言

机电系统电磁耦合通道的等效建模是复杂电子系统电磁兼容分析的重点与难点^[1,2]. 线缆是机电系统电磁耦合干扰的主要传导路径, 现有文献表明, 线缆产生的电磁干扰是大部分系统不符合电磁兼容规范的主要原因. 线缆电磁耦合问题的研究是电子系统电磁兼容研究内容的关注重点, 对系统电磁兼容性能分析具有重要作用^[3-6]. 图 1 所示为某设备控制信号线束, 存在空间布局特性, 其芯线数目大、空间任意弯曲以及位置不确定 (导线相对位置随线长发生变化) 等特点给线束电磁耦合干扰的建模与分析带来了挑战. 不确定性全线束模型耦合干扰的数值仿真对计算能力提出了更高要求, 甚至无法进行有效计算. 因此, 需要提出更有效的建模方法, 来解决机电系统干扰传输路径建模问题.



图 1 控制器信号线束

Fig. 1. Controller signal cable bundle.

线束等效建模方法 (equivalent cable bundle method, ECBM) 目的在于将多根导线等效为不超过 4 根导线的简化模型. 2008 年, 国外学者首次提出了多导体传输线 ECBM 方法^[7], 对理想导电平面上的多导体线束电磁耦合效应进行了等效建模, 并应用于汽车复杂线束耦合电流的预测, 其主要思

* 国家自然科学基金 (批准号: 51675086) 和中国博士后科学基金 (批准号: 2020M672482) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gaosheng7070@vip.163.com

路为: 根据线束终端阻抗值与其特征阻抗值的比较, 将线束最多分为 4 组; 利用多导体传输线理论得到简化线束的结合截面结构参数; 确立简化线束终端等效负载. 此外, ECBM 方法被拓展应用于理想导电平面上多导体传输线电磁辐射发射的建模 [8,9] 以及差分线束上电磁耦合电流的计算 [10].

国内一些学者对 ECBM 方法进行了拓展应用, 提出了线束串扰建模的 ECBM 方法, 并对理想导电参考地面上、理想金属圆柱腔内及正交参考面等场合进行了有效性验证 [11–13]. 此外, 一些学者成功地将 ECBM 方法应用于汽车线束的电磁干扰建模 [14]. 另有一些学者提出了时域有限差分计算方法, 拓展研究了 ECBM 方法在汽车线束串扰和辐射敏感度的预测问题 [15,16].

现有的 ECBM 方法主要解决了确定性布局线束的建模问题, 而在工程应用中, 线束布局往往具有不确定性. 因此, 本文在已有 ECBM 方法基础上, 提出了不确定性捆扎线束电磁耦合效应的广义 ECBM 方法. 考虑了线束内导线位置的不确定性, 使用高斯分布和样条插值获取不确定性捆扎线束内导线的位置, 利用导线子段之间存在换位关系求得线束的分布电感和电容矩阵参数, 根据多导体传输线理论得到简化线束的几何截面结构参数, 最后通过圆弧形和正弦弧形线束数值算例验证本文方法的有效性.

2 不确定性捆扎线束电磁耦合问题

2.1 捆扎线束不确定性分布特点

图 2(a) 为理想导电平面上弧形捆扎线束, 图 2(b) 为其电路连接示意图. 可以看出, 捆扎线束内导体并非绝对平行, 其相对位置没有固定, 线束内导线相对位置在线长方向上具有不确定性变化特点. 而线束内导线位置直接影响传输分布参数值, 因此, 导线间的电感和电容矩阵随着线长变化.

2.2 线束电磁耦合建模问题

图 3 为图 2 中不确定性捆扎弧形线束的几何截面结构, 线束内包含多根导线, 虚线表示线长方向上任意位置处线束所限区域. 假设线束横截面的几何形状在线长方向基本保持为圆形. 本文针对不确定性捆扎线束电磁耦合干扰建模问题, 利用多导

体传输线理论将不确定性捆扎的多根导线模型简化为单根线模型, 即用单根线的电磁耦合效应等效描述多根线的电磁耦合效应.

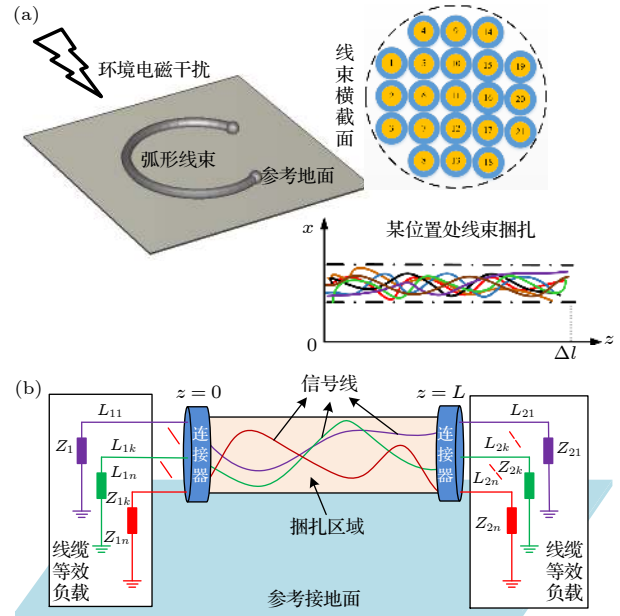


图 2 设备互连线束示意图 (a) 弧形捆扎线束; (b) 线束电路连接示意图

Fig. 2. Schematic diagram of equipment interconnection wiring cable harness: (a) Arc-shaped binding cable harness; (b) circuit connection diagram.

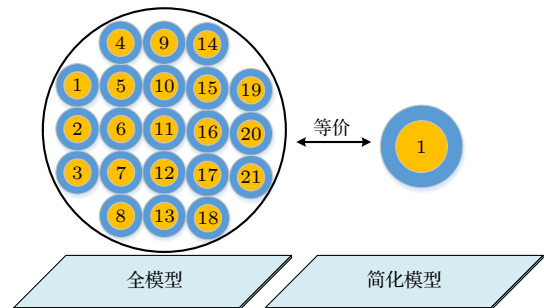


图 3 不确定性捆扎线束简化建模

Fig. 3. Simplification modeling of uncertainty binding cable harness.

3 不确定性捆扎线束电磁耦合简化建模方法

3.1 简化线束单位长度参数的计算

图 4 为位于理想导电平面上的 n 根导线, 假设 r_i 和 r_j 为其中任意两导体半径, h_i 和 h_j 为导体的对地高度, S_{ij} 为导体间距, Δr_i 和 Δr_j 分别为导线绝缘层厚度. 则导线单位长度电感计算公式为 [17]

$$\mathbf{L}_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) & \frac{\mu}{4\pi} \ln\left(1 + \frac{4h_i h_j}{S_{ij}^2}\right) \\ \frac{\mu}{4\pi} \ln\left(1 + \frac{4h_i h_j}{S_{ij}^2}\right) & \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_j}{r_j}\right) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, μ 为磁导率, 约为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m, \mathbf{L}_{ij} 中对角元素表示导线单位长度自电感, 非对角元素表示导线单位长度互电感. 由 (1) 式可知, 导线相对位置会影响导线电感和电容参数.

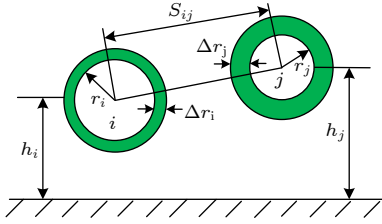


图 4 双导体传输线几何截面结构

Fig. 4. Cross-sectional geometry of double conductors.

当导体外层涂覆绝缘层材料时, 绝缘层材料的介电极化效应在电磁场作用下产生束缚电荷, 导体表面同时还分布有自由电荷. 绝缘层非均匀介质效应使得理想电容的计算公式不再适用, 即 $\mathbf{C} \neq \mu\epsilon\mathbf{L}^{-1}$. 基于镜像法原理, 单位长度导体电容参数计算公式如下 [18]:

$$\mathbf{C}_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^{-1}, \quad (2)$$

式中, a_{11} , a_{12} , a_{21} 和 a_{22} 分别为

$$\begin{cases} a_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{1}{r_i} + \epsilon_e \ln \frac{1}{r_i + \Delta r_i} - \ln \frac{1}{2h_i} \right), \\ a_{12} = a_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \left(1 + \frac{4h_i h_j}{S_{ij}^2} \right), \\ a_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{1}{r_j} + \epsilon_e \ln \frac{1}{r_j + \Delta r_j} - \ln \frac{1}{2h_j} \right), \end{cases} \quad (3)$$

其中, ϵ_0 为空气的介电常数, 约为 8.85×10^{-12} F/m. ϵ_r 为相对介电常数, $\epsilon_e = (\epsilon_r - 1)/\epsilon_r$.

对于包含 n 根理想无损导体的线束模型, 其传输线方程为

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & l_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, V_1, V_2, \dots, V_n 和 I_1, I_2, \dots, I_n 分别为单位长度导线上的电压和电流. 为了计算简化线束单位长度电容 C_{eq} 和电感 L_{eq} , 需满足以下近似:

1) 定义简化线束等效电流 I_{gc} 为原线束中 n 条导线的电流和

$$I_{gc} = I_1 + I_2 + \cdots + I_n; \quad (6)$$

2) 定义简化线束等效电压 V_{gc} 与原所有导线具有相同的电压

$$V_{gc} = V_1 = V_2 = \cdots = V_n; \quad (7)$$

3) 假设线束模型中所有导体上的电流分布相同, 则任意一根导线的共模电流 I_x 为

$$I_x = \frac{I_{gci}}{n}, \quad x = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

将 (7) 式代入传输线方程 $d\mathbf{I}/dz = -j\omega\mathbf{C}\mathbf{V}$ 并联立 (6) 式和 (8) 式得:

$$\frac{d}{dz} I_{gc} = -j\omega C_{eq} V_{gc}, \quad (9)$$

式中, $C_{eq} = \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n C_{qp}$, 为简化线束单位长度电容矩阵, 其中 p, q 为 n 根多导体编号.

此外, 将 (6) 式代入方程 $d\mathbf{V}/dz = -j\omega\mathbf{L}\mathbf{I}$ 并联立 (7) 式和 (8) 式得:

$$\frac{d}{dz} V_{gc} = -j\omega L_{eq} I_{gc}, \quad (10)$$

式中, $L_{eq} = \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{L_{pq}}{n^2}$, 为简化线束单位长度的电感矩阵.

需要注意的是本文提出的线束广义等效建模方法, 利用解析方法求解多导体单位长度分布参数时, 导线间距需满足宽间隔条件, 即相邻导线间的距离与导线半径之比不小于 4. 否则导体间的邻近效应会导致导体周向表面的电荷与电流分布不再均匀, 此时需要采用数值方法来获取分布参数.

3.2 简化线束几何截面结构参数的确立

(1) 不确定性捆扎建模

虽然线束内任意位置处导线相对位置具有不

确定性,但受限於线束两端连接器插件,它们的始端和终端是确定的.文献[19]研究表明线束内导体相对位置在长度方向上满足高斯分布特点,针对导线模型中不连续问题,采用随机样条插值法取得了良好效果.首先,利用MATLAB软件生成具有高斯分布特点的随机位置,如图5(a)所示.然后,通过样条插值法在其他位置插入更多的数值点,如图5(b)所示,从而将线束划分为一系列的均匀子段.需要注意的是,这些子线段长度需满足以下其一:1)每段长度 Δl 应小于最小波长 λ 的1/10,以确保最高频率波的空间分辨率;2)为保证线束连续性,样条线段应有足够多子段(不少于10个).利用上述两个标准所确定的较小子段,使用三次样条插值技术的分段多项式确立级联线段,如图5(c)所示.

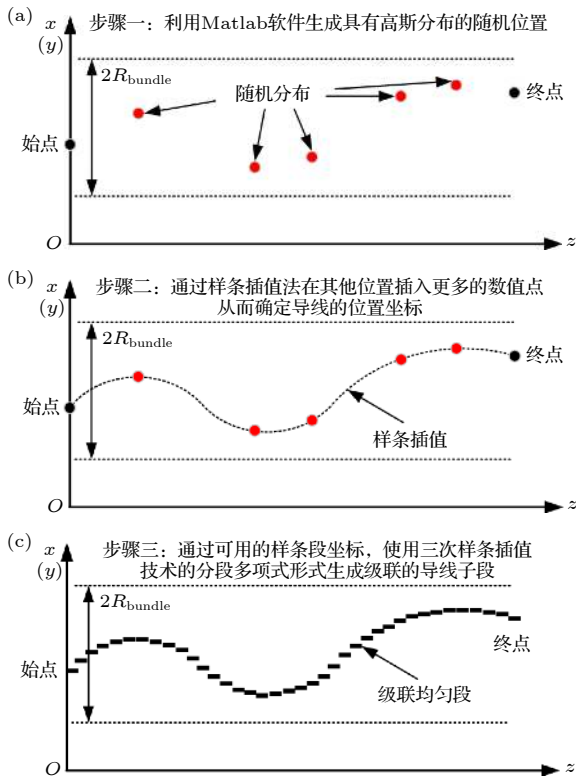


图5 不确定性线束建模步骤 (a)线束始端的确立;(b)基于样条插值法的线束位置;(c)分段级联
Fig. 5. Modeling steps for uncertainty cable harness: (a) Determination of the beginning end; (b) location of the cable harness based on spline interpolation; (c) sectional cascade.

由于线束内导线相对位置沿线长方向发生变化,线束电感和电容参数是非恒值,这些值采用有限元等数值方法可求得.然而,由于线束内有多根导体,需要多次求解计算模型,耗费时间长.因此

需要提出更有效的方法计算不确定性捆扎线束的传输参数.

本文研究模型中线束内所有导线线型相同,子段具有相互独立性,即所在横截面中任意导线的位置与该导线在其他段中横截面的位置互不影响.由于横截面的形状是固定的,导线只在每个分段连接点处于一个突变的位置,以9根捆扎线束为例,如图6所示.

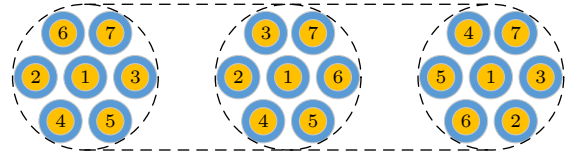


图6 线束内导线之间的换位示意图

Fig. 6. A schematic diagram of transposition between conductors in the cable harness.

取其中相邻的几段线束,子段1变为子段2时,3号导线和6号导线的位置相互变换;子段2变成子段3时,2号导线和5号导线的位置相互变换.从线束电感和电容参数矩阵的角度来看,参数矩阵没有产生新元素,只是元素相对位置发生改变.以电容参数矩阵变换为例,其变换公式如下:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} & C_{17} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} & C_{27} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} & C_{37} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} & C_{47} \\ & & & & C_{55} & C_{56} & C_{57} \\ & & & & & C_{66} & C_{67} \\ & & & & & & C_{77} \end{bmatrix} \\
 & \Downarrow \\
 & \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} & C_{14} & C_{15} & C_{13} & C_{17} \\ & C_{22} & C_{26} & C_{24} & C_{25} & C_{23} & C_{27} \\ & & C_{66} & C_{64} & C_{65} & C_{63} & C_{67} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{43} & C_{47} \\ & & & & C_{55} & C_{53} & C_{57} \\ & & & & & C_{33} & C_{37} \\ & & & & & & C_{77} \end{bmatrix} \\
 & \Downarrow \\
 & \begin{bmatrix} C_{11} & C_{15} & C_{16} & C_{14} & C_{12} & C_{13} & C_{17} \\ & C_{55} & C_{56} & C_{54} & C_{55} & C_{53} & C_{57} \\ & & C_{66} & C_{64} & C_{62} & C_{63} & C_{67} \\ & & & C_{44} & C_{42} & C_{43} & C_{47} \\ & & & & C_{22} & C_{23} & C_{27} \\ & & & & & C_{33} & C_{37} \\ & & & & & & C_{77} \end{bmatrix}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

由(1)式—(3)式可知,线束不同位置处的单位长度电容矩阵可以根据已知的单位长度电感和电容矩阵获得,这样只需执行一次分布参数矩阵的计算即可.

(2) 简化导线半径和对地高度

根据简化线束的单位长度电感 L_{eq} 和电容 C_{eq} , 确立简化线束的几何截面结构, 即简化线束半径 r 和对地高度 h .

简化线束半径: 计算简化导线的半径 r_{eq} , 根据 (1) 式理想导电平面上不确定性捆扎线束简化导体自感计算表达式, 则等效导线的半径 r_{eq} 为

$$r_{eq} = 2h_i / e^{2\pi L_{eq}/\mu}. \quad (12)$$

简化线束对地高度: 不确定性捆扎线束的等效导线距离参考地面高度 h_i , 为捆扎线束任意截面 n 根线束对地高度的平均值, 即

$$h_i = (h_1 + h_2 + \cdots + h_n) / n, \quad (13)$$

式中, d_1, d_2, \cdots, d_n 为线束中各导线对地高度.

3.3 简化线束模型终端负载的确立

由于共模干扰是线缆电磁干扰的主要因素, 在确立简化线束的终端负载时, 本文主要考虑线束的共模负载, 即导线终端与参考地之间的阻抗 (如图 7 所示), 由 n 根导线组成的共模负载模型.

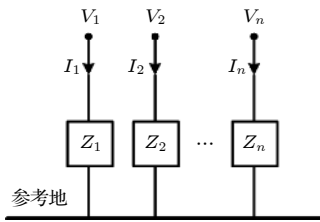


图 7 共模负载的确立

Fig. 7. Determination of the common mode load impedance.

图 7 中简化线束模型的共模负载计算公式为

$$I_{gc} = \frac{V_{gc}}{Z_{gc}} = \frac{V_1}{Z_1} + \frac{V_2}{Z_2} + \cdots + \frac{V_n}{Z_n} \\ = V_{gc} \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \cdots + \frac{1}{Z_n} \right), \quad (14)$$

则

$$Z_{gc} = 1 / \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \cdots + \frac{1}{Z_n} \right). \quad (15)$$

由 (15) 式可得, 简化线束的共模负载阻抗值等于全线束中所有导线终端共模负载的并联值.

4 数值算例验证

4.1 圆弧不确定性捆扎线束

本文采用电磁仿真软件 CST (Cable Studio 工作室) 对本文方法进行验证, 利用 CST 全波仿真方法求解计算平面波照射下圆弧不确定捆扎线束等效前后的电磁耦合效应大小. 如图 8 所示, 在 CST 中建立 21 根多导体不确定性捆扎线束模型, 线束中所有导体长度为 $3/4$ 个半径为 $R = 825$ mm 的圆弧; 芯线具有相同的半径 $r = 0.2$ mm, 绝缘层厚度为 1 mm, 绝缘层介电常数为 2.5, 相对磁导率为 1.0. 中间一排导线 (编号 2, 6, 11, 16, 20) 距离地面高度 60 mm. 参考地面为长 4000 mm, 宽 4000 mm, 厚 2 mm 的 PEC 良导体. 平面波入射方向沿 y 方向平行于参考地面, 采用线极化方式, 电场方向沿 x 方向, 幅值为 50000 V/m, 干扰源波形为 CST 默认脉冲激励源. 线束负载阻抗均为 50Ω . 图 8 中编号为 1—21 的导线近端端点坐标如表 1 所列.

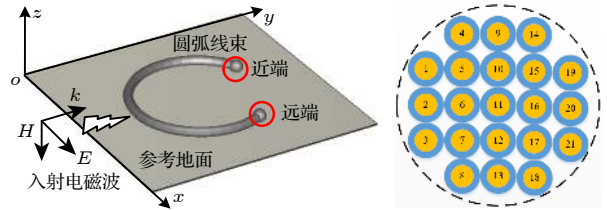


图 8 平面波照射下 21 根圆弧捆扎线束模型示意图

Fig. 8. Schematic diagram of a 21-conductor circular arc-shaped binding cable harness model illuminated by the plane wave.

使用高斯分布和样条插值法获取不确定性捆扎线束内 21 根导线的位置. 首先, 通过线束两端

表 1 直角坐标系中 21-线束模型近端位置 (单位: mm)

Table 1. Coordinates of each conductor near end of the 21-conductor cable harness (unit: mm).

导线编号	1	2	3	4	5	6	7
坐标 x, y	-8, 4	-8, 0	-8, -4	-4, 8	-4, 4	-4, 0	-4, -4
导线编号	8	9	10	11	12	13	14
坐标 x, y	-4, -8	0, 4	0, 4	0, 0	0, -4	0, -8	4, 8
导线编号	15	16	17	18	19	20	21
坐标 x, y	4, 4	4, 0	4, -4	4, -8	8, 4	8, 0	8, -4

位置确立弧形线束的始端坐标, 确立捆扎线束初始位置处电容矩阵 $C(z)$ 和电感矩阵 $L(z)$. 然后, 在 MATLAB 中使用高斯分布函数建立每根导线中心位置的随机坐标. 开始时, 在线长方向上依次将所有导线的 N 个截面在参考位置处进行填充, 从而建立不确定性捆扎线束模型.

基于简化线束单位长度电感和电容矩阵计算结果, 根据简化线束几何截面参数建立方法可以得到简化导体半径为 4 mm, 绝缘层厚度 1 mm, 对地高度为 60 mm. 根据本文提出的不确定性捆扎线束广义 ECBM 方法, 简化线束模型耦合电流值等于其全模型内各导线耦合电流之和, 21 根不确定性捆扎线束模型等效前后近端和远端负载上耦合电流对比曲线如图 9(a) 和图 9(b) 所示.

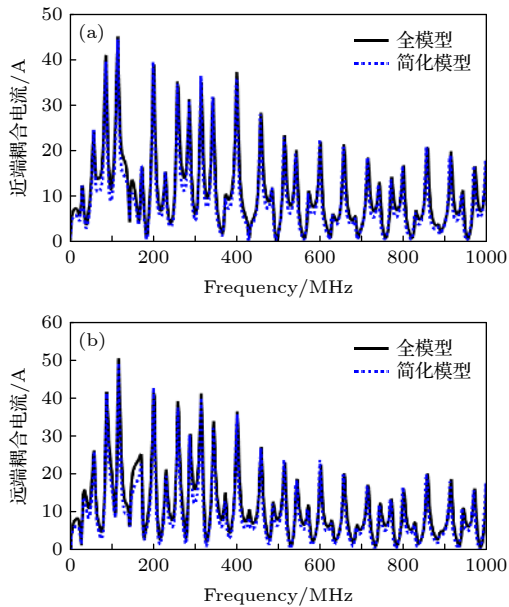


图 9 圆弧不确定性捆扎线束简化前后负载耦合电流对比 (a) 近端; (b) 远端

Fig. 9. Comparison of the load coupling current on the circular arc-shaped binding cable harness: (a) Near end; (b) far end.

从仿真结果看, 在 0—1 GHz 频段内, 不确定性捆扎线束简化模型近端和远端负载耦合电流与其全模型耦合电流符合良好, 从而验证了本文提出的广义 ECBM 方法的正确性.

4.2 正弦不确定性捆扎线束

不确定性捆扎线束布线路径呈正弦弧形, 如图 10 所示. 弧形路径满足函数 $f(t) = 500 \sin\left(\frac{\pi t}{1000}\right)$ mm, 其中 t 为线束长度方向位置坐标, 取值范围

为 (0, 2000 mm). 线束内导线参数不变, 中间一排导线 (编号 2, 6, 11, 16, 20) 距离地面高度 40 mm. 外部电磁环境为平面波, 幅值和入射方向与图 8 中保持一致.

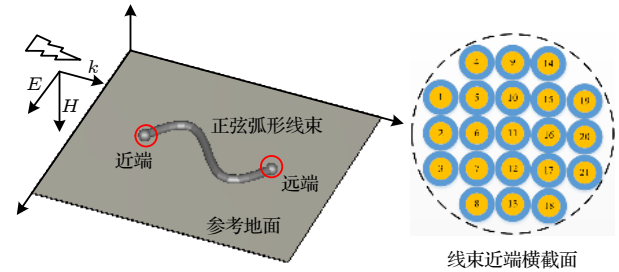


图 10 平面波照射下 21 根正弦弧形不确定性捆扎线束模型

Fig. 10. Schematic diagram of a 21-conductor sine arc-shaped binding cable harness model illuminated by the plane wave.

根据本文提出的不确定性捆扎线束广义 ECBM 方法, 21 根正弦弧形线束模型简化前后近端和远端负载上耦合电流对比曲线如图 11(a) 和图 11(b) 所示. 从仿真结果看, 在 0—1 GHz 频段内, 不确定性捆扎线束简化模型近端和远端负载耦合电流与其全模型耦合电流符合良好, 再次验证了本文提出的广义 ECBM 方法的正确性.

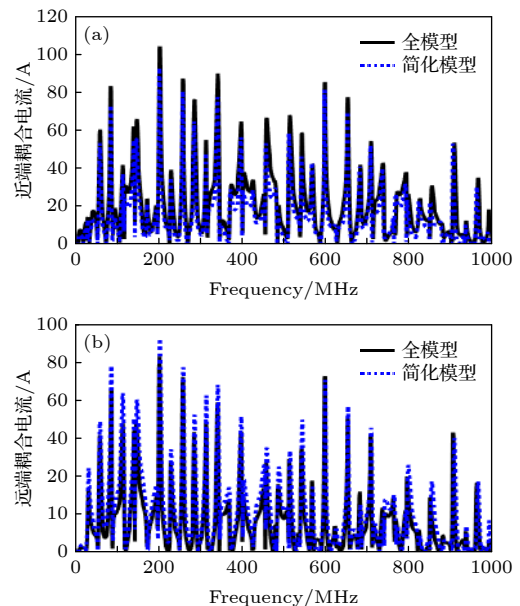


图 11 正弦不确定性捆扎线束简化前后负载耦合电流对比 (a) 近端; (b) 远端

Fig. 11. Comparison of the load coupling current on the sine arc-shaped binding cable harness: (a) Near end; (b) far end.

4.3 误差分析

本文采用特征选择验证技术 (FSV), 对完整模型和简化模型之间的仿真结果进行评价^[20,21]. FSV 技术根据特定标准显示了两组数据之间相关性. FSV 技术评价指标主要包括: 总幅差测度 (ADM_{tot})、总特征差测度 (FDM_{tot}) 和总全局差测度 (GDM_{tot}). 根据 ADM_{tot} , FDM_{tot} 和 GDM_{tot} 大小对数据间符合程度划分等级描述: excellent (0—0.1), very good (0.1—0.2), good (0.2—0.4), fair (0.4—0.8), poor (0.8—1.6) 和 very poor (> 1.6).

表 2 列出了图 9 和图 11 仿真结果的 FSV 技术评价结果. 从表 2 可以看出, 圆弧和正弦捆扎线束等效前后对比结果评价良好, 进一步说明了本文方法的有效性.

表 2 本文方法的 FSV 评价结果

Table 2. The FSV evaluation results of the proposed method.

线束终端	FSV		
	ADM_{tot}	FDM_{tot}	GDM_{tot}
圆弧线束	近端 0.265/good	0.181/very good	0.317/good
	远端 0.289/good	0.200/very good	0.345/good
正弦线束	近端 0.313/good	0.172/very good	0.376/good
	远端 0.290/good	0.157/very good	0.350/good

4.4 计算效率对比

表 3 列出了在相同仿真频段范围内本文广义 ECBM 方法和全模型线束仿真计算时间. 仿真中使用的计算机配置为: 处理器 Inter(R) Core(TM) CPU i7-8700 @ 3.20 GHz, 内存 8 G, 操作系统为 Win 10 64 位. 从表 3 可以看出, 本文提出的不确定性捆扎线束广义 ECBM 方法大大降低了线束建模难度, 有效提高了仿真效率.

表 3 全模型和简化模型仿真时间分析

Table 3. Analysis time of the simplified and complete model.

模型	圆弧全模型	圆弧简化模型	正弦全模型	正弦简化模型
计算时间/s	3222	420	2919	336

5 结束语

针对机电系统复杂线束电磁耦合效应建模问题, 本文提出了广义 ECBM 方法, 将不确定性捆扎线束模型简化为单根线束模型, 考虑了线束内导

线位置的不确定性. 利用高斯分布和样条插值获取了不确定性捆扎线束内导线的位置, 利用导线子段之间存在换位关系求得线束的分布参数. 基于理想导体平面上的多导体传输线电感和电容计算公式, 得到了原线束模型的分布参数. 由全模型与等效模型分布参数间的等价关系, 得到等效线束模型的电感和电容参数, 并依此确立了简化模型的半径和对地高度等几何截面参数. 最后, 通过圆弧和正弦不确定性捆扎线束数值算例, 验证了本文提出的线束简化建模方法的正确性. 在保证计算精度的前提下, 本文方法有效解决了复杂线束由于“不确定性捆扎”带来的建模难问题, 为机电系统内不确定性捆扎线束的电磁兼容问题分析提供了有效途径.

参考文献

- [1] Ren D, Du P A, Nie B L, Cao Z, Liu W Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 120701 (in Chinese) [任丹, 杜平安, 聂宝林, 曹钟, 刘文奎 2014 *物理学报* **63** 120701]
- [2] Cao Z, Du P A, Nie B L, Ren D, Zhang Q D 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 124102 (in Chinese) [曹钟, 杜平安, 聂宝林, 任丹, 张其道 2014 *物理学报* **63** 124102]
- [3] Ye Z H, Zhang J, Zhou J J, Gou D 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 060701 (in Chinese) [叶志红, 张杰, 周健健, 苟丹 2020 *物理学报* **69** 060701]
- [4] Wu Z J, Wang L F, Liao C L 2009 *Acta Phys. Sin.* **59** 6146 (in Chinese) [吴振军, 王丽芳, 廖承林 2009 *物理学报* **59** 6146]
- [5] Sun Y X, Zhuo Q K, Jiang Q H, Li Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 044102 (in Chinese) [孙亚秀, 卓庆坤, 姜庆辉, 李千 2015 *物理学报* **64** 044102]
- [6] Wang H L, Wu Q, Meng F Y, Li Y W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2608 (in Chinese) [王海龙, 吴群, 孟繁义, 李乐伟 2007 *物理学报* **56** 2608]
- [7] Andrieu G, Kone L, Bocquet F 2008 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **50** 175
- [8] Andrieu G, Reineix A, Bunlon M 2009 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **51** 108
- [9] Andrieu G, Reineix A 2013 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **55** 798
- [10] Schetelig B, Kechie J, Kanyou R 2010 *Adv. Radio Sci.* **8** 211
- [11] Li Z, Shao Z J, Ding J 2011 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **53** 1040
- [12] Li Z, Liu L L, Ding J 2012 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **54** 940
- [13] Li Z, Liu L L, Yan J 2013 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **55** 975
- [14] Wang Q D, Zheng Y L, Liu Q S, Zeng X, Yu J H 2012 *Transactions of China Electrotechnical Society* **7** 160 (in Chinese) [汪泉弟, 郑亚利, 刘青松, 曾铨, 俞集辉 2012 *电工技术学报* **7** 160]
- [15] Gao Y H, An Z Y, Wang J X 2015 *J. Jilin Univ.* **45** 946 (in Chinese) [高印寒, 安占扬, 王举贤 2015 *吉林大学学报* **45** 946]
- [16] Wang T H, Gao Y H, Gao L 2017 *J. Jilin Univ.* **47** 392 (in Chinese) [王天皓, 高印寒, 高乐 2017 *吉林大学学报* **47** 392]
- [17] Paul C R 2008 *Analysis of Multiconductor Transmission*

Lines (New Jersey: John Wiley & Sons)

- [18] Gao Y H, Wang R Z, Ma Y G, Wang Y Y, Yang K Y 2011 *J. Jilin Univ.* **19** 1088 (in Chinese) [高印寒, 王瑞宝, 马玉刚, 王莹莹, 杨开宇 2011 吉林大学学报 **19** 1088]
 [19] Sun S, Liu G, Drewniak J L 2007 *IEEE Trans. Electromagn.*

Compat. **49** 708

- [20] Duffy A P, Martin A J M, Orlandi A, Antonini G 2006 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **48** 449
 [21] Orlandi A, Duffy A P, Archambeault B, Antonini G 2006 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **48** 460

A generalized simplified modeling method for electromagnetic coupling effects of uncertainty strapping cable harness*

Xiao Pei¹⁾ Li Jia-Wei¹⁾ He Jia-Gang¹⁾ Li Jin-Xin²⁾

Liu Zhu¹⁾ Li Gao-Sheng^{1)†}

1) (College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

2) (College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

(Received 16 October 2020; revised manuscript received 18 December 2020)

Abstract

The cable harness provides a main gateway for electromagnetic interference(EMI) in electromechanical system. The unreasonable electromagnetic compatibility (EMC) design of cable harness will produce EMI to other on-board electronic equipment, bringing great safety risks to the system. Theoretical research and engineering practice indicate that most of the electromechanical systems cannot satisfy EMC standards, which can be attributed to the EMI generated by cables. As for the electromagnetic(EM) illumination analysis, reliably and efficiently generating a full numerical model of cable harness is becoming more prominent for the EMC designers. Therefore, it is necessary to develop a more effective method to solve the modeling problem of cable harness.

In the practical application, the cable harness has the characteristics of spatial layout, and its characteristics such as “large number of core wires”, “arbitrary curvature of space” and “randomness of wiring” bring challenges to the modeling of EM coupling to cable harness. The numerical simulation of the whole cable harness model requires severe conditions for computational resource and even makes the EM coupling analysis impossible. Thus, considering the uncertainty of wire position, this paper proposes a generalized simplified modeling method for the EM coupling effect of uncertainty strapping cable harness. Firstly, the Gaussian distribution and spline interpolation are used to determine the location of the core conductors in the random bundling. Then, the distribution parameters of the cable harness at different positions are established by using the transposition relationship between the subsegments of the wires. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by numerical examples of the arc-shaped and sine-shaped harness.

In conclusion, this paper proposes a generalized simplification technique to model the EM illumination on cable harness with uncertainty wiring factors. By grouping the conductors together, the required computation time is markedly reduced and the complexity of modeling the completely cable harness is significantly simplified within a good accuracy. The proposed method provides a way of solving the modeling problem caused by “uncertainty strapping” of the complex wiring harnesses in electromechanical systems.

Keywords: cable harness, electromagnetic coupling, uncertainty strapping, generalized simplified modeling method

PACS: 07.05.Tp, 41.20.Jb, 41.90.+e

DOI: 10.7498/aps.70.20201723

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51675086) and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2020M672482).

† Corresponding author. E-mail: gaosheng7070@vip.163.com