



·高功率微波技术·

基于图像识别技术的随机线缆束建模及分布参数统计分析*

戎帆¹, 钟龙权², 刘强³, 闫丽萍¹, 赵翔¹

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900;
3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 提出了一种对实际弯曲随机捆扎线束的建模方法, 该方法首先基于图像识别技术, 使用实际线束在侧视和俯视方向的两幅照片来实现弯曲线束轴心三维坐标的重建, 然后再基于随机转移路径方法实现弯曲线束的捆扎随机性。基于该建模方法, 通过蒙特卡洛模拟来分析弯曲随机线束分布参数的统计特征, 发现自电感、互电感和互电容均值沿线变化趋势与线束高度变化趋势一致, 自电容均值则趋势相反; 自电容、自电感和互电感的变异系数与线束高度存在负相关特征; 捆扎随机性不会改变自电感和自电容均值, 但是会降低互电容与互电感均值。

关键词: 线束; 随机; 图像识别; 分布参数

中图分类号: TM152

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210007

Modeling and statistical analysis of distribution parameters of random cable bundles based on image recognition technology

Rong Fan¹, Zhong Longquan², Liu Qiang³, Yan Liping¹, Zhao Xiang¹

(1. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

3. Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: In this paper, a modeling method of actual bending random bundled wire harness is proposed. Firstly, based on image recognition technology, the three-dimensional coordinates of bending wire harness axis are reconstructed by using two photos of actual wire harness in side view and top view; then the random bundled wire harness is realized based on random transfer path method. Based on this modeling method, this paper analyzes the statistical characteristics of distribution parameters of bending random wire harness by Monte Carlo simulation, and finds that the variation trend of self inductance, mutual inductance and mutual capacitance along the line is consistent with the variation trend of wire harness height, while the trend of self capacitance is opposite; the coefficient of variation of self capacitance, self inductance and mutual inductance has negative correlation with wire harness height; the bundling randomness is not obvious. It will change the mean value of self inductance and self capacitance, but reduce the mean value of mutual capacitance and mutual inductance.

Key words: wire-bundles; random; image recognition; distributed parameter

传输线是传输电磁信息及能量的重要媒介, 在舰船、航空和铁路等系统中广泛使用。随着现代电子设备集成化程度的提高, 大量传输线被安放在有限设备空间中。它们被随机捆扎在一起, 相互缠绕, 使设备系统内的电磁环境变得复杂, 极易产生电磁干扰, 影响设备的正常工作。因此, 在对包含随机捆扎线缆束(后文简称线束)的电磁兼容和电磁环境效应问题进行分析时, 需要考虑如何进行建模以及统计分析。

* 收稿日期: 2021-01-05; 修订日期: 2021-03-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61877041)

作者简介: 戎帆(1994—), 男, 硕士, 主要从事电磁兼容方面的研究工作。

通信作者: 赵翔(1973—), 女, 博士, 主要从事电磁效应评估与电磁兼容方面的研究工作。

针对随机线束问题, 1995年 Ciccolella 等将线束分成 N 个级联的小段, 假设每一段的横截面形状包络固定, 通过对传输线中各导线位置的随机分配, 实现了对线束随机化模型的建立^[1]。1999年 Salio 等在对随机线束的建模中使用了随机中点位移法 (RMD), 该方法基于分形理论^[2], 不断提取线的中点及各段中点, 使其高度随机, 从而使线束随机化, 计算线束在串扰问题中的电磁参数^[3-4]。2007年 Sun 等将线束逐段进行位置随机化, 并通过加入三次样条插值算法提高线束相邻横截面的连续性与线束的平滑性, 这种方法被称作随机位移样条插值算法 (RDSI)^[5]。2011年 Bellan 等在模拟随机捆扎线束结构时, 指出增加对线束的分段数可以显著提高线束的随机性, 并且在松散捆扎的情形下横截面形状不再是固定的圆形而是伪圆形^[6]。2012年 Spadacini 等针对相邻子段横截面上各导线位置相互转移的随机化策略, 提出导线换位应遵循最小转移准则并给出了几种转移路径示例^[7]。在国内, 2008年马喜来采用模糊推理的方法, 处理车内导线布置的随机性带来的导线间距不确定性, 以便分析串扰^[8]。2011年王瑞宝在汽车线束的串扰研究中, 在导线对地高度和相互间距变化时, 通过基于泰勒级数的解析法计算串扰特性^[9]。2014年高印寒等在对汽车串扰的研究中通过镜像法计算线束等效模型的分布参数, 用统计学的方法获得传输线中导线相对位置改变和线束距地高度改变时线束动态串扰的统计特性^[10]。2017年张昭等假设线束横截面形状固定, 进而通过随机化分布参数矩阵和蒙特卡洛模拟来预测串扰的统计特征; 同时认为线束布线时要考虑松弛布线情况, 即线束不在绷直的状态, 因为实际中线束的几何结构容易受重力等外力的影响而发生改变^[11]。2020年 Huang 等人在对线束逐段随机化时, 通过将每子段线束中的导线随机旋转角度来打乱线束中导线的位置, 进而将整个线束完成随机化建模^[12]。

上述研究主要涉及两种线束随机化建模方法, 一种是如 RMD 或 RDSI 方法中通过沿线随机扰动线束横截面位置来实现对线束弯曲的随机化, 另一种是将平直线束中各导线的相对位置沿线进行随机互换。这两种随机化策略均基于人们的主观假定, 某些情形下是合理的。然而, 当待分析线束是客观存在的实际线束时, 一方面线束轮廓的弯曲情况其实是确定的, 而另一方面线束捆扎的情况却是难以完全确定的。为此, 本文提出一套对实际弯曲且随机捆扎线束的建模方法, 借助该建模方法, 模拟产生大量的弯曲随机线束样本, 并对它们的分布参数进行蒙特卡洛模拟和统计分析, 因为分布参数的统计特征从根本上决定了弯曲随机线束的电磁耦合(包括浪涌、串扰、场线耦合等)特征。

1 随机线束的建模

1.1 基于图像识别技术的线束轴心三维坐标重建

以 7 芯线束为例, 采用图像识别技术, 用线束的侧视和俯视 2 幅照片(参见图 1 左列)来获取线束在 2 个彼此正交的二维平面的投影坐标, 从而构建线束轴心的三维坐标。具体步骤为:

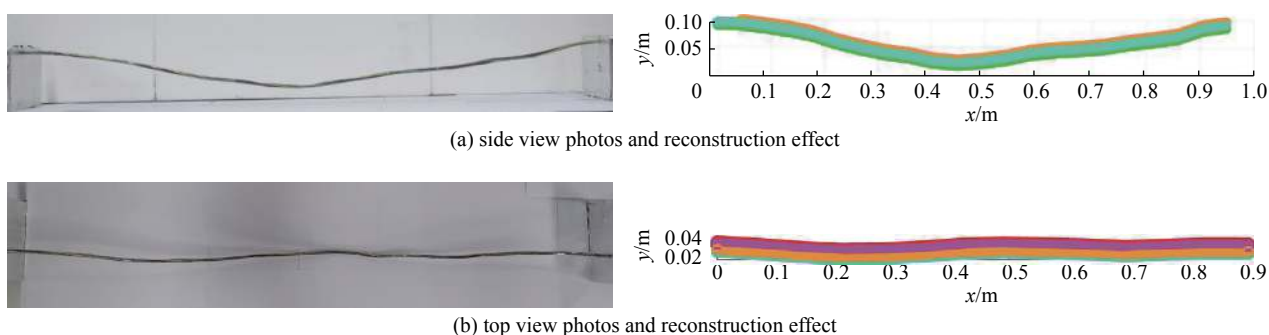


Fig. 1 Wiring harness photos and modeling drawings

图 1 线束照片与建模效果图

- (1) 进行照片图像的预处理, 分割裁剪照片上的多余部分(图像只保留线束和已知规格的工作台)。
- (2) 将预处理后的图像导入到图像识别程序中进行读取, 通过图像滤波, 消除图像上的多余背景噪声。
- (3) 对去噪图像进行边缘检测。
- (4) 以工作台作为参考尺寸(95 mm×10 mm×10 mm), 将边缘检测得到的线束在图像中的像素位置, 映射为线束在二维平面上的实际投影坐标。
- (5) 通过对应点相互匹配, 将线束在 2 个二维平面上的投影坐标对应, 从而构建线束的三维轴心坐标。

其中在步骤(2)中, 比较常用的图像滤波算法有均值滤波法和中值滤波法, 本文通过采用中值滤波法得到了更

好的图像边缘信息；在步骤(3)中, Roberts, Sobel 和 Canny 等边缘检测算子都能检测图像边缘^[13-14], 分别使用几种算子后发现 Canny 算子检测的效果最好, 因此选择使用 Canny 算子得到线束的轮廓信息。

根据上述步骤, 本文重建的示例线束三维结构如图 1 右列(侧视和俯视)和图 2(斜视)所示。可以看出, 线束照片与三维模型对应的视图具有较好的一致性, 说明了本文方法的有效性。

本文构建了 7 芯线紧密排列的线束模型, 如实呈现了线束因自身不够平直且处于重力作用下而导致的弯曲, 此时的线束是弯曲未随机的状态。

1.2 基于随机转移路径的线束随机化处理

在线束弯曲未随机状态的基础上, 对由随机捆扎带来的随机性进行建模。首先假设传输线被捆扎呈紧密排列状, 其横截面可能会近似呈圆形(以 7 芯线束为例, 设置线束的横截面如图 3 所示), 其中 a_i 是导线半径, S_{ij} 是第 i, j 号导线之间的间距, h_i 是第 i 号导线的离地高度。

先将传输线分成 K 段, 相邻每一段通过随机过程级联。第 k 个截面上各导线的位置由第 $k-1$ 个截面上各导线位置通过随机转移路径得到。考虑到线束沿轴向变化固有的连续性, 相邻横截面的导线位置改变具有相关性^[6]。以图 3 中第 2 号线为例, 该线在当前截面只能保持原位(同上一个截面)或者移动到相邻位置(1 号、3 号或者 5 号位置)。相邻两个横截面之间导线的所有转移路径能够通过求解图论完全问题来得到^[15-16]。本文通过随机选取转移路径, 实现对弯曲线束的随机化处理。图 4 给出了一组弯曲随机线束样本的建模效果图。

2 分布参数的计算与统计分析

2.1 分布参数计算与验证

无耗多导体传输线的分布参数主要由单位长度电容矩阵 $[C]$ 和电感矩阵 $[L]$ 组成。通过镜像法并结合相关电磁场理论^[17-18], 得到理想导体平面上多导体传输线分布参数的计算公式^[19-20]

$$\begin{cases} [C] = \epsilon[F]^{-1} \\ [L] = \mu[F] \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϵ 和 μ 为导体周围介质的介电常数和磁导率。

$$[F] = \frac{1}{2\pi} \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1N} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{N1} & f_{N2} & \cdots & f_{NN} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$f_{ij} = \begin{cases} \ln \frac{2h_i}{a_i} (i = j) \\ \ln \frac{s'_{ij}}{s_{ij}} (i \neq j) \end{cases} \quad (3)$$

式中: s'_{ij} 是第 i 号导线与第 j 号导线镜像的间距; N 是导线的数目。

本文根据上述公式, 对于横截面如图 3 所示的 7 芯线束进行计算, 其中 1 号导线中心距地面高度为 97.96 mm,

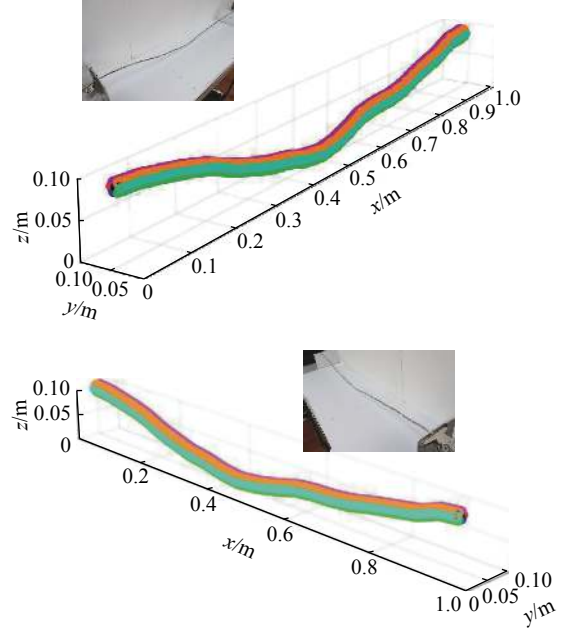


Fig. 2 Squint photos and modeling drawings

图 2 线束斜视照片与建模效果图

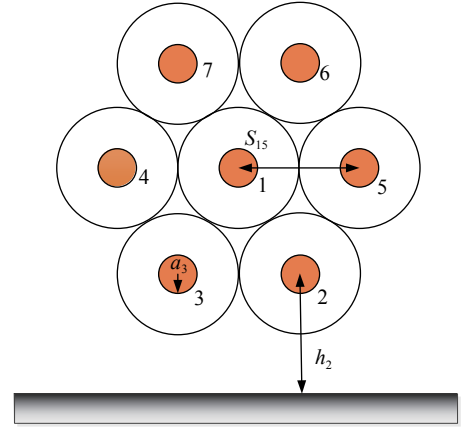


Fig. 3 Schematic diagram of wire harness cross section

图 3 线束横截面示意图

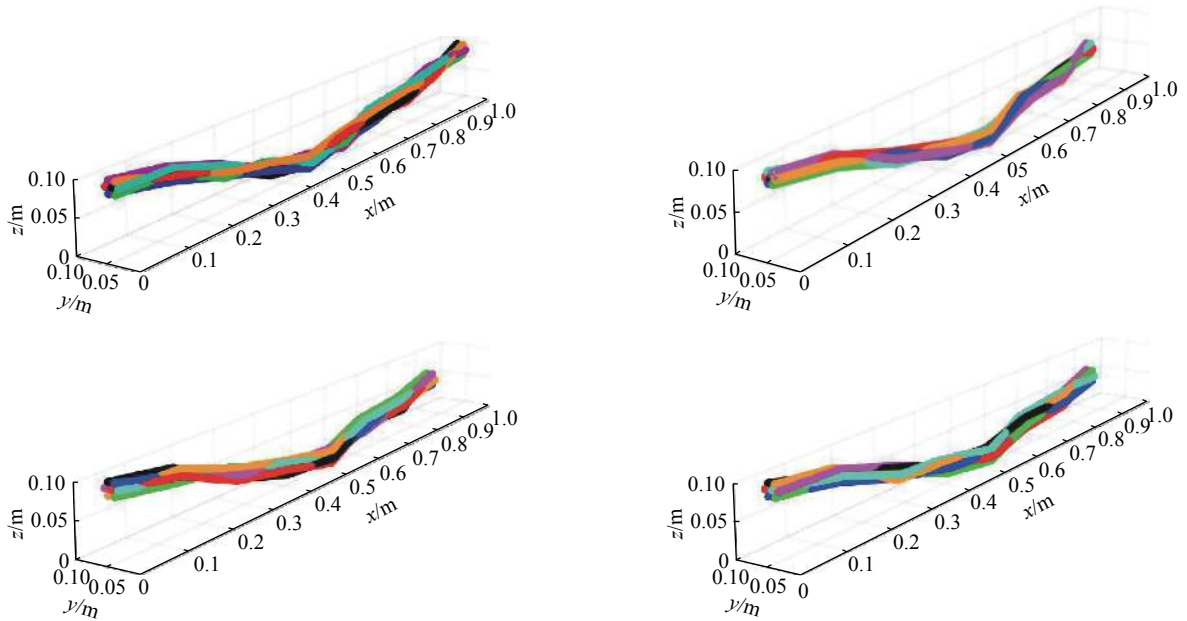


Fig. 4 Modeling effect picture of a group of bending random harness samples

图 4 一组弯曲随机线束样本建模效果图

相邻导线中心间距 10 mm, 导线半径 0.4 mm。图 5 给出了式(1)计算和商业软件计算的结果对比, 两者吻合良好, 由此可以确定本文线束分布参数计算结果的正确性。

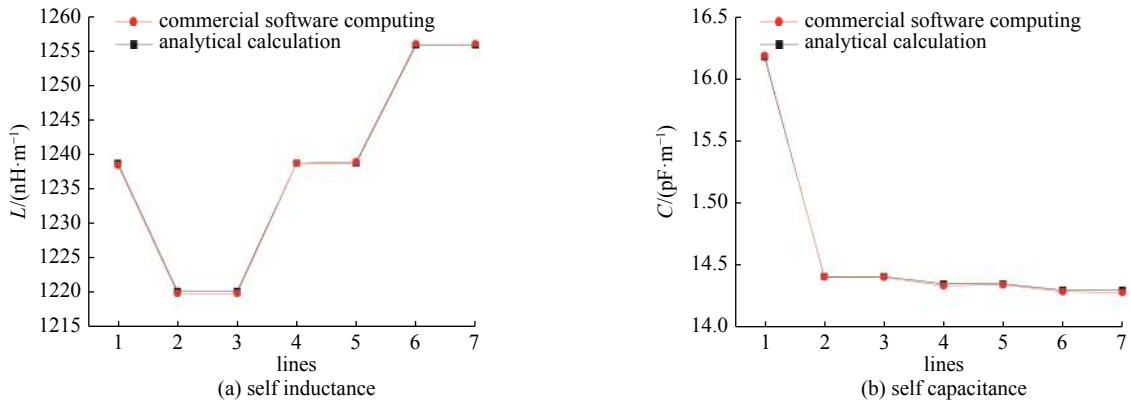


Fig. 5 The comparison between the results of distribution parameter calculation and commercial software in this paper

图 5 本文分布参数计算与商业软件结果对比图

2.2 分布参数统计分析

采用蒙特卡罗模拟对弯曲随机线束(参见图 4)的分布参数进行统计分析, 取弯曲未随机(参见图 2 右列)和平直随机(一组平直随机线束样本建模效果如图 6 所示, 其线束中心距地高度恒定, 取为弯曲线束中心高度的沿线平均值 62.4 mm)两种情况将作为参照组进行对比。在蒙特卡罗模拟中, 进行 10 000 次抽样, 即产生 10 000 个随机线束样本, 计算所有样本的分布参数然后进行统计分析。

图 7 给出了弯曲未随机线束分布参数的沿线变化。由于互电容数值为负值, 所以取其绝对值来做比较。由图 7 可知, 弯曲未随机线束各导线电感值(包括图 7(a)自电感、图 7(c)互电感)和图 7(d)互电容绝对值的沿线变化趋势均与线束高度变化趋势一致, 图 7(b)自电容值的沿线变化趋势则相反; 不同导线中距地越高的导线电感值越大, 其中高度相同则自电感相同; 除了中心导线外的其他导线高度越高自电容越小。注意到, 图 7(a)中 7 根导线的自电感(代数)平均值 \bar{L} 和高度居中的第 1, 4 和 5 号线的自电感值几乎相等。这是因为这 3 条导线的高度显然等于所有导线高度的代数平均值 \bar{h} , 而通过式(1)、式(2)和式(3)可以得到 $\bar{L} = (\mu/2\pi)\ln(2\hat{h}/a)$, 其中 \hat{h} 为所有导线高度的几何平均值, 由均值不等式可知 $\hat{h} \leq \bar{h}$, 同时由于各导线高度差异很小, 所以 \hat{h} 和 \bar{h} 非常接近, 因此 \bar{L} 略微小于第 1, 4 和 5 号线的自电感值。同样, 图 7(c)中互电感和图 7(d)中的互电容绝对值也呈现出类似的情况。

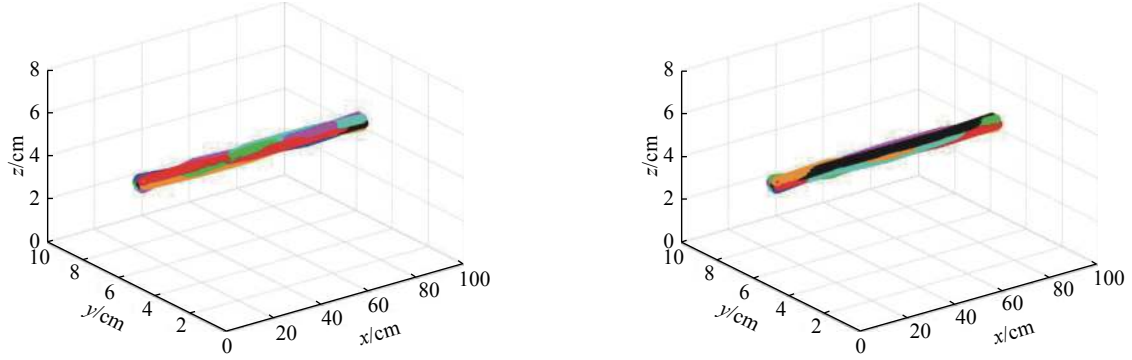


Fig. 6 Modeling effect picture of a group of straight random harness samples

图 6 一组平直随机线缆束样本建模效果图

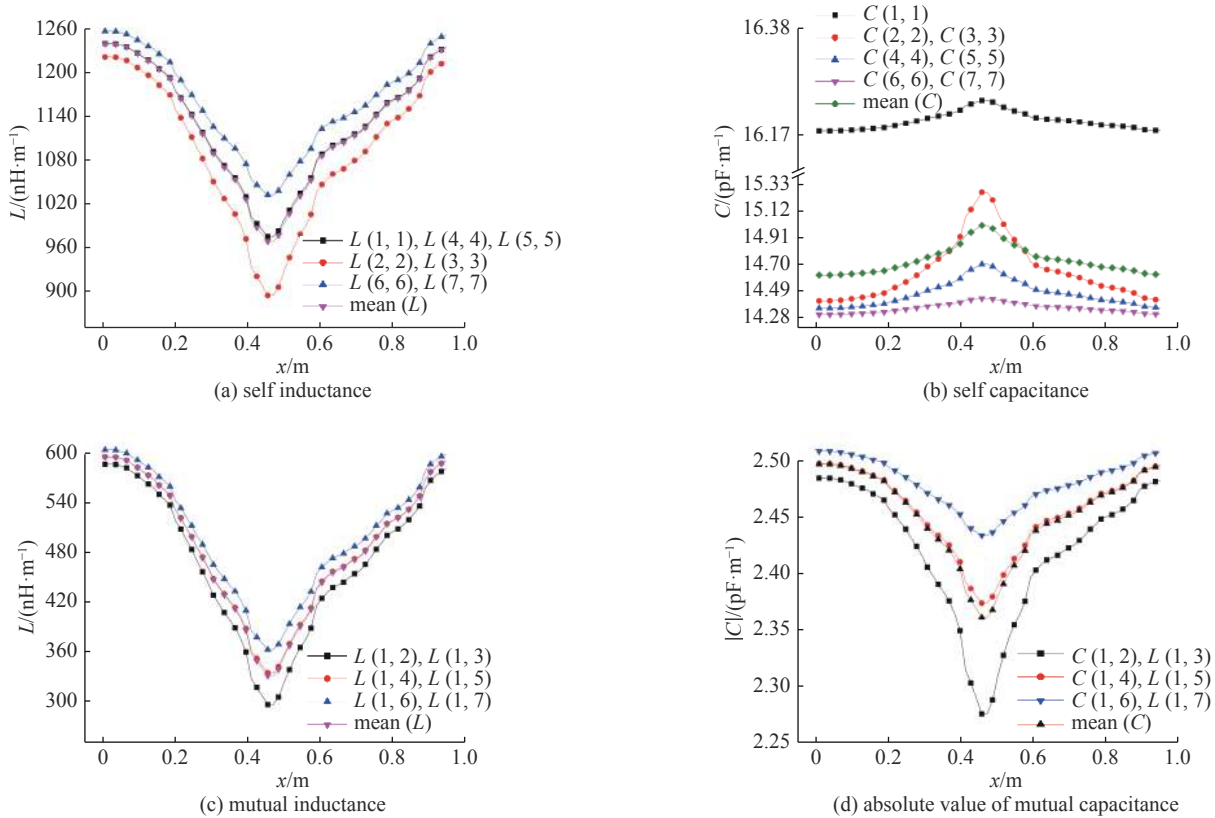


Fig. 7 Variation of distribution parameters of bending non random wire harness along the line

图 7 弯曲非随机线缆束分布参数的沿线变化

图 8 给出了平直随机线束分布参数均值的沿线变化,以图 8(a) 自电感为例,图中的 $L(i,i)(i=1, \dots, 7)$ 代表 10 000 个样本的 i 号导线自电感的样本均值,而 $\text{mean}(L)$ 则代表 7 根导线对应的 7 个自电感均值 $L(i,i)(i=1, \dots, 7)$ 的平均;图 8(a) 中的下部则给出了 $L(i,i)(i=1, \dots, 7)$ 的变异系数 C_i , 变异系数是用标准差除以均值而得,没有量纲。本文使用变异系数而不是标准差来度量数据的离散程度,以便于不同物理量和不同数据尺度的横向比较。由图 8 可知,对于距地高度不变的平直随机线束,其各导线的分布参数样本均值虽然各不相同且沿线变化,但它们的均值却沿线均匀(如自电感和自电容)或接近均匀(如互电感和互电容),同时对应的变异系数都很小,变异系数最大值从小到大依次为:自电感 $0.035\% <$ 自电容 $0.09\% <$ 互电感 $0.25\% <$ 互电容 1.2% 。因此导线间的分布参数均值可以视作线束整体分布参数的“典型值”。事实上,对于平直随机线束,由于线束高度不变只是各个导线的相对位置发生改变,所以通过式(1)~式(3)可知每个横截面分布参数数值构成的集合不变,仅仅是这些数值在分布参数矩阵中的位置会随着横截面的不同而发生变化。

图 9 给出了弯曲随机线束分布参数均值的沿线变化(图中各标示与图 8 相同)。由图 9 可知,弯曲随机线束各导线电感样本均值(包括图 9(a) 自电感和图 9(c) 互电感)和图 9(d) 互电容绝对值的样本均值沿线变化趋势均和线

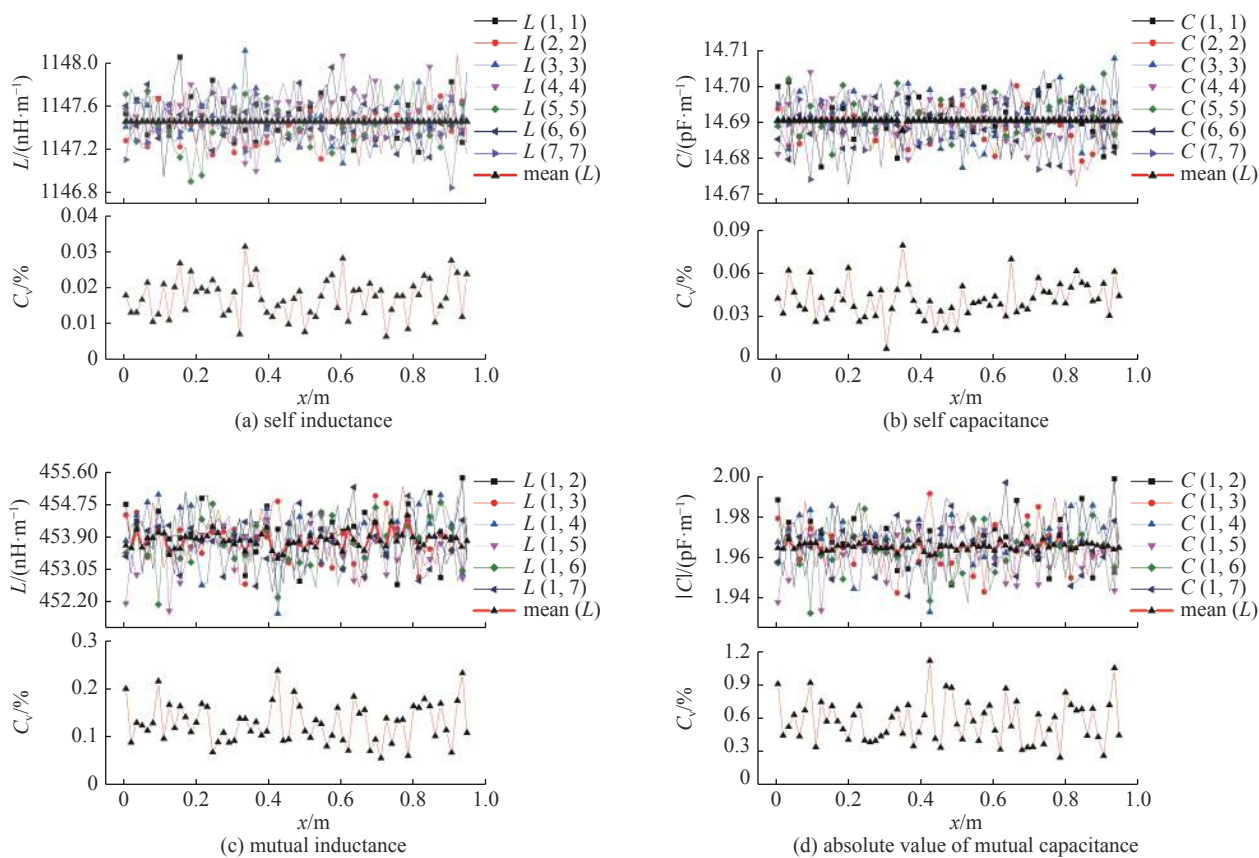


Fig. 8 Variation of distribution parameters of straight random wire harness along the line

图 8 平直随机线束分布参数沿线变化

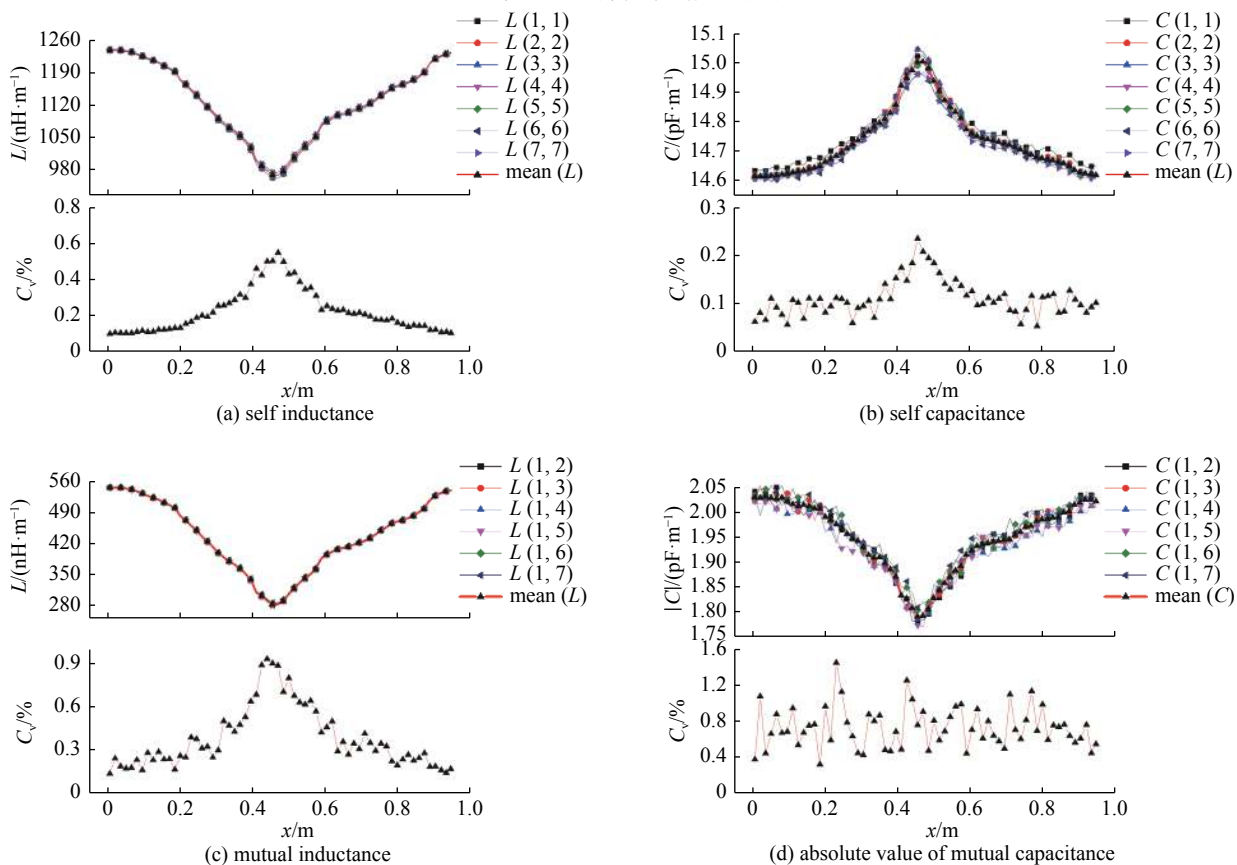


Fig. 9 Variation of distribution parameters of bending random wire harness along the line

图 9 弯曲随机线束分布参数沿线变化

束高度变化趋势一致,图9(b)自电容样本均值则趋势相反;变异系数都很小,变异系数最大值从小到大依次为:自电容 0.25% < 自电感 0.6% < 互电感 1.0% < 互电容 1.6%。值得注意的是,图9比图8传递了更多的信息——自电容、自电感和互电感的变异系数与线束高度呈显著的负相关特征,即线束越低的地方三者的变异系数越大(这也解释了图9变异系数最大值普遍高于图8的原因);另一方面,互电容绝对值的变异系数却未呈现出和线束高度的明显相关性。

为便于比较,图10给出了弯曲随机、平直随机、弯曲未随机和平直未随机(线束高度同平直随机)4种线束分布参数均值的沿线变化。从图10(a)和图10(b)可知,无论是自电感还是自电容,两种弯曲线束之间和两种平直线束之间均各自重合,而互电感(图10(c))和互电容绝对值(图10(d))未重合且随机的情况会恒小于未随机。这意味着捆扎随机性会导致互电感均值和互电容均值的降低,而且降低的幅度在平直和弯曲线束中较为一致,比如互电感均值降低约 50 nH,互电容均值降低约 0.5 pF。

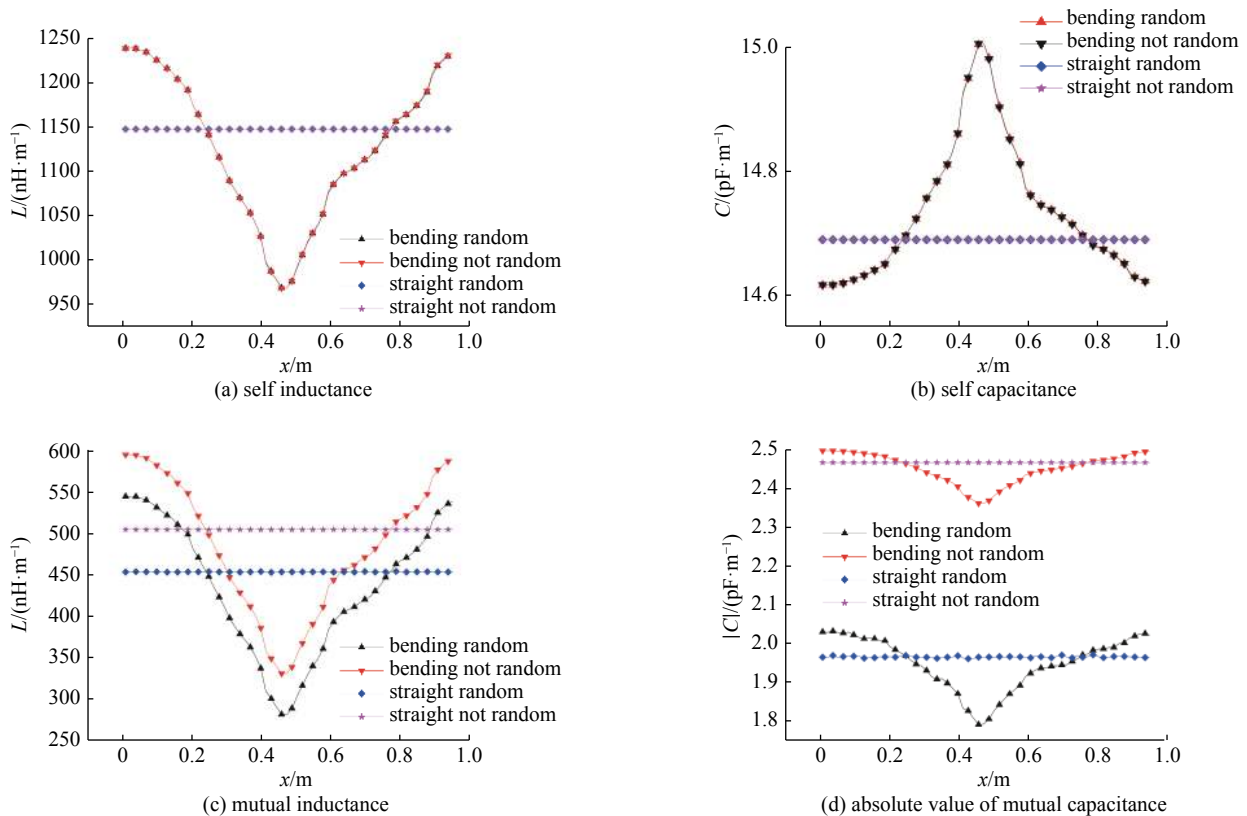


Fig. 10 The variation along the mean value of four kinds of harness distribution parameters

图 10 4 种线束分布参数均值沿线变化

3 结 论

本研究提出了一种对实际弯曲随机线束的建模方法。基于图像识别技术,利用实际线束在侧视和俯视方向的 2 幅照片来实现弯曲线束轴心三维坐标的重建;然后再基于随机转移路径方法实现弯曲线束的随机化建模。借助该方法,本研究对大量弯曲随机线束样本进行了蒙特卡洛模拟,并将其分布参数统计结果和弯曲未随机、平直随机和平直未随机等情况进行了对比分析。结果表明,弯曲随机线束的分布电感和分布互电容的沿线变化趋势与线束的高度变化趋势一致,而分布自电容则趋势相反。线束分布参数的变异系数都很小且分布自电容、分布自电感和分布互电感的变异系数与线束高度明显呈负相关特征。对线束的捆扎随机并不会改变线束的分布自电感均值和分布自电容均值,但是会减小分布互电感均值和分布互电容均值,这种情况在线束平直和弯曲的状态下都存在。这些分布参数统计特征可进一步用于对弯曲随机线束电磁耦合(包括浪涌、串扰、场线耦合等)特征的统计分析。

参考文献:

- [1] Ciccolella A, Canavero F G. Stochastic prediction of wire coupling interference[C]//Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 1995: 51-56.

- [2] Goodchild M F. Fractals and the accuracy of geographical measures[J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1980, 12(2): 85-98.
- [3] Salio S, Canavero F, Lefèbvre J, et al. Statistical description of signal propagation on random bundles of wires[C]//Presented at the 13th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility. Zurich, Switzerland: EMC, 1999.
- [4] Salio S, Canavero F, Lecoine D, et al. Crosstalk prediction on wire bundles by Kriging approach[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Washington: IEEE, 2000.
- [5] Sun Shishuang, Liu Geping, Drewniak J L, et al. Hand-assembled cable bundle modeling for crosstalk and common-mode radiation prediction[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, 49(3): 708-718.
- [6] Bellan D, Pignari S A. Efficient estimation of crosstalk statistics in random wire bundles with lacing cords[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, 53(1): 209-218.
- [7] Spadacini G, Grassi F, Pignari S A. Statistical properties of low frequency voltages induced by a plane-wave field across the terminal loads of a random wire-bundle[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Dresden, Germany: IEEE, 2015: 824-829.
- [8] 马喜来. 汽车电磁兼容性预估计的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 5-12. (Ma Xilai. Research on the pre-assessments of electromagnetic compatibility in automobile[D]. Changchun: Jilin University, 2008: 5-12)
- [9] 王瑞宝, 周诚祥. 船舶线束寄生参数和串扰动态变化估计[J]. *中国修船*, 2013, 26(2): 34-36, 40. (Wang Ruibao, Zhou Chengxiang. Estimation of parasitic parameters and crosstalk dynamics of ship harness[J]. *China Ship Repair*, 2013, 26(2): 34-36, 40)
- [10] 高印寒, 王天皓, 杨开宇, 等. 汽车线束的动态串扰特性预测[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2014, 44(5): 1258-1263. (Gao Yinhan, Wang Tianhao, Yang Kaiyu, et al. Prediction of the dynamic crosstalk of automotive wiring harness[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2014, 44(5): 1258-1263)
- [11] 张昭, 王世山, 赵亮, 等. 多导体线束内串扰概率分布的预测[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(7): 204-214. (Zhang Zhao, Wang Shishan, Zhao Liang, et al. Prediction of crosstalk probability distribution in cable bundles[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(7): 204-214)
- [12] Huang Chao, Zhao Yang, Yan Wei, et al. A new method for predicting crosstalk of random cable bundle based on BAS-BP neural network algorithm[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 20224-20232.
- [13] 袁赛, 赵海龙, 曹海丽, 等. 基于MATLAB的带噪图像的中值滤波[J]. *电子世界*, 2016(18): 185. (Yuan Sai, Zhao Hailong, Cao Haili, et al. Median filtering of noisy image based on MATLAB[J]. *Electronics World*, 2016(18): 185)
- [14] 曾建华, 黄时杰. 典型图像边缘检测算子的比较与分析[J]. *河北师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(4): 295-301. (Zeng Jianhua, Huang Shijie. Comparison and analysis of typical image edge detection operators[J]. *Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 44(4): 295-301)
- [15] 纪执楷, 赵翔, 闫丽萍, 等. 随机线缆束的建模及其场线耦合分析[J]. *无线电工程*, 2018, 48(9): 788-792. (Ji Zhikai, Zhao Xiang, Yan Liping, et al. Modeling of random wire-bundle and analysis of field-to-line coupling[J]. *Radio Engineering*, 2018, 48(9): 788-792)
- [16] Danielson G. On finding the simple paths and circuits in a graph[J]. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 1968, 15(3): 294-295.
- [17] Paul C R. Analysis of multiconductor transmission lines[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [18] Haase H. Full-wave field interactions of nonuniform transmission lines[D]. Magdeburg: der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2005.
- [19] 弗雷德里卡·M·特奇, 迈克尔·V·艾诺茨, 托比杰恩·卡尔松. EMC分析方法与计算模型[M]. 吕英华, 王旭莹, 译. 北京: 北京邮电大学出版社, 2009: 348-350. (Tesche F M, Ianoz M V, Karlsson T. EMC analysis methods and computational models[M]. Lü Yinghua, Wang Xuying, trans. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2009: 348-350)
- [20] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 67-68. (Xie Chufang, Rao Kejin. Electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 67-68)