

文章编号 1004-924X(2011)05-1088-07

汽车线束电感性串扰动态变化的预测

高印寒¹, 王瑞宝^{2,3}, 李碧若^{3,4}, 谢 军⁵, 杨开宇^{1*}

(1. 吉林大学 测试科学实验中心, 吉林 长春 130022; 2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 中国人民解放军 92571 部队, 海南 三亚 572021; 4. 海军工程大学 兵器新技术应用研究所, 湖北 武汉 430033;
5. 空军航空大学 特种专业系, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了预测汽车运动时其线束的电感性串扰动态变化, 建立了线束的电感性串扰最好、最差情况预测模型和蒙特卡罗方法改进模型。根据导线在线束内几何布置的极限位置, 得到电感性串扰的最好、最差情况预测区间; 基于蒙特卡罗法得到电感性串扰数学期望值, 在 80% 置信水平下求得期望值的置信区间, 置信区间即为改进的预测区间。与 EMC Studio 仿真软件结果的比较显示, 低于 5 MHz 时, 所选位置的线束串扰都在长度为 5 dB 最好、最差预测区间内, 多数位置线束串扰在长度为 3 dB 蒙特卡罗改进区间内, 改进的预测区间缩小了 40%; 高于 5 MHz 时, 电尺寸趋于电大, 误差变大。建立的两个汽车线束电感性串扰预测模型能够根据不同精度要求快速预测电感性串扰动态变化。

关键词: 电感性串扰; 汽车线束; 电磁兼容; 蒙特卡罗法

中图分类号: TM934.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111905.1088

Prediction of variation of inductive crosstalk in automotive cable bundles

GAO Yin-han¹, WANG Rui-bao^{2,3}, LI Bi-ruo^{3,4}, XIE Jun⁵, YANG Kai-yu¹

(1. Center of Test Science, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;
3. Unit 92571 of the Chinese People's Liberation Army, Sanya 572021, China; 4. Research Institute of New
Weaponry Technology & Application, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
5. Special Information Department, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)
* Corresponding author, E-mail: yangky@jlu.edu.cn

Abstract: In order to predict the variation of inductive crosstalk in the cable bundles as the automobile was in motion, both the prediction model of the inductive crosstalk of the best/worst cases and the amended model by Monte Carlo method were established. According to the extreme positions of wires in the cable bundles, the prediction intervals of the inductive crosstalk of the best/worst cases were defined. By using the Monte Carlo method, the mathematical expectation of the inductive crosstalk was obtained, and the confidence interval for the expectation was defined under the circumstance of 80% confidence level. Here, the confidence interval was the amended prediction interval. By compari-

收稿日期: 2011-02-28; 修订日期: 2011-04-08.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20050183019); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20080532)

son with the results from EMC Studio electromagnetic simulation software, it is shown that the cable bundle crosstalks in all selected positions are in the best/worst case interval and most of them are in the amended interval when the frequencies are lower than 5 MHz. The length of the amended interval has decreased by 40%. Moreover, the electrical dimensions tend to electrically large and the error also increases when the frequencies are higher than 5 MHz. It concludes that the both models are simple and convenient to predict the inductive crosstalk rapidly according to different accuracy requests.

Key words: inductive crosstalk; automotive cable bundle; electromagnetic compatibility; Monte Carlo method

1 引言

由于汽车上安装的电子设备越来越多,各个设备之间的电磁干扰也日趋严重。干扰信号沿着四通八达的汽车线束传导到电子设备,会对设备性能产生很大的影响。其中汽车线束串扰是最重要的传导干扰,它能增长临近导线噪声水平,破坏数据,影响系统的传导发射和辐射发射^[1-2],使得整个汽车的电磁兼容性能强烈下降,在汽车电磁兼容性能设计初期,串扰是首要的预测目标。

传统上国内外对串扰的预测主要采用仿真法。仿真法是利用计算电磁学中的矩量法、时域有限差分法^[3]、局部元等效电路法^[4]等方法计算出导线单位长度寄生参数后,使用 SPICE 电路仿真软件求得串扰。仿真法能得到精确的结果,但过程复杂,如果参数较多,需要消耗较长时间。当汽车运动时,线束几何布置——线束内导线对地高度和相互间距离发生变化,线束串扰亦随之变化,仿真法预测串扰的动态变化误差较大。国内目前尚未开展串扰的动态预测,国外学者一般使用神经网络^[5],小波理论^[6],和分形理论(Fractal theory)^[7]。这些方法虽然精度较高,但过程复杂,当多个参数同时变化时需要较长时间。

本文根据汽车运动时线束几何布置随机变化区间的端点值,建立电感性串扰最好、最差情况预测模型;利用蒙特卡罗法(Monte Carlo method M. C)计算两根导线各自对地高度和相互间距离3个随机变量平均值,得到串扰数学期望值,设定置信水平对串扰数学期望值进行区间估计,得到改进最好、最差情况预测模型。与仿真软件结果对比,电感性串扰最好、最差情况预测模型和蒙特卡罗改进模型简单、实用,能够快速预测电感性串扰,适合不同精度要求的汽车线束串扰动态预测。

2 电感性串扰耦合的最好、最差情况预测模型

导线之间通过寄生参数的电感性耦合、电容性耦合产生串扰。电路的电感性耦合和电容性耦合是同时存在的,具体分为3种情况:(1)电感性耦合占据优势,电容性耦合可忽略,电路近端串扰近似为电感性耦合;(2)电容性耦合占据优势,电感性耦合可忽略,电路近端串扰近似为电感性耦合;(3)电容性耦合与电感性耦合各自权重相同,哪种耦合都不能忽略,电路近端串扰为电感性耦合与电容性耦合之和,但这种情况极少出现。一般情况下,串扰要么是电感性耦合占优势,要么是电容性耦合占优势。本文研究对象是电感性耦合占据优势的电路^[8]。

互电感是产生电感性串扰耦合的根本原因。根据镜像法,导线单位长度互电感为^[1]

$$L_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln(1 + 4 \frac{h_2 h_1}{d^2}), \quad (1)$$

式中 μ_0 是真空磁导率, h_1 是导线1距地(回路)高度, h_2 是导线2距地(回路)高度, d 是导线1、2之间的距离。

串扰是相互靠近的导线之间的电磁耦合噪声。严格的求解可用 SPICE 仿真电路去耦电报方程,过程繁杂^[1]。对于均匀、电小尺寸(electrically small)、弱耦合的传输线可以用简单的电感、电容耦合模型求解串扰。串扰电路如图1所示。

近端电感性串扰耦合频域表达式为^[1]:

$$C_{NE} = j\omega \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{L_m l}{R_S + R_L}, \quad (2)$$

式中 C_{NE} 为导线近端串扰, l 为导线长度, R_{NE} 为近端阻抗, R_{FE} 为远端阻抗, R_S 为电源内阻, R_L 为负

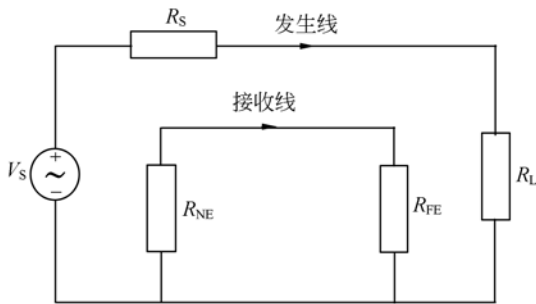


图 1 简单串扰电路示意图

Fig. 1 Schematic of a simple crosstalk circuit

载内阻, L_m 为导线单位长度互电感, ω 为角频率, j 为虚数单位。

从式(1)、(2)可以看出,知道导线对地高度和相互间距离,可以确定导线间的串扰。汽车运动时,线束内导线也随同运动,导线对地高度和相互间距离不是定值,而是随机变量。如果没有得到两条导线对地高度和相互间距离 3 个随机变量的统计规律,贸然代入具体数值,去求解单位长度寄生电感和串扰,会带来一定的误差。针对汽车运动的情况,可以用式(1)、(2)结合最好、最差情况法快速预测汽车线束串扰值的动态变化。

导线在线束内随机分布,可以位于任意位置,但只要找到导线随机分布区间,就可以利用导线在区间两个端点的单位长度互电感的最大值和最小值来估计单位长度互电感的动态变化和电感性串扰耦合的动态变化。从式(1)、(2)看出,导线对地高度 h_1, h_2 最大,相互间距离 d 最小时,单位长度互电感和电感性串扰耦合取得最大值,这是一种电感性串扰最差情况;导线对地高度 h_1, h_2 最小,导线间的距离 d 最大时,单位长度互电感和电感性串扰耦合取得最小值,这是一种电感性串扰的最好情况。

根据汽车线束实际,电感性串扰最差情况下的两条导线位于线束最高处,高度相等,导线间距离等于两条导线的半径之和,即 $h_1 = h_2 = h_{\max}, d = r_A + r_B$,如图 2 中 $A_{\max} B_{\max}$ 位置所示。将 d, h_1, h_2 代入公式(2)中得到近端串扰最差情况表达式:

$$C_{NE, \text{worst}} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}R_S + R_L} \frac{l}{\ln\left[1 + 4 \frac{h_{\max}^2}{(r_A + r_B)^2}\right]}, \quad (3)$$

式中 r_A 为导线 A 半径, r_B 为导线 B 半径, h_{\max} 为导线最大对地高度。

由于汽车线束截面是圆形,电感性串扰最好情况下的两条导线位置在线束下半圆,不易确定。为了便于计算,使用线束外两个位置 $A_{\min} B_{\min}$ 代替线束内串扰最好情况位置。导线在 $A_{\min} B_{\min}$ 位置对地高度相等,导线间距离为线束直径 $2R$ 与两根导线半径的差,即 $h_1 = h_2 = h_{\min}, d = 2R - r_A - r_B$,如图 2 所示。将 d, h_1, h_2 代入式(2)得到近端串扰最好情况表达式:

$$C_{NE, \text{best}} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}R_S + R_L} \frac{l}{\ln\left[1 + 4 \frac{h_{\min}^2}{(2R - r_A - r_B)^2}\right]}, \quad (4)$$

式中 R 为线束半径, h_{\min} 为导线最小对地高度。

由式(1)(2)可知导线在 $A_{\min} B_{\min}$ 位置互感和电感性串扰小于线束内任意位置互感和电感性串扰。

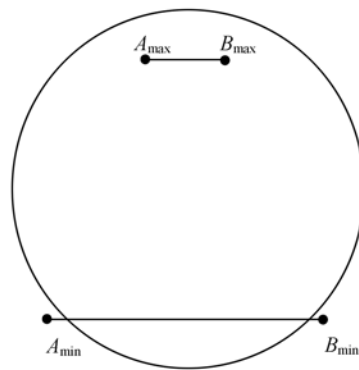


图 2 线束内任意二根导线位置

Fig. 2 Positions of two conductors in cable bundle

汽车运动时,线束电感性串扰在最好、最差情况之间动态变化,最好、最差情况区间长度就是串扰的变化范围。电感性串扰的最好、最差情况预测模型能够快速预测串扰,虽然精度不高,但能确保问题不被漏掉,且不用复杂和昂贵的软件仿真和实验测量,这在缺少数据和资金的设计初期十分重要。

3 改进的最好、最差情况预测模型

用串扰最好、最差情况预测一般情况可能存在高估或低估的问题,预测区间范围也较大。蒙特卡罗方法能够有效地缩短预测区间,改善这种

情况。

蒙特卡罗方法又称随机抽样方法,是以概率统计理论为基础的一种方法^[9-10]。蒙特卡罗方法能够逼真地描述事物的随机性质,受几何条件影响小,具有同时计算多个未知数的能力,非常适合多变量的串扰统计预测。

假设线束半径为 R ,两根导线 A, B 半径相同为 r ,圆心坐标为 $A(X_1, Y_1), B(X_2, Y_2)$ 。 A, B 位置均匀分布在以线束中心为圆心,以 $R-r$ 为半径的圆周内(包括圆周),即满足式(5)、(6)。根据导线在线束内的实际情况,两根导线间距离必须满足大于等于导线直径,小于等于线束与导线直径差的条件,即满足式(7)。

$$(X_1 - X_0)^2 - (Y_1 - Y_0)^2 \leq R - r, \quad (5)$$

$$(X_2 - X_0)^2 - (Y_2 - Y_0)^2 \leq R - r, \quad (6)$$

$$2r \leq \sqrt{(X_2 - X_1)^2 - (Y_2 - Y_1)^2} \leq 2(R - r), \quad (7)$$

导线可以位于在线束内任何位置,导线中心坐标 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ 在区间 $[-(R-r), R-r]$ 上连续均匀分布。使用 Matlab 生成均匀分布的随机数,对随机数进行 N 次抽样(即导线几何布置 N 次不同配置),得到导线间平均距离和平均对地高度,代入式(1)得到单位长度互电感的平均值。为了确定通过蒙特卡罗法得到的单位长度平均互电感的可信程度,还需要对其进行区间估计。假设互电感值是正态分布,互电感的算术平均值即为互电感的数学期望值。根据汽车线束的实际情况,置信水平 $1-\alpha$ 设为 80%,80%的互电感值会落在平均互电感值 ± 1.25 标准偏差范围内。根据概率统计知识以及单位长度互电感与电感性串扰的关系式(2),电感性串扰的标准偏差等于单位长度互电感的标准偏差。单位长度互电感的标准偏差公式为^[11]

$$\sigma = \sqrt{\left[\frac{\partial L_m}{\partial h_1} \sigma_{h_1}\right]^2 + \left[\frac{\partial L_m}{\partial h_2} \sigma_{h_2}\right]^2 + \left[\frac{\partial L_m}{\partial d} \sigma_d\right]^2} = \frac{\mu_0}{\pi} \frac{1}{d^2 + 4h_1 h_2} \sqrt{h_1^2 \sigma_{h_2}^2 + h_2^2 \sigma_{h_1}^2 + \frac{4h_1^2 h_2^2}{d^2} \sigma_d^2}, \quad (8)$$

式中 $\sigma_{h_1}, \sigma_{h_2}, \sigma_d$ 分别为 h_1, h_2, d 的标准偏差。

4 预测模型应用

根据电感性串扰最好、最差情况预测区间及蒙特卡罗法改进预测区间,结合汽车线束内导线的具体几何布置,计算线束电感性串扰。依据德

国大众公司的 VW 汽车线缆标准,所选线束包含 14 根导线,长度 1 m,线束直径 9.0 mm,线束中心距离地面为 25 mm,线束中导线材质为铜,绝缘层为 PVC(聚氯乙烯),相对介电常数 ϵ_r 为 3.0,导线半径约为 1 mm,导线中导体(铜)半径约为 0.4 mm,绝缘层厚度 0.6 mm。汽车线束截面及坐标系如图 3 所示。

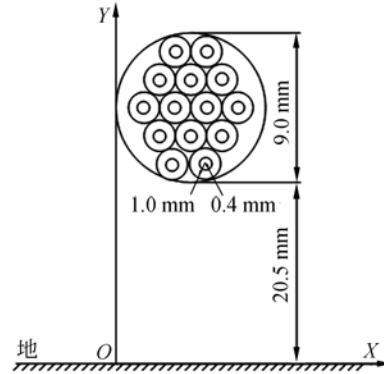


图 3 汽车线束截面及坐标系

Fig. 3 Cross-section of automotive cable bundles and coordinate system

根据线束几何情况实际,电感性串扰最差情况导线坐标为 $A_{max}(3.5, 28.5)$ 和 $B_{max}(5.5, 28.5)$,最好情况导线坐标为 $A_{min}(1, 21.5)$ 和 $B_{min}(8, 21.5)$ 。在式(2)中当 $R_{NE} = R_{FE} = R_S = R_L = 50 \Omega$ 时,线束近端串扰近似为电感性耦合。在 10 kHz~10 MHz 情况下,电感性串扰耦合最好、最差情况的频率响应曲线如图 4 最上、下曲线所示。从图(4)看出,串扰的最好、最差情况预测区间长度为 5 dB。

利用 Matlab 在区间 $(-3.5, 3.5)$ 内生成符合式(5)、(6)、(7)的连续均匀分布的随机数,经过 10 000 次抽样后,得到导线 A, B 的平均距离 \bar{d} 为 3.81 mm,标准方差 σ_d 为 1.32 mm;平均对地高度 \bar{h}_1, \bar{h}_2 分别为 25.02 mm 和 25.04 mm,标准方差 $\sigma_{h_1}, \sigma_{h_2}$ 分别为 3.20 和 3.21。将以上数值代入式(1)和(8)得到单位长度互电感数学期望 \bar{L}_m 值为 5.16×10^{-7} H/m,单位长度互电感的标准偏差 σ 为 6.08×10^{-8} H/m。 $\bar{L}_m \pm 1.25\sigma$ 为 $(4.40, 6.19) \times 10^{-7}$ H/m。在图 4 中画出 $\bar{L}_m, \bar{L}_m \pm 1.25\sigma$ 所对应的电感性串扰的数学期望值和电感性串扰的数学期望值的 $\pm 1.25\sigma$ 的置信区间频响曲线。

由图 4 看出,经过蒙特卡罗方法改进,置信水

平 80% 情况下,电感性串扰的动态变化区间由原来的 5 dB 缩短到 3 dB,缩短了 40%。可根据实际情况选择不同的置信水平,得到需要的置信区间。置信水平越大,置信区间长度越接近最好、最差情况区间。样本数越多,统计规律越明显。

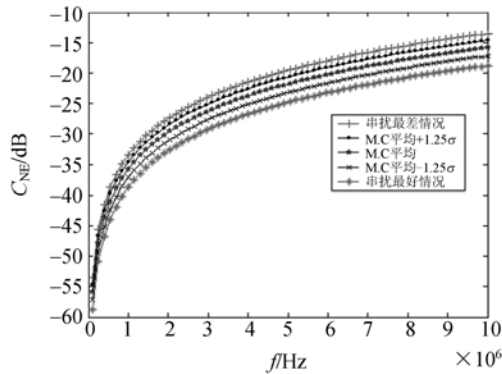


图 4 电感性串扰的最好、最差情况预测区间和蒙特卡罗改进的最好、最差情况预测区间比较

Fig. 4 Contrast of the prediction interval between the best and worst cases and the amended best and worst cases by Monte Carlo method for the inductive crosstalk

5 仿真验证

为了验证电感性串扰最好、最差情况预测区间及蒙特卡罗法改进预测区间,使用 EMC CoS 公司的 EMC Studio 软件对电感性串扰耦合进行了验证。EMC Studio 软件使用辅助源法(MAS)计算导线单位长度寄生电感,利用 SPICE 电路仿真模块计算串扰。

设定 A, B 为线束中任意两根导线,理论上, A 和 B 可以位于线束中的任意位置。随机选择了 20 对导线位置,利用 EMC Studio 软件计算出导线在这些随机位置的电感性串扰的频率响应。图 5 是线束在汽车中的位置,图 6 是 EMC Studio 显示的导线在其中的一个位置 A3B3 的截面图,图 7 是导线在 A3B3 位置,EMC Studio 的电感性串扰频率响应仿真曲线。图 8 是随机选择的 20 对导线位置电感性串扰 EMC Studio 仿真结果在电感性串扰最好、最差情况预测区间和蒙特卡罗法改进区间的分布。从图 8 可以看出,频率低于 5 MHz,所有的 20 对导线位置的电感性串扰值都在最好、最差情况区间内,说明电感性串扰最好、最差情况预测模型是有效的。其中 12 对导线位

置的电感性串扰值在改进最好、最差情况区间内分布,考虑到样本数较少,未能充分体现统计规律,但也能说明蒙特卡罗法对最好、最差情况预测模型的改进是有效的,提高了预测精度。频率高于 5 MHz,电尺寸(electrical dimensions)趋于电大(electrically large),误差增大。

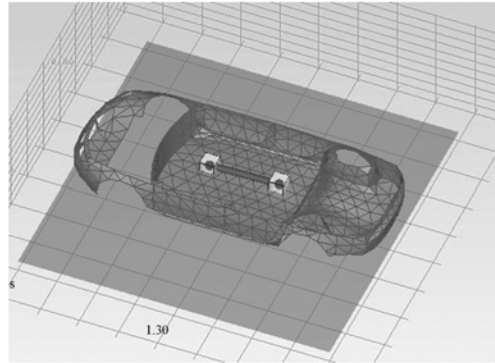


图 5 线束在汽车中的位置

Fig. 5 Position of cable bundle inside the car

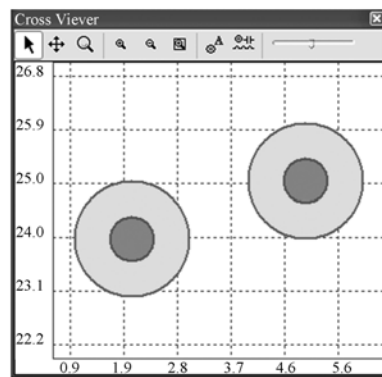


图 6 EMC Studio 中 A3B3 位置导线截面

Fig. 6 Cross-section of conductor in A3B3 position

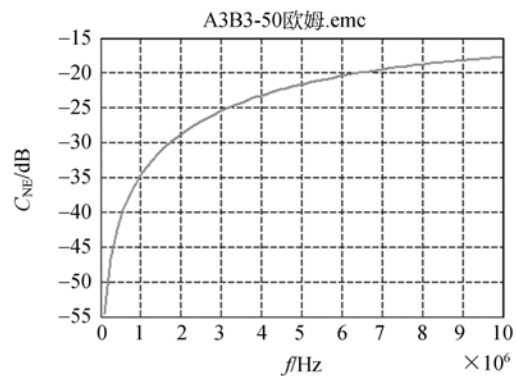


图 7 EMC Studio 得到的导线在 A3B3 位置近端电感性串扰频率响应曲线

Fig. 7 Frequency response curve of near-end inductive crosstalk from EMC Studio software in A3B3 position

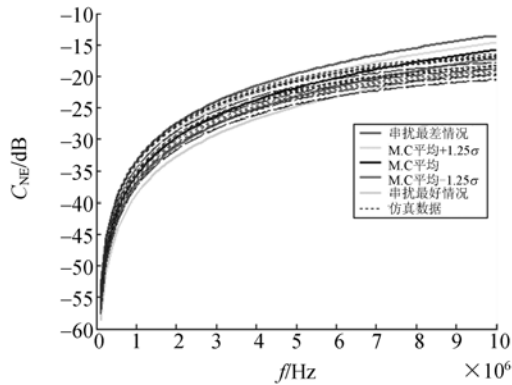


图8 电感性串扰 EMC Studio 仿真结果在电感性串扰最好、最差预测区间和蒙特卡罗法改进区间分布

Fig. 8 Distribution of simulated results from EMC Studio in prediction interval defined by the best and worst cases and Monte Carlo method

参考文献:

- [1] PAUL C R. *Introduction to Electromagnetic Compatibility* [M]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [2] 黄大庆,李勃. 无人机电磁兼容传导与辐射测试项目剪裁法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 380-387.
HUANG D, LI B. Novel tailoring method for conducting and radiating electromagnetic compatibility testing of unmanned aerial vehicle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 380-387. (in Chinese)
- [3] ZHANG Y, GAO B, LIU R. 3-D method of modeling and computing the crosstalk of multi-lines in FDTD [C]. *Proceedings International Conference on Computational Electromagnetics and its Application*, 1999: 247-277.
- [4] 李富同,梁志成,傅静波,等. PCB板 EMC 问题的 PEEC 仿真分析[J]. 安全与电磁兼容, 2007(2): 18-20.
LI F T, LIANG ZH CH, FU J B, et al.. Simulation for EMC Problem of PCB with PEEC Method [J]. *SAFETY & EMC*, 2007(2): 18-20. (in Chinese)
- [5] CANNAS B, MARADEI A F, MARADEI F. Crosstalk prediction in twisted bundles by a neural approach [C]. *Proceedings of the 3rd International Symposium & Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Beijing, 2002: 638 - 641.
- [6] NONGPIUR R C. Near-end crosstalk mitigation using wavelets [C]. *Proceedings of the 16th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2008)*, Lausanne, Switzerland, 2008.
- [7] SALIO S, LECOINTE F C D, TABBARA W. Crosstalk prediction on wire bundles by Kriging approach [C]. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, USA, 2000: 197-202.
- [8] PAUL C R. The concept of dominant effect in EMC [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1992, 34(3): 363-367.
- [9] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
XU SH Y. *The Application of the Monte Carlo Method in the Experimental Nuclear Physics* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002. (in Chinese)
- [10] 李刚,郑羽,林凌,等. 在多层介质中的频域 OCT 蒙特卡罗仿真[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7):

6 结 论

根据汽车运动时,线束内导线相互距离和对地高度动态变化,提出了电感性串扰耦合最好、最差情况预测模型和蒙特卡罗方法改进最好、最差情况预测模型。两个模型经过 EMC Studio 仿真软件验证显示:低于 5 MHz 时,所选位置导线串扰都落在长度为 5 dB 最好、最差预测区间内,多数位置导线串扰落在长度为 3 dB 蒙特卡罗改进区间内,改进模型区间缩短了 40%;高于 5 MHz 时,电尺寸增大,误差变大。串扰最好、最差预测模型和蒙特卡罗改进模型,简单、方便,能够快速预测电感性串扰动态变化。最好、最差预测模型适用于精度要求不高的情况,改进模型适用于精度较高情况。

1285-1294.

LI G, ZHENG Y, LIN L, *et al.*. Monte Carlo simulation of Fourier-domain OCT in multi-layered media[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1285-1294. (in Chinese)

[11] A. 帕普里斯, S. U. 佩莱. 概率、随机变量与随机过

程[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2004.

PAPOULIS A, PILLAI S U. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes* [M]. XI'AN: XI'AN Jiaotong University Press, 2004. (in Chinese)

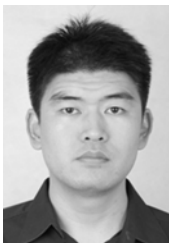
作者简介:



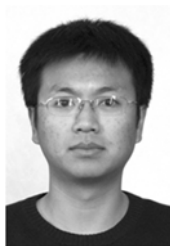
高印寒(1951—),男,吉林敦化人,教授,博士生导师,1978年于吉林工业大学获学士学位,主要从事车辆测试技术的研究。E-mail: yinhan@jlu.edu.cn



王瑞宝(1973—),男,吉林长春人,博士研究生,1998年于中国计量学院获学士学位,2005年于吉林大学获硕士学位,主要从事车辆测试技术与仪器的研究。E-mail: navywrb@gmail.com



李碧若(1975—),男,湖北武汉人,工程师,1997年、2004年于海军工程大学分别获学士、硕士学位,主要从事兵器技术的研究。E-mail: godspeed330@Hotmail.com



谢 军(1981—),男,吉林白山人,博士,讲师,2004年、2009年于吉林大学分别获得学士、博士学位,主要从事军用光电工程技术的研究。E-mail: xiejun06@mails.jlu.edu.cn

通讯作者:



杨开宇(1971—),男,江苏仪征人,博士研究生,副教授,2004年于吉林大学获硕士学位,主要从事车辆测试技术的研究, E-mail: yangky@jlu.edu.cn