

文章编号:1000-582X(2012)06-048-05

# 汽车不均匀线束串扰特性预测的改进方法

李永明, 杨 娜, 郑亚利, 汪泉弟, 俞集辉, 郑春旭

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:**针对线束的不均匀性及线束中导线间距的随机性,提出了一种采用统计学理论来预测不均匀线束串扰的方法。在弱耦合和电小尺寸的假设条件下,基于集总电路近似模型运用统计方法推导出了串扰电压比的期望值和方差,预测了最坏情况下的串扰。与 273RDSI 模拟仿真对比,验证了方法的合理性和可行性。最后分析了不同的导线数目和线束距地面高度的情况,结果表明:串扰的期望值和方差都会随导线数目的增加而降低;增大线束距地高度,期望值变大,而方差的变化不是很明显,说明方差对线束距地高度不是很敏感;随着导线数目的增加,期望对高度的变化更加敏感。

**关键词:**串扰;传输线;统计方法;汽车线束

**中图分类号:**TM751

**文献标志码:**A

## Prediction of crosstalk characterisation in cables bundles

LI Yong-ming, YANG Na, ZHENG Ya-li, WANG Quan-di, YU Ji-hui, ZHENG Chun-xu

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Based on the heterogeneity of cable bundles and the randomness of wire spacing in cable bundles, this paper adopts the statistical theory to explore a method to predict the uneven cable bundle crosstalks. Under the assumption of electrically small and weak coupling, the mean value and standard deviation of the near-end crosstalk voltage ratio are derived. 273RDSI numerical simulations are used to predict worst-case crosstalk and to test the model effectiveness. The difference of the wire number and the bundles height from the ground are analyzed. The results indicate that for a given number of wires by increasing the bundle height the mean value increases, whereas the standard deviation is substantially independent of height. Moreover, the standard deviation decreases with the number of sections. By increasing the number of wires, both the mean value and the standard deviation decrease, whereas the sensitivity of the mean value to the bundle height increases.

**Key words:** crosstalk; transmission lines; statistics; automotive cable bundles

随着电气设备的集成化综合化的发展,汽车中线束串扰所带来的电磁干扰问题日益突出。线束由许多独立的导线组成,为了节约空间和便于维护,这些导线被捆成扎。这样易使导线之间产生耦合感应

作用,可能引起线束两端电路功能的改变,导致系统性能降低或不能正常工作,直接影响整车系统的性能<sup>[1]</sup>。因此,在汽车电磁兼容 (electromagnetic compatibility, EMC) 中线束串扰的预测是一个重要

收稿日期:2012-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877081);重庆市自然科学基金资助项目(2008BB2311)

作者简介:李永明(1964-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事电磁场数值计算方法及其应用、电磁兼容与环境保护等研究,(Tel)15723231511;(E-mail)cqliym@cqu.edu.cn。

的内容<sup>[2]</sup>。

近几十年来,串扰现象得到了广泛的研究。用于线缆线束的建模方法主要有:多导体传输线(MTL)方法<sup>[3]</sup>,矩量法(MOM)<sup>[4,5]</sup>,多导体传输线与有限元法的混合算法(MTL/FEM)<sup>[6]</sup>,多导体传输线与矩量法的混合算法(MTL/MOM)<sup>[7]</sup>,多导体传输线与时域有限差分法的混合算法(MTL/FDTD)<sup>[8]</sup>等。为了更接近实际车体的线束情况,对线束内导线排列的随机性进行分析,可以采用克里金差值方法(Kriging)<sup>[9]</sup>、随机中点布置法(Random Midpoint Displacement, RMD)<sup>[10]</sup>、随机中点布置样条插值法(Random MidpointRDSI)<sup>[11]</sup>等。这些方法都要依靠大量线束结构的模拟结果,因此需要性能很高的计算机资源和很长的计算时间。在系统和设备的设计前期,对线束横截面导线的布置结构信息掌握很少的情况下,寻找一种合理又快速的方法成为预测线束串扰的关键<sup>[12,13]</sup>。通过“路”的方法建立相应的等效电路模型,运用“场”的理论用数值方法计算获取等效电路的精确参数,是预测线束串扰的有效途径<sup>[14]</sup>。

笔者针对汽车中的线束串扰问题,基于集总参数模型提出了不均匀线束串扰的统计模型。在弱耦合和电小尺寸的假设下,在固定的二维横截面的条件下,使用 Ansoft Maxwell 2D 电磁场模拟工具获取单位长度互感和互容参数,计算了互感、互容的期望值和方差,在此基础上基于集总参数模型运用统计学方法提出了线束串扰的统计特性(期望值和方差)的表达式,运用此模型预测了在最坏情况下的串扰并与 RDSI 模拟结果进行了对比。最后通过此模型分析了线束横截面对线束串扰特性的影响。

## 1 模型的建立

### 1.1 模型描述

线束模型:线束长为  $l$ , 带有  $N_w$  根导线, 安装于具有良好导电性能的接地平面上, 线束中心到地面的距离为  $h_0$ , 发射线的一端连接电压源  $V_s$ , 另一端通过负载  $R_L$  与地相连, 剩余的导线两端都带有负载并与地相连。弱耦合假设条件下仅考虑一根发射线和一根受害线的串扰, 忽略了其他导线对这两根线间串扰的影响, 可将其等效为两根导线间的串扰。在电小尺寸即导线尺寸小于最短波长的  $\frac{1}{10}(l < 0.1\lambda)$ , 2 根均匀导线在理想导电平面上的串扰可通过图 1 的集总- $\pi$  型电路模型来分析<sup>[15]</sup>。不均匀线束可以看作成  $N_s$  段均匀线束的级联。

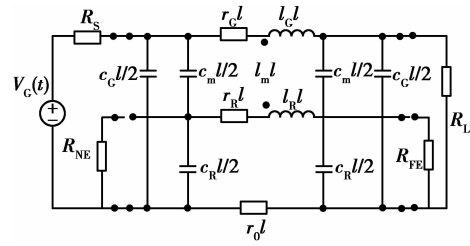


图 1 集总- $\pi$  型电路模型

为了方便计算假设导线为无耗均匀导线, 即图 1 中的  $r_G, r_R, r_0$  都为 0。当给定线束横截面时, 单位长度互感  $L_{nm}$ 、单位长度互容  $C_{nm}$  用 Ansoft Maxwell 2D 电磁场模拟工具来计算,  $L_{nm}$  也可用式(1)计算

$$L_{nm} \cong \frac{\mu}{4\pi} \ln \left( 1 + \frac{4h_n h_m}{s^2} \right). \quad (1)$$

式(1)中  $\mu$  为磁导率,  $\mu = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ,  $h_n, h_m$  为导线中心距地的高度,  $s$  为两导线间的间距。两种方法计算互感的值相近, 使用公式(1)计算  $L_{nm}$  较方便。集总- $\pi$  型电路模型中元件的参数值为单位长度的电参数与导线长度的乘积。

### 1.2 近端串扰电压比的期望值和方差

下面从近端串扰电压比 ( $N_{EXT}$ ) 的表达式<sup>[16]</sup> 来推导  $N_{EXT}$  的统计特性。

$$N_{EXT} = \omega \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{1}{R_S + R_L} l (L_{nm} + R_{FE} R_L C_{nm}). \quad (2)$$

同理可得远端串扰电压的关系式, 文中仅考虑近端串扰电压, 结果可以扩展到远端串扰电压。

不均匀线束串扰的计算, 将线束分为  $N_s$  段均匀线束。设每段长为  $\Delta l_k, k=1, \dots, N_s$ ,

$$\sum_{k=1}^{N_s} \Delta l_k = l. \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式得不均匀线束的  $N_{EXT}$

$$N_{EXT} = \omega \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{1}{R_S + R_L} \sum_{k=1}^{N_s} (L_{nm} + R_{FE} R_L C_{nm}) \Delta l_k. \quad (4)$$

当  $N_s$  确定, 公式(4)可看成是角频率、负载阻抗以及  $L_{nm}, C_{nm}$  的函数。由于导线位置是沿着线束长度不断变化的,  $L_{nm}, C_{nm}$  可看成两个相关的随机变量, 也就是说当给定一个  $L_{nm}$  值,  $C_{nm}$  值不可能随意取值,  $\Delta l_k$  也可看成取值为正数的随机变量, 设

$$p_{nm} = L_{nm} + R_{FE} R_L C_{nm}, \quad (5)$$

$$\Delta l_k = \frac{x_k}{N_s} l. \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{N_s} x_i$$

式(6)中:  $x_k$  在区间  $(0, X)$  上服从均匀分布,  $X$  为任意的正数,  $k=1, \dots, N_s$  将式(5)(6)代入式(4)得

$$N_{\text{EXT}} = \omega \frac{R_{\text{NE}}}{R_{\text{NE}} + R_{\text{FE}}} \frac{1}{R_{\text{S}} + R_{\text{L}}} l \sum_{k=1}^{N_s} p_{\text{nm}} \frac{x_k}{\sum_{i=1}^{N_s} x_i} \quad (7)$$

因为  $p_{\text{nm}}, x_k$  是两个独立的随机变量, 所以

$$\mu_{\text{NEXT}} = \omega \frac{R_{\text{NE}}}{R_{\text{NE}} + R_{\text{FE}}} \frac{1}{R_{\text{S}} + R_{\text{L}}} l \sum_{k=1}^{N_s} \mu_{p_{\text{nm}}} \frac{\mu_{x_k}}{\sum_{i=1}^{N_s} \mu_{x_i}} \quad (8)$$

$$= \omega \frac{R_{\text{NE}}}{R_{\text{NE}} + R_{\text{FE}}} \frac{1}{R_{\text{S}} + R_{\text{L}}} l \mu_{p_{\text{nm}}}$$

$$\sigma_{\text{NEXT}}^2 = \omega \frac{R_{\text{NE}}}{R_{\text{NE}} + R_{\text{FE}}} \frac{1}{R_{\text{S}} + R_{\text{L}}} l \sum_{k=1}^{N_s} \sigma_{p_{\text{nm}}}^2 \frac{\sigma_{x_k}^2}{\sum_{i=1}^{N_s} \sigma_{x_i}^2} \quad (9)$$

$$= \omega \frac{R_{\text{NE}}}{R_{\text{NE}} + R_{\text{FE}}} \frac{1}{R_{\text{S}} + R_{\text{L}}} l \frac{1}{N_s} \sigma_{p_{\text{nm}}}^2$$

对(5)式求期望和方差

$$\mu_{p_{\text{nm}}} = \mu_{L_{\text{nm}}} + R_{\text{FE}} R_{\text{L}} \mu_{C_{\text{nm}}}, \quad (10)$$

$$\sigma_{p_{\text{nm}}}^2 = \sigma_{L_{\text{nm}}}^2 + (R_{\text{FE}} R_{\text{L}})^2 \sigma_{C_{\text{nm}}}^2 + 2 \text{Cov}(L_{\text{nm}}, C_{\text{nm}}) = \sigma_{L_{\text{nm}}}^2 + (R_{\text{FE}} R_{\text{L}})^2 \sigma_{C_{\text{nm}}}^2 + 2 R_{\text{FE}} R_{\text{L}} \rho_{L_{\text{nm}} C_{\text{nm}}} \sigma_{L_{\text{nm}}} \sigma_{C_{\text{nm}}}. \quad (11)$$

将式(10)、(11)代入式(8)、(9)得  $N_{\text{EXT}}$  的期望值和方差

$$\mu_{\text{NEXT}} = \omega \frac{R_{\text{NE}}}{R_{\text{NE}} + R_{\text{FE}}} \frac{1}{R_{\text{S}} + R_{\text{L}}} l (\mu_{L_{\text{nm}}} + R_{\text{FE}} R_{\text{L}} \mu_{C_{\text{nm}}}). \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{NEXT}} = \omega \frac{R_{\text{NE}}}{R_{\text{NE}} + R_{\text{FE}}} \cdot \frac{1}{R_{\text{S}} + R_{\text{L}}} \cdot l \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{L_{\text{nm}}}^2 + (R_{\text{FE}} R_{\text{L}})^2 \sigma_{C_{\text{nm}}}^2 + 2 R_{\text{FE}} R_{\text{L}} \rho_{L_{\text{nm}} C_{\text{nm}}} \sigma_{L_{\text{nm}}} \sigma_{C_{\text{nm}}}}{N_s}}. \quad (13)$$

随机变量  $L_{\text{nm}}, C_{\text{nm}}$  的求解: 求出单位长度电感矩阵  $\mathbf{L}$ , 单位长度电容矩阵  $\mathbf{C}$  后,  $L_{\text{nm}}$  值在矩阵  $\mathbf{L}$  的上三角(或下三角)的数值中变化, 找出同一个值发生的次数即可得出该数值发生的概率, 进而求得期望值和方差, 同理, 可得  $C_{\text{nm}}$  的期望值和方差。

## 2 串扰的最坏情况预测

线束由 14 根 #19AWG 导线组成, 带有聚氯乙烯(PVC)绝缘层, 导线半径  $r_b$  为 0.45 mm, 绝缘层半径与导线半径相等, 接地平面具有良好的导电性, 线束横截面如图 2 所示。线束长  $l=2$  m, 线束中心距地高度为  $h=2$  cm。受害导线和发射导线两端所带负载为:  $R_{\text{S}}=R_{\text{L}}=R_{\text{FE}}=R_{\text{NE}}=50 \Omega$ , 其它导线两

端所带的阻抗值为  $1 \text{ k}\Omega$ 。

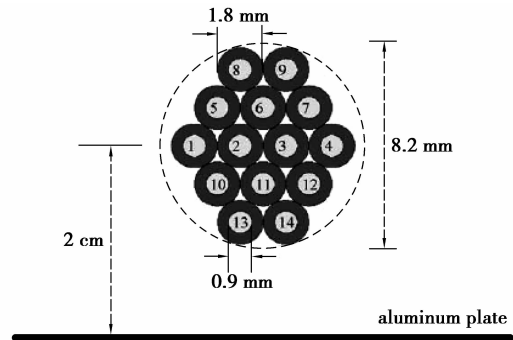


图 2 线束横截面

线束段数  $N_s=32$  相当于 273 RDSI, 下面将文中模型所得串扰值与文献[12]中的 273RDSI 进行对比。

计算步骤如下: 根据式(1)计算出  $\mathbf{L}$ , 再通过 Ansoft Maxwell 2D 电磁场模拟工具计算出  $\mathbf{C}$  并计算出  $L_{\text{nm}}, C_{\text{nm}}$  的期望值和方差, 最后根据公式(12)(13)计算  $\mu_{\text{NEXT}}, \sigma_{\text{NEXT}}$ , 串扰值的 80% 将落入到以均值为中心的  $1.25\sigma$  的范围内, 最坏情况下的串扰值为  $\mu_{\text{NEXT}} + 1.25\sigma_{\text{NEXT}}$ , 2 种方法对比结果如图 3 所示。

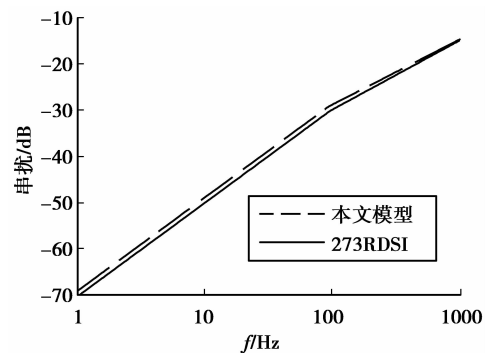


图 3 预测最坏情况的串扰值对比

从图 3 可以看出: 文中模型与 273RDSI 所得的最坏情况下的串扰在 10 MHz 以下基本吻合, 因而验证了分析计算方法的合理性和可行性。

## 3 线束的横截面对 $N_{\text{EXT}}$ 统计特性的影响

从式(12)、(13)可得  $N_{\text{EXT}}$  的统计特性与互感、互容有关, 因而, 有必要考虑这 2 个量对  $N_{\text{EXT}}$  的统计特性的影响。由于互感、互容值与线束的横截面有直接的关系, 从而可以考虑线束横截面对  $N_{\text{EXT}}$  的统计特性的影响。线束的横截面随着线束中导线的数目  $N_w$  和线束中心距地面的高度  $h$  的变化而变化, 即可研究

$N_w$  和  $h$  对  $N_{EXT}$  的统计特性(期望值和方差)的影响。下面将分别考虑  $N_w=4, 14, 37, h=0.45 \text{ mm}, 4.5 \text{ cm}$  对  $\mu_{NEXT}, \sigma_{NEXT}$  的影响,如图 4-6 所示。

以上所研究的导线为 19AWG,  $R_L = R_{FE} = R_{NE} = 1 \text{ k}\Omega, R_S = 0$ , 电压源频率  $f=1 \text{ kHz}$ 。

从图 4-6 都可以看出:随着  $h$  的增大,  $\mu_{NEXT}$  变大,而  $\sigma_{NEXT}$  的变化不是很明显,说明  $\sigma_{NEXT}$  对  $h$  不是很敏感;对比图 4,图 5 或者图 5 与图 6,可看出:随着随着  $N_w$  的增加,  $\mu_{NEXT}, \sigma_{NEXT}$  都降低;对比图 4,图 5,图 6 可得:随着导线数目  $N_w$  的增加,期望对高度  $h$  的变化越来越敏感。

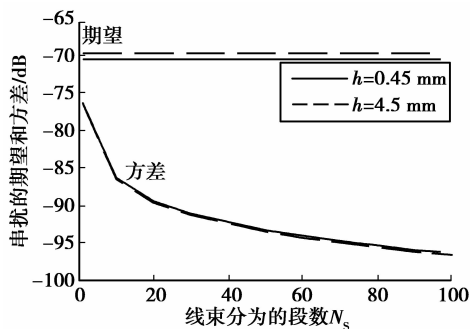


图 4  $N_w=4$  时的期望值和方差随着  $N_s$  的变化

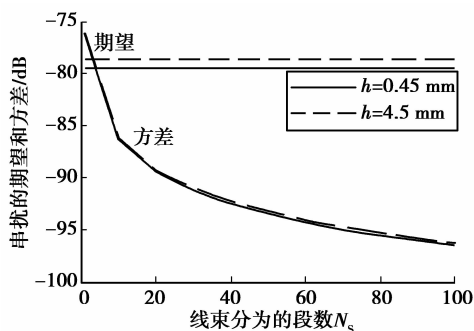


图 5  $N_w=14$  时的期望值和方差随着  $N_s$  的变化

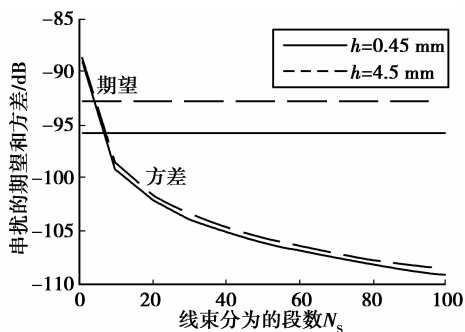


图 6  $N_w=37$  时的期望值和方差随着  $N_s$  的变化

## 4 结 论

介绍了一种简单的不均匀线束的串扰预测模型,在三导体均匀线束的基础上推导出多导体不均匀线束串扰的预测模型,预测方法是将不均匀线束转化为均匀线束,将不均匀线束看成  $N_s$  段均匀线束的级联。该模型的前提条件是:弱耦合和电小尺寸,即不考虑其他导线对干扰导线和受干扰导线的影响。此模型在 10 MHz 以下对串扰的预测都比较准确,并且此方法不需要太多的计算时间,对计算机的要求也不是很高,因此,可以成为设计前期预测低频串扰的有效手段。下一步需要解决的是高频串扰的预测和其它导线对受扰线和干扰线间串扰的影响。

### 参考文献:

- [1] WIENSS C, SCHARPING J, MULLER S, et al. Complex cable bundle simulation and validation in VR[C]//Proceedings of the Second UKSIM European Symposium on Computer Modeling and Simulation, Sept. 8-10, 2008, Liverpool, UK. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 412-417.
- [2] 段建晋,阎毓杰. 基于传输线方法的电缆耦合预测技术[J]. 舰船电子工程,2008, 28(8): 157-161.  
DUAN JIAN-JIN, YAN YU-JIE. Coupling prediction technology based on the transmission line approach [J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(8): 157-161.
- [3] LEVIN B M. Calculation of crosstalks in multiple-conductor cables [C] // Proceedings of 2007 XIIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, Sept. 17-20, 2007, Lviv, Ukraine. [S. l.]: IEEE Press, 2007: 211-214.
- [4] ANDRIEU G, KONE L, BOCQUET F, et al. Multiconductor reduction technique for modeling common-mode currents on cable bundles at high frequency for automotive applications [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(1): 175-184.
- [5] ANDRIEU G, REINEIX A, BUNLON X, et al. Extension of the "equivalent cable bundle method" for modeling electromagnetic emissions of complex cable bundles [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(1): 108-118.
- [6] FERRIERES X, PARMANTIER J P, BERTUOL S, et al. Application of a hybrid finite difference/finite volume method to solve an automotive EMC problem [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(4): 624-634.
- [7] TOPCHISHVILI D, JOBAVA R, BOGDANOV F, et al. A hybrid MTL/MoM approach for investigation

- of radiation problems in EMC[C]//Proceedings of the 9th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, Oct. 11-14, 2004, Tbilisi, Georgia. [S.l.]: IEEE Press, 2004: 65-68.
- [8] ALA G, DI PIAZZA M C, TINE G, et al. Evaluation of radiated EMI in 42-V vehicle electrical systems by FDTD simulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4): 1477-1484.
- [9] SALIO S, CANAVERO F, LECOINTE D, et al. Crosstalk prediction on wire bundles by Kriging approach [C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug. 21-25, 2000, Washington, DC, USA. [S.l.]: IEEE Press, 2000, 1:197-202.
- [10] LIU G P, POMMERENKE D J, DREWNIK J L, et al. Anticipating vehicle-level EMI using a multi-step approach [C] // Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug. 18-22 2003, Boston, MA, USA. [S.l.]: IEEE Press, 2003, 1: 419-424.
- [11] SUN S S, LIU G P, DREWNIK 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.
- [12] WU M L, BEETNER D, HUBING T, et al. Estimation of the statistical variation of crosstalk in wiring harnesses [C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug. 18-22, Detroit, MI, USA. [S.l.]: IEEE Press, 2008: 1-7.
- [13] WU M L, BEETNER D G, HUBING T H, et al. Statistical prediction of "reasonable worst-case" crosstalk in cable bundles [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 2009, 51(3): 842-850.
- [14] 孙佳伟, 张敏. 汽车电缆线束的电磁兼容仿真分析[DB/OL]. (2006). <http://www.cst-china.cn>.
- [15] SMITH W T, PAUL C R, SAVAGE J S, et al. Crosstalk modeling for automotive harnesses [J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug. 22-26, 1994, Chicago, IL, USA. [S.l.]: IEEE Press, 1994: 447-452.
- [16] BELLAN D, PIGNARI S A. Estimation of crosstalk in nonuniform cable bundles [C] // Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug. 8-12, 2005, Chicago, IL, USA. [S.l.]: IEEE Press, 2005, 2: 336-341.

(编辑 张小强)

~~~~~

(上接第 47 页)

- [8] GONZALEZ J A, PARK K C, FELIPPA C A. Partitioned formulation of frictional contact problems using localized lagrange multipliers [J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2006, 22(4): 319-333.
- [9] GONZALEZ J A, PARK K C, FELIPPA C A, et al. A formulation based on localized lagrange multipliers for BEM-FEM coupling in contact problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008, 197(6-8): 623-640.
- [10] YANG T S, SPILKER R L. A lagrange multiplier mixed finite element formulation for three-dimensional contact of biphasic tissues[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2007, 129(3): 457-471.
- [11] AHN J, STEWART D E. An euler-bernoulli beam with dynamic frictionless contact; penalty approximation and existence[J]. Numerical Functional Analysis and Optimization, 2007, 28 (9-10): 1003-1026.
- [12] KESHAVARZ S, KHOEI A R, KHALOO A R. Contact friction simulation in powder compaction process based on the penalty approach [J]. Materials and Design, 2008, 29(6): 1199-1211.
- [13] KHOEI A R, TAHERI MOUSAVI S M. Modeling of large deformation - large sliding contact via the penalty X-FEM technique [J]. Computational Materials Science, 2010, 48(3): 471-480.
- [14] 陈万吉. 弹性接触问题有限元分析的一个新方法[J]. 机械工程学报, 1981, 9(4): 43-54.  
CHEN WAN-JI. A new method for analysis of elastic contact problems using finite element methods [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1981, 9 (4): 43-54.
- [15] 林腾蛟, 李润方, 陶泽光. 齿轮传动三维间隙非线性冲击—动力接触特性数值仿真[J]. 机械工程学报, 2000, 36(6): 55-58.  
LIN TENG-JIAO, LI RUN-FANG, TAO ZE-GUANG. Numerical simulation of 3-D gap type nonlinear dynamic contact-impact characteristics for gear transmission[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(6): 55-58.
- [16] 李润方. 齿轮传动的刚度分析和修形方法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998.

(编辑 张小强)