

文章编号:1000-582X(2011)01-088-06

汽车点火系统传导电磁干扰仿真

俞集辉¹, 贾晋¹, 汪泉弟¹, 李旭²

(1. 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;

2. 长安汽车工程研究院, 重庆 401120)

摘要:汽车点火系统工作时产生的电磁干扰具有能量大, 频带宽等特点, 被认为是汽车电磁兼容最主要的电磁干扰源。笔者提出了一种预测点火系统传导电磁干扰模型建立方法: 建立系统中每个部件的电路模型, 利用测量、解析法或有限元方法确定模型中的分布参数, 集成为点火系统等效电路模型进行系统仿真计算。时域与频域实验测试结果证实了该模型的正确性与方法的可行性。

关键词:点火系统; 传导电磁干扰; 分布参数; 有限元方法; 等效电路模型

中图分类号: TM154

文献标志码: A

The simulation of conducted EMI in the ignition system for automotives

YU Ji-hui¹, JIA Jin¹, WANG Quan-di¹, LI Xu²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Automobile Engineering Institute of Chang'an Automobile Corporation Limited, 401120 Chongqing, P. R. China)

Abstract: The ignition system in automobiles is a main source of electromagnetic interference (EMI), because the electromagnetic emission from the system has the characteristics of high-energy and wide-bandwidth. A method for EMI prediction based on its components' circuit models is presented. First, the characteristics of the components are analyzed and the equivalent circuits are drawn; then, the parasitic parameters of the electromagnetic device are extracted from measurement, analytical solution or finite element method (FEM); and finally, the circuit model of the whole ignition system model in high frequency condition is established. This model is verified by the measurement and simulation results in time domain and in frequency domain.

Key words: ignition systems; conducted electromagnetic interference; parasitic parameters; finite element method (FEM); equivalent circuit model

随着汽车工业的发展,越来越多的电子产品集成到汽车的各个系统中,这将使汽车内部的电磁环境变得极其复杂,各系统间的电磁干扰(EMI)现象日益严重^[1],所以商用汽车必须通过严格的电磁兼容(EMC)标准以限制汽车电磁发射量^[2]。其中汽

车点火系统在工作时将产生高电压瞬态电磁脉冲,对汽车内部电子器件有明显的电磁干扰,对外产生很强的电磁辐射^[3]。对汽车电气系统EMI特性进行预测是解决其电磁兼容问题的关键^[4-5]。

由于计算科学的高速发展,数值计算广泛应用

收稿日期:2010-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877081)

作者简介:俞集辉(1944-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电磁场数值计算、汽车电磁兼容的研究,
(E-mail)yujihui@cqu.edu.cn。

于汽车 EMC 问题的研究^[6],如有限元法(FEM)^[3],矩量法(MOM)^[7],时域有限差分法(FDTD)^[8]及传输线方法(TML)^[9]等。在汽车原型出厂前,通过数值仿真方法预测点火系统的 EMI 情况是有效途径,这种预测方法有利于减少后期 EMC 成本,优化系统的 EMI 特性及缩短生产周期。

实际应用中,通过仿真技术通常可以预测和解决设备级与系统级的 EMI 问题^[10]。为了能预测汽车点火系统电磁干扰情况,笔者将整个点火系统分为独立的模块,通过测量、解析方法或有限元法提取每个模块的分布参数,并在电路软件 SABERTM 建立相应的高频电路模型,仿真计算了火花塞两端电压以及人工电源网络(LISN)上在 0.15~20 MHz 内的 EMI 情况。

1 点火系统测试

汽车汽油发动机点火系统为被测试设备(DUT),该系统通过 LISN 连接 12V 的直流电源。LISN 除了能排除电源侧对测试结果的影响,也能为被测量系统在 EMI 的频带内提供稳定的 50 Ω 阻抗。点火系统的控制信号为频率 25 Hz,占空比 8% 的矩形脉冲。整个测试系统还包括数字示波器 Tektronix DPO4104,测量带宽 1GHz;高压探头 Tektronix P6015A,衰减系数 1 000 倍;电流探头 Tektronix A622。为了防止外界对测试结果的影响,整个测量在半波暗室中进行,如图 1 所示。

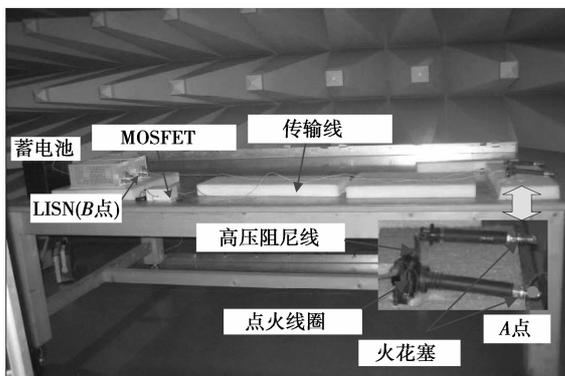


图 1 点火系统 EMI 测试示意图

2 电路模型

现代点火系统通常采用电子点火形式,系统中分为几个独立模块,其中包括传输线模块、控制模块(MOSFET)、点火线圈、高压阻尼线及火花塞,如图 2 所示。

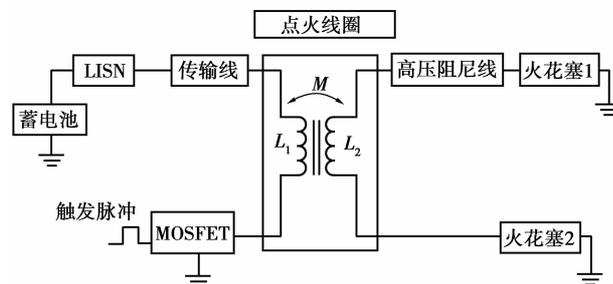


图 2 点火系统各模块示意图

笔者通过 MOSFET 控制点火系统初级线路的通断,其电路模型及其参数的求取参见文献[11]。而人工电源网络(LISN)采用厂家提供的标准电路模型,其他模块的电路模型建立与参数求取将做详细说明。

2.1 传输线模块

点火系统中的电源线以及控制线束都属于传输线。为了能够反映传输线的高频特性,采用 n 节 RLC 集总电路模型,如图 3 所示。其中 C_0 为单位对地电容, R_0 为单位电阻, L_0 为单位电感。

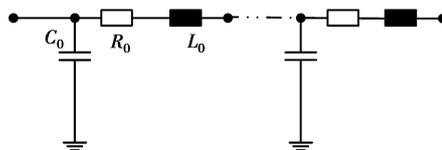


图 3 传输线电路模型

它们的值由 $\frac{R_{total}}{n} = R_0, \frac{L_{total}}{n} = L_0, \frac{C_{total}}{n} = C_0$ 确定,其中 R_{total} 与 L_{total} 为:

$$R_{total} = \rho \times \frac{L}{s}, \quad (1)$$

$$L_{total} = 5d \left\{ \ln \left(\frac{2L}{r} - 0.75 \right) \right\}, \quad (2)$$

式中: ρ 为传输线导体部分电阻率; L 为传输线长度; r 为传输线导体部分等效半径。 C_{total} 不存在解析式计算公式,可由有限元法分析根据式(3)求得,具体求解过程可参考文献[12]。

$$C_{total} = \frac{\int_{\Omega} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} d\Omega}{U^2}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{E} 与 \mathbf{D} 为当在传输线施加电压 U 时的电场强度矢量与电位移矢量值。当采用 $n=3$ 节 RLC 集总参数模型时,在频段 $1.0 \times 10^{-4} \sim 100$ MHz 内,计算值与实测值相吻合,如图 4 所示。

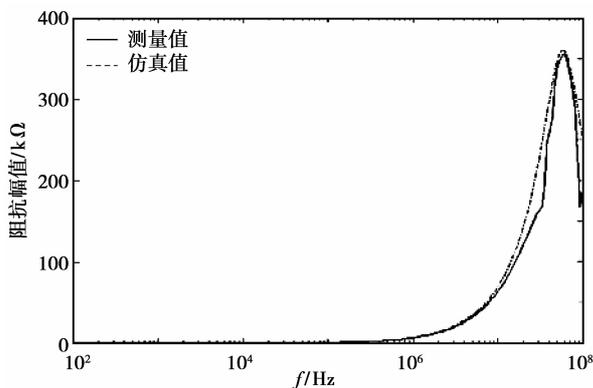


图 4 传输线阻抗特性测量值与仿真值

2.2 点火线圈模块

点火线圈在点火过程中实际为一瞬态变压器，由次级线圈所产生的高压而击穿火花塞。其三维模型及二维剖面图如图 5 所示。初次级线圈分别由 150 匝与 13 000 匝铜芯导线绕致而成。次级线圈分为 9 个线饼，每个线饼的线圈为 15~30 层，而每层为 30~60 匝导线。

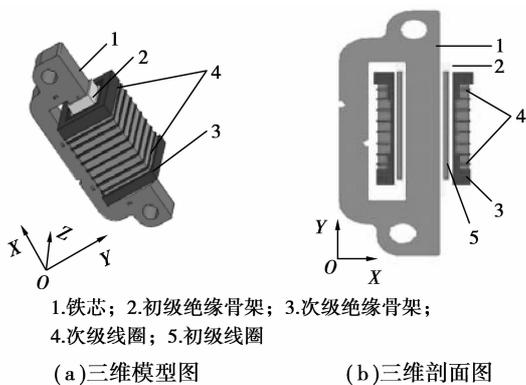


图 5 点火线圈模型

为了能够方便地将点火线圈模型进行 SPICE (电路仿真程序) 仿真，笔者采取集总参数电路模型。将线圈绕组分为多节独立线饼，每一独立线饼由 R , L , C 电路模型等效，线饼之间联系由耦合电容 C ，互感 M 等效或直接相连。图 6 为点火线圈绕组的等效电路模型。该模型一共分为 $n+1$ 节独立线饼 ($n=9$)。

由于点火线圈绕组匝数众多，不可能建立准确的三维模型，笔者将各线饼等效为实心导体，然后利用 Maxwell 3DTM 的静电场分析对等效后的点火线圈三维模型进行有限元剖分，然后基于能量原理^[12] 求取各线饼对地电容 C_g 以及各线饼间分布电容 C_p 。

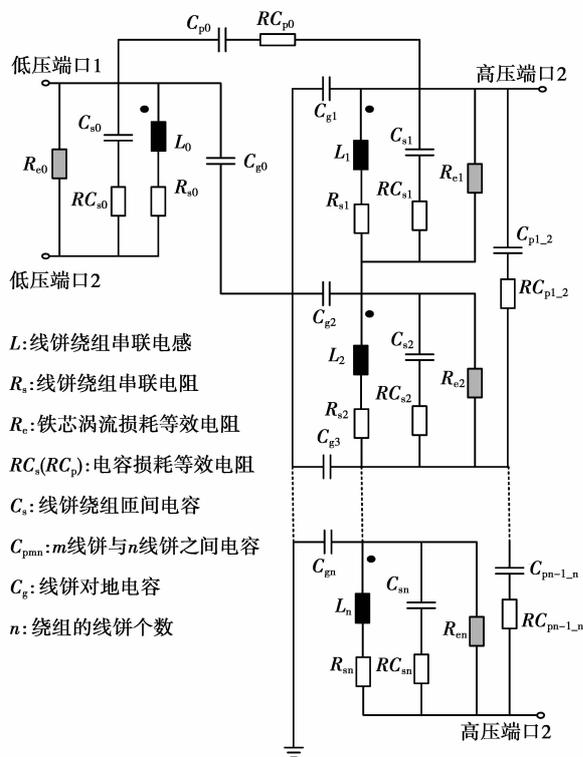


图 6 点火线圈等效电路模型

$$C_{ij} = \frac{\int_{\Omega} \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{D}_j d\Omega}{U_i U_j}, \quad (4)$$

式中： C_{ij} 为线饼 i 与线饼 j 间的电容，当 $i=j$ 时，即为线饼 i 的对地电容； \mathbf{E}_i 为线饼 i 施加电压 U_i 时的电场强度矢量； \mathbf{D}_j 为线饼 j 施加电压 U_j 时与电位移矢量值。同时为了求取每个线饼内绕组匝间电容 C_s ，采用等效电容方法，由式(5)得到。

$$C_s(N) = \frac{\sum_i^N \sum_j^N ij C_{ij}}{(N-1)^2}, \quad (5)$$

式中： N 为线饼的线圈总匝数； i 为第 i 匝线圈； j 为第 j 匝线圈； C_{ij} 为线圈 i 与线圈 j 间的电容，仍由有限元静电场分析得到。

为了求取线饼绕组电感 L ，将点火线圈各线饼等效为单匝线圈。然后利用 Maxwell 3DTM 的静磁场分析对简化后的点火线圈模型进行有限元分析，由该剖分网格从而计算得到求解区域内的磁场 \mathbf{H} 与磁感应强度 \mathbf{B} 分布，然后通过能量法由式(6)-(7) 求取各线饼的绕组电感 L 。

$$L_{ij} = N_i N_j \int_{\Omega} \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{H}_j d\Omega, \quad (6)$$

式中： L_{ij} 为 i, j 绕组通以单位电流时所求的两绕组间互感； \mathbf{B}_i 是绕组 i 中单位电流所产生的磁感应强度； \mathbf{H}_j 是绕组 j 中单位电流所产生的磁场强度； N_i ,

N_j 分别为绕组的线圈匝数。

绕组串联电阻 R_s 由电导率 ρ , 导线长度 l , 导线半径 r , 与集肤深度 δ 共同决定。

$$R_s = \frac{\rho l}{\pi(r^2 - (r - \delta)^2)} \quad (7)$$

由于测量的最高频率 100 MHz 时的集肤深度 δ 与本文模型中导线半径 r 相差不大, 故采用直流电阻 $R_s = 8.85 \Omega/\text{m}$ 就能足够反映实际的阻值情况。电容介质损耗等效电阻 RC_s (RC_p) 的计算公式为

$$R(f) = \frac{\tan\gamma}{2\pi fC}, \quad (8)$$

式中: C 为等效电阻的串联电容; $\tan\gamma$ 为介质损耗角正切; 根据文献[13], 电容损耗 3 种表达式的功率因素交点得到等效的频率点, 笔者取 $f = 1 \text{ MHz}$ 。表示铁芯中涡流损耗 R_e 主要影响绕组阻抗在整个频段内的最大值, 对谐振点影响不大, 计算方法可参考文献[14]。通过测试次级线圈阻抗特性, 计算值与测量值在 $1.0 \times 10^{-4} \sim 100 \text{ MHz}$ 内能吻合, 特别是在主要的谐振点上两者误差很小, 如图 7 所示。

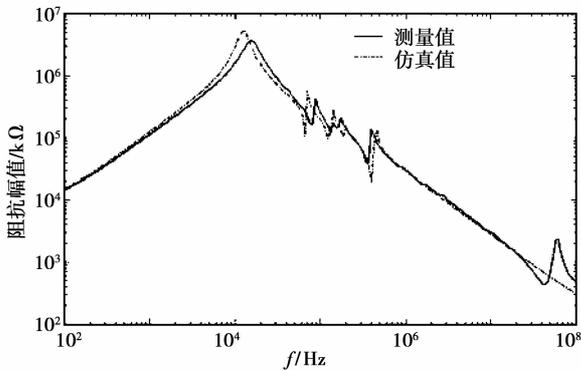


图 7 点火次级线圈阻抗特性

2.3 高压阻尼线模块

高压阻尼线在点火系统中连接点火次级线圈与火花塞。它的主要部分是高阻抗的线体, 其电阻丝环绕在绝缘海绵上, 因此可将其等效为空心螺线管, 等效电路如图 8 所示。图中 C_w 为螺线管匝间等效电容, C_{gh} 为螺线管对地电容, L 为电感, R 为电阻值。

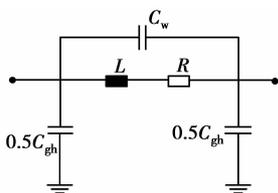


图 8 高压阻尼线电路模型

由于高压阻尼线电阻丝横截面积很小, 因此电阻值基本不随频率变化而变化, 故 R 直接由测量得到。同时螺线管电阻丝匝数众多并且密集排列, 类似于输电线对地电容的求取, 螺线管可等效为一空心圆柱体并利用有限元方法计算得到。匝间等效电容 C_w 与电感 L 由以下解析式计算得到^[14]。

$$C_w \approx \frac{\pi\epsilon \cdot 2\pi r}{\ln[a/r_w + \sqrt{a^2/r_w^2 - 1}]}, \quad (9)$$

$$L \approx \frac{\mu_0 N^2 \pi r}{l} \cdot T, \quad (10)$$

式中: ϵ 与 μ_0 分别为介电常数和真空磁导率; r 为螺线管横截面半径; a 为两相邻线圈中心距离; r_w 为电阻丝导线半径; l 为螺线管长度; T 为有限长螺线管修正因子。图 9 所示为高压阻尼线在 $1.0 \times 10^{-4} \sim 100 \text{ MHz}$ 内的阻抗特性测量曲线与计算曲线, 两者基本吻合, 从而验证了该电路模型与参数的正确性。

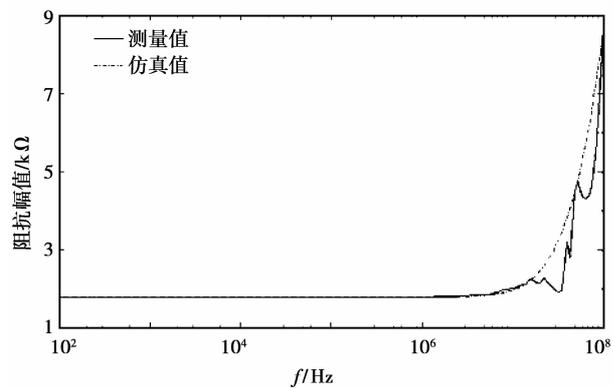


图 9 高压阻尼线的阻抗特性

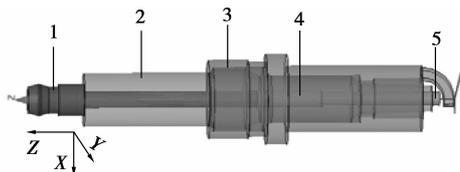
2.4 火花塞模块

火花塞是点火系统中的重要元件, 它的性能直接影响整个点火过程的质量。其结构主要由电阻、绝缘体、壳体、电阻前中心电极、电阻后中心电极等组成, 如图 10 所示。根据点火电流在火花塞中的通道^[15], 建立其电路模型, 如图 11 所示。 R_r 为火花塞内置电阻, 阻值大小主要由测量方法确定; r_g 为点火间隙等效电阻, 它随火花塞两端电压变化而呈非线性的变化, 在 SABERTM 电路仿真器中有专门的模块。 C_r 、 C_p 、 C_q 分别为内置电阻、电阻前中心电极、电阻后中心电极与金属壳体的电容, 其值仍由有限元法分析根据能量法(4)计算得到。图 12 为火花塞阻抗特性曲线的测量值与计算值。

3 仿真与测试结果

基于以上各模块的高频电路模型, 在 SABERTM

仿真平台上建立整个点火系统的电路模型。为了确保该电路模型在时域内的正确性,首先仿真计算了图 1 中 A 点即点火塞电压时域波形,如图 13 所示;图 14 为 LISN 上 B 点的 EMI 电压频谱图。



1. 电阻前中心电极; 2. 绝缘体; 3. 壳体;
4. 内置电阻; 5. 电阻后中心电极

图 10 点火塞物理模型

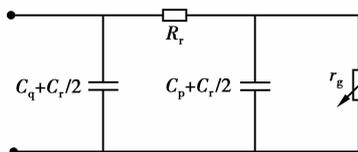


图 11 火花塞电路模型

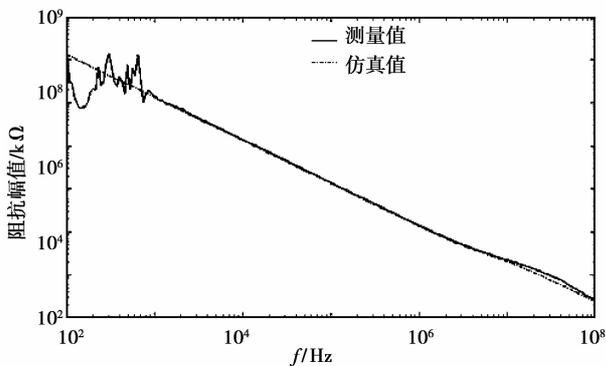


图 12 火花塞阻抗特性

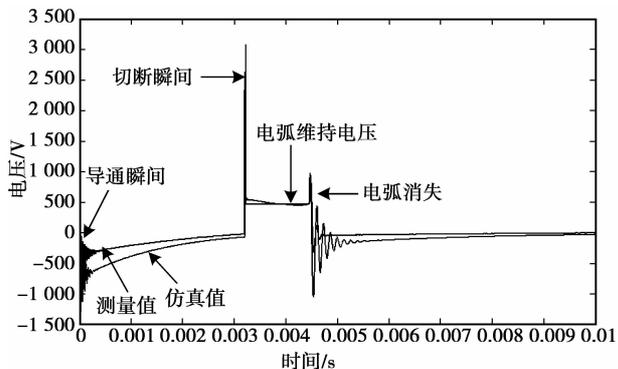


图 13 点火塞电压时域测量值与计算值

图 13 中仿真与测量结果比较吻合。当 $t \approx 0$ ms 时,点火线圈初级线路导通,导通瞬间由于初次线圈间的互感,在火花塞两端形成一个反向冲击

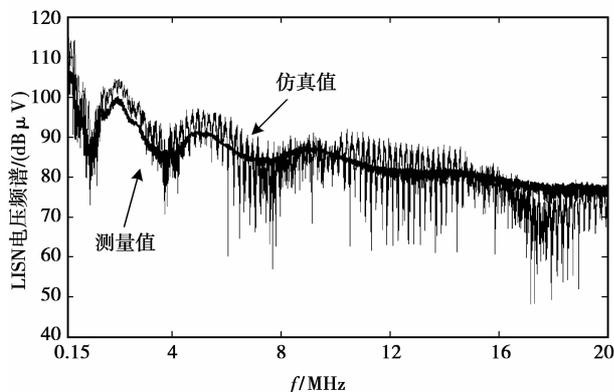


图 14 LISN 电压频域测量值与计算值

电压(约 -1 kV),又由于分布电容与电阻的存在,反向电压呈振荡型衰减,这一过程一直持续到充电结束; $t \approx 0.0035$ ms,点火线圈初级线路快速切断,在次级火花塞形成正向击穿电压(约 3 kV),这一过程伴随着分布电容的快速放电,因此将产生很强的电磁骚扰,并且火花塞电压由于电弧的存在而稳定在 500 V 左右; $t \approx 0.0045$ ms,当点火电流小于电弧最小维持电流时,电弧将消失,这时电压将振荡衰减到零。仿真结果在导通瞬间与电弧消失时的电压振荡幅值与衰减周期比测量结果都要大,这可能是由于实验中蓄电池的电阻以及与其相连的接线头的电阻没有考虑,同时其他无法计算的杂散参数也影响测试结果。

图 14 中,LISN 上 EMI 电压频谱在 $0.15 \sim 20$ MHz 内仿真值与测量值基本吻合。两者最大值包络线的误差在 10 dB 以内;仿真频谱由于是从时域信号通过傅立叶变换(FFT)而来,而测量值直接由频谱仪测量得到,因此两者最小值包络线相差比较大。

4 结 语

为了能够预测点火系统传导 EMI 情况,建立了点火系统高频电路模型。整个电路模型由各个子模块组成,每个模块的电路参数通过解析算法、测量法以及有限元法计算得到。为了确保每个子电路的正确性,计算并测量了电路在 $1.0 \times 10^{-4} \sim 100$ MHz 内的阻抗特性。最后在 SABERTM 仿真平台上进行了整个点火系统的时域仿真,点火塞电压在时域内与测量值比较吻合;LISN 上 EMI 电压频谱在 $0.15 \sim 20$ MHz 内仿真结果与测量结果相近。若要能够预测 20 MHz 以上的频谱,尚需进一步建立基于频域的仿真模型。

参考文献:

- [1] 梁振光. 汽车电磁兼容研究现状[J]. 安全与电磁兼容, 2006(5): 89-93.
LIANG ZHEN-GUANG. Current status of automotive electromagnetic compatibility studies [J]. Safety & EMC, 2006(5): 89-93.
- [2] 余召锋,于颖,徐鸣谦. 国内外汽车电磁兼容研究发展状况[J]. 客车技术与研究,2007(2): 8-10.
YU ZHAO-FENG, YU YING, XU MING-QIAN. Overview on automotive EMC research at home and abroad[J]. Bus Technology and Research, 2007 (2): 8-10.
- [3] FREI S, JOBAVA R G, TOPCHISHVILI D. Complex approaches for the calculation of EMC problems of large systems [C/OL]//2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Eindhoven, The Netherlands, August 9-13, 2004, 3:826-831[2004-11-01]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1349929.
- [4] CHEN C. Examination of electronic module immunity using transfer functions[C/OL]// 2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 8-12, 2005, 3: 756-761 [2005-10-03]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1513625.
- [5] FREI S, JOBAVA R G, KARKASHADZE D, et al. Calculation of low frequency EMC problems in large systems with a quasi-static approach [C/OL]// 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Eindhoven, The Netherlands, August 9-13, 2004, 3: 798-803 [2004-11-01] . http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1349924.
- [6] CANAVERO F, KEDZIA J C, PAVIER P. Numerical simulation for early EMC design of cars[C/OL]// 4th European Conference on Electromagnetic Compatibility, Brugge, Belgium, September 11-15, 2000. www.esi-group.com/autoEMC/Papers/SyntReport.pdf.
- [7] JOBAVA R G, BOGDANOV F G, GHEONJIAN A L, et al. Analysis of influence of vehicle body Shell on the characteristics of wire antennas using a new MoM-based EM/EMC solver [C/OL]// 2003 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, June 22-27, 2003, 4: 831-834 [2003-08-18]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1220401.
- [8] ANZALDI G, RIU P J, SILVA F, et al. Finite difference time domain low cost modeling for automotive environments[C/OL]// 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 9-13, 2004, 3: 775-780 [2004-11-01]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1349920.
- [9] WARD D D, LAWTON S. Numerical modeling for automotive EMC [C/OL]// 1995 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Atlanta, GA, USA, August 14-18,1995[2002-08-06]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=523551.
- [10] ALA G, DIPIAZZA M C, TIN G, et al. Numerical simulation of radiated EMI in 42V electrical automotive architectures [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4):879-882.
- [11] CHEN S, NEHL T W, LAI J S, et al. Towards EMI prediction of a PM motor drive for automotive applications [C/OL]// Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 9-13,2003, 1:14-22[2003-02-19]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1179170.
- [12] 刘国强,赵凌志,蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [13] YOSHIKAZUS, TAKUTO M, TSUNEHARU T. Modelling and analysis of transformer winding at high frequencies [C/OL]//The International Conference on Power Systems Transients (IPST05), Hilton Montréal Bonaventure Hotel , June 19-23, 2005. <http://www.ipst.org/IPST05Papers.htm>.
- [14] BENECKE J, STEFAN D. Analytical HF model for multipole DC motors[C/OL]//Proceedings of the 18th international Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Munich, Germany, September 24-28, 2007[2007-11-27]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4388230.
- [15] LI X, YU J H, WANG Q D, et al. Noise spark current current level cause by capacitive discharge in an automotive secondary ignition system [C/OL]//2007 IEEE International symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wirless Commulations, Hangzhou, August 16-17, 2007[2007-12-04]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4393519.