

文章编号:1000-582X(2010)04-026-05

汽车雨刮器机电磁辐射干扰预测模型

汪泉弟¹, 李飞¹, 周尚华¹, 刘青松^{1,2}, 魏欣³, 司海涛¹

(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. 重庆嘉斯特质量检测有限公司, 重庆 401122; 3. 四川电力职业技术学院, 成都 610072)

摘要:根据信号与系统理论, 导出了辐射系统的传递函数; 建立了基于 FIT 算法的雨刮器电机辐射系统计算模型, 并用仿真软件 CST 计算获得了系统的传递函数; 电机端电压作为系统的辐射干扰源, 用实验的方法获取; 传递函数和电机端电压之积便是电机产生的辐射电场。由此, 将复杂的电机辐射问题转化为提取系统传递函数和测量电机端电压的较为简单的问题来处理。仿真与实验结果的对比说明, 该辐射干扰预测模型能够准确反映电机电磁辐射系统的基本特征, 可用于雨刮器电机的电磁兼容预测研究。

关键词:雨刮器电机; 辐射干扰; 传递函数; 有限积分法

中图分类号: TM331

文献标志码: A

Prediction model on the radiated electromagnetic interference of wiper motor in automobile

WANG Quan-di¹, LI Fei¹, ZHOU Shang-hua¹, LIU Qing-song^{1,2}, WEI Xin³, SI Hai-tao¹

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

2. National Motor Vehicle Quality Supervision & Inspection Center, Chongqing 401122, P. R. China;

3. Sichuan Electric Vocational and Technical College, Chengdu 610072, P. R. China)

Abstract: According to the theory of signals and systems, the radiated system's transfer function is derived, the radiation electromagnetic interference(EMI) simulation model of the wiper motor based on the finite integration technique(FIT) algorithm is established, and the whole system's transfer function are obtained in the environment of simulation software CST. The terminal voltage of the motor, as the noise source of radiation system, can be gained with experiment. The radiation electric field can be calculated by transfer function multiplying motor's terminal voltage. Then the complex question of motor's system-level radiation can be transformed to the simple problems of computing system's transfer function and the motor's terminal voltage. By comparing simulation and experiment results, it is showed that the radiated EMI simulation model of the motor can demonstrate the essential feature of motor's electromagnetic radiation system accurately, which means that it can be used in the research of wiper motor EMC forecasting.

Key words: wiper motor; radiation electromagnetic interference; finite integration technique; transfer function

收稿日期:2009-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877081);重庆大学“211 工程”资助项目(S-09111)

作者简介:汪泉弟(1954-),女,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电磁场理论及应用、电磁场数值计算及汽车电磁兼容技术等方面研究,(E-mail) wangquandi@yahoo.com.cn.

我国汽车行业从 2003 年开始强制执行 GB18655《用于保护车载接收机的无线电骚扰特性的限值和测量方法》,闪光器、暖风机电机和雨刮器电机成为 3 种需强制检测的汽车零部件。其中,雨刮器电机的检测通过率仅 5.9%,是 3 种汽车零部件中通过率最低的^[1]。如何解决雨刮器电机的电磁兼容问题,提高汽车的可靠性和安全性,已成为一个非常重要和迫切需要研究的课题。

雨刮器电机在启动过程中会产生超过电流额定值 10~20 倍的脉冲电流,电枢绕组在换向过程中更会在其电源线上产生高频瞬变电压^[2-3]。大量的测试数据及经验表明,电源线是雨刮器电机对外引起电磁干扰的重要途径^[4]。这些电磁干扰不仅会通过导线之间的杂散电容和电感耦合进入控制线,信号线等线路,还会通过导线的天线效应,将干扰电磁能量以电磁波的形式向周围空间传播,产生辐射干扰,严重影响汽车内外电子设备的正常工作。

国内外对汽车及雨刮器电机这一类直流电机的电磁兼容问题已做了很多研究,但大多停留在射频段(0.1~100 MHz)^[5-7],而零部件产生辐射干扰最严重的频段在 30~1 000 MHz,目前对 100 MHz 及以上的高频特性研究较为鲜见^[8]。如何建立准确的高频辐射干扰预测模型,对生产商解决雨刮器电机高频段电磁兼容问题至关重要,但是要在 30 MHz~1 000 MHz 如此宽且高的频段内对雨刮器电机辐射干扰进行预测研究将面临两大难题:一是雨刮器电机的高频特性异常复杂,很难获得较准确的电机模型;二是计算电机电源线上的电流分布十分困难。基于以上原因,文中根据信号与系统理论,将复杂的电机辐射问题转化为提取系统传递函数和测量电机端电压的较为简单的问题来处理,从而建立起雨刮器电机辐射电磁干扰预测模型。实验结果表明该模型在 30~1 000 MHz 频段与实际情况吻合较好,可用于雨刮器电机辐射干扰的预测。

1 传递函数的导出

导线是效率很高的电磁波辐射天线,当传输信号频率超过 30 MHz 时,会产生明显的电磁辐射^[9]。而雨刮器电机的辐射干扰主要源于与其连接电源线上的传导电流或电压^[10],可将响应(辐射 EMI)与激励(传导电流或电压)之间的关系以传递函数的形式来表示^[11]。

图 1 为带有单根导线的雨刮器电机辐射示意图。图中方框表示雨刮器电机,电机产生的噪声电流沿线分布是不均匀的,可表示为^[12]

$$I_{CE}(\omega, x) = I_{CE}(\omega, 0)D(\omega, x)。 \quad (1)$$

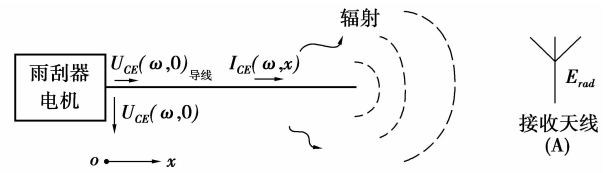


图 1 雨刮器电机电磁噪声辐射示意图

其中, $I_{CE}(\omega, x)$ 是导线上位于 x 处的电流; $I_{CE}(\omega, 0)$ 为导线近电机端,即 $x = 0$ 处的电流; $D(\omega, x)$ 表示分布函数,是与频率和导线布置有关的复杂函数,一旦导线布局确定, $D(\omega, x)$ 便确定。

导线上的噪声能量大部分通过导线以电磁波的形式向周围空间辐射,如果将整段导线电流等效为电流元的集合,那么位于观察点 A 处的天线接收到的辐射场强则是每一电流元分别在 A 点产生的辐射场强的叠加,故 A 点的辐射场强 $E_{rad}(\omega)$

$$E_{rad}(\omega) = \int_{x=0}^L [I_{CE}(\omega, x)R(\omega, x)dx]。 \quad (2)$$

其中, L 为导线的长度, $R(\omega, x)$ 为电流元辐射因子,与频率和导线布置以及周围环境相关。将(1)式代入(2)式得:

$$E_{rad}(\omega) = \int_{x=0}^L [I_{CE}(\omega, 0)D(\omega, x)R(\omega, x)]dx = I_{CE}(\omega, 0) \int_{x=0}^L [D(\omega, x)R(\omega, x)]dx。 \quad (3)$$

如以 $U_{CE}(\omega, 0)$ 表示 $x = 0$ 处的对地电压, $Z_{CE}(\omega, 0)$ 表示导线近电机端向 x 的正方向看过去的输入阻抗,则

$$I_{CE}(\omega, 0) = \frac{U_{CE}(\omega, 0)}{Z_{CE}(\omega, 0)}。 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得:

$$E_{rad}(\omega) = \frac{U_{CE}(\omega, 0)}{Z_{CE}(\omega, 0)} \int_{x=0}^L [D(\omega, x)R(\omega, x)dx] = U_{CE}(\omega, 0)K(\omega)。 \quad (5)$$

其中,

$$K(\omega) = \frac{\int_{x=0}^L [D(\omega, x)R(\omega, x)dx]}{Z_{CE}(\omega, 0)}。 \quad (6)$$

为系统的传递函数,表示辐射场强与导线近电机端电压的比值,一旦系统布局确定, $K(\omega)$ 也就确定了。因此,雨刮器电机在观测点所产生的辐射场强可由传递函数 $K(\omega)$ 和导线近电机端的电压 $U_{CE}(\omega, 0)$ 确定。

2 基于传递函数的电机辐射模型

2.1 传递函数的提取

传递函数 $K(\omega)$ 是关于频率、导线布置和周围环境的复杂函数,直接计算是不可能的。为提取

$K(\omega)$,选用电磁场仿真软件 CST 微波工作室。该软件的算法基础-有限积分法 (Finite Integration Technique—FIT),是麦克斯韦积分方程在网格空间的离散形式,于 1977 年由 T. weiland 等人提出。FIT 在分析电机辐射问题时具有以下优点:

- 1) 相对于有限元法和矩量法,数据存储量低;
 - 2) 采用循环迭代“蛙跳算法”,避免了大型线性方程组的求解,可提高计算效率;
 - 3) 采用时域求解,能预见电磁系统的瞬态响应。将瞬态数据转换到频域,可获得系统的宽频带响应。
- 另外,结合局部加密技术和多级子网格技术,FIT 对复杂系统的导线电磁辐射仿真具有明显优势。

为了与实验验证环境一致,在 CST 微波工作室建立仿真模型如图 2 所示。

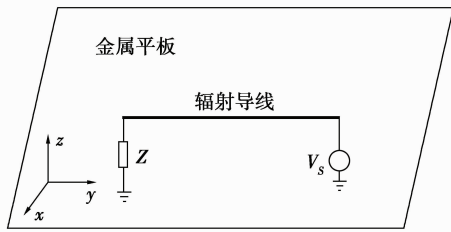


图 2 金属平板上单根导线的辐射

图 2 中,金属平板面积为 $2.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$,导线长 1.5 m ,距边缘 0.1 m ,平行位于平板上方 0.05 m 处。导线左端阻抗 Z 表示人工电源网络(LISN),因 LISN 在给定频率范围内为电路提供大小为 $50\ \Omega$ 的恒定阻抗^[13],故 $Z=50\ \Omega$ 。导线右端的 V_s 表示雨刮器电机,为系统激励源。由于是线性系统,系统传递函数与激励源无关,因此在 V_s 的选取上,采用单位高斯脉冲,即

$$V_s(t) = \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) \quad (7)$$

其中, t_0 为峰值出现时间, τ 为常数,决定了高斯脉冲的宽度。通过适当选择 τ 可以激励出满足需要的频率范围^[14]。因高斯脉冲的频宽由 $f=2/\tau$ 决定,当取 $\tau=1.9\text{ nS}$ 时,即可覆盖电机辐射干扰的频率范围。

在保证电机辐射干扰基本特征不改变和满足精度要求的前提下,为了减少计算量,对仿真计算模型做如下假设:

- 1) 忽略导线和金属平板的阻抗,设为理想导体(PEC);
- 2) 计算区域设为 $3.2\text{ m} \times 1.7\text{ m} \times 1.25\text{ m}$ 。在边界截止处,采用 PML(perfectly matched layer)为吸收边界条件^[15]。

3) 离散网格尺寸由 $\delta=\lambda/N$ 确定^[16], (λ 为计算频率上限对应的波长。为了满足数值色散对空间离散间隔的要求,一般取 $N \geq 10$,因此这里取 $N=10$,相应离散网格的最大尺寸大致在 3.0 cm 。

4) 将探针(观察点)设在距导线中心水平位置 1 m 远处,计算获取该点水平和垂直方向的辐射电场。

用 CST 瞬态求解器进行仿真分析时,计算空间剖分采用自适应网格加密技术,并设定误差为 1% 。最后满足给定误差范围的剖分单元共计 $504\ 896$ 个。因激励源幅值为单位值,因此计算得到的观察点电场分布也即系统的传递函数,如图 3 所示。

图 3 中,实线表示水平方向的传递函数,虚线表示垂直方向上的传递函数。从图中可以看出,垂直方向的传递函数远大于水平方向的,说明导线辐射具有天线的方向性,导线的天线效应十分明显。

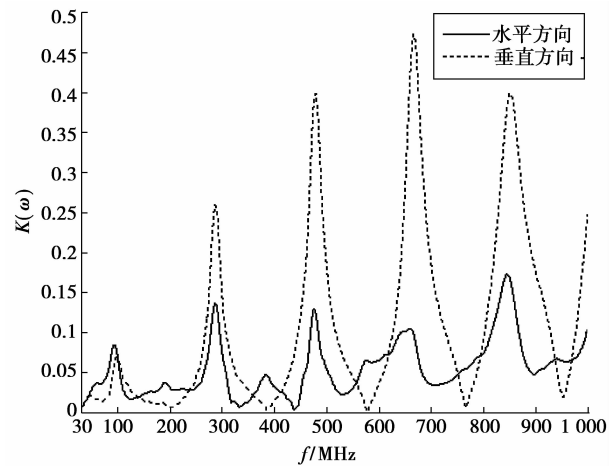


图 3 水平和垂直方向的传递函数

2.2 电机端电压的测量

以型号为 ZD1439 的雨刮器电机为测试对象,其主要性能参数见表 1。

表 1 雨刮器电机主要性能参数

输出功率 /W	额定电压 /V	极数	额定转速 /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	移刷	电刷压降 /V	工作温度 / $^{\circ}\text{C}$
40	12.0	2	2 750	0	0.5	25

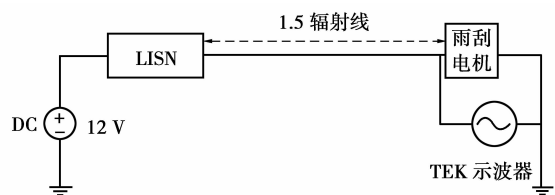


图 4 电机端电压测量原理图

图 4 为测量电机端电压的试验线路连接原理

图。为防止雨刮器电机产生的电磁干扰进入电源,同时衰减来自电源的干扰信号,电源通过 LISN 对雨刮器电机供电。电压测量仪采用 TEK 示波器,采样时间间隔为 4×10^{-10} S,采样点数为 10^4 个,频带分辨率为 0.25 MHz。将示波器记录的电压时域数据导入 MATLAB 软件中作傅里叶变换,最后得到导线近电机端电压 $U_{CE}(\omega, 0)$ 的频域值如图 5 所示。

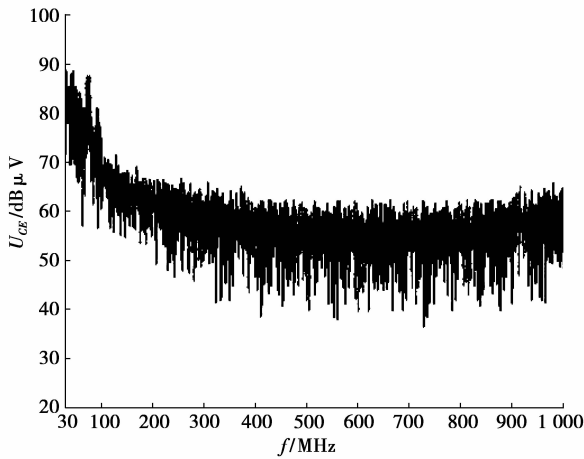


图 5 电机端电压频域图

通过实测得到了雨刮器电机辐射干扰的激励源—导线近电机端的端电压 $U_{CE}(\omega, 0)$,结合仿真获得的系统传递函数 $K(\omega)$,在 MATLAB 中由式(6)仿真获得雨刮器电机在观测点处产生的水平和垂直方向上电场的辐射特性。

3 仿真与实验对比分析

雨刮器电机辐射发射实验在重庆市电磁兼容工程技术研究中心的电波暗室完成,实验按照 GB18655 中关于汽车零部件/模块的辐射发射测试规范的要求进行,实验现场布置如图 6 所示。

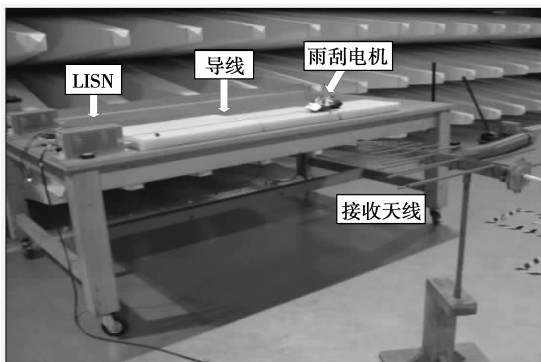


图 6 辐射发射标准测试布置图

图 6 中,测试台面尺寸为 $2.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,高度为 0.9 m ,台面上装有 2 mm 厚的接地镀锌钢板。雨

刮器电机用单电源通过 LISN 供电,LISN 和电机之间的电源线距测试台边缘 0.1 m ,长度为 1.5 m ,并用绝缘材料支撑使其高于测试台 0.05 m 。接收天线距导线中心 1 m 远处,接收水平和垂直方向的辐射电场。测量的频率范围覆盖 $30 \sim 1\,000 \text{ MHz}$ 频段。仿真和实验结果如图 7 和图 8 所示。

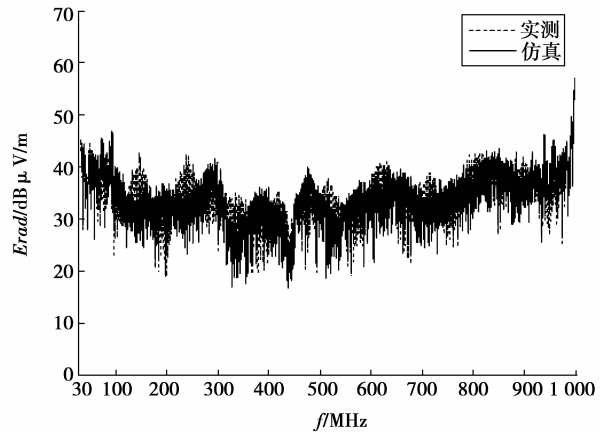


图 7 雨刮器电机水平方向的辐射电场

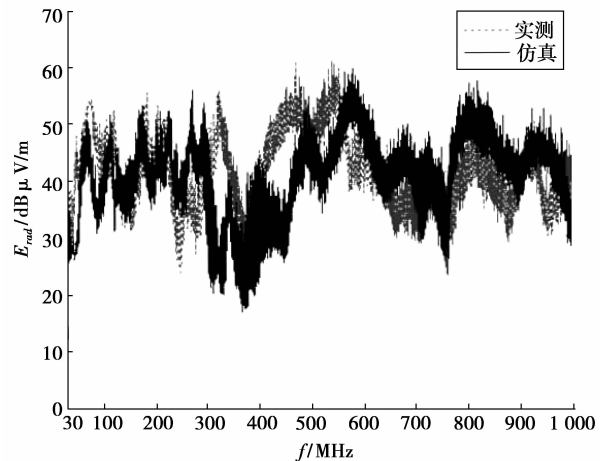


图 8 雨刮器电机垂直方向的辐射电场

从图 7 可以看出,水平方向辐射电场的仿真与实测值在整个频段内吻合较好,仿真与实测的最大误差出现在 144 MHz 处,为 $6.32 \text{ dB}_\mu\text{V/m}$,在频段 $235.5 \sim 244 \text{ MHz}$ 误差也相对较大。图 8 中,垂直方向辐射电场的仿真与实测值误差虽与水平方向的相比较有所加大,但是从总体上看变化趋势基本一致。分频段来看, $30 \sim 200 \text{ MHz}$ 仿真与实测值吻合度较高。最大误差出现在 312 MHz 附近,为 $22.6 \text{ dB}_\mu\text{V/m}$ 。在 $320 \sim 340 \text{ MHz}$ 、 $440 \sim 530 \text{ MHz}$ 及 $943 \sim 980 \text{ MHz}$ 误差相对而言较大,但在 $12 \text{ dB}_\mu\text{V/m}$ 以内。综合上述分析,在低频段特别是在雨刮器电机容易超标的 $30 \sim 100 \text{ MHz}$ 频段内,水平和极化方向的辐射电场仿

真与实测值吻合度相当高,误差在4 dB μ V/m以内。在30~1 000 MHz整个频段,仿真模型能够很好的反应辐射电场的实际情形,说明建立的仿真预测模型是合理的,采用的方法是正确的。

4 结 论

雨刮器电机电磁辐射干扰预测是一复杂系统问题。通过对电机产生电磁辐射干扰机理的分析,根据信号与系统理论,结合仿真计算出的电机辐射系统传递函数和实验测取的电机端部电压,得到雨刮器电机电磁辐射干扰的预测模型,从而将复杂问题得以简化处理。分析对比观察点处水平和垂直辐射电场的仿真结果与实验结果,两者变化趋势基本一致,误差在合理范围内,表明该预测模型能够准确反映电机电磁辐射系统的基本特征,将有助于生产商对雨刮器电机的电磁干扰特点提出有针对性的抑制措施,从而提高汽车雨刮器电机的电磁兼容性。

此外文中的研究方法可推广到汽车其它电器部件的电磁兼容预测研究,为提高汽车电系统的电磁兼容性能,具有一定的指导及借鉴意义。

参考文献:

- [1] 王玮敏,王昌文.我国汽车零部件的电磁兼容性产品水平的现状分析[EB]. [2009-10-08]http://www.catac.org.cn/bzh/html/wgqclbjdejr.pdf.
- [2] 周尚华,俞集辉,贾晋.永磁直流电动机传导干扰的建模与仿真[J].重庆大学学报,2009,32(5):539-543.
ZHOU SHANG-HUA, YU JI-HUI, JIA JIN. Modeling and simulation of the conducted electromagnetic interference for permanent magnet direct current motors [J]. Journal of Chongqing University, 2009,32(5):539-543.
- [3] GENG J P, JIN R H, YU F, et al. The study on electromagnetic compatibility of DC electric motor in HAPS [J]. Aerospace Science and Technology, 2005, 9(7):617-625.
- [4] MABUCHI Y, NAKAMURA A, HAYASHI T, et al. A feasibility study for reducing common-mode current on the wire harness connected to electronic control units [J]. Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics), 2007, 90(9):19-31.
- [5] MUTOH N, NAKANISHI M, KANESAKI M, et al. Control methods for EMI noises appearing in electric vehicle drive systems [C] // IEEE Applied Power Electronics Conference, March 16-20, 2005, Austin, Texas, USA; IEEE, 2005:1022-1028.
- [6] HUANG X D, PEPA E, LAI J S, et al. EMI characterization with parasitic modeling for a permanent magnet motor drive [C] // Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2003, v1: 416-423.
- [7] MOHAMMED O A, GANU S, ABED N, et al. High frequency PM synchronous motor model determined by FE analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006,42(4):1291-1294.
- [8] 梁振光,唐任远.电机的电磁兼容问题[J].中小型电机, 2004,19(2): 66-70.
LIANG ZHEN-GUANG, TANG REN-YUAN. Problems of electromagnetic compatibility for electric machines[J]. S & M Electric Machines, 2004, 19(2): 66-70.
- [9] 俞集辉,郑亚利,邹志星.车内导线串扰和辐射仿真研究[J].系统仿真学报,2008,20(17):4737-4739.
YU JI-HUI, ZHENG YA-LI, ZOU ZHI-XING. Simulation study on crosstalk and radiation of wire inside automobile [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(17):4737-4739.
- [10] LIU G P, CHEN C C, TU Y H, et al. Anticipating full vehicle radiated EMI from module-level testing in automobiles [C] // 2002 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, September 9-13, 2002, Sorrento, Italy; IEEE, 2002.:982 - 986.
- [11] CHEN S, NEHL T W, LAI J S, et al. Towards EMI prediction of a PM motor drive for automotive applications [C] // Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Feb 9-13, 2003, Florida, US. Florida; IEEE, 2003: 14-22.
- [12] CHEN C C. Certification of the total contents of the aqua regia soluble contents of Cd, Co, Cu, Pb, Mn, Ni, and Zn in a sewage sludge [C] // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug. 13-17, 2001, Montreal, Canada; IEEE, 2001: 1146-1151.
- [13] PAUL C R.电兼容导论[M]. 闻映红 译.北京:机械工业出版社,2006:297-298.
- [14] 耿军平,金荣洪,程月波.平流层空中信息平台中电机电磁干扰研究[J].电波科学学报,2005, 20(3):300-305.
GENG JUN-PING, JIN RONG-HONG, CHENG YUE-BO. Analysis of electromagnetic interferences of electric machine in stratospheric information platform [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(3): 300-305.
- [15] 王永刚,行文军,谢万学,等.完全匹配层吸收边界条件的研究[J].中国石油大学学报,2007,31(1):19-24.
WANG YONG-GANG, XIE WEN-JUN, XIE WAN-XUE, et al. Study of absorbing boundary condition by perfectly matched layer [J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(1):19-24.
- [16] 俞集辉,马晓雷.车载天线电磁特性及耦合度的仿真研究[J].系统仿真学报,2008,20(6):1603-1610.
YU JI-HUI, MA XIAO-LEI. Simulation and Research on Electromagnetic character and coupling degree of vehicle antennas [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(6): 1603-1610.

(编辑 张小强)