

文章编号:1000-582X(2008)10-1149-05

汽车点火系统电磁干扰的模拟仿真

李永明, 邓前锋, 俞集辉, 汪泉弟, 李 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 400030)

摘 要:点火系统工作时初级回路的瞬变电压引起的传导干扰将对蓄电池电压造成冲击,并通过导线干扰车内 ECU 和其它电子设备的正常工作;同时火花塞间隙击穿时的火花电流噪声对车内形成极强的辐射干扰。根据点火过程中初级电路和次级回路建立的电路模型,计算了点火线圈初级电压、电流在开关闭合到断开过程中的波形变化和次级回路的火花电流,并将高压导线等效为单极天线计算了在车内的辐射电场分布,比较了高压导线的工作频率和终端负载的影响。研究表明,采用阻尼导线和增大火花塞内电阻都可以有效抑制火花电磁噪声。

关键词:汽车点火系统;电磁干扰;点火线圈;火花塞;高压导线

中图分类号:TM12

文献标志码:A

Simulation of an automobile ignition system electro magnetic interference

LI Yong-ming, DENG Qian-feng, YU Ji-hui, WANG Quan-di, LI Xu

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment, System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: When an ignition system operates, conducted interference caused by transient voltage of the primary circuit will impact on the accumulator and the disturbance will travel throughout the vehicle via wiring. The ignition system can disrupt the Electronic Control Unit and the normal operation of other electrical devices. Spark plug gap noise simultaneously produces very strong radiation interference in a vehicle. We analyzed the changes of the ignition coil voltage and current when an ignition switch was turned on and off. A discharged circuit model of spark plug also was set up. The electric field distribution in an automobile was calculated. For these calculations, the high-voltage wire was considered to be a unipole antenna. This simulation indicates that using either damped wire or adding spark plug resistance can suppress spark noise effectively.

Key words: ignition system; electro magnetic interference; ignition coil; spark plug; high-voltage wire

伴随着汽车工业的发展和电子技术的进步,汽车上使用越来越多的电子产品,这些电子产品在增加汽车的经济性、安全性和舒适性的同时,也使汽车的电磁兼容问题变得更为复杂,从而使汽车电磁兼容性问题日益突出^[1-3]。

点火系统是汽车内最主要的干扰源。早在

1906年,人们就发现道路上行驶的发动机系统对周围的无线电收音机会产生干扰,从而提出对汽车点火系统产生的电磁干扰加以限制。但此项工作是汽车电磁干扰抑制、实现电磁兼容性设计的难点之一。点火系统涉及到点火电路性能、点火能量控制、点火时刻控制、汽缸工况等诸多技术问题。点火过程中

收稿日期:2008-05-10

基金项目:重庆市自然科学基金重点资助项目(2006BA6015)

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方向的研究,(E-mail) cqliym@cqu.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

产生大量的电磁骚扰,主要分为点火线圈一次回路瞬变电压引起的传导干扰、高压导线和火花放电的高频辐射干扰等。传导干扰不仅对蓄电池电压造成冲击,同时还可通过电源线传到车内其他电子设备。高频电磁辐射对车内电子控制单元(ECU)也可能产生较大影响,从而对汽车安全性方面产生严重的危害^[4]。因而点火系统电磁兼容性研究是目前众多汽车生产商和研究单位关注的重点。

1 点火系统工作原理及电磁干扰的形成

现代汽车点火系统主要由蓄电池、点火开关、点火线圈、高压点火导线、分电器和火花塞等组成,其简化模型图如图 1 所示。

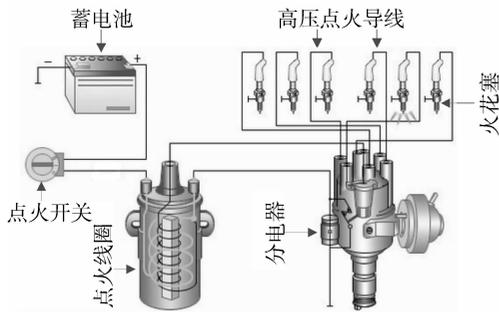


图 1 点火系统简化的原理图

当汽车启动时,分电器连同凸轮在发动机凸轮轴的驱动下旋转,凸轮旋转时交替地使断电器触点打开与闭合。在点火开关接通的情况下,当触点闭合时,点火线圈一次绕组中有电流流过,从而在铁芯中产生磁场。当断电器触点打开时,一次电路被关断,一次绕组中的电流迅速下降到零,引起磁通突降,并在一次绕组中产生幅值达 200~300 V 的自感电动势 $U_{1\max}$ 。二次绕组在互感的作用下产生与匝比成正比的高达 15~20 kV 的高压电动势 $U_{2\max}$ 。该电动势使火花塞间隙击穿,产生电火花,点燃发动机气缸中的混和气体^[5]。

1.1 点火系统传导干扰的形成机理

点火系统的传导干扰主要是由于点火开关闭合后一次回路中电流增大到一定值时触点断开引起电流迅速下降而引起的,点火系统一次侧电路如图 2 所示。

笔者根据文献^[4]提取典型电路参数如下: $U=12\text{ V}$, $R_1=2\ \Omega$, $L=0.6\text{ mH}$, $C_1=1\ \mu\text{F}$ 。

根据电路理论知识可得

$$i_1 = \frac{U}{R_1}(1 - e^{-\frac{R_1}{L}t}) \quad (1)$$

现代汽车点火控制系统设计中,触点闭合时间

为 1 ms。为提高线圈储能,附加电阻取值逐渐减小,有的设计甚至去除了附加电阻,电路时间常数由 L 和 R_1 决定。触点闭合时间由电路时间常数决定,并有相应的驱动及保护电路。

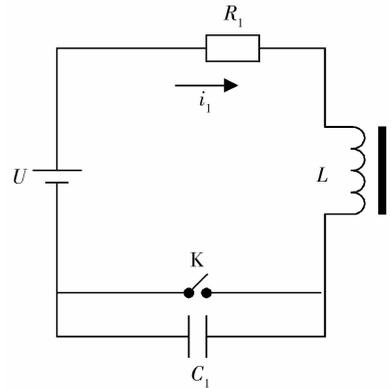


图 2 点火系统初级电路简图

开关断开之后电路由 R_1 、 L 、 C_1 构成 2 阶 RLC 串联电路,电路初始值为一次绕组中电流值 I_K , 响应电流为 i_2 , 由微分方程

$$R_1 i_2(t) + L \frac{di_2(t)}{dt} + u_c(t) = 0 \quad (2)$$

式中 $u_c(t) = u(t_0) + \frac{1}{C_1} \int_{t_0}^t i_2(t) dt$,

求得其表达式为

$$i_2(t) = \frac{1}{s_1 - s_2}(s_1 e^{s_1 t} - s_2 e^{s_2 t}) \quad (3)$$

$$u_c(t) = \frac{1}{C_1(s_1 - s_2)}(e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \quad (4)$$

式中: $s_1 = -\frac{R_1}{2L} + \sqrt{(\frac{R_1}{2L})^2 - \frac{1}{LC_1}}$;

$$s_2 = -\frac{R_1}{2L} - \sqrt{(\frac{R_1}{2L})^2 - \frac{1}{LC_1}}$$

在断开后由于一次绕组中产生感应电动势 E_1 , E_1 阻碍 i_1 下降,并向电容器 C_1 充电,使磁场能转变为 C_1 的电场能。随后, C_1 又向一次绕组反复放电、充电,在 C_1 和一次绕组中形成衰减振荡曲线,由此可以算出点火线圈一次绕组上的电压值为

$$u_1(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (5)$$

整个点火过程中点火线圈一次侧电压、电流波形如图 3 所示,图中计算了蓄电池电压为 12 V 时的电流电压。

点火过程中,线圈的瞬变电压对汽车蓄电池的冲击是造成传导干扰的干扰源,蓄电池电压较高的时候电流电压波形上升速度加快,开关闭合以后的震荡加剧。线圈电压波形受到 C_1 反复充放电影响

是一个振荡衰减曲线,最大幅值可达到 4 V,这个波动的电压将通过导线直接耦合到 ECU、车载娱乐系统、ABS 等电子设备,对其形成干扰。为避免这种影响,现代汽车多采用 IGBT(绝缘栅双极晶体管)控制点火时序,并采用 TVS(瞬变电压抑制二极管)保护控制电路,以保证点火时刻更加精确,同时要求蓄电池搭铁与电容器可靠连接,以减少触点放电产生电磁干扰。

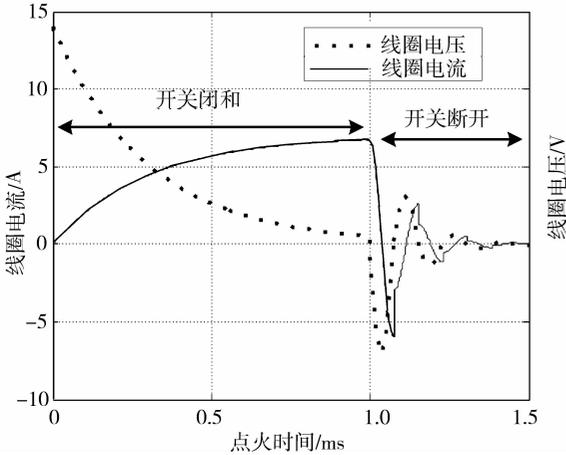


图 3 一次侧点火电流、电压波形

1.2 点火系统辐射电磁干扰的形成

由于点火系统的辐射电磁干扰是由具有高频的脉冲点火电流引起的,所以先研究火花塞间隙击穿时的点火电流。

将火花塞作为一植入电阻的同轴电容器,其物理模型结构及尺寸如图 4。

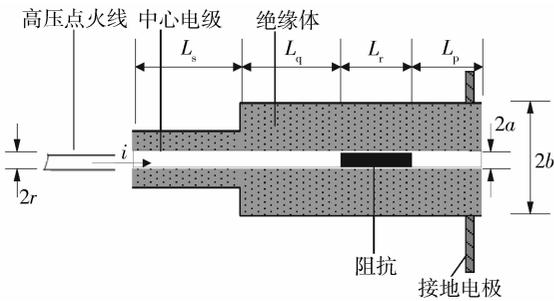


图 4 火花塞模型图

当火花塞的电极间隙被击穿时,根据模型建立的次级回路等效电路如图 5 所示。

图 5 中, \$C_q\$、\$C_p\$ 为火花塞电极的同轴分布电容; \$C_r\$ 为火花塞阻尼阻抗对地分布电容; \$R_r\$ 为火花塞内置电阻; \$r_g\$ 为火花电阻; \$R_w\$、\$C_w\$ 分别为高压点火线的电阻和分布电容; \$R_L\$、\$L_2\$ 和 \$C_L\$ 分别为次级点火线圈的电阻、电感和寄生电容。

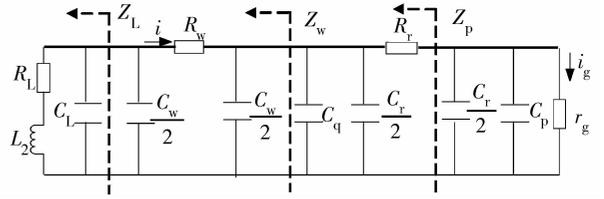


图 5 次级回路等效电路

由 Rompe-Weizel 理论可知^[6],火花电阻 \$r_g\$ 是一个随时间变化的量,当火花间隙被击穿后,它的值随时间变化的关系为

$$r_g = l_g \left\{ \left(\frac{2\alpha}{p} \int_{-\infty}^t i_g^2 dt \right) \right\}^{-0.5}, \quad (6)$$

式中: \$l_g\$ 为间隙宽度; \$\alpha\$ 为火花系数; \$p\$ 为混合燃气压力; \$i_g\$ 为流过间隙的火花电流。

在实际中, \$r_g \ll R_r\$, 高压点火线的电阻 \$R_w = R * L_w\$。其中, \$R\$ 为单位长度的高压点火线的电阻, \$L_w\$ 为高压点火线的长度。

根据电路理论得到

$$(C_r/2 + C_p)(dv_g/dt) + i_{pr} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{V_s}{R_r} e^{-R_r(C_q+C_w+C_r)/2t} + i_r = 0; \quad (8)$$

$$\frac{V_s}{R_w + R_r} e^{-(R_w+R_r)(C_L+C_w+C_w/2)t} + i_w = 0; \quad (9)$$

$$i_g = i_{pr} + i_r + i_w; \quad (10)$$

式(7)–(10)中, \$i_{pr}\$ 为电容 \$C_r/2\$ 和 \$C_p\$ 的放电电流; \$V_g\$ 为 \$t\$ 时刻火花间隙两端的电压; \$i_r\$ 为电容 \$C_w/2\$、\$C_q\$ 和 \$C_r/2\$ 通过火花塞内置电阻 \$R_r\$ 的放电电流; \$i_w\$ 为次级线圈寄生电容 \$C_L\$ 和高压点火线分布电容 \$C_w/2\$ 通过高压点火线电阻 \$R_w\$ 和火花塞内置电阻 \$R_r\$ 的放电电流; \$V_s\$ 为间隙击穿电压。

考虑到 \$v_g = i_g r_g, i_{pr} \gg i_r + i_w\$, 可得

$$v_g = i_g l_g \left\{ \left(\frac{2\alpha}{p} \int_{-\infty}^t i_{pr}^2 dt \right) \right\}^{-0.5}, \quad (11)$$

式(7)和式(11)的初始条件为当 \$t = 0\$ 时, \$i_{pr}(0) \approx 0, V_g(0) \approx V_s\$, 于是解得

$$i_{pr}(t) = \frac{1}{4}KV_s \exp\left(\frac{Kt - x_0}{2}\right) \left\{ 1 + \exp\left(\frac{Kt - x_0}{2}\right) \right\}^{-1.5}, \quad (12)$$

式中: \$K = (2\alpha/p)(V_s/l_g)^2, x_0\$ 是积分常数。

火花塞电极间隙处的电场强度 \$E\$ 可表示为^[7]

$$E(t) = \frac{1}{l_g} \left\{ V_s - \int_0^t i_g(t) dt / (C_p + C_r) \right\}. \quad (13)$$

对火花电流 \$i_g\$ 进行拉普拉斯变换可得

$$I_g(s) = \int_0^\infty i_g(t) \exp(-st) dt. \quad (14)$$

在复频域范围内考虑

$$Z_L(s) = (R_L + sL_2) // \frac{1}{sC_L} = \frac{R_L + sL_2}{1 + sC_L(R_L + sL_2)};$$

$$Z_w(s) = R_w + Z_L // \frac{1}{sC_w} = R_w + \frac{Z_L}{1 + sC_w Z_L};$$

$$Z_p(s) = R_r + Z_w // \frac{1}{s(C_q + C_r)} =$$

$$R_r + \frac{Z_w}{1 + sZ_w(C_q + C_r + C_w/2)}.$$

当火花间隙击穿电压为 V_s 时, 可以认为点火电流 i 与火花电流 i_g 随着 $V_s - \int_{-\infty}^t i_g dt / (C_p + C_r)$ 变化, 于是可以得到

$$I(s) = \frac{I_g(s)}{\{1 + sZ_p(C_r + C_p)\} \left\{1 + sZ_w(C_q + C_r + \frac{C_w}{2})\right\}}. \quad (15)$$

从以上分析可以看出, 点火电流 i 与火花电流 i_g 可以通过火花塞尺寸和火花塞的间隙击穿电压近似计算得到。同时, 从式(15)可以看出, 点火电流 i 随着阻抗 Z_w 和 Z_p 的增大而减小, 与火花电流成正比关系^[8]。

火花塞击穿时的火花电流和高压导线的电磁辐射是点火系统中辐射干扰的来源, 火花塞位于屏蔽的汽缸内, 对外辐射较弱, 对车内产生的干扰主要来自高压导线。因此, 将高压导线产生的电磁辐射情况等效为位于汽车引擎盖下方的一单极天线, 通过数值仿真的方法得到点火系统产生的辐射干扰在车内的电磁场分布。

2 辐射计算模型及仿真分析

由于实际车体的结构非常紧凑, 对电磁仿真而言, 车灯、后视镜、排气管以及连接处的缝隙和孔洞的建模非常复杂, 所以对此进行了必要的简化^[9]。此外车体为曲面结构, 在仿真过程中采用分块的多个平面方法来构造曲面结构。在 HFSS 中建立的汽车模型如图 6^[10], 车体的尺寸为 $4.4 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。

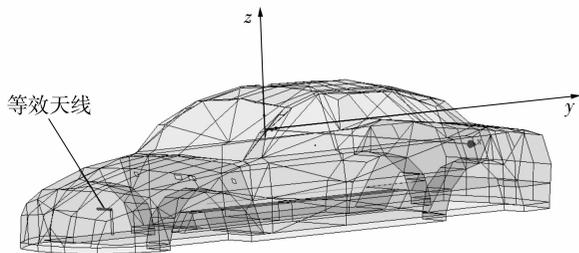


图6 车体模型

车体内外的计算区域均设为真空。天线模型设置为 $\lambda/2$ 的单极天线^[11], 天线长度 15 cm 与车内实际高压导线接近; 以高斯脉冲为激励源, 取 $\tau = 1.993 \text{ ns}$ 时, 激励的最高频率可以达到 1050 MHz , 覆盖点火噪声的频率范围。天线置于平行于汽车底板和车身 x 方向, 离底板高为 50 cm 的位置, 如图 6 所示, 通过计算得到等效天线辐射产生的电场分布如图 7。

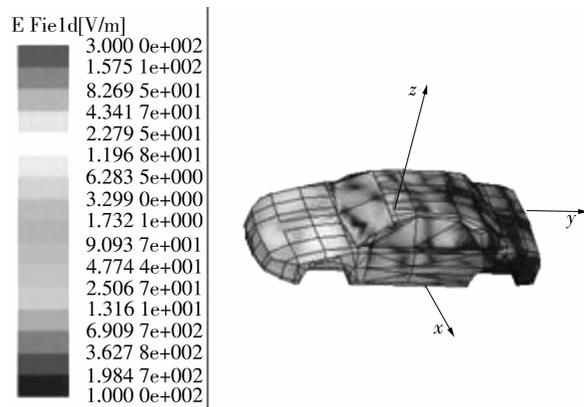


图7 车内电场分布

从图 7 中可看到位于车体前部的导线, 其产生的辐射噪声也主要集中于引擎盖内^[12], 它是对车内 ECU 和其他电子设备产生干扰的主要因素, 但乘员室和后备箱部分同样有电场分布。

由前面分析可知, 当采用阻尼导线或加大火花塞电阻时可以有效抑制火花噪声^[13-15]。因此, 仿真分析了工作频率分别为 200 、 400 和 600 MHz 的天线在终端开路 and 接负载电阻下的 6 种情况, 得到结果如图 8。

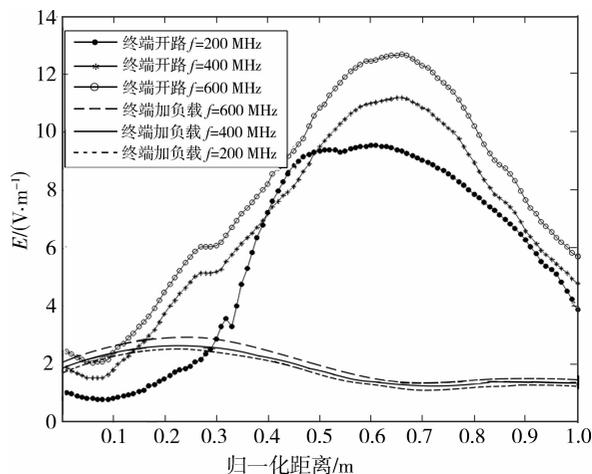


图8 导线沿轴向场强分布

从图 8 中可以看出沿车身轴向的电场幅值与高压导线距离有直接的关系, 当终端开路时先是逐渐

加大,到 0.6 m 左右达到最大值,然后开始下降。终端接上负载电阻以后,电场幅值明显减小,且随距离变化电场变化较小,可见增大电阻对抑制点火噪声在整个车内都有明显的作用。当频率增大后,接负载的时候电场变化规律趋于一致,电场幅值有微弱的增加,而终端开路的情况下电场总体变化趋势相同,幅值在不同距离处变化较大。当频率依次增加以后,可以看到电磁干扰随之加大,400 和 600 MHz 时电场变化趋势基本一致,幅值略微加大。由于车内电子设备主要集中于车体前端,因此高压导线的安装位置特别关键,要尽可能选在离 ECU 较远的地方。而其他敏感设备也应尽可能避免安装在辐射强的区域,以避免强辐射的干扰,提高安全性。

3 结 语

在深入分析汽车点火系统工作机理的基础上对点火电路一次侧点火线圈瞬变电压引起的传导干扰和二次侧火花放电产生的辐射干扰进行了分析与仿真,得到了点火过程中对汽车蓄电池电压造成冲击的瞬变电压和火花放电电流,建立了火花塞放电等效电路模型,并将点火系统中的高压导线等效为单极天线进行了车内辐射场的仿真分析,得到加大火花塞电阻和导线电阻都可以有效抑制点火系统的辐射噪声的结论。比较系统地分析了汽车点火系统的电磁干扰产生根源及对车内电磁环境的影响。该分析对汽车电磁兼容性设计具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 徐立. 汽车电磁干扰及其影响[J]. 电子产品世界, 2006 (3): 42-46.
XU LI. Automotive electromagnetic interference and its influence [J]. Electronic Engineering & Product World, 2006 (3): 42-46.
- [2] 余召锋. 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. Overview on automotive EMC research at home and abroad [J]. Bus Technology and Research, 2007 (2): 8-10.
- [3] 林艳萍. 汽车电磁兼容实验室及测试技术[J]. 安全与电磁兼容, 2003 (1): 4-10.
LIN YAN-PING. Automotive EMC laboratory and test technology [J]. Safety & EMC, 2003 (1): 4-10.
- [4] CHEN C C. Predicting vehicle-level EMC performance utilizing on-bench component characterization results [C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 2-6, 1999, Seattle, WA, USA. [S.l.]:IEEE, 1999: 765-769.
- [5] 陈渝光. 汽车电器与电子设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

- [6] FUJIWARA O, AMEMIYA Y. Calculation of ignition noise level caused by plug gap breakdown[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1982, 24(2): 26-32.
- [7] 汪泉弟, 刘春艳, 俞集辉. 汽车火花点火系统电磁干扰的抑制方法[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007, 30 (7):46-49.
WANG QUAN-DI, LIU CHUN-YAN, YU JI-HUI. On suppressing electromagnetic interference caused by automobile spark-ignition system [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(7):46-49.
- [8] LI X, YU J H, WANG Q D, et al. Noise spark current level caused by capacitive discharge in an automotive secondary ignition system [C] // IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies, August 16-17, 2007, Hangzhou, China. [S.l.]:IEEE, 2007: 1319-1322.
- [9] NEUMAYER R, STELZER A, HASLINGER F. Continuous simulation of system-level automotive EMC problems [J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003, 8(1):409-413.
- [10] 谢拥军, 王鹏. Ansoft HFSS 基础及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [11] RUDDLE A R, FERRIERES X. Experimental validation of time-domain electromagnetic models for field coupling into the interior of a vehicle from a nearby broadband antenna [J]. IEEE Proceedings, Science, Measurement and Technology, 2004, 151(11):430-433.
- [12] BURGETT R R, MASSOL R E. Relationship between spark plugs and engine radiated electromagnetic [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1974, 16(8):160-172.
- [13] SHERPHERD R A. New techniques for suppression of automobile ignition Noise [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1976, 25 (2): 2-12.
- [14] KANG I H, FUJIWARA O. Analytical approach to the spark resistance formula caused by electrostatic discharge [J]. Electronics Letters, 1997, 33 (7): 1203-1204.
- [15] 方其让, 李振磊, 杨勇, 等. 屏蔽技术在微型客车降噪设计中的应用研究[J]. 长沙交通学院学报, 2006, 22 (3): 68-72.
FANG QI-RANG, LI ZHEN-LEI, YANG YONG, et al. An experimental study on the low noise design of a microbus using shield technology [J]. Journal of Changsha Communication University, 2006, 22(3):68-72.

(编辑 张 芊)