

文章编号:1000-582X(2011)02-014-05

抑制汽车点火系统电磁干扰的光电隔离方法

汪泉弟¹,刘庆升¹,贾 晋¹,郑亚利¹,刘青松^{1,2}

(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. 重庆车辆检测研究院 重庆 401122)

摘 要:汽车发动机点火系统工作时产生的电磁辐射是车内最强的电磁干扰源,也是造成大多数电控单元(electrical control unit, ECU)误动作的主要原因。为了减小点火噪声对 ECU 的干扰,采用光电隔离技术来实现干扰源与控制电路的电气隔离。在分析点火系统电磁干扰形成机理的基础上,探讨了光电隔离技术抑制点火系统电磁干扰的可行性,设计了抑制点火系统电磁干扰的平台实验电路。实验结果表明,光电隔离电路在 20~100 MHz 频段抑制点火噪声效果明显,在解决汽车电磁兼容问题是可行的。

关键词:ECU;光电隔离;电磁干扰;点火系统;汽车

中图分类号:U463.64

文献标志码:A

The optical isolation method of suppressing electromagnetic interference of automotive ignition system

WANG Quan-di¹, LIU Qing-sheng¹, JIA Jin¹, ZHENG Ya-li¹, LIU Qing-song^{1,2}

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

2. Chongqing Vehicle Testing & Research Institute, Chongqing 401122, P. R. China)

Abstract: Electromagnetic radiation, which is caused by the engine ignition system, is the most powerful electromagnetic interference (EMI) source in the vehicles, as well as the main reason of most electronic control unit (ECU) malfunction. In order to reduce interference from ignition noise on ECU, we use optical isolation technology to isolate electrical connections between the interference source and the control circuit. The formation mechanism of the ignition system EMI is analyzed. The possibility of suppressing ignition system EMI with optical isolation technology is discussed. Then, as a result we design an experimental platform of suppressing ignition system EMI. The experimental results show that the effect of suppressing ignition noise, in 20~100 MHz frequency band, is obvious after applying optical isolation circuit. It can address the issue of automotive EMC.

Key words: electronic control unit; optical isolation; electromagnetic interference; ignition system; vehicles

汽车工业经过 120 余年的发展,其产品(汽车)已由单纯的机械产品正逐步演变成高级的机电一体

化产品,某些高档车的电子电气装置已占到汽车总成本的 40%,并有进一步增长的趋势^[1-2]。电子电

收稿日期:2010-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877081)

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、电磁场数值计算及电磁兼容技术等方面的研究,(Tel)023-65102434;(E-mail) wangquandi@yahoo.com.cn.

气产品的大量应用,在满足人们对汽车的操控、安全和娱乐等性能要求的同时也带了严重的电磁兼容问题^[3-6]。如一种国内开发的安全气囊,在汽车整车装配线上突然引爆,原因是不能承受较强的瞬变电压干扰;又如国产的某一型号微型汽车,每当汽车启动时会出现车窗玻璃自动关闭现象。由于现代汽车采用了大量电控单元(electrical control unit, ECU),其信号电压大多小于 1 V,工作灵敏度极高,不允许有过大的外来干扰^[7]。然而车内的电磁环境极其复杂,各类电子电气装置工作时都将产生电磁噪声,其中点火系统产生的电磁噪声最强^[8-9],是造成大多数 ECU 误动作的主要原因。因此,针对 ECU 的电磁兼容问题,研究点火噪声的抑制方法是非常必要的。

为了减小点火噪声对 ECU 的干扰,拟采用光电隔离技术来实现电气隔离。尽管该技术已广泛用于通信、电力、计算机等领域^[10-12],但由于在汽车狭小的空间集中了大量的电子电气装置,具有其特殊性,而且在解决汽车电磁兼容问题上目前还没有应用实例。笔者在分析点火系统电磁干扰形成机理的基础上,探讨了光电隔离技术抑制点火系统电磁干扰的可行性;设计了抑制点火系统电磁干扰的平台实验电路;通过对实验结果的分析,表明光电隔离技术在解决汽车电磁兼容问题是可行的,并具有推广意义。当汽车点火系统工作时,最容易超标的频段常常发生在 40~60 MHz,因此,笔者重点研究 10~100 MHz 频段的电磁干扰抑制问题。

1 点火系统电磁干扰形成机理

汽车点火系统主要由蓄电池、点火控制模块、点火开关、点火线圈、高压阻尼线以及火花塞组成,其结构模型如图 1 所示。

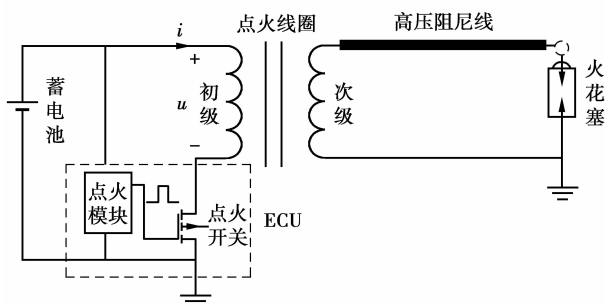


图 1 点火系统结构模型

点火系统工作时,点火控制模块送出一个高电平,点火开关导通,初级线圈有电流流过,并逐渐增

大,如图 2(a)所示。电流在铁芯建立磁场的过程中,初、次级线圈出现感应电动势,此时次级线圈的感应电动势不足以将火花塞气隙击穿,气隙处于断开状态。当点火信号由高电平变为低电平时,点火开关断开,初级线圈瞬间开路,电流迅速减小,铁芯中急剧变化的磁通在次级线圈感应出高达 30~40 kV 的电动势^[13],火花塞气隙瞬间被击穿,产生的电火花将发动机气缸中的混合气体点燃。同时,初级线圈也会感应出约 600 V 的瞬变电压,如图 2(b)所示。由于火花塞和点火线圈采取了严密的屏蔽措施,火花塞与点火线圈的连接导线采用了阻尼线,因此,点火系统产生的电磁干扰主要不是通过这些环节泄漏出去的。由图 2(b)可以观察到,尽管初级线圈感应出的电压与次级线圈的相比不高,但变化率却很大,初级线圈与蓄电池之间的电源连接线通常超过 1 m,且没有采取屏蔽措施,因此,可以推断在点火过程中,初级线圈的瞬态电压通过电源连接线以传导和辐射干扰方式对周围环境产生影响。尤其是传导电磁干扰会影响同一电源供电的 ECU 正常工作,对其它系统带来严重的安全隐患。

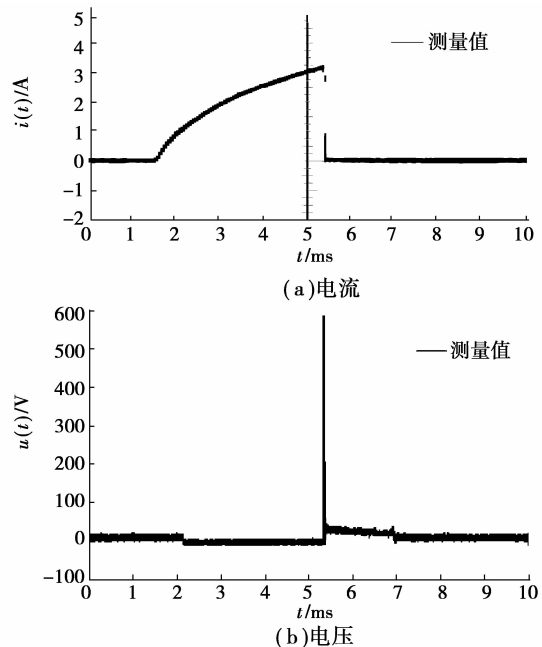


图 2 初级线圈电源线上的电流、电压时域波形

2 光电耦合器抑制点火噪声可行性分析

在信息传输过程中,光电耦合器的输入端和输出端仅用光来耦合,被耦合的两部分电路自成系统,

且不需共地,从而实现了电气隔离。光电耦合器的主要特性有^[10,14]:

1) 光电耦合器的输入阻抗很小,通常 $100 \sim 1\,000 \Omega$,干扰源内阻则很大,一般为 $10^5 \sim 10^8 \Omega$,根据分压原理,能分到输入端的噪声很小。

2) 由于干扰源内阻很大,虽有比较大的干扰电压,但可供出的能量却很小,只能形成微弱的电流。而光电耦合器输入部分的发光二极管只有在通过一定的电流时才能发光,因此,即使有幅值很高的电压干扰,也不能提供足够的电流使光电耦合器导通;

3) 由于光电耦合器是在密封条件下实现输入回路与输出回路的耦合,因此不会受到外界光的干扰。

4) 输入回路与输出回路之间的寄生电容很小,一般为 $0.5 \sim 2 \text{ pF}$,而绝缘电阻很大,通常为 $10^{11} \sim 10^{13} \Omega$,因此输入端的干扰很难通过光电耦合器馈送到另一边去,避免了通道间的干扰。

5) 光电耦合器具有耐用、可靠性高和速度快等优点,响应时间在 $1 \mu\text{s}$ 以内,高速型光电耦合器响应时间甚至小于 10 ns 。

基于上述特性,光电耦合器能有效抑制尖峰脉冲,具有很强的抗干扰能力。但对于汽车点火系统产生的电磁干扰,由于是宽频高压电磁噪声,光电耦合器能否适用? 还需要从理论上进行分析论证。

在点火过程中,点火开关根据设置的点火信号时间周而复始地导通断开,断开瞬间在初级线圈中产生的干扰电压脉冲持续时间 $\tau = 8 \mu\text{s}$,幅值 $A = 600 \text{ V}$ 。考虑最不利的情况,将点火信号周期设为 $16 \mu\text{s}$,即 $T = 2\tau$,则干扰电压脉冲频率 $f = 62.5 \text{ kHz}$,电压脉冲波形如图 3 所示。

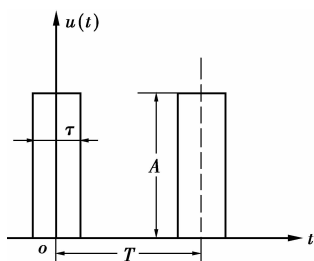


图 3 劣化后的初级线圈干扰电压脉冲

干扰电压脉冲可用傅里叶级数表示^[14]

$$u(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \cos \omega_1 t - \frac{2A}{3\pi} \cos 3\omega_1 t + \frac{2A}{5\pi} \cos 5\omega_1 t - \dots \quad (1)$$

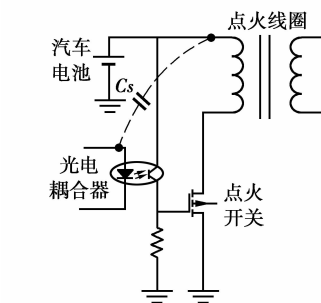
其中, $\omega_1 = 2\pi f$ 为基波角频率,各次谐波频率为基波

频率的奇数次倍; $A/2$ 为直流分量,由于干扰电压脉冲是通过导线之间的寄生电容 C_s 窜入光电耦合器输入端的,如图 4(a) 所示,因此直流分量不起作用。为方便讨论同时不引起太大的误差,用(1)式的基波分量近似代替电压脉冲,即

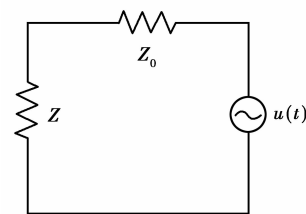
$$u(t) \approx \frac{2A}{\pi} \cos \omega_1 t = U_m \cos \omega_1 t. \quad (2)$$

图 4(b) 为对应的等效电路图。其中, Z 为光电耦合器的输入阻抗, Z_0 为干扰源等效内阻,设寄生电容 $C_s = 2 \text{ pF}$,则 Z_0 为

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi f C_s} = \frac{1}{2\pi} \times 8 \times 10^6 \Omega. \quad (3)$$



(a) 实际电路示意图



(b) 等效电路

图 4 点火系统电磁干扰电路图

使光电耦合器工作的最小输入电流为 1 mA ,由于一般发光二极管工作时的正向压降为 1 V 左右,故输入阻抗 $Z = 1 \text{ k}\Omega$ 。显然, $Z_0 \gg Z$,在图 4(b) 的等效电路中,忽略 Z 的影响,当瞬时电流达到 1 mA 时,干扰电压基波幅值

$$U_m = \frac{1}{2\pi} \times 8 \times 10^3 \text{ V}. \quad (4)$$

在前面假设的劣化条件下,结合(2)式可求出使光电耦合器工作的最小瞬时脉冲电压幅值 $A_{\min} = 2\,000 \text{ V}$ 。表明当外来干扰脉冲频率 $f = 62.5 \text{ kHz}$,脉宽 τ 为 $8 \mu\text{s}$ 时,脉冲幅值需达到 $2\,000 \text{ V}$ 时才能够启动光电耦合器,而低于该幅值的干扰脉冲都将被光电耦合器抑制掉。在实际运行中汽车点火频率远低于 62.5 kHz ,线路上实测的瞬时脉冲电压不超过 600 V ,所以,光电耦合器能够有效抑制点火系统

电磁干扰对 ECU 的影响。

3 实验设计与结果分析

因 ECU 采用整体封装,不便于产生恒定的点火信号,也不能够对其进行电路改造,因此在实验中采用自己研发的点火模块替代 ECU。该模块由 555 数字电路和外接电路构成,由单独的电池对其供电,并设定输出脉冲方波的频率为 25 Hz,占空比为 8%。实验电路如图 5 所示,其中图 5(a)为采用了光电隔离技术后的实验电路,图 5(b)为对照实验电路。光电隔离电路由型号为 4N25 的光电耦合器与 1 k Ω 电阻构成,MOSFET 为点火开关,1 k Ω 电阻为升压电阻,以保证 MOSFET 需要导通时 G 门获得足够的驱动电平。当点火信号发生器送出一个高电平时,光电耦合器的光敏三极管导通,与此同时 MOSFET 的 G 极由低电平变为高电平,点火线圈初级回路被接通。当点火信号发生器送出一个低电平时,光电耦合器的光敏三极管呈高阻态,在 MOSFET 的 G 极上形成低电平,初级回路被切断,从而完成了点火过程的一个工作周期。

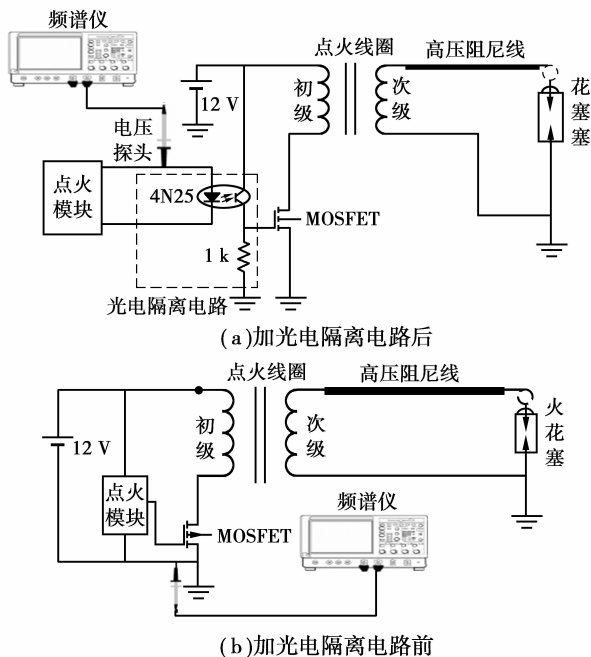


图 5 点火系统平台实验原理图

将频谱仪扫频范围设定为 10~100 MHz,采用频点最大值(peak hold)扫描,扫频时间为 1.75 s,采样间隔为 100 kHz。分别采集了加光电隔离电路前后点火模块输出端的噪声电压频谱,经 MATLAB 软件处理后的采样数据如图 6 所示。由图 6 可见,

加入光电隔离电路后,控制线上 20~100 MHz 的点火噪声明显得到抑制。这种效果可从两方面进行解释,一方面光电隔离电路切断了点火系统与控制回路的共地干扰;另一方面,由于光电耦合器输入回路输出回路之间的寄生电容很小,绝缘电阻很大,因此点火噪声不会从光电耦合器输出端反馈到输入端。实验结果说明光电隔离电路能有效阻断初级回路与点火模块之间的点火电磁噪声的通路。

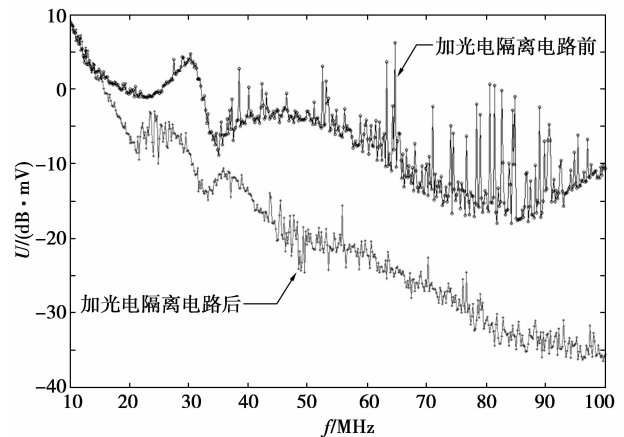


图 6 光电隔离电路电磁干扰抑制效果对比

4 结论

针对点火系统电磁噪声对 ECU 的干扰问题,分析了光电隔离技术抑制点火噪声电磁干扰的可行性,设计了抑制点火系统电磁干扰的平台实验电路,并进行了实验。由研究结果可得如下结论

- 1) 从实验结果可知,光电隔离技术能有效抑制点火噪声在点火模块输出线上的电磁干扰;
- 2) 受条件限制,实际研究的是点火系统内部的电磁干扰,但研究结论对其它位于发动机附近,或与点火系统共地的 ECU 控制电路同样有效;
- 3) 研究的噪声频带宽度仅为 10~100 MHz,对于 100 MHz 以上的电磁干扰,光电隔离技术的作用还有待进一步论证,但从实验数据的变化趋势看,光电隔离电路能抑制的噪声频率可超过 100 MHz。

参考文献:

- [1] LETEINTURIER P. Automotive semi-conductor trend & challenges[C/OL] // Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe, Munich, Germany, March 6-10, 2006 [2006-07-24]. <http://ieeexplore.ieee.org/search/srchabstract.jsp?tp=&arnumber=1656948&queryText%3DAutomotive+>

- semi-conductor + trend +. AND. + challenges%
26openedRefinements% 3D * % 26searchField%
3DSearch+ All.
- [2] 徐立. 汽车电子发展状况与对策[J]. 信息技术与标准化, 2006(8): 17-19
XU LI. Development situation and strategy of automotive electronics[J]. Information Technology & Standardization information, 2006(8):17-19
- [3] LOECKX J, GIELEN G. Efficient identification of major contributions to EMI-induced rectification effects in analog automotive circuits [C/OL] // 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore, February 27-March 3, 2006 [2006-05-15]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1629581.
- [4] 杜义辉. 汽车电磁兼容技术不容忽视[J]. 中国电子商情, 2008(6):40-42.
DU YI-HUI. Automotive EMC technology can not be ignored[J]. China Electronic Market, 2008(6):40-42.
- [5] GOURET W, NOUVEL F, EL-ZEIN G. Powerline communication on automotive network[C/OL] // IEEE 65th Vehicular Technology Conference, Dublin, April 22-25, 2007[2007-05-29]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4212952.
- [6] ADERSEN P. An overview of automotive EMC standards [J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006, 3 (8): 14-18.
- [7] RAKOUTH H, COMSTOCK L, CAMMIN C. Characteristics of AC grounding in an automotive ECU [C/OL] // IEEE International Symposium on EMC, Montreal, Canada, August 13-17, 2001[2002-08-07]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=950612&tag=1.
- [8] PATEL V, STEFFKA M. Vehicular spark ignition systems radiated emissions and reception performance [C/OL] // 2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Chicago, Illinois, USA, August 8-12, 2005 [2005-10-03]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1513464.
- [9] PETERS F H. Electrical isolation of optical components in photonic integrated circuits (PICs): US, 6999489[P]. 2004-03-24.
- [10] ZUTAVERN F J, REED K W, GLOVER S F, et al. Fiber-optic controlled PCSS triggers for high voltage pulsed power switches[C/OL] // Digest of Technical Papers-IEEE International Pulsed Power Conference, Monterey, CA, June 13-17, 2007[2007-02-05]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4084341.
- [11] 杨秦建, 李玮华. 计算机控制系统中光电隔离电路的 CAA 方法研究[J]. 机电一体化, 2008, 14(6):66-68.
YANG QIN-JIAN, Li WEI-HUA. Researched computer assistant analysis method on photoelectric coupled circuit in computer control system [J]. Mechatronics, 2008, 14(6):66-68.
- [12] 赵志伟, 王启松. 汽车点火线圈峰值电压测量仪的研制 [J]. 汽车电器, 2009, (3):43-47.
ZHAO ZHI-WEI, WANG QI-SONG. Development of peak voltage survey meter for automobile ignition coil [J]. Auto Electric Parts, 2009, (3):43-47.
- [13] 曲维本, 刘铁塘. 光电耦合器的原理及其在电子线路中的应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1981.
- [14] 秦伟刚. 光电耦合隔离技术与应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S6):2603-2604.
QIN WEI-GANG. Technique & application of photoelectric coupling isolation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(S6): 2603-2604.

(编辑 张小强)