

文章编号: 1000-582X(2012)10-017-07

汽车点火系统 EMI 产生机理及其抑制方法

杨永明, 苏承军, 安宗裕, 汪泉弟

(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: 点火系统是汽车内最主要的电磁干扰源, 其产生的电磁辐射会对周围电磁环境造成较大的影响。因此, 有必要对点火系统的电磁干扰产生机理、传播路径以及抑制措施进行研究。首先系统地分析了汽车点火系统产生电磁干扰的机理, 并结合线束电磁干扰排查测试, 得出火花塞电极间的火花放电是点火系统中的主要电磁干扰源。其次研究了传导干扰的传播路径和辐射发射的原因。最后设计并制作了两种电源线滤波器, 实验结果表明电源线混合滤波器能在宽频带范围内有效降低电源线上的干扰信号, 从而降低电源线辐射发射的能力, 使整车的辐射骚扰测试能满足相关的电磁兼容国家标准。

关键词: 汽车点火系统; 电磁干扰; 产生机理; 传播路径; EMI 滤波器

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

The study on EMI principle and suppression method of vehicle ignition system

YANG Yongming, SU Chengjun, AN Zongyu, WANG Quandi

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

Abstract: Vehicle ignition system is the main electromagnetic interference source. Electromagnetic radiation produced by ignition system will produce the interference to electromagnetic environment around. It is necessary to study the electromagnetic interference (EMI) principle, noise paths and suppression method. We analyze the electromagnetic interference principle of ignition system, and harness trouble-shooting related to electromagnetic interference is also tested. Results show that the spark discharge between spark plug electrodes is the main interference source in ignition system. Then, the paths of conducted interference and the reason of radiated emission are discussed in detail. Finally, two kinds of power supply cord EMI filters are designed and implemented on the basis of analysis results. Experimental results indicate that the filter can reduce the noise of power-wire in broadband range. Simultaneously, the radiation emission performance from power wire is also reduced observably. The proposed mixing filter has been demonstrated in this paper to perform satisfactorily with excellent effectiveness in suppression of conducted EMI from 10 MHz to 110 MHz, and the object car can also pass the EMC standard tests.

Key words: vehicle ignition system; electromagnetic interference; principle; EMI path; filter

收稿日期: 2012-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877081): 汽车电磁兼容预测与电磁干扰抑制关键技术研究

作者简介: 杨永明(1958-), 女, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为电气设备状态的在线监测与智能信息处理, (Tel)13677609537; (E-mail) yangyym@cqu.edu.cn.

伴随着科技的迅速发展,现代电子技术在汽车上得到了大量的应用,这使得车载电子设备越来越多。而且这些设备通常被集中安装在有限的空间范围内,并且随着设备工作频率的不断提高,汽车的电磁兼容问题日益突出。汽车的电磁兼容性是指车辆在运行中,车内各类电气电子设备互相不干扰,对外界干扰不超过限值以及抗外界干扰的性能,保证汽车各个系统安全可靠的工作^[1-2]。

早在 20 世纪初,人们就发现道路上行驶的汽车发动机对周围无线电收音机产生干扰,从而提出要对汽车点火系统产生的电磁干扰加以限制。20 世纪 70 年代以后,国外学者开始关注点火系统的电磁干扰问题,系统地提出了电磁干扰对环境造成的严重影响,并应用计算机对其进行研究和预测,发现点火系统是汽车内最强烈的电磁干扰源^[2]。其工作时产生的电磁干扰具有能量大,频带宽等特点,并且该干扰源还能通过与之相连的线束对外界产生电磁辐射,造成汽车的电磁兼容性能下降^[3-4]。但是国内外学者对点火系统电磁干扰的研究大多处在理论分析及仿真预测阶段^[5-7],仅少数学者对电磁干扰的抑制和优化设计进行了探索性研究^[8-12]。本文系统地分析了汽车点火系统产生电磁干扰噪声的机理,并且提出了抑制干扰的有效措施,对汽车点火系统电磁兼容性研究和整改具有一定地参考价值。

1 点火系统电磁干扰产生机理

点火系统主要由蓄电池、初级回路电源线、控制初级线圈通断的点火开关、产生高压电的点火线圈、高压阻尼线以及将高压电变成点火火花的火花塞构成。其工作过程是根据发动机的工作循环模式,在适当的时候向气缸内的可燃混合气体提供强烈的高压电火花,使可燃气体爆燃并产生强大的压力,推动活塞向外运动并带动曲轴旋转对外做功。根据典型的发动机点火系统结构和工作原理可得点火系统简化等效电路如图 1 所示。

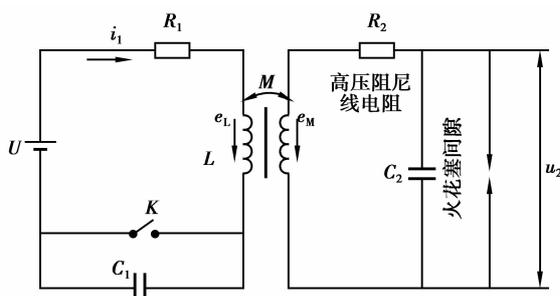


图 1 汽车点火系统简化等效电路

图中 U 为蓄电池端电压, i_1 为初级电流, R_1 为初级线圈的电阻, L 为初级线圈的电感, C_1 为初级电路的寄生电容, R_2 为高压阻尼线电阻, C_2 为火花塞电极间分布电容。

1.1 初级回路中干扰电流

当初级回路的开关 K 在 $t_0=0$ 闭合时,由电路知识得

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

在 t_1 时刻,开关 K 断开之后电路由 R_1 、 L 、 C_1 构成二阶 RLC 串联电路,电路初始值为初级绕组中断开瞬间电流值 i_K ,由微分方程

$$R_1 i_1(t) + L \frac{di_1(t)}{dt} + u_c(t) = U. \quad (2)$$

其中 $u_c(t) = u(t_0) + \frac{1}{C_1} \int_{t_0}^t i_1(t) dt$,

对式(2)微分可得到

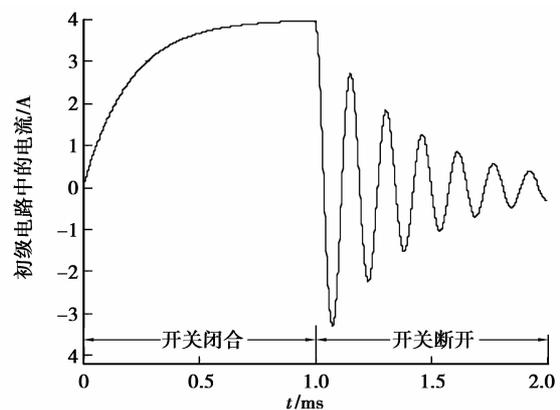
$$LC_1 \frac{d^2 i_1}{dt^2} + R_1 C_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 = 0. \quad (3)$$

求解方程(3)可得开关断开后初级回路中的电流为

$$i_1(t) = \frac{-i_K s_1}{e^{s_1 t_1} (s_2 - s_1)} e^{s_1 t} + \frac{i_K s_2}{e^{s_2 t_1} (s_2 - s_1)} e^{s_2 t}. \quad (4)$$

式(4)中: $s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$; $s_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$; $\alpha = \frac{R_1}{2L}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_1}}$ 。

当 $U_0=12\text{ V}$ 、 $L=0.6\text{ mH}$ 、 $R=3\ \Omega$ 及 $C_1=1\ \mu\text{F}$ 时,对式(1)和(4)进行计算,可以得到开关断开前后点火系统初级回路中的电流,电流波形如图 2(a)所示。当开关断开后,由于初级绕组电感和电容间的反复充放电,导致在初级回路中形成衰减的振荡电流,这个衰减的振荡电流就是初级电路中的传导干扰电流。该干扰电流会通过初级回路中的阻抗转化为干扰电压,使电源电压发生波动,从而对与电源相连接的其它设备形成传导干扰。



(a) 点火系统初级电流

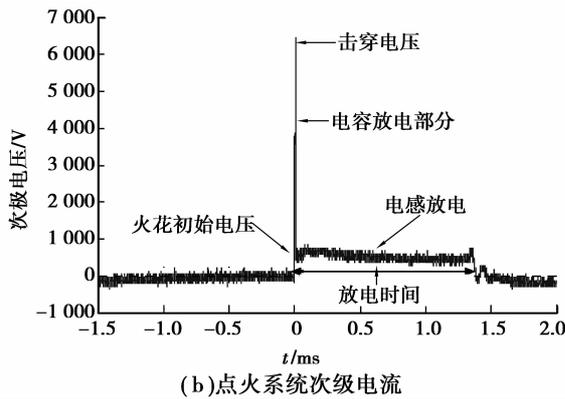


图 2 点火系统的电磁干扰

1.2 次级回路中火花放电

在初级电路闭合期间,铁心中储存的能量为 $\frac{Li_k^2}{2}$ 。初级电流切断后,初级电流迅速衰减,它的磁场也迅速变化,因此初级绕组(匝数 N_1)中产生自感电动势 e_L ,并在次级绕组(匝数 N_2)中产生互感电动势 e_M 。初级绕组中所产生的自感电动势 e_L 向电容 C_1 充电,在次级电路中,由于高压阻尼线和发动机机体之间、次级绕组线匝之间、火花塞中心电极与旁电极之间均有一定的分布电容 C_2 。所以当开关打开时,次级绕组产生的感应电动势 e_M 也会向 C_2 充电。

因此电感中的磁场能最终转换成了电容 C_1 与 C_2 中的电场能,根据能量守恒得

$$\frac{1}{2}Li_k^2 = \frac{1}{2}C_1u_{1\max}^2 + \frac{1}{2}C_2u_{2\max}^2 \quad (5)$$

式(5)中 $u_{1\max}$ 和 $u_{2\max}$ 分别为初级和次级电压最大值。如果初级和次级电路的耦合系数为 1,则

$$u_{1\max} = \frac{N_1}{N_2}u_{2\max} \quad (6)$$

把式(6)代入式(5),经整理得

$$u_{2\max} = i_k \sqrt{\frac{L}{C_1 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 + C_2}} \quad (7)$$

当次级的点火电压 u_2 上升到 $u_{2\max}$ 时,火花塞被击穿,击穿后储存在 C_1 和 C_2 中的能量迅速被释放出来,称为“电容放电”,放电特性是放电时间短,放电电流大,如图 2(b)所示。它会在很宽的频带内形成强烈的电磁干扰,并对车内电子设备的正常工作造成严重的威胁。铁心中剩余的能量会沿已电离的火花塞间隙继续放电,称为“电感放电”,放电特点是放电电压几乎保持不变,放电时间长,放电电流小。

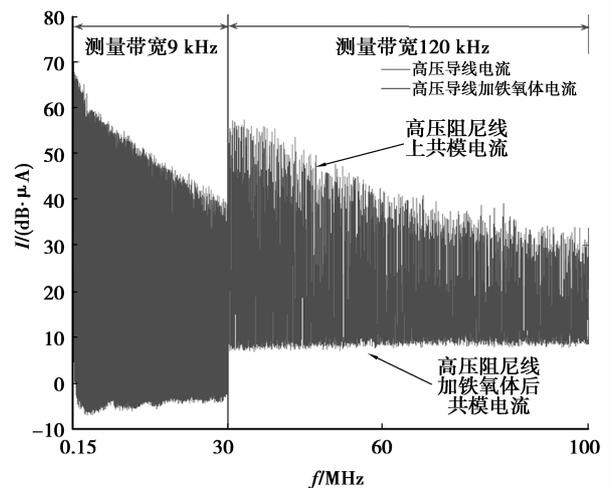
由此得出火花塞电极放电是点火系统的电磁干扰源。表现在火花塞上的电压以陡脉冲的形式出现,火花电流形成高频振荡。但是火花放电是在汽缸内进行的,电磁干扰不能直接辐射到周围空间,所以这

种强烈的干扰会通过次级回路的高压阻尼线向外辐射,或者通过点火线圈初次级之间的耦合电容传播到初级电源线上并且以天线的方式对外辐射。由于在工程实际中,高压导线通常被绕制成螺旋管的形状,阻抗较高,而且这部分导线很短,一般和点火线圈集成封装,很难有发射天线的作用。所以干扰信号有可能通过初、次级间的耦合电容传播到初级回路中的电源线上,为了明确干扰信号的传播路径,有必要对点火系统进行详细的电磁干扰排查测试。

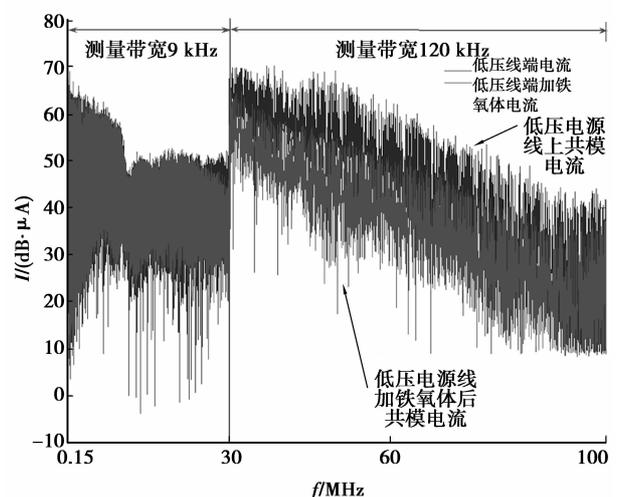
2 点火系统电磁干扰排查测试

点火系统所连接的线束比较复杂,线束作为一种辐射天线,在点火系统电磁辐射中充当了重要的角色。因此对点火系统线束的电磁干扰排查测试就显得尤为重要^[13]。

铁氧体相当于一个感性的消耗滤波器,采用“铁氧体消耗”的方法对点火系统线束的干扰进行排查,测试结果如图 3 所示。



(a)加铁氧体前后高压阻尼线上的共模电流频谱



(b)加铁氧体前后低压电源线上的共模电流频谱

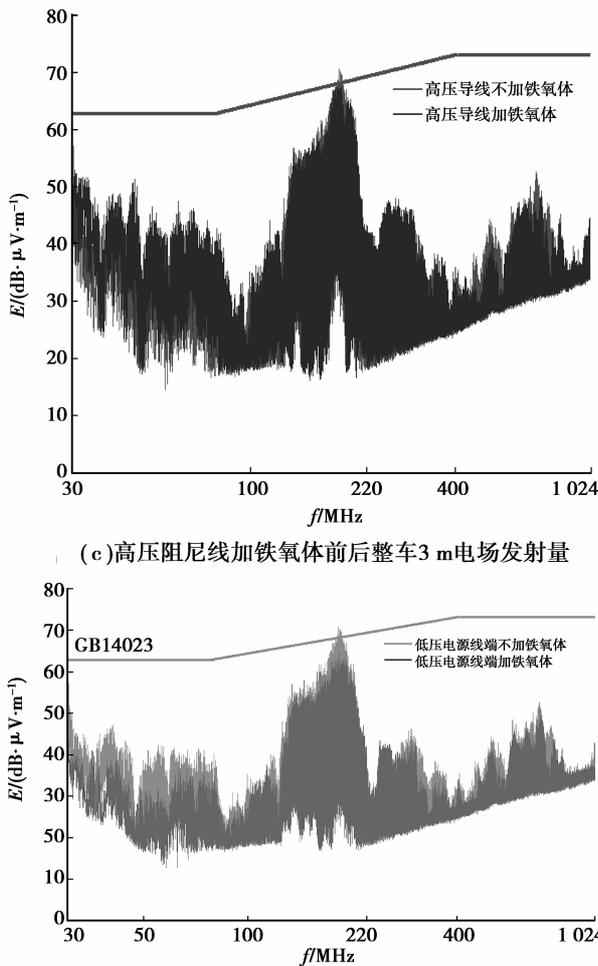


图 3 点火系统电磁干扰排查测试结果

对图 3(a)和图 3(b)的高压阻尼线和低压电源线上实测的共模电流频谱进行分析,结果表明在 30~100 MHz 之间低压电源线端比高压阻尼线端的共模电流幅值高出约 20 dB。

从图 3(a)可以看出加铁氧体前后高压导线上的共模电流在 0.15~100 MHz 的频段内基本没变化,这与该种情况下的整车电场辐射的试验结果一致,如图 3(c)所示。而图 3(b)中加入铁氧体后比不加铁氧体时低压电源线的共模电流在 30~100 MHz 的频段内下降了 10 dB,这与该种情况下的整车电场辐射的试验结果相似,如图 3(d)所示,同样在 30~100 MHz 频段内下降 5~10 dB。

以上测试结果表明:1)点火系统高压阻尼线和低压电源线上都存在传导共模干扰电流,通过加铁氧体试验对比发现低压电源线上的传导共模电流是主要的干扰噪声;2)通过加铁氧体对比分析高压阻尼线和低压电源线辐射发射量,得出整车的辐射干扰主要由低压侧电源线上的共模电流主导,而高压阻尼线所产生的辐射对整车的辐射贡献小;3)共模

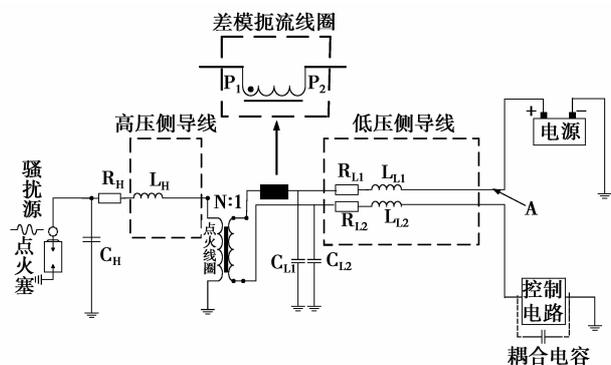
电流以低压电源线的天线效应对外产生辐射,而不是以高压侧的“天线”或其它线束对外辐射;4)传导电磁干扰转化成辐射耦合之前,铁氧体可以减弱输入线束的天线效应。

通过以上分析可知,造成辐射超标的主要原因并非火花放电时的直接辐射,而是由火花电流形成的干扰信号经点火线圈耦合到初级回路中并与初级回路中的干扰叠加,然后通过电源线的天线效应对外产生辐射。

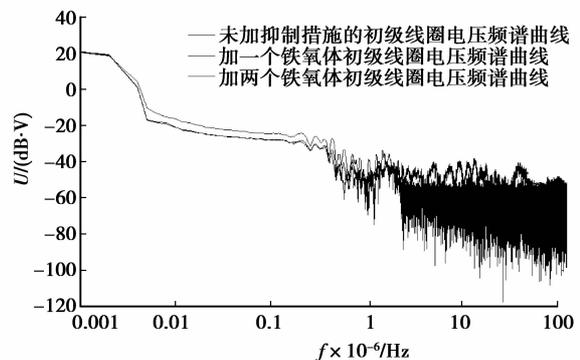
3 点火系统电源线滤波器设计

3.1 电源线差模扼流圈

采用 EMC 级铁氧体作磁芯绕成的差模扼流圈,阻抗为 $Z=R_s+jX_L$,其中 $R_s=R_0+(L_0\mu'')$, $X_L=\omega L_0\mu'$,磁芯的 μ' 和 μ'' 都对提高扼流圈的阻抗有贡献。差模扼流圈阻抗虚部部分相当于一个纯电感,实部接近一个纯电阻,为验证用 EMC 铁氧体绕制的差模扼流圈对高频干扰分量的消耗情况,特别做了一个实验。实验分 3 种情况:在电源线靠近点火线圈初级侧分别①不串联差模扼流圈;②串联一个差模扼流圈;③串联两个差模扼流圈。测试点火时电源线靠近蓄电池侧的干扰电压频谱,如图 4 所示。



(a)加入差模扼流圈后点火系统电路示意图



(b)电源线上加入差模扼流圈后抗干扰效果比较

图 4 电源线上加铁氧体扼流圈对干扰抑制情况

图 4(a)所示为电源线靠近点火线圈附近串入扼流线圈后点火系统电路示意图,图 4(b)差模扼流线圈串入形式不同时其抗干扰性能比较。

图 4(b)的结果说明串联一个与两个差模扼流圈后电源线干扰电压高频分量都比不加抑制有明显减少,说明差模扼流圈有一定滤波效果。但串联一个差模扼流圈与串联两个差模扼流圈的抑制效果差别不大。如果该差模扼流圈是靠自身的阻抗来减小流过的高频干扰能量,则串联 2 个扼流圈的效果应该好于只加一个扼流圈。但实验说明差模扼流圈抑制高频电磁干扰并非通过增大阻抗来限制流过的能量,而是利用其自身大电感特性将高频能量吸收,所以串联一个扼流圈与串联两个扼流圈没多大差别。

此外,差模扼流圈阻抗虚部只吸收高频能量,这与铁氧体磁芯构成的共模扼流圈有同样的吸收效果。再加上其绕线较多,很可能成为一个高效的磁场接发收机,会将向车内发射电磁骚扰,同时也会将车内的干扰耦合到电源线上。所以一般不将铁氧体磁芯构成的差模扼流圈单独作为电源线滤波器。

3.2 电源线混合滤波器

通过对点火系统线束电磁干扰的排查,得出低压电源线上的共模干扰电流是辐射干扰的发射源。

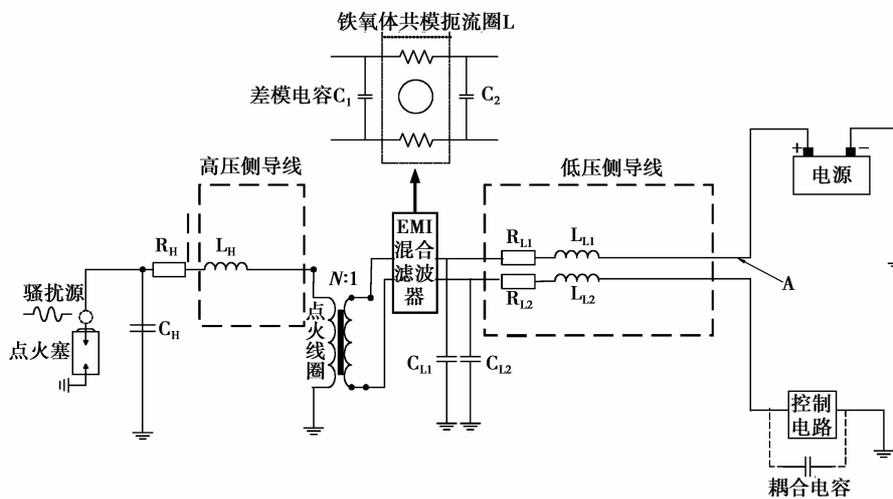


图 6 加入 EMI 混合滤波器后点火系统电路示意图

铁氧体磁导率高,共模扼流圈用铁氧体磁芯绕制,能获得较大的电感量。电感线圈通过不同频率电流时,呈现不同大小的感抗。并且频率越高,呈现的感抗就越大,说明电感线圈具有抑制高频信号的作用。铁氧体磁芯材料的选择上,参考 TDK 公司 T 系列环形产品。根据其阻抗频谱图,结合初始磁导率、居里温度、饱和磁通密度等指标,选择 M9 材料

并且对象车的辐射发射量已经超标,超标频段主要集中在 40 MHz 左右,测量结果如图 5 所示。因此必须采取有效的方法降低辐射发射量,使其满足汽车电磁兼容标准(GB14023)。

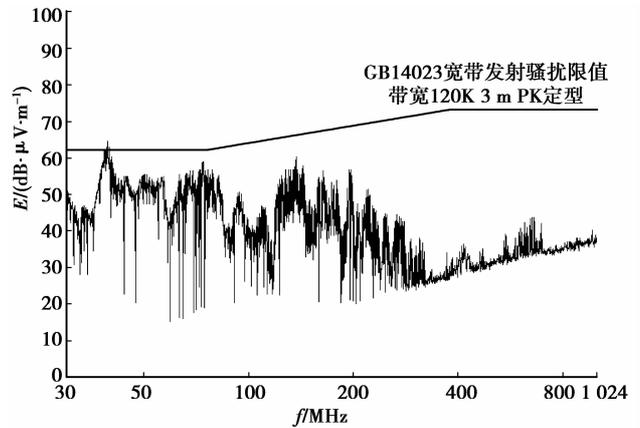


图 5 对象车 GB14023 辐射测试结果

通过对铁氧体差模扼流线圈滤波特性的分析^[14-16],结合汽车点火系统电源线上的干扰特点,确定采用差模电容与铁氧体共模扼流圈组成的混合滤波器作为电源线 EMI 滤波器,如图 6 中所示。

的磁芯作为点火系统电源线的共模扼流圈。因为在干扰频段内,M9 材料的阻抗频率特性曲线具有良好的线性,并且初始磁导率低,饱和磁通较高,居里温度高达 300 摄氏度,适合汽车发动机舱的高热特点,所以共模扼流圈适合作为电源线 EMI 滤波器的组件。

高频下差模电容器的选择必须要考虑其寄生电

感与寄生电阻的影响。将耐压 630 V,型号分别为 104、224、334、474 四种金属膜聚酯薄膜(CBB)电容用阻抗分析仪测得其电容、寄生电感、寄生电阻如表 1 所示。

表 1 4 种 CBB 电容器高频阻抗特性

型号	电容/ μF	寄生电感/ μH	寄生电阻/ $\text{m}\Omega$	谐振频率/ MHz
104	0.098	0.050 7	49.1	2.258 0
224	0.216	0.051 1	50.7	1.514 0
334	0.324	0.050 4	54.8	1.245 0
474	0.438	0.051 3	48.5	1.061 7

将这 4 种 CBB 电容的高频等效电路按照差模滤波电容方式加到点火系统仿真模型中,通过 SABER 仿真发现加入型号为 104 的薄膜电容时电源线上的高频电流最小,说明其差模滤波效果最好。所以选用容量值最小,谐振频率最大的 104 型金属聚酯薄膜电容器作为电源线 EMI 混合滤波器的差模电容。该差模电容能够为一部分干扰信号提供一个较小的流通环路,从而减小辐射发射量。将设计制作好的 EMI 混合滤波器加入点火系统实验平台中,如图 6 所示。

分别测量加混合滤波器前后图 6 中电源线 A 处的共模电流,对比结果如图 7 所示(在测试中因为 30 MHz 之前采样频率为 9 kHz,30 MHz 之后采样频率 120 kHz,所以频谱图在 30 MHz 附近有跳变)。结果表明加入 EMI 混合滤波器后,点火系统电源线上共模电流在 10 MHz 以上的频率范围内被有效地减弱,说明该混合滤波器对电源线上的高频传导电磁干扰具有很好的抑制效果。

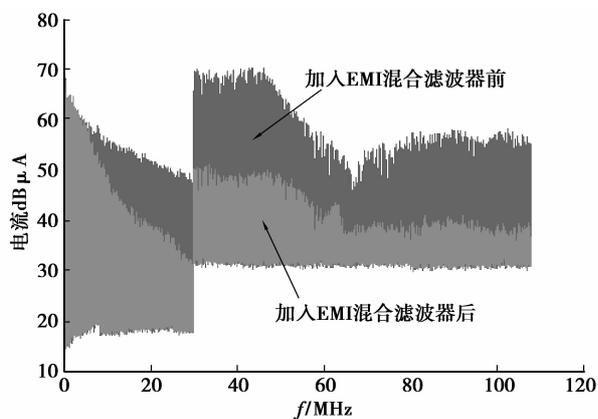


图 7 加入 EMI 混合滤波器前后电源线共模电流频谱

将 EMI 混合滤波器接在对象车点火系统靠近点火线圈处的电源线上,把车置入半波暗室中,启动发动机并使汽车处于怠速状态,进行 GB14023 辐射标准测试,测试结果如图 8 所示。

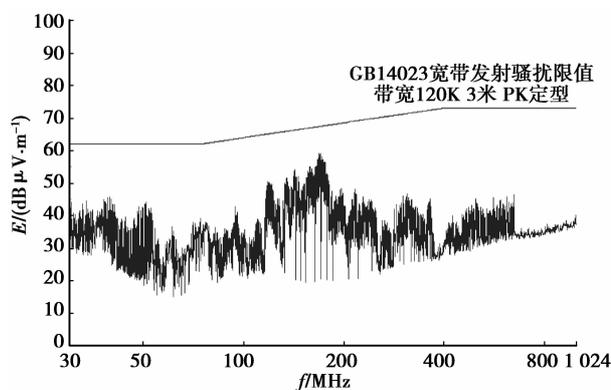


图 8 加 EMI 混合滤波器整车 GB14023 辐射测试结果

对比分析图 5 和图 8 的测试结果,当整车中加入 EMI 混合滤波器后,不再出现辐射电场超标的情况。所有检测频段的实测值距标准值都有一定的余量。特别是在先前超标的频段 40 MHz 附近,产生了近 18 dB(V/m)的衰减。这表明本文设计的混合滤波器在较低的经济成本下,取得了良好的抑制效果,具有经济实用性强的特点。

4 结 论

系统地分析了汽车点火系统产生电磁干扰的机理,并结合对点火系统线束的电磁干扰排查测试,得出火花塞电极之间的火花放电是点火系统的主要电磁干扰源。由火花放电产生的干扰信号会通过点火线圈的初级、次级之间的寄生电容耦合到初级回路中,并与初级回路中的干扰信号叠加,然后以初级回路中电源线的天线效应对外产生辐射。为了抑制点火系统的电磁辐射导致的电磁辐射超标问题,设计并制作了电源线差模扼流线圈和混合滤波器,并分析了二者的滤波特性。实验结果表明,混合滤波器在 10 MHz 以上的频率范围内能有效降低电源线上的共模干扰电流,从而降低了电源线辐射发射的能力,使得车辆得以通过 GB14023 测试。

参考文献:

- [1] Hsu H P. Automotive ignition interference[J]. IEEE Transaction on EMC, 1964, 6(3): 15-20.
- [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 Zhaofeng, YU Ying, XU Mingqian. Overview on automotive EMC research at home and abroad[J]. *Bus Technology and Research*, 2007(2): 8-10.
- [3] Noble I E. EMC and the automotive industry[J]. *Electromagnetic & Communication Engineering Journal*, 1992, 45(5): 35-41.
- [4] Chen C C. Predicting vehicle-level EMC performance utilizing on-bench component characterization results [C] // *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, August 2-6, 1999, Seattle, WA. Piscataway: IEEE Press, 1999, 2: 765-769.
- [5] 汪泉弟,刘春艳,俞集辉,等. 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 Quandi, LIU Chunyan, YU Jihui, et al. On suppressing electromagnetic interference caused by automobile spark-ignition system [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2007, 30(7):46-49.
- [6] 李永明,邓前锋,俞集辉,等. 汽车点火系统电磁干扰的仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(3):290-293.
LI Yongming, DENG Qianfeng, YU Jihui, et al. Simulation of EMI for automotive ignition system[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(3): 290-293.
- [7] 谭波,李永明,俞集辉,等. 汽车火花点火系统电磁干扰影响因素[J]. *探测与控制学报*, 2009, 31(2):76-80.
TAN Bo, LI Yongming, YU Jihui, et al. Electromagnetic interference factors of vehicle spark discharge system[J]. *Journal of Detection & Control*, 2009, 31(2):76-80.
- [8] 宋祖勋,张学平,俞卞章,等. 活塞发动机火花电磁干扰抑制方法研究[J]. *西北工业大学学报*, 2003, 21(1): 1-5.
SONG Zuxun, ZHANG Xueping, YU Bianzhang, et al. On suppressing EMI caused by spark in piston engine of RPV [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2003, 21(1):1-5.
- [9] Struzak R, Pietranik M. On two methods of measurement of ignition RFI suppressor effectiveness[J]. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 1981, 23(2):58-66.
- [10] Rao B S, Sisir K D. EMI analysis of automotive vehicles and its suppression techniques [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, December 6-8, 1995, Madras, India. Piscataway: IEEE Press, 1995: 109-117.
- [11] Gu Y F, Fang Z D. Experimental study on different ignition system matching different spark plug gap[C]// *Proceedings of the 1999 International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing*, June 6-7, 2009, Wuhan, China. Piscataway: IEEE Press, 2009:305-308.
- [12] Jia J. Study on the method of electromagnetic interference prediction for automotive ignition system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [13] 米切尔·麦迪圭安. 电磁干扰排查及故障解决的电磁兼容技术[M]. 刘萍, 魏东兴(译). 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [14] Perez A, Sanchez A M, Regue J R, et al. Characterization of power-line filters and electronic equipment for prediction of conducted emissions [J] *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, 50(3):577-585.
- [15] Son Y C, Sul S K. A new active common-mode EMI filter for PWM inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(6): 1309-1314.
- [16] 钱照明,程肇基. 电磁兼容设计基础及干扰抑制技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.

(编辑 张小强)