

发动机点火系统电磁兼容性能及优化技术研究

张立, 刘成, 田宁, 许国松, 何元章, 李佳, 陈冠军, 陈梦圆, 陈雨, 彭利华
(东风汽车集团有限公司技术中心, 武汉 430058)

Research on EMC Performance and Optimization Technology of Engine Ignition System

ZHANG

Li, LIU Cheng, TIANNing, XUGuosong, HEYuanzhang, LIJia, CHENGuanjun, CHENMengyuan, CHENYu, PENGLihua

(Dongfeng Motor Corporation Technical Center, Wuhan 430058)

Abstract: Considering that the engine ignition system is the main source of vehicle electromagnetic interference, a method to optimize its electromagnetic compatibility performance is proposed. On the basis of analyzing the mechanism of electromagnetic interference in the ignition system, theoretical research was conducted on various electromagnetic interference suppression measures. By building an electromagnetic interference test bench for the ignition system, the ignition signal and frequency of the electromagnetic interference test for the ignition system were determined, and some suppression measures for electromagnetic interference in the ignition system were verified. The results show that the EMC performance of the ignition system can be effectively improved by properly increasing the resistance value in the spark plug, lengthening the length of the internal resistance body, and adopting the ignition coil with EMC suppression resistance.

摘要: 鉴于发动机点火系统是车辆电磁干扰的主要来源, 提出了优化其电磁兼容性能的方法。在分析点火系统电磁干扰产生机理的基础上, 对各种电磁干扰抑制措施进行了理论研究。通过搭建点火系统电磁干扰试验台架, 确定点火系统电磁干扰试验的点火信号和频率, 对部分点火系统电磁干扰的抑制措施进行了试验验证。结果表明, 适当提高火花塞内电阻阻值、加长内电阻体长度、采用带有 EMC 抑制电阻的点火线圈, 可有效地提升点火系统的电磁兼容性能。

关键词: 点火系统; 电磁干扰; 电磁兼容; 抑制电阻; 火花塞内电阻

Key words: ignitionsystem; electromagnetic interference; electromagnetic compatibility; suppressionresistance; spark plug inner resistance

中图分类号: TK4***文献标识码: A

0 概述

随着车辆电子设备的逐步增加, 车辆的电磁干扰性问题也日益凸显, 各国对 EMC 法规要求也越来越严格。汽车电磁兼容性是指车辆在运行过程中, 车内各类电器设备互不干扰, 对外界干扰以及抗外界干扰的性能, 保证汽车的各系统安全可靠工作^[1]。点火系统的工作过程是在发动机各种工况和使用条件下, 在汽缸内适时、准确、可靠地产生电火花, 以点燃可燃混合气, 使汽油发动机实现做功。点火系统是汽车发动机中最重要的电磁干扰源, 其在工

作过程中所形成的高强度和宽频带的电磁干扰以传导和辐射耦合的方式易影响着车内电器设备的正常工作^[2]。同时, 它也是整车不能通过相关电磁兼容法规要求的重要因素。所以, 对点火系统的电磁兼容性进行研究具有重要的意义。本文对汽车点火系统电磁干扰形成的机理和干扰抑制措施进行了研究。搭建了点火系统电磁干扰试验台架, 并基于火花塞匹配性试验的最大点火电压工况点, 确定了电磁干扰台架的点火频率和点火占空比信号, 对相应的抑

制措施进行了试验验证，确定了提升点火系统电磁兼容性能的方法。

1 点火系统电磁干扰的形成机理

图 1 为汽车点火系统示意图，它由蓄电池、发动机电子控制系统 (Engine management system, EMS)、点火线圈、连接线束、高压导线和火花塞等部分组成^[3]。点火线圈初级绕组的通断由 EMS 中的功率晶体管控制，当点火信号为高电平时，初级线圈与蓄电池之间的回路导通，初级电流增长，初级线圈开始储能。当点火信号变为低电平时，初级线圈回路断开，在初级线圈中形成自感电动势，并通过点火线圈转化为次级线圈的互感电动势，形成高电压将火花塞间隙击穿产生电火花，从而引燃发动机气缸中的可燃混合气。

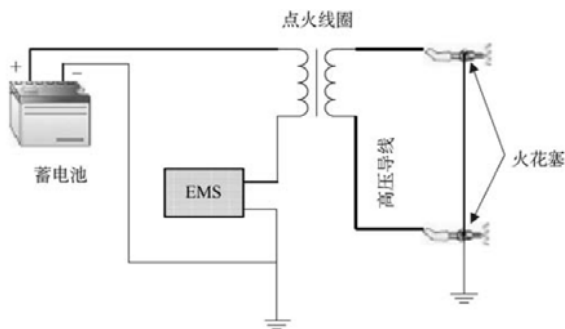


图 1 汽车点火系统示意图

根据 Ford 汽车公司 Chen Ching-chi 的研究结论^[4]，点火系统在工作过程中形成电磁干扰的机理和耦合路径，如下图 2 所示。火花塞击穿瞬间，其中心电极和侧电极之间快速的电压变化使气缸内部的火花塞及其连接导体上形成瞬变的电磁噪声，它通过高压导线和初级线缆的“天线”作用将电磁能量耦合到车内空间，对车内电磁环境产生影响。同时由于初级线缆的传导干扰会导致汽车电源质量的下降。为优化点火系统的电磁兼容性能，主要从以下方面考虑：减小火花塞击穿过程中形成的噪声电流；减小由点火线圈耦合到高压导线和初级线缆上的电磁噪声；缩短初级电缆和高压导线的长度。

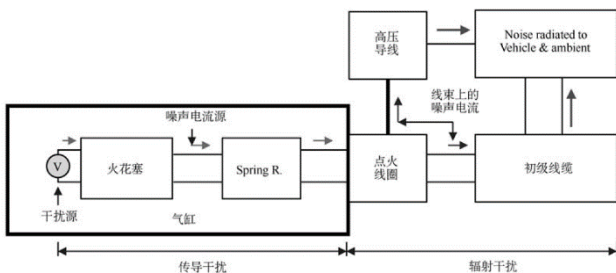


图 2 点火系统电磁干扰的形成机理和耦合路径

2 点火系统电磁干扰优化技术分析

2.1 高压导线对电磁干扰的影响

采用线绕电阻型高压点火导线的点火系统次级等效电路示意图如图 3 所示^[5]。图中： E 、 Z_0 为点火系统次级电路等效电压源和输出阻抗； Z_p 、 V_s 为火花塞的等效阻抗及放电电压； Z_w 、 R_w 、 L_w 为高压导线的等效阻抗、电阻和电感； C_w 为高压线等效并联电容； I_s 为火花塞击穿过程中，中心电极与侧电极之间形成的噪声电流。

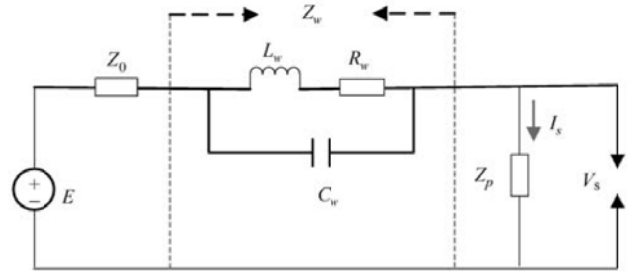


图 3 次级点火系统等效电路图

根据图 3 所示电路图，可得到火花塞击穿过程中形成的噪声电流为：

$$I_s = \frac{E}{Z_0 + Z_w + Z_p} \quad (1)$$

其中

$$Z_w = \frac{R_w + j\omega L_w}{1 + j\omega C_w(R_w + j\omega L_w)} = \frac{R_w + j\omega[L_w(1 - \omega^2 L_w C_w) - C_w R_w^2]}{(1 - \omega^2 L_w C_w)^2 + \omega^2 R_w^2 C_w^2} \quad (2)$$

考虑到 C_w 很小，点火电流频谱一般满足

$$\omega < \sqrt{\frac{1}{L_w C_w}}, \text{ 当 } \omega < \sqrt{\frac{1}{R_w C_w}} \text{ 时, 有}$$

$$Z_w = R_w + j\omega L_w \quad (3)$$

从式 (1) 中可知，点火线圈、高压导线和火花塞对噪声电流源的大小都有影响。增大火花塞和高压导线的阻抗，将有助于减小点火系统的电磁干扰。式 (3) 表明，在低频端，线绕电阻型高压导线对干扰的抑制主要由电阻决定。而随着频率的增大，电感的作用将迅速显现出来。另外，由于线绕电阻的趋肤效应，阻值 R_w 虽频率增高而迅速增加，从而使其高频干扰抑制能力加强。

2.2 火花塞对电磁干扰的影响

利用同轴分布电容器模型对火花塞进行等效后，可建立起如图 4 所示的点火系统电容放电等效电路模型。

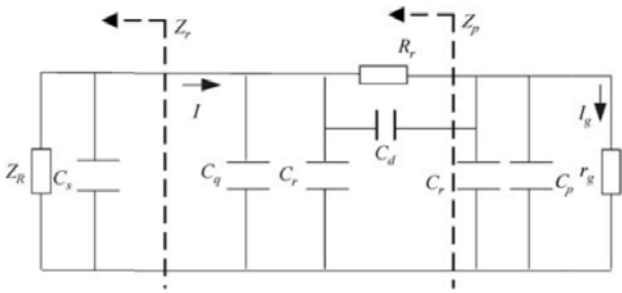


图4 点火系统电容放电的等效电路模型

图4中, Z_R 为高压点火导线的特性阻抗, C_s 为火花塞绝缘裙部对发动机壳体的电容, C_q 为火花塞电阻前端的中心电极与火花塞金属壳体之间的分布电容, C_r 为火花塞电阻与壳体之间的分布电容, C_d 为电阻型火花塞的并联电容, C_p 为火花塞电阻后端的中心电极与火花塞金属壳体之间的同轴分布电容, R_r 为火花塞电阻, r_g 为火花塞间隙之间的火花电阻。

经推导, 可得噪声电流源的表达式为:

$$I(\omega) = \frac{C_s}{\pi} \times \frac{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_d}\right)^2\right) \left(\frac{\omega R}{2\omega} + \left(1 - \sqrt{\frac{\omega R}{2\omega}}\right)^2\right)}}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_q}\right) \sqrt{\frac{\omega R q}{2\omega}}\right)^2 + \left(1 + \sqrt{\frac{\omega R q}{2\omega}}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_q}\right)^2}}$$

$$\frac{|I_g(j\omega)|}{(C_p + C_r)} \quad (4)$$

式中: V_s ——火花塞击穿电压;

$I_g(j\omega)$ ——火花间隙处的火花电流;

$$C_u = C_r + C_q + C_s;$$

$$\omega_q = 1/C_u R_r;$$

$$\omega_d = 1/C_d R_r;$$

$$\omega_R = R/C_s^2 R;$$

$$\omega_{Rq} = C/C_u^2 R;$$

R ——单位长度高压线的串联电阻;

C ——单位长度高压线并联电容。

式(4)中表明干扰电流源与火花塞的内部结构、火花塞间隙的击穿特性等有关。

根据 Rompe-Weizel 火花电阻公式, 可得到火花塞间隙处的火花电流 I_g [6] 为

$$I_g(x) = \frac{1}{4} (C_p + C_r) V_s (2\alpha/p) (V_s/l_g)^2 e^{\frac{x-x_0}{2}} [1 + e^{\frac{x-x_0}{2}}]^{-1.5} \quad (5)$$

$$\text{式中 } x = \left(\frac{2\alpha}{p}\right) \left(\frac{V_s}{l_g}\right)^2 t;$$

l_g ——火花间隙的宽度;

α ——火花系数;

p ——发动机气缸内可燃混合气的压强, 对于台

架上的点火系统而言, $p=1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

由式(4)和式(5)可知减小 C_p 、 C_d 和 V_s , 增大 l_g 、 C_q 和 R_r 将有助于减小噪声电流源。其中减小 V_s 和增大 l_g 是相互矛盾的, 这也就要求在其间综合考虑, 即在保证点火系统可靠工作的前提下, 尽量增加 l_g 。减小 C_p 的基本方法是将火花塞电阻器尽量靠近放电端。将火花塞阻尼电阻的长度做的相对长一些, 则可以减小 C_d 。

2.3 点火线圈对电磁干扰的影响

基于点火线圈电磁干扰产生的原理, 若能抑制残余能量形成的高频电磁波, 势必会从根源上降低点火线圈辐射的电磁干扰。

图5为增加了EMC抑制电阻的点火线圈内部电路图。点火线圈中所加的EMC抑制电阻并不是一个普通的电阻, 它是一个基体采用陶瓷材质、两端为铁材质的特殊电阻, 对特殊频段的电磁波进行抑制, 达到改善EMC特性的作用。该抑制电阻的大小由点火线圈单品试验确定, 其对点火线圈正常输出的能量和次级电压没有影响。

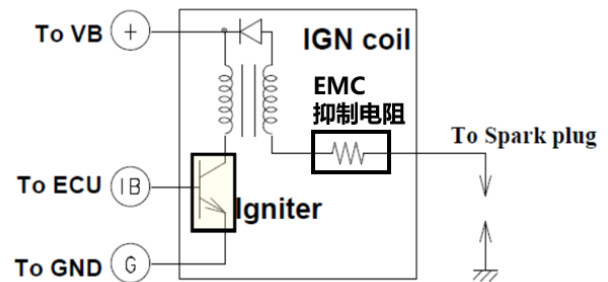


图5 增加EMC抑制电阻的点火线圈内部电路

2.4 连接线缆对电磁干扰的影响

为了有效降低电磁干扰, 需要对点火系统进行综合分析处理。除高压导线、火花塞和点火线圈等因素外, 还应考虑连接线缆的作用。耦合在高压导线和初级线缆上的噪声电流会向汽车及其周围空间辐射电磁场能量。由连接线缆所引起的差模和共模辐射电场可以表示为:

$$E_{Dmax} = \frac{1.316 \times 10^{-14} I_D f^2 L s}{r} \quad (6)$$

$$E_{Cmax} = \frac{1.257 \times 10^{-6} I_C f L s}{r} \quad (7)$$

式中:

I_C ——连接线缆上的噪声电流;

f ——频率;

L ——线缆的长度;

s ——线缆两导体间的距离。

由单根导线引起的共模辐射为 $E_{Cmax}/2$ 。从式(6)和式(7)可知,减小点火线圈连接线缆上的噪声电流,并缩短连接线缆的长度,将会降低点火系统形成的辐射电磁干扰。高压导线的长度和布置受制于发动机的设计要求,一般较难更改。但可以方便地对 EMS 和蓄电池的不知为进行优化,以减小初级连接线缆的长度,从而降低由初级线缆辐射的电磁干扰。

图 6 中所示为用于抑制点火线圈初级电源线上噪声电流的混合型滤波器,其中 L_C 为共模抑制电感, C_D 为差模抑制电容。通过对点火线圈初级电缆上共模和差模噪声电流的抑制,减小由初级电缆辐射的电磁干扰。

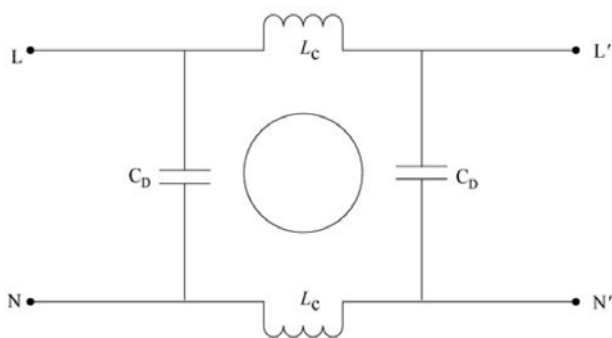


图 6 点火系统电磁干扰抑制混合滤波器

3 试验结果和分析

根据前述的分析结果,采用绕线式电阻型高压导线、电阻型火花塞(阻尼尽量大、尽量长并靠近放电端)、优化初级电缆的布置、在点火线圈初级电源线上接入混合型滤波器,以及在点火线圈次级回路中增加抑制电阻,可有效地降低点火系统在工作过程中形成的电磁干扰。关于高压导线电阻大小、导线长度、带混合型滤波器的点火线圈对点火系统电磁干扰的影响,汪泉弟^[7,8]等人已经进行过相关的研究。所以,在此针对不同火花塞内电阻大小、内电阻体长度以及点火线圈中增加 EMC 抑制电阻对点火系统电磁干扰的抑制能力进行试验测试,以验证前述理论分析的正确性。

3.1 试验台架搭建和工况确定

汽车发动机启动后,发电机对车上用电设备及点火系统进行供电,由于发动机转速变化、发电机自身特性以及车内复杂电磁环境等因素的影响,导致整车上测量的点火系统辐射出的电磁干扰信号,并不能完全体现其干扰特性,故针对点火系统搭建专门的 EMC 试验台,对其不同条件下的干扰特性

进行测试。

基于火花塞匹配性结果,3000rpm 时火花塞对应的点火电压最大,在该工况下进行测试最有代表性。故在点火信号发生器中,设定该工况下对应的点火频率为 25Hz,点火线圈充电时间为 3.48ms,占空比为 8.7%方波信号,并经过集成放大电路实现点火线圈初级回路的点火控制。图 7 为辐射发射试验布置示意图

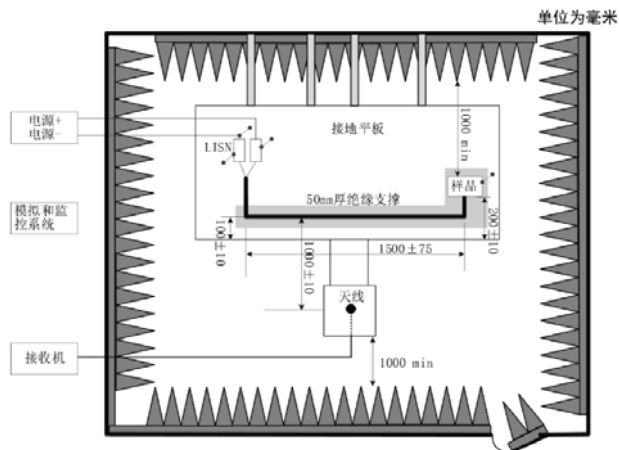


图 7 辐射发射试验布置示意图

将模拟的点火信号输入到点火线圈初级回路后,次级回路输出到负载火花塞上,火花塞固定在工装上,内部并注入 5.5bar 的氮气,工装带有观察窗可观察到火花塞点火情况。图 8 为点火系统工装台示意图。

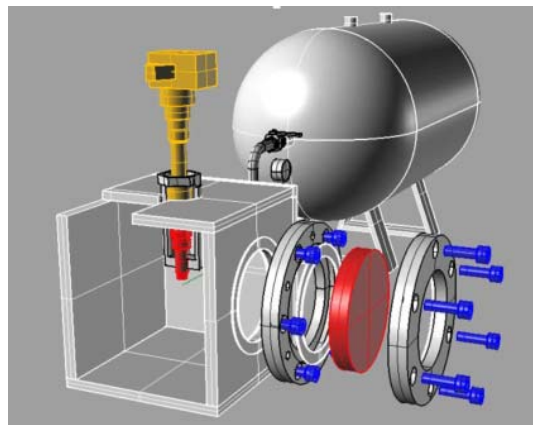


图 8 点火系统工装台示意图

3.2 火花塞内电阻阻值对电磁辐射的影响

内电阻是火花塞的重要组成部分,也是评判火花塞电磁干扰的重要参数,电阻值越小,吸收的电磁波也越小,易发出更大的电磁干扰。反之,电阻值太大,也会影响火花塞的点火性能。因此,保持火花塞内电阻的长度不变,通过改变内电阻的阻值大小,然后进行 EMC 试验对比分析。这里选取的火花塞内电阻体长度为 11mm,两种火花塞内电阻

阻值分别为 $4.5\text{k}\Omega$ 和 $7\text{k}\Omega$ ，共 4 组不同阻值的火花塞，放置不同的方位进行测试对比，测试频率在 40MHz 。

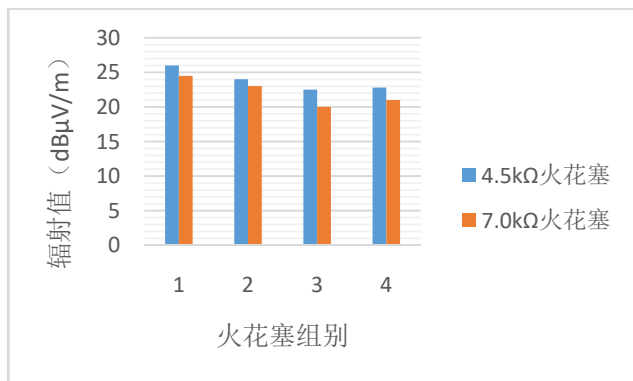


图 9 火花塞内电阻阻值对 EMC 影响结果

当火花塞内电阻长度一定时，根据火花塞电阻粉末配方的不同改变火花塞内电阻的阻值大小。测试结果如图 9 所示，内电阻 $7\text{k}\Omega$ 的火花塞辐射值要小于内电阻 $4.5\text{k}\Omega$ 的火花塞辐射值，这是由于火花塞内电阻越大，能够吸收的电磁波越多，使得火花塞点火对外辐射的越小。

3.3 火花塞内电阻体长度对电磁辐射的影响

火花塞内电阻阻值与长度呈正比，电阻体短，电阻值小，吸收的电磁波少。该试验中，保证火花塞内电阻阻值相同，改变内电阻的长度，分析不同长度对 EMC 性能的影响。保持火花塞内电阻值为 $5.5\text{k}\Omega$ ，火花塞内电阻体长度分别选取 11mm 和 13mm ，共 4 组不同内电阻体长度的火花塞，放置不同的方位进行测试对比，测试频率在 40MHz 。

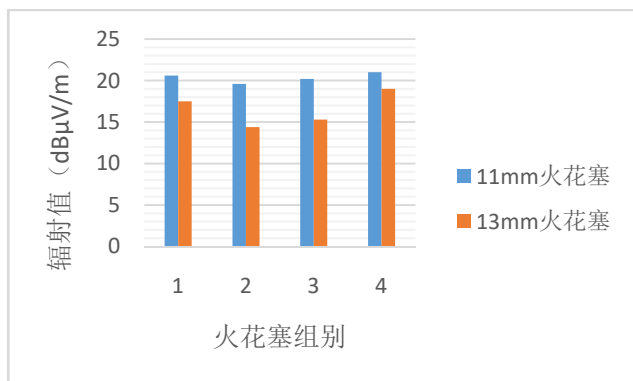


图 10 火花塞内电阻体长度对 EMC 影响结果

不同内电阻体长度火花塞的测试结果如图 10 所示，内电阻体长 13mm 的火花塞辐射值要明显小于内电阻体长度 11mm 的火花塞辐射值，这是由于在火花塞内电阻值保持相同的情况下，电阻体越长，其电阻体表面积越大，越有利于吸收电磁波，使得火花塞点火对外辐射的越小。

3.4 点火线圈抑制电阻对电磁辐射的影响

两种自带点火模块、输出点火能量均为 90mJ 的点火线圈，一种带有阻值为 $1\text{k}\Omega$ 的 EMC 抑制电阻，另外一种无 EMC 抑制电阻。在 $30\text{-}300\text{MHz}$ 的测试频率下，测试结果如图 11 所示，带有抑制电阻的点火线圈辐射值比无抑制电阻的点火线圈辐射值，在大部分中高段频率下要小 $15\text{-}20\text{dB}\mu\text{V/m}$ 。增加抑制电阻后，点火线圈所发出的电磁辐射值满足 GB/T 18655《车辆、船和内燃机无线电骚扰特性用于保护车载接收机的限值和测量方法》中等级 1 的要求。所以，在点火线圈的次级回路中加入抑制电阻可以有效降低点火系统发出的电磁辐射。

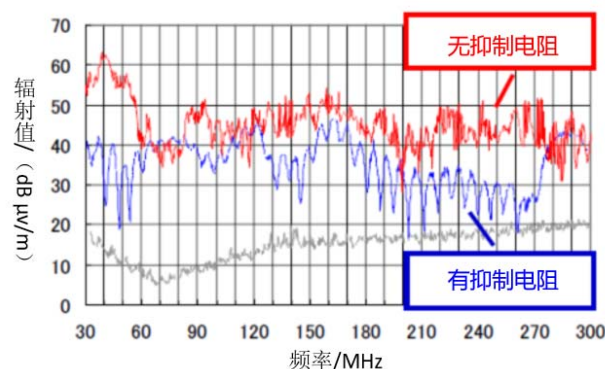


图 11 点火线圈抑制电阻对 EMC 影响结果

4 结论

为优化发动机点火系统的电磁兼容性能，对点火系统电磁干扰产生的机理和相应的干扰抑制措施进行了较深入的分析，并通过搭建点火系统 EMC 试验台架，对部分优化措施的电磁干扰抑制能力进行了试验验证，可得到如下结论：

- (1) 在满足点火性能的前提下，适当增加火花塞内电阻值，有利于降低点火系统形成的辐射干扰。
- (2) 在兼顾火花塞制造工艺性和可靠性的前提下，适当长的电阻体对降低点火系统辐射干扰有一定好处。
- (3) 点火线圈次级回路中增加 EMC 抑制电阻能大幅提升点火系统的电磁兼容性能，减低其辐射干扰，在高能点火线圈的开发中值得推广。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] B. Subba Rao, Sisir K D. EMI Analysis of Automotive Vehicles and its Suppression Techniques[C]. IEEE

International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 1995, 6 (12) : 109-117.

- [3] 高锋, 陈立东, 翟建鹏, 等. 汽车点火系统建模及传导骚扰仿真[J]. 汽车工程, 2008, 30(10): 893-897.
- [4] Chingchi Chen. Predicting vehicle-level EMC performance utilizing on-bench component characterization results[C]. IEEE International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 1999, 2(8): 765-769.
- [5] 宋祖勋, 张学平. 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.
- [6] Osamu Fujiwara, Yoshifumi Amemiya. Calculation of Ignition Noise Level Caused by Plug Gap Break-down[C]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1982, 24(1): 26-32.
- [7] 汪泉弟, 刘春艳, 俞集辉. 汽车火花点火电磁干扰抑制方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(7): 46-49.
- [8] 隋修武, 张立鹏, 李家国. 通用小型汽油机无线电骚扰产生机理及抑制措施[J]. 摩托车技术, 2005(8): 13-16.