

电动汽车传导性干扰的电磁兼容性研究

计时鸣, 刘大亮

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310032)

摘要: 电动汽车产生的电磁干扰强于传统汽车,尤其是驱动系统产生的共模传导电流不但严重干扰车辆内部电子设备的整车运行,还向周围环境辐射强烈的电磁干扰。为通过减小驱动系统的共模电流,来降低电动车辆的磁场辐射强度,介绍了阻性耦合、感性耦合和容性耦合,并且给出了在电动汽车布线中减小感性耦合与容性耦合的具体措施;从电池的物理结构和电路模型入手,建立了电动汽车电池组与底盘之间的分布电容模型;着重分析了驱动系统的共模干扰源和共模干扰路径,提出了抑制共模干扰的具体办法;最后进行了电动汽车辐射强度试验。研究结果表明,通过抑制电动汽车驱动系统的共模电流,可以有效抑制车辆的磁场辐射强度,使车辆满足 GB/T 18387 对电动汽车磁场辐射发射限值的要求。

关键词: 电动汽车;电磁兼容;传导干扰;共模电流抑制

中图分类号:U461;TM153

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)03-0359-06

Study on conducted EMC of electric vehicle

JI Shi-ming, LIU Da-liang

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: The electric vehicle generates more electromagnetic interference than the traditional cars. Especially, the power train system's common mode current affect the vehicle's electronic equipment seriously and radiate strong electromagnetic interference to the ambient environment. In order to reduce the magnetic radiation through the suppression of the common mode current, the resistance coupling, capacitive coupling and inductive coupling were introduced, and the suggestions of reducing the inductive coupling and capacitive coupling in the electric vehicle routing system were proposed. The Stray capacitance model between the battery pack and chassis was established. The battery's physical structure and circuit model were both considered during the establishment. Importantly, the source and propagation path of the common mode interference was analyzed. The inhibiting methods of the common mode interferences were proposed. The experiments result verifies that magnetic radiation is reduced through the suppression of the common mode current of the power train system, and the vehicle's magnetic radiation meets the requirement of GB/T 18387.

Key words: electric vehicle; electro-magnetic compatibility(EMC); conducted interference; inhibition of the common mode current

0 引 言

近些年来,由于能源危机和环境恶化的影响,世界各国都在积极开发应用新能源技术。美国、欧洲、日本的各大汽车公司纷纷推出了自己的新能源汽车,而且市场竞争日趋激烈^[1-2]。现代电动汽车发展非常迅速,形式多样,但都以电力为驱动能源,电压一般在200 V~400 V之间,且广泛使用了电力电子技术。由于

电力电子装置的电流大,开关频率高,会产生很强的电磁干扰。另外,电动汽车在有限的空间内集成了多种电力电子设备,给电磁兼容的研究带来了很多的问题。伴随着电动汽车的发展,电动汽车的电磁兼容性问题也越来越受到各国重视^[3]。

本研究主要探讨在电动汽车布线中如何减小感性耦合与容性耦合的问题。

1 电动汽车传导耦合干扰分析

传导干扰是指通过金属导体,例如导线、金属结构、电感器、变压器等传播的干扰。传导性干扰源的常见例子有脉冲发生器、计算机时钟及其他周期性信号发生器。噪声可以通过多种途径从干扰源耦合到敏感设备上。这些途径包括:公共导线、设备间电容、相邻导线的互感等^[4-5]。

1.1 电阻传输

不经过电抗元件的传输,就是电阻传输。在电动汽车中,由于绝缘降低或击穿而产生的漏电是一种极易被忽视的电阻传输。

1.2 电感传输

电感传输产生在两个闭合回路之间。对于两根位置接近的导线而言,主要是互感耦合,它类似于变压器的作用。这时第一根导线里的电流 I_1 产生的磁通 $d\phi$,变化的磁通在第二根导线上产生电流 I_2 。第二根导线里的电流 I_2 在与其串联的阻抗两端产生电压降 V_2 。

电感耦合的主要途径是变压器耦合和并行导线间的耦合。从干扰观点看,铁芯损耗常常使得变压器的作用类似于抑制高频干扰的低通滤波器。因此,比较重要的电感传输常常就是导线到导线之间的耦合。

电感耦合及电容耦合的物理模型如图1所示。图1中画出了一对平行的导线,每根导线都有接地回路。它们构成了初级为一圈、次级为一圈的变压器,如图2(a)所示。则电感传输的表达式为: $V_2 = MdI_1 / dt$ 。

其中:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \left| \frac{(h_1+h_2)^2+d^2}{(h_1-h_2)^2+d^2} \right| \quad (\text{单位:H}) \quad (1)$$

式中: μ_0 —自由空间的磁导率, $\mu_0=4\pi \times 10^{-9}$ H/m; h_1 —1号导线在接地上面的高度,m; h_2 —2号导线在接地上面的高度,m。

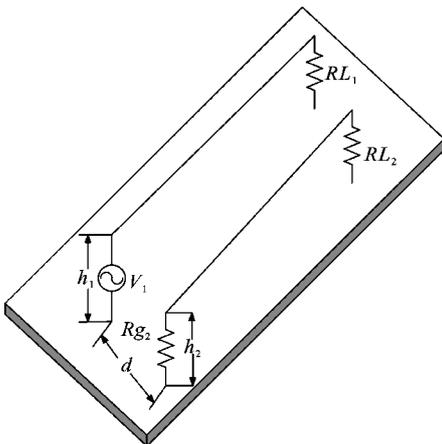


图1 电感耦合及电容耦合的物理模型

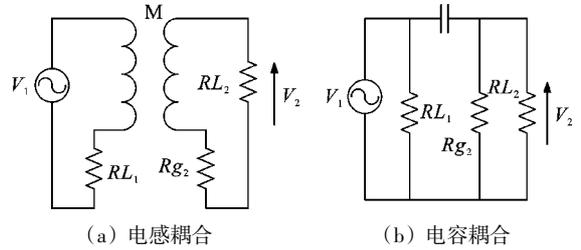


图2 电感耦合、电容耦合的电路模型

在电动汽车中,动力电池组供电的驱动系统与底盘隔离,动力电流的回线是一根连接在动力电池组总负极的动力电缆。动力线的电流一般有几十安培甚至数百安培,且电流变化率较大,所以它是一个非常强的干扰源,极易对控制系统和信号系统产生干扰。根据电感传输表达式,在电动汽车的布线上减小电感性耦合的方法有以下方法:

- (1) 使动力供电线和回线之间的距离尽量靠近;
- (2) 动力线与信号线、控制线尽可能远离;
- (3) 如果信号线是双绞线,则尽量绞紧,且贴近底盘布线;
- (4) 如果信号线是屏蔽线,则贴近底盘布线,屏蔽层要良好接地。

1.3 电容传输

所谓电容传输,是通过导线间的电容使某一电路对另一电路形成交连耦合,如图1所示。注意图1中的物理模型与电感传输是一样的。但是电容传输与电感传输不同,它不需要初级和次级回路如图2(b)所示。电容传输表达式为: $V_2 = R_2 V_1 / (R_2 + X_C)$ 。

其中:

$$\begin{cases} X_C = \frac{1}{j\omega C} \\ C = (3.5 \times 10^{-10} / 2\pi) \times l \times \ln(d^2 / r_{w1} r_{w2}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: l —导线1和导线2的共有长度,m; d —导线1和导线2之间的距离,m; r_{w1} —导线1的半径,m; r_{w2} —导线2的半径,m。

对地阻抗高的电路,容易发生电容传输。对于给定的电流而言,这种电路可以产生很高的对地电压,频率越高,电容传输越明显。这是因为,两电路间的耦合容抗是随着频率的增加而减小的。对于电容传输也需要有一个闭合的传输路径,但这个路径显然是与电感传输的路径不同。比较图2(a)和图2(b),电容传输的返回路径通常是由两根导线的公共地线。在高频工作时,多股导线电缆的电耦合作用很强。因此,一根导线上的干扰可以传输到邻近这根电缆的所有其他导线上。从电容传输表达式中可以看出减小 C 的办法有:

- (1) 增加线间距离。尽量让容易受干扰的线远离干扰源;

(2) 减小布线长度,这主要通过电器设备的合理布局,使布线尽可能短。

2 驱动系统的传导干扰分析

2.1 逆变系统干扰源计算

三相电压源逆变电路如图3所示。

图3中,6个PWM控制的电力电子开关 S_1, S_2, \dots, S_6 组成三相桥臂。在电动汽车中的开关器件多为IGBT。为方便后面分析,本研究假设电池组的电压中点为等效零电势点 O ,负载电动机为星形连接方式,中性点为 $N^{[6]}$ 。

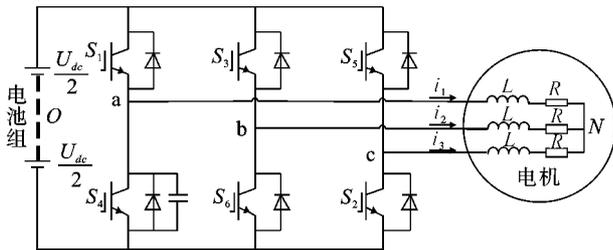


图3 三相电源逆变器

逆变器可能存在8种开关组合状态。根据逆变电路的开关组合模式,可以定义逻辑类型的开关函数来描述其开关状态。本研究设 F_1, F_2, \dots, F_6 分别在开关 S_1, S_2, \dots, S_6 开通时取1、关断时取0,则三相桥臂输出端到直流中点 O 的电压可以表示为:

$$\begin{cases} u_{AO} = \frac{U_{dc}}{2} (F_1 - F_4) \\ u_{BO} = \frac{U_{dc}}{2} (F_3 - F_6) \\ u_{CO} = \frac{U_{dc}}{2} (F_5 - F_2) \end{cases} \quad (3)$$

本研究考虑到同一桥臂的上下两个开关不能同时开通或同时关断,从电流连续的角度考虑,必有如下约束条件:

$$\begin{cases} F_1 + F_4 = 1 \\ F_3 + F_6 = 1 \\ F_5 + F_2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),得到:

$$\begin{cases} u_{AO} = \frac{U_{dc}}{2} (2F_1 - 1) \\ u_{BO} = \frac{U_{dc}}{2} (2F_3 - 1) \\ u_{CO} = \frac{U_{dc}}{2} (2F_5 - 1) \end{cases} \quad (5)$$

为了表示直观,本研究将 F_1, F_2, F_3 分别写作 F_a, F_b, F_c 。由图3列写如下电路方程式:

$$\begin{cases} L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 = u_{AN} = u_{AO} - u_{NO} \\ L \frac{di_2}{dt} + Ri_2 = u_{BN} = u_{BO} - u_{NO} \\ L \frac{di_3}{dt} + Ri_3 = u_{CN} = u_{CO} - u_{NO} \end{cases} \quad (6)$$

在对称的情况下,有 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$,故将以上3式相加可得:

$$u_{AO} + u_{BO} + u_{CO} = 3u_{NO} \quad (7)$$

从而可得此时逆变器两相(AB)间的差模电压为:

$$u_{AB} = U_{dc} (F_a - F_b) \quad (8)$$

等效共模电压 u_{NO} 为:

$$u_{NO} = \frac{U_{dc}}{6} \sum_{i=a,b,c} (2F_i - 1) \quad (9)$$

2.2 电池及电池组的电路模型

由于电动汽车仿真技术的需要,研究人员设计了大量电池性能的等效电路模型。基于电池工作原理,等效电路模型采用电路网络描述电池的工作特性,适用于多种电池。在美国国家再生能源实验室(NREL)开发的仿真软件ADVISOR中,集成了几种典型的等效电路模型。其中,Thevenin模型如图4所示,是最具代表性的电路模型。电容 C 和电阻 R_2 并联(描述超电势)后与电压源 U_{oc} (描述开路电压)、电阻 R_1 (电池内阻)串联。

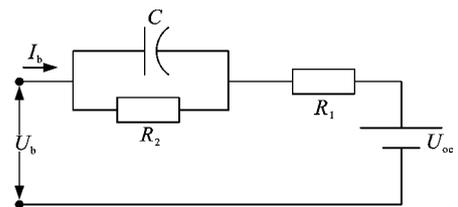


图4 Thevenin电池性能模型

锂电池的结构一般如图5所示。电池的负极材料一般为石墨,石墨镶嵌在导电的极耳上,电池的最外边包一层铝膜。电池首先装在电池箱里再安装到汽车上,每块电池的负极对车身都可以产生一个寄生电容 C_s 。当所有电池串联起来的时候,其示意图如图6所示。

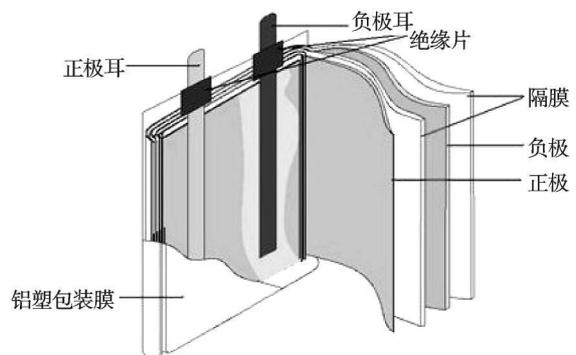


图5 锂电池结构模型

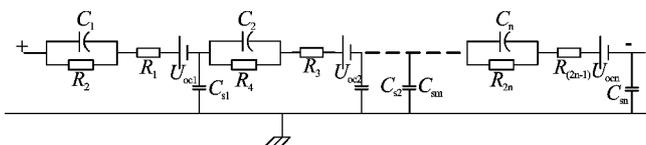


图6 电池组对底盘分布电容模型

可见这是一个相当复杂的电网络,其分布参数跟电池的布置有很大关系,分布参数产生的影响跟电池组的电流波形有很大关系。当电池组中电流变化率较大时,各单体电池负极电位变化也较大,这时在电池组跟底盘之间就会由于分布电容的存在产生对底盘的共模电流。这种干扰极易产生辐射,干扰其他电子设备的正常运行。

2.3 驱动系统的差模传导干扰分析

差模干扰是由电路中传输电流的导线所形成的环路产生的。式(8)给出了AB两相之间的差模电压。通过三相逆变器的高频等效电路可以发现,IGBT开关动作时会产生差模干扰源,经母线流回电池;其传播路径如图7所示^[7-9]。

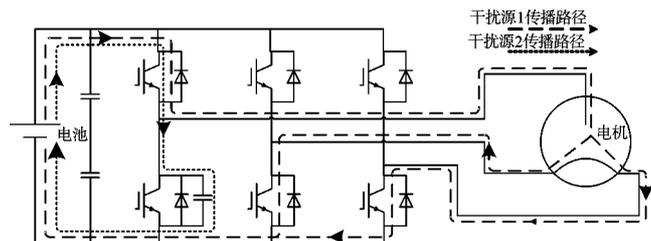


图7 驱动系统差模干扰传输路径

2.4 驱动系统的共模传导干扰分析

当逆变器正常工作时,随着每相桥臂上、下开关管的轮流开通,桥臂中点电位会随之发生阶跃变化。该现象如果从EMI角度分析,那么3个桥臂所输出的电压就是3个EMI干扰源,而且每个开关动作时都会对IGBT与散热器之间寄生电容进行充、放电,形成共模EMI电流,其大小为:

$$i_{hCM} = C_p \frac{d_u}{d_t} \approx C_p \frac{U_{DC}}{t_r + t_d} \quad (10)$$

式中: i_{hCM} —流经每个桥臂的共模EMI电流(漏电流), C_p —每个IGBT与散热器之间的寄生电容, U_{DC} —功率变换器整流桥侧直流母线电压, t_r, t_d —IGBT的开通与关断时间(主要是指电压上升和下降的时间)^[10]。

式(10)中的共模干扰电流会通过IGBT→IGBT对散热器的寄生电容→底盘→电池组对底盘的分布电容→电池组→直流母线→逆变器形成回路,如图8所示。此共模干扰电流还会通过IGBT→IGBT对散热器的寄生电容→底盘→动力电缆对底盘的分布电容→动力电缆→逆变器形成回路。

感应电机定子绕组与电机外壳之间同样具有较

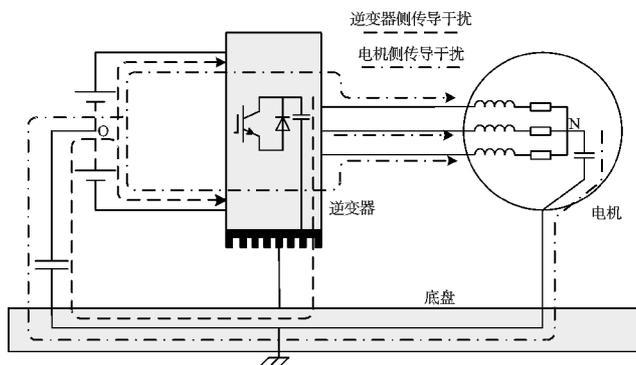


图8 经过电池组分布电容传输的共模电流

大的寄生电容。由式(9)可知,对于PWM电机驱动系统,电机中性点与电池组之间存在高频变化的共模电压,有很高的 d_u/d_t 高频共模电压会通过电机定子绕组与电机外壳之间的寄生电容产生流向底盘的共模电流。此共模电流的一个回路为:定子绕组→定子绕组与电机外壳的寄生电容→底盘→电池组对底盘的分布电容→直流母线→逆变器→电机动力线→电机,如图8所示。此共模电流另一个回路是:定子绕组→定子绕组与电机外壳的寄生电容→底盘→动力线对底盘的寄生电容→电机动力线→电机。

本研究分析了逆变器侧和电机侧两个共模干扰源。这两个干扰源可以互相作用,在逆变器与电机之间形成共模干扰电流其传输路径为:逆变器→电缆→电机→底盘→散热片→器件寄生电容→逆变器。另外,电机定子线圈上产生的电压尖峰会在轴承上感应出轴电压,随之产生的轴电流经过电机轴流向底盘,从而形成另一种共模干扰电流,如图9所示。

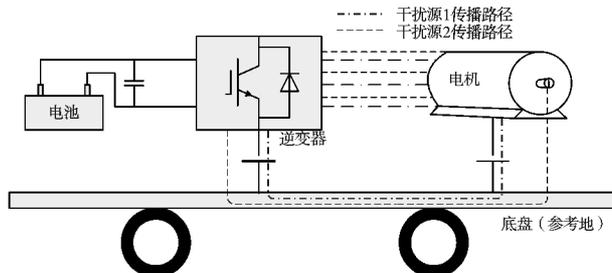


图9 逆变器与电机之间的共模电流

3 共模传导干扰抑制方法

抑制共模电流对车辆的电池兼容具有重要的意义。因为在远场,辐射发射的电磁场主要是由线缆上的共模电流贡献的。通过抑制共模电流,可以很大程度上抑制其辐射发射。

驱动系统共模传导EMI的主要干扰源是逆变器和电机。电动汽车内部空间小,电缆线的布线复杂,所以在解决电动汽车内部的电磁干扰问题时首选的解决办法是接地和屏蔽。电力电子器件在开关时容易产生

很大的 d_u/d_l 和 d_i/d_l , 所以抑制重复性开关瞬变干扰也是抑制干扰的一个有效方法。

由以上分析可知,减小共模传导的方法之一是减小功率开关管的金属底板和散热器之间的寄生电容。其方法是:在功率晶体管金属底板和散热器之间加一个屏蔽层,屏蔽层与晶体管金属底板和散热器之间都是绝缘的,并且屏蔽层需要良好的导电性,屏蔽层通常与下桥臂的功率开关管发射极相连。此时,屏蔽阻抗 Z_s 应尽量小(可使用薄铜箔),从而使得共模电流能够流经 C_{p1} 、 C_{p3} 与 Z_s 构成的高通电路返回到主电路中,如图10所示。

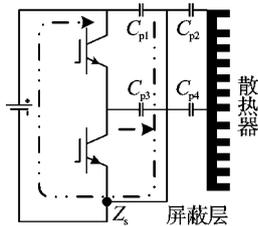


图10 屏蔽功率开关管以减小共模电流

在抑制共模电流方面,减小电池组与车身之间的分布电容是一个非常经济有效的方法。其方法是在电池箱的内壁上贴上几毫米厚的绝缘板。一方面可以减小电池组与车身之间的分布电容,从而减小共模电流。另一方面,可以增加电池和车身之间的绝缘,减小阻性耦合。

电动汽车电力电子系统中产生的传导干扰按频段可分为3类:第1类是逆变器输出的频率及其高次谐波;第2类是电力电子器件本身的开关频率及其倍数频率附近的干扰,这一干扰是由系统中一些高频开关环节(斩波、逆变)产生的,其频率分布和幅值与开关的控制策略有关,称为开关频率谐波;第3类干扰则出现在数十兆赫兹以上,这些干扰是由开关通断时器件内部的瞬变过程引起的,与开关器件内部的载流子运动有关,成为开关暂态干扰。

在车辆逆变系统中,逆变器的输出频率在几十到数百赫兹范围内,脉宽调制一般采用SVPWM,所以通常的抑制传导干扰的方法是:抑制开关器件的开关瞬态干扰。

对于IGBT功率回路上难以控制的寄生电感,在直流母线上产生的IGBT关断浪涌电压和续流二极管恢复浪涌电压需要通过吸收电路来抑制直流母线电压尖峰。IGBT功率回路上常用的吸收电路如图11所示。

其参数的设计与功率电路的寄生电感参数、直流母线上的电压尖峰大小等因素有关。逆变器的直流母排要采用低寄生电感的设计方法。其中的a型电路的吸收电容必须选择无感或低感类型,并且尽可能近地

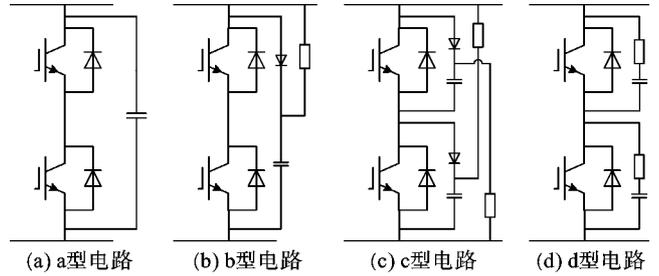


图11 IGBT功率回路上常用的吸收电路

连接到IGBT模块上。吸收电容的大小可以根据式(11)或功率器件应用手册的推荐值来选择^[11-14]:

$$C = \frac{L_p i^2}{\Delta V^2} \quad (11)$$

式中: L_p —功率回路寄生电感, i —正被关断的工作电流(一般可取最大过载电流), ΔV —吸收电压尖峰。

为了进一步减小传导干扰和辐射干扰,本研究需要对驱动系统进行屏蔽。屏蔽的关键是为干扰源(包括直流母线、逆变器和交流电缆)构造一个完整的屏蔽体。因此,电磁屏蔽设计的要点为:妥善处理好逆变器机箱上的动力线、信号线开口和机箱部件之间的缝隙。本研究选用金属接插件,采用导电布和铜箔粘接金属机箱上的缝隙以及电磁屏蔽的端接处,以消除缝隙引起的电磁泄漏。另外,信号电缆在端接处使用航空连接器,保证其屏蔽层与机箱的360°端接,以抑制辐射。

4 试 验

辐射发射的电磁场主要是由线缆上的共模电流贡献的,所以通过抑制动力线缆的共模电流可以有效抑制电动汽车磁场辐射强度,使车辆满足GB/T 18387对电动汽车磁场辐射强度限值的要求。

为了证明以上分析的正确性和方法有效性,本研究对一辆典型的国产电动汽车进行了实验。汽车的电机为永磁同步电机,电机控制器功率为22 kW,控制方法为矢量控制。样车按照GB/T 18387-2001—《电动汽车的电磁场辐射强度的限值和测量方法》进行磁场辐射发射试验。实验在10 m法电波暗室中进行,实验布置如图12所示。

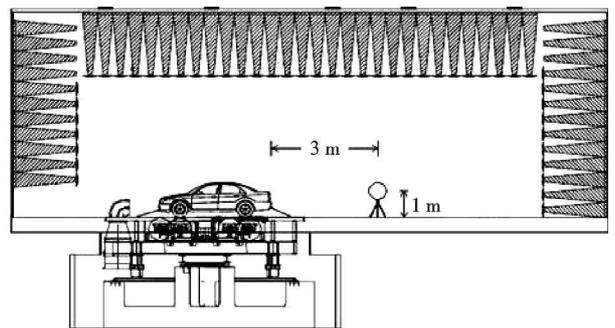


图12 9 kHz~30 MHz磁场辐射发射测试(环天线)

实验结果如图13所示。由于样车在设计时采取的抑制共模电流的措施较少,在高频段向外辐射的磁场很大,且超出限制部分,达不到国际标准要求。本研究抑制措施主要有:①对动力系统的设备和动力电缆采取了屏蔽;②加强了电池组对车身的绝缘;③对IGBT采取了减小共模电流的防护措施。

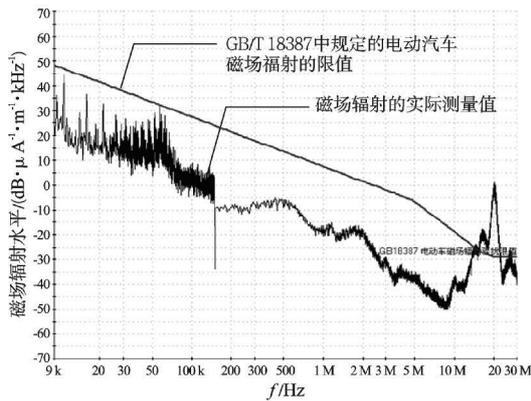


图 13 原车的磁场辐射发射

本研究采取以上措施后对样车按照最新的国际标准GB/T 18387-2008重新做磁场发射试验,其结果如图14所示。

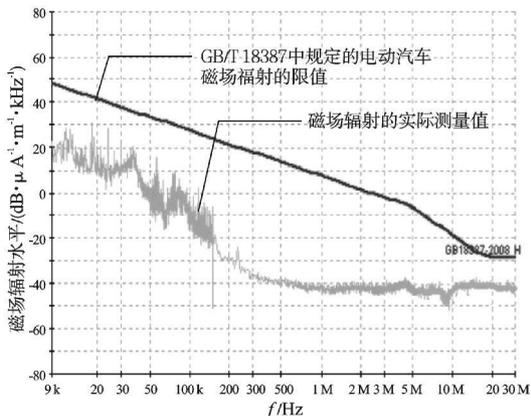


图 14 采用抑制措施后的磁场辐射发射

5 结束语

试验结果表明:在整个频段内整车的磁场辐射发射得到有效抑制,其试验结果满足国家标准要求,这

说明通过抑制动力系统的传导共模电流可以抑制整车的磁场辐射发射;同时,良好的屏蔽设计也能抑制动力线的磁场辐射。

研究结果表明,通过以上方法可以使整车的电磁兼容性得到很大提高。

参考文献(References):

- [1] 陈全世,朱家琰,田光宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [2] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
- [3] 朱学军,张逸成. 电动汽车动力电力电子装置的电磁兼容性研究现状[J]. 安全与电磁兼容,2009(2):81-85.
- [4] [美]凯瑟. 电磁兼容原理[M]. 北京:电子工业出版社,1985.
- [5] 林国荣,张友德. 电磁干扰及控制[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [6] 马伟明,张磊,孟进. 独立电力系统及其电力电子装置的电磁兼容[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [7] 张戟,孙泽昌. 现代汽车电磁兼容理论与设计基础[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [8] 王伟,周雅夫,王健. 电动汽车电磁兼容性研究[J]. 汽车工程,2008,30(5):399-402.
- [9] HELDWEIN M L, BIELA J, ERTL H, et al. Novel three-phase CM/DM conducted emission separator [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2009, 56 (9): 3693-3703.
- [10] 肖芳,孙力,孙亚秀. PWM 电机驱动系统中共模电压和轴电压的抑制 [C]// 2008 全国博士生学术论坛电气工程论文集,成都:西南交通大学出版社,2008:1802-1809.
- [11] 韩利,温旭辉,曾莉莉. 混合动力电动汽车用电机及驱动控制器的电磁兼容设计[J]. 安全与电磁兼容,2006(1):81-86.
- [12] 曲学基,曲敬锐,于明扬. 逆变技术基础与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [13] 段瑞昌,徐国卿,吴志红. 车用电机驱动器的电磁兼容性设计[J]. 电工技术,2003(10):40-42.
- [14] 韩利,赵峰. 交流电机驱动控制器的电磁兼容设计[J]. 机电设备,2007(2):16-18.

[编辑:罗向阳]

(上接第 349 页)

- [5] NEBHRAJANI V A. Asynchronous FIFO Architectures [EB/OL]. [2007-11-14]. <http://www.geocities.com/deepakgeorge2000/vlsi-book/async-fifo.pdf>
- [6] 段吉海,黄智伟. 基于 CPLD/FPGA 的数字通信系统建模与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [7] 吴继华,王诚. Altera FPGA/CPLD 设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2005.

- [8] Altera Corporation. Cyclone Device Handbook [M]. Altera Corporation, 2003.
- [9] 卢毅. VHDL 与数字电路设计[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [10] 张昌凡,龙永红,彭涛. 可编程逻辑器件及 VHDL 设计技术[M]. 广州:华南理工大学出版社,2011.

[编辑:李辉]