

电动汽车电池管理系统抗电磁干扰技术研究

李旭^{1,3}, 肖利华², 王丽芳³, 何举刚¹, 汪泉弟⁴

(1. 中国长安汽车工程研究院, 重庆 401120; 2. 重庆长安新能源汽车有限公司, 重庆 401120;
3. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190; 4. 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 400040)

摘要: 电池管理系统(BMS)是电动汽车能量管理的重要部分, 它提供整车控制策略的重要参数, 由于电池管理系统工作于电动汽车恶劣的电磁环境之中, 所以提高BMS的抗电磁干扰性能对于保证整车的安全可靠运行至关重要。基于长安中度混合动力电动车平台, 分析了车内电磁环境及其对BMS的耦合干扰机理, 并研究了BMS的有效电磁兼容性设计技术, 重点提升了BMS的抗干扰性能。试验结果表明, 经优化设计后的BMS能良好地适应电动车复杂的电磁环境。

关键词: 电动汽车; 电池管理系统; 电磁兼容; 电磁干扰

中图分类号: TM33 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2012.06.04

Research of the Electromagnetic Compatibility Technology of Battery Management System on Electric Vehicles

Li Xu^{1,3}, Xiao Lihua², Wang Lifang³, He Jugang¹, Wang Quandi⁴

(1. China Chang'an Automotive Engineering Institute, Chongqing 401120, China;
2. Chongqing Chang'an New Energy Automobile Co., Ltd, Chongqing 401120, China;
3. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400040, China)

Abstract: The battery management system (BMS) is an important part of the electric vehicle energy management. It provides important parameters of the vehicle control strategy. However BMS works in a complex electromagnetic environment of the electric vehicle, so how to improve the anti-electromagnetic interference performance of the BMS is extremely essential to guarantee the vehicle safe and reliable operation. Based on hybrid electric vehicle (HEV) platform of Chang'an Automobile CO., Ltd, the electromagnetic environment of HEV and its coupling mechanism to BMS is researched. By the EMC optimization design the anti-electromagnetic interference performance of the BMS is enhanced. Results show that the optimized BMS can be good adaptation in electric vehicle complex electromagnetic environment.

Keywords: electric vehicles, battery management system, electromagnetic compatibility, EMI

电池管理系统(Battery Management System, BMS)对动力电池的电压、电流和温度进行检测, 估算荷电状态(State of Charge, SOC), 并对动

力电池提供有效保护, 是电动汽车重要的电控单元, 但是BMS所处的电动汽车整车电磁环境异常复杂。由驱动电机、电机控制器(通常包括PWM

收稿日期: 2012-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(51177183); 国资委央企联盟电动汽车项目(JS104)

型 DC/AC 逆变和 AC/DC 整流电路) 和 DC/DC 直流变换器等组成的整车动力系统工作电压 / 电流高、功率大、开关频率高, 形成较强的电磁干扰^[1-2], 它不仅制约着电动汽车整车电磁兼容的法规通过率, 还会影响车内 BMS 等敏感电器系统的正常工作, 对整车的安全可靠运行造成威胁。因此, 对电动汽车整车及专用器件的电磁兼容性技术进行研究^[3-6], 具有重要的理论意义和工程价值。

结合长安公司中度混合动力汽车平台中某型电动车在调试过程中, 出现的 BMS 受电磁干扰, 导致采集的动力电池电压 / 电流出现错误的实际问题, 笔者研究了电动汽车内部主要电磁骚扰源及对 BMS 耦合干扰的机理, 并通过 BMS 的有效电磁兼容性设计, 重点提升了 BMS 的抗电磁干扰性能。台架试验和整车验证结果表明, 经 EMC 优化设计后的 BMS 能满足电动汽车复杂电磁环境的使用要求。

1 车内电磁环境及对 BMS 耦合机理

1.1 车内电磁环境分析

长安公司某型中度混合动力汽车动力系统布置如图 1 所示。整车动力系统由额定电压为 144 V 的镍氢动力电池及 BMS、电机控制器 (IPU)、直流变换器 (DC/DC) 及额定功率为 13 kW 的 ISG 电机与 1.6 L 汽油发动机并联组成。

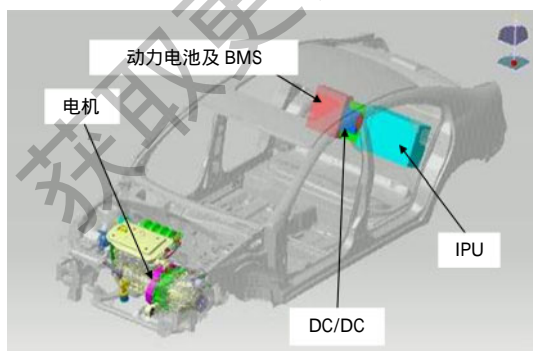


图 1 动力系统布置

1.1.1 低压电器系统的干扰

首先, 电动汽车中 12 V 低压电器系统中的各

种开关、继电器和直流电机等感性部件在通断过程中会在电路中形成很高的瞬变电压, 持续时间约为 1 ms, 最大幅值可超过 -100 V。瞬变电压的主要耦合方式为传导耦合, 通过共用的电源耦合进车内其它电子系统中。再则, 车身控制器、空调控制器和 DVD 等部件的主芯片、时钟电路、触发电路、数据线和信号线等部分在工作过程中, 会形成频段覆盖 150 kHz ~ 2.5 GHz 的电磁干扰。最后, 有刷直流电机、机械式电喇叭和点火系统等工作过程中产生的电火花, 能形成频谱很宽的辐射噪声。

1.1.2 高压动力系统的干扰

动力系统工作过程中, 电机控制器 IPU、直流变换器的开关器件 IGBT 和功率二极管工作在高速开关状态, 形成很高的 du/dt 和 di/dt, 导致较强的电磁干扰, 并以传导和辐射的形式影响 BMS 的正常工作。

1.2 对 BMS 耦合干扰机理

BMS 及其硬件电路结构如图 2 所示。电路主要由电源模块、传感器模块、保护模块、MCU 模块和通讯模块等部分组成。

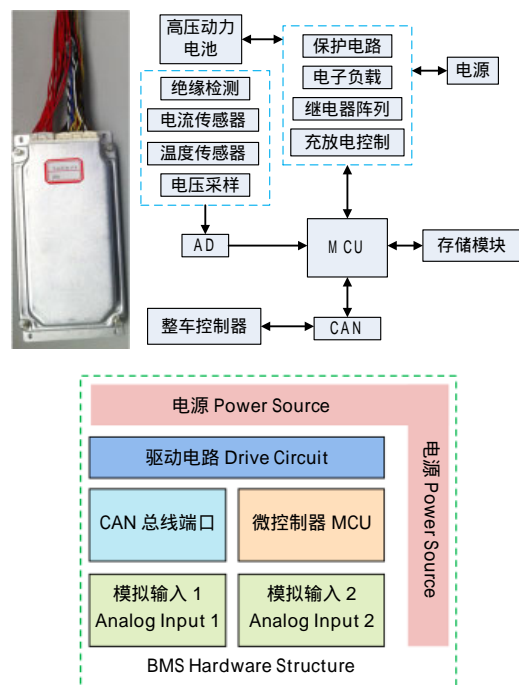


图 2 BMS 电路结构

由于BMS采用金属铝质外壳，车内电磁干扰对BMS的耦合有两种主要途径：车内的低频瞬态和各种干扰直接通过BMS的电源线以共模或差模干扰的形式耦合进BMS，而车内的各种辐射干扰场把能量耦合在BMS的连接线束上，形成共模干扰电流耦合进BMS。

2 BMS的抗电磁干扰技术

针对上述BMS外部的电磁干扰源和耦合机理可在BMS的电路原理设计、印刷电路板设计和结构设计等方面采取针对性的EMC设计方法^[7]。重点对电源电路、敏感小信号采集电路、接口电路、PCB元器件布局和布线，并结合PCB的EMC仿真分析和软件滤波技术，使BMS具有较好的抗电磁干扰性能。

2.1 BMS电路原理的EMC设计

2.1.1 供电电源电路

由于BMS的电源线与12V蓄电池和DC/DC低压输出端、电机控制器低压电源端并联，并与车用其它电器设备共用电源系统，DC/DC和其它用电设备产生的各种低频瞬态和共模干扰可通过电源耦合进BMS。为此设计如图3(a)所示电源输入电路，采用编号为V1的TVS抑制电源输入中的瞬态干扰并提供ESD防护能力，采用编号为L₁和L₂的大电流磁珠抑制电源输入中的高频干扰，同时也抑制BMS内部向外发射高频干扰。通过编号为L₃、C₁、C₈、C₂和C₇构成的共模滤波器滤除电源输入中的共模噪声和谐波干扰。通过L₁、C₆、C₄、C₅和C₃组成的LC滤波电路滤除电源输入中的差模干扰。

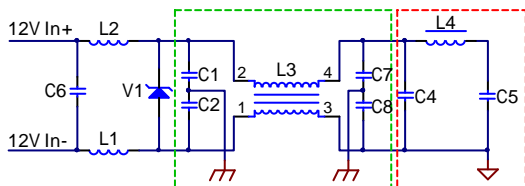


图3(a) 12V输入电源电路

BMS板内的另外一个重要电源是+5V的主工作电源，如图3(b)所示。该电源工作的稳定性及抗干扰性能直接影响到系统的信号采集准确度及稳定性。该电源抗干扰的重要措施是由L₁、C₄、C₅组成的LCπ型差模滤波电路，滤除电源线上的差模干扰，同时对板内可能传导到外部的差模干扰亦能起到有效的抑制作用。

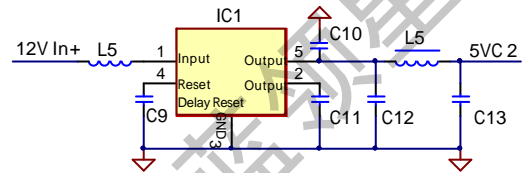


图3(b) +5V电源电路

模拟电源电路主要为BMS的模拟采集运放电路提供稳定的双电源，如图3(c)所示。

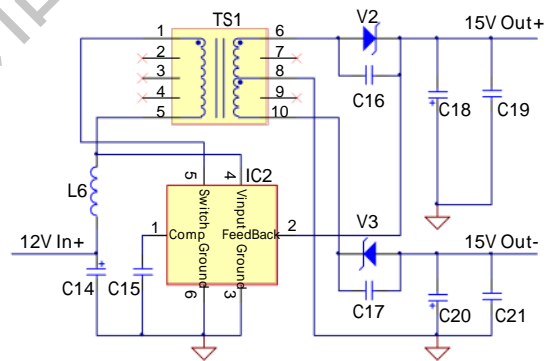


图3(c) 模拟电源电路

由TS1和IC1构成具有正负输出电压的单端反激型开关稳压电路。对该电路工作频率的选取较为关键，工作基频需要避开传导及辐射抗扰度等测试较敏感的频率段。

2.1.2 关键敏感信号采集电路

BMS内部的关键信号是动力电池的工作电流信号，该信号的采集用于动力电池的安时容量积分算法，计算动力电池的SOC。该信号是mV级的弱信号，由精密锰铜合金电阻Shunt作为传感器，因信号幅度小，极易受到干扰，造成采集电流不

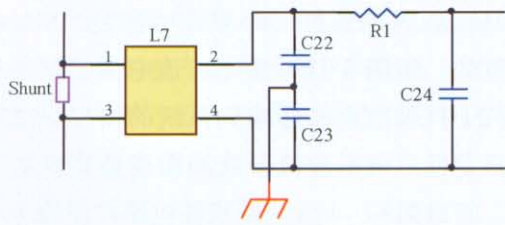


图4 关键信号采集电路

准的问题。为此，在BMS的输入端口处采用共模抑制电感和电容对采集的信号进行了共模滤波处理，如图4所示。

2.1.3 接插口电路

BMS的每个引脚采用串联磁珠和并联去耦电容的标准设计，以滤除外部高频干扰的传导耦合。磁珠和电容的选择既要考虑能有效滤除高频干扰，又要考虑到引脚信号的电平变化速度，及需要通过电流的大小。电容的等效阻抗可以表示如式(1)，其中 R_s 为等效串联电阻， L 为等效串联电感， C 为电容。

$$Z = \sqrt{R_s^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2} \quad (1)$$

由式(1)可以看出，要取得较好的滤波效果，需要综合考虑电容的容值大小、封装形式及寄生参数等的影响，针对每个信号引脚，选用不同的磁珠和旁路电容。

2.2 印刷电路板的EMC设计

2.2.1 元器件布局

BMS印刷电路板的布局 and 布线，对BMS的电磁兼容性及产品的可靠性等有重要影响。布局和布线是密不可分的，PCB设计中的布局是决定布线好坏的先决条件。布局技术主要考虑以下要点。

(1) PCB尺寸大小和形状。PCB的形状设计为矩形，长宽比3:2左右，根据元器件布局和布线要求计算合理的PCB尺寸大小。

(2) 使用相同电源的元器件集中布置在一起，以便电源分割。根据电路的功能单元，划分为数字、模拟和地区域。对元器件按功能集中布置，各功能模块分开，使相互间的干扰耦合最小，同时与

电源配置的地脚也必须匹配。

(3) 尽量缩短各元器件之间的引线和连接，特别是高频元器件间的连线。去耦电容尽量靠近芯片的电源脚，晶振离MCU的距离不超过2cm，周围用地线包围，并将晶振外壳接地。BMS外部输入的信号滤波电路布置在信号引脚处。功率驱动电路靠近接线端子，布置在PCB板边上，所有元器件距离PCB的边缘大于3mm。

2.2.2 布线设计

BMS采用4层电路板，中间两层分别为电源层和接地层，顶层和底层为信号层。电源层分为5V数字电路电源、12V和15V模拟电源。按功能将接地层分隔开，为模拟电路、数字电路和大电流功率输出电路设计单独的地。布线时综合考虑了以下几方面。

(1) 相邻导线间的串扰。SPI信号和晶振信号与低频信号不混合布线，数字信号与模拟信号分开布线，顶层与底层信号布线转角走圆弧状，避免平行走线，相邻层的布线相互垂直。

(2) 减小关键信号线的走线长度和回路面积。使电路中电流环路保持最小，信号线和回线尽可能靠近。使用较大的地平面以减小地线阻抗。

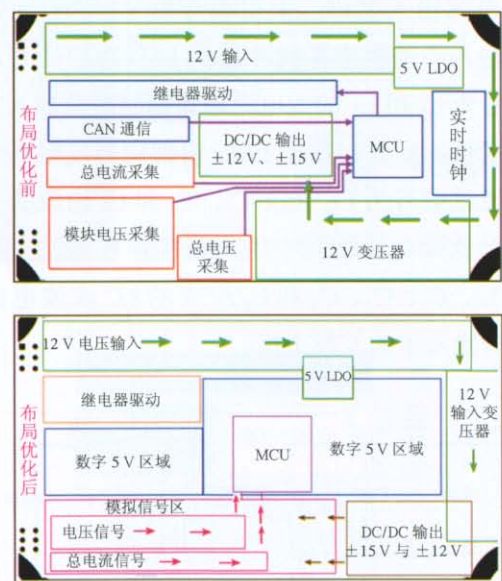


图5 BMS布局优化前后对比图

(3) 选择合理的导线宽度, 并避免布线不连续。对于数字电路, 可选 0.2 ~ 0.3 mm 导线宽度, 电源线和地线应尽量加宽, 以减小寄生电感, 地线 > 电源 > 信号线。电源线为 1.2 ~ 2.5 mm。

图 5 中给出了 BMS 在进行 EMC 优化布局前后, PCB 元器件的布局 and 关键信号的流向图。经优化后元器件的布局更为合理, 电源布局更为紧凑, 并消除了数字电源和模拟电源之间的电源交叉问题。优化后易受干扰的总电流信号走线长度由 58.48 mm (2 302.49 mil) 减小到 15.83 mm (623.35 mil), 使 BMS 系统的抗电磁干扰能力大幅增强。

2.2.3 PCB 仿真设计

为了更好地优化 BMS 的电磁兼容性能, 应用 EMC 仿真软件对 BMS 板极的 EMC 问题进行了建模仿真, 以减少 PCB 上的各种辐射能量, 并降低电源地平面谐振和电路回路路径阻抗。

图 6 中给出了应用 EMC 仿真软件对 BMS 地谐振问题进行优化前后的对比图。通过仿真分析和优化, 地谐振幅度减小了 10 dB 以上, 有效提升了 BMS 的电磁兼容性能。

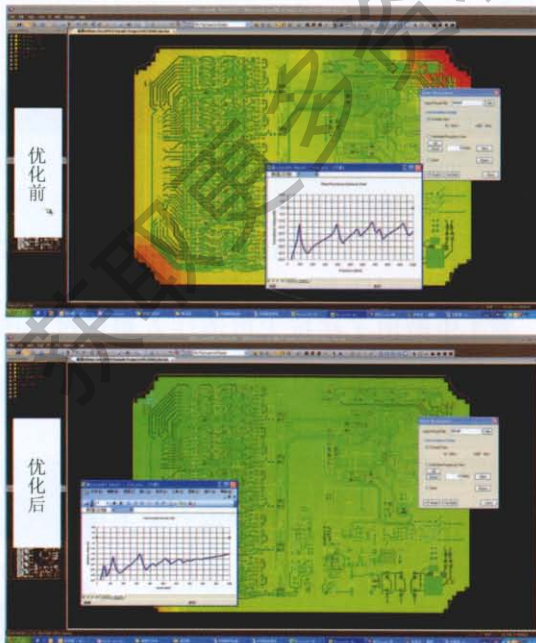


图 6 BMS 地谐振问题优化前后对比图

2.3 结构及其它 EMC 设计

BMS 外壳采用铝质外壳, PCB 的外边四周采用覆铜设计, 并良好接地。在整车上采用如图 7 所示的安装和接地设计, 获得了较好的电磁屏蔽效果, 提升了 BMS 的电磁兼容性能。



图 7 BMS 在整车上的安装

2.4 软件滤波技术

除了采用上述的硬件 EMC 设计措施外, BMS 还采用了一阶滞后滤波等常用软件滤波方法, 解决了瞬间脉冲干扰、随即干扰和周期性干扰导致的数据采集异常等问题。

一阶滞后滤波传递函数及滤波平滑系数基于 RC 一阶低通滤波器的特性进行推导。RC 电路的传递函数为

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2)$$

将式 (2) 写成差分方程, 经整理得

$$Y(k) = (1 - \alpha)Y(k-1) + \alpha X(k) \quad (3)$$

式中: $X(k)$ 为第 k 次采样值; $Y(k-1)$ 为第 $k-1$ 次滤波输出值; $Y(k)$ 为第 k 次滤波输出值; α 为滤波平滑系数。

对式 (3) 两端同时取自然对数有

$$\tau = \frac{T}{\ln(1 - \alpha)} \quad (4)$$

式中: T 为采样周期。

由 $f_0 = 1/2\pi RC$ 、 $\alpha = 1 - e^{-\tau}$ 及式 (4) 得到软件滤波平滑系数为

$$\alpha = 1 - e^{-2\pi f_0 T} \quad (5)$$

已知截止频率 f_0 , 可通过式 (5) 即确定出滤波平滑系数 α 。

长安公司中度混合动力车所用镍氢 H45 型 BMS 系统信号采集周期 $T=10\text{ ms}$ ，截止频率 $f_0=5\text{ Hz}$ ，可得平滑系数 $\bar{a}=0.0625$ ，时间常数 $\tau=160\text{ ms}$ 。其阶跃响应曲线如图 8 所示，从中可以看到，经滤波后的信号与真实信号间有一定的延时，但完全能满足 BMS 系统对实时性的要求。

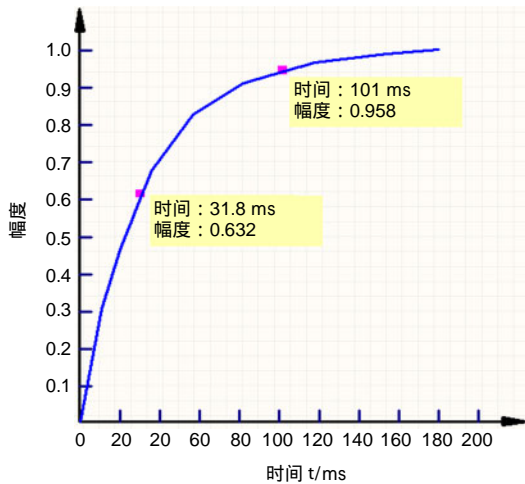


图 8 一阶滞后滤波函数的阶跃响应曲线

图 9 中给出了 BMS 有无软件滤波时，实车采集的总电压信号。

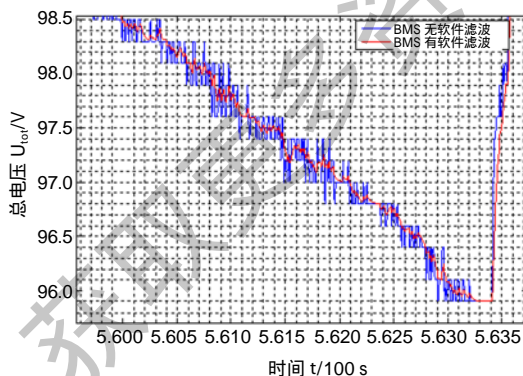


图 9 有无软件滤波时实车工况下的总电压对比

从图 9 可知，经滤波后的 BMS 采集的总电压信号更为平稳。说明软件滤波能有效消除 BMS 采集数据过程中的瞬间脉冲干扰、随机干扰，使信号更平滑，解决了由于受到外部电磁干扰导致的瞬间数据异常问题。

3 试验验证

按上述 EMC 方法设计的 BMS，具有较好的电磁干扰发射和抗电磁干扰能力。根据车内电磁干扰对 BMS 耦合干扰的机理，及对 BMS 采集电压/电流出现错误实际问题的分析，重点参照《ISO 11452-4 Road Vehicles-Component Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy》标准，第 4 部分：Bulk Current Injection (BCI) 的测试方法^[8]对 BMS 的抗电磁干扰能力进行了试验验证，共模电流大小为 100 mA ，试验频率范围为 $20\sim 400\text{ MHz}$ 。试验布置照片如图 10 所示。

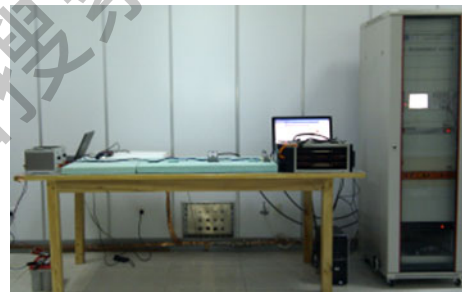


图 10 BMS 抗大电流注入试验

表 1 BCI 测试过程中 BMS 采集偏差

	总电流 I_{tot}/A	总电压 U_{tot}/V	模块电压 U/V
设计要求	± 0.6	± 1.0	± 0.1
BMS 优化前	$-1.4 \sim 2.2$	$-1.2 \sim 2.9$	$-0.3 \sim 0.9$
BMS 优化后	$-0.2 \sim 0.3$	$-0.5 \sim 0.7$	$-0.06 \sim 0.08$

表 1 中给出了在抗大电流注入测试过程中，经 EMC 优化设计前后，BMS 采集的动力电池总电压、总电流和模块电压的最大偏差对比。

经优化后，BMS 采集偏差大幅减小，达到设计要求。装有该 BMS 的 4 辆混合动力电动汽车分别在江西南昌示范运行了 $76\ 000\text{ km}$ 、 $99\ 576\text{ km}$ 、 $701\ 560\text{ km}$ 和 $61\ 888\text{ km}$ ，均未出现动力电池参数采集错误的问题，说明经 EMC 优化设计后的 BMS 能满足电动汽车复杂电磁环境的使用要求。

4 结论

电池管理系统(BMS)是电动汽车能量管理的重要部分,它提供整车控制策略的重要参数,但BMS系统在电动汽车强电磁干扰环境中工作时易出现采集参数错误的问题,影响电动汽车的安

全可靠运行。为此,笔者基于长安公司中度混合动力平台,研究了车内电磁环境及其对BMS耦合干扰机理,并通过BMS的有效电磁兼容性设计,重点提升了BMS的抗干扰性能,满足了电动汽车复杂电磁环境的使用要求。

参考文献(References):

- [1] NAKANISHI M, KANESAKI M, NAKASHIMA J. EMI Noise Control Methods Suitable for Electric Vehicle Drive Systems[J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(4): 930-937.
- [2] Meng Jin, Ma Weiming. Power Converter EMI Analysis Including IGBT Nonlinear Switching Transient Model[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1577-1583.
- [3] 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.
Wang Wei, Zhou Yafu, Wang Jian. A Research on Electromagnetic Compatibility for Electric Vehicles [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(5): 399-402. (in Chinese)
- [4] 黄勇,曾凡,陈全世,等. 电动汽车共模电流传导特性的研究[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(3): 24-28.
Hang Yong, Zeng Fan, Chen Quanshi, et al. Characteristics of Common-mode Conducted Current in Electric Vehicle[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(3): 24-28. (in Chinese)
- [5] 张逸成,韩新春,沈玉琢,等. 电动汽车用直流—直流变换器中电磁干扰与抑制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(1): 108-111.
Zhang Yicheng, Han Xinchun, Shen Yuzhuo, et al. Electromagnetic Interference Problem and Suppression Direct Current/ Direct Current Converter Use in Fuel Cell Electric Vehicles[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2005, 33(1): 108-111. (in Chinese)
- [6] 窦汝振,王惠波,苟毅彤,等. 电动汽车用电机驱动系统的电磁兼容技术研究[J]. 天津工业大学学报, 2011, 30(6): 67-70.
Dou Ruzhen, Wang Huibo, Gou Yitong, et al. Research of Electromagnetic Compatibility of Motor Drive System Applied in Electric Vehicle[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2011, 30(6): 67-70. (in Chinese)
- [7] 余勇,李建秋,周明,等. 车用柴油机ECU的电磁兼容分析与设计[J]. 汽车工程, 2001, 23(6): 396-401.
Yu Yong, Li Jianqiu, Zhou Ming, et al. EMC Analysis and Design of ECU on Diesel Vehicles[J]. Automotive Engineering, 2001, 23(6): 396-401. (in Chinese)
- [8] ISO 11452-4.Road Vehicles — Component Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy—Part 4: Bulk Current Injection[S].ISO Issue, 2005.

作者简介



责任作者:李旭(1978-),男,四川西昌人。高级工程师,工学博士,中国科学院电工研究所在站博士后,主要从事汽车电磁兼容的研发工作。

E-mail: lixu@changan.com.cn



通讯作者:肖利华(1980-),男,重庆人。工程师,主要从事新能源汽车控制器硬件开发及电磁兼容研究工作。

E-mail: johnny_shaw@126.com