

基于直流无刷电机的汽车 EPS 系统控制器开发

申荣卫¹, 何泽刚¹, 韩炯刚³

(1. 天津职业技术师范大学 汽车与交通学院, 天津 300222; 2. 天津职业技术师范大学 机械学院, 天津 300222;

3. 山东交通技师学院, 山东 临沂 276004)

摘要: 为了改善转向系统助力性能和降低系统功耗, 基于直流无刷电机, 研究了电动助力转向系统的结构组成与工作原理, 采用 Freescale 微控制器 MC56F8346 作为主控芯片, 开发了汽车电动助力转向系统控制器; 将控制器分为控制电路和驱动电路两部分, 设计了转矩、电流等信号采集电路、霍尔位置传感器的转子位置信号捕捉电路及驱动电路; 试验结果表明, 所开发的控制器静态功耗低, 动态响应快, 能够满足电动助力转向系统对转向灵活性、轻便性及可靠性的需求。

关键词: 直流无刷电机; 电动助力转向系统; 控制器; 控制电路; 驱动电路

Development of Controller of Vehicle EPS System Based on Brushless DC Motor

Shen Rongwei¹, He Zegang¹, Han Jiongong³

(1. School of Automotive and Transportation, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

3. Shandong Traffic Technician College, Linyi 276004, China)

Abstract: In order to improve the power steering system performance and reduce system power consumption, the structure and working principle of electric power steering (EPS) system were researched based on brushless DC motor. Using Freescale microcontroller MC56F8346 as the master chip, controller of the vehicle electric power steering system was developed, which consists of two modules that are control circuit and driver circuit. Torque and current signal acquisition circuit and the detecting circuit of rotor position signals of Hall position sensors and driver circuit mode were designed in detail. The test results showed that the developed controller has lower static power consumption and fast dynamic response capability, and can meet the requirements of the electric power steering system for steering flexibility, portability and reliability.

Keywords: brushless DC motor; EPS; controller; control circuit; driver circuit

0 引言

电动助力转向 (electric power steering, EPS) 系统是一种新型的汽车动力转向系统, 由于其具有节能、环保、助力特性可调等优点, 电动助力转向系统取代传统助力转向系统已成为发展的必然趋势^[1-2]。目前, 国内外在 EPS 系统方面的研究已取得丰硕的成果, 并大量装车销售, 但助力电机大多采用的是直流有刷电机^[3-4]。由于直流无刷电机采用电子换向, 具有使用寿命长、转速高、运行平稳、维护成本低等诸多优点, 欧美、日本等国也先后开发了以直流无刷电机作为助力电机的 EPS 系统, 并已有成品装车销售。国内部分高校、企业和科研院所也对直流无刷助力电机展开了研究, 但技术并不成熟, 目前还处于研发阶段^[5]。

因此, 笔者对直流无刷电机提供助力的 EPS 系统展开研究, 开发了适用于管柱助力式 EPS 系统的控制器, 控制器采用飞思卡尔 MC56F8346 作为主控芯片, 采用 IR 公司的驱动芯片 IR2110 和 MOS 管 IRF3205 设计了直流无刷电机的三相全桥逆变电路。试验结果表明, 基于 MC56F8346 芯片的 EPS 系统控制器能够快速跟踪转向盘转动并提供助力, 可获得良好的助力特性。

1 EPS 系统结构组成与工作原理

管柱助力式 EPS 系统的结构组成如图 1 所示。该系统由转矩传感器、电控单元、直流无刷助力电机及霍尔位置传感器、离合器、减速机构、中间传动轴和齿轮齿条式机械转向器等组成。

基本工作原理: 当驾驶员转动转向盘时, EPS 系统的电控单元接收到转矩信号, 转向盘转矩增大时, 电机助力转矩增加来保证转向的轻便性, 车速提高时适当减小电机助力转矩来获得较好的路感^[6-7]。电控单元根据直流无刷电机上的霍尔位置信号判断电机主转子位置, 确定 A、B、C 三相的通电顺序及 PWM 波的占空比大小, 控制助力电机输出符合该工况下的助力转矩, 经减速增扭后作用在齿轮齿条机械转向器上, 实现转向助力作用。

2 EPS 系统控制器设计

2.1 EPS 控制器主控芯片的选择

EPS 系统控制器需要实时采集转矩、车速、电压、电流等传感器信号, 还需要快速捕捉直流无刷电机的 3 个霍尔位置传感器信号, 因此, 要求主控芯片具有高速的信号处理和运算能力^[8], 还要考虑芯片集成的外设资源、存储空间、功耗、配套的开发环境及性价比等等。综合考虑, 笔者选取飞思卡尔半导体公司的微控制器 MC56F8346 作为主控芯片。MC56F8346 采用 56800E 增强型内核, 采用双哈佛存储器结构, 在主频为 60 MHz 时的运算速度是 60 MIPS, 2 个 PWM 模块、16 通道 12 位 A/D 模块、2 个正交解法器模块等等。

收稿日期: 2014-09-12; 修回日期: 2014-09-30。

基金项目: 天津市科技支撑计划项目 (12ZCZDZX04400)。

作者简介: 申荣卫 (1971-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事汽车新能源与电子控制技术方向的研究。

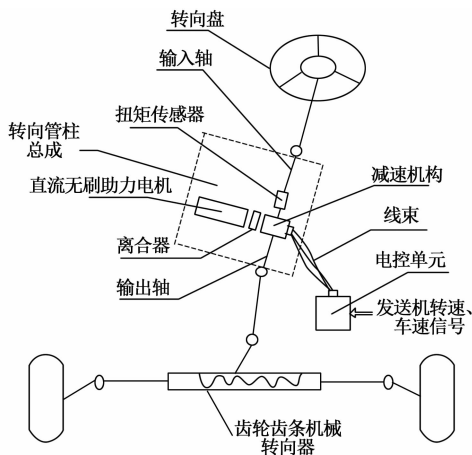


图 1 管柱助力式 EPS 系统组成

MC56F8346 具有汽车级的温度范围 (−40~+125 ℃), 是电机控制的专用芯片, 非常适合 EPS 系统控制器的开发。

2.2 EPS 控制器的整体设计

控制器分为控制电路和驱动电路两部分, 该控制器采用 12 V 蓄电池电源给三相逆变电路供电, 12 V 电源经电源转换电路转为 5 V 和 3.3 V 电源给控制电路供电。控制器的整体结构设计如图 2 所示。

控制电路以 MC56F8346 最小系统为核心, 扩展了信号调理与采集电路, 主控芯片根据转矩、车速信号按照助力特性计算出该工况下电机需提供的助力转矩, 确定 PWM 波的占空比, 同时根据 3 个霍尔位置信号的逻辑状态确定 A、B、C 三相的通电顺序, 控制 PWM 模块的输出。驱动电路包括驱动芯片和三相全桥逆变电路, 驱动芯片将 MC56F8346 产生的 PWM 波进行功率放大后驱动 MOS 管, 控制电机的通电顺序及电流大小。

控制器具有双重保护功能, 当电机发生故障或母线电流传感器检测到电流过载时, 经过过流保护电路关闭驱动电路的使能, 同时断开三相逆变电路的电源主继电器, 保证系统的安全性。系统还具有故障自诊断功能, 当系统发生故障时, ECU 驱动故障灯点亮以提醒驾驶员系统有故障产生。

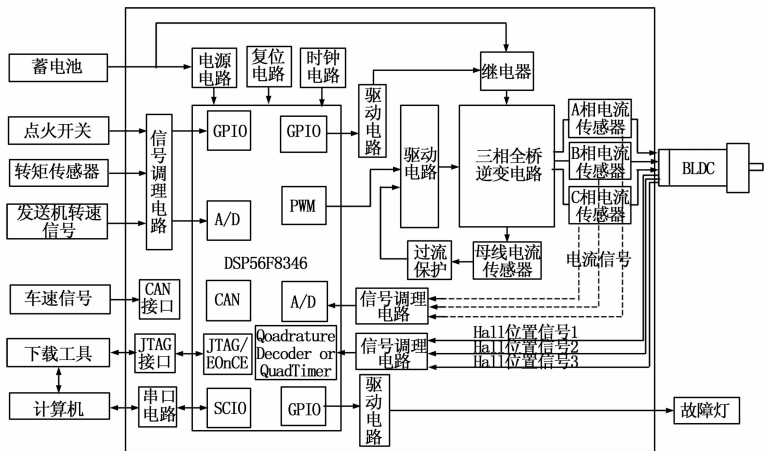


图 2 基于直流无刷电机的 EPS 系统控制器整体结构

2.3 信号采集电路的设计

传感器信号采集的准确性是实现系统控制精度的前提, 笔者研究的管柱助力式 EPS 系统的转矩传感器是电位计式转矩

传感器, 输出电压范围 0~5 V, 中位 2.5 V, MC56F8346 中 A/D 转换模块的电压输入范围为 0~3.3 V, 因此转矩信号在进入 A/D 模块前要进行电压转换, 设计的采集电路如图 3 所示。转矩信号经低通滤波器滤波后进入运放 LM324, 调整精密电位器进行电压调整, 将 0~5 V 转为 0~3.3 V 信号, 然后进入由 LM324 组成电压跟随器, 提高输入阻抗, 然后由 A/D 转换模块的 ANA0 通道采集。电流传感器的信号输出范围也是 0~5 V, 其采集电路与转矩信号的采集类似。

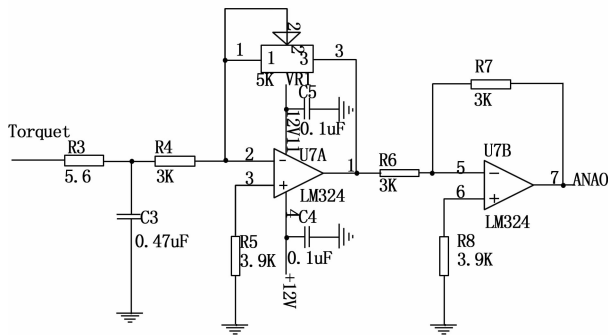


图 3 转矩信号采集电路

直流无刷电机的换向取决于 3 个霍尔位置传感器信号组合的逻辑状态, 因此需对霍尔位置信号进行采集, 为防止电磁干扰, 采用高速光电耦合器 6N137 进行电气隔离。MC56F8346 有两个正交定时模块, 笔者选用 Quad Timer A, 将其配置为正常计数模式, 使能上升沿捕捉功能, 捕捉设备分别为 TMRA0、TMRA1 和 TMRA2。将 3 个霍尔位置传感器信号 Hall Sensor1、Hall Sensor2 和 Hall Sensor1 经过光耦隔离后分别连接到正交定时模块的输入引脚 GPIOC4 (CAP1)、GPIOC5 (CAP2) 和 GPIOC6 (CAP3), 部分线路结构如图 4 所示。系统运行时, 只要检测到上升沿, 就会产生捕捉中断, 在中断服务程序里读出 3 个霍尔位置传感器的逻辑输出。

2.4 驱动电路的设计

2.4.1 电路结构及关键器件选择

笔者研究的 EPS 系统直流无刷助力电机供电电压 12 V, 最大助力电流 35 A 左右。根据系统需求及功耗、性价比等因素, 选取 IR 公司的 N 沟道 MOS 管 IRF3205 及配套的驱动芯片 IR2110 组成三相全桥逆变电路。IRF3205 漏源击穿电压 55 V, 25°时最大持续漏极电流 110 A; IR2110 具有独立的高端和低端输入通道, 悬浮电源采用自举电路, 高端工作电压 500 V, 输出电压范围 10~20 V, 峰值驱动电流 2 A, 工作频率可高达 500 kHz。采用 3 片 IR2110 驱动三相全桥逆变电路, 可以共用 1 路 10~20 电源, 笔者设计的直流无刷助力电机驱动电路如图 5 所示。

图 5 中 C30~C38 为滤波电容, D1~D6 为续流二极管, Rg1~Rg6 为 MOS 管栅极驱动电阻, 3 片 IR2110 共用一路 12 V 电源。其中 C39~C41 为自举电容, VD1~VD3 自举二极管, IR2110 驱动芯片要和这两个器件匹配才能实现电路的最优性能。自举电容的参数可按工程估算公式计算^[9]:

$$C_{bs} \geq \frac{2Q_g}{V_{cc} - V_{min} - V_{ls} - V_f} \quad (1)$$

式中, C_{bs} 为自举电容; Q_g 为 MOS 管栅极总电荷; V_{cc} 为电源

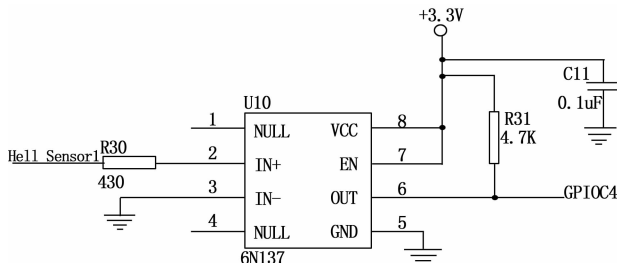


图 4 霍尔位置信号 1 捕捉电路

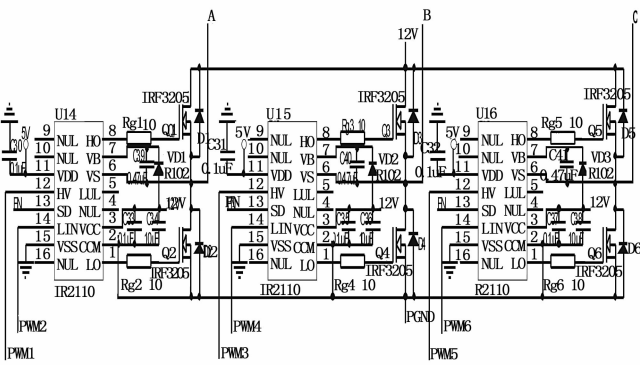


图 5 直流无刷助力电机驱动电路

电压； V_{min} 为驱动芯片 V_b 与 V_s 之间的最小电压； V_{ls} 为下半桥 MOS 管导通压降，一般取 2 V； V_f 为自举二极管的压降，一般取 1.5 V。

经查芯片手册可知，IRF3205 总体栅极电荷 $Q_g = 146$ nC，IR2110 芯片的 V_b 与 V_s 的最小电压 7.5 V，由此可得 $C_{bs} = 0.292$ μ F，取一定余量，选择自举电容值为 0.47 μ F。

自举二极管承受的电流是 MOS 管栅极电荷与开关频率之积^[9]，即：

$$I = Q_g * f \quad (2)$$

式中， I 为自举二极管承受电流； f 为 MOS 管开关频率。

笔者研究的 EPS 系统 MOS 管开关频率为 20 kHz，所以 $I = 2.92$ mA。选择的自举二极管反向耐压值要大于直流母线电压，电流要大于自举二极管承受的电流。为了减少电荷损失，一般选用反向漏电流小的快恢复二极管。本文选用 FR102 快恢复二极管，最大反向电压 100 V，最大正向平均电流 1 A，最大反向恢复时间 150 ns。

2.4.2 控制方式

直流无刷助力电机根据霍尔信号检测转子位置^[10]，通过控制 MOS 管按一定次序的开通和关断来实现 A、B、C 三相的通电次序，笔者所用直流无刷助力电机三相定子绕组星形连接，转子两对磁极，霍尔位置传感器空间 60°机械角顺序布置。电机正转时，3 个霍尔信号依次超前 120°电角度，每隔 60°电角度换向一次，每个 MOS 管持续导通 120°电角度，保证定子旋转磁场与主转子磁场夹角在 60°~120°范围内，使最大转矩出现在转子旋转过程中。本文考虑到各开关管的损耗，采用 H_PWM-L_ON 控制方式，在 60°导通区间内，图 5 中上桥臂 MOS 管 Q1、Q3 和 Q5 采用 PWM 波控制，下桥臂 Q2、Q4 和 Q6 保持常开，即控制 IR2110 驱动芯片的高边输入 HIN 和低边输入 LIN。IR2110 上的 SD 引脚为封锁驱动输出引脚，高电平有效，可以用作过载保护。当母线电流传感器检测到过流时，通过过流保护电路输出高电平至 SD 引脚，封锁高低边

输出，保护 MOS 管和电机。

3 控制程序设计

控制程序在 Freescale 配套的 CodeWarrior for DSC56800E V8.3 开发环境上进行开发，利用专家系统自带的控制模块和函数库建立软件程序所需的基本框架，并采用 C 语言编写整体算法来实现控制过程，主要包括软件滤波、数据采集、工作模式选择、故障处理、上位机通讯等。本文 EPS 系统助力控制采用直线型助力特性曲线，采用 PID 控制算法对目标电流与电机相电流的偏差进行调节，实现转矩的闭环控制，助力控制程序流程图如图 6 所示。

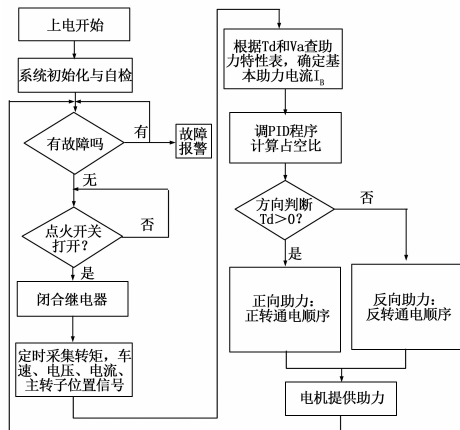


图 6 助力控制程序流程图

4 试验台试验与结果分析

将所开发的控制器进行试验台试验，试验结果如图 7 和图 8 所示。

图 7 为控制器静态吸收电流测试。由图可知，当点火开关打到 ON 位，发动机没有起动机，转向盘也没有转矩输入时，控制器上电后助力电机不工作，电路板静态所消耗电流为 1.2 A；关闭点火开关后，控制器静态电流约为 0.1 A，具有较低的静态功耗。

图 8 为试验所获得的 EPS 系统助力特性曲线。该试验选取 0 km/h、20 km/h、40 km/h、60 km/h 和 80 km/h 的 5 个特征车速，每个特征车速下，转向盘匀速向左右方向转动，转向盘转矩从 0 n·m 到 12N·m 变化。由图可知，当转向盘转矩值小于 1 n·m 时电机不提供助力；当转向盘转矩超过 1 n·m 时，随着转向盘转矩的增加，电机助力转矩也逐渐增加；当转向盘转矩超过 8N·m 时，电机助力转矩保持恒定。由 5 个特征车速的助力特性曲线对比可知，随着车速的增加，助力转矩逐渐减小，使驾驶员得到良好的路感。结果表明，实测助力特性的直线比较平滑，直流无刷助力电机转矩波动较小，控制器具有较好的动态响应性能。

5 结语

对直流无刷电机提供助力的 EPS 系统展开研究，采用 Freescale 高速低价位的 16 位定点微控制器 MC56F8346，开发了 EPS 系统控制器；直流无刷助力电机的霍尔位置信号采用 Quad Timer A 的捕捉引脚中断采集，电机控制采用 H_PWM

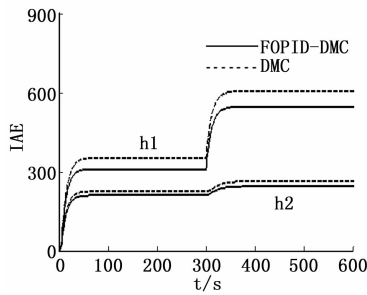


图 4 绝对误差积分曲线对比

合的新型模型预测控算法, 用李雅普诺夫第二方法证明了该算法的稳定性, 仿真实验, 验证了提出算法的有效性。同时也存在一些不足, $K_p, K_i, K_d, \lambda, \mu$ 五个新的参数需要靠经验进行调节, 今后的工作将结合智能算法进行参数自动整定。

参考文献:

[1] PetitRouchon N, Dynamics P. solutions to some control problems for water-tank systems [J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2002, 47 (4): 594-609.

[2] Join C, Sira-Ramirez, Fliess H. M. Control of an uncertain three-tank-system via on-line parameter identification and fault detection [A]. Proc. 16th IFAC World Congress on Automatic Control [C]. Prague, 2005;

[3] Cartes D, Wu L. Experimental evaluation of adaptive three-tank level control [J]. ISA transactions, 2005, 44 (2): 283-293.

[4] 任 林. 基于 RBF-ARX 模型的预测控制在液位系统中的应用

[J]. 计算机测量与控制, 2012 (1): 81-84.

[5] QinBadgwell S J, T A. A survey of industrial model predictive control technology [J]. Control engineering practice, 2003, 11 (7): 733-764.

[6] Cortés P, Ortiz G, Yuz J I. Model predictive control of an inverter with output filter for applications [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2009, 56 (6): 1875-1883.

[7] 陈 薇, 吴 刚. 非线性双容水箱建模与预测控制 [J]. 系统仿真学报, 2006 (8): 2078-2081.

[8] MercangozDoyle M. III, F J. Distributed model predictive control of an experimental four-tank system [J]. Journal of Process Control, 2007, 17 (3): 297-308.

[9] 郭 伟, 倪家健, 李 涛. 基于时域的分数阶 PID 预测函数励磁控制器 [J]. 仪器仪表学报, 2011 (11): 2461-2467.

[10] CamachoAlba E F, C B. Model predictive control [M]. Springer, 2013;

[11] Lee J H, Morari M. Garcia C E. State-space interpretation of model predictive control [J]. Automatica, 1994, 30 (4): 707-717.

[12] Rossiter J A. Model-based predictive control: a practical approach [M]. CRC press, 2013;

[13] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V. Constrained model predictive control: Stability and optimality [J]. Automatica, 2000, 36 (6): 789-814.

[14] ZhengMorari A. M. Stability of model predictive control with mixed constraints [J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 1995, 40 (10): 1818-1823.

[15] 陈 虹. 模型预测控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.

(上接第 1562 页)

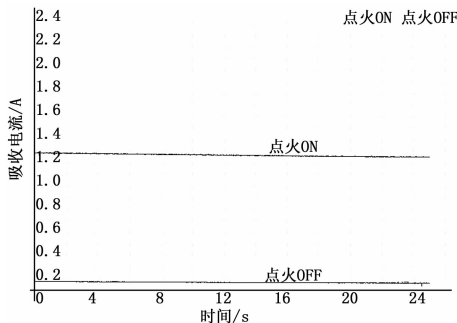


图 7 控制器静态吸收电流

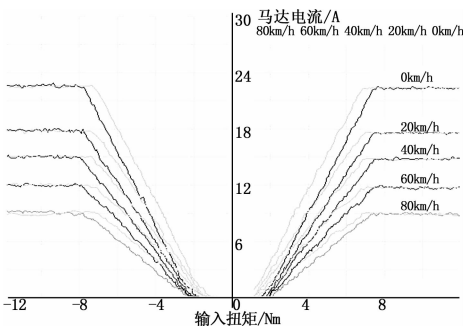


图 8 助力特性曲线

-L_ON 方式, 即保证了大的转矩输出, 又降低了功率管的开关损耗; 驱动电路采用 3 片 IR2110 驱动 6 个 MOS 管 IRF3205, 仅用一路 12 V 电源, 构成三相全桥逆变电路, 提高了系统的可靠性; 采用相电流传感器作为转矩闭环反馈信

号, 提高了系统控制精度; IR2110 驱动芯片具有电平转换、欠电压检测和低端延时输出功能, 以防上下桥臂同时导通, 保证了系统的安全性。试验台试验证明, 控制器具有较低的静态功耗和良好的动态响应性能, 助力特性直线平滑, 助力电机转矩波动小, 能够满足 EPS 系统需求。

参考文献:

[1] 申荣卫, 陶炳全. 汽车转向技术现状与发展趋势 [J]. 邢台职业技术学院学报, 2006, 23 (5): 1-4.

[2] 申荣卫, 林 逸, 台晓虹, 等. 电动助力转向系统建模与控制策略研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (8): 160-170.

[3] 沈海燕. 基于无刷直流电动机的电动助力转向系统的研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2008.

[4] 陈国迎. 基于无刷直流电机的汽车 EPS 控制系统研究 [D]. 成都: 西华大学, 2008.

[5] 胡培俊. 电动助力转向电机的应用 [J]. 汽车电器, 2014 (2): 42-44.

[6] 申荣卫, 台晓红, 赵剑锋. 纯电动客车的电动助力转向系统的开发与试验 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40 (2): 311-315.

[7] 韩炯刚, 申荣卫, 邵晓虹, 等. 混合动力客车电动助力转向系统设计及仿真研究 [J]. 现代制造工程, 2014 (1): 49-53.

[8] 林 逸, 申荣卫, 施国标. 纯电动客车电动助力转向系统控制器开发 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27 (4): 310-313.

[9] 张小鸣, 卢方民. 基于 IR2110 的 H 桥可逆 PWM 驱动电路应用 [J]. 常州大学学报: 自然科学版, 2012, 24 (24): 68-72.

[10] 段丽娜, 赵 金. 基于 DSP 的无刷直流电机控制系统的研究 [J]. 微电机, 2014, 47 (3): 60-68.