

基于 dSPACE 的电动汽车电机调速控制策略研究*

王维强, 曾晓松, 夏茂树, 严运兵
(武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430065)

摘要: 为了解决电动汽车无刷直流轮毂电机控制中普遍存在的调速不精确、转速响应慢和自适应性较差等问题, 通过分析轮毂电机调速系统特性, 研究其对电动汽车整车性能的影响。依据无刷直流电机(BLDCM)简化数学模型, 从速度调节角度分析讨论了控制策略, 并以电机转速响应迅速且稳定为控制目标, 搭建了基于 dSPACE 的 BLDCM 快速控制原型试验平台, 深入讨论了转速模糊 PI 控制策略对整车性能的影响。试验结果表明, 模糊 PI 闭环控制策略能有效改善电机的调速性能, 提高无刷直流轮毂电机电动汽车行驶的稳定性的。

关键词: 永磁无刷电机; PI 控制; 模糊控制; dSPACE 快速控制原型

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)08-0086-05

Research on the Control Strategy of Speed Governing of Electric Vehicle Motor Based on dSPACE*

WANG Weiqiang, ZENG Xiaosong, XIA Maoshu, YAN Yunbing
(School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: In order to solve the problem of imprecise speed adjustment, slow speed response and poor adaptability of electric vehicle permanent magnet brushless motor control, by analyzing the characteristics of wheel motor speed regulating system, the influence of the motor vehicle performance was studied. Based on the simplified mathematical model of permanent magnet brushless dc motor, the control strategy was discussed from the Angle of velocity adjustment. Aimed at fast and stable response of motor speed, the prototype experiment platform of permanent magnet brushless DC motor based on dSPACE was set up. The influence of fuzzy PI control strategy on vehicle performance was discussed. The experimental results showed that the fuzzy PI closed-loop control strategy could improve the speed regulation performance of the motor and improve the traveling stability of hub motor electric vehicle with permanent magnet brushless DC motor.

Key words: permanent magnet brushless motor; PI control; fuzzy control; dSPACE rapid control prototype

0 引言

随着环境污染及能源危机日益严重, 电动汽

车的研制已经成为大家关注的焦点。电动机作为电动汽车的关键部件, 其性能直接影响和制约着电动车辆的发展。由于无刷直流电机(Brushless

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51505345); 湖北省教育厅基金项目(Q20151105); “湖北省新能源汽车协同创新中心”合作建设项目

作者简介: 王维强(1967—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为汽车新能源与电子技术。

曾晓松(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车电机及控制、电机优化设计。

夏茂树(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车电机及控制、电机优化设计。

DC Motor, BLDCM) 具有起动转矩大、起动电流较小、没有机械换相结构、易于维护等优点, 成为电动汽车较为理想的驱动电机^[1]。

目前, BLDCM 的控制算法主要有 2 种: 一种是通过离线仿真来实现, 其仿真结果往往与实际有较大误差; 另一种是基于数字信号处理器 DSP 或单片机编程来实现, 其开发周期长, 代码编写工作繁重, 复杂的控制算法较难实现^[2]。

基于 dSPACE 的半实物仿真技术, 借助实时工作空间 (Real-Time Workshop, RTW) 和实时接口 (Real-Time Interface, RTI) 的支持, 实现了 dSPACE 和 MATLAB/Simulink 的无缝链接, 无需代码编写, 借助于 ControlDesk 可方便地实现变量管理、参数在线调试等功能, 从而缩短开发周期^[3]。本文通过搭建基于 dSPACE 的永磁 BLDCM 试验平台, 设计了电机调速控制的软、硬件系统, 在线试验验证了模糊 PI 控制策略的可行性。

1 BLDCM 及其控制系统建模与仿真

1.1 永磁 BLDCM 数学模型

对于两相导通三相六状态星形连接的 BLDCM, 为了便于分析其数学模型及电磁转矩等特性, 作如下假设: (1) 不计电枢反应, 其气隙磁场感应的反电动势近似认为 120° 电角度的梯形波; (2) 忽略齿槽、换相过程的影响, 电枢导体连续分布于定子内表面; (3) 忽略涡流和磁滞损耗; (4) 不计逆变电路功率开关管的内阻^[4-5]。

在此情况下, 三相绕组的电压平衡方程可表示为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_n \\ u_n \\ u_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_a, u_b, u_c ——定子绕组相电压;

r ——定子相电阻;

i_a, i_b, i_c ——定子绕组相电流;

L ——每相绕组的自感;

M ——每两相绕组间的互感;

p ——微分算子, $p = d/dt$;

e_a, e_b, e_c ——定子绕组感应电动势;

u_n ——中性点电压。

$$u_n = \frac{1}{3} [u_a + u_b + u_c - (e_a + e_b + e_c)] \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (3)$$

运动方程为

$$T_e - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中: T_e ——电磁转矩;

ω ——电机的转动角速度;

T_L ——负载转矩;

B ——阻尼系数。

J ——电机转动惯量。

1.2 BLDCM 速度调节控制系统建模

BLDCM 常用的调速控制方法有开环控制和闭环控制。开环控制时, 由于电机的转速和电流主要取决于其机械特性和负载特性, 达不到需要的调速精度。闭环控制系统可根据电机反馈的实际转速实现调速和定速控制, 常采用 PID 控制器来实现。

PID 控制器的基本原理是根据设定值与实际值之间的偏差 $e(t)$, 按比例、积分、微分的线性组合关系构成控制量 $u(t)$, 对控制对象进行控制。在实际电机闭环控制系统中, 因为比例、积分控制就能基本达到预期的控制效果, 微分项的引入会使系统容易受高频干扰, 所以永磁 BLDCM 的控制常采用 PI 控制。

BLDCM 控制系统由 6 个子模块组成, 分别为: BLDCM 本体模块、速度调节模块、霍尔信号生成模块、参考电流模块、电流滞环控制模块、逆变电路模块。BLDCM 闭环控制系统仿真模型如图 1 所示。

对所建的 BLDCM 闭环控制系统仿真模型, 进行转速调节仿真。电机的仿真参数如表 1 所示。

电机以给定转速 $n_0 = 400$ r/min 空载起动, 在 $t = 0.1$ s 时将转速增大至 600 r/min。通过图 1 中的手控开关来选择控制策略, 可得 PI 控制时电机的转速曲线, 如图 2 所示。

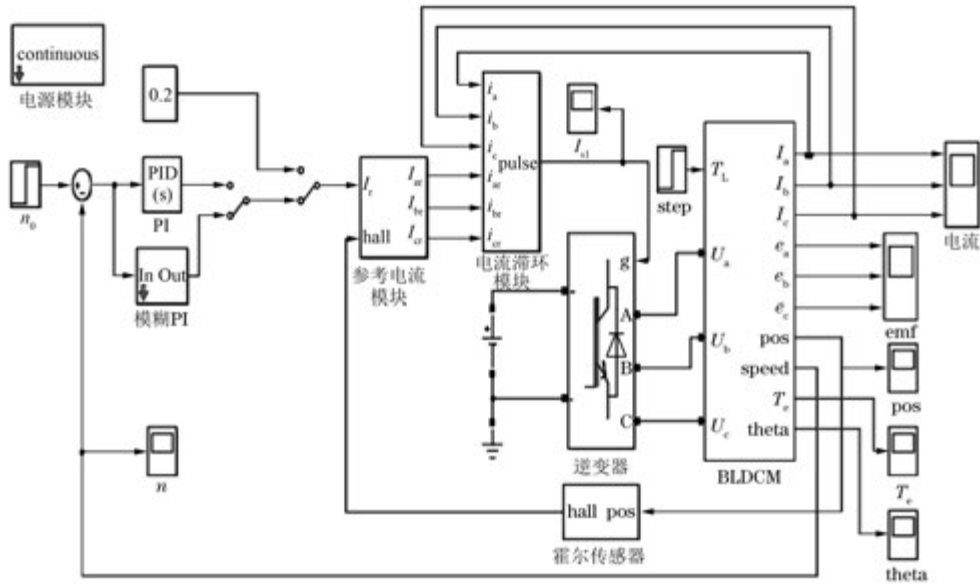


图1 BLDCM 闭环控制系统仿真模型

表1 电机仿真参数

参数名称	参数值
电压 U/V	72
电枢电阻 r/Ω	2.875
等效电感 $L\text{-}M/H$	7.5×10^{-3}
极对数 p	2
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	8×10^{-4}
阻尼系数 $B/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	0.001
反电势系数 $k/(\text{V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s})$	0.453 6

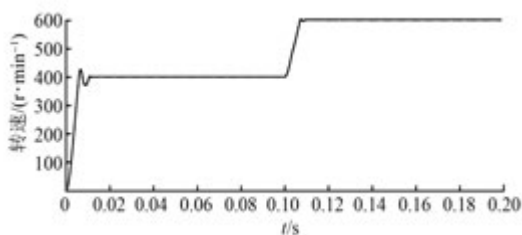


图2 PI 控制电机转速曲线

由图2可知,经过0.01 s后电机达到给定的低速稳定状态,但在低速运行时电机转速波动较大,电机控制系统对参数变化的自适应能力较差。因此,该控制方式未能完全满足电动汽车用电机的性能要求,需寻求更先进的控制策略来改善电机的调速稳定性和动、静态性能。

1.3 无刷直流轮毂电机模糊PI控制策略

为了保证电动汽车高速行驶时的迅速响应,

基于模糊逻辑算法的非线性控制方法成为电机控制的理想选择之一^[6-7]。

模糊控制器的基本工作原理:将采集的被测参数的精确值与给定值相比较,得出误差信号 e 作为模糊控制器的输入语言变量,将误差 e 经模糊化后得到模糊量 E ,再由 E 和模糊控制规则根据推理的合成规则得到模糊控制量 U , U 经模糊决策、清晰化后输出精确的控制量 u 来控制被控对象^[8]。

本文选用二维模糊控制器,以 BLDCM 实际转速和设定转速的偏差和偏差的变化率作为模糊控制器的两个输入变量,用于电机的转速闭环控制系统中。二维模糊控制器结构如图3所示。



图3 二维模糊控制器结构图

1.4 模糊PI控制系统仿真分析

电机参数及运行工况不变,通过图1中的手控开关来选择控制策略,可得模糊PI控制时电机的转速曲线,如图4所示。

由图4可知,转速在模糊PI控制策略下,经过0.005 s电机就达到给定的转速,转速响应迅速,且无论是低速还是高速运转,电机转速几乎没

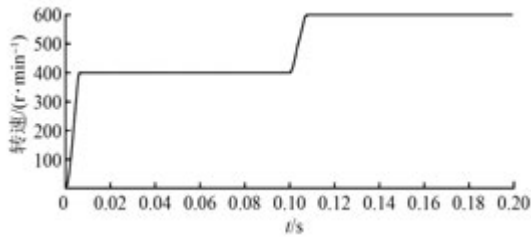


图4 模糊PI控制电机转速曲线

有波动。因此,具有较强的适应性,能满足电机在不同转速下转速稳定的要求,从而可改善电动汽车的行驶稳定性。

2 BLDCM 半实物仿真试验平台设计

鉴于仿真分析的局限性,搭建了基于dSPACE的BLDCM试验平台,设计了电机调速控制的软、硬件系统,半实物验证了模糊PI控制策略的可行性。

永磁BLDCM半实物仿真平台主要由PC机、电机驱动调理电路、dSPACE_DS1005标准组件系统和永磁BLDCM 4部分组成。其结构图如图5所示。

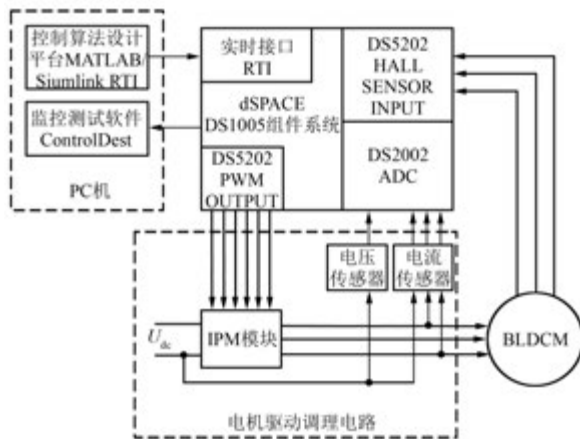


图5 基于dSPACE的BLDCM控制系统结构图

2.1 基于dSPACE的BLDCM调速系统硬件电路设计

基于dSPACE的BLDCM调速系统的硬件电路由控制板和驱动板组成,控制板采用dSPACE_DS1005标准组件中DS5202电机控制专用板卡,驱动板由驱动电路和调理电路组成。

本文所采用的BLDCM额定功率为3 kW,额定电压为72 V,考虑到大功率电机的兼容性,选

用MITSUBISHI公司第5代L系列IPM功率模块PM100RL1A060。

为了防止IPM模块对控制信号的干扰,对电机调速系统的控制电路和驱动电路分别设计成2块独立的电路板,利用Altiumdesigner电路软件进行设计,绘制原理图以及PCB图,印制电路板之后进行加工。

2.2 基于dSPACE的BLDCM调速系统软件设计

在MATLAB/Simulink中配置好RTI接口,即可建立BLDCM半实物仿真的快速控制原型(Rapid Control Prototype, RCP)。

该RCP由输入模块、控制模块和输出模块3部分组成。输入模块RTI接口为DS5202 ACME HALL SENSOR INPUT,用于采集BLDCM转子位置传感器输出的霍尔信号。控制模块根据电机的转速信号、电机母线电压和母线电流信号对转速和电流进行控制,转速采用模糊PI控制。输出模块RTI接口为DS5202 ACME BLOCK COMMUTATION,用于接收控制模块输出的时间周期、脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)占空比和电机方向信号,然后输出电机的三相PWM控制信号,驱动电机运转。

设置好仿真参数后,点击“Code”菜单栏下的“C/C++Code”选择“Build Model”即可实现代码的自动生成和下载。利用dSPACE软件系统中的ControlDesk试验软件可将编译后的程序下载至硬件系统中,实现在线试验。

2.3 BLDCM半实物仿真试验和结果分析

本试验在自行设计的四轮驱动轮毂电机电动汽车上进行。该车匹配的电机为外转子式无刷直流轮毂电机,参数设置:额定功率3 kW、额定电压72 V、额定电流42 A、额定转速750 r/min、额定扭矩38 N·m。搭建的BLDCM半实物仿真试验平台,如图6所示。

连接dSPACE、BLDCM、电机驱动控制器等实物,检查线路无误后,启动dSPACE,接通电动车蓄电池电源,电机空载。打开ControlDesk软件,新建“Project+Experiment”工程,导入RTW生成的(*.sdf)文件,即可完成快速控制原型的载入。新建Layout,根据所需观测和设置的参数或变量,选择合适的观测器件,建立虚拟仪表。



图 6 BLDCM 半实物仿真试验平台

当“PI/Fuzzy_PI”控制框输入值大于零时,为转速 PI 控制,将电机的目标转速设定为 400 r/min,点击“Go Online”即进入在线仿真模式,电机开始运转,通过 ControlDesk 可观测转速在 PI 控制时的电机转速曲线,如图 7 所示。

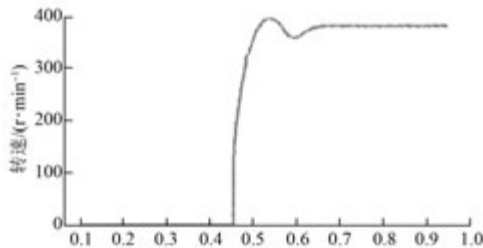


图 7 PI 控制电机转速曲线

将“PI/Fuzzy_PI”控制框输入 1(大于 0),则切换为模糊 PI 控制,同样将电机的目标转速设定为 400 r/min,点击在线运行,可得模糊 PI 控制时的电机转速曲线,如图 8 所示。

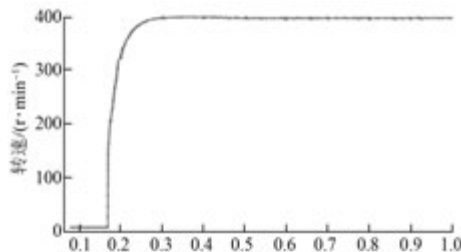


图 8 模糊 PI 控制电机转速曲线

由图 7 可知,电机从零速开始起动,从 0.45 s 开始到 0.65 s,经过 0.20 s 达到稳定的给定转速 400 r/min,电机转速响应较快,但在达到稳定的转速前,转速波动较大。由图 8 可知,0.18 s 至 0.30 s,电机从静止开始加速起动至给定转速所用时间约为 0.12 s,电机转速较传统 PI 控制时响应更迅速,且转速稳定、无超调。半实物仿真在线试验结果与离线仿真结果一致,模糊 PI 控制策略可改善电机的调速性能,增强电动汽车的行驶稳定性。

3 结 语

(1) 通过建立 BLDCM 控制系统模型,研究了闭环 PI 控制对电机转速响应的影响。通过转速闭环 PI 控制,经过 0.01 s 后电机就可达到给定的低转速稳定状态,加快了电机响应速度,但随着给定转速变化,控制效果不理想,PI 参数不能满足各种转速下的电机速度的稳定,自适应较差。

(2) 利用模糊控制和 PI 控制的优点,将两者结合在 BLDCM 控制中,在 MATLAB/Simulink 中建立模糊 PI 控制器,对 PI 控制和模糊 PI 控制进行离线仿真对比,可看出模糊 PI 控制经过 0.005 s 电机达到给定的转速,转速响应提高且稳定,具有一定的鲁棒性,能显著改善电机的调速性能。

(3) 搭建了 dSPACE 的永磁 BLDCM 调速快速控制原型试验平台,通过 ControlDesk 观测了 PI 控制和模糊 PI 控制策略对电动机转速调节的影响,电机从静止开始加速起动至给定转速所用时间由 0.20 s 加速为 0.12 s,进一步论证了模糊 PI 控制确实能使电机转速响应迅速且无超调,改善了电动汽车的行驶稳定性。

【参 考 文 献】

- [1] 王秋妍.电动汽车用永磁无刷直流轮毂电机控制器设计[D].西安:西安科技大学,2007.
- [2] 黄丹军.基于半实物仿真技术的永磁无刷直流电机控制平台研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [3] 张祺.基于 dSPACE 的永磁无刷直流电机驱动控制系统设计与开发[D].成都:电子科技大学,2007.
- [4] 呼明亮.基于 dSPACE 永磁无刷直流电机控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [5] 卢锋.无刷直流电机分布式控制系统设计[D].西安:西安科技大学,2009.
- [6] CHEN W, XIA C. Sensorless control of brushless DC motor based on fuzzy logic [J]. World Congress on Intelligent Control & Automation, 2006 (2): 6298-6302.
- [7] XIA C L, Xiu J. Sensorless control of switched reluctance motor based on ANFIS [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [8] 李孟秋,汪亮,黄庆,等.自抗扰参数模糊自整定无刷直流电机控制研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(5): 71-78.

收稿日期: 2018-01-08