

# 基于自适应模糊 PID 方法的轮毂无刷直流电机控制与仿真

刘秋生, 吕欣, 谭妍玮, 张众华, 陈启

(西华大学交通与汽车工程学院, 成都 610039)

**摘要:**针对轮毂式电动车用永磁无刷直流电机转速 PID 控制精度低、控制不稳定和响应滞后等特点,根据轮毂电机参数的变化,利用模糊控制对 PID 参数进行在线自适应调整,提出了一种基于自适应模糊 PID 的转速控制方法,获得了高精度的转速控制。首先分析永磁无刷直流电机的动态数学模型,在 MATLAB/Simulink 平台下,将模型按功能进行子模块建模,并通过与 S 函数相结合构建无刷直流电机的转速自适应模糊 PID 的双闭环控制系统模型,最后考虑车辆实际行驶情况,进行了电机系统运行工况的仿真分析。结果表明,采用自适应模糊 PID 控制无刷直流电机,能够实现控制精度高、响应速度快、无超调,且系统对干扰和参数变化具有较强的鲁棒性,明显改善对电动车用轮毂驱动电机的控制效果,提高电动车辆行驶的操纵性和稳定性。

**关键词:**轮毂式电动汽车;永磁无刷直流电机;自适应模糊 PID 控制;MATLAB/Simulink 建模与仿真  
**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A

## 引言

近年来,以永磁无刷直流轮毂电机为动力源的纯电动汽车取得了快速的发展,同时电动汽车对电机转速的控制精度和响应时间也提出更高的要求<sup>[1]</sup>。永磁无刷直流电机作为一个非线性、多变量、强耦合、时变系统,应用传统的控制方法难以取得满意的效果。传统 PID 控制虽结构简单,具有一定的鲁棒性和适应性,并能满足一般工业生产电机转速控制的需求,但是还是难以满足电机的控制要求<sup>[2]</sup>。目前,国内外学者借助抗干扰能力强、鲁棒性好且不依赖精确的数学模型的模糊控制算法来实现对电机的控制。模糊控制虽然能克服非线性因素的影响,对调节对象的参数变化也具有较强的鲁棒性,但模糊规则的总结和模糊隶属度函数的调节主要依靠经验,存在较大的主观性,且单纯的模糊控制存在一

定的稳态误差,稳态精度低<sup>[3]</sup>。

本文针对传统 PID 控制及单纯模糊控制在电机转速控制上的不足,并充分考虑模糊控制优势的基础上,以轮毂式电动车用无刷直流电机为研究对象,设计满足该轮毂电机驱动要求的自适应模糊 PID 控制器,建立基于自适应模糊 PID 方法的轮毂无刷直流电机双闭环控制系统。通过模糊算法实现 PID 参数高效、自适应整定的目的,从而实现自适应模糊 PID 控制器对无刷直流轮毂电机转速的有效控制。

## 1 永磁无刷直流电机的数学模型

永磁无刷直流电机由定子三相绕组、永磁转子、逆变器、转子位置检测器等组成<sup>[4]</sup>。为简化电机仿真模型的建立,作如下假设:(1)忽略电机铁芯饱和,不计涡流损耗和磁滞损耗;(2)忽略齿槽效应,绕组均匀分

收稿日期:2014-12-02

基金项目:西华大学研究生创新基金(ycyj2014097)

作者简介:刘秋生(1989-),男,江西赣州人,硕士生,主要从事汽车性能测试与仿真方面的研究,(E-mail)liu937129166@163.com

布在定子内表面;(3)转子上没有阻尼绕组,电机无阻尼作用;(4)不计电枢反应,气隙磁场分布近似为宽度为120°电角度的梯形波。由此可得三相绕组的电压平衡方程:

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

式中,  $u_a, u_b, u_c$  为定子相绕组电压;  $i_a, i_b, i_c$  为定子相绕组电流;  $e_a, e_b, e_c$  为定子相绕组电动势;  $L$  为每相绕组的自感;  $M$  为每两相绕组间的互感;  $p$  为微分算子。由此,一相方波电流和梯形波反电动势波形图如图1所示。

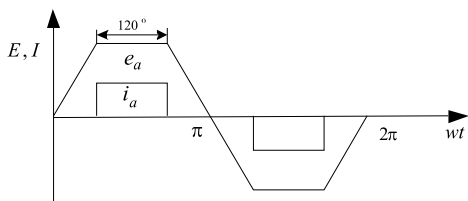


图1 一相电流和反电动势波形

由于三相绕组为星形连接且没有中线,则有:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2)$$

$$Mi_a + Mi_b + Mi_c = 0 \quad (3)$$

将式(2)与式(3)式带入式(1),得到新的电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

由(4)式得到电机如图2所示的等效电路图:

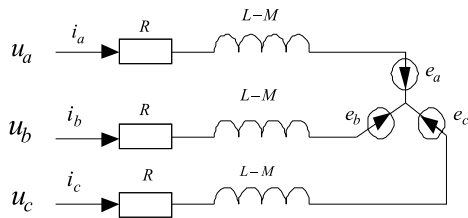


图2 永磁无刷直流电机等效电路图

由此得到电机的电磁转矩方程以及电机的运动方程:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{w} \quad (5)$$

$$T_e - T_L = J \frac{dw}{dt} + Bw \quad (6)$$

其中:  $T_e$  为电磁转矩;  $w$  为电机转子角速度;  $T_L$  为负载转矩;  $J$  为电机转动惯量。

## 2 基于模糊PID方法的双闭环控制系统

### 2.1 控制系统结构

轮毂电机纯电动汽车的调速是通过整车控制器以指令的形式控制驱动电机实现,从而通过电机的调速来完成行驶需求。电机调速系统采用转速、电流的双闭环控制,速度环采用自适应模糊PID控制,根据滞环电流跟踪型PWM逆变器原理实现电流控制<sup>[5-6]</sup>。图3为电机控制系统的整体结构框图。整个电机系统采用分层思想模块化建立,主要包括速度控制模块、参考电流模块、电流控制模块、电压逆变器模块、电机本体模块。

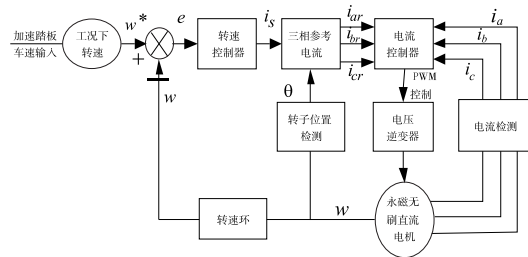


图3 电机控制系统整体结构框图

### 2.2 自适应模糊PID控制器的设计

模糊PID控制器是由模糊控制器和PID控制器两部分组成,通过找出PID控制参数  $k_p, k_i, k_d$  与误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  之间的模糊关系,在系统运行过程中不断地检测  $e$  和  $e_c$  的大小,然后根据模糊控制规则对PID控制参数进行在线修改,从而满足在系统出现不同的  $e$  和  $e_c$  时对控制参数的不同要求,保证被控制对象按照输入进行快速、稳定、准确的输出,使被控对象有良好的动、静态性能<sup>[7]</sup>。具体的控制器结构原理如图4所示。给定信号与反馈信号进行比较,得到误差  $e$  和误差变化率  $e_c$ ,经过量化因子的放大或缩小而满足设定的模糊论域要求后,作为输入送到模糊控制器中,经模糊控制器的推理计算和比例因子的变换后,得到三个调节PID控制的修正参数,PID控制器确定此时  $e$  和  $e_c$  要求的控制参数  $k_p, k_i, k_d$ ,最终给到被控对象<sup>[8]</sup>。

#### 2.2.1 模糊子集及隶属度函数定义

根据模糊PID控制器的结构,设计了三个模糊控制器。控制器采用“双输入-单输出”形式,以误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  作为输入,三个修正参数分别作为输出。设计应用MATLAB软件的FIS控制箱,采用Mamdani型推理方法。根据实际需要,设定模糊论域均为  $[-6, 6]$ ,模糊子集均为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ,各元素分别

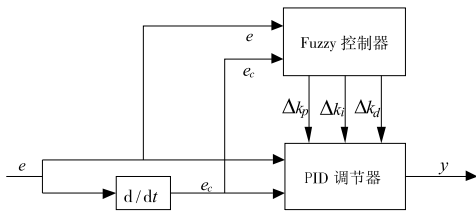


图 4 模糊 PID 控制器原理图

表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。常用的隶属度函数有高斯型、广义钟形、梯形和三角形等,选择好合适的隶属度,才能使模糊控制发挥优势,拥有优良的鲁棒性。其中三角形隶属度函数具有分辨率高、控制灵敏度高的特点,所以均选用三角形隶属度函数。具体的变量模糊子集以及隶属度函数定义如图 5 所示。

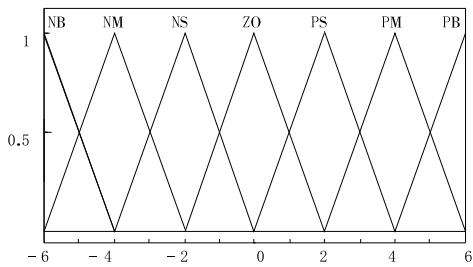


图 5  $e, e_c, \Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$  隶属度函数

2.2.2 模糊控制规则的确立

模糊控制规则作为模糊控制器的核心,是设计控制系统的主要内容。模糊控制规则的生成是根据操作人或专家对系统进行控制的实际操作经验和知识归纳总结得出的<sup>[9]</sup>。确定模糊控制规则,必须保证控制器输出能够使系统的动、静态特性达到最佳。根据模糊 PID 参数整定原则,经过总结工程实际操作经验以及专家经验,得出修正系数  $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$  的模糊规则,见表 1 ~ 表 3。

表 1  $\Delta k_p$  模糊规则

$e$	$e_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

2.2.3 清晰化及控制参数确定

经过模糊逻辑推理后,输出的是模糊集合,此时需要通过模糊清晰化将模糊集合等效成一个清晰值,从而

表 2  $\Delta k_i$  模糊规则

$e$	$e_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PS
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3  $\Delta k_d$  模糊规则

$e$	$e_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

控制执行机构。常用的清晰化方法有面积中心法(重心法)、面积平均法、最大隶属度法<sup>[10]</sup>,本文采用面积中心法,其计算公式与计算重心的方法类似。经过模糊控制器输出的精确控制量  $\{e, e_c\}_p$  后,代入式(8) ~ 式(10)即可确定模糊 PID 的控制参数,将模糊控制器输出的精确控制量按实际进行量化后得到 PID 控制的修正系数,与 PID 控制参数初始值相加得到自适应模糊 PID 控制器的控制系数。

$$k_p = k_{p0} + k_{u1} \{e, e_c\}_p \tag{8}$$

$$k_i = k_{i0} + k_{u2} \{e, e_c\}_i \tag{9}$$

$$k_d = k_{d0} + k_{u3} \{e, e_c\}_d \tag{10}$$

式(8) ~ 式(10)中,  $k_{p0}, k_{i0}, k_{d0}$  为 PID 控制参数的初始值,  $k_{u1}, k_{u2}, k_{u3}$  为模糊量化因子,实际中由试凑法确定。

2.2.4 控制系统初始参数的确定

预先设计基于常规 PID 控制的无刷直流电机系统,确定自适应模糊 PID 的初始控制参数。采用实验试凑法按“先比例,再积分,最后微分”的整定步骤进行闭环运行和模拟,观察系统响应曲线,然后根据各参数对系统的影响,反复试凑试验,直至出现满意的响应速度、稳定性和较小的超调,从而确定 PID 初始控制参数  $k_{p0}, k_{i0}, k_{d0}$  的大小。经调试,当  $k_{p0} = 3, k_{i0} = 0.15, k_{d0} = 0.02$  时,系统显示出良好的控制效果。

2.3 控制系统模型建立

根据设计的系统结构和模糊 PID 控制器,基于

MATLAB/Simulink 平台建立了电机系统的双闭环控制模型,如图 6 所示。利用 Simulink 的 SimPowerSystem Toolbox 提供的丰富模块库,选用三相全桥 IGBT 模块完

成对电压逆变器的建模,SimPowerSystem 工具箱为电机系统的建立提供了很大的便利,能够快速、有效地完成一些电力电子系统的构建。

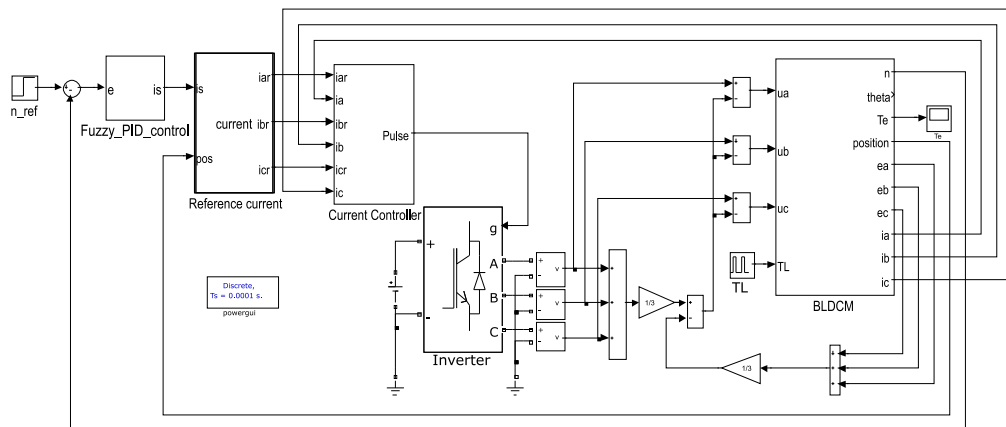


图 6 基于自适应模糊 PID 方法的无刷直流电机双闭环控制系统

### 3 仿真与分析

基于 MATLAB/Simulink 平台进行仿真试验,设定仿真采样周期  $T = 0.0001$  s。电机系统的物理参数见表 4,自适应模糊 PID 控制参数见表 5。

表 4 电机系统物理参数

参数	取值	参数	取值
绕组自感 $L$	0.02 H	转动惯量 $J$	0.005 kg · m <sup>2</sup>
绕组互感 $M$	-0.067 H	极对数 $p$	1
阻尼系数 $B$	0.0002	反电动势系数 $k_e$	0.382
电阻 $R$	1 Ω	供电电压 $U$	220 V

表 5 自适应模糊 PID 控制参数

PID 初始参数	$k_{p0} = 3$	Fuzzy 量化因子	$k_e = 0.01$
	$k_{i0} = 0.15$	比例因子 <td><math>k_{u1} = 0.38</math></td>	$k_{u1} = 0.38$
	$k_{d0} = 0.02$		$k_{i2} = k_{i3} = 0.01$

考虑仿真无刷直流电机为电动车用轮毂电机,电机转速需满足车辆正常行驶车速的工作范围。以实验室开发的试验车为例,设计的试验车在城市工况下低速行驶时的最低稳定车速为  $u_w = 20$  km/h,行驶最高速度设计在  $u_{max} = 100$  km/h。根据试验车参数,电动车轮半径  $r = 0.278$  m。由车速与电机转速关系:

$$u_w = 0.377 \frac{rn}{i_g i_o} \quad (11)$$

可计算出车辆在稳定低速下行驶时的轮毂电机转速大约为 200 r/min,高速下行驶时大约为 1000 r/min。

考虑电动车辆在低速与高速行驶时所需的电机转速,分别给定阶跃转速信号  $n = 200$  r/min,  $n = 1000$  r/min,

仿真结果如图 7 和图 8 所示。根据仿真曲线可知,当给定转速  $n = 200$  r/min 时,常规 PID 控制调节时间接近 0.2 s,响应较慢,但无超调;而采用自适应模糊 PID 控制时,反应调节时间缩减到 0.04 s,响应极快,且无超调。同样,当给定转速  $n = 1000$  r/min 时,常规 PID 控制的调节时间则为 0.22 s,响应能力明显减弱;用自适应模糊 PID 控制时,系统响应时间提高很快,达到 0.09 s,均无超调。由此表明,设计总体满足电动汽车对电机控制的响应要求。

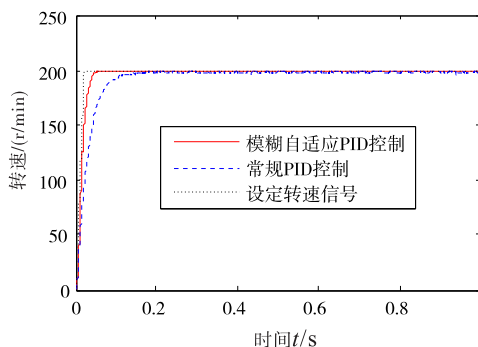
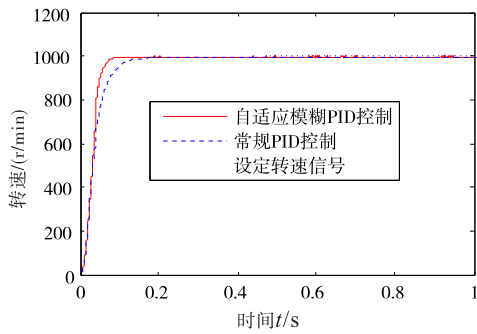


图 7  $n = 200$  r/min 时仿真曲线

针对车辆低速稳定行驶情况,给电机系统在时间为 [0.4 s, 0.8 s] 之间加入扰动负载  $TL = 15$  N · m,得到仿真结果如图 9 所示。对比两种控制模式下在时间为 [0.4 s, 0.8 s] 之间加入扰动负载后,PID 控制转速的抖动幅度和频率明显比采用自适应 PID 控制的要大,采用自适应模糊控制的调整能力快、鲁棒性好。但实际车辆在行驶中经常存在各种变速、倒车和外界因

图 8  $n = 1000$  r/min 时仿真曲线

素干扰,车速是常波动变化的,轮毂电机直接和车轮连接、控制车辆行驶的车速是通过控制轮毂电机的转速来实现,为考虑电动车辆实际行驶,仿真给定一变转速信号(图 10),模拟控制电机的响应能力和跟随特性,验证选用的电机能否达到车辆行驶要求。从结果来看,采用自适应模糊 PID 控制电机能够有效地跟踪设定转速信号。

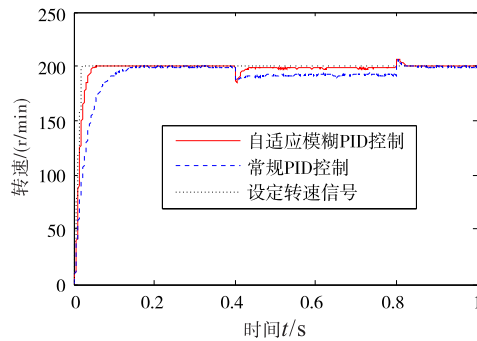
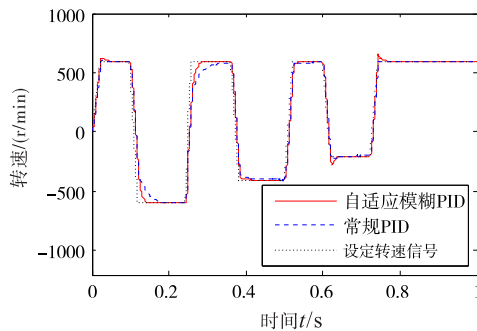
图 9 加入扰动负载  $TL = 15$  N.m 仿真曲线

图 10 持续变转速工况下仿真曲线

综合上述各工况的仿真结果表明,电机控制系统在采用自适应模糊 PID 控制比常规 PID 控制调节时间更短、响应能力更快、控制精度更高,并对干扰变化下表现出更强的鲁棒性,并且能够有效、稳定地跟踪设定转速信号,较好地满足车辆行驶对电机调速性能的要求,保证车辆行驶中对速度的精确控制。

## 4 结 论

借助实验室开发试验的四轮毂电机电动汽车,对车用永磁无刷直流电机进行了研究。文中首先分析了电机的数学模型,描述了电机运行的物理特性。设计了一种自适应模糊 PID 的控制算法,可以实现转速的高精度控制,使电动车在行驶过程中有更好的操纵性和稳定性。最后并在 MATLAB/Simulink 环境下,将模型按功能进行子模块的建模,建立了电流滞环控制和转速自适应模糊 PID 控制的双闭环控制系统,并进行了仿真对比分析,从而得到以下结论:

(1) 基于 Simulink 构建电机仿真模型时,采用分散模块化思想并结合 S 函数模块的方法简便有效,模型通用范围广,可以方便实现、验证各种电机控制策略,为实际电机控制系统的设计和调试提供了新的方法。

(2) 电机转速控制采用自适应模糊 PID 控制,实现电机转速的高效、准确、稳定控制,能够明显改善电动车用无刷直流电机的控制效果,有效地提高电动车辆行驶的操纵性和稳定性。

## 参 考 文 献:

- [1] 褚文强,辜承林.电动车用轮毂电机研究现状与发展趋势[J].电机与控制应用,2007,34(4):1-5.
- [2] 杜荣华,朱昭,舒雄,等.无刷直流电机自适应模糊 PID 控制及仿真[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2014,11(2):60-66.
- [3] 徐伟,屈百达,徐保国.基于模糊 PID 模型的无刷直流电机转速控制[J].科学与技术工程,2010,10(32):7926-7929.
- [4] 刘刚.永磁无刷直流电机控制技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [5] 纪志成,沈艳霞,姜建国.基于 MATLAB 无刷直流电机系统仿真建模的新方法[J].系统仿真学报,2003,15(12):1745-1749.
- [6] 殷云华,郑宾,郑浩鑫.一种基于 MATLAB 的无刷直流电机控制系统建模仿真方法[J].系统仿真学报,2008,20(2):293-298.
- [7] 王葳,张永科,刘鹏鹏.无刷直流电机模糊 PID 控制系统研究与仿真[J].计算机仿真,2012,29(4):196-199.
- [8] 朱颖合.自适应模糊 PID 控制器的研究与应用[D].杭州:杭州电子科技大学,2011.

- [9] 孙佃升,白连平.模糊自适应PID控制器在无刷直流电机控制系统中的应用[J].电气传动,2009,39(10): 63-66.
- [10] 石辛明,郝整清.模糊控制器的设计及其MATLAB仿真[M].北京:清华大学出版社,2008.

## Control and Simulation of Wheel Hub Brushless DC Motor Based on Adaptive Fuzzy PID Method

*LIU Qiusheng, LV Xin, TAN Yanwei, ZHANG Zhonghua, CHEN Qi*

(School of Transportation and Automotive Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** In view of the low precision, instability and response lag of control of wheel electric vehicle by permanent magnet brushless DC motor speed PID, a speed control method has been proposed based on adaptive fuzzy PID according to the variation of parameters of wheel hub motor, the high precision speed control has been achieved with the use of fuzzy control for on-line adaptive adjustment of PID parameters. First, the dynamic mathematical model of permanent magnet brushless DC motor is analyzed, and then the sub-module modeling according to function is carried under the platform of MATABL / Simulink, next, the dual closed-loop control system mode of speed adaptive fuzzy PID for brushless DC motor is established through a combination with the S function, and finally the simulation analysis of running condition of the motor system is conducted with the consideration of the actual driving conditions. The results show that the high control precision, fast response speed, and no overshoot can be achieved and system has strong robustness against disturbances and parameter changes by using adaptive fuzzy PID to control brushless DC motors. It significantly improves the control performance of electric vehicle with hub driving motor, thus the handling and stability of the electric vehicles are improved.

**Key words:** wheel electric vehicles; brushless DC motor; adaptive fuzzy PID control; MATLAB / Simulink model and Simulation

~~~~~  
(上接第20页)

## Realizing Asynchronous Uploading of Multiple Files by Using HTML5 Drag and Drop Technology

*LIU Yaoqin*

(Department of Computer Science, Yunyang Teachers' College, Shiyan 442000, China)

**Abstract:** In traditional Web applications, to realize the trans-browser application of local files not only need to write a lot of redundant code but also can not obtain good user experience. The local file is dragged and dropped to the browser by using the HTML5 drags and drops technology, the file attribution is obtained through the data Transfer object of File API, and then the eligible files are added to the analog form generated by FormData, in the end, the content in the form is submitted to the server by using the XMLHttpRequest of Ajax. Thus the dragging, dropping and the asynchronous uploading of the local files are realized, which extremely increases the user experience and decreases the overloading of the server. Asynchronous uploading of Files based upon the drag and drop technology is a new technological form of web application which has a good usage prospect.

**Key words:** HTML5; drag and drop; asynchronous; Ajax; File API