

# 无刷直流电机模糊自整定 PID 控制研究及仿真

章 涛 张 巍 忻尚芝 沈天宇

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

**摘 要:** 针对新能源汽车中的广泛采用的无刷直流电机的控制系统具有时变性、非线性、耦合强以及变量多等特点, 基于无刷直流电机的数学模型, 提出了一种简单实用的控制策略, 即模糊自整定 PID 控制的闭环转速控制方案。该算法通过模糊逻辑语句创建模糊控制准则, 根据转速变化对 PID 控制参数进行自动实时整定。利用 MATLAB 工具创建控制系统的仿真模型, 仿真结果表明: 模糊自整定 PID 控制系统实现转速响应快, 超调量小, 干扰后恢复时间短, 鲁棒性强等优点, 较传统 PID 控制有较大优势。

**关键词:** 新能源汽车; 无刷直流电机; 模糊自整定 PID; MATLAB/Simulink 仿真

**中图分类号:** TM921.47; TN702 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Research and simulation of fuzzy self-tuning PID control for BLDCM

Zhang Tao Zhang Wei Xin Shangzhi Shen Tianyu

(Department of Electrical Engineering School of Optical-Electrical and Computer Engineering,  
University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The control system of brushless DC motor, which is widely used in new energy vehicles, has the characteristics of time-varying, nonlinear, strong coupling and many variables. Based on the mathematical model of brushless DC motor, based on the mathematical model of Brushless DC motor, this paper presents a simple and practical control strategy, that is, the closed-loop speed control scheme of fuzzy self-tuning PID control. The fuzzy control rules are set by fuzzy logic, and the PID control parameters are adjusted in real time according to the change of speed. Using MATLAB tools to establish the control system simulation model. The simulation results show that: The advantage of fuzzy adaptive PID control system at the speed of fast response, small overshoot, anti-jamming and recovery time is short, strong robustness, compared with the traditional PID control has a larger advantage.

**Keywords:** new energy vehicle; brushless DC motor (BLDCM); fuzzy self-tuning PID; simulation

## 0 引 言

全球环境问题日益严重, 将来汽车的研发必然会向更为清洁的电动新能源发展, 各地政府在相关政策上均给予有力的支持。各企业也加快了对电动新能源汽车的开发和规模化产业的程度。发动机是新能源汽车的核心部件, 其中无刷直流电机作为技术最为成熟的电机, 被广泛应用于各种类型的新能源汽车中。

无刷直流电机具有结构简单, 运行稳定, 效率高等优点<sup>[1]</sup>, 因此在汽车、家电、自动化、航天等领域都有许多应用。传统 PID 控制由于其控制简单, 稳定性高, 更是得到了广泛的应用。但是传统 PID 控制系统在各个情况下都只能采取同一套参数, 调节能力仅取决于初始值, 难以克服电机缺点。面对如今越来越高的控制需求, 单纯依靠传统

的 PID 调节已经难以实现。针对这一情况, 本文提出了一种模糊自整定的 PID 控制器, 并研究将其应用在新能源汽车中。运用模糊理论的基本思想, 将人们在平时掌握的控制经验加入到控制规则中, 用模糊集的形式表示。控制系统根据电机的实际响应进行模糊推理, 自动整定 PID 参数。从软件算法和硬件结构两方面设计控制器, 用仿真加以验证。由于无须创建受控对象的准确数学模型, 因此模糊控制能够做到对系统的优良动态响应, 在精度上获得更好的控制效果, 拥有显著优势。

## 1 无刷直流电机数学模型

永磁无刷直流电机 (BLDCM) 通常由以下几部分组成: 由永磁体制成的转子、三相电机绕组、全桥逆变器, 以及转子位置检测器。整距集中式的绕组设计被应用在定子中,

所需的方波型电流由逆变器产生,其中的磁路经过特别设计,电机转子的材料也选用了瓦形的磁钢,因此气隙中的磁场能够是梯形波。

本文举例电机工作方式星型连接的两相导通三相六状态,对电机的数学模型和相应的电磁转矩等性能进行分析。为了便于分析,假定:

- 1) 气隙中的磁场为方波型,定子电流和转子磁场完全对称,同时三相绕组也同样对称;
- 2) 在换相过程中产生的影响以及电枢反应均忽略;
- 3) 定子内连续均匀分布电枢绕组;
- 4) 由涡流和磁滞带来的相应损耗忽略不计。
- 5) 永磁体和转子产生的阻尼作用不计。

通过分析 BLDCM 的特性,基于上述提前,能够建立电机的模型包括状态方程和电压、转矩方程:

用状态方程来描述 BLDCM 的三相定子电压平衡:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $u_a, u_b, u_c$  为三相定子电压;  $e_a, e_b, e_c$  为三相定子的反电动势;  $i_a, i_b, i_c$  为三相定子相电流;  $L_a, L_b, L_c$  分别为三相定子自感;  $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$  为三相定子绕组之间的互感;  $R_a, R_b, R_c$  为三相定子绕组的相电阻;  $P$  为微分子算子。

BLDCM 在电角  $360^\circ$  内,电机转子所处的位置变化不会导致磁阻的相应改变,于是:

$$L_a = L_b = L_c = L, L_{ab} = L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = M, R_a = R_b = R_c = R。$$

由于三相对称电机中,

$i_a + i_b + i_c = 0$ , 以及  $M_{ib} + M_{ic} = -M_{ia}$ , 则式(1)可改写为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

BLDCM 电磁转矩方程可表示为:

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为无刷直流电机的角速度。

BLDCM 的运动方程可表示为:

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

式中:  $B$  为阻尼系数 ( $N \cdot m \cdot s / rad$ )。  $J$  为电机的转动惯量 ( $kg \cdot m^2$ ), 负载转矩 ( $N \cdot m$ )。

由式(2)的电压方程,可得 BLDC 的状态方程:

$$P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \left\{ \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right\} \quad (5)$$

同时, BLDCM 要求方波型的定子电流和梯形波的反电动势,定子电流在半个周期中要保持  $120^\circ$ , 这两个必须达到同步<sup>[2]</sup>。在全控型三相逆变电路中,所有的状态下,都仅有两相的定子可以导通。

## 2 模糊自整定 PID 控制器设计

### 2.1 模糊自整定 PID 控制器算法设计

整个控制系统中,模糊自整定 PID 子系统是 BLDCM 控制系统最重要的部分。在这里,模糊算法的基本思想就是不停采样和检测正常运转中电机的转速,计算之前设定的转速和检测到的电机实际转速的差值  $e(k)$  和这个差值的变化率  $ec(k)$ ,通过查找模糊控制准则表,找到相对应的  $e(k)$  和  $ec(k)$ ,以此用更适合的控制策略实现参数的实时整定。通过这种方式满足对 BLDCM 系统的时变控制需求<sup>[3]</sup>。

模糊控制准则表如表 1 所示。其中论域均为:  $\{-3, 3\}$ 。模糊集均为:  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ; NB 代表负大, NM 代表负中, NS 代表负小, ZO 代表零, PS 代表正小, PM 代表正中, PB 代表正大。

表 1 模糊控制规则表

$ec \backslash e$	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	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

在控制算法上,这里 PID 模型采用增量式:

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \\ \Delta u(k) = (k_{p0} + \Delta k_p)[e(k) - e(k-1)] + (k_{i0} + \Delta k_i)e(k) + (k_{d0} + \Delta k_d)[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $u(k)$  和  $u(k-1)$  两个参数是 PID 控制在  $k$  和  $k-1$  两个时间的输出量;  $\Delta u(k)$  是当前输出量的采样数值

与前一时间采样输出量的偏差数值;各个时刻转速偏差的取值分别为  $e(k)$ 、 $e(k-1)$  和  $e(k-2)$  [4]。模糊 PID 的流程如图 1 所示。

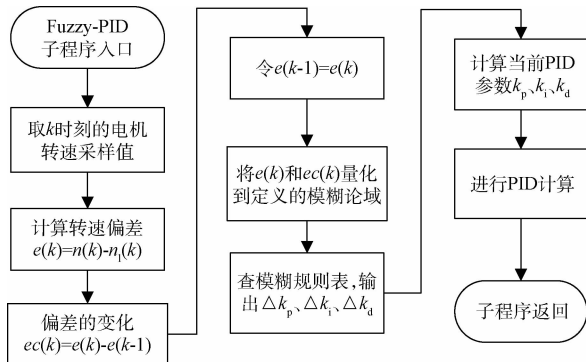


图 1 自整定 PID 流程

## 2.2 模糊自整定 PID 控制器结构设计

在新能源汽车的动力系统中, BLDCM 的控制系统硬件结构如图 2 所示。其采用的是带转子位置传感器的控制方式, 常用的位置传感器为电磁式、光电式和磁敏式 [5]。

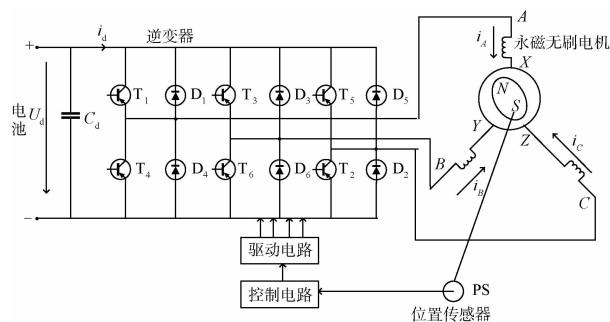


图 2 新能源汽车电机控制系统

BLDCM 闭环控制系统的结构如图 3 所示。系统采用双闭环控制, 即速度环和电流环。其中的电流环仍然沿用普通的 PID 调节, 已经能基本达到满意的控制效果。而在速度环中, 将普通的 PID 调节器替换为模糊自整定 PID 智能控制 [6]。这样设计的优点在于: 根据电机所处的运行状态不同差异, 能够自主在普通 PID 和模糊控制之间进行快速转换。在首先确保足够高的系统控制精度后, 此设计能够将普通 PID 和模糊自整定 PID 的优点都发挥出来, 同时做到两者的缺点互补, 实现对电机的快速控制且能够提高控制的鲁棒性。

其中作为控制系统中最重要的一环, 模糊自整定控制器对普通 PID 控制器在结构上进行了一定的改进。在系统运行过程中实时对 PID 控制器中的比例 ( $P$ )、积分 ( $I$ )、微分 ( $D$ ) 3 个参数进行调整, 从而获得良好的动态性能 [7]。模糊自整定控制器的结构如图 4 所示。

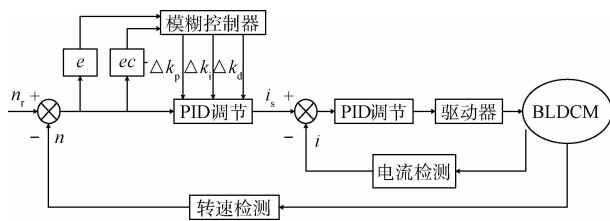


图 3 双闭环控制模糊控制结构

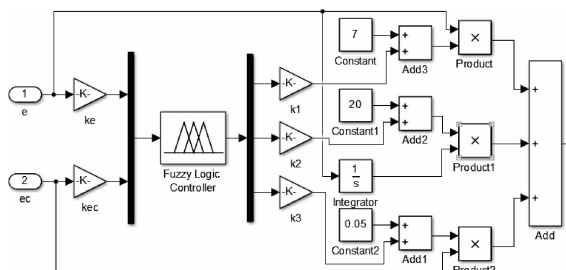


图 4 模糊自整定 PID 控制器结构

## 3 系统建模与结果分析

### 3.1 系统建模

根据前面的算法设计, 模糊自整定 PID 控制器采用二输入和三输出的形式。偏差值  $e$  和偏差的变化率  $ec$  是控制器的输入量,  $P$ 、 $I$ 、 $D$  的修正值  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  作为输出 [8]。

首先进入 MATLAB 的模糊逻辑编辑工具模块, 需要在指令栏中输入 Fuzzy 函数。新建一个 FIS 类型文件, 在选择类型栏中将控制器选择为 Mandani 型。在编辑栏中选择添加输入和输出变量。使输入量变为 2 个, 输出量变为 3 个, 并分别命名。在模糊逻辑工具箱的隶属函数中, 根据算法设计, 将论域范围改为  $\{-3, 3\}$ 。然后再编辑菜单中选择增加 MFs。将 NB 和 PB 设置为 Z(zmf) 型和 S(smf) 型, 其余设置为三角型 (trimf)。选中需要进行编辑的图标, 设置选中内容的变量的量化等级范围, 变量的种类和相应的等级, 之后标明对应模糊子集的语言值 [9]。隶属函数如图 5 所示。

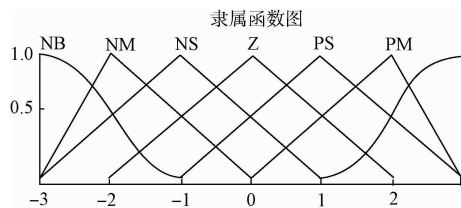


图 5 输入  $e$  隶属函数

在 Ruler Editor 编辑窗口中, 依次输入模糊控制准则。具体参看模糊控制准则, 如表 1 所示, 共列出了 49 条不同控制准则。同时在属性设置中将方式 (And method) 选择为 min; 或方式 (Or method) 选择为 max; 推理 (Implication)

选择为 min; 合成 (Aggregation) 选择为 max; 去模糊 (Defuzzification) 选择为 centroid。设置界面如图 6 所示。

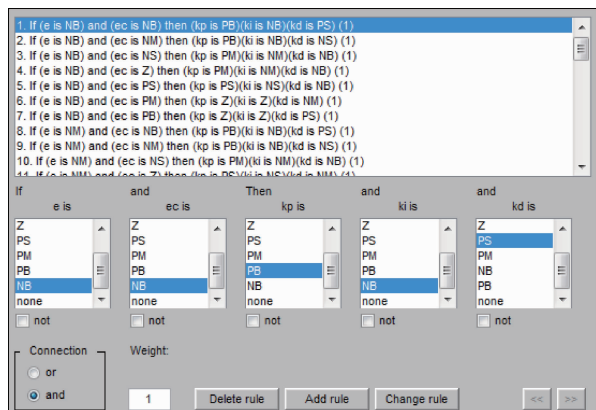


图 6 模糊控制规则设置界面

最后在 M 文件编辑器中创建一个链接文件, 将模糊规则编辑工具模块和 Simulink 仿真模块进行连接<sup>[10]</sup>。打开曲面观测窗口, 查看  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  的输出曲面分别如图 7~9 所示。

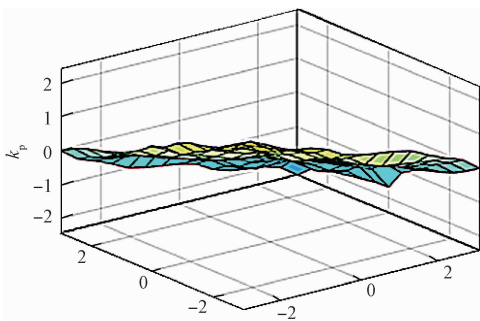


图 7  $\Delta k_p$  在论域上的输出曲面

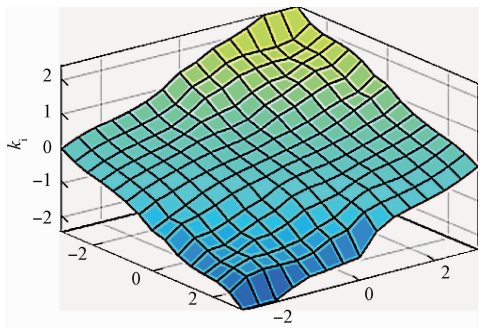


图 8  $\Delta k_i$  在论域上的输出曲面

仿真选择的 BLDCM 的参数为额定功率  $W_N=1\ 000\text{ W}$ 、额定转速  $n_N=2\ 000\text{ rpm}$ 。系统的其他参数为电枢电阻  $R_a=2.8\ \Omega$ 、电枢电感  $L_a=8.5\text{ mH}$ 、反电势常数  $k_e=0.55\text{ V/rpm}$ 、额定电流  $I_a=10\text{ A}$ 、机械转动惯量  $J=0.8\times 10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 、黏滞摩擦系数  $B_v=0.013\text{ N}\cdot\text{m/rad/s}$ <sup>[11-12]</sup>。根据以上过程在

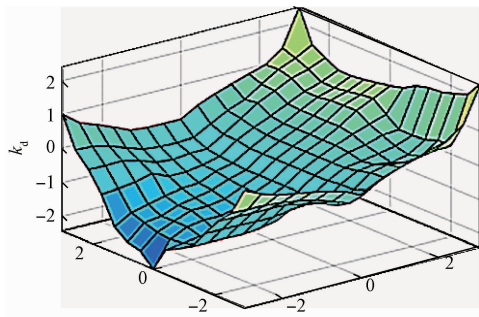


图 9  $\Delta k_d$  在论域上的输出曲面

Simulink 模块中创建的系统仿真模型如图 10 所示。

### 3.2 仿真结果及分析

考虑所仿真的无刷直流电动机为新能源汽车的动力来源, 因此在设计仿真测试时尽量模拟汽车行驶时的各种变速和外界干扰。同时为了验证模糊自整定 PID 控制系统相比传统 PID 调节的优越性。对新能源汽车上两者在预定转速  $2\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的空载、预定转速  $2\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  空载并在  $0.1\text{ s}$  时给予  $5\text{ N}\cdot\text{m}$  的突加负载以及预定转速  $2\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  空载并在  $0.1\text{ s}$  改变转速至  $1\ 500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  3 种情况对控制系统进行仿真测试<sup>[13-14]</sup>。仿真曲线分别如图 11~13 所示。最后给出了汽车在调速时, 采用模糊自整定 PID 控制电机的转矩、定子电流和电动势, 如图 14、15 所示。

分析图 11 的仿真曲线, 在电机空载启动时, 传统 PID 控制的转速超调量达到  $5.8\%$ , 调节用时  $3.8\times 10^{-2}\text{ s}$ 。而使用模糊自整定 PID 控制的系统中, 超调量接近 0, 调节时间是  $0.9\times 10^{-2}\text{ s}$ 。通过对电机在空载运行启动的转速变化的比较, 采取模糊自整定 PID 具有明显的优势。

图 12 的曲线中增加了大小为  $5\text{ N}\cdot\text{m}$  的突加负载, 转速在  $0.1\text{ s}$  左右有一个外部干扰。其中普通 PID 控制时最大转速下降为  $210\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 干扰的恢复时间为  $3.5\times 10^{-2}\text{ s}$ 。而采用模糊 PID 控制时转速下降  $117\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 干扰恢复时间为  $1.8\times 10^{-2}\text{ s}$ 。模糊控制 PID 能更好地对抗外部干扰。

在图 13 中, 系统给定了一个转速改变量, 在  $0.1\text{ s}$  时进行调速。传统 PID 控制的转速下降时的超调量为  $8.6\%$ , 调节用时达  $3.6\times 10^{-2}\text{ s}$ 。系统使用模糊自整定 PID 控制时, 超调量是  $4.1\%$ , 调节用时仅  $2.1\times 10^{-2}\text{ s}$ 。模糊自整定 PID 控制器同样具有更好的控制效果。

无刷直流电机定子绕组存在电感, 因此当相电流换相时电流增加的速度和电流减少的速度不相同, 这样就不可避免的产生转矩波动<sup>[15]</sup>。在图 14 中, 采取模糊 PID 的电机控制系统在开始启动时期, 因为相电流数值大, 使得转矩的峰值较大, 之后建立反电势, 转速快速降到稳定值。当所受负载发生突然变化时, 转矩又可以快速调整到相应的稳态。

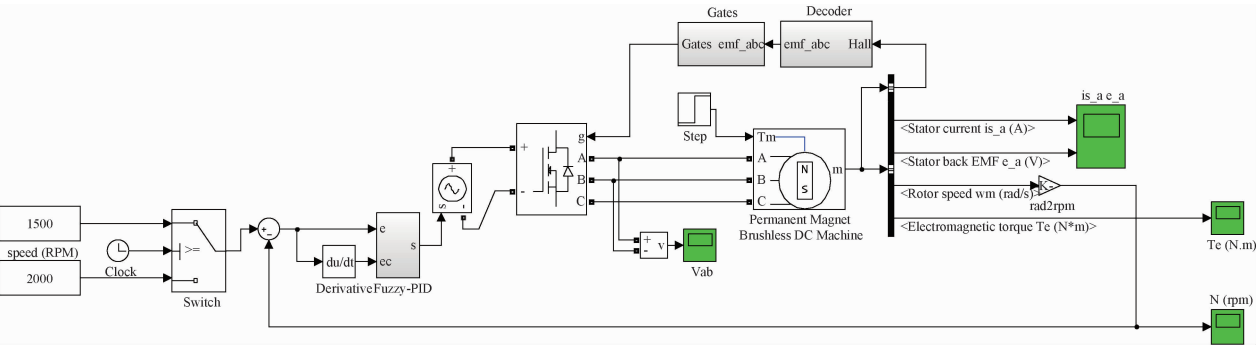


图 10 Simulink 中永磁无刷直流电机控制系统模型

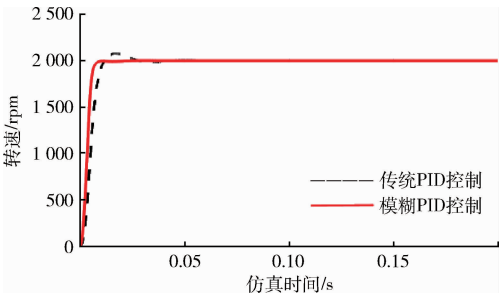


图 11 两种控制算法空载转速曲线对比

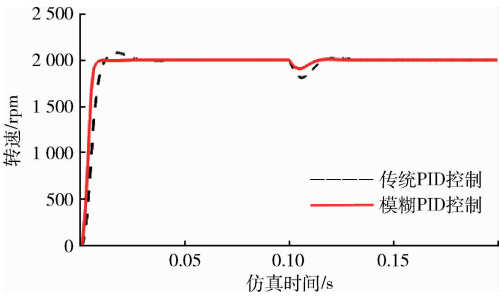


图 12 两种控制算法突加扰动转速曲线对比

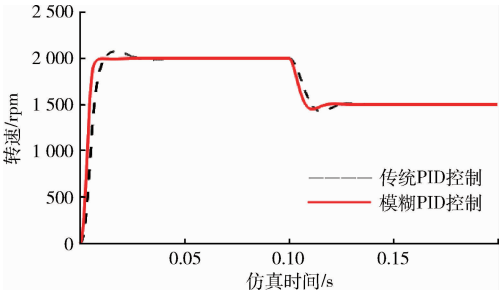


图 13 两种控制算法给定改变转速曲线对比

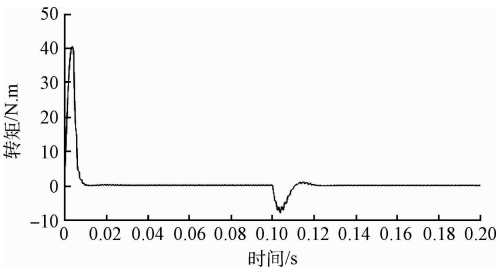


图 14 电机转矩曲线

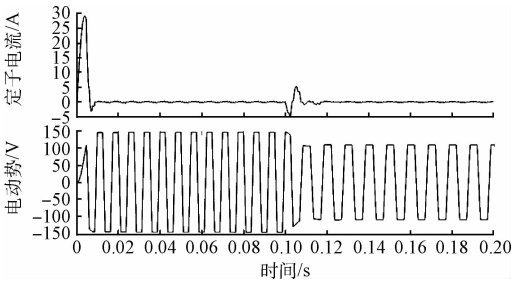


图 15 定子电流和电动势曲线

的对比,本文提出的模糊自整定 PID 的车用 BLDCM 控制系统有明显的优点,和普通的 PID 控制对比,本系统转速的响应极快,对外部干扰的抗性较强,同时还有较小的超调量。其动态特性和鲁棒性都要好于普通的 PID 调节。

#### 4 结 论

本文通过理论层面的设计和 MATLAB 仿真工具研究了模糊自整定 PID 在电动汽车上的应用。通过实验证明,将模糊控制和传统 PID 相结合,并将其应用在新能源汽车的驱动系统中,能够很好的实现无刷直流电机的高效、准确和稳定控制。能够明显的将汽车在使用过程中的操控性能和平稳性增强。新能源汽车的研发还有待深入,本文对车用 BLDCM 的控制方式的改进有一定的应用价值。

#### 参考文献

[1] 张立文,刘鑫,张淑梅,等. 全数字化无刷直流电机



- 伺服控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(5):34-38.
- [2] 马立新, 范洪成, 黄阳龙. 永磁伺服电机模糊PID自整定SVPWM控制研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(6): 20-23.
- [3] 李聪, 尹文庆, 冯学斌, 等. 基于模糊自适应PI控制的无刷直流电机无级调速系统[J]. 机电工程, 2012(1):49-53.
- [4] 夏长亮, 方红伟. 永磁无刷直流电机及其控制[J]. 电工技术学报, 2012(3):25-34.
- [5] 徐新国, 陈军峰. 电动车无刷直流电机控制器系统研究[J]. 电子世界, 2016(10):85-85.
- [6] 高文武. 无刷直流电机控制系统设计与实现[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.
- [7] 丁鹏, 姚平喜. 基于MATLAB的无刷直流电机Fuzzy-PID控制研究及其建模仿真[J]. 机电工程技术, 2012(2):10-13.
- [8] ZHANG J Z, YANG W J, ZHANG A X. Research on fuzzy self: adaptive PID control and its emulation[J]. Computer Simulation, 2009, 26(9):132-134.
- [9] 周永昌, 黄植功. 基于MATLAB的无刷直流电机双闭环控制系统建模与仿真[J]. 广西物理, 2012(01): 25-29.
- [10] 鲍雪, 王大志, 胡明. 基于自适应模糊的旋转弹反演滑模控制律设计[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1333-1339.
- [11] 王迎发, 夏长亮, 陈炜. 基于模糊规则的无刷直流电机起动策略[J]. 中国电机工程学报, 2009(30): 98-103.
- [12] 荆红莉, 赵鹏, 胡大伟. 参数自整定Fuzzy-PID在液奶杀菌系统的应用研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10): 34-36.
- [13] 汪旭东, 夏涛, 许孝卓, 等. 永磁同步直线电机的粒子群PID空间矢量控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 655-661.
- [14] 舒雄, 杜荣华, 柴健, 等. 电动汽车用无刷直流电机控制器设计[J]. 西华大学学报:自然科学版, 2015(2): 58-63.
- [15] 纪梁洲, 杨向宇, 龚晟. 多功能无刷直流电机驱动控制器的研制[J]. 微电机, 2011(4):64-67.

## 作者简介

章涛, 1992年出生, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: zty510@yeah.com

(上接第65页)

## 参考文献

- [1] 潘锋, 周慧君, 李广利. 小型断路器分断过程的动力性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [2] 张兰晶. 小型断路器发展与研究的探讨[J]. 低压电, 2013:33-40.
- [3] 周云红. 低压断路器的限流性能与级联技术应用[J]. 电器与能效管理技术, 2014.
- [4] 赵全明. 小型断路器开断过程计算机模拟的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
- [5] 李广利, 刘怡. 小型断路器限流技术[J]. 电气制造, 2005(1): 61-63.
- [6] 陈建兵. 万能式断路器温开与工作电流的关系研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(11):75-78.
- [7] 张文. 小型断路器操作机构可靠性的分析与评估[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.
- [8] 蔡伟浩, 宋志明. TDS3014B示波器在小型断路器检测试验中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2005, 24(12):37-38.
- [9] 郭瑾, 陈冰, 纽春萍, 等. 小型断路器分断电弧的试验研究及其结构优化[J]. 低压电器, 2014(8):8-12, 20.
- [10] 周少杰, 鲍光海. 基于小型断路器的电流监测系统[J]. 电器与能效管理技术, 2014.
- [11] 周荣伟, 葛伟骏, 徐迪安. 小型断路器分断电弧运动仿真分析[J]. 电器与能效管理技术, 2015(2):38-41.
- [12] 邵斌. 浅议家用小型断路器的发展趋势[J]. 低压电器, 2009(10):56-58.
- [13] LUDWINEK K, SZCZEPANIK J, SUŁOWICZ M. Experimental analysis of assessing of the tripping effectiveness of miniature circuit breakers in an electrical installation fed from a synchronous generator set[J]. Electric Power Systems Research, 2017(142):341-350.
- [14] LUDOWSKI P, WULF T, ROUMPIES A. The pole connector for miniature circuit breakers used in photovoltaic applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2016(99):1057-1070.

## 作者简介

王璐, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: wlu126126@126.com