

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.01.015

模糊PID在轮式机器人转向控制中的应用

谭会生¹, 廖雯²

(1. 湖南工业大学 交通工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对电子差速控制器在使用时对直流无刷电机的转速精度控制不高、轮式机器人转向时的稳定性差等问题, 提出一种基于模糊PID的电子差速控制策略, 结合轮式机器人转向时转速的偏差和偏差的导数进行在线调节PID参数。对于模糊PID的电子差速控制系统, 先设计出符合轮式机器人转向时控制系统的控制规则, 再应用Matlab/Simulink对设计的系统进行电机转速、转矩波形的仿真。仿真结果表明, 所设计的系统相比于传统PID控制系统具有更高的精度以及更快的动态响应, 能保证轮式移动机器人在转向状态下的平稳性。

关键词: 轮式机器人; 转向控制; 电子差速控制; 模糊PID

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)01-0081-07

Application of Fuzzy PID in Steering Control of Wheeled Robots

TAN Huisheng¹, LIAO Wen²

(1. College of Traffic Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of such flaws as the low speed precision control of the DC brushless motor with the electronic differential controller in use, as well as the low stability in the steering of wheeled robots, an electronic differential control strategy based on fuzzy PID has thus been proposed, which combines the deviations of the rotating speed and the derivative of the deviation of wheeled robots to adjust the PID parameters on line. With respect to the electric differential control system based on fuzzy PID, a design has been made of the control rules that meet the requirements for the steering control of wheeled robots, followed by the application of Matlab/Simulink to the simulation of the motor speed and torque waveforms of the designed system. The simulation results show that, compared with the traditional PID control, the design system is characterized with a higher accuracy and faster dynamic response, thus ensuring the stationarity of the wheeled mobile robot in the steering state.

Keywords: wheeled mobile robot; steering control; electronic differential speed control; fuzzy PID

1 研究背景

随着科技的发展和社会的进步, 机器人已经深入

国民生产的各个领域。轮式移动机器人具有自重轻、承载大、结构简单、行走速度快、行走机动灵活、驱动和控制相对方便、工作效率高等优点, 因而被广泛

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(6167224), 湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ6036)

作者简介: 谭会生(1966-), 男, 湖南茶陵人, 湖南工业大学教授, 硕士, 主要从事EDA技术, VLSI数字信号处理, 嵌入式系统和电力电子技术方面的研究, E-mail: huisheng21nd@163.com

廖雯(1990-), 男, 湖南郴州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为机器人运动控制系统,

E-mail: 15575750075@163.com

应用于工业、农业、反恐防暴、家庭、空间探测等领域^[1]。轮式移动机器人在转向状态时,两侧车轮在相同时间内所走过的路程不同,内侧车轮所走过的路程要小于外侧车轮。理想情况下,当两侧车轮用相同类型的直流无刷电机驱动时会得到相同的转速,但如果两侧车轮所行使的路程不等,则两侧车轮由于转速相同而导致外侧车轮产生滑移现象,这将加大车轮的磨损甚至发生翻车事故^[2]。

基于传统PID控制下的直流无刷电机双闭环调速,依靠差速控制方法可实现轮式机器人在转向状态下的差速功能。但由于直流无刷电机参数的时变性、负载扰动以及被控对象自身严重的非线性、强耦合性等特点,传统PID控制很难实现高精度的转速控制,使得轮式机器人在转向时速度调节过慢,从而导致稳定性变差^[3-4]。

本文针对电子差速器在使用时对直流无刷电机的转速精度控制不高、轮式机器人转向时的稳定性差等问题,提出一种基于模糊PID的电子差速控制策略,可根据轮式机器人在转向时转速偏差及偏差的导数进行在线调节PID参数,以提高轮式机器人转向时电子差速系统的参数自整定能力及机器人转向时的平稳性。

2 自整定双轮电子差速控制策略

电子差速控制主要分为基于转矩调节和基于转速调节两种模式。其中转矩调节需要根据不同的路面情况以及车载符合等详细参数,考虑机器人转向时车轮的滑移率,从而保证机器人小车的稳定性。而由于计算最优滑移率异常复杂和困难,并且控制精度也很难以达到预期,因此本文主要研究转速调节的机器人双轮电子差速控制^[5-7]。

以移动机器人左转向为例,在理想情况下,由于机器人两侧车轮使用的是相同的直流无刷电机,因此其输出的电磁转矩也相同,而转向时左右轮所受到的阻力会因为运动的距离不同而不同,在这种状况下,需要完成两侧车轮的差速控制。右侧车轮的直流无刷电机转速控制器首先接收外部的控制信号,随后配合主电路进行转速调节;左侧无刷直流电机转速传感器接收右侧电机发出的转速信号并进行调节,以确保机器人平稳地度过这个阶段。即右侧车轮电机接收外部信号,而左侧车轮电机接收右轮电机的速度控制信号,二者相互协调配合。

移动机器人处于左转向时双轮电子差速控制原理如图1所示。

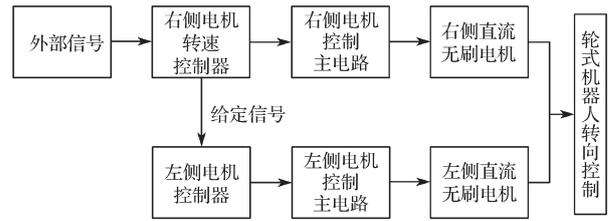


图1 左转向电子差速控制原理图

Fig. 1 Schematic diagram of left steering electronic differential control

实际上,轮式机器人左转向时,左(内)侧车轮要比右(外)侧车轮所受负载大,因此,左侧电机输出的电磁转矩也要比右侧电机输出的大,此时可对右侧电机转速进行双闭环控制,以确保左右侧电机的输出电磁转矩相同。左转向时自整定双轮电子差速调速系统原理如图2所示。

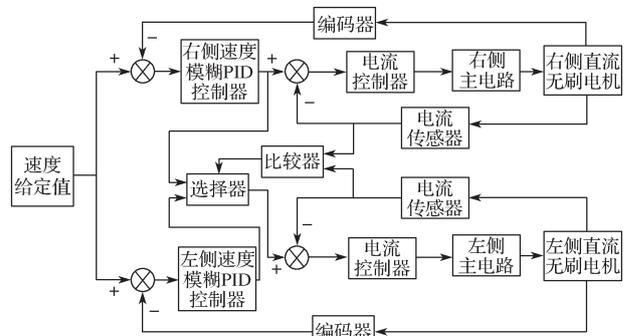


图2 左转向电子差速调速原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the left steering electron speed regulation

图2中,机器人通过选择器来判断此时的运行状态是直行还是转向。当机器人处于转向状态时,外侧驱动电机接收外部信号,内侧驱动电机接收外侧的反馈信号,确保内外侧电机输出相同的电磁转矩。其后,机器人通过比较器来比较两侧电机定子电流的大小,由于内侧车轮所受的阻力更大,导致外侧直流无刷电机的定子电流小于内侧的,此时,通过电流环来提高外侧电机的定子电流,进而通过转速环来提高外侧直流无刷电机的转速,最终完成自整定双轮电子差速控制^[8-9]。

3 直流无刷电机控制原理

3.1 直流无刷电机的数学模型

直流无刷电机控制系统的工作原理如图3所示。设电流连续,则动态电压方程为

$$U_{d0} = RI_d + L \frac{dI_d}{dt} + E. \quad (1)$$

式中: U_{d0} 为直流电源侧电压;

R 为电枢回路等效电阻;

L 为电枢回路等效电感;
 I_d 为电源侧电流;
 E 为反电动势。

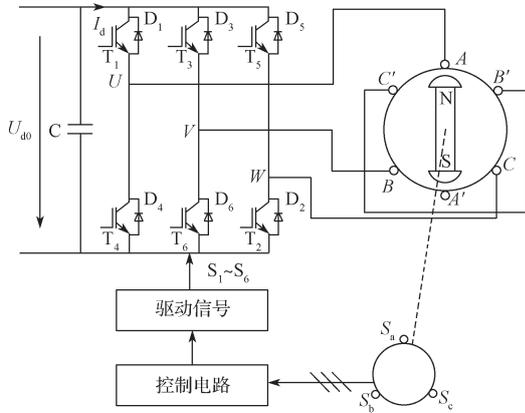


图 3 直流无刷电机控制系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the DC brushless motor control system

忽略黏性摩擦和弹性转矩, 电机轴上的运动学方程为

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad (2)$$

式中: T_e 为电磁转矩, N·m;

T_L 为包含空载转矩在内的负载转矩, N·m;

GD^2 为电力拖动装置折算到电机轴上的飞轮惯量, N·m²;

n 为电机转速;

t 为时间。

飞轮惯量与转动惯量 J 的关系式如下 (设 g 为重力加速度):

$$GD^2 = 4gJ. \quad (3)$$

额定励磁下的感应电动势及电磁转矩分别为

$$E = C_e n; \quad (4)$$

$$T_e = C_m I_d. \quad (5)$$

式中: C_e 为电动机电动势系数, V·r/min;

C_m 为电动机额定励磁时的转矩系数, N·m/A。

C_e 与 C_m 的关系为

$$C_m = \frac{30}{\pi} C_e. \quad (6)$$

定义电枢回路的电磁时间常数 (s) 和电力拖动系统的机电时间常数 (s) 如下:

$$t_l = \frac{L}{R}, \quad (7)$$

$$t_m = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_m}. \quad (8)$$

额定励磁下直流无刷电机的动态结构如图 4 所示。

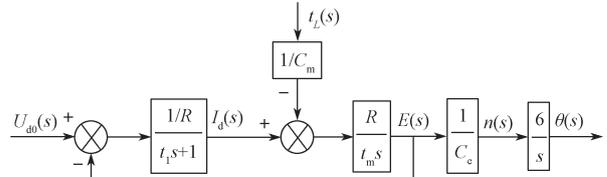


图 4 额定励磁下直流无刷电机动态结构图

Fig. 4 Dynamic structure of brushless DC motor under rated excitation

3.2 直流无刷电机双闭环调速

电力电子变换器件的传递函数可以近似为一个惯性环节:

$$W_s(s) = \frac{K_s}{t_s s + 1}, \quad (9)$$

式中: K_s 为电力电子变换器电压放大系数;

t_s 为电力拖动系统机电常数。

转速反馈和电流反馈均采用一阶惯性滤波, 其表达式分别如下:

$$FB_n(s) = \frac{\beta}{t_{on} s + 1}; \quad (10)$$

$$FB_i(s) = \frac{\gamma}{t_{oi} s + 1}. \quad (11)$$

式 (10) ~ (11) 中: t_{on} 为转速反馈滤波时间常数;

t_{oi} 为电流反馈滤波时间常数;

β 为转速环反馈系数;

γ 为电流环反馈系数。

根据以上各式, 双闭环调速系统动态结构图如图 5 所示。

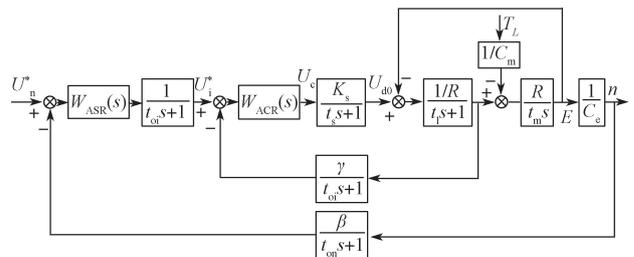


图 5 双闭环调速系统动态结构图

Fig. 5 Dynamic structure of double-closed-loop speed regulating system

课题组建立的无刷直流电机双闭环调速控制系统模型, 为使电流稳态无静差, 暂态时无较大超调, 将电流环设计为以跟随性能为主的典型 I 型环节; 为使转速稳态无静差, 并有较好的动态性能, 将转速环设计为以抗扰性为主的典型 II 型环节。

4 模糊 PID 控制

4.1 模糊 PID 控制原理

双闭环 PID 调速控制具有结构简单、容易理解

等优点，但传统PID控制器的响应速度较慢，并且对于非线性的机器人转向运动系统鲁棒性较差。为了克服这些缺点，课题组提出一种模糊PID控制策略，结合移动机器人转向时转速偏差及偏差的导数进行在线调节PID参数，克服机器人在转向时参数变化以及非线性等问题，提高了轮式移动机器人电子差速控制系统的自整定能力及稳定性。

模糊控制器将一种隐性信息量化（输入模糊集）和知识库产生控制力施加到系统。根据不同的偏差 e 及偏差变化率 e_c 在线自整定PID参数，其过程控制如图6所示。模糊PID是一种使用模糊规则库在控制过程中调节PID控制器参数（增益）的技术，它拓宽了传统PID控制器的操作区域，并且对于参数变化和不可预测的非线性系统表现良好。

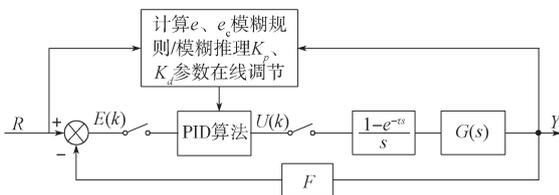


图6 模糊PID参数自整定控制原理图

Fig. 6 Schematic diagram of fuzzy PID parameter self-tuning control

4.2 各参数隶属度函数的确定

K_p 、 K_d 分别表示模糊PID控制的比例、微分系数，将二者分别定义在 $[K_{p, \min}, K_{p, \max}]$ 、 $[K_{d, \min}, K_{d, \max}]$ 范围内，为了方便，将其进行归一化处理，得到：

$$K'_p = \frac{K_p - K_{p, \min}}{K_{p, \max} - K_{p, \min}}, \quad (12)$$

$$K'_d = \frac{K_d - K_{d, \min}}{K_{d, \max} - K_{d, \min}}。 \quad (13)$$

根据微分时间常数可将积分时间常数 T_i 进行如下定义：

$$T_i = \lambda T_d。 \quad (14)$$

由此可以将积分系数表示为

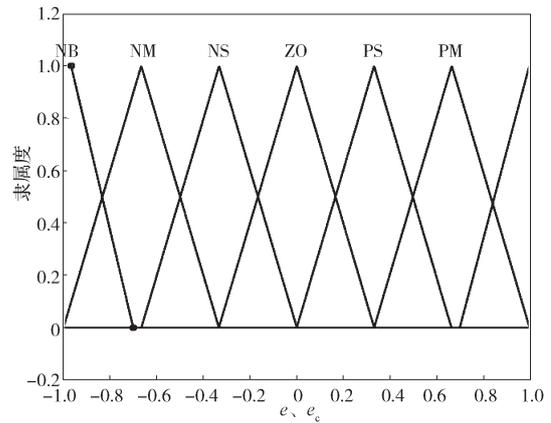
$$K_i = K_d / (\lambda T_d) = K'_d / (\lambda K_d)。 \quad (15)$$

其中， K'_p 、 K'_d 和 $i=1, 2, \dots, m$ 可由以下模糊规则来定义：If $E(k)$ is A_i and $\Delta E(k)$ is B_i , then K'_p is C_i , K'_d is D_i and $\lambda = \lambda_i$, $i=1, 2, \dots, m$ 。

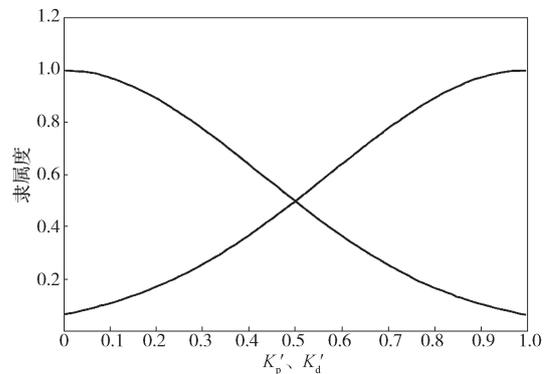
根据Ziegler-Nichols整定规则，积分时间常数 T_i 为微分时间常数 T_d 的4倍。

误差 e 和误差导数 e_c 以及 K'_p 、 K'_d 和 λ 模糊隶属函数如图7所示。其中，输入的模糊隶属函数为三角形，输出的模糊隶属函数为高斯型， λ 的论域

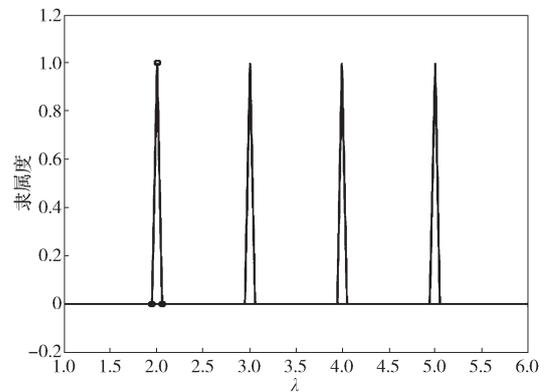
为 $[2, 5]$ ^[10]。



a) e 和 e_c 的模糊隶属度函数



b) K'_p 、 K'_d 的模糊隶属度函数



c) λ 的模糊隶属度函数

图7 各参数模糊隶属度函数

Fig. 7 Fuzzy membership function of various parameters

计算模糊控制输出之后，PID控制器参数可以根据下式计算得到：

$$K_p = (K_{p, \max} - K_{p, \min})K'_p + K_{p, \min};$$

$$K_d = (K_{d, \max} - K_{d, \min})K'_d + K_{d, \min}。$$

4.3 各参数模糊规则表的确定

模糊规则表是利用模糊规则来定义模糊控制器输入与输出关系的规则集。 K'_p 、 K'_d 和 λ 的模糊控制规则表如表1~3所示。

表 1 K'_p 模糊规则表

Table 1 Table of K'_p fuzzy rules

$E(k)$	$\Delta E(k)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	B	B	B	B	B	S
NS	S	S	B	B	B	S	S
ZO	S	S	S	B	S	S	S
PS	S	S	B	B	B	S	S
PM	S	B	B	B	B	B	S
PB	B	B	B	B	B	B	B

表 2 K'_d 模糊规则表

Table 2 Table of K'_d fuzzy rules

$E(k)$	$\Delta E(k)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	B	B	B	B	B	S
NS	S	S	B	B	B	S	S
ZO	S	S	S	B	S	S	S
PS	S	S	B	B	B	S	S
PM	S	B	B	B	B	B	S
PB	B	B	B	B	B	B	B

表 3 λ 模糊规则表

Table 3 Table of λ fuzzy rules

$E(k)$	$\Delta E(k)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	2	2	2	2	2	2	2
NM	3	3	3	3	2	3	3
NS	4	3	3	2	3	3	4
ZO	5	4	3	3	3	4	5
PS	4	3	3	2	3	3	4
PM	3	3	2	2	2	3	3
PB	2	2	2	2	2	2	2

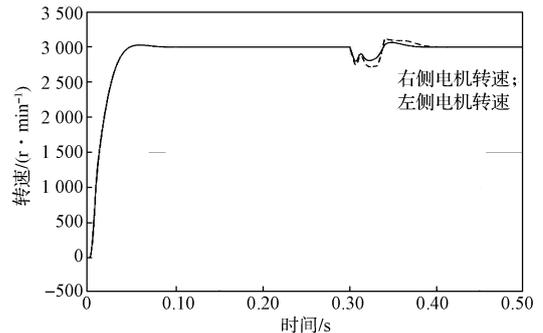
5 仿真实验

5.1 传统 PID 控制系统仿真

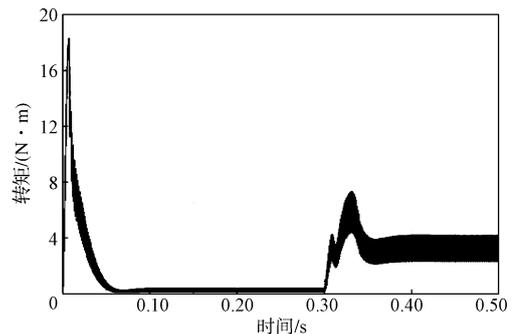
根据前文所介绍的直流无刷电机双闭环调速原理及 PID 参数的调节规则, 对基于传统 PID 调节的双轮电子差速系统进行仿真测试, 左右轮的无刷直流电机额定转速均设定为 3 000 r/min, 在 0.3 s 时模拟机器人右转向, 即给右侧无刷直流电机突加一个幅值为 5 N·m 的外界扰动, 给左侧无刷直流电机突加一个幅值为 3 N·m 的外界扰动, 即右侧的车轮阻力大于左侧车轮的。两侧直流无刷电机转速以及电磁转矩如图 8 所示。

从图 8a 可以看出, 两侧电机转速同时在 0.07 s 时进入稳态, 电磁转矩也在此时降为 0, 即空载运行。在 0.3 s 时给两侧直流无刷电机突加不同大小的外部扰动 (即负载扰动), 大约 0.10 s 后两侧电机电磁转矩重新进入稳态, 转速在 0.4 s 左右重新进入稳态,

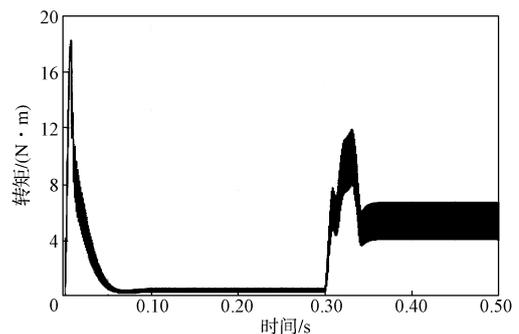
对比图 8b 和图 8c 可以发现: 突加负载扰动之后, 左侧电机转速大于右侧电机转速, 但是两侧电机的输出电磁转矩相同。换言之, 机器人双轮电机在不同阻力但相同动力的作用下通过调节 PID 参数可实现双轮电子差速控制。但观察图中细节处可以发现, 在突加负载扰动后, 该控制方式的转速调节和转矩调节时间过长, 而且在过渡过程中机器人运行处于极不稳定状态, 两侧电机转速忽大忽小, 容易发生打滑和侧翻事故。



a) 两侧电机转速图



b) 左侧电机转矩图



c) 右侧电机转矩图

图 8 右转向传统 PID 控制系统仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of right-turning traditional PID control system

5.2 模糊 PID 控制系统仿真

针对以上问题, 在控制系统仿真中将模糊 PID 控制器代替传统 PID 控制, 完成双轮电子差速控制仿真, 机器人右转向时模糊 PID 控制下的仿真图如图 9 所示。

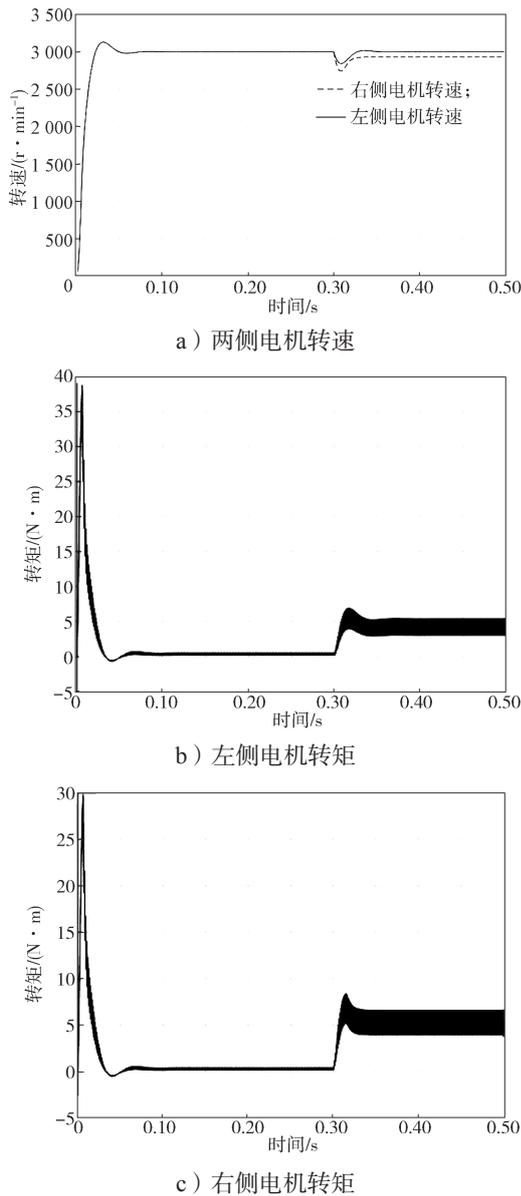


图9 右转向模糊PID控制系统仿真图

Fig. 9 Simulation diagram of right-turning fuzzy PID control system

由图9可以看出，两侧电机的转速和电磁转矩均在0.05s左右进入稳态。在0.30s时同时给两侧无刷直流电机突加不同大小的外部扰动（即负载扰动），大约0.05s后两侧电机电磁转矩和转速重新进入稳态。将图8b和8c与图9b和9c相比较可以发现：基于模糊PID控制的电子差速系统在无外界扰动时可以更快地进入稳定状态，在突加负载扰动后，转速和转矩的调节时间仅为传统PID控制调节时间的1/2，且模糊PID控制下的电子差速系统转速与转矩的过渡过程更为稳定，大大提高了双闭环调速系统的动态响应及控制精度。

图10~11为模糊PID控制下 K_p 、 K_i 变化曲线图。从图10和图11可以看出，在模糊PID控制策略的作用下， K_p 和 K_i 系数会根据误差 e 和误差导数 e_c 在线

调整，降低了电机在突加负载时转速及转矩的波动，确保机器人在转向时能平稳运行。

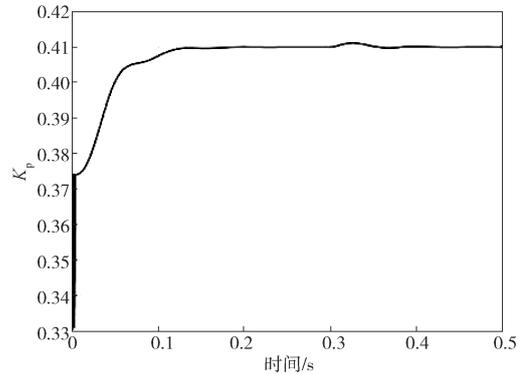


图10 模糊PID控制 K_p 变化曲线图

Fig. 10 Curve chart of K_p changes under fuzzy PID control

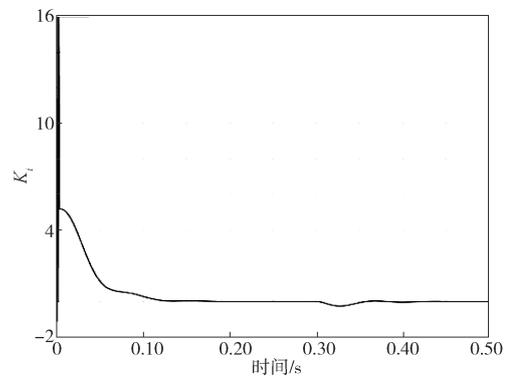


图11 模糊PID控制 K_i 变化曲线图

Fig. 11 Curve chart of K_i changes under PID control

6 结语

针对基于传统PID控制的机器人双轮电子差速控制策略与模糊PID控制下的双闭环调速系统进行了理论和仿真研究。经仿真对比测试发现，模糊PID控制^[11]较传统PID控制动态响应更快、稳定性更强、抗干扰能力突出，可以很好地实现机器人双轮电子差速控制，在轮式机器人转向过程的电子差速控制中具有重要的实用价值。

参考文献:

[1] 朱磊磊, 陈军. 轮式移动机器人研究综述[J]. 液压与机床, 2009, 37(8): 242-244.
ZHU Leilei, CHEN Jun. A Review of Wheeled Mobile Robots[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(8): 242-244.

[2] 李志远, 王涛, 张庆培, 等. 轮毂式电机驱动式微型电动汽车电子差速控制策略[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2015, 35(4): 422-426.
LI Zhiyuan, WANG Tao, ZHANG Qingpei, et

- al. Electronic Differential Strategy for Mini Electric Vehicle with In-Wheel Motors[J]. Journal of Hebei University(Natural Science Edition), 2015, 35(4): 422-426.
- [3] 潘晓磊, 赵川, 吕海立. 无刷直流电机模糊自适应 PID 控制的研究[J]. 机电工程技术, 2016, 45(3): 85-88.
PAN Xiaolei, ZHAO Chuan, Lü Haili. Study of Fuzzy Adaptive PID Control of Brushless DC Motor[J]. Mechanical and Electrical, 2016, 45(3): 85-88.
- [4] 赵正黎, 于惠钧, 张发明, 等. 基于模糊 PID 控制的直流电机调速系统[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(2): 38-43.
ZHAO Zhengli, YU Huijun, ZHANG Faming, et al. DC Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID Control[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(2): 38-43.
- [5] 董铸荣, 贺萍, 梁松峰, 等. 基于再生制动的四轮毂电机独立驱动电动汽车差速转向控制研究[J]. 汽车技术, 2013(5): 18-22.
DONG Zhurong, HE Ping, LIANG Songfeng, et al. Research on Differential Steering Control of Four-Hub Motor Driven Electric Vehicle Based on Regenerative Braking[J]. Automobile Technology, 2013 (5): 18-22.
- [6] 薛翠松, 王英. 基于 SIMULINK 无刷直流电机模糊 PID 控制的建模与仿真[J]. 变频器世界, 2015(1): 62-65.
XUE Cuisong, WANG Ying. Modeling and Simulation of Fuzzy PID Control Strategy of Brushless DC Motor Based on SIMULINK[J]. The World of Inverters, 2015(1): 62-65.
- [7] 杨康建, 侍才洪, 张西正. 基于模糊 PID 的履带式机器人运动控制[J]. 医疗机械卫生装备, 2013, 34(4): 10-11.
YANG Kangjian, SHI Caihong, ZHANG Xizheng. Tracked Robot Motion Control Based on Fuzzy PID[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2013, 34(4): 10-11.
- [8] 毛英慧, 靳光盈, 李新伟, 等. 轮式电动车转向差速控制方法[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(3): 74-80.
MAO Yinghui, JIN Guangying, LI Xinwei, et al. An Electronic Differential Control Method of In-Wheel Driven EV[J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(3): 74-80.
- [9] 王葳, 张永科, 刘鹏鹏, 等. 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): 196-200.
WANG Wei, ZHANG Yongke, LIU Pengpeng, et al. Study and Simulation of Fuzzy-PID Control System of BLDCM[J]. Computer Simulation, 2012, 29(4): 196-200.
- [10] POUREBRAHIM M, AYATI M, MAHJOOB M. Design and Implementation of PI and Fuzzy PID Supervisory Controllers for a Flexible Link Robot[C]//2016 2nd International Conference on Control Science and Systems Engineering. Singapore: IEEE, 2016: 270-274.
- [11] 王孝鹏, 吴晨雄, 黄道进. 基于模糊 PID 控制器的 1/2 整车半主动悬架仿真研究[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(6): 54-59.
WANG Xiaopeng, WU Chenxiong, HUANG Daojin. A Simulation Research on 1/2 Vehicle Semi-Active Suspension Based on the Fuzzy-PID Controller[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(6): 54-59.

(责任编辑: 申剑)