

改进型交叉耦合双电机比例同步控制研究*

侯 虎 陶为戈 梅善瑜

(江苏理工学院电气信息工程学院 常州 213001)

摘 要:针对双无刷直流电机同步控制难以满足转速比例同步控制和高精度控制问题,在交叉耦合控制结构的基础上,提出了一种改进型交叉耦合控制结构,并引入模糊控制算法,设计了模糊PID控制器。通过分析无刷直流电机的数学模型,结合模糊PID控制和空间电压矢量脉宽调制技术(SVPWM),在MATLAB/Simulink仿真实验平台上对改进型交叉耦合控制进行了仿真分析。仿真结果表明,改进后的交叉耦合控制可以实现双无刷直流电机的转速比例同步控制,在启动、升速和负载突变阶段,模糊PID相较于传统PID控制,同步误差分别减少了4%、24%和22%,控制精度更高,具有更好的稳定性与鲁棒性。

关键词:双电机控制;改进型交叉耦合;SVPWM;模糊PID控制

中图分类号: TM341 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Research on proportional synchronous control of dual motors based on improved cross-coupled

Hou Hu Tao Weige Mei Shanyu

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: Aiming at the problem that the synchronous control of double brushless DC motor is difficult to meet the requirements of speed proportional synchronous control and high-precision control, an improved cross coupling control structure is proposed based on the cross-coupled control structure, and fuzzy control algorithm is introduced to design a fuzzy PID controller. By analyzing the mathematical model of brushless DC motor, combined with fuzzy PID control and space voltage vector pulse width modulation (SVPWM) technology, the improved cross-coupled control is simulated and analyzed on MATLAB/Simulink simulation experimental platform. The simulation results show that the improved cross-coupled control can realize the speed proportional synchronization control of the dual brushless DC motor. Compared with the traditional PID control, the fuzzy PID control can reduce the synchronization error by 4%, 24% and 22% respectively in the starting, speed increase and load mutation stages, and has higher control accuracy and better stability and robustness.

Keywords: dual motor control; improved cross-coupled; SVPWM; fuzzy PID control

0 引言

无刷直流电机具有可靠性好、效率高、寿命长等优点,广泛应用于各种工业领域,随着工业自动化水平的不断发展,单台电机逐渐不能满足日常生产,需要多台电机相互配合来提高生产效率^[1-2]。因此,研究多无刷直流电机的同步控制具有重要意义。

对于多电机同步控制,控制算法和控制结构是研究的

重点^[3]。针对控制算法,一些研究学者将滑模控制、神经网络、迭代自学习等智能算法融入到电机同步控制系统中。文献[4]提出了一种滑模变结构控制的控制方案,利用滑模控制器来调控空间矢量电压,有效地提高了系统的静、动态性能,但滑模变结构控制器的非线性特征,导致控制器参数整定繁琐,整体设计过程太过复杂。文献[5]将神经网络算法融入到双轴耦合伺服驱动系统中,有效地提高了电机之间的同步性能,但神经网络算法计算量太大,

收稿日期:2022-11-20

* 基金项目:江苏省重点研发计划(BE2019317)、教育部产学研合作协同育人项目(202102563009)、江苏理工学院研究生实践创新计划(XSJCX21_20)项目资助

系统响应速度较慢。文献[6]利用迭代优化算法优化前馈控制器结构及其参数,有效地提升了系统的动态响应特性,但系统的静态性能有待提高。文献[7]将变论域模糊PI控制算法应用到无刷直流电机矢量控制系统的速度环中,取得了良好的控制效果。相较于其他控制算法,模糊控制算法不需要对被控对象进行精确的建模,适合处理电机控制系统中非线性、不确定的问题^[8-9]。针对控制结构,目前多电机的驱动结构主要有主从控制、虚拟主轴控制、交叉耦合控制等^[10-11],其中交叉耦合控制因其结构简单,同步性能好,广泛应用于双电机同步控制场合。传统的交叉耦合控制结构追求电机之间的转速同步控制,然而在一些特定的场合,需要保持电机之间的转速比例同步运行。

针对上述问题,本文提出一种改进型交叉耦合双电机比例同步控制策略,即在交叉耦合控制结构的基础上增加转速比例控制模块,并结合矢量控制算法,针对无刷直流电机双闭环矢量控制系统的速度环,设计模糊PID控制器,利用模糊算法的自适应性,实时改变PID参数,优化控制效果。

1 无刷直流电机数学模型及矢量控制策略

无刷直流电机一般采用方波控制,但方波控制存在磁场不连续、转矩脉动大、控制效率低等问题。相较于方波控制,矢量控制算法通过解耦复杂的定子电流关系,使控制变得平滑,控制效率更高^[12-13]。本文选用矢量控制策略,通过坐标变换,将无刷直流电机的数学模型由三相静止坐标系转化为两相旋转坐标系,将三相定子电流分解成控制励磁和转矩的 d 、 q 轴电流,实现对励磁和转矩的独立控制^[14-15]。

考虑到无刷直流电机复杂的运动规律以及各变量之间的复杂关系,其动态数学模型是非线性的、多变量的。因此在考虑无刷直流电机的数学模型时,设定如下条件。

- 1) 忽略电机铁心饱和,不计磁滞损耗和涡流损耗。
- 2) 假定转子采用的是无阻尼绕组,定子的各项物理性能在外界条件变化时不发生变化。
- 3) 假定转子永磁体的电导率为 0,并且假定转子内部磁导率也为 0。
- 4) 假定三相绕组中的感应电动势在稳态运行时为标准正弦波,忽略磁场中的空间谐波。
- 5) 假设三相绕组在空间上互差 120° ,且对称分布,每个绕组的电压、电阻以及磁通变化平衡^[16]。

基于以上条件,无刷直流电机在两相旋转坐标系下的 d 、 q 轴电压分量为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega \psi_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为直、交轴电流; ψ_d 、 ψ_q 分别为定子磁链的直、交轴分量; ψ_f 为永磁体磁链; R_s 为定子相电阻; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴同步电感; ω 为电气角速度。

转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

机械运动方程为:

$$T_e = T_L + \frac{1}{p_n} B \omega + \frac{1}{p_n} J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中: J 为转动惯量; ω 为电气角速度; T_e 为转矩; T_L 为负载转矩; p_n 为极对数; B 为阻尼系数。

分析电机 d 、 q 轴数学模型可以看出,电机的转矩可以通过控制电流 i_d 、 i_q 来实现,本文选用 $i_d = 0$ 矢量控制策略,使转矩 T_e 与电流 i_q 呈线性关系,以达到直流电机的控制效果,能够有效的提高电机的控制效率。

在对无刷直流电机 d 、 q 轴数学模型分析的基础上,搭建的速度环、电流环双闭环矢量控制架构如图 1 所示^[17],在速度环设计模糊PID控制器代替传统PID控制器。

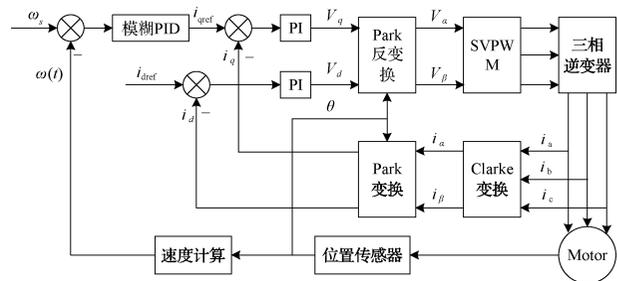


图 1 矢量控制架构框图

2 改进型交叉耦合控制

交叉耦合控制是在主从控制的基础上,增加了转速误差补偿模块,对电机的转速差进行处理后分别补偿到跟随控制器的输入,实现电机运行状态之间的耦合,交叉耦合控制结构最适合双电机控制系统^[18],但是传统的交叉耦合控制结构只能实现双电机的转速同步控制,无法实现双电机的转速比例同步控制,针对这一问题,提出了改进型交叉耦合控制结构,即在传统交叉耦合控制结构的基础上增加了速度比例控制模块,使两台电机能以不同的速度比例同步运行,以满足复杂的工作情况。本文结合模糊PID控制器与矢量控制算法,建立双无刷直流电机速度比例同步控制系统如图 2 所示。其中 P_i 为速度比例系数; K_i 为同步耦合系数; T_i 为负载; G 为同步控制参数,当需要控制两台电机时,令 $G = 1$,当只需控制一台电机时,令 $G = 0$ 。

在改进型交叉耦合控制结构中,定义电机 1、2 的比例参考速度分别为 ω_{s1} 、 ω_{s2} :

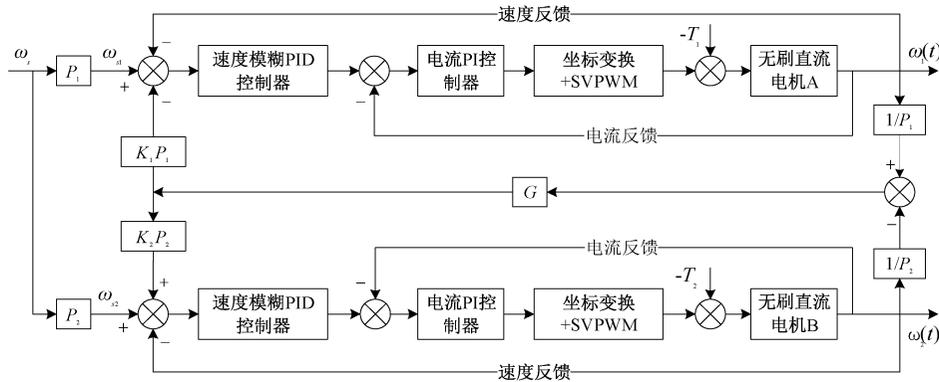


图2 双无刷直流电机速度比例同步控制系统结构框图

$$\begin{cases} \omega_{s1} = P_1 \omega_s \\ \omega_{s2} = P_2 \omega_s \end{cases} \quad (5)$$

式中： ω_s 为电机设定初始参考速度。

定义电机 1、2 的比例跟踪误差分别为 $E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ ：

$$\begin{cases} E_1(t) = \omega_{s1} - \omega_1(t) \\ E_2(t) = \omega_{s2} - \omega_2(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\omega_1(t)$ 、 $\omega_2(t)$ 为电机 1、2 的在 t 时刻的输出速度。

定义电机 1、2 的比例同步误差为 $H(t)$ ：

$$H(t) = \frac{\omega_1(t)}{P_1} - \frac{\omega_2(t)}{P_2} \quad (7)$$

定义电机 1、2 的模糊 PID 控制器的输入分别为 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ ：

$$\begin{cases} I_1(t) = E_1(t) - GK_1P_1H(t) \\ I_2(t) = E_2(t) + GK_2P_2H(t) \end{cases} \quad (8)$$

3 模糊 PID 控制器设计

传统的 PID 控制器因其采用固定参数，对复杂多变的环境适应能力不强，而模糊控制算法不依赖被控对象的数学模型，对多变的环境具有较强的适应能力，为此本文引入模糊控制算法设计模糊 PID 控制器，来优化控制效果。

模糊 PID 控制器由模糊控制器和参数可调整 PID 控制器两部分组成，模糊控制器将误差 e 及误差变化率 ec 作为输入，经过模糊化，模糊推理和解模糊得到 PID 参数调节量 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D ，参数调整 PID 控制器根据调节量实现 PID 参数的自调节，其结构框图如图 3 所示。

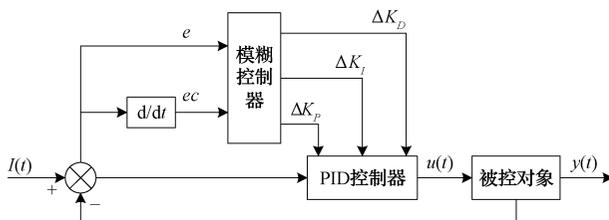


图3 模糊 PID 结构框图

$$\begin{cases} K_P = K_P^* + \Delta K_P \\ K_I = K_I^* + \Delta K_I \\ K_D = K_D^* + \Delta K_D \end{cases} \quad (9)$$

式中： K_P^* 、 K_I^* 、 K_D^* 为初始控制参数； ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 为调节量； K_P 、 K_I 、 K_D 为更新后控制参数。

经过分析测试，确定误差 e 的论域为 $[-30, 70]$ ，误差变化率 ec 的论域为 $[-1, 2.2]$ ， ΔK_P 的论域为 $[0, 0.3]$ ， ΔK_I 的论域为 $[-5, 70]$ ， ΔK_D 的论域为 $[0, 0.02]$ ；定义输入输出的模糊语言变量均用 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB} 表示，其含义为 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}；各变量的模糊论域均设为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ；输入输出均选用三角隶属度函数。

模糊规则是模糊控制器的基础，很大程度上决定着系统控制性能的好坏，通过专家经验及分析试验，设定模糊规则如下。

1) 当误差 e 较大时，选取较大的 K_P 值以提高系统响应速度；选取较小的 K_I 值或 K_I 取零值，避免系统超调量过大，出现积分饱和；选取较小的 K_D 值，避免系统误差量瞬间变大从而导致微分溢出。

2) 当误差 e 和误差变化率 ec 为中等大小时，适当减小的 K_P 值以降低系统超调量，同时为了保证系统的稳定性， K_I 和 K_D 的值大小要适中。

3) 当误差 e 较小时，选取较大的 K_P 值和 K_I 值来提高系统稳定性，同时，为了增强系统的抗干扰能力，避免输出响应振荡，当误差率 ec 较大时， K_D 值取小，误差率 ec 较小时， K_D 值取大。

根据上述分析，制定模糊规则如表 1 所示。

根据模糊规则，采用 Mamdani 推理方法进行模糊推理，求得各变量的隶属度；选用重心法进行解模糊计算，求得实际输出值，其公式如下：

$$Z = \frac{\sum_{i=0}^n Z_m \cdot Z(i)}{\sum_{i=0}^n Z(i)} \quad (10)$$

式中： Z_m 为隶属度； $Z(i)$ 为输出的模糊量； n 为模糊集合

表 1 模糊规则

$\Delta K_P/\Delta K_I/\Delta K_D$	ec							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PB/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS	
NM	PM/NB/PS	PM/NB/NS	PM/NM/NM	PS/NS/NM	PS/ZO/NM	ZO/PS/NS	NS/ZO/ZO	
NS	PM/NM/PS	PM/NM/ZO	PS/NM/NS	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO	
e	ZO	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/ZO	NS/PM/ZO	NM/PS/ZO
PS	PS/NS/ZO	PS/NS/ZO	ZO/PS/ZO	NS/ZO/ZO	NM/PS/ZO	NM/PM/ZO	NB/PM/PS	
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/PS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PM	
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PM	NB/PB/PB	

中语言变量的个数,即 $n=7$ 。

在 MATLAB/Simulink 仿真平台中搭建模糊 PID 仿真模型,如图 4 所示。

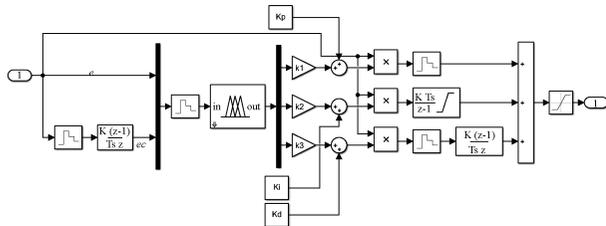


图 4 模糊 PID 仿真模型

4 仿真与结果分析

在 MATLAB/Simulink 仿真环境下,搭建改进型交叉耦合双无刷直流电机速度比例同步控制仿真模型如图 5 所示。

其中无刷直流电机模型参数为直流母线电压 $U_{dc} = 311$ V;定子电阻 $R = 0.958 \Omega$;额定转速 $n = 1200$ r/min; d 轴电感 $L_d = 5.25 \times 10^{-3}$ H; q 轴电感 $L_q = 12 \times 10^{-3}$ H;

磁链 $\psi_f = 0.1827$ Wb;转动惯量 $J = 3 \times 10^{-3}$ kg · m²;阻尼系数 $B = 8 \times 10^{-3}$ N · m · s;极对数 $p_n = 4$ 。

在转速同步控制和转速比例同步控制两种情况下,分别使用模糊 PID 控制器和传统 PID 控制器对改进型交叉耦合控制结构进行仿真对比实验,其中电机 1、2 采用模糊 PID 控制器,电机 3、4 采用传统 PID 控制器。

4.1 转速同步控制仿真与分析

在转速同步控制仿真实验中,设定电机 1、2 的转速比 $P_1:P_2 = 1:1$;电机 3、4 的转速比 $P_3:P_4 = 1:1$ 。其中仿真总时长为 0.3 s,初始转速均为 800 r/min;在 0.1 s 转速均增加到 1000 r/min;初始负载均为 2 N · m;在 0.2 s 处对电机 1、3 增加 5 N · m 的负载,对电机 2、4 增加 10 N · m 的负载。仿真结果如图 6 所示。

从图 6 可知,改进型交叉耦合控制结构能够实现双无刷直流电机的转速同步控制,在启动、升速和负载突变过程中,模糊 PID 相较于传统 PID 控制,系统超调量更小,响应速度更快,控制精度更高。其中,电机 1、2 相较于电机 3、4,在启动阶段,跟踪误差均减少了 41%,在升速阶段,跟踪误差均减少了 25%,在负载突变阶段,跟踪误差

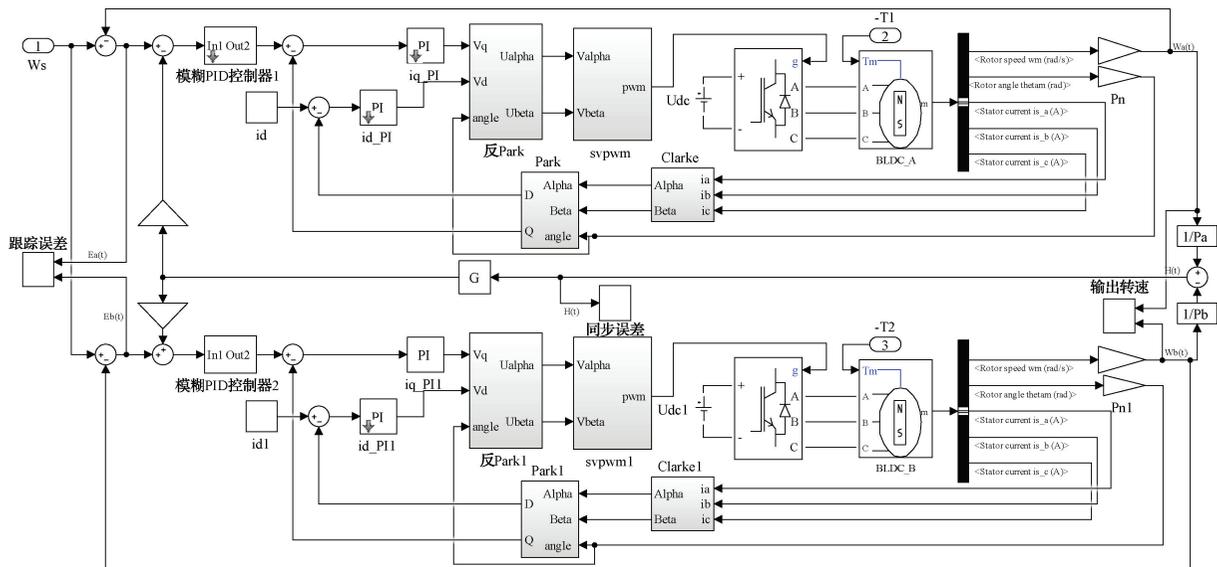


图 5 整体系统仿真模型

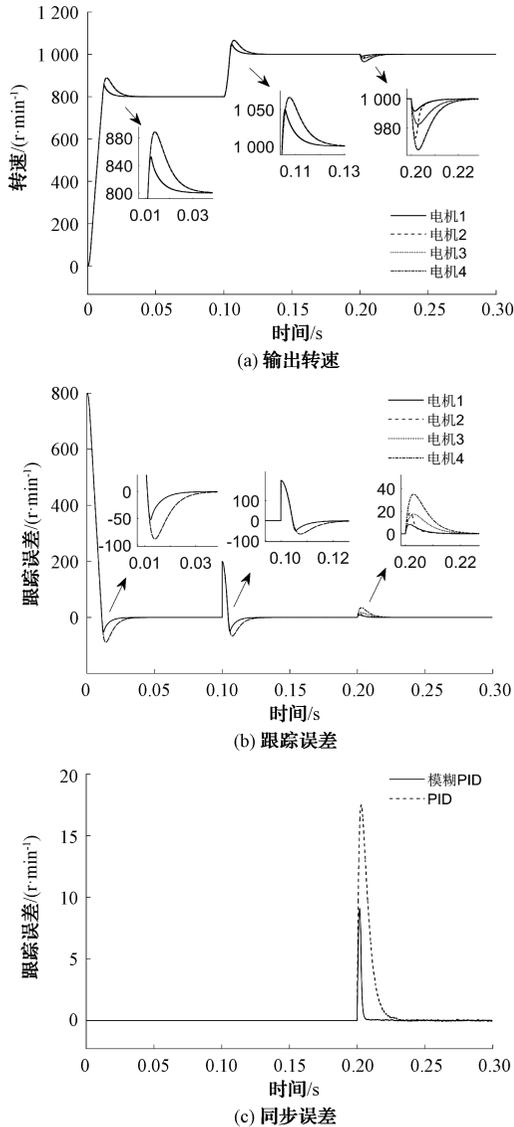


图6 转速同步仿真曲线

分别减少了51%和47%。同时,在负载突变阶段,使用模糊PID控制器的改进型交叉耦合控制结构比使用传统PID控制器的改进型交叉耦合控制结构的同步误差减少了47%。

4.2 转速比例同步控制仿真与分析

在转速比例同步控制仿真实验中,设定电机1、2的转速比 $P_1:P_2=1:1.2$;电机3、4的转速比 $P_3:P_4=1:1.2$,其他参数与完全同步控制仿真实验相同,仿真结果如图7所示。

从图7可知,改进型交叉耦合控制结构能够实现双无刷直流电机的转速比例同步控制,在启动、升速和负载突变过程中,模糊PID相较于传统PID控制,系统超调量更小,响应速度更快,控制精度更高。其中,电机1、2相较于电机3、4,在启动阶段,跟踪误差分别减少了41%和45%,在升速阶段,跟踪误差分别减少了25%和51%,在负载突

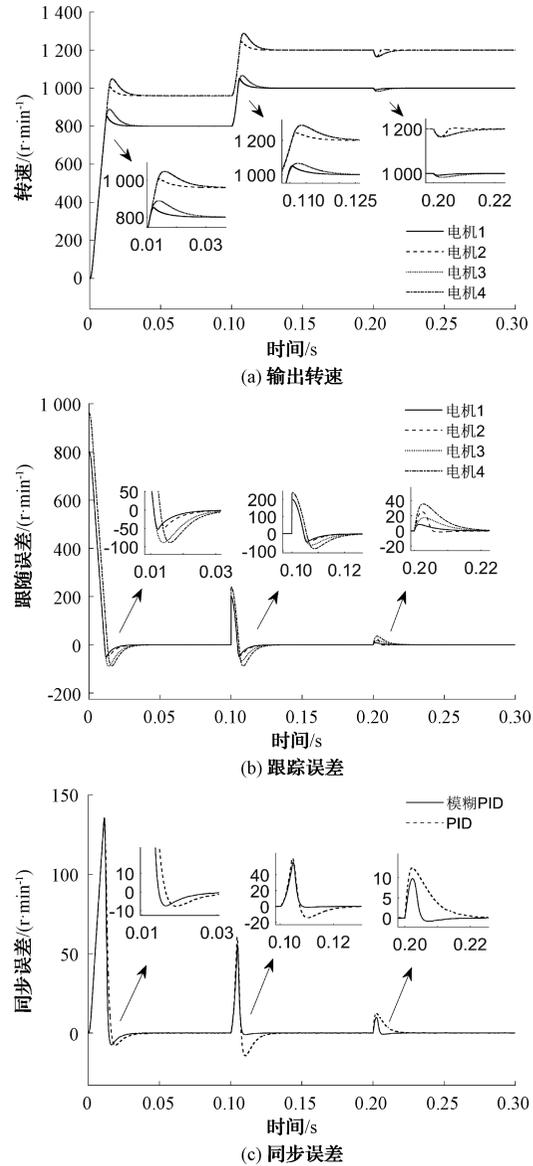


图7 转速比例同步仿真曲线

变阶段,跟踪误差分别减少了51%和29%。同时,在启动、升速和负载突变3个阶段中,使用模糊PID控制器的改进型交叉耦合控制结构比使用传统PID控制器的改进型交叉耦合控制结构的同步误差分别减少了4%、24%和22%。

5 结论

本文针对双无刷直流电机同步控制难以满足转速比例同步控制和高精度控制的问题,在传统交叉耦合控制结构的基础上,增加了转速比例控制模块,使双电机能够灵活地改变转速的比例,在无刷直流电机数学模型和矢量控制技术的基础上,设计了模糊PID控制器代替传统PID控制器。通过仿真波形可知,改进型交叉耦合控制可以实现双无刷直流电机的转速同步控制和转速比例同步控制;

相较于传统 PID 控制,在空载和负载起动阶段,模糊 PID 控制都具有更快的响应速度和更小的超调量;在升速和突变负载阶段,模糊 PID 控制能够更好地抑制转速波动,拥有更小的跟随误差与同步误差。结果表明,改进后的系统能够很好地实现双无刷直流电机的转速比例同步控制,具有更好的控制精度,能有效提升系统稳定性与鲁棒性。

参考文献

- [1] 高国彬,赵君,高嵩,等.多旋翼无人机无刷电机高功率密度驱动方式研究[J].国外电子测量技术,2021,40(12):108-113.
- [2] 卿金晖.基于FPGA的无刷直流电机转速控制系统设计与实现[D].长春:长春工业大学,2021.
- [3] SHI T, LIU H, GENG Q, et al. Improved relative coupling control structure for multimotor speed synchronous driving system[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(6): 451-457.
- [4] 李宏玉,丁善峰,余超,等.基于滑模变结构的永磁同步电机控制研究[J].国外电子测量技术,2019,38(9):112-116.
- [5] 马超,贾纯纯.基于模糊类神经网络的双轴伺服电机运动控制[J].电气传动,2019,49(9):35-40.
- [6] 李书领,段松凯,李书良.基于迭代优化的多电机交叉耦合控制方法研究[J].电气传动,2021,51(7):46-51.
- [7] 司陆军,黄巧亮.无刷直流电机变论域模糊 PI 控制系统研究[J].计算机仿真,2020,37(12):214-218,311.
- [8] 王晓瑜,赵军峰.基于模糊 PID 双电机同步控制的 PLC 设计与实现[J].现代制造工程,2020(10):128-133.
- [9] JERKOVIĆŠTIL V, VARGA T, BENŠIĆ T, et al. A survey of fuzzy algorithms used in multi-motor systems control[J]. Electronics, 2020, 9(11):1788.
- [10] 留若宸.多电机伺服系统同步控制研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- [11] 盛贤君,张亚鹏,许才.基于非线性 PID 的交叉耦合同步控制器设计[J].组合机床与自动化加工技术,2018(5):103-106.
- [12] 贾宁,程瑶,田又源.基于电流前馈的电动汽车永磁同步电机矢量控制[J].国外电子测量技术,2021,40(12):61-66.
- [13] 杜涛,曾国辉,黄勃,等.基于蜻蜓算法分数阶 PI 的 PMSM 矢量控制优化[J].电子测量与仪器学报,2020,34(10):132-141.
- [14] 邓聪颖,舒杰,陈翔,等.多参数变化下基于参数辨识的永磁同步电机偏差解耦控制方法[J].仪器仪表学报,2022,43(6):260-268.
- [15] 巫春玲,程琰清,刘智轩,等.一种永磁同步电机系统效率优化控制策略研究[J].电子测量技术,2020,43(10):36-41.
- [16] 陈奇.无刷直流电机无位置传感器矢量控制系统研究[D].天津:天津大学,2019.
- [17] 陈昱昊,郑宾.基于模糊 PI 控制的永磁同步电机矢量控制性能研究[J].国外电子测量技术,2022,41(7):75-81.
- [18] 叶宇豪,彭飞,黄允凯.多电机同步运动控制技术综述[J].电工技术学报,2021,36(14):2922-2935.

作者简介

侯虎,硕士研究生,主要研究方向为机电产品检测与智能控制。

E-mail:1832072041@qq.com

陶为戈(通信作者),副教授,硕士生导师,主要研究方向为智慧物联网技术、机电产品检测与智能控制等。

E-mail:taowg@189.cn