

尹浪, 贺福强, 陈发江. 基于控制参数自调整的异步电机转速控制研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(6): 134-139. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240618

基于控制参数自调整的异步电机转速控制研究

尹浪¹, 贺福强¹, 陈发江²

(1 贵州大学 机械工程学院, 贵阳 550025; 2 贵州晶木建材有限公司, 贵阳 550025)

摘要: 为了减小多功能木质板材生产制备时设备电机的转速变化波动,降低其对生产节拍和产品质量的影响。根据工艺控制需求,设计了一种PID控制与模糊控制相结合的控制参数自整定的电机转速控制系统。在Matlab/Simulink中,基于异步电机矢量控制原理,建立了电机转速控制系统模型。仿真结果表明,设计的控制参数自整定的电机转速控制系统的动态性能和稳态性能都有明显提升;在面对外部干扰以及工作负载变化时,系统都能保持良好的稳定性,能够满足生产工艺控制需求。

关键词: 木质板材; 转速控制系统; PID控制; 模糊控制; 仿真

中图分类号: TP272

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)06-0134-06

Research on speed control of induction motors based on self-adaptive control parameter adjustment

YIN Lang¹, HE Fuqiang¹, CHEN Fajiang²

(1 College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2 Guizhou Jingmu Building Materials Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to reduce the speed fluctuation of the equipment motor during the production and preparation of multi-functional wooden panels and to minimize its impact on production rhythm and product quality, a motor speed control system with self-tuning control parameters combining PID control and fuzzy control is designed according to the process control requirements. Based on the vector control principle of induction motors, a motor speed control system model is established in Matlab/Simulink. Simulation results show that the dynamic and steady-state performance of the designed motor speed control system with self-tuning control parameters is significantly improved, and the system maintains good stability in the face of external disturbances and changes in workload, it can meet the needs of production process control.

Key words: wooden panels; speed control system; PID control; fuzzy control; simulation

0 引言

多功能木质板材是贵州某建材公司独立研发生产的一种新型人造板,在房屋装修、户外栈道和室外景观等领域广泛使用。在多功能木质板材加工生产时,电机作为其中的一个关键工艺控制对象,其工作转速的不稳定会对板材成形质量和产线的能耗控制产生重大影响,如:搅拌工艺中多种原材料的混合均匀度、铺料工艺中混合料的铺平与高度一致性、板材预压密实度、叠垛工艺中堆垛的整齐度、生产线的生产节拍控制和设备空转等。为了解决生产制备时电机转速控制系统不稳定的问题,有必要设计一种能

够迅速调整转速并在转速发生变化时快速恢复的控制系統,确保生产线稳定运行。自传统的PID控制出现以来,其简单的结构、便捷的调试和优良的控制效果使其在工业控制系统中赢得了广泛青睐^[1]。然而,当系统出现控制对象内部发生变化或者外部工作环境变化时,PID控制器的稳定性可能受到影响,无法实现预期的控制效果^[2]。相较之下,模糊控制^[3]能够结合工人工作经验,对工业生产中的工艺控制进行引导和调整,对非线性系统和无法建立精确模型的系统有很好的控制效果,但却存在控制参数调整困难以及系统的稳定性无法保证的问题与不足^[4]。因此,为了克服传统PID控制局限性并充

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]2Y067号)。

作者简介: 尹浪(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:机械工程。

通讯作者: 贺福强(1975-),男,副教授,主要研究方向:机械工程,机器视觉。Email:hefuq75@163.com

收稿日期: 2023-04-24

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用

分发挥模糊控制的优点, 在传统 PID 控制的基础上加入模糊控制, 实现对 PID 控制参数的自适应调整^[5-6]。仿真结果表明, 对比传统的 PID 控制, 设计的控制参数自整定的模糊 PID 控制具有更好的动态性能、稳态性能以及抗干扰能力。

1 异步电机控制模型

在多功能木质板材生产时, 设备使用的减速电机由一个三相异步电机和一个减速器组成。其中, 异步电机实际工作时的动态模型是一个高阶非线性、强耦合的多变量系统, 动态特性和静态特性都十分复杂, 因此可以使用坐标系变换来简化异步电机的数学模型^[7]。在建立异步电机的数学模型时, 通常做以下假设:

- (1) 假设三相绕组对称(在空间互差 120° 电角度);
- (2) 不考虑铁心的损耗;
- (3) 忽略温度和变频变化对线圈绕组的影响;
- (4) 各绕组的自感系数和互感系数不会发生改变, 忽略磁路饱和。

在以上假设的基础上, 利用三相异步电机的数学方程在两相静止坐标系中建立数学模型。

三相异步电机的电压方程为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \\ \dot{U}_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \\ \dot{U}_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} + \omega_r \lambda_{qr} \\ \dot{U}_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} - \omega_r \lambda_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_{ds} 、 U_{qs} 、 U_{dr} 、 U_{qr} 分别表示定子 d 轴电压、定子 q 轴电压、转子 d 轴电压和转子 q 轴电压; R_s 和 R_r 分别表示定子电阻和转子电阻; i_{ds} 、 i_{qs} 、 i_{dr} 、 i_{qr} 分别表示 d 轴上定子电流、 q 轴上定子电流、 d 轴上转子电流和 q 轴上转子电流; λ_{ds} 、 λ_{qs} 、 λ_{dr} 、 λ_{qr} 分别表示 d 轴上定子磁链、 q 轴上定子磁链、 d 轴上转子磁链和 q 轴上转子磁链; ω_r 表示转子电角速度。

三相异步电机的磁链方程为:

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \dot{\lambda}_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \dot{\lambda}_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \dot{\lambda}_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

其中, L_s 、 L_r 、 L_m 分别表示定子电感、转子电感和互感。

三相异步电机的转矩方程为:

$$T_e = k_T \cdot n_p \cdot L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3)$$

其中, T_e 表示三相异步电机的电磁转矩; n_p 表示三相异步电机极对数; k_T 为变换系数。等功率变换时, $k_T = 1$; 等幅值变换时, $k_T = 1.5$ 。

三相异步电机的运动方程为:

$$T_e = T_L + \frac{J}{n_p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

其中, T_L 表示负载, J 表示转动惯量。

根据上述方程, 在 Matlab/Simulink 中建立异步电机的控制模型, 异步电机控制模型如图 1 所示。由图 1 可知, 控制原理为三相电压经过 Clarke 变化后转换为异步电机的定子 dq 轴上的电压, 然后根据上述异步电机数学方程构建控制模型。

在多功能木质板材生产线中, 减速电机的内部参数见表 1。

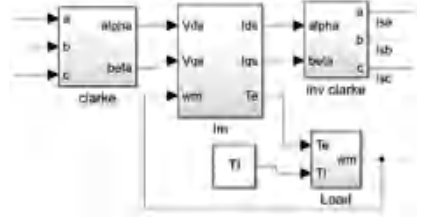


图 1 异步电机控制模型图

Fig. 1 Asynchronous motor model diagram

表 1 异步电机参数表

Table 1 Asynchronous motor parameters table

参数	参数值	参数	参数值
额定功率/kw	1.87	额定电压/V	380
额定频率/Hz	50	额定电流/A	3.55
额定转速/(r · min ⁻¹)	1 450	极对数	2
定子电阻/Ω	3.064	转子电阻/Ω	1.881
定子电感/H	0.239 7	转子电感/H	0.239 7
互感/H	0.230 11	转动惯量/(kg · m ²)	0.02

2 异步电机转速控制系统设计

异步电机转速控制系统的原理设计如图 2 所示。控制原理为根据异步电机矢量控制原理, 将模型输出的定子三相电流 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 经过 Clarke 变化和 Park 变换后转换为 dq 坐标轴上的电流 i_{ds} 和 i_{qs} , 此时将异步电机近似为直流电机进行控制分析, 其中 i_{ds} 影响异步电机的转子磁链, i_{qs} 影响异步电机的转矩。根据设定磁链与设定转速以及异步电机的实际

转速,经过对应的模块后可以得到调节电流 i_d^* 和 i_q^* ; 经过 Park 逆变换与 Clarke 逆变化后得到调节电流 $I_a、I_b、I_c$, 将调节电流 $I_a、I_b、I_c$ 与三相异步电机定

子电流 $i_{sa}、i_{sb}、i_{sc}$ 发送给 PWM 发生器,就会输出一个 g 信号给逆变器,用于调节电压,从而实现电机转速的调整。

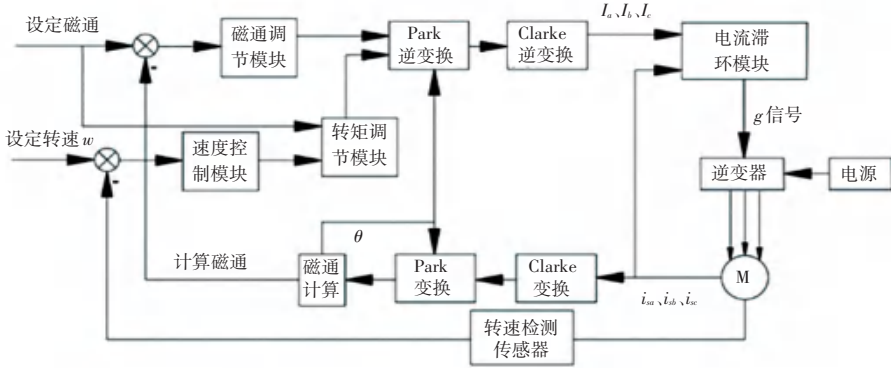


图 2 异步电机控制原理图

Fig. 2 Schematic diagram of asynchronous motor control

根据原理图,在 Simulink 中搭建的异步电机控制系统仿真设计如图 3 所示。由图 3 可知,主要组

成部分有电源控制模块、异步电机、磁通和角度测量模块、电机转速控制模块和信号触发模块。

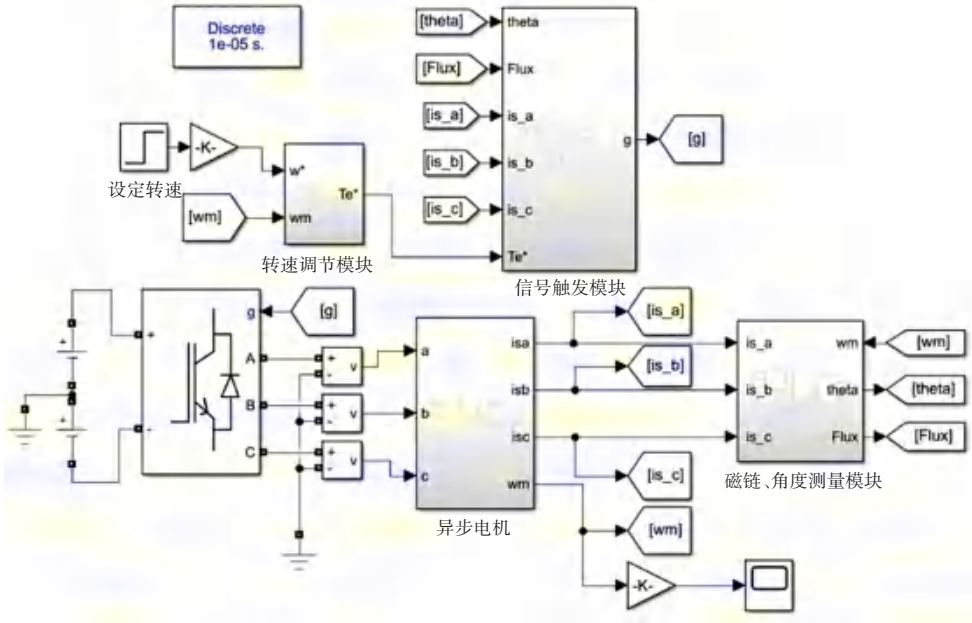


图 3 异步电机转速控制仿真模型图

Fig. 3 Simulation model diagram of asynchronous motor speed control

2.1 转速调节模块

在异步电机转速调节模块中,设计的控制参数自整定的电机转速控制系统原理如图 4 所示。

根据原理图可知,控制器将被控对象的实际值 y 与系统给定的参考值 r 的偏差 e 以及偏差变化率 ec 作为 2 个输入量,通过模糊控制器后得到 3 个控制参数的增量 $\Delta k_p、\Delta k_i、\Delta k_d$, 分别对 PID 的 3 个控制参数 $k_p、k_i、k_d$ 进行调整,使 PID 控制器的输出控

制量发生改变,进而对被控对象做出调整,最终实现被控对象的实时控制。记 $k_p、k_i、k_d$ 分别为 PID 控制器的实际值, $k'_p、k'_i、k'_d$ 为 PID 控制器的初始设定值, 则会有如下关系式:

$$\begin{cases} k_p = k'_p + \Delta k_p \\ k_i = k'_i + \Delta k_i \\ k_d = k'_d + \Delta k_d \end{cases} \quad (5)$$

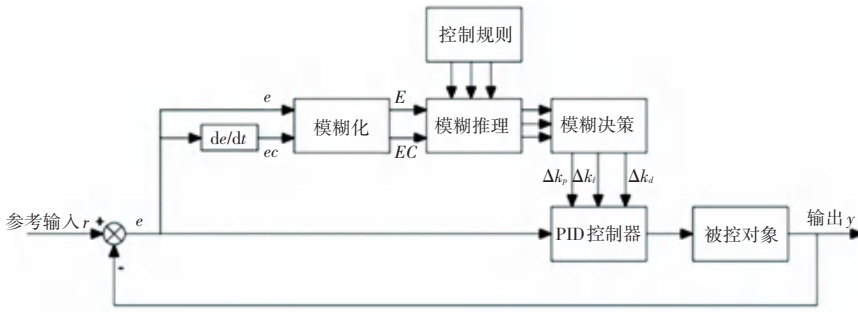


图 4 控制参数自整定的 PID 控制原理图

Fig. 4 PID control schematic diagram with self tuning control parameters

根据本文控制系统的实际需要,对偏差 e 以及偏差变化率 ec 以及 PID 控制参数的修正量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的模糊子集及其量化论域定义如下。

e 、 ec 和 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的模糊子集为: { 负大 (NL)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (ZE)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PL) }; e 和 ec 的论域为: $[-6, 6]$; Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的论域为 $[-3, 3]$ 。

在实际工作过程中,电机的最高转速为 1 450 r/min,模糊控制中 Δk_p 的实际输出范围为 $[-0.5, 0.5]$, Δk_i 的实际输出范围为 $[-0.1, 0.1]$, Δk_d 的实际输出范围为 $[-0.05, 0.05]$;因此,设计的控制系统中,量化因子为 0.002,比例因子分别为 1/12、1/60 和 1/120。

模糊控制的核心是模糊规则表的建立,这是生产工人长期的操作和以往工作经验总结得出的^[8]。在电机转速调节模块中,当转速偏差较大时,控制量应尽可能使偏差快速减小;当偏差较小时,控制量应在消除偏差的基础上尽可能地提高系统的稳态性能,防止系统发生超调或者振荡^[9],由此建立 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 模糊规则表见表 2。

表 2 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 模糊规则表
Table 2 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d fuzzy rules table

E	EC						
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PL	PL	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NL
PL	ZE	ZE	NM	NM	NM	NL	NL

转速调节模块结构如图 5 所示,内部参数见表 3。

表 3 自适应模糊 PID 控制参数表

Table 3 Adaptive fuzzy PID control parameters table

参数	参数值	参数	参数值
k_p	12	k_i	2.98
k_d	0.18	k_e	0.002
k_{ec}	0.002	k_{kd}	1/12
k_{kp}	1/60	k_{ki}	1/120

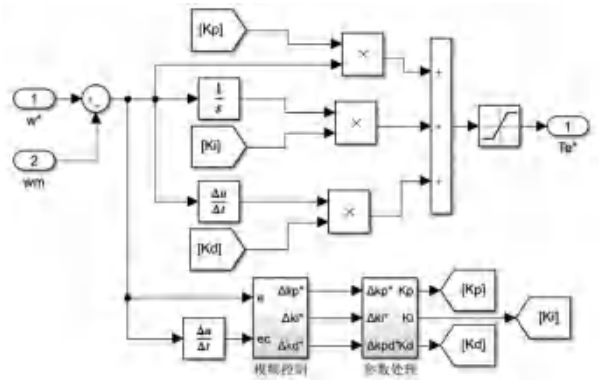


图 5 自适应模糊 PID 控制仿真模型图

Fig. 5 Adaptive fuzzy PID control simulation model diagram

2.2 磁链角度测量模块

通过三相异步电机的三相定子电流 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 经过 Clarke 变换、Park 变换以及磁通计算模块后,输出 qd 坐标轴的旋转角度以及三相异步电机的工作磁通量。其内部结构和磁链角度计算模块如图 6 和图 7 所示。

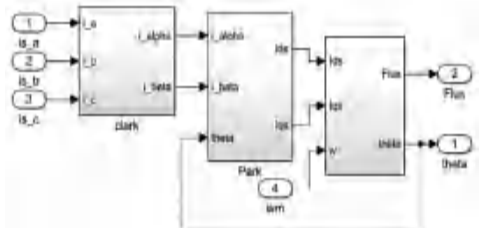


图 6 角度测量模块结构图

Fig. 6 Structural diagram of angle measurement module

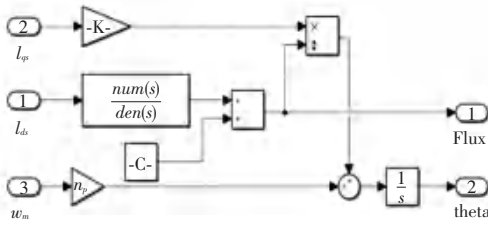


图7 磁链、角位移测量模块

Fig. 7 Magnetic flux and angular displacement measurement module

2.3 信号触发模块

根据异步电机工作时的三相定子电流 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 和测量角度以及测量磁链,经过处理后得到逆变器的控制信号。内部的主要组成模块有坐标系变换模块、 q 轴调整电流计算模块和电流滞环模块;各模块的内部结构如图8~图10所示。

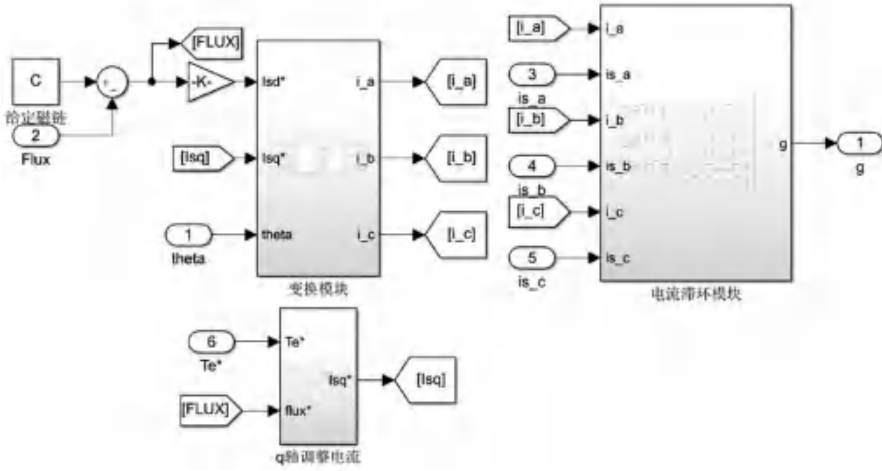


图8 信号处理模块模型组成图

Fig. 8 Composition diagram of signal processing module model

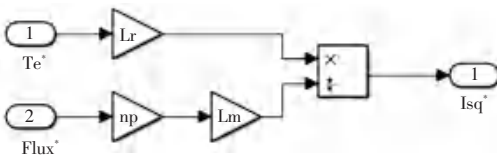


图9 q轴调整电流

Fig. 9 q-axis adjustment current

外部扰动和工作负载变化时三种情况,得到的仿真结果如图11~图13所示。

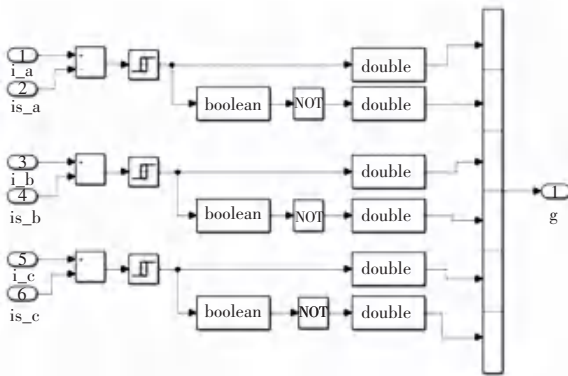


图10 电流滞环模块

Fig. 10 Current hysteresis module

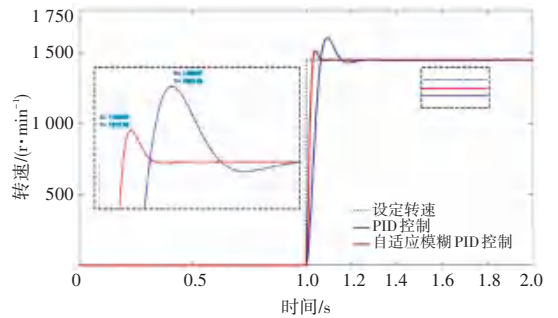


图11 2种控制方式仿真对比图

Fig. 11 Simulation comparison diagram of two control methods

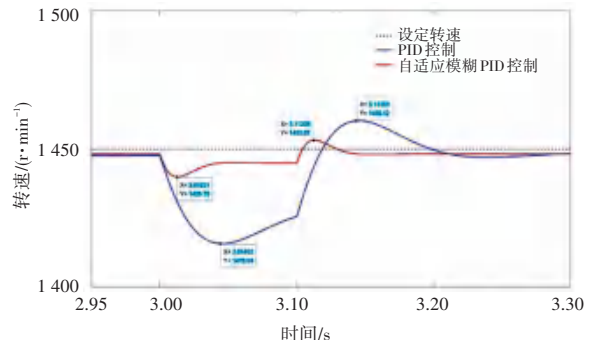


图12 增加扰动后2种控制方式仿真图

Fig. 12 Simulation diagram of two control methods after disturbance

3 系统仿真分析

为了验证设计的转速控制系统的可行性,在 Matlab/Simulink 中与传统的 PID 控制进行对比。分别仿真了设定转速 1 450 r/min、在 3.0~3.1 s 增加

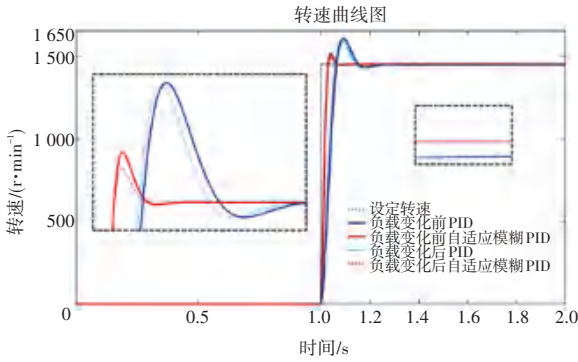


图 13 2 种控制方式在负载变化前后的仿真结果

Fig. 13 Simulation results of two control methods before and after load changes

从图 11 中可以得出,自适应模糊 PID 控制下系统的上升时间 $t_{r1} = 0.03$ s,超调量 $\sigma_1 = 4.4\%$,系统的调节时间为 $t_{s1} = 0.1$ s,系统的稳态误差为 2 r/min;传统 PID 控制下系统的上升时间 $t_{r2} = 0.06$ s,超调量 $\sigma_2 = 10.9\%$,系统的调节时间为 $t_{s2} = 0.4$ s,系统的稳态误差为 3 r/min;通过对比发现自适应模糊 PID 控制方式比传统 PID 控制方式响应更快,控制更准确,稳态误差更小。从图 12 中可以得出,在系统受到外部扰动时,自适应模糊 PID 控制系统的扰动调节时间比传统 PID 控制系统更短,转速波动幅度更小,系统的抗干扰能力更强。从图 13 中可以得出,传统 PID 控制方式与模糊自适应 PID 控制方式在系统负载变化前后都能使系统保持稳定,且负载减小时系统的性能会更加优秀。对 2 种控制方式的仿真结果对比分析,可以得出自适应模糊 PID 控制比传统 PID 控制的系统性能更好。

4 结束语

本文通过结合传统 PID 控制与模糊控制的优点,设计多功能木质板材生产线上使用的异步电机转速控制系统。仿真结果表明设计系统的动态性能、稳定性和鲁棒性上都有明显的提升,能够满足生产线的工艺控制需求,减小在生产过程中电机的转速波动,有利于降低能耗,同时也可以提高生产效率。

参考文献

- [1] 韩国强. 工业过程控制技术展望[J]. 中国科技信息, 2016(9): 123.
- [2] 张洪凯, 姜明明. 基于 PID 控制与模糊 PID 控制的比较[J]. 轻工科技, 2021, 37(11): 71-73.
- [3] 陈和洲. 模糊 PID 控制在工业过程控制中的应用[J]. 无线互联科技, 2022, 19(18): 43-45.
- [4] 孙灵芳, 董学曼, 姜其锋. 模糊控制的现状与工程应用关键问题研究[J]. 化工自动化及仪表, 2016, 43(1): 1-5.
- [5] ZHONG Guoliang, WANG Changming, DOU Weiqiang. Fuzzy adaptive PID fast terminal sliding mode controller for a redundant manipulator [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 159: 107577.
- [6] SUNDARAM A, SUNDARAM A, ROMINE P. Design of fuzzy-Pid with Landsman Converter (LC) fed BLDC drive using IFOC controller [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 925(1): 012021.
- [7] 宋文祥, 乐胜康, 吴晓新, 等. 一种改进的异步电机模型预测直接转矩控制方法[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(6): 861-876.
- [8] 胡茹. 浅谈模糊控制原理及应用[J]. 科技风, 2019(2): 19-20.
- [9] 段兴尧. 基于模糊控制实现采煤机的自动化调速控制[J]. 机械管理开发, 2022, 37(10): 100-102.