DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.81025 [文章编号] 1003-5788(2024)07-0074-07

基于 STM32 的茶叶揉捻机揉捻桶转速模糊 PID 设计

Fuzzy PID design for rotating speed of rolling drum of tea twisting machine based on STM32

何宇驰 陈永乐 贺 良 吴瑞梅 凌学龙 熊爱华

HE Yuchi CHEN Yongle HE Liang WU Ruimei LING Xuelong XIONG Aihua

(江西农业大学工学院,江西 南昌 330045)

(*College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi* 330045, *China*)

摘要:[**目的**]满足茶叶揉捻时揉捻桶转速恒定可调及揉捻桶恒速转动的要求。[**方法**]以 6CR-55 型单柱式揉捻机为研究对象,基于 STM32 单片机,利用模糊控制算法和 PWM 闭环控制方法,对揉捻桶转速进行稳定控制研究,建立揉捻桶转速控制系统数学模型,并采用 MATLAB 进行无校正、PID 和模糊 PID 算法控制仿真试验。[**结果**]相比于无校正控制和 PID 控制,模糊 PID 转速控制系统输出转速更稳定精确,抗干扰能力更强,其转速误差控制在 3 r/min 以内。[**结论**]采用模糊 PID 控制方法可满足茶叶揉捻时揉捻桶转速恒定可调的要求,从而提高茶叶成条率和细胞破损率。

关键词:模糊 PID;STM32;茶叶;揉捻桶;转速恒定控制;MATLAB 仿真

Abstract: [**Objective**] To meet the requirements of constant and adjustable rotation speed of rolling barrel and constant rotation speed of rolling barrel when tea is rolled. [**Methods**] The 6CR-55 single-column disc twisting machine was used as the research object in this paper. Fuzzy control algorithm and PWM closed-loop control method were investigated to study the stable control of rotating speed of rolling drum, and established the mathematical model of rotating speed control system of rolling drum based on the STM32 single-chip microcontroller. The simulation experiments of uncorrected, PID and fuzzy PID algorithm control system were carried out by MATLAB. [**Results**] Compared with uncorrected control and PID control, the output speed of the fuzzy PID speed control system was more stable and accurate, and the anti-interference ability was stronger. The speed error was controlled within 3 r/min. [**Conclusion**] The fuzzy PID control method can meet the requirement for the constant and adjustable rotating speed of the rolling drum during tea rolling, and improve the rate of tea forming and cell breakage.

Keywords: fuzzy PID; STM32; tea; rolling drum; constant speed control; MATLAB simulation

揉捻是茶叶初加工的一道关键工序,通过揉捻工艺,破坏鲜茶叶细胞,揉出茶汁,茶汁附着在叶表上,有利于冲泡耐泡,并使茶叶初步定型,卷成条状,提高茶叶品质。其中揉捻桶转速是影响茶叶品质的重要因素,现代制茶工艺要求揉捻过程中揉捻桶的转速精确到恒定值,而对于不同茶叶品种、不同季节、不同采摘时间的鲜茶叶,因其原材料质地不同,揉捻时转速要求也不同,需遵循“转速恒定可调”原则[1],以减少揉捻过程中的碎茶率。

而目前茶机行业中,揉捻机由三相电机驱动揉捻桶转动,其转速不可调节,由于存在供电电压波动不稳定、控制器出现故障或者信号干扰、机械结构有磨损或负载不均匀等问题,致使揉捻桶转速上下波动严重,导致碎茶率高,影响茶叶品质。赵进等[2]利用 STM32 单片机,开发了一种茶叶揉捻机组的自动揉捻控制系统,对加压进行可视化控制,解决了揉捻盖加压问题,同时以 4 台盘式揉捻机与多台送料设备结合,解决了多台揉捻机自动入料及出料问题,但无法实现揉捻桶转速恒定可调的需求。模糊控制器作为一种较为容易理解的非线性控制器[3],被应用于茶叶初加工装置智能控制等方面。曹成茂等[4]提出了一种基于模糊控制的茶叶杀青机,实现了茶叶杀

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:31460315);江西省重点研发计划项目(编号:2017ACF6004);江西省教育厅重点项目(编号:202060)

作者简介:何宇驰,男,江西农业大学在读硕士研究生。

通信作者:熊爱华(1974—),男,江西农业大学讲师,博士。E-mail:aihuaok2004@163.com

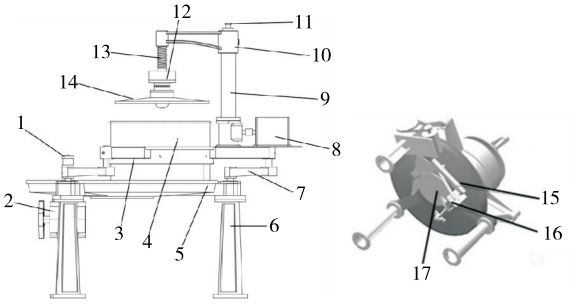
收稿日期:2023-10-16 **改回日期:**2024-04-18

青的恒温控制;高育森等[5]利用自适应模糊 PID 算法实现了温度能够稳定保持在(80±2) ℃,有效提升了茶叶烘焙品质。但有关揉桶转速精确恒定控制的研究尚未见报道。唐伟等[6]针对无刷直流电机转速的闭环控制系统中存在传感器噪声等高频信号和指令、干扰等低频信号,导致匀速转动过程中速度波动的问题,提出了一种模糊自整定的小波多分辨 PID 控制方法,该方法能够更好地处理含噪信号,其响应快、抗干扰能力强;吴斌等[7]针对电动汽车换挡过程的转速控制阶段存在控制器通信时延而导致的控制精度低、稳定性差等问题,建立了带有随机时延的驱动电机转速闭环控制数学模型,设计了一种基于模糊分数阶 PID 的驱动电机转速控制算法,该方法可降低系统的时延影响,其响应与防超调性能有所提高。

研究拟针对实验室改进的 6CR-55 型单柱式揉捻机进行改进,将 PID 算法结合模糊控制理论应用于茶叶揉捻机的揉捻桶转速控制,系统采用 STM32 控制器,在上位机上显示当前揉捻桶转速,与设置的转速值进行比较,使用模糊 PID 控制调整揉捻桶转速,并利用 MATLAB 对建立传递函数模型的转速控制系统进行仿真分析,探讨模糊 PID 控制在茶叶揉捻时精准控制转速的优越性,以期为智能数字化茶叶揉捻装置开发提供研究基础。

1　茶叶揉捻机整体结构及工作原理

茶叶揉捻机整体结构如图 1 所示,该装置在 6CR-55 型单柱式揉捻机基础上进行结构改进,实现实时自动加压、自动揉捻、自动卸料等功能,其整体结构由揉捻轴、揉捻盖、连接法兰盘、压力传感器、测速传感器、揉捻桶、桶毂、揉捻盘、卸料底盘、横臂梁、脚支座、揉捻曲柄、主电机、自动加压机构、自动卸料机构等组成,其中桶毂固定在揉捻桶的外侧,曲柄与桶毂连接,主电机驱动曲柄转动,从而带动揉捻桶做圆周转动。



(a) 揉捻机主视图　　(b) 揉捻机底盘

1. 测速传感器　2. 主电机　3. 桶毂　4. 揉捻桶　5. 揉捻盘　6. 脚支柱　7. 曲柄　8. 加压电机　9. 支柱　10. 横臂梁　11. 接触器　12. 压力传感器　13. 揉捻轴　14. 揉捻盘　15. 摆动导杆机构　16. 卸料电机　17. 卸料底盘

图 1　揉捻机结构图

Figure 1　Structure diagram of rolling machine

2　揉捻桶转速模糊控制系统设计

2.1　揉捻桶转速模糊控制系统原理

模糊控制器是通过制定模糊规则对 PID 的 K_p、K_i 和 K_d 进行实时优化,与传统 PID 算法相比,该算法可在控制系统在线模式下调整 PID 参数[8-9]。揉捻转速模糊控制系统结构由 STM32 控制器、变频器、人机交互触摸屏、三相交流异步电机、测速反馈模块等组成,其中测速反馈模块由测速传感器和 STM32 的 D/A 转换模块组成(图 2)。其工作原理:STM32 输出揉捻桶转速的设定值,由变频器调整揉捻桶转速,测速传感器测得揉捻桶的实际转速后,经 D/A 转换模块,将实测转速模拟量转化为数字量后,由 STM32 读取,STM32 对该实测值进行模糊、量化及查表操作,计算出该转速和设定转速的偏差、设定转速变化率与实际变化率的偏差,将这些偏差的控制量 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 更新到 PID 控制算法中,得到转速的偏差值,STM32 将该偏差值经过 A/D 转换后输出到变频器,通过变频器来调节主电机转速,实现电机的精确恒转速运行。

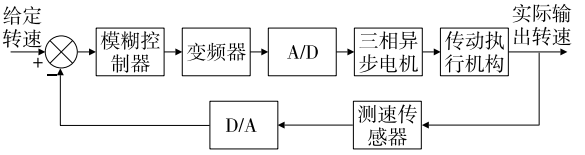


图 2　揉捻桶转速模糊控制系统图

Figure 2　Diagram of fuzzy control system for twisting barrel speed

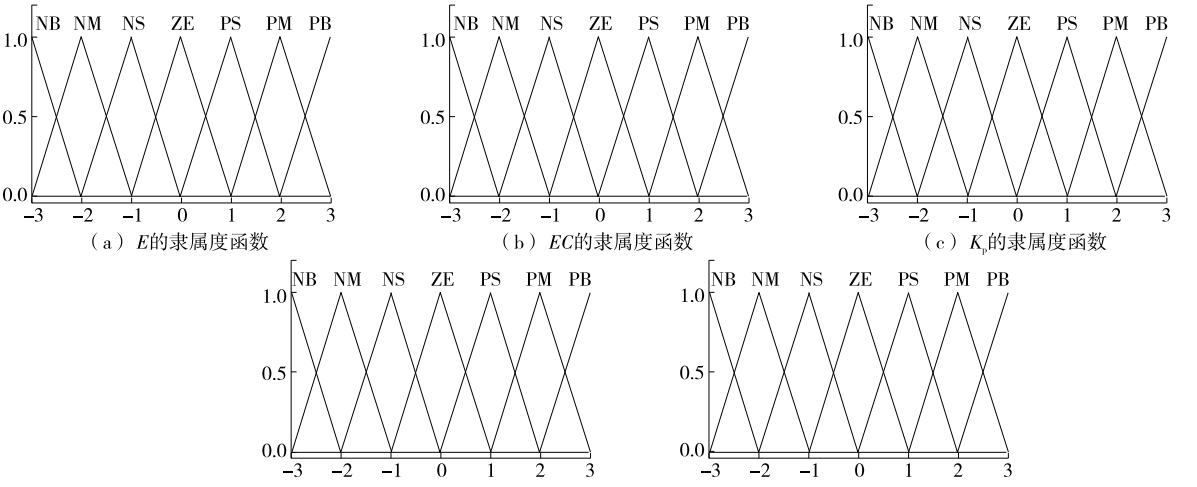
2.2　模糊 PID 控制设计

揉捻桶转速控制系统的 Fuzzy-PID 控制器主要包括输入量模糊化处理、模糊控制规则建立、确定量化因子和比例因子以及解模糊处理。

(1) 输入量模糊化处理:在揉捻桶转速模糊控制系统中,选定控制器中输入的揉捻桶转速与实际转速的误差 e 和误差变化率 ec 作为输入量。由测速传感器在揉捻机工作时对揉捻桶转速进行采样,转速误差为 −2～2 r/min,则设置揉捻转速误差语言变量 E 的论域区间为[−2,2],转速误差变化率 EC 的论域区间为[−4,4]。将比例系数 K_p、积分系数 K_i、微分系数 K_d 的在线修正值 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 作为模糊控制器的输出变量[10],经模糊规则推理得到模糊集合,设模糊控制器的 3 个输出量 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 的论域区间均为[−2,2]。将所有变量离散化处理且统一规定模糊论域为{−3,−2,−1,0,1,2,3},设定 7 个模糊子集:NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)[11]。隶属函数不同,对控制特性的影响也不同,三角形隶属度函数计算工作量小,输入值变化时灵敏度大,存在较小偏差时能迅速产生相应的控制信号,为便于工程实施,实际应用中通常采用三角形隶属度函数[12]。E、EC、K_p、K_i、K_d 隶属度函

数如图 3 所示。

（2）模糊控制规则建立：模糊控制规则需要完整地反映出模糊控制器在控制过程中出现的各种情况，是整个模糊控制器的核心[12]。以制茶师揉捻茶叶时揉捻桶转速的经验以及一些有关资料为依据，根据量化等级和模糊规则可以设计模糊控制规则表（见表 1）[13]。



（a）E的隶属度函数　（b）EC的隶属度函数　（c）K_p的隶属度函数

（d）K_i的隶属度函数　（e）K_d的隶属度函数

图 3　E、EC、K_p、K_i、K_d 隶属度函数图

Figure 3　E, EC, K_p, K_i and K_d membership function diagram

表 1　$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$ 模糊规则表

Table 1　$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$ fuzzy rules table

E	EC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZE/ZE/NM	ZE/ZE/PB
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZE/ZE/NS	NS/NS/PS
NS	PM/NB/ZE	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZE/ZE/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZE
ZE	PM/PM/ZE	PM/NS/NS	PS/NS/NS	ZE/ZE/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZE
PS	PS/NM/ZE	PS/NS/ZE	ZE/ZE/ZE	NS/PS/ZE	NS/PS/ZE	NM/PM/ZE	NM/PB/ZE
PM	PS/ZE/PB	ZE/ZE/PS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZE/ZE/PB	ZE/ZE/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

（3）确定量化因子和比例因子：E、EC、K_p、K_i、K_d 并不能直接作为模糊运算的输入变量，为了将输出信号由模糊量变为精确量，需乘以相应的比例因子（用 k 表示），误差的量化因子 k_e 和误差变化率的量化因子 k_{ec} 关系为：

$$k_e=\frac{n}{x_e}, \tag{1}$$

式中：

n——模糊集论域中的元素；

x_e——基本论域中的元素；

k_e——误差的量化因子。

输出量的比例因子 k_{op}、k_{oi}、k_{od} 计算式为：

$$k_u=\frac{p}{u}, \tag{2}$$

式中：

p——模糊集论域中的元素；

u——基本论域中的元素；

k_u——输出量的比例因子。

由上述计算得到各量化因子及比例因子的值为：$k_e=1.5$，$k_{ec}=0.75$，k_{op}、k_{oi}、k_{od} 均为 1.5。

（4）解模糊处理：采用重心法解模糊。重心法是取隶属度函数曲线与横坐标围成面积的重心为模糊推理的最终输出值，其表达式为：

$$Z_o=\frac{\int\mu_c(z_i)\cdot z_i\mathrm{d}v}{\int\mu_c(z_i)\mathrm{d}v}, \tag{3}$$

式中：

Z_o——输出量解模糊后得到的精确值;

z_i——模糊论域上的值;

$\mu_c(z_i)$——z_i 的隶属度函数。

重心法的输出端会对输入信号的微小变化产生反应,从而获得更加准确的控制量,根据模糊子集隶属度函数和各控制参数的模糊控制模型定义,模糊控制器以误差和误差变化率作为输入,利用模糊规则对 PID 控制器的参数进行整定,推理计算出 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d,结果见表 2。

表 2　$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$ 查询表

Table 2　$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$ inquiry table

E	EC						
	−3	−2	−1	0	1	2	3
−3	0.7/−2.2/2.8	0/−2.0/2.6	0/−2.0/2.0	0/−2.0/2.0	0/−1.3/1.3	0.2/−0.7/0.6	1.2/0/0
−2	0/−2.0/2.6	−0.7/−1.3/2.6	−0.7/−1.3/2.0	−0.7/−1.4/1.3	−0.7/−0.6/0.6	0.2/0/0	−0.3/0.6/−0.6
−1	−1.3/−2.0/2.0	−1.3/−1.3/2	−1.3/−0.6/1.3	−1.3/−0.3/0.6	−0.7/0/0	0/0.6/−0.6	−0.7/0.6/−1.3
0	−2.2/−0.7/0.6	−2.0/−1.3/1.3	−1.3/−0.6/0.6	−0.7/0/0	−0.7/0.6/−0.6	0/1.3/−1.3	0/1.3/−2.0
1	−2.8/−0.7/0.6	−2.7/−0.7/0.6	−1.3/0/0	0/0.6/−0.6	0/0.6/−0.6	0/1.3/−1.3	0.7/2/−2.0
2	−2.8/−0.7/0.6	−2.7/0/0	−1.3/0.6/−0.6	−0.7/1.3/−1.3	−0.7/1.3/−1.3	0/1.3/−1.3	0.7/2.0/−2.0
3	−2.7/0/0	−2.7/0.7/0.6	−2.0/1.3/−1.3	−1.3/2.0/−2.0	−0.7/2.0/−2.0	0/2.0/−2.0	0.7/2.2/−2

2.3　系统模型建立

为得出模型的具体参数,对揉捻机进行揉捻试验,以获取揉捻桶的转速曲线,设定揉捻桶转速为 50 r/min,对揉捻桶的转速值进行时间为 16 s 的不间断记录,直到揉捻桶转速达到动态稳定,即揉捻桶转速控制在一定范围内,得出揉捻桶转速拟合后的响应曲线如图 5 所示。由图 5 可得到,转速上升时间 $t_r=4.12$ s,转速的峰值时间 $t_p=4.57$ s。

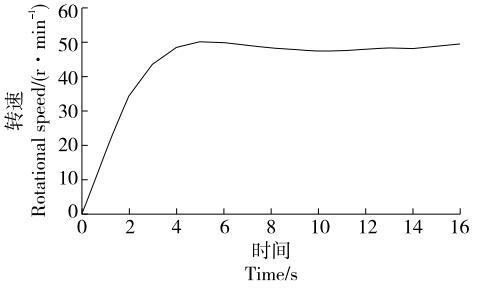


图 4　揉桶转速拟合曲线

Figure 4　Kneading barrel speed fitting curve

揉捻桶转速控制系统的执行机构由三相异步电机驱动,可通过 STM32 控制器调节变频器输出的频率来改变电机转速。对揉捻桶进行调速时,变频器频率缓慢变化到设定值,因此对三相异步电机的控制环节可近似等效为时间常数 T_1 的一阶惯性环节,该环节传递函数可以描述为:

$$G_1(s)=\frac{n_1}{f_1}=\frac{k_1}{T_1 s+1}, \tag{4}$$

式中:

$G_1(s)$——变频器控制三相异步电机转速的系统传递函数;

n_1——三相异步电机转速,rad/s;

f_1——变频器输入频率,Hz;

T_1——系统惯性时间常数;

k_1——系统增益。

三相异步电机作为揉捻桶驱动机构,其频率与转子速度的传递函数可用惯性环节描述为:

$$G_2(s)=\frac{\omega_0(s)}{\omega_1(s)}=\frac{k_2}{T_2 s+1}, \tag{5}$$

式中:

$G_2(s)$——变频器控制三相异步电机转速的系统传递函数;

$\omega_0(s)$——转子电气角度偏差的 Laplace 变换;

$\omega_1(s)$——定子电源频率的 Laplace 变换;

T_2——该环节惯性时间常数;

k_2——系统增益。

通常可理想化地将转速控制系统的控制器及监测元件和传动执行机构的数学模型简化为一个比例环节:

$$G_3(s)=k_3, \tag{6}$$

式中:

$G_3(s)$——控制器、监测元件及传动机构组成的系统传递函数;

k_3——系统增益。

系统中的三相异步电机转速 $n_2(t)$与揉桶转速 $n_3(t)$的转速比 $n_2(t)=k_4\times n_3(t)$,该环节表示为:

$$G_4(s)=k_4, \tag{7}$$

式中:

$G_4(s)$——三相异步电机控制揉桶的系统传递函数;

k_4——系统增益。

因此,整个揉捻转速控制系统的模型可以表示为3 个

环节的串联模型，其传递函数由式(4)～式(7)得出：

$$W(s)=G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)=\frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)}, \tag{8}$$

式中：

$W(s)$——整个揉捻转速控制系统的传递函数；

$G_n(s)$——各环节的系统传递函数，$n=1,2,3,4$；

k——系统增益，$k=k_1k_2k_3k_4$；

T_1、T_2——系统惯性环节时间常数。

设系统的输入信号 $x_i(t)$ 为单位阶跃信号 $1(t)$，对应输出响应为：

$$X_o(s)=W(s)L[x_i(t)], \tag{9}$$

式中：

$W(s)$——揉捻转速控制系统传递函数；

$x_i(t)$——系统输入信号；

$X_o(s)$——系统输出响应。

由于该二阶系统为稳定系统，即 $0<\xi<1$，此时时域输出为：

$$x_o(t)=L^{-1}[X_o(s)], \tag{10}$$

式中：

$X_o(s)$——系统频域输出；

$x_o(t)$——系统时域输出。

系统上升时间关系为：

$$x_o(t_r)=1, \tag{11}$$

式中：

t_r——系统上升时间，s；

$x_o(t_r)$——系统上升时间输出响应。

系统峰值时间关系为：

$$\frac{dx_o(t)}{dt}=0, \tag{12}$$

式中：

$x_o(t)$——系统输出响应；

t——系统当前时刻。

系统峰值时间与有阻尼振荡频率关系为：

$$t_p=\frac{\pi}{\omega_d}, \tag{13}$$

式中：

ω_d——有阻尼振荡频率，Hz；

t_p——系统峰值时间，s；

π——圆周率。

系统阻尼振荡频率和自然振荡频率关系为：

$$\omega_d=\omega_n\sqrt{1-\xi^2}, \tag{14}$$

式中：

ω_d——有阻尼系统振荡频率，Hz；

ω_n——自然振荡频率，Hz；

ξ——阻尼系数。

根据式(8)～式(14)和该系统的上升时间、峰值时间，计算出该系统阻尼系数 $\xi=0.236$，自然振荡频率 $\omega_n=0.707$，放大系数 $k=0.5$。求得该系统的数学模型为：

$$W(s)=\frac{25}{50s^2+15s+1}。 \tag{15}$$

3 系统仿真及测试结果分析

3.1 系统仿真模型

利用 Matlab 中的 Simulink 和 Fuzzy 工具箱对上述数学模型进行建模仿真，分别模拟无噪声干扰和有噪声干扰两种情况下控制系统的仿真分析，其中，在无噪声干扰的输入信号情况下，输入为阶跃信号，对无校正控制、PID 控制和模糊 PID 控制 3 种控制算法的输出响应进行仿真分析；在有噪声干扰的输入信号情况下，20 s 时加入单位阶跃扰动信号来模拟外部环境干扰，其他控制系统配比不变，进行系统的抗干扰分析。为了更直观对比该系统的无校正控制、PID 控制和模糊 PID 控制的性能，将上述控制模型进行组合，各自控制系统的输出显示在同一示波器上。无噪声干扰情况下和有噪声干扰情况下，控制系统的无校正、PID 和模糊 PID 仿真模型如图 5 所示。

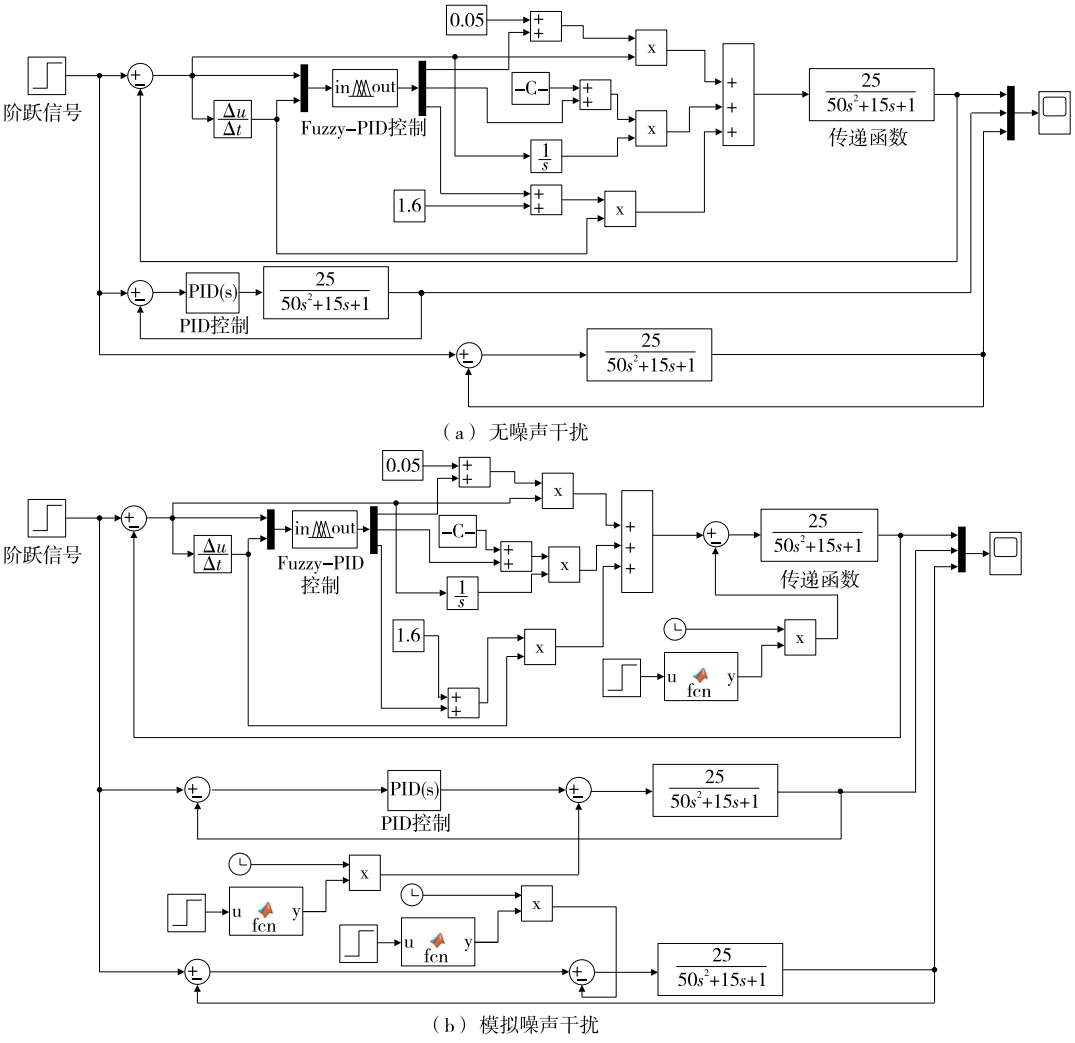
3.2 仿真结果分析

设定仿真固定步长为 0.01 s，仿真时间为 30 s，运行以上两种仿真模型，示波器显示的输出响应结果如图 6 所示。由图 6(a)可知，在无噪声干扰情况下，无校正、PID 控制和模糊 PID 控制的系统超调量分别约为 39.5%，30.0%，6.5%，调节时间分别约为 19，18，6 s，响应速度分别约为 4.5，4.0，3.5 s，稳态误差分别约为 2.00%，0.15%，0.06%。对比无校正、PID 控制和模糊 PID 控制 3 种控制方法，模糊 PID 控制的响应速度(3.5 s)最快、超调量(6.5%)最小以及调节时间最短(6 s)，系统精度也最高(稳态误差 0.06%)。

当仿真时间为 20 s 时，3 种控制系统均趋于稳定状态，此时添加一个单位阶跃信号来模拟外部环境出现噪声干扰的情况，运行仿真模型。由图 6(b)可知，在输入噪音干扰时，各控制系统的状态变得不稳定，当各系统重新恢复至稳定状态时，采用无校正、PID 和模糊 PID 控制的系统超调量分别约为 5.5%，3.9%，1.0%，稳态误差分别约为 11.67%，3.89%，1.87%，系统调节时间分别约为 13.61，10.98，1.85 s。综上，模糊 PID 的系统抗干扰能力最优。

3.3 系统测试

为判断所设计的模糊 PID 控制系统是否满足茶叶揉捻时揉捻桶转速控制要求，对茶叶揉捻机样机进行揉捻桶转速实际测试。将 10 kg 新鲜茶叶放入揉捻桶内，设定揉捻桶转速为 50 r/min，揉捻时间为 5 min，采集样机在

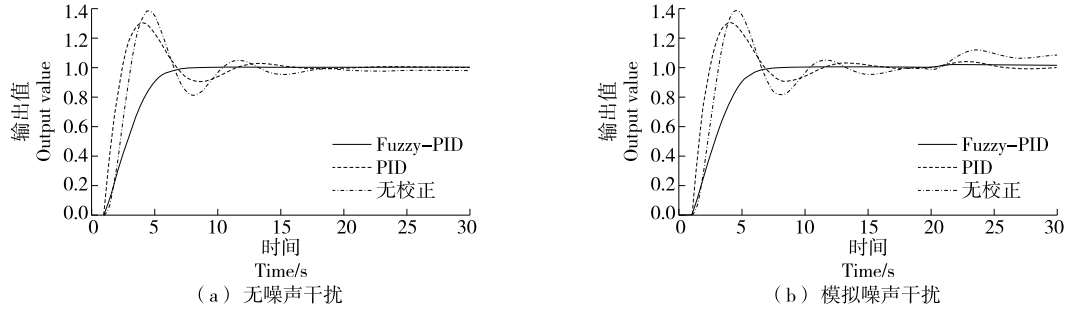


（a）无噪声干扰

（b）模拟噪声干扰

图 5　转速控制系统仿真模型图

Figure 5　Speed control system simulation model diagram



（a）无噪声干扰　　（b）模拟噪声干扰

图 6　转速控制系统输出响应曲线

Figure 6　Output response curve of speed control system

揉捻过程中揉捻桶转速数据，将该数据进行拟合后得到转速变化曲线如图 7 所示。经过样机实际测试得知，揉捻桶转速约在 5 s 达到设定值，随后在所设定值上下波动，系统超调量最大值为 5.2%，转速误差最大值≤3 r/min，完全符合茶叶揉捻时揉捻桶转速的要求。

4　结论

根据揉捻桶转速控制系统的工作流程及揉捻设计需求，在揉捻桶转速控制中引入模糊 PID 控制技术，设计了一种茶叶揉捻桶转速控制系统，以实现揉捻过程中揉捻桶的恒转速转动，并采用无校正、PID和模糊PID控制

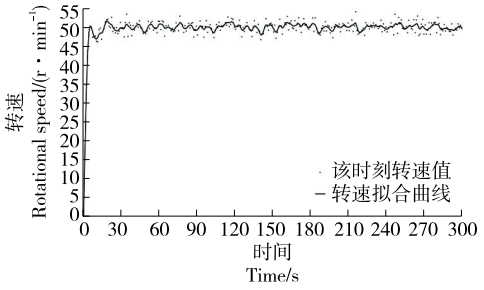


图 7 揉捻机样机及转速测试曲线图

Figure 7 Twisting machine prototype and speed test curve diagram

3 种系统进行仿真试验。结果表明，在茶叶揉捻桶转速控制中，引入模糊 PID 的系统综合性能最优，且其抗干扰能力最强，满足转速精确恒定控制的要求。后续将进一步研究揉捻过程中的其他因素与揉捻桶转速之间的相互影响关系，提高模型精度。

参考文献

[1] 杨晓平. 茶叶生产与加工机械化[J]. 现代农机, 2012(5): 24-25.
YANG X P. Mechanization of tea production and processing[J]. Modern Agricultural Machinery, 2012(5): 24-25.

[2] 赵进, 张越, 赵丽清, 等. 茶叶揉捻机组自动控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(2): 140-144.
ZHAO J, ZHANG Y, ZHAO L Q, et al. Design of automatic control system for tea disc-roller[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 140-144.

[3] DI S, CHENG C L, PENG S. Robust fuzzy model predictive control for energy management systems in fuel cell vehicles[J]. Elsevier Ltd, 2020, 98: 104364.

[4] 曹成茂, 吴正敏, 梁闪闪, 等. 茶叶杀青机双模糊控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 259-265.
CAO C M, WU Z M, LIANG S S, et al. Design and experiment of double fuzzy control system for tea cylinder water-removing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 259-265.

[5] 高育森, 任金波, 李梅娟, 等. 基于模糊 PID 控制的茶叶炭焙烘焙机设计与试验[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 96-101.
GAO Y S, REN J B, LI M J, et al. Design and test of tea charcoal roasting machine based on fuzzy PID control[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 96-101.

[6] 唐伟, 王立忠, 庄健, 等. 无刷直流电机的模糊自整定 MRPID 转速控制方法研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(15): 1 786-1 792, 1 800.
TANG W, WANG L Z, ZHUANG J, et al. Study on fuzzy self-tuning MRPID control method in rotating speed control of BLDCM[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15): 1 786-1 792, 1 800.

[7] 吴斌, 付鹏. 基于模糊分数阶 PID 的电动汽车换挡过程转速控制[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(10): 1 069-1 077.
WU B, FU P. Rotating speed control of electric vehicle during gear shift process based on fuzzy fractional PID[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(10): 1 069-1 077.

[8] JIN X, CHEN K K, ZHAO Y, et al. Simulation of hydraulic transplanting robot control system based on fuzzy PID controller[J]. Measurement, 2020, 164: 108023.

[9] SOMWANSHI D, BUNDELE M, KUMAR G, et al. Comparison of Fuzzy-PID and PID controller for speed control of DC motor using LabVIEW[J]. Procedia Computer Science, 2019, 152: 252-260.

[10] 任玲, 王宁, 曹卫彬, 等. 番茄钵苗整排取苗手定位的模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 21-30.
REN L, WANG N, CAO W B, et al. Fuzzy PID control of manipulator positioning for taking the whole row seedlings of tomato plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 21-30.

[11] 罗一, 石艳. 基于模糊 PID 控制的窖池温度监控设计[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 85-90.
LUO Y, SHI Y. The environment monitoring system of cellar based on fuzzy PID control[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 85-90.

[12] 姚颍飞, 陈学庚, 纪超, 等. 基于模糊 PID 控制的玉米精量播种机单体驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 12-21.
YAO Y F, CHEN X G, JI C, et al. Design and experiments of the single driver for maize precision seeders based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(6): 12-21.

[13] 张雁, 李彦明, 刘翔鹏, 等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 30-37.
ZHANG Y, LI Y M, LIU X P, et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 30-37.

（上接第 6 页）

[18] ZHANG J, HAN X Z, LI X, et al. Core-shell hybrid liposomal vesicles loaded with panax notoginsenoside: preparation, characterization and protective effects on global cerebral ischemia/reperfusion injury and acute myocardial ischemia in rats[J]. Int J Nanomedicine, 2012, 7: 4 299-4 310.

[19] 周柳莎, 胡香莲, 俞瑜媛, 等. 荞麦糖肽脂质体的制备及其稳定性和缓释研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(4): 119-130.
ZHOU L S, HU X L, YU Y Y, et al. Preparation, stability and sustained release of buckwheat glycopeptide liposomes[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(4): 119-130.

[20] HOANG T, RAMADASS K, LOC T T. Novel drug delivery system based on ginsenoside Rb_1 loaded to chitosan/alginate nanocomposite films[J]. Nanosci Nanotechnol, 2019, 19(6): 3 293-3 300.