

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.12.017

# 基于模糊分数阶 PID 的食品包装机 张力控制系统设计

Design of tension control system of food packaging machine based on  
fuzzy fractional-order PID

胡亚南<sup>1</sup> 李 鑫<sup>1</sup> 霍蛟飞<sup>1</sup> 李明辉<sup>2</sup> 索小娟<sup>3</sup>  
HU Ya-nan<sup>1</sup> LI Xin<sup>1</sup> HUO Jiao-fei<sup>1</sup> LI Ming-hui<sup>2</sup> SUO Xiao-juan<sup>3</sup>

(1. 西京学院, 陕西 西安 710000; 2. 陕西科技大学, 陕西 西安 710021;

3. 郑州铁路职业技术学院, 河南 郑州 450000)

(1. Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710000, China; 2. Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 3. Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, Henan 450000, China)

**摘要:**针对食品包装机袋膜张力较难控制问题,设计了一种模糊分数阶 PID 袋膜张力控制系统。利用专家知识和成熟经验,结合分数阶控制,制定分数阶 PID 5 个参数的控制规则,实现分数阶 PID 参数在线实时整定,提升了袋膜张力控制精度和稳定性。以 PLC 和触摸屏为核心,以 TIA Portal 为开发平台,完成控制系统硬件设计、网络组态、程序设计,实现控制系统升级。仿真结果表明:模糊分数阶 PID 控制器具有响应速度快、模型失配鲁棒性好、抗干扰能力强的优势。该控制系统能够满足包装机袋膜张力控制精度和稳定性需求。

**关键词:**张力控制;模糊控制;分数阶 PID;TIA portal

**Abstract:** Aiming at the problem that the film tension control system of food packaging machine has the characteristics of multi-interference, time-varying and non-linearity, and the traditional PID is difficult control, a fuzzy fractional PID film tension control system is designed. Using expert knowledge and mature experience, combined with fractional order control, the control rules of five parameters of fractional order PID are designed, and the on-line real-time tuning of fractional order PID parameters is realized, which improves the precision and stability of bag film tension control. With PLC and touch screen as the core and TIA portal as the development platform, the hardware design, network configuration and program design of the control system

are completed, and the control system is upgraded. The simulation results show that the fuzzy fractional PID controller has the advantages of fast response speed, good robustness of model mismatch and strong anti-interference ability. The control system can meet the requirements of precision and stability of tension control of packaging machine bag film.

**Keywords:** tension control; fuzzy control; fractional-order PID; TIA portal

在食品包装过程中,若要达到包装袋长精准和袋形外观平整精美,需保证袋膜供送平稳无偏、袋膜张力恒定,然而放膜卷直径非线性变小、包装速度改变、袋膜厚度及摩擦力不均匀等因素影响,从而引起袋膜张力变化<sup>[1]</sup>。袋膜张力过大易引起袋膜变形、断裂、撕拉;袋膜张力过小易引起袋膜起皱、打滑、跑偏,进而影响包装制袋、热封、切断的质量,降低包装袋形质量。因此,袋膜张力精确、稳定是保证包装产品外观质量的关键点。

目前,包装机袋膜张力控制多采用传统 PID 控制,但放膜卷直径随包装时间出现非线性变小现象,且袋膜厚度、表面质量、包装速度等因素影响,难以建立精确数学模型,所以固定参数 PID 控制无法获得较好控制效果。模糊控制依据专家知识和成熟操作经验进行逻辑推理智能控制,具有较强的鲁棒性和复杂控制系统适用性。温玉春等<sup>[2]</sup>针对包装机热封温度控制系统具有时变性、大惯性、非线性特点,设计了具有参数自整定、规则自调整的模糊 PID 控制器,提高了温度控制的响应速度和控制精度;胡汪洋等<sup>[3]</sup>通过建立模糊控制规则,设计了模糊 PID 控制器在线调控拉膜速度与纠偏辊偏移角度,降低

**基金项目:**西京学院科研基金项目(编号:XJ190201);陕西省重点研发计划资助项目(编号:2018-GY042)

**作者简介:**胡亚南(1986—),男,西京学院讲师,硕士。

E-mail: 2664961273@qq.com

**收稿日期:**2020-08-24

了袋膜跑偏位移量,改善了包装袋形质量;胡亚南等<sup>[4]</sup>为提升 3D 打印产品表面质量,利用模糊 PID 控制器提升 3D 打印设备喷头温度控制精度和稳定性,取得了较好效果。由上可知,模糊 PID 控制对非线性、时变性控制系统具有较好的控制效果。

为增强 PID 控制器的灵活性,同时保留传统 PID 优势,在分数阶微积分理论的基础上,设计分数阶 PID 控制器,同时引入模糊控制规则对分数阶 PID 的参数进行在线实时整定,避免 PID 控制参数反复繁琐和盲目性调整,以实现放膜卷力矩的精确调整,提升袋膜张力控制精度和稳定性。

### 1 张力控制系统

如图 1 所示,包装机放膜控制系统由 SIMNENS S7-1200PLC、KP1500 触摸屏、SM1232 模拟量输出模块、SM1231 模拟量输入模块、张力传感器、磁粉制动器等组成。包装过程中,随着包装袋膜消耗,放膜卷直径逐渐变小,放膜卷辊以角速度  $\omega$  旋转必然会导致线速度  $v$  变小,引起袋膜张力变化。由于  $R$  变化为非线性,且张力控制系统干扰因素较多,所以张力平稳、恒定控制较难。张力控制原理为:KP1500 触摸屏设定张力设定值,张力传感器检测袋膜张力信号传送到 S7-1200PLC 控制器进行 A/D 转换并与张力设定值进行比较运算获取张力偏差,控制器依据偏差值进行控制运算并输出控制作用,经 D/A 转换后以励磁电流形式调节磁粉制动器输出转矩,完成袋膜张力闭环控制。

设定袋膜厚度为  $h$ 、线速度为  $v$ 、张力为  $T$ 、宽度为  $b$ 、密度为  $\rho$ 、放膜卷半径为  $R$ 、放膜辊半径为  $R_0$ 、角速度为  $\omega$ 、磁粉制动器力矩为  $M$ 、放膜卷、放膜辊、袋膜的转动惯量分别为  $J$ 、 $J_0$ 、 $J_k$ ,则放膜卷系统的力矩平衡方程为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = M - TR - B_f(t)\omega, \tag{1}$$

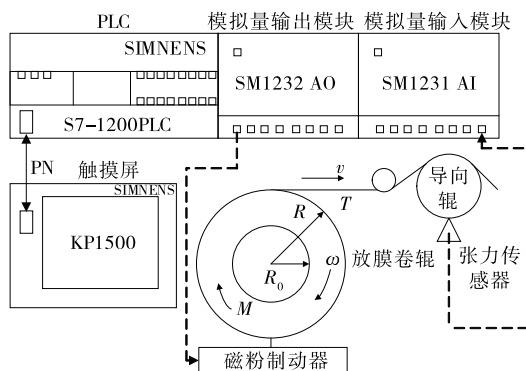


图 1 包装机放膜卷控制示意图

Figure 1 Schematic diagram of film roll control of packaging machine

$$M = \rho\pi b(R^2 - R_0^2), \tag{2}$$

$$J = J_0 + J_k, \tag{3}$$

$$J_k = \int_{R_0}^R Mrdr = \frac{1}{2}M(R^2 - R_0^2), \tag{4}$$

$$ds = hvdt, \tag{5}$$

$$R = \sqrt{R_0 + \frac{16h}{\pi} \int vdv}, \tag{6}$$

式中:

$B_f(t)$ ——阻尼系数,  $(N \cdot s)/m$ ;

$ds$ ——单位时间放膜面积值,  $m^2/s$ ;

$b$ ——袋膜宽度,  $m$ ;

$h$ ——袋膜厚度,  $m$ ;

$v$ ——袋膜移动线速度,  $m/s$ ;

$T$ ——袋膜张力,  $N$ ;

$\rho$ ——袋膜密度,  $kg/m^3$ ;

$R$ ——放膜卷半径,  $m$ ;

$R_0$ ——放膜辊半径,  $m$ ;

$\omega$ ——放膜辊角速度,  $r/s$ ;

$M$ ——磁粉制动器力矩,  $N \cdot m$ ;

$J$ 、 $J_0$ 、 $J_k$ ——放膜卷、放膜辊、袋膜的转动惯量,  $kg \cdot m^2$ 。

将式(2)~(6)代入式(1)中,整理得:

$$T = \frac{M}{R} - \frac{B_f v}{R^2} + \left( \frac{h J_0}{\pi R} - \frac{\rho b h R_0^4}{4 R^4} - \frac{3 \rho b h}{4} \right) + \left( \frac{\rho b \pi R_0^4}{4 R^2} - \rho b \pi R_0^4 - \frac{J_0}{R^2} \right) \frac{dv}{dt}. \tag{7}$$

由式(7)可知,食品包装过程中,袋膜张力与卷径、包装速度、加速度及制动力矩有关,通过调整磁粉制动器力矩,可实现不同卷径和包装速度条件下张力恒定。

### 2 模糊分数阶 PID 控制设计

#### 2.1 PID 控制

传统 PID 控制具有结构简单、成熟、易实现等优势,被广泛应用于包装设备控制领域,其依据控制对象误差  $e(t)$  的比例(P)、积分(I)、微分运算(D)的叠加获取控制输出  $u(t)$ ,控制规律为:

$$u(t) = K_P \left[ e(t) + \frac{1}{K_I} \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \right]. \tag{8}$$

也可将控制规律以传递函数形式表示:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left( 1 + \frac{1}{K_I s} + K_D s \right), \tag{9}$$

式中:

$K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ ——比例、积分、微分系数;

$s$ ——拉氏变换因子;

$e(t)$ ——控制对象误差值;

$u(t)$ ——控制系统输出值。

### 2.2 分数阶PID控制

为提高PID控制器的灵活性,结合分数阶微积分理论,在PID基础上增加微分阶数 $\mu$ 和积分阶数 $\lambda$ ,使控制范围更广,如图2所示。

由图2可知,分数阶PID控制的参数取值范围为一个平面,而传统PID控制为平面中的一个点,表明分数阶PID的控制更加精确、控制能力更强。分数阶PID的控制规律也是对控制对象偏差进行P、I、D求取并组合实现控制过程,故传递函数表达式为<sup>[6]</sup>:

$$G(s) = K_P + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (10)$$

分数阶PID控制器结构如图3所示。

由于分数阶PID存在阶次,在实际运用过程中不能直接使用固有模块,需对分数阶参数 $\mu$ 和 $\lambda$ 进行近似推导。利用Oustaloup滤波方法的求解过程为:

设工作频段为 $(\omega_b, \omega_h)$ ,对微积分算子 $s^a$ 进行拟合,则滤波器传递函数为:

$$G_0(s) = K_0 \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_k^1}{s + \omega_k^0} \quad (11)$$

式中:

$$\omega_k^0 = \omega_b \left( \frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+(1+a)/2}{2N+1}};$$

$$\omega_k^1 = \omega_b \left( \frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+(1-a)/2}{2N+1}};$$

$$K_0 = \omega_h^a, a \in (0, 1);$$

$2N+1$ ——阶次。

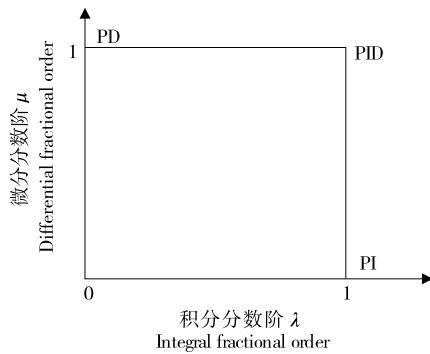


图2 P-I-D平面  
Figure 2 P-I-D plane

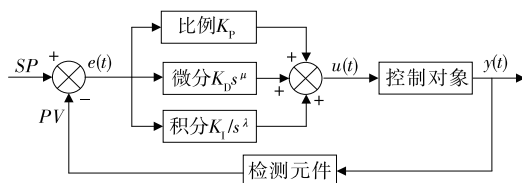


图3 分数阶PID控制器结构示意图

Figure 3 Schematic diagram of fractional-order PID controller structure

Oustaloup滤波算法将微积分算子用分数阶传递函数表示为<sup>[7]</sup>:

$$K(s) = \frac{1 + \frac{s}{(c/b)\omega_b}}{1 + \frac{s}{(c/b)\omega_h}} \quad (12)$$

式中:

$$b > 0;$$

$$c > 0.$$

频率段内一阶泰勒级数展开得:

$$s^a = \left( \frac{c\omega_b}{b} \right)^a \left[ \frac{c s^2 + c\omega_b s}{c(1-a)s^2 + b\omega_h s + ca} \right] K(s) \quad (13)$$

将式(13)中 $K(s)$ 用Oustaloup递推式展开得:

$$s^a = \left( \frac{c\omega_b}{b} \right)^a \left[ \frac{c s^2 + c\omega_b s}{c(1-a)s^2 + b\omega_h s + ca} \right] \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_k^3}{s + \omega_k^2} \quad (14)$$

式中:

$$\omega_k^2 = \left( \frac{c\omega_h}{b} \right)^{\frac{a+2k}{2N+1}};$$

$$\omega_k^3 = \left( \frac{c\omega_b}{b} \right)^{\frac{a-2k}{2N+1}}.$$

### 2.3 模糊分数阶PID控制

袋膜张力控制系统较为复杂,受到放膜卷半径非线性变小、包装速度、袋膜质量等因素影响,袋膜张力波动较大。如图4所示,为提高PID控制精度和灵活性,以袋膜张力设定值 $r(k)$ 与实际值 $y(k)$ 的偏差 $e(k)$ 和偏差变化率 $de/dt[ec(k)]$ 为输入量,采用模糊控制规则对分数阶PID控制器的 $\mu, \lambda, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  5个参数进行在线调节。

袋膜张力模糊控制器设计步骤:

(1) 控制器结构及变量:依据控制需求,设计控制器结构为二输入五输出型,输入变量为 $e, ec$ ,输出变量为 $\mu, \lambda, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ ,输入变量模糊论域 $e(ec) \in [-4, 4]$ ,输出变量 $\Delta K_P \in [-0.8, 0.8], \Delta K_I \in [-0.2, 0.2], \Delta K_D \in$

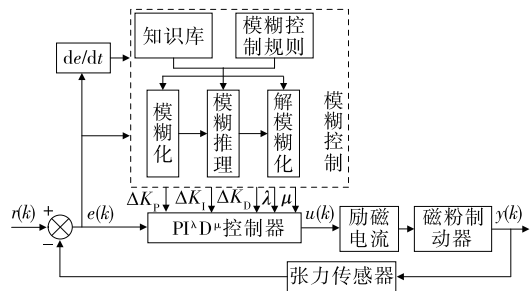


图4 模糊分数阶PID控制器张力控制系统

Figure 4 Tension control system of fuzzy fractional-order PID controller

$[-5, 5], \mu \in [0, 1.8], \lambda \in [0, 1.4], \mu, \lambda, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  的模糊子集均设定为:NB(负大值)、NM(负中值)、NS(负小值)、ZO(零值)、PS(正小值)、PM(正中值)、PB(正大值)<sup>[8]</sup>。

(2) 隶属度函数:隶属度函数曲线特性等能够反映控制系统的稳定性和灵敏性,为使袋膜张力控制系统具有较好的控制精度和稳定性,在  $e, ec$  较大区域选择曲线平滑的高斯隶属度函数,在  $e, ec$  较小区域选择曲线尖锐的三角形隶属度函数(见图 5), $\mu, \lambda, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  隶属度函数选取原则与  $e, ec$  相同。

(3) 模糊控制规则:模糊控制规则是模糊控制的核心,决定控制效果。依据工程技术人员实际操作经验和

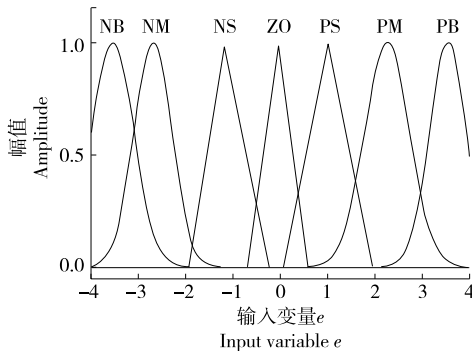


图 5 隶属度函数

Figure 5 Membership function

分数阶 PID 参数功能及性质,分析不同  $\mu, \lambda, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  参数值对张力  $e$  和  $ec$  的影响,设计模糊控制规则表(见表 1、2)<sup>[9]</sup>。

模糊控制器采用 Mamdani 进行模糊推理,获取  $\mu, \lambda, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  参数的模糊控制量,然后采用重心法进行解模糊。

### 3 控制系统设计

袋膜张力控制系统以 Siemens S7-1200PLC 控制器和 Siemens KP1500 触摸屏为核心,完成包装过程的自动控制 and 数据处理,具备数据运算、显示、报警、存储等功能。分析控制需求选用 CPU 1214C 为主控制器,集成 Profinet 接口,具有较好的扩展性和灵活性;KP1500 能够实现控制系统工艺界面设计、历史曲线、故障报警、数据报表、参数设置等功能,人机界面友好。

#### 3.1 硬件设计

袋膜张力控制系统主要包括 STS-010 张力传感器、STA-05C 张力变送器、CPU 1214C 控制器、HB-611B 恒流源及 TJ-POD2 磁粉制动器、SM1223 和 SM1231 模块。STS-010 检测袋膜张力实际信号经 STA-05C 转化为 4~20 mA 电流信号传输给 SM1231 模块,经 CPU 1214C 控制运算后由 SM1232 模块传送给 HB-611B,然后经 HB-611B 输出电流调整 TJ-POD2 的输出力矩,实现袋膜张力的恒定控制,系统接线如图 6 所示。

表 1  $\mu, \lambda$  控制规则表

Table 1  $\mu, \lambda$  control rule table

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB/PB	NB/PB	NM/PB	NM/PB	NS/PM	NS/NM	ZO/PS
NM	NB/PB	NB/PB	NM/PM	NS/PM	NS/PS	ZO/NS	PS/PS
NS	NM/PB	NM/PM	NM/PM	NS/PS	ZO/PS	PS/NS	PS/ZO
ZO	NM/PM	NM/PM	NS/PM	ZO/ZO	PS/ZO	PS/ZO	PM/ZO
PS	NS/PM	NS/PM	ZO/PS	PS/ZO	PS/PS	PM/PS	PM/NS
PM	NS/PM	ZO/PS	PS/PS	PM/NS	PM/PS	PM/PS	PB/NS
PB	ZO/PS	ZO/PS	PM/PS	PM/NM	NM/PM	PB/PM	PB/NM

表 2  $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  控制规则表

Table 2  $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$  control rule table

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NM	PM/NM/NB	PS/NS/NM	NS/ZO/NM	PS/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NM	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	ZO/ZO/PS
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PS/NS/NM	PS/ZO/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS
PS	PS/NS/PS	PS/ZO/ZO	ZO/PS/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PS/PS	NM/PM/PS
PM	ZO/ZO/PM	ZO/PS/PS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PM/PM	NB/PM/PM
PB	NS/ZO/PB	NS/PS/PM	NM/PM/PS	NM/PM/PM	NM/PM/PM	NB/PB/PB	NB/PB/PB

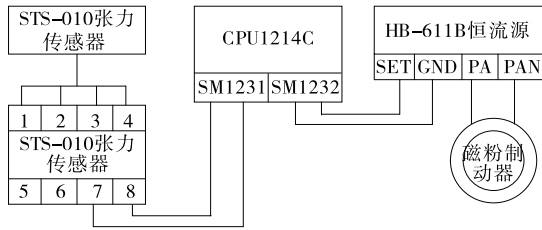
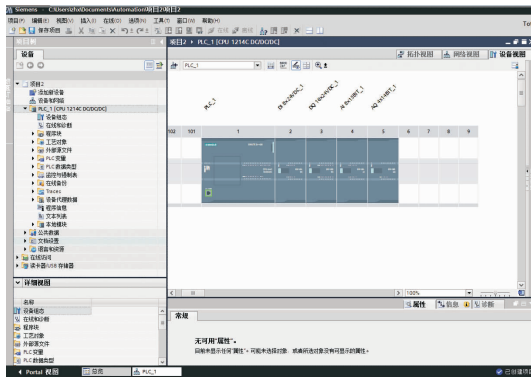


图6 袋膜张力控制硬件接线

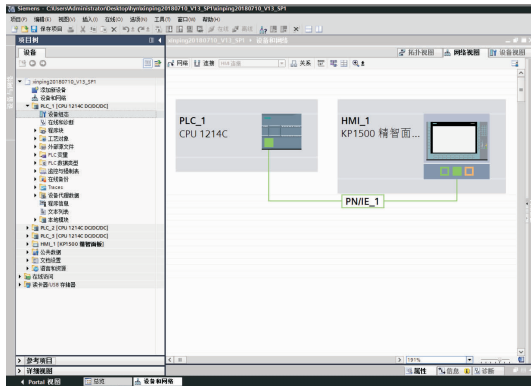
Figure 6 Hardware wiring of bag film tension control

3.2 硬件及网络组态

包装机控制系统基于 TIA Portal V13 平台进行开发,主要包含 Step7 下位机程序开发和 WinCC HMI 界面开发。启动 Protal 软件后项目创建,在新建项目的“设备与网络”菜单中选择“添加设备”中的按照设备订单号或模块型号选择 PLC、PS、IM、SM 模块完成系统硬件组成[见图 7(a)],并进行组态故障检测。将 PLC\_1 (CPU1214C)和 HMI\_1(KP1500)的 PN 端口进行连接,然后修改 Profinet 接口的网络地址、设备名称等信息后进行编译故障查询,然后保存网络组态[见图 7(b)]<sup>[10-11]</sup>。Protal 软件相对于“STEP7+WinCC”模式组态具有简便、高效、可视化性强的优势。



(a) 系统硬件组态



(b) 系统网络组态

图7 系统硬件及网络组态图

Figure 7 System hardware and network configuration diagram

3.3 程序设计

如图 8 所示,控制系统启动并完成初始化设置,经 KP1500 HMI 界面设定控制系统初始参数及张力设定值,CPU1214C 经 SM1231 获取现场实际张力检测信号值与设定值进行比较,若存在控制偏差,则计算出张力当前周期内  $e$ 、 $ec$  值;将  $e$ 、 $ec$  作为模糊控制器的输入量,模糊控制器按照模糊规则进行模糊推理的  $\mu$ 、 $\lambda$ 、 $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$  参数值;分数阶 PID 依据模糊控制输出进行控制运算;CPU1214C 对控制信号进行逻辑处理和信号转换,SM1232 将控制输出信号经恒流源作用于磁粉制动器,调整磁粉制动器输出力矩改变袋膜张力值,最终实现袋膜张力的精确、稳定控制,提高袋膜包装外观质量<sup>[12]</sup>。

4 仿真分析

选用 Simulink 软件仿真平台,分数阶 PID 的微积分时间的分数阶用 Function 建立,PID 控制的初始参数设为  $K_P=0.51$ 、 $K_I=0.35$ 、 $K_D=1.2$ ,分别建立 PID、模糊 PID、模糊分数阶 PID 控制器仿真模型进行仿真对比。设置仿真时间为 200 s,张力值为 10 N,在  $t=80$  s 时修改张力值为 5 N,对 3 种控制器的性能进行仿真对比,如图 9(a) 所示;为验证 3 种控制器模型失配鲁棒性能力,将张力控制系统传递函数的过程增益和时间常数分别增加 20% 进行仿真对比,如图 9(b) 和 (c) 所示;由于袋膜张力控制系统受多因素干扰,故在  $t=150$  s 处添加幅值为 1 N(20%) 的负向阶跃信号对比仿真控制抗干扰能力,如图 9(d) 所示。由图 9(a) 可知,PID 的超调量约为 0.62 N,模糊 PID、模糊分数阶 PID 不存在超调;模糊分数阶 PID 相比模糊 PID 的响应速度更快,到达稳定时间更短,控制器性能优越。由图 9(b) 可知,当张力控制系统过程增益增加 20% 时,PID 控制超调量明显增加,且达到稳态时间增长;模糊 PID 控制存在少量超调,模糊分数阶 PID 曲线

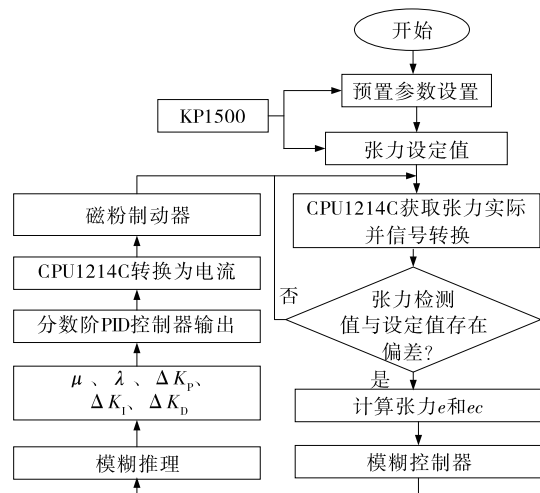


图8 张力控制流程图

Figure 8 Tension control flow chart

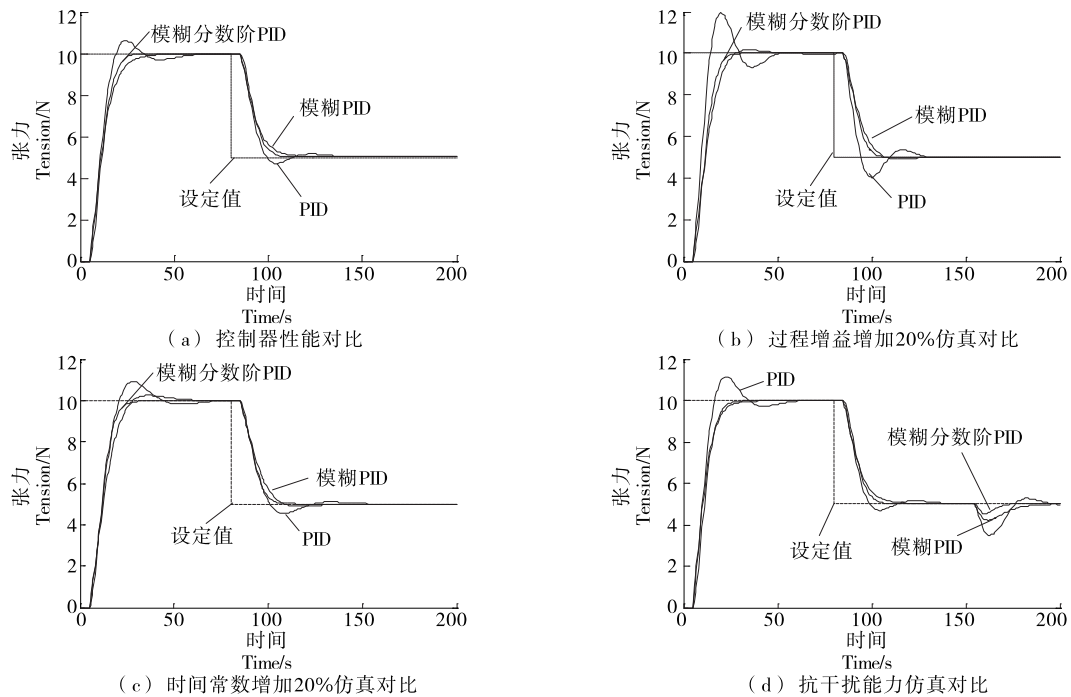


图 9 控制器仿真对比曲线图

Figure 9 Comparison graph of controller simulation

所受影响不大。由图 9(c)可知,当张力控制系统时间增加 20%时,PID 曲线的响应速度、超调量、稳态时间均有较大变化,模糊 PID 超调量增加较大。由图 9(b)和(c)综合分析可知,模糊分数阶 PID 控制具有较好的模型失配鲁棒性。

如图 9(d)所示,在  $t=150\text{ s}$  添加阶跃干扰后 PID、模糊 PID、模糊分数阶 PID 曲线偏离最大值约为 4.21,0.79,0.48 N,干扰后达到稳态时间约为 45,35,18 s,表明模糊分数阶 PID 控制具有较好的抗干扰能力。由图 9 可知,模糊分数阶 PID 控制器性能优越,具有较好的动态响应、模型失配鲁棒性及抗干扰能力。

## 5 结语

食品包装机袋膜张力控制系统具有多干扰、时变性、非线性特征,传统 PID 难以获得较好的控制效果。结合模糊控制、分数阶控制、PID 控制的优势,设计灵活性、精确度较好的模糊分数阶 PID 控制器,利用模糊控制规则对分数阶 PID 参数进行在线调节,提升袋膜张力控制精确性和稳定性。以 Siemens PLC 和 HMI 界面为核心,介绍了硬件设计、网络组态及控制流程,设计包装机自动控制系统。经 Simulink 软件对各控制进行对比分析,结果表明:模糊分数阶 PID 的控制器性能最优,具有较好的适用性,能够满足袋膜张力控制需求。但由于模糊控制规则库不具备自我优化和学习能力,后期将研究如何利用智能优化算法对模糊控制规则库进行在线优化,使张力控制算法适用于各种工况。

## 参考文献

- [1] 郑景润. 基于增量 PID 算法的包装机滤纸放卷控制[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(2): 54-57.
- [2] 温玉春, 刘祺君. 基于模糊 PID 的包装机热封切刀温度控制[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 109-113.
- [3] 胡汪洋, 曹成茂, 吴正敏, 等. 小袋山核桃仁包装机袋膜纠偏模糊控制系统设计[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 59-65.
- [4] 胡亚南, 祁广利, 霍蛟飞, 等. 基于模糊 PID 的 FDM 型 3D 打印机喷头温度控制系统[J]. 包装工程, 2017, 38(19): 173-178.
- [5] 吕颖利, 吕少龙, 焦英英. 基于二自由度 PI 控制器的吹塑机张力控制系统[J]. 塑料科技, 2020, 48(1): 118-121.
- [6] 周克良, 胡梁眉, 洪智慧. 模糊分数阶 PID 在线径控制系统中的应用[J]. 制造业自动化, 2019, 41(7): 63-69.
- [7] 车海军, 马鲁飞, 杨景明, 等. 基于模糊自适应分数阶带钢纠偏控制策略研究[J]. 高技术通讯, 2019, 29(6): 594-601.
- [8] 索小娟, 卫前伟. 改进模糊 PID 的称重式包装机智能控制[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(1): 55-60.
- [9] 任少伟, 杨传民, 孟祥飞. 基于 PLC 的全自动给袋式包装机称量控制系统研究[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 162-168.
- [10] 李鑫, 张煜星, 高博. 基于 S7-1200PLC 的啤酒发酵温度控制系统研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 116-119, 152.
- [11] 丰会萍, 胡亚南, 闫琛钰, 等. 基于 TIA Portal 的多功能茶叶包装机控制系统设计[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 85-88.
- [12] 高雪, 袁飞. 基于 STM32 和 PLC 的枕式包装机控制系统的设计[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(3): 19-23.