

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.013

玉米定向种子带恒张力卷绕系统自适应模糊PID控制*

赵学观 徐丽明 何绍林 邢洁洁

(中国农业大学农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在玉米定向种子带的卷绕过程中, 种子带的张力控制影响到种子带的质量。为此依据玉米定向种子带的要求, 建立恒张力卷绕系统的传递函数, 利用模糊控制技术实现玉米种子带的恒张力卷绕控制, 创建了模糊自适应PID控制器, 利用 Matlab 对其进行仿真, 得到了较为合理的模糊控制算法, 并将模糊控制算法通过西门子 S7-200 型 PLC 为核心的硬件控制电路应用于实际的张力控制, 并进行了实际的卷绕试验。试验结果表明: 模糊 PID 控制器与传统 PID 控制器相比, 具有更好的动态稳定性和跟踪性能, 张力产生阶跃时, 系统过渡时间约为 2 s, 超调量在 1.2% 内, 能够较好地满足种子带的卷绕要求。

关键词: 玉米 定向播种 恒张力系统 自适应模糊 PID 控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0090-07

Constant Tension Winding System of Corn Directional Belt Making Machine Based on Self-adaptive Fuzzy-PID Control

Zhao Xueguan Xu Liming He Shaolin Xing Jiejie

(Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the processing and winding process of corn directional belt making, tension control determines the quality of corn directional belt. A corn seed directional belt making machine was developed and transfer functions of constant tension winding system were set up. The fuzzy-PID self-adaptive control technology was used to achieve constant tension winding in corn directional belt making and a fuzzy-PID self-adaptive controller was created. Finally, the software Matlab was used to simulate. As a result, reasonable fuzzy-PID self-adaptive control algorithm was obtained, and fuzzy-PID self-adaptive control algorithm was used in the actual tension control by using Siemens S7-200 PLC core hardware control circuit, as well as the winding experiment was carried out. Test results showed that the fuzzy-PID self-adaptive had better dynamic stability and tracking performance compared to the conventional PID controller and the controller could meet the requirements of corn directional belt winding. When the tension generated step, system transition time was about 2 s and overshoot was in 1.2%.

Key words: Corn Directional seeding Constant tension system Self-adaptive fuzzy-PID control

引言

近年来, 在精量播种基础上, 许多自动化智能装备对植株的生长形态提出了一定的要求, 如要求瓜

科秧苗的子叶生长方向的一致性, 即通过干预种胚在土壤中的空间位置, 使植株叶片与垄向垂直, 最大限度地提高光能利用率, 进而达到增加密度提高产量的目的^[1-3]。基于此目的的玉米定向播种研究尚

收稿日期: 2014-07-19 修回日期: 2014-08-18

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120008110045)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013YJ007)

作者简介: 赵学观, 博士生, 主要从事生物生产自动化技术和装备研究, E-mail: zhaoxueguan.com@163.com

通讯作者: 徐丽明, 教授, 博士生导师, 主要从事生物生产自动化技术和装备研究, E-mail: xlmoffice@126.com

处于起步阶段^[4],Guilherme等^[5]通过控制玉米播种方向与行向的夹角,研究了播种方向与出苗率及产量之间的关系,目前国内专利公布了几种玉米定向播种技术^[6-7],但实施困难。玉米种子较大,其质心与形心不重合,便于定向。玉米种子的包装处理是通过淀粉胶将定向排列后的玉米种子粘接到可降解包容材料上,制作成玉米定向种子带,再铺放到土壤中,实现种子的定向、定距播种。

在玉米定向种子带的生产加工中,随着种子带不断地卷绕到卷筒上,其卷径不断增大,所需转矩不断增大,张力的控制效果直接影响着种子带的质量。张力大,种子带处于拉伸状态,易产生滑移现象且容易被拉断;张力小,种子带在卷筒上呈松弛状态,螺旋缠绕效果差,容易发生滑动,且种子带可能出现皱纹甚至发生跑偏现象。关于恒张力的控制在工业上应用较多^[8-11],但种子带的刚拉强度小,和电缆等卷材相比具有不匀质的特征,如通过工业上常用的张力变频器计算卷径的方式不能达到恒张力的目的。实际工作过程中为了防止其抖动,进一步改善卷绕性能,有必要对玉米定向种子带的恒张力卷绕控制进行研究。

卷绕系统具有非线性和时变性,被控参量和被控对象各种参数之间无精确数学关系式^[12-15],本文结合种子带的特点,提出以PLC作为控制核心,采用模糊控制技术实现对种子带的恒张力卷绕。

1 玉米种子带恒张力缠绕机构

玉米定向种子带恒张力控制系统主要由机械本体、张力传感器、PLC控制器及控制系统组成。复合机构由上下两对辊组成,直流电动机驱动对辊匀速转动,带动涂胶并摆放好种子的带纸匀速移动,同时进行复合形成种子带,由张力传感器检测张力,再经过导向轮缠绕到卷绕盘上。卷绕盘由步进电动机A驱动转动,同时步进电动机B驱动丝杠机构左右移动,实现种子带螺旋卷绕在卷绕盘上。其中,张力传感器将检测到的种子带张力传送给PLC控制器,PLC控制器实时控制步进电动机A的转速,实现玉米种子带恒张力缠绕。定向种子带缠绕机构示意图如图1所示。

2 张力系统的模型及传递函数

2.1 步进电动机的传递函数

步进电动机输入的是阶跃脉冲电压,设其从某一初始位置按控制指令运动到位置 θ_1 ,即步进电动机从前一励磁状态的稳定平衡点向新的平衡点转动,而转子实际转过的角度 θ_2 (即输出),由于各种

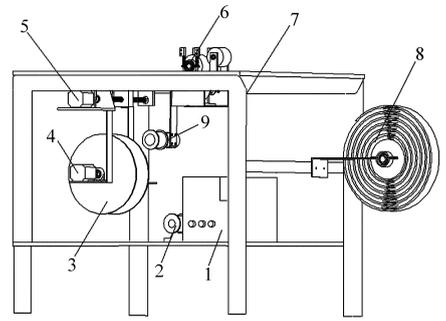


图1 基于PLC的玉米定向种子带缠绕机构示意图

Fig. 1 Structure schematic of corn directional seeding belt making machine based on PLC

1. 电控箱 2. 导向轮 3. 卷绕盘 4. 步进电动机 A 5. 步进电动机 B 6. 复合机构 7. 机架 8. 带盘 9. 张力传感器

原因与励磁量有一微小的差距,围绕新的稳定平衡点振荡。用拉普拉斯变换来表示目标量和控制量,则传递函数可定义为^[16-17]

$$G(S) = \frac{\theta_2(S)}{\theta_1(S)} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + \frac{D}{J}S + \omega_n^2} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{Z_r^2 L_s i_a^2}{2J}} \quad (2)$$

式中 ω_n ——无阻尼振荡频率

Z_r ——转子齿数

D ——粘滞阻尼系数

L_s ——电枢电感 i_a ——相电流

J ——电动机系统转动惯量

步进电动机A为57系列,主要参数有齿数40,感抗0.0107H,转动惯量 $1.05 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$,粘滞阻尼系数0.04,相电流1.5A,代入式(1)后得

$$G(S) = \frac{18.3}{S^2 + 0.038S + 18.3}$$

2.2 驱动器的传递函数

驱动器的作用是将脉冲信号转换为电流信号驱动电动机运动,由于驱动器采用桥式电路,其控制电压发生改变时,输出平均电压按照线性规律变化,但其响应会有延迟,因此该驱动器可以看成是一个滞后环节,其传递函数可以表示为

$$G(S) = K_s e^{-T_L S} \quad (3)$$

式中 K_s ——驱动器的放大系数

T_L ——驱动器的延迟时间

取驱动器放大系数5,驱动器延迟时间0.01s,可得驱动器的传递函数为: $G(S) = 5e^{-0.01S}$ 。

2.3 卷绕过程的传递函数

为了定性分析影响种子带张力的因素,简化了种子带恒张力控制系统,如图2所示。设种子带张

力为 T , 运行中种子带经复合辊上下辊的线速度为 v_1 , 缠绕辊带动种子带运动的线速度为 v_2 。为了便于计算, 将长度计算模型简化为如图 2 所示。据虎克定律建立种子带形变时张力的数学模型

$$T = \frac{EA}{L} \int_{t_1}^{t_2} [v_2 - (1+k)v_1] dt \quad (4)$$

式中 E ——种子带的弹性模量

A ——卷材的截面积

L ——有张力产生时递送段卷材的长度

t_1 ——卷材经复合辊送出的时间

t_2 ——种子带与卷绕盘接触时间

k ——种子带的前滑量

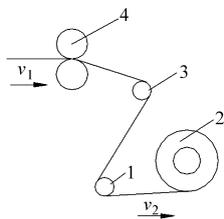


图 2 张力产生的简化模型

Fig. 2 Simplified model of tension generation

1. 导向轮 2. 卷绕盘 3. 张力传感器 4. 复合辊

在复合和卷取过程中, 种子带运动方向上存在着速度差, 使得种子带上不同部位处有相对位移而产生张应力。由式(4)可知, 要控制种子带的张力, 控制相邻辊的线速度差恒定即可, 由于复合辊在工作过程中是匀速运动, 故本文主要控制卷绕盘的速度。

根据前面建立的张力数学模型公式得^[18-19]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{EA}{L} [v_2 - (1+k)v_1] = \frac{EA}{L} \{v_2 - [1+k_0(1+\beta)]v_1\} \quad (5)$$

对公式进行拉普拉斯变换后得传递函数为

$$G(S) = \frac{K_z}{1 + \tau_z S} = \frac{\frac{1}{v_1 \beta k_0}}{1 + \frac{L}{EB} \frac{1}{v_1 \beta k_0} S} \quad (6)$$

式中 k_0 ——无张力的情况下种子带前滑影响系数

β ——有张力的情况下种子带滑行系数

τ_z ——张力模型的时间常数

K_z ——张力模型的放大倍数

本文中取卷绕的技术参数为: $\beta = 0.08$, $k_0 = 0.5$, $v_1 = 0.3$ m/s, $A = 3 \times 10^{-6}$ m², $L = 0.4$ m, $E = 1.2 \times 10^8$ Pa。则 $K_z = 83.3$ N·s/m, $\tau_z = 0.093$ s, 故得卷绕过程的传递函数为

$$G(S) = \frac{83.3}{1 + 0.093S}$$

3 自适应模糊 PID 控制系统设计

3.1 控制系统工作原理

控制系统主要包括盘 PLC 控制器、EM235 输入输出模块、卷绕步进电动机、左右移动步进电动机、张力传感器、定位传感器。工作中, 通过 PLC 中高速计数器 HCO 对 Q0.0 内部计数, Q0.0 输出脉冲控制卷绕电动机。根据系统结构, 设定卷绕角速度与左右移动距离之间的关系, 然后根据丝杠机构的螺距及卷绕盘的宽度, 确定左右移动电动机变向所需脉冲。由于系统断电后, HCO 不能保持目前脉冲数, 故设计了开机复位按钮, 系统运行后, 移动电动机向位置传感器方向运动, 由位置传感器触发左右移动电动机停止在初始位置。

3.2 模糊 PID 控制器的创建

卷绕过程中, 空卷与满卷的转动惯量变化比较大, 因此需要采用可变 PID 参数 ΔK_p 。在自动卷绕时, 事先确定 PID 3 个参数与偏差和偏差变化率之间的模糊关系, 首先建立模糊控制表的数据块, 数据块中误差 e 和误差变化率 \dot{e} 的论域值设置为 7 个, 该数据块为二维的 7×7 矩阵, 依次存储在 Vb200 ~ Vb248, 根据模糊控制论域值可知, ΔK_p 的位置增量为 $7i + j$, 同理, 将 ΔK_i 、 ΔK_d 论域分别存入 Vb250 ~ Vb299 和 Vb300 ~ Vb349, 可通过 PLC 的比较跳转指令来实现 PID 参数值的转换^[20-21]。

确定模糊关系后, 张力传感器测得张力信号, 经过自身处理器滤波、放大、转换等处理后传送到 PLC 的模拟量输入端, 即为图 3 中的张力反馈值。设张力反馈值 $y(k)$, 张力给定值 $y_d(k)$, 运算后, 得每运算步的偏差 $e(k)$ 和偏差变化率 $\dot{e}(k)$, 经模糊化后, 作为模糊控制器的输入变量, 通过模糊控制算法得到控制量, 作为模糊控制器的输出, 控制量 u 去模糊化后得精确量 u' , 经模糊量输出模块作用在被控对象上实现了卷材的恒张力控制, 控制流程图如图 4 所示。在 PLC 编程软件中, 可以设置当张力反馈值接近张力给定值的 90% 时再采用 PID 控制器, 这样可以增加系统的响应速度。

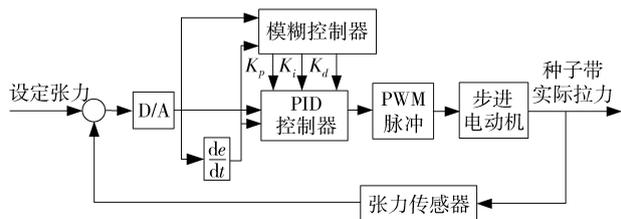


图 3 卷绕恒张力模糊 PID 自适应控制框图

Fig. 3 Fuzzy self-adaptive PID control block diagram of constant tension winding

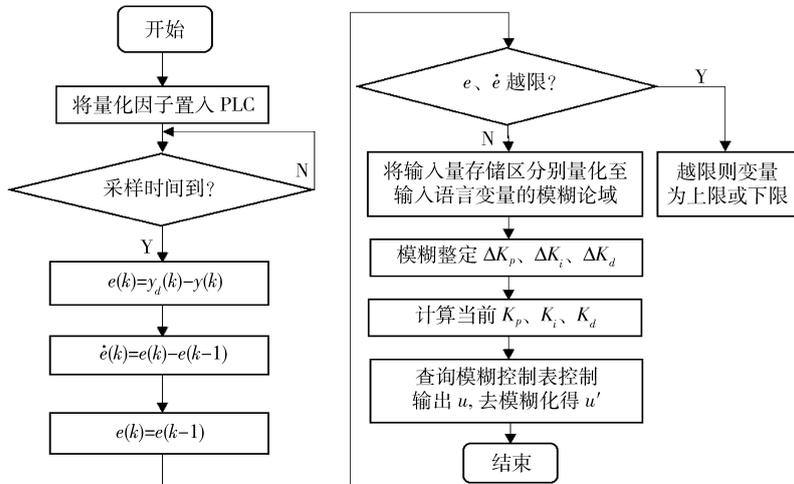


图 4 模糊控制算法程序流程图

Fig. 4 Flow chart of fuzzy control program

3.3 输入输出变量及其论域模糊子集确定

本系统选用的模糊控制系统为二维模糊控制器,其输入变量分别为种子带张力值的偏差 e 和偏差变化率 \dot{e} ,输出变量为整定 PID 参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。模糊 PID 控制是找出 3 个参数与 e 和 \dot{e} 之间的模糊关系。在运行中通过不断检测 e 和 \dot{e} ,根据模糊控制原理对 3 个参数进行在线修改。根据实际工作过程中的经验, e 取 7 个模糊子集,分别为:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB),论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, \dot{e} 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊子集和论域都与其相同。 e 的基本论域为 $[-4, 4]$,量化因子为 0.75, \dot{e} 的基本论域 $[-0.75, 0.75]$,量化因子为 4, ΔK_p 的基本论域 $[-0.06, 0.06]$,比例因子为 0.02, ΔK_i 的基本论域 $[-0.3, 0.3]$,比例因子为 0.1, ΔK_d 的基本论域 $[-0.003, 0.003]$,比例因子为 0.001。论域两端的隶属函数取半三角形的形状,其余的则取三角函数。其余输入量、输出量的隶属度函数曲线如图 5、6 所示^[22-23]。

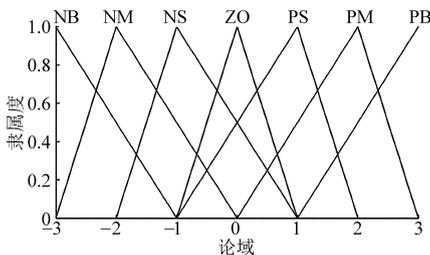


图 5 输入变量 e 、 \dot{e} 的隶属度函数

Fig. 5 Membership function of input variables e and \dot{e}

3.4 模糊控制规则及解模糊

在 PID 控制器调节初期应适当取较大的 K_p 值以提高响应速度,为防止积分饱和,其积分作用应当弱一些,甚至可以取零,应加大微分作用,这样可得

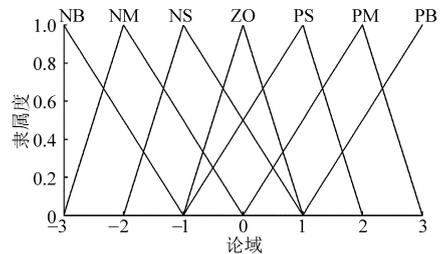


图 6 输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的隶属度函数

Fig. 6 Membership function of input variables ΔK_p , ΔK_i and ΔK_d

到较小甚至避免超调;而在调节中期, K_p 则取较小值,以使系统具有较小的超调并保证一定的响应速度,为了避免影响稳定性,其积分作用应该比较适中, K_d 值应适当小一些并保持固定不变;而在调节过程后期再将 K_p 值调到较大值来减小静差,提高控制精度,同时增强积分作用,以减小调节静差。 K_d 值应减小,以减小被控过程的制动作用,进而补偿在调节过程初期由于 K_d 值较大所造成的调节时间的延长。根据现场工作人员手动调节种子带张力的经验,并结合以上分析,通过模糊推理及试验修正,得出 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊控制规则如表 1 所示。

被控对象只能接受精确量,所以必须将模糊变量转换成精确量,即模糊量的清晰化(反模糊化),采用最大隶属度法可离线推算出模糊控制表。输入输出隶属关系与模糊规则关系如图 7、8 所示。

根据以上模糊规则关系,在某一时刻,当偏差和偏差变化率取某一组值时,可以通过模糊判决去模糊化得到精确值 K_p 、 K_i 、 K_d ,那么参数整定公式为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases}$$

式中 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} ——参数初始值

表1 模糊控制规则表
Tab.1 Fuzzy-PID self-adaptive control rules

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

4 恒张力卷绕系统模糊PID自适应控制试验

4.1 仿真试验

在 Matlab/Simulink 中导入模糊推理器,并对模糊逻辑控制器进行封装,如图9所示,经过量化的偏差及偏差变化率对PID参数进行修正,输出电动机转速信号、PID封装如图10所示。

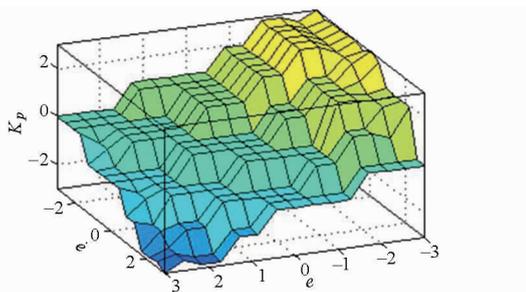


图7 输入输出变量隶属关系图

Fig.7 Membership graphic of input and output variable

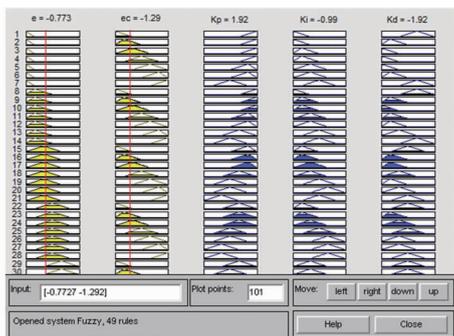


图8 输入输出模糊规则关系图

Fig.8 Fuzzy rule relationship graphic of input and output variable

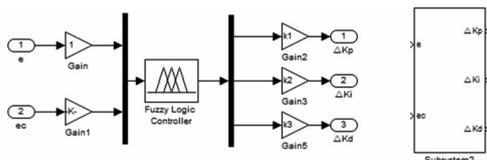


图9 模糊逻辑控制器的内部封装

Fig.9 Inside package of fuzzy logic controller

本文主要研究卷绕系统的张力动态性能,即当恒张力卷绕系统张力突变力时的响应。利用 Matlab

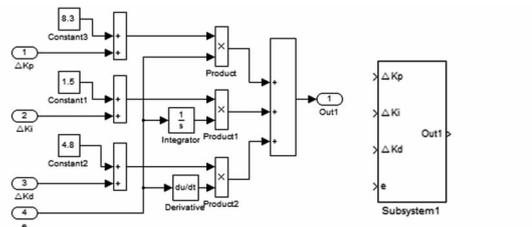


图10 PID控制器及其封装

Fig.10 PID controller and its package

中 Simulink 工具箱,建立自定义信号,张力由 3N 阶跃至 4N,仿真系统如图11所示,种子带张力正、负阶跃变化时恒张力系统的响应特性曲线如图12所示。由图12可知,当存在阶跃信号时,PID控制器的输出需要很长的调节时间才能稳定,而模糊控制器对于阶跃信号的抑制作用非常明显,几乎不受影响。常规PID控制的过渡时间为6.7s,最大超调率为16%;自适应模糊PID控制的过渡时间为1.7s,最大超调率为0.6%。综上所述,不管是外界干扰还是卷径的变化,模糊控制器的控制效果不但响应迅速,而且抗干扰性很强,比PID的控制效果优越,并且都能使对象模型的输出达到工艺要求。

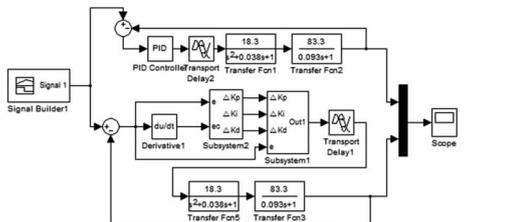


图11 模糊PID仿真系统框图

Fig.11 Diagram of fuzzy PID simulation system

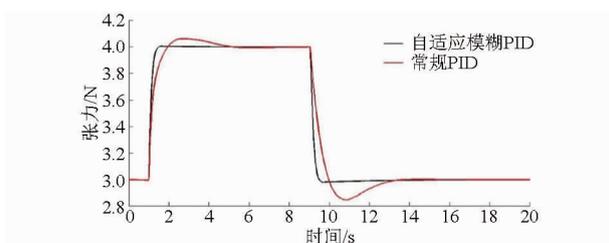


图12 张力控制系统响应曲线

Fig.12 Response curve of tension control system

4.2 样机试验

由于种子带卷绕盘在卷绕的过程中半径不断增加,张力传感器的受力点及方向不断发生变化,为保证张力传感器在检测方向不发生变化,即保证受力点和受力方向恒定,安装了导向辊,试验建立的种子带恒张力系统如图13所示。



图13 定向种子带自适应模糊PID恒张力控制试验台

Fig. 13 Fuzzy-PID self-adaptive constant tension control test of directional belt

西门子S7-200自带PID调节控制面板,通过面板观察张力控制响应曲线,通过数据库添加监视变量。本试验中,设定PLC的Q0.0输出PWM脉冲控制卷绕电动机,Q0.1输出脉冲控制左右移动电动机。卷绕盘满卷约为1200圈,卷绕盘在不同转动惯量时,对比分析PID和模糊PID控制的响应速度,设定张力3N,通过高速计数器测定卷绕盘卷绕圈数,在不同圈数时设置阶跃至4.5N,记录张力的响应曲线。多次重复试验,两种控制方式的试验结果见表2。

由表2可知,随着卷绕圈数增加,卷绕盘的转动惯量增加,模糊PID和PID控制的过渡时间增加,超调量增大,但模糊PID控制方式的过渡时间增加较少。PID控制的超调量不断增大,而模糊PID超调

量随着圈数的增加基本没有变化,根据试验知最大超调量基本控制在1.2%以内。经分析,模糊PID能对常规的PID控制器的参数实现智能调节,模糊控制的鲁棒性将张力迅速控制在期望值附近,使误差超调量在较小的范围,与PID控制方式相比,模糊PID控制提高了系统的响应速度和稳态精度,在提高系统抗干扰性及参数实变的鲁棒性等方面优越于常规的PID调节器。

表2 两种控制方式的性能

Tab. 2 Comparison of two control methods

圈数	控制方式	系统过渡时间/s	超调量/%
100	PID	2.37	2.96
	模糊PID	1.86	1.17
550	PID	2.52	3.21
	模糊PID	1.99	1.19
1000	PID	2.75	3.64
	模糊PID	2.03	1.20

5 结论

(1) 设计并搭建了基于自适应模糊PID控制的玉米定向种子带恒张力卷绕机构和控制系统,通过张力系统数学模型建立了恒张力控制系统的传递函数。

(2) 针对种子带卷绕系统进行了自适应模糊PID控制方法的研究,设计了自适应模糊PID控制器,搭建了试验平台并进行了试验。

(3) 试验结果表明采用自适应模糊PID控制方法,恒张力系统具有较高的响应速度和稳态精度,设定张力由3N阶跃至4.5N时,系统过渡时间约为2s,超调量在1.2%内,能满足种子带生产加工的要求。

参 考 文 献

- 杨艳丽,辜松,潘汝琼,等.大粒种子调向精量播种机构的设计[J].农机化研究,2009(12):68-70.
Yang Yanli, Gu Song, Pan Ruqiong, et al. Design of the directional precision seeding mechanism for big seeds[J]. Agricultural Mechanization Research, 2009(12):68-70. (in Chinese)
- 俞亚新,赵匀,张斌,等.基于稻种胚胎定向排列的排种器及参数优化[J].江苏大学学报:自然科学版,2008,29(3):194-197.
Yu Yaxin, Zhao Yun, Zhang Bin, et al. Seed metering device based on orienting ordered arrangement in embryo and parameter optimization[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(3):194-197. (in Chinese)
- 俞亚新,林佳辉,赵匀,等.基于单轴对称特性的稻种定向排序仿真与试验[J].农业机械学报,2013,44(10):62-67,74.
Yu Yaxin, Lin Jiahui, Zhao Yun, et al. Simulation and test on rice seed orientation based on single axisymmetric properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):62-67, 74. (in Chinese)
- 赵学观,徐丽明,王应彪,等.基于Fluent与高速摄影的玉米种子定向吸附研究[J].农业机械学报,2014,45(10):103-109,28.
Zhao Xueguan, Xu Liming, Wang Yingbiao, et al. Directional adsorption characteristics of corn seed based on Fluent and high-speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):103-109, 28. (in Chinese)
- Guilherme T, Jacob V, William R, et al. Maize (*zea mays*) leaf angle and emergence as affected by seed orientation at planting[J]. Experimental Agriculture, 2011, 47(4):579-592.

- 6 江光华,孙彦玲,赵建民,等.玉米精量播种机定向、定位排种器:中国,201110406380.5[P].2012-06-13.
- 7 刘闻铎.装有种子有序排列的玉米种子产品及其制造方法:中国,201110418991.1[P].2013-01-23.
- 8 李敬兆,汤文兵,顾荣荣. PLC 实现的模糊 PID 控制器及其在通风机风量调节系统中的应用[J]. 江南大学学报:自然科学版,2006,5(4):422-426.
Li Jingzhao, Tang Wenbing, Gu Rongrong. Fuzzy PID control based on PLC and application in the ventilator wind rate regulation system[J]. Journal of Southern Yangtze University: Natural Science Edition, 2006, 5(4):422-426. (in Chinese)
- 9 Treesatayapun C. Fuzzy rules emulated network and application on nonlinear control systems[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(2):996-1004.
- 10 Rubaai A, Castro-Sitiriche M J, Ofoli A R. Design and implementation of parallel fuzzy PID controller for high-performance brushless motor drives an intetrated invironment for rapid control prototyping[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2008, 44(4):1090-1098.
- 11 罗智勇. 恒压供水 PLC 模糊控制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2008(3):63-65.
Luo Zhiyong. The PLC fuzzy control of a constant pressure water supply system[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2008(3):63-65. (in Chinese)
- 12 谢守勇,李锡文,杨叔子,等.基于 PLC 的模糊控制灌溉系统的研制[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6):208-210.
Xie Shouyong, Li Xiwen, Yang Shuzi, et al. Design and implementation of fuzzy-PID self-adaptive control for irrigating system with PLC[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6):208-210. (in Chinese)
- 13 宋伯生. PLC 编程理论:算法和技巧[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- 14 廖常初. S7-200 PLC 应用技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- 15 崔厚梅,郭西进,刘克林. 模糊自适应 PID 在转速控制中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(9):101-104.
Cui Houmei, Guo Xijin, Liu Kelin. Fuzzy-adaptive PID control in the speed control system[J]. Instrumentation and Measurement, 2009, 28(9):101-104. (in Chinese)
- 16 陆华才,徐月同,杨伟民,等.永磁直线同步电机进给系统模糊 PID 控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4):59-63.
Lu Huacai, Xu Yuetong, Yang Weimin, et al. Fuzzy PID controller design for a permanent magnet linear synchronous motor feeding system[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2007, 22(4):59-63. (in Chinese)
- 17 崔家瑞,李擎,张波,等.永磁同步电机变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊):190-194.
Cui Jiarui, Li Qing, Zhang Bo, et al. Permanent magnet synchronous motor of variable universe adaptive fuzzy PID control[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2013, 33(Supp.):190-194. (in Chinese)
- 18 沈瑜. 基于模糊 PID 的恒张力控制系统设计[J]. 液压气动与密封, 2009, 29(2):48-51.
Shen Yu. Design of constant tension control system based on fuzzy-PID[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2009, 29(2):48-51. (in Chinese)
- 19 王劫斐,王坚. 卷绕张力模糊控制[J]. 计算机与现代化, 2008(5):66-69.
Wang Jiefei, Wang Jian. Fuzzy-PID self-adaptive control on constant winding tension of sizing machine [J]. Computer and Modernization, 2008(5):66-69. (in Chinese)
- 20 曾光奇,胡均安,王东,等.模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2006.
- 21 刘志壮,洪添胜,李震,等.基于模糊控制的流量控制阀仿真[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2):83-86.
Liu Zhizhuang, Hong Tiansheng, Li Zhen, et al. Simulation of flow control valve based on fuzzy-PID self-adaptive control[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2):83-86. (in Chinese)
- 22 宋乐鹏,董志明,向李娟,等.变量喷雾流量阀的变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11):114-118.
Song Lepeng, Dong Zhiming, Xiang Lijuan, et al. Variable universe adaptive fuzzy PID control of spray flow valve[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11):114-118. (in Chinese)
- 23 宋淑然,阮耀灿,洪添胜,等.果园管道喷雾系统药液压力的自整定模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6):157-161.
Song Shuran, Ruan Yaocan, Hong Tiansheng, et al. Self-adjustable fuzzy PID control for solution pressure of pipeline spray system in orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6):157-161. (in Chinese)
- 24 郭娜,胡静涛. 插秧机行驶速度变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12):245-251.
Guo Na, Hu Jingtao. Variable universe adaptive fuzzy-PID control of traveling speed for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12):245-251. (in Chinese)