

基于模糊PID的采棉机作业速度最优控制算法与试验*

苗中华¹ 李 闯¹ 韩科立² 郝付平² 韩增德² 曾 力³
(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;
3. 贵州平水机械有限责任公司, 安顺 561104)

摘要: 针对采棉机作业速度影响采棉效率的问题, 提出基于模糊PID控制技术的采棉机作业速度实时调整算法, 建立行走速度调节模型, 实现采棉机作业速度最优控制。该算法通过实时获取棉花在线流量, 经采棉输入负荷梯度堵塞条件约束, 并将模糊算法和常规PID控制相结合, 应用模糊规则和推理方法对PID参数进行在线整定, 实时调节行走速度, 实现作业速度最优控制。借助基于FPGA的硬件控制器在4MZ-5型采棉机上进行了试验研究。试验表明: 所提出的算法可以根据棉花在线流量当量大小实时调整作业速度, 提高了采棉机作业效率; 有效避免了因采棉量过大造成的输棉管堵塞故障, 提高了采棉机智能化水平。

关键词: 采棉机 作业速度 模糊PID控制

中图分类号: S225.91⁺1; TP273⁺.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)04-0009-06

Optimal Control Algorithm and Experiment of Working Speed of Cotton-picking Machine Based on Fuzzy PID

Miao Zhonghua¹ Li Chuang¹ Han Keli² Hao Fuping² Han Zengde² Zeng Li³
(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China
2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China
3. Guizhou Pingshui Machinery Co., Ltd., Anshun 561104, China)

Abstract: The working efficiency of cotton-picking machine is always influenced by its working speed. To solve this problem, an algorithm for real-time adjusting the working speed was put forward based on fuzzy PID control technology. The walking speed regulation model was also established to achieve the optimal control of the working speed of cotton-picking machine. The algorithm combined the traditional PID control with fuzzy algorithm by acquiring the real-time parameters under the input load gradient congestion conditions, such as cotton production online. Both the fuzzy rules and reasoning method of PID were used to set online parameters and adjust the real-time working speed to achieve optimal control of operating speed. The field test was conducted by using 4MZ-5 five-line cotton-picking machine based on FPGA hardware. The testing result showed that the algorithm response speed was stable in 75 s. According to the cotton volume of online production, several parameters were adjusted by using fuzzy rules under the load gradient and block boundary conditions, which ensured the stability of picking up for cotton-picking machine with the best speed and improved working efficiency. It also reduced the loss in the process of picking cotton, and effectively avoided the tube plugging failure as a result of large amount of cotton. The system showed a strong flexibility and versatility and it could be used to reduce the driver's workload and improve the automation and information level for large equipment.

Key words: Cotton-picking machine Working speed Fuzzy PID control

收稿日期: 2014-07-16 修回日期: 2014-08-26
* 国家自然科学基金资助项目(51375293)、上海市基础研究重点资助项目(12JC1404100)和高新技术产业化重点资助项目(11CH-05)
作者简介: 苗中华, 副教授, 博士, 主要从事机电装备智能控制理论及技术研究, E-mail: zhmiao@shu.edu.cn

引言

目前,采棉机作为一种大型棉花收获机械,已在我国新疆、山东黄河流域等棉田试验区得到推广应用。然而,相比国外先进采棉机,国产采棉机凸显智能化、信息化程度不高等弱点,尤其是棉花采收效率低、采收效果不佳^[1-2]。其原因主要有:国产采棉机采锭头的制作工艺差,机械装置的设计水平、批量加工工艺较低;国产采棉机无作业速度巡航功能,采棉机以驾驶员凭经验设定的初始速度进行恒速作业(初采速度为 5.6 km/h,复采速度为 7.8 km/h)。如果作业速度太快,易造成堵塞,导致机器故障,甚至发生火灾;如果作业速度过慢,不仅无法充分发挥机采棉的效率优势,而且会使稀疏区的棉花含杂率上升,导致采收效果不佳。倘若能够根据棉花在线流量实时调整作业速度,使采棉机在输棉管道不堵塞情况下始终工作在最佳速度,则可以大大提高作业安全性和工作效率。

棉田是复杂开放的非结构性作业环境,具有较强的非线性、时变性等诸多不确定性扰动。为了保证稳健行驶和高效采收,采棉机在采收过程中需要实时调整控制参数来应对不断变化的外界状况,比如棉株稀疏程度、实时产量、地面状况、棉花承载量等。常规 PID 控制器经常出现参数整定不良、控制性能欠佳、对运行工况的适应性较差等情况^[3-7],导致无法充分发挥机采棉的高效性能优势。目前,国内对 PID 算法在智能农业装备上的使用进行了大量研究,并将变论域模糊 PID 控制算法成功应用于插秧机^[8],将前进速度灰色预测模糊控制系统应用在联合收获机,但采棉机自适应作业速度调节仍是技术空白。

本文结合模糊算法和 PID 控制技术^[9-11],通过 FPGA 硬件平台,以 4MZ-5 型采棉机为应用对象,研究基于模糊 PID 控制技术的作业速度实时调整算法,建立行走速度调节模型,实现采棉机作业速度最优控制。该算法通过实时获取棉花在线流量,并在采棉输送负荷梯度和堵塞边界条件约束下应用模糊规则和推理方法对 PID 参数进行在线整定,实时调节行走速度。

1 作业速度调节原理

作业速度调节原理见图 1,首先由安装于输棉管道上的 5 组近红外光棉花流量传感器测量棉花流量,然后根据“流量-质量”当量模型获得棉花实时在线产量;在采棉输送负荷梯度和堵塞边界条件下,通过模糊 PID 自调整算法使控制器输出适量电流,

再经过伺服功率放大,驱动电磁伺服阀阀芯开度大小;通过电磁伺服阀控制行走液压变量泵液压油的流量来改变行走速度,从而实现行走速度的自动调节。

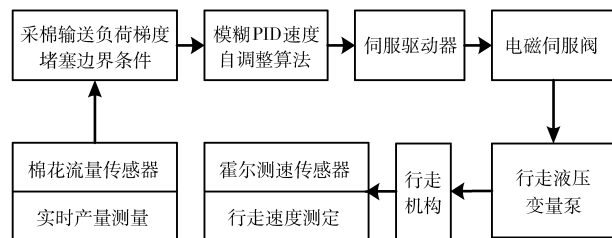


图 1 作业速度调节原理框图

Fig. 1 Scheme of working speed regulating principle

假设当前在线平均棉花流量(5个通道)为 M_r (kg/min),允许的最大在线棉花流量为 $M_{\max}$,单位电流梯度为 Δi , I_r 为当前作业速度所对应的电磁伺服阀驱动电流, I_{next} 为下一时刻输给电磁伺服阀的驱动电流, $I_{\max}$ 为电磁伺服阀允许的最大驱动电流,则棉花输送负荷梯度和堵塞边界条件为

$$I_{\text{next}} = \begin{cases} I_r + k_1 \Delta i & \left(0 \leq M_r \leq \frac{1}{5} M_{\max} \right) \\ I_r + k_2 \Delta i & \left(\frac{1}{5} M_{\max} < M_r \leq \frac{2}{5} M_{\max} \right) \\ I_r + k_3 \Delta i & \left(\frac{2}{5} M_{\max} < M_r \leq \frac{3}{5} M_{\max} \right) \\ I_r & \left(\frac{3}{5} M_{\max} < M_r \leq \frac{4}{5} M_{\max} \right) \\ I_r - k_4 \Delta i & \left(\frac{4}{5} M_{\max} < M_r \leq M_{\max} \right) \end{cases} \quad (1)$$

$$|I_{\text{next}}| \leq I_{\max}$$

式中, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 均是大于零的常数,且有 $k_1 \geq k_2 \geq k_3$ 。从式(1)可以看出,当棉花流量处于第 1、2、3 梯度 ($M_r \in [0, \frac{3}{5} M_{\max}]$) 时,允许增加棉花输送负荷,通过不断增加驱动电流来实现增速;当处于第 4 梯度 ($M_r \in (\frac{3}{5} M_{\max}, \frac{4}{5} M_{\max}]$) 时,棉花输送负荷处于最佳状态,可维持当前作业速度不变;当处于第 5 梯度 ($M \in (\frac{4}{5} M_{\max}, M_{\max}]$) 时,棉花输送负荷处于极限,有可能造成堵塞,该状态为堵塞边界条件,应通过不断减少驱动电流 ($k_4 \Delta i$) 来实现降速。

2 作业速度控制器的设计

采棉机作业时,棉花产量的不一致,在线测产信号波动、整机质量的变化,以及其他干扰因素的影响,使被控对象特性参数或结构发生变化,本文根据作业速度调节原理,使采棉机作业速度控制系统在

田间不同路况、不同产量情况下具有速度自适应调节能力。

2.1 控制器设计

采棉机作业速度控制器由一个标准 PID 控制器、模糊推理调节器和负荷梯度堵塞边界调节器组成。控制器结构见图 2，被控对象由伺服驱动器、电磁伺服阀、行走液压变量泵、行走机构组成。棉花流量传感器采集的实时流量经过传感器内部“流量-质量”当量模型转换为棉花实时在线产量，再经输送负荷梯度堵塞边界调节器转换为采棉机行走最优驱动电流，该驱动电流作为模糊 PID 调节器的输入信号 r_{in} ， y_{out} 为采棉机实时作业速度， $U(t)$ 为经模糊 PID 调节器输出的实际驱动电流。控制器在运行过程中不断监测棉花实时流量和采棉机行走速度，并将行走速度经霍尔测速传感器转换为相应的驱动电流输入控制器，与经采棉输送负荷梯度调节器输出的最优驱动电流 r_{in} 形成偏差 e 和偏差变化率 $\dot{e}$ ，实时调整 PID 控制参数输出适当驱动电流来调节行走速度，满足了系统自适应能力的要求。

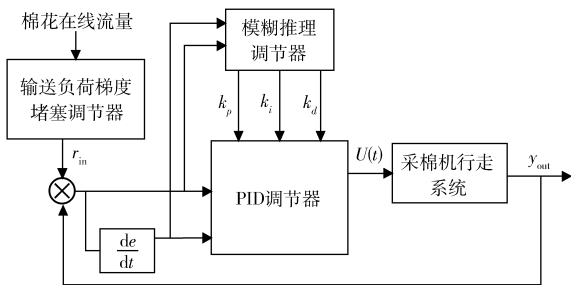


图 2 采棉机作业速度控制器结构图
Fig. 2 Chart of cotton-picking machine operation speed controller

2.2 模糊 PID 控制器模糊集、论域和隶属度函数的确定

将棉花在线流量转换的最优驱动电流作为模糊 PID 输入设定值，采棉机行走速度转换的驱动电流与设定值之间偏差 e 和偏差变化率 $\dot{e}$ 作为 PID 控制器的输入语言变量， K_p 、 K_i 、 K_d 作为输出语言变量。隶属函数均为三角分布函数。其模糊子集定义为： $\{\text{正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(ZO)、负小(NS)、负中(NM)、负大(NB)}\}$ ，对应的论域为 $\{3, 2, 1, 0, -1, -2, -3\}$ ； K_p 、 K_i 、 K_d 变量的模糊子集定义为 $\{\text{正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(ZO)}\}$ ，对应的论域为 $\{3, 2, 1, 0\}$ 。参数自整定公式为

$$\begin{cases} k_p(k) = k_{p0} + \Delta k_p(k) \\ k_i(k) = k_{i0} + \Delta k_i(k) \\ k_d(k) = k_{d0} + \Delta k_d(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中 k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} ——PID 参数的初始设计值
 $\Delta k_p(k)$ 、 $\Delta k_i(k)$ 、 $\Delta k_d(k)$ ——模糊控制器的 3 个输出

此处可根据采棉机行走速度调节器自动调整 PID 3 个参数的取值。

打开曲面窗口，输出比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 的控制曲面图形如图 3 所示，随着 e 、 $\dot{e}$ 正向增加， K_p 逐渐增大， K_i 、 K_d 逐渐减小；随着 e 、 $\dot{e}$ 反向增加， K_p 逐渐增大， K_i 、 K_d 逐渐减小；在零点 K_p 为最小， K_i 、 K_d 为最大值。

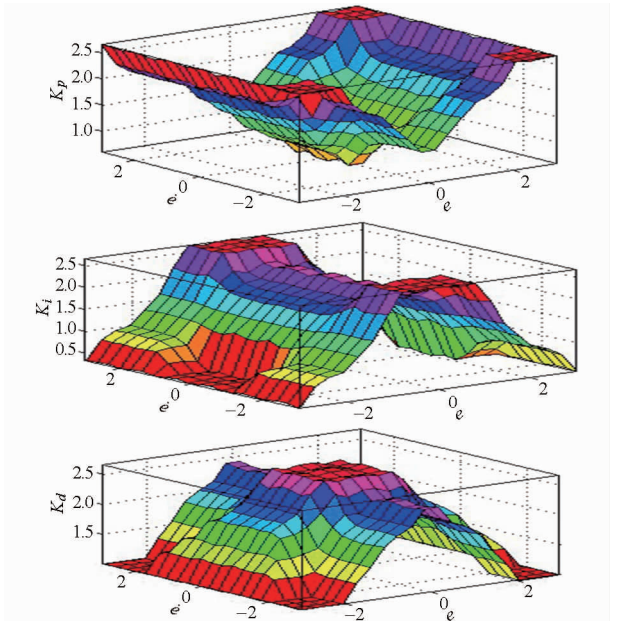


图 3 K_p 、 K_i 、 K_d 的控制曲面

Fig. 3 Graphics of control surface of K_p 、 K_i 、 K_d

2.3 控制流程

通过模糊控制来对 PID 3 个参数进行在线修正，从而使被控对象有良好的动稳态性能。基于该系统，当采棉机启动后，先设定初始作业速度，同时通过棉花流量传感器计算出实际棉花在线流量，经负荷梯度堵塞边界调节器转换为最优驱动电流，再经过模糊 PID 调节后的最终输出就是发送给采棉机作业速度所对应的实际驱动电流。算法流程如图 4 所示。

3 仿真与试验

3.1 仿真结果分析

在 Matlab 的 Simulink 环境下设计仿真框图，运用 Fuzzy 工具箱对模糊 PID 控制系统进行仿真。本文选择仿真对象为采棉机速度自调整系统经典传输模型，即

$$G(s) = \frac{0.02S + 1}{2S^2 + 3S + 2} \quad (3)$$

采样时间为 1 ms，输入信号采用幅值为 1.0 的

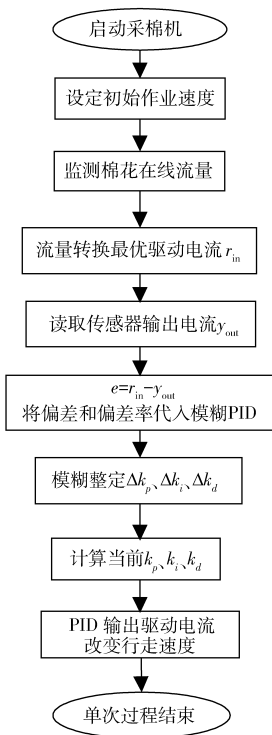


图 4 采棉机作业速度控制流程图

Fig. 4 Flow chart of cotton-picking machine operation speed controller

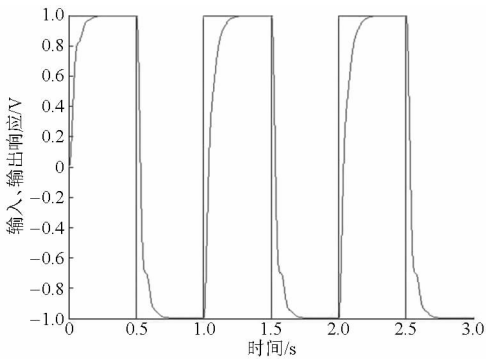


图 5 单位方波响应曲线

Fig. 5 Step response curve

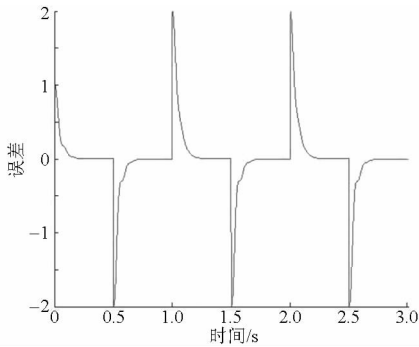


图 6 误差响应曲线

Fig. 6 Error response curves

方波信号。图 5 为单位方波信号响应曲线,图 6 为误差响应曲线,图 7~9 为阶跃信号下 K_p 、 K_d 、 K_i 自适应调整曲线。

从仿真结果看出:

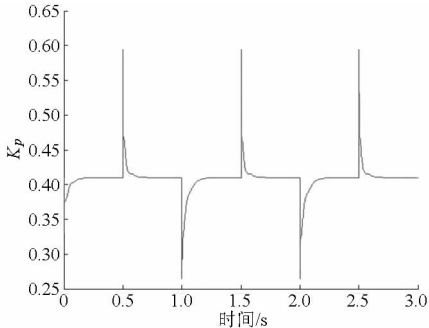


图 7 K_p 自适应调整曲线

Fig. 7 K_p adaptive adjustment curve

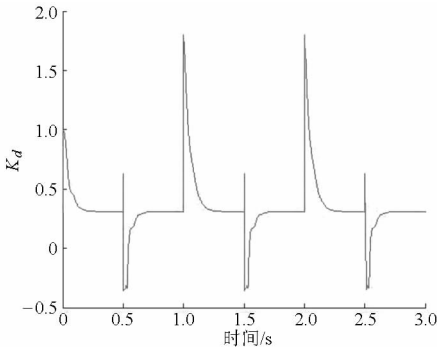


图 8 K_d 自适应调整曲线

Fig. 8 K_d adaptive adjustment curve

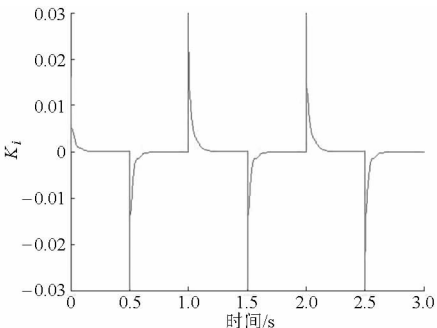


图 9 K_i 自适应调整曲线

Fig. 9 K_i adaptive adjustment curve

(1) 对于采棉机速度自调整系统经典传输模型,模糊 PID 具有较小的超调量和较短的调节时间,具有较好的动态响应特性和稳态特性。

(2) 模糊 PID 能根据工况变化过程中偏差和偏差变化率自行进行 PID 参数调整,因而具有较好的自适应能力,比较适合应用于采棉机行走速度调节。

3.2 田间试验与结果分析

将采棉机作业速度控制器应用在自行设计的基于 FPGA 的硬件平台上。通过 Matlab 仿真得出的模糊自整定 PID 参数的模糊推理规则和控制器算法结构,进行 Verilog 分层设计,分别实现采棉输送负荷梯度堵塞边界调节器算法、模糊逻辑推理、模糊自整定 PID 算法、数据缓存和外围接口控制,最后在 Altera Cyclone II 芯片上实现控制器功能,并在此基础上,以 4MZ-5 型采棉机作为试验对象,在新疆农

八师 136 兵团棉田内进行多组棉花收获试验研究(图 10)。



图 10 田间试验图片

Fig. 10 Field experiment and function verification

现以其中一组棉花收获试验结果进行分析,收获一大块棉田约 43 hm²,历时 2 h,由于需要计算棉花流速作为整个系统输入,所以将监控界面调整为每分钟刷新一次试验数据,并计算整个采棉机系统响应时间。记录数据包括在线棉花流速和模糊 PID 参数值 K_p 、 K_i 、 K_d 以及系统响应时间。为了便于观察数据变化趋势,本次试验数据为 5 min 数据总和的 5 次平均值,共 24 组数据,建立如表 2 所示的棉花在线流量、理想最佳流量、行走速度数据表。

表 2 棉花在线流量、理想最佳流量和行走速度

Tab. 2 Parameters of cotton yield, ideal optimal flow and walking speed online			
序号	棉花在线流量 /(kg·min ⁻¹)	理想最佳流量 /(kg·min ⁻¹)	行走速度/ (km·h ⁻¹)
1	93	100	5.6
2	95	100	5.9
3	98	100	6.2
4	102	114	6.5
5	103	114	6.6
6	107	114	6.9
7	113	114	7.2
8	115	114	7.4
9	118	120	7.5
10	120	120	7.8
11	135	130	7.79
12	139	140	7.81
13	142	152	7.78
14	158	152	7.8
15	162	170	7.68
16	170	170	7.4
17	185	190	6.6
18	162	170	6.2
19	144	150	5.8
20	128	130	5.6
21	110	114	6.2
22	115	114	6.8
23	122	130	7.2
24	145	152	7.5

表 3 为系统响应时间与 PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 数据表,设采棉机初始速度为 5.6 km/h, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 2、0.5、1,棉花流量传感器允许的最大在线棉花流量为 190 kg/min。

表 3 系统响应时间和 PID 参数

Tab. 3 System response time and parameters of PID				
序号	系统响应时间/s	K_p	K_i	K_d
1	75	2	0.5	1
2	75	2	0.6	1
3	74	3	0.6	1.5
4	74	3	0.6	2
5	73	4	0.7	2
6	75	4	0.7	2
7	74	5	0.7	2
8	75	5	0.7	2.5
9	76	5	0.7	2.5
10	76	5	0.7	2.5
11	74	5	0.8	2.5
12	74	5	0.8	2.5
13	72	5	0.8	2.5
14	74	5	0.8	2.3
15	75	5	0.8	2.2
16	76	5	0.8	2
17	73	4	0.7	2
18	74	4	0.7	1.8
19	75	3	0.6	1.5
20	74	2	0.6	1
21	73	3	0.6	1
22	75	3	0.6	1.5
23	74	4	0.7	2
24	75	5	0.8	2.5

将表 2 中 24 组数据按时间排序得到棉花流量与行走时间关系曲线(图 11),以及棉花流量与行走速度变化趋势(图 12)。

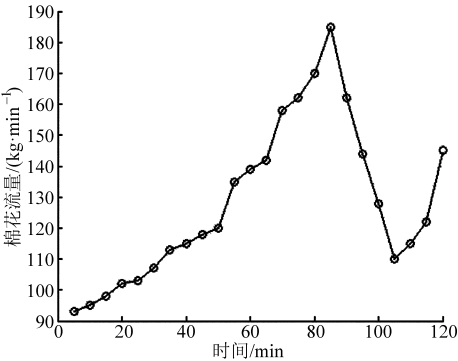


图 11 棉花流量与行走时间关系曲线

Fig. 11 Cotton flow equivalent vs travel time

采棉机以初始速度 5.6 km/h 工作,0~5 min 内监测棉花在线流量为 93 kg/min,此时采棉地况略差,棉花在线流量处于输送负荷梯度堵塞条件中第 3 梯度,理想最佳采棉流量约为 100 kg/min,控制系统允许增速来增加棉花输送负荷,在 5~50 min,采

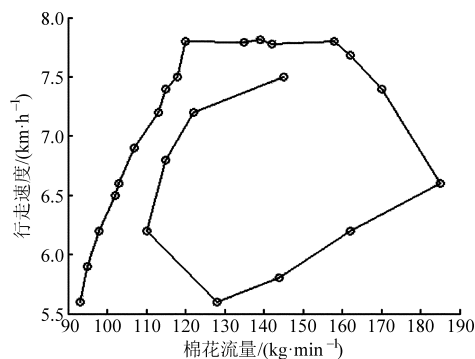


图12 棉花流量与行走速度关系曲线

Fig. 12 Cotton flow equivalent vs walking speed

棉机加速到 7.8 km/h, 理想最佳采棉流量约为 120 kg/min, 棉花在线流量增加到 120 kg/min。在 50 ~ 70 min, 采棉机进入优良采棉地况, 棉花在线流量增加到 158 kg/min, 但行走速度维持在 7.8 km/h, 验证了棉花在线流量处在棉花输送负荷梯度堵塞条件中第 4 梯度, 棉花输送负荷处于最佳状态, 维持当前作业速度不变。由于此段采棉地况良好, 棉花喂入量增多, 在线流量继续增加到 185 kg/min, 此时, 棉花在线流量处在负荷梯度堵塞条件中第 5 梯度, 为防止输棉管堵塞, 采棉机开始降速到 5.6 km/h, 棉花在线流量重新处于输送负荷梯度堵塞条件中第 3 梯度, 采棉机开始提速增加输送负荷。经由上

面控制过程并参照响应时间和 PID 参数变化数据表, 模糊 PID 最优控制算法可保证采棉机无故障的前提下优化 PID 模型参数, 系统响应时间稳定在 75 s 左右, 同时通过改变 K_p 、 K_i 、 K_d 参数调整下一阶段行走速度, 从而稳定最佳采棉速度, 提高采棉机的作业稳定性和工作效率, 实际工作概况接近理想采棉输送状态。

采棉机在采棉过程中, 驾驶员凭经验掌控采棉作业速度, 如若经验不足, 经常出现采棉头或者输棉管堵塞现象。但本次试验过程中, 采棉机根据采棉量实时调节, 有效避免了因采棉量过大造成的输棉管堵塞故障, 提高了采棉机智能化水平。

4 结束语

针对采棉机速度自调整非线性、时变性的特点, 研究了基于采棉机速度自调整系统的模糊 PID 控制技术, 建立行走速度调节模型, 该控制系统以 FPGA 为硬件平台, 对该控制过程进行仿真和田间试验, 结果表明该控制系统能在采棉机作业时通过在线流量有效调整采棉机作业速度, 提高了采棉工作效率, 同时减少采棉机在采摘过程中输棉管堵塞现象的发生, 减轻驾驶员的工作负担, 对采棉机智能控制系统的性能改善具有重要意义。

参 考 文 献

- 张彦娥, 张漫, 张文革, 等. 采棉机测产数据采集与处理的试验研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(4): 95-98.
Zhang Yan'e, Zhang Man, Zhang Wen'ge, et al. Experimental research on collection and processing of cotton yields data on the cotton picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(4): 95-98. (in Chinese)
- 苗中华, 褚建刚, 刘成良, 等. 采棉机智能监控系统 CAN 应用层协议设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 180-184.
Miao Zhonghua, Chu Jian'gang, Liu Chengliang, et al. CAN application-layer protocol design of intelligent monitoring system cotton picking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 180-184. (in Chinese)
- 裘智峰, 黄灯, 桂卫华, 等. 基于变论域插值模糊 PID 控制系统的研究与应用[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(11): 2435-2440.
Qiu Zhifeng, Huang Deng, Gui Weihua, et al. Study and application of the control system based on interpolation algorithm fuzzy-PID with variable universe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(11): 2435-2440. (in Chinese)
- 李明生, 赵建军, 朱忠祥, 等. 拖拉机电液悬挂系统模糊 PID 自适应控制方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 295-300.
Li Mingsheng, Zhao Jianjun, Zhu Zhongxiang, et al. Fuzzy-PID self-adaptive control method in electro hydraulic hitch system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 295-300. (in Chinese)
- 胡包钢. 非线性 PID 控制器研究比例分量的非线性方法[J]. 自动化学报, 2006, 32(2): 295-300.
Hu Baogang. A study on nonlinear PID controllers proportional component approach[J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(2): 295-300. (in Chinese)
- 杜井庆, 高世桥, 罗创, 等. 基于 PID 算法的控制量按任意函数变化的一种控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1317-1322.
Du Jingqing, Gao Shiqiao, Luo Chuang, et al. Control method with control quantum varying in the form of arbitrary function based on PID algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6): 1317-1322. (in Chinese)
- 苏玉鑫, 郑春红, Peter C Muller. 非线性机械系统 PID 控制渐进稳定性分析[J]. 自动化学报, 2008, 34(12): 1544-1548.
Su Yuxin, Zheng Chunhong, Peter C Muller. A asymptotic stability of PID controller for nonlinear mechanical system[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(12): 1544-1548. (in Chinese)
- 陈进, 宁小波, 李耀明, 等. 联合收获机前进速度模型参考的模糊自适应控制系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 87-91, 86.
Chen Jin, Ning Xiaobo, Li Yaoming, et al. A fuzzy adaptive control system of forward speed for combine harvester based on model reference[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 87-91, 86. (in Chinese)

- International Journal of Rotating Machinery, 2007, Article ID 83641, 8 pages.
- 6 Tan L, Zhu B S, Cao S L, et al. Cavitation flow simulation for a centrifugal pump at a low flow rate [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 949–952.
 - 7 Balaka R, Rachman A, Delly J. Blade number effect for a horizontal axis river current turbine at a low velocity condition utilizing a parametric study with mathematical model of blade element momentum [J]. Journal of Clean Energy Technologies, 2014, 2(1): 1–5.
 - 8 Chakraborty S, Pandey K M, Roy B. Numerical analysis on effects of blade number variations on performance of centrifugal pumps with various rotational speeds [J]. International Journal of Current Engineering and Technology, 2012, 2(1): 143–152.
 - 9 Singh P, Nestmann F. Experimental investigation of the influence of blade height and blade number on the performance of low head axial flow turbines [J]. Renewable Energy, 2011, 36(1): 272–281.
 - 10 Castelli M R, Betta S D, Benini E. Effect of blade number on a straight-bladed vertical-axis darreius wind turbine [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2012, 6(1): 256–262.
 - 11 谈明高, 王勇, 刘厚林, 等. 叶片数对离心泵内流诱导振动噪声的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 131–135.
Tan Minggao, Wang Yong, Liu Houlin, et al. Effects of number of blades on flow induced vibration and noise of centrifugal pumps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 131–135. (in Chinese)
 - 12 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 不同叶片包角离心泵空化振动和噪声特性 [J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(5): 390–393.
Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. Characteristics of cavitation vibration and noise in centrifugal pumps with different vane wrap angles [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 390–393. (in Chinese)
 - 13 施卫东, 吴苏青, 张德胜, 等. 叶片数对高比转速轴流泵空化特性的影响 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 72–77.
Shi Weidong, Wu Suqing, Zhang Desheng, et al. Effects of number of blades on cavitation of high specific speed axial flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 72–77. (in Chinese)
 - 14 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
 - 15 Ding H, Visser F C, Jiang Y, et al. Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial applications [C]//ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2009–78256; 2009: 1–17.
 - 16 ANSYS Inc. Theory reference [M]. ANSYS Inc, 2012.
 - 17 Hofmann M, Stoffel B, Friedrichs J, et al. Similarities and geometrical effects on rotating cavitation in two scaled centrifugal pumps [C]//Proceedings of 4th International Symposium on Cavitation, CAV 2001: Session B 8.001.
 - 18 Fu Yanxia, Yuan Jianping, Yuan Shouqi, et al. Numerical and experimental analysis of flow phenomena in a centrifugal pump operating under low flow rates [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2015, 137(1): 011102.
 - 19 Coutier-Delgosha O, Caignaert G, Bois G, et al. Influence of the blade number on inducer cavitating behavior [C]//Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2009–78405, 2009, 2: 349–360.
 - 20 任芸, 吴登昊, 刘厚林, 等. 离心泵内部不稳定流动的 PIV 测试 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 46–51.
Ren Yun, Wu Denghao, Liu Houlin, et al. PIV experiment on flow instabilities in centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 46–51. (in Chinese)
 - 21 张帆, 袁寿其, 付强, 等. 双蜗壳式离心泵内部非定常流动压力特性分析 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 52–58.
Zhang Fan, Yuan Shouqi, Fu Qiang, et al. Analysis on pressure characteristics during internal unsteady flow in double volute centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 52–58. (in Chinese)

(上接第 14 页)

- 9 朱颖合, 薛凌云, 黄伟. 基于自组织调整因子的模糊 PID 控制器设计 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(12): 2732–2737.
Zhu Yinghe, Xue Lingyun, Huang Wei. Design of fuzzy PID controller based on self-organizing adjustment factors [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(12): 2732–2737. (in Chinese)
- 10 韩成浩, 赵丁选. 基于自整定模糊 PID 控制算法的电液伺服系统设计 [J]. 制造业自动化, 2012, 34(4): 11–13.
Han Chenghao, Zhao Dingxuan. Electro-hydraulic servo-system design based on ruzz-adaptive PID control algorithm [J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(4): 11–13. (in Chinese)
- 11 杨贤军. 基于模糊理论的智能 PID 控制器设计 [J]. 制造业自动化, 2013, 35(3): 115–121.
Yang Xianjun. The design of intelligent PID controller based on fuzzy theory [J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(3): 115–121. (in Chinese)
- 12 Harinath E, Mann G K I. Design and tuning of standard additive model based fuzzy PID controllers for multivariable process systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2008, 38(3): 667–674.
- 13 Man G I, Hu B G, Gosine R G. Two-level of PID controllers [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2001, 31(2): 263–269.
- 14 Muhammad Ilyas Menhas, Fei Minrui, Wang Ling, et al. Adaptive mutation based probability binary PSO for control of ball mill pulverizing system [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(8): 1568–1574.
- 15 Shi Weivivien. A novel design of fuzzy PID controllers for dual-sensor cardiac pacemaker systems [J]. Open Journal of Applied Biosensor, 2013, 2(2): 29–38.