

基于模糊PID的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验

陈满¹ 鲁伟¹ 汪小昆^{1,2} 孙国祥^{1,2} 张瑜^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 南京 210031)

摘要: 为了实现冬小麦实时变量精确追肥,研究了基于模糊PID控制技术的变量追肥机追肥量实时调整算法,通过对排肥器转速和开度双变量调节,实现追肥量的优化控制。系统首先采用粒子群优化算法确定PID控制器参数的初始值,然后通过实时获取冬小麦冠层归一化植被指数和排肥器实时状态,结合模糊控制理论和PID控制技术,对PID参数进行在线整定,实时调整排肥器的转速和开度,从而实现追肥量的最优控制。试验结果表明:施肥过程中,施肥量存在波动性。但施肥量变异系数小,最大为3.22%,均值为2.09%,可以满足田间变量施肥的要求。模糊PID控制算法具有良好的动态稳定性和跟踪性能,无论是室内试验还是大田试验的控制精度均达到86%以上。

关键词: 冬小麦; 变量追肥; 粒子群优化算法; 转速开度双变量; 模糊PID控制

中图分类号: S224.22; TP273+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0071-06

Design and Experiment of Optimization Control System for Variable Fertilization in Winter Wheat Field Based on Fuzzy PID

Chen Man¹ Lu Wei¹ Wang Xiaochan^{1,2} Sun Guoxiang^{1,2} Zhang Yu^{1,2}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Jiangsu Province Engineering Laboratory for Modern Facilities Agricultural Technology and Equipment, Nanjing 210031, China)

Abstract: In order to achieve real-time variable dressing at winter wheat jointing stage, the fertilizer quantity real-time adjustment algorithm based on fuzzy PID control was studied. To achieve the optimal control of fertilizer, the rotation speed and opening of fertilizer apparatus were real-timely adjusted online. With ITAE criterion as the fitness function, the initial values of PID controller parameters were determined based on particle swarm optimization algorithm (PSO). The algorithm combined the traditional PID control with fuzzy algorithm by acquiring the real-time parameters, such as the crop canopy real-time spectral information (Normalized differential vegetation index, NDVI), rotation speed and opening. The parameters of PID were set online and the rotation speed and opening of fertilizer apparatus were real-timely adjusted to achieve optimal control of variable dressing. Results showed that the fuzzy PID had good dynamic stability and tracking performance. A fluctuation existed on fertilizing amount during the process of fertilization. But the variation coefficient of fertilizing amount was small with the maximum value of 3.22% and average value of 2.09%, which met the requirements of field variable fertilization. In the laboratory tests, the maximum overshoot of rotation speed was about 11.96%, the maximum overshoot of opening did not exceed 14.94%, and the system precision could reach above 87%. In the field experiments, the maximum overshoot of rotation speed was about 12.80%, the maximum overshoot of opening did not exceed 14.79%, and the system precision could reach above 86%. The system had good stability, accuracy and rapidity and it was able to satisfy the agriculture technical requirements.

收稿日期: 2015-08-12 修回日期: 2015-09-30

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD08B04-8)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX_0518)

作者简介: 陈满(1985—),男,博士生,主要从事检测技术及自动化装置研究,E-mail: chm_world@163.com

通信作者: 汪小昆(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生物环境模拟与自动化控制研究,E-mail: wangxiaochan@njau.edu.cn

Key words: winter wheat; variable fertilization; particle swarm optimization algorithm; bivariate control parameters; fuzzy PID control

引言

变量施肥技术可辨别田间养分的空间差异性,从而精确地控制施肥量,既满足了农作物的生长需求,也兼顾了生态环境,是现代化农业发展的方向^[1-2]。变量施肥技术涉及到施肥机械、施肥模型、控制系统等多个领域,而变量施肥控制技术是实现精确施肥的重要组成部分。

目前,国内外的变量施肥以测土配方为主,采用PID控制器结合施肥处方图实现单变量(排肥器转速)控制的变量施肥作业^[3-5]。但常规的PID控制器存在参数整定不良、适应性较差、控制性能不佳等情况,同时单变量模式虽然控制简单,但存在施肥量调节精度和范围小的劣势,这导致无法充分发挥变量施肥技术的优势^[6]。近些年,国内对双变量智能变量施肥机械进行了研究^[7-8],但基于近地光谱探测技术,通过开度转速双变量调节的实时变量追肥机械及其控制系统的研究尚不多见。

由于模糊PID控制具有参数自整定、控制灵活、适应性强、控制精度高等优点^[9],因此本文采用模

糊PID控制技术,以自行研制的基于近地光谱技术的变量追肥机为研究对象^[10-11],研究基于模糊PID控制技术的排肥器开度转速双变量实时调整算法,建立排肥器排量调节模型,以期实现变量追肥最优控制。

1 变量追肥工作原理

冬小麦变量追肥工作原理如图1所示,首先由安装在拖拉机前端的6个光谱传感器测量小麦冠层的归一化植被指数,进而根据Ruan模型计算出实时的小麦需氮量,然后结合安装在拖拉机上的霍尔测速系统监测得到的机具实时行进速度,计算出实时的目标追肥量;同时由霍尔传感器实时监测排肥器的转速,由位移传感器监测排肥器的开度;决策系统将目标施肥量、排肥器实时转速和开度作为前端模糊控制系统的输入量,得到排肥器的目标开度和转速控制量,然后通过模糊PID自调整算法使控制器输出相应的PWM占空比和步进数,再经过功率放大,驱动直流电动机调速,调整排肥器转速,驱动步进电动机带动丝杆滑轨,改变排肥器的开度,从而实现冬小麦变量追肥调节。

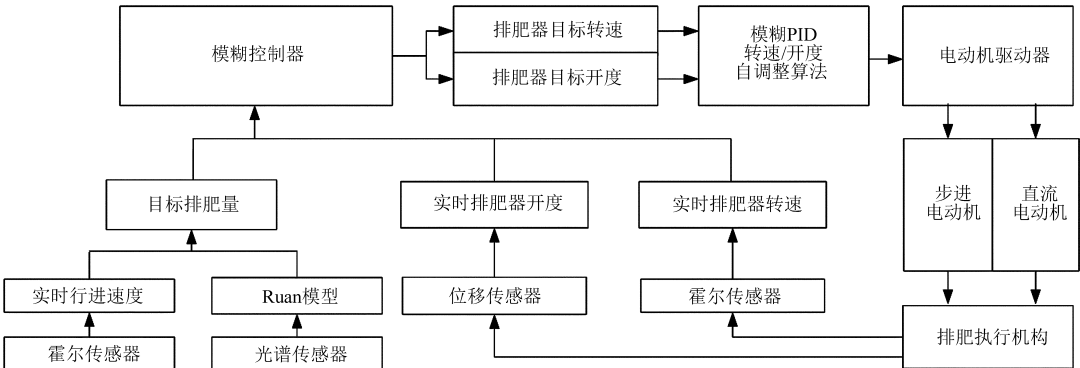


图1 变量追肥工作原理框图
Fig.1 Schematic of variable fertilization

2 变量追肥控制系统设计

冬小麦变量追肥作业时,由于小麦长势存在空间差异性,冠层归一化植被指数监测信号波动,在线测速、测排量信号的抖动,以及其他干扰因素的影响,易使得系统被控对象的参数或结构发生变化,因此本文根据变量追肥调节原理,结合模糊控制理论,研究设计变量追肥机排肥量控制系统,使其在田间肥料需求存在空间差异性的情况下具有排肥自适应调节能力。

2.1 系统模型和传递函数

变量追肥控制系统由直流电动机控制排肥器的

转速和步进电动机控制排肥器的开度两部分组成。排肥器转速控制实质上是一个直流电动机控制系统,而在忽略微小电感的情况下,直流电动机可以看成是一个典型的一阶系统,其传递函数是一个典型的惯性环节和积分环节串联^[12-13],用拉氏变换来表示目标量和控制量,则传递函数可定义为

$$G(s) = \frac{1/(2\pi K_e)}{s\left(\frac{J_a R_a}{K_e K_e} s + 1\right)}$$

(1)

式中 K_e ——电动势常数,由电动机结构参数确定
 J_a ——电动机转子转动惯量
 R_a ——电动机电阻

K_c ——电磁力矩常数,由电动机结构参数确定

本系统采用 57 系列无刷直流电动机(型号: 57ZW - 57HX),主要参数有电动势常数 6.23 Vrms/Krpm,电阻 0.600 Ω ,电磁力矩常数 0.069 0 N·m/A,转动惯量 0.3 kg·cm²,代入式(1)后得

$$G(s) = \frac{16.8}{s(0.155s + 1)} \quad (2)$$

此外,排肥器开度调节系统如图 2 所示,步进电动机转轴经减速器与丝杆导轨的转轴相连接,通过驱动滑块带动排肥轴左右移动,从而实现排肥槽开度的调节,因此实际工作只要调节滑块移动距离 l ,就可以达到调节排肥器开度的目标。

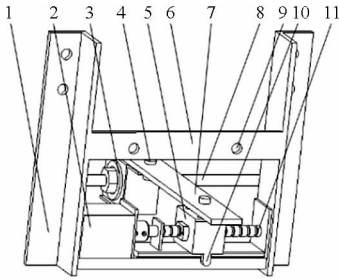


图 2 开度调节装置结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of opening adjustment device

1. 固定架 2. 步进电动机 3. 轴套滑块 4. 支点 5. 传动螺母
6. 限位开关固定架 7. 杠杆 8. 限位开关 9. 传动轴 10. 位移传感器 11. 丝杆

不考虑电磁惯性和机械惯性,假设初始状态为零,那么输出转速 n 为

$$n = k_1 k_2 U_r \quad (3)$$

式中 k_1 ——转换系数 k_2 ——减速比

U_r ——步进电动机工作电压

可建立滑块运动的数学模型为

$$dl = \frac{n P_h}{60} dt = \frac{k_1 k_2 U_r P_h}{60} dt \quad (4)$$

式中 t ——步进电动机工作时间

P_h ——单线右旋普通螺纹导程

实际工作中, U_r 和 P_h 为常数,分别为 24 V 和 5 mm。对式(4)积分可得

$$l = \frac{k_1 k_2 U_r P_h}{60} (t - t_0) \quad (5)$$

式中 t_0 ——电动机时延,由电磁惯性和机械惯性决定

对式(5)进行拉氏变换可得系统的传递函数

$$G(s) = \frac{k_1 k_2 U_r P_h}{60 s^2} - \frac{t_0}{s} \quad (6)$$

经测试,当 U_r 为 24 V 时,输出转速 n 为 12.2 r/min,电动机的延时为 0.005 ~ 0.01 s,系统取 t_0 为 0.01 s,

则传递函数为

$$G(s) = \frac{-0.01s + 1.019}{s^2} \quad (7)$$

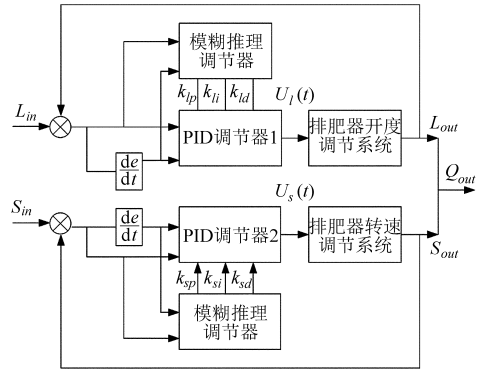


图 3 排肥器排量控制器结构图

Fig. 3 Schematic of fertilizer applicator displacement controller

2.2 控制器设计

变量追肥机排肥量控制器由开度调节和转速调节两个部分组成,分别包含一个标准 PID 控制器和模糊推理调节器。控制器结构如图 3 所示,被控对象由电动机驱动器、直流电动机、步进电动机、丝杆滑轨、执行机构组成。由前端模糊控制系统生成变量追肥机控制量序列,将序列中的排肥器开度控制量转换为滑块移动距离作为开度调整子系统中模糊 PID 调节器的输入信号 L_{in} , $U_l(t)$ 为经模糊 PID 调节器输出的开度控制量, L_{out} 为滑块实时的移动距离;将序列中的排肥器转速控制量作为转速调整子系统中模糊 PID 调节器的输入信号 S_{in} , $U_s(t)$ 为经模糊 PID 调节器输出的转速控制量, S_{out} 为排肥器实时的作业转速;而 Q_{out} 为变量追肥机实时的排肥量。根据专家经验和相关知识制定模糊推理调节器相应的控制规则^[14-16],控制器执行过程中,实时地监测排肥器的转速和滑块的实时位置,并将其输入到控制子系统中,与经前端模糊控制系统输出的最佳控制量形成偏差 e 和偏差变化率 $\dot{e}$,经模糊推理调节器实时调整 PID 控制参数输出适当控制量来调整排肥器的转速和开度,实现系统的自适应调节,到达控制目标。

2.3 优化 PID 参数初始值

为了使整个系统指标达到最优,采用粒子群优化算法(PSO)确定 PID 控制器各参数的初值的最佳组合。PSO 是一种有效的全局寻优算法,假设粒子群在一个 n 维空间中搜索,那么粒子在空间的位置可以表示为 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$,亦代表问题的一个潜在解。 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 表示粒子在空间的速度,则 PSO 算法公式^[17]为

$$v_{id}(k+1) = \omega v_{id}(k) + c_1 r_1 (p_{id}(k) - x_{id}(k)) + c_2 r_2 (p_{gd}(k) - x_{id}(k)) \quad (8)$$

$$x_{id}(k+1)=x_{id}(k)+v_{id}(k+1) \tag{9}$$

式中 $x_{id}(k)$ ——粒子 i 在第 k 次迭代中第 d 维上的位置

$v_{id}(k)$ ——粒子 i 在第 k 次迭代中第 d 维上的速度

$p_{id}(k)$ ——粒子 i 个体最优位置

$p_{gd}(k)$ ——粒子群体最优位置

$c_1、c_2$ ——加速度因子,为非负常数

ω ——惯性因子

k ——迭代次数

$r_1、r_2$ ——0~1 之间的随机数

其过程如图 4 所示。将粒子群优化算法产生的粒子群中的粒子依次赋值给 PID 控制器的 3 个控制参数,然后调用、运行建立的控制系统 Simulink 仿真模型,得到该组参数对应的性能指标,再传递到粒子群优化算法中作为该粒子的适应值,以此判断是否达到最优^[18-19]。

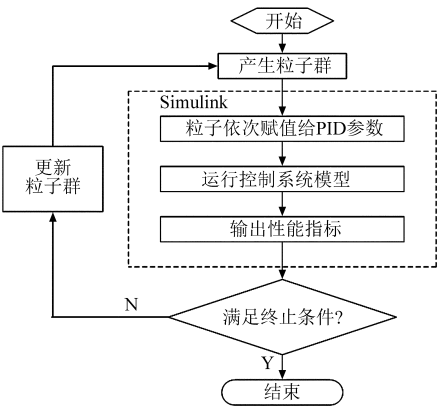


图 4 PID 参数初值整定流程图
Fig. 4 Flow chart of PSO-PID

系统选择 ITAE 准则作为适应度函数

$$f=\int_0^{\infty} t|e(t)|dt \tag{10}$$

式中 $e(t)$ —— t 时刻的偏差

粒子群算法的各参数如下:粒子群规模为 100,惯性因子为 0.6,加速常数为 2,维数为 3,最大迭代次数为 100,最小适应值为 0.01,速度范围为 $[-1,1]$,待优化的 PID 3 个参数范围均为 $[0,100]$ 。通过粒子群算法不断寻优,最终得到系统 PID 控制器最优组合为

$$\begin{cases} k'_{sp}=1.3181 \\ k'_{st}=15.4334 \\ k'_{sd}=2.9722 \\ k'_{lp}=12.9079 \\ k'_{li}=41.7403 \\ k'_{ld}=27.8673 \end{cases}$$

3 试验与结果分析

3.1 肥料余量对排量的影响

施肥作业过程中,肥料箱内的肥料将逐渐减少,肥料的变化是否会影响到实际的排肥精度。本试验通过在施肥机的肥料箱内,安置 4 个小肥料箱,控制变量施肥系统进行模拟施肥,每隔 10 s 测量一次小肥料箱内肥料的变化,探索肥料减少对施肥机械排肥量的影响,试验结果如图 5 所示。

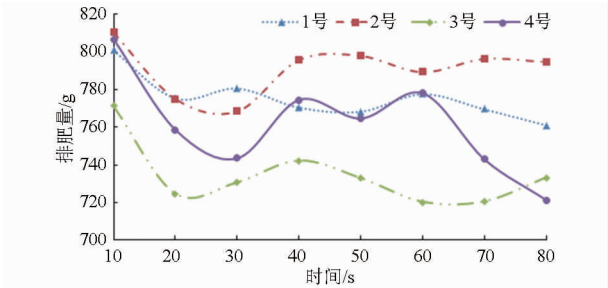


图 5 施肥机排肥量测试

Fig. 5 Test of fertilizer applicator displacement

由图 5 可见,施肥作业过程中,施肥机的排肥量呈现波动性。测试间隔内,4 号肥料箱排肥量的变异最大,变异系数达到 3.22%;而 1 号肥料箱的变异系数最小,只有 1.44%;4 个肥料箱的平均变异系数为 2.09%。由此可见,虽然施肥过程中,施肥机械的排肥量在不断地发生变化,但是其变异系数小,整体不会影响变量施肥精准作业,可以满足实际施肥作业的要求。

3.2 追肥机试验

为了研究冬小麦变量追肥开度转速优化控制的实用性,在自行研制的变量追肥机上进行试验验证。首先将模糊 PID 优化控制方法和常规 PID 控制方法分别植入变量追肥机控制系统,由计算机事先产生一组开度及转速控制序列,由串口以 10 s 为间隔发送给变量控制系统,由霍尔传感器和直线位移传感器以 1 s 为间隔实时记录排肥系统的实时转速和开度,试验结果如图 6 所示。

由图 6 可得,转速控制过程中,模糊 PID 控制最大控制误差为 11.96%,平均控制误差为 10.53%;而常规 PID 控制最大控制误差为 24.54%,平均控制误差为 17.08%;开度控制过程中,模糊 PID 控制最大控制误差为 14.94%,平均控制误差为 12.40%;而常规 PID 控制最大控制误差为 26.84%,平均控制误差为 18.91%;模糊 PID 控制平均误差比常规 PID 方法减小了 6.5%,因此,模糊 PID 控制效果更为理想,可以更好地实现精确追肥的目标。

3.3 田间试验

2014 年 3 月 7 日在江苏省盐城市响水县大有镇黄海农场进行田间试验,现以其中一组变量追肥试验结果进行分析,试验记录数据包括小麦冠层归一化植被指数、追肥机实时速率、目标追肥量、目标转速、目标开度、实时转速以及实时开度。系统的采

样周期为 1 s,部分试验数据如表 1 所示。试验结果表明,基于模糊 PID 控制算法的变量追肥系统,可以实现冬小麦变量精准变量追肥,其中转速控制误差低于 12.80%,平均误差小于 11.83%;开度控制误差低于 14.79%,平均误差小于 13.83%。

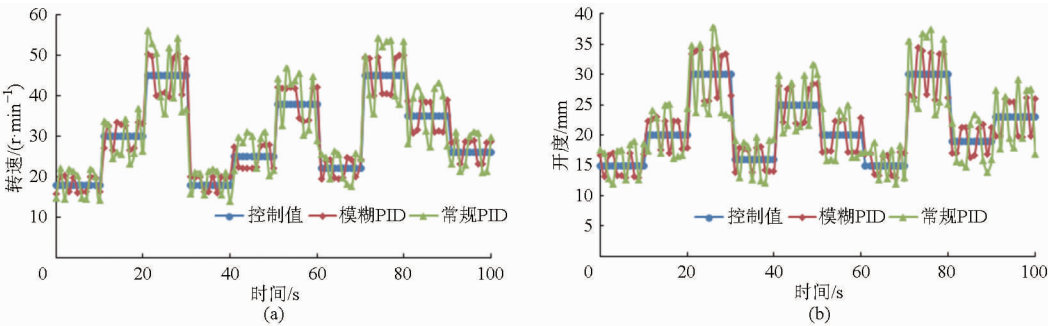


图 6 室内试验结果散点图
Fig. 6 Scatter diagram of laboratory test results

表 1 大田试验结果
Tab. 1 Results of field experiment

归一化植被 指数	追肥机速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	目标追肥量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	目标转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	目标开度/ mm	实时转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	实时开度/ mm
0.417	1.38	407.24	8.13	18.84	8.98	16.34
0.542	1.32	315.77	8.91	10.38	7.94	8.98
0.333	1.37	468.83	12.81	22.95	14.45	26.04
0.462	1.31	366.02	8.77	14.49	9.77	16.63
0.589	1.22	254.54	10.99	7.97	12.32	9.04
0.379	1.33	441.07	12.17	14.92	10.88	12.79
0.510	1.19	315.77	8.68	9.58	7.74	8.29
0.481	1.42	366.02	8.93	14.35	10.02	16.29

4 结论

- (1)针对冬小麦变量追肥机械追肥量调节非线性、时变性的特点,研究了基于模糊 PID 控制的冬小麦变量施肥控制模型,建立了相应的传递函数。
- (2)采用粒子群优化算法,以 ITAE 准则作为适

- 应度函数,确定了 PID 控制器 3 个参数的初始值,从而提高 PID 控制的性能。
- (3)试验结果表明采用模糊 PID 控制方法,冬小麦变量追肥系统具有良好的稳态精度,无论是室内试验还是大田试验的控制精度均达到 86% 以上,满足小麦变量精准追肥的工艺要求。

参 考 文 献

1 Maleki M R, Ramon H, De Baerdemaeker J, et al. A study on the time response of a soil sensor-based variable rate granular fertiliser applicator[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2):160 – 166.

2 Maleki M R, Mouazen A M, De Baerdemaeker J, et al. On-the-go variable rate phosphorus fertilization based on a VIS – NIR soil sensor[J]. Biosystems Engineering, 2007, 99(1):35 – 46.

3 Yang C, Everitt J H, Bradford J M. Comparisons of uniform and variable rate nitrogen and phosphorus fertilizer applications for grain sorghum[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(2): 201 – 209.

4 王秀,赵春江,孟志军,等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2004,20(5):114 – 117.

Wang Xiu, Zhao Chunjiang, Meng Zhijun, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 114 – 117. (in Chinese)

5 张书慧,马成林,吴才聪,等. 一种精确农业自动变量施肥技术及其实施[J]. 农业工程学报,2003,19(1):129 – 131.

Zhang Shuhui, Ma Chenglin, Wu Caicong, et al. Development and application of a variable rate fertilizer applicator for precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 129 – 131. (in Chinese)

6 古玉雪,苑进,刘成良. 基于模糊系统的开度转速双变量施肥控制序列生成方法[J]. 农业工程学报,2011,27(11):134 – 139.

Gu Yuxue, Yuan Jin, Liu Chengliang. FIS-based method to generate bivariate control parameters regulation sequence for

- fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 134 – 139. (in Chinese)
- 7 刘成良,苑进,刘建政,等. 基于 ARM 和 DSP 的双变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊): 233 – 238.
- Liu Chengliang, Yuan Jin, Liu Jianzheng, et al. ARM and DSP-based bivariable fertilizing control system design and implementation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 233 – 238. (in Chinese)
- 8 苑进,刘成良,古玉雪,等. 基于相关向量机的双变量施肥控制序列优化[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):184 – 189.
- Yuan Jin, Liu Chengliang, Gu Yuxue, et al. Bivariate fertilization control sequence optimization based on relevance vector machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 184 – 189. (in Chinese)
- 9 苗中华,李闯,韩科立,等. 基于模糊 PID 的采棉机作业速度最优控制算法与试验[J]. 农业机械学报,2015, 46(4): 9 – 14.
- Miao Zhonghua, Li Chuang, Han Keli, et al. Optimal control algorithm and experiment of working speed of cotton-picking machine based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 9 – 14. (in Chinese)
- 10 陈满,施印炎,汪小岳,等. 基于光谱探测的小麦精准追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 26 – 32.
- Chen Man, Shi Yinyan, Wang Xiaochan, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator based on crop canopy spectral reflectance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 26 – 32. (in Chinese)
- 11 陈满,施印炎,汪小岳,等. 冬小麦精准追肥机专家决策系统[J]. 农业机械学报,2015,46(7):17 – 22.
- Chen Man, Shi Yinyan, Wang Xiaochan, et al. Expert decision system of variable nitrogen application in winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 17 – 22. (in Chinese)
- 12 王艳颖,王珍,郭丽环. 直流电动机传递函数测定的实验研究[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(8): 38 – 40.
- Wang Yanying, Wang Zhen, Guo Lihuan. Experiment study on the transfer function for DC motor[J]. Experimental Technology and Management, 2008, 25(8): 38 – 40. (in Chinese)
- 13 阮毅,陈维钧. 运动控制系统[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- 14 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 1): 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. 1): 190 – 194. (in Chinese)
- 15 赵学观,徐丽明,何绍林,等. 玉米定向种子带恒张力卷绕系统自适应模糊 PID 控制[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 90 – 96.
- Zhao Xueguan, Xu Liming, He Shaolin, et al. Constant tension winding system of corn directional belt making machine based on self-adaptive fuzzy-PID control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 90 – 96. (in Chinese)
- 16 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.
- 17 孟庆宽,仇瑞承,张漫,等. 基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统[J]. 农业机械学报,2015,46(3):29 – 36.
- Meng Qingkuan, Qiu Ruicheng, Zhang Man, et al. Navigation system of agricultural vehicle based on fuzzy logic controller with improved particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 29 – 36. (in Chinese)
- 18 曹青松,洪芸芸,周继慧,等. 基于 PSO 自整定 PID 控制器的柔性臂真的控制[J]. 振动、测试与诊断,2014,34(6):1045 – 1049.
- Cao Qingsong, Hong Yunyun, Zhou Jihui, et al. Vibration control of flexible manipulator based on self-tuning PID controller by PSO[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(6): 1045 – 1049. (in Chinese)
- 19 史峰,王辉,郁磊,等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.