

基于土壤比阻的大功率拖拉机变权重力位综合控制研究

王素玉¹ 刘 站^{1,2} 李瑞川^{1,2} 徐继康^{1,3} 刘延俊⁴

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 青岛 266590; 2. 山东五征集团有限公司, 日照 276800;
3. 日照海卓液压有限公司, 日照 276800; 4. 山东大学机械工程学院, 济南 250100)

摘要: 针对土壤条件变化较大的作业环境,基于土壤比阻的力位综合控制,探索了其权重系数的自动控制算法。通过构建模糊 PID 控制策略,并采用土壤比阻 B 模拟土壤环境,利用 Matlab 对不同土壤比阻进行分析,以系统超调量、稳定时间以及耕深变化为依据,建立了权重系数与土壤比阻之间的关系模型,得出了基于土壤比阻的权重系数自动控制算法。将采用该算法的变权重力位综合控制(以下简称“变权重方法”)与权重系数为 0.5 的控制方式进行田间试验并对比。结果表明,变权重方法在土壤比阻较小的区域可以保证耕深,发挥位调节的优势;在土壤比阻较大的区域可以确保发动机的性能,发挥力调节的优势。该方法在土壤比阻变化较大的区域可实现权重系数的自动判断与设定,为系统更精确化控制奠定了基础。

关键词: 大功率拖拉机; 土壤比阻; 力位综合控制; 模糊 PID 控制; 变权重系数

中图分类号: S219.032.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0351-07

Variable Weight Force – Position Mixed Control of High-power Tractor Based on Soil Specific Resistance

WANG Suyu¹ LIU Zhan^{1,2} LI Ruichuan^{1,2} XU Jikang^{1,3} LIU Yanjun⁴

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China
2. Shandong Wuzheng (Group) Co., Ltd., Rizhao 276800, China 3. Rizhao Haizhuo Hydraulic Co., Ltd., Rizhao 276800, China
4. College of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

Abstract: In order to adapt to the multivariate environment of soil condition, a control algorithm based on soil specific resistance for force – position mixed control was explored. By building fuzzy PID control strategy, soil specific resistance B was introduced to simulate soil environment, and Matlab was used to analyze the specific resistance of different soils. Based on the system overshoot, stability time and change of tillage depth, combined with practical experience, the relationship between weight coefficient and soil specific resistance was discussed, and the control algorithm of weight coefficient was designed by the relationship. The method was compared with the method with fixed coefficient of 0.5, and the field tests were carried out. The experimental results showed that the method of variable weight force – position mixed control using this control algorithm can take advantage of position adjustment in the soil with smaller resistance, so as to ensure the depth of tillage; in the soil with larger resistance, the advantages of force adjustment can be taken to ensure the performance of the engine. The method can realize the automatic judgment and setting of the weight coefficient in the area where the soil specific resistance changed greatly, and laied the foundation for the more accurate control of the system, which can also have implications for researchers in the field.

Key words: high-power tractor; soil specific resistance; force – position mixed control; fuzzy PID control; variable weight coefficient

0 引言

大功率拖拉机是现代农业生产中重要的动力机

械,电液悬挂技术是拖拉机研究领域的关键技术^[1]。电液悬挂系统承担着农具牵引、耕深控制等重要功能,其性能直接影响作业质量和作业效

收稿日期: 2017-07-03 修回日期: 2017-08-24
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701104)、山东省农机装备研发创新计划项目(NJGG201505)、山东省重点研发计划项目(2016ZDJS02A10)和山东省科技发展计划项目(2015GNC112011)
作者简介: 王素玉(1962—),女,教授,主要从事农业机械化技术研究,E-mail: wsyskd@qq.com
通信作者: 李瑞川(1964—),男,研究员,主要从事大型动力平台电液管理单元技术研究,E-mail: liruichuan808@126.com

率^[2-3],随着现代农业对精细化作业要求的不断提高,采用一定的控制方法或策略实现耕深的自动控制^[4-7],提高作业质量,是研究热点之一^[8-9]。

在控制方式上,对力位综合控制的权重系数研究取得了一定的进展,有些学者提出了变权重力位综合控制方法^[10-15],但都局限于人工设定权重系数进行对比分析,由于土壤环境的复杂性,基于土壤比阻的权重系数自动控制研究少有报道。本文将模糊PID控制策略与力位综合控制方式相结合,探索一种基于土壤比阻的变权重系数控制方法,以期根据土壤比阻实现权重系数的自动选择与控制。

1 系统控制原理

在土壤环境变化较大的区域,由于地面不平度和土壤比阻变化的影响,犁具耕深和牵引力变化较大,故采用力位综合控制^[10]。图1为博世力士乐公司力位综合控制系统框图^[16],驾驶员通过控制面板对混合比、耕深、牵引力等参数进行设定,力、位传感器信号经数据融合传入控制器,控制器通过运算输出电信号控制阀口的开度,进而通过控制流量来控制农具的动作。其中混合比(本文设为权重系数)是系统自动控制的关键参数。

目前,对权重系数自动判断与选择的研究很少,需要解决在土壤环境变化较大时,既能保证拖拉机发动机负荷稳定性,还能保证耕深的均匀性^[17]的问题。因此,如何根据力、位传感器反馈的信息,利用

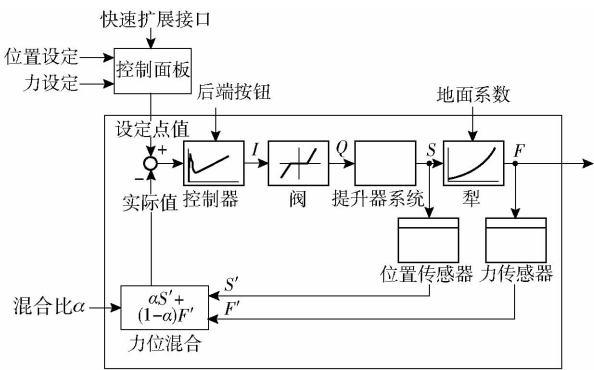


图1 博世力士乐公司力位综合控制系统框图
Fig. 1 Block diagram of mixed control system of BOSCH

一定算法对土壤性质进行实时自动判断,确定适应不同土壤比阻的权重系数,以提高作业质量,需要建立模糊PID变权重力位综合控制进行研究。

2 控制策略

模糊PID控制可以根据实际作业环境连续对PID控制中的3个参数(K_p 、 K_i 、 K_d)进行校正,以获得更好的系统动态和静态性能。

2.1 输入输出变量及其论域

模糊控制器采用双输入三输出形式,即输入耕深偏差 e 及偏差变化率 Δe ,经过模糊推理后输出PID控制中的3个参数修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。为了提高控制精度,将量化等级均划分为7级。其基本论域、离散论域、量化论域以及量化(比例)因子如表1所示。

表1 变量及其论域表				
Tab. 1 Variables and their domain				
变量	基本论域	离散论域	量化论域	量化(比例)因子
e	$[-6, 6]$	$\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$	$[-3, 3]$	0.500 0
Δe	$[-1.2, 1.2]$	$\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$	$[-3, 3]$	2.500 0
ΔK_p	$[-0.09, 0.09]$	$\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$	$[-3, 3]$	0.030 0
ΔK_i	$[-0.3, 0.3]$	$\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$	$[-3, 3]$	0.100 0
ΔK_d	$[-0.001 5, 0.001 5]$	$\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$	$[-3, 3]$	0.000 5

2.2 变量论域模糊子集

变量均采用7个模糊子集,分别为“负大”(NB)、“负中”(NM)、“负小”(NS)、“零”(Z)、“正小”(PS)、“正中”(PM)、“正大”(PB),隶属度函数

的形状为三角形,其具有运算简单、占用内存小等优点。输入变量隶属度函数采用均匀分布,输出变量隶属度函数采用非均匀分布^[18]。各变量隶属度函数如图2所示。

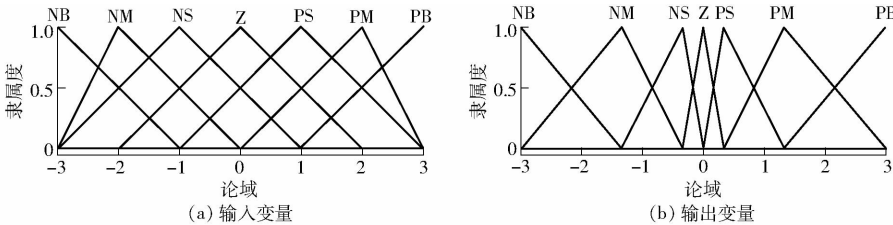


图2 输入/输出变量隶属度函数

Fig. 2 Input/output variable membership function

2.3 模糊控制规则制定

为了不断修正 PID 控制器的 K_p 、 K_I 、 K_D 3 个参

数,结合自整定原则^[19],建立表 2 所示的模糊控制规则。

表 2 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 模糊控制规则
Tab.2 ΔK_p , ΔK_I and ΔK_D fuzzy control rule

e	Δe						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB NB PS	NB NB NS	NB NM NB	NB NM NB	NB NS NB	NB Z NM	NB Z PS
NM	PB NB PS	PB NB NS	PM NM NB	PS NS NM	PS NS NM	Z Z NS	NS NS Z
NS	PM NB Z	PM NM NS	PM NS NM	PS NS NM	Z Z NS	NS PS NS	NS PS Z
Z	PM NM Z	PM NM NS	PS NS NS	Z Z NS	NS PS NS	NM PM NS	NM PM Z
PS	PS NM Z	PS NS Z	Z Z Z	NS PS NS	NS PS Z	NM PM Z	NM PB Z
PM	PS Z PB	Z Z PS	NS PS PS	NM PS PS	NM PM PS	NM PB PS	NB PB PB
PB	Z Z PB	Z Z PM	NM PS PM	NM PM PM	NM PM PS	NB PB PS	NB PB PB

注:表中数字资料区域每一栏从左到右分别对应 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 的模糊控制规则。

3 模型建立与仿真分析

3.1 传递函数

系统中采用高频响比例换向阀、控制液压缸、悬挂装置以及传感器等元器件,建立数学模型^[20-23],

以此为基础,建立基于土壤比阻的变权重力位综合控制系统如图 3 所示,并采用土壤比阻 B 模拟土壤环境,通过设定不同的权重系数,探寻权重系数与土壤比阻之间的关系,以实现权重系数的自动判断与选择。

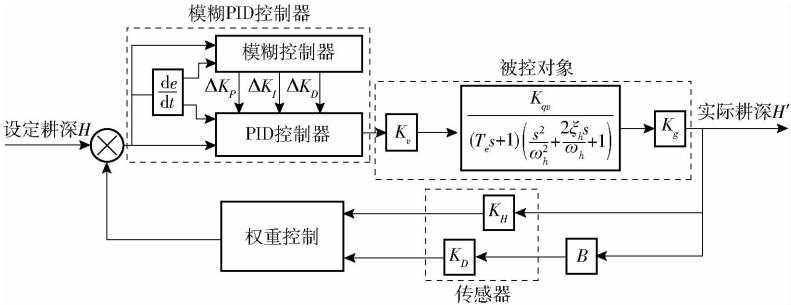


图 3 变权重力位综合控制系统框图

Fig.3 Block diagram of variable weight mixed control system

3.2 仿真模型

根据图 3,利用 Matlab/Simulink 建立控制系统仿真模型,如图 4 所示。该仿真模型以耕深为输入输出参数,耕深设定为 200 mm,通过控制面板输入并转换成电压进行仿真,将力、位传感器信号综合后与设定值进行运算。反馈信号 U 的数学模型为

$$U = Ha + \frac{F}{Bb}(1 - a)$$
(1)

式中 H ——耕深

- F ——牵引阻力
- b ——犁的工作宽幅
- a ——权重系数($a = 1$ 为位置反馈, $a = 0$ 为力反馈, $0 < a < 1$ 为力位综合反馈)

3.3 仿真结果分析

为了真实反映土壤比阻与权重系数的关系,根据某地区的土壤情况,通过实地测量,确定了 5 种土壤类型,其土壤比阻分别为:砂土 30 ~ 45 kN/m²、砂壤土 35 ~ 60 kN/m²、壤土 45 ~ 75 kN/m²、粘土 50 ~

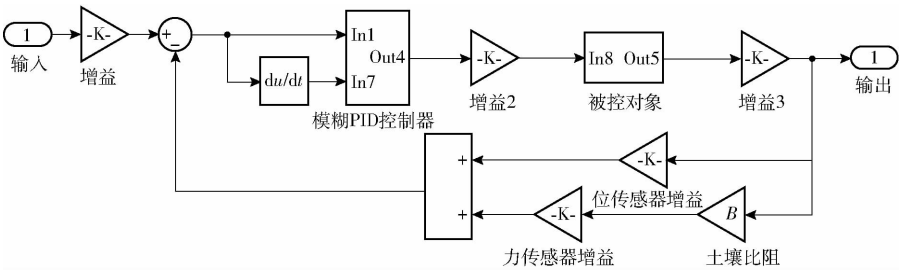


图 4 控制系统 Matlab 仿真模型

Fig.4 Matlab simulation model of control system

80 kN/m²、重粘土大于等于 80 kN/m²。

在仿真模型中设定 B 为 35 ~ 80 kN/m²,通过调节权重系数来研究其对于某种土壤环境的系统响应

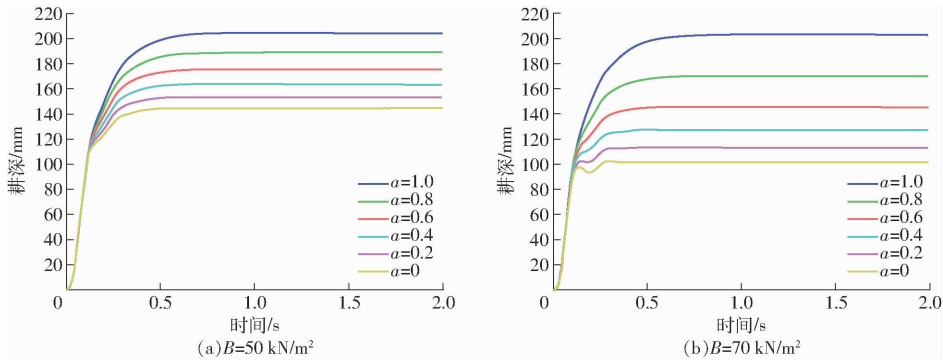


图 5 各土壤比阻条件下不同权重系数的系统阶跃响应曲线

Fig. 5 Step response curves of different comprehensive coefficients

针对不同的土壤比阻,系统超调量与权重系数之间的关系如图 6a 所示;系统稳定时间与权重系数之间的关系如图 6b 所示,耕深 H 变化曲线如图 6c 所示。从仿真结果可以看出,利用模糊 PID 控制和力位综合调节相结合的方法,系统的超调量基本上

都保持在 2% 以内,系统稳定时间也控制在 0.5 s 以内,满足实际大功率拖拉机作业对于系统“快速”、“稳定”的要求。根据以上仿真数据,并结合大量的田间作业数据,可以得到权重系数与土壤比阻之间的近似关系如表 3 所示。

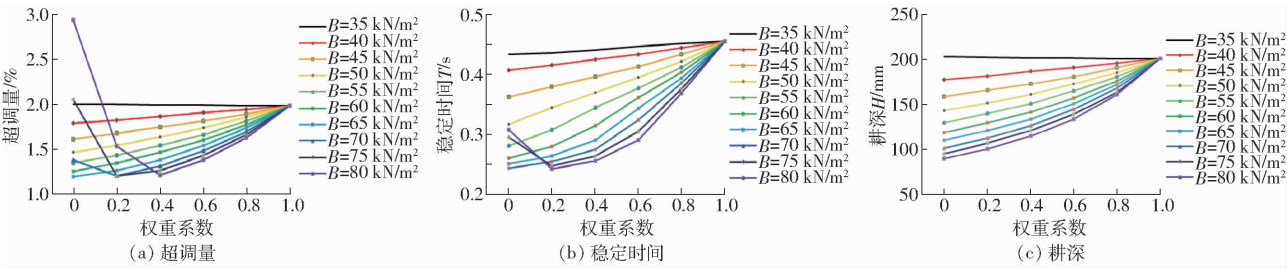


图 6 不同土壤比阻条件下各参数随权重系数变化曲线

Fig. 6 Variation curves of parameters with weight coefficient of different soil specific resistances

表 3 权重系数与土壤比阻之间的关系

Tab. 3 Relationship between weight coefficient and soil specific resistance

土壤比阻/(kN·m ⁻²)	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	≥ 80
权重系数范围	0.88 ~ 1	0.82 ~ 0.95	0.65 ~ 0.85	0.40 ~ 0.70	0.25 ~ 0.55	0.10 ~ 0.42	0 ~ 0.14

3.4 数据分析与程序设计

采用牛顿 (Newton) 插值法对表 3 数据进行处理,取有限个离散点 $(x_0, f(x_0)), (x_1, f(x_1)), \dots, (x_n, f(x_n))$, 则 K 阶均差表达式为

$$f[x_0, x_1, \dots, x_k] = \frac{f[x_0, \dots, x_{k-2}, x_k] - f[x_0, x_1, \dots, x_{k-1}]}{x_k - x_{k-1}} \quad (2)$$

根据均差公式,把 x 看成有限区间 $[a, b]$ 上的一点,则有

$$\begin{aligned} f(x) &= f(x_0) + f[x_0, x_1](x - x_0) + \\ &f[x_0, x_1, x_2](x - x_0)(x - x_1) + \dots + \\ &f[x_0, x_1, \dots, x_n](x - x_0) \cdots (x - x_n) + \\ &f[x, x_0, \dots, x_n] \omega_{n+1}(x) = N_n(x) + R_n(x) \end{aligned} \quad (3)$$

牛顿 (Newton) 均插值多项式为

$$\begin{aligned} N_n(x) &= f(x_0) + f[x_0, x_1](x - x_0) + \\ &f[x_0, x_1, x_2](x - x_0)(x - x_1) + \dots + \\ &f[x_0, x_1, \dots, x_n](x - x_0) \cdots (x - x_n) \end{aligned} \quad (4)$$

由以上方法,可以得出土壤比阻与权重系数之间的规律

$$a = N_7(B) \quad (5)$$

根据式(5),构建基于土壤比阻的权重系数的自动控制算法,如图 7 所示,并将该算法写入控制器进行实地测试,以检测该算法在土壤变化较大环境下的控制效果。

4 试验验证

4.1 试验条件与方案

通过仿真确定权重系数与土壤比阻的关系,以

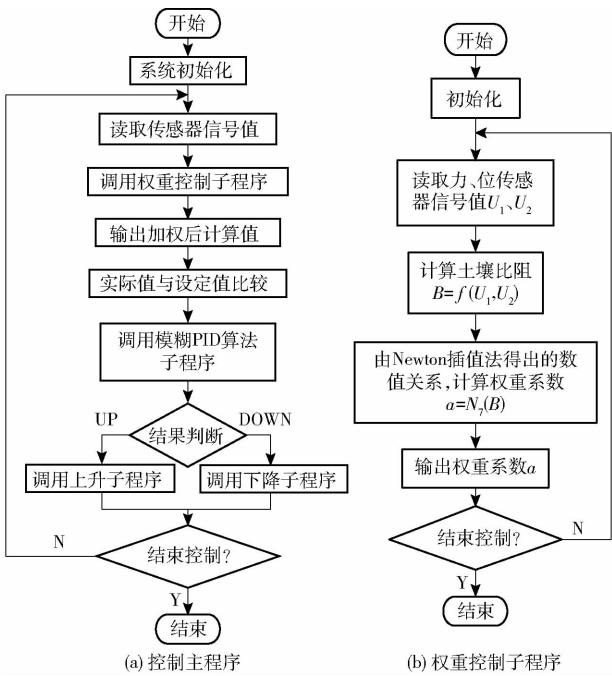


图 7 控制流程图
Fig. 7 Control flow charts

此编写的算法可以根据土壤环境自动判断与设定权重系数,为了验证其有效性,进行了田间试验。根据已有试验田状况,人为设计了 7 种土壤环境,每个区域地质较为均匀,经测试,每块区域的土壤比阻分别为 22.3、38.4、45.0、54.0、67.2、76.5、86.7 kN/m² (对应图 8 中区域 1~7)。拖拉机从低土壤比阻区

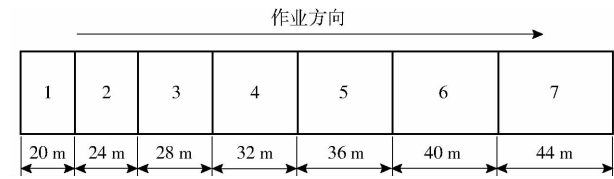
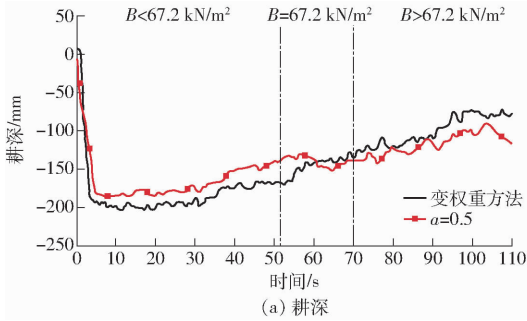


图 8 试验区域示意图
Fig. 8 Diagram of test area

域开始作业,结束于高土壤比阻区域。
采用五征雷诺曼 1454 型大马力轮式拖拉机, EHR23-EM2 型电液比例阀作为控制阀。试验中,拖拉机挡位为 B2 挡,车速控制在 7.5 km/h,耕深设定为 200 mm,牵引力设定为 6 kN。图 9 为田间试验场景。



图 9 田间试验场景
Fig. 9 Field experiment scene

4.2 试验结果与分析

为了验证本算法是否可以根据土壤情况实现权重系数的自动判断,以及作业质量是否得到一定提升,进行了与固定权重系数值 ($a = 0.5$) 的田间对比试验。试验从耕深和牵引力变化两个角度对两种控制方法进行比较。田间试验结果如图 10 所示。

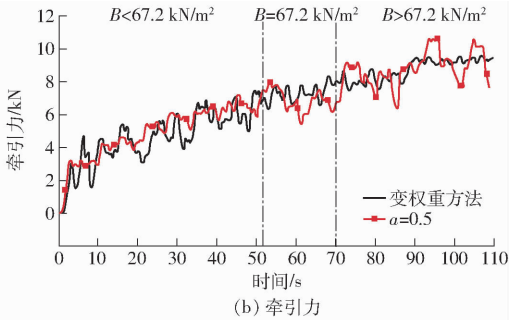


图 10 耕深和牵引力对比试验曲线

Fig. 10 Contrast experiment curves of depth and force

由图 10a 可知,耕深设定为 200 mm,变权重方法在 3.8 s 时达到设定耕深; $a = 0.5$ 的综合控制在 4.6 s 达到设定耕深。在土壤比阻 $B > 67.2$ kN/m² 的区域,变权重方法相比于 $a = 0.5$ 的综合控制,在耕深误差和波动量上表现欠佳;但在土壤比阻 $B < 67.2$ kN/m² 的区域,变权重方法耕深误差较小,波动亦较小,该方法的优势较为明显。

由图 10b 可知,牵引力设定为 6 kN,随着土壤比阻的增加,两种调节方式牵引力均随之增大。在土壤比阻 $B < 67.2$ kN/m² 的区域,变权重方法相比于 $a = 0.5$ 的综合控制,在牵引力波动量上表现欠佳;

但在土壤比阻 $B > 67.2$ kN/m² 的区域,变权重方法相比于 $a = 0.5$ 的综合控制,波动量较小,发动机负荷较为稳定,该方法的优势较为明显。

在 $B = 67.2$ kN/m² 附近区域,曲线交汇,2 种方式下耕深和牵引力的控制综合效果相差不大。

综上所述,作业过程中权重系数可以根据土壤情况自动判断与选择,验证了该算法的实用性。通过对比试验发现,变权重方法在土壤比阻较小时可以保证耕深以发挥位调节优势,在土壤比阻较大时可以保证拖拉机性能以发挥力调节的优势,作业精度也有所提高。

5 结论

(1)建立了悬挂系统的模糊 PID 变权重力位综合控制模型,通过调节权重系数分析系统的超调量、稳定时间及耕深的变化情况,结合实际作业经验得出土壤比阻与权重系数之间的关系。

(2)根据土壤比阻与权重系数之间的关系,建立

了基于土壤比阻的权重系数的自动控制算法。通过田间试验分析,变权重方法与 $a = 0.5$ 的综合控制相比,可以满足土壤比阻小时保证耕深、土壤比阻大时保证拖拉机牵引功率,实现了权重系数的自动控制与选择。

(3)变权重方法可以根据土壤比阻自动调节权重系数,在土壤比阻变化较大的区域作业效果得到提高,为系统更精确化控制奠定了基础。

参 考 文 献

- 徐煌. 拖拉机电液悬挂系统力位综合控制技术研究[D]. 南京:南京农业大学, 2010.
XU Huang. Research of force-position combined control technology for tractor electrohydraulic hitch system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 李明生, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 大功率拖拉机电液提升器比例提升阀设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 31–35, 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121006&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.006.
LI Mingsheng, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Design of proportional raise valve in electro-hydraulic lifting mechanism of big-power tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 31–35, 89. (in Chinese)
- 陈明江. 基于模糊算法的拖拉机电液悬挂系统力调节控制技术研究[D]. 南京:南京农业大学, 2009.
CHEN Mingjiang. Research of resistance-adjustment for tractor electrohydraulic hitch system based on the fuzzy algorithm[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 白学峰, 鲁植雄, 常江雪, 等. 基于滑转率的拖拉机自动耕深模糊控制仿真[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 6–10. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2012s02&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.002.
BAI Xuefeng, LU Zhixiong, CHANG Jiangxue, et al. Fuzzy control algorithm simulation of automatic control of tilling depth for tractor based on slip rate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 6–10. (in Chinese)
- RODHE L, ETANA A. Performance of slurry injectors compared with band spreading on three swedish soils with ley[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(1): 107–118.
- SAHU R K, RAHEMAN H. Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(2): 275–284.
- 商高高, 谢凌云, 季顺静. 拖拉机悬挂系统耕深自动控制策略的研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 136–140.
SHANG Gaogao, XIE Lingyun, JI Shunjing. Research on plowing depth automatic control for tractor hitch system[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 136–140. (in Chinese)
- 谢斌, 李皓, 朱忠祥, 等. 基于倾角传感器的拖拉机悬挂机组耕深自动测量方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 15–21.
XIE Bin, LI Hao, ZHU Zhongxiang, et al. Measuring tillage depth for tractor implement automatic using inclinometer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 15–21. (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/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 295–300. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s255&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.055.
LI Mingsheng, ZHAO Jianjun, ZHU Zhongxiang, et al. Fuzzy-PID self-adaptive control method in electro-hydraulic hitch system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 295–300. (in Chinese)
- 赵建军, 朱忠祥, 宋正河, 等. 重型拖拉机电液悬挂比例控制器设计[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 10–16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2014s101&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.001.
ZHAO Jianjun, ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, et al. Proportional controller for electro-hydraulic hitch system in heavy tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 10–16. (in Chinese)
- 徐煌, 鲁植雄, 宋延东. 拖拉机电液悬挂系统力位综合控制策略研究[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(4): 879–883.
XU Huang, LU Zhixiong, SONG Yandong. Study on force-position regulation of tractor electro-hydraulic hitch system[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(4): 879–883. (in Chinese)
- 郭兵. 拖拉机电液悬挂系统力位综合控制技术研究[D]. 南京:南京农业大学, 2013.
GUO Bing. Research of force-position combined control for tractor electro-hydraulic hitch system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 商高高, 彭怀江, 夏勇. 拖拉机耕深模糊自动控制方法及其仿真研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(6): 825–829.
SHANG Gaogao, PENG Huaijiang, XIA Yong. Study on auto-control method and simulation for tractor depth based on fuzzy

- control [J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(6): 825 – 829. (in Chinese)
- 14 鲁植雄, 郭兵, 高强. 拖拉机耕深模糊自动控制方法与试验研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 23 – 29.
LU Zhixiong, GUO Bing, GAO Qiang, et al. Study on auto-control method and experiment for tractor depth based on fuzzy control [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 23 – 29. (in Chinese)
- 15 李丽娜, 柳洪义, 罗忠, 等. 模糊 PID 复合控制算法改进及应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(2): 274 – 278.
LI Li'na, LIU Hongyi, LUO Zhong, et al. Study on improved Fuzzy – PID composite control arithmetics and its applications [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(2): 274 – 278. (in Chinese)
- 16 Rexroth Bosch Group. Knowledge explanation: hydraulic for tractor[M]. Ditzingen, Germany: Bosch Robert AG, 2014.
- 17 谢凌云. 大功率拖拉机电液悬挂系统耕深自动控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
XIE Lingyun. Research on plowing depth automatic control for high-power tractor electro-hydraulic hitch system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- 18 葛宝明, 林飞, 李国国. 先进控制理论及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- 19 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166 – 172.
WANG Shuyan, SHI Yu, FENG Zhongxu. A method for controlling a loading system based on a Fuzzy – PID controller [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166 – 172. (in Chinese)
- 20 谢斌. 拖拉机农具仿真作业机组悬挂系统电液控制技术的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
XIE Bin. Study on electro-hydraulic control technology of hitch system for the tractor-implement combination [D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- 21 谭彧. 拖拉机液压悬挂和加载系统性能研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
TAN Yu. The study of characteristics for hydraulic hitch & loading system in tractor [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 22 SAEYS W, ENGELEN K, RAMON H, et al. An automatic depth control system for shallow manure injection, Part 1: modelling of the depth control system [J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(2): 146 – 154.
- 23 刘义, 高翔, 王寅晓, 等. 拖拉机电-液悬挂系统耕深自动控制的研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(1): 51 – 53.
LIU Yi, GAO Xiang, WANG Yinxiao, et al. Research on plowing depth automatic control for tractor electric-hydraulic hitch system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(1): 51 – 53. (in Chinese)
-

(上接第 344 页)

- 19 张春秋, 刘杰, 谢开云, 等. 高效液相色谱法测定马铃薯薯肉中类胡萝卜素[J]. 食品科学, 2008, 29(4): 302 – 305.
ZHANG Chunqiu, LIU Jie, XIE Kaiyun, et al. Determination of carotenoids in tuber flesh by HPLC in potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Food Science, 2008, 29(4): 302 – 305. (in Chinese)
- 20 HELGERUD T, WOLD J P, PEDERSEN M B, et al. Towards on-line prediction of dry matter content in whole unpeeled potatoes using near-infrared spectroscopy [J]. Talanta, 2015, 143: 138 – 144.
- 21 PARK B, LU R. Hyperspectral imaging technology in food and agriculture [M]. New York: Springer, 2015: 104 – 108.
- 22 BROWN C R, CULLEY D, YANG C P, et al. Variation of anthocyanin and carotenoid contents and associated antioxidant values in potato breeding lines [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2005, 130(2): 174 – 180.
- 23 周竹, 李小昱, 高海龙, 等. 马铃薯干物质含量高光谱检测中变量选择方法比较 [J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 128 – 133, 185. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120226&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.026.
ZHOU Zhu, LI Xiaoyu, GAO Hailong, et al. Comparison of different variable selection methods on potato dry matter detection by hyperspectral imaging technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 128 – 133, 185. (in Chinese)
- 24 石力安, 郭辉, 彭彦昆, 等. 牛肉含水率无损快速检测系统研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 203 – 209. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150729&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.029.
SHI Li'an, GUO Hui, PENG Yankun, et al. Nondestructive rapid detection system for water content of beef [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 203 – 209. (in Chinese)
- 25 刘贵珊, 房盟盟, 冯愈钦, 等. 基于高光谱联合流化床富集的红葡萄酒白藜芦醇检测 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 301 – 308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170738&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.038.
LIU Guishan, FANG Mengmeng, FENG Yuqin, et al. Detection of resveratrol in red wine based on fluidized bed preconcentration-hyperspectral imaging [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 301 – 308. (in Chinese)