

重型拖拉机电液悬挂比例控制器设计*

赵建军 朱忠祥 宋正河 周瑞娟 王儒朋 毛恩荣

(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:设计了一种基于飞思卡尔 MC9S12XS128 型微处理器的电液悬挂比例控制器。根据重型拖拉机电液悬挂系统控制要求,在分析现有重型拖拉机电液悬挂比例控制器的结构、类型和特点的基础上,确定了比例控制器的整体设计方案,在 CodeWarrior 环境下完成软件程序设计,采用 PID 控制算法实现对拖拉机作业机组的位控制、牵引力控制和力位综合控制。以重型拖拉机电液悬挂系统为试验平台,对所设计的电液悬挂比例控制器进行了田间试验,牵引力和耕深控制的过渡时间分别为 3.89 s 和 0.81 s。结果表明:比例控制器对重型拖拉机悬挂装置的综合控制具有响应快、精度高、稳定性强等特点,在保证拖拉机平顺性和作业质量的同时,提高了作业效率,降低了拖拉机驾驶员的劳动强度。

关键词: 重型拖拉机 电液悬挂 比例控制器 PID 控制

中图分类号: S219.0324; TP273+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0010-07

引言

在农业生产过程中,拖拉机通过悬挂各种农具来完成相应的田间作业,以悬挂犁具进行春耕作业最为常见。由于地面不平度和土壤比阻变化的影响,犁具耕深和牵引阻力变化起伏较大,因此,对于一般的驾驶员而言,通过手动调节悬挂犁具位置以控制耕深和牵引阻力是非常困难的。

针对目前重型拖拉机悬挂作业机组控制问题,采用电液悬挂控制系统^[1-2]替代了原有的机液式系统,提出了多种控制方法,运用模糊控制^[3]、模糊 PID 自适应控制^[4]和前馈控制^[5]进行了耕深和牵引阻力控制研究,结合仿真和试验研究^[6-8]验证了电液悬挂控制系统的可靠性。此外,随着重型拖拉机整机作业机组对自动化和智能化水平要求不断提高,重型拖拉机防滑控制^[9]、自主导航控制^[10-13]以及多功能集成控制与性能监测^[14]正逐步发展起来。

由于大多数电液悬挂控制系统进行耕深和牵引力独立控制,且主要集中在计算机仿真或室内试验方面,缺乏田间试验指导与验证,此外,部分电液悬挂系统采用普通电磁阀进行开关控制,导致作业机组工作平稳性下降。为此,本文研究悬挂作业机组变权值 PID 力位综合控制方法,设计一套基于电液比例阀的重型拖拉机电液悬挂比例控制器,并进行

田间实车试验。

1 电液悬挂控制系统整体方案设计

重型拖拉机电液悬挂控制系统主要包括悬挂机构、液压系统和电子控制单元。其中悬挂机构为“三点式悬挂”,由 2 根下拉杆和 1 根上拉杆组成,机构通过 3 个铰接点与拖拉机机体挂接,一般用于侧向摆动较小的农机具作业。液压系统采用电液比例阀代替普通电磁阀,能根据比例电磁铁输入电流的大小连续地、按比例地控制电液比例阀阀芯位移,从而起到控制负载流量的作用,并能减弱负载变化时所产生的冲击现象,本文采用德国力士乐公司生产的 EHR23LS 型电液比例阀,额定流量为 80 L/min,额定压力为 25 MPa,12 V 直流电源供电,最大工作电流为 3.35 A,其内部液压回路如图 1 所示,A 口作为负载输出口通向单作用提升液压缸。

电子控制单元即比例控制器,以飞思卡尔 MC9S12XS128 型微处理器为核心,由最小系统电路、信号采集电路、比例阀驱动电路、虚拟终端和串口通讯接口等组成,比例控制器硬件组成结构如图 2 所示。其中,虚拟终端作为人机交互平台,不但可以监测重型拖拉机作业过程中的基本状态信息,还可以通过触摸屏发送控制指令,实时改变耕作模式,降低了驾驶员的操作强度。传感器信号通过数

收稿日期:2014-07-30 修回日期:2014-08-25

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA100307)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014JD035)

作者简介:赵建军,博士生,主要从事车辆智能控制与液压流体传动研究,E-mail:perc_zjj@126.com

通讯作者:毛恩荣,教授,博士生导师,主要从事车辆智能控制与流体传动研究,E-mail:gxyl5@cau.edu.cn

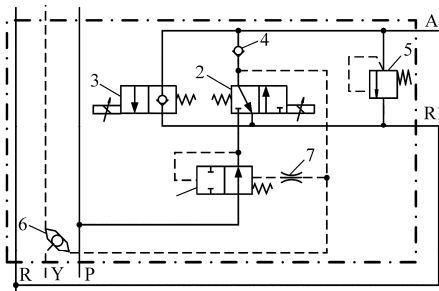


图1 比例阀液压油路图

Fig. 1 Hydraulic circuit of proportional valve

1. 定差减压阀 2. 比例换向阀 3. 比例下降节流阀 4. 进油单向阀 5. 安全阀 6. 压力补偿梭阀 7. 阻尼孔 P. 压力油道 R、R1. 回油道 Y. 压力补偿油道

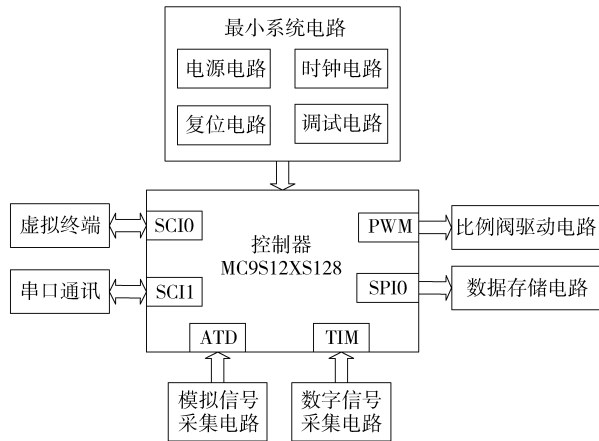


图2 比例控制器硬件组成结构图

Fig. 2 Hardware structure of proportional controller

据采集电路反馈至 MCU,MCU 对信号进行分析处理后输出一定占空比的 PWM 信号调节电液比例阀开度,从而实现对接挂农机具准确、快速地控制。串口通讯接口作为预留接口用于控制器与外围扩展功能模块进行通信。

2 比例控制器硬件设计

2.1 传感器选型

在位控制系统方案中,通过固定在提升臂上的倾角传感器的输出电压和悬挂农具提升高度之间的关系来间接测量耕深。传感器型号为 SCA60C - PWB,测量范围 $\pm 90^\circ$,抗冲击能力强,能耗低,其技术参数如表 1 所示。

在牵引力控制系统方案中,将 2 个轴销式牵引力传感器分别安装于拖拉机左右下拉杆的销孔中,其内部布置两组独立的惠斯通电桥,可同时测量水平和垂直方向上的剪切力,牵引力即为 2 个传感器水平方向剪切力之和。传感器供电电压为 24 V,量程为 0 ~ 45 kN,输出电流为 4 ~ 20 mA。

油液压力传感器选用 AK - 4 型压力传感器,该传感器精度高、性能稳定可靠、结构紧凑、安装使用

方便,广泛用于各种动静态气、液态介质的压力测量、控制。供电电压为 24 V,量程为 0 ~ 30 MPa,输出电压为 0 ~ 5 V,其技术参数如表 2 所示。

表 1 倾角传感器技术参数

Tab. 1 Technical parameters of tilt angle sensor

参数	数值
量程/g($^\circ$)	-1 ~ 1(-90 ~ 90)
激励电压/V	5 ± 0.5
输出信号/V	0.5 ~ 4.5
静态电流/mA	2 ~ 4
工作温度/ $^\circ$ C	-40 ~ 85
输出阻抗/k Ω	20
灵敏度/(V · g ⁻¹)	2
分辨率/($^\circ$)	1.8

表 2 油压传感器技术参数

Tab. 2 Technical parameters of pressure sensor

参数	数值
量程/MPa	0 ~ 30
激励电压/V	24
输出信号/V	0 ~ 5
线性误差 L/%	± 0.3
回程误差 H/%	± 0.3
重复性 R/%	± 0.3
工作温度/ $^\circ$ C	-10 ~ 60
安全过负荷率/%	120

2.2 电液比例阀驱动电路设计

电液比例阀是根据输入电磁铁的电流大小而改变阀口的开度,所以用 PWM 信号作为控制信号可得到满意的效果。由于 MC9S12XS128 型微控制器输出的 PWM 信号功率较小无法驱动比例电磁铁,所以需要设计功率放大模块,如图 3 所示, PWM 信号首先经过光耦 TLP521 与外界隔离,再将隔离后的信号经过场效应管 IRF540 放大从而驱动电磁铁。

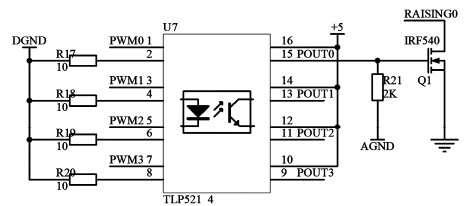


图3 电液比例阀驱动电路图

Fig. 3 Drive circuit diagram of electro-hydraulic proportional valve

依次设计最小系统电路和外围输入输出电路其余功能模块,最终得到比例控制器硬件电路整体原理图,结合电路原理图和元器件封装尺寸绘制 PCB 图,PCB 电路板加工完成后,焊接所有元器件,得到最终的控制器硬件如图 4 所示。

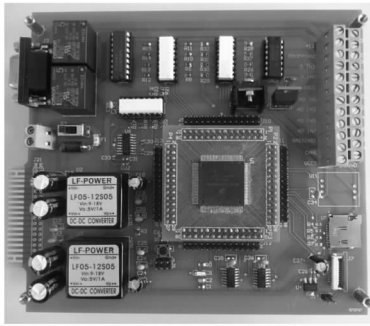


图4 控制器实物图

Fig. 4 Controller graph

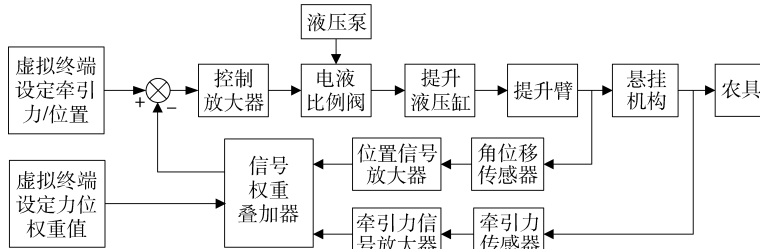


图5 变权重力位综合控制方案

Fig. 5 Variable weight mixed control scheme

软件设计采用模块化思想,各模块相互独立,结构清晰,易于扩展,通过调试可方便地找到错误。根据功能需求分为:系统初始化模块、主程序模块、PID控制算法模块、上升阀控制模块、下降阀控制模块、串口通讯模块、A/D采集模块、位控制模块、力控制模块、油压控制模块、力位综合控制模块。

3.2 PID控制流程

基于PID控制方法的特点,结合重型拖拉机田间作业实际情况,确定输入量为耕深与牵引力偏差信号 $e(k)$,输出为电液比例阀驱动电压 $u(k)$,图6为PID控制算法程序流程图。参照变权重力位综合控制方案,设计比例控制器力位综合控制流程图,如图7所示。为避免比例控制器对较小的偏差进行不断调整,使比例阀频繁动作,发生振颤,导致油温升高,需设定一个适当的死区,当偏差值小于设定的死区范围时,不改变控制量,使比例阀能够平稳工作。当偏差值大于设定的死区时,进入PID控制子程序计算控制量 $u(k)$ 。此外,当 $u(k)$ 过大时容易引起PWM占空比过大,会引起较大的电流从而损坏线路, $u(k)$ 过小时占空比过小,使得电流太小不足以驱动电磁铁,所以需要运算后的控制量 $u(k)$ 作一定的限幅处理。

4 田间试验

4.1 试验条件

为了分析验证所设计的重型拖拉机电液悬挂比例控制器的控制性能,在控制器硬件电路和软件编

3 比例控制器软件设计

3.1 软件设计整体方案

该比例控制器采用变权值力位综合控制方案,如图5所示,在该方案中,驾驶员根据田间土壤状况及作业要求通过虚拟终端设定耕深、牵引力以及力控制权值,耕深及牵引力传感器电压信号按权重比叠加后反馈到控制放大器,根据信号偏差生成控制电压,通过电液比例阀控制悬挂机构的耕深和牵引力。

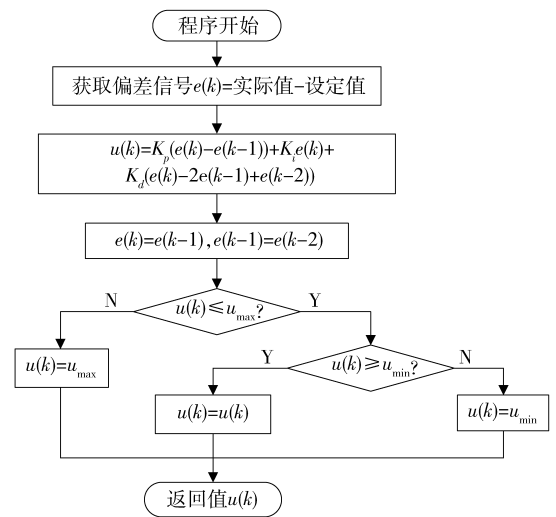


图6 PID控制算法程序流程图

Fig. 6 PID control algorithm flowchart

程调试通过之后,进行了田间试验。试验场地为中国农业大学上庄试验田,一台福田雷沃TG1254型拖拉机被改装后作为试验用拖拉机,东方红1LH-535型五铧犁作为悬挂农具,搭建的试验平台基本结构如图8所示。图9为比例控制器接线图,图10为田间试验环境。

在进行田间试验前,需要对传感器进行测试标定,其中倾角传感器输出电压与当前耕深的对应关系由试验标定得出^[15],经标定确定如下

$$y = 29.31x + 102.93 \quad (1)$$

式中 y ——拖拉机悬挂机组作业耕深,cm
 x ——耕深传感器的输出电压,V

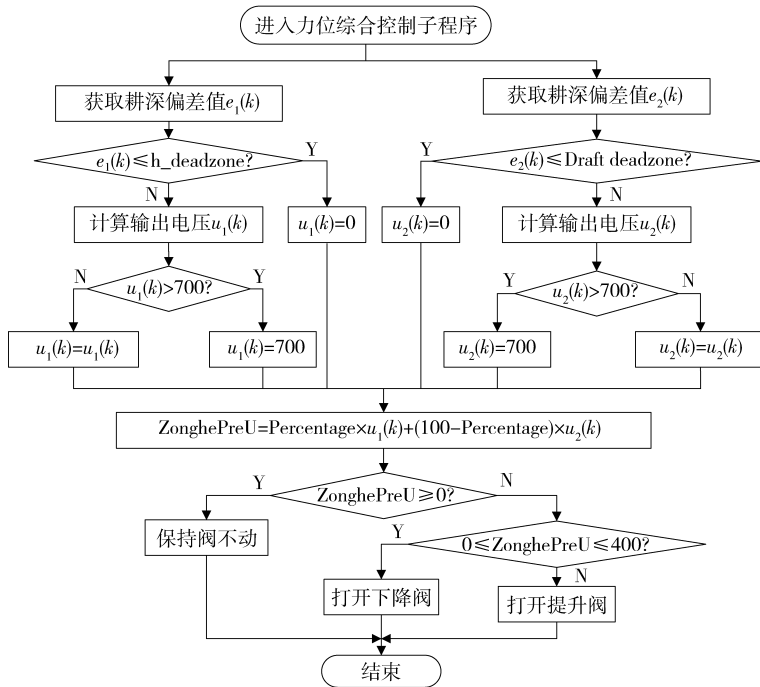


图7 力位综合控制流程

Fig.7 Mixed control flowchart

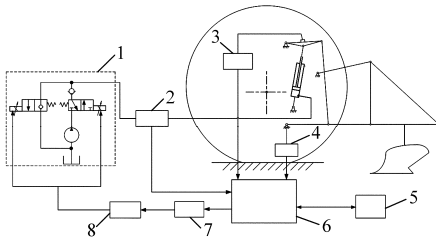


图8 硬件试验平台

Fig. 8 Test platform of hardware

1. 电液比例换向阀 2. 缸压传感器 3. 耕深传感器 4. 牵引力传感器 5. 虚拟终端 6. MC9S12XS128 型控制器 7. PWM 信号 8. 光电隔离与功率放大



图10 拖拉机悬挂系统比例控制器田间试验环境

Fig.10 Field experimental environment

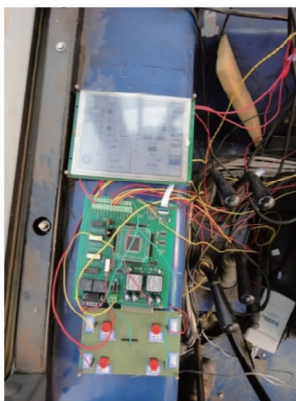


图9 比例控制器接线图

Fig.9 Connection diagram of proportional controller

牵引力传感器安装在下拉杆销孔处可直接测量悬挂农具所受的牵引力,牵引力传感器水平分力输出电压与实际牵引力的对应关系经标定确定如下:

$$\text{左水平力} \quad y_1 = 8111(x_1 - 1) \quad (2)$$

$$\text{右水平力} \quad y_2 = 8579(x_2 - 1) \quad (3)$$

式中 x_1 ——左力传感器输出电压,V

x_2 ——右力传感器输出电压,V

4.2 试验结果及分析

4.2.1 力控制试验

试验过程中,拖拉机挡位设定为 B2 挡,车速稳定在 8.6 km/h,经过仿真及田间试验不断调试,确定力控制 PID 的参数 K_p 为 0.003 1, K_i 为 0.278, K_d 为 0.9。当虚拟终端选择力权重大于 0.9 时,控制器进入力控制模式。牵引力的调节是由耕深的调节间接实现的,初始牵引力设定为 3 000 N,待系统稳定工作在预定牵引力附近时,对牵引力进行设定,阶跃上升至 7 000 N,记录实际牵引力的变化,得到牵引力动态响应曲线如图 11 所示,由图可知响应时间约为 3.82 s。由于试验地块为生地,土壤阻力变化较大。

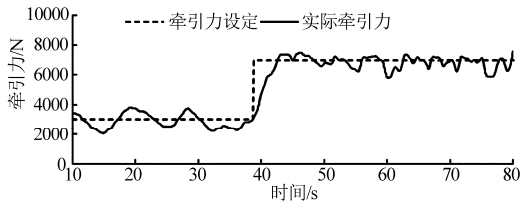


图 11 PID 力控制试验阶跃特性曲线

Fig. 11 Step response curve of PID force control experiment

control experiment

4.2.2 位控制试验

试验过程中,拖拉机挡位设定为 B2 挡,车速稳定在 8.6 km/h,经过仿真及田间试验不断调试,确定位控制 PID 的参数 K_p 为 1.55, K_i 为 1 800, K_d 为 450。当虚拟终端设定位控制权重大于 0.9 时,控制器进入位控制方式。首先由快速下降按钮将犁调整到与地面接触,然后选择自动控制挡位,使耕深由 0 cm 变化到 20 cm。图 12 为位控制方式下耕深的阶跃响应曲线。由图可知,该控制器响应时间约为 0.827 s,最大超调量为 1.58 cm,当控制达到稳定

后,耕深在死区范围内波动。在时间约为 9 s 时出现较大的振荡是由地面不平拖拉机出现起伏引起的,拖拉机上坡时耕深减小,下坡时耕深变大。

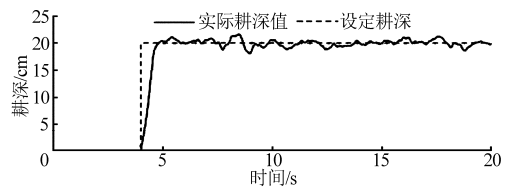


图 12 PID 位控制试验阶跃特性曲线

Fig. 12 Step response curve of PID position control experiment

control experiment

4.2.3 力位综合控制试验

试验过程中,拖拉机挡位设定为 B2 挡,车速稳定在 8.6 km/h,图 13a、13b、13c 分别为力控制权重占 30%、50%、70% 时的牵引力和耕深变化曲线。由图可知,随着力控制权重的增加,牵引力控制精度逐步提高,牵引力均值稳定在 3 900 N 左右,耕深波动范围随着位控制权重的减小而变大,但其变化量小于采用纯力控制。

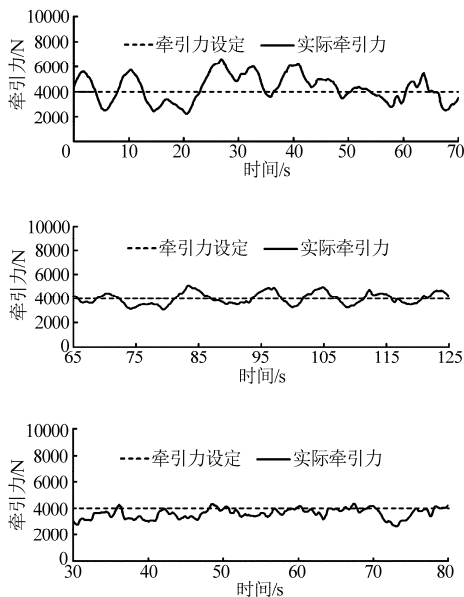


图 13 牵引力和耕深变化曲线

Fig. 13 Variation curves of traction and tillage depths

(a) 力控制权重 30% (b) 力控制权重 50% (c) 力控制权重 70%

5 结论

(1) 比例控制器具有较高的可靠性且具有良好的动态性能和稳定性,能够满足对重型拖拉机悬挂作业机组的农艺要求。

(2) 在土壤比阻较小且变化均匀的地段中,拖拉机的通过性及耕作平顺性易于保证,应减小力控

制权重,增加位置控制权重,以更好地满足农艺要求;在土壤比阻较大的地段中,应首先保证拖拉机的通过性,因此需增大力控制权重。

(3) 采用变权重力位综合控制方法,缓解了在力调节过程中耕深波动较大现象,改善了耕作质量,同时,在位调节过程中增加了力调节,降低了拖拉机功耗,减少了拖拉机尾气排放量。

参 考 文 献

- 1 王会明,侯加林,赵耀华,等. 拖拉机液压悬挂机构自动控制系统[J]. 农业机械学报,2006,37(10):42-45.
Wang Huiming, Hou Jialin, Zhao Yaohua, et al. Study on automatic control system for hydraulic hitch equipment of tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):42-45. (in Chinese)
- 2 李立. 拖拉机后悬挂电液控制系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
Li Li. Research on the electro-hydraulic system in tractor rear suspension[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- 3 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. 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)
- 4 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(增刊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(Supp.2):295-300. (in Chinese)
- 5 Jeyong Lee, Yamazaki M, Oida A, et al. Field performance of proposed foresight tillage depth control system for rotary implements mounted on an agricultural tractor[J]. Journal of Terramechanics, 2000,37(2):99-111.
- 6 刘义. 拖拉机电控液悬挂系统虚拟样机仿真研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.
Liu Yi. The simulation research of tractor electronic hydraulic hitch system based on virtual prototype[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
- 7 庞昌乐,宗伯华,鄂卓茂,等. 拖拉机作业机组模糊综合控制模型及仿真试验[J]. 农业工程学报,2003,19(4):111-113.
Pang Changle, Zong Bohua, E Zhuomao, et al. Simulated test for fuzzy integrated control model of tractor-implement combination[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(4):111-113. (in Chinese)
- 8 杜巧连,熊熙程,魏建华. 拖拉机液压悬挂耕深电液控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(8):62-65.
Du Qiaolian, Xiong Xicheng, Wei Jianhua. Design and experiment on the control system of electro-hydraulic plow depth of tractor hydraulic hitch mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(8):62-65. (in Chinese)
- 9 Pranav P K, Tewari V K, Pandey K P, et al. Automatic wheel slip control system in field operations for 2WD tractors[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012,84:1-6.
- 10 Alexey S Matveev, Michael Hoy, Jayantha Katupitiya, et al. Nonlinear sliding mode control of an unmanned agricultural tractor in the presence of sliding and control saturation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013,61(9):973-987.
- 11 吕安涛,毛恩荣,宋正河,等. 一种拖拉机自动驾驶复合模糊控制方法[J]. 农业机械学报,2006,37(4):17-20.
Lü Antao, Mao Enrong, Song Zhenghe, et al. A complex fuzzy control technique of tractor automatic steering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(4):17-20. (in Chinese)
- 12 韩科立,朱忠祥,毛恩荣,等. 基于自动机械式变速的拖拉机定速巡航系统[J]. 农业工程学报,2012,28(4):21-26.
Han Keli, Zhu Zhongxiang, Mao Enrong, et al. Cruise control system of tractor based on automated mechanical transmission[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(4):21-26. (in Chinese)
- 13 韩科立,朱忠祥,毛恩荣,等. 基于最优控制的导航拖拉机速度与航向联合控制方法[J]. 农业机械学报,2013,44(2):165-170.
Han Keli, Zhu Zhongxiang, Mao Enrong, et al. Joint control method of speed and heading of navigation tractor based on optimal control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):165-170. (in Chinese)
- 14 Andrew J Scarlett. Integrated control of agricultural tractors and implements: a review of potential opportunities relating to cultivation and crop establishment machinery[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001,30(1-3):167-191.
- 15 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)

Proportional Controller for Electro-hydraulic Hitch System in Heavy Tractor

Zhao Jianjun Zhu Zhongxiang Song Zhenghe Zhou Ruijuan Wang Rupeng Mao Enrong

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

Abstract: A proportional controller for the electro-hydraulic hitch system was developed based on the microprocessor MC9S12XS128 of Freescale. According to the analysis of the structure, type and characteristic of present proportional controllers for the hitch system, the controller architecture was put forward following the control requirements. The software was designed in the environment of CodeWarrior, and the PID control algorithm was adopted to realize three control modes including traction, position and mixed control for hitch system. By taking the heavy tractor with electro-hydraulic hitch system as the test platform, the field experiment of the proposed proportional controller was carried out, the response time of traction control was 3.89 s while 0.81 s of position control. The results showed that the proportional controller for hitch system comprehensive control in high-power tractor possessed of the features of rapid response, high precision, strong stability, etc. Meanwhile, it can not only improve the field operating efficiency in the guarantee of ride comfort and working quality of tractor, but also can reduce the driver's labor intensity.

Key words: Heavy tractor Electro-hydraulic hitch system Proportional controller PID control