

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.061

丘陵山地拖拉机电液悬挂仿形控制系统研究

范永奎^{1,2} 翟志强^{1,2} 朱忠祥^{1,2} 毛恩荣^{1,2} 王浩^{1,2} 陈一明^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对丘陵山地拖拉机作业地形复杂,传统电液悬挂控制系统地形适应性差的问题,设计了一套横向姿态可调的丘陵山地拖拉机电液悬挂仿形控制系统。根据丘陵山地拖拉机仿形控制作业需求,在传统悬挂结构基础上加装一个液压驱动旋转装置,设计了一种仿形悬挂机构,基于液压多点动力输出技术设计了带有负载反馈的闭心式液压控制系统,并提出了一种基于带死区的经典PID算法的控制方法。通过对阀控非对称液压缸工作原理的分析,建立了其数学模型并推导出仿形控制系统的传递函数,运用 Matlab/Simulink 建立了电液悬挂仿形控制系统的动力学模型并进行了仿真分析,仿真结果表明,系统在 $0^{\circ} \sim 11^{\circ}$ 阶跃信号的作用下,调整时间约为0.4 s,几乎无超调,系统稳定后农具横向往角约为 11.1° ,稳态误差约为 0.1° ,仿真结果验证了该控制算法的有效性。通过对传统拖拉机的液压悬挂装置进行改装,将原来的手柄操纵式液压悬挂装置改装成带有虚拟终端的电液悬挂控制系统,搭建了仿形控制试验台并进行了室内台架试验,试验结果表明,系统调整时间约为2.2 s,几乎无超调,系统稳定后农具横向往角约为 11.2° ,稳态误差约为 0.2° ,在系统允许误差(0.5°)范围内,试验结果验证了所设计的丘陵山地拖拉机电液悬挂仿形控制系统调节的快速性与稳定性,满足拖拉机等高线坡地作业需求。

关键词: 丘陵山地拖拉机; 电液悬挂; 仿形控制系统; 横向姿态调整

中图分类号: S219.85 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0517-08

Electro-hydraulic Hitch Terrain-adaptive Control System for Hillside Tractors

FAN Yongkui^{1,2} ZHAI Zhiqiang^{1,2} ZHU Zhongxiang^{1,2} MAO Enrong^{1,2} WANG Hao^{1,2} CHEN Yiming^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

(2. Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the complex terrain and poor terrain adaptability of the traditional electro-hydraulic hitch control system, a set of terrain-adaptive control system for electro-hydraulic hitch of hillside tractors with adjustable lateral attitude was designed. According to the requirement of terrain-adaptive control operation of hillside tractors, a new type of terrain-adaptive hitch mechanism was designed by adding a hydraulic driving rotary device on the basis of traditional hitch structure. Based on hydraulic multi-point power output technology, a closed core hydraulic control system with load feedback was designed and a control method based on the classical PID algorithm with dead zone was proposed. Through the analysis of the working principle of the valve controlled asymmetric hydraulic cylinder, the mathematical model was established and the transfer function of the copy control system was derived. The dynamic model of the electro-hydraulic hitch terrain-adaptive control system was established by Matlab/Simulink and the simulation analysis was carried out. The simulation results showed that under the action of $0^{\circ} \sim 11^{\circ}$ step signal, the adjustment time of the system was about 0.4 s, with almost no overshoot. After the system stabilized, the lateral inclination of agricultural implements was about 11.1° , and the steady-state error was about 0.1° , which verified the effectiveness of the proposed control algorithm. The traditional tractor hydraulic hitch was modified by converting the original handle control hydraulic hitch into an electro-hydraulic hitch control system with a virtual terminal, and a copy control test bench was built and an indoor bench test was carried out. The test results showed that the adjustment time of the system was

收稿日期: 2020-08-20 修回日期: 2020-09-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700504)

作者简介: 范永奎(1989—),男,博士生,主要从事车辆智能控制与液压研究,E-mail: fyk@cau.edu.cn

通信作者: 朱忠祥(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆机电液控制及智能化研究,E-mail: zhuzhongxiang@cau.edu.cn

about 2.2 s, with almost no oversetting. After the system was stabilized, the lateral inclination angle of agricultural implements was about 11.2° , and the steady state error was about 0.2° , which was within the range of 0.5° , allowed by the system. The test results verified that the designed electro-hydraulic mounted terrain-adaptive control system of the tractor can adjust quickly and stably and meet the requirements of contour slope operation of the tractor.

Key words: hillside tractor; electro-hydraulic hitch; terrain-adaptive control system; lateral attitude adjustment

0 引言

随着丘陵山区农业机械化进程不断加快,适用于丘陵山地的农业装备逐步成为农机市场的热点,特别是丘陵山地拖拉机备受关注^[1-4]。电液悬挂控制系统作为丘陵山地拖拉机的重要组成部分,对拖拉机燃油经济性、坡地适应性和作业质量有着重要影响^[5-6]。近年来,研究人员对丘陵山地拖拉机的液压控制系统^[7]、车身横向稳定性^[8-13]、车身调平^[14-19]和农机具调平^[20-25]等关键技术已开展了较多研究,并取得了代表性成果。然而在悬挂系统方面,现有大多数研究仍然局限于悬挂系统的调节能力,无法满足丘陵山区地形对机组作业多样性需求的困境。

综上,本文设计一套横向姿态可调的丘陵山地拖拉机电液悬挂仿形控制系统,建立阀控非对称液压缸数学模型,提出一种基于带死区的经典PID算法的控制方法,通过仿真与试验验证模型的准确性与控制方法的有效性。

1 仿形控制系统设计

1.1 仿形机构工作原理

根据拖拉机在坡地作业的需求,所设计的仿形悬挂机构主要由传统悬挂机构和旋转装置组成,即在传统悬挂机构和农机具之间增加一个液压驱动的旋转装置,通过旋转装置中的旋转体带动农机具绕旋转轴旋转,实现农机具横向倾角的调节,结构如图1所示。上拉杆和下拉杆的一端与拖拉机用球销连接,另外一端与牵引架用球销连接;旋转液压缸一端与牵引架用球销连接,另外一端与旋转体用球销连接;旋转体与牵引架用旋转轴和推力轴承连接,并用定位销定位;上连接杆一端与旋转体用球销连接,下拉板一端与旋转体通过定位螺栓连接,提升液压缸和旋转液压缸分别由单独的液压油路供油。

通过控制旋转液压缸活塞杆的伸缩带动旋转体旋转,进而控制悬挂农机具的横向姿态调节。具体为:当旋转液压缸活塞杆行程处于中位时,悬挂农机具横向姿态位置水平;当活塞杆缩短时,旋转体逆时针转动带动农机具向左边倾斜,规定此时的左向倾

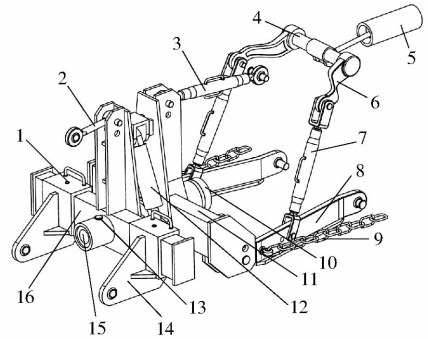


图1 悬挂机构结构图

Fig. 1 Structure diagram of hitch mechanism

1. 定位螺栓 2. 上连接杆 3. 上拉杆 4. 提升轴 5. 提升液压缸 6. 提升臂 7. 提升杆 8. 下拉杆 9. 限位链 10. 推力轴承 11. 牵引架 12. 旋转液压缸 13. 定位销 14. 下连接板 15. 旋转轴 16. 旋转体

角为负;当活塞杆伸长时,旋转体顺时针旋转带动农机具向右边倾斜,规定此时的右向倾角为正。

1.2 旋转液压缸运动学模型

旋转液压缸的活塞、活塞杆、转动臂与转动支架在横向平面内组成摆动导杆机构,如图2所示。

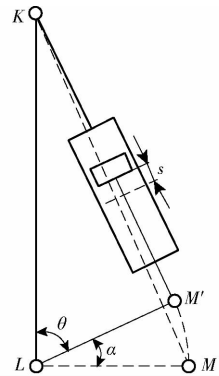


图2 旋转液压缸运动分析简图

Fig. 2 Diagram of motion analysis of rotary hydraulic cylinder

向拖拉机行驶方向看,规定:当农机具横向倾角为 0° 时,此时旋转体逆时针旋转与水平面形成的夹角 α 为负,如图2所示;反之,此时旋转体顺时针旋转与水平面形成的夹角为正。农机具的横向倾角与旋转体的横向倾角相同,即为 α 。由图2可知

$$\alpha = \arccos \frac{l_{KL}^2 + l_{LM}^2 - (l_{KM} - s)^2}{2l_{KL}l_{LM}} - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

式中 α ——转动臂 LM 与水平面之间的夹角(即农机具的横向倾角), rad

- s ——旋转液压缸的活塞位移, mm
- l_{KL} ——旋转液压缸上铰接点到旋转轴中心的距离, mm
- l_{LM} ——旋转液压缸下铰接点到旋转轴中心的距离, mm
- l_{KM} ——旋转液压缸上、下铰接点之间的距离, mm

根据液压缸内径设计公式初步计算内径尺寸, 液压缸内径为

$$D = \sqrt{\frac{4F_0}{\pi\varphi\eta p}} \quad (2)$$

- 式中 D ——旋转液压缸内径, mm
- F_0 ——旋转液压缸最大负载, 取 14 000 N
- φ ——旋转液压缸负载效率, 取 0.8
- η ——旋转体机械效率, 取 0.9
- p ——液压系统额定工作压力, 取 16 MPa

由式(2)可得, $D \approx 37.9$ mm, 根据液压缸内径尺寸系列值选为 40 mm。

根据旋转液压缸所承受载荷和工程液压缸技术规格, 速度比选为 $\psi = 1.46$, 按照公式确定活塞杆的外径为

$$d = D \sqrt{\frac{\psi - 1}{\psi}} \quad (3)$$

- 式中 d ——旋转液压缸的活塞杆外径, mm
- 由式(3)可得 $d \approx 22$ mm。

经过计算和仿真试验, 选定旋转液压缸型号为 HSG-40/22-B-E-100×305, 具体参数如表 1 所示。

表 1 旋转液压缸参数

Tab.1 Rotating cylinder parameters

参数	数值
速比	1.46
杆径/mm	22
最大行程/mm	100
公称压力/MPa	16
缸径/mm	40
安装尺寸/mm	305

基于式(1), 采用 Matlab 编程进行仿真, 根据旋转液压缸最大行程, 将仿真范围设定为 0 ~ 100 mm, 仿真得到的农机具横向倾角与旋转液压缸活塞行程的关系如图 3 所示。

由图 3 可知, 所设计的仿形悬挂机构调节农机具横向倾角的范围为 $-26.8^\circ \sim 26.3^\circ$, 可以满足拖拉机在倾斜角度较大坡地上的作业需求。

1.3 电液悬挂仿形控制液压系统工作原理

根据丘陵山地拖拉机作业环境及仿形需求, 基于电液比例控制技术设计了带有负载敏感的闭心式

电液悬挂仿形控制液压系统, 其原理图如图 4 所示。

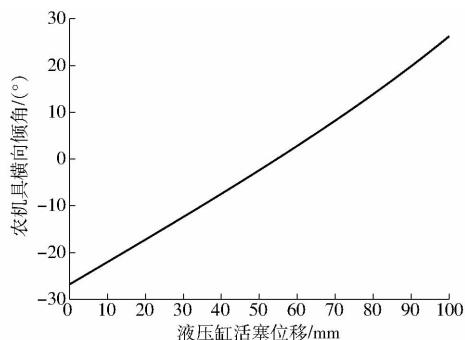


图 3 农机具横向倾角与旋转液压缸活塞行程关系曲线
Fig.3 Relation between lateral inclination angle of agricultural implement and piston stroke of rotary hydraulic cylinder

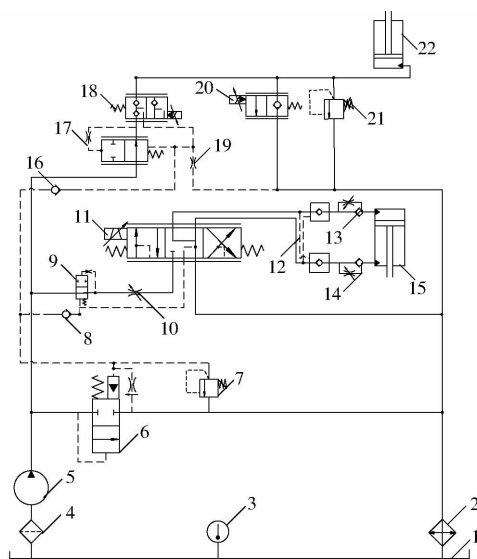


图 4 液压系统原理图

Fig.4 Schematic of hydraulic system

1. 油箱 2. 滤清器 3. 温度计 4. 过滤器 5. 齿轮泵 6. 差压式溢流阀 7, 21. 安全溢流阀 8, 16. 负载敏感单向阀 9, 17. 定差减压阀 10. 可调节流阀 11. 三位五通比例换向阀 12. 液压锁 13, 14. 单向可调节流阀 15. 双作用旋转液压缸 18. 两位三通比例提升阀 19. 阻尼孔 20. 两位两通比例下降阀 22. 单作用提升液压缸

丘陵山地拖拉机电液悬挂仿形控制液压系统主要由齿轮泵、差压式溢流阀、安全溢流阀、定差减压阀、可调节流阀、单向节流阀、三位五通比例换向阀、两位三通比例阀、两位两通比例阀、液压缸和负载压力敏感单向阀等组成。由定差减压阀、可调节流阀和三位五通比例换向阀组成一个比例调速阀, 用来控制旋转液压缸的伸缩以调节农机具的横向倾角; 另外, 由定差减压阀和两位三通比例提升阀组成的比例调速阀, 用来控制提升液压缸的伸缩以调节农机具的纵向位置。其中, 定差减压阀分别对三位五通比例换向阀和两位三通比例提升阀的阀口进行串联压力补偿, 使执行机构速度不受负载变化影响, 其

调节速度只与比例阀的阀口开度有关,从而有效地解决了单纯采用定量泵和流量阀的节流调速回路带来的低速承载能力差的问题。系统具有良好的速度刚性,宜用在拖拉机液压动力输出负载波动大、速度要求平稳的场合。

当执行机构工作时,液压缸油腔通过负载敏感单向阀与液压泵出口处的差压式溢流阀的压力敏感油道相通,通过差压式溢流阀的调节使定量泵出口压力随液压缸负载压力变化而变化,满足系统的最高压力需求。当液压动力输出系统不工作时,差压式溢流阀的压力敏感油道与回油道相通,系统流量以很小的压力从差压式溢流阀溢流回油箱,减少系统发热和压力损失。在差压式溢流阀的压力传感油道上,旁路式安装一个溢流阀,保证了系统安全。

1.4 控制方案设计

1.4.1 控制策略

采用脉冲宽度调制(Pulse width modulation, PWM)技术控制比例换向阀,通过改变节流阀口的开度和方向调节旋转液压缸的伸缩,实现农机具横向姿态的调整,其中通过改变脉冲占空比控制农机具的调整速度。

针对丘陵山地拖拉机在坡地等高线作业的情况,根据坡地的倾斜角度设置目标值,比例阀开始工作直到农机具侧倾角调整到目标值时停止。丘陵山地拖拉机农机具地面横向仿形控制系统工作原理如图5所示。

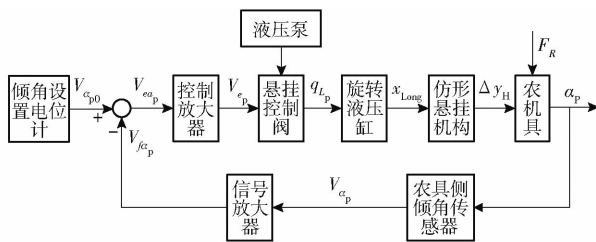


图5 丘陵山地拖拉机农机具横向地面仿形控制系统工作原理框图

Fig. 5 Block diagram of working principle of landscape profile control system for agricultural implement of hillside tractor

1.4.2 控制器设计

PID控制由于其算法简单、鲁棒性好和可靠性高,广泛应用于过程控制和运动控制中^[26]。模拟PID控制系统原理框图如图6所示,系统由模拟PID控制器和被控对象组成。

PID控制器是一种线性控制器,通过对偏差 $e(t)$ 进行比例、积分和微分变换的控制,控制规律为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

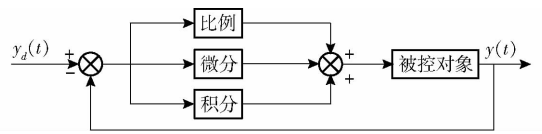


图6 模拟PID控制系统原理框图

Fig. 6 Simulation PID control system principle block diagram

式中 K_p ——比例系数

T_i ——积分时间常数

T_d ——微分时间常数

控制器在工作时,数据是系统采集的离散数据,故需将上述连续算法进行离散化,可得离散PID表达式为

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1)) \right] \quad (5)$$

$$u(k-1) = K_p \left[e(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_d}{T} (e(k-1) - e(k-2)) \right] \quad (6)$$

式(5)、(6)相减得PID控制增量为

$$\Delta u(k) = K_p (e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + K_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (7)$$

式中 K_i ——积分系数

K_d ——微分系数

2 系统建模与仿真分析

2.1 阀控液压缸数学模型

在仿形控制液压系统中,采用三位五通电磁比例阀以及非对称活塞液压缸,工作原理如图7所示。

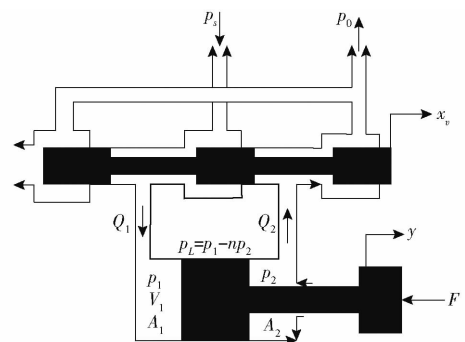


图7 阀控液压缸工作原理图

Fig. 7 Working principle diagram of valve controlled hydraulic cylinder

假设控制阀为理想的零开口四通滑阀,阀具有理想的响应能力,即阀芯的位移、阀压降的变化所产生的流量变化能在瞬间发生^[27]。

节流方程为

$$q_L = K_{q1} x_v - K_{c1} P_L \quad (8)$$

其中
$$K_{q1} = c_d \omega \sqrt{\frac{2(p_s - p_L)}{\rho(1 + n^3)}} \quad (9)$$

$$K_{c1} = \frac{c_d \omega x_v \sqrt{\frac{2(p_s - p_L)}{\rho(1 + n^3)}}}{2p_s - 2p_L} \quad (10)$$

式中 c_d ——节流口流量系数
 p_s ——三位五通比例插装阀的进口供油压力, Pa
 ρ ——液压油液密度, kg/m³
 p_L ——负载压力, Pa
 q_L ——负载流量, L/min
 K_{q1} ——流量增益系数
 K_{c1} ——流量压力增益系数
 n ——有杆腔与无杆腔有效面积比
 x_v ——三位五通比例插装阀的阀芯位移, m
 ω ——振动角频率

流量连续性方程为

$$q = \frac{(A_1 + A_2)}{2} \frac{dy}{dt} + \frac{V_1}{4\beta_e} \frac{1 + n^2}{1 + n^3} \frac{dp_L}{dt} + c_t p_L \quad (11)$$

其中
$$c_t = \frac{c_{ec}}{2} + c_{ic} \quad (12)$$

式中 A_1, A_2 ——无杆腔、有杆腔液压缸作用面积, m²
 V_1 ——进油腔容积, m³
 β_e ——有效体积弹性模量
 y ——活塞运动位移, m
 c_t ——液压缸总泄漏系数
 c_{ec} ——液压缸外泄漏系数
 c_{ic} ——液压缸内泄漏系数

液压缸力平衡方程为

$$\frac{(A_1 + nA_2)p_L + n^3 A_1 p_s - A_2 p_s}{1 + n^3} = m \frac{d^2 y}{dt^2} + B_c \frac{dy}{dt} + F \quad (13)$$

式中 F ——作用在活塞上的外负载力, N
 B_c ——活塞及负载的黏性阻力系数
 m ——活塞及负载折算到活塞上的总质量, kg

如果不考虑土壤阻力作用的影响, 即不计外负载力 F , 对式(8)、(11)、(13)进行拉普拉斯变换, 得系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{K_{q1}}{\frac{A_1 + A_2}{2}s + \left(\frac{V_1}{4\beta_e} \frac{1 + n^2}{1 + n^3} s + C_t + K_{c1} \right) \frac{(1 + n^3)(ms^2 + B_c s)}{A_1 + nA_2}} \quad (14)$$

2.2 仿真分析

运用 Matlab/Simulink 建立丘陵山地拖拉机电

液悬挂仿形控制系统的动力学模型。系统模型参数如表 2 所示, p_0 为回油压力。

表 2 系统模型参数

Tab.2 System model parameters

参数	数值
A_1/m^2	1.2566×10^{-3}
A_2/m^2	8.6×10^{-4}
n	0.685
m/kg	150
p_0/Pa	0
c_d	0.61
c_{ec}	0
c_{ic}	3×10^{-11}
β_e	6.85×10^8
B_c	800
$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	900

开始仿真前, 给信号源设置 $0^\circ \sim 11^\circ$ 的阶跃信号, 仿真时间设定为 5 s, 在 2 s 时开始阶跃, 仿真结果如图 8 所示。

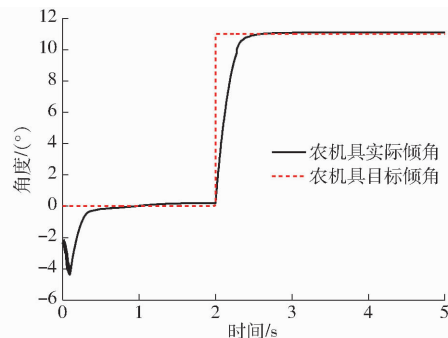


图 8 农机具横向倾角仿真变化曲线

Fig.8 Simulation lateral dip curve of agricultural implement

由图 8 可知, 系统在仿真开始时有较大的波动, 这是由于液压系统本身原因造成的; 系统的调整时间约为 0.4 s, 几乎无超调; 在 2.5 s 左右时, 系统趋于稳定, 农机具横向倾角约为 11.1° , 稳态误差约为 0.1° 。仿真结果验证了所建立的系统数学模型的正确性、控制系统的稳定性与准确性以及控制算法的有效性。

3 室内台架试验

3.1 试验平台搭建

试验拖拉机基于山拖农机装备有限公司的 T404 型传统拖拉机改造而成, 将原有手柄式操纵机构的液压悬挂装置改造成带有虚拟终端的电液悬挂控制系统, 虚拟终端中的人机交互界面如图 9 所示。将研制的仿形悬挂机构安装在拖拉机上, 进行横向倾角调节试验, 检验所设计的仿形悬挂控制系统是否满足作业需求。搭建的室内台架试验台如图 10 所

示,虚拟终端及数据采集系统如图 11 所示。控制器直接由拖拉机电源供电,倾角传感器和显示屏由电源转换模块将拖拉机电源 12 V 转换成 24 V 后供电。

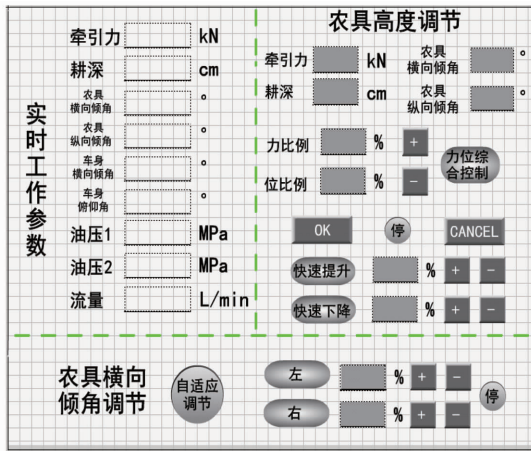


图 9 人机交互界面

Fig. 9 Human-computer interaction interface

后点击自适应调节按钮,此时控制器启动基于 PID 控制算法的农机具自适应调节模块,将农机具横向倾角调整到设定的目标值。为了防止阀口不断开闭,程序中设置 0.5°死区。调整后的农机具位置如图 12b 所示。试验结果如图 13 所示。



(a)调整前

(b)调整后

图 12 调整前后农机具位置

Fig. 12 Positions of agricultural implement before and after adjustment

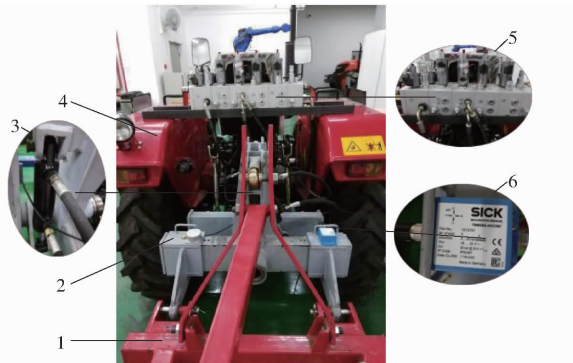


图 10 室内台架试验台

Fig. 10 Indoor test bench

1. 三铧犁 2. 悬挂机构 3. 旋转液压缸 4. 拖拉机 5. 比例阀块 6. 倾角传感器

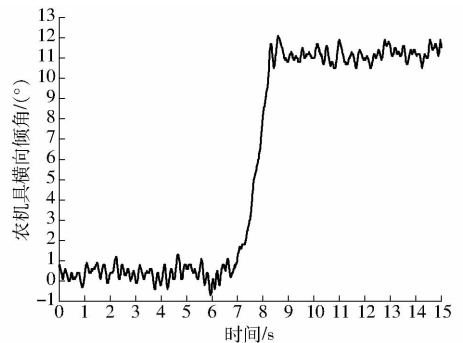


图 13 农机具横向倾角变化曲线

Fig. 13 Lateral dip curve of agricultural implement

由图 13 可知,农机具横向倾角在阶跃信号下调整时间约为 2.2 s,几乎无超调,系统稳定后农机具横向倾角约为 11.2°,稳态误差约为 0.2°,在系统允许误差(0.5°)范围内。试验结果验证了所设计的仿形控制系统调节的准确性与稳定性以及控制算法的有效性。然而农机具横向倾角在调整前后不断波动,这是由于拖拉机空转造成的振动引起的。当拖拉机在田间犁耕作业时,由于土壤阻力的作用可能会消除此振动影响。

4 结论

(1) 设计了基于带死区 PID 控制算法的丘陵山地拖拉机液压悬挂仿形控制系统,由仿形悬挂机构、负载敏感的闭心式液压驱动系统、控制系统和人机交互系统组成。

(2) 建立了阀控非对称液压缸控制系统的数学模型,通过 Matlab/Simulink 建立了丘陵山地拖拉机液压悬挂仿形控制系统的动力学模型并进行了仿真



图 11 虚拟终端及数据采集系统

Fig. 11 Virtual terminal and data acquisition system

1. 显示器 2. 控制器 3. 上位机 4. CAN 卡

3.2 试验结果与分析

调节提升杆和上拉杆长度使悬挂机构处于水平位置后挂接三铧犁,此时农机具倾角为 0°,如图 12a 所示。通过显示屏给控制器发送一个阶跃信号指令,即在倾角设置一栏中输入目标值 11°后确认,然

分析,系统的调整时间约为 0.4 s,稳态误差约为 0.1°,验证了系统数学模型的正确性和控制算法的有效性。

(3)搭建了室内台架试验台并进行了横向倾角调整试验,农机具横向倾角在阶跃信号下调整时间

约为 2.2 s,几乎无超调,稳态误差约为 0.2°,试验结果表明,所设计的丘陵山地拖拉机电液悬挂仿形控制系统调节快速稳定,能够满足拖拉机等高线坡地作业的工作需求,为研究丘陵山地拖拉机电液悬挂耕深和仿形协同控制奠定,理论基础。

参 考 文 献

- [1] 杨敏丽,白人朴,刘敏,等. 建设现代农业与农业机械化发展研究[J]. 农业机械学报,2005,36(7):68-72.
YANG Minli, BAI Renpu, LIU Min, et al. Research on the development of modern agriculture and agricultural mechanization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7):68-72. (in Chinese)
- [2] 杨印生,刘子玉,盛国辉. 我国农业机械化促进体系的构建[J]. 农业机械学报,2005,36(11):79-82.
YANG Yinsheng, LIU Ziyu, SHENG Guohui. Construction of China's agricultural mechanization promotion system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11):79-82. (in Chinese)
- [3] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报,2016,32(1):1-11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1):1-11. (in Chinese)
- [4] 王奎山,唐明霞,程玉静,等. 我国农业机械化发展现状及对现代农业发展的作用[J]. 现代农业科技,2016(21):142-143.
WANG Kuishan, TANG Mingxia, CHENG Yujing, et al. The development status of agricultural mechanization in China and its role in the development of modern agriculture[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(21):142-143. (in Chinese)
- [5] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.006. (in Chinese)
- [6] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s255&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.055. (in Chinese)
- [7] 范永奎,毛恩荣,朱忠祥,等. 丘陵山地拖拉机液压多点动力输出系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):477-485.
FAN Yongkui, MAO Enrong, ZHU Zhongxiang, et al. Design and experiment of hydraulic multi-point power output system for hilly and mountain tractors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):477-485. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s065&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.065. (in Chinese)
- [8] 张硕,李臻,朱忠祥,等. 多因素影响下拖拉机侧向稳定性模型实验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):358-363.
ZHANG Shuo, LI Zhen, ZHU Zhongxiang, et al. Scale model experiment on lateral stability of tractor affected by multi-factors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):358-363. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171046&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.046. (in Chinese)
- [9] 庄家鹏. 姿态可调丘陵山地拖拉机稳定性研究[D]. 济南:山东大学,2020.
ZHUANG Jiapeng. Research on stability of hilly mountain tractor with adjustable attitude[D]. Ji'nan:Shandong University, 2020. (in Chinese)
- [10] BALLESTEROS T, ARANA J, PEREZ D, et al. Development and validation of automatically deployable ROPS based on airbag inflator technology[J]. BIOSYST ENG, 2015, 130:92-105.
- [11] BALLESTEROS T. E2D-ROPS: development and tests of an automatically deployable, in height and width, front-mounted ROPS for narrow-track tractors[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116(1):1-14.
- [12] OJADOS G. Development of an automatically deployable roll over protective structure for agricultural tractors based on hydraulic power: prototype and first tests[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124:46-54.
- [13] QIN J, ZHU Z, JI H, et al. Simulation of active steering control for the prevention of tractor dynamic rollover on random road surfaces[J]. BIOSYST ENG, 2019, 185:135-149.

- [14] WANG Y J, YANG F Z, PAN G T, et al. Design and testing of a small remote-control hillside tractor [J]. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 2014, 57(2):363-370.
- [15] 彭贺, 马文星, 赵恩鹏, 等. 丘陵山地轮式拖拉机车身调平系统设计与物理模型试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14):36-44.
PENG He, MA Wenxing, ZHAO Enpeng, et al. Design and physical model experiment of body leveling system for roller tractor in hilly and mountainous region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(14):36-44. (in Chinese)
- [16] 彭贺, 马文星, 王忠山, 等. 丘陵山地拖拉机车身调平控制仿真分析与试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2019, 49(1):162-170.
PENG He, MA Wenxing, WANG Zhongshan, et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation experiment[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(1):162-170. (in Chinese)
- [17] 齐文超, 李彦明, 陶建峰, 等. 丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统设计与实验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(7):381-388.
QI Wenchao, LI Yanming, TAO Jianfeng, et al. Design and experiment of active attitude adjustment system for hilly area tractors[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7):381-388. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190742&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.042. (in Chinese)
- [18] 齐文超, 李彦明, 张锦辉, 等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(10):17-23, 34.
QI Wenchao, LI Yanming, ZHANG Jinhui, et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10):17-23, 34. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191002&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.002. (in Chinese)
- [19] MASHADI B, NASROLAHI H. Automatic control of a modified tractor to work on steep side slopes [J]. *Journal of Terramechanics*, 2009, 46(6):299-311.
- [20] ROHOLLAH M, AMIN S, MOHAMMAD H. Design and manufacture of an appropriate hitch mechanism for the wheels of the tractor for moving on transversal slopes[J]. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2014, 7:1406-1416.
- [21] JONSSON H, BENGTTSSON R. Return from a lateral displacement by front-mounted three-point hitched implements[J]. *J. Agric. Engng. Res.*, 1998, 69:199-208.
- [22] 刘林. 基于拖拉机三点悬挂耕作机具调平系统研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2014.
LIU Lin. Research on leveling system of tractor three-point hanging tillage equipment[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [23] 周浩, 胡炼, 罗锡文, 等. 旋耕机自动调平系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊):117-123.
ZHOU Hao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling system of rotary tiller[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.):117-123. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s018&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.018. (in Chinese)
- [24] 胡炼, 林潮兴, 罗锡文, 等. 农机具自动调平控制系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8):15-20.
HU Lian, LIN Chaoping, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling control system of agricultural implements [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(8):15-20. (in Chinese)
- [25] 邵明玺, 辛喆, 江秋博, 等. 拖拉机后悬挂横向姿态调整的模糊 PID 控制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21):34-42.
SHAO Mingxi, XIN Zhe, JIANG Qiubo, et al. Fuzzy PID control for lateral pose adjustment of tractor rear suspension[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(21):34-42. (in Chinese)
- [26] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 4 版. 北京:电子工业出版社, 2016.
- [27] 宋志安, 曹连民, 黄靖, 等. MATLAB/Simulink 与液压控制系统仿真[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.