

丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统设计与实验

齐文超¹ 李彦明¹ 陶建峰¹ 覃程锦¹ 刘成良¹ 种 昆²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 山东五征集团, 日照 276800)

摘要: 为保证拖拉机在丘陵山地的安全作业, 并提高作业效率及乘坐舒适性, 设计了基于双闭环 PID 算法的丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统。首先, 根据丘陵山地特定作业需求设计了姿态主动调整系统, 包括姿态调整机构、液压驱动系统和控制系统; 然后, 建立了系统动力学模型, 通过数值分析验证了该自动调平控制算法的有效性; 最后, 在山东五征集团生产的拖拉机上安装此系统, 并进行了实验验证。结果表明: 所设计的姿态主动调整系统在 $\pm 10^\circ$ 的坡地上调平时间为 7.5 s, 最大调平误差小于 0.5° , 左右摆动机构摆角绝对值的差在 $\pm 1^\circ$ 以内, 能有效满足丘陵山地作业需求。同时, 该拖拉机在高低起伏较大的坡地上以 1 挡速度 (1.98 km/h) 行驶时, 车身倾斜角可控制在 $\pm 3^\circ$ 范围内, 左右摆动机构摆角绝对值差在 $\pm 5^\circ$ 范围内。所设计的姿态主动调整系统能适应恶劣作业环境的作业需求。

关键词: 拖拉机; 姿态主动调整系统; 丘陵山地; 双闭环 PID

中图分类号: S232.3; S219.85 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0381-08

Design and Experiment of Active Attitude Adjustment System for Hilly Area Tractors

QI Wenchao¹ LI Yanming¹ TAO Jianfeng¹ QIN Chengjin¹ LIU Chengliang¹ ZHONG Kun²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Shandong Wuzheng Group, Rizhao 276800, China)

Abstract: To ensure safe operation, enhance productivity and improve operation comfort for the tractors in hill area, a dual-closed-loop-PID-based active attitude adjustment system was designed. Based on the special requirements for operation in mountainous regions, an active attitude adjustment system was designed, which included pose regulation mechanism, hydraulic actuation system and the corresponding control system. Then the system dynamic model was proposed along with the dual-closed-loop PID algorithm, which were verified numerically. Numerous experiments were conducted on a tractor system designed by Shandong Wuzheng Group. The experimental results showed that the proposed active pose regulator can achieve regaining of horizontal pose in 7.5 s with a maximum angular error of 0.5° and the difference of the absolute rotation angle of both rear wheel rotary mechanism was in the range of $\pm 1^\circ$, which satisfied the application requirement. Additionally, when the tractor system was operated at first-gear speed (1.98 km/h) on slopes with relatively large variation in height, the slope angle of the tractor system can be controlled with in $\pm 3^\circ$, and the absolute difference of the sway angle of the wheels on both sides were within $\pm 5^\circ$. In conclusion, the proposed active pose regulator system design can adapt to the harsh application requirement.

Key words: tractor; active attitude adjustment system; mountainous area; dual-closed-loop PID

0 引言

丘陵山地地形复杂, 农机作业环境以斜坡为主。

传统农业机械在丘陵山地作业效率低、乘坐舒适性差, 甚至出现翻车、侧倾等严重安全事故。丘陵山地拖拉机是专为丘陵山区农业生产研发的农机装备,

收稿日期: 2019-01-16 修回日期: 2019-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700505)

作者简介: 齐文超(1994—), 男, 博士生, 主要从事嵌入式软硬件、智能控制和并发编程研究, E-mail: qiwenchao7@163.com

通信作者: 李彦明(1971—), 男, 副教授, 主要从事非结构化环境下智能装备自动驾驶与自主作业研究, E-mail: ymli@sjtu.edu.cn

能够大大提高丘陵山区农业生产水平。调平系统作为丘陵山地拖拉机的核心子系统,其性能直接影响拖拉机作业时的安全性、作业效率和乘坐舒适性。国内丘陵山地拖拉机调平系统研究起步较晚,相比于国外技术上存在较大的差距,亟待研发高效、轻便、坡地适应性高的姿态主动调整系统,以提升我国丘陵山区农机装备技术水平^[1-2]。

目前,国内外学者对高空升降平台^[3-4]、果园升降平台^[5-7]、农机具^[8-13]的调平系统研究较多,关于山地拖拉机调平系统的研究尚不多见。杨福增等^[14-16]提出了适用于微型履带式拖拉机的自动调平系统,利用单片机处理倾角传感器和限位开关信号,并通过控制液压缸缸体运动实现车身自动调平。国外学者对调平控制研究较早^[17-19],LEONARD等^[17]研发的自动调平系统响应速度快、控制精度高,适用于静止状态的车辆调平。徐峰等^[20]将PLC、触控屏等自动化及人机工程引入到丘陵山地拖拉机车身调平装置中,设计了面向履带式拖拉机的车身自动调平控制系统。彭贺等^[21]提出的丘陵山地轮式拖拉机调平系统使用液压缸驱动,通过对丘陵山地拖拉机车身调平系统进行运动学与动力学仿真,得到了系统中各个零部件的受力及扭矩随时间的变化曲线,对拖拉机车身调平系统的设计具有一定的参考价值。分析上述文献可知,国内对于丘陵山地拖拉机调平系统的研究较少,现有调平系统难以应用于丘陵山地农机实际作业中。

为提高丘陵山地拖拉机的作业安全性、作业效率及乘坐舒适性,本文设计基于双闭环PID算法的丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统,并建立其动力学模型,通过数值分析和实验验证系统的作业安全性和适应性。

1 系统设计

根据丘陵山地特定作业需求,所设计的丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统由姿态调整机构、液压驱动系统和控制系统组成。丘陵山地拖拉机前驱动桥为随动系统,姿态调整主要通过附加于后驱动桥的左、右偏心轮摆动机构实现。姿态调整机构如图1所示,左、右偏心轮顺时针或逆时针方向转动可实现左右车轮的高低调整,从而实现拖拉机姿态调整。

在姿态调整过程中,要求左右摆动机构摆角相等、方向相反,使两后轮轴线基本重合,车辆可以正常行驶。摆动机构摆角与车身横向倾角的关系为

$$Lt \tan \gamma = 2l \sin \delta \quad (1)$$

式中 γ ——车身横向倾角,rad

δ ——单侧摆动机构摆角,rad

L ——轮距,m

l ——摆动机构摆动半径,m

如图2所示,左右摆动机构摆动在 $\pm 40^\circ$ 范围内。

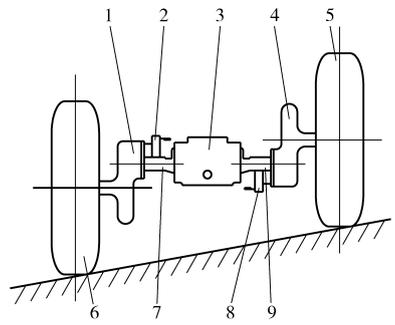


图1 姿态调整机构示意图

Fig. 1 Attitude adjustment mechanism diagram

1. 左末端传动机构 2. 左摆动机构 3. 后驱动桥 4. 右末端传动机构 5. 右车轮 6. 左车轮 7. 左半轴套管 8. 右摆动机构 9. 右半轴套管

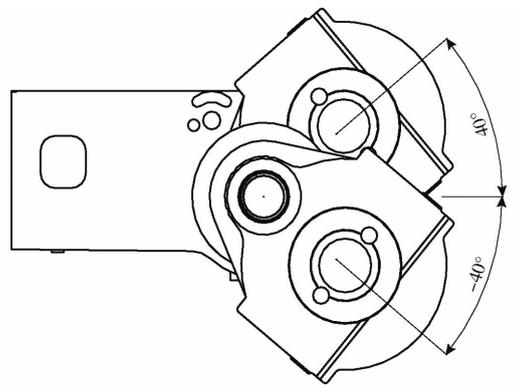


图2 摆动机构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of swing mechanism

图1中左右摆动机构分别由两个液压马达驱动,液压马达的转速和转向分别由两个电液比例阀控制。液压驱动系统和控制系统如图3所示。左右角度传感器分别安装于左右摆动机构上,用来测量

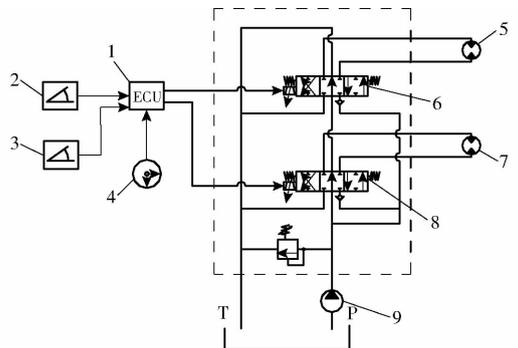


图3 液压系统和控制系统简图

Fig. 3 Diagram of hydraulic drive system and control system

1. 控制器 2. 左摆动机构摆角 3. 右摆动机构摆角 4. 水平倾角 5. 左液压马达 6. 左比例电磁阀 7. 右液压马达 8. 右比例电磁阀 9. 液压泵

其摆动角度。倾角传感器安装在车身上,用于测量车身倾角。控制器根据上述传感器实时检测的数据进行处理分析,输出相应大小的电流,进而控制两个比例电磁阀开口方向及大小,从而调整液压马达转向和转速,使左右摆动机构摆动,实现车身的姿态主动调整。

2 系统建模

2.1 电液比例阀负载流量方程

考虑到位置伺服系统动态分析往往是在零位工作条件下进行,油液泄漏和油液压缩性的影响极小,流入液压马达的流量 Q_1 与流出流量 Q_2 基本相等,为简化分析,定义负载流量为

$$Q_L = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = K_q x_v - K_c p_L \quad (2)$$

式中 K_q ——流量增益系数

x_v ——阀芯开口位移, m

K_c ——流量压力系数, $m^5/(N \cdot s)$

p_L ——负载压差, Pa

电液比例伺服阀的传递函数通常用振荡环节来近似,但当阀的固有频率较高时,亦可近似为比例环节

$$\frac{x_v}{I} = K_{sv} \quad (3)$$

式中 I ——通入比例电磁铁电流, A

K_{sv} ——比例系数

2.2 液压马达流量连续性方程

液压马达流量满足连续性方程

$$Q_L = D_m \frac{d\theta_m}{dt} + C_{lm} p_L + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{dp_L}{dt} \quad (4)$$

式中 D_m ——液压马达理论排量, m^3/rad

θ_m ——液压马达转角, rad

C_{lm} ——液压马达泄漏系数, $m^5/(N \cdot s)$

V_t ——阀腔、马达腔与连接管道总容积, m^3

β_e ——油液有效体积弹性模量, Pa

2.3 液压马达与负载力平衡方程

当液压马达与负载力平衡时,满足方程

$$D_m p_L = J_t \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} + G\theta_m + T_L \quad (5)$$

式中 J_t ——液压马达和负载折算到马达轴上的总惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

B_m ——液压马达和负载的粘性阻尼系数

G ——负载的扭转弹簧刚度, N/m

T_L ——作用在马达轴上的负载力矩, $N \cdot \text{m}$

2.4 传递函数推导及阀控马达控制框图

对式(2)~(5)拉普拉斯变换为

$$\theta_m(s) = \frac{\frac{K_q K_{sv}}{D_m} I(s) - \frac{K_{ce}}{D_m} \left(1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s\right) T_L(s)}{\frac{J_t V_t}{4\beta_e D_m^2} s^3 + \left(\frac{V_t B_m}{4\beta_e D_m^2} + \frac{J_t K_{ce}}{D_m^2}\right) s^2 + \left(1 + \frac{V_t G}{4\beta_e D_m^2} + \frac{B_m K_{ce}}{D_m^2}\right) s + \frac{G K_{ce}}{D_m^2}} \quad (6)$$

其中 $K_{ce} = K_c + C_{lm}$ (7)

式中 K_{ce} ——总流量压力系数, $m^5/(N \cdot s)$

通常在较大惯量的阀控马达系统中不考虑弹性

负载作用,即 $G = 0$,且根据系统参数可知 $\frac{B_m K_{ce}}{D_m^2} \ll 1$,

因此, $1 + \frac{V_t G}{4\beta_e D_m^2} + \frac{B_m K_{ce}}{D_m^2} \approx 1$,从而式(6)可简化为

$$\theta_m(s) = \frac{\frac{K_q K_{sv}}{D_m} I(s) - \frac{K_{ce}}{D_m} \left(1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s\right) T_L(s)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1\right)} \quad (8)$$

其中 $\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e D_m^2}{J_t V_t}}$ (9)

$$\zeta_h = \frac{K_{ce}}{D_m} \sqrt{\frac{\beta_e J_t}{V_t}} + \frac{B_m}{4D_m} \sqrt{\frac{V_t}{\beta_e J_t}} \quad (10)$$

式中 ω_h ——液压固有频率, rad/s

ζ_h ——液压阻尼比

阀控马达控制框图如图4所示。输入量为通入电液比例阀电流以及负载力矩,输出为马达转角。

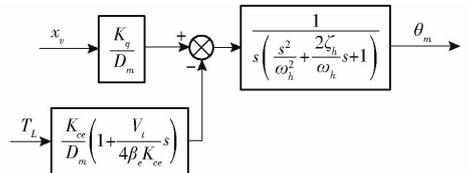


图4 阀控马达控制框图

Fig.4 Valve control motor control block diagram

2.5 状态空间模型的建立

以液压马达转角(x_1)、马达角速度(x_2)和负载压差(x_3)作为系统的状态变量,比例电磁阀输入电流(u_1)和作用在马达上的负载力矩(u_2)为系统输入,液压马达转角(y)为系统输出,令

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T \\ \mathbf{U} = [u_1 \quad u_2]^T \end{cases} \quad (11)$$

由式(2)~(5)得阀控马达系统状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases} \quad (12)$$

其中
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{G}{J_t} & -\frac{B_m}{J_t} & \frac{D_m}{J_t} \\ 0 & -\frac{4\beta_e D_m}{V_t} & -\frac{4\beta_e (K_{ce} + C_{lm})}{V_t} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_t} \\ \frac{4\beta_c K_q K_{sv}}{V_t} & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0]^T \quad (15)$$

式中 A ——系统矩阵 B ——输入矩阵

C ——输出矩阵

2.6 姿态主动调整系统

如图5(图中 θ_0 、 θ 分别为车身目标倾角和倾角传感器检测的实际倾角; α_0 、 α 、 I_α 分别为左摆动机构目标摆角、角度传感器检测的实际摆角和左

比例阀输入电流; β_0 、 β 、 I_β 分别为右摆动机构目标摆角、角度传感器检测的实际摆角和右比例阀输入电流; θ_1 为车身本身倾角)所示,提出了基于双闭环PID算法的姿态主动调整方法,在保持车身处于目标倾斜角的前提下可保证左右两摆动机构摆角相等、方向相反。控制系统由控制器、角度传感器以及倾角传感器组成。控制器实时接收倾角传感器和角度传感器所检测到的车身横向倾角和左右两摆动机构摆角,计算出左右两摆动机构应摆动角度。外环PID使两摆动机构摆动到目标角度,内环PID保证摆动过程中左右两摆动机构摆动角度相等、方向相反。

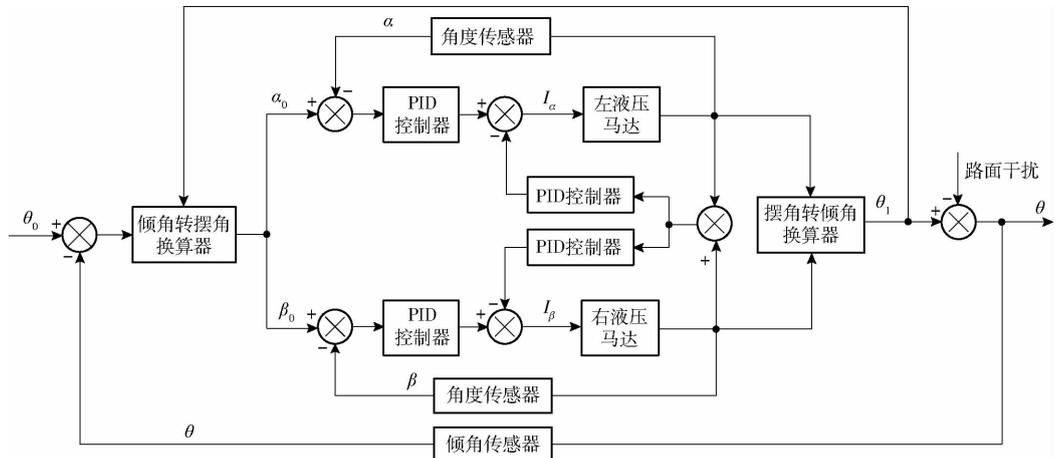


图5 姿态主动调整系统控制框图

Fig.5 Attitude active adjustment system control block diagram

其中,倾角转摆角换算器和摆角转倾角换算器计算公式为

$$L \tan(\theta_0 - \theta + \theta_1) = l \sin \alpha_0 - l \sin \beta_0 \quad (16)$$

$$l \sin \alpha - l \sin \beta = L \tan \theta_1 \quad (17)$$

其中

$$\alpha_0 = -\beta_0$$

3 数值分析

使用 Matlab 建立丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统动力学模型。丘陵山地拖拉机实际行驶过程中,液压马达转动与摆动机构摆动传动比为 79:1,且作用在液压马达轴上的负载力矩不断变化,为简化数值分析过程,假设作用在液压马达轴上的负载力矩分别为 70、80 N·m 的恒定值。系统模型参数如表 1 所示。

丘陵山地拖拉机作业环境多为 10°以内较平稳的斜坡。因此,初始给一个 10°的干扰值,以模拟拖拉机在 10°坡地上的调平过程。仿真结果如图 6 所示,图 6a 表示路面干扰值与车身横向倾角,图 6b 表示左右摆动机构摆角绝对值的差。根据仿真结果可知,由 10°调平到 0°所需时间为 6.5 s,且左右两轮

表 1 系统模型参数

Tab.1 Parameters of system model

参数	数值
$D_m / (\text{m}^3 \cdot \text{rad}^{-1})$	1.27×10^{-5}
$J_t / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	7.79×10^{-4}
V_t / m^3	1.28×10^{-4}
$K_{ce} / (\text{m}^5 \cdot (\text{N} \cdot \text{s})^{-1})$	8.94×10^{-12}
β_c / Pa	7×10^8
$K_q K_{sv}$	0.091 2
L / m	1.300
l / m	0.181

摆角绝对值的差在 $\pm 0.25^\circ$ 范围内。

进一步加大路面崎岖程度,分别以频率为 0.005、0.01 Hz,幅值为 10°的正弦波作为干扰输入,模拟拖拉机以较低速度在波动起伏较大的丘陵山地中驾驶工况,仿真结果如图 7 所示。

通过对比图 7a、7b 可看出,路面干扰频率越大,姿态主动调整后的车身横向倾角波动越大,并且可将车身横向倾角控制在 $\pm 3^\circ$ 范围内。因为左右两轮负载力矩均设为恒定值,所以仿真结果中左右摆动机构摆角绝对值差波动较小。

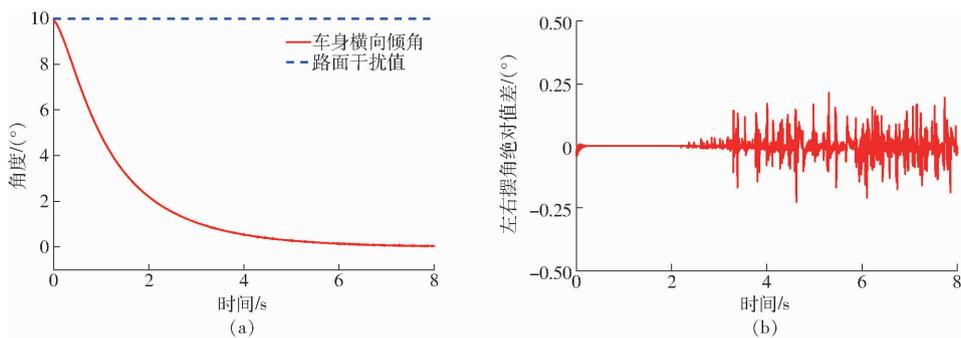


图 6 10°坡地上调平过程的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of leveling process on 10° slope

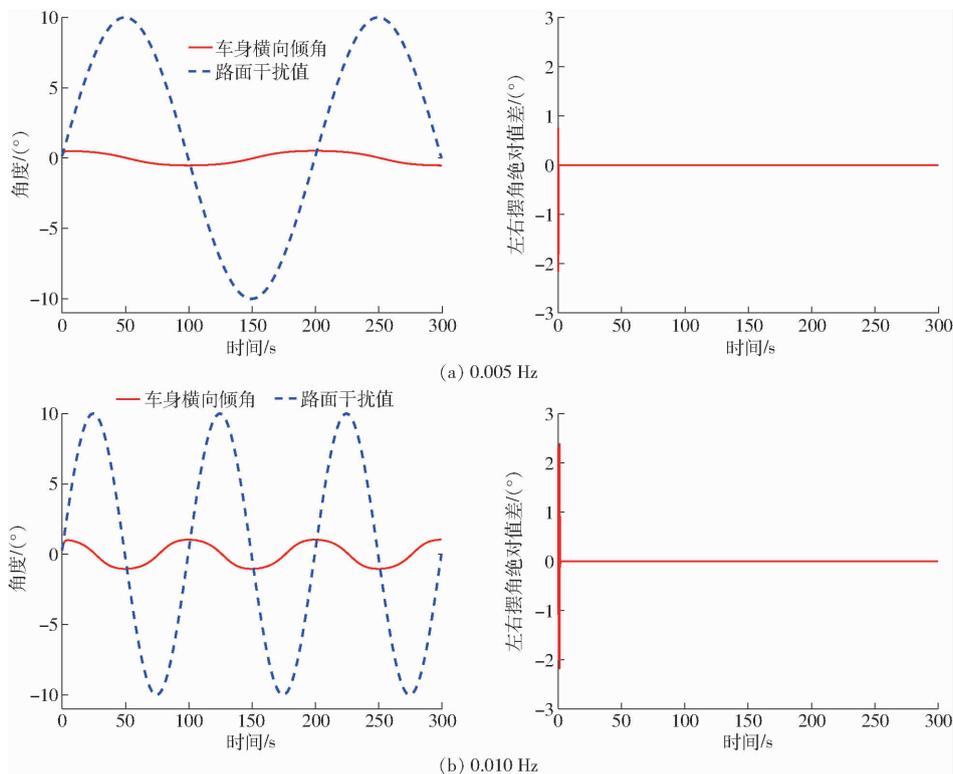


图 7 崎岖路面上调平过程的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of leveling process on rough terrain

4 实验与分析

4.1 实验平台

在山东五征集团生产的拖拉机上安装姿态主动调整系统。其中液压驱动系统由液压泵、液压马达、比例换向阀等组成。液压泵由河北正新齿轮泵厂生产,型号为 CBN-E314;液压马达选用丹佛斯 MS80 型;电液比例阀由 HYDRO CONTROL 公司生产,型号为 EX38,所需输入电流范围为 0~1.3 A。

控制系统中控制器自主研发,CPU 使用意法半导体公司的 STM32F407ZGT6 芯片;控制比例电磁阀模块采用英飞凌公司的 TLE82453 芯片,该芯片可编程输出 PWM 电流范围为 0~1.5 A,分辨率为 0.73 mA;控制器集成 CAN 总线通讯接口,用于接收动态倾角传感器数据。将北微 BW-VG525 型超精

度 CAN 动态倾角传感器(动态精度 0.3°)分别安装在左右摆动机构(用于测量左右摆动机构摆角)和后车身上(用于测量车身横向倾斜角)。实验拖拉机如图 8 所示。

4.2 实验内容及结果分析

实验分为 3 部分:实验 1,拖拉机左右摆动机构初始摆角均为 0°,分别静止在 10°和 -10°的斜坡上,随后启动自动调平控制程序。实验 2,拖拉机左右摆动机构初始摆角均为 0°,静止在水平侧倾实验台上,启动自动调平控制程序,随后实验台分别转动到 10°和 -10°。实验 3,拖拉机启动自动调平控制程序,以 1 挡速度(1.98 km/h)行驶在高低起伏较大的坡地上。

实验 1 和实验 2 使用相同的实验平台,该实验平台为 ZCF-40 型机动车侧倾实验台,实验现场如

图9所示。



图8 实验拖拉机实物图

Fig.8 Experiment tractor physical map



图9 实验现场

Fig.9 Experiment site

实验1结果如图10所示。车身横向倾角由 10° 调平到 0° 需要7.5s,调平误差在 0.5° 范围内,并且左右摆动机构摆角绝对值差为 $\pm 1^\circ$ 。调平过程平稳,满足作业需求。

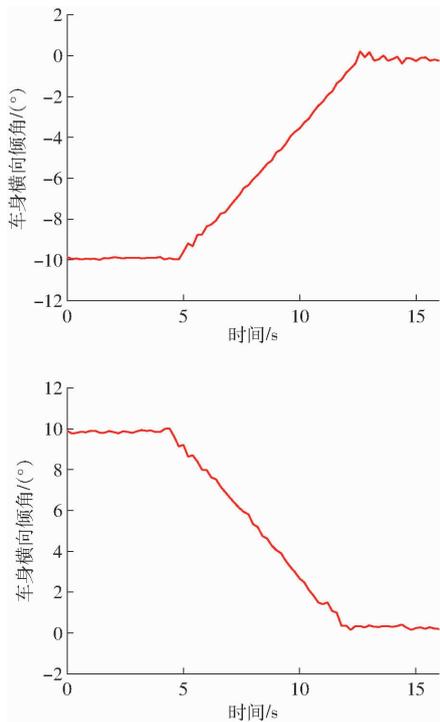


图10 实验1结果

Fig.10 Result of experiment 1

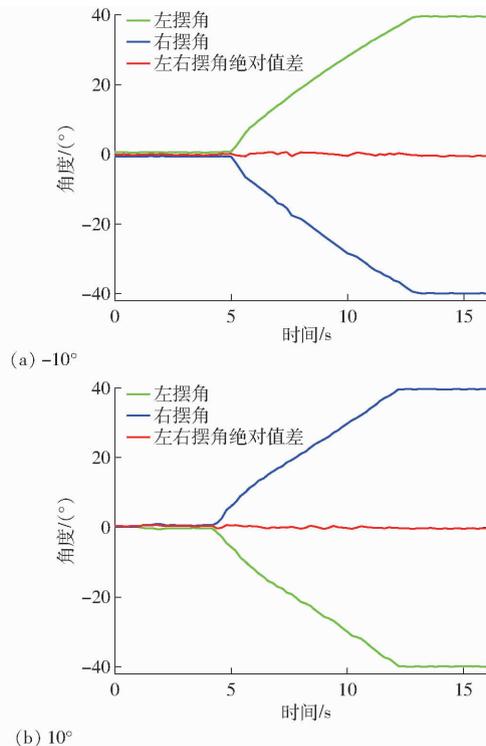
实验2结果如图11所示,实验台提升和下降速度无法设定,速度较为缓慢,在缓慢情况下调平效果与实验1基本相同。

实验3实验场景如图12所示。实验结果如图13所示,拖拉机启动自动调平控制程序后,在 $0 \sim 85$ s以及 350 s之后这两段平稳路面上行驶期间,车身横向倾角及左右摆角绝对值基本为 0° ,没有明显的稳态误差。当行驶在 $85 \sim 350$ s期间的起伏较大(最大路面倾角为 10°)的路面上时,车身横向倾角平均绝对误差为 0.49° ,均方根误差为 0.69° ,最大误差 2.95° ;左右摆动机构摆角绝对值的差平均绝对误差为 0.63° ,均方根误差为 1.02° ,最大误差为 4.95° 。

根据图13a可知,红色线为不启动自动调平系统时,所测得的实际路面倾角,最大倾角达到 10° ,说明路面高低起伏,作业环境较为恶劣。蓝色线为启动自动调平系统后,所测车身实际倾角,表明在起伏较大的恶劣工作环境下,车身倾斜角仍可控制在 $\pm 3^\circ$ 范围内,可满足安全作业的需求。如图13b所示,左右摆动机构摆角绝对值差在 $\pm 5^\circ$ 范围内,左右两轮轴线仍基本重合,能够满足车辆正常行驶需求。实验结果表明该调整系统能够适应起伏较大坡地等恶劣作业环境。

5 结论

(1)设计了基于双闭环PID算法的丘陵山地拖



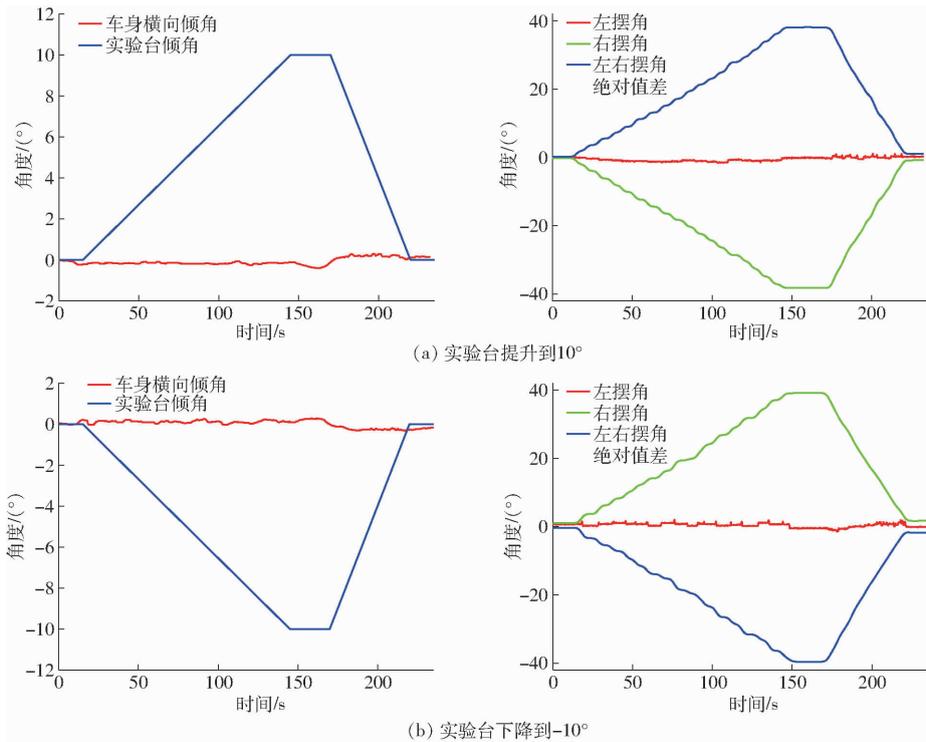


图 11 实验 2 结果

Fig. 11 Results of experiment 2



图 12 实验 3 现场

Fig. 12 Experiment 3 site

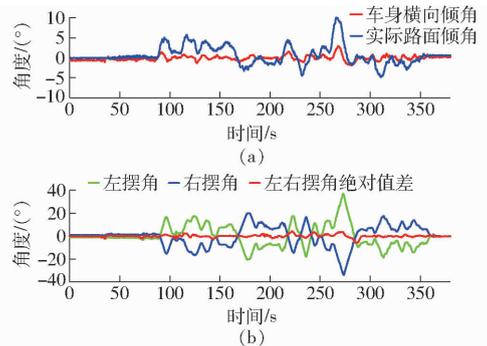


图 13 实验 3 结果

Fig. 13 Result of experiment 3

拖拉机姿态主动调整系统,该系统由姿态调整机构、液压驱动系统和控制系统组成。对姿态主动调整系统进行动力学建模,运用 Matlab 对系统进行数值分析,数值分析验证表明该自动调平控制算法能有效满足车身横向调平需求。

(2)对整机进行实验验证,结果表明,所设计的姿态主动调整系统在 $\pm 10^\circ$ 的坡地上调平时间

为 7.5 s,最大调平误差小于 0.5° ,左右两后轮摆动机构的摆角绝对值之差在 $\pm 1^\circ$ 以内。同时,该拖拉机在高低起伏较大的坡地上以 1 挡速度行驶时,车身倾斜角可控制在 $\pm 3^\circ$ 范围内,左右车轮摆角绝对值差在 $\pm 5^\circ$ 范围内。所设计的姿态主动调整系统不仅能在较平缓的丘陵坡地上安全作业,并能适应起伏较大的坡地等恶劣作业环境。

参 考 文 献

[1] 姜福东, 陈德鑫. 我国丘陵山区烟草农业机械化发展现状及对策[J]. 畜牧与饲料科学, 2009, 30(2): 97-99.
JIANG Fudong, CHEN Dexin. Current status and countermeasures of tobacco agricultural mechanization development in hilly areas of China[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2009, 30(2): 97-99. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 高兰. 基于 PLC 的高空作业平台调平控制系统研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
GAO Lan. Design of leveling control system for a high lift platform based on PLC[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016. (in Chinese)

- [4] 秦敬贤. 基于模糊的高空作业平台自动调平系统[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
QIN Jingxian. Research of suspend access platform automatic leveling system based of fuzzy PID[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012. (in Chinese)
- [5] 刘大为, 谢方平, 李旭, 等. 小型果园升降作业平台的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 113-121.
LIU Dawei, XIE Fangping, LI Xu, et al. Design and experiment of small lifting platform in orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 113-121. (in Chinese)
- [6] 买合木江·巴吐尔, 李忠新, 杨莉玲. 等. 多功能自走式果园作业平台的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(11): 32-35.
MAIHEMUJIANG Batuer, LI Zhongxin, YANG Liling, et al. Design and experiment on multifunctional self-propelled orchard working platform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(11): 32-35. (in Chinese)
- [7] 樊桂菊, 王永振, 张晓辉, 等. 丘陵山区果园作业平台的设计与试验[J]. 农机化研究, 2016, 38(8): 77-81.
FAN Guiju, WANG Yongzhen, ZHANG Xiaohui, et al. Development and experiment of platform for orchards in hill area[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(8): 77-81. (in Chinese)
- [8] 孙江宏, 何世风. 一种新型自动调平平台结构与控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2015(7): 11-15.
SUN Jianghong, HE Shifeng. Structure and control system design of a new automatic leveling platform[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(7): 11-15. (in Chinese)
- [9] DONG F, HEINEMANN W, KASPER R. Development of a row guidance system for an autonomous robot for white asparagus harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 216-225.
- [10] 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.j-csam.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)
- [11] 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 超声波传感器评定水田激光平地机水平控制系统性能[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 73-76, 81.
HU Lian, LUO Xiwen, ZHAO Zuoxi, et al. Evaluation of leveling performance for laser controlled leveling machine in paddy field based on ultrasonic sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 73-76, 81. (in Chinese)
- [12] 陈君梅, 赵祚喜, 陈嘉琪, 等. 水田激光平地机非线性水平控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 79-84.
CHEN Junmei, ZHAO Zuoxi, CHEN Jiaqi. Design of nonlinear leveling control system for paddy land leveler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 79-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140713&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.013. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 王涛, 杨福增, 王元杰, 等. 山地拖拉机机身自动调平控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(7): 232-235.
WANG Tao, YANG Fuzeng, WANG Yuanjie, et al. Design of body automatic leveling control system of hillside tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(7): 232-235. (in Chinese)
- [15] 何金伊, 杨福增, 徐秀栋. 山地履带式遥控微耕机控制系统设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2011, 38(2): 19-22.
HE Jinyi, YANG Fuzeng, XU Xiudong. Design of control system for mountain tracked remote control microgrid[J]. Tractors and Farming Vehicles, 2011, 38(2): 19-22. (in Chinese)
- [16] 张战文. 微型履带山地拖拉机稳定性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
ZHANG Zhanwen. Research on stability of micro-hillside caterpillar tractor[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- [17] LEONARD K E, WOODY V O. Automatic leveling system; US6106402[P]. 2000-08-22.
- [18] HOEHN K W, TOMPSON W L. Remotely adjustable disk leveling system; US4809786[P]. 1989-03-07.
- [19] SUN Jia, WU Yuhou, ZHANG Ke, et al. Design of automatic leveling system for suspended working platforms base on PLC[C]// Proceedings of the 2009 International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering, 2009.
- [20] 徐峰, 李广宇, 高莫尧, 等. 一种山地拖拉机机身调平控制系统设计[J]. 农业与技术, 2017, 37(17): 59-61.
XU Feng, LI Guangyu, GAO Moyao, et al. Design of leveling control system for mountain tractor body[J]. Agriculture and Technology, 2017, 37(17): 59-61. (in Chinese)
- [21] 彭贺, 马文星, 赵恩鹏, 等. 丘陵山地轮式拖拉机机身调平系统设计与物理模型实验[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)