doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.002

丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法

齐文超[1]　李彦明[1]　张锦辉[1]　覃程锦[1]　刘成良[1]　殷月朋[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: 为提高丘陵山地拖拉机自动调平控制系统性能,基于已开发的丘陵山地拖拉机姿态调整机构,提出了利用双闭环模糊 PID 算法调整车轮摆动角度的自动调平控制方法。首先,建立被控对象状态空间模型,并基于该模型设计了双闭环模糊 PID 控制算法。然后,对自动调平控制系统进行仿真分析,结果表明,在使用相同 PID 参数条件下,双闭环模糊 PID 控制比双闭环 PID 控制性能更优,可有效减少超调量和调平时间。最后,开展了静态和动态试验验证,结果表明,采用所提出的自动调平双闭环模糊 PID 控制方法,在 15°坡地上调平时间为 12.5 s,调平误差小于 0.5°,且无超调现象,左右两后轮摆角绝对值差在 ±1°以内;同时,以 1.98 km/h 的速度行驶在高低起伏的恶劣工作环境下,车身倾斜角可控制在 ±3°范围内,左右摆动机构摆动角度绝对值差在 ±5°范围内,相比于双闭环 PID 控制效果更优。

关键词: 拖拉机; 自动调平; 双闭环模糊 PID 控制; 丘陵山地
中图分类号: S219　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0017-07

Double Closed Loop Fuzzy PID Control Method of Tractor Body Leveling on Hilly and Mountainous Areas

QI Wenchao[1]　LI Yanming[1]　ZHANG Jinhui[1]　QIN Chengjin[1]　LIU Chengliang[1]　YIN Yuepeng[2]
(1. *School of Mechanical Engineering*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*
2. *Shandong Wuzheng Group*, *Rizhao* 276800, *China*)

Abstract: In order to improve the performance of automatic leveling control system of tractors in hilly and mountainous areas, based on the developed attitude adjustment mechanism of hilly mountain tractors, an automatic leveling control method for adjusting the swing angle of wheels by double closed loop fuzzy PID algorithm was proposed. The state space model of the controlled object was established, and a double closed-loop fuzzy PID control algorithm was designed based on the model. The simulation analysis of the automatic leveling control system showed that the double closed loop fuzzy PID control had better performance than the double closed loop PID control, which can effectively reduce the overshoot and leveling time. A large number of dynamic and static tests were carried out. The results showed that the proposed automatic leveling double closed-loop fuzzy PID control method had a leveling time of 12.5 s on the slope of 15°, the maximum leveling error was less than 0.5°, and there was no overshoot phenomenon. The absolute value of the difference between the left and right rear wheel swing angles was within ±1°; at the same time, driving at a speed of 1.98 km/h in a harsh working environment with high and low undulations, the tilt angle of the body can be controlled within ±3°, and the absolute difference of the left and right wheel swing angles was within ±5°. Generally, the control method proposed had better control effect than double closed loop PID control.

Key words: tractor; active pose regulator; dual closed loop fuzzy PID; hilly and mountainous areas

0　引言

丘陵山区耕地面积约占我国总耕地面积的 63.2%,其粮油产量超过总产量的 50%,在我国农业生产中具有不可替代的重要地位。丘陵山区作业环境多为倾斜角度较大的斜坡,传统农机装备在丘

收稿日期: 2019-03-28　修回日期: 2019-04-25
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

陵山区作业时效率低、乘坐舒适性差,甚至会出现侧倾、翻车等严重的安全事故。因此,亟待研发具备自动调平功能的丘陵山地拖拉机,同时提高其自动调平控制性能[1-4]。

国外对丘陵山地调平系统的研究起步较早,XIE 等[5]、HOEHN 等[6]研发的调平系统专用于坡地作业联合收获机。LEONARD 等[7]研发的自动调平系统应用于静止状态的车辆调平,不能在行驶中调平;PIJUAN 等[8]设计的可调节高度悬挂机构具有较强陡坡越障能力,并不需要严格控制调平精度。国内在果园升降平台调平[9-12]、农机具调平控制系统[13-16]、高空升降平台调平控制[17-19]方面研究较多,关于丘陵山地拖拉机自动调平控制研究相对较少。文献[20-22]提出了一种基于 PID 控制算法的自动调平系统,应用于履带式拖拉机。彭贺等[23-24]研制了基于液压缸驱动的车身四点调平机构,对其进行了详细的运动学和动力学仿真分析,在此基础上设计了一套车身自调平控制系统,最后在自调平试验台上开展了相关试验验证。上述研究为丘陵山地拖拉机车身自动调平控制方法设计与改进提供了重要的依据。

为提高丘陵山地拖拉机作业安全性和作业效率,本文在由液压马达驱动的丘陵山地拖拉机姿态调整机构的基础上,设计基于双闭环模糊 PID 算法的自动调平控制方法,以实现车身自动调平并提高其控制精度。并与双闭环 PID 算法进行对比,通过仿真与试验验证所设计的自动调平双闭环模糊 PID 控制方法性能及对起伏较大坡地等恶劣作业环境的适应性。

1 自动调平控制原理

丘陵山地拖拉机前驱动桥为随动系统,姿态调整机构安装于后驱动桥上。如图 1a 所示,A、B 两点的连线与水平线间的夹角为车身横向倾角。该丘陵山地拖拉机所使用的姿态调整机构,是通过左右两摆动机构摆动所产生的高度差与路面倾角抵消来实现车身横向调平,左右摆动机构分别由两个液压马达驱动。如图 1b 所示,左右摆动机构摆动范围为 ±80°。液压马达的转速与转动方向分别由两个电液比例阀控制。因此,通过调节电液比例阀开口大小及方向可控制摆动机构的摆动速度和摆动方向,从而实现车身调平。为保证车辆正常行驶,需保证左右摆动机构摆动角度相等、方向相反。

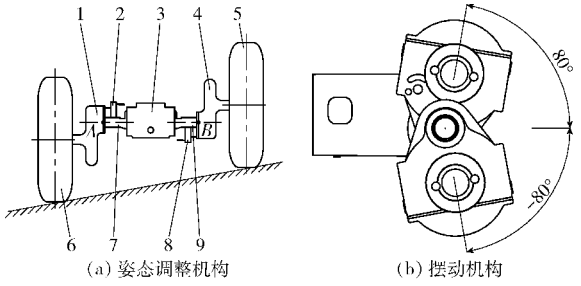


图 1 姿态调整机构示意图

Fig. 1 Attitude adjustment mechanism diagrams

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

为实现自动调平,在左右两摆动机构上各安装有角度传感器测量摆动机构摆动角,在车身上安装倾角传感器测量车身横向倾角。主控器根据上述传感器实时接收的数据进行处理分析,输出相应大小的电流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速和转向,使左右摆动机构摆动,实现车身的自动调平,如图 2 所示(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)。基于双闭环模糊 PID 算法的自动调平控制系统工作原理为:

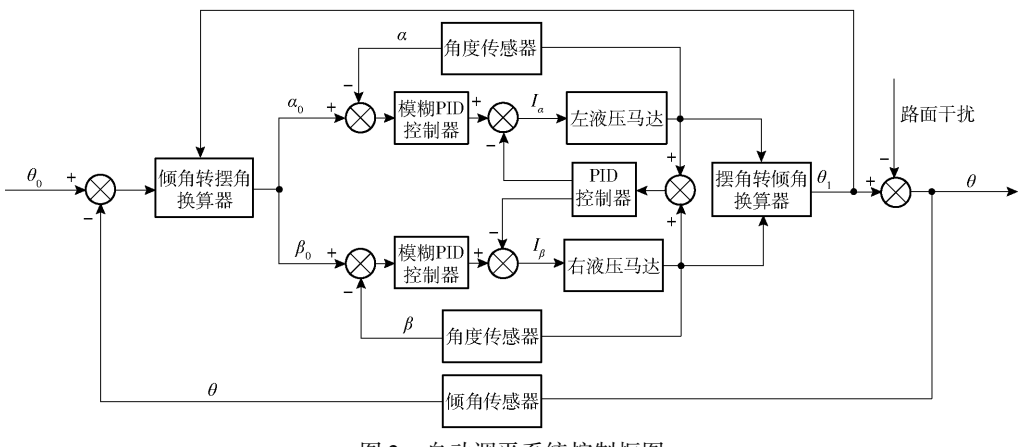


图 2 自动调平系统控制框图

Fig. 2 Automatic leveling system control block diagram

主控器实时接受倾角传感器、两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，通过倾角转摆角换算器计算出左右两摆动机构应摆动角度。外环采用模糊 PID 控制使两摆动机构摆动到目标角度，内环采用 PID 控制保证摆动过程中左右两摆动机构摆动角度相等、方向相反。

其中，倾角转摆角换算器和摆角转倾角换算器计算公式为

$$L\tan(\theta_0-\theta+\theta_1)=l\sin\alpha_0-l\sin\beta_0 \tag{1}$$

$$l\sin\alpha-l\sin\beta=L\tan\theta_1 \tag{2}$$

其中　$\alpha_0=-\beta_0$

式中　L——轮距，m

l——摆动机构摆动半径，m

2　系统建模

2.1　阀控马达系统状态空间模型

被控对象为比例阀控马达系统，故建立该阀控马达系统状态空间模型。液压马达负载流量方程为

$$Q_L=K_q x_v-K_c p_L \tag{3}$$

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

电液比例阀的传递函数为比例环节

$$\frac{x_v}{I}=K_{sv} \tag{4}$$

式中　I——通入比例电磁铁电流，A

K_{sv}——比例系数

液压马达流量连续性方程为

$$Q_L=D_m\dot{\theta}_m+C_{tm}P_L+\frac{V_t}{4\beta_e}\dot{p}_L \tag{5}$$

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_{tm}——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

当液压马达与负载力平衡时，满足方程

$$D_m p_L=J_t\ddot{\theta}_m+B_m\dot{\theta}_m+G\theta_m+T_L \tag{6}$$

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

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·m

以液压马达转角 x_1、马达角速度 x_2 和负载压差 x_3 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

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}=[x_1\quad x_2\quad x_3]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{U}=[u_1\quad u_2]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{7}$$

由式(3)～(6)得阀控马达系统状态空间模型

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}\\ \boldsymbol{Y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{X}\end{cases} \tag{8}$$

其中

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ -\dfrac{G}{J_t} & -\dfrac{B_m}{J_t} & \dfrac{D_m}{J_t}\\ 0 & -\dfrac{4\beta_e D_m}{V_t} & -\dfrac{4\beta_e(K_{ce}+C_{tm})}{V_t}\end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -\dfrac{1}{J_t}\\ \dfrac{4\beta_e K_q K_{sv}}{V_t} & 0\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{C}=[1\quad 0\quad 0]^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

$$\begin{cases}K_{ce}=K_c+C_{tm}\\ \omega_h=\sqrt{\dfrac{4\beta_e D_m^2}{J_t V_t}}\\ \zeta_h=\dfrac{K_{ce}}{D_m}\sqrt{\dfrac{\beta_e J_t}{V_t}}+\dfrac{B_m}{4D_m}\sqrt{\dfrac{V_t}{\beta_e J_t}}\end{cases} \tag{12}$$

式中　$\boldsymbol{A}$——系统矩阵

$\boldsymbol{B}$——输入矩阵

$\boldsymbol{C}$——输出矩阵

K_{ce}——总流量压力系数，$m^5/(N\cdot s)$

ω_h——液压固有频率，rad/s

ζ_h——液压阻尼比

2.2　模糊 PID 控制器

2.2.1　控制算法

传统 PID 控制算法为

$$u(t)=k_p e(t)+k_i\int_0^t e(t)\,\mathrm{d}t+k_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \tag{13}$$

式中　$u(t)$——控制器输出量

$e(t)$——控制器输入量

k_p——比例增益

k_i——积分增益

k_d——微分增益

由于丘陵山地拖拉机电液系统是一种典型的非线性不确定性系统，传统 PID 控制算法参数均为定值，难以充分发挥 PID 控制器的优良控制作用。故利用模糊控制进行改进，如图 3 所示，摆动机构摆角误差 e 及其变化率 e_c 模糊化后根据模糊控制规则进行决策，模糊控制器使用面积中心法解模糊后得到

PID 参数在线调整量 Δk_p、Δk_i 和 Δk_d，与 PID 参数初始值相加，实现 PID 参数在线自整定，即

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \tag{14}$$

式中 k_{p0}、k_{i0}、k_{d0}——PID 参数初始值

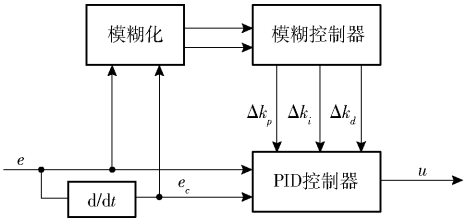


图 3 模糊 PID 控制框图

Fig. 3 Fuzzy PID control block diagram

2.2.2 模糊控制器设计

摆动机构摆角误差 e 及其变化率 e_c 基本论域分别为[-1.4,1.4]和[-0.1,0.1]；修正参数 Δk_p、Δk_i 和 Δk_d 的基本论域分别为[-0.6, 0.6]、[-0.05,0.05]和[-0.1,0.1]。设定输入输出对应论域皆为[-6,6]，模糊子集为{NL,NM,NS,ZO,PS,PM,PL}，分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。因此 e 及其变化率 e_c 的量化因子分别为 $K_e = 4.29$，$K_{ec} = 60$；Δk_p、Δk_i 和 Δk_d 的量化因子分别为 $K_{\Delta kp} = 10$，$K_{\Delta ki} = 120$，$K_{\Delta kd} = 60$。隶属度函数采用三角形函数。模糊规则设计原则如下：

(1)当摆角误差 e 较大，应适当增大比例增益 k_p 从而提高摆动速度，适当减小积分增益 k_i 以抑制积分项影响，同时减小微分增益 k_d 避免瞬时微分过分饱和。

(2)当实际摆角与目标摆角较为接近，即误差 e 及其变化率 e_c 均为中间值时，取适中的 k_p 防止超调，并取适中的 k_i 和 k_d 保证系统响应速度。

(3)当实际摆角基本达到目标摆角并趋于稳定时，应适当增大积分增益 k_i 以减小系统稳态误差，当 e_c 较小时适当增大 k_d，e_c 较大时适当减小 k_d，从而减小系统振荡。

根据上述设计原则，并结合工程经验指定 k_p、k_i、k_d 的模糊规则，如表 1 所示(以 k_p 为例)。

3 仿真分析

使用 Matlab 分别建立基于双闭环 PID 算法和双闭环模糊 PID 算法的丘陵山地拖拉机自动调平控制系统模型。丘陵山地拖拉机实际行驶过程中，作用在液压马达轴上的负载力矩是不断变化的，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为恒定值。为对比两种方法的控制性能，使用相同的 PID 参数进行仿真。系统模型参数如表 2 所示。

表 1 k_p 模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rule of k_p

E_C	E						
	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PL	PL	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NL
PL	ZO	ZO	NM	NM	NM	NL	NL

注：E、E_C 分别为 e、e_c 的语言变量。

表 2 系统模型参数

Tab. 2 Parameters of system model

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

3.1 摆动机构控制性能

姿态调整机构极限摆动角为 80°，故 75°为安全摆动角度。给定幅值为 75°摆角的阶跃信号。

仿真结果如图 4 所示，t_r 为上升时间，t_p 为峰值时间，t_s 为调节时间，M_p 为最大超调量。图 4a 为 PID 控制下的仿真结果，由图可知，上升时间为 11.5 s，最大超调量约为 1.5°。图 4b 为模糊 PID 控制下的仿真结果，由图可知，调节时间为 10.5 s，且摆动角度基本无超调。可见，使用模糊 PID 控制摆动机构可以减小超调量并增加摆动速度。

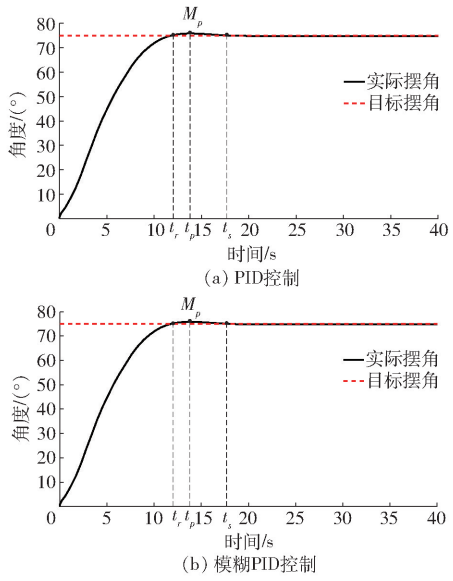
3.2 自动调平控制性能

丘陵山地地区作业环境多为 15°以内的较平稳的斜坡，根据摆动机构设计尺寸可知，当左右摆动机构摆角分别达到 75°和 -75°时，车身可达到 15°倾角。因此给定幅值为 15°路面倾角的阶跃信号。由图 5 可知，使用双闭环模糊 PID 控制方法较双闭环 PID 控制具有增加调平速度和减小超调量的优点。

4 试验与分析

4.1 试验设备与条件

对山东五征集团生产的拖拉机进行改装，安装已研制的姿态调整机构，并安装主控器、传感器等控

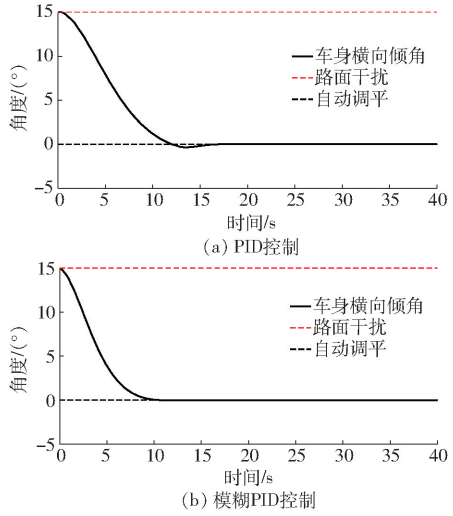


(a) PID控制

(b) 模糊PID控制

图 4　摆动目标为 75°时仿真结果

Fig. 4　Simulation results of swing target at 75°



(a) PID控制

(b) 模糊PID控制

图 5　15°坡地自动调平仿真结果

Fig. 5　Simulation results of 15°slope leveling

制元件。使用自主研发的主控器，该主控器使用 STM32F407ZGT6 作为 CPU，内部集成英飞凌公司生产的 TLE82453－3SA 芯片，可编程输出 PWM 电流范围为 0～1.5 A，分辨率为 0.73 mA，用于控制比例电磁阀。主控器集成 CAN 总线通讯接口，用于实时接收安装于车身及摆动机构上的传感器数据。使用 3 个北微公司生产的 BW－VG525 型超精度动态倾角传感器，动态精度为 0.3°，分别安装于车身和两摆动机构上，用来测量车身横向倾角和摆动机构摆角。试验拖拉机如图 6 所示。

4.2　试验内容及结果

4.2.1　静态试验

如图 7 所示，拖拉机摆动机构初始摆角均为 0°，静止在 15°的斜坡上，启动自动调平程序。分别使用双闭环 PID 算法和双闭环模糊 PID 算法进行试



图 6　试验拖拉机实物图

Fig. 6　Experiment tractor physical map



图 7　静态试验现场

Fig. 7　Static experiment site

验，试验结果如图 8 所示。

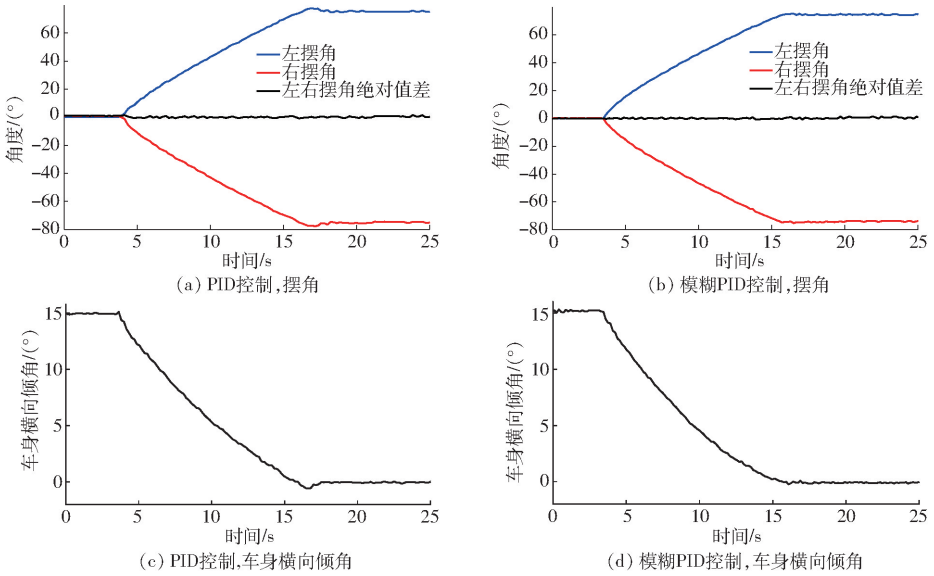
图 8a、8c 分别为双闭环 PID 控制下，摆动机构摆动状况和车身调平状况；图 8b、8d 分别为双闭环模糊 PID 控制下，摆动机构摆动状况和车身调平状况。对比可发现：双闭环模糊 PID 控制较双闭环 PID 控制，调平过程基本无超调，且调平时间较短，与仿真结果相符。调平时间约为 12.5 s，最大调平误差小于 0.5°，且无超调现象，左右两后轮摆角绝对值差在 ±1°以内，满足丘陵山地正常作业需求。

4.2.2　动态试验

如图 9 所示，拖拉机分别使用双闭环 PID 算法和双闭环模糊 PID 算法启动自动调平程序，以 1 挡速度(1.98 km/h)行驶在高低起伏较大的坡地上，模拟恶劣工况。

首先，拖拉机不启动自动调平程序，行驶于该路面上，得到实测路面倾角如图 10 所示。由图可知，最大倾角约为 14°，地面高低起伏较大，可模拟恶劣作业环境。

启动自动调平程序后，试验结果如图 11 所示。图 11a 为基于双闭环 PID 算法和双闭环模糊 PID 算法的自动调平控制方法下车身调平状况。经计算可得，双闭环 PID 控制下，车身横向倾角最大误差为 4.325 0°，平均绝对误差为 0.713 3°，均方根误差为 1.052 7°；双闭环模糊 PID 控制下，车身横向倾角最大误差为 2.870 0°，平均绝对误差为 0.499 5°，均方根误差为 0.755 7°。可见，在双闭环模糊 PID 控制



(a) PID控制,摆角 (b) 模糊PID控制,摆角

(c) PID控制,车身横向倾角 (d) 模糊PID控制,车身横向倾角

图 8 静态试验结果

Fig. 8 Static experimental results



图 9 动态试验现场

Fig. 9 Dynamic experimental site

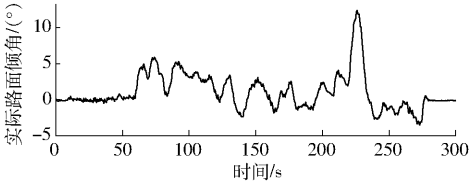
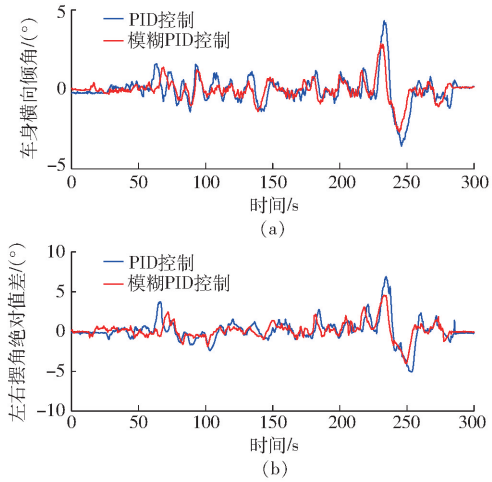


图 10 实际路面倾角变化曲线

Fig. 10 Changing curve of measured tilt angle

下,车身横向倾角最大误差、平均绝对误差和均方根误差均有所减小,提高了调平控制精度。

图 11b 为基于双闭环 PID 算法和双闭环模糊 PID 算法的自动调平控制方法下摆动机构摆动状况。经计算可得,双闭环 PID 控制下,左右摆动机构摆角绝对值差最大误差为 6.890 0°,平均绝对误差为 1.118 7°,均方根误差为 1.689 1°;双闭环模糊 PID 控制下,左右摆动机构摆角绝对值差最大误差为 4.550 0°,平均绝对误差为 0.814 7°,均方根误差为 1.204 1°。



(a)

(b)

图 11 动态试验结果

Fig. 11 Dynamic experimental results

经对比可知,在恶劣作业环境下,双闭环模糊 PID 控制效果优于双闭环 PID 控制。在高低起伏较大(最大倾角小于 15°)的坡地上,车身倾斜角度可控制在 ±3°范围内,左右车轮摆角绝对值差在 ±5°范围内,能够满足车辆正常行驶和作业需求。拖拉机启动自动调平控制程序后,在 0 ~ 60 s 以及 280 s 之后在两段平稳路面上行驶期间,车身横向倾角及其左右摆动机构摆角绝对值差基本为 0°,因此稳态误差为 0°。

5 结论

(1)提出了一种基于双闭环模糊 PID 控制算法的丘陵山地拖拉机自动调平控制方法。运用 Matlab 对系统进行数值分析,表明利用双闭环模糊 PID 控制算法相比于双闭环 PID 算法可减小超调,提高调平速度,并验证了该自动调平控制方法能有效满足车身横向调平需求。

(2)对整机进行试验验证,结果表明,所提出的控制方法性能优于双闭环 PID 算法,在 ±15°的坡地上调平时间为 12.5 s,调平误差小于 0.5°,左右两后轮摆动机构的摆角绝对值差在 ±1°以内,且无超调现象。

(3)以 1.98 km/h 的速度行驶在高低起伏的恶劣工作环境下,车身倾斜角度可控制在 ±3°范围内,左右摆动机构摆角绝对值差在 ±5°范围内。可见,所设计的基于双闭环模糊 PID 控制算法的自动调平控制方法使丘陵山地拖拉机不仅能在较平缓的丘陵坡地上安全作业,并能适应起伏较大坡地等恶劣作业环境,相比于双闭环 PID 控制性能更优。

参 考 文 献

[1] 王升升, 耿令新. 丘陵山区农业机械化发展现状及对策[J]. 农业工程, 2016,6(5): 1-4.
WANG Shengsheng, GENG Lingxin. Current situation and countermeasures of agricultural mechanization in hilly and mountainous area[J]. Agicultural Engineering, 2016,6(5): 1-4. (in Chinese)

[2] 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)

[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] 丁翔文, 徐振兴. 我国山区农业机械化发展分析[J]. 农业机械, 2010(19): 110-112.
DING Xiangwen, XU Zhenxing. Analysis of agricultural mechanization development in mountain areas of China[J]. Farm Machinery, 2010(19): 110-112. (in Chinese)

[5] XIE Y M, ALLEYNE A. Two degree of freedom control synthesis with applications to agricultural systems[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2014, 136(5): 051006.

[6] HOEHN K W, TOMPSON W L. Remotely adjustable disk leveling system: US4809786[P]. 1989-03-07.

[7] LEONARD K E, WOODY V O. Automatic leveling system: US6106402[P]. 2000-08-22.

[8] PIJUAN J, COMELLAS M, NOGUES M, et al. Active bogies and chassis levelling for a vehicle operating in rough terrain[J]. Journal of Terramechanics, 2012, 49(3): 161-171.

[9] 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)

[10] 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)

[11] 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)

[12] 樊桂菊, 王永振, 张晓辉, 等 果园升降平台自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 38-46.
FAN Guiju, WANG Yongzhen, ZHANG Xiaohui, et al. Design and experiment of automatic leveling control system for orchards lifting platform[J]. Transactions of the CASE, 2017, 33(11): 38-46. (in Chinese)

[13] 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)

[14] 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)

[15] 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 Chaoxing, 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)

[16] 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)

(下转第 34 页)

neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 152 - 158. (in Chinese)
[29] 姜红花,王鹏飞,张昭,等. 基于卷积网络和哈希码的玉米田间杂草快速识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11):30 - 38.
JIANG Honghua, WANG Pengfei, ZHANG Zhao, et al. Fast identification of field weeds based on deep convolutional network and binary hash code[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):30 - 38. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181104&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.004. (in Chinese)
[30] 孙俊,何小飞,谭文军,等. 空洞卷积结合全局池化的卷积神经网络识别作物幼苗与杂草[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11):159 - 165.
SUN Jun, HE Xiaofei, TAN Wenjun, et al. Recognition of crop seedling and weed recognition based on dilated convolution and global pooling in CNN[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 159 - 165. (in Chinese)
[31] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement[J/OL]. arXiv:1804.02767v1. 2018. https://arxiv.org/abs/1804.02767.
[32] CANZIANI A, PASZKE A, CULURCIELLO E. An analysis of deep neural network models for practical applications[J/OL]. arXiv:1605.07678v4. 2017. https://arxiv.org/abs/1605.07678.
[33] WANG Shuaihua, XIE Shipeng, CHEN Xiangqing, et al. Alcoholism identification based on an AlexNet transfer learning model[J]. Frontiers in Psychiatry, 2019, 10:1 - 13.
[34] SHIN H C, ROTH H R, GAO M, et al. Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2016, 35(5):1285 - 1298.
[35] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553):436 - 444.
[36] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6):84 - 90.
[37] MU Longtao, CUI Gongpei, LIU Yadong, et al. Design and simulation of an integrated end-effector for picking kiwifruit by robot [J/OL]. Information Processing in Agriculture 2019. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317318304372? via%3Dihub. DOI: https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.05.004.

(上接第 23 页)

[17] 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)
[18] 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)
[19] 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)
[20] 王涛, 杨福增, 王元杰, 等. 山地拖拉机车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)
[21] 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)
[22] 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)
[23] 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): 157 - 165.
PENG He, MA Wenxing, WANG Zhongshan, et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation and experiment[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019,49(1): 157 - 165. (in Chinese)
[24] 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)