

引用格式:

张富贵, 吕小莲, 杨华兵, 杜李海, 刘铮, 唐鹏, 吕小荣. 基于模糊 PID 的山地拖拉机调平控制系统的设计[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(1): 121–126.

ZHANG F G, LYU X L, YANG H B, DU L H, LIU Z, TANG P, LYU X R. Design of leveling system for mountain tractor based on fuzzy PID[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(1): 121–126.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 基于模糊 PID 的山地拖拉机调平控制系统的设计

张富贵<sup>1</sup>, 吕小莲<sup>2</sup>, 杨华兵<sup>1</sup>, 杜李海<sup>1</sup>, 刘铮<sup>1</sup>, 唐鹏<sup>1</sup>, 吕小荣<sup>1\*</sup>

(1.四川农业大学机电学院, 四川 雅安 625014; 2.农业农村部南京农业机械化研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 在自行开发的山地拖拉机调平机构上加装了自动调平控制系统。系统以可编程逻辑控制器(PLC)为主控核心, 以倾角传感器为车身平台倾角检测机构, 以模糊 PID 为调平控制算法, 通过监测倾角传感器检测的角度值来实时调整伺服电机的转动与伺服电缸的伸缩, 以实现车体平台的自动调平。静态试验结果表明, 拖拉机车体平台在倾斜 15° 的情况下, 车体平台横向和纵向单独完成调平分别用时 1.851 s 和 1.882 s, 同时调平在 3.319 s 内完成。动态试验结果表明, 拖拉机在行驶速度 1.73 km/h、最大坡度 15° 时, 完成车体平台横向和纵向调平分别用时 6.253 s 和 6.853 s; 调平时最大超调角分别为 9.053 3° 和 8.687 2°, 调平后车体平台角度偏差最终可控在 0.5°。

**关键词:** 山地拖拉机; 可编程逻辑控制器; 自动调平控制系统; 模糊 PID; 调平精度; 调平时间

中图分类号: S219.850.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)01-0121-06

### Design of leveling system for mountain tractor based on fuzzy PID

ZHANG Fugui<sup>1</sup>, LYU Xiaolian<sup>2</sup>, YANG Huabing<sup>1</sup>, DU Lihai<sup>1</sup>, LIU Zheng<sup>1</sup>, TANG Peng<sup>1</sup>, LYU Xiaorong<sup>1\*</sup>

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Yaan, Sichuan 625014, China;  
2.Nanjing Institute of Agricultural Mechanization Ministry, Agriculture and Rural Affairs, Nanjing, Jiangsu 210014, China)

**Abstract:** An automatic leveling control system is added to the self-developed leveling mechanism of mountain tractor. The system takes the programmable logic controller(PLC) as the main control core, the inclination sensor as the inclination detection mechanism of the body platform, and the fuzzy PID as the leveling control algorithm. By monitoring the angle value detected by the inclination sensor, the rotation of the servo motor and the expansion of the servo cylinder are adjusted in real time to realize the automatic leveling of the body platform. The static test results show that when the tractor body platform is inclined by 15°, it takes 1.851 s and 1.882 s to complete the lateral and longitudinal leveling respectively, and the leveling is completed within 3.319 s. The dynamic test results show that the tractor has a running speed of 1.73 km/h and a maximum slope of 15°. It takes 6.253 s and 6.853 s to complete the horizontal and vertical leveling of the vehicle body platform respectively, and the maximum overshoot angles are 9.053 3° and 8.687 2° respectively. The angle deviation of the vehicle platform after leveling is finally controlled within ±0.5°.

**Keywords:** mountain tractor; programmable logic controller(PLC); automatic leveling control system; fuzzy proportion integration differentiation(PID); leveling accuracy; leveling time

丘陵山区耕地面积约占全国总耕地面积的 65%<sup>[1]</sup>, 但生产机械化程度却远低于全国平均水平<sup>[2-3]</sup>, 严重制约了丘陵山区的农业和经济发展<sup>[4-5]</sup>。丘陵山

区田间路面斜坡多, 传统农业机械装备不仅难以展开工作, 而且易造成翻车等安全事故<sup>[6]</sup>。研发性能良好的丘陵山地拖拉机自动调平控制系统, 对提高

收稿日期: 2021-09-07

修回日期: 2022-12-01

基金项目: 现代农业产业技术体系四川豆类杂粮创新团队专项(sccxt-d-2021-20)

作者简介: 张富贵(1993—), 男, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 主要从事农业工程和人工智能研究, 18894311807@163.com; \*通信作者, 吕小荣, 博士, 教授, 主要从事现代农业装备与测控研究, lxxj2008@163.com

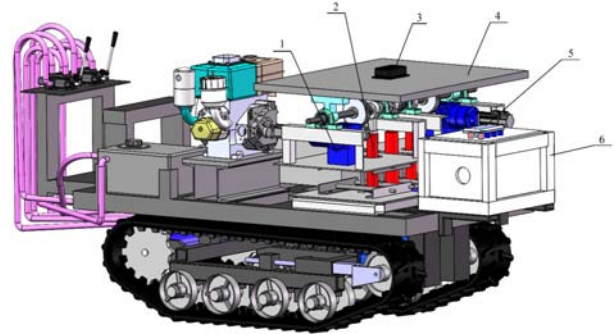
丘陵山区农业机械化水平具有重要意义<sup>[7]</sup>。

彭贺等<sup>[8]</sup>为解决丘陵山地拖拉机容易倾翻的问题,设计并搭建了具有调平功能的山地拖拉机多体动力学模型和模型车体试验台。通过试验与仿真对比分析,最大误差为15%,最大平均误差为10.20%。在此基础上彭贺等<sup>[9]</sup>还针对丘陵山地轮式拖拉机设计了一种四点液压支撑调平、液压驱动的车身调平系统,控制系统采用模糊PID控制算法,以实现车身调平。齐文超等<sup>[10]</sup>为保证丘陵山地拖拉机的安全性,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。试验结果:在 $\pm 10^\circ$ 的坡地上调平时间为7.5 s,最大调平误差小于 $0.5^\circ$ ,左右摆动机构摆角绝对值的差在 $1^\circ$ ;在高低起伏较大的坡地上以1.98 km/h行驶时,车身倾斜角可控制在 $3^\circ$ ,左右摆动机构摆角绝对值差在 $5^\circ$ 。在此基础上,齐文超等<sup>[11]</sup>又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。实地试验结果:在 $15^\circ$ 坡地上调平时间为12.5 s,调平误差小于 $0.5^\circ$ ,且无超调现象,左右两后轮摆角绝对值差在 $1^\circ$ ;以1.98 km/h的速度行驶在高低起伏的工作环境下,车身倾斜角可控制在 $3^\circ$ ,左右摆动机构摆动角度绝对值差在 $5^\circ$ ,相比于双闭环PID控制效果更优。

笔者在自行设计的履带式山地拖拉机调平机构的基础上,加装可编程逻辑控制器(PLC),采用模糊PID控制算法,适用于丘陵山区的拖拉机自动调平控制系统,使拖拉机能在丘陵山区复杂多变环境的作业中实现动态调平,以提高拖拉机在丘陵地区的地形适应性。

## 1 山地拖拉机调平控制系统的结构及工作原理

山地拖拉机调平控制系统由车体平台、控制面板、控制柜、伺服电缸、伺服电机和倾角传感器组成,如图1所示。控制柜位于车身后方,内装PLC和伺服驱动器;控制面板安装于控制柜顶部,用于人机交互操作,可显示调平时间和调平精度;伺服电机和伺服电缸位于车体平台下方,用以执行车体平台角度的调整;倾角传感器置于车体平台中心,可实时监测车体平台的倾角。



1 伺服电机; 2 伺服电缸; 3 倾角传感器; 4 车体平台;  
5 控制面板; 6 控制柜。

图1 山地拖拉机调平控制系统的组成

Fig.1 System composition diagram for mountail tractor

在调平机构中,以拖拉机车身前进方向为纵向,其调平机构采用三点支撑方法<sup>[12]</sup>,通过2个伺服电缸的伸缩来完成调平,调平时2个伺服电缸的伸缩方向相反;横向调平通过车体平台下方同侧放置2个伺服电机的转动来完成,调平时2个伺服电机转向相同。在调平机构上设计以PLC为核心的模糊PID调平控制系统,可实现实时动态调平。调平控制流程如图2所示。当拖拉机车体平台发生倾斜时,倾角传感器可监测拖拉机车体平台纵向和横向的倾角值,并发送至PLC。PLC经模糊PID算法计算,得到伺服电机和伺服电缸的控制量,发送控制信号至伺服驱动器来驱动伺服电缸伸缩和伺服电机转动,以调节车体平台纵向和横向的角度,直至检测到拖拉机车体平台倾角为 $0.5^\circ$ 为止。其中,伺服电机和伺服电缸的执行受PLC产生的脉冲频率控制,而脉冲频率变化又由模糊PID控制器实时调节,以使系统有最快的调平响应。在调平过程中,

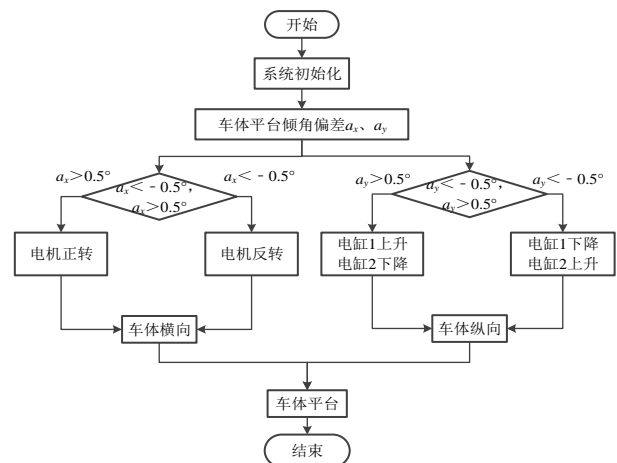


图2 调平控制系统工作流程

Fig.2 Leveling control flow chart

控制面板上的显示触摸屏可显示车体平台横向和纵向的倾角值以及车体平台调平时间。

### 2 关键部件的设计

#### 2.1 硬件设计

以三菱 FX3U-32MT/ES-A PLC 为控制核心，其内置 16 点(漏型/源型)输入、16 点晶体管(漏型)输出以及 4 路高速脉冲输出，能较好地满足自动调平控制系统的需求。控制系统整体硬件结构如图 3 所示。倾角传感器和触摸屏与 PLC 的通讯端相连接，可与 PLC 进行数据传输；伺服电机和伺服电机的驱动器与 PLC 的输出端相连接，接收 PLC 发出的控制信号，用以控制伺服电机和伺服电缸。

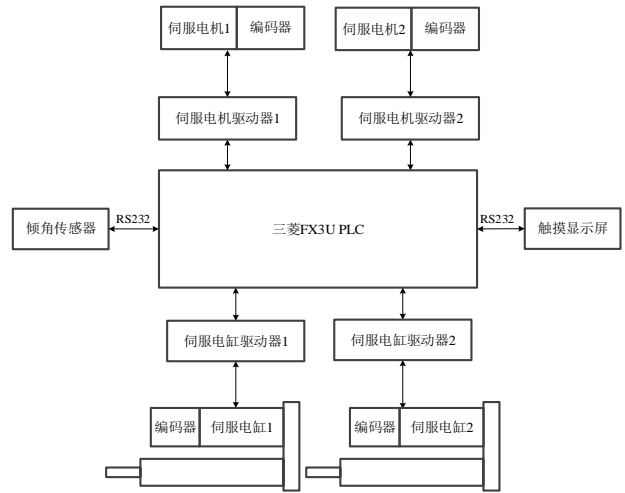


图 3 调平系统硬件的结构

Fig.3 Overall hardware structure of the system

#### 2.2 主控电路

主控电路主要实现伺服电机、伺服电缸和触摸屏的控制，如图 4 所示。以 PLC 输出点 Y0、

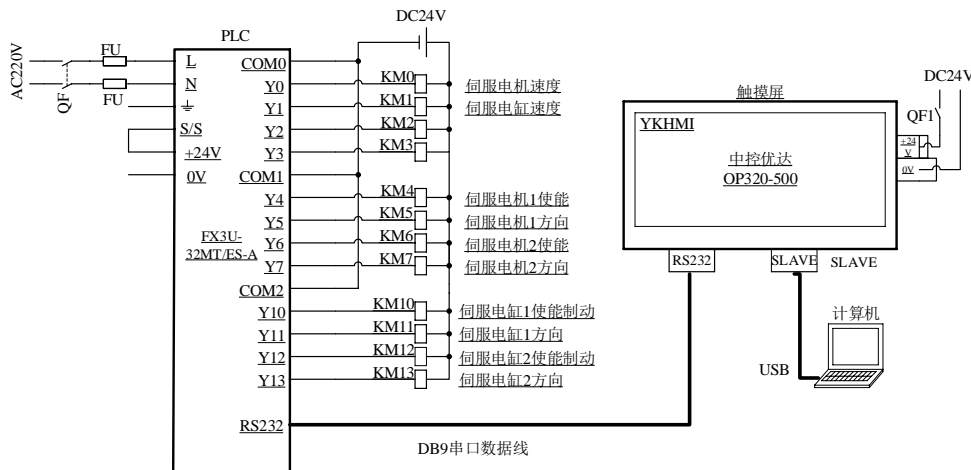


图 4 调平控制系统的主控电路

Fig.4 Master control circuit connection diagram

Y1 为高速脉冲输出点，分别给伺服电机和伺服电缸提供高速脉冲，使其转动和伸缩；以 Y4、Y5、Y6、Y7 输出点为控制伺服电机方向和伺服电缸方向的输入连接点，控制伺服电机的转向和启停；以 Y10、Y11、Y12、Y13 输出点为伺服电缸方向和伺服电缸启停信号的输入连接点，控制伺服电缸的伸缩方向、启动和制动；以 RS232 接口为 PLC 输出端，通过 DB9 线与显示屏相连，以使显示屏显示采集的倾角数据。

#### 2.3 倾角监测电路

为实现倾角的精确监测，控制系统选择高精度输出型双轴倾角传感器 HVT826T，该倾角传感器分

辨率 0.000 7°，精度小于 0.005°。倾角传感器输出接口为 RS232，通过 BD9 串口数据通讯线与 PLC 的 RS232 通讯端口连接，连接电路如图 5 所示。

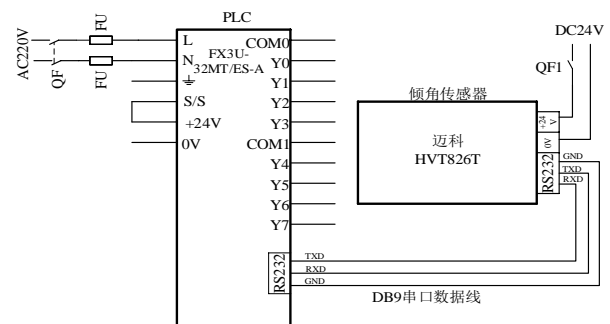


图 5 调平系统的倾角监测电路

Fig.5 Inclination monitoring circuit diagram

### 3 模糊PID控制器的设计

山地拖拉机作业时其车体平台倾角受地形变化的影响较大且无规律,若整个过程采用PID作为调平控制算法,因其比例系数 $K_p$ 、积分系数 $K_i$ 、微分系数 $K_d$ 等参数的固定难以实现复杂丘陵地区的拖拉机调平,无法根据丘陵地形的变化作出调整,因此,引入模糊控制算法来动态调整PID控制算法的参数 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ,以使控制系统能依据当前车体平台的倾角来自动进行调平<sup>[13]</sup>,以更好地应对复杂丘陵地区的地形变化。模糊控制算法设计为双输入三输出模型,其输入为车体平台的实际倾角与预设倾角之间的偏差 $|e|$ 和偏差变化率 $|ec|$ ,实际倾角可通过倾角传感器监测测得;输出为可实时调整的PID修正参数 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ ,通过改变修正参数的值来使PID控制器调整执行机构的控制量,以实现复杂路况下的拖拉机自动调平。

#### 3.1 模糊集合及其隶属函数

在自动调平控制系统中,以倾角偏差 $|e|$ 和倾角偏差变化率 $|ec|$ 作为模糊控制器的输入,以修正参数 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 作为输出。在进行模糊PID控制器<sup>[14]</sup>的设计前进行了PID控制的预试验,得出模糊控制器输入和输出的论域范围。输入 $|e|$ 和 $|ec|$ 的物理论域取值为 $[0, 15]$ ,输入的模糊论域E和EC为 $[0, 6]$ ,以四级语言变量零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)定义该输入物理论域到模糊论域上的隶属关系。E和EC的量化因子都为0.4。

通过前期进行的PID调平试验,输出修正参数 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 的物理论域分别取 $[-200, 200]$ 、 $[-5, 5]$ 、 $[-10, 10]$ ,模糊论域取 $[-6, 6]$ ,以七级语言变量负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)定义输出物理论域到模糊论域上的隶属关系,其中 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 的量化因子分别为0.03、1.2和0.6。

$\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 作为模糊控制器输出,输入到PID控制器中,需加上PID的初始控制参数 $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$ ,以得到PID控制器的最终运算参数。

在模糊控制器中,每一个语言变量对应一个模糊子集<sup>[15]</sup>,选用三角形分布为该模糊控制器的隶属

函数。

#### 3.2 模糊规则及清晰化

模糊规则定义不同的 $ec$ ,对山地拖拉机在工作时的实际情况进行分析,输入组合 $|e|$ 和 $|ec|$ 与对应的输出值 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 和 $\Delta K_d$ 之间可归纳为如下的模糊规则。

1)  $|e|$ 的大小说明车体平台当前倾角离设定值的远近。在 $|e|$ 正大时, $\Delta K_p$ 取正大值, $\Delta K_i$ 取正大值; $|e|$ 正中时, $\Delta K_p$ 取正小值, $\Delta K_i$ 取零值; $|e|$ 正小时, $\Delta K_p$ 取正小值, $\Delta K_i$ 取负小值;当 $|e|$ 为0时, $\Delta K_p$ 取负小值、 $\Delta K_i$ 取负大值。

2)  $|ec|$ 的大小说明车体平台倾角非均匀变化的大小。 $|ec|$ 值为正大时, $\Delta K_d$ 取正大值; $|ec|$ 在正中的情况下, $\Delta K_d$ 取正小值; $|ec|$ 取零值时, $\Delta K_d$ 取负小值。

3)  $|e|$ 正大且 $|ec|$ 正小时, $\Delta K_p$ 取正小值, $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 取零值。

4)  $|e|$ 正小且 $|ec|$ 正大时, $\Delta K_p$ 取负小值, $\Delta K_i$ 取负小值, $\Delta K_d$ 取正小值。

依据模糊规则可总结出不同的输入 $|e|$ 和 $|ec|$ 时,输出 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 的调整规则,如表1所示。模糊规则的建立中采用Mamdani法<sup>[16]</sup>进行模糊推理:使用取小作为“与”算法;使用取大作为“或”算法;使用求积作为“蕴涵”算法<sup>[17]</sup>。在模糊规则建立后,将输入的 $|e|$ 和 $|ec|$ 经过计算转化成相对应的模糊值。该模糊值采用面积中心法来进行解模糊,模糊值通过转化可作为控制参数的物理值。

### 4 调平控制系统试验

山地拖拉机行进中会因路面起伏和发动机的运转而产生振动,使得车体平台倾角超出平衡范围,导致控制系统产生误调,造成调平控制系统的不稳定。为解决因振动带来的误调问题,控制系统在试验时采用延时调节的方法:当控制系统检测到车身倾角超出平衡范围时计时200ms;若200ms后车身角度仍超出平衡范围,则开始自动调平调节。

#### 4.1 静态调平试验

山地拖拉机自动调平控制系统静态试验在四

川农业大学进行。

1) 样机在静止状态下,手动调节车体平台横向倾斜角度分别约为 3°、6°、9°、12°、15°,纵向倾斜角度保持为 0°,进行横向单独调平。

2) 手动调节车体平台纵向倾斜角度分别约为 3°、6°、9°、12°、15°,横向倾斜角度保持为 0°,进行纵向单独调平。

3) 手动调节车体平台横向和纵向的倾斜角度分别约为 3°、6°、9°、12°、15°,进行横向和纵向

同时调平。记录调平精度和时间。

表 1、表 2 结果表明,横向和纵向单独调平以及横向和纵向的同时调平,调平结束后车体平台的倾斜角度偏差都控制在 0.5°。车体平台倾斜 15°时,横向和纵向单独调平耗时分别 1.851 s 和 1.882 s,横向和纵向同时调平耗时 3.319 s。还可以看到,由于同时进行横向和纵向的自动调平,横向和纵向的角度变化关系存在耦合现象,影响另一个方向上的角度调平,导致调平时间耗时更长。

表 1 静态试验调平控制系统横向和纵向单独调平的精度和时间

角度/(°)	方向	调平时间/s	调平精度/(°)	角度/(°)	方向	调平时间/s	调平精度/(°)
3.005 8	横向	0.718	0.468 1	3.005 8	纵向	0.761	0.465 2
6.008 9	横向	1.268	0.429 2	6.008 9	纵向	1.353	0.358 9
9.006 3	横向	1.556	0.385 8	9.006 3	纵向	1.658	0.384 5
12.006 3	横向	1.803	0.316 2	12.006 3	纵向	1.809	0.352 1
15.005 2	横向	1.851	0.395 1	15.005 2	纵向	1.882	0.295 8

表 2 调平控制系统横向和纵向同时调平的精度和时间

角度/(°)		调平精度/(°)		调平时间/s
X 轴	Y 轴	X 轴	Y 轴	
3.005 2	3.005 8	0.463 5	0.453 2	1.584
6.001 2	6.003 5	0.369 4	0.406 5	1.965
9.006 3	9.009 5	0.376 9	0.351 2	2.569
12.008 2	12.006 3	0.352 1	0.306 8	3.089
15.003 2	15.002 5	0.405 3	0.158 3	3.319

### 4.2 动态调平试验

首先,不开启自动调平,启动拖拉机,采集路面坡度(车身横向和纵向倾角)。开启自动调平后,启动拖拉机,以相同的速度行驶在同一坡地上,采集车体平台倾角变化,在行驶状态下进行自动调平试验。

不开启自动调平,拖拉机以 1.73 km/h 的速度行驶在坡地上,接下来开启横向和纵向自动调平,进行模糊 PID 调平控制系统的动态调平试验,记录车体平台倾角变化。其中车身横向和纵向倾斜角度的变化如图 6 所示。

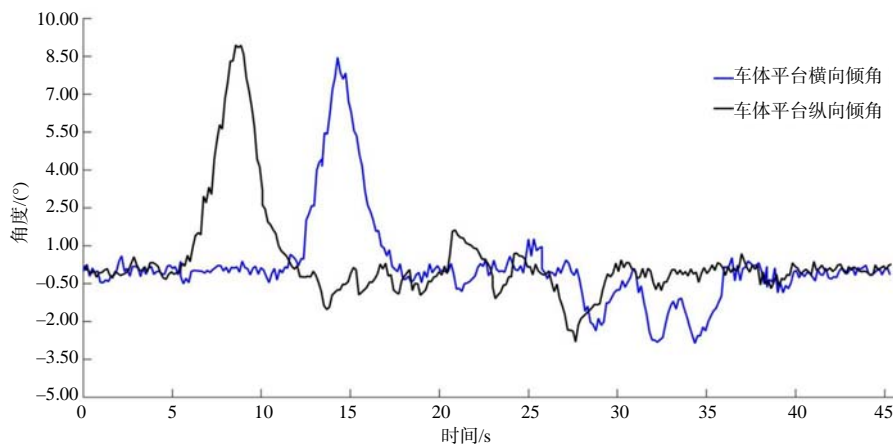


图 6 动态调平角度

Fig.6 Dynamic leveling angle test results

由动态调平试验可知,拖拉机车体平台横向自动调平中,控制系统的最大超调为 9.053 3°,经过 6.253 s

后车身完成调平;纵向自动调平中,控制系统的最大超调为 8.687 2°,经过 6.853 s 后车身完成调平。调平

完成后平台倾斜角度偏差能稳定在 $0.5^{\circ}$ 。由于拖拉机横向和纵向调平机构结构不一致,使得横向和纵向的调节响应性和调节速度不一致。与静态试验相比,由于路面坡度变化以及拖拉机变速造成的振动,对控制系统的倾角检测产生一定干扰,没有静态调平的平稳性,故调平时间和超调量较大。

#### 参考文献:

- [1] 王新明. 深化互助共赢切实支农惠农: 快速推进丘陵山区高端特色农机化大发展[J]. 农业机械, 2014(6): 68-71.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [3] 仇半农. 丘陵山区: 农机推广的蓝海区域[J]. 农机科技推广, 2019(8): 14-16.
- [4] 王隆刚, 张锋. 丘陵山区农机化创新发展的实践与思考[J]. 农业工程技术, 2019, 39(9): 60-61.
- [5] 建梅. 浅析丘陵地区农机化发展困境及解决措施[J]. 南方农业, 2019, 13(17): 117.
- [6] 蒙金梅. 农机推广存在的问题及对策[J]. 南方农机, 2019, 50(16): 47.
- [7] 李钊, 樊桂菊, 张昊, 等. 农具自动调平现状及趋势分析[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(4): 48-53.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 381-388.
- [11] 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]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 17-23.
- [12] 卢朝双. 高精度、机电式车载雷达平台调平控制系统的研发[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [13] PAUL S, ARUNACHALAM A, KHODADAD D, et al. Fuzzy tuned PID controller for envisioned agricultural manipulator[J]. International Journal of Automation and Computing, 2021, 18(4): 568-580.
- [14] 王勇. 非线性 PID 控制的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2000.
- [15] PHU N D, HUNG N N, AHMADIAN A, et al. A new fuzzy PID control system based on fuzzy PID controller and fuzzy control process[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2020, 22(7): 2163-2187.
- [16] 范军芳. 模糊控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [17] NGUYEN A T, TANIGUCHI T, ECIOLAZA L, et al. Fuzzy control systems: past, present and future[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2019, 14(1): 56-68.

责任编辑: 罗慧敏  
英文编辑: 吴志立