

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.02.010

高地隙施药机喷杆自动调平系统设计与试验

印祥^{1,2} 安家豪¹ 王显¹ 王亚林¹ 李加琪¹ 金诚谦^{1,3}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东省旱作农业机械及信息化重点实验室, 淄博 255049;
3. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 因田间地表起伏, 高地隙施药机在作业过程中车体极易发生横滚方向的倾斜, 同车体刚性连接的喷杆同时倾斜, 甚至与作物、地面碰触, 影响喷药均匀性和作业安全性。为此基于机电液一体化控制方法, 设计了高地隙施药机喷杆自动调平系统。设计电控液压调平机构, 使喷杆与车体柔性联接, 实现在横滚方向上喷杆与车体的相对转动。采用姿态测量方法实时检测喷杆横滚角度, 对横滚角度进行平均值滤波以准确感知喷杆姿态。采用增量式PID算法计算并输出信号至液压电磁阀以控制调平油缸动作, 实时调节喷杆在横滚方向上的姿态。以华盛泰山3WP-500G型施药机为平台, 在场地试验过程中, 通过改变响应阈值与平均值滤波器参数, 对系统响应速度、稳定性和控制误差进行对比分析, 确定了喷杆自动调平参数最优组合, 测试调平误差最大值为1.84°, 均方根误差小于等于0.689°。田间试验结果表明, 调平误差最大值为1.53°, 平均值为0.135°, 均方根误差为0.454°, 喷杆调平后角度保持1°以内, 70%时间角度在0.5°以内, 满足喷杆自动调平控制要求。

关键词: 高地隙施药机; 喷杆; PID; 自动调平; 调平控制

中图分类号: S224.3; TP272 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0098-08

OSID:



Design and Test of Automatic Beam Leveling System for High-clearance Sprayer

YIN Xiang^{1,2} AN Jiahao¹ WANG Xian¹ WANG Yalin¹ LI Jiaqi¹ JIN Chengqian^{1,3}

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Dry-farming Machinery and Informatization, Zibo 255049, China
3. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Since the ground surface is uneven in the field, the body of the high-clearance sprayer is prone to tilt in the rolling direction during operation and the spray beam tends to incline and even touches the crop or the ground, which is the potential of accident. Considering this problem, an automatic spray beam leveling system for the high-clearance sprayer was developed by using a mechatronics-hydraulic integrated control method. An electronically controlled hydraulic leveling mechanism was designed to connect with the spray bar through a hinged point that allowed rotation of the spray bar relative to the vehicle body in the rolling direction. The attitude measurement method was used to detect the roll angle of the beam in real time, and the average value of the roll angle was filtered to accurately sense the posture of the beam. An incremental PID algorithm was used to calculate and output signals to the solenoid valve to control the cylinder so that the spray beam was automatically adjusted in the roll direction. Taking the Huasheng Taishan 3WP-500G sprayer as the platform, the newly developed automatic spray beam leveling system was tested by changing the threshold and the average number of the filter, the system response rate, the control stability and error were analyzed, according to which the combination of parameters was optimized. The step results showed that the maximum value of the leveling error was 1.84°, the root mean square error was no more than 0.689°, and field results showed that the maximum

收稿日期: 2021-09-24 修回日期: 2021-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171910)、山东省自然科学基金项目(ZR2020MC085)和山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010734)

作者简介: 印祥(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农机自主导航与智能作业装备研究, E-mail: 666513@163.com

通信作者: 金诚谦(1973—), 男, 研究员, 博士, 主要从事大田作物种植收获机械化与智能化技术研究, E-mail: 412114402@qq.com

value of the leveling error was 1.53° , the average value was 0.135° , and the root mean square error was no more than 0.5° , the angle of the sprayer beam after leveling was within 1° , and the angle was below 0.5° for more than 70% of the time, which indicated that the automatic spray beam leveling system can meet the requirements of automatic beam leveling control. The research result can improve the operation quality and safety of the sprayer and also can provide a reference for the automatic leveling of the spray beam.

Key words: high-clearance sprayer; spraying beam; PID; automatic beam leveling; leveling control

0 引言

高地隙施药机以其作业喷幅宽、喷洒精量化、喷药量均匀化等高效施药作业优势^[1-4],越来越广泛地应用在田间植保作业中。常用施药机的喷幅为 12 m (如雷沃 ZP9500 型),大型喷雾机的展幅有的甚至达 42 m^[2-6],由于高地隙施药机的喷杆展幅长、挠性大^[7],在田间作业时,因地表硬度底层高低不一,车身微小的颠簸会引起喷杆末端较大的起伏变化^[7-10],不仅影响喷雾量分布均匀性,导致施药质量下降,严重时喷杆末端还会触碰地面或者作物冠层^[11],造成喷杆、作物、机器的损伤;为保证作业质量和作业安全,喷雾机驾驶员在作业过程中要观察喷杆与作物之间是否有接触,手动对喷杆的倾斜角度进行调节,增加了驾驶员的劳动强度。因喷杆过长对作物及机器造成损伤,现对喷杆调节系统应用研究越来越多^[12-15],因此,有必要实现喷雾机在田间植保作业过程对喷杆倾斜角度进行实时自动调节,使喷杆处于允许的倾斜角度范围内,避免喷杆与作物的接触,降低驾驶员的劳动强度。

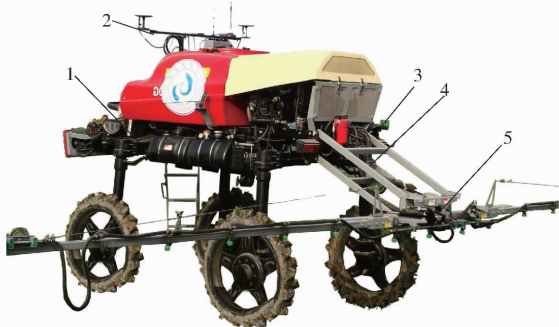
为此,国内外研究人员基于非接触式传感器和倾角传感器设计了调平控制系统。非接触式传感器包括激光测距仪、红外传感器和超声波传感器等,HERBST 等^[16]设计了基于激光测距仪的喷杆调节系统;SINFORT 等^[17]采用红外发射器检测喷杆姿态;OOMS 等^[18]采用多传感器的组合实现喷杆姿态检测;魏新华等^[2]设计了基于超声波传感器和 PLC 控制系统的喷杆高度及平衡调控系统,可以将喷杆高度变化值控制在 ± 3 cm 范围内;孙星等^[19]采用超声波传感器和倾角传感器,通过加权平均算法融合两种传感器信息,设计了基于专家控制的喷杆高度调节系统。在倾角传感器方面,张盟等^[20]采用高精度 MEMS 惯性传感器测得喷杆姿态,设计了基于 DSP 处理器自动调平系统。

综上所述,调平控制系统主要采用红外传感器、超声波传感器和倾角传感器检测喷杆倾角,红外与超声波传感器通过测量喷杆两端离地距离,推算其倾斜角度,但作业时喷杆自身柔性大两端易发生形变,导致测量精度低,而倾角传感器可以在动态环境

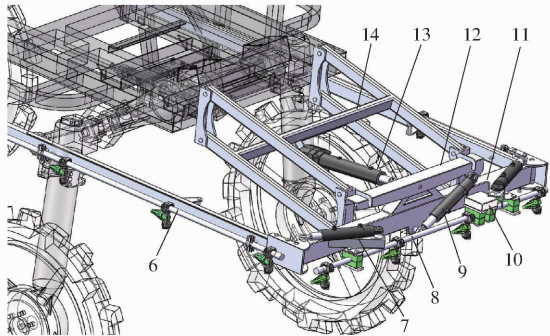
下测得倾斜角度,并广泛应用于小型无人机、智能农业装备、汽车等领域,成本较低,测量精度高。本文针对上述问题,设计一种适用于高地隙施药机的喷杆自动调平系统,使用低成本倾角传感器通过信息融合实现喷杆水平倾角动态检测,基于 PID 控制策略和机电液一体化技术,使喷杆始终保持水平。分析喷杆调平系统的工作原理,开展场地与田间测试试验,验证系统在田间作业时的准确性和稳定性。

1 高地隙施药机喷杆自动调平系统结构

高地隙施药机喷杆自动调平系统以山东华盛中天机械集团股份有限公司生产的 3WP-500G 型三段式喷杆喷雾机为研发平台,由喷杆调节机构、倾角传感器、调平控制器、液压阀组组成,如图 1 所示。喷杆喷雾机性能参数如表 1 所示。喷杆调节机构主



(a) 自动驾驶高地隙施药机



(b) 喷杆调节机构

图 1 高地隙施药机实物图与喷杆自动调平机构结构图

Fig. 1 High-clearance spraying machine and spray beam height gap automatic leveling mechanism

1. 行走控制机构 2. 定位天线 3. 喷雾作业部件 4. 液压阀组
5. 喷杆调节机构 6. 左段喷杆 7. 左侧伸展油缸 8. 中段喷杆
9. 调平油缸 10. 调平控制器 11. 中段喷杆支架 12. 横梁
13. 升降油缸 14. 喷杆升降机构

要包括升降机构和三段式喷杆支架。升降机构由平行四杆机构和横梁组成,喷杆升降是经过电磁换向阀控制液压油缸伸缩,带动平行四杆机构来实现。三段式喷杆支架采用折叠式结构,喷杆通过管夹与喷杆支架连接,两侧伸展油缸用于控制喷杆支架的展开折叠;中段喷杆支架的上端和横梁铰接,喷杆支架通过调平油缸的伸缩实现相对于铰接点的左右摆动,从而调节喷杆在横滚平面上的角度。倾角传感器水平安装在喷杆支架上,实时测量喷杆的倾斜角度。

表 1 华盛 3WP-500G 型喷杆喷雾机技术参数
Tab.1 Main technical index of Huasheng 3WP-500G sprayer

参数	数值
轮距×轴距/(mm×mm)	1 500×1 500
长×宽×高/(mm×mm×mm)	4 100×9 900×2 540
喷杆喷幅/mm	1 100
前进速度/(km·h ⁻¹)	0~5.6
最小离地间隙/mm	1 200
喷杆角度可调范围/(°)	-20~20
喷杆离地高度范围/mm	600~2 000
药箱容积/L	500

调平控制器以 PIC18F258 处理器为核心,采用维特智能公司生产的 JY61P 型倾角传感器。液压阀组中液压油缸为双作用单杠活塞式工程液压缸,采用滑阀机能为 M 型结构的三位四通电磁阀,控制液压缸的启停以及运动方向的改变。调平控制器通过串口与倾角传感器进行数据传输,获取喷杆姿态信息、运行数据处理和控制算法,并向液压阀组发送指令数据。

喷杆自动调平系统原理框图如图 2 所示。施药机田间作业时,喷杆支架与水平面夹角发生变化,倾角传感器测得喷杆支架倾角传输给调平控制器,控制器对采集的角度信号进行滤波处理,削弱测量噪声影响,并基于 PID 算法对电磁换向阀发送控制信号,驱动调平油缸伸缩调整喷杆支架达到预设角度,实现喷杆自动调平。

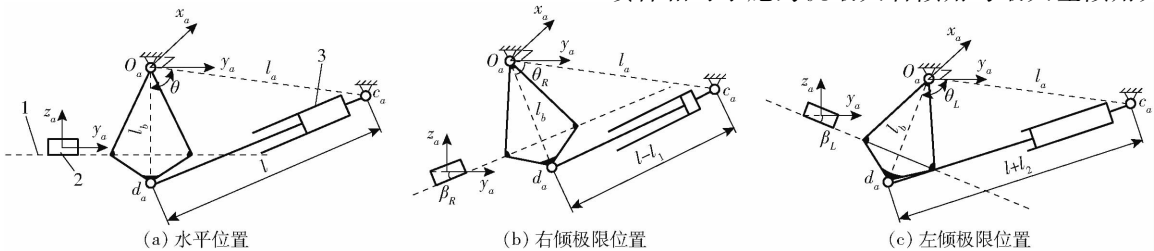


图 3 喷杆调平机构简图
Fig.3 Schematics of leveling mechanism
1. 喷杆支架 2. 倾角传感器 3. 调平油缸

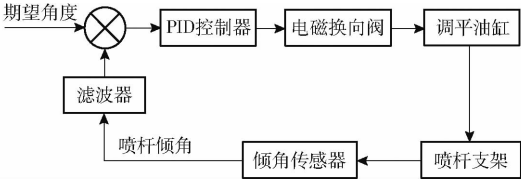


图 2 喷杆自动调平系统原理框图
Fig.2 Block diagram of automatic spray beam leveling control system

2 调平机构设计

喷杆的运动分为施药机的牵引动作和相对于机身的转动动作。不考虑施药机前进方向的牵引运动,可以把喷杆相对于机身的转动运动看作为平面转动。喷杆与施药机相对运动示意图如图 3 所示,在施药机 $O_a x_a y_a z_a$ 坐标系中, x_a 正方向为机器前进方向, O_a 为喷杆支架与横梁的上固定点, c_a 、 d_a 分别为油缸与横梁上下支撑点,喷杆调平部分可以简化为喷杆横滚传感平面和转动机构,施药机横滚传感平面平行于施药机四轮平面,倾角传感器安装在中段喷杆支架上,倾角传感器坐标系与施药机坐标系方向相同,测得喷杆倾斜角(即横滚角度)如图 3 所示,高地隙施药机喷杆向右倾斜时测量到喷杆倾角为负,向左侧倾斜时为正。喷杆支架及相关机构可简化为支架、转动铰接点与油缸连接点。

喷杆支架在液压油缸驱动下带动喷杆绕铰接点相对于施药机转动,形成喷杆相对于施药机的倾角 β ,如图 3 所示,喷杆相对于施药机倾角 β 逆时针方向转动的角度为负,顺时针方向转动的角度为正。

如图 3 所示,当喷杆相对于施药机处于水平状态时,喷杆支架与横梁的夹角为

$$\theta = \arccos \frac{l_b^2 + l_a^2 - l^2}{2l_b l} \tag{1}$$

式中 θ —— $c_a O_a$ 与 $O_a d_a$ 的夹角, (°)
 l_a —— $c_a O_a$ 的长度, mm
 l_b —— $O_a d_a$ 的长度, mm
 l ——喷杆水平时油缸初始长度, mm

以横梁为基准,喷杆处于右倾、左倾极限位时,喷杆相对于施药机最大右倾角与最大左倾角为

$$\beta_R = \theta - \arccos \frac{l_b^2 + l_a^2 - (l - l_1)^2}{2l_b l} \quad (2)$$

$$\beta_L = \arccos \frac{l_b^2 + l_a^2 - (l + l_2)^2}{2l_b l} - \theta \quad (3)$$

即喷杆可调节范围为

$$\beta_s = \beta_R + \beta_L \quad (4)$$

式中 β_R ——喷杆最大右倾角, ($^\circ$)

β_L ——喷杆最大左倾角, ($^\circ$)

l_1, l_2 ——右、左极限位置油缸伸缩量, mm

设喷杆作业时的目标角度为 φ_d , 施药机的横向倾角为 φ , 上一时刻喷杆相对于施药机倾角 β 与喷杆对于目标调节量 $\Delta\beta$ 之和应为作业保持的目标角度 φ_d 与横向倾角 φ 的差, 则此时喷杆相对于施药机倾角调节量 $\Delta\beta$ 为

$$\Delta\beta = \varphi_d - \varphi - \beta \quad (5)$$

当前时刻喷杆应控制目标角度为

$$\beta_d = \Delta\beta + \beta = \varphi_d - \varphi \quad (6)$$

高地隙施药机喷杆在自动调平模式下, 能够根据喷杆自身相对于施药机车身角度完成喷杆调平动作。当施药机车身左倾时, 喷杆会相对于车身进行右倾调整, 调平油缸活塞处于收缩状态, 此时根据活塞收缩行程计算出响应时间为

$$T_R = \frac{15\pi(D^2 - d^2)\Delta l}{q} \quad (7)$$

式中 D ——液压油缸缸径, mm

d ——液压油缸杆径, mm

Δl ——油缸活塞伸缩量, mm

q ——液压油缸流量, L/min

当施药机车身右倾时, 喷杆会相对于车身进行左倾调整, 调平油缸活塞处于伸长状态, 可根据活塞伸长行程计算出响应时间为

$$T_L = \frac{15\pi D^2 \Delta l}{q} \quad (8)$$

喷杆自动水平调节处于向右倾或左倾时, 因油缸活塞伸缩量很小并存在误差, 每转动 1° 时可看作油缸伸缩量一致, 所以喷杆每旋转 1° 响应时间为

$$T_p \approx \frac{T_R + T_L}{\beta_s} = 0.5 \text{ s} \quad (9)$$

3 喷杆自动调平控制方法

3.1 横滚角度数据预处理

施药机在田间作业时, 由于地势不平会导致倾角传感器获取的角度信息发生阶跃性变化, 瞬时性、偶然性的信号变化会影响喷杆调平精度。本研究采用的倾角传感器精度为 0.01° , 对相邻角度信号的阶跃脉冲做滤波处理即可提高角度信息的采集精

度, 因此该控制系统设计了一种移动平均滤波算法对原始角度信号进行平滑, 图4所示为滤波前后的角度测量数据对比。控制系统计算每个周期取得信号总和的平均值为

$$\bar{A}_i = \begin{cases} \frac{A_{i-N+1} + A_{i-N+2} + \dots + A_i}{N} & (i \geq N) \\ A_i & (0 < i < N) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\bar{A}_i$ ——当前周期所获得角度的平均值

N ——周期中取角度信号次数

A_i ——当前倾角传感器获取的角度

更新积累移动平均值, 每个周期平均值作为此刻喷杆的倾斜角度。

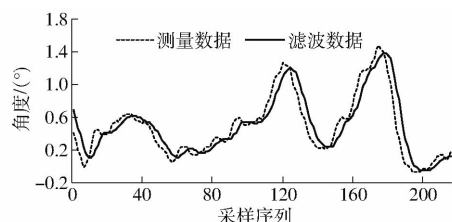


图4 倾角传感器滤波前后变化曲线

Fig. 4 Attitude sensor data before and after filtering

3.2 自动调平控制算法

喷杆自动调平系统采用PID反馈调节算法作为倾斜度调节的主要算法对调平油缸伸缩量进行闭环控制, PID系统控制原理图如图5所示。对喷杆调平控制过程为: 根据喷杆实际倾角和预设倾角的偏差计算调平油缸的流量方向和伸缩量, 对偏差的比例、积分和微分进行控制, 使偏差趋于零。调平控制器预设倾角 φ_d 作为PID控制系统输入量之一, 倾角传感器测出喷杆实际倾角 φ_a 作为PID控制系统另一输入量。为了精确控制喷杆倾角, PID控制器持续从比较器单元读取误差 $e(i)$, 该单元对目标倾斜角 φ_d 与实际倾斜角 φ_a 进行减法运算。PID控制系统将 $e(i)$ 进行比例、积分、微分运算, 将电平信号发送至继电器, 继电器通断决定了电磁阀通断和液压油流向。

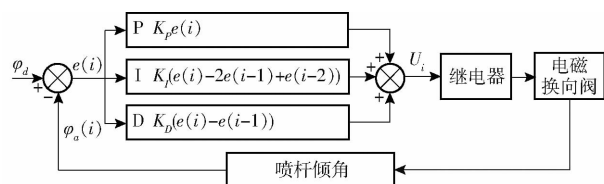


图5 PID系统控制原理图

Fig. 5 PID system control principle diagram

K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例运算、积分运算和微分运算的调整系数, 为保证喷杆自动调平系统在快速响应的同时超调量不超过响应信号的 $1/2$, 喷杆自

动调平试验中确定选取 PID 参数为 $K_p = 5, K_i = 0.03, K_d = 1$ 。当 $U_i > 0$ 时,电磁换向阀接通一端,使误差 $e(i)$ 减小到最小值 $e_{\min}$;当 $U_i < 0$ 时,电磁换向阀接通另一端,误差 $e(i)$ 减小到 $e_{\min}$;当 $U_i = 0$ 时,电磁换向阀停止工作。

4 调平控制器设计

4.1 硬件设计

喷杆自动调平系统硬件结构如图 6 所示,硬件部分主要由控制器、检测模块、执行机构、电源模块组成。控制器以 PIC18F258 处理器为核心,时钟频率 20 MHz,供电电源 5 V(DC),具有 UART 接口,电位计信号输出端 D0 与处理器 A/D 转换端口 A0 连接,对预设角度进行调整。检测模块为 JY61P 型倾角传感器,工作电压 5 V(DC),输出频率为 20 Hz,支持 UART 串口数字输出,串口波特率选用 115 200 b/s,横滚角度检测范围为 360° ,具体技术参数如表 2 所示。执行机构为继电器模块,工作电压 5 V(DC),低电平吸合,高电平释放,继电器控制端 IN+ 连接控制器 I/O 口 C0、C1 及 IN- 连接地,输出端常开端 NO1 与常闭端 NC1 连接电磁换向阀。通过 IN+ 高/低电平的设定,可控制电磁换向阀流向。电源模块包括 12 V 直流电源、12 V 转 5 V 电源转换模块,可直接为倾角传感器和控制模块供电。

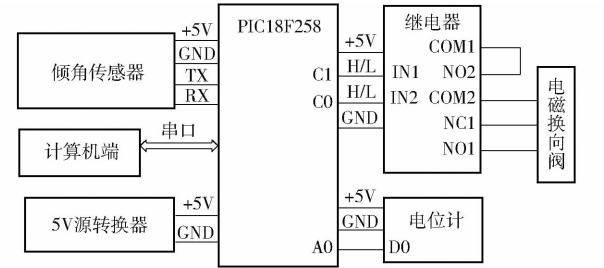


图 6 自动调平系统硬件结构图

Fig.6 Automatic leveling system hardware structure

表 2 倾角传感器主要技术参数

参数	数值
电压/V	3.3 ~ 5
角度测量精度/ $(^\circ)$	0.01
串口回转频率/Hz	0.1 ~ 200
串口波特率/ $(\text{b}\cdot\text{s}^{-1})$	2 400 ~ 921 600
角加速度测量精度/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-2})$	0.005
最大支持 I ² C 速率/ $(\text{kbit}\cdot\text{s}^{-1})$	400

当 C1 高电平时,继电器处于断开状态,电磁换向阀不工作;当 C1 低电平、C0 高电平时,电磁换向阀控制调平油缸收缩,喷杆向左旋转;当 C1 低电平、C0 低电平时,电磁换向阀控制调平油缸伸长,喷杆向右旋转。调平控制器通过 UART_RX 读取到经

过平均滤波运算后的喷杆倾斜角度,将此数值与 A0 端口读取电位计反馈的数值进行比较,经调平程序处理后,发出高低电平信号,通过继电器模块的吸合释放,控制电磁换向阀组控制油缸的流量和方向,从而实现喷杆水平的调节。

4.2 软件设计

控制程序使用 C 语言开发,运行平台为 PIC18F258 单片机。依据喷杆支架调节原理对控制系统进行设计,系统运行后按照固定的时间间隔运行主程序,首先对喷杆倾斜角度状态进行检测,然后根据倾斜状态采用相应的控制方法调节喷杆支架的转向,具体流程如图 7 所示。喷杆不同倾斜角度会对应控制器不同动作状态,结合油缸伸缩量与喷杆的几何关系求得相对角度,实现喷杆自动调平的闭环控制。

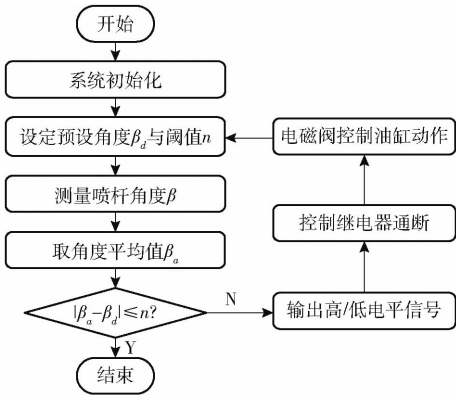


图 7 系统控制流程图

Fig.7 System control flow chart

系统启动后首先进行初始化,测量喷杆和施药机倾斜角度,观察喷杆是否达到预设角度以及与预设角度的差值,判断是否对喷杆进行水平控制,当需要对喷杆支架进行水平控制时,单片机输出高/低电平控制继电器通断,驱动电磁换向阀作业调节喷杆倾斜角度,直至调到目标倾斜角度;反之,重新测量角度信息调节油缸伸缩量,直至喷杆调整为目标角度。

5 试验

为测试在自动调平模式下调平系统的稳定性和准确性,于 2021 年 3 月在山东理工大学生态无人农场分别进行了场地试验和田间试验。

5.1 场地试验

5.1.1 试验方法与内容

施药机作业幅宽是 12 m,作业路径为直线,施药机行驶速度设为 2.5 km/h,在高为 0.3 m、总长为 10 m、上下坡度为 8° 的试验路面进行,如图 8 所示。施药机行驶过程中车身最大倾角可达到 10° ,地面

高低起伏较大,可以模拟田间复杂路况。试验示意图如图 8 所示,施药机从点 A 开始启动作业,行驶路线为 A→B、B→A 的往返运动,操作员控制机器一侧的前、后轮相继直线作业通过场地试验路面,以检验施药机喷杆自动调平系统的有效性。

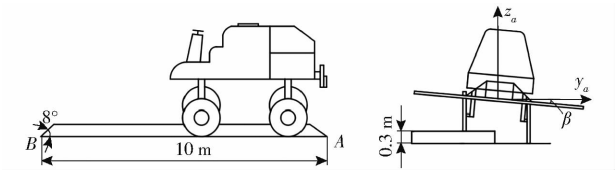


图 8 场地试验示意图
Fig. 8 Schematic of step test

根据 GB/T 24680—2009《农用喷雾机 喷杆稳定性 试验方法》进行调平效果试验,分别在喷杆横梁和喷杆支架安装倾角传感器,输出频率为 20 Hz,测得施药机车身和喷杆的倾斜角度,以施药机车身倾斜角度为对照组,传感器通过 UART 串口实时向单片机输出两者倾斜角度。打开喷杆自动调平系统的情况下,操控施药机,使其右侧前、后轮依次驶上两个阶跃激励路面,并设置喷杆预设角度为 0°,记录分析自动调平系统在不同响应阈值 n (0.5°、1.0°、1.5°、2.0°、2.5°、3.0°),不同平均采样值 b (1、2、3、4、5、6、7、8)下的调平性能。

5.1.2 试验结果分析

为评价喷杆自动水平控制系统对喷杆实时控制的性能,对倾角传感器的测量结果进行计算分析,在自动调平控制器安装过程中会有安装倾角误差,通过调节确定预设角度为 0.23°时为喷杆水平状态,结果如表 3 所示。

从表 3 可知,在不同响应阈值和采样值下,调平角度均方根误差随响应阈值增加而增大,随采样值增加而减小;调平精度随响应阈值增加而降低,随采样值增加而增大。在测试过程中,响应阈值 n 为 0.5°时,车身倾角的变化会使喷杆变化,喷杆振动会影响角度变化量在 0.5°上下浮动,导致油缸一直处于调节状态,喷杆调平稳定性低。当响应阈值 n 为 1.0°~3.0°,自动调平倾角误差随响应阈值增大而增大,精度逐渐降低;测试数据中,响应阈值 n = 1.0°时,最大误差为 1.84°,最大平均绝对误差为 0.59°;响应阈值 n = 1.5°时,最大误差为 2.50°,最大平均绝对误差为 0.97°;响应阈值 n = 2.0°时,最大误差为 2.96°,最大平均绝对误差为 1.20°;响应阈值 n = 2.5°时,最大误差为 3.50°,最大平均绝对误差为 1.44°;响应阈值 n = 3.0°时,最大误差为 3.97°,最大平均绝对误差为 1.73°。

图 9 为响应阈值分别是 0.5°、1.0°、1.5°、2.0°时,施药机车身与喷杆支架倾角变化曲线。装配喷

表 3 场地试验数据分析结果

Tab.3 Step test data analysis result

响应阈 值/(°)	采样 值	平均绝对 误差/(°)	最大误 差/(°)	平均值/ (°)	均方根误 差/(°)
0.5	1	0.70	2.19	0.44	0.873
	2	0.74	2.70	0.22	0.915
	3	0.70	2.26	0.38	0.860
	4	0.59	2.29	0.37	0.740
	5	0.50	2.08	0.35	0.645
	6	0.45	2.04	0.33	0.584
	7	0.49	2.00	0.26	0.573
	8	0.48	1.99	0.27	0.571
1.0	1	0.51	1.68	0.22	0.625
	2	0.52	1.54	0.23	0.628
	3	0.54	1.70	0.29	0.638
	4	0.47	1.55	0.35	0.598
	5	0.48	1.76	0.41	0.627
	6	0.59	1.84	0.33	0.689
	7	0.49	1.82	0.36	0.615
	8	0.52	1.71	0.28	0.633
1.5	1	0.97	2.07	0.40	1.056
	2	0.80	2.50	0.31	0.931
	3	0.82	2.19	0.32	0.960
	4	0.78	2.43	0.28	0.918
	5	0.87	2.20	0.32	0.990
	6	0.88	2.07	0.29	0.998
	7	0.83	1.94	0.49	1.00
	8	0.83	2.41	0.27	0.966
2.0	1	1.10	2.73	0.35	1.284
	2	1.20	2.69	0.60	1.377
	3	1.16	2.79	0.42	1.332
	4	1.13	2.96	0.42	1.321
	5	1.11	2.72	0.43	1.256
	6	1.12	2.76	0.43	1.286
	7	1.13	2.94	0.45	1.315
	8	1.11	2.68	0.39	1.275
2.5	1	1.43	3.44	0.27	1.616
	2	1.44	3.50	0.12	1.602
	3	1.37	3.23	0.27	1.560
3.0	1	1.73	3.68	0.22	1.958
	2	1.69	3.82	0.34	1.940
	3	1.67	3.97	0.19	1.880

杆自动调平功能的施药机,当调平系统中响应阈值 $n \leq 3.0^\circ$ 时,可以有效减小因阶跃激励路面而引起的喷杆倾斜。调平响应阈值 n 越小,系统响应时间越短,角度变化幅度越小。当 $n = 1.0^\circ$ 时为系统最优响应阈值,平均绝对误差最大为 0.59°,均方根误差最大为 0.689°,可以将喷杆倾斜角控制在 $\pm 1.5^\circ$ 范围内,并在采样值 $b = 2$ 时,平均绝对误差与均方根误差小、稳定性高,系统控制响应时间短,可以保证自动调平系统正常进行田间作业。

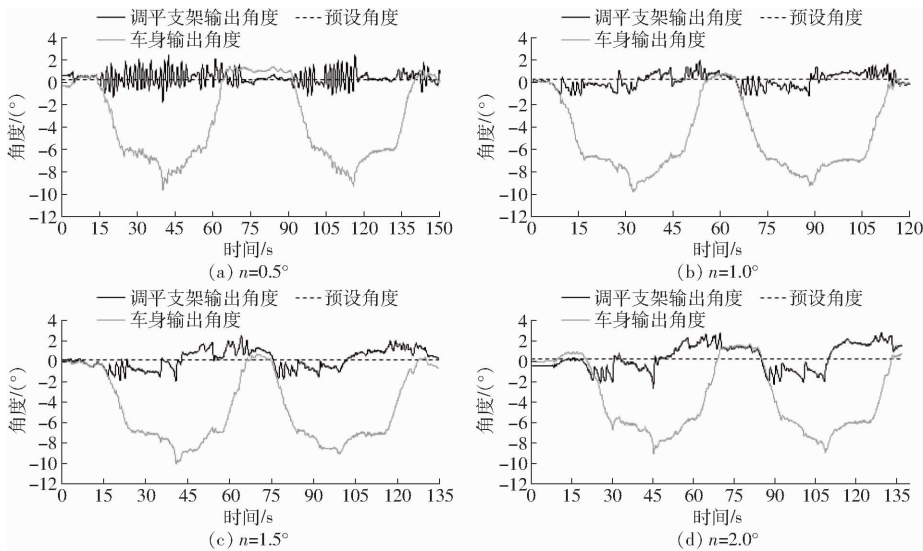


图 9 场地试验结果

Fig. 9 Step test results

5.2 田间试验

5.2.1 试验条件

田间试验场地作物为小麦,小麦返青期高度为 20 ~ 25 cm,选用山东理工大学研发的基于华盛泰山 3WP-500G 型施药机的无人驾驶施药机^[21],如图 10 所示。



图 10 试验场景与机具

Fig. 10 Test field and equipment

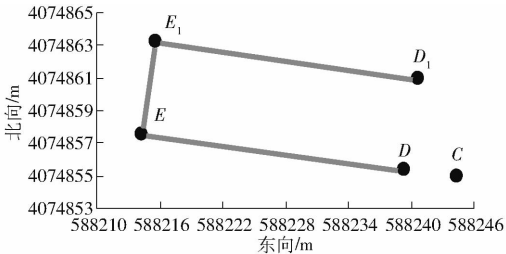


图 11 试验路径规划

Fig. 11 Test path planning

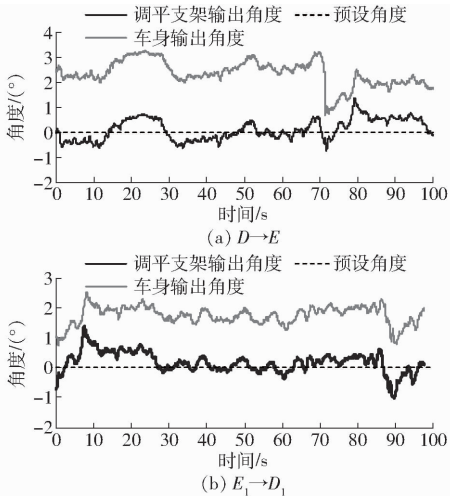


图 12 田间试验结果

Fig. 12 Field test results

5.2.2 试验过程与数据分析

作业路径为直线,采用矩形地头转弯方式,自动导航行驶速度设为实际田间作业速度 3.6 km/h。选用通过场地测试得到的最优参数响应阈值 $n = 1^\circ$ 、采样值 $b = 2$,设喷杆目标倾斜角为 0° ,其初始横向倾角为 0° ,自动驾驶施药机从点 C (588 244. 298 m, 4 074 855. 007 m) 出发沿图 11 中试验规划路径行驶,从点 D (588 239. 221 m, 4 074 855. 369 m) 至 E (588 214. 123 m, 4 074 857. 609 m)、 E_1 (588 215. 485 m, 4 074 863. 247 m)、 D_1 (588 240. 556 m, 4 074 860. 963 m),两次试验路线均为直线作业,当施药机到达边界时进行地头转弯进入邻行作业,分别记录两个路径不同路况,喷杆自动调平系统作业后喷杆与施药机车身倾角信息,并通过倾角信息检验喷杆自动调平系统的调平性能。

图 12 为田间试验倾角变化曲线,数据记录频率

为 50 Hz,以车身倾角传感器测量的横向倾角为参考,在田间试验中,分别在 $D \rightarrow E$ 和 $E_1 \rightarrow D_1$ 两个路径得喷杆调平后最大误差 1.53° ,调平后角度平均值 0.135° ,均方根误差 0.454° ,平均绝对误差 0.265° ,70% 时间内喷杆调平后角度在 0.5° 以内。表明喷杆自动调平系统田间工作正常,能实现喷杆工作时自动调平,在田间作业时偶有晃动,但能够很快恢复平衡,喷杆没有发生误调现象,系统工作平稳。

6 结论

- (1)设计了以 PIC18F258 为核心的喷杆自动调平系统,采用倾角传感器实时测量喷杆倾角,并基于 PID 算法控制电磁换向阀实现喷杆自动调平控制。
- (2)场地试验表明,以华盛泰山 3WP-500G 型施药机为平台,装配喷杆自动调平系统后,可以有效改善路面起伏不平引起的喷杆倾斜角度变化,在 10°的台阶路面上以 2.5 km/h 速度行驶,在响应阈

值为 1°的情况下,平均绝对误差不大于 0.59°,均方根误差不大于 0.689°,可以将喷杆倾斜角控制在 ±1.5°范围内,且无超调现象。

(3)田间试验表明,喷杆支架倾角传感器测得调平后角度平均值为 0.135°,平均绝对误差为 0.265°,均方根误差为 0.454°,最大误差为 1.53°。喷杆自动调平系统田间工作正常,在地面起伏时偶有晃动,但能快速恢复平衡,未发生喷杆与作物接触现象,喷杆调节稳定。

参 考 文 献

[1] 杨学军,严荷荣,徐赛章,等. 植保机械的研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报,2002,33(6):129-131,137.
YANG Xuejun, YAN Herong, XU Saizhang, et al. Current situation and development trend of equipment for crop protection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 129-131,137. (in Chinese)

[2] 魏新华,邵菁,缪丹丹,等. 喷杆式喷雾机喷杆高度及平衡在线调控系统[J]. 农业机械学报,2015,46(8):66-71.
WEI Xinhua, SHAO Jing, MIAO Dandan, et al. Online control system of spray boom height and balance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(8):66-71. (in Chinese)

[3] 马俊,温浩军,猴海啸,等. 高地隙喷杆喷雾机喷架设计及分析[J]. 农机化研究,2019,41(12):98-102.
MA Jun, WEN Haojun, GOU Haixiao, et al. Design and analysis of spray frame for high altitude gap spray rod sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(12):98-102. (in Chinese)

[4] 崔龙飞,薛新宇,乐飞翔,等. 大型喷杆喷雾机钟摆式主被动悬架自适应鲁棒控制研究[J]. 农业机械学报,2020,51(12):130-141.
CUI Longfei, XUE Xinyu, LE Feixiang, et al. Adaptive robust control of active and passive pendulum suspension for large boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):130-141. (in Chinese)

[5] 潘佛雏,邓伏栋,温浩军. 喷杆高度在线调控设计与试验研究[J]. 农机化研究,2017,39(11):107-111.
PAN Fochu, DENG Fudong, WEN Haojun. Design and experiments on boom height automatic adjusting system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 107-111. (in Chinese)

[6] 张海星,茹煜. 自走式旋翼气流静电喷杆喷雾机喷雾性能测试[J]. 农机化研究,2017,39(7):164-168,179.
ZHANG Haixing, RU Yu. Spray performance test of a self-propelled with rotary wing air-flow assisted electrostatic spray boom sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(7): 164-168, 179. (in Chinese)

[7] 庄腾飞,杨学军,董祥,等. 大型自走式喷雾机喷杆研究现状及发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):189-198.
ZHUANG Tengfei, YANG Xuejun, DONG Xiang, et al. Research status and development trend of large self-propelled sprayer booms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 189-198. (in Chinese)

[8] 崔龙飞,薛新宇,丁素明,等. 双钟摆主被动悬架式大型喷雾机喷杆动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(2):82-90.
CUI Longfei, XUE Xinyu, DING Suming, et al. Modeling and simulation of dynamic behavior of large spray boom with active and passive pendulum suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 82-90. (in Chinese)

[9] 邱白晶,何耀杰,盛云辉,等. 喷雾机喷杆有限元模态分析与结构优化[J]. 农业机械学报,2014,45(8):112-116,105.
QIU Baijing, HE Yaojie, SHENG Yunhui, et al. Finite element modal analysis and structure optimization of spray boom[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(8):112-116,105. (in Chinese)

[10] JEON H Y, WOMAC A R, WILKERSON J B, et al. Sprayer boom instrumentation for field use[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 659-666.

[11] 邱白晶,杨宁,徐溪超,等. 喷雾机前后轮相继激励下喷杆理想运动响应提取[J]. 农业机械学报,2012,43(2):55-60.
QIU Baijing, YANG Ning, XU Xichao, et al. Ideal spray boom response extraction with front and rear tires excited by steptrack[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):55-60. (in Chinese)

[12] 张铁,董祥,尹素珍,等. 轻便型高地隙喷杆喷雾机大豆田间施药试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):182-188.
ZHANG Tie, DONG Xiang, YIN Suzhen, et al. Spraying performance of lightweight high clearance boom sprayer in soybean field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 182-188. (in Chinese)

[13] CUI L F, MAO H P, XUE X Y, et al. Optimized design and test for a pendulum suspension of the crop spray boom in dynamic conditions based on a six DOF motion simulator[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2018, 11(3):76-85.

[14] 崔龙飞,薛新宇,丁素明,等. 大型喷杆及其摆式悬架减振系统动力学特性分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(9):69-76.
CUI Longfei, XUE Xinyu, DING Suming, et al. Analysis and test of dynamic characteristics of large spraying boom and pendulum suspension damping system[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 69-76. (in Chinese)