

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.032

基于专家控制的喷杆高度智能调节系统研究

孙星¹ 杨学军^{1,2} 董祥¹ 张铁³ 严荷荣² 王之东³

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083;

3. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对喷杆喷雾机作业过程中,因田间地表起伏和土壤硬度不同导致喷杆与施药靶标面无法始终保持适当距离、影响施药均匀性和防治效果的问题,设计了一种喷杆高度智能调节系统。该系统采用3个超声波测距传感器获取喷杆不同位置的高度信息并用限幅滑动平均滤波算法对传感器数据进行预处理,同时将双轴倾角传感器分别安装于车体底盘中部和喷杆上,以实时获取喷雾机和喷杆的姿态信息。然后采用基于加权平均的多传感器融合算法对喷杆高度信息进行融合处理。利用专家知识和经验,综合考虑当前喷雾机姿态信息和喷杆高度信息,设计使用不同的控制参数和控制规则,再由专家控制推理机按照制定的控制策略进行推理输出。然后控制机构通过PWM控制电磁比例换向阀动作,驱动喷杆调节油缸对喷杆高度进行调节,使喷杆高度误差快速稳定在允许误差范围内。给出了喷杆系统的机械结构,阐述了系统硬件系统组成、工作原理和喷杆高度智能调节系统的专家控制算法和软件实现。系统通过CAN总线实时获取外部变量施药系统的工作状态信息,实现与变量施药系统的工作同步,同时由触摸屏实现人机交互,设定放大系数、衰减系数、动作阈值等控制参数,再通过CAN总线输送至控制器用于喷杆高度控制。系统应用于课题组研制的3WZG-3000A型大型喷雾机,并针对喷杆高度智能调节系统的调节性能进行了试验。试验结果表明,该系统可以快速跟随阶跃激励引起的喷杆高度调节需求,当喷杆高度控制允许误差设定为8%、阶跃激励为20 cm时,最大调节时间不大于0.75 s。

关键词: 喷杆喷雾机; 专家控制; 喷杆高度; 智能调节; 多传感器融合

中图分类号: S224.3; TP272 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0275-08

Spray Boom Height Intelligent Adjustment System Based on Expert Control

SUN Xing¹ YANG Xuejun^{1,2} DONG Xiang¹ ZHANG Tie³ YAN Herong² WANG Zhidong³

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Beijing 100083, China

3. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to ensure the application effect of plant protection, the proper distance between spray boom and plant canopy need to be maintained when field surface relief and soil hardness were changed during the whole working period. Three ultrasonic distance measuring sensors were used to obtain the height information of spray boom, and the sensors data were preprocessed with amplitude-limiting and moving average algorithm. Two dual-axis inclination sensors were used to obtain the posture information of sprayer and spray boom which were installed on the chassis of sprayer and spray boom respectively. And then multi-sensor fusion algorithm based on weighted average was used to handle the spray boom height information. Then different control strategies were designed for different working states of sprayer by using expert knowledge and experience. According to the established control strategy, the control signal was outputted by the inference engine of expert control to control mechanism which was used to drive the spray boom height adjustment cylinder. The mechanical structure of the boom system was introduced, and the composition and working principle of the boom height intelligent adjustment system (BHIAS) were described. The control algorithm and software realization of BHIAS were elaborated. The work status of external variable spraying system was obtained by CAN bus to achieve synchronization of work status between BHIAS and variable spraying system. The touch screen was used to achieve human-computer

收稿日期: 2020-07-30 修回日期: 2020-09-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700903、2016YFD0200705)和国家马铃薯产业技术体系项目(CARS-09)

作者简介: 孙星(1986—),男,高级工程师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: sun_xing2010@163.com

interaction and control parameters was sent to the controller for boom height control, such as amplification coefficient, attenuation coefficient, adjustment tolerance, etc. The BHIAS was applied to 3WZG-3000A boom sprayer which was developed by the research group. Ground tests were conducted separately for testing the adjustment performance of BHIAS. The test results showed that BHIAS can follow the boom height adjustment requirements which was caused by step excitation quickly. When the allowable error of boom height adjustment was 8% and the height of step excitation was 20 cm, the maximum adjustment time of BHIAS was no more than 0.75 s.

Key words: boom sprayer; expert control; boom height; intelligent adjustment; multi-sensor fusion

0 引言

随着我国现代农业的发展和科学技术的进步,土地资源集中化利用已成为必然趋势。对于大规模农田的植保作业需求,喷杆式喷雾机以其喷幅宽、作业效率高、药液分布均匀、防治效果好等优势被越来越广泛地应用在生产中^[1-4]。但由于喷杆喷雾机的喷杆较长,一般都在12 m以上,大型喷雾机甚至达到42 m^[5],在田间作业时地块微小的不平整就会引起喷杆末端较大的起伏变化^[5-6],使喷雾分布不均,影响施药质量,严重时喷杆末端还会触碰地面或植被冠层,造成喷杆或植被损伤。因此,有必要实现在植保作业过程中对喷杆高度的实时自动调节,使喷杆始终与植被冠层高度始终处于允许范围内。

为此,相关研究人员基于超声波传感器或接触式传感器设计了喷杆高度控制系统^[5-12],采用PID或者通过建立的精确数学模型进行控制,但是在实际植保作业中,田间环境复杂多变,这些固定参数的控制算法容易出现震荡、超调现象,控制效果和适应性较差,难以满足控制要求。将自适应模糊滑膜控制算法等智能控制算法^[12-13]应用于喷杆控制,取得

了一定的效果,但算法一般比较复杂、数据计算量大、实现难度高。鉴于此,本文采用非线性的设计手段,将领域专家和现场技术人员的丰富经验和专业知识引入到控制中形成知识库,以知识库为基础制定针对性的控制策略,构建专家控制算法,解决固定参数或模型在不同工况、环境下控制精度和适应性差的问题。

1 喷杆结构

本文采用现代农装科技股份有限公司研制的长度为18 m的桁架式喷杆,结构如图1所示。采用平面桁架结构,共分为5段(左侧外段喷杆、左侧内段喷杆、中段喷杆、右侧内段喷杆和右侧外段喷杆),其喷杆升降悬挂架与底盘之间采用平行四连杆升降机构连接,保证喷杆在通过升降调节油缸整体升降时始终垂直于地面。而喷杆升降悬挂架则通过4个悬挂连接杆与喷杆连接,同时在水平方向设置了水平阻尼器吸收喷杆左右摆动的能量,垂直方向设置了减振弹簧、平衡弹簧、垂直阻尼器来吸收喷杆上下摆动的能量,以提高喷杆结构的抗振动干扰能力。

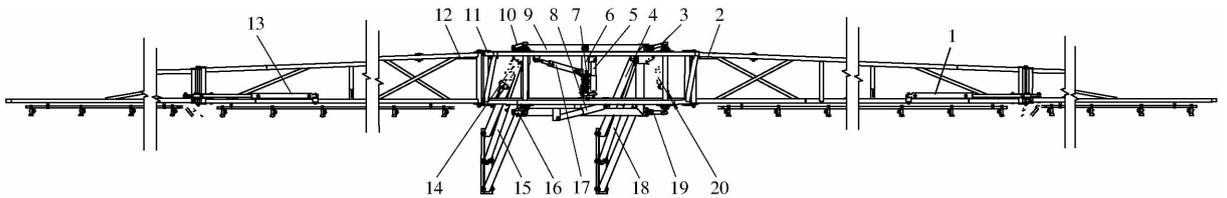


图1 喷杆结构简图

Fig. 1 Spray boom structure schematic

1. 右侧外段喷杆折叠油缸
2. 右侧内段喷杆折叠油缸
- 3、10、16、19. 悬挂连接杆
4. 升降连杆
5. 垂直阻尼器
6. 外挂接导向管
7. 减振弹簧
8. 水平阻尼器
9. 喷杆升降悬挂架
11. 中间段喷杆
12. 左侧内段喷杆折叠油缸
13. 左侧外段喷杆折叠油缸
- 14、20. 平衡弹簧
- 15、18. 喷杆整体升降调节油缸
17. 喷杆倾斜调节油缸

两侧内段喷杆通过安装在喷杆上的两个内侧折叠油缸向车辆行进方向同步折叠或反方向同步展开;两侧外段喷杆通过外侧折叠油缸向车辆后退方向同步折叠或反方向同步展开;安装于中段喷杆上的喷杆倾斜调节油缸可以绕固定支点调节喷杆倾斜角度,从而改变两侧喷杆对地高度,达到喷杆高度跟随地形变化的目的。

2 喷杆高度智能调节系统设计

2.1 系统工作原理

喷杆高度智能调节系统原理如图2所示,在喷杆中段角度调节支点附近和两侧外段喷杆上分别安装一个超声波测距传感器,用于实时测量喷杆整体和两侧喷杆对地高度;在喷雾机底盘上安装双轴倾

角传感器,用于实时测量喷雾机姿态;在喷杆中段角度调节支点附近安装双轴倾角传感器,用来测量喷杆倾斜角度。当喷雾机在起伏不平的地块作业,车辆处于侧倾或俯仰状态使喷杆高度发生变化时,通过控制器输出控制信号给电磁比例换向阀,驱动喷杆整体升降调节油缸或喷杆倾斜调节油缸,对喷杆高度进行调节。

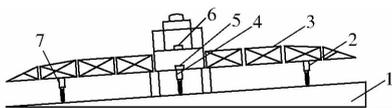


图 2 喷杆高度调节原理图

Fig. 2 Schematic of spray boom height control

1. 地面 2,4,7. 超声波测距传感器 3. 喷杆 5,6. 双轴倾角传感器

为了防止喷杆在设定的目标高度附近振荡,系统设定了喷杆高度调节阈值,当实时采集的喷杆高度落入阈值范围内时,自动关闭喷杆调节动作。另外,为保证调节精度,喷杆整体升降电磁阀和喷杆倾斜调节电磁阀均采用无内置驱动器的直动型电磁比例换向阀,控制器输出 PWM 信号对其动作速度进行控制。

由于系统安装于喷雾机上,作业环境复杂恶劣,为提高系统可靠性,所采用硬件均为耐温、宽电压供电、高防护等级的车规级产品。喷杆高度智能调节系统硬件系统原理如图 3 所示。测距传感器采用德国 Sick 公司生产的 UM18 型超声波测距传感器,该传感器检测范围为 120 ~ 1 300 mm,4 ~ 20 mA 输出,响应时间为 80 ms,准确度 $\pm 1\%$;双轴倾角传感器采用深圳瑞芬科技有限公司生产的 LCA328T - 60 - A1 型倾角传感器,该传感器测量范围为 $-60^\circ \sim 60^\circ$,输出 4 ~ 20 mA,分辨率 0.1° ,绝对精度 0.2° ,响应时间 0.02 s,双轴水平安装,防水等级为 IP67;控制器采用 Bodas 公司的 RC12 - 10 型车载控制器,专用于比例电磁铁和附加开关功能的可编程控制,具有 74 个可配置(0 ~ 5 V、0 ~ 20 mA、0 ~ 10 kHz、数字量输入等功能)输入端口、12 个 PWM 输出端口、10 个数字量输出端口和 4 个 CAN 总线接口,支持 Bodas Design 软件编程;触摸显示屏采用硕博电子生产的 SPD070 型 7 英寸可编程车载触摸屏,具有 2 个 CAN 总线接口,支持 Codesys3.5 软件编程,用来采集控制器状态信息,设置控制参数等。系统通过 CAN 总线扩展接口与外部变量施药系统通信,实时读取变量施药系统的工作状态,实现与变量施药系统的工作同步。

2.2 传感器信号处理

田间作业时,超声波测距传感器发出的超声波信号可能会遇到不同高度的冠层枝叶,对传感器造

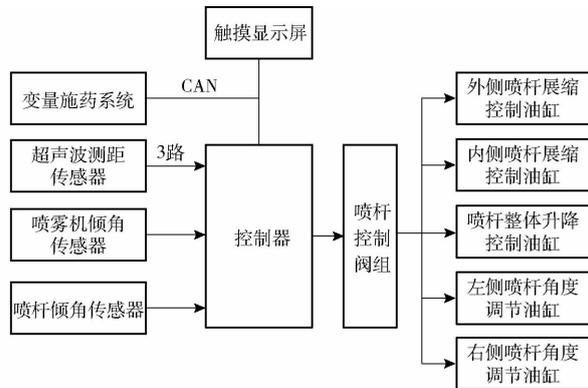


图 3 硬件系统结构图

Fig. 3 Schematic of hardware system

成干扰,使控制器误认为喷杆高度发生了较大变化而引起系统误动作。同时考虑到信号采集的实时性要求,采用限幅滑动平均滤波算法对输入信号进行滤波,排除脉冲性尖波干扰引起的采样数据偏差,计算式为

$$Y(k) = \sum_{i=k-N+1}^k \frac{y(i)}{N} \quad (1)$$

其中

$$y(i) = \begin{cases} y(i) & (|y(i) - y(i-1)| \leq \Delta y_{\max}) \\ y(i-1) & (|y(i) - y(i-1)| > \Delta y_{\max}) \end{cases}$$

式中

- $y(i)$ ——第 i 次采样值, cm
- $y(i-1)$ ——第 $i-1$ 次采样值, cm
- Δy_{\max} ——相邻两次采样值最大容许偏差,取为 10 cm
- N ——滑动滤波缓冲区采样个数,取 $N=3$
- $Y(k)$ ——第 k 次采样进行滤波处理后的估计值, cm

为提高喷杆高度数据的准确性,真实反映喷杆的工作状态,采用基于加权平均的多传感器融合方法对采集的喷杆高度数据进行处理。喷雾机在侧倾状态下喷杆某时刻的运动模型如图 4 所示。

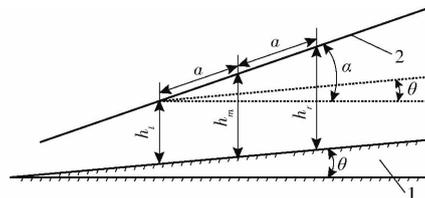


图 4 喷杆某时刻状态示意图

Fig. 4 State of spray boom at a certain moment

1. 斜坡 2. 喷杆

由几何关系可知

$$\begin{cases} h_1 = h_t + 2a \sin \alpha - 2a \cos \alpha \tan \theta \\ h_2 = h_m + a \sin \alpha - a \cos \alpha \tan \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中 h_1 ——由左侧喷杆高度得到的右侧喷杆高度估算值, cm

- h_2 ——由中段喷杆高度得到的右侧喷杆高度估算值, cm
 h_m ——中段喷杆高度, cm
 h_l ——左侧喷杆高度, cm
 a ——喷杆高度传感器之间的安装距离, 左右两侧传感器对称安装, 取为 600 cm
 α ——喷杆倾斜角, ($^\circ$)
 θ ——喷雾机倾斜角, ($^\circ$)

已知当前时刻的 h_m 和 h_l , 则由方程组(2)分别取得估算值 h_1 和 h_2 。然后进行加权平均得

$$h = w_1 h_1 + w_2 h_2 + (1 - w_1 - w_2) h_r \quad (3)$$

式中 h ——喷杆高度近似估计值, cm

w_1 ——加权系数, 取为 0.2

w_2 ——加权系数, 取为 0.3

h_r ——右侧喷杆高度, cm

由式(3)得到的喷杆高度近似估计值 h 作为喷杆高度的真实值, 将其输入到控制器中, 参与专家控制规则的运算推理。

另外, 相对于超声波测距传感器, 倾角传感器安装位置靠前、响应速度快, 能快速感知喷雾机姿态的变化, 因此采用倾角传感器对喷杆姿态进行预判, 屏蔽干扰信号, 提前获取真实的田间地形变化。例如一般田间地形变化比较缓慢, 相对应的喷雾机倾角变化也比较缓慢, 但当作业过程中遇到沟、坎、石块等造成喷雾机倾斜角发生短暂大幅跃变, 进而可能使喷杆调节系统误动作时, 系统记录跃变前的数据作为基准数据, 并延时 100 ms 后再次采集一次数据, 如果采集的数据及前一次采集的数据与跃变前的数据误差大于喷雾机倾斜角尖波干扰源检测阈值 g_0 , 则系统判断其为干扰数据。此时将喷杆调节系统关闭 1 s, 等待喷杆减振系统吸收喷杆振动能量, 以屏蔽喷杆振动造成喷杆高度信号跳变振荡。

2.3 控制算法

2.3.1 控制器结构

专家控制是智能控制的一个分支, 通过将专家系统的理论和技术同控制理论、方法与技术相结合, 在无对象模型的情况下, 模仿领域专家的经验来实现对被控对象的控制^[14-17]。控制器结构如图 5 所示, 它主要包括知识库和推理机。知识库主要存放与喷杆高度控制有关的参数、数据及专家控制规则; 推理机依据喷雾机的喷杆工作状态、喷雾机姿态信息、知识库资源以及分段参数库逻辑推理出当前最佳适配参数并输出至控制机构, 控制被控对象动作, 以实现喷杆高度的调节。

2.3.2 控制规则

控制规则是专家控制器的核心, 其为模拟工作

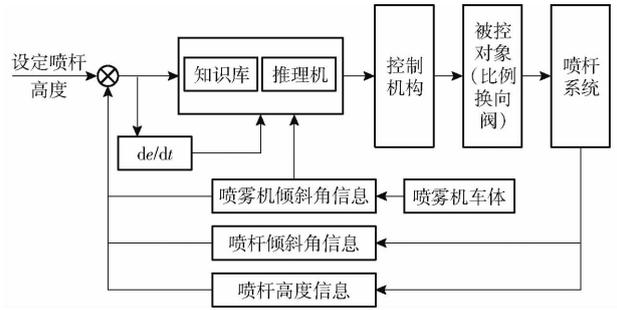


图 5 控制器结构图

Fig. 5 Structure diagram of controller

人员调节系统参数的判断和决策过程、操作经验而总结出来的参数规则, 用于调控喷杆高度控制机构。控制器主要是依据输入信号(即喷杆高度误差)的大小、方向以及变化趋势做出相应决策, 然后选择适当的控制模式进行控制^[15]。考虑到喷雾机姿态信息、作业状态信息, 喷杆高度调节的专家控制器控制规则设计为:

(1) 当接收到变量喷药系统工作状态关闭的信息时, 关闭喷杆高度调节控制器。

(2) 当 $g_t(k) > g_0$ 且 $g_{t+100}(k) < g_0$ 时, 表明遇到沟、坎等干扰源, 暂停喷杆高度调节控制 1 s。 $g_t(k)$ 为第 k 次喷雾机倾角传感器采集到的相对于 $k-1$ 次数值的误差, 如大于 g_0 , 记此次采集时刻为 t 。 $g_{t+100}(k+1)$ 为从 t 时刻延时 100 ms 后采集到的第 $k+1$ 次喷雾机倾斜角数值相对于第 $k-1$ 次数值的误差。

(3) 当 $g_x(k) > g_1$ 时, 表明当前喷雾机处于侧倾作业状态, 此时优先进行喷杆倾斜角度调节, 然后再进行喷杆整体高度调节。 $g_x(k)$ 为倾角传感器采集到的喷雾机俯仰角。 g_1 为设定的倾角传感器动作阈值。

(4) 当 $g_y(k) > g_1$ 时, 表明当前喷雾机处于俯仰作业状态, 此时优先进行喷杆整体高度调节, 然后再进行喷杆倾斜角调节。 $g_y(k)$ 为倾角传感器采集到的喷雾机侧倾角。

(5) 当 $|e(k)| \geq \delta_1 h_0$ 时, 表明当前喷杆高度与设定高度相差很大, 控制器应以最大(最小)值输出, 使油缸快速动作, 驱动喷杆快速调整以减少误差。 $e(k)$ 为喷杆高度误差。 h_0 为设定的喷杆高度目标值。 δ_1 为第 1 级喷杆高度允许误差设定值, 取值为 15%。

(6) 当 $\delta_2 h_0 < |e(k)| < \delta_1 h_0$ 时, 表明当前喷杆高度与设定高度相差仍较大, 此时控制器应以 90% 最大(最小)值输出, 使油缸较快动作, 以相对较快的速度减少误差。 δ_2 为第 2 级喷杆高度允许误差设定值, 取值为 8%。

(7) 当 $\sigma h_0 < |e(k)| \leq \delta_2 h_0$ 时, σ 为喷杆高度控制允许误差设定值, 分以下情况: ① 当 $e(k)\Delta e(k) > 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$ 时, 表明喷杆高度误差在向绝对值增大的方向变化或者误差为常量, 此时控制器输出为

$$U(k) = U(k-1) + K_p e(k) + K_1 \sum_{k=1} e(k) \quad (K_1 > 1) \quad (4)$$

式中 $U(k)$ ——第 k 次控制器的输出
 $U(k-1)$ ——第 $k-1$ 次控制器的输出
 K_1 ——放大系数
 K_p ——比例增益

② 当 $e(k)\Delta e(k) < 0$ 时, 表明喷杆高度误差在向绝对值减小的方向变化, 系统控制状态有向好的趋势, 但误差仍较大, 此时控制器输出为

$$U(k) = U(k-1) + K_2 e(k) \quad (K_2 < 1) \quad (5)$$

式中 K_2 ——衰减系数
 $\Delta e(k)$ ——喷杆高度误差变化率, %

(8) 当 $|e(k)| \leq \sigma h_0$ 时, 表明喷杆高度误差已经减少到允许阈值范围内, 为避免调节震荡, 认为系统已处于稳态, 控制器输出为零, 停止喷杆高度调节。

2.4 软件设计

软件系统采用基于 IEC61131-3 标准的编程语言开发, 总体开发框架如图 6 所示。控制器主程序、触摸屏交互程序及喷药系统控制程序之间通过 CAN2.0A 协议进行通信, 通信速率为 250 kb/s。

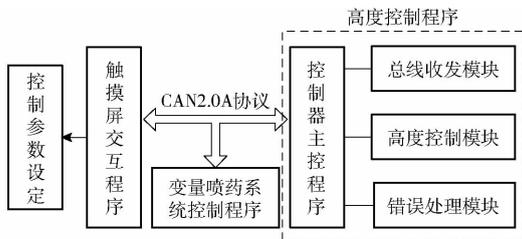


图 6 软件总体框图

Fig. 6 General structure diagram of software system

控制器主控程序中的总线收发模块实时从总线上接收变量喷药系统控制程序发出的作业状态信号, 当接收到作业开始信号时启动喷杆高度智能调节程序; 同时读取来自触摸屏交互程序的控制参数, 如阈值设定、放大及衰减系数设定等, 用于控制器进行推理输出。而错误处理模块则用于实时监测控制器主控程序运行工作状态, 根据不同的错误状态信号执行相应的错误处理程序, 防止系统运行出现错误导致喷杆误动作造成不必要的损失; 高度控制模块根据设定的推理规则和采集的作业状态信息进行推理后输出控制信号到控制机构中。

喷杆高度控制程序流程图如图 7 所示, 程序运行于独立的固定周期扫描线程上, 扫描周期为

10 ms。在每个扫描周期的开始都读取喷药系统开启状态以实现与变量喷药系统的工作同步。喷杆中段高度仅与用于喷杆整体升降控制的油缸伸缩长度有关, 与喷杆的摆动角度无关。

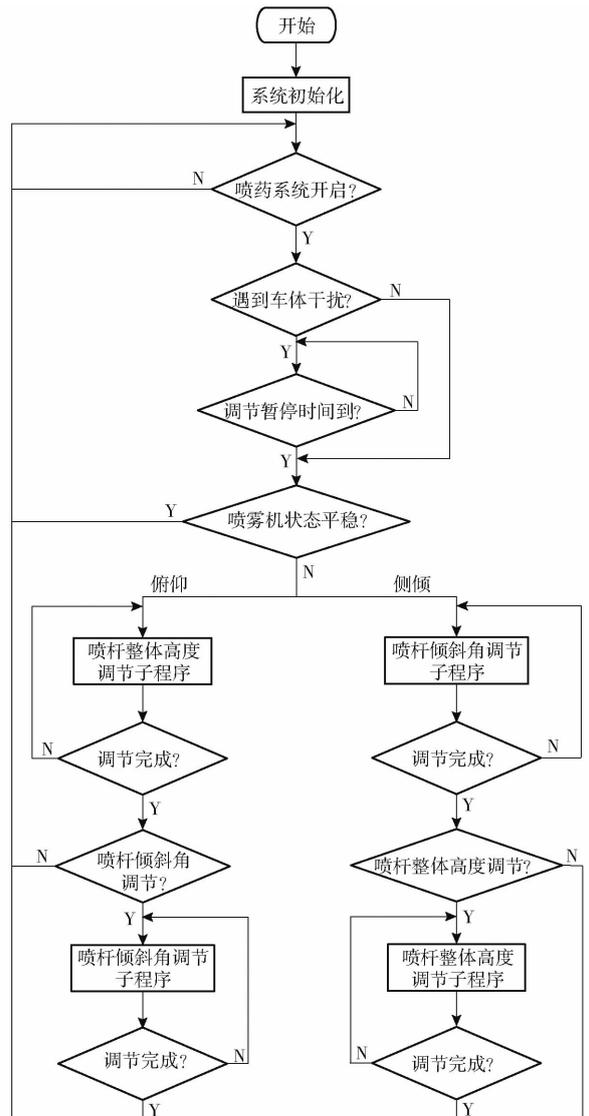


图 7 喷杆高度控制流程图

Fig. 7 Flow chart of boom height control program

在进行喷杆高度调节前, 首先判断当前喷雾机姿态, 如果喷雾机处于平稳作业状态, 即倾斜角未超过设定动作阈值, 则不进行喷杆高度调节, 避免小扰动造成的喷杆往复振荡运动; 如果处于俯仰状态, 则喷杆整体高度调节为第一调节优先级; 如果处于侧倾状态, 则喷杆倾斜调节为第一调节优先级。

3 试验与结果分析

为验证所设计喷杆高度智能调节系统的调节性能, 将其安装于课题组开发的 3WZG-3000A 型高地隙自走式喷杆喷雾机上进行测试, 试验样机如图 8 所示。



图8 试验样机

Fig.8 Test machine

测试动态系统常用的激励信号有阶跃激励、脉冲激励和正弦激励^[18]。参照文献[18-23]的试验方案,采用阶跃激励进行试验。阶跃激励路面为预制混凝土水泥路面,高度分别为10、20 cm。测试试验根据喷雾机的工作状态分为喷雾机爬坡状态和侧倾状态两组。

考虑到喷雾机运转时自身振动及作业过程中减少倾斜角对喷杆调节系统的影响^[23],将 g_0 设定为 10° , g_1 设定为 1.0° 。控制参数 K_p 、 K_1 、 K_2 分别设置为15、1.3、0.8;喷雾机喷杆高度设定为50 cm;喷杆高度允许误差 σ 分别设定为2%、4%、6%、8%。触摸屏开发测试试验程序通过CAN总线实时读取当前喷杆高度,同时在调节开始时启动内部定时器。在喷杆高度调节完成后,记录此时的喷杆最终高度和使用调节时间。试验在现代农装科技股份有限公司保定分公司测试场地进行。

3.1 侧倾试验

如图9所示,喷雾机以5 km/h的速度单侧轮通过阶跃激励路面,模拟喷雾机侧倾状态下系统的动态调节性能。

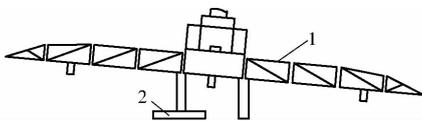


图9 侧倾试验示意图

Fig.9 One side tilt test of sprayer

1. 喷雾机 2. 阶跃激励

试验结果如表1所示,在设定 σ 为4%、6%、8%时系统能够快速响应阶跃激励带来的喷杆高度变化,最终将喷杆高度调节到允许误差范围内。 σ 越大,调节时间越短,当设定 σ 为8%、阶跃激励为20 cm时,最大调节时间不大于0.75 s。而在 σ 为2%时,由于喷雾机自身振动引起的喷杆振荡等原因,角度调节油缸一直处于左右运动状态,无法达到控制目标,因此无法采集到最终高度。在 σ 从6%变为8%时,平均调节时间缩短了0.8 s,这是由于系统第2级喷杆高度相对高度误差阈值 δ_2 设定为8%,在调节过程中仅进行了高低速快速比例调节,没有进行PID调节。

表1 侧倾试验结果

Tab.1 Result of one side tilt test

| 激励高度/cm | 允许误差 σ /% | 喷杆最终高度/cm | | | 调节时间/s |
|---------|---------------------|-----------|------|------|--------|
| | | 左侧 | 中段 | 右侧 | |
| 10 | 4 | 51.1 | 50.7 | 50.7 | 1.45 |
| | 4 | 48.8 | 50.5 | 51.7 | 1.54 |
| | 4 | 51.9 | 49.6 | 49.9 | 1.47 |
| | 6 | 48.7 | 50.1 | 51.1 | 1.29 |
| | 6 | 47.3 | 51 | 52.2 | 1.25 |
| | 6 | 52.4 | 50.6 | 48.8 | 1.36 |
| | 8 | 52.6 | 51.1 | 48.4 | 0.51 |
| | 8 | 48.9 | 49.8 | 53.1 | 0.48 |
| 20 | 8 | 48.5 | 49.3 | 51.6 | 0.47 |
| | 4 | 50.9 | 49.6 | 50.7 | 1.63 |
| | 4 | 51.5 | 50.4 | 49.6 | 1.67 |
| | 4 | 49.6 | 49.8 | 50.7 | 1.72 |
| | 6 | 52.1 | 50 | 50.4 | 1.52 |
| | 6 | 49.7 | 49.4 | 48.2 | 1.43 |
| | 6 | 47.8 | 49.1 | 49.5 | 1.51 |
| | 8 | 47.4 | 49.5 | 53.2 | 0.64 |
| 20 | 8 | 51.3 | 48.7 | 46.6 | 0.75 |
| | 8 | 47.4 | 49.6 | 52.9 | 0.69 |

从阶跃激励对系统调节时间的影响看,阶跃激励增大时调节时间相应变长,但是变化幅度较小,平均小于0.2 s,这主要是因为喷杆长度较大导致喷杆高度变化时的控制需求反映到角度调节油缸上,对角度调节油缸长度变化的控制需求较小。

3.2 爬坡试验

由于场地有限,无足够宽度和长度的大斜坡用于试验,为检验爬坡过程中喷杆整体高度变化后系统的动态响应能力,设计了如图10所示的试验。沿喷雾机行进方向在左右两侧超声波测距传感器下方放置与阶跃激励高度相同的障碍物,然后喷雾机以速度5 km/h通过阶跃激励路面,模拟喷雾机爬坡状态下喷杆整体高度变化时系统的动态调节性能。

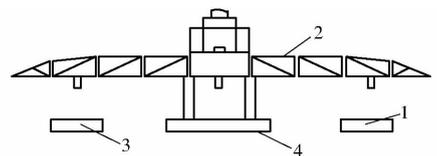


图10 爬坡试验示意图

Fig.10 Climbing test of sprayer

1、3. 障碍物 2. 喷雾机 4. 阶跃激励

从表2可以看出, σ 变化时系统在试验结果上与侧倾试验呈现出一致性,即当 σ 大于等于4%时,系统能够最终将喷杆高度调节到允许误差范围内。但从阶跃激励变化对系统调节时间的影响看,当 σ 为4%、6%时,阶跃激励增大对调节时间的影响较

表 2 爬坡试验结果

Tab.2 Result of climbing test

| 激励高度/cm | 允许误差 $\sigma/\%$ | 喷杆最终高度/cm | | | 调节时间/s |
|---------|------------------|-----------|------|------|--------|
| | | 左侧 | 中段 | 右侧 | |
| 10 | 4 | 51.4 | 51.1 | 50.7 | 1.37 |
| | 4 | 48.1 | 48.8 | 47.9 | 1.30 |
| | 4 | 51.8 | 51.9 | 52.3 | 1.35 |
| | 6 | 46.5 | 47.1 | 47.7 | 1.23 |
| | 6 | 51.8 | 51.9 | 52.6 | 1.29 |
| | 6 | 48.5 | 48.2 | 47.6 | 1.16 |
| | 8 | 47.8 | 48.0 | 47.3 | 0.46 |
| | 8 | 50.4 | 50.6 | 51.1 | 0.43 |
| 20 | 8 | 53.1 | 52.9 | 52.2 | 0.50 |
| | 4 | 50.5 | 49.6 | 49.8 | 1.76 |
| | 4 | 52.2 | 51.4 | 51.3 | 1.71 |
| | 4 | 50.2 | 49.8 | 50.7 | 1.73 |
| | 6 | 52.1 | 52.8 | 51.9 | 1.69 |
| | 6 | 48.9 | 48.4 | 48.2 | 1.62 |
| | 6 | 48.7 | 47.8 | 47.6 | 1.59 |
| | 8 | 50.9 | 50.3 | 51.8 | 0.67 |
| 8 | 49.7 | 49.1 | 48.7 | 0.72 | |
| 8 | 46.8 | 46.5 | 47.3 | 0.73 | |

大,且变化相对侧倾试验大,达到了 0.4 s 以上。这主要是因为是在爬坡试验中主要进行的是喷杆整体高度的调节,没有进行喷杆角度调节。而喷杆整体高度变化时对高度调节油缸长度相应变化的控制需求比角度调节时大很多。但当 σ 为 8% 时,阶跃激励

增大对调节时间的影响相对变小,缩短为 0.2 s 左右,主要是因为此时系统仅进行了快速比例调节,调节时间仅与液压系统流量即油缸运动速度相关。

试验结果表明,无论是在侧倾状态还是爬坡状态,在喷杆允许误差 σ 大于等于 4% 时,调节系统能够最终将喷杆高度回调至稳定状态。当 σ 设定为 8%、阶跃激励为 20 cm 时,最大调节时间不大于 0.75 s。

4 结论

(1) 根据植被特点采用了限幅滑动平均滤波算法对超声波传感器输入信号进行滤波,以排除脉冲性尖波干扰引起的采样数据偏差,同时设计了基于加权平均的多传感器融合算法对采集的喷杆高度数据进行处理,以真实反映作业环境的状态。

(2) 提出了基于专家控制的喷杆高度智能调节算法,根据喷杆高度信息和喷雾机姿态信息提出了相应的控制规则,设计了硬件及软件,并将其应用于 3WZG-3000A 型高地隙喷杆喷雾机上进行试验。试验结果表明,该控制策略对喷杆高度的控制是可行且有效的。在喷杆允许误差 $\sigma \geq 4\%$ 时,调节系统能够最终将喷杆高度回调至稳定状态。当 σ 设定为 8%、阶跃激励为 20 cm 时,最大调节时间不大于 0.75 s。

参 考 文 献

- [1] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 189-198. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/jissn.1000-1298.2018.S0.025. (in Chinese)
- [2] 贾卫东,张磊江,燕明德,等. 喷杆喷雾机研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(4): 19-22.
JIA Weidong, ZHANG Leijiang, YAN Mingde, et al. Current situation and development trend of boom sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(4): 19-22. (in Chinese)
- [3] 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): 129-137.
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): 129-137. (in Chinese)
- [4] 武秀恒,秦嘉浩,杜岳峰,等. 高地隙喷雾机主动空气悬架减振控制与实验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):60-67.
WU Xiuheng, QIN Jiahao, DU Yuefeng, et al. Experiments of vibration control for active pneumatic suspension system in high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180607&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.007. (in Chinese)
- [5] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 66-71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150811&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.011. (in Chinese)
- [6] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 82-

90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170211&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.011. (in Chinese)
- [7] 王佳文, 杨自栋. 自动调平喷杆式喷药机设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(7): 162-166.
WANG Jiawen, YANG Zidong. Design and experimental research on automatic levelling boom sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(7): 162-166. (in Chinese)
- [8] 潘佛维, 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)
- [9] 张盟, 胡炼, 可欣荣, 等. 水田自走式喷雾机喷杆自动调平系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 45-51.
ZHANG Meng, HU Lian, KE Xinrong, et al. Design and experiment of boom automatic leveling control system for self-propelled paddy sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 45-51. (in Chinese)
- [10] 徐晶. 喷杆式喷雾机喷杆高度调节与自平衡系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
XU Jing. Research on boom height adjustment and self-balancing system of sprayer[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [11] 邓伏栋. 喷杆自平衡及高度自动调控系统设计[D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
DENG Fudong. Design of self balancing and height automatic control system for spray boom[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017. (in Chinese)
- [12] 李树江, 夏彬, 苏锡辉, 等. 植保机械喷杆位置控制器设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(6): 83-87.
LI Shujiang, XIA Bin, SU Xihui, et al. Plant protection machinery spray boom position controller design[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 83-87. (in Chinese)
- [13] 薛涛, 李伟, 杜岳峰, 等. 大型高地隙喷雾机喷杆主动悬架自适应模糊滑模控制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 47-56.
XUE Tao, LI Wei, DU Yuefeng, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control of spray boom active suspension for large high clearance sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 47-56. (in Chinese)
- [14] 王风云, 赵一民, 张晓艳, 等. 基于分段控制策略的温室智能测控系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 178-181.
WANG Fengyun, ZHAO Yimin, ZHANG Xiaoyan, et al. Measure-control system design based on sectional-control strategy in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 178-181. (in Chinese)
- [15] 金立生, 赵丁选, 国香恩. 液压挖掘机PID专家节能控制系统[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 1-3.
JIN Lisheng, ZHAO Dingxuan, GUO Xiang'en. Study on energy-saving control system of PID expert system in hydraulic excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 1-3. (in Chinese)
- [16] 王金凤, 蔡国良, 关长亮, 等. 应用专家PID实现某矿山半自磨机的控制[J]. 金属矿山, 2019(7): 177-181.
WANG Jinfeng, CAI Guoliang, GUAN Changliang, et al. Application of expert PID to realize the control of a mine semi-autogenous mill[J]. Metal Mine, 2019(7): 177-181. (in Chinese)
- [17] 刘金琨. 先进PID控制Matlab仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [18] 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/OL]. 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 step track[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 55-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120212&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.012. (in Chinese)
- [19] HART W E, JEON H Y, WOMAC A R, et al. Sprayer boom instrumentation for field use[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 659-666.
- [20] ANDREAS H, HANS-JUERGEN O. A novel method for testing automatic boom height control systems for field sprayers[J]. Gesunde Pflanzen, 2019, 71(Supp. 1): 17-24.
- [21] HANS-JUERGEN O, HARTJE S, ANDREAS H. A novel method for testing automatic systems for controlling the spray boom height[J]. Biosystems Engineering, 2018, 174: 115-125.
- [22] 吴吉麟, 苗玉彬. 不同激励源下宽幅喷雾机喷杆的动态特性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 39-44.
WU Jilin, MIAO Yubin. Dynamic characteristic analysis of boom for wide sprayer with different exciting sources[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 39-44. (in Chinese)
- [23] 崔龙飞, 薛新宇, 丁素明, 等. 大型喷杆运动模拟器设计与田间工况复现试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 51-59.
CUI Longfei, XUE Xinyu, DING Suming, et al. Design of large boom dynamic simulator and field condition reappearance experiment[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 51-59. (in Chinese)