

基于 LiDAR 的对靶喷雾实时控制系统设计与试验

袁鹏成 李秋洁 邓 贤 周宏平 茹 煜 周梦飞

(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

摘要: 针对自动对靶喷雾中延时喷雾问题设计了实时控制对靶喷雾系统,该系统以二维激光雷达(Laser detection and ranging, LiDAR)作为探测器,利用地速传感器(True ground speed sensor, TGSS)获取喷雾车实时速度,建立了自适应延时喷雾模型,模型可不断调整喷雾延时时间。自适应延时喷雾模型包括延时存储器和延时计数器。延时存储器利用 FIFO 缓存区暂存喷雾指令;延时计数器指向延时存储器地址,其利用当前车速计算延时指数,取出对应延时存储器地址的喷雾指令并发送给电磁阀控制器,实现对靶喷雾。试验部分首先对系统响应时间进行分析,包括识别靶标时间、计算喷雾指令时间、通信时间、电磁阀响应时间,试验结果表明,系统响应时间为 160 ms,延时存储器共 42 个延时单元;其次通过 Proteus 仿真比较了单片机在采用 M 法、T 法计算 TGSS 发出信号频率的准确性,结果表明 M 法更适合于本文所述测速系统的频率计算;在 TGSS 安装角确定后,喷雾车速度与方波信号的频率成正比关系,通过拟合确定了比例系数 0.009 9,拟合优度为 0.999 8;最后通过试验验证了系统的整体有效性,并测量了实时控制对靶喷雾系统的可识别最小间距,试验结果表明,可识别的最小间距在 80 ~ 180 mm 之间,系统可识别靶标间距的能力随着喷雾车速度的提升而降低,当靶标间距大于 180 mm 时,系统均可有效识别靶标。

关键词: 对靶喷雾; 实时控制系统; 激光雷达; 速度测量; 系统响应时间

中图分类号: S776.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0273-08

Design and Experiment of Real-time Control System for Target Spraying Based on LiDAR

YUAN Pengcheng LI Qiujie DENG Xian ZHOU Hongping RU Yu ZHOU Mengfei

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Aiming at the problem of delayed spray in automatic target spraying, a real-time control target spray system was designed. The system took the laser detection and ranging (LiDAR) as the detector and the real-time speed of the spray vehicle was obtained by using the true ground speed sensor (TGSS), and a delayed spray model was established, which continuously adjusted the spray delay time. The delay spray model included delay memory and delay counter. The delay memory used the FIFO buffer to store the spray instruction temporarily. The delay counter was pointed to the delay memory address, which used the current vehicle speed to calculate the delay index. The delay counter took out the spray instruction corresponding to the delay memory address and sent it to the solenoid valve controller to realize the target spray. The response time of the system was firstly analyzed in the experimental part, including identifying target time, calculating the spray command time, communication time and the response time of the solenoid valve. The experimental results showed that the system response time was 160 ms and the delay memory had 42 delay units. Secondly, the accuracy of the MCU in calculating the frequency of the TGSS signal was compared by using the M method and T method with the Proteus simulation. Experimental results showed that the M method was more suitable for the frequency calculation of the described speed measurement system. Then, the speed of the spray vehicle was proportional to the frequency of the square wave signal after the installation angle of TGSS was determined. The proportional

收稿日期: 2020-07-31 修回日期: 2020-09-20

基金项目: 江苏省基础研究计划-青年基金项目(BK20170930)、国家自然科学基金项目(31901239)、国家林业局“948”项目(2015-4-56)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(18)1007)

作者简介: 袁鹏成(1994—),男,硕士生,主要从事模式识别与智能信息处理研究,E-mail: dapeng_325@163.com

通信作者: 李秋洁(1983—),女,副教授,主要从事林业自动化与信息化研究,E-mail: liqiujiel@163.com

coefficient was determined to be 0.009 9 through fitting. The r-squared of linear fitting of speed and frequency was 0.999 8. Finally, the experiment verified the overall effectiveness of the real-time control to the target spray system and measured the minimum recognizable spacing of the real-time control to the target spray system. The experimental results showed that the minimum recognizable spacing was between 80 mm and 180 mm, the ability of the system to recognize the target spacing was decreased with the increase of the speed of the spray vehicle, when the target spacing was greater than 180 mm, the system can identify targets effectively.

Key words: spraying; real-time control system; LiDAR; speed measurement; system response time

0 引言

针对传统果园连续喷雾存在果树间隙无效喷雾的特点,自动对靶喷雾在提高农药利用率、减少农药用量与残留以及降低环境风险等方面的巨大潜力和广阔前景已获得普遍认同^[1]。目前,自动对靶喷雾系统主要采用红外线、超声波、图像处理、激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)等传感器探测靶标^[2-5]。红外线技术受植物外观和光照强度的影响较大;超声波技术的测量范围小、精度低,需要多个传感器共同探测靶标;图像处理技术计算量大,输出结果时间较长,不适合用于在线计算^[6];LiDAR具有精度高、响应快、装置简单等优势,已成功应用在对靶喷雾系统中。文献[7]利用LiDAR探测靶标并计算树冠体积,利用C++编程语言开发一套支持手动和自动调整的变量对靶喷雾。文献[8]利用LiDAR探测靶标,设计了基于上下位机的自动对靶喷雾控制系统,通过上下位机联合调试等实验测试系统性能。文献[9]利用LiDAR检测靶标、计算树冠体积,并通过实验验证了靶标信息采集的准确性。文献[10-11]利用LiDAR获取靶标参数计算靶标叶面积、叶面积密度,为对靶喷雾提供数据基础。

在自动对靶喷雾系统中,系统响应时间和喷雾车移动速度是影响对靶精度的主要因素。靶标识别、靶标参数计算、执行机构响应速度等问题都影响着系统响应时长,如何利用喷雾车速度来延时喷雾,以补偿系统响应时间成为对靶喷雾成功与否的关键问题^[12]。针对上述问题,研究者们主要采用固定延时法和自适应延时法补偿系统响应时间。固定延时法^[13-16]是根据人为设定的喷雾车移动速度,计算固定延时喷雾时间。此方法简单,但在实际果园环境中喷雾车无法保持匀速移动,容易造成脱靶现象。自适应延时法利用测速装置获取喷雾车实时速度,调整延时喷雾时间。自适应延时法中速度检测的策略大体分为:光电、霍尔转速传感器^[17-21]、全球定位系统^[22-25](Global positioning system, GPS)、雷达测速^[26-28]等。光电传感器与喷雾车传动装置相连接,

根据传动装置的转速计算喷雾车移动速度。此类设备对安装的要求较高,要专人操作。GPS测速需要在实际工作范围内建立基站,且前期投入和后期维护的成本较高。雷达测速的检测频率较高,但准确率不足且造价较高,安装位置和设备位姿需要专人调试。

文献[29]研制的基于激光雷达探测的变量喷雾控制系统,利用经验设定喷雾车速度,从而得到固定喷雾延时时间。在此基础上,本文分析系统响应时间,研究地速传感器(True ground speed sensor, TGSS)获得实时速度的算法,建立自适应延时喷雾模型,设计延时存储器暂存喷雾指令,延时计数器提取喷雾指令。模型可根据实时速度不断调整喷雾延时时间,以实现精准对靶喷雾。

1 整机结构与测速装置

1.1 整机结构

以文献[29]研制的变量喷雾控制系统为基础,设计了实时控制对靶喷雾系统,喷雾机结构示意图如图1所示,样机如图2所示。喷雾机结构主要包括行走机构、电器柜、药箱、探测装置、控制中心、电磁阀、喷头、风机、发电机组、地速传感器。

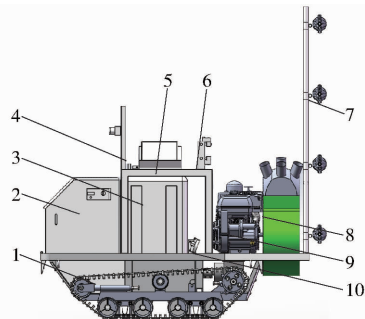


图1 喷雾机结构示意图

Fig. 1 Schematic of sprayer structure

1. 行走机构 2. 电器柜 3. 药箱 4. 探测装置 5. 控制中心
6. 电磁阀 7. 喷头 8. 风机 9. 发电机组 10. 地速传感器

喷雾机配备红外遥控器,可对喷雾机的启停、前进、后退、转弯、变速等方面进行遥控,行驶速度0.35~1.0 m/s可调。探测装置选用型号为UTM-30LX的2D-LiDAR,扫描范围270°,角度分辨率

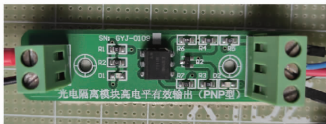


图 2 喷雾机样机
Fig. 2 Sprayer in kind

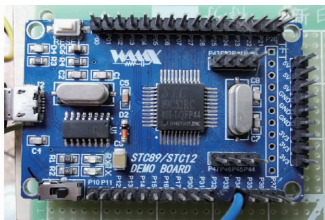
0.25°,可检测 1 081 个点,扫描周期 25 ms。为保证 LiDAR 探测两侧靶标的深度一致,LiDAR 安装在喷雾机中心前方,盲区垂直向下。控制中心的信息处理上位机选用 32 位的得利珑工业计算机(G530-N18),电磁阀控制器采用 STC12C5604AD 单片机。采用亚德客 2V025-08B 型号的电磁阀,频率为 10 Hz。采用五指风送式喷头,左右两边各 4 个,每个五指喷头具有 5 个喷头,共 40 个喷头,系统通过电磁阀的启闭控制喷头喷雾。



(a) 地速传感器



(b) 光电耦合隔离模块



(c) 单片机

图 3 测速装置

Fig. 3 Speed measuring device

2 对靶喷雾实时控制方法

2.1 自适应延时喷雾模型

自动对靶喷雾系统原理图如图 4 所示。信息处理上位机通过 USB 读取 LiADR 获取的靶标参数后计算喷雾指令,并保存到延时喷雾模型中。同时上位机根据喷雾车实时速度计算延时计数器,延时计数器将延时指数对应的喷雾指令取出并发送给电磁阀控制器,电磁阀控制器将其转化为 TTL 电平信号,控制电磁阀启闭。

自适应延时喷雾模型需要补偿的延时时间由系统的响应时间 t_{sys} 、LiDAR 与喷雾的水平距离和喷雾车当前速度 v 共同确定,公式为

$$t_{\text{comp}} = \frac{L}{v} - t_{\text{sys}} \quad (2)$$

式中 t_{comp} ——自适应延时喷雾模型需要补偿的时间,s

t_{sys} ——系统响应时间,s

L ——LiDAR 与喷雾的水平距离,m

1.2 测速装置

系统测速装置如图 3 所示,选用 TGSS-A,测量范围 0.13~19.68 m/s。TGSS 使用多普勒频移原理确定车辆的速度,喷雾车移动时 TGSS 发出方波信号,信号反射离开地面并被 TGSS 接收。当地面相对于传感器移动时,反射信号的频率会发生变化,通过测量频率变化来计算地面速度。TGSS 脉冲信号幅值为 12 V,无法直接作为单片机引脚的输入信号,需要使用单路光电耦合隔离模块进行信号转换。光电隔离模块输出端信号为 5 V,信号输出端与接地端并联一个 4.7 kΩ 的电阻,以便单片机检测方波信号。采用 STC89C52 单片机计算 TGSS 发出信号的频率,并将频率测量值发送给上位机计算当前车速

$$v = \frac{cf_d}{2\cos\theta f_o} \quad (1)$$

式中 f_d ——TGSS 发出的微波信号频率,Hz
 f_o ——标准收发器频率,24.125 GHz
 θ ——TGSS 的安装角,(°)
 c ——光速,299 792 458 m/s

为了保证系统有足够的响应时间,LiDAR 与喷头的实际距离需大于喷雾车在 t_{sys} 时间内以最大速度移动的距离,即

$$L \geq d = v_{\text{max}} t_{\text{sys}} \quad (3)$$

式中 v_{max} ——喷雾机行驶的最大速度,m/s
 d ——LiADR 与喷头的最小距离,m

自适应延时喷雾模型由延时存储器和延时计数器组成。延时存储器利用 FIFO 缓存区保存数据,每一层视为一个延时单元,可保存一组喷雾指令。延时存储器的大小由喷雾车以最小速度移动时需要补偿的延时时间与识别靶标时间共同决定,即

$$M = \left\lceil \frac{\frac{L}{v_{\text{min}}} - t_{\text{sys}}}{t_{\text{tar}}} \right\rceil \quad (4)$$

式中 $\lceil \rceil$ ——向上取整运算符号

M ——延时存储器单元数

v_{min} ——喷雾车最小的移动速度,m/s

t_{tar} ——识别靶标时间,s

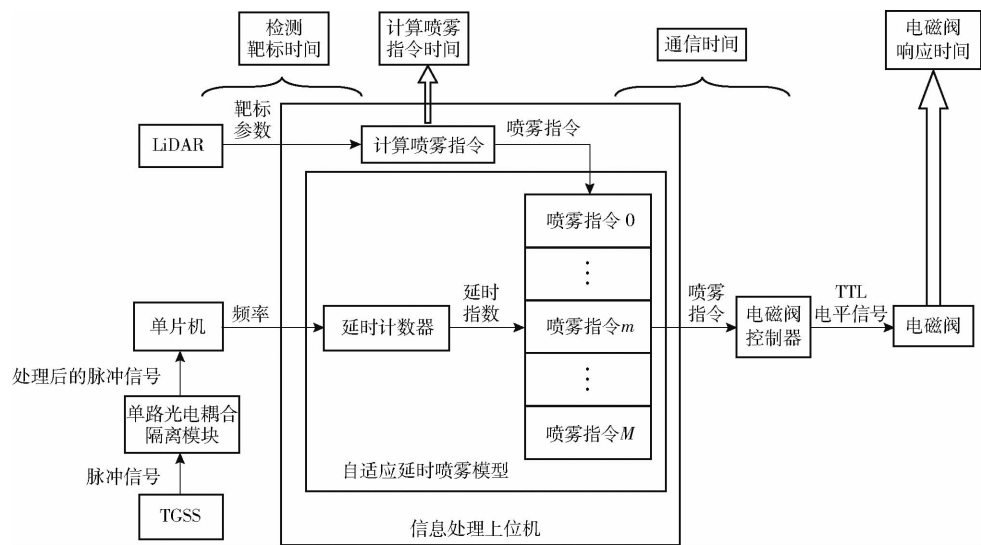


图4 自动对靶喷雾系统原理图

Fig.4 Schematic of automatic target spray system

当延时计数器取出喷雾指令后,延时存储器内所有单元的数据整体下降一层,新计算的喷雾指令保存到第0层延时单元。

延时计数器是当前喷雾车速度下需补偿的延时时间与检测靶标时间的比值,比值四舍五入取整,指向延时存储器的层数为

$$m = \left[\frac{t_{\text{comp}}}{t_{\text{tar}}} \right]$$

(5)

式中 m ——延时计数器层数

$[\]$ ——四舍五入取整运算符

2.2 系统响应时间

精准的系统响应时间是实现对靶喷雾的基础,系统响应时间主要由4部分组成,分别为:

(1)识别靶标时间 t_{tar} :为满足电磁阀响应周期,检测靶标时间需大于电磁阀响应时间,LiDAR 扫描周期小于电磁阀响应周期,上位机累积 n 帧靶标参数, n 向上取整为

$$n = \left\lceil \frac{1}{f\Delta t} \right\rceil$$

(6)

式中 f ——电磁阀频率,Hz

Δt ——LiDAR 的扫描周期,ms

$$t_{\text{tar}} = n\Delta t$$

(7)

(2)计算喷雾指令时间 t_{ins} :此部分时间是上位机将靶标参数转化为喷雾指令所用的时间。

(3)通信时间 t_{com} :此部分时间为信息处理上位机将喷雾指令发送给电磁阀控制器所用时间,实验平台采用串口通信的方式,通信时间为

$$t_{\text{com}} = \frac{8p}{B}$$

(8)

式中 B ——串口通信波特率,bit/s

p ——串口通信字节数

(4)电磁阀响应时间 t_{rad} :此部分是电磁阀接收到喷雾指令到喷头开始喷雾所需要的时间,可通过电磁阀响应测试实验获取。

系统响应时间为

$$t_{\text{sys}} = t_{\text{tar}} + t_{\text{ins}} + t_{\text{com}} + t_{\text{rad}}$$

(9)

2.3 测速算法

单片机测量频率的方法有 M 法和 T 法,M 法采用计算单位时间内的脉冲数得到频率,如图 5a 所示,但因为在测量时间 t_1 内首尾会存在半个脉冲的问题,会有 2 个脉冲的误差,单位时间内的脉冲数越少,误差所占的比例越大,因此 M 法适合测量较高频率;T 法是测量相邻两个脉冲的时间 t_2 得到方波频率,如图 5b 所示,因存在半个时间单位的问题,可能会有 1 个时间单位的误差,测得的周期越小,误差所占比例越大,T 法适合测量较低频率。利用 M 法、T 法测量频率时的误差分别为

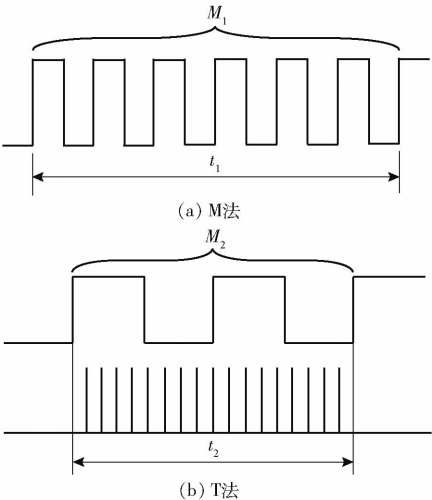


图5 测频原理图

Fig.5 Frequency measurement principle diagrams

$$\varepsilon_M = \frac{f_M - (f_M - 2)}{f_M} = \frac{2}{f_M} \quad (10)$$

式中 ε_M ——M 法测量频率的误差

f_M ——振荡源频率, Hz

$$\varepsilon_T = \frac{\frac{1}{T_0 - 1} - \frac{1}{T_0}}{\frac{1}{T_0}} = \frac{1}{T_0 - 1} \quad (11)$$

式中 ε_T ——T 法测量频率的误差

T_0 ——相邻两个脉冲的时间, s

在测量频率误差要求小于 5% 时, 采用 M 法测量, 振荡源频率最小为 40 Hz, 采用 T 法测量, 振荡源频率最大为 47 Hz。

当确定 TGSS 的安装角后, 公式(1)中 $c f_o$ 、 $\cos\theta$ 可视为定值, 此时方波信号的频率与车速成正比, 即

$$v = \frac{c f_d}{2 \cos\theta f_o} f_d = k f_d \quad (12)$$

式中 k ——频率和车速的比例系数

因此, 为减小由 TGSS 安装角带来的计算误差, 可通过线性回归拟合出频率和车速之间的关系。

3 试验与结果分析

试验平台采用 C/C++ 语言编写上位机控制软件; 电磁阀控制器软件采用单片机语言 C51 编程, 实现喷雾指令接收与喷头启闭控制。自适应延时喷雾模型中延时存储器的大小由系统响应时间确定; 为获得准确的延时指数, 进行测频算法比较和测速参数估计试验; 通过喷雾实时控制试验验证了系统的整体有效性, 并检测了系统的最小可识别间距。

3.1 系统响应时间测量

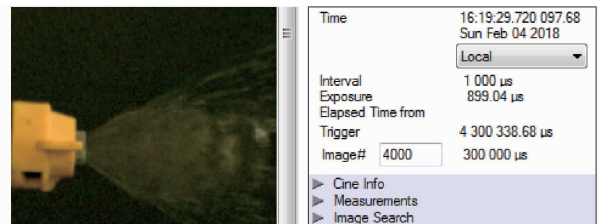
系统响应时间测量方法见文献[29]。为了保证电磁阀有足够的响应时间, 识别靶标时间需大于电磁阀响应时间, 试验平台使用的电磁阀频率为 10 Hz, 由公式(6)可得上位机至少累积 4 帧靶标信息, 即 $n=4$, 由公式(7)可得识别靶标时间 $t_{tar}=100$ ms。

计算喷雾指令时间可利用 time.h 头文件中的时钟函数测量, 该函数最小可测量 1 ms。设 $start = clock()$ 为识别靶标参数结束时刻, 即计算喷雾指令开始时刻, 设 $end = clock()$ 为靶标转为喷雾指令结束时刻, 两者之间的差值即为计算喷雾指令所用的时间 t_{ins} , 经测量计算喷雾指令时间不足 1 ms, 可忽略不计。

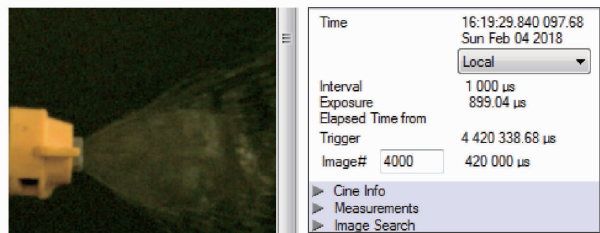
试验平台信息处理上位机与电磁阀控制器之间的通信采用 24 位异步串口通信, 通信数据包含 1 位起始位、1 位喷头个数位、1 位地址位、20 位数据位、1 位累加和校验位。上位机分别发送左右各 20 喷

头的喷雾指令, 共 48 字节, 串口波特率为 9 600 bit/s, 通信时间为 $t_{com}=40$ ms。

利用美国 VRI 的 Phantom 系列高速摄影仪确定电磁阀响应时间, 记录喷头喷水状态, 设置拍摄频率为 1 000 f/s。用串口助手软件向电磁阀控制器每隔 0.1 s 发送一次喷雾指令。获取喷头喷雾效果相同的相邻帧图片对应的时间, 图 6 所示为 6 V 电压的试验结果。计算 3 次试验结果的平均值, 电压为 6、9、12 V 时的响应周期均为 120 ms。



(a) 同周期开始状态



(b) 同周期结束状态

图 6 电磁阀响应试验结果

Fig. 6 Response test results of solenoid valve

电磁阀响应周期为 120 ms, 其中串口助手发送喷雾指令周期为 100 ms, 电磁阀响应周期大于其额定周期, 主要原因是电磁阀的电信号能够达到 100 ms 响应一次, 但其机械结构响应滞后于电信号响应。

系统响应时间为 160 ms, 试验平台 LiDAR 与喷头水平距离为 $L=1.5$ m, 最小速度为 0.35 m/s, 由公式(4)得到延时存储器的单元个数 $M=42$ 。

3.2 测速算法比较

本试验旨在比较单片机分别采用 M 法、T 法计算 TGSS 输出信号频率的准确性。试验利用 Proteus 进行仿真, 仿真电路图见图 7, 使用 DPULSE 代替 TGSS 作为信号源。喷雾车行驶速度为 0.35 ~ 1.0 m/s, TGSS 输出信号频率的范围为 46 ~ 132 Hz, 所以将 DPULSE 频率分别设置 20、40、60、80、100、120、140、160、180、200 Hz, 利用 LCD 显示频率测量结果。

单片机采用 M 法、T 法计算频率的结果见表 1, 相对误差变化曲线见图 8。采用 M 法测量的频率略小于振荡源频率, 误差随着频率增高而增大; 采用 T 法测量的频率大于振荡源频率, 且误差较大。综上所述, 单片机采用 M 法测量 TGSS 信号频率。

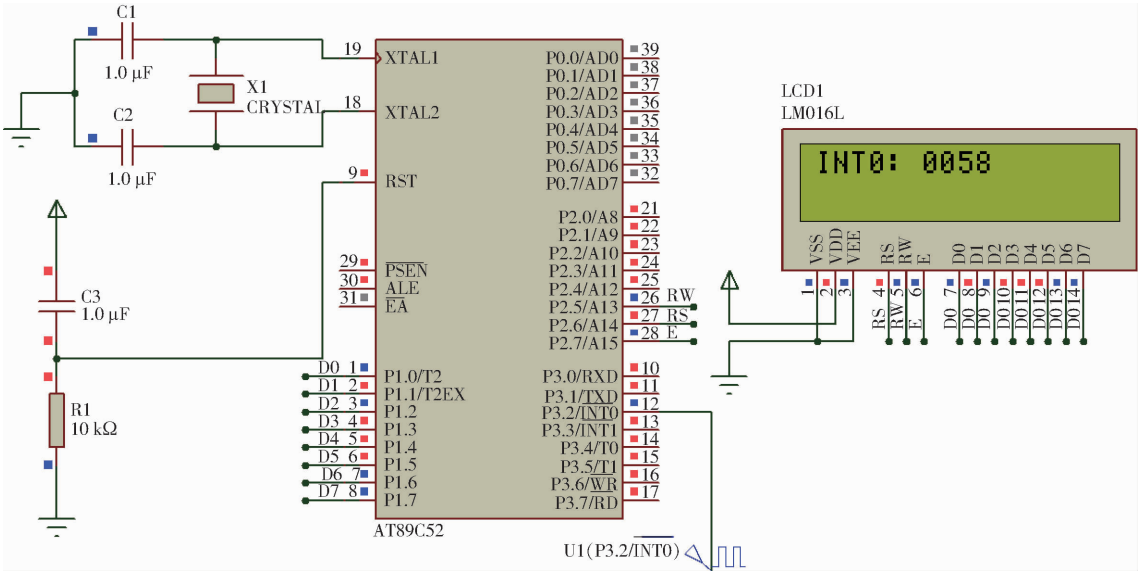


图 7 Proteus 仿真电路图

Fig.7 Proteus simulation circuit diagram

表 1 M 法、T 法计算的频率

Tab.1 Frequency value calculated by M method and T method		
T method		Hz
振荡源频率	M 法	T 法
20	20	24
40	39	55
60	58	100
80	77	86
100	97	125
120	116	181
140	135	250
160	153	181
180	173	222
200	191	285

考,让喷雾车以 5 种不同车速直线行驶,并记录行驶时间。STC89C52 单片机计算 1 s 内传感器输出信号的频率值,并使用串口助手读取保存数据,保存格式为 txt。由于喷雾车开始启动时会有一个加速的过程,所以在起点线前 1~2 m 处开始行驶。

不同速度行驶下的平均频率见表 2。当频率为 0 时,即喷雾车没有移动,此时速度应为 0 m/s,所以在拟合曲线时加入速度为 0 的点。试验结果散点及拟合曲线见图 9,拟合优度 $R^2 = 0.999\ 8$,拟合方程为

$$v = 0.009\ 9f_d \tag{13}$$

表 2 速度传感器试验结果

Tab.2 Experimental results of speed sensor		
时间/s	平均频率/Hz	速度/(m·s ⁻¹)
10. 23	99	0. 977 5
14. 26	70	0. 701 3
17. 65	57	0. 566 6
17. 75	56	0. 563 4
27. 26	37	0. 366 8

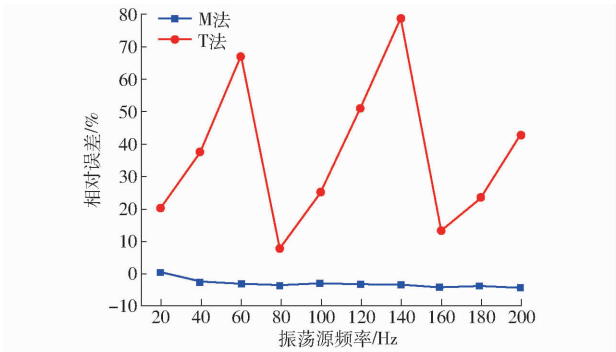


图 8 测频相对误差变化曲线

Fig. 8 Relative error of frequency measurement

3.3 测速参数估计

本试验旨在拟合喷雾车移动速度与 TGSS 输出信号频率之间的关系,减小由 TGSS 的安装角度带来的速度计算误差。为了使喷雾车能够平稳移动,选择在平坦的水泥路面上试验。试验时,在路面上用卷尺测量 10 m 的直线距离,并分别于起点及终点位置做标记线。以喷雾车的车头同一位置作为参

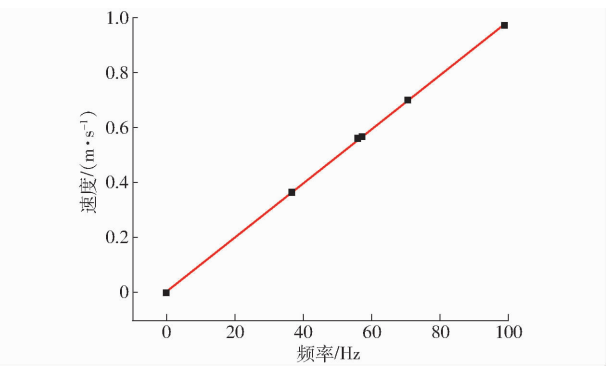


图 9 频率-速度拟合曲线

Fig. 9 Frequency - speed fitting straight line

3.4 喷雾实时控制

本试验旨在验证实时控制对靶喷雾系统的整体有效性以及测量喷雾车在行驶时可识别的最小间距。靶标为 6 个 300 mm × 300 mm 木板,将其固定在木制支架上,木板中心位置高 1 m,且位于同一直线,形成 5 个空隙,靶标与喷雾车行驶方向平行。靶标间距设定为 50、80、100、120、150、180 mm,传感器与靶标水平距离为 2 m,每种靶标间距均以低速、中速、高速进行测量,低速、中速、高速范围分别为 0.35 ~ 0.5 m/s、0.5 ~ 0.8 m/s、0.8 ~ 1.0 m/s。将喷雾机靠近靶标一侧的最下方喷头对准地面,并去除喷芯,使其喷射出细水柱,其余喷头关闭,通过观测靶标下方水痕确定靶标识别精度,如图 10 所示。

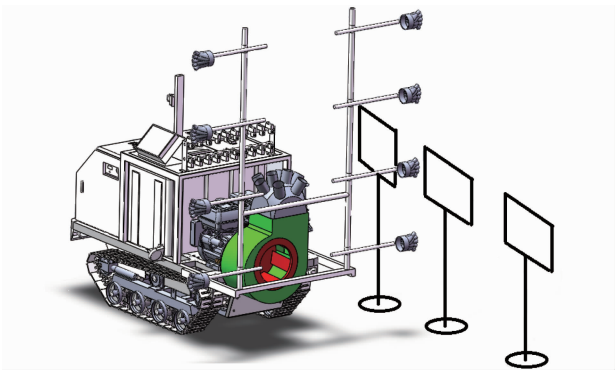


图 10 靶标间距测试布局图
Fig. 10 Layout of target spacing test

由系统响应时间测量试验得到系统响应时间为 $t_{sys} = 160\text{ ms}$,测量靶标间距的喷雾车速度见表 3,系统在不同速度下理论可识别靶标间距见表 4。实际工作时由于试验环境、设备震动、水在管道里的流速等影响,实际的系统可识别间距大于理论间距。

表 3 测量靶标间距的喷雾车速度

Tab.3 Speed of spray truck for measuring distance between target			
	m/s		
靶标间距/mm	低速	中速	高速
50	0.384	0.600	0.957
80	0.392	0.574	0.848
100	0.376	0.557	0.882
120	0.392	0.574	0.941
150	0.373	0.596	0.905
180	0.385	0.577	0.972

系统可识别的靶标间距测量结果见表 5。由表 5 可知,靶标间距小于 80 mm,系统无法识别;靶

表 4 系统在不同速度下理论可识别间距
Tab.4 Oretically identifiable spacing of system at different speeds

速度/(m·s ⁻¹)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
理论间距/mm	64	80	96	112	128	144	160

表 5 靶标识别间距测试结果
Tab.5 Test results of target recognition spacing

靶标间距/mm	低速	中速	高速
50	×	×	×
80	✓	×	×
100	✓	✓	×
120	✓	✓	×
150	✓	✓	×
180	✓	✓	✓

注: × 表示不能识别该间距;✓ 表示能够识别该间距。

标间距大于等于 180 mm,系统均可识别;说明系统最小识别间距介于 80 ~ 180 mm 之间。当喷雾车以低速行驶时,系统可识别的靶标间距在 50 ~ 80 mm 之间,大于在速度 0.4 m/s 下的理论靶标间距;当喷雾车以中速行驶时,系统的靶标间距识别在 80 ~ 100 mm 之间,大于在速度 0.6 m/s 下的理论靶标间距;当喷雾车以高速行驶时,系统的靶标间距识别在 120 ~ 150 mm 之间,大于在速度 0.9 m/s 下的理论靶标间距;说明实时控制对靶喷雾系统识别靶标间距的能力随着速度的提升而降低。

4 结论

(1)根据喷雾车实时速度建立了自适应延时喷雾模型,由延时存储器 and 延时计数器组成,延时存储器可暂存喷雾指令,延时计数器指向延时存储器的地址并取出喷雾指令发送至电磁阀控制器,实现实时控制对靶喷雾。

(2)分析了系统响应时间,主要包括识别靶标时间、计算喷雾指令时间、通信时间、电磁阀响应时间,利用软件、高速摄影仪等测量了各部分时间,试验结果表明系统响应时间 $t_{sys} = 160\text{ ms}$ 。

(3)设计喷雾车速度检测系统,利用 TGSS、单路光电耦合隔离模块、单片机检测速度,通过仿真验证了单片机采用 M 法计算频率的误差较小;拟合 TGSS 信号频率与喷雾车速度之间的函数关系 $v = 0.009\ 9f_d$,拟合优度为 $R^2 = 0.999\ 8$ 。

参 考 文 献

[1] 何雄奎. 植保精准施药技术装备[J]. 农业工程技术, 2017, 37(30): 22 – 26.
[2] 刘金龙,丁为民,邓巍. 果园对靶喷雾红外探测系统的设计与试验[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(12): 370 – 372.
[3] 姜红花,白鹏,刘理民,等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 189 – 195.
JIANG Honghua, BAI Peng, LIU Limin, et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 189 – 195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s029&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.

- issn. 1000-1298. 2016. S0. 029. (in Chinese)
- [4] 李丽, 李慧. 基于计算机图像处理的自动对靶精准施药平台研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(10): 211–215.
LI Li, LI Hui. Research on precision platform of automatic target-matching drug application based on computer image processing [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(10): 211–215. (in Chinese)
- [5] LLORENS J, GIL E, LLOP J, et al. Ultrasonic and LIDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: advances to improve pesticide application methods[J]. Sensors, 2011, 11(2): 2177–2194.
- [6] 南玉龙, 张慧春, 徐幼林, 等. 农林仿形对靶喷雾及其控制技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, 31(4): 54–58.
NAN Yulong, ZHANG Huichun, XU Youlin, et al. Research progress on profiling target spray and its control technology in agriculture and forestry[J]. World Forestry Research, 2018, 31(4): 54–58. (in Chinese)
- [7] LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Design and experiment of variable rate orchard sprayer based on laser scanning sensor[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(1): 101–108.
- [8] 李秋洁, 徐波, 束义平, 等. LiDAR 探测自动对靶喷雾控制系统设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(8): 65–71.
LI Qiujie, XU Bo, SHU Yiping, et al. Design of automatic target spray control system based on LiDAR [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(8): 65–71. (in Chinese)
- [9] CAI Jichen, WANG Xiu, SONG Jian, et al. Development of real-time laser-scanning system to detect tree canopy characteristics for variable-rate pesticide application[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 155–163.
- [10] 李秋洁, 袁鹏成, 邓贤, 等. 基于移动激光扫描的靶标叶面积计算方法[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 192–198.
LI Qiujie, YUAN Pengcheng, DENG Xian, et al. Calculation method of target leaf area based on mobile laser scanning [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 192–198. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200521&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.021. (in Chinese)
- [11] 张美娜, 吕晓兰, 邱威, 等. 基于三维激光点云的靶标叶面积密度计算方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 172–178.
ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, QIU Wei, et al. Calculation method of leaf area density based on three-dimensional laser point cloud [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 172–178. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171121&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.021. (in Chinese)
- [12] SHEN Yue, ZHU Hepin, LIU Hui, et al. Delay times of a LiDAR-guided precision sprayer control system [C] // ASABE Annual International Meeting, Kansas City, Missouri, 2013.
- [13] 李井祝, 朱凤武. 基于 PLC 自动对靶喷雾控制系统的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(8): 55–58.
LI Jingzhu, ZHU Fengwu. Design and experiment of automatic targeting spraying control system based on PLC [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(8): 55–58. (in Chinese)
- [14] 许林云, 张昊天, 张海峰, 等. 果园喷雾机自动对靶喷雾控制系统研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 1–9.
XU Linyun, ZHANG Haotian, ZHANG Haifeng, et al. Development and experiment of automatic target spray control system used in orchard sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22): 1–9. (in Chinese)
- [15] 徐波, 李秋洁, 束义平, 等. WiFi 遥控精确对靶喷雾控制系统设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 51–57.
XU Bo, LI Qiujie, SHU Yiping, et al. Design of accurate target spray system remote controlled through WiFi [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 51–57. (in Chinese)
- [16] 束义平, 李秋洁, 周宏平, 等. 基于激光雷达探测的变量喷雾控制系统设计[J]. 林业工程学报, 2020, 5(1): 139–147.
SHU Yiping, LI Qiujie, ZHOU Hongping, et al. Design of variable rate spray control system based on LiDAR detection [J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(1): 139–147. (in Chinese)
- [17] 李井祝, 朱凤武. 喷雾机行走路径示教及再现控制系统设计[J]. 河北农机, 2018(11): 13–14.
- [18] 刘理民, 张晓辉, 石光智, 等. 多态自动对靶风送式喷雾试验台的设计与试验[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 260–263.
LIU Limin, ZHANG Xiaohui, SHI Guangzhi, et al. Design and test of polymorphic automatic target air-blast spray test-bed [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(13): 260–263. (in Chinese)
- [19] 张美娜, 吕晓兰, 雷晓晖. 可移植的对靶喷雾控制系统设计与试验[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(5): 1182–1187.
ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, LEI Xiaohui. Design and testing on a transplantable target spraying control system for the spraying machine [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2017, 33(5): 1182–1187. (in Chinese)
- [20] CAI J, WANG X, GAO Y, et al. Design and performance evaluation of a variable-rate orchard sprayer based on a laser-scanning sensor[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(6): 51–57.
- [21] 许绩彤. 果园实时混药风送式变量喷雾系统研制[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
XU Jitong. Research on orchard on-line mixing for air-assisted variable rate spray system [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [22] 曹旻罡, 张漫, 马文强, 等. RTK-GPS 系统设计及 VRS 差分方式分析比较[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊): 141–145.
CAO Mingang, ZHANG Man, MA Wenqiang, et al. Development of RTK-GPS receiver system and comparison of VRS differential modes [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Suppl.): 141–145. (in Chinese)
- [23] 马景宇, 潘瑜春, 赵春江, 等. 基于 GPS 和 GIS 的农田变量喷药控制系统[J]. 微计算机信息, 2006(4): 85–87.
MA Jingyu, PAN Yuchun, ZHAO Chunjiang, et al. A control system for field variable spraying based on GPS and GIS [J]. Microcomputer Information, 2006(4): 85–87. (in Chinese)
- [24] 何勇, 方慧, 冯雷. 基于 GPS 和 GIS 的精细农业信息处理系统研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 145–149.
HE Yong, FANG Hui, FENG Lei. Information processing system for precision agriculture based on GPS and GIS [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 145–149. (in Chinese)
- [25] 王新忠, 王熙, 王智敏, 等. 黑龙江垦区精准农业两种 GPS 差分方式比较研究[J]. 中国农机化, 2004, 25(6): 75–77.
- [26] CHEN Y, ZHU H, OZKAN H E. Development of a variable-rate sprayer with laser scanning sensor to synchronize spray outputs to tree structures [J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(3): 773–781.
- [27] TIAN Lei. Development of a sensor-based precision herbicide application system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2): 133–149.
- [28] CARRARA M, COMPARETTI A, FEBBO P, et al. Spatially variable rate herbicide application on durum wheat in sicily [J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 387–392.
- [29] 束义平. 基于激光雷达探测技术的果园变量喷雾控制系统研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
SHU Yiping. Research on control system of orchard variable-rate spray based on LiDAR detection technology [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018. (in Chinese)