

连栋温室分段变距喷雾机器人设计与试验

李天华^{1,2} 董广胜¹ 姚玉康¹ 张观山^{1,2} 王德伦³ 施国英^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018;
3. 泰安市质量技术监督检测研究院, 泰安 271000)

摘要: 针对国内连栋温室缺乏植保喷雾机、机械走直定位与换轨转向精度低等问题, 设计了一种连栋温室分段变距喷雾机器人, 在实现无人化喷药的同时提高作业精度。为满足连栋温室机械作业路轨结合、精准切换的要求, 提出一种通用型移动底盘, 并确定其关键设计参数; 为减少底盘上下轨时的偏移量, 设计轨上矫正装置, 通过分析计算及试验验证, 确定其安装余量为 4 mm; 针对底盘对轨误差大的问题, 提出一种二维码融合陀螺仪及光电传感器双向垂直寻迹的路面关键点定位与转向控制方法。设计分段变距喷雾装置, 提出一种丝杆滑台驱动的喷杆变距方案, 分析校验其驱动参数以满足工作要求; 基于滚针轴承设计喷杆辅助防抖装置, 减小因喷杆剧烈抖动带来的滑台与喷杆损伤。开发底盘运动及分段变距喷雾控制系统, 实现喷雾机器人在连栋温室内的全程自动化作业。最后, 对样机进行底盘性能与喷雾效果试验。底盘作业时直线行走与对轨误差平均值分别为 4.8、5.8 mm, 满足控制精度要求; 避障距离为 34 cm, 满足安全性要求; 防抖装置的安装使喷杆行进方向的抖动量从 $-1^{\circ} \sim 1.3^{\circ}$ 降低到 $\pm 0.4^{\circ}$ 内, 喷头方向的抖动量从 $\pm 0.5^{\circ}$ 降低到 $\pm 0.3^{\circ}$ 内, 防抖效果显著; 分段变距喷雾作业后, 盛果期番茄叶片正面雾滴沉积量为 $1.76 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, 反面沉积量为 $0.2 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, 雾滴体积中径在 $100 \sim 180 \mu\text{m}$ 之间, 满足作业要求。

关键词: 连栋温室; 喷雾机器人; 扫码定位; 分段喷雾; 变距喷雾

中图分类号: S224.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)02-0170-10

OSID:



Design and Experiment of Segmented and Variable Distance Spraying Robot for Multi-span Greenhouse

LI Tianhua^{1,2} DONG Guangsheng¹ YAO Yukang¹ ZHANG Guanshan^{1,2} WANG Delun³ SHI Guoying^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China

3. Taian Institute of Quality and Technology Inspection and Testing, Taian 271000, China)

Abstract: In response to the lack of connected greenhouse plant protection spraying machines, low precision in mechanical straight-line positioning and rail switching, a segmented and variable distance spraying robot was designed for multi-span greenhouses to achieve unmanned spraying while improving operational precision. To meet the requirements of combining road and track operation and precise switching for mechanical operations in multi-span greenhouses, a universal mobile chassis was proposed with its key design parameters determined. To reduce deviations during chassis movement along the upper and lower rails, a rail correction device was designed. Through analysis, calculations, and experimental validation, an installation clearance of 4 mm was established as suitable. Considering the significant chassis tracking errors, a road surface key point positioning and steering control method combining QR codes, gyroscopes, and photoelectric sensors was proposed. The design of the segmented and variable distance spraying device involved proposing a screw slide table-driven spray boom with variable-distance capabilities. The driving parameters were analyzed and validated to meet the operational requirements. Additionally, an auxiliary anti-vibration device based on roller bearings was developed to reduce damage caused by severe vibration of the spray rod. The chassis motion and segmented and variable distance spraying control system were developed to enable full automation of the spraying robot within multi-span

收稿日期: 2023-07-13 修回日期: 2023-08-22

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2022CXGC020708, 2019JZZY020620)和山东省蔬菜产业技术体系项目(SDAIT-05-11)

作者简介: 李天华(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能农机装备研究, E-mail: lth5460@163.com

通信作者: 施国英(1980—), 女, 高级实验师, 主要从事设施机械与农机装备研究, E-mail: sgy509@sdau.edu.cn

greenhouses. Finally, performance and spray effect tests were conducted on the prototype, yielding the following results; the average straight-line travel error and tracking error of the chassis were 4.8 mm and 5.8 mm, respectively, meeting the requirements for control precision. The obstacle avoidance distance was 34 cm, ensuring safety. The installation of the anti-vibration device reduced the vibration in the travel direction of the spray rod from -1° to 1.3° to within $\pm 0.4^{\circ}$ and limited the vibration in the nozzle direction from $\pm 0.5^{\circ}$ to within $\pm 0.3^{\circ}$, demonstrating significant improvement in anti-vibration effectiveness. Following segmented and variable distance spraying, the deposition of mist droplets on the front surface of tomato leaves during the fruiting stage was approximately $1.76 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, while the back surface achieved approximately $0.2 \mu\text{L}/\text{cm}^2$ of deposition. The mist droplet volume median diameter ranged from $100 \mu\text{m}$ to $180 \mu\text{m}$, meeting the operational requirements.

Key words: multi-span greenhouse; spray robot; scan code positioning; segmented spray; variable distance spray

0 引言

温室病虫害多发是严重制约农作物产量和经济发展的重要因素^[1],喷洒农药是目前病虫害防治中最高效的手段^[2-3]。在连栋温室内喷洒药液过程中普遍存在定量、无差别喷雾的现象,因此提高农药喷洒效率、减少药液浪费是当前亟需解决的难题。

围绕温室植保机械,国外学者不仅对小型化背负式喷雾设备^[4-6]进行了改良,还对温室智能化喷雾设备的精确喷雾、自动导航等进行了较多研究。REFIGH 等^[7]利用温室内部搭建的标准化热水管道作为移动轨道,设计了一款自动装置对两侧同时喷雾,提高了作业效率。HEJAZIPOOR 等^[8]设计了一种使用 Kinect v.1 相机采集植株冠层体积的智能喷雾机器人,通过估算冠层体积进行对靶喷雾。CANTELLI 等^[9]开发了一种能够在温室与田地中作业的履带式植保机器人,利用立体摄像头并融合多传感器技术,实现在复杂环境下自主导航植保作业。HEIDARI 等^[10]利用温室喷雾移动机器人验证了基于路径学习的导航算法,其自主学习算法的直线与方形路径导航精度偏差低于人工遥控方式。

我国温室喷洒农药的方式仍然以人工或半自动机械喷雾为主,存在效率低、成本高、难以实现人药分离、喷洒随机性高、药液利用率低等问题^[11-14]。部分研究学者与机构对植保喷雾机械静电喷雾、变距喷雾、风送喷雾及自动导航等关键技术^[15-20]进行了相关研究。吴亚奎等^[21]设计了嵌入式远程喷雾控制系统,通过采集植株冠层信息,改变风送喷雾距离,实现变距离对靶喷雾。石雨欣等^[22]针对内部无行走通道的温室设计了一种手推式离心雾化喷雾机,采用离心雾化技术配合气流辅助喷雾方式,进行远距离风送喷雾。马国义等^[23]结合风送喷雾及远程遥控技术,设计了一种温室履带式自走喷雾机。北京农业智能装备技术研究中心^[24]设计了一款应用于大型玻璃温室的植保喷雾机器人,采用 SLAM

(Simultaneous localization and mapping) 技术实现室内导航作业,但没有对不同高度植株变量喷雾展开研究。苏州博田自动化技术有限公司^[25]也根据双行保温管道的铺设特点,研制了轨道喷雾机器人,使用视觉结合 RFID (Radio-frequency identification) 标签定位的方式实现导航作业,使用超声波传感器检测植株高度以达到精准对靶喷雾的目的。

综上所述,国内所应用的温室植保喷雾设备正从手动式向半自动、全自动化方向发展,但是大多数植保喷雾机械需要人工辅助作业,自动化、智能化植保喷雾设备仍处于研究试验阶段。本研究拟提出一种连栋温室分段变距喷雾机器人,实现基于作物高度与植株生长特性的自动喷雾作业。

1 整机结构与参数

喷雾机器人包括上部喷雾系统和下部通用移动底盘。喷雾系统主要包括双边移动喷杆装置、供水调压装置及终端控制装置等。通用移动底盘主要包括方管框架、直流电机、轨道轮、主动轮、万向轮及多种传感器等。三维模型如图 1 所示,相关设计参数如表 1 所示。

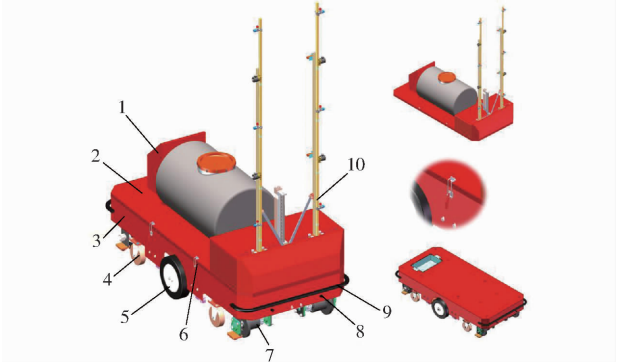


图 1 喷雾机器人三维模型图

Fig.1 3D model diagram of spray robot

- 1. 终端控制装置 2. 喷雾系统 3. 通用移动底盘 4. 万向轮
- 5. 主动轮 6. 卡扣 7. 轨道轮 8. 超声波传感器 9. 防撞条
- 10. 双边移动喷杆

表 1 喷雾机器人设计参数

Tab.1 Design parameters of spray robot

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	1 750×718×2 458
整机最大质量/kg	500
最大载药液量/L	200
地面行驶最大速度/(m·s ⁻¹)	1.2
轨道行驶最大速度/(m·s ⁻¹)	0.5
连续工作时长/h	5
喷杆调节距离/cm	0~25
喷雾压力/MPa	0.3~0.5
喷幅/m	2.1
作业效率/(km ² ·h ⁻¹)	2.5

2 关键部件设计与分析

2.1 通用移动底盘

设计通用移动底盘以满足连栋温室机械“路轨结合”移动方式要求,在行间作业时以双行保温管道为行走轨道,换行时在室内路面行走、转向。通用移动底盘结构如图 2 所示。

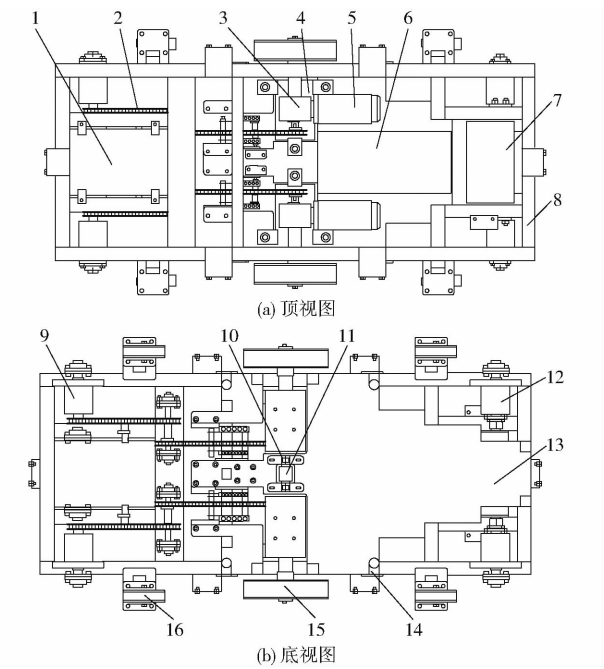


图 2 通用移动底盘结构简图

Fig.2 Structural diagrams of universal mobile chassis

1. 配重 2. 链条 3. 减速器 4. 减振器 5. 直流电机 6. 锂电池 7. 控制箱 8. 方管框架 9. 主动轨道轮 10. 光电传感器 11. 扫码模块 12. 从动轨道轮 13. 连接底板 14. 轨上矫正装置 15. 行走主动轮 16. 万向轮

2.1.1 行走驱动设计

通用移动底盘由两台直流电机提供动力,经减速器连接主传动轴,主传动轴一端连接行走主动轮,另一端连接链轮。主动轨道轮由两级链传动驱动,与从动轨道轮组成四轮系统,满足轨道行走要求。

此外,4 个万向轮用于地面行走的辅助支撑。移动底盘行驶阻力为^[26]

$$F = F_f + F_r + F_a + F_q$$
 (1)

其中
$$F_f = fm_0g$$
 (2)

$$F_r = m_0g\sin\beta_0$$
 (3)

$$F_a = m_0a_0$$
 (4)

式中 F ——底盘运行时克服的阻力,N
 F_f ——地面滚动摩擦力,N
 F_r ——坡度阻力,N F_a ——加速阻力,N
 F_q ——空气阻力,忽略不计,N
 f ——滚动阻力系数,取 0.018
 m_0 ——整机最大质量,取 500 kg
 g ——重力加速度,取 9.8 m/s²
 β_0 ——地面坡度,取 3°
 a_0 ——最大加速度,取 0.3 m/s²

经计算,底盘需要克服的阻力 F 为 495 N。单个电机扭矩 T_0 、转速 n_0 、功率 P_0 需满足

$$T_0 = \frac{Fd_0}{4\eta_0i}$$
 (5)

$$n_0 = \frac{60vi}{\pi d_0}$$
 (6)

$$P_0 = \frac{T_0n_0}{9\,550}$$
 (7)

式中 d_0 ——车轮直径,取 0.3 m
 η_0 ——传动效率,取 0.9
 i ——减速比,取 30
 v ——设计运行速度,取 1.2 m/s

经计算,满足条件的电机扭矩 T_0 为 1.4 N·m,转速 n_0 为 2 291 r/min,功率 P_0 为 0.34 kW。选型时留出适量余量,最终选择的电机额定扭矩为 1.7 N·m,功率为 0.5 kW,转速为 2 800 r/min。

2.1.2 轨上矫正装置

轨上矫正装置如图 3 所示,由 4 个直角轴承构成,通过 U 形螺栓分别固定于左右两侧车架上。单个直角轴承由滚针轴承与支架构成,滚针轴承通过螺栓固定于支架上。每个直角轴承可上下自由调节,将滚针轴承中部调节至保温管道中部水平切面位置,以防止脱轨;同时,通过调整双孔垫片个数调



图 3 轨上矫正装置

Fig.3 Angle correction device on rail

节滚针轴承与管道间的距离。

底盘上轨整体偏到极限位置,即对角线轨上矫正装置的滚针轴承同时接触轨道时,车身达到最大偏差角。如图 4 所示,以底盘处于轨上右偏极限位置进行分析,图中竖直虚线为双行保温管道中心线,矫正装置的 4 个滚针轴承中心点构成长方形 4 个顶点。图中 L 表示侧边两个直角轴承机构中心间距,mm; γ 表示偏差角, ($^{\circ}$); K 表示左右两个轨上矫正装置轴承机构中心距离,mm; r 表示滚针轴承半径,mm; J 表示双行保温管道距离,mm。

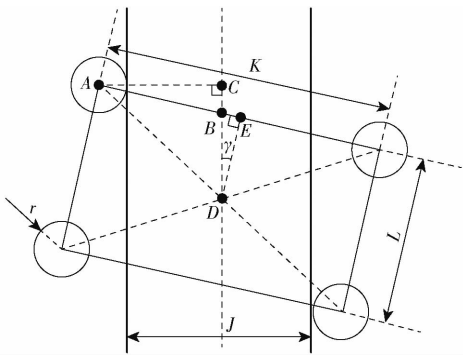


图 4 右偏极限位置示意图

Fig. 4 Diagram of right deviation limit position

由图 4 可知, $\triangle ABC \sim \triangle DBE$, 可得

$$\frac{\frac{K}{2} - \frac{L}{2} \tan \gamma}{\frac{L}{2 \cos \gamma}} = \frac{\frac{J}{2} + r}{\frac{L}{2}} \quad (8)$$

将 $L = 500 \text{ mm}$ 、 $J = 600 \text{ mm}$ 、 $r = 20 \text{ mm}$ 代入式(8)中,整理可得左右两个轨上滚针轴承中心的水平间距 K 与偏差角 γ 的关系为

$$K = \frac{640 + 500 \sin \gamma}{\cos \gamma} \quad (9)$$

底盘与轨道两者中心线重合时,单边轨上滚针轴承外边缘与保温管道的距离为

$$M = \frac{K - J}{2} - r \quad (10)$$

结合上下轨精度要求,偏差角 γ 范围为 $0^{\circ} \sim 2^{\circ}$,符合偏差角要求的 M 最大值为 8.9 mm 。可减小 M 提高矫正效果,但 M 过小会出现卡轨导致上轨失败。经测试,在 $M = 4 \text{ mm}$ 时,可以兼顾上轨矫正精度与成功率。上轨矫正效果如图 5 所示,由图可知,安装与未安装矫正装置均在上轨初始阶段产生较大波动,这是因为主动轨道轮刚上轨时,矫正装置尚未接触轨道。当轨上矫正装置接触轨道后,可以明显抑制喷雾机器人摆动,限制其偏差角,使其顺利上轨。

2.1.3 路面定位系统

(1) 路面定位标志

路面定位标志由黑色十字标及位于其交叉中心

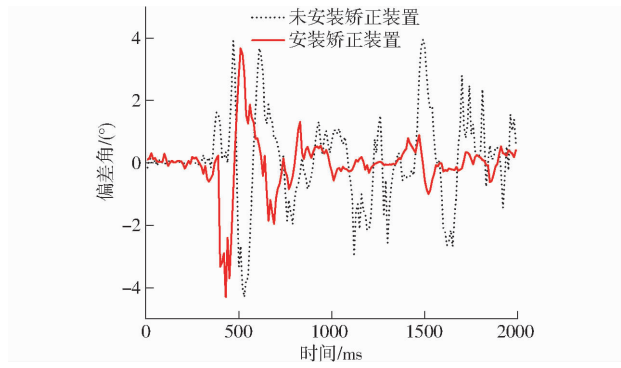


图 5 上轨矫正效果

Fig. 5 Effect diagram of upper rail correction

的二维码组成,如图 6 所示。竖直短划线为作物行间保温管道中心线,水平点划线为地面通道底盘行走中轴线,两条线相交点即为定位标记铺设位置。其中,二维码用于标记轨道编号及路轨切换信息;黑色十字标用于喷雾机器人的转向校准,解决因路面不平整、建设误差等原因造成的机器人跑偏问题。

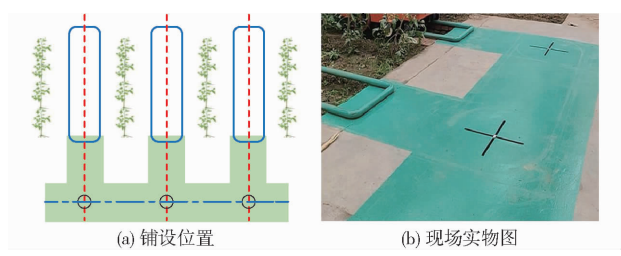


图 6 路面定位标志

Fig. 6 Road positioning signs

(2) 底盘定位传感器

底盘定位传感器由扫码模块与光电传感器阵列组成。扫码模块扫描二维码,以获取编号信息;光电传感器阵列检测黑色十字标,进行车身角度调整,增加对轨准确性。底盘定位传感器安装于移动底盘底面的中心位置,排列方式如图 7 所示。

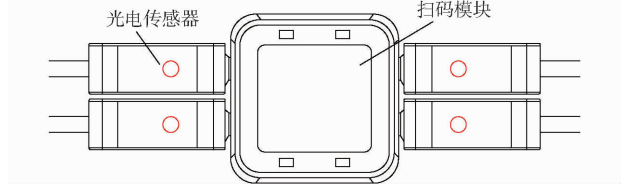


图 7 底盘定位传感器排列方式示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the arrangement of chassis positioning sensor

2.2 分段变距喷雾机构

分段变距喷雾机构由喷头、喷杆、电磁阀、激光传感器、丝杆滑台、连接杆、药桶、水泵及护罩等构成。分段变距喷雾机构结构如图 8 所示。

2.2.1 双边移动喷杆装置

选用丝杆滑台作为喷杆移动驱动装置,提供竖直方向的驱动力。连接杆一端铰接于丝杆滑台滑块的双头连接件上,另一端铰接于喷杆支架上。喷杆

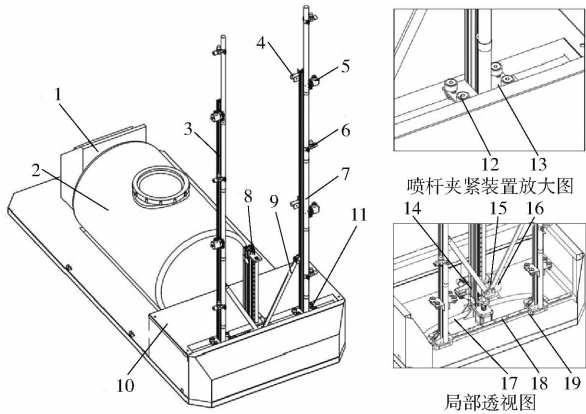


图 8 分段变距喷雾机构结构图

Fig. 8 Structure diagram of segmented and variable distance spray mechanism

1. 控制箱 2. 药桶 3. 喷杆支架 4. 激光传感器 5. 电磁阀
6. 喷头 7. 喷杆 8. 丝杆滑台 9. 连接杆 10. 护罩 11. 喷杆夹紧装置 12. 螺栓型滚针轴承 13. 安装支架 14. 丝杆滑台支架 15. 双头连接件 16. 水泵 17. 水管 18. 滑轨 19. 滑块底座

经支架固定于底部的滑块上,可在滑轨上移动。

为保证丝杆滑台在工作时的稳定性,校核所选丝杆容许极限负载与转速。容许极限轴向负载为^[27]

$$P_c = \frac{n\pi^2 EQ}{k^2} \alpha_m = m \frac{d_r^4}{k^2} \times 10^4 \quad (11)$$

其中 $Q = \frac{\pi}{64} d_r^4$ (12)

- 式中 P_c ——容许极限轴向载荷, N
 k ——螺母与支撑座间距, mm
 E ——杨氏模量, 取 2.06×10^{11} Pa
 Q ——丝杆轴螺纹内径截面最小惯性矩, mm^4
 d_r ——丝杆轴径, mm
 α_m ——余量系数, 取 0.8
 n 、 m ——由滚珠丝杆支撑方式确定的系数, n 取 4, m 取 19.9

容许极限转速为

$$N_c = f_a \frac{60\lambda^2}{2\pi k^2} \sqrt{\frac{1\,000EQ}{\varphi}} = \delta \frac{d_r}{k^2} \times 10^7 \quad (13)$$

- 式中 N_c ——丝杆容许极限转速, r/min
 f_a ——余量系数, 取 0.8
 φ ——密度, 取 7.8×10^{-6} kg/mm³
 λ 、 δ ——由滚珠丝杆支撑方式确定的系数, λ 取 4.73, δ 取 21.9

丝杆滑台为垂直安装,且使用时为匀速转动,其轴向负载为

$$P_b = M_0 g^2 + 2\mu_0 M_1 g \tan \psi \quad (14)$$

- 式中 P_b ——轴向负载, N
 M_0 ——滑块与连接杆质量, 取 1 kg

- M_1 ——单侧喷杆装置质量, 取 4 kg
 μ_0 ——滑台摩擦因数, 取 0.15
 ψ ——连接杆与水平面夹角, ($^\circ$)
负载扭矩为

$$T = \frac{P_b l_0}{2\pi \eta_1} \quad (15)$$

其中 $\eta_1 = \frac{1 - \mu_1 \tan \beta_1}{1 + \frac{\mu_1}{\tan \beta_1}}$ (16)

- 式中 T ——负载转矩, N·cm
 l_0 ——滚珠丝杆螺距, 取 0.5 cm
 η_1 ——滚珠丝杆效率, 取 0.9
 μ_1 ——滚珠丝杆摩擦因数
 β_1 ——螺纹升角, ($^\circ$)

连接杆与水平面夹角 ψ 最大值为 70° , 经计算, 轴向负载最大约为 133 N, 负载扭矩最大约为 11.8 N·cm。最终选定丝杆滑台的滚珠丝杆直径为 1.6 cm, 导程为 5 cm, 步进电机扭矩为 65 N·cm, 所选丝杆滑台容许极限负载与转速均符合设计要求。

喷头间距与到喷雾作业面的距离关系如图 9 所示。图中 d 为喷头安装间距, m; h 为喷头到喷雾平面的距离, m; β 为喷雾角, ($^\circ$); a 为相邻喷头间喷雾线重叠距离, m; l 为喷头有效喷雾线长度, m。

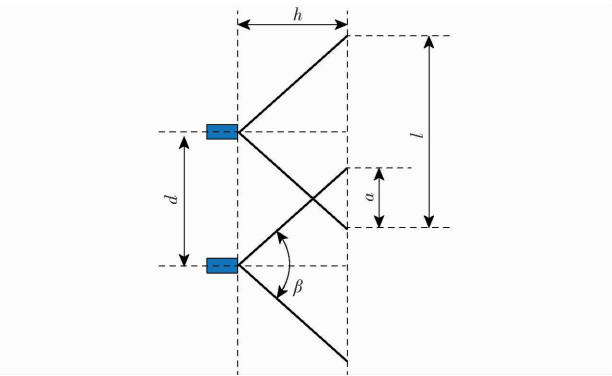


图 9 喷头安装间距与喷头到喷雾作业面距离关系示意图

Fig. 9 Schematic diagram of relationship between sprinkler installation spacing and distance from sprinkler to spray working surface

相邻两喷头之间, 一定的重叠作业面积能保证喷头边缘作业的有效性, 重叠率控制在 0.25 ~ 0.3 为宜, 本研究取 0.3。故由图 9 可得^[28]

$$l = 2h \tan \frac{\beta}{2} \quad (17)$$

$$a = 0.3l \quad (18)$$

$$d = l - a \quad (19)$$

整理得 $d = 1.4h \tan \frac{\beta}{2}$ (20)

选用喷头型号为 VP110 - 015, 其喷雾角为

110°,喷头间距为 0.78 m,喷头到喷雾平面的距离 h 为 0.39 m。

2.2.2 喷杆辅助防抖装置

在喷雾机器人启停与上下轨过程中,受惯性与振动影响喷杆易产生抖动,影响滑轨使用寿命与喷雾精度。为降低喷杆的抖动幅度,增加喷杆辅助防抖装置,如图 10 所示。防抖装置由护罩及喷杆夹紧装置两部分组成,护罩的中部槽宽 60 mm,其槽内侧挡板能够为喷杆夹紧装置提供支撑作用;夹紧装置由 2 个螺栓型滚针轴承及安装架构成。单侧喷杆左右两侧对称安装有 2 个喷杆夹紧装置,滚针轴承紧贴护罩槽内侧板,限制喷杆在运行时的抖动幅度。



图 10 喷杆辅助防抖装置

Fig. 10 Spray rod auxiliary anti shaking device

3 控制系统设计

喷雾机器人硬件系统构成如图 11 所示。STM32 控制器采集 IMU (Inertial measurement unit) 的姿态信息与编码器速度信息并控制电机运行,完成底盘的直行与转向等功能;超声波模块与防撞条用于安全防护;扫码模块用于换行信息的采集;光电传感器对底盘进行姿态微调,保证对行的准确度;激光传感器采集植株的高度信息,改变喷雾作业覆盖范围,实现分段喷雾;控制器改变给水泵驱动器的 PWM (Pulse-width modulation) 信号以调整喷雾供水压力;液位传感器检测水箱中水位,水位过低时报警提示;步进电机驱动丝杆滑台运转,调整喷杆与植株的距离,进行变距喷雾;接近开关安装于丝杆滑台工作范围的上端与下端,进行限位保护;MCGS (Monitor and control generated system) 用于人机交互,修改相关参数。

3.1 底盘运动控制系统

(1) 底盘直线行走与转向控制

喷雾机器人在相邻两个路面定位标志之间移动时,采用串级 PID (Proportion integration differentiation) 控制算法对两轮动态调速,使其保持直线运动。其中,驱动轮转动速度由空心轴增量式编码器测量,车体角度通过 IMU 获取。串级 PID 内环为速度环,用于控制机器人的速度;外环为位置环,用于控制机器人在直线上的位置,如图 12a 所

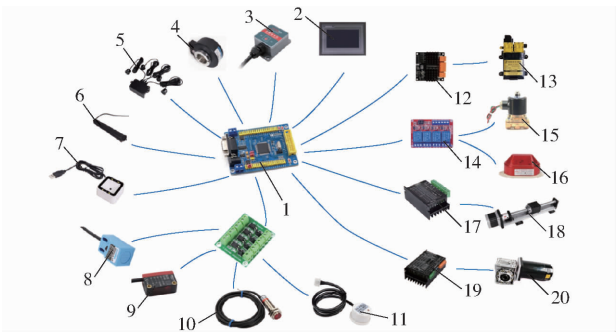


图 11 硬件系统构成图

Fig. 11 Hardware system composition diagram

1. STM32 2. MCGS 3. IMU 4. 编码器 5. 超声波模块 6. 防撞条 7. 扫码模块 8. 接近开关 9. 光电传感器 10. 激光传感器 11. 液位传感器 12. 水泵驱动器 13. 水泵 14. 继电器模块 15. 电磁阀 16. 声光报警器 17. 步进电机驱动器 18. 丝杆滑台 19. 电机驱动器 20. 电机

示。以左轮为参考标准,右轮调速进行车体角度跟随,使得两轮速度相关联,保持前行角度。旋转时,串级 PID 内环为角速度环,用于控制机器人旋转速度;外环为角度环,用于控制机器人原地旋转角度,如图 12b 所示。

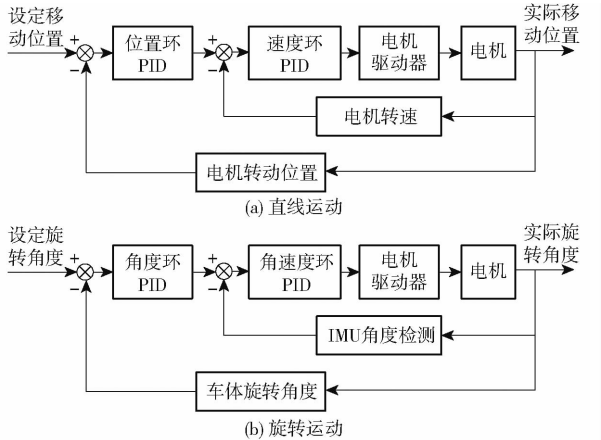


图 12 串级 PID 结构图

Fig. 12 Cascade PID structure diagram

(2) 底盘定位控制

通过对光电传感器触发阈值的调整,使其照射地面时为触发状态,照射黑色十字标时为非触发状态。喷雾机器人行间定位时,当左右任一边激光点均检测到黑色十字标时,停机扫码。此时若激光点状态如图 13a 所示,则对齐结束,若有激光点位于黑色十字标之外,如图 13b 所示,则喷雾机器人进行姿态微调,直到达到图 13a 所示的激光点照射状态。

3.2 分段变距喷雾控制系统

3.2.1 基于激光传感器的分段喷雾

喷雾机器人除手动模式设置喷雾高度外,也支持自动测高分段模式。通过单点激光传感器分段检测作物高度,传感器安装在与电磁阀高度一致的喷

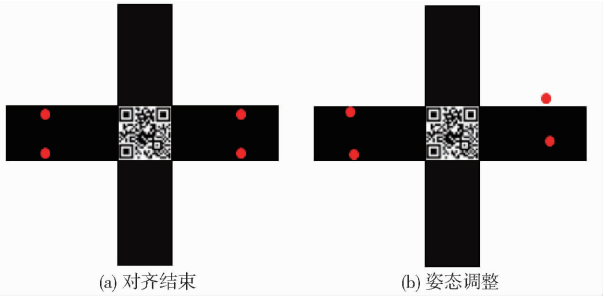


图 13 定位控制示意图
Fig. 13 Positioning control schematics

杆支架上,对植株分为 3 个挡位进行分段喷雾。

喷雾机器人在上轨的同时开始采集激光传感器信号,若没有检测到植株,则会检测到较为规律的吊蔓绳信号,如图 14a 所示。在典型喷雾速度 0.4 m/s 时,吊蔓绳产生的平均脉宽信号为 2.5 ms,为留有一定余量,选取 3 ms 为吊蔓绳判定脉宽。检测过程中当采集的脉宽信号大于 3 ms 时为植株信号,如图 14b 所示,喷雾机器人开启对应电磁阀进行分段喷雾。在下轨阶段时,底盘光电传感器检测到地面信号后,喷雾停止。

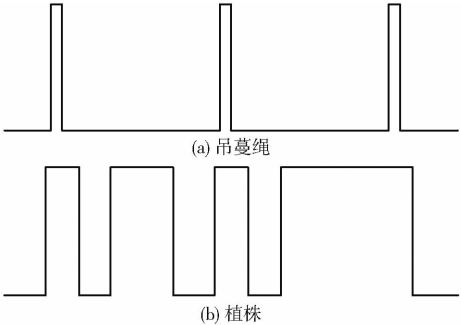


图 14 脉宽信号示意图
Fig. 14 Schematics of pulse width signal

3.2.2 基于定植时间的变距喷雾

除手动设置喷头与植株距离实现变距喷雾外,还可根据番茄植株生长规律实现自动变距喷雾。以番茄为试验对象,从定植开始,每隔 5 d 进行一次测量,每次选取 50 株同批次的植株,记录植株外侧叶片到植株主杆的平均距离。将同一天采集的数据取平均值,得到如图 15 所示的统计图。

从图 15 可以看出,作物在定植后的前 20 d 左右,叶片平均伸出距离随时间的增长明显,在 20 d 后稳定在 30 cm 左右,在 30 d 后有所下降是因为叶片生长后期下垂的原因。

以上述曲线作为控制依据,20 d 前使用曲线数据拟合叶片伸出距离,定植时间不在折线点处的数据由其前后折线点数据线性拟合。20 d 后的数据使用 20 ~ 55 d 叶片平均伸出距离的平均数进行代替,即 30 cm。

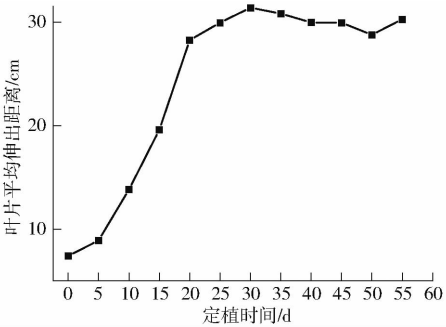


图 15 作物叶片平均伸出距离与定植时间的关系曲线
Fig. 15 Relationship curve between average extension distance of crop leaves and planting time

如图 16 所示,控制器调整丝杆滑台上双头连接件的位置即可实现喷杆在喷雾机器人位置的调整。丝杆滑台上的双头连接件与其初始位置的长度 X 为

$$X = H - \sqrt{P^2 - (Z - O - R)^2} \quad (21)$$

式中 H ——连接杆上部安装位置与双头连接件初始位置的竖直距离, m
 P ——连接杆长度, m
 Z ——喷雾机器人中心位置与培养槽中心位置距离, m
 O ——连接杆上部安装位置到叶片边缘的水平距离,长度为喷雾距离 h (0.39 m) 加一段喷头长度与连接杆固定座的补偿距离 (0.1 m), 取 0.49 m
 R ——叶片伸出距离, m

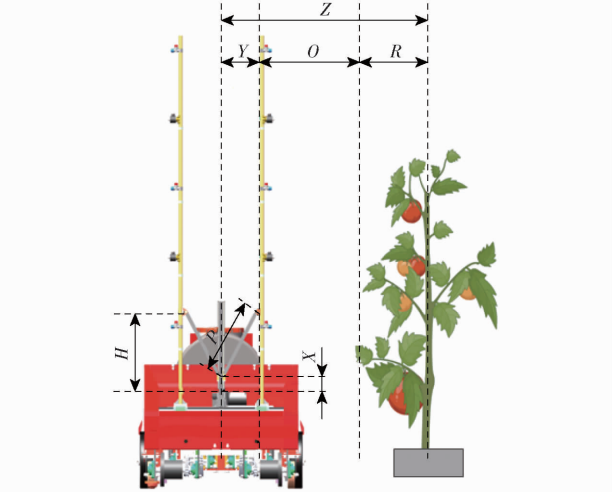


图 16 变距喷雾各部分距离关系图
Fig. 16 Distance relationship diagram of various parts of variable distance spray

4 样机试验

4.1 底盘性能试验

喷雾机器人在运行过程中,对正、走直、转准是作业成功的关键。因此对底盘性能进行试验,确保其满足设计要求。试验在山东华龙农业装备股份有

限公司试验棚进行,样机与试验环境如图 17 所示。



图 17 样机与试验环境
Fig. 17 Prototype and test environment

(1) 直线行走试验

选定两处相邻的路面定位标志,分别作为起点与终点,使激光水平仪的光线穿过两处黑色十字标中心点。在喷雾机器人前方标记车身中心,调整车身位置使其落在激光线处。使底盘从起点出发,进行直线行走,在终点处停止,并利用十字标记调整自身姿态,调整完毕后停机并声光报警。记录此时激光线与车身中心标记线的距离。试验 5 次,取平均值。

(2) 对轨试验

标记测试轨道两头的中心位置,将激光水平仪的激光线穿过这两点,在延伸处布置路面定位标志,使定位标志中心点与两轨道中心点共线。试验时,喷雾机器人从起始位置出发,当扫描到路面定位标志后停止,进行微调与 90° 旋转对轨,对齐后,停机报警。测量此时激光线与车身前部中心线的误差,将此值作为对轨误差。试验 5 次,取平均值。

(3) 避障试验

对喷雾机器人的超声波避障进行试验,确保其避障距离符合安全性要求。试验时,在喷雾机器人的工作路径上(包括轨道上)随机放置 5 处采摘筐,每次避障停机报警后,测量承载底盘到采摘筐的距离并记录,随后移除障碍物使其继续行进,直至 5 处避障距离数据采集完毕。

对试验数据进行整理,得到如表 2 所示的试验结果。

经过试验,喷雾机器人直线行走与对轨误差平均值均在 6 mm 以内,控制精度满足自动化运行的

要求,避障距离平均在 34 cm 左右,可以保证底盘运行的安全性。

4.2 喷杆抖动试验

为验证喷杆辅助防抖装置的防抖效果,设计了喷杆抖动试验。采用型号为 TL720D 的 IMU 实时测量喷杆抖动情况,如图 18 所示。



图 18 喷杆抖动试验
Fig. 18 Spray rod shake test

行走距离设置为 3 m,在有、无防抖装置的情况下,分别设置行走速度为 0.3、0.4、0.5 m/s,采集喷杆抖动数据。喷杆抖动角度数据通过 Gyroscope 软件保存,并输出至 Excel 表格中。对 Excel 表格中 y 轴(沿喷头方向抖动量)、 z 轴(沿行进方向抖动量)角度数据进行整理,结果如图 19 所示。

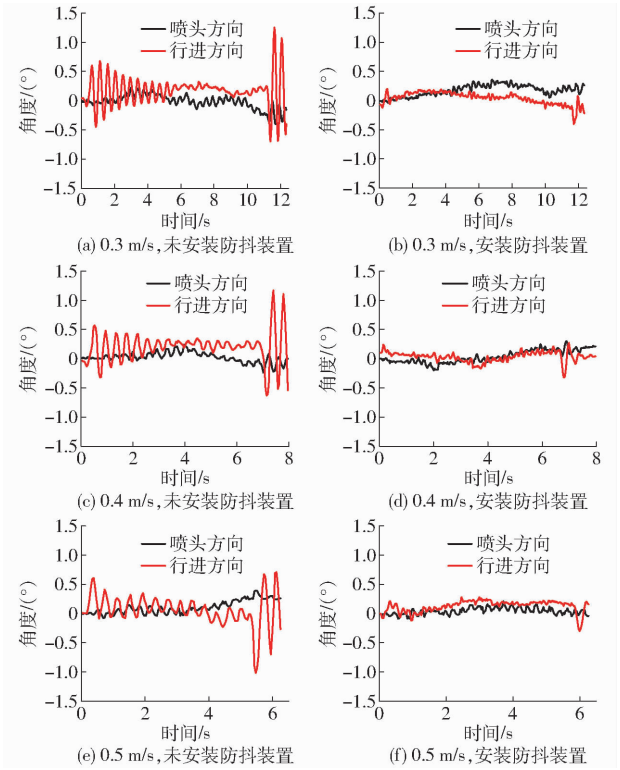


图 19 喷杆抖动试验结果

Fig. 19 Spray rod shaking test results

由图 19 可知,通过安装辅助防抖装置,喷杆行进方向的抖动从 $-1^{\circ} \sim 1.3^{\circ}$ 控制在 $\pm 0.4^{\circ}$ 内,喷头方向的抖动从 $\pm 0.5^{\circ}$ 控制在 $\pm 0.3^{\circ}$ 内。因此,辅助防抖装置对喷杆抖动影响具有显著性,提高了喷杆稳定性。

表 2 底盘性能试验结果

Tab. 2 Chassis performance test results

试验组别	直线行走误差/mm	对轨误差/mm	避障距离/cm
1	4	6	34
2	3	4	33
3	6	7	36
4	6	6	34
5	5	6	33
平均值	4.8	5.8	34

4.3 喷雾效果试验

现场喷雾试验在山东寿光现代农业创新创业示范园进行。试验时,随机选取5行作业轨道,在每行作业轨道中随机选择一个位置,在上、中、下3层任选1个叶片,分别在正反面使用曲别针加持一片水敏纸。喷雾机器人对所选行进行分段变距喷雾作业。试验现场如图20所示。



图20 试验现场
Fig. 20 Testing site

试验完毕后,收集所有水敏纸并晾干,放入塑料密封袋中保存。处理时,将水敏纸粘贴于A4纸上,使用惠普扫描仪在分辨率为600 dpi下对水敏纸进行扫描,随后编号保存。通过进行图像优化降噪、阈值优化、背景填充等操作,最终得到沉积量与体积中径的分析数据,将同一位置的数据取平均值作为喷雾效果最终评价标准,结果如表3所示。

由表3可知,叶片正面雾滴沉积量约1.76 μL/cm²,叶片反面沉积量约0.2 μL/cm²,可以达到较好的防治效果。当雾滴直径大于200 μm时,可能会从叶片上脱落,影响药液利用^[29],本试验雾滴体积中径在100~180 μm之间,满足此参数要求。

5 结论

(1)提出了一种分段变距连栋温室喷雾机器

表3 喷雾效果试验结果
Tab.3 Spray effect test results

位置	沉积量/(μL·cm ⁻²)	体积中径/μm
上部正面	1.912	178
上部反面	0.253	97
中部正面	1.512	179
中部反面	0.192	117
下部正面	1.881	155
下部反面	0.209	97

人,设计了通用移动底盘,提出了轨上矫正装置,保证了机器人轨上运行的稳定性;设计分段变距喷雾机构,提出了以丝杆滑台为动力部件的喷杆双边移动结构,并设计辅助防抖装置减小喷杆抖动。研发喷雾机器人底盘运动与分段变距喷雾控制系统,并制作样机进行试验。

(2)喷雾机器人行间直线行走误差为4.8 mm,对轨误差为5.8 mm,避障距离为34 cm,各参数满足喷雾机器人导航精度、上下轨成功率及运行安全性的要求。

(3)通过安装防抖装置,将喷杆行进方向抖动从-1°~1.3°控制在±0.4°内,喷头方向抖动从±0.5°控制在±0.3°内,防抖效果显著。

(4)进行分段变距喷雾试验,结果表明,叶片正面可以得到约1.76 μL/cm²的雾滴沉积量;叶片反面也可获得约0.2 μL/cm²的沉积量;雾滴体积中径为100~180 μm,满足植保要求。

(5)建立了基于定植时间与植株叶片伸出距离的简单喷雾模型,尚不能满足间歇式精准对靶喷雾要求,在后续的研究中可结合作物实时生长状况建立动态喷雾管理模型,以满足精准喷雾要求。

参 考 文 献

[1] 储为文. 我国植保机械化发展短板与提升对策分析[J]. 中国农机化学报,2021,42(1):46-51.
CHU Weiwen. Analysis of developing short board and lifting countermeasure of plant protection mechanization in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 46-51. (in Chinese)

[2] 兰玉彬,闫瑜,王宝聚,等. 智能施药机器人关键技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报,2022,38(20):30-40.
LAN Yubin, YAN Yu, WANG Baoju, et al. Current status and future development of the key technologies for intelligent pesticide spraying robots[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(20): 30-40. (in Chinese)

[3] 邱荣洲,陈韶萍,赵健,等. 农作物病虫害防治农药速查系统构建与应用[J]. 农药学报,2022,24(3):630-636.
QIU Rongzhou, CHEN Shaoping, ZHAO Jian, et al. Construction and application of pesticide fast searching system for crop diseases and pests control[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2022, 24(3): 630-636. (in Chinese)

[4] AGUS D, SISWOYO S. Test of sprayer droplet distribution using water level detector-based patternator[J]. Jurnal Teknik Pertanian Lampung, 2020, 9(2): 85-95.

[5] MARTELLI R, LANZONI A, MAINI S, et al. Mechanical application of *Orius laevigatus* nymphs for the control of *Frankliniella occidentalis* in greenhouse crops[J]. Bull Insectol, 2020, 73: 59-69.

[6] PUTRI R E, APRILIO J, GERALDO J P, et al. Semi-automatic boom sprayer development for corn crop protection[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022: 012002.

[7] REFIGH A, KALANTARI D, MASHHADIMEYGHANI H. Construction and development of an automatic sprayer for greenhouse[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2014, 16(2): 36-40.

[8] HEJAZIPOOR H, MASSAH J, SORYANI M, et al. An intelligent spraying robot based on plant bulk volume[J]. Computers

- and Electronics in Agriculture, 2021, 180: 105859.
- [9] CANTELLI L, BONACCORSO F, LONGO D, et al. A small versatile electrical robot for autonomous spraying in agriculture[J]. Agri. Engineering, 2019, 1(3): 391–402.
- [10] HEIDARI A, PARIAN J A. Greenhouse mobile robot navigation using wheel revolution encoding and learning algorithm[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2021, 11(1): 1–15.
- [11] 郑加强,徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2021,52(3):1–16.
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 1–16. (in Chinese)
- [12] 陈炳太,郑永军,江世界,等. 果园施药机械资源消耗水平评价模型研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):289–297.
CHEN Bingtai, ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, et al. Resource consumption evaluation model of orchard spray machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 289–297. (in Chinese)
- [13] 刘雪美,刘兴华,崔慧媛,等. 作物冠层雾滴沉积研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2021,52(11):1–20.
LIU Xuemei, LIU Xinghua, CUI Huiyuan, et al. Research progress and trend analysis of crop canopy droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 1–20. (in Chinese)
- [14] 郑永军,陈炳太,吕昊瞰,等. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2020,36(20):110–124.
ZHENG Yongjun, CHEN Bingtai, LÜ Haotun, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 110–124. (in Chinese)
- [15] 刘兴华,刘雪美,苑进,等. 植保静电喷雾技术发展现状与前景[J]. 农机化研究,2019,41(2):8–14.
LIU Xinghua, LIU Xuemei, YUAN Jin, et al. The development and prospect of electrostatic spraying technique in crop protection[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 8–14. (in Chinese)
- [16] 肖珂,郝毅,高冠东. 果园自动变距精准施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):137–145.
XIAO Ke, HAO Yi, GAO Guandong. Design and experiment of automatic variable-distance precision spraying system in orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 137–145. (in Chinese)
- [17] 茹煜,陈旭阳,刘彬,等. 轴流式果园喷雾机风送系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):147–157.
RU Yu, CHEN Xuyang, LIU Bin, et al. Optimized design and performance test of axial flow orchard sprayer air delivery system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 147–157. (in Chinese)
- [18] 李建平,边永亮,霍鹏,等. 喷雾机风送式环形喷管喷雾装置设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2021,52(9):79–88.
LI Jianping, BIAN Yongliang, HUO Peng, et al. Design and experimental optimization of spray device for air-fed annular nozzle of sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 79–88. (in Chinese)
- [19] 刘慧,刘加林,沈跃,等. 基于融合深度信息的自动喷雾车全局非线性轨迹优化方法[J]. 农业机械学报,2019,50(5):33–42.
LIU Hui, LIU Jialin, SHEN Yue, et al. Path optimization method using fusion depth information and nonlinear pose estimation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 33–42. (in Chinese)
- [20] 王士林,宋坚利,何雄奎,等. 电动背负式风送喷雾器设计与作业性能试验[J]. 农业工程学报,2016,32(21):67–73.
WANG Shilin, SONG Jianli, HE Xiongkui, et al. Design of air-assisted electric knapsack sprayer and experiment of its operation performance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 67–73. (in Chinese)
- [21] 吴亚垒,祁力钧,张豪,等. 基于嵌入式互联网的远程智能喷雾控制系统设计[J]. 农业工程学报,2018,34(20):28–35.
WU Yalei, QI Lijun, ZHANG Hao, et al. Design and experiment of remote intelligent spray control system based on embedded internet[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(20): 28–35. (in Chinese)
- [22] 石雨欣,龚艳,刘德江,等. 设施离心雾化喷雾机的雾化性能探究试验[J]. 中国农机化学报,2022,43(12):44–50, 66.
SHI Yuxin, GONG Yan, LIU Dejiang, et al. Research on the atomization performance of centrifugal atomizing sprayer in the greenhouse[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(12): 44–50, 66. (in Chinese)
- [23] 马国义,宋坚利,宋卫堂,等. 温室自走式风送喷雾机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):54–61.
MA Guoyi, SONG Jianli, SONG Weitang, et al. Development and experimental study of solar greenhouse self-propelled air sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 54–61. (in Chinese)
- [24] 北京农业智能装备技术研究中心. 设施农业路轨两用机器人专用底盘:CN112659826B[P]. 2022-07-01.
- [25] 苏州博田自动化技术有限公司. 用于温室自动作业的路轨两用底盘车:CN111716969A[P]. 2020-09-29.
- [26] 倪志永. 文洛型温室路轨通用机器人底盘的结构设计与稳定性研究[D]. 泰安:山东农业大学,2021.
NI Zhiyong. Structure design and stability research of Venlo type greenhouse general robot chassis for ground and track operation[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [27] 成大先. 机械设计手册. 单行本. 机械传动[M]. 北京:化学工业出版社,2004:11–43.
- [28] 齐闯. 喷雾机变量施药控制系统研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
QI Chuang. Variable spraying control system for sprayer[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)
- [29] LI Y, YUAN J, LIU X, et al. Spraying strategy optimization with genetic algorithm for autonomous air-assisted sprayer in Chinese heliogreenhouses[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 84–95.