

超声波测距温室苗架喷淋车牵引导向系统研究

李和明¹ 黄志彬¹ 梁建智¹ 李军壮¹ 毕晨星¹ 盘海平²

(1. 广西电力职业技术学院智能制造工程学院, 南宁 530007; 2. 柳州方略科技有限公司, 柳州 545007)

摘要: 温室大棚内人工喷淋作业存在劳动强度大、效率低下的问题,而顶部浇灌装置则成本高昂、利用率偏低,在此背景下,地面行走式喷淋车成为有效解决途径。针对温室苗架喷淋车地面行走的导向难题,提出一种结构简易、成本低廉的循迹式前轮牵引导向系统技术方案,并结合场地条件与传感器特性,确定了循边导向系统的传感器选型方法及导向纠偏逻辑算法。该系统以四轮独立驱动、前端或后端双轮同步转向的机构为本体,配备前后端超声波测距传感器及可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC)运算核心;通过变比例增益比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制模型完成纠偏导向运算后,系统向转向电机输出方向、偏摆角及转动速度等控制信号,驱动行走轮组向指定方向偏摆以实现精准纠偏。此外,基于上述理论设计了一套导向行走控制系统,详细阐述测试平台勘测数据、系统硬件组成及底层硬件连线原理,并开展变比例增益 PID 模型的 Matlab 仿真、关键数据关联验证、现场实测及测试效果评估。试验结果表明,当系统以速度 5 m/min 行驶时,可精准识别预设纠偏边界,纠偏精度达 5 mm,且纠偏导向运动稳定平顺,全程无干涉、碰撞等异常问题。

关键词: 温室; 苗架喷淋车; 超声波测距; 牵引导向系统; 动态纠偏; PID 控制

中图分类号: S232.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)15-0384-11

OSID:



Towing Guidance System for Greenhouse Seedling Frame Sprinklers Based on Ultrasonic Distance Measurement

Li Heming¹ Huang Zhibin¹ Liang Jianzhi¹ Li Junzhuang¹ Bi Chenxing¹ Pan Haiping²

(1. Department of Intelligent Manufacturing Engineering, Guangxi Electrical Polytechnic Institute, Nanning 530007, China

2. Liuzhou Fanglue Technology Co., Ltd., Liuzhou 545007, China)

Abstract: Due to the high labor intensity and low efficiency of manual spraying operations in greenhouses, as well as the high cost and low utilization rate of spraying operations performed by overhead irrigation devices, ground-moving sprayers have become an effective solution. To address the guidance problem of greenhouse seedling frame sprayers moving on the ground, a technical solution for an edge-tracking front-wheel towing guidance system with simple structure and low cost was proposed. Meanwhile, a sensor selection method for the edge-tracking guidance system and a guidance-deviation-correction logic algorithm were put forward based on field conditions and sensor characteristics. The system was composed of a four-wheel mechanism with independent drive, a dual-wheel synchronous steering mechanism that can realize steering function at either the front or rear end, an information acquisition device equipped with ultrasonic sensors, and a PLC-based computing core. Upon completing guidance-deviation-correction via the variable proportional gain PID model, the system output direction, yaw angle, and rotation speed signals to the steering motor, which then yawed in the designated direction to realize deviation correction. In addition, based on the above theories, an implementation case of the edge-tracking front-wheel towing guidance system was provided, including survey data of the test platform, hardware composition of the system and its underlying hardware wiring principle. Furthermore, Matlab simulation of the variable proportional gain PID model, correlation verification of key data, field tests and test effect evaluation were carried out. Test results showed that when the system operated at a speed of 5 m/min, it can accurately identify the preset deviation-correction boundary, with a deviation correction accuracy of 5 mm. The deviation correction and guidance movement was stable and smooth, without any interference, collision or

other problems throughout the process.

Key words: greenhouse; seedling frame sprinklers; ultrasonic distance measurement; towing guidance system; dynamic deviation correction; PID control

0 引言

温室大棚苗架育苗过程中,作物喷淋是必需环节,目前,国内外苗架育苗喷淋作业的主要方法有传统人工作业、顶部浇灌装置、地面行走喷淋装置等^[1-5]。其中,人工作业强度大,效率低,效果差;顶部浇灌装置主要有移动喷灌机、微喷头、喷灌带等,便于自动化、智能化控制,是目前应用最广的自动喷淋装置,但需要在大棚每一跨的顶部安装布置,成本高,空间占用多;地面行走喷淋装置主要有地面喷淋机器人、苗架循边喷淋机等,具有可跨棚作业的优点,其中,一台苗架循边喷淋机设备可满足约 $1 \times 10^4 \text{ m}^2$ 大棚群的喷淋需求,成本仅为顶部浇灌装置的十分之一,应用前景大,但大棚内地面状况复杂多样,对地面行走系统的普适性要求高,因此,研究稳定可行且低成本的苗架地面自动行走系统,对该类喷淋机的应用推广具有重要意义。

影响地面自动行走系统稳定性的关键技术是行走方向的引导技术,目前,国内外地面行走导向技术主要有:基于物理接触的导向技术、非接触式传感器导向技术及卫星导航导向技术 3 类^[6]。其中,基于物理接触的导向技术是指通过物理接触的方式获取导向参照物位置信息,进而引导载体跟随移动的技术,典型类型为导轨导向和接触式循迹导向,如一种配置防失稳液压自动调平系统的山地轨道运输平台、采用切换剪切控制器和触觉探索的轮廓跟踪机器人等^[7-10],该导向技术优点是结构简单、维护方便,缺点是附加的导向设施占地大,影响作业环境,且物理触头易磨损,适合在辅助设施铺设量小、运动范围小的场合应用;非接触式传感器导向技术是指通过非接触式传感器获取导向参照物位置信息,进而控制载体跟随移动的技术,目前应用较多的是磁条、超声波、红外线、RFID、图像视觉、SLAM 等信息采集方法,如通过采集大棚内部道路图像或墙面特征、利用超声波三角定位原理等方法均可实现车辆的导向控制^[11-15],相对接触式,其对作业环境的影响较小,无接触磨损,但易受温湿度、光照等环境因素干扰,对算法依赖高,适合在面积大、场地相对规范标准的场合应用;卫星导航导向技术是指通过接收导航卫星系统发射的射频信号,解算载体的实时三维坐标、速度和航向信息,进而规划运动路径并控制载体运动方向的技术,其核心是依靠卫星信号完

成定位与导向,无需依赖作业现场的环境参照物或预设轨道,如抗差自适应扩展卡尔曼滤波法处理卫星信号的园艺履带式自动导航电动微耕机^[16]、基于星基增强精密单点定位的农机自动导航系统等^[17],但单纯依靠卫星定位的导向精度不高,通常会利用机载传感器系统辅助校正,如采用 GPS 与视觉导航相结合的方法可将阿克曼转向移动机器人自主导航横向偏移值缩小至 48 mm 以内^[18],可见,卫星导航导向技术不依赖作业环境特征,作用范围广,但其技术相对复杂,成本高,导向精度低,适合在导向精度要求不高且作业现场无参照物的大面积场地规模化应用。

综上所述,物理接触式导向方案对作业现场工况干扰较大,且触头磨损易导致导向稳定性衰减;卫星导航导向方案则存在定位精度不足、硬件成本偏高的问题,二者均难以满足苗架作物喷淋机的导向作业需求。同时,考虑到苗架边板多采用铝合金材质,具备平直光滑的结构特性,可作为导向参照物。基于此,拟设计非接触式牵引导向系统,该系统通过超声波传感器实时探测与参照物的间距,经变比例增益 PID 算法运算后,输出参照物方向拟合纠偏指令,最终由前轮实现牵引与导向功能,以有效规避传统方案的缺陷。

1 机械结构与工作原理

图 1a 为牵引导向系统底盘结构的三维模型,其前后共配置 4 组轮系,且各组轮系结构完全一致;图 1b 为单个轮系的运动简图。4 组轮系支持独立驱动,工作时仅行走方向前端轮组承担牵引与转向功能,后端轮组则从动跟随。每组轮系中,安装于行走轮座上的行走驱动电机经减速处理后,直接驱动装配在电机轴上的行走轮,从而实现底盘行走驱动。此外,底盘前、后端分别搭载一套转向系统,用于实现前进或后退工况下同向轮组的同步转向:转向动作触发时,编码步进一体转向电机同步驱动同一端两组轮系,动力经减速器传递至主动齿轮,再通过中间齿轮啮合传动至从动齿轮,最终带动行走轮座绕轴旋转,进而驱动行走轮偏转以完成转向。同时,转向电机自带的编码器可实时采集轮座及行走轮的当前偏摆角度,并将信号反馈至控制系统,系统通过与目标摆角进行差值计算,精准获取转向所需的实际偏摆角度,保障转向精度。

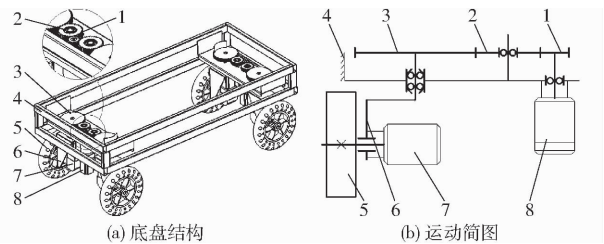


图 1 双轮同步转向四轮驱动机械系统
Fig. 1 Four-wheel drive mechanical system with dual-wheel synchronous steering

1. 主动齿轮 2. 中间齿轮 3. 从动齿轮 4. 车体 5. 行走轮
6. 行走轮座 7. 行走驱动电机 8. 转向电机

2 控制系统设计

2.1 整体架构

如图 2 所示,牵引导向系统采用“感知-决策-执行”3 级架构,通过超声波测距传感器与智能控制算法协同实现纠偏导向^[19-20]。感知层由前、后两组超声波测距传感器及检测车轮当前偏摆角度的编码器等构成,测距传感器用于检测参照物与传感器之间的距离,编码器用于检测转向轮当前的偏摆角度,并向决策层输出检测反馈信号。决策层主要由 PLC 控制器组成,构建了 3 级数据处理流水线,首先进行数据预处理与滤波,继而通过变比例增益 PID 控制模型运算生成控制指令,最终向执行层发出纠偏转向信号^[21]。执行层由前端、后端转向步进电机及其驱动器、传动机构、驱动轮组等组成,在决策层纠偏指令控制下实施转向动作。

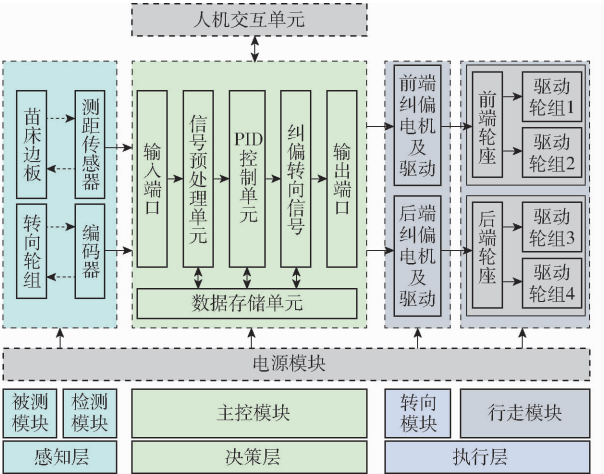


图 2 喷淋车牵引导向系统框图

Fig. 2 Block diagram of sprayer traveling guidance system

2.2 传感器布局与选型方法

2.2.1 传感器布局

地面行走喷淋车沿苗架行走喷淋时,需有可被清晰检测的导向参照物,为了减少对大棚现有布局的破坏,可选用大棚中现有机构作为参照物。例如,某大棚中的苗架结构如图 3 所示,边板贯穿苗架全

长,材料为铝合金,表面光滑平整,对超声波的反射效果较好,截面高度 65 mm,板厚 2 mm,能被有效分辨,因此,选择该边板作为超声波测距传感器的静态参照物。

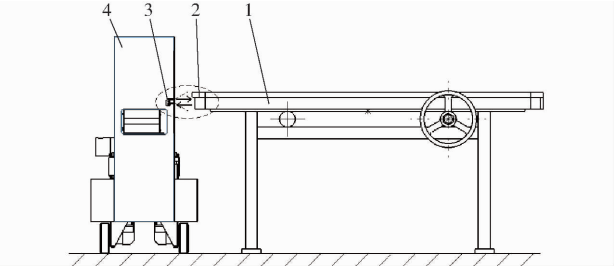


图 3 传感器与参照物位置关系示意图
Fig. 3 Position relationship between sensors and reference objects

1. 苗架 2. 苗架边板 3. 传感器 4. 喷淋车

在喷淋车前、后两端同一水平上分别安装测距传感器,靠近参照物一侧安装,如图 3 虚线部分所示,其安装高度能使传感器声束对准参照物,同时,在传感器和参照物之间的空间区域不能出现体积过大的干扰物,如块状的金属、木头等物品。

2.2.2 传感器参数选定方法

超声波测距传感器的检测数据直接决定牵引导向系统的纠偏精度与稳定性,因此传感器参数需与作业现场工况、测量对象特性适配,确保在纵向及横向空间范围内均能稳定捕获参照物信号,为纠偏控制提供可靠数据支撑。本系统中,需确定的传感器参数包括纵向检测范围,以及与检测灵敏度密切相关的工作频率、声束半角等关键指标。

纵向检测范围 $R_{\min}$ 、 $R_{\max}$ (mm) 的确定:如图 4 所示,已知喷淋车车身宽度为 B (mm),长度为 L (mm),苗架间巷道宽度为 W (mm)。当车身与参照物保持平行且处于远端极限位置时,传感器与苗架边板间距 δ (mm),最大允许值为巷道宽度与车身宽度之差 ($W - B$);当车身与参照物平行且处于近端极限位置时,理论最小距离为 0,但受超声波传感器固有检测盲区限制,车身与参照物的最小允许间距需修正为传感器盲区距离 B_z (mm)。基于上述分析,所选传感器的检测范围需完整覆盖传感器与参照物的最大、最小允许间距,即需满足: $R_{\max} \geq W - B, R_{\min} = B_z$ 。由于超声波传感器的工作频率越高,盲区越小且检测精度越高,因此,在满足系统最大检测范围需求、保证探测能量充足的前提下,应优先选用高频、小盲区的超声波传感器,以此完成传感器的初步选型工作^[22]。

检测灵敏度分析:喷淋车沿着苗架边沿行走时,受地面平整度不足、地面与参照物平行度偏差等因素影响,传感器会产生垂向位移波动,如图 5 所示。

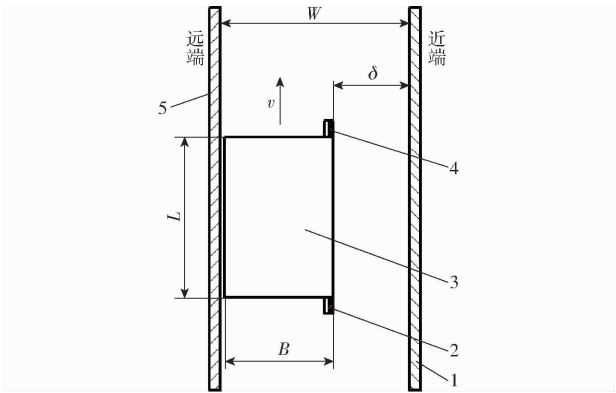


图 4 传感器纵向检测范围示意图

Fig. 4 Schematic of sensor longitudinal detection range
1. 参照物 2. 后置传感器 3. 喷淋车 4. 前置传感器 5. 相邻苗架边板

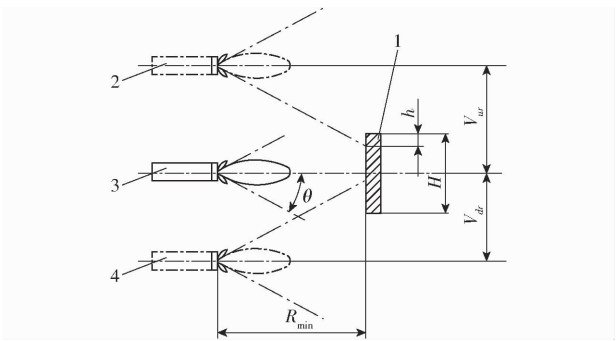


图 5 传感器垂向波动示意图

Fig. 5 Schematic of sensor vertical fluctuation
1. 参照物 2. 上浮极限 3. 传感器 4. 下浮极限

当超声波波束偏移至参照物边线外侧时,波束覆盖参照物的有效高度 $h(\text{mm})$ 随之减小,若 h 低于传感器检测灵敏度阈值,将导致测距数据失真。根据行业通用结论,超声检测的灵敏度阈值约为波长 λ 的一半,基于此,结合几何关系与灵敏度阈值,可推导出满足有效测距的频率 f 约束公式

$$f \geq \frac{c}{2R_{\min} \tan \theta - (2V_{r\max} - H)} \quad (1)$$

其中 $V_{r\max} = \max(V_{ur}, V_{dr})$
式中 c ——声速, mm/s
 θ ——声束半角, $(^\circ)$
 H ——参照物高度, mm
 $V_{r\max}$ ——垂向波动最大值, mm
 V_{ur} ——超声波传感器轴线相对于参照物中心向上波动值
 V_{dr} ——超声波传感器轴线相对于参照物中心向下波动值

其中, H 、 $V_{r\max}$ 为与大棚现场配置相关的参数,可通过现场勘测获得, f 、 θ 、 $R_{\min}$ 为传感器固有参数,可从初步选定的传感器产品参数表中获取。将所有参数代入式(1),若不等式成立,则表明该型号传感器满足系统的灵敏度要求。

2.3 导向纠偏控制原理

牵引导向系统控制逻辑如图 6 所示,导向纠偏控制过程可划分为 3 个步骤:行驶控制、纠偏运算、纠偏执行。

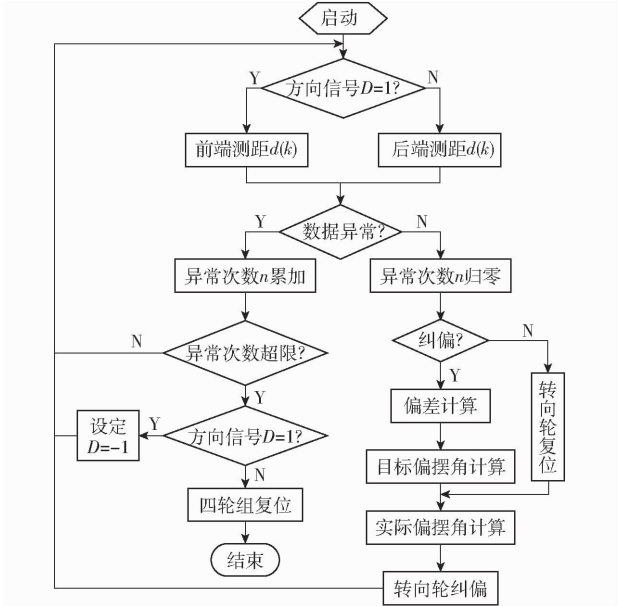


图 6 牵引导向系统控制逻辑框图

Fig. 6 Block diagram of traveling guidance system control logic

(1) 行驶控制

行驶前,人工将车辆布置到苗架巷道入口,并使测距传感器能有效检测到参照物,做好初始行驶方向参数的设定等启动准备后,发出车辆行驶启动指令,车辆即可行走。如图 7 所示,启动后,喷淋车从苗架起端向远端行驶,到达远端后再返回起端并自动停止,然后再由人工移到下一苗架去喷淋。行驶时,当方向信号 $D = 1$ 时,行驶方向为前进方向,此时,前端测距传感器起作用,当前端传感器越过苗架远端时,前端传感器测距反馈信号突然变大异常,当连续接收到异常反馈脉冲数 n 达到连续异常累积参数设定值时,可判断车辆已到达远端,此时可后退返回,系统内方向信号 D 自动变为 -1 ;当设定方向信号 $D = -1$ 时,行驶方向为后退方向,此时,后端测距传感器起作用,当后端传感器越过起端时,同理,可判断车辆已回到起端,车辆停止并使 4 个轮组偏

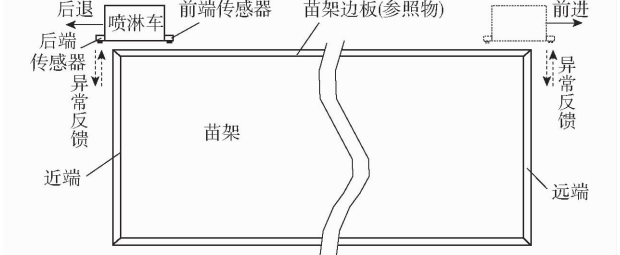


图 7 喷淋车行驶控制示意图

Fig. 7 Schematic of sprayer traveling control

摆复位。

(2) 纠偏运算

前进时,由前端测距传感器反馈第 k 周期的距离数据,由前端轮组实施牵引驱动和转向纠偏,后端轮组偏摆复位并被动跟随;后退时,由后端测距传感器反馈距离数据,后端轮组实施牵引驱动和转向纠偏,前端轮组偏摆复位并被动跟随。以前进方向为例,如图 8 所示,为了减少纠偏动作过于频繁,以传感器与苗架边板的间距为依据,设定了非纠偏区域的边界下限 $d_{\min}$ (mm) 和上限 $d_{\max}$ (mm),当超声波传感器检测反馈间距 $d(k)$ (mm) 处于区间 $[d_{\min}, d_{\max}]$ 时,前端轮组目标偏摆角 $A_t(k)$ ($^{\circ}$) 为零,不进行纠偏;当处于区域①或区域②时(图 8),即 $d(k) < d_{\min}$ 或 $d(k) > d_{\max}$ 时,则需纠偏,所需纠偏的偏差量为

$$e_d(k) = d_{ref} - d(k) \tag{2}$$

式中 $e_d(k)$ ——纠偏偏差量,mm
 d_{ref} ——预设纠偏边界参数,mm

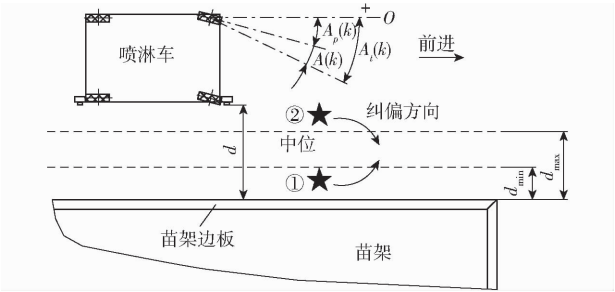


图 8 纠偏执行示意图

Fig. 8 Schematic of deviation correction execution

当喷淋车在①号区域时, $d_{ref} = d_{\min}$, 向远离苗架方向纠偏,在②号区域时, $d_{ref} = d_{\max}$, 向靠近苗架方向纠偏。

为了使纠偏动作顺滑稳定,采取变比例增益 PID 控制模型进行控制, $e_d(k)$ 越大, $A_t(k)$ 也越大,反之越小。

(3) 纠偏执行

如图 8 所示,以喷淋车运动方向为零位,规定顺时针偏摆为负、逆时针偏摆为正,第 k 周期转向轮实际偏摆角为

$$A(k) = A_t(k) - A_p(k) \tag{3}$$

式中 $A(k)$ ——转向轮实际偏摆角, ($^{\circ}$)

$A_p(k)$ ——转向轮当前偏摆角, ($^{\circ}$)

$A_p(k)$ 由转向电机绝对式编码器反馈并经运算变换后所得, $A_t(k)$ 则由超声波测距传感器反馈并经控制模型运算所得。

执行纠偏动作时,依据 $A(k)$ 的符号确定转向轮的偏摆方向:当 $A(k)$ 为正时,转向轮逆时针偏转;当 $A(k)$ 为负时,转向轮顺时针偏转,据此确定转向电机的旋转方向。同时,根据 $A(k)$ 的数值确定转向轮

的偏摆角度大小。最终,在控制器输出的转向指令、偏摆角度、运行速度等信号的控制下,转向电机按预期完成纠偏动作。

2.4 变比例增益 PID 控制模型构建

在纠偏过程中,采用了变比例增益 PID 控制模型进行转向轮目标偏摆角的计算,主要包含以偏差为变化因子的比例项、由静态偏差引起的累积误差所需的积分项和因跑偏速率所需的微分项。该模型解决了固定增益 PID 在偏差动态变化场景下响应滞后、超调量大的问题。

2.4.1 变比例增益系数设计

传统固定增益 PID 的比例系数无法适应偏差动态变化场景,小偏差时比例系数过大会导致转向超调,大偏差时比例系数过小会导致响应滞后,为此,设计了融合距离偏差与转向轮当前偏摆角度的变比例增益系数 $K_p(k)$ ($^{\circ}$)/mm,由基础增益和转弯增益修正组成^[23]。

基础增益是指在不考虑离心力影响时,比例增益中的基准部分,其仅需随距离偏差调整,确保偏差越大,增益越大。基础增益采用固定基础增益和偏差缩放的线型模型,避免增益突变导致的转向抖动^[24],该公式为

$$K_{pb}(k) = K_{pb0} + K_{ps} |e_d(k)| \tag{4}$$

式中 $K_{pb}(k)$ ——周期基础增益, ($^{\circ}$)/mm

K_{pb0} ——固定基础增益, ($^{\circ}$)/mm,表示单位长度偏差对应的基础转向角,确保即使偏差较小时,系统仍有足够转向力修正偏差

$K_{ps} |e_d(k)|$ ——偏差缩放项, ($^{\circ}$)/mm

其中: K_{ps} 为比例增益缩放因子, ($^{\circ}$)/mm²,用于调节偏差对增益的影响速率,当 $K_{ps} = 0.05$ ($^{\circ}$)/mm², $|e_d(k)|$ 从 50 mm 增至 100 mm 时,增益同步增加 0.25 ($^{\circ}$)/mm,表示偏差越大增益系数也越大。

转弯增益修正是指在转弯工况下,车辆受离心力作用易偏离加剧,需额外提升比例增益以增强转向修正能力而进行的增益修正^[25],引入转向轮当前偏摆角 $A_p(k)$ 与最大转弯角 $A_{\max}$ 的比值作为修正因子, $A_{\max}$ 是由转弯机构的结构设计所决定的固定值,如 60 $^{\circ}$,故修正后的变比例增益系数为

$$K_p(k) = K_{pb}(k) \left(1 + K_t \frac{|A_p(k)|}{A_{\max}} \right) \tag{5}$$

式中: $1 + K_t \frac{|A_p(k)|}{A_{\max}}$ 为转弯修正因子,无量纲。 K_t 为转弯增益放大系数,无量纲,表示当转向轮当前偏摆角越大,则转弯修正因子也越大,进而提升转弯响

应,当 $K_{pb}(k) = 1(^{\circ})/\text{mm}$ 、 $K_t = 0.1$ 、 $\frac{|A_p(k)|}{A_{\max}} = 0.5$ 时, $K_p(k) = 1.05(^{\circ})/\text{mm}$, 转向响应速度较无修正时提升了 0.05 倍, 对转弯时的偏离趋势具有抑制作用。

2.4.2 完整 PID 控制模型

结合喷淋车与苗架边板距离偏差、转向轮当前偏摆角度、纠偏误差、距离偏差变化速率等因素, 构建转向轮目标偏摆角计算的完整 PID 模型

$$A_t(k) = D \left[K_p(k)e_d(k) + K_i \sum_{i=0}^k (e_d(i)\Delta t) + K_d \frac{e_d(k) - e_d(k-1)}{\Delta t} \right] \quad (6)$$

$K_p(k)e_d(k)$ 为比例项, 由变比例增益系数与当前偏差相乘所得, 输出核心转向角度, 是偏差修正的主要力量, 表现在偏差越大则目标偏摆角越大, 同时, 转向轮当前偏摆角越大, 则目标偏摆角也越大, 以提高纠偏响应。

$K_i \sum_{i=0}^k (e_d(i)\Delta t)$ 为积分项, K_i 为积分增益系数, $(^{\circ})/(\text{mm} \cdot \text{s})$, 用于调节累积纠偏误差与纠偏力度的匹配度; $\sum_{i=0}^k (e_d(i)\Delta t)$ 为累积纠偏误差量化, $\text{mm} \cdot \text{s}$, Δt 为控制周期, s , 通过历史偏差与控制周期乘积的累积, 来表征由设备、环境等客观因素造成的累积纠偏误差, 该值越大则目标偏摆角也越大, 纠偏力度越强, 比如: 若喷淋车在连续多个作业周期内持续向同一方向跑偏, 说明系统中存在可诱发该方向跑偏的机械、环境等干扰因素, 且当前纠偏力度不足以抵消这类影响。鉴于喷淋车在最小与最大允许距离之外时, 纠偏方向会完全相反, 为避免单侧跑偏的积分累积值对另一侧产生持续性叠加干扰, 当车辆处于非纠偏区域时, 需将积分项累积值清零。

$K_d \frac{e_d(k) - e_d(k-1)}{\Delta t}$ 为微分项, 反映偏差变化越快, 角度调节越强的逻辑, 其中 K_d 为微分增益系数, $(^{\circ}) \cdot \text{s}/\text{mm}$, 表示单位偏差变化率对应的微分角度补偿, $\frac{e_d(k) - e_d(k-1)}{\Delta t}$ 表示偏差变化率, mm/s , 例如, 当喷淋车向远离理论方向移动时, 将正补偿目标偏摆角, 以提高纠偏响应速率, 当向靠近理论方向移动时, 将负补偿目标偏摆角, 以抑制纠偏超调, 使转向更加趋于平滑。

2.5 PID 模型仿真

为验证导向纠偏模型的动态特性, 采用 Matlab 开展数值仿真。主要参数取值: $K_{pb0} = 0.2(^{\circ})/\text{mm}$, $K_{ps} = 0.01(^{\circ})/\text{mm}^2$, $K_i = 0.005(^{\circ})/(\text{mm} \cdot \text{s})$, $K_t =$

0.005 , $K_d = 2(^{\circ}) \cdot \text{s}/\text{mm}$, $d_{\min} = 55 \text{ mm}$, $d_{\max} = 75 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$, $A_{\max} = 60^{\circ}$ 。为简化仿真难度, 假定当前偏摆角恒定, 本例中取 $A_p(k) = 20^{\circ}$, 此时, 喷淋车运动方向倾斜于苗架边板并作直线轨迹移动。仿真内容包括变比例增益系数变化曲线, 如图 9 所示, 以及喷淋车前进、后退两种运动状态下, 分别由远及近靠近参照物和由近到远远离参照物时, PID 模型中的比例项、积分项、微分项、目标偏摆角等曲线, 如图 10 所示。曲线图中 X 轴坐标值表示超声波传感器检测距离, 仅对高频分布区域 20 ~ 120 mm 进行仿真, X 轴坐标值从左到右递增表示喷淋车远离苗架运动, 递减表示靠近苗架运动, 在 55 ~ 75 mm 为非纠偏区域、20 ~ 55 mm 和 75 ~ 120 mm 为纠偏区域, 分别对应图 8 的中位、①、② 3 个区域。

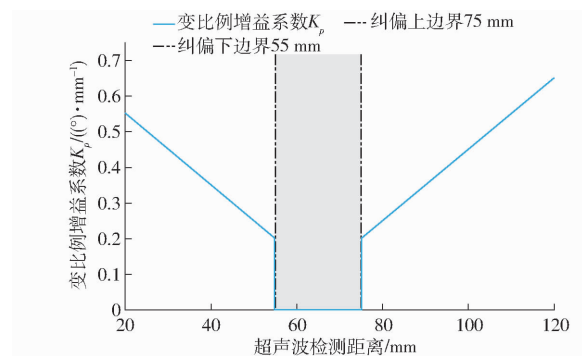


图 9 变比例增益系数 K_p 曲线

Fig. 9 Variation curves of variable proportional gain coefficient K_p

仿真结果表明各曲线的变化规律与理论预期一致:

(1) 本例中假定当前偏摆角恒定, 故变比例增益系数与偏差量为正相关关系, 其变化范围为 0 ~ $0.65(^{\circ})/\text{mm}$, 在非纠偏区域内为零; 越靠近非纠偏区域数值越小, 以使转向趋于平缓, 越远离则数值越大, 以增强纠偏力度。

(2) 目标偏摆角为比例项、积分项、微分项的综合, 在纠偏区域内偏差量越大其数值也越大, 反之越小, 在非纠偏区域为零; 越靠近非纠偏区域, 曲线越平缓, 可使导向动作平稳, 反之曲线越陡, 纠偏力度就越强; 纠偏方向与喷淋车运动方向、当前所处区域有关, 前进时①号区域正向纠偏, ②号区域负向纠偏, 后退时①号区域负向纠偏, ②号区域正向纠偏。

(3) 比例项是目标偏摆角的主要影响因素, 其值受变比例增益系数和偏差量变比例正相关影响, 体现出偏差大纠偏力度大, 偏差小纠偏平缓的特点, 在非纠偏区域为零, 在跨越纠偏边界后非零输出。

(4) 积分项随偏差累积呈单向增长, 在同侧纠偏区域偏差越大、时间越长则纠偏力度越大, 其正补

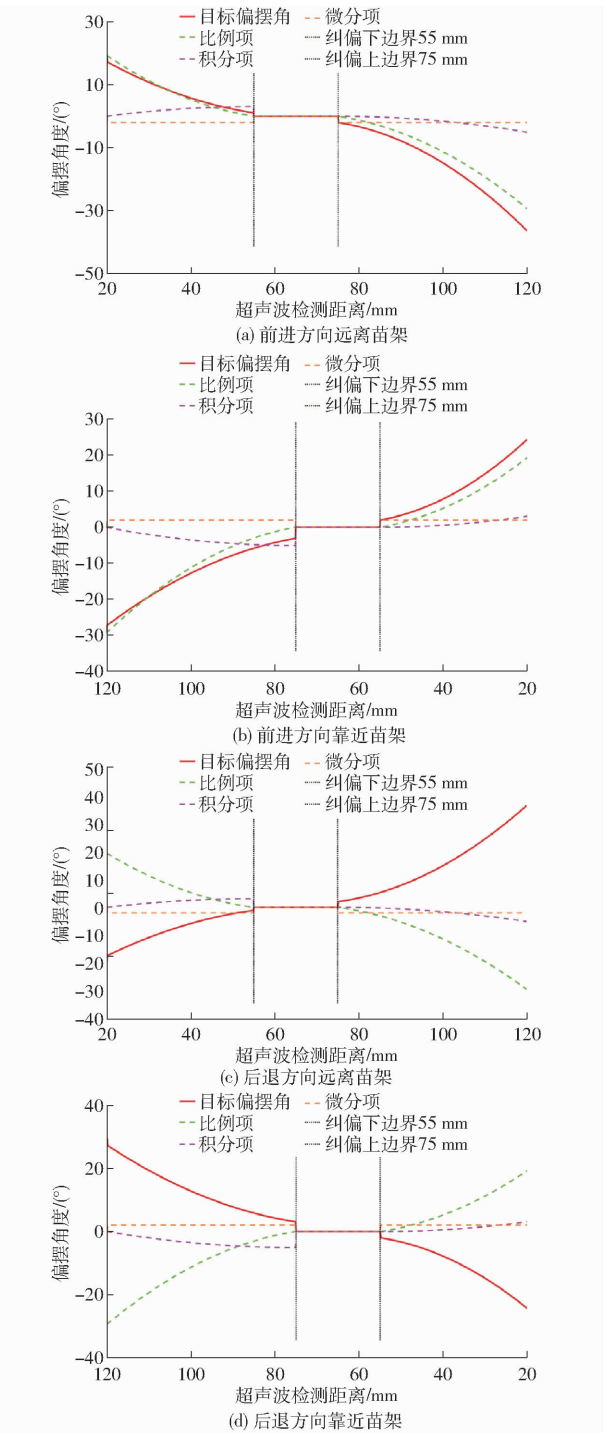


图 10 变比例增益 PID 模型仿真曲线

Fig. 10 Simulation curves of variable proportional gain PID model

偿于目标偏摆角;进入非纠偏区域时累积值归零,跨越另一侧纠偏区域时,重新开始累积。

(5)微分项反映了本例假定的恒定偏差变化率特性,因本例假定喷淋车移动路线为直线轨迹,相邻周期偏差量差值不变,故变化率不变,在纠偏区域补偿值恒定;喷淋车向非纠偏区域靠近时,其负补偿于目标偏摆角,以使转向趋于平缓,远离时则为正补偿,以增强纠偏力度,在非纠偏区域时不进行补偿。

实际应用中,需考虑噪声对偏差计算的干扰,后续需引入滤波环节以提升模型鲁棒性;同时,模型中各项调节系数需根据实际系统的响应速度进一步整定,避免纠偏力度过强导致超调或过弱导致系统响应迟缓、纠偏不及时。

3 导向纠偏试验

3.1 中试平台搭建

3.1.1 作业环境

循边导向地面行走式喷淋车及中试大棚基地如图 11 所示,其内苗架宽度 1 850 mm,长度 30 m,均为移动式,可以横移腾出巷道,巷道最大宽度为 600 mm,苗架边框宽度为 65 mm,材质为铝合金,表面光滑平整,对超声波反射性好,地面为工程彩砖,最大上浮量 30 mm。



图 11 喷淋车及中试大棚基地

Fig. 11 Sprayer and pilot greenhouse base

1. 苗架及作物 2. 车体 3. 喷淋架 4. 大棚

3.1.2 系统配置

基于超声波传感器的选型原则及控制系统的设计指标,本牵引导向系统的硬件架构配置如下:主控单元选用 PLC,配置 A/D 扩展模块及 EtherCAT 通讯接口,确保其运算能力与 I/O 资源满足系统控制需求;信息采集单元采用超声波测距模块,其核心参数为:工作频率 40 kHz,声束半角 15°,有效测距范围 20 ~ 4 000 mm,测距精度 3 mm,经校核,该参数配置满足式(1)的理论要求;转向驱动单元采用闭环步进伺服系统,主要由集成式步进伺服电机(内置绝对式编码器)、SSDC 总线型驱动器及 PX 行星减速器组成;行走驱动单元采用开环步进驱动系统,主要包含步进电机及其驱动器、直角行星减速器,以提供稳定的行进动力。

3.1.3 边界约束

在纠偏模型的程序实现过程中,需设置三重边界约束以确保系统鲁棒性:

(1)传感器盲区的数据钳位处理:考虑到超声波传感器在近场存在测量盲区,当检测距离小于盲区阈值时,反馈数据存在失真风险,因此,程序设定将所有小于该阈值的反馈值强制修正为盲区阈值。

(2)异常反馈数据的逻辑判定:基于大棚巷道宽度与喷淋车本体宽度的几何约束,传感器的理论最大测量值不应超过 $W-B$,若反馈值超出此范围,则判定为数据异常,以本例参数 $W-B=200\text{ mm}$,对应反馈码值 3 772 为例,当 PLC 接收的数据大于该数值时,系统将触发异常处理机制。

(3)转向机构的行程限位保护:受限于机械结构与安装空间,转向轮的转角存在物理极限,因此,当模型计算输出的纠偏角大于机械行程极限角时,控制器将自动以行程极限角作为最终输出指令,以防止机械损坏。

3.2 底层硬件接线原理

牵引导向系统的接线原理如图 12 所示,包含转向步进电机伺服模块与行走驱动步进电机模块的典型接线示例,其核心接线逻辑及信号传输流程如下:首先,行走速度、转向速度、初始方向等控制参数通过触摸屏设定,经 Mini Din-8 芯接口及

DB9 插头连接的通信电缆传输至 PLC;再由设备面板上的手动控制按钮及开关触发信号,通过 PLC 数字输入端口实现喷淋车的启动、停止、复位等动作控制;系统启动后,PLC 依据预设的初始方向参数,通过数字输出端口向步进驱动器发送转向、脉冲及使能信号,驱动步进电机运转,进而带动喷淋车行驶;行驶过程中,超声波测距传感器按设定周期检测与参照物的间距,检测信号经 A/D 转换模块处理后,通过扩展电缆传输至 PLC,同时,集成于转向步进电机的多圈绝对编码器,将实时角度位置数据经同步串行接口 SSI 反馈至 SSDC 步进伺服驱动器,再通过 EtherCAT 网线上传至 PLC。PLC 接收距离数据与角度位置数据后,经变比例增益 PID 控制模型运算,输出转向电机实际偏摆角度指令,该指令通过 EtherCAT 网线传送至 SSDC 步进伺服驱动器,最终驱动步进电机精准转动,实现系统的实时纠偏导向功能。

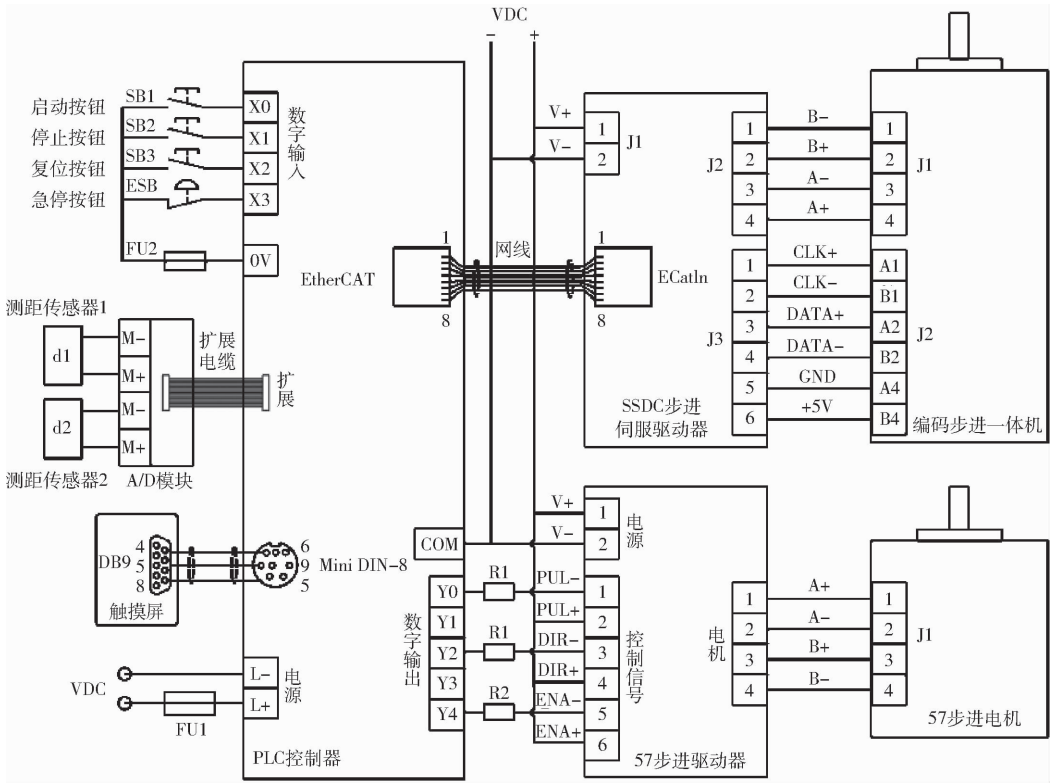


图 12 控制系统接线原理图

Fig. 12 Schematic of control system wiring principle

3.3 关键数据关联验证

为了验证转向系统的实际功效,将 4 组轮系的驱动功能临时停用,仅保留转向轮的偏转功能,再将喷淋车行驶方向设定为“前进”,在超声波测距前将转向轮当前偏摆角置为零,通过苗架移位手轮手动将苗架边板向测距传感器靠近,每移动 10 mm 采集一次数据,逐个对喷淋车与苗架边板之间的高频分布区域 20 ~ 100 mm 中的 9 个测量点进行测试,采集

数据包括手工测量间距、超声波反馈间距、转向轮理论目标偏摆角和实测偏摆角等,并将实测结果与仿真数据进行对比,测试结果如图 13、14 所示。

从机验证的单步采集数据和 Matlab 仿真数据的分析来看,本系统主要表现出以下特性:

(1)测距精度方面:传感器反馈距离与人工测量间距的最大正、负偏差分别为 2.91、-1.57 mm,误差范围在超声波传感器标称精度(3 mm)以内。

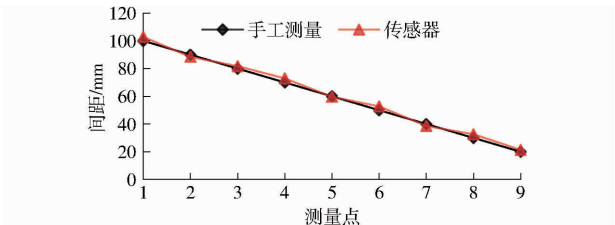


图 13 传感器反馈与手工测量距离数据对比

Fig. 13 Comparison of distance data between sensor feedback and manual measurement

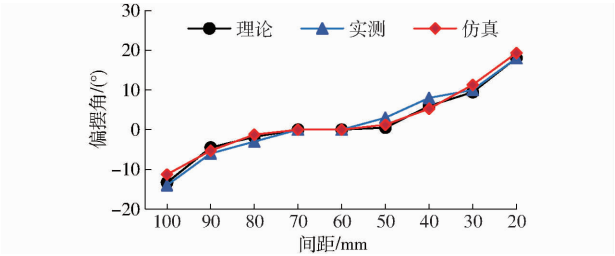


图 14 转向轮偏摆角数据对比

Fig. 14 Comparison of steering wheel yaw angles

(2)转向控制方面:车轮转向的实测偏摆角与理论目标偏摆角的偏差小于 2.5° ,处于转向轮偏摆行程极限角的 5% 以内,符合预期。

(3)模型一致性方面:各测量点的实机验证PLC输出理论目标偏摆角、人工实测偏摆角与Matlab模型仿真比例项三者变化规律一致,表明实机系统的理论输出与实测效果均实现了模型仿真的控制逻辑。但前两者与模型仿真在各测量点的数据存在随机性正负偏差,反映出系统存在测量误差与精度问题。

综上所述,实机验证结果与模型仿真基本吻合,二者均体现了转向轮偏摆角随距离偏差呈变比例正相关的变化规律,验证了变比例增益PID控制模型的有效性 & 理论预期。

3.4 整机实测效果

整机实测旨在全面验证系统的纠偏导向综合性能,考核指标涵盖边界识别、方向控制、定位精度、动态响应及控制效能5个维度。测试条件设定为:喷淋车行进速度 5 m/min ,纠偏边界上、下限设定为 $d_{\min}=55\text{ mm}$ 、 $d_{\max}=75\text{ mm}$ 。

实测结果表明:系统能够准确识别纠偏边界,在

从纠偏区域向非纠偏区域切换的过程中,边界识别的最大正、负偏差分别为 3 mm 、 -2 mm 。纠偏方向控制逻辑与模型仿真一致,执行机构运动平滑稳定,无明显突变或抖动现象。此外,导向纠偏全过程运行安全平稳,未发生与苗架的干涉或碰撞,现场调试如图15所示,传感器与模拟边板之间始终保持在安全距离。

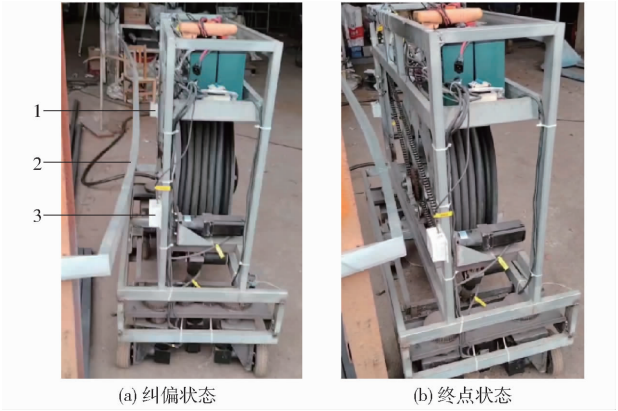


图 15 整机调试现场情况

Fig. 15 Overall machine commissioning on site

1. 后置传感器 2. 模拟边板 3. 前置传感器

4 结束语

针对温室苗架喷淋车地面行走导向难题,设计四轮独立驱动、前后端双轮同步转向的牵引导向系统,构建以超声波测距为感知核心、PLC为控制单元、变比例增益PID为纠偏算法的自动循迹控制系统,实现沿苗架边板稳定行走与动态纠偏。试验结果表明,系统在行走速度 5 m/min 工况下,纠偏精度达 5 mm ,导向运动平稳无碰撞、无干涉,运行安全性与可靠性满足设计要求。

该系统以现有苗架边板为循迹基准,无需对温室进行结构改造,具有结构简洁、成本低廉、适配性强等特点。与传统人工喷淋相比,可显著降低劳动强度、提升作业效率;与顶部固定式灌溉装置相比,设备投资降低约 90% ,利用率提升数十倍。研究成果解决了温室喷淋装备自动行走导向关键技术问题,在温室育苗自动化作业中具备良好的工程应用与推广价值。

参考文献

[1] 赵向鹏,王荣先,姬江涛. 温室双孢菇栽培智能喷淋装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2022,44(12):187-191.
Zhao Xiangpeng, Wang Rongxian, Ji Jiangtao. Design and experiment of intelligent spray device for cultivation of agaricusbisporus in greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(12):187-191. (in Chinese)

[2] El Amraoui K, El Ansari M, Lghoul M, et al. Embedding a real-time strawberry detection model into a pesticide-spraying mobile robot for greenhouse operation[J]. Applied Sciences, 2024, 14(16): 7195.

[3] Luo Y, Huang D, Jiang P, et al. Design and experimental testing of an overhead rail automatic variable-distance targeted spray system for solar greenhouses[J]. Agriculture, 2023, 13(9): 1853.

[4] 赵擎,王新坤,颜海兰,等. 基于射流脉冲三通的桁架喷灌机水力性能试验[J]. 节水灌溉,2024(9):59–64,73.
Zhao Qing, Wang Xinkun, Yan Hailan, et al. Hydraulic performance test of truss sprinkler irrigation machine based on jet pulse tee[J]. Water Saving Irrigation,2024(9):59–64,73. (in Chinese)

[5] 苗中华,朱子煜,张伟,等. 具身智能农业机器人关键技术与发展趋势[J]. 农业机械学报,2025,56(9):212–239.
Miao Zhonghua, Zhu Ziyu, Zhang Wei, et al. Key technologies and development trends of embodied intelligence agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(9):212–239. (in Chinese)

[6] 孟志军,王昊,付卫强,等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2023,54(10):1–24.
Meng Zhijun, Wang Hao, Fu Weiqiang, et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):1–24. (in Chinese)

[7] 肖茂华,丁甲辰,朱烨均,等. 丘陵山地轨道农机具转运平台防失稳系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(12):170–179.
Xiao Maohua, Ding Jiachen, Zhu Yejun, et al. Design and test of anti-instability system of hilly and mountain track agricultural machinery transfer platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(12):170–179. (in Chinese)

[8] Aquilina K, Barton D A W, Lepora N F. Tactile control for object tracking and dynamic contour following[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2024, 178: 104710.

[9] 林熙淼,叶云翔,王梦想,等. 基于侧偏力矩检测的旋耕起垄拖拉机自主导航控制方法[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊1):373–382,391.
Lin Ximiao, Ye Yunxiang, Wang Mengxiang, et al. Autonomous navigation control method of rotary tillage ridging tractor based on lateral torque detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(S1):373–382,391. (in Chinese)

[10] 马丽娜,徐扬杰,罗承铭,等. 茶园自走式修剪机接触式循垄导航系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(16):34–43.
Ma Lina, Xu Yangjie, Luo Chengming, et al. Design and experiment of the contact-style ridge-following navigation system for a tea garden self-propelled trimming machine[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(16): 34–43. (in Chinese)

[11] 邵明玺,张秀梅. 基于视觉导航的电动运输车自动行驶系统设计与验证[J]. 中国农机化学报,2025,46(5):261–268.
Shao Mingxi, Zhang Xiumei. Design and verification of automatic driving system for electric transport vehicles based on visual navigation [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2025,46(5):261–268 (in Chinese)

[12] 应仇凯,程泓超,马锟宏,等. 基于 YOLO v8–Seg 的地栽草莓采摘机器人垄面视觉导航控制方法[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊1):9–17.
Ying Qiukai, Cheng Hongchao, Ma Zenghong, et al. Ridge visual navigation control method for ground-planted strawberry picking robots based on YOLO v8–Seg algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(S1):9–17. (in Chinese)

[13] 尹春杰,安子孟,肖发达. 基于超声波定位的无轨运输机随动控制系统设计[J]. 农业装备与车辆工程,2023,61(4):130–134.
Yin Chunjie, An Zimeng, Xiao Fada. Following trackless transportation system based on ultrasonic distance measurement[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering,2023,61(4):130–134. (in Chinese)

[14] 周建军,刘泉乐,曹磊,等. 基于 MLKA 与时序 RANSAC 融合的梨园导航线提取方法[J]. 农业机械学报,2025,56(12):657–665.
Zhou Jianjun, Liu Quanle, Cao Lei, et al. Navigation line extraction in pear orchard based on MLKA and temporal RANSAC fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(12):657–665. (in Chinese)

[15] Rapado-Rincon D, Kootstra G. Tree–SLAM: semantic object SLAM for efficient mapping of individual trees in orchards[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101439.

[16] 王家博,魏文波,王广阔,等. 履带式电动微耕机自动导航系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(23):63–72.
Wang Jiabo, Wei Wenbo, Wang Guangkuo, et al. Design and experiment of the automatic navigation system for tracked electric micro tillers[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(23): 63–72. (in Chinese)

[17] 张智刚,王明昌,毛振强,等. 基于星基增强精密单点定位的农机自动导航系统开发与测试[J]. 华南农业大学学报,2021,42(6):109–116.
Zhang Zhigang, Wang Mingchang, Mao Zhenqiang, et al. Development and test of auto-navigation system for agricultural machinery based on satellite-based precision single-point positioning[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 109–116. (in Chinese)

[18] Mwitwa C, Rains G C. The integration of GPS and visual navigation for autonomous navigation of an Ackerman steering mobile robot in cotton fields[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2024, 11: 1359887.

[19] 范珍珍,樊富起. 超声波雷达测距下的车辆线控转向稳定性模糊控制[J]. 现代雷达,2025,47(6):62–68.
Fan Zhenzhen, Fan Fuqi. Fuzzy control of vehicle steer-by-wire stability under ultrasonic radar ranging[J]. Modern Radar, 2025,47(6):62–68. (in Chinese)

[20] Alam A, Abdullah A S, Akhter I, et al. Object detection learning for intelligent self automated vehicles [J]. Intelligent Automation & Soft Computing,2022,34(2):941-955.

[21] 冯添,黄玉祥,赵鹏飞,等. 基于多传感器融合的玉米播种机播深控制系统设计与试验[J]. 干旱地区农业研究,2025,43(4):261-272.
Feng Tian, Huang Yuxiang, Zhao Pengfei, et al. Design and test of control system for sowing depth of cornseeder based on multi-sensor fusion[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2025,43(4):261-272. (in Chinese)

[22] 王鹏,张涛,龚克,等. 超精密超声波测距装置设计[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2022,35(3):469-474.
Wang Peng, Zhang Tao, Gong Ke, et al. Design of ultra-precision ultrasonic ranging device[J]. Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition),2022,35(3):469-474. (in Chinese)

[23] 姚杰. 基于深度强化学习的自适应增益控制算法研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2022.
Yao Jie. Adaptive gain control algorithm based on deep reinforcement learning[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022. (in Chinese)

[24] 寇发荣,方博,张新乾,等. 汽车线控转向系统自适应变增益传动比设计[J]. 郑州大学学报(工学版),2024,45(5):8-15,29.
Kou Farong, Fang Bo, Zhang Xinqian, et al. Adaptive variable gain transmission ratio design for automotive steer-by-wire systems[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science),2024,45(5):8-15,29. (in Chinese)

[25] 阎春利,吴占煊. 基于模糊 PID 的线控转向汽车转向控制研究[J]. 武汉理工大学学报,2023,45(7):54-61.
Yan Chunli, Wu Zhanxuan. Research on steering control of steering-by-wire vehicle based on fuzzy PID[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2023,45(7):54-61. (in Chinese)

(上接第 303 页)

[18] Chen G J, Hou Y J, Cui T, et al. YOLOv8-CML: a lightweight target detection method for color-changing melon ripening in intelligent agriculture[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 11937.

[19] Fu L, Tola E, Al-Mallahi A, et al. A novel image processing algorithm to separate linearly clustered kiwifruits[J]. Biosystems Engineering, 2019, 183(1): 184-195.

[20] 李振波,刘欣,竺明昊,等. 面向种植农业复杂场景的 YOLO 算法应用综述[J]. 农业机械学报,2026,57(13):48-70.
Li Zhenbo, Liu Xin, Zhu Minghao, et al. Survey of YOLO algorithm applications for complex scenarios in crop agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(13):48-70. (in Chinese)

[21] Zhang Y, Li S, Pereira L A, et al. P4CN-YOLOv5s: a passion fruit pests detection method based on lightweight-improved YOLOv5s[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1612642.

[22] Ultralytics. YOLOv11: real-time object detection and segmentation[EB/OL]. (2024-10-01)[2024-11-20]. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.

[23] 张震,周俊,江自真,等. 基于改进 YOLO v7 轻量化模型的自然果园环境下苹果识别方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 231-242.
Zhang Zhen, Zhou Jun, Jiang Zizhen, et al. Apple recognition method in natural orchard environment based on improved YOLO v7 lightweight model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 231-242. (in Chinese)

[24] 苗荣慧,李志伟,武锦龙. 基于改进 YOLO v7 的轻量化樱桃番茄成熟度检测方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 225-233.
Miao Ronghui, Li Zhiwei, Wu Jinlong. Lightweight maturity detection of cherry tomato based on improved YOLO v7[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 225-233. (in Chinese)

[25] Rana S, Hensel O, Nasiakhmadi A. From vineyard to vision: multi-domain analysis and mitigation of grape cluster detection failures in complex viticultural environments[J]. Results in Engineering, 2024, 24(1): 102928.

[26] Qin D, Leichner C, Delakis M, et al. MobileNetV4 - universal models for the mobile ecosystem[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2024: 1-12.

[27] Wang Q, Wu B, Zhu P, et al. ECA-Net: efficient channel attention for deep convolutional neural networks[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020: 11534-11542.

[28] Wang A, Chen H, Liu L, et al. YOLOv10: real-time end-to-end object detection[J]. Advances in Neural Information Processing System, 2024, 37:107984-108011.