

丘陵果园除草机器人底盘系统设计与试验

赵智宇^{1,2} 朱立成^{1,2} 周利明^{1,2} 吕程序^{1,2} 李沐桐³ 董鑫^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 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. 广东省现代农业装备研究所, 广州 510630)

摘要: 针对丘陵果园环境非结构化且复杂多变,常规的除草方式效率低等问题,设计了一种果园除草机器人底盘系统。根据果园丘陵地形地貌环境,确定车体控制方式和除草机器人底盘的总体结构方案,主要包括液压传动系统、电气控制系统等。设计配套的除草车电气控制系统和遥控接收、车载主控和导航功能的 CAN 通信协议。以运动控制为核心,采用角度传感器、电机驱动、车载主控、导航模块,构成闭环控制。使用自抗扰控制算法,以油阀控制电机为对象应用 Simulink 仿真,仿真结果显示自抗扰控制相比 PID 控制调节时间减少 0.42 s,超调幅度减小 11.5%,稳定时间缩短 0.14 s。田间试验表明,运用自抗扰控制、结合导航功能的除草机器人行走速度均值为 6.2 km/h,均方差 0.037 km/h,作业效率 0.51 hm²/h,有效除草率均值 97.46%,可在 25°斜面上正常行走,对导航路径的跟踪误差标准差为 4.732 cm,运动控制响应及时,能够提高除草作业安全性和准确性。

关键词: 丘陵果园; 除草机器人底盘; 自抗扰控制; 控制器局域网

中图分类号: S232.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0048-10

Design and Experiment of Chassis Control System for Weeding Robot in Hilly Orchard

ZHAO Zhiyu^{1,2} ZHU Licheng^{1,2} ZHOU Liming^{1,2} LÜ Chengxu^{1,2} LI Mutong³ DONG Xin^{1,2}

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

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

3. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China)

Abstract: Aiming at the problems of unstructured and complex hilly orchard environment and low efficiency of conventional weeding methods, an orchard weeding robot chassis system was proposed. According to the hilly terrain and landform environment of the orchard, the vehicle body control mode and the overall structure scheme of the weeding robot chassis were determined, mainly including the hydraulic transmission system, and electrical control system, etc. With motion control as the core, in order to improve the control accuracy of the hydraulic system, the supporting electrical control system, remote control receiver and CAN communication protocol of the weeding vehicle were designed, which were composed of the main controller, remote control receiver, motor drive module and navigation module, and the software flow was determined. The motion controller was designed based on the active disturbance rejection control algorithm. The robot track speed was determined by the valve angle of the hydraulic system, it can be seen that the dynamic performance of the motor directly connected to the control valve was the motion control target. The Simulink simulation model was established by taking the motor angle of the hydraulic valve as the object and the speed, disturbance and output as the state variables. The simulation results showed that the ADRC reduced the adjustment time by 0.42 s, the overshoot by 11.5% and the stability time by 0.14 s compared with the PID control. Ground experiments were arranged to verify the effectiveness of the robot system. The experiments showed that the average walking speed of the weeding robot using active disturbance rejection control combined with navigation function was 6.2 km/h, the mean square deviation was 0.037 km/h, the operation efficiency was 0.51 hm²/h, and the average effective weeding rate was 97.46%. It can walk normally on a 25° slope, and the standard deviation of

收稿日期: 2022-06-10 修回日期: 2022-07-28

基金项目: 广东省乡村振兴战略专项(粤财农[2021]125号)

作者简介: 赵智宇(1995—),男,硕士生,主要从事自动检测与控制技术研究,E-mail: tjuzhaozhiyu@163.com

通信作者: 周利明(1982—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业传感控制技术研究,E-mail: haibo1129@163.com

tracking error for the navigation path was 4.732 cm. The motion control response was timely, which can improve the safety and accuracy of weeding operation.

Key words: hilly orchard; weeding robot chassis; active disturbance rejection control; CAN

0 引言

果园是丰富农业产业结构、提高农村经济水平、凸显地域特色的重要植物园地^[1]。作为我国种植业中历史悠久的经济作物来源,果园一直以人工护理为主,其中除草是劳动强度较大的重要环节^[2]。果园除草常见的方法包括人工除草、化学除草、机械除草^[3]。人工除草费时费力,且目前城镇化发展使农村劳动力流失严重^[4]。化学除草虽然快速高效^[5],但在除草的同时药剂会渗入土壤损伤根系,喷施时需要封行封园^[6]。人工除草和化学除草难以满足要求,且目前市面上又缺乏适用于丘陵果园除草的小型割草机^[7]。

国外对移动除草设备的研究开展较早。日本 ATEX 公司研发了 R-805AB 型乘坐式割草机^[8];HUANG 等^[9]应用行跟踪系统驱动机器人以提高底盘在苹果树行间远程控制的自动化水平;MHAMUNKAR 等^[10]设计了带有支撑轮和支撑杆的手持式割草机,作业灵活且不受地形限制。国内除草机器人起步比国外晚,但农业除杂草工作受到各高校和研究机构的关注。BAO 等^[11]研究了一种履带式山地果园移动除草底盘,采用锂电池供电、电机驱动;刘永平等^[12]针对矮砧密植果园开发了三轮驱动除草机器人,作业方式灵活;周汉林等^[13]开发出可安装除草机具的履带式丘陵山地多功能底盘;杜蒙蒙等^[14]采用模块化设计开发了一种丘陵山地履带式小型动力底盘,可以手动操作行进方向。

上述研究提升了丘陵除草设备机械化水平,但在面向低承载力的丘陵山地起伏地形时,除草机器人底盘的自动控制和远程通信功能仍有提升空间。针对丘陵果园除草设备自动化水平不足的问题,本文提出一套机器人底盘系统,并研发适配的运动控制方法,从结构设计、控制策略和性能试验展开,采用自抗扰控制设计阀控电机控制系统,保证系统鲁棒性,满足实际除草作业需求,为丘陵山地果园场景提供一种智能化除草方案。

1 果园除草机器人底盘结构设计

智能果园除草机器人(图 1)底盘的控制对象主要是除草装置、履带、液压系统、电控系统、电池、遥控接收机等。

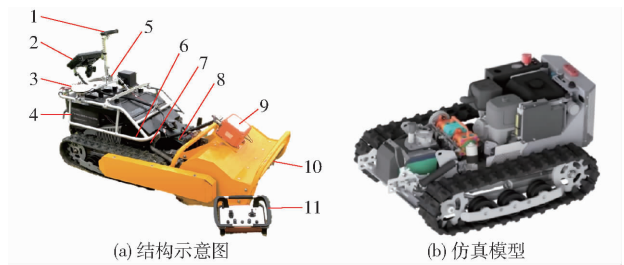


图 1 除草机器人结构图

Fig. 1 Structure diagrams of weeding robot

1. 摄像头 2. 显示屏 3. 天线 4. 驱动模块 5. 车载控制器
6. 电磁离合器 7. 液压油泵 8. 液压油箱 9. 接收器 10. 割刀
11. 遥控器

汽油发动机安装在车体后方,靠皮带轮为割刀提供动力。车载控制器和驱动模块分别安装在车后方左右两侧,控制器负责连通驱动、电磁离合器、导航模块、遥控接收机等,驱动模块负责驱动电机。车体中部是两台斜盘柱塞式液压泵以及电磁离合器、液压油箱和接近开关;履带转速由液压泵阀门决定,电机控制阀门开度。车体前部是防止割刀外露的安全罩,上方安装遥控器接收机和天线,下方为割刀(图 1)。

除草机器人底盘的行走靠柱塞式液压泵带动两侧履带转动,与车载油箱、阀门控制电机和油管组成液压系统。液压油流量与履带转速正相关,液压油流向决定履带转向,液压阀门通过螺丝和 L 形联动柄连接。当电机转动,通过杠杆原理带动 L 形联动柄,牵动油阀旋转,实现液压驱动。

L 形联动柄末端上下各有一个限位金属柄。金属柄末端有挂钩,通过一根弹簧将两个金属柄的挂钩连接,对 L 形联动柄的末端进行夹持。液压泵相关各部件的连接关系如图 2 所示。

割刀的启停由电磁离合器控制,当接收机收到停刀信号,控制器发出信号断开离合器,停止割草作业。

2 控制系统硬件设计

控制系统是底盘运动的关键核心。其主要由主控制器、遥控接收器、电机驱动模块和导航模块等组成。主控制器选择 KSTECH-C6-A 型 32 位汽车级车载控制器,工作主频 500 MHz,带有 32 MB 运行内存和 64 MB 存储器,包含 2 组支持传输速度 1 Mb/s 的 CAN 接口、1 组 RS232 调试接口、1 组 RTU 模式从站 RS232 接口和 7 组 50~3 000 Hz 的

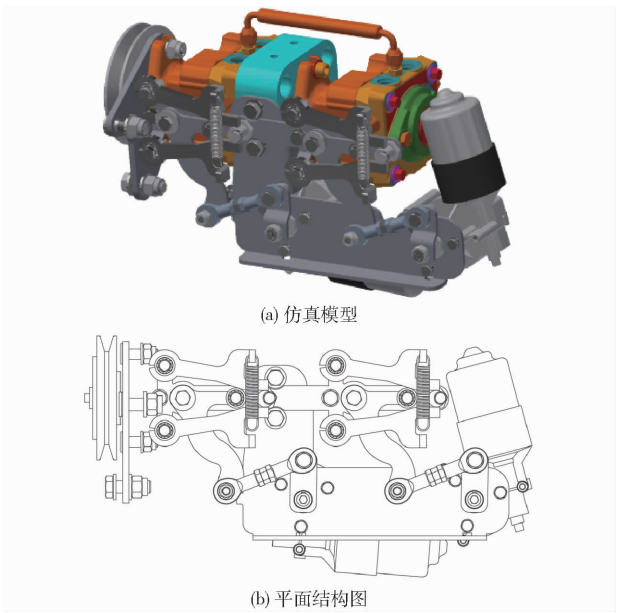


图 2 液压系统仿真模型和平面结构图
Fig. 2 Hydraulic system simulation model and structure diagram

PWM 输出口;同时车载控制器自带降压电路,为驱动模块、磁编码器、遥控接收机、导航模块、油泵供电。为满足果园除草环境,使用带有夹槽和锁止结构的 80 芯接插件引出对应信号线。

遥控接收器负责接收指令,选用 SGC001 型接收器,接收器支持 10 ~ 30 V 直流供电,遥控系统的有效频率范围为 433. 10 ~ 434. 75 MHz。

电机驱动模块是 2 块 AQMD2410NS 型驱动器,负责接收控制器的信号,分配电机工作电压,采用脉宽调制 (PWM) 信号通过驱动控制电机位置和速度;绝对值编码器为 novotech RFD - 4021,线性度 $\pm 0.5\%$,测量范围最大可达 360° ,有效量程为 180° ,对应 0 ~ 5 V,分辨率为 12 位。

导航模块由 1 组天线、定位模块和路径规划模块组成。定位模块负责将当前机器人坐标信息输入路径规划模块,计算下一个状态的坐标、方向和速度信息。

控制系统的供电由一个 12 V 车载蓄电池提供,主控制器完成分压,给磁编码器等器件供电。系统结构图如图 3 所示。

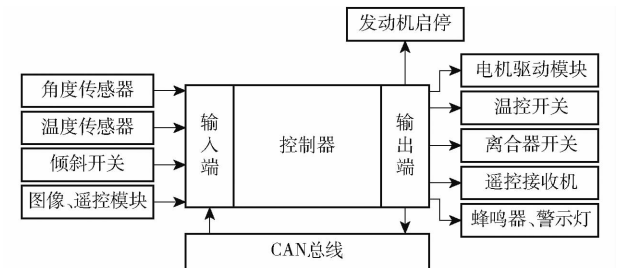


图 3 控制系统功能结构框图

Fig. 3 Functional structure diagram of control system

3 控制系统软件设计

编程软件为符合 IEC61131 - 3 国际标准的 Codesys 编程环境,编程语言为结构化语言 (ST)。编写功能块,并包含结构体等数据单元,组成 POU s, 本文的功能块包括模拟量采集和运算、接收器通信、初始化、电机正反转控制、电机控制、数字量输出控制、数字量采集。程序运行流程如图 4 所示。

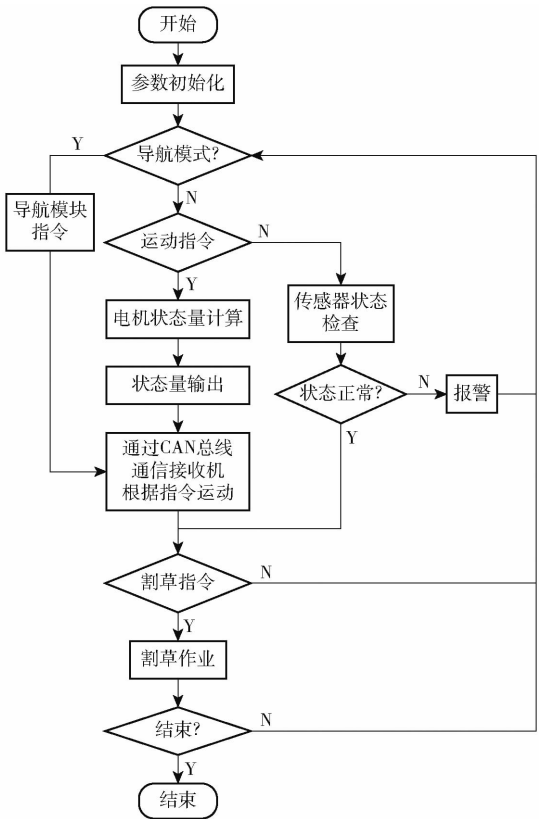


图 4 程序流程图

Fig. 4 Program flow chart

3.1 通信协议

CAN (Controller area network) 总线是线性异步串行总线,单个节点的增删、替换不影响其它功能^[15]。CAN 总线报文格式通常采用标准帧^[16], 0 ~ 8 字节组成的一帧包含起始、仲裁、指令、数据、校验、应答和结束信息^[17], 其中国际标准协议 ISO11783 适用于农机具设备^[18], 传输速度 250 kb/s, 支持最大长度 40 m 和最多 30 个电子控制单元^[19]。

本文通信速度设为 250 kb/s,接收模块与主控制器通信距离 1.5 m,选择数据标准帧格式,主控模块地址 0x81,导航模块地址 0x3F,每 0.01 s 收发一次状态数据,5 个字节依次代表前进、车速、转弯、割刀、急停,0x00 代表默认状态,按位增加 0x01 对实际运动状态进行区分。导航模块、驱动模块和遥控接收机分别作为一个节点连在 CAN 总线上,CAN 协议内容和拓扑图如表 1 和图 5 所示。

表 1 CAN 基础协议内容
Tab.1 Basic CAN protocol content

序号	功能	数据指令
B0	行走	0x00: 停车; 0x01: 前进; 0x03: 后退
B1	车速	每增加 0x01, 速度加 1 挡
B2	转弯	0x00: 直行; 0x01: 左转; 0x03: 右转
B3	割刀	0x00: 停刀; 0x01: 割草
B4	急停	FALSE: 启动急停; TRUE: 正常工作
B5 ~ B7	备用	

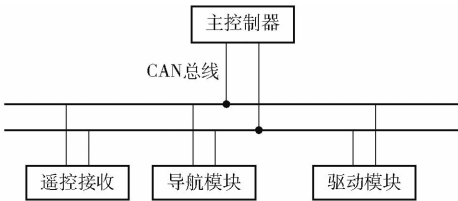


图 5 CAN 网络连接拓扑图
Fig. 5 CAN network topology

3.2 行走控制

行走控制采用遥控方式,包括前进后退、左右偏转、原地转向和微调功能。

前进、后退指令需要两侧履带保持相同转速、相同加速度;电机对应过程为左右两侧阀门控制电机以保持相同转速和方向启动、以相同转角位置停止;程序对应过程为左右电机上传感器反馈电压和电机驱动电压信号保持相同的增速和截止值,且驱动电压和反馈值应当一致。由于两侧电机电压目标值需要一致,将一侧电压作为另一侧的目标值,保证一致性。行走运动控制方式如图 6 所示。

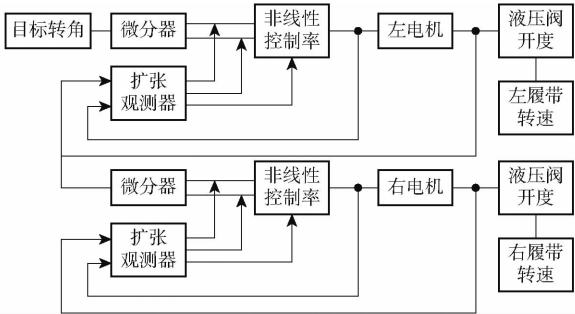


图 6 运动控制流程图
Fig. 6 Motion control flow chart

3.3 转向控制

转向控制包括原地转向和偏移转向,均基于左右履带的差速实现。当两侧履带转速不一致,高速相对低速一侧产生额外的横向力,使底盘的运动路径变为弧线。原地转向时,左右履带的转速相同且方向相反,对应液压阀门电机以相同的转角和相反的方向运动;偏移转向时,左右履带的转速不同,方向相同,对应液压阀门电机之间保持某一转角差运动。主控制器根据反馈值,控制输出驱动信号之间的差值。

微调功能是为了在实际作业过程中,对机械误差导致的电机转角相同但两侧履带转速不一致现象进行补偿,其本质相当于幅度更小、精度更高的转向控制,在主控制器输出驱动电压时再增加小幅度补偿信号,实现微调功能。转向运动控制方式如图 7 所示。

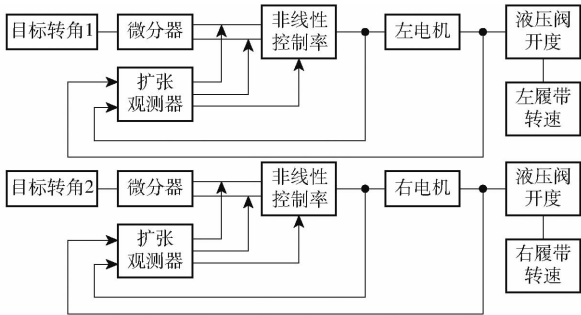


图 7 转向控制流程图
Fig. 7 Steering control flow chart

目标转角和传感器反馈电压之间的误差、目标转角变化速度和角度信号导数之间的误差作为实际输出和观测值的差值。当电机运动达到理想状态时,实际输出和观测值之间的误差应为 0。

为了保证除草机器人行走功能稳定,左右两侧阀门控制电机在转动时应保持相同转速和方向、停止时应保持相同转角。因此行走功能的重点在于电机的位置控制。

4 液压阀控制电机的控制策略

4.1 电机传递函数

除草机器人底盘为履带式,由液压马达驱动,通过电机控制液压阀门,改变液压系统内液压油流量和流向。每侧履带行走转向各需要一个阀门电机,根据扭矩、启动速度、变速因素选用广州威稳有限公司的 D63L-1280 型蜗杆电机,最大扭矩 14.88 N·m,工作电压 12 V。

将连接联动柄的电机作为被控对象,精度决定稳态误差,转角决定履带速度,转速决定加速度,因而底盘运动控制实际就是电机位置随动控制,使阀门电机稳定、迅速并准确到达指定角度位置,即为运动控制目标。

假设转子和转轴都是刚体,转子受到的磁场恒定,转子受到的摩擦为粘性摩擦,即受到的摩擦力与速度成正比。设 J 为转子的转动惯量, b 为电机粘性摩擦常数, K_t 为电机扭矩常数, K_e 为电动势常数, R 为电阻, L 为电感。为不失一般性,设 $K = K_t = K_e$ 。一般情况下直流电机的扭力与电流成正比(磁场恒定),得到方程

$$L = K_t i \tag{1}$$

式中 i ——电流

因发电机效应,电枢绕组在磁场中旋转时产生与电枢电压极性相反的反电动势 e' ,反电动势与转速成正比,即

$$e' = K_e \dot{\theta} \tag{2}$$

式中 $\dot{\theta}$ ——角速度

根据牛顿第二定律和基尔霍夫电压定律得到

$$J \ddot{\theta} + b \dot{\theta} = K i \tag{3}$$

$$iR + L \frac{di}{dt} = U - K \dot{\theta} \tag{4}$$

式中 U ——电压

对式(3)、(4)进行拉氏变换得到

$$s(Js + b)\Theta(s) = KI(s) \tag{5}$$

$$(Ls + R)I(s) = U(s) - Ks\Theta(s) \tag{6}$$

将式(5)代入式(6),消除电流项得到电机传递函数方程为

$$P(s) = \frac{\dot{\Theta}(s)}{U(s)} = \frac{y}{u} = \frac{K}{JLs^2 + (Lb + JR)s + Rb + K^2} \tag{7}$$

式中 y ——输出信号 u ——输入信号

4.2 自抗扰控制策略

自抗扰控制理论由韩京清^[20]首次提出,是一种基于扩张状态观测器的非线性控制策略,后被称为自抗扰控制(Active disturbance rejection control, ADRC)。由于系统扰动难以测定,把未知动态和外扰在自抗扰控制器的输出量中进行估计和补偿^[21],得到期望的输出。ADRC 的主要组成包括非线性状态误差控制律(Nonlinear state error feedback, NLSEF)、扩张状态观测器(Extended state observer, ESO)和跟踪微分器(Tracking differentiator, TD)3 部分^[22-23]。TD 是对输入的信号进行平滑处理,为了避免微分引发超调量过大的问题,引入 TD 将输入信号的微分作为跟踪信号^[24]。NLSEF 是一个非线性模块,将 TD 处理后的输入信号及其微分与 ESO 观测后的输出信号及其微分相减,计算出控制量输出^[25-27]。ADRC 的核心组成部分是 ESO^[28],将被控对象的微分方程转换为状态空间方程^[29],然后在 ESO 中利用控制率抑制和消除扰动,增强鲁棒性^[30]。

为了实现对电机转角位置的控制,设计自抗扰位置闭环控制,位置环为二阶自抗扰控制器。根据电机传递函数建立微分方程得到

$$\ddot{y} = \frac{K}{JL}u + \left(-\frac{Lb + JR}{JL}\dot{y} - \frac{Rb + K^2}{JL}y \right) \tag{8}$$

将式(8)括号内的部分视为扰动信号 $f(y, \omega,$

$t), u$ 的系数为控制量系数 $b_0 = \frac{K}{JL}$,得到范式

$$\dot{y} = b_0 u + f(y, \omega, t) \tag{9}$$

选取状态变量电机转角 θ 、角速度 $\dot{\theta}$ 、扰动量 f 为目标状态变量,即

$$\begin{cases} \theta = x_1 \\ \dot{\theta} = x_2 \\ f = x_3 \end{cases} \tag{10}$$

建立状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u \end{cases} \tag{11}$$

其中

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} & \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{C} &= [1 \quad 0 \quad 0] \\ \mathbf{D} &= 0 \end{aligned}$$

式(11)展开得到

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ \mathbf{y} = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{12}$$

根据状态空间方程即可建立 ESO,有 2 个输入量和 3 个输出观测量。保持状态空间方程的状态矩阵不变, $\mathbf{I}_3$ 为 3 阶单位矩阵,设总扰动量为矩阵 $\mathbf{F} = [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \delta_3]^T$,加入状态空间方程,得到 ESO 的方程为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta_1 & 1 & 0 \\ -\delta_2 & 0 & 1 \\ -\delta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{y} = \mathbf{I}_3 \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{13}$$

式中 z_1, z_2, z_3 ——目标状态观测量
 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ ——观测器参数
 b_0 ——补偿系数

当电机跟踪输入的位置信号时,ESO 输出的观测量和经过 TD 处理的输入量之间的偏差值将代入 NLSEF 进行扰动补偿。经过 NLSEF 处理后,得到控

制量 u 。控制量 u 的方程表示为

$$u = \frac{\delta_1 \text{fal}(v_1 - z_1, \alpha_1, \gamma) + \delta_2 \text{fal}(v_2 - z_2, \alpha_2, \gamma) - z_3}{b_0}$$

(14)

其中

$$\text{fal}(e, \alpha, \gamma) = \begin{cases} |e|^{\alpha \text{sgn}(e)} & (|e| > \gamma) \\ \frac{e}{\gamma^{1-\alpha}} & (|e| \leq \gamma) \end{cases}$$

(15)

$$e = v - z$$

式中 α ——非线性因子

γ ——滤波因子
 v_1, v_2 ——输入信号变化率

4.3 直流电机位置控制仿真与分析

完成电机控制器建立后,基于 Simulink 对直流电机进行位置闭环控制模型的仿真。如图 8 所示,仿真模型由 TD、ESO、NLSEF 和被控对象组成。

TD 接收角度输入信号后,将其转换为位置和速度信号,TD 内部模型如图 9 所示,根据常见采样时间间隔,选择滤波因子 h_0 为 1 ms,速度因子 r 为 500,

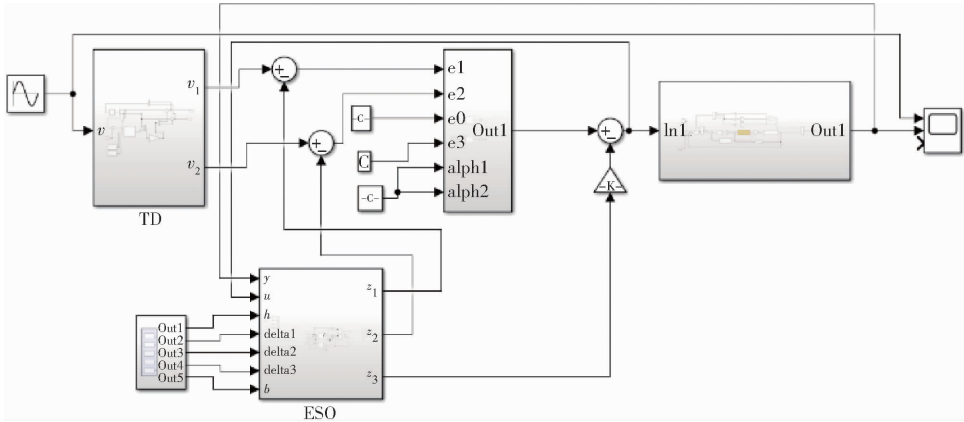


图 8 控制器仿真模型
Fig. 8 Controller simulation model

增益 h_1 设为 0.001,补偿系数 b_0 为 150。设输入信号为 4 V,得到对应的仿真结果如图 10 所示,可见 TD 输出值在 1.20 s 内达到输入量,对输入信号的跟踪效果满足要求。

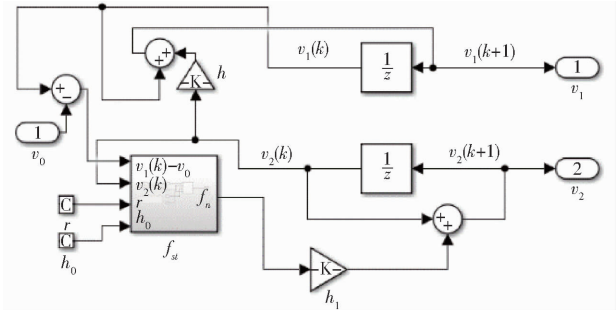


图 9 TD 仿真模型
Fig. 9 TD simulation model

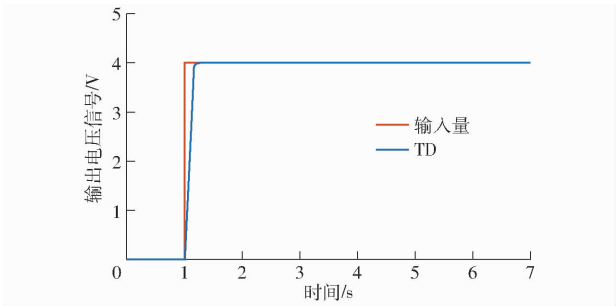


图 10 TD 阶跃响应曲线
Fig. 10 TD step response curves

ESO 的输入是输出转角和控制量输出(图 11)。

基于上文固定的 b_0 ,从 1 开始按 10 倍的数量级逐步放大或缩小,观察补偿量和抖震变化,设为观测器参数 δ_1 。然后依次放大至少 3~5 倍得到 δ_2 和 δ_3 ,最终确定 $\delta_1 = 102, \delta_2 = 2\,500, \delta_3 = 26\,000$ 。将 ADRC 控制与 PID 控制的输出结果进行对比,输出信号对比如图 12、13 所示;为了验证 ADRC 控制的抗扰能力与传统 PID 控制对噪声信号矫正效果的区别,在系统控制量之后加入一个脉冲扰动信号,输出信号的平滑程度表示扰动补偿能力,系统输出电压信号如图 14、15 所示。

系统仿真结果表明,自抗扰位置闭环控制策略下直流电机的位置信号于 1.21 s 到达峰值 4.06 V,峰值时间 0.06 s,调节时间 1.23 s,超调量 1.5%,受到噪声干扰之后回归稳态所需时间为 0.10 s;PID 控制于 1.38 s 到达峰值 4.52 V,峰值时间 0.10 s,调节时间 1.65 s,超调量 13%,受到噪声干扰之后回归稳态所需时间 0.24 s。ADRC 算法与 PID 算法相比调节时间减少 0.42 s,超调幅度减小 11.5%,稳定时间缩短 0.14 s。由图 14、15 可知,液压阀控制电机的转速可以根据当前和电机目标转角的差距自行改变,输出变化平滑。

计算得到的 ADRC 控制器相关参数即为图 6、7 中行走控制和转向控制的主控制器控制模块需要的参数值。观测器参数为 $\delta_1 = 102, \delta_2 = 2\,500, \delta_3 =$

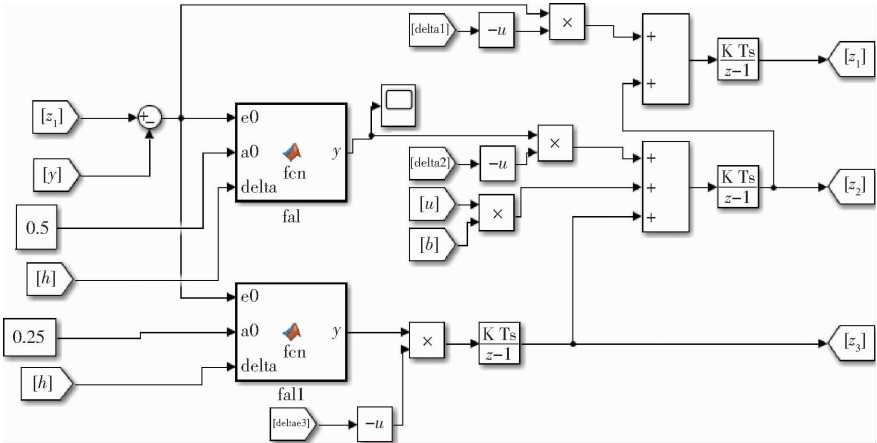


图 11 ESO 仿真模型

Fig. 11 ESO simulation model

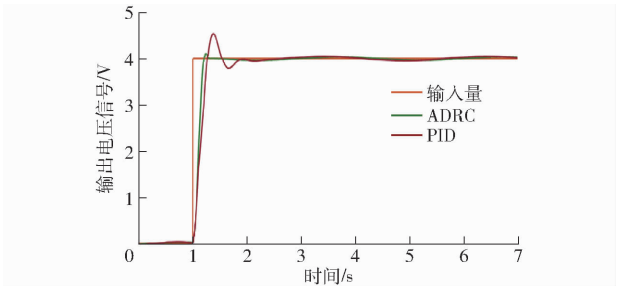


图 12 阶跃响应仿真曲线

Fig. 12 Step response simulation curves

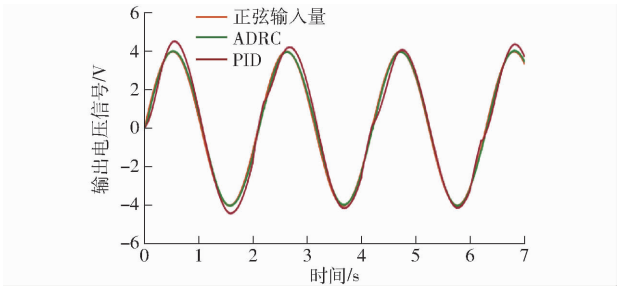


图 15 加入噪声信号的正弦信号响应曲线

Fig. 15 Sinusoidal signal response curves with noise signal

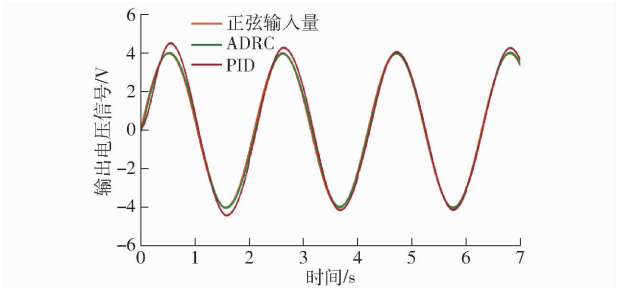


图 13 正弦信号响应曲线

Fig. 13 Sinusoidal signal response curve

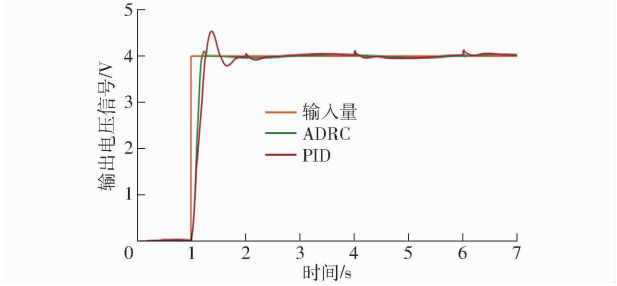


图 14 加入噪声信号的阶跃响应曲线

Fig. 14 Step response curves with noise signal

26 000, 补偿系数 $b_0 = 2\,829$, 滤波因子 $h_0 = 0.001$, 速度因子 $r = 500$; fal 函数非线性参数 $\alpha_1 = 0.002$, $\alpha_2 = 0.002$, $a_0 = 0.7$, $a_1 = 1.4$, $\gamma = 0.001$ 。

上述参数值作为主控制器中电机位置环控制模块的设置值,共同用于输出驱动电压进行约束和补偿,实现对阀门电机的扰动补偿控制。阀门电机位

置闭环控制实现准确定位和及时响应,即可遥控控制履带转速,满足底盘运动控制系统的稳定性、快速性。

为了验证控制参数和控制系统的^[16]有效性,进行除草机器人田间试验,根据不同试验项证明控制系统和控制策略的实际效果。

5 试验结果与分析

5.1 试验内容与要求

试验内容包括行驶性能、除草性能、爬坡性测试、路径规划误差试验。试验于 2022 年 1 月在广东省江门市新会区柑之林橘园进行,除草机器人尺寸(长×宽×高)为 1.85 m×0.89 m×0.79 m,质量 247 kg,履带宽度 80 cm。试验工具和装置包括场景标注软件、尺子(50 m)、秒表、坡度测量尺。具体测试内容包括:

在试验地测定除草机器人行走速度,计算公式为

$$v'_1 = \frac{l'}{t}$$

(16)

式中 v'_1 ——行驶速度,m/s

l' ——测区行驶距离,m

t ——测区行驶时间,s

作业效率计算公式为

$$S_c=0.1Wv'_2 \tag{17}$$

式中 S_c ——作业效率, hm^2/h
 W ——工作幅宽, m
 v'_2 ——作业速度, km/h

在试验地测定除草机器人除草率,除草率计算公式为

$$C=\frac{Q-H}{Q}\times 100\% \tag{18}$$

式中 C ——除草率, %
 Q ——除草前草地面积, m^2
 H ——除草后草地面积, m^2

测定除草机器人爬坡能力,选择干硬坡度路面,以除草机器人俯仰方向为作业坡度,选择一段与水平面夹角 25° 的倾斜路面,控制除草机器人保持前进状态(图 16)。计算路径跟踪误差(标准差)。

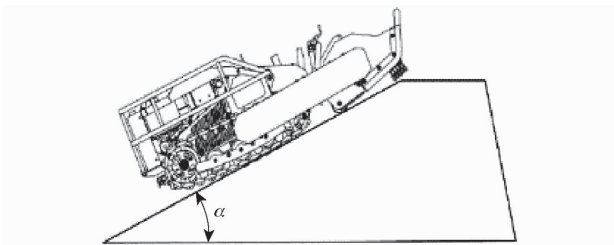


图 16 除草机器人爬坡试验示意图

Fig. 16 Schematic of climbing experiment of weeding robot

5.2 试验结果与分析

5.2.1 行驶速度

行驶速度试验地包括 20 m 以上前预备区、50 ~ 100 m 测区、20 m 以上后预备区。在前预备区启动除草机器人,并稳定运行至预设速度;在测区测量行驶速度,记录测区行驶的时间与距离;在后预备区减速并停止。行驶速度试验如图 17 所示。

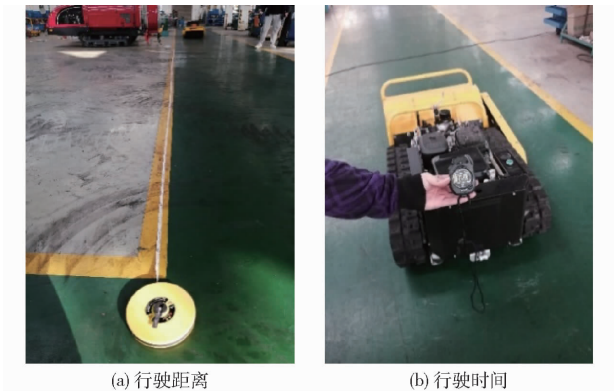


图 17 行驶速度试验

Fig. 17 Driving speed tests

由表 2 可知,设定期望行走速度为 $6.3\text{ km}/\text{h}$ 时,除草机器人行驶平均时间 5.79 s ,速度均值为 $6.2\text{ km}/\text{h}$,均方差 $0.037\text{ km}/\text{h}$,作业效率 $0.51\text{ hm}^2/\text{h}$,证明电机控制算法对电机位置控制和液压系统控制

的有效性,可以保证运动控制系统和作业效率达到作业指标。

表 2 行驶速度测定结果

Tab. 2 Measurement of driving speed					
试验序号	行驶距离/m	行驶时间/s	期望速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	行驶速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	速度误差/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
1	10	5.84	6.3	6.2	-0.1
2	10	5.53	6.3	6.5	0.2
3	10	5.47	6.3	6.6	0.3
4	10	5.66	6.3	6.4	0.1
5	10	5.98	6.3	6.0	-0.3
6	10	5.79	6.3	6.2	-0.1
7	10	5.92	6.3	6.1	-0.2
8	10	5.86	6.3	6.1	-0.2
9	10	5.96	6.3	6.0	-0.3
10	10	5.91	6.3	6.1	-0.2
均值	10	5.79	6.3	6.2	-0.1

5.2.2 除草率测试

根据农业机械推广鉴定大纲(DG/T 041—2019)的判定规则,试验地包括 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 以上测区,以及长宽外延 2 m 以上的预备区。测量除草前后根部向上的高度小于 50 mm 的草地面积并求比值,除草率试验结果如表 3 所示。经试验验证,除草率高于 97% ,满足果园除草作业需求。除草前后效果如图 18 所示。

表 3 除草率测定结果

杂草面积/ m^2	漏除面积/ m^2			除草率/%
	区域 1	区域 2	合计	
20.000 0	0.302 5	0.202 5	0.505 0	97.50
19.500 0	0.320 0	0.240 0	0.560 0	97.10
20.000 0	0.212 5	0.220 0	0.432 5	97.80



图 18 除草前、后效果

Fig. 18 Effect drawings before and after weeding

5.2.3 爬坡能力测试

爬坡能力试验时,控制除草机器人在前(纵)方向以低速起步,均匀加速,连续行驶距离不小于 2 m

(图 19)。试验结果表明,当坡度为 25°时,除草机器人在坡面爬升过程中无明显滑陷、失稳、履带脱离路面等现象。

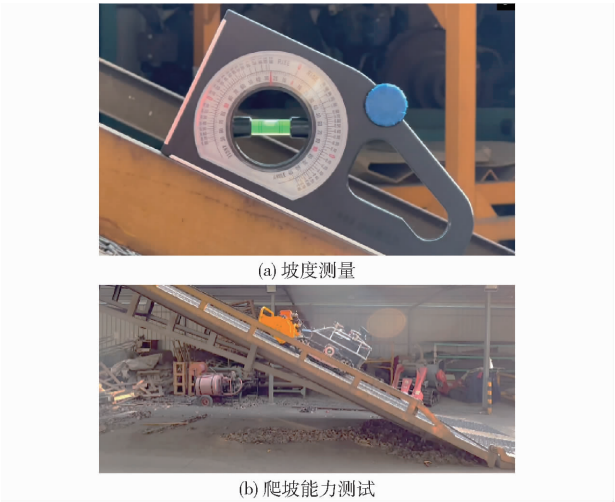


图 19 爬坡能力试验

Fig. 19 Climbing ability test

5.2.4 路径跟踪误差测试

路径跟踪试验根据导航模块获取目标点坐标。在橘园内引导除草机器人按规划路径自动行走 20 m,测量实时位置相对于预定作业路线的横向偏差(图 21)。



图 20 路径跟踪样本点采样

Fig. 20 Sample point sampling of path tracking

导航的基准线与机器的纵向中心线接近重合,在测试过程中标记右履带外侧轨迹作为样本点,故

误差为实际测量值减去履带宽度的一半(40 cm)。

当行走方向和指定路径发生偏差时,转向控制将响应纠偏信号,横向偏转返回原路径。根据误差测定结果得到标准差为 4.732 cm,行走控制效果如图 21 所示。

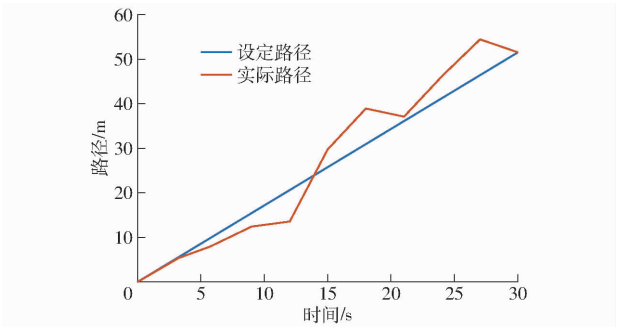


图 21 路径跟踪测定结果

Fig. 21 Path tracking measurement result

综上,行走速度均值为 6.2 km/h,均方差 0.037 km/h,作业效率 0.51 hm²/h,有效除草率均值 97.46%,可在 25°斜面上正常行走,对导航路径的跟踪误差标准差为 4.732 cm。可认为本除草机器人控制系统能适应丘陵果园大多数作业场景。

6 结论

(1)针对丘陵果园环境非结构化等问题,提出一种果园除草机器人底盘系统。根据果园丘陵地形地貌环境,确定车体控制方式和总体结构方案,包括除草装置、斜盘柱塞式液压泵、主控制器、电磁离合器、导航模块、遥控接收机,驱动模块等。

(2)采用自抗扰闭环控制算法,根据阀控电机期望角度、实际角度的偏差,基于扩张状态观测器约束状态输出,仿真结果与 PID 算法相比调节时间减少 0.42 s,超调幅度减小 11.5%,稳定时间缩短 0.14 s。

(3)装配除草机器人并进行田间试验。试验结果表明,除草机器人行走速度均值为 6.2 km/h,均方差 0.037 km/h,作业效率 0.51 hm²/h,有效除草率均值 97.46%,可在 25°斜面上正常行走,对导航路径的跟踪误差标准差为 4.732 cm,运动控制响应及时,运动性能通过测试达到预期,能够提高除草作业准确性和效率。

参 考 文 献

[1] 马攀宇,李善军,赵纯清,等. 柑橘园仿形割草机切割器的设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2019,38(6):156-162. MA Panyu, LI Shanjun, ZHAO Chunqing, et al. Design and test of cutter of citrus garden profile mower[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019,38(6): 156-162. (in Chinese)

[2] PATEL H, PRAJAPATI A, MAHESHWARI R. Design & implementation of solar weeding robot for cotton field[J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2018, 5(4): 3295-3298.

[3] 韩振浩,朱立成,苑严伟,等. 山地果园履带底盘坡地通过性能分析与优化设计[J]. 农业机械学报,2022,53(5):413-421,448. HAN Zhenhao, ZHU Licheng, YUAN Yanwei, et al. Analysis of slope trafficability and optimized design of crawler chassis in

- hillside orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 413–421, 448. (in Chinese)
- [4] KANAGASINGHAM S, EKPANYAPONG M, CHAIHAN R. Integrating machine vision-based row guidance with GPS and compass-based routing to achieve autonomous navigation for a rice field weeding robot[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(4): 831–855.
- [5] SUGIMOTO M, TAKEUCHI K, YAMAJI T, et al. A study for development of autonomous paddy-weeding robot system—an experimentation for autonomously straight-running based on compass-compensation[J]. International Journal of New Computer Architectures and Their Applications, 2018, 8(4): 186–198.
- [6] PAN D, GAO Q, ZHAO P, et al. Design and test of a distributed control system of weeding robot based on multi-STM32 and CAN bus[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2203(1): 012019.
- [7] QUAN L, JIANG W, LI H, et al. Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode[J]. Biosystems Engineering, 2022, 216: 13–31.
- [8] 甘玲, 李君略, 何林, 等. 广东省果园智能除草装备现状与展望[J]. 现代农业装备, 2019, 40(1): 12–15, 31.
- GAN Ling, LI Junlue, HE Lin, et al. Current situation and prospect of intelligent weeding equipment in orchards in Guangdong Province[J]. Modern Agricultural Equipment, 2019, 40(1): 12–15, 31. (in Chinese)
- [9] HUANG P, ZHU L, ZHANG Z, et al. An end-to-end learning-based row-following system for an agricultural robot in structured apple orchards[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021.
- [10] MHAMUNKAR M, BAGANE S, KOLHE L, et al. Handheld grass cutter machine with supporting wheel[C]//International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Springer, Cham, 2019: 228–235.
- [11] BAO X, MAO J, DAI P, et al. Research on trajectory planning and control system of general mobile platform for mountain orchard[J]. The Journal of Engineering, 2019, 11(2): 29–40.
- [12] 刘永平, 许杰, 廖福林, 等. 新型果园除草机器人结构设计与切割仿真分析[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 28–32, 39.
- LIU Yongping, XU Jie, LIAO Fulin, et al. Structural design and cutting simulation analysis of a new orchard weeding robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 28–32, 39. (in Chinese)
- [13] 周汉林, 刘华, 陈中武, 等. 丘陵山地履带式多功能底盘的设计[J]. 现代农业装备, 2021, 42(5): 56–59.
- ZHOU Hanlin, LIU Hua, CHEN Zhongwu, et al. Design of tracked multifunctional chassis in hilly and mountainous areas[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42(5): 56–59. (in Chinese)
- [14] 杜蒙蒙, 姬江涛, 杜新武, 等. 丘陵山区双履带式小型动力底盘的设计[J]. 农机化研究, 2013, 35(9): 116–119, 124.
- DU Mengmeng, JI Jiangtao, DU Xinwu, et al. Design of double track small power chassis in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(9): 116–119, 124. (in Chinese)
- [15] 权龙哲, 张景禹, 姜伟, 等. 基于玉米根系保护的株间除草机器人系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 115–123.
- QUAN Longzhe, ZHANG Jingyu, JIANG Wei, et al. Design and experiment of inter plant weeding robot system based on corn root protection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 115–123. (in Chinese)
- [16] OLUFOWOBI H, YOUNG C, ZAMBRENO J, et al. Specification-based automotive intrusion detection using controller area network (CAN) timing[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2022, 69(2): 1484–1494.
- [17] 任大凯, 廖振松. 5G 车路协同自动驾驶应用研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2020, 33(9): 68–74.
- REN Dakai, LIAO Zhensong. Research on the application of 5G vehicle road cooperative automatic driving[J]. Telecommunications Engineering Technology and Standardization, 2020, 33(9): 68–74. (in Chinese)
- [18] 王雪, 王红印, 田正凯, 等. 基于 CAN 总线的实时数据采集串口通信的实现[J]. 电子质量, 2012(6): 16–17, 25.
- WANG Xue, WANG Hongyin, TIAN Zhengkai, et al. Implementation of real-time data acquisition serial port communication based on CAN bus[J]. Electronic Quality, 2012(6): 16–17, 25. (in Chinese)
- [19] 周超. 基于 CAN 的车载辅助驾驶单元的设计与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- ZHOU Chao. Design and implementation of vehicle aided driving unit based on CAN[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [20] 韩京清. 非线性 PID 控制器[J]. 自动化学报, 1994, 20(4): 487–490.
- [21] 韩京清. 非线性状态误差反馈控制律 NLSEF[J]. 控制与决策, 1995, 10(3): 221–225.
- HAN Jingqing. Nonlinear state error feedback control law NLSEF[J]. Control and Decision Making, 1995, 10(3): 221–225. (in Chinese)
- [22] 黄一, 薛文超. 自抗扰控制: 思想、应用及理论分析[J]. 系统科学与数学, 2012, 32(10): 1287–1307.
- HUANG Yi, XUE Wenchao. Active disturbance rejection control: thought, application and theoretical analysis[J]. System Science and Mathematics, 2012, 32(10): 1287–1307. (in Chinese)
- [23] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13–18.
- HAN Jingqing. From PID technology to “auto disturbance rejection control” technology[J]. Control Engineering, 2002, 9(3): 13–18. (in Chinese)
- [24] HAI X, WANG Z, FENG Q, et al. Mobile robot ADRC with an automatic parameter tuning mechanism via modified pigeon-inspired optimization[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(6): 2616–2626.
- [25] LIU B, HONG J, WANG L. Linear inverted pendulum control based on improved ADRC[J]. Systems Science & Control Engineering, 2019, 7(3): 1–12.
- [26] ZHONG S, HUANG Y, GUO L. A parameter formula connecting PID and ADRC[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(9): 1–13.
- [27] LU W, LI Q, LU K, et al. Load adaptive PMSM drive system based on an improved ADRC for manipulator joint[J]. IEEE Access, 2021, 9: 33369–33384.
- [28] HERBST G. A simulative study on active disturbance rejection control (ADRC) as a control tool for practitioners[J]. Electronics, 2013, 2(3): 246–279.
- [29] XIA Y, PU F, LI S, et al. Lateral path tracking control of autonomous land vehicle based on ADRC and differential flatness[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3091–3099.
- [30] XUE W, HUANG Y. On frequency-domain analysis of ADRC for uncertain system[C]//2013 American Control Conference. IEEE, 2013: 6637–6642.