

折腰转向无人驾驶植保车控制系统设计与试验

李赫 赵弋秋 秦超斌 丁力 程上上 张开飞
(河南农业大学机电工程学院, 郑州 450002)

摘要: 针对黄淮海地区作物多样,行距差异大,植保机械通用化低和智能程度低的问题,设计了一种轮距和离地间隙可调的折腰转向无人驾驶植保车。该植保车可使用遥控器远程控制,切换自动模式后,可根据预定路线进行路径跟踪,实现植保车的自主行走。对植保车自主行走模式建立运动学模型,确定了利用航向跟踪实现路径跟踪策略,并通过 Lyapunov 函数分析了折腰转向控制的稳定性。提出了传感器的扩展卡尔曼滤波算法和驱动电机的 PID 控制方法。利用 Matlab 阶跃响应对自主行走控制系统进行仿真分析,结果表明,当 $K_p = 1$ 、 $T_i = 0.05$ 、 $T_d = 0.01$ 时,系统响应速度和精度能够满足自主植保车导航控制的需要。以作业平台转弯半径、直线行走偏移为控制参数进行田间试验,样机转弯速度 3 km/h 时,最小外轮转弯半径为 2 m;行走速度为 6 km/h 时,100 m 直线行走平均偏移量为 5.51 cm;植保车满载情况下的平均续航时间达到 2.54 h,整机达到设计要求。

关键词: 植保机械; 折腰转向; 无人驾驶; 远程遥控; 控制系统

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0544-10

Design and Test of Control System of Articulated Steering Unmanned Plant Protection Vehicle

LI He ZHAO Yiqiu QIN Chaobin DING Li CHENG Shangshang ZHANG Kaifei
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In view of the diversity of crops in the Huang-Huai-Hai area, the row spacing is large and the plant protection machinery is low in generalization and intelligence. A articulated steering unmanned plant protection vehicle with adjustable wheelbase and ground clearance was designed. The plant protection vehicle can be remotely controlled by a remote control, and after switching the automatic mode, it can track the path according to the predetermined route to realize the autonomous walking of the plant protection vehicle. A kinematics model was established for the autonomous walking mode of the plant protection vehicle, and the strategy of using heading tracking to realize the path tracking was determined, and the stability of the waist turning control was analyzed through the Lyapunov function. The extended Kalman filter algorithm of the sensor and the PID control method of the drive motor were proposed. Finally, the step response of Matlab was used to simulate and analyze the autonomous walking control system. The results showed that when the coefficients $K_p = 1$, $T_i = 0.05$, $T_d = 0.01$, the system response speed and accuracy can meet the needs of autonomous plant protection vehicle navigation control. Field tests were conducted with the turning radius of the work platform and the offset parameters of straight-line walking. When the turning speed of the prototype was 3 km/h, the minimum outer wheel turning radius was 2 m, and when the walking speed was 6 km/h, the average offset for 100 m straight travel was 5.51 cm, and the average endurance time of the plant protection vehicle under full load was 2.54 h. The whole machine met the design requirements.

Key words: plant protection vehicle; articulated steering; unmanned; remote control; control system

0 引言

智慧农业是指在农机化生产、管理中应用更多

更广的互联网、大数据、物联网、无人驾驶及人工智能技术。随着卫星导航、信息无线传输、传感器和控制技术的发展,智能农机装备的应用越来越广

收稿日期: 2020-08-20 修回日期: 2020-09-20
基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-04-PS25)
作者简介: 李赫(1972—),男,副教授,主要从事智能农机装备研究,E-mail: chungbuk@163.com
通信作者: 张开飞(1978—),男,讲师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: zhangkaifei1220@163.com

泛^[1]。根据农业部 2017 年统计,当前我国小麦、玉米、水稻三大主要粮食作物在生产过程中农药有效利用率为 38.8%,而欧美发达国家为 50%~60%^[2]。其中,植保机械和施药技术落后是农药利用率低的主要原因,研发适应现代农业发展的新型施药器械成为当前施药技术的趋势^[3]。

黄淮海地区是我国的粮食主产区之一,该地区耕地具有地块小、分布散的特点。植保机械和田间管理技术相对落后,农药的有效利用率较低。喷杆喷雾机是应用最广泛的植保机具,其存在机构复杂、同步协调操作性差、制造成本高、机具使用可靠性低等问题^[4-5]。电驱动植保车常见转向方式为阿克曼转向,由步进电机控制四杆机构实现转向,但是需要较多的零件和必要的安装空间^[6],且前轮转向时,后轮轮辙不重复,易压苗伤苗。无人驾驶的行走系统,可以有效提高喷雾均匀性。

针对上述问题,本文设计一种中部折腰转向式无人驾驶植保车,对植保车自主行走模式建立运动学模型,确定利用航向跟踪实现路径跟踪策略,并通过 Lyapunov 函数分析折腰转向控制的稳定性,提出传感器的扩展卡尔曼滤波算法和驱动电机的 PID 控制方法,最后运用 Matlab 仿真系统响应速度和精度,并进行样机试验验证。

1 植保车结构设计

在水肥条件较好的黄淮海平原区,小麦主要种植行距为 15~20 cm,其中河南省、河北省、山东省和陕西省 4 省小麦品种的平均株高分别是 60.58、67.09、68.09、70.22 cm。大豆种植行距有等行距直播和宽窄行密植条播:等行距直播,有 33、40、50、60 cm 等不同行距;宽窄行密植条播,宽行 50 cm、窄行分别为 20、25、33 cm,也有宽行 40 cm、窄行 20 cm 等行距。2003—2016 年,黄淮海地区大豆品种株高则略有降低,平均在 80 cm 左右^[7-8]。综合上述条件,轮距设计参数为 1~1.3 m 可调,离地间隙设计为 0.7~1.3 m 可调。折腰转向通过铰接的底盘单元来改变车辆的前进方向。

折腰转向协调转向的车辆更加机动,优于滑行转向。因为在转弯期间,可以保持驱动元件提供的最大推力,如图 1 所示,图中 l_1 、 l_2 为前、后车桥长, r_1 、 r_2 为前、后车轴的转弯内径, C 为平台转动半径中心, v 为前车轴瞬时速度, W 为轮距。设计采用中梁式车架,车轮与车架在平面内没有发生相对运动,提高了越野性能,转向机构不需要扭转梁和其他部件,优化了前后桥结构;转向时,两侧车轮不会相对车桥偏转,随着折腰角 φ 的增加,转向半径明显减小。

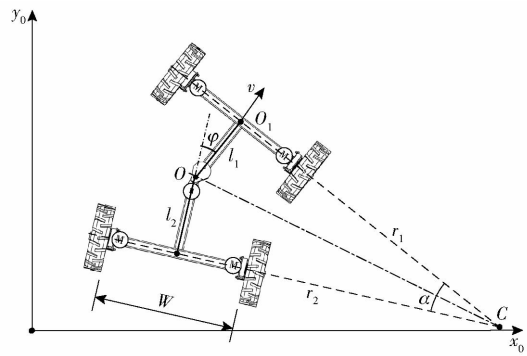


图 1 转弯半径分析
Fig. 1 Turning radius analysis

通过理论分析,设计采用的轴距为 1 200 mm,前车梁与后车梁长度相同^[9]。

平台转动半径中心 C 描述了植保车在大地坐标系下的旋转半径。此参数可用于控制植保车进行路径跟踪。由于设定路径的每个小部分可以通过其曲率半径来描述,因此可以用曲率半径作控制前后平台之间所需的折腰角。

在 $l_1 = l_2$ 时,取前后车架长度为 l ,转弯内径为 $r_1 = r_2$,则

$$\alpha = \pi - (\pi - \varphi) = \varphi \tag{1}$$

$$r_c(t) = l \cot \frac{\varphi(t)}{2} \tag{2}$$

式中 $r_c(t)$ —— t 时刻 O 处转弯半径

α ——前后车体方位角度差

所以植保车在转向过程中的转弯内径 $r_{\min}$ 为

$$r_{\min} = l \cot \frac{\varphi(t)}{2} - \frac{W}{2} \tag{3}$$

外圈半径 $r_{\max}$ (即最小转弯半径) 为

$$r_{\max} = l \cot \frac{\varphi(t)}{2} + \frac{W}{2} \tag{4}$$

当最大转向角为 50° ,轮距为 1 000 mm 时,得出内圈转弯半径为 787 mm,最小转弯半径为 1 787 mm,适合全地形作业的转向需求。

由于植保车采用小型轻量化底盘结构设计,整体载重较小,不需要采用全液压转向系统。采用全液压转向不仅增加额外载重,也影响模块化设计的轻量结构,设计时主要考虑利用差速转向或电机主动转向。由于作业环境多为砂土,车轮滚动阻力对车辆直线行走和转向时影响较大。植保车采用铰接式车架进行差速转向,有一定概率发生偏转。经过综合考虑,选用电机主动转向。

在计算类似的折腰转向车辆转向阻力矩时,通常忽略车身转向惯性,主要考虑滚动阻力矩^[10]

$$M_s = Gf \sqrt{\frac{W^2}{4} + L_\alpha^2} \tag{5}$$

式中 M_s ——转向阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

f ——滚动阻力系数
 G ——底盘重力
 L_{α} ——底盘轴距, m

由于实际作业时,前车架部分质量占总车质量的30%,主要计算前车架的转向阻力矩。植保车使用电机提供动力,电动机体积小,噪声也很小,易于智能控制,但是电源需要采用电池。另外,结合控制系统来看,电机控制能够满足智能化的应用。植保车整体设计如图2所示。

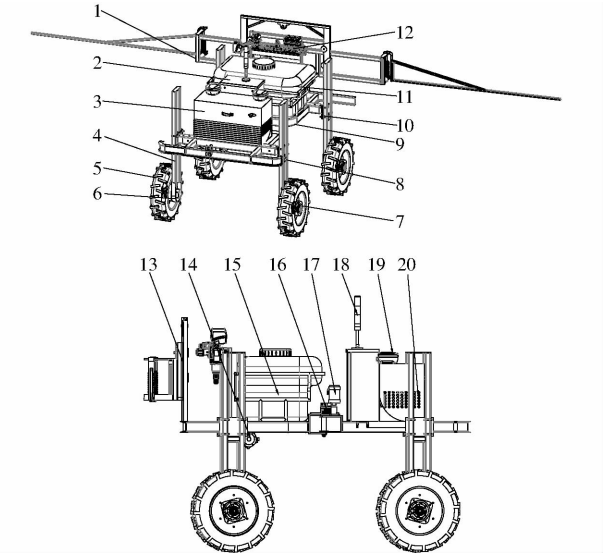


图2 植保车结构示意图

Fig. 2 Schematic of plant protection vehicle
1. 喷杆 2. 控制单元 3. 电池仓 4. 车架支撑柱 5. 车轮 6. 驱动电机 7. 行星齿轮减速箱 8. 前车架 9. 后车架 10. U型螺栓 11. 药箱 12. 喷雾控制器 13. 喷杆移动架 14. 电动隔膜泵 15. 药箱固定架 16. 转向调整齿轮系 17. 转向电机 18. 信号灯 19. GPS模块 20. 电池

2 植保车控制系统设计

2.1 植保车运动学模型

铰接式车辆由两部分组成,前部和后部,采用刚性连接,转向动作是通过改变连接关节来执行的,如图3所示。由于前后轴的约束,铰接关节属于面与面之间的接触,是一个低副。在建立所设计的行走平台模型中,平台具有4个自由度,3个自由度表示平台的运动位置和方向,另外1个自由度表示2个平台之间的夹角^[11-13]。当然,在实际运动中可能存在更多的自由度,如考虑车辆的倾斜和轮胎特性,推导的模型主要满足通过主动转向设计,得到偏航稳定性的控制算法,所以其他情况不进行讨论。

图中 O 为铰接点,带有电机助力转向; O_1 、 O_2 分别为前后桥中心; φ 为转向角即折腰角; θ_1 、 θ_2 为前后车架的方位角; $l_1 = l_2$ 。

为了得到行走平台的运动学方程,需要假设几

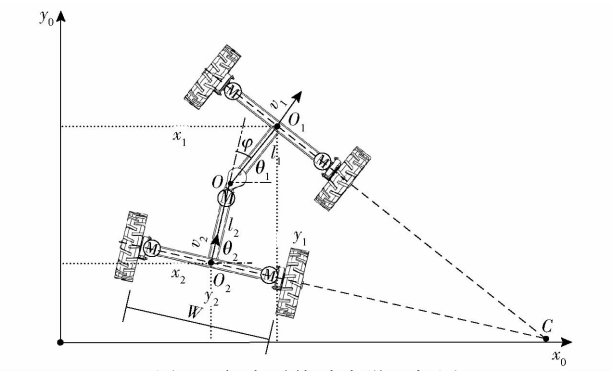


图3 行走系统动力学坐标图

Fig. 3 Dynamic coordinate graphics of walking system
种情况:平台转向角 φ 在小位移情况下保持恒定;忽视低速引起的动力效应;行走平台在平面上运动时没有滑移效应。

前后车架的非完整性积分约束可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \sin \theta_1 - \dot{y}_1 \cos \theta_1 = 0 \\ \dot{x}_2 \sin \theta_2 - \dot{y}_2 \cos \theta_2 = 0 \end{cases} \tag{6}$$

φ 与前后车架的方位角之间的运动关系可表示为

$$\dot{\varphi} = \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2 \tag{7}$$

前车架平移运动方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_1 \cos \theta_1 \\ \dot{y}_1 = v_1 \sin \theta_1 \end{cases} \tag{8}$$

速度 v_1 和 v_2 被认为相对于车辆刚性自由关节的速度具有相同的变化,因此相对速度方程可以定义为

$$\begin{cases} v_1 = v_2 \cos \varphi + \dot{\theta}_2 l_2 \sin \varphi \\ v_2 \sin \varphi = \dot{\theta}_1 l_1 + \dot{\theta}_2 l_2 \cos \varphi \end{cases} \tag{9}$$

结合转矩,滚动阻力和空气阻力可得

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = (v_1 \sin \varphi + l_2 \dot{\varphi}) / (l_1 \cos \varphi + l_2) \\ \dot{\theta}_2 = (v_1 \sin \varphi - l_2 \dot{\varphi} \cos \varphi) / (l_1 \cos \varphi + l_2) \end{cases} \tag{10}$$

角度 φ 和 θ_1 可以很精确地测量,由于铰链接安装的辅助转向电机,驱动后部时存在转向限制,前车架和后车架的关系可以表示为

$$\begin{cases} x_2 = x_1 - l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_2 \\ y_2 = y_1 - l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin \theta_2 \end{cases} \tag{11}$$

在所提出的方法中,变量为折腰角变化速率 $\dot{\varphi}$,而车辆速度被认为恒定,具有初始参数 $[x, y, \theta, \varphi]$ 的行走平台真实动态运动行为如图3所示。设置 $l_1 = l_2$,车辆运动模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ \frac{\sin \varphi}{l(\cos \varphi + 1)} & \frac{1}{l(\cos \varphi + 1)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中 θ ——速度方位角

通过运动学分析,建立了植保车的运动学模型,运动学模型是控制车辆行走的关键问题,此矩阵会在路径跟踪方式中应用。

2.2 路径追踪策略

本文研究的路径跟踪控制方法的基本思路是利用航向跟踪实现路径跟踪,如图 4 所示,利用上位机控制软件定义行驶路径信息(KML),与植保车控制器利用无线电通信或直接存储到植保车控制器内。由植保车上安装的 GPS 模块实时接收卫星定位信号,主控制器将当前定位信息与定义的路径信息进行解算,进而得出目标航向,控制转向角度和速度。转向角度是控制植保车航向的关键因素。

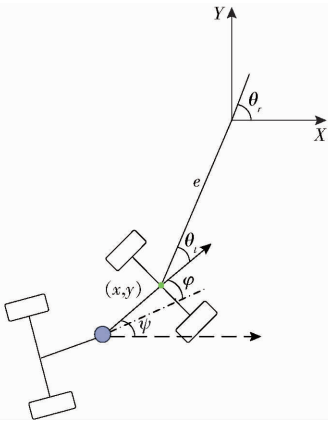


图 4 极坐标下植保车与目标点误差示意图
Fig. 4 Error schematic between operating vehicle and target point in polar coordinates

对于预定路径的二维坐标点,植保车需要根据自身信息和靶标信息调整转向并更新路径点,所以建立植保车在大地坐标系中的运动过程^[14-15]。

结合图 1 植保车运动学模型,分析极坐标下航点距离误差为

$$e = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{13}$$

其中 $x = -e \cos \theta_r$ (14)

$$y = -e \sin \theta_r \tag{15}$$

式中 e ——距离误差

θ_r ——相对于靶标的误差矢量方向角
式(13)的时间导数可写为

$$\dot{e} = \frac{x \dot{x} + y \dot{y}}{e} \tag{16}$$

联立式(13)~(15)得

$$\dot{e} = -(\dot{x} \cos \theta_r + \dot{y} \sin \theta_r) \tag{17}$$

将式(8)代入式(17)得

$$\dot{e} = -v \cos(\theta_r - \psi) \tag{18}$$

式中 ψ ——后车桥前进方向与 x 轴方向夹角
取式(14)、(15)的时间导数代入式(8)得

$$v \sin(\theta_r - \psi) = e \dot{\theta}_r \tag{19}$$

由图 4 可知, $\theta_t = \theta_r - \psi$, 可得

$$\dot{\theta}_t = \frac{v \sin \theta_t}{e} \tag{20}$$

式中 θ_t ——距离误差矢量 e 和线速度矢量之间的角度

结合运动学分析可得

$$\dot{\theta}_t = \left[\frac{v \sin \theta_t}{e} - \frac{\sin \varphi}{l(\cos \varphi + 1)} v \right] - \frac{1}{l(\cos \varphi + 1)} \omega \tag{21}$$

式中 ω ——转向角速度

结合式(12),可得极坐标中植保车的运动方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_t \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_t & 0 \\ \frac{\sin \theta_t}{e} & 0 \\ \frac{\sin \theta_t}{e} - \frac{\sin \varphi}{l(\cos \varphi + 1)} & -\frac{1}{l(\cos \varphi + 1)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{22}$$

在自动控制领域中, Lyapunov 稳定性(Lyapunov stability) 可用来描述一个动力系统的稳定性。Lyapunov 稳定性理论是设计控制系统的常用工具。这里用一个简单的二次方程作为候选 Lyapunov 函数^[11]。

使植保车最初定位在距靶标的非零位置,转向控制系统的目的是控制植保车,使其与靶标精确对准。实际是在找到一个稳定的控制律($v(e, \theta_r, \theta_t, \varphi)$, $\dot{v}(\dot{e}, \dot{\theta}_r, \dot{\theta}_t, \dot{\varphi})$), 能够驱动植保车从任何初始位置($e(0), \theta_r(0), \theta_t(0)$)到目标小邻域($0, 0, 0$)。

考虑正定形式

$$v = \frac{1}{2} \lambda_1 e^2 + \frac{1}{2} \lambda_2 \theta_r^2 + \frac{1}{2} \lambda_3 \theta_t^2 + \frac{1}{2} \lambda_4 \varphi^2 \tag{23}$$

($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 > 0$)

式中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 表示一次姿态变换的一组四元数。

v 的时间导数为

$$\dot{v} = \lambda_1 e \dot{e} + \lambda_2 \theta_r \dot{\theta}_r + \lambda_3 \theta_t \dot{\theta}_t + \lambda_4 \varphi \dot{\varphi} \tag{24}$$

将式(22)代入式(24)得

$$\dot{v} = \left[(\lambda_2 \theta_r + \lambda_3 \theta_t) \frac{\sin \theta_t}{e} - \lambda_1 e \cos \theta_t - \frac{\lambda_3 \theta_t \sin \varphi}{l(\cos \varphi + 1)} \right] v + \left[\lambda_4 \varphi - \frac{\lambda_3 \theta_t}{l(\cos \varphi + 1)} \right] \omega \tag{25}$$

经过稳定性理论分析,可以得到

$$\lim_{e, \theta_t \rightarrow 0} v = -\frac{\lambda_2 \theta_r \theta_t}{e} \tag{26}$$

结合式(20)可以得到

$$\dot{\theta}_r = -\lambda_2 \left(\frac{\theta_t}{e} \right)^2 \theta_r \tag{27}$$

当 $\lambda_2 > 0$ 且 $\left(\frac{\theta_i}{e}\right)^2$ 不为 0 时, θ_i 是稳定的并且最终接近零,它可以缓慢地进行。

因此, $\dot{V} \rightarrow 0$ 导致 $(e, \theta_r, \theta_i) \rightarrow (0, 0, 0)$ 。由于该系统无漂移。实际上,在选择参数时需要权衡,设置 $\lambda_4 = 0$, 稳定 (e, θ_r, θ_i) , 同时使 φ 不可控制。在这种情况下, φ 可以采用物理上不可实现的值,例如,使折腰转向底盘自身折叠。相比之下, λ_4 选择过大会导致原点非常缓慢。所提出的中心铰接式植保车模型在 $e = 0$ 时具有奇点,因为根据式(22),在没有定义 $\dot{\theta}_r$ 和 $\dot{\theta}_i$ 时,条件 $e = 0$ 不能发生在有限的时间内。

有一种特殊情况,即控制器无法稳定机器人的配置。当 φ 和 θ_i 最初都为零时,会发生这种特殊情况。由式(26)可得,在这种情况下, $\omega = 0$ 且 $v = \lambda_1$, θ_r 将无法控制。控制系统应该识别这种特殊情况并采取适当的措施,可以将初始角度设置为非零。

中部折腰转向的植保车运动模型属于非线性运动,应用扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)进行数据采集更新。控制系统直接读取传感器回传数据时,可以看到数据波动很大,无法进行正常的命令输出,加入扩展卡尔曼滤波算法后,数据波形稳定,但与实际值仍有不小差值,可以正常工作,但会有偏移;多传感器融合数据经过扩展卡尔曼滤波,可以输出与实际值接近的波形,误差很小。本文采用多传感器融合数据采集的方式,提高工作稳定性和精确度。

2.3 姿态获取程序

植保作业姿态获取对自动行走十分重要,需要捷联惯导系统和卫星导航定位系统协作保证数据的准确性和可靠性。采用扩展卡尔曼滤波算法对陀螺仪和加速度计输出的数据进行滤波,如果干扰值过大,加入 GPS 的坐标信息结算植保车的姿态信息,程序流程如图 5 所示。

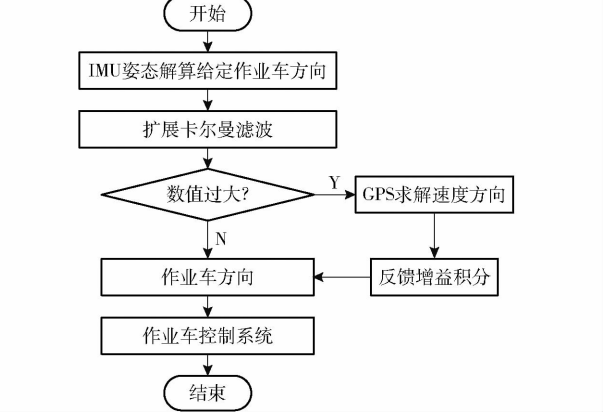


图 5 姿态获取程序流程图
Fig. 5 Posture acquisition program flow chart

2.4 路径跟踪程序

利用航向跟踪实现路径跟踪,如图 6 所示。利用上位机控制软件定义行驶路径信息(KML),与植保车控制器利用无线电通信或直接存储到植保车控制器内。由植保车上安装的 GPS 模块实时接收卫星定位信号,主控制器将当前定位信息与定义的路径信息进行解算,进而得出目标航向,控制转向角和速度^[16-17]。

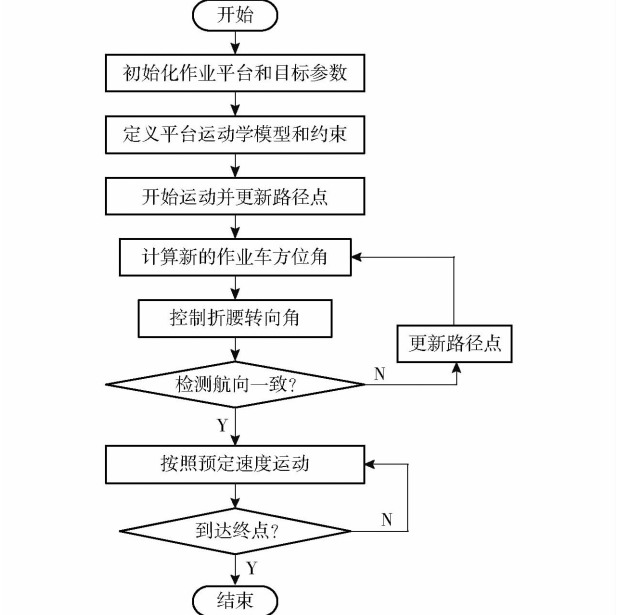


图 6 路径跟踪程序流程
Fig. 6 Path tracing program flow chart

2.5 控制程序设计

采用 C++ 语言在 Windows 环境下进行程序编写和编译,使用 Visual Studio Community 2017 开发平台。Visual Studio 配合 Visual Micro 插件(Arduino for Visual Studio 插件),对项目进行修改和编译,主程序的功能主要有:

- (1)对主控芯片与其它芯片进行初始化,做好控制系统的准备工作。
- (2)读取植保车姿态等基础数据,处理来自上位机控制软件的命令。利用 IMU 读取姿态数据(该系统安装有三轴的微型陀螺仪、加速度传感器和电子罗盘),并传输进行卡尔曼滤波。
- (3)根据姿态数据转换(坐标变换)的矩阵数据,偏航修正,计算偏航累加值,得出油门和转向加速度数据,向电机对象设置输出目标姿态值,计算各电机 PWM 输出。
- (4)调用通信子程序,与上位机通信,实时对工作参数(植保车行进速度、环境信息、路径信息)进行显示与调整,主程序控制架构如图 7 所示。

2.6 驱动电机控制

PID 控制器可用于控制可测量和控制的任何变量。在工业控制应用中,PID 控制器是常用的反馈

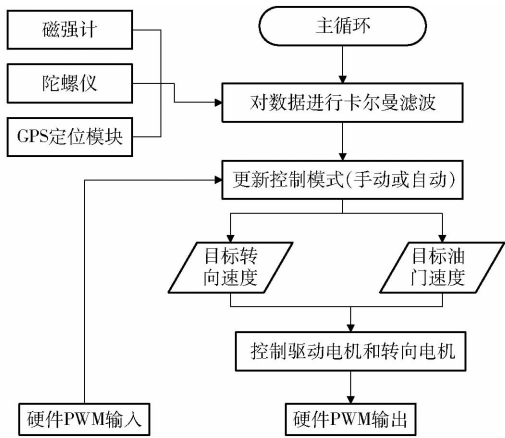


图 7 控制架构

Fig. 7 Control architecture

回路组件。控制器将收集的数据与参考值进行比较,然后使用差值计算新的输入值。计算的目的是允许系统数据达到或维持在参考值。PID 控制器可根据历史数据和差值的发生率调整输入值,提高系统的准确性和稳定性,如图 8 所示。

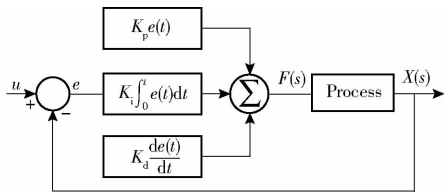


图 8 PID 控制器框图

Fig. 8 PID controller block diagram

PID 控制器可以视为频域系统的滤波器。如果数值选择不当,控制系统的输入值会反复振荡,导致系统可能永远无法达到预设值。进行拉普拉斯变换可得 PID 控制器的传递函数为

$$G_c(s) = \frac{E(s)}{U(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (28)$$

式中 K_p ——比例系数 T_i ——积分时间常数
 T_d ——微分时间常数

植保车的驱动电机为他励电机,根据结构和电磁感应定律推导驱动电机感应电动势和电磁转矩^[18],由基尔霍夫第二定律(KVL)建立电机的电压平衡方式

$$E = K_e \Phi n_m = C_e n_m \quad (29)$$

其中

$$C_e = K_e \Phi$$

式中 E ——驱动电机感应电动势, V

K_e ——电动势常数

Φ ——电机每磁极的磁通, Wb

n_m ——电机额定转速, r/min

C_e ——电动势系数, V·min/r

$$T_e = K_T \Phi I_d = C_m I_d \quad (30)$$

其中

$$C_m = 30\pi^{-1} C_e$$

式中 T_e ——驱动电机电磁转矩, N·m

K_T ——电机结构决定的转矩常数

I_d ——电枢电流, A

C_m ——额定磁通下转矩电流比, N·m/A

驱动电机运行时电枢等效电路如图9所示,微分方程为

$$U_{d0} = I_d R + E + L \frac{dI_d}{dt} \quad (31)$$

$$T_m - T_L = \frac{J dn}{9.57 dt} \quad (32)$$

式中 T_m ——电机输出转矩, N·m

T_L ——负载转矩, N·m

J ——转动惯量, kg·m²

R ——电枢电阻, Ω

L ——电枢电感, H

n ——电机转速, r/min

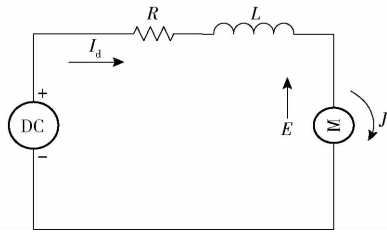


图 9 电机电枢等效电路

Fig. 9 Motor armature equivalent circuit

从直流电机拖动系统理论分析得, $T_\alpha = \frac{L}{R}$ 为电

枢回路电池时间常数, $T_\beta = \frac{R}{C_e C_m \Phi^2}$ 为电力拖动系统的机电时间常数。在零初始条件下,将时间常数代入公式得

$$\frac{I_d(s)}{U_{d0}(s) - E(s)} = \frac{R^{-1}}{T_\alpha s + 1} \quad (33)$$

电流与电动势传递函数为

$$\frac{E(s)}{I_d(s) - I_{dL}(s)} = \frac{R}{T_\beta s} \quad (34)$$

$$\frac{I_d(s)}{U_{d0}(s) - E(s)} = \frac{R^{-1}}{T_\alpha s + 1} \quad (35)$$

$$\frac{E(s)}{I_d(s) - I_{dL}(s)} = \frac{R}{T_\beta s} \quad (36)$$

式中 I_{dL} ——负载电流

等式两侧经过拉普拉斯等式变换,得到电压电流线性响应系统的传递函数。通过式(34)~(36)得到直流电机动态结构如图10所示。

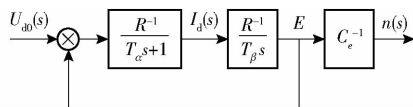


图 10 直流电机动态结构示意图

Fig. 10 Schematic of DC motor dynamic structure

根据厂家提供的参数,额定电压 $U_m = 48\text{ V}$ 、电枢电流 $I_d = 30\text{ A}$ 、额定转速 $n_m = 3\,000\text{ r/min}$ 、电阻 $R = 0.161\text{ }\Omega$ 、电感 $L = 0.01\text{ H}$,确定驱动电机电动势系数 C_e 为 $0.014\text{ V}\cdot\text{min/r}$,确定电枢回路电磁时间常数 T_α 为 0.006 s ,电力拖动系统的机电时间常数 T_β 为 1.2 s ^[19-20]。代入驱动电机动态结构图中,得到植保车驱动电机动态结构图,如图 11 所示。

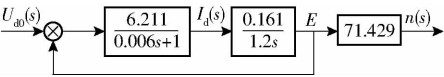


图 11 植保车驱动电机动态结构图

Fig. 11 Dynamic structure diagram of driving motor of working vehicle

结合植保车驱动电机动态结构图,加入 PID 控制后,电机控制系统结构如图 12 所示。

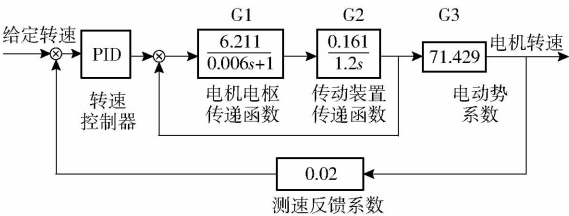


图 12 驱动电机控制系统示意图

Fig. 12 Schematic of drive motor control system

在 Matlab 中用 step 函数做出控制系统的阶跃响应曲线,研究 K_p 、 T_i 、 T_d 3 个参数对植保车控制驱动电机性能的影响。首先利用凑试法整定 PID 参数,在只有比例控制的情况下, $T_i \rightarrow \infty$, $T_d = 0$,令 K_p 分别取 1、2、3、4、5,阶跃响应曲线如图 13 所示, K_p 的增加会增加超调量使得系统响应速度加快,同时减小稳态误差但不能消除稳态误差^[21-22]。

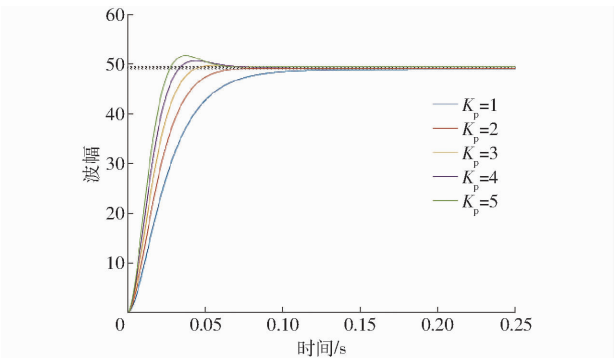


图 13 不同的比例系数 K_p 的系统阶跃响应曲线

Fig. 13 System step response curves of different K_p scale factors

K_i 积分增益的强度取决于积分常数 T_i , T_i 越小,积分作用越强;如果 T_i 很大,积分效应很弱。 K_i 积分增益是提高系统的稳态性能,消除系统的稳态误差。当系统中存在控制误差时,执行积分控制直到没有差值,停止积分调整,并且积分控制输出恒定值。在 $K_p = 1$ 条件下, T_i 取 0.01 与 0.05 之间的值,

每次循环增加 0.01,得到 PI 控制系统阶跃响应曲线,如图 14 所示。 T_i 的减小可能导致系统的过冲增加,并且 T_i 的增大可能使系统的响应减至稳态。

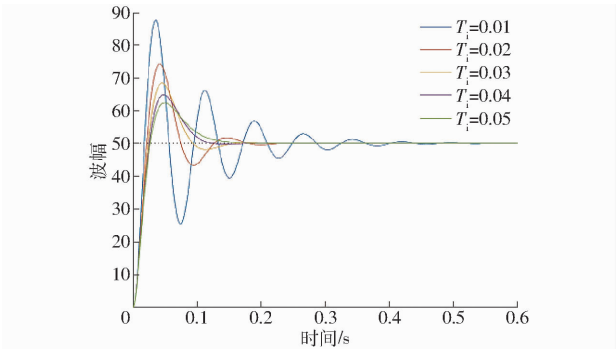


图 14 不同的积分常数 T_i 的系统阶跃响应曲线

Fig. 14 System step response curves with different T_i integration constants

K_d 微分增益强度取决于微分常数 T_d ,固定系数 $K_p = 1$, $T_i = 0.05$, T_d 在 0.01 与 0.1 之间取值,做出系统阶跃响应曲线如图 15 所示。随着微分时间常数的增加,闭环系统响应速度增加,并且调整时间减小。微分增益的主要功能是提高系统的响应速度。由于误差率发生作用,它可以在误差大时应用适当的控制,但是过大的 T_d 可能是由系统引起的或受控对象的响应时间延迟,所以不适用于信号不变或变化缓慢的系统。

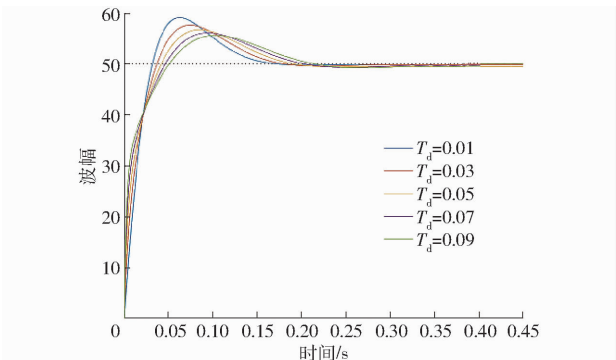


图 15 不同微分常数 T_d 的系统阶跃响应曲线

Fig. 15 System step response curves with different T_d

通过以上分析和仿真得,利用 PID 控制器控制驱动电机运动,能够提高控制系统的准确性和可靠性,取系数 $K_p = 1$ 、 $T_i = 0.05$ 、 $T_d = 0.01$ 时系统响应速度和精度能够满足自主植保车导航控制的需要。植保车驱动电机控制采用比例微分 PID 控制器, PID 参数可以在样机作业测试中根据经验进一步整定,满足植保车运行的精确性和可靠性。

2.7 系统硬件框架

自主植保车的控制模式采用手动和自动 2 种方式,可以使用遥控器进行人机交互。在自动模式下,可以输入预定路径的 KML 数据,植保车控制器通过

读取 IMU 姿态信息和 GPS 卫星定位信息调整转向,控制驱动电机按照预定路径自主行走。在作业过程中,植保车通过无线通信模块实时回传位置和速度信息,在计算机或手机端可以进行查看并修改航线或行驶速度。因为通信方式采用了 MAVLink 协议,可以直接使用在此协议下开发的开源地面站软件。植保车需要控制器输出 PWM 信号控制驱动电机进行调速,转向电机也是如此。控制器使用了脉冲触发开关控制开闭喷雾系统的隔膜泵,系统硬件框图如图 16 所示。

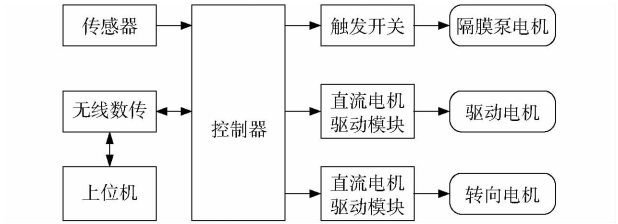


图 16 系统硬件框图

Fig. 16 System hardware block diagram

根据实际应用情况和各单片机的应用场合和优缺点,采用 ATMEL 公司生产的 ATMEGA2560 - 16AU 型号的单片机作为行走植保车控制系统的控制核心,反馈控制中,单片机需不断计算数据,同时还需要不断接收姿态传感器及定位信息,对数据进行运算处理,对单片机的稳定性和运算能力要求高。单片机工作参数如表 1 所示。IMU 传感器选用 MPU - 6000。传感器将三轴加速度计和三轴陀螺仪集成在一个硅片上,具有较低的噪声,较好的温度稳定性和精度。

表 1 单片机的工作参数

Tab.1 Control chip working parameters	
参数	数值
内核位数	8
频率/MHz	16
程序存储器容量/kB	256
RAM 容量/kB	64
电压/V	4.5 ~ 5.5
工作温度/℃	-40 ~ 105

3 验证试验

植保车采用四轮驱动,设计了中部折腰转向的底盘结构,关键参数如表 2 所示。主要进行了转向性能试验、直线行走试验和续航时间试验。试验地点为河南省滑县,土壤类型为干砂土,测量指标转弯半径、直线偏移量、续航时间,所用到的仪器主要包括 3 m 长卷尺、100 m 长皮尺、秒表。

3.1 植保车转向性能试验

植保车设计最大转向角为 50°,最小轮距

表 2 样机关键参数

Tab.2 Key parameters of prototype	
参数	数值
轴距/mm	1 200
轮距/m	1.0 ~ 1.3
底盘间隙/m	0.5 ~ 1.3
电机额定功率/W	650
电机额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
电机最大扭矩/(N·m)	40
电源规格	48V110AH
电源质量/kg	45

1 000 mm。在轮距不变的情况下,植保车以 3 km/h 的速度在干砂土地面上低速转向,自转一周,可以得到植保车车轮的内侧和外侧轨迹,如图 17 所示,利用卷尺测量外侧轨迹可测得植保车的最小转弯半径为 2 m。



图 17 植保车转弯半径试验

Fig. 17 Turning radius test of plant protection vehicle

3.2 植保车直线偏移量试验

自主行驶植保车在田间行走时,直线行走的偏移率是评价控制系统的重要指标。植保车喷雾作业时,为降低雾滴漂移,行进速度较慢。

本机设置试验速度为 6 km/h,具体的试验方法为:以设计的作业速度在预定直线路径行走 100 m,测量终点与起点之间的偏移量,重复 5 次并记录数据,试验过程如图 18 所示,5 次试验的偏移量分别为 5.44、5.61、5.44、5.51、5.55 cm。由直线偏移量试验数据可以计算出平均偏移量为 5.51 cm,直线偏移量主要跟测试场地的平整程度和 GPS 精度有关。根据测量数据显示,植保车在作业行进时,转向关节稳定,能够保证植保车高效可靠作业。



图 18 植保车直线偏移量试验

Fig. 18 Plant protection vehicle straight line offset test

3.3 续航时间测试

在试验场地内,在满载条件下以作业速度 6 km/h在预定区域内进行不间断的行驶,得到续航时间。进行了 5 次试验,续航时间分别为 2.5、2.4、2.5、2.7、2.6 h。植保作业车满载情况下平均续航时间达到了 2.54 h,符合设计要求。

4 结论

- (1)建立了折腰转向植保车的运动学模型,推导的模型主要满足通过主动转向设计,得到偏航稳定性的控制算法。并在按照预定路径自主行走的方式下,推导中部折腰转向的植保车路径跟踪模型,使用 Lyapunov 函数分析了转向控制模型的稳定性。
- (2)在运动学模型和路径跟踪模型的基础上,

- 设计了植保车的控制系统,通过硬件选型和电路设计,采用 C++语言编写了自主行走的控制程序。
- (3)提出了传感器的扩展卡尔曼滤波算法和驱动电机的 PID 控制方法。最后通过试凑法对自主行走控制系统阶跃响应进行了 Matlab 仿真分析,结果表明 $K_p = 1$ 、 $T_i = 0.05$ 、 $T_d = 0.01$ 时,系统响应速度和精度能够满足自主行走植保车导航控制的需要。
- (4)以作业平台转弯半径、直线行走偏移为控制参数进行田间试验。得到了样机转弯速度 3 km/h 时,最小外轮转弯半径为 2 m,行走速度为 6 km/h 时,100 m 直线行走平均偏移量为 5.51 cm,植保车满载情况下平均续航时间达到 2.54 h,整机达到设计要求。

参 考 文 献

[1] 马程宏. 田间作物对靶喷施机器人关键技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
MA Chenghong. Study on key technology of target spraying robot on crops in field[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[2] 乔白羽,丁素明,薛新宇,等. 喷雾机喷杆结构的研究现状及展望[J]. 农机化研究,2017,39(11):246-250,256.
QIAO Baiyu, DING Suming, XUE Xinyu, et al. The research status and prospects on the structure of spray boom[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(11):246-250,256. (in Chinese)

[3] 本刊讯. 化肥农药利用率稳步提高 提前 3 年实现零增长目标[J]. 中国农技推广,2018,34(1):26-27.

[4] 庄腾飞,杨学军,董祥,等. 大型自走式喷雾机喷杆研究现状及发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):189-198.
ZHUANG Tengfei, YANG Xuejun, DONG Xiang, et al. Research status and development trend of large self-propelled sprayer booms[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):189-198. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s025&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.025. (in Chinese)

[5] 李伟,薛涛,毛恩荣,等. 高地隙自走式喷雾机多轮转向系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):141-151.
LI Wei, XUE Tao, MAO Enrong, et al. Design and experiment of multifunctional steering system for high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):141-151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190115&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.015. (in Chinese)

[6] 李世超,曹如月,季宇寒,等. 基于不同电机的拖拉机自动导航转向控制系统性能对比[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):40-49.
LI Shichao, CAO Ruyue, JI Yuhan, et al. Performance analysis and comparison of different types of steering wheel turning control motors in automatic navigation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.):40-49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s007&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.007. (in Chinese)

[7] 刘立晶,尹素珍. 黄淮海地区夏大豆生产机械化现状及发展趋势[J]. 现代农业研究,2016(1):16-19.
LIU Lijing, YIN Suzhen. The current situation and development trend of summer soybean production mechanization in Huanghuaihai area[J]. Modern Agricultural Research, 2016(1):16-19. (in Chinese)

[8] 任欣欣,姚占军,岳艳丽,等. 黄淮海麦区四省份小麦品种的农艺性状及遗传多样性分析[J]. 华北农学报,2010,25(1):94-98.
REN Xinxin, YAO Zhanjun, YUE Yanli, et al. Genetic diversity analysis of bread wheat(*triticum aestivum* L.) cultivars in four provinces of Huang-Huai-Hai area based on agronomic traits[J]. Acta Agriculture Boreali-sinica, 2010, 25(1):94-98. (in Chinese)

[9] 王晓明. 微型四轮独立驱动电动汽车底盘设计与研制[D]. 南京:东南大学,2017.
WANG Xiaoming. Design and development of a miniature four-wheel independent drive electric vehicle chassis[D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)

[10] 沈红光. 高地隙折腰式水田动力底盘设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
SHEN Hongguang. Design and test of high-gap knurled paddy field power chassis[D]. Harbin: Northeast Agricultural

- University, 2017. (in Chinese)
- [11] FARMER J L. Kinematic analysis of a two-body articulated robotic vehicle[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- [12] DAHER N, IVANTYSYNOVA M. Yaw stability control of articulated frame off-highway vehicles via displacement-controlled steer-by-wire[J]. Control Engineering Practice, 2015, 45(7): 46–53.
- [13] 陈永峰. 铰接式防爆胶轮车转向运动学动力学分析与试验[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(7): 66–68, 71.
CHEN Yongfeng. Dynamics analysis and test of steering kinematics of articulated explosion-proof rubber-tyred vehicle[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(7): 66–68, 71. (in Chinese)
- [14] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11–19.
WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11–19. (in Chinese)
- [15] 李革, 王宇, 郭刘粉, 等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 21–26.
LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure pursuit algorithm for rice transplanter path tracking[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 21–26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180502&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.002. (in Chinese)
- [16] 贾全, 张小超, 苑严伟, 等. 拖拉机自动驾驶系统上线轨迹规划方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 36–44.
JIA Quan, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Guided trajectory planning method for tractor autopilot system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 36–44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180404&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.004. (in Chinese)
- [17] 杨柳, 罗婷婷, 程新荣, 等. 基于 Raspberry Pi 的拖拉机通用自动驾驶系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 109–115.
YANG Liu, LUO Tingting, CHENG Xinrong, et al. Universal autopilot system of tractor based on Raspberry Pi[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 109–115. (in Chinese)
- [18] 段贤强, 陶建峰, 覃程锦, 等. 变速条件下农业机械路径跟踪稳定控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 18–24, 32.
DUAN Xianqiang, TAO Jianfeng, QIN Chengjin, et al. Agricultural machinery path tracking stability control method under variable speed conditions [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 18–24, 32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190902&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.002. (in Chinese)
- [19] 李同辉, 谢斌, 宋正河, 等. 电动拖拉机双电机耦合驱动系统传动特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 379–388.
LI Tonghui, XIE Bin, SONG Zhenghe, et al. Transmission characteristics of dual-motor coupling system for electric tractors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 379–388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190645&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.045. (in Chinese)
- [20] 王康. 调速永磁同步电动机的模态分析计算[D]. 济南: 山东大学, 2018.
WANG Kang. Modal analysis and calculation of variable-speed permanent magnet synchronous motor[D]. Ji'nan: Shandong University, 2018. (in Chinese)
- [21] 余浩, 李进. 基于 MATLAB 的智能车辆导航路径提取[J]. 科技信息, 2014(15): 3–4.
YU Hao, LI Jin. Intelligent vehicle navigation path extraction based on MATLAB[J]. Science and Technology Information, 2014(15): 3–4. (in Chinese)
- [22] 许根源, 王直, 王志强. 基于自适应卡尔曼滤波的 GPS/INS 位置组合导航[J]. 电子设计工程, 2017, 25(21): 100–103, 108.
XU Genyuan, WANG Zhi, WANG Zhiqiang. GPS/INS position integrated navigation based on adaptive Kalman filter[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(21): 100–103, 108. (in Chinese)