

王伟康,罗承铭,张国忠,等.双电机履带式水稻收获机底盘自动导航系统设计与试验[J].华中农业大学学报,2022,41(2):199-207.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.02.024

双电机履带式水稻收获机底盘自动导航系统设计与试验

王伟康¹,罗承铭^{1,2},张国忠^{1,2},付建伟^{1,2},董昭¹,季超¹,赵状状¹

1. 华中农业大学工学院,武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

摘要 针对人工操作履带式收获机进行再生稻头季收获碾压率高、对行稳定性差,以及现有电动履带式机械大田作业精度低等问题,设计一套双电机履带式底盘自动导航系统并进行了试验验证。以自主设计的用于水稻收获的双电机履带式底盘为基础,基于田间滑移模型推导了底盘转向半径与两侧驱动电机转速关系,并设计了自动导航模糊控制器。采用双天线RTK-GNSS获取双电机履带式底盘的实时位置和航向角信息,由自动导航系统的横向模糊纠偏控制器和两侧电机转速PID控制器实时控制两侧电机转速,实现作业路径自动跟踪。路面试验结果显示:双电机履带式底盘水稻收获机行驶速度为0.6、1.0 m/s时,自动导航系统的平均横向偏差分别为0.015、0.021 m。田间试验显示:双电机履带式底盘水稻收获机行驶速度为0.6 m/s时,自动导航系统的平均横向偏差为0.050 m。研究表明,相较于使用电控液压转向改装的导航系统,本导航系统控制量精准、响应速度快,跟踪误差小,可用于再生稻头季机收对行作业以降低碾压率。

关键词 再生稻; 收获机械; 自动导航; 双电机履带式底盘; 模糊控制; 精准作业; 田间路径追踪

中图分类号 S225.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)02-0199-09

再生稻是通过特有栽培措施使收割过的稻茬再次萌发成穗的一种水稻种植模式^[1],具有一种两收、省工、省时、省种、稻米品质好等优点^[2]。再生稻头季机收过程中碾压率高、人工操作对行收获稳定性差等问题严重制约再生稻的发展,且再生稻头季收获时因晒田不足导致田面湿软,对收获机械底盘通过性要求较高^[3-4]。随着农业机械自动化与智能化水平的不断提高^[5],先进的导航定位技术和控制在联合收获机上逐渐得到广泛应用^[6-7]。为减轻劳动强度、提高再生稻头季收获作业效果,电力驱动的智能履带式联合收获机是未来重要的发展方向^[8]。因此,设计一种用于再生稻头季收获的电动履带式底盘自动导航系统对于提高作业时的对行精度、减小碾压损失和提高再生季产量具有重要意义。

在电驱动农机和履带式车辆导航控制领域,国内外相关学者开展了大量研究。2020年8月,2BM-FQ-4型智能导航电动精量整地播种机在第22届河北农机新机具展上亮相^[9],该机具采用智能电动控制

系统,配套使用拖拉机自动驾驶技术,对行精度可控制在2.5 cm内。贾全等^[10]对NF-752型履带式拖拉机进行适应性改造,建立航向预估模型并设计航向预估路径跟踪算法。Huang等^[11]在履带式机器人平台上基于目标点前视距离信息设计了PI路径跟踪控制器,实现路径自动追踪。Takai等^[12-13]使用RTK-GPS和IMU作为导航传感器,基于洋马CT801型履带式拖拉机搭建导航平台,得到履带式拖拉机基于角速度具有不同转向行为的结论,自动追踪试验结果表明,该机可成功完成多路径导航。在众多导航控制方法中,模糊控制具有不依赖精确数学模型、鲁棒性好等特点^[14]。伟利国等^[15]针对履带式开沟铺管机,采用模糊控制方法,实现导航作业。张朝宇等^[16]基于轻简履带式油菜播种机运动学和几何学模型,设计了一种模糊自适应纯追踪控制器,根据当前偏距和实时速度调整前视距离,试验结果表明,该机可满足播种作业要求。丁幼春等^[17]基于田间信息采集平台设计了一种运动控制器,通过横向模糊控制

收稿日期: 2021-11-28

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2662019QD001);国家特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-D-02);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201934)

王伟康, E-mail: 18853855531@163.com

通信作者: 张国忠, E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

和纵向PID定速控制的方式实现信息采集平台田间路径追踪。

当前在履带式车辆导航控制器的研究上,多以经典控制的方法研究车辆前视预瞄转向控制算法,但履带式车辆田间作业时因滑移滑转等因素较难建立精确的数学模型。另外当前以履带式农机为对象的导航研究,多是依托机械式转向履带车平台,通过在原有转向系统上进行电控液压改装进而进行导航作业,其改装难度较大、成本高,且多以小型装备为主^[18-20],较少有中大型电动履带式车辆的大田作业导航研究。

本研究针对再生稻头季机收碾压率高、人工对行稳定性差等问题,以笔者所在团队自主研发水稻收获机的双电机履带式底盘^[21]为基础,基于履带式底盘田间滑移模型制定模糊控制规则,设计了双电机履带式底盘模糊控制器,并进行了路面及田间试验,以满足未来再生稻头季机械收获自动化与精准作业的需求。

1 材料与方方法

1.1 双电机履带式底盘自动导航系统构成

1) 自动导航系统硬件组成。双电机履带式底盘自动导航系统主要由双电机履带式底盘、车载计算机、RTK-GNSS实时动态差分卫星导航系统、电机光电测速传感器等组成,如图1所示。

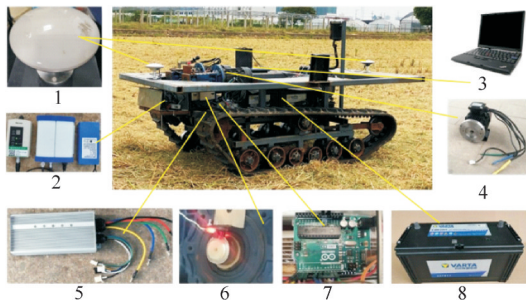


图1 双电机履带式底盘自动导航系统硬件结构

1.RTK-GNSS接收机天线 RTK-GNSS receiver antennas; 2.RTK-GNSS移动站 RTK-GNSS rover station; 3.车载计算机 On-board computer; 4.直流永磁无刷电机 DC permanent magnet brushless motor; 5.电机控制器 Motor controller; 6.光电测速传感器 Photoelectric speed sensor; 7.下位机控制器 Lower-level computer controller; 8.供电电瓶 Power supply battery.

图1 双电机履带式底盘自动导航系统硬件结构

Fig.1 Hardware structure of the automatic navigation system for the double-motor crawler chassis

导航平台为笔者所在团队自主设计的水稻收获机双电机履带式底盘,该平台采用2个YP100B3/5-48V3.0-1500型直流永磁无刷电机驱动,通过两侧电

机正反转实现启停、行走及转向。实际调研显示,再生稻头季栽插及直播行距多为300 mm,本机械底盘900 mm轨距可实现对行收获,280 mm宽度的履带不会碾压相邻行稻茬,通过提高对行精度减小再生稻头季机收碾压率,底盘整体结构和技术参数分别如图2和表1所示。用于导航的GNSS定位定向天线分别安装于底盘前后端中心位置,基线长度 R 为2.25 m,光电测速传感器安装于电机经蜗轮蜗杆减速器减速后的驱动轮动力轴,实时测量履带式底盘驱动轮转速。

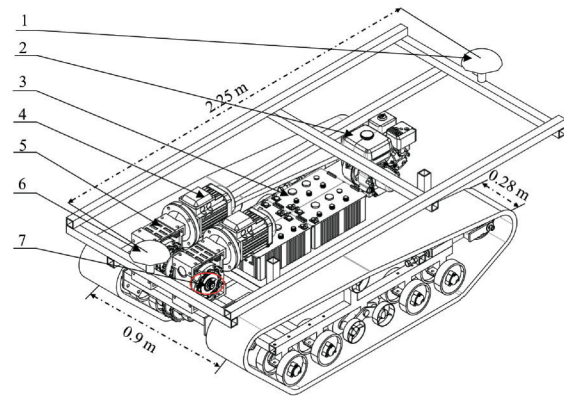


图2 双电机履带式底盘整体结构

1.后端天线 Rear-end antenna; 2.增程器 Range extender; 3.供电电瓶 Power supply battery; 4.直流永磁无刷电机 DC permanent magnet brushless motor; 5.蜗轮蜗杆减速器 Worm gear reducer; 6.前端天线 Front-end antenna; 7.光电测速传感器 Photoelectric speed sensor.

表1 双电机履带式底盘主要参数

Table 1 Main parameters of double motor crawler chassis

| 参数 Parameters | 数值 Values |
|---|-----------|
| 单个电机驱动功率/kW Single motor drive power | 3 |
| 轨距/mm Track width | 900 |
| 接地长度/mm Grounding length | 1 140 |
| 履带规格(宽度×节距×节数)/mm Track specification (width × pitch × number of knots) | 280×90×48 |
| 驱动轮直径/mm Driving wheel diameter | 230 |
| 蜗轮蜗杆减速器减速比 Reduction ratio of worm gear reducer | 10:1 |
| 最大前进速度/(m/s) Maximum traveling velocity | 1.8 |
| 空载质量/kg Unloaded weight | 600 |

2) 控制系统结构。电动底盘自动导航系统结构如图3所示,由GNSS定位系统、控制系统、驱动系统和遥控系统4部分组成。定位系统采用高精度RTK-GNSS定位定向仪(型号:北斗星通NC201,水平定位精度1 cm,2 m基线定向精度0.08°,数据频率10 Hz),用于实时获取电动底盘的位置和航向角信息。

控制系统采用车载计算机记录并处理实时位置和航向角信息,根据导航控制器的模糊控制算法得出两侧电机转速控制量PWM占空比之差的决策,通过串口通讯方式输出决策信息至下位机Arduino控制器。采用光电测速传感器(基于H2010槽型光耦和LM393双电压比较器,编码盘分辨率为每转200脉冲)测得两侧履带驱动轮实时转速,反馈至下位机控制器并进行PID反馈调节,保持两侧电机目标转速恒定。驱动系统电机控制器接收下位机控制器的PWM占空比信息后对两侧电机转速进行控制,动力输出至两侧履带驱动轮,进行启停转向等操作,完成作业路径自动跟踪。遥控系统基于ZigBee模块搭建,ZigBee1模块通过点对点模式实时发送Arduino遥控器信息至ZigBee2模块,下位机控制器接收到ZigBee2模块所传信息后输出电机动作信号驱动底盘行走。

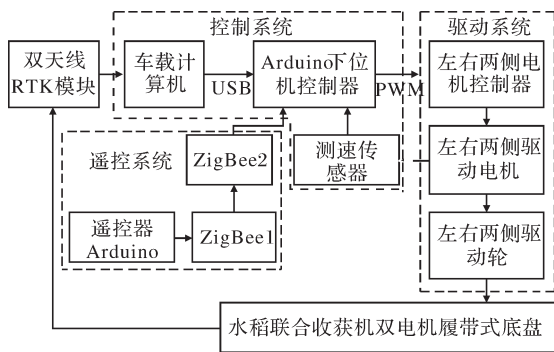


图3 自动导航系统结构

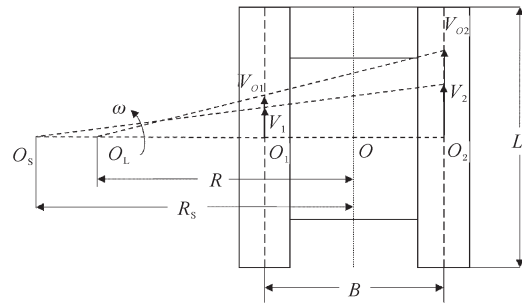
Fig.3 Automatic navigation system structure

1.2 双电机履带式底盘运动学模型

现有履带式农业机械一般通过三档齿轮变速箱加静液压无级变速器的方式实现前进后退及方向调节^[22-23]。本机械底盘动力来源于左右两侧电机,通过两侧电机的正反转来实现前进后退及原地转向,转向及行走控制方式与传统履带式底盘有较大区别。另外,履带式机械导航作业时,特别是在湿软田间环境中,由于履带剪切或挤压使土壤变形,会产生较大的滑移^[24-25]。为提高双电机履带底盘的导航作业精度,需建立合适的导航控制模型。

为更快速合理地减小直线路径追踪时的误差,设定当导航航向偏角超过 $\pm 45^\circ$ 时,通过两侧电机正反转、原地等速反向转向的形式进行车身姿态调整。当导航时航向偏角在 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 之间时,调整横向偏差及航向偏差的转向方式为一侧履带电机转速固定,另一侧电机转速根据控制规则调整的差速转向形式。

考虑再生稻头季收获作业时作业速度一般在 $0.5 \sim 1.2 \text{ m/s}$,故差速转向时设定低速侧履带电机PWM占空比为40%,此时无负荷空转条件下测得履带卷绕速度为 0.6 m/s 左右。高速侧电机占空比在55%~85%调整,此时无负荷空转条件下测得履带卷绕速度为 $0.8 \sim 1.2 \text{ m/s}$,此时电动底盘以履带低速侧外的一瞬时转向中心为圆心转动(图4)。



O 为底盘形心; O_1 、 O_2 分别为两侧履带接地段中心; O_L 为理论转向中心; O_S 为实际转向中心; B 为轨距,m; L 为接地长度,m; R 为理论转向半径,m; R_S 为实际转向半径,m; V_{O1} 、 V_{O2} 分别为两侧履带理论速度,m/s; V_1 、 V_2 分别为两侧履带考虑滑移后的实际速度,m/s; ω 为角速度,rad/s。 O is the chassis centroid; O_1 and O_2 are the center of the crawler connecting section on both sides respectively; O_L is the theoretical steering center; O_S is the actual steering center; B is the track width, m; L is the grounding length, m; R is the theoretical turning radius, m; R_S is the actual turning radius, m; V_{O1} and V_{O2} are the theoretical speeds of tracks on both sides, m/s; V_1 and V_2 are the actual speed of tracks on both sides after considering slip, m/s; ω is the angular velocity, rad/s.

图4 双电机履带式底盘差速转向方式示意图

Fig.4 Schematic diagram of differential steering mode

本底盘动力源自左右两侧电机,差速转向时,左右两侧履带理论速度与左右电机转速关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} V_{O1} = \frac{60}{10^6} 2\pi n_1 r_q = \frac{120\pi n_1 r_q}{10^6 l} \\ V_{O2} = \frac{60}{10^6} 2\pi n_2 r_q = \frac{120\pi n_2 r_q}{10^6 l} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, n_1 、 n_2 分别为左右两侧电机转速,r/min; r_q 为底盘驱动轮节圆半径,mm; l 为蜗轮蜗杆减速器减速比。

通过光电增量式编码器可测得两侧驱动轮实际转速,即可得到左右两侧履带的实际速度 V_1 、 V_2 。则左右两侧履带滑移率 δ_1 、 δ_2 即为两侧履带理论速度与实际速度的差与理论速度的比值,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \delta_1 = \frac{V_{O1} - V_1}{V_{O1}}, \delta_2 = \frac{V_{O2} - V_2}{V_{O2}} \\ V_1 = (1 - \delta_1)V_{O1}, V_2 = (1 - \delta_2)V_{O2} \end{cases} \quad (2)$$

定义低速侧履带滑移系数为 k_1 , 高速侧履带滑移系数为 k_2 , 如式(3)所示。

$$\begin{cases} k_1 = \frac{V_1}{V_{O1}} = 1 - \delta_1 \\ k_2 = \frac{V_2}{V_{O2}} = 1 - \delta_2 \end{cases} \quad (3)$$

因此, 结合运动学原理, 差速转向时双电机履带式底盘的理论转向半径 R 与实际转向半径 R_s 如式(4)所示。

$$\begin{cases} R = \frac{B}{2} \frac{V_{O1} + V_{O2}}{V_{O2} - V_{O1}} = \frac{B}{2} \frac{n_1 + n_2}{n_2 - n_1} \\ R_s = \frac{B}{2} \frac{V_1 + V_2}{V_2 - V_1} = \frac{B}{2} \frac{k_2 + k_1(n_1/n_2)}{k_2 - k_1(n_1/n_2)} \end{cases} \quad (4)$$

为实现对双电机履带式底盘的直线跟踪控制, 根据底盘的理论和实际转向半径与两侧电机转速的关系确定导航时出现不同横向偏差、不同航向偏差时的模糊控制规则和控制量。

1.3 导航控制器设计

双电机履带式底盘导航作业时, 车载计算机利用双天线 RTK-GNSS 获取底盘的实时位置和航向信息, 与设定导航路径起始点后生成的目标路径进行比较得到横向偏差 d 和航向偏差 θ , 而后通过模糊控制器得出决策。基于 Arduino 的下位机控制器将两侧电机各自的目标转速 n 与光电测速传感器测得的当前转速 n_1 进行比较, 通过增量式 PID 算法得到实际需要的调整转速 Δn , 并输出 PWM 占空比信息到两侧电机控制器, 驱动底盘进行路径跟踪。导航控制器整体设计如图 5 所示。

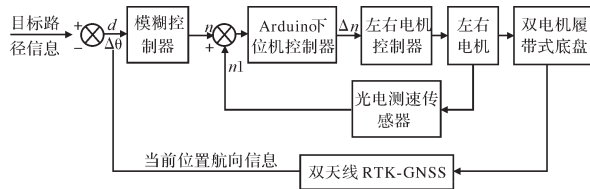


图5 双电机履带式底盘导航控制器整体设计

Fig.5 Overall design of navigation controller for dual-motor crawler chassis

1) 模糊控制器设计。双电机履带式底盘直线跟踪时, 需提前确定 1 条目标导航线, 即 AB 线。将 WGS-84 坐标系坐标转换为 ENU 站心坐标系坐标, 起点为 $A(x_1, y_1)$, 终点坐标为 $B(x_2, y_2)$ 。可求得参考线方程如式(5)所示。

$$Ax + By + C = 0 \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} A = y_2 - y_1 \\ B = x_1 - x_2 \\ C = x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2 \end{cases} \quad (6)$$

底盘导航作业时, 会因履带的滑移产生较大偏差, 使控制效果降低, 故根据田间滑移后的转向半径与两侧电机转速关系设计模糊控制器。首先需确定底盘的实时位置偏差及航向角度偏差, 通过 RTK-GNSS 获得电动底盘实时位置 $P(x_0, y_0)$, 规定左侧偏差为正、右侧为负, 则电动底盘与导航线 AB 的横向偏差 d 如式(7)所示。

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (7)$$

确定航向角度偏差时, 以正北方向为起始方向, 顺时针方向为正, 如图 6 所示, 导航线 AB 的航向角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化。可求得目标导航线航角 α 如式(8)所示, 双天线 RTK-GNSS 获取的底盘航向 β 与 α 之差即为航向角度偏差 θ 。

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0 & x_1 < x_2, y_1 < y_2 \\ 180^\circ - \alpha_0 & x_1 < x_2, y_1 > y_2 \\ 180^\circ + \alpha_0 & x_1 > x_2, y_1 > y_2 \\ 360^\circ - \alpha_0 & x_1 > x_2, y_1 < y_2 \end{cases} \quad (8)$$

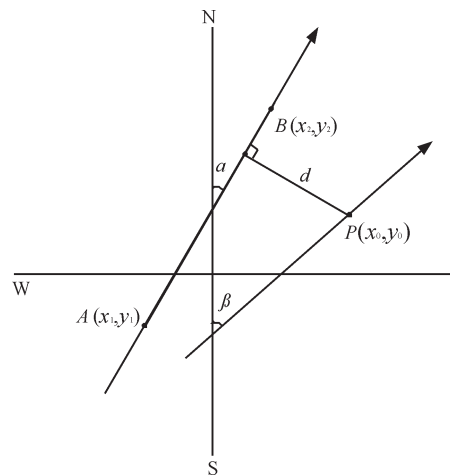


图6 横向偏差与航向偏差示意图

Fig.6 Schematic diagram of lateral offset and heading deviation

以横向偏差和航向偏差作为模糊控制器的两个输入量, 以电动底盘两侧电机转速控制量 PWM 占空比之差作为输出量, 需要先对输入输出变量进行模糊化处理。横向偏差为 d , 基本论域为 $[-0.3 \text{ m}, 0.3 \text{ m}]$, 量化等级为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\} = \{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, 0, \text{RS}, \text{RM}, \text{RB}\}$, 量化因子取 20。航向偏差为 θ , 基本论域为 $[-45^\circ, 45^\circ]$, 量化等级为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3,$

4,5,6} = {NB,NM,NS,0,RS,RM,RB},量化因子取0.13。电动底盘两侧电机转速控制量PWM占空比之差 u 模糊子集的论域为 $[-60,60]$,量化等级为 $\{-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6\} = \{NB,NM,NS,0,RS,RM,RB\}$,量化因子取0.1。

双电机履带式底盘自动导航时,需先确定底盘与导航线 AB 的相对位置关系,再采用不同的策略进行偏差调整。以横向偏差大小在 $0.02\sim 0.05\text{ m}$ 时为小偏差,在 $0.05\sim 0.15\text{ m}$ 时为中偏差,大于 0.15 m 时为大偏差;航向偏角在 $4^\circ\sim 10^\circ$ 时为小偏角,在 $10^\circ\sim 25^\circ$ 时为中偏角,大于 25° 时为大偏角。图7显示了左侧横向偏差且大偏角时的几种位置关系,其他情况亦然。

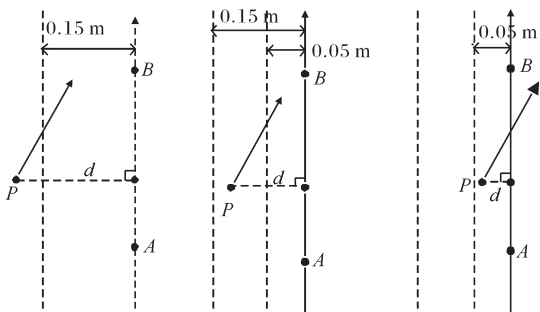


图7 左侧横向偏差且大偏角时几种位置关系

Fig.7 Several positional relationships in case of left lateral deviation and large deflection angle

横向偏差、航向偏差以及输出量的隶属函数采用三角形函数构建,航向偏差的隶属度函数如图8所示。

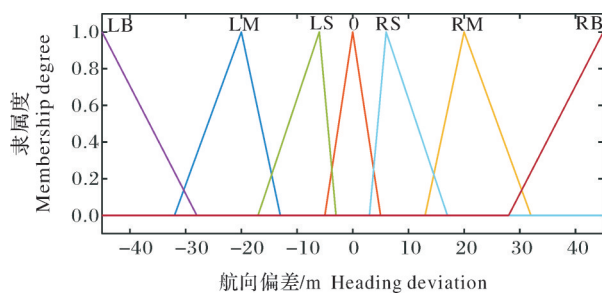


图8 航向偏差隶属函数

Fig.8 Course deflection membership function

根据偏移后的转向半径与两侧电机转速关系制定模糊控制规则和控制量,如表2所示。当底盘姿态位置为横向大偏差且航向大偏差时,两侧电机转速控制量PWM占空比之差应较大,以尽快消除偏差为主。当接近导航目标线时,为减小超调量,两侧电机转速控制量PWM占空比之差以减小偏差波动为主,使底盘维持较好姿态。

表2 模糊控制规则表

Table 2 Fuzzy control rule table

| 两侧电机PWM控制量之差 Difference of PWM control signals of motors on two sides | 横向偏差 d Lateral deviation | | | | | | |
|--|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| | LB | LM | LS | 0 | RS | RM | RB |
| 航向偏差 Heading deviation θ | LB | RB | RB | RB | RS | RS | 0 |
| | LM | RB | RB | RM | RM | RS | 0 |
| | LS | RB | RM | RS | RS | 0 | LS |
| | 0 | RM | RM | RS | 0 | LS | LM |
| | RS | RM | RS | 0 | LS | LS | LM |
| | RM | RS | 0 | LS | LM | LM | LB |
| | RB | 0 | LS | LS | LB | LB | LB |

2)双电机PID控制器设计。当底盘过沟过坎及遇到复杂路况时,实际速度与目标速度存在较大偏差,在基于Arduino的下位机控制器中采用增量式PID算法保持左右两侧电机转速的恒定,其离散形式方程如式(9)所示。

$$PWM = k_p * [e(k) - e(k-1)] + k_i * e(k) + k_d * [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (9)$$

其中, $e(k)$ 为本次偏差, $e(k-1)$ 为上次偏差, $e(k-2)$ 为上上次偏差,PWM代表输出增量。光电传感器具有灵敏度高、输出波形比霍尔元件更接近方波、结构紧凑、安装方便等优点,综合考虑驱动轴空间狭小等因素,选用达到使用要求的基于H2010槽型光耦和LM393双电压比较器的光电传感器。

进行不同PWM占空比条件下底盘速度标定后,多次试验确定最优参数,选定参数为 $k_p = 3.5, k_i = 8.0, k_d = 0$ 。如图9所示,在该参数下,左右两侧电机能快速达到目标转速,振荡及稳态误差较小。

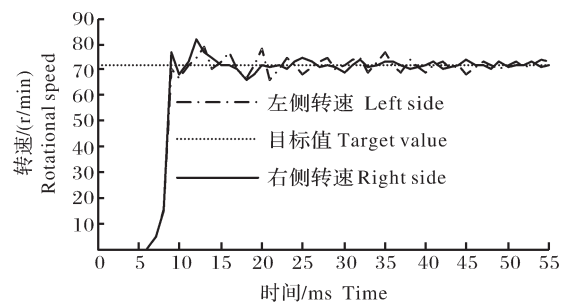


图9 电机转速波形

Fig.9 Motor speed waveform

2 结果与分析

2.1 路面试验

为验证设计的模糊导航控制器和双电机PID速度控制器的可靠性和合理性,于2021年8月晴朗天

气条件下,在华中农业大学工学院机电训练中心平整且遮挡较少的水泥路面进行验证试验。

首先在测试路段上确定导航路径的起始坐标点A和终止坐标点B,根据A、B点的坐标生成导航基准线,A、B两点间隔在30 m以上;启动自动导航系统,分别以0.6、1.0 m/s的速度进行直线追踪,车载计算机以10 Hz的频率记录直线跟踪数据,重复以上过程。

表3为双电机履带式底盘分别在0.6、1.0 m/s的速度下水泥路面试验的横向偏差测试结果,测试时均设置初始航向角偏差为 45° 、初始横向距离偏差0.3 m左右。由表3可知,底盘行驶速度为0.6 m/s时,最大绝对偏差不超过0.048 m,平均绝对偏差不超过0.019 m,标准差不超过0.029 m。底盘行驶速度为1.0 m/s时,最大绝对偏差不超过0.089 m,平均绝对偏差不超过0.025 m,标准差不超过0.065 m。

表3 路面试验的路径跟踪横向偏差测试结果

Table 3 Lateral deviations of path tracking tests on pavement roads

| 底盘速度/ (m/s) Chassis speed | 序号 No. | 最大绝对偏差 Maximum absolute deviation | 平均绝对 偏差 Mean absolute deviation | 标准差 Standard deviations |
|------------------------------------|------------------|--|---|-------------------------------|
| 0.6 | 1 | 0.033 | 0.011 | 0.016 |
| | 2 | 0.041 | 0.016 | 0.022 |
| | 3 | 0.048 | 0.019 | 0.029 |
| | 均值 Mean value | 0.041 | 0.015 | 0.023 |
| 1.0 | 1 | 0.089 | 0.025 | 0.065 |
| | 2 | 0.065 | 0.018 | 0.059 |
| | 3 | 0.074 | 0.021 | 0.061 |
| | 均值 Mean value | 0.076 | 0.021 | 0.062 |

图10为双电机履带式底盘在速度为0.6(图10A)和1.0 m/s(图10B)时的一组水泥路面追踪效果图,底盘在快速接近目标线的上线过程中发生1次超调,产生最大横向偏差,而后迅速调整进行直线追踪。

2.2 田间试验

田间试验于2021年9月晴朗天气下,在华中农业大学校内水稻试验基地试验田中进行,试验现场如图11所示。田间留茬高度为250~350 mm,与再生稻头季机收后环境相同,五点取样法测得土壤含

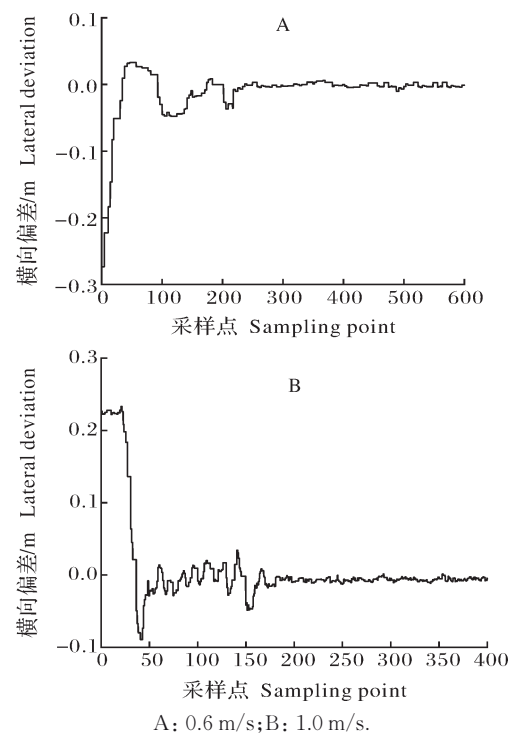


图10 水泥路面路径跟踪效果

Fig.10 Path tracking effect on cement pavement road



图11 田间导航试验现场

Fig.11 Field navigation test site

水率平均值为20.15%,土壤坚实度平均值为1 081.23 kPa。

本底盘设计目标为适用于再生稻头季机械收获,根据中小型联合收获机作业要求和实际经验,按照路面试验方法,在0.6 m/s作业速度下进行验证试验。设置起始点横向距离偏差为1.0 m左右,起始点航向角度偏差为 45° 左右。表4为田间试验的路径跟踪横向偏差测试结果,最大绝对偏差不超过0.783 m,平均绝对偏差不超过0.056 m,标准差不超过0.174 m。图12为一组田间路径跟踪效果图,在从初始位置快速上线到目标路径的过程中发生1次超调,此时产生最大横向偏差,而后逐渐稳定在目标线附近,整个过程平均绝对偏差为0.050 m,满足田间作业要求。

表4 田间试验的路径跟踪横向偏差测试结果

| 序号 No. | 最大绝对偏差 Maximum absolute deviation | 平均绝对偏差 Mean absolute deviation | 标准差 Standard deviations |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 1 | 0.554 | 0.045 | 0.148 |
| 2 | 0.783 | 0.056 | 0.174 |
| 3 | 0.638 | 0.051 | 0.165 |
| 均值 Mean value | 0.658 | 0.050 | 0.162 |

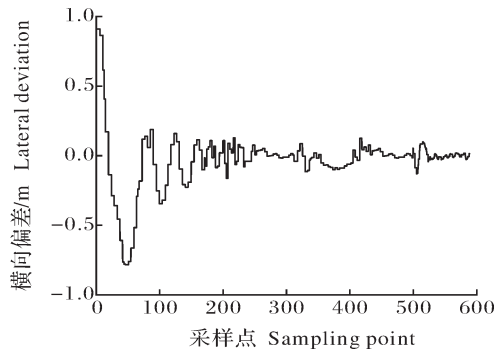


图12 田间路径跟踪效果

Fig.12 Path tracking effect in the field

3 讨论

本研究以笔者所在团队自主研发的双电机履带式底盘为基础设计了适用于再生稻头季对行收获的自动导航系统。通过分析双电机履带式底盘转向方式和运动学模型,考虑田间滑移得到转向半径与两侧电机转速的关系,据此设置模糊控制的控制规则和控制量。以Arduino单片机为下位机控制器,基于增量式PID实现两侧电机转速的精准控制。以双天线RTK-GNSS和光电测速传感器为底盘姿态及电机转速采集装置,设计了基于模糊控制的导航控制器控制底盘进行路径追踪,达到提高田间导航控制精度的目的。路面试验表明,双电机履带式底盘行驶速度为0.6 m/s时,平均横向偏差为0.015 m;田间试验表明,双电机履带式底盘行驶速度为0.6 m/s时,平均横向偏差为0.050 m,满足再生稻头季对行机收的精度要求。

田间试验与路面试验相比,导航系统上线过程中的最大横向偏差与整个过程的平均偏差均有所增大。其原因主要在于田间存在滑移现象,地面条件越差滑移率越高、误差越大,依据双电机履带式底盘运动学模型设置模糊控制规则和控制量,以减小平均偏差。在履带式机械田间导航研究上,丁幼春

等^[26]基于小型履带式油菜播种机平台设计了免疫PID控制器,田间试验表明,作业速度为0.5 m/s时,直线跟踪平均绝对偏差为5.8 cm。王吉中等^[27]针对大型履带式无沟铺管机设计了北斗导航控制系统,应用试验表明,在作业速度0.2 m/s时,横向误差保持在±4 cm以内。与国内同行研究相比,本研究中双电机履带式底盘田间作业速度为0.6 m/s时,平均绝对偏差为0.050 m,满足使用要求,且本履带式底盘采用纯电动双电机驱动,底盘驱动方式和控制形式上与传统履带式机械有较大区别,可为电动农机及履带式机械的导航研究提供一定参考和借鉴。

由于再生稻收获田块环境复杂,暂未实现根据滑移率进行模糊控制量的实时调整,后续还将进一步开展实时监测田间滑移、实时修正控制量及转向跟踪的研究,以更好地满足再生稻头季对行机收的导航作业要求。

参考文献 References

- [1] 朱奇奇. 超级杂交稻再生特性及其生理基础研究[D]. 长沙:中南大学,2008.ZHU X Q.Studies on ratooning characteristics and its physiological basis of super hybrid rice[D].Changsha: Central South University,2008(in Chinese with English abstract).
- [2] 王新飞. 不同氮肥运筹对再生稻再生芽及氮素利用特征的影响[D]. 武汉:华中农业大学,2018.WANG X F.Effects of different nitrogen managements on bud growth and nitrogen utilization characteristics in ratoon rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2018(in Chinese with English abstract).
- [3] 刘婉茹,张国忠,周勇,等. 智能化技术在水稻生产全程机械化中的应用研究与发展趋势[J]. 华中农业大学学报,2022,41(1):105-122.LIU W R,ZHANG G Z,ZHOU Y, et al. Application and development of intelligent technology in full mechanization of rice production[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2022,41(1):105-122(in Chinese with English abstract).
- [4] 付建伟. 双通道全喂入式再生稻收获机研制[D]. 武汉:华中农业大学,2020.FU J W.Development of double-channel full feeding harvester for ratoon rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2020(in Chinese with English abstract).
- [5] 刘昊,许天瑶. 我国智能化农业机械发展概况[J]. 农业工程,2016,6(6):7-8.LIU H,XU T Y.Development situation of intelligent agricultural machinery in China[J]. Agricultural engineering,2016,6(6):7-8(in Chinese with English abstract).
- [6] 姬长英,周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报,2014,45(9):44-54.JI C Y,ZHOU J.Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAM,2014,45(9):44-54(in Chinese with English abstract).
- [7] 胡静涛,高雷,白晓平,等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报,2015,31(10):1-10.HU J T,GAO L,BAI X P, et al.Review of research on automatic guidance of agricultural ve-

- hicles[J].Transactions of the CSAE,2015,31(10):1-10(in Chinese with English abstract).
- [8] 谢斌,武仲斌,毛恩荣.农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J].农业机械学报,2018,49(8):1-17.XIE B,WU Z B,MAO E R.Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J].Transactions of the CSAM,2018,49(8):1-17(in Chinese with English abstract).
- [9] 张俊杰,李霄鹤.2BMFQ-4智能导航电动精量整地播种机亮相2020河北农机新机具新技术推广演示会[J].河北农机,2020(8):20.ZHANG J J,LI X H.2BMFQ-4 intelligent navigation electric precision land preparation planter appears in 2020 Hebei agricultural machinery new machinery and technology promotion demonstration meeting [J].Hebei agricultural machinery,2020(8):20(in Chinese).
- [10] 贾全,张小超,苑严伟,等.NF-752型履带式拖拉机自动驾驶系统[J].农业工程,2018,8(4):24-29.JIA Q,ZHANG X C,YUAN Y W, et al. Automatic driving system for NF-752 tracked tractor[J].Agricultural engineering,2018,8(4):24-29(in Chinese with English abstract).
- [11] HUANG P,ZHANG Z,LUO X, et al.Path tracking control of a differential-drive tracked robot based on look-ahead distance[J].IFAC-PapersOnLine,2018,51(17):112-117.
- [12] TAKAI R,BARAWID O J,NOGUCHI N.Autonomous navigation system of crawler-type robot tractor[J].IFAC proceedings volumes,2011,44(1):14165-14169.
- [13] TAKAI R,YANG L L,NOGUCHI N.Development of a crawler-type robot tractor using RTK-GPS and IMU[J].Engineering in agriculture,environment and food,2014,7(4):143-147.
- [14] 刘兆祥,刘刚,籍颖,等.基于自适应模糊控制的拖拉机自动驾驶系统[J].农业机械学报,2010,41(11):148-152,162.LIU Z X,LIU G,JI Y, et al.Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control[J].Transactions of the CSAM,2010,41(11):148-152,162(in Chinese with English abstract).
- [15] 伟利国,胡小安,王丽丽.开沟铺管机自动驾驶系统设计与试验[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2012,34(6):667-670.WEI L G,HU X A,WANG L L.Automatic navigation system design and experiment of pipe-laying trencher[J].Journal of Wuhan University of Technology (information & management engineering edition),2012,34(6):667-670(in Chinese with English abstract).
- [16] 张朝宇,董万静,熊子庆,等.履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(12):105-114.ZHANG C Y,DONG W J,XIONG Z Q, et al.Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J].Transactions of the CSAM,2021,52(12):105-114(in Chinese with English abstract).
- [17] 丁幼春,詹鹏,周雅文,等.北斗定位田间信息采集平台运动控制器设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(12):178-185.DING Y C,ZHAN P,ZHOU Y W, et al.Design and experiment of motion controller for information collection platform in field with Beidou positioning[J].Transactions of the CSAE,2017,33(12):178-185(in Chinese with English abstract).
- [18] 宋彦,张羊阳,姚琦,等.基于启发式动态规划的履带机器人路径跟随控制方法[J].农业机械学报,2019,50(11):24-33.SONG Y,ZHANG Y Y,YAO Q, et al.Path following control method of tracked mobile robot based on heuristic dynamic programming[J].Transactions of the CSAM,2019,50(11):24-33(in Chinese with English abstract).
- [19] HAN J H,PARK C H,KWON J H, et al.Performance evaluation of autonomous driving control algorithm for a crawler-type agricultural vehicle based on low-cost multi-sensor fusion positioning[J/OL].Applied sciences,2020,10(13):4667[2021-11-28].<https://doi.org/10.3390/app10134667>.
- [20] 刘志杰,王小乐,任志刚,等.基于虚拟雷达模型的履带拖拉机导航路径跟踪控制算法[J].农业机械学报,2021,52(6):376-385.LIU Z J,WANG X L,REN Z G, et al.Crawler tractor navigation path tracking control algorithm based on virtual radar model[J].Transactions of the CSAM,2021,52(6):376-385(in Chinese with English abstract).
- [21] 张仕杰,张国忠,赵胜华,等.水稻联合收获机双电机履带式底盘设计与驱动功率试验[J].安徽农业大学学报,2019,46(6):1075-1082.ZHANG S J,ZHANG G Z,ZHAO S H, et al.Design of dual-electric motors crawler chassis for rice harvester and drive power test [J].Journal of Anhui Agricultural University,2019,46(6):1075-1082(in Chinese with English abstract).
- [22] 高海涛,邓志刚,高敏强,等.静液压驱动技术在玉米联合收获机行走驱动上的应用[J].农业机械,2013(25):138-140.GAO H T,DENG Z G,GAO M Q, et al.Application of hydrostatic drive technology on the drive system of corn combine harvester [J].Farm machinery,2013(25):138-140(in Chinese).
- [23] 熊斌,张俊雄,曲峰,等.基于BDS的果园施药机自动驾驶控制系统[J].农业机械学报,2017,48(2):45-50.XIONG B,ZHANG J X,QU F, et al.Navigation control system for orchard spraying machine based on Beidou navigation satellite system[J].Transactions of the CSAM,2017,48(2):45-50(in Chinese with English abstract).
- [24] 杨聪彬,董明明,顾亮,等.考虑履刺形状的履带板土壤推力研究[J].北京理工大学学报,2015,35(11):1118-1121.YANG C B,DONG M M,GU L, et al.Research on soil shear strength considering the shape of grouser[J].Transactions of Beijing Institute of Technology,2015,35(11):1118-1121(in Chinese with English abstract).
- [25] 关卓怀,沐森林,吴崇友,等.履带式联合收获机水田作业转向运动学分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(13):29-38.GUAN Z H,MU S L,WU C Y, et al.Steering kinematic analysis and experiment of tracked combine harvester working in paddy field[J].Transactions of the CSAE,2020,36(13):29-38(in Chinese with English abstract).
- [26] 丁幼春,何志博,夏中州,等.小型履带式油菜播种机导航免疫PID控制器设计[J].农业工程学报,2019,35(7):12-20.DING Y C,HE Z B,XIA Z Z, et al.Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder[J].Transactions of the CSAE,2019,35(7):12-20(in Chinese with English abstract).
- [27] 王吉中,赵博,赵士猛,等.无沟铺管机北斗导航控制系统设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(9):47-54.WANG J Z,ZHAO B,ZHAO S M, et al.Design and test of the BDS navigation system for trenchless pipe laying machines [J].Transactions of the CSAE,2021,37(9):47-54(in Chinese with English abstract).

Design and experiment of automatic navigation system for rice harvester with dual-motor crawler chassis

WANG Weikang¹, LUO Chengming^{1,2}, ZHANG Guozhong^{1,2},
FU Jianwei^{1,2}, DONG Zhao¹, JI Chao¹, ZHAO Zhuangzhuang¹

1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*
2. *Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in
Mid-Lower Yangtze River, Wuhan 430070, China*

Abstract A set of automatic navigation system for rice harvester with dual-motor crawler chassis was designed and tested to solve problems of high rolling rate, poor alignment stability of manual-operated crawler harvester and low field operation accuracy of existing electric crawler machinery for ratoon rice harvesting in the first season. Based on the dual-motor crawler chassis self-designed for the rice harvesting, the relationship between the steering radius of the chassis and the speed of the driving motors on both sides was derived on the basis of the field slip model. An automatic navigation fuzzy controller was designed. The dual-antenna RTK-GNSS is used to obtain the real-time position and heading angle information of the dual-motor crawler chassis. The lateral fuzzy correction controller of the automatic navigation system and the PID controller of the motor speed on both sides control the motor speed in real time to realize the automatic tracking of the working path. The results of road test showed that the average lateral deviation of the automatic navigation system was 0.015 m and 0.021 m when the dual-motor crawler chassis was driven at 0.6 m/s and 1.0 m/s. When the driving speed was 0.6 m/s, the average lateral deviation of the automatic navigation system was 0.050 m. Compared with the navigation system modified with electronically controlled hydraulic steering, this navigation system has precise control volume, fast response speed and small tracking error. It can be used in the row-to-row operation of ratoon rice in the first season to reduce the rolling rate.

Keywords ratooning rice; harvesting machinery; automatic pilot; dual-motor crawler chassis; fuzzy control; precision operation; field path tracking

(责任编辑:陆文昌)