

基于模糊控制的插秧机 LQR 曲线路径跟踪控制器优化方法

马悦琦^{1,2} 迟瑞娟^{1,2} 赵彦涛^{1,2} 班超^{1,2} 苏童^{1,2} 李峥嵘^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学车辆智能控制实验室, 北京 100083)

摘要: 为了提高无人插秧机地头转向时的曲线路径跟踪精度,针对传统的误差权重矩阵固定的线性二次调节器 (Linear quadratic regulator, LQR) 路径跟踪控制器对插秧机的纵向速度、横向偏差以及航向角偏差的变化适应性较差的问题,基于车辆二自由度动力学模型,提出了一种通过模糊控制实时调整 LQR 控制器误差权重矩阵的路径跟踪控制器优化方法。该方法以纵向速度、横向偏差、航向角偏差为输入,以横向偏差和航向角偏差对应的误差权重为输出,建立模糊控制模型实时调整 LQR 控制器的误差权重矩阵。为了验证所提出算法的曲线路径跟踪控制精度和可行性,以改装后的洋马 VP6E 型无人插秧机为对象,进行 Carsim 和 Simulink 联合仿真试验以及实车试验。仿真试验结果表明,在控制插秧机跟踪半径为 2 m 的 1/4 圆弧路径时,所提出算法控制下的横向偏差绝对值均值为 0.014 m,最大值为 0.032 m,小于 0.04 m 的占 100%,航向角偏差绝对值均值为 1.67°,最大值为 4.94°,相较于传统引入前馈控制的 LQR 控制器,横向偏差绝对值均值降低 50%,航向角偏差绝对值均值降低 23%。实车试验结果表明,在插秧机跟踪半径为 2 m 的 1/4 圆弧路径时,所提出算法控制下横向偏差绝对值均值为 0.027 m,最大值为 0.048 m,小于 0.04 m 的占 62%,航向角偏差绝对值均值为 1.86°,最大值为 4.94°,相较于传统引入前馈控制的 LQR 控制器,横向偏差绝对值均值降低 40%,航向角偏差绝对值均值降低 4.1%。该方法提升了无人插秧机曲线路径跟踪控制精度,为无人插秧机曲线路径跟踪控制提供了参考。

关键词: 无人插秧机; 路径跟踪; 线性二次调节器; 模糊控制

中图分类号: S223.91⁺2; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0001-08

Optimization Method of LQR Curve Path Tracking Controller for Unmanned Rice Transplanter Based on Fuzzy Control

MA Yueqi^{1,2} CHI Ruijuan^{1,2} ZHAO Yantao^{1,2} BAN Chao^{1,2} SU Tong^{1,2} LI Zhengrong^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Vehicle Intelligent Control Laboratory, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The precision of curve path tracking affects the efficiency of unmanned rice transplanter by affecting the efficiency of line changing. In order to improve the curve path tracking accuracy of the unmanned rice transplanter when turning from the headland, in view of the poor adaptability of the traditional linear quadratic regulator (LQR) path tracking controller with fixed error weight matrix to the changes of the longitudinal speed, lateral deviation and heading angle deviation of the rice transplanter, an optimization method of path tracking controller by adjusting the error weight matrix of linear quadratic regulator in real time through fuzzy control was presented. The method took the longitudinal speed, lateral deviation and heading angle deviation as the input, and the error weight corresponding to the lateral deviation and heading angle deviation as the output, and a fuzzy control model was established to adjust the error weight matrix of the linear quadratic regulator in real time. In order to verify the accuracy and feasibility of the curve path tracking control of the proposed algorithm, the refitted Yangma VP6E unmanned rice transplanter was taken as the object, and Carsim and Simulink joint simulation tests and real vehicle tests were carried out. The simulation test results showed that when the rice transplanter was controlled to track a quarter arc path with radius of 2 m, the average value of absolute value of lateral deviation under the control of the proposed algorithm was 0.014 m, the maximum value was 0.032 m,

收稿日期: 2023-06-18 修回日期: 2023-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52172396)

作者简介: 马悦琦(1999—),男,博士生,主要从事农机路径跟踪研究,E-mail: 180158967@qq.com

通信作者: 迟瑞娟(1969—),女,副教授,主要从事汽车电子控制技术研究,E-mail: chiruijuan@cau.edu.cn

and 100% of those were less than 0.04 m, the average value of the absolute value of heading angle deviation was 1.67° , and the maximum value was 4.94° . Compared with the traditional linear quadratic regulator with feedforward control, the average value of absolute value of lateral deviation was reduced by 50%, the average absolute value of heading angle deviation was decreased by 23%. The real vehicle test results showed that when the rice transplanter tracked a quarter arc path with radius of 2 m, the average value of the absolute value of lateral deviation under control of proposed algorithm was 0.027 m, the maximum value was 0.048 m, and 62% of those were less than 0.04 m, the average value of absolute value of heading angle deviation was 1.86° , and the maximum value was 4.94° . Compared with the traditional linear quadratic regulator with feedforward control, the average value of absolute value of lateral deviation was reduced by 40%. The average absolute value of heading angle deviation was decreased by 4.1%. The method improved the curve path tracking control accuracy of the unmanned rice transplanter, and provided a reference for the curve path tracking control of the unmanned rice transplanter.

Key words: unmanned transplanter; path tracking; linear quadratic regulator; fuzzy control

0 引言

无人驾驶农机是未来农机发展的方向^[1-4]。无人水稻插秧机是无人农机的典型代表。为了提高水稻种植的效率与质量,路径跟踪已成为无人水稻插秧机需要解决的一项关键技术^[5]。目前针对无人插秧机路径跟踪的研究多停留在直线路径跟踪,而曲线路径跟踪精度会影响插秧机的换行效率^[6],对插秧机的作业效率起着重要作用,因此进行插秧机曲线路径跟踪控制的研究对于无人农机的有着重要意义。

国内外学者已对农机路径跟踪进行了研究。唐小涛等^[7]以速度和横向偏差作为输入,以前视距离作为输出,设计模糊控制模型,提高了纯跟踪算法控制下插秧机直线路径跟踪控制器对车速的适应性与稳定性,但未针对曲线路径跟踪进行研究;李革等^[8]根据车速以及路径曲率改变纯跟踪算法前视距离,提高了插秧机曲线跟踪的精度,并在横向偏差大于一定值时使期望输出的前轮转角乘以一个系数,使控制器可以同时控制横向偏差和航向角偏差,但此种方法无法保证纯跟踪控制器对横向偏差产生最优响应;TOYOFUMI等^[9]通过线性二次调节器(Linear quadratic regulator, LQR)算法控制拖拉机直线和曲线路径跟踪,但其将误差权重矩阵设置为定值,没有考虑到 LQR 控制器的误差权重矩阵对不同车速适应性差的问题;HE等^[10]和迟瑞娟等^[11]基于模型预测控制(Model predictive control, MPC)对插秧机的直线路径跟踪进行了控制,但也均未对插秧机的曲线路径跟踪控制进行深入研究。黄沛琛等^[12]采用 BP 神经网络对纯跟踪算法的前视距离进行调整,以此提升农机地头转向的精度,但模型的训练需要大量的可靠样本。

直线路径跟踪时,控制器通常将纵向速度视为定值。相较于直线路径跟踪,插秧机在进行曲线路径跟踪时纵向速度变化较大,因此,在跟踪曲线路径时,使用直线路径的跟踪方法将产生相对较大的误差。所以,需要对传统的算法进行优化以提高控制器对于纵向速度的适应性。此外,为提高控制系统的稳定性,控制器的设计还需考虑控制律增益系数矩阵对跟踪误差(横向偏差和航向角偏差)的适应性^[13]。

综上所述,为了提升插秧机地头转向时的曲线路径跟踪精度,本文将通过模糊控制实现 LQR 控制器对于纵向速度、横向偏差和航向角偏差的自适应,并以洋马 VP6E 型插秧机为试验平台,验证所提出控制器的控制精度。

1 路径跟踪误差模型

根据车辆二自由度动力学模型、轮胎侧偏角公式以及前轮转角与前轮侧滑角关系式,可推导并简化跟踪误差模型的状态空间方程为^[14]

$$\dot{X} = AX + BU + CW \quad (1)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_{af} + 2C_{ar}}{mv_x} & \frac{2C_{af} + 2C_{ar}}{m} & -\frac{2aC_{af} - 2bC_{ar}}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2aC_{af} - 2bC_{ar}}{I_z v_x} & \frac{2aC_{af} - 2bC_{ar}}{I_z} & -\frac{2a^2 C_{af} + 2b^2 C_{ar}}{I_z v_x} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{af}}{m} \\ 0 \\ \frac{2aC_{af}}{I_z} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2aC_{af} - 2bC_{ar}}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ -\frac{2a^2 C_{af} + 2b^2 C_{ar}}{mv_x} \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} e_d \\ \dot{e}_d \\ e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \end{bmatrix} \quad U = [\delta] \quad W = [\dot{\varphi}_r]$$

式中 v_x ——纵向速度 m ——车辆总质量
 I_z ——车辆绕 z 轴的转动惯量
 a ——车辆质心距前轴的纵向距离
 b ——车辆质心距后轴的纵向距离
 C_{af} ——车辆前轮侧偏刚度
 C_{ar} ——车辆后轮侧偏刚度
 e_d ——车辆质心位置与前方最近参考路径点的横向偏差
 e_φ ——车辆质心位置与前方最近参考路径点的航向角偏差
 δ ——车辆前轮转角
 $\dot{\varphi}_r$ ——参考路径航向角变化率
 X ——状态量 U ——控制量

2 路径跟踪控制器设计

控制系统总体方案如图 1 所示。控制系统通过基于车辆二自由度动力学模型设计的 LQR 控制器控制无人插秧机的路径跟踪,在此基础上,通过模糊控制对 LQR 控制器的误差权重矩阵 Q 进行调节,以提升控制器对插秧机纵向速度和跟踪偏差的适应性。

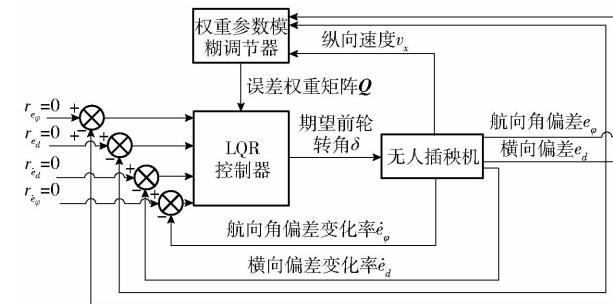


图 1 控制系统总体方案

Fig. 1 Overall control system

2.1 LQR 控制器

LQR 控制器的设计思想为建立最优控制律

$$U = -KX \quad (2)$$

使损失函数

$$J = \int_0^\infty (X^T(t)QX(t) + U^T(t)RU(t))dt \quad (3)$$

式中 R ——控制量权重

K ——控制律增益系数矩阵

达到最小值。

根据文献[14]可知,LQR 控制器设计步骤为:首先选取 Q 和 R ,然后求解 Riccati 方程 $A^T P + PA -$

$PBR^{-1}B^T P + Q = 0$ 得到矩阵 P ,最后计算得到控制律增益系数矩阵 $K = R^{-1}B^T P$ 。对于基于车辆二自由度动力学模型设计的 LQR 路径跟踪控制器, K 为 4 维行向量,即 $K = (K_1, K_2, K_3, K_4)$ 。

根据文献[15]可知,基于车辆二自由度动力学模型设计曲线路径跟踪控制器时,对于未引入前馈控制的 LQR 控制器,无论控制律增益系数矩阵 K 为何值,状态量 X 与其导数 $\dot{X}$ 都不能同时为 0。因此,需在基础 LQR 控制器控制律的基础上增加前馈控制量 $\delta_f = \dot{\varphi}_r \left[a + b - bK_3 + \frac{mv_x^2}{a+b} \left(\frac{b}{2C_{af}} - \frac{a}{2C_{ar}}K_3 + \frac{a}{2C_{ar}} \right) \right]$ 。最终,引入前馈控制后的 LQR 控制器的控制律为 $U = -KX + \delta_f$ 。

2.2 模糊控制策略

插秧机在实际工作过程中,受力情况复杂,使插秧机的实际纵向速度发生抖动,曲线跟踪时更是如此。而固定误差权重矩阵的 LQR 控制器无法较好地适应车速变化,这将对控制器的路径跟踪效果产生较大影响。此外,为了提高控制系统的稳定性,控制器参数对于跟踪误差的适应性也需要被纳入考虑。针对上述问题,参照文献[16],采用模糊控制的方法对 LQR 控制器的误差权重矩阵进行自适应调节,以保证 LQR 控制器在插秧机车速、横向偏差以及航向角偏差变化时仍具有较好的路径跟踪效果。

2.2.1 变量选取及模糊化

基于车辆二自由度动力学模型设计的 LQR 控制器的权重矩阵分别为状态量误差权重矩阵 $Q = \text{diag}(q_1, q_2, q_3, q_4)$ 和控制量权重矩阵 R ,其中 q_1, q_2, q_3, q_4 分别为横向偏差、横向偏差变化率、航向角偏差、航向角偏差变化率对应的权重; R 为前轮转角对应的权重。权重越大,控制器对相应变量的关注程度将越大^[17],随着控制器同时关注的状态量增多,控制器的保守性也会加强,从而导致路径跟踪精度下降。因此本文中所设计的控制器将 q_2, q_4 设为相对较小的定值 1,且不通过模糊控制对其进行调整。此外,本文所设计控制器重点关注跟踪误差,因此根据经验将 R 设为 0.1。最终,仅根据纵向速度和跟踪偏差(横向偏差和航向角偏差)对 q_1 和 q_3 进行调整,实现控制器对车速和跟踪偏差变化的自适应。各变量的论域及量化等级如表 1 所示。

2.2.2 模糊规则设计

较大的权重可以使插秧机快速接近目标位置,但会导致严重的超调现象;而较小的权重虽会使插

表 1 变量论域及量化等级

Tab.1 Variable universe and quantification level

变量	基本论域	量化等级
v_x	(0 m/s,0.8 m/s)	$\{0,0.5,1\}=\{L,M,H\}$
q_1	(0,100)	$\{0,0.25,0.5,0.75,1\}=\{L,ML,M,MH,H\}$
q_3	(0,100)	$\{0,0.25,0.5,0.75,1\}=\{L,ML,M,MH,H\}$
e_d	(-0.5 m,0.5 m)	$\{-1,-0.5,0,0.5,1\}=\{NH,NM,L,PM,PH\}$
e_φ	(-20°,20°)	$\{-1,-0.5,0,0.5,1\}=\{NH,NM,L,PM,PH\}$

秧机的工作更加平稳,但会降低响应速度。同时,当速度和误差权重均较大时系统也会产生较大的振荡。综合上述分析,在设计模糊规则时,需遵循以下规则:跟踪偏差越大,误差权重参数需越大;纵向速度越大,误差权重参数需越小。由此设计模糊规则如表 2、3 所示,隶属度函数及模糊控制曲面如图 2 所示。

3 试验

通过仿真试验和实车试验将模糊 LQR 控制器和引入前馈控制的 LQR 控制器(简称 LQR 控制器)的路径跟踪效果进行对比,验证通过模糊控制实

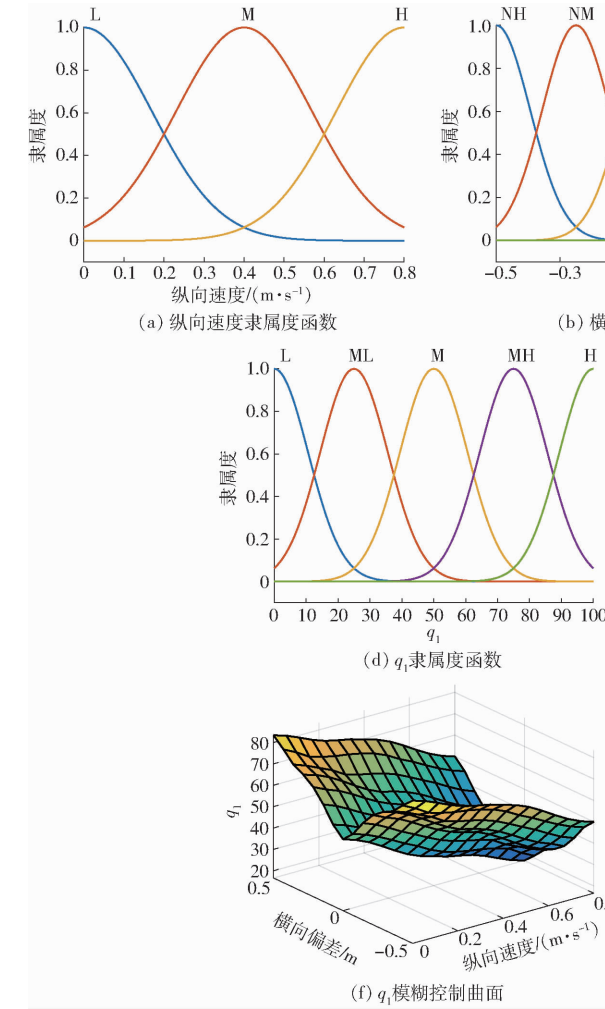


图 2 隶属度函数及模糊控制曲面

Fig.2 Membership function and fuzzy control surface

表 2 q_1 模糊规则

Tab.2 Fuzzy control regulation of q_1

纵向速度	横向偏差				
	NH	NM	L	PM	PH
L	H	MH	M	MH	H
M	MH	M	ML	M	MH
H	M	ML	L	ML	M

表 3 q_3 模糊规则

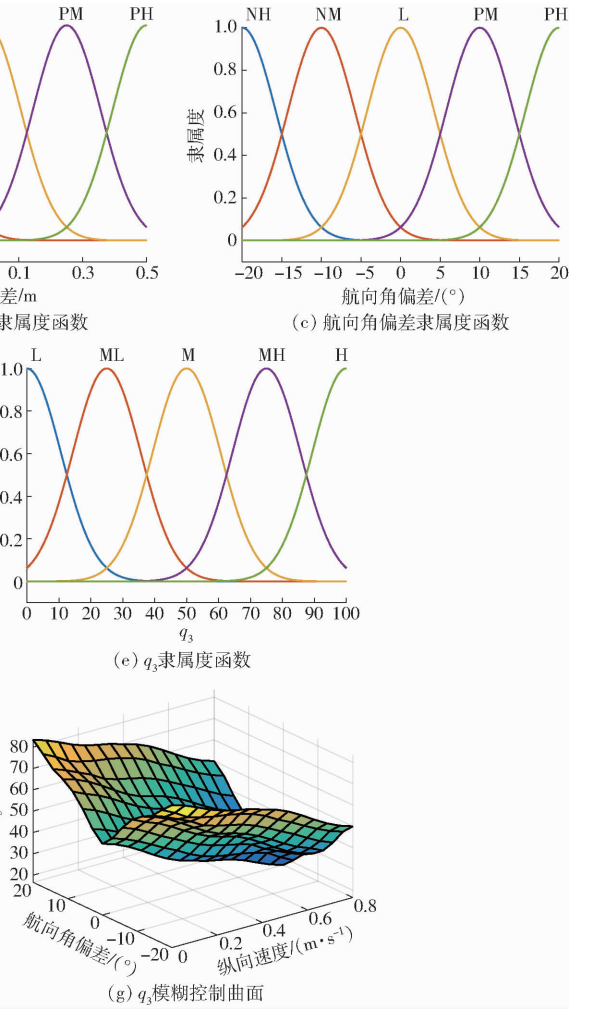
Tab.3 Fuzzy control regulation of q_3

纵向速度	航向角偏差				
	NH	NM	L	PM	PH
L	H	MH	M	MH	H
M	MH	M	ML	M	MH
H	M	ML	L	ML	M

时调整 LQR 控制器误差权重的方法对 LQR 控制器路径跟踪效果的提升。

3.1 试验平台配置

试验平台为经过改装的洋马 VP6E 型插秧机^[11,18],如图 3 所示,基本参数如表 4 所示。插秧机的油门踏板和制动踏板改装为电推杆控制,插秧



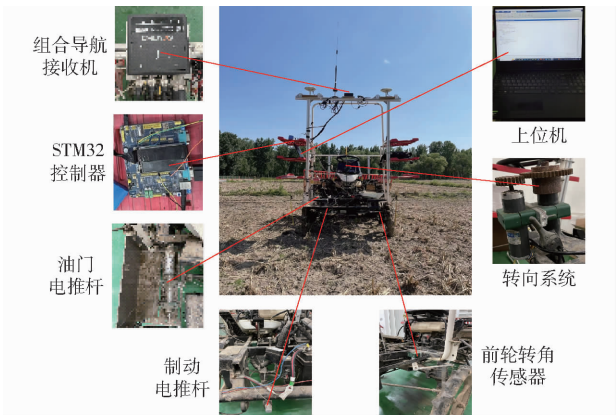


图3 改装后洋马 VP6E 型插秧机

Fig.3 Modified Yanmar VP6E rice transplanter

表 4 插秧机基本参数

Tab.4 Basic vehicle parameters

参数	数值
整车质量 m/kg	496
质心到前轴的距离 a/m	0.65
质心到后轴的距离 b/m	0.40
绕 z 轴的转动惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	124
前轮最大转角绝对值 $\delta_m/(\circ)$	57

机速度由 STM32 控制器控制电推杆进行调整。插秧机转向由 STM32 控制器控制直流电机驱动齿轮机构,进而控制方向盘转动来实现,并由前轮转角传感器实时测量前轮转角,由此实现插秧机前轮转角的闭环控制。导航设备为华测 CHC CGI-610 厘米级组合导航系统,配置其以频率 10 Hz 按 GPCHC 数据传输协议发送。上位机为便携式计算机,系统型号为 LENOVO-81V4,处理器型号为 Intel Core i5-9300H。插秧机进行路径跟踪时,STM32 控制器通过串口接收组合导航发送的插秧机位姿数据,并结合提前输入其中的控制律对期望前轮转角进行计算,当需要控制器实时更新控制律时,上位机将对控制律增益系数矩阵进行计算并将计算结果通过串口发送给 STM32 控制器。

3.2 参考路径、插秧机初始位姿及期望纵向速度设计

无人插秧机工作过程中,对曲线路径的跟踪主要发生在地头转向时。根据作业间距和转弯半径的关系,农机地头转向方式可以分为 Π 型、 Ω 型和 T 型,且这 3 种方法的地头转向路径中的部分路径均由圆弧组成^[19]。因此,结合插秧机实际工作情况,选取半径为 2 m 的 1/4 圆弧作为参考路径,用以评价路径跟踪控制器的曲线路径跟踪效果。

试验开始时,在大地坐标系下,使插秧机初始航

向角调整为 90° ,初始前轮转角调整为 0° ,控制器首先获取插秧机起始位置 (x_0, y_0) ,然后以 $(x_0 + 0.02 \text{ m}, y_0 + 0.06 \text{ m})$ 为参考路径的起点,顺时针做半径为 2 m 的 1/4 圆弧,以此作为插秧机曲线跟踪的参考路径,并以 $\Delta x = 0.05 \text{ m}$ 为间隔将参考路径离散为 40 个参考路径点。

此外,结合插秧机实际工作情况,设插秧机曲线路径跟踪时期望纵向速度为 0.7 m/s 。

3.3 系统参数确定

为获取轮胎侧偏刚度,根据文献[20]中插秧机轮胎侧偏刚度的辨识结果并结合魔术公式对试验所用插秧机轮胎侧偏刚度进行估算,得到前轮轮胎侧偏刚度 C_{af} 为 400 N/rad ,后轮轮胎侧偏刚度 C_{ar} 为 517 N/rad 。其余插秧机系统参数参见表 4。

对于 LQR 控制器的控制律增益系数矩阵的确定,根据经验选取 LQR 控制器控制量权重参数 R 为 0.1,并以表 4 中参数为参考,纵向速度为 0.7 m/s ,通过 Carsim 和 Simulink 联合仿真对 LQR 控制器模型的状态误差权重矩阵 Q 的权重进行从 1 到 100 以内以 4 间隔的穷举法试凑,最终得到使横向偏差绝对值均值最低的误差权重矩阵 $Q = \text{diag}(49, 1, 25, 1)$,并得到控制律增益系数矩阵 $K = R^{-1} B^T P = [22.135 \ 9, 3.9, 12.405 \ 3, 1.856 \ 6]$ 。

3.4 控制器仿真对比试验

在控制器实车试验前,首先通过仿真试验对模糊 LQR 控制器的路径跟踪控制效果进行验证。为了使仿真效果更接近于水田环境的实际应用效果,首先根据插秧机在水田中转向时的实际纵向车速近似拟合出纵向车速随时间变化的函数,然后将该函数输入仿真模型中实时改变仿真试验时插秧机纵向速度,以此模拟水田恶劣环境对插秧机纵向速度的影响。

为获得纵向速度函数,通过 PID 算法控制插秧机纵向速度保持在 0.7 m/s 附近,使插秧机在水田中沿 3.2 节中设计的半径为 2 m 的 1/4 圆弧路径转向,获取组合导航测得的位姿信息和车速,最终得到的纵向速度变化曲线如图 4 所示。据此,可以近似拟合出插秧机在水田环境中转向时纵向速度随时间变化的函数

$$v_x = 0.6 + 0.2 \sin\left(\frac{\pi}{2}t - \frac{\pi}{4}\right) \tag{4}$$

将该函数输入到仿真模型中控制每一时刻插秧机的纵向速度发生改变,可以表示水田的复杂性对插秧机纵向速度的影响。

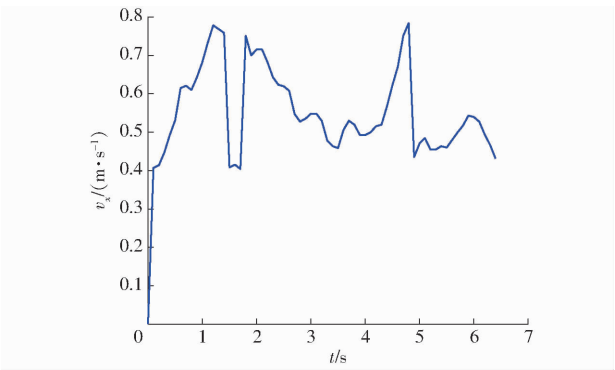


图4 插秧机水田环境转向时纵向速度变化曲线

Fig.4 Change curve of longitudinal speed of rice transplanter during turning in paddy field environment

通过 Carsim 和 Simulink 联合仿真试验对模糊 LQR 控制器和 LQR 控制器的路径跟踪效果进行分析和比较。期望路径按 3.2 节描述设计,插秧机参数根据表 4 中参数和 3.3 节中的估算结果进行设置,插秧机初始位姿按 3.2 节描述设置,插秧机驱动轮转速设为 $0.6 + 0.2\sin\left(\frac{\pi}{2}t - \frac{\pi}{4}\right)$,仿真步长设为 1 ms。仿真过程中,横向偏差 e_d 、横向偏差变化率 $\dot{e}_d$ 、航向角偏差 e_φ 以及航向角偏差变化率 $\dot{e}_\varphi$ 的计算式为

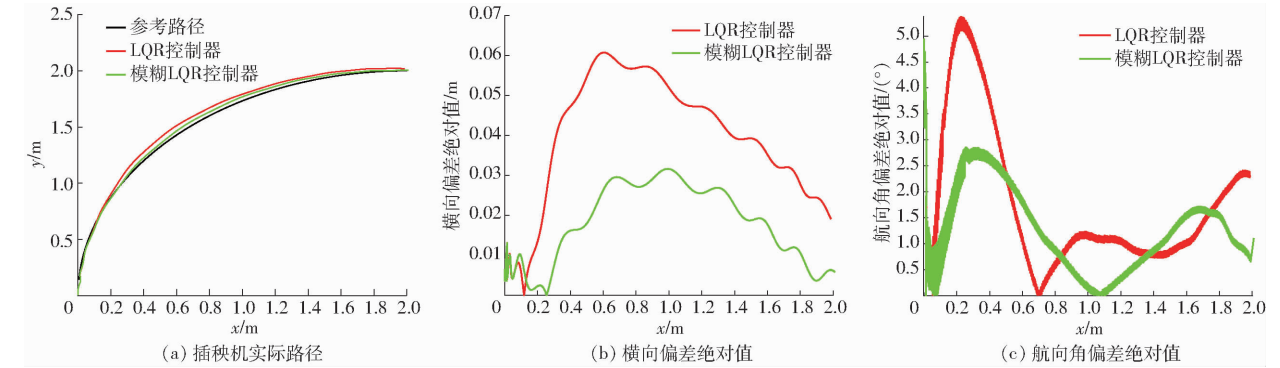


图5 仿真试验结果

Fig.5 Simulation test results

表5 仿真结果数据统计

Tab.5 Simulation result data statistics

控制器	横向偏差			航向角偏差		
	绝对值均值/ m	绝对值最大值/ m	绝对值小于 0.04 m 百分比/%	绝对值均值/ (°)	绝对值最大值/ (°)	绝对值小于 5° 百分比/%
LQR 控制器	0.028	0.061	69	2.17	5.38	97
模糊 LQR 控制器	0.014	0.032	100	1.67	4.94	100

由图 5 和表 5 可知,模糊 LQR 控制器控制下插秧机的实际路径与期望路径的接近程度大于 LQR 控制器控制下插秧机的实际路径与期望路径的接近程度;模糊 LQR 控制器控制下的横向偏差绝对值的均值为 0.014 m,最大值为 0.032 m,整体小于 LQR 控制器控制下的横向偏差,且横向偏差绝对值的均

$$\begin{cases} e_s = -(x - x_r) \cos \varphi_r + (y - y_r) \sin \varphi_r \\ e_d = -(x - x_r) \sin \varphi_r + (y - y_r) \cos \varphi_r \\ \varphi_d = \varphi_r + \dot{\varphi}_r e_s \\ \dot{\varphi}_r = \frac{v_x}{r} \\ \dot{e}_d = v_y \cos(\varphi - \varphi_d) + v_x \sin(\varphi - \varphi_d) \\ e_\varphi = \varphi - \varphi_d \\ \dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - \dot{\varphi}_r \frac{v_x \cos(\varphi - \varphi_d) + v_y \sin(\varphi - \varphi_d)}{1 - \dot{\varphi}_r e_d} \end{cases} \quad (5)$$

- 式中 e_s ——纵向偏差
 x ——插秧机实际横坐标
 x_r ——最近参考路径点横坐标
 y ——插秧机实际纵坐标
 y_r ——最近参考路径点纵坐标
 φ ——插秧机实际航向角
 φ_d ——期望航向角
 φ_r ——最近参考路径点航向角
 v_y ——横向速度
 r ——参考路径半径

仿真试验结果如图 5 所示,仿真结果数据统计如表 5 所示。

值相较 LQR 控制器降低 50%;模糊 LQR 控制器控制下的航向角偏差绝对值的均值为 1.67°,最大值为 4.94°,航向角偏差绝对值的均值相较 LQR 控制器降低 23%。由此可得,模糊 LQR 控制器的曲线路径跟踪精度优于将误差权重矩阵视为定值的 LQR 控制器。

3.5 控制器田间实车试验

为验证模糊 LQR 控制器的实用性和精度,对模糊 LQR 控制器进行实车试验,并将跟踪效果与 LQR 控制器做对比。

在插秧机进行路径跟踪的过程中,通过 PID 算法维持期望纵向速度 v_x 在 0.7 m/s 附近,STM32 控制器通过串口对组合导航发送的位姿数据(经纬度坐标、北向速度 v_N 、东向速度 v_E 、航向角 φ)进行接收与解析,并以 $T=0.1\text{ s}$ 为周期将当前经纬度坐标转换为墨卡托投影下的横纵坐标 $x、y$,同时计算插秧机横向速度 v_y 、纵向速度 v_x 和最近的参考路径点,并根据前后时刻的航向角计算横摆角速度 $\dot{\varphi}$ 。然后根据式(5)^[14]分别计算横向偏差 e_d 、横向偏差变化率 $\dot{e}_d$ 、航向角偏差 e_φ 以及航向角偏差变化率 $\dot{e}_\varphi$ 。完成上述计算后,对于 LQR 控制器,STM32 控制器仅需根据控制律和状态量 $\mathbf{X} = [e_d \ \dot{e}_d \ e_\varphi \ \dot{e}_\varphi]^T$ 即可实现对期望前轮转角的计算,进而实现路径跟踪的控制;而对于模糊 LQR 控制器,由于需实时更新控制律增益系数矩阵,计算量较大,因此需借助上位机完成控制律增益系数矩阵的计算,实现方法为:STM32 控制器通过串口将纵向速度 v_x 、横向偏差 e_d 、航向角偏差 e_φ 发送给上位机后,上位机通过 Matlab 读取串口数据,并在

Matlab 中根据纵向速度 v_x 、横向偏差 e_d 、航向角偏差 e_φ 和提前设定的插秧机跟踪误差模型参数以及模糊 LQR 控制器控制律增益系数矩阵计算方法对控制律增益系数矩阵进行计算,然后实时将计算结果通过串口发送给 STM32 控制器,最终,控制器将状态量 $\mathbf{X} = [e_d \ \dot{e}_d \ e_\varphi \ \dot{e}_\varphi]^T$ 与最优控制律增益系数矩阵 $\mathbf{K}$ 相乘,得到期望输出的前轮转角,并控制插秧机前轮转动,实现曲线路径跟踪。试验场景如图 6 所示。



图 6 插秧机地头转向路径跟踪试验场景

Fig.6 Experimental scenarios for tracking turning path of rice transplanter on ground head

3.6 田间试验结果与分析

试验结束后,对试验数据进行处理和统计,可以得到模糊 LQR 控制器和 LQR 控制器控制下的插秧机实际路径和横向偏差绝对值变化曲线以及航向角偏差绝对值变化曲线如图 7 所示,统计数据如表 6 所示。

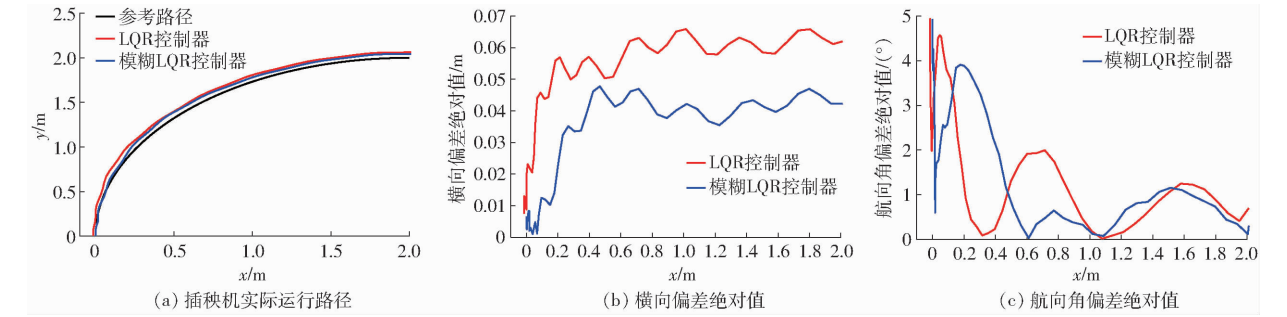


图 7 田间试验结果

Fig.7 Field test results

表 6 跟踪偏差对比

Tab.6 Tracking deviation comparison

控制器	横向偏差				航向角偏差			
	绝对值均值/m	绝对值最大值/m	绝对值最小值/m	绝对值小于 0.04 m 百分比/%	绝对值均值/(°)	绝对值最大值/(°)	绝对值最小值/(°)	绝对值小于 5° 百分比/%
LQR 控制器	0.045	0.066	0.008	29	1.94	4.94	0.09	100
模糊 LQR 控制器	0.027	0.048	0.001	62	1.86	4.94	0.03	100

由图 7 可知,模糊 LQR 控制器控制下的插秧机实际路径相较于 LQR 控制器控制下的插秧机实际路径更接近期望路径,且前者的横向偏差和航向角偏差总体小于后者的横向偏差和航向角偏差。

由表 6 可知,模糊 LQR 控制器控制下的横向偏差绝对值均值和航向角偏差绝对值均值分别为

0.027 m、1.86°,横向偏差绝对值最大值为 0.048 m,航向角偏差绝对值最大值为 4.94°。相较于 LQR 控制器,横向偏差绝对值均值降低 40%,航向角偏差绝对值均值降低 4.1%。

综上所述,通过模糊控制实时调整 LQR 控制器误差权重矩阵的方法提升了 LQR 控制器的曲线路

径跟踪精度,且通过模糊 LQR 控制器控制插秧机进行地头转向时的曲线路径跟踪可行。

4 结论

(1)提出了一种通过模糊控制调整 LQR 控制器误差权重矩阵的路径跟踪控制器优化方法。该方法以纵向速度、横向偏差、航向角偏差为输入,以横向偏差和航向角偏差对应的误差权重为输出,建立模糊控制模型实时调节 LQR 控制器的误差权重矩阵,以实现 LQR 控制器对于纵向速度、横向偏差、航向角偏差的自适应。

(2)仿真试验结果表明,无人插秧机在跟踪半径为 2 m 的 1/4 圆弧路径时,模糊 LQR 控制器控制

下的横向偏差绝对值的均值为 0.014 m,最大值为 0.032 m,航向角偏差绝对值的均值为 1.67°,最大值为 4.94°,相较于传统的引入了前馈控制的 LQR 控制器,横向偏差绝对值的均值降低 50%,航向角偏差绝对值的均值降低 23%,可以提升无人插秧机的曲线路径跟踪精度。

(3)实车试验结果表明,无人插秧机在跟踪半径为 2 m 的 1/4 圆弧路径时,模糊 LQR 控制器控制下横向偏差绝对值均值为 0.027 m,最大值为 0.048 m,航向角偏差绝对值均值为 1.86°,最大值为 4.94°,相较于传统引入前馈控制的 LQR 控制器,横向偏差绝对值均值降低 40%,航向角偏差绝对值均值降低 4.1%,提升了无人插秧机的曲线路径跟踪精度。

参考文献

- [1] 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 Changying, ZHOU Jun. Analysis of the development of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9):44-54. (in Chinese)
- [2] 杜岳峰,傅生辉,毛恩荣,等.农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J].农业机械学报,2019,50(9):1-17.
DU Yuefeng, FU Shenghui, MAO Enrong, et al. Development situation and prospects of intelligent design for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(9):1-17. (in Chinese)
- [3] 张智刚,王进,朱金光,等.我国农业机械自动驾驶系统研究进展[J].农业工程技术,2018,38(18):23-27.
- [4] 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 Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):1-10. (in Chinese)
- [5] 贺佳贝,柳春柱,隋新,等.无人驾驶插秧机的发展现状与应用前景[J].现代化农业,2022(11):94-96.
- [6] LI Yanming, WU Tao, XIAO Yangfan, et al. Path planning in continuous adjacent farmlands and robust path-tracking control of a rice-seeding robot in paddy field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107900.
- [7] 唐小涛,陶建峰,李志腾,等.自动导航插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J].农业机械学报,2018,49(1):29-34.
TANG Xiaotao, TAO Jianfeng, LI Zhiteng, et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(1):29-34. (in Chinese)
- [8] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):21-26. (in Chinese)
- [9] TOYOFUMI Y, RYO T. Path tracking control of autonomous agricultural mobile robots[J]. Journal of Zhejiang University (Science A: an International Applied Physics & Engineering Journal), 2007,8(10):1596-1603.
- [10] HE Jie, HU Lian, WANG Pei, et al. Path tracking control method and performance test based on agricultural machinery pose correction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200:107185.
- [11] 迟瑞娟,熊泽鑫,姜龙腾,等.基于模型预测的插秧机路径跟踪控制算法[J].农业机械学报,2022,53(11):22-30,99.
CHI Ruijuan, XIONG Zexin, JIANG Longteng, et al. Path tracking control algorithm of transplanter based on model prediction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):22-30,99. (in Chinese)
- [12] 黄沛琛,罗锡文,张智刚.改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法[J].计算机工程与应用,2010,46(21):216-219.
HUANG Peichen, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang. Control method of headland turning based on improved pure pursuit model for agricultural machine[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(21):216-219. (in Chinese)
- [13] 崔冰波,孙宇,吉峰,等.基于模糊 Stanley 模型的农机全田块路径跟踪算法研究[J].农业机械学报,2022,53(12):43-48,88.
CUI Bingbo, SUN Yu, JI Feng, et al. Study on whole field path tracking of agricultural machinery based on fuzzy Stanley model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(12):43-48,88. (in Chinese)
- [14] 吴受章.最优控制理论与应用[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [15] 徐明泽,刘清河.基于 LQR 和 PID 的智能车轨迹跟踪控制算法设计与仿真[J].太原理工大学学报,2022,53(5):877-885.
XU Mingze, LIU Qinghe. Design and simulation of intelligent vehicle trajectory tracking control algorithm based on LQR and PID[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022,53(5):877-885. (in Chinese)

FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):68-77. (in Chinese)

[26] 高原源,王秀,杨硕,等. 基于 CAN 总线的播深监测评价系统研究[J]. 农业机械学报,2019,50(12):23-32.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based sowing depth monitoring and evaluation system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(12):23-32. (in Chinese)

[27] 高原源,翟长远,杨硕,等. 精密播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(6):15-28.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based downforce and sowing depth monitoring and evaluation system for precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):15-28. (in Chinese)

[28] 温丽萍,张永,范雄飞,等. 基于 PLC 的精密播种机播深控制系统研究[J]. 农机化研究,2014,36(2):98-101.
WEN Liping, ZHANG Yong, FAN Xiongfei, et al. The research of precision planter sowing depth control system based on PLC [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(2):98-101. (in Chinese)

[29] 曾光奇,胡均安,王东,等. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006.

[30] 崔家瑞,李擎,张波,等. 永磁同步电机变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(增刊1):190-194.
CUI Jiarui, LI Qing, ZHANG Bo, et al. Permanent magnet synchronous motor of variable universe adaptive fuzzy PID control [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering,2013,33(Supp. 1):190-194. (in Chinese)

(上接第 8 页)

[16] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[17] 胡杰,钟鑫凯,陈瑞楠,等. 基于模糊 LQR 的智能汽车路径跟踪控制[J]. 汽车工程,2022,44(1):17-25,43.
HU Jie, ZHONG Xinkai, CHEN Ruinan, et al. Path tracking control of intelligent vehicles based on fuzzy LQR [J]. Automotive Engineering, 2022,44(1):17-25,43. (in Chinese)

[18] 姜龙腾,迟瑞娟,熊泽鑫,等. 基于优化人工势场法的插秧机绕障策略研究[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):20-27.
JIANG Longteng, CHI Ruijuan, XIONG Zexin, et al. Obstacle winding strategy of rice transplanter based on artificial potential field method after optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp. 1):20-27. (in Chinese)

[19] 黄小毛,丁幼春,宗望远,等. 农机作业地头转弯方式及路径生成算法研究[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集,2011:406-411.

[20] LI Yibo, LI Hang, GUO Xiaonan. Online parameter identification of rice transplanter model based on IPSO-EKF algorithm [J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2020, 61(2): 25-34.