

面向田间路径控制的轮式拖拉机辅助转向系统设计与验证

梁晋雄¹ 冯严艺² 肖茂华^{1,*} 王法安² 沈成³ 胥文翔¹ 孟为国¹

(¹南京农业大学 工学院, 南京 210095; ²昆明理工大学 现代农业工程学院, 昆明 650500; ³农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210095;

*通信作者, email: xiaomaohua@njau.edu.cn)

Design and Validation of an Assisted Steering System for Wheeled Tractor Path Tracking in Field Operations

LIANG Jinxiong¹, FENG Yanyi², XIAO Maohua^{1,*}, WANG Faan², SHEN Cheng³, XU Wenxiang¹, MENG Weiguo¹

(¹College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ²Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; ³Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210095, China; *Corresponding author, email: xiaomaohua@njau.edu.cn)

Abstract: 【Objective】Field operations in rice cultivation, such as dry direct seeding and transplanting, require higher path tracking accuracy of agricultural machinery. To meet the requirements for operational consistency and uniform crop distribution in rice production, we designed an assisted steering control system for wheeled tractors, aiming to assist human operators in achieving precise path tracking during rice field operations. 【Method】First, we constructed a driver steering model using data from driving simulator tests, and combined it with the kinematic model of wheeled tractors to develop an integrated vehicle control model that incorporates the driver-in-the-loop. Then, we used a polytopic linear parameter varying system to describe the uncertainties in the model, including time-varying driver model parameters and vehicle speed. Based on this model, an output feedback robust controller was designed to ensure robust stability of the system under uncertainties described by polyhedral sets. Additionally, a region pole placement method was employed to improve the transient response performance of the system. Finally, driver-in-the-loop tests were conducted to evaluate the performance of the designed controller. 【Result】The results show that this method effectively enhances the path tracking performance of wheeled tractors while alleviating the physical and mental burdens on the operator. In single lane-change maneuvers and complex serpentine driving conditions, the maximum lateral tracking error is reduced by 66.7% and 55.6% compared with that of the PID control algorithm, respectively, while the physical workload of the driver was reduced by 26.86% and 37.6%, and the mental workload was reduced by 4.2% and 31.3%, respectively. 【Conclusion】The proposed control strategy offers a technical foundation for enhancing the operational quality of rice and other crop fieldwork.

Keywords: rice mechanization; path tracking; robust control; driver-vehicle model; integration of agricultural machinery and agronomy

摘要: 【目的】水稻田间作业如旱直播和插秧对农业机械的路径控制精度提出了更高要求。为满足水稻生产中对作业一致性和作物均匀性的需求,本研究设计了一种用于轮式拖拉机的转向辅助控制系统,辅助农机驾驶员在水稻田间作业时实现精确的路径跟踪控制。【方法】首先,我们通过驾驶模拟器测试数据构建了驾驶员转向模型,并结合轮式拖拉机的运动学模型,开发了一个融合驾驶员在环的整车控制模型。然后,采用多胞线性参数时变系统来描述模型中的不确定性,包括时变的驾驶员模型参数和车速。基于此模型,设计了一种输出反馈鲁棒控制器,以确保系统在由多面体空间描述的不确定性下的鲁棒稳定性,此外,还采用了区域极点配置方法来提高系统的瞬态响应性能。最后,通过驾驶员在环测试对设计控制器的性能进行评估。【结果】结果表明,该方法能够有效提升轮式拖拉机的路径跟踪性能,同时减轻驾驶员的身体和心理负担,在单次车道变更操作和复杂蛇形道路两种不同行驶工况下,路径跟踪最大横向偏差较PID控制算法可以分别降低66.7%和55.6%,而驾驶员的物理负荷可以分别降低26.86%和37.6%,精神负荷可以分别降低4.2%和31.3%。【结论】所提出控制方法为提升水稻等作物田间作业质量提供了技术支撑。

关键词: 水稻机械化; 路径跟踪; 鲁棒控制; 驾驶员-车辆模型; 农机农艺融合

收稿日期: 2025-06-09; 修改稿收到日期: 2025-09-16。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFD2001604); 江苏省现代农机装备与技术创新示范项目(NJ2025-14); 中央高校基本科研业务费专项(KPYT2025004); 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202510307108S)。

农业机械在水稻生产全过程中的广泛应用显著提升了我国水稻种植的作业效率与规范化水平。尤其在播种、插秧、施肥及中耕管理等环节中,对农业机械的路径控制精度、行进稳定性和操作者负荷提出了更高要求^[1-2]。近年来,随着水稻旱直播、少耕精播等栽培模式的推广,对作业路径的直线度、一致性以及作物行间分布均匀性的控制能力成为保障水稻产量与品质的关键因素之一。

农业机械自动导航技术作为实现精准农艺作业的重要支撑手段,已经被广泛应用于耕整、播种、施肥和收获等各个环节。然而,在水稻田块作业中,复杂的地形、打滑与行距密集等因素均会导致路径跟踪精度下降,影响作物行间均匀性和作业效率^[3-5]。因此,如何提升农业机械在水稻田间的路径控制性能,特别是在实际驾驶干扰与环境变化条件下的鲁棒性控制能力,成为亟待解决的问题。

目前,已有研究围绕自动驾驶农机的导航精度与控制方法展开,包括基于 GNSS 的导航定位、模型预测控制、自适应控制等策略,但多数方法忽略了驾驶员行为建模与农艺要求之间的协同作用^[6-10]。尤其在水稻田作业场景中,作业路径是否紧贴农艺设计要求将直接影响行距均匀性、后续除草防病操作的效率和农机利用率。为此,本研究提出一种基于驾驶员-车辆协同模型的输出反馈鲁棒控制方法,服务于水稻田间路径控制,旨在实现路径精度与作业负荷的双重优化。

大量研究已对路径跟踪控制器进行了探讨^[11-12],包括基于模型和无模型的方法。Bai 等^[13]研究了曲线行驶过程中影响跟踪精度的因素,并提出了一种自调节模型控制方法用于农业机械导航,该方法可以动态调整转向控制输入。测试结果表明,曲线跟踪误差可以小于 18.57 cm。Backman 等^[14]设计了一种基于非线性模型预测控制算法的拖拉机及挂车系统的路径跟踪系统,并进行了实车测试以验证所提控制方法的有效性。

值得注意的是,上述方法依赖于农业机械的精确建模。无模型控制方法也可以是一种替代策略,PID 控制和模糊控制在无模型控制中被广泛应用。Norremark 等^[15]将 PID 控制器引入除草机的车轮速度控制中。以 0.31 m/s 和 0.52 m/s 的速度行驶时,路径跟踪误差分别为 1.6 cm 和 2.2 cm。Kannan 等^[16]利用模糊控制技术设计了一种多功能轮式拖拉机,用于自动耕地、播种和土壤湿度感应。模糊控制器用于调整驱动轮的速度和控制转向角。

然而,无模型方法在设计合适的控制器参数方

面存在一定的困难^[17],而这些参数决定了系统的控制性能。此外,参数自调节方法也需要大量的实验测试。因此,本研究的控制器基于轮式拖拉机的双轮运动学模型进行开发。然而,如王辉等^[17]所述,运动学模型使用线性近似方法,假设航向角小且速度恒定。这些假设可能导致控制系统的稳定性较弱。在速度变化时,系统的鲁棒性无法得到保证。鉴于现有的农业机械大多数需要驾驶人员的参与,本研究开发了一套转向辅助系统,在系统存在时变参数的情况下辅助驾驶员实现精确的路径跟踪控制。

针对模型中的时变参数,鲁棒控制算法可以被引入用于处理系统的不确定性^[18-20]。Liang 等^[21]利用鲁棒控制器设计了主动前轮转向系统,在考虑转向刚度不确定性的情况下保证了车辆的稳定性。驾驶员的转向角输入被视为外部扰动,Zhang 等^[22]提出了一种鲁棒增益调度的 H_∞ 控制方法,实现车辆的主动转向系统与直接横摆力矩控制系统的集成控制。测试结果表明,该方法能有效确保车辆在外部扰动作用下的横向稳定性。Jin 等^[23]开发了一种 T-S 模糊鲁棒控制器,以提高车辆的操控稳定性。极限转向操纵工况验证了该控制方法的有效性。此外,驾驶员转向模型也被研究并集成到车辆模型中^[24-25]。Chen 等^[24]建立了一个驾驶员-车辆模型,基于此设计了一种鲁棒控制器,以在接管操纵场景中帮助驾驶员跟踪期望路径。为了实现驾驶员与转向辅助系统之间的良好协作,Nguyen^[25]考虑了驾驶员的操纵活跃性。随后设计了一种 T-S 模糊鲁棒控制器用于车道保持辅助系统。在本研究中,驾驶员模型参数和车辆速度被视为时变参数,采用有限顶点的多胞线性参数时变模型来描述系统不确定性,然后重构了一个线性参数变化模型,该方法可以被广泛用于处理模型不确定性并简化控制器的设计流程^[22]。

鉴于现代农业机械具备获取周围环境信息及自身状态的能力,本研究面向水稻田间作业场景,扩展农业机械自动导航中的路径跟踪控制研究。本研究的主要贡献如下:首先,引入驾驶员预瞄模型以刻画人机协同操作中驾驶员在期望路径跟踪过程中的转向行为^[26],并通过驾驶模拟器实验识别模型参数,构建了驾驶员-车辆协同控制模型;其次,针对田间环境中的模型不确定性,设计了一种具有区域极点配置能力的输出反馈鲁棒控制器,用于构建转向辅助系统并提升路径跟踪精度与系统鲁棒性;最后,通过驾驶模拟器测试验证所提控制器的

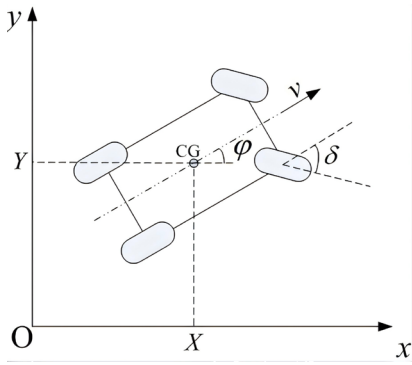


图1 轮式拖拉机运动学模型

Fig. 1. Kinematic model of a wheeled tractor

性能。结果表明,该控制方法在提升农业机械路径跟踪性能的同时,也显著降低了驾驶员操作负荷,具备良好的工程适应性与农艺作业支撑价值。

1 运动学模型建立

轮式拖拉机的运动控制依赖于精确的农业机械的建模。考虑到农业机械在稻田间作业为低速行驶工况,本研究采用了轮式拖拉机的双轮运动学模型,集成了拖拉机的横向和偏航运动。随后,引入单点预瞄模型来研究驾驶员在路径跟踪过程中转向操纵的行为。

1.1 运动学模型建模

如图1所示,轮式拖拉机运动学模型被应用于车辆的运动控制。该模型能够在实际驾驶条件下提供保证满足运动学几何约束的可行路径。我们定义了一个状态空间方程,轮式拖拉机的转向运动学模型就可以被描述为以下方程:

$$\dot{\xi} = f(\xi, v) = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ \tan \delta / l \end{bmatrix} v \quad (1)$$

其中,系统状态为 $\xi = [X, Y, \varphi]^T$, X 和 Y 表示轮式拖拉机质心的纵向和横向位置, φ 表示轮式拖拉机的横摆角,是位于 x 坐标轴和车头朝向之间的夹角,CG 表示轮式拖拉机的质心, l 和 v 分别表示轮距和车速,轮式拖拉机的前轮转向角控制输入表示为 $v = \delta$, 其包括了驾驶员的转向角输入 δ_d 和辅助转向控制器的输入 δ_c 。

1.2 驾驶员转向输入建模

在水稻田块作业中,驾驶员的转向操作行为与路径跟踪精度密切相关。如图2所示,我们引入了单点预瞄模型^[26]来表示轮式拖拉机在转向行驶工况中驾驶员的操作 δ_d :

$$\delta_d = \frac{G_h}{a_0 T_d s^2 + T_d s + 1} Y_e \quad (2)$$

其中, G_h 和 T_d 分别表示驾驶员的转向输入增益和延迟时间。 a_0 表示一个常数, Y_e 表示的是驾驶员在转向行驶工况下预瞄点的位置和参考路径之间的横向路径偏差,其可以进一步表示为^[27]:

$$Y_e = Y_p - (Y + v\tau_p\varphi) \quad (3)$$

τ_p 和 Y_p 分别表示驾驶员预瞄行为的延迟和参考路径。考虑到实际过程中我们需要对驾驶员的模型参数进行辨识,所以我们首先需要对模型(2)进行离散化,具体可以表示如下:

$$\delta_d((k+1)T) = \lambda_1 \delta_d(kT) + \lambda_2 \delta_d((k-1)T) + \kappa_1 Y_{ref}((k-1)T) + \kappa_2 Y((k-1)T) + \kappa_3 \varphi((k-1)T) \quad (4)$$

$$\text{其中 } \lambda_1 = 2 - \frac{T}{a_0 T_d}, \quad \lambda_2 = \frac{T}{a_0 T_d} - \frac{T^2}{a_0 T_d^2} - 1,$$

$$\kappa_1 = \kappa_2 = \frac{G_h T^2}{a_0 T_d^2}, \quad \kappa_3 = v\tau_p \frac{G_h T^2}{a_0 T_d^2}。$$

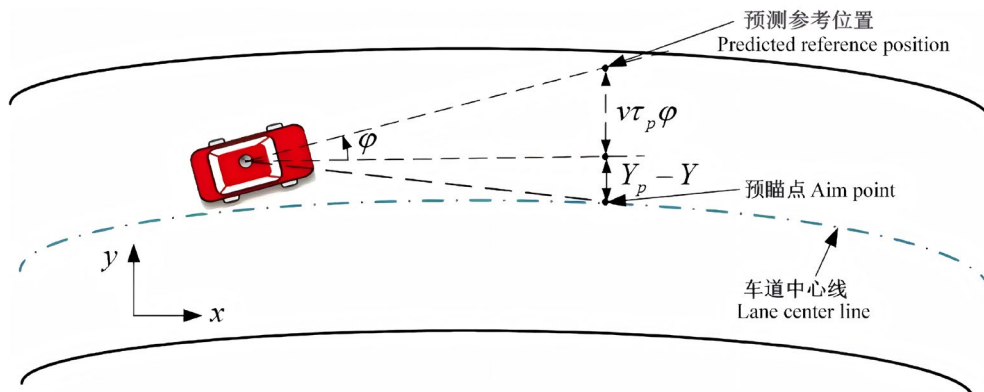


图2 驾驶员单点预瞄转向模型

Fig. 2. Single-point preview steering model for the driver

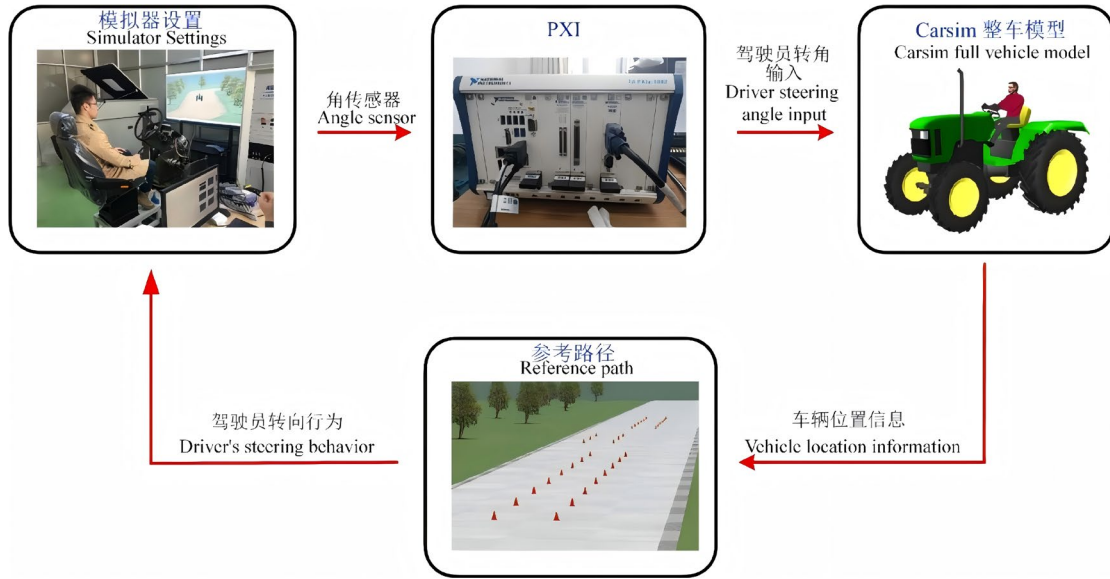


Fig. 3. Driving simulator test platform

其中， T 表示我们所采用的驾驶员模拟器的数据采样时间， $\delta_d(kT)$ 表示驾驶员在 kT 时刻的转向输入， $Y_{ref}(kT)$ 和 $Y(kT)$ 分别表示在 kT 时刻参考路径的横向位置和车辆实际的横向位置， $\varphi(kT)$ 表示车辆在 kT 时刻的横摆角，在本项研究中，我们需要对参数 a_0 ， T_d 和 G_h 进行辨识。

图3展示了我们所搭建的驾驶员模拟器，可用于驾驶员模型的参数辨识和控制器性能的硬件在环测试，其中轮式拖拉机采用了商用软件 Carsim 里面的一个高保真的整车模型。驾驶员可以根据动画里面实时的驾驶工况进行方向盘的操纵去跟踪设计的参考路径，然后通过角传感器可以获取驾驶员的转向输入并传输至 Carsim 里面的轮式拖拉机模型。在测试中，Carsim 被嵌入到了实时的仿真机器 PXI 里面，可以通过 CAN 总线进行信号的传输。在这项工作中，我们通过驾驶模拟器实验采集了大量的驾驶员转向数据，并采用了递推最小二乘法进行了驾驶员模型参数的辨识。

1.3 融合驾驶员转向模型在环的整车控制模型

为了进一步提高路径跟踪精度并满足水稻田块的作业需求，我们构建了驾驶员-车辆协同控制模型。该模型结合了车辆运动学模型和驾驶员行为模型，在水田作业环境中实现了协同控制。通过结合等式（1）和（2），同时利用驾驶员模型参数的辨识结果，可以得到融合驾驶员转向模型在环的整车控制模型：

$$\dot{x} = Ax + B_1 u + B_2 w \quad (5)$$

其中，系统状态为 $x = [\varphi, Y, \delta_d, \dot{\delta}_d, \int_0^t (Y - Y_p) dt]$ ，系

统的辅助转向控制输入为 $u = \delta_e$ ，系统的外部扰动为 $w = Y_p$ ，

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & v/l & 0 & 0 \\ v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 \\ -vT_p & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_u = \begin{bmatrix} v/l \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ v/l \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$a_{41} = -\frac{G_h \tau_p v}{a_0 T_d^2}, \quad a_{42} = -\frac{G_h}{a_0 T_d^2}, \quad a_{43} = \frac{-1}{a_0 T_d^2}, \quad a_{44} = \frac{-1}{a_0 T_d}。$$

这里，轮式拖拉机模型参数 $\varphi, Y, \delta_d, \dot{\delta}_d$ ，和 $\int_0^t (Y - Y_p) dt$ 可以通过车载的传感器获取，因此，这些系统状态被视为可测量的状态输出，并被表示为 $y = C_1 x$ ，其中 $C_y = I$ 。在控制器设计中，我们主要考虑了轮式拖拉机的路径跟踪能力和驾驶员转向操纵过程中的舒适性。因此，系统的性能输出矩阵可以被定义为 $z = [\delta_d, \dot{\delta}_d, Y_e]$ ，并可以通过状态空间方程的形式表示为 $z = C_2 x + Dw$ 。

$$\text{其中，} C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 \\ -v\tau_p & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}。$$

2 控制器设计

通过融合系统状态方程 (5)，系统可测量状态输出 y 和性能输出 z ，人-车协同转向模型可以表示如下：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 u + B_2 w \\ y = C_1 x \\ z = C_2 x + Dw \end{cases} \quad (6)$$

2.1 多胞体模型构建

在本研究中，我们开发了一个鲁棒控制器用于驾驶员的辅助转向控制。考虑到在水稻田作业的实际行驶工况下，驾驶员的操作行为和车辆的速度控制需求会随着环境条件的变化而变化。具体而言，在水稻田块中，土壤湿度、地形不均匀性以及作物行距等因素对驾驶员的控制策略和车速要求有显著影响。此外，在不同作业条件下，驾驶员的转向响应会根据田间环境的变化进行动态调整。因此，我们采用了一个多胞线性参数时变模型来表征系统状态方程 (6) 中参数的不确定集 $[T_d, G_h, v]$ 。 $G_{h \min}$, $T_{d \min}$ 和 $v_{\min}$ 分别表示驾驶员转向增益 G_h ，延迟时间 T_d 和车速 v 在动态行驶工况中的最小值，而 $G_{h \max}$, $T_{d \max}$ 和 $v_{\max}$ 则表示了这些参数的最大值。通过引入参考文献[28]的多胞体构建方法，一个由不确定参数集 $[1/T_d, 1/T_d^2]$ 构建的矩形区域可以被简化为一个平行四边形区域。我们首先定义两个多胞体顶点 $\mathfrak{R}_1$ 和 $\mathfrak{R}_2$ ：

$$\mathfrak{R}_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{d \min}}, \frac{7T_{d \max}^2 + 2T_{d \min}T_{d \max} - T_{d \min}^2}{8T_{d \min}^2 T_{d \max}^2} \\ + \frac{(T_{d \max} - T_{d \min})^2}{8T_{d \min}^2 T_{d \max}^2} N(t) \end{pmatrix}$$

$$\mathfrak{R}_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{d \max}}, \frac{7T_{d \min}^2 + 2T_{d \min}T_{d \max} - T_{d \max}^2}{8T_{d \min}^2 T_{d \max}^2} \\ + \frac{(T_{d \max} - T_{d \min})^2}{8T_{d \min}^2 T_{d \max}^2} N(t) \end{pmatrix}$$

那么平行四边形中的一个点 ℓ 则可以被定义为：

$$\ell = \omega_1 \mathfrak{R}_1 + \omega_2 \mathfrak{R}_2, \text{ with } \omega_1 + \omega_2 = 1.$$

$$\text{其中, } \omega_1 = \frac{\left| \frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_{d \max}} \right|}{\left| \frac{1}{T_{d \max}} - \frac{1}{T_{d \min}} \right|}, \omega_2 = \frac{\left| \frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_{d \min}} \right|}{\left| \frac{1}{T_{d \max}} - \frac{1}{T_{d \min}} \right|}.$$

通过这样的设计，不确定参数集 $[1/T_d, 1/T_d^2]$ 可以被进一步简化为两个多胞体顶点。驾驶员模型参数的不确定集则可以表示为图 4 所示的一个矩形

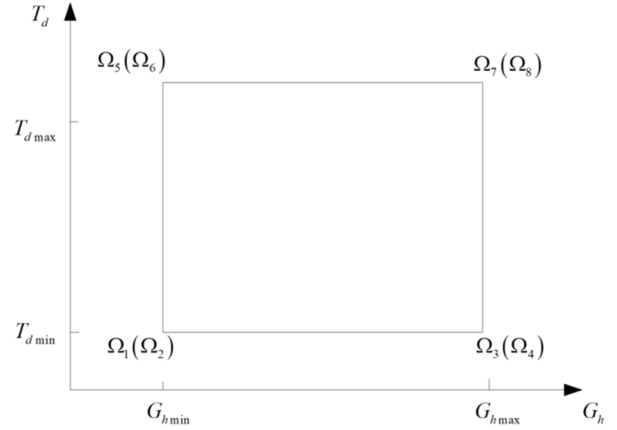


图 4 具有时变参数的多胞体模型

Fig. 4. Polytopic model with time-varying parameters

区域，随后，具有时变参数的模型 (6) 可以被进一步表示为多胞体模型：

$$\begin{cases} \dot{x} = \Theta_i (A_i x + B_i^1 u + B_i^2 w) \\ y = C_i x \\ z = \Theta_i (C_i^2 x + Dw) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (7)$$

其中， $\sum_{i=1}^8 \Theta_i = 1$,

$$\Theta_1 = \omega_1 \frac{G_h - G_{h \min}}{G_{h \max} - G_{h \min}} \frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}}, \Theta_2 = \omega_1 \frac{G_{h \max} - G_h}{G_{h \max} - G_{h \min}} \frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}},$$

$$\Theta_3 = \omega_1 \frac{G_h - G_{h \min}}{G_{h \max} - G_{h \min}} \frac{v_{\max} - v}{v_{\max} - v_{\min}}, \Theta_4 = \omega_1 \frac{G_{h \max} - G_h}{G_{h \max} - G_{h \min}} \frac{v_{\max} - v}{v_{\max} - v_{\min}},$$

$$\Theta_5 = \omega_2 \frac{G_h - G_{h \min}}{G_{h \max} - G_{h \min}} \frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}}, \Theta_6 = \omega_2 \frac{G_{h \max} - G_h}{G_{h \max} - G_{h \min}} \frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}},$$

$$\Theta_7 = \omega_2 \frac{G_h - G_{h \min}}{G_{h \max} - G_{h \min}} \frac{v_{\max} - v}{v_{\max} - v_{\min}}, \Theta_8 = \omega_2 \frac{G_{h \max} - G_h}{G_{h \max} - G_{h \min}} \frac{v_{\max} - v}{v_{\max} - v_{\min}}.$$

模型 (7) 中的参数可以进一步被表示为：

$$A_1 = A_i(T_{d \min}, G_{h \min}, v_{\min}), A_2 = A_i(T_{d \min}, G_{h \min}, v_{\max}),$$

$$A_3 = A_i(T_{d \min}, G_{h \max}, v_{\min}), A_4 = A_i(T_{d \min}, G_{h \max}, v_{\max}),$$

$$A_5 = A_i(T_{d \max}, G_{h \min}, v_{\min}), A_6 = A_i(T_{d \max}, G_{h \min}, v_{\max}),$$

$$A_7 = A_i(T_{d \max}, G_{h \max}, v_{\min}), A_8 = A_i(T_{d \max}, G_{h \max}, v_{\max}),$$

$$B_1^1 = B_3^1 = B_5^1 = B_7^1 = B_i^1(v_{\min}), B_2^1 = B_4^1 = B_6^1 = B_8^1 = B_i^1(v_{\max}),$$

$$B_1^2 = B_3^2 = B_5^2 = B_7^2 = B_i^2(v_{\min}), B_2^2 = B_4^2 = B_6^2 = B_8^2 = B_i^2(v_{\max}),$$

$$C_1^2 = C_i^2(T_{d \min}, G_{h \min}, v_{\min}), C_3^2 = C_i^2(T_{d \min}, G_{h \max}, v_{\min}),$$

$$C_2^2 = C_i^2(T_{d \min}, G_{h \min}, v_{\max}), C_4^2 = C_i^2(T_{d \min}, G_{h \max}, v_{\max}),$$

$$C_5^2 = C_i^2(T_{d \max}, G_{h \min}, v_{\min}), C_6^2 = C_i^2(T_{d \max}, G_{h \min}, v_{\max}),$$

$$C_7^2 = C_i^2(T_{d \max}, G_{h \max}, v_{\min}), C_8^2 = C_i^2(T_{d \max}, G_{h \max}, v_{\max}).$$

2.2 鲁棒输出反馈控制器设计

在本研究中，我们开发了输出反馈鲁棒控制器来辅助驾驶员，从而使闭环系统能够对时变模型参

数具有鲁棒性，输出反馈控制律可以表示为：

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = \hat{A}\zeta + \hat{B}y \\ u = \hat{C}\zeta + \hat{D}y \end{cases} \quad (8)$$

其中， ζ 表示控制器的状态参数， $\hat{A} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ ， $\hat{B} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ ， $\hat{C} \in \mathbb{R}^{1 \times 5}$ 和 $\hat{D} \in \mathbb{R}^{1 \times 5}$ 表示待求解的控制器参数矩阵。通过结合等式 (7) ~ (8)，具有动态输出反馈的闭环系统可以被表示为：

$$\begin{cases} \dot{g} = A_A g + B_A w \\ z = C_A g + D w \end{cases} \quad (9)$$

其中， $g = \begin{bmatrix} x \\ \zeta \end{bmatrix}$ ， $A_A = \begin{bmatrix} A + B_1^T \hat{D} C_1 & B_1^T \hat{C} \\ \hat{B} C_1 & \hat{A} \end{bmatrix}$ ， $B_A = \begin{bmatrix} B_1^T \\ 0 \end{bmatrix}$ ， $C_A = [C_1^T \ 0]$ 。在闭环系统中，轮式拖拉机运行时的参考路径 Y_p 被视为系统的外部扰动，系统控制器的设计旨在降低外部扰动对于系统控制性能的影响，因此，我们引入了鲁棒 H_∞ 控制性能指标来描述这个过程，具体可以表示为：

$$\|e\|_2 \leq \gamma \|w\|_2 \quad (10)$$

其中， γ 可以表示扰动抑制的程度，通过最小化 γ ，我们可以降低扰动对于系统控制性能的影响，然后，控制器参数 $\hat{A}$ 、 $\hat{B}$ 、 $\hat{C}$ 和 $\hat{D}$ 被求解来满足上述的性能需求，同时保证系统的稳定性，首先引理 1 被引入引理 1^[29]：闭环系统的稳定性和抑制扰动的鲁棒 H_∞ 性能可以得到保证，如果存在一个正定矩阵 Ψ 可以满足以下的不等式：

$$\begin{bmatrix} \text{dua}\{A_A^T \Psi\} & \Psi B_A & C_A^T \\ * & -\gamma I & D^T \\ * & * & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

其中， $\text{dua}(\Phi) = \Phi^T + \Phi$ 。* 表示对称矩阵，矩阵 Ψ 和其逆矩阵满足以下的条件：

$$\Psi = \begin{bmatrix} \hat{Y} & \hat{N} \\ \hat{N}^T & \hat{W} \end{bmatrix} \Psi^{-1} = \begin{bmatrix} \hat{X} & \hat{M} \\ \hat{M}^T & \hat{Z} \end{bmatrix} \quad (12)$$

然后我们可以得到以下的等式：

$$\Psi \begin{bmatrix} \hat{X} & I \\ \hat{M}^T & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \hat{Y} \\ 0 & \hat{N}^T \end{bmatrix}$$

通过定义：

$$F_1 = \begin{bmatrix} \hat{X} & I \\ \hat{M}^T & 0 \end{bmatrix}, F_2 = \begin{bmatrix} I & \hat{Y} \\ 0 & \hat{N}^T \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过对不等式 (11) 进行同余变换，乘以 $\text{diag} = \{F_1^T, I, I\}$ ，我们可以得到以下的等效线性矩阵不等式(14)。

$$\begin{bmatrix} \text{dua}\{A\hat{X} + B_1\hat{C}\} & \tilde{A}^T + (A + B_1\hat{D}C_1) & B_2 & (C_2\hat{X})^T \\ * & \text{dua}\{\tilde{Y}A + \tilde{B}C_1\} & \tilde{Y}B_2 & C_2^T \\ * & * & -\gamma I & D^T \\ * & * & * & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

其中， $\tilde{A} = Y(A + B_1\hat{D}C_1)X + \tilde{N}\hat{B}C_1\hat{X} + \tilde{Y}B_2\hat{C}\hat{M}^T + \tilde{N}\hat{A}\hat{M}^T$ ， $\tilde{B} = \tilde{Y}B_1\hat{D} + \tilde{N}\hat{B}$ ， $\tilde{C} = \hat{D}C_1\hat{X} + \hat{C}\hat{M}^T$ ， $\tilde{D} = \hat{D}$ 。此外，可以将不等式 (15) 作为控制器设计的约束：

$$\begin{bmatrix} \hat{X} & I \\ I & \hat{Y} \end{bmatrix} > 0 \quad (15)$$

通过舒尔补理论，我们可以得到 $Y > 0$ 和 $I - XY > 0$ 。通过奇异值分解，我们可以得到矩阵 $\hat{M}$ 和 $\hat{N}$ ： $\hat{M}\hat{N}^T = I - \hat{X}\hat{Y}$ 。这样，控制器的参数可以通过下式求解：

$$\begin{cases} \hat{D} = \tilde{D} \\ \hat{C} = (\tilde{C} - \hat{D}C_1\hat{X})(\hat{M}^T)^{-1} \\ \hat{B} = \hat{N}^{-1}(\tilde{B} - \tilde{Y}B_1\hat{D}) \\ \hat{A} = \hat{N}^{-1}[\tilde{A} - \tilde{Y}(A + B_1\hat{D}C_1)\hat{X}](\hat{M}^T)^{-1} \\ \quad - \hat{B}C_1\hat{X}(\hat{M}^T)^{-1} - \hat{N}^{-1}\tilde{Y}B_2\hat{C} \end{cases} \quad (16)$$

此外，为了保证控制器的稳定性，本研究采用了极点配置的方案来保证闭环系统的极点配置在期望的位置。然而，由于模型的干扰和不确定性，精确的极点配置对于控制器设计来说是不可行的。因此，采用文献[30]所描述的方案，我们引入了区域极点配置的方案，即把系统的极点配置在一个期望的区域。具体来说，本工作中采用了一个圆形区域 $D(-\rho, \mathfrak{R})$ 的极点配置方案， $D(-\rho, \mathfrak{R})$ 表示一个原点为 $(-\rho, 0)$ ，半径为 $\mathfrak{R}$ 的圆。通过将极点分配在左半复平面上的一个圆形区域，可以保证系统的瞬态稳定性能。这里引入引理 2 来完成极点的配置问题。

引理 2^[30]：对于一个给定的矩阵 A ，如果存在一个正定矩阵 Ψ 满足以下等式，那么其特征值可以分布在 $D(-\rho, \mathfrak{R})$ 所描述的区域。

$$\begin{bmatrix} -\mathfrak{R}\Psi & \rho\Psi + \Psi A \\ * & -r\Psi \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

同样地，我们对不等式 (17) 进行同余变换，乘以 $\text{diag} = \{F_1^T, F_1^T\}$ ，可以进一步表示为一个线性矩阵不等式：

$$\begin{bmatrix} -\mathfrak{R}\hat{X} & -\mathfrak{R}I & A\hat{X} + B_1\hat{C} + \rho\hat{X} & A + B_1\hat{D}C_1 + \rho I \\ * & -\mathfrak{R}\hat{Y} & \tilde{A} + \rho I & \tilde{Y}A + \tilde{B}C_1 + \rho\hat{Y} \\ * & * & -\mathfrak{R}\hat{X} & -\mathfrak{R}I \\ * & * & * & -\mathfrak{R}\hat{Y} \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

根据引理 1 和引理 2, 本研究为人-车系统协同转向模型(6)设计了鲁棒输出反馈控制器。

定理 1: 对于闭环系统 (9), 当不等式 (14) 和 (18) 在多胞体每个顶点都成立时, 系统的抗干扰鲁棒 H_∞ 性能和瞬态稳定性可以得到保证, 即对于 $i = 1, 2, \dots, 8$,

$$\begin{bmatrix} \text{dua}\{A_i\tilde{X} + B_i^1\tilde{C}\} & \tilde{A}^T + (A_i + B_i^1\tilde{D}C_1) & B_i^2 & (C_i^2\tilde{X})^T \\ * & \text{dua}\{\tilde{Y}A + \tilde{B}C_1\} & \tilde{Y}B_i^2 & (C_i^2)^T \\ * & * & -\gamma I & D^T \\ * & * & * & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} -\Re\tilde{X} & -\Re I & A_i\tilde{X} + B_i^1\tilde{C} + \rho\tilde{X} & A_i + B_i^1\tilde{D}C_1 + \rho I \\ * & -\Re\tilde{Y} & \tilde{A} + \rho I & \tilde{Y}A_i + \tilde{B}C_1 + \rho\tilde{Y} \\ * & * & -\Re\tilde{X} & -\Re I \\ * & * & * & -\Re\tilde{Y} \end{bmatrix} < 0 \quad (20)$$

控制器的参数可以表示为:

$$\begin{cases} \hat{D}_i = \tilde{D}_i \\ \hat{C}_i = (\tilde{C}_i - \hat{D}_i C_i^1 \tilde{X}_i) (\hat{M}_i^T)^{-1} \\ \hat{B}_i = \hat{N}_i^{-1} (\tilde{B}_i - \tilde{Y}_i B_i^1 \tilde{D}_i) \\ \hat{A}_i = \hat{N}_i^{-1} [\tilde{A}_i - \tilde{Y}_i (A_i + B_i^1 \tilde{D}_i C_i^1) \tilde{X}_i] (\hat{M}_i^T)^{-1} \\ \quad - \hat{B}_i C_i^1 \tilde{X}_i (\hat{M}_i^T)^{-1} - \hat{N}_i^{-1} \tilde{Y}_i B_i^1 \tilde{C}_i \end{cases} \quad (21)$$

其中, $\hat{M}_i \hat{N}_i^T = I - \tilde{X}_i \tilde{Y}_i$, 控制器增益最终表达式为 $\hat{A} = \sum_{i=1}^4 g_i \hat{A}_i$, $\hat{B} = \sum_{i=1}^4 g_i \hat{B}_i$, $\hat{C} = \sum_{i=1}^8 g_i \hat{C}_i$, 和 $\hat{D} = \sum_{i=1}^4 g_i \hat{D}_i$ 。这个求

解过程可以通过 MATLAB 的 LMI 工具箱实现。

3 驾驶模拟器测试

本节通过驾驶模拟器测试, 验证了基于整车模型的路径跟踪控制方法在水稻田作业中的有效性。测试过程中, 驾驶员根据设定的参考路径操作方向盘, 模拟了水稻田块中实际作业的路径跟踪情境。测试设定了两种典型工况, 旨在评估控制系统在不同水稻作业环境下的适应性和性能。工况 1 主要模拟了较为简单的路径跟踪任务, 验证了系统在水稻田相对平坦道路条件下的表现。工况 2 则模拟了更复杂的田间作业环境, 包括路径的弯曲和不规则地形, 检验了控制方法在水稻田块中面对起伏不平或障碍物时的鲁棒性。

在测试过程中, 驾驶员可以根据预定的参考路径操作方向盘。然后, 驾驶员的转向角信息被传输到 dSPACE 系统, 根据驾驶员的转向角信息 δ_d , 基于鲁棒控制器可以计算辅助的转向控制角输入 δ_c 。最后, 总的转向角输入 δ 被发送到使用 Carsim 软件建立的车辆模型中。图 5 展示了实验测试台架, 其中转向电机采用闭环的 PID 控制器。主控制器 dSPACE 用于编译所提出的转向辅助控制方法。PXI 内嵌 Carsim 可以用于实时的动画显示。控制流程如图 6 所示, 同时设置了一个 PID 控制算法作为对比



NI系统
NI system



实验台架
Experiment bench



主控制器
Main Controller



转向执行器 Steering actuator



测试参与人员 Test participants

图 5 实验测试台架
Fig. 5. Experimental test bench

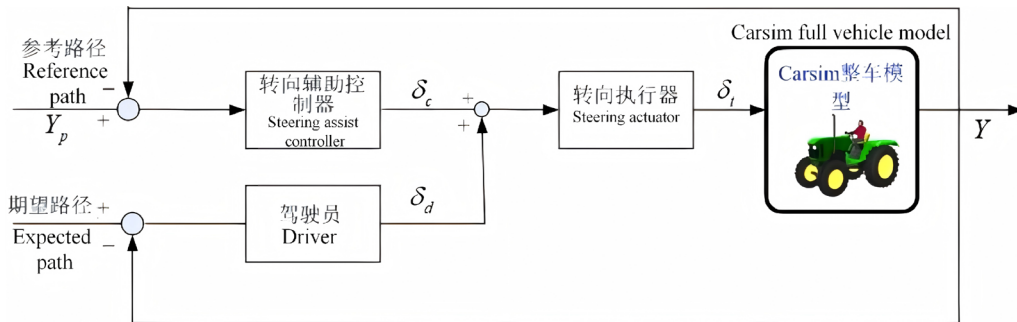


图6 辅助转向控制器的算法流程

Fig. 6. Algorithm flowchart of the auxiliary steering controller

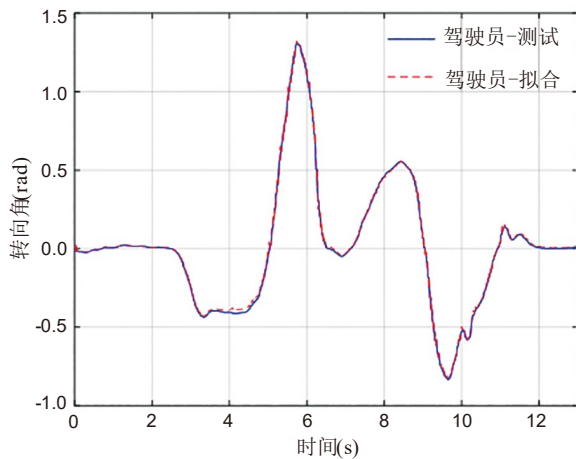


图7 驾驶员参数辨识结果

Fig. 7. Driver parameter identification results

测试，以验证所提出控制器的优势。其中，为了保证对比的公平性，本研究所采用的PID控制器参数是在单车道变更和复杂蛇形道路两种工况下，通过反复测试调整获得的。最终确定比例系数为200、积分系数为10以及微分系数为2，该组参数能够在保证系统稳定性的同时实现较好的路径跟踪性能。此外，进行了实车测试以验证所提出的控制方法的有效性。

在测试之前，首先需要确定驾驶员模型参数。通过驾驶员模拟器我们训练了一名操作熟练的驾驶员。然后通过一个小曲率路径采集了驾驶员的操纵数据。图7显示了驾驶员参数的辨识结果，可以看出，最小二乘法在辨识驾驶员参数方面的有效性。

其次，在进行控制器性能对比时，我们定义了性能矩阵 $J_1 = \int \|\delta_c\|^2$ 和 $J_2 = \int \|\delta_d\|^2$ 来分别描述驾驶员的物理和精神负荷。测试中的圆形区域，即 $D(-\rho, \Re)$ 被设置为 $D(-10, 8)$ 。我们首先对比了系统在有鲁棒控制器情况下的极点分布情况，如图8所示。其中， x 轴和 y 轴分别表示复平面的实轴和虚轴。可

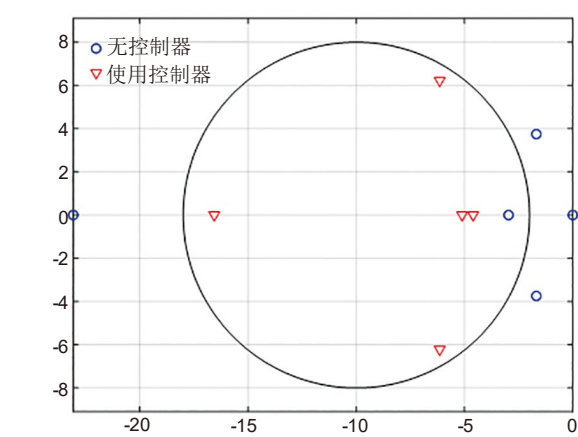


图8 系统极点位置分布

Fig. 8. Distribution of system pole positions

以看出，通过引入鲁棒控制器，系统的所有极点都能够分布于期望的区域，可以在保证系统稳定性的基础上改善系统的瞬态响应性能。最后，我们设置了两种不同的测试场景来进一步验证控制器的辅助驾驶性能。

3.1 测试工况1

在测试工况1中，测试模拟了单车道变更操作，驾驶员需要在田间进行路径跟踪，确保路径跟随精度。该测试场景模拟了水稻田块中典型的转向操作，驾驶员需要应对作业过程中可能遇到的田间不规则地形或路径偏离，并及时调整操作。在这种工况下，控制系统主要验证了其在水田作业中的应用性能，确保即使在田间道路变化时，系统仍能够稳定执行路径跟踪任务。

图9和图10分别展示了参考路径和在不同控制器参与下的横向路径跟踪偏差。很明显，轮式拖拉机的路径跟踪性能可以通过两种控制器得到改善。然而，所提出的鲁棒控制器的性能要优于PID控制器。可以看出，在没有采用鲁棒控制器的情况下，轮式拖拉机的横向位置与期望路径之间的最大

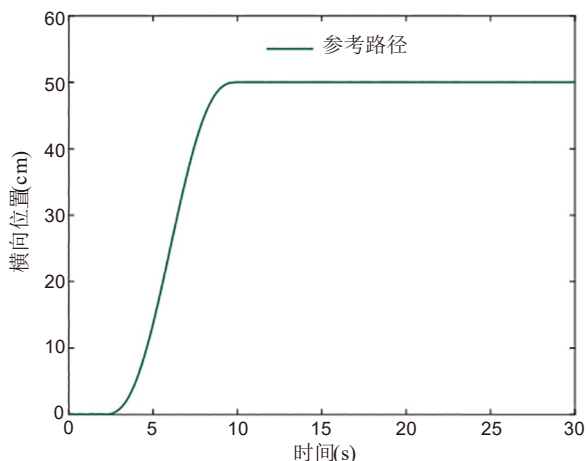


图9 工况1的参考路径

Fig. 9. Reference path for Scenario 1

偏差绝对值在 5~10 s 时约为 10 cm。这是因为从直线道路变为曲线道路行驶的过程中, 驾驶员可能无法很好地预判期望路径。如果在辅助转向控制中引入所提出的鲁棒控制算法, 最大偏差绝对值可以减少到 2 cm, 而 PID 控制下则为 6 cm, 这表明鲁棒控制的路径跟踪性能优于 PID 控制。这是因为通过辨识的驾驶员模型参数可以匹配真实的驾驶员转向特性, 基于此, 鲁棒控制方法能够提供合适的辅助转向角, 以帮助轮式拖拉机进行路径跟踪。这一结果表明, 即使在系统扰动相对简单的单车道变更工况中, 鲁棒控制方法仍能保持更小的瞬态偏差。其原因在于, 该方法不仅考虑了车辆运动学特性, 还引入了驾驶员模型参数, 使控制输入能够更好地贴合驾驶员实际操纵行为, 从而在转向初始阶段迅速抑制误差。同时, 鲁棒控制的极点配置策略保证了系统的瞬态响应速度, 使车辆能够更快收敛至参考路径。相比之下, PID 控制器依赖于经验调参, 在面对路径突变时缺乏对扰动的系统性补偿, 因此偏差收敛较慢。所提出的控制架构有助于提高农业机械系统的精确作业过程, 相反地, PID 算法难以通过工程经验调整控制参数并实现更好的控制性能。

此外, 在是否引入控制器的情况下, 量化的驾驶员物理负荷 $J_1 = \int \|\delta_d\|^2$ 和精神负荷 $J_2 = \int \|\dot{\delta}_d\|^2$ 的数据在表 1 中给出。在此处, 可以通过驾驶模拟器采集驾驶员转向角输入 δ_d 和转向角速率 $\dot{\delta}_d$ 去计算不同的操纵负荷。很显然, 所提出的鲁棒辅助控制方法能够减轻驾驶员的两种工作负荷, 其中, 物理负荷可以降低 26.86%, 而精神负荷可以降低 4.2%, 这归功于辅助转向系统的作用。

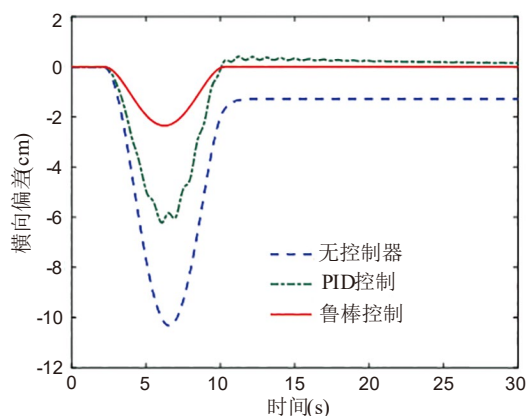


图10 工况1不同控制器作用下的路径跟踪偏差

Fig. 10. Path tracking deviation under different controllers in Scenario 1

3.2 测试工况 2

在工况 2 中, 测试模拟了复杂蛇形道路, 代表了水稻田间作业中路径不规则性和复杂地形的挑战。在这一场景中, 驾驶员需进行较频繁的转向调整, 以保持期望路径的准确性。测试重点考察了转向辅助控制系统在复杂田间地形下的适应性和鲁棒性, 特别是在水稻作业中, 田块的不同地形(如起伏、障碍物)可能影响路径跟踪的精度。

图 11 和图 12 分别展示了测试工况 2 中的参考路径和横向路径跟踪偏差。可以看出, 与单车道变更操作场景相比, 未使用任何辅助控制器时横向路径跟踪偏差明显增加, 而通过使用辅助控制算法可以减小路径跟踪误差。此外, 相比 PID 控制算法, 所提出的鲁棒控制器在跟踪参考路径方面表现更为优异。使用鲁棒控制时, 横向路径跟踪偏差的最大绝对值可以降低 75%, 而 PID 控制则只能降低 33.3%。在复杂蛇形道路工况下, 系统扰动更为复杂, 车辆需要应对频繁的曲率变化与动态参数波

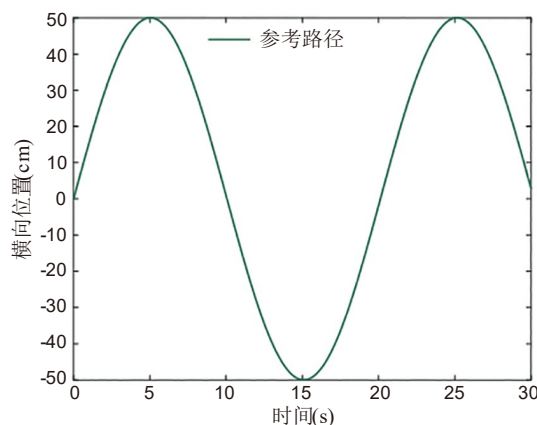


图11 工况2的参考路径

Fig. 11. Reference path for Scenario 2

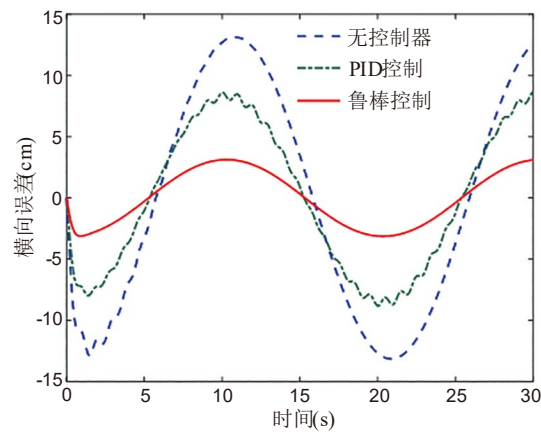


图12 工况2不同控制器作用下的路径跟踪偏差
Fig. 12. Path tracking deviation under different controllers in Scenario 2

动。此时，PID 控制难以及时适配，导致偏差峰值明显增加，并出现跟踪曲线波动较大的情况。而鲁棒控制方法能够利用参数时变建模和不确定性描述，对驾驶员操纵延迟与车辆速度变化进行有效补偿，从而使横向偏差保持在较低水平。这说明鲁棒控制在复杂扰动环境下更具适应性和鲁棒性，为保障农机作业的精确性与可靠性提供了支持。

此外，表 2 中给出了驾驶员在操纵轮式拖拉机时的负荷性能指标。可以看出，在引入鲁棒辅助转向控制器时，驾驶员的物理负荷 $J_1 = \int \|\delta_e\|^2$ 可以降低 37.6%，而精神负荷 $J_2 = \int \|\delta_e\|$ 可以降低 31.3%。

从图 10 和图 12 可以看出，所提出的鲁棒控制方法在两种工况下均表现出优于 PID 控制的路径跟踪性能。但两者的提升幅度存在差异。在工况 1(单车道变更)中，系统扰动较为简单，PID 控制器仍能在一定程度上维持较好的路径跟踪性能，因此鲁棒控制相较之下的改进幅度有限。而在工况 2(复杂蛇形道路)中，系统扰动更为复杂，车辆需应对频繁的路径曲率变化及动态影响，PID 控制难以实现自

适应调整，导致路径跟踪误差明显增大。在此情况下，鲁棒控制方法能够更好地抑制复杂扰动对系统性能的影响，从而获得更显著的性能提升。

4 结论

本研究设计了一种面向水稻田间路径控制的轮式拖拉机转向辅助系统，以协助驾驶员进行精确的路径跟踪控制。为验证所提方法的有效性，实验通过不同场景下的驾驶模拟器测试，展示了该系统在田间作业环境中的实际表现。

(1) 构建了驾驶员-车辆的协同作业模型，考虑到稻田作业环境下驾驶员模型参数和轮式拖拉机速度的不确定性，采用线性参数时变方法对模型进行了重构，其中模型中的不确定参数通过具有有限顶点的多胞线性参数时变系统进行处理，能够有效适应稻田作业环境的复杂性，确保控制系统在变化环境下的鲁棒性。

(2) 提出了一种动态输出反馈鲁棒控制算法来设计转向辅助控制器，以提高路径跟踪的精度，同时减少驾驶员的工作负荷，该控制算法通过区域极点配置方法提升了系统的瞬态响应性能，能够应对稻田田块中可能出现的作业干扰，提高了系统的稳定性与响应速度。

(3) 通过不同场景下的驾驶模拟器测试验证了该方法的有效性。结果表明，所提出的控制方法能够减少路径跟踪中的横向偏差，同时保证驾驶员的舒适性，在单车道变更操作和复杂蛇形道路两种不同行驶工况下，最大路径跟踪横向偏差较 PID 控制算法可以分别降低 66.7%和 55.6%，而驾驶员的物理负荷可以分别降低 26.86%和 37.6%，精神负荷可以分别降低 4.2%和 31.3%。这些结果进一步证明了所提控制方法在提升农业机械作业效率、服务

表 1 测试工况 1 下的驾驶员物理负荷和精神负荷

Table 1. Physical and mental workload of drivers under Test Condition 1

工况 1 Test condition 1	物理负荷 Physical workload	精神负荷 Mental workload
无控制器 Without controller	2.56	3.5
有控制器 With controller	2.3	2.4

表 2 测试工况 2 下的驾驶员物理负荷和精神负荷

Table 2. Physical and mental workload of drivers under Test Condition 2

工况 2 Test condition 2	物理负荷 Physical workload	精神负荷 Mental workload
无控制器 Without controller	9.6	15.4
有控制器 With controller	7.9	11.5

稻田作业以及优化驾驶员体验方面的显著优势。未来的研究可进一步考虑更复杂的田间作业工况及非线性扰动对系统性能的影响,并探索与自动驾驶技术的深度融合,以增强系统的适应性与智能化水平。同时,该方法具备较好的工程应用潜力,有望在更多类型的农机装备中推广应用,为智能农业的发展提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 李逃昌, 刘晓光. 农业机械自动驾驶技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
Hu J T, Gao L, Bai X P, Li T C, Liu X G. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张闻宇, 丁幼春, 王雪玲, 张幸, 蔡翔, 廖庆喜. 基于SVR 逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 29-36.
Zhang W Y, Ding Y C, Wang X L, Zhang X, Cai X, Liao Q X. Pure pursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 29-36. (in Chinese)
- [3] 李革, 王宇, 郭刘粉, 童俊华, 何勇. 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 G, Wang Y, Guo L F, Tong J H, He Y. 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 with English abstract)
- [4] 何杰, 朱金光, 张智刚, 罗锡文, 高阳, 胡炼. 水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 17-24.
He J, Zhu J G, Zhang Z G, Luo X W, Gao Y, Hu L. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [5] 史扬杰, 程馨慧, 奚小波, 单翔, 金亦富, 张瑞宏. 农业机械导航路径跟踪控制方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 1-14.
Shi Y J, Cheng X H, Xi X B, Shan X, Jin Y F, Zhang R H. Research progress on the path tracking control methods for agricultural machinery navigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(15): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [6] 伍龙梅, 张悦, 刘妍, 邹积祥, 杨陶陶, 包晓哲, 黄庆, 陈青春, 蒋耀智, 梁巧丽, 张彬. 直播稻研究进展及发展对策分析[J]. 中国农学通报, 2023, 39(6): 1-5.
Wu L M, Zhang Y, Liu Y, Zou J X, Yang T T, Bao X Z, Huang Q, Chen Q C, Jiang Y Z, Liang Q L, Zhang B. Direct seeding rice: Research progress and development strategy[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(6): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [7] Reid J F, Zhang Q, Noguchi N, Dickson M. Agricultural automatic guidance research in North America[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25(1/2): 155-167.
- [8] Bevilacqua D M, Gerdes J C, Parkinson B W. A new yaw dynamic model for improved high speed control of a farm tractor[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2002, 124(4): 659-667.
- [9] Wang Q, He J, Lu C, Wang C, Lin H, Yang H, Li H, Wu Z. Modelling and control methods in path tracking control for autonomous agricultural vehicles: A review of state of the art and challenges[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(12): 7155.
- [10] Hiremath S, van Evert F K, ter Braak C, Stein A, van der Heijden G. Image-based particle filtering for navigation in a semi-structured agricultural environment[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 121: 85-95.
- [11] O'Connor M L. Carrier-phase differential GPS for automatic control of land vehicles. Stanford: Stanford University, 1997.
- [12] Zhou B, Su X, Yu H, Guo W, Zhang Q. Research on path tracking of articulated steering tractor based on modified model predictive control[J]. *Agriculture*, 2023, 13(4): 871.
- [13] 白晓平, 胡静涛, 高雷, 李逃昌, 刘晓光. 农机导航自校正模型控制方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 1-7.
Bai X P, Hu J T, Gao L, Li T C, Liu X G. Self-tuning model control method for farm machine navigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [14] Backman J, Oksanen T, Visala A. Navigation system for agricultural machines: Nonlinear Model Predictive path tracking[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 82: 32-43.
- [15] Nørremark M, Griepentrog H W, Nielsen J, Søgård H T. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(4): 396-410.
- [16] Kannan P, Natarajan S K, Dash S S. Design and implementation of fuzzy logic controller for online computer controlled steering system for navigation of a

- teleoperated agricultural vehicle[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 590861.
- [17] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 张智刚, 高阳, 何杰, 岳斌斌. 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 H, Wang G M, Luo X W, Zhang Z G, Gao Y, He J, Yue B B. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(4): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [18] Li P, Nguyen A T, Du H, Wang Y, Zhang H. Polytopic LPV approaches for intelligent automotive systems: State of the art and future challenges[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 161: 107931.
- [19] Guo J, Luo Y, Li K. Robust gain-scheduling automatic steering control of unmanned ground vehicles under velocity-varying motion[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2019, 57(4): 595-616.
- [20] Nguyen A T, Sentouh C, Zhang H, Popieul J C. Fuzzy static output feedback control for path following of autonomous vehicles with transient performance improvements[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(7): 3069-3079.
- [21] Liang J, Yin G, Li G. Robust H_∞ output-feedback vehicle yaw control using an active front wheel steering[C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC). July 25-27, 2018. Wuhan: IEEE, 2018: 7760-7764.
- [22] Zhang H, Wang J. Vehicle lateral dynamics control through AFS/DYC and robust gain-scheduling approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(1): 489-494.
- [23] Jin X, Yu Z, Yin G, Wang J. Improving vehicle handling stability based on combined AFS and DYC system via robust Takagi-Sugeno fuzzy control[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(8): 2696-2707.
- [24] Chen Y, Zhang X, Wang J. Robust vehicle driver assistance control for handover scenarios considering driving performances[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(7): 4160-4170.
- [25] Nguyen A T, Sentouh C, Popieul J C. Driver-automation cooperative approach for shared steering control under multiple system constraints: Design and experiments[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(5): 3819-3830.
- [26] Guo K. Driver-vehicle closed-loop simulation of handling by "preview optimal curvature method". *Automobile Engineering*, 1984, 6: 1-16.
- [27] Liang J, Lu Y, Feng J, Yin G, Zhuang W, Wu J, Xu L, Wang F. Robust shared control system for aggressive driving based on cooperative modes identification[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(11): 6672-6684.
- [28] Zhang H, Zhang X, Wang J. Robust gain-scheduling energy-to-peak control of vehicle lateral dynamics stabilisation[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(3): 309-340.
- [29] Liang J, Feng J, Lu Y, Yin G, Zhuang W, Mao X. A direct yaw moment control framework through robust T-S fuzzy approach considering vehicle stability margin[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 29(1): 166-178.
- [30] Zhang K, Jiang B, Staroswiecki M. Dynamic output feedback-fault tolerant controller design for Takagi-Sugeno fuzzy systems with actuator faults[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2010, 18(1): 194-201.