doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.009

# 基于转向非线性模糊补偿的水田履带拖拉机路径跟踪控制方法

何　杰[1,2]　贺子豪[1,2]　陆炳辛[1,2]　莫家骏[1,2]　汪　沛[1,2]　徐梓涵[1,2]
曾鸿禧[1,2]　林　涵[1,2]　胡　炼[1,2]

(1.华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室,广州 510642;
2.华南农业大学工程学院,广州 510642)

**摘要**:针对水田作业中履带拖拉机因差速转向非线性与履带滑移导致路径跟踪精度下降的问题,本文提出一种基于实时侧滑估计与模糊补偿的自动导航控制方法。建立了履带拖拉机运动学模型,通过转向系统参数辨识与中位标定,确立了转向控制参数与转向曲率的线性关系,并设计了自适应预瞄纯追踪算法。在此基础上,通过运动学分析进行了侧滑估计并构建了以实时滑移率与期望转向角为输入的模糊控制器,在线修正由履带侧滑与液压转向死区引起的决策偏差。Matlab/Simulink 仿真结果表明,在跟踪 S 形与双扭路径时,相比传统纯追踪算法,该方法最大横向偏差降低 54.1%、66.7%,平均绝对偏差减少 34.4%、55.8%,表现出更优的跟踪精度与抗干扰能力。以 1GLX-230 型履带自走式旋耕机为平台的田间试验进一步验证了其有效性:连续作业行平均最大横向偏差为 0.059 m,平均绝对偏差为 0.025 m,且 97.33% 跟踪偏差被控制在 ±0.05 m 范围内。该方法有效提升了水田复杂环境下履带拖拉机路径跟踪稳定性、对行精度与整体鲁棒性,满足精准农业自动导航作业要求。

**关键词**:履带拖拉机;路径跟踪;非线性;模糊补偿
**中图分类号**:S220;S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)12-0099-12　　**OSID**:

# Path Tracking Control for Crawler Tractors in Paddy Fields Based on Fuzzy Compensation for Nonlinear Steering Characteristics

HE Jie[1,2]　HE Zihao[1,2]　LU Bingxin[1,2]　MO Jiajun[1,2]　WANG Pei[1,2]　XU Zihan[1,2]
ZENG Hongxi[1,2]　LIN Han[1,2]　HU Lian[1,2]

(1. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment*, *Ministry of Education*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*)

**Abstract**: Aiming at the problem of path tracking accuracy degradation in crawler tractors operating in paddy fields, caused by the nonlinearity of differential steering and track slippage, an automatic navigation control method was proposed based on real-time sideslip estimation and fuzzy compensation. A kinematic model of the crawler tractor was established. Through steering system parameter identification and neutral calibration, the linear relationship between steering control parameters and steering curvature was determined, and an adaptive preview pure pursuit algorithm was designed. Building upon this foundation, sideslip estimation was performed via kinematic analysis, and a fuzzy controller using real-time slip rate and desired steering angle as inputs was constructed to correct decision-making deviations online caused by track sideslip and hydraulic steering dead zone. Simulation results in Matlab/Simulink showed that, when tracking S-shaped and double-lane change paths, the proposed method reduced the maximum lateral deviation by 54.1% and 66.7% and the mean absolute deviation by 34.4% and 55.8% compared with that of the traditional pure pursuit algorithm, demonstrating superior tracking accuracy and anti-interference capability. Field tests conducted on a 1GLX-230 crawler self-

收稿日期:2026-01-12　修回日期:2026-03-20
**基金项目**:广东省基础与应用基础研究基金项目(2025A1515011012)
**作者简介**:何杰(1985—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备和无人化农场技术研究,E-mail:hooget@scau.edu.cn
**通信作者**:汪沛(1983—),女,副教授,博士,主要从事无人农场和精准作业研究,E-mail:wangpei@scau.edu.cn

propelled rotary tiller further verified its effectiveness: the average maximum lateral deviation across consecutive operation rows was 0.059 m, the average mean absolute deviation was 0.025 m, and 97.33% of the tracking deviations were controlled within the ±0.05 m range. This method effectively enhanced the path tracking stability, inter-row alignment accuracy, and overall robustness of crawler tractors in the complex paddy field environment, meeting the requirements for automatic navigation operations in precision agriculture.

**Key words**: crawler tractors; path tracking; nonlinearity; fuzzy compensation

## 0 引言

履带式农业机械是现代化农业装备的重要组成部分[1]。精准农业是未来发展方向,无人驾驶拖拉机是无人农场的核心[2],使得智能农业装备自动导航技术成为关键[3]。履带拖拉机因其对地压强小、通过性好等优点,特别适用于水田作业[4]。农机导航的核心目标是实现高精度路径跟踪,将横向偏差控制在允许范围内[5]。尽管发达国家已开发了多种农机导航系统[6],但针对水田履带拖拉机的研究仍相对较少。

路径跟踪的有效性主要取决于算法与转向控制策略[7-10]。现有研究大致分为 3 类:基于模型参数求解[11-13]、基于动力学模型的误差补偿控制[14-16],以及应用 PID、模糊控制、模型预测控制等智能算法[17-20]。智能算法在特定场景下性能优异,但在复杂田间环境中鲁棒性仍面临挑战。

针对履带车辆路径跟踪,学者们已开展多项研究[21-26]。WANG 等[27]建立了精确动力学模型并设计了自适应鲁棒控制器,在强干扰下实现了精确运动控制。王法安等[28]提出了一种基于瞬时转向中心(ICR)的算法,通过规划最优转向目标点,使路径跟踪平均误差面积和平均转向次数分别降低 68.95% 和 68.77%。李睿等[29]基于拉格朗日方程建立了耦合模型,采用自适应前馈补偿方法,在保证高精度跟踪的同时展现了强鲁棒性。刘辉等[30]采用虚拟前轮反馈控制,为履带车提供参考轨迹,仿真结果表明对圆弧路段平均横向误差为 0.044 m,较传统 PID 控制精度提高 25%。

然而,上述研究多集中于旱田环境。水田作业中,履带拖拉机差速转向系统非线性特性以及履带与硬底层滑移,引入更大的干扰,使得路径跟踪控制更具挑战。因此,亟需发展一种能有效处理转向非线性和滑移干扰的水田履带拖拉机路径跟踪控制方法。

为此,本文提出一种基于转向非线性模糊补偿的路径跟踪控制方法。通过建立履带拖拉机运动学模型及转向参数辨识,提出一种转向系统中位修正方法,并设计自适应预瞄纯追踪算法。进而,通过侧滑估计设计模糊补偿控制器以修正由侧滑与液压系统死区导致的控制偏差。最后,通过仿真与以星光农机 1GLX-230 型旋耕机为平台的田间试验,验证所提方法在提升水田作业路径跟踪精度、抗干扰能力及鲁棒性方面的有效性。

## 1 履带拖拉机运动学模型

为了简化履带拖拉机模型,假设履带拖拉机质心与形心重合,将其运动限制在一个二维平面内,从而将车辆运动简化为 3 个自由度$(x,y,\theta)$,其中,$x$、$y$ 表示履带拖拉机在平面上位置坐标。如图 1 所示,存在 2 个坐标系:$\delta_1$ 和 $\delta_2$,大地坐标系 $\delta_1$ 原点 $O_{\delta_1}$可选择为运动平面内任何一点,$X$ 轴朝向正东,$Y$ 轴朝向正北。车辆坐标系 $\delta_2$ 原点 $O_{\delta_2}$位于履带拖拉机底盘中心,$x$ 轴指向车辆前方,$y$ 轴指向车辆左侧垂直于 $x$ 轴,$\theta$ 表示车辆航向角。

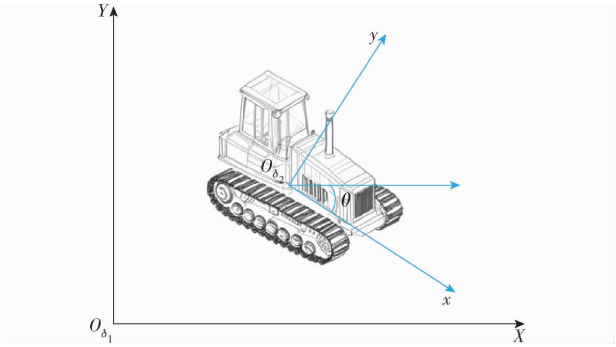


图 1 履带拖拉机参考系

Fig. 1 Crawler tractor reference frame

履带拖拉机在坐标系之间的转换满足

$$\boldsymbol{n}_1 = \boldsymbol{J}_\theta(\boldsymbol{n}_1)\boldsymbol{v}_1 \tag{1}$$

其中

$$\boldsymbol{J}_\theta(\boldsymbol{n}_1) = \begin{bmatrix} \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{n}_1$——在大地坐标系下履带拖拉机位置和航向角度组成的向量

$\boldsymbol{v}_1$——车辆坐标系下履带拖拉机速度和角速度组成的向量

$\boldsymbol{J}_\theta(\boldsymbol{n}_1)$——从车辆坐标系 $\delta_2$ 转换到大地坐标系 $\delta_1$ 的转换矩阵

在车辆路径跟踪中,由于履带式车辆行驶速度

较小，履带拖拉机运动学模型如图 2 所示，其运动学方程为

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\theta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta & 0\\ \sin\theta & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_c\\ \omega_c\end{bmatrix} \tag{3}$$

其中

$$\begin{cases}v_c=\dfrac{v_L+v_R}{2}\\ \omega_c=\dfrac{v_R-v_L}{D}\end{cases} \tag{4}$$

式中　$v_c$——履带拖拉机运动速度

$v_L$、$v_R$——履带拖拉机左侧和右侧履带速度

$\omega_c$——履带拖拉机旋转角速度

$D$——履带拖拉机两侧履带中心距离，即轨距

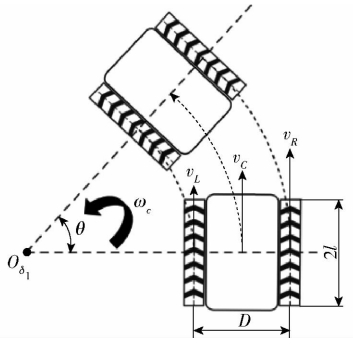


图 2　履带拖拉机运动学模型

Fig. 2　Kinematic model of crawler tractor

## 2　履带拖拉机转向系统参数辨识及中位修正方法

为提高履带拖拉机在无人驾驶时直线跟踪精度，需对转向系统进行参数辨识与中位修正。由于田间环境复杂且系统存在非线性与延迟，直接在田间建模较为困难。因此，本方法在平坦水泥地面上进行测试，以排除地面干扰，专注于建立电动方向盘转角与拖拉机转向曲率之间的线性关系模型。

参数辨识过程为：以试验平台（星光农机 1GLX－230 型）为例，调整方向盘使两侧履带转速近似相同，记录此时方向盘编码器中位值。逐步向单一方向转动方向盘（例如每次增加 5°），并同步记录转角与对应的转弯半径，直至一侧履带接近停止，从而获得一系列转角-曲率数据。

由于方向盘转角-曲率数据线性关系明显，采用最小二乘法找到该组数据点最佳函数匹配，基本思想是最小化预测值和实际观测值之差的平方和，即

$$S=\sum_{i=1}^{n}(y_i-f(x_i))^2 \tag{5}$$

其中　$f(x_i)=ax_i+b$

式中　$n$——数据点数量

$y_i$——第 $i$ 个数据点实际观测值

$x_i$——第 $i$ 个数据点自变量值

$f(x_i)$——模型对第 $i$ 个数据点预测值

$a$——斜率　　$b$——截距

在最小二乘法中，通过求解正规方程使 $S$ 最小化的 $a$ 和 $b$ 找到最佳拟合直线。绘制曲率-方向盘转角拟合曲线，如图 3 所示。

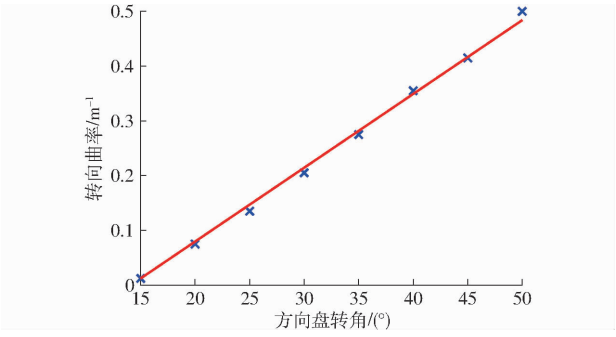


图 3　曲率-方向盘转角拟合曲线

Fig. 3　Curvature－steering wheel turning corner drawing

通过回归分析，由转向系统参数辨识可得

$$K=0.013\,48\delta-0.189\,85 \tag{6}$$

式中　$\delta$——电动方向盘相对中位转角

$K$——拖拉机转向曲率

由图 3 可知，当方向盘转角小于 50°，转向曲率与方向盘转角呈线性。当方向盘转角接近 90°时，因为一侧履带几乎停止转动，履带拖拉机围绕静止履带中心，以轨距作为半径进行圆周运动。式（6）表明，在测试范围内，转向曲率与方向盘转角呈良好的线性关系，为转向控制提供了关键模型参数。

对于履带拖拉机，简化实际系统中可能存在的非线性因素和动态变化后，油门功率 $P$ 随油门电机伸长量线性增长，假设线性关系式为

$$P=\alpha x \tag{7}$$

式中　$\alpha$——比例系数

$x$——油门电机伸长量

采用比例阀控制左、右 2 个液压马达履带式底盘转向，流入液压马达流量比 $k$ 随着方向盘转角变化，即

$$Q_L=kQ_R \tag{8}$$

式中　$Q_L$、$Q_R$——左、右液压马达流量

由于流量 $Q$ 与油门功率 $P$ 成正比，可推出

$$\begin{cases}Q_L=c_L\alpha x\\ Q_R=c_R\alpha x\end{cases} \tag{9}$$

式中　$c_L$、$c_R$——比例常数

联立式（8）可得

$$\begin{cases}v_L=d_LQ_L=d_Lc_L\alpha x\\ v_R=d_RQ_R=d_Rc_R\alpha x\end{cases} \tag{10}$$

式中　$d_L$、$d_R$——反映流量与速度关系的比例常数

式(10)表明随着油门线性增长,履带速度 $v_L$ 和 $v_R$ 也呈线性增长。

由履带拖拉机运动学模型可知,车辆转向半径为

$$R=\frac{D}{2}\frac{v_L+v_R}{|v_L-v_R|}=\frac{D}{2}\alpha\frac{d_Lc_L+d_Rc_R}{|d_Lc_L-d_Rc_R|}x \tag{11}$$

式中,由于 $d_L$、$d_R$、$c_L$、$c_R$ 均为结构常数,式(11)表明转弯半径与油门电机伸长量呈线性关系。

而式(6)是在油门电机位置处于最大位置 $x_{\max}$ 得到的,联立式(11)可构建曲率与油门电机位置、方向盘转角关系

$$K=\frac{x_{\max}}{x}(0.013\,48\delta-0.189\,85) \tag{12}$$

电动方向盘仅在上电时才能准确反馈实时转角,断电状态不反馈。采用位置环控制 CES-T 型电动方向盘时,由于电动方向盘存在间隙,长时间使用后编码器零位会发生改变,造成发送使能信号后电动方向盘在归零过程发生偏转,方向盘偏转后则与中位位置存在角度偏差,且角度偏差会随着使用情况发生变化而不是定值。因此,编码器不能保证在每次启动时电动方向盘自动回归到中位位置,因此在启动后首先进行中位标定及调整,以确保电动方向盘能够精确响应拖拉机无人驾驶控制命令。

完成履带差速转向运动参数辨识后,能够借助式(12)完成履带拖拉机中位修正,拖拉机转向标定轨迹如图 4 所示,具体修正过程为:

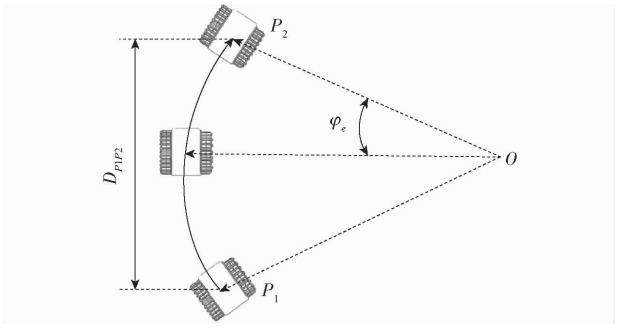


图 4 履带拖拉机转向标定轨迹

Fig. 4 Trajectory of crawler tractor steering calibration

(1)启动履带拖拉机并打开导航系统,确保 Android 一体机能接收到差分信号的固定解,以拖拉机当前位置点 $P_1$ 作为标定起点,在标定系统中记录 $P_1$ 经纬度坐标。

(2)仅使能电动方向盘而不发送控制指令,此时方向盘完全由电机控制,处于抱死状态。记录此状态下方向盘编码器读数。给油门电机发送恒定速度,拖拉机匀速运动 10 s 后停止,以履带拖拉机当前位置点 $P_2$ 作为标定终点,在标定系统中记录 $P_2$ 经纬度坐标及航向偏差角 $\varphi_e$。

(3)由于电动方向盘不在中位位置,所以拖拉机实际上在围绕点 $O$ 做圆周运动,计算点 $P_1$ 和点 $P_2$ 之间的间距 $D_{P1P2}$,并在此基础上计算履带拖拉机修正半径 $R_m$,计算式为

$$R_m=\frac{D_{P1P2}}{2\sin\varphi_e} \tag{13}$$

(4)将式(13)代入式(6)计算方向盘修正角,即

$$y_m=\frac{\frac{2\sin\varphi_e}{D_{P1P2}}+0.189\,85}{0.013\,48} \tag{14}$$

(5)使用 $y_m$ 修正当前编码器数值,并发出方向盘转动指令,转动角为 $y_m$。

修正中位后,履带拖拉机在水泥路上沿相同路径直线行驶 50 m,拖拉机横向偏距由 0.5 m 减小到 0.1 m 以内。经中位修正后履带拖拉机在无人驾驶过程直线度更好,固定位置偏差明显减小,航向偏差和横向偏差波动变小。

## 3 履带拖拉机路径跟踪控制方法

### 3.1 预瞄纯追踪算法

纯追踪算法基于拖拉机运动学方程和几何原理,设定固定前视距离,并与参考路径相交于 1 个预瞄点,从而推导出拖拉机后轮轴中心点到以圆弧轨迹走到预瞄点处轮角控制律[31]。该算法能够模拟驾驶员视觉,具有仿生、简单、直观、易实现的特点,已被广泛应用于路径跟踪领域。通过对履带拖拉机转向系统特性分析,设计自适应纯追踪控制方法,控制系统框架如图 5 所示。

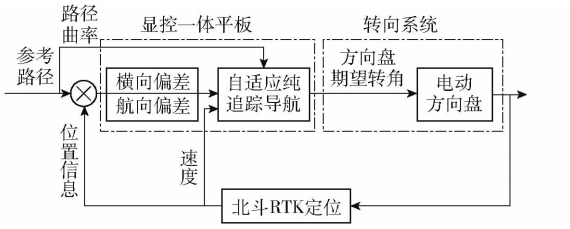


图 5 自适应纯追踪控制系统

Fig. 5 Adaptive pure tracking control system

拖拉机为履带差速转向,假设不考虑侧滑等干扰影响,以拖拉机履带底盘中心 $P_0(x_0,y_0)$ 为控制点,此时航向角即为 $P_0(x_0,y_0)$ 切线倾斜角,两侧履带保持一定差速,能引导控制点走过一段圆弧到固定前视距离上预瞄点 $P(x,y)$ 处,进而使控制点以圆弧轨迹运动到跟踪路径上,如图 6 所示,已知 $P_0(x_0,y_0)$ 和 $P(x,y)$ 以及 $P_0(x_0,y_0)$ 切线方向,可求解出以点 $O$ 为圆心,以 $P_0P$ 为弦的圆,$\phi$ 为圆心角,$r$ 为从 $P_0(x_0,y_0)$ 到 $P(x,y)$ 圆弧路径半径,$e_\varphi$ 为航向偏差,$e_d$ 为横向偏差。

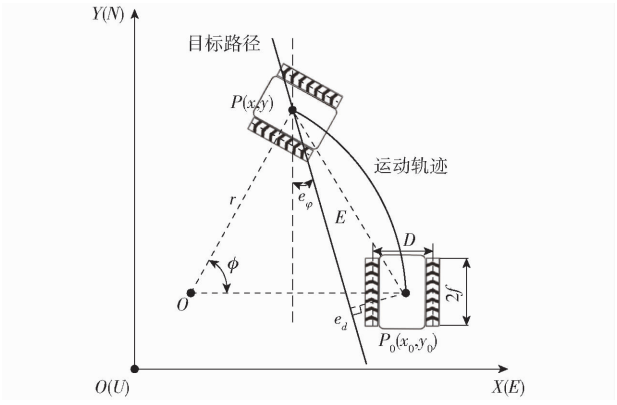


图 6　纯追踪算法示意图

Fig. 6　Pure tracking algorithm schematic

控制系统不断根据下一时刻拖拉机位置和航向数据计算所需的转向角。通过不断重复这一流程，拖拉机能够逐渐靠近并跟随预定路径。纯追踪算法计算过程为：

由图 6 可得

$$x - x_0 = -e_d\cos e_\varphi + \sqrt{E^2 - e_d^2}\sin e_\varphi \tag{15}$$

$$x - x_0 = -r(1 - \cos\phi) \tag{16}$$

$$y - y_0 = -r\sin\phi \tag{17}$$

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = E^2 \tag{18}$$

式中　$E$——前视距离

联立式(15)～(18)可得转弯半径与前视距离关系为

$$r = -\frac{E^2}{2(x - x_0)} \tag{19}$$

根据履带拖拉机转向参数辨识，可得方向盘期望转向角 $\delta_u$ 与转弯半径 $r$ 之间的关系为

$$r = \frac{1}{0.013\,48\delta_u - 0.189\,85} \tag{20}$$

将式(20)代入式(19)可得方向盘期望转向角为

$$\delta_u = \frac{0.189\,85E^2 + 2(e_d\cos e_\varphi - \sqrt{E^2 - e_d^2})\sin e_\varphi}{0.013\,48E^2} \tag{21}$$

电动方向盘按照式(21)求解的期望转向角执行，从而使拖拉机实现路径跟踪。根据式(21)，在纯追踪算法中唯一可调参数是前视距离。按照驾驶员习惯，前视距离与车速呈正相关，通常将前视距离构建为车速的一次函数，但在田间作业中发现转弯时仅考虑前视距离往往控制量偏小，导致追踪精度下降。针对这种情况，通过结合拖拉机速度和路径曲率动态调整前视距离，基于速度和曲率动态前视距离调整策略为

$$E = E_v v + E_0 \tag{22}$$

其中

$$E_0 = E_k K' \tag{23}$$

式中　$E_v$——速度增益　　$E_k$——曲率增益

$K'$——根据当前点及后续 2 个连续点计算所得的曲率

$E_0$——最小前视距离，根据路径曲率设置

如果路径曲率太大，则减小 $E_0$，使追踪更加精确；如果路径曲率较小，则增大 $E_0$，使轨迹追踪更平滑。前视距离过短时，系统容易产生振荡，而前视距离过长时，虽然路径跟踪更平稳，但上线时间会很长。为了确保前视距离在实际应用中可行性，需对其进行限制，即设定最小值 $E_{0_{\min}}$ 和最大值 $E_{0_{\max}}$，即

$$E_{0_{\min}} \leqslant E_0 \leqslant E_{0_{\max}} \tag{24}$$

可避免在超低速或高曲率情况下前视距离过小，或在高速直线行驶情况下前视距离过大。

### 3.2　实时跟踪偏差计算方法

车辆当前航向 $\varphi$ 和当前位置由北斗星通外置测量天线 GPS300 测得，该设备相位中心误差 ±2 mm。跟踪偏差包括位置横向偏差及航向偏差，由全球导航卫星系统(Global navigation satellite system，GNSS)通过点到直线法获取位置偏差。假设履带拖拉机一条直线作业参考路径方程为 $Ax + By + C = 0$($A$、$B$、$C$ 均为常数)，控制点坐标为 $R(x_r, y_r)$，规定当控制点在参考路径前进方向左侧时 $e_d < 0$，当控制点在参考路径前进方向右侧时 $e_d > 0$，则由 GNSS 点到直线法计算位置偏差为

$$e_d^{GNSS}(t) = \frac{|Ax_r(k) + By_r(k) + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \tag{25}$$

由车辆控制点坐标和预瞄点坐标，可得车辆当前航向偏差为

$$e_\varphi(t) = \begin{cases} \left|90 - \dfrac{180}{\pi}f(x_r(t) - x_0(t), y_r(t) - y_0(t)) - \varphi\right| & \left(-\pi < f(x_r(t) - x_0(t), y_r(t) - y_0(t)) \leqslant \dfrac{\pi}{2}\right) \\ \left|450 - \dfrac{180}{\pi}f(x_r(t) - x_0(t), y_r(t) - y_0(t)) - \varphi\right| & \left(\dfrac{\pi}{2} < f(x_r(t) - x_0(t), y_r(t) - y_0(t)) \leqslant \pi\right) \end{cases} \tag{26}$$

$$f(x,y)=\begin{cases}\arctan\dfrac{y}{x} & (x>0)\\ \arctan\dfrac{y}{x}+\pi & (x<0,y\geqslant 0)\\ \arctan\dfrac{y}{x}-\pi & (x<0,y<0)\\ \dfrac{\pi}{2} & (x=0,y>0)\\ -\dfrac{\pi}{2} & (x=0,y<0)\end{cases} \tag{27}$$

式中 $f(x,y)$——方位角求解函数

$x_r(t)$——第 $t$ 时刻控制点横坐标

$y_r(t)$——第 $t$ 时刻控制点纵坐标

$x_0(t)$——第 $t$ 时刻预瞄点横坐标

$y_0(t)$——第 $t$ 时刻预瞄点纵坐标

$e_\varphi(t)$——第 $t$ 时刻航向偏差

### 3.3 侧滑估计

为量化转向过程因履带滑移导致的运动偏差，引入滑移率 $\sigma$ 作为核心评价指标。其定义为车辆实际转向半径 $R_{\text{real}}$ 与理论转向半径 $R_{th}$ 的相对偏差，即

$$\sigma=\frac{R_{\text{real}}-R_{th}}{R_{th}}=\frac{R_{\text{real}}}{R_{th}}-1 \tag{28}$$

其中

$$\begin{cases}R_{th}=L/\tan(\delta_u)\\ R_{\text{real}}=v/\dot{\varphi}\end{cases} \tag{29}$$

式中 $R_{th}$ 基于阿克曼转向几何，由控制器决策的方向盘转角 $\delta_u$ 和车辆轴距 $L$ 计算得出，表示无滑移理想条件下期望转向半径。$R_{\text{real}}$ 基于 GNSS 与惯性测量单元(Inertial measurement unit，IMU)导航系统实时提供的车体质心纵向速度 $v$ 与横摆角速度 $\dot{\varphi}$ 计算得出，反映车辆在包含滑移的真实环境中瞬时运动曲率。

当 $\sigma=0$ 时，实际运动与理论模型一致，无滑移影响；当 $\sigma>0$ 时 $R_{\text{real}}>R_{th}$，即实际转向比期望更平缓，表现为转向不足。在履带车辆上，这通常是由于外侧履带打滑(滑转)或内侧履带制动不足(滑移)所致；当 $\sigma<0$ 时 $R_{\text{real}}<R_{th}$，即实际转向比期望更急促，表现为过度转向。这通常是内侧履带严重打滑或外侧履带提供了过大的驱动力所致。该定义从运动学层面直观地量化了滑移对车辆转向路径的宏观影响。

### 3.4 基于侧滑估计的模糊补偿控制器设计

为应对水田环境中履带滑移对路径跟踪精度的影响，本文基于实时侧滑估计设计模糊补偿控制器。该控制器以路径跟踪模块计算期望转向角 $\delta_u$ 和实时滑移率 $\sigma$ 作为输入，通过模糊推理输出补偿控制角 $\Delta\delta_c$，对转向指令进行自适应修正，以抑制滑移带来的跟踪误差。履带拖拉机转向控制系统如图 7 所示。

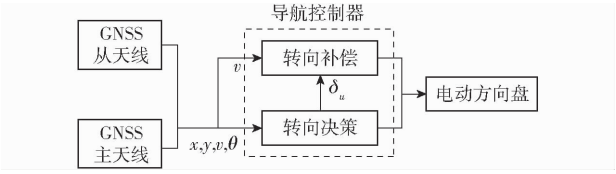


图 7 履带拖拉机转向控制系统

Fig. 7 Steering control system of crawler tractor

在实际行驶过程中，当拖拉机前进速度一定时，履带与地面存在滑移、滑转现象，车辆实际转向半径可能大于或小于理论转向半径。因此，履带拖拉机导航跟踪路径确定后，实际转向控制时需通过改变转向控制值修正转向半径，补偿因侧滑导致的曲率减小量。

通过分析履带拖拉机转向系统特性，可得本文设计模糊控制算法结构如图 8 所示。

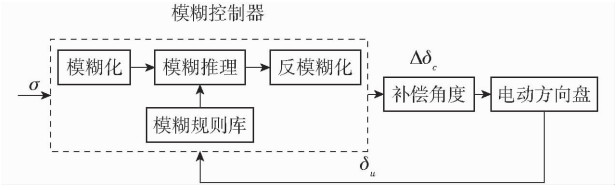


图 8 模糊控制算法结构示意图

Fig. 8 Vague control algorithm structure schematic

根据式(28)计算得滑移率 $\sigma$，结合水田作业典型工况，实际有效论域设定为[-0.4，0.4]，并模糊化 7 个子集：{负大(NB)，负中(NM)，负小(NS)，零(ZO)，正小(PS)，正中(PM)，正大(PB)}，隶属度函数采用三角形函数。期望转向角 $\delta_u$ 来自纯追踪算法，为满足实际作业地头转弯等大角度转向需求，论域设定为[-90°，90°]，并同样模糊化 7 个子集：{NB，NM，NS，ZO，PS，PM，PB}。补偿角 $\Delta\delta_c$ 输出论域设定为[-15°，15°]，模糊子集划分为：{NB，NM，NS，ZO，PS，PM，PB}。

当滑移率 $\sigma$ 为正(PS，PM，PB)时，表明实际转弯半径大于理论值(转向不足)，需施加正向补偿以增大综合转向角；反之，当 $\sigma$ 为负(NS，NM，NB)时，表明实际转弯半径小于理论值(过度转向)，需施加负向补偿以减小综合转向角。补偿的强度同时取决于滑移严重程度($\sigma$ 模糊等级)和期望转向角($\delta_u$ 模糊等级)。依据此原则，建立模糊控制规则如表 1 所示。

采用三角形隶属度函数构建模糊控制器，输入变量为滑移率 $\sigma$ 与期望转向角 $\delta_u$，输出变量为补偿角 $\Delta\delta_c$。推理过程采用 Mamdani 方法，并利用质心法进行解模糊，最终得到精确的补偿控制量。为直观展示控制器输入输出间的非线性映射关系，利用

**表 1　补偿量 $\Delta\delta_c$ 模糊推理规则**

**Tab. 1　Compensation quantity $\Delta\delta_c$ fuzzy reasoning rules**

| $\Delta\delta_c$ | | $\delta_u$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| $\sigma$ | NB | NB | NB | NM | NM | NS | ZO | ZO |
| | NM | NB | NM | NM | NS | NS | ZO | PS |
| | NS | NM | NM | NS | NS | ZO | PS | PM |
| | ZO | NM | NS | NS | ZO | PS | PS | PM |
| | PS | NS | NS | ZO | PS | PS | PM | PM |
| | PM | NS | ZO | PS | PS | PM | PM | PB |
| | PB | ZO | ZO | PS | PM | PM | PB | PB |

Matlab Fuzzy Logic Toolbox 生成输入、输出变量的隶属度函数曲线及模糊规则，如图 9、10 所示。

### 3.5　仿真分析

为验证本文路径跟踪控制方法的纠偏与抗干扰能力，在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型，结构如图 11 所示，主要包括 5 个部分：路径生成模块负责提供期望跟踪路径，作为系统参考输入；运动学模型作为被控对象模型，将控制量转换为车辆实际运动状态，为贴近实际条件，模型中设置动态变化速度并加入随机扰动；路径跟踪模块基于预瞄纯追踪算法

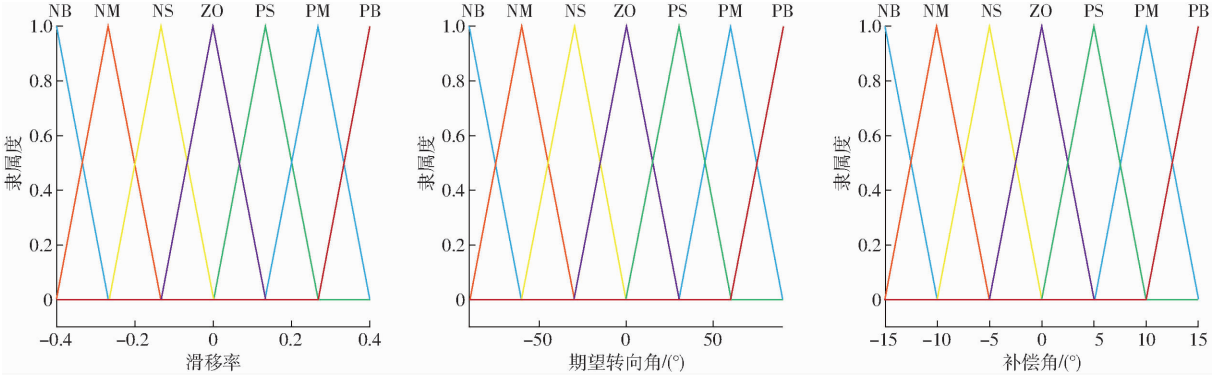


图 9　输入输出参数隶属度曲线

Fig. 9　Input/output parameter affiliate function and vague regular curved surface

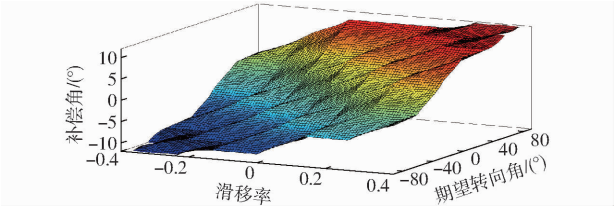


图 10　模糊规则曲面

Fig. 10　Fuzzy rule surface

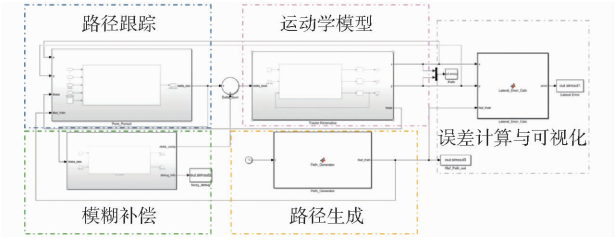


图 11　模糊补偿纯追踪仿真模型

Fig. 11　Fuzzy compensation pure trace simulation model

计算期望方向盘转角；模糊补偿模块则以模拟的滑移率和期望转向角为输入，通过模糊规则计算补偿控制量，以自适应调整非线性误差；误差计算与可视化模块则实时计算并显示横向偏差，用于性能评估与参数优化。

通过路径生成模块生成 S 形参考路径，对传统纯追踪控制进行仿真。设拖拉机初始速度为 1 m/s，基础预瞄距离为 1.8 m，令其跟踪 S 形路径，仿真时长 50 s，仿真结果如图 12 所示。在随机扰动下，拖拉机

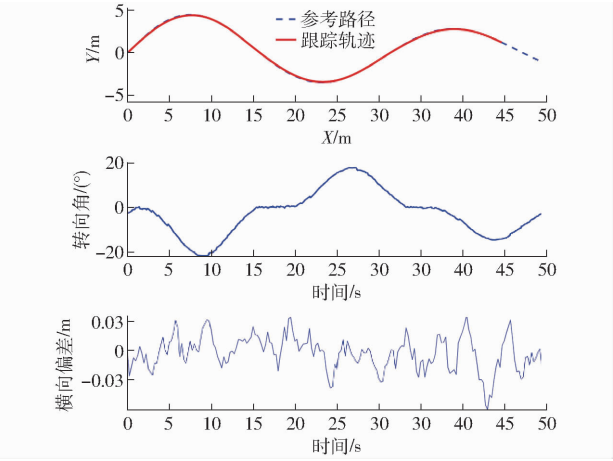


图 12　无补偿 S 形路径跟踪仿真结果

Fig. 12　Simulation results of S-shaped path tracking without compensation

表现出明显的转向偏差，期望转向角调节不足，导致直线跟踪不稳定且抗扰动能力较弱，最大绝对横向偏差达 0.061 m，平均绝对偏差为 0.032 m。

将模糊补偿控制器引入系统。在相同初始速度（1 m/s）与预瞄距离（1.8 m）条件下，令拖拉机再次跟踪 S 形路径。由图 13 可知，经补偿的控制使转向行为更平顺，转向角调节更为迅速，偏差收敛更快，直线跟踪精度显著提升。最大绝对横向偏差降至 0.028 m，平均绝对偏差减少至 0.021 m，表明其抗干扰能力与跟踪性能均得到增强。

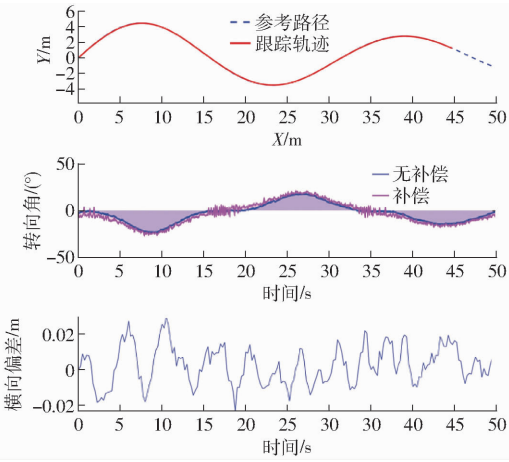


图 13 模糊补偿 S 形路径跟踪仿真结果

Fig. 13 Simulation results of S-shaped path tracking with fuzzy compensation

仿真结果表明,在随机扰动条件下,引入模糊补偿控制器后相较于传统纯追踪算法,最大绝对横向偏差降低 54.1%,平均绝对偏差减少 34.4%。这些改进验证了所提方法具有较高的控制精度、较强的抗扰动能力及整体有效性。

随后生成双扭线参考路径以评估控制算法的动态跟踪性能。采用传统纯追踪方法与所提补偿算法进行仿真,结果如图 14、15 所示。在相同初始条件下——拖拉机速度设定为 1 m/s,预瞄距离设为 1.8 m,2 种控制器均跟踪双扭路径,仿真时长为 55 s。

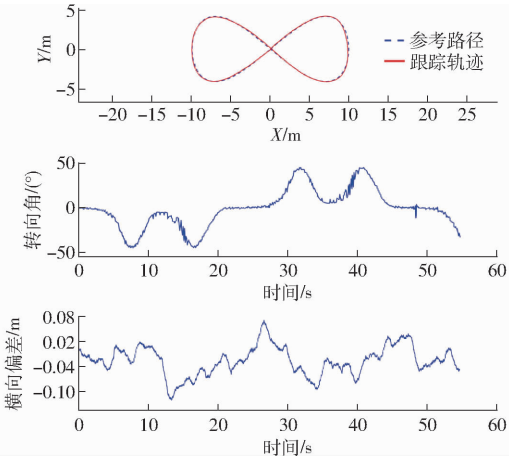


图 14 无补偿双扭路径跟踪仿真结果

Fig. 14 Simulation results of uncompensated 8-shaped path tracking

在无补偿情况下,传统方法表现出明显的跟踪偏差,最大横向偏差达 0.12 m,平均绝对偏差为 0.043 m,反映其对复杂曲线路径适应能力有限。相比之下,采用模糊转向补偿算法显著提升了跟踪精度与鲁棒性,最大横向偏差降至 0.04 m,平均绝对偏差降至 0.019 m。

试验结果表明,所提算法在随机扰动下能有效处理复杂的双扭线轨迹。相较于传统纯追踪策略,最大横向偏差降低 66.7%,平均绝对偏差减少 55.8%,验证了该算法在复杂动态路径跟踪任务中具有较高的跟踪精度与强鲁棒性。

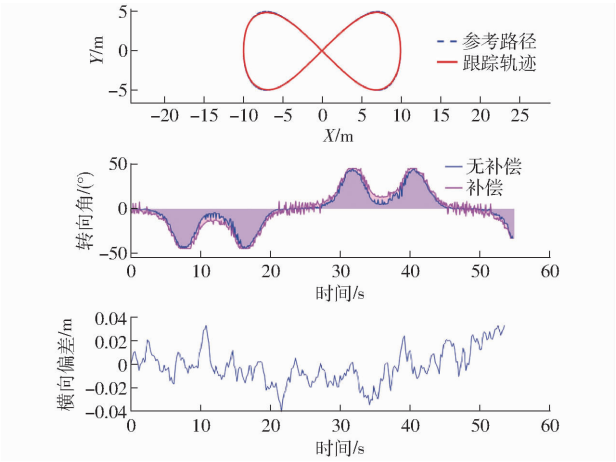


图 15 模糊补偿双扭路径跟踪仿真结果

Fig. 15 Simulation results of 8-shaped path tracking with fuzzy compensation

## 4 田间试验

### 4.1 试验材料

试验平台采用星光农机 1GLX-230 型履带自走式旋耕机(长×宽×高为 3 800 mm×2 700 mm×2 750 mm,额定功率 74.8 kW),搭载实验室自研的无人驾驶导航系统,如图 16 所示。该系统包括:1 台集成高精度定位定向模块(UB482 板卡)的显控平板,通过双天线 GNSS/RTK(Real-time kinematic,实时动态载波相位差分)技术实现厘米级定位;1 台 CES-T 驱控一体电动方向盘(额定转矩 6 N·m,集成非接触式编码器),用于接收平板指令并执行转向;以及 1 台 HWT605-CAN 型姿态传感器,用于实时获取车辆姿态与航向角信息。




图 16 履带拖拉机导航系统核心部件

Fig. 16 Diagram of core components of crawler tractor navigation system

1. 电动方向盘 2. 姿态传感器 3. 外置测量天线 4. 显示控制一体平板 5. UB482 型全系统多频高精度定向板卡

### 4.2 上线及直线跟踪性能试验

为验证所提方法在水田中对转向非线性及滑移的抗干扰性能,考察在水田中进行上线及直线追踪

作业控制精度，上线性能反映拖拉机转向控制动态响应速度，直线跟踪精度则体现算法在外界扰动下稳定性与鲁棒性。田间试验在华南农业大学增城实践教学基地开展，对传统纯追踪算法与所提方法进行测试。试验设计为：在初始横向偏差 1.0、1.5 m 条件下评估拖拉机自主上线性能，关键指标包括上线时间、上线距离与超调量等，随后在相同初始偏差条件下考察直线跟踪性能，以量化跟踪精度与抗干扰能力。

测试田块长度大约为 50 m，在其中沿田埂通过高精度 GNSS 设备采集点 $A$、$B$ 定位信息，将由点 $A$ 指向点 $B$ 的直线作为拖拉机跟踪目标路径，启动拖拉机并开启导航系统，分别将其置于 2 种初始偏差位置进行试验。拖拉机以初速度 1 m/s 上线并跟踪路径，试验过程通过显控一体屏实时记录位置信息及横向偏差，试验时设定基础前视距离为 1.8 m。不同初始位置偏差下拖拉机上线及直线跟踪结果如图 17～20 及表 2 所示。

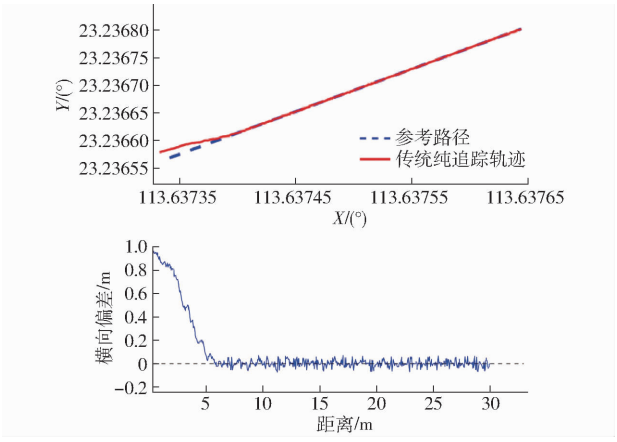


图 17　初始偏差 1 m 传统纯追踪方法上线及直线追踪试验

Fig. 17　Initial deviation 1 m path-alignment and straight-line tracking test with traditional pure tracking methods

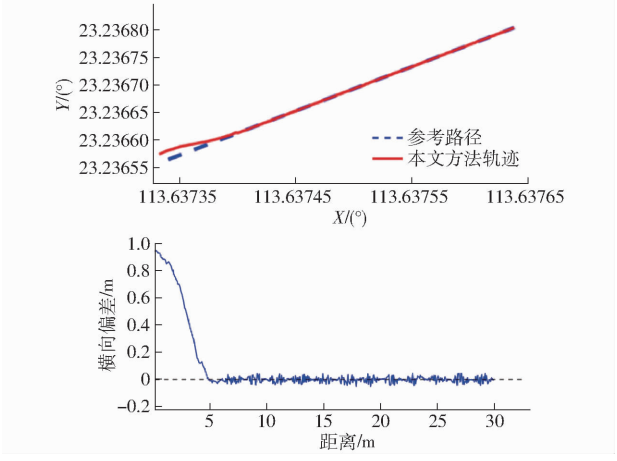


图 18　初始偏差 1 m 本文方法上线及直线追踪试验

Fig. 18　Initial deviation 1 m path-alignment and straight-line tracking test with proposed method

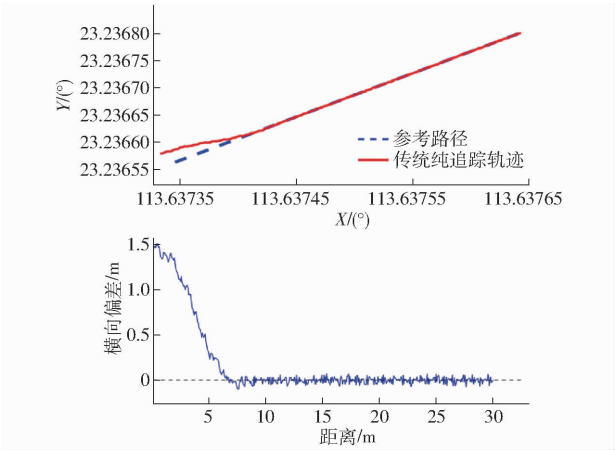


图 19　初始偏差 1.5 m 传统纯追踪方法上线及直线追踪试验

Fig. 19　Initial deviation 1.5 m path-alignment and straight-line tracking test with traditional pure tracking method

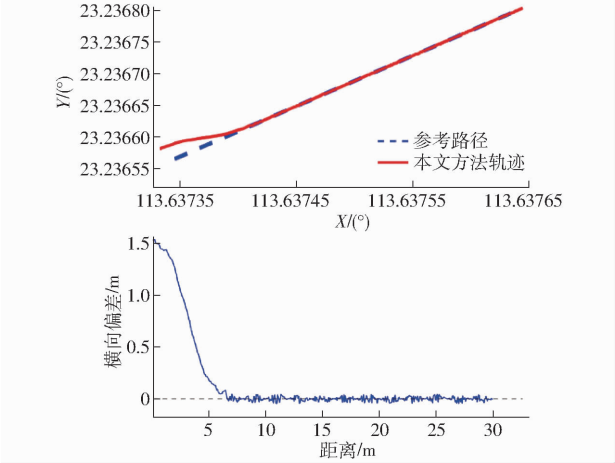


图 20　初始偏差 1.5 m 本文方法上线及直线追踪试验

Fig. 20　Initial deviation 1.5 m path-alignment and straight-line tracking test with proposed method

由图 17～20 及表 2 可知，所提出的控制方法在所有评价指标上均展现出优于传统纯跟踪方法的路径上线与直线跟踪性能。在初始偏差 1.0 m 和 1.5 m 下，路径上线时间分别减少 17.2% 和 12.3%，上线距离分别缩短 15.0% 和 13.0%。直线跟踪精度得到明显改善：平均绝对偏差分别降低 48.8% 和 54.9%，最大偏差绝对值分别减少 30.1% 和 32.4%。

传统方法在上线过程表现出转向修正相对迟缓并伴有轻微振荡，反映在复杂水田环境中抗干扰能力较弱、控制精度较低。相比之下，所提方法能够更平滑、更快速地收敛至目标路径，验证了该方法具有更强的抗干扰能力，可有效补偿转向角误差，并在路径跟踪中展现出更高的整体鲁棒性与精度。

### 4.3　水田作业试验

选取一块水田作为水旋耕自动作业试验场地，提前 2 d 放水浸泡田块，并保持 3～4 cm 水深。首先采集试验田块的边界信息，根据机具幅宽采用套圈作业规划作业路径共 10 行，地头地尾处均预留安全

表 2 不同初始偏差下上线及直线追踪性能统计

Tab. 2 Statistics of path-alignment and straight-line tracking performance under different initial deviations

| 初始偏差/m | 上线时间/s | | 上线距离/m | | 最大超调量/m | | 平均绝对偏差/m | | 最大偏差绝对值/m | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 纯追踪 | 本文方法 | 纯追踪 | 本文方法 | 纯追踪 | 本文方法 | 纯追踪 | 本文方法 | 纯追踪 | 本文方法 |
| 1.0 | 6.4 | 5.3 | 6.13 | 5.21 | 0.054 | 0.042 | 0.041 | 0.021 | 0.073 | 0.051 |
| 1.5 | 7.3 | 6.4 | 6.91 | 6.01 | 0.057 | 0.040 | 0.051 | 0.023 | 0.068 | 0.046 |

转向距离,设置基本控制参数前视距离为 1.8 m,将拖拉机在起点处对行,使位置偏差在 0.5 m 以内,航向偏差在 15°以内。开始自动导航作业,由显控一体屏记录自动作业定位数据。直线段为作业路径,曲线段为转弯路径,拖拉机直线作业完成后进入转弯路段,完成掉头动作后进入下一作业行作业,如此往复,在作业全部完成后于终点处停止。拖拉机水田旋耕作业场景如图 21 所示,自动作业行驶轨迹如图 22 所示,作业行跟踪性能如表 3 所示。



图 21 水田旋耕作业

Fig. 21 Rotary tillage operation in paddy field

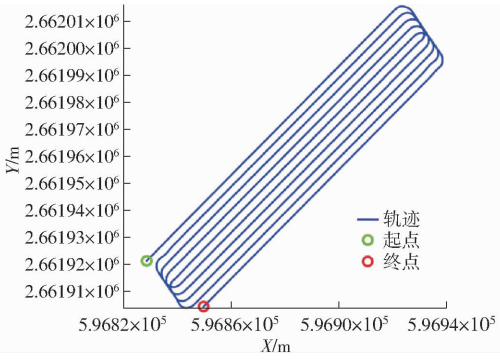


图 22 全田旋耕作业路径跟踪轨迹

Fig. 22 Track tracking diagram of whole field rotary tillage operation

表 3 作业行跟踪性能

Tab. 3 Operation row tracking performance

| 作业行 | 最大绝对误差/m | 平均绝对偏差/m | 误差在 ±0.05 m 内所占比例/% |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.062 | 0.031 | 96.88 |
| 2 | 0.057 | 0.024 | 97.52 |
| 3 | 0.068 | 0.027 | 96.43 |
| 4 | 0.052 | 0.021 | 98.63 |
| 5 | 0.056 | 0.020 | 97.21 |
| 平均值 | 0.059 | 0.025 | 97.33 |

由图 22 及表 3 可知,模糊补偿预瞄纯追踪算法在水田旋耕作业中展现出较好的路径跟踪性能,拖拉机行驶平稳且转向灵敏。该算法平均绝对偏差为 0.025 m,最大偏差仅为 0.059 m,均显著低于农业机械作业允许误差范围。97.33% 跟踪偏差被严格控制在 ±0.05 m 阈值范围内,充分体现了较高的控制精度。连续作业行间性能波动较小(平均绝对偏差为 0.020 ~ 0.031 m),证明了算法在泥泞不平水田环境中具有优异的稳定性和抗干扰能力。

在复杂作业环境下实现高精度、高稳定性与强鲁棒性,验证了该控制算法在实际自动驾驶应用的有效性。结果表明,所提方法能够有效补偿车辆转向系统固有非线性特性,并显著抑制复杂田间条件下引起的各类干扰。

综上所述,该算法展现出精度高、稳定性强、适应性优的先进控制性能,满足水田环境农业机械自动导航作业要求。

## 5 结论

(1)提出了一种用于水田环境的履带拖拉机路径跟踪控制方法。通过集成转向系统参数辨识、中位修正、自适应预瞄纯追踪算法,以及基于实时侧滑估计的模糊补偿控制器,有效应对差速转向系统的非线性与履带滑移干扰。

(2)建立了履带拖拉机运动学模型,通过参数辨识得到了转向控制参数与转向半径的线性关系,并提出了中位修正方法,提升了直线跟踪稳定性。

(3)设计了以滑移率和期望转向角为输入、以补偿转角为输出的模糊控制器,用以在线补偿由侧滑和转向系统非线性引起的跟踪误差。

(4)仿真与田间试验结果表明,该方法能显著抑制水田环境下轨迹偏差。在 S 形与双扭路径跟踪中,控制精度与抗干扰能力均优于传统纯追踪算法。田间旋耕作业测试显示,作业行平均最大横向偏差为 0.059 m,平均绝对偏差为 0.025 m,满足水田自动化作业的精度要求。有效提升了履带拖拉机在水田复杂工况下路径跟踪精度、稳定性和鲁棒性。

## 参 考 文 献


[1] 关卓怀. 履带式水稻联合收获机辅助导航系统关键技术研究[D]. 武汉:华中农业大学,2020.
GUAN Zhuohuai. The key technology of auxiliary navigation system for crawler rice combine harvester[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University,2020. (in Chinese)

[2] 罗锡文,胡炼,廖娟,等. 水稻无人化智慧农场探索与实践[J]. 农业机械学报,2025,56(10):277 - 290.
LUO Xiwen,HU Lian, LIAO Juan, et al. Exploration and practice of unmanned smart rice farms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(10):277 - 290. (in Chinese)

[3] 王伟康. 基于 GNSS 的双电机履带式水稻收获机底盘自动导航系统设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
WANG Weikang. Design and test of a GNSS-based automatic navigation system for a dual-motor crawler-type rice harvester chassis[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University,2022. (in Chinese)

[4] TANG Z, REN H, LI X, et al. Structure design and bearing capacity analysis for crawler chassis of rice combine harvester[J]. Complexity, 2020, 7610767: 15.

[5] 罗锡文,谷秀艳,胡炼,等. 大田无人化智慧农场农田边界识别技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(2):1 - 18.
LUO Xiwen, GU Xiuyan, HU Lian, et al. Research status and outlook of farmland boundary recognition technology in large-scale unmanned smart farms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(2):1 - 18. (in Chinese)

[6] 何杰,曾鸿禧,李明锦,等. 基于驱动轮横向侧偏补偿的自动导航拖拉机改进纯追踪路径跟踪控制方法[J]. 农业机械学报,2025,56(2):28 - 37.
HE Jie, ZENG Hongxi, LI Mingjin, et al. Improved pure pursuit path tracking control method for automatic navigation tractor based on drive wheel lateral deviation compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2):28 - 37. (in Chinese)

[7] 何杰, 刘善琪, 满忠贤, 等. 基于全状态反馈控制的农机自动驾驶曲线路径跟踪方法[J]. 农业机械学报,2025,56(2):145 - 154.
HE Jie, LIU Shanqi, MAN Zhongxian, et al. Curve path tracking control of agricultural machinery automatic driving based on full state feedback control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(2):145 - 154. (in Chinese)

[8] 贺静, 何杰, 罗锡文, 等. 基于多传感器融合的水稻行识别与跟踪导航研究[J]. 农业机械学报,2022,53(3):18 - 26,137.
HE Jing, HE Jie, LUO Xiwen, et al. Rice row recognition and navigation control based on multi-sensor fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):18 - 26,137. (in Chinese)

[9] 赵状状, 张国忠, 罗承铭, 等. 考虑滑移滑转的双电机履带底盘路径跟踪算法[J]. 农业工程学报,2024,40(12):46 - 54.
ZHAO Zhuangzhuang, ZHANG Guozhong, LUO Chengming, et al. Path tracking algorithm of the dual motor tracked chassis considering skid and slip[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(12): 46 - 54. (in Chinese)

[10] MARIA L C. Data driven control and slip estimation for agricultural tracked vehicles[J]. Franklin Open, 2023,5: 100048.

[11] MA Z H, YIN C, DU X Q, et al. Rice row tracking control of crawler tractor based on the satellite and visual integrated navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022,197:106935.

[12] DIMITRIOS K,OLIVIER S,VICENTE M, et al. Gain-scheduled steering control for autonomous vehicles[J]. IET Control Theory & Applications,2021, 14(20): 3451 - 3460.

[13] YANG Y, LI Y, WEN X, et al. An optimal goal point determination algorithm for automatic navigation of agricultural machinery: improving the tracking accuracy of the pure pursuit algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022,194: 106760.

[14] DAI Y, XUE C, SU Q. An integrated dynamic model and optimized fuzzy controller for path tracking of deep-sea mining vehicle[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021,9(3): 249.

[15] ZHU G, HONG W. Efficient nonlinear model predictive path tracking control for autonomous vehicle: investigating the effects of vehicle dynamics stiffness[J]. Machines, 2024,12(10): 742.

[16] GUAN Z, LI Y, MU S, et al. Tracing algorithm and control strategy for crawler rice combine harvester auxiliary navigation system[J]. Biosystems Engineering, 2021, 211: 50 - 62.

[17] 何杰, 满忠贤, 胡炼, 等. 履带式花生联合收获机路径跟踪控制方法与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(1):9 - 17.
HE Jie, MAN Zhongxian, HU Lian, et al. Path tracking control method and experiments for the crawler-mounted peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 9 - 17. (in Chinese)

[18] LI S, ZHANG M, CAO R, et al. Development of the automatic navigation system for combine harvester based on GNSS[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021,14(5): 163 - 171.

[19] LIU W, GUO R, ZHAO J. Adaptive sliding mode predictive control for path tracking of wheeled agricultural vehicles[J]. Machines, 2025,13(2): 157.

[20] ZHANG Y, LIU K, GAO F, et al. Research on path planning and path tracking control of autonomous vehicles based on improved APF and SMC[J]. Sensors, 2023,23(18): 7918.

[21] 赵润茂,丁帅奇,何杰,等. 履带式除草机路径跟踪误差补偿改进型 MPC 控制方法[J]. 农业机械学报,2025,56(9):326 - 334,354.
ZHAO Runmao, DING Shuaiqi, HE Jie, et al. Error compensation improved MPC track-laying weeding machine path tracking control method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(9):326 - 334,354. (in Chinese)

[22] 刘环宇,邹顺,唐嘉城,等. 基于参数预调型超螺旋滑模控制的履带农用底盘路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报,2025,56(2):136 - 144.
LIU Huanyu, ZOU Shun, TANG Jiacheng, et al. Path tracking control algorithm for tracked agricultural chassis based on

parameter-pre-tuned super-twisting sliding mode control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(2):136 - 144. (in Chinese)
[23] 胡子谦. 基于北斗定位的联合收获机自主导航技术研究[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
HU Ziqian. Research on autonomous navigation technology of combine harvester based on Beidou positioning[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2022. (in Chinese)
[24] 张月新. 智能收获机的非线性运动控制方法研究[D]. 南京:东南大学,2021.
ZHANG Yuexin. Research on nonlinear motion control method for intelligent harvester[D]. Nanjing: Southeastern University, 2021. (in Chinese)
[25] 贾伟健, 刘西侠, 王可, 等. 基于 MPC 的无人履带车辆轨迹跟踪方法研究[J]. 计算机仿真,2024,41(5):429 - 435.
JIA Weijian, LIU Xixia, WANG Ke, et al. Research on trajectory tracking method of unmanned tracked vehicle based on MPC [J]. Computer Simulation,2024,41(5):429 - 435. (in Chinese)
[26] 吴洋,王聪,董国新,等. 考虑滑移的无人履带车自适应路径跟踪控制策略[J]. 机械工程学报,2024,60(24):211 - 225.
WU Yang, WANG Cong, DONG Guoxin, et al. Slip-aware adaptive trajectory tracking control strategy for autonomous tracked vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024,60(24):211 - 225. (in Chinese)
[27] WANG X, WANG Y, SUN Q, et al. Adaptive robust control of unmanned tracked vehicles for trajectory tracking based on constraint modeling and analysis[J]. Nonlinear Dynamics,2024,112: 9117 - 9135.
[28] 王法安, 杨全合, 张兆国, 等. 基于 ICR 的履带车辆路径跟踪与转向控制算法研究[J]. 农业机械学报,2024,55(1): 386 - 395,425.
WANG Faan, YANG Quanhe, ZHANG Zhaoguo, et al. Path tracking and turning control algorithm of tracked vehicle based on ICR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):386 - 395,425. (in Chinese)
[29] 李睿, 项昌乐, 王超, 等. 自动驾驶履带车辆鲁棒自适应轨迹跟踪控制方法[J]. 兵工学报,2021,42(6):1128 - 1137.
LI Rui, XIANG Changle, WANG Chao, et al. Robust adaptive trajectory tracking control approach for autonomous tracked vehicles[J]. Acta Armamentarii,2021,42(6):1128 - 1137. (in Chinese)
[30] 刘辉, 王振辉, 陈洪月, 等. 基于虚拟前轮反馈控制算法的履带车轨迹跟踪方案研究[J]. 机械设计,2024,41(1): 117 - 124.
LIU Hui, WANG Zhenhui, CHEN Hongyue, et al. Research on trajectory-tracking scheme for tracked vehicles based on virtual front-wheel feedback control algorithm[J]. Journal of Machine Design,2024,41(1):117 - 124. (in Chinese)
[31] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的拖拉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)

(上接第 98 页)

[11] 熊保星,甘文洋,陈铭治,等. 基于模糊线性自抗扰的水下机器人定深控制[J]. 控制工程,2026,33(1):161 - 169.
XIONG Baoxing, GAN Wenyang, CHEN Mingzhi, et al. Depth control of underwater vehicles based on fuzzy linear active disturbance rejection[J]. Control Engineering of China, 2026, 33(1): 161 - 169. (in Chinese)
[12] WANG T, NIE Y, WANG S, et al. Depth control of ROV using the improved LADRC based on nutcracker optimization algorithm[J]. Ocean Engineering,2024, 309(1):118370.
[13] BENAZOUZ R, CHEMORI A, CREUZE V. A novel intelligent RISE feedback control of autonomous tethered underwater vehicles: design & real-time experiments[J]. Ocean Engineering,2024,300(2):117470.
[14] CARLUCHO I,PAULA D M,VILLAR S, et al. Incremental Q-learning strategy for adaptive PID control of mobile robots[J]. Expert Systems With Applications,2017,80:183 - 199.
[15] CARLUCHO I, PAULA D M, ACOSTA G G. Double Q - PID algorithm for mobile robot control[J]. Expert Systems With Applications,2019,137:292 - 307.
[16] 高强,李旭,吉月辉,等. 基于 Q 学习的高超声速飞行器自抗扰控制研究[J]. 控制工程,2024,31(4):577 - 582.
GAO Qiang, LI Xu, JI Yuehui, et al. Research on active disturbance rejection control of hypersonic vehicle based on Q-learning[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(4): 577 - 582. (in Chinese)
[17] GU Yanping, ZHANG Hao, XU Tao, et al. Temperature regulation of optical machine frame based onreinforcement learning active disturbance rejection control[J/OL]. Journal of Southeast University(English Edition),1 - 13[2025 - 12 - 08]. https://link.cnki.net/urlid/32.1325.N.20251112.1452.002.
[18] HASIB A S, GULZAR M M, OISHY R S, et al. An investigation of innovative strategies in underwater soft robotics[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal,2025,70:102123.
[19] 袁东,马晓军,曾庆含,等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究[J]. 控制理论与应用,2013,30(12): 1630 - 1640.
YUAN Dong, MA Xiaojun, ZENG Qinghan, et al. Research on frequency-band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control for second-order systems[J]. Control Theory & Applications,2013,30(12):1630 - 1640. (in Chinese)
[20] GANDHI J, NARMAWALA Z. Q-Learning and double Q-Learning based routing in opportunistic networks[J]. International Journal of Networked and Distributed Computing,2026,14(1):13.
[21] 周奇,柳丹,席磊,等. 基于超松弛双 Q 学习的源荷储协同频率稳定算法研究[J]. 中国电机工程学报,2024,44(4):1419 - 1429.
ZHOU Qi, LIU Dan, XI Lei, et al. Research on source load storage cooperative frequency stabilization algorithm based on super relaxed double Q learning[J]. Proceedings of the CSEE,2024, 44(4): 1419 - 1429. (in Chinese)