doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.013

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

刘环宇　邹　顺　唐嘉城　韩志航　于　浩　王　霜
(西华大学现代农业装备研究院, 成都 610039)

摘要: 针对传统滑模控制在农机路径跟踪中易出现高频抖振、参数调整难等问题,以履带农用底盘为研究对象,构建运动学模型及偏差动态方程,设计超螺旋滑模控制律实现路径跟踪控制,引入参数预调控制器,采用有限内存布罗伊登算法优化超螺旋滑模控制器参数,并以李雅普诺夫稳定性分析为依据,验证所设计的超螺旋滑模控制器路径跟踪稳定性。仿真验证结果表明,当履带农用底盘作业速度为 1.0 m/s 时,跟踪最大绝对误差为 0.063 m,绝对平均误差为 0.013 m,相较于线性 PID 控制器与传统滑模控制,最大偏移量分别降低 61.3%、62.1%,绝对平均误差分别降低 89.2%、75.4%。实地试验结果表明,当速度为 0.5、1.0 m/s 时,参数预调型超螺旋滑模控制算法绝对平均偏差相较于传统滑模控制算法分别降低 69.2%、50%,航向偏差分别降低 61.1%、40%,有效减少高频抖振现象。

关键词: 履带式农用底盘; 路径跟踪; 超螺旋滑模控制; 参数预调控制器
中图分类号: S229　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0136-09　　**OSID**:

Path Tracking Control Algorithm for Tracked Agricultural Chassis Based on Parameter-pre-tuned Super-twisting Sliding Mode Control

LIU Huanyu　ZOU Shun　TANG Jiacheng　HAN Zhihang　YU Hao　WANG Shuang
(*Institute of Modern Agricultural Equipment*, *Xihua University*, *Chengdu* 610039, *China*)

Abstract: To address the challenges of high-frequency oscillations and difficulty in parameter tuning typically encountered in traditional sliding mode control (SC) for path tracking in agricultural machinery, a novel control approach was proposed. The research focused on a tracked agricultural chassis, where a kinematic model and deviation dynamic equations were firstly developed. A super-twisting sliding mode control (TSC) law was then designed to ensure accurate path tracking. In addition, a parameter pre-tuning controller was introduced to facilitate the fine-tuning of control parameters. The finite memory Broyden algorithm was employed to optimize the parameters of the super-twisting sliding mode controller, enhancing its robustness. The stability of the path tracking system was verified by using Lyapunov stability analysis, ensuring that the proposed control method maintained stability under various operational conditions. Simulation results demonstrated that when the tracked agricultural chassis operated at a speed of 1.0 m/s, the maximum absolute tracking error was reduced to 0.063 m, and the average absolute error was minimized to 0.013 m. When compared with traditional linear PID control and conventional sliding mode control, the maximum deviation was reduced by 61.3% and 62.1%, respectively. Furthermore, the absolute average error was decreased by 89.2% and 75.4%, respectively. These results indicated a significant improvement in tracking accuracy with the proposed method. Field test results further validated the effectiveness of the control algorithm. When the operational speeds were 0.5 m/s and 1.0 m/s, the absolute average error of the parameter pre-tuned super-twisting sliding mode control algorithm was reduced by 69.2% and 50%, respectively, compared with that of the traditional sliding mode control. Additionally, the heading error was reduced by 61.1% and 40%, respectively, contributing to a noticeable reduction in high-frequency oscillations during operation. Overall, the proposed TSC strategy

收稿日期: 2024-11-22　修回日期: 2024-12-23
基金项目: 四川省农业农村厅揭榜挂帅项目(232206-1)和四川省青年基金项目(25QNJJ4155)
作者简介: 刘环宇(1990—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: 1220220044@mail.xhu.edu.cn
通信作者: 王霜(1974—),男,教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: wsh@mail.xhu.edu.cn

significantly enhanced the path tracking performance of agricultural machinery, providing a more stable and reliable control method compared with existing approaches. The method not only improved tracking accuracy but also effectively mitigated high-frequency oscillations, making it suitable for real-world applications in agricultural vehicle guidance systems.

Key words: tracked agricultural chassis; path tracking; super-twisting sliding mode control; pre-tuning controller

0　引言

农机装备路径跟踪系统是无人驾驶农机的关键组成部分,结合全球导航卫星系统和传感器技术,使农机装备能够精准地沿预定路径行驶。路径跟踪系统依赖控制参数的精准选择可实现理想的路径跟踪效果,确保农机装备能够沿预定轨迹精准作业,有效减少作业误差并提高作业效率[1-3]。路径跟踪系统精度与稳定性依赖于路径跟踪控制方法的选择[4]。目前常用的跟踪算法包括纯追踪算法[5]、PID 控制[6]、模糊控制[7]、模型预测控制[8]和滑模控制(Sliding mode control, SC)[9]等。

滑模控制是一种非线性控制策略,通过设计滑模面使系统状态滑动并趋向目标,其核心在于保持系统状态在滑模面上运动,滑模面的参数调整决定系统误差[10]。然而,在路径跟踪系统中,传统滑模控制的高频切换逼近滑模面易引发高频抖振,导致执行器磨损,影响系统稳定性和精度,需进一步优化控制律以减小跟踪误差[11]。对此,文献[12]提出了一种基于农业轮式移动机器人反演自适应滑模控制策略,采用反演控制方法设计运动学控制律和自适应滑模动力学控制律,实现农业轮式移动机器人平稳的运行,但该控制策略需在不同的控制模态间切换,会导致运行过程中出现抖振现象。文献[13]提出优化的反步控制器作为运动控制器,收集车辆的线速度和角速度,利用滑模控制器计算扭矩,应用优化技术来自动调整反步控制器的增益,这样可以在不增加计算负担的情况下提高控制性能,消除实际姿态与参考轨迹之间的姿态偏差,但该方法的实施需要实时获取车辆的状态,计算量较高。文献[14]提出了一种无人农用车辆路径跟踪的新型自适应滑模控制,以前视距离的横向偏移为状态变量,设计 SC 保证闭环错误动态的渐进收敛,通过滑模观测器技术实时估计 SC 中转弯刚度的不确定边界,以自适应调节转弯刚度,达到无需提前获取道路信息完成控制器设计。文献[15]将自适应二阶滑模控制与扰动观测技术相结合,设计出二阶滑模控制农机路径跟踪控制算法,与鲁棒精确微分器结合,在一定程度上简化系统控制器的设计过程,为农机在复杂工况下自动驾驶提供了可靠的技术支持,但二阶滑模控制对系统参数的选择较为敏感,不同参数设置可能导致系统性能的显著变化。

超螺旋滑模控制(Super-twisting sliding mode control, TSC)算法是一种先进的非线性控制策略,以连续项滑模面代替传统滑模控制中的非连续项滑模面,确保系统可以在滑模面上平滑过渡,从而有效避免了传统滑模控制中因频繁切换导致的抖振现象[16-18]。为克服现有滑模控制方法存在的局限性,尤其是高频抖振和参数敏感性问题,超螺旋滑模控制算法因其独特的连续项滑模面设计,成为了减少抖振、提升系统稳定性的优选方案[19-20]。

基于此,本文引入超螺旋滑模控制作为控制方案,以期实现履带农用底盘路径精准跟踪。设计滑模面与滑模控制律,进行李雅普诺夫稳定性证明,设计参数预调控制器,在路径跟踪前对超螺旋滑模控制器进行参数预调,以适应当前操作需求和车辆动态特性,并通过仿真试验和田间实地试验,对本文方法进行验证。

1　理论模型构建

1.1　农机运动学模型构建

履带农用底盘的运动学模型描述了其位置和速度随时间的变化,广泛用于路径跟踪。为准确描述农用底盘运动,引入两个坐标系:大地坐标系 XOY 和车身坐标系 xoy。大地坐标系用于描述农机在地面上的位置,X 轴向东、Y 轴向北。车身坐标系固定在车辆上,x 轴向前、y 轴向左,主要用于描述车辆的相对运动状态。在大地坐标系 XOY 中建立履带农用底盘的运动学模型,如图 1 所示。

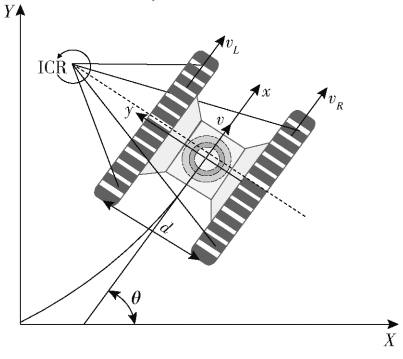

图 1　履带农用底盘运动学模型

Fig. 1　Tracked agricultural machinery kinematic model

根据履带农用底盘运动学方程[21]，可以推导出履带农用底盘在 X 轴和 Y 轴上的速度分量以及航向角速度，即

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\theta}\end{bmatrix}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}\cos\theta & \cos\theta\\ \sin\theta & \sin\theta\\ \frac{2}{d} & \frac{-2}{d}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_R\\ v_L\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 $\dot{x}$——农机前进速度 v 在 X 轴上的分量，m/s

$\dot{y}$——农机前进速度 v 在 Y 轴上的分量，m/s

$\dot{\theta}$——航向角速度，rad/s

d——履带间距，m

v_L、v_R——左、右履带行驶速度，m/s

此外，v 表示在坐标系下履带农用底盘线速度，定义为左、右履带速度平均值，计算式为

$$v=\frac{v_R+v_L}{2} \tag{2}$$

根据式(1)可得履带农用底盘速度 v、角速度 ω、转弯半径 R 与左右侧履带速度 v_L、v_R 之间的关系，即

$$\begin{bmatrix}v\\ \omega\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{2} & \frac{1}{2}\\ \frac{1}{d} & -\frac{1}{d}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_R\\ v_L\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix}v_R\\ v_L\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & \frac{d}{2}\\ 1 & -\frac{d}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ \omega\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$R=\frac{v}{\omega}=\frac{d}{2}\frac{v_R+v_L}{v_R-v_L} \tag{5}$$

将式(4)代入式(1)可得履带农用底盘平面运动状态方程为

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\theta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta & 0\\ \sin\theta & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ \omega\end{bmatrix} \tag{6}$$

1.2 偏差模型

为直接体现横向偏差和航向偏差与其他变量的关系[22]，建立路径跟踪模型，如图 2 所示，将横向偏差 L_e 和航向偏差 θ_e 表示为

$$\begin{cases}L_e=-(x-x_d)\sin\theta_d+(y-y_d)\cos\theta_d\\ \theta_e=\theta-\theta_d\end{cases} \tag{7}$$

式中 $(x_d,\ y_d,\ \theta_d)$——参考路径任意点位置信息

θ——航向角

假设农机速度 v 相对较小，参考路径速度可以近似忽略，对上述两个误差进行微分处理，得到跟踪误差和航向偏差动态方程[23]为

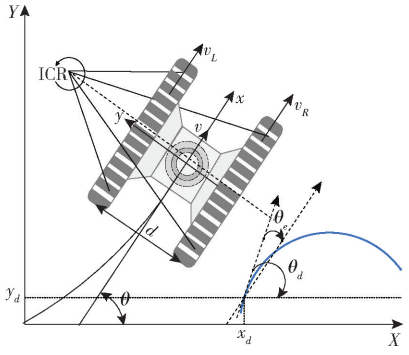

图 2 路径跟踪模型示意图

Fig. 2 Path tracking model diagram

$$\begin{cases}\dot{L}_e=\dfrac{\mathrm{d}[-(x-x_d)\sin\theta_d+(y-y_d)\cos\theta_d]}{\mathrm{d}t}\\ \dot{\theta}_e=\dot{\theta}-\dot{\theta}_d\end{cases} \tag{8}$$

式中 $\dot{L}_e$——跟踪误差随时间变化速率，m/s

$\dot{\theta}_e$——航向偏差随时间变化速率，rad/s

$\dot{\theta}_d$——目标路径上切线角随时间变化速率，rad/s

将式(8)代入式(7)可得履带农机横向偏差和航向偏差动态方程为

$$\begin{cases}\dot{L}_e=v\sin\theta_e\\ \dot{\theta}_e=\dfrac{v_R-v_L}{d}-vc_t\end{cases} \tag{9}$$

式中 c_t——参考路径曲率

2 控制器设计与稳定性证明

2.1 超螺旋滑模控制器设计

针对智能农机装备在路径跟踪中存在参数调整难及参考路径曲率变化的干扰问题，采用传统滑模控制算法，在系统到达滑模面后，系统与控制参数及扰动干扰下出现抖振现象，超螺旋滑模算法可有效解决抖振现象，提高农机装备路径跟踪精度，因此本文采用超螺旋滑模算法。

超螺旋滑模控制器滑模面与系统误差相关，根据式(9)设计控制器滑模面。将偏差模型转换成具有标准柯西形式的表达式[24]。首先引入变量 s_1、s_2、u，设

$$\begin{cases}s_1=L_e\\ s_2=v\sin\theta_e\\ u=v_R-v_L\end{cases} \tag{10}$$

更新后柯西形式的偏差运动学模型公式为

$$\begin{cases}\dot{s}_1=s_2\\ \dot{s}_2=F+Gu\end{cases} \tag{11}$$

其中
$$G=\frac{v\cos\theta_e}{d}$$
$$F=-v^2c_t\cos\theta_e$$

设计线性滑模面，公式为
$$\chi=as_1+s_2 \tag{12}$$

式中　a——基准参数，决定滑模面对 L_e 的基本增益

对滑模面进行求导可得
$$\dot{\chi}=F+as_2+Gu \tag{13}$$

由此控制律可以表示为
$$u=-\frac{1}{G}\left(F+as_2+\lambda_1\chi^{\frac{1}{2}}+\lambda_2\int_0^t\operatorname{sign}(\chi(t))\,\mathrm{d}t\right) \tag{14}$$

式中，λ_1、λ_2 均为正数。

2.2　李雅普诺夫稳定性证明

为确保控制器设计的稳定性和有效性，在设计超螺旋滑模控制器时，通过李雅普诺夫稳定性理论进行严格的稳定性证明[25]。

首先，选取常见的李雅普诺夫函数，即
$$V(s_1,s_2)=\frac{1}{2}s_1^2+\frac{1}{2}s_2^2 \tag{15}$$

该函数为正定函数，在 $s_1=0$ 和 $s_2=0$ 时达到最小值 0。计算李雅普诺夫函数时间导数，对 V 求导，得到
$$\dot{V}=s_1\dot{s}_1+s_2\dot{s}_2 \tag{16}$$

根据已知误差模型，即
$$\begin{cases}\dot{s}_1=s_2\\ \dot{s}_2=F+Gu\end{cases} \tag{17}$$

将 $\dot{s}_1$ 和 $\dot{s}_2$ 代入 $\dot{V}$，得到
$$\dot{V}=s_1s_2+s_2F+s_2Gu \tag{18}$$

代入式(14)，控制律为
$$u=-\frac{1}{G}\left(F+as_2+\lambda_1\chi^{\frac{1}{2}}+\lambda_2\int_0^t\operatorname{sign}(\chi(t))\,\mathrm{d}t\right) \tag{19}$$

将 u 代入式(16)得到
$$\dot{V}=s_1s_2+s_2F-s_2\left(F+as_2+\lambda_1\chi^{\frac{1}{2}}+\lambda_2\int_0^t\operatorname{sign}(\chi(t))\,\mathrm{d}t\right) \tag{20}$$

将相应项抵消后，得到
$$\dot{V}=s_1s_2-as_2^2-\lambda_1s_2\chi^{\frac{1}{2}}-\lambda_2s_2\int_0^t\operatorname{sign}(\chi(t))\,\mathrm{d}t \tag{21}$$

为确保 $\dot{V}$ 为负定，需设计参数 λ_1、λ_2，使得
$$s_1s_2-\lambda_1s_2\chi^{\frac{1}{2}}-\lambda_2s_2\int_0^t\operatorname{sign}(\chi(t))\,\mathrm{d}t\leqslant 0 \tag{22}$$

选择合适的参数，如果 λ_1、λ_2 足够大，便可以确保 $\dot{V}$ 负定，从而保证系统的渐进稳定性。

2.3　参数预调控制器设计

为实现超螺旋滑模控制器对不同路径的高效跟踪，设计一种参数预调控制器[26]。参数预调控制器在实际路径跟踪前，利用内存需求低和收敛速度快的有限内存布罗伊登算法(L－BFGS－B)，对超螺旋滑模控制器参数 a、λ_1、λ_2 进行预调[27]，核心是通过更精准的控制参数使系统对参考路径进行预跟踪，得到更好的跟踪效果。在满足李雅普诺夫稳定性证明条件下，持续搜索和调整，直至跟踪后平均误差达到设定值[28]。

设 $\boldsymbol{P}=(a,\lambda_1,\lambda_2)$，设计目标优化函数 $f(\boldsymbol{P})$ 为
$$\begin{cases}\min f(\boldsymbol{P})=\min\left(\dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{i=1}^{N}L_e(\boldsymbol{P})\right)\\ l_{bi}\leqslant P_i\leqslant u_{bi}\end{cases} \tag{23}$$

式中　N——仿真采样时间步数

$\boldsymbol{P}$——待优化参数向量

i——参数序号　　$L_e(\boldsymbol{P})$——模拟误差

l_{bi}、u_{bi}——第 i 个参数下界和上界

L－BFGS－B 算法依赖于目标函数 $f(\boldsymbol{P})$ 的梯度信息，即
$$g_k=\nabla f(\boldsymbol{P}_k) \tag{24}$$

式中　g_k——第 k 次迭代时梯度

在准牛顿方法中，通常通过近似的 Hessian 矩阵 $\boldsymbol{H}_k$ 来获得更新方向。L－BFGS－B 方法利用有限内存，只存储最近 m 次迭代的信息来近似这个矩阵。
$$\begin{cases}\boldsymbol{S}_k=\boldsymbol{P}_{k+1}-\boldsymbol{P}_k\\ \boldsymbol{Y}_k=\boldsymbol{g}_{k+1}-\boldsymbol{g}_k\end{cases} \tag{25}$$

式中　$\boldsymbol{S}_k$、$\boldsymbol{Y}_k$——信息更新

Hessian 逆矩阵更新公式为
$$\boldsymbol{H}_{k+1}^{-1}=\left(\boldsymbol{I}-\frac{\boldsymbol{S}_k\boldsymbol{Y}_k^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{Y}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_k}\right)\boldsymbol{H}_k^{-1}\left(\boldsymbol{I}-\frac{\boldsymbol{Y}_k\boldsymbol{S}_k}{\boldsymbol{Y}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_k}\right)+\frac{\boldsymbol{S}_k\boldsymbol{S}_k^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{Y}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_k} \tag{26}$$

式中　$\boldsymbol{I}$——单位矩阵

利用 Hessian 逆矩阵近似计算更新方向，即
$$\boldsymbol{L}_k=-\boldsymbol{H}_k^{-1}\boldsymbol{g}_k \tag{27}$$

在搜索方向上进行线性搜索来确定步长 α_k，使目标函数下降，更新参数为
$$\boldsymbol{P}_{k+1}=\boldsymbol{P}_k+\alpha_k\boldsymbol{L}_k \tag{28}$$

为了保证参数 $\boldsymbol{P}$ 满足边界约束 $l_{bi}\leqslant\boldsymbol{P}_i\leqslant u_{bi}$，对更新后的参数进行投影操作，即
$$\boldsymbol{P}_j^{new}=\max(l_{bi},\min(u_{bi},\boldsymbol{P}_i)) \tag{29}$$

2.4　算法流程

算法流程如图 3 所示，首先启动系统并初始化控制算法；根据任务需求生成参考路径，为后续的路

径跟踪提供依据;判断是否需要进行参数预调,若需要则进入参数预调控制器模块,对超螺旋滑模控制器进行参数预调;应用预调后的超螺旋滑模控制器进行实际路径跟踪;根据控制器的输出生成控制律,实时调整车辆的路径跟踪;更新车辆状态信息(如位置、速度等),以便下一次控制计算;判断路径跟踪任务是否完成,若跟踪任务完成,则结束任务,若跟踪任务未完成则返回超螺旋滑模控制器继续控制循环。

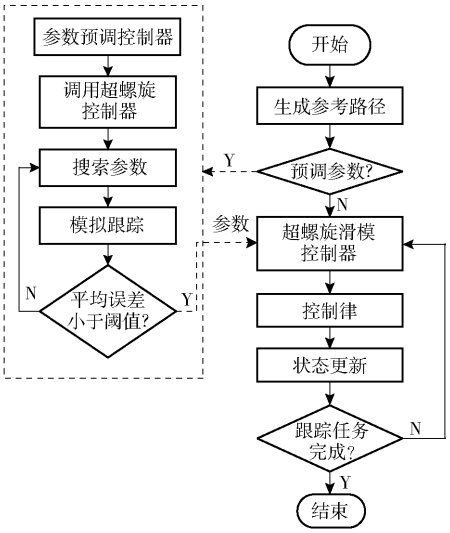

图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flowchart

3 仿真试验

以履带农用底盘作为试验平台,其轴距 L 为 1 m。使用路径规划算法生成直线路径和灯泡形转向路径,参考路径起点为左上角直线起始点,如图 4 所示,其中 Ref 为参考路径,PP 为纯追踪算法。为验证本文方法的可行性,采用对比试验,根据文献[29-30],以横向偏差和航向偏差及其波动作为评判标准。参考农机作业速度,设定速度 v 为 1 m/s。设计以 PID 算法为代表的线性控制器、传统滑模控制器为对照组。

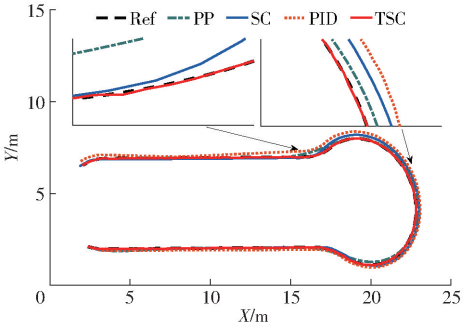

图 4 跟踪效果

Fig. 4 Tracking rendering

仿真结果对比如图 4 所示。因 TSC 通过参数预调控制器调整参数精确到小数点后 4 位,所以 TSC 算法在直线以及转向路段路径跟踪效果比 PID 算法和 SC 算法跟踪效果更加精准。由表 1(数据取绝对值)可知,PID 算法最大误差为 0.163 m,绝对平均误差为 0.121 m,标准差为 0.041 m;SC 算法最大误差为 0.166 m,绝对平均误差为 0.053 m,标准差为 0.034 m;TSC 算法绝对平均误差降至 0.013 m,最大偏移量降至 0.063 m,标准差降至 0.003 m。结果表明,TSC 算法在适应性和精度上优于 SC 算法,绝对平均误差降低约 75.4%,最大偏移量减少 0.103 m,证明 TSC 算法在农机路径跟踪具有较好的效果。

表 1 仿真误差

Tab. 1 Simulation error m

算法	最大值	最小值	平均值	标准差
PID	0.163	0.056	0.121	0.041
SC	0.166	0.002	0.053	0.034
TSC	0.063	0	0.013	0.003

为验证该算法的有效性,利用横向偏差和航向偏差作为指标进行试验。由图 5 可知,PID 控制器能逐渐减小误差,但响应较慢,对环境变化适应性差,导致跟踪效果不稳定。SC 控制器在初始阶段误差较大,随后逐渐收敛,但仍存在高幅振荡。TSC 控制器偏差波动小,维持在 -0.05 ~ 0.05 m,且快速回归零附近,表现出良好的鲁棒性和抑制振荡的能力。由图 6 可知,PID 控制器在初始阶段产生大幅波动,且中后期振荡明显,稳定性差。SC 控制器虽在初始阶段收敛较快,但振荡依然频繁,尤其在后期表现不稳定,而 TSC 控制器航向误差最小,迅速收敛并稳定在零附近,展现出优异的控制效果。

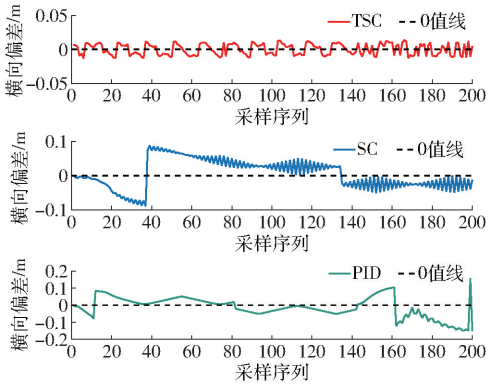

图 5 横向偏差对比

Fig. 5 Lateral deviation comparison

为进一步验证本文提出算法的稳定性和可靠性,通过误差箱式图进行分析,结果如图 7 所示。可以看出 TSC 控制器的误差范围小于其他控制器,最小值为 0,最大值仅为 0.06 m,且四分位间距为 0,中

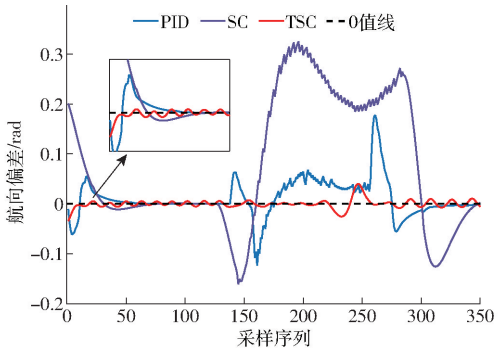

图 6　路径平滑度对比

Fig. 6　Path smoothness comparison

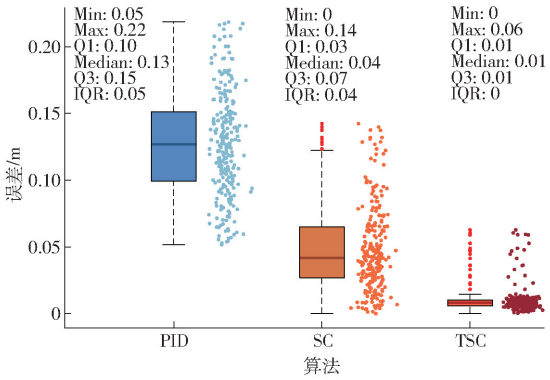

图 7　误差箱式图

Fig. 7　Error box diagram

位数为 0.01 m，误差分布高度集中和系统的高稳定性。通过对比可知，PID 控制器的误差分布较分散，误差范围为 0.05 ~ 0.22 m，中位数为 0.13 m，说明其控制精度较低且波动较大；SC 控制器误差范围比 PID 控制器小，但误差仍在 0 ~ 0.14 m 之间，且四分位间距为 0.04 m，显示出显著抖动。这进一步证明 TSC 控制器在降低误差波动、提升跟踪稳定性和控制精度方面具有显著优势。

4　实地试验

为进一步验证 TSC 控制器的有效性和实用性，以履带农用底盘为试验对象，如图 8 所示，在西华大学 2 号农田利用路径进行实地试验，路径包括直线 130 m，曲线 120 m。在速度为 0.5、1.0 m/s 条件下重复 3 次试验，选取横向误差最大的试验结果为最终结果，直接与 SC、TSC 算法运行结果比较。

如图 9、10 所示，在低速 0.5 m/s 条件下，TSC 控制器与参考路径基本重合，转弯处实现精准跟踪；而 SC 控制器虽总体上能够跟随路径，但在转弯和复杂路段出现明显偏离，无法贴合路径。在 1.0 m/s 高速条件下，TSC 控制器依然保持较高的精度和贴合度，适应性强。而 SC 控制器在高速下偏差显著增大，尤其在急转弯处偏离程度较大，跟踪精度和稳定性大幅下降。

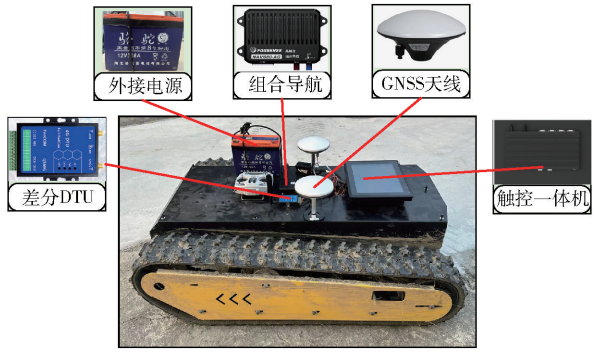

图 8　试验平台

Fig. 8　Test platform

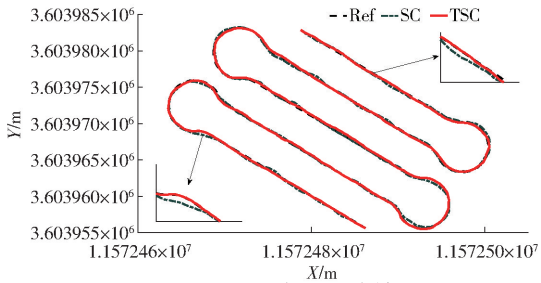

图 9　0.5 m/s 实地跟踪效果

Fig. 9　Actual tracking effect at speed of 0.5 m/s

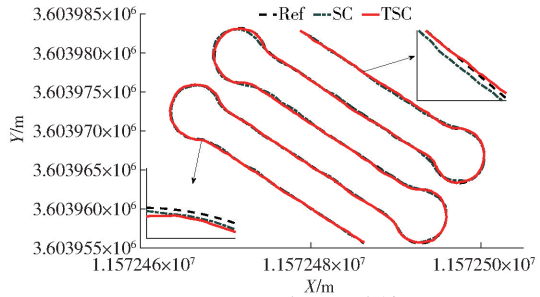

图 10　1.0 m/s 实地跟踪效果

Fig. 10　Actual tracking effect at speed of 1.0 m/s

在速度 0.5 m/s 下，由表 2 可知，SC 控制器表现出明显的高频抖振，横向偏差最大值为 0.35 m，平均偏差为 0.13 m，且标准差为 0.08 m，显示出较大的波动性。横向偏差波动如图 11 所示，TSC 控制器的横向偏差波动显著减少，抖振现象较轻，最大偏差降至 0.18 m，平均偏差仅为 0.04 m，标准差降至 0.03 m，表明 TSC 控制器能够更好地抑制抖振，保持稳定的路径跟踪效果。由表 3 可知，SC 控制器在航向偏差上波动较大，最大偏差为 0.66 rad，平均偏差为 0.18 rad，标准差为 0.13 rad，显示出明显的抖振现象，控制稳定性较差。航向偏差波动如图 12 所示，TSC 控制器尽管偶尔出现峰值，但整体航向偏差较小，最大偏差为 0.41 rad，平均偏差降至 0.07 rad，标准差也降至 0.10 rad，表现出更高的稳定性和精确性，能有效抑制抖振。因此，TSC 控制器在航向偏差控制上显著优于 SC 控制器，能提供更平稳的路径跟踪效果。

表 2 实地跟踪横向偏差

Tab. 2 Field tracking lateral error m

速度/(m·s^{-1})	算法	最大值	最小值	平均值	标准差
0.5	SC	0.35	0.01	0.13	0.08
	TSC	0.18	0.00	0.04	0.03
1.0	SC	0.48	0.00	0.12	0.09
	TSC	0.25	0.00	0.06	0.05

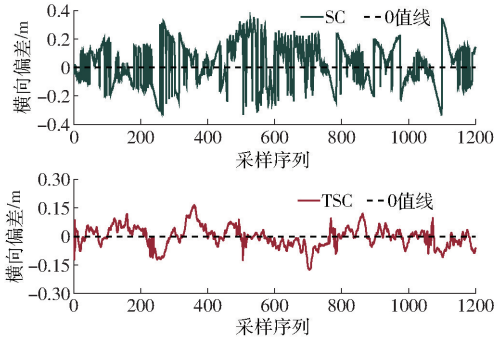

图 11 0.5 m/s 跟踪横向偏差对比

Fig. 11 Tracking lateral deviation comparison at speed of 0.5 m/s

表 3 实地跟踪航向偏差

Tab. 3 Field tracking heading error rad

速度/(m·s^{-1})	算法	最大值	最小值	平均值	标准差
0.5	SC	0.66	0.02	0.18	0.13
	TSC	0.41	0.02	0.07	0.10
1.0	SC	0.55	0.01	0.15	0.11
	TSC	0.42	0.00	0.09	0.12

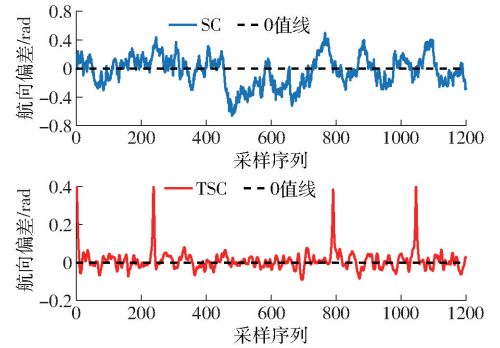

图 12 0.5 m/s 跟踪航向偏差对比

Fig. 12 Tracking heading deviation comparison at speed of 0.5 m/s

在速度 1.0 m/s 下,由表 2 可知,SC 控制器表现出较大的偏差波动和明显的抖振现象。SC 控制器横向偏差最大值为 0.48 m,平均偏差为 0.12 m,标准差为 0.09 m,在较高速度下 SC 控制器不稳定,波动较大,控制精度下降。横向偏差波动如图 13 所示,TSC 控制器的横向偏差波动显著降低,抖振现象得到有效抑制,最大偏差降至 0.25 m,平均偏差为 0.06 m,标准差仅为 0.05 m。这表明 TSC 控制器在高速下依然保持较高的稳定性和控制精度,能减少偏差波动,表现出更优异的抖振抑制能力。由表 3 可知,SC 控制器表现出较大的航向偏差波动,其最大偏差达到 0.55 rad,平均偏差为 0.15 rad,标准差为 0.11 rad,显示出显著的高频波动和较大的抖振现象,跟踪效果不稳定。航向偏差波动如图 14 所示,TSC 控制器的航向偏差总体上较小,尽管出现尖峰值,也存在抖振现象,但整体抖振程度低,最大偏差为 0.42 rad,平均偏差为 0.09 rad,标准差为 0.12 rad。TSC 控制器标准差虽比 SC 控制器标准差大 0.01 rad,但是波动幅度更小,表现出更好的稳定性和对航向偏差的控制能力。

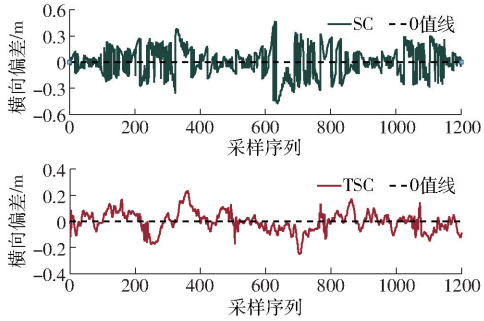

图 13 1.0 m/s 跟踪横向偏差对比

Fig. 13 Tracking lateral deviation comparison at speed of 1.0 m/s

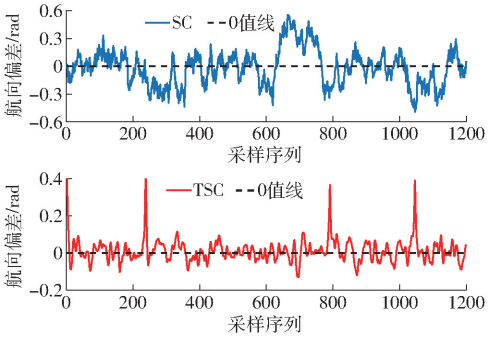

图 14 1.0 m/s 跟踪航向偏差对比

Fig. 14 Tracking heading deviation comparison at speed of 1.0 m/s

5 结论

(1)针对传统滑模控制易出现抖振以及参数难调整的问题,引入超螺旋滑模控制器,设计滑模面和滑模控制律,并通过李雅普诺夫稳定性证明系统的稳定性。引入参数预调控制器,在路径跟踪前对控制参数进行优化,以适应不同操作需求和车辆动态特性。

(2)仿真试验结果表明,TSC 控制器在路径跟踪精度上显著优于传统 PID 控制器和 SC 控制器。TSC 控制器最大误差为 0.063 m,绝对平均误差降至 0.013 m,相比 SC 控制器降低 75.4%,标准差也缩小至 0.003 m。PID 控制器和 SC 控制器在各项误

差指标上均不及 TSC，尤其是在动态环境中的适应能力较差，容易受到扰动影响，导致跟踪效果不稳定。

(3)实地测试进一步验证 TSC 控制器的有效性与实用性。在田间试验中，当速度分别为 0.5、1.0 m/s 时，TSC 控制器的表现显著优于 SC 控制器，最大误差分别降低 0.17、0.23 m，平均误差分别降低 0.09、0.06 m，标准差分别降低 0.05、0.04 m。这一结果表明，系统在面对转弯和变化幅度较大的情况时，TSC 控制器可以保持高水平跟踪精度，还能保证系统在动态环境下路径跟踪的稳定性和可靠性。

参 考 文 献

[1] 张漫，季宇寒，李世超，等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报，2020，51(4)：1－18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1－18. (in Chinese)

[2] 罗锡文，廖娟，胡炼，等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报，2021，42(6)：8－17，5.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8－17, 5. (in Chinese)

[3] 孟志军，王昊，付卫强，等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2023，54(10)：1－24.
MENG Zhijun, WANG Hao, FU Weiqiang, et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 1－24. (in Chinese)

[4] 王辉，王桂民，罗锡文，等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报，2019，35(4)：11－19.
WANG HUI, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11－19. (in Chinese)

[5] 张闻宇，胡力文，王辉，等. 基于 B 样条优化的改进纯追踪农机导航曲线跟踪方法[J]. 农业机械学报，2024，55(9)：42－51，115.
ZHANG Wenyu, HU Liwen, WANG Hui, et al. Improved pure pursuit agricultural machinery navigation curve path tracking method based on B-spline optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 42－51, 115. (in Chinese)

[6] 周志艳，余鑫，梁乐彬，等. 四轮转向喷杆喷雾机平移换行导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(7)：68－78，143.
ZHOU Zhiyan, YU Xin, LIANG Lebin, et al. Design and experiment of translation and line feed navigation control system for four wheel steering sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 68－78, 143. (in Chinese)

[7] 张雁，李彦明，刘翔鹏，等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J]. 农业机械学报，2018，49(10)：30－37.
ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 30－37. (in Chinese)

[8] 徐立鸿，陈戎泉，袁洪良. 含斜坡扰动的轮式拖拉机路径跟踪控制方法[J]. 农业机械学报，2023，54(11)：421－430.
XU Lihong, CHEN Rongquan, YUAN Hongliang. Path tracking control method for wheeled tractors with slope disturbance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 421－430. (in Chinese)

[9] 汪若尘，苏兆睿，丁仁凯，等. 基于滑模同步控制的履带式作业机全向调平系统研究[J]. 农业机械学报，2024，55(4)：394－401.
WANG Ruochen, SU Zhaorui, DING Renkai, et al. Omnidirectional leveling system of crawler machine based on sliding mode synchronous position control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 394－401. (in Chinese)

[10] 陈勇，刘哲，乔健，等. 轮式机器人移动过程中滑模控制策略的研究[J]. 控制工程，2021，28(5)：963－970.
CHEN Yong, LIU Zhe, QIAO Jian, et al. Research on sliding mode control strategy of wheeled robot in moving process[J]. Control Engineering, 2021, 28(5): 963－970. (in Chinese)

[11] 华星淇，何锋. 基于二阶滑模算法的双电机后驱车辆差速系统设计[J]. 机械设计与制造，2021(9)：115－119，124.
HUA Xingqi, HE Feng. Design of dual motor rear drive vehicle differential system based on second order sliding mode algorithm [J]. Mechanical Design & Manufacturing, 2021(9): 115－119, 124. (in Chinese)

[12] 彭继慎，仇文超，李军锋，等. 农业轮式移动机器人反演自适应滑模轨迹跟踪控制[J]. 计算机应用与软件，2019，36(11)：86－90.
PENG Jishen, QIU Wenchao, LI Junfeng, et al. Inversion adaptive sliding model path tracking control of agricultural wheeled mobile robot[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(11): 86－90. (in Chinese)

[13] SABIHA A D, KAMEL M A, SAID E, et al. ROS-based trajectory tracking control for autonomous tracked vehicle using optimized backstepping and sliding mode control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 152: 104058.

[14] GE Z, MAN Z, WANG Z, et al. Robust adaptive sliding mode control for path tracking of unmanned agricultural vehicles[J].

Computers and Electrical Engineering, 2023, 108: 108693.
[15] 丁晨,魏新华,梅珂琪. 农用拖拉机的自适应二阶滑模路径跟踪控制[J]. 控制理论与应用,2023,40(7):1287 - 1295.
DING Chen, WEI Xinhua, MEI Keqi. Adaptive second-order sliding mode path tracking control for agricultural tractors[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(7): 1287 - 1295. (in Chinese)
[16] 张越,郭中阳,黄孝慈,等. 基于改进超螺旋滑模控制的线控制动系统控制方法[J]. 汽车技术,2024(9):18 - 24.
ZHANG Yue, GUO Zhongyang, HUANG Xiaoci, et al. Brake-by-wire system control method controlled by improved super twisting sliding mode control[J]. Automotive Technology, 2024(9): 18 - 24. (in Chinese)
[17] YESMIN A, NATH K, KUMARI K, et al. Adaptive generalized super-twisting sliding mode controller for wheeled mobile robot [J]. IFAC - PapersOnLine, 2024, 57: 345 - 350.
[18] SAADAOUI A, OUASSAID M. Super-twisting sliding mode control approach for battery electric vehicles ultra-fast charger based on vienna rectifier and three-phase interleaved DC/DC buck converter[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 84: 110854.
[19] SUN Z,ZHENG J,MAN Z, et al. Nested adaptive super-twisting sliding mode control design for a vehicle steer-by-wire system [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2019,122:658 - 672.
[20] GONG K, WANG Y, DUAN Y, et al. A generalized super-twisting algorithm-based adaptive fixed-time controller for spacecraft pose tracking[J]. Open Astronomy,2024,33(1):20220229.
[21] 毛婷婷,薛金林. 自动驾驶履带车辆的变曲率路径的跟踪控制策略研究[J]. 机械科学与技术,2024,43(9):1493 - 1504.
MAO Tingting, XUE Jinlin. Study on optimal speed planning hybrid lateral control undervariable curvature path based on LQR - MPC[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(9): 1493 - 1504. (in Chinese)
[22] ASTOLFI A, BOLZERN P, LOCATELLI A. Path-tracking of a tractor-trailer vehicle along rectilinear and circular paths: a Lyapunov-based approach[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation,2004,20(1):154 - 160.
[23] 武涛,李彦明,林洪振,等. 基于干扰观测器的直播机路径跟踪快速终端滑模控制[J]. 农业机械学报,2021,52(12): 24 - 31.
WU Tao, LI Yanming, LIN Hongzhen, et al. Fast terminal sliding mode control for autonomous rice seeding machine based on disturbance observer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 24 - 31. (in Chinese)
[24] SHET R M, LAKHEKAR G V, IYER N C, et al. Robust path following control of AUVs using adaptive super twisting SOSMC [J]. Journal of Marine Science and Application, 2024,23:947 - 959.
[25] 张建锋,何东健,张志勇. 采摘机器人自适应鲁棒跟踪控制算法设计[J]. 农机化研究,2009,31(12):10 - 14,42.
ZHANG Jianfeng, HE Dongjian, ZHANG Zhiyong. Picking robot adaptive robust tracking control algorithm design[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(12): 10 - 14,42. (in Chinese)
[26] 陈志勇,李攀,叶明旭,等. 自动驾驶电动车辆基于参数预测的径向基函数神经网络自适应控制[J]. 中国机械工程,2024,35(6):982 - 992.
CHEN Zhiyong, LI Pan, YE Mingxu, et al. RBF neural network adaptive control for autonomous electric vehicles based on parameter prediction[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2024, 35(6): 982 - 992. (in Chinese)
[27] 严军荣,江沛莲,李沛. 一种基于有限内存拟牛顿法的混合波束成形算法[J]. 电子与信息学报,2024,46(6):2542 - 2548.
YAN Junrong, JIANG Peilian, LI Pei. A hybrid beamforming algorithm based on Limited-Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(6): 2542 - 2548. (in Chinese)
[28] 郑鑫,赵又群. 基于李雅普诺夫稳定性理论的路径跟踪控制器设计[J]. 汽车技术,2020(8):1 - 5.
ZHENG Xin, ZHAO Youqun. Design of path tracking controller based on Lyapunov stability theory [J]. Automotive Technology, 2020(8): 1 - 5. (in Chinese)
[29] 马悦琦,迟瑞娟,赵彦涛,等. 基于模糊控制的插秧机 LQR 曲线路径跟踪控制器优化方法[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):1 - 8,102.
MA Yueqi, CHI Ruijuan, ZHAO Yantao, et al. Optimization method of LQR curve path tracking controller for unmanned rice transplanter based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 1 - 8,102. (in Chinese)
[30] 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)