DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.01.003

基于滑移率与姿态反馈的丘陵山地联合收割机自适应抗滑控制策略

赵立军[1]，代凡程[1]，雷良钥[1]，胡繁森[1]，沈成[2,3]，张雪峰[1*]

（1. 重庆文理学院，重庆市，402160；2. 农业农村部南京农业机械化研究所，江苏南京，210014；
3. 农业农村部现代农业装备重点实验室，江苏南京，210014）

摘要：针对丘陵山地联合收割机在起伏坡地、横坡叠加工况及湿软土壤条件下易出现履带高滑移、速度波动、姿态失稳甚至侧翻风险，导致路径跟踪精度下降与能耗增加的问题，本研究提出一种基于滑移率与姿态反馈的自适应抗滑控制策略。该策略以车体滑移率与侧倾角为核心状态量，融合定位与惯性测量实现关键状态的在线获取，并构建“正常—滑移风险—姿态风险—耦合高风险”的分级风险判别机制，引入阈值与滞回退出规则，避免临界工况下控制频繁切换。与传统仅关注横向误差的固定参数控制不同，本研究创新性地将纵向牵引调节与横向稳定干预纳入统一闭环：当滑移风险触发时，自适应下调发动机目标转速抑制过度滑转；当姿态风险触发时，在降速的同时对预瞄目标点进行坡上方向偏置，引导车辆产生更有利的稳定趋势；在滑移与姿态耦合的高风险状态下，通过安全监督器进行优先级裁决，实现“姿态安全优先、牵引次之、跟踪最后”的协同控制，从而在复杂地形与负载波动条件下兼顾安全性、跟踪精度与经济性。田间对比试验基于履带式联合收割机平台在约15°～25°坡地、土壤含水率约25%～30%的工况下开展，结果表明：所提方法将平均路径跟踪误差由0.117 1 m降至0.020 8 m、最大误差由0.445 1 m降至0.090 5 m；平均滑移率约6.12%、最大滑移率约18.00%；综合节油约4.94%。总体而言，本研究将滑移率与姿态风险统一建模并驱动控制策略切换，提出预瞄点坡上偏置与安全监督优先级机制，实现面向丘陵山地联合收割机的可落地自适应抗滑与稳态作业控制方案。

关键词：联合收割机；自适应控制；丘陵山地；滑移率；姿态反馈；路径跟踪

中图分类号：S225.3；TP273　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096-7217（2026）01-0019-12

赵立军，代凡程，雷良钥，胡繁森，沈成，张雪峰. 基于滑移率与姿态反馈的丘陵山地联合收割机自适应抗滑控制策略[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2026，7(1)：19－30

ZHAO Lijun, DAI Fancheng, LEI Liangyao, HU Fansen, SHEN Cheng, ZHANG Xuefeng. Adaptive anti-slip control strategy for combine harvesters in hilly and mountainous terrain based on slip ratio and attitude feedback [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(1): 19－30

0 引言

随着精准农业与智能农机技术的发展，联合收割机的自动导航与路径跟踪已成为提升作业效率与作业质量的重要手段。然而，在丘陵山地等复杂地形条件下，地形起伏与横坡工况频繁叠加，土壤含水率与附着条件时变明显，作物喂入负载存在强波动，使履带/驱动系统易出现滑转、侧滑及速度波动，并进一步诱发车身姿态失稳甚至侧翻风险[1]。其根本原因在于“车辆—土壤—作物负载”系统具有显著非线性与时变特性：附着能力随土壤压实度与含水率快速变化，履带下沉/剪切导致牵引效率与侧向稳定裕度同步变化，纵向滑移与横向姿态之间呈现强耦合关系，传统仅以横向误差为目标的路径跟踪控制难以在复杂工况下同时兼顾精度、能耗与安全[2]。

围绕滑移抑制、姿态稳定与能耗优化等关键问题，国内外学者已开展了大量研究[3-8]，并取得了积极进展。ZHANG等[9]针对后轮独立驱动电动拖拉机在犁耕作业中能耗高与滑移失配的问题，提出了兼顾行驶速度与滑移率的联合控制方法，在保证作业质量的同时实现了能耗的显著降低。WANG等[10]针对配备滑行电池组的轮式电动拖拉机在犁耕过程中速度与滑移

收稿日期：2025-11-12　　修回日期：2025-12-28

基金项目：国家自然科学基金面上项目（52272438）；重庆市2024年农机装备研产推用一体化“揭榜挂帅”项目（cqjjxxwjbgs-njzb2024002）；重庆市科技局英才计划项目（20231102）；2025年重庆市研究生科研创新项目（CYS25872）

第一作者：赵立军，男，1980年生，黑龙江克山人，博士，教授；研究方向为山地智能农业装备及机器人。E-mail：20190005@cqwu.edu.cn

*通信作者：张雪峰，男，1994年生，重庆巴南人，博士，讲师；研究方向为山地智能农业装备及机器人。E-mail：1534868347@qq.com

率控制目标切换不顺畅的问题,提出了基于速度与滑移率切换的联合控制策略,有效平衡了牵引效率与能耗。另一项研究中,WANG 等[11]针对犁耕阻力波动与电机温升耦合引发的性能退化问题,提出了基于电机温度补偿的阻力自适应运行控制方法,可在抑制过热的同时维持目标速度与滑移率,从而降低能耗。LUO 等[12]则针对后轮独立驱动平台在犁耕工况下的横摆与侧偏稳定性问题,提出了基于学习的双层控制架构,在保障车辆稳定性的同时维持了作业效率。尹成强等[13]系统梳理了拖拉机侧翻风险识别与主动防侧翻方面的姿态、侧倾与横摆指标、预警阈值及主动控制技术路线,为"安全—效率"协同优化提供了综述性参考与研究空白定位。de MELO 等[14]针对电动拖拉机牵引效率受轮胎滑移影响显著的问题,提出了电机—车轮闭环滑移率控制策略并建立了实验验证体系,有效提高了牵引效率并降低了能耗。BAEK 等[15]围绕四轮独立驱动 E-axle 电动拖拉机在不同工况下的滑移与牵引效率评估问题,构建了试验与仿真一体化的评价框架,量化了效率与滑移之间的关系,为后续扭矩分配与节能控制提供了依据。因此,如何在保证路径跟踪精度的前提下,面向丘陵山地的强耦合、强扰动与受限执行条件,构建可实时识别滑移风险与姿态风险、并能按风险等级有序协同调控的控制框架,仍是联合收割机自动化作业亟待解决的关键问题

为此,本研究提出一种基于滑移率与车身姿态反馈的自适应抗滑控制策略:融合实时动态全球导航卫星系统(real-time kinematic (RTK) -positioning of global navigation satellite system (GNSS), RTK-GNSS)与惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)紧耦合位姿测量,实现滑移率与姿态状态的高置信度在线获取;构建以滑移率与侧倾角为核心输入的风险评估与分级机制;基于多阈值自适应规则库,动态协调发动机目标转速与路径跟踪目标点(含坡面上方目标点偏置),实现滑移抑制、姿态稳定与能耗控制的协同优化。

1 联合履带式收割机平台

1.1 试验平台与系统架构

以洋马 YH1180R 履带式联合收割机为试验平台。该机额定喂入量为 6.0 kg/s,作业速度范围 0~2.45 m/s,发动机额定功率为 88.4 kW,能够满足丘陵山地复杂工况下的连续作业需求。平台搭载实时动态全球导航卫星系统(RTK-GNSS,联适导航 T100),其水平定位精度优于±2.5 cm,在 1.0 m 基线条件下航向角精度为 0.2°;车身姿态信息由惯性测量单元(IMU)实时获取,为车辆位姿解算与姿态反馈控制提供高精度测量基础。

整机控制系统以工业计算机(IPC,联适导航 T100 核心板)为核心处理单元,负责作业数据的实时采集、融合解算与控制决策。IPC 通过控制器局域网(CAN)与车辆控制器(联适导航 AF305 转向驱动器)进行通信,下发转向与行驶控制指令;车辆控制器驱动电动方向盘与转向执行机构,实现车辆的行进与转向操作。在转向过程中,相关传感器持续采集履带转角等状态信息并反馈至 IPC,构成完整的闭环控制链路。

同时,系统配备人机交互终端(联适导航 T100 显控平板),用于作业参数设置、路径信息加载与运行状态实时监测,从而构建了集"感知—决策—执行—监测"于一体的行进自适应控制平台,其硬件组成与数据流如图 1 所示。



图 1 行进自适应控制平台

Figure 1 Travel adaptive control platform

1.2 行驶自适应控制系统

为实现丘陵山地复杂工况下联合收割机的稳定行驶与路径跟踪,本研究构建行驶自适应控制系统,其结构如图 2 所示。系统以 RTK-GNSS 与 IMU 为信息源,通过数据融合获得车辆实时位姿与姿态状态,并在此基础上形成"局部路径规划—转向控制—滑移补偿—姿态修正—指令执行"的闭环控制链路[16-18]。

数据融合模块对 GNSS 位置与航向信息以及 IMU 角速度、姿态角信息进行时间同步与联合解算,输出车辆平面位姿(x, y, ψ)、地速 v_g 以及侧倾角 ϕ、俯仰角 θ。其中,平面位姿(x, y, ψ)用于局部跟踪路径规划与转向控制计算,地速 v_g 用于滑移率在线估计,侧倾角 ϕ 用于姿态风险判别。

局部跟踪路径规划模块基于参考轨迹生成预瞄目标点并输入转向控制模型,得到名义转向指令。为实现稳定性干预,系统保留目标点可调接口:当姿态风险触发时,对预瞄目标点沿坡面上方方向进行偏置修正,以在不改变参考路径结构的前提下引导车辆获得更有利的侧向稳定趋势。

滑移补偿与姿态修正分别对应纵向驱动与横向稳定两条干预通道(图 2 右侧)。滑移率 s 由履带理论速

度v_t与地速v_g计算得到，如式(1)所示。

$$s=\frac{v_t-v_g}{\max(v_t,\varepsilon)} \tag{1}$$

式中：ε——为防止低速时分母过小引起滑移率发散的最小速度阈值，$\varepsilon>0$。

当滑移率超过阈值A(见2.2节)时，系统下调发动机目标转速以抑制过度滑转；否则维持原转速设定。姿态修正以侧倾角阈值C(见2.2节)为触发条件：当$\phi>C$时，系统一方面降低发动机目标转速以削弱扰动放大效应，另一方面对路径跟踪目标点实施偏置修正以提升稳定裕度；当ϕ回落至安全区间时，保持原目标点与转速设定。为避免临界状态频繁切换，滑移与姿态通道均采用滤波与滞回缓变恢复机制。

最终，系统将驱动与转向指令经合成后通过CAN下发至车辆控制器执行，车辆实际状态再由GNSS/IMU实时反馈至数据融合模块，形成闭环控制。该系统为后续基于风险评估的自适应抗滑控制策略提供了可落地的实现平台。

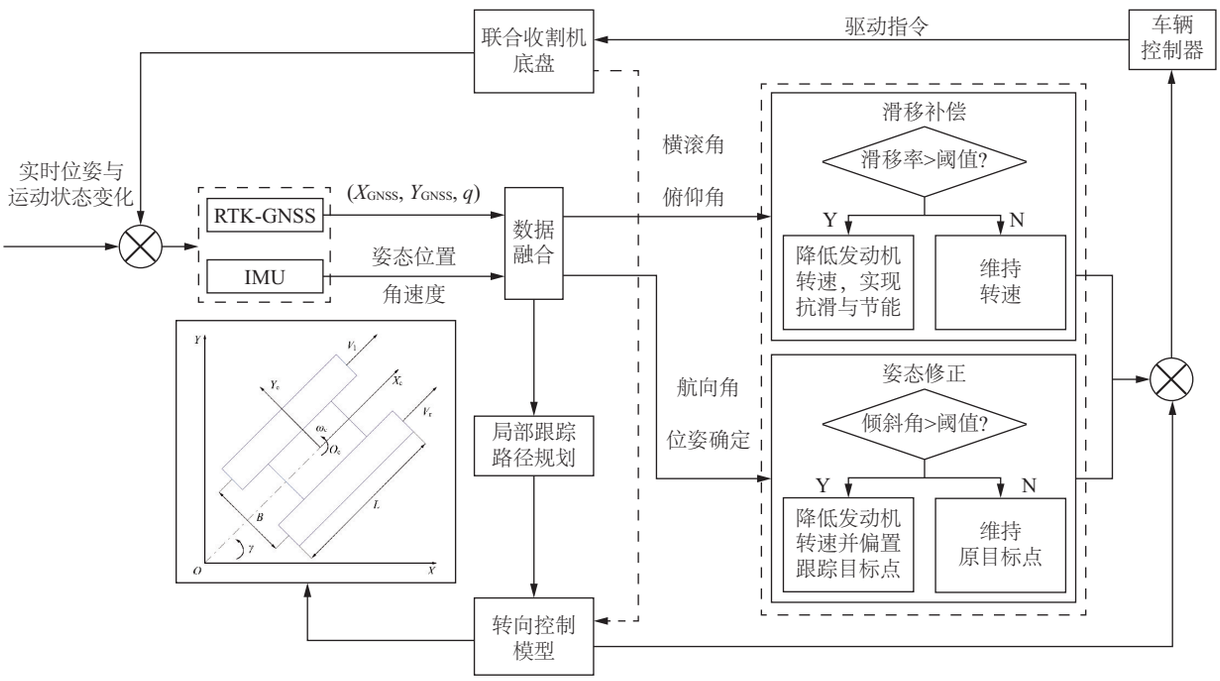


图2　履带式联合收割机行驶自适应控制系统

Figure 2　Travel adaptive control system for crawler combine harvester

2　基于滑移率与姿态反馈的控制策略

在丘陵山地的复杂地形条件下，地表附着条件、坡度起伏及作物负载的耦合扰动，使得采用固定参数的传统路径跟踪方法难以同时兼顾作业精度、能量效率与行驶安全性[19-23]。为解决此问题，提出一种集“滑移率实时估计—姿态反馈—分级规则库”于一体的自适应控制策略。该策略基于RTK-GNSS与IMU的紧耦合测量系统，实时获取车辆的高精度地速与姿态信息，并依据不同的风险评估等级，动态调整发动机目标转速、转向指令约束以及路径跟踪目标点，从而在滑移抑制、能耗降低与侧向稳定性提升之间实现多目标协同优化。

2.1　运动学与滑移率模型

将联合收割机简化为平面两履带底盘模型[24]，并建立惯性参考系与车体坐标系。设XOY为惯性参考系，其原点固定于地面，不随底盘运动而改变；设$X_cO_cY_c$为车体坐标系，其原点取于底盘形心，随底盘的平移与转动。基于平面运动假设，仅考虑两标系在水平面内的位姿变化[25]。

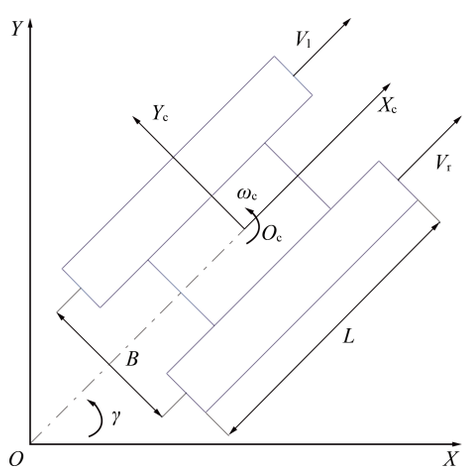


图3　履带式联合收割机平面运动示意图

Figure 3　Planar motion diagram of a tracked combine harvester

注：V_l、V_r分别为左右两侧带理论速度，m/s；O_c为履带底盘形；ω_c为底盘绕形心的角速度，rad/s；L为履带接地段长度，m；B为底盘轨距，m；γ为履带底盘中轴线和X轴正向夹角，(°)。

设联合收割机t时刻位置如图3所示,其平面运动方程描述如下:

$$\begin{cases} x(t)=\dfrac{1}{2}\displaystyle\int_0^t(V_{\mathrm{r}}+V_{\mathrm{l}})\cos\gamma\mathrm{d}t \\ y(t)=\dfrac{1}{2}\displaystyle\int_0^t(V_{\mathrm{r}}+V_{\mathrm{l}})\sin\gamma\mathrm{d}t \\ \gamma(t)=\dfrac{1}{B}\displaystyle\int_0^t(V_{\mathrm{r}}-V_{\mathrm{l}})\mathrm{d}t \end{cases} \tag{2}$$

式中:$x(t)$——t时刻履带底盘X轴位置坐标,m;

$y(t)$——t时刻履带底盘Y轴位置坐标,m;

$\gamma(t)$——t时刻动参考系和定参考系的夹角,(°)。

对式(2)进行求导,可得瞬时运动关系:

$$\begin{cases} \dot{x}(t)=\dfrac{1}{2}(\mathrm{V_r}+\mathrm{V}_t)\cos\gamma \\ \dot{y}(t)=\dfrac{1}{2}(\mathrm{V_r}+\mathrm{V}_t)\sin\gamma \\ \dot{\gamma}(t)=\dfrac{1}{B}(\mathrm{V_r}-\mathrm{V}_t) \end{cases} \tag{3}$$

式中:$\dot{x}(t)$——定参考系下X轴坐标方向线速度,m/s;

$\dot{y}(t)$——定参考系下Y轴坐标方向线速度,m/s;

$\dot{\gamma}(t)$——旋转角速度,rad/s。

上述运动学模型描述了联合收割机两侧履带速度与底盘整体运动的关系。

然而,在实际作业中,行进方向(纵向)与横向的滑移不可避免,导致执行器的输出控制量与期望控制量之间存在偏差,进而引入轨迹跟踪误差。行进方向与横向的打滑模型如式(4)。

$$\begin{cases} i_{\mathrm{L}}=\dfrac{r\omega_{\mathrm{L}}-v_x}{r\omega_{\mathrm{L}}} \\ i_{\mathrm{R}}=\dfrac{r\omega_{\mathrm{R}}-v_x}{r\omega_{\mathrm{R}}} \\ \varphi=\arctan\dfrac{v_y}{v_x} \end{cases} \tag{4}$$

式中:i_{L}、i_{R}——联合收割机在左、右履带行驶方向上的滑移;

φ——联合收割机的横向滑移旋转角,(°);

v_x——行进方向(纵向)的实际速度,m/s;

v_y——横向速度,m/s;

ω_{L}、ω_{R}——左右侧履带的角速度,rad/s;

r——履带驱动轮半径,m。

考虑到联合收割机滑动(打滑和滑转)轨迹跟踪误差,将导致联合收割机滑动姿态偏移,如图4所示。

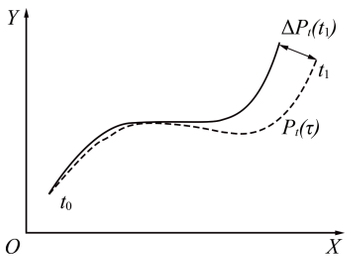


图4 联合收割机滑动轨迹误差

Figure 4 Sliding trajectory error of combine harvester

2.2 基于风险评估的自适应规则库设计

为实现丘陵山地复杂工况下滑移抑制、姿态稳定与路径跟踪精度之间的协同优化,本研究在统一控制框架下引入基于运行风险评估的自适应规则库。该规则库以车辆实时运行状态为输入,根据风险等级动态调整发动机目标转速、转向控制约束及路径跟踪目标点,从而实现控制策略的按需介入与有序切换。

2.2.1 风险评估指标与分级机制

为明确控制介入时机与强度,本研究以滑移率s与车身侧倾角ϕ作为运行风险评估的核心指标。滑移率反映履带—土壤附着状态与纵向牵引效率,侧倾角表征坡地工况下侧翻风险水平,两者分别对应纵向驱动安全性与横向姿态稳定性。

考虑到田间测量噪声与瞬时冲击,风险判别采用滤波后的指标$(\bar{s})$、$(\bar{\phi})$。依据$(\bar{s})$与$(|\bar{\phi}|)$的阈值关系,将车辆运行状态划分为4类离散风险等级:正常状态(R0)、滑移风险(R1)、姿态风险(R2)与耦合高风险(R3)。

阈值选取如下:滑移率触发阈值取$A=20\%$,该值综合考虑丘陵地块湿软土壤工况下牵引效率与能耗随滑移率变化的经验规律,当滑移率持续高于约20%时无效剪切功与搅土损耗显著增加,且易诱发车速波动;侧倾角触发阈值取$C=15°$,该值结合整机质心高度h与轨距B的静态侧翻临界角$\varphi_{\mathrm{crit}}=\arctan\left(\dfrac{B}{2h}\right)$的保守裕度,并参考横坡安全作业经验,预留地面不平整与动态扰动余量,用于提前触发姿态风险控制。

为避免阈值附近频繁切换导致控制抖振,滑移与姿态通道均采用“滞回+驻留”机制:设置退出阈值$A_{\mathrm{r}}=15\%$、$C_{\mathrm{r}}=12°$,仅当风险指标回落至退出阈值以内且保持最小持续时间(0.3~0.5 s)后才允许降级;同理,风险指标超过触发阈值并持续满足最小持续时间后才升级。在此基础上,风险分级判据如表1所示,可区分滑移风险、姿态风险与耦合高风险,并给出明确的控制介入时机,避免单指标触发导致的控制目标冲突。

表 1　风险等级判据与控制介入方式

Table 1　Risk level criteria and control intervention methods

风险等级	判断依据	车辆运行状态
正常 R0	$\bar{s}<A_r$ 且 $\lvert\bar{\phi}\rvert<C_r$	保持基准发动机目标转速/转向约束/目标点不偏置
滑移风险 R1	$\bar{s}\geqslant A$ 且 $\lvert\bar{\phi}\rvert<C$	下调发动机目标转速(抗滑移调速)
姿态风险 R2	$\lvert\bar{\phi}\rvert\geqslant C$ 且 $\bar{s}<A$	发动机目标转速下调＋路径跟踪目标点向坡上偏置(抗侧翻调节)
耦合高风险 R3	$\bar{s}\geqslant A$ 且 $\lvert\bar{\phi}\rvert\geqslant C$	采用更强降速＋更严格转向约束＋目标点偏置 (优先保障姿态稳定)

注：触发阈值 $A=20\%$、$C=15^\circ$；退出阈值 $A_r=15\%$、$C_r=12^\circ$。其中 s 为纵向滑移率，ϕ 为车身侧倾角。

2.2.2　抗滑移调速策略

抗滑移调速规则的决策流程基于实时计算的滑移率，其逻辑判断与执行过程如图 5 所示。该规则的核心是通过监测驱动轮的滑转状态，动态匹配发动机扭矩与地面附着条件，从而在保障牵引效率的同时抑制能量损失。

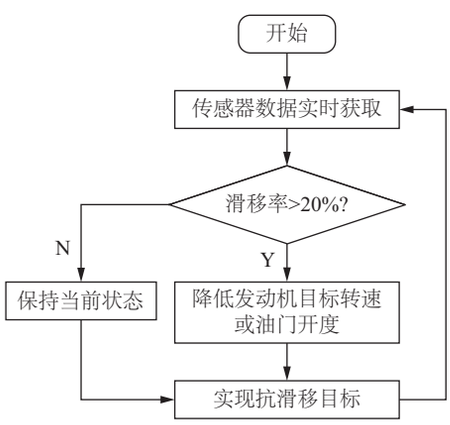


图 5　联合收割机抗滑移调速规则

Figure 5　Anti-slip speed regulation rules for combine harvesters

当系统检测到滑移率超过 20% 时，判定车辆进入滑移风险区。此时通过降低发动机目标转速或限制油门开度，减少驱动系统输出扭矩，使驱动力与地面附着能力重新匹配，从而抑制履带过度滑转。若滑移率回落至安全区间，系统逐步恢复发动机输出，避免频繁调节引起的速度波动。

抗滑移调速策略以实时计算的滑移率为触发条件，其核心目标是在附着条件恶化时抑制履带过度滑转，减少无效能量损失。当系统检测到滑移率超过阈值 $A=20\%$ 时，判定车辆进入滑移风险状态，此时规则库触发纵向驱动力调节策略。

具体而言，通过降低发动机目标转速或限制油门开度，减小履带驱动扭矩，使驱动力水平与当前地面附着能力重新匹配，从而促使履带—土壤接触状态由滑转主导向牵引主导转变。随着滑移率逐步回落至安全区间，系统采用缓变方式恢复发动机输出，避免频繁调节引起的车速波动与控制抖振。该策略在保证基本行驶能力的同时，有效抑制了高滑移工况下的能量浪费

2.2.3　抗侧翻调节

抗侧翻调节规则的决策流程基于 IMU 实时监测的车身姿态信息，其逻辑判断与多动作协同过程如图 6 所示。该规则针对丘陵山地作业的侧翻风险，采用纵向驱动力控制与横向路径跟踪相协同的策略，通过主动干预提升车辆的侧向稳定性。

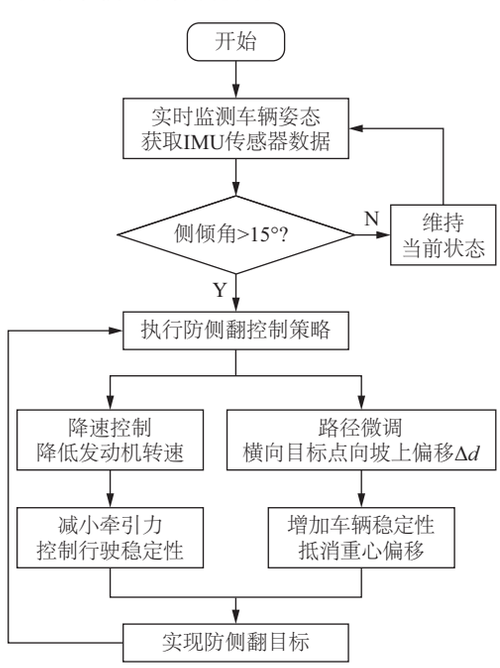


图 6　联合收割机抗侧翻调节规则

Figure 6　Adjustment rules for anti-rollover of combine harvester

当检测到车身侧倾角超过 15°时，系统判定存在侧翻风险。此时同步执行纵向与横向协同控制：一方面降低发动机输出转速，减小车辆行驶惯性；另一方面将路径跟踪目标点向坡面上方偏置 Δd，利用转向产生的稳定力矩抵消重心横向偏移所形成的翻覆力矩，从而提升车辆侧向稳定性。

抗侧翻调节策略以 IMU 实时监测的车身侧倾角为触发依据，主要面向坡地与横坡工况下的侧向稳定性保障。当检测到侧倾角超过阈值 $C=15^\circ$ 时，系统判

定车辆进入姿态风险状态,并触发纵向与横向协同控制。

在纵向方向,通过降低发动机输出转速,减小车辆行驶惯性与侧向扰动放大效应;在横向方向,通过将路径跟踪目标点向坡面上方偏置Δd,引导车辆产生有利于稳定的转向趋势,利用由此形成的附加稳定力矩抵消重心横向偏移所产生的翻覆力矩。该协同调节方式避免了单一控制手段在复杂地形下作用不足的问题,有效提升了车辆侧向稳定裕度。

为应对滑移率与侧倾角同时超阈值的耦合高风险情形(R3),本研究引入安全监督器对上层规则库输出进行冲突消解与优先级裁决:当$\bar{s}\geqslant A$且$|\bar{\phi}|\geqslant C$时,系统以"姿态安全优先、牵引次之、跟踪最后"为目标序,同步执行更强纵向降速与更严格转向约束,并维持坡上偏置以增加稳定裕度。具体实施为:发动机目标转速在R1/R2调节基础上增加附加降速量Δn_{R3},并对变化率施加限幅;转向指令采用更小的限幅ω_{max},R3(相对于正常工况按比例收紧),抑制急转导致的侧向力峰值;预瞄目标点偏置Δd取风险相关的饱和值($\Delta d_{R3}\geqslant\Delta n_{R2}$)。当$\bar{s}$与$|\bar{\phi}|$回落至退出阈值并满足驻留时间后,按缓变恢复律逐步解除上述约束,避免"解除—再触发"的振荡。

2.2.4 发动机/传动执行机构动态与时延处理

丘陵山地作业工况下,抗滑移调速与抗侧翻调节均通过发动机目标转速(或等效油门/扭矩指令)实现纵向驱动力干预。然而发动机/传动系统存在明显的执行动态与时延:一方面,ECU对目标转速/油门指令的执行具有惯性与速率限制;另一方面,负载突变(泥泞附着、坡度分力、作业负荷变化)会导致实际转速对指令跟踪滞后。若规则库直接对目标转速进行阶跃式切换,易在起步段或坡道段诱发速度振荡、滑移率二次超调以及路径跟踪误差耦合放大。

为此,本研究在规则库输出与发动机指令之间引入"指令整形+速率限幅+抗饱和"机制,对纵向控制通道进行平滑化处理。将规则库给出的发动机目标转速记为n_{ref},实际下发指令记为n_{cmd},采用离散斜坡约束:

$$n_{cmd}(k)=n_{cmd}(k-1)+sat\left(n_{ref}(k)-n_{cmd}(k-1),-\Delta n_{max},\Delta n_{max}\right) \tag{5}$$

其中,Δn_{max}为单位采样周期允许的最大转速变化量,用于抑制执行器时延导致的"过度调节"。同时对n_{cmd}施加物理限幅$n_{min}\leqslant n_{cmd}\leqslant n_{max}$,并对$n_{ref}$或滑移率估计值采用一阶低通滤波以降低噪声触发造成的频繁微调。

当纵向通道与底层路径跟踪(如含PID积分环节)耦合时,发动机限幅/速率限制会引发积分累积,导致解除风险后出现二次波动。为避免该问题,采用抗积分饱和(anti-windup):当纵向指令进入饱和或触发速率限幅时,冻结积分项或采用回算修正,使积分状态与可实现的纵向指令保持一致,从而降低起步段波动与坡道段超调。

此外,规则库风险等级切换已设置滞回阈值与最小持续时间(0.3~0.5 s),配合上述"缓变恢复"策略:当滑移率/侧倾角回落至退出阈值区间后,纵向指令不立即跳变回正常设定,而是按斜坡方式逐步恢复,避免"恢复过快—再触发"的往复切换。通过上述处理,上层风险干预既能及时降低高滑移/高侧倾风险,又能兼顾发动机执行动态,提升整体闭环的平顺性与鲁棒性。

2.3 闭环控制系统结构与稳定性分析

底层路径跟踪器依据车辆位姿与参考轨迹生成名义转向指令;上层规则库依据滑移率与侧倾角的风险等级,对发动机目标转速(等效速度目标)、转向指令约束以及预瞄目标点进行在线修正,从而实现抗滑移与抗侧翻的协同控制。

为刻画路径跟踪闭环的误差收敛特性,在参考轨迹Frenet坐标系下定义横向误差e_y与航向误差e_ψ,其低速运动学误差动态可写为:

$$e_y=v\sin(e_\psi)+d_y \tag{6}$$

$$e_\psi=\omega-\omega_r+d_\psi \tag{7}$$

式中:v——车辆地速;

ω——实际航向角速度;

ω_r——参考轨迹曲率对应的期望角速度;

d_y、d_ψ——由纵/横向滑移、模型不确定性等引起的等效扰动。

其中等效扰动$d(t)$综合了履带—土壤相互作用导致的纵/横向滑移未建模项、土壤附着系数/坡度分力/作物负载等时变因素引起的模型不确定性,以及RTK-GNSS/IMU测量噪声与滤波残差。由于上述因素在田间作业中均处于有限变化范围,且测量信号经低通滤波、控制量经物理限幅处理,因此可认为存在常数$\bar{d}>0$使得$\|d(t)\|\leqslant\bar{d}$。

底层转向控制采用预瞄几何跟踪形式。由预瞄目标点构造前视角α,得到角速度指令:

$$\omega_c=(2v/L_d)\sin\alpha \tag{8}$$

$$\omega=sat(\omega_c,\omega_{max}) \tag{9}$$

式中:L_d——预瞄距离;

ω_{max}——转向指令约束。

规则库通过3类通道对闭环进行"外环整形":

1)滑移风险时下调发动机目标转速以降低速度,

并采用缓变恢复限制速度突变；

2）姿态风险时收紧 ω_{max} 并对预瞄目标点沿坡上方向偏置 Δd（等效改变 α 的几何构造）；

3）耦合高风险时联合采取更强降速与更严格转向约束，优先保障姿态稳定。

在单一风险等级下，取李雅普诺夫函数：

$$V=\frac{1}{2}e_y^2+c\left(1-\cos e_\psi\right),\ c>0 \tag{10}$$

在小角度误差范围内结合饱和约束，可得：

$$\dot{V}\leqslant -k_1e_y^2-k_2e_\psi^2+\left|e_y\right|\bar{d}_y+c\left|e_\psi\right|\bar{d}_\psi \tag{11}$$

其中：k_1、$k_2>0$，由预瞄距离与转向约束对应的等效反馈强度决定；$\bar{d}_y$ 为纵向扰动上界，$\bar{d}_\psi$ 为横向扰动上界。

由此可知：无扰动时误差渐近收敛；存在滑移扰动时系统满足输入到状态稳定性（ISS），误差最终一致有界。规则库在风险上升时主动降低 V 并收紧 ω_{max}，可降低扰动放大效应并提升稳定裕度。

当系统在不同风险等级间切换时，可将闭环视为切换系统。本研究切换信号由连续可测的滑移率与侧倾角触发，并引入滤波、阈值滞回与最小持续时间约束以避免高频抖振；由于各等级子系统均满足上述有界稳定性且切换满足驻留/滞回条件，故整体闭环在多规则切换下保持一致有界稳定，为策略在复杂工况下的可靠运行提供理论支撑。

3　试验与验证

3.1　试验设计与方案

为验证所提出的基于滑移率与姿态反馈的自适应路径跟踪方法的有效性，于 2025 年 8 月在重庆市江津区“江小白未来农场”高粱试验田开展了田间实地试验。试验平台为 2.1 节所述的洋马 YH1180R 履带式联合收割机，平台集成了全部所需的传感器与控制系统。验场地为典型的丘陵山地地形，包含多处坡度为 15°～25°的斜坡（图 7）。土壤类型为黏壤土，试验前经历降雨，土壤含水率较高（约 25%～30%），形成易引发履带滑转的湿软工况。作物为成熟期高粱，采用垄作种植模式。田间不同区域的土壤压实度存在明显差异，为验证控制算法的适应性提供了多样化测试条件。



(a) 低土壤压实度　(b) 中等土壤压实度　(c) 高土壤压实度

图 7　高粱收获期不同土壤压实度的地块

Figure 7　Land plots with different soil compaction degrees during the sorghum harvest period

为进行公平对比，设置两种控制策略进行性能验证：对照组采用传统 PID 路径跟踪算法[26]，保持恒定前进速度 1.2 m/s，控制器以最小化横向跟踪误差为单一目标；试验组则采用提出的自适应抗滑控制策略，设定滑移率阈值 $A=20\%$，侧倾角阈值 $C=15°$，当实时测量值超越阈值时立即触发相应的自适应规则。两组试验在同一复杂田块内进行，沿预设的 200 m“弓”字形作业路径连续运行 3 个往返，所有传感器数据均通过 CAN 总线进行全周期高频记录，用于后续分析处理。

3.2　数据采集与油耗测量方法

试验数据由 RTK-GNSS/IMU 紧耦合定位系统与整机 CAN 总线同步采集。GNSS 提供三维位置与地速信息；IMU 提供三轴加速度、三轴角速度以及姿态角（横滚、俯仰、航向）；CAN 总线记录履带驱动轮转速、发动机目标/实际转速、转向执行机构状态与控制量等关键变量。上述数据共同用于滑移率估计、姿态风险判别与控制策略验证。

为保证多源信号的时间一致性，采集端对所有信号记录统一时间戳；后处理中按时间戳完成对齐，并将不同通道重采样至统一频率用于融合分析。以本研究用于分析的典型连续有效数据段为例，姿态数据经均匀重采样后共 800 点，持续 84.43 s，对应等效采样频率约 9.48 Hz；CAN 报文时间间隔中位数为 0.107 s，其中 62.75% 落在 0.09～0.13 s 区间，能够满足同频融合与控制闭环分析需求。

试验工况覆盖丘陵地块的弯道—坡道复合区域。典型片段中，车体横滚角范围为 −8.33°～3.73°，俯仰角范围为 −13.07°～9.91°；角速度模长 95% 分位为 15.92°/s，最大为 29.41°/s，反映了转向与坡度扰动下的姿态动态变化。

GNSS 地速信号在起停阶段接近 0，且受卫星遮挡/多路径与地面冲击等影响可能出现瞬时跳变。为抑制尖峰并降低噪声触发造成的误判，本研究对地速信号先采用 3 点中值滤波剔除离群点，再采用一阶低通滤波进行平滑；同时设置低速阈值 $v<0.05$ m/s 的样本不参与滑移率统计，以避免低速分母导致的滑移率数值发散。

转向执行机构角度由 CAN 回传的编码器计数线性换算得到，编码器计数与转向角满足：$\delta(°)=(90/1\,024)\times c$，其中 c 为编码器计数，δ 为转向角。该换算用于将总线回传的离散计数统一为物理角度量，以便与姿态/轨迹等状态量同步分析。

燃油消耗采用“定路线—定往返—重复试验”的对比方式评估。为避免整机油箱液面波动带来的误差，试验中使用外置透明刻度测量容器串接供油管路，在

每次往返试验开始与结束后读取燃油液面高度,并根据事先建立的“液面高度—体积”换算关系计算体积差作为单次消耗量;为降低读数误差,每次起止读数重复读取并取平均。

3.3 结果与分析

为全面评估所提出的自适应路径跟踪方法的综合性能,从轨迹跟踪精度与滑移率控制效能两个方面,对试验组与对照组的试验结果进行对比分析与讨论。

3.3.1 轨迹跟踪性能与动力学机理分析

路径跟踪轨迹的对比直观反映了不同控制策略的性能差异。如图8所示,采用传统PID控制的收割机,其跟踪轨迹在直线段尚能保持稳定,但在弯道及坡度变化区域出现了明显的滞后与超调,轨迹波动显著。这表明固定参数的控制器难以适应地形变化引发的动力学扰动。相比之下,采用自适应策略的试验组,其跟踪轨迹与预设路径的贴合度更高,尤其在弯道过渡更为平滑,无明显超调现象。

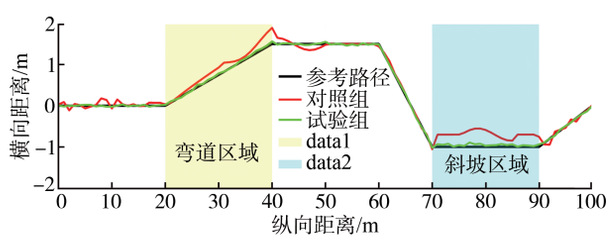


图8 路径跟踪轨迹对比图

Figure 8 Comparison diagram of path tracking trajectories

图8表明,对照组采用恒速1.2 m/s的传统PID策略,在起步段出现短时摆动,在坡道—弯道复合段产生明显滞后与超调。起步阶段初始位姿偏差与作物负载突变导致横向误差快速变化,固定增益PID的积分项易在短时间内累积并产生过度修正,从而引发轨迹振荡。进入坡道与弯道叠加区域后,坡度分力与附着条件变化使滑移率上升、实际车速下降;PID为减小横向误差进一步加大转向输入,履带剪切滑移随之增强,导致超调被耦合放大。相比之下,试验组在滑移率接近阈值$A=20\%$或侧倾角增大时触发规则库,通过下调发动机目标转速并对预瞄目标点上偏置,实现纵向牵引与横向转向协同调节,因此可抑制起步振荡并显著减小弯坡段超调。

3.3.2 坡道与弯道区域超调差异的机理分析

在坡道与弯道叠加区域,车辆动力学特性发生显著变化:一方面,坡度引入的重力分力改变了纵向驱动力平衡;另一方面,转向过程中履带与土壤的剪切作用增强,使滑移率迅速上升。

传统PID控制中,发动机转速保持恒定,纵向驱动力无法根据附着条件变化进行调整。当滑移率升高时,部分驱动力被消耗于履带滑转而非有效推进,导致实际车速低于期望值,控制器为弥补轨迹偏差进一步加大转向输入,最终形成“滑移—超调—再修正”的恶性循环,表现为轨迹明显滞后与超调。

自适应策略在该工况下的控制过程则不同。

当系统检测到滑移率接近20%阈值或侧倾角持续增大时,规则库立即触发联合调节机制。一方面,通过降低发动机目标转速抑制驱动力过剩,防止滑移进一步恶化;另一方面,通过对路径跟踪目标点进行坡面上方偏置,使车辆产生有利于稳定的转向趋势。纵向与横向控制的协同作用有效削弱了坡道区域动力学突变对路径跟踪的影响,从而显著降低了轨迹超调幅度。

跟踪误差的统计结果从定量角度验证了上述观察。如图9所示,传统PID控制的平均跟踪误差为0.117 1 m,最大误差高达0.445 1 m。而采用自适应策略后,平均跟踪误差降至0.020 8 m,最大误差降至0.090 5 m。与对照组相比,平均误差与最大误差分别降低了82.27%与79.67%。这一显著的精度提升,源于方法对滑移与侧倾扰动的实时补偿。抗滑移规则通过抑制驱动轮过度滑转,保障了纵向运动的有效性;抗侧翻规则通过横向目标点偏置,优化了转向过程中的横向动力学,二者协同工作确保了车辆在复杂路段的高精度、平稳跟踪。

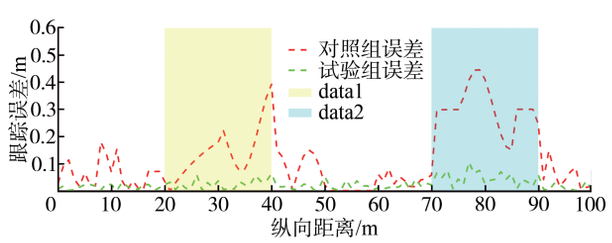


图9 路径跟踪误差对比图

Figure 9 Comparison chart of path tracking errors

3.3.3 滑移率控制效果与分析

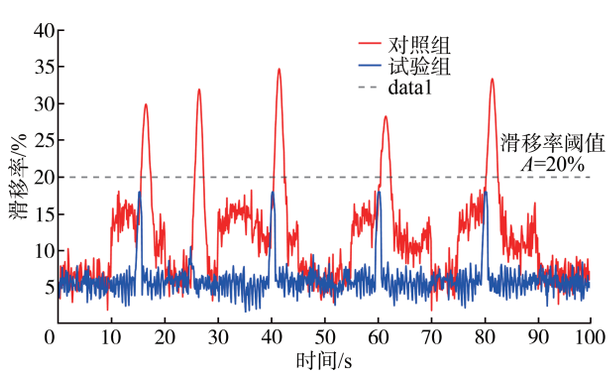


图10 滑移率随时间变化曲线

Figure 10 Slip rate over time curve

图10给出了两种控制策略下滑移率随时间的变化趋势。可以观察到,传统PID控制下滑移率波动剧

烈，在附着条件突变时出现多个尖峰；而自适应策略下滑移率变化更为平缓，始终被约束在合理区间内。

1）传统PID控制下的滑移演化过程。在传统PID控制中，发动机转速设定为常值，驱动力仅与油门开度相关。当车辆进入湿软土壤或坡道区域时，地面附着系数骤降，履带无法将输入扭矩完全转化为牵引力，导致滑移率迅速升高。由于控制器未对滑移状态进行反馈，发动机仍持续输出较高扭矩，使滑移率在短时间内形成尖峰，并伴随明显的速度波动。

2）自适应策略下的滑移抑制机理。在自适应控制策略中，滑移率被引入为直接反馈量。当滑移率超过20%阈值时，系统立即下调发动机目标转速，降低履带驱动扭矩，使履带—土壤接触状态由“滑转主导”逐步回归至“牵引主导”。随着驱动力与附着能力重新匹配，滑移率快速回落，车速变化趋于平缓，避免了剧烈的加减速过程。

3）弯道与斜坡区域的关键控制量时序对比。仅给出滑移率结果不足以揭示控制介入的内部机理。为此，本研究基于CAN总线记录的发动机目标转速/实际转速与地速信号，对图10中标注的弯道区域与斜坡区域分别截取对应时间窗，给出滑移率$s(t)$、发动机转速$n_{\mathrm{ref}}(t)$及车辆地速$v(t)$的时序对比。结果表明：传统PID在弯道与坡道负载突变时仍维持恒定转速，地速下降后误差增大，积分项累积造成转向修正过量，从而出现起步段波动与坡道段明显超调；而本研究策略在滑移接近阈值或姿态风险上升时提前下调目标转速并收紧转向约束，使驱动力与附着能力匹配，地速变化更平缓，因而抑制了超调与振荡。

3.3.4　滑移率与能耗关系的系统层面解释

在丘陵山地作业中，土壤含水率、下沉量与作物负载持续变化，整机能耗的关键矛盾并不在于“某一固定滑移率下的瞬时牵引效率最优”，而在于附着突变与坡—弯复合工况下高滑移尖峰所引起的无效做功、车速波动与控制反复介入。因此，本研究从系统层面将能耗优化理解为：在满足路径跟踪与姿态安全约束的前提下，通过抑制高滑移状态、降低工况波动，使发动机输出功更多转化为有效牵引功并减少无效剪切与搅土损耗。需要强调的是，牵引效率并非随滑移率减小而单调上升。松软土壤条件下履带/车轮牵引特性通常表现为：当滑移率处于较低区间（工程上常见约5%～15%）时，牵引力与效率取得较优折中；滑移率继续增大则无效剪切功显著增加并带来土壤扰动。本研究试验组平均滑移率为6.12%，属于低滑移工作区间；节油结论来源于对高滑移尖峰与超限时间的抑制以及工况平滑化，而非简单追求“越低越好”。从功率路径看，滑移率升高会使理论行驶功率中更大比例转化为履带—土壤剪切滑移功与搅土损耗，同时引起地速波动与作业时间增加。传统PID策略下发动机目标转速恒定，遇到附着条件突变时容易出现高滑移尖峰，导致发动机负荷与车速频繁波动；而本研究自适应策略将滑移率纳入闭环，当滑移接近阈值时主动下调发动机目标转速并限制急剧变化，使驱动力与附着能力重新匹配，从而降低“高扭矩—高滑移—低有效推进”的无效功率占比。

因此，试验组约4.94%的节油效果并不依赖“将滑移率压到极低值”，而主要来源于对超限高滑移状态的系统性抑制与发动机工况的平滑化。具体而言（表2），试验组的平均滑移率与最大滑移率分别为6.12 %和18.00%，较对照组（11.90%和34.00%）显著降低，滑移率标准差也从6.41%降至2.31%。尤为重要的是，对照组在20%阈值以上的超限时间占比为9.69%，而试验组全程无超限。本研究的能耗优化结论并非建立在“将滑移率压到极低值”的假设上，而是建立在削减高滑移超限状态、降低功率/速度波动、减少反复加减速与空转做功这一系统性机制之上。

表2　综合性能指标对比

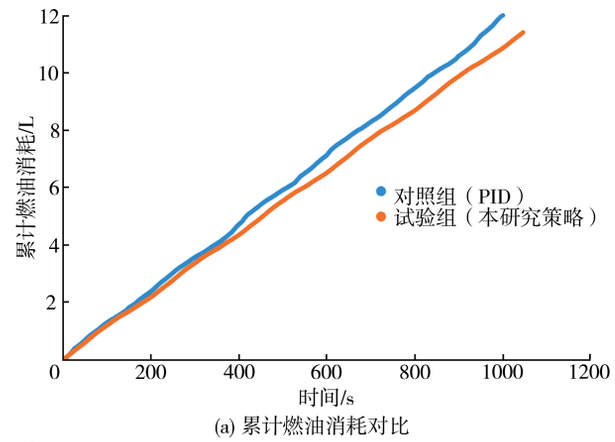
Table 2　Comparison of comprehensive performance indicators

评价指标	对照组	试验组	提升幅度/%
平均跟踪误差/m	0.117 1	0.020 8	82.27
最大跟踪误差/m	0.445 1	0.090 5	79.67
平均滑移率/%	11.90	6.12	48.57
最大滑移率/%	34.00	18.00	47.06
滑移率标准差/%	6.41	2.31	63.96

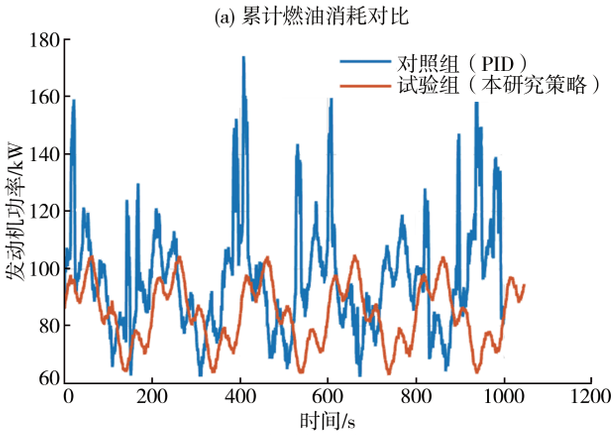
为直观呈现“滑移抑制—能耗降低”的系统效应，如图11所示。图11(a)为累计燃油消耗对比，其累计值由每次往返试验的燃油消耗量顺序累加得到，燃油消耗量按3.2节所述刻度测量容器方法在每次试验开始与结束后读数换算获得。

结果表明，在相同路线与作业参数条件下，试验组累计燃油消耗曲线整体低于对照组；综合3个往返试验统计，节油率为4.94%。图11(b)为发动机功率对比，可用于解释节油的“过程机理”：对照组在附着突变及弯坡复合段为维持误差收敛更易出现频繁加大油门与转向的情况，使发动机输出功率呈现更强的波动与峰值，而其中相当部分功率在高滑移状态下被消耗为无效剪切与滑转做功；试验组通过提前降速、限制急转与缓变恢复，降低了功率峰值与功率振荡，使发动机输

出功率在时间积分意义上更多用于有效推进,从而降低单位作业周期的燃油消耗。



(a) 累计燃油消耗对比



(b) 发动机功率对比

图 11 累计燃油消耗及发动机功率对比图

Figure 11 Cumulative fuel consumption and engine power comparison chart

4 结论

田间试验结果表明,所提出的基于滑移率与姿态反馈的自适应控制策略,有效解决了丘陵山地联合收割机在复杂地形下面临的滑移与失稳难题。相较于传统PID控制方法,策略展现出3个方面的显著优势:

1)在轨迹跟踪与滑移抑制方面,通过实时滑移率估计与发动机转速的自适应调节,系统将平均与最大滑移率分别从11.90%和34.00%显著降低至6.12%和18.00%。对驱动滑移的有效控制,直接提升了路径跟踪的精确性与平稳性,使平均与最大跟踪误差分别降低了82.27%与79.67%,实现了高精度的自主作业。

2)在作业安全性与车身稳定性方面,引入的侧倾角反馈与目标点偏置规则,使系统能够主动应对坡道工况。试验中,车辆最大侧倾角得到有效约束,验证了该策略能预先识别并化解侧翻风险,显著增强了在崎岖地形下的作业安全裕度。

3)在综合效能方面,该策略通过抑制无效滑转,将更多发动机功率转化为有效牵引力,在保证作业质量的同时实现了约4.94%的燃油节约。尽管为保障安全而采取的主动降速策略使作业时间略有增加约4.6%,但以此微小代价换取安全性与作业质量的显著提升,在安全优先的丘陵山地作业中具有充分的工程合理性与应用价值。为解决丘陵山地农机自动化作业中的能耗与安全问题,提供了一种行之有效的技术途径。

参 考 文 献

[1] 王法安, 曹钦洲, 李彦彬, 等. 丘陵山区自走式马铃薯联合收获机设计与通过性试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S2): 10−19.
WANG Faan, CAO Qinzhou, LI Yanbin, et al. Design and trafficability experiment of self-propelled potato harvester in hilly and mountainous areas [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S2): 10−19.

[2] 赵立军, 周文智, 殷文科, 等. 山地小型增程式油—电混动履带旋耕机动力匹配机制与控制策略研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(3): 22−34.
ZHAO Lijun, ZHOU Wenzhi, YIN Wenke, et al. Research on the power matching mechanism and control strategy of mountain small series-propulsion hybrid tracked cultivator [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(3): 22−34.

[3] LI Y, HE D, SI Q. Theoretical and experimental analysis on the interaction properties between tracks and sediments considering sand content for unmanned underwater tracked bulldozer [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2021: e136036−e136036.

[4] LI Y, HE D, MA F, et al. MPC-based trajectory tracking control of unmanned underwater tracked bulldozer considering track slipping and motion smoothing [J]. Ocean Engineering, 2023, 279: 114449.

[5] 郭存涵, 苏小平. 分布式驱动越野汽车驱动防滑控制[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(4): 608−612.
GUO Cunhan, SU Xiaoping. Acceleration slip regulation of distributed driving off-road electric vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering Research and Development, 2019, 38(4): 608−612.

[6] MARKDAHL J. Automatic traction control for articulated off-road vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 31(2): 945−952.

[7] VOŠAHLÍK D, HANIS T. Real-time estimation of the optimal longitudinal slip ratio for attaining the maximum traction force [J]. Control Engineering Practice, 2024, 145: 105876.

[8] CHANDRAKAR H, RAHEMAN H. Effect of contact length of bias ply tractor tire on its tractive performance [J]. Journal of Terramechanics, 2024, 113: 100969.

[9] ZHANG S, WEN C, REN W, et al. A joint control method considering travel speed and slip for reducing energy consumption of rear wheel independent drive electric tractor in ploughing [J]. Energy, 2023, 263: 126008.

[10] WANG Q, WANG X, WANG W, et al. Joint control method based on speed and slip rate switching in plowing operation of wheeled electric tractor equipped with sliding battery pack [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108426.

[11] WANG Q, WANG X, WANG W, et al. Plowing drag-adaptive operation control method based on motor temperature compensation for electric tractor [J]. Journal of Terramechanics, 2024, 112: 69－79.

[12] LUO Z, XIE B, CHEN Z, et al. Learning-based double layer control method of yaw stability simulation research for rear wheel independent drive electric tractor plowing operation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108985.

[13] 尹成强，高洁，徐广飞，等. 农用拖拉机侧翻保护与防侧翻控制关键技术研究综述[J]. 农业工程学报，2024，40(22)：1－11.
YIN Chengqiang, GAO Jie, XU Guangfei, et al. Key technologies on the rollover protection and anti-rollover control for agricultural tractors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(22): 1－11.

[14] de MELO R R, TOFOLI F L, DAHER S, et al. Wheel slip control applied to an electric tractor for improving tractive efficiency and reducing energy consumption [J]. Sensors, 2022, 22(12): 4527.

[15] BAEK S Y, JEON H H, PARK C G, et al. Slip and tractive efficiency of an electric tractor with a 4WID E-axle system [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 28424.

[16] DONG Y, WANG D, ZHANG L, et al. Tightly coupled GNSS/INS integration with robust sequential Kalman filter for accurate vehicular navigation [J]. Sensors, 2020, 20(2): 561.

[17] LI T, ZHANG H, NIU X, et al. Tightly-coupled integration of multi-GNSS single-frequency RTK and MEMS-IMU for enhanced positioning performance [J]. Sensors, 2017, 17(11): 2462.

[18] 李团，章红平，牛小骥，等. RTK/INS紧组合算法在卫星数不足情况下的性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2018，43(3)：478－484.
LI Tuan, ZHANG Hongping, NIU Xiaoji, et al. Performance analysis of tightly coupled RTK/INS algorithmin case of insufficient number of satellites [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(3): 478－484.

[19] HU C, RU Y, LI X, et al. Path tracking control for brake-steering tracked vehicles based on an improved pure pursuit algorithm [J]. Biosystems Engineering, 2024, 242: 1－15.

[20] IBRAHIM A E B. Self-tuning look-ahead distance of pure-pursuit path-following control for autonomous vehicles using an automated curve information extraction method [J]. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 2022, 20(3): 709－719.

[21] 关卓怀，沐森林，吴崇友，等. 履带式联合收获机水田作业转向运动学分析与试验[J]. 农业工程学报，2020，36(13)：29－38.
GUAN Zhuohuai, MU Senlin, WU Chongyou, et al. Steering kinematic analysis and experiment of tracked combine harvester working in paddy field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(13): 29－38.

[22] 李尚平，韦雨彤，任泓宇，等. 丘陵地区履带式甘蔗收获机横向调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(6)：374－385.
LI Shangping, WEI Yutong, REN Hongyu, et al. Design and experiment of leveling system for crawler-type sugarcane harvesters in hilly areas [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 374－385.

[23] LA H, OH K. Adaptive path-tracking control algorithm for autonomous mobility based on recursive least squares with external condition and covariance self-tuning [J]. World Electric Vehicle Journal, 2024, 15(11): 504.

[24] 胡宸玮，陈雨，曹佳宇，等. 4WID高地隙自走式电动喷雾机定速巡航控制方法[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(2)：19－32.
HU Chenwei, CHEN Yu, CAO Jiayu, et al. Research on constant speed cruise control of 4WID high ground clearance self-propelled electric sprayer [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(2): 19－32.

[25] LU E, MA Z, LI Y, et al. Adaptive backstepping control of tracked robot running trajectory based on real-time slip parameter estimation [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 178－187.

[26] 雷小龙，陈宇，李举，等. 谷物联合收获机底盘自动升降液压系统设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(2)：9－18.
LEI Xiaolong, CHEN Yu, LI Ju, et al. Design and experiment of chassis automatic lifting hydraulic system for harvester [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(2): 9－18.

Adaptive anti-slip control strategy for combine harvesters in hilly and mountainous terrain based on slip ratio and attitude feedback

ZHAO Lijun[1], DAI Fancheng[1], LEI Liangyao[1], HU Fansen[1], SHEN Cheng[2, 3], ZHANG Xuefeng[1*]

(1. *Chongqing University of Arts and Sciences*, *Chongqing* 402160, *China*; 2. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*; 3. *Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: To address the problems of track slippage, speed fluctuations, attitude instability, and even rollover risks that can occur in combine harvesters operating on undulating slopes, overlapping cross slopes, and soft, wet soil conditions, leading to decreased path tracking accuracy and increased energy consumption, this study proposes an adaptive anti-slip control strategy based on slip-ratio and attitude feedback. The strategy treats the vehicle slip ratio and roll (lateral tilt) angle as the key state variables, integrates positioning data with inertial measurements to obtain these critical states online, and establishes a hierarchical risk-identification mechanism with four levels: "normal-slip risk-attitude risk-coupled high risk". Thresholds and hysteresis-based exit rules are incorporated to prevent frequent controller switching near critical operating boundaries. Unlike conventional fixed-parameter schemes that focus only on lateral tracking error, this study innovatively integrates longitudinal traction regulation and lateral stability intervention within a unified closed loop. When slip risk is triggered, the controller adaptively reduces the engine target speed to suppress excessive slip. When attitude risk is detected, it simultaneously reduces speed and applies an uphill-direction bias to the preview target point, guiding the vehicle toward a more favorable stabilizing trend. Under the coupled high-risk state where slip and attitude risks coexist, a safety supervisor arbitrates control priorities to realize coordinated control following the principle of "attitude safety first, traction second, tracking last", thereby balancing safety, tracking accuracy, and fuel economy under complex terrain and load fluctuations. Field comparative experiments were conducted on a tracked combine harvester platform on slopes of approximately 15°—25° with soil moisture content of about 25%—30%. The results show that the proposed method reduces the average path-tracking error from 0.117 1 m to 0.020 8 m and the maximum error from 0.445 1 m to 0.090 5 m, achieves an average slip ratio of approximately 6.12% with a maximum of about 18.00%, and yields an overall fuel-saving improvement of approximately 4.94%. In summary, this study unifies slip-ratio and attitude-risk modeling to drive control-mode switching, and introduces an uphill-biased preview point together with a safety-supervision priority mechanism, providing a practical adaptive anti-slip and stable-operation control solution for hillside and mountainous combine harvesters.

Keywords: combine harvesters; adaptive control; hilly and mountainous terrain; slip ratio; attitude feedback; path tracking

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(52272438); Chongqing 2024 Integrated′ Leaderboard and Leadership′ Project for the Research, Production, Promotion, and Application of Agricultural Machinery Equipment (cqjjxxwjbgs-njzb2024002); Chongqing Science and Technology Bureau Talent Program Project(20231102); 2025 Graduate Research and Innovation Project of Chongqing City(CYS25872)

First Author: ZHAO Lijun, E-mail: 20190005@cqwu.edu.cn

* **Correspondence Author:** ZHANG Xuefeng, E-mail: 1534868347@qq.com