DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.01.008

滩涂贝类采收设备自动驾驶滑移模型研究

张志磊[1]，郭飞宏[1]，周炳洋[1]，徐斌[1]，吴昊[1]，母刚[1, 2, 3*]

(1. 大连海洋大学机械与动力工程学院，辽宁大连，116023；2. 辽宁省海洋渔业装备专业技术创新中心，辽宁大连，116023；3. 设施渔业教育部重点实验室，辽宁大连，116023)

摘要：针对自走轮式滩涂贝类采收设备在作业时，由于滩涂底质受力应变导致车轮滑动产生相对位移，进而影响自动驾驶路径跟踪精度等问题，本研究提出了一种基于车辆运动学和动力学模型的滑移预测方法。根据四轮底盘运动学模型推导车辆运动轨迹，并结合轮胎横向和纵向受力特性，建立设备行走动力学模型，明确纵向滑移与横向滑移滑转的计算方法。本研究设计了一套自动驾驶试验平台，包括感知层、规划层和控制层，通过RTK-GNSS系统及相关传感器采集设备位置、转角及轮速等信息。通过纵向滑移试验与横向滑移滑转试验，探究采收设备在滩涂环境下的滑移特性。纵向滑移试验分析了电机PWM(pulse width modulation)与设备载重对滑移率的影响，并通过数据拟合建立纵向滑移模型。横向滑移滑转试验探讨了不同转向角条件下的滑移特性，拟合得出横向滑移滑转模型。为简化计算，模型采用泰勒多项式形式表达滑移系数函数，并通过试验验证模型准确性，实际轨迹与预测轨迹误差小于16%，显著降低了滩涂自动驾驶滑移干扰误差。本研究通过试验分析和模型优化，提升了滑移预测精度，为滩涂贝类采收设备在软质地面环境下实现高精度导航提供参考。未来可进一步研究滑移模型参数实时估计与触土部件动力学建模，以提高设备作业性能。

关键词：自动驾驶；滩涂；贝类采收；动力学模型；滑移预测

中图分类号：S24 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-7217(2025)01-0081-10

张志磊，郭飞宏，周炳洋，徐斌，吴昊，母刚. 滩涂贝类采收设备自动驾驶滑移模型研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2025，6(1)：81－90

ZHANG Zhilei, GUO Feihong, ZHOU Bingyang, XU Bin, WU Hao, MU Gang. Research on slip model of automatic driving of shellfish harvesting equipment in mudflat [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(1): 81－90

0 引言

中国是贝类养殖大国，2023年我国贝类养殖产量16 650 kt，约占渔业养殖总产量29%，贝类养殖面积1 350 khm^2，占总面积62%[1]。但滩涂贝类采收长期面临诸多挑战，其底质特性复杂多变，在空间和时间维度上波动大。在这种复杂环境下，滩涂贝类采收仍长期依赖传统人工和机械采收方法，直接导致生产效率低下。近年来，大农业领域的农业设备已经从机械化、电气化朝着自动化、智能化方向发展[2-7]。自动驾驶技术[8-10]的应用更是极大减小了从业人员的劳动强度，值得在滩涂渔业上借鉴发展，但由于滩涂底质易受力应变，导致设备在行走时滑移量大，对自动驾驶系统造成较大干扰，使得自动驾驶精度难以得到保证。党的二十大报告明确提出，要加快发展现代渔业，推动渔业高质量发展，促进渔业与生态环境协调发展，提升渔业生产力和可持续发展能力。为此，推动滩涂渔业生产的自动化、智能化进程，将有助于提升渔业效率和可持续发展，符合国家对渔业发展的战略要求。

自动驾驶技术研究内容主要包括传感器定位、路径规划和轨迹追踪等。在轨迹追踪的研究中，涉及的主要控制方法包括PID控制[11-13]、模糊控制[14-16]、纯追踪[17-19]以及模型预测[20-22]等。张凯良等[17]针对玉米收获机以横向偏差和航向偏差为输入，利用模糊控制原理的动态调整纯追踪模型的前视距离，确定转向轮的期望转角。张万枝等[22]提出一种基于线性时变模型预测控制的路径跟踪方法，提高了农业车辆导航路径自动跟踪精度，所设计的自适应模型预测控制器在跟踪

收稿日期：2024-12-01 修回日期：2025-01-05

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD2400800)；辽宁省教育厅基本科研项目(LJ232410158048)；辽宁省本科高校基本科研业务费项目(2024JBPTZ002)；辽宁省科技计划联合计划(2024JH2/102600082)；大连市科技创新基金(2024JJ13GX039)

第一作者：张志磊，男，1996年生，内蒙古通辽人，硕士研究生；研究方向为滩涂自动驾驶。E-mail：1455518698@qq.com

*通信作者：母刚，男，1982年生，内蒙古乌兰察布人，博士，正高级实验师；研究方向为渔业装备。E-mail：mugang@dlou.edu.cn

精度和稳定性方面都有较大改善。提高滩涂自动驾驶精度前提是降低滑移量和扰动误差对自动驾驶控制系统的影响,上述方法,难以减小滑移滑转的扰动对自动驾驶的影响。有学者采用滑移、滑转系数等描述履带车辆的滑动程度[23-24]。ZHAO等[25]分析履带式机器人滑移滑转特性,建立了履带与土壤之间的运动学模型并估计履带机器人行驶过程中的滑移滑转参数,显著降低了轨迹预测误差。毕松等[26]提出了轮胎驱动力实时估计及优化分配算法,解决了因滑动转向控制器设计时轮胎动力学参数简化导致的机器人姿态控制稳定性低等问题。但针对类似滩涂复杂环境的滑移模型建立少有研究。

滩涂滑移大且不能被消除,预测出滑移量进而进行补偿能有效提高自动驾驶精度。因此,本研究针对此问题,建立滑移滑转预测模型。在滩涂进行试验,验证模型的准确性,旨在提高滩涂自动驾驶的精度,为轮式设备在柔性底质高精度导航系统设计提供参考。

1 试验平台设计

轮式车辆设备在道路上行走时,滑移、滑转可以忽略不计,但在滩涂地形中,轮式底盘设备行走会产生超过30%的滑移率,且行走误差超过20%,导致滩涂作业漏采率和复采率高。本研究的滩涂贝类采收设备,是具有代表性的前轮转向和后轮驱动底盘的设备类型,底盘作为农业机械的行走装置和动力装置,是实现农业机械自动导航的载体。底盘主要包括轮式和履带式两种,相较于履带式底盘,轮式车辆的结构简单,维护成本相对较低,可实现采收、运输等一系列滩涂作业任务。为了便于自动驾驶研究的快速验证,本研究针对滩涂贝类采收设备设计了一种轮式自动驾驶试验平台,试验平台主要由GNSS天线、RTK基站、移动卫星定位模块i.MX 6ULL单片机、转角传感器等组成。自动驾驶的试验平台如图1所示。

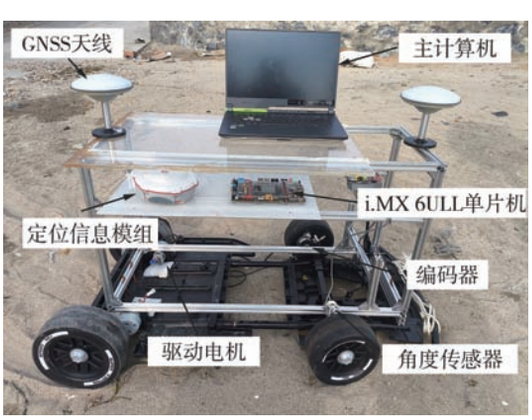


图1 自动驾驶试验平台

Figure 1 Autonomous driving experiment platform

滩涂贝类采收自动驾驶试验平台采用了典型的3层电气结构。分为感知层、规划层和控制层,如图2所示。3层架构的细节描述如下。

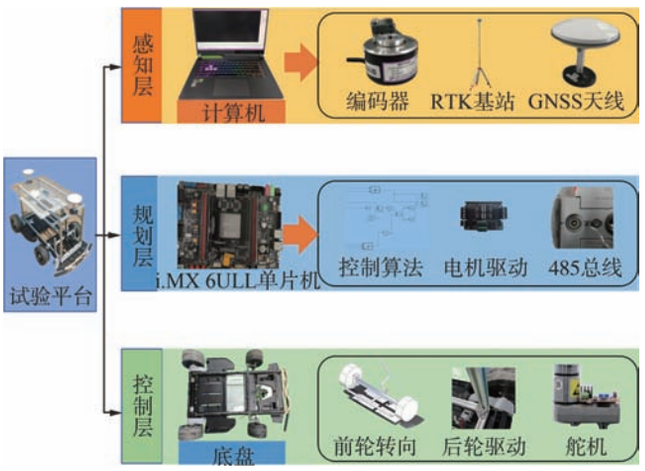


图2 试验平台3层架构

Figure 2 Three-layer architecture of the experimental platform

1)感知层:系统从RTK-GNSS系统中收集信息数据,通过数据的解析得到了车辆当前位置信息。从角度传感器中获取前轮转角,从编码器中获取后轮转动的圈数,计算预测车辆的纵向滑移和横向滑移滑转。

2)规划层:该层利用i.MX 6ULL单片机控制试验平台执行试验时的动作。单片机通过串口接收来自感知层的位置信息和转向角度数,按照规定对车辆的行进速度和转向角度进行控制。本研究通过试验,得到了在滩涂环境下同型号车辆的载重、速度和转向角与车辆滑移之间的关系。

3)控制层:该层由底盘、前轮转向系统、后轮驱动系统组成,通过舵机实现对前轮转向角度的控制,后轮电机控制车辆速度,是实现车辆按规定速度和转向运动的基础。

导航控制系统采用基于上海司南导航技术股份有限公司的T30导航模块组成基站模块和移动模块,供电电压6~24 V,由基站模块通过电台向车载移动模块发射RTK差分信号,车载移动站负责接收基站差分信号和太空卫星信号进行差分运算得到定位信息。

2 车辆滑移预测模型建立

车辆数学模型的建立涉及对车辆在运动过程中的运动学和动力学研究,目的是为车辆控制提供更准确的参数依据。在车辆作业过程中,基于运动学模型确定理论位置,主要研究车辆的坐标、速度和航向。动力学模型将车辆视为刚体,不考虑车辆内部力的作用和材料的形变,通过车辆自身的移动、旋转以及外部受力来研究车辆的纵向和横向动力学特性。通过分析车辆

的速度变化和转向，确定车辆在不同时间点的受力状态。纵向动力学主要分析车辆的加速度、牵引力和阻力推测车辆滑移，横向动力学则根据车辆的转动惯量和侧向合力分析车辆的滑移滑转趋势。

2.1　车辆运动学模型

在地固坐标系下，将作业的滩涂近似为平面 XOY，建立车辆阿克曼运动学模型[27-29]。通过对车速和前轮转向角数据的采集，运用阿克曼运动学模型计算出车辆的理论位移距离。

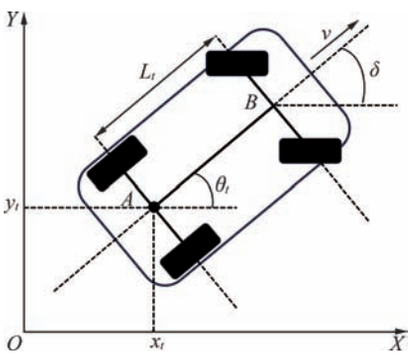


图 3　车辆运动学模型

Figure 3　Vehicle kinematics model

注：A——车辆后轮轴的中点坐标(x_t,y_t)；B——前轮轴的中点；L——前后轴距，m；v——车辆行进速度，m/s；φ——车辆航向角，rad；δ——前轮转向角，rad。

如图 3 所示建立作业车辆的运动学模型，计算车辆的理想位置。

$$x_0' = v \cdot \cos(\varphi) \tag{1}$$

$$y_0' = v \cdot \sin(\varphi) \tag{2}$$

$$\varphi' = w = \frac{v}{R} = \frac{v}{L} \cdot \tan(\delta) \tag{3}$$

式中：x_0'——x 轴方向的分速度，m/s；

y_0'——y 轴方向的分速度，m/s；

φ——车辆运动数据中的航向角，rad；

φ'——航向角速度，rad/s；

v——车辆运动数据中的车速，m/s；

δ——车辆运动数据中的前轮转向角，rad/s；

L——车辆前轴与后轴的轴距，m；

R——车辆转向时瞬心到车辆后轮轴中心点的距离，m。

2.2　车辆动力学模型

车辆动力学模型用于描述车辆在运动中的动力学行为，它通过研究力、力矩、速度和加速度之间的关系，揭示车辆在行驶过程中的动态特性。车辆动力学模型可分为纵向动力学和横向动力学，如图 4 所示。纵向动力学模型通过车辆位移和前后轮转速以及前后轮纵向受力分析纵向滑移趋势。横向动力学模型基于车辆的速度、加速度和前后轮横向受力情况，推测车辆在转向过程中的滑移滑转趋势。通过对纵向滑移量和横向滑移量进行矢量叠加分析，得到作业设备在运行时的总滑移滑转量。车辆动力学模型为控制系统设计提供了理论依据，通过对控制系统的优化提高自动驾驶车辆在滩涂环境下的运动精度和稳定性。

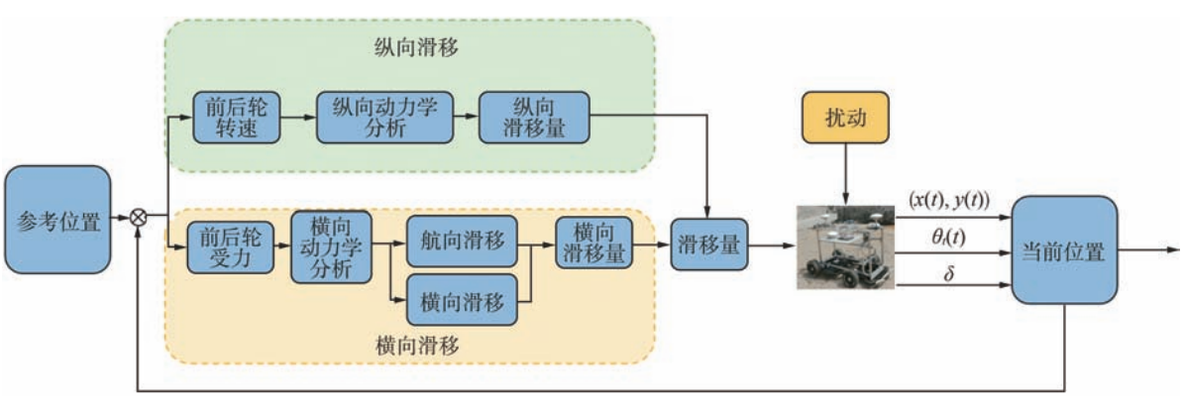


图 4　作业设备滑移量示意图

Figure 4　Schematic diagram of slip for operational equipment

注：$(x(t),y(t))$——车辆位置坐标；$\theta_t(t)$——车辆航向角，rad；δ——前轮转向角，rad。

2.2.1　纵向动力学模型

纵向动力学主要关注车辆沿着其运动方向（通常是前进方向）的运动特性。关键变量包括：车辆的前进速度、后轮转速，后轮和前轮与地面的相互作用力。详细受力分析如图 5 所示。

根据纵向动力学模型确定车辆的纵向受力状态，因为滩涂采收设备速度慢，忽略风阻影响，所述纵向受力状态表示为

$$F = F_{\mathrm{ff}} + F_{\mathrm{rf}} \tag{4}$$

滑移率表示为

$$\varepsilon = v / v_{\mathrm{r}} \tag{5}$$

式中：v_{r}——后轮速度，m/s；

ε——滑移率。

又因为滩涂环境的多变，速度很难表征轮胎与地

面的相互作用力,故将速度替换为控制器直接控制的脉宽调制(pulse width modulation)信号。

$$v_r = f_v(pwm) \tag{6}$$

式中:pwm——高电平持续时间占整个周期的比例。

根据纵向受力状态求解纵向滑移公式,所述纵向滑移公式表示为

$$\varepsilon_x = k_x \cdot f_x(pwm, mg, \Delta t) \tag{7}$$

式中:f_x——根据车辆速度以及车辆自重作为自变量,纵向滑移作为因变量对应的纵向动力学函数;

k_x——纵向滑移影响因子;

ε_x——纵向滑移系数。

Δt——车辆受力状态下的受力时间,s。

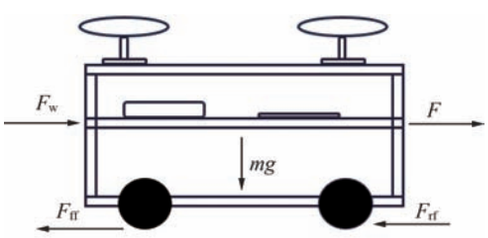


图 5 车辆纵向受力分析图

Figure 5 Vehicle longitudinal force analysis diagram

注:F——车辆后轮驱动力,N;F_{ff}——车辆前轮与地面的滚动阻力,N;F_{rf}——车辆后轮与地面的滚动阻力,N;F_w——风阻,N;mg——车辆自重,N。

2.2.2 横向动力学模型

横向动力学关注车辆在垂直于其运动方向上的运动特性[30-32],如转弯和横向移动。关键变量包括:横向滑移量,即车辆在转弯时前后轮受同向力作用产生的侧向滑移;航向滑移,即转弯时,前后轮受力不同产生的转动惯量,也称滑转。横向动力学模型的受力如图6所示。

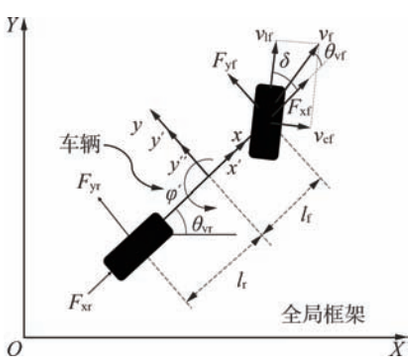


图 6 车辆横向受力分析

Figure 6 Lateral force analysis of vehicle

注:y、y'、y''——垂直于车辆行进方向的位移、速度和加速度,m,m/s,m/s^2;x、x'——平行于车辆运动方向的位移,速度,m,m/s;φ'——车辆航向角速度,rad/s;F_{yf}——前轮的横向受力,N;F_{xf}——前轮的纵向受力,N;F_{yr}——后轮的横向受力,N;F_{xr}——后轮的纵向受力,N;l_f——前轮轴与质心间的距离,m;l_r——后轮轴与质心的距离,m;θ_{vf}——前轮的侧偏角,rad;v_f——车辆速度,m/s;v_{lf}、v_{cf}——车辆速度方向的分速度,m/s;θ_{vr}——后轮的侧偏角,rad。

根据横向动力学模型确定位移预测数据下车辆的横向受力状态,所述横向受力状态表示为

$$m(y'' + x' \cdot \varphi') = F_{yf} + F_{yr} \tag{8}$$

$$l_z \cdot \varphi' = F_{yf} \cdot l_f + F_{yr} \cdot l_r \tag{9}$$

$$F_{yf} = 2Ca_f(\delta - \theta_{vf}) \tag{10}$$

$$F_{yr} = 2Ca_r(-\theta_{vr}) \tag{11}$$

$$\tan\theta_{vf} = (v_y + \varphi' \cdot l_f)/v_x \tag{12}$$

$$\tan\theta_{vr} = (v_y + \varphi' \cdot l_r)/v_x \tag{13}$$

式中:v_x——车辆纵向分速度,m/s;

v_y——车辆横向分速度,m/s;

m——车辆质量,kg;

l_z——车辆的转动惯量;

Ca_f——前轮的侧偏刚度;

Ca_r——后轮的侧偏刚度。

根据横向受力状态求解航向滑移公式和横向滑移公式,所述滑转模型表示为

$$\begin{aligned}\varepsilon_\varphi &= f_\varphi(I_z \cdot \varphi'') = f_\varphi(\varphi, F_{yf}, F_{yr}) = f_\varphi(\delta, v, m, l_f, l_r)\\ &= k_\varphi \cdot m\left(l_f\left(2Ca_f\left(\delta - \arctan\left(\frac{v_y + \varphi' \cdot l_f}{v_x}\right)\right)\right)\right.\\ &\quad \left. + l_r\left(2Ca_r \cdot \left(-\left(\arctan\left(\frac{v_y - \varphi' \cdot l_r}{v_x}\right)\right)\right)\right)\right)\end{aligned} \tag{14}$$

式中:ε_φ——航向滑移系数;

f_φ——航向滑移方程;

k_φ——航向滑移影响因子。

所述横向滑移模型表示为

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= f_y(F_y) = f_y(F_{yf}, F_{yr}) = f_y(\delta, v, m, l_f, l_r)\\ &= k_y \cdot m\left(Ca_f\left(\delta - \arctan\left(\frac{v_y + \varphi' \cdot l_f}{v_x}\right)\right)\right.\\ &\quad \left. + Ca_r\left(-\left(\arctan\left(\frac{v_y - \varphi' \cdot l_r}{v_x}\right)\right)\right)\right)\end{aligned} \tag{15}$$

式中:ε_y——横向滑移系数;

k_y——横向滑移影响因子;

f_y——横向滑移函数;

F_y——车辆的横向受力;

k_y——车辆横向滑移系数拟合函数。

2.3 车辆滑移模型

在车辆行进时两轮横向受力无法直接计算,当车辆转弯时前轮转动一定的角度,车辆运动方向、轮胎朝向和轮速度方向各不相同,轮胎与路面之间产生摩擦力,摩擦力是前后轮横向力的主要来源,车辆实际行驶方向与车辆纵向分速度方向之间夹角为侧偏角,侧向力与侧偏角的大小直接相关,车辆速度较小时,侧偏角与轮胎的侧向力线性度更好,所以传统动力学模型中

小侧偏角假设是一个重要前提。

滩涂土壤与硬质路面性质相差大，车辆在滩涂受横向力后车辆轮胎与涂面相互作用，产生滑移的同时涂面也会受力应变，图 7 展示了试验平台在静止状态下，滩涂受到横向力作用时轮胎的移动距离。研究结果表明，当施加的横向力达到 30 N 时，滩涂土壤出现应变，车辆的移动开始被监测到。而当横向力增加到 140 N 时，明显的失稳滑移现象开始出现。这一过程表明了土壤应变与横向力之间的关系，以及其对车辆稳定性的影响。所以在滩涂中传统动力学模型中的小侧偏角假设会产生更大的误差。这种误差不仅来自侧偏角与侧向力之间的非线性因素，更多的来自滩涂涂面与轮胎的相互作用，因为滩涂土壤性质随时间和空间波动大无法使用函数代表。

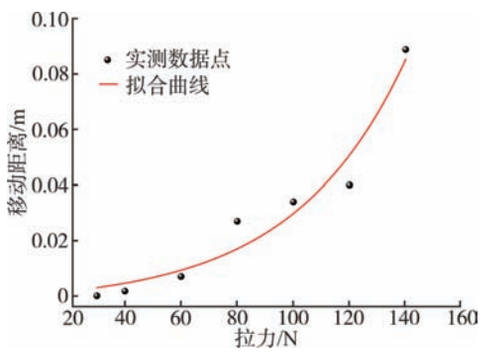


图 7　车辆在滩涂土壤上受 20 s 横向力轮胎移动距离

Figure 7　The lateral displacement of the vehicle on the tidal flat soil under force for 20 seconds

根据所述纵向滑移系数 ε_x、航向滑移系数 ε_φ 以及横向滑移系数 ε_y 求解车辆运动轨迹公式，基于运动轨迹公式构建滑移模型，所述运动轨迹公式表示为

$$f(x,\varphi)=\begin{bmatrix} x(v,\delta)+\varepsilon_y\cdot t+\varepsilon_x\cdot t \\ \varphi(v,\delta)+\varepsilon_\varphi\cdot t \end{bmatrix} \tag{16}$$

式中：$f(x,\varphi)$——运动轨迹；

$x(v,\delta)$——位移轨迹；

$\varphi(v,\delta)$——航向角轨迹；

t——车辆运动的时间，s。

因试验条件限制，横向滑移与航向滑移在实际测量时难以区分，故将两个滑移合并

$$\begin{aligned}\varepsilon_y&=f_y(I_z\cdot\varphi'',F_y)=f_y(\delta,v,m,l_f,l_r)\\&=(k_y+k_\delta)\cdot((\delta-\arctan(v_y+\varphi'\cdot l_f/v_x))\\&\quad+(\arctan(v_y-\varphi'\cdot l_r/v_x))\end{aligned} \tag{17}$$

这里将侧偏刚度归为轮胎与滩涂地面的复杂互相作用因素里。滑移系数函数复杂，且在实际计算中车辆参数会根据载重等外界因素变化，数值很难确定。所以使用泰勒级数展开，将复杂函数替换为计算更简单的多项式表达式。这样可以简化计算过程，提高计算效率，也方便滩涂贝类采捕机动态工作过程中根据前几次计算周期的运动状态更新模型系数，增强模型的适用性。故将纵向滑移和横向滑移滑转系数展开为泰勒多项式形式。

纵向滑移公式

$$\begin{aligned}\varepsilon_x&=k_x\cdot f_x(v,mg)\\&=y_0+a_1\cdot v+a_2\cdot mg+a_{12}\cdot v\cdot mg+\\&\quad a_{21}\cdot v\cdot mg\cdots\end{aligned} \tag{18}$$

横向滑移公式为

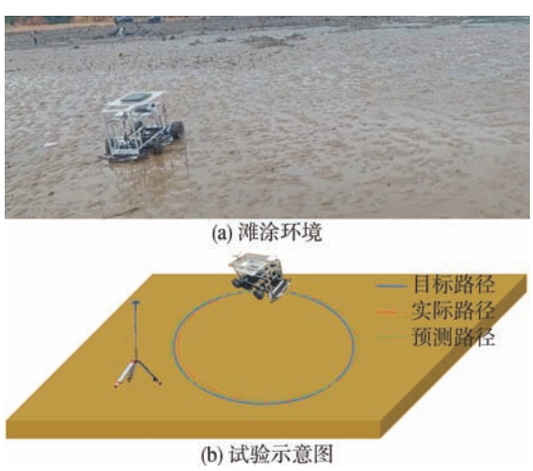
$$\begin{aligned}k_y+k_\delta&=y_0+a_1\cdot\delta+a_2\cdot v+a_3\cdot mg+a_{12}\cdot\delta\cdot v+\\&\quad a_{13}\cdot\delta\cdot mg+a_{23}\cdot v\cdot mg\cdots\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_y&=k_y\cdot f_y(\delta,v,mg)=\varepsilon_y\cdot((\delta-\arctan(v_y+\varphi'\cdot\\&\quad l_f/v_x))+(\arctan(v_y-\varphi'\cdot l_r/v_x))\end{aligned} \tag{20}$$

3　试验研究

3.1　材料与方法

为获得滑移预测模型拟合函数的多项式结构，于 2024 年 7 月 20—28 日在中国辽宁省大连市庄河东经 123°13′3″，北纬 39°42′4″，每日落潮期间进行滩涂行走试验。试验现场为沿海地区的沙质滩涂，潮汐活动导致地表的海水周期性淹没与裸露，退潮过程中，地表残留的水体以水洼形式分布，形成了复杂的水—土交互环境。沙质滩涂的颗粒组成主要为细沙，具有较高的透水性和排水性，导致水体在退潮后迅速渗透至沙层内部，形成了水纹形状凸起，但仍在地表形成小型水洼。这些水洼在地表的分布呈现不均匀性，受地形微起伏的影响，如图 8 所示。



(a) 滩涂环境

(b) 试验示意图

图 8　场地与试验

Figure 8　Site and test

考虑到滩涂贝类采捕车作业时行进速度一般不超过 0.45 m/s[33]，本试验将试验平台行进速度设定在 0.1～0.45 m/s 之间，导航系统数据采集频率为 10 Hz。分别开展纵向滑移试验、定转向角滑移滑转试验。

3.2 结果与分析

3.2.1 纵向滑移试验

针对滩涂贝类采捕车进行采捕作业时产生纵向滑移的问题,设计了纵向滑移试验。试验平台搭载设定的载重,控制后轮以设定的速度直线行走。试验平台的转向轮采用半径为0.105 m的橡胶轮,驱动轮采用半径为0.125 m的橡胶轮。以高精度BDS-RTK测量试验平台的行进轨迹,通过光电编码器的数据计算驱动轮转动圈数,在试验场地内进行了21组测试,对数据进行分析,部分数据如表1所示。

表1 纵向滑移试验

Table 1 Longitudinal sliding test

序号	载重/kg	PWM占空比/%	车辆平均速度/(m·s^{-1})	平均后轮转速/(m·s^{-1})	平均滑移率/%	滑移率最值差/%
1	0	30	0.219 42	0.300 38	37.11	8.81
2	0	35	0.303 60	0.386 47	27.34	7.22
3	0	40	0.385 16	0.467 82	21.51	8.37
4	5	30	0.237 03	0.283 12	19.51	10.75
5	5	35	0.303 66	0.360 69	18.92	7.50
6	5	40	0.380 26	0.434 61	14.29	0.27
7	10	30	0.201 26	0.240 48	19.63	5.32
8	10	35	0.274 26	0.321 56	17.26	4.74
9	10	40	0.337 82	0.390 71	15.65	0.50

速度与纵向滑移率关系如图9所示。

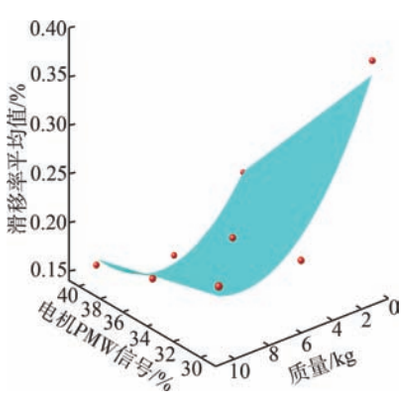


图9 速度与纵向滑移率关系图

Figure 9 Velocity and longitudinal slip rate diagram

通过试验数据拟合出空载情况下PWM与速度的关系函数

$$y = 0.314\,93x^{1.928\,45} \tag{21}$$

$$R^2 = 0.998\,18 \tag{22}$$

并进一步拟合出PWM、载重与纵向滑移率的关系函数为

$$y = 0.779\,16 - 0.014\,07x_1 - 0.073\,86x_2 + 0.002\,21x_2^2 + 0.001\,16x_1x_2 \tag{23}$$

$$R^2 = 0.968\,72 \tag{24}$$

拟合结果显示纵向滑移系数多项式在最高次为二次的情况下拟合度达到要求。故多项式最高次数设为二次幂。

3.2.2 滑移滑转试验

针对滩涂贝类采捕车在转向过程中产生的横向滑移滑转问题,设计了滑移滑转试验。在选定的试验场地内进行了27组测试,对数据进行分析,部分数据如表2所示,滑移滑转因传感器检测能力不足,无法分别测量,后分析试验数据未能将两个指标分离,考虑到本试验平台试验时速度低,横向所受合力小,故将滑移和滑转合并,以滑转进行表征。

拟合得到前轮转角、PWM和载重与横向滑移的系数函数为

$$y = y_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \tag{25}$$

拟合结果显示横向滑移系数多项式在最高次为二次的情况下拟合度达到要求,R^2=0.942 42。故多项式最高次数设为二次幂。

3.3 验证试验

为验证本文滑移滑转预测方法的可行性,在滩涂试验场地进行试验平台实际行走验证试验,控制试验平台以PWM占空比36%、载重6 kg的条件下直线行驶20 s,后前轮向左定转向角25°行驶20 s。试验结果如图10所示,与运动学理论轨迹相比,本研究动力学预测模型轨迹较为贴近实际轨迹,且预测模型轨迹与实际行走轨迹误差小于16%。本研究可以有效减小滩涂贝类采收设备自动驾驶控制系统外界干扰带来的误差。

表 2　横向滑移试验

Table 2　Longitudinal sliding test

序号	前轮转角/(°)	载重/kg	PWM 占空比/%	直径/m	偏移距离/m	角度偏移率/%
1	20	0	30	5.65	1.666	36.91
2	20	10	30	5.563	1.579	36.03
3	20	0	40	5.33	1.346	33.54
4	20	10	40	5.225	1.241	32.36
5	10	0	35	8.43	0.207	9.59
6	10	10	35	7.9	0.323	3.99
7	30	0	35	2.265	0.246	14.30
8	30	10	35	2.23	0.281	13.26
9	10	5	30	7.5	0.723	0.71
10	10	5	40	9.07	0.847	15.53
11	30	5	30	2.17	0.341	11.43
12	30	5	40	2.22	0.291	12.96
13	20	5	35	5.46	1.476	34.96

表 3　拟合参数结果

Table 3　Results of fitting parameters

拟合参数	拟合结果	拟合参数	拟合结果
y_0	−1.013 970 0	a_{22}	0.000 165 6
a_1	0.013 090 0	a_{33}	−0.002 500 0
a_2	0.006 270 0	a_{12}	−0.000 230 7
a_3	0.108 100 0	a_{13}	−0.000 171 2
a_{11}	−0.000 101 3	a_{23}	−0.000 064 9

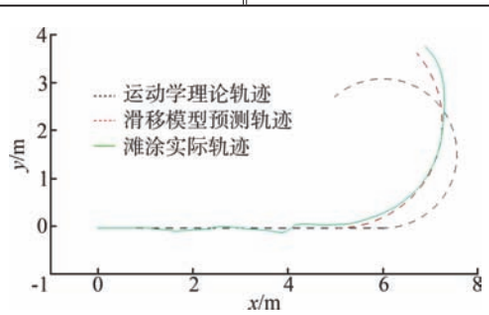


图 10　轨迹图

Figure 10　Trajectory diagram

4　结论

1）本研究提供了一种应用于滩涂贝类采收设备的自动驾驶滑移预测方法。该方法基于车辆运动学和动力学模型建立了路径跟踪时的纵向滑移和横向滑移滑转计算方法；为研究不同因素的影响，将滑移系数与车辆动力学方程分离，使滑移函数可以单独表征轮胎与滩涂地面的作用因素，并将滑移系数列为泰勒公式形式，并通过滩涂试验拟合得出滑移系数方程的各项系数。并进行验证试验，实际行走轨迹与预测模型轨迹误差小于16%。

2）本研究针对滩涂环境预测车辆滑移，降低滩涂四轮车辆自动驾驶控制系统的外部扰动，滑移模型是根据传统车辆动力学建立，优化了轮胎与滩涂之间的模型，但并未针对具体滩涂贝类采收触土部件建模，导致采收设备作业误差加大；另一方面因数据采集设备限制未能将横向的滑移和滑转分离开；拟合的滑移函数缺乏实时性。接下来，研究工作将围绕3个方面展开：针对滑移模型参数与传感器的适配性进行优化；对滑移系数进行实时估计；进一步完善动力学模型中轮胎与滩涂土壤的关系和开展触土部件的建模工作。

参　考　文　献

[1] 农业农村部渔业渔政管理局．2024年中国渔业统计年鉴[M]．北京：中国农业出版社，2024：17−50.

[2] 万欢，欧媛珍，管宪鲁，等．无人农机作业环境感知技术综述[J]．农业工程学报，2024，40(8)：1−18.
WAN Huan，OU Yuanzhen，GUAN Xianlu，et al. Review of the perception technologies for unmanned agricultural machinery operating environment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2024，40(8)：1−18.

[3] BECHAR A，VIGNEAULT C. Agricultural robots for field operations：Concepts and components [J]. Biosystems Engineering，2016，149：94−111.

[4] MHAMED M，ZHANG Z，YU J，et al. Advances in apple′s automated orchard equipment：A comprehensive

research [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108926.

[5] 李文峰, 徐蕾, 杨琳琳, 等. 基于改进蚁群算法的农业机器人多田块路径规划方法与试验[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(4): 823－834.
LI Wenfeng, XU Lei, YANG Linlin, et al. Multi field path planning method and experiment of agricultural robot based on improved ant colony algorithm [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(4): 823－834.

[6] 卢心缘, 赵华民, 任锐, 等. 基于YOLOv5s-seg的非结构化枣园视觉导航路径提取[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(6): 1241－1250.
LU Xinyuan, ZHAO Huamin, REN Rui, et al. Unstructured jujube garden visual navigation path extraction based on YOLOv5s-seg [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(6): 1241－1250.

[7] 张腾霄, 王斌, 王鹏, 等. 引领世界新一轮农业革命、筑牢粮食安全体系的中国式农业强国路径[J]. 农业展望, 2024(3): 26－32.
ZHANG Tengxiao, WANG Bin, WANG Peng, et al. Path of a Chinese style agricultural power that leads the world's new round of agricultural revolution and solidifies the food security system [J]. Agricultural Outlook, 2024 (3): 26－32.

[8] XIE B, JIN Y, FAHEEM M, et al. Research progress of autonomous navigation technology for multi-agricultural scenes [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107963.

[9] 史扬杰, 程馨慧, 奚小波, 等. 农业机械导航路径跟踪控制方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 1－14.
SHI Yangjie, CHENG Xinhui, XI Xiaobo, et al. Research progress on the path tracking control methods for agricultural machinery navigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(15): 1－14.

[10] 万其号, 布库, 邢植. 基于北斗农机作业云智能共享系统开发[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2021, 2(1): 51－56.
WAN Qihao, BU Ku, XING Zhi. Development of cloud intelligent sharing system based on Beidou agricultural machinery operation [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2021, 2(1): 51－56.

[11] 邵俊恺, 赵翾, 杨珏, 等. 无人驾驶铰接式车辆强化学习路径跟踪控制算法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 376－382.
SHAO Junkai, ZHAO Xuan, YANG Jue, et al. Reinforcement learning algorithm for path following control of articulated vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 376－382.

[12] WANG S, YIN C, GAO J, et al. Lateral displacement control for agricultural tractor based on cascade control structure [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020, 18: 2375－2385.

[13] 徐济双, 焦俊, 李淼, 等. 融合改进A*算法与模糊PID的病死畜禽运输机器人路径规划与运动控制方法[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(4): 127－136.
XU Jishuang, JIAO Jun, LI Miao, et al. Path planning and motion control method for sick and dead animal transport robots integrating improved A* algorithm and fuzzy PID [J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4): 127－136.

[14] 贺庆, 冀杰, 冯伟, 等. 割草机器人自适应时域MPC路径跟踪控制方法[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(3): 82－93.
HE Qing, JI Jie, FENG Wei, et al. Adaptive time horizon MPC path tracking control method for mowing robot [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 82－93.

[15] AN G, ZHONG Z, YANG S, et al. EASS: An automatic steering system for agricultural wheeled vehicles using fuzzy control [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108544.

[16] 刁勤晴, 张雅妮, 朱凌云. 双预瞄点智能车大曲率路径的横纵向模糊控制[J]. 中国机械工程, 2019, 30(12): 1445－1452.
DIAO Qinqing, ZHANG Yani, ZHU Lingyun. A lateral and longitudinal fuzzy control of intelligent vehicles with double preview points for large curvature roads [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30 (12): 1445－1452.

[17] 张凯良, 胡勇, 杨丽, 等. 玉米收获机自动对行系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 103－114.
ZHANG Kailiang, HU Yong, YANG Li, et al. Design and experiment of auto-follow row system for corn harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (2): 103－114.

[18] 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.

[19] 张朝宇, 董万静, 熊子庆, 等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 105－114.
ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder [J]. Transactions of the

Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 105－114.

[20] ERLIEN S M, FUJITA S, GERDES J C. Shared steering control using safe envelopes for obstacle avoidance and vehicle stability [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 17(2): 441－451.

[21] 吴永刚，梁华为. 基于自适应模型预测的无人车跟踪控制方法研究[J]. 制造业自动化，2023，45(2)：198－202.
WU Yonggang, LIANG Huawei. Research on obstacles avoidance control method of unmanned ground vehicles based on adaptive model prediction [J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(2): 198－202.

[22] 张万枝，白文静，吕钊钦，等. 线性时变模型预测控制器提高农业车辆导航路径自动跟踪精度[J]. 农业工程学报，2017，33(13)：104－111.
ZHANG Wanzhi, BAI Wenjing, LÜ Zhaoqin, et al. Linear time-varying model predictive controller improving precision of navigation path automatic tracking for agricultural vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13): 104－111.

[23] JING Y, LIU G, LUO C. Path tracking control with slip compensation of a global navigation satellite system based tractor-scraper land levelling system [J]. Biosystems Engineering, 2021, 212: 360－377.

[24] SUN J, LI Q, DING S, et al. Fixed-time generalized super-twisting control for path tracking of autonomous agricultural vehicles considering wheel slipping [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108231.

[25] ZHAO X, LU E, TANG Z, et al. Trajectory prediction method for agricultural tracked robots based on slip parameter estimation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 109057.

[26] 毕松，韩奕非. 果园滑动转向机器人轮胎动力学参数实时估计方法[J]. 农业机械学报，2023，54(8)：110－121，192.
BI Song, HAN Yifei. Real-time estimation method of tire dynamics parameters for sliding steering robots in orchards [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 110－121, 192.

[27] 时培成，陈旭，杨爱喜，等. 4WID-4WIS智能车阿克曼转向轨迹规划及位置估算[J]. 工程设计学报，2022，29(2)：123－132.
SHI Peicheng, CHEN Xu, YANG Aixi, et al. Ackerman steering trajectory planning and position estimation of 4WID-4WIS intelligent vehicle [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(2): 123－132.

[28] 薛昊渊，连晋毅，王嘉仑，等. 阿克曼转向模型的改进及其电子差速控制仿真[J]. 汽车实用技术，2020(10)：118－121.
XUE Haoyuan, LIAN Jinyi, WANG Jialun, et al. Electronic differential control simulation based on improved Ackerman steering model [J]. Automobile Applied Technology, 2020(10): 118－121.

[29] 曾锦锋，陈晨，杨蒙爱. 基于阿克曼转向原理的四轮转向机构设计[J]. 轻工机械，2013，31(3)：13－16，19.
ZENG Jinfeng, CHEN Chen, YANG Mengai. Design of four-wheel steering mechanism based on Ackerman steering principle [J]. Light Industry Machinery, 2013, 31(3): 13－16, 19.

[30] 王国栋，刘立，孟宇，等. 一体式车辆避撞轨迹规划与跟踪控制[J]. 交通运输系统工程与信息，2022，22(2)：127－136，162.
WANG Guodong, LIU Li, MENG Yu, et al. Integrated control of trajectory planning and tracking for vehicle collision avoidance [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 127－136, 162.

[31] LIN F, CHEN Y, YAO Y, et al. Path tracking of autonomous vehicle based on adaptive model predictive control [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(5): 1729881419880089.

[32] 毛营忠，冯智勇，郭会茹. 考虑多性能约束的车辆主动前轮转向静态输出反馈控制[J]. 上海交通大学学报，2022，56(2)：156－164.
MAO Yingzhong, FENG Zhiyong, GUO Huiru. Static output feedback control of vehicle active front steering considering multiple performance constraints [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(2): 156－164.

[33] 王玉瑞. 滩涂贝类采捕机自动行驶控制技术研究[D]. 大连：大连海洋大学，2023.
WANG Yurui. Automatic driving control technology for tidal flat shellfish harvester [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023.

Research on slip model of automatic driving of shellfish harvesting equipment in mudflat

ZHANG Zhilei[1], GUO Feihong[1], ZHOU Bingyang[1], XU Bin[1], WU Hao[1], MU Gang[1, 2, 3*]

(1. *School of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian* 116023, *China*; 2. *Marine Fishery Equipment Professional Technology Innovation Center of Liaoning Province, Dalian* 116023, *China*; 3. *Key Laboratory of Facility Fisheries, Ministry of Education, Dalian* 116023, *China*)

Abstract: In view of the problem of relative displacement caused by wheel slippage during the operation of autonomous wheeled clam harvesting equipment on intertidal mudflats, which affects the path tracking accuracy of the autonomous driving system, a slip prediction method based on vehicle kinematics and dynamics models was proposed. The vehicle's motion trajectory was derived according to the four-wheel chassis kinematic model, and the walking dynamics model was established by incorporating tire lateral and longitudinal force characteristics. The calculation methods for longitudinal slip and lateral slip were clarified. An autonomous driving test platform was designed, consisting of perception, planning, and control layers. The platform collected position, steering angle, and wheel speed data using an RTK-GNSS system and relevant sensors. Longitudinal and lateral slip experiments were conducted to investigate the slip characteristics of the harvesting equipment in the intertidal environment. The longitudinal slip experiment analyzed the effects of motor PWM (pulse width modulation) and load on slip ratio, and a longitudinal slip model was established through data fitting. The lateral slip experiment explored the slip characteristics under different steering angles, leading to the fitting of a lateral slip model. To simplify calculations, the slip coefficient function was expressed in the form of a Taylor polynomial. The model's accuracy was validated through experiments, with the error between the actual and predicted trajectories being less than 16%, significantly reducing slip-related interference errors in autonomous driving on mudflats. Through experimental analysis and model optimization, this study improves the accuracy of slip prediction and provides a reference for achieving high-precision navigation for clam harvesting equipment in soft ground environments. Future research could focus on real-time parameter estimation of the slip model and the dynamics modeling of ground-contact components to enhance the equipment.

Keywords: autopilot; mudflats; shellfish harvesting; dynamics modeling; slippage prediction

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2023YFD2400800); The Basic Scientific Research Program of Liaoning Provincial Education Department (LJ232410158048); Liaoning Provincial Undergraduate Colleges and Universities Basic Scientific Research Operational Fees Program (2024JBPTZ002); Liaoning Provincial Science and Technology Program Joint Fund (2024JH2/102600082); Dalian Science and Technology Innovation Fund (2024JJ13GX039)

First Author: ZHANG Zhilei, E-mail: 1455518698@qq.com

* **Correspondence Author:** MU Gang, E-mail: mugang@dlou.edu.cn