

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.10.036

梁卫强, 孟文俊, 张磊, 等. 基于EDEM—ADAMS的粮仓机器人参数优化及试验研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(10): 275—283

Liang Weiqiang, Meng Wenjun, Zhang Biao, et al. Parameter optimization and experimental research of a grain silo robot using EDEM—ADAMS coupling [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(10): 275—283

基于 EDEM—ADAMS 的粮仓机器人参数优化及 试验研究 *

梁卫强^{1, 2}, 孟文俊², 张磊², 高吉祥², 张永安², 聂煌³

(1. 山西工程科技职业大学汽车工程学院, 太原市, 030619; 2. 太原科技大学机械工程学院, 太原市, 030024; 3. 中央储备粮南昌直属库有限公司, 南昌市, 330044)

摘要: 为提高粮食储藏作业效率和自动化水平, 对粮仓机器人实际工况下的行驶和导航性能进行研究。采用离散元方法(EDEM)精确模拟玉米颗粒的力学特性, 结合多体动力学软件(ADAMS)构建粮仓机器人动力学模型, 从而建立粮仓机器人—玉米耦合模型, 分析不同螺旋转速和车身质量下粮仓机器人行驶性能; 设计机器人导航系统, 实现环境感知、2D 激光雷达建图和自主导航功能, 完成导航性能试验。结果表明: 随着螺旋转速的增加, 机器人行驶速度呈线性增加, 滑转率与俯仰角亦随之增加, 沉陷量随之减少, 颗粒接触力变大, 机器人行驶稳定性变差。此外, 滑转率、沉陷量和俯仰角与车身质量呈正相关, 行驶速度与车身质量呈线性负相关, 车身质量每增加 5 kg, 行驶速度下降 0.023 m/s, 滑转率增加 11.2%。粮仓机器人可完成多点导航作业, 最大定位误差为 0.17 m, 满足使用需求, 为粮仓自动化装备的优化设计提供重要依据。

关键词: 粮仓机器人; 螺旋驱动; 粮面作业; 自主导航; 多体动力学; 离散元

中图分类号: S229+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2025) 10-0275-09

Parameter optimization and experimental research of a grain silo robot using EDEM—ADAMS coupling

Liang Weiqiang^{1, 2}, Meng Wenjun², Zhang Biao², Gao Jixiang², Zhang Yong'an², Nie Huang³

(1. School of Automotive Engineering, Shanxi Vocational University of Engineering and Technology, Taiyuan, 030619, China; 2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, 030024, China; 3. Central Grain Reserve Nanchang Direct Warehouse Co., Ltd., Nanchang, 330044, China)

Abstract: To improve the efficiency and automation level of grain storage operations, research is conducted on the driving and navigation performance of grain silo robots under actual working conditions. This research utilized the Discrete Element Method (EDEM) for the precise simulation of the mechanical properties of corn particles. Concurrently, by integrating multi-body dynamics software (ADAMS) to develop a dynamic model of a grain silo robot, a coupled model encompassing the interaction between the robot and corn particles was established. The driving performance of the grain silo robot was analyzed under different spiral speeds and body masses; Designed a robot navigation system to achieve environmental perception, 2D LiDAR mapping, and autonomous navigation functions, and completed navigation performance experiments. The results show that as the spiral speed increases, the robot's travel speed increases linearly with the spiral speed, and the slip rate and pitch angle also increase accordingly, while the sinkage decreases, the particle contact force increases, and the robot's driving stability deteriorates. In addition, the slip rate, sinkage, and pitch angle are positively correlated with body mass, while the driving speed is linearly negatively correlated with body mass. For every 5 kg increase in body mass, the driving speed decreases by 0.023 m/s, and the slip rate increases by 11.2%. Finally, the grain

收稿日期: 2025年5月15日 修回日期: 2025年6月12日

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52075356); 太原科技大学横向课题(2023131)

第一作者: 梁卫强, 男, 1987年生, 山西平遥人, 博士研究生, 讲师; 研究方向为机械工程、粮食机械。E-mail: tyustlwq@163.com

通讯作者: 孟文俊, 男, 1963年生, 太原人, 博士, 教授; 研究方向为起重运输机械、智能物流装备。E-mail: tyustmwj@126.com

silo robot can complete multi-point navigation operations with a maximum positioning error of 0.17 m, meeting the needs of use. It provides an important basis for the optimization design of automated equipment for grain silos.

Keywords: grain silo robot; screw drive; grain surface operation; autonomous navigation; multi-body dynamics; discrete element

0 引言

粮食储藏是保障粮食安全的重要环节,在平粮、翻粮等作业中,多以人工为主,存在作业效率低、安全隐患大、成本高等^[1]问题,采用粮仓机器人可提高粮食储藏作业效率和自动化水平,保证粮食最佳存储时间^[2]。

现有的粮仓机器人有固定式和移动式^[3]。固定式粮仓机器人^[4]结构复杂,需要铺设专用导轨,存在作业死角;移动式粮仓机器人有轮式、履带式和螺旋驱动式,轮式粮仓机器人^[5]需在平方仓内铺设规则的方形板道,采用双底盘托举大尺度平粮机构组成移动平粮机器人,但大尺度的平粮机构在换仓作业时难度较大,履带式粮仓机器人^[6,7]有驱动装置结构复杂、体积大、易碾粮^[1]的问题,螺旋驱动式粮仓机器人^[8,9]接地比压小,驱动力大,通过性好,适合行驶在粮面。

靳航嘉^[3]、林吉照^[10]等设计了螺旋驱动式粮仓机器人,研究不同螺旋轮参数、不同粮面参数对机器人运动性能的影响,对驱动轮控制策略、机器人定位和粮面行驶控制算法进行了研究,得到粮仓机器人的优化结构参数。陈本灶^[11]设计螺旋推进粮仓机器人,建立机器人转向动力学模型,分析螺旋叶片结构参数对运动性能的影响,得到结构参数的重要程度由大到小为螺旋升角、螺旋叶片高度、螺旋轴径。张栩汉^[12]、Gao^[13]等研究螺旋驱动机器人在沙地的行驶性能,结果表明,螺旋叶片直径越大速度越好,但稳定性差,齿形角较小时,行驶性能好,螺旋叶片数为2时,方向性和稳定性好。Beknalkar 等^[14]基于牛顿—欧拉方法,建立了螺旋驱动式两栖探测车动态模型和控制器,发现探测车能准确跟踪多个二维、三维轨迹。Rizwan^[15]采用 GPS 和 IMU 融合为螺旋驱动全地形机器人进行定位,并在沙地和草地上进行矩形轨迹 PID 控制导航试验。生明超^[16]采用双目相机定位,基于 UKF 卡尔曼滤波的视觉动态定位跟踪方法实现粮仓粮堆动态定位,为螺旋驱动式粮仓机器人路径规划提供理论依据。秦玉广^[17]、马浩杰^[18]基于模糊控制算法和多染色体优化遗传算法对螺旋驱动式除草机器人巡线导航和多机路径规划进行了研究。以上研究建立了粮仓机器人动力学模型和运动学模型,研究螺旋结构参数、粮面参数对粮仓机器人运动性能的影响,进行了直行、旋转、爬坡试验,对粮仓机器人定位算法、粮堆位置识别算法、点到点粮面行驶控制算法进行了研究。但缺乏粮仓机器人运行参数对行

驶性能影响的研究,且对螺旋驱动粮仓机器人面对粮仓环境下自主导航作业性能的研究还不够深入。

对机械装置与颗粒特性的研究常采用离散元法 (DEM) 和多体动力学 (MBD) 联合仿真。Jin 等^[19]采用 EDEM 与 RecurDyn 联合仿真研究了螺旋叶片高度、螺旋角、滚筒长度和螺旋叶片数量对螺旋驱动式粮仓机器人驱动性能的影响,得到了玉米粮面的最佳螺旋角为 32.3°。张云鹏等^[20]采用 EDEM—ADAMS 耦合仿真研究了甘薯水平移栽机构的作业性能,得到了最优组合参数。张智泓等^[21]通过 EDEM—RecurDyn 耦合仿真研究了铲板式滚动触土部件在土壤表面微形貌加工时的作业机理。朱惠斌等^[22]采用 EDEM—ADAMS 联合仿真研究了双轴破茬免耕装置的作业性能,得到了装置最优参数。

综上,本文对螺旋驱动式粮仓机器人导航系统^[5,23]进行设计,根据粮仓机器人实际运行工况进行行驶性能分析。通过 EDEM—ADAMS 耦合仿真,以行驶速度、滑转率、沉陷量、俯仰角、颗粒速度、行驶轨迹为评价指标,对粮仓机器人行驶性能进行分析;基于 ROS 系统,通过上下层分级控制,实现环境感知、自身状态参数获取、2D 激光雷达建图和自主导航功能。为粮仓机器人优化设计和高效智能运行提供理论基础。

1 整机结构及工作原理

1.1 整体结构

粮仓机器人整体结构如图 1 所示,由螺旋驱动装置、控制系统和工作装置组成。螺旋驱动装置由车身、2 个旋向相反的螺旋车轮、驱动电机、传动装置等组成。控制系统由控制器单元、传感器、电机驱动模块等组成。粮仓机器人采用模块化设计,根据工作需要开发相应的工作装置安装在车身上,如平粮装置。

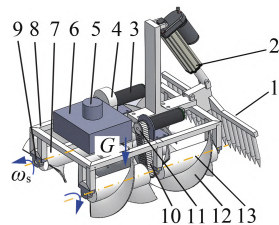


图 1 粮仓机器人模型

Fig. 1 Grain silo robot model

1. 平粮装置
2. 电动推杆
3. 驱动电机
4. 同步轮保护罩
5. 激光雷达
6. 控制系统
7. 螺旋滚筒
8. 车身
9. 轴承
10. 同步带
11. 同步带轮
12. 螺旋叶片
13. 左螺旋车轮

1.2 工作原理

螺旋驱动装置工作时,驱动电机通过同步带、同步轮将动力传递给螺旋车轮,螺旋车轮旋转时,螺旋叶片对粮食颗粒进行摩擦剪切,获得颗粒的推力。左、右螺旋车轮等速反向旋转时机器人实现前进、后退,左、右螺旋车轮同向旋转实现转向^[9]。为防止颗粒进入同步轮中,安装保护罩以确保机构稳定工作。

2 力学分析

2.1 粮仓机器人工况

粮仓机器人在工作时,会安装不同的工作装置,因而车身质量会发生变化;在粗平粮工况,行走装置利用自身螺旋车轮旋转,将粮堆摊平,螺旋车轮的转速对粗平粮效果和工作效率产生很大影响。因此,螺旋转速和车身质量 2 个运行参数对粮仓机器人实际工况影响较大。

以螺旋转速和车身质量 2 个变量为输入,运行参数设置如表 1 所示,在研究螺旋转速的变化规律时,设置车身质量为 3 kg,在研究车身质量的变化规律时,设置螺旋转速为 1 r/s。

表 1 运行参数
Tab. 1 Operating parameter

运行参数	参数设置
螺旋转速 $\omega_s/(\text{r} \cdot \text{s}^{-1})$	0.5、1、2、3、4、5
车身质量 M/kg	1、4、9、14、19、24

2.2 动力学分析

螺旋车轮的导程计算如式(1)所示。

$$S = \pi(2r + h) \tan \varphi \tag{1}$$

式中： S ——螺旋车轮导程,m;
 r ——螺旋滚筒半径,m;
 h ——螺旋叶片高度,m;
 φ ——螺旋升角,(°)。

如图 2 所示,定义粮仓机器人的坐标为 $oxyz$,当机器人在平整的粮面沿 z 轴方向行驶时,在不考虑机器人跑偏的情况下,机器人沿 z 轴正方向的实际速度为 v_{za} ,在不考虑机器人跑偏、螺旋车轮打滑的情况下,定义机器人沿 z 轴正方向的理想速度为 v_{zi} ,故

$$v_{zi} = \frac{S\omega_s}{2\pi} \tag{2}$$

式中： ω_s ——螺旋转速,rad/s。

机器人滑转率

$$i = \frac{v_{zi} - v_{za}}{v_{zi}} \times 100\% \tag{3}$$

因此,机器人沿 z 轴正方向的实际行驶速度

$$v_{za} = \frac{S\omega_s(1 - i)}{2\pi} \tag{4}$$

机器人俯仰角

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{v_y}{v_z} \right) \tag{5}$$

式中： v_y ——机器人在竖直方向的速度,m/s;
 v_z ——机器人在前进方向的速度,m/s。

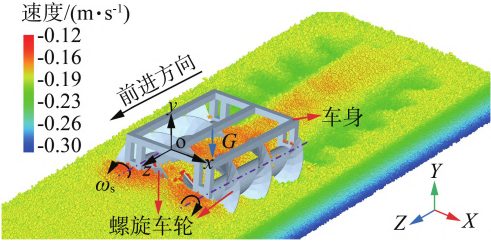


图 2 粮仓机器人离散元模型

Fig. 2 Discrete element model of grain silo robot

如图 3 所示,基于地面力学原理^[3, 24],将粮仓机器人与玉米粮面的作用力分为正应力和切应力,则

$$\begin{cases} \sigma = \left(\frac{k_c}{b} + k_\eta \right) y^n \\ \tau = (c + \sigma \tan \eta)(1 - e^{-j/k}) \end{cases} \tag{6}$$

式中： σ ——螺旋车轮对玉米粮面的正应力,kPa;
 k_c ——玉米的黏聚模量,kPa/mⁿ⁻¹;
 b ——螺旋车轮与玉米粮面的接触宽度,m;
 k_η ——玉米的摩擦变形模量,kPa/mⁿ;
 η ——玉米内摩擦角,(°);
 y ——沉陷量,m;
 n ——玉米变形指数;
 τ ——剪切应力,kPa;
 c ——玉米黏聚系数;
 e ——自然常数;
 j ——剪切位移,m;
 k ——剪切模量,m。

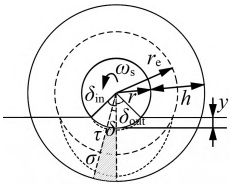


图 3 螺旋车轮与粮面接触横截面受力分析图

Fig. 3 Analysis diagram of the force on the cross-section of the contact between the spiral wheel and the grain-paved road

因螺旋车轮左右沉陷量基本一致,设入粮角等于出粮角,故

$$\delta_{in} = \delta_{out} = \arccos [(r - y)/r] \quad 0 < \delta \leq \delta_{in}, \delta_{out} < \delta \leq 0 \tag{7}$$

式中： δ ——入粮角到出粮角范围内的任一角度,rad;
 δ_{in} ——入粮角,rad;
 δ_{out} ——出粮角,rad。

螺旋车轮和玉米颗粒之间的正应力和剪切应力是大小相等、方向相反的相互作用力。假设螺旋滚筒受到的最大应力出现在螺旋滚筒最底部,螺旋叶片受到的剪切应力等效分布在等效剪切半径处。螺旋叶片沉陷在粮面的部分会受到驱动力和阻力,采用等效宽度描述螺旋叶片与粮面的剪切宽度。则

$$\begin{cases} r_e = r + \frac{h}{2} \\ b_e = \frac{\delta_{in} L N \sqrt{(2\pi r_e)^2 + S^2}}{\pi S} \end{cases} \quad (8)$$

式中: r_e ——等效剪切半径, m;

b_e ——等效宽度, m;

L ——螺旋车轮长度, m;

$$F_z = 2b_e h c \delta_{in} (1 - e^{-h^2/[k(1-i)]}) + r_e^n h \tan \eta (k_c + k_q b_e) (1 - e^{-h^2/[k(1-i)]}) \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-\cos \delta_{in})^k \int_{\delta_{out}}^{\delta_{in}} (\cos \delta)^{n-k} d\delta \quad (10)$$

式中: F_z ——粮面对螺旋叶片 z 轴方向的驱动力, N。

2.3 运动学分析

粮仓机器人坐标系采用笛卡尔坐标系表示, 图 4 为螺旋驱动式粮仓机器人运动坐标示意图, 考虑 xz 平面内运动, $x_w O_w z_w$ 为全局坐标系, xoz 为粮仓机器人坐标系。

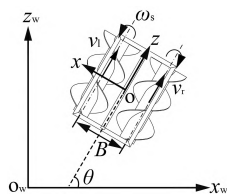


图 4 粮仓机器人运动示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the motion of the grain silo robot

机器人在 $x_w O_w z_w$ 坐标系下的线速度和角速度为

$$\begin{bmatrix} v_{xw} \\ v_{zw} \\ \omega_{yw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos \theta & \frac{1}{2} \cos \theta \\ \frac{1}{2} \sin \theta & \frac{1}{2} \sin \theta \\ -\frac{1}{B} & \frac{1}{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_l \\ v_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: v_{xw} ——机器人沿 x_w 轴线速度, m/s;

v_{zw} ——机器人沿 z_w 轴线速度, m/s;

ω_{yw} ——机器人绕垂直于 $x_w O_w z_w$ 平面轴线的旋转角速度, rad/s;

θ ——机器人运动方向与全局坐标系 $x_w O_w z_w$ 中 x_w 轴夹角, 即航向角, ($^\circ$);

B ——左、右车轮的轮距, m;

v_l, v_r ——左、右轮电机输出线速度。

设 ω_l, ω_r 分别为左、右轮电机输出的角速度, 相应车轮输出的线速度为

N ——螺旋叶片数。

假设在 $t_1 \sim t_2$ 时间内, 螺旋车轮沿 z 轴方向移动的距离为 l , 则玉米颗粒 z 轴方向的剪切位移、剪切力

$$\begin{cases} j_z = \int_{t_1}^{t_2} v_{zi} dt = \frac{li^2}{1-i} \\ \sigma(\delta) = r_e^n \left(\frac{k_c}{b_e} + k_q \right) (\cos \delta - \cos \delta_{in})^n \\ \tau_z(\delta) = [c + \sigma(\delta) \tan \eta] (1 - e^{-j_z/k}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: j_z ——玉米颗粒在 z 轴方向的剪切位移, m;

$\sigma(\delta)$ ——玉米颗粒在任一角度 δ 处的正切力, kPa;

$\tau_z(\delta)$ ——玉米颗粒在 z 轴方向的剪切力, kPa。

单个螺旋叶片在 $t_1 \sim t_2$ 时间 z 轴受到的驱动力为

$$F_z = 2b_e h c \delta_{in} (1 - e^{-h^2/[k(1-i)]}) + r_e^n h \tan \eta (k_c + k_q b_e) (1 - e^{-h^2/[k(1-i)]}) \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-\cos \delta_{in})^k \int_{\delta_{out}}^{\delta_{in}} (\cos \delta)^{n-k} d\delta \quad (10)$$

$$\begin{cases} v_l = \frac{S(1-i)}{2\pi} \omega_l \\ v_r = \frac{S(1-i)}{2\pi} \omega_r \end{cases} \quad (12)$$

代入式(11), 可以得

$$\begin{cases} v_{xw} = \frac{S(1-i)(\omega_l \cos \theta + \omega_r \cos \theta)}{4\pi} \\ v_{zw} = \frac{S(1-i)(\omega_l \sin \theta + \omega_r \sin \theta)}{4\pi} \\ \omega_{yw} = \frac{S(1-i)(\omega_r - \omega_l)}{2\pi B} \end{cases} \quad (13)$$

3 粮仓机器人行驶仿真分析

3.1 多体动力学模型

将粮仓机器人结构简化, 按实际尺寸建立三维模型, 如图 5 所示。基本参数如表 2 所示。

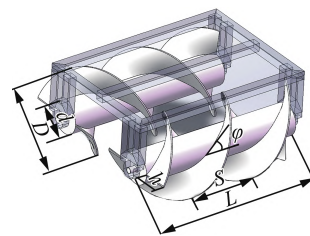


图 5 三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model

表 2 螺旋驱动装置参数

Tab. 2 Spiral drive device parameters

参数	数值	参数	数值
车身质量 M/kg	7	螺旋滚筒直径 d/mm	56
轮距 B/mm	190	螺旋叶片高度 h/mm	45
螺旋滚筒长度 L/mm	300	螺旋线数 $N/\text{个}$	2
螺旋升角 $\varphi/(^\circ)$	37	导程 S/mm	239

采用 EDEM—ADAMS 耦合仿真进行模拟。在 ADAMS 中导入三维模型,设置机器人材料参数、本征参数,为螺旋车轮与车轴添加转动副,为螺旋车轮添加 Gforce。

3.2 离散元模型

粮仓机器人与玉米接触部分为螺旋车轮,螺旋车轮采用 3D 打印加工,材质为 Polylactic Acid (PLA)。在初步研究中^[25, 26],建立玉米离散元建模,完成玉米种间接触参数、玉米—PLA 接触参数标定,如图 6 所示,玉米离散元模型采用马齿形、球锥形和类球形进行模拟,三者数量比为 81:12.5:6.5,含水率为 14%,每个颗粒的子球按正态分布生成。采用 Hertz—Mindlin 无滑动接触模型,相关材料的物理参数和接触参数^[20, 21]如表 3、表 4 所示。粮仓机器人离散元模型如图 2 所示。

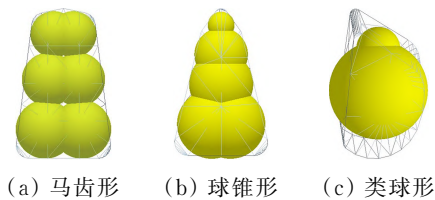


图 6 玉米离散元模型
Fig. 6 Discrete element model for corn

表 3 材料参数
Tab. 3 Material parameters

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
玉米	0.4	137	1 197
PLA	0.39	770	1 150

表 4 接触参数
Tab. 4 Contact parameters

材料	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
玉米—玉米	0.351	0.225	0.024 3
玉米—PLA	0.528	0.418	0.038 3

3.3 不同螺旋转速对机器人行驶性能的影响

3.3.1 行驶速度

图 7 为粮仓机器人行驶速度随螺旋转速的变化曲线,可以看出,机器人平均行驶速度与螺旋转速呈线性增长关系,螺旋转速从 1 r/s 增加到 5 r/s,行驶速度增加 3.4 倍,速度提升明显。图 7 中虚线为由式(2)求得理想行驶速度,可以看出,随着螺旋转速的增加,实际行驶速度与理想速度的误差增大。

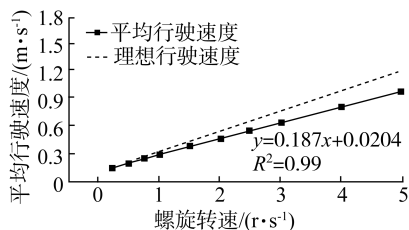


图 7 不同螺旋转速下的平均行驶速度
Fig. 7 Average driving speed at different spiral speeds

3.3.2 滑转率

图 8 为粮仓机器人平均滑转率随螺旋转速的变化曲线,随着螺旋转速增加,平均滑转率先下降后增大,螺旋转速为 0.75 r/s 时,平均滑转率达到最小值 7.93%,在 5 r/s 时,平均滑转率达到最大值 19.79%,螺旋转速从 2 r/s 增加到 5 r/s,平均滑转率增加 3.47%。因此,当粮仓机器人在低速(0~2 r/s)工作时,可优选 0.75 r/s 作为运行参数,节能效果更好,当粮仓机器人在高速(2~5 r/s)工作时,可根据工况优选高转速作为运行参数,工作效率更高。

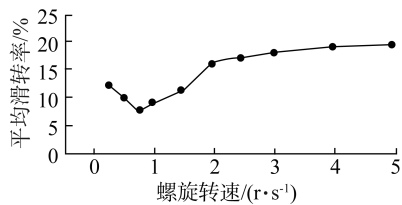


图 8 平均滑转率曲线
Fig. 8 Average slip rate curve

3.3.3 沉陷量

图 9 为不同螺旋转速下机器人平均沉陷量变化曲线。对平均沉陷量进行数据拟合,发现其随螺旋转速增加呈现渐减趋势,符合二次函数关系特征。平均沉陷量标准差为 12.16~15.01 mm,其波动与螺旋转速变化无关,螺旋转速变化对沉陷量稳定性无显著影响。

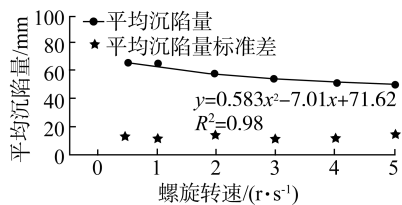


图 9 不同螺旋转速下的平均沉陷量
Fig. 9 Average sinkage at different spiral speeds

3.3.4 俯仰角

图 10 为粮仓机器人平均俯仰角随螺旋转速变化的曲线,对平均俯仰角进行数据拟合,发现其与螺旋转速符合二次函数关系特征,螺旋转速为 0~4 r/s 时,平均俯仰角单调递增,在 4.45 r/s 时平均俯仰角达到最大值。平均俯仰角标准差为 0.4°~4.07°,其波动随螺旋转速的增加而增加,说明螺旋转速增加后,机器人与颗粒接触力变大,使车身姿态稳定性变差。

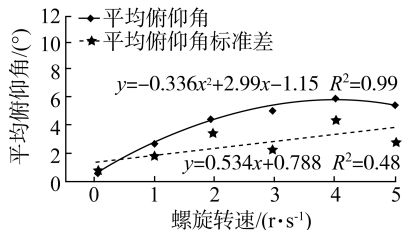


图 10 不同螺旋转速下的平均俯仰角
Fig. 10 Average pitch angle at different spiral speeds

3.3.5 颗粒接触力

图 11 为不同螺旋转速下颗粒受力云图,可以看出,机器人与颗粒接触时,受力较大的部位为车身前部和螺旋叶片底部。随着螺旋转速的升高,车身前部、螺旋叶片底部与颗粒的接触力不断增大。对比螺旋叶片

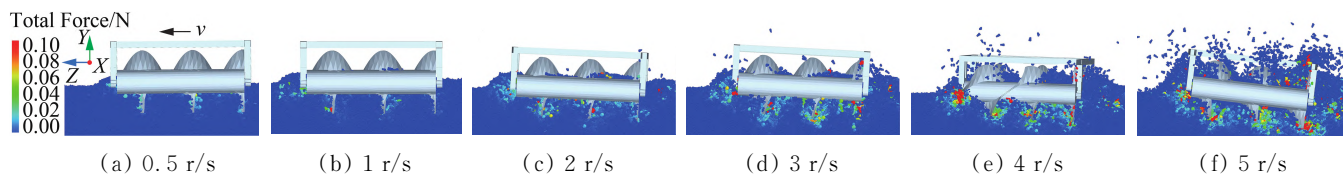


图 11 不同螺旋转速下颗粒受力云图

Fig. 11 Cloud map of particle force under different spiral speeds

3.3.6 行驶轨迹

图 12 为不同螺旋转速下的粮仓机器人行驶轨迹。可以看出,螺旋转速为 1 r/s 时,机器人行驶轨迹为直线,随着螺旋转速的增加,机器人行驶出现左右摆动,螺旋转速越大,摆动范围越大,说明随着螺旋转速的增加,机器人行驶稳定性变差。

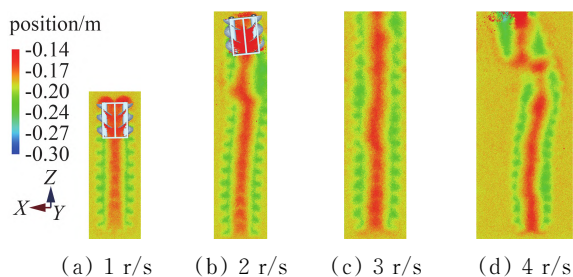


图 12 不同螺旋转速下的行驶轨迹

Fig. 12 Driving trajectory at different spiral speeds

3.4 不同车身质量对机器人行驶性能的影响

3.4.1 行驶速度

图 13 展示了机器人平均行驶速度随车身质量变化的关系,平均行驶速度与车身质量呈负线性关系,车身质量每增加 5 kg,行驶速度下降 0.023 m/s,平均行驶速度标准差为 0.039~0.048 m/s,其波动与车身质量无关,车身质量变化对行驶速度稳定性无显著影响。

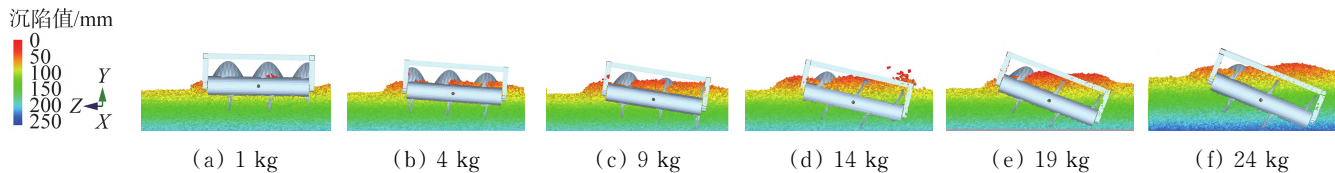


图 13 平均行驶速度随车身质量的变化曲线

Fig. 13 Curve of average driving speed changing with body mass

3.4.2 滑转率

图 14 为不同车身质量下的机器人平均滑转率曲线,平均滑转率随车身质量的增加呈线性增加,车身质量每增加 5 kg,滑转率增加 11.2%,滑转率的增加导致行驶速度降低,工作效率降低,能耗提高。

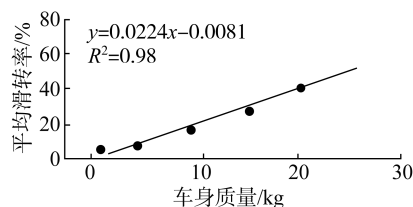


图 14 不同车身质量下的平均滑转率

Fig. 14 Average slip rate under different body masses

3.4.3 沉陷量和俯仰角

图 15 展示了在不同车身质量下,机器人稳态时的沉陷情况。

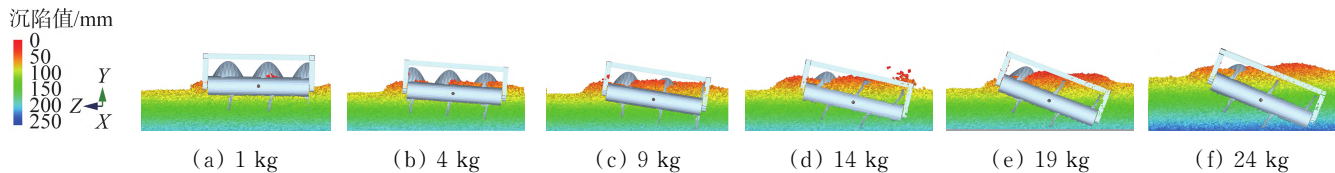


图 15 不同车身质量下机器人沉陷分布情况

Fig. 15 Distribution of robot sinkage under different body masses

当车身质量为 1 kg 时,机器人的俯仰角为 1.02°,螺旋滚筒沉陷部分不足 1/2,当车身质量为 4 kg 时,俯仰角为 3.8°,螺旋滚筒沉陷部分约 1/2,当车身质量为 9 kg 时,俯仰角为 8.58°,螺旋滚筒沉陷部分超过 2/3,当车身质量为 14 kg 时,俯仰角为 11.54°,螺旋滚筒几乎

全部沉陷,当车身质量为 19 kg 时,俯仰角为 18.02°,机器人重心沉陷量进一步加深,但由于俯仰角过大,前方部分滚筒露出粮面,当车身质量为 24 kg 时,俯仰角为 19.19°,螺旋车轮几乎全部沉陷在粮面中。随着车身质量的增加,车身俯仰角和沉陷量都在增加,而俯仰角的

增加,让机器人沉陷在粮面内的体积变得更多。

如图 16 所示,实心圆点为不同车身质量下机器人平均俯仰角,双点划线为线性拟合曲线。曲线方程为

$$y=0.825x+0.590 \tag{14}$$

拟合度 $R^2=0.98$,可以看出,平均俯仰角与车身质量呈正相关,车身质量每增加 1 kg,俯仰角约增加 0.825°。图 16 中空心方块表示机器人重心处的平均沉陷量,空心三角形表示机器人车身后方的平均沉陷量,空心五角星表示机器人车身前方的平均沉陷量,机器人车身前方和后方沉陷量的平均值等于机器人重心处的沉陷量,车身质量每增加 1 kg,重心处的沉陷量增加 3.49 mm,随着车身质量的增加,机器人车身前方和后方的沉陷量差值越来越大,差值的增大使俯仰角变大,结合图 16 可知,沉陷量和俯仰角同时增大后,机器人陷入玉米的体积也变大,行驶阻力变大。因此,在设计机器人时,要尽可能减小车身质量。

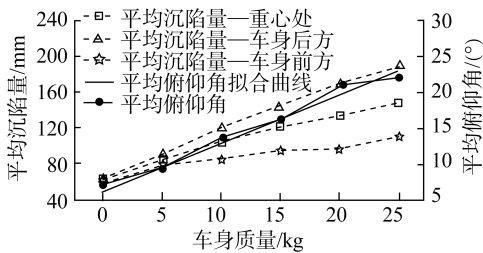


图 16 不同车身质量下的平均滑转率和俯仰角
Fig. 16 Average slip rate and pitch angle under different body masses

4 粮仓机器人导航系统设计与分析

4.1 控制系统组成

机器人控制系统采用上下层分级,上位机采用 Jetson Nano 搭载 ROS 操作系统,下位机采用 STM32 控制器,实现粮仓机器人环境感知、自身状态参数获取、粮面行走和自主导航等功能^[1]。如图 17 所示,机器人控制系统硬件采用模块化设计,包括控制器模块、传感器模块、电机驱动模块和供电模块。控制模块由 STM32 单片机、Jetson Nano 和上位机 PC 组成,上位机 PC 通过 WIFI 发送控制命令给 Jetson Nano,然后 Jetson Nano 通过串口发送命令给单片机控制驱动电机的转动,单片机同时接收到里程计、IMU 等传感器的数据并传输给 Jetson Nano。传感器模块包括里程计、IMU、UWB、蓝牙和激光雷达,其中激光雷达通过 USB 线发送数据给 Jetson Nano,其他传感器则通过串口和单片机通信。电机驱动模块包括驱动器和直流电机,驱动器接收到单片机发出的 PWM 信号,将其转化成电压信号驱动电机转动。供电模块采用 24 V 电源和稳压模块。控制系统接线时其他模块的

负极要和电源模块的负极共地。

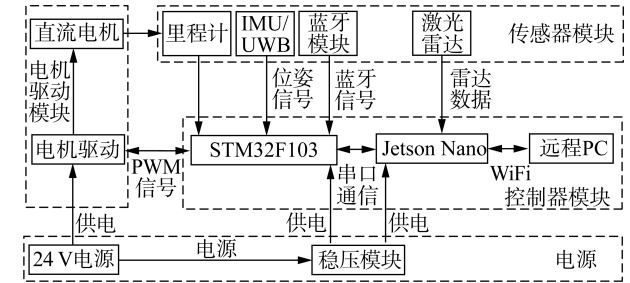


图 17 粮仓机器人控制系统架构

Fig. 17 Architecture of grain silo robot control system

4.2 导航系统设计

在机器人导航任务中,全局路径规划负责在已知的全局范围内找到最优路径。局部路径规划负责处理全局地图中出现的动态障碍或未知障碍^[27],使机器人在面临变化环境时能够安全地规避障碍物,确保机器人到达目标地点,设计如图 18 所示的导航系统,在 ROS 系统中创建工作空间,搭建机器人导航框架,在工作空间中加入功能包,包括传感器信号接收、运动控制、激光雷达建图、路径规划算法等。

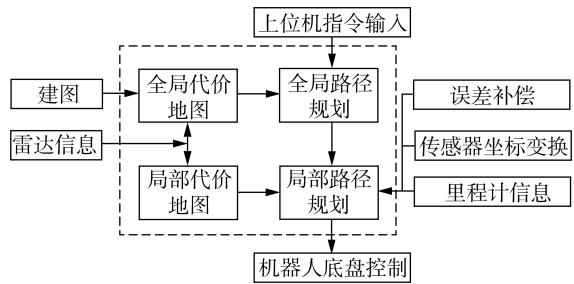


图 18 ROS 系统导航框架

Fig. 18 ROS navigation framework

机器人导航的主要功能^[28]:(1)Amcl:该功能包通过订阅雷达、地图和坐标变换信息,发布机器人位置,当机器人出现定位误差,如在粮面上打滑时,Amcl会对误差计算,然后发布给里程计进行误差补偿。(2)Gmapping:雷达建图功能包,通过激光雷达对周围环境扫描,建出全局地图,将地图保存到工作空间的“map”中,需要导航时可以调用。(3)Move_base:功能包中包含全局路径规划算法和局部路径规划算法,全局路径使用了 A*算法进行路径规划,局部路径使用 DWA 算法进行动态避障。

4.3 导航试验

机器人在撒药作业时需要容易生虫的地点针对性作业,如果采用遥控控制的方式,不仅耗费人力成本,而且效率不高。粮仓机器人的多点自主导航作业可有效解决这一问题。

启动粮仓机器人电源,使用 WiFi 连接到上位机。在上位机中开启机器人控制节点与激光雷达建图节

点,对实际工作环境进行建图,运行导航 launch 文件,打开 RVIZ 终端,设置机器人起始与目标点位置姿态朝向,在上位机中标记目标点 0、1、2,使机器人从起点出发,沿直线行驶到目标点 0,然后逆时针转向 90° ,继而以相同方式依次行驶至点 1、2。其中,起点到目标点 0 的直线距离为 4 m,目标点 0 到目标点 1 的距离为 1 m,目标点 1 到目标点 2 的距离为 2.5 m,试验过程和导航轨迹如图 19 所示。

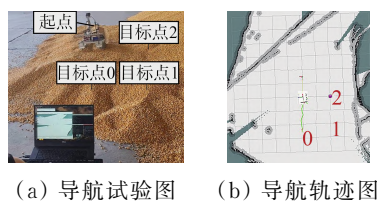


图 19 机器人导航试验和轨迹图

Fig. 19 Robot navigation in the real environment and trajectory diagram

4.4 结果分析

为验证机器人导航效果,对机器人导航精度进行测试。机器人每行驶到一个目标点,记录该位置的输出位姿,和目标轨迹进行对比,记录每一段的平均行驶速度 $\bar{v}$ 和最大位置误差 Δs ,分别进行 3 次试验,如表 5 所示。机器人在目标点 0、1、2 处的最大定位误差平均值分别为 0.17 m、0.06 m、0.10 m,定位误差在可接受范围内,三段路径的平均行驶速度为 0.219 m/s、0.157 m/s、0.176 m/s。第一段行驶路径长,机器人从静止状态到加速—匀速—减速过程,平均速度最快,第二段路径段,机器人加速后很快就减速,故平均速度最慢。粮仓机器人导航性能良好,可自主完成多点导航任务,试验结果误差能满足机器人撒药作业要求。

表 5 机器人导航速度及误差

Tab. 5 Robot navigation speed and error

试验 次数	路段 1		路段 2		路段 3	
	$\bar{v}$ /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Δs /m	$\bar{v}$ /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Δs /m	$\bar{v}$ /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Δs /m
1	0.226	0.13	0.156	0.03	0.181	0.11
2	0.212	0.21	0.158	0.08	0.175	0.13
3	0.219	0.18	0.156	0.07	0.171	0.05
平均值	0.219	0.17	0.157	0.06	0.176	0.10

5 结论

1) 机器人行驶速度与螺旋转速呈线性正相关,随着螺旋转速的增加,滑转率与俯仰角亦随之增加,沉陷量随之减少。螺旋转速从 1 r/s 增加到 5 r/s,行驶速度增加 3.4 倍,颗粒接触力变大,机器人行驶稳定性变差。

2) 不同车身质量下,粮仓机器人平均行驶速度与

车身质量呈负线性关系,车身质量每增加 5 kg,行驶速度下降 0.023 m/s;平均滑转率与车身质量呈正相关,车身质量每增加 5 kg,滑转率增加 11.2%;平均俯仰角与车身质量呈正相关,车身质量每增加 1 kg,俯仰角约增加 0.82° ;平均沉陷量与车身质量呈正相关。

3) 此粮仓机器人导航系统能够实现环境感知、自身状态参数获取、2D 激光雷达建图和多点导航任务。基于本文建立的粮仓环境,机器人行驶速度可达 0.219 m/s,最大定位误差为 0.17 m,完全满足机器人在玉米粮面环境下的撒药作业要求。后续的研究应根据粮食品种调节螺旋车轮的结构参数和工作参数,以提高机器人的行驶稳定性,研究新的算法提高复杂粮面地形环境下粮仓机器人定位和导航的鲁棒性,为粮食仓储行业的发展提供有力的支持。

参 考 文 献

- [1] 王虎生, 聂煌. 一项粮仓自动巡航多用途作业机器人的研发[J]. 粮食加工, 2024, 49(3): 74—78.
Wang Husheng, Nie Huang. A multi-purpose robot for automatic cruise control in grain storage [J]. Grain Processing, 2024, 49(3): 74—78.
- [2] 祝玉华, 张钰涵, 李智慧, 等. 基于 TCN—BiGRU 结合自注意力机制的储粮温度预测研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 133—139.
Zhu Yuhua, Zhang Yuhuan, Li Zhihui, et al. Research on temperature prediction of grain storage based on TCN—BiGRU combined with self-attention mechanism [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 133—139.
- [3] 靳航嘉. 螺旋驱动式粮仓机器人关键技术及装备研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
Jin Hangjia. Research on key technologies and equipment of screw-drive granary robot [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [4] 戴军, 魏风辉, 李浩楠, 等. 一种粮食平仓机[P]. 中国专利: CN202410865595.0, 2024—11—12.
- [5] 张港. 基于视觉的平粮机器人导航与控制技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [6] 蒋林, 金祖飞, 刘晓磊, 等. 平粮机器人结构设计及运动仿真[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 78—86.
- [7] 蒋林, 刘晓磊, 赵慧, 等. 基于遗传改进人工势场法的全区域平粮机器人路径规划[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(5): 220—226, 243.
Jiang Lin, Liu Xiaolei, Zhao Hui, et al. Path planning for full region grain flatting robot based on the APFI—GA [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 220—226, 243.
- [8] 董平. 新型粮面机器人行走结构的设计与优化[D]. 长

- 春: 吉林大学, 2021.
- Dong Ping. Design and optimization of walking structure of newgrainsurfacrobot[D]. Changchun: JilinUniversity, 2021.
- [9] 靳航嘉, 吴文福, 吴子丹, 等. 螺旋驱动式粮仓机器人行走机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 20—26.
- Jin Hangjia, Wu Wenfu, Wu Zidan, et al. Design and experiment of screw drive granary robot running on the loose grain surface [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(2): 20—26.
- [10] 林吉照. 螺旋驱动式平粮机器人姿态控制及系统设计[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [11] 陈本灶. 基于螺旋推进的平粮机器人结构设计及仿真优化[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.
- [12] 张栩汉. 螺旋滚筒升角对颗粒推力的影响[J]. 一重技术, 2024(1): 25—27, 38.
- [13] Gao K, Wei H, Xu W, et al. Simulation and analysis of propulsive performance for screw propulsion inspection robot [J]. Powder Technology, 2024, 434: 119300.
- [14] Beknalkar S, Bryant M, Mazzoleni A. Algorithm for locomotion mode selection, energy estimation and path planning for a multi-terrain screw-propelled vehicle for arctic exploration [C]. 2024 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2024: 1462—1467.
- [15] Rizwan M. Screw-propelled omni-directional robot: Automation of waypoint navigation and control system integration [D]. Edmonton: University of Alberta, 2024.
- [16] 生明超. 基于双目视觉的螺旋式粮面机器人平粮作业测距与目标识别定位研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [17] 秦玉广. 稻田螺旋除草机器人视觉导航技术研究[D]. 杭州: 浙江科技大学, 2024.
- Qin Yuguang. Research on visual navigation technology of rice field spiral weeding robot [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2024.
- [18] 马浩杰. 稻田螺旋推进车多机协同路径规划方法研究[D]. 杭州: 浙江科技大学, 2024.
- Ma Haojie. Research on cooperative path planning method of paddy field screw propulsion vehicle [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2024.
- [19] Jin H, Lu Y, Wu W, et al. Influence of screw blades on the performance of a screw-drive granary robot [J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(7): 2133—2146.
- [20] 张云鹏, 谭芊, 许鹏, 等. 基于 EDEM—ADAMS 的甘薯水平移栽机构优化设计[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(1): 35—41.
- Zhang Yunpeng, Tan Qian, Xu Peng, et al. Optimization design of sweet potato horizontal transplanting mechanism based on EDEM—ADAMS [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 35—41.
- [21] 张智泓, 赵亮亮, 赖庆辉, 等. 基于 DEM—MBD 耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 10—20.
- Zhang Zhihong, Zhao Liangliang, Lai Qinghui, et al. Operation mechanism analysis and experiments of shovel-type rolling soil-engaging components based on DEM—MBD coupling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (15) : 10—20.
- [22] 朱惠斌, 吴宪, 白丽珍, 等. 基于 EDEM—ADAMS 仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 10—22.
- Zhu Huibin, Wu Xian, Bai Lizhen, et al. Development of the biaxial stubble breaking no-tillage device for rice stubble field based on EDEM—ADAMS simulation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(19): 10—22.
- [23] 傅泓龙, 胡裕兵, 谢立敏, 等. 番茄温室机器人的多传感器融合建图与导航研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(4): 171—178, 185.
- Fu Honglong, Hu Yubing, Xie Limin, et al. Multi-sensor fusion mapping and navigation research for tomato greenhouse robot [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(4): 171—178, 185.
- [24] Nagaoka K, Otsuki M, Kubota T, et al. Terramechanics-based propulsive characteristics of mobile robot driven by Archimedean screw mechanism on soft soil [C]. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010: 4946—4951.
- [25] Liang W, Meng W, Zhang B, et al. Calibration method and experimental verification of corn discrete element parameters [J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36(5): 055003.
- [26] Li X, Zhang W, Xu S, et al. Calibration of collision recovery coefficient of corn seeds based on high-speed photography and sound waveform analysis [J]. Agriculture, 2023, 13(9): 1677.
- [27] 叶强强, 郑明魁, 邱鑫. 基于 ROS 的室内自主导航移动机器人系统实现[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(2): 90—93.
- Ye Qiangqiang, Zheng Mingkui, Qiu Xin. Realization of indoor autonomous navigation mobile robot system based on ROS [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(2): 90—93.
- [28] 温淑慧, 问泽藤, 刘鑫, 等. 基于 ROS 的移动机器人自主建图与路径规划[J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44(1): 90—94.