

粮仓螺旋机器人螺杆推力模型构建与实验验证

Establishment and experiment verification of screw thrust model of spiral robot for granary

赵险峰 尹强 余俊鹏 杨柳 张永林

ZHAO Xianfeng YIN Qiang YU Junpeng YANG Liu ZHANG Yonglin

(武汉轻工大学机械工程学院, 湖北 武汉 430023)

(School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China)

摘要:目的:构建更加精确的粮仓螺杆推力模型。方法:利用数理模型进行建模,结合 Janssen 储粮压力理论和 Janosi 剪切—位移方程,建立剪切应力模型,并由剪切应力模型推导出螺杆的推力模型。通过设计并搭建试验装置,采用不同转速和压力组合进行全因素试验,将测得的试验数据与理论值进行对比。结果:推力模型理论值与试验值接近,曲线变化趋势相同,轴向推力模型平均相对误差为 14%,阻力转矩模型平均相对误差为 24%。结论:结合 Janssen 储粮压力理论和 Janosi 剪切—位移方程提出的不同深度下螺杆推力模型具有较高的可靠性。

关键词:螺杆;螺旋机器人;推力模型;运动学;粮仓

Abstract: **Objective:** To clarify the interaction mechanism model between screw and grain in grain pile depth, and to determine the mechanical characteristics of screw of spiral robot for granary at different speeds and depths, so as to provide the design basis for the motion control system. **Methods:** Using mathematical model, combining Janssen grain storage pressure theory and Janosi shear-displacement equation, the shear stress model was established, and then the thrust model of screw was derived from the shear stress model. Through the design and construction of the experimental device, the combination of different speed and pressure was used to carry out the all-factor experiment, and the measured experimental data was compared with the theoretical value. **Results:** The theoretical value of the thrust model was close to the experimental value, and the curve variation trend was the same. The average relative error of the axial thrust model was

14%, and the average relative error of the resistance torque model was 24%. **Conclusion:** The screw thrust model based on Janssen grain storage pressure theory and Janosi shear-displacement equation at different depths has high reliability.

Keywords: screw; spiral robot; thrust model; kinematics; granary

为了防止散装粮食在仓储过程中发生水分凝结和霉变^[1],需要在粮食入库后进行平仓、扦样、翻仓等工序。随着粮仓自动化的发展,更多学者致力于实现仓储作业的自动化,设计出相应的自动设备或者移动机器人代替人工进行作业,用以提高作业效率,达到储粮危害预防的目的^[2]。勒航嘉等^[3]开发了一种基于双螺旋滚筒作为驱动机构的粮仓用机器人,分析了螺杆在谷堆表面移动时的受力,并对螺杆推力模型进行建模,但模型简化,不够精确。Johnson 等^[4]发明了一种名为“Grain Weevil”的粮仓管理机器人,该机器人依靠两个螺旋机构推动其前进,同时通过在粮堆表面快速移动推平粮面,但该工作只研究了不同推力方向与机器人运动方向的关系,并未研究螺杆的推力模型。

将螺杆作为驱动机构,为了提供较为准确的控制参数,Jin 等^[5]对螺旋滚筒在粮堆表面行驶时螺旋滚筒与粮面地形的相互作用机理进行了研究。基于土壤力学对螺旋滚筒与粮食相互机理建立数学模型,构建出螺旋滚筒的推力模型和平衡方程。但该研究只考虑螺杆在谷堆表面的受力情况,未分析螺杆在不同深度下螺杆与谷物的相互作用机理,但有较多学者已将螺杆在粮面上的应用转移到粮堆内部。常金攀等^[6]对餐厨垃圾固液分离装置关键部位螺旋轴进行参数优化,并通过 EDEM 仿真软件对挤压过程进行仿真分析,制作优化后的螺旋轴样机并进行实验验证。李博昕^[7]设计了一款翻仓机器人,通过移动平台携带一根可摆动的螺杆,到达指定位置后将螺杆深入粮堆进行翻仓,并通过仿真试验选取电机规格,完

基金项目:武汉轻工大学科研项目(编号:2023Y32);湖北省科技厅科技人才服务企业项目(编号:2023DJC105);湖北省技术创新计划重点研发专项项目(编号:2023BBB018)

作者简介:赵险峰,男,武汉轻工大学实验师。

通信作者:尹强(1978—),男,武汉轻工大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail: yinqiang@whpu.edu.cn

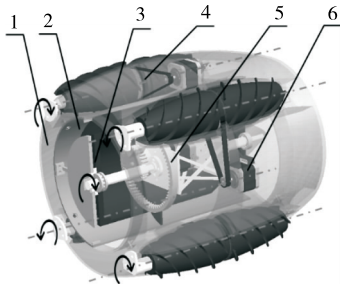
收稿日期:2023-07-24 **改回日期:**2023-12-10

成螺杆设计。冯硕等^[8]借助离散单元法对颗粒进行力学分析,研究了影响变螺距挤压装置脱水效果的因素,并建立了螺旋挤压装置模型。Yin 等^[9]为了实现粮堆深度信息的采集,提出了一种粮仓钻入式螺旋机器人,该机器人由 4 个螺杆驱动其在粮堆内前进和转向等运动,螺杆在粮堆内为机器人提供推力,但该研究仅基于运动学分析了不同因素对螺杆运动性能的影响。研究拟通过粮仓钻入式螺旋机器人(以下简称“螺旋机器人”)对螺杆在粮堆内部的受力进行分析,考察不同深度下螺杆与谷物相互作用机理,构建更加精确的螺杆推力模型,并搭建试验台进行验证,为驱动螺杆控制系统的设计提供依据。

1 螺旋机器人结构与单个螺杆运动学模型

1.1 螺旋机器人结构及工作原理

螺旋机器人在钻入粮堆后,围绕在四周的螺杆以相同的转速同时旋转驱动螺旋机器人向前运动,旋转方向与螺杆旋向相同^[9]。位于中心的螺旋输送机构将谷物输送至螺旋机器人的后方以减小前进的阻力,同样螺旋输送机构的旋转方向与旋向相同。在粮堆内部进行转向时,利用两对螺杆的转速差实现其整体的差速转向。该装置共有 5 个转动副,每个转动副的传动系统相互独立(图 1)。



1. 外壳 2. 内壳 3. 螺旋运输机构 4. 螺杆 5. 内啮合传动 6. 螺杆驱动电机

图 1 螺旋机器人总体结构示意图

Figure 1 Overall structure diagram of spiral robot

1.2 螺杆的运动学建模分析

理想的螺杆单元运动学模型如图 2 所示,将螺杆单元置于一个绝对三维坐标系 $\sum O(X,Y,Z)$ 中。

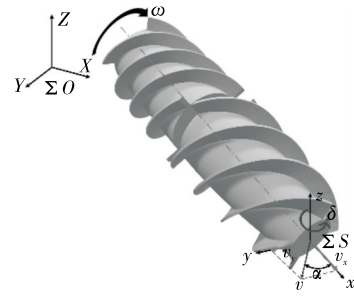
螺旋机器人在谷堆内部运动时,由于在螺杆的作用下谷物颗粒会被挤压或者相对滚动,螺杆与谷物之间产生滑移,因此引入滑移率的概念,其表达式为^[10]:

$$s_x = \frac{P\omega/2\pi - v_x}{P\omega/2\pi} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

s_x ——滑移率, %;

ω ——角速度, rad/s;



v_x, v_y , 速度在 x, y 轴上的分量 α , 偏移角($^\circ$) δ , z 轴旋转角度($^\circ$)

图 2 螺杆单元运动模型

Figure 2 Movement model of screw element

P ——螺距, m;

v_x ——螺杆沿 x 方向上的速度, m/s。

在给定坐标系 $\sum s(x, y, z)$ 中的速度矢量 $\mathbf{v}$ 与其在 x 轴上的分量 v_x 之间形成的夹角可定义为偏移角 α , 在 $\sum s(x, y, z)$ 中 α 与矢量 $\mathbf{v}$ 和分量 v_x 之间的表达式为:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{v_y}{v_x} \right). \quad (2)$$

此外, v_x, v_y 可分别表达为:

$$v_x = \frac{P\omega(1-s_x)}{2\pi}, \quad (3)$$

$$v_y = \frac{P\omega(1-s_x)}{2\pi} \tan^{-1} \alpha. \quad (4)$$

2 螺杆与谷物相互作用力学模型

2.1 螺杆对粮堆的法向应力

当探测器在谷堆内部向下运动时,螺杆会受到来自谷物的侧压力。同理,螺杆与谷物的相互作用使接触的谷物发生形变与挤压,因此在螺杆周围的谷物存在法向应力。谷物承受的法向应力通常与深度相关,根据 Janssen 等^[11-12]提出的储粮压力理论,谷物承受的正应力与深度的关系式为:

$$\begin{cases} \sigma(z) \approx \sigma_m [1 - e^{-\frac{z}{\lambda}}] \\ \lambda = \frac{C_b}{A_b K \mu} \end{cases}, \quad (5)$$

式中:

σ_m ——饱和正应力, Pa;

z ——螺旋机器人深度, m;

λ ——粮仓特征高度, m;

K ——散体侧压力系数;

μ ——谷物与螺杆之间的摩擦系数;

C_b ——粮堆底部周长, m;

A_b ——粮堆底面积, m^2 。

K 与谷物间的摩擦角 φ 的关系式为:

$$K = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (6)$$

由于“粮仓效应”的存在,粮堆内部压力并不会随着粮堆深度的增加而增大,而是趋于一个饱和值 σ_m :

$$\sigma_m = \rho K \lambda, \quad (7)$$

式中:

ρ ——颗粒容重, kg/m^3 。

当螺旋机器人经过时间 t , 从粮堆表面以垂直向下的速度 v 运动到 z , 旋转角度 θ 与 z 的关系式为:

$$z = \frac{P\omega t(1-s_x)\cos v}{2\pi} = i\omega t = i\theta, \quad (8)$$

式中:

s_x ——滑移率, %;

P ——螺距, m;

v ——偏转角度, $^\circ$ 。

由于垂直向下运动螺旋机器人偏转角度 $v=0$, 将式(8)代入式(5)得:

$$\sigma(\theta) = \sigma_m [1 - e^{(-\frac{\theta}{\lambda})}]. \quad (9)$$

2.2 螺杆对粮堆的剪切应力

螺杆在粮堆中旋转时, 螺杆上的叶片会对谷堆进行分割。谷物的剪切应力便主要发生在螺旋叶片上, 谷物会沿着螺旋叶片发生形变和位移。根据 Janosi 等^[13-14]提出的剪切应力—位移的关系式, 确定剪切应力 τ 和位移 j 关系为:

$$\begin{cases} \tau = \tau_{\max}(1 - e^{-\frac{j}{k}}) \\ \tau_{\max} = c + \sigma \tan \varphi \end{cases}, \quad (10)$$

式中:

$\tau_{\max}$ ——抗剪强度, Pa;

k ——谷堆地形的剪切模量, Pa;

c ——谷物黏聚力, Pa。

为了预测螺杆驱动机器人的牵引力, 确定谷物接触面—螺杆之间的剪切应力是前提。螺旋机器人通过螺杆对接触面施加剪切应力, 使接触的谷物产生相应的形变和位移。将剪切位移可以分解为轴向的剪切位移 j_y 和切向的剪切位移 j_x , 然后可以确定相应的剪切应力 τ_y 和 τ_x , 如图 3 所示。

根据 Ding 等^[15]提出的剪切力—位移公式为:

$$\begin{cases} \tau_x(\theta) = [c + \sigma(\theta) \tan \varphi] [1 - e^{-\frac{j_x(\theta)}{k}}] \\ \tau_y(\theta) = [c + \sigma(\theta) \tan \varphi] [1 - e^{-\frac{j_y(\theta)}{k}}] \end{cases}, \quad (11)$$

式中:

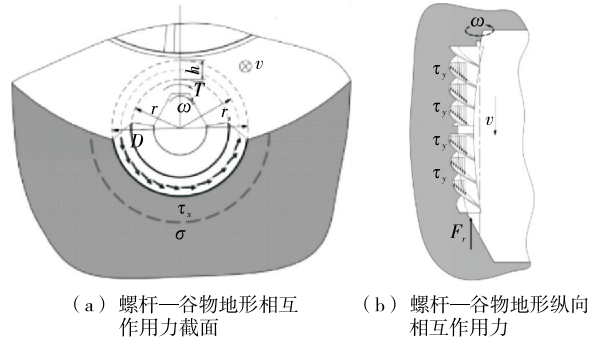
j_x ——切向剪切位移, m;

j_y ——纵向剪切位移, m;

τ_x ——切向剪切应力, Pa;

τ_y ——纵向剪切应力, Pa。

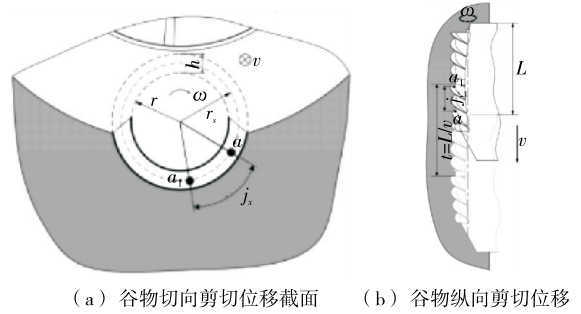
综上, 剪切应力与剪切位移有关, 当螺旋机器人以轴向速度 v 移动 L 距离时, 颗粒在螺杆的作用下从 a 点移动到 a_1 点的轨迹如图 4 所示。



(a) 螺杆—谷物地形相互作用力截面 (b) 螺杆—谷物地形纵向相互作用力

图 3 螺杆与谷物相互作用示意图

Figure 3 Schematic diagram of the interaction between screw and grain



(a) 谷物切向剪切位移截面 (b) 谷物纵向剪切位移

图 4 螺杆作用下谷物的剪切位移示意图

Figure 4 Shear displacement diagram of grain under screw action

由于螺杆和谷物之间会发生相对滑移, 所以螺旋机器人移动 L 距离所花费的时间 t 超出理想时间 t_0 , 滑移时间 Δt 由实际时间 t 与理想时间 t_0 表示^[5]:

$$\begin{cases} t = \frac{L}{v} = \frac{2\pi L}{(1-s_x)P\omega} \\ t_0 = \frac{2\pi L}{P\omega} \\ \Delta t = t - t_0 = \frac{2\pi L}{P\omega} \left(\frac{s_x}{1-s_x} \right) \end{cases}, \quad (12)$$

式中:

L ——移动距离, m;

t ——实际时间, s;

t_0 ——理想时间, s;

Δt ——滑移时间, s。

在等效半径 r_s 上的切向剪切位移 j_x 为:

$$\begin{cases} \xi = \frac{L}{1-s_x} \\ j_x = r_s \int_0^{\Delta t} \omega dt = \xi \frac{2\pi r_s s_x}{P} \end{cases}, \quad (13)$$

式中:

r_s ——等效半径, m;

ξ ——理想位移, m;

j_x ——切向剪切位移, m。

将式(13)代入式(11),得到对应的切向剪切应力 τ_x 为:

$$\tau_x(\theta) = [c + \sigma(\theta) \tan \varphi] [1 - e^{-\frac{\xi^2 \pi r_s s_x}{P k}}]. \quad (14)$$

由图 4(b)可知,与螺杆的纵向剪切位移 j_y 是由 a 点滑移到 a_1 点所引起的。此处引入滑移速度 v_j 的概念,滑移速度 v_j 是由于谷物与螺杆发生轴向滑移导致的,用于描述速度的减少量。可以基于滑移速度 v_j 分析,研究谷物的纵向剪切位移。由式(15)可以得到螺杆的滑移速度 v_j :

$$\begin{cases} s_x = \frac{P\omega/2\pi - v}{P\omega/2\pi} = \frac{v_j}{v_l}, \\ v_j = \frac{P\omega s_x}{2\pi} \end{cases}, \quad (15)$$

式中:

v_l ——螺杆的轴向理想速度, m/s。

对滑移速度积分得到谷物的纵向剪切位移为

$$\begin{cases} j_y = \int_0^t v_j dt = \frac{v_j L}{v_l(1-s_x)} = \frac{s_x L}{(1-s_x)}, \\ \xi = \frac{L}{(1-s_x)} \end{cases}. \quad (16)$$

将式(16)代入式(11),得到纵向剪切应力 τ_y 为:

$$\tau_y(\theta) = [c + \sigma(\theta) \tan \varphi] (1 - e^{-\frac{s_x \xi}{k}}). \quad (17)$$

2.3 螺杆的力平衡方程

根据建立的剪切应力模型进行积分得到螺杆的轴向牵引力 F_{sy} 和螺杆切向牵引力 F_{sx} 。根据力矩平衡,对切向剪切应力进行积分得到阻力力矩,螺杆的力平衡方程为:

$$\begin{cases} F_{sy} = \frac{G}{4} + F_y - F_r = r_s \int_0^{\theta_1} \int_0^L d_s \cdot \tau_y(z) d\xi d\theta - \\ F_r + \frac{G}{4} = r_s \cdot d_s [c + \sigma(z) \tan \varphi] \int_0^{\theta_1} \int_0^L (1 - \\ e^{-\frac{j_y}{k}}) d\xi d\theta - F_r + \frac{G}{4} \\ F_{sx} = d_s [\int_0^L \int_0^{\theta_1} r_s \tau_x(z) \cos \theta d\xi d\theta - \\ \int_0^{\theta_1} r \sigma(z) \sin \theta d\theta] \\ M_{SR} = r_s \int_0^{\theta_1} \int_0^L r_s d_s \tau_x(z) d\xi d\theta = \\ r_s^2 d_s [c + \sigma(z) \tan \varphi] \int_0^{\theta_1} \int_0^L (1 - e^{-\frac{j_x}{k}}) d\xi d\theta \end{cases}, \quad (18)$$

式中:

F_y ——螺杆的轴向力, N;

F_r ——运动阻力, N;

M_{SR} ——阻力矩, N·m;

G ——螺旋机器人所受重力, N;

d_s ——等效剪切宽度, m;

θ_1 ——螺杆与谷物接触弧度, rad。

F_y 为螺杆受到的推力, 为螺旋机器人提供动力; M_{SR} 为阻力矩, 即螺杆所需扭矩。

3 螺杆推力模型实验验证

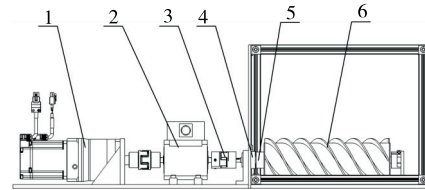
3.1 试验材料及设备

搭建一套螺杆受力测定系统, 测定螺杆的阻力扭矩和螺杆受到的轴向力。所用的动态扭矩传感器量程为 0~30 N·m, 采集精度为 0.3%, 使用串口传输数据, 所用的环形轴向压力传感器量程为 0~500 N, 采集灵敏度为 1.244 V/V。选用 6~8 mm 粒径大小的仓储黄豆作为试验对象。将螺杆置于长为 330 mm, 宽为 220 mm, 高为 300 mm 的小型仓中进行试验, 螺杆受力特性测定试验如图 5 所示。

试验所用的螺杆结构如图 6 所示^[16], 各参数见表 1。

3.2 试验方案

选取螺杆转速和螺杆所在深度作为影响因素, 将螺杆转速和深度两个因素均分为 4 个水平, 采用不同的转速和粮堆高度组合进行全因素试验, 共 16 组, 每组重复 3 次取平均值, 并对试验数据进行处理, 得到螺杆阻力转



1. 伺服电机 2. 扭矩传感器 3. 波纹管联轴器 4. 推力传感器 5. 推力轴承及轴承座 6. 螺杆

图 5 螺杆受力测定试验

Figure 5 Physical diagram of screw force measuring testbench

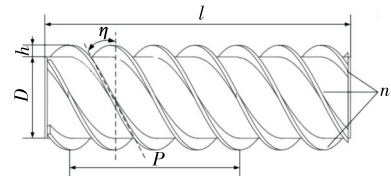


图 6 螺杆结构及尺寸参数

Figure 6 Screw structure and size parameters

表 1 螺杆尺寸参数

Table 1 Screw size parameters

参数名称	单位	取值
叶片高度 h	m	10
螺距 P	m	149
滚筒半径 r	m	35
螺旋升角 η	°	30
螺旋头数 n		4

矩和轴向推力,试验因素及水平见表 2。为了改变螺杆所在深度,在小型试验仓中改变粮堆的高度以实现螺杆的深度水平变化,粮堆高度变化梯度为 68 mm。

为了验证螺杆阻力转矩变化特性,减少实验台设计所带来的误差,需设置对照组试验确认螺杆在空载情况下所需的转矩。

3.3 结果与分析

3.3.1 试验结果 在没有粮堆作为负载的情况下,由于螺杆自身存在转动惯量,螺杆在旋转时会产生转矩,动态扭矩传感器会检测到并记录。在处理螺杆受到阻力转矩数据时,减去相应转速下对照组的转矩,得到螺杆受到的阻力转矩。当螺杆转速为 2,3,4,5 r/s 时,对照组的转矩

分别为 2.792,2.789,2.780,2.787 N·m。

为了研究阻力转矩随螺杆转速和粮堆高度的变化趋势,根据动态扭矩传感器采集的数据,分别绘制阻力转矩随螺杆转速变化曲线和阻力转矩随粮堆高度的变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,相同粮堆高度下,螺杆受到的阻力转矩随螺杆转速的增加逐步增加,但增加趋势在 4 r/s 后有所减缓,说明螺杆阻力转矩受转速的影响较大,初步验证了螺杆受力模型的变化趋势。相同转速下,螺杆受到的阻力转矩随粮堆高度的增加而增加,但增加趋势明显下降,螺杆在与谷堆相互作用时,谷堆与螺杆的接触截面会出现剪切应力,经分解后,可分为纵向剪切应力和切向剪切应力,由谷物受到的剪切应力作用到螺杆上会形成轴向推力,因此,轴向推力同样会受到粮堆高度和转速的影响。通过轴向压力传感器采集试验数据,分别绘制出轴向推力在不同粮堆高度和转速下的变化曲线如图 8 所示。

由图 8 可知,同一粮堆高度下,螺杆受到的轴向推力随螺杆转速的增加逐步增加,但增加趋势在 3 r/s 后逐渐降低,曲线逐渐平缓,这种变化趋势在粮堆高度为 96,

表 2 试验因素及水平
Table 2 Experimental factors and experimental level

水平	A 螺杆转速/(r·s ⁻¹)	B 粮堆高/mm
1	2	96
2	3	164
3	4	232
4	5	300

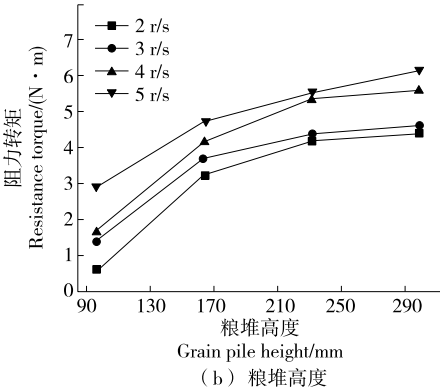
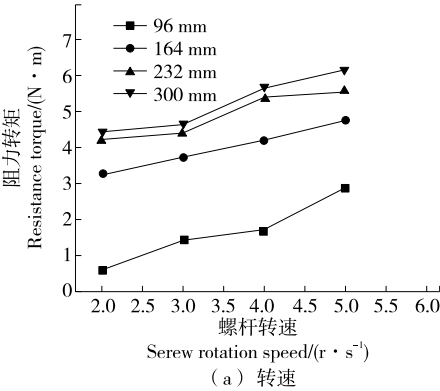


图 7 阻力转矩在不同因素作用下的特性曲线
Figure 7 The resistance torque characteristic under various factors

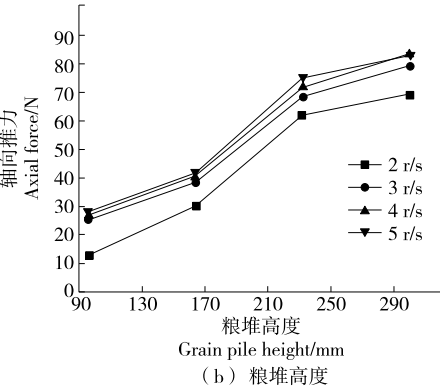
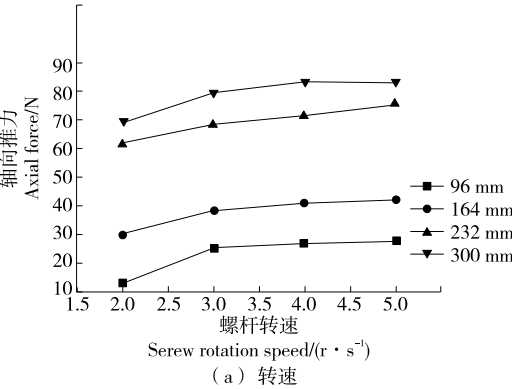


图 8 轴向推力在不同因素作用下的特性曲线
Figure 8 The characteristic of axial thrust under various factors

164 mm 时尤为明显,粮堆高度达到 232 mm 后,轴向推力增加的趋势略微增加,可能是粮堆高度低导致螺杆在与谷物相互作用时被排开,粮堆无法完全覆盖在螺杆上,致使谷物无法与螺杆充分相互作用,使推力减小。综上,螺旋机器人在距离粮面较深时,螺杆的推力性能较好。转速一定时,轴向推力随粮堆高度的增加而增加,但由于“粮仓效应”,螺杆与谷物接触截面的正应力不会因粮堆高度增高而增大,所以轴向推力增长的趋势变缓,轴向推力随粮堆高度变化曲线会平缓。

3.3.2 试验结果对比 将粮仓压力模型融入螺杆推力模

型中,在不同粮堆高度下对改进推力模型的影响加以验证。

由图 9 可知,轴向推力试验值与计算值相差较小,计算值与试验值均随粮堆高度的增加而增加,且增加幅度逐渐趋于平缓,因此,变化趋势大致相同,初步验证螺杆推力模型的可靠性。阻力转矩试验值与计算值的变化趋势基本一致,但试验值略大于计算值,可能是动态扭矩传感器存在电磁干扰,基本验证阻力转矩模型的可靠性。

由图 10 可知,轴向推力的误差随粮堆高度的增加而减小,粮堆越高,螺杆与谷物相互作用越充分,所以测量

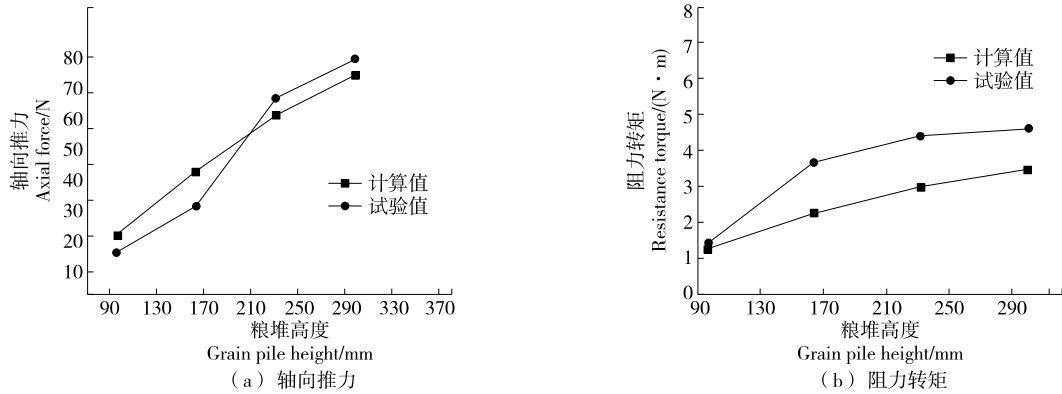


图 9 不同粮堆高度下螺杆受力对比

Figure 9 Comparison of screw forces under different grain pile heights

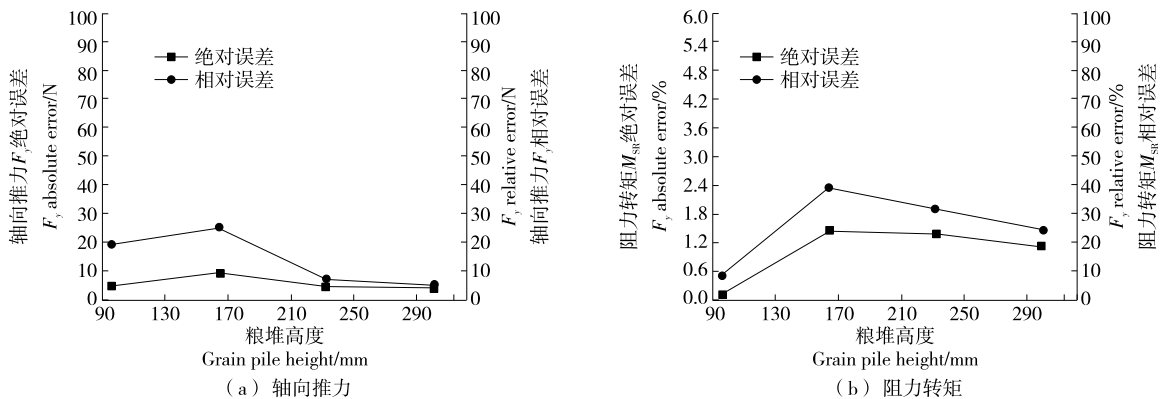


图 10 轴向力和阻力转矩计算值与试验值的相对误差和绝对误差

Figure 10 Comparison error between calculated and experimental values of axial force and resistance torque

出的试验值越准确。轴向推力的计算值与试验值的绝对误差最大值为 9.727 N,最小值为 4.216 N;相对误差最大值为 25.3%,最小值为 5.3%,平均值为 14%。阻力转矩的对比误差总体趋势也随粮堆深度的增加而减小,其绝对误差最大值为 1.453 N·m,最小值为 0.118 N·m;其对比相对误差最大值为 39.2%,最小值为 8.51%,平均值为 24%。

4 结论

研究构建了谷物颗粒在螺旋运输机构中的运动学模型,分析了螺杆在粮堆中与谷物之间的耦合作用关系,并

基于 Janssen 的储粮压力理论和 Janosi 的剪切一位移方程建立了螺杆轴向力与阻力转矩的模型。结果表明,螺杆的转矩和轴向力随螺杆转速和深度的增加而增大,二者的变化趋势一致且相差较小,说明螺杆推力模型具有较高可靠性。其中,轴向推力模型的最大相对误差为 25.3%,最小相对误差为 5.3%,平均值为 14%;阻力转矩的最大相对误差为 39.2%,最小相对误差为 8.51%,平均值为 24%。试验建立的螺杆轴向力与阻力转矩的模型还需改进,提高模型精度,并可选取不同的螺杆几何参数设计试验,进一步验证模型的可靠性。

参考文献

- [1] 王小萌, 吴文福, 尹君, 等. 基于温湿度场云图的小麦粮堆霉变与温湿度耦合分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 260-266.
WANG X M, WU W F, YIN J, et al. Coupling analysis of mildew and temperature and humidity in wheat grain pile based on cloud map of temperature and humidity field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 260-266.
- [2] 尹君, 吴子丹, 张忠杰, 等. 基于多场耦合理论浅析浅圆仓局部结露机理[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(5): 90-95.
YIN J, WU Z D, ZHANG Z J, et al. Analysis of local condensation mechanism of shallow silo based on multi-field coupling theory[J]. China Journal of Grain and Oils, 2015, 30(5): 90-95.
- [3] 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 J H, WU F W, WU Z D, et al. Design and experiment of screw driven granary robot walking mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(2): 20-26.
- [4] JOHNSON B H, JOHNSON C E, ZENTS Z. Bulk store slope adjustment: US2021276794[P]. 2021-09-09.
- [5] JIN H, LIN J, WU W, et al. Interaction mechanics model for screw-drive wheel of granary robot traveling on the loose grain terrain[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(6): 827-839.
- [6] 常金攀, 果霖, 贺小梅, 等. 基于 EDEM 固液分离装置螺旋轴参数优化与试验[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 128-132.
CHANG J P, GUO L, HE X M, et al. Optimization and test study on parameters of helical axis based on EDEM solid-liquid separation device[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 128-132.
- [7] 李博昕. 翻仓机器人结构设计及其仿真研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021: 12.
LI B X. Structure design and simulation research of tipping robot [D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2021: 12.
- [8] 冯硕, 王延刚, 王信锬, 等. 基于离散元方法的餐厨垃圾螺旋挤压装置性能研究[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 109-113.
FENG S, WANG Y G, WANG X K, et al. Study on performance of kitchen waste spiral extrusion device based on discrete element method[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 109-113.
- [9] YIN Q, YU J P, SONG S Y, et al. Research on structural parameters and kinematic properties of a drill-in granary grain condition detector[J]. Mech Sci, 2022, 13(2): 961-978.
- [10] DUGOFF H, EHLICH I R. Model tests of bouyant screw rotor configurations[J]. Journal of Terramechanics, 1967, 4(3): 9-22.
- [11] JANSSEN H. Versuche uber getreidedruck in silozellen[J]. Vercin Deutcher Ingenieure, 1895, 39: 1 045.
- [12] ZHANG D, ZHANG M, ZHANG Q, et al. Method to detect granary storage weight based on the Janssen model[J]. Grain Oil Science Technology, 2018(1): 20-27.
- [13] JANOSI Z. The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in defarmable soils[C]// The 1st International Conference. Torino, Italy: International Society for Terrain-Vehicle Systems, 1961: 707-726.
- [14] WONG J Y. Theory of ground vehicles[M]. New York: John Wiley & Sons, 2022: 115.
- [15] DING L, DENG Z, GAO H, et al. Interaction mechanics model for rigid driving wheels of planetary rovers moving on sandy terrain with consideration of multiple physical effects[J]. Journal of Field Robotics, 2015, 32(6): 827-859.
- [16] 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: 16.
DONG P. Design and optimization of walking structure of new grain surface robot[D]. Changchun: Jilin University, 2021: 16.
- (上接第 56 页)
- [22] WAHED P, RAZZAQ M A, DHARMAPURI S, et al. Determination of formaldehyde in food and feed by an in-house validated HPLC method[J]. Food Chemistry, 2016, 202: 476-483.
- [23] 谢永萍, 李慧勇, 席绍峰, 等. 高效液相色谱法测定密胺餐具中甲醛单体迁移量[J]. 理化检验: 化学分册, 2015, 51(6): 810-813.
XIE Y P, LI H Y, XI S F, et al. Determination of formaldehyde content in melamine wares by HPLC[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2015, 51(6): 810-813.
- [24] LIN Y L, WANG P Y, HSIEH L L, et al. Determination of linear aliphatic aldehydes in heavy metal containing waters by high-performance liquid chromatography using 2, 4-dinitrophenylhydrazine derivatization [J]. Journal of Chromatography A, 2009, 1216: 6 377-6 381.
- [25] CUSTER T G, KATO S, BIERBAUM V M, et al. Gas-phase kinetics and mechanism of the reactions of protonated hydrazine with carbonyl compounds. Gas-phase hydrazone formation: kinetics and mechanism[J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, 126(9): 2 744-2 754.
- [26] FANG S Y, LIU Y Y, HE J H, et al. Determination of aldehydes in water samples by coupling magnetism-reinforced molecular imprinting monolith microextraction and non-aqueous capillary electrophoresis [J]. Journal of Chromatography A, 2020, 1632: 461602.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 实验室质量控制规范 食品理化检测: GB/T 27404—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 1-6.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Laboratory quality control standard: Food physical and chemical testing: GB/T 27404—2008 [S]. Beijing: China Standards Press, 2011: 1-6.