

定量变距螺旋结构与试验

徐雪萌 李飞翔 李永祥 申长璞 孟坤鹏 陈 静

(河南工业大学机电工程学院, 郑州 450001)

摘要: 针对等径变距螺旋喂料结构出料量不稳的问题,在等距螺旋结构流量计算式的基础上,提出一种变距螺旋结构流量的计算方法,并推导出流量计算式。根据流量计算式,采用响应面法对变距螺旋结构进行螺距设计,以流量作为响应值,应用 Design-Expert 软件设计试验,得到螺旋喂料结构进料段最佳螺距组合为 $S_1 = 0.35D$, $S_2 = 0.60D$, $S_3 = 0.85D$, $S_4 = D$ 。根据所得的最佳参数组合,用 SolidWorks 软件建立螺旋喂料结构三维模型并导入 EDEM 软件,以小米物料进行离散元分析,仿真质量流量平均值为 0.321 kg/s ,与变距实际计算流量值 0.319 kg/s 的误差为 0.627% ,与实际要求流量值误差为 3.7% ,验证了变距流量式的可靠性和响应面设计的可行性,可为定量变距螺旋结构的设计计算提供参考。

关键词: 变螺距; 螺旋输送; 质量流量; 响应面法; 离散元

中图分类号: TS206.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0089-09

Design and Experiment of Quantitative Variable Pitch Screw

XU Xuemeng LI Feixiang LI Yongxiang SHEN Changpu MENG Kunpeng CHEN Jing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To face challenges of unstable discharge for feed structure with equal diameter variable pitch screw, a theoretical analysis for variable pitch screw capacity was presented under some simplification assumption, which was compared with the equal pitch one, and resulted in a flow calculation formula by reasonable mathematical derivation. Furthermore, design of variable pitch screw was optimized by using response surface method which a flow rate was set as the response value in accordance with the above calculation formula. The Box-Behnken test analysis was performed with the help of Design-Expert software, turning out that the optimal pitch combination for the smallest target flow error was $S_1 = 0.35D$, $S_2 = 0.60D$, $S_3 = 0.85D$, and $S_4 = D$. After all, movement simulation for millet as transport medium were performed in the screw with obtained optimum design, which the 3D model was built with SolidWorks software and the EDEM software was imported for discrete element analysis. After calibration, the result indicated that the simulative mass flow was 0.321 kg/s , compared with calculation flow value of 0.319 kg/s and the difference rate of 0.627% , relative error of which was measured to the actual required flow was 3.7% . The reliability of the flow formula was verified while the feasibility of the response surface method to design the screw structure was proven, which provided a reference for the design of the quantitative variable pitch screw.

Key words: variable pitch; conveying screw; mass flow rate; response surface method; discrete element

0 引言

自动包装生产线上粉体及颗粒物料的供送与定量大多采用螺旋输送设备,螺旋输送装置的合理设计是提高物料输送效率及包装精度的关键因

素^[1-5]。国内外学者在改进与优化螺旋体结构方面做了大量研究^[6-9]。但对于定量变距螺旋结构参数的相关研究较少,本文针对等径变距螺旋喂料结构出料量不稳的问题,提出一种定量变距螺旋参数确定方法。

收稿日期: 2019-08-12 修回日期: 2019-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0400704)和河南省科技厅自然科学基金项目(182102110163)

作者简介: 徐雪萌(1972—),女,副教授,主要从事粮油食品包装工艺与装备研究,E-mail: xuxuemeng7439@163.com

通信作者: 李永祥(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事粮食机械及理论研究,E-mail: liyongxiang@haut.edu.cn

首先,在等距螺旋结构流量计算式的基础上,提出一种针对变距螺旋结构流量的计算方法,并推导出变距流量式;然后,根据流量计算式,以流量作为响应值,应用 Design-Expert 软件,采用响应面法^[10-12]对变距螺旋结构进行螺距设计,得到最佳螺距组合;最后进行仿真分析。为提高仿真精度,以小米为物料、小米休止角为响应值对离散元仿真参数进行标定,得到最佳仿真参数组合;根据所得最佳螺距组合与仿真参数组合,建立三维模型,导入 EDEM 软件进行离散元分析,验证变距流量式可靠性及螺旋参数正确性。

1 流量计算

1.1 理论基础

定量变距螺旋结构工作时,其物料在料筒内的运动状态非常复杂,为分析料筒内物料运动变化规律,在建立变距螺旋轴参数化模型前需做合理假设。结合相关文献假设条件^[13-15],本文作以下假设:不考虑物料在螺旋内的压缩情况;假设螺旋内物料轴向运动速度等于叶片轴向推移速度,不考虑螺旋面与物料间摩擦情况。

为保证物料在螺旋叶片内全面流动,防止“死区”及料仓“结拱”现象出现,须保证螺旋轴在整个下料段单位长度的下料量相等,即每个螺距的体积应等于本螺距前面螺距体积与料仓进入本螺距下料量之和^[15],可表达为

$$\left\{\begin{aligned} V_1 &= ES_1 \\ V_2 &= E(S_1 + S_2) \\ V_3 &= E(S_1 + S_2 + S_3) \\ &\vdots \\ V_n &= E \sum_{k=1}^n S_k = EL \end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中 V_1 ——进料口第 1 个螺距的体积,mm³
 V_2 ——进料口第 2 个螺距的体积,mm³

V_3 ——进料口第 3 个螺距的体积,mm³
 V_n ——进料口第 n 个螺距的体积,mm³
 E ——单位长度每转下料体积,mm³/mm
 S_1 ——螺旋进料口第 1 个螺距,mm
 S_2 ——螺旋进料口第 2 个螺距,mm
 S_3 ——螺旋进料口第 3 个螺距,mm
 S_n ——螺旋进料口第 n 个螺距,mm
 L ——螺旋进料口长度,mm

由相关文献可知^[15],单位长度每转下料体积计算式为

$$E = \frac{10^9 Q}{60 n \rho \varphi L} \quad (2)$$

式中 Q ——生产率,kg/h
 n ——转速,r/min
 ρ ——物料密度,kg/m³
 φ ——填充率

1.2 流量计算

变距螺旋流量计算与等距螺旋流量计算的不同点主要在进料口螺距的变化,等距螺旋的流量计算公式为^[16-17]

$$Q = 47 D^2 \rho \varphi S n C K \quad (3)$$

式中 D ——螺旋叶片外径,m
 S ——螺距,m
 C ——倾斜输送修正系数
 K ——螺旋叶片影响系数

针对变距螺旋结构,对于进料段的每个螺距,将其看作是针对变距螺旋结构的等距延伸,如图 1 所示,以进料段 4 圈螺距为例进行说明。螺旋结构转速、叶片外径及进料段总长度保持不变,对变距螺旋进料段的各圈螺距分别看作等螺距螺杆进行分析。图 1b 为进料段首圈螺距 S_1 与其螺距对应的等距螺杆;图 1c、1d、1e 分别为与进料段螺距 S_2 、 S_3 、 S_4 对应的等距螺杆;以此类推,对于变距螺旋结构进料段的第 n 圈螺距延伸为与其螺距 S_n 相等的等距螺杆。

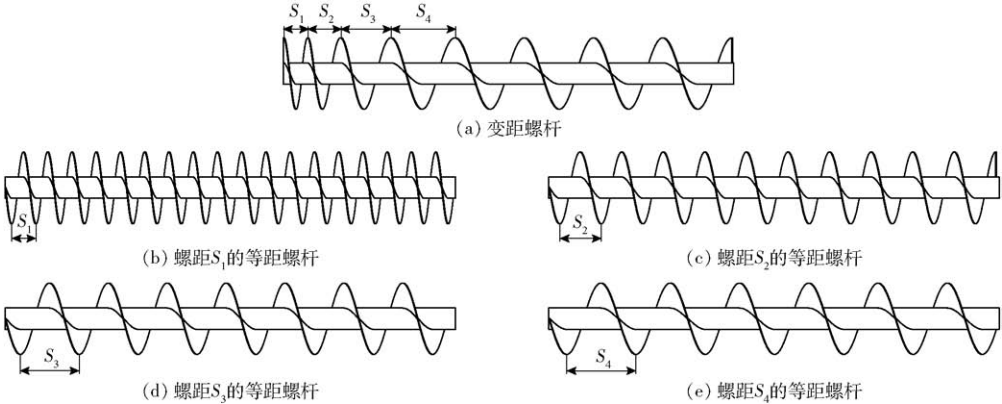


图 1 变距转换等距图

Fig. 1 Variable distance conversion isometric map

在单位长度下料量相等的理想假设条件下,针对延伸后的等距螺杆结构,对其进料段单位长度上每转的下料量进行分析求解,以此看作与其螺距值对应的变距螺旋结构进料段各圈螺距的单位长度每转的下料量,如将延伸的螺距 S_1 的等距螺杆结构进料段的单位长度每转下料量作为首圈螺距 S_1 进行分析。根据延伸前后单圈螺距料槽体积的不变性,延伸后各个等距单圈料槽体积之和即为变距螺旋结构进料段料槽体积的总和,由此对变距螺旋结构的流量计算式进行推导。

由图 1 可知,针对进料段各圈螺距所延伸的等距螺旋结构,同样基于与变距结构相同的假定条件,管径、填充率、密度的不变性,由式(3)可知各个等距螺旋结构的质量流量为

$$\begin{cases} Q_1 = S_1 \times 47D^2 \rho \varphi n C K \\ Q_2 = S_2 \times 47D^2 \rho \varphi n C K \\ \vdots \\ Q_n = S_n \times 47D^2 \rho \varphi n C K \end{cases} \quad (4)$$

式中 $Q_1、Q_2、Q_n$ ——变距螺旋第 1 圈、第 2 圈、第 n 圈螺距等距转换后的流量, kg/h

由式(2)可知

$$\begin{cases} E_1 = \frac{10^9 Q_1}{60 n \rho \varphi L} = S_1 \frac{47 D^2 \times 10^9}{L} \\ E_2 = \frac{10^9 Q_2}{60 n \rho \varphi L} = S_2 \frac{47 D^2 \times 10^9}{L} \\ \vdots \\ E_n = \frac{10^9 Q_n}{60 n \rho \varphi L} = S_n \frac{47 D^2 \times 10^9}{L} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $E_1、E_2、E_n$ ——第 1 圈、第 2 圈、第 n 圈螺距等距转换后的单位长度每转下料体积, mm³/mm

由式(5)可知,变距螺旋进料段的下料总体积可表示为

$$V_s = \sum_{i=1}^n E_i S_i = \sum_{i=1}^n S_i^2 \frac{47 D^2 \times 10^9}{L} \quad (6)$$

由变距螺旋的基本理论可知

$$\begin{aligned} V_s &= \sum_{i=1}^n V_i = \\ ES_1 + E(S_1 + S_2) + E(S_1 + S_2 + S_3) + \cdots + EL &= \\ E[nS_1 + (n-1)S_2 + (n-2)S_3 + \cdots + S_n] \end{aligned} \quad (7)$$

由式(6)、(7)等价,可知变距螺旋单位每转下料体积 E 为

$$E = \sum_{i=1}^n S_i^2 \frac{47 D^2 \times 10^9}{L[nS_1 + (n-1)S_2 + (n-2)S_3 + \cdots + S_n]} \quad (8)$$

由此可得变距螺旋结构流量计算式为

$$Q_B = \frac{E \times 60 \rho \varphi n L}{10^9} = \frac{47 D^2 \rho \varphi n \sum_{i=1}^n S_i^2}{nS_1 + (n-1)S_2 + (n-2)S_3 + \cdots + S_n} \quad (9)$$

2 响应面设计

本文根据推导的变距螺旋流量计算式,以螺旋喂料结构的流量作为响应值对螺旋结构进行响应面设计。考虑到变距螺旋结构的复杂性以及正交试验组合的多样性,若进行实际试验设计,会耗费大量的时间及成本,本文以实际定量变距螺旋流量需求为响应,以变距螺旋流量计算式结果作为预测值进行试验设计分析。

2.1 材料参数

输送物料为小米,物料密度 $\rho = 780 \text{ kg/mm}^3$,物料综合特性系数 $A = 65$,物料填充率 $\varphi = 0.4$,螺旋给料装置生产率 $Q = 1\,200 \text{ kg/h}$,螺旋总长度 $L = 650 \text{ mm}$,螺旋转速 $n = 150 \text{ r/min}$,倾斜输送修正系数 $C = 1$,螺旋叶片影响系数 $K = 1$ ^[17-20]。结合国内外文献以及实际变距设计,本文采用四段式进行分析^[21]。

2.2 因素水平

根据推导的变距螺旋结构流量计算式,在实际叶片直径、填充率、密度、转速一定的情况下,主要考虑进料段变螺距对流量的影响,选定各段螺距进行相关试验设计,根据实际首圈螺距要求及等差级数设计原则^[22-24],选定各圈螺距变化范围,采用 3 水平进行 Box - Behnken 试验设计,因素编码如表 1 所示。

表 1 Box - Behnken 试验因素编码
Tab. 1 Factors and codes of Box - Behnken test

编码	因素			
	S_1	S_2	S_3	S_4
-1	30	40	50	60
0	45	60	75	90
1	60	80	100	120

2.3 Box - Behnken 试验及回归模型

选取 $X_1、X_2、X_3、X_4$ 为因素编码值进行试验设计,选 3 个中心点对误差进行评估。Box - Behnken 试验结果如表 2 所示,应用 Design - Expert 建立进料段 4 圈螺距与流量的二阶回归方程为

$$\begin{aligned} Q &= 927 - 13X_1 + 19X_2 + 118X_3 + 212X_4 + X_1X_2 + \\ &48X_1X_3 - 19X_1X_4 - 12X_2X_3 - 22X_2X_4 - \\ &23X_3X_4 + 33X_1^2 + 8X_2^2 + 41X_3^2 + 24X_4^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Box - Behnken 试验模型方差分析结果如表 3

表 2 Box – Behnken 试验设计与结果

Tab.2 Design and results of Box – Behnken test

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	$Q/(kg\cdot h^{-1})$
1	0	-1	0	0	908
2	0	-1	0	-1	725
3	1	0	-1	0	839
4	0	0	1	1	1 271
5	1	1	0	0	948
6	0	0	0	0	927
7	0	0	-1	-1	648
8	0	0	0	0	927
9	0	-1	1	0	1 059
10	0	1	1	0	1 074
11	-1	1	0	0	1 008
12	0	0	-1	1	1 118
13	1	0	1	0	1 245
14	0	1	0	-1	806
15	-1	0	-1	0	887
16	-1	-1	0	0	972
17	0	-1	-1	0	836
18	0	1	-1	0	897
19	0	0	1	-1	893
20	1	0	0	1	1 136
21	-1	0	1	0	1 103
22	-1	0	0	-1	774
23	0	1	0	1	1 186
24	0	0	0	0	927
25	0	-1	0	1	1 194
26	1	0	0	-1	749
27	-1	0	0	1	1 238

表 3 Box – Behnken 试验设计二次多项式模型方差分析

Tab.3 ANOVA of quadratic polynomial model of Box – Behnken test

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	0.742 4	14	0.053 0	31.23	<0.000 1
X_1	0.002 1	1	0.002 1	1.21	0.029 3
X_2	0.004 2	1	0.004 2	2.48	0.014 1
X_3	0.168 0	1	0.168 0	98.97	<0.000 1
X_4	0.541 0	1	0.541 0	318.64	<0.000 1
X_1X_2	4.0×10^{-6}	1	4.0×10^{-6}	0.002 4	0.962 1
X_1X_3	0.009 0	1	0.009 0	5.32	0.039 8
X_1X_4	0.001 5	1	0.001 5	0.8730	0.368 5
X_2X_3	0.000 5	1	0.000 5	0.3116	0.587 0
X_2X_4	0.002 0	1	0.002 0	1.17	0.301 4
X_3X_4	0.002 1	1	0.002 1	1.25	0.286 1
X_1^2	0.005 7	1	0.005 7	3.34	0.092 4
X_2^2	0.000 4	1	0.000 4	0.220 3	0.647 2
X_3^2	0.008 7	1	0.008 7	5.15	0.042 4
X_4^2	0.003 1	1	0.003 1	1.81	0.203 5
残差	0.020 4	12	0.001 7		
失拟项	0.020 4	10	0.002 0		
纯误差	0.000 0	2	0.000 0		
总和	0.762 8	26			

所示,根据表 3 结果可知,该拟合模型 $P<0.000\ 1$;进料段各圈螺距 $P<0.05$,各个螺距交互项间除了交互项 X_1X_3 的 $P<0.05$ 外,其余交互项 $P>0.05$;失拟项 $P=0.06>0.05$,表明模型良好,没有弯曲失拟现象发生。试验变异系数 $C_v=4.23\%$,决定系数 $R^2=0.973\ 3$;校正决定系数 $R^2_{Adj}=0.942\ 1$;预测决定系数 $R^2_{Pre}=0.846\ 1$;决定系数与校正决定系数大于 0.9,预测决定系数接近 0.9,表明模型能够较为真实反映实际情况。试验精度为 21.53,说明模型具有良好精确度。

根据表 3 结果,在保证模型良好前提下,剔除对流量影响不显著项(X_1X_2 、 X_1X_4 、 X_2X_3 、 X_2X_4 、 X_3X_4 、 X_1^2 、 X_4^2),优化模型后的方差分析结果如表 4 所示,变异系数 $C_v=4.05\%$;决定系数 $R^2=0.961\ 2$;校正决定系数 $R^2_{Adj}=0.947$;预测决定系数 $R^2_{Pre}=0.987$;试验精度为 30.81。可知,模型拟合性、可靠性及精确性良好,较优化前有了一定改善,优化后回归方程为

$$Q=949-13X_1+19X_2+118X_3+212X_4+46X_1X_3+25X_1^2+32X_3^2$$

(11)

表 4 Box – Behnken 试验优化回归模型方差分析
Tab.4 ANOVA of modified model of Box – Behnken test

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	0.733 2	7	0.104 7	67.33	<0.000 1
X_1	0.002 1	1	0.002 1	1.32	0.026
X_2	0.004 2	1	0.004 2	2.71	0.011 6
X_3	0.168 0	1	0.168 0	108.01	<0.000 1
X_4	0.541 0	1	0.541 0	347.76	<0.000 1
X_1X_3	0.009 0	1	0.009 0	5.80	0.026
X_1^2	0.003 9	1	0.003 9	2.48	0.013
X_3^2	0.006 7	1	0.006 7	4.32	0.052
残差	0.029 6	19	0.001 6		
失拟项	0.029 6	17	0.001 7		
纯误差	0.000 0	2	0.000 0		
总和	0.762 8	26			

2.4 回归模型交互效应分析

根据优化回归模型方差分析结果,可知螺旋结构进料段第 1 和第 3 圈螺距间交互项 $P<0.05$,表明其对螺旋结构流量影响极显著。应用 Design-Expert 软件对第 1 与第 3 圈螺距间交互作用的三维响应曲面进行绘制,如图 2 所示,可以直观地反映交互项对响应值流量的影响。由响应曲面可知,相对于螺距 $S_1(X_1)$,螺距 $S_3(X_3)$ 的响应面曲线比较陡,表明其对螺旋结构流量的影响较为显著。

应用 Design-Expert 软件以螺旋喂料结构的质量流量为目标,对优化后的回归方程进行寻优求解可知,欲使与实际需求流量误差最小,则最佳的螺距

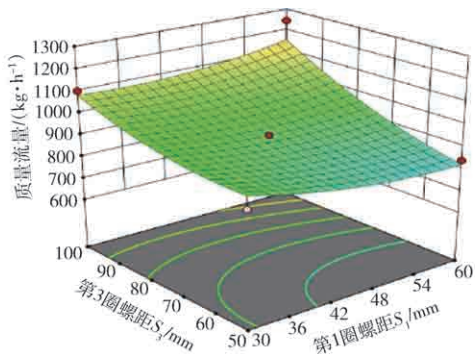


图 2 螺距 S_1 与螺距 S_3 交互效应

Fig. 2 Interaction diagram between pitch S_1 and pitch S_3

组合为 $S_1 = 0.346D, S_2 = 0.589D, S_3 = 0.865D, S_4 = 1.03D$ 。考虑螺距的等差变化,对数据进行圆整可知, $S_1 = 0.35D, S_2 = 0.60D, S_3 = 0.85D, S_4 = D$ 。

3 参数标定

考虑到仿真时间的局限性,本文采用小米物料进行仿真验证试验。为提高仿真试验的精确性,以休止角作为响应值对小米物料的仿真接触参数进行标定,以使得仿真所得结果更加符合实际^[25-27]。

3.1 试验材料

原材料为山东老乡生态农业有限公司生产的小米:蛋白质质量分数 17%,脂肪质量分数 6%,含水率 12.7%,平均粒径为 1.5 mm。

3.2 物理模型

为尽量减少因人为而导致的测量误差,利用 Matlab 对采集图像进行处理,如图 3 所示。在 Matlab 读取试验图像后,依次对图像进行灰度处理、二值化处理、边缘检测,最后提取边界点,以高斯函数进行拟合,通过计算高斯曲线拐点处的斜率来得到休止角^[25],测量重复 5 次取其平均值,测得小米休止角为 31.15°。

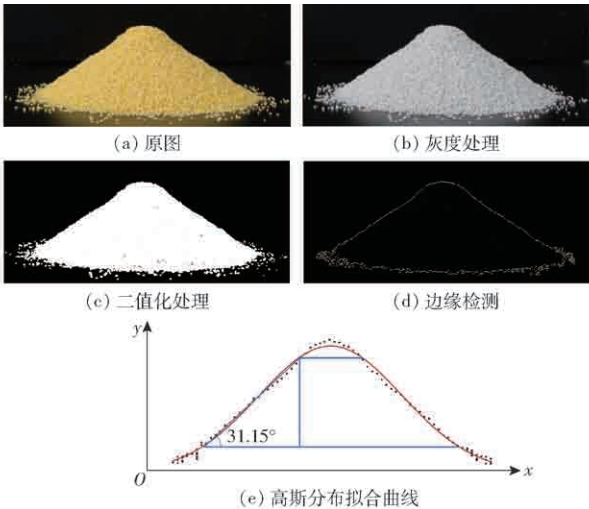


图 3 小米颗粒堆积试验

Fig. 3 Millet particle accumulation experiment

3.3 仿真模型

3.3.1 仿真参数

结合国内外文献对小米颗粒与不锈钢离散元仿真参数的设置及软件内置 GEMM 数据库^[28-32],本研究中各仿真参数的变化范围如表 5 所示。模拟所需本征参数设定为小米密度 800 kg/m³,小米泊松比 0.25,小米剪切模量 5.2×10^7 Pa。材料的接触参数随材料密度、形状、粒径等不同变化较大,无法通过查阅物性手册或文献资料获取,采用虚拟试验进行标定。

表 5 离散元仿真参数		
Tab. 5 Discrete element simulation parameter		
仿真参数	数值范围	本文取值
小米密度/(kg·m ⁻³)	800	800
小米泊松比	0.25	0.25
小米剪切模量/Pa	5.2×10^7	5.2×10^7
不锈钢密度/(kg·m ⁻³)	7 800	7 800
不锈钢泊松比	0.3	0.3
不锈钢剪切模量/Pa	7×10^{10}	7×10^{10}
小米-小米恢复系数	0.15 ~ 0.30	0.25
小米-小米静摩擦因数	0.2 ~ 0.8	0.65
小米-小米滚动摩擦因数	0.01 ~ 0.05	0.01
小米-不锈钢恢复系数	0.15 ~ 0.30	0.3
小米-不锈钢静摩擦因数	0.2 ~ 0.6	0.5
小米-不锈钢滚动摩擦因数	0.05 ~ 0.10	0.05

3.3.2 仿真模型

本模拟参照 GB - T 11986—98《表面活性剂粉体和颗粒休止角的测量》标准,采用注入法,漏斗出口内径为 10 mm,接收圆柱底面直径为 100 mm,漏斗下端口与圆柱底盘上表面距离 75 mm,仿真模型如图 4 所示。

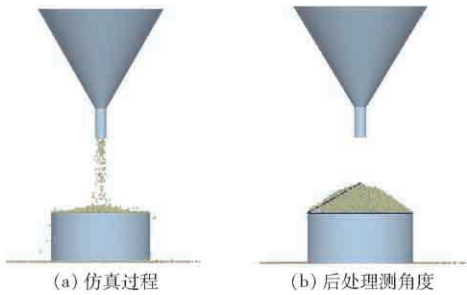


图 4 小米颗粒堆积的模拟仿真

Fig. 4 Simulation of millet particle accumulation

3.3.3 正交试验

为得到小米的最优接触参数,应用 Minitab 软件设计六因素两水平的正交试验,考虑到因素较多,采用部分试验设计,试验结果如表 6 所示,应用 Minitab 建立 6 个仿真参数与休止角的回归方程为

$$Q = 19.16 + 2.26F + 2.74G + 3.18H + 1.82I + 0.91J + 1.12K - 0.49JK$$

(12)

表 6 正交试验设计与结果

Tab.6 Orthogonal test design and results

序 号	小米- 小米恢 复系数 <i>F</i>	小米- 小米静 摩擦因数 <i>G</i>	小米- 小米滚动 摩擦 因数 <i>H</i>	小米- 不锈钢 恢复 系数 <i>I</i>	小米- 小米静 摩擦 因数 <i>J</i>	小米- 小米滚动 摩擦 因数 <i>K</i>	休止 角/ (°)
1	1	-1	-1	-1	-1	1	13.52
2	-1	1	1	-1	-1	1	20.56
3	-1	-1	1	1	-1	-1	21.68
4	-1	-1	-1	1	1	1	22.05
5	1	1	-1	1	-1	-1	30.96
6	-1	-1	-1	1	1	1	15.32
7	-1	1	-1	-1	1	-1	13.28
8	-1	-1	1	1	-1	-1	13.36
9	1	-1	1	-1	1	-1	14.54
10	-1	1	1	-1	-1	1	15.25
11	1	1	-1	1	-1	-1	15.32
12	1	1	1	1	1	1	30.43
13	1	-1	-1	-1	-1	1	20.05
14	1	1	1	1	1	1	21.35
15	-1	1	-1	-1	1	-1	18.03
16	1	-1	1	-1	1	-1	20.83

应用 Minitab 软件以小米实际休止角为目标,对正交试验所得回归方程进行寻优求解可知,欲使仿真与试验所得休止角误差最小,小米-小米恢复系数为 0.25,小米-小米静摩擦因数为 0.65,小米-小米滚动摩擦因数为 0.01,小米-不锈钢恢复系数为 0.3,小米-不锈钢静摩擦因数为 0.6,小米-不锈钢滚动摩擦因数为 0.05。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

根据小米离散元参数标定结果,本研究中各仿真参数的取值如表 5 所示。

利用 SolidWorks 软件建立变距螺旋结构三维模型,导入 EDEM 软件进行仿真。结合相关文献^[33-36],料筒内径与叶片外径间隔 3 mm,料斗高距料筒中心线 300 mm,料斗上口径长 300 mm,宽 200 mm,螺旋进料段螺距为 $S_1=35\text{ mm}$, $S_2=60\text{ mm}$, $S_3=85\text{ mm}$, $S_4=100\text{ mm}$ 。料斗下口边线与料筒端线切线方向夹角为 30° 。颗粒仿真采用软球模型,颗粒生成方式为 Dynamic,先以快速填充方式使物料充满料斗,静止 1 s,待物料处于静止状态,对螺旋体转速进行设置,步长设为 0.05 s,仿真时间设为 15 s,待仿真结束后,通过后处理中 Geometry Bin 对输送的颗粒速度、质量流量进行采集,仿真模型如图 5 所示。

4.2 变距螺旋运动速度分析

待仿真结束后,采用后处理中上色功能对物料

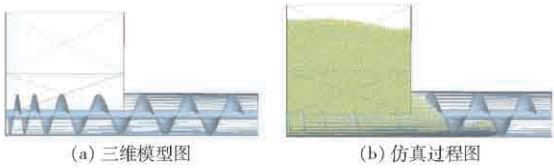


图 5 仿真模型

Fig.5 Simulation model diagram

颗粒速度大小进行标记,较大值标记为红色,中间值标记为蓝色,较小值标记为黄色。仿真时间为 15 s,本文采用 4 个时间节点对物料颗粒运动速度进行分析,速度仿真如图 6 所示。

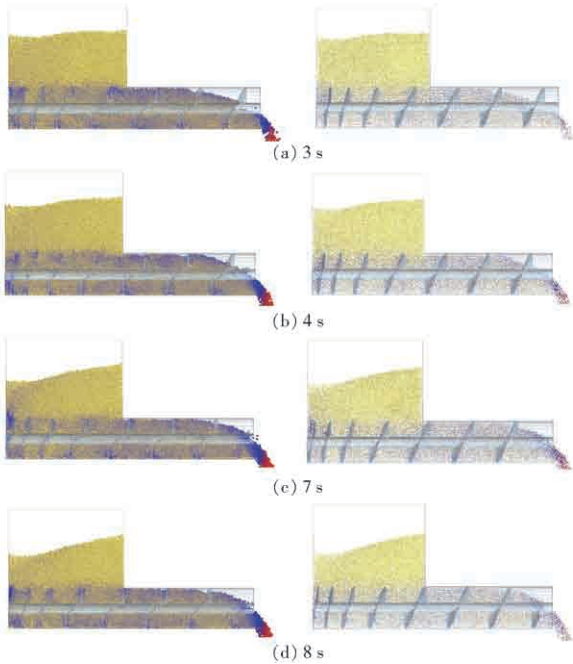


图 6 螺旋结构速度仿真

Fig.6 Spiral structure velocity simulation

如图 6 所示,在 3、4 s 时,物料刚刚被输送出料筒,料筒的末端填充还未达到稳定阶段,料斗中物料速度较小且处于相对稳定趋势,在螺旋料筒中,蓝色物料大多处在螺旋叶片附近,螺旋进料段的首圈螺距处有少许红色物料,表明分布在螺旋叶片附近的物料因叶片推力呈现较大速度;螺旋进料段处,料斗中的物料更多地趋向首圈螺距,因此此处物料颗粒速度最大。在 7、8 s 时,物料已开始稳定被输送出料筒,料筒的末端填充已达到稳定阶段,料斗中部物料运动趋势更加明显,速度有所提升;进料段的各个螺旋处,叶片附近的蓝色物料随着输送的稳定其速度分布也较为均匀;在料筒的末端,因采用无叶片螺旋,物料在出口处因后面物料推力而呈现较大速度。

4.3 螺旋结构质量流量分析

质量流量是评价螺旋输送装置性能的重要指标,质量流量的稳定保证了计量精度。待仿真结束后,去除物料充填时间段,采用两个输送稳定段对料筒末端质量流量进行采集。采用后处理工具质量流

量传感器 Mass Flow Sensor 对质量流量进行检测,观察变距螺旋结构质量流量的变化趋势,检测结果如图 7 所示。

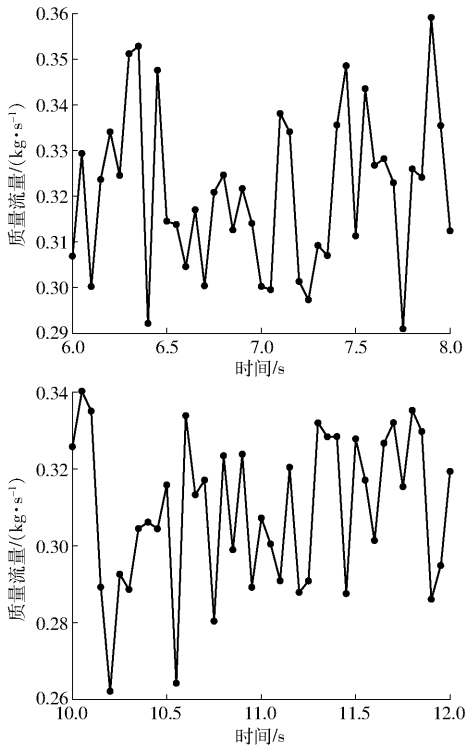


图 7 质量流量检测结果
Fig. 7 Mass flow detection charts

由图 7 可知,质量流量随时间呈现波浪状,这主要由于单位螺距送料中,受螺旋叶片终止端面影响,螺旋叶片转到不同位置时,叶片与料筒形成不同的存料空间,在螺旋转一圈的时间里,单位转角呈现不同下料量。质量流量的波动范围较小,平均值为 0.321 kg/s,与变距计算流量值 0.319 kg/s 的误差为 0.627%,进一步表明了定量变距螺旋流量计算式的可行性以及所设计螺旋结构的稳定性。

为进一步验证质量流量的稳定性,以失重式原则对质量流量进行分析。采用后处理 Geometry Bin 对整个料筒中物料颗粒质量进行采集,结果如图 8 所示。

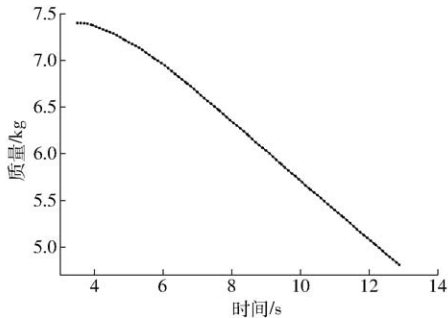


图 8 质量-时间变化曲线
Fig. 8 Quality-time curve

由图 8 可知,料筒中物料颗粒的总质量随时间变化趋势基本呈线性递减变化,其斜率的绝对值即为料筒末端的平均质量流量。测得料筒末端平均质量流量为 0.325 kg/s。与最佳参数计算值 0.319 kg/s 误差为 1.89%,进一步验证了变距流量公式的可靠性及响应面法寻优求解的可行性。

5 结论

(1) 针对定量变距螺旋喂料结构流量计算以经验为主、缺乏系统的计算方法的问题,在等距螺旋结构流量计算式的基础上,根据变距向等距转换的思想,提出一种变距螺旋结构流量的计算方法,并推导出流量计算式。

(2) 根据推导的变距螺旋流量计算式,采用响应面法对变距螺旋结构进行螺距设计,以流量作为响应值,应用 Design-Expert 软件,得到进料段螺距最佳组合为 $S_1=0.35D, S_2=0.60D, S_3=0.85D, S_4=D$ 。

(3) 根据响应面设计所得最佳参数以及标定所得仿真参数结果,用 SolidWorks 软件建立螺旋结构三维模型并导入 EDEM 软件,以小米物料进行离散元仿真分析,发现仿真质量流量平均值为 0.321 kg/s,与变距计算流量值 0.319 kg/s 的误差为 0.627%,与实际要求流量值误差为 3.7%。验证了流量公式的可靠性,以及响应面法设计螺旋结构的可行性。

参 考 文 献

[1] 高鹏. 粉末定量包装机充填螺杆的研究[D]. 无锡:江南大学,2011.
GAO Peng. Research on filling screw of powder quantitative packaging machine [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011. (in Chinese)

[2] 彭博. 粉末包装精密计量系统的设计与分析[D]. 武汉:湖北工业大学,2017.
PENG Bo. Design and analysis of precision measurement system for powder packaging [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017. (in Chinese)

[3] 宋欢. 定量螺旋输送机的优化设计及模拟[D]. 青岛:青岛科技大学,2016.
SONG Huan. Optimum design and simulation of quantitative screw conveyor [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[4] 罗胜,张西良,许俊,等. 螺旋不连续加料装置结构优化与性能仿真[J]. 农业工程学报,2013,29(3):250-257.
LUO Sheng, ZHANG Xiliang, XU Jun, et al. Structural optimization and performance simulation of spiral discontinuous feeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 250-257. (in Chinese)

[5] 李勇,刘伟冬. 基于 EDEM 软件的单螺杆离散元模拟仿真与分析[J]. 起重运输机械,2017(4):78-81.

- LI Yong, LIU Weidong. Single-screw discrete element simulation and analysis based on EDEM software[J]. Hoisting and Transportation Machinery, 2017(4): 78–81. (in Chinese)
- [6] HOU Q F, DONG K J, YU A B. DEM study of the flow of cohesive particles in a screw feeder[J]. Powder Technology, 2014, 256: 529–539.
- [7] PORDESOMO L O, ONWULATA C I, CARVALHO C W P. Food powder delivery through a feeder system: effect of physicochemical properties[J]. International Journal of Food Properties, 2009, 12(3): 556–570.
- [8] 张建. 粉体定量加料器及应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
ZHANG Jian. Powder quantitative feeder and application research [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
- [9] FU Y F, GONG J, PENG Z, et al. Optimization design for screw wash-sand machine based on fruit fly optimization algorithm [J]. Tamkany University of Science and Technology, 2016, 19(2): 149–161.
- [10] 蒲攀, 张森, 张丽楠, 等. 基于响应面法的 ISE 泥浆直测前处理影响模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 155–161.
PU Pan, ZHANG Miao, ZHANG Li'nan, et al. Study on the influence model of ISE mud direct measurement pretreatment based on response surface method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 155–161. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s125&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.025. (in Chinese)
- [11] 康建明, 陈学庚, 温浩军, 等. 基于响应面法的梳齿式采棉机采收台优化设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 57–61.
KANG Jianming, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Optimization design of the harvesting table of comb-type cotton picker based on response surface method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Sup. 2): 57–61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s212&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.012. (in Chinese)
- [12] NAYAK M G, VYAS A P. Optimization of microwave-assisted biodiesel production from Papaya oil using response surface methodology[J]. Renewable Energy, 2019, 138: 18–28.
- [13] 宋亚英. 变螺距螺旋结构参数的理论研究[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 1996, 12(4): 96–100.
SONG Yaying. The oretical study on parameters of variable pitch spiral structure[J]. Journal of Suzhou University (Natural Science), 1996, 12(4): 96–100. (in Chinese)
- [14] 蒙贺伟, 高振江, 坎杂, 等. 等径变螺距奶牛精确饲喂给料装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 103–107.
MENG Hewei, GAO Zhenjiang, KAN Za, et al. Design and experiment of precise feeding and feeding device for equal-diameter variable pitch cows[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 103–107. (in Chinese)
- [15] 邱爱红, 龚曙光, 谢桂兰, 等. 变径变螺距螺旋轴参数化模型及性能仿真[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 131–136.
QIU Aihong, GONG Shuguang, XIE Guilan, et al. Parametric model and performance simulation of variable diameter variable pitch screw axis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 131–136. (in Chinese)
- [16] MONDAL D. Study on filling factor of short length screw conveyor with flood-feeding condition[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(1): 1286–1291.
- [17] 刘四麟. 粮食工程设计手册[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2002.
- [18] BALASUBRAMANIAN S, VISWANATHAN R. Influence of moisture content on physical properties of minor millets[J]. Journal of Food Science and Technology, 2010, 47(3): 279–284.
- [19] SINGH K P, MISHRA H N, SAJA S. Moisture-dependent properties of barnyard millet grain and kernel[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(4): 598–606.
- [20] JAIN R K, BAL S. Properties of pearl millet[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 66(2): 85–91.
- [21] 都红云, 赵军. 圆管螺旋给料机的设计与制作[J]. 现代面粉工业, 2014, 28(2): 16–19.
DU Hongyun, ZHAO Jun. Design and fabrication of round pipe screw feeder[J]. Modern Flour Industry, 2014, 28(2): 16–19. (in Chinese)
- [22] YU Y, ARNOLD P C. Theoretical modelling of torque requirements for single screw feeders[J]. Powder Technology, 1997, 93(2): 151–162.
- [23] 申楚襄. 变螺距与等螺距螺旋输送器的计算机绘图程序通用化[J]. 郑州粮食学院学报, 1991(1): 82–85.
SHEN Chuxiang. Generalization of computer drawing program for variable pitch and equal pitch screw conveyor[J]. Journal of Zhengzhou Grain College, 1991(1): 82–85. (in Chinese)
- [24] 胡广华. 介绍计算变螺距的一种方法[J]. 饲料机械, 1983(2): 37.
HU Guanghua. Introducing a method for calculating variable pitch [J]. Feed Machinery, 1983(2): 37. (in Chinese)
- [25] KARWA T B. Calibration of bulk material model in discrete element method on example of perlite d18-dn kalibracja modelu materiału sypkiego w metodzie elementów dyskretnych na przykładzie perlitu d18-dn[J]. Eksploatacja I Niezawodnosc, 2019, 21(2): 351–357.
- [26] MOUSAVIRAAD M, TEKESTE M Z, ROSENTRATER K A. Calibration and validation of a discrete element model of corn using grain flow simulation in a commercial screw grain auger[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(4): 1403–1415.
- [27] 彭飞, 王红英, 方芳, 等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 140–147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Parameter calibration of particle feed discrete element model based on injection section method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 140–147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180416&journal_id=jcsam. DOI: 10.

- 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 04. 016. (in Chinese)
- [28] 罗帅,袁巧霞,GOUDA Shaban,等. 基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018, 49(4):343–350.
LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA Shaban, et al. Parameter calibration of scum manure matrix based on JKR bond model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343–350. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180440&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 04. 040. (in Chinese)
- [29] HASSELDINE B P J, GAO C, COLLINS J M, et al. Mechanical response of common millet (*Panicum miliaceum*) seeds under quasi-static compression: experiments and modeling[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 73: 102–113.
- [30] HORVATH D, POOS T, TAMAS K. Modeling the movement of hulled millet in agitated drum dryer with discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 254–268.
- [31] OWEN P J, CLEARY P W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM)[J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 274–288.
- [32] RAMASHIA S E, GWATA E T, MEDDOWS-TAYLOR S, et al. Some physical and functional properties of finger millet (*Eleusine coracana*) obtained in sub-Saharan Africa[J]. Food Research International, 2018, 104: 110–118.
- [33] PEZO M, PEZO L, JOVANOVIC A P, et al. Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors[J]. Powder Technology, 2018, 336: 255–264.
- [34] MOYSEY P A, THOMPSON M R. Modelling the solids inflow and solids conveying of single-screw extruders using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2005, 153(2): 95–107.
- [35] WANG S, LI H, TIAN R, et al. Numerical simulation of particle flow behavior in a screw conveyor using the discrete element method[J]. Particuology, 2019, 43: 137–148.
- [36] FERNANDEZ J W, CLEARY P W, MCBRIDE W. Effect of screw design on hopper drawdown of spherical particles in a horizontal screw feeder[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(22): 5585–5601.
-

(上接第 79 页)

- [13] 亓丹丹,史建新,王学农. 4MZ-5 梳齿式采棉机采摘头工作参数的确定[J]. 农机化研究, 2012, 34(3):64–67.
QI Dandan, SHI Jianxin, WANG Xuenong. On the operational parameter confirmation of 4MZ-5 serrate-type cotton picking-up head[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(3):64–67. (in Chinese)
- [14] 孙胃岭,曹卫彬,古乐乐,等. 基于红花力学特性的梳夹式采摘机构的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018,40(5): 46–51.
SUN Weiling, CAO Weibin, GU Lele, et al. Design and validation of gripping picking mechanism based on safflower mechanical properties[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(5):46–51. (in Chinese)
- [15] 李长河,刘承诚,庄文华,等. 梳齿式蓖麻采摘系统的设计与运动轨迹模拟[J]. 机械设计与制造, 2016,5(5):95–98.
LI Changhe, LIU Chengcheng, ZHUANG Wenhua, et al. The structural design and motion simulation of the comb-type castor picking system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016,5(5):95–98. (in Chinese)
- [16] 王文明,王春光. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2012,43(10):82–89.
WANG Wenming, WANG Chunguang. Parameter analysis and simulation of spring-finger cylinder pickup collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(10):82–89. (in Chinese)
- [17] 左志严,格日乐,常玉山,等. 内蒙古中西部 6 种乡土植物枝条抗拉力学特性[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2015,36(4):55–60.
ZUO Zhiyan, GE Rile, CHANG Yushan, et al. 6 kinds of native plants in central and western Inner Mongolia branch tensile mechanical properties [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2015,36(4):55–60. (in Chinese)
- [18] MILOS P, DRAGISA R, MIODRAGOVIC R. The comparative analysis of basic working parameters for different chamomile harvesters[J]. Acta Horticulturae, 2007,1(7):245–251.
- [19] 何为. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.