

小型制粒机喂料器参数优化与试验

彭 飞^{1,2} 李腾飞^{1,2} 康宏彬¹ 张国栋¹ 孔丹丹¹ 王红英^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业部国家农产品加工技术装备研发分中心, 北京 100083)

摘要: 采用离散元法 EDEM 对喂料器的工作过程进行了数值模拟, 定量研究了喂料过程中喂料量的变化规律以及由于物料受螺旋叶片终止断面的影响, 产生不稳定、不均匀的“脉动”喂料现象, 此现象在转速较低的情况下尤其明显。以主轴直径 X_1 、螺距 X_2 和喂料转速 X_3 为因素, 以喂料质量流率 Y_1 、稳定性 Y_2 和出料口落料速度 Y_3 为评价指标, 按照 3 因素 5 水平正交旋转组合设计试验方法, 利用 Design-Expert 8.0.6 软件回归分析法和响应面分析法, 建立了 3 个因素下喂料评价指标的数学模型。通过与研制的喂料器的实际运送情况进行对比, 验证了模型的可靠性。结果表明, 3 个因素相对喂料质量流率和流率稳定性都具有显著相关性, 显著水平分别为 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$, 而这 3 个因素与出料口落料速度无明显相关性; 采用响应面法对最佳参数组寻优, 得到喂料器的最佳参数组合: 轴径为 35 mm、螺距为 57 mm、转速为 139 (°)/s, 喂料器喂料量波动性减小、喂料稳定性得到提高。采用该参数组的虚拟试验结果显示, 喂料器质量流率为 13.89 g/s, 稳定性为 8.46 g/s。实体样机验证试验表明: 采用该参数组设计的喂料器可以使得小型环模制粒机的喂料质量流率提高 4.28%, 喂料变异系数降低 16.11%。

关键词: 小型制粒机; 喂料器; 仿真优化; 试验; EDEM; 响应面法

中图分类号: S817.12⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0051-08

Optimization and Experiment on Feeder for Small-scale Pellet Mill

Peng Fei^{1,2} Li Tengfei^{1,2} Kang Hongbin¹ Zhang Guodong¹ Kong Dandan¹ Wang Hongying^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National Agricultural Products Processing Technology & Equipment Research and Development Center, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: The discrete element analysis software EDEM was used to numerically simulate the working process. The change regulation of feeding mass and the instability and uneven “pulse” phenomenon of materials caused by the end section of helical blade were quantitatively studied. The spindle diameter X_1 , pitch of screw X_2 , and feeding rate X_3 were selected as the influencing factors, and the feeding mass flow rate Y_1 , stability Y_2 , drop speed of the materials Y_3 were selected as evaluating indicators, and experiments were conducted by the simulation model under quadratic orthogonal rotation design. Based on the software regression analysis of Design-Expert 8.0.6 and response surface analysis method, the relationships between the three influencing factors and feeding evaluating indicators were established. The reliability of the simulation model was verified by comparing the performance of virtual scraper with the feeder for small-scale pellet mill. The results showed that X_1 , X_2 and X_3 were significantly correlated with Y_1 and Y_2 ($P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively), but no correlation was found with Y_3 . By using response surface method, the optimal aggregative index could be obtained under the condition that the spindle diameter X_1 was 35 mm, the pitch of screw X_2 was 57 mm and the rotation rate X_3 was 139 (°)/s.

收稿日期: 2015-07-23 修回日期: 2015-08-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项项目(201203015)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD26B0401)

作者简介: 彭飞(1989—), 男, 博士生, 主要从事饲料加工装备研究, E-mail: feipeng2012zhn@163.com

通信作者: 王红英(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事饲料加工工艺与装备研究, E-mail: hongyingw@cau.edu.cn

Under this condition, the volatility of feeding mass was reduced and the stability was improved. The virtual test designed by the optimized parameters showed that the feeding mass flow rate was 13.89 g/s, and the stability of mass flow rate was 8.46 g/s. The verifying test of the physical prototype indicated that the mass flow rate was increased by 4.28% and the coefficient of variation was reduced by 16.11%.

Key words: small-scale pellet mill; feeder; simulation and optimization; experiment; EDEM; response surface method

引言

制粒机作为饲料生产机械的四大主机之一,其性能直接影响颗粒饲料的生产质量,在饲料生产中占有很重要的地位^[1-2]。小型制粒机具有样品用料少、物料残留小、不受工作地点限制、操作灵活等优点,特别适合小批量精确性地进行饲料生产与研究,原料用量少,指标测定更精准。小型制粒机的螺旋喂料器工作原理是利用旋转叶片旋转推动物料沿着料槽运动并进入到制粒系统的调质器内,与大型制粒设备相比,小型制粒机作业要求更高,不仅要保证喂料量,更要保证喂料过程中的稳定性。因此,喂料装置的合理分析与设计,是保证制粒机正常高效工作的前提。目前螺旋喂料器作业过程中喂料量脉动现象严重^[3-5],这一现象在低速旋转情况下尤为明显,无法满足精确喂料的技术要求,且国内针对饲料精确喂料器研究较少。因此,本文分析喂料器作业过程中物料受力和运动情况,建立喂料器仿真模型,并通过虚拟正交试验,对喂料量及喂料稳定性进行试验研究。

1 螺旋喂料器分析

1.1 螺旋喂料器的结构和原理

小型制粒机由料斗、喂料器、调质器、制粒室等组成。螺旋喂料器是小型制粒机的关键装置之一,与大型制粒设备中连续喂料计量投料的机械功能不同,本文研究的螺旋喂料器为不连续加料装置,且转速较低,能够实现精确喂料。在变频调速器和驱动电动机的带动下,饲料原料经料斗由喂料器连续均匀地输送至调质器中。原料在调质器中经过水热处理,充分吸收热量、水分及液体,达到或接近制粒工艺的需求,进而进入制粒室中挤压成型。喂料器工作时,叶片在槽内旋转,使加入料槽的物料由于本身重力及其对料槽的摩擦力的作用,沿着料槽向前移动,完成喂料作业^[2],图1为小型环模制粒机喂料器结构图。

1.2 喂料器中物料力学及运动学机理分析

为研究喂料器内物料的运动规律和运动状态,对喂料器内的物料进行力学和运动学分析。按单质

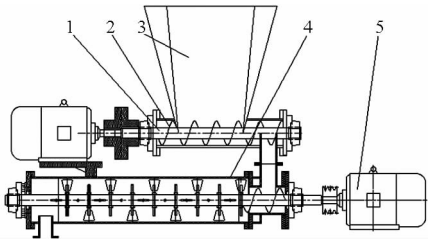


图1 喂料器及调质器结构

Fig.1 Structure of feeder and conditioner

1. 喂料器主轴 2. 螺旋叶片 3. 料斗 4. 调质器 5. 电动机

点法,当螺旋面升角 α 展开时,螺旋线可以用一条直线表示。螺旋面对距离螺旋轴线 R 位置处的颗粒物料的作用力为 F ,由于摩擦的影响, F 方向与螺旋线的法向偏离了 β , F 可以分解为轴向力 F_n 和径向力 F_t ,如图2所示。

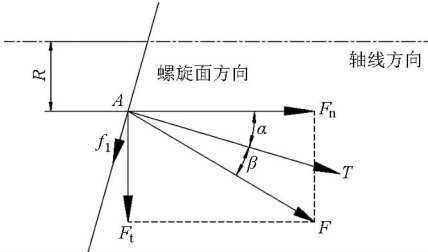


图2 饲料原料的力学分析

Fig.2 Force analysis of feed raw material

$$F_t = F \sin(\beta + \alpha) \tag{1}$$

$$F_n = F \cos(\beta + \alpha) \tag{2}$$

其中 $\alpha = \arctan \frac{H}{2\pi R}$ $\beta = \arctan \mu$

式中 μ ——颗粒物料与螺旋面的摩擦因数
 H ——螺距, m

切向摩擦力阻碍饲料原料沿轴向运动,由图2分析可知,要使饲料原料轴向移动则应保证法向力的轴向分力大于轴向阻力,即满足

$$T \cos \alpha > f_1 \sin \alpha \tag{3}$$

其中 $f_1 = \mu T = T \tan \beta$

代入后可得

$$T \cos \alpha > T \tan \beta \sin \alpha \tag{4}$$

整理后可得

$$\alpha < \frac{\pi}{2} - \beta \tag{5}$$

螺旋面上的各点螺距相同, R 越小即距离螺旋

轴越近,螺旋升角 α 越大,故切向力越大,对物料的扭转程度越明显。当切向力大到一定程度,物料的摩擦力和重力无法达到平衡时,物料就会随螺旋轴作旋转运动,因此距离螺旋主轴越近,物料旋转运动越明显。在文献[6]基础上进一步分析可知,翻滚的饲料原料处于应力极限状态,翻滚与输送物料的滑移面为一圆锥面,滑移面的母线与螺旋面母线呈 $45^\circ + \rho/2$ 的夹角, ρ 为饲料原料的内摩擦角。依据应力极限理论^[7]和虚位移(虚功)原理建立力和功率平衡方程,推导整理可得

$$\frac{1}{9}(R_0 - r)(R_0^2 + R_0r - 2r^2)(R_0 + 2r) \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2}\right) g \cos\theta_0 \sin\varphi = 0 \quad (6)$$

式中 R_0 ——饲料翻滚态与输送态分界面处的半径, m
 ρ ——饲料原料内摩擦角, ($^\circ$)
 θ_0 ——物料原料的堆积角, ($^\circ$)
 φ ——饲料原料沿圆周方向倾斜的角度, ($^\circ$)

由上述分析可知,饲料原料靠近主轴处易出现翻滚现象,即 R_0 越接近 r 时,翻滚角 φ 越大。对于给定的 R_0 ,可计算翻滚角 φ 。为使饲料原料可靠输送,应使 $2\theta_0 + \varphi < 180^\circ$; 当 $2\theta_0 + \varphi \geq 180^\circ$ 时,喂料器输送饲料原料过程中,有一部分饲料原料将随主轴的旋转作翻滚运动。原料在 F 的作用下,在喂料筒体内进行复杂的运动,具有轴向速度 v_z 和径向速度 v_r ,合速度为 v ,如图 3 所示。

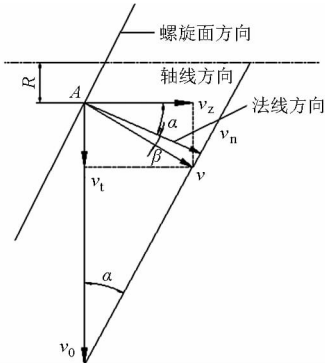


图 3 饲料原料的运动速度分解

Fig. 3 Velocity of movement analysis of feed raw material

设螺旋转速为 n ,螺旋面上物料的运动速度可按速度三角形方法求解,得

$$v_t = v \sin(\beta + \alpha) \quad (7)$$

$$v_z = v \cos(\beta + \alpha) \quad (8)$$

$$v = \frac{v_n}{\cos\beta} = \frac{v_0 \sin\alpha}{\cos\beta} \quad (9)$$

进一步推导可得

$$v_0 = \omega R = \frac{2\pi n}{60} R = \frac{2\pi n}{60} \frac{H}{2\pi \tan\alpha} = \frac{nH}{60 \tan\alpha} \quad (10)$$

$$\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{H}{2\pi R}\right)^2}} \quad (11)$$

$$\sin\alpha = \frac{H}{2\pi R \sqrt{1 + \left(\frac{H}{2\pi R}\right)^2}} \quad (12)$$

整理可得

$$v_z = \frac{nH}{60} \frac{1 - \mu_1 \frac{H}{2\pi R}}{1 + \left(\frac{H}{2\pi R}\right)^2} \quad (13)$$

$$v_t = \frac{nH}{60} \frac{\mu_1 + \frac{H}{2\pi R}}{1 + \left(\frac{H}{2\pi R}\right)^2} \quad (14)$$

式中 ω ——主轴角速度, rad/s
 μ_1 ——饲料原料与螺旋面间的摩擦因数
 v_n ——饲料原料法线方向速度
 v_0 ——饲料原料线速度

2 模型的构建

2.1 喂料器几何模型

在 Pro/E 软件中建立喂料器几何模型,然后保存为 igs 格式并导入到 EDEM 仿真软件^[8-12],为减少计算量同时重点研究旋转过程中物料运动情况,简化了喂料器的几何模型^[13],几何模型由喂料器主轴、螺旋叶片、料斗、出料口组成,如图 4 所示。通过查阅文献及试验检测^[14-18],确定模型的材料参数。

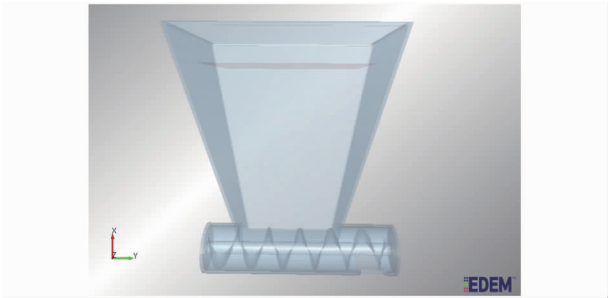


图 4 仿真模型

Fig. 4 Simulation model of feeder

2.2 颗粒物料接触模型的定义

常用的接触模型有 6 种:Hertz - Mindlin 无滑动接触模型、Hertz - Mindlin 黏结接触模型、线性黏附接触模型、运动表面接触模型、线弹性接触模型和摩擦电荷接触模型^[19]。根据原料颗粒近似球形和颗粒间无明显黏附的物性特点,本文采用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型作为颗粒与颗粒之间及颗粒与喂料器之间的接触模型。饲料原料颗粒与颗粒之间以及颗粒与喂料器之间的恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数分别为 0.3、0.4、0.1 和 0.5、0.6、0.1。

2.3 仿真参数

参照真实物料,粒径大小呈正态分布。将颗粒级别放大一定程度,在保留颗粒离散型同时,使颗粒的数目在可模拟的范围内。其密度为 585 kg/m^3 ,半径为 3 mm 。仿真物料所选相关物理参数尽量接近实际情况,部分参数参考相关研究^[20-21],具体如表 1 所示。

表 1 仿真物料和仿真装置主要物理参数
Tab.1 Physical properties of materials and device in DEM model

参数属性	参数	数值
原料颗粒属性	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	585
	剪切模量 G/Pa	3×10^6
	泊松比	0.5
	颗粒半径 r/mm	3
喂料器材料属性	剪切模量 G/Pa	1×10^{10}
	泊松比	0.3
	颗粒与颗粒碰撞恢复系数	0.01
	颗粒与颗粒静摩擦因数	0.4

2.4 模型验证

基于所建模型,进行仿真试验的预试验,如图 5 所示,随着螺旋轴的旋转,颗粒受到螺旋叶片法向推力和切向摩擦力,同时受到主轴轴向和周向摩擦力的作用。在综合作用下,颗粒在筒体内形成类螺旋运动,该模型可以很好地模拟喂料器运行作业时颗粒的运动情况。

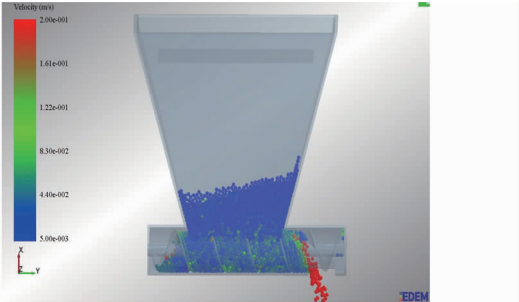


图 5 喂料输送过程仿真
Fig.5 Process simulation of feeder

按照小型环模制粒机第一代样机设计制造的工艺参数和设计参数调整模型,进行仿真模拟,对比仿真试验的模拟值和实体样机运行工作时测得的数据。喂料器工作稳定后出料口物料的质量流率模拟值为 11.95 g/s ,测量值为 11.67 g/s ;出料速度模拟值为 0.71 m/s ,测量值为 0.78 m/s 。模型的仿真值与测量值接近,该模型可以用于模拟喂料器作业时颗粒的运动情况。

3 试验设计与指标测定

3.1 试验设计

小型环模制粒机喂料器工作时,主要影响指标

为轴径、螺距、螺旋转速。根据螺旋输送理论,以旋转轴轴径 X_1 、螺旋叶片螺距 X_2 、旋转轴转速 X_3 为试验变量,基于二次正交旋转组合试验原理,建立因素水平表如表 2($x_1\sim x_3$ 为各变量真实值, $X_1\sim X_3$ 为各变量编码值)所示。

表 2 二次回归正交试验设计因素水平
Tab.2 Factors and levels of quadratic regression orthogonal rotating experiment design

编码	因素		
	旋转轴轴径 x_1/mm	螺旋叶片螺距 x_2/mm	旋转轴转速 $x_3/((^\circ)\cdot\text{s}^{-1})$
2	35	70	150
1	30	60	130
0	25	50	110
-1	20	40	90
-2	15	30	70

3.2 指标测定

物料在螺旋输送过程中的输送行为可以通过检测物料输送时的质量流率来检测。质量流率是指单位时间内通过某截面的物质质量,可以直接反应喂料器的传输能力。

在一个螺距的喂料过程中,物料流量会产生不均匀的“脉动现象”,这是因为受到螺旋叶片终止断面的影响,在卸料口处,螺旋叶片旋转到不同位置时,螺旋叶片与筒体形成的存料空间不同,当螺旋的断面运动到不同位置时,物料受阻挡的情况不同,因此产生了落料的差异,导致了流量的不稳定、不均匀现象^[3],此现象对于转速较低的螺旋喂料器尤其明显。喂料量稳定性是指在连续喂料过程中,随着时间的变化喂料量的波动量应尽量小。在喂料器仿真过程中,定间隔记录喂料量,分析一段时间内喂料量的标准差。标准差越小,说明喂料器的稳定性越好,本文将落料标准差作为喂料器稳定性的评价指标。

喂料器落料质量流率线状图如图 6 所示,可以看出喂料器工作过程中,在单位螺距内落料量呈现周期性的脉动现象,这与李振亮等^[3]的研究结果一致。待喂料器正常出料后,每间隔 0.05 s 取一组,共选取 160 组出料口处的质量流率和落料速度,分别取其平均值作为平均质量流率 Y_1 和平均落料速度 Y_3 ,将质量流率的标准差作为落料稳定性 Y_2 。

4 试验结果与分析

4.1 回归模型建立

以各影响因素水平编码值为自变量,以出料口平均质量流率 Y_1 、落料稳定性 Y_2 、平均落料速度 Y_3 为评价指标,构建不同试验组的几何体并导入到

EDEM 中进行仿真试验,结果如表 3 所示。

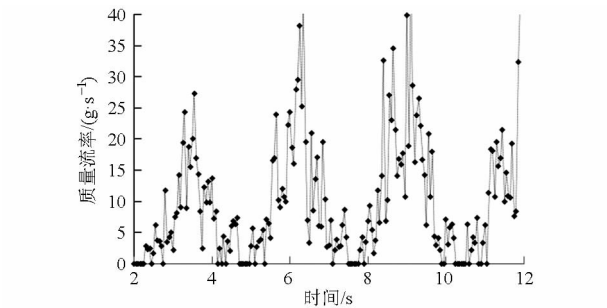


图 6 喂料质量流率

Fig.6 Mass flow rate of feed raw material

表 3 二次回归正交旋转组合设计及试验结果

Tab.3 Experimental levels and results of quadratic regression orthogonal rotating experiment						
试验 序号	X_1	X_2	X_3	$Y_1/$ ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)	$Y_2/$ ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)	$Y_3/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	1	1	1	13.652	10.44	0.757
2	1	1	-1	10.478	9.75	0.687
3	1	-1	1	8.102	8.36	0.589
4	1	-1	-1	4.844	5.28	0.522
5	-1	1	1	10.382	5.87	0.778
6	-1	1	-1	13.218	12.68	0.707
7	-1	-1	1	11.100	10.85	0.656
8	-1	-1	-1	6.725	7.61	0.542
9	2	0	0	8.392	6.99	0.677
10	-2	0	0	12.011	12.42	0.685
11	0	2	0	21.652	14.01	0.845
12	0	-2	0	7.116	6.85	0.341
13	0	0	2	15.255	12.68	0.716
14	0	0	-2	7.593	7.03	0.626
15	0	0	0	9.993	9.56	0.689
16	0	0	0	10.116	10.05	0.700
17	0	0	0	10.089	10.49	0.644
18	0	0	0	10.223	9.86	0.689
19	0	0	0	9.834	9.61	0.669
20	0	0	0	9.880	9.49	0.672
21	0	0	0	10.018	10.37	0.687
22	0	0	0	9.917	10.12	0.650
23	0	0	0	10.079	9.68	0.690

对 Y_1 的方差分析结果显示, $F = 6.22, P < 0.01$, 回归是较为显著的, 决定系数 $R^2 = 0.81$, 对决定系数进行显著性检验结果如表 4 所示。由回归方程中 P 值可知, 各因素对 Y_1 影响由大到小依次为 X_2 、 X_3 、 X_1 。

对 Y_2 的方差分析结果显示, $F = 3.48, P < 0.05$, 回归是较为显著的, 决定系数 $R^2 = 0.71$, 对决定系数进行显著性检验结果如表 5 所示。由回归方程中 P 值可知, 各因素对 Y_2 影响由大到小依次为 X_2 、 X_1 、 X_3 。

表 4 喂料器质量流率回归方程系数显著性检验结果

Tab.4 Significance test results for regression coefficient of mass flow rate of feeder					
变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
常数项	198.92	9	22.10	6.22	0.0017
X_1	7.84	1	7.84	2.21	0.1613
X_2	125.01	1	125.01	35.17	<0.0001
X_3	32.01	1	32.01	9.01	0.0102
X_1X_2	2.75	1	2.75	0.77	0.3949
X_1X_3	17.94	1	17.94	5.05	0.0427
X_2X_3	4.15×10^{-3}	1	4.150×10^{-3}	1.168×10^{-3}	0.9733
X_1^2	3.77	1	3.77	1.06	0.3216
X_2^2	2.93	1	2.93	0.82	0.3804
X_3^2	6.56	1	6.56	1.85	0.1972

表 5 喂料器喂料稳定性回归方程系数显著性检验结果

Tab.5 Significance test results for regression coefficient of stability of feeder					
变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
常数项	0.77	9	0.086	3.48	0.0209
X_1	0.11	1	0.11	4.49	0.0539
X_2	0.26	1	0.26	10.32	0.0068
X_3	0.069	1	0.069	2.78	0.1193
X_1X_2	0.015	1	0.015	0.62	0.4440
X_1X_3	5.136×10^{-4}	1	5.136×10^{-4}	0.021	0.8876
X_2X_3	0.011	1	0.011	0.43	0.5241
X_1^2	0.052	1	0.052	2.11	0.1703
X_2^2	0.067	1	0.067	2.72	0.1232
X_3^2	0.19	1	0.19	7.81	0.0152

对 Y_3 方差分析结果显示, $F = 1.26, P > 0.05$, 可见各因素对 Y_3 的影响均不显著。可知喂料器落料口平均落料速度 Y_3 与 3 个因素均无显著相关性。

使用 Design - Expert 软件对数据进行分析, 得出喂料器作业稳定后饲料原料颗粒质量流率 Y_1 和落料稳定性 Y_2 的回归方程分别为

$$Y_1 = 10.067 - 0.758X_1 + 3.025X_2 + 1.531X_3 + 0.687X_1X_2 + 0.605X_1X_3 - 0.906X_2X_3 - 0.416X_1^2 + 1.063X_2^2 + 0.016X_3^2 \quad (15)$$

$$Y_2 = 9.939 - 0.090X_1 + 0.137X_2 + 0.071X_3 + 0.081X_1X_2 + 0.092X_1X_3 - 0.155X_2X_3 - 0.031X_1^2 - 0.006X_2^2 - 0.026X_3^2 \quad (16)$$

4.2 回归模型的寻优

为使小型环模制粒机喂料器获得最佳机械性能, 即保证喂料稳定后落料质量流率 Y_1 取最大值, 而落料稳定性最好即 Y_2 取最小值。运用响应曲面法分析各因素对喂料器落料质量流率和落料稳定性的影响。固定 3 因素中 1 个因素为零水平, 考察其他 2 个因素对质量流率和稳定性的影响。

4.2.1 各因素对质量流率影响分析

由图 7a 可以看出,在该试验条件下螺距对质量流率的影响比轴径显著;质量流率随螺距的增加而增加,且增加趋势逐渐明显,这是因为筒体容积随着螺距的增加而增大,通过的物料增加,单位时间内流出的物料量增加;质量流率随轴径的增加而缓慢减小,且减小趋势逐渐明显,这是由于随着轴径增加,轴向单位长度内容积减小趋势增加,通过的物料减少,故质量流率减小趋势明显。

由图 7b 可知,在该试验条件下主轴转速对质量流率的影响比轴径显著;质量流率随主轴转速的增加而增加;质量流率随轴径的增加而减小;主轴转速和轴径对质量流率的交互作用较为显著。

由图 7c 可知,在轴径为零水平时,随着螺距增大和主轴转速增加,质量流率逐渐增大,且上升趋势明显;螺距大小和主轴转速无明显交互作用。

4.2.2 各因素对落料稳定性影响分析

由图 7d 可以看出,在该试验条件下,随着轴径增大和螺距增加,落料变异系数减小,落料稳定性增加,这是因为随着螺距的增加,饲料原料颗粒受螺旋叶片终止断面的影响减弱,故落料差异性有减小趋势,落料有稳定均匀的趋势;轴径对质量流率的影响比螺距显著;螺距和轴径对质量流率无显著交互作用。

由图 7e 可知,在螺距为零水平时,随着主轴转速增加和螺距增大,落料标准差减小,落料变异系数减小,落料稳定性增加;主轴轴径对变异系数的影响比主轴转速显著。

由图 7f 可知,螺距和主轴转速的交互作用对落料稳定性的影响为略上凸的曲面;当螺距从零水平点正向增加时,随着主轴转速从零水平点负向增加,曲面呈下降趋势,落料变异系数减小,落料稳定性增加。

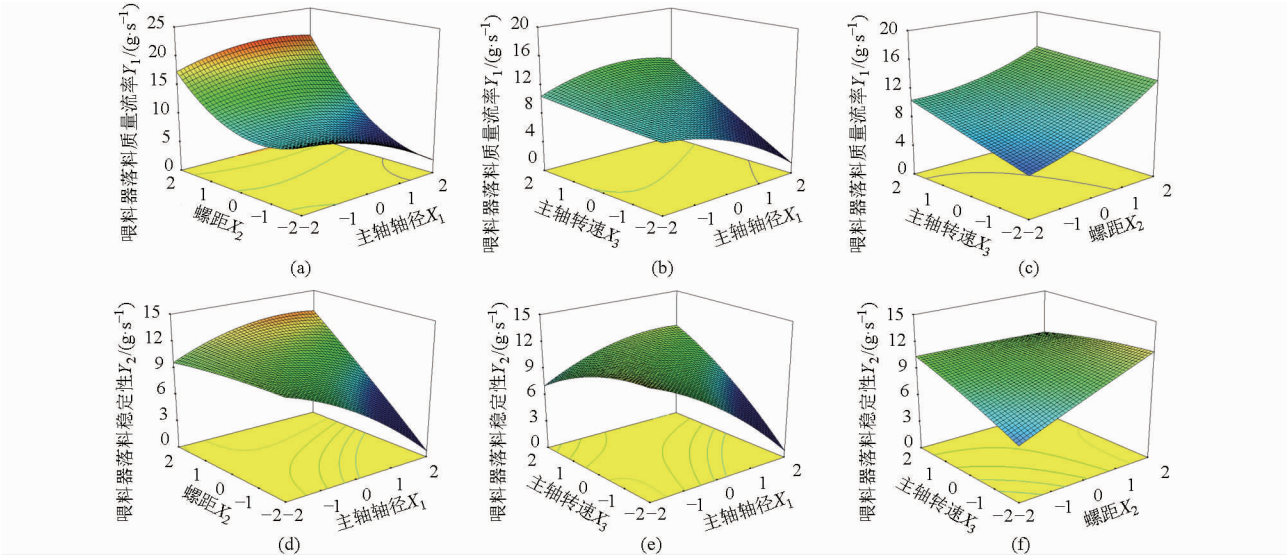


图 7 使用响应面法对参数组寻优

Fig. 7 Optimization of parameter group by using response surface method

在保证制粒机产量 40 ~ 50 kg/h,即质量流率约为 11 ~ 14 g/s 的前提下,使喂料器落料标准差最小,即落料稳定性最好,通过 Design - Expert 软件获得了最佳工作参数组合:轴径为 35 mm,螺距为 57 mm,主轴转速为 139(°)/s,此时喂料器模拟结果是质量流率为 13.89 g/s,达到理想喂料量,质量流率稳定性为 8.46 g/s,喂料稳定性最好。

5 试验验证

2015 年 4 月,根据回归模型预测的最佳结构设计和参数,对已有样机进行改进优化。利用该样机进行了喂料试验,试验地点为北京市密云区昕三峰饲料厂。试验对象为饲料厂正常生产的乳猪料,其原料成分包括:膨化玉米、膨化豆粕、乳清粉、预混

料、啤酒酵母、进口鱼粉、红糖和豆油。其物料性能指标为:平均粒径 437 μm ,密度 0.524 g/cm^3 ,休止角 41.6°,与不锈钢材料间的摩擦因数为 0.92,其他物理指标性能良好,图 8 为样机在车间进行试验。



图 8 样机车间作业

Fig. 8 Prototype working in workshop

对原料进行喂料试验,通过变频器调节控制喂料器的转速,并通过转速传感器显示。文献[3,6]通过转动螺旋轴一定角度记录加料量或喂料量,但由于启停过程中转动角速度不均及振动等原因导致螺旋落料量数据结果采集准确度差。本试验采用 Serial Port Utility 串口调试助手将 PL2002 型电子天平与计算机连接,能够实时准确读取记录喂料量及其变化情况。试验测定具体方法为将喂料器电动机启动后,通过变频器调节电动机的转速至验证试验

应达到的转速,待转速稳定后,通过数据接口每隔 0.05 s 实时采集落料质量数据;更换优化后的主轴,在相同试验条件下进行对比试验,分别对优化前和优化后的主轴喂料进行 3 次试验。

喂料对比试验结果如表 6 所示,结果表明使用优化后的喂料器不仅能够满足最佳生产率的需要,而且喂料量稳定性提高,质量流率提高 4.28%,喂料变异系数降低 16.11%,喂料性能得到改善,符合小型制粒机生产作业需要。

表 6 对比试验结果
Tab.6 Results of contrast experiment

参数	改进前主轴				改进后主轴			
	1	2	3	平均值	1	2	3	平均值
质量流率/(g·s ⁻¹)	11.53	11.66	11.82	11.67	12.13	12.11	12.26	12.17
稳定性/(g·s ⁻¹)	9.81	10.08	9.73	9.87	8.27	8.36	8.21	8.28

6 结论

(1)对小型环模制粒机喂料器作业过程中饲料原料的力学和运动状态进行了分析,建立了物料运动过程中受力和运动状态方程和模型。

(2)使用 EDEM 软件对小型环模制粒机喂料器作业过程进行数值模拟,采用自主研发的样机进行试验验证,结果表明,所建模型可以较好地模拟饲料原料在喂料器筒体中的工作情况;同时,通过模拟并统计定量研究了以螺旋形式的喂料器存在的喂料量不均匀、不稳定的脉动现象,这对原料用量少、精确定量喂料会有很大影响,通过串口调试工具实时采

集喂料质量数据,对连续喂料过程中喂料量及其变化情况进行了验证。

(3)通过 3 因素 5 水平正交组合试验,得出各因素对喂料质量流率的影响显著性顺序为:螺距、主轴转速、轴径;各因素对喂料稳定性的影响显著性顺序为:螺距、轴径、主轴转速。通过 Design - Expert 软件分析得出喂料器最佳设计和参数组合:轴径为 35 mm、螺距为 57 mm、转速为 139(°)/s,此时喂料器喂料量和喂料稳定性都可获得最优解。通过对比实测值与预测值,验证了仿真试验与回归预测模型的可靠性。

参 考 文 献

1 曹康,金征宇. 现代饲料加工技术[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,2003.

2 曹康,郝波. 中国现代饲料工程学[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,2014.

3 李振亮,付长江,李亚. 定量螺旋给料机的结构研究[J]. 盐业与化工,2010(1):27-29.

Li Zhenliang, Fu Changjiang, Li Ya. Quantitative spiral feeder structural research[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2010(1): 27-29. (in Chinese)

4 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.

5 Artoni R, Zugliano A, Primavera A, et al. Simulation of dense granular flows: comparison with experiments[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(3): 548-557.

6 尹忠俊,孙洁,陈兵,等. 开式螺旋输送机输送机理分析与参数设计[J]. 矿山机械,2010(11):66-71.

Yin Zhongjun, Sun Jie, Chen Bing, et al. Study on transportation mechanism of open screw conveyors and design of parameters [J]. Mining Machine, 2010(11): 66-71. (in Chinese)

7 宋祁群. 水平螺旋输送机输送机理的研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,1993,17(3):375-382.

Song Qiqun. Study on transport mechanism of horizontal screw conveyer [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 1993, 17(3): 375-382. (in Chinese)

8 Yu Y, Arnold P C. Theoretical modelling of torque requirements for single screw feeders[J]. Powder Technology, 1997, 93(2): 151-162.

9 Rozbroj J, Zegzulka J, Nečas J. Use of DEM in the determination of friction parameters on a physical comparative model of a vertical screw conveyor[J]. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, 2015, 29(1): 25-34.

10 Xiong Q, Aramideh S, Passalacqua A, et al. Characterizing effects of the shape of screw conveyors in gas-solid fluidized beds

using advanced numerical models[J]. Journal of Heat Transfer, 2015, 137(6): 061008.

11 Zareiforoush H, Komarizadeh M H, Alizadeh M R, et al. Screw conveyors power and throughput analysis during horizontal handling of paddy grains[J]. Journal of Agricultural Science, 2010, 2(2): 147 – 157.

12 李恒,李腾飞,高扬,等. 基于离散元法的多层刮板式清粪机仿真优化[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊 1):131 – 137.
Li Heng,Li Tengfei,Gao Yang, et al. Simulation optimization of multilayer manure cleaning system based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 131 – 137. (in Chinese)

13 于建群,付宏,李红,等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报,2005,21(5):1 – 6.
Yu Jianqun, Fu Hong, Li Hong, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 1 – 6. (in Chinese)

14 冯俊小,林佳,李十中,等. 秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J]. 农业机械学报,2015,46(3):208 – 213.
Feng Junxiao, Lin Jia, Li Shizhong, et al. Calibration of discrete element parameters of particle in rotary solid state fermenters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 208 – 213. (in Chinese)

15 Su O, Akcin N A. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(3): 434 – 442.

16 胡建平,周春健,侯冲,等. 磁吸板式排种器充种性能离散元仿真[J]. 农业机械学报,2014,45(2):94 – 98.
Hu Jianping, Zhou Chunjian, Hou Chong, et al. Simulation analysis of seed-filling performance of magnetic plate seed-metering device by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 94 – 98. (in Chinese)

17 Jerier J F, Hathong B, Richefeu V, et al. Study of cold powder compaction by using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2011, 208(2): 537 – 541.

18 Lim K W, Andrade J E. Granular element method for three-dimensional discrete element calculations[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, 38(2): 167 – 188.

19 王国强,郝万军,王继新,等. 离散元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.

20 Shimizu Y, Cundall P A. Three-dimensional DEM simulations of bulk handling by screw conveyors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(9): 864 – 872.

21 孙其诚,王广谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京:科学出版社,2009.