

基于离散元法的螺旋喂料器流量计算修正

Research on modification of flow calculation of screw feeder

林苑 徐长斌 周祥明 程帅鹏

LIN Yuan XU Chang-bin ZHOU Xiang-ming CHENG Shuai-peng

(江西师范高等专科学校, 江西 鹰潭 335000)

(Jiangxi Teachers College, Yingtan, Jiangxi 335000, China)

摘要:针对螺旋喂料器实际流量检测值与传统计算式计算值相差较大的问题,采用响应面法对螺旋喂料器的流量计算式进行修正。考虑到实际试验的复杂性,采用离散元仿真流量值与计算式计算值的比值作为响应,以对流量比值影响显著的螺距、转速、管径为试验因素设计响应面法,得到3个因素与响应值之间的二阶回归方程,由此进一步得到螺旋喂料器的流量计算式。为进一步验证修正后流量计算式的可行性,根据设计要求,用SolidWorks软件建立三维模型并进行仿真分析,发现仿真所得流量值为1.258 t/h,与修正式计算所得流量值1.210 t/h的误差为3.97%,表明了流量修正计算式的合理性。

关键词:螺旋喂料;流量;公式修正;离散元

Abstract: For the problem that the actual flow detection value of the screw feeder differs greatly from the calculation value of the traditional calculation formula, an RSM experimental design is used to modify the flow calculation formula of the screw feeder. Considering the complexity of the actual test, the ratio of the flow value measured by the discrete element simulation and the value calculated by the calculation formula is used as the response, and the RSM experimental design is designed by taking the screw pitch, speed, and pipe diameter that significantly affect the flow difference as the factors. The second-order regression equation between the factors and the response value, from which the flow calculation formula of the screw feeder is further obtained. In order to verify the feasibility of the flow calculation formula, the SolidWorks software was used to establish a three-dimensional model according to the design requirements, and the EDEM software was imported for discrete element simulation. The flow value obtained from the simulation was found to be

1.258 t/h. The error of the calculated flow value of 1.210 t/h with the correction formula is 3.97%, indicating the rationality of the flow correction calculation formula and providing a reference for the design calculation of the screw feeder.

Keywords: screw feeding; flow rate; formula modification; discrete element

螺旋喂料器结构简单,更换方便,在粮食输送领域被广泛的应用。流量是评价螺旋喂料器性能的重要指标,螺旋喂料器结构参数的选取离不开流量计算式。实际应用中,采用传统的流量计算式所得值与实际试验值相差较大,严重影响到螺旋喂料器结构的合理设计。在螺旋喂料器结构参数优化方面,国内外学者已做大量研究,梅潇等^[1]为使垂直螺旋输送机的流量计算模型更符合实际情况,采用Matlab软件的拟合功能,并结合试验所测流速完成了流量计算模型的修正,流量计算值更加符合实际;赵方超等^[2]为提高农业纤维螺旋喂料装置的性能,采用Design-expert 11设计优化试验,确定了各个因素对螺旋喂料器性能的最佳组合;梅潇等^[3]针对螺旋喂料流量计算不精确的问题,基于散体力学理论,考虑螺旋面和颗粒群升角的径向变化,推导出螺旋喂料器的流量计算式,提高了流量计算的精确性。

螺旋喂料器内物料运动情况较为复杂,且不能直接进行观察与检测,离散元法是专门用来解决不连续介质问题的数值模拟方法,采用离散元法可以有效解决此问题。在利用离散元法对螺旋喂料器仿真分析方面,国内外学者做了大量研究,郭创等^[4]基于离散单元法建立了螺旋输送机仿真模型,并通过离散元仿真软件进行模拟,同时采用正交试验法得出螺旋输送机的最佳参数组合;朱鸿翔等^[5]针对螺旋喂料器因输送机理复杂而常常根据经验来进行设计的问题,采用离散元法对影响螺旋喂料器性能的相关参数进行了研究;李勇等^[6]基于离散单元法,分析了不同转速及填充率下螺旋输送的情况,并分析填充系数、流量及合力矩在输送中的影响,为螺旋输送机

基金项目:江西省教育厅科技课题(编号:GJJ191224)

作者简介:林苑,女,江西师范高等专科学校助教,硕士。

通信作者:徐长斌(1976—),男,江西师范高等专科学校教授,硕士。E-mail: 1002373317@qq.com

收稿日期:2020-04-06

的结构设计提供依据。

针对螺旋喂料器实际流量检测值与传统计算式的计算值相差较大的问题,拟采用响应面试验对螺旋喂料器的流量计算式进行修正。考虑到实际试验的复杂程度,采用离散元仿真测定流量值与计算式计算所得值的比值作为响应,以对流量差值影响显著的螺距、转速、管径为因素,设计响应面试验,得到 3 个因素与响应值之间的二阶回归方程,由此进一步得到螺旋喂料器的流量计算式,为螺旋喂料器的设计计算提供参考。

1 基础理论

1.1 运动分析

对螺旋喂料器内物料的运动情况进行分析,有利于螺旋喂料器的结构优化设计。设螺旋喂料器螺旋升角为 α , $P_{\text{合}}$ 为 r 处的物料颗粒 A 上的力,此力可分解为切向和法向力,如图 1(a) 所示。

图 1(b) 为 A 的运动分析, A 的合成速度可分解为轴向、圆周速度。设转速为 n , 可知

$$V_{\text{合}} \cos \rho = AB \sin \alpha. \quad (1)$$

又因

$$AB = \frac{2\pi rn}{60}. \quad (2)$$

可知

$$V_{\text{合}} = \frac{2\pi \gamma n}{60} \times \frac{\sin \alpha}{\cos \rho}. \quad (3)$$

可知,圆周速度为

$$V_{\text{圆}} = V_{\text{合}} \sin(\alpha + \rho) = \frac{2\pi \gamma n}{60} \times \frac{\sin(\alpha + \rho) \sin \alpha}{\cos \rho}. \quad (4)$$

由式(4),可知

$$V_{\text{圆}} = \frac{2\pi \gamma n}{60} \sin \alpha (\sin \alpha + \mu \cos \alpha). \quad (5)$$

联立 $\mu = \tan \alpha$, 得

$$V_{\text{圆}} = \frac{\frac{sn}{60} \times \frac{s}{2\pi r} + \mu}{\left(\frac{s}{2\pi r}\right)^2 + 1}. \quad (6)$$

将式(6)对 r 求导,然后使对 r 的倒数为 0, 当在 $V_{\text{圆}}$ 值最大时, r 值为

$$r = \frac{\mu_{\text{面}} + \sqrt{1 + \mu_{\text{面}}^2}}{2\pi} s. \quad (7)$$

由速度分解,可知

$$V_{\text{轴}} = \frac{sn}{60} \times \frac{1 - \mu_{\text{面}} \frac{s}{2\pi r}}{\left(\frac{s}{2\pi r}\right)^2 - 1}. \quad (8)$$

1.2 流量公式

由式(8)可知物料轴向速度的计算式,经验中,轴向速度常常简化处理为 $v = sn/60$, 投影面积 A 的计算也常常不考虑影响较小的内轴径 d , 由此得到螺旋喂料器的计算式为^[7]:

$$Q = 47D^2 \varphi Sn \gamma CK, \quad (9)$$

式中:

Q ——螺旋喂料器流量, t/h;

D ——叶片外径, m;

φ ——填充率;

S ——螺距, m;

n ——转速, r/min;

γ ——物料容重, t/m³。

2 响应面试验

针对螺旋喂料器的流量计算公式计算结果与实际测定流量值误差较大的问题,因实际试验的复杂程度,以小米为研究对象,采用离散元仿真流量值与螺旋喂料器公式计算值的比值作为响应,以对流量比值影响显著的螺距 S 、管径 D 、转速 n 为变量设计响应面试验,对螺旋喂料器的流量计算式进行修正。

2.1 仿真参数

响应值的计算需要根据螺旋喂料器离散元仿真的结果,离散元仿真参数的确定,根据相关文献资料^[8],小米离散元仿真参数如表 1 所示。

2.2 试验因素

采用离散元仿真流量值与螺旋喂料器公式计算值的比值作为响应,以对流量比值影响显著的螺距 S 、管径 D 、转速 n 为变量设计响应面试验,结合设计要求及实际情况选取因素水平如表 2 所示。

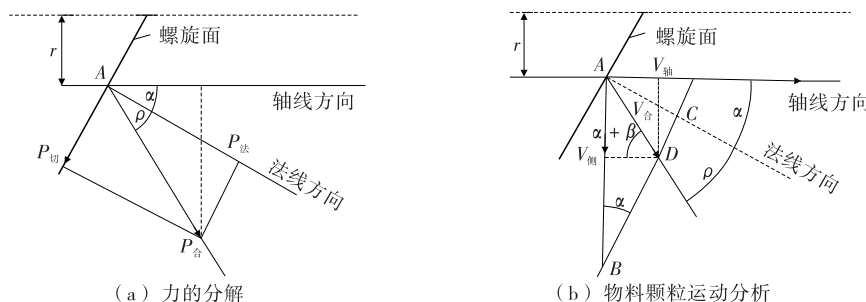


图 1 物料受力分析

Figure 1 Material stress analysis

表 1 离散元仿真参数表

Table 1 Discrete element simulation parameter table

仿真参数	单位	数值
小米密度	kg/m ³	800
小米泊松比		0.25
小米剪切模量	MPa	52
不锈钢密度	kg/m ³	7 800
不锈钢泊松比		0.3
不锈钢剪切模量	MPa	70
小米—小米恢复系数		0.35
小米—小米静摩擦系数		0.5
小米—小米滚动摩擦系数		0.01

表 2 响应面试验水平表

Table 2 Levels of RSM experimental design

水平	A 管径 D/mm	B 螺距 S/mm	C 转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
—1	80	65	60
0	90	75	80
1	100	85	100

2.3 试验设计

根据表 2,试验设计选取 3 个中心点对误差进行评估,结果如表 3 所示。

由表 4 可知,该模型 $P<0.05$;A、B、C、AB、BC 以及 A^2 的 P 值均 <0.05 。失拟项 $P=0.181\ 2>0.05$,表明模型

表 3 试验设计及结果

Table 3 Test design and results

试验号	A	B	C	仿真试验/(kg · s ⁻¹)	理论计算/(kg · s ⁻¹)	流量比值/(t · h ⁻¹)
1	—1	—1	0	0.522	0.423	1.235
2	1	0	1	1.311	0.953	1.375
3	0	0	0	0.878	0.617	1.423
4	1	0	—1	0.871	0.572	1.523
5	1	—1	0	0.870	0.661	1.316
6	—1	0	1	0.712	0.610	1.167
7	0	—1	—1	0.607	0.401	1.513
8	—1	1	0	0.667	0.553	1.206
9	1	1	0	1.263	0.864	1.462
10	0	0	0	0.873	0.617	1.415
11	—1	0	—1	0.441	0.366	1.205
12	0	1	—1	0.788	0.525	1.502
13	0	1	1	1.323	0.875	1.512
14	0	0	0	0.899	0.617	1.457
15	0	—1	1	0.841	0.669	1.256

表 4 试验模型方差分析[†]

Table 4 ANOVA of test model

方差来源	均方	自由度	平方和	F 值	P 值
模型	0.022	9	0.025	15.60	0.003 7
A	0.093	1	0.093	58.38	0.000 6
B	0.016	1	0.016	10.27	0.023 9
C	0.023	1	0.023	14.70	0.012 2
AB	0.007	1	0.007	4.80	0.080 0
AC	0.003	1	0.003	1.90	0.226 9
BC	0.018	1	0.018	11.18	0.020 5
A^2	0.060	1	0.060	37.69	0.001 7
B^2	1.000×10^{-5}	1	1.000×10^{-5}	1.10×10^{-3}	0.975 6
C^2	4.000×10^{-5}	1	4.000×10^{-5}	0.42	0.547 0
残差	7.900×10^{-3}	5	1.500×10^{-3}		
失拟项	6.900×10^{-3}	3	2.300×10^{-3}	4.68	0.181 2
纯误差	9.900×10^{-3}	2	4.000×10^{-4}		
总和	0.230	14			

[†] $R^2=0.965\ 6, R^2_{\text{Adj}}=0.903\ 7, R^2_{\text{pre}}=0.508\ 6, CV=2.91\ \%, \text{Adep Precision}=10.378$ 。

良好。变异系数 CV 较高,预测决定系数 $R^2_{pre}=0.508\ 6$,由此剔除对流量比值影响不显著的项后进行方差分析。

根据表 4 结果,在保证模型良好前提下,剔除对响应

值影响不显著的项(AC 、 B^2 、 C^2),优化后的结果如表 5 所示,失拟项 $P=0.234\ 7$;试验精密度 $Adep\ Precision=14.04$ 。可知,模型较优化前有了很大的改善,优化后回归方程为:

表 5 试验优化模型方差分析[†]

Table 5 Analysis of variance of experimental optimization model

方差来源	均方	自由度	平方和	F 值	P 值
模型	0.022	6	0.037	25.16	<0.000 1
A	0.093	1	0.093	63.86	<0.000 1
B	0.016	1	0.016	11.24	0.010 1
C	0.023	1	0.023	16.08	0.003 9
AB	0.007	1	0.007	5.25	0.051 1
BC	0.018	1	0.018	12.22	0.008 1
A^2	0.062	1	0.062	42.34	0.000 2
残差	0.012	8	1.500×10^{-3}		
失拟项	0.011	6	1.700×10^{-3}	3.58	0.234 7
纯误差	9.900×10^{-4}	2	4.000×10^{-4}		
总和	0.230	14			

[†] $R^2=0.949\ 7$, $R^2_{adj}=0.911\ 9$, $R^2_{pre}=0.878\ 3$, $Adep\ Precision=14.04$ 。

$$Q = -5.11 + 0.209A - 0.062B - 0.028C + 0.000\ 44AB + 0.000\ 33BC - 0.013A^2.$$
 (10)

修正后的螺旋喂料器的流量计算式可表示为:

$$Q = 47D^2Sn\gamma\varphi \times (-5.11 + 0.209D - 0.062S - 0.028n + 0.000\ 44DS + 0.000\ 33Sn - 0.013D^2).$$
 (11)

2.4 响应面分析

根据优化回归模型方差分析结果可知, AB 、 BC 的 P 值<0.05。在转速为 80 r/min 以及管径为颗粒间滚动摩擦系数 90 mm 2 种情况下,绘制 AB 及 BC 交互作用的响应曲面。由图 2(a)可知,相对于管径,螺距的效应面曲线比较陡;由图 2(b)知,相对于螺距,转速的效应面曲线比较陡。

3 仿真实验验证

3.1 设计要求

螺旋流量 $Q=1.0\ t/h$,物料为小米,物料综合特性系数 $A=65$,填充率 $\varphi=0.53$,物料容重 $r=0.51\ t/m^3$,转速 $n=100\ r/min$,管径 $D=100\ mm$,螺距 $S=0.8D^{[9-11]}$ 。根据设计要求 D 、 S 、 n 的取值及式(11)可知,螺旋喂料器的流量计算值为 $1.210\ t/h$ 。

3.2 仿真模型

根据设计要求,建立螺旋喂料器的三维模型,然后转化为 step 格式后导入离散元软件进行仿真。结合相关文献^[12-14],颗粒仿真采用软球模型仿真模型如图 3 所示。

3.3 仿真结果

待仿真结束后,采用两个稳定时间段对螺旋喂料器的流量进行检测,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,螺旋喂料器的平均流量为 $1.258\ t/h$,与修正式计算流量值 $1.210\ t/h$ 误差为 3.97%,表明了修正

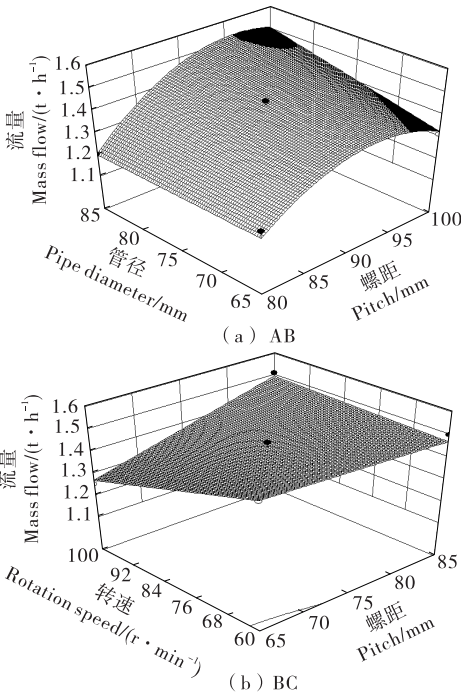


图 2 AB 与 BC 的交互效应图
Figure 2 AB and BC interaction effect diagram

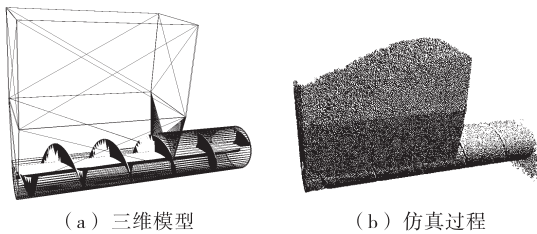


图 3 仿真模型
Figure 3 Simulation model

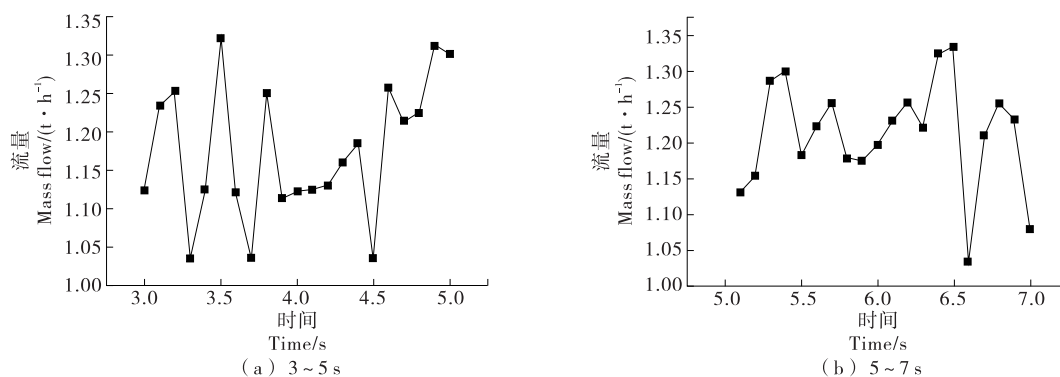


图4 螺旋喂料器流量检测图

Figure 4 Flow chart of screw feeder

流量计算式的精确性。

4 结论

(1) 针对螺旋喂料器实际流量检测值与传统计算式的计算值相差较大的问题,采用响应面试验对螺旋喂料器的流量计算式进行修正。考虑到实际应用的复杂程度,采用离散元仿真测定流量值与计算式计算所得值的比值作为响应,以对流量差值影响显著的螺距、转速、管径为因素,设计响应面试验,得到3个因素与响应值之间的二阶回归方程,由此进一步得到螺旋喂料器的流量计算式。

(2) 为进一步验证流量计算式的可行性,根据设计要求用SolidWorks软件建立三维模型,并进行离散元仿真,发现仿真所得流量值为1.258 t/h,与修正式计算所得流量值1.210 t/h的误差为3.97%,表明了流量修正计算式的合理性,为螺旋喂料器的设计计算提供参考。

(3) 试验中以仿真流量与计算流量比值作为响应,因仿真存在一定的误差,修正所得的流量计算式可粗略求解,后续可根据试验设计,加工螺杆,对仿真流量修正公式的可行性进一步研究。

参考文献

- [1] 梅潇,柯周军,王伟,等.垂直螺旋输送机生产率计算模型的修正[J].中国粉体技术,2018,24(4):37-43.
- [2] 赵方超,王春光,乌兰图雅.螺旋式输送装置参数优化研究[J].中国农业科技导报,2019,21(6):70-78.
- [3] 梅潇,郑颖,刘海洋,等.垂直螺旋输送机中颗粒群的运动特性分析[J].机械设计与制造,2017(7):26-29.
- [4] 郭创,朴香兰.基于EDEM的螺旋输送机数值模拟分析[J].延边大学学报(自然科学版),2018,44(2):179-182.
- [5] 朱鸿翔,谭欢.基于EDEM的螺旋输送机性能研究[J].机电工程技术,2018,47(7):27-29,202.
- [6] 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.
- [7] 陈源,彭旭东,李纪云,等.螺旋槽结构参数对干气密封动

- 态特性的影响研究[J].摩擦学学报,2016,36(4):397-405.
- [8] 彭飞,李腾飞,康宏彬,等.小型制粒机喂料器参数优化与试验[J].农业机械学报,2016,47(2):51-58.
- [9] 李飞翔,李永祥,徐雪萌,等.变螺距螺旋结构的螺距设计与仿真分析[J].包装工程,2019,40(13):214-221.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] PEZO M, PEZO L, JOVANOVIĆ A, et al. Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors[J]. Powder Technology, 2018, 336: 255-264.
- [13] 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.
- [14] WANG Shu-yan, LI Hao-long, TIAN Rui-chao, et al. Numerical simulation of particle flow behavior in a screw conveyor using the discrete element method[J]. Particuology, 2019, 43: 137-148.