doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.016

小麦粉等距螺旋喂料装置优化设计与试验

徐雪萌[1]　李飞翔[1]　申长璞[1]　李永祥[1]　常东涛[2]
(1.河南工业大学机电工程学院,郑州 450001;2.河南金谷实业有限公司,郑州 450001)

摘要:针对自动包装生产线上输送小麦粉等距螺旋喂料装置参数以经验设计为主、缺乏系统设计方法的问题,基于粒子群算法对螺旋喂料装置参数进行了优化设计。首先,针对输送小麦粉螺旋喂料器流量计算公式与实际流量误差较大、降低参数优化设计准确性的问题,以实际流量与理论流量的差值作为响应值,以对流量差值影响显著的螺距、内轴径、转速为变量设计正交试验,建立了变量与响应值之间的二阶回归方程,由此得到修正后的小麦粉流量计算式;然后,基于粒子群算法,以流量最大和螺旋体质量最小作为优化目标,以螺旋叶片外径、螺距、内轴外径、内轴筒内径作为变量,并采取比例的形式将 2 个目标转换为单目标优化问题,进行寻优求解;最后,根据算法优化结果进行试验,结果表明,优化后流量为 3.054 6 t/h,比经验设计值提升了 18.15%,螺旋体质量为 6.277 9 kg,比经验设计质量减小了 29.39%,修正后优化的理论流量为 2.864 7 t/h,与实际测定流量的误差为 6.22%。

关键词:小麦粉;螺旋喂料;粒子群优化;正交试验
中图分类号:S229　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)12-0150-08　　**OSID**:

Optimization Design and Experiment of Wheat Flour Equal Pitch Screw Feeding Device

XU Xuemeng[1]　LI Feixiang[1]　SHEN Changpu[1]　LI Yongxiang[1]　CHANG Dongtao[2]
(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou* 450001, *China*
2. *Henan Jingu Industrial Co., Ltd., Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract: Aiming to meet its operational challenges, the parameters of a wheat flour equal-pitch screw feeder are mainly based on empirical design, but systematic research of its optimization is lacking. Thus, an optimization method was presented based on particle swarm optimization. Firstly, to improve the accuracy and rationality of the algorithm optimization results, the large error between the empirical calculation formula of the mass flow rate was mitigated, and actual tests were done. The differences between the response value, pitch S, inner shaft diameter d, and rotational speed n, which had significant influences on the flow difference, were taken as variables. The orthogonal experiments were designed by using Design-Expert software, a second-order regression equation between the three variables and the response value was established and the modified formula of wheat mass flow rate was obtained. Then, according to the modified formula, based on particle swarm optimization, with maximum mass flow rate and smallest screw weight as the optimization goals, the outer diameter of the blade, pitch, outer diameter of the inner shaft, and inner diameter of the inner shaft were taken as variables. The two goals were then transformed into single-objective optimization problems in a proportional way for optimization. Finally, tests were carried out according to the optimization results, showing that the optimized mass flow rate was 3.054 6 t/h, which was 18.15% higher than the empirical design value of 2.585 3 t/h, and the screw weight was 6.277 9 kg, which was 29.39% lower than its empirical design. The theoretical mass flow rate of the modified optimization result was 2.864 7 t/h and the error for the actual measured flow value of 3.054 6 t/h was 6.22%. The result demonstrated the reliability of the modified mass flow rate calculation formula and optimization design method, which provided a reference for the design of a wheat flour equal-pitch screw.

Key words: wheat flour; screw feeding; particle swarm optimization; orthogonal test

收稿日期:2020-08-03　修回日期:2020-09-07
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,主要从事粮食机械研究,E-mail:liyongxiang@haut.edu.cn

0　引言

自动包装生产线上小麦粉的输送与计量大多采用螺旋喂料装置，合理设计螺旋喂料装置是提高物料输送效率及包装精度的关键。螺旋轴是螺旋喂料器的核心部件，对螺旋轴参数设计及优化具有重要意义。在螺旋喂料装置的参数优化方面，国内外学者进行了大量研究。彭飞等[1]采用离散元法对喂料器工作过程进行数值模拟，基于回归分析和响应面分析法建立了喂料评价指标的数学模型，得到了喂料器的最佳参数组合。赵方超等[2]为提高农业纤维物料螺旋式输送装置的输送性能，利用 Matlab 软件对比功耗数学模型进行单变量优化，并结合试验验证得到了螺旋式输送装置输送性能参数最佳的取值范围。FU 等[3]为降低螺旋洗砂机的比能耗，基于果蝇优化算法（FOA），以最小比能耗为目标、以转速为变量对螺杆式冲砂机结构参数进行优化，得到了目标灵敏度和约束灵敏度。

粒子群优化（Particle swarm optimization，PSO）算法是一种基于群体的搜索算法，该算法源于对鸟群觅食行为的研究[4]。文献[5]基于粒子群运算，以最小表面应力和最大产量为目标对螺旋输送机螺旋轴参数进行了优化，明显降低了最大主应力，有效延长了使用寿命。文献[6]针对螺旋钻采煤机输送生产率、煤块二次破碎率及能耗问题，基于螺旋钻采煤机输送机构参数，采用改进粒子群算法对螺旋钻采煤机进行多目标优化设计，优化了螺旋钻采煤机的输送结构参数，有效提高了整机工作性能。文献[7]以重型螺旋输送机驱动滚筒为例，利用粒子群算法对螺旋输送机的运行参数进行了精确优化，为设计合理的驱动滚筒结构提供了依据。

目前，国内外对小麦粉等距螺旋喂料装置结构参数系统设计及其优化方面的研究较少。本文首先针对输送小麦粉螺旋喂料器流量计算公式与实际流量误差较大的问题，对小麦粉螺旋喂料流量计算式进行修正，然后基于粒子群算法对螺旋喂料装置参数进行优化设计，并根据算法优化结果对经验设计和优化设计的螺旋装置性能指标进行试验对比，以期为小麦粉螺旋喂料结构的设计计算提供参考。

1　试验材料与方法

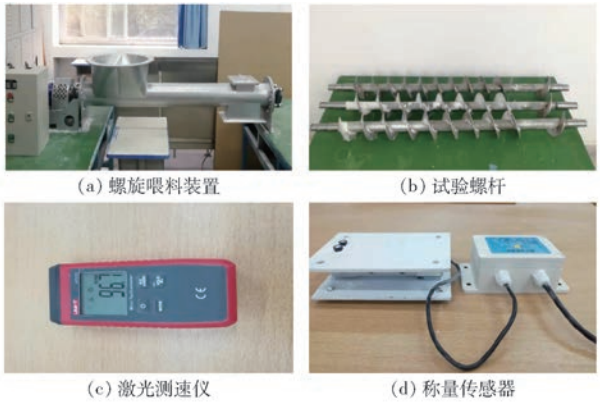
1.1　试验材料、仪器与设备

普通小麦粉，郑州海嘉食品有限公司，含水率 13.5%，灰分 0.51%，松散密度 0.52 t/m^3。

GLLS12 系列螺旋喂料器，河南金谷实业有限公司，产能 2 t/h，螺杆总长 1 300 mm，螺旋叶片外径 D = 120 mm，螺旋体材质 304 不锈钢，变频电机，转速范围 60 ~ 150 r/min，见图 1a、1b。

UT373 型激光测速仪，优利德科技有限公司，测量范围 10 ~ 99 999 r/min，测量距离 50 ~ 200 mm，测量误差 ±（0.04% +2dgt），见图 1c。

RS485 型平面称量传感器，恒远传感器科技有限公司，称量范围 0 ~ 50 kg，采样频率 10 ~ 30 Hz，测量误差 ±0.003 kg，见图 1d。



（a）螺旋喂料装置　（b）试验螺杆　（c）激光测速仪　（d）称量传感器

图 1　试验仪器与设备

Fig. 1　Test equipment and device

1.2　试验方法与过程

（1）螺旋喂料流量

根据文献[8 -9]，因螺旋叶片外径与料筒内壁间隙对螺旋结构流量影响极小可忽略不计，由此螺旋喂料器的流量可表示为

$$Q = 47(D^2 - d^2)Sn\gamma\varphi \tag{1}$$

式中　Q——螺旋喂料器流量，t/h

d——螺旋内轴径，m　　S——螺距，m

n——转速，r/min　　γ——物料容重，t/m^3

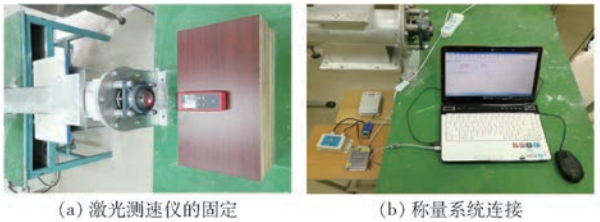
φ——填充率

（2）小麦粉流量测定

在进行小麦粉喂料试验前，采用激光测速仪对所需调节转速的频率进行测定。测定时，首先停止螺杆的转动，裁剪一片反光纸（尺寸约 10 mm × 10 mm）贴在末端轴头端面处，然后将测速仪平放于光滑的模板上使其位置稳定，如图 2a 所示，测速仪的激光发射与接收窗口距离螺旋末端轴头端面处 50 ~ 200 mm 之间，垂直夹角小于 30°。为保证测定的准确性，测量重复 5 次，针对转速为 80、100、120 r/min 的频率分别为 25.3、31.6、37.9 Hz。

喂料试验中，采用称量传感器对流量进行实时监测。称量传感系统组成主要有 485 数字模块、485 转 USB 数据线、传感器和安装板。为提高称量稳定性，加工亚克力平板与安装板连接，用于放置接料桶，整体传感系统连接如图 2b 所示。数据采集采用

JYHGS 软件,打开软件后首先进行串口连接、参数读取后进行校准,校准后选定高速模式进行数据记录。



(a) 激光测速仪的固定 (b) 称量系统连接

图 2 仪器连接与放置

Fig. 2 Instrument connection and placement

1.3 试验结果

称量传感器输出数据为质量随时间的变化曲线,为提高流量测定的精确性,传感器记录时间间隔精确为 1 ms,每一转速试验 5 次,得到 5 条质量–时间变化曲线,针对每条曲线,测定每一时刻的曲线斜率(即流量)取其平均值,将 5 次测定的平均值作为最终结果。内轴径 35 mm、螺距 100 mm、转速 80 r/min 下的测定结果进行计算。称量传感器的 5 次流量测定曲线如图 3 所示。

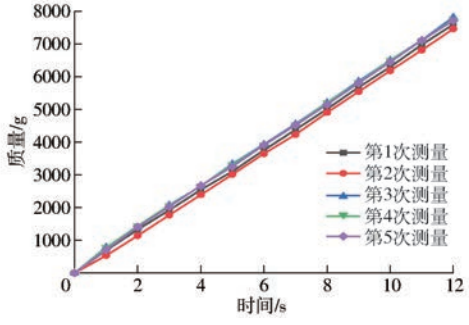


图 3 质量–时间变化曲线

Fig. 3 Mass – time curves

根据称量传感器记录的质量–时间变化曲线,计算每条曲线间隔 1 s 内的斜率进行统计,统计结果如表 1 所示。

由表 1 可知各曲线的斜率平均值,由此可知内轴径 35 mm、螺距 100 mm、转速 80 r/min 时测定流量为 0.582 kg/s。

2 试验设计

2.1 正交试验及流量公式修正

因小麦粉具有很强压缩性,螺旋进料口处小麦粉受料斗中物料压力较大,填充率较高,随着物料被叶片推进,不同螺旋段处的物料密度也有所不同,因此以经验计算公式计算流量与实际流量误差较大[10-12],修正小麦粉螺旋喂料器的流量计算公式以提高算法优化结果的精确性及合理性。

由螺旋喂料器的流量计算式(1)可知,理论流量的计算值与填充率、叶片外径、内轴径、螺距、转速及物料的密度有关。小麦粉的螺旋喂料因具有较强的压缩性,螺旋进料口处小麦粉受料斗中物料压力较大,填充率较高,随着物料被叶片推进,不同螺旋段处的物料密度也有所不同,导致以经验计算式计算流量与实际流量误差较大。实际小麦粉的螺旋喂料中,螺旋管内小麦粉的密度及填充率都很难检测,且密度及填充率随着螺旋结构的变化而发生改变,因此正交试验不以密度及填充率作为因素。由相关手册及文献[8-9]可知,螺旋喂料器螺距 S 的取值一般为(0.8~1.2)D,可知螺距会随着叶片外径的变化而变化。反过来,螺距的不同会间接影响叶片外径,经验设计可认为叶片外径可以用螺距来表示,因此为尽量减小试验的复杂程度,正交试验以螺距作为因素来间接反映叶片外径对响应值的影响。本文以实际流量与理论流量差值作为响应值,以对流量差值影响显著的螺距 S、内轴径 d、转速 n 为变量设计正交试验,试验装置为河南金谷实业有限公司的 GLLS12 系列螺旋喂料器,螺旋叶片外径 D = 120 mm,由螺旋叶片的外径来确定螺距及内轴径的因素选取,转速采用常规值设计试验,正交试验因素编码如表 2 所示。

表 1 各曲线斜率统计表

Tab. 1 Statistics of slopes of each curve kg/s

时间点/s	第 1 条	第 2 条	第 3 条	第 4 条	第 5 条
1	0.583 91	0.573 99	0.657 52	0.673 21	0.655 39
2	0.517 75	0.559 74	0.540 55	0.554 38	0.581 94
3	0.596 84	0.583 76	0.654 13	0.578 65	0.563 31
4	0.510 81	0.568 99	0.530 97	0.560 51	0.596 93
5	0.589 16	0.564 61	0.599 22	0.585 86	0.526 25
6	0.566 98	0.547 18	0.559 01	0.559 35	0.601 15
7	0.578 65	0.627 18	0.576 32	0.543 15	0.566 35
8	0.635 31	0.570 89	0.602 45	0.646 57	0.571 40
9	0.560 95	0.597 37	0.585 59	0.566 87	0.606 55
10	0.600 39	0.574 17	0.582 55	0.617 19	0.591 41
11	0.587 92	0.594 26	0.570 98	0.529 48	0.613 85
12	0.601 67	0.580 34	0.588 13	0.588 84	0.544 97
平均值	0.577 53	0.578 54	0.587 28	0.583 67	0.584 96

表 2 正交试验因素编码

Tab. 2 Orthogonal test factors and levels

编码	因素		
	螺距 S/mm	内轴径 d/mm	转速 n/(r·min^{-1})
-1	100	35	80
0	110	40	100
1	120	45	120

根据正交试验因素编码,采用 Design-Expert 软件进行 Box – Behnken 试验设计,试验选取 3 个中心

点对误差进行评估。Box－Behnken 试验结果如表 3 所示。

表 3　Box－Behnken 试验设计与结果

Tab. 3　Design and results of Box－Behnken test

序号	转速 n/（r·min^{-1}）	螺距 S/mm	内轴径 d/mm	实际流量/（kg·s^{-1}）	理论流量/（kg·s^{-1}）	流量差值/（t·h^{-1}）
1	100	110	40	0.817	0.382 4	1.564 6
2	120	120	40	0.937	0.500 5	1.571 4
3	120	110	35	0.788	0.472 3	1.136 5
4	100	120	35	0.837	0.429 3	1.467 7
5	100	120	45	0.779	0.403 3	1.352 5
6	80	110	35	0.631	0.314 8	1.138 3
7	100	110	40	0.786	0.382 4	1.452 9
8	100	110	40	0.815	0.382 4	1.557 4
9	80	100	40	0.561	0.278 1	1.018 4
10	120	100	40	0.823	0.417 1	1.461 2
11	100	100	35	0.729	0.357 8	1.336 3
12	100	100	45	0.678	0.336 1	1.230 8
13	80	120	40	0.665	0.333 7	1.192 7
14	120	110	45	0.858	0.443 6	1.491 8
15	80	110	45	0.535	0.295 7	0.859 7

Box－Behnken 试验模型方差分析结果如表 4 所示，根据表 4 可知，该拟合模型 $P<0.005$；n、S、nd、n^2、d^2 的 P 值都小于 0.05，说明各个参数对响应值的显著影响，表明了回归模型的有效性。失拟项 $P=0.457>0.05$，表明模型良好，没有弯曲失拟现象发生。但试验中变异系数较高，预测决定系数较低，$R^2=0.599$，由此剔除对流量差值影响不显著的项后进行方差分析。

表 4　Box－Behnken 试验设计二次多项式模型方差分析

Tab. 4　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	0.640 6	9	0.071 2	15.240 0	0.004 0
n	0.263 9	1	0.263 9	56.520 0	0.000 7
S	0.036 3	1	0.036 3	7.780 0	0.038 5
d	0.002 6	1	0.002 6	0.555 1	0.489 7
nS	0.001 1	1	0.001 1	0.226 2	0.654 4
nd	0.100 5	1	0.100 5	21.520 0	0.005 6
Sd	0.000 0	1	0.000 0	0.005 4	0.944 5
n^2	0.151 2	1	0.151 2	32.390 0	0.002 3
S^2	0.000 5	1	0.000 5	0.111 5	0.752 0
d^2	0.101 9	1	0.101 9	21.820 0	0.005 5
残差	0.023 3	5	0.004 7		
失拟项	0.015 5	3	0.005 2	1.330 0	0.457 0
纯误差	0.007 8	2	0.003 9		
总和	0.663 9	14			

根据表 4 结果，在保证模型良好前提下，剔除对流量差值影响不显著的项（nS、Sd、S^2），优化模型后的方差分析结果如表 5 所示，失拟项 $P=0.675\,7$，决定系数 $R^2=0.962\,4$，校正决定系数 $R^2=0.934\,2$，预测决定系数 $R^2=0.810\,9$，试验精密度为 20.245 9。可知，模型拟合性、可靠性以及精确性良好，优化后回归方程为

$$q=-9.257\,63+0.046\,412n+0.006\,738S+0.366\,577d+0.001\,585nd-0.000\,504n^2-0.006\,608d^2 \quad (2)$$

式中　q——实际试验与理论计算流量差值，t/h

表 5　Box－Behnken 试验优化回归模型方差分析

Tab. 5　ANOVA of modified model of Box－Behnken test

方差来源	均方	自由度	平方和	F	P
模型	0.639 0	6	0.106 5	34.15	<0.000 1
n	0.263 9	1	0.263 9	84.63	<0.000 1
S	0.036 3	1	0.036 3	11.65	0.009 2
d	0.002 6	1	0.002 6	0.83	0.388 6
nd	0.100 5	1	0.100 5	32.22	0.000 5
n^2	0.150 8	1	0.150 8	48.34	0.000 1
d^2	0.101 4	1	0.101 4	32.51	0.000 5
残差	0.024 9	8	0.003 1		
失拟项	0.017 1	6	0.002 9	0.731 7	0.675 7
纯误差	0.007 8	2	0.003 9		
总和	0.663 9	14			

根据式（1）及优化后的回归方程式（2），可知修正后的小麦粉螺旋喂料器的流量计算式为

$$Q_x=47(D^2-d^2)Sn\gamma\varphi-9.257\,63+0.046\,412n+0.006\,738S+0.366\,577d+0.001\,585nd-0.000\,504n^2-0.006\,608d^2 \quad (3)$$

式中　Q_x——修正后螺旋喂料器流量，t/h

2.2　转速确定

应用 Design-Expert 软件，以理论流量与实际流量的差值为目标，对优化后的回归方程进行寻优求解，固定螺距与内轴径为定值，以流量差值与实际流量比值在 0.6 以内进行参数选取，得到一组相对最优解集如表 6 所示。

根据实际管径及螺距选取标准，并结合表 6 中流量差值与实际流量的占比，选定转速 $n=100$ r/min，为后续算法优化及与经验设计螺杆的性能对比奠定基础。

3　粒子群算法参数优化

3.1　算法原理

3.1.1　迭代公式

粒子群算法是研究鸟群觅食而产生的智能优化算法，系统随机初始化一组粒子，通过不断进行迭代搜寻出问题的最优解[13－14]。迭代公式

表 6 相对最优解集

Tab. 6 Relative optimal solution set

序号	转速 n/(r·min^{-1})	螺距 S/mm	内轴径 d/mm	理论计算值/(kg·s^{-1})	流量差值/(kg·s^{-1})	比值
1	100.00	100	35	0.357 8	0.361 9	0.502 8
2	96.24	100	35	0.344 3	0.358 9	0.510 3
3	82.35	100	35	0.294 6	0.312 8	0.514 9
4	92.99	100	35	0.332 7	0.352 8	0.514 6
5	94.17	100	35	0.336 9	0.355 3	0.513 2
6	100.57	100	35	0.359 8	0.362 2	0.501 6
7	89.28	100	35	0.319 4	0.342 4	0.517 4
8	97.81	100	35	0.349 9	0.360 6	0.507 4
9	87.65	100	35	0.313 6	0.336 7	0.517 7
10	102.97	100	35	0.368 4	0.361 7	0.495 3

$$v_{ij}(t+1)=wv_{ij}(t)+c_1r_1(p_{ij}(t)-x_{ij}(t))+c_2r_2(p_{gj}(t)-x_{ij}(t)) \tag{4}$$

$$x_{ij}(t+1)=x_{ij}(t)+v_{ij}(t+1) \tag{5}$$

式中 w——惯性因子

c_1、c_2——加速因子,正常数

r_1、r_2——[0,1]之间的随机数

x_{ij}——粒子位置 v_{ij}——粒子速度

p_{ij}——粒子个体位置最优值

p_{gj}——粒子群体位置最优值

$[-x_{j,\max},x_{j,\max}]$——第 $j(1\leqslant j\leqslant d)$ 维的位置变化范围

$[-v_{j,\max},v_{j,\max}]$——第 $j(1\leqslant j\leqslant d)$ 维的速度变化范围

3.1.2 惯性权重

在 PSO 算法中,惯性因子 w 的取值影响算法整体的收敛性能,用来控制前一速度对当前速度的影响。w 较大时,对前一速度的影响较大,全局搜索能力强;w 较小时,对前一速度的影响较小,局部搜索能力较强[15-16]。w 的一般取值是随着算法迭代次数线性递增或非线性递减[17-18]。线性权重虽能极大改善粒子群算法的性能,但在迭代初期,因局部搜索能力较弱而易错过全局最优,在迭代后期又因全局搜索能力变弱而易陷入局部最优。非线性权重能够克服迭代初期错过全局最优及后期陷入局部最优的问题[19-20]。本文采用非线性递减的凹曲线,如图 4 所示,计算公式为[21]

$$w=w_e\left(\frac{w_s}{w_e}\right)^{1/(1+10i/g)} \tag{6}$$

式中 w_s——初始值 w_e——结束值

i——粒子序号 g——迭代次数

3.2 参数优化

3.2.1 设计要求

圆管螺旋喂料器,材料为不锈钢,用于水平输送,参照表 6 选定转速 $n=100$ r/min;输送物料为小麦粉,物料容重 $\gamma=0.52$ t/m^3,填充率 $\varphi=0.4$,物料综合特性系数 $A=75$[22-24]。

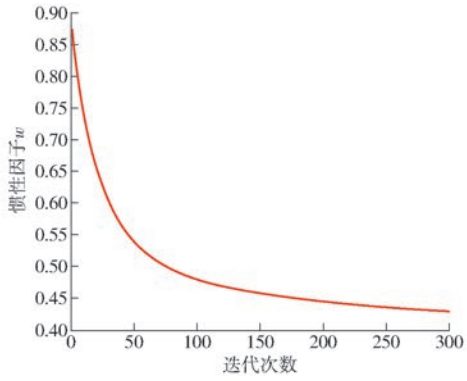


图 4 惯性因子曲线

Fig. 4 Inertia weight curve

3.2.2 目标函数

(1)螺旋喂料流量

按式(3)修正后的计算式计算小麦粉螺旋喂料器的流量。

(2)螺旋喂料器螺旋体质量

$$M=(V_1+V_2)\rho \tag{7}$$

其中

$$V_1=\frac{(D-d)\tau L}{4S}\left[\sqrt{(\pi D)^2+S^2}+\sqrt{(\pi d)^2+S^2}\right] \tag{8}$$

$$V_2=\frac{\pi(d^2-d_0^2)L}{4} \tag{9}$$

式中 V_1——螺旋叶片体积,m^3

V_2——内轴体积,m^3

ρ——不锈钢密度,kg/m^3

τ——螺旋叶片厚度,m

L——螺旋体总长度,m

d_0——螺旋内轴筒内径,m

3.2.3 设计变量

设计变量是影响螺旋体性能的主要因素,在转速、填充率、物料密度一定的情况下,由目标函数可知,影响螺旋流量及质量的主要尺寸参数为叶片外径 D、螺距 S、内轴径 d 及内轴筒内径 d_0,因此设计变量为

$$\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,x_3,x_4)=(D,S,d,d_0) \tag{10}$$

3.2.4 约束条件

(1)叶片外径约束

$$0.11\text{ m}\leqslant D\leqslant 0.13\text{ m} \tag{11}$$

(2)螺距约束

$$0.7D\leqslant S\leqslant 1.0D \tag{12}$$

(3)内轴径约束

$$0.3D\leqslant d\leqslant 0.4D \tag{13}$$

(4)内轴筒内径约束

$$0 \leqslant d_0 \leqslant 0.3D \tag{14}$$

3.2.5　粒子群算法寻优

基于粒子群算法，以流量最大及螺旋体质量最小为目标进行寻优求解。为了方便求解，将多目标向单目标转换[25-26]，转换的单目标模型为

$$Y_{\min}(D,S,d,d_0) = \frac{M}{Q} \tag{15}$$

算法参数的选定，初始种群大小为 100，迭代次数为 150，空间维数为 4，惯性因子选取凹型曲线，自学习因子为 0.5，分组学习因子为 0.5[27-28]。公式修正后的算法优化过程如图 5 所示。

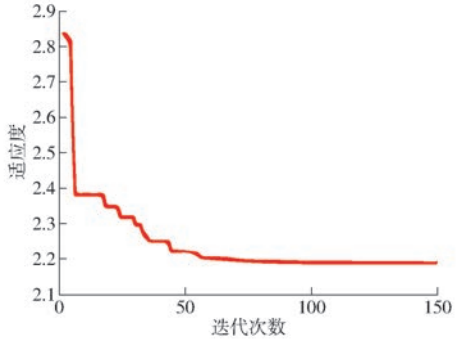


图 5　修正后算法迭代曲线

Fig. 5　Modified algorithm iteration diagram

由粒子群算法寻优求解得到的最优参数值为：M = 6.277 9 kg，Q = 2.864 7 t/h，$Y_{\min}$ = 2.148 8 kg·h/t，D = 0.124 6 m，S = 0.105 1 m，d = 0.037 5 m，d_0 = 0.029 7 m。对算法优化结果进行圆整可得：D = 0.125 m，S = 0.105 m，d = 0.038 m，d_0 = 0.03 m。为进一步分析采用修正式算法优化的效果，以修正前的流量式为目标进行优化求解，算法优化过程如图 6 所示。

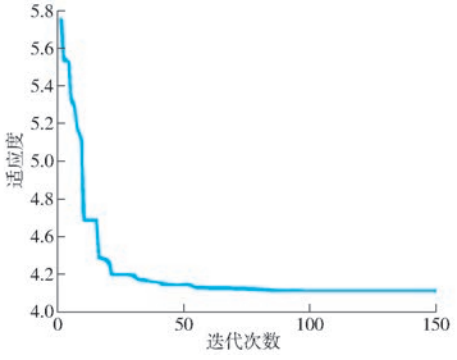


图 6　修正前算法迭代曲线

Fig. 6　Algorithmic iteration diagram before correction

由粒子群算法寻优求解得到的最优参数值为：M = 6.798 5 kg，Q = 1.653 8 t/h，$Y_{\min}$ = 4.127 2 kg·h/t，D = 0.130 m，S = 0.110 m，d = 0.039 m，d_0 = 0.031 2 m。对算法优化结果进行圆整可得：D = 0.130 m，S = 0.110 m，d = 0.04 m，d_0 = 0.03 m。

4　试验

4.1　设计参数

根据设计要求及约束条件，以经验设计及算法优化设计螺旋结构参数的结果如表 7 所示。

表 7　螺旋结构设计参数对比

Tab. 7　Comparison of design parameters　　m

方法	螺旋参数			
	D	S	d	d_0
经验设计	0.120	0.100	0.035	0.020
修正前优化	0.130	0.110	0.040	0.030
修正后优化	0.125	0.105	0.038	0.030

4.2　试验分析

根据传统设计参数及算法优化参数，对螺旋喂料结构进行加工，参考螺旋喂料试验相关文献[29-32]搭建试验平台，物料为小麦粉，采用称量传感器分别对经验螺杆及算法优化螺杆的流量进行检测，试验过程如图 7 所示。



图 7　小麦粉流量检测系统

Fig. 7　Wheat flour flow detection system

在高速检测模式下，由称量传感器检测得到质量-时间变化曲线，导出曲线数据，以 1.3 节所述求解方法对数据进行处理，可得各个时间节点的流量，结果如图 8 所示。

由图 8 可知，物料流量在时间段内呈现波浪状，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，在螺旋旋转一周的时间里，单位转角呈现不同下料量。根据流量检测结果，计算各螺杆质量，确定评价系数(质量与流量的比值)对各螺杆进行对比分析，统计结果如表 8 所示。

由表 8 可知，公式修正后的算法优化结果较好，优化后流量为 3.054 6 t/h，比经验设计提升了 18.15%，螺旋体质量为 6.277 9 kg，相对经验设计质量减少了 29.39%。修正后优化结果理论流量为 2.864 7 t/h，与实际测定流量值 3.054 6 t/h 的误差为 6.22%。表明了修正后流量计算式的可靠性及优化后参数的合理性，为螺旋输送装置的设计计算提供参考。

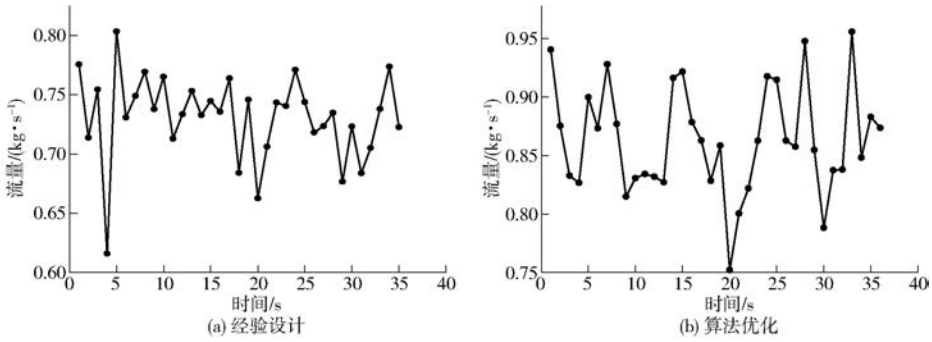


图 8 流量检测结果

Fig. 8 Flow detection results

表 8 试验结果对比分析

Tab. 8 Comparative analysis of test results

螺旋参数	D/m	S/m	d/m	d_0/m	M/kg	理论流量/(t·h^{-1})	试验流量/(t·h^{-1})	质量与流量比/(kg·h·t^{-1})
经验设计	0.120	0.100	0.035	0.020	8.891 6	1.288 0	2.585 3	3.439
修正前优化	0.130	0.110	0.040	0.030	6.798 5	1.653 8	2.921 6	2.327
修正后优化	0.125	0.105	0.038	0.030	6.277 9	2.864 7	3.054 6	2.055

5 结论

(1)针对输送小麦粉螺旋喂料器流量计算式与实际流量误差较大的问题,以实际流量与理论流量的差值作为响应值,以对流量差值影响显著的内管径、螺距、转速为变量设计正交试验,建立了变量与响应值之间的二阶回归方程,由此得到修正后的小麦粉流量计算式。

(2)根据所得流量式,基于粒子群算法,以流量和螺旋体质量作为优化目标,以管径、螺距、内轴外径、内轴筒内径作为变量,对螺旋喂料结构参数进行寻优求解,根据设计要求及约束条件,得到最佳参数组合为:D=0.125 m,S=0.105 m,d=0.038 m,d_0=0.030 m。

(3)根据算法优化结果进行试验对比分析,由试验可知,优化后流量值为 3.054 6 t/h,比经验设计提升了 18.15%,螺旋体质量为 6.277 9 kg,比经验设计质量减少了 29.39%。公式修正前理论流量与实际流量的误差较大,而修正后优化理论流量值为 2.864 7 t/h,与实际测定流量值 3.054 6 t/h 的误差为 6.22%,验证了修正后流量计算式的可靠性。本研究可为小麦粉螺旋喂料结构的设计提供参考。

参 考 文 献

[1] 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/OL]. 农业机械学报, 2016,47(2):51-58.
PENG Fei, LI Tengfei, KANG Hongbin, et al. Parameter optimization and experiment of small granulator feeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 51-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.007. (in Chinese)

[2] 赵方超, 王春光. 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.
ZHAO Fangchao, WANG Chunguang. Research on parameter optimization of helical conveying device[J]. China Agricultural Science and Technology Review, 2019, 21(6): 70-78. (in Chinese)

[3] FU Y F, GONG J, PENG Z, et al. Optimization design for screw wash-sand machine based on fruit fly optimization algorithm [J]. Tamkang University of Science and Technology, 2016, 19(2): 149-161.

[4] HEITMANN A P, PATRÍCIO P S O, COURA I R, et al. Nanostructured niobium oxyhydroxide dispersed Poly (3-hydroxybutyrate)(PHB) films: highly efficient photocatalysts for degradation methylene blue dye[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 189: 141-150.

[5] HE F, YAO X, PING A, et al. Optimization of spiral shaft parameters of particle type conveyor based on particle swarm optimization[C]//International Conference on Electronical, Mechanical and Materials Engineering (ICE2ME 2019). Atlantis Press, 2019.

[6] 刘雨博,段芬,刘思朔. 改进粒子群算法的螺旋钻采煤机钻杆参数优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(1): 61-64.
LIU Yubo, DUAN Fen, LIU Sishuo. Optimization of drill pipe parameters of auger shearer with improved particle swarm optimization[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 2017, 36(1): 61-64. (in Chinese)

[7] CAI J, MENG W, CHEN Z. The optimisation research of screw conveyor[J]. International Journal of Innovative Computing and Applications, 2011, 3(3): 169-176.

[8] 刘四麟. 粮食工程设计手册[M]. 郑州:郑州大学出版社,2020.
[9] 杨洋. 基于 EDEM 的输粮搅龙输送性能仿真研究与优化[D]. 成都：西华大学, 2016.
YANG Yang. EDEM-based simulation study and optimization of auger conveying performance [D]. Chengdu: Xihua University, 2016. (in Chinese)
[10] 柳忠魁, 刘延章. 粉粒体螺旋输速器的分析与计算[J]. 饲料工业,1987(5)：32－36.
[11] 宿坤根. 螺旋输送机生产率计算误差的探讨[J]. 饲料工业, 1995(12)：5－6.
SU Kungen. Discussion on calculation error of screw conveyor productivity[J]. Feed Industry, 1995(12): 5－6. (in Chinese)
[12] 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.
MEI Xiao, ZHENG Ying, LIU Haiyang, et al. Analysis of the motion characteristics of particle swarms in vertical screw conveyors[J]. Mechanical Design & Manufacture, 2017(7): 26－29. (in Chinese)
[13] XUE B, ZHANG M, BROWNE W N. Particle swarm optimization for feature selection in classification: a multi-objective approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2012, 43(6): 1656－1671.
[14] ZHANG G, SHAO X, LI P, et al. An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(4): 1309－1318.
[15] TRIPATHI P K, BANDYOPADHYAY S, PAL S K. Multi-objective particle swarm optimization with time variant inertia and acceleration coefficients[J]. Information Sciences, 2007, 177(22): 5033－5049.
[16] JANSON S, MERKLE D, MIDDENDORF M. Molecular docking with multi-objective particle swarm optimization[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 666－675.
[17] 吴雪娟. 多目标粒子群优化算法的研究及应用[D]. 南京:南京邮电大学, 2016.
WU Xuejuan. Research and application of multi-objective particle swarm optimization algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)
[18] 付丹丹. 基于改进粒子群算法的多目标优化研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2012.
FU Dandan. Research on multi-objective optimization based on improved particle swarm optimization algorithm [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
[19] 周俊, 陈璟华, 刘国祥, 等. 粒子群优化算法中惯性权重综述[J]. 广东电力, 2013, 26(7)：6－12.
ZHOU Jun, CHEN Yihua, LIU Guoxiang, et al. Overview of inertia weights in particle swarm optimization algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(7): 6－12. (in Chinese)
[20] 戴文智,杨新乐. 基于惯性权重对数递减的粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2015,51(17)：14－19.
DAI Wenzhi, YANG Xinle. Particle swarm optimization algorithm based on logarithmic decrement of inertia weight[J]. Computer Engineering and Applications, 2015,51(17): 14－19. (in Chinese)
[21] 郭鲁彦. 非线性动态调整惯性权重的粒子群算法[D]. 沈阳:东北大学,2008.
GUO Luyan. Particle swarm optimization algorithm for nonlinear dynamic adjustment of inertia weight [D]. Shenyang: Northeastern University,2008. (in Chinese)
[22] KUMAR S, SAINI C S. Study of various characteristics of composite flour prepared from the blend of wheat flour and gorgon nut flour[J]. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology, 2016, 9(4): 679－689.
[23] PATWA A. Discrete element method model of the first break wheat milling process[D]. Manhattan:Kansas State University, 2014.
[24] WAJE S S, THORAT B N, MUJUMDAR A S. An experimental study of the thermal performance of a screw conveyor dryer [J]. Drying Technology, 2006, 24(3): 293－301.
[25] 徐玉杰. 粒子群算法的改进及应用[D]. 南京：南京师范大学, 2013.
XU Yujie. Improvement and application of particle swarm optimization algorithm [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013. (in Chinese)
[26] 陈绍新. 多目标优化的粒子群算法及其应用研究[D]. 大连：大连理工大学, 2007.
CHEN Shaoxin. Multi-objective optimization particle swarm optimization algorithm and its application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
[27] DU K L, SWAMY M N S. Particle swarm optimization[M]//Search and optimization by metaheuristics. Birkhäuser, Cham, 2016: 153－173.
[28] DELGARM N, SAJADI B, KOWSARY F, et al. Multi-objective optimization of the building energy performance: a simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO)[J]. Applied Energy, 2016, 170(10): 293－303.
[29] PEZO M, PEZO L, JOVANOVIĆ A P, et al. Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors[J]. Powder Technology, 2018, 336(7): 255－264.
[30] RUIZ-CARCEL C, STARR A, NSUGBE E. Estimation of powder mass flow rate in a screw feeder using acoustic emissions [J]. Powder Technology, 2018, 336(7): 122－130.
[31] 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.
[32] 徐雪萌,李飞翔,李永祥,等. 定量变距螺旋结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(12):89－97.
XU Xuemeng, LI Feixiang, LI Yongxiang, et al. Design and experiment of quantitative variable pitch screw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(12):89－97. http://www.j-csam.org/jc-sam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20191210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.010. (in Chinese)