粉料包装机计量螺杆的结构参数优化设计

林吉靓¹,陈潇¹,田野²

(1.开封大学,河南开封 475004; 2.哈尔滨商业大学,哈尔滨 150028)

摘要:目的 在不改变螺杆转速和外径的前提下,对已有包装机的计量螺杆结构参数进行优化设计,提高计量螺杆的输送效率。方法 构建螺杆的输送能力模型,并分析颗粒在计量螺杆内部的运动速度。通 过电镜显微镜观测典型物料颗粒微观形貌,在离散元仿真环境中构建颗粒形貌,并模拟粉状物料的计量 输送过程。通过比对不同结构参数的计量螺杆输送能力,得到初选结构参数,基于粒子群优化算法得到 螺杆最佳结构参数,通过仿真模拟方法对优化后的计量螺杆输送能力进行比对验证。结果 优化后的计 量螺杆对粉状物料输送速度为 358.79 mm/s,输送效率提高了 7.44%。结论 通过优化结构参数和仿真模 拟结合的方法,提高了粉状物料计量螺杆的输送效率,为工业企业计量螺杆的设计和加工提供基础数据 参考。

关键词:螺杆优化; 仿真模拟; 算法优化; 设计 中图分类号: TB482.2; TH122 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)05-0181-07 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.05.023

Optimal Design of Structural Parameters of Metering Screw in Powder Packaging Machine

LIN Ji-jing¹, CHEN Xiao¹, TIAN Ye²

(1. Kaifeng University, Henan Kaifeng 475004, China; 2. Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the design of structural parameters of metering screw in packaging machine and improve the conveying efficiency of metering screw without changing its speed and outer diameter. The conveying capacity model of the screw was established and the movement velocity of particles in the metering screw was analyzed. The typical particle morphology was observed by electron microscope. Then, the particle morphology was constructed in discrete element simulation environment, and the measurement and conveying process of powdery materials was simulated. The primary structural parameters were obtained by comparing the conveying capacity of metering screw with different structural parameters. The optimal structural parameters of screw were obtained based on particle swarm optimization algorithm, and the conveying capacity of optimized metering screw was compared and verified by simulation method. The conveying speed of optimized metering screw for powdery materials was 358.79 mm/s, and the conveying efficiency increased by 7.44%. The conveying efficiency of metering screw for powdery materials is improved by optimizing structural parameters and combining simulation, which provides basic data reference for design and processing of metering screw in industrial enterprises.

KEY WORDS: screw optimization; simulation; optimization by algorithm; design

收稿日期: 2022-05-05

通信作者:田野(1981-),男,博士,教授,主要研究方向为智能包装机械。

基金项目:开封市新型农机装备研发创新型科技团队横向项目;河南省科技发展计划项目(202102110272);黑龙江省自 然科学基金(LH2020E027)

作者简介:林吉靓(1979-),女,硕士,副教授,主要研究方向为机械设计、农业机械。

由于螺杆计量方式具有结构简单、维修保养方 便、成本低等特点,目前国内外的食品和药品的生产 企业普遍采用螺杆计量包装机对粉末状和颗粒状物 料进行计量包装。

通过对螺杆的结构参数进行设计可提高其输送 效率和精度。对螺杆的螺距进行设计可改变螺旋叶片 间的粉体物料密实度,从而提高单位转速上物料的输 送效率^[1]。针对流动性和黏度不同的粉体,提出了异 型螺杆结构,对螺杆的螺旋升角、底径、螺距、齿 形、尾部头数等结构参数进行设计,不仅能保证粉 体输送的送料稳定性,还能提高螺杆的分装速度和 装量精度^[2-4]。通过对螺杆结构参数的研究可知,螺 杆的螺距、分量孔的尺寸以及粉料的物性都会对粉料 包装的效率和精度产生较大影响^[5-6]。

借助计算机 CAE 软件的分析功能可对螺杆的性 能进行改进和优化。利用 ABAQUS 软件的非线性计 算能力可分析不同工况下螺杆的压力载荷,证明螺 杆运行过程中的热形变对螺杆挤压性能的影响[7]。通 过比较有限元软件计算的固有频率和实测频率,可 对频率项进行敏感度分析,使用设计参数修改方法 可对该参数进行优化设计和修正^[8]。通过有限元方法 分析搅拌桨对相应物料推送、搅拌和灌装的影响, 提高了黏稠液体物料的混合效率[9-10]。考虑黏稠物料 的流动特性可采用流体力学软件,设计确定影响水 平输送螺杆的结构参数,并获得最佳质量时的几何 参数^[11]。基于 HyperMorph 对主动辊筒的结构形状进 行拓扑优化,改进辊筒辐板的力学性能,优化后其 结构不仅轻量化还可抑制振动^[12]。Kothalkar 等^[13]通 过改变料斗侧壁坡角的试验确定其对粉体流量的影 响。Keisuke 等^[14]利用 X 射线可视化技术,在图像处 理技术的帮助下,实现了粉末在螺旋给料机中流动 扩散系数的测量。

螺杆的结构参数直接影响物料的输送效率和计 量精度,利用仿真软件和优化算法得到最优的螺杆结 构参数,在功率和转速相同的情况下比较其计量输送 效率。

1 计量螺杆的输送能力模型构建

计量螺杆的输送效率和螺杆的尺寸参数有关,当 转速一定时,相同时间内螺杆的外径、内径越大,螺 距越长,输送的物料就越多。由于计量速度与螺杆计 量能力成正比,因此,计量螺杆的内外径、螺距是否 合理,极大地影响粉体计量误差。

目前某医药企业采用的计量螺杆最大直径为40mm, 螺杆结构参数设置如图1所示,S为螺杆螺距,H为螺 杆槽深。

计量螺杆的输送能力
$$Q$$
表达式见式(1)。
 $Q = \rho A v$ (1)

式中: *ρ* 为物料的密度; *A* 为计量螺杆的截面积; *v* 为螺杆的进给速度。当输送的物料和螺杆的转速确 定时,输送能力由螺杆的结构参数确定。



图 1 螺杆的结构参数 Fig.1 Structural parameters of screw

计量螺杆的截面积 A 见式 (2)。

$$4 = \frac{\pi}{4} \left(D^2 - d^2 \right) - \frac{\delta H}{\sin \alpha} \tag{2}$$

式中:D为螺杆的外径;d为螺杆的内径; δ 为 螺杆叶片厚度;H为螺杆槽深; α 为螺旋升角。

计量螺杆的给料速度v见式(3)。

$$v = \frac{SAn}{60} \tag{3}$$

式中: *S*为螺杆螺距; *n*为螺杆转速。螺旋升角 与螺距之间的关系见式(4)。

$$\alpha = \arctan \frac{S}{\pi D} \tag{4}$$

整理后见式(5)。

$$Q = \rho \left[\frac{\pi}{4} \left(D^2 - d^2 \right) - \frac{\delta H}{\sin \alpha} \right]^2 \frac{Sn}{60} = k \left[\frac{\pi}{4} \left(D^2 - d^2 \right) - \frac{\delta H}{\sin \alpha} \right]^2 S$$
(5)

式中: *k* 为常数项系数,其根据具体物料和螺杆转速确定,再联立式(4)和式(5),物料的输送能力 *Q* 计算见式(6)。

$$Q = k \left\{ \frac{\pi}{4} \left[D^2 - \left(D - H \right)^2 \right] - \frac{\delta H}{\sin\left(\arctan\frac{S}{\pi D} \right)} \right\}^2 S \quad (6)$$

由式(6)可知,当物料和螺杆的转速确定时, 物料的输送能力取决于螺杆的槽深及螺杆的螺距。

2 粉状物料在计量螺杆内的运动速 度分析

螺旋输送机在输送物料过程中,物料的运动由于 受旋转螺旋的影响,其运动并非单纯的沿轴线做直线 运动,颗粒物料在自身重力,螺旋叶片法向推力以及 摩擦力的共同作用下作空间复合运动。将螺旋槽中的 单个物料颗粒作为研究对象,颗粒的运动速度矢量图 见图 2。



图 2 颗粒速度矢量图 Fig.2 Vector diagram of particle velocity

图 2 中, v_t为计量螺杆对颗粒的周向牵连运动速度, 其表达式见式(7)。

$$v_{\rm t} = \frac{\omega d_{\rm c}}{2} \tag{7}$$

式中: ω 为螺杆的旋转的角速度; d_c 为颗粒的直径。 计量螺杆内颗粒的绝对运动速度 v_a 的表达式见式(8)。 $\vec{v_a} = \vec{v_t} + \vec{v_z} + \vec{v_r}$ (8)

式中: v_z为计量螺杆对颗粒的轴向牵连运动速 度; v_r为计量螺杆内颗粒相对于螺旋面的滑动速度。

将得到的颗粒绝对速度进行分解,如图3所示。



图 3 颗粒绝对速度分解 Fig.3 Decomposition of particle absolute velocity

颗粒绝对速度分解满足以下关系:

 $v_{\rm h} = \omega_{\rm l} r_{\rm c} \tag{9}$

 $v_{v} = \omega_{1}r_{c}\tan\beta = \omega_{2}r_{c}\tan\alpha + v_{z}$ (10) $\omega_{1} = \omega - \omega_{2}$ (11)

$$\omega_1 = \omega - \omega_2$$

式中: α_i 为螺杆槽内颗粒旋转的绝对角速度; α_i 为螺旋面相对于颗粒的旋转角速度; v_h 为颗粒绝对速 度的周向分量; v_v 为颗粒绝对速度的轴向分量; α 为 v_a 与水平方向的夹角; β 为 v_r 与水平方向的夹角。

3 粉体物料微观形貌表征

为了对粉体物料的运动特性进行研究,需要对物料的粒径分布进行分析,以某品牌的膳食纤维粉为研

究对象,通过激光粒度仪对其进行测量,测量参数见表 1。图 4 为膳食纤维粉体的粒径分布曲线。通过测量结果可知,膳食纤维粉体的中位径为 116.9 μm。

表 1 膳食纤维粉体粒径测量参数 Tab.1 Particle size measurement parameters of dietary fiber powder

测量参数	数值
中位径/µm	116.9
跨度	1.874
体积平均径/µm	122.9
长度平均径/µm	5.721
面积平均径/μm	34.92
比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	63.63
遮光率/%	6.42
拟合残差/%	4.659



图 4 膳食纤维粉体粒径分布 Fig.4 Particle size distribution of dietary fiber powder

为了对颗粒形貌进行模拟,使用电镜(SEM)观察膳食纤维粉体颗粒的表面微观形貌,其图像如图5 所示。由图5可以看出,膳食纤维粉体团聚现象明显, 且表面形貌不规则,粒径分布并不均匀,因此在设置 粉体粒径大小时,参考膳食纤维的中位径作为仿真模 拟的均值粒径。

4 粉体物料计量螺杆的仿真模拟

图 6a 为电镜下观测到的颗粒形貌,以实际颗粒 形貌边缘轮廓特征作为基础,在仿真软件中通过多种 尺度粒径颗粒叠加的方式对颗粒进行重构,如图 6b 所示,多个颗粒组合后的整体即为重构的模拟颗粒, 重构颗粒的等效体积直径为 116.9 μm。



a 区域1

b 区域2

图 5 膳食纤维表面微观形貌 Fig.5 Microscopic morphology of dietary fiber surface



a 电镜下颗粒形貌



图 6 模拟颗粒形貌构建 Fig.6 Construction of simulated particle morphology

为了设计适用于大多数粉体颗粒输送的螺杆,将 螺杆的外径固定为40mm。探究螺杆结构参数对粉体物 料输送能力的影响,设置螺杆的不同结构参数,利用建 模软件对不同结构参数的螺杆进行建模,通过改变螺杆 的槽深*H*和螺距*S*,得到不同参数下的螺杆。分别设计 了9组不同槽深和螺距的螺杆,其具体参数如表2所示。

表 2 试验参数设置 Tab.2 Test parameter settings					
试验组	槽深 H/mm	螺距 S/mm			
1	5	20			
2	5	30			
3	5	40			
4	10	20			
5	10	30			
6	10	40			
7	15	20			
8	15	30			
9	15	40			

利用粉体仿真软件 EDEM 对物料输送状态进行 模拟,粉体物料为膳食纤维,螺杆材料为 304 不锈 钢,物料的填充效率在水平状态下设置为 0.5,物料 的综合系数、物料的综合特性系数以及螺杆的最大 转速参考相关标准^[15],其仿真部分物理参数如表 3 所示。

表 3 粉状物料和螺杆物理参数 Tab.3 Powdery material and physical parameters of screw

仿真项目	泊松比	密度/ (g·cm ⁻³)	剪切模量/ GPa	恢复系数
粉状物料	0.25	0.52	0.01	0.42
螺杆	0.3	7.93	74.6	0.6

粉状物料在不同槽深的计量螺杆中输送状态如 图 7 所示。当颗粒不断生成后,螺杆将颗粒输送至出 料口,不同结构参数的螺杆在相同转速下的物料速度 是不同的,通过比较物料在螺杆中的平均运动速度, 确定最佳的螺杆尺寸参数。





将不同结构参数的螺杆输送粉体的速度数据绘制 成曲线,如图 8 所示。由图 8 可以看出,颗粒在输送的 过程中速度呈现规律的波动,当槽深为 10 mm,螺距为 40 mm 时,输送的粉状物料平均输送速度最大。

选取1s以后粉料输送速度数据,得到输送过程中 的平均速度如表4所示,第6组试验中槽深为10mm、螺 距为40mm时,颗粒输送的平均速度最高为333.95mm/s。 将1、2、3组,4、5、6组和7、8、9组分别作为3 个试验大组可以看出,颗粒输送的平均速度随着螺距 的增加而增大。



图 8 不同结构螺杆输送粉料速度曲线 Fig.8 Curves of powder conveying by screws of different structures

different structural parameters					
试验组	槽深 H/mm	螺距 S/mm	平均速度		
		·承山 D/IIIII	$\overline{v}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$		
1	5	20	200.20		
2	5	30	249.13		
3	5	40	307.88		
4	10	20	218.44		
5	10	30	193.93		
6	10	40	333.95		
7	15	20	191.11		
8	15	30	244.25		
9	15	40	299.25		

表 4 不同结构参数下颗粒输送平均速度 Tab 4 Average particle conveying speed under

5 算法优化设计

通过 EDEM 对多组不同结构参数的计量螺杆仿 真模拟结果可知,当螺杆的槽深为 10 mm、螺距为 40 mm 时,粉状物料的平均输送速度最高,但参数选 择只能是根据经验选择,因此需要利用粒子群优化算 法寻找最佳的螺杆参数。

由表 4 可知, 螺距越大, 颗粒输送平均速度越高, 槽深对粉料的输送主要体现在对粉料的容纳能力上, 因此将槽深计算域设置为[5,15],将螺距的计算域设 置为[35,60]。

优化算法中将螺杆的槽深和螺距作为变量,获得 包含槽深和螺距变量的目标函数。

通过粒子群优化算法得到螺距和槽深所对应的目标函数关系曲线,见图 9。由图 9 可以看出,目标函数的拐点处对应的槽深为 10.65 mm、螺距为 49.3 mm。

基于优化后的槽深和螺距结构参数,建立计量螺 杆的三维模型如图 10 所示。





图 10 粒子群算法优化后螺杆参数 Fig.10 Screw parameters optimized by particle swarm algorithm

为了验证优化后的计量螺杆对粉状料的输送能力,将其三维模型输入仿真模拟软件中,得到其输送的速度曲线。设置最佳参数和粒子群算法优化后参数的颗粒输送速度图像对比见图 11,由图 11 可以看出, 粒子群算法优化后的螺杆在输送颗粒物料时,颗粒的输送速度相对较快。



图 11 算法优化参数与设置最佳参数对比 Fig.11 Comparison of parameters optimized by algorithm and set optimal parameters

选取 1 s 后颗粒输送速度稳定后的图像数据,得 到 2 组试验螺杆输送颗粒的平均速度,颗粒输送的平 均速度分别为 333.95、358.79 mm/s,其螺杆参数输 送速度提高了 7.44%。

6 结语

文中基于已有螺杆计量包装机结构尺寸,在外径 和转速不变的前提下,对螺杆的结构参数进行优化, 得到以下结论:

1)建立了颗粒物料在计量螺杆内的运动速度模型和计量螺杆的输送量模型。

2)基于颗粒微观形貌仿真模拟了粉料计量输送 过程,得到槽深和螺距对物料输送效率影响较大。 3)基于粒子群优化算法对计量螺杆结构参数进 行了优化设计,算法优化后的计量螺杆对粉状物料输 送的效率提高了 7.44%。

参考文献:

- 王震民,李永祥,徐雪萌. 粉体密实变螺距螺杆结构 设计与仿真分析[J]. 包装工程, 2020, 41(23): 172-178.
 WANG Zhen-min, LI Yong-xiang, XU Xue-meng. Structural Design and Simulation Analysis of Powder Compact Pitch Screw[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(23): 172-178.
- [2] 东时,远中杰.提高螺杆式计量装置装量精度的途径 与方法[J]. 机电信息, 2008(29): 26-28.
 DONG Shi, YUAN Zhong-jie. Ways and Methods to Improve the Loading Accuracy of Screw Measuring Device[J]. Electromechanical Information, 2008(29): 26-28.
- [3] 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 Precise Metering System of Powder Packaging[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017.
- [4] 郝友莉. 粉体包装螺旋式密实输送研究[D]. 无锡: 江 南大学, 2017.
 HAO You-li. Study on Spiral Dense Conveying of Powder Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [5] 张淑芬, 袁方. 影响螺杆分装机装量因素[J]. 黑龙江 医药, 2000, 13(3): 151.
 ZHANG Shu-fen, YUAN Fang. Factor Affecting Load Capacity of Screw Sub-Loader[J]. Heilongjiang Medical Journal, 2000, 13(3): 151.
- [6] FU Ping, LI Shan-hu, WANG Chuan-sheng. Screw Conveyor Design and Processing in Rubber Production[J]. Advanced Materials Research, 2011(221): 394-398.
- [7] 张培建,邢鸿雁,卫静怡.基于热固耦合的双螺杆挤 压机机筒有限元分析[J].包装工程,2022,43(7): 218-224.

ZHANG Pei-jian, XING Hong-yan, WEI Jing-yi. Finite Element Analysis of Twin-Screw Extruder Cylinder Based on Thermo-Mechanical Coupling[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 218-224.

- [8] 景银萍,崔志琴,刘贞,等.复杂机械结构动力学参数优化设计[J].包装工程,2017,38(3):95-99.
 JING Yin-ping, CUI Zhi-qin, LIU Zhen, et al. Optimization Design of Dynamic Parameters for Complex Mechanical Structure[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 95-99.
- [9] 冯砚博,由海田,陈博,等.小型粘性物料灌装混拌 机搅拌桨结构优化设计[J].包装工程,2021,42(3): 164-170.

FENG Yan-bo, YOU Hai-tian, CHEN Bo, et al. Optimal Design of Stirring Paddle Structure of Small Viscous Material Filling and Mixing Machine[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 164-170.

- [10] 冯砚博, 宋晓倩, 于瑞凤, 等. 小型粘性物料混合输送机构设计[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 126-130.
 FENG Yan-bo, SONG Xiao-qian, YU Rui-feng, et al. Design of Small Viscous Material Mixing and Conveying Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 126-130.
- [11] 周丹, 王利强, 方先其, 等. 基于 Ansys Fluent 的超细 粉阀口袋包装水平输送螺杆设计[J]. 中国粉体技术, 2020, 26(5): 54-59.

ZHOU Dan, WANG Li-qiang, FANG Xian-qi, et al. Design of Horizontal Conveying Screw for Valve Pocket Packing of Ultrafine Powder Based on Ansys Fluent[J]. China Powder Science and Technology, 2020, 26(5): 54-59.

[12] 于宁波,黄中玉.基于结构优化技术的皮带输送机辊 简性能改进[J].包装工程,2019,40(23):156-161. YU Ning-bo, HUANG Zhong-yu. Performance Improvement of Belt Conveyor Roller Based on Structural Optimization Technology[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(23): 156-161.

- [13] KOTHALKAR C, MODAK D J, TATWAWADI D V H. Variable Dispensing Capacity Screw Feeder Based Powder Dispenser: Improving the Design by Studying the Effect of the Hopper Side Wall Slope(φs) on Performance of the Dispenser[J]. A.C. Dey1International Journal of Engineering Research & Technology, 2013, 2(8): 181-190.
- [14] KEISUKE U, KOJI O. Measurement TechniquE on the Diffusion Coefficient Of Powder Flow in a Screw Feeder by X-ray Visualization[J]. Powder Technology, 2008, 187(2): 138-145.
- [15] 向冬枝, 徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定
 [J]. 水泥技术, 2010(1): 29-33.
 XIANG Dong-zhi, XU Yu-wei. Design Parameter Selection of Spiral Conveyer[J]. Cement Technology, 2010(1): 29-33.

责任编辑:曾钰婵