

变螺距螺旋结构的螺距设计与仿真分析

李飞翔, 李永祥, 徐雪萌, 唐静静, 孟坤鹏, 陈静

(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450001)

摘要: **目的** 针对变距螺旋主要以经验设计为主, 缺乏系统设计方法的问题, 提出一种函数拟合法。**方法** 首先以二次函数 $y=Ax^2+Bx$ 对变距展开线进行初始拟合, 考虑进料段螺旋变距的均匀变化, 再以线性函数 $y=Ax+B$ 进行二次拟合。根据线性拟合结果, 采用粒径为 1.5 mm 的小米物料对等距和变距螺旋进行离散元仿真。**结果** 得到了进料段变距设计方案, $S_1=0.4D$, $S_2=0.56D$, $S_3=0.72D$, $S_4=0.8D$ 。相比等螺距, 在相同转速及外径下, 变距螺旋进料段下料均匀, 输送稳定, 质量流量与实际流量相对误差为 1.8%。**结论** 验证了变距设计的合理性, 可为变距螺旋研究提供参考。

关键词: 螺旋输送; 变螺距; 函数拟合; 离散元; 质量流量

中图分类号: TB484.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)13-0214-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.13.031

Pitch Design and Simulation Analysis of Variable Pitch Spiral Structure

LI Fei-xiang, LI Yong-xiang, XU Xue-meng, TANG Jing-jing, MENG Kun-peng, CHEN Jing

(School of Electromechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: This paper aims to propose a function fitting method to solve the problem that the variable pitch spiral structure is mainly based on empirical design and there is a lack of system design methods. First, the initial fitting of the variable-distance spiral expansion line was performed by the quadratic function $y=Ax^2+Bx$. Considering the uniform variation of the pitch-changing spiral of the feed section, the second function was performed by the linear function $y=Ax+B$. Based on the result of leaner fitting, discrete element of equidistant and variable pitch spirals was simulated with millet material with a particle size of 1.5 mm. The variable pitch design of the feed section was obtained as follows: $S_1=0.4D$, $S_2=0.56D$, $S_3=0.72D$, and $S_4=0.8D$. Compared with the equal pitch, at the same speed and blade outer diameter, the feeding section of the variable pitch spiral structure was relatively uniform, the conveying was relatively stable, and the relative error between the mass flow and the actual flow was 1.8%. The simulation results verify the rationality of the design of the variable pitch spiral structure, and have certain reference value for the study of the variable pitch spiral structure.

KEY WORDS: screw conveyor; variable pitch; function fitting; discrete element; mass flow

自动包装生产线上物料的输送与计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。国内外学者在改进

与优化螺旋体结构方面做了大量研究, 罗胜等针对螺旋加料装置加料不稳、能耗高的问题, 采用随机方向优化算法对加料装置的结构参数进行了优化^[1]; 余书

收稿日期: 2019-03-26

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

作者简介: 李飞翔(1992—), 男, 河南工业大学硕士生, 主攻粮食机械及理论。

通信作者: 徐雪萌(1972—), 女, 副教授, 主要研究方向为粮油食品包装工艺与装备。

豪针对以经验设计螺旋结构的局限性，采用相似理论与量纲分析推导了参数无量纲方程，并建立了螺旋输送参数设计的相似模型^[2]；CAI Jianghui 等基于粒子群算法，建立了螺旋参数优化模型，以输送产量为目标函数快捷地得到了参数最佳配置值^[3]。

传统等距螺旋输送装置，每段螺距都有相同的输送能力。在进料段，后段会被前段叶片向后推进的物料填满，导致后段不再接收料斗的下料，物料在料斗内出现压实的(死区)现象^[4]。采用变距螺旋可有效防止下料的不均性。目前，对变距设计的相关文献较少，变距结构还未有系统设计方法。宋亚英基于一定假设对变距螺旋结构参数进行理论研究，给出了变距螺旋的计算公式^[5]。张东海等以抛物线对变距展开线进行拟合，得出了变距螺旋进料段各圈螺距的具体计算公式^[6]。赵冬梅等针对变距螺旋结构设计，提出一种指数型拟合方法并建立了开发环境的变距设计界面^[7]。

文中根据文献^[5-7]假设和拟合方法，提出一种新的函数拟合法。首先以二次函数对变距展开线进行初始拟合，然后根据初始拟合结果，考虑进料段下料的均匀性，以线性函数进行二次拟合。根据拟合结果建立变距三维模型，以粒径 1.5 mm 的小米物料对等距与变距螺旋进行离散元仿真，验证变距螺旋设计的合理性。

1 变螺距设计

1.1 理论基础

为有效防止料斗内物料的结拱，以便物料能沿螺旋轴向均匀下料，进料段采用变距设计。变距与螺旋轴交线展开是一条曲线，曲线斜率随螺距增加而增加。为保证物料的稳定输送，进料段最后留一圈等螺距，可知最后一圈展开后的斜率即等螺距展开斜率。变距展开曲线见图 1。

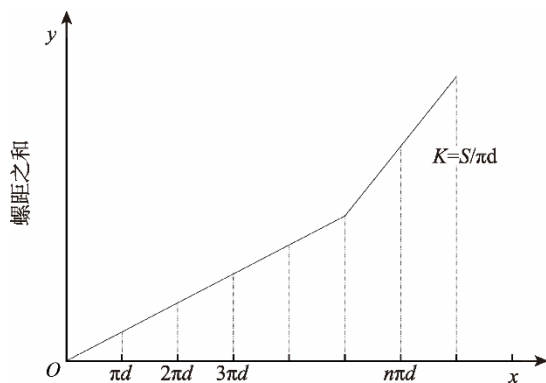


图 1 变螺距展开曲线
Fig.1 Expanded variable-pitch curve

由图 1 中曲线变化趋势可知，变距与螺旋轴交线在沿每一螺距不断增加，需采用函数拟合得到螺距

值，若采用开口向上的二次函数进行拟合，设螺旋体进料段共有 n 个变螺距， l 个等螺距，第 n 个螺距与螺旋轴的相交线展开后曲线的切线应与等螺距重合，第 n 个螺距对应曲线切线的斜率是：

$$k = \frac{S}{\pi d} \tag{1}$$

式中： S 为等螺距值； d 为螺旋轴径。

1.2 二次函数拟合

采用开口向上过原点的二次函数对螺距展开线进行拟合，设：

$$y = Ax^2 + Bx (B \neq 0) \tag{2}$$

式中： y 为各段螺距对应的螺距之和； x 为螺旋轴回转长度与段数乘积。将式 (2) 对 x 进行求导，得：

$$y' = 2Ax + B \tag{3}$$

在 $x = n\pi d$ 时，由式 (1) 和 (3) 可知：

$$2A \times n\pi d + B = \frac{S}{\pi d} \tag{4}$$

设当 $x = m\pi d$ 时， $y = kS$ ，则：

$$kS = A(m\pi d)^2 + Bm\pi d \tag{5}$$

结合式 (4) 和 (5) 求解可得：

$$A = \frac{m - k}{m(2n - m)} \cdot \frac{S}{(\pi d)^2} \tag{6}$$

$$B = \frac{2nk - m^2}{m(2n - m)} \cdot \frac{S}{\pi d} \tag{7}$$

综上可得曲线方程为：

$$y = \frac{m - k}{m(2n - m)} \cdot \frac{S}{(\pi d)^2} x^2 + \frac{2nk - m^2}{m(2n - m)} \cdot \frac{S}{\pi d} x \tag{8}$$

由于 $S_n = y_n - y_{n-1}$ ，可知：

$$S_n = \frac{2nm - m + k - m^2}{m(2n - m)} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \tag{9}$$

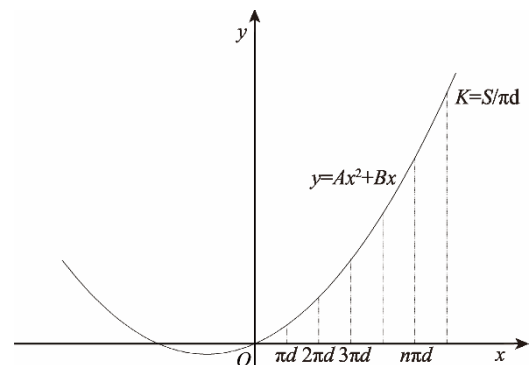


图 2 二次函数初始拟合
Fig.2 Initial fit of the quadratic function

采用开口向上过原点的二次函数拟合，可知 $-\frac{B}{2A} < 0$ ，表明 A 和 B 同号，曲线开口向上，可知

$A>0, B>0$: $A>0$, 可得 $k<m<2n$, n 最小值为 1, 可知 $k<m<2$, m 为整数, 取 $m=1$; $B>0$, 可得 $2nk-m^2>0$, 可知, $k>1/2n$, n 最小值为 1, 可得 $0.5\leq k<1$.

$m=1$, 首端螺距取较小值 $k=0.5$, 可知:

$$S_n = 1 - \frac{1}{4n-2} \quad (10)$$

根据式 (10) 可知, 从 $n=4$ 开始, 前段螺距与后段螺距间差值在 $0.01S$, 由此进料段取 4 圈变距进行分析, 可知各段螺距与标准螺距间的比例关系为: $S_1=0.5S, S_2=0.83S, S_3=0.9S, S_4=0.93S$.

1.3 线性函数拟合

为使进料口下料均匀及变距螺旋输送稳定, 变距螺旋设计中应考虑螺距间的均匀变化, 为此, 采用线性函数进行二次拟合。

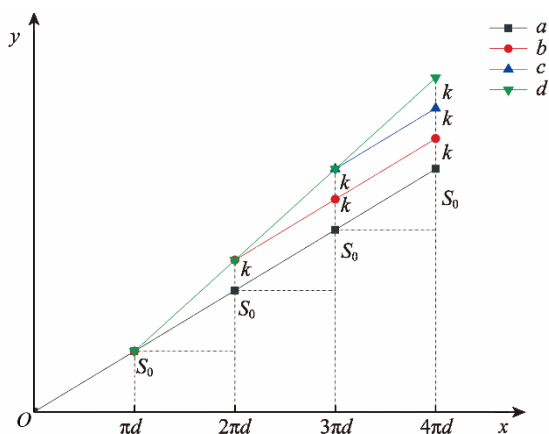


图3 线性函数的二次拟合
Fig.3 Quadratic fitting of linear functions

针对各螺距间的均匀变化, 设各螺距间以 k 值递增, 见图 3, d 呈线性变化, 以线性函数 $y=Ax+B$ 进行拟合。设初始螺距 $S_1=S_0$, 可知 $S_2=S_0+k, S_3=S_0+2k, S_4=S_0+3k$ 。由式 (10) 可知, 要使 $S_n=S$, n 需趋于无穷大, 从 $n=4$ 开始, 前段螺距与后段螺距间差值在 $0.01S$, 可近似取最后一圈 ($n=4$) 螺距为等螺距 S_0 。可知各段螺距与标准螺距间的比例关系为: $S_1=0.5S, S_2=0.83S, S_3=0.9S, S_4=S$ 。则进料段总螺距之和为:

$$S_{\text{sum}} = 0.5S + 0.83S + 0.9S + S = 3.23S \quad (11)$$

各螺距以 k 值递增的螺距之和可表示为:

$$S_{\text{sum}} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = S_0 + S_0 + k + S_0 + 2k + S_0 + 3k = 2S + 6k \quad (12)$$

由式 (11) 和 (12) 可知:

$$3.23S = 2S + 6k \Rightarrow k = 0.205S$$

对 k 圆整取近似值: $k=0.2S$, 由此可得线性函数拟合下进料段各螺距值为:

$$S_1=0.5S, S_2=0.7S, S_3=0.9S, S_4=S \quad (13)$$

针对水平螺旋输送结构, 转化为螺距与螺旋外径的关系为:

$$S_1=0.4D, S_2=0.56D, S_3=0.72D, S_4=0.8D \quad (14)$$

2 设计实例与仿真分析

2.1 设计实例

已知输送物料为小米, 物料容重 $r=0.51 \text{ t/m}^3$, 物料综合特性系数 $A=65$, 物料填充率 $\phi=0.53$, 螺旋给料装置的生产率 $Q=2.04 \text{ t/h}$, 螺旋总长度 $L=800 \text{ mm}$, 螺旋转速 $n=200 \text{ r/min}$, 螺旋轴径 $d=30 \text{ mm}$, 倾斜输送修正系数 $C=1$, 螺旋叶片影响系数 $K=1$, 螺距 $S=0.8D$ 。

$$Q = 47D^2\phi S n \gamma C K \quad (15)$$

由式(15)可计算外径 $D=100 \text{ mm}$ 。根据式 (13—14) 计算可知: $S_1=0.540 \text{ mm}, S_2=56 \text{ mm}, S_3=72 \text{ mm}, S_4=80 \text{ mm}$ 。

在螺旋各段螺距设计中, 进料段按照拟合结果采用变距设计, 输送段还用等螺距, 在螺旋装置末端, 为减小螺旋脉动现象, 采用无叶片结构^[8-10]。利用 SolidWorks 软件建立三维模型, 为后续仿真做好铺垫。

2.2 仿真分析

2.2.1 仿真参数

考虑到仿真时间的局限性, 采用小米物料进行仿真试验。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^[11-12], 各仿真参数的取值如下: 小米的密度为 800 kg/m^3 , 泊松比为 0.25, 剪切模量为 52 MPa ; 不锈钢的密度为 7800 kg/m^3 , 泊松比为 0.3, 剪切模量为 70 GPa ; 小米-小米恢复系数为 0.35, 小米-小米静摩擦因数为 0.5, 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 0.5, 动摩擦因数为 0.05。

2.2.2 仿真模型

利用 SolidWorks 软件分别建立等距与变距螺旋装置的三维模型, 导入 EDEM 软件进行仿真。结合相关文献^[13-15], 料筒内径与叶片外径间隔 3 mm , 料斗高距料筒中心线 250 mm , 料斗上口口径长 300 mm , 宽 200 mm , 下口径长 300 mm , 宽 100 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 10 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, 三维模型见图 4。

2.2.3 等距螺旋流动状态分析

等距螺旋是包装输送中常用结构, 先以等距螺旋为例对料斗中物料运动状态进行分析。待仿真结束后, 采用后处理中的上色功能, 对物流进行着色处理^[16], 见图 5。

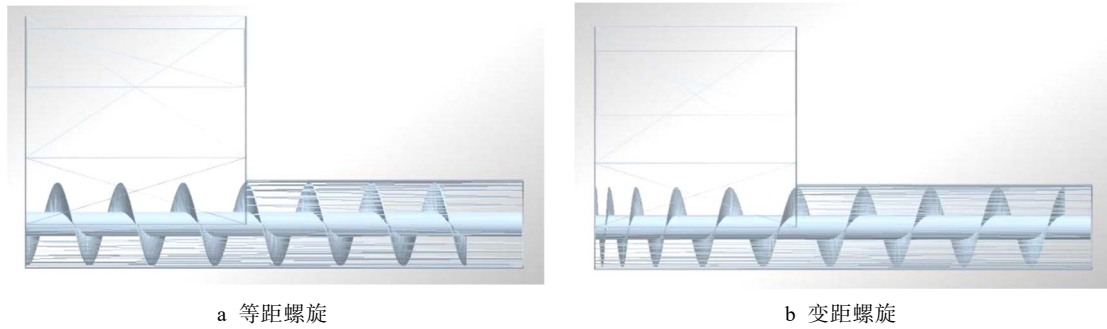


图 4 三维模型
Fig.4 3D model diagram

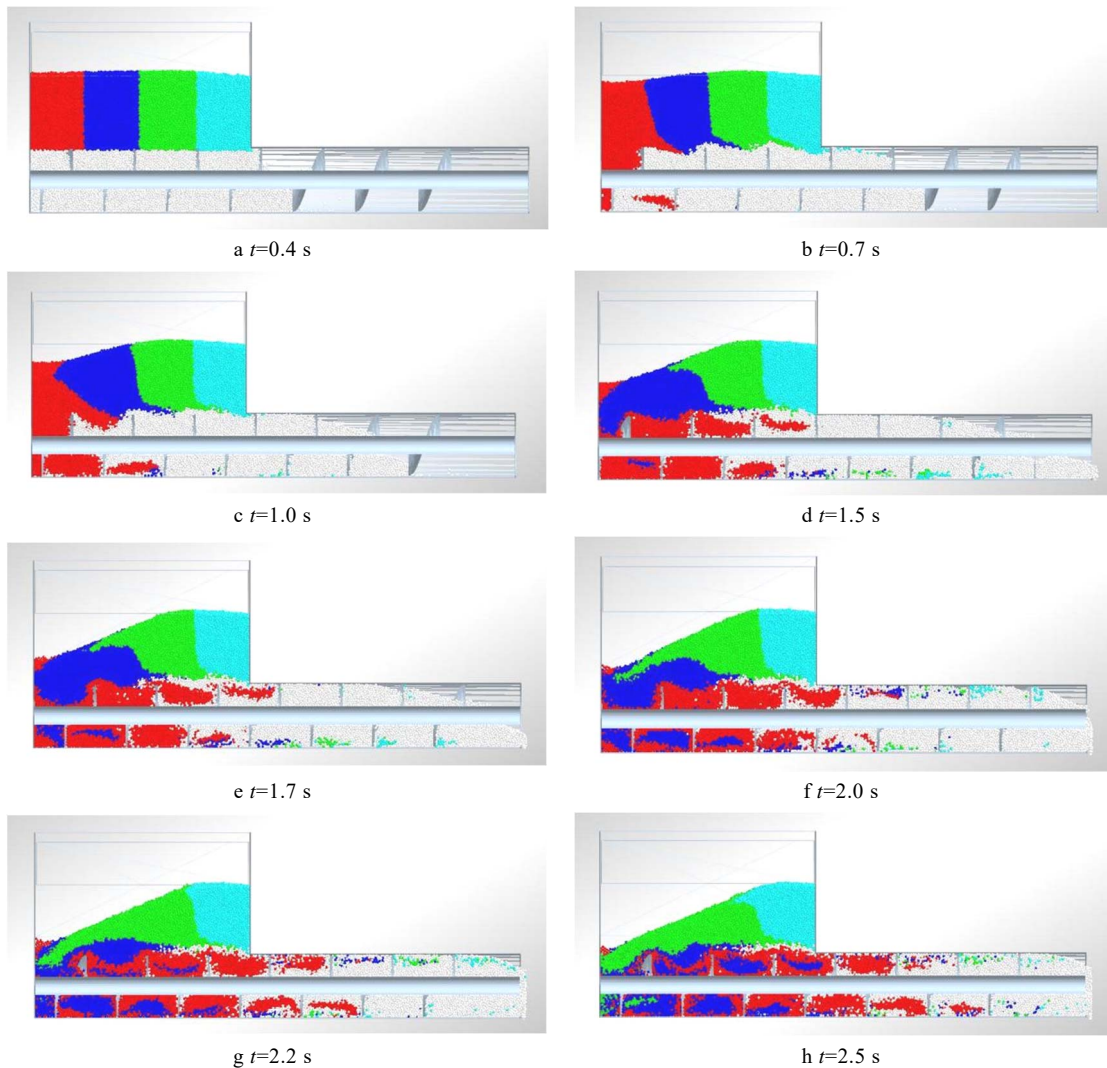


图 5 等螺距仿真
Fig.5 Simulation of equal pitch

如图 5a 所示，仿真开始时物料的快速填充过程经历了 0.4 s，分别以红色、蓝色、绿色、青色对料斗物料分带上色，用白色对料筒中物料上色。初始输送阶段，红色物料开始进入首圈螺距，其他色带没有下落迹象，见图 5b。如图 5c 所示，红色大量红色物料进入料筒，料斗内顶部物料线由水平开始变得倾斜，蓝色物料有明显向首圈螺距移动的趋势。如图 5d 所

示，红色物料除了被挤压在端壁的少许外，基本完全进入料筒。蓝色物料开始进入料筒，绿色呈现出向首圈螺距移动的趋势。青色带物料基本处于垂直状态。如图 5e 所示，原始料筒中的白色物料基本被输送出进料段，大量蓝色物料进入料筒。如图 5f 所示，蓝色物料完全进入料筒，此时料筒中处于蓝色与红色混合状态，绿色物料朝向首圈螺距的趋势更加明显，青

色物料还是基本处于垂直状态。如图 5g 所示，绿色物料开始进入料筒，白色物料已完全被输送出进料段。如图 5h 所示，绿色物料已进入料筒，此时料筒内处于绿色、蓝色、红色物料混合状态，青色物料稍有朝向首圈螺距的趋势。

2.2.4 等距螺旋速度分析

结合流动分析图，对等距螺旋速度进行分析。采用后处理中上色功能对物料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，较小值标记为绿色，见图 6。

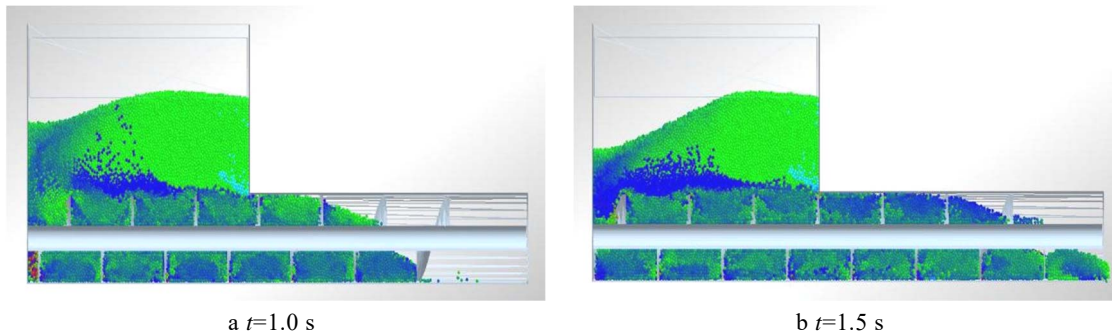


图 6 等螺距速度分析
Fig.6 Velocity analysis of equal pitch

首圈螺距处有红色物料，向上蓝色物料看似倾斜漏斗状，首圈有吸引料斗物料的趋势，见图 6a。在物料进入首圈螺距的始端，有大量蓝色物料，此时料斗内物料的倾斜面明显加大，料筒内由于螺旋的旋转，蓝色与绿色物料处于均匀混合状态，见图 6b。

2.2.5 等距螺旋质量流量分析

质量流量是评价螺旋输送装置性能的重要指标，先对等距螺旋质量流量进行分析。待仿真结束后，去除物料充填时间段，采用 2 个输送稳定时间段对料筒末端口的质量流量进行采集，结果见图 7。

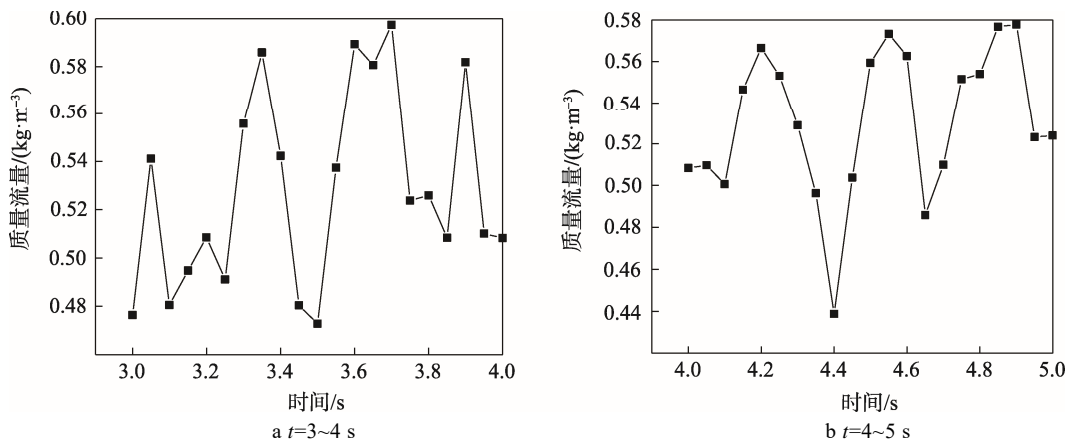


图 7 等螺距质量流量检测
Fig.7 Mass flow rate of equal pitch

由图 7 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，在螺旋一圈的时间里，单位转角呈现不同下料量。等距螺旋物料平均质量流量为 0.53 kg/s，与实际质量流量误差为 6.2%。

2.2.6 变距螺旋二次拟合流动状态分析

根据线性函数二次拟合结果，利用 SolidWorks 软件建立相同外径的变距螺旋结构模型，导入 EDEM 软件设置螺旋体相同转速进行仿真模拟，仿真结果见图 8。

如图 8a 所示，采用与等距螺旋相同的处理方式对变距螺旋体进行上色处理，观测物料的流动状态。图 8b 所示，相对等距螺旋，此时蓝色物料基本处于垂直状态，没有向首圈螺距流动的趋势。如图 8c 所示，料斗内物料开始出现轻微倾斜，蓝色物料稍有流向首圈螺距的趋势。如图 8d 所示，相对红色物料已基本完全进入料筒的等距螺旋，此时红色物料在料斗内还留有带条状，也有少许蓝色物料进入料筒。图 8e 所示，原始料筒物料已基本被输送出进料段，此时进料段为蓝色与红色的混合物料，绿色物料稍有朝向首圈螺距趋势，料斗中还留有明显的红色带。如图 8f 所示，相对等螺距，此时红色与蓝色物料并未完全

进入料筒，绿色物料有明显朝向首圈螺距趋势，青色物料基本处于垂直状态。

2.2.7 变距螺旋速度分析

结合流动分析图，对变距螺旋速度进行分析。采用后处理中上色功能对物料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，较小值标记为绿色，见图 9。

如图 9a 所示，此时首圈螺距处有少许红色物料，

蓝色物料不再呈现倾斜漏斗状，料斗中速度分布较为均匀，首圈吸引物料的趋势明显大有改善。如图 9b 所示，此时料斗内物料的倾斜面虽有明显增加，料斗物料的速度分布仍然均匀。

2.2.8 变距螺旋线性拟合质量流量分析

采用相同处理方式对质量流量进行检测，观察线性拟合下变距螺旋结构质量流量的变化趋势，检测结果见图 10。

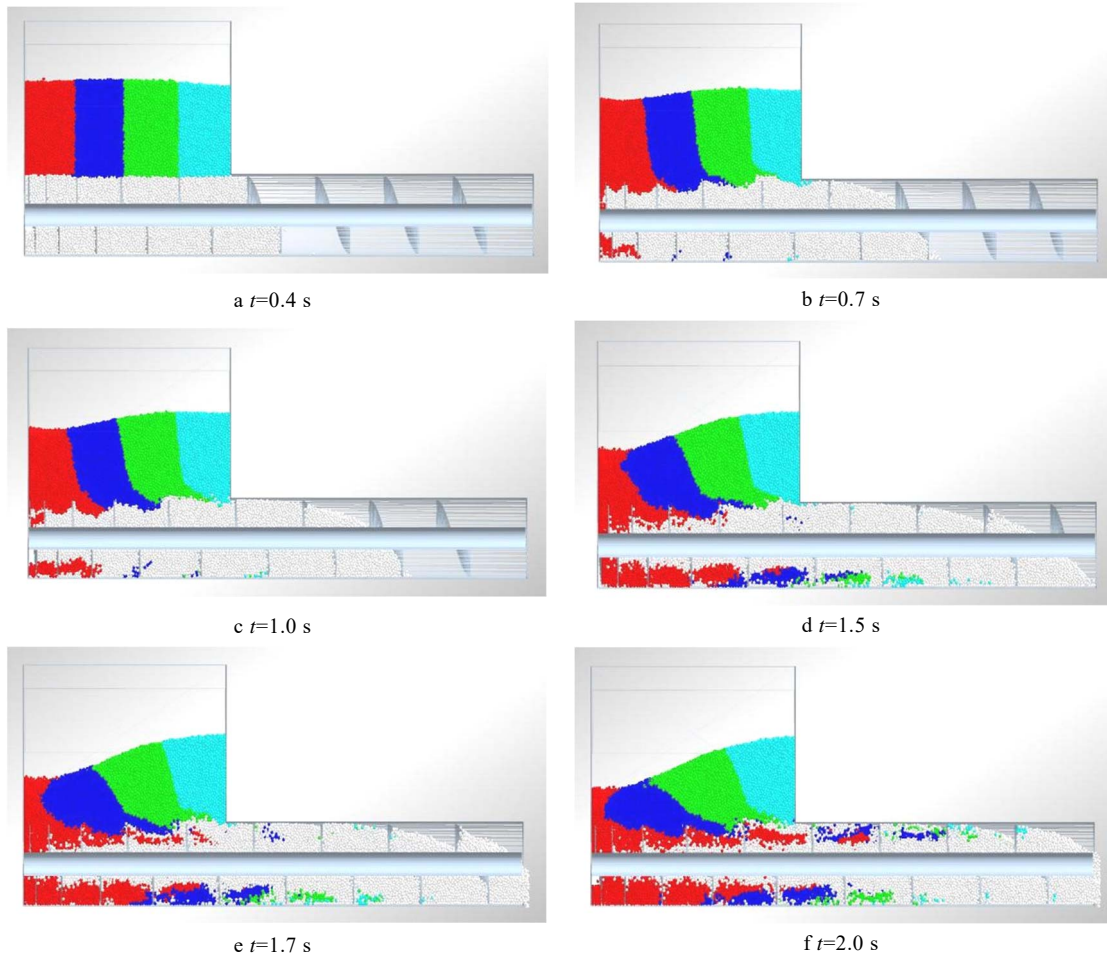


图 8 变螺距仿真
Fig.8 Simulation of variable pitch

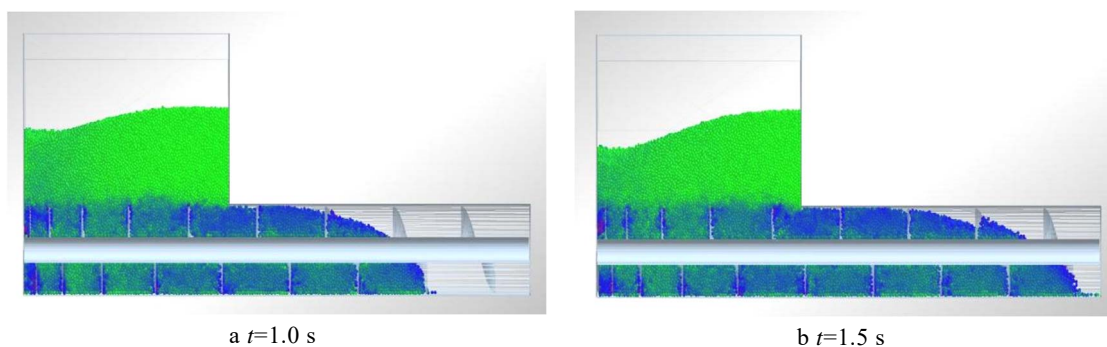


图 9 变螺距速度分析
Fig.9 Velocity analysis of variable pitch

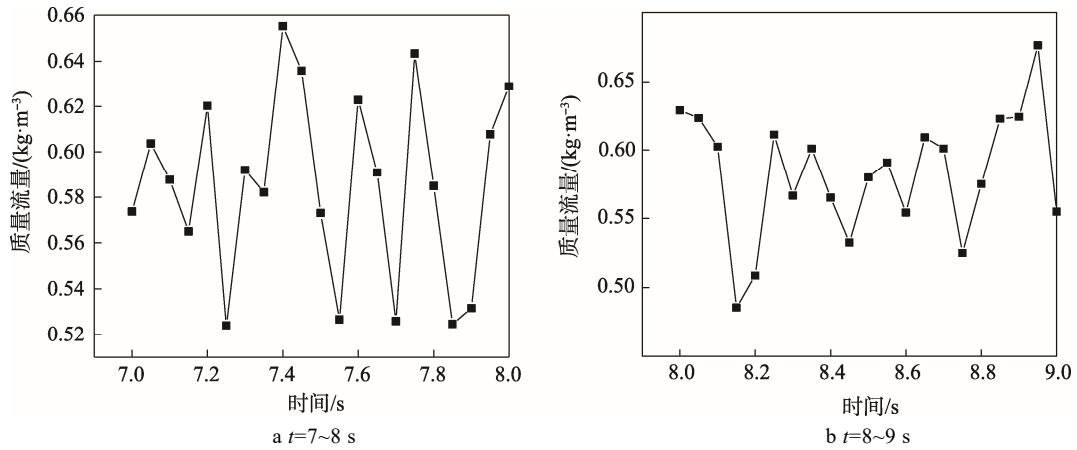


图 10 变距质量流量检测
Fig.10 Mass flow rate of variable pitch

由图 10 可知，质量流量随时间呈现波浪状，但波动范围明显减小，质量流量平均值为 0.575 kg/s，与实际质量流量误差为 1.8%，表明了变距螺旋的稳定与精确性。为进一步验证质量流量的稳定性，采用圆筒接收物料的形式，利用后处理中流量传感器对圆筒接收物料量进行检测，导出数据，绘制圆筒中物料质量随时间的变化趋势图，结果见图 11。

采用后处理中 Geometry bin 对物料质量流量进行采集，可知等距螺旋平均质量流量为 0.53 kg/s，与实际流量误差为 6.2%；变距螺旋平均质量流量为 0.58 kg/s，与实际流量误差为 1.8%。相比等螺距，变距螺旋质量流量与实际流量相差不大，验证了函数拟合的合理性，为变距螺旋结构设计提供了参考。

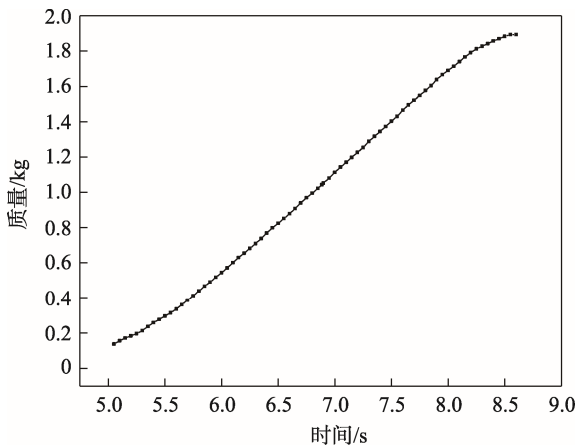


图 11 质量随时间的变化趋势
Fig.11 Mass-time curve

由图 11 可知，圆筒内质量随时间的变化趋势基本成线性变化，验证了变距螺旋结构输送量的稳定性。

3 结语

针对变距螺旋设计，提出一种函数拟合方法。先用二次函数 $y = Ax^2 + Bx$ 进行拟合，然后根据拟合结果，考虑螺旋螺距变化的均匀性，用线性函数 $y = Ax + B$ 进行二次拟合，得到拟合结果为 $S_1 = 0.4D$, $S_2 = 0.56D$, $S_3 = 0.72D$, $S_4 = 0.8D$ 。

对等距与变距螺旋进行离散元仿真可知，变距螺旋下料较为均匀，死区现象得到一定改善。

参考文献:

- [1] 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 Xi-liang, XU Jun, et al. Structural Optimization and Performance Simulation of Spiral Discontinuous Feeding Device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 250—257.
- [2] 余书豪. 垂直螺旋输送机性能参数的优化设计[J]. 机械设计与制造, 2015(11): 215—218.
YU Shu-hao. Optimization Design of Performance Parameters of Vertical Screw Conveyor[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(11): 215—218.
- [3] CAI Jiang-hui, MENG Wen-jun. A New Parameters Optimization Method for Screw Conveyor Based on PSO[C]. In: 2010 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. IEEE, 2010: 263—266.
- [4] 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 Hong-yun, ZHAO Jun. Design and Fabrication of Round Tube Screw Feeder[J]. Modern Flour Industry, 2014, 28(2): 16—19.
- [5] 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), 1996(4): 96—100.
SONG Ya-ying. Theoretical Study on Parameters of Variable Pitch Spiral Structure[J]. Journal of Suzhou University(Natural Science), 1996(4): 96—100.
- [6] 张东海. 螺旋输送机的优化研究[D]. 大连: 大连理

- 工大学, 2006.
- ZHANG Dong-hai. Optimization of Screw Conveyor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [7] 赵冬梅, 余书豪. 变螺距螺旋输送机的螺距设计与性能分析[J]. 机械设计与制造, 2018(6): 52—55.
- ZHAO Dong-mei, YU Shu-hao. Pitch Design and Performance Analysis of Variable Pitch Screw Conveyor[J]. Mechanical Design & Manufacturing, 2018(6): 52—55.
- [8] 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, 39(1): 27—29.
- LI Zhen-liang, FU Chang-jiang, LI Ya. Research on the Structure of Quantitative Screw Feeder[J]. Salt Industry and Chemical Industry, 2010, 39(1): 27—29.
- [9] 蒙贺伟, 高振江, 林海. 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 He-wei, GAO Zhen-jiang, LIN Hai. Design and Experiment of Precise Feeding and Feeding Device for Equal-diameter Variable Pitch Cows[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 103—107.
- [10] BATES L. Entrainment Patterns of Screw Hopper Dischargers[J]. Journal of Engineering for Industry, 1969, 91(2): 295—302.
- [11] 杨作梅, 孙静鑫, 郭玉明. 不同含水率对谷子籽粒压缩力学性质与摩擦特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 253—260.
- YANG Zuo-mei, SUN Jing-xin, GUO Yu-ming. Effects of Different Moisture Contents on Compressive Mechanical Properties and Friction Characteristics of Millet Seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 253—260.
- [12] 郝友莉, 唐正宁, 季婷婷. 粉体包装机密实输送螺杆的设计[J]. 轻工机械, 2017, 35(5): 12—15.
- HAO You-li, TANG Zheng-ning, JI Ting-ting. Design of Compact Conveying Screw for Powder Packaging Machine[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(5): 12—15.
- [13] PEZO, MILADA. Discrete Element Model of Particle Transport and Premixing Action in Modified Screw Conveyors[J]. Powder Technology, 2018, 336: 255—264.
- [14] 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.
- [15] WANG Shu-yan, et al. Numerical Simulation of Particle Flow Behavior in a Screw Conveyor Using the Discrete Element Method[J]. Particuology, 2019, 43: 137—148.
- [16] FERNANDEZ, JUSTIN W, CLEARY P W, et al. Effect of Screw Design on Hopper Drawdown of Spherical Particles in a Horizontal Screw Feeder[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(22): 5585—5601.