螺旋喂料器变径变螺旋结构设计与性能仿真分析

王特栋[1]，葛正浩[1]，赵向娟[2]，薛宇飞[1]，王琳[1]，狄琳杰[1]
（1.陕西科技大学 机电工程学院，西安 710021；2.青海大学 土木工程学院，西宁 810016）

摘要：目的 针对螺旋喂料器在日常工作中发生物料堵机的工况，分析堵机原因，寻求通过新的螺旋设计方法来缓解物料堵机的形成，提升螺旋喂料器的工作性能。**方法** 先通过常规定螺距设计方法进行定螺距螺旋结构设计，再利用等角圆锥螺旋线在喂料区进行变径变螺距结构设计，对 2 种设计结果利用 SolidWorks 进行建模，将定螺距螺旋模型与变径变螺距螺旋模型分别导入离散元仿真软件 EDEM 做性能仿真分析。**结果** 分析结果显示，变径变螺距喂料螺旋与定螺距喂料螺旋相比，喂料区料流均匀，无物料倾斜面形成，相同时间段内物料输送速率显著提升了 8.7%，物料质量流率显著提升了 12.2%。**结论** 喂料区变径变螺距的设计有效提高了料流的稳定性，使得喂料区前后料流均匀一致，从源头上解决了螺旋喂料器的堵机问题，同时在相同的设计需求下，提升了螺旋输送的传输效率，对解决螺旋喂料器堵机问题以及变径变螺距螺旋的结构设计具有参考意义。

关键词：变径变螺距；物料形态；物料输送速率；物料质量流率
中图分类号：TB486^{+}.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2023)07-0250-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.028

Design and Simulation Analysis of Variable Diameter and Variable Pitch Spiral Structure of Screw Feeders

WANG Te-dong[1], *GE Zheng-hao*[1], *ZHAO Xiang-juan*[2], *XUE Yu-fei*[1], *WANG Lin*[1], *DI Lin-jie*[1]

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. College of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the cause of blocking according to the working condition of material blocking in the daily work of screw feeders, seek new structural improvement methods to alleviate the formation of material blockage and improve the working performance of screw feeders. Firstly, the fixed pitch screw structure was designed through the conventional fixed pitch design method, and then the equiangular conical screw was used to design the variable diameter and variable pitch structure in the feeding area. The two design results were modeled by SolidWorks, and the fixed pitch screw model and variable diameter and variable pitch screw model were respectively imported into the discrete element simulation software EDEM for performance simulation analysis. The analysis results showed that compared with the fixed pitch feeding screw, the feed flow in the feeding area was uniform and there was no formation of material inclined plane. In the same time period, the material conveying rate was significantly increased by 8.7% and the material mass flow rate was significantly increased by 12.2%. The design of variable diameter and variable pitch in the feeding area effectively improves the stability of the material flow, makes the material flow in front and behind the feeding area uniform, solves the machine blocking problem of the screw feeder from the source, and improves the transmission efficiency of the screw conveyor under the same design requirements, which has reference significance for solving the machine blocking problem of the screw feeder and the structural design of the variable diameter and variable pitch screw.

KEY WORDS: variable diameter and variable pitch; material form; material conveying rate; material mass flow rate

收稿日期：2022−04−13
作者简介：王特栋（1997—），男，硕士生，主攻包装机械。
通信作者：葛正浩（1964—），男，博士，教授，主要研究方向为机械设计及理论。

螺旋喂料器由于其结构简单，运输性能可靠，广泛应用于包装机械、饲料机械、船舶运输、食品机械、农机工程等各种短距离喂料输送[1]以及高温物料喂料输送。定螺距螺旋结构喂料区域下料时极易发生堵机，造成生产停滞从而影响生产效率。目前，各行业多采用配置大功率驱动的方法来解决堵机问题，但势必会增加额外的能耗[2]并导致生产成本增加。目前，部分行业也出现了应用变螺距螺旋来缓解喂料器的堵机工况，但大多数都是根据设计者的经验进行设计制造，并没有形成完整统一的设计方法流程[3]。

在定螺距螺旋喂料器的正常工作过程中，喂料区后段叶片的容积空间被前端叶片旋转推进的物料填满，没有剩余空间来接受喂料区后段喂料，连续喂料将导致喂料区后段物料堆积，形成喂料区物料倾斜面，使螺旋结构受到额外的径向力，从而出现物料在料斗内压实的死区现象，进一步会造成喂料螺旋的堵机。解决螺旋喂料器堵机的关键就是保证喂料区前后螺旋的下料料流均匀,不出现物料堆积。喂料区采用变径变螺距设计，由于螺距从前到后依次增加，前段螺旋推进的物料并不能完全填满后段螺旋的容积空间，螺旋依然可以接收喂料区后段的持续喂料，可有效削减物料的压实堆积，从根源上减小消除喂料螺旋堵机的可能性。国内外研究学者在研究螺距优化设计方面也做了大量的理论研究，李飞翔等[4]结合二次函数拟合得出各段螺距与标准螺距间的比例关系：S_1=0.5S、S_2=0.83S、S_3=0.9S、S_4=0.93S。徐雪萌等[5]通过响应面优化设计得出S_1=0.35D、S_2=0.60D、S_3=0.85D、S_4=D。赵冬梅等[6]选用对数曲线拟合得到各段螺旋 $S_n=\dfrac{S}{\pi d}\mathrm{e}^{-(n-1)\pi d}(1-\mathrm{e}^{-\pi d})$。Cai 等[7]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。

1　螺旋喂料器机理分析与理论设计

1.1　螺旋喂料器主体结构与输送机理分析

螺旋喂料器主体结构如图 1 所示，主要包括螺旋叶片、螺旋轴以及喂料壳体。根据物料在输送螺旋中的位置将整个喂料螺旋区域划分为喂料区、阻碍区、出料区[8]。物料在单个螺旋输送过程中的受力边界如图 2 所示，主要包括驱动面的轴向驱动力、螺旋中的物料和料槽间隙中的物料在剪切面上的摩擦阻力、物料与芯轴之间的摩擦阻力、物料与尾面之间摩擦阻力以及物料与料槽表面的摩擦阻力[9]。

螺旋叶片上任一点的法线与螺旋轴线的夹角被定义为该点的螺旋升角 α。如图 3 所示，随着螺旋叶片直径的增大，螺旋升角减小。

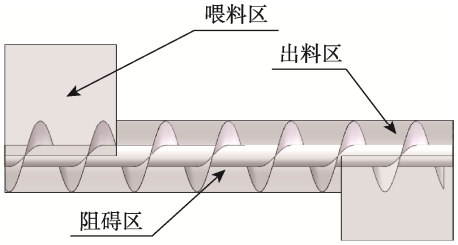


图 1　喂料螺旋结构
Fig.1 Structure of feeding screw

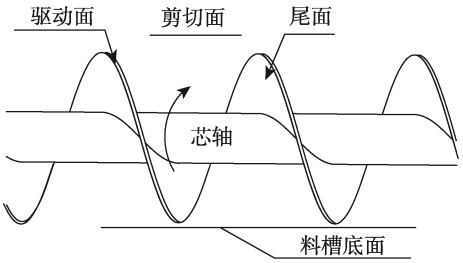


图 2　物料与螺旋边界面
Fig.2 Boundary surface of material and screw

$$\begin{cases}\alpha=\arctan\left(\dfrac{S}{\pi D_i^{\mathrm{a}}}\right)\\ \alpha_1=\arctan\left(\dfrac{S}{\pi D}\right)\\ \alpha_2=\arctan\left(\dfrac{S}{\pi d}\right)\end{cases}\tag{1}$$

式中：S 为喂料绞龙螺距，mm；D_i^{a} 为绞龙叶片某点的直径，mm；α_1 为螺旋外侧的螺旋升角；α_2 为螺旋内侧的螺旋升角；D 为螺旋叶片直径，mm；d 为螺旋轴直径，mm。

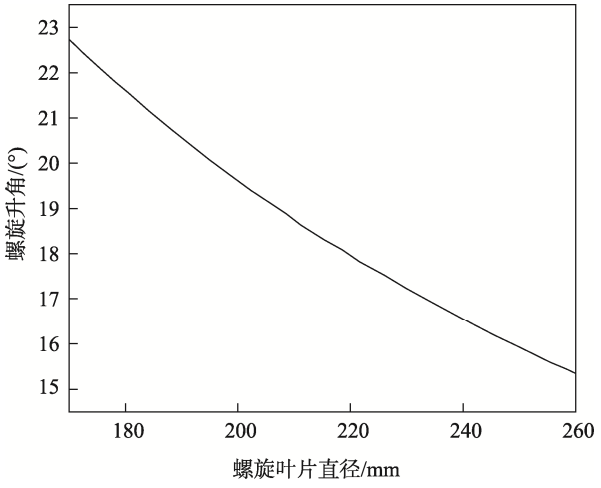
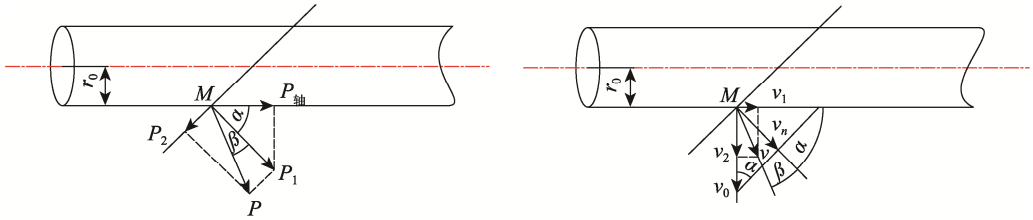


图 3　螺旋升角与叶片直径变化关系
Fig.3 Relationship between spiral rise angle and blade diameter

选取螺旋面升角为 α 的单头螺旋，选择距离螺旋轴向 r_0 处的物料颗粒 M 做受力分析与运动分析。



a 颗粒受力分析　　b 颗粒运动分析

图 4　叶片上颗粒力学分析与运动分析

Fig.4 Mechanical analysis and motion analysis of particles on blades

由图 4 有：

$$\begin{cases} v_0=\omega\times r_0 \\ v_1=v_n/\cos\beta \\ v_n=v_0/\sin\alpha \\ v_1=v\times\cos(\alpha+\beta) \\ v_2=v\times\sin(\alpha+\beta) \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} v_1=\dfrac{S_n}{60}\times\dfrac{1-fS/2\pi r_0}{1+(S/2\pi r_0)^2} \\ v_2=\dfrac{S_n}{60}\times\dfrac{f+S/2\pi r_0}{1+(S/2\pi r_0)^2} \end{cases} \tag{3}$$

式中：α 为螺旋叶片升角；β 由物料与螺旋叶片之间的物料摩擦角与螺旋叶片表面粗糙度共同决定，一般可忽略表面粗糙度对 β 的影响，取 $\beta=\rho$；ω 为螺旋轴旋转角速度；f 为物料与叶片的摩擦因数，$f=\tan\rho=\tan\beta$；v 为颗粒运动速度；v_1 为颗粒轴向速度；v_2 为颗粒径向速度；v_0 为瞬时速度；r_0 为距螺旋轴线的距离；S_n 为第 n 个螺旋的螺距。图 4 中，P 为颗粒综合受力；$P_{轴}$ 为轴向力；P_1 为法向力；P_2 为切向力。

物料在喂料螺旋中的填充系数会直接影响喂料螺旋的输送效率以及能耗，由图 5 及其分析可知，物料越靠近螺旋叶片的外侧，螺旋升角越小，轴向速度越小，径向速度先增大再减小，因此，拥有更小的填充系数，输送物料就会获得更大的轴向速度与更小的径向速度，从而输送过程料流更加稳定。但输送系数过小，会降低喂料螺旋的产量，因此必须选择合适的填充系数。一般工作场合中，填充系数不大于 0.5。

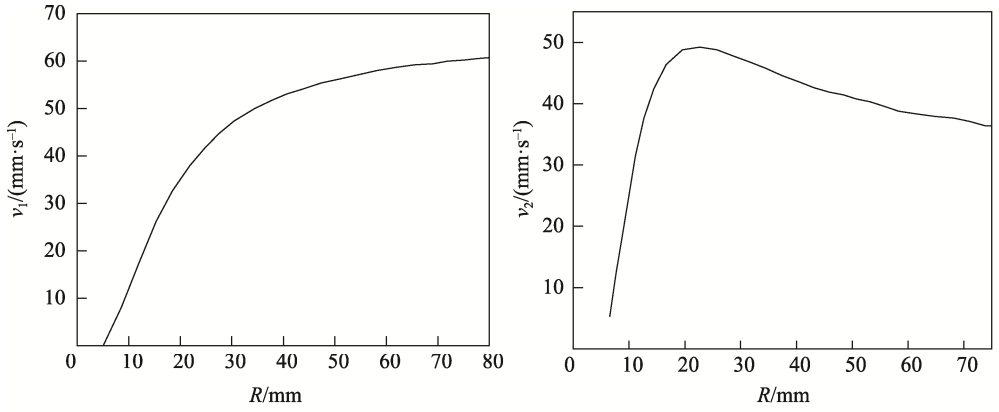
由上述分析可知，螺距的大小直接影响到螺旋升角的变化，同时螺距的选择会决定物料在传输过程中滑移面的位置，螺距在设计过程中，应首先满足以下边界条件。

1）必须满足物料在传输过程中能够正常轴向推进，即螺旋叶片对物料的轴向力必须满足 $P_{轴}>0$，由图 4a 可知，$P_{轴}=P\times\cos(\alpha+\beta)$，则 $\alpha<\dfrac{\pi}{2}-\beta$。螺旋升角在 $D_i^a=d$ 时取得最大值，所以必须满足 $\alpha_2<\dfrac{\pi}{2}-\beta$。最大螺距 $S_{\max}=\pi d\tan(\dfrac{\pi}{2}-\beta)$。

2）物料在传输过程中在合理的轴向速度与径向速度分配的基础上，拥有尽可能大的轴向输送速度，同时必须保证在任意一点的物料其轴向速度必须大于等于其径向速度。如图 4b 所示，当螺距增大时，轴向速度随其增大，但圆周速度的分布不符合预期。当螺距减小时，圆周速度的分布符合预期，但轴向输送速度过小，传送效率太低。

1.2　定螺距螺旋理论设计

定螺距螺旋的设计方法比较成熟，通过查阅相关资料[10]，以产量为目标，结合空间安装尺寸，选配电机，再通过式（4）确定主要设计参数。



a 轴向速度与螺旋半径变化关系　　b 径向速度与螺旋半径变化关系

图 5　颗粒速度与螺旋半径

Fig.5 Particle velocity and semi diameter

$$Q = 47D^2Sn\varphi\lambda\varepsilon \tag{4}$$

式中：Q 为螺旋输送机输送量，t/h；λ 为物料的单位容积质量，t/m^3；ε 为倾斜输送系数；D 为螺旋外径，m；S 为螺距，m；n 为螺旋转速；r/min；φ 为填充系数。对于标准的喂料螺旋，通常 $\varepsilon\in(0.8,1.0)$；当倾斜布置或输送物料流动性较差时，$\varepsilon\leqslant 0.8$；当水平布置时，ε=1.0。

1.3　变径变螺距设计理论推导

变径变螺距的设计主旨是保证单位长度上的料流均匀[2]一致，即当前螺距的物料体积应等于当前螺距的下料量与之前螺距的传送量之和[11]。整体结构如图 6 所示，喂料区采用变径变螺距螺旋设计，由于阻碍区与出料区无喂料，只起物料输送作用，故采用等螺距螺旋设计。

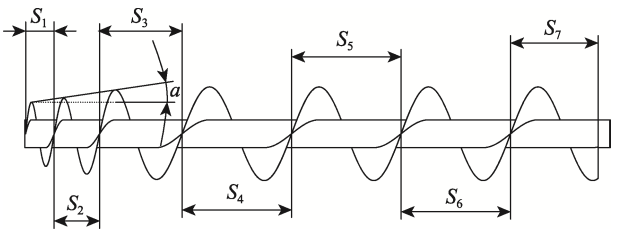


图 6　喂料区变径变螺距螺旋结构
Fig.6 Structure of variable diameter and variable pitch screw in feeding area

$$\begin{cases} v_1 = E\times S_1 \\ v_2 = E\times(S_1+S_2) \\ ..... \\ v_k = E\times\sum_{n=1}^{k} S_n = E\times L \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} v_1 = \pi\int_0^{S_1}\left[\left(R_1+s\cdot\tan\partial\right)^2 - r^2\right]\mathrm{d}s \\ v_2 = \pi\int_{S_1}^{S_2}\left[\left(R_2+s\cdot\tan\partial\right)^2 - r^2\right]\mathrm{d}s \\ ..... \\ v_n = \pi\int_{S_{n-1}}^{S_n}\left[\left(R_n+s\cdot\tan\partial\right)^2 - r^2\right]\mathrm{d}s \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} S_1+S_2+...+S_n = L \\ \tan\partial = \dfrac{R_2-R_1}{S_1} = \dfrac{R_3-R_2}{S_2} \\ E = \dfrac{Q\times 10^9}{60n\rho\varphi L} \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{n} V_k = E\times S_1 + ... + E\times L \\ \sum_{k=1}^{n} V_k = \pi\int_0^{L}\left[\left(R_1+\tan\partial\right)^2 - r^2\right]\mathrm{d}s \end{cases} \tag{8}$$

式中：E 为单位长度螺旋每转下料体积，mm^3/(r·mm)；L 为螺旋总长，mm；R_n 为螺旋半径，mm；r 为螺旋轴半径；V 为单个螺旋体积，mm；∂ 为等倾角变螺距圆锥螺旋线的螺旋角，(°)。

联立式（4）、（5）解得

$$\begin{aligned} &E\times S_1 + E\times(S_1+S_2)+...+E\times L = \\ &\frac{\pi}{3}\times L\times(R_1^2+R_1R_{n-1}+R_{n+1}^2-3r^2) \end{aligned} \tag{9}$$

对式（6）两侧所有 S 取极限，当 S 无穷小时，该 S 段的下料量接近于单位长度的下料量 E，故此时求得的 R_1 最小，但同时为了不削弱螺旋叶片轴的强度，必须保证最小叶片直径大于螺旋轴直径。

$$\begin{cases} \lim\limits_{s\to 0} R_n = R_1 \\ EL = \dfrac{\pi}{3}L(3R_1^2-3r^2) \\ R_1 = \sqrt{\dfrac{E}{\pi}+r^2} \end{cases} \tag{10}$$

R_1 的最终解见式（11）。

$$R_1 = \max\left\{r, \sqrt{\frac{E}{\pi}+r^2}\right\} \tag{11}$$

将喂料区变径变螺距螺旋的螺旋线视为等角圆锥螺旋线，其参数方程见式（12）。

$$\begin{cases} x = n\mathrm{e}^{mt}\cos t \\ y = n\mathrm{e}^{mt}\sin t \\ z = b\mathrm{e}^{mt} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$n = a\times\sin\gamma$，$b = a\times\cos\gamma$，a 为常数，γ 为圆锥顶半角；$m = \sin\gamma\times\cos\alpha$；$t$ 为参数。当 $t = 2k\pi$ 时，$x = n\mathrm{e}^{2k\pi m}$，$y = 0$，$z = b\mathrm{e}^{2k\pi m}$。

螺旋线的半径：

$$r = \sqrt{x^2+y^2} = n\mathrm{e}^{mt} = n\mathrm{e}^{2k\pi\sin\gamma\cos\alpha} \tag{13}$$

螺旋线的螺距：

$$P_k = Z_k - Z_{k-1} = b(\mathrm{e}^{2\pi km} - \mathrm{e}^{2\pi(k-1)m}) \tag{14}$$

1.4　变径变螺距实例设计

设螺旋叶片轴直径为 ϕ76 mm，喂料区螺旋叶片外直径在 170 mm 到 256 mm 之间均匀变化，生产率为 12.7 t/h，螺旋轴长度为 1 600 mm，进料口螺旋部分长度为 400 mm，螺旋轴转速 50 r/min，初始螺距选择 P_1=60 mm，用三段式变径变螺旋结构设计，填充系数取 $\varphi = 0.47$，物料倾斜输送系数取 $\varepsilon = 1$，物料摩擦角 $\beta = 27°$。

先进行定螺距螺旋设计，将上述目标参数代定螺距公式（4），得定螺距螺旋 S=224 mm，螺旋数量为 L/S=7.14，取整后采用 7 段螺旋设计。再进行变径变螺距螺旋设计，将上述参数代入式（7）、（10）、（11），得到 E=7 189.86 mm^3/(r·mm)、V=15.875 m^3/h、R_1=85 mm、γ=6.14°；将 P_1=64 mm 代入式（14），得到 m_1=0.011 6；

将 R_3=128 m 代入式（13），得到 m_3=0.021 7，对 m_2 进行线性插值，则 m_2=0.016 65。将 m_2、m_3 代入式（14），得到 P_2=96.88 mm、P_3=151.82 mm，对上述参数进行取整，得到 P_2=97 mm、P_3=152 mm，喂料区半径均匀变化，R_1=85 mm，R_2=106.5 mm，R_3=128 mm。除喂料区外其他螺旋主要是将进料口螺旋摄入的物料进行输送，采用定螺旋设计，P_1+P_2+P_3=309 mm，考虑到喂料区螺旋的变径，将定螺旋进行缩小取整，P_4=P_5=P_6=P_7=300 mm，螺旋数量依旧采取 7 段螺旋设计，将螺距设计结果代入上述边界条件进行验证，验证结果符合边界条件要求。

2 仿真与分析

2.1 仿真参数设置与模型建模

将 SolidWorks 建立的定螺距喂料螺旋与变径变螺距喂料螺旋分别导入 EDEM，利用 EDEM 离散元分析对定螺距喂料螺旋与变径变螺距喂料螺旋进行性能对比仿真分析，仿真参数设置如表 1 所示，仿真接触参数设置如表 2 所示[12]。

表 1 物料参数设置

Tab.1 Parameter setting of materials

材料	密度/（kg·m^{-3}）	泊松比	剪切模量/MPa
小米	800	0.25	25
不锈钢	7 800	0.3	70 000

在喂料区建颗粒工厂[13]，考虑到整个分析过程并不对单个颗粒进行分析以及计算机的处理能力，将颗粒直径设置为 5 mm，粒径分布采用正态分布，采用动态快速生成的方法以 50 000 颗/s 生成的速度在 1 s 中快速填充喂料区，然后在 1 s 时对喂料螺旋轴施加 50 r/min 的转速驱动，总仿真时间设定为 4 s，对物料进行仿真[14-16]输送，对 2 种形式螺旋喂料器输送过程中的喂料区的物料形态、物料输送速率、物料质量流率进行对比分析。

2.2 输送过程中物料形态对比分析。

在 1～4 s 内的整体输送过程中的物料形态[17]如表 3 所示。

对整个喂料输送过程物料形态进行对比分析。t=1 s 时，为方便后续观察以及形成鲜明对比，对喂料区的定螺距螺旋料层与变径变螺距螺旋料层进行等区域划分，从右至左手动划分为 5 个等宽度 Selection，对划分区域从右至左做绿、蓝、红、紫、棕等着色[18]，在物料初始料位高度位置划定初始高度线，如表 3 中料层上方水平线所示，为后续料位下降以及物料倾斜面的形成分析提供参考依据。t=2 s 时，定螺距螺旋最左侧位置 Selection 5 已开始大幅度流动，物料料位高度下降明显，越靠近右侧，料位高度下降越不明显，Selection 1 中的物料料位高度几乎没有下降，物料倾斜面基本形成。变径变螺旋料层料位高度整体开始下降，下降均匀一致，5 个 Selection 料层高度基本上与初始料层高度线保持水平平行。t=3 s 时，定螺距螺旋中的 Selection 5 区域中物料已全部进入螺旋喂料器螺旋中，Selection 1 中的料位高度依旧没有明显下降，物料倾斜面成形已经很明显。变径变螺距喂料螺旋与定螺距螺旋相比，各区域依旧维持均匀下料，无明显物料倾斜面生成。t=4 s 时，定螺距螺旋喂料器中，Selection 4 与 Selection 3 中的物料也已完全进入螺旋喂料器螺旋中，Selection 2 中有部分物料进入螺旋输送器螺旋中，但 Selection 1 中的物料从 0～4 s 的喂料过程中，料层料位高度下降速率明显慢于其他 Selection 的，形成了明显的物料倾斜面，在持续下料过程中很有可能因物料堆积引起物料堵机。变径变螺距螺旋相较于定螺距螺旋，各区域物料基本全部进入螺旋喂料器，各区域料位高度下料均匀，喂料区没有物料堆积，无明显物料倾斜面形成，整个输送过程更加流畅稳定。

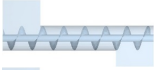
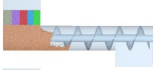
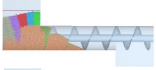
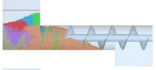
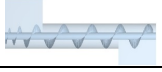
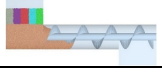
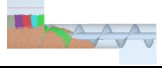
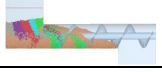
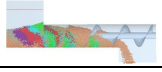
表 2 仿真接触参数设置

Tab.2 Parameter setting of simulation contact

小米–小米恢复系数	小米–小米静摩擦因数	小米–小米滚动摩擦因数	小米–不锈钢恢复系数	小米–不锈钢静摩擦因数	小米–不锈钢滚动摩擦因数
0.35	0.5	0.01	0.3	0.5	0.05

表 3 输送过程物料形态对比

Tab.3 Comparison of material forms during conveying

输送方式	空载螺旋	t=1 s	t=2 s	t=3 s	t=4 s
定螺距螺旋输送					
变径变螺距绞龙螺旋输送					

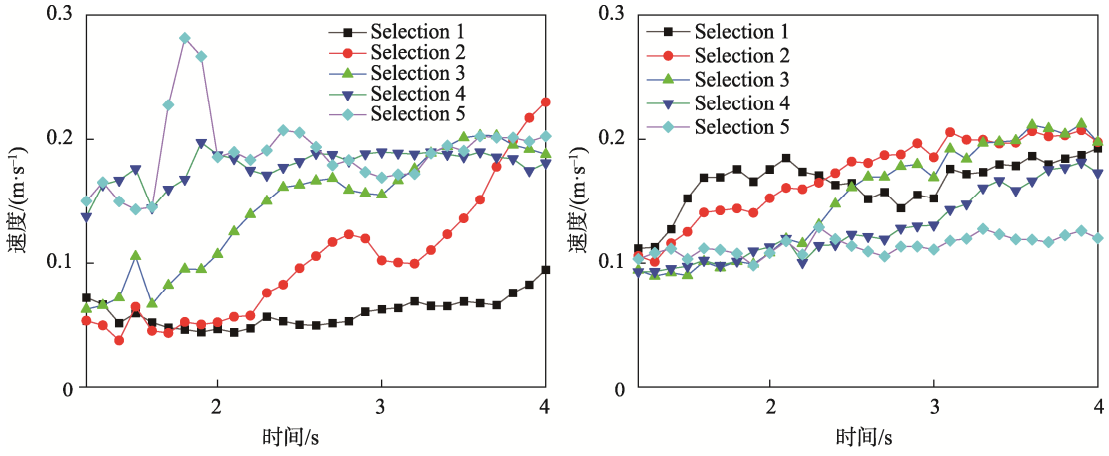
2.3　输送过程中各区域物料速度对比分析

如图 7 所示，对定螺距螺旋与变径变螺距螺旋 5 个 Selection 区域物料平均速度进行对比分析[19]。在定螺距螺旋中，从 Selection 1 到 Selection 5 各区域的平均物料速度依次增加且彼此之间差距大，整体速度分布在[0.03,0.26]，跨度范围大。Selection 1 中的物料速度一致维持在较低水平，解释了前面所提到的 Selection 1 中的物料料位高度下降缓慢，而 Selection 5 中的物料输送速度较高且上下波动大。变径变螺距螺旋相较于定螺距螺旋，整体速度范围分布在[0.08,0.22]，Selection 1 中的物料速度明显提升，与此同时，由于第 1 圈喂料螺旋直径的减小，使得 Selection 5 中的物料速度与波动幅度都有所下降，其他区域的喂料输送速度更加均匀稳定。

如图 8 所示，对定螺距螺旋喂料器与变径变螺距螺旋喂料器中物料的 1～4 s 内的平均输送速度进行对比分析，定螺距螺旋喂料器平均输送速度为 0.164 31 m/s，变径变螺旋喂料器平均输送速度为 0.178 59 m/s，在定螺距螺旋输送的基础上，平均输送速度提升了 8.7%，进一步提升了喂料传输效率。平均输送速度提高的主要原因是变径变螺距结构与定螺距结构相比，避免了喂料区后段的物料堆积的出现，整段喂料区螺旋都在下料输送，提高了喂料区喂料螺旋的利用率。

2.4　输送过程中物料质量流率对比分析

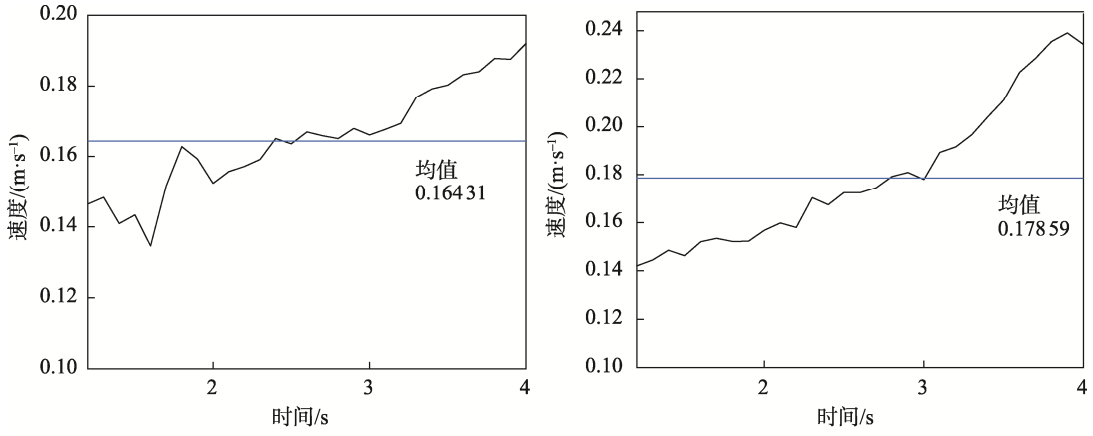
在定螺距螺旋与变径变螺距螺旋阻碍区的相同位置分别布置 100 mm 的质量流率传感器，分别测定在稳定输送时间段 3～4 s 内的 2 种不同螺旋的质量流率[20]，结果如图 9 所示。定螺距螺旋单位质量流率稳定在 2.921 63 kg/s，变径变螺距螺旋单位质量流率稳定在 3.278 22 kg/s，变径变螺距螺旋的质量流率相较于定螺距螺旋的提升了 12.2%，进一步提升了喂料传输效率。物料质量流率上升的主要原因是在相同的转速条件下，变径变螺距结构无物料堆积，喂料区下料螺旋的利用率提高，从而使得质量流率更高。



a 定螺距各区域速度曲线　　b 变径变螺距各区域速度曲线

图 7　各区域物料速度对比

Fig.7 Comparison of material speed by region



a 定螺距平均输送速度　　b 变径变螺距平均输送速度

图 8　物料平均输送速度对比

Fig.8 Comparison of average conveying speed of materials

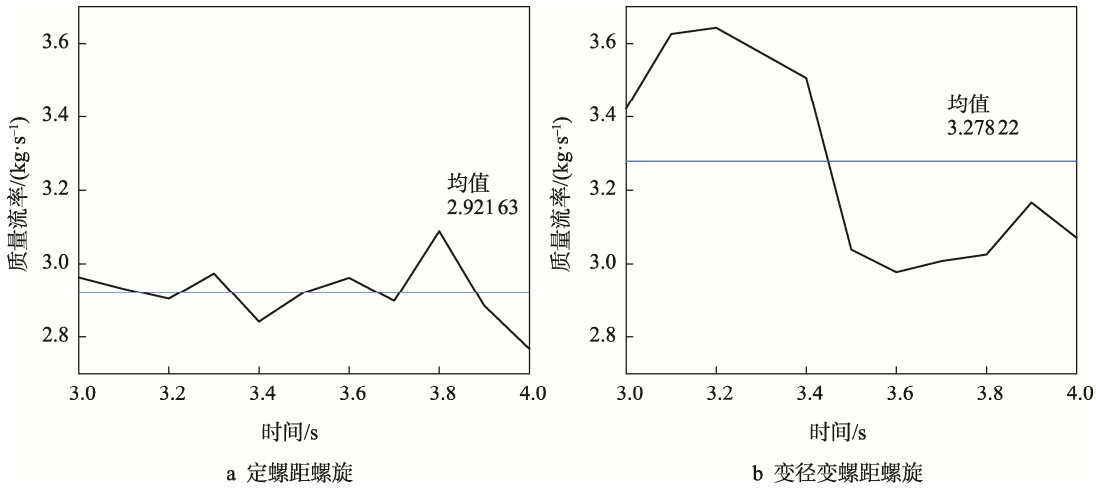


图 9 物料输送质量流率对比

Fig.9 Comparison of material conveying mass flow rate

3 结语

螺旋喂料器喂料区螺旋采用变径变螺距结构可缓解物料堵机，具体设计参数可借助等角圆锥螺旋线参数方程进行设计。

定螺距螺旋与变径变螺距螺旋相比，定螺距螺旋喂料区各区域下料速度差异大，会形成明显的物料倾斜面，而变径变螺距喂料螺旋各区域速度相对均匀一致，料流稳定，无明显物料倾斜面形成。

变径变螺距结构与定螺距结构相比，由于在稳定输送阶段，喂料区后段无物料堆积，在相同驱动条件下，喂料区下料螺旋部分的利用率更高，所以物料输送平均速率显著提升了 8.7%，物料质量流率显著提升了 12.2%，进一步提升了螺旋喂料器的输送效率。

总的来说，变径变螺距螺旋喂料器与定螺距螺旋喂料器相比，具有料流均匀、无物料堆积、喂料区无物料倾斜面的形成，以及提升了喂料区螺旋下料螺旋的利用率等优点，在解决堵机问题的同时进一步提升了螺旋喂料器的输送效率。

参考文献：

[1] 石云飞, 张西良, 徐云峰. 加料机单、双头螺旋对颗粒群接触力的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 76-81.
SHI Yun-fei, ZHANG Xi-liang, XU Yun-feng. Influence of Single and Double Screw on Contact Force of Particle Group in Feeder[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science), 2019, 40(1): 76-81.

[2] 苏永亮. 变螺距变直径螺旋输送器主要参数的选择[J]. 沈阳农业大学学报, 1988(4): 67-71.
SU Yong-liang. Selection of Main Parameters of Variable Pitch and Variable Diameter Screw Conveyor[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1988(4): 67-71.

[3] 邱爱红, 龚曙光, 谢桂兰. 变径变螺距螺旋轴参数化模型及性能仿真[J]. 机械工程学报, 2008(5): 131-136.
QIU Ai-hong, GONG Shu-guang, XIE Gui-lan. Parametric Model and Performance Simulation of Helical Shaft with Variable Diameter and Pitch[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008(5): 131-136.

[4] 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.
LI Fei-xiang, LI Yong-xiang, XU Xue-meng, et al. Pitch Design and Simulation Analysis of Variable Pitch Spiral Structure[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(13): 214-221.

[5] 徐雪萌, 李飞翔, 李永祥, 等. 定量变距螺旋结构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 89-97.
XU Xue-meng, LI Fei-xiang, LI Yong-xiang, et al. Design and Experiment of Quantitative Variable Pitch Screw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 89-97.

[6] 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]. Journal of Mechanical Design and Manufacturing, 2018(6): 52-55.

[7] 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.

[8] 李永祥，王震民，徐雪萌. 螺旋喂料装置密实段参数优化设计及耦合仿真[J]. 包装学报，2021，13(2): 30-36.
LI Yong-xiang, WANG Zhen-min, XU Xue-meng. Optimization Design and Coupling Simulation of the Parameters of the Dense Section of the Screw Feeding Device[J]. Journal of Packaging, 2021, 13(2): 30-36.

[9] YU Y, ARNOLD P C. Theoretical Modelling of Torque Requirements for Single Screw Feeders[J]. Powder Technology, 1997, 93(2): 151-162.

[10] 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. Selection and Determination of Design Parameters of Screw Conveyor[J]. Cement Technology, 2010(1): 29-33.

[11] 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 Structural Parameters of Variable Pitch Screw[J]. Journal of Suzhou University(Natural Science), 1996(4): 96-100.

[12] 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.
LI Yong, LIU Wei-dong. Discrete Element Simulation and Analysis of Single Screw Based on EDEM Software[J]. Journal of Lifting and Transportation Machinery, 2017(4): 78-81.

[13] 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.

[14] PEZO, MILADA. Discrete Element Model of Particle Transport and Premixing Action in Modified Screw Conveyors[J]. Powder Technology, 2018, 336: 255-264.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 向少学，王小乐. 基于 EDEM 仿真的水平螺旋输送机输送机理分析研究[J]. 港口装卸, 2015(5): 49-51.
XIANG Shao-xue, WANG Xiao-le. Analysis and Research on Conveying Mechanism of Horizontal Screw Conveyor Based on EDEM Simulation[J]. Journal of Port Handling, 2015(5): 49-51.

[18] 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.

[19] 刘伟立，卫红波. 基于 EDEM 软件的螺旋输送机仿真及分析[J]. 机械工程师, 2015, 34(10): 121-123.
LIU Wei-li, WEI Hong-bo. Simulation and Analysis of Screw Conveyor Based on EDEM Software[J]. Mechanical Engineer, 2015, 34(10): 121-123.

[20] 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 Conveying Screw for Powder Packaging[J]. Journal of Light Industry Machinery, 2017, 35(5): 12-15.

责任编辑：曾钰婵