



垂直螺旋输送机临界转速的仿真研究

张 氢, 夏 华, 孙远韬, 秦仙蓉

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 为确定实际模型的临界转速, 采用 EDEM、RecurDyn 和 ADAMS.2 建立螺旋直径为 400 mm、升程为 330 mm 的双螺旋垂直螺旋输送机和单个颗粒的仿真模型, 通过仿真确定临界转速的区间, 根据二分法不断缩小临界转速的区间, 直至得到临界转速终止仿真, 在 EDEM 中建立输送高度为 0.3 m、填充率分别为 20%、40%、60% 和 80% 的颗粒群仿真模型, 采用相同的方法完成仿真。结果表明, 仿真结果验证了粒子与螺旋面、罩壳内壁之间的接触力类型, 得到单个颗粒时螺旋的临界转速约为 70 r/min; 4 种填充率下的临界转速分别为 75、81、91、100 r/min; 单质点法求解的理论临界转速为 82 r/min, 与单个颗粒、输送高度为 0.3 m、填充率为 20% 和 40% 的颗粒群仿真结果接近, 而小于输送高度为 0.3 m、填充率为 60% 和 80% 的颗粒群仿真临界转速。说明单质点理论只适用于小填充率的垂直螺旋输送机模型。

关键词: 垂直螺旋输送机; 临界转速; 单颗粒; 颗粒群

中图分类号: TH24 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2017)05-0001-06

Simulation research of critical speed for vertical screw conveyor

ZHANG Qing, XIA Hua,

SUN Yuantao, QIN Xianrong

(School of Mechanical Engineering, Tongji University,
Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to determine the critical speed of the actual model, a simulation model, including a single particle and a double spiral vertical screw conveyor was presented, whose screw diameter was 400 mm and pitch was 330 mm. The simulation model was established by EDEM, RecurDyn and ADAMS.2. First, the range of critical speed was obtained through simulation. Then, using the bisection method, the range was narrowed gradually. Finally, the simulation was terminated until the critical

speed was obtained. The simulation model of particle swarm were established and simulated based the same method by EDEM, whose height was 0.3 m and filling rates were 20%, 40%, 60% and 80%. The results show that the types of contact between particle and spiral surfaces and inner surface of the shell are verified. The critical speed is about 70 r/min when there is only one particle. The critical speed for four filling rates are 75, 81, 91 and 100 r/min. The critical speed which is obtained by single particle theory is 82 r/min, and the value is close to the simulation results of one particle and particle swarm with 20% and 40% filling rates. But the value is smaller than the results of particle swarm with 60% and 80% filling rates. So single particle theory is only applied to the vertical screw conveyor with small filling rate.

Keywords: vertical screw conveyor; critical speed; single particle; particle swarm

垂直螺旋输送机广泛运用于煤炭、粮食等散货的输送, 具有生产效率高、环保、结构简单等特点, 在码头的卸船工作中起重要作用。垂直螺旋输送机由取料装置、焊有螺旋叶片的中间螺杆和罩壳组成, 结构简单。工作原理类似于螺母与螺杆的旋转运动, 螺杆固定, 螺母旋转, 产生轴向位移。虽然其组成、原理简单, 但输送物料的真实运动状态、物料之间的受力关系等却十分复杂^[1]。在其设计过程中往往借助于假设简化、经验公式、试验数据等, 设计中的重要参数如螺旋转速对功率消耗、磨损、能否完成向上输送物料都有很大影响, 并且是驱动电机的重要选择参数之一。临界转速则是电机转速的最小值, 当低于此转速时将无法向上输送物料, 如何确定满足工程需要的临界转速显得尤为重要。

临界转速的概念是由 Emhremidis、Vilerling 和 Sinha 等^[2]学者在研究垂直输送机理时首次提出, 并得到广泛运用, 是设计垂直螺旋输送机中的关键参数。该理论将颗粒群简化成一个质点, 致使该模型过于简化, 实际设备工作时候的转速远远高于此, 而转速增大不但大大增加功率而且还增加输送货物的破损。

目前无其他准确得到临界转速的计算方法, 采用仿真技术是较好的方式。韩正铜^[3]分析了传统临界转速的计算方法的缺陷, 并提出一种新的临界转速的计算方法。陈松等^[4]探讨了立式螺旋输送机的临界转速

收稿日期: 2017-02-20, 修回日期: 2017-04-13。

基金项目: 上海市科技成果转化和产业化项目, 编号: 15DZ1161203。

第一作者简介: 张氢(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为建设机械及其关键技术。E-mail: zhqing_tj@126.com。

通信作者简介: 孙远韬(1979—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为机械传动系统及结构安全性评价。E-mail: sun1979@sina.com。

的求解方法,建立了临界转速新的计算公式。李英等^[5]根据物料的受力与运动,得到了输送效率最佳和转速最佳的计算公式,并通过程序实现立式螺旋输送机的快速设计。张雷等^[6]用 ANSYS 建立了螺旋输送器的有限元模型,通过模态求解获得系统的临界转速。

早期设计垂直螺旋输送机主要依靠一些经验公式、试验数据等^[7-9]。确定临界转速的理论计算方法主要是单质点法,该方法是设计者青睐的计算方法。而通过试验的方法来确定临界转速,势必会造成成本增加、周期变长。随着计算机的计算能力不断增强,可以通过计算机仿真的方法确定临界转速,而且类似的研究并没有出现过。本文中通过粒子仿真软件 EDEM、

动力学仿真软件 ADAMS.2、RecurDyn 对临界转速进行仿真研究,得到只有单个颗粒、颗粒群的临界转速,对垂直螺旋输送机的设计提供参考。

1 临界转速的数学模型

传统的单质点理论是将螺旋面上的颗粒群简化成 1 个质点,对该质点进行运动与受力分析。物料在螺旋的旋转作用下,将受到如下的力:重力 mg ,螺旋作用于物料的法向作用力与摩擦力的合力 F_s (F_s 与法线方向偏转一摩擦角 φ_s),管壁作用于物料的法向作用力 F_t 和摩擦力 $F_t\mu_t$,离心力 F_t 。当螺旋的转速为临界转速 n_k 时,物料在上述几个力的作用下处于临界平衡状态^[10]。

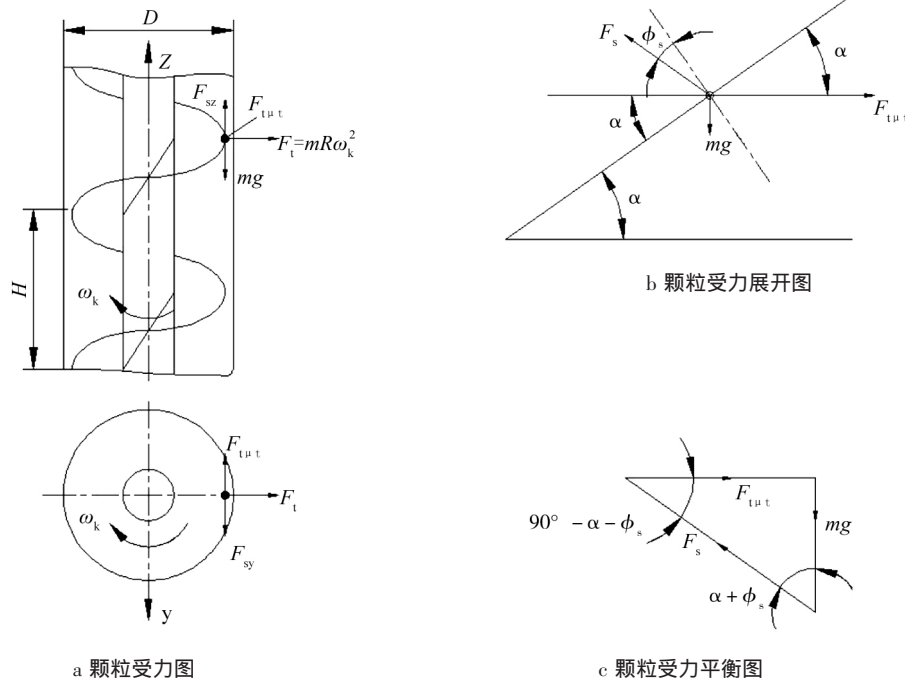


图 1 临界转速下物料颗粒的受力分析

Fig. 1 Stress analysis of particle at critical speed

临界转速下物料颗粒的受力状态见图 1。

由图中力多边形可以看出,

$$\tan(90^\circ - \alpha - \varphi_s) = \frac{mg}{F_t\mu_t}, \quad (1)$$

又

$$F_t = mR\omega_k^2, \quad (2)$$

可得

$$\omega_k^2 = \frac{g}{R\mu_t} \tan(\alpha + \varphi_s), \quad (3)$$

或者

$$\omega_k = \sqrt{\frac{g}{R\mu_t} \tan(\alpha + \varphi_s)}, \quad (4)$$

而转速

$$n_k = \frac{30\omega_k}{\pi}, \quad (5)$$

故临界转速为

$$n_k = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R\mu_t} \tan(\alpha + \varphi_s)}, \quad (6)$$

式中 R 为螺旋叶片的半径; μ_t 为物料与管壁的摩擦系数; α 为螺旋叶片外缘处的螺旋升角; φ_s 为物料与螺旋叶片的摩擦角。相关参数取值见表 1。

表 1 相关参数取值

Tab. 1 Values of relating parameters

名称	符号	数值
螺旋叶片半径/m	R	0.2
物料与管壁摩擦系数	μ_t	0.18
螺旋升角/(°)	α	5
物料与螺旋叶片摩擦角/(°)	φ_s	10

由表 1 和公式(6)可得螺旋临界转速的理论值为 82 r/min。

2 模型参数

本文中仿真的模型参数为生产率为 300 t/h、输送高度为 3 m、双螺旋的垂直螺旋输送机的设计参数。实际设计过程中,螺旋与罩壳的间距为 8 mm,考虑到要在 ADAMS.2、RecurDyn 中仿真单个粒子的情况,为了避免粒子通过螺旋与罩壳之间的空隙落入底面而无法继续仿真,故取仿真模型的螺旋与罩壳间距设为 1 mm。垂直螺旋输送机结构尺寸:螺旋直径为 400 mm,螺距为 330 mm,螺旋叶片厚为 10 mm,螺杆外直径为 150 mm,罩壳内直径为 402 mm,罩壳厚度为 10 mm。物料为煤粒,仿真模型为球,半径为 4mm。

仿真模型采用简化后的模型,简化了上部的反向螺旋、耐磨衬板、取料装置等部件。用 Inventor 建立输送高度 h 分别为 3、0.3 m 的三维模型图,见图 2。将模型以“.igs”和“.x_t”的文件格式导出,分别导入 EDEM、RecurDyn 和 ADAMS.2 中,进行仿真。

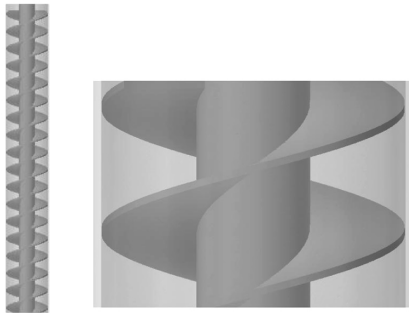


图 2 2 种输送高度的垂直螺旋输送机三维模型
Fig. 2 Models of two kinds of vertical screw conveyor

3 仿真过程和结果分析

3.1 仿真设置

3.1.1 摩擦系数设置

由临界转速的计算公式(6)可以得到仿真中参数与摩擦系数有关,摩擦系数的设置对仿真结果具有很大影响。煤与不同材料的钢材的摩擦系数以及不同状态的煤与同一钢材之间的摩擦系数都有所不同。EDEM 中相关参数设置如表 2、3 所示^[11]。

表 2 材料属性表
Tab. 2 Material property

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)
煤粒	0.4	1.1×10 ⁷	900
钢	0.3	8.1×10 ¹⁰	7 850

表 3 接触属性表
Tab. 3 Contact property

相互作用	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
煤粒-煤粒	0.5	0.6	0.05
煤粒-钢	0.5	0.26	0.18

3.1.2 接触设置

EDEM 中接触模型的类型有 7 种,选用的接触模型为 Hertz-Mindlin(no slip),该接触模型基于 Hertz-Mindlin 理论,能较好地反映颗粒之间的接触情况。

与 EDEM 不同的是,动力学仿真软件 ADAMS.2、RecurDyn 是依靠添加接触力实现颗粒的向上运动。

仿真步骤为运动分析—环境设置—约束定义—定义激励—结果处理^[12]。通过定义颗粒与罩壳内壁和螺旋叶片的接触,产生颗粒向上运动的动力。为了反映物料真实的接触情况,RecurDyn 中添加 Sphere to Surface 接触,而由于 ADAMS.2 没有该种接触类型,因此添加的接触力类型为 Solid to Solid 接触。在接触力属性中设置如表 3 所示的摩擦系数。

3.1.3 颗粒生成设置

由颗粒与螺旋的接触位置不同,颗粒获得的初速度不同,所以颗粒的位置会影响螺旋的临界转速。对于只有 1 个颗粒的情况,RecurDyn 和 ADAMS.2 是将该颗粒放置在某个具体的坐标点处。EDEM 中的颗粒是在颗粒工厂中生成,颗粒工厂用于定义仿真中颗粒产生的位置、时间及方式。虚拟的平面或封闭的几何体均可作为颗粒工厂^[13]。为了保证在不同软件中,防止由于颗粒的初始条件不同对仿真结果的有所影响,设置颗粒的材料类型、大小、生成位置、初始速度、方向、角速度等量均是定值且均保持一致。

当存在颗粒群时,在螺旋旋转前,留出一个时间让空间内的颗粒自由下落到螺旋面上。

3.2 单个颗粒时螺旋临界转速仿真与分析

3.2.1 EDEM 仿真

在 EDEM 中给螺旋杆添加转动驱动,通过估计确定螺旋临界转速的范围。分别取转速为 60、70、80 r/min,完成仿真并进入后处理,导出颗粒的垂向速度数据,画出速度曲线,如图 3 所示。

由图可知,3 种转速下颗粒的垂向速度曲线趋势基本一致。颗粒在与螺旋面接触前做自由落体运动,最大垂向速度接近-1 m/s。与螺旋接触并逐渐增速以后,垂向速度开始反向增加,在 0.75 s 时,颗粒的垂向速度趋于稳定。稳定后的垂向速度曲线如图 4 所示。

3 种转速作用下,颗粒稳定后的平均垂向速度为-0.46、1.63、3.33 mm/s,所以颗粒垂向速度为 0 落在转速为 60~70 r/min 区间里。采用优化中缩小搜索范

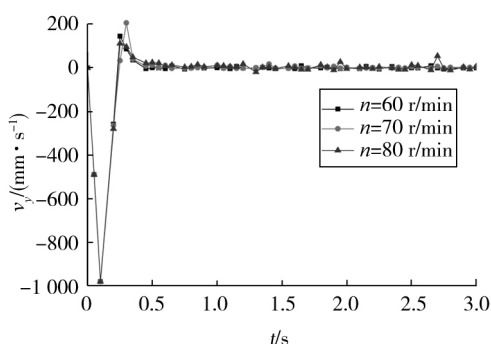


图 3 EDEM 中颗粒的垂向速度

Fig. 3 Vertical velocity of particle by EDEM

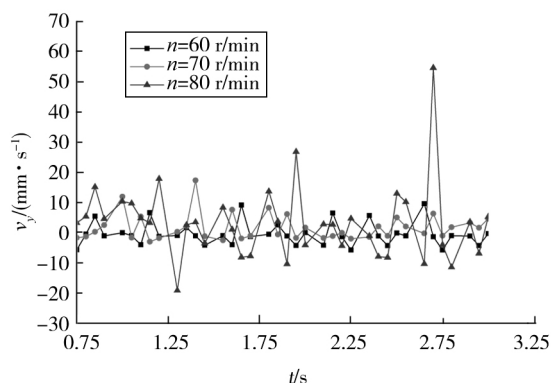


图 4 EDEM 中颗粒稳定后的垂向速度

Fig. 4 Stable vertical velocity of particle by EDEM

围的“二分法”,不断缩小小区间,进而确定出临界转速。分别取螺旋的转速为 60、61、62 r/min,颗粒稳定后的垂向速度如图 5 所示。

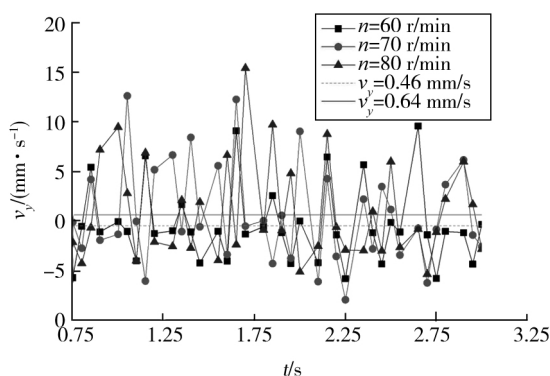


图 5 EDEM 中颗粒稳定后的垂向速度

Fig. 5 Stable vertical velocity of particle by EDEM

3 种转速下颗粒稳定后的平均垂向速度分别为 -0.46、0.64、0.95 mm/s,可知单个颗粒时螺旋的临界转速为 61 r/min。

3.2.2 RecurDyn 仿真

首先确定临界转速的区间范围,分别取螺旋的转速为 60、70、80 r/min,颗粒的轴向速度如图 6 所示。

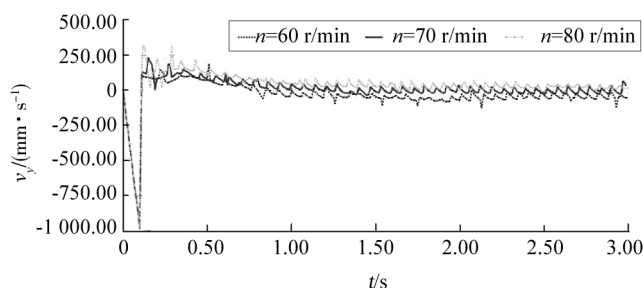


图 6 RecurDyn 中颗粒的垂向速度

Fig. 6 Vertical velocity of particle by RecurDyn

由图可知,3 种转速下颗粒的垂向速度曲线规律基本相同。颗粒与螺旋面接触前做自由落体运动,最大垂向速度接近 -1 m/s。与螺旋接触以后,垂向速度开始反向增加。在 1 s 时,颗粒的速度趋于稳定,且稳定后 3 种转速下颗粒的平均速度为 -44.74、-0.34、31.62 mm/s。故螺旋的临界转速落在 70~80 r/min 之间。

采用与 EDEM 中相同的方法确定螺旋的临界转速。分别取螺旋的转速为 70、71、72 r/min,颗粒稳定后的垂向速度如图 7 所示。

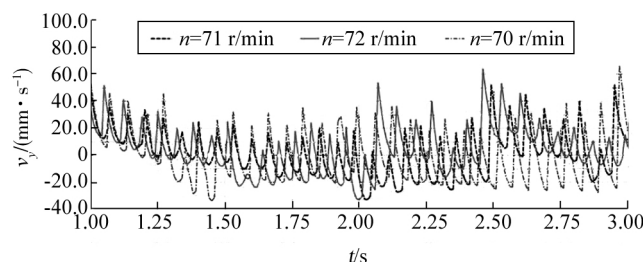


图 7 RecurDyn 中颗粒稳定后的垂向速度

Fig. 7 Stable vertical velocity of particle by RecurDyn

3 种转速下颗粒稳定后的平均垂向速度为 -0.34、1.38、3.87 mm/s。故由 RecurDyn 仿真结果可知,单个颗粒时螺旋的临界转速为 71 r/min。

3.2.3 ADAMS.2 仿真

确定螺旋的临界转速的方法同上,分别取螺旋的转速为 100、110、120 r/min,颗粒的垂向速度如图 8 所示。

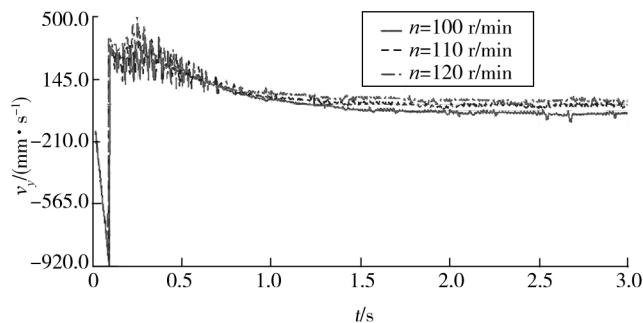


图 8 ADAMS.2 中颗粒的垂向速度

Fig. 8 Vertical velocity of particle by ADAMS.2

由图可知,3种转速下颗粒的垂向速度曲线规律基本一致。先做自由落体运动,最大垂向速度为 -1 m/s 。与螺旋接触以后,颗粒与螺旋存在相对运动,故有摩擦力,该摩擦力提供动力,使颗粒的垂向速度不断变大。在 1 s 左右,颗粒的速度趋于稳定,且稳定后3种转速下颗粒的速度为 -32.91 、 5.3 、 31.30 mm/s ,故螺旋的临界转速落在 $100\sim 110\text{ r/min}$ 之间。采用相同的方法确定螺旋的临界转速。分别取螺旋的转速为 108 、 109 、 110 r/min ,颗粒稳定后的垂向速度如图9所示。

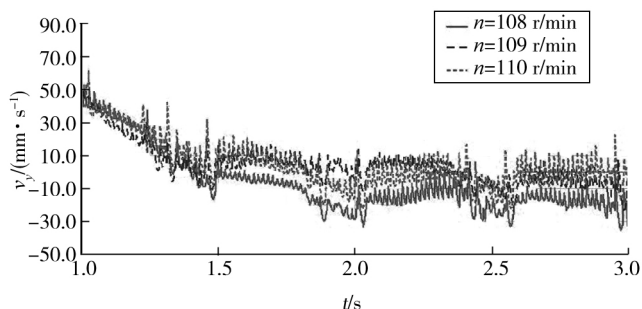


图9 ADAMS.2中颗粒稳定后的垂向速度

Fig. 9 Stable vertical velocity of particle by ADAMS.2

3种转速下颗粒稳定后的平均垂向速度分别为 -6.38 、 4.47 、 5.3 mm/s ,故通过ADAMS.2仿真结果可知,单个颗粒时螺旋的临界转速为 109 r/min 。

3.2.4 对比分析3种结果

只有一个颗粒时,分别采用EDEM、RecurDyn、ADAMS.2等3个软件仿真。颗粒的垂向速度如图3或图4、图6、图8所示,对比分析3种结果,发现曲线规律基本一致,验证了仿真过程的正确性,并得到如下结论。

1)颗粒运动规律:与螺旋面接触前,颗粒先作一段时间的自由落体运动,向下的速度达到 -1 m/s 左右,此时与螺旋面接触,获得向上的加速度,经过一段时间后,颗粒的垂向速度趋于稳定。

2)临界转速3种仿真结果显示的临界转速分别为 61 、 71 、 109 r/min 。可知,EDEM和RecurDyn仿真结果比较接近而ADAMS.2的结果与前两者差距较大,对比仿真模型,发现ADAMS.2和RecurDyn的接触力类型不同。RecurDyn中接触力类型为Solid to Surface而ADAMS.2中的接触力类型为Solid to Solid,所以,修改RecurDyn中的接触力类型也为Solid to Solid,并进行仿真。采用同样的方法,先确定螺旋的临界转速的范围,再进一步确定具体的临界转速。

分别取螺旋的转速为 100 、 110 、 120 r/min ,颗粒的垂向速度如图10所示。

由图可知,颗粒与螺旋面接触前,颗粒做自由落体运动,最大垂向速度为 -0.9 m/s 。与螺旋接触以后,

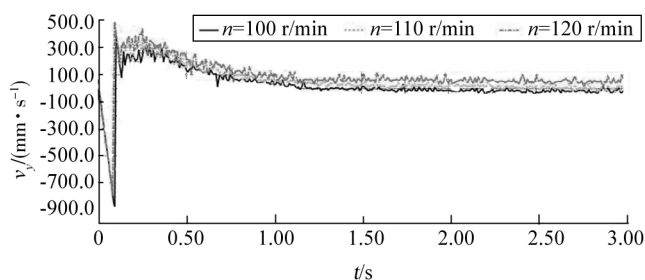


图10 RecurDyn中颗粒的垂向速度

Fig. 10 Vertical velocity of particle by RecurDyn

颗粒的轴向速度不断变大。在 1 s 左右,颗粒的速度趋于稳定,且稳定后3种转速下颗粒的平均速度为 -8.43 、 21.5 、 62.07 mm/s 。故螺旋的临界转速落在 $100\sim 110\text{ r/min}$ 之间。采用相同的方法确定螺旋的临界转速。分别取螺旋的转速为 103 、 104 、 105 r/min ,颗粒稳定后的垂向速度如图11所示。

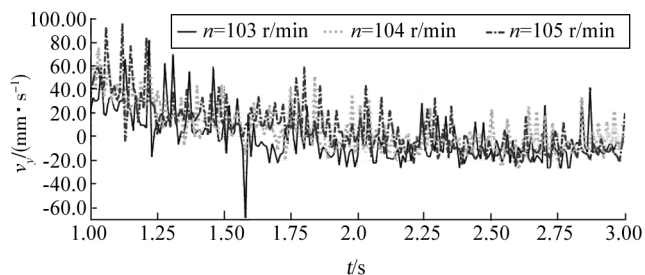


图11 RecurDyn中颗粒稳定后的垂向速度

Fig. 11 Stable vertical velocity of particle by Adams

3种转速下稳定后的平均垂向速度分别为 -0.27 、 7.07 、 7.75 mm/s ,故由RecurDyn仿真结果可知,单个颗粒时螺旋的临界转速为 104 r/min 。

通过单质点理论计算的临界转速为 82 r/min ,再结合上述仿真结果得到,通过仿真确定单个颗粒时螺旋的临界转速约为 70 r/min ,而ADAMS.2的仿真结果出现比较大的偏差是因为添加了不合适的接触力类型。修改了接触力类型后,ADAMS.2的结果跟RecurDyn的结果具有很好的一致性,说明了仿真过程的正确性。

3.3 基于颗粒群螺旋临界转速仿真与分析

在实际工程运用中,垂直螺旋输送机是将物料输送一定高度,因此垂直螺旋输送机内充满着一定数量的颗粒。颗粒的数量越多,则仿真需要的时间越长。本文中分析了输送高度为 0.3 m ,填充率为 20% 、 40% 、 60% 和 80% 时螺旋临界转速。对于输送高度为 3 m 的实际运输模型,可以采用相同的研究方法,只是耗时将大大增加。仿真过程进行以下假设:1)忽略颗粒的加速过程;2)忽略实际工程中取料装置对颗粒的作

用 3) 当螺旋以临界转速旋转时, 颗粒的垂向速度为 0, 故颗粒可近似看作同螺旋叶片一起在原高度旋转而高度位置不发生化。

输送高度为 0.3 m, 填充率分别为 20%、40%、60%、80% 时垂直螺旋输送机的临界转速为 75、81、91、100 r/min, 颗粒稳定后的垂向速度如图 12 所示。

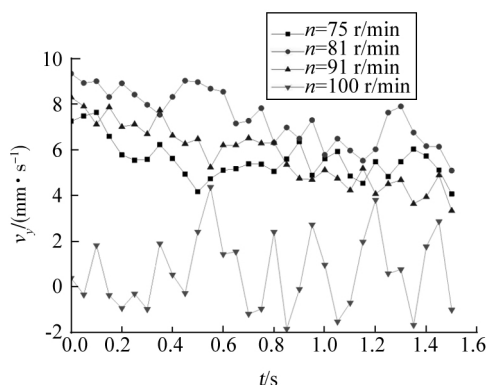


图 12 颗粒群稳定后的垂向速度

Fig. 12 Stable vertical velocity of particle swarm

对比只有单个颗粒时螺旋临界转速和不同数量的颗粒群时螺旋临界转速发现, 随着颗粒数量的不断增加, 螺旋临界转速值也在不断增加。

4 结论

1) 研究了某生产率为 300 t/h 的螺旋输送机的螺旋临界转速。根据单质点理论确定该垂直螺旋输送机的理论临界转速, 并通过不同的软件对该模型进行仿真。仿真结果表明只有 1 个颗粒时, 螺旋的临界转速约为 70 r/min; 仿真结果也验证了仿真中添加的接触力类型。

2) 讨论了输送高度为 0.3 m、填充率分别为 20%、40%、60%、80% 的颗粒群情况, 得到螺旋的临界转速

为 75、81、91、100 r/min。

3) 对比通过仿真得到的临界转速值和理论临界转速值可以发现, 当只有 1 个颗粒和输送高度为 0.3 m、填充率为 20% 和 40% 时, 仿真值和理论值很接近。当颗粒的数量增加时, 仿真临界转速值也在不断增加。对于输送高度为 0.3 m, 填充率为 60% 和 80% 时, 仿真得到的临界转速值显著大于理论值。说明单质点理论只适用于小填充率的垂直螺旋输送机模型。

参考文献(References):

- [1] OWE N, P J, CLEARY, P W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method(DEM)[J]. Powder Technology, 2009, 193(3):274-288.
- [2] FORDERN, HEBEN, 朱志成. 垂直螺旋输送机输送过程的研究[J]. 起重运输机械, 1964, 2:9-16.
- [3] 韩正钢. 垂直螺旋输送机临界转速的设计[J]. 起重运输机械, 1996, (3):3-5.
- [4] 陈松, 黄浩堂. 立式螺旋输送机临界转速的探讨[J]. 粮食与饲料工业, 2000(4):11-12.
- [5] 李英, 潘家祯, 孔令超. 立式螺旋输送机最佳输送状态理论及计算机可视化设计[J]. 起重运输机械, 2004(3):9-12.
- [6] 张雷, 王凡, 王毅. 螺旋输送机临界转速的数值分析与研究[J]. 煤矿机械, 2014, 35(12):125-127.
- [7] ROZBROJ J, ZEGZULKA J, NECAS 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.
- [8] GUNTHER, W A, BLOMEYER N. Dimensioning of vertical screw conveyors[J]. Bulk Solids Handling, 2008, 28(1): 20-25.
- [9] 陈汝超, 陈晓平, 蔡佳莹, 等. 粒煤螺旋输送特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2012(1):154-157.
- [10] 蒋琼珠. 连续输送机[M]. 北京: 人民交通出版社, 1986.
- [11] 梅磊. 螺旋卸船机垂直输送机理及试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [12] 李佩泉, 毕长飞. 基于 ADAMS 的行星齿轮传动系统运动学仿真分析[J]. 机械, 2009(10):19-21.
- [13] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.

本期广告目次

彩色

- 封面 济南微纳颗粒仪器股份有限公司
- 封二 合肥中亚建材装备有限责任公司
- 封三 福建龙岩市亿丰粉碎机械有限公司
- 封四 丹东百特仪器有限公司
- 插一 浙江丰利粉碎设备有限公司
- 插二 江阴市启泰非金属工程有限公司
- 插三 山东·章丘大成机械有限公司
- 插四 第十六届上海国际袋式除尘技术与设备展览会暨研讨会
- 插五 长沙高新开发区万华粉体设备有限公司
- 插六 山东华特磁电科技股份有限公司

插七 河南黎明重工科技股份有限公司

插八 北京航空航天大学

单色

- 插一 浙江力普粉碎设备有限公司
- 插二 沈阳飞机研究所粉体公司
- 插三 南通富莱克流体装备有限公司
- 插四 宜兴市东山新型材料有限公司
- 山东恒拓科技发展有限公司
- 插五 南京南大有限公司
- 插六 上海细创粉体装备有限公司