

付兴兰,安晓飞,张兆国,等. 基于单质点法的联合收割机谷物卸粮质量理论建模与分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(11):208-211.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.11.053

# 基于单质点法的联合收割机谷物卸粮质量理论建模与分析

付兴兰<sup>1,2,3</sup>, 安晓飞<sup>2,3,4</sup>, 张兆国<sup>1</sup>, 李晨源<sup>1</sup>, 李立伟<sup>2,3,5</sup>, 于佳杨<sup>1,2,3</sup>

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 云南昆明 650000; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097;

3. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 4. 农业智能装备技术北京市重点实验室, 北京 100097;

5. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100097)

**摘要:**针对目前联合收割机谷物产量计量采用卸粮后人工称量的方式费时费力的难题,在研究了谷物在收割机卸粮螺旋输送机运动规律的基础上,基于单质点法分析谷物在稳定状态时的力学与运动规律,并考虑到收割机机器振动、背景噪声等因素的影响,提出采用双阈值均值滤波前值取代法进行传感器信号数据预处理。以螺旋输送机推算公式为基础模型,在中联重机 TB60 型谷物联合收割机螺旋输送机上进行了螺旋输送机转速传感器性能试验与单质点谷物卸粮质量模型验证试验,建立分段式的谷物卸粮质量模型。结果表明,双阈值均值滤波前值取代法有效地消除了收割机振动、机身倾斜、背景噪声的影响,计量精度高,经过双阈值均值滤波前值取代法处理后,模型验证误差可以达到 3.90%,满足实际生产需要。

**关键词:**单质点法;螺旋输送机;联合收割机;谷物;卸粮质量

**中图分类号:** O311.1; S129; S225.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)11-0208-04

谷物产量计量是谷物生产管理实施的关键步骤,国内外的研究人员提出了多种产量实时监测方法,如冲量法、光电容积法、称重法和  $\gamma$  射线法等<sup>[1-4]</sup>。目前系统精度受到收割机

田间工况引起的机器振动、机身倾斜、背景噪声等因素的影响<sup>[5-6]</sup>,因此 Roberts 等分别提出双自适应陷波滤波信号处理方法、倾角传感器修正机身倾斜法、加速度传感器测量由于地面凹凸不平等引起的非周期性干扰信号,来自适应补偿谷物流量传感器的输出,消除外界的干扰<sup>[7-10]</sup>。为了进一步提高谷物产量计量的精度,李新成等基于冲击式原理提出了一种基于电压/升运器速度产量模型,比传统的质量-电压模型更能准确表征谷物运动的实际情况,均方根误差为 2.03%<sup>[11-12]</sup>。

关于螺旋输送机输送量的研究有很多,Roberts 等采用量纲分析法及动力学相似理论,对颗粒涡旋运动建立理论模型,

收稿日期:2016-12-23

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0200605);国家高技术  
研究发展计划(编号:2013AA102308);北京市农林科学院青年基  
金(编号:QNJJ201529)。

作者简介:付兴兰(1991—),女,云南大理人,硕士研究生,主要从事  
农业信息化技术研究。E-mail:1581433861@qq.com。

通信作者:张兆国,教授,主要从事农业装备设计与制造研究。  
E-mail:zhaoguozhang@163.com。

## 参考文献:

- [1] Gai N, Pan J, Tang H, et al. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in surface soils from Ruergai high altitude prairie, east edge of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2014, 478(15): 90-97.
- [2] Xing X L, Qi S H, Zhang Y, et al. Organochlorine pesticides (OCPs) in soils along the eastern slope of the Tibetan Plateau [J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 607-615.
- [3] 卜元卿,孔源,智勇,等. 化学农药对环境的污染及其防控对策建议[J]. 中国农业科技导报, 2014(2): 19-25.
- [4] Cochran R C. Risk assessment for acute exposure to pesticides[M]// Handbook of pesticide toxicology, two-volume set. Elsevier Inc, 2001: 691-705.
- [5] Armstrong J L, Fenske R A, Yost M G, et al. Presence of organophosphorus pesticide oxygen analogs in air samples [J]. Atmospheric Environment, 2013, 66(1): 145-150.

- [6] 刘秀娟,周宏平,郑加强. 农药雾滴飘移控制技术进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 186-190.
- [7] 曾爱军,何雄奎,陈青云,等. 典型液力喷头在风洞环境中的飘移特性试验与评价[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 78-81.
- [8] 张慧春, Dorr G, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 53-57.
- [9] Dorr G, Hanan J, Adkins S, et al. Spray deposition on plant surfaces: a modelling approach [J]. Functional Plant Biology, 2008, 35(9/10): 988-966.
- [10] 傅泽田,祁力钧. 风洞实验室喷雾飘移试验[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 115-118.
- [11] 茹煜,朱传银,包瑞. 风洞条件下雾滴飘移模型与其影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 66-72.
- [12] 吕晓兰,傅锡敏,宋坚利,等. 喷雾技术参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 59-63.
- [13] 张慧春, Dorr G, 郑加强, 等. 喷雾飘移的风洞试验和回归模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 94-100.

并进行了更深层次的研究,初步预测了螺旋输送机工作时的一般理论公式<sup>[13-15]</sup>。丁永前等利用冲量原理测量固体颗粒物料实时物料速度和质量流量,同时提出了一种可动态估算速度和质量流量测量误差的方法,使用自行设计的试验装置,以大豆作为试验材料进行质量计量试验,结果表明估算的质量流量相对误差最大值为 4.00%,平均相对误差 1.44%;估算的速度相对测量误差最大值为 9.69%,平均相对误差为 5.03%,动态测量精度和总质量计量精度之间有较好的相关性<sup>[16-17]</sup>。李立等采用混砂车螺旋输砂器试验装置从统计试验数据出发,修正了混砂车输砂能力计算公式,并建立了 45° 倾角螺旋输砂器的经验公式  $Q = 0.38(D^2 - d^2)nP$ ,根据经验公式对输砂器的螺距和直径进行优化设计,有效地解决了最高转速时输砂器振动大的问题<sup>[18-19]</sup>。贾宏禹等建立空间坐标系的方法,对物料在大倾角螺旋输送机中的受力情况进行分析,得到了螺旋输砂器的临界转速和临界转速下的输砂量与倾角、叶片表面摩擦因数、筒壁摩擦因数、填充量、密度等参数之间的理论公式,并以 45° 倾角布置的螺旋输砂器建立了实际输沙量的表达式  $Q = (1.313n_k/n + 0.194)Q_0$ <sup>[20-22]</sup>。但未见有研究者采用单质点法应用于联合收割机螺旋输送机卸粮谷物质量计量的模型公式。

本研究的目的是在研究谷物运动规律的基础上,采用单质点法分析谷物在稳定状态时的力学与运动规律,建立联合收割机卸粮螺旋输送机与谷物产量的关系模型,并进行试验验证。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验条件

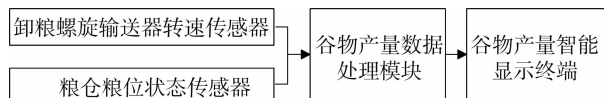
试验于 2016 年 6 月选择在北京小汤山国家精准农业研究示范基地进行,试验中选用收割机为中联重机生产的谷王 TB60(4LZ-6B)型自走式联合收割机,收割机螺旋输送机结构参数为螺旋叶片直径 0.210 m、螺旋输送轴轴径 0.067 m、螺旋叶片螺距 0.155 m、螺旋叶片厚度 0.003 m、螺旋倾角 30°。

### 1.2 试验材料

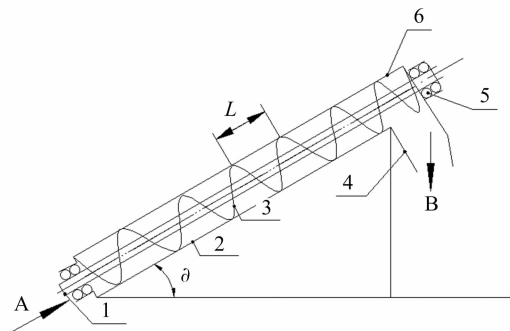
本次试验搭载的系统为自主研发的谷物卸粮质量计量系统,系统总体结构如图 1-a 所示,主要由传感器信号采集模块、谷物产量数据处理模块和谷物产量智能显示终端组成。卸粮螺旋输送机转速传感器安装在卸粮螺旋输送机上,粮仓粮位状态传感器安装在粮仓底部。当联合收割机开始卸粮作业时,卸粮螺旋输送机转速传感器输出速度信号,粮仓粮位状态传感器根据粮仓内谷物的剩余高度输出粮位状态信号,数据处理模块将采集到的 2 路传感器信号进行滤波后通过 RS485 总线通信方式传输至智能显示终端并在终端上显示谷物的卸粮质量、螺旋输送机速度、粮位状态等信息。图 1-b 是收割机螺旋输送机结构示意图。

### 1.3 谷物单质点理论模型建立

在收割机卸粮螺旋输送机工作时,谷物颗粒在螺旋叶片推动下产生较大的离心力,使谷物颗粒克服与螺旋叶片之间的摩擦力被压向螺旋叶片,从而与筒壁形成新的摩擦力,当摩擦阻力达到足够大时,就能克服谷物颗粒本身重力及其他力所引起的下滑力。同时谷物颗粒在螺旋叶片的推动下,克服



a. 谷物卸粮质量计量系统组成



1—螺旋轴; 2—机壳; 3—螺旋片; 4—卸粮板; 5—轴承; 6—上盖板; A—进料口; B—出料口

b. 收割机螺旋输送机结构示意图  
图1 卸粮质量计量系统

它与螺旋叶片间的摩擦阻力和它与输送管内壁间的摩擦阻力,从而以螺旋输送机转速的同比旋转速度上升,直到卸粮出口卸出。

对于卸粮螺旋输送机输送量的推导采用单质点法,对谷物颗粒进行力学分析,再对谷物颗粒进行运动规律分析,并求解出沿轴线方向上的分速度,再求解螺旋输送机填充量为满负荷时的输送量。根据试验研究,求解填充量不是满负荷工作时的输送量,从而达到求解谷物卸粮质量的目的。

1.3.1 稳定状态下谷物颗粒受力分析 设卸粮螺旋输送机为标准的等螺距、等直径、螺旋面升角为  $\beta$  的单头螺旋。以单个谷物颗粒作为研究对象进行运动分析。谷物颗粒受力分析如图 2 所示。

螺旋输送机螺旋升角  $\beta$  为

$$\beta = \arctan \frac{L}{\pi D} \quad (1)$$

式中:  $L$  为螺旋输送机螺距,  $m$ ;  $D$  为螺旋输送机螺旋叶片直径,  $m$ 。

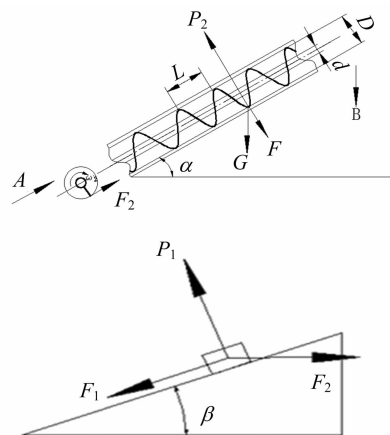


图2 谷物颗粒受力

根据谷物在稳定状态下的受力平衡可以得到如下等式关系:

$$F_1 = P_1 \mu_1 = \mu_1 (G \sin \alpha \cos \beta + F_2 \sin \beta); \quad (2)$$

$$F_2 = P_2 \mu_2 = \mu_2 (F + G \cos \alpha); \quad (3)$$

$$F_1 = G \sin \alpha \sin \beta = F_2 \cos \beta. \quad (4)$$

式中:  $G$  表示谷物颗粒在筒壁上的重力,  $G = mg$ ;  $F$  表示谷物颗粒所受离心力,  $F = mu_k^2 R$ , 其中  $w_k$  表示螺旋输送机转速;  $P_1$  表示螺旋叶面对谷物颗粒的支持力;  $P_2$  表示筒壁对谷物颗粒的支持力;  $F_1$  表示谷物颗粒在螺旋叶片表面的摩擦阻力;  $F_2$  表示筒壁对谷物颗粒的摩擦阻力;  $\mu_1$  表示谷物颗粒对于叶片的摩擦因数;  $\mu_2$  表示谷物颗粒与筒壁的摩擦因数;  $\alpha$  表示螺旋输送机与地面的倾角。

1.3.2 谷物颗粒运动分析 谷物颗粒在螺旋输送机中运动时, 一边沿着叶片表面绕螺旋轴旋转, 一边沿着螺旋轴的方向做直线运动<sup>[15]</sup>。谷物颗粒运动的总速度由螺旋输送机旋转的螺旋速度和颗粒相对于螺旋面的相对速度组成<sup>[19]</sup>。设谷物颗粒相对速度为  $v_1$ , 螺旋速度为  $v_2$ , 则谷物颗粒的运动  $v$  可以表示为

$$v = v_1 + v_2. \quad (5)$$

谷物颗粒以  $v$  的速度相对于筒壁沿轴线向上做螺旋运动。谷物颗粒运动分析如图 3 所示。

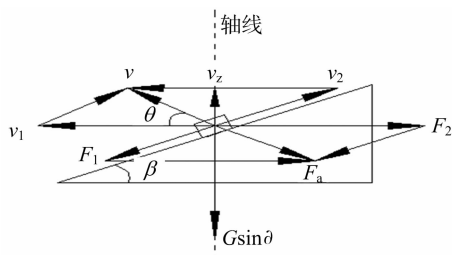


图3 谷物运动分析

根据图 3 可知, 由正弦定理可以建立以下等式:

$$\frac{F_1}{\sin \theta} = \frac{F_2}{\sin(\pi - \beta - \theta)}. \quad (6)$$

则可得到绝对速度与螺旋速度的夹角  $\theta$  为

$$\theta = \arctan \frac{(\mu_1 g \sin \alpha \cos \beta + \mu_1 \mu_2 w_k^2 R \sin \beta + \mu_1 \mu_2 g \cos \alpha \sin \beta) \sin \beta}{\mu_2 (w_k^2 R + g \cos \alpha) - (\mu_1 g \sin \alpha \cos \beta + \mu_1 \mu_2 w_k^2 R \sin \beta + \mu_1 \mu_2 g \cos \alpha \sin \beta) \cos \beta}. \quad (7)$$

谷物颗粒在通过螺旋输送器的过程中, 是一种沿旋转轴运动, 输送量的大小靠轴向速度  $v_z$  来决定<sup>[20]</sup>。

根据图 3, 由正弦定理可以建立等式(8):

$$\frac{v}{\sin \beta} = \frac{v_2}{\sin(\beta + \theta)}. \quad (8)$$

则谷物颗粒轴向分速度  $v_z$  为

$$v_z = v \sin \theta = \frac{v_2 \sin \beta \sin \theta}{\sin(\beta + \theta)}. \quad (9)$$

### 1.3 基于单质点模型的谷物卸粮质量计量模型公式

根据公式(9)得到的卸粮螺旋输送机沿轴向速度  $v_z$  可以得到卸粮螺旋输送器的谷物输送量  $Q_0$  的理论计算公式为

$$Q_0 = \begin{cases} 0.9 k_1 \pi (D^2 - d^2) v_z \rho \psi & \psi = 1 \\ \Delta Q & \psi < 1 \end{cases}. \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为谷物容重,  $\text{kg/m}^3$ ;  $D$  为螺旋叶片直径,  $\text{m}$ ;  $d$  为螺旋轴直径,  $\text{m}$ ;  $\psi$  为填充系数,  $\psi = 1$  表示螺旋输送机填充量为满负荷工作,  $\psi < 1$  表示螺旋输送机填充量不是满负荷工作,  $\Delta Q$  为输送量。

谷物卸粮质量为

$$m_i = \sum_{t=0}^n Q_0 t_i. \quad (11)$$

式中:  $t_i$  为卸粮开始到卸粮结束的时间,  $\text{s}$ 。

考虑到在卸粮螺旋输送机实际卸粮工作中, 螺旋输送机转速是实时变化的, 因此须要通过试验结果来建立基于螺旋输送机输送量的谷物卸粮质量计算模型。

## 2 试验验证与分析

### 2.1 卸粮螺旋输送机转速传感器性能测试

卸粮螺旋输送机转速在谷物卸粮质量模型计算中是一个重要参数, 为检验卸粮螺旋输送机转速传感器的准确性和稳定性, 调节 TB60 型联合收割机在 400、500、600、700、800、900  $\text{r/min}$  这 6 个转速水平下进行测试, 根据试验数据计算得到升运器转速的标准方差和相对误差等参数见表 1。

表 1 卸粮螺旋输送机转速传感器试验数据

实际转速 ( $\text{r/min}$ )	平均值 ( $\text{r/min}$ )	标准偏差 ( $\text{r/min}$ )	相对误差 (%)
400	404	1.98	1.06
500	507	2.11	1.53
600	598	2.05	0.33
700	696	2.42	0.43
800	802	1.00	0.32
900	903	2.04	0.36

由表 1 可见, 卸粮螺旋输送机转速传感器测量最大误差为 1.53%, 低于 2.00%, 各转速水平标准差最大为 2.42  $\text{r/min}$ , 离散程度小, 具有较好的准确性。

### 2.2 数据预处理

谷物联合收割机卸粮作业时, 因机身振动、机器噪声等影响及人工操作会造成其卸粮螺旋输送机转速实时变化, 特别是卸粮刚开始和结束时, 速度变化较大, 造成奇异点数据。因此, 须要对采样数据进行数据预处理以减小误差, 本研究提出双阈值均值滤波前值取代法对卸粮螺旋输送机转速信号进行处理。

根据螺旋输送机在不同转速条件下获得的转速数据, 首先对原始转速数据采用 8 点均值滤波处理, 在此基础上确定转速正常值的上限值  $n_{T1}$ , 下限值  $n_{T2}$  作为判断原始数据中奇异值的标准。阈值滤波时对超阈值范围的数据进行前值取代, 具体算法见公式(12)。

$$n_i = \begin{cases} n_{i-1} & (n_i > n_{T1}) \\ n_i & (n_{T2} \leq n_i \leq n_{T1}) \\ n_{i-1} & (n_i < n_{T2}) \end{cases}. \quad (12)$$

当采样值大于最大阈值  $n_{T1}$  或者小于最小阈值  $n_{T2}$  时, 使采样值等于前一个采样值, 否则保持不变。若阈值设置不恰当, 特别是当阈值下限设置过大或者输送量过小时, 阈值法会降低输送量精度。为了判断双阈值动态滤波效果, 按照时间序列对不同预处理算法的数据进行比较。图 4 是不同数据预处理方法对比结果。

采用本研究中提出的数据预处理后, 从图 4 中可以明显看出数据的整体平滑程度提高, 原始数据中的奇异点已经完全消除, 变异系数也从 5.56 降低为 1.44, 卸粮螺旋输送机转

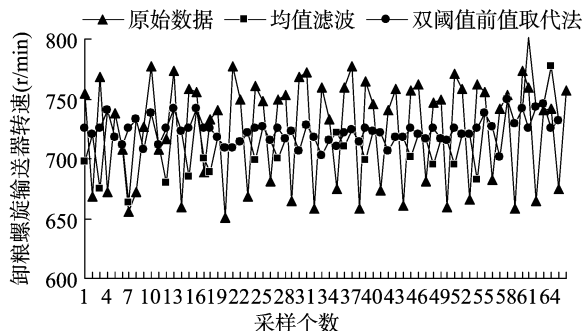


图4 不同数据预处理方法对比结果

速传感器输出信号稳定性提高。

### 2.3 模型验证

为获得实际的谷物卸粮质量与卸粮螺旋输送机转速的函数关系,在产量数据预处理的基础上,进行标定试验和验证试验。标定试验中将联合收割机螺旋输送机结构参数带入公式(10)、(11),通过6组卸粮标定试验获得实际的谷物卸粮质量计量模型公式,具体见公式(13)。

$$m_i = \begin{cases} 0.10v_{zi} \times t_i + 16.58 & \psi = 1 \\ 10.35 & \psi < 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $v_{zi}$ 为谷物沿轴线方向的实时分速度, m/s;  $t_i$ 为卸粮开始到卸粮结束的时间, s。

标定试验后进行验证试验,试验共6组,分别对不同质量的谷物进行卸粮,通过公式(13)的模型公式计算卸粮谷物质量,试验数据如表2所示。从试验数据表可以看出系统检测质量与实际称量最大相对误差为3.90%,误差波动较小,具有较好的测量精度。

表2 模型验证试验数据

试验序号	实际称量谷物质量 (kg)	模型预测谷物质量 (kg)	相对误差 (%)
1	92.9	94.6	1.83
2	99.3	97.4	1.91
3	145.8	148.6	1.92
4	151.2	157.1	3.90
5	177.5	173.6	2.20
6	194.2	189.5	2.42

### 3 结论

通过以上试验和分析,可以得出以下结论:(1)通过联合收割机卸粮螺旋输送机输送量计算谷物卸粮质量可以有效消除人工误差、机身振动等的影响,该方法测量简单,可以代替人工谷物质量称量,具有良好的稳定性和准确性。(2)提出了适用于卸粮转速传感器数据的双阈值均值滤波前值取代法的处理方法,经该方法处理后的数据平滑度提高,变异系数降低,卸粮螺旋输送机转速传感器输出信号稳定性提高。(3)在考虑卸粮螺旋输送机转速和粮仓粮位状态条件下,螺旋输送机输送量模型实测值和检测值的验证误差为3.90%。

为了进一步提高卸粮螺旋输送机输送量模型的准确性,下一步须要考虑谷物形状的变化情况对计算模型的影响,并开展大量的试验进行验证。

### 参考文献:

- [1] 张小超,胡小安,苑严伟,等. 精准农业智能变量作业装备研究开发[J]. 农业工程,2011,1(3):26-32.
- [2] 张小超,胡小安,张爱国,等. 基于称重法的联合收获机测产方法[J]. 农业工程学报,2010,26(3):125-129.
- [3] 李伟,张小超,胡小安,等. 联合收获机称量式测产系统软件设计[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊1):94-99.
- [4] An X F, Meng Z J, Wu G W, et al. Development of grain yield monitoring system based on CAN bus technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(S2):262-266.
- [5] 丛秉华,周俊. 双平行梁谷物流量传感器振动噪声消除方法[J]. 传感器技术学报,2013,26(3):377-381.
- [6] 魏新华,张进敏,但志敏,等. 冲量式谷物流量传感器测产信号处理方法[J]. 农业工程学报,2014,30(15):222-228.
- [7] Roberts A W. Design considerations and performance evaluation of screw conveyors[J]. Powder Technology,2009,19(3):4-9.
- [8] Pelletier M G. Adaptive signal processing for removal of impulse noise from yield monitor signals[J]. The Journal of Cotton Science,2001,5(4):224-233.
- [9] Shoji K, Miyamoto M. Improving the accuracy of estimating grain weight by discriminating each grain impact on the yield sensor[J]. Precision Agriculture,2014,15(1):31-43.
- [10] Maertens K, Reyns P, de Baerdemaeker J. Double adaptive notch filter for mechanical grain flow sensors[J]. Journal of Sound and Vibration,2003,266(3):645-654.
- [11] 李新成,李民赞,王锡九,等. 谷物联合收割机远程测产系统开发与降噪试验[J]. 农业工程学报,2014,30(2):1-8.
- [12] 李新成,李民赞,郑立华,等. 谷物联合收获机测产系统采样频率优化与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(增刊1):74-78.
- [13] Roberts A W. The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors[J]. Powder Technology,1999,104(1):56-67.
- [14] Roberts A W. Design considerations and performance evaluation of screw conveyors[J]. Powder Technology,2009,19(3):4-9.
- [15] Owen P J, Cleary P W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM) [J]. Powder Technology,2009,19(3):274-288.
- [16] 丁永前,丁为民. 颗粒料质量流量测量误差动态估算方法[J]. 农业机械学报,2012,43(10):314-317.
- [17] 董群,王丽,任东海. 固体质量流量测量技术进展[J]. 化工进展,2010,29(增刊1):1-4.
- [18] 李立,胡渊,吴汉川. 混砂车螺旋输送机输砂能力分析及优化[J]. 石油机械,2010,30(6):96-98.
- [19] 胡勇克,戴莉莉,皮亚男. 螺旋输送器的原理与设计[J]. 南昌大学学报(工科版),2000,22(4):29-33.
- [20] 贾宏禹,周思柱,孙文斌,等. 基于单点法的大倾角螺旋输沙器理论建模与分析[J]. 油气田开发工程,2015,43(12):73-76.
- [21] 贾宏禹,孔建益,周思柱,等. 螺旋输砂器精确称量试验台架设计[J]. 机械设计与制造,2016(9):244-246.
- [22] 黄学群,唐敬麟,栾桂鹏. 运输机械选型设计手册(下册)[M]. 北京:化学工业出版社,2011:611-615.