

种子重力分选机预分层喂料系统设计与试验

王旭¹ 王春光¹ 王全喜² 杜建强¹

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018;
2. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要: 为了提高种子重力分选机分选性能,降低设备使用调节难度,提出了种子进入分选台面的预分层工艺,设计了配套的分层喂料系统,计算确定了结构参数。在 SolidWorks 中建立了系统模型,采用 SolidWorks – Simulation 对模型工作应力和位移进行分析。采用 SolidWorks – Flow Simulation 对流场进行仿真和系统结构参数优化。在 5TZX – 50 型重力分选机上进行试验,利用 Design-Expert 软件进行 Box – Behnken 响应面分析,建立了性能指标与影响因素的数学回归模型,选出了气流速度为 3.40 m/s、振动频率为 9.75 Hz、导流板倾角为 29.65° 的最佳组合,该组合下除轻杂率和除重杂率试验值为 95.12% 和 96.37%。试验表明,除杂率与目标优化预测值的误差不大于 1.36%,分层喂料系统满足设计要求。

关键词: 种子重力分选机; 分层喂料; 分级; 清选

中图分类号: S817.8⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0080-09

Design and Experiment of Pre-stratified Feeding System for Gravity Seed Separator

WANG Xu¹ WANG Chunguang¹ WANG Quanxi² DU Jianqiang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China
2. Huhhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Co., Ltd., Huhhot 010010, China)

Abstract: Gravity separator is important equipment for seed separating processing. Aiming at that seed entering the separating table from disordered state to layered state occupied the area of the separation table, which affected the separating performance and made the adjustment more difficult, the pre-stratification technology of seed entering the separation table was put forward and the matching stratified feeding system was developed. The system was installed on the “5TZX – 50 gravity separator”, which was located between the feed system and the separating table, and it was fixed with the separating table. It was mainly composed of a feeding hopper, a laminar grid, a guide board, a stratified net, and a wind tube. The feeding hopper received the seeds of the feeding system, and the stratified net transmitted the separating seeds to the separating table. The stratified feeding system was a vibrated feed machine and also a material suspender. The system vibrated synchronously with the separating table to complete the seed transport, while the system gave the seeds suspended air flow to stratify the seed. The key parameters obtained were: inclination angle of feeding hopper was 54°, laminar grid length was 8.5 mm, width was 8.2 mm, and stratified net inclination angle was 26°. The system model was established in SolidWorks, and the maximum acceleration was applied to the model by SolidWorks – Simulation, and the working stress and displacement were analyzed. The flow field was simulated by SolidWorks – Flow Simulation, and the flow velocity distribution, static pressure field distribution, and ion flow traces on flow field were obtained. Inclination angle of the guide board was optimized with the minimum entrance pressure as the optimization condition. Through the verification test, the Box – Behnken response analysis was carried out by the Design-Expert software, also using the variance analysis of the regression model, the mathematical regression model of performance indexes and influencing factors was established, the

收稿日期: 2019 – 08 – 15 修回日期: 2019 – 10 – 10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701704)和内蒙古自治区自然科学基金项目(2017MS0355)

作者简介: 王旭(1991—),男,博士生,主要从事农牧机械智能化研究,E-mail: wx_xhl@163.com

通信作者: 王春光(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事农牧机械智能化研究,E-mail: jdweg@imau.edu.cn

obtained best combination was flow velocity of 3.40 m/s, vibration frequency of 9.75 Hz and inclination angle of 29.65°. The results showed that range of errors of separating rate of impurity and target optimization predictive value was not more than 1.36%. The stratified feeding system can improve the impurity removal performance of gravity separator. For the low density impurity removal rate, the effect of airflow speed of stratified feeding system was greater than that of vibration frequency; for the high density impurity removal rate, the effect of vibration frequency of stratified feeding system was greater than that of airflow speed. The stratified feeding system reduced the influence of airflow speed on the high density impurity removal rate, and reduced the influence of vibration frequency on the low density impurity removal rate, thus reducing the difficulty of adjusting gravity separator. The research can provide theoretical basis and technical support for the design of stratified feeding system of gravity separator.

Key words: gravity seed separator; stratified feeding; classification; cleaning

0 引言

重力分选机是种子清选加工的重要设备^[1-7]。设备工作时,种子在分选台面上由无序状态进入分层状态,挤占了分选面积^[8-10],影响了分选性能,增大了设备使用调节的难度^[2]。

目前,国内外未见采用预分层工艺设计的重力分选机和对重力分选机分层喂料方面研究的报道。王旭^[2]对重力分选机分选台面上多层种子在气流作用下的运动进行了研究,得到了种子从底层到上层密度依次递减的分层规律;胡志超等^[10]分析了重力式精选机上物料按密度分层运动的过程;WEI 等^[11]开展了颗粒尺寸分层特征对液-固流化床重力分离性能影响的研究。

为了使分层喂料系统设计达到重力式种子分选机标准^[12]的要求,本文对其主要结构参数进行计算,在 SolidWorks 中建立模型,采用 SolidWorks - Simulation 对模型工作应力和位移进行分析,采用 SolidWorks - Flow Simulation 对空气流场进行仿真和系统结构参数优化,依据标准^[12]对重力分选机进行试验,并利用 Design-Expert 软件进行 Box - Behnken 响应面分析和目标优化。

1 分层喂料系统结构和工作原理

分层喂料系统与 5TZX - 50 型重力分选机配套,系统与整机的结构关系如图 1 所示。分层喂料系统安装在喂料系统与分选台面之间,与分选台面固定连接。分层喂料系统结构如图 2 所示,主要由喂料斗、层流格、导流板^[13]、分层网、风筒等部分构成。喂料斗接收喂料系统的种子,分层网将分层的种子输送给分选台面。

分层喂料系统既是一台振动给料机,又是一台物料悬浮器。该系统与分选台面同步振动,完成种子的输送,同时系统给予种子悬浮气流,使种子分层。如图 1 和图 2 所示,种子通过喂料系统进入分

层喂料系统,沿导流板向下流动进入分层网的上端,在合适的气流速度作用下,密度大的种子下沉与分层网接触,密度低的种子上浮,悬浮在比自身密度高的种子上,在分层网上种子密度由下向上依次递减。在分层过程中,种子在分层网振动产生的摩擦力和重力的共同作用下,沿分层网向下流动进入分选台面。

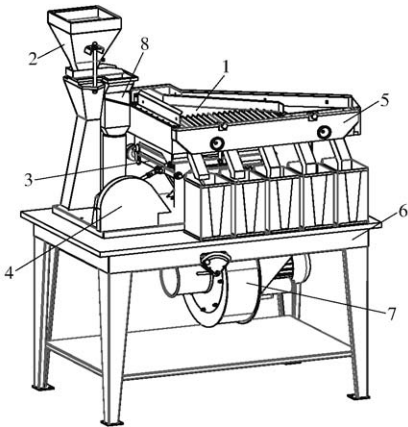
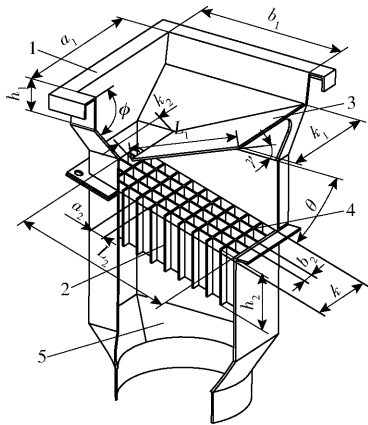


图 1 重力分选机结构示意图

Fig. 1 Gravity separator diagram

1. 分选台面 2. 喂料系统 3. 支架系统 4. 传动系统 5. 排料系统 6. 机架 7. 供风系统 8. 分层喂料系统



2 分层喂料系统参数计算与模型建立

2.1 喂料斗模型参数

如图2所示,喂料斗的作用是收集和缓冲喂料系统投放的种子,使种子沿导流板移动形成厚度均匀和落点集中的种子层。分层喂料系统应用在5TZX-50型重力分选机上,其外形尺寸应相适应,选取喂料斗长度 a_1 为100 mm,喂料斗宽度 b_1 为100 mm。分选机工作需要的缓冲容积 $a_1 b_1 h_1 \geq 2.5 \times 10^5 \text{ mm}^3$,计算选取喂料斗竖直段高度 $h_1 = 30 \text{ mm}$ 。喂料斗内种子自然流动应能够排空,即喂料斗倾斜段钢板倾角 ϕ 应大于种子与钢板的摩擦角 19.29° 。结合后续研究给出的导流板倾角 γ ,采用SolidWorks软件建模获得 $\phi = 54^\circ$ 。

2.2 层流格模型参数

如图2所示,层流格的作用是支撑和连接分层网,同时将风筒送来的紊流调制为层流。层流格顶部平面覆盖分层网。层流格顶部平面与水平面夹角 θ 在分层网部分计算得出。

雷诺数计算公式为

$$Re = \frac{v_1 d \rho}{\eta} \quad (1)$$

式中 Re ——雷诺数 v_1 ——气体流速, m/s

d ——圆管内径, m

ρ ——气体密度, kg/m^3

η ——气体动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

苜蓿种子气流悬浮速度为 $3.5 \sim 5.0 \text{ m/s}$,气流流速不能大于悬浮速度, $v_1 \leq 3.5 \text{ m/s}$ 。空气温度 20°C 时, $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 1.809 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。通过SolidWorks建模,平均分配长方形网格的长度和宽度。层流格由5行10列50个长方形截面的网格构成,长 a_2 为8.5 mm,宽 b_2 为8.2 mm。

对于非圆截面系统,式(1)中圆管内径 d 用流体力学等效直径 d_e 替代,即

$$d_e = \frac{4S}{C_1} \quad (2)$$

其中 $S = a_2 b_2$ $C_1 = 2a_2 + 2b_2$

式中 d_e ——等效直径, m

S ——流道截面积, m^2

C_1 ——流道截面积上被流体浸润的周边长度, m

按式(2)计算得 $d_e = 0.00835 \text{ m}$,按式(1)计算 $Re \leq 1947$,雷诺数小于2000,层流格网格内气流状态为层流,满足分选气流要求。

2.3 导流板模型参数

如图2所示,为了让种子能够以均匀的厚度进

入分层网的上端,设计了导流板。种子在导流板上由高端自然滑落到低端,滑落速度由导流板与水平面的夹角决定。苜蓿种子与钢板的摩擦因数 $\mu = 0.35$,即摩擦角为 19.29° ,为了提高种子在导流板上的流速,导流板倾角取 $\gamma = 25^\circ$ 。分选苜蓿种子时台面工作纵向倾角 $\beta = 5^\circ$ ^[2],分层喂料系统与台面固定。导流板与水平面的夹角 $\gamma_1 = \gamma + \beta = 30^\circ$ 。根据喂料斗尺寸通过SolidWorks建模获得导流板的长度 $L_1 = 83 \text{ mm}$ 。

种子在导流板上受力图见图3。苜蓿种子重力为 $G = mg$,导流板法向力为 N ,摩擦力为 F_1 。种子在导流板上被抛起会影响导流效果,不被抛起的条件是沿导流板的垂直方向,种子重力的分力不小于振动产生的分力^[14],即

$$mg \cos \gamma_1 \geq m \omega^2 A_1 \sin \beta_1 \quad (3)$$

式中 m ——单粒种子质量, kg

g ——重力加速度, m/s^2

γ_1 ——导流板与水平面的夹角, ($^\circ$)

ω ——曲柄角速度, rad/s

A_1 ——振幅, m

β_1 ——激振角(振动支杆垂线与导流板的夹角), ($^\circ$)

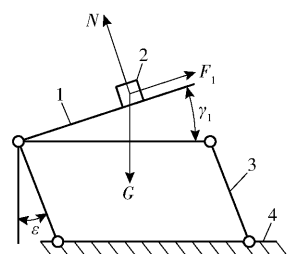


图3 种子在导流板上受力图

Fig. 3 Force diagram of seeds on guide board

1. 导流板 2. 苜蓿种子 3. 振动支杆 4. 水平面

工作要求分层喂料系统的振动应使种子沿导流板向下滑动,种子向下滑动的条件^[9]为

$$\frac{\omega^2 A_1}{g} \geq \frac{\sin(\varphi_1 + \gamma_1)}{\cos(\varepsilon - \gamma_1 - \varphi_1)} \quad (4)$$

式中 φ_1 ——种子与钢板的摩擦角, ($^\circ$)

ε ——振动方向角, ($^\circ$)

式中 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $\gamma_1 = 30^\circ$, $\omega = 62.83 \text{ rad/s}$ ^[2], $A_1 = 0.0046 \text{ m}$ ^[2], $\beta_1 = 5^\circ$, $\varphi_1 = 19.29^\circ$, $\varepsilon = 25^\circ$ ^[2],代入式(3)、(4)计算,不等式成立,说明分层喂料系统的振动不会将导流板上的种子抛起,也不会使种子沿导流板向上滑动。

导流板平面与振动支杆夹角为 95° ,接近 90° ,激振角为 5° ,振动对种子向下的输送作用非常小,在不影响堆积分析结果的情况下,为了简化计算,忽略振动对种子在导流板上运动速度的影响。导流板

末端苜蓿种子发生堆积的可能性通过种子在导流板上受力情况(图 3)进行计算判定。沿导流板平面根据牛顿第二定律建立方程

$$mgsin\gamma_1 - \mu mgcos\gamma_1 = ma_3 \tag{5}$$

式中 a_3 ——种子流动加速度, m/s^2
 μ ——摩擦因数

按式(5)计算得 $a_3 = 1.93\text{ m/s}^2$ 。

$$L_1 = v_0t + a_3t_1^2/2 \tag{6}$$

式中 L_1 ——导流板的长度, m
 v_0 ——种子在导流板上端时的速度, m/s
 t_1 ——种子移动时间, s

$v_0 = 0, L_1 = 83\text{ mm}$, 由式(6)计算得种子由导流板上端到导流板末端的时间 $t_1 = 0.29\text{ s}$ 。

$$v_2 = v_0 + a_3t_1 \tag{7}$$

式中 v_2 ——种子沿导流板滑动到末端时速度, m/s

按式(7)计算 $v_2 = 0.56\text{ m/s}$ 。

$$Q = 3\,600h_3v_2k_2\rho_1 \tag{8}$$

式中 Q ——分选机的生产率, kg/h
 h_3 ——导流板末端种子层厚度, mm
 k_2 ——导流板末端宽度, mm
 ρ_1 ——种子容重, kg/m^3

$Q = 50\text{ kg/h}, k_2 = 0.05\text{ m}, \rho_1 = 500\text{ kg/m}^3$, 按式(8)计算得 $h_3 = 0.99\text{ mm}$ 。苜蓿种子宽度平均值约 1.55 mm , 大于 h_3 , 说明种子流厚度为 1 层, 而且是非紧密排布, 种子沿导流板滑动到末端不会产生堆积。

2.4 分层网模型参数

如图 2 所示, 分层网固定在层流格顶部平面, 作用是下部接通层流格网格中的气流, 上表面承接种子。根据苜蓿种子不能堵塞编织网网孔的要求, 分层网选择规格 n 为 30 目的不锈钢丝编织网。分层网上单位时间流过的种子质量应不小于分选机的生产率, 即

$$Q \leq 3\,600hkv_3\rho_1 \tag{9}$$

式中 h ——种子层厚度, m
 k ——分层网宽度, mm
 v_3 ——种子流在分层网上运动的速度, m/s
 $h = 4.5\text{ mm}$ (苜蓿种子 3 或 4 层), $k = 50\text{ mm}$, 按式(9)计算得 $v_3 \geq 0.124\text{ m/s}$ 。

分选台面与振动给料器的振动原理相同^[2], 分层网与水平面的夹角 δ 按振动给料器速度公式计算^[14]。

$$v_3 \leq \eta_1 \sqrt{\frac{gA_1}{K}} \pi n_1^2 (\cos\varepsilon \cos\delta - \sin\delta) \tag{10}$$

其中
$$K = \frac{4\pi^2 f^2 A_1}{g} \tag{11}$$

式中 K ——机械指数

η_1 ——速度修正因数

n_1 ——抛掷系数

δ ——分层网与水平面的夹角, $(^\circ)$

f ——振动频率, Hz

取种子在分层网上运动速度的最小值为 $v_3 = 0.124\text{ m/s}$, $\eta_1 = 0.85$ (对于大块、干燥物料, 取 $0.85 \sim 1.0$), $n_1 = 0.77$ (表示物料飞行时间与槽体振动周期之比, 为 $0.77 \sim 0.84$), $f = 10\text{ Hz}$ ^[2]。由式(11)计算得 $K = 1.853$ 。由式(10)计算得 $\delta \geq 20.4^\circ$ 或 $\delta \geq 64^\circ$ 。种子在分层网上无振动力和惯性力作用时, 应保持静止状态, 即 δ 应小于种子与分层网的摩擦角 23.18° , 小于种子的休止角 39° 。舍去 $\delta \geq 64^\circ$, 取 $\delta = 21^\circ$ 。工作时分选台面纵向倾角 $\beta = 5^\circ$, 分层网与喂料斗上表面的夹角 $\theta = \delta + \beta = 26^\circ$ 。

3 软件分析与结构参数优化

3.1 应力和位移分析

为了减小分层喂料系统对 5TZX-50 型重力分选机振动系统工作状态的影响, 采用了轻量化设计理念, 在 SolidWorks-Simulation 中对分层喂料系统模型进行静应力分析。分层喂料系统振动加速度与分选台面相同, 即

$$a = \omega^2 A_1 \cos(\omega t) \tag{12}$$

由式(12)计算最大加速度为 18.16 m/s^2 , 安全系数取 1.5, 在喂料斗模型重心位置施加加速度为 27.24 m/s^2 , 获得应力图(图 4a), 最大应力为 $1.166 \times 10^6\text{ Pa}$, 小于屈服极限 $2.206 \times 10^8\text{ Pa}$, 获得位移图(图 4b), 最大位移 $4.669 \times 10^{-4}\text{ mm}$, 位移可以忽略。

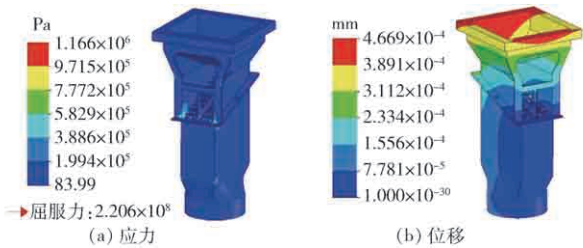


图 4 静应力分析

Fig.4 Static stress analysis

3.2 流场分析与 γ 值优化

采用 SolidWorks-Flow Simulation 有限元流体 CFD 分析软件进行流场分析。进口为分层喂料系统底部, 边界条件设为速度进口。进口直径 0.072 m , 根据 2.2 节中数据计算层流格通风面积为 $50a_2b_2 = 0.003\,485\text{ m}^2$, 进口与层流格流量相同, 计算获得 $v_1 = 3.5\text{ m/s}$ 时进口流速为 $2.995\,8\text{ m/s}$, 选择该值为进口流速设定值。分层喂料系统内流场的流动形态

为层流。分层喂料系统设有 2 个出口,1 个是喂料斗顶部,1 个是出料口,出口边界条件设为环境压力。为了对导流板倾角进行优化,根据 2.3 节中对 γ 取值的分析,取 25° 、 27° 、 29° 、 31° 4 种模型进行分析。获得流场流速分布图(图 5a)、静压场分布图(图 5b)、流场离子流动迹线图(图 5c)。为了对流场参数进行分析,进行流场区域划分(图 6), A_2 为分层网上 10 mm 范围的工作区域, B_2 为层流格所有网格内的区域, C_2 为导流板末端与 A_2 之间的区域, D_2 为导流板与 A_2 之间的区域, E_2 为喂料斗内区域, F_2 为进风口区域。

使用 CFD 分析软件,在图 5 中,在 $A_2 \sim F_2$ 各区域内确定对应的最大值和最小值,计算极差,仿真数据见表 1。

(1)层流格内外流场分析

由图 5a、5b 和表 1 可以看出, A_2 区域流场流速极差范围为 0.504 ~ 0.877 m/s,风压极差范围为 0.005 ~ 0.008 kPa, B_2 区域流场流速极差范围为 0.738 ~ 1.142 m/s,风压极差为 0.007 kPa,极差小说明工作区域与供风区域的流场流速、静压分布均匀。由图 5c 可以看出, A_2 区域的离子流动迹线与竖直方向夹角为 $-4.5^{\circ} \sim 4.7^{\circ}$,夹角变化范围小。

(2)导流板对流场影响分析

由表 1 和图 5a 可以看出, E_2 区域流场流速极差为 0.001 m/s,说明导流板对种子流动扰动小, C_2 区域流场流速 3.421 ~ 3.493 m/s,平均值高于 A_2 区域流场流速,利于种子下落过程的分层。由图 5c 可以看出, D_2 区域没有旋涡,即导流板对 A_2 区域流场无扰动。

(3)结构参数优化分析

由表 1 可以看出, $\gamma = 29^{\circ}$ 时, $A_2 \sim F_2$ 各区域内流场流速分布和静压场分布的极差最小,说明流场参

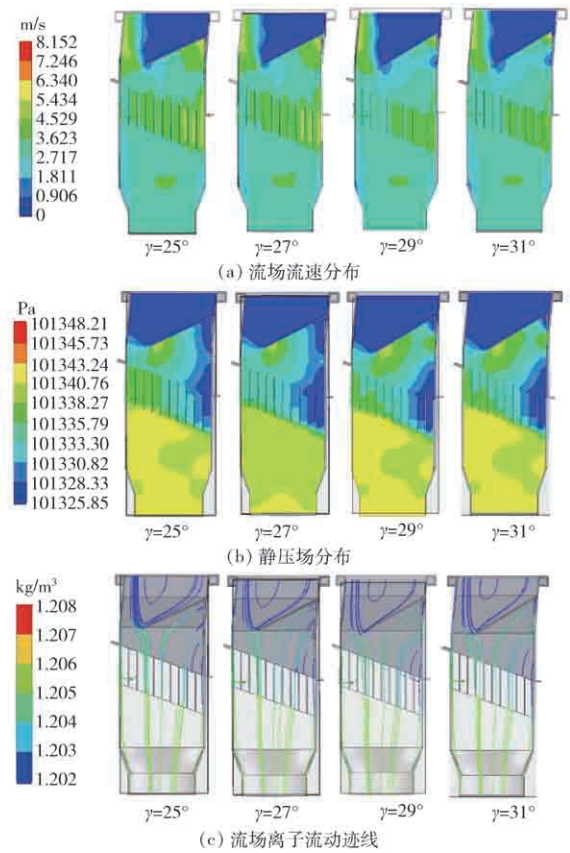


图 5 流场分析

Fig.5 Flow field analysis

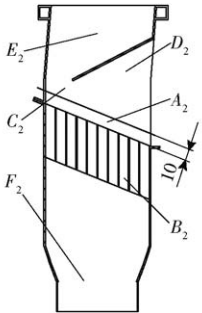


图 6 流场区域划分

Fig.6 Area division of flow field

表 1 流场仿真数据

Tab.1 Flow field simulation data

$\gamma/(^{\circ})$	流场流速极差/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$						静压极差/kPa					静压/kPa
	A_2	B_2	C_2	D_2	E_2	F_2	A_2	B_2	C_2	D_2	E_2	F_2
25	0.782	1.142	0.306	2.875	0.001	0.022	0.007	0.007	0.001	0.013	0.000 1	101.341 55
27	0.877	1.093	0.385	2.717	0.001	0.028	0.008	0.007	0.001	0.013	0.000 1	101.341 49
29	0.504	0.738	0.293	2.658	0.001	0.020	0.005	0.007	0.001	0.011	0.000 1	101.341 46
31	0.512	0.811	0.369	2.698	0.001	0.020	0.006	0.007	0.001	0.012	0.000 1	101.341 92

数最均匀。 F_2 区域静压最低,说明系统流场阻力最小,节能效果最好。综合以上分析得出, γ 的优化值为 29° 。

3.3 气流速度试验测定

为了验证分层喂料系统流场数值模拟的准确性,验证进口流速为 2.995 8 m/s 时层流格流速是否

为 3.5 m/s,同时考虑层流格内流速测试的方便性,采用 HT-8398 型热敏风速仪对层流格出口 A_2 工作区域进行了气流速度测定。测定方法是将 A_2 工作区域划分成 9 个面积相同的矩形^[15],测试各个矩形几何中心的气流速度,重复测试 3 次,取平均值作为该测点的气流速度。气流速度测点分布见图 7。

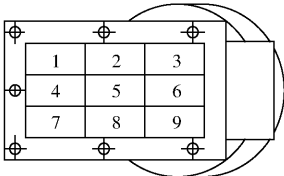


图 7 气流速度测点分布

Fig. 7 Airflow velocity test points distribution

表 2 为分层喂料系统 A_2 区域各测点气流速度模拟值与实测值对比。由表 2 可知,气流速度仿真结果数值高于实测结果,相对误差不大于 6.38%,分析原因可能与流场仿真时壁面条件设定为光滑,而实际壁面存在一定的粗糙度有关。仿真结果与实测结果变化趋势一致,数值相对误差小,说明仿真结果可靠。

表 2 气流速度模拟值与实测值对比

Tab. 2 Comparison between simulated and tested airflow velocity values

测点位置	实测值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	模拟值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	相对误差/%
1	2.86	3.03	5.76
2	3.11	3.23	3.83
3	3.23	3.39	5.09
4	2.94	3.08	4.79
5	3.27	3.35	2.41
6	3.38	3.49	3.38
7	2.85	3.03	6.38
8	3.09	3.23	4.47
9	3.23	3.39	5.02

4 试验验证与工作参数优化

4.1 试验设备和材料

仪器设备:5TZX-50 型重力分选机(图 8),分层喂料系统,DFL200N-HJ02S1-075A 型变频器,SFWE 型面板式调速器,TUNYO-RB 型离心风机,HT-8398 型热敏风速仪。

试验材料:紫花苜蓿种子,净度 85%~88%,含轻杂率 7%,含重杂率 8%,含水率 12%~13%^[16-19]。轻杂质包括茎、花、叶、颖壳、破碎种子,其外形尺寸范围 0.8~4.0 mm。重杂质包括泥土、沙粒、石砾、金属碎渣,其外形尺寸范围 1.5~3.0 mm。苜蓿种子长度范围 1.9~3.0 mm,宽度范围 1.1~2.0 mm,厚度范围 0.8~1.2 mm^[20]。

4.2 试验指标

国家行业标准^[12]规定重力式分选机除轻杂率不小于 85%,除重杂率不小于 80%,除轻杂率 W_1 、除重杂率 W_2 为

$$W_1 = \frac{Q_1}{Z_1 W_0} \times 100\%$$

(13)



图 8 5TZX-50 型重力分选机实物图

Fig. 8 5TZX-50 gravity separator physical picture

1. 分层喂料系统 2. DFL200N-HJ02S1-075A 型变频器 3. SFWE
- 型面板式调速器 4. TUNYO-RB 型离心风机

$$W_2 = \frac{Z}{Z_2 W_0} \times 100\%$$

(14)

式中 Q_1 ——轻杂排出口样品中含轻杂质量,g
 Z ——重杂排出口样品中含重杂质量,g
 Z_1 ——原始物料中含轻杂率,%
 Z_2 ——原始物料中含重杂率,%
 W_0 ——各排出口样品质量之和,g

4.3 试验设计

选取分层喂料系统的气流速度、振动频率、导流板倾角为试验因素,其编码值分别为 A、B、C,除轻杂率和除重杂率为试验指标。分层喂料系统振动频率适宜范围 8~10 Hz^[2]。采用单因素试验获得分层喂料系统气流速度适宜范围 3.0~3.4 m/s。由流场分析获得导流板倾角适宜范围 27°~31°。为了对比重力分选机分层喂料系统安装前后的性能,选取振动频率为试验因素,除轻杂率和除重杂率为试验指标,在无分层喂料系统的重力分选机上试验。试验因素及编码如表 3 所示。应用 Design-Expert 11 软件,通过 Box-Behnken 响应面优化方法设计^[21-22]。试验方案如表 4,试验编号 1~12 和 18~20 重复 3 次,取平均值。

表 3 因素编码
Tab. 3 Factor coding

编码	因素		
	气流速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	振动频率 f/Hz	导流板倾角 $\alpha/(^{\circ})$
-1	3.0	8	27
0	3.2	9	29
1	3.4	10	31

4.4 回归模型建立与显著性分析

根据表 4 中试验编号 1~17 的数据,在 Design-Expert 11 软件中进行多元回归拟合与方差分析(表 5)。剔除不显著项,建立除轻杂率 W_1 和除重杂率 W_2 指标与气流速度、振动频率、导流板倾角因素

表 4 试验结果
Tab. 4 Test results

试验 编号	试验因素			除轻杂率	除重杂率
	A	B	C	$W_1/\%$	$W_2/\%$
1	-1	-1	0	89.3	87.5
2	1	-1	0	97.5	89.8
3	-1	1	0	88.2	96.9
4	1	1	0	95.8	98.2
5	-1	0	-1	89.5	94.1
6	1	0	-1	96.1	94.7
7	-1	0	1	89.4	90.1
8	1	0	1	97.1	94.4
9	0	-1	-1	95.3	88.9
10	0	1	-1	93.1	97.8
11	0	-1	1	95.3	86.3
12	0	1	1	95.0	94.8
13	0	0	0	96.0	95.2
14	0	0	0	96.2	93.9
15	0	0	0	95.4	93.6
16	0	0	0	95.2	95.0
17	0	0	0	95.6	93.3
18		-1		92.9	87.1
19		0		91.7	92.3
20		1		90.6	96.7

编码值的二次多项式回归模型。实际值方程为

$$W_1 = -577.44 + 376.03v + 6.82f + 0.77\alpha - 0.24f\alpha - 57.88v^2 - 0.67f^2 - 0.09\alpha^2 \quad (R^2 = 0.9924) \quad (15)$$
$$W_2 = -56.82 - 72.50v + 32.13f + 7.11\alpha + 2.31v\alpha + 3.44v^2 - 1.24f^2 - 0.25\alpha^2 \quad (R^2 = 0.9828) \quad (16)$$

方差分析中,除轻杂率回归模型中包含显著交互作用项 $f\alpha$, 包含不显著子项 α^2 , 若排除子项 α^2 将使模型不满足层级结构, 因此将子项 α^2 加入模型。同理, 除重杂率回归模型将不显著子项 v^2 加入模型。

由表 5 可知, 除轻杂率 W_1 和除重杂率 W_2 指标的数学回归模型的 P 值均小于 0.05, 表明模型相关性显著。其失拟项的 P 值分别为 0.551 和 0.889, 均大于 0.05, 表明模型的失拟性不显著, 说明回归模型与试验结果数据误差小。该模型可以用来对实际分选指标进行分析和预测^[23]。

4.5 性能对比分析

由表 4 可知, 分层喂料系统结构参数设计达到了标准^[12]对分选性能的要求。表 4 中试验编号 1 ~ 17 的除轻杂率和除重杂率的平均值是 94.12% 和 93.21%。试验编号 18 ~ 20 的除轻杂率和除重杂率的平均值是 91.73% 和 92.03%, 说明分层喂料系统能够显著提高重力分选机除杂性能, 尤其对除轻杂率指标提高更明显。

表 5 回归模型方差分析
Tab. 5 Regression model variance analysis

试验指标	除轻杂率 W_1		除重杂率 W_2	
	F	P	F	P
模型	102.23	<0.001	44.50	<0.001
v	717.10	<0.001	18.91	<0.004
f	22.23	<0.003	324.36	<0.001
α	6.21	0.042	25.66	<0.002
vf	0.57	0.475	0.52	0.493
$v\alpha$	1.92	0.209	7.17	0.032
$f\alpha$	5.71	0.048	0.08	0.781
v^2	142.88	<0.001	0.17	0.695
f^2	11.79	0.011	13.5	0.008
α^2	3.08	0.123	9.04	0.020
失拟项	0.81	0.551	0.20	0.889

注: $P < 0.05$ 为显著, $P < 0.01$ 为极显著。

4.6 响应面分析

如图 9a 所示, 除轻杂率随气流速度的增大而增加, 随振动频率的增大而减小。由响应面整体趋势来看, 图像沿气流速度方向数据变化剧烈, 而沿振动频率方向变化缓慢, 说明对于除轻杂率, 分层喂料系统的气流速度的作用大于振动频率。实际工作中需要较高除轻杂率时, 可以减少对振动频率的频繁调节, 这一特性使重力分选机的调节难度降低。

如图 9c 所示, 除重杂率随气流速度和振动频率的增大而增加。由响应面整体趋势来看, 图像沿气流速度方向数据变化缓慢, 而沿振动频率方向变化剧烈, 说明对于除重杂率, 分层喂料系统的振动频率的作用大于气流速度。实际工作中需要较高除重杂率时, 可以减少对气流速度的频繁调节, 这一特性使重力分选机的调节难度降低。

如图 9b 和图 9d 所示, 除轻杂率随导流板倾角的增大而缓慢增加, 除重杂率随导流板倾角的增大而减小。由响应面整体趋势来看, 除重杂率受导流板倾角的影响程度高于除轻杂率。实际设计中导流板倾角的取值应兼顾除轻杂率和除重杂率 2 项指标。

4.7 参数优化

为了获得分层喂料系统同时兼顾除轻杂率和除重杂率的最优工作参数组合, 以除轻杂率 W_1 、除重杂率 W_2 为目标函数, 运用 Design-Expert 11 软件的优化分析功能对数学回归模型进行优化分析。优化目标函数和约束函数为

$$W = \begin{cases} \max W_1(v, f, \alpha) \\ \max W_2(v, f, \alpha) \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} v \in [3 \text{ m/s}, 3.4 \text{ m/s}] \\ f \in [8 \text{ Hz}, 10 \text{ Hz}] \\ \alpha \in [27^\circ, 31^\circ] \end{cases} \quad (18)$$

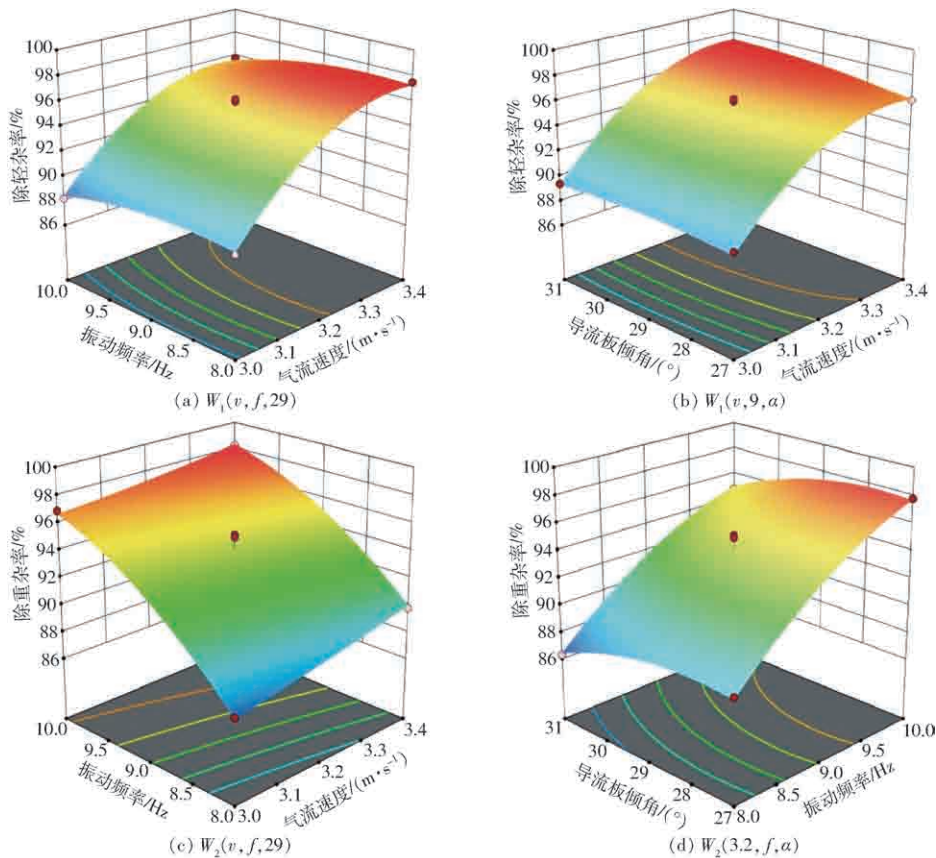


图 9 分层参数对除杂率影响的响应面

Fig. 9 Effect of stratified parameters on response surface of impurity removal rate

式中 W ——目标函数, %

通过软件选出满意度最高的参数组合为 $v = 3.40\text{ m/s}$, $f = 9.75\text{ Hz}$, $\alpha = 29.65^\circ$, 对应的目标函数预测值为: $W_1 = 96.43\%$, $W_2 = 97.58\%$ 。将选出的参数组合在重力分选机上进行验证试验, 获得分选指标为 $W_1 = 95.12\%$, $W_2 = 96.37\%$, 与软件选出值的相对误差分别为 1.36% 和 1.24%, 说明回归模型有效, 能够指导相关设计, 指导设备分选参数调节和预测实际分选指标。

5 结论

(1) 分层喂料系统结构参数设计达到了标准对分选性能的要求, 各部位的应力和位移在安全范围,

流速分布、静压场分布、离子流动迹线满足工作需要。

(2) 对于除轻杂率, 分层喂料系统的气流速度的作用大于振动频率; 对于除重杂率, 分层喂料系统的振动频率作用大于气流速度。

(3) 分层喂料系统使气流速度和振动频率分别对除重杂率和除轻杂率的影响变小, 降低了重力分选机使用的调节难度。

(4) 分层喂料系统能够显著提升重力分选机除杂性能。最佳参数组合为: 气流速度 $v = 3.40\text{ m/s}$, 振动频率 $f = 9.75\text{ Hz}$, 导流板倾角 $\alpha = 29.65^\circ$ 。此组合下除轻杂率和除重杂率试验值为 95.12% 和 96.37%。

参 考 文 献

[1] 王旭, 李小燕, 王全喜, 等. 台式重力分选机设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(4): 91-97, 103.
WANG Xu, LI Xiaoyan, WANG Quanxi, et al. Design and experiment of the desktop gravity separator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(4): 91-97, 103. (in Chinese)

[2] 王旭. 苜蓿种子重力分选性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
WANG Xu. Experimental study on gravity separation property of alfalfa seeds[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[3] 阴伟锋. 粮食比重去石机和种子重力分选机玉米提胚试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
YIN Weifeng. Study on the corn germ separation using specific gravity stoner of grain and the gravity separator of seed[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014. (in Chinese)

[4] 颜克涛. 台面式种子分选机的分选机理和小麦分选试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
YAN Ketao. Sorting mechanism and wheat sorting experimental study of mesa type seed sorting machine[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005. (in Chinese)

[5] 李毅念, 王俊. 稻谷按厚度分级加工后的特性与应用分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 181-186.

- LI Yinian, WANG Jun. Characteristics of rice fractionated by rice kernel thickness and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 181–186. (in Chinese)
- [6] 朱玉昌. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)污染小麦重力分选研究及设备研制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- ZHU Yuchang. Study on the separation technology and equipment for DON-contaminated wheat with gravity separator[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [7] 王全喜, 张俊国, 包德胜, 等. 牧草种子加工线设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 113–118.
- WANG Quanxi, ZHANG Junguo, BAO Desheng, et al. Design and experiment of forage seed processing line[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 113–118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s119&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.019. (in Chinese)
- [8] 王国强, 王晓冬, 张海春, 等. 丹麦 GA100 型重力分选机结构特点及使用调试[J]. 新疆农机化, 2007(1): 52–53.
- [9] 王艳丰, 梁中华, 刘兆丰, 等. 5XFZ-30.0 型重力复式清选机单向倾斜比重筛参数的选择与试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 115–119.
- WANG Yanfeng, LIANG Zhonghua, LIU Zhao Feng, et al. Selection of parameters and experiment of one-way inclining gravity screen for 5XFZ-30.0 model gravity cleaner[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 115–119. (in Chinese)
- [10] 胡志超, 谢煊雄, 计福来, 等. 5XZ-5 型重力式精选机的研制[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 193–196, 201.
- HU Zhichao, XIE Huanxiong, JI Fulai, et al. Design of 5XZ-5 gravity separator[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007, 35(7): 193–196, 201. (in Chinese)
- [11] WEI Lubin, SUN Mingyang. Numerical studies of the influence of particles' size distribution characteristics on the gravity separation performance of liquid-solid fluidized bed separator[J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 157: 111–119.
- [12] 中华人民共和国农业部. NY/T 372—2010 重力式种子分选机质量评价技术规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [13] 王兆国, 冯显英, 王昊鹏. 籽棉清理漏斗形重杂分离器的参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 30–36.
- WANG Zhaoquo, FENG Xianying, WANG Haopeng. Parameter optimization and experiment of funnel-shaped heavy impurity separator in seed cotton cleaning process[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 30–36. (in Chinese)
- [14] 张之仪. 机械化运输设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [15] 蒋恩臣, 孙占峰, 潘志洋, 等. 超级稻摘穗收获机沉降箱性能分析与运行参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 100–105.
- JIANG Enchen, SUN Zhanfeng, PAN Zhiyang, et al. Performance analysis and operational parameters optimization of deposition chamber to clean super rice in stripper combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 100–105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150115&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.015. (in Chinese)
- [16] 王全喜, 马卫民, 王振华, 等. 禾本科牧草种子收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 96–101.
- WANG Quanxi, MA Weimin, WANG Zhenhua, et al. Design and experiment on gramineous herbage seed harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 96–101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s219&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.019. (in Chinese)
- [17] 王全喜, 王德成, 杜建强, 等. 牧草种子热泵辅助型太阳能储热干燥设备设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 222–226, 265.
- WANG Quanxi, WANG Decheng, DU Jianqiang, et al. Design and experiment on heat pump assisted solar energy heat-storage drying equipment of herbage seed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 222–226, 265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s45&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.045. (in Chinese)
- [18] 王全喜, 王德成, 翟改霞, 等. 苜蓿种子制丸的平底釜工作参数试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 59–62, 78.
- WANG Quanxi, WANG Decheng, ZHAI Gaixia, et al. Operation parameters experiment of kettle for alfalfa seed pelleting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 59–62, 78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s12&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.012. (in Chinese)
- [19] 王文明, 王春光. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 82–89.
- WANG Wenming, WANG Chunguang. Parameter analysis and simulation of spring-finger cylinder pickup collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 82–89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121015&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.015. (in Chinese)
- [20] 周显青, 张玉荣, 褚洪强, 等. 糙米机械破碎力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 255–262.
- ZHOU Xianqing, ZHANG Yurong, CHU Hongqiang, et al. Experiment and analysis of mechanical properties of mechanical crushing brown rice[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18): 255–262. (in Chinese)
- [21] 刘文帅, 姚小敏, 李超群, 等. 基于响应面和遗传算法的尾座式无人机结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 88–95.
- LIU Wenshuai, YAO Xiaomin, LI Chaoqun, et al. Optimization of configuration parameters of tail-sitter UAV based on response surface and genetic algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 88–95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190510&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.010. (in Chinese)
- [22] 谢胜仕, 王春光, 邓伟刚, 等. 摆动分离筛薯土分离机理分析与参数优化试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 156–164.
- XIE Shengshi, WANG Chunguang, DENG Weigang, et al. Separating mechanism analysis and parameter optimization experiment of swing separation sieve for potato and soil mixture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 156–164. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171119&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.019. (in Chinese)
- [23] 王永维, 唐海燕, 王俊, 等. 蔬菜钵苗高速移栽机吊杯式栽植器参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 91–99.
- WANG Yongwei, TANG Haiyan, WANG Jun, et al. Parameter optimization for dibble-type planting apparatus of vegetable pot seedling transplanter in high-speed condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 91–99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160113&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.013. (in Chinese)