# 一种艾根有序分离-种植装置设计与试验

吴 杰[1] 张诚先[1] 李 奕[2*] 张道德[1,2]
1.湖北工业大学农机工程研究设计院,武汉,430068
2.湖北工业大学机械工程学院,武汉,430068

**摘要**:针对艾根有序分离难的问题,基于双带式结构与差速翻滚运动原理设计了一种艾根有序分离装置。依据艾根分离要求与物料物理力学特性设计装置结构方案,完成三维实体建模以明确影响合格率的关键因素,并计算间隙调节装置的结构参数;通过单因素试验、Plackett-Burman试验、Steepest ascent试验及Box-Behnken试验确定最优结构参数(两带间间隙13 mm、带A速度120 mm/s、带A倾角55°、带B速度90 mm/s、带B倾角45°);最后,研制艾根分离装置并搭建台架试验系统。试验结果表明,分离装置的合格率可达83.2%,与仿真模拟结果的相对误差为3.86%。该分离装置运行平稳且符合艾根机械化分离要求,可为非规则形态根茎作物分离提供理论与技术参考。

**关键词**:艾根;有序分离;双带差速;间隙排量模型;分离试验
**中图分类号**:S223.2
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.013 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

## Design and Test of an Orderly Separation-Planting Device for Mugwort Roots

WU Jie[1] ZHANG Chengxian[1] LI Yi[2*] ZHANG Daode[1,2]
1.Agricultural Machinery Engineering Research and Design Institute, Hubei University of Technology, Wuhan, 430068
2.School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, 430068

**Abstract**: Aiming at the problems of difficult orderly separation of mugwort roots, an orderly separation device was designed for mugwort roots based on the double-belt structure and the principle of differential rolling motion. According to the separation requirements of mugwort roots and the physical and mechanical properties of the materials, the structural scheme of the device was designed, 3D solid modeling was completed to identify the key factors affecting the qualification rate, and the structural parameters of the gap adjustment device were calculated. Through single-factor experiments, Plackett-Burman experiments, Steepest ascent experiments and Box-Behnken experiments, the optimal combination of structural parameters was determined(the gap between the two belts is as 13 mm, the speed of Belt A is as 120 mm/s with an inclination angle of 55°, and the speed of Belt B is as 90 mm/s with an inclination angle of 45°). Finally, a mugwort root separation device was developed and a bench test system was built. The testing results show that the qualification rate of the separation device reaches 83.2%, with a relative error of 3.86% compared with the simulation results. The separation device operates stably and meets the requirements of mechanized separation of mugwort roots, which may provide theoretical and technical references for the separation of irregular rhizome crops.

**Key words**: mugwort root; orderly separation; double-belt differential motion; gap displacement model; separation test

## 0 引言

艾草是菊科多年生草本植物,遍布中国各地区,它是制作艾条、艾柱的主要原料,在艾灸治疗中可温暖经络、驱散寒气、除湿及缓解疼痛[1]。近年来,湖北、河南、河北等省开始大面积人工栽培艾草,蕲艾亦成为湖北省种植面积与产值最大的中药材单品种。尽管蕲春艾草行业呈现快速增长态势,但是艾草栽培以分株繁殖、根状茎繁殖的无性育苗为主,目前仍依赖人工种植,产业机械化程度低[2],导致劳动力投入大、人工费用高、种植效率低,严重影响艾草产业现代化进步与持续发展潜力。因此,研发适合艾草种植的机械化设备是

**收稿日期**:2025-09-13
**基金项目**:湖北省科技厅重大专项(2024BAA014);湖北省农业农村厅项目(HBSNYNCT202309)

推进产业机械化转型的关键，为此提出并设计用于艾根分离的装置，以方便艾根播种。

目前尚未见艾草种植设备及长条形根茎种子分离的研究，但较为类似的作物播种机械已有探索。在甘蔗播种机械方面，WANG等[3]设计了甘蔗单芽段播种机，其耙齿链输送机构对艾根分离有借鉴意义；MA等[4]为甘蔗种植机设计了多级链条横向定量装置；GAN等[5]设计的甘蔗补种装置通过链槽与滚轮耙优化播种；ZHONG等[6]的双芽甘蔗种植机采用多级链条输送种子。在马铃薯播种机械方面，BUITENWERF等[7]设计的杯式皮带播种机通过优化参数提高了马铃薯播种精度；XING等[8]优化了链式勺式排种器；LU等[9]分析了多种马铃薯播种计量装置。上述研究虽在甘蔗、马铃薯播种领域取得进展且多采用链结构与孔带式附加振动结构，但因艾根与二者形状尺寸差异显著，现有结构难以实现艾根有序分离，故需设计全新的分离装置。

针对上述问题，本文根据艾根农艺分离要求及艾根物料特性设计了一种双皮带式艾根分离装置，并对分离装置内部的艾根进行受力分析，以确定最佳的机构结构与运动参数；结合EDEM仿真试验与Design-Expert 13数据分析验证了分离装置的可行性；完成了艾根分离装置的结构设计与样机加工，并通过台架试验反向验证了分离装置的可行性。

## 1 总体结构与工作原理

艾根分离装置结构如图1所示。从动轴固定于间隙调节装置（由滑块、连杆、导轨组成），该装置用于调整两从动轴间隙；两皮带倾角可通过角度调节轮沿壳体弧形槽滑动调节；张紧轮固定在两皮带内部，用于调整皮带张紧程度；清种刷末端固定软质金属片，金属片贴合皮带表面，可防止艾根从上部排出。

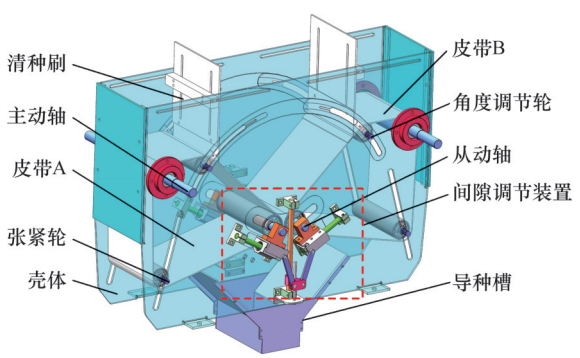
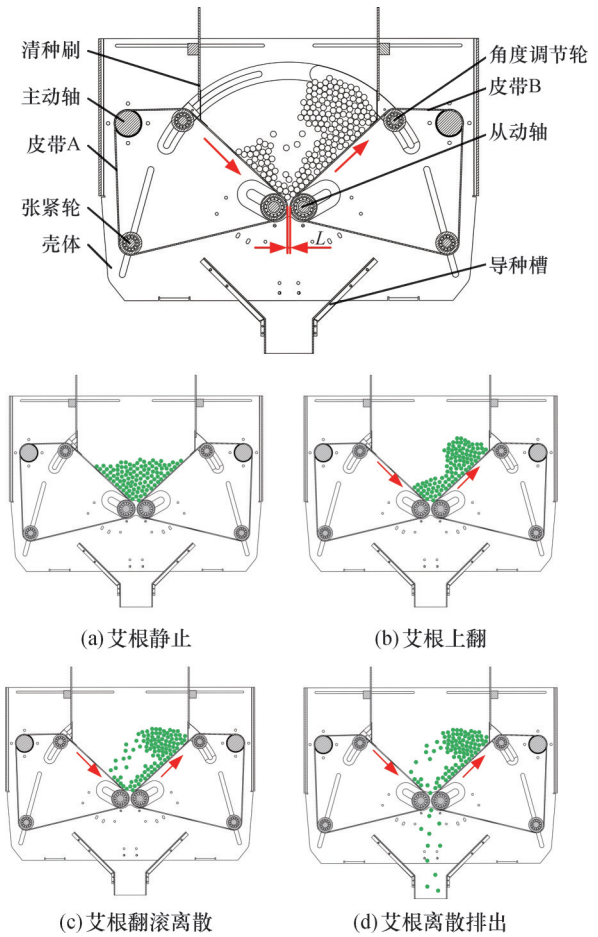



**图1 艾根分离装置示意图**

**Fig.1 Schematic diagram of the mugwort root separation device**

分离装置的工作过程如图2所示，准备工作阶段需先通过间隙调节装置确定并调整两皮带间隙$L$，再利用角度调节轮确定并调节两皮带倾角，随后借助张紧轮调节皮带张紧程度，最后调整并固定清种刷；进入工作过程后，动力从两侧主动轴输入，带动两皮带转动（一根向下、一根向上，方向如图2中箭头所示），初始时艾根静止于分离器内（图2a），电机启动后艾根沿右侧向上皮带翻滚（图2b），待右侧艾根堆积到一定程度时会翻滚至左侧皮带上（图2c），最终艾根到达两皮带底部并从间隙排出（图2d），工作过程中清种刷会阻挡艾根从皮带上方流出，导种槽则控制艾根流向。




注：红色箭头表示皮带运动方向，绿色圆圈表示艾根截面。

**图2 分离装置工作过程示意图**

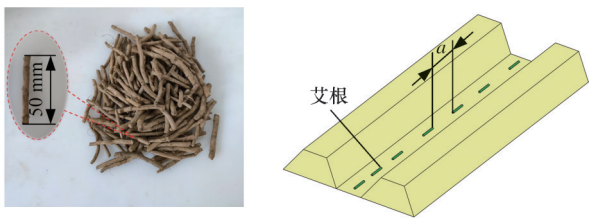
**Fig.2 Schematic diagram of the operating process for separation device**

## 2 关键部件设计与参数分析

### 2.1 艾根外形及农艺要求

本研究以湖北蕲春5～6月采收的艾根为研究对象，随机选取100根艾根，采用精度为0.01 mm的电子游标卡尺测定其直径，结果显示艾根平均直径为4.35 mm，如图3a所示。相较于大

豆、玉米、花生、棉花种子这类近似圆粒种子，艾根属于一种长条形根茎类的种植作物；而相较于甘蔗，虽然两者均是长条形根茎类种子，但艾根尺寸小，且受力后易发生弯曲变形、韧性高。对艾根形态笔直程度进行统计分析，其中笔直的占63.2%、基本笔直的占32.1%、显著弯曲的占4.7%。剔除显著弯曲样本后，95.3%的艾根呈笔直类形态。根据蕲春当地农艺要求，艾根裁剪长度需控制在30～60 mm。试验统计结果表明，艾根裁剪长度越小，形态越趋于笔直，本试验选取裁剪长度为50 mm的艾根作为试验样本。蕲春县艾草种植的农艺分离要求如图3b所示，播种后对艾根朝向无要求，两艾根之间距离$a$处于0～50 mm范围内为合格，否则判定为漏播；在相同位置处的艾根数量不得多于4根，否则属于分离不充分视为种植不合格。艾草通常将艾根作为种子进行种植，这种方式较为罕见。蕲春艾草种植以艾根种植为主，目前仍采用人工手动种植方式，缺乏适用于艾根播种的机具，由此需要设计一种特殊的艾根分离装置以提高艾根播种效率。




(a)艾根试验样本　　(b)艾根分离农艺要求

**图3　艾根试验样本与分离农艺要求**

**Fig.3　Mugwort root test samples and agronomic separation requirements**

## 2.2　艾根分离装置的设计

### 2.2.1　种箱宽度的确定

分离装置的种箱宽度$W$对分离装置的排量有一定的影响，初定种箱宽度为艾根长度的3倍，设置$W$=150 mm。

### 2.2.2　带间间隙的确定

带间的间隙$L$是影响分离装置性能的关键因素。间隙$L$过小会导致分离装置发生堵塞，间隙$L$过大会影响分离装置的分离效果，参考艾根的直径与前期仿真效果，初步确定间隙$L$的最小值为9 mm、最大值为17 mm。

### 2.2.3　带运动方向与倾角的确定

根据前期研究，艾根休止角平均值为36.6°，艾根与带的滚动摩擦角平均值为13°，滚动摩擦因数为0.5，为保证艾根在分离装置内离散充分，两带的倾斜角度应不低于36.6°。两带的运动方向可分为如下3种情况：

1)当两带均向上运动、角度均为36.6°时，此时角度大于艾根与带的滚动摩擦角，大部分艾根会在底部发生滑移现象，导致分离装置发生堵塞；

2)当两带均向下运动时，此时两侧艾根向下运动，导致分离装置发生堵塞；

3)当一带向上运动、另一带向下运动时，此时的艾根受力如图4所示，为便于受力分析，艾根在分离装置内呈有序排布。

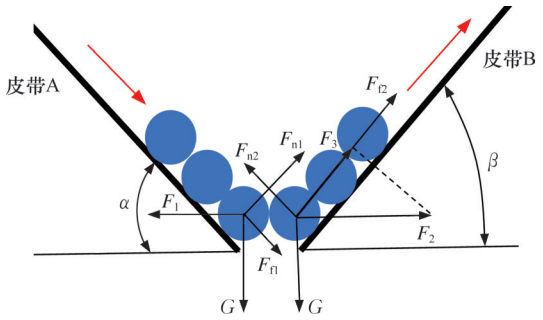



**图4　受力分析图**

**Fig.4　Force analysis diagram**

由图4可知，在分离过程中左侧带的线速度向下，右侧带的线速度向上。左侧底部艾根受到重力$G$、左侧带的支持力$F_{n1}$、左侧带摩擦力$F_{f1}$、右侧艾根的推力$F_1$；右侧底部艾根受到重力$G$、右侧带的支持力$F_{n2}$、右侧带摩擦力$F_{f2}$、左侧艾根的推力$F_2$($F_3$为$F_2$在斜面上的分力)。

对左侧艾根的受力分析如下：

$$\left.\begin{aligned} F_{n1}&=G\cos\alpha+F_1\sin\alpha\\ F_{f1}&=\mu F_{n1}\\ F_1\cos\alpha&=F_{f1}+G\sin\alpha \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

对右侧艾根的受力分析如下：

$$\left.\begin{aligned} F_{n2}&=G\cos\beta+F_2\sin\beta\\ F_{f2}&=\mu F_{n2}\\ F_3+F_{f2}&=F_2\cos\beta+F_{f2}=F_{sum}>G\sin\beta\\ F_1&=F_2 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：$F_{sum}$为艾根沿带向上的合力；$\alpha$为左侧向下运动的皮带A倾角；$\beta$为右侧向上运动的皮带B倾角。

由式(1)、式(2)可知，当右侧艾根无左侧艾根的推力$F_2$时，大部分艾根会发生滑移现象，而当左侧带向下运动时，右侧艾根会受到左侧艾根的推力$F_2$，经计算$F_{sum}$大于艾根沿带向下的力，即艾根会沿带向上运动；左侧艾根会受到带沿斜向下的摩擦力，便于从间隙排出，可提高分离装置的分离性能；当沿斜向上运动带的$\beta$角逐渐增大时，艾根所受沿带向上的合力先增大后减小，从而会影响分离装置的分离性能。

综上，分离装置带的运动方向在两侧相反。由此开展仿真试验，并初定两带的最小倾角为35°、最大倾角为55°。

#### 2.2.4 带速度的确定

考虑艾根在分离装置内的运动具有复杂性，通过大量的仿真试验，初定分离装置带A与带B的最小速度均为65 mm/s、最大速度均为175 mm/s。

## 3 EDEM离散元仿真与试验

### 3.1 仿真参数的确定与仿真试验模型的建立

#### 3.1.1 仿真目的

为了优化带间间隙、带A与带B的速度及倾角参数组合，应用EDEM离散元仿真，通过参数优化实现分离装置合格率的最大化。

#### 3.1.2 仿真参数的确定

根据前期大量的试验与相关文献[10-12]得到艾根的本征参数以及艾根与艾根、带(橡胶)、铝合金的接触参数，如表1所示。

**表1 离散元仿真参数**

**Tab.1 Discrete element simulation parameters**

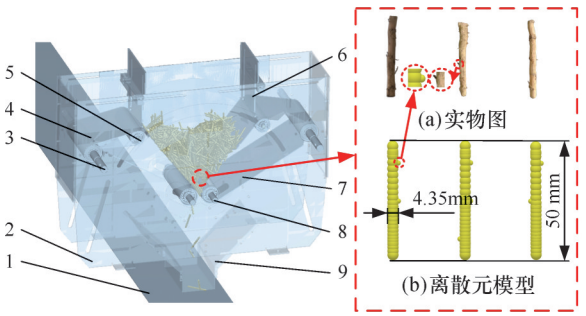
| 项目 | 参数 | 数值 | 项目 | 参数 | 数值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 艾根 | 泊松比 | 0.36 | 艾根-艾根 | 碰撞恢复系数 | 0.18 |
| | 剪切模量/MPa | 12.0 | | 静摩擦因数 | 0.35 |
| | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 1.29 | | 滚动摩擦因数 | 0.15 |
| 橡胶 | 泊松比 | 0.38 | 艾根-橡胶 | 碰撞恢复系数 | 0.23 |
| | 剪切模量/MPa | 0.9 | | 静摩擦因数 | 0.96 |
| | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 1000 | | 滚动摩擦因数 | 0.5 |
| 铝合金 | 泊松比 | 0.25 | 艾根-铝合金 | 碰撞恢复系数 | 0.33 |
| | 剪切模量/GPa | 27 | | 静摩擦因数 | 0.40 |
| | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 2700 | | 滚动摩擦因数 | 0.21 |

#### 3.1.3 仿真试验模型的建立

在EDEM软件中，采用Hertz-Mindlin(noslip)模型进行仿真试验[13]。艾根近似圆柱体，通过球形颗粒组合的方法[14-16]在EDEM软件中将直径为4.35 mm的球形颗粒依次排列组合成长度为50 mm的艾根刚性模型。由于艾根部分位置长有小短的侧根，故按照实物依次在模型上添加凸包，如图5a所示。在SolidWorks软件中创建艾根分离装置的三维模型，简化后的模型如图5b所示。其中输送带模拟地面移动，其线速度设定为0.5 m/s。

### 3.2 分离装置的仿真试验过程及方法

在EDEM软件中构建艾根颗粒模型，静态生成共2500根三类艾根颗粒，静置3 s后启动双带及输送带系统，仿真时长为10 s，选取1～9 s(仿真启动1 s后)作为有效分析区间以评估分离装置的合格率。




1. 输送带 2. 壳体 3. 主动轴 4. 皮带A 5. 角度调节轮 6. 清种刷 7. 皮带B 8. 从动轮 9. 导种槽

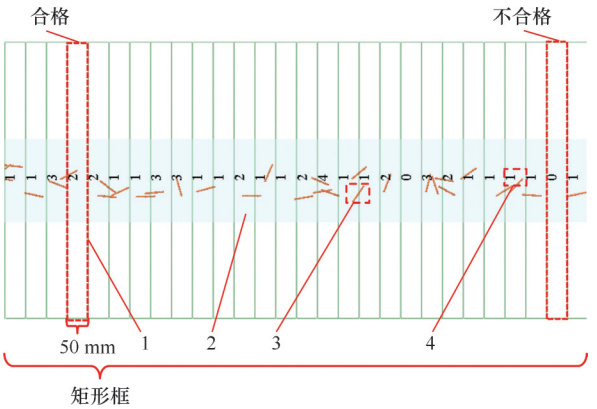
**图5 仿真简化模型**

**Fig.5 Simplified simulation model**

分离装置的合格率测量方法如图6所示，合格率测定采用Analyst的Grid Bin Group格子计数方法。设置沿输送带方向上长度为50 mm的矩形框32个(即在长度为1.6 m的区域测定分离装置合格率)，在每个矩形框内记录相应位置的艾根数量，最后统计每个格子中的艾根数量，合格率的计算公式如下：

$$Q=\frac{n}{N} \tag{3}$$

式中：$Q$为合格率；$N$为矩形框总数；$n$为合格的矩形框数量。




1. 计数矩形框 2. 输送带 3. 艾根 4. 计数数值

**图6 艾根合格率测定方法**

**Fig.6 Determination method for qualification rate of mugwort roots**

### 3.3 参数优化与试验

Plackett-Burman试验可筛选出对试验结果影响显著的因素；Steepest ascent试验根据误差之间的数值增减趋势来确定最佳取值范围；Box-Behnken试验对显著参数进行BBD试验以得到最优组合参数[17-19]。

以分离装置中的间隙、带A倾角、带A速度、带B倾角、带B速度进行分离装置的Plackett-Burman试验，考虑后续加工以及带的包角问题，

结合单因素仿真试验与前期大量仿真得到试验编码如表2所示，Plackett-Burman试验方案与结果如表3所示。

**表2　Plackett-Burman试验因素编码**

**Tab.2　Factor coding for the Plackett-Burman experiment**

| 仿真参数 | 编码 | | |
|---|---|---|---|
| | −1 | 0 | 1 |
| 两带间间隙$x_1$/mm | 10.0 | 13.5 | 17.0 |
| 带A倾角$x_2$/(°) | 35 | 45 | 55 |
| 带A速度$x_3$/(mm·s$^{-1}$) | 65 | 120 | 175 |
| 带B倾角$x_4$/(°) | 35 | 45 | 55 |
| 带B速度$x_5$/(mm·s$^{-1}$) | 65 | 120 | 175 |

**表3　Plackett-Burman试验方案与结果**

**Tab.3　Plackett-Burman experimental design and results**

| 序号 | 因素 | | | | | 合格率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | |
| 1 | 1 | 1 | −1 | 1 | 1 | 31.2 |
| 2 | −1 | 1 | 1 | −1 | 1 | 62.5 |
| 3 | 1 | −1 | 1 | 1 | −1 | 28.1 |
| 4 | −1 | 1 | −1 | 1 | 1 | 56.2 |
| 5 | −1 | −1 | 1 | −1 | 1 | 56.2 |
| 6 | −1 | −1 | −1 | 1 | −1 | 59.4 |
| 7 | 1 | −1 | −1 | −1 | 1 | 12.5 |
| 8 | 1 | 1 | −1 | −1 | −1 | 53.1 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | −1 | −1 | 50.0 |
| 10 | −1 | 1 | 1 | 1 | −1 | 65.6 |
| 11 | 1 | −1 | 1 | 1 | 1 | 15.6 |
| 12 | −1 | −1 | −1 | −1 | −1 | 53.1 |

表4所示的试验分析结果表明，两带间的间隙$x_1$、带A倾角$x_2$、带B速度$x_5$三者的$P$值均小于0.05，说明三者对合格率有显著影响。

**表4　Plackett-Burman试验结果显著性分析**

**Tab.4　Significance analysis of Plackett-Burman experimental results**

| 来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$值 | $P$值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 3496.8 | 5 | 699.36 | 17.21 | 0.0017 |
| $x_1$ | 2200.5 | 1 | 2200.52 | 54.14 | 0.0003 |
| $x_2$ | 731.64 | 1 | 731.64 | 18.00 | 0.0054 |
| $x_3$ | 13.02 | 1 | 13.02 | 0.32 | 0.5919 |
| $x_4$ | 81.64 | 1 | 81.64 | 2.01 | 0.2062 |
| $x_5$ | 470.00 | 1 | 470.00 | 11.56 | 0.0145 |

以该显著性最高的三个因素进行Steepest ascent试验，显著性较小的因素取测量值的中心水平，即取$x_3$=120 mm/s、$x_4$=45°。Steepest ascent试验方案与结果如表5所示。

对Steepest ascent试验结果进行分析，试验结果表明，2号试验的合格率最高(75.0%)，3号试验合格率为71.8%，两次试验的合格率相差较小，为锁定最优参数区间，选取1号试验为高水平，4号试验为低水平，并进行三因素三水平Box-Behnken试验。Box-Behnken试验参数编码如表6所示，对应试验方案与结果如表7所示，其中第13～17组试验的三个因素均设置为中间水平，理论上输出结果应保持一致，但实测结果存在小幅偏差，该现象属于正常试验误差。为提高试验准确性，将矩形框个数增加至86(即在长度为4.3 m的区域测定分离装置合格率)并在此基础上开展

**表5　Steepest ascent试验方案与结果**

**Tab.5　Steepest ascent experimental design and results**

| 序号 | 因素 | | | 合格率/% |
|---|---|---|---|---|
| | $x_1$/mm | $x_2$/(°) | $x_5$/(mm·s$^{-1}$) | |
| 1 | 11.0 | 55 | 70.0 | 53.1 |
| 2 | 12.5 | 50 | 95.0 | 75.0 |
| 3 | 14.0 | 45 | 120.0 | 71.8 |
| 4 | 15.5 | 40 | 147.5 | 59.3 |
| 5 | 17.0 | 35 | 170.0 | 53.1 |

**表6　Box-Behnken试验参数编码**

**Tab.6　Parameter encoding for Box-Behnken experiment**

| 编码 | 因素 | | |
|---|---|---|---|
| | $x_1$/mm | $x_2$/(°) | $x_5$/(mm·s$^{-1}$) |
| 1 | 16 | 55 | 146 |
| 0 | 13 | 50 | 108 |
| −1 | 11 | 40 | 70 |

**表7　Box-Behnken试验方案与结果**

**Tab.7　Box-Behnken experimental design and results**

| 序号 | 因素 | | | 合格率% |
|---|---|---|---|---|
| | $x_1$ | $x_2$ | $x_5$ | |
| 1 | −1 | −1 | 0 | 67.4 |
| 2 | 1 | −1 | 0 | 59.3 |
| 3 | −1 | 1 | 0 | 75.5 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 65.1 |
| 5 | −1 | 0 | −1 | 72.1 |
| 6 | 1 | 0 | −1 | 65.1 |
| 7 | −1 | 0 | 1 | 63.9 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 55.8 |
| 9 | 0 | −1 | −1 | 72.1 |
| 10 | 0 | 1 | −1 | 83.7 |
| 11 | 0 | −1 | 1 | 63.9 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 68.6 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 80.2 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 75.5 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 77.9 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 76.7 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 74.4 |

Box-Behnken试验。

Box-Behnken试验结果的显著性分析如表8所示。由试验分析结果可知，$x_1$、$x_2$、$x_5$、$x_1^2$、$x_5^2$对合格率的影响显著，其他对合格率的影响不显著。决定系数$R^2$为0.9468，此模型方差接近于1，回归模型($P$=0.0005)显著，失拟项($P$=0.7479)不显著，说明此模型可靠性较高。

**表8 Box-Behnken试验结果显著性分析**

**Tab.8 Significance analysis of Box-Behnken experimental results**

| 来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$值 | $P$值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 905.45 | 9 | 100.61 | 26.57 | 0.0001** |
| $x_1$ | 141.12 | 1 | 141.12 | 37.27 | 0.0005** |
| $x_2$ | 114.01 | 1 | 114.01 | 30.11 | 0.0009** |
| $x_5$ | 208.08 | 1 | 208.08 | 54.96 | 0.0001** |
| $x_1x_2$ | 1.32 | 1 | 1.32 | 0.3493 | 0.5731 |
| $x_1x_5$ | 0.3025 | 1 | 0.3025 | 0.0799 | 0.7856 |
| $x_2x_5$ | 11.9 | 1 | 11.9 | 3.14 | 0.1195 |
| $x_1^2$ | 339.73 | 1 | 339.73 | 89.73 | 0.0001** |
| $x_2^2$ | 5.4 | 1 | 5.4 | 1.43 | 0.2713 |
| $x_5^2$ | 58.66 | 1 | 58.66 | 15.49 | 0.0056** |

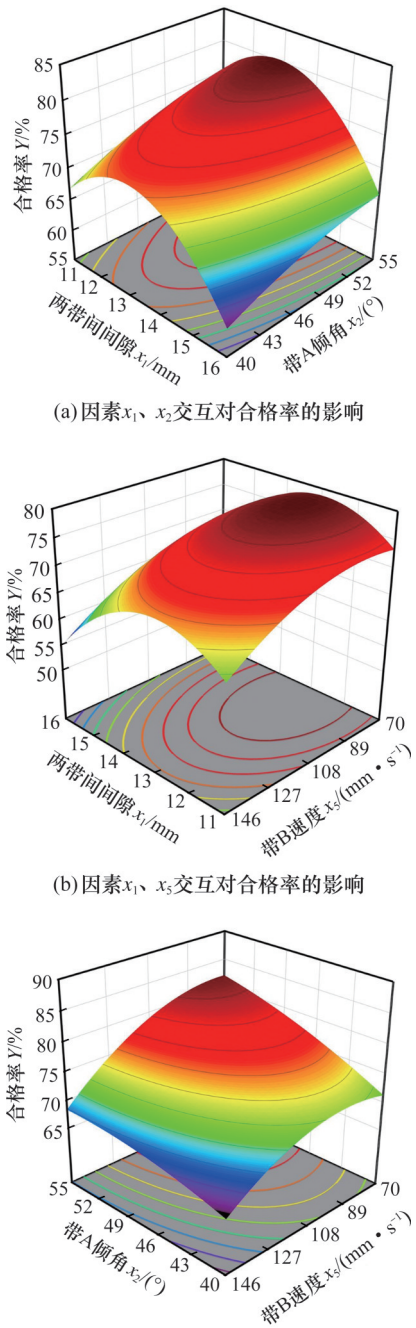
除去合格率中的不显著因素外，合格率与显著因素的回归方程为

$$Y=76.46-4.2x_1+3.78x_2-5.10x_5-9.04x_1^2-3.79x_5^2 \tag{4}$$

由式(4)可知，影响分离装置合格率$Y$的主次因素依次为两带间的间隙$x_1$、带B速度$x_5$、带A倾角$x_2$。

采用Design.Expert软件对仿真试验得到的数据进行处理，得到三因素对分离合格指数影响的响应曲面，如图7所示[20-22]。由图7a可知，当带A倾角不变时，随着间隙的增大，分离装置合格率呈现先增大后减小的趋势；当间隙大小不变时，随着带A倾角的增大，分离装置合格率呈现缓慢增大的趋势。由图7b可知，当带B速度不变时，随着间隙的增大，分离装置合格率呈现先增大后减小的趋势；当间隙不变时，随着带B速度的增大，分离装置合格率呈现先增大后减小的趋势。由图7c可知，当带B速度不变时，随着带A倾角的增大，分离装置合格率呈现缓慢减小的趋势；当带A倾角不变时，随着带B速度的增大，分离装置合格率呈现先增大后减小的趋势。

以最大合格率为研究对象，得到分离装置的最优组合如下：间隙为12.5 mm、带B速度为88.3 mm/s、带A倾角为55°。为便于台架试验调试设置间隙为13 mm、带B速度为90 mm/s。开展数次仿真试验，部分结果如图8所示，可以看出，艾根分布较为均匀，分离装置运行稳定。




(a)因素$x_1$、$x_2$交互对合格率的影响

(b)因素$x_1$、$x_5$交互对合格率的影响

(c)因素$x_2$、$x_5$交互对合格率的影响

**图7 因素交互对合格率的影响**

**Fig.7 Effects of factor interactions on the qualified rate**

如图9所示，共进行10次仿真试验，可知合格率的平均值为79.99%，表明分离情况良好。为进一步确认分离装置的性能，需开展分离装置的台架试验进行进一步验证。

## 4 分离装置台架试验

分离装置的台架试验装置如图10所示，试验地点为湖北工业大学实验室。图10中两主动轴由两直流电机驱动；导种装置将散落在输送带两

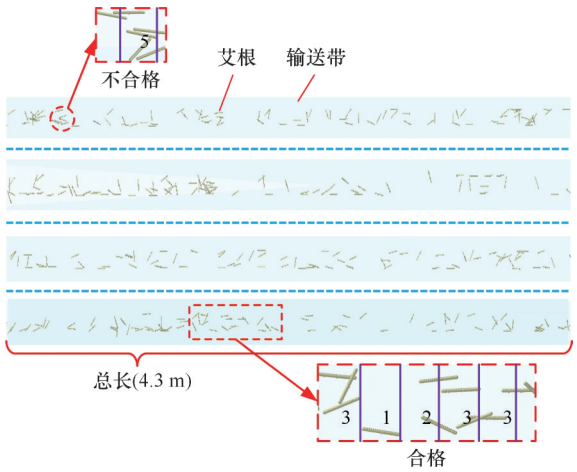



图 8　部分艾根分布仿真结果

Fig.8　Partial simulation results for the distribution of mugwort roots

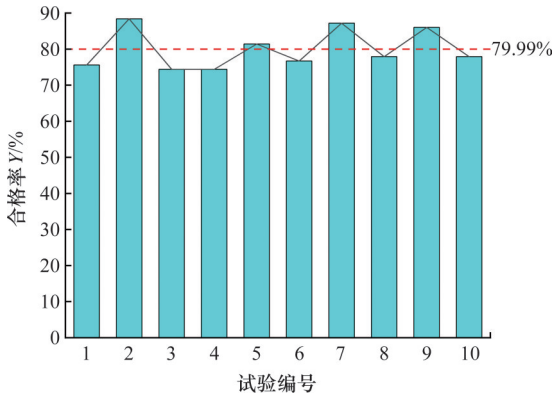



图 9　仿真试验结果

Fig.9　Simulation experimental results

侧的艾根集中排序，方便记录分析数据。

试验设备包括电机（60 W、DC24 V、1.5 N·m

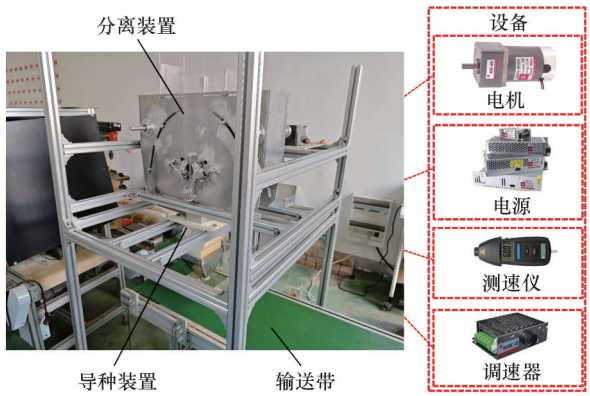



图 10　分离装置主要零部件

Fig.10　Main components of separation device

扭矩）、电源、测速仪（量程 2.5～99 999.0 r/min）及调速器，输送带速度设为 0.5 m/s。试验流程如下：先校准电机转速，向分离装置放入定量艾根，接通输送带电源，再启动分离装置双电机并计时，15 s 后断电，最后用卷尺测量艾根分布以计算合格率并记录数据。相同条件下不同参数对合格率的影响如图 11 所示。图 11a 表明带 A 倾角增大时合格率先急升后缓增，当带 A 倾角为 35°时艾根分布不均，合格率最低；图 11b 表明带 B 速度增大时合格率先升后骤降，带 B 速度为 80 mm/s 时艾根分布较为均匀；图 11c 表明两带间隙增大时合格率先升后降，间隙为 18 mm 时出现多处多播的情况，重播严重。综上，三类试验结果表明分离装置的合格率受上述三因素显著影响，与仿真结论基本吻合。

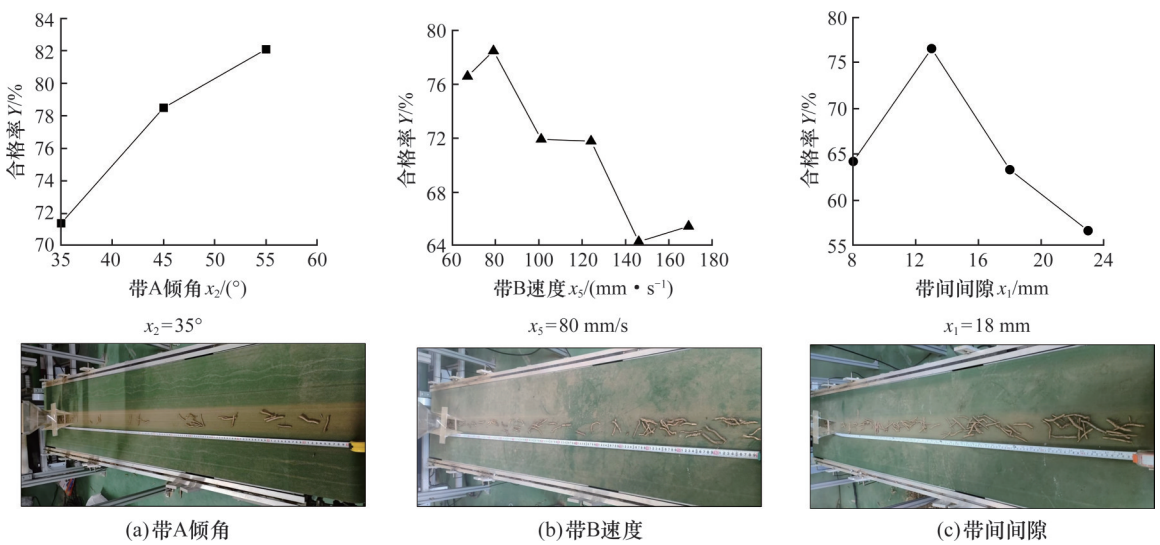



图 11　各变量参数与合格率的关系

Fig.11　Relationship between variable parameters and qualification rate

结合仿真试验，设定带 A 与带 B 的倾角分别为 55°和 45°、两带之间的间隙为 13 mm、带 A 和带 B 速度分别为 120 mm/s 和 90 mm/s。重复上述台架试验数次，试验结果如图 12 所示，可以看出，艾根的排列相对均匀，这也验证了分离装置的可行性和合理性。

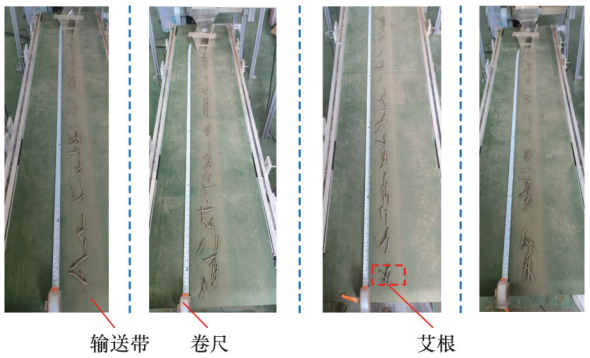



图12 分离装置试验结果

Fig.12 Test results of the separation device

由图13可知，台架试验的合格率平均值为83.2%，分离装置的仿真与实际的合格率存在一定的误差，相对误差为3.86%。原因可能是台架试验过程中艾根种子尺寸、形状、大小不一，而仿真试验的艾根颗粒相对规整，且在电机旋转过程中试验台易发生抖动等。综上可知，分离装置的仿真与实际合格率的相对误差较小，由此说明仿真试验结果较为真实可靠，分离装置台架试验的合格率较高。

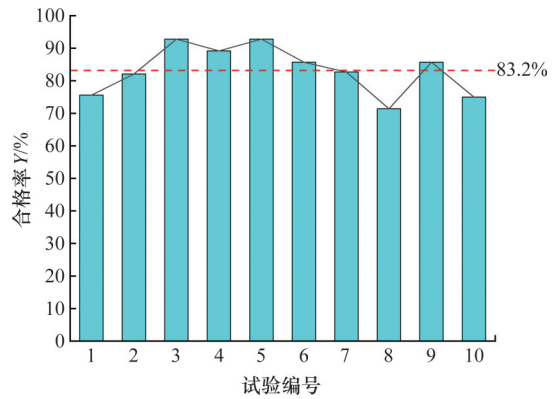



图13 台架试验结果

Fig.13 Results of bench tests

## 5 结论

1)设计了一款适用于艾根的分离装置。在分离装置内对艾根进行受力分析计算，包括皮带的倾角、皮带的线速度、皮带间的间隙等参数。

2)利用EDEM软件进行分离装置合格率的仿真试验，依次通过Plackett-Burman试验、Steepest ascent试验、Box-Behnken试验得到影响分离装置性能的三个因素分别为带A倾角、带B速度、带间间隙。经优化得到上述三个因素的最优组合为带A倾角55°、带B速度90 mm/s、带间间隙13 mm。基于该优化结果确定最终仿真的带间间隙为13 mm、带A速度为120 mm/s、带A倾角为55°、带B速度为90 mm/s、带B倾角为45°，并再次开展分离装置仿真试验进行验证，得到合格率平均值为79.99%。该结果可为试验样机的理论与结构设计工作奠定基础。

3)利用仿真优化后的结构与运动参数进行了分离装置的台架试验，台架试验结果的合格率为83.2%，与仿真试验结果的相对误差为3.86%，验证了仿真试验的可靠性，同时也证明将所设计的分离装置应用于艾根分离具备良好的可行性。

**参 考 文 献：**

[1] BISHT D, KUMAR D, KUMAR D, et al. Phytochemistry and Pharmacological Activity of the Genus Artemisia [J]. Archives of Pharmacal Research, 2021, 44(5): 439-474.

[2] 李玉萍，魏莉霞，张东佳，等. 艾草的研究现状、应用与展望[J]. 中国种业，2024(8)：21-27.
LI Yuping, WEI Lixia, ZHANG Dongjia, et al. Research Status, Applications and Prospect of Artemisia Argyi[J]. China Seed Industry, 2024(8): 21-27.

[3] WANG Meimei, LIU Qingting, OU Yinggang, et al. Numerical Simulation and Verification of Seed-filling Performance of Single-bud Billet Sugarcane Seed-metering Device Based on EDEM[J]. Agriculture, 2020 12(7): 983.

[4] MA Fanglan, LI Ke, LUO Xiaohu, et al. Design and Experimental Study of a Transverse Metering Device for Precut Sugarcane Setts[J]. Sugar Tech, 2022, 24(5): 1597-1611.

[5] GAN Fangfang, LIANG Yehang, ZHANG Yang, et al. Design and Experiment of Seed Compensator Device for Transversal Sugarcane Planter with Seeds Pre-cutting[J]. Sugar Tech, 2022, 24(5): 1551-1569.

[6] ZHONG Jiaqin, TAO Limin, LI Shangping, et al. Design and Evaluation of a Novel Transversal Double-bud Sugarcane Planter with Seed Pre-cutting[J]. Sugar Tech, 2021, 23(5): 1147-1156.

[7] BUITENWERF H, HOOGMOED W B, LERINK P, et al. Assessment of the Behaviour of Potatoes in a Cup-belt Planter[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(1): 35-41.

[8] XING Wei, ZHANG Hua, SUN Wei, et al. Performance Study of a Chain-spoon Seed Potato Discharger Based on DEM-MBD Coupling [J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1520.

[9] LU Jinzhu, LIU Senping, WANG Qi, et al. Research on Device and Sensing Technology for Precision Seeding of Potato[J]. Agriculture, 2024, 14(12): 2146.

[10] 解开婷. 三七根土复合体分离机理研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2022.
XIE Kaiting. Study on separation mechanism of panax notoginseng soil complex[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[11] 闫建伟，魏松，张万萍，等. 白萝卜种子颗粒接触参数标定[J]. 中国农机化学报，2023，44(8)：1-11.
YAN Jianwei, WEI Song, ZHANG Wanping, et al. Calibration of Discrete Element Contact Parameters for White Radish Seed Particles[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(8): 1-11.

[12] 姚艳萍，古向宇，郭振海，等. 基于EDEM的单侧犁式卸料器弧形挡料板仿真研究[J]. 起重运输机械，2023(13)：30-36.

YAO Yanping, GU Xiangyu, GUO Zhenhai, et al. Simulation Study on Arc Baffle of One-side Plow Discharger Based on EDEM[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2023(13): 30-36.

[13] 刘宏新，徐晓萌，郭丽峰，等. 具有复合充填力的立式浅盆型排种器充种机理[J]. 农业工程学报，2014，30(21)：9-16.
LIU Hongxin, XU Xiaomeng, GUO Lifeng, et al. Research on Seed-filling Mechanism of Vertical Shallow Basin Type Seed-metering Device with Composite Filling Force [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 9-16.

[14] 陈涛，衣淑娟，李衣菲，等. 苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报，2023，54(5)：91-100.
CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Establishment of Discrete Element Model and Parameter Calibration of Alfalfa Stem in Budding Stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 91-100.

[15] MILKEVYCH V, MUNKHOLM L J, CHEN Y, et al. Modelling Approach for Soil Displacement in Tillage Using Discrete Element Method[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183: 60-71.

[16] ZENG Zhiwei, CHEN Ying. Simulation of Straw Movement by Discrete Element Modelling of Straw-sweep-soil Interaction[J]. Biosystems Engineering, 2019, 180: 25-35.

[17] GAO Xiaojun, XIE Guanfu, LI Jiang, et al. Design and Validation of a Centrifugal Variable-diameter Pneumatic High-speed Precision Seed-metering Device for Maize[J]. Biosystems Engineering, 2023, 227: 161-181.

[18] HU Mengjie, XIA Junfang, ZHOU Mingkuan, et al. Design and Experiment of Seed-cleaning Mechanism for Inside-filling Pneumatic Cotton Precision Seed-metering Device[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1217.

[19] WANG Haoyi, SUN Xinping, LI Hua, et al. Design and Parameter Optimization of a Finger Clip Plate Garlic Seed-metering Device Based on EDEM[J]. Agronomy, 2022, 12(7): 1543.

[20] TRAD A, AMOURA N, ABDELLAH ELHADJ A, et al. Optimizing Plastic Shredder Rotor Design through Structural Finite Element Analysis: a Comprehensive Approach Using Experimental Design and Response Surface Methodology[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2024, 52(12): 10682-10701.

[21] 邢雷，李金煜，赵立新，等. 基于响应面法的井下旋流分离器结构优化[J]. 中国机械工程，2021，32(15)：1818-1826.
XING Lei, LI Jinyu, ZHAO Lixin, et al. Structural Optimization of Downhole Hydrocyclones Based on Response Surface Methodology[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15): 1818-1826.

[22] 时强胜，张小俭，陈巍，等. 基于灰色关联度分析响应面法的橡胶软模端面抛磨表面粗糙度预测[J]. 中国机械工程，2021，32(24)：2967-2974.
SHI Qiangsheng, ZHANG Xiaojian, CHEN Wei, et al. Prediction of Surface Roughness of Rubber Soft Die End Face Polishing Based on GRA-RSM[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(24): 2967-2974.

（编辑　胡佳慧）

**作者简介：吴　杰**，男，1991年生，副教授。研究方向为智能材料与智能结构、磁流变智能传动与驱动以及农机装备设计。E-mail：jiewu323@163.com。**李　奕***（通信作者），男，1976年生，教授。研究方向为流体传动与控制、机电一体化方向的研究。E-mail：20011013@hbut.edu.cn。

**本文引用格式：**

吴杰，张诚先，李奕，等. 一种艾根有序分离-种植装置设计与试验[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2807-2815.

WU Jie, ZHANG Chengxian, LI Yi, et al. Design and Test of an Orderly Separation-Planting Device for Mugwort Roots[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(11): 2807-2815.

（上接第2773页）

[18] 池元成，方杰，饶大林，等. 自适应中心变异差分进化算法及其在涡轮叶型优化设计中的应用[J]. 航空动力学报，2010，25(8)：1849-1854.
CHI Yuancheng, FANG Jie, RAO Dalin, et al. Self-adaptive Center-mutation Differential Evolution and Its Application to Shape Optimization Design of a Turbine Blade [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1849-1854.

[19] 刘熠. 轴流压气机人工智能气动设计优化探索[D]. 北京：北京航空航天大学，2023.
LIU Yi. Exploring Artificial Intelligence Assisted Aerodynamic Design and Optimization of Axial Compressor[D]. Beijing: Beihang University, 2023.

[20] 龚致富，王清华，姬静怡，等. 基于模糊聚类与径向基神经网络的工作量智能分析算法研究[J]. 微型电脑应用，2024，40(12)：63-66.
GONG Zhifu, WANG Qinghua, JI Jingyi, et al. Research on Workload Intelligent Analysis Algorithm Based on Fuzzy Cluster and Radial Basis Function Neural Network[J]. Microcomputer Applications, 2024, 40(12): 63-66.

[21] 韩忠华. Kriging模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报，2016，37(11)：3197-3225.
HAN Zhonghua. Kriging Surrogate Model and Its Application to Design Optimization: a Review of Recent Progress [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3197-3225.

（编辑　胡佳慧）

**作者简介：车同同**，男，2001年生，硕士研究生。研究方向为微小型燃气轮机离心压气机气动性能优化。E-mail：2191236769@qq.com。**向　航***（通信作者），男，1991年生，博士后研究人员。研究方向为叶轮机气动设计与优化。E-mail：xhyyyh@buaa.edu.cn。

**本文引用格式：**

车同同，陈江，金海良，等. 高压比离心压气机多维气动外形协同参数化及代理辅助优化[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2765-2773.

CHE Tongtong, CHEN Jiang, JIN Hailiang, et al. Multi-dimensional Aerodynamic Shape Co-parameterization and Surrogate-assisted Optimization for High-pressure-ratio Centrifugal Compressors[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(11): 2765-2773.