

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.05.010

# 稻麦联合收获机清选装置智能设计与优化系统研究

李青林 宋玉莹 姚成建 李文斌 岳颖超

(江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 针对传统农机产品研发周期长、设计效率低等问题,构建了一套稻麦联合收获机清选装置智能设计与优化系统。该系统由用户需求模块、知识库和推理模块、参数化建模模块以及智能优化模块组成,可以实现清选装置的智能设计与优化。首先,在 SQL Server 2012 中建立了清选装置设计知识库,研究了清选装置设计的推理流程,系统可以根据用户需求,调用知识库中的相关设计知识,并使用实例和规则相结合的推理方法进行设计推理,从而输出清选装置关键零部件参数;其次,使用 Visual Studio 编程软件,结合 C++ 及 KF(知识融合)两种开发语言对 NX 进行二次开发,搭建清选装置参数化模型库,参考知识库和推理模块输出的零部件参数进行建模,得到清选装置部件模型;以清选装置入风口风速、上导风板倾角、下导风板倾角、振动筛频率为优化变量,设计清选装置 CFD-DEM 耦合仿真的正交试验,通过计算试验过程中的清选含杂率和损失率来评估清选效果;最后,基于仿真结果数据,采用 PSO-SVR 算法建立清选装置优化变量与清选含杂率、损失率的回归模型,使用 SPEA2 算法实现清选含杂率、损失率的多目标优化,并得到一组损失率最低的 Pareto 非劣解集,即当清选装置入风口风速为 6 m/s、振动筛频率为 4.5 Hz、上导风板倾角为 32°、下导风板倾角为 18°时,对应的清选装置模型损失率最低,含杂率、损失率分别为 1.077%、0.97%。以此为参考,可优化清选装置关键零部件模型设计参数,为稻麦联合收获机清选装置设计提供优化方案。

**关键词:** 稻麦联合收获机;清选装置;智能设计与优化系统;参数化建模;多目标优化

**中图分类号:** S225.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2021)05-0092-10

**OSID:**



## Intelligent Design and Optimization System for Cleaning Device of Rice and Wheat Combine Harvester

LI Qinglin SONG Yuying YAO Chengjian LI Wenbin YUE Yingchao

(College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of long development cycle and low design efficiency in the process of agricultural machinery product design and development, an intelligent design and optimization system for cleaning device of rice and wheat combine harvester was constructed. The system was composed of user demand module, knowledge base and inference engine module, parametric modeling module and intelligent optimization module, which can realize the design and optimization of cleaning device. Firstly, the design knowledge base of cleaning device in SQL Server 2012 was established, and the inference engine of cleaning device design was studied. According to the user's design requirements, combined with the established knowledge base and inference engine module of cleaning device design, the relevant design knowledge in the knowledge base was called, and the reference method based on case and rule was used for designing, so as to output the parameters of key parts of cleaning device. Secondly, NX was redeveloped in Visual Studio programming software, which combined the two development languages, C++ and KF (knowledge fusion). In this way, the parametric model library of cleaning device was built, and then some key parts of cleaning device could be built rapidly in this library. Thirdly, the orthogonal tests of the CFD-DEM coupling simulation of the cleaning device were designed with the air inlet velocity of the cleaning device, the inclination angle of the upper air guide plate, the inclination angle of the lower air guide plate and the vibration screen frequency as optimization variables. The cleaning impurity rate and loss rate in the test process were calculated to evaluate the cleaning effect.

收稿日期: 2020-10-22 修回日期: 2021-02-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700101)

作者简介: 李青林(1977—),女,副教授,主要从事参数化设计和虚拟仿真研究,E-mail: lql@ujs.edu.cn

Finally, based on the simulation data, PSO - SVR algorithm was used to construct the regression model of the optimization variables, the cleaning impurity rate and the cleaning loss rate. After that, the SPEA2 algorithm was used to realize the multi-objective optimization of the cleaning impurity rate and loss rate, and to obtain a set of Pareto non-inferior solution. The results showed that when the wind speed at the air inlet of the cleaning device was 6 m/s, the frequency of the vibrating screen was 4.5 Hz, the inclination angle of the upper air guide plate was  $32^\circ$  and the inclination angle of the lower air guide plate was  $18^\circ$ , the impurity content and loss rate of the corresponding cleaning device model were 1.077% and 0.97%, respectively. As a reference, the model design parameters of key parts of the cleaning device can be optimized, which provided an optimization scheme for the design process.

**Key words:** rice and wheat combine harvester; cleaning device; intelligent design and optimization system; parametric modeling; multi-objective optimization

## 0 引言

设计是产品研发的重要环节。随着计算机技术的不断发展,越来越多农机产品的设计研发过程采用了智能设计技术<sup>[1]</sup>。稻麦联合收获机是农业机械化、现代化的典型产品,应用智能设计技术可以有效解决稻麦联合收获机在研发过程中存在的设计周期长、效率低、设计可靠性差等问题。清选装置是稻麦联合收获机的重要组成部分,其结构复杂、零部件众多、设计难度大。清选效果直接影响整机的作业质量,选择合适的清选方式并设计合理的部件结构可以在很大程度上提高稻麦联合收获机的整机性能<sup>[2-3]</sup>。因此,探索稻麦联合收获机清选装置的智能设计与优化方法十分必要。

研究者在清选装置设计和优化的多个环节已进行了深入、详细的研究<sup>[4-8]</sup>,但尚未形成一套完整的智能设计与优化系统。本文采用多学科交叉的方法搭建稻麦联合收获机清选装置智能设计与优化的整体框架;以 SQL Server 2012 关系型数据库作为存储工具,建立清选装置知识库和相关推理机制;结合 C++ 及 KF(知识融合)两种开发语言对 NX 进行二次开发,建立清选装置参数化模型库;进行清选装置 CFD-DEM 耦合仿真的正交试验,并基于试验结果,采用 PSO-SVR 算法构建清选装置关键零部件参数与清选含杂率、损失率的回归模型,使用 SPEA2 算法实现清选含杂率、损失率的多目标优化,为清选装置的设计提供优化方案。

## 1 清选装置智能设计与优化框架

清选装置的主要功用是将经脱粒装置分离出来的茎秆、颖壳等杂余清选干净,其性能直接影响着整机的工作质量与效率。清选后的籽粒含杂率和损失率是衡量清选效果的主要指标<sup>[9]</sup>。清选装置结构复杂,其传统设计过程主要靠经验积累,以 CAE 软件为辅助进行设计;其智能化设计过程包括需求分

析、零部件结构设计、三维建模、仿真与试验验证、结构优化等主要步骤。本文在传统设计和智能设计的基础上,构造了一套由用户需求模块、知识库和推理模块、参数化建模模块、智能优化模块 4 部分组成的稻麦联合收获机清选装置智能设计与优化系统,其总体框架结构如图 1 所示。

### 1.1 用户需求模块

用户需求模块主要用来获取用户在设计产品时的定制化需求信息。用户在系统中输入设计需求,可以指导系统有针对性地从中调用相关知识并进行推理。清选装置智能设计与优化用户需求模块包括清选装置总体设计要求以及清选装置作业参数。其中,清选装置总体设计要求包括清选装置的关键尺寸(如清选室外形尺寸)以及结构配置(气流式、风扇筛子式、气流清选筒式);清选装置作业参数包括总产量、作业速度在内的总体作业参数以及喂入量、谷草比等辅助作业参数<sup>[10]</sup>。

### 1.2 知识库和推理模块

知识库和推理模块由清选装置知识库和推理机组成,主要功能是对用户输入的需求信息进行分析、推理,输出清选装置设计所需的关键零部件参数,供用户建模参考。清选装置设计知识库主要来源于农机设计手册、国家标准、文献等,并对清选装置设计的相关知识进行整理、归纳,根据知识之间的差异将知识库分为包含规则表、公式表、参数表在内的规则库,以及包含经验知识表、整机实例表等的实例库。清选装置设计的推理机制主要采用基于实例推理和基于规则推理的混合推理机制进行推理。

### 1.3 参数化建模模块

参数化建模模块的主体部分是清选装置关键零部件模型库,通过 Visual Studio 2012 平台对 NX 进行二次开发,包括配置开发环境、创建工程路径、创建菜单栏、制作 UI 界面、编写生成模型的应用程序等流程。参数化建模过程主要采用基于程序的参数驱动方法,根据零部件的几何拓扑关系,结合知识库

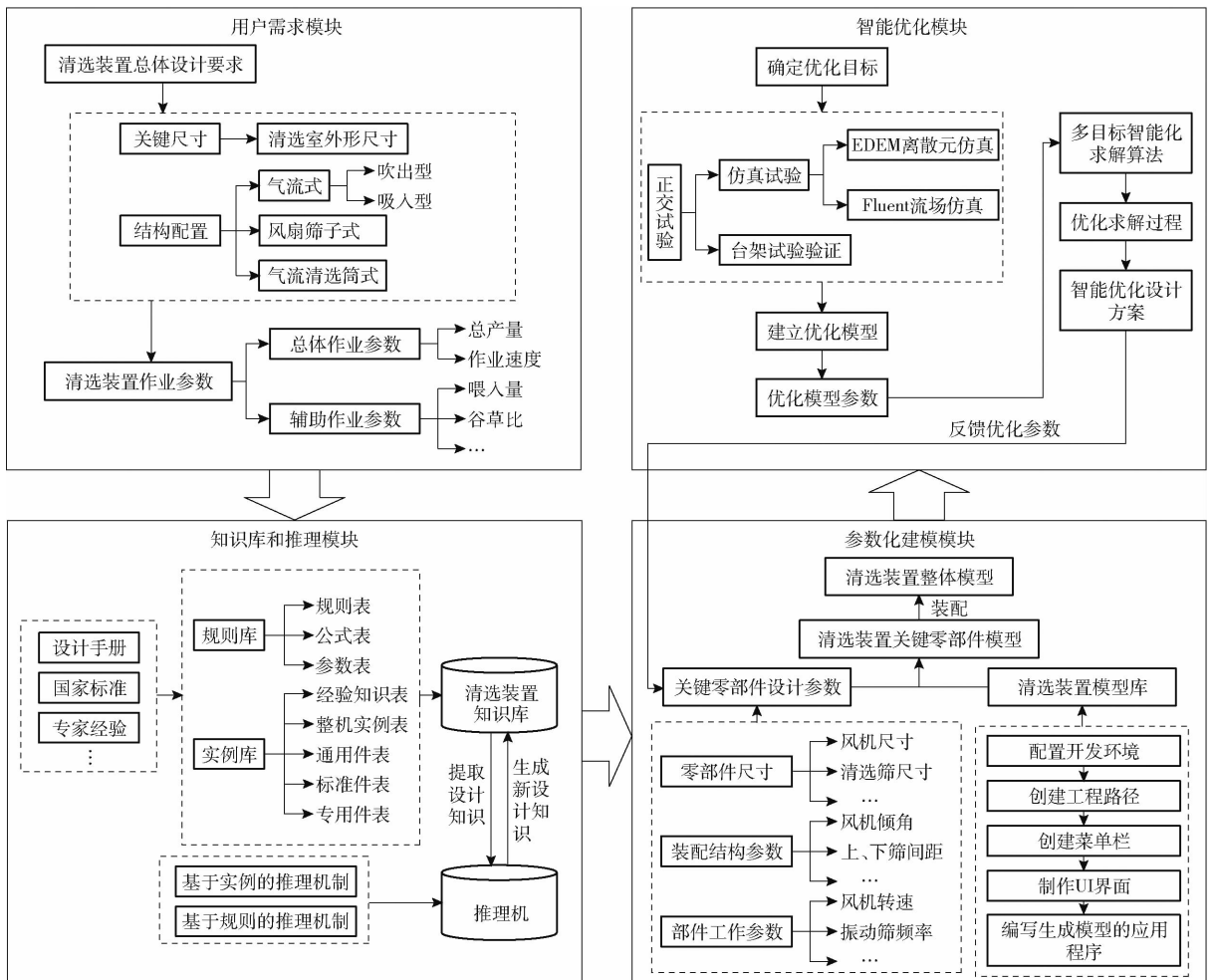


图1 稻麦联合收获机清选装置智能设计与优化系统框架

Fig. 1 Intelligent design and optimization system framework for cleaning device of rice and wheat combine harvester

和推理模块得到的关键零部件设计参数,如零部件尺寸、装配结构参数、部件工作参数等,参数驱动生成清选装置关键零部件模型,然后对各零部件进行装配,生成清选装置整体模型。

#### 1.4 智能优化模块

智能优化模块主要功能是:采用正交试验法对清选装置整体三维模型进行基于 EDEM 离散元和 Fluent 流场的耦合仿真分析,研究清选装置关键零部件参数对于清选效果(含杂率、损失率)的影响;根据试验结果建立清选含杂率、损失率的数学模型,结合多目标优化算法,对清选装置关键零部件参数进行优化,为稻麦联合收获机清选装置的设计过程提供优化方案。

## 2 清选装置智能设计知识库和推理机构建

以 SQL Server 2012 关系型数据库作为存储工具,建立稻麦联合收获机清选装置知识库。该知识库包括实例库和规则库,其中,实例库知识存储了清选装置各零部件及整机的实例类知识,如图 2 所示;规则库中存储了选型规则、设计规则、性能评价规则

等规则类知识,如图 3 所示。

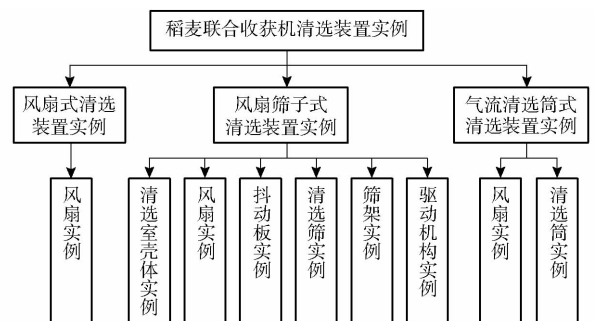


图2 稻麦联合收获机清选装置设计实例结构框图

Fig. 2 Structure diagram of cleaning device design example of rice and wheat combine harvester

清选装置推理机是通过读取用户输入需求,采用基于实例的推理和基于规则的推理机制,根据设计流程和设计规则逐步确定各零部件尺寸、结构等参数。其推理流程如图 4 所示。

## 3 清选装置参数化建模方法

### 3.1 关键零部件设计参数

清选装置参数化建模过程的实现依托于清选装

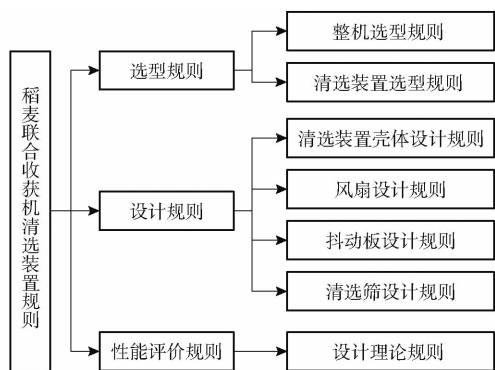


图 3 稻麦联合收获机清选装置设计规则结构框图  
Fig. 3 Structure diagram of design rules for cleaning device of rice and wheat combine harvester

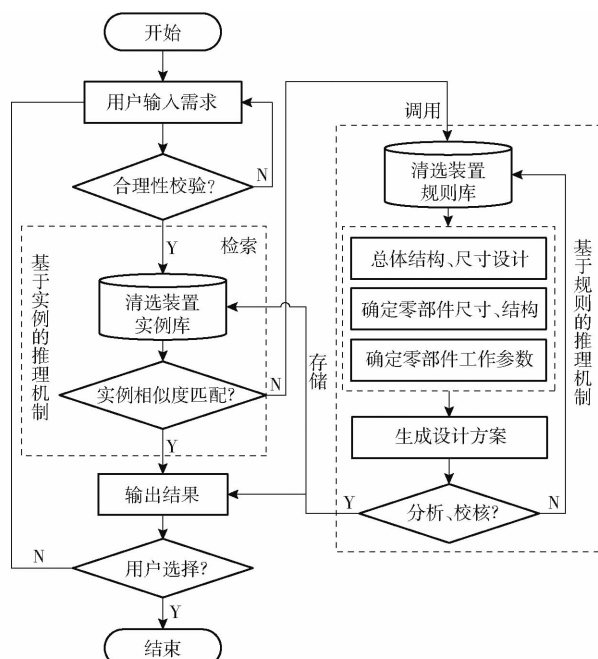


图 4 稻麦联合收获机清选装置推理流程图  
Fig. 4 Reasoning process of cleaning device of rice and wheat combine harvester

置参数化模型库以及知识库和推理模块推理得出的关键零部件设计参数。根据设计过程中的参数特征,本文将清选装置关键零部件设计参数分为 3 类<sup>[11]</sup>:

(1) 零部件尺寸参数:清选装置中的风机整体尺寸及风机中的叶轮直径、叶轮宽、叶片数等,清选筛整体尺寸及清选筛的筛片厚度等。

(2) 装配结构参数:风机安装倾角,导风板倾角,抖动板倾角,清选筛上、下筛间距,清选筛倾角,筛片倾角等参数。

(3) 部件工作参数:风机转速,风机吹风方向,抖动板摆幅,清选筛摆幅,振动筛频率等。

### 3.2 参数化模型库及其创建流程

稻麦联合收获机清选装置主要部件包括:清选筛、抖动板、驱动装置、风机等。本文基于 Visual

Studio 2012 开发平台,采用 NX 二次开发的方法创建参数化模型库。

在对 NX 进行二次开发时,通常需要提前在二次开发文件夹下创建子文件夹,以方便归类 and 整理各类文件。图 5 为 NX 二次开发文件夹及其归类简图,二次开发文件夹命名为 TOOLS,在二次开发文件夹内建立 4 个子文件夹,其中“Application”放置 KF 编程文件(. dfa)、对话框相关文件(“. dlx”以及“. dlg”文件)、动态链接库文件(. dll),Pictures 文件夹用于存放图文件(. bmp),Data 文件夹用于存放相关 Excel 表格文件(. xls),Startup 文件夹存放工具条(. tbr)和菜单(. men)脚本文件<sup>[12]</sup>。

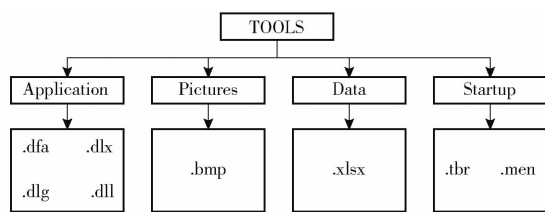


图 5 NX 二次开发文件夹及其归类简图  
Fig. 5 NX secondary development folder and its classification diagram

清选装置参数化模型库的开发流程包括配置开发环境、创建工程路径、创建菜单栏、制作 UI 界面、编写生成模型的应用程序等,如图 6 所示。

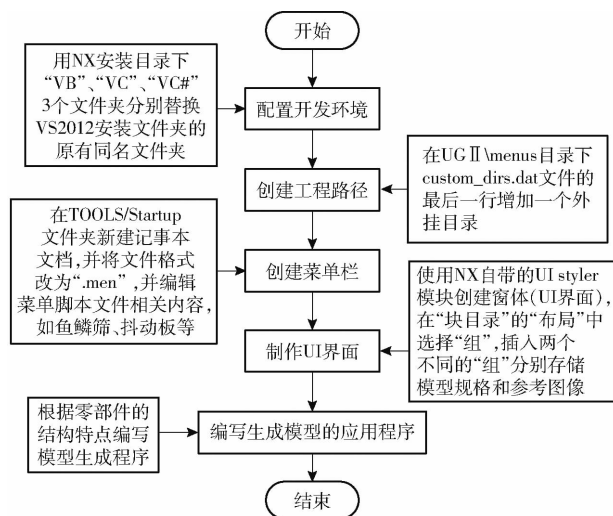


图 6 清选装置参数化模型库 NX 二次开发流程图  
Fig. 6 Secondary development process of NX for cleaning device parametric model library

应用程序需结合建模需求及零部件的结构特点进行编写:编写程序读取与调用参数化设计对话框中的输入值,根据零件的几何特征,使用拉伸、布尔运算等命令创建几何模型,从而控制模型的结构尺寸与约束关系。以鱼鳞筛筛片为例,生成模型的应用程序步骤为:

(1) 调用对话框里的相关值  
double L1 = L -> Value();

```

double T1 = T - > Value()
:
(2)转换字符格式
char L2[256],W2[256],T2[256];
sprintf(L2,"%f",L1);
:
(3)创建直线
double a1 = a - > Value();
char a2[256];
sprintf(a2,"%f",a1)
(4)通过 for 循环计算齿数
int n;
for (int i = 1; i * a1 < L1 - 100; i + +);
{ n = i; }
(5)创建齿板
UF_FEATURE_SIGN block1sign
= UF_POSITIVE;
double block1conner[3] = {50.0,W1/4,0.0};
char * block1edgeleg[3] = {L22,W22,T22};
tag_t block1TAG = NULL_TAG;
UF_MODL_create_block1
(block1sign, block1conner, block1edgeleg,
&block1TAG)
:

```

## 4 清选装置智能优化方法

采用数值模拟技术与现代优化设计理论相结合的优化方法,设计 CFD-DEM 耦合仿真的正交试验,使用有限的试验数据建立待优化参数与清选含杂率、损失率之间的数学模型,采用多目标优化算法计算得到清选装置关键零部件结构的最优参数组合<sup>[11]</sup>。

### 4.1 CFD-DEM 耦合仿真试验

目前,诸多试验研究表明,利用 CFD-DEM 耦合对稻麦联合收获机进行数值模拟是可行的,可为清选装置的优化设计提供依据<sup>[13-17]</sup>。此外,本文采用的 CFD-DEM 耦合仿真试验已通过台架试验对比验证,在相同优化变量下,仿真试验与台架试验结果的相对误差大部分在 3%~10% 之间。

稻麦联合收获机清选装置多为风扇筛子式清选装置,通过筛箱的筛选和风场的风选共同完成清选过程,而控制风场的入风口风速和进行筛选的振动频率则是影响清选效果的重要因素。因此,本文选取清选装置入风口风速、上导风板倾角、下导风板倾角和振动筛频率这 4 个因素作为优化变量,选取清选含杂率、损失率作为衡量清选效果的评价指标,设

计四因素四水平( $L_{16}(4^4)$ )的正交试验,采用 CFD-DEM 耦合仿真的方法对 16 组试验分别进行数值模拟。通过使用 EDEM 分析模块中的“Grid bin Group”功能,统计清选装置的含杂质量和损失籽粒的质量,从而计算出清选含杂率、损失率。所设计耦合仿真正交试验与清选含杂率、损失率如表 1 所示。

表 1 CFD-DEM 耦合仿真正交试验结果  
Tab.1 Orthogonal test result of CFD-DEM coupling simulation

试验号	入风口 风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	振动筛 频率/ Hz	上导风 板倾角/ ( $^{\circ}$ )	下导风 板倾角/ ( $^{\circ}$ )	含杂 率/%	损失 率/%
1	6	4	20	15	1.24	1.12
2	6	5	24	19	0.98	1.11
3	6	6	28	23	1.02	1.14
4	6	7	32	27	1.13	1.72
5	7	4	24	23	0.96	1.54
6	7	5	20	27	0.93	1.87
7	7	6	32	15	0.91	1.59
8	7	7	28	19	0.88	1.89
9	8	4	28	27	0.83	1.83
10	8	5	32	23	0.81	1.61
11	8	6	20	19	0.79	1.66
12	8	7	24	15	0.76	2.26
13	9	4	32	19	0.72	2.24
14	9	5	28	15	0.69	2.11
15	9	6	24	27	0.65	2.19
16	9	7	20	23	0.71	2.56

## 4.2 PSO-SVR 代理模型构建

### 4.2.1 支持向量回归模型

支持向量回归 (Support vector regression, SVR) 是建立在支持向量机 (Support vector machine, SVM) 思想上的高效回归算法,具有泛化能力强、适合小样本和高维特征的优点<sup>[18]</sup>。因此,本文采用该算法构建稻麦联合收获机清选含杂率、损失率的回归模型。

设样本数据的特征向量为  $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ ,  $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^m, y_i \in \mathbf{R}$ , 其中,  $\mathbf{x}_i$  为  $m$  维输入向量,  $y_i$  为对应的响应值。

回归模型为

$$f(x) = \mathbf{w}^T \varphi(x) + b = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (\varphi(\mathbf{x}_i) \varphi(x)) + b = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b$$

其中  $0 \leq (\alpha_i, \alpha_i^*) \leq C$

$\mathbf{w}$ ——权重向量  $b$ ——偏置量

$\alpha, \alpha^*$ ——拉格朗日乘子

$\varphi(x)$ ——函数映射  $C$ ——惩罚系数

$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})$ ——核函数

为了将样本数据映射到高维线性空间,本文采用高斯核函数(Radial basis function, RBF)<sup>[19]</sup>,则

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp(-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2)$$

式中  $\gamma$ ——高斯核函数超参数

### 4.2.2 PSO-SVR 代理模型构建过程

支持向量回归模型的回归参数决定了模型的拟合精度和泛化性能,若想得到拟合效果较好的代理模型,则需对模型参数进行优化<sup>[20]</sup>。本文选用的是 RBF 核函数,故待优化参数为惩罚系数  $C$  和核函数超参数  $\gamma$ 。

粒子群优化算法(Particle swarm optimization, PSO)是一种群智能优化算法,通过计算每个粒子的适应度,将每个粒子的适应度与粒子全局所经历的最好位置相比较,不断更新粒子的最优位置,从而实现全局寻优。粒子群算法具有设计模型简单、设计参数少、运行速度快等优点<sup>[21]</sup>。因此,本文采用粒子群算法对回归模型的参数(惩罚系数  $C$ 、核函数超参数  $\gamma$ )进行优化,且采用均方误差(MSE)来检验代理模型样本预测值与真实值之间的偏差,采用决定系数  $R^2$  来检验模型的拟合效果。

稻麦联合收获机清选含杂率、损失率 PSO-SVR 回归模型的构建及参数优化流程如图 7 所示。

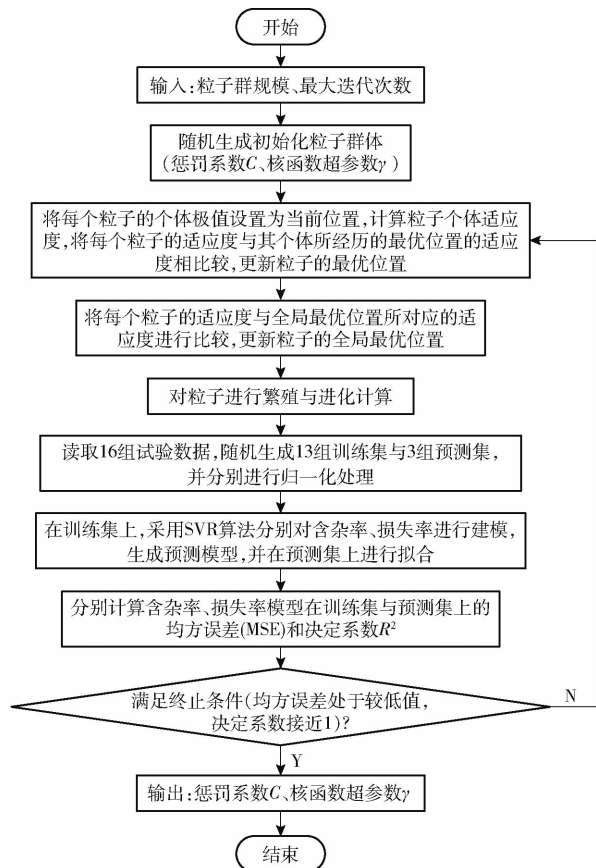


图 7 PSO-SVR 回归模型构建及参数优化流程图

Fig. 7 PSO-SVR regression model construction and parameter optimization process

### 4.3 基于 SPEA2 优化算法的关键零部件优化

依据上文所述方法,构建了稻麦联合收获机清选装置含杂率、损失率的 PSO-SVR 代理模型。为了得到清选装置入风口风速、上导风板倾角、下导风板倾角和振动筛频率的最佳参数组合,需要对所构建的含杂率、损失率模型进行多目标优化。

Pareto 强度进化算法 2(SPEA2 算法)是解决多目标优化问题的常用算法,具有分布性好、设置参数少、收敛速度快等优点,且在处理低维问题时,SPEA2 算法具有较好的综合性能<sup>[19]</sup>。因此,本文采用 SPEA2 算法寻优,得出清选含杂率、损失率 PSO-SVR 代理模型的 Pareto 非劣解集,其具体流程<sup>[22-24]</sup>如图 8 所示。

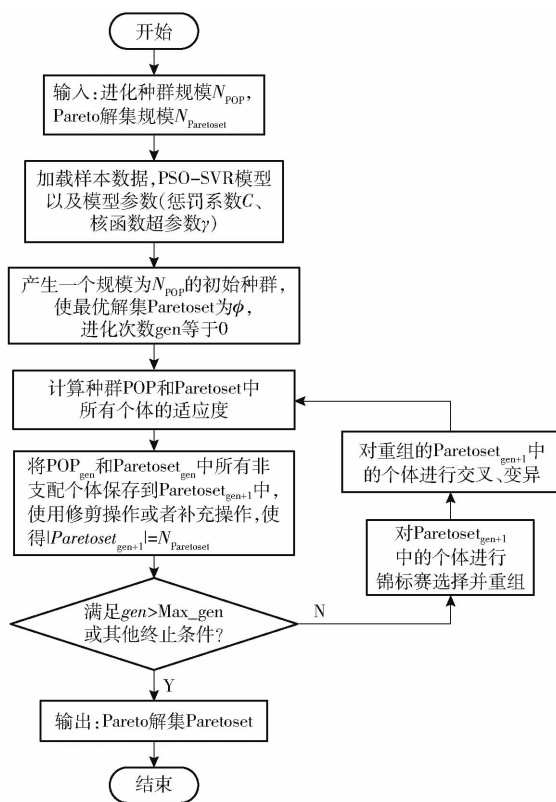


图 8 SPEA2 多目标优化流程图

Fig. 8 SPEA2 multi-objective optimization process

## 5 案例应用

### 5.1 清选装置智能化设计过程

用户输入需求:从智能设计与优化系统中进入用户需求界面(图 9a),输入需求参数;单击“设计计算”按钮,平台便会根据用户需求调用知识库管理模块中的相关设计知识,并通过知识推理,生成清选装置关键零部件设计参数(图 9b)。

单击“链接 NX”按钮,即可进入 NX 建模软件。打开清选装置参数化模型库,根据设计系统中输出的参数,在 NX 中进行参数化建模。以鱼鳞筛为例,其建模过程为:单击“清选装置模型库”按钮,选择

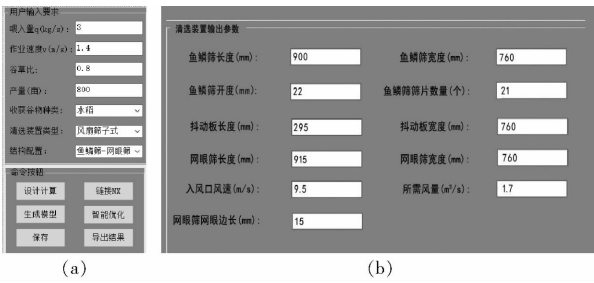


图9 稻麦联合收获机清选装置智能设计与优化系统界面

Fig.9 Interface of intelligent design and optimization system for cleaning device of rice and wheat combine harvester

“鱼鳞筛”,参考图9b中的输出参数,分别完成鱼鳞筛片、上连接板、下连接板的参数化建模,最后选择“装配体”实现鱼鳞筛各零部件的整体装配,如图10所示。

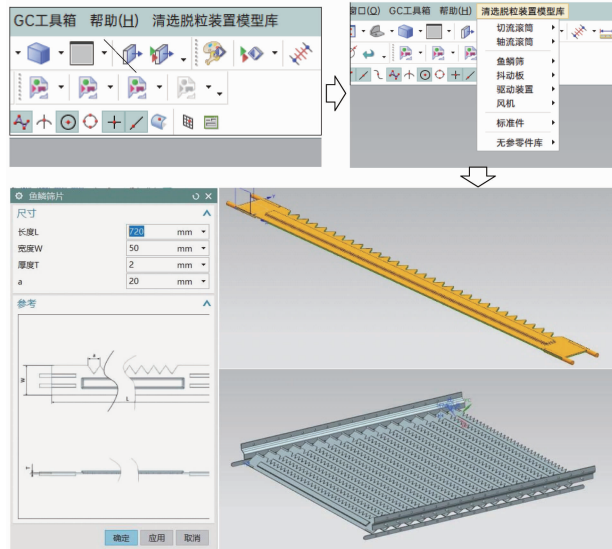


图10 鱼鳞筛参数化建模流程

Fig.10 Parameterized modeling process of fish scale sieve

清选装置模型库还包括网眼筛、风机、抖动板、驱动装置,通过清选装置参数化模型库生成的相关部件及整体装配效果如图11所示。

## 5.2 清选装置智能优化过程

清选装置智能优化过程所涉及算法的编译与应用均在 Matlab 软件中实现。以表1所设计的16组 CFD-DEM 耦合仿真试验作为样本数据,随机生成13组训练集和3组测试集,分别构建清选含杂率和损失率训练集的 SVR 回归模型,采用粒子群算法对模型参数进行优化。其中,含杂率模型惩罚系数  $C$  为100,核函数超参数  $\gamma$  为0.01,损失率模型惩罚系数  $C$  为724.0773,核函数超参数  $\gamma$  为0.0078125。

而后,验证模型在训练集和测试集上的拟合精度,如图12所示。可见,清选含杂率、损失率 PSO-SVR 代理模型在训练集上的决定系数在0.99~1之间,在测试集上的决定系数也都在0.96~1之间,且

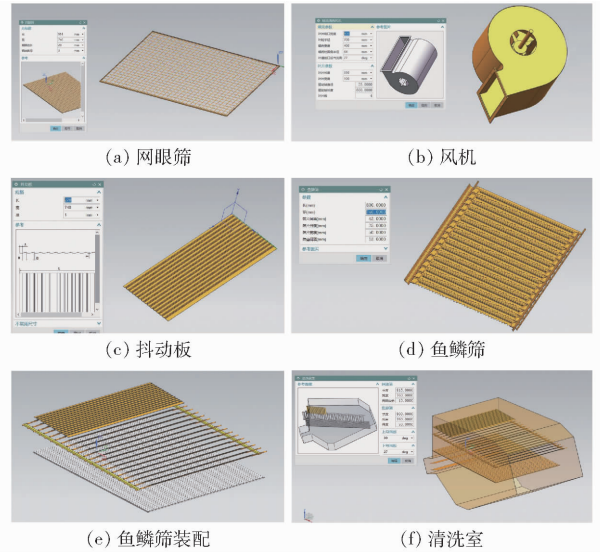


图11 清选装置各部件模型

Fig.11 Model of cleaning device

均方误差也都处于0.05之内,可以判断清选含杂率、损失率经 PSO 算法优化的 SVR 回归模型拟合精度较高。

采用 SPEA2 算法对清选含杂率、损失率代理模型进行多目标优化,以获得清选装置关键零部件的最优参数组合。

输入进化种群规模为30, Pareto 解集规模为30,最大迭代次数为100,在 Matlab 中运行 SPEA2 程序,得到全局寻优后的清选装置含杂率、损失率以及模型的 Pareto 非劣解集,如表2和图13所示。

图13为全局寻优后得到的清选装置含杂率、损失率的散点图,由图中可看出,清选含杂率和损失率大致存在反比例关系。当清选含杂率高时,相同参数组合下对应的清选损失率低;当清选含杂率较低时,相同参数组合下对应的清选损失率较高。

表2为清选含杂率、损失率 PSO-SVR 代理模型的30组 Pareto 非劣解集,这30种关键零部件参数组合所对应的含杂率和损失率均是最优的。然而,在实际作业中,尽管清选损失率的降低往往会伴随着清选含杂率的升高,但清选损失率的重要程度高于清选含杂率<sup>[25]</sup>。当检测出损失率大于国家标准时,即判定产品不合格而不会再去检查破碎率和含杂率的情况。因此,本文选取损失率最低值对应的参数组合作为该模型关键零部件参数的最优组合,即第19组数据(四舍五入):入风口风速6 m/s、振动筛频率4.5 Hz、上导风板倾角32°、下导风板倾角18°,此时清选含杂率、损失率分别为1.077%和0.97%。最后,将优化结果反馈到参数化建模模块中,依据表3中对应参数修改相关零部件模型。

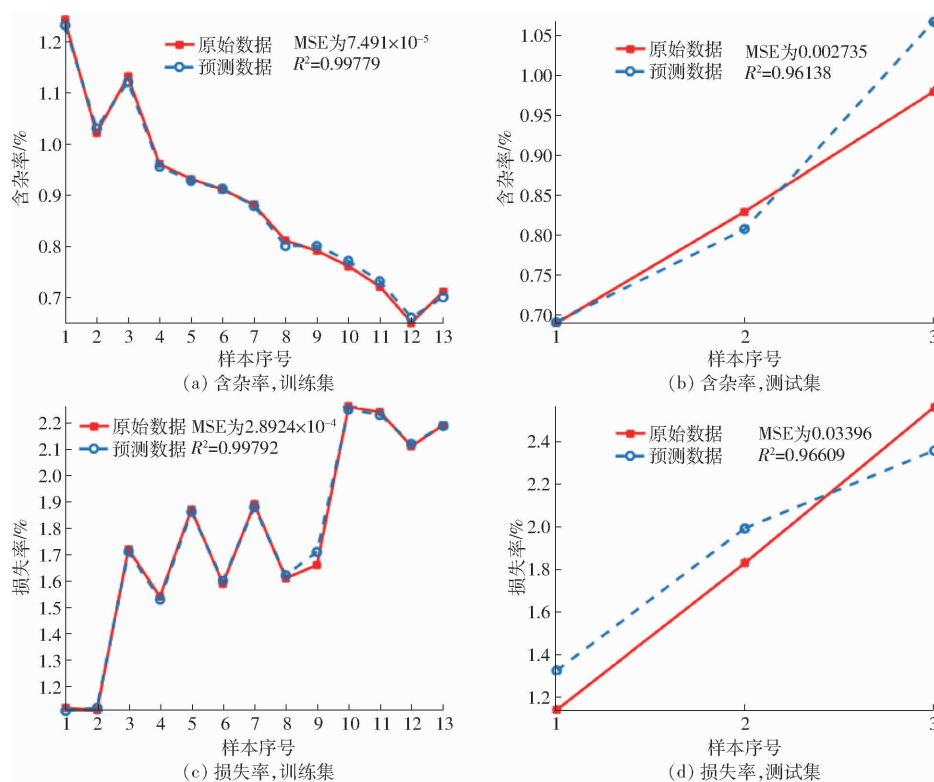


图 12 清选含杂率、损失率 PSO-SVR 回归模型拟合效果

Fig. 12 Fitting effect of PSO-SVR regression model for impurity rate and loss rate of cleaning

表 2 清选含杂率、损失率 Pareto 解集

Tab.2 Pareto solution set of cleaning impurity rate and loss rate

序号	入风口 风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	振动筛 频率/ Hz	上导风 板倾角/ ( $^{\circ}$ )	下导风 板倾角/ ( $^{\circ}$ )	含杂 率/%	损失 率/%
1	8.093	5.248	26.801	20.367	0.767	1.617
2	8.992	5.242	24.870	20.795	0.675	1.936
3	6.997	4.993	27.622	19.596	0.914	1.262
4	8.528	5.425	25.856	19.956	0.716	1.780
5	9.000	6.562	25.886	19.849	0.647	2.226
6	8.756	5.516	25.856	20.834	0.687	1.876
7	8.389	5.231	24.928	19.695	0.742	1.704
8	9.000	5.981	25.953	20.372	0.653	2.049
9	9.000	6.266	25.831	20.364	0.649	2.119
10	6.022	4.865	29.842	17.728	1.059	0.999
11	7.253	5.248	28.251	20.365	0.870	1.355
12	8.992	5.713	24.870	20.022	0.662	1.981
13	6.229	4.993	29.305	19.584	1.018	1.065
14	8.017	5.202	26.806	19.555	0.780	1.585
15	7.569	4.928	27.957	18.604	0.846	1.426
16	7.388	5.155	28.247	20.405	0.855	1.386
17	7.629	5.273	26.909	19.778	0.823	1.467
18	6.402	5.014	29.305	19.439	0.994	1.103
19	6.000	4.547	31.608	17.645	1.077	0.970
20	9.000	6.447	25.464	19.324	0.648	2.189
21	6.497	5.137	29.541	20.412	0.976	1.142
22	9.000	6.643	25.763	19.555	0.646	2.261
23	7.075	5.333	29.783	20.460	0.894	1.307
24	8.453	5.310	25.838	20.038	0.727	1.741
25	6.817	4.865	29.857	20.411	0.941	1.202
26	6.159	4.832	29.870	19.224	1.036	1.029
27	8.630	5.444	26.218	20.815	0.702	1.825
28	7.814	5.081	25.941	19.808	0.810	1.509
29	7.901	5.275	26.353	19.555	0.792	1.551
30	8.250	5.184	25.945	19.672	0.755	1.660

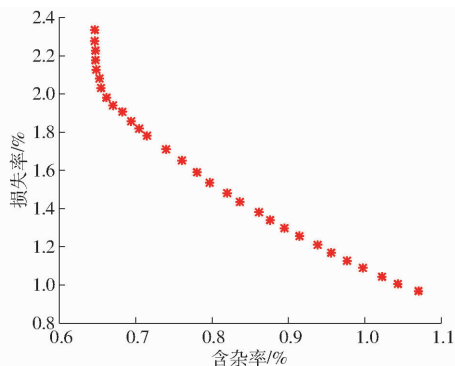


图 13 SPEA2 多目标优化结果

Fig. 13 Multi-objective optimization results of SPEA2

表 3 优化变量与设计参数对应关系

Tab.3 Corresponding relationship of optimization variables and design parameters

优化变量	关键设计参数
清选装置入风口风速	风机转速、风机出风口高度
导风板倾角	导风板安装倾斜角

## 6 结论

(1) 构建了一套稻麦联合收获机清选装置智能设计与优化系统,该系统可根据用户需求推理出清选装置设计所需的关键零部件参数,进行清选装置参数化建模以及智能优化,有助于提高农机产品的研发效率。

(2) 结合 C++ 及 KF(知识融合)两种开发语



言对 NX 进行二次开发,构建了稻麦联合收获机清选装置参数化模型库,并通过实例演示了清选装置关键零部件的参数化建模过程。

(3)设计并进行清选装置 CFD-DEM 耦合仿真的正交试验,基于仿真结果数据,采用 PSO-SVR 算法构建了清选装置关键零部件参数与清选含杂率、损失率的回归模型,使用 SPEA2 算法实现了清选含

杂率、损失率的多目标优化。结果表明,当清选装置入风口风速为 6 m/s、振动筛频率为 4.5 Hz、上导风板倾角为 32°、下导风板倾角为 18°时,对应的清选装置模型含杂率与损失率分别为 1.077% 和 0.97%。以此为参考,可优化清选装置关键零部件模型设计参数,为稻麦联合收获机清选装置的设计提供优化方案。

### 参 考 文 献

- [1] 赵庆亮. 农机产品质量影响因素[J]. 农业工程, 2020, 10(8): 11-13.  
ZHAO Qingliang. Influencing factors of agricultural machinery product quality [J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(8): 11-13. (in Chinese)
- [2] 杜岳峰, 傅生辉, 毛恩荣, 等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 1-17.  
DU Yuefeng, FU Shenghui, MAO Enrong, et al. Development status and prospect of intelligent design technology of agricultural machinery [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 1-17. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190901&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190901&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.001. (in Chinese)
- [3] 黄云林. 稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.  
HUANG Yunlin. Study on intelligent design system for threshing device of rice wheat combine harvester [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [4] 唐忠, 李耀明, 李洪昌, 等. 联合收获机风筛式清选装置清选室内涡流试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 62-66.  
TANG Zhong, LI Yaoming, LI Hongchang, et al. Indoor eddy current test of air and screen cleaning device for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 62-66. (in Chinese)
- [5] 钟挺, 胡志超, 顾峰玮, 等. 4LZ-1.0Q 型稻麦联合收获机脱粒清选部件试验与优化[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 76-81.  
ZHONG Ting, HU Zhichao, GU Fengwei, et al. Experiment and optimization of threshing and cleaning components of 4LZ-1.0Q rice wheat combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 76-81. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20121014&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121014&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.014. (in Chinese)
- [6] XU L, LI Y, CHAI X, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow to predict the cleaning performance of rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 11-24.
- [7] 徐立章, 李洋, 李耀明, 等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 1-16.  
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1-16. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191001&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191001&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.001. (in Chinese)
- [8] 李骅, 张美娜, 尹文庆, 等. 基于 CFD 的风筛式清选装置气流场优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 12-16.  
LI Hua, ZHANG Meina, YIN Wenqing, et al. Optimization of airflow field on air-and-screen cleaning device based on CFD [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 12-16. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s203&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s203&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.003. (in Chinese)
- [9] 徐立章, 于丽娟, 李耀明, 等. 双出风口多风道离心风机内部流场数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 78-86.  
XU Lizhang, YU Lijuan, LI Yaoming, et al. Numerical simulation of internal flow field of centrifugal fan with double outlet and multi-duct [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 78-86. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20141013&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141013&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.013. (in Chinese)
- [10] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [11] 苏航. 脱粒与清选装置参数匹配技术与方法研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.  
SU Hang. Study on parameter matching technology and method of threshing and cleaning device [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [12] 林东玲. 基于 UG 的冷冲模标准件库的建立[J]. 南方农机, 2019, 50(20): 126.  
LIN Dongling. Establishment of cold stamping die standard parts library based on UG [J]. South Agricultural Machinery, 2019, 50(20): 126. (in Chinese)
- [13] 童哲铭, 朱鹏飞, 童水光, 等. 基于 GA-SVR 代理模型的谷物风筛清选系统优化设计[J]. 机械设计, 2020, 37(6): 11-16.  
TONG Zheming, ZHU Pengfei, TONG Shuiguang, et al. Optimization design of grain air screen cleaning system based on GA-SVR agent model [J]. Mechanical Design, 2020, 37(6): 11-16. (in Chinese)
- [14] 童水光, 沈强, 唐宁, 等. 纵轴流清选装置混合流场数值模拟与优化试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 135-142.  
TONG Shuiguang, SHEN Qiang, TANG Ning, et al. Numerical simulation and optimization test of mixed flow field in axial flow cleaning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 135-142. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160701&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160701&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.014. (in Chinese)

- // www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? file\_no = 20160719&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.019. (in Chinese)
- [15] 李骅. 风筛式清选装置设计理论与方法研究[D]. 南京:南京农业大学,2012.  
LI Hua. Research on design theory and method of air and screen cleaning device [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [16] 李德建. 大喂入量谷物收获机清选过程仿真研究[D]. 济南:济南大学,2020.  
LI Dejian. Simulation research on cleaning process of large feed grain harvester [D]. Ji'nan: Jinan University, 2020. (in Chinese)
- [17] 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(2):79-84.  
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. CFD-DEM numerical simulation of material movement on vibrating screen of air and screen cleaning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):79-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? file\_no = 20120217&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.017. (in Chinese)
- [18] 张春艳. 基于支持向量数据描述的累积和控制图[D]. 天津:天津大学,2012.  
ZHANG Chunyan. Cumulative sum control chart based on support vector data description [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [19] 方瑞明. 支持向量机理论及其应用分析[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [20] 熊伟丽,徐保国. 基于 PSO 的 SVR 参数优化选择方法研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(9):2442-2445.  
XIONG Weili, XU Baoguo. Study on SVR parameter optimization method based on PSO [J]. Journal of System Simulation, 2006,18(9):2442-2445. (in Chinese)
- [21] 舒宗玉. 基于多目标混合粒子群算法的无人船全局路径规划[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.  
SHU Zongyu. Global path planning for unmanned ship based on multi-objective hybrid particle swarm optimization [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [22] 郑金华,邹娟. 多目标进化优化[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [23] ZITZLER E, LAUMANNNS M, THIELE L. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm[R]. Lausanne, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [24] DAS I, DENNIS J E. A closer look at drawbacks of minimizing weighted sums of objectives for Pareto set generation in multicriteria optimization problems[J]. Structural Optimization, 1997, 14(1):63-69.
- [25] 吴崇友,丁为民,张敏,等. 油菜分段收获脱粒清选试验[J]. 农业机械学报,2010,41(8):72-76.  
WU Chongyou, DING Weimin, ZHANG Min, et al. Experiment on threshing and cleaning of rape by stage harvest [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):72-76. (in Chinese)

(上接第 211 页)

- [20] YU B, ZHAN P, LEI M, et al. Food quality monitoring system based on smart contracts and evaluation models[J]. IEEE Access, 2020, 8: 12479-12490.
- [21] 袁勇,王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报,2016,42(4):481-494.  
YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494. (in Chinese)
- [22] POURNADER M, SHI Y, SEURING S, et al. Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: a systematic review of the literature[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(7):2063-2081.
- [23] FOSSO W S, KALA K J R, EPIE B R, et al. Bitcoin, blockchain and fintech: a systematic review and case studies in the supply chain[J]. Production Planning & Control, 2020, 31(2-3):115-142.
- [24] 王小云,于红波. SM3 密码杂凑算法[J]. 信息安全研究,2016,2(11):983-994.  
WANG Xiaoyun, YU Hongbo. SM3 cryptographic hash algorithm[J]. Journal of Information Security Research, 2016,2(11): 983-994. (in Chinese)
- [25] 卜晓燕,张根耀,郭协潮. 基于 AES 算法实现对数据的加密[J]. 电子设计工程,2009,17(3):86-90.  
BU Xiaoyan, ZHANG Genyao, GUO Xiechao. Encryption system about data based on AES algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2009,17(3):86-90. (in Chinese)
- [26] SZABO N. Formalizing and securing relationships on public networks[J]. First Monday, 1997, 2(9):1-21.
- [27] 蔡晓晴,邓尧,张亮,等. 区块链原理及其核心技术[J]. 计算机学报,2021,44(1):84-131.  
CAI Xiaoping, DENG Yao, ZHANG Liang, et al. The principle and core technology of blockchain[J]. Chinese Journal of Computers, 2021,44(1):84-131. (in Chinese)
- [28] 高一琛,赵斌,张召. 面向以太坊的智能合约自动生成方法研究与实现[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2020,2020(5):21-32.  
GAO Yichen, ZHAO Bin, ZHANG Zhao. Research and implementation of a smart automatic contract generation method for Ethereum[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2020, 2020(5):21-32. (in Chinese)