

粮食加工机械装备多目标耦合优化设计技术研究

武照云¹, 鱼鹏飞¹, 刘晓霞¹, 李丽², 阮竞兰¹

1.河南工业大学机电工程学院,河南郑州450001

2.河南职业技术学院汽车工程学院,河南郑州450046

摘要:为了解决我国粮机装备可靠性差、故障率高、工艺效果不佳等问题,提出了粮食加工机械装备多目标耦合优化设计技术。针对粮机装备制造行业的现状,分析了面粉加工、大米加工等粮机装备的类型划分与行业特点,构建了粮机装备多目标耦合优化设计技术的体系模型。对粮机装备系列化模型快速生成、结构强度灵敏度分析、结构可靠性灵敏度分析、工艺性能参数灵敏度分析、多目标耦合优化设计方法等关键技术进行了深入研究。基于这些技术的应用,设计并开发了粮机装备数字化设计平台。实际应用案例表明,该技术体系对提高粮机装备的综合性能具有重要意义。

关键词:粮机装备;多目标耦合优化;可靠性;工艺性能

中图分类号:TS212.3

文献标志码:B

文章编号:1673-2383(2020)03-0078-06

DOI:10.16433/j.1673-2383.2020.03.013

Research on multi-objective coupling optimization design technology for grain processing equipment

WU Zhaoyun¹, YU Pengfei¹, LIU Xiaoxia¹, LI Li², RUAN Jinglan¹

1.School of Mechanical & Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

2.Automobile Engineering Department, Henan Polytechnic, Zhengzhou 450046, China

Abstract: In order to solve the problems of poor reliability, high failure rate and poor process effect of grain equipment in China, the multi-objective coupling optimization design technology for grain equipment was put forward in this study. According to the present situation of grain equipment manufacturing industry, the classification and characteristics of grain equipment such as flour processing and rice processing were analyzed. The technical system model of multi-objective coupling optimization design for grain equipment was established. The key technologies were presented in detail, including the rapid generation of grain equipment serialization model, structural strength sensitivity analysis, structural reliability sensitivity analysis, process performance parameter sensitivity analysis and multi-objective coupling optimization design method. Based on the above key technologies, a digital design platform for grain equipment was designed and developed. The practical application case showed that this technology is of great significance to improve the comprehensive performance of grain equipment.

Key words: grain equipment; multi-objective coupling optimization; reliability; process performance

粮食加工机械装备(简称粮机装备)是我国粮食加工行业重要的发展基础,对粮食生产与供

给、满足基本社会需求等具有重要影响。近年来,我国粮机装备制造的发展速度较快,国内

收稿日期:2019-10-02

基金项目:河南省科技攻关计划项目“基于精益排样与敏捷调度的粮食机械智能制造关键技术研究”(182102210396);河南省科技攻关计划项目“新型高可靠性胶辊磨谷机关键技术与装备开发”(192102210053);河南省高等学校重点科研项目“新型双电机驱动胶辊磨谷机可靠性技术与装备研制”(19A210009);河南省高等学校重点科研项目“高可靠性粮食搬运RGV关键技术与装备研制”(20B210001)

作者简介:武照云(1981—),男,辽宁铁岭人,博士,副教授,主要从事粮机装备、数字化设计的研究。

自主品牌的粮机装备种类日益增多,技术水平不断提高,市场份额也不断提升。但是,与国外同类先进装备相比,我国粮机装备可靠性差、故障率高、工艺效果不佳等问题非常突出,对我国粮机装备制造业造成了极大困扰。针对这些问题,经过深入调研与分析发现,落后的根本原因在于我国大多数粮机制造企业仍然在使用传统的设计方法,经验与类比设计居多,普遍缺乏先进技术与手段的应用。因此,有必要开展粮机装备先进设计方法与技术的研究,以提高企业设计水平与装备技术性能。

在粮食机械设计方法研究领域,阮竞兰等^[1]通过对胶辊砻谷机工作参数与工艺效果的试验研究,优化了胶辊砻谷机工作参数;史艳花等^[2]运用离散元仿真技术对碾米机械进行了仿真研究;武文斌等^[3]提出了大型高方平筛的有限元分析及机械强度测试方法;张双等^[4]应用 Fluent 中的滑移网格技术对碾米机碾白室内的气流场进行了数值模拟分析;王娜等^[5]采用 ANSYS Workbench 对振动筛机架及筛箱结构进行了有限元模态分析;李美生等^[6]提出了一种使用离散元仿真技术研究砻谷过程的方法;武照云等^[7]构建了基于 SolidWorks 的砻谷机零部件 CAD/CAM 系统;王豪东等^[8]运用 Fluent 对回转组合多层筛进行了数值模拟分析;李丽等^[9]设计并开发了胶辊砻谷机的数字化集成平台。这些研究均取得了较好效果,但是研究目标相对单一,没有综合考虑

装备技术性能、可靠性、工艺效果等多优化目标以及彼此之间的耦合关联性。

作者针对我国粮机装备制造业存在的问题,研究了粮机装备多目标耦合优化设计技术,开发了粮机装备数字化设计平台,提升了粮机企业的设计水平。

1 粮机装备制造业特点分析

粮机装备制造行业中装备种类繁多。粮机装备主要以小麦、稻谷、玉米、杂粮等粮食作物为加工对象,根据粮食种类及加工要求的不同,可分为面粉加工、大米加工、玉米加工和杂粮加工等装备,其中面粉和大米加工机械装备的占比总量最大。面粉加工机械装备主要包括清理分级、制粉、输送、计量打包、通风除尘等设备;大米加工机械装备主要包括清理、去石、砻谷、分离、碾米、分级、色选、抛光、输送等设备。各类设备根据工作原理与结构的不同,又有很多种具体类型,如面粉加工的清理分级设备包括组合旋振筛、圆筒初清筛、组合多层筛等,具体类型如图 1 所示。粮食加工属于典型的连续流程型工业生产,各种加工设备需要按照工艺流程组成生产线才能工作。粮机装备的生产制造分工相对细化,粮机企业面向的领域相对明确,如有些粮机企业只生产面粉加工装备,而有些粮机企业只生产大米加工装备。

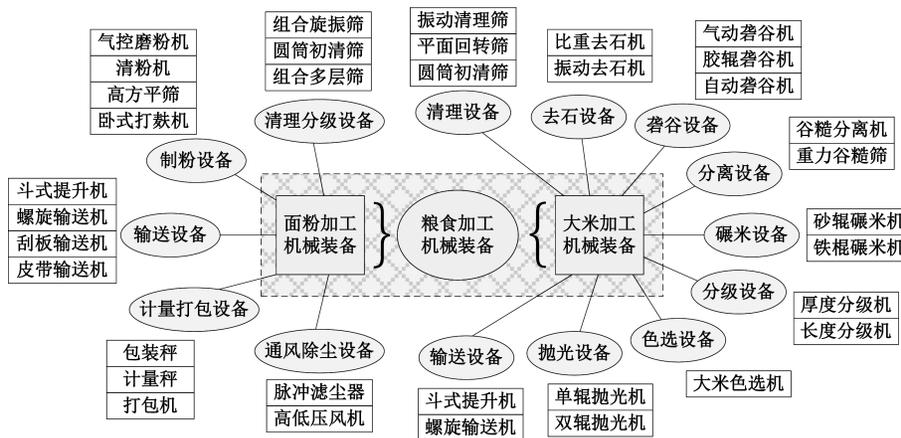


图 1 面粉与大米加工机械装备类型划分结构

Fig.1 Type classification structure of flour and rice processing equipment

2 多目标耦合优化设计技术体系

与国外先进产品相比,我国粮机装备的差距

主要体现在粮机装备工艺性能指标(如除杂效率、脱壳率、出米率、碎米率等)全面落后;粮机装备的质量和可靠性较差,故障率偏高。针对这些问题,构建了粮机装备多目标耦合优化设计技术

体系模型,如图2所示。总体技术方案:先运用参数化CAD技术快速生成各零部件及整机的系列化三维模型;再分别进行强度、可靠性以及工艺性能的仿真分析与计算,通过灵敏度分析,得到设计参数与评价指标之间的影响关系及变化规律;最后采用多指标耦合优化设计方法完成结构参数的确定。基于该技术方案,可有效提高粮机装备的数字化设计水平与产品技术性能。

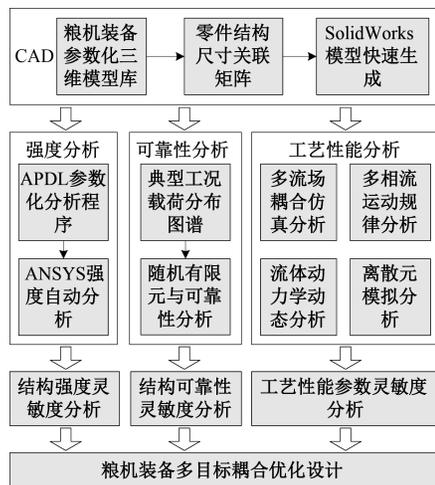


图2 粮机装备多目标耦合优化设计技术体系
Fig.2 Multi-objective coupling optimization design technology system of grain equipment

3 多目标耦合优化设计关键技术

3.1 粮机装备系列化模型快速生成

根据粮机装备的种类及结构形式,分析设备的结构特征,设置特征参数与设计变量,建立零件的SolidWorks变量化结构模型 $PartModel = \{ID, PartName, Params, PartFile\}$,其中, ID 表示零件模型的唯一标识; $PartName$ 为零件名称; $Params = \{Param_1, Param_2, \dots, Param_k\}$ 为零件模型的独立特征参数集合; $PartFile$ 为零件模型文件。根据设备的组成结构,建立层次关系模型 $RelationModel = \{ID, Name, File, Type, ParentID\}$,其中, ID 表示对象标识; $Name$ 表示对象名称; $File$ 表示对象模型文件; $Type$ 为对象类型:0-整机,1-部件,2-零件; $ParentID$ 为父对象 ID ,若对象为整机,则 $ParentID=0$ 。按照层次关系模型 $RelationModel$ 来组织并构建粮机装备参数化三维模型库。分析同一零件不同尺寸、不同零件不同尺寸之间的关联关系,建立了零件结构尺寸关联矩阵,结果如表1所示。其中, va_{pi}^j 表示零件 pi 的第 j 个结构尺寸; $f(va_{pi}^j, va_{pl}^k)$ 表示零件 pi 的第 j 个结构尺寸与零件 pl 的第 k 个结构尺寸之间的关系函数。运用C#对SolidWorks进行二次开发,调用

表1 零件结构尺寸关联矩阵

Table 1 Correlation matrix of part structure dimension

结构尺寸	va_{p1}^1	va_{p1}^2	va_{p2}^1	va_{p2}^2	...	va_{pn}^m
va_{p1}^1	0	$f(va_{p1}^1, va_{p1}^2)$	$f(va_{p1}^1, va_{p2}^1)$	$f(va_{p1}^1, va_{p2}^2)$...	$f(va_{p1}^1, va_{pn}^m)$
va_{p1}^2		0	$f(va_{p1}^2, va_{p2}^1)$	$f(va_{p1}^2, va_{p2}^2)$...	$f(va_{p1}^2, va_{pn}^m)$
va_{p2}^1			0	$f(va_{p2}^1, va_{p2}^2)$...	$f(va_{p2}^1, va_{pn}^m)$
va_{p2}^2				0	...	$f(va_{p2}^2, va_{pn}^m)$
⋮					0	⋮
va_{pn}^m						0

参数化三维模型库与尺寸关联矩阵,通过尺寸驱动与协调装配,自动完成粮机装备零件、部件以及整机模型的快速生成。该技术能够自动为后续的结构强度、可靠性以及工艺性能分析快速提供系列化的设备模型。

3.2 粮机装备结构强度灵敏度分析

粮机装备种类规格较多,结构相对复杂,不同的结构形状与尺寸对结构强度影响很大。在修改零部件结构尺寸后,虽然运用ANSYS软件可完成结构强度分析,但是该过程需要做大量复杂

的前处理和后处理工作,极大影响了工作效率。因此,可采用基于APDL的ANSYS二次开发技术实现自动化的有限元分析,再结合系列化的粮机装备变参数模型库,便可分析结构参数与强度之间的灵敏度关系。主要步骤如下:根据粮食机械的结构特点与工作原理,分析零件的受力状态、约束加载方式、连接方式与边界条件等;运用APDL参数化设计语言编写粮机装备的建模、网格划分、约束加载等有限元分析命令流;采用C#开发应用程序界面,通过进程通信技术调用APDL

文件进行计算,并将 ANSYS 分析结果的数据与图片返回到程序界面,供技术人员分析使用;运用上述技术,自动对系列化的粮机装备变参数模型进行 ANSYS 强度分析,根据大量的计算结果,分析粮机装备结构参数与强度之间的灵敏度关系。

3.3 粮机装备结构可靠性灵敏度分析

粮机装备的可靠性基础数据往往需要大量试验且长期积累才能获得,因此通常采用仿真模拟的方法来分析装备可靠性。随机有限元法是一种具有随机参数特性的可靠性分析方法,目前在很多领域都被广泛应用。基于此,运用 ANSYS 中的 PDS 技术对粮机装备进行随机有限元计算并分析可靠性,再结合系列化的粮机装备变参数模型库,完成结构参数与可靠性之间影响关系的灵敏度分析。具体步骤:分析粮机设备在工作过程中的不同工况,确定具体载荷形式,对所受载荷及其波动量进行监测并统计,形成粮机装备典型工况载荷分布图谱;利用 APDL 技术编制分析命令流,建立可靠性分析文件,并定义输入、输出随机变量及其分布参数;基于蒙特卡洛原理,通过大量重复的随机抽样(总计 N 次),进行可靠性分析模拟与计算;通过后处理方法,得到分析对象的总失效数 N_f ,并计算失效概率 P_f 和可靠度 R 。

$$P_f = N_f/N,$$

$$R = (N - N_f)/N.$$

以系列化的粮机装备变参数模型为对象,重复上述分析过程,完成结构参数与可靠性之间影响关系的灵敏度分析。

3.4 粮机装备工艺性能参数灵敏度分析

我国粮机装备工艺性能指标落后是一个亟须解决的问题,然而粮机工艺性能的分析与计算却非常特殊,因为只关注粮机本身结构是远远不够的,必须综合考虑粮机与粮食物料之间的相互作用原理以及相应的影响因素,如机械力、温度、气流、散粒体特性等。因此,对粮机装备工艺性能分析方法与技术进行了深入系统的研究,形成了以仿真模拟为核心的工艺性能分析技术体系。

3.4.1 多流场耦合仿真分析方法

对于在多流场复合工况下工作的粮机装备而言,由于机械力场、粮食颗粒流场、气流场以及温度场的耦合交互作用比较复杂,过去只能依靠经验进行分析与设计。针对该问题,提出采用 Fluent-EDEM 耦合分析的技术方案^[10]。以碾米机为例,通过多流场耦合仿真,能够探明糙米颗

粒流场与气流场的耦合交互效应、摩擦擦离碾白压力与碾削碾白压力对糙米皮层的综合作用效果等,为碾米机的结构设计提供理论依据^[11]。

3.4.2 流体动力学动态分析技术

为解决粮食气力输送与排风除尘设备性能不佳的问题,如除尘器内部经常出现气旋涡流与局部高压现象^[12],提出了基于流体动力学的气-固两相流动态分析技术。该技术以流体动力学分析软件 Fluent 为工具,通过建立气-固两相流物理模型,可实现对设备内部流场、压力场与速度场的仿真分析,进而得到内部流体的运动规律,有利于发现设备的设计缺陷,避免出现气流不畅、阻力大等问题。

3.4.3 离散元模拟分析技术

粮食物料在加工过程中呈现颗粒群流体形态,具有典型的散粒体特性。为更清楚地掌握粮食颗粒的状态,采用离散元模拟软件 EDEM 来分析粮食颗粒群体内部的相互作用。该技术基于散粒体力学原理,采用颗粒黏结法建立粮食颗粒的离散模型,运用离散单元法进行模拟仿真,可得出粮食颗粒群体的整体运动形态,有助于对粮食加工装备进行工艺效果分析与评估^[13-14]。

根据粮机设备工艺性能的不同要求,以系列化的设备变参数模型为基础,完成结构参数与工艺性能指标之间影响关系的灵敏度分析。

3.5 粮机装备多目标耦合优化设计

在粮机装备结构设计时需要综合考虑强度、可靠性与工艺性能指标,但是这些指标往往无法同时达到最优化,只能根据实际情况进行权衡和取舍。对此,提出了粮机装备多目标耦合优化设计方法:根据粮机装备结构参数集合 Va 与强度 σ 、可靠度 R 及工艺性能指标 PE 的灵敏度关系,构建 $Va \sim \sigma$ 矩阵、 $Va \sim R$ 矩阵与 $Va \sim PE$ 矩阵;引入强度权重系数 α 、可靠度权重系数 β 与工艺性能权重系数 γ ,且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$;为了消除不同指标的量纲影响,定义相对强度 $Re(\sigma)$ 、相对可靠度 $Re(R)$ 与相对工艺性能 $Re(PE)$:

$$Re(\sigma) = [\sigma(Va) - \sigma_{\min}] / (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}),$$

$$Re(R) = [R(Va) - R_{\min}] / (R_{\max} - R_{\min}),$$

$$Re(PE) = [PE(Va) - PE_{\min}] / (PE_{\max} - PE_{\min}),$$

式中: σ_{\max} 、 R_{\max} 、 PE_{\max} 分别为各指标的最高值;

σ_{\min} 、 R_{\min} 、 PE_{\min} 分别为各指标的最低设计要求;

$\sigma(Va)$ 、 $R(Va)$ 、 $PE(Va)$ 分别为各指标的实际值。

建立多目标优化函数:

$$\max F = \alpha Re(\sigma) + \beta Re(R) + \gamma Re(PE).$$

针对该数学优化模型,应用常规迭代寻优算法即可求解出最佳结构参数集合 Va^* ,具体步骤如下:对系数 α, β, γ 进行初始化赋值,在 $Va \sim \sigma$ 矩阵、 $Va \sim R$ 矩阵与 $Va \sim PE$ 矩阵中分别读取 $\sigma_{\max}, R_{\max}, PE_{\max}$,对优化目标函数进行表达式重构;设置结构参数变量 $Param$,在结构参数集合 Va 的定义域内,循环遍历 $Va \sim \sigma$ 矩阵、 $Va \sim R$ 矩阵与 $Va \sim PE$ 矩阵,分别得到对应的 $\sigma(Va)$ 、 $R(Va)$ 与 $PE(Va)$,并计算目标函数值 F ,保留当前最大值;算法遍历结束,输出目标函数最大值 F^* 以及对应的最优结构参数集合 Va^* ;基于最优结构参数集合 Va^* ,自动生成对应的装备零部件及整机的三维模型。

4 粮机装备数字化设计平台开发

为了使多目标耦合优化设计技术在实际应用中更加方便,设计并开发了粮机装备数字化设计平台,该平台的开发技术方案如表 2 所示。在

平台中,设置了粮机装备系列化模型快速生成、结构强度灵敏度分析、结构可靠性灵敏度分析、工艺性能参数灵敏度分析与多目标耦合优化设计等功能模块,并且与三维建模软件 SolidWorks、有限元分析软件 ANSYS、流体动力学分析软件 Fluent、离散元模拟软件 EDEM 等均建立了数据导入/导出接口,极大地提升了平台的易用性^[15]。平台的体系架构如图 3 所示。

表 2 平台开发技术方案

Table 2 Technical solution for platform development

平台开发要素	技术方案
开发环境	Visual Studio 2017
开发语言	C#
数据库	SQL Server 2016
架构模式	C/S 架构
平台体系	三层体系结构
算法模块	Matlab
对外数据接口	XML、API
平台集成接口	WebService

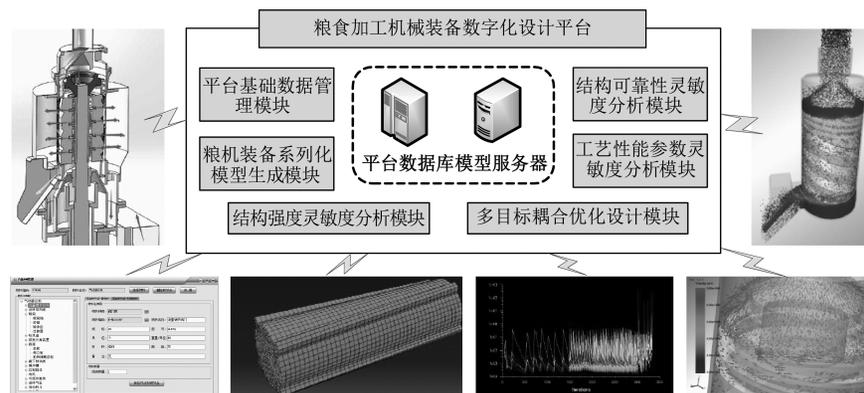


图 3 平台体系架构与功能组成

Fig.3 Platform architecture and functional composition

以 HGDLGJ01 型胶辊砻谷机为对象,对该装备进行多目标耦合优化设计,以验证本文方法的有效性。胶辊砻谷机主要用于对稻谷进行脱壳,是非常重要的稻谷加工装备,主要由快辊、慢辊、进料装置、吸风道、稻壳分离装置、机身、控制箱、附属机构等组成。根据胶辊砻谷机的结构组成与工作原理,建立了参数化三维模型构件库,并生成系列化的零部件以及整机装备模型。运用基于 APDL 的强度自动分析技术,得到结构强度灵敏度分布特征及关系矩阵;通过随机有限元与可靠性分析原理,得到结构可靠性灵敏度分布特征及关系矩阵;运用离散元模拟分析技术,对砻谷过程进行仿真模拟分析,得到工艺性能参数灵

敏度分布特征及关系矩阵。在此基础上,对胶辊砻谷机进行多目标耦合优化设计,得到各零部件的最佳结构参数。通过该方法对胶辊砻谷机进行结构优化与改进,使得砻谷机脱壳率提高 2%、胶耗降低 5%、能耗降低 6%,综合效益非常明显,表明本文方法对提高粮机装备综合性能是可行且有效的。

5 结束语

面向我国粮机装备制造业的实际需求,以提高粮机装备设计水平与产品综合性能为目标,提出了一种粮机装备多目标耦合优化设计技术体

系模型。系统研究了粮机装备系列化模型快速生成、结构强度灵敏度分析、结构可靠性灵敏度分析等关键技术,并设计开发了粮机装备数字化设计平台。构建的技术体系对提高粮机装备质量可靠性、提升工艺性能等具有重要的现实意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 阮竞兰,向光波,程相法.胶辊砻谷机性能参数试验与优化[J].农业工程学报,2011,27(5):353-357.
- [2] 史艳花,张国全,黄志平,等.基于外碾削立式碾米机的离散元法仿真分析[J].农机化研究,2015,37(5):54-57.
- [3] 武文斌,原富林,杜尚伟,等.10仓高方平筛的有限元分析及机械强度测试研究[J].中国粮油学报,2015,30(9):94-97.
- [4] 张双,阮竞兰,吴杰俊.基于滑移网格技术的碾米机气流场数值模拟分析[J].河南工业大学学报(自然科学版),2017,38(6):91-97.
- [5] 王娜,赵俊凯,李孟红.基于 ANSYS Workbench 的振动筛模态分析[J].粮食加工,2018,43(4):60-63.
- [6] 李美生,宋少云,张永林,等.基于 EDEM 的砻谷机的砻谷过程仿真[J].武汉轻工大学学报,2017,36(4):48-53.
- [7] 武照云,张海红,阮竞兰,等.基于 SolidWorks 的砻谷机零部件 CAD/CAM 系统研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2013,34(2):85-88.
- [8] 王豪东,阮竞兰.基于 FLUENT 的回转组合多层筛沉降室流场的数值模拟[J].粮食加工,2018,43(5):58-61.
- [9] 李丽,武照云,阮竞兰.胶辊砻谷机数字化集成设计平台研究[J].科技创新与生产力,2017(4):103-104,107.
- [10] 惠志全,黄思,黄家兴,等.基于 EDEM-Fluent 耦合计算的喷砂机磨损特性的影响因素研究[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2019,33(12):111-118.
- [11] 庞晓霞,阮竞兰.基于离散元法砂辊碾米机碾白室内物料运动仿真[J].食品与机械,2016,32(4):106-108.
- [12] 阮竞兰,张双,张海红.基于 FLUENT 对袋式除尘器气流流场的数值模拟[J].河南工业大学学报(自然科学版),2015,36(4):16-19,39.
- [13] 郭柄江,马学东,赵磊,等.基于 EDEM 的谷物分离模拟与试验研究[J].中国农机化学报,2019,40(12):100-105.
- [14] 王豪东,阮竞兰,原富林.基于 EDEM 的回转组合多层筛筛选过程的离散元分析[J].中国油脂,2019,44(6):151-157.
- [15] 武照云,张毓兰,原富林,等.基于排样优化与车间调度的粮机装备智能制造平台研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2019,40(1):89-93.