doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.004

基于 CBR 的机械式大豆排种器设计重用技术

刘宏新　周兴宇　贾　儒　付露露
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为缩短机械式大豆排种器设计周期,降低设计成本,研究了机械式大豆排种器设计重用技术。运用物元模型表示排种器设计知识,构建排种器实例物元数据库,并与排种器参数化模型库共同组成排种器实例库;将排种器实例属性划分为基本参数、匹配参数和评价参数,通过基本参数的匹配缩小检索范围,利用改进的最近邻算法计算匹配参数和评价参数的相似度,实现相似实例的快速检索;利用规则关联的方法建立设计需求与排种器参数化模型主驱动参数间变换关系,通过对模型主驱动参数的调整实现实例的修改;采用 Visual Basic 语言、结合计算机辅助三维交互应用(Computer aided three-dimensional interactive application,CATIA)软件实现机械式大豆排种器交互式设计重用,运用工程离散元方法(Engineering discrete element method,EDEM)对重用排种器进行虚拟仿真,根据仿真分析结果提出改进意见,并对改进后的排种器进行仿真验证与台架试验。结果表明,改进后的排种器作业性能得到了提高,验证了该设计重用技术的可行性和有效性,可为农机装备的智能化设计研究提供技术借鉴。

关键词: 机械式排种器; 设计重用; 实例推理; 物元; EDEM 仿真
中图分类号: S223.2; TP311.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)07-0039-12

Design and Reuse Technology of Mechanical Soybean Seed-metering Device Based on CBR

LIU Hongxin　ZHOU Xingyu　JIA Ru　FU Lulu
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to reuse the design knowledge of mechanical soybean seed metering device, shorten the design cycle and reduce the design cost, the design reuse technology of mechanical soybean metering device was studied. It's difficult to describe the design knowledge qualitatively and quantitatively of the traditional knowledge representation method of case-based reasoning (CBR), such as frame representation, semantic network representation, predicate logic representation and so on. In order to realize the visualization, standardization and unification of design knowledge, the product design knowledge was described in the form of case matter element which contained case name, characteristic attribute and measure value. The method was beneficial to the effective use of design knowledge. In order to facilitate case storage and retrieval, the organization structure and case creation method of the design reuse were studied, Classification of basic hierarchy by seed-metering device category, and a case base was constructed which case model was corresponding to the case matter element, and some case relational matter elements were contained in the case base. This kind of organization structure was beneficial to the retrieval and reuse of examples, which made the restorage of cases follow the rules and provided convenience for the management and maintenance of the case library. At the same time, the components of the products were no longer isolated individuals, which fully reflected the overall characteristics of the products. In order to quickly retrieve the instance that met the design requirements from the case library, the characteristic property parameters of the instance were divided into basic parameters, matching parameters and evaluation parameters. The retrieval range can be reduced to a specific type and operation speed of seed metering device for retrieval by the selection of basic parameters. Similarity of cases was calculated by using improved nearest neighbor algorithm. The weight of the attributes of an instance can be determined by expert scoring or analytic hierarchy process (AHP) method, which can reduce the

收稿日期: 2018-12-21　修回日期: 2019-03-06
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700100)
作者简介: 刘宏新(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事农机数字化设计与数字资源管理研究,E-mail: Lcc98@neau.edu.cn

amount of computation and improve the efficiency and accuracy of retrieval. In order to meet the specific design requirements of the user, the quantitative relationship between the design requirements and the structural parameters of the instance was established by using the method of rule association, and the rapid revision of the case was realized by modifying the key parts of the case-parameterized model. An example of mechanical soybean seed metering device design reuse was given, the case library was constructed by using Access and computer aided three-dimensional interactive application (CATIA), and the retrieval, evaluation and correction system of metering device was developed by Visual Basic. According to the current job object, the feasibility of the similar metering device was verified by using engineering discrete element method (EDEM) software and the modification suggestions were put forward. Finally, the simulation and prototype test of the revised metering device were carried out. The results showed that the improved metering device can meet the current requirements. The feasibility and effectiveness of the design reuse technology was validated. At the same time, it can also provide technical reference for intelligent design of other types of mechanical equipment.

Key words: mechanical seed-metering device; design reuse; case-based reasoning; matter-element; EDEM simulation

0 引言

随着制造技术的发展,农业装备更新换代周期日益缩短,面对快速多变的市场,提高产品设计效率、加快产品整体流程速度、满足用户日益多样化和个性化的需求是提高我国农业装备生产企业竞争力的必要途径[1-2]。在实际生产中,产品设计工作以适应性设计和变型设计为主[3]。据统计,制造业中55%的产品属于适应性设计,20%的产品属于变型设计,25%的产品属于新设计,即约75%的产品采用修改已有产品来解决设计问题,即使全新设计也可借鉴已有产品展开工作[4-7]。因此,实现产品设计知识的重用对提高产品设计的效率与质量具有十分重要的作用。

产品设计重用是将检索到的设计实例通过调整设计参数和修改少数零部件以满足当前需求,从而提高设计效率和质量[8-9]。基于实例推理(Case-based reasoning,CBR)是当前实现设计重用的重要方法[10]。采用CBR技术可以检索产品实例库中与新机型设计要求相符或相似的设计实例,CBR技术已经广泛应用于产品设计的各个领域[11-17]。但目前CBR缺乏定性与定量相结合的统一化的知识表达形式,在完成相似实例检索后,缺少有效的实例评价与修改手段,限制了新产品研发的精确度与优化程度[18]。

近年来,作者团队一直致力于农业装备智能化设计研究,主要进展有:研究了基于模糊聚类法的大豆播种装备谱系模块划分[19],利用参数化建模方法实现模型的变型设计[20-21],提出了一种数字模型全息体系与辅助标识的方法[22],研究了基于物元标识的虚拟装配技术[23]。以上研究为机械式大豆排种器设计重用技术研究奠定了良好的基础。

排种器作为播种机的核心工作部件,其性能直接影响播种机的工作性能。排种器设计过程中包含大量的设计信息、规则和经验,因此,研究排种器的设计重用技术具有重要的现实意义。本文以机械式大豆排种器为对象,采用物元对排种器设计知识进行定性与定量相统一表示,构建机械式大豆排种器设计重用实例库,研究实例的检索和评价方法,探索基于规则关联的实例修改方法。通过将CBR与物元相结合实现机械式大豆排种器设计知识的重用,提高排种器设计效率与质量,亦可为其他类农业装备智能化设计提供技术方案的借鉴。

1 设计重用流程

机械式大豆排种器设计重用是将以往成功的排种器设计实例用于当前的设计活动中,可有效提高排种器的设计效率。图1为机械式大豆排种器设计重用流程,包括实例库、实例检索、实例调用与修改和虚拟仿真与改进。

(1)实例库。实例库是实现设计重用的基础,在设计时,将已有产品的设计知识以物元的形式进行表示,进而转换为实例库中的实例,通过对实例库中实例进行检索、调用与修改,以适应新的设计需求。

(2)实例检索。实例检索是设计重用的关键步骤。在进行实例检索时,设计人员首先需要根据设计要求输入检索参数和阈值t,并确定是否采用系统默认权重,默认权重由专家打分确定并存储于实例库中。如不采用默认权重,则利用层次分析法(Analytic hierarchy process,AHP)由设计人员确定各检索参数权重。通过对实例库中各实例检索参数的匹配计算,得到按相似度降序排列的推荐实例。如

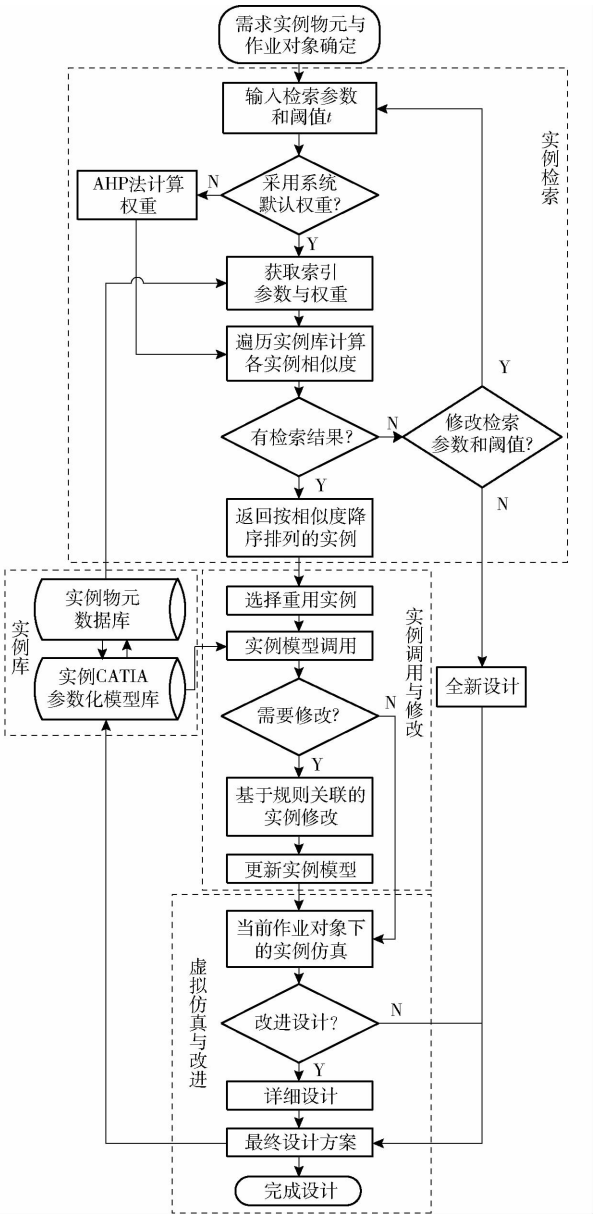


图 1　排种器设计重用流程图

Fig. 1　Design reuse flowchart of seed metering device

没有满足要求的设计实例，则修改检索参数和阈值重新进行检索或进行全新设计。

(3)实例调用与修改。选择检索到的重用实例，并从实例库中调用实例参数化模型。重用的实例一般与需求之间存在一定的差异，设计人员结合专业知识对重用实例进行修改，以提高产品作业性能。如重用的实例不需要修改，则直接对重用实例进行虚拟仿真。

(4)虚拟仿真与改进。对重用或修改后的实例进行虚拟仿真，检验其是否能够满足当前作业对象下的性能需求。通过对仿真结果分析，确定是否能够做进一步的改进设计。如进行改进，则由设计人员进行详细设计，从而得到最终设计方案。如不需要进行改进设计，则直接将其作为最终设计方案，完成设计重用过程。

2　实例表示与实例库构建

2.1　实例物元表示

实例清晰、完整和准确的表达，是实现设计重用的重要步骤。常用的实例表示方法有产生式规则表示法、谓词表示法、语义网络表示法和框架表示法。但这些表示方法具有对深层知识表达困难或使表达结果与原型不符等局限性[24]。为了能够将实例、实例特征和特征的取值用简洁、统一的方式进行表示，形成定性与定量相结合的实例表达形式，在此引入物元概念，以便解决产品设计过程中的复杂问题。

实例物元即表示实例和实例零部件的名称、属性及量值的物元，用 M 表示。对于实例和实例零部件 O_m，具有 $c_{mi}(i=1,2,\cdots,n)$ 个属性，O_m 关于 c_{mi} 的对应量值 $v_{mi}(i=1,2,\cdots,n)$，则其构成一个 n 维实例物元，记为

$$\boldsymbol{M}_m=(O_m,C_m,V_m)=\begin{bmatrix} O_m & c_{m1} & v_{m1} \\ & c_{m2} & v_{m2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{mn} & v_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中　O_m——实例和实例零部件名称

m——实例和实例零部件标识

n——实例属性数目，$n\in\mathbf{N}$

属性 c_{mi} 所对应的量值 v_{mi} 可以是数值、数值区间或对实例属性的定性评价。

实例关系物元即表示实例零部件间相互关系的物元，用 R 表示。当实例零部件在尺寸、结构和装配等方面存在相互关系时，若某一零部件属性所对应的量值发生改变，必然会引起与其相关联的实例属性量值的变化，因此，可用实例关系物元表示，记为

$$\boldsymbol{R}_{ij}=(M_i,M_j,V_{f(ij)})=\begin{bmatrix} M_i & M_j & V_{f(ij)} \\ c_{i1} & c_{j1} & v_{f(ij1)} \\ c_{i2} & c_{j2} & v_{f(ij2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{ik} & c_{jk} & v_{f(ijn)} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中　M_i、M_j——存在相互关系的实例零部件

i、j——零部件标识

k——存在相互关系的属性数目，$k\in\mathbf{N}$

对于实例零部件 M_i 和 M_j 其属性数目 k 可以不同；$V_{f(ij)}$ 为属性间所对应的关系，$V_{f(ij)}$ 可以是等式、不等式、函数及关系表述语句。

2.2　实例库构建

机械式大豆排种器实例库由实例物元数据库和实例 CATIA 参数化模型库两部分组成。其中，实例物元数据库用于存储实例特征属性、量值等信息，即

将实例转换为物元表达形式后存储于 Access 数据库中。实例 CATIA 参数化模型库存储有实例的三维模型,用于实例模型的调用和修改。

由于不同类型排种器结构差异性较大,以排种器类别划分基础层次结构,建立图 2 所示的排种器实例库组织结构。这种组织结构有利于实例的检索和重用,也使实例的再存储有章可循,并且给实例库的管理维护提供便利。实例模型采用 CATIA 知识工程模块进行参数化建模,预先定义零部件间的尺寸及装配关系,即将部分实例关系物元蕴含于实例模型中,从而使各零部件不再是孤立的个体,充分体现产品的整体特性。

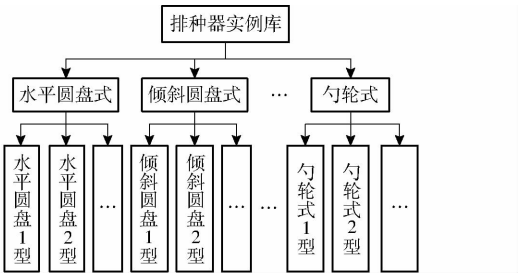


图 2 实例库组织结构示意图

Fig. 2 Schematic of organizational structure of case library

3 实例检索策略

3.1 实例属性参数划分

相似实例的共有特征是进行实例检索的依据[25]。排种器设计过程中,既要考虑排种器的作业性能、整体尺寸,同时也要考虑其成本等因素。为了能够快速、准确地从实例库中获取结构尺寸相近,且性能较优的排种器,本文将排种器的属性参数划分为基本参数、匹配参数和评价参数。

基本参数:能够对实例的检索范围进行限定的参数。由于不同类型排种器结构差异性较大,检索参数有所不同,而对于同一排种器在不同作业速度下的作业性能存在差异,不对作业速度进行限定会造成重复检索和推荐,因此,本文将排种器的类型和作业速度作为基本参数。

匹配参数:反映与设计要求相似程度的参数。如窝眼轮式排种器的排种轮直径,实例库中已有排种器的排种轮直径仅需与设计要求值相近即可,排种轮直径差值的绝对值反映其相似程度。

评价参数:能够反映排种器性能的参数。如排种器的合格指数,实例库中已有排种器合格指数大于设计要求,且其差值越大说明该排种器性能越好。反之,说明性能越差。

3.2 检索算法

机械式大豆排种器设计重用中,为了从实例库中获取结构尺寸相近且性价比较优的设计实例,在确定基本参数的前提下,需要对需求实例物元与实例库中已有实例所对应的匹配参数和评价参数进行计算。本文在最近邻算法基础上进行改进,分别建立匹配参数和评价参数的相似度计算算法。假定实例物元集 $M'=\{M_1,M_2,\cdots,M_j,\cdots,M_m\}$,各实例具有属性 $C'=\{c_1,c_2,\cdots,c_i,\cdots,c_n\}$,需求实例物元 M_q 与实例 M_j 的第 c_i 个属性所对应的量值分别为 v_{qi} 和 v_{ji},则 M_q 与 M_j 对应的属性 c_i 的距离可表示为

$$\mathrm{dist}(M_{qi},M_{ji})=v_{ji}-v_{qi} \tag{3}$$

(1)匹配参数相似度计算

对于匹配参数,仅需 M_q 与 M_j 的量值相近,无需考虑距离的正负。为了消除不同量纲的影响,进行归一化处理,从而得到其相似度算法为

$$\mathrm{sim}(M_{qi},M_{ji})=\begin{cases}1-\dfrac{|v_{ji}-v_{qi}|}{\max(v_i)-\min(v_i)} & (\max(v_i)\neq\min(v_i))\\ 1 & (\max(v_i)=\min(v_i))\end{cases} \tag{4}$$

式中 $\max(v_i)$、$\min(v_i)$——第 i 个属性所对应最大值和最小值

当 v_{qi} 和 v_{ji} 为区间量时,取区间中点进行计算。

(2)评价参数相似度计算

评价参数中,有些参数量值越大表示排种器性能越好,其相似度计算式为

$$\mathrm{sim}(M_{qi},M_{ji})=\begin{cases}\dfrac{v_{ji}-v_{qi}}{\max(v_i)-\min(v_i)} & (\max(v_i)\neq\min(v_i))\\ 0 & (\max(v_i)=\min(v_i))\end{cases} \tag{5}$$

评价参数中,有些参数量值越小表示排种器性能越好,其相似度计算式为

$$\mathrm{sim}(M_{qi},M_{ji})=\begin{cases}\dfrac{v_{qi}-v_{ji}}{\max(v_i)-\min(v_i)} & (\max(v_i)\neq\min(v_i))\\ 0 & (\max(v_i)=\min(v_i))\end{cases} \tag{6}$$

式(5)、(6)中,当 $\mathrm{sim}(M_{qi},M_{ji})>0$ 时,实例所对应的属性量值满足设计要求,且其值越大,说明该性能越优;当 $\mathrm{sim}(M_{qi},M_{ji})=0$ 时,实例所对应的属性量值处于临界状态;当 $\mathrm{sim}(M_{qi},M_{ji})<0$ 时,实例所对应的属性量值不能满足设计要求,且其值越小,说明该性能越差。

根据式(4)~(6),需求实例物元 M_q 与实例物元集 M 中所有实例对应属性的计算结果可构成一个相似度矩阵

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} s_{11} & s_{21} & \cdots & s_{m1} \\ s_{12} & s_{22} & \cdots & s_{m2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{1n} & s_{2n} & \cdots & s_{mn} \end{bmatrix} \tag{7}$$

为了区分各属性对决策的影响程度，本文默认采用专家评价的方式对各属性评估并赋予不同权重 $W=\{w_1,w_2,\cdots,w_i,\cdots,w_n\}$，也可由设计人员根据不同参数的重要性利用 AHP 法确定权重。规范化检索算式为

$$\mathrm{sim}(M_q,M_j)_w=\sum_{i=1}^{n} w_i s_{ji} \tag{8}$$

其中

$$\sum_{i=1}^{n} w_i=1$$

该算法实现了对实例相似性与性能的计算，得到实例相似度范围 $\mathrm{sim}(M_{qi},M_{ji})_w\in[-1,1]$，检索时设定的阈值不宜过大。

4　实例修改

采用基于规则关联的方法对实例进行修改。规则关联是指实例结构尺寸参数与设计要求间存在可定量描述关系或与设计要求中的性能有强相关性。设计要求与实例结构尺寸参数间的规则关联如图 3 所示。实例结构尺寸参数包括主驱动参数 P 和被驱动参数 U 两类，主驱动参数是与设计要求直接相关或对实例整体结构和性能起决定性作用的参数，如排种器种盘直径、型孔个数等；被驱动参数是与主驱动参数间存在规则关联的参数，随主驱动参数的变化而变化。根据设计要求 Q，通过对主驱动参数的调整可实现实例的快速修改。

基于规则关联的实例修改过程的物元表达式为

$$T^*M_o=T^*\begin{bmatrix} O_o & c_{o1} & v_{o1} \\ & c_{o2} & v_{o2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{oj} & v_{oj} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{on} & v_{on} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} O'_o & c_{o1} & v'_{o1} \\ & c_{o2} & v'_{o2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{oj} & v'_{oj} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{on} & v'_{on} \end{bmatrix}=M'_o \tag{9}$$

其中

$$T^*=\{T_1,T_2,\cdots,T_n\} \tag{10}$$

式中　T^*——修改方式集合

M_o——修改前实例物元

O_o——被修改的实例或实例零部件

M'_o——修改后得到的新实例物元

c_{oj}——被修改的实例物元属性

v'_{oj}——修改后实例物元属性的量值

实例物元 M_o 与实例物元集 $M'=\{M_1,M_2,\cdots,M_m\}$ 中各实例物元间存在规则关联，用关系物元集 $R'=\{R_{o1},R_{o2},\cdots,R_{om}\}$ 表示，修改 M_o 引起的实例物元变化表达式为

$$\{M_1,M_2,\cdots,M_m\}\xrightarrow{T^*M_o+R'}\{M'_1,M'_2,\cdots,M'_m\} \tag{11}$$

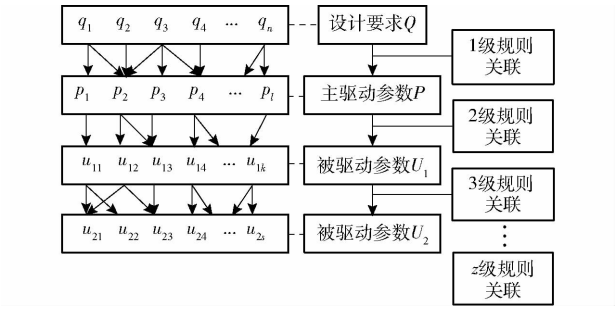


图 3　设计要求与实例结构尺寸参数规则关联

Fig. 3　Relationship between design requirements and structural dimension parameters of cases

以立式浅盆型排种器折边倾角和排种盘直径变化为例对基于规则的实例修改过程进行说明。图 4 为排种器结构示意图，其结构尺寸参数有排种盘直径 D、铆钉孔分度圆直径 d_f、型孔分度圆直径 d_k、折边倾角 α、折边长度 L_z 和排种盘厚度 B。其中，排种盘折边倾角 α 和排种盘直径 D 是影响排种器结构和性能的主要参数，将其作为主驱动参数。利用 CATIA 软件构建模型，为实现排种盘的变形变异设计，需定义参数间的关联规则。以型孔分度圆直径 d_k 为例，在图 5a 的 CATIA 知识工程的规则对话框中输入如下规则

if $'\alpha'=\ =0$deg

　　$d_k=D-9$ mm

else if $'\alpha'<\ >0$deg

　　$d_k=(D/2-L_z/2)*\cos('\alpha')*2$

利用此方法对排种盘其他参数进行设置，建立图 5b 所示的排种盘参数化模型。

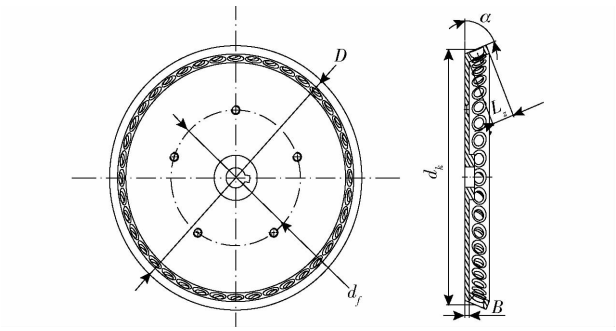
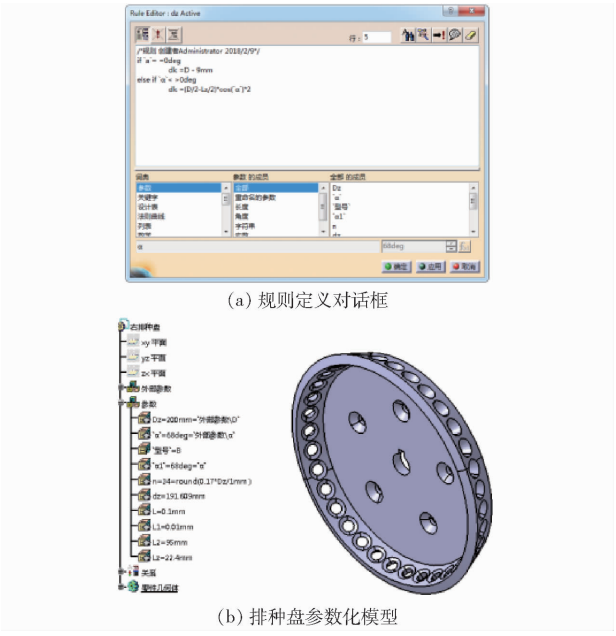


图 4　排种盘结构示意图

Fig. 4　Structure sketch of seed plate

排种盘结构变化会引起护种板、排种轴等一系列零部件的变化，依照上述方法建立排种器其他零部件参数化模型。分别取折边倾角 α 等于 0°、45°



(a) 规则定义对话框

(b) 排种盘参数化模型

图 5 排种盘规则定义与模型建立

Fig. 5 Rule definition and model establishment of seed plate

和 90°,排种盘直径 D 取 160、220 mm,不同参数的排种器结构如表 1 所示。为便于对排种器内部结构进行观察,隐藏了排种器右壳体、右检视窗、上盖等零部件。

由于实例修改过程的复杂性和领域适应性,目前实例的自动修改还存在很多问题,如设计回溯点的确定,设计失败时数据的记录和利用等[4,26]。本文采用交互式人工修改方法,将检索到的相似实例的主驱动参数呈现在交互界面中,供设计人员修改。

5 人机交互与技术集成

5.1 人机交互界面

机械式大豆排种器设计重用过程中,用户首先需要对重用排种器的类型进行选择,进而进入与排种器类型相对应的检索界面。图 6 为排种器类型选择界面,通过该界面可对重用排种器类型进行确定,同时了解所选排种器的结构、工作原理、特点及适用范围。

表 1 基于规则关联的排种器修改

Tab. 1 Modification of seed metering device based on rules association

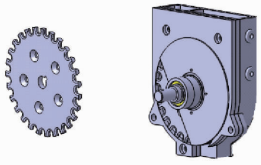
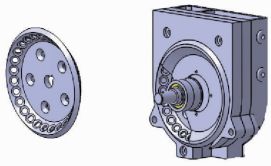
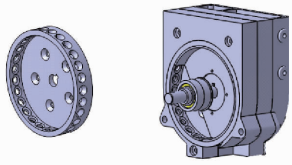
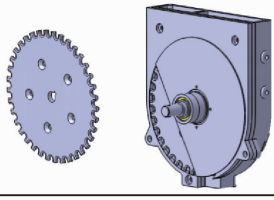
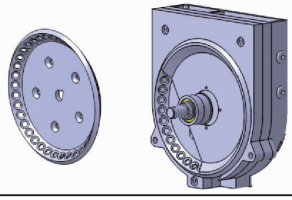
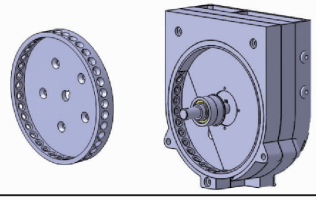
排种盘直径 D/mm	折边倾角 α/(°)		
	0	45	90
160			
220			



图 6 排种器类型选择界面

Fig. 6 Type selection interface of seed metering device



图 7 排种器检索界面

Fig. 7 Search interface of seed metering device

排种器检索时,可采用通过专家打分确定的默认权重,也可由设计人员根据各检索参数的相对重要性,利用判断矩阵计算权重,图 7 为立式圆盘排种器检索界面。

图 8 为立式浅盆型排种器实例修改界面,界面中包括排种盘直径、折边倾角、型孔个数等主驱动参数和排种器长度、高度等被驱动参数。其中,型孔个数随排种盘直径和型孔直径的修改而变化,其参数可传递给排种器模型,与其他主驱动参数共同驱动模型修改。排种器长度、高度等被驱动参数不可人为修改,仅供设计人员对排种器尺寸进行整体把握,其文本框的 Enabled 属性设置为 False,单击“参数

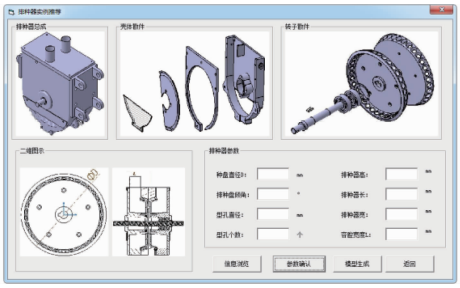


图 8　排种器实例修改界面

Fig. 8　Modification interface of seed metering device

确认”，其值会随主驱动参数变化而变化。

5.2　技术集成

机械式大豆排种器设计重用实现的关键在于实例物元数据库的连接和实例 CATIA 参数化模型库中三维模型的调用与修改。

5.2.1　数据库连接

机械式大豆排种器设计重用过程中，采用 Access 关系型数据库对排种器的实例参数进行存储，其与人机交互界面的连接代码如下

```
Dim conn As ADODB.Connection
Dim rs As Recordset
Set conn = New ADODB.Connection
Set rs = New ADODB.Recordset
conn.ConnectionString = "Provider = Microsoft.Jet.OLEDB.4.0;Data Source = " + App.Path + "\DataBase\SMD_Ass.mdb"
conn.Open
```

5.2.2　实例模型的调用与修改

通过对 CATIA 进行二次开发，实现对 CATIA 的访问、实例模型调用和修改，其程序流程图如图 9 所示。

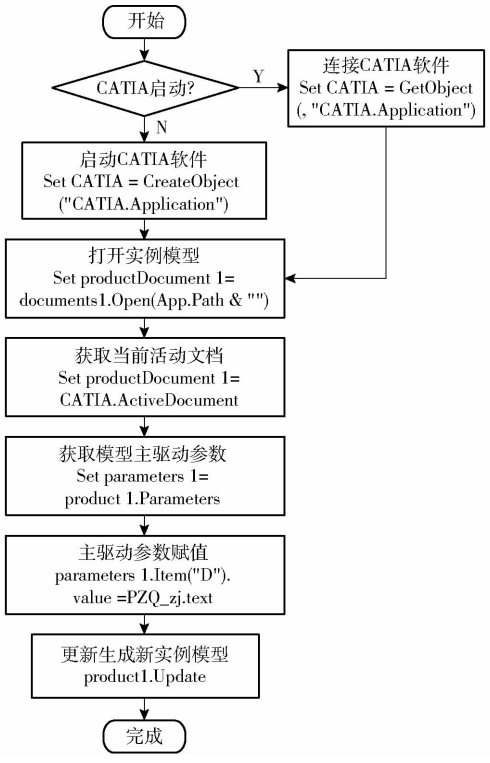


图 9　实例模型调用与修改流程图

Fig. 9　Invocation and modification block diagram of instance model

6　实例分析

6.1　需求实例物元与作业对象确定

排种器作业性能受种子外形尺寸影响，设定重用排种器的作业对象为垦丰 16 大豆种子，测得粒长、粒宽、粒厚平均值为 6.95、6.77、6.18 mm；最大值分别为 7.46、7.35、6.89 mm；最小值分别为 6.16、6.09、5.69 mm。根据设计要求建立需求实例物元 M_q 为

$$M_q=\begin{bmatrix} \text{排种器} & \text{类型} & \text{立式圆盘排种器} \\ & \text{作业速度} & \text{7 km/h} \\ & \text{排种盘直径} & \text{200 ~ 230 mm} \\ & \text{合格指数} & \geqslant 90\% \\ & \text{破损率} & \leqslant 1\% \\ & \text{成本} & \leqslant 180 \text{ 元} \end{bmatrix}$$

其中，基本参数为排种器类型和作业速度，匹配参数为排种盘直径，评价参数为合格指数、破损率和成本。

6.2　实例检索

设定阈值 $t=0.4$，计算匹配参数与评价参数权重，构造判断矩阵 $\boldsymbol{H}$ 为

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} \\ 7 & 1 & 3 & 5 \\ 5 & \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ 2 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$$

权重 $W=(0.072\,4, 0.483\,7, 0.317\,5, 0.126\,4)$，检索得到如表 2 所示按相似度降序排列的推荐实例。

6.3　实例调用与修改

选择表 2 中相似度最大的立式浅盆型排种器作为设计重用对象。为提高排种器作业性能，在排种器实例修改界面中，对排种器主驱动参数作如下修改：①根据作业对象大豆种子平均粒长 6.95 mm，最大粒长 7.46 mm，暂定型孔直径为 8 mm。②在型孔中心距一定时，增大排种盘直径会增加型孔数目；在转速一定时，排种盘旋转一周排出种子越多，即相同株距下，增大排种盘直径可降低排种盘转速，有利于高速作业[27]。且当型孔直径减小时，大种盘直径有利于型孔数目的增加，因此，在设计要求允许范围内，

将排种盘直径修改为 230 mm。③在作业速度和株距一定时,增加型孔数目,可降低排种盘转速,增加充种时间,提高充填率。在型孔直径为 8 mm,排种盘直径 230 mm 条件下,实例修改界面中型孔个数计算值为 42 个。修改前后排种器参数如表 3 所示。修改后的排种器模型如图 10 所示。

表 2 排种器推荐实例

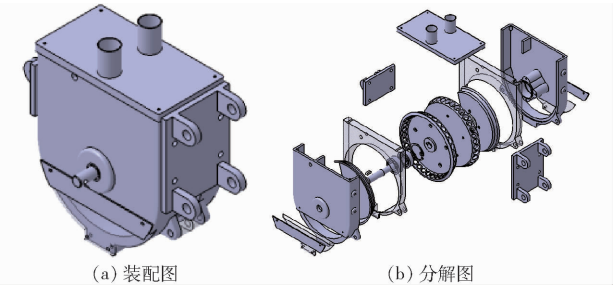
Tab. 2 Recommended cases of seed metering device

排名	实例	相似度	作业速度/(km·h^{-1})	排种盘直径/mm	合格指数/%	破损率/%	成本/元
1	立式浅盆型排种器	0.68	7	220	91.6	0.05	220
2	组合勺型复式型孔排种器	0.48	7	210	92.3	0.8	320
3	双腔立式圆盘排种器	0.43	7	230	90.7	0.3	190

表 3 排种器参数对比

Tab. 3 Comparison of parameters of seed metering device

浅盆型排种器	排种盘直径/mm	排种盘折边倾角/(°)	型孔数目/个	型孔直径/mm	排种器长度/mm	排种器宽度/mm	排种器高度/mm	容腔宽度/mm
修改前	220	68	36	9	232	126	273	30
修改后	230	68	42	8	242	126	283	30



(a) 装配图 (b) 分解图

图 10 排种器三维模型

Fig. 10 3D model of seed metering device

6.4 虚拟仿真与改进

6.4.1 EDEM 虚拟仿真

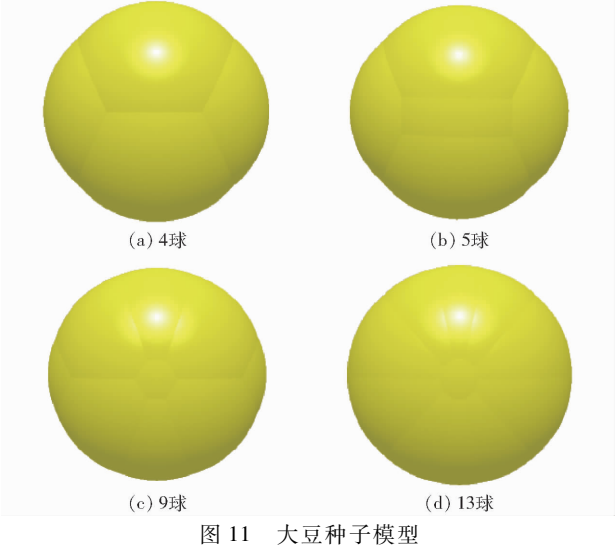
利用 EDEM 软件对修改后的排种器进行离散元仿真验证。接触碰撞模型为 Herz - Mindlin(no slip) built - in 模型。仿真参数设置如表 4 所示[28-29]。

表 4 EDEM 仿真参数设置

Tab. 4 EDEM simulation parameter setting

项目	参数	数值
大豆颗粒	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	6.12×10^{5}
	密度/(kg·m^{-3})	1 168
钢铁壁面	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	7×10^{10}
	密度/(kg·m^{-3})	7 800
颗粒-颗粒	恢复系数	0.55
	静摩擦因数	0.45
	滚动摩擦因数	0.06
颗粒-壁面	恢复系数	0.56
	静摩擦因数	0.43
	滚动摩擦因数	0.03

垦丰 16 大豆种子呈近似椭球形,采用球充填方法建立种子模型。充填球的原则为:充填球的外轮廓尽可能逼近椭球的外轮廓;充填球的球心落在椭球的轴线或轴平面上;在满足精度的条件下,充填球数尽可能少[30]。本文分别采用 4、5、9、13 球构造大豆种子模型,如图 11 所示。4、5 球与种子椭球形差距相对较大,交界线明显,9、13 球更接近椭球形,曲线更为流畅,理论上充填球数越多越接近种子实际轮廓,但随着球数增多会导致仿真计算时间增加。以测定的种子平均粒长、粒宽和粒厚为标准,综合考虑种子外形曲线的圆滑性和仿真效率,采用 9 球充填建立大豆种子模型,设定种粒尺寸呈正态分布。



(a) 4球 (b) 5球 (c) 9球 (d) 13球

图 11 大豆种子模型

Fig. 11 Soybean seed models

将排种器 CATIA 参数化模型另存为 stp 格式并导入到 EDEM 软件中,设置排种盘为转动部件,并在两型腔顶部分别添加虚拟工厂。排种盘转速计算式为

$$n=\frac{u}{0.0006\times 2z_k e} \tag{12}$$

式中　n——排种盘转速，r/min

u——作业速度，km/h

z_k——型孔数

e——理论株距，取 10 cm

根据需求实例物元中对排种器作业速度要求，对作业速度在 7 km/h 下排种器作业情况进行虚拟仿真，仿真结果为：合格指数 91.3%，重播指数 8.3%，漏播指数 0.4%。

修改后的排种器在当前作业对象下合格指数大于 90%，满足设计要求，但小于修改前的 91.6%，重播指数偏高是造成合格指数降低的主要原因。通过对 EDEM 仿真过程分析发现，重播指数偏高的原因为型孔尺寸相对种子模型较大，沿排种盘轴向和圆周方向均有两粒种子同时填充的情况，且多余的种子未能在清种区及时清除，如图 12 所示。由此可知，在实例修改过程中，减小型孔直径是正确的。且通过对型孔结构进行改进设计，可进一步降低重播指数，提高排种器作业性能。

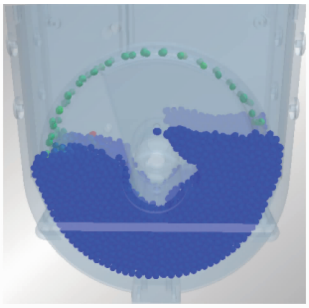


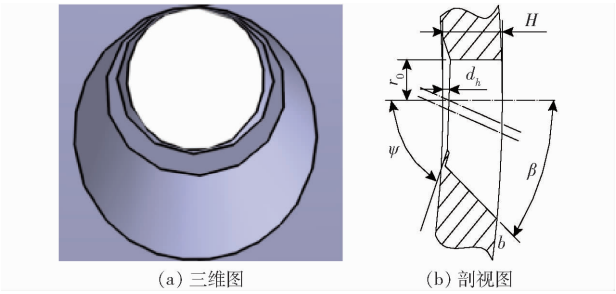
图 12　排种器仿真试验截图

Fig. 12　Screenshots of seed metering device simulation test

6.4.2　改进设计

改进前排种器型孔结构如图 13 所示[31]。排种盘厚度 $H=8$ mm，外引导面深度 $d_h=1$ mm，基圆半径 $r_0=4$ mm，外面倾角 $\Psi=78°$，内面倾角 $\beta=40°$。型孔呈近似圆锥状，导致型孔内部空间较大，易造成尺寸较小的种粒同时填充，且型孔在排种盘轴向和圆周方向均有挡边，不利于清种，从而造成重播。

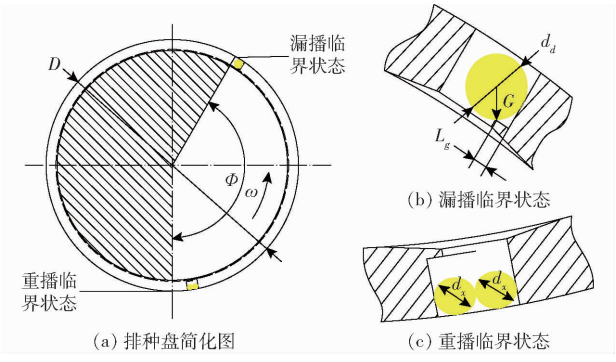
对排种器漏播与重播临界状态进行分析，以便对型孔结构进行改进，如图 14 所示。图中 D 为排种盘直径，$D=230$ mm，Φ 为充种与清种区域角，$\Phi=150°$，ω 为排种盘转动角速度，d_d 为种子最大直径，G 为种子重力；L_g 为型孔挡边长度临界值；d_x 为种子平均直径。图 14a 的排种盘简化图中，阴影部



(a) 三维图　　(b) 剖视图

图 13　修改前的排种器型孔结构

Fig. 13　Hole structure of seed metering device before modification

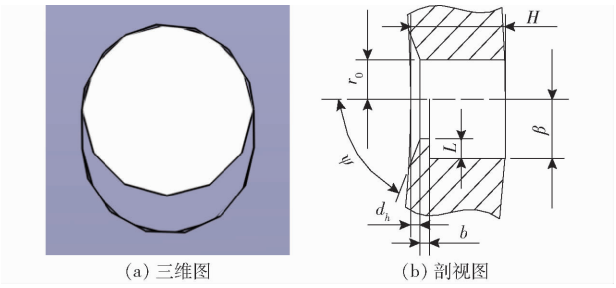


(a) 排种盘简化图　　(b) 漏播临界状态　　(c) 重播临界状态

图 14　型孔结构分析

Fig. 14　Hole structure analysis

分为排种器的护种区[32]。根据测量所得到的种子参数，对型孔结构进行改进分析。外面倾角 Ψ 仍取 78°，外引导面深度 $d_h=1$ mm；设定大豆尺寸参数服从正态分布，置信水平 95%，计算得粒长的置信上限为 7.07 mm，以置信上限为型孔设计基准，型孔直径取 1～1.5 倍置信上限，确定基圆半径 $r_0=4$ mm，型孔内深 8 mm，型孔尺寸可满足测量所得粒长最大值 7.46 mm 要求。考虑部分粒径偏离区间范围以及漏播和重播两种临界状态，若假定种子为球体，最大直径 $d_d=8$ mm，型孔内面倾角 $\beta=0°$，当型孔进入护种区瞬间，型孔挡边长度临界值为 1.73 mm，即该长度可保证种子重力刚好通过挡边边缘，如图 14b 所示。因此，确定型孔挡边长度 $L_g=2$ mm，考虑型孔加工工艺性，型孔挡边厚度 b 取 1 mm，此时，排种盘厚度 $H=10$ mm，型孔沿排种盘圆周方向长度为 10 mm；若仍将种子假定为球体，仅有当两粒种子平均直径 $d_x=5$ mm 时才会发生重播，即重播临界状态，如图 14c 所示。而测得粒厚最小值为 5.69 mm，满足设计要求。增大型孔内面倾角，型孔内部空间相应增大，容易造成重播，因此，型孔内面倾角 β 确定为 0°，修改后的型孔结构如图 15 所示。修改后的型孔内部由近似圆锥状变为长圆孔，型孔沿排种盘圆周方向尺寸变小，为进一步提高排种器性能，修改型孔个数，最终确定型孔个数为 46 个。



(a) 三维图 (b) 剖视图

图 15 修改后的排种器型孔结构

Fig. 15 Hole structure of seed metering device after modification

7 结果验证

7.1 仿真验证

为验证改进后排种器的可用性,对 4 ~ 12 km/h 下的排种器作业性能进行虚拟仿真,结果如表 5 所示。

表 5 不同作业速度下排种器仿真结果

Tab. 5 Simulation results of seed metering device at different operation speeds

作业速度/(km·h^{-1})	排种盘转速/(r·min^{-1})	合格指数/%	重播指数/%	漏播指数/%
4	7.25	100	0	0
5	9.06	100	0	0
6	10.87	99.5	0	0.5
7	12.68	99.2	0	0.8
8	14.49	99.2	0	0.8
9	16.30	98.6	0	1.4
10	18.12	98.7	0	1.3
11	19.93	97.1	0	2.9
12	21.74	94.1	0	5.9

由表 5 可知,修改后的排种器的漏播指数随着作业速度增大而上升,由于型孔沿排种盘轴向和周向尺寸减小,没有重播发生,在作业速度为 7 km/h 时,合格指数为 99.2%,其作业性能相对改进前得到提高。

7.2 台架试验

在改进后的排种器样机上进行台架试验。试验地点为东北农业大学排种性能实验室,试验品种为垦丰 16 大豆种子,千粒质量约为 170.67 g,自然休止角 27.93°。试验仪器采用 JPS-12 型计算机视觉排种器性能检测试验台。按照 GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法进行,每组试验重复3 次,取平均值,排种器试验台及试验结果分别如图 16 和表 6 所示。

由表 6 可知,台架试验结果与仿真结果基本相同,在 4 ~ 12 km/h 的作业速度下,合格指数相对误差最大值为 3.6%。产生误差的原因可能是台架试验用种子与仿真种子模型存在差异性,台架试验链条传动产生振动,样机制造加工精度等。

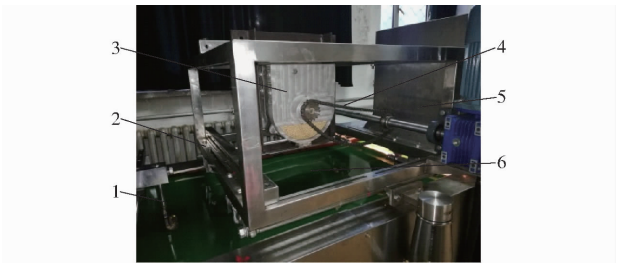


图 16 排种器试验台

Fig. 16 Seed metering test-bed

1. 油刷 2. 试验台架 3. 排种器 4. 传动系统 5. 图像采集装置 6. 种床带

表 6 排种器样机试验结果

Tab. 6 Experiment results of seed metering device prototype

作业速度/(km·h^{-1})	排种盘转速/(r·min^{-1})	合格指数/%	重播指数/%	漏播指数/%	变异系数/%	破损率/%
4	7.25	98.6	1.4	0	6.4	0
5	9.06	98.3	1.7	0	7.5	0
6	10.87	98.3	1.0	0.7	8.9	0
7	12.68	98.0	1.2	0.8	9.7	0
8	14.49	97.2	1.6	1.2	10.1	0
9	16.30	96.5	1.4	2.1	10.4	0
10	18.12	95.3	1.1	3.6	11.8	0
11	19.93	94.9	0.8	4.3	12.4	0
12	21.74	92.9	0.7	6.4	13.2	0

8 结论

(1)采用包含实例名称、特征属性和量值的实例物元对排种器设计知识进行表示,可以实现对设计知识定性、定量的描述,使设计知识的表示完整、具体、清晰、规范,有利于设计知识的有效利用。

(2)将排种器属性划分为基本参数、匹配参数和评价参数,通过确定基本参数,可缩小检索范围,对匹配参数和评价参数采用与之对应的计算算法,可实现实例的检索与评价,这种方法可减少实例检索过程中的计算量,提高检索的效率与准确度。

(3)对重用排种器的主驱动参数进行修改,并对型孔结构进行改进设计和试验验证。结果表明,在 7 km/h 作业速度下,合格指数 98.0%、重播指数 1.2%、漏播指数 0.8%、变异系数 9.7%、破损率 0。改进后的排种器作业性能得到了提高,证明了设计重用技术的可行性和有效性。

参 考 文 献

[1] 李岩磊,白鹏, 张晓辉,等. 基于物联网的现代设计方法在农业装备设计中的应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(2):269 – 273.
LI Yanlei, BAI Peng, ZHANG Xiaohui, et al. Application of modern design method based on Internet of Things in agricultural equipment design[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2016, 47(2): 269 – 273. (in Chinese)

[2] 王军,张宗超,何平,等. 面向快速智能设计的产品实例数据精简与重构[J]. 机械设计,2017,34(11):22 – 26.
WANG Jun, ZHANG Zongchao, HE Ping, et al. Case data reduction and reconstruction for rapid and intelligent product design [J]. Journal of Machine Design, 2017,34(11): 22 – 26. (in Chinese)

[3] 周临震. 产品快速设计系统通用平台的研究与开发[J]. 组合机床与自动化加工技术,2013(2):54 – 57.
ZHOU Linzhen. A research on general platform design in rapid product design system[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(2): 54 – 57. (in Chinese)

[4] 杨宇,李成华,张国梁. 基于实例推理的铲式玉米精密播种机设计[J]. 农业机械学报,2009,40(12):51 – 55.
YANG Yu, LI Chenghua, ZHANG Guoliang. Design method of precision spade punch planter of maize based on CBR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 51 – 55. (in Chinese)

[5] PAHL G, BEITZ W, FEIDHUSEN J, et al. Engineering design: a systematic approach[J]. Students Quarterly Journal, 2010, 34(133): 63 – 64.

[6] 陈黎卿,郑媛媛,陈无畏,等. 基于适应性重构的分动器设计系统开发[J]. 机械设计,2013,30(7):1 – 5.
CHEN Liqing, ZHENG Yuanyuan, CHEN Wuwei, et al. Development of transfer case design system based on adaptive reconfiguration[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(7): 1 – 5. (in Chinese)

[7] 程贤福,李文杰,王浩伦. 基于相似性、重用性和定制柔性的产品设计适应性评价方法[J]. 现代制造工程,2017(6):156 – 161.
CHENG Xianfu, LI Wenjie, WANG Haolun. A new evaluation method of design adaptability based on similarity, reuse and customized flexibility[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(6): 156 – 161. (in Chinese)

[8] 武守飞,潘晓弘,张勇,等. 面向大批量定制的设计重用支撑平台研究[J]. 计算机集成制造系统,2009,15(2):258 – 264.
WU Shoufei, PAN Xiaohong, ZHANG Yong, et al. Design reuse supporting platform for mass customization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(2): 258 – 264. (in Chinese)

[9] 李博. 设计重用研究综述 [J]. 计算机集成制造系统,2014,20(3):453 – 463.
LI Bo. Review on design reuse[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 453 – 463. (in Chinese)

[10] 文家富,郭伟,邵宏宇. 基于领域本体和 CBR 的案例知识检索方法[J]. 计算机集成制造系统,2017,23(7):1377 – 1385.
WEN Jiafu, GUO Wei, SHAO Hongyu. Case retrieve methodology based on domain ontology and case-based reasoning[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(7): 1377 – 1385. (in Chinese)

[11] 陈友东,韩美华,叶进军. 基于 CBR 的数控设备故障诊断系统知识表示[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(12): 1557 – 1561.
CHEN Youdong, HAN Meihua, YE Jinjun. Knowledge representation for CNC equipment fault diagnosis system based on CBR [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(12): 1557 – 1561. (in Chinese)

[12] 宋正河,毕淑琴,金晓萍,等. 履带式收获机械传动系快速设计推理方法[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊 2):268 – 272.
SONG Zhenghe, BI Shuqin, JIN Xiaoping, et al. Rapid design reasoning method for crawler harvester transmission system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 268 – 272. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2013s250&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.050. (in Chinese)

[13] 徐元浩,殷国富,许德帮,等. 基于 CBR 的机床导轨智能设计研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2014,36(12):177 – 186.
XU Yuanhao, YIN Guofu, XU Debang, et al. Research on intelligent design of machine tool rails based on CBR[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2014, 36(12): 177 – 186. (in Chinese)

[14] 赵秀艳,宋正河,张开兴,等. 基于多属性决策的农机专业底盘实例推理方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):370 – 377.
ZHAO Xiuyan, SONG Zhenghe, ZHANG Kaixing, et al. Evaluation method of agricultural machinery professional chassis' cases[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 370 – 377. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170250&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.050. (in Chinese)

[15] BOTAR-JID C C, AVRAMENKO Y, KRASLAWSKI A, et al. Case-based selection of a model of a reverse flow reactor[J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2010, 49(1): 74 – 83.

[16] CABANILLAS D, BONADA F, VENTURA R, et al. A combination of knowledge and argumentation based system for supporting injection mould design[J]. Frontiers in Artficial Intelligence and Applications, 2013, 37(6): 293 – 296.

[17] WANG P J, GONG Y D, XIE H L, et al. Applying CBR to machine tool product configuration design oriented to customer

requirements[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(1): 60 - 76.

[18] 王相兵,童水光,钟崴,等.基于可拓重用的液压挖掘机结构性能方案设计[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(11):1992 - 2002.
WANG Xiangbing, TONG Shuiguang, ZHONG Wei, et al. Study on scheme design technique for hydraulic excavator's structure performance based on extension reuse[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(11): 1992 - 2002. (in Chinese)

[19] 刘宏新,付露露,贾儒,等.大豆播种装备谱系模块聚类划分方法[J].农业工程学报,2016,32(19):43 - 50.
LIU Hongxin, FU Lulu, JIA Ru, et al. Partition method for module clustering of soybean seeding equipment pedigree[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 43 - 50. (in Chinese)

[20] 刘宏新,周向荣,李蓉,等.复式播种单元3D模型参数化数字资源研究[J].东北农业大学学报,2014,45(12):105 - 111.
LIU Hongxin, ZHOU Xiangrong, LI Rong, et al. Parametric digital resources research on 3D model of compound seeding unit [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45(12): 105 - 111. (in Chinese)

[21] 刘宏新,付露露,周兴宇,等.基于规则转换的机械式排种器系列与变异变型设计[J].东北农业大学学报,2015,46(11):77 - 85.
LIU Hongxin, FU Lulu, ZHOU Xingyu, et al. Series and variation variant design of mechanical seed-metering device based on conversion of rule[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(11): 77 - 85. (in Chinese)

[22] 刘宏新,贾儒,郭丽峰,等.数字模型全息标识体系与辅助标识方法研究[J/OL].农业机械学报,2018,49(9):414 - 426.
LIU Hongxin, JIA Ru, GUO Lifeng, et al. Hierarchy of holographic identification and technology of auxiliary identification[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 414 - 426. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180949&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.049. (in Chinese)

[23] 刘宏新,贾儒,周兴宇,等.基于物元标识的人机交互式机械排种器虚拟装配[J].农业工程学报,2016,32(1):38 - 45.
LIU Hongxin, JIA Ru, ZHOU Xingyu, et al. Virtual assembly of man-machine interactive mechanical seed-metering device based on matter-element identification[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 38 - 45. (in Chinese)

[24] 赵燕伟,苏楠.可拓设计[M].北京:科学出版社,2010:12 - 29.

[25] 程贤福,从言言.基于知识重用的门式起重机快速设计方法[J].机械设计与研究,2016,32(4):145 - 148,153.
CHENG Xianfu, CONG Yanyan. Rapid design method for gantry crane based on knowledge reuse[J]. Machine Design & Research, 2016, 32(4): 145 - 148,153. (in Chinese)

[26] 白晓虎,李芳,张祖立,等.基于实例推理的免耕播种机圆盘破茬装置设计[J].沈阳农业大学学报,2014,45(2):180 - 184.
BAI Xiaohu, LI Fang, ZHANG Zuli, et al. Design of disc coulter of no-tillage seeder based on CBR[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(2): 180 - 184. (in Chinese)

[27] 刘佳,崔涛,张东兴,等.机械气力组合式玉米精密排种器[J/OL].农业机械学报,2012,43(2):43 - 47.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 43 - 47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20120209&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.009. (in Chinese)

[28] RESORT G S, NEVADA C R. Material and interaction properties of selected grains and oil seeds for modeling discrete particles[J]. ASABE Annual International Meeting, 2009(7): 3 - 16.

[29] 刘宏新,刘俊孝,唐师法,等.对置斜盘高速精密大豆排种器设计与充种机理分析[J].农业工程学报,2016,32(20):24 - 31.
LIU Hongxin, LIU Junxiao, TANG Shifa, et al. Design on opposed inclined-plate high-speed precision seed-metering device and its working mechanism analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20):24 - 31. (in Chinese)

[30] 王扬,吕凤妍,徐天月,等.大豆籽粒形状和尺寸分析及其建模[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(2):507 - 517.
WANG Yang, LÜ Fengyan, XU Tianyue, et al. Shape and size analysis of soybean kernel and modeling[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(2): 507 - 517. (in Chinese)

[31] 刘宏新,徐晓萌,付露露,等.立式浅盆型复合种盘大豆排种器结构设计与参数优化[J].中国机械工程,2016,27(22):3005 - 3011.
LIU Hongxin, XU Xiaomeng, FU Lulu, et al. Design and parameter optimization on vertical shallow-basin type composites seed-plate soybean seed-metering devices[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(22): 3005 - 3011. (in Chinese)

[32] 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 CSAE, 2014, 30(21): 9 - 16. (in Chinese)