

稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台构建

李文斌 李青林 黄云林 宋玉营 岳颖超
(江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为提高脱粒装置的设计效率,本文构建了一种稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台。分析联合收获机脱粒装置关键零部件设计知识特点,收集设计知识,采用产生式和框架式知识表示法表示设计知识,以 SQL Server 2012 构建设计知识库,并以 Visual Studio 2012 为开发工具建立脱粒装置知识库管理系统;针对脱粒装置关键零部件结构特征,研究不同的参数化建模方法,对 NX 软件进行二次开发,建立脱粒装置关键零部件参数化模型库;根据脱粒装置常规设计流程和零部件的设计要求,采用基于实例和基于规则的正向演绎推理方法,建立脱粒装置智能设计推理机;以 Visual Studio 2012 为开发平台,融合知识库、推理机、参数化模型库和人机交互界面,构建稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台,实现脱粒装置的智能化设计。利用平台设计一个脱粒滚筒实例,并基于 CAE 软件进行了虚拟仿真试验,对设计实例进行了分析。结果表明,该平台缩短设计周期,降低设计成本,提高产品质量,推动农机企业的发展。

关键词: 稻麦联合收获机; 脱粒装置; 智能化设计; 知识库; 推理机

中图分类号: S225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0154-08

Construction of Intelligent Design Platform for Threshing Device of Combine Harvester for Rice and Wheat

LI Wenbin LI Qinglin HUANG Yunlin SONG Yuying YUE Yingchao
(College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to improve the design efficiency of the threshing device, an intelligent design platform for the threshing device of a rice and wheat combine harvester was constructed. Firstly, the structural characteristics and design knowledge of key parts of threshing device were analyzed. The methods and technologies of collecting, classifying, sorting and expressing design knowledge were studied. The design knowledge of key parts of threshing device was collected, and the design knowledge of key parts of threshing device was expressed by production and framework knowledge representation. The method and technology of using SQL Server 2012 relational database to store the design knowledge of threshing device were discussed, the design knowledge base was constructed, and Visual Studio 2012 was used as the development tool to realize the functions of knowledge query, addition and deletion by using ADO.NET technology, and the knowledge base management system of combine threshing device was established. Secondly, according to the different structural characteristics of the key parts of threshing device, different parametric modeling methods were studied, Visual Studio 2012 was used as programming software combined with C++ and KF (knowledge fusion) two development languages to secondary development NX software, through extracting the relevant parameters in the design process of threshing device parts, the parametric model library of threshing device was established in NX software. Thirdly, according to the design process of threshing device and the design requirements of parts, the reasoning process of intelligent design of threshing device of rice and wheat combine harvester was studied by using case-based and rule-based forward deductive reasoning method. Based on the analysis of threshing device performance evaluation standards and influence factors, the intelligent design reasoning engine of rice-wheat combine threshing device was constructed. Finally, using Visual Studio 2012 as the development platform, combining with SQL Server 2012 database and NX three-dimensional software and other tools,

收稿日期: 2020-08-05 修回日期: 2020-09-16
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700101)
作者简介: 李文斌(1992—),男,硕士生,主要从事虚拟仿真研究,E-mail: 1101341975@qq.com
通信作者: 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

integrating knowledge base, reasoning engine, parametric model base and human-computer interaction interface, the intelligent design platform for threshing device of rice wheat combine was constructed. The intelligent design of threshing device was realized, the utilization rate of design knowledge was improved, the design cycle was shortened, the design cost was reduced, the product quality was improved, and the total agricultural machinery design level in China was improved.

Key words: rice and wheat combine harvester; threshing device; intelligent design; knowledge base; inference mechanism

0 引言

水稻和小麦是我国机械化作业程度最高的主要粮食作物。联合收获机作为水稻和小麦的收获机械得到了大面积的推广,在我国乃至世界的粮食收获方面发挥着重要作用,但其结构复杂,设计过程繁琐。近年来为提升农业装备研发效率,抢占市场先机,国外农机装备企业应用信息化及自动化等先进技术和手段,纷纷建立了以 PDM/PLM (Product data management/Product lifecycle management) 为支撑的产品研发体系和知识积累平台^[1-2]。我国对联合收获机的研究和设计起步晚于国外,且缺乏创新设计,研发模式存在着设计生产周期长、效率低以及产品性能差等问题。

智能化设计是知识工程和计算机辅助设计理论相结合的现代设计方法,知识工程 (KBE) 是源于专家系统而形成的一个研究领域^[3],对智能化设计而言,知识工程技术贯穿整个智能化设计过程,因此设计系统能够运用丰富的知识 (如专家经验、设计手册、标准、行业规范等) 进行推理、判断、决策,实现产品设计的定制化、自动化、智能化^[1]。目前,智能化设计技术广泛应用于航空航天、机床、船舶、汽车等制造领域^[4-7],农业机械产品设计的智能化程度与上述领域还存在较大差距。农业机械产品具有种类繁多、作业环境复杂、工况多变、使用季节性强的特点,其智能化设计是一个知识密集的复杂过程,涉及多个领域。智能化设计技术对缩短产品设计周期、提升设计效率、提高产品质量有着积极地推动作用^[8]。本文以 Visual Studio 2012 为开发平台,结合 SQL Server 2012 数据库与 NX 三维软件等工具,融合知识库、推理机、参数化模型库和人机交互界面,构建稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台^[9],以期提高我国农机设计水平和质量。

1 设计知识库构建

1.1 设计知识收集和整理

根据稻麦联合收获机脱粒装置设计知识的特点,可以将脱粒装置的设计知识大致分为实例类知识和规则类知识两大类,其中实例类知识包括标准

件、通用件、专用件,规则类知识包括公式类知识、选型类知识等^[10-11]。公式类知识是指稻麦联合收获机脱粒装置设计过程中的大量的尺寸计算公式和设计校核公式,这是一种确定性的知识。选型类知识是指设计过程中对所需要参数或型号的选择,例如,脱粒装置中闭式脱粒滚筒线速度 $V:13 \sim 16 \text{ m/s}$ 。

1.2 设计知识表示和存储

1.2.1 设计知识表示

知识表示主要是将设计知识符号化和形式化的过程。知识表示方法主要有产生式表示法、框架表示法、本体表示法、Petri 网表示法、面向对象表示法、语义网络表示法等^[9]。

(1) 规则类知识表示

根据规则知识分类,稻麦联合收获机脱粒装置规则类型结构如图 1 所示。规则包括选型规则、设计公式及参数和力学理论公式等。选型、公式、参数等规则类知识一般采用产生式规则表达法,其基本形式为:IF 〈前提〉 THEN 〈结论〉或者 IF 〈条件〉 THEN 〈动作〉。其中,前提可以是简单条件,也可以是复合条件,用于指出何种情况下成立的条件,结论或动作指明前提成立时应得到的结论或执行的操作^[12]。

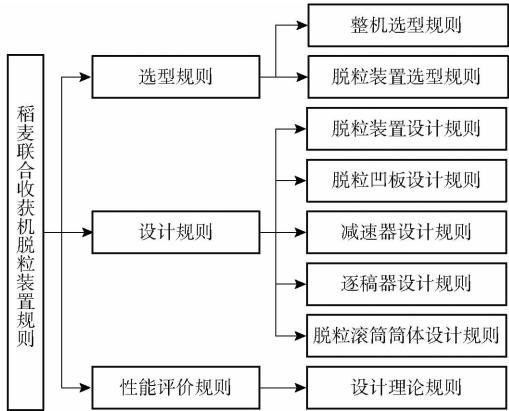


图 1 稻麦联合收获机脱粒装置规则结构框图

Fig. 1 Rule structure diagram of threshing device of rice-wheat combine harvester

例如:稻麦联合收获机脱粒装置喂入量与联合收获机机型有关。大型联合收获机,喂入量 q 大于等于 5 kg/s ;中型联合收获机,喂入量 q 小于 5 kg/s 大于 3 kg/s ,小型联合收获机,喂入量 q 小于等于

3 kg/s,则此条知识可表示为:

IF 联合收获机类型 = “大型” THEN $q \geq 5$ kg/s;
IF 地域条件 = “中型” THEN $5\text{ kg/s} > q > 3\text{ kg/s}$; IF
联合收获机类型 = “小型” THEN $q \leq 3\text{ kg/s}$ 。

(2)实例类知识表示

根据联合收获机脱粒装置的结构与分类特点,实例类知识采用框架式表示法。稻麦联合收获机脱粒装置实例结构如图 2 所示。

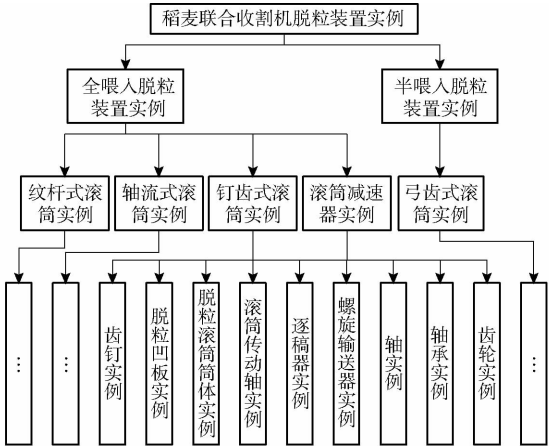


图 2 稻麦联合收获机脱粒装置实例结构框图

Fig.2 Example structure diagram of threshing device of combine harvester for rice and wheat

1.2.2 设计知识存储

(1)规则类知识存储

规则类知识存入 SQL Server 2012 数据库时,将规则类知识表分为编号、规则名称、规则内容、参数、说明和来源等内容存入知识库,存储格式如表 1 所示。

表 1 规则类知识的存储方式

Tab.1 Storage method of formula type knowledge

序号	编号	规则名称	规则内容	参数	...	参数	说明	来源
...	...	...	...	...	...	...	...	...

以钉齿式脱粒滚筒设计公式存储为例,其存储形式如图 3 所示。

ID	公式名称	公式结果	参数1	参数2	参数3	参数4	参数5	参 参...	参数8	公式内容	单位	说明	知识来源
1	滚筒的钉齿数	z	β	q	qd	...	...	...	...	$z = (1 - \beta)q/qd$		q: 脱粒量...	农业机械设...
2	钉齿平均厚度	b	b1	b2	...	...	...	...	...	$b = (b1 + b2) / 2$	mm	...	农业机械设...
3	齿距	a	b1	δ	...	...	...	...	...	$a = 2(b + \delta)$	mm	...	农业机械设...
4	滚筒长度	L	a	Z	K	+	...	...	...	$L = a(Z/K - 1)$	mm	...	农业机械设...
5	齿顶圆直径	D	M	s	h	...	...	...	...	$D = Ms/r + 2h$	mm	...	农业机械设...
6	齿顶圆厚度	δ	H	a	...	...	...	...	...	$\delta = H \sin a$		a: 钉齿角...	农业机械设...
7	齿顶圆厚度	δ	a	b1	α	δ'	h	...	...	$\delta = (a/2 - b1) \sin \alpha$		a: 齿顶圆...	农业机械设...

图 3 钉齿式脱粒滚筒设计公式存储表

Fig.3 Storage table of design formula for nail tooth threshing drum

(2)实例类知识存储

实例类知识包括各个零部件及整机的实例。存入数据库时,将实例类知识分为编号、厂家、型号、参

数、说明和来源,其存储表格式如表 2 所示。

表 2 实例类知识的存储方式

Tab.2 Storage method of case type knowledge

序号	编号	公司	产品	参数	...	参数	说明	来源
...	...	厂家	型号	...	...	...	...	...

以纹杆式脱粒滚筒实例的存储为例,其存储形式如图 4 所示。

序号	型号	滚筒形式	滚筒直径/mm	纹杆数	转速	滚筒型式	纹杆角度	纹杆条数	纹杆面积	说明	来源
1	ZK6-5	开式滚筒	$\phi 550 \times 1190$	8	425~1350	槽槽式	101°	9	0.58	'NULL'	《农业机械...
2	儿·金马-10...	开式滚筒	$\phi 610 \times 1040$	8	470~1160	槽槽式	104°	14	0.61	'NULL'	《农业机械...
3	丰收-3.0	开式滚筒	$\phi 550 \times 900$	8	575~1320	槽槽式	115°	10	0.51	'NULL'	《农业机械...
4	4LZ-2.5	开式滚筒	$\phi 550 \times 900$	8	500~1250	槽槽式	115°	13	0.51	'NULL'	《农业机械...
5	MF-510	开式滚筒	$\phi 560 \times 1140$	8	484~1360	槽槽式	82°	9	0.47	'NULL'	《农业机械...
6	MF-670	开式滚筒	$\phi 560 \times 1520$	8	590~1220	槽槽式	106°	11	0.8	'NULL'	《农业机械...
7	JD-7700	开式滚筒	$\phi 560 \times 1370$	8	407~1220	槽槽式	100°	13	0.71	'NULL'	《农业机械...

图 4 纹杆式脱粒滚筒实例存储表

Fig.4 Example storage table of bar threshing drum

1.3 知识库系统构建

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脱粒装置知识库。该知识库主要包括实例库和规则库,其中实例库含有稻麦联合收获机脱粒装置各零部件及整机实例,规则库包括在脱粒装置设计中用到的选型参数、设计公式和其他设计参数和规则。另外,规则库中还存储了知识的主要来源,便于工程师进行查阅和参考。

以 Visual Studio 2012 作为开发工具,以 C + + 语言为主要开发语言实现知识库管理系统界面的设计和其功能程序的编写。知识库管理系统包括规则库管理界面与实例库管理界面。

规则库如图 5 所示,根据知识的特征,将公式类知识、参数类知识和规则类知识分别在规则库左侧显示界面的上中下 3 块区域显示,以便于浏览。主界面左侧下方表示知识来源,主要包括农业机械设计手册、机械设计手册等相应的设计来源资料。在规则库显示界面最右侧区域显示知识管理区域,该界面主要采用 ADO. NET 数据访问技术实现对知识的查询、添加、修改、删除,并根据知识的分类特点将其分为公式管理、规则管理、参数管理。

实例库如图 6 所示,左侧为实例树状结构,包括脱粒装置各个零部件和整机等选项,当单击树状结构节点,右侧显示相应实例表、实例参数和对应的模型图片。

2 参数化模型库建立

2.1 参数化模型构建方法

目前参数化建模方法主要有:基于特征的参数化建模、使用表达式进行参数化建模、利用电子

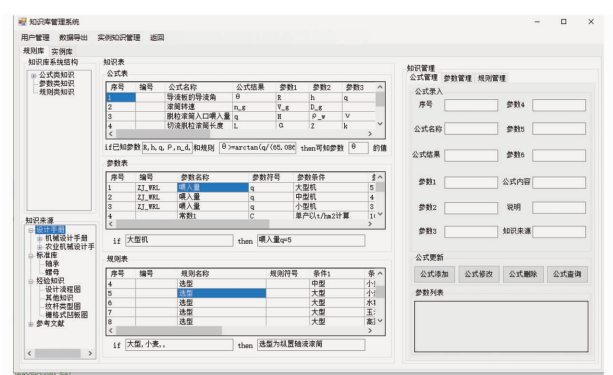


图 5 规则知识库管理界面

Fig. 5 Rule knowledge base management interface

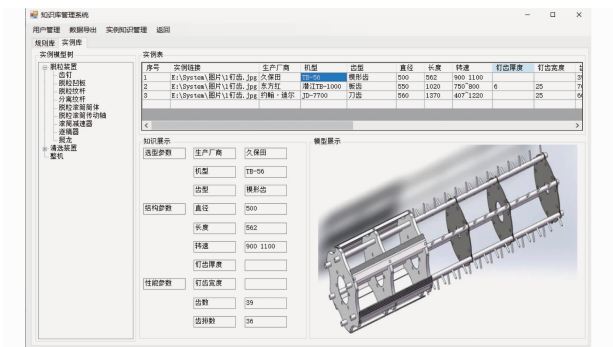


图 6 实例知识库管理界面

Fig. 6 Case knowledge base management interface

表格进行参数化建模和对 NX 软件进行二次开发 4 种方法^[13]。根据脱粒装置零部件特征和设计平台的需求,再结合 4 种方法的优缺点,本文选用对 NX 软件进行二次开发的方法建立模型库。稻麦联合收获机脱粒装置参数化模型库结构如图 7 所示。

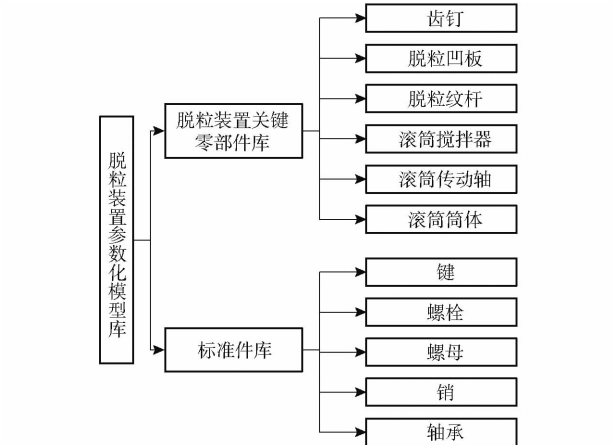


图 7 脱粒装置参数化模型库结构图

Fig. 7 Structure drawing of parameterized model library for threshing device

2.2 脱粒装置模型库系统开发

脱粒装置模型库是智能化设计平台的重要组成部分,模型库可以通过调用智能化设计平台得到的相关参数并在 NX 平台上生成相关设计模型,设计

者也可以在 NX 平台上根据需求,调整相关参数,更改相关尺寸,NX 会根据相关尺寸参数和拓扑关系生成模型^[14-16]。零部件模型库开发流程如图 8 所示,首先,配置 NX 二次开发的计算机环境和创建工作目录。其次,明确参数化的零部件及其特征,分析并确定零部件参数化需要的参数。然后,编写菜单、UI 界面和模型生成代码。最后,将代码文件放入工作目录,即可在 NX 中建立模型库。

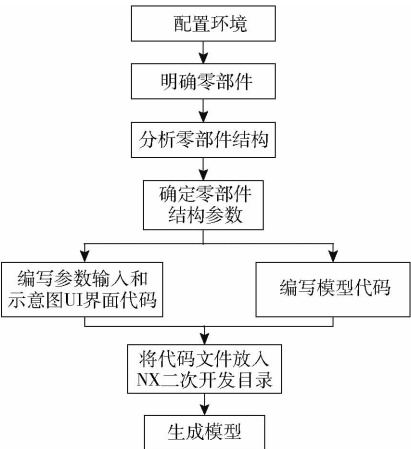


图 8 零部件创建流程图

Fig. 8 Component creation flow chart

通过 NX 二次开发建立了稻麦联合收获机脱粒装置的关键零部件模型库,根据智能化设计模块推理出的相关参数,生成脱粒装置零部件的三维模型。以切流式脱粒滚筒模型为例,生成模型如图 9 所示。

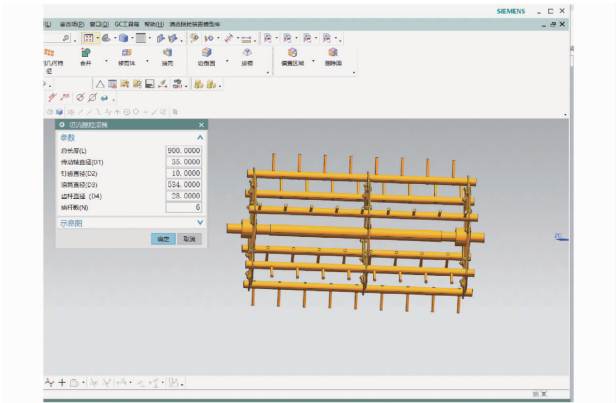


图 9 切流式脱粒滚筒参数化模型实例

Fig. 9 Example of threshing drum model

3 设计平台推理机建立

目前推理机制分为基于规则的推理机制 (RBR)、基于模型的推理机制 (MBR)、基于实例的推理机制 (CBR)^[17-19]。

根据稻麦联合收获机脱粒装置设计流程和设计知识的表示方法,采用基于实例和基于规则的正向演绎推理方法,推理机制流程如图 10 所示,当设计

人员输入设计要求,首先采用基于实例的推理机制。根据输入的设计参数,推理机在实例库中搜索相似实例,并进行相似度匹配,排序搜索结果,设计人员选择,如果不满意基于实例的推理结果,则转入基于规则的推理。设计人员输入的设计参数需和规则库中的规则匹配,以检查参数的合理性,不合理的参数需重新输入。输入合理的参数后,智能化设计系统利用推理机和规则数据库中的规则集进行计算推理,得出推导结果并在链接的 CAE 软件中进行合理性检验,若检验不合格,则重新推理判断,检验合格则输出结果参数,然后输出参数化模型,并将结果录入设计实例库。

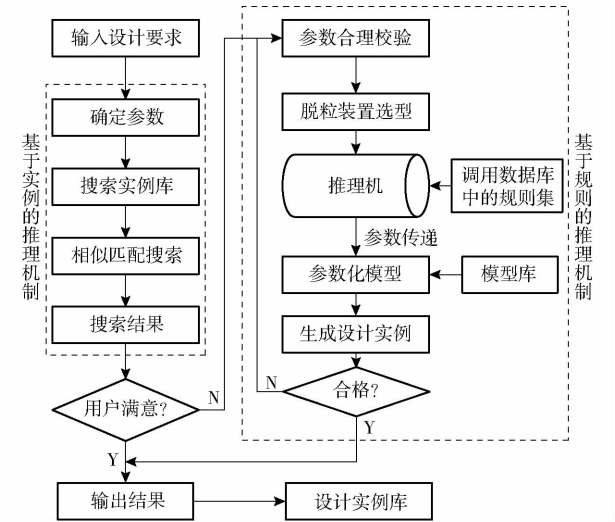


图 10 推理机制流程图

Fig. 10 Flow chart of reasoning mechanism

推理机是通过设计要求中的参数,按照设计规则逐步确定各个零部件的材料、尺寸等结果参数。为方便推理机程序的编写,完成推理机的实现,根据脱粒装置设计流程确定了推理设计流程图,如图 11 所示。

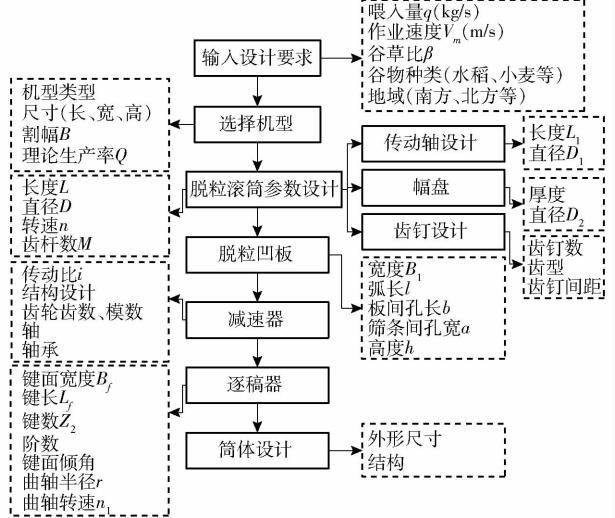


图 11 推理设计流程图

Fig. 11 Flow chart of reasoning design

4 智能化设计平台开发

4.1 平台功能和界面

稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台主要实现的功能有:对数据库中知识的管理和维护;按照设计人员的设计要求,实现脱粒装置的智能化设计;对设计过程进行解释和说明,其功能有利于设计人员提高工作效率。智能化设计平台功能框架如图 12 所示。

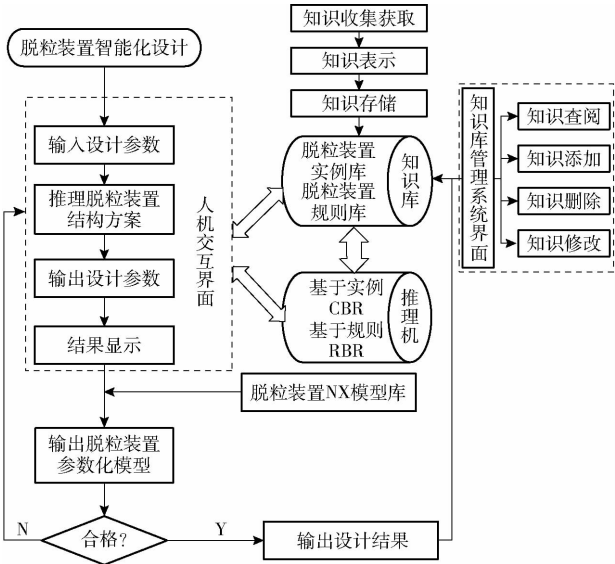


图 12 智能化设计平台功能框架图

Fig. 12 Frame diagram of intelligent design platform

根据稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台的主要功能,本智能化平台的人机界面分成设计项目选择模块、推理计算模块和结果显示模块。以 Visual Studio 2012 为开发工具,完成三大模块人机界面和界面设计,如图 13 所示。设计项目选择模块位于智能化系统主界面最左侧的上面部分,包括联合收获机脱粒装置设计和知识库管理等项目。推理计算模块位于右上侧,设计人员按要求输入设计参数,点击实例检索或者设计计算,即可在推理计算模块中显示计算结果。结果显示模块位于右下侧,主要是将结果参数传递至 NX 参数化模型库中并生成三维参数化模型,然后显示。

所有零部件设计完成后,在 NX 模型库中完成零部件装配,实现脱粒装置的智能化设计。

4.2 滚筒设计实例和仿真

振动影响机械的稳定性和可靠性,而联合收获机脱粒装置的振动主要来源于脱粒滚筒^[20-22],所以在满足结构强度和刚度的条件下对脱粒滚筒进行模态仿真。借助稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台连接的仿真软件完成仿真,判断脱粒滚筒设计的合理性。

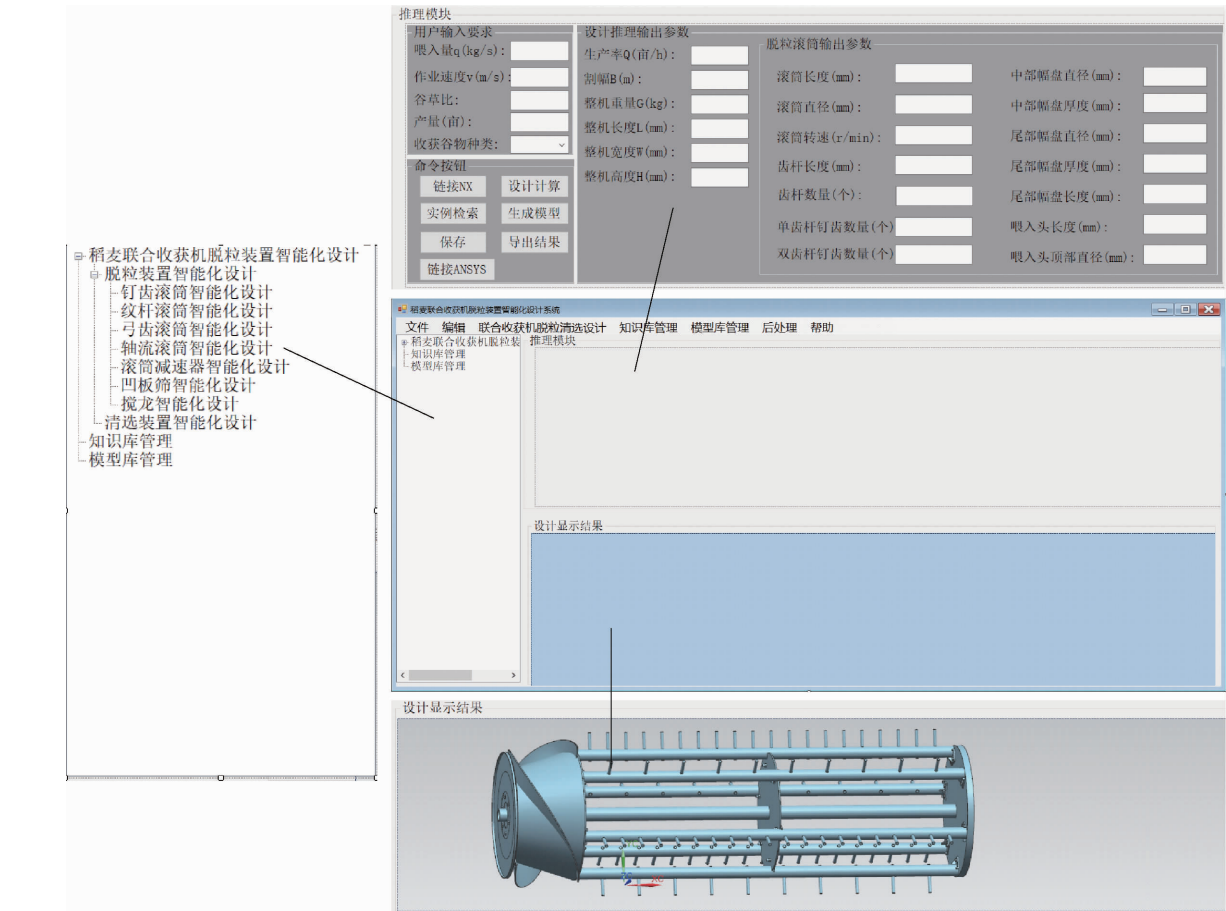


图 13 智能化设计系统主界面
Fig. 13 Intelligent design system main interface

稻麦联合收获机智能化设计平台输出的脱粒滚筒实例模型如图 14 所示,其主要设计参数和设计标准如表 3 所示。

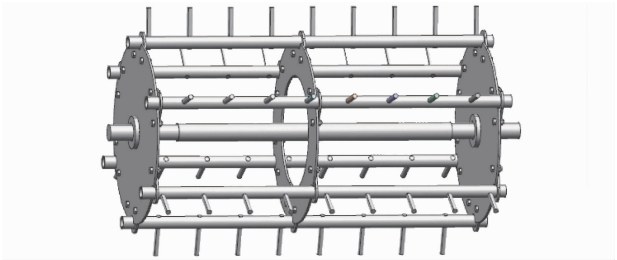


图 14 切流式脱粒滚筒模型

Fig. 14 Model of tangential threshing drum

表 3 滚筒实例参数和设计标准

Tab. 3 Roller case parameters and design standards

主参数	数值	设计标准
滚筒长度 L/mm	760	$L = a \left(\frac{Z}{K} - 1 \right) + 2\Delta L$
滚筒直径 D/mm	440	$D = \frac{Ms}{\pi} + 2h$
齿数 Z	51	$Z \geq (1 - \beta)q / (0.6q_d)$
齿杆数 M	6	$M = 6$
齿迹距 a/mm	45	$a = 25 \sim 50$
螺旋头数 K	3	$K = 2 \sim 5$
齿距 S/mm	90	$S = Ma/K$
滚筒转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	650	$n = 60V / (\pi D)$

将模型导入 ANSYS WorkBench 中,设置材料为 45 钢,划分网格,添加约束,求解。因为低阶的固有频率对脱粒滚筒影响较大,所以只对求解结果的前 6 阶模态振型和频率进行计算分析^[23-24]。模态仿真结果如图 15 和表 4 所示。

由表 4 可知,前 6 阶振型中,固有频率在 95.47 ~ 173.30 Hz 之间,且频率随着振型阶次增加而增加,2 阶、3 阶频率相近,4 阶、5 阶频率相近,表现出的振型也相近。由图 15 可知,前 6 阶振型以伸缩、弯曲、扭转为主。1 阶振型为传动轴沿 Z 轴伸缩;2 阶振型为整体弯曲,变形主要发生在中部幅盘处;3 阶振型呈整体弯曲;4 阶振型为幅盘弯曲;5 阶振型为幅盘弯曲;6 阶振型为齿杆扭转。

通过模态仿真得出的频率避开了外部激振频率^[25],此类型的脱粒滚筒可以避免共振。由此可见,智能化设计平台输出的滚筒模型合理,可以将平台输出的结果参数和模型放入实例库。

5 结束语

本文完成了稻麦联合收获机脱粒装置设计知识的收集、表示和存储,借助 SQL Server 2012 关系型数据库构建了脱粒装置设计知识库,然后利用

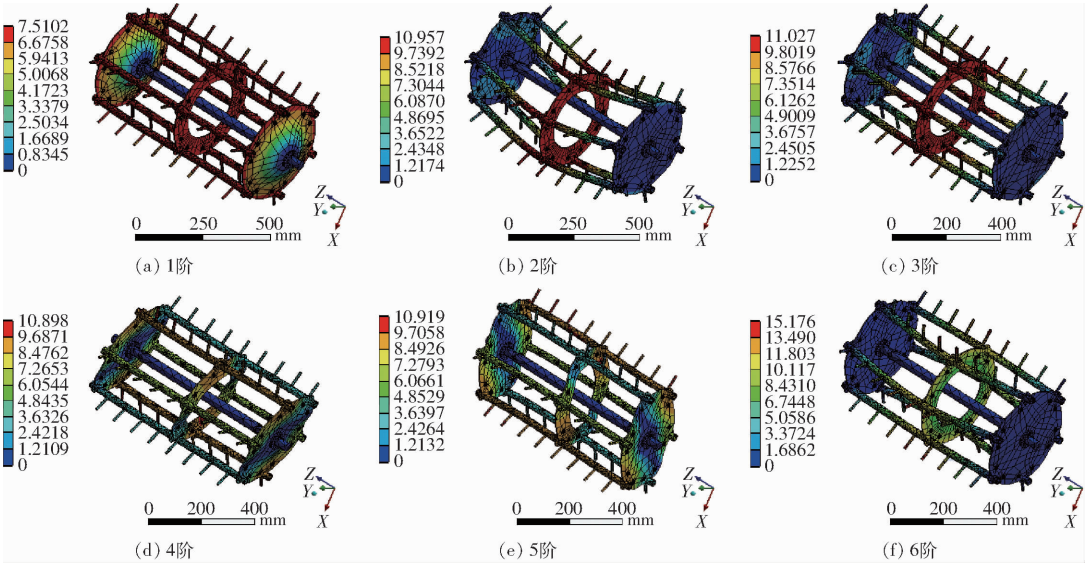


图 15 前 6 阶振型

Fig. 15 Mode diagrams of 6th order

表 4 模态仿真试验结果

Tab. 4 Modal simulation test results

阶数	频率/Hz	振型
1	95. 47	传动轴沿 Z 轴伸缩
2	125. 74	整体弯曲
3	126. 00	整体弯曲
4	146. 98	幅盘弯曲
5	148. 77	幅盘弯曲
6	173. 30	齿杆扭转

Visual Studio 2012 作为开发平台,建立了知识库管理系统和稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台,实现了知识库的管理、维护和脱粒装置的智能化设计。稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台整合了知识库、NX 模型库与推理机 3 部分,方便设计人员利用平台快速设计产品,该平台可以提高知识的利用率,缩短设计周期,提升产品设计质量,提高企业适应市场的能力。

参 考 文 献

[1] 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. Research on parameter matching technology and method of threshing and cleaning device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2019. (in Chinese)

[2] 刘宏新,王登宇,郭丽峰,等. 先进设计技术在农业装备研究中的应用分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):1-18.
LIU Hongxin,WANG Dengyu,GUO Lifeng, et al. Development of advanced design technology and its application in agricultural equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190701&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 07. 001. (in Chinese)

[3] VERHAGEN W J C, BERMELL-GARCIA P, DIJK R E C V, et al. A critical review of knowledge-based engineering: an identification of research challenges[J]. Advanced Engineering Informatics, 2012, 26(1):5-15.

[4] SANDBERG M, TYAPIN I, KOKKOLARAS M, et al. A knowledge-based master model approach exemplified with jet engine structural design[J]. Computers in Industry, 2017, 85:31-38.

[5] OLOFSSON J, SALOMONSSON K, JOHANSSON J, et al. A methodology for microstructure-based structural optimization of cast and injection moulded parts using knowledge-based design automation[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 109(C):44-52.

[6] CUI J, WANG D, SHI Q. Structural topology design of container ship based on knowledge-based engineering and level set method[J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(4):551-564.

[7] STENHOLM D, MATHIESEN H, BERGSJO D. Knowledge based development in automotive industry guided by lean enablers for system engineering[J]. Procedia Computer Science, 2015, 44:244-253.

[8] 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 situation and prospects of intelligent design for 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&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 09. 001. (in Chinese)

- [9] 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. Research on intelligent design system of threshing device for rice-wheat combined harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [10] 李长林,王雪亮,金晓萍,等. 高速插秧机底盘快速设计专家系统[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):323-328.
LI Changlin, WANG Xueliang, JIN Xiaoping, et al. Expert system design of chassis rapid design for high-speed transplanter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):323-328. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2012s66&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.066. (in Chinese)
- [11] 李长林. 基于知识的农机专业底盘快速设计专家系统构建方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
LI Changlin. Research on building method of knowledge based rapid design expert of agricultural machinery professional chassis [D]. Beijing: China Agricultural University,2014. (in Chinese)
- [12] 毕淑琴,宋正河,金晓萍,等. 履带式联合收获机传动系设计知识库构建[J]. 农业工程,2013,3(3):94-98.
BI Shuqin, SONG Zhenghe, JIN Xiaoping, et al. Design of knowledge base for crawler combine harvester transmission system [J]. Agricultural Engineering,2013,3(3):94-98. (in Chinese)
- [13] 金建国,周明华,邬学军. 参数化设计综述[J]. 计算机工程与应用,2003(7):16-18,86.
- [14] NAHM Y E,ISHIKAWA H. A new 3D-CAD system for set-based parametric design[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(1-2):137-150.
- [15] CAMBA J D, CONTERO M, COMPANY P. Parametric CAD modeling: an analysis of strategies for design reusability[J]. Computer Aided Design, 2016, 74:18-31.
- [16] 严婷. 基于UG的三维参数化标准件库的研究与开发[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
YAN Ting. Research and development of 3D parameterized standard parts library based on UG[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2007. (in Chinese)
- [17] 陈雨,毛恩荣,吕黄珍,等. 基于推理的大型收获机械变速箱参数化设计[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):278-282.
CHEN Yu, MAO Enrong, LÜ Huangzhen, et al. Parametric design of large harvesting machinery transmission gearbox based on reasoning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2):278-282. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s252&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.052. (in Chinese)
- [18] 王万良. 人工智能导论[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2011.
- [19] 李晓辉,刘妍秀. 基于实例推理机制(CBR)综述[J]. 长春大学学报,2006(8):68-70.
LI Xiaohui, LIU Yanxiu. A survey of case-based reasoning(CBR) mechanism[J]. Journal of Changchun University, 2006(8):68-70. (in Chinese)
- [20] 关卓怀,吴崇友,汤庆,等. 联合收获机脱粒滚筒有限元模态分析与试验[J]. 农机化研究,2016,38(8):136-140.
GUAN Zhuohai, WU Chongyou, TANG Qing, et al. Finite element mode analysis and experiment of combine harvester threshing cylinder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(8):136-140. (in Chinese)
- [21] 肖星星,李骅,齐新丹,等. 基于ANSYS Workbench脱粒滚筒的模态和瞬态分析[J]. 农机化研究,2016,38(8):46-50.
XIAO Xingxing, LI Hua, QI Xindan, et al. Modal and transient analysis of threshing cylinder based on ANSYS Workbench [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(8):46-50. (in Chinese)
- [22] 郑磊,尹健,纪斌,等. 基于ANSYS的脱粒滚筒模态分析[J]. 农机化研究,2013,35(4):48-51.
ZHENG Lei, YIN Jian, JI Bin, et al. Modeling analysis of threshing cylinder based on ANSYS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,35(4):48-51. (in Chinese)
- [23] ZHANG Bo, SHI Zhongke, LI Jianjun. Flight flutter modal parameters identification with atmospheric turbulence excitation based on wavelet transformation[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2007,20(5):394-401.
- [24] 姚艳春,宋正河,杜岳峰,等. 玉米收获机割台振动特性及其主要影响因素分析[J]. 农业工程学报,2017,33(13):40-49.
YAO Yanchun, SONG Zhenghe, DU Yuefeng, et al. Structural parameter optimization of combine harvester cutting bench[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(13):40-49. (in Chinese)
- [25] 李耀明,李有为,徐立章,等. 联合收获机割台机架结构参数优化[J]. 农业工程学报,2014,30(18):30-37.
LI Yaoming, LI Youwei, XU Lizhang, et al. Structural parameter optimization of combine harvester cutting bench [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18):30-37. (in Chinese)