doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.008

马铃薯收获机挖掘装置智能设计系统与评价方法研究

王凤花　熊海辉　赖庆辉　刘志迎　陈可凡　鲁超宇
(昆明理工大学农业与食品学院,昆明 650500)

摘要:针对马铃薯收获机挖掘装置设计效率低、设计知识难以高效获取和运用的问题,构建了马铃薯收获机挖掘装置智能设计系统。在收集整理挖掘铲设计规则的基础上,以产生式、框架式和混合式的知识表示方法表达挖掘装置的设计知识并进行存储,建立智能设计系统知识库;利用 Visual Studio 软件搭建知识管理系统,对规则类和实例类知识进行管理;采用基于规则和基于实例的正向推理方法,探讨智能设计系统推理机制;基于 SolidWorks 二次开发技术,对挖掘装置进行参数化建模;基于挖掘铲挖掘阻力分析和 RecurDyn - EDEM 联合仿真试验,构建挖掘装置工作性能评价体系;以 Visual Studio 为开发平台、VB.NET 为开发语言,应用 SolidWorks API 接口技术和 MySQL 数据管理方法,对设计知识库、知识管理系统、推理机、参数化模型库和评价体系进行整合及联合运用,开发了马铃薯收获机挖掘装置智能设计系统。利用系统进行挖掘铲实例设计,并进行工作性能评价分析,结果表明,挖掘铲工作所需牵引力为 856.24 N,所受最大牵引阻力为 724.81 N,明薯率为 97.22%,伤薯率为 1.43%,表明该挖掘铲满足设计要求。

关键词:马铃薯收获机;挖掘装置;智能设计系统;知识库;参数化建模
中图分类号:S225.7+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)08-0086-12　　**OSID**:

Intelligent Design System and Evaluation Method of Potato Harvester Excavator

WANG Fenghua　XIONG Haihui　LAI Qinghui　LIU Zhiying　CHEN Kefan　LU Chaoyu
(*College of Agricultural and Food*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of low design efficiency and difficult to acquire and apply design knowledge efficiently, an intelligent design system for excavating device of potato harvester was constructed. Based on the collection of mining shovel design rules, the knowledge of mining device design was expressed and stored by production, frame and mixed knowledge representation methods, and the knowledge base of intelligent design system was established. Visual Studio software was used to build a knowledge management system to realize the management of rule class and instance class knowledge. The reasoning mechanism of intelligent design system was discussed by using the method of rule-based and case-based forward reasoning. Based on SolidWorks secondary development technology, parametric modeling of mining device was realized. Based on excavating resistance analysis and RecurDyn - EDEM co-simulation test, the working performance evaluation system of excavating device was constructed. With Visual Studio as the development platform, VB.NET as the development language, SolidWorks API interface technology and MySQL data management method were applied to realize the integration and joint application of design knowledge base, knowledge management system, inference machine, parametric model base and evaluation system, and an intelligent design system for excavating device of potato harvester was established. An example of excavating shovel was designed with the system, and its performance was evaluated and analyzed. The results showed that the traction force required by the excavating shovel example was 856.24 N, and the traction resistance of the simulation test was 724.81 N,

收稿日期:2021-05-08　修回日期:2021-06-01
基金项目:国家自然科学基金项目(51975265)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700600 - 2017YFD0700604)、云南省重大科技专项(2018ZC001-1、2018ZC001-3、2018ZC001-4、2018ZC001-5)和云南省高校工程研究中心建设计划项目
作者简介:王凤花(1980—),女,副教授,主要从事丘陵山地农业装备研究,E-mail:158877172@qq.com
通信作者:赖庆辉(1980—),男,教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail:laiqinghui007@163.com

the exposture rate and the damaged rate were 97.22% and 1.43%, and the excavating shovel example met the design requirements.

Key words: potato harvester; excavating device; intelligent design system; knowledge base; parametric modeling

0　引言

目前,云南省马铃薯收获机械化技术非常落后[1],而农机企业的研发存在仿制多、创新少、产品投放上市慢、产品竞争力差等问题[2]。在传统研发模式下新产品开发难以对设计知识进行高效获取和重用[3],且马铃薯收获机种类繁多、专业知识庞杂,设计人员进行产品设计时往往需要花费大量时间来收集设计知识,大大延长了产品的研发周期,影响了产品的设计效率。挖掘装置作为马铃薯收获机的关键部件,其挖掘性能直接影响马铃薯收获机的整机性能。目前挖掘装置已取得了较多成果[4-8]。利用先进的设计方法支持农机装备研发过程,开发基于知识工程的马铃薯收获机挖掘装置的智能设计系统,不仅可以对前人的设计知识进行高效获取和重用、提高研发质量,还可以缩短研发周期、提高设计效率。

近年来,国内外基于知识工程(KBE)的智能设计方法在先进制造领域已有广泛应用[9-13]。在农业机械领域,李文斌等[14]将设计知识库、推理机、参数化模型库和人机交互界面融为一体,构建了稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台,实现了脱粒装置的智能化设计。刘宏新等[15]应用装备谱系及谱系拓扑图形式将联合收获机知识进行层次化组织,解决了设计时难以高效获取并应用联合收获机设计知识的问题,提高了设计效率。杜岳峰等[16]根据剥皮装置结构特征、技术参数和性能评价指标之间的关系,提出了基于知识工程的玉米果穗剥皮装置设计方法,并建立了剥皮装置工作性能评价模型,有效提高了设计效率。农机装备种类繁多、作业环境复杂和工况多变、使用季节性强,其智能化设计是一个知识密集的复杂过程,涉及多个领域[17]。目前,农机装备的智能设计与先进制造业相比仍存在较大的差距,而针对马铃薯收获机及其关键部件的相关研究则更少。

本文以 Visual Studio 为开发平台,利用 VB.NET 语言并结合 MySQL 数据库对 SolidWorks 进行二次开发,对设计知识库、知识管理系统、推理机、参数化模型库和评价体系进行整合,创建友好人机交互界面,构建马铃薯收获机挖掘装置智能设计系统,以期解决马铃薯收获机挖掘装置设计效率低、设计知识难以高效获取和运用的问题。

1　挖掘装置智能设计系统框架

智能设计系统由知识库构建模块、推理机模块、设计方案生成模块、参数化建模模块和系统评价分析模块 5 部分组成,当用户输入设计参数后,经推理机的推理生成参数化设计方案,经参数化建模后生成模型实例,实例模型经评价分析后,满足设计要求则向用户输出模型,不满足设计要求则返回重新生成设计方案,系统总体框架如图 1 所示。

2　设计知识及知识库构建

2.1　设计知识及设计规则

挖掘装置的设计知识主要来源于学位论文、专业文献、农业机械设计手册、产品图册、国家行业标准和领域专家知识等。在对挖掘装置的相关设计知识进行分析后,明确挖掘铲是挖掘装置的主要设计目标。故对挖掘铲进行参数化设计,而调整装置、连接活板等部件则采用从动匹配设计。如挖掘铲结构图(图 2)所示,挖掘铲的主要设计参数为:铲刃倾角 γ、铲面倾角 α、铲长度 L 和铲幅宽 S_1 等。

2.1.1　铲刃倾角 γ

铲刃倾角的作用是保证铲刃在克服挖掘阻力的同时,仍具有较好的自洁功能,铲刃倾角 γ 应满足

$$\gamma < 90° - \varphi \tag{1}$$

式中　φ——土壤对钢的摩擦角,取 30°~36°

由摩擦定律可知,铲刃倾角 γ 越小,铲刃的切土能力越强,但 γ 过小时,容易损伤薯块,故 γ 一般取 40°~50°。

2.1.2　铲面倾角 α

铲面倾角 α 的作用是保证铲体将土垄切开的同时,能顺利将薯土混合物往后端输送。一般 α 越小,铲体的挖掘阻力越小。对薯土混合物在铲面上的受力进行平衡分析,可得

$$\begin{cases} P\cos\alpha - T - G\sin\alpha = 0 \\ R - G\cos\alpha - P\sin\alpha = 0 \end{cases} \tag{2}$$

推导化简可得

$$\alpha = \arctan\frac{P - \mu_1 mg}{\mu_1 P + mg} \tag{3}$$

其中　$\mu_1 = \tan\varphi$

式中　P——在铲面上移动掘起物所需的力,N

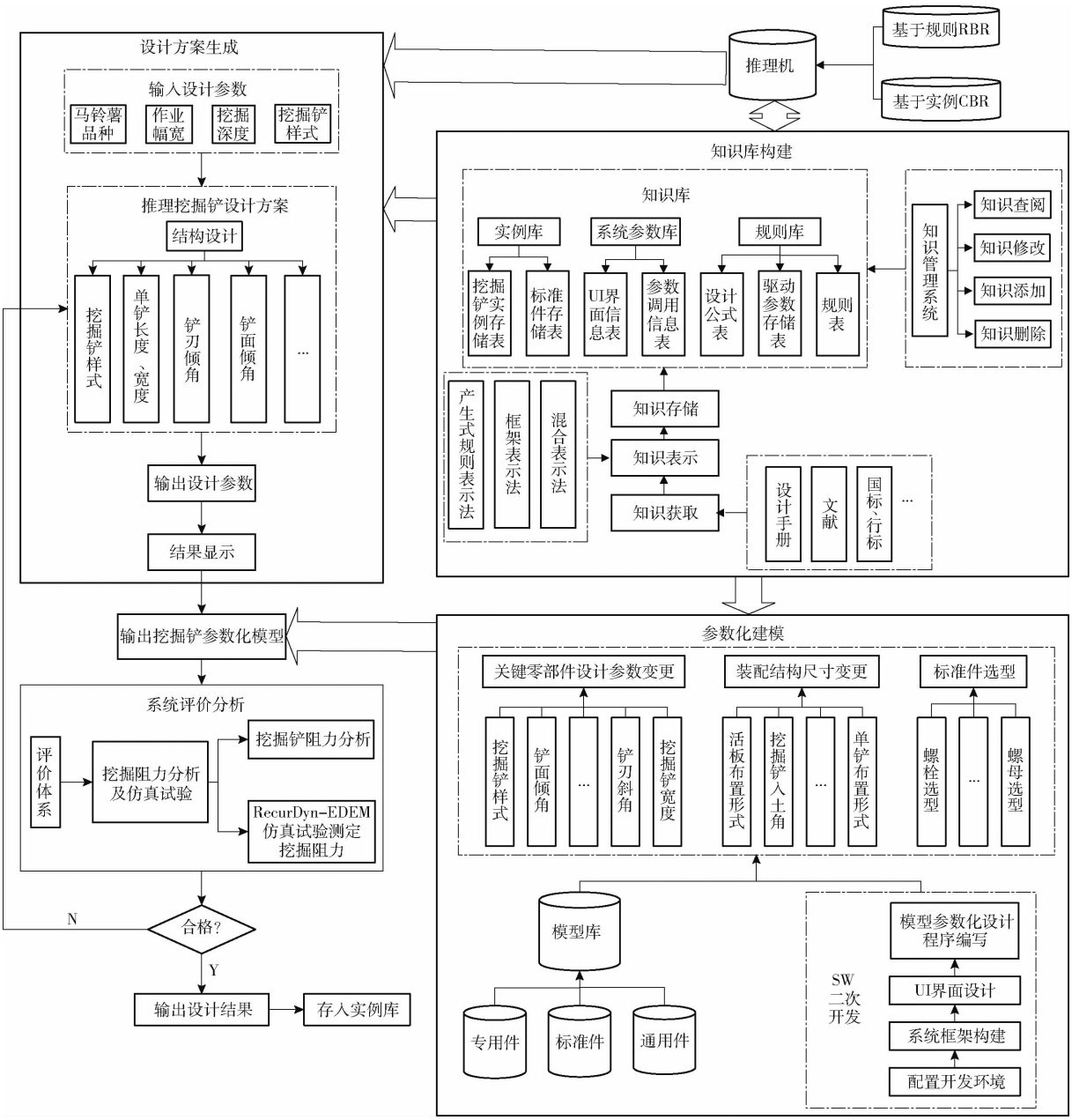


图 1 智能设计系统总体框图

Fig. 1 Overall framework of intelligent design system

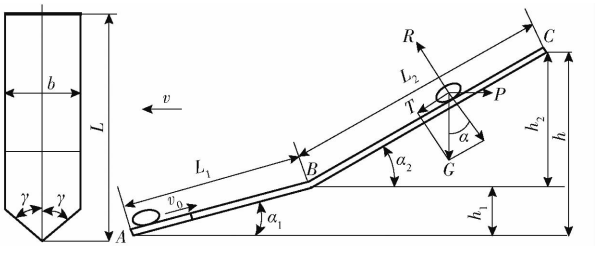


图 2 挖掘铲结构示意图

Fig. 2 Diagram of excavating shovel structure

μ_1——土壤对挖掘铲的摩擦因数

m——掘起物质量,kg

g——重力加速度,m/s^2

R——铲体对土壤的反作用力,N

G——掘起物重力,N

T——铲体对土壤沿铲面滑动的反作用力,N

为了使挖掘铲后端离地面既有足够的高度 h,又能保证挖掘铲对土垄的切削性能,将铲面分成两段,前端铲面倾角 α_1 为 10°~15°,后端铲面倾角 α_2 为 16°~24°。

2.1.3 铲长度 L

挖掘铲的单铲主要由前段铲体和后段土垄破碎板组成,前段铲体长度 L_1 与确定后的铲面倾角 α 以及平均挖掘深度 h_1(14~18 cm)有关,计算公式为

$$L_1 = \frac{h_1}{\sin\alpha} \tag{4}$$

而后段土垄破碎板的长度 L_2 可由能量守恒定律计算,设掘起物在挖掘铲铲面上以挖掘装置前进

速度 v_0 为初速度从点 A 运动到点 B，则薯土混合物在点 B 时所具有的动能为

$$E_B = \frac{1}{2}mv_0^2 \tag{5}$$

当掘起物沿着铲面继续前进到点 C 时，处于相对静止状态（$v_c = 0$），此时土壤开始膨胀、堆积，松散的土壤开始向铲的两侧散开，随着土壤的散落，马铃薯块茎逐渐显露在铲面上。掘起物在点 B 上具有的动能全部用于克服 BC 段（即 L_2）的摩擦功 W_f 和将掘起物提升了 h_2 的重力势能 W_g。则有

$$W_f = R\tan\varphi L_2 = mgL_2\tan\varphi\cos\alpha \tag{6}$$

$$W_g = mgh_2 = mgL_2\sin\alpha \tag{7}$$

式中　h_2——挖掘铲后段高度，mm

掘起物在铲面 BC 段的能量守恒方程为

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgL_2\tan\varphi\cos\alpha + mgL_2\sin\alpha \tag{8}$$

化简得

$$L_2 = \frac{v_0^2\cos\varphi}{2g\sin(\alpha+\varphi)} \tag{9}$$

则铲体的总长度 L 为

$$L = L_1 + L_2 = \frac{h_1}{\sin\alpha} + \frac{v_0^2\cos\varphi}{2g\sin(\alpha+\varphi)} \tag{10}$$

2.1.4　铲幅宽 S_1

根据经验，挖掘铲的幅宽与马铃薯块茎地下分布宽度、株行距和收获机工作行驶的偏差等有关[18]。为了保证垄内的薯土混合物都被掘起，挖掘铲的设计幅宽应略大于垄地幅宽，幅宽 S_1 的计算公式为

$$S_1 = M + B + 3\sigma + 2c \tag{11}$$

其中

$$\sigma = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_b^2} \tag{12}$$

式中　M——平均行距，mm

B——薯块平均分布宽度，mm

c——机器行驶偏差，一般取 50 ~ 80 mm

σ——综合标准差，mm

σ_M——行距标准差，mm

σ_b——薯块分布宽度标准差，mm

上述挖掘铲的设计规则是智能设计系统输出设计参数的主要推导依据，也是挖掘铲实现参数化建模的基础。

2.2　设计知识表示和存储

2.2.1　设计知识表示

挖掘装置的设计知识繁杂，需通过产生式规则、框架式以及混合式的知识表示法将设计知识形式化和数字化，转换成计算机能够读取和调用的数据类型。

（1）产生式规则表示法

产生式规则表示法主要用于表达设计公式、选型方法、参数变化及力学理论公式等规则类知识。产生式规则表示法的形式为："If A then B，即如果 A 成立则 B 成立"，简化为"$A \rightarrow B$"。例如，表 1 为挖掘铲的设计幅宽和马铃薯品种关联表。该表的知识表示形式为：If 马铃薯品种 = "丽薯 6 号" then S = 90 cm；If 马铃薯品种 = "云薯 304" then S = 105 cm；If 马铃薯品种 = "云薯 301" then S = 85 cm；If 马铃薯品种 = "云薯 104" then S = 65 cm。

表 1　挖掘铲设计幅宽和马铃薯品种的关联

Tab. 1　Association of excavating spade design width and potato varieties　cm

马铃薯品种	种植垄宽	挖掘铲总幅宽
丽薯 6 号	80 ~ 100	90
云薯 304	90 ~ 120	105
云薯 301	80 ~ 100	85
云薯 104	60 ~ 70	65

（2）框架式知识表示法

框架式的表示方法主要用于表达实例类知识，在知识表达时需表示出各实例之间的父子关系及其静态属性，挖掘装置实例结构的表达形式如图 3 所示。

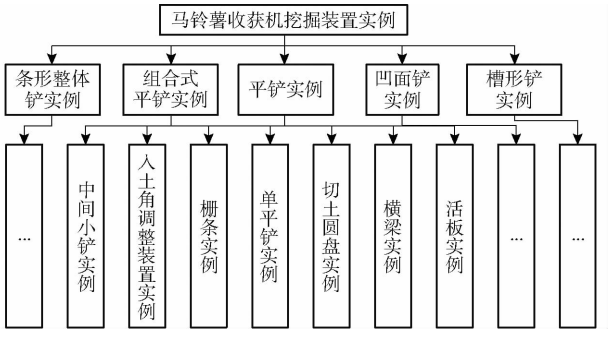


图 3　挖掘装置实例结构的知识表示

Fig. 3　Knowledge representation of excavating device instance structure

（3）混合式知识表示法

混合式的表示方法主要用于表达部分结构比较复杂的零部件，如挖掘铲实例，先将其分解成相对简单的实例，再通过产生式表示方法表示其设计参数等知识，表达形式如图 4 所示。

2.2.2　设计知识存储及知识库构建

设计知识通过知识表示转换成形式不一的数据表，需按规则类和实例类两种类型进行知识分类，然后以相对应的格式存储在 MySQL 数据库中，完成设计知识的存储。

规则类知识的存储：规则类知识包括设计公式、选型方法、参数变化及力学理论公式等知识，以公式类知识为例，其存入 MySQL 数据库时的存储表格式为：序号、参数名称、公式内容、单位、说明、来源和参

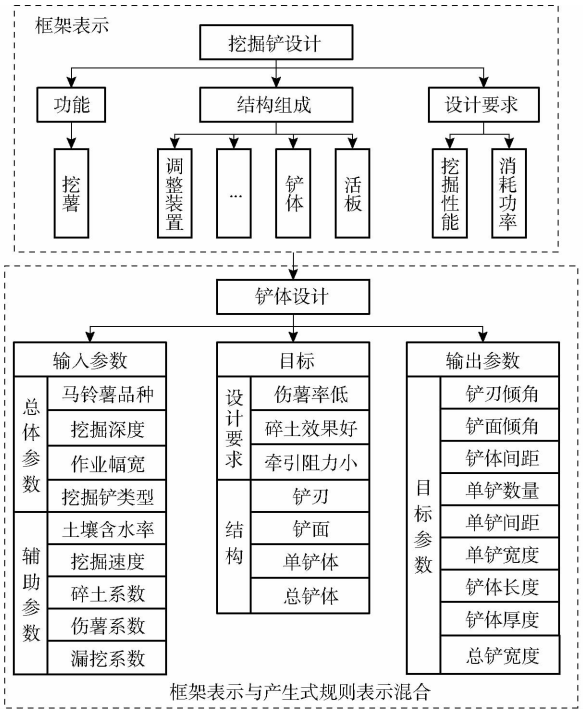
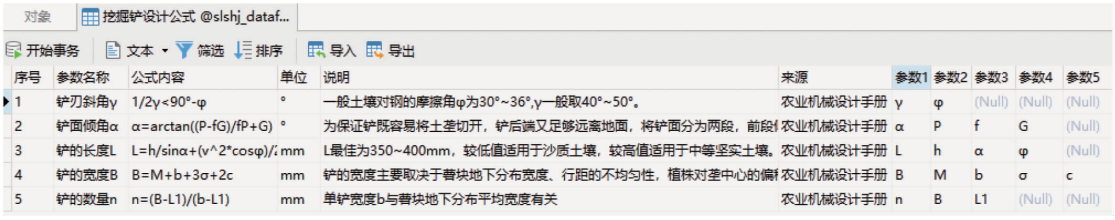


图 4 挖掘铲实例的知识表示

Fig. 4 Knowledge representation of mining shovel instances

数,其存储形式如图 5 所示。



对象 挖掘铲设计公式 @slshj_dataf...

开始事务 文本 筛选 排序 导入 导出

序号	参数名称	公式内容	单位	说明	来源	参数1	参数2	参数3	参数4	参数5
1	铲刃斜角γ	1/2γ<90°-φ	°	一般土壤对钢的摩擦角φ为30°~36°,γ一般取40°~50°。	农业机械设计手册	γ	φ	(Null)	(Null)	(Null)
2	铲面倾角α	α=arctan((P-fG)/fP+G)	°	为保证铲既容易将土垄切开,铲后端又足够远离地面,将铲面分为两段,前段	农业机械设计手册	α	P	f	G	(Null)
3	铲的长度L	L=h/sinα+(v^2*cosφ)/	mm	L最佳为350~400mm,较低值适用于沙质土壤,较高值适用于中等坚实土壤。	农业机械设计手册	L	h	α	φ	(Null)
4	铲的宽度B	B=M+b+3σ+2c	mm	铲的宽度主要取决于薯块地下分布宽度、行距的不均匀性,植株对垄中心的偏	农业机械设计手册	B	M	b	σ	c
5	铲的数量n	n=(B-L1)/(b-L1)	mm	单铲宽度b与薯块地下分布平均宽度有关	农业机械设计手册	n	B	L1	(Null)	(Null)

图 5 挖掘铲设计公式存储表

Fig. 5 Storage table of mining shovel design formula



对象 挖掘铲实例存储表 @slshj_dat... 挖掘铲实例存储表 @slshj_dat...

开始事务 文本 筛选 排序 导入 导出

编号	产品型号	生产厂家	类型	铲数	工作幅宽/cm	挖掘深度/cm	配套动力/hp	适应垄距/cm
1	洪珠4U-90	青岛洪珠	条形整体铲	1	60~85	20~30	20~35	90~120
2	4UX-100	希森天成	条形整体铲	1	100	15~25	25~35	≤100
3	1100型	潍坊众科	条形整体铲	1	70~90	≤30	≥50	≤120
4	4UMF-180	德沃科技	组合式平铲	2	160~180（双行）	15~35	80~160	80~90
5	4UX-120	希森天成	组合式平铲	1	120	≤30	≥50	≤120
6	洪珠4U-170A	青岛洪珠	组合式平铲	2	170（双行）	15~30	≥90	≤70
7	洪珠4U-83	青岛洪珠	平铲	8	83	15~25	25.7~36.8	≤80
8	4u-80	航远	平铲	7	80	15~20	30	80

图 6 挖掘铲实例存储表

Fig. 6 Mining shovel instance storage table

点选挖掘铲设计公式时,右侧自动更新对应的公式表和参数解释。

3 系统推理机构建

推理机是将用户需求与知识库相连接的桥梁,也是系统实现智能设计的核心。推理机的核心是推理算法,本智能设计系统应用的推理算法[19-21]主要为基于规则的推理(RBR)和基于实例的推理(CBR)。智能设计系统的推理流程如图 10 所示,当用户输入设计参数后,先基于规则的推理来检索输入参数是否合理,若不合理则提示用户重新输入。

实例类知识的存储:实例类知识主要包括整机及各个零部件的经验知识,其存入数据库时的存储表格式为:编号、产品型号、生产厂家、参数,其存储形式如图 6 所示。

根据上述知识存储的格式,在 MySQL 数据库中建立了零部件参数库、实例库、设计规则库、装配信息库、标准件选型库等,形成挖掘铲智能设计系统的数据库,如图 7 所示。

2.3 知识管理系统构建

以 Visual Studio 为开发平台,VB. NET 为开发语言,构建了知识管理系统。知识管理系统的主要功能为实例类知识的管理和规则类知识的管理。实例库知识管理界面如图 8 所示,包括实例树状结构、模型视图、实例模型设计参数以及实例参数表,其中界面左侧的实例树状结构方便用户选择和查看不同的部件实例,选择好实例后,右侧的模块自动更新该实例的模型视图及模型的参数信息。规则库知识管理界面如图 9 所示,包括规则类知识树状结构、零件设计公式表、设计参数示意图、参数解释及公式修改模块。例如,当用户在树状结构

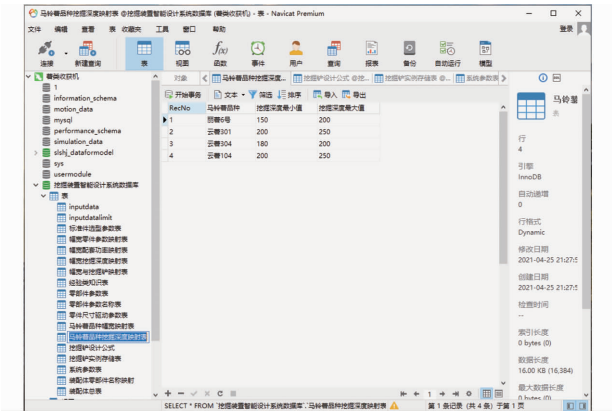


图 7 挖掘装置智能设计系统的数据库

Fig. 7 Database of intelligent design system for excavating device

若合理则继续推理输入参数所映射的实例属性,并在实例库中搜索相似实例,进行相似度计算,若相似度为 1,则直接向用户交付模型。否则,排序检索结果后输出相似度最高的实例,用于后续参数化建模的驱动模型。在基于规则的推理确定设计参数值



图 8　实例库知识管理界面

Fig. 8　Interface of instance base knowledge management

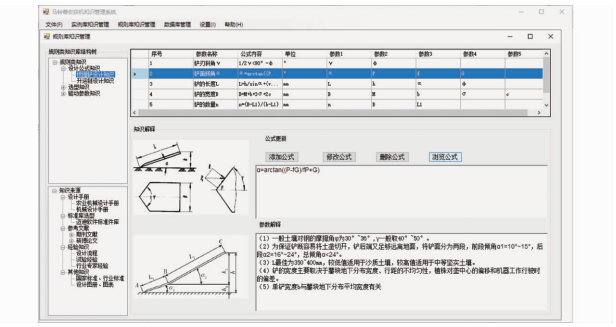


图 9　规则库知识管理界面

Fig. 9　Knowledge management interface of rule base

后，进行参数化建模，最后输出实例。实例转入产品验证模块，若产品验证不满足设计要求，则返回参数化设计模块，重新推理和参数化设计。若产品验证满足设计要求，则向用户交付模型，并存入实例库中，以丰富实例库。

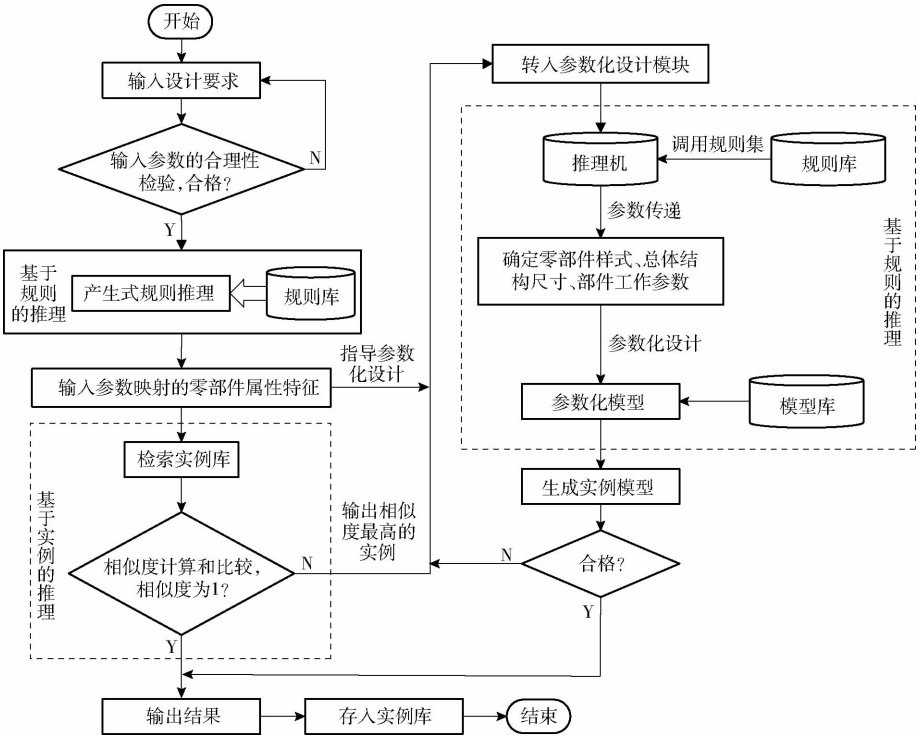


图 10　挖掘装置智能设计系统推理流程图

Fig. 10　Reasoning flow of intelligent design system of excavating device

3.1　基于规则的推理

基于规则的推理采用基于产生式规则的推理方法，推理时以已知参数或数值为前提条件，结合相应的计算公式和经验规则，进行一级或多级推导计算，直至推理出计算结果。以三角形平铲式挖掘铲单铲长度的推理计算为例，其推理路线如图 11 所示，图中的一个箭头代表一次产生式规则推理。

3.2　基于实例的推理

基于实例推理的关键在于两实例间的相似度计算。由前文实例类知识的存储可知，实例模型的特征主要包括名称、样式和尺寸参数等属性知识，故实例推理计算的是两实例属性间的相似度。目前，计算实例相似度通常采用最近相邻法[22]，计算公式为

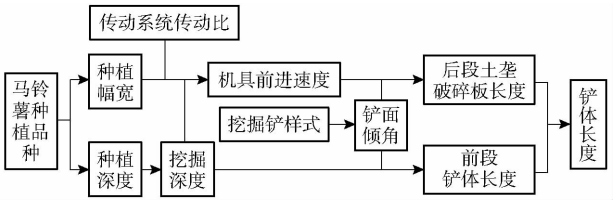


图 11　三角形平铲式挖掘铲单铲长度的推理路线

Fig. 11　Reasoning line of single shovel length for triangular plane type mining shovel

$$S(case1, case2) = \sum_{i=1}^{n} \frac{w_i}{1 + |p_i - q_i|} \tag{13}$$

式中　S——实例相似度

n——实例个数

p_i——实例 1 的属性

q_i——实例 2 的属性

w_i——特征权值

式(13)中,若 *case*1、*case*2 两实例完全相同,则可计算出 $S(case1、case2)=1$,即当两实例的相似度越接近 1,则两实例越相似。当系统同时检索多个实例时,设定系统选择相似度最高的实例作为输出结果,输出的实例作为后续参数化建模的驱动模型,进行模型重用,以减少后续模型修改的工作量。

例如,表 2 为用户的需求模型和实例库中现有 2 个实例的特征参数和权重。其中,各特征参数权重的给定依据为专家知识、设计经验知识和参数驱动模型变更的复杂性。由式(13)计算可得,实例模型 1 与用户需求模型的实例相似度为 0.43,实例模型 2 与用户需求模型的实例相似度为 0.58,故选择实例模型 2 为驱动模型,进行参数化设计。

表 2 用户需求模型与挖掘铲现有实例的特征参数和权重

Tab.2 User demand model and characteristic parameters and weights of existing instances of mining shovel instances

模型	铲数	工作幅宽/cm	挖掘深度/cm	适应垄距/cm	配套动力/kW
实例模型 1	8	83	22	83	20.9
实例模型 2	7	80	18	81	16.4
用户需求模型	8	80	20	80	18.6
权重	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1

4 智能设计系统开发及参数化建模

4.1 系统功能和 UI 界面

挖掘装置智能设计系统的主要功能有:基于设计人员设定的设计参数,实现挖掘装置的智能设计;对数据库中的知识进行调用、管理和维护,并通过实例库和规则库的知识管理来解释和说明整个设计过程。以 Visual Studio 为开发工具,完成了挖掘装置智能设计系统 UI 界面的设计,如图 12 所示。系统 UI 界面分为 3 个模块,界面最上方为用户设置模块,用户可在此设置模型的保存路径、更改账号登录密码和阅读帮助文档等。界面的中间为系统的功能选择模块,包括智能设计系统和知识管理系统等。界面下方为功能模块显示界面,如挖掘装置设计系统的 UI 界面,包括用户设计参数输入、部分设计参数输出、建模进度条显示和建模完成提示等。参数化建模完成后,可在保存路径里打开并查看模型。

4.2 参数化建模

采用 SolidWorks 二次开发的方法对挖掘装置进行参数化建模,参数化建模的结构如图 13 所示,用户选择好马铃薯品种类型和挖掘铲类型,按系统提示输入挖掘深度和作业幅宽后,二次开发平台调用

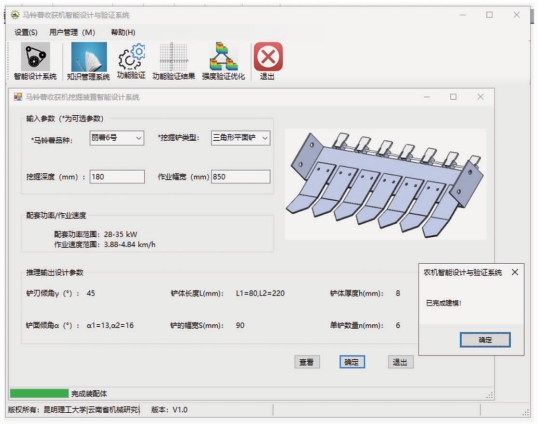


图 12 智能设计系统 UI 界面

Fig. 12 UI interface of intelligent design system

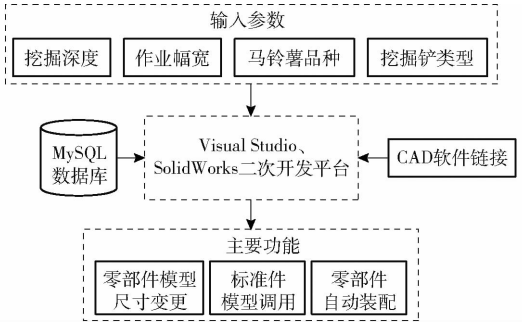


图 13 参数化建模结构图

Fig. 13 Parametric modeling structure diagram

数据库的相关信息,进行零部件模型尺寸变更、标准件模型调用、零部件自动装配等操作,从而实现了参数化建模。以三角形平铲式挖掘铲模型为例,生成模型如图 14 所示。

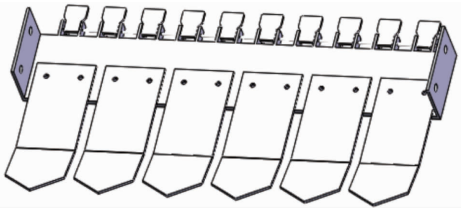


图 14 三角形平铲式挖掘铲参数化模型实例

Fig. 14 Example of parametric model of triangular flat shovel mining

5 挖掘装置工作性能评价

本文以设计实例的工作性能评价来间接地评价智能设计系统的可靠性。因此,基于挖掘铲挖掘阻力分析和 RecurDyn - EDEM 的联合仿真试验,从挖掘阻力评价和收获质量评价两个角度对挖掘装置工作性能进行评价。

5.1 挖掘铲挖掘阻力分析

挖掘铲在挖掘作业过程中主要受力有拖拉机的牵引力、土壤对铲面的法向载荷、土壤对挖掘铲的摩擦力、土壤纯切削阻力和因土壤粘性而产生的铲面

附着力[23]，分别以挖掘铲和铲面上的掘起物为对象进行受力分析，如图 15 和图 16 所示。

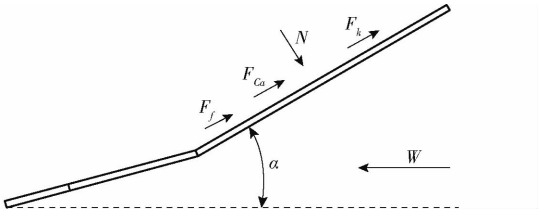


图 15　挖掘铲受力分析

Fig. 15　Excavation shovel force analysis

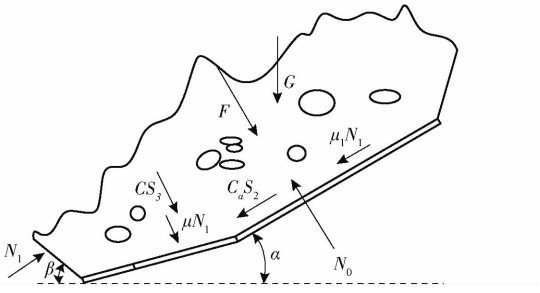


图 16　掘起物受力分析

Fig. 16　Stress analysis of excavated objects

由图 15 可得，挖掘铲在水平方向上的受力平衡方程为

$$W = N\sin\alpha + F_f\cos\alpha + F_{Ca}\cos\alpha + F_k\cos\alpha \quad (14)$$

其中　$F_f = \mu_1 N$　$F_{Ca} = C_a S_2$　$F_k = kb$

式中　W——拖拉机牵引力，N

N——土壤作用于挖掘铲铲面的法向载荷，N

F_f——土壤对挖掘铲的摩擦力，N

F_{Ca}——土壤作用于铲面的附着力，N

F_k——土壤纯切削力，N

S_2——挖掘铲面积，m^2

C_a——土壤附着力因数，Pa

k——单位幅宽土壤的纯切削力，N/m

b——挖掘铲宽度，m

土壤对挖掘铲的纯切削力很小，当土壤中有大量石块、茎秆残枝或刃口变钝时，切削力才比较重要，由于马铃薯目前多为规范化种植，故土壤的纯切削力可以忽略不计[24]。则无土壤纯切削力时拖拉机的牵引力为

$$W_1 = N\sin\alpha + \mu_1 N\cos\alpha + C_a S_2\cos\alpha \quad (15)$$

由图 16 可得，掘起物在水平方向上的受力平衡方程为

$$N_0(\sin\alpha + \mu_1\cos\alpha) + C_a S_2\cos\alpha = N_1(\sin\beta + \mu\cos\beta) + (CS_3 + F)\cos\beta \quad (16)$$

掘起物在竖直方向上受力平衡方程为

$$G + C_a S_2\sin\alpha + (CS_3 + F)\sin\beta = N_0(\cos\alpha - \mu_1\sin\alpha) + N_1(\cos\beta - \mu\cos\beta) \quad (17)$$

式中　N_1——前失效面的法向载荷，N

C——土壤的内聚力，Pa

N_0——挖掘铲对掘起物的反作用力，N

S_3——土壤剪切面积，cm^2

F——土壤沿铲面运动的加速力，N

μ——土壤内摩擦因数，重黏土、黏土与钢的摩擦因数为 0.4 ~ 0.9

β——前失效面倾角，(°)

由式(15)化简可得

$$N_0 = N = \frac{W_1 - C_a S_2\cos\alpha}{\sin\alpha + \mu_1\cos\alpha} \quad (18)$$

将式(16)、(17)、(18)整合可得

$$(W_1 - C_a S_2\cos\alpha)\left(\frac{\cos\alpha - \mu_1\sin\alpha}{\sin\alpha + \mu_1\cos\alpha} + \frac{\cos\beta - \mu\sin\beta}{\sin\beta + \mu\cos\beta}\right) = G + \frac{CS_3 + F}{\sin\beta + \mu\cos\beta} + C_a S_2\left(\sin\alpha - \cos\alpha\frac{\cos\beta - \mu\sin\beta}{\sin\beta + \mu\cos\beta}\right) \quad (19)$$

令 $Z = \dfrac{\cos\alpha - \mu_1\sin\alpha}{\sin\alpha + \mu_1\cos\alpha} + \dfrac{\cos\beta - \mu\sin\beta}{\sin\beta + \mu\cos\beta}$，则式(19)变形为

$$W_1 = \frac{G}{Z} + \frac{CS_3 + F}{Z(\sin\beta + \mu\cos\beta)} + \frac{C_a S_2}{Z(\sin\alpha + \mu_1\cos\alpha)} \quad (20)$$

为了得到 W_1 的值，仍需求解出 G、F 和 S_3 等辅助参数的值，分析挖掘铲铲面上薯土的尺寸关系和薯土混合物及挖掘铲的运动示意图[25-26]，由几何关系和牛顿第二定律可得

$$\begin{cases} G = \lambda bd\left(l + \dfrac{l_1 + l_2}{2}\right)g \\ S_3 = \dfrac{bh}{\sin\beta} \\ l_1 = \dfrac{h\cos(\alpha + \beta)}{\sin\beta} \\ l_2 = d\tan\alpha \\ d = \dfrac{h\sin(\alpha + \beta)}{\sin\beta} \\ a = \dfrac{\lambda bhv_1^2\sin\alpha}{g\sin(\alpha + \beta)} \end{cases} \quad (21)$$

式中　l_1——土壤沿铲尖伸出的距离，m

l_2——土壤沿铲尾伸出的距离，m

l——土壤从铲尖到铲尾的距离，m

d——土壤厚度，m

v_1——挖掘装置工作速度，m/s

λ——土壤容积密度，kg/m^3

h——挖掘铲的挖掘深度，m

a——土壤在铲面上运动的加速度，m/s^2

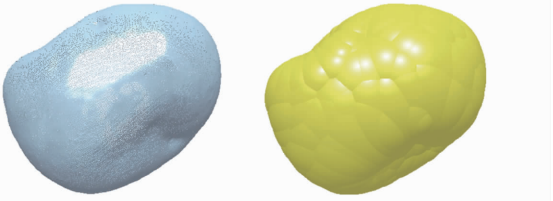
以挖掘铲整体为研究对象，当不计算土壤纯切削力时，由式(19)、(20)可知，所需的牵引力与初始

的设计参数 λ、α、β、μ、μ_1、b、h、l、v_1、C、C_a有关。智能设计系统生成挖掘铲实例后,将以上初始设计参数代入式(20)、(21)中,计算便可得到挖掘铲工作时挖掘铲所需要的牵引力。

5.2 RecurDyn - EDEM 联合仿真试验

5.2.1 仿真模型建立

以云南省陆良县小百户镇马铃薯种植基地的丽薯 6 号为建模对象,选取与丽薯 6 号平均三轴尺寸相接近的薯块,利用三维扫描仪扫描得到马铃薯块茎的三维空间点云数据,运用 Geomagic studio 软件后处理获得马铃薯网格几何模型。将模型导入 EDEM 软件并通过颗粒快速填充的方法获得马铃薯离散元模型,如图 17 所示。



(a) 马铃薯三维点云模型 (b) 马铃薯颗粒离散元模型

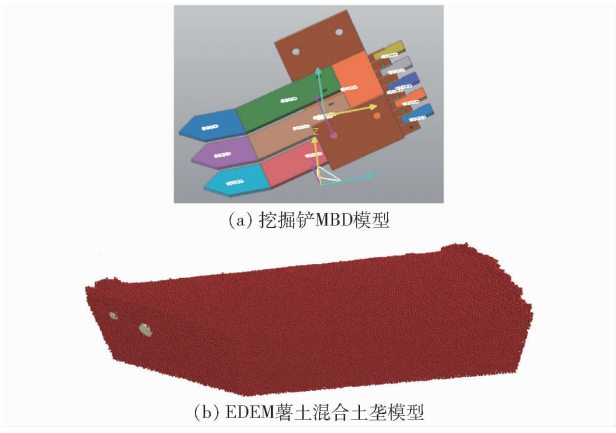
图 17 马铃薯离散元模型

Fig. 17 Potato discrete element models

智能设计系统在生成实例模型后,以. step 格式导入 RecurDyn 软件中,通过软件中合并的功能进行铲体合并,并在 motion 中设置速度驱动参数,使得挖掘铲以 0.5 m/s 的速度匀速往前运动。设置完模型参数后,通过 RecurDyn 中 External SPI 模块将挖掘铲选择为耦合刚体 Wall 输出。因土壤为湿黏物料,基于 Hertz - Mindlin with JKR 的接触模型能使颗粒间易发生明显粘结和团聚[27],为较好地模拟出土壤粘附在马铃薯和机具的现象,将土壤-马铃薯、土壤-挖掘铲的接触模型设置为 Hertz - Mindlin with JKR 模型,并设置好各接触组合的 JKR 表面能[28]。同时,将土壤-土壤的接触模型设置为 Hertz - Mindlin with JKR and Bonding 模型,以模拟云南地区黏重红壤的特性。以半径为 4 mm 的圆球作为土槽的土壤颗粒模型,通过颗粒工厂的快速填充方法构建薯土混合土垄模型,并在 Geometries 中导入由 RecurDyn 输出的耦合刚体 Wall 文件,完成耦合仿真试验的模型构建,模型如图 18 所示。

5.2.2 仿真参数设置

在构建 EDEM 薯土混合土垄模型时,其相关参数设置[29]如表 3 所示。进行耦合仿真前,设置 EDEM 模型的 Rayleigh 时间步长为 10%,仿真时间为 6 s,每 0.05 s 保存一次数据,并打开 EDEM 与 RecurDyn 的耦合接口;在 RecurDyn 中设置仿真步数为 100 步,仿真时间为 6 s,开始耦合仿真的计算,仿真过程剖面图如图 19 所示。



(a) 挖掘铲MBD模型

(b) EDEM薯土混合土垄模型

图 18 RecurDyn 和 EDEM 仿真模型

Fig. 18 RecurDyn and EDEM simulation models

表 3 薯土混合土垄模型仿真参数

Tab. 3 Simulation parameter of potato soil mixed soil ridge model

参数	数值
马铃薯泊松比	0.48
马铃薯密度 ρ_1/(kg·m^{-3})	1 058
马铃薯弹性模量 E_1/MPa	3.47
马铃薯-马铃薯碰撞恢复系数 e_1	0.313
马铃薯-65Mn 钢碰撞恢复系数 e_2	0.46
马铃薯-土壤碰撞恢复系数 e_3	0.206
马铃薯-65Mn 钢静摩擦因数 f_{s1}	0.41
马铃薯-马铃薯静摩擦因数 f_{s2}	0.36
马铃薯-土壤静摩擦因数 f_{s3}	0.2
马铃薯-马铃薯滚动摩擦因数 f_{d1}	0.1
马铃薯-土壤滚动摩擦因数 f_{d2}	0.13
马铃薯-65Mn 钢滚动摩擦因数 f_{d3}	0.06
土壤泊松比	0.38
土壤密度 ρ_2/(kg·m^{-3})	1 850
土壤剪切模量 G_1/MPa	0.412
65Mn 钢泊松比	0.3
65Mn 钢密度 ρ_3/(kg·m^{-3})	7 810
65Mn 钢剪切模量 G_2/MPa	7 850
土壤-土壤碰撞恢复系数 e_4	0.6
土壤-65Mn 钢碰撞恢复系数 e_5	0.6
土壤-土壤静摩擦因数 f_{s4}	0.5
土壤-65Mn 钢静摩擦因数 f_{s5}	0.6
土壤-土壤滚动摩擦因数 f_{d4}	0.4
土壤-65Mn 钢滚动摩擦因数 f_{d5}	0.05
土壤-土壤 JKR 表面能/(J·m^{-2})	7.91
土壤-马铃薯 JKR 表面能/(J·m^{-2})	6.21
土壤-挖掘铲 JKR 表面能/(J·m^{-2})	3
土壤颗粒间法向刚度/(N·m^{-3})	100
土壤颗粒间切向刚度/(N·m^{-3})	80
土壤颗粒间法向最大应力/MPa	0.18
土壤颗粒间切向最大应力/MPa	0.086

5.2.3 挖掘阻力评价

将数值模拟得到的牵引力和仿真试验测得的牵引阻力进行比较,当牵引力大于牵引阻力时,挖掘装

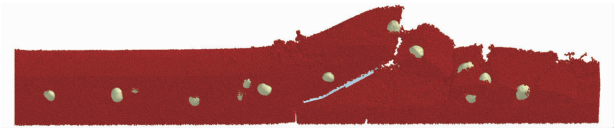


图 19　挖掘仿真过程剖面图

Fig. 19　Profile of dig operation simulation process

置才能正常挖掘作业，表明所设计的实例满足设计要求。反之，则该实例不满足设计要求。其中，实例模型相关的设计参数如表 4 所示，将设计参数代入式(20)、(21)可得，挖掘铲工作所需的牵引力约为 856.24 N。在 RecurDyn 后处理模块中导出挖掘铲在 X 方向受到马铃薯和土壤颗粒作用力的受力数据，如图 20 所示。挖掘铲前进过程中受到的阻力即为 X 方向上的受力，则由图可得，最大牵引阻力为 724.81 N，小于计算得到的拖拉机牵引力 856.24 N，故智能设计系统所设计的挖掘铲满足设计要求。

表 4　实例模型设计参数

Tab. 4　Example model design parameters

参数	数值
铲面倾角 α/(°)	15
前失效面倾角 β/(°)	34
土壤内摩擦因数 μ	0.5
土壤与铲面摩擦因数 μ_1	0.6
单铲宽度 b/m	0.09
铲尖到铲尾的距离 l/m	0.3
工作速度 v_1/(m·s^{-1})	0.5
挖掘深度 h/m	0.18
土壤内聚力 C/Pa	20 000
土壤附着力因数 C_a/Pa	20 360

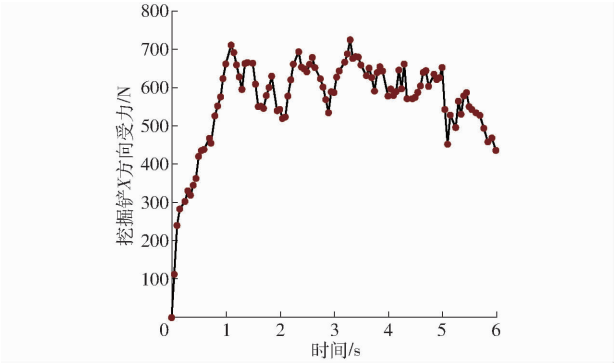
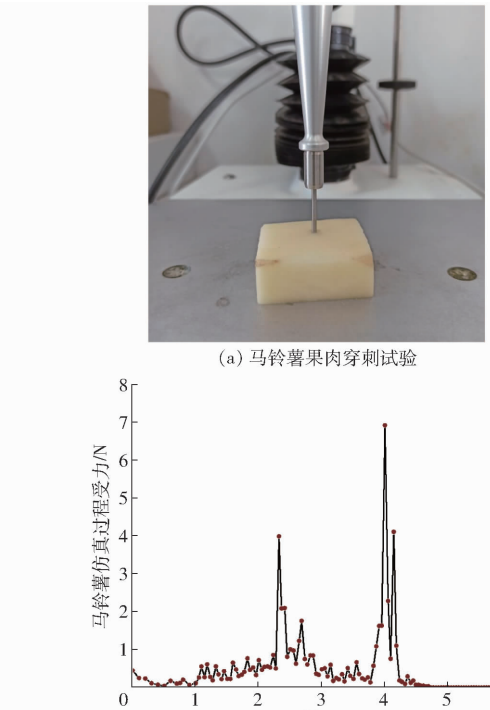


图 20　挖掘铲 X 方向受力变化曲线

Fig. 20　Force change curve of excavating shovel in X direction

5.2.4　收获质量评价

参考 NY/T 648—2015 关于牵引式马铃薯收获机收获质量的评价标准，以明薯率和伤薯率作为评价指标。使用 TA Type－XTPlus 型食品质构仪对马铃薯 X、Y、Z 方向的 3 组果肉进行穿刺试验，测得马铃薯果肉的平均硬度为 7.524 N。仿真结束后利用 EDEM 后处理的 Manual Selection 功能，提取马铃薯在仿真过程中的受力，当马铃薯受力的最大值超过 7.524 N 时，则判定该马铃薯为伤薯，马铃薯损伤判断依据如图 21 所示。统计结果表明明薯率为 97.22%，伤薯率为 1.43%，均满足收获质量评价标准。



(a) 马铃薯果肉穿刺试验

(b) 马铃薯仿真过程受力变化曲线

图 21　马铃薯损伤判断依据

Fig. 21　Criterion of potato damage

6　结论

(1)应用产生式规则和框架式的表示方式对挖掘装置设计知识进行表达，开发了设计知识库和知识管理系统；基于规则和实例的推理方法构建了系统推理机，并将推理机制与参数化设计技术相结合，实现了模型的设计重用和智能化设计，增强了模型建立的灵活性和设计知识的继承性。

(2)对挖掘铲进行挖掘阻力分析和数值模拟，结合 RecurDyn－EDEM 联合仿真试验对挖掘装置的工作性能进行评价。结果表明，挖掘铲工作所需牵引力为 856.24 N，所受最大牵引阻力为 724.81 N，明薯率为 97.22%，伤薯率为 1.43%，满足设计要求。

(3)利用 Visual Studio 平台，对设计知识库、知识管理系统、推理机、参数化模型库和评价体系进行整合及联合运用，建立了马铃薯收获机挖掘装置智能设计系统，实现了对挖掘装置复杂设计过程的封装，使设计人员能基于友好人机界面进行产品设计，并提高了产品设计的准确性和工作效率。

参 考 文 献

[1] 张兆国,王海翼,李彦彬,等. 多级分离缓冲马铃薯收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(2):96 - 109.
ZHANG Zhaoguo, WANG Haiyi, LI Yanbin, et al. Design and experiment of multi-stage separation buffer potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2):96 - 109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210209&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.009. (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 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? flag = 1&file_no = 20190901&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.001. (in Chinese)

[3] 刘宏新,刘招金,张光甫,等. 基于 Skeleton Design 的脱粒装置交互式设计系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(12):405 - 416.
LIU Hongxin, LIU Zhaojin, ZHANG Guangfu, et al. Interactive design system of threshing device based on Skeleton Design[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(12):405 - 416. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20201244&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.044. (in Chinese)

[4] 魏忠彩,李洪文,苏国梁,等. 缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机研制[J]. 农业工程学报,2019,35(8):1 - 11.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Development of potato harvester with buffer type potato-impurity separation sieve[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(8):1 - 11. (in Chinese)

[5] 郑媛媛,郭栋,王政增,等. 马铃薯挖掘铲的改进设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(3):137 - 140.
ZHENG Yuanyuan, GUO Dong, WANG Zhengzeng, et al. Improved design and experiment of potato digging shovel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(3):137 - 140. (in Chinese)

[6] 樊昱. 基于离散元法的马铃薯挖掘机理研究及仿生铲设计[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
FAN Yu. Research on potato digging mechanism based on discrete element method and design of bionic shovel[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[7] 刘潇,何彬涛,段爱国,等. 振动式马铃薯挖掘装置关键部件设计[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):6 - 12.
LIU Xiao, HE Bintao, DUAN Aiguo, et al. Design of key components of vibrating potato excavator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(3):6 - 12. (in Chinese)

[8] 崔刚,马云海,杨德秋,等. 马铃薯挖掘铲仿生减阻技术研究概况[J]. 农业工程,2019,9(9):19 - 22.
CUI Gang, MA Yunhai, YANG Deqiu, et al. Research situation of bionic resistance reducing technology about potato digging shovel[J]. Agricultural Engineering, 2019,9(9):19 - 22. (in Chinese)

[9] 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(1): 31 - 38.

[10] SKOUPAS S, ZARAPHONITIS G, PAPANIKOLAOU A. Parametric design and optimisation of high-speed ro-ro passenger ships [J]. Ocean Engineering, 2019, 189(1): 106346 - 106368.

[11] REDDY E J, RANGADU V P. Development of knowledge based parametric CAD modeling system for spur gear: an approach [J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(4): 3139 - 3149.

[12] 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(3): 44 - 52.

[13] 卫永斌,艾俊强. 并列双发三维非对称多 S 弯喷管参数化设计方法[J]. 航空动力学报,2015,30(2):271 - 280.
WEI Yongbin, AI Junqiang. Parameter design method of double juxtaposition 3-D asymmetric several-S-shaped nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 2015,30(2):271 - 280. (in Chinese)

[14] 李文斌,李青林,黄云林,等. 稻麦联合收获机脱粒装置智能化设计平台构建[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):154 - 161.
LI Wenbin, LI Qinglin, HUANG Yunlin, et al. Construction of intelligent design platform for threshing device of combine harvester for rice and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.2):154 - 161. (in Chinese)

[15] 刘宏新,李金龙,郭丽峰,等. 联合收获机知识组织与知识库系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(2):381 - 393.
LIU Hongxin, LI Jinlong, GUO Lifeng, et al. Knowledge organization and knowledge base system of combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2):381 - 393. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20210238&flag = 1. DOI: 106041/j.issn.1000-1298.2021.02.038. (in Chinese)

[16] 杜岳峰,贺诗,毛恩荣,等. 基于知识工程的玉米果穗剥皮装置设计[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):249 - 260.
DU Yuefeng, HE Shi, MAO Enrong, et al. Design of corn ear peeling device based on knowledge-based engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.2):249 - 260. (in Chinese)

[17] 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? flag = 1&file_no = 20190701&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-

1298.2019.07.001. (in Chinese)
[18] 吕金庆,田忠恩,吴金娥,等.4U1Z 型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(12):39 - 47.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, WU Jin'e, et al. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 39 - 47. (in Chinese)
[19] 李晓辉,刘研秀.基于实例推理机制(CBR)综述[J].长春大学学报,2006,8(4):668 - 700.
LI Xiaohui, LIU Yanxiu. A survey of case-based reasoning(CBR) mechanism[J]. Journal of Changchun University, 2006, 8(4): 668 - 700. (in Chinese)
[20] 王万良.人工智能导论[M].3 版.北京:高等教育出版社,2011.
[21] COSTA C A, LUCIANO M A, LIMA C P, et al. Assessment of a product range model concept to support design reuse using rule based systems and case based reasoning[J]. Advanced Engineering Informatics, 2012, 26(2): 292 - 305.
[22] HASHEMI H, SHAHAROUN A M, SUDIN I. A case-based reasoning approach for design of machining fixture[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(1): 113 - 124.
[23] 邓伟刚,王春光,孙宏,等.马铃薯挖掘机挖掘铲力学模型构建[J].农机化研究,2014,36(1):84 - 86.
DENG Weigang, WANG Chunguang, SUN Hong, et al. The mechanical model building of the potato excavator digger shovel [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(1): 84 - 86. (in Chinese)
[24] 邓伟刚,孙宏,王春光.马铃薯挖掘铲工作阻力计算与分析[J].农机化研究,2014,36(10):71 - 74.
DENG Weigang, SUN Hong, WANG Chunguang. Working resistance calculating and analyzing of the potato digger shovel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(10): 71 - 74. (in Chinese)
[25] ITO M, SAKAI K, HATA S, et al. Technical notes: damage to the surface of potatoes from collision[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(5): 1431 - 1433.
[26] 贾晶霞,张东兴,桑永英,等.马铃薯挖掘铲计算机辅助分析与模拟试验研究[J].农业工程学报,2006,22(8):106 - 110.
JIA Jingxia, ZHANG Dongxing, SANG Yongying, et al. Computer aided analysis and simulation experiment of potato digging blade[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 106 - 110. (in Chinese)
[27] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids[J]. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1971, 324(1558): 301 - 313.
[28] 武涛,黄伟凤,陈学深,等.考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J].华南农业大学学报,2017,38(3):93 - 98.
WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93 - 98. (in Chinese)
[29] LAI Q, YU Q, DONG J. Dynamic analysis of rotary tiller gearbox based on EDEM, ADAMS and ANSYS[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 36(2): 1153 - 1160.

(上接第 72 页)

[24] 蔡增基. 流体力学泵与风机[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
[25] 姜丙孝,杨军虎,白小榜,等. 基于高维混合模型与遗传算法的离心泵叶片优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(7):128 - 132.
JIANG Bingxiao, YANG Junhu, BAI Xiaobang, et al. Optimization of centrifugal pump blade based on high-dimensional hybrid model and genetic algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020, 48(7): 128 - 132. (in Chinese)
[26] 王乐,樊敏,詹翔宇,等. 气体搅拌下厌氧消化反应器 CFD 数值模拟及模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):305 - 312.
WANG Le, FAN Min, ZHAN Xiangyu, et al. Numerical simulation and models of gas-stirred anaerobic digester by CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 305 - 312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180239&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.039. (in Chinese)
[27] 雷小龙,廖宜涛,王磊,等. 油麦兼用型气送式集排器增压管气固两相流仿真与参数优化[J]. 农业工程学报,2017,33(19):67 - 75.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Simulation of gas - solid two-phase flow and parameter optimization of pressurized tube of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 67 - 75. (in Chinese)
[28] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(20):10 - 18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10 - 18. (in Chinese)