

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.029

# 基于知识工程的玉米果穗剥皮装置设计

杜岳峰 贺诗 毛恩荣 朱忠祥 栗晓宇 杨帆

(中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室,北京 100083)

**摘要:** 收获机械结构复杂多样,使用季节性强,且用户多样性、定制化需求特征明显,传统研发模式存在设计周期长、效率低和质量难以保证等问题。本文以玉米联合收获机果穗剥皮装置为研究对象,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。首先明确剥皮装置设计流程,制定模块化设计方案,按照功能划分为专用件模块、通用件模块和标准件模块,其中专用件模块为剥皮装置核心组成部件,主要包括剥皮辊、压送器,通用件模块包括喂入辊、输送机构、排杂器、传动机构和果穗回收机构等,标准件模块包括传动件、连接紧固件和轴承等。然后按照标准、规范和约束范围,建立剥皮装置相关设计知识库,分析玉米品种特性、作业形式、传动方案、结构参数和工作参数之间的数学关系,同时利用框架式表示法对剥皮装置进行分解,建立自顶向下的谱系层次结构。基于果穗运动学和动力学分析,融合文献资料、试验数据和专家经验,建立了剥皮装置工作性能评价模型,包括苞叶剥净率评价模型、籽粒损失率评价模型和籽粒破碎率评价模型。基于 Visual Studio 平台,融合知识库、推理机、评价模型和系统人机界面,开发了基于知识工程的玉米剥皮装置设计系统,实现用户需求参数输入下设计参数的实时计算输出及参数评价。基于上述研究,以 TPJ16 型玉米果穗剥皮装置参数为例,在交互界面输入功率 7.5 kW、喂入量 16.6 t,计算获取剥皮装置关键结构参数和运动参数,并进行设计参数的性能评价,求解结果表明该剥皮装置的苞叶剥净率为 96.01%,籽粒破碎率为 1.42%,籽粒损失率为 3.25%。

**关键词:** 知识工程;玉米果穗剥皮装置;推理机制;评价模型;设计系统

**中图分类号:** TH122; S225 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0249-12

## Design of Corn Ear Peeling Device Based on Knowledge-based Engineering

DU Yuefeng HE Shi MAO Enrong ZHU Zhongxiang LI Xiaoyu YANG Fan

(Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** As one of the important agricultural equipment, the design of harvesting machinery has many typical characteristics, such as complex and diverse structures, strong seasonality, and obvious characteristics of users' diversity and customization requirements. The traditional R&D mode have some problems, such as long design cycle, low efficiency and difficult quality assurance. Taking the ear peeling device of corn combine harvester as the research object, according to the relationship among the structural characteristics, technical parameters and performance evaluation indexes of the peeling device, the design method of the ear peeling device based on knowledge was presented. Firstly, the design process of peeling device was clarified, and the modular design scheme was formulated, which was divided into special parts module, general parts module, and standard parts module according to functions. The special module was the core component of the peeling device, mainly including the peeling roller and the pressure feeder; the general module included the feeding roller, the conveying mechanism, the impurity eliminator, the driving mechanism and the fruit spike recovery mechanism and so on; the standard module included the driving part, the connecting fastener and the bearing and so on. Secondly, according to the scope of standards, rules and constraints, the related design knowledge base of peeling device was established, the mathematical relationship between the features, operation form corn varieties, transmission scheme, structure parameters, and operating parameters were analyzed. The representation and storage method of the design knowledge of corn ear peeling device was studied.

收稿日期: 2020-07-25 修回日期: 2020-09-22

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFD0700101)和国家自然科学基金项目(51805536)

**作者简介:** 杜岳峰(1984—),男,副教授,博士生导师,主要从事农机装备数字化设计与自动控制技术研究,E-mail: dyf@cau.edu.cn

Meanwhile, the framework representation method was used to decompose the husking plant, and a top-down hierarchical structure was designed. Finally, the computer aided design (CAD) and knowledge engineering were integrated to study the reasoning mechanism design of corn ear peeling device. In addition, the working performance evaluation model of corn ear peeling device was established, including the component life calculation model, the bract stripping rate evaluation model, the grain loss rate evaluation model, and the grain breakage rate evaluation model. Based on the Visual Studio platform, the knowledge base, reasoning machine, evaluation model and human-machine interface of system were integrated, and a design system of corn ear peeling device with knowledge was developed, which realized the real-time calculation output and parameter evaluation of design parameters under the input of user's demand parameters. On the basis of the above research, taking the parameters of TPJ16 corn ear peeling device as an example, the input power at the interface was 7.5 kW, the feeding amount was 16.6 t, the key structural parameters and motion parameters of the peeling device were calculated and evaluated, and the performance of the design parameters was evaluated. The solution results showed that the peeling rate of bract leaves, grain crushing rate and grain loss rate of the peeling device were 96.01%, 1.42% and 3.25%, respectively. The research results provided a reference for the rapid design of agricultural machinery and equipment.

**Key words:** knowledge-based engineering; corn ear peeling device; reasoning mechanism; evaluation model; design system

## 0 引言

当前,工程设计已从传统的数据资源密集型向知识信息密集型转化,知识工程在产品设计中可避免大量的重复性工作,提高研发效率,节约成本<sup>[1-4]</sup>。农机装备设计是一个知识密集的复杂过程,涉及机械设计、农机农艺、CAD/CAM(Computer aided design/Computer aided manufacturing)、人工智能与知识融合、知识管理和网络协同仿真等多领域的技术和方法。

经过几十年的发展,我国农机装备产品种类和性能基本能够满足使用需求。然而,就农机装备数字化设计的整体研发水平而言,我国仍处于起步阶段,农机企业面临来自目标市场多层面竞争的严峻挑战,特别是大功率拖拉机、联合收获机等具有工作环境复杂多变、作业类别多、使用季节性强、配置需求多样化、单产品市场需求规模小等特点的农机装备,当前以跟踪和仿造国外产品为主的研发模式明显存在设计周期长、效率低、设计可靠性差等诸多问题。随着信息化技术的发展,部分农机企业不同程度地积累了大量设计资源与知识,在一定程度上提升了设计效率。但由于缺乏系统化和结构化的知识利用体系,无法实现农机设计与知识的有效融合,难以满足多样化、定制化的产品设计需求<sup>[5]</sup>。

近年来,国内外很多科研单位都对知识工程(Knowledge-based engineering, KBE)技术进行了大量深入的研究。美国华盛顿大学融合CAD与KBE技术,将开发出的汽车设计系统应用到了汽车的概念设计中,有效地缩短了汽车设计的研发周期<sup>[6]</sup>。

美国福特公司利用开发出的汽车零部件KBE系统进行汽车零部件的开发设计,大大缩短了研发时间,提高了设计效率<sup>[7]</sup>。刘波将KBE技术的理论与车身的设计领域结合,研究了基于KBE的车身结构设计和车门部件系统,对知识驱动的车身开发关键技术进行了总结,给KBE技术与车身附件的结构设计相结合开辟了新道路<sup>[8]</sup>。顾雨甜等<sup>[9]</sup>对比了大量卡板数据并对其进行分类,研究了卡板的设计流程和分析步骤,开发了飞机卡板快速设计系统,为飞机卡板的设计效率低的问题提供了有效的解决方法。王雪亮等<sup>[10-12]</sup>将KBE技术分别应用于高速插秧机、联合收获机底盘的设计过程,实现了高速插秧机底盘、联合收获机传动系统与行走系统的快速设计。前述研究为实现农机装备的快速设计提供了基础,但由于缺乏设计结果的评价及分析,设计的可行性无法得到有效评价。

玉米果穗剥皮装置作为收获机械典型工作部件,其结构特征复杂、异形件数量多,设计过程涉及力学、机械设计、机械原理、材料、工艺、经验等多方面知识,对研发人员要求较高,且产品的定制化、小批量特征显著。传统研发模式通常以模仿成熟产品为主,样机设计参数多通过搭建试验台或田间试验优化验证<sup>[13-14]</sup>,研发周期长,且质量难以保证。

针对上述问题,本文在前期研究基础上,提出基于知识工程的玉米剥皮装置设计方法,首先搜集剥皮装置相关设计知识,开展剥皮机构模块划分,构建剥皮装置设计知识库;其次,通过剥皮过程的力学分析,基于文献、试验数据和专家经验等,建立剥皮装置工作性能评价模型,进行设计结果的参数评价;最

后,融合知识库、推理系统和人机界面,开发基于知识工程的玉米剥皮装置设计系统。

## 1 剥皮装置参数设计系统

### 1.1 剥皮装置结构及工作原理

玉米果穗剥皮装置一般由喂入机构、剥皮辊组、压送装置、排杂装置、传动系统、机架等组成,其核心部件为剥皮辊组和压送装置。剥皮辊组的主要功能是抓取苞叶,撕开苞叶,将苞叶从剥皮辊间隙中排除,其结构参数、表面材料、表面结构形式、配置方式等决定性能的优劣。压送装置作用于玉米果穗的力可分为两种,一是将玉米果穗压向剥皮辊组,使得玉米果穗与剥皮辊稳定地接触避免跳动,从而保证玉米果穗与剥皮辊间有足够大的摩擦力;二是推动玉米果穗滑离剥皮辊,进而保证玉米果穗通过剥皮辊组的连续性,从而提高剥皮效率<sup>[15]</sup>。压送装置按结构可分为叶轮式、凸轮式和键式等。目前,胶板叶轮式压送器凭借其能使苞叶蓬松而使苞叶易于被剥皮辊抓取的优势,得到广泛应用。

玉米剥皮装置的工作原理如下:果穗通过喂入

机构以一定初速度进入相向旋转的剥皮辊组间,果穗在压送装置和自身重力作用下沿剥皮辊表面下滑,同时受两辊对果穗表面的切向摩擦力不同,果穗产生绕自身轴线旋转的转矩,当剥皮辊表面与玉米果穗苞叶之间的摩擦力大于玉米果穗苞叶穗柄连接力时,苞叶被剥除,并被排杂装置排出,无苞叶果穗进入集穗箱,完成果穗剥皮作业。

### 1.2 剥皮装置模块划分

模块化设计是在产品功能分析基础上,划分并设计出一系列功能模块,通过模块的选择和组合,构成不同产品,以满足用户定制需求<sup>[16]</sup>。玉米剥皮装置零件种类多,但各零件之间又相互关联,为了能够实现对整个剥皮装置进行有序的设计,实现零部件设计中的知识资源表达,通过剥皮装置的谱系层次划分,将玉米剥皮装置各零部件进行清晰的分类和表达。基于层次化设计原则,根据剥皮装置结构功能分析,运用自顶向下法对剥皮装置进行结构划分,划分为具有继承关系的谱系层次结构<sup>[17]</sup>,如图 1a 所示,运用与基础结构相对应的框架式表示法对玉米剥皮装置分解来进行谱系层次结构的设置。

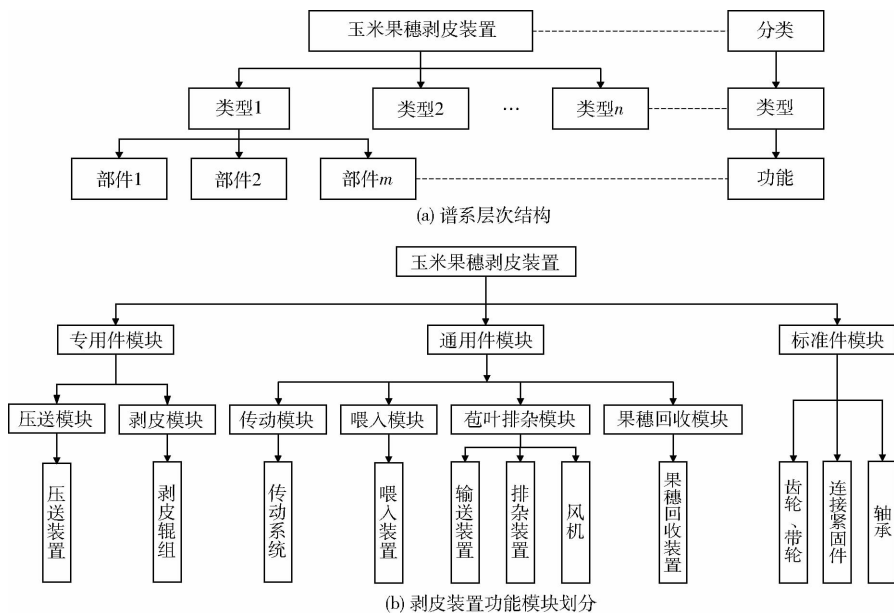


图 1 玉米剥皮装置的模块划分

Fig. 1 Module division of corn peeling device

由于产品各零部件之间功能相关性不同,在满足产品功能相关性的基础上<sup>[18]</sup>,结合零件的设计准则,对剥皮装置中的零件间的功能相关性进行分析,可以将剥皮装置谱系层次结构中的零部件组成划分为通用件、标准件和专用件模块。如图 1b 所示,剥皮辊组、压送装置是剥皮装置中的核心部件,不同系列机型中这两部分的结构和配置形式存在差异,这两个关键部件也常被设计人员进行创新设计,因此这两个模块中的零件属于专用件模块;剥皮装置中

的连接紧固件、轴承、齿轮、带轮等标准件与其他零部件间的关联性比较小,因此这类零件可归为标准件模块;剥皮装置中的其他零部件根据功能划分为喂入模块、传动模块、苞叶排杂模块、果穗回收模块,这些模块在不同型号的剥皮装置中可通用,这部分属于通用件模块。

### 1.3 剥皮装置设计知识库与推理系统

知识库是将知识以某种表示形式存储在计算机中,便于设计人员进行查询设计<sup>[19]</sup>。剥皮装置设计

知识种类繁多、知识信息总量大、形式复杂,根据前期研究成果<sup>[20-22]</sup>,玉米剥皮装置设计知识可分为实例类知识、规则类知识、参数类知识及相关资料等。玉米果穗剥皮装置设计知识库的结构如图2所示。

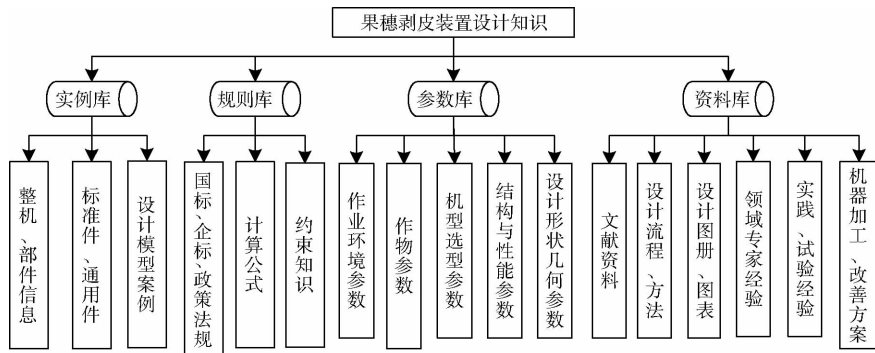


图2 玉米剥皮装置设计知识

Fig. 2 Design knowledge base structure of corn peeling device

推理是基于一定的规则推导出结果的过程。在剥皮装置设计系统中,推理机是根据用户需求按照设计规则逐步进行推理,得到中间结果后,再对该结果不断地进行验证,直至得到最终结果。推理机制是知识库与用户需求之间的连接桥梁,也是剥皮装置设计系统的核心。

用户输入设计参数,推理机首先按照基于实例的推理方法检索是否有相似实例,若有相似实例可直接调用实例。基于实例的推理是在已有产品模型的基础上,根据设计需求对局部零件进行改进形成新的设计,在进行实例检索时,首先输入剥皮装置的总体设计参数:喂入量和输入功率;剥皮装置关键设计参数:剥皮辊排列型式、压送器型式、剥皮辊表面花纹和材料、剥皮辊轴向倾角等;根据这些要求在实例库中进行检索判断,找到相似度最高的实例,然后再对该实例中相似度小于相似度阈值的部件进行修改,最后输出设计结果。实例相似度可采用实例各属性相似程度来表示。

$$S_{IM}(P, Q) = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{1 + |p_i - q_i|} \quad (1)$$

式中  $P, Q$ ——实例,这两个实例的属性集为  $(p_1, p_2, \dots, p_n), (q_1, q_2, \dots, q_n)$

$S_{IM}$ ——实例相似度  $n$ ——实例个数

$p_i, q_i$ —— $P, Q$  的属性

$\mu_i$ ——权值,各属性对实例的影响程度

剥皮装置设计系统基于实例推理的工作流程图如图3所示,若存在相似实例则将相关设计知识输出,并通过 Pro/E 建立剥皮装置三维模型,并对其进行工作性能评价分析,若满足要求则将该模型保存到模型库中,否则重新进行设计。

当两个实例完全相同,则  $S_{IM}(P, Q) = 1$ 。由于

根据剥皮装置知识的结构和知识特点,采用面向对象的技术,确定相关设计知识的表达方式、在知识库中的存储方式和数据表的存储结构<sup>[17]</sup>、知识查询及编辑等,在此不再赘述。

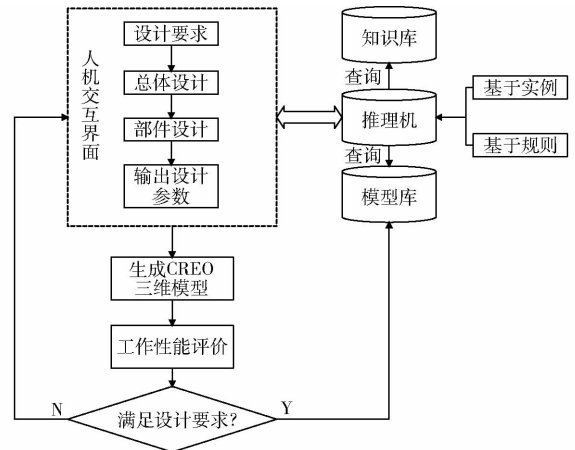


图3 基于实例的剥皮装置设计系统

Fig. 3 Design system of corn peeling device based on case

两个实例总会存在差异,故本文设定相似度阈值为0.6,只要两个实例相似度超过0.6即为相似,反之则进行基于规则的推理。推理流程为:用户首先根据需求输入剥皮装置的果穗喂入量和输入功率,计算确定整个装置的作业行数和剥皮辊、压送器转速;接着进行剥皮辊的设计:在经验范围内选择剥皮辊的直径、长度,选取剥皮辊花纹组合材料和组合型式,确定相邻两剥皮辊轴线水平间距,从而计算得到剥皮辊轴上啮合传动的直齿轮参数;由于不同型号剥皮装置上的压送器和果穗排杂装置的形式类似,只存在尺寸上的差别,故只需在经验参数范围内选择压送器和果穗排杂装置的设计参数即可;然后进行传动系统的设计:由于前面已经得到了剥皮装置的作业行数和剥皮辊轴上直齿轮传动的参数,故可确定横轴上锥齿轮的位置,再由锥齿轮的传动比得到齿轮的定型参数;链轮传动参考已有机型的方案进行设计;最后基于评价模型,进行设计参数的性能评价,完成剥皮装置设计,如图4所示。

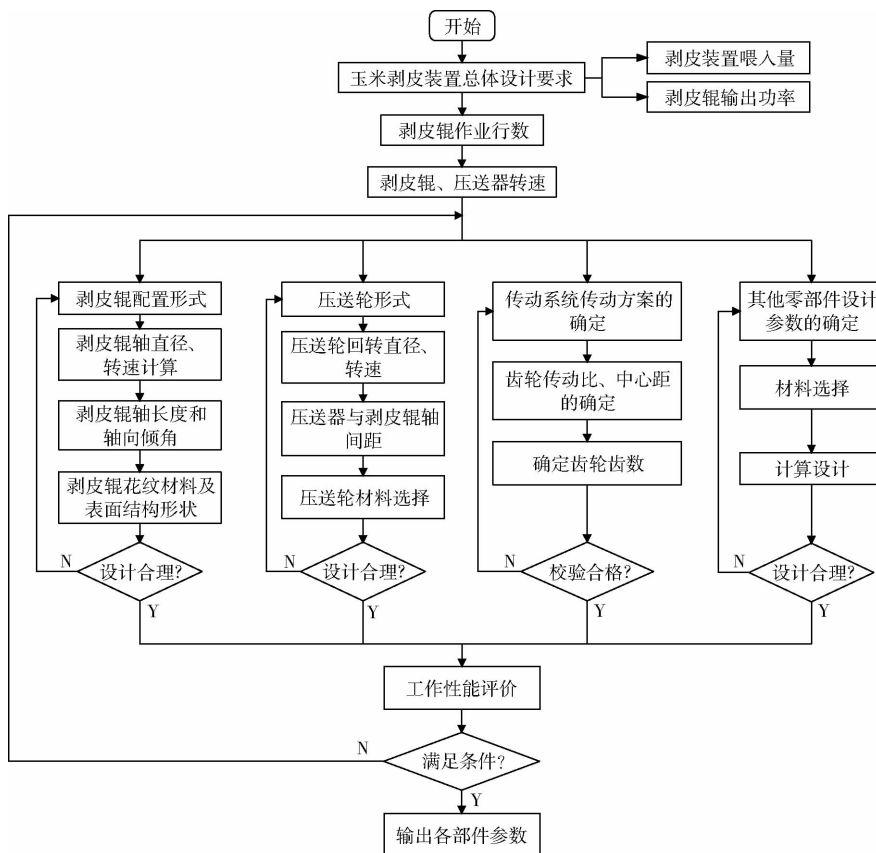


图 4 基于规则的剥皮装置设计系统推理流程图

Fig. 4 Reasoning process of corn peeling device design system based on rule

## 2 剥皮装置工作性能评价模型

基于知识工程的剥皮装置参数设计系统完成参数设计及输出后,如何进行参数的设计评价是非常关键和重要的,当前商业软件仅可进行机构的运动学、动力学或结构动力学评价分析,不具备工作性能评价功能。玉米果穗剥皮装置设计性能优劣可通过苞叶剥净率、籽粒破碎率和籽粒损失率等指标进行评价。基于此,本文通过果穗剥皮过程的运动学和动力学分析,融合文献资料、试验数据和专家经验,建立了苞叶剥净率评价模型、籽粒损失率评价模型和籽粒破碎率评价模型,实现对设计参数的性能评价。

### 2.1 剥皮过程力学分析

玉米果穗在剥皮辊组间运动时,由于相向旋转的两剥皮辊材料不同,故玉米果穗不仅做沿剥皮辊轴线下滑的运动,还做沿自身轴线的旋转运动,其绝对运动速度方向与剥皮辊轴线方向呈一定角度<sup>[23]</sup>,玉米果穗所受摩擦力方向与其绝对运动速度方向的关系如图 5 所示。由图 5 可知,玉米果穗受到的沿剥皮辊方向的摩擦力计算公式为

$$F = F_1 \cos\delta_1 + F_2 \cos\delta_2 \quad (2)$$

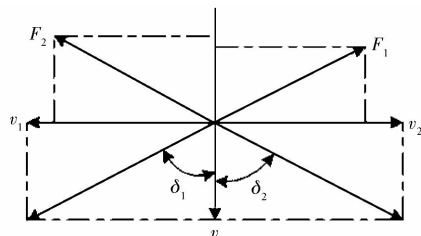


图 5 玉米所受摩擦力的方向与其绝对速度方向的关系

Fig. 5 Relationship between direction of friction force on corn and its absolute speed direction

其中

$$\begin{cases} F_1 = f_{10} N_{10} \\ F_2 = f_{20} N_{20} \\ \delta_1 = \arctan \frac{v_1}{v} \\ \delta_2 = \arctan \frac{v_2}{v} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $F$ ——玉米沿剥皮辊下滑的摩擦力,  $N$   
 $F_1$ 、 $F_2$ ——右、左辊与玉米果穗间的摩擦力,  $N$   
 $f_{10}$ 、 $f_{20}$ ——右、左辊与玉米果穗间的摩擦因数  
 $N_{10}$ 、 $N_{20}$ ——右、左辊对玉米果穗的支撑力,  $N$   
 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ ——右、左辊与玉米果穗间的摩擦力与辊轴的夹角, ( $^\circ$ )  
 $v$ ——玉米果穗沿辊轴下滑速度,  $m/s$   
 $v_1$ 、 $v_2$ ——玉米果穗沿右、左辊下滑速度,  $m/s$

分别对玉米果穗在平行辊轴平面和垂直辊轴平面内进行受力分析,如图6所示。

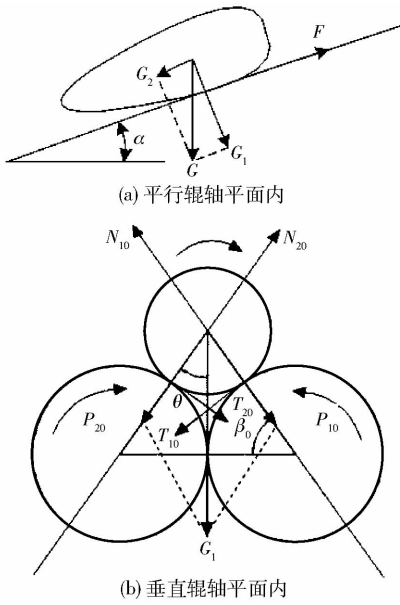


图6 果穗受力分析

Fig. 6 Diagram of corn stress analysis

经分析整理可求得两剥皮辊分别对果穗的支撑力、果穗沿剥皮辊下滑的摩擦力,2个剥皮辊分别与果穗之间的切向摩擦力,为

$$\begin{cases} N_{10} = N_{20} = \frac{G \cos \alpha (R+r)}{2\sqrt{r^2+2Rr}} \\ F = \frac{G \cos \alpha (R+r)}{2\sqrt{r^2+2Rr}} (f_{10} \cos \delta_1 + f_{20} \cos \delta_2) \\ T_{10} = \frac{f_{10} G \cos \alpha (R+r)}{2\sqrt{r^2+2Rr}} \\ T_{20} = \frac{f_{20} G \cos \alpha (R+r)}{2\sqrt{r^2+2Rr}} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $G$ ——玉米果穗重力, N

$R$ ——剥皮辊半径, mm

$r$ ——玉米果穗半径, mm

$\alpha$ ——剥皮辊倾角, ( $^\circ$ )

$T_{10}$ ——右辊与玉米之间的切向摩擦力, N

$T_{20}$ ——左辊与玉米之间的切向摩擦力, N

玉米果穗与压送器叶片之间的接触为线接触(内啮合),可看作是赫兹接触,接触应力为

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\frac{F'_0}{L} \left( \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right)}{\pi \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (5)$$

式中  $\sigma_H$ ——玉米与压送叶片的接触应力, MPa

$F'_0$ ——压送器对玉米果穗施加的载荷, N

$L$ ——玉米与压送叶片的接触长度, mm

$E_1$ ——玉米果穗弹性模量, MPa

$E_2$ ——压送器弹性模量, MPa

$\mu_1$ ——玉米果穗泊松比

$\mu_2$ ——压送器泊松比

$\rho_1$ ——玉米果穗半径, mm

$\rho_2$ ——压送器叶片半径, mm

玉米果穗苞叶和压送器各参数值如表1所示,经计算整理可求得玉米果穗所承载荷  $F'_0$  为

$$F'_0 = \frac{24\,586}{36r - r^2} \quad (6)$$

表1 带苞叶玉米果穗和压送器参数

Tab. 1 Parameter of corn ear and pressure transmitter

名称	弹性模量/MPa	半径/mm	泊松比
带苞叶玉米果穗	1.980		0.359
压送器	1.869	36	0.499

此时只在压送器作用下,通过对玉米果穗在剥皮辊上的受力情况进行分析,如图7所示,可求得玉米果穗在压送器和剥皮辊共同作用下受到两剥皮辊的总支撑力和玉米果穗与两剥皮辊间的切向摩擦力为

$$\begin{cases} N'_1 = \frac{G \cos \alpha (R+r)}{2\sqrt{r^2+2Rr}} + F'_0 \cos \theta \\ N'_2 = \frac{G \cos \alpha (R+r)}{2\sqrt{r^2+2Rr}} + F'_0 \cos \theta \\ T'_1 = 0.38 \left[ \frac{G \cos \alpha (R+r)}{2\sqrt{r^2+2Rr}} + \frac{24\,586\sqrt{r^2+2Rr}}{(36r-r^2)(R+r)} \right] \\ T'_2 = 0.336 \left[ \frac{G \cos \alpha (R+r)}{2\sqrt{r^2+2Rr}} + \frac{24\,586\sqrt{r^2+2Rr}}{(36r-r^2)(R+r)} \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中  $N'_1$ ——右辊对玉米果穗的总支撑力, N

$N'_2$ ——左辊对玉米果穗的总支撑力, N

$\theta$ ——剥皮辊与玉米中心连线与垂直方向的夹角, ( $^\circ$ )

$T'_1$ ——右辊与玉米果穗间的切向摩擦力, N

$T'_2$ ——左辊与玉米果穗间的切向摩擦力, N

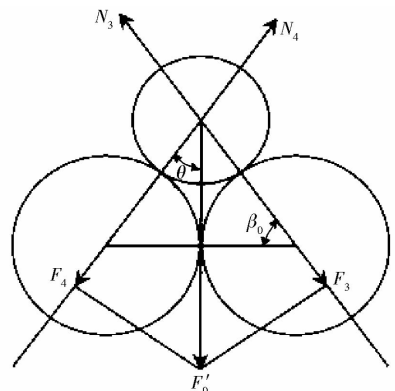


图7 玉米在压送器作用下受力分析

Fig. 7 Diagram of corn stress analysis under action of pressure transmitter

### 2.2 苞叶剥净率评价模型

经查阅文献[23-25]可知,100个玉米果穗直

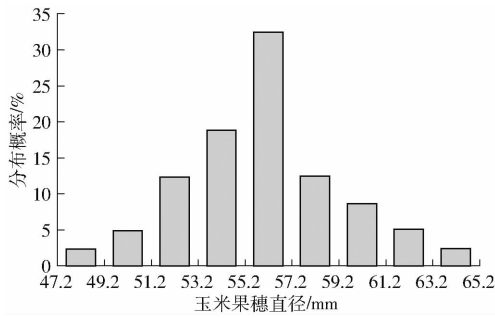
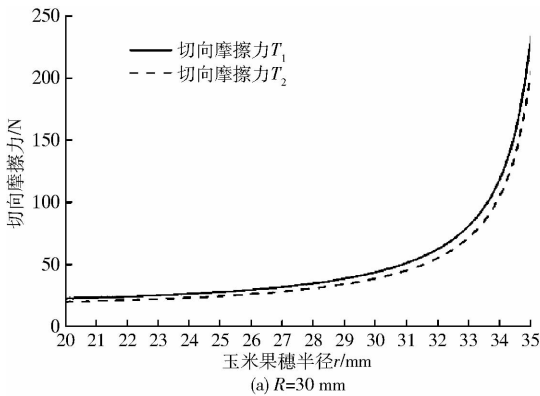


图8 玉米果穗尺寸分布图

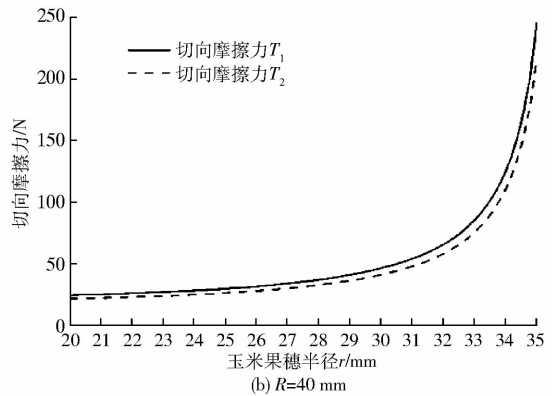
Fig. 8 Size distribution of corn ear

向剥离力的范围在 24.95 ~ 59.99 N 之间<sup>[26]</sup>,故可求解在该条件下能够被剥掉苞叶的玉米果穗的径向尺寸范围,分析该范围在玉米径向尺寸分布图上所占的比例,即可求得玉米果穗苞叶剥净率。

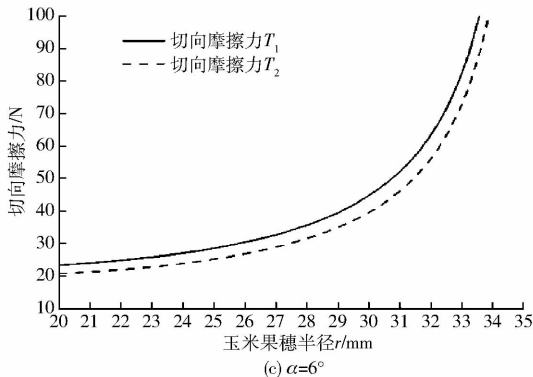
如图9所示,在剥皮辊半径经验范围内,当R分别取30、40 mm时,根据玉米果穗与两剥皮辊间的切向摩擦力与玉米果穗半径的关系,计算求得苞叶剥净率分别为93.75%、87.77%;在剥皮辊倾角经验范围内,当α分别取6°、10°时,根据玉米果穗与两剥皮辊间的切向摩擦力与玉米果穗半径的关系,计算求得苞叶剥净率分别为91.075%、92.3%。综上所述,可见苞叶剥净率与剥皮辊轴向倾角基本成正比关系,与剥皮辊半径成反比关系。



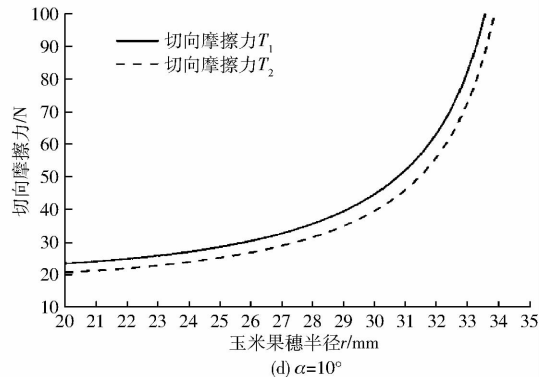
(a) R=30 mm



(b) R=40 mm



(c) α=6°



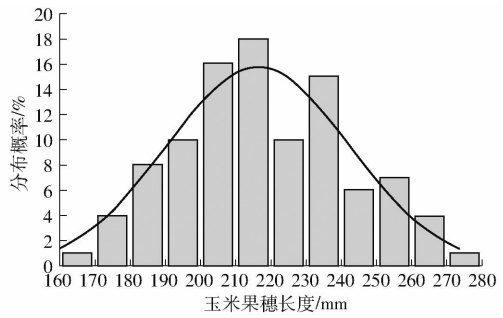
(d) α=10°

图9 不同条件下切向摩擦力与果穗半径间的关系

Fig. 9 Relationship between tangential friction and corn ear radius under different conditions

径分布和长度分布如图8所示。

由前期研究可知,玉米苞叶剥离实验得到横



### 2.3 籽粒损失率评价模型

赵武云等<sup>[27]</sup>针对玉米果穗不同部位的籽粒,通过玉米果柄断裂力学特性试验,分别测得当籽粒两侧支撑粒数不同时,受横向支撑压力而掉落的压力和受纵向支撑压力而掉落的压力如图10所示,将其所得试验数据进行拟合得到支撑粒数与最小作用力之间的关系为

$$\begin{cases} f_{01} = 0.8778x + 2.784 \\ f_{02} = 1.095x + 3.015 \end{cases} \quad (9)$$

式中 x——支撑籽粒数,个

$f_{01}$ ——横向支撑时最小作用力,N

$f_{02}$ ——纵向支撑时最小作用力,N

一般单穗玉米每横行籽粒数一般为8~16粒,每纵行籽粒数为18~40粒,当力的方向为横向支

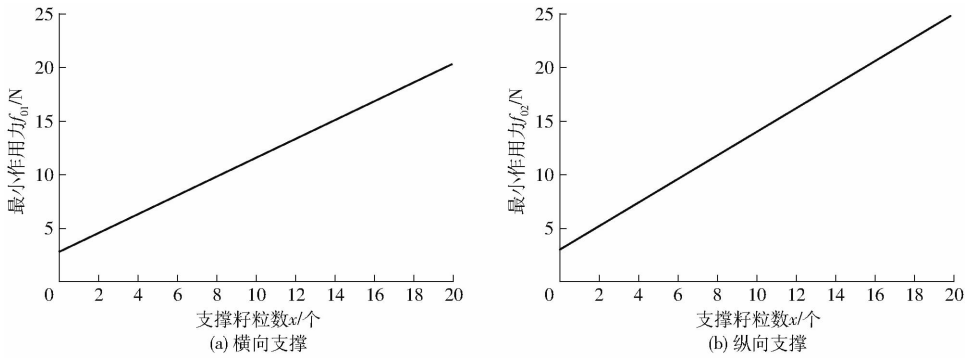


图 10 不同条件下支撑籽粒数与最小作用力的关系

Fig. 10 Relationship between number of supporting grains and minimum acting force under different conditions

撑力时,最小作用力为 7.45 N,当力的方向为纵向支撑力时,最小作用力为 11.775 N,由于以上试验分析的是分别在两种不同施力方式(横向支撑力和纵向支撑力)下得到的玉米籽粒果柄断裂力,实际情况中玉米籽粒在剥皮辊上同时受到这两个方向的约束,故剥皮辊挤压玉米籽粒的力必须同时满足以上两个方向的约束力时才能保证玉米籽粒完全掉落。

由于压送器与玉米果穗(无苞叶)之间的接触也可看作 Hertz 接触,经分析求得:压送器对玉米无苞叶果穗施加的载荷与玉米无苞叶果穗受到的总压力为

$$F'_1 = \frac{2\ 154}{r'(36 - r')} \quad (10)$$

$$N'_1 = \frac{G \cos \alpha (R + r)}{2\sqrt{r^2 + 2Rr}} + \frac{2\ 154}{r'(36 - r')} \frac{\sqrt{r^2 + 2Rr}}{R + r} \quad (11)$$

式中  $F'_1$ ——压送器对玉米无苞叶果穗施加的载荷, N

$r'$ ——玉米无苞叶果穗半径, mm

求解在满足  $N'_1 > 11.775\text{ N}$  时玉米籽粒掉落的玉米果穗径向尺寸范围,分析该范围在玉米径向尺寸分布图上占比即可求得玉米籽粒损失率。

### 2.4 籽粒破碎率评价模型

玉米果穗在剥皮辊上完成苞叶剥离后,玉米籽粒直接与剥皮辊表面、压送器叶片接触,此时若剥皮辊、压送器叶片对玉米籽粒施加的压力大于玉米籽粒破裂的最小载荷,则玉米籽粒破碎。参考玉米籽粒的最小破裂载荷平均值为 145.1 N。为避免籽粒破碎,只要满足压送器对玉米果穗施加的载荷和剥皮辊作用于玉米果穗的载荷均小于玉米籽粒的最小破裂载荷。求解满足

$$\begin{cases} 0 \leq F_0 = \frac{24\ 586}{36r - r^2} \leq 145.1\text{ N} \\ N'_1 = \frac{G \cos \alpha}{2} + \frac{24\ 586 \cos \theta}{36r - r^2} \leq 145.1\text{ N} \end{cases} \quad (12)$$

时玉米果穗半径的范围在玉米果穗径向尺寸分布图上的占比即可求得籽粒破碎率。

## 3 玉米剥皮装置设计系统实现

### 3.1 人机界面设计

以 Visual Studio 2012 作为开发工具,使用 ADO. Net(ActiveX Data Objects)技术通过程序关联存储在 SQL Server 数据库的知识,并在系统中以交互界面形式呈现。玉米剥皮装置设计系统的人机交互界面主要包括 3 部分,如图 11 所示,左侧界面为菜单栏、右侧为设计推理区、下侧为模型展示区。其中菜单栏包括进入界面、总体设计、剥皮辊设计、压送装置设计、果穗排杂装置设计、传动系统设计、性能评价系统和生成报告等部分。用户按照设计流程在菜单栏点选相应的设计模块,设计推理界面显示相应的设计内容,用户根据其需求在该界面进行输入计算,对于通用件和标准件,其三维模型还可在模型展示界面进行调用查看。



图 11 玉米剥皮装置界面设计

Fig. 11 Interface design of corn peeling device

### 3.2 玉米剥皮装置设计系统实现

首先进入初始界面,然后进入剥皮装置设计推理过程,如图 12~17 所示,具体设计过程如下:

(1)用户在总体设计界面根据需求输入果穗喂入量和输入功率,点击“计算”按钮,根据规则类知识即经验公式计算得到剥皮装置总体设计参数:剥皮辊作业行数、剥皮辊转速和压送器转速。

(2)进行剥皮辊的设计,在对应的剥皮辊直径和长度对话框中根据对话框显示的范围,在不同系



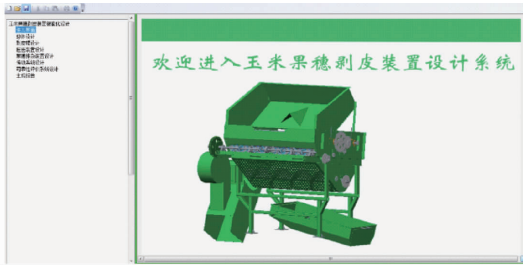


图 12 初始界面  
Fig. 12 Initial interface

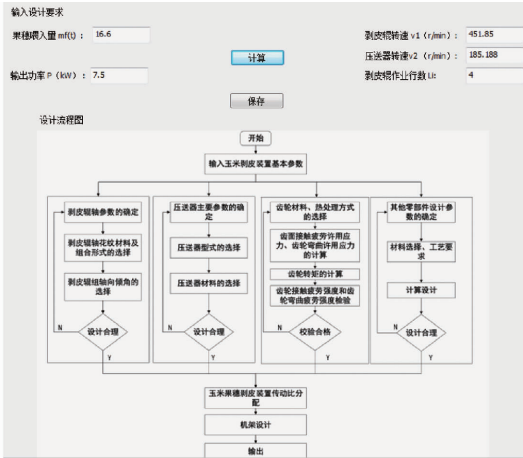


图 13 总体设计界面  
Fig. 13 Overall design

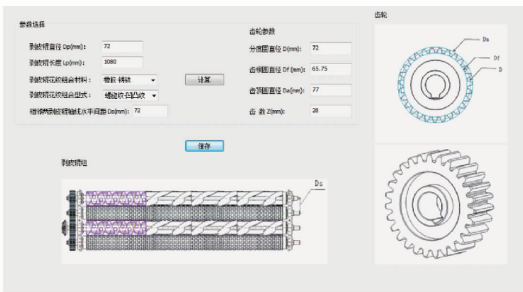


图 14 剥皮辊设计界面  
Fig. 14 Design of peeling roller

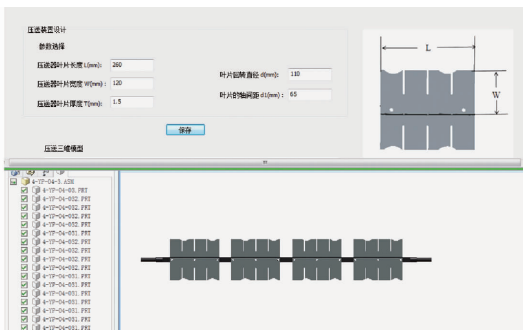


图 15 压送器设计界面  
Fig. 15 Design of presser

列剥皮辊直径、长度的经验范围内输入参数值；在剥皮辊花纹组合材料和型式对话框的下拉框中选择剥皮辊花纹组合材料和型式，确定相邻两剥皮辊轴间距，计算得到各剥皮辊轴上相互啮合的直齿轮的设计参数。

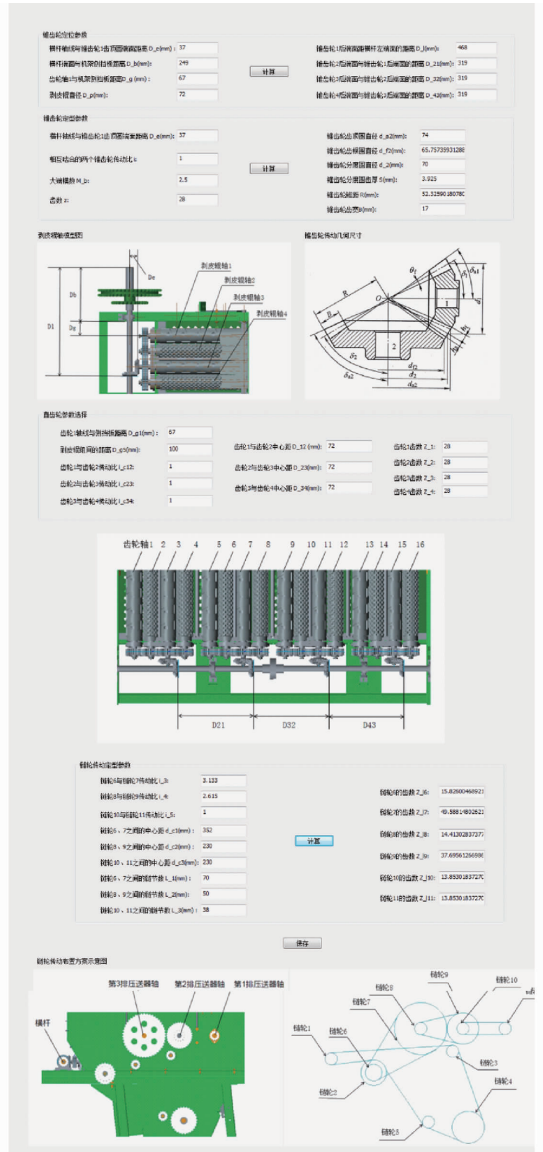


图 16 传动系统设计界面  
Fig. 16 Transmission system design interface

(3) 进行压送装置的设计，由于不同系列玉米果穗剥皮装置上的压送器型式相似，故可在压送器各结构参数对话框中根据对话框显示的经验值范围输入压送器叶片的设计参数值、叶片回转直径和轴间距。

(4) 进行传动系统的设计，动力输入轴与剥皮辊轴之间采用锥齿轮传动，通过锥齿轮轴及机架与剥皮辊轴的定位关系与计算得到的剥皮辊直径参数，计算得到锥齿轮轴上锥齿轮间的位置关系。剥皮辊组之间采用直齿轮传动，相邻剥皮辊轴间靠直齿轮啮合传递动力，传动比均为 1，确定了剥皮辊轴间距，可得到各啮合直齿轮间的定位参数。由计算得到的齿轮定型参数可确定直齿轮间的传动方案；压送装置与螺旋输送机之间采用链传动，输入玉米果穗剥皮装置链传动的经验传动比、中心距和链节数等参数，计算得到各链轮齿数和链传动的传动

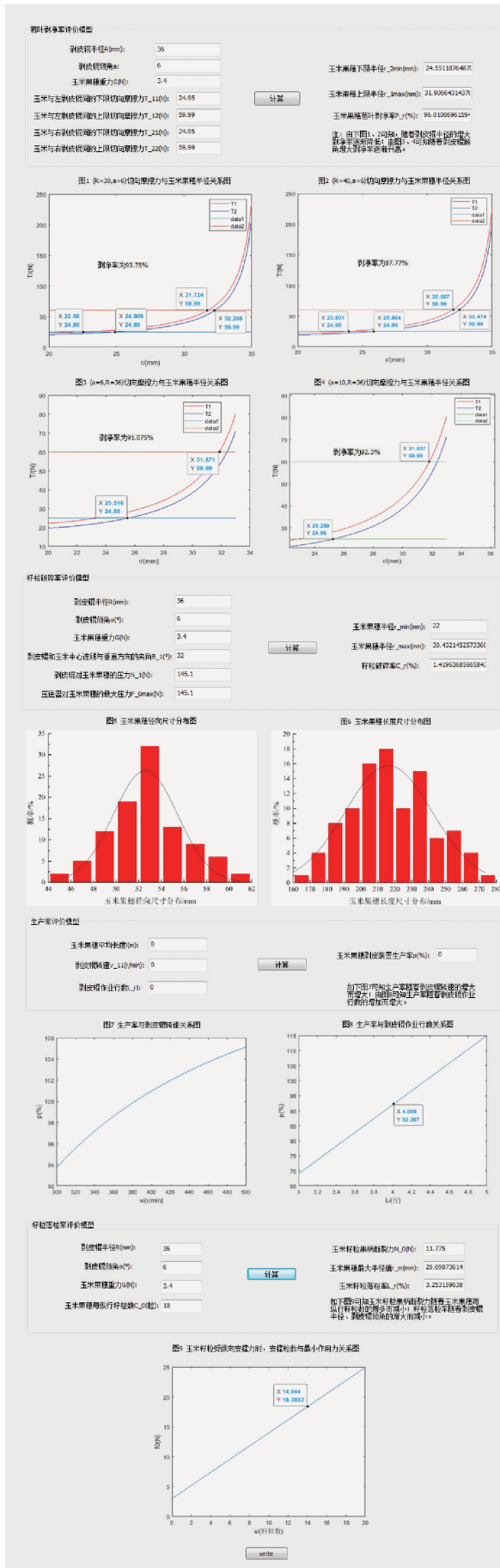


图17 性能评价系统界面

Fig. 17 Performance evaluation system interface

方案。

(5)最后,输入得到的设计参数,计算玉米果穗剥皮装置的工作性能参数:苞叶剥净率、籽粒损失率和籽粒破碎率,根据玉米收获机械技术条件判断剥皮装置的工作性能是否满足要求。

### 3.3 玉米剥皮装置设计系统实例计算

应用基于知识工程的玉米剥皮装置设计系统,以TPJ16型玉米剥皮装置的关键部件设计参数作为输入,其关键部件设计参数如表2所示。经计算得该型号玉米果穗剥皮装置的苞叶剥净率为96.01%,籽粒破碎率为1.42%,籽粒损失率为3.25%,满足玉米收获机械技术条件。

表2 剥皮辊和压送器结构参数

Tab. 2 Structural parameters of peeling roller and pressure transmitter

参数	数值/型式
剥皮装置输入功率/kW	7.5
剥皮装置喂入量/t	16.6
剥皮辊作业行数	4
剥皮辊转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	451
压送器转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	185
剥皮辊直径/mm	72
剥皮辊轴向倾角/( $^{\circ}$ )	6
剥皮辊表面花纹型式	螺旋纹和凸起
相邻两剥皮辊间距/mm	72
玉米果穗平均重力/N	3.4
玉米果穗半径/mm	26.5

## 4 结论

(1)运用自顶向下法和框架式表示法对剥皮装置进行谱系层次结构的设置,结合剥皮装置零部件间的功能相关性分析对剥皮装置进行模块划分。根据剥皮装置设计知识特点和表达形式,应用产生式规则表达法和框架表达方式对剥皮装置设计知识进行了表达,并开发了剥皮装置设计知识库;基于实例和规则推理,建立了剥皮装置的设计推理流程。

(2)基于果穗运动学和动力学分析,融合试验数据和专家经验,建立了剥皮装置工作性能评价模型,包括苞叶剥净率评价模型、籽粒损失率评价模型和籽粒破碎率评价模型。

(3)基于Visual Studio平台,融合知识库、推理机和系统人机界面,开发了基于知识工程的玉米剥皮装置结构设计系统,实现剥皮装置的快速设计,并开展了实例验证。结果表明,所开发的剥皮装置设计系统能够满足装备的快速设计需求。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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](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)
- [6] CALKINS D E, EGGING N, SCHOLZ C, et al. Auto DSS: a system level KEB tool for vehicle product definition[C]. *SAE Technical Paper*2000 – 01 – 1351, 2000.
- [7] 宋龙. 基于知识工程的闭式双点曲柄压力机模块参数化设计研究[D]. 太原:太原科技大学,2016. SONG Long. Research onparametric design of closed double-point crank press module based on knowledge engineering[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [8] 刘波. 知识驱动的车身结构设计方法研究及相关软件开发[D]. 长春:吉林大学,2007. LIU Bo. Research on knowledge-drivenbody structure design method and related software development[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [9] 顾雨甜,廖文和,李迎光. 飞机装配型架卡板快速设计与分析技术研究及实现[J]. *机械制造与自动化*,2007(1):25 – 28. GU Yutian, LIAO Wenhe, LI Yingguang. Research and implement of quick design and analysis for assembly fixture boards[J]. *Machine Building & Automation*, 2007(1):25 – 28. (in Chinese)
- [10] 王雪亮. 基于知识的高速插秧机底盘快速设计[D]. 北京:中国农业大学,2012. WANG Xueliang. Rapid design of knowledge-based high-speed transplanter chassis [D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [11] 尹世琛. 基于知识的轮式联合收割机底盘传动系快速设计[D]. 北京:中国农业大学,2012. YIN Shichen. Knowledge-based fast design of wheel combine chassis drive system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [12] 孙晶晶. 基于知识的履带式水稻收割机行走系快速设计[D]. 北京:中国农业大学,2012. SUN Jingjing. Fast design of crawler rice harvester walking system based on knowledge [D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [13] 陈庆文,陈志,韩增德,等. 我国玉米收获机剥皮装置的现状分析及展望[J]. *农机化研究*,2014,36(10):257 – 260. CHEN Qingwen, CHEN Zhi, HAN Zengde, et al. Analysis and prospects of the cornhusker of corn harvester in China[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014,36(10): 257 – 260. (in Chinese)
- [14] 马健飞. 玉米剥皮装置的设计与试验研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2018. MA Jianfei. Design and experimental study of corn peeling device [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [15] 赵玉强,何晓鹏,师建芳,等. 鲜食玉米剥皮机的设计与试验[J]. *农业工程学报*,2011,27(2):114 – 118. ZHAO Yuqiang, HE Xiaopeng, SHI Jianfang, et al. Design and experiment of sweet and waxy corn husker[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2):114 – 118. (in Chinese)
- [16] PIRAN F A S, LACERDA D P, CAMARGO L F R, et al. Product modularization and effects on efficiency: an analysis of a bus manufacturer using data envelopment analysis (DEA)[J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 182:1 – 13.
- [17] 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. Clustering and dividing method of soybean sowing equipment pedigree module [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(19): 43 – 50. (in Chinese)
- [18] 刘琼,徐洋,邓明中. 面向产品配置的模块划分方法[J]. *南华大学学报(自然科学版)*,2012,26(2): 36 – 40. LIU Qiong, XU Yang, DENG Mingzhong. Module partition method for product configuration [J]. *Journal of South China University (Natural Science Edition)*, 2012, 26(2): 36 – 40. (in Chinese)
- [19] NOMAGUCHI Y, MIZUTA M, HIROOKA M, et al. Study on knowledge-based product design framework for facilitating the interaction of model-based development and proto typing[J]. *International Journal of Automation Technology*, 2014, 8(3): 344 – 355.
- [20] 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](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)
- [21] 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?flag=1&file\\_no=2012s66&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s66&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.066. (in Chinese)
- [22] 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?flag=1&file\\_no=2013s252&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s252&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.052. (in Chinese)
- [23] 朱忠祥,岳小微,杜岳峰,等. 玉米果穗剥皮的运动仿真与高速摄像试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):42-48.  
ZHU Zhongxiang, YUE Xiaowei, DU Yuefeng, et al. Dynamic simulation and high-speed photography experiment on corn-ear husking[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 42-48. (in Chinese)
- [24] 徐丽明,王应彪,张东兴,等. 玉米通用剥皮机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):14-20.  
XU Liming, WANG Yingbiao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of corn universal husker mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 14-20. (in Chinese)
- [25] 戴株荫,曲继祥. 玉米果穗剥皮辊型及其主要参数优选试验[J]. 农业机械学报,1995,26(2):58-62.  
DAI Zhuyin, QU Jixiang. The test for selecting the type and parameters of ear-corn husking roll[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(2): 58-62. (in Chinese)
- [26] 解福祥,宋健,霍洪鹏,等. 玉米苞叶力学性能与剥离试验[J]. 农机化研究,2018,40(8):129-133.  
XIE Fuxiang, SONG Jian, HUO Hongpeng, et al. Mechanical properties and stripping test of maize bracteal[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 129-133. (in Chinese)
- [27] 赵武云. 组合式螺旋板齿种子玉米脱粒装置研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.  
ZHAO Wuyun. Research on combined spiral plate tooth seed corn threshing device[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)

(上接第 248 页)

- [20] 张惠芳,张海宁. 动态车辆称重系统的算法研究[J]. 国外电子测量技术,2017,36(7):52-54.  
ZHANG Huifang, ZHANG Haining. Research on the algorithm of dynamic vehicle weighing system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(7): 52-54. (in Chinese)
- [21] 李莲,翟丽霞. 动态轨道衡称重系统误差分析及数据处理的研究[J]. 仪器仪表学报,2011,32(12):270-273.  
LI Lian, ZHAI Lixia. Research on error analysis and data processing of the dynamic track scale weighing system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 270-273. (in Chinese)
- [22] 肖俊,张伟,王浩. FIR 滤波在汽车动态轴组计量信号处理中的应用[J]. 测控技术,2017,36(9):135-137.  
XIAO Jun, ZHANG Wei, WANG Hao. Application of FIR filtering in vehicle dynamic axis group weighing signal processing[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(9): 135-137. (in Chinese)
- [23] 张振乾,彭程,孙意凡,等. 联合收获机喂入量监测系统信号分析与处理[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):73-78.  
ZHANG Zhenqian, PENG Cheng, SUN Yifan, et al. Signal analysis and processing of combine harvester feedrate monitoring system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 73-78. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2019s012&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2019s012&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.012. (in Chinese)
- [24] 付兴兰,张兆国,安晓飞,等. 光电漫反射式联合收割机谷物产量计量系统研发与性能试验[J]. 农业工程学报,2017,33(3):24-30.  
FU Xinglan, ZHANG Zhaoguo, AN Xiaofei, et al. Development and performance experiment on grain yield monitoring system of combine harvester based on photoelectric diffuse reflectance[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 24-30. (in Chinese)
- [25] 安晓飞,付兴兰,孟志军,等. 光电信号与收割机谷物产量数据转换模型的构建与验证[J]. 农业工程学报,2017,33(2):36-41.  
AN Xiaofei, FU Xinglan, MENG Zhinjun, et al. Grain yield data transformation model based on photoelectric principle and its validation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(2): 36-41. (in Chinese)