

# 农业机械智能化设计技术发展现状与展望

杜岳峰 傅生辉 毛恩荣 朱忠祥 李臻

(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:**我国地域差异大、农作物种类和种植模式多样,农业机械具有多功能、小批量、定制化及多样化的用户需求特征。当前国内农业机械制造企业产品研发普遍以跟踪、仿制为主,存在研发周期长、效率低、产品可靠性差等问题,企业和产品的竞争力低下,缺乏核心技术,已成为制约我国农业机械企业可持续发展的瓶颈。智能化设计技术以满足用户定制化、多样化需求为目标,以知识工程(KBE)、数据管理(DM)、人工智能(AI)、虚拟仿真等现代信息技术为手段,通过整合农业机械全生命周期过程中上下游相关企业已有资源,集成产品数据管理(PDM)和产品生命周期管理(PLM)的协同设计平台,实现农业机械设计过程的协同化、自动化和智能化,是提高我国农业机械设计水平的关键。本文针对农业机械特点,对农业机械智能化设计技术的定义、技术体系、关键技术及发展现状进行了深入剖析,重点总结了近年来计算机辅助设计(CAD)、模块化设计、知识工程、虚拟仿真、PDM/PLM协同设计等智能化设计关键技术的研究现状与发展趋势,并提出了农业机械智能化设计领域未来发展趋势,为农业机械设计技术发展提供参考。

**关键词:** 农业机械; 智能化设计; CAD/CAE; 模块化设计; 知识工程; 虚拟仿真

**中图分类号:** S23; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0001-17

## Development Situation and Prospects of Intelligent Design for Agricultural Machinery

DU Yuefeng FU Shenghui MAO Enrong ZHU Zhongxiang LI Zhen

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

**Abstract:** Due to the constraints of agricultural production conditions, such as regional differences, variety of crop types and planting patterns, agricultural machinery needs to meet the requirements of multi-functional, small batch, customization and diversification of customers' needs. At present, all of Chinese agricultural machine enterprises generally focus on tracking and copying foreign agricultural machinery product, which lead to problems such as long development cycle, low efficiency of design knowledge reuse, and poor product reliability. The low competitiveness of products and lack of core independent technologies have bottlenecked the sustainable development of agricultural machine enterprises in China. To meet the diversified needs of users as the goal, intelligent design technology with knowledge based engineering (KBE), data management (DM), artificial intelligence (AI), virtual simulation technology and other modern information technology as means, the synergistic, automatic and intelligent design of agricultural machinery can be realized by integrating existing resources of related enterprises in the whole life cycle of agricultural machinery and product data management/product lifecycle management (PDM/PLM) collaborative design platform. It's the key to improve the design level of agricultural machinery in China. Based on the characteristics of agricultural machinery, the definition, technical system, key technology and development status of intelligent design technology for agricultural machinery were introduced. The current situation and future development trends of the key technologies in intelligent design technology for agricultural machinery such as computer aided design (CAD), modular design, knowledge based engineering, virtual simulation, PDM/PLM collaborative design were deeply analyzed in recent years. And the reference suggestions for the research direction of agricultural machinery design were put forward.

**Key words:** agricultural machinery; intelligent design; CAD/CAE; modular design; knowledge based engineering; virtual simulation

收稿日期: 2019-06-27 修回日期: 2019-07-20

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,主要从事农业装备数字化设计及智能控制技术研究, E-mail: dyf@cau.edu.cn

通信作者: 毛恩荣(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备数字化设计及流体传动技术研究, E-mail: gxy15@cau.edu.cn

## 0 引言

在当前工程设计从传统的数据资源密集型向知识信息密集型转化的背景下,新产品设计逐渐向智能化、集成化、虚拟化、网络化、全球化方向发展。以信息处理为主的智能化设计,能够满足多样化、定制化市场需求,避免大量重复工作,缩短研发周期,增强产品竞争力,已广泛应用于航空航天<sup>[1]</sup>、汽车<sup>[2]</sup>、船舶<sup>[3]</sup>、机床<sup>[4]</sup>等先进制造领域,被誉为“面向21世纪的先进设计技术”。

相比之下,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。具体而言,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、配置需求多样、单产品市场需求规模小等特点,其智能化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/CAE/CAM(Computer aided design/Computer aided engineering/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。近年来,国际农机企业间竞争愈发激烈,为提升产品研发效率,抢占市场先机,如约翰迪尔(John Deere)、凯斯纽荷兰(CNH)、爱科(AGCO)和久保田(Kubota)等国外知名企业应用各种自动化及信息技术手段,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。虽然我国农业机械产量稳居世界第一,但国内企业正面临来自目标市场多层面竞争的严峻挑战。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、设计可靠性差等问题,导致企业核心技术自主知识产权水平普遍偏低,企业竞争力不强,单纯依靠国内农机补贴政策无法保证农机企业的可持续发展。

《中国制造2025》明确指出,农业机械制造业发展的重点任务就是加强行业技术标准体系、行业信息化数据服务系统、行业试验检测能力、产品数字化设计平台建设,推动数字化、智能化、清洁生产、虚拟制造、网络制造、并行制造、模块化、快速资源重组技术的应用。《农业机械发展行动方案(2016—2025)》也明确要求,加强重点关键技术攻关,推动数字化、智能化等先进技术与农业机械制造技术的深度融合,促进我国由农机制造大国向制造强国转变,显著提高农业机械有效供给能力。

本文在分析国内外智能化设计技术发展现状基础上,重点分析当前农业机械智能化设计技术的研究热点,阐述归纳用户需求描述和分析、产品模块化设计、计算机辅助设计建模技术、知识工程

(Knowledge based engineering, KBE)、虚拟仿真与虚拟试验验证、基于PDM/PLM的协同设计等相关技术在农业机械智能化设计方面的典型应用,并在此基础上,结合我国农业机械设计现状,展望农业机械智能化设计未来发展趋势,以期为我国农业机械设计制造提供参考。

## 1 智能化设计技术概述

### 1.1 智能化设计

智能化设计是结合KBE和计算机辅助设计理论的现代设计方法,旨在通过对设计人员在设计活动中的认知和行为特征的模拟,使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<sup>[5]</sup>。

### 1.2 智能化设计特点

以现代设计理论和方法为指导,以知识为依托、以人工智能技术为实现手段、以传统CAD技术为数值计算和图形处理工具,以设计自动化为目的,是当前智能化设计的显著特点。具有专业领域知识库、可利用知识求解相关设计问题、具备协调数据库和图形库等多种资源的能力,是当前智能化设计系统与传统CAD的根本区别。

随着大数据、智能制造、并行工程、虚拟现实技术(Virtual reality, VR)、多领域协同仿真技术(Multi-domain co-simulation, MDCS)等概念的兴起,智能化设计正向更高层次的自动化方向发展,以支持大规模的多学科、多领域知识集成。未来智能化设计技术将重点突出“以人为本”的设计思想,强调网络及分布式数据库环境下的多个独立智能体(Agent)协同合作,实现产品设计集成化、并行化、协同化和网络化。

产品设计过程实质是一个反复决策过程,包括用户需求评估、设计过程决策、技术问题决策和评价性决策,而在决策过程中,用户需求的模糊性、设计空间的约束性、设计过程的复杂性、设计结果的多样性及其相对准确性,使智能化设计系统存在不同于其他智能系统的特殊困难,具体如下:

(1)用户明确需求及隐性需求的正确描述及有效分析,即从市场需求、同业竞争力、企业现状等多方位综合评估分析,深入挖掘产品设计与用户需求之间的转换和映射关系,实现产品的定制化生产。

(2)设计任务的合理分解及其子任务之间相互关系的正确描述,即如何将产品的决策空间恰当地分为决策子空间,使有关决策在相应的子系统内有效进行,并实现决策结果的自动整合,以适应任务的

多层次性和多目标性。

(3)如何充分表达各种异构知识及构建拥有良好组织结构知识库,对不同类型的知识和数据进行合理的表示、分类、组织和管理。

(4)高效的推理机制及产品再设计的集成,即如何针对设计问题特点和知识表现形式,采用相应的推理机制提高知识的重用率和利用率,并可根

据再设计知识确定回溯点和相应参数的修改,实

### 1.3 智能化设计技术体系

现产品再设计。分析农业机械产品及设计特点,综合运用知识工程原理及数字化建模、虚拟仿真和虚拟试验验证技术;基于PDM/PLM、集成CAX等通用软件,构建基于知识的农业机械智能化设计通用基础平台;通过指导产品设计,形成智能化设计标准规范和框架体系,如图1所示。

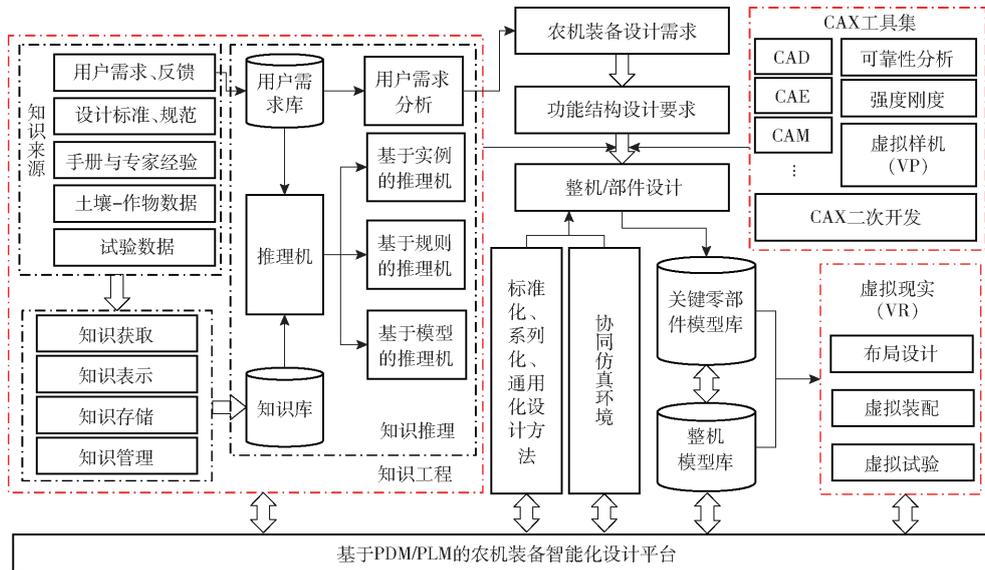


图1 农业机械智能化设计技术体系

Fig. 1 Intelligent design technology system of agricultural machinery equipment

## 2 农业机械智能化设计关键技术

将农业机械智能化设计关键技术重点概括为用户需求分析、模块化设计、计算机辅助设计建模技术、知识工程、虚拟仿真和虚拟试验验证、基于PDM/PLM的协同设计等6方面,并对其技术发展现状进行深入分析。

### 2.1 用户需求描述与分析

用户需求(Customer requirements, CRs)通常具有明显的特性,如多样性、层次性、动态性、模糊性、优先性等<sup>[6]</sup>。在当前竞争激烈的农机市场,农机企业越来越注重设计出用户满意度高、价格低的产品,如何对用户需求进行有效分析,为优化产品设计提供决策支持,是农业机械制造业当前迫切需要解决的问题。

一般通过分析、数据挖掘和预测等方式满足用户需求,实现农机产品的定制化设计。Kano模型<sup>[7]</sup>和产品质量功能配置模型(Quality function deployment, QFD)<sup>[8]</sup>是用户需求描述和分析的典型代表。其中,Kano模型是一种对CRs分类和优先排序的有用工具,其特点是将用户需求分为五大需求,如图2所示,通过标准化的问卷调查解决产品属性

定位问题,以提高用户满意度。QFD是一种用户需求驱动的产品设计开发方法,代表了从传统设计方法向现代设计方式的转变,其核心技术产品质量屋(House of quality, HOQ)采用矩阵图解方法建立用户需求和

技术需求之间的关系,如图3所示。

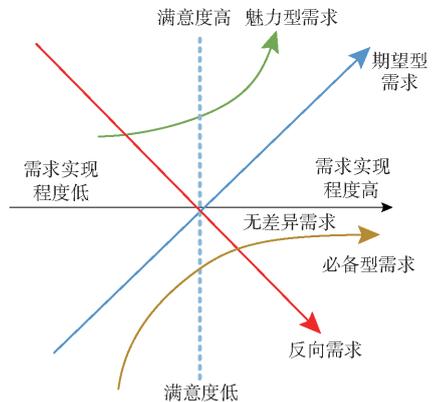


图2 Kano模型的五大需求

Fig. 2 Five requirements of Kano model

对于CRs的描述和分析,JIN等<sup>[9]</sup>针对竞争性产品的在线评论,提出了考虑信息的代表性、可比性和多样性的优化问题,并利用3种贪婪算法进行最优求解,实现客户关注产品的细粒度级别分析。WANG等<sup>[10]</sup>提出了基于朴素贝叶斯方法来描述客

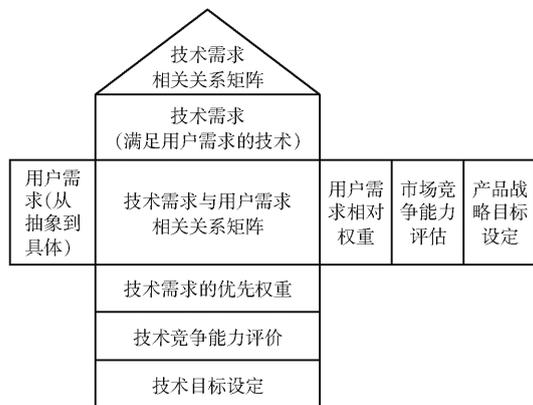


图3 QFD产品质量屋基本结构图

Fig. 3 Structure diagram of house of quality

户的技术功能需求和主观偏好,并根据具体属性和设计参数进行映射。张宇博<sup>[11]</sup>提出一种Kano模型改进下基于交互式遗传算法(Interactive genetic algorithm, IGA)的产品配置决策方法,从产品定制属性的有效识别和合理设置角度出发,进一步降低产品定制过程中的复杂性,优化设计体验。KAHRAMAN等<sup>[8]</sup>提出一种集成模糊QFD和模糊ANP的产品设计模型,以确定产品设计中需考虑的技术要求。利用模糊理论求解用户需求重要权重已成为解决用户需求不确定性的的重要手段。

为解决传统Kano模型和QFD模型的固有不足,JI等<sup>[12]</sup>和HE等<sup>[13]</sup>将Kano模型的定性和定量结果用非线性规划模型集成到QFD中,从而在企业满意度和客户满意度的最佳平衡下,实现最优设计方案。PAKIZEHKAR等<sup>[14]</sup>通过整合Kano模型、AHP和QFD实现了客户需求的识别和优化。此外,引入公理化设计(Axiomatic design, AD)理论等现代设计方法实现用户需求与设计参数之间的映射转化也是当前的研究热点之一,如ASHTIANY等<sup>[15]</sup>利用AD理论,结合QFD和生态设计理念,实现了Beech Baron 58轻型双引擎飞机的再设计。AD理论通常由客户域、功能域、物理域和工艺域等4个域组成。利用两条设计公理和若干定理及推论实现域之间的映射,完成从抽象到具体的设计过程。杨汝静<sup>[6]</sup>集成AD和QFD实现了机床方案设计需求信息的功能转化,为数控机床的实例检索提供了依据。DU等<sup>[16]</sup>提出了基于AD理论和QFD模型的面向重用的旧产品再设计方法。

此外,国内外学者也对用户需求建模和集成知识的需求描述进行了探索。SIM等<sup>[17]</sup>提出了基于本体角色驱动的用户需求模型;SINGHAPUTTANGKUL等<sup>[18]</sup>开发了一种基于模糊知识的决策支持系统质量功能自动部署(KBDSS-QFD)工具,以解决高层住宅设计早期的评估决策问

题。ZHAI等<sup>[19]</sup>提出了一种基于粗集理论的改进模糊QFD方法的新扩展,建立基于QFD的产品设计专家系统,提高了设计目标的可辨性。

综上,用户需求研究主要集中在基于集合理论、本体理论等方法的需求描述和基于模糊理论的需求转化映射等方面。当前基于用户需求的设计面临以下问题:

#### (1)用户需求的一致性描述

为了快速提高用户需求的标准化程度,保证CRs设计过程的准确性和一致性,需要从时间维度、过程维度、空间维度等方面建立多层次的用户需求模型。

#### (2)预测和挖掘用户需求

云计算和人工智能的兴起,使得通过互联网和物联网收集用户数据成为可能,从海量数据中挖掘用户行为模式和使用习惯,预测CRs,确定隐藏需求已成为分析CRs的重要手段。

#### (3)用户需求的转化和映射

为保证CRs到工程技术特征转换的一致性、准确性和时效性,需要建立用户域到功能域的转换模型,包括动态的、模糊的以及隐性的CRs。

## 2.2 农业机械模块化设计

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>[20]</sup>。研究发现,对于农业机械这种具有特殊要求的复杂产品,应用现有技术,在共性单元归并形成模块方面,尚不能得到有效解决,产生的模块适应范围较小,且数量偏多,不能充分发挥模块化设计的优势<sup>[21]</sup>。因此,针对农业机械模块化设计,国内外相关研究主要集中在模块划分(识别)和模块优化与评价方面。

### 2.2.1 模块划分方法

目前,常用的模块划分方法可大致分为启发式、聚类式和其他方法。其中,启发式方法根据不同的工程应用背景构建数学规划模型,并采用启发式算法获取最优模块划分方案,其求解过程如图4所示。一般启发式方法主要应用启发式遗传算法、基于约束的遗传算法、组合编码遗传算法、混合多目标蛙跳算法等<sup>[22-24]</sup>。罗石林<sup>[25]</sup>通过计算零部件间的关联度建立了山地农机设计结构矩阵(Design structure matrix, DSM),分别运用遗传算法和遗传模拟退火算法,实现了山地农机产品的模块化处理。

聚类式方法利用设计矩阵、图论、复杂网络等方法对产品元素的拓扑关系进行形式化表达,并利用聚类算法实现零部件成组/聚类的模块划分,其一般求解过程如图5所示。常见的方法有两种:基于

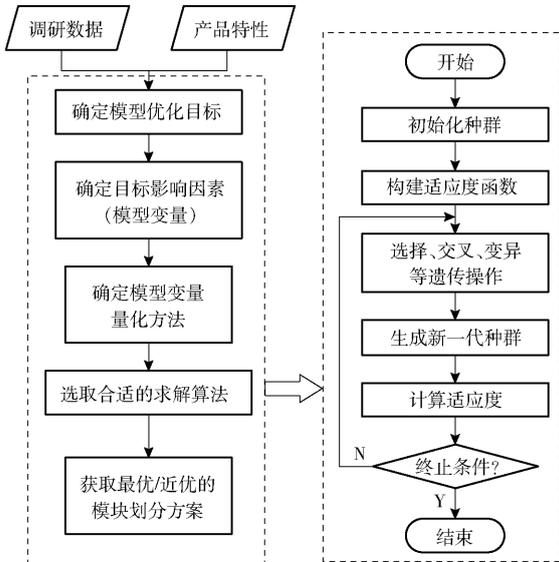


图 4 启发式方法的一般框架(以遗传算法为例)

Fig. 4 General framework of heuristic module partition approach (GA)

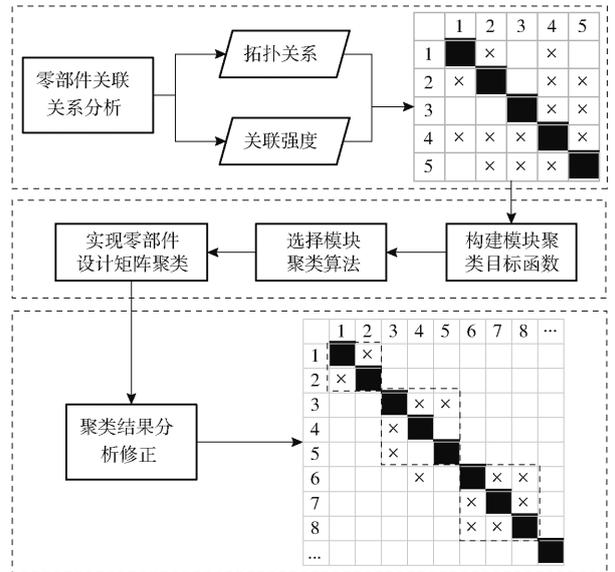


图 5 聚类式方法的一般框架(以 DSM 为例)

Fig. 5 General framework of clustering module partition approach (DSM)

DSM 聚类的模块划分方法和基于图论的模块划分方法<sup>[26-28]</sup>。ALGEDDAWY<sup>[29]</sup>采用网格理论和 DSM 矩阵编制模块化代码。KUSIAK 等<sup>[30]</sup>以图论为工具表达零部件间的各种物理连接关系,采用定性的启发式规则实现了模块化组件的识别,并尝试采用模糊神经网络算法探索产品性能和成本之间的平衡点。

研究发现,启发式方法极易陷入局部最优,而基于 DSM 和图论的聚类式方法,其矩阵变化过程和聚类过程极其复杂,不适合复杂产品的模块划分,因此,部分学者尝试通过多种方法集成实现复杂产品

的模块化设计。其中, SCHUH 等<sup>[31]</sup>提出一种面向高度集成机电产品的模块化产品平台 (Modular product platforms, MPP) 设计方法,该方法应用扩展的 AD 理论将复杂系统分解为机电一体化功能模块 (Mechatronic function modules, MFM), 确保开发过程中的功能导向,并将 MFM 用于产品平台设计。

依据模块划分标准可将模块划分方法分为基于功能的方法、基于功能和结构的方法和基于产品生命周期的方法。为此,本文对当前常见的模块划分方法进行总结归纳,如表 1 所示。

表 1 基于模块划分标准的模块划分方法分类

Tab.1 Classification of module partition methods based on module division standard

方法	算法	特点	模块划分标准	文献序号
启发式遗传算法	启发式遗传算法	基于零部件相关性矩阵,以最大化零部件之间的功能和结构相关度为目标进行求解	功能 & 结构	[22]
启发式模块划分方法	基于约束的遗传算法	Leader-Fellow 双层联合优化模型,目的是寻求产品模块化程度和物料重用率的均衡点	生命周期-使用/回收	[23]
	多目标蛙跳算法	通过综合考虑约束条件,建立面向维修的模块化设计模型,进行优化求解	生命周期-使用/回收	[24]
聚类式模块划分方法	K 均值聚类	基于功能-行为-原理模型的 DSM 自动构建法	生命周期-研发	[26]
	模糊聚类算法	基于广义有向图和改进质量屋的准则形式化和量化模型	功能	[27]
	基于图论的聚类算法	模糊连通图和模糊数表达的产品结构拓扑关系及关联强度	功能 & 结构	[28]
其他模块划分方法	基于 AD 的模块划分	使用扩展 AD 理论建立机电一体化功能模块	生命周期-研发	[31]
	三阶段启发式算法	基于功能元和时间序列功能链的产品功能统一描述	功能	[32]
	基于和谐搜索算法	根据产品功能、性能、物理等因素关联的综合 DSM 建立基于 AD 理论的优化函数	功能 & 结构	[33]

2.2.2 模块化方案优化与评价

产品模块化划分方案并不唯一,不同模块化方案对应不同的模块度。ULRICH<sup>[34]</sup>对模块度的概念和内涵进行了初步探讨。SOSA 等<sup>[35]</sup>提出了基于图

论和社会网络的 3 种零件模块度的度量方法。FUJITA<sup>[36]</sup>从属性、模块、系统 3 层次研究模块化产品族优化问题,提出产品族优化要考虑并平衡模块和生产过程中的各种因素,建立系统成本结构,以系

统运行总成本为优化目标。罗石林<sup>[25]</sup>提出了基于编码加权计算的模块相似度评价方法,并应用于山地农机扶手架设计。

综上,农业机械作为一种复杂、异质性产品系统,其模块化设计支持理论及应用技术还相对匮乏,模块化设计在农业机械领域中的应用仍存在一定的不足:

(1)农业机械零部件与功能之间通常具有显著异质性、零部件数量巨大、零部件间的耦合强度高特点,因此,在进行模块划分时,要对其异质的功能和零部件进行同质化约简,剔除冗余功能和零部件。另外,由于农业机械零部件的多维复杂性,需充分考虑产品生命周期各环节的影响,实现模块划分方案的多属性评价。

(2)考虑客户需求及设计知识支撑的系统模块参数规划问题。模块化设计要形成完善的应用体系,除实现模块划分之外,还应对模块的主参数进行设计,包括模块接口标准、主参数的取值范围、取值个数等信息,合理的模块规划对满足用户需求和提高变型设计具有重要意义。

### 2.3 计算机辅助设计建模

当前 CAD 建模主流技术是以 PTC Creo 为代表的参数化建模技术和以 SDRC I - DEAS Master Series 为代表的变量化建模技术,广泛应用于农机产品的数字化设计<sup>[37]</sup>。RIESENFIELD 等<sup>[38]</sup>认为,现有的 CAD 系统与支撑整个工程设计的最初设想背道而驰。不必要的人为干预、异构 CAD 系统信息共享、CAx 的集成是阻碍高效设计的关键因素。针对现有 CAD 系统建模技术的不足,国内外学者开展了广泛深入的研究。

#### (1) 基于统一建模思想的 CAD 建模技术

常见的产品模型数据交换标准如 DXF、IGES、ESP、PDES、VDAFS 以及早期的 STEP 等只能传递显式边界表示实体模型,而无法支持几何构造历史、参数、特征、约束等设计意图的完整传递。为此,MUN 等<sup>[39]</sup>提出了一套基于历史的参数化建模方法的标准命令,通过宏命令交换 CAD 模型。LI 等<sup>[40]</sup>提出了一种实现异构 CAD 系统互操作性的参数化数据交换方法,并将该方法应用于 TransCAD 和 AVEVA Marine 的数据交换。虽然基于中性文件和标准的方法可以实现产品模型信息和建模过程的有效交互,但这些方法只考虑产品模型中的几何信息。为了实现非几何描述建模,FENVES<sup>[41]</sup>开发了一种描述产品信息的核心产品模型(Core product model, CPM)。CPM 的关键对象是制成品,制成品是一个独立实体,通过功能、结构、行为 3 方面描述其属性。新一

代 CPM 在概念、中间、应用模型 3 个不同层级上描述广泛的产品生命周期信息,而且 CPM 的扩展已包括开放的装配模型、产品语义表达语言、设计分析综合、产品族进化模型、混合材料模型等,涵盖产品建模的各个方面<sup>[42]</sup>。

此外,基于统一建模语言的 CAD 建模技术或将从根本上改变异构 CAD 系统的数据交换难题。常见的统一建模语言包括:面向对象建模语言(Object-oriented modeling language, OOML)和基于本体的建模语言(Ontology-based modeling language, OBML)。其中,OOML 以 STEP 标准的 EXPRESS 及其图形表示格式 EXPRESS - G、统一建模语言(Unified modeling language, UML)为主。SEKARAN<sup>[43]</sup>基于 UML 设计了一种基于多智能 Agent 的复杂系统开发框架。XUE<sup>[44]</sup>在基于特征的产品建模语言(Feature-based product modeling language, FBPM)基础上,提出了一种分布式的基于特征的产品建模语言(Distributed feature-based product modeling language, DFBPM),用于对不同位置的类特征和实例特征进行建模,并将这些特征关联到一个集成环境中。而对于基于本体的建模语言,应用最广泛的是本体 Web 语言(Ontology web language, OWL)。BOCK 等<sup>[45]</sup>将本体与模型相结合的技术用于协同设计,开发了本体产品建模语言(Ontology product modeling language, OPML)。在该方法中,产品模型被视为基于模型体系结构中整体系统的本体类型。BARBAU 等<sup>[46]</sup>提出了 OntoSTEP 模型,用于 STEP 数据与 OWL 数据的转换。PANETTO 等<sup>[47]</sup>开发了一个公共核心模型——产品驱动的产品数据管理本体(Product-driven ontology for product data management, ONTO - PDM)。该模型通过现有标准的概念化提供以产品为中心的信息模型,然后将其形式化为产品本体。

#### (2) 基于知识的 CAD 建模

智能化设计的实现依赖于设计知识的高效利用,尤其在 CAD 建模方面,设计知识与建模过程的融合,有利于提高模型的灵活性、适应性和可重用性。CAD 模型的设计知识包括标准规范、尺寸约束、材料特性、装配语义等显性知识和设计意图等隐性知识。IYER 等<sup>[48]</sup>对二维 CAD 中的设计意图进行了定义,指出“CAD 设计意图是对设计变量(设计目标、约束、备选方案、演变、指南、加工指令和标准)的洞察,这些变量隐含在几何结构、材料特性、维度实体和文本实体之间的结构、语义中”。XUE 等<sup>[49]</sup>开发了一种基于 NIST CPM 的面向并行工程的设计数据库表示模型(CE - DDRM),将设计知识



表2 常用知识表示方法比较

Tab.2 Comparison of common knowledge representation methods

表示方法	优点	缺点
产生式表示法	表达灵活、推理方便、易于排除故障、允许直接演绎	工作效率较低,解释能力有限
谓词逻辑表示法	简单、灵活、推理严格、通用	难以表示过程性和启发式知识,易产生组合爆炸
框架表示法	结构化表示,有特性继承性	适应性较差,多重继承易产生歧义
语义网络表示法	具有联想性、自索引性、自然性	表达范围有限,推理规则则不明了
人工神经网络表示法	具有较强的容错性和自适应学习能力	处理过程封闭,需大量数据
基于粗糙集表示法	可描述不确定性知识,支持并行运算	难以确定模糊边界,应用范围较窄
面向对象表示法	知识对象封装,利用知识库维护和修正	表示方式抽象,位移对外接口是消息模式
本体表示法	简洁、可扩充,有利于知识的共享与重用	推理能力较弱

知识表达和模糊推理方面的应用前景。WU等<sup>[63]</sup>提出了一种基于语义超图的知识表示框架,以支持产品开发中的知识共享。LIU等<sup>[64]</sup>提出了一种通用模糊知识的本体表示方法,对语义网中模糊知识表示具有重要意义。

综上所述,显性知识已经有了很好的表达方式,而隐性知识结构化的映射方式并不唯一,基于几何属性、组合和继承方式的启发式方法确定工程本体的映射仍是当前研究的重点。基于本体理论,融合多种知识表示方法实现农业机械设计知识的有效表达是未来发展趋势。

#### 2.4.2 知识获取

在KBE中,知识库的知识量已成为制约其发展的瓶颈,因此,知识自动获取技术受到国内外学者的重点关注。分析已有文献发现,目前的知识自动获取研究具有以下两个显著特点:

(1) 基于数据库的知识发现(Knowledge discovered in database, KDD)技术。KDD技术将数据中隐含的模型或模式以易于被人理解的形式表现出来。根据数据挖掘方法,KDD可分为:机器学习方法、统计方法、神经网络方法、遗传算法、数据库方法、近似推理和不确定性推理方法、粗糙集理论、基于证据理论和元模式的方法、集成方法等<sup>[65]</sup>。如,麻芳兰<sup>[66]</sup>采用模糊理论、神经网络、粗集理论集成方法,获取甘蔗收获机仿真分析和试验数据中的隐性知识。李长林<sup>[67]</sup>综合运用粗糙集理论和回归分

析算法,提取了收割机总体设计参数知识。

(2) 基于本体建模的知识获取。虽然基于智能算法的KDD技术发展迅速,但知识的进一步集成却受到了知识表示方法的制约。WIELINGA<sup>[68]</sup>认为,基于上下文语境的语义Web是知识获取技术最有前途的研究方向,但也是获取形式化知识最困难的来源,因此,本体论与知识获取技术的结合成为当下知识自动获取的研究热点。CHEN等<sup>[69]</sup>开发了一种基于本体建模的知识获取方法和需求驱动的知识获取系统。CHERGUI等<sup>[70]</sup>提出一种基于本体的隐性知识获取方法,通过“过滤和显化—结构化—模型重建—本体填充”四步实现隐性知识的获取,如图7所示。

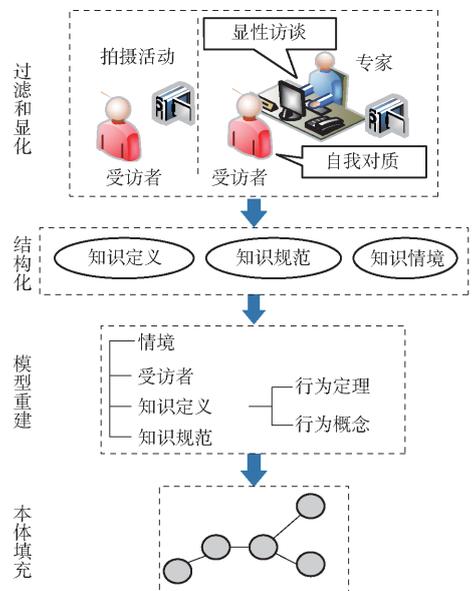


图7 隐性知识获取模型

Fig.7 Tacit knowledge acquisition model

#### 2.4.3 知识推理

知识推理是根据一定的设计原则,从已知判断得出新判断的思维过程。从推理方法上,可将知识推理分为:基于规则的推理(Rule based reasoning, RBR)、基于实例的推理(Case based reasoning, CBR)和基于模型的推理(Model based reasoning, MBR),其优缺点比较如表3所示。

对于农业机械设计而言,知识的复杂性决定了单一推理模式无法满足农业机械设计的需求,因此,集成多种推理方法的混合推理技术是实现知识重用、支撑农业机械智能化设计的主要手段。

李长林<sup>[67]</sup>系统研究了基于知识的农机专业底盘快速设计系统,提出了基于CBR和RBR的集成推理技术。宋正河等<sup>[71]</sup>在综合分析履带式收获机械传动系统设计流程和设计知识特点的基础上,建立了集成CBR和RBR的混合推理机制,并开发了

表3 常用推理方式的比较

Tab.3 Comparison of common reasoning methods

方法	优点	缺点
RBR	具有很强的推理能力和较高的推理效率;知识表示形式简单,易于实现	知识提取、维护困难;运行效率随知识规模增大而迅速降低;非结构化的知识组织形式,求解复杂问题困难
CBR	符合人类认知过程;知识库创建简单,可实现自动化和系统学习;推理效率较高;提供良好的解释和决策机制;适用于弱知识领域	求解全新问题时,缺乏相似实例指导,效率较低;随着实例库的增大,实践和空间复杂性将会提高;细节技术多样化,无完整、成熟的理论指导
MBR	技术相对成熟;求解中小规模新问题时,推理效率相对较高;具有良好通用性	系统维护困难;适用领域受能否建立模型的限制,且知识获取困难;问题求解规模有限

相应推理系统。惠为东<sup>[72]</sup>将基于 CBR-RBR 的混合推理技术应用到拖拉机制动器智能化设计系统,实现了制动器分层实例检索、匹配及基于规则的实例修改。LI 等<sup>[73]</sup>提出了一种基于 MBR 的产品模块化检索方法,该方法在相对信息不完整的情况下,利用 MBR 间接搜索产品最相似模块作为最佳解决方案,并通过 AD 理论和 TRIZ 理论再设计完成产品的模块化设计。COSTA 等<sup>[74]</sup>提出了产品范围模型(Product range model, PRM)概念,该模型将基于规则的系统 and 基于案例的推理结合起来,为产品设计提供决策支持。

虽然在推理方式上,各种推理机制的集成弥补了单一推理模式的不足,有利于问题求解,但推理机制的检索策略、决策模型、修改方式等算法的选择和应用是影响推理结果的关键因素,因此,优化推理机制的核心算法,提高推理准确性和推理效率仍是当前农业机械智能化设计系统实现知识推理、重用研究的关键。

## 2.5 虚拟仿真与虚拟试验验证

### 2.5.1 虚拟仿真在农业机械中的应用

农业机械融合生物和农艺技术,是集成先进制造与智能控制、新一代信息通信、新材料等高新技术的先进装备。农业机械仿真是一个涉及农学、机械、电子、液压、控制等多领域、多学科交叉耦合的协同分析过程。现有的仿真工具虽然可以解决大部分单领域仿真问题,但难以满足复杂条件下农业机械多系统、多物理场耦合的仿真需求,因此,基于土壤-植物-机器体系的复杂农业机械多领域仿真分析已成为当前研究的重点和热点。

### (1) 面向对象的多领域统一建模

多领域协同仿真实现了多物理场仿真子系统的集成,各子系统间有不同程度的约束和交互,难以实现完全解耦。相比基于接口技术和高层体系结构(High level architecture, HLA)的建模方法,基于统一建模语言的方法实现了各领域仿真模型的无缝集成和数据交换,具有可重用性和扩展性优势,逐渐成为多领域建模仿真的主流<sup>[75]</sup>。

面向对象的多领域统一建模源自 Elmqvist 论文提出的 Dyloma 建模语言,受其影响,先后涌现出一大批类似的统一建模语言,如 Omola、ObjectMath、ASCEND、Allan、Smile 等。面对这种混乱局面,欧洲仿真协会 EUROSIM 于 1996 年推出了多领域系统统一建模语言——Modelica,因其面向对象和基于方程的非因果关系建模特点,模型的重用性得到了较大提升,广泛应用于航空航天、汽车、电机控制、电液控制等领域<sup>[76]</sup>。

在农业机械仿真领域,基于 Modelica 语言的仿真应用较少。邹湘军等<sup>[77]</sup>提出了基于 Modelica 的采摘机械手运动控制建模方法,构建了机械手的 DriveLib 模型库。袁文华等<sup>[78]</sup>利用基于 Modelica 语言的 MWorks 建模仿真软件,实现了高地隙喷雾机喷杆运动的建模和仿真。李明等<sup>[79]</sup>应用 Modelica 对电液伺服阀进行建模仿真,克服了传统方法不能从底层元件反映伺服阀动态特性的缺点,模型灵活性和可重用性有了较大提高。

### (2) 基于土壤-植物-机器体系建模的多软件协同仿真

从土壤-植物-机器系统角度分析,农机作业是一个复杂的机械物理过程,土壤条件、作物的表现形态、几何尺寸和物理特性等在与农机工作部件的相互作用过程中发生了一系列变化,基于传统经典力学基础的分析方法,都不能完全揭示这一复杂过程的变化特征,因此,开展针对农机工作部件与作物相互作用模型的仿真研究,对揭示农机工作部件的作用机理,实现农业机械的优化设计具有重要的现实意义。

王志明<sup>[80]</sup>建立了稻谷与脱粒、清选装置的相互作用模型,基于 Matlab 和 CFD 软件实现了脱粒过程的联合仿真。宗望远<sup>[81]</sup>在油菜生物力学特性和脱粒特性的研究基础上,建立了油菜本构模型,并利用 ADAMS、EDEM 和 Matlab 等多软件协同仿真技术揭示了油菜脱粒过程中的运动机理,为油菜收获机的匹配设计和性能试验奠定了基础。于建群等<sup>[82]</sup>实现了 CAD 软件与离散元分析软件的集成,构建了与散体物料相互作用的农业机械工作部件的

通用数字化设计方法,并指出了离散元法在农机具优化设计中的潜在优势与应用前景<sup>[83]</sup>。

### (3) 基于硬件在环的虚拟仿真

硬件在环仿真(Hardware in loop simulation, HILS)技术在快速原型、电子控制单元和复杂控制系统的开发过程中,以其可重复性高、灵活性强、成本低等特点,广泛应用于汽车控制、自动控制系统开发与验证等领域<sup>[84]</sup>,尤其是基于dSPACE的硬件在环仿真技术也逐步应用到了液压系统和农业机械的自动控制系统研究中,一定程度上缓解了农作物生长周期、田间地形差异等因素对田间试验造成的影响<sup>[85]</sup>。罗陆锋等<sup>[86]</sup>开发了基于HILS的葡萄采摘机器人虚拟试验系统,克服了季节和场地的影响,实现了对视觉定位、路径规划、夹剪行为的仿真实验验证。张硕<sup>[85]</sup>利用HILS模拟多种田间工况,实现了对重型拖拉机犁耕作业滑转率控制算法及控制器性能的评价测试。陈随英<sup>[87]</sup>在高地隙喷雾机的研究中,利用HILS技术搭建了全工况滑转率控制硬件在环仿真系统,验证了喷雾机滑转率控制器在各种工况下的控制效果,为后续实车研发提供了有力支撑。

### 2.5.2 虚拟现实技术

VR技术带来了农业机械设计和开发模式的巨大变革。对于结构复杂、设计困难的大型农业机械,设计人员采用VR技术,对产品的外观、结构、性能进行建模,通过虚拟现实系统,借助逼真的虚拟作业场景,实现产品的设计、性能试验和特性评估,同时可实现人与机械的实时交互。

目前,VR技术在农业机械领域的应用前景已经引起了人们的高度重视,并取得了一些成果,但受硬件水平和建模算法的制约,一般的VR技术在农业机械设计中并不强调交互性,用户不能通过虚拟现实系统和虚拟样机之间实现实时交互。此外,VR在农业机械领域的应用并不广泛,主要集中在虚拟装配(Virtual assembly, VA)和虚拟试验(Virtual experiment, VE)两方面。

#### (1) 虚拟装配技术

与传统装配技术相比,采用VA技术,在沉浸式或半沉浸式的环境中进行产品装配,可从整个产品的装配角度考虑其可装配性,同时进行装配规划,获得可行的装配工艺信息,指导生产。特别是复杂产品的装配问题,VA技术具有其他技术无可比拟的优势。自VA技术提出后,国内外都对虚拟装配中的人机交互、装配建模、装配序列规划、装配路径优化、碰撞检测、约束导航、装配工具以及可装配性等进行了深入研究。但是,具有沉浸感、交互性和想象性的虚拟现实装配技术在国内农业机械设计制造领

域的应用尚不成熟。朱忠祥等<sup>[88]</sup>研究了基于虚拟现实的联合收获机底盘部件虚拟装配关键技术。

#### (2) 虚拟试验验证

应用VR技术进行农业机械的虚拟试验验证不仅能够设计阶段评估产品性能,同时也能为操作者熟悉产品使用提供便利。而VR技术在农业机械虚拟试验验证方面尚处于起步阶段<sup>[89]</sup>。KARKEE等<sup>[90]</sup>基于VR Juggler软件和Matlab/Simulink,开发了一种非道路车辆虚拟样机系统,实现了基于VR技术的驾驶功能模拟。LUECKE等<sup>[91]</sup>同样借助VR Juggler软件,搭建了收获机驾驶员培训系统,模拟John Deere Series 70 STS收获机的操作,该系统还具有对驾驶、作业控制系统的测试评估功能。JONES等<sup>[92]</sup>建立了模拟真实田间场景的作物和杂草3D虚拟模型,并用于测试作物和杂草识别的图像处理算法。

在国内,中国农业大学率先将VR技术应用于农业机械的虚拟试验,臧宇等<sup>[93]</sup>开发了拖拉机虚拟试验系统,运用MultiGen Creator和Vega Prime(VP)搭建虚拟试验场景仿真环境,实现了拖拉机加速、转向和制动试验。王菲<sup>[94]</sup>在此基础上开发了自走式农业机械虚拟试验系统,该系统内嵌车辆动力学模块,能够模拟多种动力学性能试验和田间作业试验。苑严伟<sup>[95]</sup>系统研究了典型农业机械虚拟试验方法,设计了田间工况模拟平台,实现了实体样机与虚拟农田的交互控制。杨方飞等<sup>[96]</sup>运用ADAMS分析联合收割机作业过程中的受力状态并将仿真结果导入Vega Prime中作为运动路径,以此实现对联合收割机行走作业的3D视景仿真。翟志强<sup>[89]</sup>提出了一种基于虚拟现实的拖拉机双目视觉导航试验方法。

### 2.6 基于PDM/PLM的协同设计

CAD/CAE/CAM/CAPP等计算机辅助技术在农业机械设计中的应用,一定程度上缩短了研发周期、提高了设计效率,但也带来了信息的爆炸性增长,开发基于PDM/PLM的农业机械产品全生命周期管理系统,实现各种CAX和DFX的集成应用、实时协同、资源共享和数据集成,对提升我国农业机械智能化设计水平具有重要意义。

在国外,PDM/PLM经过几十年的长远发展,相关研究和系统平台已日趋完善,较为著名的PDM/PLM平台如PTC Windchill、西门子 TeamCenter、达索 ENOVIA、Autodesk Vault等。约翰迪尔、凯斯、爱科等国际农机巨头更是将PDM/PLM技术作为支持过程重组、实施并行工程、CIMS工程和ISO质量认证等系统工程的使能技术,以保持企业竞争力。而国内的PDM/PLM产品引入及自主开发起步较晚,

部分农机企业也多以基于 PDM 的产品管理系统为主,如中国一拖的 TiPDM、山东时风集团的 Windchill IntePDM、山东五征集团的 WIT - PDM、中国农业机械化科学研究所的 CAXA - PDM、福田雷沃的 TeamCenter 等。PDM/PLM 在国内农业机械领域的应用整体较少,效果也不够理想。

就目前农业机械领域 PDM/PLM 系统的应用而言,仍有许多不足之处:农机企业在产品设计以及上下游企业协同中存在多种专业设计软件并产生了大量异构多源数据,尤其农业机械本身多样化、个性化的用户需求、频繁的配置设计与变型设计导致了协同研发中存在系统集成困难、数据一致性差、共享水平低、信息孤岛突出等问题。随着人工智能、分布式计算、Web Services 等技术的推广应用,PDM/PLM 的发展也越来越为人们所关注。从当前趋势来看,其研究主要集中在以下几方面:

### (1) 可互操作体系结构的建立

PDM/PLM 系统的可互操作体系支持数字化产品信息和过程与用户系统的无缝集成,如桌面生产率应用、异构 CAD 系统和办公支持系统,包括 ERP、SCM、CRM 及其它 PDM、数据库等。目前,主要有 3 种方法支持 CAX 和 CAX 与其他数据管理系统之间的互操作性和数据交换<sup>[97]</sup>。

①本体和语义 Web 技术。在智能化设计中,本体论已作为设计与其他工程活动的信息交换标准得到了广泛应用,利用本体论可在概念层次上实现异构软件间的映射。PANETTO 等<sup>[47]</sup>提出了 ONTO - PLM 框架,作为共同的核心模型,实现了企业应用程序(如 ERP、CAD 和 MES 等)之间的数据交换。此外,模型驱动和基于知识的体系结构也支持 PDM/PLM 系统和其他应用程序之间的信息交互<sup>[98-99]</sup>,如, MUN 等<sup>[99]</sup>将日立公司的通用产品模型扩展为中性数据仓库,作为核电站 ERP 系统与产品数据库之间的接口。

②标准规范。通过标准的中性机制保证异构模型之间的信息定义与数据交换,例如过程标准(ISO15288, CMII)和 STEP。在该方法中,XML(Extensible markup language)是 Web 中支持异构数据服务器之间的数据映射和通信的最常用标准语言。产品生命周期支持(Product lifecycle support, PLCS)是 STEP 标准 AP239 产品全生命周期保障应用协议,包括保障工程、构型管理、资源管理、维修及反馈四大领域,2005 年由国际标准组织 ISO 颁布。基于此协议,文献[100]提出了一种 ERP 和 PLM 数据映射的交互框架,以支持设计和生产之间的信息交换和共享。

③基于 API 和 Web Services 的动态接口技术。在该方法中,通过 API 标准和 Web Services 实现软件集成,以支持项目团队成员之间异构信息的分发。基于中间件技术的 OMG PLM Enablers 和 PLM Services,都是基于 Web Service 技术的产品数据交换标准。

PLM Services 1.0 规范由平台无关模型 PIM 和平台指定模型 PSM 组成,如图 8 所示。其中 PSM 模型由基于 SOAP 架构的 WSDL(Web services description language)规范和 XML 标准共同开发。文献[101]提出了基于 PLM Services 规范的异构 PDM 系统集成架构,通过在 PDM 系统和 PLM Services 服务器之间实现数据模式的适配,把 PDM 系统的数据转换成 PLM Services 标准格式,应用于另一个 PDM 系统。此外,GUNPINAR 等<sup>[102]</sup>以 PLM Services 框架为基础,利用 Web 方式集成异构 PDM,实现了 SmartPDM 和 DynaPDM 间的产品数据同步交换。

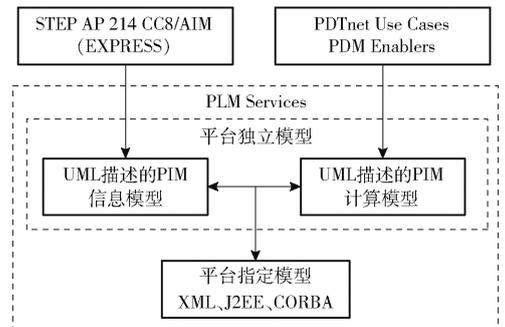


图 8 OMG PLM Services 1.0 规范架构

Fig. 8 OMG PLM Services 1.0 architecture

### (2) 以 Web Services 为支撑的工作流管理

Web Services 是一种基于 Internet 的支持分布式计算和企业间协作的新标准,广泛应用于工作流管理。2002 年,工作流管理联盟颁布了基于 Web Services 的流程定义语言 1.0 版最终文本(文档编号:WFMC - TC - 1025),与此前发布的工作流应用软件接口规范构成了工作流定义及系统设计标准。文献[103]开发了一种基于服务契约的方法,以支持供应商和客户之间跨工作流交互操作,并开发了以交换业务流程作为商业服务的体系架构。为了促进跨组织工作流的管理和互操作性,JIANG 等<sup>[104]</sup>开发了基于 Petri 网络的流程视图方法。企业可根据不同市场需求,重用内部工作流模型,快速、灵活地构建企业间协同工作流模型。然而,其局限性在于参与企业的工作流建模方法必须一致,因此,JIANG 等<sup>[105]</sup>在此基础上提出基于 Web Services 和 ProcessView 相结合的方法,以实现更好的企业间协作和工作流管理。在该方法中,参与企业的单个工

作流模型首先映射到 ProcessView workflow 模型,以 WSDL 统一表示所有 ProcessView 模型,最后,通过 Web 服务的业务流程执行语言(BPEL4WS)构建整个 CPD 流程。在此基础上,利用 JXTA 平台开发了基于混合 P2P 的 WMSs 框架,协调控制各部门之间的流程和信流,实现业务流程自动化。此外,ALEXOPOULOS 等<sup>[106]</sup>提出了面向 Web Services 的 workflow 管理系统,并在该系统中提出了连接异构工程工具的 3 种互补技术和标准:业务流程执行语言 BPEL、自动化标记语言以及 与 BPEL 引擎关联的 Web 服务。

### (3) 基于 PDM/PLM 的访问控制技术

PDM/PLM 系统的管理范围涉及设计、制造、销售、财务和售后等多个部门,信息安全问题日益突出,各种信息安全技术得到了大规模应用,尤其是系统的访问控制技术成为当下 PDM/PLM 系统安全研究的热点,表 4 描述了部分主流 PDM/PLM 系统的授权模型分析。

传统的访问控制模型很多,如矩阵模型、自主访问控制模型(Discretionary access control, DAC)、强制访问控制模型(Mandatory access control, MAC)、基于角色的访问控制模型(Role-based access control, RBAC) 以及其扩展模型——基于角色访问控制管理模型(Administrative role-based access control, ARBAC) 等<sup>[107]</sup>。RBAC 模型具备容易理解、支持最小权限原则、责任分离、权限继承等优点,一度成为该领域的主流技术。

随着 PDM/PLM 系统的企业协作复杂性、用户

访问动态性、workflow 多样性等问题日益凸显, RBAC 模型缺乏对上下文环境的动态考虑,增加了系统的不安全性。因此,为了弥补传统模型的不足,更方便控制和管理访问控制模块的权限粒度,国内外学者对访问控制模型进行了积极探索,并提出了一些 RBAC 的改进模型和具有典型代表性的访问控制模型。OH 等<sup>[108]</sup>提出了一种基于任务和角色的访问控制模型(Task-role-based access control, T-RBAC),作为 RBAC 的改进模型,T-RBAC 先将访问权限分配给任务,再将任务分配给角色,角色通过任务与权限关联,任务是角色和权限交换信息的桥梁。AL-KAHTANI 等<sup>[109]</sup>提出了一种基于属性的访问控制模型(Attributes-based access control, ABAC),该模型是一种为解决行业分布式应用可信关系访问控制模型,它利用相关实体(如主体、客体、环境)的属性作为授权的基础来研究如何进行访问控制。与 ABAC 一样,使用控制模型(Usage control, UCON)对用户权限进行更细粒度的控制。UCON 模型不仅包含了传统模型,而且还包含了数字版权管理(DRM)、信任管理等。UCON 模型涵盖了现代商务和信息系统需求中的安全和隐私这两个重要问题,被称作下一代访问控制模型。此外,基于风险的访问控制模型(Risk-based access control, RBAC)、基于能力的访问模型(Capability-based access control, CapBAC)、基于组织的访问控制模型(Organizational-based access control, OrBAC)、基于角色的隐私感知访问控制模型(Privacy-aware role-based access control, P-RBC) 等也得到了广泛关注。

表 4 部分 PDM/PLM 系统的授权模型分析

Tab. 4 Authorization model analysis of different PDM/PLM systems

功能类型	PLM 产品			
	WindChill	TeamCenter Enterprise	TeamCenter Engineering	TiPLM
授权方式	基于规则	基于规则	基于规则/矩阵	基于矩阵
授权作用范围	域	全局	全局	全局
授权的等级蔓延	通过类树	通过类树		多级蔓延
访问控制的实现	访问控制列表	规则解析、规则缓存	访问控制列表	访问控制矩阵实时计算
主体	用户、角色、组织	用户、角色、组织、动态参与者	用户、角色、组织	用户、角色、组织
主体的激活和冻结	是	是		是
角色	与 Project 相关	与 Project 相关	与 Project 相关	独立的主体
对象的控制粒度	类、对象	类、对象	类、对象	类、对象、属性
基于条件的授权	是	是	否	是
基于生命周期	是	是		是
管理权限范围	通过域控制授权范围	只有全局的统管理员	只有全局系统管理员	管理权限可以分级
管理权限	Administrative		更改所有权	创建/删除用户,多种管理权限
负向授权	是	否	否	是
操作	读/写/修改/删除/创建等	Messag、Message Group	读/写/删/改等	读/写/删/改/定版/升版等

## 3 发展趋势及展望

近年来,随着互联网、网络物理系统(Cyber-

physical systems, CPSs) 等技术的发展和应用,人类已经进入工业 4.0 时代。农业机械的智能化设计技术从早期的数字化设计逐渐向设计的协同化、网络

化和智能化方向发展。笔者认为我国农业机械智能化设计应紧紧围绕农机制造企业的实际需求,以提高农业机械设计能力和核心竞争力,促进农机企业的可持续发展为目标,开展基础理论、关键技术研究,解决当前产品正向设计、三维建模、知识重用、多学科动态联合仿真、分布式协同设计等重大科学问题,形成一套基于知识的农业机械智能化设计理论和体系。未来农业机械的智能化设计技术研究将主要从以下几方面展开:

#### (1) 农业机械设计基础数据及交互机理

立足于发展现代农业、保障粮食安全的国家战略需求,针对农业机械设计基础数据匮乏、产品质量和可靠性较差等问题,开展土壤-机器-作物系统的交互规律、农机载荷谱、基础工艺/材料/部件、关键作业装置等技术瓶颈的研究,研究构建基于网络的农田土壤力学参数、农作物机械物理特性参数、农业机械载荷谱和结构力学参数、工程材料以及整机和通用零部件数字化设计模型数据库,为农业机械智能化设计提供数据支撑。

#### (2) 以用户需求为导向的农业机械个性化、定制化设计

针对农业机械用户需求的多层次性、模糊性和隐蔽性等特点,开展基于大数据技术的用户需求分析,深入挖掘农具使用、田间管理与用户需求之间的潜在关系,建立规范化的用户需求模型,同时,研究用户需求和产品设计之间的转化和映射方法,如人工智能算法、TRIZ理论和AD理论等,完成用户域到功能域、结构域的关系映射,从而设计出高效、低成本的农机产品,以满足多样化、个性化的用户需求。

#### (3) 以知识重用为驱动的产品建模技术

在产品全生命周期的视角下,实现多开发人员、多系统、多阶段间的数据交换、信息共享和跨学科知识重用需要集成的产品建模框架,当前主流建模技术如本体建模、STEP标准建模、MBD技术和基于Modelica的建模等,广泛用于汽车、航空航天、船舶等领域,显著提高了智能化设计与加工制造的协同性,尤其是MBD技术,彻底改变了产品的研发模式,

保证了设计数据的唯一性,减少了对其他信息系统的过度依赖,实现了设计/制造厂/供应商之间的高效信息沟通,因此,从农业机械的全生命周期角度,开发集成产品TDP、具有统一建模思想的农业机械产品表示模型,实现知识重用和全生命周期过程的无缝集成与信息共享是未来农业机械智能化设计研究的重点。

#### (4) 基于土壤-植物-机器系统的多领域协同仿真技术

随着精细农业、信息农业的发展,田间管理和农艺要求对农机性能提出了更高要求,农业机械的仿真分析也由单一领域向多领域协同仿真发展。柔性体建模、多学科优化、人机交互、硬件在环仿真、机电液联合仿真等关键技术成为本领域的研究重点。此外,考虑到农业机械作业的特殊性,从土壤-植物-机器系统角度,深入分析多物理场下作物与工作部件的相互作用机理,实现农业机械的优化设计已引起了人们的广泛关注,而基于虚拟现实技术的农机产品虚拟装配、虚拟仿真和虚拟试验验证等典型应用则成为未来研究的热点。

#### (5) 以分布式计算、CPS系统为支撑的PDM/PLM协同管理平台

未来PLM的发展将更加专注于覆盖产品生命周期各阶段及更好地支持工程协同,因此,与产品全生命周期相关的技术和应用,将成为PLM的研究重点,主要包括企业基础信息框架、统一产品模型、单一数据源、基于Web的产品入口,以及PLM标准与规范体系。此外,分布式计算技术,特别是云计算,将支撑下一代PLM的发展。基于云的PLM将为企业节省部署成本,合理配置资源,同时,更有效地实现跨组织、跨地域的实时协同工作,确保数据的准确性、唯一性。而CPS的应用,推动了制造企业的数字化转型。借助智能传感器、智能化工业设备对数据进行高度可视化及深入分析,优化产品生产制造,形成新工业数据生命周期,因此,利用PLM提供的协调管理平台,打通流程、人、数据等多个环节,实现对智能工厂的运营支撑,是PLM未来发展的主要方向。

### 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] 李玲玲, 李志刚. 智能设计与不确定信息处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [6] 杨汝静. 复杂产品方案设计中多级实例推理检索算法研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2014.  
YANG Rujing. Research of the multistage case reasoning retrieval algorithm in complex product[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2014. (in Chinese)
- [7] VIOLANTE M G, VEZZETTI E. Kano qualitative vs quantitative approaches: an assessment framework for products attributes analysis[J]. Computers in Industry, 2017, 86:15-25.
- [8] KAHRAMAN C, ERTAY T, BÜYÜKÖZKAN G. A fuzzy optimization mode for QFD planning process using analytic network approach[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 171(2):390-411.
- [9] JIN Jian, JI Ping, GU Rui. Identifying comparative customer requirements from product online reviews for competitor analysis[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2016, 49:61-73.
- [10] WANG Y, TSENG M M. Integrating comprehensive customer requirements into product design[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1):175-178.
- [11] 张宇博. 集成 Kano 模型的协同交互产品配置决策方法及支持系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
ZHANG Yubo. Research on Kano model-integrated co-interactive product customization strategy and its support system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [12] JI P, JIN J, WANG T, et al. Quantification and integration of Kano's model into QFD for optimising product design[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(21):6335-6348.
- [13] HE L, SONG W, WU Z, et al. Quantification and integration of an improved Kano model into QFD based on multi-population adaptive genetic algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 114: 183-194.
- [14] PAKIZEHKAR H, SADRABADI M M, MEHRJARDI R Z, et al. The application of integration of Kano's model, AHP technique and QFD matrix in prioritizing the bank's substructions[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2016, 230: 159-166.
- [15] ASHTIANY M S, ALIPOUR A. Integration axiomatic design with quality function deployment and sustainable design for the satisfaction of an airplane tail stakeholders [J]. Procedia CIPR, 2016, 53:142-150.
- [16] DU Y, CAO H, CHEN X, et al. Reuse-oriented redesign method of used products based on axiomatic design theory and QFD [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 39:79-86.
- [17] SIM W W, BROUSE P. Towards an ontology-based persona-driven requirements and knowledge engineering[J]. Procedia Computer Science, 2014, 36:314-321.
- [18] SINGHAPUTTANGKUL N, LOW S P, TEO A L, et al. Knowledge-based decision support system quality function deployment (KBDSS-QFD) tool for assessment of building envelopes[J]. Automation in Construction, 2013, 35:314-328.
- [19] ZHAI L Y, KHOO L P, ZHONG Z W. Towards a QFD-based expert system: a novel extension to fuzzy QFD methodology using rough set theory[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(12):8888-8896.
- [20] 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.
- [21] 胥芳. 面向大批量定制的小型农业作业机可重构模块化设计方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2007.  
XU Fang. Reconfigurable modules design method of small agricultural machinery under MC[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [22] KAMRANI A K, GONZALEZ R. A genetic algorithm-based solution methodology for modular design[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2003, 14(6):599-616.
- [23] JI Y, JIAO R J, CHEN L, et al. Green modular design for material efficiency: a leader-follower joint optimization model[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 41:187-201.
- [24] 郑维强, 冯毅雄, 谭建荣, 等. 面向维修的复杂装备模块智能聚类与优化求解技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11):2459-2469.  
JIA Weiqiang, FENG Yixiong, TAN Jianrong, et al. Intelligent clustering and optimal solving technology for complex equipment modules oriented to maintenance properties[J]. Computer Intergrated Manufacturing Systems, 2012, 18(11): 2459-2469. (in Chinese)
- [25] 罗石林. 面向山地农机的模块化产品平台关键技术研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.  
LUO Shilin. The key technologies research of modular product platform for mountain agricultural machinery[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [26] BEEK T J V, ERDEN M S, TOMIYAMA T. Modular design of mechatronic systems with function modeling [J]. Mechatronics, 2010, 20(8):850-863.
- [27] 高飞, 潘双夏, 冯培恩. 基于广义有向图的产品功能建模方法研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(5):648-651.  
GAO Fei, PAN Shuangxia, FENG Peien. Product function modelling based on generalized directed graph[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(5):648-651. (in Chinese)
- [28] LI J, ZHANG H, GONZALEZ M A, et al. A multi-objective fuzzy graph approach for modular formulation considering end-of-life issues[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(14):4011-4033.
- [29] ALGEDDAWY T. A new model of modular automation programming in changeable manufacturing systems [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11:198-206.
- [30] KUSIAK A, HUANG C C. Development of modular products [J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology Part A, 1996, 19(4):523-538.
- [31] SCHUH G, RUDOLF S, BREUNIG S. Modular platform design for mechatronic systems using axiomatic design and mechatronic function modules[J]. Procedia CIRP, 2016, 50:701-706.

- [32] STONE R B, WOOD K L, CRAWFORD R H. A heuristic method for identifying modules for product architectures[J]. *Design Studies*, 2000, 21(1):5–31.
- [33] SHAN Q, CHEN Y. Product module identification based on assured customer requirements[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15:5313–5317.
- [34] ULRICH K. The role of product architecture in the manufacturing firm[J]. *Research Policy*, 1995, 24(3):419–440.
- [35] SOSA M E, EPPINGER S D, ROWLES C M. Identifying modular and integrative systems and their impact on design team interactions [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2003, 125(2):240–252.
- [36] FUJITA K. Product variety optimization under modular architecture[J]. *Computer-Aided Design*, 2002, 34(12):953–965.
- [37] LYU G, CHU X, XUE D. Product modeling from knowledge, distributed computing and lifecycle perspectives: a literature review[J]. *Computers in Industry*, 2017, 84:1–13.
- [38] RIESENFELD R F, HAIMES R, COHEN E. Initiating a CAD renaissance: multidisciplinary analysis driven design [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015, 284:1054–1072.
- [39] MUN D, HAN S, KIM J, et al. A set of standard modeling commands for the history-based parametric approach [J]. *Computer-Aided Design*, 2003, 35(13):1171–1179.
- [40] LI J, KIM B C, HAN S. Parametric exchange of round shapes between a mechanical CAD system and a ship CAD system[J]. *Computer-Aided Design*, 2012, 44(2):154–161.
- [41] FENVES S J. A core product model for representing design information [S]. National Institute of Standards and Technology NISTIR 6736, 2001.
- [42] RACHURI S, HAN Y H, FOUFOU S, et al. A model for capturing product assembly information[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2006, 6(1):11–21.
- [43] SEKARAN K C. An intelligent framework for CAD of complex systems[C]//IEEE International Conference on Computational Intelligence & Multimedia Applications, 2007.
- [44] XUE D. Developing a superset language of smalltalk for modeling distributed mechanical design systems[J]. *ACM Sigplan Notices*, 2006, 41(2):8–17.
- [45] BOCK C, ZHA X F, SUH H W, et al. Ontological product modeling for collaborative design[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2010, 24(4):510–524.
- [46] BARBAU R, KRIMA S, RACHURI S, et al. OntoSTEP: enriching product model data using ontologies[J]. *Computer-Aided Design*, 2012, 44(6):575–590.
- [47] PANETTO H, DASSISTI M, TURSÌ A. ONTO – PDM: product-driven ontology for product data management interoperability within manufacturing process environment[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2012, 26(2):334–348.
- [48] IYER G R, MILLS J J. Design intent in 2D CAD: definition and survey[J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2006, 3(1–4):259–267.
- [49] XUE D, YANG H. A concurrent engineering-oriented design database representation model[J]. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(10):947–965.
- [50] 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.
- [51] REDDY E J, SRIDHAR C N V, RANGADU V P. Development of an approach for knowledge-based system for CAD modelling [J]. *Materialstoday: Proceedings*, 2018, 5(5):13375–13382.
- [52] GUJARATHI G P, MA Y S. Parametric CAD/CAE integration using a common data model[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2011, 30(3):118–132.
- [53] WAN N, MO R, LIU L, et al. New methods of creating MBD process model: on the basis of machining knowledge[J]. *Computers in Industry*, 2014, 65(4):537–549.
- [54] QUINTANA V, RIVEST L, PELLERIN R, et al. Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry[J]. *Computers in Industry*, 2010, 61(5):497–508.
- [55] ALEMANNI M, DESTEFANIS F, VEZZETTI E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 52(1–4):1–14.
- [56] ZHU W, BRICOGNE M, DURUPT A, et al. Implementations of model based definition and product lifecycle management technologies: a case study in Chinese aeronautical industry[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(12):485–490.
- [57] 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.
- [58] CHANDRASEGARAN S K, RAMANI K, SRIRAM R D, et al. The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems[J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(2):204–228.
- [59] 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](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)
- [60] 陆凤祥, 石小龙, 李春燕. 基于本体的拖拉机变速器系统设计知识表示研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2018, 47(6):91–94. LU Fengxiang, SHI Xiaolong, LI Chunyan. Research on ontology-based design knowledge representation of tractor transmission [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2018, 47(6):91–94. (in Chinese)
- [61] QIN H, WANG H, JOHNSON A L. A RFBSE model for capturing engineers' useful knowledge and experience during the design process[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 44:30–43.
- [62] LIU H C, YOU J X, LI Z W, et al. Fuzzy Petri nets for knowledge representation and reasoning: a literature review[J].

- Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017, 60:45 – 56.
- [63] WU Z, LIAO J, SONG W, et al. Semantic hyper-graph-based knowledge representation architecture for complex product development[J]. Computers in Industry, 2018, 100:43 – 56.
- [64] LIU J, ZHENG B J, LUO L M, et al. Ontology representation and mapping of common fuzzy knowledge[J]. Neurocomputing, 2016, 215:184 – 195.
- [65] ALONSO F, MARTÍNEZ L, PÉREZ A, et al. Cooperation between expert knowledge and data mining discovered knowledge: lessons learned[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(8):7524 – 7535.
- [66] 麻芳兰. 智能设计关键技术的研究及其在甘蔗收获机械中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
MA Fanglan. Study on key technology and application in sugarcane harvester of intelligent design[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese)
- [67] 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)
- [68] WIELINGA B J. Reflections on 25 + years of knowledge acquisition[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2013, 71(2): 211 – 215.
- [69] CHEN Y J, CHEN Y M. Demand-driven knowledge acquisition method for enhancing domain ontology integrity[J]. Computers in Industry, 2014, 65(7):1085 – 1106.
- [70] CHERGUI W, ZIDAT S, MARIR F. An approach to the acquisition of tacit knowledge based on an ontological model[J/OL]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.09.012>.
- [71] 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)
- [72] 惠为东. 基于知识的拖拉机制动器智能化设计方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.  
HUI Weidong. Research on knowledge-based method for tractor brake intelligent design[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015. (in Chinese)
- [73] LI X, QIU S, MING H X G. An integrated module-based reasoning and axiomatic design approach for new product design under incomplete information environment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 127:63 – 73.
- [74] 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.
- [75] 胡全义. 基于键合图的多领域统一建模与仿真技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.  
HU Quanyi. Research of multi-domain modeling and simulation based on bond graph [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [76] 张政. 基于 SysML 和 Modelica 的多领域设计和仿真建模集成[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
ZHANG Zheng. SysML and Modelica based intergration of system design and simulation modeling of multi-domain [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [77] 邹湘军, 金双, 陈燕, 等. 基于 MODELICA 的采摘机械手运动控制建模[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5882 – 5885.  
ZOU Xiangjun, JIN Shuang, CHEN Yan, et al. MODELICA-based modeling research of picking manipulator motion control process[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(18):5882 – 5885. (in Chinese)
- [78] 袁文华, 邱白晶. 基于 Modelica 的喷杆运动试验装置[J]. 农机化研究, 2013, 35(4):89 – 91.  
YUAN Wenhua, QIU Baijing. Sprayer boom movement test device design based on Modelica[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(4):89 – 91. (in Chinese)
- [79] 李明, 孟光, 荆建平, 等. 基于 Modelica 语言的电液伺服阀非因果建模仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(12): 2946 – 2951.  
LI Ming, MENG Guang, JING Jianping, et al. Non-casual modeling and simulation of electro-hydraulic servo valve based on Modelica[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(12): 2946 – 2951. (in Chinese)
- [80] 王志明. 横置差速轴流脱分选系统工作机理及设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.  
WANG Zhiming. Study on work mechanism and design of axial flow differential-speed threshing-separating-cleaning unit[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [81] 宗望远. 油菜联合收获纵轴流脱离系统的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.  
ZONG Wangyuan. Research on the longitude axial flow threshing and separating unit of rape combine harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [82] 于建群, 付宏, 李红, 等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 1 – 6.  
YU Jianqun, FU Hong, LI Hong, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5):1 – 6. (in Chinese)
- [83] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于 DEM – CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11):48 – 57.  
DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM – CFD coupling method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):48 – 57. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181106&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181106&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.006. (in Chinese)

- [84] YU M, TANG X, LIN Y, et al. Diesel engine modeling based on recurrent neural networks for a hardware-in-the-loop simulation system of diesel generator sets[J]. *Neurocomputing*, 2018, 283:9–19.
- [85] 张硕. 基于滑模变结构的重型拖拉机犁耕作业滑转率控制方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.  
ZHANG Shuo. Study on slip rate control of heavy tractor for ploughing based on sliding mode variable structure control[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [86] 罗陆锋, 邹湘军, 程堂灿, 等. 采摘机器人视觉定位及行为控制的硬件在环虚拟试验系统设计[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4):39–46.  
LUO Lufeng, ZOU Xiangjun, CHENG Tangcan, et al. Design of virtual test system based on hardware-in-loop for picking robot vision localization and behavior control[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(4):39–46. (in Chinese)
- [87] 陈随英. 高地隙自走式喷雾机全工况滑转率控制方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
CHEN Suiying. Research on slip-ratio control method for high clearance self-propelled sprayer over all operating conditions [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [88] 朱忠祥, 陈莉, 李山山, 等. 基于虚拟现实的联合收获机底盘虚拟装配关键技术[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊2):262–267.  
ZHU Zhongxiang, CHEN Li, LI Shanshan, et al. Critical techniques of virtual assembly for combine harvester chassis based on virtual reality[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp. 2):262–267. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s249&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s249&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.049. (in Chinese)
- [89] 翟志强. 基于虚拟现实的拖拉机双目视觉导航试验方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
ZHAI Zhiqiang. A test method of binocular vision-based guidance for tractor based on virtual reality[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [90] KARKEE M, STEWARD B L, KELKAR A G, et al. Modeling and real-time simulation architectures for virtual prototyping of off-road vehicles[J]. *Virtual Reality*, 2011, 15(1):83–96.
- [91] LUECKE G R. GREENSPACE: virtual reality interface for combine operator training[J]. *Presence Teleoperators and Virtual Environments*, 2012, 21(3):245–253.
- [92] JONES G, GÉE C, VILLETTE S, et al. Validation of a crop field modeling to simulate agronomic images[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10):10694–10703.
- [93] 臧宇, 朱忠祥, 宋正河, 等. 农业机械虚拟试验系统平台的建立[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(9):70–74.  
ZANG Yu, ZHU Zhongxing, SONG Zhenghe, et al. Virtual experiment system platform for agricultural equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9):70–74. (in Chinese)
- [94] 王菲. 基于虚拟现实的自走式农业机械试验方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.  
WANG Fei. Research of self-propelled agricultural machinery virtual experiment method based on virtual reality[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [95] 苑严伟. 数字农业典型智能化装备虚拟仿真技术研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2010.  
YUAN Yanwei. Study on virtual simulation technology of special intelligent agricultural equipment in digital agricultural[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2010. (in Chinese)
- [96] 杨方飞, 阎楚良. 基于视景仿真的联合收获机虚拟试验技术[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1):79–83.  
YANG Fangfei, YAN Chuliang. Virtual test of combine harvester based on visual simulation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1):79–83. (in Chinese)
- [97] PENCIUC D, DURUPT A, BELKADI F, et al. Towards a PLM interoperability for a collaborative design support system[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 25:369–376.
- [98] BELKADI F, BERNARD A, LAROCHE F. Knowledge based and PLM facilities for sustainability perspective in manufacturing: a global approach[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 29:203–208.
- [99] MUN D, HWANG J, HAN S, et al. Sharing product data of nuclear power plants across their lifecycles by utilizing a neutral model[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2008, 35(2):175–186.
- [100] PAVIOT T, CHEUTET V, LAMOURE S. A PLCS framework for PDM/ERP interoperability[J]. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 2013, 5(5):295–313.
- [101] CHOI S S, YOON T H, NOH S D. XML-based neutral file and PLM integrator for PPR information exchange between heterogeneous PLM systems[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2010, 23(3):216–228.
- [102] GUNPINAR E, HAN S. Interfacing heterogeneous PDM systems using the PLM Services[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2008, 22(3):307–316.
- [103] GREFFEN P, ABERER K, HOFFNER Y, et al. CrossFlow: cross-organizational workflow management in dynamic virtual enterprises[J]. *Computer Systems Science and Engineering*, 2000, 15(5):277–290.
- [104] JIANG P, SHAO X, QIU H, et al. Interoperability of cross-organizational workflows based on process-view for collaborative product development[J]. *Concurrent Engineering*, 2008, 16(1):73–87.
- [105] JIANG P, SHAO X, QIU H, et al. A web services and process-view combined approach for process management of collaborative product development[J]. *Computers in Industry*, 2009, 60(6):416–427.
- [106] ALEXOPOULOS K, MAKRIS S, XANTHAKIS V, et al. A web-services oriented workflow management system for integrated digital production engineering[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2011, 4(3):290–295.
- [107] LOPEZ J, RUBIO J E. Access control for cyber-physical systems interconnected to the cloud[J]. *Computer Networks*, 2018, 134:46–54.
- [108] OH S, PARK S. Task-role-based access control model[J]. *Information Systems*, 2003, 28(6):533–562.
- [109] AL-KAHTANI M A, SANDHU R. A model for attribute-based user-role assignment[C]//18th Annual Computer Security Applications Conference, 2002:353–362.