

先进设计技术在农业装备研究中的应用分析

刘宏新 王登宇 郭丽峰 刘文武 张光甫 孙 伟

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 现代装备企业及其产品的竞争力在很大程度上取决于能否以最快的速度向市场提供满足需求的产品,即是否有先进的设计方法支持科学、高效的研发过程。针对中国农业装备研发整体水平低,以及由于种类繁多和地域差异显著所导致的专业知识、结构形式、实践经验等庞杂,个体设计人员难以全面掌握,无法保证研发质量,严重制约产业发展及自主创新能力的问题,阐述并全面梳理了设计方法的发展历程,从而探讨适合农业装备的先进设计方法与发展方向,以支撑《中国制造 2025》等国家重大发展规划对农业装备设定的战略目标的实现。研究表明,结合当前科技水平与社会背景,充分利用 3D-CAD 虚拟现实的优势与计算机技术的发展成果,基于数字技术的智能化设计是必然趋势,代表了先进设计的发展方向与最高水平。智能化设计以知识重用为特征,以数字模型资源化为基础,以产品数据管理(PDM)平台和产品生命周期管理(PLM)平台为载体,以广义的计算机辅助设计概念组织并贯通与设计相关的上下游方案论证、数字样机(DMU)、工程分析(CAE)、工艺流程(CAPP)等研发环节,实现各类计算机辅助技术 CAX 的高度集成,是人工智能(AI)在设计领域的实践运用。明确了当前先进设计的发展思路,为装备智能化设计系统的建立提供了基础理论与体系架构,对充分整合行业资源、共享成果与专业知识、提高研发效率和水平、提升中国农业装备企业及其产品的核心竞争力具有理论价值与实践指导意义。

关键词: 先进设计技术; 农业装备; 数字化设计; 资源重用; 知识工程; 智能化设计

中图分类号: S23; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0001-18

Development of Advanced Design Technology and Its Application in Agricultural Equipment

LIU Hongxin WANG Dengyu GUO Lifeng LIU Wenwu ZHANG Guangfu SUN Wei

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The competitiveness of modern equipment enterprises and their products largely depends on whether they can provide products to meet the market demand at the fastest speed, that is, whether they have advanced design methods to support the efficient research and development process. Aiming at the problem in low integral level of agricultural machinery research and development in China, as well as various types and significant regional differences result in a variety of professional knowledge, structural forms, practical experience and so on, making it difficult for individual designers to fully grasp, unable to guarantee the quality of research and development, and severely restricting the industrial development and independent innovation ability, thus the development process of design methods was comprehensively reviewed, the characteristics of times at each stage and the generation rules of advanced design methods were analyzed, the advanced design methods and development direction suitable for agricultural equipment was discussed, and the realization of the strategic goals set for agricultural equipment in major national development plans such as “Made in China 2025” was supported. The research showed that the trend of intelligent design based on digital technology was obvious, which represented the development direction and the highest level of advanced design by combining the current technological level and social background, making full use of the advantages of 3D-CAD virtual reality and the development results of computer technology. Intelligent design was characterized by knowledge reuse, based on digital model resource, carried by product data management (PDM) and product lifecycle management (PLM) platform, and organized and connected upstream and downstream design-related research links such as

收稿日期: 2019-05-10 修回日期: 2019-05-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700100)

作者简介: 刘宏新(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备数字化设计与数字资源管理研究,E-mail: Lcc98@neau.edu.cn

scheme reasoning, digital mockup (DMU), computer aided engineering (CAE), computer aided process planning (CAPP) by the generalized computer aided design concept. In this way, intelligent design can implement the high integration of CAX, which was the practical application of artificial intelligence (AI) in the field of design. The development ideas of current advanced design were clarified, basic theory and system architecture for the establishment of equipment intelligent design system were provided, and it had significant theoretical value and practical guiding significance for fully integrating industry resources, highly sharing achievements and professional knowledge, greatly improving research and development efficiency and level, and significantly enhancing the core competitiveness of Chinese equipment enterprises and their products.

Key words: advanced design technology; agricultural equipment; digital design; resource reuse; knowledge engineering; intelligent design

0 引言

设计是产品研发的重要环节,是企业智力资源及研发条件转化为生产力的主要形式。现代社会的装备产品必须满足用户的定制化、多样化的需求,装备企业及其产品的核心竞争力很大程度上取决于能否以最快的速度向市场提供适合的产品,即是否有足够的高素质技术人员以及先进的设计方法支撑高效与优质的研发过程。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要》与《中国制造 2025》均明确指出:装备制造业是国民经济的主要支柱,我国是世界制造大国,但还不是制造强国,制造技术基础薄弱,创新能力不强。应提高装备设计、制造和集成能力,促进企业技术创新。用高新技术改造和提升制造业,大力推进制造业信息化,大幅度提高产品档次、技术含量和附加值,全面提升制造业整体技术水平^[1-2]。《国家粮食安全中长期规划纲要》和《国务院关于促进农业机械化和农机工业又好又快发展的意见》明确要求:根据不同区域的自然禀赋、耕作制度,以促进农机农艺结合、实现重大装备技术突破为重点,加快实现粮食主产区、大宗农作物、关键生产环节机械化,积极推行主要粮食作物全程机械化作业,促进粮食生产专业化和标准化发展^[3-4]。通过创新装备设计的方法与技术,构建先进的研发平台,同步提高效率与水平是实现这些目标的必要途径^[5-6]。

当前,农业装备的先进设计正逐渐演变成一个知识密集与交叉的复杂过程,涉及机构原理、机械设计、农机农艺、CAD/CAM (Computer aided design/Computer aided manufacturing)、数字样机 (Digital mockup, DMU)、知识工程、人工智能 (Artificial intelligence, AI)、网络协同和虚拟仿真 (Virtual reality, VR) 等多领域多学科的技术和方法^[7-14]。为提升产品研发效率,抢占市场先机,约翰迪尔 (John Deere)、凯斯纽荷兰 (CNH)、爱科 (AGCO)、

久保田 (Kubota) 等国际知名企业应用现代信息技术,纷纷建立了以 PDM/PLM (Product data management/Product lifecycle management) 为基础,结合高端工程应用软件的优质产品研发体系和设计资源与信息共享平台。同时,基于知识工程的 CAD/CAM 技术得到了高度重视,并取得快速发展,参数化、虚拟化、网络化和集成化成为先进设计技术研究与开发的热点^[15]。

相对而言,中国农业装备制造企业与国际先进水平存在较大差距,正面临来自目标市场多层面竞争的严峻挑战。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、缺乏自主核心技术,已成为中国农业装备企业可持续发展的瓶颈^[16]。加之农业装备种类繁多和地域差异显著所导致的专业知识、结构形式、实践经验等极其庞杂,没有先进的研发体系与技术手段的支持,个体设计人员难以全面掌握相关知识与技能,无法保证研发质量,严重制约了产业发展及自主创新能力。

研究适合农业装备的先进设计技术,对支撑《中国制造 2025》等国家重大规划为农业装备设定的发展目标的实现,在国际上实现弯道超车具有重要的现实与战略意义。先进设计方法与技术在不同的历史阶段有不同的内涵,是一个相对的概念,有其产生的必然条件和时代环境。本文拟通过全面梳理并分析设计方法及其在农业装备研发中应用的发展历程,探寻先进设计方法的产生规律与特点,结合当前科技与社会背景,充分利用现代 3D-CAD 虚拟现实的优势与计算机技术的发展成果,为开发农业装备智能化设计系统提供基础理论与技术模式,充分整合行业成果及专业知识,提高研发效率和水平,提升中国装备制造业的国际竞争力。

1 设计方法与技术的演变

1.1 设计的概念

设计是人类为了实现某种特定目的而进行的一

项创造性活动,是把头脑中的一种规划、设想以视觉的形式传达出来的人类智力运用过程。随着人类社会的逐渐发展,设计在不同领域细化出不同的内涵与方法。机械工程领域,设计是根据使用要求对机械装备的工作原理、结构组成、形状尺寸、运动方式、力和能量传递、零件材料、润滑形式、控制过程等进行构思、分析、计算,并将其转化为具体的描述以作为制造依据的工作过程。机械设计是机械工程的重要组成部分,是机械生产的第一步,是决定机械装备性能的最主要因素^[17]。

1.2 发展历程

为高度概括人类几千年文明史中机械工程领域设计的发展历程,根据其在时代轴上的宏观特征,划分为以下 3 个阶段:17 世纪前,人类创造和使用机械装备为古代机械设计阶段;17 世纪至第二次世界大战,机械设计在世界范围内快速发展,为近代机械设计阶段;第二次世界大战结束至今,计算机出现,进入并主导着设计的变革,为现代机械设计阶段。机械设计发展历程如图 1 所示。

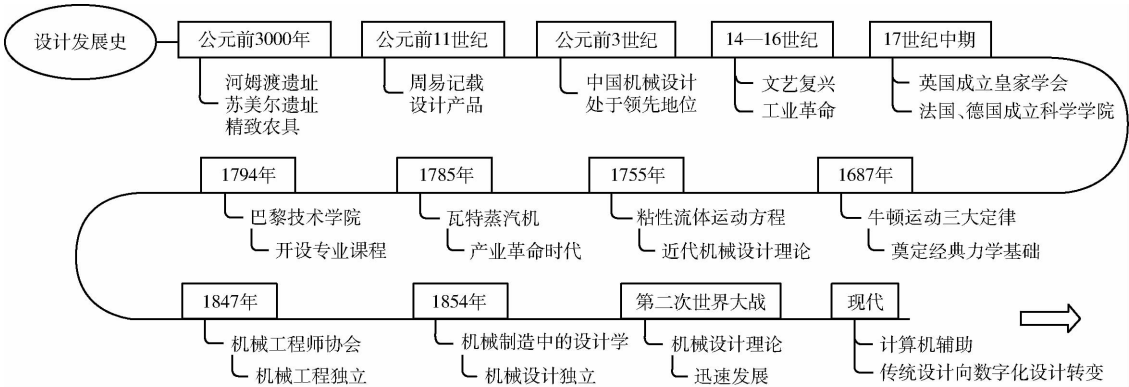


图 1 机械设计发展历程

Fig. 1 History of mechanical design

2 计算机辅助设计

2.1 计算机辅助设计的产生

计算机辅助设计(CAD)是利用计算机快速的数值计算和强大的图文处理功能,辅助工程技术人员进行产品设计、工程绘图和数据管理的一门计算机应用技术,是计算机科学技术发展和应用中的一个重要领域^[18]。朴素的计算机辅助设计用于辅助

图形的生成与设计的表达,以单纯的提高速度为其主要任务,并通过提供一些标准的图形与图例而兼顾规范性与美观性。随着科技的进步,CAD 的外延不断扩大,逐渐囊括了为设计结构而进行的分析、计算及虚拟仿真。

2.2 CAD 技术发展过程

计算机辅助设计技术的发展过程如图 2 所示。

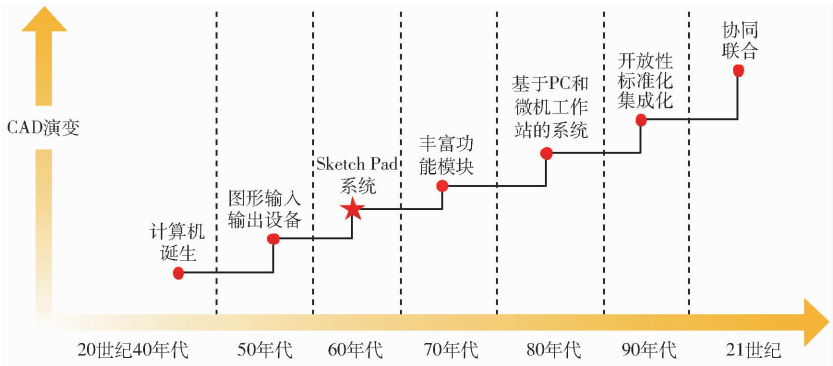


图 2 CAD 技术发展过程

Fig. 2 Development stage of CAD

20 世纪 90 年代以来,计算机辅助设计技术趋于成熟,以现代 3D-CAD 软件为代表,CAD 技术不再停留在单一模式、单一功能、单一领域的功能与水平,而是向着开放性、标准化、集成化的方向发展^[19]。CAD 技术结合企业管理平台的并行工程和

协同共享的组织架构,允许更多计算机辅助设计功能实现,为其技术的发展和应用提供了更为广阔的空间。

近年来,以计算机辅助设计为基础的新方法与新技术受到越来越多的关注,并在设计实践活动中

普遍应用,不断提升产品设计过程的专业化与自动化水平。

2.3 CAD技术的优势与意义

2.3.1 技术优势

计算机可根据人的意图迅速做出反应,并能够将设计结果实时显示出来,设计者可根据计算机的显示及时处理。同时,利用计算机所提供的复制、查询、存储等功能以及模版、图样、模型等资源,使得在计算机上进行设计与修改相比在图纸上工作简便易行,节省了大量的开发时间^[20-22]。

由于计算机的计算能力强,计算精度高,设计人员在具备专业知识的基础上,利用计算机辅助设计手段可以完成复杂的参数分析与结构优化。结合实体模型参数化设计、全相关数据库技术可以最大程度保证产品的设计质量,并为其它先进技术的应用提供基础和前提条件^[23]。

计算机辅助设计系统设计过程的记录及所生成的设计结果均以数字信息的形式呈现,易于存储和检索,便于同其它计算机应用系统接口,从而实现资源共享及多任务协同组织,依托企业内部网络可实现全局性的管理,大幅提高企业的管理效率与管理水平^[24]。

2.3.2 影响与意义

计算机辅助设计能够缩短产品研发周期,提高产品设计质量以及管理水平,大大降低了企业的生产成本,提高了行业竞争力^[25]。农业装备由于其自身特点和工作对象的复杂性,很多理论分析和综合计算过程复杂,计算量大,依靠人工几乎不可能完成。因此,被CAD概念外延所扩展的过程分析、参数计算、优化求解、虚拟仿真等,在农业装备的研发过程中发挥了重要的作用^[26-27],多种综合性农业装备设计问题的解决,如:大行程液压支撑机构的参数求解^[28]、曲柄摇杆式分插机构的运动学和动力学分析^[29]、悬挂机组空间多维作用力下的平衡分析与计算^[30]、滚筒式免耕播种机构交互式优化^[31]、物料清选过程的多相耦合分析与仿真^[32]。

计算机辅助设计的影响与意义不止在于对设计过程的各项辅助,更重要的是其设计过程的数字信息形式催生了模型资源重用、数字化设计、智能化设计等先进设计技术的产生与发展。广义的计算机辅助设计技术已发展成一项集计算机图形学、数据库、网络通讯等计算机及其它领域知识于一体的综合性的高新技术,是先进制造技术的重要组成部分,并对诸多领域的技术进步和发展产生了巨大影响^[33-34]。

3 基于3D模型的资源重用与产品重构

目前,产品设计过程中三维模型已逐渐取代二

维图纸成为技术交流与信息传递的媒介^[35]。三维模型可为产品提供更丰富的展示形式,使产品抽象的空间信息直观化和可视化,同时,基于特征创建的三维模型具有嵌入式参数化和关联能力,通过对模型主要参数的修改可实现零件、部件乃至整个产品尺寸结构的快速修改,易于系列化设计的实现。

三维模型的特点使其具有重复使用的可能,即具有了资源的属性,现代三维设计软件良好的二次开发接口功能也为这种可能提供了技术支持。

3.1 模型重用技术

3.1.1 模型重用的定义

关于模型重用的概念,目前还没有一个统一、标准而又全面的描述。根据其应用目的不同,国内外学者们从不同角度给出了关于模型重用的定义,较为典型的有:模型重用是对已有代码、函数、组件和完整模型通过软件分析判断后实现的重复利用^[36];模型重用是通过对已有的模型进行重复使用或在已有模型基础上做进一步开发,以适应新环境的要求^[37];模型重用是将仿真模型进行重复使用,避免模型的重复构建,通过对成熟模型的重用降低仿真开发成本,提高仿真水平和质量^[38]。综合上述定义,模型重用是将已有成熟的模型资源直接进行重复使用,或通过对其进行适当调整以满足当前的需求,其目的是通过对模型的再利用快速获得满足需求的结果,提高产品设计效率和质量。

可重用度用于评价模型资源可被重复使用的能力,是对零部件模型在不同环境下重复使用能力的度量^[39-40]。模型资源在重用前,需要对模型的可重用性进行判断,根据当前的需求判定已有模型满足需求的程度,模型可重用的判定标准和可重用度是模型重用准确与否的关键。

3.1.2 模型的组织

模型的标准化、规范化及组织结构的层次化是实现模型资源重用的前提^[41-42]。模型资源的建设可以从基础的标准件库和行业通用件库开始,随着模型资源的数量与种类的不断增多,逐渐多样化模型库的构建形式,并加强与软件工程和数据库技术的结合。将模型所具有的属性值和量值进行提取,用模型实体加属性信息的形式表达设计实例,并将模型实体与属性信息分别但又相互关联的方式存储,通过实例属性匹配实现高效检索与模型资源重用。

目前较为完善的模型库有 TraceParts、Inpart、Cadenas、3DSource、Cadenas Link 和 Strack Norma,能够提供标准件、行业通用件、模具专用件等模型资源。同时,基于三维软件二次开发的零件参数化设计和零件库构建方法^[43]、针对提高基于 Web 的零

件库自主性和自助性的领域本体组织开放式零件库系统^[44]、同步 CAD/CAE (Computer aided engineering) 模型构建使模型可直接用于仿真分析^[45]等对模型库建设与模型组织的深入研究仍在继续。

3.1.3 设计重用流程与方法

设计重用的一般流程如图 3 所示,该流程为一分支循环过程。

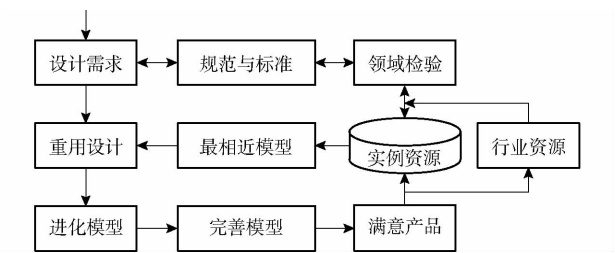


图 3 设计重用过程
Fig. 3 Design reuse process

设计重用时,设计人员运用自身掌握的专业知识与经验,分解用户需求为设计需求,通过对自有实例资源及行业资源的检索获取与设计需求最为相似的已有设计,然后对获取的已有设计进行修改完善,最终得到满足用户需求的新设计模型,循环过程中通过引入行业规范与标准检验环节保证检索与模型

推荐的专业性。设计完成后,对新产品模型进行再学习,提取信息并处理后按规则转换为新的重用设计资源,实现资源的不断扩充,以及重用系统的自我升级^[46-48]。并不是所有的产品设计重用都必须具有上述流程中的所有环节,针对不同设计装备领域与具体对象,设计重用过程也有所不同。

针对不同的目标与重点,现行设计重用方法多样,各具特点与优势,如:基于结构与功能模块划分的自适应通用结构产品族建模方法^[49-50]、基于实例(范例)推理(Case-based reasoning, CBR)的产品设计重用^[51-52]、针对装配体模型进行模糊与精确检索相结合的柔性装配检索方法^[53]、基于计算机辅助集成制造方法(Integrated computer-aided manufacturing definition/ ICAM DEfinition method, IDEF)的设计知识重用^[54]、基于规则推理(Rule-based reasoning, RBR)和基于实例推理综合运用实现产品模型资源的重用^[55-56]、面向设计重用的三维模型局部结构检索方法^[57]、基于模拟退火的三维模型典型结构挖掘与相似性评价^[58],等。按设计的原理与流程,归纳出机械产品设计重用的主要方法及各自特点,如表 1 所示。

表 1 机械产品设计重用方法
Tab.1 Design reuse method of mechanical products

方法	特点
基于结构模块	通过对产品进行模块划分,实现设计各阶段零部件功能、结构和特征的重用。仅可对已有特征做简单修改,适用于较低层次的设计重用
基于本体方法	计算基于本体的概念语义相似度和相关度等实现产品设计重用,支持对设计意图等认知过程知识的提取、检索与重用。需要大量领域词汇,且需要对其相互关系进行精确的描述,系统开发成本高,当前仍处于试验研究阶段
基于规则推理	将设计知识进行提取并建立系统的规则体系,通过一组前提必可得到一组结论。当有新规则加入且与已有规则冲突时,不便于进行修改,不适用于规则难以或无法提取的产品设计
基于实例推理	利用目标案例的描述信息查询过去相似的已有案例,应用条件成熟,支持一定程度的重用创新,在一些大型企业得到应用,对于中小企业由于实例库的规模有限,限制了该方法的应用
基于知识模板	根据知识表示和设计模型,抽象出不同产品间的相似处,具有较高的灵活性和重用创新性,目前处于研究初期阶段
基于 IDEF 方法	含多种具体形式,针对系统功能过程和活动过程进行建模与分析,或通过对实体、属性、关系等定义对信息进行建模描述。对设计过程中模型的适应性修改和支持有限,导致设计模型的可重用性较低,对创新性重用支持不足
零部件重用检索	采用一定的检索算法,从模型库中获取与设计要求相似的模型,与基于模块的设计重用方法相似,适用范围有限
基于可拓学方法	采用可拓模型对设计知识、信息及事物关系进行表达,结合可拓聚类、推理、变换、评价等实现已有设计方案的重用与创新。该方法可实现模型各层次的适应性修改,创新性较好,但主要集中在理论研究,实际应用研究有待加强
基于生物学原理	模仿自然现象的一种全局寻优检索方法,匹配及修改支持性较好,处于理论研究阶段,是当前的研究热点之一

3.2 产品重构技术

3.2.1 可重构设计的内涵

重构是对被分解的产品结构进行优化和重组,经过对解构之后的产品进行分析,可以筛选出必要的部分和可以被删除或者替换的部分,是对现有产品的调整、改进,使产品在结构、功能等方面优化升级。

可重构设计是为解决产品的客户化定制与高效、可靠、低成本间矛盾而提出的一种新的设计和制造思想,通过对产品进行模块化重组,快速响应市场需求^[59-60]。可重构设计根据市场需求的变化,通过重复利用、重新组态快速调整产品的结构、功能和加工工艺,缩短产品开发周期,实现以较低成本获取高质量的投资效益^[61]。产品的可重构性是指以经济

有效的方式重复改变和重新排列系统组件的能力^[62]。可重构设计是使系统具有可重构性的一类设计方法,具体包括可重构产品的设计、可重构制造系统的设计和可重构软件系统的设计^[63]。

3.2.2 可重构设计活动域及过程

可重构设计活动域是重构设计活动过程中涉及的范围及其集合,根据各范围所表达的主要内容,设计活动域可分为用户域(C_u)、功能域(F_r)、物理域(D_p)和过程域(P_v)4部分。从用户提出需求直至满足需求的产品设计过程中,可重构设计表现为各活动域的顺序映射过程^[64]。

用户域即需求域,既含用户对产品用途、性能的要求,又包括企业对生产效率、成本、质量等方面的控制标准。功能域是对技术系统或产品所能完成任务的抽象描述,反映产品所具有的用途和特征,并以功能需求的形式表达设计目标及设计方案。物理域是实现功能需求的物理结构集合,描述产品的结构设计过程,并通过可变设计参数实现满足需求的功能。过程域是描述产品的工艺制造过程和加工方法,以过程变量形式满足产品生产需求。

3.2.3 可重构设计的分类与特点

根据技术层次由低到高的顺序,产品的重构设计可分为调整重构、更换重构、集成重构、创新重构4种类型^[65],呈金字塔状结构,如图4所示。根据可重构设计过程中所针对的目标要素,可重构设计可分为面向功能的可重构设计和面向结构的可重构设计两种类型。

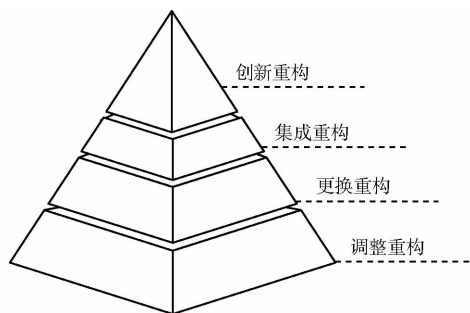


图4 重构层次金字塔

Fig.4 Pyramid of reconstitution hierarchy

面向功能的可重构设计是从功能的角度出发,对产品进行功能模块划分后,根据市场对产品功能的需求,对产品各部分进行重新排列组合,实现对产品功能的调整,以满足当前的需求。其特点在于以产品的功能需求为目标,通过产品重构增加产品功能或去除冗余的功能,从而获得具有可重构性且功能不同的系列产品。适用于通过零部件重新配置即可使产品具有不同功能,或对性能进行调整的产品设计^[66-67]。

面向结构的可重构设计研究通过对产品装配结构进行重组,以满足对产品外形尺寸、质量、成本等方面的要求。其特点是在产品功能不变的前提下,通过产品重构实现对产品的优化改进或作业能力的改变,从而获得可满足不同设计需求的产品。适用于通过功能相同但材料、结构等不同的零部件配置,从而使产品具有不同空间结构、工作方式、强度特性的产品设计^[68-71]。

4 基于 PLM 平台的数字化设计

数字化设计的概念与实际应用是在计算机技术发展 to 一定阶段后出现的,借助 PLM 平台以数字模型及其相关信息数据贯穿产品研发的论证、设计、分析、制造,乃至售后的整个环节。数字化设计从属性上来讲是多种计算机辅助技术 CAX 的集成或链式应用,以三维模型为信息载体,数据高度共享、关联,有效提高企业运行及团队协作的效率。

4.1 产品生命周期管理(PLM)

自 20 世纪 90 年代以来,产品管理的概念从主要管理产品的定义数据,拓展到管理产品设计过程上下游的全链数据^[72]。产品数据的范围也逐渐扩展为包括产品需求、设计、加工、销售、供应、安装和维护等全面信息,这些信息构成了装备企业的核心数据^[73]。产品生命周期管理的主要目的是支持工作人员能够使用计算机系统在产品生命周期的各环节使用并处理这些数据^[74],其体系架构如图5所示。

PLM 是一种管理模式和信息系统,集成组织计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助工艺(Computer aided process planning, CAPP)、产品数据管理(PDM)、企业资源计划(Enterprise resource planning, ERP)、制造执行系统(Manufacturing execution system, MES)、软件配置管理(Software configuration management, SCM)、客户关系管理(Customer relationship management, CRM)等应用系统和企业资源。

相关人员在产品生命周期管理系统的支持下,可以协同进行产品设计、工艺规划、生产制造等活动,并对所产生的业务数据进行系统的管理^[75]。PLM 系统为产品的整个生命周期提供了高度集成的数据、过程和组织环境^[76]。

4.2 数字化设计的概念与内涵

数字化设计以计算机技术为支撑,以数字化信息为表现形式,支持产品建模、分析、性能预测、优化以及生成设计文档^[77-78]。虽然任何基于计算机图

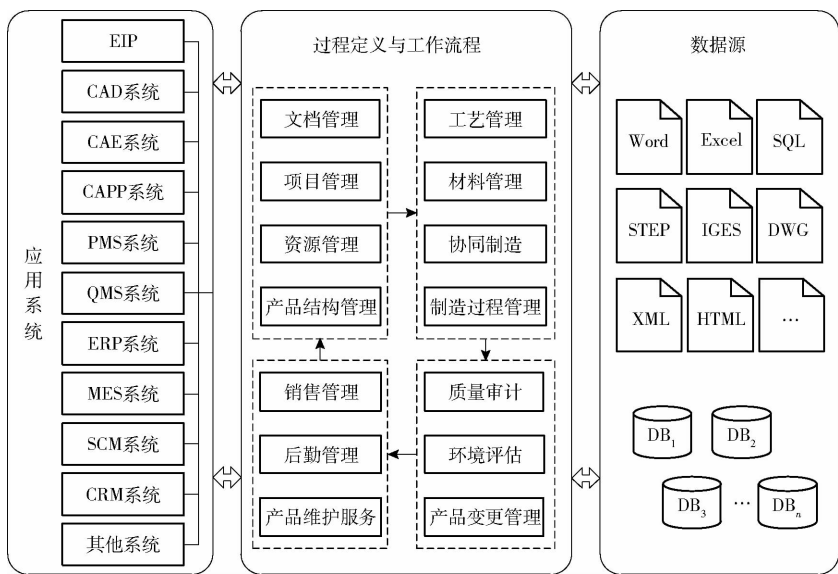


图 5 产品生命周期管理体系框架

Fig. 5 Framework for product lifecycle management

形学 (Computer graphics, CG)、支持产品设计的计算机硬件和软件系统都可以归为产品数字化设计的技术类别,但不可将数字化设计等同于计算机辅助设计。数字化设计的概念是以 3D - CAD 为基础,结合产品设计过程的各项要求,形成的一整套解决方案,以数字信息的形式贯穿于产品研发相关的全过程,与数字化制造、数字化管理共同构成了现代制造业的研发平台。

数字化设计总体上包含结构设计与虚拟验证两大环节,其中结构设计阶段有对应不同设计对象的高效功能化模块,如实体造型、钣金设计、曲面设计、工程制图,以及相应的设计方法学,并可引入知识工程模板,加入经验公式、方案判断、防错机制等辅助功能^[79]。虚拟验证基于结构设计环节所完成的三维模型仿真进行设计审核与工程分析,验证并排除配合干涉、组装拆卸、运动状态、人机界面、结构强度与变形等方面的性能与问题,有效控制下游试制环节的大量返工和方案变更。同时,可将设计的可生产性、可维护性、可操作性等制造、工艺、生产、维护等问题提前到设计阶段,进一步提高研发的效率和水平。

4.3 数字化设计的技术特征

数字化设计强调计算机、数字化信息、网络技术和算法在产品开发中的相互结合与运用^[80]。数字化设计融合先进的计算机设计软件和数据管理技术,通过缩短产品研发周期和提高产品设计质量的途径降低成本,并为生产效率的持续提高奠定基础,具有多种特征与优势^[81]。

4.3.1 统一且附载产品信息的数字模型

传统的产品设计,同一产品在设计过程中各阶

段具有多种定义模式,且定义手段与方法相互独立。在设计的不同阶段对同一产品的重复定义使得最终产品的设计复杂性不断积累和扩展,增加了额外的协调和组织工作,这将导致最终产品的质量降低,研制成本增加和开发时间延迟^[82]。数字化设计技术摒弃了传统的产品重复定义模式,建立了从产品设计到制造的单一计算机化产品定义模型,涵盖了产品由方案论证到发布的整个设计制造及管理过程^[83]。

以数字化设计技术建立的产品模型,其零部件并非独立存在,它集成了零部件和装配体的全部可用信息,是一个全局化数字模型,这一模型可被不同设计环节的工程师调用^[84 - 85]。数字化设计技术可以跟踪搜寻极其复杂的零部件和大型装配体之间的内在关系,项目负责人可以随时通过系统跟踪搜寻,可以在早期的产品设计周期内快速准确地更改设计,而无需花费大量协调时间^[86]。

4.3.2 面向产品生命周期

面向产品生命周期意味着从产品的策划、研发、制造、发布,直至售后的集成,产品生命周期中各个环节的数字化信息都集中承载到模型可对应的数据库中,并相应地于各环节进行专门的管理和维护^[87]。统一且包含完整信息的模型有助于实现产品的设计兼容性分析 (Design compatibility analysis, DCA)、面向装配的设计 (Design for assembly, DFA)、面向制造的设计 (Design for manufacturing, DFM)、面向维修的设计 (Design for serviceability, DFS) 等多项 DFX 集成,对于提高产品设计的效率和质量具有重要的意义^[88 - 89]。

4.3.3 支持协同与虚拟仿真

传统的产品研发采用的是一种串行的工作方

式,整个产品开发过程是一个静态的、顺序的、互相分离的过程。数字化设计支持产品设计的协同与并行,设计工作可以由多个设计团队在不同的地域分头并行设计,协作完成虚拟装配,最终形成一个完整的数字化产品模型。

数字化设计允许产品设计在制造实物样机之前,即产品的实际生产之前,在计算机上通过虚拟仿真完成设计验证。数字化模型不仅能够用于完成结构强度、制造工艺、经济成本、机构功能的分析与测试,还能够可视化地展示给用户,及时接受反馈^[90]。数字化设计在计算机上定义的完整抽象信息与实体形象模型,可以节省大量生产实物模型的费用,并可反复引用,设计缺陷可以被及时发现并解决,减少由设计问题引起的工程反复问题,加快产品的发布^[91]。

4.3.4 可实现面向对象的产品研发

常规的设计方法是一种面向产品结构的设计,强调过程和细节,这种设计方法适应性较广,易于实现产品设计的多样性,但对设计人员的专业知识及综合素质具有较高的要求,专业性极强。

借助现代高端 CAD 软件的二次开发接口,开发第三方软件,将模型、信息等数字化资源与操作平台组织起来,联合运行,通过人机交互,可实现以需求为导向的产品设计。同时,结合模型参数化技术,将规则与标准固化于模型中,并对数字样机(DMU)、工程分析(CAE)等专门模型预设运动机构及边界条件,提供融入专业知识与规范标准的模型资源,从而将面向结构的设计转化为面向对象的设计,大幅降低对研发人员的专业性要求,并有效提高产品设计的准确性与专业性^[92-94]。

综上所述,基于 PLM 平台的数字化设计技术的应用和发展,构建了系统完备的信息化体系,促进了传统制造业的改革和升级,随着信息化进程的加快,制造业的智力转化和管理水平日益增强^[95]。

5 基于知识工程的智能化设计

在相关科学技术发展到一定阶段,具备了广泛集成可能性的前提下,促成了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,智能化设计的概念由此产生。理想的智能化设计系统无需设计者全面了解设计开发系统底层的全部细节,支持缺省检索与模糊推理,通过人机交互的方式,由计算机智能地根据用户需求调动资源进行设计,高效获得满意的产品^[96]。目前,智能化设计整体上处于理论研究与实际应用的探索与试验时期。

在前述的计算机辅助技术、三维模型的资源重

用与产品重构、基于 PLM 平台的数字化设计阶段,已无意识地出现了一些智能化设计的特征与应用,但并未形成系统的理论与体系。智能化设计可以简单地理解为在数字化设计技术及其体系的基础上,模拟人的思维,以知识重用与推理为特征,有机组织与利用设计资源的集成化应用。

农业装备在机械装备中具有最多的种类,高达几千种形式,涉及农艺、环境等复杂因素,加之地域差异显著,导致业装备设计与研发所需要的专业知识与实践经验极其庞杂,个体设计人员难以全面掌握,因此对以知识信息应用为特征的智能化设计需求更为迫切。

5.1 技术体系与系统架构

5.1.1 共性关键技术

智能化设计的共性关键技术包括两大类,一是基础技术,二是特征技术。其中,基础共性关键技术有:计算机辅助设计、参数化建模、数据库、模型库、虚拟仿真、PDM/PLM、专家系统、人机交互;特征共性关键技术有:知识工程、多系统联合与多机制协同。

共性关键技术 in 智能设计理论的指导与组织下形成智能化的设计系统,其进展取决于人们对智能化设计过程的理解,以及在设计方法、设计程序和设计规律等方面适合于计算机处理的设计理论和技术模式研究的不断深入。

就特征技术而言,知识工程以知识信息处理为主,是支持智能系统开发的核心技术。知识工程除涉及常规的知识表示、存储、参数化于模型创建外,更为重要的是如何支持设计过程人工智能的实现,以及知识的再学习。当设计结果不能满足要求时,系统应该能够自动返回到相应的层次,重新组织并调动资源进行再设计,以完成局部或全局的优化任务。同时,采用归纳推理和类比推理等方法总结经验,获得并存储新知识,通过再学习实现功能的自我完善与知识库的自主扩充。多系统联合与多机制协同用于解决集成化体系中多种应用系统联合运行与多维推理机制协同运用等问题。复杂的设计过程一般可分解为若干环节,分别由专门的应用系统及综合的推理机制提供解决方案,各环节有机联合、信息与数据共享,并通过模糊评价和人工神经网络等方法有效解决多环节设计过程中多学科、多目标的决策与优化问题。

5.1.2 智能化设计系统架构

理想的智能化设计系统架构如图 6 所示,具有开放特征与平台属性,各类设计资源流的运行由基于 PDM/PLM 的企业内部循环及基于互联网的行业

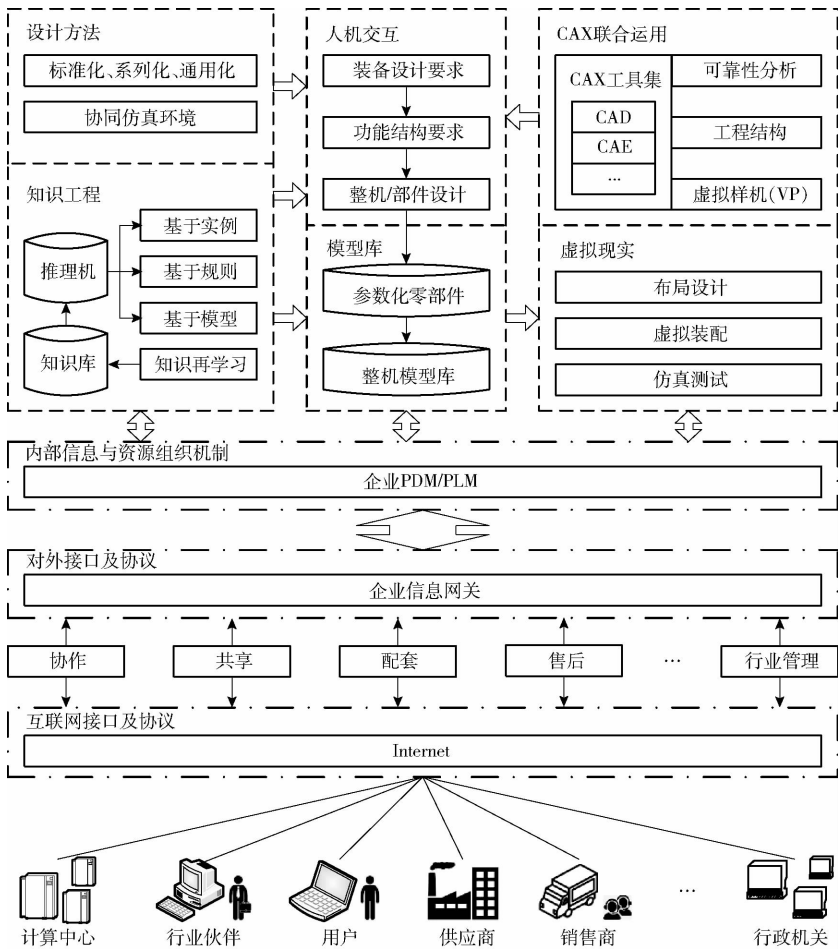


图 6 智能化设计系统架构

Fig. 6 Intelligent design system architecture

循环两个层次组成。

其中,内部循环以企业自身资源共享及再用为特征,基于 CAX 技术与 PLM/PDM 平台,通过内部知识与资源管理体系,有效融合设计规范与专业经验,满足多样化、定制化的农业装备产品研发需求,按功能及技术区域分别设置知识工程、人机交互、模型库、CAX 集成、虚拟现实等结构模块及其子系统,并在结构模块及其子系统内部设置细化组织单元,辅以系统维护、拓展、帮助等服务机制,形成有机的运行体系。

外部循环是在特定机制下的行业设计资源与专业知识有限、有偿共享,涵盖装备领域的行业伙伴、用户、供应商、销售商,社会资源的计算中心,以及行业管理的行政机关等所有相关方,是一种高层次的运行,也是智能化设计概念全内涵的体现与最大优势所在。

5.2 关键科学与技术问题

5.2.1 智能化设计理论与方法

当前农业装备行业通过不同程度的数字化设计平台积累了一定的设计资源与专业知识,但由于缺乏成熟的理论与方法指导,以及系统化和模式化的

利用体系,资源与知识继承与重用度不高,大多以拷贝下载及查询浏览的方式提供低级服务,无法实现设计过程与知识的有效融合,难以满足现代装备产品的设计需求。

建立一套以知识重用与推理为主要特征的农业装备智能化设计专门理论和方法,是智能化技术全面发展与实际应用的前提。同时,研究智能化设计系统架构体系方案的评价方法,包括响应指标的确定、评价因素的选择、因素权重的评估以及评价模型的优化,也是农业装备智能化设计能否取得预期效果的关键因素。通过系统的理论方法与科学的体系架构指导智能化设计系统开发,实现满足用户定制化、多样化需求,以知识工程、数据管理、人工智能、虚拟仿真等现代信息技术为手段,整合机械装备全生命周期管理过程中上下游相关节点资源,集成 PDM/PLM 协同设计平台,实现协同、高效、精准的设计过程。

5.2.2 模型资源的三化组织

规范化的模型及系统的标识是模型程序化识别、产品虚拟组装,以及模型资源化与资源库资源有效调用的前提条件。农业装备类型繁多,工作部件

更是数不胜数,规格不一,导致在模型资源的组织上存在很大难度,在设计和使用阶段需要大量投入管理与识别精力。结合目前我国高端农业装备处于小批量生产模式的现状,难以在控制成本并提高产品质量的同时满足定制化、多样化的产品设计需求。

标准化、系列化、通用化的三化设计及对应的模型资源配置,配合统一的标识方法,使模型真正的资源化,方可有效减轻设计工作量,大幅提高设计质量、缩短生产周期,且便于零部件的大批量生产、维修更换和产品整体质量保证,综合控制企业成本并提高用户满意度。

5.2.3 多学科动态协同仿真与验证

农业装备部件工作条件复杂且面对的作物对象具有强非线性、时空变异性极大的材料力学特性,现有仿真软件难以描述其相互作用过程和有效边界条件的确定,使得仿真验证与实际结果吻合难度大。同时,关键部件仿真验证涉及多个学科,目前通用仿真软件无法实现在动力学计算、控制仿真、流体系统分析等多个仿真过程中的协同工作。需要建立复杂条件下功能部件与作物相互作用多体动力学模型,解决基于通用仿真软件的多学科动态协同仿真技术和虚拟验证方法。

5.2.4 多元知识的组织与再学习

由农业装备的特点所决定,即使同一类装备仍受应用地域、作业环境、作物品种、种植模式,以及生产的组织与管理方式、设计与制造水平、使用与维护技术能力等多因素制约,涉及需求、功能、结构、制造与装配等多个环节,其数据总量庞大、增长快速、种类多样,且因素多变、组合方式多样。目前在设计知识的获取、归纳、分类、表达、推理及推送等方面还没有很好的解决方案。如何快速准确地获取整机及关键零部件设计信息和知识,进行归纳与分类,进而构建合适的设计知识表示模型和应用模式,有效建立农业装备设计知识库,实现智能化的知识服务等问题亟待解决。

同时,装备的发展也必须配合不断发展的农艺技术,系统运行期间能够快速准确地补充获取关键零部件与整机设计信息和知识,与原有知识库有机融合,保持知识库的时效性极为重要。其中,作为开放式的架构体系,再学习知识的科学评判,是新知识相对于已有知识而采用替换、补充或修正的关键,同时也影响基于知识推理的信息流向及信息处理方式,是智能化设计系统中开放运行,自我更新的技术保障。

5.2.5 多源异构数据的组织与传递

装备企业在产品设计以及上下游企业协同设计

中应用了多种专业设计软件,依据了多种企业规范与行业标准,产生了大量异构多源数据,农业装备产品本身又有个性化强、定制要求多、配置设计和变型设计频繁等特点,研发协同中存在数据一致性差、数据共享困难以及信息孤岛等突出问题,有待建立以物料清单(Bill of material,BOM)为核心的多源数据管理模型,突破产品全生命周期中数据组织、传递与共享的瓶颈。

5.2.6 行业开放共享的机制与方法

企业现有 PDM/PLM 以内部局域网架构为主,水平参差不齐,虽有部分高端平台,但实际上大多只用于文档调存和审批流程的简单管理,不能有效集成专业设计软件,尚未形成企业内部资源的有效共享。缺少基于供应链的多维度研发协同管控模型,体系结构不适应农业装备企业应用扩展的需求,难以支持产品全生命周期中供应链上下游各部门的横向协同和产品规划、总体设计、详细设计、试验验证、生产制造的纵向协同。更为突出的是当前企业的 PDM/PLM 在行业内均以一种封闭的单元孤岛形式存在,除内部运行的一些问题外,几乎无对外的端口与相关机制,行业范围的资源共享与信息流动体系无法搭建。

5.3 部分研究进展与技术突破

5.3.1 基于规则转换的变型设计

模型资源的建设及数字样机与仿真技术运用过程中需要大量的模型设计和装配工作,很多为重复性劳动。利用参数化解决装配体的系列变形与变异变型设计,可有效减少基础模型的数量,提高工作效率。装配体通过参数化设计可根据市场的需求对产品进行结构形式上的更新,实现产品的改进,是现代工业产品研发与升级换代的主要形式^[97]。国内外针对装配体参数化变型设计大多停留在具有几何拓扑关系的系列模型,而对于结构发生变化的变异模型的研究鲜有报道,装配体同时实现系列变型与变异变型,在参数化变型设计中具有更大的应用价值。

装配体是具有装配约束关系的零件集合,一个完整的装配体,除要对装配体中各个零件描述外,还需明确零件间相互关联关系,装配体的参数化模型应该包括零件参数化模型和装配体内零件间的参数关联^[98]。装配体的变型是由关键零件变型引起,对装配体进行变型设计前,需先解决零件变型设计,并将装配体的设计主参数转化为零件的驱动参数。装配体参数化层次关系如图 7 所示。为实现变异变型设计过程,需要在核心零件创建过程中,对某些关键尺寸进行“规则”设置,引入新的函数替换原有数值,称为规则转换。

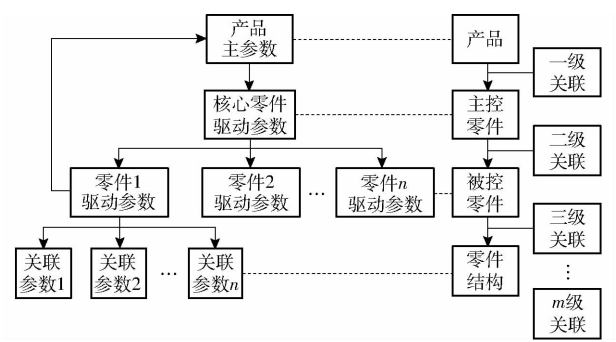


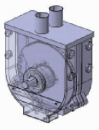
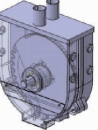
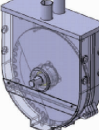
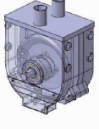
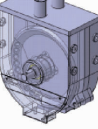
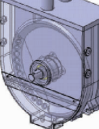
图 7 装配体参数化层次关系

Fig. 7 Parametric hierarchy relationship of assembly

如表 2 所示,为同一个 3D 模型所实现的 2B-JP-FX 系列排种器中 2B-JP-FL 立式种盘及 2B-JP-FP 浅盆形种盘同类两型排种器的系列型与变异变型。

表 2 同体系列变型与变异变型

Tab.2 Serial variation and variant variation based on one model

型式	折边倾角 $\alpha(^{\circ})$	排种盘外圆直径 D/mm		
		160	200	240
立式种盘	0			
浅盆形种盘	40			

规则转换法的效率及有效性取决于约束条件的全面性以及模型间关联函数的清晰表达,是实现装配模型变型的基础,在解决此问题上具有明显的优越性与便捷性。在同一个基础的装配体 3D 模型上同时实现由尺寸改变引发的系列变型及型式变化引发的变异变型设计,对于以模型资源调用与重复利用为技术特征的智能化系统中模型集合的构建,可极大减少基础模型资源的数量,并有效提高模型集的检索与组织效率^[99]。

5.3.2 农业装备模块聚类划分与谱系拓扑

当模型库及其数据规模增大到一定程度,模型资源的组织管理、高效检索以及便捷重用成为必须解决的问题。因此提出了装备谱系与谱系拓扑图的概念,用于对复杂机械装备系统的零部件进行深入的分类与规划,为清晰表达装备系统的组成模块及拓扑关系,从而实现规范化、程序化管理零部件模型,保证信息数据的可用性与易用性奠定基础。谱系拓扑图的制作需经过谱系层次设置、模块化分解与聚类分析等前期工作准备。

谱系层次设置是整个拓扑图构建过程的重要阶段,按照资源库的层次化设计原则,以装备分类设置基础层次结构,结合对象装备设计领域的专业知识和相关特征,采用自顶向下的方法,依次将各类的零部件按功能与类型逐层分解,形成具有单一继承关系树状结构的谱系层次,如图 8 所示。

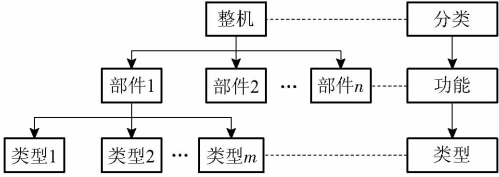


图 8 谱系层次结构

Fig. 8 Pedigree layer structure

模块化分解是针对零部件各自功能,利用模糊聚类分析对零部件进行单元聚合,结合装备实际应用中零部件所属类别确定装备的功能模块分组,完成模块化分解,分解流程如图 9 所示。

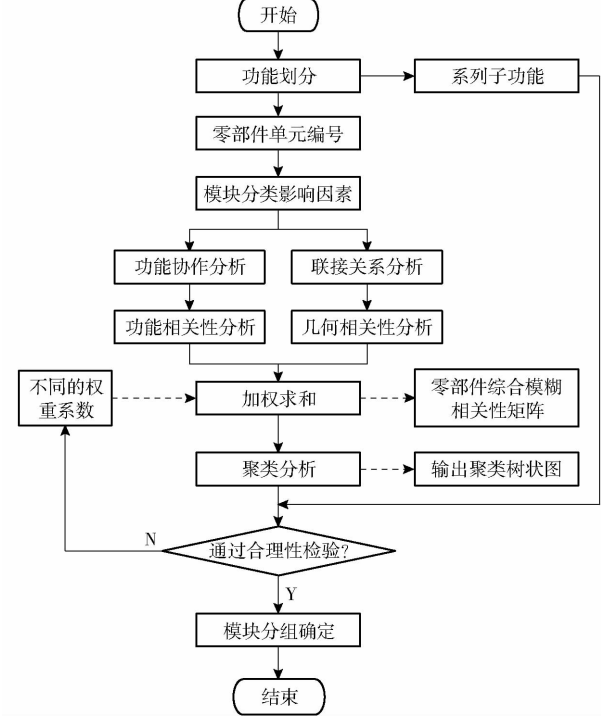


图 9 模块化分解流程图

Fig. 9 Flow chart of modularity decomposition

模块分组遵循各模块应彼此独立且结构完整、模块间相关性较弱且模块内各个单元间相关性较强、模块分解程度适中的三原则。为了使模块分类结果具有足够的准确性与通用性,将功能与结构相互结合、映射。根据零部件间存在的功能相关性与几何相关性,通过加权求和方法计算并建立综合相关矩阵,然后使用模糊聚类分析确定分组。

根据最终的模块化分解结果,结合谱系层次进行归纳与整合,即可构建出装备谱系拓扑图。谱系拓扑图以装备分类为基本组成单元,具有与模块化

分解相对应的层次结构,逐层分布专用件模块、标准件模块、通用件模块及系列功能模块,除拓扑指向与连接关系外,辅以色块方式表示功能模块之间的相关性。谱系拓扑图不仅为模型的资源化组织、索引与重复利用提供路径引导,也为模型资源中相关性较高的零部件间优先匹配性检索提供了重要的信息来源^[100]。

5.3.3 资源模型的全息物元化标识

为系统、规范、全面地表达数字模型信息,适应复杂机械装备零部件的互换性装配,以及模型库系统性扩展与维护要求,提出全息物元化标识的概念。这里将全息物元化标识定义为数字模型检索及实现自动装配所需的全部信息被以物元形式完整标记的过程。全息标识体系可为标准化的数字模型库的构建提供方法和规则,规则化标识和标准化模型可为模型资源的检索与虚拟装配提供丰富的可重用资源和信息。

全息标识结构由基本信息和装配信息两部分组成,包含数字模型调用和虚拟装配所需的全部要素,如图 10 所示。

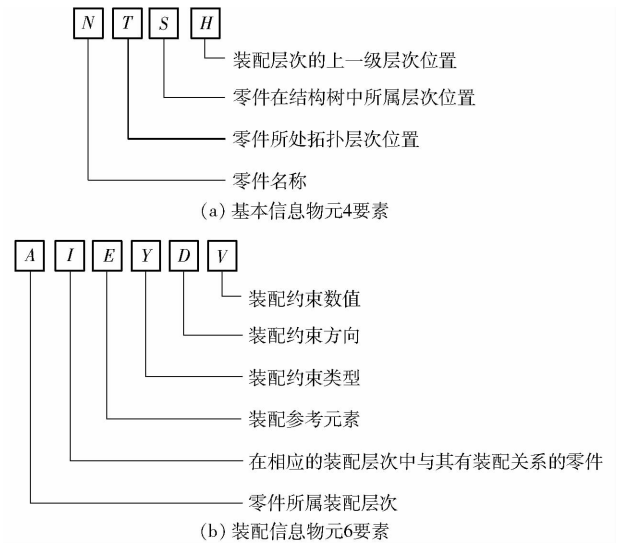


图 10 全息标识结构与物元要素

Fig. 10 Holographic identification structure and matter-element factors

基本信息物元由零件名称、零件所处拓扑层次位置、零件在装配结构树中所属层次位置和上一级层次位置 4 要素构成,以有序的四元组 $B = (N, T, S, H)$ 表达。装配信息物元定义为零件所属装配层次、与其有装配关系的零件、装配参考元素、装配约束类型、装配约束方向和装配约束数值 6 要素,以有序六元组 $R = (A, I, E, Y, D, V)$ 表达。

为使信息计算机可读,将基本物元和装配物元要素语义抽象为编码,并制定普适性与精简性兼具的语义编码规则,满足信息表达的完整性与可计算性。配套开发辅助标识软件,实现面对任何一般装

配体,通过对装配体装配信息的分析与提取,以人机交互的形式实现模型的全息标识和装配参考元素的创建,快速完成数字模型的资源转化,为全息物元化标识方法的实用性提供了技术保障^[101]。

5.3.4 基于物元标识的虚拟装配

产品的装配是制造过程的关键环节,装配质量是产品性能的重要影响因素。据统计,装配成本在制造成本中的比重超过 40%,装配工作量占产品制造工作总量 20% 以上,最高可达 70%^[102]。虚拟装配技术对优化产品设计、避免或减少物理模型制作、缩短装配周期、降低装配成本、提高装配质量和效率具有重要意义。但利用计算机辅助设计(CAD)软件进行的虚拟装配,主要依靠用户手动添加繁琐的约束关系,并且在装配组件形状体征变化时,无法适时更新重新装配,不能满足复杂机械装备数字化模型的快速装配^[103]。因此,研究人员尝试基于 CAD 软件二次开发的智能装配技术,以期为复杂装配体的快速虚拟装配提供一种可行的方法和高效的模式。国内外对于智能装配技术中的人机交互、装配序列规划、装配建模、装配路径、碰撞检测及可装配性等方面进行了广泛的研究,但在农业装备设计制造领域的应用还处于起步阶段。现有虚拟装配系统普遍缺乏对复杂零部件的装配情景的分析能力,难以准确预测用户的意图,导致系统智能性较差,用户认知负荷较重^[104]。

目前,主流的三维设计软件均为用户提供了多种开放式接口,支持第三方的开发软件对其进行后台操作与驱动,为智能化虚拟装配提供了基本条件。基于装配物元标识的智能装配系统,以 VB (Visual Basic) 为开发语言,结合 CATIA (Computer aided three-dimensional interactive application) 的二次开发,辅以人机交互界面,完成装配信息的提取与分析,并将信息整合转化为装配约束,实现智能引导下的自动装配^[105]。虚拟装配流程如图 11 所示。

装配过程包括操作平台软件访问、装配物元信息的获取、装配层次顺序的确定、相关零部件级依次组合、装配约束驱动等环节。装配过程通过人机交互引导、监视及必要的人工干预:在装配顺序区域中,可以人工设置装配层次,如不做设置则默认为系统缺省;完成装配层次设置后,在引导装配区域按照由低到高的层次顺序依次进行逐级装配,一级装配完成后自动保存,并可以进行查看和另存设置,确认无误后进行下一等级的装配,直至完成总装配。

5.3.5 基于知识图谱的知识服务体系

知识图谱 (Knowledge graph) 又称为科学知识图谱,在图书情报界解释为知识域可视化或知识领域

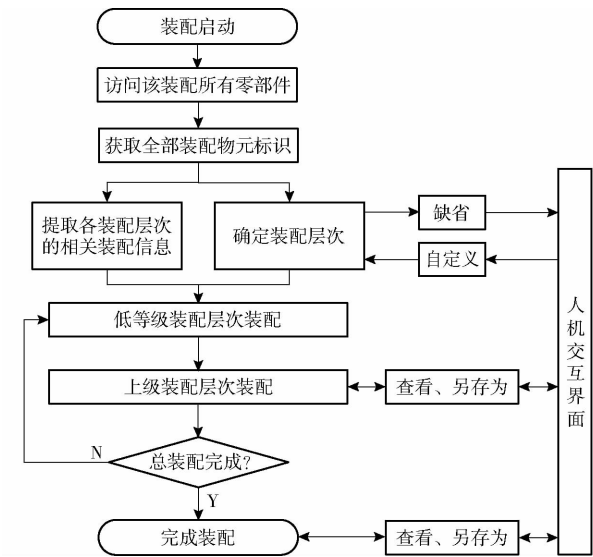


图 11 虚拟装配流程图
Fig. 11 Virtual assembly process

映射地图,是显示知识发展进程与结构关系的一系列各种不同的图形,用可视化技术描述知识资源及其载体,挖掘、分析、构建、绘制和显示知识及它们之间的相互联系。

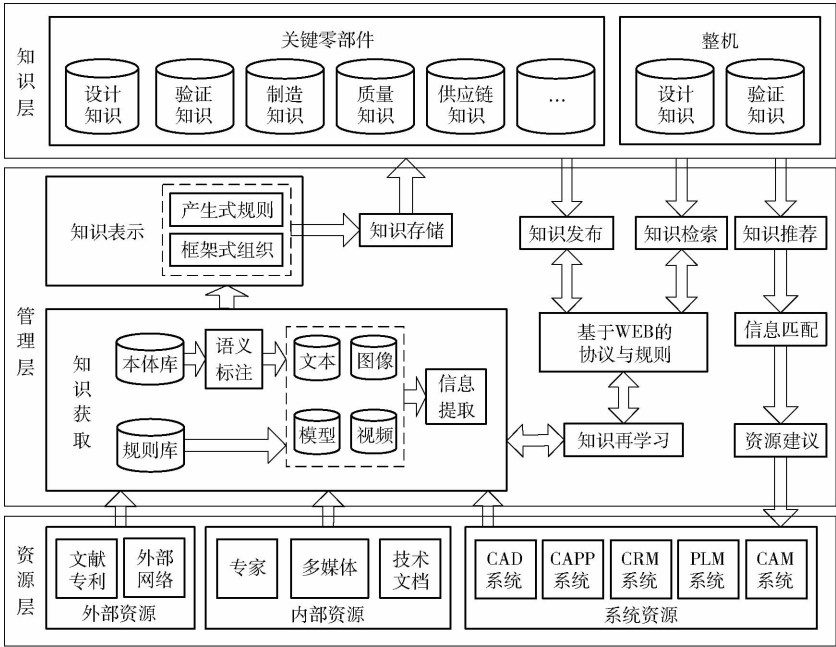


图 12 农业装备智能化设计知识服务体系
Fig. 12 Agricultural equipment intelligent design knowledge service system

6 结论与展望

6.1 结论

(1)先进设计是一个相对的概念,不同时代有其不同的特点与具体的方法,但构成先进设计的要素是不变的,一是当时的科学技术基础,二是针对性的设计理论,二者缺一不可。随着人们对先进设计发展规律认识的深入,以及科学技术的不断进步,先进设计的更新与升级呈现出不断加速的趋势。

农业装备整机及关键零部件设计知识数据总量庞大、增长快速、信息率低、数据种类多样,基于知识图谱技术的知识服务系统可有效解决智能化设计中的设计知识获取、表达、呈现、推送及管理等问题,能提供智能搜索、智能推荐和智能管理等功能。

应用知识工程理论和方法,将农业装备设计知识分为实例类、规则类、参数类和资料类等形式,采用面向对象的产生式规则与框架式组织相结合的混合知识表示方法,将文本、图像、三维模型、视频等不同类型数据的特征提取,实现多元异构农业装备设计知识的统一表达,进而支持知识的关联推送^[106]。通过知识图谱直观辨识农业装备前沿的演进路径和内部联系,借助实例、规则和模型相结合的推理机技术,优化知识检索、推荐和管理等服务^[107-108]。构建包含知识获取、表示、存储、发布、检索、评价、推理等知识复合重用与联合驱动,以及自主再学习的农业装备智能化设计知识服务体系,如图 12 所示。

知识服务体系采用资源层、管理层和知识层的 3 层次结构,由中间的管理层联接上下层,基于网络运行,统筹知识的获取、储存、运用及相关服务。

(2)21 世纪以来,以计算机辅助设计为基础的各种先进设计技术与方法互为支撑、交叉递进,划代与分级界线不明显,但数字化为主线的集成融合、联合架构,智能化、自动化运行的特征显著。

(3)智能化设计代表了当今时代的先进设计及发展趋势,是相关科学技术发展到一定阶段后,促成的设计从数据资源密集型向知识信息密集型的集成式转化。智能化设计是人工智能在设计上的应用,以知识重用与推理、学科交叉与融合、平台开放与共

享为典型特征,是设计资源有机组织与综合利用的最高级形式。

(4)农业装备智能化设计目前整体上处于理论研究和实际应用的探索与试验时期,距有效的实用性开发和推广尚有很长的距离。有关智能化设计理论与方法、模型资源三化组织、动态协同仿真和验证、多元知识组织与再学习、异构数据的组织及传递、行业开放共享等诸多理论、技术以及机制等问题有待解决。

6.2 展望

中国整体科技水平的高速发展与先进科学技术

的不断积累,现已具备实现农业装备智能化设计的各项条件,应将智能化设计提升至国家高技术发展的战略层面,通过系统的规划与顶层设计,协调并融合高校、科研院所、企业等相关单位,以合理的机制打通各部门设计资源与信息的孤岛壁垒,实现行业资源的有偿、适度、分类共享,顺畅企业内部循环及基于互联网的行业循环。

充分融合现代信息技术的最新发展,引入云计算、大数据等信息领域的前沿技术,强化知识调动及优化设计资源的效率与效果,扭转中国农业装备研发水平低下、国际竞争力不足的局面。

参 考 文 献

- [1] 国家中长期科学和技术发展规划纲要[EB/OL]. http://www.gov.cn/jrzq/2006-02/09/content_183787.htm.
- [2] 国务院关于印发《中国制造2025》的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [3] 国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020年)全文[EB/OL]. http://www.gov.cn/jrzq/2008-11/13/content_1148414.htm.
- [4] 国务院关于促进农业机械化和农机工业又好又快发展的意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zwqk/2010-07/09/content_1649568.htm.
- [5] 刘宏新,周向荣,李蓉,等.复式播种单元3D模型参数化数字资源研究[J].东北农业大学学报,2014,45(12):105-111. LIU Hongxin, ZHOU Xiangrong, LI Rong, et al. Parametric digital resources research on 3D model of compound seeding unit [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45(12): 105-111. (in Chinese)
- [6] 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(Suppl. 2): 262-267. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s249&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.049. (in Chinese)
- [7] TOFAEL A, TIAN L, LIU H X. Spectral sensing for dry matter biomass estimation of energy crops[C]//2010 ASABE Conference, Pittsburgh, 2010.
- [8] 刘宏新,宋微微,廉光赫.基于CATIA的大型农具机架有限元分析与结构优化[J].东北农业大学学报,2012,43(11):116-121. LIU Hongxin, SONG Weiwei, LIAN Guanghe. Finite element analysis and structural optimization of large agricultural machinery frame based on CATIA[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(11): 116-121. (in Chinese)
- [9] LIU H X, GUO L F, FU L L, et al. Study on multi-size seed-metering device for vertical plate soybean precision planter[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(1): 1-8.
- [10] 臧宇,朱忠祥,宋正河,等.农业装备虚拟试验系统平台的建立[J].农业机械学报,2010,41(9):70-74,127. ZANG Yu, ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, et al. Establishment of virtual experiment system platform for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 70-74, 127. (in Chinese)
- [11] 刘宏新,孟永超,李彦龙,等.沼肥采运车储罐动力学数值模拟与相似模型试验[J].农业工程学报,2015,31(17):42-49. LIU Hongxin, MENG Yongchao, LI Yanlong, et al. Numerical simulation of dynamic and similarity model test of tank in biogas fertilizer transport truck[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 42-49. (in Chinese)
- [12] 刘宏新,徐晓萌,刘俊孝,等.利用高速摄像及仿真分析立式浅盘型排种器工作特性[J].农业工程学报,2016,32(2):13-19. LIU Hongxin, XU Xiaomeng, LIU Junxiao, et al. Working characteristics of vertical shallow-basin type seed-metering device based on high-speed photography and virtual simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 13-19. (in Chinese)
- [13] 曹丽娜,田晓霞.三维CAD技术在机械设计中的应用研究[J].装备制造技术,2014(6):97-99. CAO Lina, TIAN Xiaoxia. Application of 3D CAD technology in mechanical design[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(6): 97-99. (in Chinese)
- [14] WANG H, ZENG Y, LI E, et al. "Seen Is Solution" a CAD/CAE integrated parallel reanalysis design system[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016, 299: 187-214.
- [15] 刘宏新.三维机械设计[M].北京:科学出版社,2018.
- [16] LIU H X. Research of the primary agricultural mechanization in developing country[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2009, 16(4): 63-69.
- [17] 刘永贤,蔡光起.机械工程概论[M].北京:机械工业出版社,2010:10-15.
- [18] 刘宏新.三维机械设计[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [19] 张武.计算机辅助设计CAD技术在机械设计及制造中的应用[J].现代制造技术与装备,2017(2):82,84.

- ZHANG Wu. Application of computer aided design CAD technology in mechanical design and manufacture[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017(2): 82, 84. (in Chinese)
- [20] FOUGÈRES A J, OSTROSI E. Intelligent agents for feature modelling in computer aided design[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2018, 5(1): 19–40.
- [21] CHANG Y S, CHEN M Y C, CHUANG M J, et al. Improving creative self-efficacy and performance through computer-aided design application[J]. Thinking Skills and Creativity, 2019, 31(3): 103–111.
- [22] JHANJY Y. Computer-aided design—garment designing and patternmaking[M] // NAYAK R, PADHYE R. Automation in garment manufacturing. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2018: 253–290.
- [23] HORVÁTH I, VROOM R W. Ubiquitous computer aided design: a broken promise or a Sleeping Beauty? [J]. Computer-Aided Design, 2015, 59(2): 161–175.
- [24] QIN Y, LU W, QI Y, et al. Status, comparison, and issues of computer-aided design model data exchange methods based on standardized neutral files and web ontology language file[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2017, 17(1): 010801.
- [25] PAN Z, WANG X, TENG R, et al. Computer-aided design-while-engineering technology in top-down modeling of mechanical product[J]. Computers in Industry, 2016, 75(1): 151–161.
- [26] 刘孜文. 计算机辅助设计在农业机械中的应用[J]. 农业机械, 2016, 59(2): 108–110.
- [27] LINDSAY K, POPP MICHAEL, ASHWORTH A, et al. A decision-support system for analyzing tractor guidance technology [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153(10): 115–125.
- [28] 刘宏新, 贾儒, 李彦龙, 等. 区域逼近与动态图形法求解大行程液压支撑机构参数及优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 1–9.
- LIU Hongxin, JIA Ru, LI Yanlong, et al. Parameters solving and optimization of long working stroke hydraulic support mechanism using regional approximation and dynamic graphical solution[J]. Transactions of the CSEA, 2017, 33(4): 1–9. (in Chinese)
- [29] 冷坚. 计算机辅助技术在农业机械设计中的应用[J]. 北京农业, 2014, 34(30): 240.
- [30] ZENG Z, CHEN Y, ZHANG X. Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 130–138.
- [31] 刘宏新, 苏航, 李金龙, 等. 滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 58–68.
- LIU Hongxin, SU Hang, LI Jinlong, et al. Interactive optimal design system of drum-type no-till planter mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 58–68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190306&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2019.03.006. (in Chinese)
- [32] YUAN J, WU C, LI H, et al. Movement rules and screening characteristics of rice-threshed mixture separation through a cylinder sieve[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 320–329.
- [33] TAN C L, VONDEREMBESE M A. Mediating effects of computer-aided design usage: from concurrent engineering to product development performance[J]. Journal of Operations Management, 2006, 24(5): 494–510.
- [34] HEINTZ J, BELAUD J P, PANDYA N, et al. Computer aided product design tool for sustainable product development[J]. Computers & Chemical Engineering, 2014, 71(4): 362–376.
- [35] 丁红宇, 张红旗. 《机械产品三维建模通用规则》系列标准研究[J]. 机械工业标准化与质量, 2009(11): 30–32.
- [36] PIDD M. Simulation software and model reuse: a polemic[C] // Simulation Conference, San Diego, 2002.
- [37] PETTY M D, WEISEL E W. A formal basis for a theory of semantic composability[C] // Proceedings of the Spring Simulation Interoperability Workshop, Orlando, 2003.
- [38] 梁义芝, 张维石, 康晓予, 等. 仿真模型重用方法综述[J]. 计算机仿真, 2008, 25(8): 1–5, 13.
- LIANG Yizhi, ZHANG Weishi, KANG Xiaoyu, et al. A survey of model reuse methods[J]. Computer Simulation, 2008, 25(8): 1–5, 13. (in Chinese)
- [39] BALCI O, ARTHUR J D, ORMSBY W F. Achieving reusability and composability with a simulation conceptual model[J]. Journal of Simulation, 2011, 5(3): 157–165.
- [40] 李文豪, 李密, 赵鹏, 等. 仿真概念模型可重用性评估[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(2): 92–96.
- LI Wenhao, LI Mi, ZHAO Peng, et al. Reusability assessment of simulation conceptual model[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(2): 92–96. (in Chinese)
- [41] 刘营, 张霖, 赖李媛君. 复杂系统仿真的模型重用研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(7): 743–766.
- LIU Ying, ZHANG Lin, LAI Liyuanjun. Study on model reuse for complex system simulation [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2018, 48(7): 743–766. (in Chinese)
- [42] 刘洪豪, 赵秀艳, 张开兴, 等. 基于三维小波变换的农机 CAD 模型特征提取与评价方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 338–346, 274.
- LIU Honghao, ZHAO Xiuyan, ZHANG Kaixing, et al. Feature extraction and evaluation for agricultural CAD model based on 3D wavelet transformation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 338–346, 274. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s045&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2018. S0.045. (in Chinese)

- [43] GU L Z, JIE X J, HONG Q. Approach toward parametric design of typical parts and parts-library based on UG[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 84 – 85: 8 – 13.
- [44] 马嵩华, 田凌. 领域本体组织的自助式零件库[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(2): 250 – 258.
MA Songhua, TIAN Ling. Self-service parts library organized by domain ontology[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(2): 250 – 258. (in Chinese)
- [45] PAN Z, WANG X, TENG R, et al. A synchronous CAD/CAE modeling method and applications in parametric parts library[J]. *Open Mechanical Engineering Journal*, 2015, 9(1): 189 – 195.
- [46] 武守飞, 潘晓弘, 张勇, 等. 面向大批量定制的设计重用支撑平台研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(2): 258 – 264.
WU Shoufei, PAN Xiaohong, ZHANG Yong, et al. Design reuse supporting platform for mass customization[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(2): 258 – 264. (in Chinese)
- [47] 李博. 设计重用研究综述[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(3): 453 – 463.
LI Bo. Review on design reuse research[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(3): 453 – 463. (in Chinese)
- [48] DUFFY S M, DUFFY A H B. Sharing the learning activity using intelligent CAD[J]. *Artificial Intelligence for Engineering, Design, Analysis and Manufacturing*, 1996, 31(5): 403 – 436.
- [49] BRIERE-COTE A, RIVEST L, DESROCHERS A. Adaptive generic product structure modelling for design reuse in engineer-to-order products[J]. *Computers in Industry*, 2010, 61(1): 53 – 65.
- [50] 刘雪梅, 张启成, 李爱平, 等. 基于模块模板的桥式起重机桥架的可重用设计[J]. *中国工程机械学报*, 2010, 8(4): 409 – 414.
LIU Xuemei, ZHANG Qicheng, LI Aiping, et al. Reusable design for crane bridges using modular templates[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2010, 8(4): 409 – 414. (in Chinese)
- [51] MAHER M L, GARZA A D S. Case-based reasoning in design[J]. *IEEE Expert*, 1995, 12(2): 34 – 41.
- [52] 宋正河, 毛恩荣. 基于范例推理的人机界面设计系统[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2007, 34(5): 66 – 69.
SONG Zhenghe, MAO Enrong. Human-machine interface design system based on CBR[J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2007, 34(5): 66 – 69. (in Chinese)
- [53] CHEN X, GAO S, GUO S, et al. A flexible assembly retrieval approach for model reuse[J]. *Computer-Aided Design*, 2012, 44(6): 554 – 574.
- [54] JEONG K Y, WU L, HONG J D. IDEF method-based simulation model design and development[J]. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2009, 2(2): 337 – 359.
- [55] 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?file_no=2013s250&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.050. (in Chinese)
- [56] 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.
- [57] 张开兴, 杭晟煜, 赵秀艳, 等. 面向设计重用的三维 CAD 模型局部结构检索方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 405 – 412, 375.
ZHANG Kaixing, HANG Shengyu, ZHAO Xiuyan, et al. Effective subpart retrieval method of 3D CAD models for design reuse[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 405 – 412, 375. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170752&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.052. (in Chinese)
- [58] 张开兴, 杭晟煜, 王金星, 等. 基于模拟退火的三维模型典型结构挖掘与相似性评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(3): 402 – 410.
ZHANG Kaixing, HANG Shengyu, WANG Jinxing, et al. Typical structure mining in 3D model and similarity evaluation based on simulated annealing algorithm[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 402 – 410. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.spx?file_no=20180351&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.051. (in Chinese)
- [59] KOREN Y, UISOY A. Reconfigurable manufacturing systems[R]. Ann Arbor: Engineering Research Center for Reconfigurable Machining Systems Report No.1, The University of Michigan, 1997.
- [60] KOREN Y. Reconfigurable manufacturing systems[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 1999, 29(4): 130 – 141.
- [61] 罗振璧, 盛佰浩, 赵晓波, 等. 快速重组制造系统[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(3): 300 – 303.
- [62] SETCHI R M, LAGOS N. Reconfigurability and reconfigurable manufacturing systems: state-of-the-art review[C]// *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 2004.
- [63] 李中凯. 产品族可重构设计理论与方法及其在大型空分装备中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
LI Zhongkai. Theories and methodologies for product family reconfigurable design and application in large scale air separation systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
- [64] 胡光忠, 肖守纳, 肖世德, 等. 机械产品模糊可重构设计原理与方法[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(1): 116 – 121.

- HU Guangzhong, XIAO Shoune, XIAO Shide, et al. Fuzzy reconfigurable design principles and methods of complex mechanical products[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1): 116 – 121. (in Chinese)
- [65] 田波,梁锡昌,潘继生.基于可重构的轮辋自动加工机床[J].机械工程学报,2007,43(6):216 – 219.
TIAN Bo, LIANG Xichang, PAN Jisheng. Automatic working machine tools of wheel rims based on reconfiguration[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 216 – 219. (in Chinese)
- [66] YASSINE A, JOGLEKAR N, BRAHA D, et al. Information hiding in product development: the design churn effect[J]. Research in Engineering Design, 2003, 14(3): 145 – 161.
- [67] 蒋建东,叶永伟,张宪,等.基于CBR小型农业作业机的可重构设计[J].农业机械学报,2006,37(6):32 – 35.
JIANG Jiandong, YE Yongwei, ZHANG Xian, et al. Study on small agricultural machinery products reconfigurable design based on CBR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 32 – 35. (in Chinese)
- [68] YIGIT A S, ULSOY A G, ALLAHVERDI A. Optimizing modular product design for reconfigurable manufacturing[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2002, 13(4): 309 – 316.
- [69] AGARD B, KUSIAK A. Data-mining-based methodology for the design of product families[J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(15): 2955 – 2969.
- [70] 李盼盼,谌炎辉,胡旭宇,等.重构模块化产品并提高重用的优选算法研究[J].机械设计与制造,2016(11):241 – 244.
LI Panpan, CHEN Yanhui, HU Xuyu, et al. Research on optimized options algorithm method through reconstruct modular product and improve reuse[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(11): 241 – 244. (in Chinese)
- [71] 杨欣霖,张建辉,谭若诗,等.CAI驱动机械产品CAD模型重构研究[J].机械设计与制造,2017(6):123 – 126.
YANG Xinlin, ZHANG Jianhui, TAN Ruoshi, et al. Research on CAD model reconstruction of mechanical products driven by CAI[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(6): 123 – 126. (in Chinese)
- [72] KONOVALENKO I, LUDWIG A. Event processing in supply chain management—the status quo and research outlook[J]. Computers in Industry, 2019, 105(2): 229 – 249.
- [73] DALLASEGA P, RAUCH E, LINDER C. Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: a systematic literature review[J]. Computers in Industry, 2018, 99(8): 205 – 225.
- [74] XIN Y, OJANEN V, HUISKONEN J. Knowledge management in product-service systems—a product lifecycle perspective[J]. Procedia CIRP, 2018, 73: 203 – 209.
- [75] 王成恩,郝永平,舒启林.产品生命周期建模与管理[M].北京:科学出版社,2004.
- [76] 贺华玲.PLM中工作组级三维协同设计管理的研究与实现[D].武汉:华中科技大学,2012.
HE Hualing. The research and development of 3D collaborative design management based on workgroup in PLM[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [77] 苏春.数字化设计与制造[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [78] 刘检华,孙连胜,张旭,等.三维数字化设计制造技术内涵及关键问题[J].计算机集成制造系统,2014,20(3):494 – 504.
LIU Jianhua, SUN Liansheng, ZHANG Xu, et al. Connotation and key problem of three-dimensional digital design and manufacturing technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 494 – 504. (in Chinese)
- [79] MAROPOULOS P G, CEGLAREK D. Design verification and validation in product lifecycle[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 740 – 759.
- [80] HARRIS S L, HARRIS D M. Digital design and computer architecture[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2016.
- [81] CHENG Y D, LIU A G, CHEN G. Research on key data management technology in high energy physics grid[J]. Application Research of Computers, 2007, 24(10): 20 – 22.
- [82] TAO F, ZHANG M, NEE A Y C. Digital Twin driven smart manufacturing[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2019.
- [83] 陈志,杨方飞.农业机械数字化设计技术[M].北京:科学出版社,2013.
- [84] 蔡敏,卢佩,陶俐言.面向复杂产品的数字化装配系统体系结构[J].计算机集成制造系统,2013,19(11):2757 – 2764.
CAI M, LU P, TAO L Y. Architecture of digital assembly system for complex product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(11): 2757 – 2764. (in Chinese)
- [85] VILLAGE J, SALUSTRI F A, NEUMANN W P. Using action research to develop human factors approaches to improve assembly quality during early design and ramp-up of an assembly line[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2017, 61(9): 107 – 119.
- [86] 阎楚良,杨方飞.机械数字化设计新技术[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [87] AßMANN G, STETTER R. Position evaluation in industrial product life-cycles[J]. Procedia CIRP, 2017, 62: 553 – 558.
- [88] 周思杭.产品装配质量设计、预测与控制理论、方法及其应用[D].杭州:浙江大学,2013.
ZHOU Sihang. Design, prediction and control of product assembly quality and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [89] RIEL A, KREINER C, MACHER G, et al. Integrated design for tackling safety and security challenges of smart products and digital manufacturing[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 177 – 180.
- [90] EZEKIEL J, LUTTGEN G, SIMINICEANU R. To parallelize or to optimize? [J]. Journal of Logic and Computation, 2011, 21(1): 85 – 120.
- [91] KUIJK J V, DAALHUIZEN J, CHRISTIAANS H. Drivers of usability in product design practice: induction of a framework

- through a case study of three product development projects[J]. *Design Studies*, 2019, 60(1): 139–179.
- [92] 宋正河,毛恩荣,周一鸣.面向对象的机械系统虚拟人机界面建模方法的研究[J]. *中国农业大学学报*, 2005, 10(5): 69–72.
SONG Zhenghe, MAO Enrong, ZHOU Yiming. Modeling method of virtual human-machine interface in mechanical system based on object-oriented technology[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10(5): 69–72. (in Chinese)
- [93] 刘宏新,周兴宇,徐晓萌,等.浅盆型立式种盘模型第三方程序驱动系列化设计[J]. *农机化研究*, 2016, 38(1): 76–80.
LIU Hongxin, ZHOU Xingyu, XU Xiaomeng, et al. Third-party applications driven series design for model of vertical shallow basin type seed plate[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(1): 76–80. (in Chinese)
- [94] 刘宏新,安晶玉,王登宇,等.基于全息模型库的数字样机运动机构交互式创建系统[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 377–387.
LIU Hongxin, AN Jingyu, WANG Dengyu, et al. Digital prototype motion mechanism interactive creation system based on holographic model library[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3): 377–387. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190343&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.043. (in Chinese)
- [95] ZHOU J, LI P G, ZHOU Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing[J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 11–20.
- [96] POKOJSKI J, OLEKSINSKI K, PRUSZYNSKI J. Knowledge based processes in the context of conceptual design[J/OL]. *Journal of Industrial Information Integration*, [07–26–2018]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X17300754>.
- [97] LIU Q, XI J. Case-based parametric design system for test turntable[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(6): 508–516.
- [98] 姚春革,孙永厚,匡兵,等.基于参数化技术的装配件变型设计[J]. *计算机系统应用*, 2012, 21(7): 160–163.
YAO Chunge, SUN Yonghou, KUANG Bing, et al. Assembly variant design based in parameterization[J]. *Computer Systems & Applications*, 2012, 21(7): 160–163. (in Chinese)
- [99] 刘宏新,付露露,周兴宇,等.基于规则转换的机械式排种器系列与变异变型设计[J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(11): 77–85.
LIU Hongxin, FU Lulu, ZHOU Xingyu, et al. Series and variation design of mechanical seed-metering device based on conversion of rule[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(11): 77–85. (in Chinese)
- [100] 刘宏新,付露露,贾儒,等.大豆播种装备谱系模块聚类划分方法[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 43–50.
LIU Hongxin, FU Lulu, JIA Ru, et al. Partition method for module clustering of soybean seeding equipment pedigree[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(19): 43–50. (in Chinese)
- [101] 刘宏新,贾儒,郭丽峰,等.数字模型全息标识体系与辅助标识方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 414–426.
LIU Hongxin, JIA Ru, GUO Lifeng, et al. Hierarchy of holographic identification and technology of auxiliary identification [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 414–426. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180949&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.049. (in Chinese)
- [102] 曾冰,李明富,张翼,等.基于萤火虫算法的装配序列规划研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(11): 177–184.
ZENG Bing, LI Mingfu, ZHANG Yi, et al. Research on assembly sequence planning based on firefly algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(11): 177–184. (in Chinese)
- [103] 陆皆炎,赵高晖,李祥,等.基于CATIA二次开发的智能装配技术[J]. *机械设计与制造*, 2012, 28(5): 84–90.
LU Jieyan, ZHAO Gaohui, LI Xiang, et al. Automatic assembly technology based on secondary development with CATIA [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012, 28(5): 84–90. (in Chinese)
- [104] HOLLENDER N, HOFMANN C, DENEKE M, et al. Integrating cognitive load theory and concepts of human-computer interaction[J]. *Computers in Human Behavior*, 2010, 26(6): 1278–1288.
- [105] 刘宏新,贾儒,周兴宇,等.基于物元标识的人机交互式机械排种器虚拟装配[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 38–45.
LIU Hongxin, JIA Ru, ZHOU Xingyu, et al. Virtual assembly of man-machine interactive mechanical seed-metering device based on matter-element identification[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(1): 38–45. (in Chinese)
- [106] 陈永府,杨小献,黄正东,等.基于规则的数据收集研究[J]. *计算机工程与设计*, 2007, 28(1): 158–161.
CHEN Yongfu, YANG Xiaoxian, HUANG Zhengdong, et al. Research on rule-based data collection [J]. *Computer Engineering and Design*, 2007, 28(1): 158–161. (in Chinese)
- [107] 万立,侯添元,熊体凡.面向重用的产品设计过程知识建模与检索[J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33(8): 3176–3183.
WAN Li, HOU Tianyuan, XIONG Tifan. Knowledge modeling and retrieval for product-design knowledge reuse [J]. *Computer Engineering and Design*, 2012, 33(8): 3176–3183. (in Chinese)
- [108] 魏一雄,王启富,黄运保,等.特征联动下的建模-分析集成系统研发[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2014, 26(12): 2258–2266.
WEI Yixiong, WANG Qifu, HUANG Yunbao, et al. Research and development of modeling-analysis integration system based on feature association[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(12): 2258–2266. (in Chinese)