

基于知识工程的智能化 产品设计关键技术及应用

Key Technologies and Application for
Intelligent Product Design Based on Knowledge Engineering

郝 佳 牛红伟 刘玉祥 龙永松 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

基于知识工程的智能化产品 设计关键技术及应用

郝 佳 牛红伟 刘玉祥 龙永松 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书围绕复杂产品智能化设计需求,对智能化产品设计的思路、方法、实现技术和行业应用进行了较为全面的论述。全书共分7章,沿着从智能化产品设计现状、技术框架到基于知识组件的设计知识封装、基于案例推理的智能化设计、基于模糊认知图的设计方案评价这条主线逐步深入,详细介绍了智能化设计的需求、模式、技术框架、关键技术与实现思路,为工程设计领域的从业人员了解相关智能化产品设计技术提供参考。本书可作为机械设计、知识工程等专业本科生及研究生的教学参考用书,也可供研究院所从事智能制造、产品设计、企业信息化领域的研发人员阅读参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

基于知识工程的智能化产品设计关键技术及应用/
郝佳等著. --北京:北京理工大学出版社,2021.4
ISBN 978-7-5682-9724-0

I. ①基… II. ①郝… III. ①智能技术—应用—产品设计 IV. ①TB472

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第063556号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(总编室)

(010) 82562903(教材售后服务热线)

(010) 68944723(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京九州迅驰传媒文化有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/13.5

责任编辑/孙 澍

字 数/180千字

文案编辑/孙 澍

版 次/2021年4月第1版 2021年4月第1次印刷

责任校对/周瑞红

定 价/72.00元

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

随着创新设计在现代经济发展中所起的促进及推动作用越来越大，在经济结构中所占比例越来越重，国家已经将创新设计提高到新的战略高度。与此同时，随着技术革新提速、市场竞争环境剧烈变化，研发创新型产品已经成为国防、医疗、电子等领域的企业获得竞争优势的重要途径。可见，无论是从国家战略还是从企业发展角度看，如何增强企业的产品创新设计能力已成为亟待解决的重要问题。

产品设计是产品开发过程中的创造性阶段，其本质是一个基于既有知识产生新知识的创新性过程。在产品设计领域，近70%的产品设计为变型设计，并且在新产品设计时60%以上的设计工作需要以往历史经验的支撑。因此，如何有效利用企业内部多源、跨领域、多学科的设计知识辅助设计者，成为当前提升产品创新设计能力的重要问题。随着设计科学、计算科学、人工智能等领域技术水平的高速发展，基于知识的产品智能化设计技术已经成为设计领域研究的未来趋势。

为了提升产品设计知识资源的管理与重用水平，增强知识资源在产品设计过程中的渗透能力，实现知识服务与设计流程的柔性集成，为复杂产品设计过程提供全方位的智能化支持，本书作者在长期进行相关研究的基

基础上,对复杂产品智能化设计的相关理论、方法、实现技术和行业应用进行了较为全面的论述。

全书共7章内容,第1章主要介绍了智能化产品设计的相关背景和基本概念,分析了当前智能化产品设计的技术现状,并对主要研究内容进行梳理,为后续各章节内容的展开奠定了基础。

第2章以设计过程及其特点为切入点,阐述了设计过程中应用知识工程及智能化技术的基础,分析了产品设计过程对设计知识的需求及知识重用模式;在此基础上,提出基于案例推理的智能化产品设计技术框架并分析了其中的关键技术。

第3章讨论了基于知识组件的自动化设计技术,从模型及软件工程的角度,重点解决知识组件的建模方法以及不同知识组件的组合方法,并给出了产品设计过程中的知识组件应用实例。

第4章着重讨论了面向智能化设计的知识库构建技术,在对设计知识进行分类的基础上,分别给出基于决策模板和设计规则的设计知识表示方法,为实现基于案例推理的智能化设计技术奠定了基础。

第5章讨论了基于案例推理的智能化设计技术,分别阐述了基于案例相似度计算的案例匹配方法和基于规则的设计案例适配方法,并给出设计案例匹配与适配方法的应用案例。

第6章讨论了基于模糊认知图的设计方案评价技术,给出了基于模糊认知图的设计方案指标关系建模方法,并结合灰色关联分析,实现对设计方案的评价过程。

第7章以某射击装置和固体动力装置的产品设计为例,介绍了面向复杂产品的智能化设计解决方案。

本书由郝佳总体策划,确定总体结构及各章内容、组稿、统稿,并最终审定。各章主要编写人员有:第1、2章郝佳、牛红伟;第3章郝佳、刘玉祥、王嘉蕙;第4章牛红伟、郝佳、龙永松;第5章郝佳、张晓宁;第6章牛红伟、刘玉祥;第7章郝佳、刘玉祥、龙永松。

本书还凝聚了作者同事、朋友和研究生的心血，在本书的撰写过程中参阅并引用了很多文献和部分国内外近年来在该领域的研究成果，特此表示感谢。

最后还应说明的是，由于相关的研究工作还有待继续深入，加之智能化产品设计的相关理论及关键技术尚处于不断完善、探索和发展之中，书中瑕疵和纰漏在所难免，敬请各位读者提出宝贵意见，激励我们不断完善提升。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 智能化产品设计研究背景	1
1.1.1 时代背景——全球制造业回归	1
1.1.2 技术背景——设计技术亟待提升	3
1.2 智能化产品设计基本概念	4
1.2.1 智能化产品设计内涵	4
1.2.2 智能化产品设计模式	5
1.3 智能化产品设计技术现状	7
1.3.1 设计重用技术	7
1.3.2 知识表示技术	16
1.3.3 方案评价技术	17
1.4 智能化产品设计研究内容	20
第 2 章 基于案例推理的智能化产品设计技术框架	23
2.1 产品设计过程及其特点	23
2.1.1 产品设计过程的嵌套结构	23
2.1.2 产品设计过程的特点	26

2 ■ 基于知识工程的智能化产品设计关键技术及应用

2.2	产品设计对知识的需求	27
2.2.1	设计过程的知识需求层次	27
2.2.2	设计知识的重用模式	29
2.3	基于案例推理的智能化产品设计技术框架	32
2.3.1	传统的产品设计模式及问题	32
2.3.2	智能化产品设计技术框架	33
2.3.3	基于案例推理的智能化设计过程	34
2.4	基于案例推理的智能化产品设计关键技术	36
2.4.1	知识组件构建技术	36
2.4.2	设计知识库构建技术	36
2.4.3	设计案例检索及匹配技术	37
2.4.4	设计案例适应性修改技术	37
2.4.5	设计案例评价与选择技术	37
第3章	基于知识组件的自动化设计技术	39
3.1	知识组件构建技术	39
3.1.1	知识组件的定义	39
3.1.2	知识组件的结构	40
3.1.3	知识组件的调用	45
3.2	基于虚拟化的求解器集成技术	46
3.2.1	求解器部署方式	46
3.2.2	求解器请求机制	47
3.2.3	虚拟化求解器调用过程	48
3.3	知识组件应用案例	50
3.3.1	知识组件功能	50
3.3.2	解决设计问题	50
3.3.3	知识组件参数	51
3.3.4	知识组件模板	52

3.3.5 知识组件运行	54
3.4 知识组件组合技术	57
3.4.1 基于流程的知识组件组合	57
3.4.2 可视化知识组件组合建模	57
3.4.3 知识组件组合体执行方式	60
3.5 知识组件组合应用案例	62
3.5.1 设计问题	62
3.5.2 知识组件构建	63
3.5.3 知识组件组合体建模	64
3.5.4 知识组件组合体执行	66
第4章 面向智能化设计的知识库构建技术	67
4.1 设计知识分类	67
4.2 基于决策模板的案例表示方法	69
4.2.1 设计案例的多层次结构	69
4.2.2 基于 cDSP 的案例知识模型	70
4.2.3 基于模板的案例知识表示	71
4.2.4 设计案例的表达模型	75
4.3 设计规则的表达方法	76
4.4 设计知识表示案例	78
第5章 产品设计案例匹配及适配技术	81
5.1 产品设计案例相似度计算	81
5.1.1 产品设计案例参数类型	81
5.1.2 数值型指标相似度计算	82
5.1.3 字符型指标相似度计算	83
5.1.4 包含型指标相似度计算	84
5.1.5 综合相似度计算	85
5.2 基于规则的设计案例适配技术	86

4 ■ 基于知识工程的智能化产品设计关键技术及应用

5.2.1	基于规则的设计案例适配流程	86
5.2.2	基于规则的设计案例适配技术	88
5.3	设计案例匹配案例	91
第6章	基于模糊认知图的设计方案评价技术	97
6.1	设计方案评价问题描述	97
6.2	基于模糊认知图的指标关系建模	100
6.2.1	模糊认知图	100
6.2.2	基于模糊认知图的指标关系建模	104
6.2.3	指标关系建模案例	109
6.3	基于模糊认知图和灰色关联分析的评价方法	113
6.3.1	模糊决策机制	113
6.3.2	灰色关联分析	116
6.3.3	FDM - GRA 方案评价方法	119
6.3.4	FDM - GRA 应用案例	125
第7章	智能化产品设计在复杂产品中的应用案例	133
7.1	某射击装置智能化产品设计应用案例	133
7.1.1	某射击装置智能化产品设计需求分析	133
7.1.2	某射击装置智能化产品设计模式	142
7.1.3	某射击装置智能化产品设计平台实施方案	148
7.2	固体动力装置智能化产品设计应用案例	163
7.2.1	固体动力装置智能化产品设计需求分析	163
7.2.2	固体动力装置智能化产品设计平台建设目标	167
7.2.3	固体动力装置智能化产品设计平台实施方案	168
	参考文献	193

第 1 章

绪 论

当前，全球制造业迎来了新一轮发展机遇，各国政策凸显全球制造业回归、争夺高端制造业制高点的新趋势。作为制造过程不可或缺的组成部分，产品设计同样是高端制造业竞争的焦点。在智能制造技术风起云涌的时代，如何提升产品设计过程的自动化与智能化水平成为研究热点之一。本章在分析智能化产品设计产生背景的基础上，介绍了智能化产品设计的基本概念、技术现状及主要研究内容。

1.1 智能化产品设计研究背景

1.1.1 时代背景——全球制造业回归

为了在新一轮的制造业变革浪潮中抓住机遇、加速制造业向价值链高端转移、引领全球制造业变革发展，全球发达国家纷纷从国家层面出台制造业顶层规划，提出再工业化，重振制造业的战略主张。

美国先后出台一系列顶层规划以推进制造业回归，主要包括 2010 年 8 月生效的《美国制造业振兴法案》、2011 年 6 月发布的《确保美国先进制造领导地位》白皮书和“先进制造业伙伴关系”计划（AMP）、2012 年 2 月发布的《国家先进制造战略规划》、2012 年 3 月提出的“国家制造创新网络”计划、2012 年 5 月美国空军发布的“下一代敏捷制造”计划等。分析显示，美国的制造业回归并不是全面回归，而是将战略重点集中在纳米技术、新能源电池、新材料等高端制造技术领域，同时通过人工智能、机器人以及数字化制造三种以指数形式发展的技术重塑制造业，提升制造业竞争优势。德国政府决议进一步发展高技术战略，并于 2010 年发布《高技术战略 2020》，以此规划德国未来发展。“工业 4.0”战略计划于 2013 年成为德国《高技术战略 2020》的重要组成部分。借助“工业 4.0”，德国已经开启制造业深度变革的引擎，并开始引领全球制造业变革的方向。欧盟于 2010 年 3 月正式发布《欧洲 2020 战略》，旨在使欧盟在 10 年内成为“以知识为基础的，世界上最具有活力和竞争力的经济体”，其中被列为七大旗舰计划之一的“全球化时代的工作政策”，旨在建立强大、有竞争力和完备的制造业价值链。

为应对我国制造业所面临的现实机遇与挑战，我国发布《中国制造 2025》，为制造业未来 10 年设计顶层规划和路线图，推动中国迈入制造强国行列。该规划以体现信息技术和制造技术深度融合的数字化、网络化和智能化制造为主，推动我国由生产型制造业转变为服务型制造业，紧紧瞄准全球制造业价值链的顶端。2015 年 3 月 23 日，工信部副部长苏波在“中国发展高层论坛 2015”上明确指出：当前全球产业分工体系正在重塑，制造业成为全球经济竞争的制高点。本轮制造业回归，将不会是传统制造业的回归，而是高端制造业竞争格局的进一步重组。

制造业正处于变革与重组的进程中，从政府、学术界到产业界都在激辩制造业的未来。由此产生的众多与制造业相关的理念、方法和实践

逐渐将知识作为制造业的关键要素，一方面，知识作为企业的智力资产逐渐成为制造企业竞争力的核心表征；另一方面，数据、知识价值化成为提升制造企业竞争力的必然途径。可以预见，随着知识工程在制造业各个环节中的深入应用，其必然成为制造业价值链提升的引擎，成为获得竞争优势的关键。

1.1.2 技术背景——设计技术亟待提升

产品开发是产品形成有关的构思、规划、结构设计、组织等的具体体现。一般而言，产品开发过程可划分为产品规划、产品设计、生产准备和样品试验等几个阶段。产品设计是产品开发过程中的创造性阶段，是产品开发过程中最重要的一个环节，其本质是一个基于既有知识产生新知识的过程。产品设计的好坏将直接影响产品开发过程后续的制造与销售环节，Huthwaite 曾形象地将设计的影响比喻为“波浪效果”，其影响力可以涉及企业的各个领域。Ford 汽车公司公布的报告也明确指出：尽管设计成本只占复杂产品制造总成本的5%，但70%的复杂产品成本是由设计阶段决定的，并且在设计、材料、劳动力和管理费用四个因素中，70%的生产节约来源于设计的改进。一方面，产品设计面向用户需求，以满足用户在功能、结构、性能等方面的需求为目的；另一方面，产品设计还需要考虑来自制造、销售以及维护等过程的要求和限制。因此，不断提升产品设计水平是企业降低成本、保证产品质量、提升创新水平以及快速响应市场需求的重要手段与突破口。

产品设计作为一个复杂的知识密集型过程，其中蕴含着大量设计知识。在工程设计领域，大约70%的设计工作为自适应设计和变型设计，新产品设计大约60%的工作都是基于以往经验展开的。然而有资料表明，在整个设计过程中，设计工程师要用70%的时间整理、查找已有设计数据和知识，而用于设计活动的时间只有30%。所以，企业必须

采用新的设计模式，从宏观规划和微观技术等多层次上对企业已有的设计知识进行规范化整合，促进产品设计知识与新产品设计业务过程及设计人员的深度融合，从而达到优化资源配置、提升产品设计质量、减少设计返工以及缩短产品设计周期的目的。因此，基于知识的或者知识驱动的智能化设计技术成为提升产品设计能力和设计效率的重要方法。

1.2 智能化产品设计基本概念

1.2.1 智能化产品设计内涵

目前，大多数的机械产品其功能、结构多为复杂型，而复杂产品的设计是一个多学科高度耦合的多阶段复杂过程，不仅包括大量基于数学模型和数值处理的计算型工作，还涉及基于符号型知识模型和符号处理的推理和决策过程，如设计方案的确定、主要参数的决策、几何结构设计的评价选优、分析模型的建立，这些工作的完成既需要借助计算机辅助设计工具，也需要运用丰富的知识进行推理、判断、决策。智能设计的目的就是使用人工系统来代替人的思考和推理，实现产品设计的自动化，从而减少产品设计循环迭代时间和降低重复工作量。

因此，给智能化产品设计下一个定义：“智能化产品设计是集成多领域知识，借助计算机辅助设计工具开展的人机交互的智能设计活动。”

智能化产品设计的内涵可分为以下四个层次：

(1) 基础资源层——实现产品智能化设计，首先需要有大量的设计资源，包括：信息资源，例如产品数据（尺寸、精度、模型等）、文

档（经验、标准、规范等知识信息）；工具资源，例如二、三维建模工具（AUTOCAD、UG、ProE、CATIA 等），计算仿真工具（MATLAB/SIMULINK、ANSYS 等）。基础资源及主要为智能设计提供底层数据支持。

（2）集成层——利用一定的技术手段将基础资源层的内容进行集成，使其形成一个合理、有序的整体，可以高效地服务于智能设计过程。

（3）引擎层——是实现智能化设计活动的关键，也是实现智能设计过程各功能的驱动工具；它的实现需要借助人工智能、知识处理等相关技术手段。

（4）交互层——系统界面以及相关的使用方法，因为考虑目前技术即使系统再智能，设计过程仍然是一个需要人来参与的过程，交互层是实现人与智能系统交互的桥梁。

综上，智能化产品设计系统的重点是实现智能设计内涵中集成层和引擎层功能（即信息处理和智能推理与决策等）的一个载体，但其目标并不是完全取代人而实现产品设计过程，因为这是不现实的，它的目标是更好地辅助设计人员进行决策和设计，这就更加需要借助设计专家的领域知识来实现，而对于设计人员（即智能化产品设计的使用人员）改变的只是设计行为，即从原有的“自发式”设计活动变为“指令式”设计活动。设计人员在设计过程中只是需要向计算机发出指令，通过计算机完成一些规则性的推理活动，使其辅助设计人员进行决策与设计。

1.2.2 智能化产品设计模式

设计是与人的思维密切相关的活动，是人类智能的体现，是一个复杂的分析、综合及决策活动。而智能设计就是利用计算机代替人类专家，完成类似人类设计活动过程中涉及的各种推理与决策动作。通过对

传统智能设计模式的分析,可以发现,由于机械产品越来越复杂,以及知识密集型、异构型的环境下,传统的单一智能设计模式已经不能满足现在需求,因此,为了更好地适应复杂环境下产品设计对智能化的新要求,结合上述对智能设计的内涵分析,重新定义了产品智能设计模式(图 1.1),其主要可以分为四个层次:

- (1) 设计知识的有效管理;
- (2) 设计工具的高效封装;
- (3) 设计方案的智能推理;
- (4) 设计知识的辅助决策。

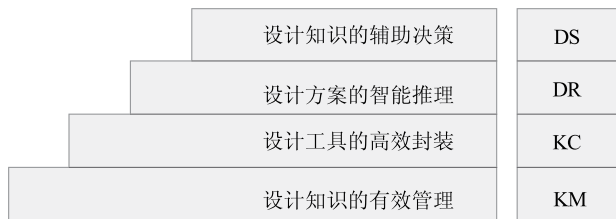


图 1.1 智能设计模式层次结构

智能设计模式的四个层次是与智能设计内涵的层次对应的,同时智能设计模式也是实现智能设计过程的保障。在智能设计模式的四个层次中,设计知识的有效管理和设计工具的高效封装体现了智能设计内涵中的集成层功能,设计方案的智能推理和设计知识的辅助决策则体现了智能设计内涵中的引擎层功能。其中,设计知识的有效管理和设计工具的高效封装是智能设计模式的预备过程,用来实现设计资源的组织与管理,为智能推理与决策提供必要的准备。智能推理和辅助决策是智能设计模式的应用过程,用来实现从以往的设计案例中检索出与新设计需求(设计任务)相似的案例集,借助相关的领域设计知识从中决策出最合理的案例,再以自动或半自动方式辅助设计人员对相似案例进行修改,得到符合设计需求的最终设计方案,并自动进行三维建模与仿真分析,

最终形成完整设计方案。智能设计模式的应用过程和预备过程是相辅相成、缺一不可的。

相比传统智能设计模式，本项目提出的智能设计模式，不仅具有传统模式中的功能，同时更注重了设计资源对于智能设计过程的辅助支持功能，可以说评价一个智能设计模式的好坏或者智能化程度的高低，不能单单看其推理能力，更需要强调的是智能设计模式在实际设计过程中的辅助性和适应性，这就需要其有能力将大量的设计专家领域知识进行集成，同时可以将不同类型的设计工具进行封装与重用，最终实现对不同设计阶段、不同设计任务的智能化辅助与决策支持。

1.3 智能化产品设计技术现状

1.3.1 设计重用技术

设计重用在软件设计领域的研究已经有较长的历史，软件重用是以标准程序库的方式规范、整理和管理软件部件，从而减少软件设计人员的重复劳动。在基于计算机的设计重用系统出现之前，零部件分类技术的发展就已经在鼓励设计重用。1998年，在英国 Brunel 大学召开的工程设计国际会议使设计重用的研究达到一个阶段性的高潮。设计重用的思想是将以往设计活动产生的知识、经验和成果等信息应用于新的设计场景，以减少重复性的设计过程，优化设计资源，提高设计效率。本节从设计重用策略研究、设计知识重用、设计过程建模及重用和产品模型重用四个方面对设计重用的国内外研究现状进行梳理。

1. 设计重用策略研究

设计重用策略的研究包括重用框架研究、基于模块的快速化设计重