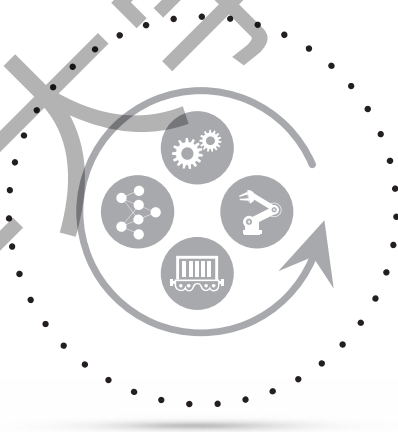


智能制造系列教材

可重用设计

REUSABLE DESIGN

张国军 程强 张健 编著



清华大学出版社

北京

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

可重用设计/张国军,程强,张健编著. —北京:清华大学出版社,2022.5

智能制造系列教材

ISBN 978-7-302-60732-8

I. ①可… II. ①张… ②程… ③张… III. ①智能制造系统—设计—教材 IV. ①TH166

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 074358 号

责任编辑:刘 杨

封面设计:李召霞

责任校对:王淑云

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市国英印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:7.25 字 数:142 千字

版 次:2022 年 6 月第 1 版 印 次:2022 年 6 月第 1 次印刷

定 价:29.00 元

产品编号:089099-01

智能制造系列教材编审委员会

主任委员

李培根 雒建斌

副主任委员

吴玉厚 吴 波 赵海燕

编审委员会委员(按姓氏首字母排列)

陈雪峰	邓朝晖	董大伟	高 亮
葛文庆	巩亚东	胡继云	黄洪钟
刘德顺	刘志峰	罗学科	史金飞
唐水源	王成勇	轩福贞	尹周平
袁军堂	张 洁	张智海	赵德宏
郑清春	庄红权		

秘书

刘 杨

清华大学出版社

多年前人们就感叹,人类已进入互联网时代;近些年人们又惊叹,社会步入物联网时代。牛津大学教授舍恩伯格(Viktor Mayer-Schönberger)心目中大数据时代最大的转变,就是放弃对因果关系的渴求,转而关注相关关系。人工智能则像一个幽灵徘徊在各个领域,兴奋、疑惑、不安等情绪分别蔓延在不同的业界人士中间。今天,5G 的出现使得作为整个社会神经系统的互联网和物联网更加敏捷,使得宛如社会血液的数据更富有生命力,自然也使得人工智能未来能在某些局部领域扮演超级脑力的作用。于是,人们惊呼数字经济的来临,憧憬智慧城市、智慧社会的到来,人们还想象着虚拟世界与现实世界、数字世界与物理世界的融合。这真是一个令人咋舌的时代!

但如果真以为未来经济就“数字”了,以为传统工业就“夕阳”了,那可以说我们就真正迷失在“数字”里了。人类的生命及其社会活动更多地依赖物质需求,除非未来人类生命形态真的变成“数字生命”了,不用说维系生命的食物之类的物质,就连“互联”“数据”“智能”等这些满足人类高级需求的功能也得依赖物理装备。所以,人类最基本的活动便是把物质变成有用的东西——制造!无论是互联网、物联网、大数据、人工智能,还是数字经济、数字社会,都应该落脚在制造上,而且制造是其应用的最大领域。

前些年,我国把智能制造作为制造强国战略的主攻方向,即便从世界上看,也是有先见之明的。在强国战略的推动下,少数推行智能制造的企业取得了明显效益,更多企业对智能制造的需求日盛。在这样的背景下,很多学校成立了智能制造等新专业(其中有教育部的推动作用)。尽管一窝蜂地开办智能制造专业未必是一个好现象,但智能制造的相关教材对于高等院校与制造关联的专业(如机械、材料、能源动力、工业工程、计算机、控制、管理……)都是刚性需求,只是侧重点不一。

教育部高等学校机械类专业教学指导委员会(以下简称“教指委”)不失时机地发起编著这套智能制造系列教材。在教指委的推动和清华大学出版社的组织下,系列教材编委会认真思考,在 2020 年新型冠状病毒肺炎疫情正盛之时即视频讨论,其后教材的编写和出版工作有序进行。

本系列教材的基本思想是为智能制造专业以及与制造相关的专业提供有关智能制造的学习教材,当然也可以作为企业相关的工程师和管理人员学习和培训之

用。系列教材包括主干教材和模块单元教材,可满足智能制造相关专业的基础课和专业课的需求。

主干课程教材,即《智能制造概论》《智能装备基础》《工业互联网基础》《数据技术基础》《制造智能技术基础》,可以使学生或工程师对智能制造有基本的认识。其中,《智能制造概论》教材给读者一个智能制造的概貌,不仅概述智能制造系统的构成,而且还详细介绍智能制造的理念、意识和思维,有利于读者领悟智能制造的真谛。其他几本教材分别论及智能制造系统的“躯干”“神经”“血液”“大脑”。对于智能制造专业的学生而言,应该尽可能必修主干课程。如此配置的主干课程教材应该是此系列教材的特点之一。

特点之二在于配合“微课程”而设计的模块单元教材。智能制造的知识体系极为庞杂,几乎所有的数字-智能技术和制造领域的新技术都和智能制造有关。不仅涉及人工智能、大数据、物联网、5G、VR/AR、机器人、增材制造(3D 打印)等热门技术,而且像区块链、边缘计算、知识工程、数字孪生等前沿技术都有相应的模块单元介绍。这套系列教材中的模块单元差不多成了智能制造的知识百科。学校可以基于模块单元教材开出微课程(1 学分),供学生选修。

特点之三在于模块单元教材可以根据各个学校或者专业的需要拼合成不同的课程教材,列举如下。

课程例 1——“智能产品开发”(3 学分),内容选自模块:

- 优化设计
- 智能工艺设计
- 绿色设计
- 可重用设计
- 多领域物理建模
- 知识工程
- 群体智能
- 工业互联网平台(协同设计,用户体验……)

课程例 2——“服务制造”(3 学分),内容选自模块:

- 传感与测量技术
- 工业物联网
- 移动通信
- 大数据基础
- 工业互联网平台
- 智能运维与健康管理

课程例 3——“智能车间与工厂”(3 学分),内容选自模块:

- 智能工艺设计
- 智能装配工艺

- 传感与测量技术
- 智能数控
- 工业机器人
- 协作机器人
- 智能调度
- 制造执行系统(MES)
- 制造质量控制

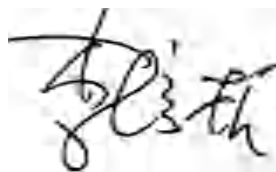
总之,模块单元教材可以组成诸多可能的课程教材,还有如“机器人及智能制造应用”“大批量定制生产”等。

此外,编委会还强调应突出知识的节点及其关联,这也是此系列教材的特点。关联不仅体现在某一课程的知识节点之间,也表现在不同课程的知识节点之间。这对于读者掌握知识要点且从整体联系上把握智能制造无疑是非常重要的。

此系列教材的编著者多为中青年教授,教材内容体现了他们对前沿技术的敏感和在一线的研发实践的经验。无论在与部分作者交流讨论的过程中,还是通过对部分文稿的浏览,笔者都感受到他们较好的理论功底和工程能力。感谢他们对这套系列教材的贡献。

衷心感谢机械教指委和清华大学出版社对此系列教材编写工作的组织和指导。感谢庄红权先生和张秋玲女士,他们卓越的组织能力、在教材出版方面的经验、对智能制造的敏锐是这套系列教材得以顺利出版的最重要因素。

希望这套教材在庞大的中国制造业推进智能制造的过程中能够发挥“系列”的作用!



2021 年 1 月

清华大学出版社

制造业是立国之本,是打造国家竞争能力和竞争优势的主要支撑,历来受到各国政府的高度重视。而新一代人工智能与先进制造深度融合形成的智能制造技术,正在成为新一轮工业革命的核心驱动力。为抢占国际竞争的制高点,在全球产业链和价值链中占据有利位置,世界各国纷纷将智能制造的发展上升为国家战略,全球新一轮产业升级和竞争就此拉开序幕。

近年来,美国、德国、日本等制造强国纷纷提出新的国家制造业发展计划。无论是美国的“工业互联网”、德国的“工业 4.0”,还是日本的“智能制造系统”,都是根据各自国情为本国工业制定的系统性规划。作为世界制造大国,我国也把智能制造作为制造强国战略的主攻方向,于 2015 年提出了《中国制造 2025》,这是全面推进实施制造强国建设的引领性文件,也是中国建设制造强国的第一个十年行动纲领。推进建设制造强国,加快发展先进制造业,促进产业迈向全球价值链中高端,培育若干世界级先进制造业集群,已经成为全国上下的广泛共识。可以预见,随着智能制造在全球范围内的孕育兴起,全球产业分工格局将受到新的洗礼和重塑,中国制造业也将迎来千载难逢的历史性机遇。

无论是开拓智能制造领域的科技创新,还是推动智能制造产业的持续发展,都需要高素质人才作为保障,创新人才是支撑智能制造技术发展的第一资源。高等工程教育如何在这场技术变革乃至工业革命中履行新的使命和担当,为我国制造企业转型升级培养一大批高素质专门人才,是摆在我们面前的一项重大任务和课题。我们高兴地看到,我国智能制造工程人才培养日益受到高度重视,各高校都纷纷把智能制造工程教育作为制造工程乃至机械工程教育创新发展的突破口,全面更新教育教学观念,深化知识体系和教学内容改革,推动教学方法创新,我国智能制造工程教育正在步入一个新的发展时期。

当今世界正处于以数字化、网络化、智能化为主要特征的第四次工业革命的起点,正面临百年未有之大变局。工程教育需要适应科技、产业和社会快速发展的步伐,需要有新的思维、理解和变革。新一代智能技术的发展和全球产业分工合作的新变化,必将影响几乎所有学科领域的研究工作、技术解决方案和模式创新。人工智能与学科专业的深度融合、跨学科网络以及合作模式的扁平化,甚至可能会消除某些工程领域学科专业的划分。科学、技术、经济和社会文化的深度交融,使人们

可以充分使用便捷的软件、工具、设备和系统,彻底改变或颠覆设计、制造、销售、服务和消费方式。因此,工程教育特别是机械工程教育应当更加具有前瞻性、创新性、开放性和多样性,应当更加注重与世界、社会 and 产业的联系,为服务我国新的“两步走”宏伟愿景作出更大贡献,为实现联合国可持续发展目标发挥关键性引领作用。

需要指出的是,关于智能制造工程人才培养模式和知识体系,社会和学界存在多种看法,许多高校都在进行积极探索,最终的共识将会在改革实践中逐步形成。我们认为,智能制造的主体是制造,赋能是靠智能,要借助数字化、网络化和智能化的力量,通过制造这一载体把物质转化成具有特定形态的产品(或服务),关键在于智能技术与制造技术的深度融合。正如李培根院士在本系列教材总序中所强调的,对于智能制造而言,“无论是互联网、物联网、大数据、人工智能,还是数字经济、数字社会,都应该落脚在制造上”。

经过前期大量的准备工作,经李培根院士倡议,教育部高等学校机械类专业教学指导委员会(以下简称“教指委”)课程建设与师资培训工作组联合清华大学出版社,策划和组织了这套面向智能制造工程教育及其他相关领域人才培养的本科教材。由李培根院士和雒建斌院士为主任、部分教指委委员及主干教材主编为委员,组成了智能制造系列教材编审委员会,协同推进系列教材的编写。

考虑到智能制造技术的特点、学科专业特色以及不同类别高校的培养需求,本套教材开创性地构建了一个“柔性”培养框架:在顶层架构上,采用“主干课教材+专业模块教材”的方式,既强调了智能制造工程人才培养必须掌握的核心内容(以主干课教材的形式呈现),又给不同高校最大程度的灵活选用空间(不同模块教材可以组合);在内容安排上,注重培养学生有关智能制造的理念、能力和思维方式,不局限于技术细节的讲述和理论知识推导;在出版形式上,采用“纸质内容+数字内容”相融合的方式,“数字内容”通过纸质图书中镶嵌的二维码予以链接,扩充和强化同纸质图书中的内容呼应,给读者提供更多的知识和选择。同时,在教指委课程建设与师资培训指导组的指导下,开展了新工科研究与实践项目的具体实施,梳理了智能制造方向的知识体系和课程设计,作为整套系列教材规划设计的基础,供相关院校参考使用。

这套教材凝聚了李培根院士、雒建斌院士以及所有作者的心血和智慧,是我国智能制造工程本科教育知识体系的一次系统梳理和全面总结,我谨代表教育部机械类专业教学指导委员会向他们致以崇高的敬意!



2021年3月

前言

PREFACE

信息技术和制造技术相融合,是过去几十年来先进制造技术最重要的特征之一。学术界和产业界一直致力于将信息技术应用于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节,旨在提高制造业质量、效益和核心竞争力。在过去,由于缺乏足够的信息和案例,一度制约了制造业信息系统的成功应用和推广普及。然而,随着信息技术的普及,尤其是互联网技术的应用,另外一个问题随之而来。正如著名的未来学家约翰·奈斯比特(John Naisbitt)在其经典著作《大趋势》中所言“我们被信息淹没,却渴望知识。”如何从浩如烟海的信息中,获取有用的知识,以支持解决新的问题,是实现制造经验重用的关键。

在产品设计阶段,研发人员希望充分利用现代先进的科学信息技术,提升计算机模拟人的行为和思维进行自我深度学习的能力,以协助人类完成多样化、庞大的设计工作任务。在产品开发的数据、信息与知识的统一管理的基础上,充分地重复利用已有的、经过生产实践验证的产品设计信息、工艺信息与制造信息的可重用设计,无疑是缩短开发周期和提高产品质量,从而快速反应市场需求的重要手段。

可重用设计就是在工程需求与现有设计局限的背景下提出来的,它是指能够被重复利用的设计信息、设计规则和设计方法,以及利用这些信息、规则与方法解决新的设计问题的过程。

本书的编写团队在多年围绕可重用设计研究的基础上,参考了大量国内外相关文献,遵循教育部对于“智能制造系列教材”所倡导的编写精神,对可重用设计的相关知识进行了系统梳理,旨在教授学生可重用设计的基本知识,引导学生能够兼顾工程、环境等因素进行综合设计,培养学生建立具有跨学科智能制造系统思维和可持续发展观。

本书由华中科技大学张国军、北京工业大学程强以及汕头大学张健编著。其中:张国军负责第1章、第2章、第7章的编写,并完成整体规划与统稿;程强完成了第3章、第4章、第6章的编写;张健完成了第5章、第8章和第9章的编写。

由于编者水平有限,书中难免存在不足和错误,恳请广大读者批评指正。

作 者

2022 年 4 月

清华大学出版社

目录

CONTENTS

第 1 章 可重用设计简介	1
1.1 可重用设计概要	1
1.1.1 工程背景介绍	1
1.1.2 可重用设计定义	2
1.1.3 可重用设计原理	3
1.2 可重用设计的结构、原则与特点	5
1.2.1 可重用设计总体结构	5
1.2.2 可重用设计基本原则	6
1.2.3 可重用设计的特点	7
1.3 可重用设计的基本过程	7
1.3.1 产品可重用设计的基本过程	7
1.3.2 工艺可重用设计的基本过程	8
1.3.3 制造系统可重用设计的基本过程	9
1.4 可重用设计的关键技术	10
参考文献	11
第 2 章 可重用设计知识的表示方法	12
2.1 知识表示方法简介	12
2.1.1 产生式表示法	12
2.1.2 框架式表示法	12
2.1.3 语义网络表示法	12
2.2 本体表示法	13
2.2.1 本体	13
2.2.2 本体构建	13
2.2.3 本体映射	14
2.2.4 本体推理	14
2.3 基于三表的知识表达方式	15

2.3.1	信息表	15
2.3.2	决策表	15
2.3.3	控制表	16
2.4	基于三表的工艺设计知识表示实例	17
2.4.1	产品信息的获取	17
2.4.2	工艺信息表与工艺决策表的生成	18
2.4.3	基于决策表的工艺设计规则的获取	18
	参考文献	21
第3章	可重用设计知识的获取方法	22
3.1	显性知识的获取方法	22
3.1.1	显性知识的特点	22
3.1.2	显性工程设计知识的数据资源	23
3.1.3	显性知识的获取机制	24
3.2	隐性知识的获取方法	25
3.2.1	隐性知识的概述	25
3.2.2	基于粗糙集理论的隐性知识获取机制	26
3.2.3	基于神经网络的隐性知识获取方法	28
	参考文献	30
第4章	可重用设计知识的管理	31
4.1	知识管理的概念	31
4.2	可重用知识的组织技术	32
4.2.1	可重用知识检索技术	32
4.2.2	可重用知识导航技术	33
4.2.3	可重用知识推送技术	34
4.2.4	可重用知识的共享与安全管理	35
4.3	可重用知识管理技术的种类划分	35
4.4	可重用知识发现	38
4.4.1	知识发现与数据挖掘	38
4.4.2	数据挖掘方法	39
4.4.3	数据挖掘方法的比较与选择	42
	参考文献	44
第5章	基于参数化的可重用设计	45
5.1	参数化设计技术	45

5.1.1 参数化设计原理	45
5.1.2 参数化设计的关键技术	46
5.2 基于参数化的可重用设计流程	49
5.3 典型应用案例	51
参考文献	53
第 6 章 基于模块化的可重用设计	54
6.1 模块化设计技术	54
6.1.1 模块化设计的发展背景及应用	54
6.1.2 模块化设计原理	55
6.1.3 模块划分方法	56
6.2 QFD 背景下的可重用设计	58
6.2.1 产品用户需求分析	58
6.2.2 基于 QFD 的需求-功能映射	60
6.2.3 基于 QFD 的功能-结构映射	61
6.2.4 典型应用案例	61
参考文献	63
第 7 章 基于成组技术的可重用设计	65
7.1 成组技术	65
7.1.1 成组技术的基本概念	65
7.1.2 相似性原理简介	66
7.1.3 机械零件分类与编码	67
7.2 基于成组技术的零件可重用设计	74
7.2.1 零件的可重用设计步骤	74
7.2.2 零件的相似系数计算	74
7.2.3 零件的参数化	76
7.3 典型应用案例	76
参考文献	77
第 8 章 基于实例推理的可重用设计	78
8.1 实例推理技术	78
8.1.1 实例推理技术的基本概念	78
8.1.2 实例推理求解问题的基本步骤	79
8.2 基于实例库的可重用设计	80
8.3 典型应用案例	84

8.3.1 减速器实例库的建立	84
8.3.2 实例检索	85
8.3.3 参数化变型设计	85
8.3.4 实例更新	85
参考文献	85
第9章 基于开放式架构的可重用设计	87
9.1 产品架构的内涵	87
9.1.1 产品架构的定义	87
9.1.2 不同类型架构	88
9.2 基于开放式架构的可重用设计主要特点	88
9.2.1 开放式架构主要特征	88
9.2.2 开放式架构与可适应设计、可重用设计之间的关系	89
9.3 基于开放式架构的可重用设计过程与设计要点	91
9.4 基于开放式架构的可重用设计方法	91
9.4.1 开放式架构的设计建模方法	91
9.4.2 开放式架构设计评价方法	93
9.4.3 开放式架构设计方案优选方法	94
9.5 应用案例	95
参考文献	97

第1章

可重用设计简介

在过去的几十年中,人类对科学知识的发现以及技术工具的掌握均得到了快速的发展。在这个大背景下,随着更加激烈的市场化、全球化产品竞争,制造业的环境与制造模式正在发生深刻的变化。面对日益增长的多样化、个性化市场需求,传统的大批量、同质化生产模式难以适应新的市场形势需要。如何有效重复利用已有产品中蕴含的知识来支撑新产品的快速开发,有效增强对市场需求的响应能力,已经成为企业能否在激烈的市场竞争中占得一席之地的重要标志^[1]。

1.1 可重用设计概要

1.1.1 工程背景介绍

产品从提出需求到市场销售需要通过产品设计、工艺规划、制造加工等环节。这些环节不仅对产品的全生命周期性能与质量、工作可靠性、生产成本、资源环境友好性等诸多关键指标产生重要影响,也决定着制造企业对市场需求的响应速度、对多样化个性化需求的适应能力乃至制造企业的核心竞争力。

为了克服产品开发过程中的困难,研究人员与制造企业普遍认识到,产品开发过程中可以充分地利用经过生产实践考验的产品设计信息、工艺信息与制造信息,只需要对很少的一部分零件进行重新设计和制造,对绝大部分零部件仍使用以前的产品信息。实践表明,重复利用产品已有的设计与制造信息是十分有意义的。人们在产品信息重复利用的研究中,也探索和发展了各种方法,其中有代表性的包括:

- (1) 参数化计算机辅助设计;
- (2) 模块化设计;
- (3) 基于特征的设计;
- (4) 基于实例的工艺设计;
- (5) 成组技术^[2]。

尽管这些方法的重要性已经得到了企业的认可,并在产品设计阶段、工艺设计阶段和生产制造阶段均有不同程度的实施,但并没有完全达到预期的目的。主要有以下四点原因:

(1) 虽然参数化计算机辅助设计(CAD)可实现零部件拓扑结构相同或者相近的系列化产品设计,但对零部件拓扑结构变异(个性化、多样化)的产品,如何重复利用已有的零部件结构,并对其结构进行进化与变异映射,还有待于进一步研究。另外,参数化 CAD 系统通常只支持设计的详细阶段,取代图板以表达设计的最终结果,由于它丢失了大量的设计意图和设计过程信息,给产品设计信息的重用带来了困难。

(2) 模块化设计(包括产品设计与工艺设计)是建立在模块的定义和组织管理基础之上的,其对特定产品的模块划分不是随意的,而且两两模块之间的装配关系是预先确定的,也不能任意改变。这些因素大大限制了模块化设计的使用范围。目前,模块化设计主要适用于产品功能基本相同、品种较多的行业,如机床、汽车等。对于功能结构变动较大的产品或行业,现有模块化设计方法难以适用^[3]。

(3) 基于特征与实例的产品与工艺设计存在许多问题:设计人员或工艺人员在设计时必须采用系统预定义的特征来设计产品;特征设计使概念设计、技术设计、工艺设计完全受制造方法的限制;特征设计用于变型设计时,一般和参数化设计方法结合,但特征间的交互作用对特征的影响和设计过程中特征的有效性的维护,都是这种变型设计方法的致命缺陷。另外,从根本上讲特征设计是零件级的设计,特征设计无法支持概念设计和自顶向下的设计方法,不支持产品设计的全过程。例如产品的装配工艺设计,需要设计者综合考虑整个产品的拓扑结构与各个零部件之间的装配关系,基于特征与实例的设计是难以实现这一点的。

(4) 企业对产品设计信息、工艺信息及设计规则缺乏统一的、有效的组织和管理。这里说的设计规则指的是显式的知识,如公式、定理等。而设计信息和工艺信息是隐式的知识,表现为设计结果,例如零件材料信息、图纸、工艺卡片等。有些方法,如专家系统,强调对设计规则的管理和利用,而缺乏对设计信息的利用。尽管可以通过知识学习的方式获取一定的规则,但是由于这些规则缺乏设计信息的支持变得晦涩难懂而难以利用。更重要的是,这些方法不能从已有的设计信息中获取知识^[4]。

基于以上分析可以发现,现有各类设计方法对产品信息的重复利用仍不够深入系统,阻碍了产品设计制造的发展。因此,有必要系统探究重复利用设计信息(包括产品设计信息与工艺设计信息)和设计规则的机理,掌握知识重用合适的方法、策略和工具。

1.1.2 可重用设计定义

可重用设计是在工程需求与现有设计局限的背景下提出来的。可重用设计是

指能够被重复利用的设计信息、设计规则和设计方法,以及利用这些信息、规则与方法解决新的设计问题的过程。

由于“方法”是对“解决问题过程”的抽象,这一概念本身即意味着方法的通用性和可重复利用性。因此,可重用设计主要指“设计信息”与“设计规则”的重复利用。设计信息和设计规则可以统称为设计知识,因此可重用设计在一定程度上也可以称为基于知识重用的设计。

可重用设计包括两层含义,一是指在未来的系统设计(广义的系统设计包括制造系统设计、产品设计、工艺设计等)中能够被重复利用的设计成果,如产品性能分析、产品结构、材料选择、加工方法等。可重用设计的这个含义,意味着设计者在设计过程中就要考虑自己的设计知识能够在将来被方便地重复利用。可重用设计的另一个含义则是指,在开发和设计新的系统时,对已有设计知识的重复利用过程。

可重用设计的两层含义,前者把它理解为一个名词,强调的是可被重复利用的设计知识;后者将它理解为动词,强调的是设计知识重复利用的方法与过程。这也恰恰反映了可重复设计研究的两个方面,即:

- (1) 如何创造和评价可被重复利用的知识;
- (2) 如何利用已有的设计知识进行新的系统设计。

在可重用设计定义中提到了三个概念,即设计信息、设计规则和设计方法。需要指出的是,这里给出的定义是出于本书阐述内容的需要,只限于在本书讨论的范围内使用。

设计信息:以信息化形式存在的设计结果,包括产品结构、零部件属性、工艺信息等,如零件材料信息、图纸、工艺卡片等。

设计规则:以输入条件、输出结果和推理过程三元形式表现的设计规则,如工程设计原理、工程设计规范等,包括公式、定理等。

设计方法:综合利用设计信息和设计规则以完成设计任务的过程。在实际设计任务求解中,可能没有现成的设计规则直接解决问题,但是可以将这些问题分解为可以用各种设计规则解决的子问题,然后通过子问题求解实现总问题求解。因此,设计方法由多个设计规则以及综合利用这些规则的过程组成。

对上面的定义可以这样理解,设计信息是设计规则的载体,是隐式的设计知识;而设计规则是设计信息中蕴含的知识的归纳和形式化描述,是显式的设计知识^[4]。

1.1.3 可重用设计原理

为阐述可重用设计的基本原理,先给出以下定义:

问题空间:由当前应解决和已解决的各种问题所构成,用集合 S_p 表示;

求解空间:针对问题空间中的各个问题所产生的可能解,用集合 S_s 表示;

求解策略:由问题空间发现求解空间,以及问题空间和求解空间之间相互转

换所采取的方法和过程,用函数 R_D 表示。

设计问题求解的途径有两种。途径 1 如图 1-1 中虚线箭头表示,即执行求解策略 R_D ,由当前问题空间 S_P 直接求出求解空间 S_S 。途径 2 如图中实线箭头表示,根据问题空间 S_P ,间接求出求解空间 S_S ,即:(1)执行求解策略 R'_{D1} ,在当前问题空间找出一个(或几个)已解决的问题空间 S'_P ; (2)执行求解策略 R'_{D2} ,得到 S'_P 的求解空间 S'_S ; (3)再通过一个求解策略 R'_{D3} ,由 S'_S 产生 S_S ,即得到原始问题空间 S_P 的最终求解空间。

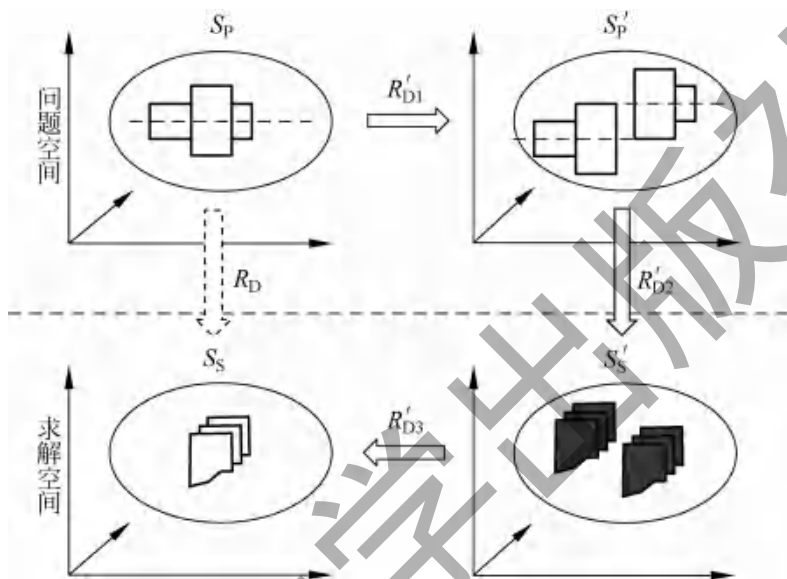


图 1-1 设计问题求解途径

途径 1 是利用设计规则直接求解,而途径 2 是利用已有的设计结果(设计信息)进行间接求解。利用途径 1 求解的典型设计方法是专家系统。专家系统是一种模拟人类专家解决领域问题的计算机程序系统,它应用人工智能技术和计算机技术,根据某领域一个或多个专家提供的知识和经验,进行推理和判断,模拟人类专家的决策过程,以便解决那些需要人类专家处理的复杂问题。利用途径 2 求解的典型设计方法是基于实例的设计方法。基于实例的设计方法是基于实例的推理方法在设计领域中的应用,其设计思想来源于人类的思维方式,面对一个新的设计要求,设计者的脑海中往往首先浮现出以往的工作中曾经出现过的类似的设计条件,找出两者之间的区别,并以此为依据联系标准的设计准则,确定新的设计方案。基于实例的设计试图利用计算机再现这一过程:设计系统根据用户对设计条件的描述抽象出实例特征并建立筛选条件;根据这一条件从实例库中选择与设计要求最接近的实例;对比两者之间的区别,调整选定实例中不能满足条件的因素,生成最终的设计方案并更新实例库^[5]。

途径 1 和途径 2 的实质都是基于知识的重复利用,即新的产品创新包含对原有产品知识的重复利用。实际上,绝大部分产品创新是在吸收已有的产品设计、工艺与制造经验等产品知识的基础上完成的,体现了对已有知识的重复利用。研究

表明,在设计、制造或工程领域,大多数新问题的产生来自于某些旧问题局部发生了变化或增加了新的内容,而这些旧问题往往已得到圆满解决。因此,可以认为设计过程实际上是对设计规则和设计知识重复利用的过程。可重用设计的原理就是建立在这一研究结果的基础之上的。

可重用设计原理可以表述为,产品设计是在设计信息、设计规则与设计方法统一组织与管理的基础上,综合利用知识处理方法和技术从而重复利用以前的设计成果,以实现快速的产品设计。同时,在此过程中,新的设计以便于重用为目标,按照知识表达和信息模型的要求对设计结果进行组织,并归入统一的知识库中进行管理。以石油生产行业为例,如进行井网密度设计,可以借鉴以前相关类型条件下的井网密度设计方案,通过在知识库中查阅以前相关成功案例中的成熟设计信息、设计规则和设计方法等设计知识,然后对多个设计方案进行评价,选出可重用程度高的设计方案,并对其进行适当修改,使其满足当前设计要求;如没有满足当前设计要求的方案,则进行创新设计,并将设计知识进行组织归入统一的知识库,方便以后的可重用设计。应用实践表明,采用可重用设计进行井网密度设计一般可以比原设计方法的设计效率提高 30% 左右^[6]。

可重用设计原理的基本出发点为,人们在解决一个实际问题时,总是习惯于首先从一般规律和规则出发,若没有相应的设计规则指导,则看看以前是否解决过类似的问题。由于产品设计的工作领域具有相对的稳定性,虽然设计中没有通用的设计模型,但有多数年积累的经验规律。因为这些规律是人们长期生产实践中经验教训的总结,因而具有客观性,如一些设计公理。另外还有些是在多个学科的研究中经过证明的一些理论,如物理学公式、力学定理等。在面对设计问题时,我们必须利用这些经验规律和设计知识,否则就有可能导致失败的重复发生,造成不必要的损失。在没有规律和规则利用的情况下,就要考虑以前解决的相似的设计实例,通过对这些设计实例的重复利用来达到设计目的。因此,可以说可重用设计过程是规则推理和实例推理的综合应用^[4]。

1.2 可重用设计的结构、原则与特点

1.2.1 可重用设计总体结构

可重用设计的总体结构如图 1-2 所示,在图的水平方向自左向右描述了可重用设计的过程。图中用矩形框来表示可重用设计的对象,椭圆形表示对这些对象的处理。指向处理框的箭头末端是输入对象,离开处理框的箭头则指向处理后的对象(输出结果)。一个处理可能会有一个或者多个输入,并且有一个或者多个输出。在结构图下边的矩形框是设计信息和设计规则集成的重用知识库。重用库在网络环境下实现设计规则与信息的共享。而在重用库内部,设计规则和产品模型

同时成为设计信息的索引。对企业已有的设计信息,则通过工程语义理解等方式来提取设计知识,并通过一定的表达方式存入知识库。

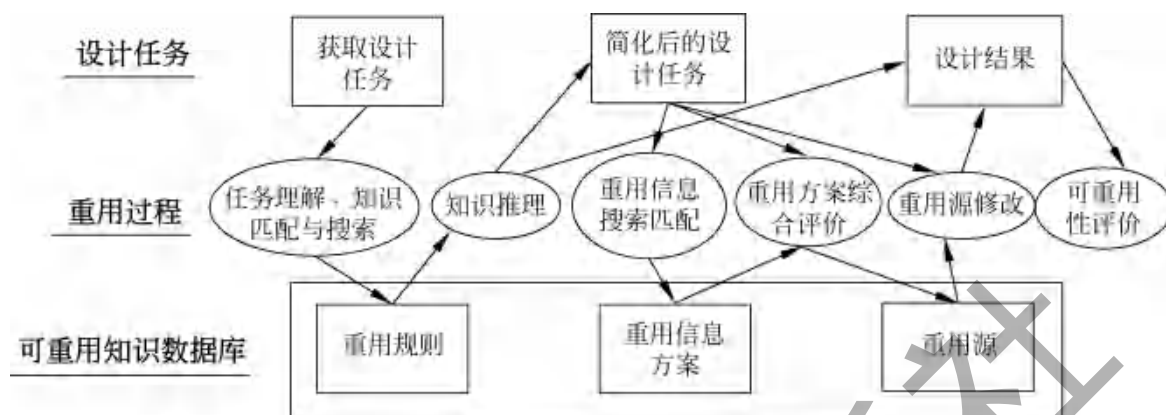


图 1-2 可重用设计的总体结构示意图

在可重用设计原理和可重用设计总体结构中,我们大致可以看出可重用设计的大致过程。但实际应用过程会更加复杂,主要表现在:

- (1) 设计任务的理解和表达是整个重用设计的源头。
- (2) 由于设计任务可能包含的内容较多,如果不对其进行分解,在设计规则搜索、设计信息搜索、重用方案评价等环节会使问题变得过于复杂。
- (3) 重用设计过程是一个并行的过程,有些设计活动实际上是交替进行的^[4]。

1.2.2 可重用设计基本原则

从可重用设计原理中可以总结出如下的设计原则:

(1) 可重用设计是建立在设计知识(包括设计信息、设计规则与设计方法)的集成管理的基础之上的。

(2) 设计任务可以通过专业知识规则进行简化,简化内容包括设计目标和设计约束,这是由于设计任务可能包含多个设计目标或多种设计约束,如果不对其进行简化,会使设计任务在之后的设计规则搜索、设计信息搜索和重用方案评价等环节变得过于复杂。

(3) 经过简化后产品设计首先是重用设计,然后才是创新设计。通过在可重用知识数据库中进行检索,重用设计就可以解决设计任务中的大部分要求,同时提高效率;针对重用设计无法满足的设计要求,需要进行创新设计,这通常只占产品设计任务的一小部分。

(4) 可重用设计首先是设计规则的共享与重复利用,其次才是设计信息共享与重复利用。设计规则指的是显式的知识,而设计信息是隐式的知识,在产品设计中,人们一般首先采用显性知识,其次才是隐性知识。

(5) 从知识的角度去理解设计实例包含的信息。设计实例在可重用知识数据库中,以设计信息、设计规则和设计方法的形式存储。从知识的角度理解设计实

例,一方面有助于在数据库中快速准确地搜索到可重用度高的成熟案例,有利于新的产品设计任务的进行;另一方面有助于将设计好的新设计案例以规范的形式存储到数据库中。

(6) 设计结果以设计信息和设计规则两种方式进行存储,以方便未来的产品设计重复利用。

(7) 可重用设计是多种重用设计方法的综合应用^[6]。

1.2.3 可重用设计的特点

通过分析总结,我们可以发现可重用设计与其他一些智能化设计方法相比存在如下两个特点。

1. 强调多种设计知识的综合利用

以前的工艺设计方法可以分为两类:一类是专家系统这样的解决专门工艺问题的工艺设计方法,其强调对设计规则的利用(知其然,知其所以然);另一类是成组技术、基于特征与实例的工艺设计,强调的是对设计信息(设计成果)的利用,这些方法并不关心工艺问题的解决到底依据了何种设计规则(知其然,不知其所以然)。然而,对于不同的工艺设计问题,有必要针对其复杂程度不同,采取不同的解决方法,以最大程度提高解决问题的效率。

2. 强调设计成果的可重用性

可重用工艺设计通过对设计任务的分解、设计成果管理等方式,将设计成果的可重复利用性变成为设计者一种自觉的行为。这对于建立可重用知识库具有重要的意义^[4]。

1.3 可重用设计的基本过程

可重用设计包括产品可重用设计、工艺可重用设计和制造系统可重用设计。在下文中,将分别介绍产品可重用设计、工艺可重用设计和制造系统可重用设计的概念及其基本过程。

1.3.1 产品可重用设计的基本过程

产品可重用设计是指在产品概念设计、功能设计、结构设计等技术活动以及围绕该产品设计过程的各种管理活动中重用或者参考已有的过程控制、设计方法、设计经验等知识。从具体的内容上来说包含三方面的重用:在对一个新产品建立产品设计项目流程时,对已有的产品项目流程模型的重用;对已有 CAD 图纸、产品模型、专利、软件等显性知识的重用;对设计人员头脑中设计经验、思路、设计原理,以及产品设计对象中功能信息、行为信息的重用。产品可重用设计的基本过程

包括以下阶段：

- (1) 确定设计需求：进行需求分析，明确设计需求；
- (2) 检索匹配设计方案：根据设计需求，以需求、功能、设计原理、结构特征等为索引，从知识库中匹配符合要求的知识进行重用，找到与满足需求的产品相似度最高的几个产品设计作为备选方案；
- (3) 方案分解与重用设计：通过对备选方案的参考，再结合实际情况制定出最终的设计方案；
- (4) 得到满足需求的设计方案^[7]。

1.3.2 工艺可重用设计的基本过程

工艺可重用设计(reusable process planning, RPP)是指通过对工艺设计规则和已有工艺设计信息等知识重复利用的方式完成工艺设计,同时通过对工艺设计结果的有效管理达到设计知识的可重用性。

从工艺可重用设计的定义来看,工艺可重用设计包含两层含义。其一是在设计过程中对已有的工艺设计规则知识的利用,或者直接在原有的设计实例基础之上通过实例修改的方式完成工艺设计,当然也有可能是这两种方式的结合使用;可重用工艺设计的第二个含义是通过对工艺设计成果的有效组织和管理,并提供相应的索引和检索机制,达到工艺设计知识能够在将来的设计中重复利用的目的。

工艺可重用设计的这两个含义分别从“重用”和“被重用”两个方面表述了工艺可重用设计的基本思路。

可见,工艺可重用设计是可重用设计原理的一个应用。但是它又有其专业领域的特殊性。工艺可重用设计实际上是在可重用设计原理的基础上,将“创成式工艺设计”(专家系统)和“派生式工艺设计”(基于特征与实例的设计)结合起来,尤其强调了对灰色知识(包括不确定性规则、工艺设计信息等)的重复利用。

工艺可重用设计基本过程如图 1-3 所示,可以分为 5 个主要阶段:

- (1) 产品设计信息获取阶段;
- (2) 产品设计的工艺合理性评价阶段;
- (3) 设计规则重用阶段;
- (4) 设计信息重用阶段;
- (5) 设计成果管理阶段。

产品设计信息是工艺设计的主要信息源之一,它提供了工艺设计的设计对象(产品或零部件)、设计任务(加工、装配、热处理等)、设计约束(公差尺寸、加工精度、表面质量等)。因此,在工艺设计任务模型中,设计信息和制造资源信息一起构成了工艺设计两大约束条件。在直接工程环境下,设计信息和工艺信息需要进行统一管理。在并行工程环境下,产品设计小组和工艺设计小组组成协同工作小组,共同完成产品的开发工作。为了避免在设计的后期因为工艺不合理而更改产品设

计,协同工作小组中的工艺人员在设计过程中即对产品设计的工业合理性做出评价,并以此为依据给出更改建议^[4]。

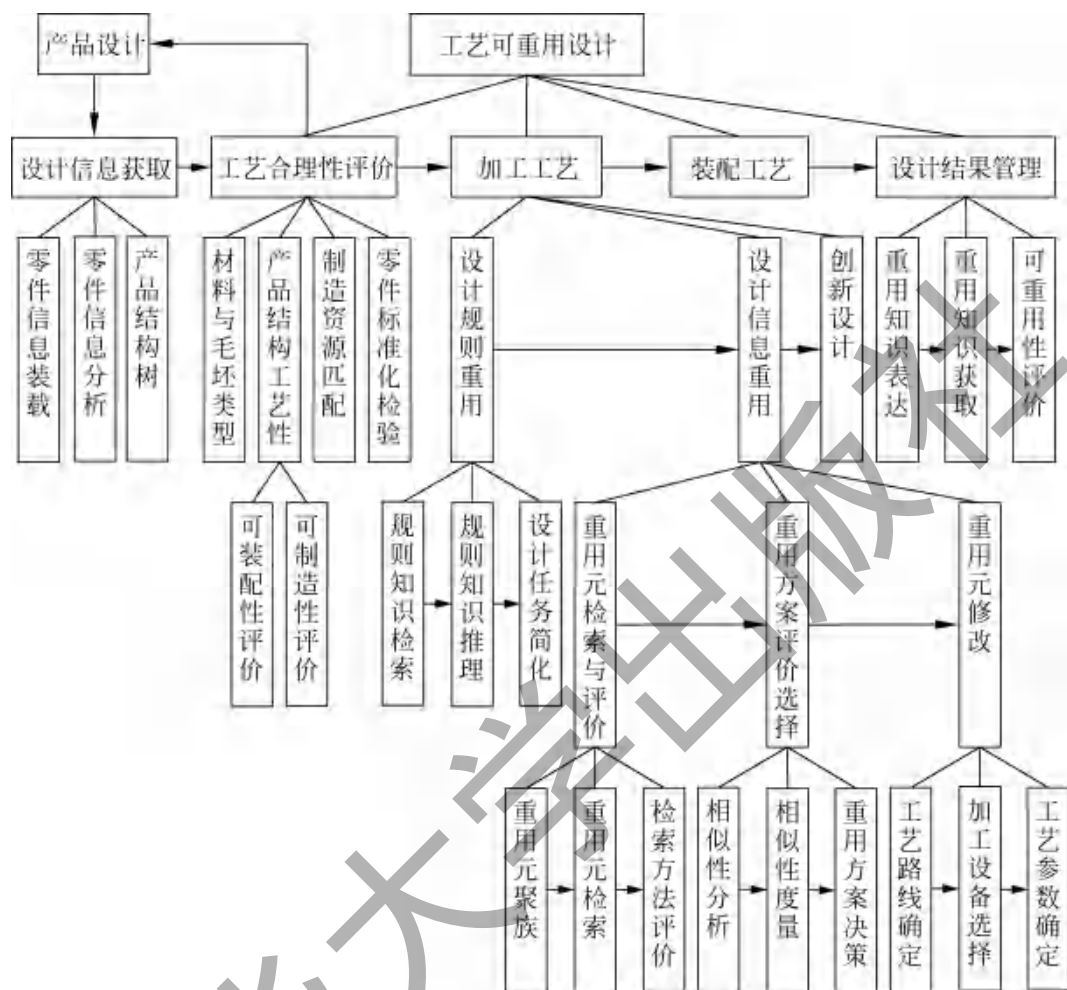


图 1-3 工艺可重用设计基本过程

1.3.3 制造系统可重用设计的基本过程

制造系统可重用设计不是设计一个全新的制造系统,而是在已有制造系统设计基础之上展开的,尽量利用已有的制造系统设计资源,其目的是实现经济、快速、高效的制造系统设计,以满足动态多变的市场需求这一关键性问题。否则,重新设计一个制造系统或者重新添置新设备,必然会延长制造时间或者导致极大的浪费。另外,当加工对象在零件族内变化时,其加工任务在很大程度上存在相似性,也就是说,加工对象发生变化后如果能将待加工零件与现有零件相同或相似的加工任务分配到同一工作站上,不但可以减少或避免重新设计制造系统,而且还能降低操作工人的工作时间和劳动强度。因此,考虑制造系统的可重用设计是很有必要的^[8]。

制造系统可重用设计的基本过程:首先,制造商在与客户沟通后确定制造系

统的要求,新制造系统的设计不是从头开始的,过去的布局和尚未实行的预先确定的布局,通常被用作新制造系统的基础;接下来,工程师根据客户的要求,在知识库中去检索;在检索结果提供的制造系统中进行筛选,找出与正在设计的制造系统最相似的一个方案;最后,由工程师结合实际情况制定出最终的制造系统设计方案,新的制造系统设计完成。通过以上分析,制造系统可重用设计的基本过程如图 1-4 所示^[9]。



图 1-4 制造系统可重用设计基本过程

1.4 可重用设计的关键技术

从可重用设计原理及所要解决的问题中,可以看出可重用设计需要解决如下的关键问题。

1. 重用知识表达

目前对知识的研究存在两个倾向:一是对诸如事实、非结构化信息、解决问题的过程一些潜在的知识研究较少;另外一个倾向是缺少对非确定性知识描述和研究的理论与方法。在可重用设计中,重用知识的类型是多样的,既有诸如公式、原理等确定性知识;更多的则是一些非确定性知识,如大量的技术文档中蕴含的非结构化信息等,又如设计实例中大量存在的相互矛盾的设计结果等。这些重用知识不可能简单地用某一种知识表达方式,而是需要综合利用各种知识表达方式,针对知识的不同确定性程度和不同的存在形式采用最合适的表达方式。

2. 重用知识获取

人们对设计知识获取的研究比较注重“专家经验的信息化”和“知识学习”等方面,却忽视了从大量的历史数据中提取设计知识。在重用知识获取方面,主要的关键技术包括工程语义的提取、决策表的生成等方面。为了提高知识的可重用性,有必要研究从大量信息中提取一般规律的方法,即如何提高灰色知识的“白化”程度,降低不确定性。

3. 重用知识组织与管理

重用知识及其表达的多样性决定了重用知识组织和管理复杂性。例如,在设计知识的组织方面,如何将设计知识的组织模型与产品模型相结合;对于重用知识的存储问题,数据库对模糊知识、不确定性知识的存储难以适应;再有,如何实现重用知识的高效索引与检索。因此,需要研究和开发用于知识管理的数据库,即“知识库”。然而遗憾的是,真正意义上的通用化的“知识库”尚处于早期研究阶

段,离实用化还相去甚远。在这种情况下,有必要结合现有的数据库与信息管理的各种先进技术,如数据仓库技术、搜索引擎技术等,找到适用于重用知识管理的有效模式。

4. 重用实例评价

在重用设计过程中,设计者输入的检索条件不够精确(实际上,在多数情况下也不可能十分精确),往往导致会有多个实例被检索出,也有可能会有多个重用实例的组合(多个重用方案)供评价和选择。重用实例的评价往往是多目标的,如设计任务与重用实例之间的相似程度、重用设计达到的效果、重用代价等。同时,评价的依据又往往是一些不确定信息或者不完整的信息等。因此,必须将相似理论、模糊理论和灰色知识等相互结合,才能探索出重用实例评价的有效方法。

5. 可重用设计过程中的决策

针对不同的设计对象,可重用设计过程中有多项决策问题。例如,重用知识聚族的决策,产品设计的工艺合理性评价,可重用工艺设计中加工设备选择的决策,等等。

从上面的总结可以看出,可重用设计的一个关键在于对不确定性问题的处理,包括不确定性的知识表达、获取与管理,在条件不完备的情况下检索和评价重用实例,利用不确定性研究理论进行工艺决策等^[4]。

参考文献

- [1] GOLDMAN S,PREISS K. 21st century manufacturing enterprise strategy: an industry-led view[M]. PA Iacocca Institute, Lehigh University, 1991.
- [2] LAU H,JIANG B. A generic integrated system from CAD to CAPP: a neutral File-Cum-GT approach[J]. Computers industry engineering, 1998, 11(1/2): 67-75.
- [3] 祁卓娅. 机械产品模块化设计方法研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2006.
- [4] 张国军. 基于灰色知识的可复用工艺设计理论及关键技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002.
- [5] 孙晓斌, 杨海成, 王佑君. 基于实例的设计方法研究[J]. 机械科学与技术, 2000(2): 331-332.
- [6] 陈庆陵, 李伟, 张国军. 基于知识重用的设计体系与应用[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2003(3): 60-63.
- [7] 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.
- [8] 张青雷, 郝文玲, 段建国, 等. 考虑系统重用和加工任务重现的制造系统布局重组规划[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 170-181.
- [9] EFTHYMIU K, SIPSAS K, MOURTZIS D, et al. On knowledge reuse for manufacturing systems design and planning: a semantic technology approach [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2015, 8: 1-11.



第1章部分
知识拓展

第2章

可重用设计知识的表示方法

可重用设计的主要问题是知识的复用,而知识复用的关键是知识的表达、获取和管理。要实现知识的可重用,知识的合理表示首当其冲。人工智能与计算机技术的结合产生了所谓“知识处理”的新课题,即要用计算机来模拟人脑的部分功能,以知识和智能解决各种问题,回答各种询问,或从已有的知识推演出新知识,等等。此时,计算机要处理的不仅仅是简单的数据和函数,而是表示在机器中的各种“知识”。为了对知识进行处理,首先遇到的也就是如何表示知识的问题。即研究如何把人类自己的知识逻辑地表示出来,并最终物理地表示和存储到计算机中去。它与数的表示在数据处理中的重要作用一样,是知识处理学中最基本的问题之一。

2.1 知识表示方法简介

2.1.1 产生式表示法

一般地,一个产生式系统由全局数据、产生式规则、控制策略三部分构成。产生式规则的一般形式是:

如果 P_1 和 P_2 和 那么 Q

其中 P 是产生式的前提,用于指出产生式是否可用的条件; Q 是一种结论,表示如果前提 P 被满足,则可推出结论 Q ^[1]。

2.1.2 框架式表示法

框架一般可以用嵌套的连接表表示,它具有如下形式:

$$f_i(s_{ij}(c_{ijk}(v)))$$

其中 v 是第 i 个框架 f_i 中第 j 个槽 s_{ij} 中第 k 个侧面 c_{ijk} 的取值集合^[1]。

2.1.3 语义网络表示法

语义网络模式由节点和弧组成。其中:节点表示各种事物、概念、情况、属性、

动作、状态等；弧表示各种语义联系，表明所连接节点间的某种语义联系。语义网络不仅包括由语义网络构成的知识库，也包括用于求解问题的解释程序。语义网络可以表示事实性的知识，也可以表示事实性知识间的复杂联系^[2]。

2.2 本体表示法

2.2.1 本体

本体是概念模型的明确的规范化说明，本体的形式化定义为一个五元组 $\{C, R, H^R, Rel, A\}$ ，其中 C 为本体中概念的集合， R 为关系的集合， H^R 表示概念间的层次关系， Rel 表示概念间的非层次关系， A 为公理^[3]。

2.2.2 本体构建

1. 本体构建准则

本体构建的五条准则如下：

(1) 明确性和客观性：即本体应该用自然语言对所定义术语给出明确的、客观的语义定义。

(2) 完全性：即所给出的定义是完整的，完全能表达所描述术语的含义。

(3) 一致性：即由术语得出的推论与术语本身的含义是相容的，不会产生矛盾。

(4) 最大单调可扩展性：即向本体中添加通用或专用的术语时，不需要修改其已有的内容。

(5) 最小承诺：即对待建模对象给出尽可能少的约束^[4]。

2. 本体构建方法

骨架法清晰地描述了本体开发的基本流程和指导方针，对于当前本体开发实践具有重要的指导意义，存在的问题在于没有明确提出本体的演进。具体内容包
括四个方面：①确定本体的引用目的和范围；②构建本体；③本体的评价；④本体成文，避免知识共享障碍。流程如图 2-1 所示^[5]。

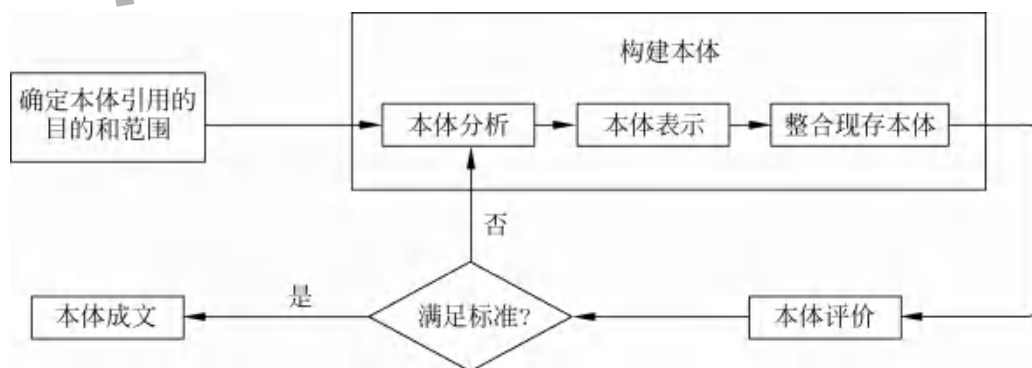


图 2-1 骨架法流程图

2.2.3 本体映射

本体映射基于信息获取技术,使用词汇术语搜索引擎将名称、标签、注释、限制属性等概念内涵,以及继承关系、主次关系、等同关系等结构特征进行综合考虑,实现了不同本体间概念的映射^[6]。

本体映射步骤为:步骤 1,特征提取。在本体中对概念名称、属性名称、概念实例等用于映射操作的各种特征的提取,一般在预处理组件中完成。步骤 2,选取用于映射的概念对。在源本体和目标本体中分别选择概念进行映射的准备,一般在映射发现组件中实现。步骤 3,计算选取的概念对特征的相似度。所选取概念之间的相似度计算是本体映射系统的核心步骤,一般是由匹配器组件中的各种匹配器来完成。步骤 4,整合相似度。衡量实体间的相似度往往会使用多种不同的策略方法,从而产生多种相似度结果,要综合考虑每个相似度,从而得到一个合理的综合相似度,该操作一般在映射表示组件中完成。步骤 5,优化。完成上一步操作后,已经获得待映射的每个实体之间的最初相似度,此时可以利用资源组件中的领域相关知识或者是运用启发式知识对结果进行调节,例如利用概念的结构之间的约束关系,若两个概念的子概念相似,则它们也可能相似。步骤 6,迭代。反复进行步骤 1 至步骤 5,直到得到满意结果^[6]。

2.2.4 本体推理

1. 描述逻辑

描述逻辑是一阶谓词逻辑的一个可判定子集,是一种基于对象的知识表示的形式化。它以结构化的方法来形式化的描述应用领域的知识,具有良好的建模和推理特性。

描述逻辑的基本构件有概念和关系。概念解释为对象的集合,关系解释为对象之间的二元关系。

2. 推理服务

推理服务可分为检测冲突、优化表达。

(1) 检测冲突:检查构建者设计的本体是否符合本体语言描述或是否存在逻辑矛盾,从而保证本体的正确性和一致性。检测的目的是设计和维护高质量的本体,得到一个有意义、正确的本体。检测冲突通常表现为检测实例体系的冲突和检测定义体系的冲突。

检测实例体系的冲突,检查所有实例是否符合本体中的全部约束,从而检测出概念定义与概念断言间的冲突以保证知识描述的正确性。例如,本体中定义了类“车床”和类“铣床”,并声明它们不相交,且个体“CA6140 车床”是类“车床”的一个实例,若其他构建者又声明“CA6140 车床”是类“铣床”的一个实例,这就产生了实