

上海交通大学学术出版基金资助

知识融合理论与方法

胡洁 彭颖红 戚进 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

产品设计是一个知识驱动的创造性过程。它包含了对知识的继承、集成、创新和管理,随着产品结构越来越复杂,功能越来越趋向集成化和复合化。新产品开发所需要的知识越来越多,尤其是面对市场国际化的激烈竞争,产品设计活动越来越要求以最快的时间将所需要的知识融合到新产品设计之中。正因为如此,知识融合作为知识工程和信息技术的交叉学科,在产品设计中已受到越来越多的关注。本书拟在产品概念设计领域中引入知识融合思想,为设计者提供基于知识的产品设计解决方案,也为实现产品的创新设计提供技术支持。

当前,中国企业亟需从模仿照搬国外先进产品阶段,跨越到自主研发创新设计产品阶段,知识融合作为知识工程和信息技术的交叉学科,在产品设计中已越来越体现出其研究的必要性。本书介绍了知识融合的理论和方法,并在原有理论基础上,创造性地提出了面向跨领域设计的知识融合方法,以利实现基于知识的产品创新设计,提高企业产品设计的新颖性与效率。在国务院 2006 年发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,支持产品创新设计的“数字化与智能化设计制造”被列为优先主题,提出了用高新技术改造和提升制造业,大力提高制造业创新能力的发展思路。研究知识融合驱动下的新产品设计方法,符合国家战略思路,同时也是智能化设计理论方法的一个重要发展趋势。

本书首先介绍现代产品设计方法以及产品设计领域知识工程理论方法,并分析目前知识工程方法在产品中的挑战与难题,引申出知识融合方法的必要性;接着,进一步论述产品设计中知识融合的主要步骤,包括知识模型构建、知识相似检索、知识语义聚类、知识功

能融合、知识结构推理和融合解优化,并介绍了知识融合相关系统的开发;最终通过工程领域中面向产品知识融合的设计案例,说明知识融合方法在产品过程中的应用情况。

本书系统阐述了产品设计中知识融合理论与方法,涵盖了理论与实践部分。理论方面,本书介绍了知识建模、知识检索、知识聚类、功能融合、结构推理、融合解优化等知识融合关键技术,构建了完整的知识融合理论体系。实践方面,本书介绍了知识融合相关系统开发,以及在实际产品设计中应用情况,便于读者理解知识融合理论方法。本书编写过程中,黄海清博士、胡晓博士、朱国牛博士、马进博士、李晟博士等提供了相关资料,并得到了陈集懿、陈彪、刘玮洁等的帮助,在此一并表示感谢。

知识融合理论、方法及其应用研究仍处于发展阶段,同时限于作者水平,书中存有不足之处、缺点和错误,恳请读者批评指正。

作者

2018. 4. 16

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 知识工程概述	1
1.2.1 知识工程背景	1
1.2.2 知识工程发展	3
1.2.3 知识驱动的产品概念设计	5
1.3 产品设计模型	7
1.3.1 功能-结构映射模型	7
1.3.2 功能-行为-结构映射模型	8
1.3.3 扩展模型	10
1.4 知识融合技术	10
1.4.1 知识融合内涵	10
1.4.2 物理层知识融合	12
1.4.3 知识层融合	13
1.5 本书内容	16
1.6 小结	16
参考文献	16
第 2 章 设计知识模型构建	20
2.1 引言	20
2.2 设计知识模型	20
2.2.1 传统设计知识模型	20
2.2.2 扩展设计知识模型	23
2.3 RFSC 模型构建	26

2.3.1	RFSC 模型层次映射	26
2.3.2	RFSC 模型功能分解	27
2.3.3	功能分解案例	29
2.4	RFSC 模型定义	32
2.4.1	RFSC 模型映射数学定义	33
2.4.2	RFSC 模型中功能结构映射特性	34
2.4.3	从属知识和局部知识	35
2.4.4	知识映射	36
2.5	RFSC 模型数学建模	37
2.5.1	设计功能建模	37
2.5.2	设计结构建模	39
2.5.3	结构-功能约束映射建模	39
2.6	实例分析	40
2.7	小结	41
	参考文献	42

第3章 设计知识相似检索

3.1	引言	45
3.2	相似性计算简介	45
3.2.1	系统相似性理论	45
3.2.2	相似性理论研究内容	46
3.3	相似性算法研究现状	48
3.3.1	早期相似度计算方法	49
3.3.2	常用相似度计算方法	49
3.3.3	热点相似度计算方法	50
3.3.4	新型相似度计算方法	51
3.3.5	研究现状小结	52
3.4	面向设计需求的相似性计算	54
3.4.1	相似性计算框架	54
3.4.2	数值型相似性计算(NSM)	55

3.4.3	语义型相似性计算(TSM)	56
3.4.4	区间型相似性计算(ISM)	56
3.4.5	模糊型相似性计算(FSM)	57
3.5	模糊相似性计算	58
3.5.1	基于模糊转化的 FSM 算法(FFSM)	58
3.5.2	基于隶属度函数的 FSM 算法(MFSM)	60
3.5.3	基于修正高斯隶属度函数的 FSM 算法 (AMFSM)	63
3.6	实例分析	66
3.6.1	基于 MFSM 算法的设计知识相似性检索 实例	66
3.6.2	基于 AGFSM 算法的设计知识相似性检索 实例	69
3.6.3	FSM 算法比较分析	70
3.7	小结	74
	参考文献	74
第 4 章	设计知识语义聚类	78
4.1	引言	78
4.2	设计知识功能信息语义模型	78
4.2.1	语义模型数学表达	78
4.2.2	标准语义模型构建	80
4.3	基于功能谓词的语义相关度聚类算法	83
4.4	基于模糊语义计算模型的术语冲突消解	84
4.4.1	描述性功能信息定义	84
4.4.2	模糊语义计算模型	86
4.5	实例分析	89
4.5.1	设计知识语义相关度聚类实例	89
4.5.2	设计知识语义冲突消解实例	91
4.6	小结	95

参考文献	95
------------	----

第5章 设计知识功能融合 97

5.1 引言	97
5.2 设计知识完整性分析	97
5.3 聚类知识功能融合	99
5.3.1 聚类知识融合架构	99
5.3.2 聚类知识封闭式融合	100
5.3.3 聚类知识开放式融合	103
5.4 异构知识功能融合	104
5.4.1 异构知识融合架构	105
5.4.2 异构知识合并式融合	106
5.4.3 异构知识补充式融合	107
5.5 功能融合不足	108
5.6 小结	109
参考文献	109

第6章 设计知识结构推理 111

6.1 引言	111
6.2 结构设计存在问题	111
6.3 融合知识元集构建	112
6.3.1 基于融合知识元集的推理框架	112
6.3.2 融合知识元集构建	113
6.4 设计结构环境适应性分析	115
6.4.1 环境因素分析	115
6.4.2 环境适应度	117
6.5 设计结构约束推理	120
6.5.1 设计结构关联约束研究	120
6.5.2 设计结构推理	122
6.6 小结	126

参考文献	126
------------	-----

第 7 章 设计知识融合解优化 128

7.1 引言	128
7.2 融合解空间存在的问题	128
7.2.1 融合解创新性问题	128
7.2.2 融合解制造性问题	129
7.2.3 融合解可靠性问题	130
7.3 融合解空间创新设计	131
7.3.1 基于 TRIZ 的冲突分析	131
7.3.2 基于 TRIZ 的冲突解决创新方法	134
7.4 融合解空间制造性分析	137
7.4.1 多目标决策方法	137
7.4.2 基于模糊 TOPSIS 法的融合解制造性分析	138
7.4.3 制造性分析举例说明	142
7.5 设计解空间可靠性分析	145
7.5.1 概念设计中产品可靠性分析方法	145
7.5.2 基于点态模糊交/并集运算的融合解故障树 分析	147
7.5.3 可靠性分析举例	150
7.6 小结	152
参考文献	152

第 8 章 设计知识融合系统开发 155

8.1 引言	155
8.2 系统架构与开发工具	156
8.2.1 系统架构	156
8.2.2 开发工具	158
8.3 关键技术	158
8.3.1 J2EE 平台	159

8.3.2	本体解析 Jena	160
8.3.3	本体创建 Protégé	161
8.4	系统功能模块	161
8.4.1	实例采集模块	161
8.4.2	实例融合模块	163
8.4.3	融合评价模块	163
8.4.4	实例管理模块	164
8.4.5	系统设置模块	164
8.5	系统运行流程	166
8.6	小结	167
	参考文献	168
第9章	设计知识融合应用案例	169
9.1	引言	169
9.2	产品设计要求	169
9.3	新设计需求输入	170
9.4	实例知识聚类	172
9.5	相似实例知识融合	179
9.6	异构实例知识融合	189
9.7	设计结构推理	194
9.8	融合解创新设计	196
9.9	小结	199
	参考文献	199

第1章

绪论

1.1 引言

进入 21 世纪,在以信息和知识为主导的“知识经济”时代中,知识的继承、集成、管理乃至创新是各领域迫切需要解决的问题。产品设计是一个知识驱动的创造性过程。它包含了对知识的继承、集成、管理和创新。随着产品结构越来越复杂,功能越来越趋向集成化和复合化,新产品开发所需要的知识越来越多。尤其是面对市场国际化的激烈竞争,产品设计活动越来越要求以最快的时间将所需要的知识融合到新产品设计之中。正因为如此,知识融合作为知识工程和信息技术的交叉学科,在产品设计中已受到越来越多的关注^[1]。本书旨在产品设计领域中引入知识融合思想,为产品设计师提供基于知识的产品设计解决方案,也为实现产品的创新设计提供技术支持。

1.2 知识工程概述

1.2.1 知识工程背景

世纪之交,全球知识经济的兴起和快速变化、竞争日益激烈的现代市场对制造业提出了更高的时间(T)、质量(Q)、成本(C)、创新(I)、服务(S)要求:

(1) 时间(time)。不仅是指产品的交货时间,更重要的是指新产品的开发时间和上市时间,甚至是指产品的整个生命周期。时间是体现企业竞争力的第一要素。谁能在最短的时间内交货,谁能最快地开发出新产品并打入市场,谁能在产品整个生命周期之内提供最好的服务,谁就能够占领市场。这就要求企业具有快速的应变能力、产品开发能力和生产能力。

(2) 质量(quality)。不仅是指对产品本身的性能、功能、外观、可靠性和使用寿命等方面的要求,更重要的是指如何在产品整个生命周期之内全面地满足客户的要求,包括各种服务要求。顾客对产品及其服务的满意程度是质量的度量。质量永远是衡量企业竞争力的重要指标。谁能提供高质量的产品,谁能在产品整个生命周期之内提供高质量的服务,谁就能够保住市场。这就对企业的产品设计水平、制造设备和制造工艺水平以及服务水平提出较高要求。

(3) 成本(cost)。不仅是指单一的产品制造和销售成本,而且是指包括产品的运行成本、维护成本及报废后的处理成本在内的全成本。成本或价格一直是顾客选择产品的一个主要指标。谁能提供质量价格比最优的产品,谁就能够拥有市场。为了降低成本,要求企业的产品和制造系统均具有高度的柔性,能够以相对不变的制造设施制造各种各样的产品,能够以尽量低的代价对产品进行维护和升级。

(4) 创新(innovation)。指产品的新颖性和技术独占性。当前独占性技术构成了产品的主要价值,且一项技术的独占期也越来越短。这就要求企业具有很强的创新意识和对市场的快速应变能力。

(5) 服务(service)。指产品整个生命周期之内的服务,包括售前咨询服务、售后维护和升级升值服务等。可以说,企业卖给顾客的不仅是产品,而是借助产品这座桥梁将自己的服务也卖给了顾客。服务已经越来越成为企业占领市场和保住市场的重要因素。企业在产品整个生命周期之内都必须具有强烈的服务意识和令顾客满意的高质量的服务水平。

面临着这些严峻的挑战和前所未有的机遇,将知识创新应用于传统制造领域,是现代制造业发展的必由之路。知识创新作为工程设计和制造领域的第一推动力,它的主导作用日益明显。但是,知识创新始终是建立在千百年来人类工程实践的经验和理论之上,在不断的知识改良和知识重组中获得新的知识。显然,知识的继承、集成、管理乃至创新是工程技术界迫切需要解决的问题。20世纪90年代以来,出现了以知识工程为代表的创新制造技术,并且在不长的时间里,已成为科技界和企业界的研究热点之一,而且这些新概念对制造业革命性的影响也已经显现出来。

20世纪80年代以来,一些工业发达国家和新兴工业化国家都把先进制造技术作为国家可以优先发展的方向和高技术的实施重点,加快发展先进制造技术已成为各国政府的共识。制造技术重新获得世界各国的重视,纷纷制订先进制造技术研究和发 展计划,其中最具代表性的有美国的先进制造技术计划(AMT)、韩国的高级先进技术国家计划(G-7计划)、日本的智能制造技术计划

(IMS)、美国国家关键技术(制造)计划、美国敏捷制造智能技术计划(TeAM)和德国制造 2000 计划等^[2]。进入 20 世纪 90 年代,人类社会开始进入信息时代,如何以最短时间开发出高质量和高性能价格比的创新产品已成为市场竞争的新焦点。而创新产品的竞争优势正在于其所拥有的知识含量。

知识来源于客观世界的各种信息,但是它又区别于数据和信息。数据(数值、符号)通常只是事物的名称,单个数据本身不能说明什么,而信息则通过数据之间的某种联系,揭示有意义的概念。知识则是通过一定信息的有效组合,用以揭示事物的规律性。

从认识论的角度看,知识是人们在改造世界的实践中所获得的认识和经验的总和,而关于知识的本质,目前尚无定论,只是从不同侧面加以说明。随着知识经济理论的逐渐发展,经济合作与发展组织(Organization of Economic Cooperation and Development, OECD)从知识经济的角度来阐述知识,认为知识是指人类迄今为止通过思索、研究和实践所获得的对世界(包括物质世界和精神世界)认识的总和,按其性质可分为四种类型^[3]:

- ① 知道是什么的知识(know-what),指关于事实方面的知识。
- ② 知道为什么的知识(know-why),指事物客观原理和规律性方面的知识。
- ③ 知道怎样做的知识(know-how),指满足人们某种需要的技艺、技巧和能力方面的知识。
- ④ 知道是谁的知识(know-who),指哪些人掌握这些知识,也就是关于管理的知识和能力。

以上知识可以进一步分为两大类:显性知识和隐性知识。显性知识指的是有一定的存在形式和固定的载体,可以明确地表达或描述出来,关于 know-what 和 know-why 的知识基本属于显性知识;隐性知识往往是个人或组织经过长期积累而拥有的知识,通常不容易用言语表达、传播起来也非常困难。关于 know-how 和 know-who 的知识基本属于隐性知识。虽然隐性知识更难于掌握,但却是社会财富的最主要源泉。在产品设计中,工程师在长期工作中积累的 know-how 起着十分重要的作用,应该尽可能地将隐性知识应用于产品设计决策过程。

1.2.2 知识工程发展

知识工程(knowledge-based engineering, KBE)技术的产生与智能技术的发展密切相关。1956 年在美国达特茅斯(Dartmouth)学院举办的学术研讨会上由 J. McCarthy, M. Minsky, N. Lochester 和 Shannon 共同提出了“人工智能”

这一术语,标志着人工智能这门使用计算机研究和模拟人类智能的新兴学科的诞生。随着研究的深入,人们发现人工智能的求解能力不仅取决于它使用的形式化体系和推理模式,而且取决于它所拥有的知识。1965 年美国斯坦福(Stanford)大学的 E. A. Feigenbaum 教授首先将通用的解题策略与特定领域的专业知识和实际经验相结合,提出了基于领域知识的智能型系统的思想,并开发出根据化合物的分子式及其质谱数据来推断分子结构的 DENDRAL 系统,标志着专家系统(expert system)的诞生^[4]。1977 年 Feigenbaum 教授在第五届国际 AI 大会上提出了知识工程(knowledge engineering)的概念,成为知识可操作化的里程碑。知识工程的研究有利于缩短专家系统的研制周期,出现了一批通用程度不等、类型不同的专家系统工具。

用于产生满足约束条件的目标方案的专家系统为设计型专家系统,它在本质上采用了单一知识领域的符号推理技术。设计型专家系统主要具有以下特点^[5]: ① 设计结果的多样性和可行性;② 设计任务的多层次和多目标性;③ 计算与推理交替运行的操作环境;④ 问题表示、求解策略和方法的多样性;⑤ 结构问题的求解和知识表示;⑥ 再设计的复杂性和问题的组合爆炸;⑦ 求解问题解释的复杂性。将设计型专家系统与工程设计领域结合的一个重要实践是智能 CAD 技术(ICAD)。ICAD 最明显的特征是拥有解决设计问题的知识库、具有选择知识、协调工程数据库和图形库等资源共同完成设计任务的推理决策机制。目前比较成功的 ICAD 系统主要是将知识系统作为 CAD 前端或后端,强调 AI 与 CAD 的结合,而且主要集中在常规的和改良的设计系统,而在方案设计或工艺设计阶段,一直未能很好地运用和体现。

在早期智能系统中,智能活动是以设计型专家系统形式出现的,但存在许多缺陷: ① 缺乏对数值计算的集成;② 缺乏对众多领域知识的集成;③ 缺乏对多种任务和功能的集成。因而设计对象的规模和复杂性都受到限制^[5]。而现代工程设计是一个知识驱动的创造性过程,它包含了对知识的继承、集成、创新和管理。为了适应现代工程设计日益强烈的创新要求,有必要改造传统的设计型专家系统和智能 CAD,建立新型的智能设计方法,使之不仅胜任常规设计,更支持创造型设计^[6]。知识工程正是面向现代设计要求而产生、发展的新型智能设计方法。知识工程概念诞生于 20 世纪 80 年代初,由于有许多成功的工程应用,在 80 年代后期得到了广泛的认可。如今,知识工程已成为智能设计领域最活跃的分支之一,成为促进工程设计智能化的重要途径。英国 Warwick 制造组的 Chapman 博士指出^[7]: 到 2010 年,知识工程对于企业的重要性,就如同 CAD/CAE/CAM 在 20 世纪 90 年代给工业界带来的变革一样;美国 Ford 汽车公司也

将 KBE 作为 20 世纪发展战略中信息领域的关键技术之一。

近年来,美国、日本和欧洲各国政府在知识工程技术的开发与应用方面给予了有力的支持。许多跨国公司和著名大学纷纷开展研究,以期提高对产品开发的决策能力。KBE 对工业界的影响是显著的,如福特汽车公司在英国的子公司——美洲虎(Jaguar)汽车公司采用 KBE 技术设计某车型发动机盖,设计时间由 2 个月减为 2 小时^[7];British Aerospace(BAe)^[8]在设计 A340-600 飞机的机翼时,如用常规的参数化 CAD 软件进行设计,仅对 A340-600 的所有翼脚进行一次设计、分析需要一个人年,而采用 KBE 技术后,10 小时即可完成机翼的设计;联合技术公司(United Technologies Corp.)的 Pratt & Whitney 部门已将 KBE 技术应用于波音 B777 的 PW4084 喷气发动机转子、轴、叶片等关键部件的设计^[8]。

1.2.3 知识驱动的产品概念设计

Pahl 和 Beitz 在其 *Engineering Design* 一书中首次给出概念设计定义:“在确定任务之后,通过抽象化,拟定功能结构,寻求适当的作用原理及其组合等,确定出基本求解途经,得出求解方案,这一部分设计工作叫做概念设计”^[9]。French 在其 *Conceptual Design for Engineers* 一书中定义概念设计为“概念设计是考虑设计问题的内容,并以方案的形式提出众多的解的设计阶段”^[10]。

彭颖红教授在《KBE 技术及其在产品中的应用》一书中指出概念设计是“指充分发挥设计者的创造力,利用人类已有的相关科学技术成果,含理论、方法和技术原理等,构思创新产品概念,并进一步应用新技术、新原理和新方法进行产品的设计和分析,开发具有新颖性和实用性的新产品的实践活动。”^[1]

一般认为,概念设计是指以设计要求为输入,以最佳方案为输出的系统所包含的创新性思维工作流程。概念设计包含两个基本过程:分析综合过程与优化评价过程。其中,前者是指由设计要求生成众多的方案的过程。后者则指从方案集中选出最佳方案的过程。由概念设计概念可知,产品概念设计不可能涉及全部结构的细节,而是集中精力于主要功能和结构的主要组成部分,特别是与创新概念有关的方面。因为方案没有选定之前,烦琐的细节设计可能会成为徒劳,不同方案的细节设计往往完全不同。经过对各种方案进行技术上和经济上可行性的测试后,对选定的方案进行结构细节设计,称为详细设计。在局部结构的详细设计中遇到不能采用已知解时,同样需要创新,这时再次进入概念设计。两个步骤交替进行,直到所有在设计过程中需要解决的问题全部确定为止。

对于机械类产品而言,其概念设计具有如下特性:

(1) 创新性。产品概念设计阶段是产品创新最为集中的阶段,机械产品概念设计中的产品创新归结为功能修改与增加原理置换、布局、形状以及结构修改与更换等多个方面。其中功能创新是整个机械产品设计过程中最初的也是最重要的一步,它需要找出可以实现该产品功能的各种可能方案并进行优选。

(2) 复杂性。机械产品概念设计的复杂性主要体现在其设计路径和设计结果的多样化上。机械产品中不同的功能定义、功能分解和作用原理等会产生完全不同的设计思路和设计方法,从而在功能载体的设计上产生完全不同的解决方案。

(3) 层次性。机械产品概念设计的层次性体现在两方面,即设计过程的层次性和设计对象表达的层次性,概念设计过程是作用在功能、行为、结构等不同的层次上,并且各层自身包含一定的层次关系。

(4) 多目标性。机械产品设计是在多种因素的限制和约束下进行的,如科学、技术、经济的发展水平,生产厂家提出的特殊要求及环境、社会等因素。这些限制和要求变成了设计师进行谋划和构思的“设计空间”,只有满足了这些约束目标,才可能得到可行解。

(5) 递归性。产品概念设计的递归性表现在不断细化、逐步求精的递归求解过程上。递归性反映了概念设计的迭代性和反复性。

(6) 不良结构性。概念设计信息的不完整、不一致、不精确甚至是模糊的特性,使得人们难以对该阶段进行准确、定量的描述和检验,导致从问题空间到解空间求解的过程变成了不良结构问题。

知识驱动的产品概念设计即采用 KBE 技术,把已有的产品设计知识充分利用,辅助工程师进行新产品的概念设计。在企业中,产品设计知识通常以设计规则、设计实例等显性方式表达。随着产品型号数量的增加,产品设计知识也会大量的积累。目前,企业对上述知识利用率仍然偏低,产品的设计依然依靠设计者自身的经验与设计手册。如何利用上述积累的知识,一直是设计型企业亟待解决的难题。KBE 技术包括知识表示、知识推理、知识获取和知识管理等方面。知识表示是利用计算机能够接受并且进行处理的符号和方式来表示人类在改造客观世界中所获得的知识;知识推理指的是从已知的事实出发,通过运用已掌握的知识,找出其中蕴含的事实,或归纳出新的事实;知识获取就是把用于问题求解的各种专门知识从知识源中提炼出来,并将其转换成计算机上可执行代码的过程;知识管理目标就是将基于计算机的知识管理系统和基于人际网络的沟通系统进行集成,形成具有认知能力和创新能力的知识网络。在概念设计阶段中

已有大量的关于 KBE 技术的应用案例。相对而言,知识融合是 KBE 范畴中新兴的技术,目前在产品设计中应用并不多。本书就是在产品设计领域中引入知识融合思想,为设计者提供新的产品概念设计解,关于知识融合的介绍,将在后续章节中论述。同时,为了便于论述,在后续章节中若不加以区分,所指的产品设计即为在概念设计阶段的产品设计活动。

1.3 产品设计模型

1.3.1 功能-结构映射模型

在产品设计过程中需要实现从功能模型到结构模型的转换,当前关于产品设计建模技术的研究基于以下两个模型:功能-结构映射(function-structure)模型和功能-行为-结构(function-behavior-structure)模型。随着研究深入,许多学者提出了以这两种模型为基础的扩展模型。

功能-结构映射模型直接完成功能到结构的映射,该方法尤其适合结构化良好的设计问题,其映射过程需要预定义的设计单元支持。由设计单元组成的知识库包括结构化领域专有的基本功能及其对应的物理结构(设计单元)。该方法的主要任务包括设计问题结构化,从库中检索适合的设计单元,重新组合这些单元产生结构列表,通过匹配和检索算法找到相应的结构。

Pahl 和 Beitz 首先提出了反映功能-结构映射机制的系统模型(systematic model)^[9]。在系统模型中,产品设计方案生成过程包括三个步骤:建立功能结构(function structure)、寻求求解原理(solution principles)、组合求解原理。为了减小设计的复杂程度,通常将较为复杂的功能分解为较为简单的子功能,将子功能进行组合就构成了反映系统总功能的功能结构。Kota 和 Lee^[11]将设计过程视为在满足约束条件下由功能确定出结构的过程,即由功能向结构映射的过程(见图 1-1)。并将产品设计技术分为功能和结构两个层次。

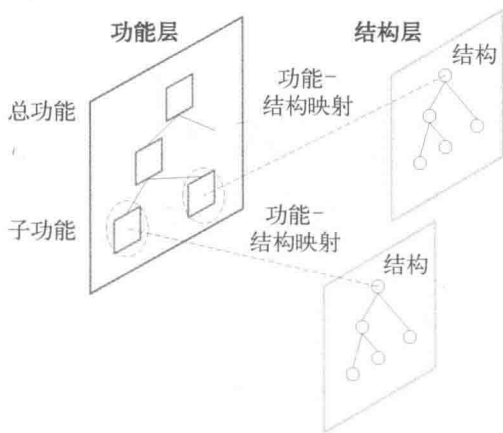


图 1-1 功能-结构模型

不同于系统模型中功能-结构单映射机制, Freeman 和 Newel^[12] 提出了功能-结构反复映射模型, 即 Freeman - Newel 模型(简称 F - N 模型)。该模型通过描述方案生成过程的组成单元(可以理解为设计思维片段)以及单元之间的连接关系, 进而对设计方案生成过程进行刻画。F - N 模型中将结构与其上层(提供)功能和下层(所需)功能关联起来建立了结构认知模型, 其含义为: 结构为了提供其上层功能, 需要其下层功能的实现作为支持。这反映了设计过程的局部求解活动。基于结构认知模型, F - N 模型对设计过程进行了描述: 根据设计问题的功能描述搜索满足功能的结构, 所获结构需要下层功能作为支持以实现其上层功能。下层功能又需要由更底层的结构来提供, 这些结构又产生其下层功能需求。这个过程不断重复, 直到所获得的结构为产品基本构造元素。

结合功能-结构单映射和反复映射机制, Tor 等^[13] 提出复合映射模型。其模型区分了功能、结构之间的三种关系: 分解、实现和支持, 并以这三种基本关系构造了四种功能推理类型, 在此基础上建立了设计方案生成过程模型。

彭颖红教授团队^[14] 根据功能-结构映射机制在产品设计中提出了基于功能元知识(functional meta-knowledge cell)的设计知识表示方法, 其框架如图 1-2 所示。功能元知识包括两个层, 即功能层(function layer)和结构层(structural layer)。功能层中各个功能类(function class)由功能谓词表示, 采用功能分解理论, 通过分析功能分解矩阵, 确保功能层中子功能的独立性。

1.3.2 功能-行为-结构映射模型

功能-行为-结构映射模型通过分析和综合物理行为来实现功能到结构的映射^[15]。物理结构行为通过描述完成功能的动作, 从而架起了功能需求和结构方案之间的桥梁。这类模型认为功能与结构必须通过行为才能建立联系, 将产品设计看作是从功能向行为再向结构映射的过程, 一个功能可能对应多个行为, 一个行为可以和多个结构相联系。同样, 同一行为可以从多个结构中推导出^[16,17]。原理方案求解时, 先确定设计需求功能, 再由功能需求转化为行为, 最后转化为物理结构。

Oian^[18] 和 Gero^[19,20] 最先提出了功能-行为-结构模型(见图 1-3)。他们进行了较为系统的研究, 并给出了一种数学模型描述此结构, 研究了各映射空间之间关系, 将功能、行为和结构之间的关系称为 FBS 通道(path), 通过这个通道, 给定一个功能就能发现实现这个功能的行为和结构。

文献[20]将行为作为功能集合到结构转换的手段。行为定义为两类映射: 第一类将事实行为直接映射到结构, 第二类将期望行为映射到功能。在设计过