

陈光柱 著

产品免疫概念设计理论及应用



科学出版社

www.sciencep.com

产品免疫概念设计 理论及应用

陈光柱 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在全面总结国内外产品概念设计和人工免疫系统发展现状的基础上,介绍了免疫决策的理论体系;免疫 Agent、多目标免疫应答激活算法、补体激活算法、克隆激活算法、基于免疫网络的 Q-学习算法。在此基础上,以产品概念设计为工程背景,提出了基于免疫决策理论的方案设计、方案评价、评价指标协商等概念设计方法,构建了基于免疫 Agent 的群体决策支持系统,并基于提出的理论和方法开发了带式输送机传动方案协同开发系统。

本书对提升产品设计人员的产品创新开发能力具有重要的参考价值,也可供计算机科学、信息科学、人工智能和自动化技术等领域从事人工免疫系统优化与决策研究的相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

产品免疫概念设计理论及应用/陈光柱著. —北京:科学出版社,2009
ISBN 978-7-03-025020-9

I. 产… II. 陈… III. 产品—设计 IV. TB472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 120144 号

责任编辑:耿建业 装 育 / 责任校对:张怡君
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

诸清彩色印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 7 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2009 年 7 月第一次印刷 印张:10 1/2

印数:1—2 500 字数:202 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(长虹))

前 言

在产品设计过程中,概念设计是产品整个生命周期的初始阶段,是在整个设计过程中最能体现设计人员经验与智慧、最富创造性的过程。产品概念设计结果在很大程度上决定着产品的技术和经济效益。据统计,产品概念设计阶段实际投入的费用虽然仅占总成本的5%,却决定了产品总成本的70%。由此可见,产品概念设计是产品设计的关键所在,其设计结果很难用后续更为详细的细节设计来弥补。正是由于产品概念设计的重要地位,越来越多的国内外学者对其理论及方法进行研究。

产品概念设计过程可以看做是对满足设计要求的不同方案群体进行全局优化、决策的过程,即在现有的功能结构库中找到满足各项功能的执行机构,通过不同的组合生成多个设计方案,再通过评价,优胜劣汰,最终优选出最佳设计方案的过程。因此可见,产品概念设计过程实际上是一个对产品的决策过程。

决策是针对某个问题,为了实现一个或一组目标,个人或群体从可以实现该目标且可以互相替代的行动方案中,选定一个最合适方案的行为。决策在信息、控制、能源、运输、制造、社会管理等诸多工程领域得到了广泛的应用。随着计算机和计算方法的发展,在信息处理、工业控制、科学研究等领域中提出了智能决策问题,即机器如何才能根据其所面临的任务,自主或辅助人类做出决策,以实现其目的。近年来,决策目标的复杂性和决策环境的不确定性对传统智能决策技术提出了新的挑战 and 机遇。

生物免疫系统作为具有很高智能行为的并行、分布式、自适应信息处理系统,为工程应用问题的解决提供了新的契机;充分挖掘、利用和借鉴这种系统的有关理论来发展人工免疫系统理论及应用已经成为人工智能领域的重要研究内容和发展趋势。生物免疫系统也是一个不同于大脑思维方式的决策系统,在系统中,抗原的识别、抗体的产生、抗原的杀死过程实际上是一个多种免疫细胞、免疫分子协同决策的过程。因此,将生物免疫系统的有关原理应用于决策分析而构建的免疫决策理论是智能决策的重要研究内容。

本书主要以带式输送机的传动方案设计为工程背景,提出了一系列的免疫决策理论与产品概念设计方法,并建立了带式输送机传动方案协同开发系统。

免疫决策理论主要包括:借鉴免疫细胞的特性提出了一种新型的Agent——免疫Agent;借鉴免疫应答原理和补体激活原理,提出了多目标免疫应答激活算法;借鉴补体激活原理提出了一种补体激活算法;借鉴克隆选择原理和补体激活原理,提出了一种克隆激活算法;将免疫网络与Q-学习算法相结合,提出了基于免疫网络的Q-学习算法。在此基础上,提出了基于免疫决策理论的产品概念设计方法;基于多目标免疫应答激活算法的方案设计方法、基于克隆激活算法的方案评价方法、基于免疫学习算法的评价指标的协商方法,并构建了基于免疫Agent的群体决策支持系统,最后开发了带式输送机传动方案协同开发系统。

本书得到了国家自然科学基金项目“含噪混合性能指标优化问题的进化优化理论与方法”(60575046)、江苏省高校“青蓝工程”和中国矿业大学科学基金项目“基于人工免疫的多智能体协同设计研究”(E200412)的资助,本书包含了这些基金资助项目的研究成果;同时,本书的出版还得到了中国矿业大学学科建设经费的资助。为此特致以衷心的感谢!

特别感谢四川大学的博士生指导教师李志蜀教授在作者就读博士期间的悉心培养和指导;感谢中国矿业大学的朱真才教授、巩敦卫教授、唐大放教授、程志红教授的指导和帮助;感谢四川大学的袁道华教授的指导和帮助;感谢硕士研究生翟雨生在实验与程序开发方面所付出的辛勤劳动;感谢科学出版社的大力支持。另外,作者在写作过程中,参考了大量的相关书籍和文献,同时也向这些作者致以诚挚的谢意!

感谢作者家人的大力支持和理解。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请各位专家、学者和读者批评指正。

陈光柱

2009年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 概念设计	2
1.2.1 概念设计概述	2
1.2.2 概念设计发展	5
1.2.3 概念设计中的决策分析	12
1.2.4 概念设计存在的问题	13
1.3 智能决策	14
1.3.1 决策	14
1.3.2 智能决策的概念	15
1.3.3 智能优化与决策的关系	15
1.3.4 智能决策研究现状	16
1.3.5 智能决策存在的问题	18
1.4 免疫决策	20
1.4.1 免疫决策思想的提出	20
1.4.2 免疫决策的研究现状	20
1.5 带式输送机传动方案设计概述	22
1.6 本书的结构	23
1.7 本章小结	25
参考文献	25
第 2 章 免疫系统	31
2.1 引言	31
2.2 生物免疫系统	31
2.2.1 生物免疫的概念	31
2.2.2 生物免疫系统的组成	31
2.2.3 免疫机制	34
2.2.4 生物免疫系统的特征	38

2.3	补体系统	39
2.4	人工免疫系统	40
2.4.1	免疫算法	40
2.4.2	免疫网络模型	42
2.5	本章小结	43
	参考文献	44
第3章	免疫 Agent	47
3.1	引言	47
3.2	免疫 Agent 概述	49
3.2.1	免疫 Agent 的生物来源	49
3.2.2	免疫 Agent 的定义及特征	49
3.2.3	免疫 Agent 的种类及工作流程	50
3.3	多免疫 Agent 系统	52
3.3.1	体系结构	52
3.3.2	形式化描述	53
3.3.3	免疫 Agent 之间的协作模式	54
3.3.4	应答 Agent 的动力学形式化模型	56
3.3.5	多免疫 Agent 系统的特点	56
3.4	本章小结	57
	参考文献	57
第4章	基于多目标免疫应答激活算法的方案设计	59
4.1	引言	59
4.2	免疫应答原理	62
4.3	补体激活原理	63
4.3.1	经典激活途径	63
4.3.2	旁路激活途径	64
4.4	多目标免疫应答激活算法	64
4.4.1	基本定义	64
4.4.2	邻居排挤算法	66
4.4.3	操作算子的构造	67
4.4.4	多目标免疫应答激活算法流程	69
4.4.5	算法的收敛性分析	70
4.4.6	实验测试	72

4.5	产品方案设计模糊信息建模	77
4.5.1	模糊理论	77
4.5.2	方案设计模糊信息描述	80
4.6	带式输送机的传动方案设计	82
4.6.1	传动方案建模	82
4.6.2	带式输送机传动方案的求解	85
4.7	本章小结	86
	参考文献	87
第5章	基于克隆激活算法的方案评价	90
5.1	引言	90
5.2	基本定义	91
5.3	补体激活算法	92
5.3.1	补体激活算法流程	92
5.3.2	补体激活算法的实验	93
5.4	克隆激活算法	95
5.4.1	克隆激活算法流程	95
5.4.2	克隆激活算法的收敛性分析	96
5.4.3	实验测试	98
5.5	基于克隆激活算法的多目标群决策方法	103
5.5.1	多目标决策问题	103
5.5.2	多目标决策的权重处理	104
5.5.3	多目标决策方法	106
5.5.4	多目标群决策方法	110
5.6	本章小结	111
	参考文献	111
第6章	基于免疫学习算法的评价指标协商	113
6.1	引言	113
6.2	冲突消解方法	114
6.3	多方多议题协商体系	115
6.3.1	协商模型	115
6.3.2	协商协议	119
6.4	强化学习	119
6.4.1	强化学习概述	120

6.4.2	Q-学习算法	120
6.4.3	多 Agent 强化学习	122
6.5	基于免疫网络的 Q-学习算法	124
6.6	带式输送机传动方案的评价指标协商	125
6.6.1	评价指标体系的建立	125
6.6.2	带式输送机传动方案评价指标协商实验	126
6.7	本章小结	128
	参考文献	129
第 7 章	基于免疫 Agent 的群体决策支持系统	131
7.1	群体决策支持系统	131
7.1.1	群体决策支持系统概述	131
7.1.2	群体决策支持系统的体系结构	132
7.2	基于免疫 Agent 的群体决策支持系统	133
7.2.1	体系结构	133
7.2.2	决策过程	135
7.2.3	知识表示	135
7.3	带式输送机传动方案群体决策支持系统	137
7.3.1	系统结构	137
7.3.2	各 Agent 的实现	138
7.3.3	数据层	144
7.3.4	带式输送机传动方案协同开发系统	147
7.4	本章小结	150
	参考文献	151
附录 A	测试问题	152
附录 B	基本术语	157

第 1 章 绪 论

概念设计是产品设计中的重要阶段,在这个阶段,设计人员不断地进行产品方案的设计与评估决策,以期得到一个最优的产品设计方案。随着人工智能的兴起,人工智能理论和决策分析技术相结合而产生的智能决策已经在决策中得到了关注。实际上,人工智能与决策存在深刻的联系,几乎所有的智能行为都是通过决策来实现的,因此,智能决策问题是人类智能的核心问题。在生物免疫系统中,抗原的识别、抗体的产生、抗原的杀死过程实际上是一个多种免疫细胞、免疫分子协同决策的过程。本章首先介绍了产品概念设计和智能决策的研究现状,然后通过抽取生物免疫系统原理提出了免疫决策的思想。

1.1 引 言

在产品设计过程中,概念设计是产品整个生命周期的初始阶段,是在整个设计过程中最能体现设计人员经验与智慧、最富创造性的过程。产品概念设计结果在很大程度上决定着产品的技术和经济效益。据统计,产品概念设计实际投入的费用虽然仅占总成本的 5%,却决定了产品总成本的 70%。由此可见,产品概念设计是产品设计的关键所在,其设计结果很难用后续更为详细的细节设计来弥补。正是由于产品概念设计的重要地位,越来越多的国内外学者对其理论及方法进行研究。

产品概念设计的过程可以看做对满足设计要求的不同方案群体进行全局优化的过程,即在现有的功能结构库中找到满足各项功能的执行机构,通过不同的组合生成多种设计方案,再通过评价,优胜劣汰,最终优选出最佳设计方案的过程。因此,产品概念设计过程实际上是一个对产品的决策过程。

决策是针对某个问题,为了实现一个或一组目标,个人或群体从可以实现该目标且可以互相替代的行动方案中,选定一个最合适方案的行为^[1]。目前,决策已经在信息、控制、能源、运输、制造等诸多工程领域得到了广泛的应用。决策水平的高低对科学、工程及其他社会实践的成败、优劣起着关键作用。富有成效的决策依赖于科学的决策方法,随着系统化的科学方法作为人类探索自然与指导社会实践的重要手段的产生、发展与完善,对基于理性思维的决策

方法展开了广泛的研究,产生了丰硕的成果,并形成了以统计决策理论与系统分析法等为支撑的决策分析这一专门学科^[2]。

传统的决策依靠决策人员个人的洞察力、理智、经验和直觉判断,这种决策方法远远不能满足日益复杂的管理决策的需要。随着计算机科学与计算方法的普及,越来越多的复杂计算和推理任务都依赖计算机来完成。现代决策技术是一门集成系统建模、统计分析、优化理论与计算机科学等理论和方法的综合性应用学科。随着人工智能的兴起,人工智能理论与技术已经广泛应用于信息处理、控制、管理等众多领域。将人工智能理论与技术和决策分析技术相结合就产生了智能决策。实际上,人工智能与决策存在深刻的联系,几乎所有的智能行为都是通过决策来实现的。因此,智能决策问题是人类智能的核心问题^[3]。近年来,随着信息技术的发展,在金融、科学研究、信息服务、控制等领域提出了一系列复杂的智能决策问题,它们具有海量数据,包含不确定性因素,要求环境自适应、自动决策、实时决策、群体决策等特点。这些复杂的决策问题,对传统智能决策的建模方法和求解手段提出了新的要求。

生物免疫系统具有良好的多样性、耐受性、免疫记忆、分布式并行处理、自组织、自学习、自适应和鲁棒性等特点。生物免疫系统这些典型的特性,引起了工程研究人员的普遍关注。受生物免疫系统的启发,人们建立起了基于生物免疫系统原理的智能系统——人工免疫系统(artificial immune system, AIS)。AIS已经在信息安全、模式识别、数据挖掘、机器学习、工业控制等领域得到了一定的应用。在生物免疫系统中,抗原的识别、抗体的产生、抗原的杀死过程实际上是一个多种免疫细胞、免疫分子协同决策的过程^[4]。将生物免疫系统应用于决策,有两方面的诱因:①应用需求对智能决策提出的挑战呼唤新方法的创新;②生物免疫系统中的应答过程实际上是一个决策过程,为免疫决策的提出提供了很好的隐喻。

1.2 概念设计

1.2.1 概念设计概述

产品设计是将市场需求映射成产品功能要求,并将功能要求转化为能实现该功能要求的产品功能结构的过程。产品的设计过程大概可分为需求分析、概念设计、装配设计和详细设计等四个过程^[5],如图 1.1 所示。每个过程的末端都输出相应的文档:需求分析过程输出需求分析技术说明,概念设计过程输出概念产品方案,装配设计过程输出三维总体装配模型,详细设计过程输

出二维工程图。

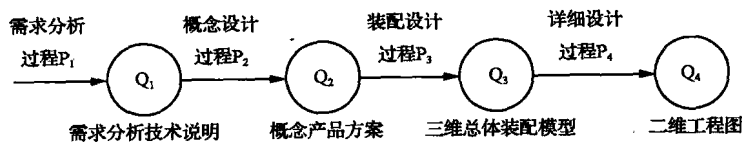


图 1.1 产品设计过程

上述四个设计过程既有顺序上的逻辑性,又有相互之间的重叠性。在这四个过程中,概念设计日益引起人们的关注和重视^[6]。在产品设计过程中,概念设计是工程设计的前期工作过程,概念设计的结果是产生最优的设计方案。概念设计包括设计人员对设计任务的理解、设计灵感的表达、设计理念的发挥,因此,概念设计应该充分体现设计人员的智慧和经验。概念设计过程又可细分为前期阶段和后期阶段:前期阶段的工作应充分发挥设计人员的形象思维,如构想市场需求、确定功能要求、选择工作原理;而后期阶段的工作较多地集中在构思功能结构,如选择功能与结构解、组成概念设计方案等。

概念设计阶段对设计人员的约束最少,具有较大的创新空间,最能体现设计人员的经验、智慧和创造性。概念设计是整个设计进程中决定产品技术经济指标的关键阶段,是研究产品设计优化过程中不可缺少的重要研究内容,也是创新设计的关键阶段,其结果直接决定着产品最终价值的80%以上。概念设计不仅决定产品的结构、性能、质量、成本、安全性和环保性等,而且产生的设计缺陷无法在后续设计过程弥补^[7]。

自 Pahl 和 Beitz 于 1984 年在 *Engineering Design* 中提出概念设计这一名词以来,人们已经对概念设计进行了二十多年的研究,学者们对概念设计的本质和任务进行了深入的研究,提出了各自对概念设计的理解。Pahl 和 Beitz 将概念设计定义为: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,确定出基本求解途径,得出求解方案^[8]。根据 Pahl 和 Beitz 对概念设计的定义,可以得出概念设计的一般过程,主要包括明确设计要求、建立功能结构、原理方案设计、原理解的组合及组合解的优选等步骤,如图 1.2 所示^[9]。

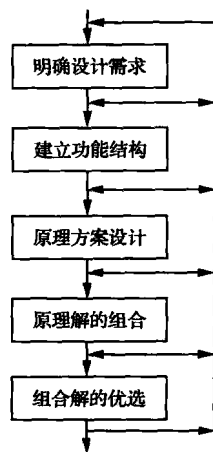


图 1.2 概念设计的一般过程

在上述概念设计的一般过程中,明确设计需求是将市场或用户需求转化为设计需求;建立功能结构是指根据目的功能通过功能分解、拓展和(或)综合等方式建立待设计产品的功能结构;原理方案设计是指为功能结构中的子功能寻求合适的原理解;原理解的组合是指根据功能结构将子原理解进行综合;组合解的优选是指利用合适的评价方法优选出合适的方案。

French 认为概念设计是将设计问题进行描述并以方案的形式提出众多解的设计阶段^[10]。邹慧君认为设计过程是由综合过程、选择过程和分析过程

组成^[11]。综合过程是实现产品创新的关键步骤,主要包括功能结构综合、原理综合、构型综合以及尺度综合四部分,其中原理综合和构型综合统称为概念设计。邓家提在分析概念产品的基础上将概念设计作如下定义:概念设计是由分析用户需求到生成概念产品的一系列有序的、可组织的、有目标的设计活动,它表现为一个由粗到精、由模糊到清楚、由抽象到具体、不断进化的过程^[12]。其产品概念设计过程如图 1.3 所示。

综合以上两种主要的概念设计模型,提出如图 1.4 所示的多层概念设计模型。多层概念设计模型分为四大过程:需求分析、功能结构映射、方案设计、方案评价。

多层概念设计模型可形式化描述如下:

(1) 需求分析。

$$F = f_F(I, K_F) \quad (1.1)$$

式中, F 表示功能信息; f_F 表示需求分析映射函数; I 表示需求信息; K_F 表示需求分析知识。

(2) 功能结构映射。

$$S = f_S(F, K_S) \quad (1.2)$$

式中, S 表示结构信息; f_S 表示功能结构

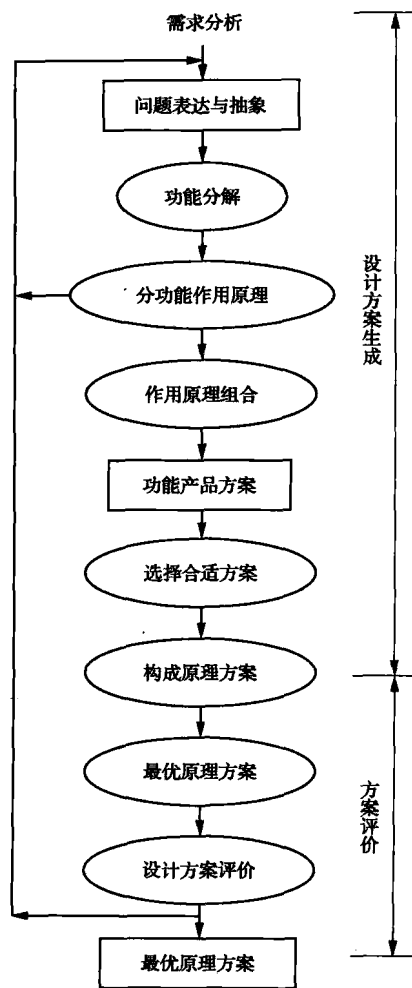


图 1.3 产品概念设计过程

映射函数; F 表示功能信息; K_s 表示功能结构分析知识。

(3) 方案设计。

$$C = f_c(S, K_c) \quad (1.3)$$

式中, C 表示可行设计方案; f_c 表示方案设计映射函数; S 表示结构信息; K_c 表示方案设计知识。

(4) 方案评价。

$$O = f_o(C, K_o) \quad (1.4)$$

式中, O 表示最优设计方案; f_o 表示方案评价映射函数; C 表示可行设计方案; K_o 表示方案评价知识。

定义 1.1 多层概念设计模型可表示为

$$O = f_o(f_c(f_s(f_f(I, K_f), K_s), K_c), K_o) \quad (1.5)$$

1.2.2 概念设计发展

目前,对概念设计的研究主要包括两个方面:一是概念设计信息建模,即采用一定的表达模式对产品的需求信息进行分析、甄别,然后采用合适的表达语言建立其概念设计模型;二是概念设计模型求解,即选择合适的方法对所建立的概念设计信息模型进行推理、求解,求得最优的设计方案。

1. 概念设计信息建模

一些研究者已经提出了如键合图理论、形态学分析法、基于图(树)的方法、多色集理论、知识方法等一些概念设计信息建模方法。

(1) 键合图理论。

键合图理论是20世纪60年代初美国的Paynter教授提出的,其研究的主要目的是建立面向计算机的自动建模与仿真的理论方法^[13]。键合图理论的基本思想是任何系统都可以由一些基本元件以一定联结方式,用规定的符号表示出来,这就是系统的键合图模型。

曹东兴对键合图理论在概念设计中的应用进行了较深入的研究,提出将

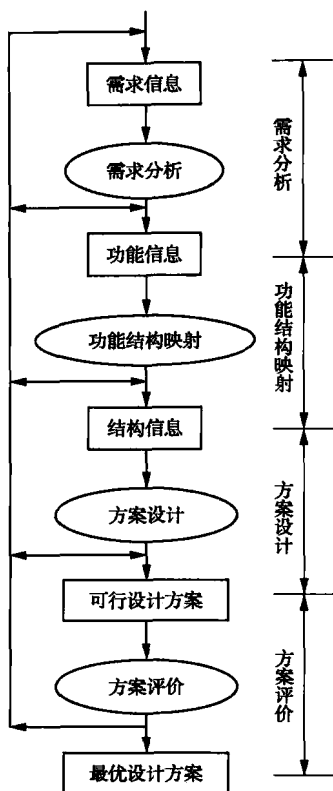


图 1.4 多层概念设计模型

作用原理视为系统能量传递中的状态转换,通过键合图理论建立其状态空间转换矩阵,由状态空间变换操作,实现产品方案的求解^[14];建立了基于键合图理论的行为矩阵模型,结合公理化设计的功能独立性和信息化公理,对行为矩阵模型进行公理化验证,并结合实例说明了行为矩阵模型的求解过程^[15];提出将功能方法树和键合图理论相结合,利用键合图的基础元件建立行为矩阵,根据机械系统中能量传递建立矩阵模型,采用人工智能技术生成功能方法树来产生多种机械传动系统设计方案,并结合实际设计说明了其应用^[16]。Wang 提出一种使用键合图理论来描述机电系统概念设计阶段的网络合成方法。该方法通过将一种基因编程树表示法融入键合图编码结构来促进知识的演变^[17]。张建明建立了基于功能—载体关系的概念设计产品模型。通过功能建模来描述元功能和输入输出流,采用键合图描述输入输出流的动态行为属性,从而建立功能模型。采用无向图描述载体的层次结构,基于零件—连接器建立载体模型。在提取产品的功能特征,包括元功能、流对象和关系约束的基础上,通过功能分解和载体映射生成设计方案^[18]。Toufighi 提出利用键合图来精简概念设计中产生的模型,以减少参数的数量和模型序列,从而减少分析设计方案的时间^[19]。

尽管基于键合图理论的概念设计研究在理论方法上进展较快,但要进入实用化阶段尚需作进一步的研究工作^[20]。

(2) 形态学分析法。

形态学分析法由美国加州理工学院 Zwicky 教授首先提出,是利用集合代数的方法来描述系统形态和分类问题的学科。形态学矩阵是一种基于形态学方法形象地描述机构组合方法的有效工具^[21]。形态学矩阵如表 1.1 所示,该方法又称为形态方格法、棋盘格法或形态综合法^[22]。

表 1.1 形态学矩阵

功能元	技术手段(形态)				
	1	2	3	...	n
F_1	t_{11}	t_{12}	t_{13}	...	t_{1n}
F_2	t_{21}	t_{22}	t_{23}	...	t_{2n}
F_3	t_{31}	t_{32}	t_{33}	...	t_{3n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
F_m	t_{m1}	t_{m2}	t_{m3}	...	t_{mn}

形态学分析法以建立形态学矩阵为基础,通过对系统的合理分解和组合

寻求各种方案。应用形态学分析法求解产品方案设计问题,是将所设计的系统分解为功能元,对应形态学矩阵的列;找出实现功能元的全部形态(即实现该功能的结构),对应形态学矩阵的行;每一行的一种形态与其他行的任意一种形态组合就组成一种方案。

陈泳提出了基于运动特征矢量的传动功能模型,构造了以传动功能矩阵为载体的设计目录;开发了计算机辅助机械传动系统概念设计软件;并进一步提出了一种基于设计原型综合方法的机构自动概念设计方法^[23]。为了有效地支持自动化机构综合,传统形态学矩阵被改进为一个运动功能矩阵(MFM)。基于MFM开发了一种详尽的机构综合算法,该算法能够产生许多种解答,以期望发现新颖和最优的组合解答^[24]。Bryant提出了一种基于自动形态学搜索方法和概念设计算法的交互概念生成器,这种生成器允许用户在收到关于组成部分兼容的瞬时反馈时,自动选择一种解答^[25]。Fung提出了一种基于质量工程的概念设计方法,该方法集成了质量功能配置、形态学矩阵分析、多属性决策技术、概率优化模型等技术^[26]。

形态学分析法为计算机自动求解设计方案提供了可能性,但是获得的设计方案有些可能是重复的,有些可能是无效的,而且较依赖于设计人员的经验;另外,分类和归纳常常耗费大量的时间,而且极易使方案设计陷入组合爆炸,因此,还有待于对形态学分析法作进一步的深入研究^[22]。

(3) 基于图(树)的方法。

图和树是方案设计阶段常用的两种表示手段,可以对有关产品的所有属性,包括功能、行为和结构进行描述。图的表达形式常用于机械机构创新设计中,以产生不同形式的机构。

Al-Hakim用图论中的“树”和“森林”来表示功能设计产品和其对应的闲置条件,图的顶点表示产品部件,边表示部件间能量流动的连接方式。这种方法能够直观地表示组成元素间的能量流动,同时也易于在设计中将约束条件(如可靠性和成本等)考虑进去,实现了包含滑移齿轮、离合器、超越离合器和飞轮等设计零件的机器的并行概念设计^[27]。彭继忠探讨了以产品结构树为中心的产品信息管理方式,并提出了采用这种管理方式对概念设计阶段产品信息进行管理的一些关键问题及其解决方法,初步构造了一个可行的并行化概念设计的产品信息管理模式^[28]。颜洪森提出了“再生运动链法”进行机构的方案设计^[29]。其基本思路是:首先将满足设计基本要求的已知机构的功能构件演化为一般化构件,然后根据设计的约束条件将该机构抽象为一般化运动链,运用综合方法推演出众多的再生运动链,并通过比较寻找功能相同但性

能更优的新机构。Liu 提出了一种将相似功能增加到一个原始功能树的功能树重建方法,这种方法能够扩大求解空间,帮助设计人员产生更多的创新思想^[30]。李颖哲提出基于可扩展单元线性图的改进模型,通过增设两个运动特征定义弧,来描述机械传动组件,得到包含运动学与动力学信息的拓扑矩阵以及运动特征矢量,实现机械传动概念设计解与动态性能分析的集成^[31]。Hung 提出一种基于图论和组合数学中著名定理的体系过程,该过程可被用来对平面机构的数量进行计数,以便设计来自于候选运动链的约束^[32]。

图论方法能够很好地描述机构的拓扑构造,其初始构型依赖于运动链的长度、运动副的类型和自由度、独立环的数目等条件,仅考虑构件间的拓扑关系。由于在设计机构时倾向于从功能要求的角度考虑问题,并且还不知道运动链的长度和类型,因而使图论方法受到一定的限制。

(4) 多色集理论。

多色集集合(polychromatic sets, PS)是俄罗斯的 Pavlov 教授于 2002 年提出的^[33]。该理论的核心思想是使用标准的数学模型描述不同的对象(产品、设计过程、工艺过程和生产系统)及其元素间的层次结构和复杂关系。

李善仓提出了一种基于多色集集合的机械产品概念设计的推理算法。在该算法中,集合中的元素及集合本身可通过统一颜色、个人颜色来描述,用它们能很好地描述功能方法树中层与层之间的关系,因而多色集理论可以作为功能分解和方案求解的推理基础,以实现机械产品的概念设计;并以钻铣镗类加工中心为对象对该算法进行了方案设计,得出了满足需求的方案集^[34]。高新勤将机械产品中的约束关系分为三类四种,并在功能方法树中以边的形式进行表示,建立了包含约束信息的功能方法树模型;在此基础上,利用多色集集合的元素、统一颜色、个人颜色等概念以及多色图,建立了产品概念设计形式化结构模型;从功能分解和约束条件两方面进行了数学形式的描述、推理,给出了实现产品概念设计形式化推理的计算机算法流程;并以隔振系统的概念设计为例,应用和验证了以上理论和方法^[35]。姜莉莉通过对夹具设计模型的装配关系及各元素基本作用的分析,得到夹具概念设计的元素关联图,并生成多色图^[36]。Gao 提出了一种基于多色集理论的计算机辅助概念设计过程,该过程包括方案推理和机械创新^[37]。邹光明建立了用于概念产品拓扑结构抽象表示的设计特征层次关系模型,提出了设计特征属性依存关系网模型;在这两个模型基础上,构造了用于表示概念产品设计信息的关系网,并将概念解设计信息所包含的单元与多色集合的成分相对应,建立了基于多色集集合的概念产品设计信息数学描述^[38]。Gao 进一步构建了机械概念设计的形式化