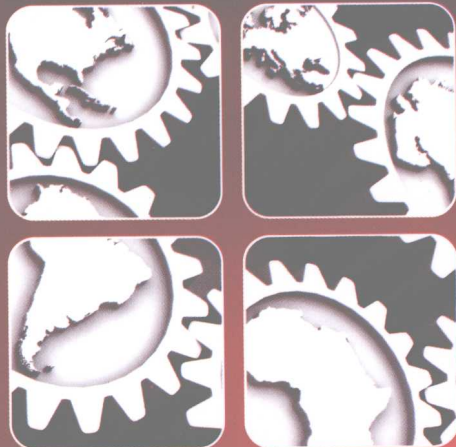


CONCEPT DESIGN



CONCEPT DESIGN

# 计算机辅助 机械系统概念设计

苗鸿宾 著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

# 计算机辅助机械系统 概念设计

苗鸿宾 著

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书在机械系统概念设计基本内容和过程模型的基础上, 提出机械系统设计过程的“功能-工作机理-行为-结构”(FMBS)模型, 给出了实现计算机辅助机械系统概念设计的体系结构, 并对模型进行基于工作机理的行为建模。为提高概念设计的创新性, 研究了行为空间的重组创新方法。最后通过采用层次组合优化理论、偏序关系理论、形态学分析理论等理论和遗传算法等方法对模型及算法加以实现, 开发了机械系统概念设计的计算机辅助设计软件系统。

本书可作为机械专业高年级本科生和研究生的学习参考书, 也可供机械设计工程技术人员及研究人员参考使用。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有, 侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机辅助机械系统概念设计 / 苗鸿宾著. —北京: 电子工业出版社, 2010.6  
ISBN 978-7-121-10944-7

I. ①计… II. ①苗… III. ①机械设计: 计算机辅助设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第094007号

责任编辑: 朱清江

印 刷: 北京机工印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 10 字数: 200千字

印 次: 2010年6月第1次印刷

定 价: 28.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

机械产品概念设计、创新设计等内容研究已成为现代设计、先进制造与自动化技术领域的关键问题之一。概念设计阶段是新产品开发过程中最能体现人类创造性的阶段，是详细设计的前提，概念设计成为产品开发创新的核心环节。概念设计的目标是在一定的时间内拿出能够满足市场需要的具有创新性的产品方案。计算机辅助技术已经在工程设计的很多领域有了成功的应用，但是在概念设计阶段计算机辅助技术的应用具有较大的难度，原因在于概念设计阶段所涉及的知识往往是不精确的、不完整的。随着计算机、人工智能技术等相关技术的发展，使概念设计过程某些环节的计算机化成为可能。因此，本书围绕计算机辅助机械系统概念设计这一问题从理论、实现方法和应用等方面展开相关研究。

(1) 分析了机械系统概念设计的基本内容和过程模型，在此基础上提出机械系统概念设计过程“功能-工作机理-行为-结构”(FMBS)模型，给出该模型实现的细化流程。在 FMBS 模型的基础上，给出了实现计算机辅助机械系统概念设计系统的体系结构。

(2) FMBS 模型第一步工作：功能建模。探讨了功能的概念、分类、表达及功能分解的一般过程。提出建立功能分解模型主要完成两项工作：实现功能分解，表达功能分解模型。功能分解操作的实现采用了闭包数学理论来描述。功能分解模型的表达采用了形式化描述方法，对功能分解模型中的各种关系（与或关系、分解映射关系、功能结构中功能关系）作了详细的分析，并给出相应的数学表达方法。

(3) FMBS 模型第二步工作：基于工作机理的行为建模。提出机械系统运动行为多属性的编码方法及机械系统运动行为空间表达法，运动行为空间可表达运动行为之间的关系；通过研究功能行为映射，提出采用工作机理作为联系功能和行为空间的桥梁，实现功能到行为的映射；为提高概念设计创新性，研究了行为空间的重组创新方法，并给出了相应的实现算法。

(4) FMBS 模型第三步工作：设计方案的生成。根据机械系统的特点，提出了机械系统形态学矩阵动态构造方法；根据形态学矩阵方法存在的不足之处，提出了一种基于评价和多目标优化的形态搜索方法，该方法在实现过程中考虑形态的性能等级和形态之间连接关系的等级，通过采用层次组合优化理论、偏序关系理论、形态学分析理论等理论和遗传算法等方法加以实现。

(5) FMBS 模型第四步工作：设计方案的评价。以工程模糊集理论为基础，建立模糊评价模型。对设计方案评价的指标体系进行了层次分析，以指标体系为依据划分了若干个评价单元，将方案系统的整体评价问题转换为一系列基本单元的评价和基本评价单元的综合问题。结合工程模糊集理论、模糊识别理论建立方案评价的模糊多级识别模型，通过模糊识别给出了概念设计方案对各个给定级别的相对隶属度矩阵，以此作为方案排序的依据。

(6) 以 Microsoft Visual C++ 为平台开发了辅助设计软件系统，主要包括三个部分：系统模块，知识库，方案数据库。系统模块分为两类：一类是系统驱动模块，主要包括功能模块、工作机理模块、行为模块、结构模块、方案组合模块、系统评价模块；另一类是知识和方案数据维护与管理模块。

希望本书的出版对机械系统的概念设计和创新设计方面有较高的参考价值。同时，还希望对机械系统设计领域进行学习和研究的本科生、研究生能有所帮助。

由于作者水平有限，疏漏之处在所难免，请各位读者、专家批评指正。

苗鸿宾

# 目 录

VI

|   |      |
|---|------|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                           | (1)  |
| 1.1 产品开发、产品设计与产品概念设计 .....                      | (1)  |
| 1.2 产品概念设计研究现状 .....                            | (3)  |
| 1.2.1 概念设计方法学 .....                             | (3)  |
| 1.2.2 概念设计核心技术 .....                            | (6)  |
| 1.2.3 方案的生成 .....                               | (9)  |
| 1.2.4 方案的评价与决策 .....                            | (11) |
| 1.2.5 概念设计支持技术 .....                            | (12) |
| 1.2.6 概念设计的系统实现 .....                           | (13) |
| 1.3 研究现状分析 .....                                | (15) |
| <b>第 2 章 机械系统概念设计模型</b> .....                   | (17) |
| 2.1 引言 .....                                    | (17) |
| 2.2 机械系统组成及功能 .....                             | (18) |
| 2.2.1 执行系统 .....                                | (18) |
| 2.2.2 传动系统 .....                                | (19) |
| 2.3 概念设计模型 .....                                | (20) |
| 2.3.1 机械系统概念设计的基本过程 .....                       | (20) |
| 2.3.2 概念设计模型的相关研究 .....                         | (21) |
| 2.3.3 机械系统概念设计 FMBS 过程模型 <sup>[142]</sup> ..... | (22) |
| 2.4 机械系统概念设计体系结构 .....                          | (27) |
| <b>第 3 章 功能建模</b> .....                         | (29) |
| 3.1 引言 .....                                    | (29) |
| 3.2 功能 .....                                    | (30) |
| 3.2.1 功能的概念 .....                               | (30) |
| 3.2.2 功能的分类 .....                               | (31) |
| 3.2.3 功能的表达 .....                               | (32) |

|            |                              |             |
|------------|------------------------------|-------------|
| 3.3        | 功能分解模型 <sup>[90]</sup> ..... | (35)        |
| 3.3.1      | 功能分解 .....                   | (35)        |
| 3.3.2      | 功能分解操作的实现 .....              | (36)        |
| 3.3.3      | 功能分解结果——功能结构的表达 .....        | (40)        |
| 3.3.4      | 功能分解模型 .....                 | (41)        |
| 3.4        | 功能分解模型实例 .....               | (45)        |
| <b>第4章</b> | <b>基于工作机理的行为建模</b> .....     | <b>(50)</b> |
| 4.1        | 引言 .....                     | (50)        |
| 4.2        | 行为 .....                     | (50)        |
| 4.2.1      | 行为的概念 .....                  | (50)        |
| 4.2.2      | 机械系统的行为 .....                | (51)        |
| 4.3        | 执行系统运动行为及行为空间表达 .....        | (52)        |
| 4.3.1      | 单个运动行为的表达 .....              | (52)        |
| 4.3.2      | 行为空间的表达 .....                | (55)        |
| 4.4        | 功能映射成行为 .....                | (56)        |
| 4.4.1      | 功能和行为的关系 .....               | (56)        |
| 4.4.2      | 基于工作机理实现功能空间到行为空间的映射 .....   | (57)        |
| 4.5        | 行为空间的重组创新 .....              | (64)        |
| 4.5.1      | 行为空间的重组 .....                | (64)        |
| 4.5.2      | 行为空间的重组实现策略与算法 .....         | (65)        |
| 4.6        | 应用实例 .....                   | (67)        |
| <b>第5章</b> | <b>设计方案的生成——形态学建模</b> .....  | <b>(73)</b> |
| 5.1        | 引言 .....                     | (73)        |
| 5.2        | 形态学分析法的基本理论 .....            | (74)        |
| 5.2.1      | 基本概念 .....                   | (74)        |
| 5.2.2      | 基本过程及表达 .....                | (74)        |
| 5.2.3      | 形态关系的处理 .....                | (75)        |
| 5.3        | 机械系统形态学矩阵的构造方法 .....         | (75)        |
| 5.4        | 基于优化和评价的形态组合方法 .....         | (77)        |
| 5.4.1      | 基本思想 .....                   | (77)        |
| 5.4.2      | 形态学组合前提 .....                | (78)        |
| 5.4.3      | 形态的评价 .....                  | (78)        |
| 5.4.4      | 形态的组合 .....                  | (83)        |
| 5.4.5      | 形态组合搜索的实现 .....              | (84)        |

|              |                          |              |
|--------------|--------------------------|--------------|
| 5.5          | 应用实例 .....               | (89)         |
| <b>第 6 章</b> | <b>概念设计方案的评价 .....</b>   | <b>(96)</b>  |
| 6.1          | 引言 .....                 | (96)         |
| 6.2          | 方案评价的指标体系 .....          | (97)         |
| 6.3          | 方案评价的基本原理 .....          | (98)         |
| 6.4          | 方案评价的模糊识别模型 .....        | (99)         |
| 6.4.1        | 评价指标权重的确定 .....          | (99)         |
| 6.4.2        | 评价指标相对优属度矩阵的建立 .....     | (101)        |
| 6.4.3        | 多级模糊识别理论 .....           | (101)        |
| 6.5          | 方案评价的实例 .....            | (102)        |
| 6.5.1        | 确定单元系统, 以及相应的指标权重 .....  | (103)        |
| 6.5.2        | 确定基本单元系统的输入相对优属度矩阵 ..... | (105)        |
| 6.5.3        | 基本单元系统求解 .....           | (106)        |
| 6.5.4        | 综合单元系统求解 .....           | (107)        |
| <b>第 7 章</b> | <b>系统实现及综合应用实例 .....</b> | <b>(108)</b> |
| 7.1          | 引言 .....                 | (108)        |
| 7.2          | 计算机辅助概念设计软件系统的开发 .....   | (108)        |
| 7.2.1        | 软件系统结构 .....             | (108)        |
| 7.2.2        | 软件系统实现技术和手段 .....        | (109)        |
| 7.2.3        | 系统实现界面 .....             | (111)        |
| 7.3          | 系统综合应用实例 .....           | (114)        |
| 7.3.1        | 任务描述 .....               | (114)        |
| 7.3.2        | 功能建模 .....               | (115)        |
| 7.3.3        | 基于工作机理的行为建模 .....        | (119)        |
| 7.3.4        | 设计方案的生成 .....            | (126)        |
| 7.3.5        | 设计方案的评价 .....            | (135)        |
| <b>参考文献</b>  | .....                    | <b>(145)</b> |



# 第1章 绪 论

## 1.1 产品开发、产品设计与产品概念设计

纵观世界范围来看，商业上成功的公司总是致力于产品的创新，根据用户的需求不断地开发新产品或是对现有的产品改进、提高。如图 1.1 所示，产品的开发是一个由概念设计（方案设计）、详细设计、制造、装配、运输、使用、回收等环节所组成的复杂过程。新产品开发中关键的问题是信息的获取，即用户所需要的是何种产品、哪些产品特征是必须的、产品的价格如何、是否在市场具有竞争力等。为开发新颖的产品，了解用户的需求是非常必要的。如果产品的开发策略不是基于用户需求，那么产品不可能取得成功。在产品开发过程中，必须理解设计问题，来确定设计任务和需求，在此基础上产生多个理想的设计概念，这些设计概念经过进一步的开发和分析以引导做出新颖的产品。

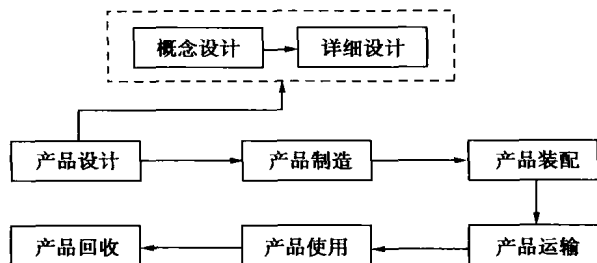


图 1.1 产品开发过程

为应对市场竞争，企业必须快速地、经济地、高效地制造出质量好的、市场认同度高的产品。因此，成功的产品开发应在以下方面具有优势：

- ① 产品成本，由产品的设计和制造成本所决定；
- ② 质量；
- ③ 产品的开发周期，即推向市场所需要的时间；
- ④ 开发的专有技术，指为生产某种产品或采用某种工艺所需要的保密的知识、经验、技艺的总和。

近年来由于产品开发领域支撑技术的日渐成熟，产品设计方法的研究成为一个

热点问题。很多研究人员致力于此项研究的目的是为了缩短产品开发周期、降低产品开发成本、提高产品质量、帮助设计者提高产品的创新性。对大多数产品而言,产品的设计的实际成本一般只是产品制造成本的一部分,一般情况是设计成本占制造成本的5%左右,但是设计质量对制造成本的影响要远大于5%。产品设计在产品开发过程中的重要性是不言而喻的。

产品设计活动是产品开发过程中最重要的环节之一,而在产品设计过程中,概念设计又是最重要的阶段。因为概念设计决定了产品的基本特征和主要框架,在概念设计结束后,设计的主要方面就被决定下来了,而后续的设计过程只要保证概念设计结果能满足设计需求即可。概念设计是一个设计过程,是一个发散思维和创新设计的过程,对一个产品而言大部分的设计决策都是在概念设计阶段完成的。概念设计过程主要包含功能求解、方案产生、方案评价等步骤,通过概念设计,可获得满足各种技术经济指标的、可能存在的各种方案,并最终确定综合最优方案。概念设计阶段具有明显的创造性、多解性、层次性、近似性、经验性和综合性特点,是一个复杂的决策过程。研究表明:一个产品的概念设计已决定了从设计到生产该产品所有费用的70%~80%<sup>[1]</sup>。为了满足用户日益增长的个性化要求,概念设计的地位变得越来越重要了,概念设计也对制造的效率和产品的质量产生了深远的影响。如果概念设计的方案有缺陷,很难在随后的详细设计中进行弥补或者修正<sup>[2,3]</sup>。在概念设计阶段,由于对设计人员的约束相对较少,具有较大的创新空间,因此概念设计是产品设计过程中最富有创造性的阶段。实践表明,产品创新主要来自概念设计阶段所涉及的功能、原理、形状、布局和结构等方面的创新。因此概念设计是设计过程中一个非常重要的阶段,已成为企业竞争的一个制高点。以知识为基础、以创新为灵魂的新产品竞争是21世纪全球化制造环境下企业技术竞争的核心。目前,关于概念设计、创新设计等的研究已成为现代设计、先进制造与自动化技术领域的热点问题<sup>[4~10]</sup>。现代产品更新换代速度显著加快,要求大幅度缩短概念设计阶段的时间,概念设计成为产品开发创新的核心环节。

计算机辅助技术已经在工程设计的很多领域有了成功的应用,如建模、仿真、优化等。但是在概念设计期间,所涉及的设计需求和约束的种种知识,往往是不精确的、近似的或未知的,也就是说复杂性很高,这给计算机辅助概念设计技术带来了很大的难度<sup>[2,8]</sup>。随着计算机、人工智能技术等相关技术的发展,使概念设计过程的计算机化成为可能,计算机辅助概念设计逐渐受到人们的普遍重视。因此,探索支持概念设计的以知识表达和推理为基础的新一代ICAD是当今国际上CAD发展方向的一个主流<sup>[11,12]</sup>。

## 1.2 产品概念设计研究现状

### 1.2.1 概念设计方法学

#### (1) Pahl 及 Beitz 的设计理论<sup>[3]</sup>

德国的设计理论是优秀设计过程所积累经验的总结, 典型代表是 Pahl 及 Beitz 的普适设计方法学 (Comprehensive Design Methodolgy)。是一种系统化的设计方法学, 对工程设计过程的描述更接近于实际。工程设计过程可分为四个主要的阶段: 产品规划和阐明任务、概念设计、结构设计、施工设计。方法学中建立了设计人员在每一个设计阶段的工作步骤、计划, 这些计划包括策略、规则、原理, 从而形成一个完整的设计过程模型。一个特定产品的设计可以完全按该过程模型进行, 也可以选择其中的一部分使用。

在产品概念设计阶段, 系统化的设计方法包含以下三个步骤。

#### 步骤一、设计任务的抽象

设计任务采用以下的抽象步骤:

- ① 去除个人的偏好的需求;
- ② 忽略对功能和必要约束条件无直接影响的需求;
- ③ 将定量的需求转换为定性的需求并简化为必要表达;
- ④ 从前一步中归纳出结论;
- ⑤ 以中立的词汇形式化地描述需求。

#### 步骤二、功能结构的建立

在系统化的设计方法中, 概念设计的阶段核心是建立待设计产品或技术系统的功能结构。产品首先由总功能描述, 总功能可以分解为分功能, 各分功能可一直分解到能够实现为止。功能、能量、信号三种流作为输入与输出, 将功能有机地组合在一起就形成了产品的功能结构。Pahl 及 Beitz 的设计理论对产品的定义、技术设计和详细设计都很有效, 对于概念设计, 核心是建立待设计产品的功能结构, 功能结构的实现就是新的工作原理。该理论所给出的建立功能结构的方法是一种基于经验的方法, 没有太多的规则可遵循, 对于经验不足的设计人员, 或有一定设计经验但经验中知识含量不高的设计人员不一定有效。

#### 步骤三、工作结构开发

此步骤中要开发能实现子功能的工作原理。工作原理是一个概念, 描述了完成给定功能的物理效应。系统化设计方法认为功能分解是功能设计中的重要内容并将

功能之间的流作为实现功能分解的驱动。系统化设计方法在功能设计时避免涉及结构装置，这样功能定义时具有较大的自由度，也便于发展较多的结构方案。因此，在功能设计之后，形态学的方法可有实现功能的多种结构方案。

目前全世界发表的很多论文、研究报告都引用 Pahl 及 Beitz 的研究成果，有些认为它们是经典的设计理论。

### (2) 公理性设计理论

公理性设计理论 (Axiomatic Design) [13] 是美国 MIT 以 N. P. Suh 为首的设计理论小组提出的，目的是为产品设计和工艺设计提供一种形式化算法和指导性原则。公理性设计理论认为，满足给定设计功能需求的设计原则上有无穷多个，一个 (相对) 优化的设计应满足以下两个公理：独立公理 (The Independence Axiom) 和信息公理 (The Information Axiom) 两部分组成。独立公理是指辅助设计者在开发设计解时使用分层映射策略，在产品功能与物理结构之间建立某种关系；信息公理是指在概念设计阶段和最初设计阶段，为了满足所需的 功能需求，在已知解中选择最优解的方法。公理性设计理论中提出了四个主要概念：域 (Domains)、层级 (Hierarchies)、曲折映射 (Zig-zagging) 和设计公理 (Design Axioms)。

公理性设计中，设计空间被划分为依次相邻的域：顾客需求域 (Customer Domain)、功能域 (Function Domain)、载体域 (Physical Domain) 和过程域 (Process Domain)，如图 1.2 所示。四个域中的元素包括为：用户需求项，表示顾客使用产品的目的；功能需求项，表示在功能层次上对产品 设计目标的说明；设计参数，表示实现功能的载体；工艺参数，表示制造过程所涉及的主要因素。公理性设计理论认为层的抽象度是不同的，层次越高越抽象，层次越低越具体。

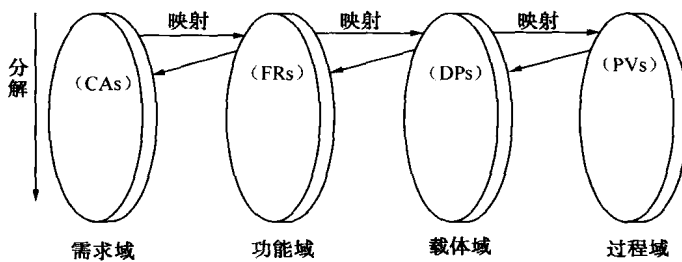


图 1.2 公理化设计过程

公理性设计过程被描述为以顾客的需求为驱动的域之间的映射过程，也就是如图 1.2 所示的左边域映射到右边域的过程，左边域表示要满足的需求，右边域表示需求的实现手段。除了域的映射关系外，公理化设计包含了分解的概念，即在每个

域中包含了从上层到下层的分解过程，此过程是一个由抽象到具体的过程。公理性设计的重要特征是设计过程是一个“Z”字形的映射过程。公理性设计的层级展开，需要相邻域之间自上而下地进行曲折映射变换，最终得到不同层次的功能要求、设计参数和工艺变量组成的层次结构树，非常清晰地描述了各个设计域。公理化设计的核心是：从功能域到物理域的转化过程中的功能与设计参数应满足独立性与最小信息两条公理，如果能满足则原理解是优化的解。应用公理性设计理论的主要有：Beom Seon Janga<sup>[14]</sup>等人对海洋船只进行了成功的产品设计，国内林志航<sup>[15~17]</sup>等人将公理化设计应用在概念设计领域，引入行为域，提出了具有“顾客需求域，功能域，行为域，载体域”的概念设计方案生成模型。

### (3) 通用设计理论

通用设计理论（General Design Theory, GDT）<sup>[18]</sup>是由日本的吉川弘之等人提出的一种形式化设计理论，该理论认为设计是把人脑中的思维概念转换成实体，概念是可以被人接受的，可以用语言、数学、图形等来描述，是可以交流的。如图 1.3 所示，是设计流程的简单示意。通用设计理论从知识处理和操作的角度出发，试图揭示设计过程的一般规律，从设计过程的微观入手进而描述宏观的设计过程。该理论从集合论出发，使用拓扑理论，对设计过程进行了数学抽象，用数学形式化来表达设计过程，是一种设计过程的描述模型。通用设计理论包含三种基本的元素：实体和实体集，属性和属性值，功能。

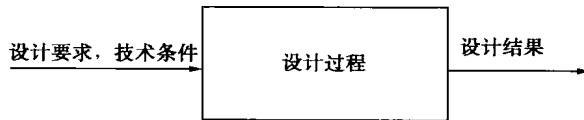


图 1.3 通用设计理论的设计流程示意图

通用设计理论详细描述了在理想状况下功能空间（Function Space）到属性空间（Attribute Space）的映射过程，其中功能空间是设计需求的描述空间，属性空间是设计方案的描述空间。通用设计理论认为拥有理想知识的设计者能精确地描述功能空间到属性空间的每一种映射，但是由于现实世界的复杂性，理想的知识并不存在，决定了这种直接的映射过程只是一种理想情况，产品的设计过程实际上是一种逐步完善的过程。

三种经典的设计方法学都认为对功能而言自身并不需要给出一个明确的定义，而需要给出的是总功能是如何分解成可以识别的子功能，直到子功能能与对应的结构相匹配为止。但是，子功能是如何与结构相匹配的并不清楚，功能分解何时停止也没有明确的判断方法<sup>[19]</sup>。

## 1.2.2 概念设计核心技术

### 1. 功能设计及建模

产品设计过程是一个基于功能的设计过程，或者称为由功能驱动的设计过程。产品的功能设计是概念设计中极为重要的一环，概念设计是面向功能的设计。产品的功能设计，主要包括功能描述、功能模型的建立等内容。在设计过程上游阶段的研究中，功能设计是一种新的设计方法。功能设计的研究目的是提供一种计算机辅助工具，该工具可以把设计功能和完成对应功能的具体结构联系起来<sup>[20]</sup>。功能的表达、建模等相关内容是概念设计的重点和热点问题，AIEDAM<sup>[21-26]</sup>专题讨论了相关的内容。

在功能设计的研究中，功能是一个很重要的概念，功能决定了产品的基本特征。对一个复杂产品来说，如果基本功能不能满足要求，该产品是不可能获得成功的。功能至今仍没有统一的定义，在机械系统中是一个比较模糊的概念，不同学者根据自己的研究领域和内容对功能有各自认识，但是大多数学者都认为功能和行为之间有紧密的联系。一般认为功能是行为的抽象，行为是功能的实现，结构是行为的载体。

概念设计的主要任务是依据功能获得结构的描述，完成这个任务的常见的过程模型有两个：“功能-结构”（FS）模型和“功能-行为-结构”（FBS）模型。以上两种模型主要是为了更加符合人的设计思维规律而提出的认知框架模型。

**FS 模型。**Kota<sup>[27]</sup>详细研究了 FS 模型，将设计过程描述为在满足约束条件下由功能确定出结构的过程，即由功能向结构的映射过程。通过功能定义、功能分解、功能合成方案，形成形态学矩阵，通过评价选择方案。FS 模型本质上是基于功能分解与重组的，因此基于 FS 模型的产品概念设计的创新性主要体现在功能抽象的描述，以及如何将抽象的功能描述分解为细化的能够与结构对应的功能元两个方面。功能描述的抽象性越高，其概念设计的求解空间越大，得到的概念设计结果的创新性越高<sup>[28]</sup>。由此可见，功能的抽象程度的高低，决定了产品概念设计结果的新颖性水平。由于功能的定义往往取决于定义者的主观意念和其对问题观察深入的程度，含经验的成分较高，因此，很难给出功能抽象的方法和准则，结果是很难获得创新性的概念设计结果。

**FBS 模型。**在这个模型中，功能不直接映射到结构层，而是在功能层和结构层之间引入了行为层，映射分成两步走，首先把目的功能转换到行为描述，然后再将结构与行为进行匹配。行为抽象的层次比结构高，在行为空间进行方案解的搜索比在结构空间搜索效率要高，用行为进行表达为概念设计方案的生成提供了很好的基

础。功能和行为之间没有明显的区分,表达功能时独立于行为之外是没有意义的。

Qian<sup>[29]</sup>和 Gero<sup>[30]</sup>最早提出了 FBS 模型,在 FBS 模型中,“结构”用于定义该设计由哪些元件组成,这些元件的属性如何,以及元件之间的关系;“行为”表示设计者用来推断出结构的方法,它由行为类型、行为变量和定性的因果关系构成;“功能”则是一个设计目的的表达。行为在功能和结构之间建立起沟通的桥梁。

FBS 模型之后提出的扩展模型,包括“功能-行为-状态”模型<sup>[31]</sup>、“功能-环境-行为-结构”(FEBS)模型<sup>[32,33]</sup>、“结构-行为-功能”模型<sup>[34,35]</sup>等。Umeda、Goel<sup>[36~38]</sup>等人认为:“功能”是人们为实现设计意图而对行为的抽象描述;“状态”由一组实体的属性及该实体在其他实体间的关系组成;“行为”是状态沿时间而不断变化的过程。FBS 模型给出了行为变量的不同变化方式对功能实现的影响(F-B),以及结构和行为间的依赖关系(B-S),说明了结构或子结构通过行为达到设计功能的方法。FEBS 模型是 Deng<sup>[32]</sup>提出来,在因果分解功能时考虑到了所设计系统外部环境的影响,这种模型把多种设计因素(功能、环境、行为、结构)集成在一个统一的框架内,非常适合交互式的功能设计。FEBS 模型的推理采用了完全的自上而下的分解和搜索策略,缺乏回溯,因此这个系统是缺乏柔性的,计算工作量很大,问题分解很小的情况下,很容易出现“解爆炸”的问题。为了克服上述问题,Zhang<sup>[39,40]</sup>基于行为驱动的“功能-环境-结构”(B-FES)模型,在推理过程中采用了行为驱动的策略,系统只有在搜索不到符合目的功能的行为时,才对目的功能进行分解,这样就减少了在功能分解时产生“解爆炸”的可能性。

近年来,概念设计过程模型成为国内外学者研究的热点。Deng<sup>[41]</sup>等人采用基于约束方法,建立一个综合模型,通过增加约束、减少设计变量,实现概念设计的功能建模。邹慧君<sup>[42]</sup>对机构系统的概念设计的基本内容进行了研究,提出了机构系统概念设计的步骤:工艺动作过程的构思、工艺动作过程实现动作分解、选择或创新执行机构实现各个动作、采用形态学矩阵方法构成多种机构系统、通过综合评价得到综合最优的机构系统。冯涛<sup>[43~45]</sup>提出了基于“功能-工艺动作-执行机构”的概念设计过程模型,工艺动作层及其子层描述了行为分解过程及其与功能分解过程的映射关系,一个功能可由单个或多个工艺动作实现,而一个工艺动作也可实现单个或多个功能。工艺动作层定性地描述了执行动作的各个运动区段及其逻辑关系;执行机构层定量地描述了执行机构各运动区段及它们之间的逻辑和时序关系。冯涛<sup>[46]</sup>、梁庆华<sup>[47]</sup>等详细研究了机械系统概念设计过程中运动行为的表达、行为结构的变形等内容。吴斌<sup>[48]</sup>等提出基于“功能-结构-行为”的设计模型,认为功能是满足需求的属性,结构是产品组成要素的联系方式、组织秩序和时空关系,行为是产品表现出的活动和反应,结构是功能的载体,行为是结构的效应,功能是行为的抽象。

## 2. 功能设计的数学描述

### (1) 基于图论的方法

图论方法在描述机构的拓扑构造方面提供了强有力的帮助,但其考虑的几乎是一种完全意义的拓扑关系。在功能上,只有自由度被加以考虑。而在设计时,设计者更倾向于从功能要求的角度考虑问题,因而缺少功能间关系的描述,使概念设计受到限制。Zhang<sup>[40]</sup>采用了有向图表示来表达 B-FES 模型,该模型是由三个层组成的:功能层、行为层和环境层。把相应的功能关系蕴涵到图中,提高了构造、修改、访问功能模型的效率。尽管用有向图来描述功能模型非常的清晰,但是当功能、行为以及它们之间的关系很多时,表示就是非常的复杂的,降低了功能模型分析和推理的效率。Al-Hakim<sup>[49]</sup>等也提出了用图论来表达一个产品以及产品组件之间关系,使用这种表达方式使得组件之间能量流实现了可视化。

### (2) 矩阵的方法

整个机构方案设计中设计的功能要求及约束较多,很难用有效的数学模型来描述。Kota<sup>[50]</sup>曾开创性地提出矩阵矢量化表示方法,使方案设计通过数学求解成为可能。但该方法中各部分矢量之间缺乏有效的联系,功能分解中依赖许多变换规则,数学描述不够完善,求解的过程更多地采用知识与特征匹配。Zhang<sup>[40]</sup>等建立功能模型时,为了提高分析和推理复杂模型的效率,提出了基于矩阵的方法来表示功能模型,优点是可以非常简洁、意义明确地表达设计方案,而且计算效率高,适合于计算机的处理。该方法建立两个矩阵:行为拓扑矩阵和功能邻接矩阵。行为拓扑矩阵用来表示行为和动作流之间的连接关系;功能邻接矩阵来表示功能之间的关系,如支撑功能、子功能、功能的与或、功能的无关等。

### (3) 形态学综合匹配的方法

形态学是由 F.兹维奇教授<sup>[51, 52]</sup>提出的,是用集合代数的方法描述系统形态和分类问题的学科。而形态综合法建立在形态学矩阵的基础上,通过系统的分解和组合寻找各种方案。应用该方法处理方案设计问题,首先将系统功能分解为多个功能元,对应于形态学矩阵的列;而每个功能元对应于多个原理解,对应于形态学矩阵的行。将矩阵不同行从上到下的顺序依次组合,获得多个原理解。该方法依赖于设计者的经验,利用计算机实现自动求解比较困难,且在数学组合时容易产生“组合爆炸”。

### (4) 基于多色集合理论<sup>[53~55]</sup>

目前,在概念设计阶段,在多色集合理论基础上,应用数学方法进行建模和求解很不成熟,还需进一步完善。



### 1.2.3 方案的生成

方案生成是指由设计生成的诸多方案，既是设计综合过程，也是概念设计的关键。采用何种合适的方法，将用户需求映射到相应的物理空间，即为设计方案的生成。目前计算机辅助概念设计的方法大多采用了功能推理的方法。采用人工智能技术，推理问题实际上就是生成和选择合适的方案。推理问题的重点是在转换过程，即把用户需求映射到实现所给需求集合的一些实际的结构上。难点在于产生和选择合适的映射方法。推理可以分为两类：基于数据驱动和基于知识驱动。数据驱动指摒弃规则，依赖大量实际数据参与推理，如实例推理、人工神经网络和基于知识的推理、定性推理等，应用于存在大量领域知识的情况下，典型技术如知识推理和优化等。常见的推理方法如下。

#### 1. 基于实例推理

基于实例推理（CBR）方法是 AI 技术中一个重要的发展方向，该方法是一种相似问题的解决方法<sup>[56]</sup>，核心在于以实例为主进行描述、定义，建立规则库或实例库，根据设计要求、实例特征等并依据规则进行推理，进而获得方案设计解。它克服和回避了知识获取瓶颈，有效地利用存在于已有的设计实例中的知识，已得到广泛应用。CBR 的优点：CBR 不需要复杂模型，在知识很少的情况下，可以生成完整的、复杂的解决方案；最初提出的解决方案已经是一个完整的设计，因此，也降低了问题的复杂性；设计实例是知识的源泉，CBR 可通过添加新的实例，很容易实现系统扩充。

宋玉银<sup>[57]</sup>基于所提出的实例模型概念，根据设计要求和产品的特征，建立产品的实例模型，采用面向对象技术描述实例，建立产品实例库，基于设计要求和实例模型进行实例推理，对龙门铣床的 6 类进给箱进行概念设计，获得产品设计的相似实例。Lee<sup>[58]</sup>在文中提出了船舶概念设计系统 BASCON-IV，该模型是基于设计产品实例的。

然而，CBR 也有一些自己的缺点。

(1) 相似性判断标准问题。相似性的尺度很难获得和表达。描述相关问题的特征决定了相似性，因此，该特征必须能被确定并且有利于以某种数字的形式来表达相似性的程度。

(2) 改进后原来的方案应用到新的问题上。因为获得的新方案是基于不精确匹配得到的，所以，它不可能是一个新问题的完全正确的解决方案，如果要接受，也要做改变。因此，这就涉及所检索方案的失败问题，很明显系统要知道如何进行这