

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：

装 订：

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 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

前　　言

机械产品概念设计、创新设计等内容的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

第 1 章 绪论	(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)
第 2 章 机械系统概念设计模型	(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 ^[142]	(22)
2.4 机械系统概念设计体系结构	(27)
第 3 章 功能建模	(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 ^[90]	(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)
第4章 基于工作机理的行为建模		(50)
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)
第5章 设计方案的生成——形态学建模		(73)
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)
第6章 概念设计方案的评价	(96)
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)
第7章 系统实现及综合应用实例	(108)
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)
参考文献.....	(145)

第1章 絮 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、是否在市场中具有竞争力等。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。

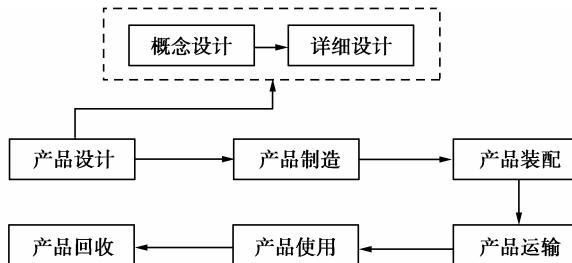


图 1.1 产品开发过程

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%^[1]。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^[2, 3]。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^[4~10]。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^[2, 8]。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^[11, 12]。

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^[3]

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 Methodology）。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。

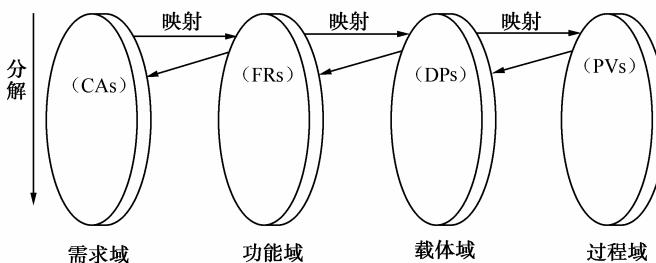


图 1.2 公理化设计过程

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，公理性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^[14]等人对海洋船只进行了成功的产品设计，国内林志航^[15~17]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)^[18]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。

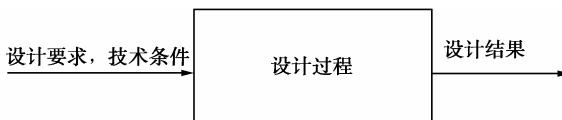


图 1.3 通用设计理论的设计流程示意图

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^[19]。

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^[20]。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^[21~26]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^[27]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^[28]。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^[29]和 Gero^[30]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^[31]、“功能-环境-行为-结构”（FEBS）模型^[32,33]、“结构-行为-功能”模型^[34,35]等。Umeda、Goel^[36~38]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^[32]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^[39,40]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^[41]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^[42]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^[43~45]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^[46]、梁庆华^[47]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^[48]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^[40]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^[49]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^[50]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^[40]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^[51, 52]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^[53~55]

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^[56]，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^[57]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^[58]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

些工作，但是失败的诊断和修复不是一个简单的问题。

2. 人工神经网络

人工神经网络^[59]能够用到概念设计系统中，是因为人工神经网络具有很多的优点：能模仿人脑结构以及智能行为；大规模并行处理、容错、自组织和自适应能力及联想功能等；作为一种新的建模工具，人工神经网络像专家系统那样需要事先建立复杂的知识库，知识的获取只需要足够的样本，训练合格的网络将知识存储在权系数中；人工神经网络有很好的容错性能，在局部节点或连接失效、部分规则不掌握的情况下，仍能正常工作。机械设计是一个多阶段、多子任务的链式序列，现行专家系统采用符号匹配方式，为了不致使系统出现“死角”，必须将所有可能的组合考虑完全，极容易产生“组合爆炸”。而设计人员在进行方案构思时，往往只考虑几种可行方案。因此面对复杂的情况，要能快速做出较好决策，同时在方案匹配时，不能因为部分信息的缺乏而出现匹配不上、没有方案可选的情况。因此这种选择的模糊以及高度综合的过程利用神经网络来模拟是比较合适的。

3. 基于知识的推理

常用的基于知识的推理方法有两种：类比推理和规则推理。

(1) 类比推理

与实例推理有区别，实例推理是描述具体实例来指导设计，类比推理是从设计实例中抽象出一般知识指导设计。参考文献[60,61]采用类比推理系统进行智能化概念设计，包括三个推理机：基于实例的推理机、启发式推理机（规则表示）和首要原理推理机（知识表示）。针对设计过程中功能要求的不同抽象层次，以分级方式建立系统索引，实现对设计实例的储存和检索。对实例库中保存的资源实例，采用类比推理，进行相似度计算，选择变换规则，并替换、添加、删除实例库中的组件。Li^[62]等人在该方法的基础上利用机构元件库的定性知识表示和基于 11 个规则的启发式搜索，进行方案设计的综合。Sun 和 Chen^[63]则将输入问题和实例问题采用 7 位代码表示，并使用索引规则进行索引，开发了一个模型混合设计系统。

优点：易于实现创新；缺点：知识抽象与相似性判定困难。

(2) 规则推理

基于规则推理是应用比较普遍的一种推理方式，它要求将设计领域知识表达为规则，用规则来指导设计。许多概念设计知识系统采用了这种推理方式，如 POTTER^[64]，EFDEX^[33]。规则推理的优点是比较容易实现，主要缺点是：产品概念设计的复杂性将会导致基于规则推理的智能系统效率低下，而且也使冲突消解的难

度加大；知识的获取一直是专家系统中的一个瓶颈问题，这就导致了其知识库的扩充将是困难的和缓慢的，推理过程一般是比较固定的，基于规则推理的系统很难获得创新解。

4. 定性推理

定性推理使用定性信息，对系统结构、行为和功能进行描述，并研究它们之间的关系，从而推出定性解释，以模仿人类的定性常识推理，是一种跨领域推理方法。其主要思路是：忽视所描述问题的次要因素或忽视问题中可能出现的非精确性和不确定性，借助各种规范、规则和掌握的主要因素来简化对问题的描述，在此基础上，将描述问题的传统定量方法转化为相应的定性模型，进行推理并给出定性解释。在概念设计早期，精确数字信息没有或不足，定性推理的使用更有必要性。常用离散符号系统表达知识，能够反映和推理物理原理包含的因果关系，而功能与结构通过行为联系，恰恰反映了这种因果关系。Qian^[29]和Umeda^[31]在其研究中均应用了定性推理方法。定性推理的优点是易于实现；缺点是知识属性划分困难。

另外还有很多推理方法也是支持概念设计活动的，如机器学习、优化算法、价值工程、Agent 推理和进化推理等。

上面所谈到的推理方法目前也只能设计一些特定领域的例子，离全面应用还有差距。应用的对象是比较简单的系统，推理方式比较单一，复杂系统推理能力不强。总的来说，这方面的许多工作还应继续进行。知识获取是人工智能领域中一个大难题，为了解决这一问题，可以采用数据挖掘技术^[65, 66]从已有的设计库中自动获取感兴趣的领域的知识。

1.2.4 方案的评价与决策

概念设计中一个重要的步骤是方案选择问题，是决定概念设计之后进行详细设计的关键环节。方案选择要求从诸多方案中选出一个或几个最优方案，决定了后续设计的方向。方案的选择不只考虑功能因素，还需考虑制造性、可靠性、安全性等要求，以及经济性和社会性等其他要求，是一个多准则决策问题^[67]。

在产品概念设计阶段，概念设计方案的结构尺寸尚未精确定，缺乏相应的数据和知识，通常情况下概念设计方案的评价与选择很大程度上取决于定性的选择和判断，因此存在着很大的主观性，如何有效地利用产品设计初期一些不完全的知识和数据为决策人员提供定量信息和决策支持，与评价方法的选择是有很大关系的。常见的评价方法有三种：价值工程评价法、系统工程评价法和模糊综合评价法。

1. 价值工程评价法

价值工程是以提高产品实用价值为目的，以功能分析为核心，以开发集体智慧资源为基础，以科学的分析方法为工具，用最低的成本去实现机械产品的必要功能。该方法的实质是以功能为评价对象，以金额为评价尺度，找出实现某一必要功能的最低成本。

2. 系统工程评价法

系统工程评价法将整个方案作为一个系统，从整体上评价方案适合总功能要求的情况，以便客观地、有效地选择整体最优方案。该方法的核心是建立适当的评价指标体系。

3. 模糊综合评价法

模糊评价就是利用集合与模糊数学将模糊信息数值化，以进行定量评价的方法。机械运动方案的评价指标体系应该是多种评价指标组成的，由于评价指标体系的评价常带有模糊性，因此，应用模糊评价方法进行综合评价将会取得更好的效果。典型的模糊评价方法有模糊优序方法^[68]、基于神经网络的模糊推理方法^[69]、模糊综合评判^[70]等。

概念设计的过程主要是评价和决策的过程，涉及产品功能、动作和结构等因素，对产品的价格性能、可靠性、安全性等起决定性的影响作用。正因为应考虑的因素和目标是多方面的，所以评价和决策过程是一个很复杂的，难度很大的过程。

1.2.5 概念设计支持技术

概念设计的支持技术主要涉及设计的表达问题，对实现概念设计的支持技术研究集中在设计信息的表达、集成上。产品概念信息主要包括功能、行为、结构及其关系。功能主要描述产品完成的任务，行为描述实现功能所需的原理或执行的动作，结构则描述产品组成要素及其相互关系。许多研究人员已经认识到工程设计的信息表达是设计研究和设计自动化发展中的一个中心议题^[71]。

一些研究者采用功能、行为、结构的集成表达支持概念设计^[33,37]，概念设计信息表达的手段如下。

(1) 语言

用语言来表达产品模型，是一种形式化的设计，能清楚设计的意图，能无歧义地表达人们对设计的理解。由语法定义的语言表达简洁，是构造设计知识的有效方

法^[72]。其缺点是难以进行复杂的推理。

(2) 几何模型

几何模型是对产品结构特性的表达，目的是在计算机上表示二维或三维的几何形状。其优点是易于后续的设计相集成；缺点是不能处理功能，缺乏对概念设计的有效支持。目前，几何模型的应用是非常广泛的，所以完全脱离几何模型去建立纯概念设计模型是不现实的，必须和几何模型相结合。

(3) 图形

在概念设计阶段，图形是比较流行的表达方法，常常用于构建产品的功能、行为和结构、设计部件及其布局的物理描述，还可构建需求和约束。使用图形对设计的不同方面进行建模的主要优点是：图论是一个比较成熟的理论，已存在许多关于图的算法，通过使用图形来建模，可以方便地使用这些算法。Shai^[73]曾用图论的方法来表达设计系统和其中隐含的知识，颜鸿森^[74]用树状图表示加工中心的拓扑结构。

(4) 对象

对象^[75]已成为越来越流行的模型描述方法。对象是将数据结构和行为结合在一起的实体。面向对象的描述方法具有抽象性、封装性、多态性、继承性等特点，为概念设计提供了灵活的建模手段。设计对象的基本结构及其性能、参数等可以描述成为对象，几个对象结合起来可以形成装配对象。这种混合和结合不同对象的能力可快速产生许多设计方案。

(5) 知识

概念设计发生在产品生命周期的早期，这个阶段很难获得关于需求、约束等方面完整精确的信息和知识。概念设计非常复杂，它不仅需要来自诸如成本、性能、环境等不同方面的知识，而且需要诸如物理、数学、经验等不同类型的知识。知识表达的优点是易于实现推理，缺点是知识获得困难。

Yoko Ishino^[76]把知识划分为领域知识和策略知识，领域知识中有设计原理知识、产品知识、过程知识，策略知识包括“know-how”知识和“know-why”知识。Yoko Ishino 重点研究了“know-how”知识的捕捉与获取问题，提出了一种创新的模型和方法。Potter^[64]也研究了概念设计中知识的获取问题，他认为不可能直接从人类专家处获取，而需要采用归纳式的机器学习来获得这种知识。

尽管已有很多不同的概念设计表示法，它们各有自己的优点，但它们往往只支持描述概念设计的某一方面，缺少一种能描述概念设计各种因素的统一表示法。

1.2.6 概念设计的系统实现

随着信息技术的发展，产品的概念设计已经离不开计算机的支持。当前计算机

辅助概念设计（Computer Aided Conceptual Design, CACD）是一个研究的热点。概念设计是一个创造性的过程。近年来，CAD 技术得到了长足的发展，如 Pro/Engineer、UG、SolidWorks 软件等，使用这些 CAD 系统可以提高设计效率和质量，但是目前的 CAD 系统旨在生成复杂、精确、完整、参数化的三维造型，和制造、工艺联系紧密，但是由于其本身不是为概念设计而开发的，本身缺乏设计方法学的有效支持，没有体现概念设计的创造过程，即不能较好地支持创新设计^[77]。传统的 CAD 主要应用在设计的下游，即详细设计阶段，较少考虑对设计过程中的重要阶段——概念设计的支持，把设计过程割裂开来，设计人员在设计时需要首先进行概念设计，然后在计算机中进行装配设计和零件详细设计，以形成最后的产品，不允许快速输入和再现不完备的概念造型，从而成了一个设计方案确定之后的绘图工具，而不是辅助概念设计工具。因此，CACD 的研究以及 CACD 系统的开发是非常有必要的。目前建立一个功能完备的 CACD 系统还存在着许多困难。一个基本的 CACD 系统应该具有以下四个基本功能：能够表达方案，能够产生方案，能够产生多个可行方案，能够确定最优方案^[78]。

系统开发是实现 CACD 的关键步骤。针对具体的应用，研究人员开发了大量的原型系统：

(1) 新加坡南洋理工大学 Zhang W. Y. 等人开发了基于知识的概念设计原型系统 EFDEX^[33]，该系统基于较强的规则推理，考虑了如何避免方案生成时“组合爆炸”的问题，但是知识的获取困难。随后提出了另一个概念设计原型系统 FuncDesigner^[79]，该系统通过功能推理支持机械产品的功能设计，采用了行为驱动的“功能-环境-结构”(B-FES) 模型框架，整个系统采用了面向对象的数据结构。

(2) FBSModeler 系统将设计归结为“功能-行为-状态”的模型演化过程^[37]。在模型的演变过程中，定性推理是主要的研究内容，该系统不仅建立了设计意图模型，有利于产品创新，而且能够捕捉冗余功能，实现功能共享。

(3) DSSUA 系统是悉尼大学 Gero JS^[29]领导的研究小组开发的原型系统，该系统基于“功能-行为-结构”框架，采用原型表达方式，能够支持领域间类比，具有一定的创新能力。

(4) 基于实例设计系统是清华大学宋玉银^[57]等人开发的概念设计原型系统，该系统基于 CBR 的方法来实现概念设计与结构设计的集成。

概念设计面临的困难之一是概念设计的对象涉及很多学科，经常会遇到客户、设计人员、制造工程师之间的协调问题。这就产生了协同概念设计^[8,80]的需求，近年来随着计算机技术和网络技术的发展，也为其实现奠定了基础。协同概念设计系统实现的基础是互联网，还有一些人工智能的支持技术，如代理技术、知识管理、知

识库等。协同式概念设计根据所采用的技术不同有两种：基于 Web 的协同式概念设计和基于代理的协同式概念设计。下面列举几种协同式概念设计系统。

(1) Schemebuilder^[81]是英国 Lancaster 大学 Sharpe 教授领导开发的智能化方案设计软件，该系统基于集成的思想，采用了多种技术，如数据库技术、键合图技术以及超媒体和超文本技术，提供了多学科知识的产品设计环境，实现概念设计与详细设计的集成。

(2) WebCADET^[82]是英国剑桥大学 Rodgers 教授领导开发的系统，采用了 Prolog 作为开发工具，系统可以帮助设计者高效地搜索所需要的设计知识，对概念设计解进行评价和决策。

(3) Web-based Morphological Chart 是香港大学 Huang^[83]教授等人开发的系统，系统使用了 Web、html、ActiveX 等技术，采用了 B/S（浏览器/服务器）结构，将概念设计模块（功能分析模块、原理解产生模块和原理解评价模块）移植到互联网上。

(4) A-Design 是美国卡耐基梅隆大学 Campbell^[84,85]等人开发的概念设计系统，系统采用了一种新的设计方法学，其中包含有：多目标优化、多代理系统、自动设计综合等。系统给设计人员在概念设计阶段提供了一种新的搜索策略，系统采用基于 Agent 的推理技术，面向机电产品，支持创新设计。

(5) ICM^[86]是美国斯坦福大学 Fruchter 等人开发的协同式概念设计系统，使用了 Agent 推理技术和网络技术，提供了一种集成的共享图形建模环境。

1.3 研究现状分析

概念设计阶段对产品的整个设计、制造过程有举足轻重的影响，因此国内外学者对有关概念设计的理论、方法和应用做了大量的研究。前面系统地分析和总结了概念设计的各个环节，可以看出概念设计有了较大的进展，但是全面的应用还有很大的距离。

1. 概念设计的创新性

概念设计的本质是创新，创新是概念设计的灵魂。只有创新才有可能得到结构新颖、性能优良、价格低廉、富有竞争力的产品。离开创新，概念设计就不具有生命力。计算机辅助概念设计系统的核心是要体现创新，虽然这种创新是辅助创新，不能完全意义上代替人类的创新，但是通过计算机辅助概念设计系统所获得的方案也要具有创新性。目前很多系统的创新性并不明显，其主要原因是最能体现创新性的过程（如功能分解、行为分解等）缺乏有效描述的数学手段，使得创新性得不到

有效的发挥。

2. 概念设计自动化

随着计算机硬件、软件和人工智能技术的发展，很多计算机辅助概念设计系统都致力于概念设计过程的完全自动化，其实这是一种误区，这样的概念设计系统很难获得真正意义上的创新解。基于目前的人工智能技术，很难实现概念设计的完全自动化，但是对其中一些环节进行自动化设计是完全可能的，而且还可以获得满意的解。

3. 知识的表达与处理

现代概念设计是一个基于知识的体系，知识的表达及推理是核心。在机械系统概念设计中，知识包括功能分解的知识、运动行为的知识、功能载体的知识。概念设计现在缺乏统一的表达模式，不能够捕捉抽象、具体的知识，不能实现概念设计与下游的详细设计的无缝集成，制约了概念设计进一步发展。

4. 概念设计方案的组合

概念设计方案组合方面应用了很多的技术，如问题求解策略、遗传算法、基于实例推理、代理技术等。概念设计方案组合的核心问题是如何快速地获得有效解，用恰当的方法可实现设计方案的组合。但是大多数方法只是考虑概念设计方案如何组合，没有考虑组合过程中多种设计因素对方案组合的影响。

5. 方案的评价与决策

方案评价的过程中要考虑的因素很多，方案评价中既有定性指标，又有定量指标，是一个典型的多准则决策问题。同时考虑到概念设计所处理的信息通常是不完整的、不精确的、模糊的，概念设计的评价具有模糊性的特点，又是一个模糊评价问题。目前，很多方案评价模型不具有一定的柔性，没有采用人机结合的评价方法，不能充分发挥人和计算机在评价中应有的作用。

本章小结

本章首先介绍了概念设计研究在工程设计中的重要地位，综述了计算机辅助机械概念设计的相关文献，从概念设计方法学、概念设计的核心技术、方案的生成、方案的评价与决策、概念设计支持系统、系统实现等多个方面介绍概念设计研究及其进展，并对当前机械系统概念设计的研究现状做了定性分析。

第2章 机械系统概念设计模型

2.1 引言

工程设计是产品开发过程中一个非常重要的阶段。一般认为在设计阶段决定了产品全生命周期中 70% 的成本。有效的产品设计能提高产品质量，降低成本，缩短上市时间，使产品能更好地满足客户需求，这对于企业保持优势和竞争力是非常必要的。因此，对产品设计过程模型、产品设计工具进行研究是非常有必要的。随着优化技术、统计方法、基于知识的方法的发展和应用以及计算机软硬件技术的进步，出现了各种各样的计算机辅助设计工具，但是迄今为止，大多数计算机辅助设计工具的研究集中在参数化层次上，面向的是工程设计的下游阶段，即详细设计阶段。概念设计是设计决策的重要阶段是不容置疑的，然而和相对成熟的参数化研究领域比较，概念设计仍然是缺乏有效的理论和模型支持，缺乏高效的计算机辅助设计工具。本章主要研究概念设计模型，通过该模型从总体上为后续计算机辅助概念设计软件的开发提供模型支持。

本书研究的对象是完成工艺动作的机械设备，通过工艺动作来实现功能的机械设备从系统角度可看成一个机械系统，对这类机械设备的设计重点和难点是如何传递和实现所需要的动作。机械系统方案设计的优劣直接影响设备的功能、成本等指标。所以机械系统方案设计作为设计过程中重要的一环，理应得到重视。计算机辅助概念设计的过程模型一般都是基于设计方法学的基本理论，其中，比较典型的是 Kota^[27]为代表的“功能-结构”模型（Function-Structure,FS）和 Qian^[29]和 Gero^[30]为代表的“功能-行为-结构”模型（Function-Behavior-Structure,FBS）。对一般意义上的机械系统，不论是采用两阶段的过程模型，还是三阶段的过程模型，概念设计都是从功能层面开始、通过多层次映射得到结构层面的过程。对机械系统方案设计而言，因为其运动行为的存在，直接采用 FS 模型或 FBS 模型都不能获得满意的结果。

机械系统设计过程模型可分为三个层次^[43]。

(1) 描述模型。能够描述设计的基本过程，设计思路在设计过程中有所体现，模型要基本能够反映设计过程。

(2) 辅助设计模型。在模型的引导下设计者可逐步完成产品的设计工作，由于

设计过程中存在复杂的推理和决策，计算机无法独立完成，必须依赖人的参与。

(3) 辅助创新模型。在数据库或知识库的支持下，模型可以提供多个备选方案，即相关性能信息或评价信息，由设计者做判断。计算机的本质决定了它无法进行真正意义上的创新，但它的大容量数据库、快速的基于算法的推理和判断可以为创新提供条件。

基于以上的讨论，本书提出了一种机械系统概念设计的过程模型，该模型兼有辅助设计模型和辅助创新模型的特点，过程模型可以划分为功能分解、功能到工作机理的映射、工作机理到行为的映射、行为到结构的映射、方案组合、评价等过程，使得计算机辅助概念设计得以顺利实现。

2.2 机械系统组成及功能

从系统的观点来分析，按实现系统功能划分，机械系统主要包括下列一些子系统：动力系统、传动系统、执行系统、操纵及控制系统等，其中传动系统和执行系统又常常称为机械系统。机械系统是整个机械系统功能主要的、具体的实现环节。这个特性决定了机械系统的方案设计是机械系统设计中最复杂、最困难的，也是最具有创造性的部分。

2.2.1 执行系统

执行系统是机械系统中的一个重要组成部分，是直接完成系统预期工作任务的部分。执行系统是利用机械能来改变作业对象的性质、状态、形状和位置，或对作业对象进行检测、度量等，以进行生产或达到预定的要求的装置。

1. 执行系统的组成

执行系统由执行构件和与其相连的执行机构组成。不同的功能要求，机械的执行系统也不同。执行构件是执行系统中直接完成工作任务的零部件，或是与工作对象直接接触并携带它完成一定的动作（如夹持、搬运、转位等），或是在工作对象上完成一定的动作（如喷涂、洗刷、锻压）。执行构件往往是执行机构中一个构件，它的动作由与之相连的执行机构带动，其结构、强度和刚度，运动形式和精度，可靠性与使用寿命等不仅取决于整个机械系统的工作要求，而且也与执行机构的类型及其工作特性有关。

2. 执行系统的功能

执行机构的作用是传递和变换动力，即把传动系统传递过来的运动和动力进行必要的变换，以满足执行部件的要求。执行机构变换运动，就其变换形式来说，常见的是转动转换为移动或摆动，或反之。就变换的节拍来说，则可将连续移动变换为不同形式的连续运动或间歇运动。

执行构件的形式可以根据执行系统的工艺功能不同而多种多样。常见的工艺功能主要包含以下几个方面。

(1) 夹持。执行构件要对工件进行操作，要对工件施加作用力，首先需要将工件夹持住。例如，机床要加工零件，必须要将零件夹紧，然后才能进行加工。

(2) 搬运、输送及转换工位。执行构件对工件操作要不断转换位置，执行构件要起到搬运、运输及转换工位等工作，使构件从一个位置转移到另一个位置。

(3) 施力。机械为了完成一定的功能，要实现一定的运动和动作，执行构件有时需要对工作对象施加力或力矩以达到完成任务的目的。

2.2.2 传动系统

传动系统是把动力机的动力和运动传递给执行系统的中间装置。

1. 传动系统的组成

每个执行机构中执行构件与动力机之间有一个传动联系，有时执行机构或执行构件之间也有传动联系。组成传动联系的一系列传动件成为传动链，所有传动链以及它们之间的相互联系组成传动系统。传动系统通常包括以下几个组成部分：变速装置、起停和换向装置、制动装置和安全保护装置。

2. 传动系统的功能

(1) 减速或增速。把动力机的速度降低或升高，以适应执行系统工作的需要。

(2) 变速。当用动力机进行变速不经济、不可能或不能满足要求时，通过传动系统实行变速（有级或无级），以满足执行系统多种速度的要求。

(3) 改变运动规律或形式。把动力机输出的均匀连续旋转运动转变为按某种规律变化的旋转或非旋转、连续或间歇的运动，或改变运动方向，以满足执行系统的运动要求。

(4) 传递动力。把动力机输出的动力传递给执行系统，供给执行系统完成预定任务所需要的转矩和动力。

2.3 概念设计模型

2.3.1 机械系统概念设计的基本过程

机械系统概念设计过程包括以下 5 个方面^[87]。

1. 明确和规范化设计任务

把市场、用户、设计人员的需求，进行功能抽象。因为这些需求本身可能是模糊不清的，有时甚至是不科学的。该阶段的主要任务是将设计需求明确化、科学化、规范化，确定产品的总功能，以便于抓住问题的本质，突出核心问题。

2. 功能分析与功能结构

直接对系统总功能求解往往难以实现。尤其是对复杂的系统，系统的输入和输出关系很复杂，难以直接求解，必须先分解总功能，使其得到合适的若干子功能，分解过程一定程度上也是创新的过程，然后对子功能进行求解、综合。功能分解不仅降低了问题求解的难度，同时也为一个新的设计提供了好的设计起点和超越其经验的广阔的设计思维空间。

功能分解后不仅获得是一些子功能，同时子功能之间的关系通过功能结构体现出来。

3. 工艺动作原理设计阶段（行为分析与综合阶段）

机械产品的功能是靠工艺动作来完成的，即一系列工艺动作的目的是完成需要实现的功能。为了实现同一工作原理，可以采用不同的工艺动作原理（运动规律）。所谓工艺动作原理设计，是指为了实现工作原理而采用何种工艺动作原理。这一过程通常是对工作原理所提出的工艺动作过程进行分解。工艺动作的分解往往对应于功能的分解。工艺动作分解方式不同，所得到的工艺动作原理也不相同，因此所设计出的方案也各不相同。例如，缝纫机的缝纫功能分解为刺布、挑线、钩线和送料四大功能，它们所对应的动作分别是机针上下运动、挑线杆供线和收线、梭子钩线、推送缝料。

4. 执行机构系统方案的构思与设计

实现功能的工艺动作，在机械系统中是靠若干个执行机构来完成的。机械产品

的概念设计最终归纳为机械运动方案设计，也就是执行系统方案设计。执行系统的构思与设计是概念设计中非常重要的内容。

5. 方案评价与优选

机械运动方案的构思和拟定的最终目标是最优地确定某一运动方案。采用科学的评价和决策方法来确定最佳的运动方案是机械运动方案设计的重要内容。

2.3.2 概念设计模型的相关研究

随着市场竞争的加剧和用户对新产品的迫切需求，机械产品更新换代的速度大大加快，同时机械产品系统也变得更加的复杂，开发周期相应延长，因此，在产品设计开发过程中矛盾就凸显出来。随着计算机技术，特别是人工智能技术的发展，使用计算机软件技术对机械产品的概念设计给予充分支持，使得产品的开发周期大大缩短，同时又在方案层次获得较为创新的产品成为可能。

概念设计的主要任务是依据功能获得结构的描述，常见的过程模型有两个：“功能-结构”模型（FS）和以行为为桥梁的功能求解模型。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。

（1）FS模型中最具代表性的模型有系统化模型、公理化模型以及Freeman-Newell^[88]模型。FS映射模型是将设计过程视为在满足约束的条件下由功能确定出结构形式的过程，是由功能到结构的映射。通过功能定义、功能分解、功能合并和结构映射等多种方法，在尽量广泛的知识支撑下，生成一组可行的解决方案，构成形态学矩阵，并经过评价选择方案。“功能-结构”直接映射的方法允许设计者通过功构建模方法将功能需求与单个机械组件直接对应起来，这种映射是当设计经验积累到一定阶段后，跨越了行为层而建立起来的映射关系。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，结果很难获得创新性的概念设计结果。

（2）以行为为桥梁的功能求解模型。行为处于功能和结构之间，把两者有机联系起来。最为典型的是功能-行为-结构（FBS）模型，该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，然后再用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。

对机械系统而言，其最终的目的是通过功能载体实现机械运动、动作和工艺动作来完成机械运动过程，实现总功能。机械运动方案设计从总体上看是由功能到结

构的过程，由于设计过程的复杂性，直接从功能到结构的映射难以完成，很难采用FS过程模型。因此，根据机械系统的特点，FBS模型是基本适合的，该模型比较符合设计者的设计习惯，而且也有利于计算机的实现。对机械系统而言，“功能-工艺动作-机构-机械系统”的映射过程也符合工程类设计人员的习惯。如图 2.1 所示，功能通过 FB 映射成行为，行为通过 BS 映射成为结构，结构表现出一定的行为，该行为可实现给定的功能。

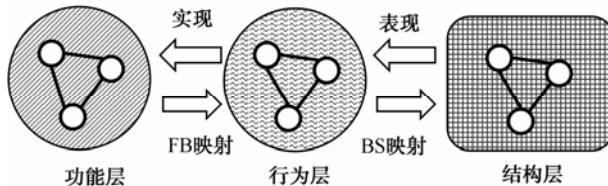


图 2.1 FBS 模型

2.3.3 机械系统概念设计FMBS过程模型^[142]

由于功能的多义性及领域相关性，功能到行为的直接映射比较困难，也不便于计算机的储存和管理，为此在 FBS 模型的基础上，提出了一种“功能-工作机理-行为-结构”（Function-Mechanism-Behavior-Structure, FMBS）模型，该模型在功能与行为之间增加了工作机理节点，使得功能到行为的映射，变成了“功能-工作机理-行为-结构”映射。为讨论问题方便，同时考虑到所研究的对象（机械系统），下面给出所涉及的有关名词的解释。

1. 功能及功能空间

功能视为设计意图的描述（产品的设计目标）。功能是对所设计对象的一种抽象的、明确而简洁的表达。若干个相关联的功能组成了一个功能空间。

2. 工作机理及工作机理空间

机械系统的工作机理是符合工作原理条件下的实现功能的动作或方法的细化描述，工作机理说明了完成功能的若干个运动行为(工艺动作)及其相互关系。工作机理空间是由多个工作机理所组成的，工作机理之间具有一定的关联。

3. 行为及行为空间

行为描述了实现某一功能的具体的实现途径、方法、手段。对机械系统来说行

为是实现功能的具体工艺动作，具有一定关联的行为组成了行为空间。

4. 结构

在机械系统中，结构是指基本机构，通过输出构件的特定运动行为实现功能。

5. 结构形态学组合

结构形态学组合是通过形态学矩阵中不同因素下的结构形态的组合得到全体结构方案，并根据相关联的性能关系以及结构自身的特性，缩小选择范围，初步确定2~4项待评价方案。

6. 方案评价

在概念设计阶段要产生多个可行方案，并且要进行恰当的评价和选择，从中选出1~2个认为是伯仲之间的方案同时进行下一步设计。FMBS模型具有以下四个特点。

(1) 与传统的FBS模型的不同之处在于，FMBS模型增加了工作机理节点，很多与行为相关的信息添加到工作机理节点中，当工作机理映射到行为层时，不是一个单个行为，而是一个含有行为关系的行为子空间，行为子空间明确地表达了行为之间的相互关系；同时行为层中行为子空间之间也存在相互关系，如图2.2所示。

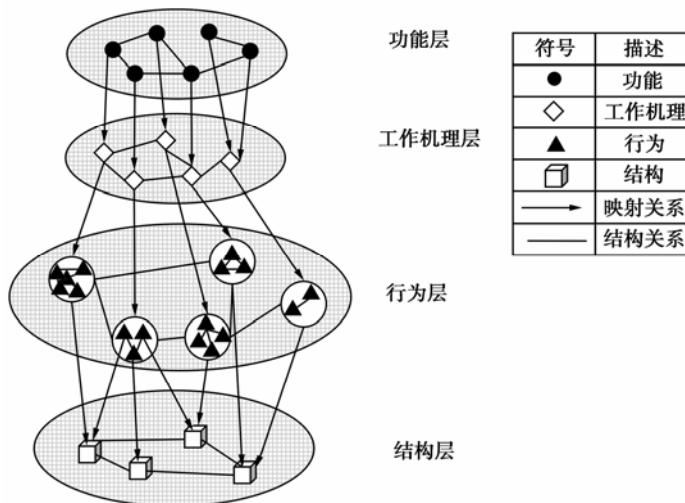


图2.2 FMBS模型各层关系示意图

(2) 行为层的单个行为不直接映射到结构，而是通过行为子集映射到结构，一个行为子集由一个基本结构来完成；行为子集的获得是通过行为重组来实现的，通过行为重组，可在一定程度上提高概念设计过程的创新性。

(3) 在方案生成的过程中，采用形态学组合的方法，形态学矩阵具有良好的动态性能，用于机械系统的概念设计，可以方便地形成众多的方案，开拓设计思路；同时还可简化设计的概念设计过程。但是其主要问题是形态组合时容易产生“解爆炸”问题。为了解决这一问题，提出了一种改进的形态学分析法，既发挥了设计人员的创造力，又充分利用计算机的计算能力，获得概念设计的初步方案。

(4) 方案评价以非结构性决策模糊集理论对设计方案评价的指标体系进行层次分析，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。该评价方法既利用了专家的知识和经验，又利用了客观存在的数据，符合概念设计评价的特点，是非常有效的评价方法。

根据计算机辅助概念设计模型的框架，机械系统概念设计模型的细化流程如图2.3所示。

1. 功能分解

功能分解是一个层次化的过程，是一个从粗到细的过程，不可能是一步就分解完成的。总功能最终可分解为若干个功能空间，组成功能空间层，功能空间之间满足或关系，即任意一个功能空间都可实现总功能。每一个功能空间具有确定的功能元和功能结构。选择不同的功能空间进一步细化设计，将会获得不同的设计方案。功能分解可以看成是一个反复搜索功能分解相关知识，进行匹配的过程。采用闭包空间理论来作为描述功能分解知识搜索过程的数学工具。功能分解是一个思维发散的过程，功能分解是体现概念设计过程创新的第一步。

2. 功能空间映射为工作机理空间

该映射的基础是：属于功能空间中的任意一个功能都映射成为一个工作机理，与功能空间对应的全部工作机理组成了工作机理空间，而工作机理层是由工作机理空间组成。对任意一个功能空间，可以有多种工作机理空间与之对应，每个工作机理空间都是可能实现总功能的，这里功能求解的思维进一步得到发散，这是体现概念设计创新的第二步。

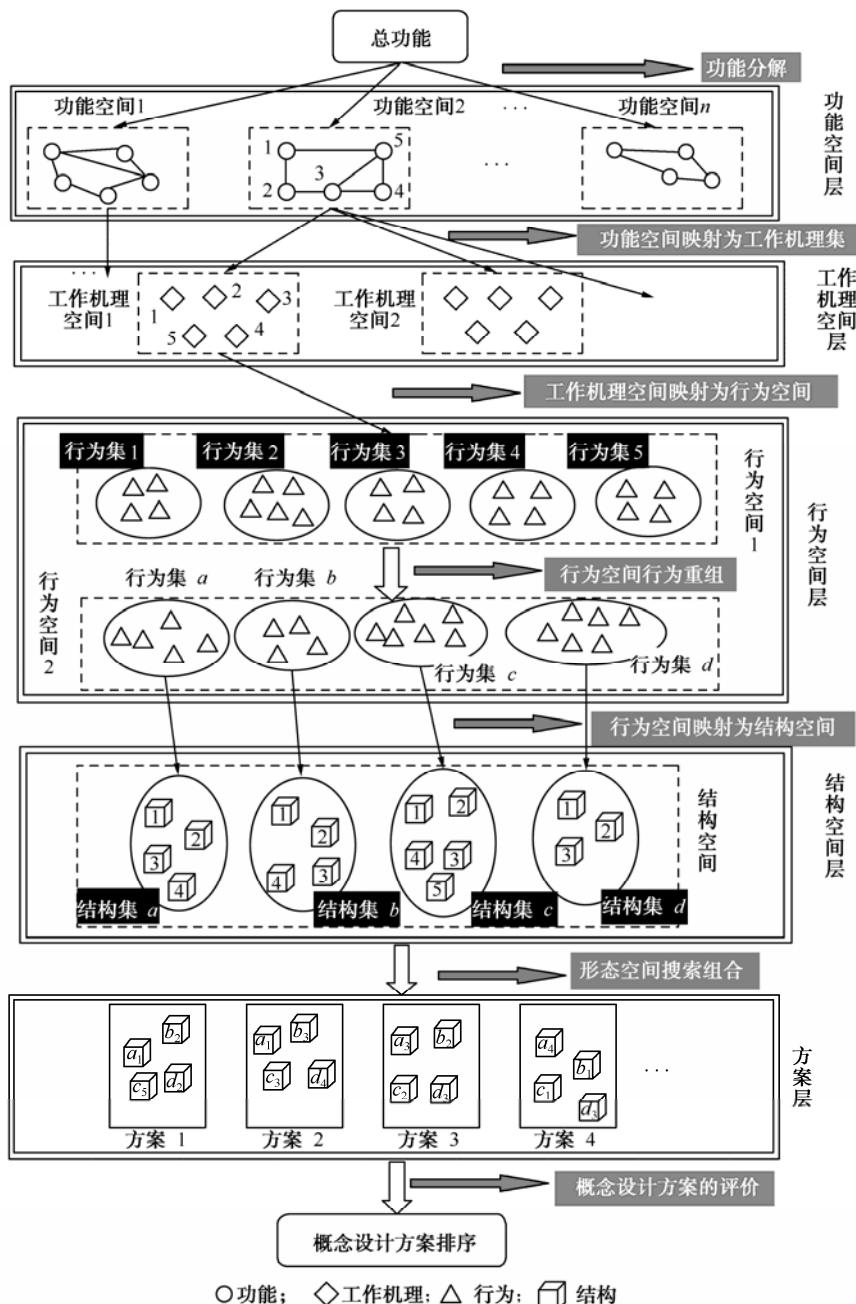


图 2.3 FMBS 模型细化流程

3. 工作机理空间映射为行为空间

在映射过程中，工作机理映射为一个行为集，工作机理空间可映射到行为层上，将会得到一个有行为集组成的行为空间，因此工作机理层可以映射为行为空间层。行为空间中的行为通过行为重组，将可能获得创新的设计方案。由于行为空间不仅仅是一个，所以行为空间的行行为重组是体现概念设计创新的第三步。

4. 行为空间映射成为结构空间

通过映射确定结构层，依据行为空间层内的行为空间，可确定结构层上结构空间。行为空间中每个行为集在结构空间中将会有相对应的结构（机构载体，形态）实现。

5. 形态空间的搜索，确定设计方案

主要实现步骤：

- ① 根据结构层中所获得的基本结构，构造执行机构的形态学矩阵；
- ② 在此基础上采用前面所提出的方法，构造机械系统完整的形态学矩阵；
- ③ 针对每个因素下的形态集，采用定性评价的方法，给出形态集内形态的优先级排序；
- ④ 通过不同因素下形态的相容性分析，给出连接关系的评价级别；
- ⑤ 构造组合方案的多目标评价向量，采用遗传算法和多目标优化方法，实现机构的形态组合搜索，确定概念设计方案解集。由于存在一结构多功能的和一功能多个实现结构的情况，所以可获得不同的结构组合方案。结构方案形态学组合是体现概念设计创新的第四步。

6. 概念设计方案评价

对所确定概念设计方案集进行评价，给出优劣排序。以指标体系为依据划分若干个评价单元，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。基本单元的评价是以互补性的模糊判断矩阵和相对隶属度概念为基础，采取先定性后定量的方法，确定基本单元中指标的权重和方案对单元指标的相对优属度矩阵，进行多级模糊优选，可以得到在此单元系统下方案的相对优属度向量，来作为综合单元系统的输入。采用多级模糊识别理论，获得方案最终的排序。

2.4 机械系统概念设计体系结构

计算机辅助概念设计是一个基于知识的设计过程，在此过程中涉及大量的知识，包括功能知识、工作机理的知识、行为知识、机构知识、系统评价知识等内容。因此，概念设计模型中需建立功能及功能分解知识库、工作机理知识库、行为知识库、机构知识库等内容，这些知识库是概念设计的基础。计算机辅助概念设计模型框架如图 2.4 所示，系统由三个大部分组成：系统模块部分，知识库部分，方案数据部分。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；另一类是知识维护与管理模块，主要涉及知识库数据的添加、修改、删除等工作以及知识库其他相关的工作。知识库部分涉及五类知识，都以数据库的形式加以存储。方案数据部分主要存储概念设计过程的各种数据，储存到数据库中，便于管理，也可用类似概念设计过程的模板。计算机辅助概念设计模型的最终是通过“软件+算法+数据管理”三者有机结合实现的，缺一不可。

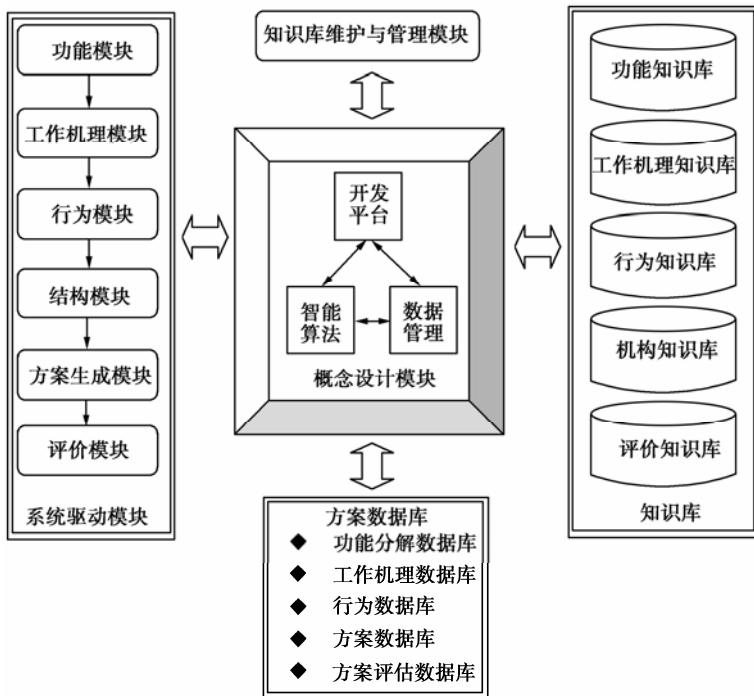


图 2.4 概念设计结构组成框架

本章小结

为了建立机械系统概念设计模型，本章首先根据机械系统的组成及功能分析了机械系统概念设计的基本内容，随后根据概念设计模型的相关研究内容分析了概念设计过程模型，在此基础上提出机械运动概念设计过程模型，即 FMBS 模型，初步分析该模型的工作流程。在 FMBS 模型的基础上，提出了机械系统概念设计体系框架结构。

第3章 功能建模

3.1 引言

在工程设计过程中设计知识的类型、粒度级别、知识的运算变化是多种多样的。然而，设计过程早期（概念设计阶段）的一些重要的信息需要保留下来以便在设计后续阶段为设计人员所使用。其中一个重要的信息类型是设计所需功能的集合。工程设计的最终目的是制造产品来实现功能并且产品的功能完全满足客户的需求^[89, 90]。

概念设计的核心问题是功能设计，功能设计可通过映射来获得实现功能的各种可能方案。功能设计主要指功能的产生、功能分解和功能求解三个方面，也就是依据设计任务书的要求抽象出总功能，再对总功能分解来求解原理方案的过程。功能分解是功能设计的关键所在，不同的功能分解思路往往带来不同的设计结果，功能分解是体现概念设计过程创新性的重要环节。

Pahl Beitz^[3]认为大多数技术系统是可分解的，存在一个构成关系：一个系统由几个子系统构成，一个子系统又由其他部件构成，依此类推，形成一个层次结构。对系统在不同的层的描述反映出对技术系统的不同深度的抽象。从系统的角度观察功能，功能是可以进行分解的。功能分解的目的是为了使功能求解较为容易，对于给定的总功能，需要经过功能分解过程，可以将总功能分解为一系列功能元，总功能应分解到什么程度，也就是功能分解的层数以及每一层中分功能数多少，取决于任务的新颖程度，也取决于功能分解的过程。

功能分解阶段具有如下特征。

- (1) 体现了思维的逆向性和发散性特征。
- (2) 是一个不断满足上一级功能并通过自定义的功能关系（上下层之间、同层之间）引发功能分解向更低抽象层次进行的过程。
- (3) 功能分解阶段需要人脑的高度参与，宜采用人-机交互方式进行。功能的分解对人来说不是一件很困难的事情，因为人在分析和解决抽象问题时，总是先对问题进行初步分析，得到问题的高层次描述，然后根据自身已有的经验和知识对问题由高层次逐步向低层次深入、细化，直至达到目标。然而单用计算机来实现功能分

解却是很困难的，主要的原因是缺乏有效的数学模型来表达分解过程。

因此，本章提出采用人-机相互结合的功能分解方法，计算机辅助功能分解采用了闭包空间理论作为数学工具，在功能知识的驱动下实现功能的分解，建立功能分解过程模型。这样充分发挥了计算机的优势，便于获得新颖的功能分解方案，同时设计人员可对功能分解结果和过程加以干预，使得结果变得更加合理可行。

3.2 功能

3.2.1 功能的概念

早在 20 世纪 40 年代末就有人提出：用户购买的不是机器本身而是它的功能。人们逐渐意识到，只有从功能的观点来观察和认识机器，人们的思维才能从旧的结构和形式中解放出来，才能有不断探索新原理、新结构的广阔视野^[91]。

功能在设计过程中起到举足轻重的作用，它向上体现设计者的设计意图，向下映射为设计对象。因此，功能是设计中至关重要的一个方面。Umeda^[92]指出，功能没有清晰的、统一的、客观的、能被广泛接受的定义。Pahl 和 Beitz^[3]认为，功能是系统输入和输出的一般关系，功能的目的在于完成一个任务，一般采用“动词+名词”的方式来表达。Coler^[93]认为功能是一个系统根据外界环境所作出的动作，其目的在于完成设定的任务或目标。Tomiyama^[36]认为，功能是人类对行为的抽象。Stone^[94]认为功能是装置或结构所完成动作的描述，以子功能的主动动词来表达。在设计文献中给出了多种多样的功能的定义，有时甚至是相互矛盾的，但是关于功能可以划分为以下三个基本观点^[95]。

1. 系统的观点

功能看做是系统输入和输出之间的关系，可由系统的流变量来表达功能。任何技术系统都需要以一个清晰的、可重现的方式对输入和期望输出之间的关系进行描述，输入和输出的这种关系，称为功能。当一个系统实现了输入到输出的转换后，就表达了一个特定的功能。

2. 性能的观点

功能是物理行为的抽象。产品的物理结构可实现给定的功能，结构之间或结构与环境之间相互作用，表现出相应的行为，这些行为的抽象描述了所要表达的功能。

3. 设计的观点

功能视为设计意图的描述（即产品的设计目标）。功能是对所设计对象的一种抽象的、明确而简洁的表达，它独立于任何特殊的、用来达到所期望输出的物理系统之外。

一个好的功能定义方法应该包含这些观点。在本文中，核心问题是关于机械产品的功能，功能是一个概念，用来描述或规定所设计的产品。功能的概念可根据产品的功能、行为、结构以及它们之间的关系来阐述。当功能用于产品表达时，功能是产品的结构所实现行为的抽象。功能是主要行为的抽象，而结构则提供一种机械装置来实现行为。

3.2.2 功能的分类

功能存在多种多样的分类方式，下面简单讨论两种功能的分类方式。

1. 依据功能的使用场合进行分类

规范的产品功能说明是联系设计人员和其他人员的纽带。设计人员可以为同一件产品指定不同的功能，来转换功能信息为不同的使用场合。在概念设计阶段，功能是设计需求的抽象，一般称为设计功能。在详细设计阶段，产品的功能有装配功能、制造功能、市场功能、维护功能等类型^[95]。

2. 依据功能在功能分解模型中的特性进行分类

依据功能所处层次不同，可分为总功能、分功能（子功能）、功能元。功能具有层次性，机械装置所能完成的功能，常称为该装置的总功能。例如，车床的总功能就是利用移动刀具对旋转工件进行切削的功能。为了实现其总功能，至少要有两个主要分功能（工件旋转功能，刀具进给功能）的相互配合动作，才能完成。分功能（子功能）由更低层次的子功能集或功能元集来实现。

依据功能抽象性进行分类，功能分为抽象功能和具体功能。抽象功能是设计者设计意图或设计目的描述。抽象功能一般具有抽象性、主观性的特点，和设计者密切相关，具有较大的随意性。而具体功能则是产品具体行为的抽象表达。因此，抽象功能和具体功能与不同的设计层次相关联。一般来说，总需求功能和其相关的子功能处于功能分解模型的上层，大多是抽象的表达了设计意图。总功能和上层次的子功能需要较低层次的子功能及其相应的行为完成。低层次的子功能称为具体功能。

区分抽象功能和具体功能的意义有以下几点。

(1) 抽象功能是较高层次上的设计抽象，其有利于在更广的范围内选择设计解。而具体功能一般局限机械设计或其他的设计领域，所设计产品的行为相关于特定的具体功能。具体功能往往和具体工作机理相联系，通过具体功能来搜索更多可能解。

(2) 有利于功能表达的明确化。

(3) 在一个设计模型中存在不同类型的功能，有利于功能的综合。

抽象功能不仅仅是处于设计的较高层次（即它给出相应的设计需求），而且处于设计抽象的较高层次（也就是说其是一个设计意图，不涉及具体的输入和输出）。

3.2.3 功能的表达

功能在概念设计过程中的重要地位是不容置疑的，目前也存在很多关于功能的定义、描述等方面的内容，但是在功能表达方面仍具有较大的模糊性和不确定性。存在模糊性和不确定性的根本原因是设计任务的广泛性和深入性，因此功能的明确表达是一件较为困难的事情。本节以机械装置的功能为研究对象，从内涵和手段两个方面研究了功能表达。

3.2.3.1 功能表达的内涵

功能的表达必须满足功能本质上的要求，即功能是输入/输出流的转换或状态转换。功能是一个陈述，用于描述流的变换。下面给出功能的数学描述。

1. 流

功能之间的运动对象称为流，用符号 w 表示， $w=(name,type)$ ，用二元组来具体描述， $name$ 表示流的名称， $type$ 表示流的类型。

流的类型一般物料、能量、信号。本文面向的是机械系统，对流做了进一步的细分。能量可细分为运动、力或力矩。对给定的设计问题，流域是一个各种可能存在的流的集合，用符号 W 表示。在输入与输出模型的背景下，流一旦开始运作就会被子功能所控制，并会处于一种新的状态。

2. 转换

转换说明了流之间变换的实现方式，用符号 t 表示。设 w_i 表示输入流， w_o 表示输出流，则转换表示为 $w_o=t(w_i)$ 。所有各种可能的转换方式的集合称为转换域，用符号 T 表示。 $\forall i, t_i \in T$ 。根据 Deng 等人的研究，对机械系统而言，转换域内容主要包括：提供 (*supply*)、储存 (*store*)、传递 (*transmitte*)、聚合 (*converge*)、分枝

(branch)、改变 (change) 等转换动作。

转换域 T 可表示为一个集合：

$$\{supply, store, transmitte, converge, branch, change, \dots\}$$

3. 功能

转换 t 为输入和输出流之间建立特定的关系。因此，功能 f 可定义为三元组： (w_i, t, w_o) ， f 主要由三个基本元素组成，两个基本元素 w 是流对象，一个基本元素 t 是变换对象。全部可能的功能集合称为功能域，用符号 F 表示。根据功能定义输入流、输出流、变换及其之间的关系，功能域可表示为流域、转换域、流域三个集合的笛卡儿积，即 $F=W\times T\times W$ 。

实际上，功能 f 中三元素满足转换关系 $w_o=t(w_i)$ ，那么三元素在类型上也存在一定的约束关系。在一个功能中，若先确定输入流 w_i 和输出流 w_o ，对功能而言则变换的类型范围缩小，有时可直接确定下来。例如，一个功能中，输入流的类型是电，输出流的类型是热，则变换通过改变的动作 (change, transfer) 实现。反过来，在功能中，给出变换后，则流的类型得到一定的约束。考虑到流和变换的这种关系，当前的设计中，功能采用了“动词+名词”的方式。动词暗示了对象的功能，名词表达了由动词所生成的物理效应、材料或能量。例如，储存物料功能，只表明了输出流是物料，隐含了输入流也是物料。又如，功能为“改变角速度大小”，没有提及输入和输出流，但是通过对象分析，输入流和输出流的类型均为转动。又如，功能为“改变旋转运动为直线运动”，则清楚地说明了输入流是旋转运动，输出流是直线运动。

对功能而言，输入流往往是已知条件，是直接从环境中获取或者是从其他已知功能的输出获取，而输出流则说明了功能将要完成的任务，指定输入流和输出流的变换则是说明流的改变是如何实现的。对功能来说，输入流和输出流隐含了所需要变换的类型。如何实现变换，需要进一步的功能细化过程。随着细化的进行，变换本身就体现了流，有时甚至不需要流表达功能。

3.2.3.2 功能的表达手段

功能常见的表达手段有自然语言、数学表达式等。功能可以使用自然语言来表达。自然语言具有柔性、易表达性，是一种广泛使用的表达方法，在设计文档、设计文献中均可见到。使用自然语言表达功能是一种定性的表达方式。功能也可用物理量的关系或数学表达式来定量地表达。

在功能建模阶段，功能可分为抽象功能和具体功能。因为抽象功能的抽象性

和主观性，只能使用自然语言来表达。对具体功能而言，其表达的内容可能是定性的，也可能是定量的。因此，具体功能根据使用场合，采用自然语言或数学表达式作为表达手段。考虑到自然语言应用的广泛性，本文主要使用自然语言作为表达功能的手段。

自然语言表达特性在设计综合过程中也有一定的有利之处。在设计过程中，功能结构具有不同的层次，从抽象功能到具体功能都需要产生。设计人员不必完全、精确地了解各层次上的功能。在这种场合下，自然语言提供了一种很好的工具。

自然语言这种表达方法也有其缺陷。首先，在功能的定义上缺乏严格性。其次，缺乏唯一性。例如，电动机的功能可以描述为“提供机械能”、“改变电能为机械能”、“提供旋转运动”等。另外，还有许多的同义词存在，如“提供（provide）”可以用供应（furnish）、产生（generate）、提供（offer）、生成（produce）、供给（supply）替代；“改变（change）”可以用 alter、convert、transfer、transform、turn 等词来替代。为了克服自然语言在表达功能时的缺陷，Pahl Beitz^[3]、Szykman^[96, 97]、Stone^[98]、Hirtz^[99]等研究人员对功能元进行详细的研究，提出了相应功能元表达方案。

本文以 Hirtz^[99]所提出的标准功能元（Functional Basis）作为表达功能的手段，功能 $f(w_i, t, w_o)$ 中的输入流 w_i 和输出流 w_o 、转换 t 均采用了功能元的表达方法，其中转换类的基本词汇见表 3.1。

表 3.1 功能元

分支(Branch)	分离(Separate)	分开(Divide)
		提取(Extract)
		去除(Remove)
	分散(Distribute)	
导向(Channel)	输入(Import)	
		输出(Export)
	转移(Transfer)	运送(Transport.)
		传输(Transmit)
	引导(Guide)	平动(Translate)
		旋转(Rotate)
		允许自由度(Allow Degree of Freedom)
连接(Connect)	耦合(Couple)	加入(Join)
		相连(Link)
	混合(Mix)	

续表

控制大小 (Control Magnitude)	开动(Actuate)	
	操纵(Regulate)	增加(Increase)
		减小(Decrease)
	改变(Change)	增量(Increment)
		减量(Decrement)
		形状(Shape)
		条件(Condition)
	停止(Stop)	防止(Prevent)
		禁止(Inhibit)
转换(Convert)	转换(Convert)	
供应(Provision)	储存(Store)	包含(Contain)
		收集(Collect)
	提供(Supply)	
信号(Signal)	感觉(Sense)	检测(Detect)
		测量(Measure)
	表示(Indicate)	痕迹(Track)
		显示(Display)
	处理(Process)	
支持(Support)	稳定(Stabilize)	
	保护(Secure)	
	定位(Position)	

3.3 功能分解模型^[90]

3.3.1 功能分解

产品概念设计的核心问题是功能问题，设计的主要目标是拟定出产品功能的最佳实现方案。确定了机械系统的总功能和约束之后，就是寻找实现该总功能的功能原理解了。往往采用系统分解的原则进行功能分解，先将总功能分解为比较容易寻求实体解答的分功能或功能单元，针对每个分功能或功能单元选用不同方案，然后

以不同的方式进行组合，形成多个方案，最终完成产品的方案设计。

实际的机械系统往往比较复杂，通常很难立即找到相应的满足总功能的功能原理方案，需要进行功能的分解，主要存在以下三方面的原因。

(1) 功能分解结果决定了设计问题解的搜索方向。功能决定概念方案，产品依存于概念方案。在设计产品之前，必须对功能要有深刻的理解，否则只能是浪费时间，设计的产品根本不能满足功能要求。

(2) 功能的细化将有助于更好地理解设计问题，大多数创新的设计方案来自于对功能需求的深刻理解。

(3) 功能分解后，功能由抽象变得更加具体，这样有利于功能的求解，可直接寻找到相应的结构。

通过功能分解不仅可以简化实现机械产品总功能的功能原理方案的构思方法，同时有利于设计人员摆脱经验设计和类比设计的束缚，开拓创造性思维。在概念设计的开始阶段，尽可能多地分解功能；如果需要的话，可以在后续设计过程中缩减。功能经过功能分解后，得到子功能的集合，子功能之间的关联可通过功能结构来描述。把子功能有目的地、协调地组合成功能，就形成了功能结构，在通常情况下，满足目的功能和约束的功能结构不止一个，而是若干个。功能结构确定了子功能之间的相互作用，也就是子功能通过输入和输出关系把它们连接起来满足所设计产品的总功能。

依据上述讨论，当确定功能集和功能结构后，所组成的空间称为功能空间。

3.3.2 功能分解操作的实现

分解是解决复杂设计问题的有利工具，分解的优点是降低设计问题的复杂性。功能分解操作是一个功能分解成若干个子功能的过程，子功能通过一定的组合关系实现所要求的功能。通过功能分解就建立了功能与子功能之间特定的分解关系。功能分解是一个自上而下的发散过程，上层功能与下层子功能可能存在的关系有一对一映射关系、一对多的映射关系。以图 3.1 所示的功能分解图为例说明，图中功能 (2,1,1) 与功能 (3,1,1)、功能 (3,2,1)、功能 (3,3,1) 是一对多的映射关系，功能 (2,2,1) 和功能 (3,4,2) 是一对一的映射关系。图 3.1 说明功能分解图是一个树形结构图。

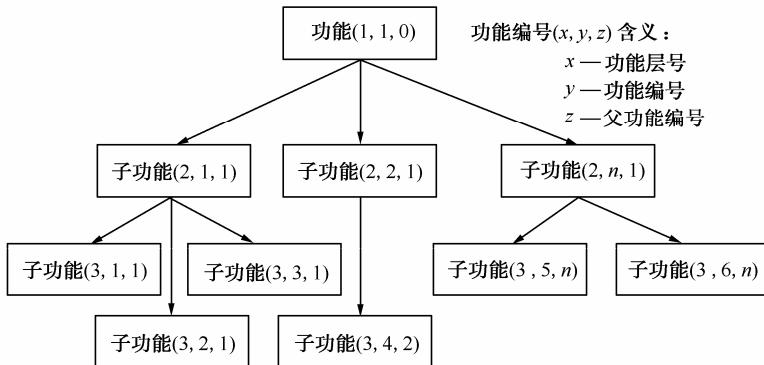


图 3.1 功能分解图示例

机械装置功能分解的基本思路如下。

(1) 通常是按照解决问题的因果关系或手段目的关系来分析子功能。例如，对于平口虎钳，为了夹紧工件，必须施加压力，“夹紧工件”是目的，“施加压力”是手段，可沿着这个思路逐步分解。

(2) 按照生产的空间顺序或时间顺序来分析，如汽水自动灌装机的分功能包括：瓶、盖、汽水的储存和运输，灌装，加盖，封口，贴商标，成品运输。子功能之间是并列的平行型，不分主次，但是有时序关系。

(3) 按照主辅功能来添加子功能。任何一台机器，从系统性角度来看，除具有实现总功能的主要功能外，同时还存在很多低层次的、起支持和保证作用的功能，称为辅助功能。例如，为保证车削质量，适应不同工件要求，车床还应具有变速功能（主轴变速，进给变速）、润滑和车削时的冷却功能。

(4) 按照功能具体化的方式添加子功能。例如，设计一个药片成型装置，总的需求功能是获得圆形药片，这是一个抽象的目的功能，其可通过细化的手段获得低层次上的具体功能，如“通过上下挤压粉末形成药片”。

对上述功能分解的过程和思路进行分析，可以得出以下结论。

(1) 功能经过初步分解后所确定的若干个子功能是相对独立的子任务，子功能之间不存在耦合性或者存在相对较弱的耦合性。随着功能分解的进行，功能层次的降低，设计功能之间的耦合性逐渐增强^[100]。

(2) 功能分解过程是以相关领域的背景知识作为基础进行知识搜索与推理的过程。

根据结论(2)，如图 3.2 所示，功能分解可以看成是一个反复搜索功能分解相关知识进行匹配的过程。通过已知条件搜索知识的过程与数学上求给定元素的闭包

很相似, 如图 3.3 所示。因此, 本文使用闭包空间理论来作为描述功能分解知识搜索过程的数学工具^[101]。

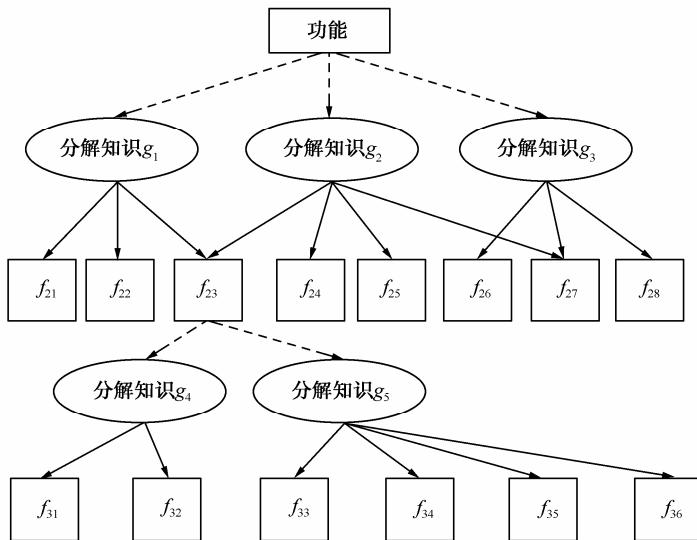


图 3.2 功能分解知识推理

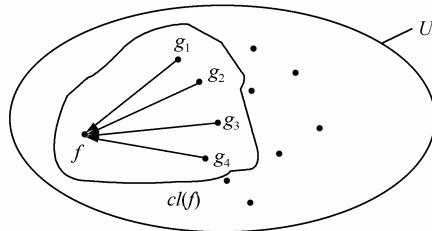


图 3.3 元素 f 的闭包

1. 闭包空间的相关理论^[102]

为研究闭包空间理论, 先给出相关概念的定义。

(1) 集值映射。设 X 、 Y 是两个集合, $T: X \rightarrow Y$ 是一种对应法则, 如果对每一个 $x \in X$, 通过 T 有 Y 中的一个子集 $T(x)$ 与之对应, 则称 T 是 X 到 Y 的一个集值映射, $T(x)$ 称为 T 在 x 处的像或值。

(2) 闭包运算。设 U 为论域, 若集值映射 $cl: 2^U \rightarrow 2^U$ 满足如下的三个条件:

$$cl(\Phi) = \Phi$$

$$\forall X \subseteq U, \quad X \subseteq cl(X)$$

$$\forall X, Y \subseteq U, \quad cl(X \cup Y) = cl(X) \cup cl(Y)$$

则称 cl 为 U 上的闭包运算。

(3) 闭包空间。设 U 为论域, $cl(X)$ 为子集 X 的 cl 闭包, 称二元组 (U, cl) 为闭包空间。 $\forall x \in U$, 称 x 为闭包空间 (U, cl) 中的点, $cl(x)$ 是点 x 的闭包。因此

$$cl(X) = \bigcup_{x \in X} cl(x)$$

(4) 其他定义。设 (U, cl) 为闭包空间, 设 $X \in U$, 那么

- 集合 $cl(X^c)^c$ 为子集 X 的内部, 记为 $intct(X)$, 简称为 $int(X)$, 这里 $cl(X^c)^c$ 表示 X 补集闭包的补集。
- 若 $x \in X$, 使得 $x \in cl(X - \{x\})$, 则称 x 是集合 X 的聚集点。集合 X 的所有聚集点的集合用 X' 表示, 称为 X 的导集。
- 若 $\exists Y \in U$, 使得 $X \subseteq int(Y)$, 则 Y 是 X 的邻域, 表示为 $N(X)$ 。
- 若 $X = cl(X)$, 则称 X 是闭集(Closed Sets)。
- 若 $X = int(X)$, 则称 X 是开集(Open Sets)。

2. 闭包在功能分解中应用

下面对闭包空间理论应用到功能分解加以解释, 如图 3.3 所示, 设 f 表示功能, cl 表示闭包运算, 则 $cl(f)$ 是功能 f 的闭包。若 $g_i \in (cl_U(f) - f)$, 则 g_i 表示功能 f 的一个可行的功能分解规则, 通过该规则功能 f 可分解后 n_{gi} 个子功能, 这些子功能通过逻辑推理来实现功能 f 。设 $x \in cl(f), x \neq f$, 那么可以说功能分解知识 x 是“接近”功能 f 的, $cl(f)$ 是功能 f 的邻域。因此, 给定功能 f 的情况下, 可能存在不同的分解知识和规则, 也就存在多种功能分解方案, 其中任意一个功能分解方案都能完成功能 f 。

根据闭包定义, 设 $x, y \in cl(F)$, 分析功能集 F 闭包的 $cl(F)$ 组成结构, 发现闭包由三类元素所组成:

- ① $x \notin F$;
- ② $x, y \in F$, 功能元素 x 和 y 之间存在关系, 即 $x \rightarrow y$;
- ③ $x, y \in F$, 功能元素 x 和 y 之间不存在关系, 即 $x \not\rightarrow y$ 。

下面给出基于闭包运算获得功能分解结果的一般过程。

步 1 确定输入功能集 F_1 , 令 $F = F_1$;

步 2 求功能集的闭包 $cl(F)$;

步3 依次对 $cl(F)$ 中的非功能元素, 基于规则采用反向推理的方法, 获得功能分解集, 添加到 $Result$ 集中;

步4 if $cl(F) = F$, then goto 步5, else goto 步6;

步5 输出功能分解集 $Result$, 结束功能分解;

步6 令 $F = Result$, goto 步2。

3.3.3 功能分解结果——功能结构的表达

功能结构采用了连接关系矩阵表达功能之间的输入和输出之间的关系。设功能集 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, 功能集 F 中功能间的连接关系, 可用连接关系矩阵 R^F 表达, $R^F = [r_{ij}^F]$, 其中 i 和 j 分别表示行和列, 即功能在功能集中的编号, 在关系矩阵中, 如果 $r_{ij}^F = 1$, 表示功能 j 和 i 之间具有连接关系; $r_{ij}^F = -1$, 表示功能 i 和 j 之间具有连接关系; $r_{ij}^F = 0$, 表示分功能 j 和 i 没有连接关系。下面给出功能之间连接关系的有关定义。

定义1 输入和输出连接关系: 如果一个功能 f_1 输出流是另一个功能 f_2 的输入流, 则两个功能之间具有输入和输出的关系, f_1 称为前导功能, f_2 称为后置功能。其数学描述: 设 $f_1 = (w_i, t, w_o)_1$, $f_2 = (w_i, t, w_o)_2$, 如果 $f_1 \cdot w_o = f_2 \cdot w_i$, 则 $r(f_1, f_2) = relation$ 。

定义2 外界输入关系: 若功能集中的功能不存在前导功能, 则称为由外界环境提供输入的功能, 其数学描述: 设 $f_i \in F$, $\forall f_j \in F$ 且 $i \neq j \not\Rightarrow r(f_i, f_j) = relation$, 则 $\forall d_k \in D$, 满足 $f_i \cdot w_o = d_k$ 。

定义3 向外界输出关系: 若功能集中的功能不存在后置功能, 则称为向外界环境带来输出的功能, 其数学描述: 设 $f_i \in F$, $\forall f_j \in F$ 且 $i \neq j \not\Rightarrow r(f_j, f_i) = relation$, 则 $\forall d_k \in D$, 满足 $f_i \cdot w_o = d_k$ 。

如图 3.4 所示, 功能集 F 的功能结构矩阵为

$$\begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 \\ f_1 & \left[\begin{matrix} 0 & 0 & -1 \end{matrix} \right] \\ f_2 & \left[\begin{matrix} 0 & 0 & -1 \end{matrix} \right] \\ f_3 & \left[\begin{matrix} 1 & 1 & 0 \end{matrix} \right] \end{matrix}$$

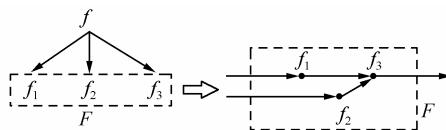


图 3.4 功能分解及功能结构

3.3.4 功能分解模型

3.3.4.1 功能分解模型的形式化描述

功能分解过程中,产生了若干功能层,功能层是一个功能空间(Function Space)或多个具有或关系的功能空间组成的空间集合,可用符号 FSS 来表示。图 3.5 是图 3.2 功能分解过程的功能空间表达。

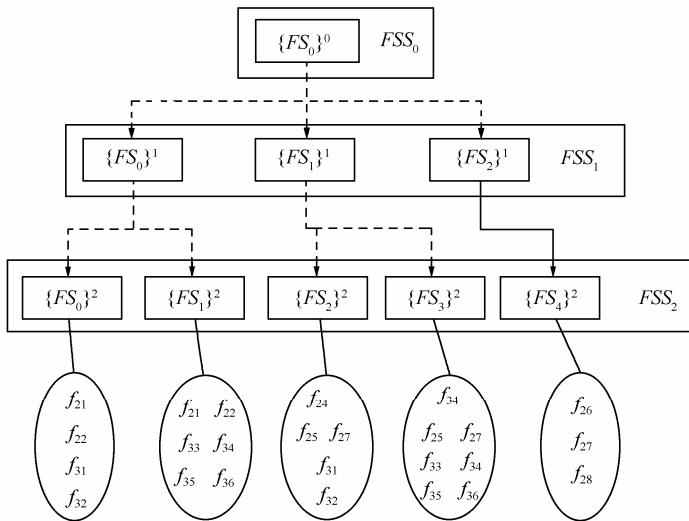


图 3.5 功能分解的功能空间表达

因此,任意功能层 k 的数学描述为

$$\begin{aligned} FSS &= \{FS_0, FS_1, \dots, FS_j, FS_m\} \\ &= \{(F_0, Attr_0, R_0), (F_1, Attr_1, R_1), \dots, (F_j, Attr_j, R_j), \dots, (F_m, Attr_m, R_m)\}^k \end{aligned}$$

其中, k 表示功能层的编号; m 表示该功能层中功能空间的数目,即任意一个功能空间都可完成上一级的功能空间的某个具体功能; $\{(F_j, Attr_j, R_j)\}^k$ 表示位于功能层 k 层的一个功能空间 FS_j ; F_j^k 表示功能空间 FS_j 内全部功能的集合; $Attr_j^k$ 表示 FS_j 内全部功能的属性集合, $Attr_j^k = \{Attr.P_{jn}^k, Attr.R_{jn}^k\}$, $Attr.P_{jn}^k$ 表示功能集 F_j^k 中的编号是 (k, j, n) 的功能的父功能的编号, $Attr.R_{jn}^k$ 表示功能集 F_j^k 中的编号是 (k, j, n) 的功能的子功能空间集, R_j^k 是功能集 F_j^k 中功能之间的连接关系矩阵。

功能分解是一个功能分解成为若干个子功能,子功能通过一定的连接关系来实

现总功能。一个功能 f 经过分解后：

① 如果只有一种功能分解的情形，则所有的子功能构成了一个功能空间 FS ，即 $f \rightarrow FS$ ；

② 如果存在多种功能分解的情形，则所有子功能构成了若干子功能空间 FS_1, FS_2, FS_3, \dots ，构成集合 FSS ，即 $f \rightarrow FSS = FS_1 \vee FS_2 \vee FS_3 \vee \dots \vee FS_n$ 。

由于在功能分解过程中所给出的是功能之间的与或关系，因此，要通过功能间的与或关系来生成全部功能空间的或关系。

3.3.4.2 功能分解的与或图的表达

1. 与或图基本理论

与或树中有与节点和或节点两种不同的节点。若节点是由与运算连接的，它们在图中就被称为与节点，如图 3.6 (b) 中的 Q 和 R ，并用一条弧线将相关的边连接起来。这种弧线所相关的边被称为超弧。与或图中超弧表示 Q 和 R 都为真时， P 才为真，即 $(Q \wedge R) \Rightarrow P$ 。若节点是由或运算连接的，它们在图中就被称为或节点，或节点与父节点之间的边就不用弧线，如图 3.6 (a) 所示，表示只要 Q 和 R 任意一个为真时， P 就为真，即 $(Q \vee R) \Rightarrow P$ 。

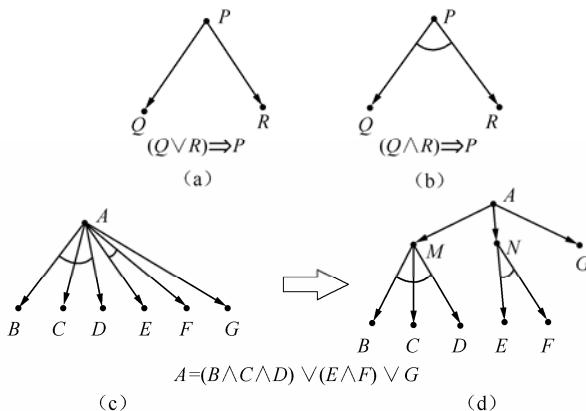


图 3.6 与或图

与或图是一种普遍图，因图中存在超弧所以称为超图。图中超弧所相关的边数 K 称为该超弧的度。一个与或图可能有如图 3.6 (c) 所示的结构。当引入附加节点后 (M, N, G)，图 3.6 (c) 可转换如图 3.6 (d) 所示，其与或关系保持不变，并且使与或关系变得清晰。

2. 功能分解采用与或图表达

功能分解过程是由两部分组成：一是将复杂的大问题分解为一组简单的小问题，将总问题分解为若干子问题，若所有子问题都解决了，则总问题也解决了，这是与的逻辑关系，同样，子问题又可分为子问题的子问题；二是将较抽象的问题变换为较为具体且容易实现的等价或等效的问题，若一个难题可以等价变换为几个相对具体的问题，则任何一个具体问题解决了，也就解决了原有的抽象问题，这是或的逻辑关系，而这些具体问题还有可能进一步再等价变换为若干更具体的问题。因此，功能分解过程中大量存在着与或关系，可以用与或树来表达。

功能分解与或树可以表达交互式的功能分解的过程，图中的节点的类型：功能节点，使用符号 f 表示；知识节点，使用符号 g 表示，该节点属于辅助节点，每个节点属于与关系或者是或关系中的一种。如图 3.7 所示，功能 f_0 是或节点，分解成为知识节点 g_1 和 g_2 ， g_1 是与节点，因此功能 f_0 基于 g_1 可以分解成 f_1 和 f_2 两个功能，功能 f_1 映射为节点 g_3 ，节点 g_3 是或节点，功能 f_1 依据 g_3 又可进一步划分为功能 f_{31} 和 f_{32} 。

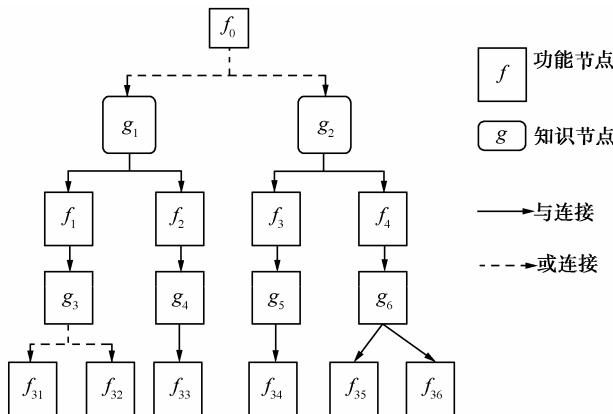


图 3.7 功能分解与或树

3. 功能分解与或树的搜索

功能分解的结果通过对功能分解与或树的搜索来实现。考虑到功能分解的层数和每层的元素的数目较少，可采用下面搜索算法实现，算法如下。

输入：功能分解与或树。

输出：获得功能分解结果集。

- (1) 把起始节点构造成为一个节点组，放入到节点组列表中。
- (2) 从节点组列表中依次读取节点组。
- (3) 从节点组 m 依次读取节点 n ，如果节点 n 是或节点则转到 (4)；如果节点 n 是与节点则转到 (5)。
- (4) 设节点 n 有 k 个子节点，判断节点组 m 中是否存在其他节点，若不存在，则节点组列表删除节点组 m ，将该节点 n 的每一个子节点作为一个节点组，即构造 k 个不同的节点组加入到节点组列表中；若节点组 m 中存在非 n 的节点，则该节点 n 的每一个子节点和节点组的其他节点组成 k 个不同的节点组加入到节点组列表中，并且将节点组 m 从节点组列表中删除。转到 (6)。
- (5) 将节点 n 的子节点替换节点 n ，对节点组中节点进行更新。
- (6) 判断节点组中的节点元素是否为叶节点，若节点组中全部是叶节点，则转到 (2)，否则，转到 (3)。
- (7) 判断节点组列表中是否处理结束，若没有结束，则转到 (2)；否则输出节点组列表作为功能分解的结果。

采用上面的搜索算法，具体说明功能解的搜索过程，见表 3.2。

表 3.2 功能解搜索

序号	节点组列表	节点组	叶节点判断	节点	子节点
1	$\{f_0\}$	$\{f_0\}$	否	f_0	$p_1 \vee p_2$
2	$\{p_1\}, \{p_2\}$	$\{p_1\}$	否	p_1	$f_1 \wedge f_2$
3	$\{f_1 \wedge f_2\}, \{p_2\}$	$\{f_1 \wedge f_2\}$	否	f_1	p_3
4	$\{p_3 \wedge f_2\}, \{p_2\}$	$\{p_3 \wedge f_2\}$	否	p_3	$f_7 \vee f_8$
5	$\{f_7 \wedge f_2\}, \{f_8 \wedge f_2\}, \{p_2\}$	$\{f_7 \wedge f_2\}$	是		
6	$\{f_7 \wedge f_2\}, \{f_8 \wedge f_2\}, \{p_2\}$	$f_8 \wedge f_2$	是		
7	$\{f_7 \wedge f_2\}, \{f_8 \wedge f_2\}, \{p_2\}$	$\{p_2\}$	否	p_2	$f_3 \wedge f_4$
8	$\{f_7 \wedge f_2\}, \{f_8 \wedge f_2\}, \{f_3 \wedge f_4\}$	$f_3 \wedge f_4$	否	f_4	$f_5 \wedge f_6$
9	$\{f_7 \wedge f_2\}, \{f_8 \wedge f_2\}, \{f_3 \wedge f_5 \wedge f_6\}$	$\{f_3 \wedge f_5 \wedge f_6\}$	是		

功能最终分解的结果也可以用与或表达式来描述，总功能 f_0 可以分解为 $(f_7 \wedge f_2) \vee (f_8 \wedge f_2) \vee (f_3 \wedge f_5 \wedge f_6)$

3.3.4.3 功能分解关系的数学描述

设 f 是待分解的功能， f 到功能空间之间的功能分解变换可以看成基于映射规则

p 的变换，映射规则是非常重要的，对是否成功分解有决定性的作用。映射规则 p 属于映射规则集 $P(p \in P)$ ， P 通过闭包运算修正所获得的解，即 $P = \{x | x \in cl(f)\}$ 。

1. 功能保持

在功能分解模型中，相邻两个功能层各自有一个功能，如果它们之间存在着映射关系，但是功能没有发生变化，称为功能的保持。其数学描述如下。

设 $F_{i,j,k}$ 为功能层 i 功能空间 j 上的第 k 个功能，即 $F_{i,j,k} \in FS_{i,j}$ ，同样 $F_{(i+1),m,n}$ 为相邻功能层 $i+1$ 功能空间 m 上的第 n 功能，即 $F_{i+1,m,n} \in FS_{i+1,m}$ ，若两者存在映射关系 $p(F_{i,j,k}, F_{(i+1),m,n}) = Preservation$ ，则 $F_{i,j,k} = F_{(i+1),m,n}$ 。

2. 功能具体化

在功能分解模型中，相邻两个功能层各有一个功能，如果上层功能和下层功能存在一一映射关系，上层功能较为抽象，下层功能较为具体，此过程称为功能具体化。其数学描述如下。

设 $F_{i,j,k}$ 为功能层 i 功能空间 j 上的第 k 个功能，即 $F_{i,j,k} \in FS_{i,j}$ ，同样 $F_{(i+1),m,n}$ 为相邻功能层 $i+1$ 功能空间 m 上的第 n 功能，即 $F_{i+1,m,n} \in FS_{i+1,m}$ ，若两者存在映射关系 $p(F_{i,j,k}, F_{(i+1),m,n}) = Embody$ ，则 $F_{(i+1),m,n}$ 称为 $F_{i,j,k}$ 的功能具体化。

3. 功能的分解

在功能分解模型中，当功能映射成为功能空间时，功能分解成为若干个子功能。其数学描述如下。

设 $F_{i,j,k}$ 为功能层 i 功能空间 j 上的第 k 个功能，即 $F_{i,j,k} \in FS_{i,j}$ ，同样 $F_{(i+1),m,n}$ ($n=1,2,\dots,w$) 为相邻功能层 $i+1$ 上的功能空间 m 中的若干个功能，即 $F_{(i+1),m,n} \in FS_{(i+1),m}$ ，若两者存在映射关系 $p(F_{i,j,k}, F_{(i+1),m,q}) = Descomposition$ ，则 $[F_{(i+1),m,q}] = D(F_{i,j,k})$ 。

3.4 功能分解模型实例

功能分解实例：零件成形装置的设计。

(1) 设计任务： $Q=\{\text{设计一个零件成型装置}\}$ 。

(2) 通过对设计需求分析，可获得总功能为

$$f = \{w_i, t, w_o\} = \{\text{金属材料, 改变, 成型零件}\}$$

功能第 0 层的功能空间集为

$$FSS_0 = \{FS_{0,0}\} = \{\{f_{0,0,0}\}, Attr_{0,0}, R\}$$

(3) 功能层 1。根据功能分解知识库中的知识，采用闭包理论，求功能 f 的闭包 $cl(f)$ ，功能 f 进一步得到细化，如图 3.8 所示。 $cl(f) = \{f, f_1, f_2\}$ ，其中 f_1 =改变 \wedge 压力方式， f_2 =改变 \wedge 切削方式。

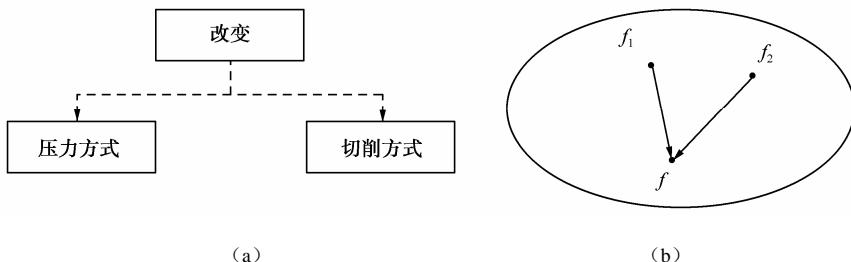


图 3.8 功能分解

功能层第 1 层的功能空间集为

$$\begin{aligned} FSS_1 &= \{FS_{1,0}, FS_{1,1}\} \\ &= \{\{\{f_{1,0,0}\}, Attr_{1,0}, Null\}, \{\{f_{1,1,0}\}, Attr_{1,1}, Null\}\} \end{aligned}$$

其中：

$f_{1,0,0} = \{\text{金属材料, 改变} \wedge \text{压力方式} \wedge \text{常温, 成形零件}\}$ ；

$f_{1,0,0} = \{\text{金属材料, 改变} \wedge \text{切削方式, 成形零件}\}$ ；

$Attr_{1,0} = \{Attr(f_{1,0,0})\}$ ；

$Attr(f_{1,0,0}) = \{(0,0,0), Null\}$ ；

$Attr_{1,1} = \{Attr(f_{1,1,0})\}$ ， $Attr(f_{1,1,0}) = \{(0,0,0), Null\}$ 。

更新功能第 0 层上功能空间内功能的属性，即

$$Attr_{0,0} = \{Attr(f_{0,0,0})\} = \{\{Null, \{(1,0) \vee (1,1)\}\}\}$$

(4) 功能层 2。功能 $f_{1,0,0}$ 的分解：功能 $f_{1,0,0}$ 的闭包可表达为 $cl(f_{1,0,0}) = \{f_{1,0,0}, f_{2,0,0}, f_{2,1,0}\}$ ，功能 $f_{1,0,0}$ 的闭包是包含自身的，所以，功能 $f_{1,0,0}$ 可以分解为功能 $f_{2,0,0}$ 、 $f_{2,1,0}$ ，其中：

$f_{2,0,0} = \{\text{金属材料, 改弯} \wedge \text{压力方式} \wedge \text{常温, 成型零件}\}$

$f_{2,1,0} = \{\text{金属材料, 改弯} \wedge \text{压力方式} \wedge \text{加热, 成型零件}\}$

功能 $f_{1,0,0}$ 分解与或图如图 3.9 所示。

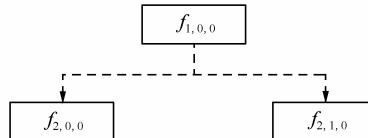


图 3.9 功能分解与或图

功能 $f_{1,1,0}$ 的分解。功能 $f_{1,1,0}$ 的闭包可表达为 $cl(f_{1,1,0}) = \{f_{1,1,0}, f_{2,2,0}, f_{2,3,0}, f_{2,4,0}\}$ 。同理功能 $f_{1,1,0}$ 可以分解为 $f_{2,2,0}, f_{2,3,0}, f_{2,4,0}$ 。其中：

- $f_{2,2,0} = \{\text{金属材料, 改变 } \cup \text{切削 } \cup \text{车削, 成型零件}\}$
- $f_{2,3,0} = \{\text{金属材料, 改变 } \cup \text{切削 } \cup \text{铣削, 成型零件}\}$
- $f_{2,4,0} = \{\text{金属材料, 改变 } \cup \text{切削 } \cup \text{刨削, 成型零件}\}$

根据上述功能分解结果，功能空间集为

$$\begin{aligned}
 FSS_2 &= \{FS_{2,0}, FS_{2,1}, FS_{2,2}, FS_{2,3}\} \\
 &= \{\{\{f_{2,0,0}\}, Attr_{2,0}, Null\}, \\
 &\quad \{\{f_{2,1,0}\}, Attr_{2,1}, Null\}, \\
 &\quad \{\{f_{2,2,0}\}, Attr_{2,2}, Null\}, \\
 &\quad \{\{f_{2,3,0}\}, Attr_{2,3}, Null\}, \\
 &\quad \{\{f_{2,4,0}\}, Attr_{2,4}, Null\} \\
 &\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Attr_{2,0} &= \{Attr(f_{2,0,0})\}, \quad Attr(f_{2,0,0}) = \{(1, 0, 0), Null\} \\
 Attr_{2,1} &= \{Attr(f_{2,1,0})\}, \quad Attr(f_{2,1,0}) = \{(1, 0, 0), Null\} \\
 Attr_{2,2} &= \{Attr(f_{2,2,0})\}, \quad Attr(f_{2,2,0}) = \{(1, 1, 0), Null\} \\
 Attr_{2,3} &= \{Attr(f_{2,3,0})\}, \quad Attr(f_{2,3,0}) = \{(1, 1, 0), Null\} \\
 Attr_{2,4} &= \{Attr(f_{2,4,0})\}, \quad Attr(f_{2,4,0}) = \{(1, 1, 0), Null\}
 \end{aligned}$$

同时，更新父功能的属性值为

$$\begin{aligned}
 Attr(f_{1,0,0}) &= \{(0, 0, 0), \{(2, 0) \vee (2, 1)\}\} \\
 Attr(f_{1,1,0}) &= \{(0, 0, 0), \{(2, 2) \vee (2, 3) \vee (2, 4)\}\}
 \end{aligned}$$

(5) 功能层 3。为了简化起见，下面只研究功能 $f_{2,0,0}$ 的进一步分解。

功能 $f_{2,0,0}$ 的闭包可表达为 $cl(f_{2,0,0}) = \{f_{2,0,0}, f_{3,0,0}, f_{3,1,0}\}$ ，功能 $f_{2,0,0}$ 的闭包是包含自身的，所以功能 $f_{2,0,0}$ 可以分解为功能 $f_{3,0,0}$ 、 $f_{3,1,0}$ （图 3.10）。

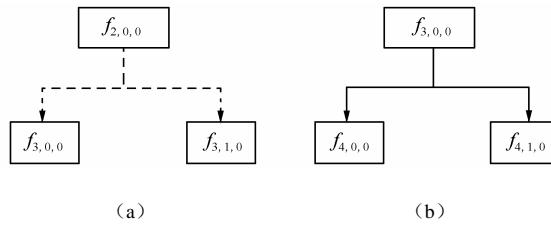


图 3.10 功能分解

其中：

$$f_{3,0,0} = \{\text{金属材料, 改变 } \dot{U} \text{ 压力 } \dot{U} \text{ 常温 } \dot{U} \text{ 机械式, 成型零件}\}$$

$$f_{3,1,0} = \{\text{金属材料, 改变 } \dot{U} \text{ 压力 } \dot{U} \text{ 常温 } \dot{U} \text{ 液压式, 成型零件}\}$$

因此，功能层 3 的功能空间集为

$$\begin{aligned} FSS_3 &= \{FS_{3,0}, FS_{3,1}, \dots\} \\ &= \{\{\{f_{3,0,0}\}, Attr_{3,0}, Null\}, \{\{f_{3,1,0}\}, Attr_{3,1}, Null\}\} \end{aligned}$$

$$Attr_{3,0} = \{Attr(f_{3,0,0})\} = \{\{(2,0,0), Null\}\}$$

$$Attr_{3,1} = \{Attr(f_{3,1,0})\} = \{\{(2,0,0), Null\}\}$$

可更新父功能 $f_{2,0,0}$ 的属性为

$$Attr(f_{2,0,0}) = \{(1,0,0), \{(3,0) \vee (3,1)\}\}$$

(6) 功能层 4。为了简化起见，下面只研究功能 $f_{3,0,0}$ 的进一步分解。

功能 $f_{3,0,0}$ 的闭包可表达为 $cl(f_{3,0,0}) = \{f_{3,0,0}, f_{4,0,0}, f_{4,0,1}\}$ ，因此，功能 $f_{3,0,0}$ 可以分解为功能 $f_{4,0,0}$ 、 $f_{4,0,1}$ ， $f_{4,0,1}$ 为辅助功能。其中：

$$f_{4,0,0} = \{\text{金属材料, 改变 } \dot{U} \text{ 压力 } \dot{U} \text{ 常温 } \dot{U} \text{ 机械式 } \dot{U} \text{ 动能大, 成型零件}\}$$

$$f_{4,1,0} = \{\text{成型零件 (在模具内), 改变, 成型零件 (在模具外)}\}$$

因此，功能层 4 的功能空间集为

$$\begin{aligned} FSS_4 &= \{FS_{4,0}, \dots\} \\ &= \{\{\{f_{4,0,0}, f_{4,0,1}\}, Attr_{4,0}, Null\}\} \end{aligned}$$

$$Attr_{4,0} = \{Attr(f_{4,0,0}), Attr(f_{4,1,0})\} = \{\{(3,0,0), Null\}, \{(3,0,0), Null\}\}$$

可更新父功能 $f_{3,0,0}$ 的属性为

$$Attr(f_{3,0,0}) = \{(2,0,0), \{(4,0)\}\}$$

综上所述，功能分解流程可用图 3.11 进行表示。

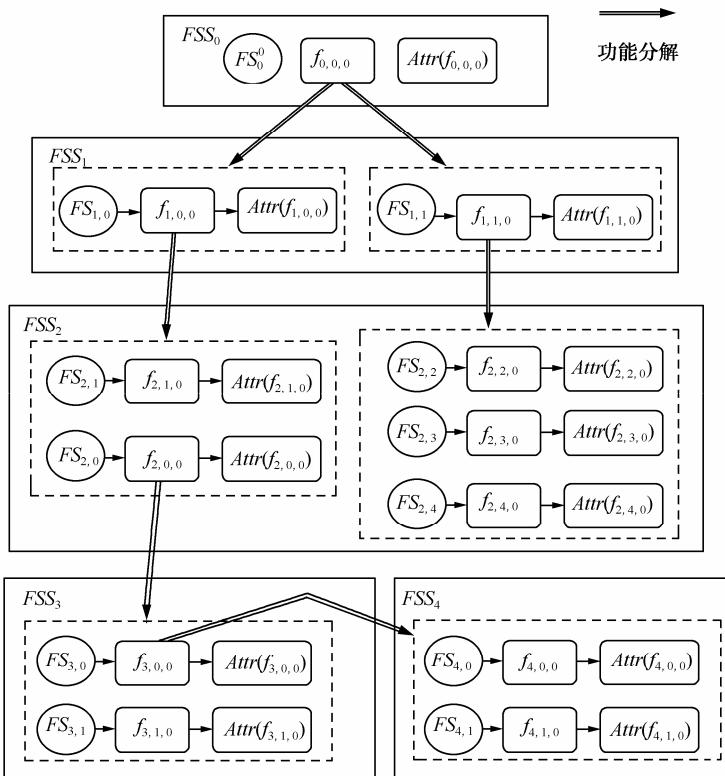


图 3.11 功能分解流程

本章小结

为了建立功能分解模型，本章首先讨论了功能建模相关的概念、分类、表达，随后介绍了采用功能分析法实现功能分解的一般过程。功能分解主要包含两项内容：功能分解操作，功能结构的表达。其中功能分解操作采用了闭包数学理论来描述。在相关的研究基础上，提出了功能分解模型的形式化描述方法，对功能分解模型中的各种关系(与或关系、分解映射关系、功能结构中功能间的关系)作了详细的分析，并给出相应的数学表达方法。最后分析一个具体的实例。

第4章 基于工作机理的行为建模

4.1 引言

当人们最初设计一种产品时，对于其中某一功能的求解首先考虑的是应该通过怎样的行为动作才能够实现该功能，然后再去寻求能够完成这种行为的各种基本结构。由于设计资源的积累，当实现某种行为的基本结构比较成熟时，人们就跨越了行为阶段，而将功能与结构直接对应起来。但是，这样做不利于产品的创新。在功能域和载体域之间加入行为域作为二者的转换桥梁，不仅使得产品的设计过程更加符合人们的思维习惯，而且拓展了设计空间，提高了产品创新的可能性。产品概念设计大多采用类比或经验设计方法进行，基本上是在原来产品基础上的改型或改进。

行为的重要性是不言而喻的，功能到行为映射是一个抽象到具体的过程，直接映射比较难于实现，因此，本章提出了基于工作机理的行为求解模型，即通过工作机理把功能和行为联系起来。工作机理所对应的是一组行为，即行为空间，行为空间有效地表达了行为之间的关系，也为行为之间的运动规律的协调奠定了基础。

4.2 行为

4.2.1 行为的概念

产品是由一些具有特定功能并相互作用的元件所组成的、用来实现某一特定目标的技术系统。在工作工程中，物理元件表现出不同的行为，行为是描述实现某一功能的具体的实现途径、方法、手段，也就是说行为是功能的具体化。功能与行为是互相联系的，功能是抽象，行为是具体，两者结合起来我们就可非常明确整个事件，即我们要做什么，采用什么手段。行为在概念设计模型中具有非常重要的作用，功能和结构通过行为连接起来，增强了功能到结构映射的可操作性。若干个行为组成了行为集，具有一定行为关系的行为所构成的空间称为行为空间。

4.2.2 机械系统的行为

对机械系统而言，行为是指运动行为，即通常所说的“工艺动作”。在机械系统设计过程中，功能和行为联系紧密，在进行功能分析时，一般同时考虑行为或者工艺动作，故 Umeda^[31]认为功能和行为应同时考虑。功能分解操作完成之后，每个功能元对应于一个或一组工艺动作，同时功能元之间存在功能关系，通过功能和行为之间的映射可得到包含行为关系的行为集。

机械系统可分为传动系统和执行系统。传动系统的主要目的是为了实现速度或力的变换，或实现特定的运动规律的要求。执行系统是机械系统的输出部分，其主要功能是改变或保持物料的状态，实现预期工作任务。在此，状态主要是指物料的物理学特性，如物料的运动学特性、动力学特性及物料的分离、合并、形状的改变。执行系统由执行构件和与之相连的执行机构组成，直接完成机械系统的预期功能。带动执行构件进行工作并使之获得工作力或力矩的机构称为执行机构。执行机构的主要作用是给执行构件产生工作力同时带动执行构件实现给定的运动规律或特定的运动轨迹。

1. 执行系统的运动行为

机械系统都有一定的工艺功能，其功能是通过与工作对象相关的执行构件来表现出来的，如铣床的铣刀、缝纫机的机针、冲床的冲头等。执行构件直接接触并携带工作对象完成一定的工作（如夹持、搬运、转位等），或者是在工作对象上完成一定的工艺动作（如锻压、洗涤、喷涂）。

执行构件通过完成一系列的工艺动作，来实现目的功能，执行构件所完成的工艺动作称为执行构件的运动行为。现代机器系统虽然增加了很多信息和控制的模块，但是主功能仍然是完成特定的工艺动作要求，执行系统是完成主功能的主体。执行系统的设计目标是实现既定的工艺动作（运动行为），其行为就表现为一系列的动作过程。

2. 传动系统的运动行为

执行系统要实现预定的工艺动作，必须要有一定运动行为的输入，这些运动行为可能直接来自于动力源。例如，发电机、直流电动机、伺服电动机、液压缸等，但是更多的是来自于传动系统所输出的运动行为，即机构传动系统实现了运动行为的转换，这部分内容不是本文重点研究的，但是也和下面所讨论的机器的工作机理密切相关的。

因此，机械系统中行为的表达主要是运动行为的表达。在“功能-行为-结构”(FBS)设计模型中，运动行为知识的表达非常重要。行为一方面能够从功能层中推出，同时也起着映射到结构层的作用。如果行为的表达过粗，虽然可以产生意想不到的解，但是同时也可能产生大量毫无意义的解；反之，则无法产生有创造性的解。

4.3 执行系统运动行为及行为空间表达

4.3.1 单个运动行为的表达

执行机构行为的知识表达是必不可少的。无论是 Qian 或是 Umeda 的过程模型，“行为”是两者的共同点。但不同的应用领域，行为的含义和表达方法应该有所不同^[29, 31, 36]。对于实现工艺动作为主的现代机械，行为应该指其运动系统完成的一个或一组工艺动作，是功能和结构之间的过渡，可以在相应知识库的支持下找到可行的机构方案解，达到计算机辅助机构方案生成的目的。

单个行为的数学描述为 $b = \{ID, Object, Attr\}$ ，其中 ID 表示行为代号， $Object$ 表示行为执行载体， $Attr$ 表示行为属性。

运动行为（工艺动作）或其组合的实现是机械系统的功能，因此，运动行为的核心是属性描述。运动行为是执行构件的输出运动，设计实践表明，工艺动作与运动学和动力学参数密不可分的，同样的工艺动作不同的运动特征参数可实现不同的功能。例如，一个向下的直线运动，不同的运动特征参数可产生冲、压、推、拉等功能。所以，表达行为属性时，要考虑执行构件的运动学、动力学方面的相关属性。

运动行为属性描述的主要内容是运动类型、运动轴线、运动方向、运动连续性、运动速率变化、运动速率大小、行程、作用力等。运动行为属性描述可分为三类。

1. 运动类型属性及相关属性

运动行为的类型可以分为移动（直线运动）、转动（回转运动）、螺旋运动三类。所谓复合运动则是由两种以上的简单运动组合而成的，例如螺旋运动、摆线运动等都是由直线运动和回转运动或直线运动和摆动运动所组成的。与运动类型所密切相关的运动属性是运动轴线、运动的方向、运动连续性。运动轴线是属于空间坐标系中 X 、 Y 、 Z 轴或空间任意轴，直线运动直接根据运动方向确定轴线位置，转动和螺旋运动可以根据其自身的轴线来确定轴向位置。运动方向属性可分为单向正、单向

负、往复、任意四种类型，单向正指沿着所确定轴线的正方向运动，单向负指沿着所确定轴线的负方向运动，往复是指沿着所确定轴线的正、负两个方向来回运动，任意指该行为对运动方向不做具体要求。运动连续性属性可分为三种：连续、间歇、任意，任意说明对运动连续属性不做具体要求。例如，在直线运动中，根据其运动的特性，可确定轴线方向、运动方向、运动连续性，可能的行为方式是沿 X 轴正向连续直线运动。

2. 运动速度特性和行程属性

通过行为实现功能时，速度特性是极其重要的因素。举例来说，如果仅仅只要从 A 点移动到 B 点，没有别的要求，那么任何可实现目标的行为都可以采用。但是，在移动速度很大（如行驶的汽车），以致可能对移动物体产生冲击时，必须降低开始时和终止时的速度。另外，只要求单向动作时，必须采用快速返回，以提高效率。所以，要考虑速度特性对行为的影响。对一个周期性工作的机器，其执行构件的位移图、速度图的某些特性可以根据速度特性和行程特性加以表达^[143~144]。

3. 力的属性

运动行为属性增加了力的有关信息，执行机构的运动过程是对物料实施作用力的过程。描述这一过程离不开力的信息，如推动物料和压缩物料虽都可用直线运动实现，但两者作用力差距悬殊，所含的力的信息也不一样。

为了便于计算机对运动行为属性的储存与管理，采用编码方式表达运动行为的属性。运动行为属性的编码原则见表 4.1。

表 4.1 运动行为属性的编码原则

例如，冲压的一般过程是由冲头的往复直线运动所实现的，其位移线图和速度图如图 4.1 所示，该过程可划分为冲头的空行程 $a \rightarrow b$ 、工作行程 $b \rightarrow c$ 、回程 $c \rightarrow d$ 、停歇 $d \rightarrow e$ 四个基本过程。根据运动行为属性表的行为属性的编码原则，空行程的行为 $b_1=\{1, \text{冲头}, 22215114\}$ ，工作行程的行为 $b_2=\{2, \text{冲头}, 22212351\}$ ，回程的行为 $b_3=\{3, \text{冲头}, 22112114\}$ ，停歇的行为 $b_4=\{4, \text{冲头}, 44444444\}$ 。 b_1 的行为 ID 编号是 1，行为载体是冲头，运动行为的属性：移动+Y 轴+单向负+连续+速率变不做要求+速率快+行程大+无作用力（无负载）。 b_2 的行为 ID 编号是 2，行为载体是冲头，运动行为的属性：移动+Y 轴+单向负+连续+非匀速+速率慢+行程不做要求+力大。 b_3 的行为 ID 编号是 3，行为载体是冲头，运动行为的属性：移动+Y 轴+单向正+连续+速率变化任意+速率快+行程大+无负载。

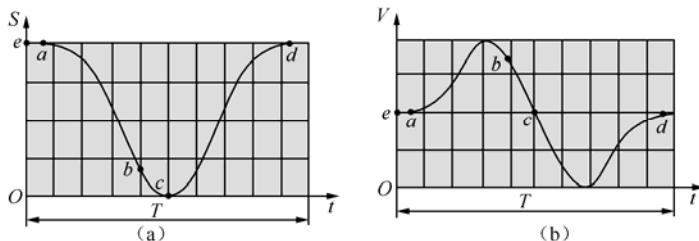


图 4.1 冲压过程运动曲线

行为的表达是多层次的，行为既可以是单一的基本行为，也可以是复合行为。若一个行为不能再分解了，此行为称为基本行为，用来实现基本操作。基本行为可以用运动行为属性参数直接进行描述，基本行为的主要类型是连续转动、连续直线运动、连续直移运动。复合行为是一组基本行为复合而成的，复合行为可以继续分解成基本行为。例如上面冲压行为可以表达为一个复合行为 b （垂直方向上的往复直线运动），是由基本行为 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 串联而成，即 $b=b_1 \rightarrow b_2 \rightarrow b_3 \rightarrow b_4$ 。

下面给出行为的串、并联关系的定义。

(1) 行为的串联关系，用于描述同一行为组内行为之间的关系。若行为都属于同一载体，行为具有相对独立的属性特征，且行为之间只存在因果关系或时序关系，则称行为具有串联关系。其表达式为 $b=b_1 \rightarrow b_2 \rightarrow b_3 \rightarrow \dots \rightarrow b_n$ 。例如复合行为间歇直线运动、间歇转动的基本行为都是串联关系。

(2) 行为的并联关系，用于描述同一行为组内行为之间的关系。若行为都属于同一载体，只有这些行为同时作用时，才能完成特定的功能，这些行为的关系称为并联关系。其表达式为 $b=b_1+b_2+b_3+\dots+b_n$ 。如果合成运动是复合行为，其组成的基本行为之间的关系是并联关系。

4.3.2 行为空间的表达

功能可以映射成行为，功能结构可以映射成行为结构，所以由功能和功能结构所组成的功能空间可以映射成由行为和行为结构所组成的行为空间。

行为空间采用如下的数学描述：用二元组 $BS = (X, R)$ 来描述一个行为空间， X 为行为论域，是一个有限的非空集合， $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，论域中任意行为 $x_i = \{ID, Object, Attr\}$ ； R 表示论域 X 中元素之间的连接关系矩阵， $R = [r_{ij}]$ ，其中 i 和 j 分别表示行和列，表示行为在行为集中的位置编号。

在行为连接关系矩阵中的关系主要分为四类。

(1) 无连接关系。行为之间没有任何的因果或时间上的前后顺序关系。 $r_{ij}=0$ ，表示行为 j 和 i 没有连接关系。

(2) 串联关系。同一行为组内行为所具有的相互顺序连接的关系，即前一个行为动作的结束后一个行为动作立即开始。如果 $r_{ij}=1$ ，表示行为 i 和 j 之间具有串联关系；如果 $r_{ij}=-1$ ，则说明行为 j 和 i 之间具有串联关系。

(3) 并联关系。同一行为组内行为之间所具有同时作用关系。如果 $r_{ij}=2$ ，表示行为 i 和 j 之间具有并联关系；

(4) 时间顺序关系。行为动作是一个过程，存在着开始时刻和结束时刻，因此不同行为组的运动行为在考虑开始时刻和结束时刻后顺序关系可分为以下四种关系 I、II、III、IV，见表 4.2。

表 4.2 行为的时间顺序关系

关系	符号表示	动作描述	图形表达
I	$r_{ij}=3$ (或 $r_{ji}=-3$)	表示行为动作 i 完成后，行为动作 j 才能开始	
II	$r_{ij}=4$ (或 $r_{ji}=-4$)	表示行为动作 i 完成后，行为动作 j 才能完成	
III	$r_{ij}=5$ (或 $r_{ji}=-5$)	表示行为动作 i 开始后，行为动作 j 才能开始	
IV	$r_{ij}=6$ (或 $r_{ji}=-6$)	表示行为动作 i 开始后，行为动作 j 才能完成	

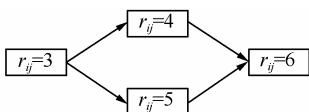


图 4.2 时间顺序关系

行为间的时间顺序关系如图 4.2 所示。图中的箭头说明关系之间具有特定的联系, $r_{ij}=3 \rightarrow r_{ij}=4$, 说明从关系 I 可以推出关系 II, 也就是说行为 i, j 只要满足关系 I 一定也满足关系 II。行为顺序关系 I、II、III、IV 之间的推理关系可表达为一个有序关系, $\mathbf{R}_I < \mathbf{R}_{II}$,

$\mathbf{R}_{III} < \mathbf{R}_{IV}$, 这种有序关系表达了行为关系内部的推理关系。当两个行为之间有多种行为关系时, 优先选择关系左侧的关系, 这样所确定行为之间顺序关系相对而言最为准确。

时间顺序关系具有可传递性, 设行为 i, j, k 分别属于不同的行为组, 行为关系传递类型如下:

- ① $r_{ij}=3$ 且 $r_{jk}=3 \Rightarrow r_{ik}=3$;
- ② $r_{ij}=3$ 且 $r_{jk}=4 \Rightarrow r_{ik}=4$ 或 $r_{ik}=6 \Rightarrow r_{ik}=4$;
- ③ $r_{ij}=3$ 且 $r_{jk}=5 \Rightarrow r_{ik}=3$ 或 $r_{ik}=5 \Rightarrow r_{ik}=3$;
- ④ $r_{ij}=3$ 且 $r_{jk}=6 \Rightarrow r_{ik}=4$ 或 $r_{ik}=6 \Rightarrow r_{ik}=4$;
- ⑤ $r_{ij}=4$ 且 $r_{jk}=4 \Rightarrow r_{ik}=4$ 或 $r_{ik}=6 \Rightarrow r_{ik}=4$;
- ⑥ $r_{ij}=4$ 且 $r_{jk}=5 \Rightarrow \phi$;
- ⑦ $r_{ij}=4$ 且 $r_{jk}=6 \Rightarrow \phi$;
- ⑧ $r_{ij}=5$ 且 $r_{jk}=5 \Rightarrow r_{ik}=5$;
- ⑨ $r_{ij}=5$ 且 $r_{jk}=6 \Rightarrow r_{ik}=6$;
- ⑩ $r_{ij}=6$ 且 $r_{jk}=6 \Rightarrow r_{ik}=5$ 。

4.4 功能映射成行为

4.4.1 功能和行为的关系

概念设计模型中, 功能特征的表现具有抽象性, 处于较高的层次; 而行为特征的表现为具体的, 处于相对较低的层次。从抽象的功能映射到具体行为或行为空间是一个复杂的过程。

功能和行为都属于概念的范畴, 概念在心理学上指的是反映客观事物共同特点与本质属性的思维形式, 是高级认知活动的基本单元, 包含在每个概念下的事物一般都具有共同的属性和特性。每个概念都包含内涵和外延两个部分。内涵指的是概念所反映的事物的本质, 外延指的是概念的范围。概念通常形成于经验概括, 是一个归纳的过程。经验概括以关于个别事物的现象的观察陈述作为根据, 通过比较其

间的异同，找出对象的共同点，从而上升为较普遍的认识，即由个体特性的认识上升为对个体所属种群的特性的认识。这个过程称为抽象化。与此过程相反，是使抽象的概念具体化，就是从反映事物最简单、最抽象的概念出发，一步一步地达到其越来越复杂、越来越具体的概念，直到把整个事物的丰富多彩性再现出来。

从抽象的功能到具体化行为的过程是一个概念演绎的过程，是一个由一般到特殊的过程，二者实现直接的映射是非常困难的，通过引入工作机理实现了功能到行为或行为空间的映射。

4.4.2 基于工作机理实现功能空间到行为空间的映射

4.4.2.1 工作机理相关概念

机械系统工作机理的实现往往是由工艺动作来实现的，下面讨论与工作机理相关的基本概念。

1. 工艺

国家标准 GB/T 4863—2008 给出了工艺 (Technology) 的定义为“使各种原材料、半成品成为产品的方法和过程”。因此，可以说工艺是为使物体达到预期的状态而对之施加作用的方式和方法。自然科学，尤其是机械制造工艺学、材料科学、冶金学、流程工艺学等方面的知识是寻求有效作用的基础。实际上，工艺是一个过程，工艺是由有次序的一系列动作所确定的。工艺过程分解为较小的组成部分——工艺动作。

工艺是与领域相关的，如包装工艺、冲压工艺、封面装帧工艺等，不同的领域就会有不同的工艺。

2. 工作原理

机械系统的工作原理是工艺赖以实现的一种原理。同样一种功能，可以采用不同的工作原理予以实现。功能的具体实现归根到底是靠某些工艺动作来完成。因此，实现机械系统功能的工艺动作过程都体现了某种特定的工作原理。

3. 作用

工艺的概念和作用的概念是密切相关的，作用是一个物体对另一个物体的作用的一般称呼。作用分为直接作用和间接作用。作用的结果是接受作用的物体做出反应，即产生了某种效应，通过服从于自然现象的物体特性的某些变化体现出来。在设计时需把那些作为产生预期转化（取得预期的特性）的原因的作用确定下来。从

机械系统的角度看，产生特定的作用是它的一个目的功能。作用一般存在多种形式，如物理作用、化学作用、生物作用等，在机械系统中主要使用的是物理作用。

物理作用的基本类型有：力作用，热作用，电磁作用，光作用，声作用等。作用是作用效应链的源头，作用具有以下特征。

(1) 作用必然产生某种效应，效应必然来源于某种作用。

(2) 作用产生的效应必须由某种对象来承受，没有承受对象的作用是不可行的。

机械系统中，物理作用的对象一定是具体的，一般是一些零部件对象。但物理作用的效应可以是具体的，也可以是抽象的。例如冲压成型是以金属板料为加工对象，在外力作用下使其发生塑性变形或分离而成为制件的一种金属加工方法。这里外力作为相应的作用，加工对象发生的变形或者分离现象为效应^[104]。

4.4.2.2 工作机理及其表达

1. 工作机理

在一些词典中，关于机理的解释是“涉及或导致某些行动，反应和其他自然现象的一系列相关的基本活动或过程”。工作机理是实现工作原理的具体过程。这里的研究对象是机械系统，各种各样的机械系统在工作过程中有不同的机理，称为工作机理。机械系统的工作机理是符合工作原理条件下的实现功能的动作或方法的细化描述，工作机理说明了完成功能的若干个运动行为（工艺动作）及其相互关系。因此，工作机理是体现机械系统工作原理的一种行为组成和行为特征的表现^[105]。

工作机理一般均应具有如下的主要特征：

- ① 应充分体现机器的工作原理；
- ② 应有效地实现机器特定的功能；
- ③ 反映出机械运动和动力的传递和变换的过程；
- ④ 应充分表现机器工作行为变化过程。

根据第3章的内容，总功能经过多次功能分解后最终获得一组功能元，功能元之间具有一定的连接关系，其构成一个功能空间，通过功能空间来实现总功能。为了便于问题研究，定义工作机理与功能分解模型中的最底层的功能相关联，即具体功能的实现依赖于所采用的工作机理。而功能空间则由一组工作机理组成具有一定连接关系的工作机理空间来实现。

2. 工作机理的表达

工作机理的表达，就是将机器的工作原理实施过程编制出机器的工艺动作过程。

这里主要研究的是机械加工系统，选择工作机理时要考虑机器的工作原理、机器工作的对象、精度和外在环境四个方面。用六元组(ID, N, X, IO, C, B)来形式化地表达工作机理 p 。 ID 表示工作机理的编号； N 表示工作机理的名称，反映了该工作机理可实现的功能； X 表示基本工作原理； IO 是加工的对象； C 是约束的集合； B 表示可实现工作机理的行为空间。

下面以冲压^[106~109]为例说明实现功能的工作机理表达，冲压过程的工作机理为

{1, 冲压, [压力加工], 不确定, 精度不确定, 行为空间 B_1 }

行为空间 $B_1 = \{X_1, R_1\}$ ，其行为集 $X_1 = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ ，其描述见表 4.3。

表 4.3 行为的描述

行 为	描 述	行 为	描 述
b_1	{1,冲头,22215114}	b_2	{2,冲头,22212351}
b_3	{3,冲头,22112114}	b_4	{4,冲头,44444444}

行为关系矩阵为

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_1 & 0 & 1 & 0 \\ b_2 & -1 & 0 & 1 \\ b_3 & 0 & 0 & 0 \\ b_4 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

依据参考文献[108, 109]，给出各种具体冲压工艺的关系如图 4.3 所示，根据冲压的工艺的工作机理，可给出相应的工作机理，见表 4.4。

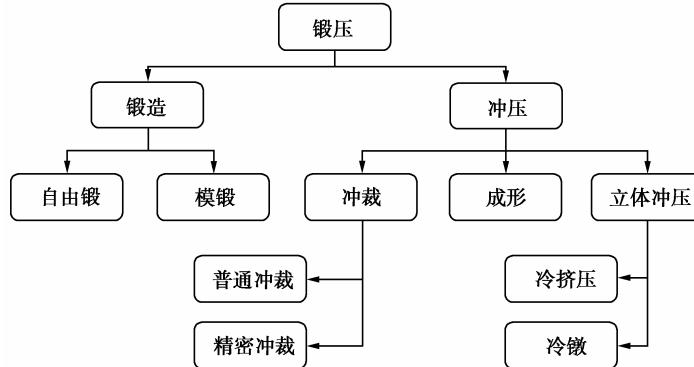


图 4.3 压力加工分类

表 4.4 工作机理

序号	工艺	工作机理
1	冲压	{1,冲压,[压力加工],不确定,精度不确定,行为空间 B_1 }
2	普通冲裁	{2,普通冲裁,[断裂&分离物料&压力加工],板料,精度较高,行为空间 B_2 }
3	精密冲裁	{3,精密冲裁,[塑性变形&分离物料&压力加工],板料,精度高,行为空间 B_3 }
4	冲压成型	{4,冲压成形,[成型物料&压力加工],板料,精度高,行为空间 B_4 }
5	冷挤压	{5,冷挤压,[成型物料&压力加工&模具],坯料,精度高,行为空间 B_5 }
6	冷镦	{6,冷镦,[成型物料&压力加工],坯料,精度高,行为空间 B_6 }

从表 4.4 中可以看出, 冲压工艺的实现工作机理是其他冲压具体工艺工作机理的模板, 如普通冲裁的工作机理是由冲压的工作机理演化而来, 普通冲裁用于板料的断裂分离加工, 精度较高, 其行为空间为 $B_2 = \{X_2, R_2\}$, 行为集 $X_2 = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ 是继承行为集 X_1 并对 X_1 的行为作相应的改变, 这里只有行为 b_2 发生了变化, 即由原来的 {2,冲头,22212351} 改变为 {2,冲头,22212231}, 行为关系矩阵 R_2 同 R_1 , 未发生变化。同样精密冲裁的工作机理也是由一般冲压工作机理演化而来, 其不同之处在于用塑性变形实现板料的分离, 精度高, 工作过程的行为进一步细化, 冲头速度慢, 行程小, 也就是将行为 b_2 变成 {2,冲头,22212331}。

工作机理空间是在工作机理表达的基础上得来的, $PS = \{ID, P, S, BS\}$, PS 表示工作机理空间, ID 是工作机理空间的编号, P 表示工作机理的集合, S 表示工作机理的连接关系, BS 表示行为空间。

4.4.2.3 功能空间到行为空间映射

工作机理是实现功能具体方式的描述, 这里的功能是单一功能, 通过工作机理, 功能就映射到行为空间, 即功能由若干个工艺动作(运动行为)来完成, 功能到行为空间映射的数学描述如下。

设 $f \in F$, F 表示功能域, $p = IdentifyFrom_1(f)$, $BS = IdentifyFrom_2(p)$, 则 $p \in P$, $BS \xrightarrow{\text{realize}} p \xrightarrow{\text{realize}} f$ 。其中 f 表示功能, p 表示工作机理, BS 表示实现功能 f 的运动行为空间。如图 4.4 所示, 一个功能可以由不同的工作机理来实现, 即存在多个可能的行为空间实现功能。如图 4.5(a) 所示, 单个功能可以通过搜索工作机理数据库得到可能的行为空间。

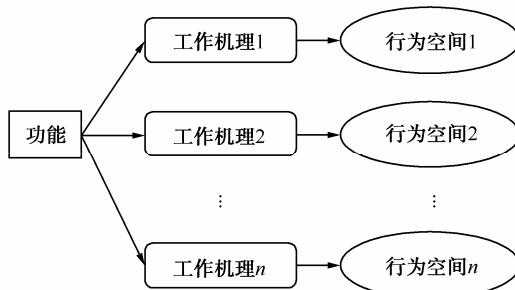


图 4.4 功能与工作机理关系

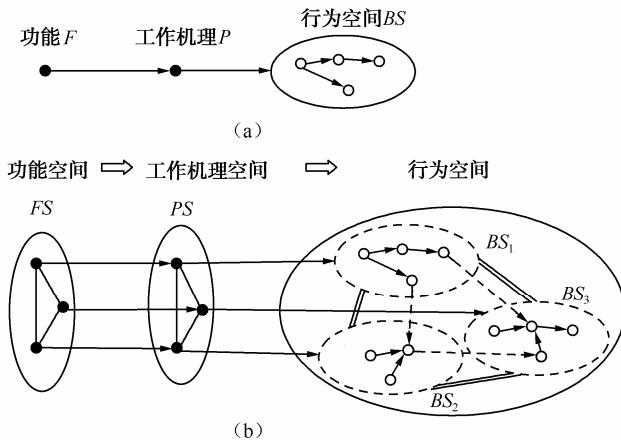


图 4.5 “功能-工作机理空间-行为空间”映射

如果多个功能组成的功能空间要映射成行为空间，则需要通过工作机理空间来实现，如图 4.5 (b) 所示，此过程分为两次映射过程。

第 1 步：功能空间到工作机理空间的映射，即功能空间中的功能通过搜索工作机理知识库得到相应的工作机理节点，同时功能之间连接关系也映射到工作机理空间，得到工作机理之间的连接关系。

第 2 步：工作机理空间到行为空间的映射，首先把工作机理节点映射为行为子空间，行为子空间构造成一个新的行为空间，工作机理空间的关系映射到行空间，行为子空间之间添加连接关系，最后连接关系细化为行为之间的关系。

数学描述：给定功能空间 $FS = \{F, Attr, R_{FS}\}$ ，其中 F 为功能集， $Attr$ 是属性的集， R 是功能关系矩阵，设 $|F| = n$ ， $f_i \in F$ ， $1 \leq i \leq n$ 。

若 $BS = \{X, R_{BS}\}$ 满足下面三个基本条件：

- ① $X = \{\{b\}_{BS_1}, \{b\}_{BS_2} \dots \{b\}_{BS_n}\}$, $BS_i = Identify From_2(Identify From_1(f_i))$;
- ② 若功能关系矩阵 R_{FS} 中功能 f_j 和 f_k 相关联, 即 $(r_{jk})_{R_{FS}} = 1$, 则 $\forall b_m \in \{b\}_{BS_j}$, $\forall b_n \in \{b\}_{BS_k}$, $(r_{mn})_{R_{BS}} = 1$;
- ③ 若 $\forall b_m \in \{b\}_{BS_j}$, $\forall b_n \in \{b\}_{BS_j}$, 且 $(r_{mn})_{R_{BS_j}} = 1$, 那么 $(r_{mn})_{R_{BS}} = 1$ 。

则 $BS \xrightarrow{realize} FS$, 实现了功能空间向行为空间的映射。

功能到执行系统工作机理的映射的总体过程, 如图 4.6 所示, 可以看出, 这是一个自上而下逐步细化的过程, 实现了抽象的功能映射到相对具体的工作机理。

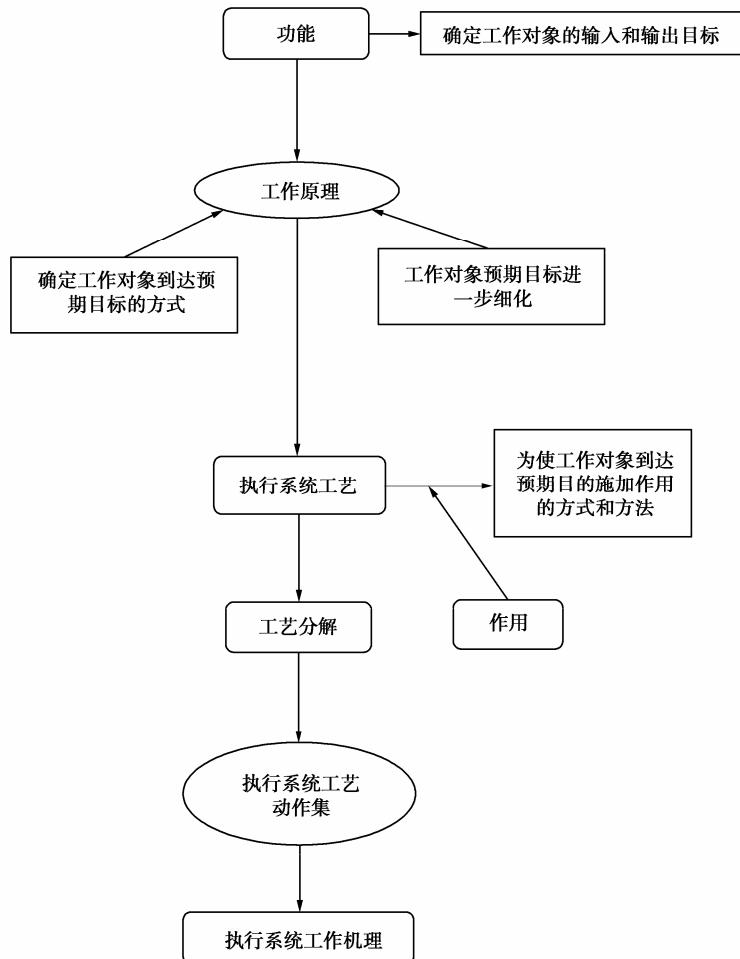


图 4.6 工作机理生成

下面以电阻压帽机的方案设计为例说明工作机理空间表达。如图 4.7 所示为运动循环图。

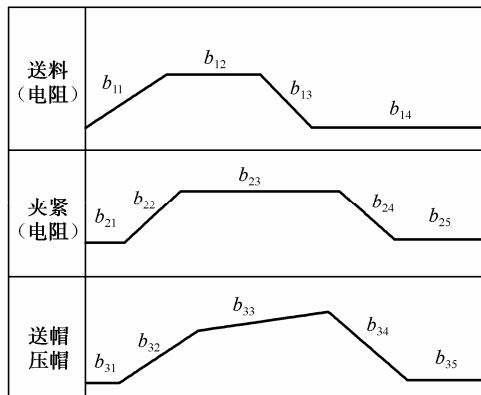


图 4.7 压帽机运动循环

(1) 电阻压帽机的总功能 F 经过功能分解后得到相应功能空间 FS ，
 $FS = \{\{f_1, f_2, f_3\}, Attr, R\}$ ，分功能分别是送料功能 f_1 、夹紧 f_2 、压帽 f_3 ，功能空间 FS 功能结构可用连接关系矩阵 R 来表示，即

$$R = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 \\ f_1 & 0 & 1 & 0 \\ f_2 & -1 & 0 & 1 \\ f_3 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

(2) 功能空间映射到工作机理空间。 $PS = \{1, \{p_1, p_2, p_3\}, S, BS\}$ ， p_1 、 p_2 、 p_3 是与功能相对应的并可实现功能的三个工作机理，矩阵 S 表达了工作机理的连接关系，即

$$S = \begin{matrix} & p_1 & p_2 & p_3 \\ p_1 & 0 & 1 & 0 \\ p_2 & -1 & 0 & 1 \\ p_3 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$p_1 = \{1, 送料, [力推动], 电阻, 精度较高, 行为空间 BS_1\}$

$p_2 = \{2, 夹紧, [力夹紧], 电阻, 精度较高, 行为空间 BS_2\}$

$p_3 = \{3, 压帽紧, [力作用], 帽, 精度较高, 行为空间 BS_3\}$

$BS_1 = \{X_1, R_1\}$ ， $BS_2 = \{X_2, R_2\}$ ， $BS_3 = \{X_3, R_3\}$ 是三个工作机理相对应的行为空

间，工作机理空间 PS 所对应的行为空间 $BS = \{X, R\}$ ， $X = X_1 \cup X_2 \cup X_3$ ，即 $X = \{b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}, b_{25}, b_{31}, b_{32}, b_{33}, b_{34}, b_{35}\}$ ，连接关系矩阵 R 保留原来连接关系矩阵 R_1 、 R_2 、 R_3 中的关系，根据矩阵 S ，增加新的连接关系，成为运动行为关系矩阵：

	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{31}	b_{32}	b_{33}	b_{34}	b_{35}
b_{11}	0	1	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{12}	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{13}	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{14}	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{21}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{22}	-4	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	4	0	0	0
b_{23}	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0
b_{24}	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0
b_{25}	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
b_{31}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
b_{32}	0	0	0	0	0	-4	0	0	0	-1	0	0	0	0
b_{33}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
b_{34}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1
b_{35}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0

4.5 行为空间的重组创新

4.5.1 行为空间的重组^[103]

经过前面的设计过程获得行为空间后，不能简单地将行为空间中的行为集映射为相应的结构，来构造结构空间，否则无法体现一结构多功能的特性。因此，需要对行为空间的运动行为进行重新组合，将行为空间划分为行为集，获得创新的行为方案，如图 4.8 所示。

行为空间中的运动行为组合时主要考虑运动行为能否共存，若两个运动行为能够共存，则说明运动行为是相容的，可以划分到同一个行为集。运动行为相容的条件：同一行为子空间内的运动行为；不同行为子空间内不存在冲突关系的运动行为。根据冯涛^[43]所提出的运动行为不宜共存的条件，本文也归纳了运动行为具有冲突关系的条件。

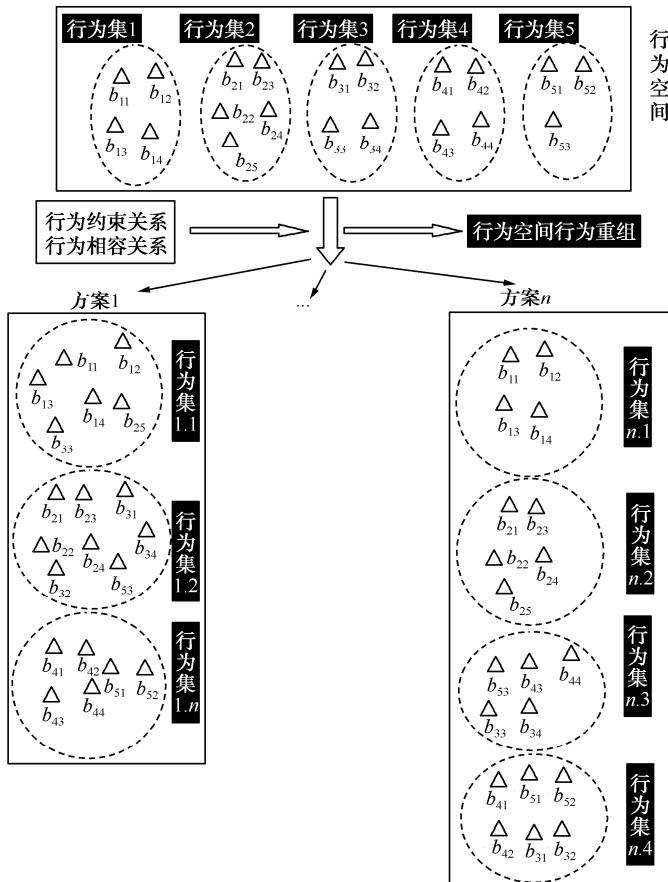


图 4.8 行为空间的重组

- (1) 行为并联，且行为的运动形式相同、方向相反。
- (2) 行为并联，且行为之间存在相对运动关系。
- (3) 若物料不可穿越，运动范围在物料两侧的行为。
- (4) 运动轴线互相垂直的行为。
- (5) 作用力相差悬殊的行为。

4.5.2 行为空间的重组实现策略与算法

行为空间的重组是通过论域集合的划分而实现的，集合的划分与等价关系是一一对应的，也就是给出一种等价关系就给出唯一的划分。由于等价关系的条件要求比较严，要实现论域集合的多种划分，必须构造多个等价关系。为了解决这个问题，

引入相容关系 r ，通过相容关系实现行为论域的多种划分。

1. 划分策略

- (1) 通过判定行为空间 BS 中论域 $X = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 的元素之间关系来确定相容关系 r ， $r = \{(a_i, a_j) | a_i, a_j \in A, i \neq j\}$ ，其中 (a_i, a_j) 表示 a_i 与 a_j 之间是相容关系。
- (2) 由相容关系 r 确定行为空间 BS 中论域 X 的完全覆盖 $C_r(X)$ 。
- (3) 通过完全覆盖 $C_r(X)$ 可快速搜索出满足相容关系 r 的论域 X 的一个最粗划分 $[X]$ ，设 $[X]$ 对应的粒度为 $\zeta_{[X]}$ 。
- (4) 根据设定的粒度 $\zeta_{[X]}$ ，采用 Stirling 算法对行为论域的划分进行搜索，得到符合相容条件的行为空间集合 $P = \{BS_1, BS_2, \dots, BS_m\}$ ，行为空间集的粒度关系满足： $\zeta(BS_1) = \zeta(BS_2) = \dots = \zeta(BS_m)$ ，其中“=”说明行为空间的粒度相同。
- (5) $P = \{BS_1, BS_2, \dots, BS_m\}$ ，进行行为求解，若可获得创新方案，则划分结束，若无法获得创新设计的方案，则粒度 $\zeta_{[X]}$ 减小一级，重回第(4)步。

2. Stirling 算法

目标：生成满足相容关系的集合划分，使任何子集中的元素均是相容的。

输入： n 个元素集合 $X = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ ， X 上相容关系 r (r 的相容关系矩阵为 M_r)，划分的元素个数 $\|X\|$ 。

输出：满足相容约束的划分集。

步1 $i \leftarrow 1$ ；

步2 令含 i 个元素的集合为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ ；

步3 如果 $R(x_m, x_n) = 1$ 且 $m \neq n$ ， $i < m < i$ ， $1 < n < i$ ，则集合 X 中的元素划分成一组 $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ ，添加到 $B[i, 1]$ 尾部；

步4 集合 X 中的元素划分成 i 组，即 $\{x_1\}, \{x_2\} \dots \{x_i\}$ ，添加到 $B[i, i]$ 尾部；

步5 $i \leftarrow i + 1$ ，goto 步 2，直至 $i = n$ ；

步6 $i \leftarrow 3$ ， $j \leftarrow 2$ ；

步7 取出 $B[i-1, j-1]$ 的链表，可以得到 $S(i-1, j-1)$ 个划分方案，每个划分方案中子集数目为 $j-1$ ，现分别在每个划分方案中新增加元素 i 为第 j 个子集，添加到链表 $B[i, j]$ 的尾部；

步8 取出 $B[i-1, j]$ 的链表，可以得到 $S(i-1, j)$ 个划分方案，对链上每个方案，含有子集的数目是 j ；

for 每个方案 k ，其中 $k \in B[i-1, j]$ 的链表中的方案集，依次 do

for 每个子集 S ，其中 $S \in$ 方案 k 中的子集，依次 do

if $R(i, x) = 1$, $\forall x \in S$, 那么元素 i 添加到子集 S 中, 该方案添加到链表 $B[i, j]$ 的尾部

步 9 $i \leftarrow i+1$, goto 步 7, 直至 $i = n$, $j = \|X\|$;

步 10 最终得到单链表 $B[n, j]$ 为含有 n 个元素、 j 个划分的所有划分方案。

4.6 应用实例

这里以切制销钉工艺为例加以说明。如图 4.9 所示, 销钉机的工作过程为: 销钉坯料由送料机构输送, 输送长度由凸轮 2 控制的挡块 6 来确定, 凸轮 2 还控制割刀 7 将加工好的销钉切割下来, 坯料 8 的夹紧与放松由凸轮 1 控制, 凸轮 3 则带动刀架完成车外圆及倒角。

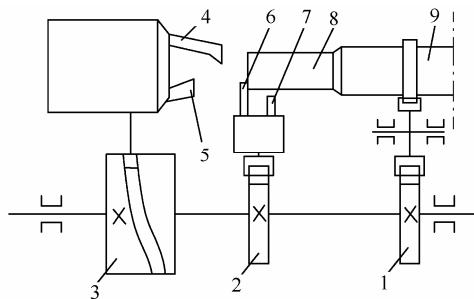


图 4.9 切制销钉机构

1、2、3—凸轮; 4—外圆车刀; 5—倒角刀; 6—挡块; 7—割刀; 8—坯料; 9—夹头

1. 功能空间

销钉机的总功能是切制销钉, 经过功能分解建模, 获得一个可实现总功能的功能空间 FS , $FS = \{F, Attr, R\}$, 功能空间要映射到工作机理空间, 主要相关的是功能集 F 和功能结构 R , 属性关系 $Attr$ 主要和功能建模有关, 这里未加使用。 $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\} = \{\text{夹紧}, \text{定位}, \text{切削外圆}, \text{切制倒角}, \text{切断}\}$ 。

$$R = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 \\ f_1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ f_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_3 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ f_4 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ f_5 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{matrix}$$

2. 工作机理空间 PS

经过对知识库的搜索，功能空间 FS 可映射到工作机理空间 PS ， PS 表达为

$$PS = \{ID, P, S, BS\} = \{1, \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}, S, \{BS_1, BS_2, BS_3, BS_4, BS_5\}\}$$

工作机理空间论域集由工作机理 p_i 所组成，并与功能 f_i 相对应，工作机理空间中工作机理 p_i 之间的关系用矩阵 S 表示， BS_i 表示工作机理 p_i 所对应的行为空间。

例如，功能 f_1 可能的工作机理是 p_1 ，表达式如下：

$$p_1 = \{1, 夹紧, [力], 毛坯, 精度较高, 行为空间 $BS_1\}$$$

工作机理 p_1 的行为空间为

$$BS_1 = \{X_1, R_1\}, X_1 = \{b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}\}$$

具体运动行为的描述见表 4.5。

表 4.5 运动行为的描述

行 为	描 述	行 为	描 述
b_{11}	{1, 夹头, 12115223}	b_{12}	{2, 夹头, 44444444}
b_{13}	{3, 夹头, 12215223}	b_{14}	{4, 夹头, 44444444}
b_{21}	{5, 挡块, 44444444}	b_{22}	{6, 挡块, 23211233}
b_{13}	{7, 挡块, 44444444}	b_{24}	{8, 挡块, 23111233}
b_{31}	{9, 割刀, 44444444}	b_{32}	{10, 割刀, 23111332}
b_{33}	{11, 割刀, 23212125}	b_{42}	{13, 外圆车刀, 22111332}
b_{41}	{12, 外圆车刀, 44444444}	b_{44}	{15, 外圆车刀, 44444444}
b_{43}	{14, 外圆车刀, 22211235}	b_{52}	{12, 倒角刀, 22111332}
b_{51}	{16, 倒角刀, 44444444}	b_{54}	{19, 倒角刀, 44444444}
b_{53}	{18, 倒角刀, 22211235}		

行为空间 BS_1 的行为关系矩阵为

$$\mathbf{R}_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \end{matrix} \\ \begin{matrix} b_{11} \\ b_{12} \\ b_{13} \\ b_{14} \end{matrix} & \left\{ \begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{matrix} \right\} \end{matrix}$$

3. 行为空间 BS

行为空间 $BS = BS_1 \cup BS_2 \cup BS_3 \cup BS_4 \cup BS_5$ ，行为空间 BS 论域的组成如下：

$$X = \{b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{31}, b_{32}, b_{33}, b_{41}, b_{42}, b_{43}, b_{44}, b_{51}, b_{52}, b_{53}, b_{54}\}$$

行为空间 BS 中行为关系的构造如下。

第1步：建立行为关系矩阵，根据行为空间 BS 的子空间 BS_i 的结构关系添加到该矩阵中：

b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{31}	b_{32}	b_{33}	b_{41}	b_{42}	b_{43}	b_{44}	b_{51}	b_{52}	b_{53}	b_{54}
b_{11}	0	1	0	0														
b_{12}	-1	0	1	0														
b_{13}	0	-1	0	1														
b_{14}	0	0	-1	0														
b_{21}				0	1	0	0											
b_{22}				-1	0	1	0											
b_{23}				0	-1	0	1											
b_{24}				0	0	-1	0											
b_{31}							0	1	0									
b_{32}							-1	0	1									
b_{33}							0	-1	0									
b_{41}								0	1	0	0							
b_{42}								-1	0	1	0							
b_{43}								0	-1	0	1							
b_{44}								0	0	-1	0							
b_{51}											0	1	0	0				
b_{52}											-1	0	1	0				
b_{53}											0	-1	0	1				
b_{54}											0	0	-1	0				

第2步：根据行为子空间之间的连接关系，添加行为空间 BS 内的行为之间的关系。

	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{31}	b_{32}	b_{33}	b_{41}	b_{42}	b_{43}	b_{44}	b_{51}	b_{52}	b_{53}	b_{54}
b_{11}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{12}	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{13}	0	-1	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{14}	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{21}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{22}	0	0	-3	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0
b_{23}	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{24}	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{31}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{32}	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	-3	0	0	0	-3	0
b_{33}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{41}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
b_{42}	0	0	0	0	0	-3	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0
b_{43}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	-1	0	1	0	0	0	0
b_{44}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
b_{51}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
b_{52}	0	0	0	0	0	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0
b_{53}	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0
b_{54}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0

切制销钉的运动循环图如图 4.10 所示。

4. 行为空间划分与重组

根据行为空间内运动行为之间的关系，确定相容关系矩阵如下。

根据相容关系矩阵可以确定行为空间的 179 种划分，为减少不必要解的数量，添加约束条件，若要求原来同一行为集内的行为还保持在同一分组内，经过重组算法，给出如下的分组：

- ① $\{b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}\}, \{b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}, b_{31}, b_{32}, b_{33}\}, \{b_{41}, b_{42}, b_{43}, b_{44}\}, \{b_{51}, b_{52}, b_{53}, b_{54}\}$
- ② $\{b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}\}, \{b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}\}, \{b_{31}, b_{32}, b_{33}\}, \{b_{41}, b_{42}, b_{43}, b_{44}, b_{51}, b_{52}, b_{53}, b_{54}, b_{55}\}$
- ③ $\{b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}\}, \{b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}, b_{31}, b_{32}, b_{33}\}, \{b_{41}, b_{42}, b_{43}, b_{44}, b_{51}, b_{52}, b_{53}, b_{54}, b_{55}\}$ 。

	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{31}	b_{32}	b_{33}	b_{41}	b_{42}	b_{43}	b_{44}	b_{51}	b_{52}	b_{53}	b_{54}
b_{11}	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{12}	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{13}	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{14}	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{21}	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{22}	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{23}	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{24}	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{31}	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{32}	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{33}	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
b_{41}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
b_{42}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
b_{43}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
b_{44}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
b_{51}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
b_{52}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
b_{53}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
b_{54}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1

夹头	放松工件	保持放松	夹紧工件	保持夹紧工件				
挡块	停留挡块挡料			退回挡块	停留			推出挡块
割刀	停留				割下工件		退回割刀	
外圆	停留, 保持刀架不动				车外圆	退刀	停留, 保持刀架不动	
倒角刀	停留, 保持刀架不动				车倒角	退刀	停留, 保持刀架不动	

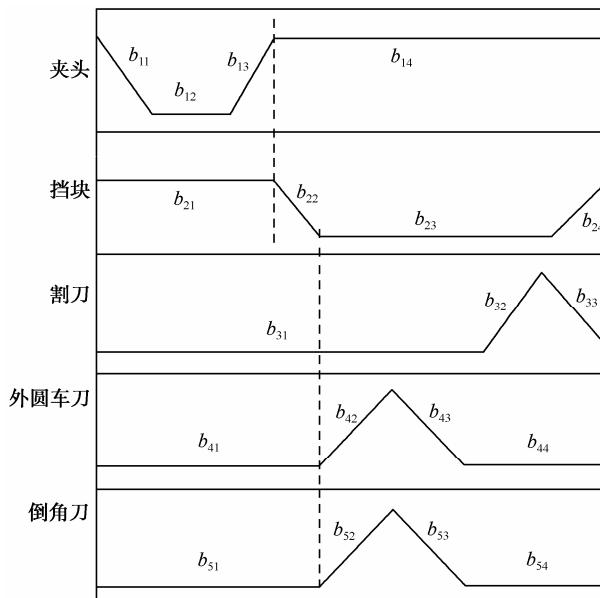


图 4.10 切制销钉的运动循环图

本章小结

本章以机械系统为研究对象，分析了机械系统的行为，研究了运动行为建模的有关问题。第一，提出了机械运动行为多属性的编码方法及为表达行为之间的关系所提出的运动行为空间表达法；第二，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；第三，研究行为空间的重组创新，提出辅助算法。最后，分析一个具体实例。

第5章 设计方案的生成——形态学建模

5.1 引言

通过功能分析、工艺动作过程的合理构思和描述、机构的选型和组合，可完成性能优良、价格低廉的新机器创新。

机械系统设计方案的生成本质上是机构系统的设计。机构系统设计的主要问题是：机构系统是由多种机构组成，机构间并非没有关系，而是紧密联系的。例如，机构系统中一个机构的输出可以是另外一个机构的输入，使得机构结构相对紧凑；同时各工艺动作之间的配合可以由曲柄的相位角控制。

机构系统设计中，形态分析法是一种系统搜索和程式化组合求解的方法^[110]。因素和形态是形态学分析法中的两个概念。所谓因素是指构成机械产品总功能的各个分功能或者是与功能相对应的行为（行为集）。而相应的实现分功能或行为（行为集）的执行机构和技术手段，则称为形态。例如，某机械产品的运动行为是“间歇运动”，那么棘轮机构、槽轮机构、间歇凸轮机构等执行机构，则为相应因素的表现形态。

形态学分析法是建立在功能分解和行为求解的基础上，通过形态学矩阵中的形态组合得到方案空间。形态学矩阵是一种能够形象描述机构系统组合特性的工具。方案空间中任意一个方案并不一定是可行的，在形态组合中，必须考虑形态之间的相容性条件、连接条件等，使得方案设计空间缩小，同时也为了下一步方案的精确评价。需要对方案进行初步评价，对无存在价值或价值不大的方案，可以在初步筛选时去除。形态学矩阵具有良好的动态性能，用于机械系统的概念设计，可以方便地形成众多的设计方案，开拓设计思路；同时还可简化概念设计过程。但其主要问题是机构形态组合时容易产生“解爆炸”问题。为了解决上述问题，提出一种改进的形态学分析法，既发挥了设计人员的创造力，又充分利用计算机的计算能力，通过该方法可获得机械系统概念设计的初步方案集。

5.2 形态学分析法的基本理论

5.2.1 基本概念

形态学一词来源于古希腊语，主要表示对象的形状和结构。当今，形态学一词与许多的学科相关。形态学已经应用于一些具有一定的形式结构，但不具有必要的数量的场合，如地质学、解剖学、动物学等。

瑞士的天文学家兹维基^[52]（1898—1974年）对形态学研究的概念做了进一步的归纳和拓展，他认为仅仅是研究几何、材料或其他领域中的结构、形状是不够的，更需要研究更加抽象的形态，如现象、概念、想法等以及它们之间所存在的内部关系^[51]。兹维基通过对形态学的研究提出了形态学分析法，兹维基应用形态学分析法开发了火箭发射推进系统，之后 Ritchey^[111, 112]提出使用计算机辅助设计技术进行形态分析，形态分析法在更大的范围内得到应用^[113~115]。可以说形态学分析是一种交互分析和综合的科学方法。

形态学分析法是一种让思维更有条理的方法。该方法是把研究对象或问题分为一些基本组成部分，称为因素，然后对每个因素单独进行处理，为其提供尽可能多的各种解决问题的办法或方案，称为形态，最后通过形态的组合关系构造出包含若干个总方案的方案空间，从方案空间中搜索出若干个解决整个问题的总方案。本质上，一般的形态学分析方法是确定所给定复杂问题中的所有各种可能的关系或配置的集合。在这种意义上，和拓扑的构造有点类似^[116]，只是形式和概念更加一般而已。

5.2.2 基本过程及表达

兹维基认为形态分析法可划分为五个步骤。

- (1) 明确地提出问题，并加以解释。
- (2) 把问题分解成若干个基本组成部分，每个部分都有明确的定义，并且有其特性。
- (3) 建立一个包含所有基本组成部分的多维矩阵（形态模型），在这个矩阵中应包含所有可能的总解决方案。
- (4) 检查这个矩阵中所有的总方案是否可行，并加以分析和评价。
- (5) 对各个可行的总方案进行比较，从中选出一个最佳的总方案。

数学表达：设形态学矩阵的因素为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ，相对应的形态用集合序列用 A_1, A_2, \dots, A_n 表示，从集合序列的每个集合中任取一个元素组成 (x_1, x_2, \dots, x_n) ，

$\forall j, k, 1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq n, x_j \in A_j, x_k \in A_k$, 若 x_j 和 x_k 满足相容关系, 则序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 是一个组合。上述的组合问题一般情况下是个 NP 问题。

5.2.3 形态关系的处理

构造好形态学矩阵后, 在分析与综合过程中, 可采用矛盾简化原理, 即通过分析不同因素下的形态之间的关系, 缩小可能总方案集到相对比较小的集合, 所得到的集合称为解空间, 解空间中的每个方案满足一致性要求。约减方法的基础是形态学域中存在许多不相容的关系, 即矛盾的或不一致的关系。

为了实现形态学矩阵的约减, 不同因素之间的形态需要做二元比较, 形成相容关系矩阵或冲突关系矩阵。通过对不同形态对的研究, 做出相应的形态对是否共存的判断, 即表达一致性关系。通过形态之间相容性的二元比较, 就可去除那些不相容的方案, 使得解空间的维数降低, 有利于方案的获得。形态学分析法中形态学方案的数目和因素的数量是指数增长关系, 而形态之间的二元关系数目和因素的数量则是二次多项式的关系。若形态学矩阵涉及 10000 个 ($10 \times 10 \times 10 \times 10$) 形式上的方案, 而为了获得可行的解空间, 只需要做 600 个形态的二元评价。

形态学可能的方案数目是不同因素下所具有形态数目的乘积。对人来说, 可以很容易地人工确定或标出一系列可行的配置方案。然而, 研究所有可能的配置方案则可能是困难的, 因为这会花费大量的时间和精力。例如, 包含 10 维的形态学矩阵可能会包含 30000 个配置方案, 配置方案的增多, 使得无法用人工处理来完成。

5.3 机械系统形态学矩阵的构造方法^[142]

第 4 章通过引入工作机理, 实现了功能空间到行为空间的映射, 行为空间通过重组获得若干个行为子集, 行为子集则是由行为载体即结构所实现的, 本章主要讨论的内容是根据行为空间中的行为集, 通过机构选型获得执行机构系统, 在不考虑传动系统的情况下, 执行机构系统通过组合可实现所要求的功能, 如图 5.1 所示, 这是一个形态学的组合问题。

如果考虑执行机构系统的运动及动力来源, 即执行机构系统的输入运动来自于其他机构的输出运动, 则执行机构(单自由度)可能与多个输入机构相连接。如图 5.2 所示, 这是一个典型的一对多的映射关系。输入机构还可能与其他的输入机构相连接。考虑到机构系统的复杂性, 传动链过长带来的可靠性的下降, 一般输入机构层数不会超过 3 层。

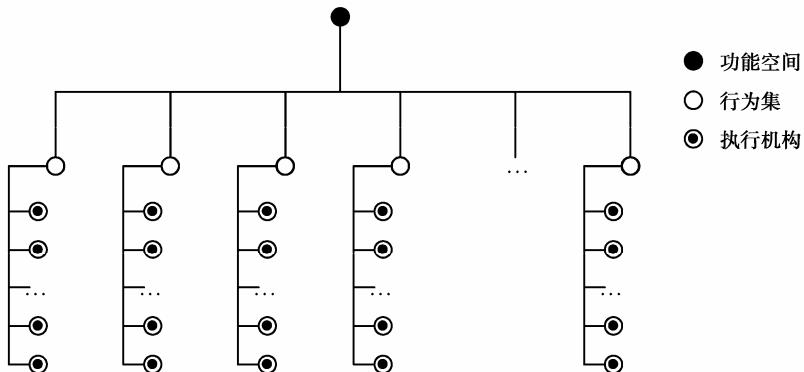


图 5.1 执行机构系统的形态学组合

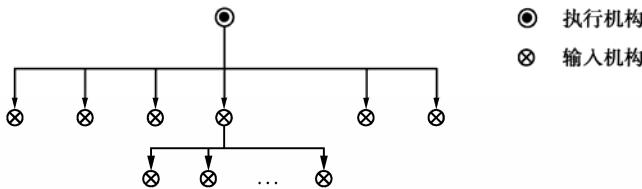


图 5.2 含有输入机构的执行机构系统的形态学组合

如果在图 5.1 的基础上，同时给定执行机构可选择的输入机构，则机构组合问题变得非常的复杂。为了提高分析的效率，采用了如下的组合算法。

目的：构造机械系统的形态学矩阵。

输入：执行机构系统的形态学矩阵。

步 1 根据执行机构系统的形态学矩阵，因素集为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ，相应的形态集用集合序列 A_1, A_2, \dots, A_n 来表示， A_i 表示实现因素 c_i 的执行机构的集合。从集合序列中依次取集合 A_j ，令 $S^Z = A_j$ ，执行步 2~6；全部执行完毕，转步 7。

步 2 执行机构集合 S^Z 依据输入运动形式进行划分，可划分为 m 个子集，可表示为 $S^Z = \{S_1^Z, S_2^Z, \dots, S_i^Z, \dots, S_m^Z\}$ 。

步 3 执行机构的子集 S_i^Z ，确定输入机构的子集合 S_i^I 。

步 4 确定输入机构的集合 $S^I = S_1^I \cup S_2^I \dots S_n^I$ 。

步 5 因素集 C 增加新的因素 c ，相应的形态集合为 S^I 。

步 6 确定输入机构集合 S^I 是否要进一步分解，若要分解，令 $S^Z = S^I$ ，重复步 2 至步 6 来确定新的机构集合；否则返回到步 1。

步 7 结束，输出形态学矩阵。

如图 5.3 所示, 执行机构集合 A_3 添加输入机构集合 A_{n+1} , A_{n+1} 和 A_3 集合之间关系为引入关系, 机构集合 A_{n+1} 又添加新的输入机构集合 A_{n+2} , 则增加了两个因素 c_{n+1} 和 c_{n+2} , 相应的形态集合也增加为集合 A_{n+1} 和 A_{n+2} 。

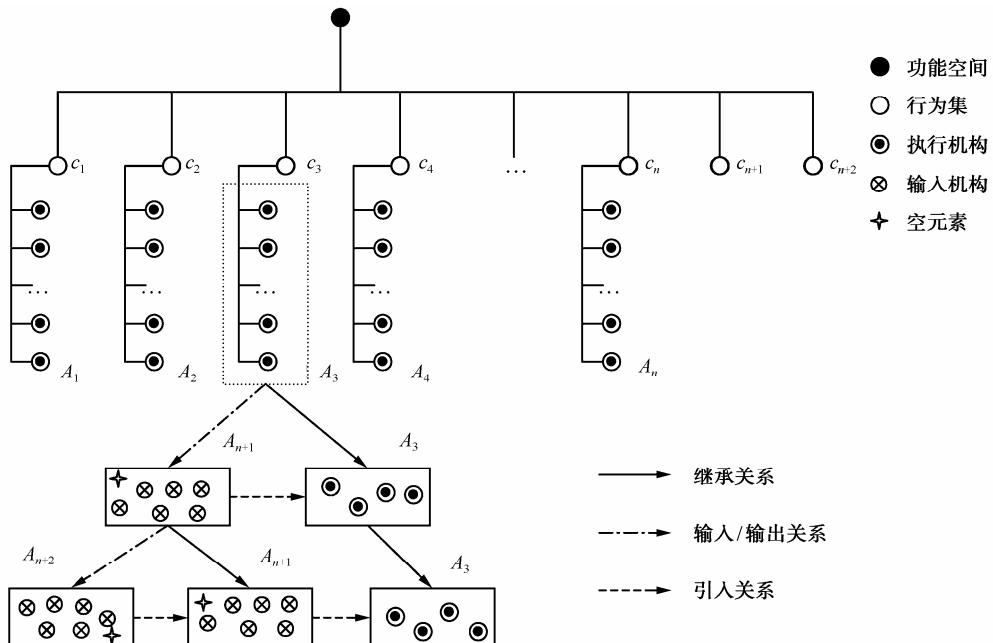


图 5.3 机构多层次组合

很多情况下, 执行机构集合 A_j 的执行机构是各相同的, 有的执行机构不需要输入机构就可实现运动行为, 为了不遗漏这部分执行机构的解, 这里对新的输入机构的集合增加一个特殊的空元素。

5.4 基于优化和评价的形态组合方法

5.4.1 基本思想

借鉴 Levin^[117~120]所提出的系统分解后组合寻优的方法, 这里提出了一种改进形态学分析法, 分析法的基本思想: 给出形态组合方案的多目标评价向量, 采用多目标优化的方法和遗传算法搜索出符合要求的形态组合方案解集。其基本过程如下。

(1) 给出要组合的因素及其各自对应的形态。

(2) 针对每个因素下的形态集, 采用定性评价的方法, 给出形态集内形态的优先级排序。

(3) 通过不同因素下形态的相容性分析, 给出连接关系的评价级别。

(4) 构造组合方案的多目标评价向量。

(5) 通过遗传算法或多目标优化的方法, 给出相应的方案解集。

5.4.2 形态学组合前提

如图 5.4 所示, 形态学组合的前提是所描述的系统可以分解成类似树形的结构, 系统 P 分解为子系统 P_1, P_2, \dots, P_n , $\forall i, 1 \leq i \leq n$, 子系统 P_i 的可能实现手段集为 DA_i , $DA_i = \{DA_{i1}, DA_{i2}, \dots, DA_{ij_i}\}$, j_i 为完成子系统 P_i 可能手段的数目。在机械系统概念设计过程中, 子系统是指运动行为集。

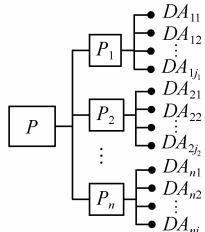


图 5.4 系统分解

5.4.3 形态的评价

5.4.3.1 问题的描述

通过多属性评价得到形态集内形态的评价等级。评价时设定 n 个评价等级, 评价等级是有序的, 每个待评价形态方案必定属于其中一个等级。属于第一等级的所有方案优于属于第二等级的方案, 依次类推。每个形态对象或方案可以由其相关属性值来描述。

通常, 有两种表达属性值信息的方式^[121], 一种是需要决策者提供属性值的基数信息, 另一种则要求决策者给出属性值的序数信息。一般认为, 对决策者而言, 给出属性值的序数信息要比给出属性值的基数信息相对容易一些。这是因为后者需要在给定的指标下确定方案更加精确的性能评价, 但是在一个不确定的环境下, 这种性能评价往往是不准确的、不可靠的, 甚至是不可得到的。实际上, 由于问题的复杂性和信息的有限性, 对任意一个属性 $C_k (k=1, 2, \dots, n)$, 决策者很难准确估计方案的属性值, 决策者相对比较容易给出每个方案的序数信息, 也就是可给出方案的每一个属性的偏序关系。因此, 这里采用基于二元比较的偏序关系作为评价的初始信息。通过评价分析, 最后得到方案是部分有序的集合, 称为半序集。

5.4.3.2 偏序关系下的评价

1. 偏序关系

根据 Roy 和 Slowinski^[122]的理论，“ \succ ”和“ \prec ”称为偏好关系，偏好关系之间具有传递性，即对于属性 C_k ，方案 A_i 和 A_j 之间可能存在四种关系：

- ① A_i 优于 A_j （记为 $A_i \succ A_j$ ）；
- ② A_i 劣于 A_j （记为 $A_i \prec A_j$ ）；
- ③ A_i 无偏于 A_j （记为 $A_i \sim A_j$ ）；
- ④ 不能对 A_i 和 A_j 进行比较（记为 $A_i ? A_j$ ）。

决策者给出某一方案每一属性完整的偏序关系是不太可能的，因为决策者知识和经验的欠缺，或者需要表达方案之间不存在偏好信息，即 $A_i ? A_j$ 。另外，有时方案之间性能的差异非常小，也不可能表达明确的偏好关系，可以表达成无偏于关系，即 $A_i \sim A_j$ 。偏好关系“ \succ ”和“ \prec ”是传递的、不对称的；无偏于关系 $A_i \sim A_j$ 是自反的、对称的；不可比关系 $A_i ? A_j$ 是反自反的、对称的。

因此，属性 C_k 下的方案之间的偏序关系就构成了部分有序偏序集 P_k 。在不同属性所对应的偏序集中，方案之间的关系可能是不同的，例如，在偏序集 P_k 中，方案 A_i 和 A_j 的关系是 $A_i \prec A_j$ ，而在另外一个偏序集 $P_{k'}$ 下，方案 A_i 和 A_j 的关系可能是 $A_i \succ A_j$ 。不同偏序集反映了在不同评价指标下方案性能的不同。很明显，如果一个方案 A_i 相对于另外一个方案 A_j 有更多的 \succ 关系（ $A_i \succ A_j$ ）和较少的 \prec 关系（ $A_i \prec A_j$ ），则方案 A_i 的性能优于方案 A_j 的性能。因此，方案 A_i 总的性能取决于方案 A_i 和其他所有方案之间关系与 \succ 和 \prec 的接近程度。为了获得方案集上的偏序关系，需要度量四种关系 $\{\succ, \prec, \sim, ?\}$ 之间的距离，下面给出偏序关系上距离的概念。

2. 偏序关系的度量

设 $R_1, R_2 \in \{\succ, \prec, \sim, ?\}$ ，关系 R_1 和 R_2 之间的偏离度为 $d(R_1, R_2)$ ，当偏离度满足下面的条件时， $d(R_1, R_2)$ 就是 R_1 和 R_2 之间的距离。 $d(R_1, R_2)$ 要满足的条件如下：

- ① $d(\succ, ?) = d(\prec, ?)$ ， $d(\succ, \sim) = d(\prec, \sim)$ ；
- ② $d(\succ, \sim) + d(\sim, \prec) = d(\succ, \prec)$ ；
- ③ $d(\succ, ?) \geq d(\sim, ?)$ ；
- ④ $d(\sim, ?) \geq d(\sim, \succ)$ ；
- ⑤ $d(\succ, \prec) = \max \{d(R_1, R_2) | R_1, R_2 \in \{\succ, \prec, \sim, ?\}\}$ ；
- ⑥ $d(R_1, R_2) > 0$ ，其中 $R_1 \neq R_2$ ； $d(R_1, R_2) = 0$ ，其中 $R_1 = R_2$ ；

$$\textcircled{7} \quad d(\succ, \prec) - d(\succ, ?) = d(\succ, ?) - d(\sim, ?) = d(\sim, ?) - d(\sim, \succ)。$$

关系之间的距离见表 5.1。

表 5.1 关系之间的距离^[123, 124]

$d(\cdot, \cdot)$	$A_i \succ A_j$	$A_i \prec A_j$	$A_i ? A_j$	$A_i \sim A_j$
$A_i \succ A_j$	0	$2a$	$(5/3)a$	a
$A_i \prec A_j$	$2a$	0	$(5/3)a$	a
$A_i ? A_j$	$(5/3)a$	$(5/3)a$	0	$(4/3)a$
$A_i \sim A_j$	a	a	$(4/3)a$	0

注: a 表示关系的距离。

设 R 是方案 A_i 和 A_j 在某个给定属性指标下的关系。方案 A_i 的性能可以由两种类型的距离来表达。

(1) \succ 和 $A_i R A_j$ 之间的距离, 即 $d(\succ, R)$, 距离越小反映出方案 A_i 越优。

(2) \prec 和 $A_i R A_j$ 之间的距离, 即 $d(\prec, R)$, 距离越大反映出方案 A_i 越优。

因此, 通过综合两种情况就可获得方案 A_i 的性能。

假设, 指标之间的相对重要性可由评价者给出, 设 w_k 是指标 C_k ($k=1, 2, \dots, n$) 的权重。

设 $R_{ij}^{(k)} \in \{\succ, \prec, \sim, ?\}$ 是在指标 C_k 下方案 A_i 和 A_j 之间的关系, 也可表达成为 $A_i R_{ij}^{(k)} A_j$, 其中 $i, j=1, 2, \dots, m, k=1, 2, \dots, n$ 。

定义 1 劣势指数

(1) 设 $\psi_k^{\prec}(A_i) = \sum_{i \neq j} d(\prec, R_{ij}^{(k)})$, 称为方案 A_i 第 k 个劣势指数, 其反映了在指标 C_k 下方案 A_i 劣于其他方案的程度。

(2) 设给定权重 w_k , $k=1, 2, \dots, n$, 可以通过下式确定方案 A_i 整体的劣势指数。

$$\phi^{\prec}(A_i) = \sum_{k=1}^n w_k \psi_k^{\prec}(A_i)。$$

定义 2 优势指数

(1) 设 $\psi_k^{\succ}(A_i) = \sum_{i \neq j} d(\succ, R_{ij}^{(k)})$, 称为方案 A_i 第 k 个优势指数, 其反映了在指标 C_k 下方案 A_i 优于其他方案的程度。

(2) 设给定权重 w_k , $k=1, 2, \dots, n$, 可以通过下式确定方案整体的优势指数。

$$\phi^<(A_i) = \sum_{k=1}^n w_k \psi_k^<(A_i)$$

$\phi^<(A_i)$ 是 \succ 和 $R_{ij}^{(k)}$ 之间的加权距离的和，它反映了方案 A_i 在整体上劣于其他方案的程度。 $\phi^<(A_i)$ 值越大，方案 A_i 与其他方案之间的关系与 \succ 的距离就越大，方案 A_i 就劣。因此，具有最小劣势指数的方案意味着它劣于其他方案的程度最小，应该将该方案排在最前面。

$\phi^<(A_i)$ 是 \prec 和 $R_{ij}^{(k)}$ 之间的加权距离的和，它反映了方案 A_i 在整体上优于其他方案的程度。 $\phi^<(A_i)$ 值越大，方案 A_i 与其他方案之间的关系与 \prec 的距离就越大，方案 A_i 就优。因此，具有最大优势指数的方案意味着它优于其他方案的程度最大，应该将该方案排在最前面。

3. 给定权重情况下的聚类算法

目标：获得方案集 X 上的全序关系 $R \succ$ 。

输入：方案集 $X = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ ；指标权重集 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ；偏序集为 P_k , $k = 1, 2, \dots, n$ 。

输出：方案集的排序链表。

步 1 $l \leftarrow 1$, $I_l = \{1, 2, \dots, m\}$;

步 2 $e \leftarrow 1$;

步 3 $i = GetAt(I_l, e)$, if $i == Null$, then goto 步 7;

步 4 计算 $\phi^>(A_i) = \sum_{k=1}^n w_k \psi_k^>(A_i)$;

步 5 if $e == 1$, then { $value = \phi^>(A_i)$, $b = i$ }

else if $value > \phi^>(A_i)$

{ $value = \phi^>(A_i)$, $b = i$ }

步 6 $e = e + 1$, goto 步 3;

步 7 将方案 A_b 添加到 List (全序关系表) 的尾部，令 $X_1 = \{A_b\}$;

步 8 $X = X - X_1$; $l \leftarrow l + 1$, $I_l = \{i \in I_{l-1} \mid A_i \in X\}$;

if $I_l = Null$, then goto 步 9

else goto 步 2

步 9 输出 List。

用类似的算法，也可获得方案集 X 上的全序关系 $R \prec$ 。由于计算过程的不同，所得到全序关系 $R \succ$ 和 $R \prec$ 不一定是相同的。为了获得方案的偏序关系，采用 Roy^[125] 的取交集的方法，即 $R = R \succ \cap R \prec$ ，此时需要满足以下的规则。

(1) 如果在 R 中满足 $A_i \succ A_j$ ，则需要满足下面条件之一。

① 在 $R \succ$ 和 $R \prec$ 中均有 $A_i \succ A_j$ ；

② 在 $R \succ$ 中 $A_i \succ A_j$ ，在 $R \prec$ 中 $A_i \sim A_j$ ；或者是在 $R \succ$ 中 $A_i \sim A_j$ ，在 $R \prec$ 中 $A_i \succ A_j$ 。

(2) 如果在 R 中满足 $A_i \sim A_j$ ，则需要在 $R \succ$ 和 $R \prec$ 中均满足 $A_i \sim A_j$ 。

(3) 如果在 R 中满足 $A_i ? A_j$ ，则需要在 $R \succ$ 中 $A_i \succ A_j$ ，在 $R \prec$ 中 $A_j \succ A_i$ ；或者是在 $R \succ$ 中 $A_j \succ A_i$ ，在 $R \prec$ 中 $A_i \succ A_j$ 。

例如，按照劣势指数的值所确定的全序关系 $R \succ$ 为 $A_1 \rightarrow A_4 \rightarrow A_3 \rightarrow A_2 \rightarrow A_5$ ，按照优势指数的值所确定的全序关系 $R \prec$ 为 $A_4 \rightarrow A_1 \rightarrow A_3 \rightarrow A_5 \rightarrow A_2$ ，通过取交集的方法，可获得方案之间的全序关系 $\{A_1, A_4\} \rightarrow A_3 \rightarrow \{A_2, A_5\}$ 。方案 A_1 和方案 A_4 无法比较优劣，方案 A_2 和 A_5 也是如此。

5.4.3.3 偏序集的划分

通过 5.4.3.2 节的内容可获得方案之间的偏序关系，在此基础上，根据所获得方案整体的劣势指数 $\phi^>(A_i)$ 和优势指数 $\phi^<(A_i)$ 的值的大小来构造一个映射函数，

$F: Y \rightarrow \{Y_l\}, l=1, 2, \dots, N$ ，函数满足条件 $Y = \bigcup_{l=1}^N Y_l$ ，其中 Y_l 是集合 Y 的子集，和第 l 层

相

关。如果任意方案 $A_{i_1} \succeq A_{i_2}$ ， $\forall A_{i_1} \in Y_{l_1}, \forall A_{i_2} \in Y_{l_2}$ ，那么 $l_1 < l_2$ 。属于 A 的任意一个方案 $A_j \in A$ 都存在一个序数 r_j ，这个数与方案所在层的编号一致，如图 5.5 所示。在方案集的实际划分时，采用分为三层的方式，任何一种方案必定属于其中一层，也就给定了相应的评价值。

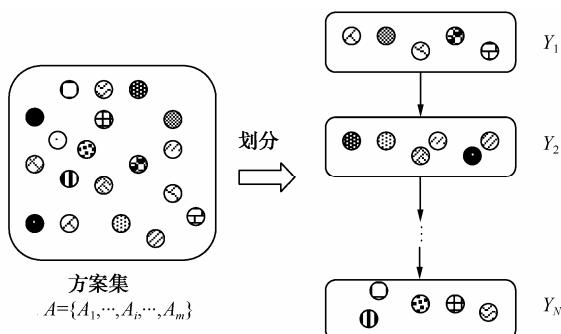


图 5.5 方案的分层评价

5.4.4 形态的组合

形态学空间可表示为 $A_0 = A(1) * \dots * A(j) * \dots * A(m)$ 。 $A(j)$ 是实现因素项 j 的形态集。形态学分析法的目标是在形态学空间内，搜索一组在不同因素下的形态的组合，要满足以下两个基本要求。

(1) 组合方案所选择的形态要满足最佳相容性的要求，即方案中有连接关系的组成元素之间是相容的，且相容度是最优的。

(2) 在给定因素下选择形态时，要选取相对最优的形态。

形态学组合问题中主要存在三类对象因素：隶属于因素类的形态，不同因素类形态之间的相互连接关系，同一因素类下形态之间的偏好关系。因此，形态学组合问题可用图来表示，顶点表示形态，边表示形态之间的连接关系。

数学描述： $G = (V, E) = (\{A(j)\}, \{\{E(j)\} \cup E_c\})$ ， $j = 1, \dots, m$ 。 $A(j)$ 是顶点的集合 V 的一个子集，表示在因素类 j 下所具有的所有形态；边的集合 E 分为两个子集， $\{E(j)\}$ 和 E_c ， $E(j)$ 是一个因素类 j 对应的边集， $E(j)$ 反映了因素类 j 下形态之间的偏好关系； E_c 是边的集合，反映了不同因素类下的形态之间的相互连接关系，其权重反映了其相容连接性能的好坏。

因此，组合问题中主要存在两类元素的评价。

1. 连接关系的评价——相容度

根据功能目标或工艺动作的需要，不同因素类（功能或行为）下元素（机构载体）之间如果具有输入和输出关系，机构通过其输入和输出构件间的连接实现机构组合，必须保证它们输入和输出构件连接处的运动能够协调配合，即机构的输入和输出运动行为具有物理意义上可连接性和相容性，具体可定义为相邻两个机构连接处构件的运动类型、轴线和运动往复性等基本行为特征值相等。若输入和输出机构的基本行为特征完全相同则称为二者是相容的。但是还存在一些其他的运动行为特征，这些特征的匹配也会对传动系统产生很大的影响，因此，符合相容性的连接关系的性能可用相容度 γ 来度量。

设前一机构输出特征集 A ，具有 n_A 个特征，后一机构的输入特征集 B ，具有 n_B 个特征，相容的特征数目为 l ，可得到连接的相容度为

$$\gamma = \frac{l}{n_A + n_B - l}$$

这里只考虑了输入和输出特征集之间相容特征的数量关系。根据前面计算出来的相容度数值，将其转换为序标度来表示： $0, 1, 2, \dots, l$ ，其中 l 表示最佳的相容连接

关系，0表示不相容的连接关系。

机构的特征分为三类：输入特征、输出特征、固有特征。输入和输出特征一般包括：运动的类型、运动的平稳性、运动速度、稳定性、载荷特征、精度等，常见的固有特征有：效率、结构、可靠性、经济性和寿命等。

设 $S = \{S(1), \dots, S(j), \dots, S(m)\}$ 是一个可行的组合方案，其中 $S(j)$ 是集合 $A(j)$ 的元素， $w(e_c(S(a), S(b)))$ 是以 $S(a)$ 和 $S(b)$ 为顶点的边权重，组合方案整体连接性能用方案中连接关系最差的边权重来表达，即

$$w(S) = \min\{w(e_c(S(a), S(b))) \mid \forall S(a), S(b) \in S\}$$

2. 方案组成元素的评价

在 5.4.3 节我们已对因素类的形态做了定性的评价，给出了形态的优先级别。设 $Z = \{S\}$ 为可行组合方案集，为反映组合方案 S 所组成元素的质量，用参数 $n(S)$ 表示， $n(S) = (n(1), \dots, n(i), \dots, n(k))$ ，其中 $n(i)$ 表示组合方案中的元素属于优先级 i 的数目，显然 $n(S)$ 是一个关于方案性能的模糊评价。采用三级的表达方案，即 $n(S) = (n(1), n(2), n(3))$ ，如图 5.6 所示。

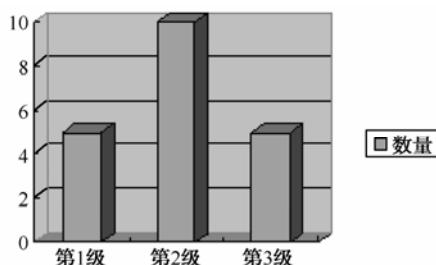


图 5.6 方案性能表达示例

因此，考虑连接关系的组合方案整体性能用 $N(S)$ 表示，即

$$N(S) = \{w(S); n(S)\} = \{w(S), \{n(1), n(2), n(3)\}\}$$

5.4.5 形态组合搜索的实现

形态学空间可表示为 $A_0 = A(1) * \dots * A(j) * \dots * A(m)$ ，通过不同因素下的形态的组合，可获得形态组合方案集，每个组合方案的整体性能使用参数 N 来描述，如何从组合方案集中搜索出若干个整体性能相对较好的形态组合是要研究的问题。

具体来说，搜索一个或若干个组合方案的整体性能相对最优，不仅要满足所选择的设计方案性能尽可能是最优的，而且也要同时满足所选择的设计方案之间的连

接关系的性能也是相对最优的。组合方案满足形态相对最优，同时连接关系相对最优，这是一个典型的多目标优化问题。

5.4.5.1 多目标优化

1. 多目标优化的概念^[126]

与单目标优化问题不同，多目标优化问题所追求的目标不是单一的，各个目标之间具有矛盾性，通常情况下不能获得问题的绝对最优解，只能求得满意解（有效解或弱有效解），问题的解是一个集合，即解集。多目标优化问题可以表述为下面的形式。

寻求 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ ，使 $\max \{z_1 = f_1(x), z_2 = f_2(x), \dots, z_q = f_q(x)\}$ ，s.t. $g_i(x) \leq 0$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。 $f(x)$ 是目标函数。 $g_i(x)$ 是 m 个不等式约束函数。

S 用来表示决策空间中的可行域， Z 用来表示判据空间的可行域。 $Z = \{x \in \mathbf{R}^q \mid z_1 = f_1(x), z_2 = f_2(x), \dots, z_q = f_q(x), x \in S\}$ ，其中 $x \in \mathbf{R}^q$ ， \mathbf{R}^q 是带有 q 个目标函数的向量，即 Z 是 S 中所有点的象的集合。

2. 多目标优化中的非支配解

多目标优化问题与单目标优化问题的差异非常大。在单个目标时，人们寻找最好的解，这个解比其他所有解都要好。在有多个目标存在时，由于存在目标之间的无法比较和冲突现象，不一定有在所有目标上都是最优的解。一个解可能在某个目标上是最优的，但是在其他目标上是最差的。因此，在有多个目标存在时，通常存在一系列无法简单进行相互比较的解。这种解称作非支配解（Nondominated Solutions）或 Pareto 最优解（Pareto Optimal Solutions）^[127]，其基本特点是：任何一个目标函数值的提高，都必须以牺牲其他目标函数值为代价。对于一个给定判据空间 Z 中的非支配解，它在决策空间的原像点称为有效的（Efficient）或非劣的（Noninferior）。 S 中的一点是有效的当且仅当的像在 Z 中是非支配的。

5.4.5.2 遗传算法

作为强有力且应用广泛的随机搜索和优化方法，遗传算法是影响最广泛的进化算法之一^[128~130]。遗传算法提供了一种在复杂解空间上进行有向随机搜索的方法。遗传算法原则上进行的是盲搜索，选择算子则有可能将遗传算法搜索的方向引导到解空间的理想区域内。

一般认为，遗传算法有五个基本组成部分。

- (1) 问题的解的遗传表示。
- (2) 创建解的初始种群的方法。
- (3) 根据个体适应值对其进行优劣评价的函数。
- (4) 用来改变复制过程中产生的子个体遗传组成的遗传算子。
- (5) 遗传算法的参数值。

遗传算法维持由一群个体组成的种群 $P(t)$, t 表示遗传代数。每一个个体均代表问题的一个潜在的解。每一个个体都被评价优劣并得到其适应值。某些个体要经历称做遗传操作的随机变换, 由此产生新的个体。主要有两种变换方法: 变异 (Mutation) 的方法是将一个个体改变从而获得新的个体; 杂交 (Crossover) 的方法是将两个个体的有关部分组合起来形成新的个体。新产生的个体 (称作后代 (Offspring), $C(t)$) 继续被评价优劣。从父代种群和子代种群中选择比较优秀的个体形成新的种群。在若干代后, 算法收敛到一个最优个体, 该个体很有可能代表着问题的最优或次优解。遗传算法的一般结构可以描述如下。

```
Begin
     $t \leftarrow 0$ 
    初始化  $P(t)$ 
    评价  $P(t)$ 
    While(终止条件不满足)do
        Begin
            重组  $P(t)$  以产生  $C(t)$ 
            评价  $C(t)$ 
            从  $P(t)$  和  $C(t)$  中选择  $P(t+1)$ 
             $t \leftarrow t+1$ 
        End
    End
```

5.4.5.3 遗传算法实现多目标优化

1. 形态组合多目标函数

组合方案的性能用 $N(S) = \{w(S); n(S)\}$ 表示, 所以形态组合多目标优化问题可以描述为, 寻找 $S = \{S(1), \dots, S(j), \dots, S(m)\}$, 使得 $\max \{z_1 = f_1(S), z_2 = f_2(S)\}$ 。目标函数有两个, $f_1(S)$ 和 $f_2(S)$, $f_1(S)$ 可以直接用 $w(S)$ 表示, $f_2(S)$ 不能直接使用 $n(S)$ 表示。为了简化起见, 元素性能等级设定 3 级, $n(S) = \{n(1), n(2), n(3)\}$, 规定 1 级最优,

3 级最差, $n(1)$ 、 $n(2)$ 、 $n(3)$ 是组合方案中分别属于各个级别元素的数目。因此, 可定义 $f_2(S) = 3 \times n(1) + 2 \times n(2) + 1 \times n(3)$ 。

遗传算法已广泛应用于单目标的优化问题中。当我们应用处理单目标优化问题的遗传算法到多目标问题上时, 多目标函数需要组合成标量表示的适应度函数。组合多目标函数成为一个标量适应度函数一般是采用加权求和的方法 (假定是极大化的多目标函数):

$$f(x) = w_1 \square f_1(x) + \cdots + w_i \square f_i(x) + \cdots + w_n \square f_n(x)$$

其中 x 是一个字符串, $f(x)$ 是组合适应度函数, $f_i(x)$ 是第 i 个目标函数, w_i 是目标函数 $f_i(x)$ 的恒定权重, n 是目标函数的数量。

在两种目标空间中有代表性的搜索行为^[131]是: 多目标空间中具有代表性的搜索行为是^[131]: 固定方向搜索和多方向搜索。我们假定目标函数的权重是相等的, 则遗传算法在多目标空间搜索的方向则是固定的, 随机权重方法来获得目标是 Pareto 解前沿面上的可变搜索方向。固定权重方法使遗传算法向着判据空间中一个固定点所在的区域内采样的趋势, 而随机权重方法则使遗传算法具有可变搜索方向, 即在整个 Pareto 解前沿面上进行均匀采样的能力。

两个目标优化问题可以设定如下的变权重方法:

$$f(x) = w_1 \square f_1(x) + w_2 \square f_2(x)$$

$$\begin{cases} w_1 = \frac{rnd_1}{\sum\limits_{j=1}^2 rnd_j} \\ w_2 = 1 - w_1 \end{cases}$$

其中 rnd_j 表示非负的随机整数。

2. 编码原则

遗传算法的特点是不对求解问题的决策变量直接进行操作, 而是通过个体编码进行交叉与变异的进化运算过程, 不断搜索出适应度高的新个体, 最终寻求问题的最优解或近似最优解。对组合优化问题最关键的问题是要寻找满足约束项目的最佳排列或组合, 整数排列编码是处理这问题的有效方法。所以, 这里采用整数编码, 这样就不存在编码和解码的过程。整数编码的情况下, 一个整数矢量对应一个染色体, 一个整数对应一个基因。

形态学空间是 $A_0 = A(1) * \cdots * A(j) * \cdots * A(m)$, $A(j)$ 是因素 j 下所有形态的集合, 对集合 $A(j)$ 内的形态可给出相应的整数编号。染色体的表示见表 5.2, 基因 $S(j)$ 表示 $A(j)$ 集合内选择的形态的整数编号。

表 5.2 染色体表示

染色体	$A(1)$	$A(2)$...	$A(j)$...	$A(m)$
对应编号	$S(1)$	$S(2)$...	$S(j)$...	$S(m)$

3. Pareto解的保持

严格意义上，遗传算法中 Pareto 解与传统优化算法中 Pareto 解有所不同。在遗传算法中，由于每代种群中仅包含原始问题的部分解，因此 Pareto 解仅表示当前所获得解的非支配点的含义，可以说是对 Pareto 解的一种近似。在进化过程中，每代都需要确定 Pareto 解，一些 Pareto 解可能出现了丢失，也就是说没有机制来确保进化过程中产生 Pareto 解进入到下一代。为了避免这种误差，这里采用了随机的精英保持策略，使得 Pareto 解得到了保持。

4. 算法流程图

流程图如图 5.7 所示。

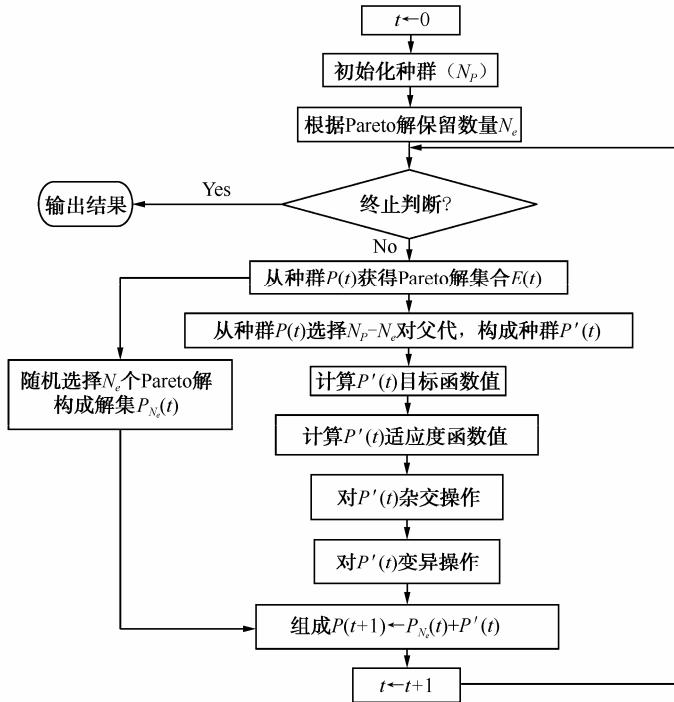


图 5.7 算法流程图

5.5 应用实例

纹版自动冲孔机一般由计算机控制，按需要可在纹版上冲出一系列孔。把一批冲好各种排列组合孔的纹版提供给提花织机，可织出一系列花样的提花织物。

1. 形态学矩阵的构造

纹版冲孔机的功能经过功能分解后，得到五个执行系统所完成的功能，称为执行功能。通过工作机理的映射执行功能在行为域内表现为若干个工艺动作或运动行为，依据运动行为或运动行为集通过对机构知识库的搜索可以获得相应的基本机构作为执行机构来实现功能。因此，就产生了与功能序列相对应的执行机构集的序列，如图 5.8 所示。例如，执行机构集 1 可实现分纸功能， $A_1=\{\text{摇杆滑块机构、曲柄滑块机构、移动从动件盘形凸轮机构、移动从动件圆柱凸轮机构，气动吸纸机构}\}$ ；执行机构集 9 是输出运动，是摆动或移动的机构集合， $A_9=\{\text{摆动从动件盘形凸轮机构，摆动从动件圆柱凸轮机构，曲柄摇杆机构、气动直线夹持机构}\}$ 。根据执行机构集 $A_1 \sim A_9$ 构造形态学矩阵。同时，执行系统与原动机相连接，涉及运动形式变换问题，由相应的基本机构来实现。例如，执行机构集 A_1 ，其输入的运动形式有往复摆动、连续转动，若所提供的运动形式是连续转动，则所输入是连续转动的机构，不需要进行运动形式变换，若输入是往复运动形式的机构，则需要前置的转换机构。基本过程如图 5.9 所示。

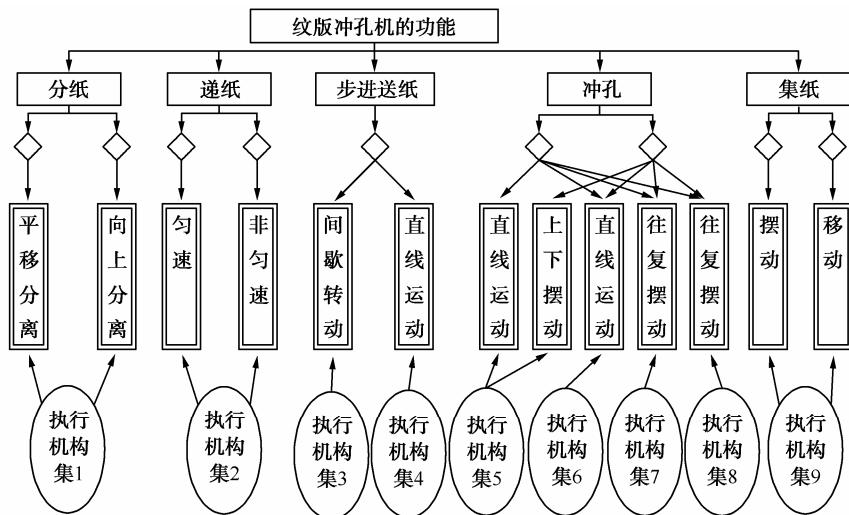


图 5.8 纹版冲孔机

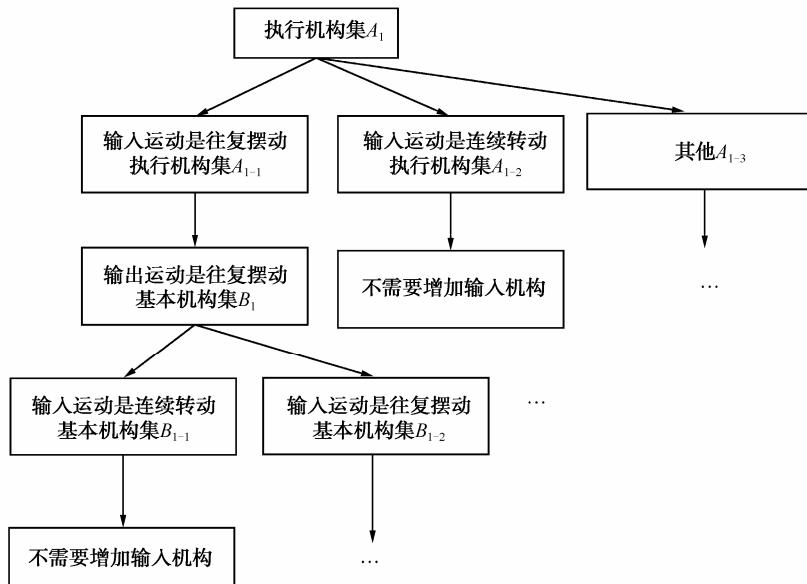


图 5.9 执行机构集的扩展

$A_1=\{\text{摇杆滑块机构、曲柄滑块机构、移动从动件盘形凸轮机构、移动从动件圆柱凸轮机构, 气动吸纸机构}\};$

$A_{1-1}=\{\text{摇杆滑块机构}\};$

$A_{1-2}=\{\text{曲柄滑块机构、移动从动件盘形凸轮机构, 移动从动件圆柱凸轮机构}\};$

$A_{1-3}=\{\text{气动吸纸机构}\};$

$B_1=\{\text{摆动从动件盘形凸轮机构, 曲柄摇杆机构, 双摇杆机构, 摆动导杆机构}\};$

$B_{1-1}=\{\text{摆动从动件盘形凸轮机构, 曲柄摇杆机构, 转动导杆机构}\};$

$B_{1-2}=\{\text{双摇杆机构, 摆动导杆机构}\};$

B_{1-2} 可进一步分解下去。

如图 5.10 所示, 执行机构集 A_1 , 通过分解、再映射过程, 这样就构成了一个机构集合的运动链, $B_1 \rightarrow A_1$ 。

执行机构集合的运动形式分解后, 可给出纹版自动冲孔机的形态学矩阵, 见表 5.3。另外, 考虑到执行机构系统的运动和动力来自于传动系统, 因此, 对形态学矩阵需要扩充, 增加传动系统的相关内容, 见表 5.4。对机械系统而言, 形态学矩阵中的因素与系统所要实现的运动行为相关联, 因素下的形态集是各种具体的机构载体所组成, 是可实现所要求运动行为的集合。

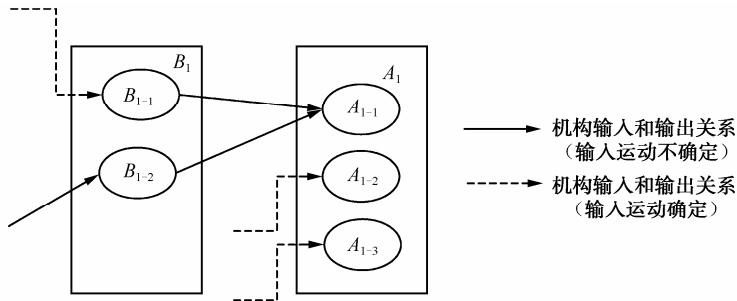


图 5.10 机构输入和输出关系

表 5.3 形态学矩阵

功能	代号	运动行为	载体				
			1	2	3	4	5
分纸	A	直线运动	摇杆滑块机构	移动从动件 盘形凸轮机构	移动从动件 圆柱凸轮机构	气动吸纸机 构	—
	B	往复摆动	摆动从动件盘 形凸轮机构	曲柄摇杆机 构	双摇杆机构	摆动导杆机 构	Null
递纸	C	直线运动	摩擦轮机构带 纹版移动	链传动机构 带纹版移动	皮带传动带 纹版移动	—	—
间歇送纹版	D	间歇转动	槽轮机构	棘轮机构	不完全齿轮 机构	圆柱凸轮间 歇运动机构	—
	E	直线运动	摩擦轮机构	—	—	—	—
冲头打击	F	直线运动 或摆动	曲柄摇杆机构	曲柄滑块机 构	六杆摇杆机 构	六杆滑块机 构	—
冲头移动至 冲针上方	G	直线运动	曲柄滑块机构	—	—	—	—
冲头复位	H	往复摆动	四连杆摇杆机 构	—	—	—	—
	I	往复摆动	摆动从动件盘 形凸轮机构	摆动从动件 圆柱凸轮机构	—	—	—

续表

功能	代号	运动行为	载体				
			1	2	3	4	5
冲针复位	J	往复摆动	四连杆摇杆机构	—	—	—	—
	K	往复摆动	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件圆柱凸轮机构	—	—	—
集纸运动	L	往复摆动	曲柄摇杆机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件圆柱凸轮机构	—	—

表 5.4 形态学矩阵补充内容

功能	代号	运动行为	载体			
			1	2	3	4
减速 I	M	输入：转动 输出：转动	皮带传动	链传动	齿轮传动	蜗轮传动
减速 II	N	输入：转动 输出：转动	同步齿形带传动	链传动	齿轮传动	摆线针轮传动

形态学矩阵中，行为或（功能）因素之间的连接关系，直观上可用图来表示，如图 5.11 所示。在计算机实现编程时，采用矩阵的形式来表达。

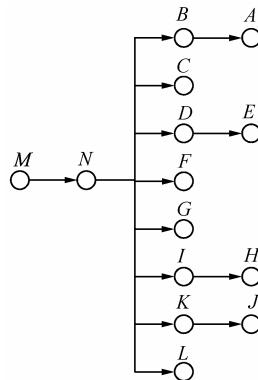


图 5.11 形态学矩阵因素连接关系

	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>I</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>J</i>	<i>L</i>
<i>M</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>N</i>	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
<i>B</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>A</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>C</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>D</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>E</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>F</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>G</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>I</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>H</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>K</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>J</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>L</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. 形态(行为载体)的定性评价

对形态学矩阵中的行为因素集 $\{A, B, \dots, L\}$ ，依次从行为因素集中取出一项，对该行为因素下的形态可分别在多个评价指标下作定性比较，可得到偏序关系矩阵的集合，通过 5.4.3 节所提出的算法，可获得形态的定性排序，最后可获得方案的所在评价层。

例如，形态学矩阵中行为因素 *A* 下的载体集，设定要评价的指标分别是 *C₁*(功能)、*C₂*(性能)、*C₃*(经济性)。为方便表达，做如下规定：

方案 $A_i \succ A_j$ ，评价矩阵 *M* 中元素 $m_{ij} = 1$ ， $m_{ji} = -1$ ；

方案 $A_i \prec A_j$ ，评价矩阵 *M* 中元素 $m_{ij} = -1$ ， $m_{ji} = 1$ ；

方案 $A_i \sim A_j$ ，评价矩阵 *M* 中元素 $m_{ij} = 0$ ， $m_{ji} = 0$ ；

方案 $A_i ? A_j$ ，评价矩阵 *M* 中元素 $m_{ij} = 2$ ， $m_{ji} = 2$ ；

方案 $A_i A_i$ ，评价矩阵 *M* 中元素 $m_{ii} = 3$ 。

<i>C₁</i>	<i>A₁</i>	<i>A₂</i>	<i>A₃</i>	<i>A₄</i>	<i>C₂</i>	<i>A₁</i>	<i>A₂</i>	<i>A₃</i>	<i>A₄</i>	<i>C₃</i>	<i>A₁</i>	<i>A₂</i>	<i>A₃</i>	<i>A₄</i>
<i>A₁</i>	3 0 0 2				<i>A₁</i>	3 1 1 0				<i>A₁</i>	3 1 1 1			
<i>A₂</i>	0 3 0 2				<i>A₂</i>	-1 3 2 -1				<i>A₂</i>	-1 3 1 1			
<i>A₃</i>	0 0 3 2				<i>A₃</i>	-1 2 3 -1				<i>A₃</i>	-1 -1 3 1			
<i>A₄</i>	2 2 2 3				<i>A₄</i>	0 1 1 3				<i>A₄</i>	-1 -1 -1 3			

通过计算劣势指数和优势指数的值，可获得最终评价结果：1, 3, 3, 3。

3. 确定方案的相容度的等级

若机构载体之间存在输入和输出关系，则其连接关系性能可以用相容度来表达。例如， B_2 （摆动从动件盘形凸轮机构）和 A_1 （摇杆滑块机构）具有输入和输出的连接关系，是完全相容的，相容级别为2； N_1 （同步齿形带传动）和 B_3 （双摇杆机构）具有输入和输出的连接关系，但是运动形式不一致，并不相容，相容级别为0； M_1 （皮带传动）和 N_2 （链传动）具有输入和输出的连接关系，相容度为0.4，相容级别为1。

4. 通过遗传算法，获得优选方案

在前面的步骤1、2、3的基础上，设定初始种群规模为100，交叉概率为0.8，变异概率为0.15，最大迭代次数为500，采用精英保持的遗传算法，可得到如图5.12所示的优选方案，表5.5是优选方案的具体描述。

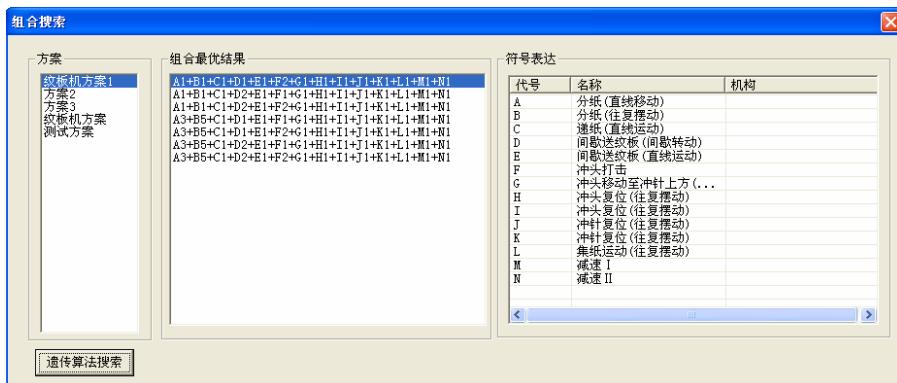


图 5.12 组合优选方案

表 5.5 优选方案集

		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
分纸	A	摇杆滑块机构	摇杆滑块机构	摇杆滑块机构	移动从动件圆柱凸轮机构	移动从动件圆柱凸轮机构	移动从动件圆柱凸轮机构	移动从动件圆柱凸轮机构
	B	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	Null	Null	Null	Null

续表

		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
递纸	C	摩擦轮机构	摩擦轮机构	摩擦轮机构	摩擦轮机构	摩擦轮机构	摩擦轮机构	摩擦轮机构
间歇送 纹版	D	槽轮机构	棘轮机构	棘轮机构	槽轮机构	槽轮机构	棘轮机构	棘轮机构
	E	摩擦轮机构	摩擦轮机构	摩擦轮机构	摩擦轮机构	摩擦轮机构	摩擦轮机构	摩擦轮机构
冲头 打击	F	曲柄滑块机 构	曲柄摇杆 机构	曲柄滑块 机构	曲柄摇杆 机构	曲柄滑块 机构	曲柄摇杆 机构	曲柄滑 块机构
冲头 移动	G	曲柄滑块机 构	曲柄滑块 机构	曲柄滑块 机构	曲柄滑块 机构	曲柄滑块 机构	曲柄滑块 机构	曲柄滑 块机构
冲头 复位	H	双摇杆机构	双摇杆机 构	双摇杆机 构	双摇杆机 构	双摇杆机 构	双摇杆机 构	双摇杆机 构
	I	摆动从动件 盘形凸轮机构	摆动从动 件盘形凸轮 机构	摆动从动 件盘形凸轮 机构	摆动从动 件盘形凸轮 机构	摆动从动 件盘形凸轮 机构	摆动从动 件盘形凸轮 机构	摆动从 动件盘形 凸轮机构
冲针 复位	J	双摇杆机构	双摇杆机 构	双摇杆机 构	双摇杆机 构	双摇杆机 构	双摇杆机 构	双摇杆机 构
	K	摆动从动件 盘形凸轮机构	摆动从动 件盘形凸轮 机构	摆动从动 件盘形凸轮 机构	摆动从动 件盘形凸轮 机构	摆动从动 件盘形凸轮 机构	摆动从动 件盘形凸轮 机构	摆动从 动件盘形 凸轮机构
集纸 运动	L	曲柄摇杆机 构	曲柄摇杆 机构	曲柄摇杆 机构	曲柄摇杆 机构	曲柄摇杆 机构	曲柄摇杆 机构	曲柄摇 杆机构
减速 I	M	皮带传动	皮带传动	皮带传动	皮带传动	皮带传动	皮带传动	皮带传 动
减速 II	N	同步齿形带 传动	同步齿形 带传动	同步齿形 带传动	同步齿形 带传动	同步齿形 带传动	同步齿形 带传动	同步齿 形带传动

本章小结

本章首先介绍了形态分析法的基本内容和基本理论，然后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，考虑了性能和连接关系的等级问题，并采用偏序关系理论、遗传算法加以实现。最后分析一个具体的例子。

第6章 概念设计方案的评价

6.1 引言

随着计算机辅助设计、并行工程和虚拟产品制造技术的不断发展。计算机代替了大量人类的工作，使人在详细设计阶段的工作量逐渐减少，设计者有更多的精力和能力关注概念设计。概念设计对开发具有市场竞争力的新产品有至关重要的作用，成功的概念设计可降低生产成本，提高产品质量，缩短产品的上市时间。概念设计成功与否，关键在于设计领域的专家对设计方案的评价。概念设计中的方案评价历来是争议最多，但又不得不做的一件事情。在概念设计阶段要产生多个可行方案，并且要进行恰当的评价和选择，从中选出几个认为是伯仲之间的方案同时进行下一步设计。概念设计方案评价的重要性是不言而喻的，它决定了后续设计的方向。

方案评价的过程中要考虑的因素很多，不仅仅考虑功能性要求，还要考虑全生命周期中一些其他要求，如制造性、可靠性、安全性、经济性要求。方案评价中既有定性指标，又有定量指标，是一个典型的多准则决策问题。经典的多准则决策问题一般可分为两个领域，即多属性决策和多目标决策。本质上多属性决策是研究已知方案的评价选择问题，目前应用很广泛。多属性决策方法的关键是确定评价指标体系，分配权重和计算总价值，常用的方法主要包括效用分析法和模糊评价法。

方案评选时，由于多指标的存在，要考虑的影响因素繁多，这些因素有些是可量化因素，有些是不可量化的，对这些不可量化因素的评价又带有一定的模糊性，无法做出定性的评价，给评价带来了很大的难度，采用常规评价方法如效用分析法显然是无能为力的^[132]。考虑到概念设计所处理的信息通常是不完整的、不精确的、模糊的，无法用确定的数学模型来表达，用模糊集理论进行模糊评价是比较合适的，符合概念设计的抽象性和模糊性的特点，这样使得概念设计评价模型具备了更多的柔性，模糊评价法得到了广泛的应用。常见的模糊评价方法有模糊优序方法^[133]、基于神经网络的模糊推理方法^[69]、模糊综合评判^[70]，但是模糊评价法评价指标模糊隶属度的确定，一直是影响模糊集理论广泛应用的难点，文献[134]提出相对隶属度

的概念，突破了经典隶属度的唯一性概念与定义，建立了适合工程实际需要的隶属度概念。

对有限方案集进行综合评价后，可获得方案集排序并选出最满意方案。在决策分析中，为得到最终的方案排序结果，评价者常常给出的是关于两两方案比较的偏好信息，由于决策问题的复杂性，评价者很难直接给出所有方案的排序结果，但就两个方案的优劣容易做出判断。评价者给出的两两方案比较的偏好信息，可由一个判断矩阵来构成，从判断矩阵中元素表示方式大致可分为两大类：一类是基于互反性的层次分析法（AHP）判断矩阵；另一类是基于互补性的模糊判断矩阵。层次分析法的基础二元比较的“互反性”判断思维模式与我们的“互补性”思维习惯不符^[135]，另外 AHP 将元素之间两两比较的目标，一律归结为“重要性”的比较，在物理概念上不合理，没有将元素的“重要性”和“优越性”等目标分离，所以用层次分析法进行概念设计评价确定权重时，若影响方案的指标很多，指标之间又存在层次关系，权重是很难细致分配的，即使一一给出了权重，但是要满足归一化的要求，每一个指标的权重必然很小，模糊综合评价后将有很多的信息丢失，得不到任何有意义的结果。因此，这里采取互补性的模糊判断矩阵作为二元判断的基础。

工程模糊集理论在复杂问题决策方面得到了广泛的应用^[136~137]，这里采用该理论作为研究基础。

6.2 方案评价的指标体系

为了使评价结果尽量准确、有效，必须建立一个评价指标体系，这是所设计的方案要达到的目标群。概念设计是一个设计过程，评价贯穿于整个过程。在这个过程中信息是逐步增加和明晰的，因而评价的指标体系随着概念设计的过程应该有所变化。评价指标体系的结构应满足两方面的要求：一是评价的指标体系应尽可能地全面，但又必须抓住重点；二是体系随着设计活动的发展能不断提取和完善相应的指标体系。所以，可用递阶层次结构模型来建立机械系统评价指标体系。最高层次的指标是对整体性能的抽象描述，最低层次的指标是对系统基本性能各方面的描述，指标体系结构如图 6.1 所示^[138]。

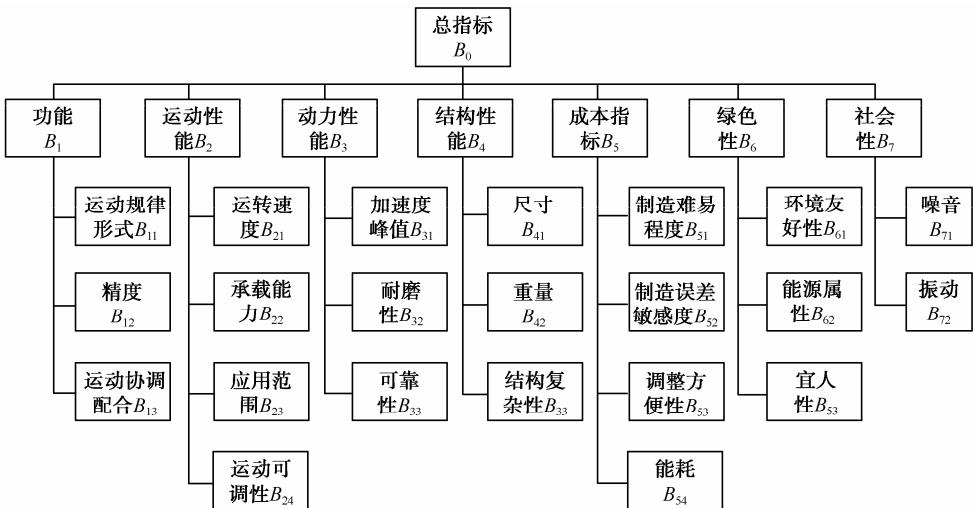


图 6.1 指标体系图

6.3 方案评价的基本原理

概念设计中方案的评价与选择问题，可以看成半结构性系统选优的问题，对半结构性选优的问题可以转换为一系列单元系统半结构性模糊优选问题的求解^[139]。图 6.1 所示为指标体系结构图，指标分两个层次，相邻指标层次之间存在相互隶属关系，每个指标层次中划分为若干个单元系统。这样评价系统就可以分解为一系列相互独立又相互联系的单元系统，如图 6.2 所示。单元系统的基本特点是：以对于优的隶属度作为它的输入和输出，通常输入为一模糊矩阵，输出为一模糊行矩阵。第一层单元系统有一个，随着层次的增加，单元系统的数量也在增加。单元系统分为两类：综合单元系统和基本单元系统。综合单元系统的输入是若干个单元系统输出，即综合单元系统和单元系统之间的联系是通过指标之间隶属关系来实现的。基本单元系统位于底层，与待评价方案集相关联。求解的基本思路是，从低层开始求解，分别对每个基本单元系统求解，每个基本单元系统的输入是相对优属度矩阵和该单元系统中指标的权重，输出的是相对优属度向量，即各方案对应的优的相对隶属度。这里输入的相对优属度矩阵^[134]是和基本单元系统中的指标相对应的，也就是输入的相对优属度矩阵的行数要等于基本单元系统的指标数，输出的相对优属度向量是针对基本单元系统的上级指标而言。当低层基本单元系统都已求解完毕，开始逐个求解高层次中的综合单元系统，直至最高层。

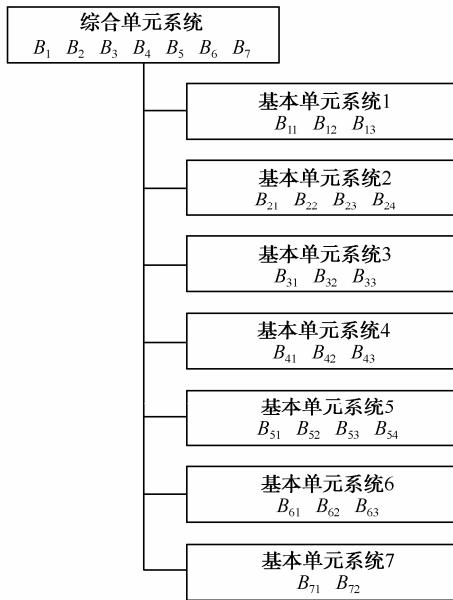


图 6.2 系统分解图

当最高层的综合单元系统求解完成之后，可以得到该目标的各方案的相对优属性向量，即可得到各方案的优越性排序。

6.4 方案评价的模糊识别模型^[138]

概念设计方案评价过程中，不存在绝对的优劣之分，是一个模糊概念，设待评价设计方案有 n 个，即给定一组可能的方案 x_1, x_2, \dots, x_n ，形成了方案集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，待求的基本单元系统有 m 个指标，形成了指标集 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ ，参加方案评定的专家有 t 位， $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_t\}$ 。决策的本质就是优选，模糊综合评价的最终目的就是在论域 n 个方案之间在基本单元系统框架之内做相对优劣性比较，给出方案的优劣顺序。

6.4.1 评价指标权重的确定

权重的确定方法有很多，如 AHP 法、专家评定法、模糊集分析单元理论等。为了便于二元比较，这里采取了模糊集分析单元理论^[134, 135]作为确定权重的方法，具体步骤如下。

1. 作指标重要性定性排序

给出二元比较矩阵，将要排序的基本单元系统的指标集 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 经第 h 位专家二元比较之后给出重要性的二元比较矩阵，即

$${}_h F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ {}_h f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mm} \end{bmatrix} = {}_h(f_{kl})$$

其中 $k = 1, 2, \dots, m$; $l = 1, 2, \dots, m$ 。

采用行和法，给出指标集的重要性定性排序。若有 t 位专家参加重要性定性排序，可得到重要性排序一致性标度矩阵 ${}_h F$ ($h = 1, 2, \dots, t$)，由于专家的学术水平和经验不尽相同，利用排序矩阵得到的结果一般不会相同，为此需要对 t 位专家的结果进行处理。令

$${}_h f_k = \sum_{l=1}^m f_{kl}$$

则有

$${}_h f = ({}_h f_1, {}_h f_2, \dots, {}_h f_m)$$

由上式，得到 t 位专家对指标集 D 进行重要性排序的综合标度矩阵 $F = ({}_h f_k)$ 。

设 t 位专家根据自己在此领域熟悉程度，给出指标集重要性排序一致性标度矩阵的可信度为

$$w^z = (w_1^z, w_2^z, \dots, w_t^z)$$

由此得到总的重要性排序一致性矩阵为

$$\begin{aligned} F &= (w_1^z, w_2^z, \dots, w_t^z) \cdot \begin{bmatrix} {}_1 f_1 & {}_1 f_2 & \cdots & {}_1 f_m \\ {}_2 f_1 & {}_2 f_2 & \cdots & {}_2 f_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ {}_t f_1 & {}_t f_2 & \cdots & {}_t f_m \end{bmatrix} \\ &= [f_1, f_2, \dots, f_m] \end{aligned}$$

其中行向量 $[f_1, f_2, \dots, f_m]$ 是对指标集重要性排序的综合标度，是 t 位专家的知识经验的综合反映。根据行向量中由大到小排序，就给出了指标集的重要性一致排序。

2. 指标重要性定量排序，确定相对隶属度

文献[134]提出相对隶属度概念，突破了之前隶属度的唯一性概念与定义，建立了适合工程实际需要的隶属度概念，在工程应用中常常只需要确定相对隶属度，计算相对隶属度比确定绝对隶属度容易。

根据文献[134]，给出了权重的计算公式

$$w_i = \frac{1 - g_{1i}}{g_{1i}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_{1i}}{g_{1i}}, \quad 0.5 \leq g_{1i} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

为了在二元定量比较中更符合我们的语言习惯，可以参考文献[134]给出的语气算子与定量标度、相对隶属度之间的关系，通过语气算子判断给出 g_{1i} ，可得到指标集对重要性的相对隶属度向量：

$$\mathbf{w}' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_m)$$

6.4.2 评价指标相对优属度矩阵的建立

根据相对隶属度的定义规定某个指标对优的相对隶属度称为相对优属度。指标确定相对优属度的步骤是：对 d_i 而言先通过二元比较矩阵对方案进行定性排序，确定相对最优的方案 k ；若 $r_{ik} = 1$ ，则以该方案为标准，与其他序号的方案之间比较由模糊语气算子得到的相对隶属度，因此可以得到定性指标的相对优属度矩阵：

$$\mathbf{R}_{m \times n} = (r_{ij})_{m \times n}$$

若有多位专家参加评价，具体处理方法和指标权重的确定方法一样，在此不再赘述。

6.4.3 多级模糊识别理论

方案的优劣程度依据 m 个指标特征值，按从优级到劣级的 c 个级别进行识别^[139]。显然，对于任一目标，就模糊概念优而言，可以规定优级（1 级）对优的相对隶属度（简称相对优属度）为 1，劣级（ c 级）的相对优属度为 0。可以认为 c 级到 1 级的相对优属度从 0~1 呈线性递增，则相邻两个级别的相对优属度差值为

$$\Delta = \frac{1}{c-1}$$

对于任一指标，从 1 级到 c 级各个级别的相对优属度标准值向量为

$$\mathbf{s} = \left[0, \frac{1}{c-1}, \dots, \frac{c-2}{c-1}, 1 \right] = (s_{ih})$$

设方案集归属于各个级别的相对隶属度矩阵为 $\mathbf{U} = (u_{hj})_{c \times n}$ ， u_{hj} 为方案 j 从属于

级别 h 的相对隶属度，满足条件 $\sum_{h=1}^c u_{hj} = 1; \quad 0 \leq u_{hj} \leq 1; \quad \forall j, \forall h$ 。

根据参考文献[134]所建立的多级模糊优选模型：

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & d_{kj} = 0; \quad k \neq h \\ \left[\frac{\sum_{k=1}^c \frac{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - s_{ih})]^2}{\sum_i [w_i(r_{ij} - s_{ik})]^2}}{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - s_{ih})]^2} \right]^{-1} & d_{kj} \neq 0; \quad \forall i, j \\ 1 & d_{hj} = 0; \quad h = k \end{cases}$$

其中 s_{ik} 表示级别 k 对指标 i 的相对隶属度； d_{kj} 表示方案 j 与级别 k 之间的差异，用广义欧氏权距离来表示，即

$$d_{kj} = \left\{ \sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - s_{ih})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

应用上述模型可解得方案集归属于各个级别的相对隶属度矩阵：

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{c1} & u_{c2} & \dots & u_{cn} \end{bmatrix} = (u_{hj}) \quad h = 1, 2, \dots, c; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

根据各级别特征值 h 的特征向量为

$$\mathbf{H} = (1, 2, \dots, c)(u_{hj}) = (h_1, h_2, \dots, h_n)$$

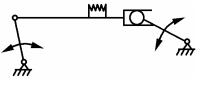
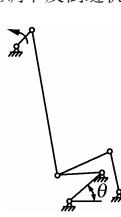
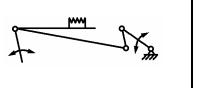
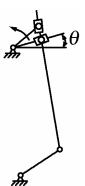
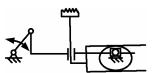
得到 n 个方案的级别特征值，根据特征值可以得到方案优劣排序，也可得到方案对待求解单元系统的相对优属度：

$$\mathbf{Y} = (h_1/c, h_2/c, \dots, h_n/c)$$

6.5 方案评价的实例

表 6.1 是多功能高速润滑工业平缝机四大机构备选方案，它包括四大机构：刺料机构、挑线机构、勾线传动机构和送料机构。

表 6.1 备选方案

机构 方案 机构	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
刺料机构	急回往复运动的摇杆滑块机构	曲柄滑动机构	移动滚子从动件盘形凸轮机构	正弦机构
挑线机构	齿轮连杆机构	四连杆机构	平面凸轮机构	空间凸轮机构
勾线传动机构	齿轮机构	连杆机构	齿轮机构	连杆机构
送料机构	下送料机构: (1) 五杆机构构成的抬牙送料机构  (2) 连杆机构构成的针距调节及倒缝机构 	下送料机构: (1) 五杆机构构成的抬牙送料机构  (2) 连杆机构构成的针距调节及倒缝机构 	下送料机构: (1) 七杆机构构成的抬牙送料机构  (2) 连杆机构构成的针距调节及倒缝机构 	下送料机构: (1) 凸轮式抬牙送料机构  (2) 采用凸轮为动力源的针距调节及倒缝机构 

6.5.1 确定单元系统，以及相应的指标权重

以基本单元系统方案 2 为例说明指标权重的确定方法，设指标为

$$D = \{d_1, d_2, d_3, d_4\} = \{\text{运转速度}, \text{承载能力}, \text{应用范围}, \text{运动可调性}\}$$

6.5.1.1 定性排序

为了简化起见，设有 3 位专家参加方案评价，每位专家根据自己的经验和知识，对单元系统中的指标做重要性二元比较，得到了重要性的二元比较矩阵。系统经过判断、修正可以得到重要性排序一致性标度矩阵。根据三位专家的判断可给出的重要性排序一致性标度矩阵：

$$\begin{array}{cccc}
 d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\
 \hline
 d_1 & \left[\begin{matrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0.5 \end{matrix} \right] & (1.5) & d_1 & \left[\begin{matrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0.5 \end{matrix} \right] & (1.5) \\
 d_2 & \left[\begin{matrix} 1 & 0.5 & 1 & 1 \end{matrix} \right] & (3.5) & d_2 & \left[\begin{matrix} 1 & 0.5 & 1 & 1 \end{matrix} \right] & (3.5) \\
 d_3 & \left[\begin{matrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0.5 \end{matrix} \right] & (1.5) & d_3 & \left[\begin{matrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \end{matrix} \right] & (1) \\
 d_4 & \left[\begin{matrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0.5 \end{matrix} \right] & (1.5) & d_4 & \left[\begin{matrix} 0.5 & 0 & 1 & 0.5 \end{matrix} \right] & (2) \\
 \hline
 & & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\
 & & d_1 & \left[\begin{matrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 1 \end{matrix} \right] & (2) & \\
 & & d_2 & \left[\begin{matrix} 1 & 0.5 & 1 & 1 \end{matrix} \right] & (3.5) & \\
 & & d_3 & \left[\begin{matrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \end{matrix} \right] & (1) & \\
 & & d_4 & \left[\begin{matrix} 0 & 0 & 1 & 0.5 \end{matrix} \right] & (1.5) &
 \end{array}$$

其中右侧的括号中的数字是每行的和数。

由上面三个矩阵的三组行的和数，可得到 3 位专家对指标集 D 进行重要性排序的综合标度矩阵：

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1.5 & 3.5 & 1.5 & 1.5 \\ 1.5 & 3.5 & 1 & 2 \\ 2 & 3.5 & 1 & 1.5 \end{bmatrix}$$

设三位专家对本领域的熟悉程度为： $\mathbf{O} = (O_1, O_2, O_3) = (85, 75, 95)$ ，做归一化，可得三位专家的权重：

$$\mathbf{w}^z = (w_1^z, w_2^z, w_3^z) = (0.294, 0.333, 0.373)$$

可以得到 3 位专家对指标集 D 总的重要性排序一致性矩阵：

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F} &= [0.294, 0.33, 0.373] \begin{bmatrix} 1.5 & 3.5 & 1.5 & 1.5 \\ 1.5 & 3.5 & 1 & 2 \\ 2 & 3.5 & 1 & 1.5 \end{bmatrix} \\
 &= [1.707, 3.5, 1.144, 1.66]
 \end{aligned}$$

基本单元系统方案 2 指标重要性的排序为 d_2, d_1, d_4, d_3 。

用同样的方法可以确定其他单元系统中指标的定性排序。

6.5.1.2 定量排序

以基本单元系统方案 2 为例说明，根据此单元中指标的定性排序，最为重要的指标是 d_1 ，每位专家把指标 d_1 与其他指标做重要性定量比较重要比较的语气算子，得到相对隶属度。

设每位专家权重和定性评价时取的一样的值，下式可得到未归一化的权向量：

$$\begin{aligned} \mathbf{w}' &= (w_1^z, w_2^z, \dots, w_t^z) \square \begin{bmatrix} {}_1 w_1 & {}_1 w_2 & {}_1 w_3 & {}_1 w_4 \\ {}_2 w_1 & {}_2 w_2 & {}_2 w_3 & {}_2 w_4 \\ {}_3 w_1 & {}_3 w_2 & {}_3 w_3 & {}_3 w_4 \end{bmatrix} \\ &= (0.294, 0.333, 0.373) \square \begin{bmatrix} 0.818 & 1 & 0.429 & 0.667 \\ 0.818 & 1 & 0.429 & 0.538 \\ 0.818 & 1 & 0.333 & 0.667 \end{bmatrix} \\ &= (0.818, 1, 0.391, 0.624) \end{aligned}$$

经过归一化：基本单元系统方案 2 各指标的权重为

$$\mathbf{w} = (0.288, 0.353, 0.138, 0.22)$$

同理，其他单元组指标的权重也可一一确定。

6.5.2 确定基本单元系统的输入相对优属度矩阵

以基本单元系统方案 2 为例说明相对优属度矩阵的确定。可通过先定性排序后定量的方法确定单元系统方案 2 的相对优属度向量，然后建立相对优属度矩阵。

方案按照特定指标作排序时，二元比较不容易进行，为了解决这个问题，根据方案中的结构组成，对指标进行了细化，细化后的指标进行二元比较就比较容易了，如图 6.3 所示是对运转速度指标细化后和方案的对应关系。

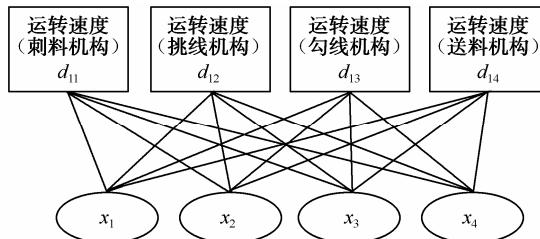


图 6.3 指标细化评价图

因此，通过二元比较，可得到方案集对指标 d_i 的细化集 d_{11} 、 d_{12} 、 d_{13} 、 d_{14} 的相对优属度向量分别为

$$d_{11}(r_{x_1}, r_{x_2}, r_{x_3}, r_{x_4}) = (1, 1, 0.538, 1)$$

$$d_{12}(r_{x_1}, r_{x_2}, r_{x_3}, r_{x_4}) = (1, 1, 0.538, 0.538)$$

$$d_{13}(r_{x_1}, r_{x_2}, r_{x_3}, r_{x_4}) = (1, 0.538, 1, 0.538)$$

$$d_{14}(r_{x_1}, r_{x_2}, r_{x_3}, r_{x_4}) = (1, 1, 1, 0.538)$$

方案集对指标 d_1 的细化集 d_{11} 、 d_{12} 、 d_{13} 、 d_{14} 相对优属度矩阵为

$$d_1 \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.538 & 1 \\ 1 & 1 & 0.538 & 0.538 \\ 1 & 0.538 & 1 & 0.538 \\ 1 & 1 & 1 & 0.538 \end{bmatrix} = (\mathbf{r}_{4 \times 4})$$

优的相对隶属度识别模型为

$$u_j = \frac{1}{1 + \left[1 - \sum_{i=1}^4 r_{ij} \right]^2}$$

根据该模型可得到指标 d_1 相对优属度向量为

$$d_1 \mathbf{r} = (d_1 r_{x_1}, d_1 r_{x_2}, d_1 r_{x_3}, d_1 r_{x_4}) = (1, 0.983, 0.917, 0.781)$$

同理也可得到基本单元系统方案 2 对指标 d_2 、 d_3 、 d_4 的相对优属度向量为

$$d_2 \mathbf{r} = (d_2 r_{x_1}, d_2 r_{x_2}, d_2 r_{x_3}, d_2 r_{x_4}) = (1, 0.979, 0.917, 0.826)$$

$$d_3 \mathbf{r} = (d_3 r_{x_1}, d_3 r_{x_2}, d_3 r_{x_3}, d_3 r_{x_4}) = (1, 0.976, 0.595, 0.768)$$

$$d_4 \mathbf{r} = (d_4 r_{x_1}, d_4 r_{x_2}, d_4 r_{x_3}, d_4 r_{x_4}) = (0.957, 0.998, 0.826, 0.892)$$

则基本单元系统方案 2 的相对优属度矩阵为

$$d_2 \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0.983 & 0.917 & 0.781 \\ 1 & 0.979 & 0.917 & 0.826 \\ 1 & 0.976 & 0.595 & 0.768 \\ 0.957 & 0.998 & 0.826 & 0.892 \end{bmatrix}$$

这里只考虑了单人评价，多人评价的问题处理方式和指标权重的处理方式一样，这里不再一一列举。用同样的方法也可确定其他基本单元系统输入的相对优属矩阵。

6.5.3 基本单元系统求解

仍然以单元系统方案 2 为例，根据上面确定的指标权重 $\mathbf{w} = (0.288, 0.353, 0.138, 0.22)$ ，以及相对优属度矩阵 \mathbf{Y} ，根据多级模糊优选模型进行模糊识别，可以得到四种方案对差、中、优的相对隶属矩阵为

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0013 & 0.0014 & 0.1269 & 0.2462 \\ 0.9987 & 0.9986 & 0.8731 & 0.7538 \end{bmatrix}$$

由此可得到特征向量为

$$\mathbf{H} = \{2.999, 2.999, 2.873, 2.754\}$$

得到单元系统方案 2 对优的隶属度为：(0.9996, 0.9995, 0.09577, 0.9179)，可以作为综合单元的输入。

6.5.4 综合单元系统求解

当基本单元系统求解完成后，就可求解上一层综合单元系统，综合单元系统可以由基本单元系统各自输出的相对优属度向量作为输入，根据多级模糊优选模型进行模糊识别，得到 4 种方案分别对差、中、优三级的相对隶属度矩阵为

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.002515 & 0.000219 & 0.018722 & 0.029455 \\ 0.997485 & 0.999781 & 0.981278 & 0.970545 \end{bmatrix}$$

可以得到特征值为

$$\mathbf{H} = (1, 2, 3)^\top \mathbf{U} = (2.997485, 2.999781, 2.981278, 2.970545)$$

根据 4 种方案的特征值，可以判定方案排序为 2, 1, 3, 4。

机械运动系统概念设计方案为各种机构方案的组合，在实施方案评价时没有考虑机构不同尺度下的运动特性，今后在方案评价时要根据机构的尺度对机构进行自动化的运动分析^[143,144]，获得相对更加合理的机械运动系统的概念设计方案。

本章小结

本章基于非结构性决策模糊集理论，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。基本单元的评价是以互补性的模糊判断矩阵和相对隶属度概念为基础，采取先定性后定量的方法，确定基本单元中指标的权重和方案对单元指标的相对优属度矩阵，进行多级模糊优选，可以得到在此单元系统下方案的相对优属度向量，来作为综合单元系统的输入。在确定权重和定性指标的相对隶属度的过程中，考虑到了多专家评价的问题。提出的评价方法既利用了专家的知识和经验，又利用了客观存在的数据，符合概念设计评价的特点，是非常有效的评价方法，具有很好的应用前景。

第7章 系统实现及综合应用实例

7.1 引言

第2章提出了机械系统概念设计总体框架，第3章至第6章从理论和实际应用两方面介绍机械系统概念设计的主要内容。在以上各章的基础上，开发了机械系统的计算机辅助概念设计软件系统（Mechanism Computer Aided Conceptual Design System）。该系统基于“功能-工作机理-行为-结构”（FMBS）模型，将各类型知识、数据和算法有机地结合起来，提供给设计者一个辅助设计工具。设计者既可以利用其中部分模块来进行设计，实现方案创新，也可从总功能开始，按照FMBS模型流程，快速产生机械系统方案集，随后经过评价模块，为后续设计提供1~3个较为优秀的设计方案。

7.2 计算机辅助概念设计软件系统的开发

7.2.1 软件系统结构

软件系统主要由6个子系统所组成：功能、行为、结构、方案生成、评价、维护。如图7.1所示，功能、行为、结构、方案生成、评价5个子系统(模块)具有独立的输入和输出。当每个分系统确定输入参数后，系统将会输出结果，因此，每个子系统可独立使用。当功能子系统有确定的总功能和一些条件作为输入，同时5个子系统具有图示输入流和输出流的连接关系时(图中的虚线连接)，方案评价子系统将会给出几个可行方案的定性排序。维护子系统可管理并维护软件系统中存在的各类知识和数据，例如功能、行为、结构知识、功能分解过程的数据，行为空间数据，评价数据等，这些数据和知识将保存在数据库中。

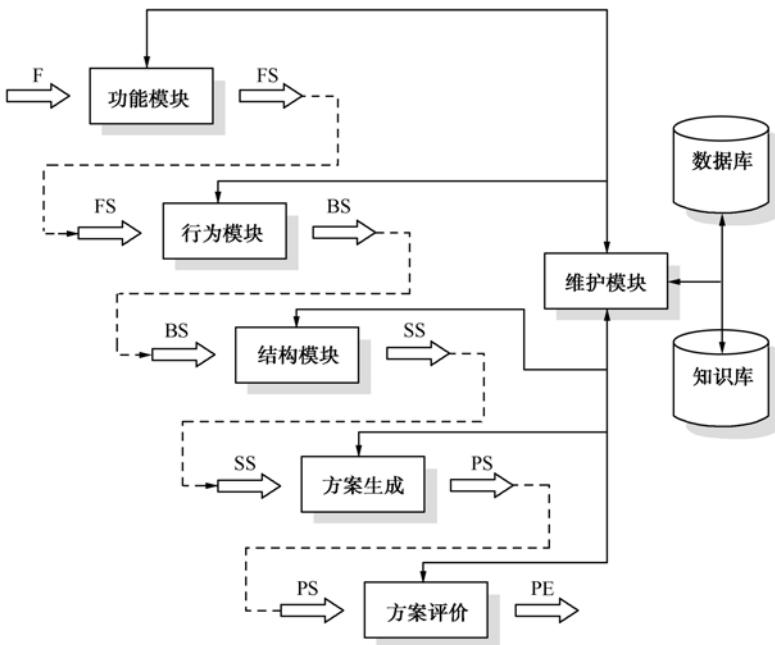


图 7.1 软件系统结构图

7.2.2 软件系统实现技术和手段

1. 采用面向对象技术

面向对象技术（Object-Oriented Technology, OOT）将现实世界中的对象及其行为作为一个整体来考虑，用对象这个概念来完整反映客观事物的静态和动态属性；通过设置属性、控制方法或事件，将各类实体转化为程序设计中所要求的类。类的实例对象是构造软件的基本组件，消息是对象之间进行通信的手段。面向对象技术以客观世界中的对象为中心，其分析和设计思想符合人们的思维方式，分析和设计的结果与客观世界的实际比较接近，容易被人们所接受。面向对象开发不仅允许在一个应用中共享信息，而且给将来的项目提供了重复利用设计代码的可能。

机械系统概念设计过程是一个复杂的动态过程，其中涉及大量的数据管理，采用面向对象技术处理这类复杂问题是比较合适的。本软件系统中主要的基本类包括方案、功能、行为、结构、工作机理、功能空间、行为空间等。基本类确定后，则同性质的对象都可使用。根据面向对象设计中继承的思想，在基本类的基础上，可

以通过派生类或属性区别的方法设计同一大类元素中的不同具体元素，还可以利用重载完成同一方法不同属性元素的计算。表 7.1 给出通用功能类的主要属性和方法。

表 7.1 功能类

类	主要属性	主要方法
功能	地址编号 代号 名称 坐标位置 所属功能方案 功能所处层次 父功能 子功能 工作机理	增加 删除 修改 获取 分解 求解

2. 基于数据库的数据存储技术

数据库是计算机辅助概念设计系统的重要组成部分，其中主要有两类数据，静态数据和动态数据。静态数据是指事先保存在数据库中供程序进行查询、检索、修改的数据；动态数据是指随着概念设计过程进行所涉及的一些数据，如功能分解过程的分功能、功能元、功能空间、功能结构，与行为求解相关的工作机理、行为及行为空间等，这些数据需要保存下来，比较好的方法是存在数据库中。因此，软件系统建立多个中间过程数据库，如功能分解数据库，通过该数据库既可以保存功能分解过程的相关数据，便于进一步分析功能分解过程，同时也可作为功能分解的模板，提高功能分解的效率。

3. 实现手段

软件系统具体实现上，采用 Visual C++6.0 编程开发工具，开发用户界面和相应的功能模块，知识库和数据采用 Access 数据库文件的格式，使用 Visual C++实现数据库的管理^[145, 146]。

7.2.3 系统实现界面

系统的实现界面如图 7.2 所示，主要包括功能、行为、方案组合、方案评价、知识库维护和退出菜单项，每个菜单项下存在相应的子菜单。前四项菜单的内容结合 7.3 节的内容加以介绍，本节主要介绍知识库维护菜单，主要分为三类：功能知识库、行为知识库、机构知识库。功能知识库主要包括功能分解知识库和标准功能词汇两项子菜单，其相应的对话框如图 7.3 和图 7.4 所示。行为知识库菜单主要涉及工作机理维护、工作机理知识库、行为空间知识库、行为属性编码维护四项子菜单，图 7.5~图 7.10 是各子菜单的主要对话框。机构知识库主要包括：机构类型库管理、机构知识库添加与修改、机构输入/输出变换符号、机构固有属性符号和机构运动行为符号五项子菜单，图 7.11 所示是“机构类型管理”对话框，图 7.12 所示是“机构知识库”页面。

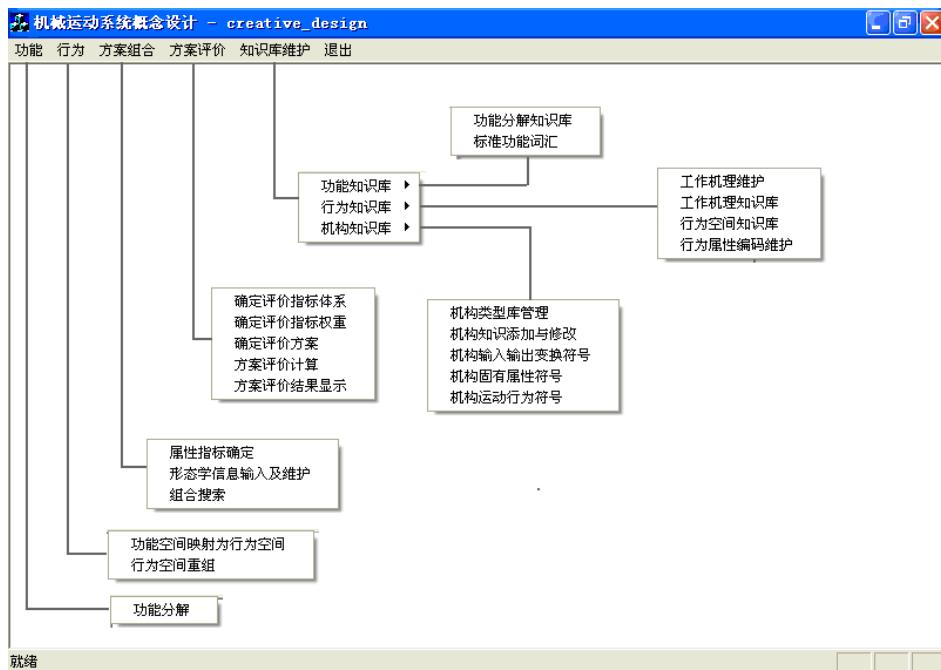


图 7.2 概念设计系统界面

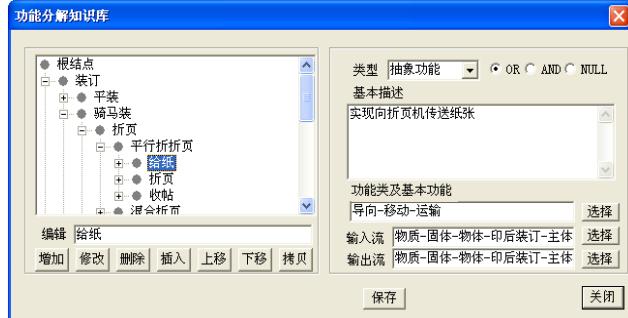


图 7.3 “功能分解知识库”对话框

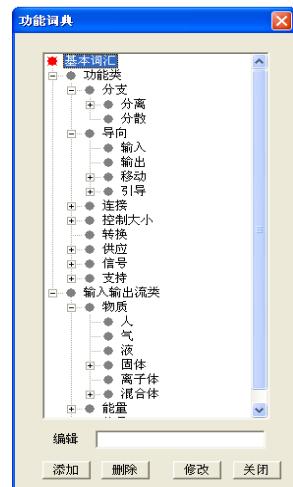


图 7.4 “功能词典”对话框



图 7.5 “工作机理选择”对话框

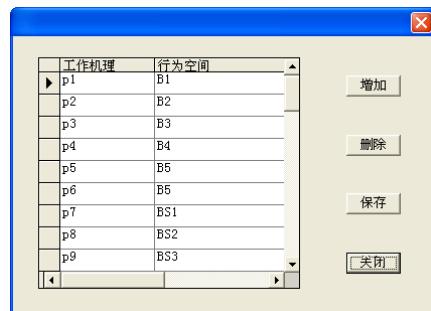


图 7.6 “工作机理库”对话框



图 7.7 “行为空间选择”对话框

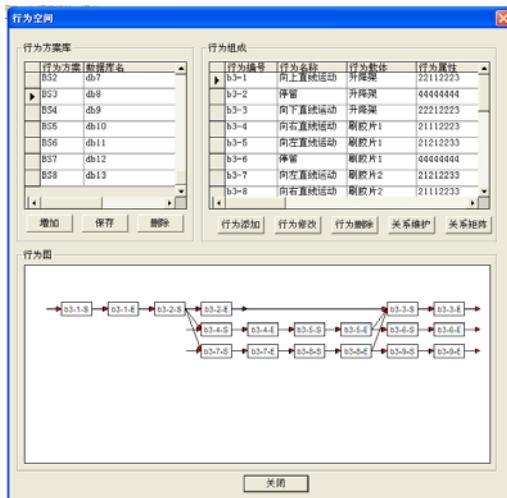


图 7.8 “行为空间”对话框



图 7.9 “行为维护”对话框



图 7.10 “行为属性编码维护”对话框



图 7.11 “机构类型管理”对话框



图 7.12 “机构知识库”页面

7.3 系统综合应用实例^[142]

7.3.1 任务描述

任何一种印刷成品的获得都要经过制版、印刷、装订三大工序^[147~152]。装订作为印刷后工序对成品质量、外观装潢和耐用性起着极其重要的作用。装订就是根据成品的要求，将印刷后的纸张进行一系列加工和装潢，直至成品为止的工艺流程的总称。装订分为装和订两项工序，装即装帧工序，是完成封面的加工；而书心（图 7.13）的加工（将印刷过的纸张加工成书本）则称为订。装订的作用主要存在三个方面：防止书页散失；

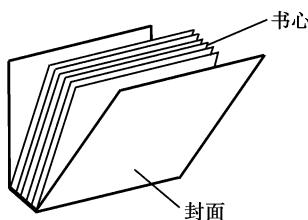


图 7.13 书刊的封与书心
实现设计任务。

便于阅读和鉴赏；便于保存和收藏。装订质量的优劣直接关系到书刊的艺术效果和阅读感受，而装订的快慢又直接影响到出版的速度及生产效率。

由于书刊装订的需要，装订形式和装订材料不尽相同，也就有着不同的工艺流程。同一种装订方法，装订设备的不同，装订工艺也不会相同。常见的装订工艺有平装、骑马装、精装、线装、特殊类型装订等。图 7.14 是通用的装订工艺流程。本实例以书刊的装订为要求实

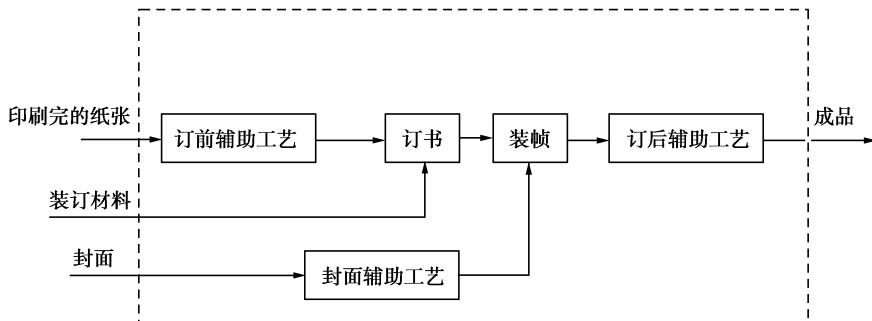


图 7.14 书刊装订工艺流程

7.3.2 功能建模

通过专家对设计任务需求进行分析，可确定任务的总功能为“装订”，因此功能名称可表示为 $f^{name}=\{\text{装订}\}$ ，同样该功能也可采用功能元的表达方式： $f^{function_base}=\{w_i, t, w_o\}=\{\text{印张, 相连, 书}\}$ ，为便于表达，下文中功能直接以名称来表示。

功能第 0 层的功能空间集为 $FSS_0=\{FS_{0,0}\}=\{\{f_{0,0,0}, Attr_{0,0,R}\}\}$ ，功能空间 $FS_{0,0}$ 集中只存在一个功能空间 $FS_{0,0}$ ，功能空间 $FS_{0,0}$ 只存在一个功能 $f_{0,0,0}$ （装订）。根据功能分解知识库中的知识，采用闭包理论，求功能 $f_{0,0,0}$ 的闭包 $cl(f_{0,0,0})$ ，功能 $f_{0,0,0}$ 进一步得到细化，如图 7.15 所示。

$$cl(f_{0,0,0}) = \{f_{(0,0,0)}, f_{1(0,0,0)}, f_{2(0,0,0)}, f_{3(0,0,0)}, f_{4(0,0,0)}, f_{5(0,0,0)}\}$$

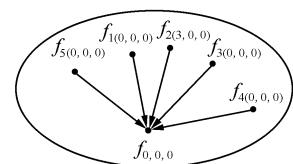
其中 $f_{1(0,0,0)}=\{\text{平装}\}$ ， $f_{2(0,0,0)}=\{\text{骑马订}\}$ ， $f_{3(0,0,0)}=\{\text{精装}\}$ ， $f_{4(0,0,0)}=\{\text{线装}\}$ ， $f_{5(0,0,0)}=\{\text{特殊类型装订}\}$ 。功能之间的与或关系为

$$f_{0,0,0} = f_{1(0,0,0)} \vee f_{2(0,0,0)} \vee f_{3(0,0,0)} \vee f_{4(0,0,0)} \vee f_{5(0,0,0)}$$

经过功能第一次分解操作，功能层由第 0 层映射为功能层第 1 层，即 $FSS_0 \rightarrow FSS_1$ ，在此过程中主要完成了两项工作。

(1) 更新功能层第 0 层的功能空间相关功能属性。
功能第 0 层只存在一个功能空间 $FS_{0,0}$ ，其功能的属性 $Attr_{0,0}=\{Attr(f_{0,0,0})\}=\{\{Null, \{(1,0) \vee (1,1) \vee (1,2) \vee (1,3) \vee (1,4)\}\}\}$ ，其中 $Null$ 表示 $f_{0,0,0}$ 没有父功能， $(1,0) \vee (1,1) \vee (1,2) \vee (1,3) \vee (1,4)$ 表示该功能具有 5 个子功能，子功能之间的连接关系系为或。

(2) 产生功能第 1 层的功能空间集。经过功能分解可获得功能第 1 层功能空间

图 7.15 装订功能 $f_{0,0,0}$ 的分解

集，该功能空间集与功能 $f_{1(0,0,0)} \sim f_{5(0,0,0)}$ 相对应， $FSS_1 = \{FS_{1,0}, FS_{1,1}, FS_{1,2}, FS_{1,3}, FS_{1,4}\}$ 。

功能空间集 FSS_1 中元素表示为

$$FS_{1,0} = \{\{f_{1,0,0}\}, Attr_{1,0}, R_{1,0}\}$$

$$FS_{1,1} = \{\{f_{1,1,0}\}, Attr_{1,1}, R_{1,1}\}$$

$$FS_{1,2} = \{\{f_{1,2,0}\}, Attr_{1,2}, R_{1,2}\}$$

$$FS_{1,3} = \{\{f_{1,3,0}\}, Attr_{1,3}, R_{1,3}\}$$

$$FS_{1,4} = \{\{f_{1,4,0}\}, Attr_{1,4}, R_{1,4}\}$$

以 $FS_{1,0}$ 为例加以说明，其中 $f_{1,0,0} = f_1$ ，即 $f_{1,0,0} = \{\text{平装}\}$ ， $f_{1,0,0}^{function_base} = \{\text{印张, 相连, 平装书}\}$ ， $Attr_{1,0} = \{Attr(f_{1,0,0})\} = \{(0,0,0), Null\}$ 表明 $f_{1,0,0}$ 的父功能是 $f_{0,0,0}$ ， $Null$ 说明功能关系为空。

当功能第 1 层确定后，进入到第二次功能分解操作过程，在此过程中对每一个功能根据功能分解知识判断其能否进一步功能分解。通过此过程功能第 1 层映射为功能第 2 层，即 $FSS_1 \rightarrow FSS_2$ 。

例如对 $f_{1,0,0}$ 进行功能分解，通过对功能分解知识库的知识的搜索，可获得功能 $f_{1,0,0}$ 的闭包为

$$cl(f_{1,0,0}) = \{f_{1,0,0}, f_{0(1,0,0)}, f_{1(1,0,0)}, f_{2(1,0,0)}, f_{3(1,0,0)}, f_{4(1,0,0)}\}$$

其中 $f_{0(1,0,0)} = \{\text{折页}\}$ ， $f_{1(1,0,0)} = \{\text{配页}\}$ ， $f_{2(1,0,0)} = \{\text{订书}\}$ ， $f_{3(1,0,0)} = \{\text{包封}\}$ ， $f_{4(1,0,0)} = \{\text{切书}\}$ ，即功能 $f_{1,0,0}$ 可分解为 $f_{0(1,0,0)} \wedge f_{1(1,0,0)} \wedge f_{2(1,0,0)} \wedge f_{3(1,0,0)} \wedge f_{4(1,0,0)}$ ，也就是说功能 $f_{1,0,0}$ 可以由功能空间 $FS_{2,0} = \{\{f_{2,0,0}, f_{2,0,1}, f_{2,0,2}, f_{2,0,3}, f_{2,0,4}\}, Attr_{2,0}, R_{2,0}\}$ 表示，其中的关系为

$$f_{2,0,0} = f_{0(1,0,0)}, \quad f_{2,0,1} = f_{1(1,0,0)}, \quad f_{2,0,2} = f_{2(1,0,0)}, \quad f_{2,0,3} = f_{3(1,0,0)}, \quad f_{2,0,4} = f_{4(1,0,0)}$$

功能属性为

$$Attr_{2,0} = \{Attr(f_{2,0,0}), Attr(f_{2,0,1}), Attr(f_{2,0,2}), Attr(f_{2,0,3}), Attr(f_{2,0,4})\}$$

$$Attr(f_{2,0,0}) = \{(1,0,0), Null\}$$

$$\begin{array}{cc} & \begin{matrix} f_{2,0,0} & f_{2,0,1} & f_{2,0,2} & f_{2,0,3} & f_{2,0,4} \end{matrix} \\ \begin{matrix} f_{2,0,0} \\ f_{2,0,1} \\ f_{2,0,2} \\ f_{2,0,3} \\ f_{2,0,4} \end{matrix} & \left[\begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right] \end{array}$$

功能关系矩阵为 $R_{2,0} = f_{2,0,1}$

基于上述的功能建模过程，实现了计算机辅助功能分解模块，如图 7.16 所示，通过人机交互的方式实现了功能的分解，既充分利用了知识库的知识，又充分利用

了人类在功能分解方面的经验，提高了功能分解的可行性。如图 7.17 所示是装订功能分解的结果。

图 7.16 中的功能及分解相关数据已保存在数据库中，这里为了便于说明问题，将其功能的基本描述列于表 7.2 中。图 7.16 描述了一个功能分解初步过程，底层的功能可以进一步分解，如功能 F2-0、F2-1，…，F2-16 等，这里为了便于表达，以功能 F2-3 为例加以说明。令 T0-0 表示顶层功能，代替功能 F2-3，图 7.18 是功能 F2-3 具体的分解过程。

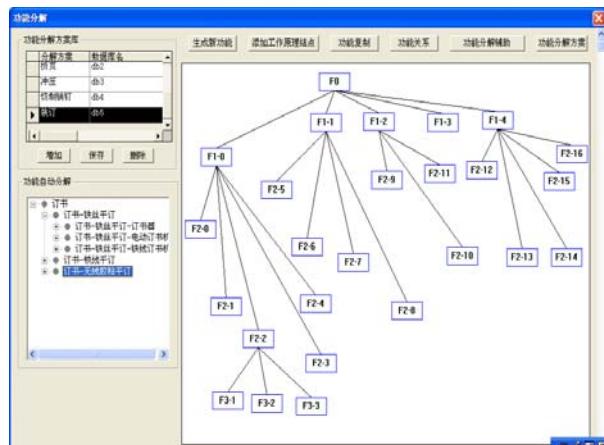


图 7.16 装订功能分解



图 7.17 装订功能分解结果

表 7.2 装订机总功能及子功能

功能代号	功能描述	功能代号	功能描述	功能代号	功能描述
F0	装订	F1-0	平装	F1-1	骑马装
F1-2	精装	F1-3	线装	F1-4	特殊装
F2-0	折页	F2-1	配页	F2-2	订书
F2-3	包封	F2-4	切书	F2-5	折页
F2-6	搭页	F2-7	骑马订	F2-8	切书
F2-9	加工书壳	F2-10	加工书心	F2-11	书本成型
F2-12	线订	F2-13	塑料夹条装订	F2-14	螺旋圈装订
F2-15	开闭环装订	F2-16	高黏度黏条订		

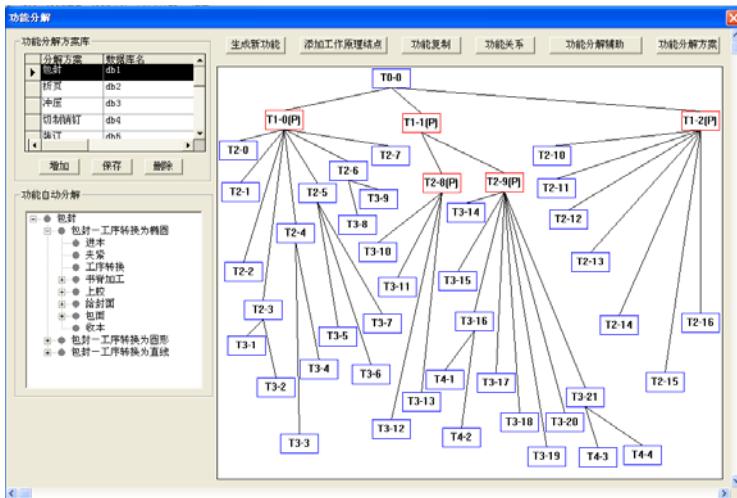


图 7.18 装订功能 T0-0 (F2-3) 的分解

图 7.19 是功能 T0-0 的可能的分解结果, 即可行方案, 表 7.3 是其相应的功能描述。以功能分解方案 3 作为 T0-0 功能分解的方案, 如图 7.20 所示, 确定并显示功能分解方案中功能之间的关系。

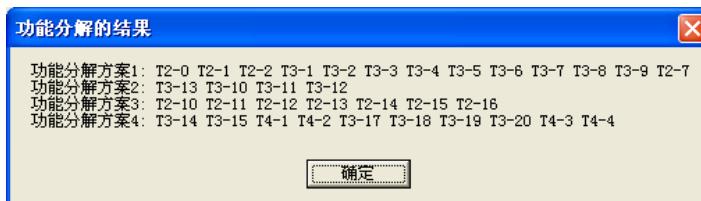


图 7.19 装订功能 T0-0 的分解方案

表 7.3 装订机功能 T0-0 及子功能

功能代号	功能描述	功能代号	功能描述	功能代号	功能描述
T0-0	包封	T1-0(p)	包封 (椭圆)	T1-1(p)	包封 (直线)
T1-2(p)	包封 (圆)	T2-0	进本	T2-1	夹紧
T2-2	工序转换	T2-3	加工书脊	T2-4	上胶
T2-5	给封面	T2-6	包面	T2-7	收本
T3-1	铣背	T3-2	开槽	T3-3	书背上胶
T3-4	书侧上胶	T3-5	储存封面	T3-6	分离封面

续表

功能代号	功能描述	功能代号	功能描述	功能代号	功能描述
T3-7	定位封面	T3-8	托本合成	T3-9	包本成型
T2-8(p)	包封(台式)	T2-9(p)	包封(长条式)	T3-10	夹紧书心
T3-11	移动书心	T3-12	刷胶	T3-13	包本
T3-14	进本	T3-15	抓本	T3-16	刷胶
T4-1	刷侧胶	T4-2	刷背胶	T3-17	输本
T3-18	给封面	T3-19	压痕	T3-20	包本
T3-21	出书	T4-3	挡书	T4-4	推书
T2-10	进本	T2-11	夹紧	T2-12	上胶
T2-13	给封面	T2-14	包面	T2-15	出书
T2-16	转换工序				



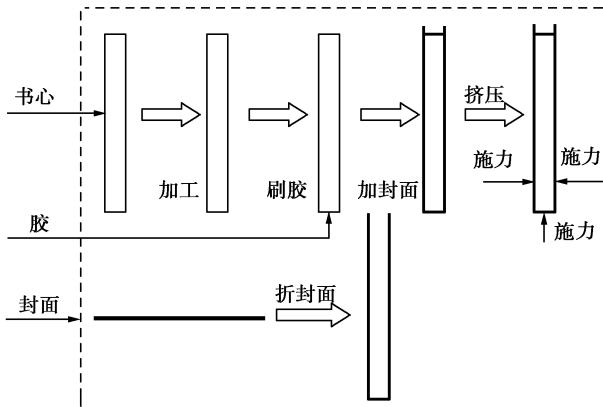


图 7.21 包封基本工艺流程

1. 功能空间

包封的总功能是包封，根据 7.3.2 节的功能分解，获得一个可实现总功能的功能空间 FS , $FS = \{F, Attr, R\}$, F 是功能集, R 是功能关系矩阵。功能映射为工作机理，功能结构映射为工作机理结构，则功能空间映射为工作机理空间，即 $FS \rightarrow PS$ 。

2. 工作机理空间 PS

经过对工作机理知识库的搜索，包封功能空间 FS 可映射到工作机理空间 PS ，如图 7.22 所示。 PS 表达为 $PS = \{ID, P, S, BS\}$ ，其中 ID 是 PS 空间的编号， P 是工作机理集，工作机理空间中工作机理 p_i 之间的关系用矩阵 S 表示， BS 表示与工作机理空间相对应的行为空间。

与功能空间 FS 相对应的工作机理空间 PS 的具体参数是：工作机理集 $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7\}$ ，功能与工作机理的映射关系见表 7.4； S 为工作机理关系矩阵；行为空间 $BS = \{BS_1, BS_2, BS_3, BS_4, BS_5, BS_6, BS_7\}$ ，具体内容见表 7.5；行为子空间 BS_i 储存在行为方案数据库中，如图 7.23 所示。

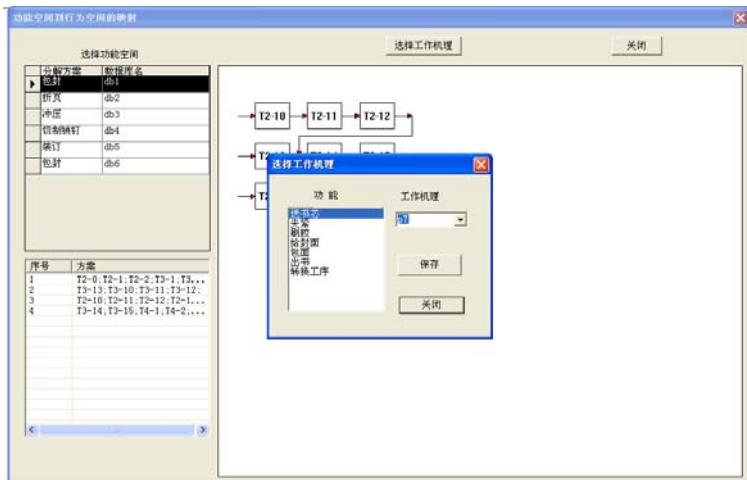


图 7.22 包封功能的工作机理

$$S = p_4 \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 \\ p_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_2 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ p_3 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_5 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ p_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ p_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

表 7.4 包封的工作机理

功能	工作机理	
T2-10	p_1	{1, 进本,[机械式],书心, 精度中等, 行为空间 BS_1 }
T2-11	p_2	{2, 夹紧,[力],书心, 精度中等, 行为空间 BS_2 }
T2-12	p_3	{3, 上胶,[滚动式],书心, 精度中等, 行为空间 BS_3 }
T2-13	p_4	{4, 给封面,[机械式],封面, 精度中等, 行为空间 BS_4 }
T2-14	p_5	{5, 包本,[力],封面, 精度中等, 行为空间 BS_5 }
T2-15	p_6	{6, 出书,[力],书心, 精度中等, 行为空间 BS_6 }
T2-16	p_7	{7, 输送,[力],书心, 精度中等, 行为空间 BS_7 }

表 7.5 包封的行为空间

行为空间	行为集		行为结构矩阵									
BS_1	b_{1-1}	{1,皮带, 21115233}	$b_{1-1} \ b_{1-2} \ b_{1-3} \ b_{1-4} \ b_{1-5} \ b_{1-6}$									
	b_{1-2}	{2,皮带, 44444444}	b_{1-1}	0	1	-4	0	0				
	组成 描述	b_{1-3}	b_{1-2}	-1	0	0	0	0				
		{3,挡规, 13115233}	b_{1-3}	4	0	0	0	0				
	b_{1-4}	{4,挡规, 13215233}	b_{1-4}	0	0	0	0	5				
	b_{1-5}	{5,吸板, 13215223}	b_{1-5}	0	0	0	-5	0				
	b_{1-6}	{6,吸板, 13115223}	b_{1-6}	0	0	0	0	0				
BS_2	组成 描述	b_{2-1}	{1,夹板, 22115232}	$b_{2-1} \ b_{2-2} \ b_{2-3} \ b_{2-4}$								
		b_{2-2}	{2,夹板, 22215232}	b_{2-1}	0	1	0	0				
		b_{2-3}	{3,夹板, 22215232}	b_{2-2}	-1	0	1	0				
		b_{2-4}	{4,夹板, 44444444}	b_{2-3}	0	-1	0	1				
BS_3	组成 描述	b_{3-1}	{1,升降架, 22112223}	$b_{3-1} \ b_{3-2} \ b_{3-3} \ b_{3-4} \ b_{3-5} \ b_{3-6} \ b_{3-7} \ b_{3-8} \ b_{3-9}$								
		b_{3-2}	{2,升降架, 44444444}	b_{3-1}	0	1	0	0	0	0	0	
		b_{3-3}	{3,升降架, 22212223}	b_{3-2}	-1	0	1	5	0	0	0	
		b_{3-4}	{4,刷胶片 1, 22212223}	b_{3-3}	0	-1	0	0	-3	0	0	
		b_{3-5}	{5,刷胶片 1, 21212233}	b_{3-4}	0	-5	0	0	1	0	0	
		b_{3-6}	{6,刷胶片 1, 44444444}	b_{3-5}	0	0	3	-1	0	1	0	
		b_{3-7}	{7,刷胶片 2, 21212233}	b_{3-6}	0	0	0	0	-1	0	0	
		b_{3-8}	{8,刷胶片 2, 21112233}	b_{3-7}	0	-5	0	0	0	0	1	
		b_{3-9}	{9,刷胶片 2, 44444444}	b_{3-8}	0	0	3	0	0	-1	0	
BS_4	组成 描述	b_{4-1}	{1,吸嘴摆杆, 13111222}	$b_{4-1} \ b_{4-2} \ b_{4-3} \ b_{4-4} \ b_{4-5} \ b_{4-6} \ b_{4-7} \ b_{4-8} \ b_{4-9} \ b_{4-10} \ b_{4-11} \ b_{4-12}$								
		b_{4-2}	{2,吸嘴摆杆, 44444444}	b_{4-1}	0	1	0	0	0	-5	-4	0
		b_{4-3}	{3,吸嘴摆杆, 13211223}	b_{4-2}	-1	0	1	-4	0	0	0	0
		b_{4-4}	{4,压纸轮摆杆, 13115223}	b_{4-3}	0	-1	0	0	0	0	0	0
		b_{4-5}	{5,压纸轮摆杆, 13215223}	b_{4-4}	0	4	0	1	0	0	0	0
		b_{4-6}	{6,接纸轮摆杆, 13215223}	b_{4-5}	0	0	-1	0	0	0	0	0
		b_{4-7}	{7,接纸轮摆杆, 13115223}	b_{4-6}	0	4	0	0	0	1	0	0
		b_{4-8}	{8,托纸板, 13215223}	b_{4-7}	0	0	0	0	-1	0	0	0
		b_{4-9}	{9,托纸板, 13115223}	b_{4-8}	5	0	0	0	0	0	1	0
		b_{4-10}	{10,前挡规, 13215223}	b_{4-9}	4	0	0	0	0	-1	0	0
		b_{4-11}	{11,前挡规, 13115223}	b_{4-10}	5	0	0	0	0	0	1	0
		b_{4-12}	{12,接纸轮, 13111222}	b_{4-11}	4	0	0	0	0	-1	0	0

续表

行为空间	行为集			行为结构矩阵								
BS_5	b_{5-1}	{1,升降架, 22112222}		b_{5-1}	b_{5-2}	b_{5-3}	b_{5-4}	b_{5-5}	b_{5-6}	b_{5-7}	b_{5-8}	b_{5-9}
	b_{5-2}	{2,升降架, 44444444}		b_{5-1}	0	1	0	0	0	0	0	0
	b_{5-3}	{3,升降架, 22212223}		b_{5-2}	-1	0	1	5	0	0	5	0
	b_{5-4}	{4,左夹板, 21112232}		b_{5-3}	0	-1	0	0	-3	0	0	-3
	b_{5-5}	{5,左夹板, 21212233}		b_{5-4}	0	-5	0	0	1	0	0	0
	b_{5-6}	{6,左夹板, 44444444}		b_{5-5}	0	0	3	-1	0	1	0	0
	b_{5-7}	{7,右夹板, 21212232}		b_{5-6}	0	0	0	0	-1	0	0	0
	b_{5-8}	{8,右夹板, 21112233}		b_{5-7}	0	-5	0	0	0	0	0	1
	b_{5-9}	{9,右夹板, 44444444}		b_{5-8}	0	0	3	0	0	0	-1	0
BS_6	b_{6-1}	{1,挡书板, 13112233}		b_{6-1}	b_{6-2}	b_{6-3}	b_{6-4}	b_{6-5}	b_{6-6}	b_{6-7}	b_{6-8}	b_{6-9}
	b_{6-2}	{2,挡书板, 44444444}		b_{6-1}	0	1	0	0	0	0	0	0
	b_{6-3}	{3,挡书板, 44444444}		b_{6-2}	-1	0	1	0	0	0	0	0
	b_{6-4}	{4,推书板, 21115232}		b_{6-3}	0	-1	0	5	0	0	0	0
	b_{6-5}	{5,推书板, 21215233}		b_{6-4}	0	0	-5	0	1	0	0	0
	b_{6-6}	{6,推书板, 44444444}		b_{6-5}	0	0	0	-1	0	1	0	0
BS_7	b_{7-1}	{1,转盘, 13111252}		b_{7-1}	b_{7-2}	b_{7-3}	b_{7-4}	b_{7-5}	b_{7-6}	b_{7-7}	b_{7-8}	b_{7-9}
	b_{7-2}	{2,转盘, 13111252}		b_{7-1}	0	1	0	0	0	0	0	0
	b_{7-3}	{3,转盘, 13111252}		b_{7-2}	-1	0	1	0	1	0	0	0

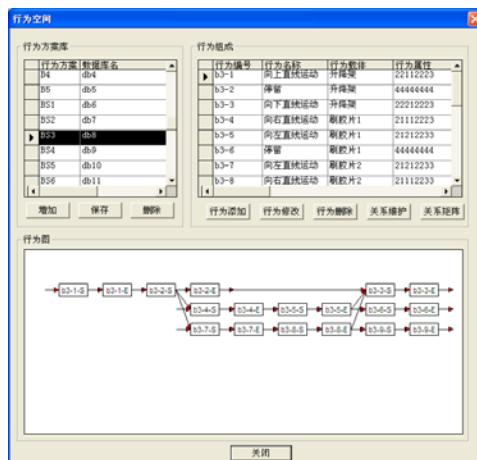


图 7.23 包封的行为方案

3. 行为空间 BS

行为空间 BS 可表示为 $\{X, R\}$ 。行为空间 BS 论域的组成为

$$X = \{ b_{1-1}, b_{1-2}, b_{1-3}, b_{1-4}, b_{1-5}, b_{1-6}, b_{2-1}, b_{2-2}, b_{2-3}, b_{2-4}, b_{3-1}, b_{3-2}, \\ b_{3-3}, b_{3-4}, b_{3-5}, b_{3-6}, b_{3-7}, b_{3-8}, b_{3-9}, b_{4-1}, b_{4-2}, b_{4-3}, b_{4-4}, b_{4-5}, b_{4-6}, b_{4-7}, \\ b_{4-8}, b_{4-9}, b_{4-10}, b_{4-11}, b_{4-12}, b_{5-1}, b_{5-2}, b_{5-3}, b_{5-4}, b_{5-5}, b_{5-6}, b_{5-7}, b_{5-8}, \\ b_{5-9}, b_{6-1}, b_{6-2}, b_{6-3}, b_{6-4}, b_{6-5}, b_{6-6}, b_{7-1}, b_{7-2}, b_{7-3} \}$$

设 x 表示论域 X 中的行为，则论域可表示为

$$X = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_{49}\}$$

行为空间 BS 中行为关系矩阵 R 的构造步骤如下。

第 1 步：建立行为关系矩阵，将行为空间 BS 的子空间 BS_i 的结构关系添加到该矩阵中。例如，行为子空间 BS_6 的行为结构矩阵为

	b_{6-1}	b_{6-2}	b_{6-3}	b_{6-4}	b_{6-5}	b_{6-6}
b_{6-1}	0	1	0	0	0	0
b_{6-2}	-1	0	1	0	0	0
b_{6-3}	0	-1	0	5	0	0
b_{6-4}	0	0	-5	0	1	0
b_{6-5}	0	0	0	-1	0	1
b_{6-6}	0	0	0	0	-1	0

则关系 $r_{41,42}=1$, $r_{42,43}=1$, $r_{43,44}=5$, $r_{44,45}=1$, $r_{45,46}=1$, 加入到矩阵 R 中。

第 2 步：根据行为子空间之间的连接关系，添加行为空间 BS 内的行为之间的关系。其中连接关系有： $r_{5,7}=3$, $r_{7,47}=3$, $r_{47,11}=3$, $r_{16,48}=5$, $r_{19,48}=5$, $r_{48,32}=3$, $r_{31,32}=3$, $r_{36,49}=3$, $r_{39,49}=3$, $r_{34,49}=3$, $r_{49,3}=3$, $r_{3,40}=5$ 。

经过上述两步，建立了完整的包封功能的行为空间，行为空间的行行为论域集可实现特定的功能。实现的功能的行为论域集是具有一定的约束关系的，行空间的结构矩阵 R 表达了运动行为之间的约束关系，也就是运动行为之间的协调关系。

4. 行为空间划分与重组

根据行为空间内运动行为之间的关系，可确定相应的约束关系和相容关系，其中相容关系矩阵如图 7.24 所示。

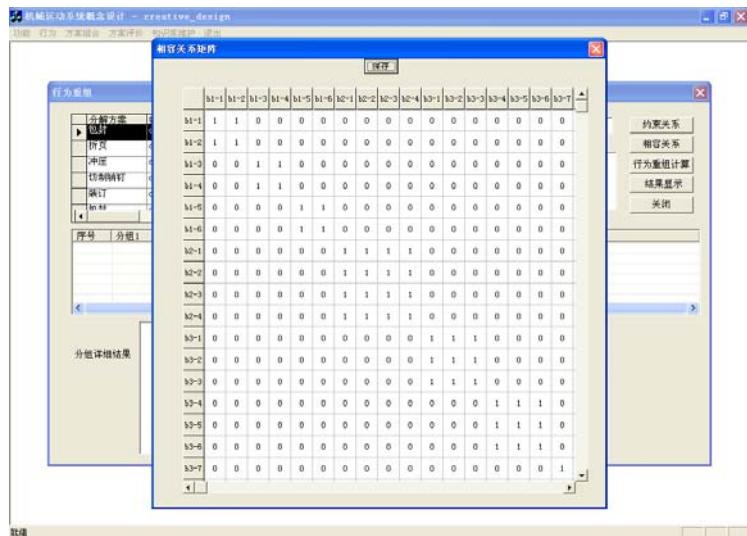


图 7.24 包封行为的相容关系矩阵

根据相容关系矩阵可以确定行为空间的多种划分，为减少不必要的解的数量，添加约束条件，若要求原来同一行集内的行为还保持在同一分组内，且限定分组数为 14，经过重组算法，给出如图 7.25 所示的分组。

序号	方案	最大分组数	约束关系
1	T2-0; T2-1; T2-2; T3-1; T3-2; T3-3; T3-4; T3-5; T3-6; ...	14	相容关系
2	T3-13; T3-10; T3-11; T3-12;	10	行为重组计算
3	T2-10; T2-11; T2-12; T2-13; T2-14; T2-15; T2-16;	11	结果显示
4	T3-14; T3-15; T4-11; T4-2; T3-17; T3-18; T3-19; T3-20; ...	13	关闭

序号	分组1	分组2	分组3	分组4	分组5	分组6	分组7	分组8	分组9	分组10	分组11	分组12	分组13	分组14
1	b1-...	b1-...	b1-...	b2-...	b3-...	b3-...	b4-...	b4-...	b4-...	b4-...	b4-12,	b6-...	b6-...	b7-...

分组详细结果:

```

分组1: b1-1, b1-2,
分组2: b1-3, b1-4,
分组3: b1-5, b1-6,
分组4: b2-1, b2-2, b2-3, b2-4,
分组5: b3-1, b3-2, b3-3, b5-1, b5-2, b5-3,
分组6: b3-4, b3-5, b3-6, b5-4, b5-5, b5-6,
分组7: b3-7, b3-8, b3-9, b5-7, b5-8, b5-9,
分组8: b4-1, b4-2, b4-3,
分组9: b4-4, b4-5, b4-8, b4-9, b4-10, b4-11,
分组10: b4-6, b4-7,
分组11: b4-12,
分组12: b6-1, b6-2, b6-3,
分组13: b6-4, b6-5, b6-6,
分组14: b7-1, b7-2, b7-3.

```

图 7.25 包封方案的行为重组

以功能分解方案 3 (图 7.25) 为例加以说明, 划分后的行为集与功能的关系见表 7.6。从表 7.6 中看出, 行为集共有 14 个, 每个行为集将会有一个执行机构或执行机构组来完成。行为集 5、6、7 合在一起, 既可以完成上胶功能, 又可以实现包面的功能。行为集 9 中的行为的载体并不是完全一致的, 行为集 9 将由一个执行结构来完成, 执行机构会表现出不同的行为。因此, 行为划分与重组过程中体现了一结构多功能的特性, 提高了概念设计过程的创新性。

表 7.6 包封的行为集

功 能	行 为 集	行 为
进本	行为集 1	b_{1-1}, b_{1-2}
	行为集 2	b_{1-3}, b_{1-4}
	行为集 3	b_{1-5}, b_{1-6}
夹紧	行为集 4	$b_{2-1}, b_{2-2}, b_{2-3}, b_{2-4}$
上胶 包面	行为集 5	$b_{3-1}, b_{3-2}, b_{3-3}, b_{5-1}, b_{5-2}, b_{5-3}$
	行为集 6	$b_{3-4}, b_{3-5}, b_{3-6}, b_{5-4}, b_{5-5}, b_{5-6}$
	行为集 7	$b_{3-7}, b_{3-8}, b_{3-9}, b_{5-7}, b_{5-8}, b_{5-9}$
给封面	行为集 8	$b_{4-1}, b_{4-2}, b_{4-3}$
	行为集 9	$b_{4-4}, b_{4-5}, b_{4-8}, b_{4-9}, b_{4-10}, b_{4-11}$
	行为集 10	b_{4-6}, b_{4-7}
	行为集 11	b_{4-12}
出书	行为集 12	$b_{6-1}, b_{6-2}, b_{6-3}$
	行为集 13	$b_{6-4}, b_{6-5}, b_{6-6}$
转换工序	行为集 14	$b_{7-1}, b_{7-2}, b_{7-3}$

7.3.4 设计方案的生成

7.3.3 节确定实现包封能的行为集方案, 以图 7.25 所示的经过行为重组后的行为划分方案作为一步机构设计方案生成的依据。

1. 系统学矩阵的构造

图 7.26 是实现包封功能的运动行为集的组合, 通过对机构知识库的搜索可以获得相应的基本机构作为执行机构来实现相应的行为集。因此, 就产生了与行为集序列相对应的执行机构集的序列。例如, 行为集 1 可实现进本功能中的书心前移的

子功能，执行机构集 A_1 可表示为：{皮带传动，链传动，曲柄块机构移动从动盘形凸轮机构，摇杆滑块机构}；行为集 2 是实现进本功能中的定位子功能，执行机构集 $A_2=\{\text{双摇杆机构，摆动从动件盘形凸轮机构，摆动导杆机构，摆动从动件圆柱凸轮机构}\}$ 。



图 7.26 包封的行为集

执行机构的动作可满足行为集的运动特性要求，但是执行机构往往需要特定的输入运动，这和机构系统所提供的输入运动不一致，因此，需要给出执行机构的输入机构。具体的过程可参考 5.3 节和 5.5 节的内容。通过上述过程，依据行为集可构造形态学矩阵，见表 7.7。表 7.7 中，行为集 6 和行为集 7（已略去）所要求的行为动作本质上是相同的，为了简化形态学矩阵，这里略去行为集 7。

表 7.7 包封功能形态学矩阵

行为集	代号	运动行为	载 体				
			1	2	3	4	5
行为集 1	A	直线移动	皮带传动	链传动	曲柄滑块机构	移动从动件盘形凸轮机构	—
	B	间歇转动	棘轮机构	槽轮机构	不完全齿轮机构	圆柱凸轮间歇运动机构	—
	C	往复摆动	曲柄摇杆机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动导杆机构	—	—
行为集 2	D	往复摆动	双摇杆机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动导杆机构	摆动从动件圆柱凸轮机构	
	E	往复摆动	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件圆柱凸轮机构	—	—	—
行为集 3	F	往复摆动	双摇杆机构	摆动导杆机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件圆柱凸轮机构	—
	G	往复摆动	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件圆柱凸轮机构	—	—	—
行为集 4	H	往复直线移动	移动从动件移动形凸轮机构	移动从动件盘形凸轮机构	移动从动件圆柱凸轮机构	—	—
—行为集 5	I	往复直线移动	摇杆滑块机构	移动从动件盘形凸轮机构	拨销机构	—	—
	J	往复摆动	摆动从动件盘形凸轮机构	双摇杆机构	—	—	—
	K	往复摆动	摆动从动件盘形凸轮机构	—	—		
行为集 6	L	往复直线移动	空间曲柄滑块机构	曲柄滑块机构	拨销机构	双滑块机构	—
	M	往复摆动或移动	凹槽凸轮机构	空间 RSSR 机构	曲柄滑块机构	双摇杆机构	—
	N	往复摆动	凹槽凸轮机构	—	—	—	—

续表

行为集	代号	运动行为	载体				
			1	2	3	4	5
行为集 8	O	往复摆动	双摇杆机构	摆动导杆机构	—	—	—
	P	往复摆动	摆动从动件盘形 凸轮机构	摆动从动件圆柱 凸轮机构	—	—	—
行为集 9	Q	往复摆动	双摇杆机构	摆动导杆机构	—	—	—
	R	往复摆动	摆动从动件盘形 凸轮机构	摆动从动件圆柱 凸轮机构	—	—	—
行为集 10	S	往复摆动	摆动从动件盘形 凸轮机构	摆动从动件圆柱 凸轮机构	—	—	—
行为集 11	T	转动	齿轮机构	—	—	—	—
行为集 12	U	往复直线移动	摇杆滑块机构	拨销机构	—	—	—
	V	往复摆动	双摇杆机构	摆动从动件盘形 凸轮机构	摆动从动件圆柱 凸轮机构	—	—
	W	往复摆动	摆动从动件盘形 凸轮机构	摆动从动件圆柱 凸轮机构	—	—	—
行为集 13	X	往复摆动	双摇杆机构	摆动从动件盘形 凸轮机构	摆动从动件圆柱 凸轮机构	—	—
	Y	往复摆动	摆动从动件盘形 凸轮机构	摆动从动件圆柱 凸轮机构	—	—	—
行为集 14	Z	连续转动	齿轮机构	皮带传动	链传动	—	—

考虑到执行机构系统的运动和动力来自于传动系统，需要增加传动系统部分的形态学矩阵，见表 7.8。为实现计算机辅助形态学分析，图 7.27 是构造形态学矩阵的相关信息的主要界面，主要由三部分组成：方案、形态类、对象。主要实现的功能有确定输入和输出关系、确定相容度关系、形态对象评价。形态学矩阵中行为载体的可连接关系如图 7.28 所示，实际使用过程中，本系统可用矩阵来表示，如图 7.29 所示。

表 7.8 包封功能形态学矩阵增补内容

功能	代号	运动行为	载体				
			1	2	3	4	5
减速 I	ZI1	输入：转动 输出：转动	皮带传动	链传动	齿轮传动	蜗杆传动	—
减速 II	ZI2	输入：转动 输出：转动	蜗杆传动	链传动	齿轮传动	—	—



图 7.27 包封形态方案确定

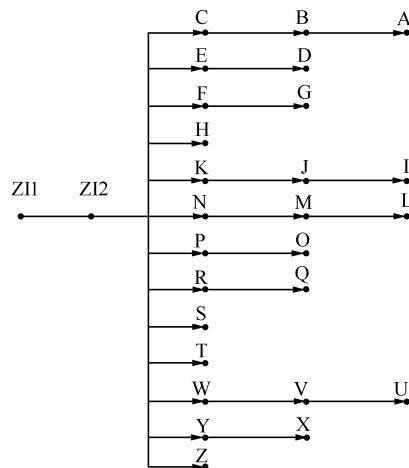


图 7.28 连接关系示意图

输入输出连接关系																▲		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	▲
A	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
B	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
C	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
D	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
E	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
G	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
I	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
J	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Q	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

保存

图 7.29 连接关系的矩阵表示

2. 形态的定性评价

从形态学矩阵（表 7.7 和表 7.8）的行为因素集中，依次取出一项，对该行为因素下的形态可分别在多个评价指标下作定性比较，可得到偏序关系矩阵的集合，通过 5.4.3 节所提出的算法，可获得形态的定性排序，最后可获得方案的所在评价层，如图 7.30 所示为形态定性评价结果。

<前定位(往复摆动)>定性评价																				
评价矩阵				代号				属性				属性								
	D1	D2	D3	D4	D1	双摇杆机构			D2	摆动从动件盘形凸轮机构			D3	摆动导杆机构			D4	摆动从动件圆柱凸轮机构		
	3	1	0	1	D1				D2				D3			D4				
	-1	3	-1	0																
	0	1	3	1																
	-1	0	-1	3																

1 优于
-1 小于
0 等价
2 无法比较
3 不比较

评价计算 保存 关闭

图 7.30 形态定性评价结果

3. 方案的相容度的等级

若机构载体之间的存在输入和输出关系，则其连接关系的性能可用相容度来表示。系统可自动给出有输入和输出关系载体之间的相容级别，并可以根据实际情况

加以修改，如图 7.31 所示。

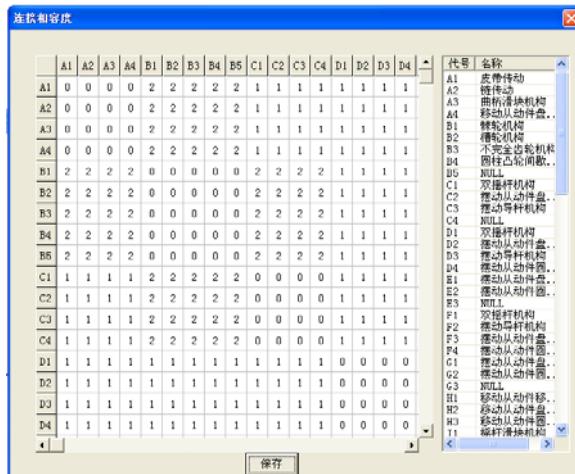


图 7.31 机构相容度级别

4. 获得优选方案集

在前面第 1、2、3 步的基础上，设定初始种群规模为 300，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.15，最大迭代次数为 1000，采用精英保持的遗传算法，可得到如图 7.32 所示的优选方案集。优选方案集的具体结果见表 7.9，为了便于说明问题只列出前 8 个方案。

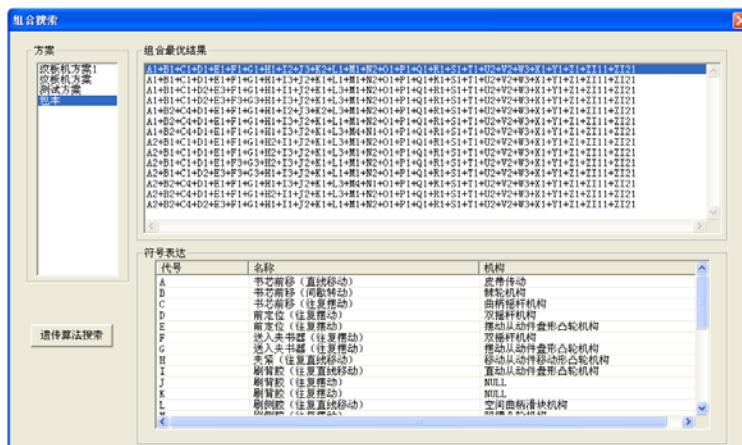


图 7.32 优选方案集

表 7.9 优选方案集的结果

方案功能		方案1	方案2	方案3	方案4
书芯前移	A	皮带传动	皮带传动	皮带传动	皮带传动
	B	棘轮机构	棘轮机构	棘轮机构	棘轮机构
	C	曲柄摇杆机构	曲柄摇杆机构	曲柄摇杆机构	曲柄摇杆机构
书芯定位	D	双摇杆机构	双摇杆机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
	E	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	—	—
书芯输送	F	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构	摆动从动件盘形凸轮机构
	G	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	—
夹紧	H	移动从动件盘形凸轮机构	移动从动件盘形凸轮机构	移动从动件盘形凸轮机构	移动从动件盘形凸轮机构
上背胶 背加压	I	移动从动件盘形凸轮机构	拨销机构	摇杆滑块机构	拨销机构
	J	—	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构
	K	—	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
上侧胶 侧加压	L	空间曲柄滑块机构	空间曲柄滑块机构	拨销机构	拨销机构
	M	凹槽凸轮机构	凹槽凸轮机构	凹槽凸轮机构	凹槽凸轮机构
	N	—	—	—	—
分离 封面	O	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构
	P	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
压纸 托纸 定位	Q	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构
	R	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
接纸	S	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
送纸	T	齿轮机构	齿轮机构	齿轮机构	齿轮机构
挡纸	U	拨销机构	拨销机构	拨销机构	拨销机构
	V	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
	W	—	—	—	—
推纸	X	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构
	Y	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
工序 转换	Z	齿轮机构	齿轮机构	齿轮机构	齿轮机构
减速 I	ZI1	皮带传动	皮带传动	皮带传动	皮带传动
减速 II	ZI2	蜗杆传动	蜗杆传动	蜗杆传动	蜗杆传动

续表

方案功能		方案 5	方案 6	方案 7	方案 8
书芯前移	A	皮带传动	皮带传动	皮带传动	链传动
	B	槽轮机构	槽轮机构	槽轮机构	棘轮机构
	C	—	—	—	曲柄摇杆机构
书芯定位	D	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构
	E	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
书芯输送	F	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构
	G	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
夹紧	H	移动从动件盘形凸轮机构	移动从动件盘形凸轮机构	移动从动件盘形凸轮机构	移动从动件盘形凸轮机构
上背胶 背加压	I	动从动件盘形凸轮机构	拨销机构	拨销机构	摇杆滑块机构
	J	—	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构
	K	—	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
上侧胶 侧加压	L	拨销机构	空间曲柄滑块机构	拨销机构	拨销机构
	M	凹槽凸轮机构	凹槽凸轮机构	双摇杆机构	凹槽凸轮机构
	N	—	—	凹槽凸轮机构	—
分离 封面	O	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构
	P	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
压纸 托纸 定位	Q	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构
	R	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
接纸	S	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
送纸	T	齿轮机构	齿轮机构	齿轮机构	齿轮机构
挡纸	U	拨销机构	拨销机构	拨销机构	拨销机构
	V	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
	W	—	—	—	—
推纸	X	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构	双摇杆机构
	Y	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构	摆动从动件盘形凸轮机构
工序 转换	Z	齿轮机构	齿轮机构	齿轮机构	齿轮机构
减速 I	ZI1	皮带传动	皮带传动	皮带传动	皮带传动
减速 II	ZI2	蜗杆传动	蜗杆传动	蜗杆传动	蜗杆传动

7.3.5 设计方案的评价

方案的评价主要包括确定评价指标体系、确定评价指标权重、确定待评价优选方案集、方案评价计算、方案评价结果显示。

1. 确定评价指标体系

方案评价首先要确定评价指标体系，本例中沿用了第6章所提出的用递阶层次结构模型描述方案评价的指标体系的方法，见表7.10。在评价系统中，用户根据自己的需要确定评价指标及相应的层次关系，评价指标及连接关系保存在数据库中。图7.33所示是评价指标维护模块，可实现指标添加、修改、删除等操作。

表7.10 评价指标体系

总指标	一级指标	二级指标
总体性能 d	功能 d_1	运动规律形式 d_{11}
		精度 d_{12}
		运动协调配合 d_{13}
	运动性能 d_2	运转速度 d_{21}
		承载能力 d_{22}
		应用范围 d_{23}
		运动可调性 d_{24}
	动力性能 d_3	加速度峰值 d_{31}
		耐磨性 d_{32}
		可靠性 d_{33}
	结构性能 d_4	尺寸 d_{41}
		重量 d_{42}
		结构复杂性 d_{43}
	成本指标 d_5	制造难易程度 d_{51}
		制造误差 d_{52}
		调整方便性 d_{53}
		能耗 d_{54}
	绿色性 d_6	环境友好性 d_{61}
		能源属性 d_{62}
		宜人性 d_{63}
	社会性 d_7	噪声 d_{71}
		振动 d_{72}



图 7.33 评价指标维护模块

2. 确定评价指标权重

(1) 指标重要性定性排序

通过二元比较，给出重要性的二元比较矩阵，就可确定指标的重要性定性排序，也就给出了在相应指标层次中最最重要的指标。如图 7.34 所示是一级组指标的定性的二元比较，经过判断、修正可以得到重要性排序一致性标度矩阵。通过比较发现 d_1 、 d_2 、 d_3 的行和的数值一样，取其中一个作为相对重要指标。同样的方法，也可确定二级组 1~7 中的相对重要指标，见表 7.11。

一级组评价指标定性比较							
一级组 二级组1 二级组2 二级组3 二级组4 二级组5 二级组6 二级组7							
功能——运动性能	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 结构性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 成本指标——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
功能——动力性能	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
功能——结构性能	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——结构性能	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
功能——成本指标	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
功能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
功能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
运动性能——动力性能	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 结构性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 成本指标——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——结构性能	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
运动性能——结构性能	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 结构性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
运动性能——成本指标	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
运动性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 结构性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
运动性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
结构性能——成本指标	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
结构性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 动力性能——社会性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要	<input type="radio"/> 结构性能——绿色性	<input type="radio"/> 重要 <input type="radio"/> 等价 <input type="radio"/> 不重要
	<input type="radio"/> 定性排序	<input type="radio"/> 定量排序	<input type="radio"/> 关闭				

图 7.34 一级组评价指标定性比较

表 7.11 相对重要指标

组别 指标	一级组 1	二级组 1	二级组 2	二级组 3	二级组 4	二级组 5	二级组 6	二级组 7
相对重 要指标	d_1	d_{13}	d_{24}	d_{31}	d_{43}	d_{51}	d_{61}	d_{71}

重要性排序一致性标度矩阵为：

$$\begin{array}{ccccccc} & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & d_5 & d_6 & d_7 \\ \begin{matrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \\ d_7 \end{matrix} & \left[\begin{matrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 1 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 1 & 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 1 & 0.5 & 1 & 0.5 \end{matrix} \right] & \begin{matrix} (6.5) \\ (3.5) \\ (5.5) \\ (1) \\ (2.5) \\ (1) \\ (3.5) \end{matrix} \end{array}$$

(2) 指标重要性定量排序

基本单元组中的指标经过定性评价后，确定了最为重要的指标，该指标与指标组中的其他指标作语气算子比较，得到相对隶属度，就可确定不同指标组中指标的权重，如图 7.35 所示。

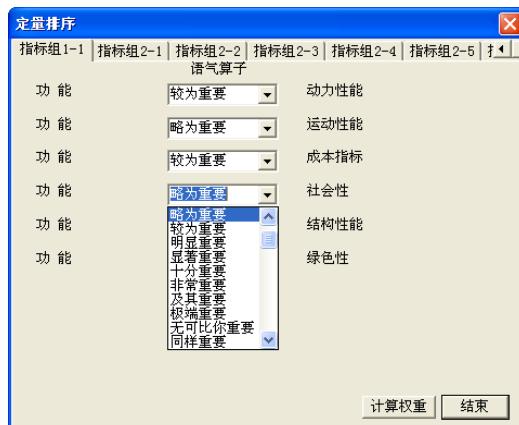


图 7.35 评价指标重要性定量比较

例如，通过语气比较，指标组 1-1 重要性的相对隶属度向量为：{1,0.6667,0.818,0.539,0.6667,0.539,0.6667}，相应可确定该指标组的各指标的权向量为：{0.204290,0.136261,0.109908,0.136261,0.109908,0.167109,0.136261}。评价指标的权重见表 7.12。

表 7.12 评价指标的权重

一级指标		二级指标	
指标	权重	指标	权重
d_1	0.204290	d_{11}	0.354862
		d_{12}	0.290277
		d_{13}	0.354862
d_2	0.136261	d_{21}	0.293716
		d_{22}	0.193178
		d_{23}	0.154040
		d_{24}	0.359066
d_3	0.109908	d_{31}	0.453515
		d_{32}	0.243991
		d_{33}	0.302494
d_4	0.136261	d_{41}	0.318225
		d_{42}	0.204676
		d_{43}	0.477099
d_5	0.109908	d_{51}	0.348189
		d_{52}	0.232242
		d_{53}	0.232242
		d_{54}	0.187326
d_6	0.167109	d_{61}	0.333333
		d_{62}	0.333333
		d_{63}	0.333333
d_7	0.136261	d_{71}	0.5
		d_{72}	0.5

3. 确定待评价优选方案集

由 7.3.4 节的内容所确定的优选方案集的前 8 个方案作为待评价方案，进行精确评价。在待评价方案中，如果实现同一功能的载体完全一致，则该项功能不出现在方案评价项目中，见表 7.13。将待评价的方案输入到待评价方案数据库中，如图 7.36 所示。

表 7.13 包封待评价方案

方案	进本	定位	送入夹书器	夹书	刷背胶/向上包本	刷侧胶/侧面包本
方案 1	A1+B1+C1	D1+E1	F1+G1	H1	I2+J3+K2	L1+M1+N2
方案 2	A1+B1+C1	D1+E1	F1+G1	H1	I3+J2+K1	L1+M1+N2
方案 3	A1+B1+C1	D2+E3	F1+G1	H1	I1+J2+K1	L3+M1+N2
方案 4	A1+B1+C1	D2+E3	F3+G3	H1	I3+J2+K1	L3+M1+N2
方案 5	A1+B2+C4	D1+E1	F1+G1	H1	I2+J3+K2	L3+M1+N2
方案 6	A1+B2+C4	D1+E1	F1+G1	H1	I3+J2+K1	L1+M1+N2
方案 7	A1+B2+C4	D1+E1	F1+G1	H1	I3+J2+K1	L1+M4+N1
方案 8	A2+B1+C1	D1+E1	F1+G1	H2	I1+J2+K1	L3+M1+N2

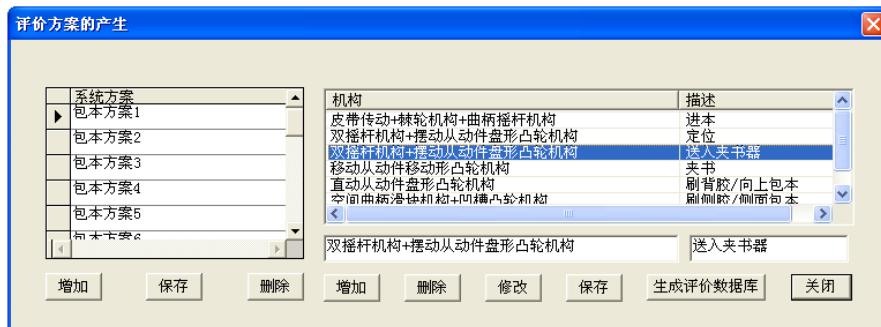


图 7.36 包封待评价方案的产生

4. 包封方案的计算机评价

图 7.37 所示是包封方案评价的基本过程，方案通过细化评价后进行模糊识别获得基本单元系统的输入相对优属度矩阵，基本单元系统根据输入矩阵和权向量进行求解，多个基本单元系统输出(相对优属度向量)构造成相对优属度矩阵，作为综合单元系统的输入，综合单元系统求解后得到方案的相对隶属度矩阵并可计算出方案的级别特征值，并以级别特征值的大小作为方案排序的依据。

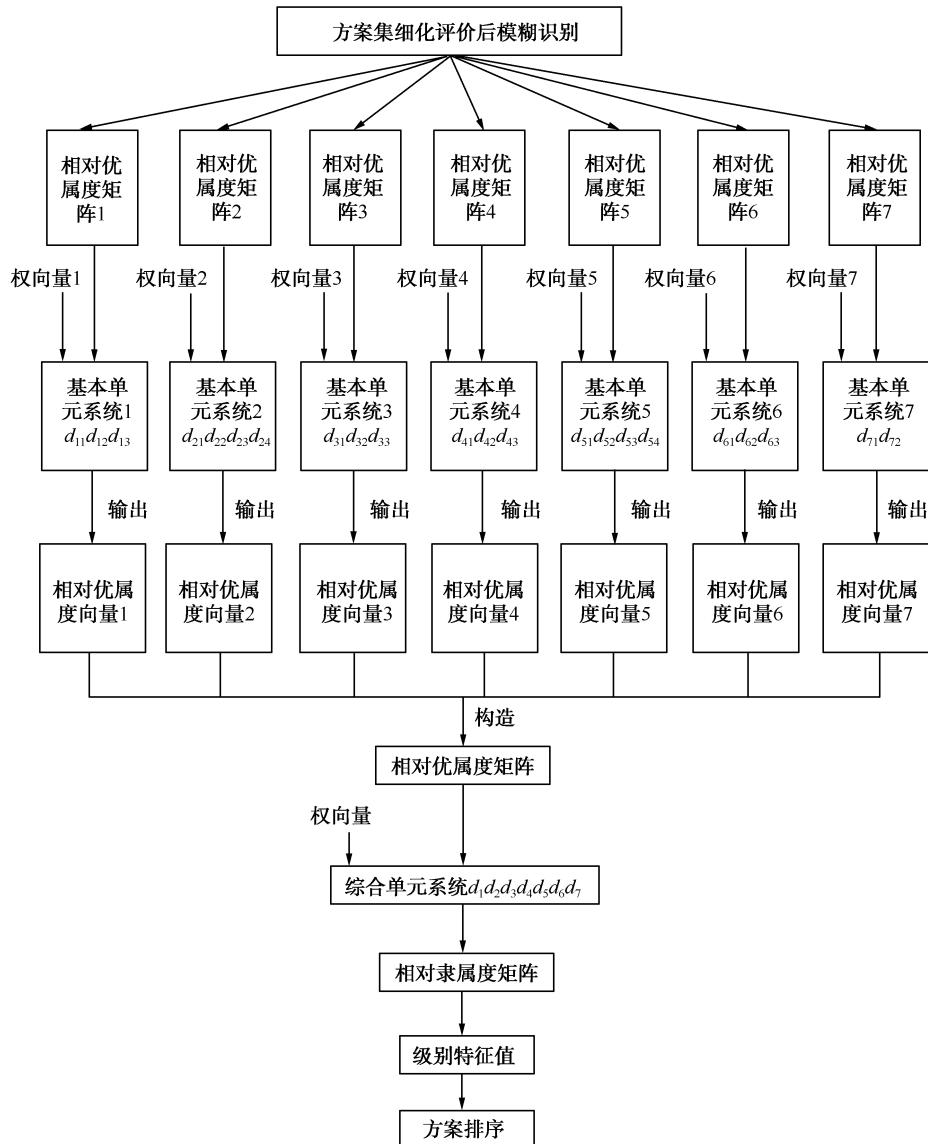


图 7.37 包封方案的评价基本过程

(1) 方案的细化评价

以基本单元系统 2 为例说明相对优属度矩阵的确定过程。基本单元系统 2 的指标有 $d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{24}$, 每个指标可进行细化, 细化后可以对方案进行二元比较, 具体过程如图 7.38 到图 7.40 所示。通过上述过程可获得指标对应的相对优属度矩阵。

例如，包封方案集对指标 d_{24} 细化后的相对优属度矩阵为

$$d_{24} \quad R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0.176 & 0.176 & 0.176 & 0.818 \\ 1 & 1 & 0.538 & 0.667 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0.538 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0.818 & 0.818 & 0.818 & 1 & 0.818 & 0.818 & 0.818 \\ 1 & 1 & 0.538 & 0.538 & 0.538 & 1 & 1 & 0.667 \end{bmatrix}$$

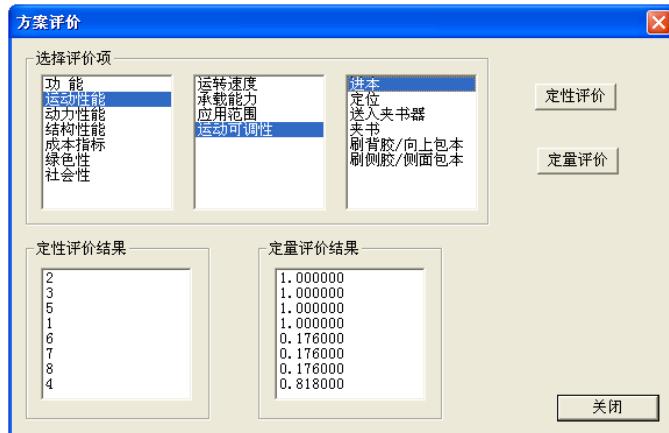


图 7.38 方案的评价选项

指标	运动规律形式	类别	进本	选项
皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案1]	——	皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案2]		等价
皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案1]	——	皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案3]		等价
皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案1]	——	皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案4]		等价
皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案1]	——	皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案5]		优先
皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案1]	——	皮带传动+棘轮机构 [包本方案6]		优先
皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案1]	——	皮带传动+棘轮机构 [包本方案7]		优先
皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案1]	——	链传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案8]		等价
皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案2]	——	皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案3]		等价
皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案2]	——	皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案4]		等价
皮带传动+棘轮机构+曲柄摇杆机构 [包本方案2]	——	皮带传动+棘轮机构 [包本方案5]		优先

图 7.39 方案的定性评价结果



图 7.40 方案的定量评价结果

根据对优的相对隶属度识别模型，可求得 d_{24} 的相对优属度向量如下为

$$d_{24} \mathbf{r} = (1, 0.999022, 0.9514, 0.909471, 0.93073, 0.961004, 0.961004, 0.983018)$$

同理也可获得基本单元系统 2 对指标 d_{21} 、 d_{22} 、 d_{23} 的相对优属度向为

$$d_{21} \mathbf{r} = (1, 1, 1, 0.993089, 0.98059, 0.98059, 0.98059, 1)$$

$$d_{22} \mathbf{r} = (0.926117, 0.98059, 0.887729, 0.714445, 0.76359, 0.947633, 0.989059, 0.946008)$$

$$d_{23} \mathbf{r} = (0.989059, 0.989059, 0.926177, 0.825001, 0.939782, 0.926177, 0.98, 0.953732)$$

通过四个相对优属度向量可构造基本单元系统 2 的相对优属度矩阵 ${}_2\mathbf{R}$ 。

(2) 基本单元系统求解

以基本单元系统 2 为例加以说明，根据表 7.2 所确定基本单元系统 2 的指标权重构造权向量 ${}_2\mathbf{w}=(0.293716, 0.193178, 0.154040, 0.359066)$ ，以及相对优属度矩阵 ${}_2\mathbf{R}$ ，根据三级模糊优选模型进行模糊识别，可以得到八种方案对差、中、优的相对隶属矩阵为

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.011224 & 0.000257 & 0.032773 & 0.236274 & 0.150214 & 0.008954 & 0.001646 & 0.006835 \\ 0.988776 & 0.999743 & 0.967227 & 0.763726 & 0.849786 & 0.991046 & 0.998354 & 0.993165 \end{bmatrix}$$

根据相对隶属度矩阵 \mathbf{U} 可计算包封方案的级别特征值，构造特征向量为

$$\mathbf{H} = \{2.988777, 2.999742, 2.9691228, 2.763726, 2.849787, 2.991045, 2.998353, 2.993166\}$$

由 \mathbf{H} 可获得单元系统 2 对优的隶属度向量为

$${}_2\mathbf{r} = (0.996259, 0.999914, 0.989076, 0.921242, 0.949929, 0.997015, 0.999451, 0.997722)$$

该向量可以作为综合单元的输入。

(3) 综合单元系统求解

综合单元系统的输入量是指标权重向量 \mathbf{W} 和相对优属度矩阵 \mathbf{R} , 矩阵 \mathbf{R} 可由基本单元系统输出的相对优属度向量来构造, 即

$$\mathbf{w} = (0.204290, 0.136261, 0.109908, 0.136261, 0.109908, 0.167109, 0.136261)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.999794 & 0.999866 & 0.999842 & 0.987875 & 0.976318 & 0.999177 & 0.999177 & 0.993944 \\ 0.996259 & 0.999914 & 0.989076 & 0.921242 & 0.949929 & 0.997015 & 0.999451 & 0.997722 \\ 0.999805 & 0.999760 & 0.998599 & 0.983751 & 0.996203 & 0.997993 & 0.997286 & 0.999107 \\ 0.999863 & 0.999497 & 0.999863 & 0.999977 & 0.999977 & 0.999863 & 0.999497 & 0.999263 \\ 0.998026 & 0.999867 & 0.999744 & 0.995219 & 0.993312 & 0.996641 & 0.999579 & 0.99957 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.999991 & 0.999991 & 0.999991 & 0.999991 & 1 & 1 & 1 & 0.999991 \end{bmatrix}$$

根据 6.4.3 节所提出的多级模糊优选模型, 这里采用差、中、优三级模糊优选模型, 设包封方案集归属于差、中、优三个级别的相对隶属度矩阵为 $\mathbf{U}=(u_{hj})_{c \times n}$, $c=3$,

$n=8$, $1 \leq h \leq c$, $1 \leq j \leq 8$, u_{hj} 为方案 j 从属于级别 h 的相对隶属度, 满足条件 $\sum_{h=1}^c u_{hj} = 1$;

$$0 \leq u_{hj} \leq 1; \quad \forall j, \forall h.$$

三级模糊优选模型为

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & d_{kj} = 0; \quad k \neq h \\ \left[\frac{\sum_{k=1}^c \sum_i^m [w_i(r_{ij} - s_{ik})]^2}{\sum_i^m [w_i(r_{ij} - s_{ik})]^2} \right]^{-1} & d_{kj} \neq 0; \quad \forall i, j \\ 1 & d_{hj} = 0; \quad h = k \end{cases}$$

其中

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} = (S_{ik})$$

应用上述模型可解得方案集归属于三个级别的相对隶属度矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000009 & 0.000000 & 0.000061 & 0.003670 & 0.002010 & 0.000014 & 0.000007 & 0.000045 \\ 0.999991 & 1.000000 & 0.999939 & 0.996330 & 0.997990 & 0.999986 & 0.999993 & 0.999955 \end{bmatrix} = (u_{ij})$$

得到 8 个方案的级别特征值为

$$H = (2.999991, 3, 2.99994, 2.996331, 2.99799, 2.999985, 2.999994, 2.999955)$$

根据特征值可以得到方案优劣排序是 2, 7, 1, 6, 8, 3, 5, 4。

图 7.41 所示为评价结果显示对话框，可以显示基本单元系统和综合单元系统求解所获得的相对隶属度矩阵，以及相对优属度向量。

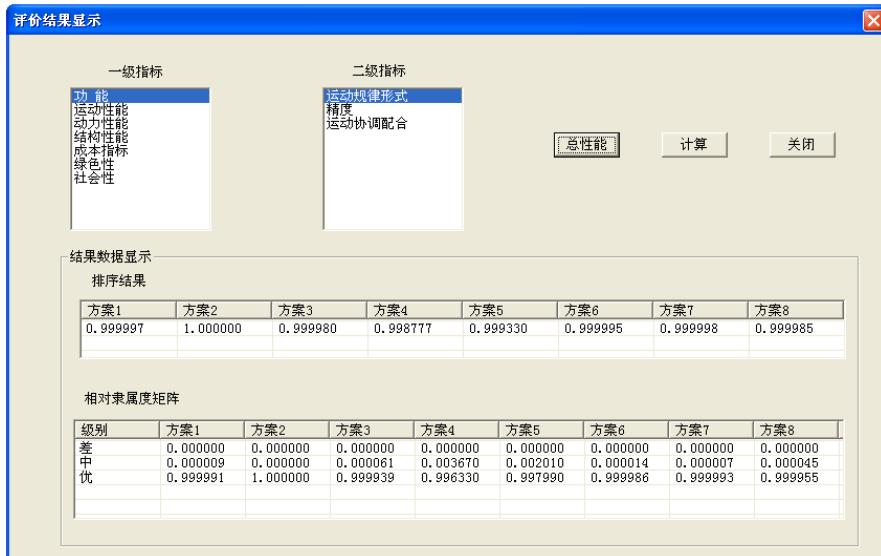


图 7.41 评价结果显示对话框

7.4 本章小结

本章从系统实现角度讨论了计算机辅助概念设计系统的开发问题。首先讨论了计算机辅助概念设计系统软件开发的内容，重点研究了软件体系结构、软件系统实现技术和手段；然后讨论了计算机辅助概念设计软件系统的一个完整的应用实例。

参 考 文 献

- [1] Al-Salka M. A. CMP, Hardy S. A Framework for a Generalized Computer-based Support Environment for Conceptual Engineering Design. *Journal of Engineering Design*. 1998,35(10):57~88.
- [2] Hsu W, liu B. Conceptual design: issues and challenges. *Computer-Aided Design*. 2000,32(14):849~850.
- [3] Pahl G, Beitz W. *Engineering Design–A systematic approach*. London. Springer - Verlag, 1996.
- [4] 张建明, 魏小鹏. 产品概念设计的研究现状及其发展方向. *计算机集成制造系统*. 2003,9(8):613~620.
- [5] 孙守迁等. 计算机辅助概念设计研究进展. *计算机辅助设计与图形学学报*. 2003,15(6):643~650.
- [6] Xiong MC. Global manufacture by using conceptual design. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003,139(1):453~456.
- [7] Hsu W, Woon I MY. Current research in the conceptual design of mechanical products. *Computer-Aided Design*. 1998,30(5):377~389.
- [8] Wang L, Shen W, Xie H. Collaborative conceptual design – state of the art and future trends. *Computer-Aided Design*. 2002,34(13):981~996.
- [9] 雷永刚, 彭颖红, 阮雪输. 机械产品概念设计:综述与分析[J]. *机械科学与技术*. 2000,19(1):18~20.
- [10] 舒慧林, 刘继红, 钟毅芳. 计算机辅助机械产品概念设计研究综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*. 2000,12(12):947~954.
- [11] Xue D, H.Yang. A concurrent engineering-oriented design database representation model. *Computer-Aided Design*. 2004,36(10):947~965.
- [12] U.Roy, Pramanik N, Sudarsan R, Sriram RD, Lyons KW. Function-to-form mapping: model, representation and applications in design synthesis. *Computer-Aided Design*. 2001,33(10):699~719.
- [13] Suh N. *Axiomatic design:advances and applications*. New York: Oxford University Press, 2001.
- [14] Janga B-S, Yanga Y-S, Songb Y-S, Yeunc Y-S, Dod S-H. Axiomatic design approach for marine design proble. *Marine Structures*. 2002,15(1).
- [15] 宋慧军, 林志航. 公理化设计支持的概念设计产品模型[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*. 2002,12(4):9~11.
- [16] 宋慧军, 林志航. 机械产品概念设计多层混合映射功能求解框架[J]. *机械工程学报*. 2003,39(5):82~87.

- [17] 宋慧军, 林志航. 机械产品概念设计中的知识表示[J]. 计算机辅助设计与图形学学报. 2003,15(4):438~443.
- [18] Yoshikawa H. General design theory and a CAD system, Man-machine Communication, in CAD/CAM. North-Holland, 1981.
- [19] Kikuchi M, Nagasaka I. Situation Theoretic Analysis of Functions for a Formal Theory of Design. International Conference on engineering Design ICED 03; 2003:19~21.
- [20] Tor SB, Britton, G A., Chandrashekhar, M. et al. Functional design. New York: Wiley, 1998.
- [21] Wie MV, Bryant CR, Bohm MR, A.Mcadams D, Stone RB. A model of function-based representations. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing 2005,19(2):89~111.
- [22] Prasanna, Sridharan, Matthew I, Campbell. A study on the grammatical construction of function structures. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing 2005,19(3):139~160.
- [23] Umeda Y, Kondoh S, Yoshiki, Shimomura, Tomiyama T. Development of design methodology for upgradable products based on function-behavior-state modeling. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. 2005,19(3):161~182.
- [24] Wilhelms S. Function- and constraint-based conceptual design support using easily exchangeable, reusable principle solution elements. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. 2005,19(3):201~209.
- [25] Homayoun B, Far, Elamy AH. Functional reasoning theories Problems and perspectives. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. 2005,19(3):75~88.
- [26] Wood WH, Dong H, Dym CL. Integrating functional synthesis. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. 2005,19(3):183~200.
- [27] Kota S. Function,Structure, and Constraints in Conceptual Design. Design Theroy and Methodology —DTM'90 ASME; 1990.
- [28] 王玉新. 数字化设计. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [29] Qian L, Gero JS. Function-behavior-structure Paths and their Role in Analogy-based Design. AIEDAM. 1996,10(4):289~312.
- [30] Gero JS. Design prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design. AI Magazine. 1990,11(4):26~36.
- [31] Umeda Y, Ishii M, Yoshioka M. Supporting conceptual design based on the function-behavior-state modeler. AI EDAM. 1996,10(4):275~288.
- [32] Deng Y-M, Tor SB, Britton G. Abstracting and exploring functional design information for conceptual product design. Engineering with Computers. 2000,16(1):36~52.
- [33] Zhang WY, Tor SB, Britton GA. EFDEX: A Knowledge-Based Expert System for Functional

- Design of Engineering Systems. *Engineering with Computers*. 2001,17(4):339~353.
- [34] Goel KA. Design, Analogy, and Creativity. *IEEE EXPERT*. 1997,12(3):62~70.
- [35] Prabhakar S, Goel KA. Functional modeling for enabling adaptive design of devices for new environments. *Artifical Intelligence in Engineering*. 1998,12(4):417~444.
- [36] Tomiyama T, Umeda Y, Yoshikawa H. A CAD for Function Design. *Annals of the CIRP*. 1993,42(1):143~164.
- [37] Umeda Y, Ishii M. Supporting Conceptual Design Based on the Function-behavior-state Modular. *Arifical Intelligence for Engineering Design, Analysis and manufacturing*. 1996,10(4):275~288.
- [38] Goel V, Pirolli P. The Structure of Design Problem Spaces. *Cognitive Science*. 1992,16:395~429.
- [39] Tor SB, Britton GA, Zhang W. Y. Guiding functional design through rule-based causal behavioral reasoning. *Int J Prod Res*. 2002,40(3):667~682.
- [40] Zhang WY, Tor SB, Britton GA. A graph and matrix representation scheme for functional design of mechanical products. *Int J Adv Manuf Technol*. 2004,25(3-4):221~232.
- [41] Deng Y-M, Britton GA, Tor SB. Constraint-based functional design verification for conceptual design. *Computer-Aided Design*. 2000,32(14):889~899.
- [42] 邹慧君, 田永利, 郭为忠, 梁庆华. 机构系统概念设计的基本内容. *上海交通大学学报*[J]. 2003,37(5):668~673.
- [43] 冯涛. 基于搭接网络计划技术的孕育模型及其在机械运动方案创新设计中的应用研究. *上海交通大学博士论文*. 2001.
- [44] 冯涛, 邹慧君. 一种能设计计算机械工作循环的概念设计过程模型[J]. *上海交通大学学报*[J]. 2002,36(3):367~372.
- [45] 冯涛等. 计算机辅助协调设计的新方法-网络计划法[J]. *中国机械工程*. 2002,13(17):1489~1492.
- [46] 冯涛, 邹慧君. 行为结构变型与创新. *上海交通大学学报*[J]. 2002,36(8):1075~1081.
- [47] 梁庆华, 郭为忠等. 行为结构变型方法研究[J]. *机械工程学报*. 2004,40(1):43~49.
- [48] 吴斌, 沈精虎. 概念产品设计模型的研究与实现[J]. *机械工程学报*. 2002,38(3):50~53.
- [49] Al-Hakima L, Kusiak A, Mathew J. A graph-theoretic approach to conceptual design with functional perspectives. *Computer-Aided Design*. 2000,32(14):867~875.
- [50] Moon Y-M, Kota S. Automated synthesis of mechanisms using dual-vector algebra. *Mechanism and Machine Theory*. 2002,37(2):143~166.
- [51] Zwicky F. *New Methods of Thought and Procedure: Contributions to the Symposium on Methodologies*. Berlin: Springer, 1967.
- [52] Zwicky F. *Discovery, Invention, Research - Through the Morphological Approach*. Toronto: The Macmillan Company, 1969.

- [53] 李宗斌, 赵丽萍. 多色集合的研究及在机械产品概念设计中应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报. 2002,14(7):688~692.
- [54] 唐凤鸣, 李宗斌. 基于多色集合理论的机械产品概念设计方法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报. 2003,15(2):150~155.
- [55] 唐永刚, 李宗斌, 李善仓. 基于多色集合理论的概念设计形式化解决方法[J]. 西安交通大学学报. 2004,38(1):68~72.
- [56] Maher, Garza. Case-Based Reasoning in Design. IEEE EXPERT. 1997,12(2):34~41.
- [57] 宋玉银, 蔡复之. 基于实例推理的产品概念设计系统[J]. 清华大学学报(自然科学版). 1998,38(8):5~8.
- [58] Mani S, Shankle WR, Dick MB, Pazzani MJ, Lee D, Lee K-H. An approach to case-based system for conceptual ship design assistant. Expert Systems with Applications. 1999,16(2):97~104.
- [59] 关立文, 黄洪钟. 机械产品概念设计:综述与展望[J]. 机械设计. 2001,18(8):1~6.
- [60] 邹慧君, 王石刚. 基于多层推理机制的机械产品概念设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报. 1997,9(6):548~553.
- [61] 蔡逆水, 邹慧君. 类比推理在智能化概念设计中的应用[J]. 上海交通大学学报[J]. 1997,31(3):70~73.
- [62] C.L.LI, S.T.TAN, K.W.CHAN. A Qualitative and Heuristic Approach to the Conceptual Design of Mechanisms. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 1996,9(1):17~31.
- [63] Sun SH, Chen JL. A Fixture Design System using Case-based Reasoning. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 1996,9(5):533~540.
- [64] POTTER S, DARLINGTON MJ, CULLEY SJ, CHAWDHRY PK. Design synthesis knowledge and inductive machine learning. AI EDAM. 2001,15(3):233~249.
- [65] 景旭文, 易红等. 基于数据挖掘工具的机械产品概念设计研究[J]. 机械科学与技术. 2004,23(10):1215~1218.
- [66] 杨茂发, 景旭文等. 基于 web 数据挖掘技术的机械产品概念设计研究[J]. 华东船舶工业学院学报. 2004,18(1):72~75.
- [67] Green G. Modeling Conceptual Design Evaluation. AI EDAM. 1997,11:211~217.
- [68] Juite. Ranking engineering design concepts using a fuzzy outranking preference model [J]. Fuzzy Sets and Systems. 2001,119(1):161~170.
- [69] Sun J, Kalenchuk DK, Xue D, Gu P. Design candidate identification using neural network-based fuzzy reasoning. Robotics and Computer Integrated Manufacturing. 2000,16(5):383~396.
- [70] 韩晓建等. 产品概念设计方案评价方法[J]. 北京航空航天大学学报. 2000,26(2):210~212.
- [71] Summers JD, Shah. JJ. Representation in Engineering Design: A Framework for Classification. ASME Design Engineering Technical, 2004.

- [72] Chakrabarti A, Bligh TP. A scheme for functional reasoning in conceptual design. *Design Studies*. 2001,22(6):493~517.
- [73] Shai O, Preiss K. Graph theory representations of engineering systems and their embedded knowledge. *Artifical Intelligence in Engineering*. 1999,13(3):273~285.
- [74] Yan HS, Chen F. Configuration synthesis of machining centers without tool change arms. *Mechanism and Machine Theory*. 1998,33(1):467~495.
- [75] Gorti SR, Gupta A, Kim GJ, Sriram RD. An object-oriented representation for product and design processes[J]. *Computer-Aided Design*. 1998,30(7):489~501.
- [76] Ishino Y, Jin Y. Acquiring engineering knowledge from design processes. *AI EDAM*. 2002,16(1):73~91.
- [77] Zhang WY, Tor SB, Britton G. Automated functional design of engineering systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2002,13(2):119~133.
- [78] 邹慧君. 机械系统概念设计. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [79] Zhang WY, Tor SB, Britton G. A FuncDesigner—a functional design software system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003,22(3-4):295~305.
- [80] 关立文等. 机械产品概念设计的协同设计研究. *中国机械工程*. 2002,13(21):1865~1868.
- [81] Bracewell R, Sharpe J. Functional descriptions used in computer support for qualitative scheme generation-'Schemebuilder'[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*. 1996,10(4):333~345.
- [82] Rodgers P, Huxor A, Nicholas N. Design Support Using Distributed Web-Based AI Tools. *Research in Engineering Design*. 1999,11(1):31~44.
- [83] Huang GQ, Mak KL. Web-based collaborative conceptual design. *Journal of Engineering Design*. 1999,10(2):98~107.
- [84] Campbell M, Cagan J, Kotovaky K. A-Design: an agent-based approach to conceptual design in a dynamic environment. *Research in Engineering Design*. 1999,11(3):172~192.
- [85] Campbell M, Cagan J, Kotovaky K. The A-Design approach to managing automated design. *Research in engeering Design*. 2003,14(1):12~24.
- [86] Fruchter R, Reiner KA, Toye G. Collaborative mechatronic system design. *Concurrent Engineering: Reasearch and applications*. 1996,4(4):401~402.
- [87] 苗鸿宾等. 从概念设计到虚拟实体设计的机械系统的快速市场响应创新设计方法, 机构学年会. 机械设计与研究, 2004.
- [88] Freeman P, Newell A. A model for functional reasoning in design. *Proceedings of the Second International Joint Conference on Artificial Intelligence London*; 1971:621~633.
- [89] Suh NP. *The Principles of Design*. New York: Oxford University Press, 1990.

- [90] H. B. Miao. Function Decomposition Model Based on Quotient Space. 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems, 419~423, 2009.
- [91] 黄靖远. 机械设计学. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [92] Umeda Y, Tomiyama T. Functional reasoning in design. IEEE Expert Intelligent Systems. 1997,12(2):42~48.
- [93] Cole E. Functional analysis: a system conceptual design tool IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems. 1998,34(2):354~365.
- [94] Stone R, Wood K. Development of a functional basis for design. Journal of Mechanical Design Studies. 2000,122:359~370.
- [95] Deng Y, Britton G, Tor S. A design perspective of mechanical function and its objectoriented representation scheme Engineering with Computers. 1998,14:309~320.
- [96] Szykman S. The representation of function in computer-based design. Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences (11th International Conference on Design Theory and Methodology), Paper NoDETC99/DTM-8742. Las Vegas: ASME; 1999.
- [97] Szykman S. A foundation for interoperability in next-generation product development systems. Computer-Aided Design. 2001,33(7):545~559.
- [98] Stone R, Wood K. Development of a functional basis for design. Journal of Mechanical Design Studies. 2000 359~370,122(4).
- [99] Hirtz J, Stone RB, McAdams DA, Szykman S, Wood KL. A functional basis for engineering design:Reconciling and evolving previous efforts. Research in Engineering Design. 2002,13(2):65~82.
- [100] DENG Y-M, TOR SB, BRITTON GA. A dual-stage functional modelling framework with multi-level design knowledge for conceptual mechanical design. 2000,11(4):347~375.
- [101] Dan B, Yoram R. Topological structures for modeling engineering design processes. Research in Engineering Design. 2003,14(4):185~199.
- [102] Cech E. Topological spaces. London: Wiley, 1966.
- [103] H. B. Miao. Conceptual Design Method Based on Behavior Re-Creation. Applied Mechanics and Materials 2008, Vols. 10~12, 198~202.
- [104] 赵呈林. 冷挤压机设计基础. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [105] 邹慧君, 张青, 王学武. 机器工作机理的行为表述方法及其在产品创新设计中应用的研究. 机械设计与研究. 2005,21(5).
- [106] 何德誉. 曲柄压力机. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [107] 华中工学院等五院(校). 机械传动及曲柄压力机. 北京: 人民教育出版社, 1976.
- [108] 吴振亭, 王德俊. 冷冲压模具设计与制造. 郑州: 河南科学技术出版社, 2006.
- [109] 夏巨谌. 塑性成型工艺及设备. 北京: 机械工业出版社, 2001.

- [110] 邹慧君. 机械系统设计原理. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [111] Ritchey T. General Morphological Analysis A general method for non-quantified modelling. 16th EURO Conference on Operational Analysis. Brussels; 1998.
- [112] Ritchey T. Problem structuring using computer-aided morphological analysis. Journal of the Operational Research Society. 2006,57(7):792~801.
- [113] Eriksson T, Ritchey T. Scenario Development using Computerised Morphological Analysis. International OR Conferences. England; 2002.
- [114] Yoon BC, Park YT. Morphology analysis approach for technology forecasting. Engineering Management Conference, 2004 Proceedings 2004 IEEE International; 2004.
- [115] 宾鸿赞. 机械制造工艺过程的形态学分析法. 中国机械工程. 1992,3(5):20~22.
- [116] Bailey K. Typologies and Taxonomies-An Introduction to classification Techniques. Sage University Papers, Sage Publications: Thousand Oaks, Baltimore; 1994.
- [117] Levin M. Combinatorial engineering of decomposable systems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [118] Levin M. Towards Combinatorial Analysis, Adaptation, and Planning of Human-Computer Systems. Applied Intelligence. 2002,16(3):235~247.
- [119] Levin M. Hierarchical combinatorial planning of medical treatment. Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2004,73(1):3~11.
- [120] Levin M. Hierarchical morphological multicriteria design of decomposable systems. Concurrent Eng Res. 1996,4(2):111~117.
- [121] Larichev OI, Moshkovitch HM. An Approach to Ordinal Classification Problems. International Transactions in Operational Research. 1994,1(3):375~385
- [122] Roy B, Slowinski R. Criterion of distance between technical programming and socio-economic priority. RAIRO Recherche Operationnelle. 1993,27:45~60.
- [123] Xu X, Martel J-M, Lamond BF. A multiple criteria ranking procedure based on distance between partial preorders. European Journal of Operational Research. 2001,133(1):69~80.
- [124] 廖貅武, 李垣, 董广茂. 一类不确定信息下的多属性决策问题的研究. 西安交通大学学报. 2005,39(8):792~795.
- [125] Roy B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. Theory and Decision. 1991,31:49~73.
- [126] 林锉云, 董加礼. 多目标优化的方法与理论. 长春: 吉林教育出版社, 1992.
- [127] 谢涛, 陈火旺. 多目标优化与决策问题的演化算法. 中国工程科学. 2002,4(2):59~68.
- [128] 陈伦军等. 机械优化设计遗传算法. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [129] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化. 北京: 清华大学出版社, 2004.

- [130] Renner G, Ekart A. Genetic algorithms in computer aided design. Computer-Aided Design. 2003,35(8):709~726.
- [131] Tadahiko M, Hisao I, Hideo T. Multi-Objective Genetic Algorithm and its Applications to Flowshop Scheduling. Computers and Industrial Engineering 1996,30(4):957~968.
- [132] Thurston DL, Carnahan JV. Fuzzy Ratings and Utility Analysis in Preliminary Design Evaluation of Multiple Attributes. ASME J Mech Des. 1992,114(4):648~658.
- [133] Wang J. Ranking engineering design concepts using a fuzzy outranking preference model. Fuzzy Sets and Systems. 2001,119(1):161~170.
- [134] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [135] 陈守煜. 模糊分析决策理论. 华北水利水电学报学报. 1995,1:1~9.
- [136] 陈守煜. 防洪调度多目标决策理论与模型. 中国工程科学. 2000,2:47~52.
- [137] 陈守煜. 多目标系统半结构性决策理论与方法. 辽宁工程技术大学学报. 2001,10:578~582.
- [138] 苗鸿宾, 刘钊. 机械系统概念设计方案评价方法研究. 机械传动, 2008, 32(1).
- [139] Miao H. B. A study on evaluation method of conceptual design scheme of mechanical system,ISTM: 7th International Symposium On Test And Measurement, 2007.
- [140] 陈守煜. 相对隶属度与两级模糊识别模型及其在水工评价中应用. 大连理工大学学报. 2004,2:288~291.
- [141] 王建明. 武器系统综合效能模糊识别模型. 火力与指挥控制. 2003,3:15~19.
- [142] 苗鸿宾. 基于FMBS 模型的计算机辅助概念设计方法的研究. 同济大学博士论文, 2008.
- [143] 苗鸿宾, 乔峰丽. 空间 RSSR 机构运动分析的研究. 机械设计与制造, 2008(2).
- [144] Miao H. B. A method for kinematic analysis of constraint-based planar mechanism, ISTM: 6th International Symposium On Test And Measurement, 2005.
- [145] 沈炜, 徐慧. Visual C++数据库编程技术与实例 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [146] 李力, 欧阳. Visual C++ 6.0 实用数据库编程. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [147] 苗海龙等. 书刊装订工艺及设备. 北京: 印刷工业出版社, 2007.
- [148] 陕西机械学院印刷机械教研室. 装订机概论. 北京: 印刷工业出版社, 1986.
- [149] 翁杰. 印后加工机械. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [150] 邵万生. 书刊装订. 上海: 上海出版印刷公司, 1980.
- [151] 张选生. 印后加工工艺与设备 北京: 印刷工业出版社 2007.
- [152] 张海燕. 印刷机与印后加工设备. 北京: 中国轻工业出版社, 2004.