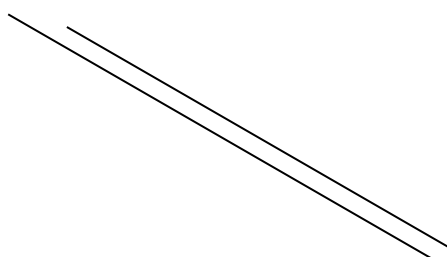


基于公理设计的新型石油装备 及工具设计开发

席文奎 著



西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

基于公理设计的新型石油装备及工具设计开发/ 席文奎著. —成都: 西南交通大学出版社, 2022.11

ISBN 978-7-5643-9022-8

I. ①基… II. ①席… III. ①石油工程-机械设备-产品设计②石油工程-机械设备-产品开发 IV. ①TE9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 216680 号

Jiyu Gongli Sheji de Xinxing Shiyou Zhuangbei ji Gongju Sheji Kaifa
基于公理设计的新型石油装备及工具设计开发
席文奎 著

| | |
|---------|---|
| 责任编辑 | 陈 斌 |
| 封面设计 | 何东琳设计工作室 |
| 出版发行 | 西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼) |
| 发行部电话 | 028-87600564 028-87600533 |
| 邮 政 编 码 | 610031 |
| 网 址 | http://www.xnjdcbs.com |
| 印 刷 | 成都勤德印务有限公司 |
| 成 品 尺 寸 | 170 mm × 230 mm |
| 印 张 | 10.75 字 数 220 千 |
| 版 次 | 2022 年 11 月第 1 版 印 次 2022 年 11 月第 1 次 |
| 书 号 | ISBN 978-7-5643-9022-8 |
| 定 价 | 38.00 元 |

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

国家实施双碳、绿色发展战略给我国油气田开发带来诸多机遇，同时受制于石油装备与技术工具，在复杂油气田开发领域存在多个技术难题亟待解决、多个技术瓶颈有待突破，而要彻底摆脱“依赖进口、受制于人”的局面，需要产品创新、技术创新，需要中国制造、中国智造，将“能源的饭碗端在自己手里”。本书以创新驱动为核心，围绕现代石油天然气开采开发过程提速、增效、降本、能源可再生利用、智能与仿生等主题，将作者所主持完成的国家级、省部级以及中石油重大校企合作课题的技术创新、产品结构创新以及设计理论与方法创新等成果进行归纳总结，涉及现代油气田开发、排水采气、钻井工程、测井工程、海洋工程等领域。

本书的重要特色是将谢友柏院士所提倡的公理设计理论与方法贯穿始终，将多个新型石油装备与工具的创新设计过程、创新设计知识获取进行了公理化建模与表达，实现了产品功能—设计结构—服役性能的最优匹配。

本书第一章介绍了公理设计理论基础，构建了基于公理设计的产品设计方法，是学习后续章节的准备；紧接着以公理设计理论为主线、产品结构创新为核心，通过五个章节分别介绍了天然气井智能排水采气工具——井下节流装置、石油钻井自适应减摩降阻工具——可膨胀套管扶正器、石油测井仿生仪器——可变径井径测量仪、海洋能源可再生利用装置——棘轮式海洋波浪能发电装置、石油随钻提速提效工具——水力振荡器等新型石油装备与工具的创新设计过程及创新设计知识获取。

本书兼具理论性与实践性，对石油天然气开发利用、产品创新设计等领域
的研究人员、工程技术人员具有实践指导和参考价值；对高校教师、研究生、
本科生来说是重要的参考著作；特别是对从事产品研发的项目管理人员，可对
项目方案决策、过程优化、质量控制等提供理论与方法工具和案例借鉴。

本书由西安石油大学席文奎博士执笔，全书的撰写和统稿工作由其完成。
西安交通大学袁小阳教授担任主审，对本书提供了重要的学术指导。感谢西安
石油大学徐建宁教授、长庆油田首席技术专家慕立俊教授级高工，从专业领域
和工程应用方面对本书提供了重要指导和参考意见。课题组的贺齐齐、彭蒋伟、
罗珺睿、张轩、王科强、付骥、陈虎子、杨森、阎郡等多名研究生为本书的资
料整理和文字工作付出了辛勤的劳动。本书在编写过程中也参考了部分文献资
料，值本书出版之际，在此一并表示感谢。

本书的出版得到陕西省自然科学基金（2017JM5059）、陕西省厅市联动重
点项目（宝鸡传感器产业）、西安石油大学“石油机械现代设计及先进采油采
气工程青年科研创新团队”项目的资助。

限于作者水平，本书仅代表一家之言，难免以偏概全，敬请读者谅解；书
中难免有疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2022年10月

目 录

| | | |
|-------|----------------------------|-----|
| 第 1 章 | 基于公理设计的复杂产品现代设计 | 001 |
| 1.1 | 公理设计的基本框架 | 001 |
| 1.2 | 基于公理设计的设计成功概率表征 | 005 |
| 1.3 | 面向复杂产品的公理化设计方法构建 | 008 |
| 第 2 章 | 新型可膨胀变径套管扶正器设计 | 016 |
| 2.1 | 新型可膨胀变径套管扶正器结构的提出 | 016 |
| 2.2 | 可膨胀变径套管扶正器设计方案的公理化建模 | 020 |
| 2.3 | 可膨胀变径套管扶正器结构设计方案的实现 | 030 |
| 2.4 | 可膨胀变径套管扶正器静动性能分析 | 038 |
| 第 3 章 | 新型仿生测井仪结构设计 | 049 |
| 3.1 | 新型仿生结构测井仪的提出 | 049 |
| 3.2 | 测井仪设计方案的公理化建模 | 051 |
| 3.3 | 仿生式测井仪结构设计方案的实现 | 061 |
| 3.4 | 机械、运动学性能分析 | 065 |
| 3.5 | 测井仪精准分析系统开发 | 072 |
| 第 4 章 | 新型卡爪式井下节流器机构设计及参数优化 | 076 |
| 4.1 | 新型卡爪式井下节流器创新结构的提出 | 076 |
| 4.2 | 卡爪式井下节流器设计方案的公理化建模 | 079 |
| 4.3 | 卡爪式井下节流器结构设计方案的实现 | 087 |
| 4.4 | 卡爪式井下节流器静动性能分析 | 093 |

| | | |
|-------|------------------------------|-----|
| 第 5 章 | 新型结构水力加压器设计 | 104 |
| 5.1 | 新型结构水力加压器的提出 | 104 |
| 5.2 | 水力加压器的公理化建模 | 108 |
| 5.3 | 水力加压器结构设计方案的实现 | 116 |
| 5.4 | 水力加压器设计参数优化 | 126 |
| 5.5 | 水力加压器的工作性能分析 | 131 |
| 第 6 章 | 新型棘轮式海洋波浪能发电装置结构设计 | 140 |
| 6.1 | 新型棘轮式海洋波浪能发电装置的提出 | 140 |
| 6.2 | 棘轮式海洋波浪能发电装置设计方案的公理化建模 | 143 |
| 6.3 | 棘轮式海洋波浪能发电装置结构设计方案实现 | 151 |
| 6.4 | 棘轮式海洋波浪能发电装置静动性能分析 | 156 |
| 参考文献 | | 165 |

第1章 基于公理设计的复杂产品现代设计

公理设计 (Axiomatic Design) 理论最早由 MIT Suh 教授提出, 它是一种将设计思维、设计理论、设计方法与设计工具相统一的设计科学与设计方法论, 在多个领域已经得到成功应用和发展。本章从支持产品结构创新—结构功能实现—结构功能保障三个层面出发, 对公理设计基本理论、方法及定义进行应用和发展, 建立面向于石油机械及装备领域的复杂产品公理化设计理论与方法。

1.1 公理设计的基本框架

1.1.1 设计域及其之间的映射

域是公理化设计中最基本和最重要的概念, 它贯穿于整个设计过程。域分为四种类型:

- (1) 用户域: 表示用户所要解决的问题 (CA_s , Customer Attributes)。
 - (2) 功能域: 表示设计方案所要实现的一系列功能性要求最小集 (FR_s , Functional Requirements)。
 - (3) 物理域: 表示设计方案中满足 FR_s 的设计结构及参数集合 (DP_s , Design Parameters)。
 - (4) 过程域: 表示过程变量集合 (PV_s , Process Variables)。
- 四个域之间的相互关系和作用如图 1-1 所示。

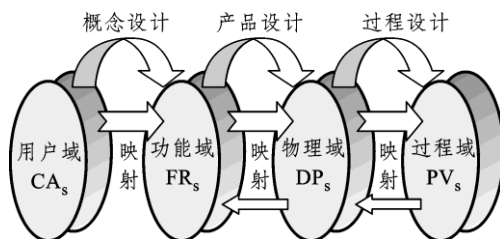


图 1-1 公理设计中的域的相互作用与关系

公理化设计通过相邻两个设计域间的“之”字形映射进行产品设计，并在映射过程中利用设计公理判断设计的合理性和最优化。与其他设计理论相比，公理化设计不单纯是在某一个设计域中完成自身的设计，它是在相邻的两个设计域之间自上而下地进行映射和变换，充分考虑两者之间的相互关系，整个映射过程形象地描述为“之”字形映射。

以功能域到物理域的映射为例，设计人员首先必须明确产品应具有什么样的功能，从而确定出产品的总功能要求。然后从总功能要求出发，确定满足总功能要求的总体设计参数，当总功能要求满足后，根据总设计参数来进行总功能分解，再根据子功能确定该级的设计参数，当子功能完全满足后，再分解下一级子功能，以此类推，直至分解到子问题全部解决为止。经过“之”字形映射，可得到功能层次结构和设计参数的层次结构树，以及设计参数和功能要求之间的关系。功能域向物理域映射原理如图 1-2 所示。同样地，物理域到过程域的映射也有类似的关系。

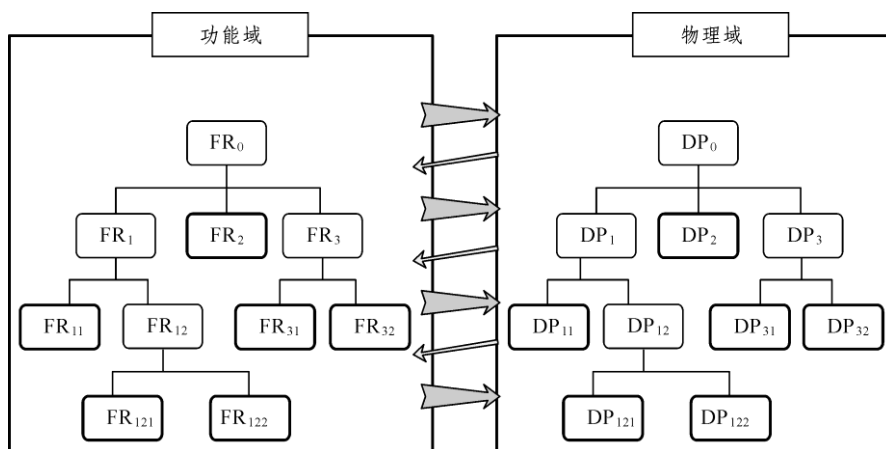


图 1-2 功能域向物理域映射原理及层次结构

层次 (Hierarchy) 是指公理化设计中某域的层次树。公理化设计的整个过程就是从功能域到物理域, 再到过程域之间的映射过程。整个设计是一个从高级别的抽象概括到低级别的详细描述过程。如果把产品看成是一个系统, 那么设计就是一个把系统分解为子系统, 然后分解为部件, 再分解为零件, 最后分解为零件特征的过程。设计的最终结果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树, 它非常清晰地描述了各个设计域的工作目的。产品的功能层次树和结构层次树如图 1-2 所示, 其中, 黑体框代表叶 (即不必进一步分解的层次) 节点。

1.1.2 两个设计公理

整个设计过程实际就是四个域之间的映射过程。在公理化设计的映射过程中, 要做出正确的设计决策必须用两条基本设计公理来评价设计方案的好坏和优劣。两条基本公理是:

- (1) 独立公理 (The Independence Axiom): 保持功能需求的独立性。
- (2) 信息公理 (The Information Axiom): 力求使设计的所需信息量最少。

公理化设计的两个设计公理可以在设计过程中帮助设计者判断设计的合理性。

1. 独立公理

独立公理: 保持功能需求 (FR_s) 独立。

FR_s 定义为设计所必须满足的独立需求的最小集合。一组 FR_s 是设计目的描述。满足独立公理, 那就意味着当有两个或更多 FR_s 时, 设计结果必须是能够满足 FR_s 中的每一个而不影响其他的 FR_s 。因此必须选择一组正确的 DP_s 以满足 FR_s 和保持它们的独立性。

在给定的设计层次上, 功能需求集, 它确定特定的设计目标, 构成功能域中的 FR 向量。同样, 在物理域中已经被选择来满足 FR_s 的设计参数集, 构成了 DP 向量。这两个向量之间的关系可以写成如下的方程:

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad (1-1)$$

式中 $[A]$ ——设计矩阵, 它表征产品设计。

式 (1-1) 是产品设计的设计方程。对于有 3 个 FR_s 和 DP_s 的设计, 其设

设计矩阵有如下形式：

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

对于一个线性的设计， A_{ij} 是常数；对于非线性设计， A_{ij} 是 DP_s 的函数。设计矩阵有两个特殊情况：对角线矩阵和三角形矩阵。在对角线矩阵中，除掉 $i=j$ 以外所有的 $A_{ij}=0$ 。

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

如下所示，在下三角形矩阵中，所有的上三角元素等于零。

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

在上三角形矩阵中，所有的下三角元素等于零。

过程设计涉及从物理域中的 DP 向量到过程域中的 PV 向量的映射，设计方程可以写成：

$$\{DP\} = [B]\{PV\} \quad (1-5)$$

式中 $[B]$ ——表征过程设计特征的设计矩阵，与 $[A]$ 的形式相似。

为了满足独立公理，设计矩阵必须是对角矩阵或三角矩阵。

2. 信息公理

信息公理：使设计中的信息量为最小。

信息公理说的是，具有最小信息量的设计是最佳设计，因为它为达到设计目标只需要最少的信息量。当所有的概率都等于1.0时，信息含量为零。反之，当概率之中的一个或几个等于零时，所需要的信息量就是无穷大。也就是说，如果概率很小，就必须提供更多的信息来满足功能需求。对于满足独立公理的诸多设计中，信息公理提供给定设计所需信息的定量度量，因此可用来从那些可接受的设计中选出最好的设计。另外，信息公理为优化设计

提供了基础。

成功概率可以这样得到：为 FR 规定设计范围 (dr)，并确定拟议中的设计为满足 FR 所能提供的系统范围 (sr)，然后进行计算。图 1-3 画出了这两个范围。其中纵轴是系统概率密度，横轴是 FR 或 DP 之一，取决于涉及的映射域。当映射是在功能域和物理域之间进行时，如产品设计，横轴是 FR；当映射是在物理域和过程域之间进行时，如在过程设计，横轴就是 DP。

图 1-3 显示了某个 FR 的系统范围上的概率密度函数。设计范围与系统范围重叠的部分称为公共范围 A_{cr} ，这是满足 FR 的唯一区域。于是，系统概率密度函数下并在公共范围中的面积 A_{cr} ，就是达到规定目标的设计的概率。这样信息含量可以表示为：

$$I = \log_2 \frac{1}{A_{cr}} \quad (1-6)$$

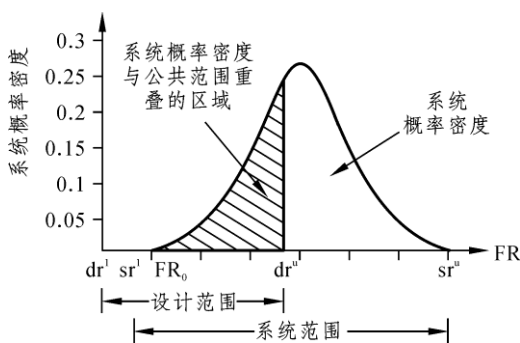


图 1-3 设计范围、系统范围和系统概率密度函数

1.2 基于公理设计的设计成功概率表征

1.2.1 设计成功概率的定义

国内外关于设计过程建模、控制及优化决策有诸多研究，具有代表性的有谢友柏院士提倡的现代设计理论和麻省理工学院的公理设计理论以及多色集合等设计理论与方法，还包括过程控制、优化决策、复杂网络等数学手段。各理论方法都从不同角度体现了设计成功概率的理念，但由于解决问题的出发点、目的和手段的不同，各方法对产品最终设计目标的实现以及设计成功

概率的影响是不同的。本节采用公理设计中信息量、复杂性等相关概念和定义，从设计成功概率的角度加以综合分析。

公理设计方法中将复杂性定义为实现 FR_s 的不确定性的度量，并用信息量 I (成功概率 P_i) 来表征。对于有 m 个 DP_s “叶”的设计结果，系统总的信息量等于各“叶”的信息量之和，计算公式如下：

$$I = -\sum_{i=1}^m \log_2 P_i \quad (1-7)$$

根据图 1-3，在实际计算过程中，某个用来实现 FR 的 DP 的信息量可通过设计范围与系统范围公共部分的概率密度函数面积来确定，图中设计范围与系统范围重叠的部分称为公共范围 A_{cr} ，这是满足 FR 的唯一区域。于是，系统概率密度函数中公共范围中的面积 A_{cr} 就是达到规定目标的设计的概率，信息含量 I 可按式 (1-8) 计算。

$$I = \log_2 \frac{1}{A_{cr}} = \frac{sr(\text{系统范围})}{dr(\text{设计范围})} \quad (1-8)$$

同样，公理设计将复杂性分为正交的两个部分，一部分是真实复杂性 I_R ，另一部分是虚拟复杂性 I_m ， I_m 是由于设计人员专业知识不完备、理解不足所产生的。由于二者的正交关系，存在虚拟复杂性的设计是不能通过真实复杂性的改善而改善。

在实际研究中，设计者根据设计功能和目标对 FR_s 做不同层次的分解，并根据多学科领域专业知识、经验知识以及不同的手段构造 DP_s 与 PV_s 并完成它们的分解、映射和迭代。最低层的“叶”即设计结果可以是某种结构方案、设计参数，可以是计算方法和软件工具，也可以是一个抽象的节点。各 DP_s 的不同及它们的组合会导致设计结果存在复杂的耦合关系，甚至矛盾、冲突的关系，围绕它们进行优化决策及冲突解耦是设计的核心所在，而各领域各方法对冲突等问题解决所依赖的知识基础是不同的，因而体现的复杂性是不同的，接下来对各方法进行对比分析。

1.2.2 复杂性的来源分析

1. DP_s 与 PV_s 的选择和数目导致“真实复杂性”

在 DP_s 与 PV_s 选择中要尽可能保证它们是无耦合的，即满足独立公理，

这样的设计信息量最低，是一个理想设计。实际设计中大多数情况下面临的是耦合设计，由于每个 DP_s 与 PV_s 都有其设计可行域范围并且与系统范围并不完全重合，有多个参数时我们不可能保证每个参数都在一个理想的范围之内，即存在真实复杂性。 DP_s 与 PV_s 数量越多，真实复杂性越高，因此采用尽可能多的参数并不能带来复杂性的降低，而一个好的设计应该是保证实现 FR_s 设计目标及映射迭代过程所需信息量越低（设计成功概率越高）所需的 DP_s 与 PV_s 。

2. 专业知识不完备、理解不足导致“虚拟复杂性”

由于设计者不能完全或正确确定 DP_s 与 PV_s 设计范围和系统范围，得到的设计方案尽管在形式上可能是一个理想设计，但会导致错误的设计结果。要减少“虚拟复杂性”，设计人员必须具有完备的深知识获取及融合的基础能力，同样 DP_s 与 PV_s 数量增多并不能减少虚拟复杂性。

可见一个设计的成功概率与 DP_s 与 PV_s 的选择和数目有关，而一个好的设计过程必须是在保证设计成功概率和尽可能避免虚拟复杂性的前提下进行的，接下来对几种方法进行讨论。

1.2.3 不同设计方法的复杂性对比分析

(1) DSM 方法、GN 算法以及复杂网络理论等方法将设计过程用“节点来表征”（可以理解为公理设计中的 DP_s ），例如一个叶片的设计过程被抽象为几十个设计节点，各设计节点的设计关系是耦合的，呈网络结构，其设计主要解决的是节点的耦合与冲突关系，追求的是通过尽可能多的“节点”数目来提高设计可信度和系统性，解决问题所依赖的是数学方法与计算机工具。采用该方法可有效提高多个设计企业、团队及设计人员组成的设计联盟的效率和自动化程度，但该方法由于没有考虑多学科领域本源设计知识在过程优化、协同决策及冲突解耦中的作用，从提高产品设计成功概率角度而言，不仅存在真实复杂性，而且存在虚拟复杂性。

(2) 博弈论及方法是多参数、多目标优化方法中比较新的方法，目的是解决设计不同学科领域及不同参数间设计目标、设计可行域及约束条件不同

带来的冲突问题。实际高速转子设计过程涉及大量的热力学参数、关键部件结构参数及运行参数等，不同设计方案、参数及它们的组合会体现出明显耦合和冲突矛盾关系，而博弈论与其他参数优化方法一样，主要追求多的设计变量（ DP_s ）数目但却与本源设计方法及“深知识”融合的程度不够，极大地提高了设计复杂性，得到的结果在实际中是并不可信的，并不能带来设计成功概率的提高。一方面，过多的设计变量不仅不会带来设计成功概率的提高，反而会带来真实复杂性；另一方面，设计人员对于多个变量设计可行域范围、系统范围了解不足的情况，导致了虚拟复杂性的存在。

综上分析可知，DSM方法、GN算法及复杂网络、多参数优化等“非本源方法”由于侧重于追求多的变量（节点）数目以及对数学工具和计算方法的依赖性，极大地提高了设计复杂性和不确定性，却并不能带来设计成功概率和设计可信度的提升，因此，一个好的过程建模及控制方法必须考虑与本源设计方法及“深知识”的融合才能更好地发挥作用。

1.3 面向复杂产品的公理化设计方法构建

1.3.1 设计准则

根据设计成功概率讨论分析，给出公理设计过程的一般性准则。

准则一：公理化设计建模，首先需要保证高层次的设计成功概率（前文研究中将设计过程研究分为四个阶段，其中概念设计阶段是最核心的），高层的耦合和冲突问题并不能通过底层来解决。

准则二：在保证实现 FR_s 设计目标所必需 DP_s 与 PV_s 信息量（设计成功概率越高）最小的情况下，通过增加 DP_s 与 PV_s 数目并不能带来设计信息的降低（设计成功概率的提高）。

准则三：设计过程矛盾冲突的解决依赖于多学科领域“本源设计知识”，通过数学工具及计算方法，却并不能带来设计成功概率和设计可信度的提升。

公理设计过程依赖于两类知识：① 设计流程控制及决策类知识；② 多学科领域本源设计知识。一个好的设计方法必须是两方面知识的融合，其具

体要求如下:

(1) 体现设计过程的层次性和阶段性。根据设计准则三,设计过程中的不同阶段、不同层次对设计成功概率的影响作用是不同的,而一个好的设计方法应该对该过程进行支持。

(2) 以设计成功概率提升为核心。一个好的设计方法首先必须保证设计目标实现的成功概率的提升。

(3) 具有系统的过程建模及知识表达体系,具备有效的冲突解耦机制,并能有效支持多学科领域“本源设计知识”的融合。

(4) 支持与其他设计理论与方法的融合。

经过上述分析,研究复杂产品设计过程及其控制命题,必须以多学科本源设计方法为基础,并有效融合相关“非本源方法”,在保证设计成功概率并尽可能避免虚拟复杂性的前提下,选择合适的 DP_s 与 PV_s ,基于多学科领域“本源设计知识”进行关键节点的控制、决策及冲突解耦。

公理化设计方法是满足上述设计准则和要求的:① 公理设计方法通过“域”的形式把设计过程划分为四个相互联系和不断映射迭代的阶段,该方法与 F-B-S(功能-行为-结构)等方法相似;② 公理设计以 FR_s 、 DP_s 、 PV_s 等基本构件、设计矩阵、有向图(流程图、模块图等)构成了设计过程建模及知识表达的系统体系,以两大设计公理、若干推理及信息量形成设计过程控制、冲突解耦的有效机制;③ 公理设计方法是开源的,而相关研究都是以设计成功概率提高为核心的。

1.3.2 公理化设计知识表达及设计过程建模

公理设计在“域”的概念框架下,以 FR_s 、 DP_s 、 PV_s 等“标准”构件、设计矩阵、有向图(流程图、模块图等)为设计过程建模及控制提供了有效的技术体系和工具支持。以下以某旋转机械设计过程中的知识表达与流程控制为例进行说明。一个旋转机械主要有功能实现(FR_1 : 能量转化、传递)与功能保障(FR_2 : 保障系统稳定可靠工作)两大设计功能,以通流模型关键物理参数构造 DP_s 与 PV_s 来进行主要设计节点的知识表达,并完成它们

的分解和映射迭代，如表 1-1 和 1-2 所示。

表 1-1 FR_s 功能分解及与 DP_s 的映射

| FR_s | | DP_s | |
|-----------|----------|-----------|---------------------|
| FR_{11} | 旋转运动实现 | DP_{11} | 旋转运动装置设计 |
| FR_{12} | 径向支撑、定位 | DP_{12} | 轴承设计 |
| FR_{21} | 密封性能满足要求 | DP_{21} | 密封设计 |
| FR_{22} | 轴向平衡、定位 | DP_{22} | 平衡装置设计 |
| FR_{23} | 系统稳定可靠工作 | DP_{23} | 转子-轴承-密封系统静力学、动力学设计 |

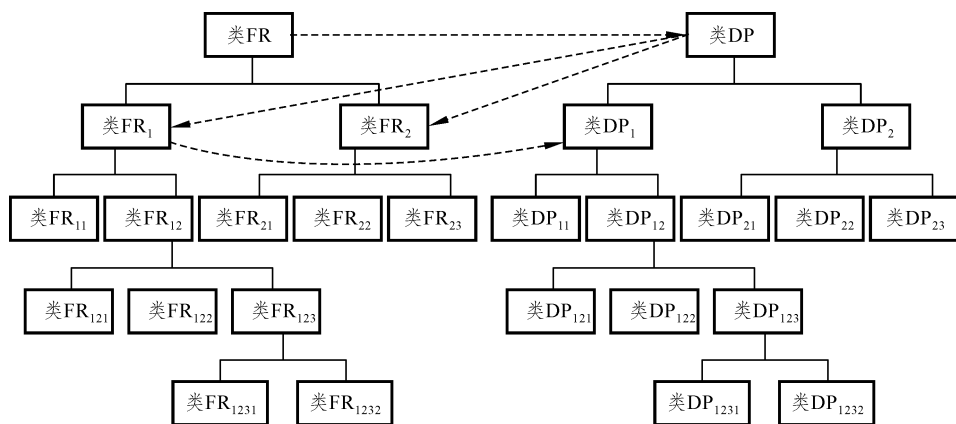
表 1-2 映射过程的设计矩阵

| 功能需求 FR_s | | 设计参数 DP_s | | | | |
|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | DP_1 | | DP_2 | | |
| | | DP_{11} | DP_{12} | DP_{21} | DP_{22} | DP_{23} |
| FR_1 | FR_{11} | x | x | 0 | 0 | 0 |
| | FR_{12} | x | x | 0 | 0 | 0 |
| FR_2 | FR_{21} | 0 | 0 | x | 0 | x |
| | FR_{22} | x | 0 | 0 | x | 0 |
| | FR_{23} | x | x | x | x | x |

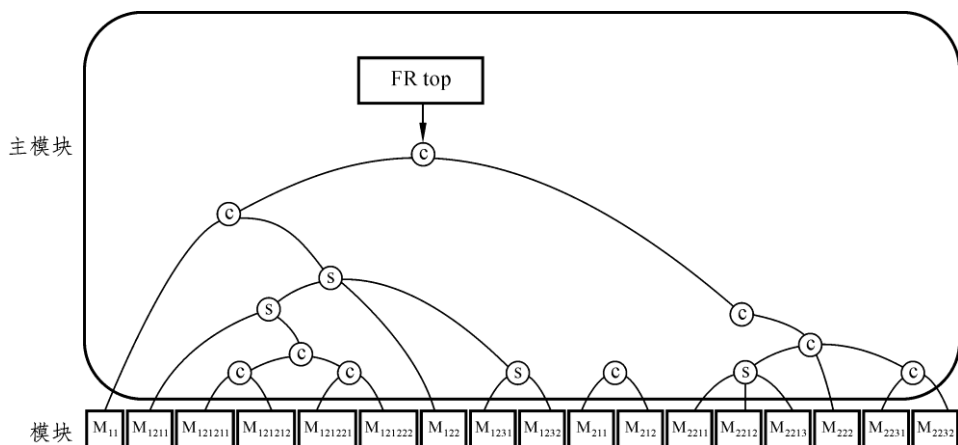
可见公理设计中“域”的概念框架以及 FR_s 、 DP_s 、 PV_s 等基本构件是设计知识表达的基本元素。与其他方法相比，公理设计方法所表达“节点”信息更为丰富，各节点处的 FR_s 、 DP_s 、 PV_s 以本源专业知识为基础，体现了不同设计阶段的功能和设计目标以及实现功能和目标的关键技术和手段，同时节点的控制与成功概率相联系，这是其他方法所不具备的。

产品设计是从“功能”到“结构”到“行为”不断映射迭代的过程，公理化设计过程具有现代设计产品过程的共性特征。采用公理化方法，若一个系统的设计功能用 $FR_s = (FR_1, FR_2 \cdots FR_m)$ 表示，表征系统“行为”的关键

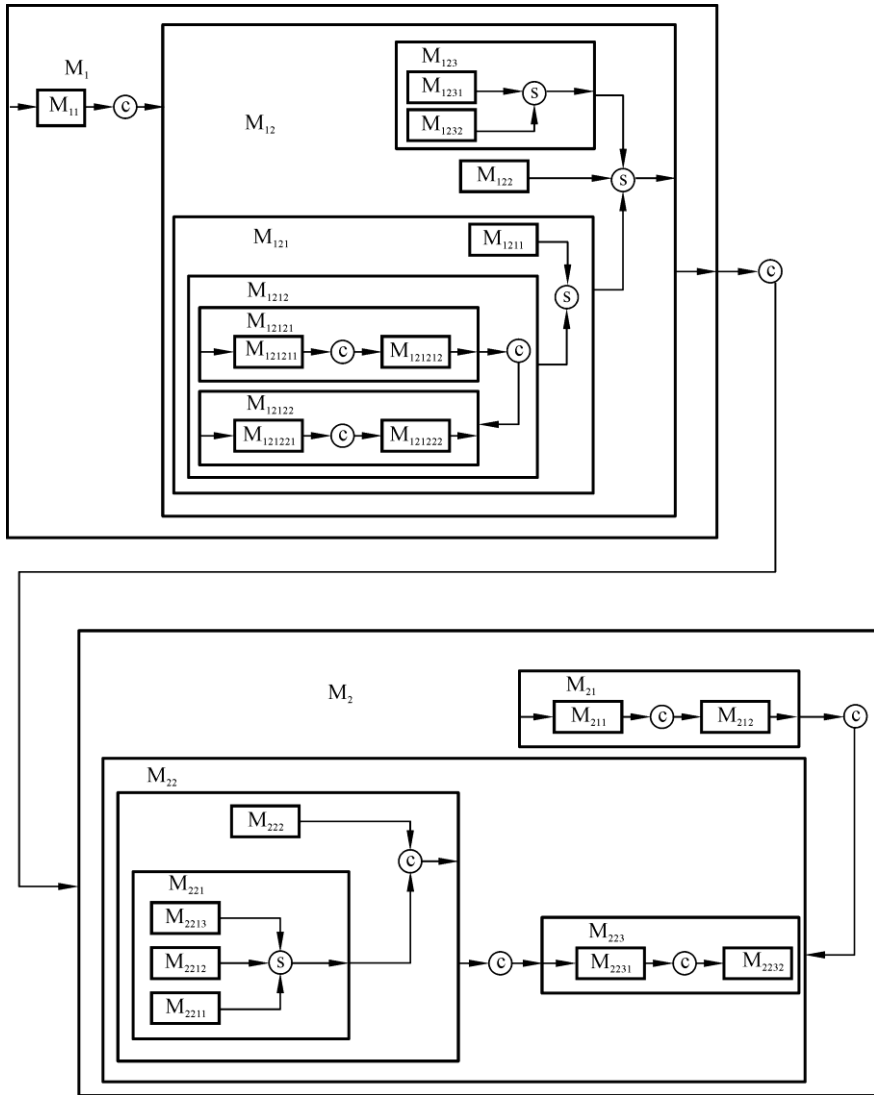
变量用 $DP_s = (DP_1, DP_2 \cdots DP_m)$ 表示, 最终实现的结构方案或过程变量用 $PV_s = (PV_1, PV_2 \cdots PV_m)$ 表示, 则该系统的设计过程为 $FR_s \rightarrow DP_s \rightarrow PV_s$ 不断分解和映射迭代的过程。公理设计提供了三种设计过程表示方法, 实现主要设计节点的控制和优化配置, 如图 1-4 所示。



(a) FR、DP 的层次结构及迭代过程



(b) 模块连接结构



(c) 设计流程

M—各个级别的设计模块；S—模块间关系为无耦合，设计时不考虑先后顺序；C—模块间关系为解耦关系，设计时要考虑先后顺序。

图 1-4 公理设计中设计过程的三种表达方式

以公理设计相关理论、方法及定义为基础，研究建立面向复杂产品的公理化设计方法，如图 1-5 所示。

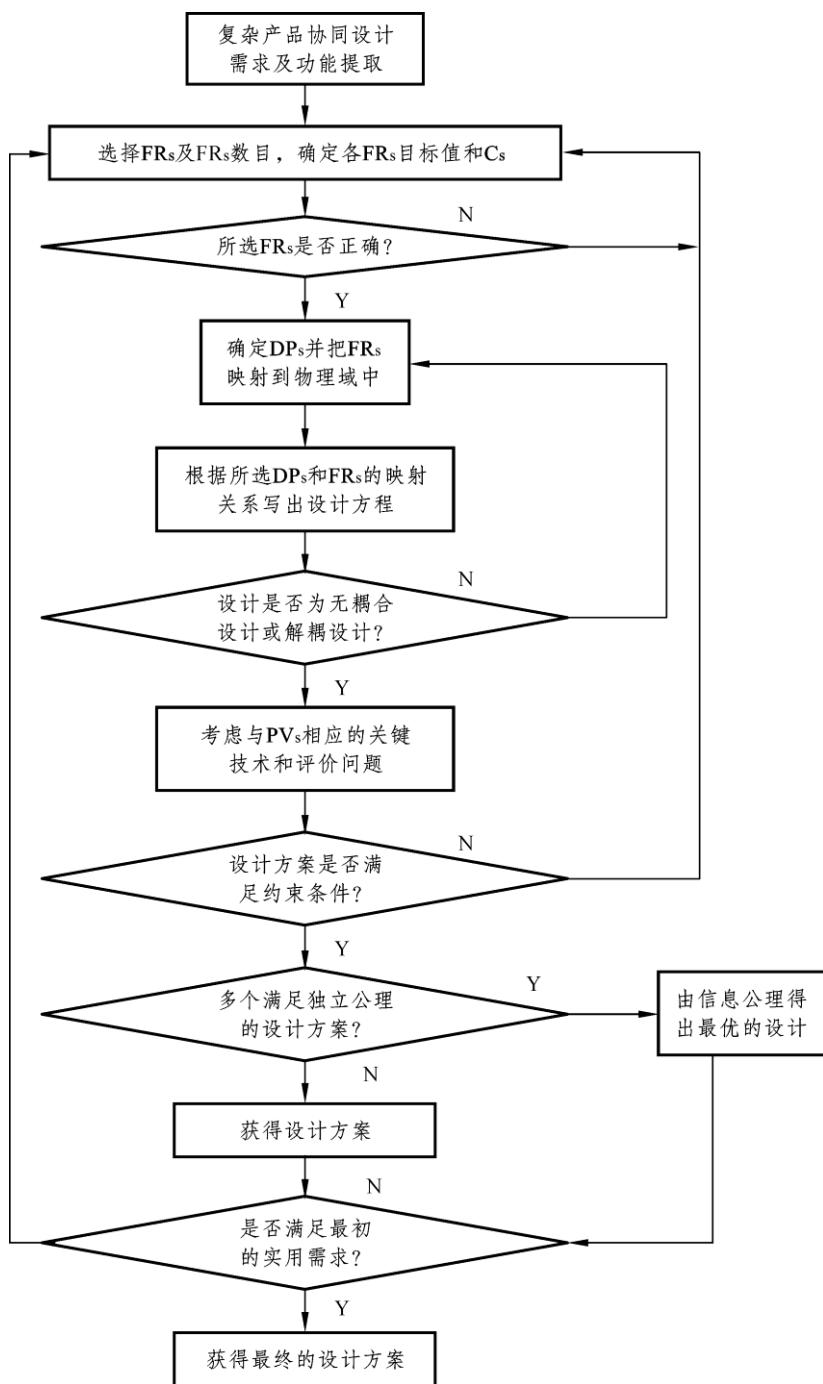


图 1-5 面向复杂产品的公理化设计方法

1.3.3 设计过程控制及关键节点决策

不同学科领域对知识有不同的分类方法,概括起来可分为:① 设计流程控制及决策类知识;② 多学科领域本源设计知识,而设计过程控制及关键节点决策是两方面知识的有效融合和统一。

公理化设计方法实现设计过程控制的核心是通过“域”的框架、域之间的映射迭代、设计矩阵、信息量等决策知识来控制本源设计知识的构成、流动及表达方式。换个角度来说,在公理化设计体系中,知识在四个域之间的映射迭代过程可以理解为设计过程驱动的各本源设计过程的过程,知识的流动规律和特点可通过设计矩阵和两个公理进行表达,知识的流动机制可从设计矩阵的特点中反映出来,而控制即为决策,对设计过程的控制就是以公理化设计的信息公理和独立公理为决策知识,通过判断设计矩阵是否解耦来决策设计方案的去留问题,控制过程如图 1-6 所示。

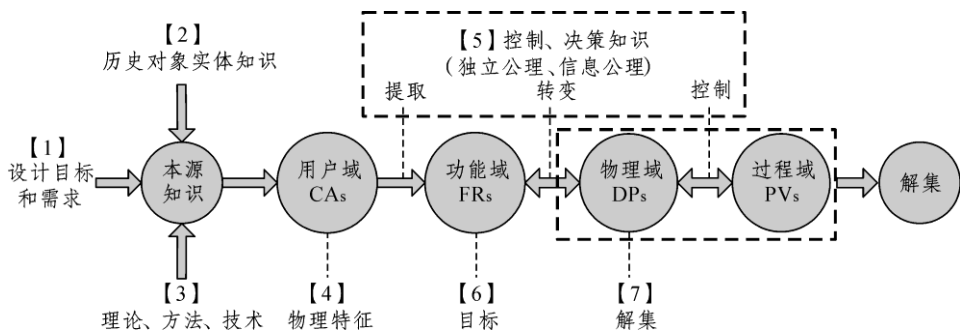


图 1-6 基于公理化方法的设计过程建模及优化决策

采用公理化知识表达方法,产品设计是 $FR_s \rightarrow DP_s$ 的分解和映射的过程,有多个 FR_s 时,存在多种 DP_s 选择、组合形成的方案,它们对设计成功概率以及对最终设计目标实现的影响是不同的,而对它们进行正确的设计决策是概念设计核心所在,由于 DP_s 可以是某种结构、设计参数,也可以是计算方法和软件工具等,是设计人员所采用设计知识和技术工具的体现,多学科领域本源设计知识是不同 DP_s 形成方案优选及决策的基础和关键。

将公理设计理论和方法与本源设计知识相融合,使复杂的多目标耦合问题研究和方案决策过程既简明、有效,同时又可有效支持设计过程中新知识

的融入和融合，一些先进结构设计、技术工艺及计算方法的出现同样会产生一些先进的 DP_s，进而使设计人员在概念设计阶段就能得到成功概率高的优秀的设计方案。在公理设计框架下基于本源设计知识进行方案优选、关键节点决策及控制，主要包括基础理论、方法等知识，还包括计算仿真与实验得到的数据、图表等定性定量知识，相关研究得到的设计定性定量规律是支持公理化设计过程的重要知识基础和来源。