



华夏英才基金学术文库

檀润华 编著

发明问题解决理论

 科学出版社
www.sciencep.com



华夏英才基金学术文库

发明问题解决理论

檀润华 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

发明问题的求解是产品创新设计的核心。本书首先定义发明问题,发明的级别;之后详细介绍获得不同级别产品的设计方法与进程:TRIZ 中的冲突解决理论,确定冲突的 QFD 方法、AD 方法;技术进化理论、效应及应用;基于 QFD、AD、TRIZ 集成的概念设计过程模型;最后介绍计算机辅助设计软件 InventionTool1.0,该软件由冲突、进化和效应三个模块组成,能帮助设计者获得创新解。全书以发现产品设计中的问题、冲突和解决冲突为主线,以苏联发明问题解决理论(TRIZ)为核心,结合德国的普适设计方法学(P&B)、日本的质量功能布置(QFD)和美国的公理设计(AD)中的优点,形成新的、可操作性更强的产品创新设计方法。

本书可帮助广大企业设计人员、管理人员,大学高年级本科生、研究生及 MBA 学员提高创新能力。

图书在版编目(CIP)数据

发明问题解决理论/檀润华编著. —北京:科学出版社,2004
ISBN 7-03-013277-7

I. 发… II. 檀… III. 创造发明—理论研究 IV. G305

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 039628 号

责任编辑:沈红芬 侯俊琳 / 文案编辑:吴伶伶
责任校对:张 琪 / 责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

http://www.sciencep.com

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2004 年 8 月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2004 年 8 月第一次印刷 印张:7 5/8 插页:1

印数:1—3 000 字数:233 000

定价:18.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

近年来,由于市场竞争的加剧,产品占有市场的时间越来越短。产品创新已成为现代制造企业竞争的焦点。

为了快速开发新产品,国际设计理论界已进行了多年的研究,并取得了丰硕的成果,这些成果在国外的企业,特别是在一些大企业的新产品开发中起到了重要作用。尽管理论成果很多,但还没有一种是全世界公认的最好的设计理论,新的设计方法、工具还在不断出现。

本书以发现产品设计中的问题、冲突及解决冲突为主线,以苏联发明问题解决理论(theory of inventive problem solving, TRIZ)为核心,结合德国的普适设计方法学(P&B)、日本的质量功能布置(QFD)、美国的公理设计(AD)中的优点,形成新的、可操作性更强的产品创新设计方法,以便设计者们应用。

本书共 10 章。第一章主要介绍产品设计的基本概念、国际著名的设计理论、TRIZ 基本内容;第二章介绍用户需求分析及概念设计;第三章介绍产品设计中的冲突;第四章介绍产品设计中冲突的确定方法;第五章为产品设计中的冲突解决原理;第六章是 76 个标准解;第七章是产品设计中的效应;第八章是产品技术进化理论;第九章介绍产品创新过程模型;第十章介绍计算机辅助创新设计软件。

在国家自然科学基金、教育部骨干教师基金、天津市自然科学基金、河北省自然科学基金、河北省教委基金等多方面的资助下,作者有幸成为 QFD、AD、TRIZ 理论学习、研究、应用的探索者。现将学习、研究、应用中的体会、成果,汇同学者们的论文和著作中的部分观点与方法写成此书,以推动我国的产品创新。

感谢华夏英才基金资助本书的出版。感谢科学出版社出版此书。

感谢导师路甬祥院士及浙江大学流体传动及控制国家重点实验室陈鹰教授的关心、指导与培养,正是因在攻读博士期间所掌握的科学研究方法,使我能很快进入新的研究领域。

感谢我的在读及已毕业的博士、硕士研究生:张瑞红、王永山、曹国忠、张换高、江屏、张青华、卢顺杰、郭悦红、王素新、马伟琴、吕洪玉、杨博军、张建辉、刘芳、刘英梅、吴佳宾,正是我们几年来的共同研究与探索,为本书积累了部分知识。本书第七章主要是曹国忠博士研究生的成果。感谢马建红教授、武优西副教授、朱怀忠讲师的合作,正是他们软件开发的知识与经验,使 InventionTool1.0 开发成功成为可能。

作者学习、研究、应用 QFD、AD、TRIZ 的时间较短,书中观点如有不妥之处,欢迎批评指正。

檀润华

2003 年 11 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 设计研究分层	1
第三节 设计理论与方法	5
第四节 设计过程模型	8
第五节 发明问题与创新设计	12
第六节 发明问题解决理论(TRIZ)	15
第七节 本章小结	19
第二章 用户需求分析及概念设计	20
第一节 概述	20
第二节 概念设计过程模型	20
第三节 用户需求分析	22
第四节 功能模型的建立	30
第五节 功能元求解与合成	39
第六节 TRIZ 应解决的问题	42
第七节 本章小结	43
第三章 产品设计中的冲突	44
第一节 概述	44
第二节 技术发展过程中的冲突	45
第三节 冲突的分类	47
第四节 技术冲突的通用化	51
第五节 物理冲突	58
第六节 技术冲突与物理冲突	58
第七节 本章小结	59
第四章 产品设计中冲突的确定方法	60

第一节	概述	60
第二节	物质-场分析	60
第三节	产品设计中小问题的确定	61
第四节	基于物质-场分析的冲突确定	69
第五节	基于 QFD 的冲突确定	72
第六节	基于公理设计(AD)的冲突确定	83
第七节	本章小结	94
第五章	产品设计中的冲突解决原理	95
第一节	概述	95
第二节	发明原理	95
第三节	冲突矩阵	119
第四节	技术冲突问题解决过程	120
第五节	技术冲突解决工程应用	122
第六节	物理冲突解决原理	127
第七节	本章小结	132
第六章	76 个标准解	133
第一节	概述	133
第二节	物质-场模型的建立	134
第三节	76 个标准解	135
第四节	标准解应用过程	151
第五节	工程实例:昆虫危害粮食的解决方案	153
第六节	本章小结	155
第七章	产品设计中的效应	156
第一节	概述	156
第二节	效应	156
第三节	效应的收集	167
第四节	效应链与功能	169
第五节	FEE 概念设计过程模型	171
第六节	应用效应知识库解决问题的一般过程	174
第七节	工程实例:快速切断阀的改进设计	175
第八节	本章小结	179

第八章 产品技术进化理论	180
第一节 概述.....	180
第二节 产品进化过程实例.....	180
第三节 产品技术成熟度预测.....	183
第四节 产品渐进创新与优化.....	190
第五节 产品进化模式与进化路线.....	190
第六节 工程实例:滚筒型纺纱机	202
第七节 本章小结.....	206
第九章 产品创新过程模型	207
第一节 概述.....	207
第二节 产品开发过程模型.....	207
第三节 产品开发过程模型的进化.....	209
第四节 发明的 5 种模式.....	212
第五节 技术进化过程驱动的产品概念设计宏观过程模型.....	214
第六节 本章小结.....	222
第十章 计算机辅助创新设计软件	223
第一节 概述.....	223
第二节 发明的分级.....	223
第三节 发明问题解决原理.....	224
第四节 计算机辅助创新设计软件的组成.....	228
第五节 InventionTool1.0	229
第六节 本章小结.....	232
主要参考文献	233

第一章 绪 论

第一节 概 述

未来世界肯定要发生变化,技术创新是很多变化的直接动力。预测未来技术进化的过程,快速开发新一代产品,迎接未来变化的挑战,对任何制造企业竞争力的提高都起着重要作用。

技术进化过程是靠设计者直接推动的,当前的产品如果没有设计者引入新技术,它将停留在当前的水平上,新技术的引入使其不断沿着某些方向进化。任何设计活动都需要经费的支持,如果投资者认为对新技术的投资所产生的市场收益大于投资本身,设计者才会得到经费支持。因此,产品进化的真正动力是市场需求或投资者对未来市场需求的洞察力。

很多新的市场需求是政治、经济、社会、环境、工业及技术发展趋势相互作用形成的压力所产生的。通常已有的产品不能满足全部需求,需要改进已有的产品或设计制造全新的产品并投入市场,以最大限度地满足需求,缓解压力。

面对这些新的需求,有一些企业能很快设计、制造出新产品并占领市场,为企业带来滚滚财源;另一些企业无此设计能力而只能观望,仅靠几乎没有改进或改进很少的老产品勉强生存,甚至在竞争中失败而退出市场。

以往的研究表明:创新设计是有规律的,企业设计人员如能掌握这些规律并在市场竞争中发挥作用,将大大提高企业的竞争力。

本章将介绍设计分层、设计理论与方法、发明问题与创新设计及发明问题解决理论(theory of inventive problem solving, TRIZ)等的基本概念。

第二节 设计研究分层

设计是人类的基本活动。在过去很长的时间内,设计一直作为人类

所从事的一种艺术活动,并采用师傅带徒弟的方式进行。如早期的制陶者根据经验与构思直接操作黏土,做出所需要形状的陶器,并没有事先绘制陶器的形状,经验来自师傅对徒弟的培训及徒弟自身实践的积累。由于社会的发展,产品竞争加剧,师傅带徒弟的设计方式已不能满足要求,而需要设计理论与方法的指导及专业设计人员。

到了 20 世纪 60 年代,对设计的研究得到空前的关注,很多研究目的是为了提出更好的设计方法以便改进设计过程及相关的教育。正是这些研究,使设计由艺术转变为科学与艺术的结合,设计中科学的一面是设计者能更好地理解设计过程;艺术的一面是设计者的灵感及创造性的发挥。

关于设计的大量研究可以分为如图 1-1 所示的三个层面。这三个层面的研究目的是从不同的高度理解设计的。

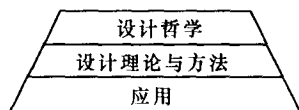


图 1-1 设计的三个层面

设计哲学从心理学及认知的层面研究设计的本质。如设计思维、设计能力及极限、心理学基础等都是设计哲学的研究课题。这些研究从哲学的高度定义设计问题、设计目标及设计过程。

【例 1-1】“场所制造(place making)”是美国捷得国际建筑师事务所(The Jerde Partnership International Inc.)在购物中心与社区中心设计中贯穿的重要设计哲学与思想。根据这种思想,该事务所设计的购物中心不是一幢建筑物,而是一种综合建筑、景观、空间、声音的“体验式场所”,是一种为群众创造的拥挤热闹的场所。

【例 1-2】“慢速设计(slow design)”是一种哲学思想。按照这种思想,正在诞生一种新的设计模式:设计的角色是与环境相协调的条件下,保持社会文化与个性需求相平衡。在这种模式中,时间不是主要的约束,不必快速响应市场及与对手竞争,不必再追求最小化、最大化或最快,设计所要确保的是个性及社会美学的需求与人类所在地球的平衡。一个通俗的例子是:很多人喜欢快餐,但谁也不否认满汉全席是美餐。

设计理论与方法是依据设计哲学的研究结果及设计的实践,建立分步的或细化的设计过程模型、研究过程模型的支持工具、开发工具软件。按照这种模型,设计者可分步骤地按规定完成设计所需要的所有活动,其中的各种工具可以使设计者更好地完成过程。

【例 1-3】 在概念设计阶段,设计者要确定待设计产品的功能、效应及原理解,并用简图或草图表示该原理解。图 1-2 是单功能(传递扭矩功能)产品的概念设计过程中的主要步骤。

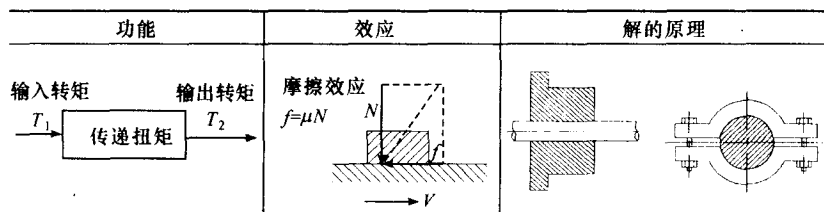


图 1-2 传递扭矩功能的实现步骤

应用研究领域很广,包括特定产品的设计、稳健设计、可靠性设计、优化设计、动态设计、各种应用软件开发等。

【例 1-4】 三杆构件的稳健设计问题。三杆构件如图 1-3 所示。

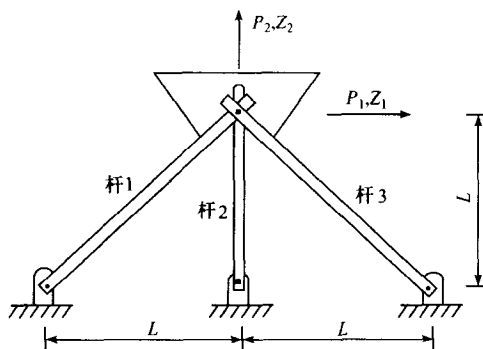


图 1-3 三杆构件

杆 2 和杆 3 被首先固定在联结板上,杆 1 的制造公差为 $\pm \delta$,杆 1 太长、太短都会使它被强制联结到指定位置。构件受 x 、 y 向的载荷 P_1 、 P_2 。光学装置的支架要求 x 向的偏移 Z_1 限制在允许范围 Z_1^{all} 内。 Z_1 的制造公差 δ 是干扰变量,其公称值 $\delta^e = 0$ 。设计变量是杆的截面积 A_i (杆 i 的截面积), $b = [A_1, A_2, A_3]$ 组成了设计变量的向量。

通过分析可以得到 Z_1 的数学表达式

$$Z_1(b, \delta) = \frac{(2\sqrt{2}A_2 + A_1 + A_3)F_1 + (A_3 - A_1)F_2}{E(A_1A_2 + \sqrt{2}A_1A_3 + A_2A_3)} \times L \\ + \frac{A_1(\sqrt{2}A_2 + A_3)}{(A_1A_2 + \sqrt{2}A_1A_3 + A_2A_3)} \times \delta$$

参数设计的目的是找到使 Z_1 对于扰动变量 δ 灵敏度最小的设计变量, 根据构件的其他设计要求, 可以得到参数设计的数学模型

$$\begin{cases} \left. \text{Min} \frac{dZ_1(b, \delta)}{d\delta} \right|_{\delta = \delta^e} \\ S. T |Z_1(b, \delta^e)| \leq Z_1^{\text{all}} \\ V(b) \leq V_0 \\ |\sigma_i(b, \delta^e)| \leq \sigma_i^{\text{all}} \quad (i = 1, 2, 3) \\ b_L \leq b \leq b_U \end{cases}$$

式中: V_0 ——材料体积的上界;

σ_i ——杆 i 的强度;

b_U, b_L ——设计变量的上、下界。

载荷向量给定如下

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} + \delta \begin{Bmatrix} A_1 E / 2L \\ A_2 E / 2L \end{Bmatrix}$$

此例的数据如下

$$P_1 = 44\,452.8\text{N}, \quad P_2 = -88\,905.6\text{N}$$

$$Z_1^{\text{all}} = 0.0254\text{mm}, \quad L = 254\text{mm}$$

$$\sigma_1^{\text{all}} = 34.3\text{MPa}, \quad \sigma_2^{\text{all}} = 68.6\text{MPa}, \quad \sigma_3^{\text{all}} = 34.3\text{MPa}$$

$$b_L = [64.516, \quad 64.516, \quad 64.516] \text{mm}^2$$

$$b_U = [6451.6, \quad 6451.6, \quad 6451.6] \text{mm}^2$$

$$E = 205.8 \times 10^3 \text{MPa}, \quad \delta^e = 0$$

$$V_0 = 3277.413\text{mm}^3$$

设 b 的稳健设计解为 b^* 。选定优化方法, 可求出 $b^* = [64.5, 5276.8, 5328.2] \text{mm}^2$ 。

设计理论与方法的研究对指导创新设计起着重要作用,本书主要涉及该方面的内容。

第三节 设计理论与方法

设计理论与方法要依据设计哲学的研究成果及设计的实践,建立分步的或细化的设计过程模型,按照这种模型,设计者可分步骤地按规定完成设计所需要的所有活动。在现代设计的历史上,该领域的研究有两个重要的历史时期:20世纪20年代和60年代。20年代追求“科学至上”的产品设计,有别于之前的经验设计,60年代追求“科学的设计过程”。60年代被称为“设计科学的年代”,“科学的设计过程”基于科学、技术及合理化思想,克服人类本身及环境的问题,这些问题靠政治及经济的手段不能解决。1962年9月在英国伦敦召开的国际设计方法会议(The Conference of Design Methods)被认为是设计方法学(design methodology)作为一个研究领域的开始。到目前为止,该领域的研究已经有很多研究成果,表1-1是部分已出版的有影响的著作,表1-2是国际上该领域的一些英文杂志。

表 1-1 部分设计理论的著作

作 者	名 称	出版年份
Tjalve	《工业设计教程》 (<i>A Short Course in Industrial Design</i>)	1979
Hubka	《工程设计原理》 (<i>Principles of Engineering Design</i>)	1982
Pahl and Beitz	《工程设计——系统化方法》 (<i>Engineering Design: A Systematic Approach</i>)	1984
French	《面向工程师的概念设计》 (<i>Conceptual Design for Engineers</i>)	1985
Cross	《工程设计方法》 (<i>Engineering Design Methods</i>)	1989
Pugh	《全面设计——成功产品工程中的集成方法》 (<i>Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering</i>)	1991

表 1-2 设计方法学的英文杂志

序号	杂志名称	创刊年份
1	《设计研究》(<i>Design Studies</i>)	1979
2	《设计期刊》(<i>Design Issues</i>)	1984
3	《工程设计研究》(<i>Research in Engineering Design</i>)	1989
4	《工程设计杂志》(<i>Journal of Engineering Design</i>)	1990
5	《设计管理杂志》(<i>Journal of Design Management</i>)	1990
6	《设计语言》(<i>Languages of Design</i>)	1993
7	《设计杂志》(<i>Design Journal</i>)	1997

已有的研究成果可分为如下 5 类:①系统化设计方法;②基于决策的设计理论;③基于人工智能(AI)的设计理论;④公理设计理论;⑤基于科学的设计理论。

一、系统化设计方法

系统化设计方法是建立分步设计过程,如将设计分为产品计划与明确任务、概念设计、技术设计、详细设计四个阶段是典型的分步设计过程。四个阶段中的每一个阶段又可分为一系列具有特定目标的设计活动,上一个设计活动的输出是下一个活动的输入,最后一个活动的结束标志设计的结束,设计出的产品用图纸或数据文件表示。

此领域著名的理论为德国 Pahl 及 Beitz 的设计理论,该理论于 20 世纪 70 年代提出,继承了可以追溯到 19 世纪的研究成果。他们的著作用德文发表于 1977 年,1984 年被译成英文,目前的版本是第二版(1995),并已被英国剑桥大学的 Ken Wallace 等译成英文。设计方法学的研究在德国较普遍,Pahl 及 Beitz 的设计理论是一种被世界所接受的理论。该理论的德文第一版被张直明教授等译成中文并已由机械工业出版社于 1994 年出版。

苏联的发明问题解决理论(TRIZ)、质量功能布置(quality function deployment, QFD)等理论与方法也属于此领域。

二、基于决策的设计

基于决策的设计是将决策论及相关科学中的规则用于设计,相关科学包括效能理论(utility theory)、多属性决策理论(multi-attribute decision theory)、游戏理论(game theory)、信息科学(information science)。认为设计是包含一系列决策的过程,决策支持系统可以支持设计人员制定最佳决策,以保证设计的合理性。

基于决策的设计采用面向决策的设计过程处理设计中的产品,最终设计结果取决于设计者的决策。不同的设计者、不同的时间,其决策的结果可能是不同的。因此,该领域研究的重要方面是如何提高决策质量,以改进设计实践。目前的研究包含 4 个方面:①提供解决冲突及多目标优化的工具及技术,因为设计决策通常都涉及多个约束,约束之间还存在冲突;②提出定性参数的定量化方法,以便在设计早期阶段对这些参数进行评价;③处理设计者决策过程中的不确定性、风险、模糊等问题;④提出协同设计过程中的分布式决策方法。

三、基于 AI 的设计理论

基于 AI 的设计理论研究产品建模、设计中的知识及产生或选择由用户需求到物理结构的实现方法。

产品建模是用模型描述不同阶段的设计。如概念设计阶段的产品是由语言信息及草图定义的,而详细设计阶段的产品由几何信息及领域的技术要求表达,所建立的模型是不同的。概念设计阶段的模型应包括语言及对象,语言用形式化方法(formal method)描述设计中的产品(即对象),如基于图形的语言、形状语法等。

设计知识的表达方法与设计过程的推理有紧密的关系,对于基于知识的设计是最重要的。不同的知识应由不同的模型描述。因此,不同知识表达的框架是研究的重要内容,通常分为 3 类:①基于模型的设计(model-based design),其基础是设计对象为各种概念因果关系定性模型;②基于规则的设计(rule-based design),其基础是设计知识的规则化;③基

于实例的设计(case-based design),其基础是以往成功的设计实例。

四、公理设计理论

MIT 的 Suh 早在 20 世纪 70 年代就提出了公理方法的概念,到 1990 年前后此概念成熟并形成了公理设计理论。该理论将设计过程归纳成用户域、功能域、结构域、工艺域之间的映射,其 4 个域的描述向量分别是用户属性(CAS)、功能需求(FRS)、设计参数(DPS)、功能变量(PVS)。Suh 提出了两条公理:①公理 1——功能独立性原理;②公理 2——信息量最少原理。

按照这两个公理,设计是 4 个域之间的映射。虽然多数工程设计实际上都是耦合的,但这两个公理为质量功能布置(QFD)、基于特征的设计(feature based design)、计算机辅助工艺规划(computer aided processes planning)等其他方法提供了一个框架。

公理设计属于设计科学。按该理论,设计过程中问题的解决按公理所示的逻辑过程进行。

五、基于科学的设计理论

基于科学的设计理论是为工程设计建立一些基本的原理与理论。与其他工程科学一样,科学的设计应包括定律与语言两个部分。定律是关于设计过程的基本假设与原理,语言是描述定律的基本手段。基本定律的研究伴随着哲学、心理学及实验的研究,采用数学的方法描述设计是基本的方法。虽然该领域有一些成果,但目前所提出的语言还不足以支持设计过程。

第四节 设计过程模型

一、产品设计的性质

经过多年的研究,设计理论界对设计的性质有了如下共同的认识:

性质 1,设计起始于用户需求,终止于满足用户需求的产品详细描述。

性质 2,设计是从抽象概念到具体描述变换的进化过程。

性质 3,对所有的设计问题存在一个基本的设计过程。该过程包括综合与评价两个主要的分过程。

性质 4,原始的用户需求通常是不精确、不完善的。因此,对用户需求的进一步研究变成了设计过程的一部分。

性质 5,多方案设计结果不是在问题解决之前就确定了,设计过程中要通过综合、发现确认这些方案。

性质 6,设计者面对受限制的合理性问题。传统的设计采用满意标准,而不是优化标准。

性质 7,设计是创新活动。同一设计者在不同的时间对同一设计问题的解可能是不同的,不同设计人员对同一设计问题的解通常是不同的,即设计具有随机性。

这些性质说明,设计是复杂的创新活动,研究设计过程,建立设计过程模型,对指导设计具有重要意义。

二、设计过程模型

设计是一复杂的过程,不同的企业所采用的设计过程一般也不同。为了对这些不同的设计过程进行描述,需要采用设计过程模型,该类模型是工业界真实设计过程的一种抽象,并能回答真实设计过程中的问题。这些模型一方面应与工业界真实的设计过程基本相符;另一方面又要提出规范的或优化的设计过程,并为设计者提供设计与工具,以达到提高设计质量、降低设计成本、减少开发周期、提高产品竞争力等目的。

经过多年的研究,已提出多个设计过程模型。英国 OPEN 大学的 Cross 将这些模型归为描述型(descriptive model)与规定型(prescriptive model)两类过程模型。前者对设计过程中可行的活动进行描述,后者规定设计过程所必需的活动。

图 1-4 为一种描述型设计过程模型。该模型强调在设计初期产生一个原理解,然后逐步完善,如果经评价认为该解无效,则重新产生另