

# 公理化设计与 TRIZ 的比较研究及其集成模型

丁俊武<sup>1</sup>, 韩玉启<sup>1</sup>, 郑称德<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学经济管理学院, 南京 210094; 2. 南京大学商学院, 南京 210093)

**[摘要]** 摆脱设计对经验的依赖, 探索以科学原理为基础的设计理论是设计方法学的研究热点。公理化设计理论和创新问题解决理论是基于科学的设计方法学, 近年来已得到设计界的高度重视。分析比较了两种理论的内在联系和区别, 以此为基础建立了产品概念设计过程集成模型。给出了应用案例, 验证了模型的有效性。

**[关键词]** 公理化设计; TRIZ; 产品设计; 集成模型

**[中图分类号]** TH122 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)05-0074-05

## 1 引言

对产品设计的过程、规律进行研究一直是产品设计方法学的主要内容, 研究成果将会大大改善产品设计质量、减少设计失误和缩短产品开发时间。多年以来, 为改变传统设计过程以经验为基础进行演绎、归纳的现状, 设计界一直在探索以科学原理为基础的设计理论, 以求提高设计效率。目前, 在学术界影响比较大的是公理化设计理论(axiomatic design, AD)和创新问题解决理论(TRIZ)\*。对二者进行了分析比较, 探讨了其内在的联系和区别, 在此基础上, 建立了一个产品概念设计过程集成模型, 并给出了应用案例。

## 2 公理化设计理论概述<sup>[1,2]</sup>

公理化设计是由美国 MIT 的 Suh 教授于 20 世纪 70 年代提出的一种设计决策方法, 在文献[2, 3]中, Suh 教授详细地阐述了公理化设计的基本内容, 目的是通过为设计者提供基于逻辑和理性的思维方法和工具, 指导设计者在设计过程中做出正确的决策。其主要概念包括域、层级、曲折映射

和设计公理。

### 2.1 域、层级和曲折映射

在 AD 中, 域是区别不同设计活动的界限, 设计空间被划分为依次相邻的 4 个域: 用户域、功能域、结构域和过程域, 如图 1 所示。相邻域之间, 左边表示设计目标, 右边表示实现目标的手段和方法。用户域描述用户的需求, 即用户需求属性(customer needs, CNs); 功能域表示产品所要实现的一系列功能需求(functional requirements, FRs); 结构域表示满足功能需求的设计参数(design parameters, DPs); 过程域是制造过程中工序和工艺的变量集合(process variables, PVs)。在 AD 中, 产品的设计过程被描述为以顾客需求为驱动的, 从功能域到结构域再到过程域的反复迭代和映射过程。

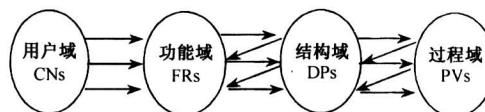


图 1 域的结构及域间的关系

Fig.1 The structure and relationship of domains

\* “TRIZ”目前尚无统一的中文译名, 笔者以“inventive”含有创造、创新之义, 在此将其译为“创新问题解决理论”

[收稿日期] 2005-07-07; 修回日期 2005-12-07

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(70302013)

[作者简介] 丁俊武(1971-), 男, 山东淄博市人, 南京理工大学经济管理学院博士研究生, 从事新产品开发与产品创新理论研究

层次结构是指公理化设计中某域的层次结构树。公理化设计的层级展开需要相邻域之间自上至下进行曲折映射变换,充分考虑两者之间的相互关系,域间的层级展开具有相互依赖性。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结构树,它非常清晰地描述了各个设计域的工作目的。

## 2.2 设计公理

为了对设计方案进行分析和评价,AD给出了两个基本设计公理:独立公理和信息公理。

**2.2.1 独立公理** 独立公理是指保持功能需求的独立性,即在功能域中每一层分解得到的功能需求集  $\{FR\}$  中的元素要相互独立,某个具体的设计参数  $DP$  调整满足其对应的而不影响其他的  $FR$ 。 $FR$  和  $DP$  的映射关系可表示为:

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

式中  $\{FR\} = \begin{bmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_n \end{bmatrix}$ ;  $\{DP\} = \begin{bmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_n \end{bmatrix}$ ;  $A$  为设计

矩阵,  $A = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}$ , 其中  $A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j}$ 。

满足独立公理的设计矩阵  $A$  有两种典型形式,即对角阵和三角阵。当  $A$  为对角阵时,称为非耦合设计,是理想设计;当  $A$  为三角阵时,称为准耦合设计。若  $A$  为其他一般形式,则是耦合设计。非耦合设计和准耦合设计满足功能独立性公理,耦合设计不满足功能独立性公理,必须进行解耦处理或重新设计。

**2.2.2 信息公理** 信息公理指出满足独立公理的多个设计方案中,信息量最小的为最优方案。信息公理为设计方案的选择提供了定量的计算方法,使选择最佳设计成为可能。在 AD 中,每个功能需求  $FR_i$  被看作一个随机变量,信息量  $I_i$  是满足功能需求  $FR_i$  实现的概率  $P_i$  的对数函数,即

$$I_i = \text{lb} \frac{1}{P_i} = -\text{lb} P_i \quad (2)$$

当有  $n$  个功能需求时,由于功能需求的独立性,系统的信息总量  $I_{\text{sys}}$  可以表示为

$$I_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^n I_i = -\sum_{i=1}^n \log_2 P_i \quad (3)$$

## 3 TRIZ 理论概述

TRIZ 音译自俄文 ТРИЗ (теория решения

изобретательских задач), 其英文为 theory of inventive problem solving (TIPS)<sup>[3,4]</sup>。TRIZ 是由苏联 Altshuller 及其领导的一批研究人员,在分析世界各国专利的基础上提出的一种创新问题解决理论,由解决技术问题和实现创新开发的各种方法、工具和算法组成,目标是使 TRIZ 成为指导人们进行创新活动的科学,其理论体系非常庞大,技术系统的演化规律是其理论基础,分析工具有理想解分析、物质场模型、矛盾分析、预期失效判定分析、发明问题解决算法等,应用工具有发明原理、分离原理、技术参数、矛盾矩阵、标准解和知识效应库等。

利用 TRIZ 解决产品设计问题,首先通过问题分析和定义把其转换为 TRIZ 问题模型,然后利用 TRIZ 的分析工具得到问题通解,最后得到特定解,如图 2 所示。TRIZ 本身没有提供各种工具的应用选择顺序,设计师可以根据自己的经验选择。TRIZ 的各种分析工具之间虽然相互独立,可以平行使用,但部分工具之间存在重叠交叉现象。

## 4 比较研究

### 4.1 立足点

公理化设计和 TRIZ 理论的目的是使设计活动变得有规律可循,以建立设计的科学基础<sup>[1,3]</sup>。

Suh 教授认为在设计中存在着控制设计决策产生的基本原则,因此优良的设计决策不是随机产生的,而是一种系统推理的结果,它的本质可以捕捉并通用化以改进设计过程。

Altshuller 坚信创新问题的基本原理客观存在并有规律可循,创新不是发明家的灵感突现。通过对大量专利的研究,Altshuller 发现仅有 1% 的解决方案具有原创性,其余都是对已知方案在新领域的应用。不同技术领域有着相同模型的问题,解决方案往往类似,而且方案具有可传递性。这说明,我们遇到的大多数问题都存在已知解决方案,把这些方案予以总结可使创新具有可预测性。

### 4.2 相关概念和工具的比较

**4.2.1 功能** 功能是描述一个产品的关键所在<sup>[5]</sup>。TRIZ 采用物质场模型来描述产品功能,该模型基于 Altshuller 关于功能的假设,功能可分解为使能部件、被动部件和能量资源(场)等基本组件。在 AD 理论中,独立公理要求一个功能需求只能由一个设计参数来实现,从而保证设计非耦合或可解耦,但 AD 没有提供使功能需求保持独立性的工

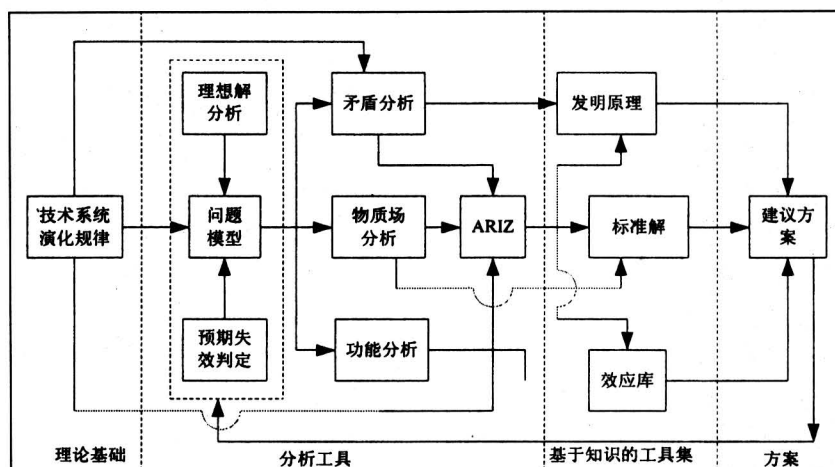


图 2 TRIZ 理论的问题解决流程

Fig.2 The basic flow for problem solving of TRIZ

具，依赖于设计师的经验，与 TRIZ 存在明显区别。

物质场模型可以表征产品物理部件的层级关系，如某功能的被动部件可能是其子功能的使能部件，直到最低级别的功能，这类似于 AD 功能域到结构域的曲折映射。但是该模型没有反映高一设计参数对次级功能展开的约束作用。相比较而言，物质场模型的展开有利于描述一个功能的物理部件之间的关系，而且涉及物理部件之间互动的能量资源，这是 AD 的层级展开所忽略的。物质场模型可以成为公理化设计描述功能需求的辅助工具，二者的适时转换有益于设计师发现问题的根本原因。

4.2.2 理想化水平与设计公理 AD 的设计公理提供了判断设计方案优劣的标准。独立性公理要求单一功能需求由单一设计参数来保证，不受其他设计参数的影响，而且功能需求要尽量集中，减少功能需求数量从而降低产品信息含量以满足信息公理。

但设计参数的调整是否会对某项功能需求产生影响，需要依赖特定的物理、化学等科学技术知识。而且当一个设计系统涉及多项功能需求和设计参数时，需要大量的时间和成本才能获取足够数据计算系统信息量，这使信息公理的应用变得难以实现<sup>[5-7]</sup>。另外，信息公理仅仅涉及预定义时的功能需求和设计参数，所以可能没有反映出详细设计时相关需求的信息。

TRIZ 理论用理想化水平概念测度技术系统的设计优劣，所谓理想化水平就是技术系统有益功能之和与有害功能之和的比值，优良的设计是有益功能增加或有害功能减少的设计。

$$\text{Ideality} = \frac{\sum UF}{\sum UH} \quad (4)$$

式中 Ideality 为理想化水平； $\sum UF$  (Useful Function) 为系统有益功能之和； $\sum UH$  (Harmful Function) 为系统有害功能之和；理想化水平演化的终点是理想解，即不消耗资源能够完成系统功能的状态，理想解分析可以为设计师提供新的设计思路，是 TRIZ 重要的分析工具。因功能的有益与否取决于客户的主观因素，所以 TRIZ 没有提供定量的测度工具，只能从定性的角度判断设计优劣。

从理性化水平来看，增加设计系统的有益功能，系统的理想化水平与客户获得的价值就增加，而信息公理强调尽量减少功能需求数量，以减少待设计系统复杂度从而提高成功率，二者存在一定的差别。评价产品设计方案时，可把它们结合起来。

4.2.3 矛盾与耦合 矛盾是 TRIZ 的重要概念，分为技术矛盾和物理矛盾<sup>[3]</sup>。技术矛盾是指系统中对某一参数的改善会导致另一个参数的恶化，如改善系统的启动速度会恶化系统稳定性。物理矛盾是指对系统中的子系统或某一部件具有相互矛盾的属性要求，如即要求某夹持机构的力足够大，使被夹持部件保持稳定，又要求其力要小以易于拆卸。

从定义可以看出，TRIZ 中的矛盾概念类似于公理化设计中的耦合设计，所谓耦合即某设计参数的调整会同时影响多个功能需求变量<sup>[8,9]</sup>，显然，二者具有内在的一致性和相容性。TRIZ 认为创新问题就是存在内在矛盾的问题，设计的本质就是解决系统存在的矛盾，公理化设计认为耦合设计是不

可接受的设计方案，必须进行解耦设计。从公理化设计的视角来看，技术矛盾可以分为设计参数不能满足设计约束，功能需求之间存在耦合和设计矩阵非对角线元素为非零三种情况。

通过 TRIZ 的相关工具可以使耦合设计变为非耦合或解耦设计。需要指出的是，矛盾和耦合具有相对性，在有些设计问题中，TRIZ 工具并不能彻底解决系统内部所蕴含的矛盾，只是减轻了矛盾的危害性，使之变得在相应的设计约束中可以接受。另外，功能需求之间是否存在耦合也取决于科技发展水平，随着对物质结构和化学原理认识的深入，现在的非耦合设计也可能变为将来的耦合设计。

### 4.3 应用比较

经过多年研究，AD 和 TRIZ 的应用范围都超出了最初目标，逐步从简单产品向复杂产品，从技术领域向非技术领域扩大。如 AD 从最初的水龙头、起瓶器扩大到汽车、半导体、设备包装、工序设备、电子、金融等各方面；TRIZ 也从机械、电子、建筑等技术领域逐渐向管理，教育、经济、广告业、环境生态和软件工程等非技术领域扩展。

从在产品概念设计过程中的作用来看，公理化设计主要应用于产品设计的概念设计阶段，而 TRIZ 理论则可以同时应用于产品生命周期的其他阶段，如工艺设计、加工装配、故障诊断和回收等阶段。

### 4.4 小结

从以上比较来看，AD 和 TRIZ 的很多概念具有内在的联系和共同点，二者可以互相补充和借鉴。总体而言，公理化设计理论侧重于为设计活动构造一个完整的实用性框架，独立公理和信息公理为设计的合理性和优劣以及方案的选择提供了有效的判断标准，使设计师可以摆脱传统试错式方法耗时、过程反复的缺陷，提高效率。而 TRIZ 以技术系统的演化规律为纲，侧重于应用具体的工具算法解决设计中的矛盾，使创新设计变得有规律可循，两种理论具有很强的优势互补性<sup>[10]</sup>。

## 5 集成模型

将不同设计理论或其中的部分集成以形成新的设计模型是设计方法学领域的发展趋势之一。通过集成，不同设计理论中的优点得到增强，不足以克服，以期能够产生通用的、统一的设计理论。笔者在分析比较 AD 和 TRIZ 理论的基础上，建立了图 3 所示的产品概念设计过程集成模型。该模型的

关键是把 TRIZ 的分析工具和知识工具库集成到 AD 功能域到结构域的映射过程中，使得 AD 理论中选择设计参数以保持功能独立时能够得到 TRIZ 有效工具的支持，而不是依赖于设计师的经验。

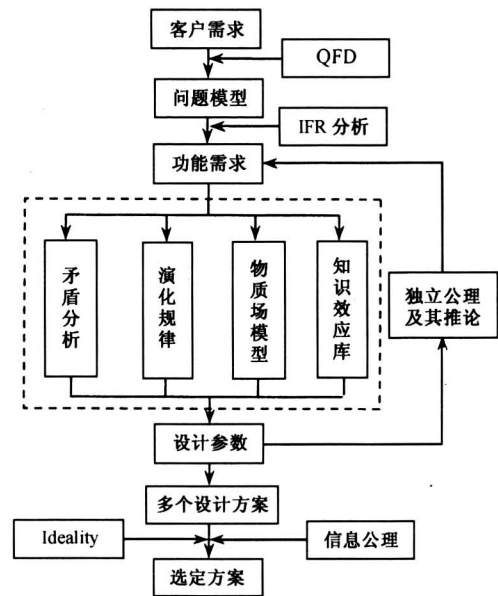


图 3 AD 与 TRIZ 的产品概念设计过程集成模型

Fig.3 The integration model of AD and TRIZ for concept design

## 6 案例分析

### 6.1 车轮罩

20 世纪 80 年代，通用电机公司改进车轮罩设计时遇到一个问题。设计师发现，如果固定车轮罩的夹持弹簧力太小，车轮罩在汽车行驶过程就容易脱落；力太大，车轮罩又难以拆卸。试验表明，当夹持力  $< 35 \text{ N}$  时，拆卸非常容易，当  $> 35 \text{ N}$  时脱落概率很小。文献[2]按设计的功能需求，弹簧夹持力为  $34 \pm 4 \text{ N}$ ，最终方案是其设计名义值  $34 \text{ N}$ ，公差为  $\pm 4 \text{ N}$ ，大批量生产的波动性能满足公差要求。但是，由于存在制造误差，仍然导致部分客户的夹持弹簧不符合使用要求。为此，笔者把功能需求分为  $FR_1$ （车辆行驶时弹簧夹持力） $\geq 35 \text{ N}$  和  $FR_2$ （车辆静止时夹持力  $< 35 \text{ N}$ ）。

显然，功能需求之间存在耦合。从 TRIZ 的视角来看，由于对同一部件（夹持弹簧）存在相互矛盾的属性需求，因此构成了物理矛盾<sup>[4]</sup>。本例中，可以采用基于时间的分离原理解决，即通过设置一个反馈机构，使弹簧的夹持力能够动态变化，从而

满足功能需求的独立性 (具体的设计方案从略)。

## 6.2 微型粒子的混合

微型粒子的干法混合一直是个工艺难题, 由于粒子很小, 混合过程经常因粒子凝结而失败。Suh 教授在筛选很多试验方案后, 得到电晕放电效应的解决方案, 实现了粒子的均匀混合<sup>[1]</sup>。很明显, 该方案的选择是依赖于 Suh 教授的个人经验。

其实, 应用 TRIZ 的知识效应数据库, 可以很容易地得到上面的方案。专利研究显示, 很多创新方案就是在特定工程领域没有使用过的自然效应中得到的<sup>[4]</sup>。在 TRIZ 中, 效应被当作“黑箱”系统, 没有内部结构, 不能进一步分解, 只对特定输入产生特定响应。效应库中的效应排列依据功能原则, 应用效应库时, 工程人员首先确定问题需要解决的功能, 再根据相应功能选择所需要的效应。

在本例中, 功能需求可以表示为使粒子 A 和粒子 B 均匀混和。按照功能分类搜索 TRIZ 知识效应库, 没有实现粒子混和功能的效应类别, 却有物质分离功能效应类。稍加分析即知, 二者可以应用同样的效应。TRIZ 提供的物质分离效应有吸附、阿基米德定律、电晕放电、库仑定律、结晶化、电解、铁磁效应、受迫振动、中子运动、氧化、无声放电和湍流等十几种。仔细分析功能需求与效应的关系, 不难发现电晕放电和库仑定律可以实现“粒子混和”, 然后利用独立公理选择相应的设计参数。显然, 应用 TRIZ 效应库, 寻找设计方案的盲目性大大降低、时间大大缩短。

## 7 结语

笔者对公理化设计理论和 TRIZ 理论进行了比

较研究, 建立了集成产品概念设计过程模型。案例分析表明, 二者虽然采用不同的视角来考察设计过程, 但是二者之间具有强烈的互补性, 能够相互加强各自在产品概念设计的作用。

### 参考文献

- [1] Suh N P. The Principle of Design [M]. New York: Oxford University Press, 1990
- [2] Suh N P. Axiomatic Design: Advances and Applications [M]. New York: Oxford University Press, 2001
- [3] Altshuller G. Creativity as an exact science, the theory of the solution of inventive problems [M]. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1988
- [4] Savransky S D. Engineering of Creativity [M]. New York: CRC Press, 2000
- [5] Kim Y S, Cochran D S. Reviewing TRIZ from the perspective of axiomatic design [J]. Journal of Engineering Design, 2000, 11 (1): 79 ~ 94
- [6] Yang Kai, Zhang Hongwei. A comparison of TRIZ and axiomatic design [J]. TRIZ Journal, 2000, 5 (8): 32 ~ 37
- [7] Yang Kai, Zhang Hongwei. Compatibility analysis and case studies of axiomatic design and TRIZ [J]. TRIZ Journal, 2000, 5 (9): 45 ~ 49
- [8] Mann D. Axiomatic design and TRIZ: compatibilities and contradictions [J]. TRIZ Journal, 1999, 4 (6): 34 ~ 39
- [9] Mann D. Axiomatic design and TRIZ: compatibilities and contradictions(2) [J]. TRIZ Journal, 1999, 4 (7): 53 ~ 58
- [10] Hu Matthew, Yang Kai, Shin Taguchi. Enhancing robust design with the aid of TRIZ and axiomatic design [J]. TRIZ Journal, 2001, 6 (1): 23 ~ 30

# Integrated Model and Comparison of Axiomatic Design and TRIZ

Ding Junwu<sup>1</sup>, Han Yuqi<sup>1</sup>, Zheng Chengde<sup>2</sup>

(1. School of Economics & Management, Nanjing Univ. of S&T, Nanjing 210094, China;

2. Business School, Nanjing Univ., Nanjing 210093, China)

[Abstract] In order to get rid of the dependence on the designers' experience, exploring a science-based design methodology becomes one of the research kernels. The Theory of Inventive Problem Solving and Axiomatic Design have lately gained popularity as they are developed based on scientific principles. In this paper, the relationship and differences between these two design methodologies are analyzed, and one integrated design model for the concept design phase is established. Finally, two cases are given to testify the feasibility of the proposed model.

[Key words] axiomatic design; TRIZ; product design; integration model