

DOI: 10.3901/JME.2008.12.001

## 公理设计的研究现状与问题分析\*

肖人彬<sup>1</sup> 蔡池兰<sup>1,2</sup> 刘勇<sup>3,4</sup>

(1. 华中科技大学 CAD 中心 武汉 430074;

2. 上海第二工业大学机电工程学院 上海 201209;

3. 广西制造系统与先进制造技术重点实验室 南宁 530004;

4. 三峡大学电气信息学院 宜昌 443002)

**摘要:** 公理设计理论为系统设计提供了科学基础, 同时也可为其他设计方法和工具提供概念框架。以公理设计对设计活动的指导为线索, 在剖析其历史背景的基础上, 对公理设计的理论概要进行归纳和简要评析, 从而导出研究热点; 从公理设计理论的扩展和完善、公理设计与其他设计方法的关系、耦合设计问题的处理以及基于公理设计的复杂性科学研究角度对公理设计的研究进展进行阐述说明, 并展开细致深入的分析; 综述了公理设计在产品的设计、制造系统设计、材料及材料加工和设计评价与决策领域的典型应用情况; 最后对公理设计研究目前所存在的问题和局限性进行分析, 并展望了今后的研究重点和发展趋势。

**关键词:** 公理设计 研究现状 问题分析

中图分类号: TH122

## Current Research Situation and Problem Analysis of Axiomatic Design

XIAO Renbin<sup>1</sup> CAI Chilan<sup>1,2</sup> LIU Yong<sup>3,4</sup>

(1. CAD Center, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074;

2. School of Mechanical & Electronic Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209;

3. Guangxi Key Laboratory of Manufacturing System & Advanced Manufacturing Technology, Nanning 530004;

4. College of Electrical Engineering and Information Technology,

China Three Gorges University, Yichang 443002 )

**Abstract:** Axiomatic design (AD) has provided scientific basis for system design. It is also a conceptual framework for other design methods and tools. Firstly, along the track of AD guiding design, AD framework are summarized and analyzed after the review of AD's historical background, and the relevant research hotspots are pointed out. Secondly, the current research situation is summed up and discussed in detail in terms of extension and perfection of AD, relation between AD and other methods, processing of coupled design problem and complexity study based on AD. Then the applications of AD to product design, manufacturing system design, materials and material processing, evaluation and decision of design are introduced. Finally, some key points of research and development trends of AD in the future are prospected based on the analysis of existing problems and limitations.

**Key words:** Axiomatic design Current research situation Problem analysis

### 0 前言

目前, 设计学领域的公理化研究在实际应用需

求和理论发展需求的双重推动下正在兴起。具体来说, 在实际应用需求方面, 快速开发新产品是企业生存与发展之关键, 而有效的设计理论与方法的应用则是其支撑; 在理论发展需求方面, 设计理论体系的公理化意味着设计学逐渐由经验基础向符合科学规范性和逻辑严密性的阶段迈进, 故其遵循了科学界和工程界历史发展趋势。在现有的公理化方法

\* 国家自然科学基金 (50575083)和广西制造系统与先进制造技术重点实验室开放课题 (桂科能 07109008\_023\_K)资助项目。20071225 收到初稿, 20080612 收到修改稿

代表性成果中, 美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)SUH 教授<sup>[1-2]</sup>的公理设计(Axiomatic design, AD)理论影响最大, 并得到了普遍认可。

20 世纪 70 年代末 SUH<sup>[1]</sup>提出公理设计概念, 并于 1990 年在《The Principles of Design》一书中正式提出 AD 理论。AD 理论建立在“存在可归纳的控制设计过程的原理和法则——设计公理”基础之上。文献[1-2]详细阐述了 AD 理论, 其最终目标是为设计建立一种科学基础, 通过为设计人员提供基于逻辑和理性思维过程及工具的理论基础来改进设计活动, 使得原先从经验甚至直觉发展而来的设计准则有了科学依据<sup>[3]</sup>。AD 理论的核心——独立公理和信息公理为好的设计提供了评判标准。基于两条公理, 已推导出一系列的定理、推论和相应的方法论。近十年来, AD 已被应用于产品、过程、系统、软件、组织机构、材料和商业计划设计等领域。

已有的研究成果表明, AD 不仅为新产品设计和已有产品的改进提供原理指导, 同时也为其他一些设计方法和工具提供概念框架<sup>[4]</sup>。因此, AD 理论的研究、扩展和应用得到了大学、研究机构和工业界的广泛关注和重视。MIT 的帕克复杂系统中心(Park Center for Complex Systems, PCCS)在完善 AD 理论的基础上研究复杂性科学, 并探讨其在成本工程、系统生物学和内燃机设计等方面的应用<sup>[5]</sup>; 美国的 Axiomatic Design Solutions 公司致力于 AD 研究成果的传播, 提供 AD 的相关资料、咨询、培训和一系列 AD 应用软件<sup>[6]</sup>; 定期召开的 AD 国际会议为 AD 研究成果的及时交流提供平台; 众多公司(如美国的 Ford Motor Company)和机构也开始引入 AD 方法<sup>[7]</sup>; 北美、欧洲和亚洲的许多工程技术学校已着手向学生讲授 AD 理论; 国内学者也逐步开始关注和探讨 AD 及其工程应用<sup>[8-15]</sup>。

有鉴于此, 本文从 AD 指导设计开发活动的角度出发, 在对其基本理论框架进行归纳概述的基础上, 力图对其研究进展状况、典型工程应用给出完整系统的综述, 并由此对目前存在的问题和局限性进行分析, 继而展望其今后的研究重点和发展趋势。

## 1 公理设计概要

AD 旨在使设计过程更具创新性的同时减少搜索解的过程的随意性, 最小化“设计/反馈/再设计”循环迭代过程, 并在可行方案中确定最佳设计<sup>[6]</sup>。其基本理论和方法包括: 域、映射、设计公理、域间 Z 字形分解、层级、若干定理和推论。

### 1.1 域

有别于其他方法, AD 将设计领域分为四个域: 用户域、功能域、物理域和过程域。用户域刻画顾客需求(Customer attributes, CAs), 功能域为由 CAs 转化而来的相互独立的一系列功能需求(Functional requirements, FRs)的最小集和约束(Constraints, Cs), 在物理域中构思实现 FRs 的设计参数(Design parameters, DPs), 过程域中则确定实现 DPs 的工艺参数(Process variables, PVs)。设计过程是四个域之间自顶向下的 Z 形分解映射过程, 如图 1 所示。

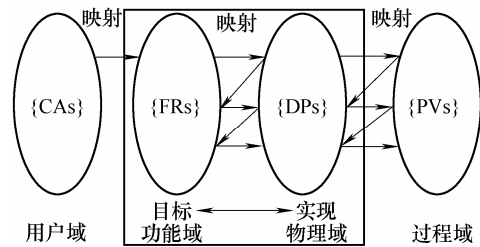


图 1 设计域及映射

从图 1 可看出, AD 能促使参与设计的人员尽可能在设计早期和其他相关人员充分沟通, 这对于提高团队协作能力无疑具有积极意义; 此外, 通过分析域间映射所分别对应的常规设计阶段, 可为探讨将其他工具和方法融入 AD 框架提供启发。目前, 已有不少学者关注 AD 与其他工具和方法的联系和集成的问题, 并取得了重要进展, 后文将对该研究热点进行归纳分析。

### 1.2 设计公理

(1) 独立公理: 保持 FRs 之间的独立性。即对于多个 FRs, 设计方案必须满足每个功能需求  $F_i$  可由相应的设计参数  $P_i$  实现且不影响其他功能需求  $F_j (j \neq i)$ 。故须选择恰当的 DPs 来保持 FRs 的独立。FRs 确定后的功能域/物理域之间的映射可用设计方程表示。设计方程由代表设计目标和方案的特征矢量及表示特征矢量间联系的设计矩阵(Design matrix, DM)组成。在某一设计层次, 功能域中一系列 FRs 组成矢量  $\mathbf{F}$ , 物理域中相应 DPs 组成矢量  $\mathbf{P}$ , 若为一个  $n \times m$  设计, 两者之间关系如下

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}\mathbf{P} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{F}=(F_1, F_2, \dots, F_n)^T$ ,  $\mathbf{P}=(P_1, P_2, \dots, P_m)^T$ ,  $\mathbf{A}$  为设计矩阵, 形式如式(2)所示。式(2)中  $A_{ij} = \partial F_i / \partial P_j$ , 为常数或 DPs 的函数, 分别代表线性和非线性设计

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nm} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$\mathbf{A}$  表示了两个域间的映射关系, 因此比只代表

物理域内信息的设计结构矩阵(Design structure matrix, DSM)包含更丰富的信息。为满足独立公理,  $A$  必须为对角阵或三角阵, 分别表示无耦合和准耦合设计, 否则为不满足独立公理的耦合设计, 必须进行解耦处理。因此, 对于耦合问题的处理研究也是 AD 理论的又一扩展点。

过程域中 PVs 组成矢量  $V$ , 同样物理域/过程域间的映射可用表示工艺过程设计特征的矩阵  $B$  连接, 即

$$P = BV \tag{3}$$

式中矩阵  $B$  与  $A$  的形式相似。

(2) 信息公理: 最小化信息量。即满足独立公理的设计中, 信息量最小的设计具有最大成功可能性, 故是最佳设计。从综合评价角度来说, 其积极意义在于提供一个可量化的设计质量评估准则。对于  $F_i$  的信息量  $I_i$  采用其成功概率  $P_i$  计算(公式见文献[2])。SUH 提出  $P_i$  可用  $F_i$  的设计范围和解决方案中相应的系统范围计算。图 2 为信息量计算原理, 图中设计范围和系统范围重叠部分是可满足 FR 的区域, 从而系统概率密度函数下重叠部分的面积  $A_{cr}$  则为满足所求 FR 的概率, 故信息量用式(4)计算

$$I = -\log_2 A_{cr} \tag{4}$$

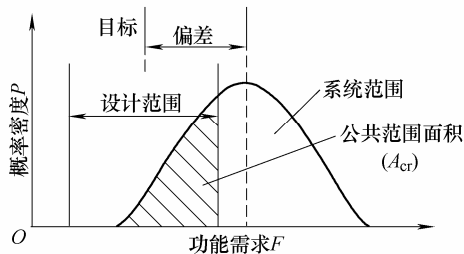


图 2 信息量的计算原理

(3) 耦合度的度量。SUH 提出以  $R$  和  $S$  来度量 FRs 间的独立性,  $R$  和  $S$  的计算公式分别为式(5)和式(6)。其中,  $R$  度量 DPs 轴间的夹角关系, 而  $S$  则表示归一化后矩阵对角线元素的幅值。在概念设计阶段, 由于设计知识的不精确性和不完备性, 可能致使矩阵元素无法明确表达, 此情况下该度量方式不适用。显然, 针对不同实际设计情况及设计不同阶段, 可用其他更为简洁合适的测度来度量 FRs 的耦合关系。这是目前对耦合问题处理策略探讨的一个重要研究内容<sup>[8-10,16]</sup>。

$$R = \prod_{\substack{i=1, n-1 \\ j=1+i, n}}^n \sqrt{1 - \frac{(\sum_{k=1}^n A_{ki} A_{kj})^2}{\sum_{k=1}^n A_{ki}^2 \sum_{k=1}^n A_{kj}^2}} \tag{5}$$

$$S = \prod_{j=1}^n \left[ \frac{|A_{jj}|}{\sqrt{\sum_{k=1}^n A_{kj}^2}} \right] \tag{6}$$

(4) 减少信息量的措施。① 信息公理要求信息量最小化, 得到稳健设计(Robust design, RD)则是其主要措施。首先, 如图 2 所示消除目标值和系统概率密度函数均值间的偏差, 则信息量减少。其次, 减少方差增强系统的稳健性则信息量也随之降低。减少方差方法较多, 如降低刚度(即减小  $A_{ii}$  从而增大  $P_i$  的公差范围)、设计不受方差影响的系统(即  $A_{ii}$  较小的同时又能大于所要求的最低信噪比)、固定冗余 DPs、减少 DPs 和 PVs 的随机变化等。因此, 从信息公理角度来说, RD 与 AD 是一致的。实际上, 目前两者关系的探讨也是一个成果较多的研究热点。② 集成 DPs 来减少物理部件在装配过程中引入的误差并简化制造过程, 从而减少信息量。此措施在产品阶段就考虑到制造过程相关问题, 故对于减少设计的迭代过程效果显著。

### 1.3 层级和 Z 形分解

对于一个设计问题, 在设计顶层没有可实施的设计细节, 故需进行分解。AD 分解策略的独特之处在于该过程是相邻域间 Z 形映射, 而不是在单个域内进行, 图 3 给出了功能域/物理域的分解映射。

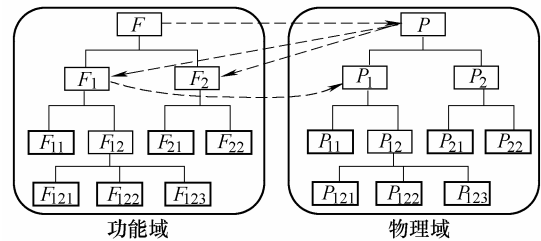


图 3 功能域和物理域间的映射和层级

图 3 中粗线框表示不需再分解即可实现的叶节点。若要分解顶层功能需求  $F$ , 则必须先物理域中选择实现  $F$  的设计参数  $P$ , 然后回到功能域, 依据  $P$  分解  $F$  得到下层的  $F_1$  和  $F_2$ 。若  $P$  选择不同则下层功能不同。再又进入物理域, 根据  $F_1$  和  $F_2$  来确定该层的  $P_1$  和  $P_2$ 。如此进行直到所有功能需求得到满足不需进一步分解就可执行为止。通过分解可建立 FR/DP/PV 层次结构、相应的设计矩阵和模块连接图以及流程图等。

显而易见, 设计矩阵等表示系统体系结构的工具为后续方案优化、项目管理提供了方便, 可得到最优的时序安排和有效的资源配置, 并可用于回溯设计、分析存在的问题或用于未来改进; 同时结合信息公理选择最佳设计来获得较低的技术和商业风险。故而针对分解结果, 很多学者致力于包含丰富

信息的设计矩阵的规划算法研究,并将计算智能方法应用于耦合 FRs 的规划和项目管理。例如文献[9]将人工免疫算法应用于规划耦合 FRs,在保证良好搜索性能的同时有效避免了耦合信息的不必要丢失。

另外,在用 AD 框架指导分解时约束的传播是必须考虑的问题,目前这方面的研究较少。

#### 1.4 公理设计的设计流程

AD 提供的设计范式指导设计者按以下流程进行设计:① 市场调查与预测,识别、分析并定义 Cas。② 根据 CAs 形成设计目标,即将 CAs 转化为 FRs 和约束。③ 根据图 1 和图 3 的映射分解并结合独立公理及其定理和推论,构思设计方案。④ 分析和优化所得方案。⑤ 利用信息公理选择最佳方案。总的来说,AD 的原理和工具可将概念设计过程转化为 FRs 驱动连续的、可度量的行为,从而导向最佳设计方案;同时,整个设计过程的每个环节无不体现出 AD 作为设计框架可有效集成其他方法和工具的特点,这也正是 AD 模型独到之处,目前众多学者正致力于此方面的扩展研究。

## 2 研究进展及其分析

目前,关于 AD 理论的扩展研究已不鲜见,学术论文不断涌现,下面进行归纳论述。

### 2.1 AD 理论的扩展和完善

自从 AD 理论正式提出以来,不少学者从不同层面和角度来探讨其理论根源和实际效用,极大地丰富了该理论的内容,并促使其逐步完善。

(1) 对信息公理进行扩展。① 寻求新的信息量计算方法,如采用 SHANNON 信道和熵定义及 KULLBACK 信息测度计算信息量<sup>[17]</sup>,但该计算方法在计算简洁性上逊于式(4)。② 拓展信息量内涵<sup>[18-19]</sup>。如前所述,信息公理是建立在 Fisher 和 Shannon 理论上且仅度量概率重复事件,因此有必要建立一个包括概率和非概率重复事件的扩展的信息公理,PAPPALARDO 等<sup>[18]</sup>的工作实现了这一点。③ 扩大信息量的应用范围。例如,NAIDU 等<sup>[20]</sup>将信息量作为智能的判断尺度。

在独立公理的延伸方面,GU 等<sup>[21]</sup>从理论上证明满足独立公理的设计是稳健设计,而稳健设计不必非要满足 FRs 间的独立性;而针对独立公理的严格性质疑而提出的广义独立公理则可适应不可忽略的交互作用和界面接口的设计<sup>[22]</sup>;此外文献[19]提出计算具有多个 FRs 和 DPs 的解耦设计信息量的方法,并将其有效扩展到耦合设计情况;本课题组也正在进行该方面内容的探讨,目前主要将违反独立

公理的耦合问题的解决作为一个切入点<sup>[8-10,12-13]</sup>。

(2) AD 模型的扩展。产品设计过程中,行为通常被作为功能和物理模块之间的转换桥梁,因此在功能域和物理域间引入行为域,建立域结构模板的研究有效推动了概念设计方案的生成<sup>[14]</sup>。鉴于 AD 理论指导复杂制造系统设计时存在的局限性,也即 DPs 和 PVs 之间一对一的映射很难实现的问题,文献[23]提出增加一个过程需求域来处理该问题。而文献[22]则进一步增加了制造域和市场域等。以上这些对 AD 模型的扩展使相邻域间的映射过程更加符合设计人员的思维习惯,可有效加快设计进程。

(3) 决策方法理论的扩展。设计是一个不断进行决策的过程,AD 以一种易于理解的模式实现形式化设计决策,LINDHOLM 等<sup>[24]</sup>对 AD 指导下设计决策的相关内容进行了深入探讨。而在 AD 的决策有效性分析方面,OLEWNIK 等<sup>[25]</sup>在提出评价设计决策方法有效性标准的基础上,通过一个简单的设计问题对目前流行的两种决策支持方法——质量屋和 AD 进行了实证研究。

(4) 人类专家进行设计的过程实质上是一个对知识的掌握、处理和应用的过程。鉴于良构功能知识对于指导功能设计的必要性和对创新设计的支持作用,MEIJER 等<sup>[26]</sup>通过对设计实例的探讨指出独立公理依赖于良构知识,好的设计结果不是由 FRs 的独立性产生,而是来源于良构功能知识,这是对 AD 的基础理论的进一步探讨。而 JUNG 等<sup>[27]</sup>提出了功能几何特征(Functional geometric features, FGFs)概念,并用遗传算法来求解装配规划问题,这实质上是将计算智能融入 AD 框架中。

可用图 4 简要说明 AD 理论的扩展和完善内容。

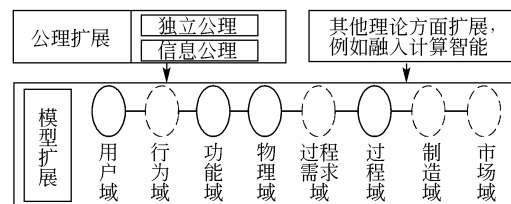


图 4 AD 理论的扩展和完善

### 2.2 AD 与其他设计方法和工具的关系

现有的设计理论、方法和工具从各自角度研究解决设计问题的进程,由于侧重点不同而具有不同的特点和优势。因此综合多种方法取长补短,并进行延伸和扩展无疑是加快设计学发展的一条有效途径。关于 AD 与其他方法和工具的联系及综合的研究成果颇多,包括 AD 与 RD、六西格玛设计(Design for six sigma, DFSS)、质量功能配置(Quality function deployment, QFD)、优化设计(Optimization design,

OD)、TRIZ、并行工程(Concurrent engineering, CE)、面向 x 的设计(Design for x, DFX)、失效模式及后果分析(Failure modes and effects analysis, FMEA)等。

### 2.2.1 AD 与稳健设计和六西格玛设计

AD 和 RD 两者在保证设计质量上具有一致性,故可进行融合来提高 AD 改善设计质量的功效和扩展 RD 的通用性。为促进设计前期思维的稳健性,可利用 AD 原理和 TRIZ 探讨选择适当系统输出响应的有效方法来实现稳健设计,并进一步建立概念设计和参数设计之间的桥梁<sup>[28-29]</sup>。另外,在对 AD 与 RD 之间定性关系分析的基础上研究两条公理与 RD 的联系,并针对质量特性常用的几种统计分布类型,建立信息量描述和计算与质量损失函数/信噪比之间的数学关系<sup>[30]</sup>,从机理上揭示了两者的内在联系。目前已有结合 AD 和 RD 处理产品设计的成功实例,如在解耦的振动陀螺仪的设计中<sup>[31]</sup>,根据独立公理将 DPs 分组后决定其实现顺序,采用田口方法加强其稳健性。众多的研究成果表明 AD 与 RD 之间存在很大的相似性和内在联系, RD 是信息公理的结论,而信息公理则为 RD 提供了理论基础。

DFSS 是按照合理的流程、运用科学的方法准确理解和把握 CAs,对新产品/流程进行稳健设计,从而在低成本下实现六西格玛质量水平,其内涵与 AD 存在一致性,已有的研究成果表明两者可有效集成<sup>[32-33]</sup>。例如,ARCIDIACONO 等<sup>[32]</sup>论证了将 AD 引入 DSFF 框架中的相关问题,阐述了在应用 DSFF 进行产品优化的过程中如何有效使用 AD,同时也证明了 AD 不仅可用于提高阶段,也可用于六西格玛工程的其他阶段。另外,应用软件 Acclaro DFSS<sup>[6]</sup>则是两者成功结合的范例。总的来说,AD 和 DFSS 的结合及应用已比较成熟。

### 2.2.2 AD 与质量功能配置

QFD 从质量保证角度出发,通过市场调查获取 CAs,采用矩阵图解法将 CAs 的实现过程分解到产品开发的各个过程和各部门,并协调各部门工作。作为一种 CAs 驱动的方法,QFD 建立质量屋的过程与 AD 的域间映射密切联系,可将其作为映射工具,结合 AD 有效支持设计过程的进行。这方面国内外都已有相关文献,比如,通过分析 QFD 和 AD 之间的矛盾,应用独立公理来加强 QFD<sup>[34]</sup>,该研究同时也为如何结合两者来优化概念设计过程提供了启发;利用 AD 的独立公理和 Z 形分解来改进 QFD 在并行工程中的使用<sup>[35]</sup>,结果表明 AD 可有效避免 QFD 的多级迭代过程,显著节约设计成本和时间。实际上,AD 与 QFD 的关系探讨也从另一侧面说明了 AD 作为设计框架可有效集成其他设计

工具。

### 2.2.3 AD 与优化设计和可靠性设计

OD 是根据数学模型搜索目标函数优化值的方法,目标函数实际上就是一个 FR,而目标函数的参数则为 DPs。在设计上层,设计问题较抽象难以用精确的数学模型表达,但当设计到达较底层可用数学模型表达时,设计问题就可转化为优化问题。按照 AD 理论,设计变量与设计目标(FRs)的数目应相同,而优化设计中前者的数目往往多于后者。针对这种情况,文献<sup>[36]</sup>提出基于 AD 的优化设计方法,利用正交试验和方差分析确定设计变量对各设计目标的影响程度,从而确定主要设计参数,并将其按无耦合设计形式分组,依照特定次序优化各目标,从而有效避免多个目标间的迭代。在用 AD 处理可靠性设计问题方面,ARCIDIACONO 等<sup>[37]</sup>综合了 AD 和 FMEA 等方法提出最优化产品可靠性的方法——失效模式与影响树分析(Failure mode and effect tree analysis, FMETA),并用柴油机设计验证其有效性。实际上,可靠性也可视为 AD 的一个 FR。因此,一方面,OD 和可靠性设计的要求可转化为 AD 中的 FRs 或约束;另一方面,AD 也可减少优化所需的大量分析和建模过程。

### 2.2.4 AD 与创新设计

设计的本质是创造和革新,但工程设计中的创造性过程至今为止仍未被充分理解,如何产生创新性概念这个问题一直以来都特别引人注目。旨在使设计过程更具创新性的 AD 提出后,有学者便从其与创新设计的联系角度来探讨该问题<sup>[38-41]</sup>。其中,最值得关注的便是 AD 与 TRIZ 的联系研究<sup>[38-40]</sup>,内容包括两者的区别、不相容性、在方法和工具层的联系和兼容性,两者集成的可能性,并进一步利用这些内在联系有效解决实际设计问题。尤其值得一提的是基于 AD 的解耦与 TRIZ 的消除冲突概念类似,故可利用冲突矩阵来解决功能耦合问题。文献<sup>[12-13]</sup>则分析了 AD 与系统创新思维的关联和一致性,构造出结构化解耦方法。

### 2.2.5 AD 与并行工程

CE 要求从设计开始就考虑产品的整个生命周期,强调功能和过程上的集成,而 AD 的功能域/物理域/过程域间映射形成 FR/DP/PV 的过程与 CE 思想是统一的。ALBANO 等<sup>[42]</sup>讨论了 AD 作为 CE 的框架问题;其他学者也作了相关工作,如 JUNG 等<sup>[43]</sup>为了提高生产率用 AD 支持 CE,开发专家系统检验 AD 在 CE 中的适用性。而 GUENOV 等<sup>[44]</sup>则结合 DSM 和 AD 并应用在工程系统分解方面,提出一个用于复杂产品开发规划的设计分解—综合模型,用 DM 表达 FRs/DPs 的映射,而 DSM 为系

统开发相关过程和内容为结构化表达, DM 和 DSM 共进化, 协同考虑了设计决策过程以及体系结构相关的系统知识的应用, 从而更好地描述了复杂产品设计过程。另外, 作为 CE 支持工具的 DFx 与 AD 的结合关系, 文献[4]给出了较详细的论述, 指出采用 AD 的映射、分解和两条公理可得到 DFx 的设计指导方针。实际上, 从 AD 角度看, x 可视为 AD 中的 FR, 故有学者称其为 Design for FRs。

### 2.2.6 AD 与多种设计方法集成

多种设计方法集成研究是一个热点, 主要是将 AD 作为基本框架, 其他方法和工具则应用于各个设计阶段来加速设计过程, 提高质量并降低成本。比如, 旨在加强大系统可靠性的大系统概念设计混合方法<sup>[45]</sup>, 成功集成了 AD、RD 和 TRIZ 方法的特征以及传统的可靠性分析等; AD 和有限元分析技术的结合也已成功应用于监视器减振包装自动化设计系统<sup>[46]</sup>; CHEN<sup>[4]</sup>较系统地分析了多种设计方法及其相互间的联系, 阐述了 AD 作为设计框架综合集成其他方法的可能性; 国内部分学者也开始关注此方面问题<sup>[11]</sup>。众多研究从不同侧面说明 AD 是阐明设计过程的方法, 不是取代其他方法, 而其他方法和工具则是 AD 域间映射过程中搜索解的某种特定方法, 在恰当的设计层次和决策环节发挥效用, 促进 CAs 向 FRs 的转化、创新概念的产生及设计参数的优化。该方面的研究成果可结合 AD 的设计流程图用图 5 来简要说明。

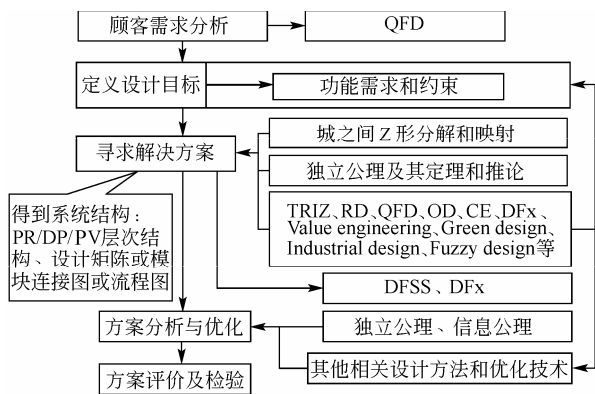


图 5 多种方法和工具与 AD 的集成

### 2.3 耦合设计问题的处理研究

随着产品日益复杂而导致耦合设计的频繁出现, 国内外学者已逐渐开始探讨不满足独立公理的耦合设计问题。① 研究耦合对求解过程和时间的影响。通过 DPs 之间的耦合程度和问题规模对参数设计问题求解的影响试验得出如下结论: 耦合因素对于两个输入/输出的设计仅有中度影响, 随着变量数目的增加耦合对求解过程和任务完成时间的影响急剧变大<sup>[47]</sup>, 从而消除耦合可显著加快设计进程。

② 针对具体实例的解耦, 如定制的汽车悬架的反馈控制系统的解耦设计方案和实现<sup>[48]</sup>。③ 耦合设计任务的协调和折中<sup>[8-10,16,49-51]</sup>。比如, 定义功能耦合为两个子系统的解在实现一个 FR 时的相互否定的作用, 探讨特定的功能解对其他 FRs 的影响<sup>[49]</sup>; 综合考虑消除 DM 的非对角线元素的成本和收益, 识别出最小序列非对角线元素实现解耦并消除假想复杂性<sup>[50]</sup>; 另外, 基于模糊逻辑和层次分析法度量功能耦合度, 将耦合问题转化为旅行商问题(Traveling salesman problem, TSP), 从而寻求耦合功能的最优初始迭代顺序<sup>[8-9,16]</sup>; 在软件设计领域用协作图来定义 FRs 和 DPs 间的耦合度<sup>[51]</sup>。

总的来看, 工程设计人员通常依靠直觉和经验处理耦合问题, 耦合参数的调整和寻求替代技术是两个主要措施, 上述研究均属于这两个范畴。采用这些常规方法往往不能获得满意解, 因此应寻求更具创造性和指导性的方法。

针对上述问题, 已有学者结合创新设计技术解耦。例如用 TRIZ 方法解耦<sup>[38-39]</sup>, 但所获得的创新原理即使有 TRIZ 庞大的方案原理和范例数据库的指导和借鉴, 若缺乏系统的培训和实际经验则无法将该抽象的解决方案转化为实际可行的方案, 从而限制了其应用。文献[12-13]针对此问题提出基于系统创新思维的解耦方法, 采用 Z 形层级分解处理设计问题, 在规划 DM 识别出耦合功能后应用系统创新思维模式描述问题, 进而选择相应的工具来获得保持原技术概念的解决方案, 最后选择新的满足独立公理的 DPs, 实现完全解耦关联的 FRs。

上述研究工作有重要参考价值, 但总体上看关于 AD 中耦合设计问题的处理研究尚未系统展开。根据工程设计的实际需要, 为解决设计中违背独立公理的耦合问题, 有必要寻求更有效的处理该问题的方法, 从而扩展 AD 理论的应用。

### 2.4 复杂性科学研究

复杂性研究是 21 世纪一门新兴学科, 已有学者应用 AD 研究复杂性科学。如用信息公理检验设计的复杂性<sup>[33]</sup>, 从参数设计中的耦合对设计者解决问题能力的影响角度出发对认知和复杂性问题进行探讨<sup>[47]</sup>, 文献[3]是关于复杂性科学的系统研究成果。另外, 值得关注的是帕克复杂系统中心<sup>[5]</sup>, 其研究重点聚焦于 AD 基础上发展起来的复杂性科学及其应用, 包括: ① 基于 AD 研究复杂系统的成本工程; ② 应用 AD 和复杂性理论研究系统生物学; ③ 将 AD 应用于定制的汽车悬架和内燃机设计; ④ 将微结构效应从流体领域扩展到生化领域。

### 3 公理设计的典型应用

随着研究的深入, AD 正逐步被应用于各个领域并显示出其效用。

#### 3.1 产品设计

产品设计是将 CAs 尽量以最佳方案变为产品实现的过程。该过程中设计人员依据两条公理和定理、推论在各设计节点做出正确决策; 其他工具比如 DM 则用于沟通设计目标和方案从而进行分析和优化。产品设计包括硬件和软件系统的设计。

(1) 在硬件设计方面, AD 可贯穿于设计所有阶段处理相关问题<sup>[31,46,48,51-54]</sup>。例如 HIRANI 等<sup>[52]</sup>结合多目标遗传算法和 AD 进行轴承设计, 有效提高了稳定载荷径向轴承润滑油膜的工作特性, 其中遗传算法处理液体动压轴承的多重模态性质, AD 提供目标函数和设计变量(如径向游隙等), 该应用也说明进化算法可融入 AD。总的来说, AD 在汽车工业上的应用较多<sup>[5,7]</sup>, 且该方面应用仍在升温。从大量成功应用来看, AD 在硬件设计方面主要是利用其框架指导整个设计过程, 包括概念设计和详细设计, 同时在不同的设计阶段, 有效融合其他方法和工具。

(2) AD 提供的软件设计框架不考虑编程语言, 可处理纯软件或硬/软组成的系统。① 结合 AD 与面向对象编程技术指导软件系统的开发<sup>[6,46,55]</sup>。SUH 以面向对象技术和 AD 的兼容为目的改进前者, 建立面向对象软件的公理设计基础, 其最成功的应用是 Axiomatic Design Solutions 公司辅助设计人员在交互式环境下进行设计和决策的系列软件<sup>[6]</sup>。

② AD 指导下的计算机辅助设计, 包括 CAD 模型建立的方法和重用、几何体拓扑结构设计等, 如 CHEN 等<sup>[56]</sup>提出的异质材料构成的组件的计算机辅助设计方法。③ AD 指导软/硬件实时控制系统设计。SCHREYER 等<sup>[57]</sup>将 AD 和状态切换表示法结合用于可编程控制器的软件设计, 应用 AD 得到等价状态切换表示法, 由于状态表不允许状态交叠故可得到无耦合或解耦设计, 从而简化编程、调试和测试。

#### 3.2 制造系统设计

制造是把原材料变成产品的过程, 制造系统设计则指合理组织机器、材料、人员和信息等要素, 以减少运输时间和资金, 提高产品质量和生产率, 达到增加客户满意度的目的。① 在制造系统设计基础方面的研究较多<sup>[58-59]</sup>, 如结合 AD 和系统设计方法研究制造系统设计方法, 阐述公理在不同设计阶

段如何使用, 从而在设计阶段强调增强其柔性、适应性和响应速度以满足产品需求的快速变化对制造系统提出的要求<sup>[59]</sup>。② 在实际制造系统设计方面, 利用 AD 简化设计问题从而对汽车车身装配线重新设计便是一个成功案例<sup>[60]</sup>。③ KULAK 等<sup>[61]</sup>提出基于 AD 的策略来指导设计人员从传统过程导向的制造系统转向单元导向的制造系统, 并给出连续改进的反馈机制, 根据事先确定的性能标准来评价和改善制造单元的设计。总的来说 AD 在此方面的应用主要是针对制造系统面临的挑战: 效率、柔性、适应性、响应速度和分布式等, 侧重于在 AD 框架下探讨适应新要求的制造系统设计的模型和系统化方法, 改进和提高制造系统各要素, 完善其性能分析、评价方法以及集成产品/工艺设计和制造系统的设计。

#### 3.3 材料及材料加工

AD 已被应用于新材料设计和材料加工工艺的制定<sup>[2,56,62-63]</sup>。比如金属成形加工过程设计<sup>[62]</sup>; 在聚合物基复合材料零件叠层制造过程中验证所选的过程试验设计<sup>[63]</sup>; 基于 AD 的计算机辅助材料设计<sup>[56]</sup>; 而最典型的应用则是 SUH<sup>[2]</sup>发明的已商业化的混合合金和微孔塑料, 设计人员首先将用户域内客户期望的材料性能转化为功能域中材料应具备的性质 FRs, 然后映射为物理域中的微观结构 DPs, 最后映射到过程域中的加工技术 PVs, 使用 AD 显著缩短了新材料开发的昂贵迭代设计过程。目前材料设计方法主要是在经验规律基础上进行归纳或从有关原理出发进行演绎, AD 从另一侧面为材料设计和加工提供了结构化过程指导, 同时 AD 在该方面的应用还有待于进一步深入和丰富。

#### 3.4 设计评价与决策

设计工作的核心是在设计中不断的综合和反复决策, AD 实质上关注的是设计过程如何决策的问题, 其应用可总结为三类: ① 在设计过程决策方面, 文献[8-10]涉及的是对设计过程的规划决策, 即决定下一步做什么和如何做。② 在技术方案决策方面, AD 已被用于安排具体的技术问题。如 KULAK 等<sup>[64]</sup>将 AD 的多属性综合评价决策扩展为简洁 AD 和模糊 AD 方法后进行制造系统的多属性比较, 分别处理完整和不完整信息情况。③ 在可接受性决策方面, 主要是确定候选方案是否满足设计需求, 并从多个满意解中选择最优解。比如基于 AD 评价产品族根据 CAs 产生产品变化的固有柔性, 在解耦设计和模块化设计两种情况下研究相应的柔性指标<sup>[65]</sup>。另外, 应用 AD 进行设计评价和决策时常常要结合其他综合评价方法, 例如结合模糊数学方法就提出了基于模糊信息公理的设计方案评价法<sup>[66]</sup>。

## 4 问题分析与展望

### 4.1 问题分析

从上述对 AD 的基本理论、研究现状和应用的讨论可知, AD 已广泛应用于各个领域, 并被越来越多的学者和技术人员所重视。然而, AD 研究无论是从理论深化还是从应用扩展角度来说, 仍是一个值得关注的领域, 面临着许多问题亟待解决。

#### 4.1.1 AD 框架

在 AD 的发展过程中, SUH 等致力于设计的理论和方法而不是算法和工具, 通过对大量成功设计实例进行分析归纳, 抽象出设计过程本质而形成该理论框架。

但正如上面所说, AD 更侧重于理论框架的建立, 对于具体实现和解决问题的方法涉及相对较少。也即在指导设计的过程中, AD 的公理、定理和推论更多的是被用来进行决策, 它告诉设计者什么样的设计方案是一个好的方案, 但在指导设计人员如何产生一个好的方案, 或者如何具体改进不满意方案方面相对较弱, 从而导致实际应用 AD 指导设计的过程并不如预想的顺利, 还遇到不少障碍。

#### 4.1.2 独立公理和信息公理

首先, 独立公理要求保持 FRs 间的独立性, 它为设计者是否实现满意的设计结果提供评判准则, 要求对于多个 FRs 情况时必须设法得到无耦合或准耦合设计, 这对于减少设计迭代、缩短研发时间和降低成本极具意义。其次, 作为选择最佳设计准则的信息公理为优化设计和稳健设计提供了基础, 它采用最大成功概率作为信息量评价准则, 并用设计范围和系统范围来计算。结果表明, 该信息量计算方法在设计知识比较充分且准确时, 简单而有效。

但对于复杂系统而言, 由于设计对象的复杂性或现有知识的局限性, 耦合设计经常不可避免地出现。AD 虽然给出了计算 FRs 耦合度的  $R$  和  $S$ , 但未提供系统化的分析和处理耦合设计的方法, 尤其是结构化的解耦方法以及当耦合设计无可避免时减少迭代使设计继续进行的措施。此外, 在设计初期, 当设计知识缺乏准确性和充分性时, 将会影响信息量计算方法的有效性, 而且信息公理仅度量概率和重复事件。因此, 寻求适合于不同设计情况的信息量计算方法等问题是增强信息公理实用性的关键。

#### 4.1.3 多种设计方法和工具的集成

由于 AD 主要着重于设计过程的控制及其相关节点的决策, 缺乏对于设计中知识的获取和获取知识所依赖的智力资源的关注, 对于设计过程中所可

能遇到的某些问题缺乏理论的指导和方法工具的支持, 因此 AD 可作为其他设计方法和工具的框架, 充分利用其他方法和工具的优势, 进行域间映射, 并以 AD 的公理、定理和推论作为设计准则来获得满意解。AD 与多种设计方法和工具的关系研究及集成成果充足, 已有成功的实际应用。

但研究成果总的来说还比较零散, 缺乏系统性, 要使 AD 作为一个框架有效而完善的集成其他相关方法和工具来支持设计的各层次和节点, 仍有许多问题亟待解决, 如基于 AD 融合其他设计方法的研究大多集中于理论上的探讨, 实际应用扩展较少, 尤其缺乏相关的计算机辅助设计软件, 像多种方法集成的智能设计系统就是其中之一。

#### 4.1.4 计算智能技术的融入

计算智能将模糊逻辑与智能化技术手段(如神经网络和进化算法等)以及概率推理有机结合起来, 在计算机环境下模仿人类推理行为, 解决复杂系统中带有不确定因素问题的建模和优化求解, 使模型建立更接近客观事物, 优化求解过程更具操作智能和自适应性。计算智能的广泛应用显示出其强大的信息处理和求解能力以及广阔的前景。但在前面已有的 AD 相关研究成果的分析中, 计算智能与 AD 技术的结合研究较少。

## 4.2 研究展望

根据上述分析, 预计今后 AD 研究将围绕下面几个方面展开。

(1) AD 理论研究的深入及实用性的加强。在理论方面, 针对复杂产品设计的实际需求应进一步建立更为完整的范式, 并在 AD 基础上进一步展开复杂性科学的相关问题研究; 另外, 虽然 AD 已成功应用于各个领域, 但该理论的工程实用性方面的研究还要继续开展, 主要是有效解决设计过程中各个不同阶段的 AD 实际应用问题及实用工具的开发, 达到 AD 框架模型和系统工具的更加实用化。

(2) 独立公理和信息公理的扩展。针对独立公理, 要进一步探讨耦合问题处理的策略, 包括耦合设计的解耦方法和在现有条件限制下无法得到解耦设计时的耦合设计的迭代寻优。而信息公理的扩展主要指寻求新的信息量计算方法、拓展信息量内涵及应用范围。

(3) AD 与其他设计方法和工具的集成。首先继续开展 AD 与其他方法和工具的联系研究; 其次, 根据各种方法的不同侧重点, 研究利用 AD 提供的框架有效集成各种方法的策略; 再次, 将集成成果有效应用于生产实践中仍是值得关注的重要内容; 最后, 开发相关集成成果的计算机辅助设计软件。

(4) 计算智能与AD的结合。探讨将计算智能融入AD框架中,充分利用其智能控制、并行运算、模糊处理和自适应性等特点,为解决复杂系统设计问题提供新方法和可行而有效的手段。主要工作包括研究如何利用计算智能的原理和方法解决应用AD时遇到的复杂系统分解、综合及迭代寻优等问题。

### 参 考 文 献

- [1] SUH N P. The principles 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] SUH N P. Complexity: theory and applications[M]. New York: Oxford University Press, 2005.
- [4] CHEN K Z. Identifying the relationship among design methods: key to successful applications and developments of design methods[J]. Journal of Engineering Design, 1999, 10(2): 125-141.
- [5] MIT Park Center for Complex Systems. Research[EB/OL]. [2007-04-18]. <http://web.mit.edu/pccs>.
- [6] Axiomatic Design Solutions, INC. Axiomatic design solutions [EB/OL]. [2006-6-21]. <http://www.axiomaticdesign.com/>.
- [7] SMITH L R, SUDJANTO A. Principle based approaches to product development[C]//Industrial Engineering Research Conference Proceedings, Miami Beach, 1997: 369-374.
- [8] 曹鹏彬, 肖人彬, 库琼. 公理设计过程中耦合设计问题的结构化分析方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3): 46-55.
- CAO Pengbin, XIAO Renbin, KU Qiong. Structural analytical approach to coupled design in design with axiomatic design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 46-55.
- [9] 肖人彬, 库琼, 曹鹏彬. 基于免疫聚类识别的耦合功能规划方法与实例[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(9): 1 421-1 430.
- XIAO Renbin, KU Qiong, CAO Pengbin. Coupling function planning & practical example based on immune clustering recognition approach[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(9): 1 421-1 430.
- [10] CAI C L, XIAO R B. A structured approach to product design management based on axiomatic design[C]//Proc. of ICFDM2006, Guangzhou, China, 2006, 1: 195-200.
- [11] 朱龙英, 朱如鹏, 刘正坝. 公理化设计理论研究及其应用进展[J]. 机械设计与研究, 2004, 20(4): 43-46.
- ZHU Longying, ZHU Rupeng, LIU Zhengxun. Development in research and application of axiomatic design theory[J]. Machine Design and Research, 2004, 20(4): 43-46.
- [12] 蔡池兰, 肖人彬. 公理设计下基于系统创新思维的解耦方法研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 184-191.
- CAI Chilan, XIAO Renbin. Structured approach to decouple coupled design in axiomatic design based on SIT[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 184-191.
- [13] CAI C L, XIAO R B. The method for uncoupling design with the aid of systematic inventive thinking[J]. Proc. IMechE, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(C3): 435-445.
- [14] 宋慧军, 林志航. 产品概念设计方案生成模型[J]. 计算机集成制造, 2002, 8(5): 342-346.
- SONG Huijun, LIN Zhihang. A model of generating schemes in product conceptual design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(5): 342-346.
- [15] 江屏, 檀润华, 张瑞红, 等. 公理设计下的闸阀结构分析[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(3): 247-252.
- JIANG Ping, TAN Runhua, Zhang Ruihong, et al. Structure analysis of a valve based on axiomatic design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(3): 247-252.
- [16] SU J C Y, CHEN S J, LIN L. A structured approach to measuring functional dependency and sequencing of coupled tasks in engineering design[J]. Computers and Industrial Engineering, 2003, 45: 195-214.
- [17] KAR A K. Linking axiomatic design and Taguchi methods via information content in design[C]//Proceedings of ICAD2000, Cambridge, MA, 2000, ICAD033, 2000: 219-224.
- [18] PAPPALARDO M, NADDEO A. Failure mode analysis using axiomatic design and non-probabilistic information [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164-165: 1 423-1 429.
- [19] SHIN G S, YI J W, YI S I, et al. Calculation of information content in axiomatic design[C]//Proceedings of ICAD2004, Seoul, Korea, 2004, ICAD-2004-22.
- [20] NAIDU P C, GOLDENBERG A A. Design of intelligent systems: Measure of information content[C]//Proc. ASME DETC/CIE-DETC, 2005, 3(A): 23-32.
- [21] GU P, LU B, SPIEWAK S. A new approach for robust design of mechanical systems[J]. Annals of the CIRP, 2004, 53(1): 129-134.

- [22] 罗振璧, 朱耀祥, 莫汝虎, 等. 新产品的创新设计、开发与管理[M]. 海口: 南海出版公司, 2007.
- LUO Zhenbi, ZHU Yaoxiang, MO Ruhui, et al. Innovational design, development and management of new product[M]. Haikou: Nanhai Publishing Corporation, 2007.
- [23] VALLHAGEN J. Aspects on process planning issues in axiomatic design[C]//Proceedings of the 1994 ASME Design Technical Conferences, Minneapolis, 1994, 69(2): 373-381.
- [24] LINDHOLM D, TATE D, HARUTUNIAN V. Consequences of design decisions in axiomatic design[J]. Journal of Integrated Design & Process Science, 1999, 3(4): 1-12.
- [25] OLEWNIK A T, LEWIS K. On validating engineering design decision support tools[J]. Concurrent Engineering Research and Applications, 2005, 13(2): 111-122.
- [26] MEIJER B R, TOMIYAMA T, VAN DER HOLST B H A, et al. Knowledge structuring for function design[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2003, 52(1): 89-92.
- [27] JUNG J, LEE K S, SUH N P. Automatically assembled shape generation using genetic algorithm in axiomatic design[J]. LNAI, 2005, 3 681: 41-47.
- [28] HU M, YANG K, TAGUCHI S. Enhancing robust design with the aid of TRIZ and axiomatic design (Part I) [EB/OL]. [2006-6-21]. [http : //www.axiomaticdesign.com/](http://www.axiomaticdesign.com/).
- [29] HU M, YANG K, TAGUCHI S. Enhancing robust design with the aid of TRIZ and axiomatic design (Part II). [EB/OL]. [2006-6-21]. [http : //www.axiomaticdesign.com/](http://www.axiomaticdesign.com/).
- [30] XIAO R B, CHENG X F. An analytic approach to the relationship of axiomatic design and robust design[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2008, 31(2/3/4): 241-258.
- [31] HWANG K H, LEE K H, PARK G J, et al. Robust design of a vibratory gyroscope with an unbalanced inner torsion gimbal using axiomatic design[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2003, 13(1): 8-17.
- [32] ARCIDIACONO G, CAMPATELLI G, CITTI P. Axiomatic design for Six Sigma[C]//Proc. of ICAD2002, Cambridge, MA, 2002, ICAD004.
- [33] YANG K, EI-HAIK B S. Design for Six Sigma[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2003.
- [34] BASCARAN E, TELLEZ C. Use of the independence design axiom as an enhancement to QFD[C]//6th International Conference on Design Theory and Methodology, Minneapolis, 1994, 68: 63-69.
- [35] GONCALVES-COELHO ANTONIO M, MOURAO ANTONIO J F, PEREIRA ZULEMA L. Improving the use of QFD with axiomatic design[J]. Concurrent Engineering Research and Applications, 2005, 13(3): 233-239.
- [36] 程贤福, 肖人彬. 基于公理设计的优化设计方法与应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 117-121.
- CHENG Xianfu, XIAO Renbin. Optimization method based on axiomatic design and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2007, 38(3): 117-121.
- [37] ARCIDIACONO G, CAMPATELLI G. Reliability improvement of a diesel engine using the FMETA approach[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2004, 20(2): 143-154.
- [38] YANG K, ZHANG H. A comparison of TRIZ and axiomatic design[C]//Proceedings of ICAD2000, Cambridge, MA, 2000, ICAD056, 2000: 235-242.
- [39] KANG Y J. The method for uncoupling design by contradiction matrix of TRIZ and case study[C]// Proceedings of ICAD2004, Seoul, 2004: ICAD-2004-11.
- [40] DUFLOU J R, DEWULF W. On the complementarity of TRIZ and axiomatic design: from decoupling objective to contradiction identification.[C]//Proceedings of the ETRIA TRIZ Future Conference 2006, Kortrijk, 2006, 1: 1.
- [41] SEKIMOTO S, UKAI M. Study of creative design based on the axiomatic design theory[C]//Proceedings of the 1994 ASME Design Technical Conferences, Minneapolis, 1994, 68: 71-77.
- [42] ALBANO L D, SUH N P. Axiomatic design and concurrent engineering [J]. Computer Aided Design, 1994, 26(7): 499-504.
- [43] JUNG J Y, BILLATOS S B. Applicability of axiomatic design in concurrent engineering[J]. ASME DE, 1993, 52: 129-135.
- [44] GUENOV M D, BARKER S G. Application of axiomatic design and design structure matrix to the decomposition of engineering systems[J]. Systems Engineering, 2005, 8(1): 29-40.
- [45] SARNO E, KUMAR V, LI W. A hybrid methodology for enhancing reliability of large systems in conceptual design and its application to the design of a multiphase

- flow station[J]. *Research in Engineering Design*, 2005, 16(1-2): 27-41.
- [46] YI J W, PARK G J. Development of a design system for EPS cushioning package of a monitor using axiomatic design[J]. *Advances in Engineering Software*, 2005, 36: 273-284.
- [47] HIRSCHI N W, FREY D D. Cognition and complexity: an experiment on the effect of coupling in parameter design[J]. *Research in Engineering Design*, 2002, 13(4): 123-131.
- [48] DEO H V, SUH N P. Mathematical transforms in design: Case study on feedback control of a customizable automotive suspension[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, 53(1): 125-128.
- [49] JOHANNESSON H L. On the nature and consequences of functional couplings in axiomatic machine design[C]// *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences*, Irvine, CA, 1996, 96-DETC/DTM-1528.
- [50] LEE T. Optimal strategy for eliminating coupling terms from a design matrix[J]. *Journal of Integrated Design and Process Science*, 2006, 10(2): 45-55.
- [51] TOGAY C, DOGRU A H. Component oriented design based on axiomatic design theory and COSEML[J]. *LNCS*, 2006, 4 263: 1 072-1 079.
- [52] HIRANI H, SUH N P. Journal bearing design using multi-objective genetic algorithm and axiomatic design approaches[J]. *Tribology International*, 2005, 38 : 481-491.
- [53] LEE H, SEO H, PARK G J. Design enhancements for stress relaxation in automotive multi-shell-structures[J]. *Int. J. of Solids & Structures*, 2003, 40(20): 5 319-5 334.
- [54] THIELMAN J, GE P, WU Q, et al. Evaluation and optimization of General Atomics' GT-MHR reactor cavity cooling system using an axiomatic design approach[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, 235: 1 389-1 402.
- [55] PIMENTEL A R, STADZISZ P C. Application of the independence axiom on the design of object-oriented software using the axiomatic design theory[J]. *Journal of Integrated Design and Process Science*, 2006, 10(1): 57-69.
- [56] CHEN K Z, FENG X A. Computer-aided design method for the components made of heterogeneous materials[J]. *Computer-Aided Design*, 2003, 35(5): 453-466.
- [57] SCHREYER M, TSENG M M. Hierarchical state decomposition for the design of PLC software by applying axiomatic design[C]//*Proceedings of ICAD2000*, Cambridge, MA, 2000, ICAD006, 2000: 264-271.
- [58] COCHRAN D, ARINEA J, DUDA J, et al. A decomposition approach for manufacturing system design[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2001, 20(6): 371-389.
- [59] GU P, RAO H A, TSENG M M. Systematic design of manufacturing systems based on axiomatic design approach[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2001, 50(1): 299-304.
- [60] HOUSHMAND M, JAMSHIDNEZHAD B. A lean manufacturing roadmap for an automotive body assembly line within axiomatic design framework[J]. *Int. J. of Engineering, Transactions A: Basics*, 2004, 17(1): 51-72.
- [61] KULAK O, DURMUSOGLU M B, TUFEKCI S. A complete cellular manufacturing system design methodology based on axiomatic design principles[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2005, 48(4): 765-877.
- [62] GUNASEKERA J S, ALI A F. Three-step approach to designing a metal-forming process[J]. *JOM*, 1995, 47(6): 22-25.
- [63] ZAK G, SELA M N, YEVKO V, et al. Layered-manufacturing of fiber-reinforced composites[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 1999, 121(3): 448-456.
- [64] KULAK O, KAHRAMAN C. Multi-attribute comparison of advanced manufacturing systems using fuzzy vs. crisp axiomatic design approach[J]. *Int. J. Production Economics*, 2005, 95(3): 415-424.
- [65] DAN B, TSENG M M. Assessing the inherent flexibility of product families for meeting customisation requirements[J]. *Int. J. of Manufacturing Technology and Management*, 2007, 10(2/3): 227-246.
- [66] 肖人彬, 程贤福, 廖小平. 基于模糊信息公理的设计方案评价方法及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(12): 2 331-2 338.
- XIAO Renbin, CHENG Xianfu, LIAO Xiaoping. Evaluation method for design scheme based on fuzzy information axiom and its application[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(12): 2 331-2 338.

作者简介: 肖人彬, 男, 1965 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能设计与复杂产品创新设计。

E-mail: rbxiao@163.com

