

DOI:10.13196/j.cims.2015.05.001

## 可拓设计理论方法综述与展望

赵燕伟<sup>1</sup>, 周建强<sup>1,2</sup>, 洪欢欢<sup>1</sup>, 陈尉刚<sup>1</sup>, 何 路<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014;

2. 衢州学院 机械工程学院, 浙江 衢州 324000)

**摘 要:**为了针对产品创新设计中的矛盾问题寻求最佳设计方案,提出一种可拓设计理论方法,该方法集理论、实践、科学、哲学和方法论为一体,具有设计目标清晰、冲突消解过程有序、方案输出结果满意等特点。通过分析比较发明问题解决理论、基于规则/实例推理、约束松弛、协商、回溯、可拓设计等常用于产品创新设计过程中的冲突问题消解方法,论述了可拓设计方法最大的特色在于模型化、形式化、定性与定量相结合,是一种智能化处理设计对象、设计系统的现代设计方法;系统介绍了可拓学和可拓设计的形成及相互关系、可拓设计的研究方法和设计原理,对可拓设计各步骤环节的研究现状进行了综述,论述了目前存在的不足及今后的发展方向与思路;阐述了可拓设计方法及其计算机实现的策略生成系统,对几种典型的可拓设计软件系统做了简要介绍;最后对全文进行总结,展望了今后的研究目标及需要解决的研究难点。

**关键词:**可拓设计;可拓策略生成系统;低碳设计;知识演化;可拓变换

**中图分类号:**TH122;TP391

**文献标识码:**A

### Overview and prospects of extension design methodology

ZHAO Yan-wei<sup>1</sup>, ZHOU Jian-qiang<sup>1,2</sup>, HONG Huan-huan<sup>1</sup>, CHEN Wei-gang<sup>1</sup>, HE Lu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology,

Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Institute of Mechanical Engineering, Quzhou College, Quzhou 324000, China)

**Abstract:** To find the best program for solving contradiction in product innovation design, an extension design method was proposed, which had features of clear design goal, orderly conflict resolution process, satisfactory output program in product innovation design application. Through the analysis and comparison of common conflict resolution methods in innovative product design such as Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ), rule/case-based reasoning, constraint loosening, negotiation, backtracking and extension design, the extension design method was chiefly characterized by its formalization, modeling and combination of qualitative and quantitative. It was a modern design method that intelligently processed design objects, design systems and design processes. The formation of extenics and extension design, their relationship, the research methods and design principles of extension design were systematically introduced. The research status of various steps and links in extension design was summarized. The current deficiencies as well as future directions and ideas of extension design were discussed. Extension design methods and the strategy generating systems for their computer implementation were explained. A brief introduction was given to several typical software systems for extension design, and the prospective research objectives as well as difficulties were forecasted.

**Key words:** extension design; extension strategy generating system; low-carbon design; knowledge evolution; extension transformation

收稿日期:2014-07-31;修订日期:2014-12-31。Received 31 July 2014; accepted 31 Dec. 2014.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51275477);浙江省自然科学基金资助项目(LY13E050020)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 51275477), and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China(No. LY13E050020).

## 0 引言

创新是人类社会发展的原动力,掌握创新理论和创新技法,对人们理解产品设计、开阔设计者的思路有重要作用。现有的产品设计冲突问题的消解方法通常包括发明问题解决理论(Theory of Invention Problem Solving, TRIZ)、基于规则/实例推理、约束松弛、协商、回溯和可拓设计等。

TRIZ 提供了解决问题的设计方向,却没有给出冲突问题的形式化方法、具体设计步骤和约束,以及通用解转化方法,而且需要较强的专业理论<sup>[1-5]</sup>;基于规则/实例推理的方法在处理复杂设计冲突问题并涉及产品全生命周期和多领域知识时,难以有效构建冲突消解的规则库和实例库<sup>[6-9]</sup>;约束松弛方法侧重于调整设计规定和要求,但可能因此降低设计标准,并容易改变求解目标和利益目标,直接导致消解失败;协商方法给出了冲突消解的方式,但在冲突消解过程中的使用性和通用性还不够强<sup>[10-11]</sup>;回溯方法在回溯过程中缺少明确的依据和参考,在解决复杂冲突问题时需要花费大量时间构建系统、有效的依据和参考,且无法保证冲突问题的正确消解<sup>[12-13]</sup>。可拓设计<sup>[14]</sup>是一种智能化处理设计系统、设计对象、设计过程中矛盾问题的现代设计方法,但其基元理论模型智能演化机制和基于可拓变换的算法实现缺乏严格、可行的研究支持,是影响冲突问题快速、有效解决的关键和瓶颈。

## 1 可拓学与可拓设计

可拓学是由中国学者蔡文教授创立的一门新学科,它以形式化语言研究事物的拓展性、可拓创新规律和方法,主要用于解决各学科领域中的一些矛盾问题。经过近 30 年的发展和完善,可拓学在理论和方法研究上取得了创新性、突破性的研究成果,并在多学科领域有着许多成功的应用案例。

可拓设计是一种以可拓论为理论基础,通过形式化建模、变换、推理、聚类、评价与决策等方式,研究产品设计系统、对象、过程中产生的矛盾问题,并最终确定设计方案解的智能化设计方法,该方法具有如下 4 个特点:

(1)提供了一种创新性思维方法 可拓设计能够有效实现创新与辩证思维的形式化和模型化,符合设计者的习惯性思维表达与操作,使设计者充分发挥其智慧和创造性。

(2)避免了设计模型集成度低、演化能力不足的

问题 可拓设计实现了信息集成表达,能够满足不同信息的集成和映射,特别是实现了产品上游初始设计、中游详细设计、下游完善设计阶段的无缝集成。

(3)能够表达和处理一些复杂矛盾问题 可拓设计不仅能够研究常规逻辑推理方法,还能描述促进矛盾转化中的动态信息交互与协调反馈机制,具有化解矛盾、消除对立、协调设计的能力。

(4)能够求解和变换多目标、多方案问题 长期以来,多目标、多方案求解一直采用类比、符号推理、模糊评判等方法,而可拓设计可以减少对描述对象的依赖性,构建多方案生成的可拓模型,避免使设计问题局部最优,形成对复杂产品的设计经验和方案再利用的有效方法。

## 2 可拓设计研究方法及其原理分析

可拓设计的研究方法体系如图 1 所示。该体系通过基元理论,构建描述设计过程中相关物元、事元、关系元等问题的形式化模型,研究设计对象拓展的可能性及其拓展分析方法;通过基元的拓展分析,研究设计知识聚类的关联度和知识检索的相似度;通过共轭分析方法,从物质性、动态性、对立性和系统性分析物元的结构,并进一步研究矛盾问题推理、变换和知识演化技术;通过评价要素权重分配、相容度和共存度计算、传导效应与传导度控制等构建综合评价体系,研究可拓设计方案输出的内在机理。

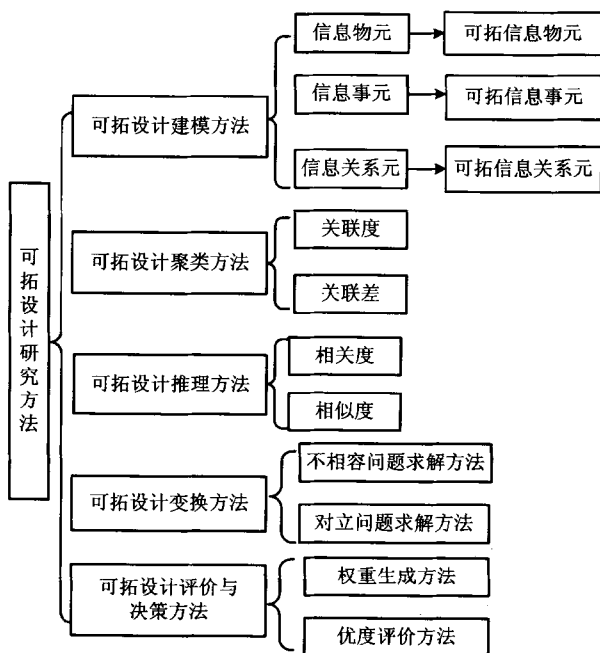


图1 可拓设计研究方法

## 2.1 可拓设计的知识建模

可拓设计知识模型是可拓推理的基础,在求解设计冲突问题时,必须先对冲突问题的关联设计要素进行可拓知识建模。可拓设计知识属于变化的知识<sup>[15]</sup>,其表达形式并没有统一的提法,目前主要有以拓展式为基础的可拓建模<sup>[16]</sup>、以框架式描述的可拓建模<sup>[17]</sup>、以产品设计单元为基础的可拓建模<sup>[18]</sup>、基于本体的可拓知识链建模<sup>[19]</sup>和基于多级菱形思维的可拓建模<sup>[20-22]</sup>等几种表示方法。

在可拓设计知识的建模阶段,研究重点主要在利用分合链、发散树、共轭对、蕴含系和相关网等方法,针对设计目标、条件、约束、规划和标准,表达设计对象及过程中产生的深层次复杂矛盾问题,给出初始设计方案。基元模型和复合元模型具有良好的形式化表达设计问题功能,不同的建模方法旨在更好地表示设计过程中的各要素和冲突问题<sup>[23]</sup>。在可拓模型与实际问题的结合应用上所形成的可拓知识模型,包括多元耦合仿生可拓模型<sup>[24]</sup>、绿色设计单元可拓模型<sup>[25-26]</sup>、可拓知识空间和网格<sup>[27-28]</sup>等。因此,基于实际工程问题的可拓基元理论的深入研究,势必有助于统一可拓设计知识的建模方法。

## 2.2 可拓设计的聚类分析

可拓聚类<sup>[29]</sup>是一种应用关联函数理论进行元素定性定量聚类分析的方法,它将特征关联性因子作为定量定性的划分依据,采用最小关联距离法划分特征模块,目的是将模块可拓知识模型按照不同类型、同类型不同结构等因素进行聚类,实现产品方案知识的快速匹配。可拓聚类主要研究模块的可拓展性及各模块间的关联传导性,其研究基础包括模块及其可组合性、产品族通用特征模块<sup>[30-31]</sup>、可拓聚类分类管理<sup>[32]</sup>、模块化设计<sup>[33]</sup>、模块可拓性<sup>[34]</sup>、模块配置可拓关联等<sup>[35]</sup>。聚类过程中的分类环节需要构建可拓集合,包括可拓集合运算研究<sup>[36-38]</sup>、多维可拓集合性质分析及其运算研究<sup>[39-40]</sup>等。

## 2.3 可拓设计的推理方法

针对实例推理方法难以描述定量定性相结合设计知识的不足,赵燕伟等<sup>[41-48]</sup>采用框架语义网、关系元等模型表示设计知识,将基于实例推理(Case Based Reasoning, CBR)中查找类似实例的工作转变为语义网络的类比匹配和识别问题。实现基于CBR的关键是建立一种合适的知识表示与检索方式,而实例间的相似性度量是检索的关键,相似度公

式的构建以可拓距为基础,针对可拓距在实例知识检索中存在的缺点,有必要对其进行改进<sup>[49-50]</sup>,但是这些改进方法都仅适用于计算最优值不是区间中点时的距离,无法应用于计算结构相似度。因此需要对可拓距做进一步改进<sup>[51-52]</sup>。

谭建荣等<sup>[53]</sup>等围绕产品设计知识建模、演化与应用,提出产品设计各个阶段中知识获取、转换、表达、映射、重用、派生、进化的方法和工具,分析了基于定性推理的产品信息符号建模技术以及基于可拓推理的产品设计知识派生技术。目前,可拓推理方法包括可拓关联分析推理<sup>[54]</sup>、基于Petri网的可拓推理<sup>[55]</sup>、物元系统和网模型推理<sup>[56]</sup>等,其所涉及的可拓理论包括可拓关联规则挖掘<sup>[57]</sup>、可拓数据挖掘<sup>[58]</sup>、可拓空间挖掘<sup>[59]</sup>和推理规则生成<sup>[60]</sup>等。可拓推理通过物元之间的关联性和物元属性之间的变化传导性,来推理分析并挖掘出所需的设计知识,当复杂产品需求或者个性化需求“苛刻”时,可通过可拓推理获得设计方案知识,但往往是最相似的产品案例,尚不能满足设计需求,需按照产品设计成本控制、时间约束和设计制约要素等条件,进一步对其零件结构特征进行可拓变换,从而获取产品设计的初始可行方案集。

## 2.4 可拓设计的变换方法

可拓设计中,解决矛盾问题的工具是可拓变换。通过某些变换,可以使不可知问题变为可知问题、不可行问题转化为可行问题。一般将可拓产品设计中的矛盾问题分为两大类,第一类是主观和客观的问题,简称不相容问题,如产品设计中大量的设计需求和设计结构之间的矛盾问题;第二类是主观和主观矛盾问题,简称对立问题,如汽车设计过程中客户期望增大汽车的排量,同时降低其百公里油耗这样一对矛盾问题。不相容问题的求解思路有三种:①目标不变,通过条件变换化解不相容问题;②条件不变,通过目标变换化解不相容问题;③目标和条件同时改变,使不相容问题化解。对于对立问题的求解,关键在于寻求合适的可拓变换,使对立问题转化为共存问题,通过转换桥方法使其对立问题的共存度从不大于0变为大于0。

可拓变换的基本变换方法包括基于基本变换、关联准则和论域的变换三种。目前,可拓变换的对象大多选取论域中的元素即零部件特征,通过相关变换,将元素的关联函数属性值与目标域的值区间进行匹配和回溯,直至满足目标域为止。由于论域

中的元素在激励条件下处于动态性,杨国为<sup>[61-62]</sup>等为此讨论了元素的可变性,但是没有给出元素的可变优先级和变化相应域。近年来,在可拓变换方法研究上有了新的突破,如转换桥方法研究<sup>[63]</sup>、可拓智能体构建<sup>[64]</sup>、可拓学与 TRIZ 理论结合研究<sup>[65]</sup>等新方法层出不穷,其变换的具体对象包括相似模块变换<sup>[66]</sup>、相似实例变换<sup>[67]</sup>、产品变型<sup>[68-69]</sup>等。图 2 所示为基于转换桥方法的对立问题求解流程,即通过构建矛盾问题的可拓模型确定变换对象及目标,建立共存度函数,并进行包括零界的分析与确定<sup>[70]</sup>、可拓集中关联函数进展分析<sup>[71]</sup>、可拓层次分析及权重的确定等在内的系列研究过程<sup>[72]</sup>,最终形成可拓设计对立问题的解决方案。

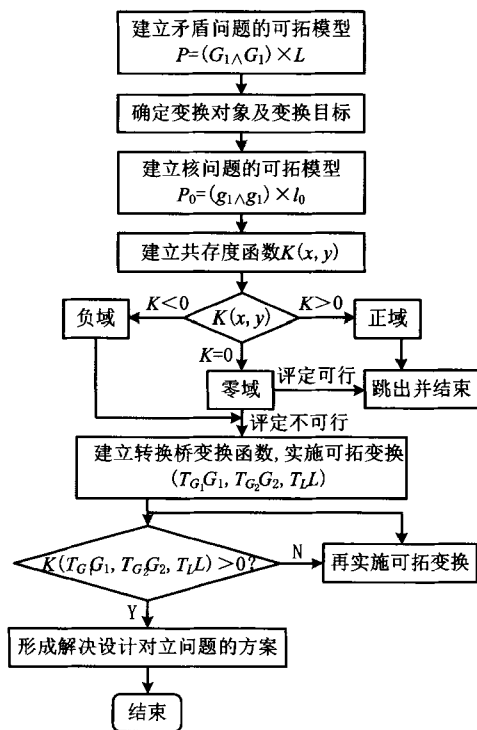


图2 基于转换桥方法的对立问题求解流程

因此,面对设计中的冲突问题,可选择不同类型的可拓求解变换方法获得变换后的新结构,通过定性定量相结合的方法分析新旧结构之间的耦合关系,结合现有规则进行挖掘,比较样本方案与规则之间的传导关系,判断这种传导变换发生的难易程度,最终输出可拓设计初始方案集。

## 2.5 可拓设计的评价与决策方法

产品设计是一个不断对设计知识进行拓展与优化的过程。设计知识评价在产品设计过程中所起的作用不只局限于检验与审核所运用的设计知识,更重要的是建立并完善企业的产品设计知识库,同时

分析与评估各类设计知识的应用情况。可拓设计的评价与决策建立在可拓集合论的基础上,利用条件基元和目标基元,通过关联函数建立事物之间、因素之间关联程度和数量的有机联系并生成可拓策略集,获取多个可选的设计方案,通过可拓综合评判模型最终确定最优解。

可拓设计的评价和决策方法目前已趋完善,相关理论方法包括优度评价方法<sup>[73]</sup>、可拓决策的智能 CAD 理论<sup>[74]</sup>、多维物元关联度评价模型<sup>[75]</sup>、可拓关联度直接计算评价方法<sup>[76]</sup>、改进的多级可拓评价模型<sup>[77]</sup>、决策生成器<sup>[78]</sup>和可拓群决策<sup>[79]</sup>等。

图 3 所示为产品设计知识优度评价信息流。当设计知识库中的产品设计知识被运用到企业的产品设计中时,会被不同设计人员借用与变化,此时会产生新的设计知识,通过设计知识评价与决策来判断这些知识是否可以作为可重用的设计知识,以及是否可以作为以后的设计活动提供参考。基于可拓集合论,可拓设计评价和决策能够利用产品设计物元与事元的可拓性精准而全面地找到设计对象的评价指标,基于关联函数构建因素之间、事物之间关联程度与数量的有机联系,从而比较客观准确地反映对象的实际情况<sup>[80]</sup>。

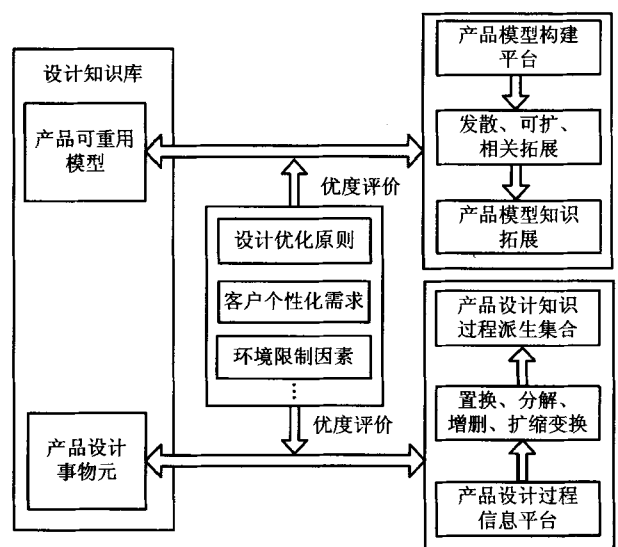


图3 产品设计知识优度评价信息流

## 3 可拓设计方法及其计算机实现

### 3.1 可拓设计方法

结合可拓创新方法与可拓论,可拓设计旨在解决工程设计领域中的矛盾问题,基于不同时期的研究热点,产生了许多具体的可拓设计方法,根据其应

用领域和侧重点,可分为可拓概念设计、可拓配置设计、可拓优化设计、可拓绿色低碳设计和可拓建筑设计等方法。

(1)可拓概念设计 运用可拓学理论、模糊理论和优化技术,分别在概念设计可拓知识表达、分解与综合、优化与求解、推理与评价等方面提出若干新思想、新原理与新方法。

(2)可拓优化设计 针对多目标、非线性、不良结构、不精确设计问题进行优化求解。

(3)可拓配置设计 建立定性定量相结合的产品族设计的可拓模型,揭示客户需求与产品族设计之间的传导规律,实现客户对产品的个性化定制。

(4)可拓绿色、低碳设计 研究绿色属性、低碳需求纳入或凸显情况下产品全生命周期的设计活动,是目前的研究热点。

(5)可拓建筑设计 将思维科学、可拓学、建筑学、创新学等多学科知识交叉融合,利用逆向、菱形、传导、共振等思维模式,在建筑创新设计中进行推广应用,逐步形成基于可拓学的建筑领域创新设计理论方法<sup>[81-83]</sup>。

### 3.2 可拓设计方法的计算机实现

针对复杂产品、建筑景观、系统装备、复杂对象设计中的矛盾、对立和冲突问题,20世纪90年代末在国内开展可拓设计理论与方法的应用研究,研究目标有:形成数字化、智能化、集成化的可拓设计软件产品和应用工具,研究可拓概念设计、可拓配置设计、可拓建筑设计、可拓进化设计、可拓实例推理、可拓优化设计、可拓聚类分析、可拓设计知识挖掘、菱形思维设计、产品族适应性设计和绿色设计冲突问题消解方法等。

将可拓设计与决策科学、人工智能相结合,用计算机进行产品创新设计策略生成和策略评价,即开发可拓策略生成系统(Extension Strategy Generating System, ESGS),以提高设计者的决策水平和机器智能,是产品创新设计策略科学化的必由之路,也是可拓设计方法计算机实现的重要手段。可拓策略生成系统中相关可拓设计软件的开发,旨在利用现代数字化、网络化、智能化技术,处理产品设计过程中的客户个性化需求与产品设计成本、效率和性能之间的矛盾问题,快速输出设计策略,以降低产品的开发成本,缩短产品的开发周期,提高产品的质量,增强企业竞争力。因此,研制相应的可拓设计软件对国民经济中各行业进行科学决策具有实用

价值。

目前,国内各科研院所开发的可拓设计软件系统很多,比较典型的有机电产品可拓配置设计系统、可拓数据挖掘系统、大型水轮机方案设计原型系统、鞋类产品和谐智能计算机辅助概念设计(Computer Aided Conceptual Design, CACD)系统等面向相关行业的应用软件系统。如图4和图5所示为浙江工业大学开发的复杂机电装备可拓配置设计系统,该系统面向机械工程领域,实现了产品设计的可拓实例推理、可拓综合评价、模糊物元优化、设计布局知识与决策等子系统的融合,体现了机械产品可拓概念设计系统的集成。

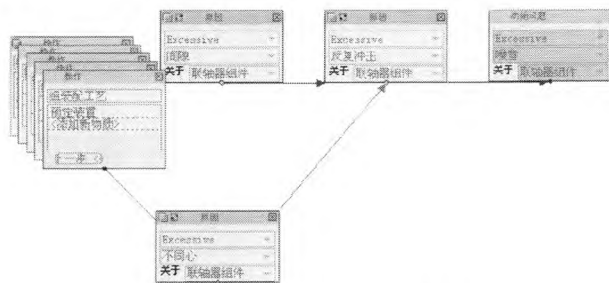


图4 螺杆空压机噪音成因实例推理



图5 螺杆空压机相似实例检索子系统输出

南京航空航天大学机电学院针对复杂机械产品概念设计的创造性、复杂性、推理不确定性等特点,将可拓方法应用于实例适应性修改设计,从智能设计角度对概念设计过程中的需求分析与功能映射、多级实例推理技术、可拓方案评价等关键问题内容作了深入研究,并基于.NET Framework 开发平台研制了大型水轮机方案设计原型系统<sup>[84]</sup>,如图6所示。

哈尔滨工业大学建筑学院将可拓理论应用于建筑设计领域,开展了包括对可拓建筑策划涵义、可拓建筑策划建模、可拓建筑策划应用规则、可拓建筑策



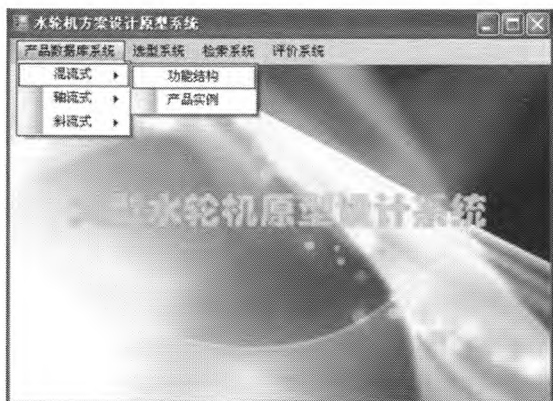


图6 大型水轮机原型设计系统

划策略生成四个部分的研究,力求建立起一套完整且开放的理论体系,并开发出能够反映设计师创造性思维的可拓建筑策划的策略生成软件系统,如图7所示。



图7 可拓建筑策划的策略生成

此外,青岛大学开发的鞋类产品和谐智能 CACD 系统,针对鞋类产品的模型表示、产品概念设计中矛盾冲突解决的模型化方法等计算机辅助产品概念设计的瓶颈问题,以及鞋类产品概念设计知识的获取、组织、表达、集成和使用等关键技术,运用可拓设计理论,提出鞋类产品概念设计的模型化、和谐化、智能化方法和技术,开发了一套鞋类产品和谐智能 CACD 系统,以提高鞋类产品设计 CAD 的智能水平和人机交互的和谐性,缩短鞋类产品的开发周期,降低鞋类产品的设计成本。

综上所述,虽然目前已开发的可拓设计软件较多,但是缺乏商品化、通用性较好的系统,其商品化软件开发过程中主要存在以下问题:

(1)开发工具的差异性问题的可拓设计软件平台开发工具存在较大差异。商品化的软件大多要求提供便捷的用户化修改模块,然而现有的原型系统

开发平台和工具都不尽相同,二次开发性能较差。

(2)软件的规范性问题 规范化的商品软件其文档应该齐备,包括用户手册、运行手册、培训教材、实施指南等都应方便自习者使用,但是现有的可拓设计软件一般都根据相关企业生产实际自行开发,缺乏齐备的文档资料,没有统一的数据接口,数据转换模型缺陷较多,从而影响了快速、高效的产品创新设计。

(3)软件的开放性问题 现有的可拓设计系统软件,其系统的可适应性,如在采用符合工业标准的程序语言、数据库、操作系统和友好的通信界面方面,还有进一步提升的空间。

(4)软件的普适性问题 现有可拓设计原型系统软件一般只能完成特定行业或产品的数据处理和设计决策,适用面窄。

## 4 总结与展望

### 4.1 总结

可拓设计源于理论与实践的结合,继承了可拓学的精髓——变化,与其他设计方法相比,最大区别在于其模型化、形式化以及定性与定量相结合,现在可拓设计在工程应用中日益成熟,推动了可拓学的自我完善。

#### (1)可拓设计中的哲学思想

传统哲学认为,现实世界客观存在的矛盾是事物内部或事物间的一种本质关系。这种关系受到从量变到质变、否定之否定、对立统一三大客观规律的支配,而促进矛盾双方的转化是解决矛盾问题的最佳途径。可拓设计中所强调的“可拓变换”与这种“转化”思想不谋而合,其以形式化模型表达工程设计领域中哲学的基本思想,提供了如何寻找创新设计中矛盾问题转换关系项的相关方法,最后运用可拓策略生成系统加以实现。

#### (2)可拓设计中的基元理论

可拓设计中的基元理论用物元、事元与关系元描述被研究对象,将对象、特征和量值放在一个统一体中加以考虑,运用基元理论,更加全面、形式化地描述物的行为状态、性质以及物间的关系等特征,包括描述一物关于某一特征的数量、范围和程度,以及物元、事元和关系元的可拓性等,为计算机辅助工程领域处理矛盾问题提供了基础理论和基础方法。

#### (3)可拓设计中的可拓推理方法

可拓推理方法可以更好地解决产品设计中的矛

盾问题。设计问题有“多输入、多输出”的特性,需要不断反复、不断匹配才能逐步达到设计最优。可拓设计推理依据事、物和关系元的可拓性,基于可拓分析,产生包括发散、相关、可扩、蕴含等基元拓展推理方法,基于传导变换产生传导推理规则,基于物的共轭性质得到共轭推理规则。这些拓展推理方法、传导推理规则、共轭推理规则等可拓推理方法被应用到专家系统的可拓规则库中,能更好地指导人类灵活解决可拓设计中的矛盾冲突问题。

#### 4.2 展望

目前对可拓设计方法发展的研究尚属于成长期,迫切需要解决的难题包括以下3个方面:

(1)可拓设计知识建模与演化能力有待提高 现代产品设计通常基于知识的设计,如何在新的需求与环境下,运用各种设计知识推动多样化的设计创新,是未来研究的方向。可拓学具有良好的形式化语言描述和建模理论,但是在描述复杂问题时,其复合基元的逻辑运算能力不足,在演化过程中,复合基元在集成和分解时所受约束较多,不仅会降低演化速度,还会使演化效率不高。

(2)多因素耦合冲突消解问题 复杂多变问题中多因素驱动的可拓距构建及其相似度检索机制设定、多维评价关联函数和变化的可拓函数构建、多因素的聚类 and 分类方法等是目前迫切需要解决的难点之一。如机械产品低碳设计中涉及的全生命周期多因素耦合的冲突消解问题,包括产品碳足迹、成本、性能等复杂多变的各设计域、设计因素之间如何进行知识关联、拓展、转换和推理,如何实现低碳设计定性表达与定量求解算法的智能化,尚缺乏严格、可行的研究支持,其多因素耦合冲突消解问题已经成为可拓设计领域进一步成功发展的瓶颈和关键。

(3)商业化的可拓设计软件实现问题 鉴于可拓模型既考虑事物数量关系、还考虑质的特征,又可描述事物的可拓性,利用可拓模型作为策略生成的形式化工具比数学模型更为合理可行,更便于计算机操作,也便于人机结合处理较为复杂的问题。然而,目前所开发的可拓设计软件仅适用于特定的行业或产品,缺乏相对成熟的通用性产品设计决策软件,因此,如何加速研究进程,探索新的研发途径,推出行业内标准化、通用化、开放式商业化软件,使中国在利用计算机进行产品创新设计策略生成方面走在世界的前列,是值得深入研究的课题。

#### 参考文献:

- [1] CHANG H T, CHEN J L. The conflict-problem-solving CAD software integrating TRIZ into eco-innovation[J]. *Advances in Engineering Software*, 2004, 35(8/9): 553-566.
- [2] CHANG H T, CHEN J L. An approach combining extension method with TRIZ for innovative product design[J]. *Journal of Chinese Society of Mechanical Engineers*, 2004, 25(1): 13-22.
- [3] CHEN Zhijun. The research of refrigerator green design conflict resolution based on TRIZ[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009(in Chinese). [陈志军. 基于 TRIZ 的冰箱绿色设计冲突消解方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.]
- [4] GAO Changqing, HUANG Kezheng, WANG Guofeng, et al. From generic solution to specific solution of TRIZ[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(1): 84-87(in Chinese). [高常青, 黄克正, 王国峰, 等. 由 TRIZ 理论的通用解求问题的特殊解[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(1): 84-87.]
- [5] MA Lihui, TAN Runhua. Contradiction discovery and solving method based on TRIZ evolution theory and TOC prerequisite tree[J]. *Journal of Engineering Design*, 2007(3): 20-24(in Chinese). [马力辉, 檀润华. 基于 TRIZ 进化理论和 TOC 必备树的冲突发现与解决方法[J]. *工程设计学报*, 2007(3): 20-24.]
- [6] WONG S T C. Coping with conflict in cooperative knowledge-based systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: System and Humans*, 1997, 27(1): 57-72.
- [7] MARK K. Conflict management as part of an integrated exception handling approach[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 1995, 9(4): 259-267.
- [8] SHENG Buyun, LIN Zhijun, DING Yufeng, et al. Rough set-based conflict resolution case reasoning in collaborative design[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2006, 12(12): 1952-1956(in Chinese). [盛步云, 林志军, 丁毓峰, 等. 基于粗糙集的协同设计冲突消解事例推理技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2006, 12(12): 1952-1956.]
- [9] MENG Xiuli, HAN Xiangdong, CAO Jie. Research case-based conflict resolution system in collaborative design of machine tools[J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2005, 34(10): 109-112(in Chinese). [孟秀丽, 韩向东, 曹杰. 机床协同设计中基于实例的冲突消解[J]. *中国制造业信息化*, 2005, 34(10): 109-112.]
- [10] FENIOSKY P M, WANG Chunyi. Computer-supported collaborative negotiation methodology[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1998, 12(2): 64-81.
- [11] LOTTAZ C, SMITH I F C, ROBERT N Y, et al. Constraint-based support for negotiation in collaborative design[J]. *Journal of Artificial Intelligence in Engineering*, 2000, 14(3): 261-280.
- [12] MENG Xiuli, YI Hong, NI Zhonghua, et al. Research on conflict resolution method based on multi-objective decision-making in collaborative design[J]. *Computer Integrated*

- Manufacturing Systems, 2005, 11(7): 625-629 (in Chinese). [孟秀丽, 易红, 倪中华, 等. 基于多目标决策的协同设计冲突消解方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(7): 625-629.]
- [13] MENG Xiuli, YI Hong, NI Zhonghua. Research on negotiation method of goal conflict in collaborative design based on game theory[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(24): 2190-2194 (in Chinese). [孟秀丽, 易红, 倪中华. 基于对策论的协同设计目标冲突协调方法研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(24): 2190-2194.]
- [14] ZHAO Yanwei, SU Nan. Extension design[M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese). [赵燕伟, 苏楠. 可拓设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [15] HE Bin, CAI Wen. Matter-element propositions and affair-element propositions[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2001, 18(1): 88-94 (in Chinese). [何斌, 蔡文. 物元命题和事元命题[J]. 广东工业大学学报, 2001, 18(1): 88-94.]
- [16] CHEN Wenwei, YANG Chunyan, HUANG Jincai. Extension knowledge and extension knowledge reasoning[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(7): 1094-1096 (in Chinese). [陈文伟, 杨春燕, 黄金才. 可拓知识与可拓知识推理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1094-1096.]
- [17] ZHONG Shisheng, ZHANG Yan. Extension-based knowledge representation and development of knowledge base system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(11): 2184-2190 (in Chinese). [钟诗胜, 张艳. 可拓知识表示及知识库系统的开发[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(11): 2184-2190.]
- [18] MA Hui. Research on the methods of modeling and evolution for product design knowledge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006 (in Chinese). [马辉. 产品设计知识建模与演化关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.]
- [19] CHEN Wenwei. Acquisition of an extensional knowledge chain based on ontology[J]. CaaI Transaction on Intelligent Systems, 2007, 2(6): 68-71 (in Chinese). [陈文伟. 基于本体的可拓知识链获取[J]. 智能系统学报, 2007, 2(6): 68-71.]
- [20] ZHAO Yanwei. A new method for scheme design based on the multilevel rhombus thought models[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(6): 684-686 (in Chinese). [赵燕伟. 基于多级菱形思维模型的方案设计新方法[J]. 中国机械工程, 2000, 11(6): 684-686.]
- [21] ZHAO Yanwei. Research in the method of intelligent conceptual design based on the extension theory[D]. Shanghai: Shanghai University, 2005 (in Chinese). [赵燕伟. 智能化概念设计的可拓方法研究[D]. 上海: 上海大学, 2005.]
- [22] ZHAO Yanwei, SU Nan, ZHOU Peng, et al. Custom-oriented product configuration design by extension theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(7): 1153-1155 (in Chinese). [赵燕伟, 苏楠, 周鹏, 等. 面向定制的产品可拓配置设计方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1153-1155.]
- [23] LIU Xiaoping, QIN Jin. Comparison different knowledge representation in innovation design[J]. Journal of Engineering Graphics, 2006(6): 31-35 (in Chinese). [刘晓平, 秦晋. 创新设计中的物元的知识表示方法[J]. 工程图学学报, 2006(6): 31-35.]
- [24] HONG Yun, QIAN Zhihui, REN Luquan. Extensive model of multi-factor coupling bionics and analysis of coupling elements[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(3): 726-732 (in Chinese). [洪筠, 钱志辉, 任露泉. 多元耦合仿生可拓模型及其耦元分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(3): 726-732.]
- [25] WANG Qiulian. Knowledge reuse during product green design based on extension theory[J]. Science and Technology Management Research, 2010(13): 167-171 (in Chinese). [王秋莲. 基于可拓理论的产品绿色设计知识重用研究[J]. 科技管理研究, 2010(13): 167-171.]
- [26] LIU Zhifeng. Integrated assessment of green product and research on analysis method of fuzzy-matter element [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003 (in Chinese). [刘志峰. 绿色产品综合评价及模糊物元分析方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.]
- [27] SHEN Bin, YAO Min, JIANG Zhiwei, et al. Extension knowledge spaces and extension knowledge grid model (1) [J]. Journal of Circuits and Systems, 2006, 11(4): 131-135 (in Chinese). [沈斌, 姚敏, 江志伟, 等. 可拓知识空间和可拓知识网格模型 (1) [J]. 电路与系统学报, 2006, 11(4): 131-135.]
- [28] JIANG Zhiwei, YAO Min, SHEN Bin, et al. Extension knowledge spaces and extension knowledge grid model (2) [J]. Journal of Circuits and Systems, 2006, 11(4): 136-140 (in Chinese). [江志伟, 姚敏, 沈斌, 等. 可拓知识空间和可拓知识网格模型 (2) [J]. 电路与系统学报, 2006, 11(4): 136-140.]
- [29] SU Nan, ZHAO Yanwei, TANG Huijun, et al. Product family configuration planning based on extension logic[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(10): 1897-1904 (in Chinese). [苏楠, 赵燕伟, 唐辉军, 等. 基于可拓逻辑的产品族可配置规划研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(10): 1897-1904.]
- [30] ZHAO Yanwei, TANG Huijun, SU Nan, et al. Extension-based clustering method: an approach to support adaptable design of the product[C]//Proceedings of International Conference on Manufacturing Science & Engineering. New York, N. Y., USA: ASME, 2007.
- [31] TANG Huijun. Research in the platform of product family design based on extension logic[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2008 (in Chinese). [唐辉军. 基于可拓逻辑的产品族核心平台设计[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008.]



- [32] SHANG Bailin, ZHANG Hengxi. Aviation spares clustering analysis based on extension method[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2002, 32(2): 258-263 (in Chinese). [尚柏林, 张恒喜. 航空备件可拓聚类分析[J]. 数学的实践与认识, 2002, 32(2): 258-263.]
- [33] LI Jiang, ZHONG Shisheng, LIU Jin, et al. Research on modular design methods based on extension theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(5): 641-647 (in Chinese). [李江, 钟诗胜, 刘金, 等. 基于可拓理论的模块化设计方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(5): 641-647.]
- [34] BAI Jing, QIN Xiansheng, ZHANG Shunqi, et al. Product configuration design based on module extension[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(11): 2090-2097 (in Chinese). [白晶, 秦现生, 张顺琦, 等. 基于模块可拓性的产品配置设计[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(11): 2090-2097.]
- [35] GUO Gang, LUO Yu, TANG Huamao, et al. Extension association analysis method for product family configuration[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(9): 47-54 (in Chinese). [郭钢, 罗好, 汤华茂, 等. 面向产品族配置的可拓关联分析方法[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(9): 47-54.]
- [36] SUN Hong'an. On operations of the extension set[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007, 37(11): 180-184 (in Chinese). [孙弘安. 关于可拓集合的运算[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(11): 180-184.]
- [37] LYU Dan, WU Mengda, ZHANG Xuezh. The extension module set operation[J]. Journal of Xiangtan Normal University: Natural Science Edition, 2005, 27(1): 1-2 (in Chinese). [吕丹, 吴孟达, 张学志. 可拓集合的模运算[J]. 湘潭师范学院学报: 自然科学版, 2005, 27(1): 1-2.]
- [38] LI Xiaolin, QIU Weigen. The matrix representation of the extension set operation[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2012, 29(3): 23-27 (in Chinese). [李晓琳, 邱卫根. 可拓集合运算的矩阵表示[J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(3): 23-27.]
- [39] CAO Shaozhong, YANG Guowei, TU Xuyan, et al. Multilayer multidimensional dynamic extension set and its properties[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006, 26(5): 129-135 (in Chinese). [曹少中, 杨国为, 涂序彦, 等. 多层高维动态可拓集合及其性质[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(5): 129-135.]
- [40] CAO Shaozhong, LIU Heping, TU Xuyan. Multilayer multidimensional affair element extension set and its operations[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(6): 641-646 (in Chinese). [曹少中, 刘贺平, 涂序彦. 多层多维事元可拓集及其运算[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(6): 641-646.]
- [41] ZHAO Y W, WANG W L, ZHANG G X. The Rhombus-thinking method and its application in scheme design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2001, 14(2): 156-159.
- [42] ZHAO Y W, ZHANG G X. Conceptual design based on the divergent tree method for tool storage[J]. Advances in Grinding and Abrasive Processes, 2004, 259(2): 772-777.
- [43] ZHAO Yanwei. Study of conceptual design of extension for mechanical products[J]. Engineering Science, 2001, 5(5): 69-73 (in Chinese). [赵燕伟. 机械产品可拓概念设计研究[J]. 中国工程科学, 2001, 5(5): 69-73.]
- [44] ZHAO Yanwei, YANG Chunyan, ZHANG Guoxian. The application of the extension methods in mechanical product conceptual design[J]. Journal of Taiwan University, 2001(1): 11-20 (in Chinese). [赵燕伟, 杨春燕, 张国贤. 可拓方法在机械产品概念设计中的应用[J]. 台湾大学工程学报, 2001(1): 11-20.]
- [45] ZHAO Yanwei, LIU Haisheng, ZHANG Guoxian. A new evolution-reasoning method in conceptual design based on extension theory[J]. Engineering Science, 2003, 5(5): 63-69 (in Chinese). [赵燕伟, 刘海生, 张国贤. 基于可拓学理论的设计方案进化推理方法[J]. 中国工程科学, 2003, 5(5): 63-69.]
- [46] ZHAO Yanwei, JIN Fangshun, WANG Wanliang, et al. Conceptual design of tool storage based on divergence tree method[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2001, 18(1): 11-16 (in Chinese). [赵燕伟, 金方顺, 王万良, 等. 基于发散树思维方法的刀库概念设计[J]. 广东工业大学学报, 2001, 18(1): 11-16.]
- [47] ZHAO Yanwei. Research on case-based reasoning intelligent CAD for designing machining center[J]. Journal of System Simulation, 2000, 12(2): 142-145 (in Chinese). [赵燕伟. 基于事例推理的加工中心模块化设计智能CAD系统研究[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(2): 142-145.]
- [48] WU Jieyu. Intelligent conceptual design research of case extension-based reasoning[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2003 (in Chinese). [吴杰雨. 基于可拓实例推理的智能概念设计研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2003.]
- [49] HU Baoqing, WANG Xiaoli, HE Juanjuan. Extension set and the independent function on intervals[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2000, 17(3): 101-108 (in Chinese). [胡保清, 王孝礼, 何娟娟. 区间上的可拓集合及其关联函数[J]. 广东工业大学学报, 2000, 17(3): 101-108.]
- [50] LI Qiaoxing, LIU Sifeng. The method to construct interval elementary dependent function based on interval distance and side distance[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(7): 1097-1100 (in Chinese). [李桥兴, 刘思峰. 基于区间距和区间侧距的初等关联函数构造[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1097-1100.]
- [51] ZHANG Feng. Product of configuration design based on relationship-matter element reasoning[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2008 (in Chinese). [张峰. 基于关系物元实例推理的产品配置设计方法[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008.]
- [52] GUO Ming. Complex product performance configuration de-

- sign on extension classification knowledge mining[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012 (in Chinese). [郭明. 基于可拓分类知识挖掘的复杂产品性能配置设计[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.]
- [53] TAN Jianrong. Theory, method and technology of modern design of mechanical and electrical products [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009 (in Chinese). [谭建荣. 机电产品现代设计: 理论、方法与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.]
- [54] HUANG Fengli, LIN Jianping, XU Jinhong, et al. The Optimum method on craft parameters of plastic injection based on extensive correlation[J]. China Plastics Industry, 2009, 37(4): 43-48 (in Chinese). [黄凤立, 林建平, 许锦泓, 等. 基于可拓关联的注塑成型工艺参数优化方法[J]. 塑料工业, 2009, 37(4): 43-48.]
- [55] HUANG Hongmei, ZHANG Yun, LUO Bing, et al. Petri net expression of extension reasoning[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(7): 1115-1119 (in Chinese). [黄红梅, 章云, 罗兵, 等. 可拓推理的 Petri 网表示[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1115-1119.]
- [56] YANG Guowei, LU Xinghua, TU Xuyan. AND/OR net model of matter element system for concept design and related extension reasoning [J]. Computer Engineering, 2004, 30(17): 29-31 (in Chinese). [杨国为, 卢兴华, 涂序彦. ICAD 中概念设计的物元系统与或网模及相关可拓推理[J]. 计算机工程, 2004, 30(17): 29-31.]
- [57] ZHAO Sai, CHEN Bingfa, WANG Tichun. Product scheme design based on extension association rule mining[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(11): 1876-1880 (in Chinese). [赵赛, 陈炳发, 王体春. 基于可拓关联规则挖掘的产品方案设计[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(11): 1876-1880.]
- [58] LI Zhong, TU Fanghui, LI Xin, et al. Study on method of extenics data mining based on text files[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2011, 13(2): 24-27 (in Chinese). [李忠, 涂方辉, 李鑫, 等. 基于文本文件的可拓数据挖掘方法研究[J]. 防灾科技学院学报, 2011, 13(2): 24-27.]
- [59] TANG Jiafa, YAO Lingkan, YANG Ming. Extenics spatial data mining and its application[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2003, 23(10): 69-75 (in Chinese). [汤家法, 姚令佩, 杨明. 可拓空间数据挖掘技术及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(10): 69-75.]
- [60] ZHAO Yanwei, SU Nan, ZHOU Peng, et al. Product conceptual design method based on information element; China, ZL200510062040. X [P]. (2006-06-21) [2014-05-02]. <http://www.pss-system.gov.cn/sipublicsearch/search/search/showViewList.shtml> (in Chinese). [赵燕伟, 苏楠, 周鹏, 等. 基于信息物元的产品概念设计方法: 中国, ZL200510062040. X, 2006. 06. 21 [P]. <http://www.pss-system.gov.cn/sipublicsearch/search/search/showViewList.shtml>.]
- [61] YANG Guowei, LU Xinghua, TU Xuyan. AND/OR net model of matter element system for concept design and related extension reasoning[J]. Computer Engineering, 2004, 30(17): 29-31 (in Chinese). [杨国为, 卢兴华, 涂序彦. ICAD 中概念设计的物元系统与或网模及相关可拓推理[J]. 计算机工程, 2004, 30(17): 29-31.]
- [62] HE Bin, ZHANG Yingli. Classification properties of extension set and extension method of information exploitation[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1999, 19(7): 63-68 (in Chinese). [何斌, 张应利. 可拓集合的分类性质和信息开发的可拓方法[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(7): 63-68.]
- [63] CHEN Jian, ZHAO Yanwei, LI Fangyi, et al. Transforming bridge-based conflict resolution for product green design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 132-143 (in Chinese). [陈建, 赵燕伟, 李方义, 等. 基于转换桥方法的产品绿色设计冲突消解[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 132-143.]
- [64] XU Juan, HAN Jianghong, ZHU Ming, et al. Decoupling method for conceptual design of textile machinery[J]. Journal of Textile Research, 2012, 33(3): 129-135 (in Chinese). [徐娟, 韩江洪, 朱明, 等. 纺织机械概念设计的解耦方法[J]. 纺织学报, 2012, 33(3): 129-135.]
- [65] LIU Haisheng, QI Tieli. An extenic-agent based autodesign strategy for mechanical product conceptual design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(6): 221-223 (in Chinese). [刘海生, 齐铁力. 基于可拓智能体的概念设计自动化求解方法[J]. 机械设计与制造, 2010(6): 221-223.]
- [66] YANG Gangjun, YU Suihuai, CHU Jianjie. A new product innovation design method based on extenics model[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(18): 30-33 (in Chinese). [杨刚俊, 余隋怀, 初建杰. 基于可拓学模型的产品创新设计方法[J]. 包装工程, 2011, 32(18): 30-33.]
- [67] QIU Cheng, FENG Junwen, GUO Chunming. Research on comparison between TRIZ and extension theory[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2007, 26(10): 105-107 (in Chinese). [仇成, 冯俊文, 郭春明. TRIZ 与可拓学的比较研究[J]. 工业技术经济, 2007, 26(10): 105-107.]
- [68] GONG Jingzhong, QIU Jing, LI Guoxi, et al. Product configuration design based on extension theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(9): 1700-1709 (in Chinese). [龚京忠, 邱静, 李国喜, 等. 基于可拓理论的产品配置设计[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(9): 1700-1709.]
- [69] WANG Tichun. Knowledge reuse technologies and its application for large scaled hydraulic turbine scheme design[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009 (in Chinese). [王体春. 大型水轮机方案设计中的知识重用技术及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.]
- [70] CHEN Wei. The structure of dependent function and determination of zero boundary on the extenics[J]. Mathematics in

- Practice and Theory, 2009, 39(4): 155-160 (in Chinese). [陈薇. 可拓学中关联函数的构造及零界的确定[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(4): 155-160.]
- [71] YANG Chunyan, CAI Wen. Recent research progress in dependent functions in extension sets[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2012, 29(2): 7-14 (in Chinese). [杨春燕, 蔡文. 可拓集中关联函数的研究进展[J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(2): 7-14.]
- [72] WANG Guiping, JIA Yazhou, ZHOU Guangwen. Evaluation method and application of CNC machine tool's green degree based on Fuzzy-EAHP[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 141-147 (in Chinese). [王桂萍, 贾亚洲, 周广文. 基于模糊可拓层次分析法的数控机床绿色度评价方法及应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 141-147.]
- [73] LI Renwang, PENG Weiping, GU Xinjian, et al. Study on goodness evaluation method in extenics and its application in the variant design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2001, 7(4): 48-51 (in Chinese). [李仁旺, 彭卫平, 顾新建, 等. 可拓学中优度评价方法在变型设计中的应用研究[J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(4): 48-51.]
- [74] WANG Wanliang, ZHAO Yanwei. Research extension decision of mechanical intelligent CAD system[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1998, 18(2): 114-117 (in Chinese). [王万良, 赵燕伟. 探索机械智能CAD的可拓决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(2): 114-117.]
- [75] SHAN Miyuan, LI Guo, CHEN Dan. Multidimensional matter-element relative evaluation for scheme of mass customization product family design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(7): 1146-1152 (in Chinese). [单汨源, 李果, 陈丹. 大规模定制产品族设计方案多维物元关联评价研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(7): 1146-1152.]
- [76] YE Jun. Evaluation method of mechanical design schemes based on extension theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 107-109 (in Chinese). [叶军. 基于可拓理论的机械设计方案评价方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 107-109.]
- [77] HU Baoqing, ZHANG Xuan, LU Zhaoming. Research on assessment of building fire safety by improved extension assessment method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(5): 79-84 (in Chinese). [胡宝清, 张轩, 卢兆明. 可拓评价方法的改进及其应用研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2003, 36(5): 79-84.]
- [78] HOU Hanping. Research on extension conceptual design of agile products for mass customization[J]. Journal of Shaoxing College of Arts and Sciences, 2002, 22(3): 83-87 (in Chinese). [侯汉平. 面向大规模定制敏捷产品可拓概念设计[J]. 绍兴文理学院学报: 自然科学版, 2002, 22(3): 83-87.]
- [79] ZHU Jiajun. Application and methods of uncertain extension group decision-making optimization[D]. Shanghai: Donghua University, 2010 (in Chinese). [朱佳俊. 不确定可拓群决策优化方法与应用[D]. 上海: 东华大学, 2010.]
- [80] ZHAO Y W, ZHANG G X. Study of intelligent conceptual design based on extension case reasoning[C]//Proceedings of International Conference on Manufacturing Automation 2004. Bury St. Edmunds: Professional Engineering, 2004.
- [81] ZOU Guangtian. Innovation of architectural design and extension thinking modes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(7): 1120-1123 (in Chinese). [邹广天. 建筑设计创新与可拓思维模式[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1120-1123.]
- [82] LIU Xiaoguang, ZOU Guangtian. Landscape design and extension theory[J]. Architectural Journal, 2004(9): 8-10 (in Chinese). [刘晓光, 邹广天. 景观设计与可拓学方法[J]. 建筑学报, 2004(9): 8-10.]
- [83] WANG Tao, ZOU Guangtian. Space-element and contradictory problems consisting in design of architectural interior space[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(7): 1139-1143 (in Chinese). [王涛, 邹广天. 空间元与建筑室内空间设计中的矛盾问题[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1139-1143.]
- [84] CHENG Lili. Research and application on multi-level case-based reasoning technology in conceptual design of complex mechanical products[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011 (in Chinese). [承莉莉. 复杂机械产品概念设计中实例推理技术的研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.]

## 作者简介:

赵燕伟(1959—),女,河南郑州人,教授,博士生导师,研究方向:可拓设计理论与方法、数字化设计与制造、产品现代设计方法等, E-mail: zyw@zjut.edu.cn;

周建强(1973—),男,浙江江山人,浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室博士研究生,衢州学院机械工程学院教授,研究方向:数字化产品低碳设计、可拓设计理论与方法;

洪欢欢(1984—),男,浙江宁海人,博士研究生,研究方向:数字化设计与制造、产品现代设计方法;

陈尉刚(1989—),男,浙江临安人,硕士研究生,研究方向:产品现代设计方法;

何路(1990—),男,浙江诸暨人,硕士研究生,研究方向:产品现代设计方法。