

公理化设计框架下产品设计知识重用的关键技术

杨杰^{1*}, 陈雪兆²

(1. 湖南科技学院 计算机与通信工程系, 湖南 永州 425100; 2. 湖南永州职业技术学院 计算机系, 湖南 永州 425100)

(* 通信作者电子邮箱 41206991@qq.com)

摘要: 针对具有层次性、多属性特点的复杂产品设计过程, 对公理化设计框架下的产品设计重用技术进行了研究。通过建立公理化设计框架将复杂产品设计过程进行分解, 形成产品设计的需求域、功能域、结构域与工艺域的 Z 形映射关系, 提出一种基于实例的综合考虑设计域间和域内设计信息的知识重用方法, 采用基于相似度的知识重用检索算法, 获得符合设计要求的最佳重用对象, 并以实例进行了验证。

关键词: 产品设计; 知识重用; 公理化设计; 智能设计; 模型

中图分类号: TP311 **文献标志码:** A

Key technology of knowledge reuse in product design based on axiomatic design

YANG Jie^{1*}, CHEN Xuezhao²

(1. Department of Computer and Communication Engineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou Hunan 425100, China;

2. Computer Science Department, Yongzhou Vocational and Technical College in Hunan, Yongzhou Hunan 425100, China)

Abstract: Due to the multi-hierarchy, multi-attribute process of product design, the key technology of knowledge reuse in product design based on axiomatic design was studied. With the axiomatic design framework, the design process was decomposed, and the Z map of the requirement domain, functional domain, structure domain, process domain of the product design was put forward. Then, a case-based knowledge reuse method with overall consideration of inter-domain and intra-domain design information was presented, which adopted the similarity-based retrieving in knowledge reuse algorithm, and got the best reuse objects. Finally, a case was provided to validate and prove the efficiency and feasibility of the method.

Key words: product design; knowledge reuse; axiomatic design; intelligent design; model

0 引言

在产品设计领域中, 无论是从产品的功能、行为、原理等高层信息, 还是从产品设计结果本身来看, 新产品的的设计往往需要借鉴和重用已有产品的设计实例、设计经验、设计准则等设计知识^[1-2]。随着计算机科学技术的发展, 产品设计在知识重用的认知研究、知识重用的工具集成、知识重用的方法设计等方面的研究越来越多, 并取得了一系列的研究成果^[3-9], 同时, 这些成果的涌现也推动了基于设计知识的智能化设计在复杂产品数字化设计中的发展和应用。但是, 目前知识重用技术的研究还存在一些不足, 具体体现在以下几个方面: 1) 知识重用更多地是表征设计过程中表层设计知识的重用, 而对深层次的设计信息的处理和重用涉及得不够; 2) 目前知识重用技术多是针对设计过程中某一个设计环节进行重用分析, 而忽略了设计过程的整体性以及各设计环节之间的关联关系; 3) 知识重用过程没有一个清晰的设计框架, 在产品设计过程中重用的设计对象可能会增加新产品设计的耦合设计或者冗余设计。为此, 本文通过引入公理化设计理论与方法, 从知识重用的角度对产品设计过程进行设计域的分解与规划, 给出相应的公理化设计框架, 并建立在公理化设计框架下的知识重用模型与算法。

1 产品设计中的公理化设计框架构建

1.1 公理化设计的基本概念

公理化设计是由麻省理工大学 (Massachusetts Institute of

Technology, MIT) 的 Suh 等提出的设计理论^[10-11], 它是以域和设计公理为基础, 对产品创新设计、变型设计以及适应性设计等设计形式提供理论依据和相应的设计判断准则, 而且, 对于复杂产品设计, 它还提供了设计过程分解的框架与形式, 有效地克服了产品设计早期设计目标不够明确的现象, 从而使得复杂产品设计的流程更加清晰^[12-16]。

公理化设计的一个重要概念就是提出了设计域的概念, 它将产品设计域划分为需求域、功能域、结构域和工艺域等四个基本设计域, 通过建立各个设计域间和域内的层级映射关系, 为设计工程师提供基于逻辑和理性的思维方法、模型和工具, 进而改善复杂产品设计开发中的设计活动, 如图 1 所示。为了能够对设计活动进行决策, 公理化设计给出了相应的决策分析方法, 其中最重要的是提出了独立性公理和信息公理等两条设计公理。

1) 独立性公理。独立性公理用来判断产品相邻设计域间的不同设计属性之间的关系, 并且要求各个设计属性能够相互独立地满足设计域内所有的特性要求, 即保证产品设计过程中各个设计域内设计参数的独立性, 从而减少设计过程中的冗余设计和耦合设计。

2) 信息公理。从上层设计域映射获得的下级设计域的设计方案可能并不止一种, 在满足独立性设计公理的前提下, 需要对多种有效映射方案进行优选决策, 而含有最少信息量的设计方案即为最优的设计映射。

收稿日期: 2012-11-13; 修回日期: 2012-12-26。

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (11JJ6065); 湖南省教育厅科研项目 (12C0681)。

作者简介: 杨杰 (1976-), 男 (瑶族), 湖南永州人, 副教授, 硕士, 主要研究方向: 人工智能、数据挖掘; 陈雪兆 (1975-), 女 (土族), 青海民和人, 讲师, 主要研究方向: 计算机网络安全、网络检测。

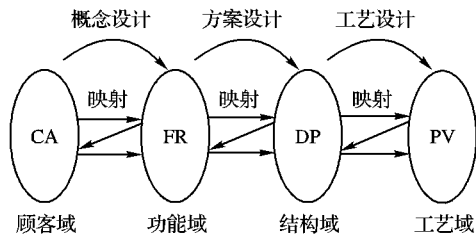


图1 公理化设计的域及其关联

1.2 面向知识重用的产品公理化设计框架

构建面向知识重用的产品公理化设计框架的核心包括两

个方面的内容,一方面是提取不同设计域的设计特征,进行Z型层级分解,获取对应的映射关系或者映射矩阵;另一方面采用相关的设计特征关联判别方法,判断不同设计特征之间的关联性,即保证各个设计特征和其对应的设计参数的独立性。

针对设计域的设计特征提取和映射矩阵构建,首先需要从设计域内总的设计特征提取开始,然后逐层分解设计特征并获得相应的设计参数,形成每一层级的设计特征结构树与相邻设计域间的设计矩阵,直到满足设计分解的要求为止,整个过程是一个逐渐细化的过程,最终形成面向知识重用的产品设计公理化设计框架如图2所示。

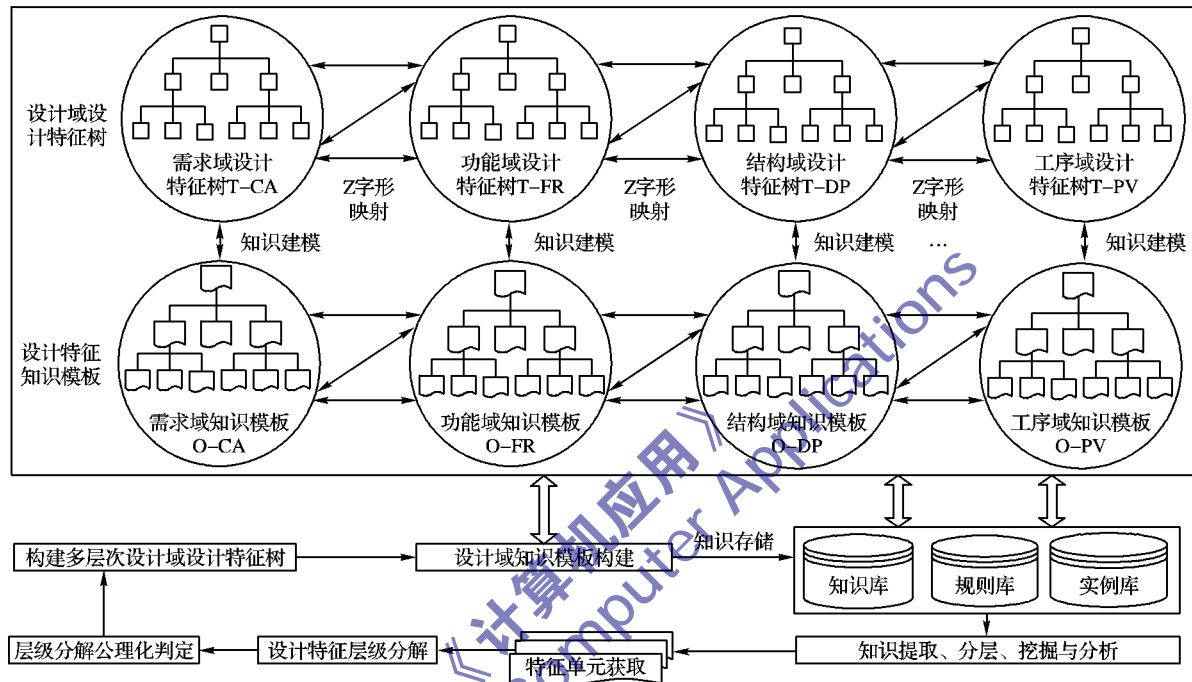


图2 面向知识重用的产品设计公理化设计框架

在面向知识重用的产品设计公理化设计框架中,层级分解公理化判定是其有效分解的关键部分,直接影响到设计重用的有效性。为此,在设计分解的过程中,需要对相邻设计域间有关联的设计特征进行独立性分析,本文运用比率标度的形式,首先以上层级设计域的关联特征 D_i^Δ 为独立性评判准则,并基于层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 获得与此评判准则相关的下层级设计域设计特征 D_j^∇ 的相对相关系数 a_{ij} ,由此获得上层级设计域映射下层级设计域设计特征的综合矩阵 A ;同理,以下层级设计域的关联特征 D_i^∇ 为独立性评判准则,获得与此评判准则相关的上层级设计域设计特征 D_j^Δ 的相对相关系数 b_{ij} ,由此获得下层级设计域映射上层级设计域设计特征的综合矩阵 B ,即

$$A = \begin{bmatrix} D_1^\Delta & D_2^\Delta & \cdots & D_n^\Delta \\ a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{matrix} D_1^\nabla \\ D_2^\nabla \\ \vdots \\ D_n^\nabla \end{matrix} \quad (1)$$

$$B = \begin{bmatrix} D_1^\nabla & D_2^\nabla & \cdots & D_n^\nabla \\ b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \begin{matrix} D_1^\Delta \\ D_2^\Delta \\ \vdots \\ D_n^\Delta \end{matrix} \quad (2)$$

对矩阵 A 和 B 采用几何归一化处理,获得上层级设计域映射下层级设计域设计特征综合独立性系数矩阵 Ω :

$$\Omega = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdots & \varphi_{1n} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdots & \varphi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{n1} & \varphi_{n2} & \cdots & \varphi_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3)$$

其中 $\varphi_{ij} = \frac{\sqrt{a_{ij} \times b_{ji}}}{\sqrt{a_{1j} \times b_{j1}} + \sqrt{a_{2j} \times b_{j2}} + \cdots + \sqrt{a_{nj} \times b_{jn}}}$ 。

根据 Suh 等定义的判定设计独立性的交角性 R 与角相似性 S 的概念,则有:

$$R = \prod_{i=1,2,\dots,n-1, j=1+1,2+i,\dots,n} \left\{ 1 - \left(\sum_{k=1}^n \varphi_{ki} \varphi_{kj} \right)^2 / \left[\left(\sum_{k=1}^n \varphi_{ki}^2 \right) \left(\sum_{k=1}^n \varphi_{kj}^2 \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$S = \prod_{i=1}^n \left(|\varphi_{ii}| / \sqrt{\sum_{k=1}^n \varphi_{ki}^2} \right) \quad (5)$$

若 R 与 S 均能够满足设计领域内关于设计独立性判定的关联度的阈值要求,则说明面向设计重用的公理化设计框架搭构是可行的;否则,需要基于设计域间的映射关系对设计特征进行重新分解或者修改,以使其满足阈值要求。

2 基于公理化设计框架的产品设计知识重用

2.1 知识模型的构建

在知识重用的公理化设计框架下,设计对象的表述一方

面要能够表征出特征属性,另一方面还要表征出设计特征的层级关联,这样才有助于有效地重用设计对象。

定义1 设计对象模型(Design Object Model, DOM)。设计对象是在满足已有设计需求条件下所获得的设计知识。设计对象模型 M_{DOM} 表述如下:

$$M_{DOM} = \{T_D | \Gamma_F(T_D), C_{D1} | V_D(C_{D1}), C_{D2} | V_D(C_{D2}), \dots, C_{Dn} | V_D(C_{Dn})\} \quad (6)$$

其中: T_D 为设计对象父特征节点标识, $\Gamma_F(T_D)$ 为父特征节点是否为根节点的布尔值; C_{Di} 为设计特征属性, $V_D(C_{Di})$ 为设计特征属性值。

定义2 问题对象模型(Problem Object Model, POM)。问题对象是一组设计需求与设计约束的集合,它反映了在公理化设计框架下产品工程语义的设计要求,与问题特征属性相对应。问题对象模型 M_{POM} 表述如下:

$$M_{POM} = \{T_P | \Gamma_F(T_P), C_{P1} | (V_P(C_{P1}), w_{C_{P1}}, \Gamma_P(C_{P1})), C_{P2} | (V_P(C_{P2}), w_{C_{P2}}, \Gamma_P(C_{P2})), \dots, C_{Pn} | (V_P(C_{Pn}), w_{C_{Pn}}, \Gamma_P(C_{Pn}))\} \quad (7)$$

其中: T_P 为问题对象父特征节点标识, $\Gamma_F(T_P)$ 为父特征节点是否为根节点的布尔值; C_{Pi} 为设计特征属性, $V_P(C_{Pi})$ 为需求特征属性值, $w_{C_{Pi}}$ 为需求特征符合要求的相关值,此处取相对于设计目标的重要度即权重, $\Gamma_P(C_{Pi})$ 为问题对象中的设计特征符合设计要求的属性匹配布尔值。

2.2 设计重用对象的检索

通过公理化设计框架的层级映射关系,要想获得设计重用对象,获得与设计目标最为相近的设计对象,在子级设计特征获得的过程中需要考虑特征父级标识匹配、特征属性匹配、匹配属性间的相关值以及匹配属性间的相似值,为此建立设计重用对象的数学模型为:

$$R_{DP} = [M_{DOM}, M_{POM}, \Psi(M_{POM} \rightarrow M_{DOM})] \quad (8)$$

其中 $\Psi(M_{POM} \rightarrow M_{DOM})$ 为 M_{POM} 与 M_{DOM} 间的关联函数。

$$\Psi(M_{POM} \rightarrow M_{DOM}) = \varphi(M_{POM} \rightarrow M_{DOM}) \times \rho(M_{POM} \rightarrow M_{DOM}) \times \sigma(M_{POM} \rightarrow M_{DOM}) \times \lambda(M_{POM} \rightarrow M_{DOM}) \quad (9)$$

$\varphi(M_{POM} \rightarrow M_{DOM})$ 为 M_{POM} 与 M_{DOM} 之间的父级特征匹配函数,定义为

$$\varphi: M_{POM} \times M_{DOM} \rightarrow \Gamma_{\varphi_F}(T_P) \quad (10)$$

其中 $\Gamma_{\varphi_F}(T_P)$ 表示符合要求的父级特征匹配布尔值。

$\rho(M_{POM} \rightarrow M_{DOM})$ 为 M_{POM} 与 M_{DOM} 之间的特征匹配函数,定义为

$$\rho: M_{POM} \times M_{DOM} \rightarrow \Gamma_{\rho_P}(C_P) \quad (11)$$

其中 $\Gamma_{\rho_P}(C_P)$ 表示符合要求的特征匹配布尔值。

$\sigma(M_{POM} \rightarrow M_{DOM})$ 为 M_{POM} 与 M_{DOM} 间的相关函数,用来描述 M_{DOM} 与设计问题的相关度,定义为

$$\sigma: M_{POM} \times M_{DOM} \rightarrow \Gamma_{\sigma_P}(C_P) \quad (12)$$

其中 $\Gamma_{\sigma_P}(C_P)$ 表示符合设计要求的相关值,此处取 M_{DOM} 相对于设计问题对象 M_{POM} 的重要度即权重 w_{C_P} 作为二者之间的相关值。

$\lambda(M_{POM} \rightarrow M_{DOM})$ 为 M_{POM} 与 M_{DOM} 间的相似函数,用来描述二者之间的相似程度,定义为

$$\lambda: M_{POM} \times M_{DOM} \rightarrow \Gamma_{\lambda_P}(C_P) \quad (13)$$

其中 $\Gamma_{\lambda_P}(C_P)$ 表示符合要求的相似值,这里采用灰色关联分析处理方法建立其表达式,假设第 r 个子级设计对象 M_{DOM} 关于第 i 个设计特征与所匹配的设计问题对象 M_{POM} 第 i 个设计需求特征的相似系数为:

$$\lambda_r(c_{M_{DOM-i}}, c_{M_{POM-i}}) = \frac{\min_r \min_i |v_{M_{POM-i}} - v_{M_{DOM-i}}| + \beta \max_r \max_i |v_{M_{POM-i}} - v_{M_{DOM-i}}|}{|v_{M_{POM-i}} - v_{M_{DOM-i}}| + \beta \max_r \max_i |v_{M_{POM-i}} - v_{M_{DOM-i}}|} \quad (14)$$

其中: $v_{M_{POM-i}}, v_{M_{DOM-i}}$ 均为规范化后的设计特征值; β 为分辨系数,一般取为 0.5。

则 M_{POM} 与 M_{DOM} 关于所有设计特征的关联度为:

$$\Psi(M_{POM} \rightarrow M_{DOM}) = \sum_{i=1}^n (\Gamma_{\varphi_F}(T_{Pi}) \times \Gamma_{\rho_P}(C_{Pi}) \times \Gamma_{\sigma_P}(C_{Pi}) \times \Gamma_{\lambda_P}(C_{Pi})) \quad (15)$$

2.3 基于公理化设计框架的知识重用模型与算法

在产品公理化设计框架下,集中体现了产品设计过程中设计需求与设计过程之间的潜在的关联,通过建立设计特征的层级映射关系,获得新设计所需的设计参数,并基于层级设计特征构建相应的知识库,即在公理化设计框架下分别构建各个设计域内的层级结构特征树,其中树的节点即为设计域内的不同设计特征,凡能表征设计对象的性质、状态、功能等征象的都是设计对象的特征,然后基于各个设计域间的层级映射关系,获得知识库构建的设计域结构模板,从而建立功能特性、结构设计参数和设计对象层级关联的知识库,并且功能特性和结构设计参数均是知识库索引的有效组成部分;然后搜索知识库计算问题对象与设计对象间的关联度,获得最为相似的设计重用对象,从而为产品数字化快速设计提供支持。图3给出了公理化设计框架下产品设计知识重用的过程模型。

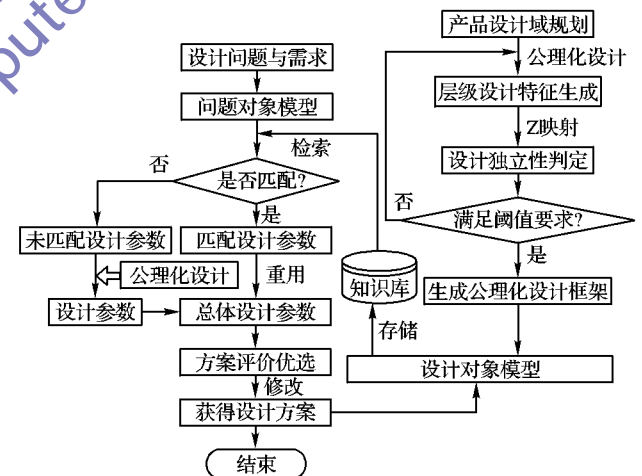


图3 公理化设计框架下产品设计知识重用的过程模型

综上所述,公理化设计框架下产品设计知识重用实施的具体步骤如下:

- 1) 在产品设计领域内,基于公理化设计理论对产品设计过程进行规划,生成相应的设计域;
- 2) 针对不同的设计域进行知识提取与分析,获得相应的层级设计特征,并建立相邻域间层级设计特征的映射关系;
- 3) 基于式(1)~(5)对分解的层级设计特征进行独立性分析,若满足设计独立性判定的关联度的阈值要求,则执行下一步,否则需要重新进行设计特征的层级分解;
- 4) 获得设计特征的层级结构树,并基于式(6)进行层级设计特征的知识建模,获得对应的知识模板,构建相应的知识库;
- 5) 基于式(7)获得问题设计对象的知识模型、基于知识库中的设计特征层级映射关系检索知识库;
- 6) 基于式(8)~(14)计算问题对象与设计对象之间的关

联度,获取最为相似的设计对象,将其应用到新产品的设计中;

7) 利用设计领域知识对设计对象进行改进与修改,并对改进的设计方案进行评价与优选,获取最优设计方案;

8) 将新设计对象存储到基于公理化设计框架的知识库中,为下次设计做准备,结束。

3 应用实例

以某水力产品设计装置为例,对基于公理化设计框架的

某型式结构下水力产品引水装置

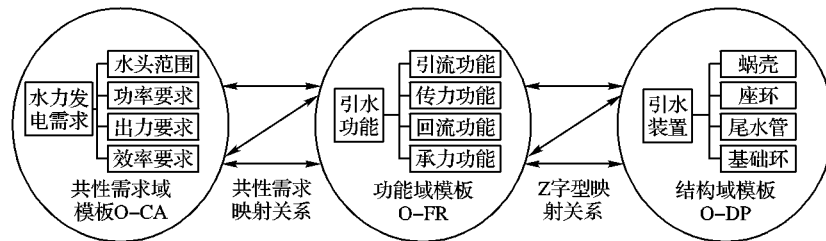


图4 水力产品引水装置的公理化设计框架

基于引水装置的公理化设计框架,构建各设计域间的映射矩阵 M :

$$M = M_{CA \rightarrow FR} \otimes M_{FR \rightarrow DP} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中: $M_{CA \rightarrow FR}$ 为引水装置的需求域与功能域间的子映射矩阵, $M_{FR \rightarrow DP}$ 为引水装置的功能域与结构域间的子映射矩阵。可以看出,功能域中的引流功能、回流功能与结构域中的蜗壳、尾水管具有关联作用,为此需进行独立性判定。

基于领域经验,对关联设计特征进行比率标度分析,分别获得以功能特征为判定准则和以结构特征为判定准则的比率标度值,具体数据见表1、表2。

表1 以功能特征为判定准则的比率标度值

结构特性	引流功能		回流功能	
	蜗壳	尾水管	蜗壳	尾水管
蜗壳	1	9	1	1/9
尾水管	1/9	1	9	1

表2 以结构特征为判定准则的比率标度值

功能特性	蜗壳		尾水管	
	引流功能	回流功能	引流功能	回流功能
引流功能	1	9	1	1/8
回流功能	1/9	1	8	1

基于式(1)~(5)获得设计独立性判定的交角性 R 与角相似性 S : $R = 0.892$, $S = 0.946$ 。

基于领域设计经验可知,该水力产品装置设计由于内部水流运动的复杂性和设计理论的不完善性,其设计过程需要基于相似设计理论进行,在新产品的设计过程中不可避免地要重用已有典型设计结构和型式,这个过程中可能会有部分的冗余设计或者耦合设计,所以经过分析和专家调查,设定其独立性判定阈值为0.800时即可认为框架的建立是可信的,可以看出有交角性 $R = 0.892 \geq 0.800$,同时角相似性 $S = 0.946 \geq 0.800$,两者均满足独立性判定阈值要求,因此上述公理化设计框架的建立是有效的,由此可以搭构该公理化设

计框架下相应的知识库。图5给出了公理化设计框架实现的部分界面。



图5 产品公理化设计框架支持系统实现

当有新的产品设计时检索知识库,基于式(8)、(9)建立设计重用对象的数学模型,并分别基于式(10)~(12)获得目标设计参数与设计对象间的父级特征匹配值、同级特征匹配值和相关系数,同时,利用式(13)、(14)获得目标设计特征属性与设计对象特征属性间的相似系数,利用式(15)获得设计目标与设计对象的综合关联度值,并将符合设计阈值要求的设计对象重用到新产品的设计中;同时,根据产品领域设计知识修改重用的设计对象的设计参数,并把修改后的设计参数应用到新产品的方案设计中,获得新产品设计方案的总体设计参数,对产品设计参数进行综合决策与优选,完成该水力产品引水装置的方案设计。限于篇幅,本文对此不再进行展开说明。

4 结语

本文搭构了面向知识重用的产品公理化设计框架,并建立了基于该框架的设计重用对象的数学模型,提出了公理化设计框架下产品设计知识重用的过程模型。产品公理化设计框架的构建,一方面使得复杂产品设计过程的重用更加清晰,减少了设计重用过程中的冗余设计与耦合设计;另一方面不仅能够重用已有产品设计的表层知识,同时能够处理设计过程中隐含的关联与映射关系,使得设计重用更具有整体性,从而能够有效地提高新产品的设计效率和设计质量。

(下转第1312页)

4 结语

本文针对粒子群优化算法早熟收敛和收敛速度慢等问题,受人工蜂群算法的启发,对标准粒子群优化算法增加局部搜索能力,并能在粒子陷入局部最优时及时跳出极值点,从而既克服了早熟现象,同时提高了算法的收敛速度。对8个函数的寻优结果表明,FAPSO在单峰函数和多峰函数上均表现出良好的性能,与标准PSO及其他改进的粒子群优化算法相比有了较大的改善。 t 检验结果也表明该算法有明显优势。此外,FAPSO算法还有比较大的改进空间,如算法中的分群规则、变异方式及学习策略等;同时还可在此基础上作进一步的改进,如增加某些新改进算法的内容等。因此,FAPSO算法还有较大的研究空间,这也是该算法今后研究的内容。

参考文献:

- [1] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE, 1995, 4: 1942-1948.
- [2] 刘丽军,蔡金铤.基于自适应强引导粒子群算法的电力系统无功优化[J].电工电能新技术,2012,31(4):24-28.
- [3] 王勇.基于混沌粒子群的神经网络主汽温控制系统[J].计算机仿真,2012,29(8):322-325.
- [4] 李鹏,马红梅,张旭珍.基于粒子群优化算法的模拟滤波器设计[J].计算机工程,2011,37(13):246-250.
- [5] 吴晓军,杨战中,赵明.均匀粒子群搜索算法[J].电子学报,2011,39(6):1261-1266.
- [6] 陈伟,周嶙,孙俊,等.一种采用完全学习策略的两子行为粒子群优化算法[J].控制与决策,2012,27(5):719-730.
- [7] 刘黎黎,李国家,汪定伟.动态环境下带有非线性效益的复合粒子群优化算法[J].控制理论与应用,2012,29(10):1253-1262.
- [8] KARABOGA D, BASTURK B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3):459-471.
- [9] BAO L, ZENG J C. Comparison and analysis of the selection in artificial bee colony algorithm [C]// Proceeding of the 9th International Conference on Hybrid Intelligent Systems. Washington, DC: IEEE

Computer Society, 2009:411-416.

- [10] LIANG J J, QIN A K, SUGANTHAN P N, *et al.* Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3):281-295.
- [11] SUGANTHAN P N, HANSEN N, LIANG J J, *et al.* Problem definitions and evaluation criteria for the CEC2005 special session on realparameter optimization, KanGAL Report Number 2005005[R/OL]. [2012-10-01]. <http://bschw.googlecode.com/svn-history/r599/trunk/EvalCompu/Tech-Report-May-30-05.pdf>.
- [12] JIAO B, LIAN Z G, GU X S. A dynamic inertia weight particle swarm optimization algorithm[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2008, 37(3):698-705.
- [13] RATNAWEERA A, HALGAMUGE S, WATSON H C. Self organizing hierarchical particle swarm optimizer with time varying acceleration coefficients[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3):240-255.
- [14] SHI Y, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer [C]// The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence. Piscataway: IEEE Press, 1998:69-73.
- [15] KENNEDY J, MENDES R. Population structure and particle swarm performance [C] // Proceeding of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002:1671-1676.
- [16] MENDES R, KENNEDY J, NEVES J. The fully informed particle swarm: Simpler maybe better[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3):204-210.
- [17] LIANG J J, QIN A K, SUGANTHAN P N, *et al.* Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3):281-295.
- [18] GONG W Y, CAI Z H, CHARLES X, *et al.* Enhanced differential evolution with adaptive strategies for numerical optimization[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2011, 41(2):397-413.

(上接第1297页)

参考文献:

- [1] 蔡文沁,彭培林,姜寿山.航空产品设计知识的表示与重用技术研究[J].计算机集成制造系统,2004,10(1):55-58.
- [2] 殷国富,干静,胡晓兵,等.面向信息时代的机械产品现代设计理论与方法研究进展[J].四川大学学报:工程科学版,2006,38(5):38-47.
- [3] WU M-C, LO Y-F, HSU S-H. A fuzzy CBR technique for generating product ideas[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(1):530-540.
- [4] DURAN O, AGUILO J. Computer-aided machine-tool selection based on a fuzzy-AHP approach[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(3):1787-1794.
- [5] ROSS S, FANG L P, HIPEL K W. A case-based reasoning system for conflict resolution: design and implementation[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2002, 15(3/4):369-383.
- [6] 沈斌,官大.产品设计知识重用研究[J].计算机工程,2006,32(18):186-210.
- [7] HUNTER R, VIZAN A, PEREZ J, *et al.* Knowledge model as an integral way to reuse the knowledge for fixture design process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164(15):1510-

1518.

- [8] COSTA C A. Product range models supporting design knowledge reuse[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215(3):323-337.
- [9] 罗仕鉴,朱上上,孙守迁,等.基于集成化知识的产品概念设计技术研究[J].计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(3):261-266.
- [10] SUH N P. Axiomatic design advances and applications[M]. New York: Oxford University Press, 2000.
- [11] MELVIN J W, SUH N P. Simulation within the axiomatic design framework[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2002, 51(1):107-110.
- [12] 唐敦兵,钱晓明,王晓勇,等.基于公理化设计矩阵与设计结构矩阵同步演化的产品设计[J].计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(4):541-544.
- [13] HEO G Y, LEE S K. Design evaluation of emergency core cooling systems using axiomatic design[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(1):38-46.
- [14] 宋慧军,林志航.基于域结构模板的机械产品概念设计方案生成[J].机械工程学报,2001,37(9):24-29.
- [15] 于学军,罗振璧,朱立强.公理设计中确定交互作用程度的方法[J].机械工程学报,2007,43(4):39-43.