

基于知识重用的复杂产品可拓方案设计模型

王体春^{1,2} 黄翔¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016;

2. 南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京, 210016)

摘要:大型复杂产品方案设计是一个多层次、多属性和创造性的配置过程, 往往需要大量借鉴以往的设计方案。对方案设计过程中的多类型知识进行合理的建模与重用可以有效地支持方案设计的顺利实施。通过基元对设计过程中的各种类型知识进行基元建模, 建立了基于基元模型的方案设计可拓集合, 研究了基于知识重用的可拓方案设计问题, 给出了知识可拓重用策略, 提出了知识可拓重用推理模型, 建立了基于知识重用的可拓方案设计模型。最后, 通过实例验证了模型的有效性和可操作性。

关键词:知识重用; 方案设计; 可拓理论; 智能设计

中图分类号: C934; TV741

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)04-0548-05

Complex Mechanism Extension Scheme Design Model Based on Knowledge Reuse

Wang Tichun^{1,2}, Huang Xiang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Due to the complication, multi-hierarchy, multi-attribute and creative process of the complex mechanism scheme design, the design cases of the history scheme is always reused in new scheme design. Reasonably organizing and reusing design knowledge is helpful to supporting the new scheme design. The design knowledge is described with the basic element, and then, the basic element extension set is put forward. The extension scheme design based on knowledge reuse is studied and the corresponding knowledge extension reuse strategies are given. Then, the reasoning model of knowledge extension reuse is presented and the extension scheme design model based on knowledge reuse is achieved. Finally, an example is provided to examine the models and the algorithms.

Key words: knowledge reuse; scheme design; extension theory; intelligent design

航空航天、发电装备等大型复杂产品方案设计过程中蕴涵有大量的、复杂的设计信息、设计规则、设计方法和设计经验等设计知识, 特别是对于具有多设计域的该类型产品设计而言, 由于多具有单件、小批、大成套的生产模式, 在新产品方案设计中

往往需要借鉴或者重用已有的相似设计方案。因此, 归纳、总结已有设计方案中的多类型设计知识, 进行形式化和模型化的知识建模, 选取合理地存储、推理和重用模式, 把以往的设计知识有效地应用到新产品方案设计中将是十分有工程应用价值

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51005114)资助项目; 江苏省高校优势学科建设工程资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金(56XAA12060)资助项目; 中国博士后科学基金(20100471334)资助项目。

收稿日期: 2011-09-27; **修订日期:** 2011-11-18

通讯作者: 王体春, 男, 副教授, 1981年8月出生, E-mail: wangtichun2010@nuaa.edu.cn。

的^[1-2]。近年来,国内外已有许多学者对此进行了研究,并取得了相应的研究成果^[3-6],但是,知识重用技术在复杂产品设计应用中还存在一些不足,包括知识重用表达模型不够形式化和模型化、知识重用推理过程无法有效解决设计的矛盾问题与不相容问题、知识重用多偏重于表层知识的处理而无法有效地重用设计过程中的深层知识、适应性设计能力不足等方面,从而限制了知识重用技术在复杂产品设计中的应用。针对这种情况,目前已有一些学者基于可拓理论进行了相关的研究,并取得了不错的成果^[7-10]。本文在上述研究的基础上,针对方案设计过程中的可拓推理和重用等内容进行研究。

1 基于知识重用的可拓方案设计模型

1.1 方案设计基元模型与基元可拓集

基元作为可拓理论的逻辑细胞,基元概念从定性和定量的角度把质与量、动作与关系的相应特征分别统一在一个由对象 Γ 、特征 c 及 Γ 关于 c 的量值 v 构成的有序三元组 $\mathbf{J}=(\Gamma, c, v)$ 中,可以形式化描述物、事与关系,为人们认识现实世界、解决现实世界中的矛盾提供了一种新的方法论体系^[11]。为了便于有效地可拓重用设计方案中各种类型知识,解决方案可拓设计过程中的矛盾问题以及提高产品数字化设计的适应性,本文采用基元对多类型知识进行统一描述,形成形式化和模型化的知识模型。

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \Gamma & C_1 & \langle V_1^L, V_1^R \rangle \\ & C_2 & \langle V_2^L, V_2^R \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle V_n^L, V_n^R \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n 为基元的特征数; V_i^L, V_i^R 表示具有不确定性设计信息的特征 C_i 的极限量值。特别地,若 $V_i^L=V_i^R$,则特征 C_i 的量值为精确点值设计信息。

设计知识基元模型的建立构建了方案可拓设计的基本知识单元,由此生成基元的基本可拓集。然而,由于复杂产品方案设计过程的复杂性,往往基本可拓集合中的基元不能够较好地满足设计要求,需要在已有的设计基础上进行拓展才能满足。为此,需要基于可拓理论进行发散、蕴含、相关、可扩等可拓变换获得可拓变换基元集,生成设计知识更为丰富的基元可拓重用集。基元可拓集统一表述如下

$$\begin{aligned} S_{\mathbf{J}(T)} &= \{(\mathbf{J}, Y, Y') \mid \mathbf{J} \in T_{W_j} W_{\mathbf{J}}, \\ Y &= K(\mathbf{J}) = k(x) \in (-\infty, +\infty), \\ Y' &= T_K K(T_{\mathbf{J}} \mathbf{J}) = T_k k(x') \in (-\infty, +\infty), \\ x' &= c_0(T_{\mathbf{J}} \mathbf{J}) \} \end{aligned} \quad (2)$$

1.2 方案设计知识可拓重用策略

方案可拓设计的顺利实施在于设计过程中可拓推理的有效执行,从而达到设计知识的有效可拓重用。为了能够解决可拓推理过程中的矛盾问题,需要给出相应的可拓推理与可拓重用策略框架,如图1所示。

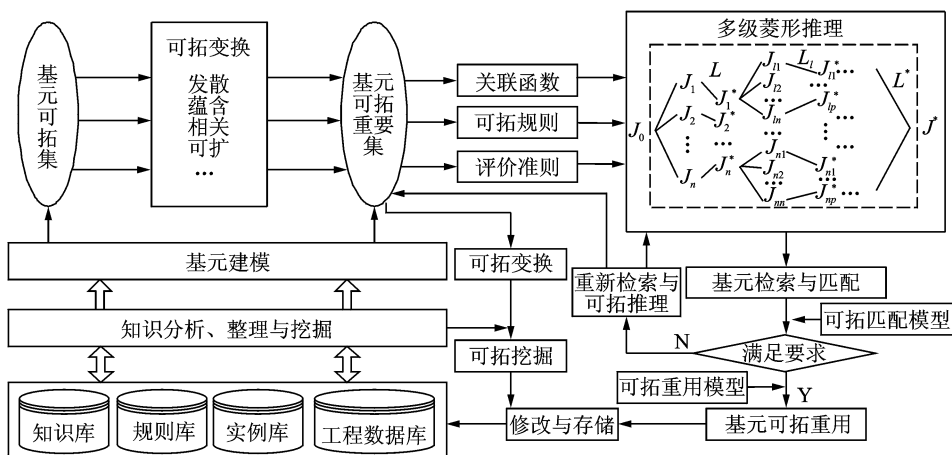


图1 方案设计可拓推理与可拓重用策略框架

基元建模搭构了基元集合与知识库的纽带,并将设计知识转化为计算机能够识别的知识表示模型存入知识库,通过可拓变换并应用关联函数、可拓规则、评价准则等方法,采用发散-收敛的多级菱形思维策略进行可拓推理,通过基元匹配算法与模型获得最优设计对象,并重用到新方案设计中。

1.3 基于可拓关联函数的知识重用推理模型

在实际的产品方案设计应用中,设计需求既有定量需求也有定性需求,定量需求有可能具有模糊性,且往往以区间的形式给出设计要求,而定性需求则较多采用模糊数表示。为此,本文采用基于关联函数的方法来进行知识可拓推理。假设具有 n 个

需求特征的需求对象基元模型为 $J_0 = (\Gamma_0, C_0, V_0)$, 为了表述具有一般性, 这里认为设计需求特征值 V_0 具有区间套的性质, 即需求特征值具有可行域 $X = [X^L, X^R]$ 与优度域 $X_0 = [X_0^L, X_0^R]$, 且满足 $X_0 \subseteq X$, 当可行域与优度域重合时即是经典的区间数值分析, 特别地, 若 $X^L = X^R$, 则为精确点值分析。与其具有相同特征的历史设计对象基元模型为 $J_i = (\Gamma_i, C_i, V_i)$, $1 \leq i \leq m$, 则设计对象基元 $J(i)$ 与需求对象基元 J_0 关于共同特征 c_j 的距 $\rho(V_{ij}, X)$ 为

$$\rho(V_{ij}, X) = |v_i(j) - (v_j^L + v_j^R)/2| - (v_j^R - v_j^L)/2 \quad (3)$$

则设计对象基元 $J(i)$ 与需求对象基元 J_0 关于共同特征 c_j 的关联函数

$$K_i(j) = \begin{cases} \rho(v_i(j), X_{0i}) / (\rho(v_i(j), X_i) - \rho(v_i(j), X_{0i})) & v_i(j) \notin X_{0i} \\ \rho(v_i(j), X_{0i}) / (\rho(v_i(j), X_i) - \rho(v_i(j), X_{0i})) + X_{0i}^L - X_{0i}^R & v_i(j) \in X_{0i} \vee (\rho(v_i(j), X_i) = \rho(v_i(j), X_{0i})) \end{cases} \quad (4)$$

由于不同特征可能具有不同的量纲, 为便于可拓推理需进行规范化处理, 规范后的关联函数

$$k_{ij} = \begin{cases} K_i(j) / \max_{x \in X_0} K_i(x) & K_i(j) > 0 \\ 0 & K_i(j) = 0 \\ K_i(j) / \max_{x \in X_0} |K_i(x)| & K_i(j) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

则设计对象基元 $J(i)$ 基于需求对象基元 J_0 的可拓重用度为

$$\Psi(J(i)) = W * K(J(i)) =$$

$$(W_1, W_2, \dots, W_n) [k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}]^T = \sum_{j=1}^n (W_j * k_{ij}) \quad (6)$$

式中: W_j 为第 j 个共同特征的权重, 且满足 $W_1 + W_2 + \dots + W_n = 1$ 。

1.4 可拓方案设计重用模型构建

结合复杂方案设计可拓推理与可拓重用策略框架, 通过采用基于可拓关联函数的方法来进行知识可拓推理算法实现与模型建立, 进而可以实现基元可拓重用, 构建出可拓方案设计重用模型, 具体实施步骤如下:

步骤1 针对产品设计方案进行该设计领域内设计知识归纳、分析与整理, 根据领域设计知识的类型生成相应的形式化与模型化的基元模型 J ;

步骤2 根据新产品方案设计需求, 提取需求对象特征及其映射关系, 建立相应需求对象基元

模型 J_0 ;

步骤3 基于已建立的设计对象基元生成相应的基元可拓集, 结合需求分析进行基元可拓变换, 生成内容更丰富的基元可拓重用集, 并构建相应的知识库、规则库等;

步骤4 采用关联函数、可拓规则、评价准则等多种方法相结合进行多级菱形可拓推理分析, 基于式(3)计算设计对象基元 $J(i)$ 与需求对象基元 J_0 关于共同特征 c_j 的距 $\rho(V_{ij}, X)$, 并基于式(4)获得该共同特征 c_j 的可拓关联函数;

步骤5 基于式(5)对具有不同量纲的各共同特征的可拓关联函数距进行规范化处理;

步骤6 基于式(6)获得设计对象基元 $J(i)$ 基于需求对象基元 J_0 的可拓重用度 $\Psi(J(i))$;

步骤7 根据可拓理论采用择近原则, 可知 $\Psi_0 = \min(\Psi(J(1)), \Psi(J(2)), \dots, \Psi(J(m)))$ 为最佳重用设计对象, 进行相应的修改并重用到新产品方案设计中, 优选设计方案, 得到最佳设计方案;

步骤8 检查新产品设计方案是否满足设计要求, 若满足, 提取新产品方案设计相关设计信息, 构建相对应的设计知识基元模型存入知识库中, 可拓重用结束; 否则, 则需重新设计。

2 验证实例

大型水轮机方案设计是一个复杂的、多层次、多属性和创造性的复杂产品设计配置过程, 蕴涵有大量的、复杂的设计规则、设计经验、设计信息等设计知识, 因此, 大型水轮机方案设计配置过程又是一个继承与重用设计知识的过程。以某大型发电装备水轮机转轮方案设计为例进行详细分析, 将能很好地验证本文提出的相关模型与算法。根据某水电站设计需求参数建立设计需求对象基元模型

$$J_0 = \begin{bmatrix} \text{Turb0} & \text{最大水头/m} & 121.2 \sim 122.7 \\ & \text{最小水头/m} & 80.5 \sim 80.9 \\ & \text{额定水头/m} & 102.8 \sim 103.2 \\ & \text{额定水头/MW} & \geq 300 \\ & \text{效率/\%} & \geq 92 \end{bmatrix}$$

基于共同的基元特征, 从与基元可拓集相对应的已有设计实例库中获得相应的水电站设计对象基元模型

$$J(1) = \begin{bmatrix} \text{Turb1} & \text{最大水头/m} & 143.0 \\ & \text{最小水头/m} & 111.0 \\ & \text{额定水头/m} & 83.0 \\ & \text{额定出力/MW} & 310.0 \end{bmatrix}$$

$$J(2) = \begin{bmatrix} \text{Turb2} & \text{最大水头 /m} & 141.0 \\ & \text{最小水头 /m} & 112.0 \\ & \text{额定水头 /m} & 68.0 \\ & \text{额定出力 /MW} & 306.0 \end{bmatrix}$$

$$J(3) = \begin{bmatrix} \text{Turb3} & \text{最大水头 /m} & 109.5 \\ & \text{最小水头 /m} & 80.0 \\ & \text{额定水头 /m} & 62.1 \\ & \text{额定出力 /MW} & 248.0 \end{bmatrix}$$

根据大型水轮机领域设计知识可知,在水轮机方案设计中水头设计需求的可行域即是设计对象的优度域,可以得到最大水头的设计需求优度域为 $X(H_{\max}) = [121.2, 122.7]$,基于式(3)获得最大水头的可拓距计算式 $\rho(V_i(H_{\max}), X(H_{\max})) = |v_i(j) - (121.2 + 122.7)/2| - (122.7 - 121.2)/2$,将此计算式代入式(4)得到相应的关联函数式。采用相同的分析方法,可以获得最小水头、额定水头以及额定出力的可拓距计算式与关联函数式,由于步骤相似,这里不再累述。通过征求领域设计专家的意见,给定各基元特征权重为 $W = (0.30, 0.15, 0.15, 0.40)$,根据1.3节中提出的基于可拓关联函数的知识重用推理模型,即利用式(5,6)进行可拓重用度计算,可得各个设计对象基元可拓重用度序列为 $\Psi = (0.463, 0.517, 0.717)$,根据可拓理论并采用择近原则可知,水电站Turb1的设计方案与设计目标最为接近,但并不完全满足设计要求,需要对水电站Turb1的转轮设计方案进行可拓变换,结合水轮机设计领域知识,对水电站Turb1对应的模型转轮进行多级菱形推理分析,根据已有的模型转轮综合特性曲线绘制软件,以最大水头及水头段为发散特征,以水轮机的出力和效率作为发散约束条件,则在水轮机模型转轮综合特性曲线图上找到匹配的转轮的单位转速和单位流量,若单位转速和单位流量不能满足设计需求,需要再以单位转速和单位流量为发散特征进行可拓发散,由此可以获得3个候选转轮基元模型

$$J_{z1} = \begin{bmatrix} \text{转轮 A384} & \text{最大水头 /m} & 125.0 \\ & \text{单位转速 /}(r \cdot \text{min}^{-1}) & 77.7 \\ & \text{单位流量 /}(m^3 \cdot s^{-1}) & 1017.0 \\ & \text{效率 /}\% & 93.1 \end{bmatrix}$$

$$J_{z2} = \begin{bmatrix} \text{转轮 A464} & \text{最大水头 /m} & 125.0 \\ & \text{单位转速 /}(r \cdot \text{min}^{-1}) & 80.0 \\ & \text{单位流量 /}(m^3 \cdot s^{-1}) & 1026.0 \\ & \text{效率 /}\% & 92.5 \end{bmatrix}$$

$$J_{z3} = \begin{bmatrix} \text{转轮 A466} & \text{最大水头 /m} & 125.0 \\ & \text{单位转速 /}(r \cdot \text{min}^{-1}) & 73.0 \\ & \text{单位流量 /}(m^3 \cdot s^{-1}) & 1068.0 \\ & \text{效率 /}\% & 92.4 \end{bmatrix}$$

由出力和效率约束作为可拓重用规则与评价准则,即效率 η 与出力 P 满足用户在要求的情况下越大则转轮越优,可以看出,最佳设计对象为 J_{z1} ,则把 J_{z1} 对应的设计转轮A384作为最佳重用对象应用到选型方案设计的后续设计中。结合领域设计知识,可在设计转轮A384的基础上进行适应性修改与设计,从而满足丰富多样的设计要求,并将提取相关的设计信息,构建相对应的设计知识基元模型,存入知识库、规则库或实例库中,丰富产品方案设计基元可拓重用集的内容,提高设计知识重用能力。限于篇幅,作者将另撰文对复杂产品方案设计可拓适应性修改与设计进行分析。

3 结束语

基于知识重用的可拓方案设计模型将可拓理论中的基元模型、可拓变换、关联函数以及可拓推理等应用于复杂产品方案设计中,既有效地重用了已有的设计知识,又形式化和模型化地描述了复杂产品方案可拓设计过程,为产品方案设计理论的实际应用奠定了基础。本文通过对复杂产品方案设计过程中的基元建模、可拓重用策略分析、可拓推理模型以及重用模型的构建进行分析,并通过实例进行了验证,为复杂产品设计重用提供了一种新的途径,具有重要的学术意义和工程应用价值。然而,可拓方案设计方法的研究还处于初级阶段,在设计对象知识库实现以及可拓方案设计过程软件实现方面还需要做更加深入的研究。

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.
Cai Wenqin, Peng Peilin, Jiang Shoushan. Knowledge representation and reuse in aircraft design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(1):55-58.
- [2] 王体春,卜良峰,王威. 基于知识重用的产品方案设计多级实例推理模型[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3):571-576.
Wang Tichun, Bu Liangfeng, Wang Wei. Model of hierarchical case-based reasoning for product scheme design based on knowledge reuse[J]. Computer In-

- egrated Manuf Acturing Systems, 2011, 17(3): 571-576.
- [3] Van Tooren M J L, Nawijn M, Berends J P T J, et al. Aircraft design support using knowledge engineering and optimisation techniques[C]// Structural Dynamics and Materials Conference. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005: 5074-5089.
- [4] Zhou Shouqin, Chin Kwai sang, Xie Youba, et al. Internet-based distributive knowledge integrated system for product design[J]. Computers in Industry, 2003, 50(2): 195-205.
- [5] Wu Muhcherng, Lo Yingfu, Hsu Shanghwa. A fuzzy CBR technique for generating product ideas [J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(1): 530-540.
- [6] 马辉, 张树有, 谭建荣, 等. 基于事物元的产品设计过程可拓重用方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3): 110-116.
Ma Hui, Zhang Shuyou, Tan Jianrong, et al. Method on the reuse of product design process based on affair-matter element [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 110-116.
- [7] 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.
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.
- [8] Zhao Yanwei, Zhang Guoxian. A new integrated design method based on fuzzy matter-element optimization [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1/3): 612-618.
- [9] 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.
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.
- [10] 赵燕伟, 苏楠, 周鹏, 等. 面向定制的产品可拓配置设计方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1153-1155.
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.
- [11] 杨春燕, 蔡文. 可拓工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Yang Chunyan, Cai Wen. Extension engineering [M]. Beijing: Science Publishing House, 2007.