

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.05.001

# 基于可拓本体的复杂产品方案设计 可拓集成框架研究\*

王体春, 秦家祺, 华 洋

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 为了有效提升大型复杂产品方案设计结构配置的设计效率和质量, 对大型复杂产品方案可拓集成设计进行了研究。对大型复杂产品方案可拓设计过程中的可拓本体概念模型、可拓本体库构建框架、方案设计可拓需求模式、方案设计可拓配置模式和方案设计可拓再设计模式进行了分析, 提出了一种基于可拓本体概念的复杂产品快速设计可拓模式框架; 通过将应用层、应用工具层以及环境支撑软件层相融合, 建立了基于可拓设计模式的型号飞机产品快速设计可拓集成平台体系结构。研究表明: 该可拓集成设计平台体系结构的建立, 能够实现多层次、多属性、创造性、复杂性等特点的复杂产品方案设计的结构可拓配置, 从而为复杂产品快速设计的顺利实施提供理论和工程应用支持。

**关键词:** 可拓集成框架; 可拓本体; 方案设计; 可拓设计模式; 可拓设计平台

中图分类号: TH122; TP311; TB472

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)05-0461-10

## Extension integration framework for complex product scheme design based on extension ontology

WANG Ti-chun, QIN Jia-qi, HUA Yang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of  
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at improving the product design efficiency and design quality of the structural configuration of large-scale complex product scheme design, the extension integrated design methods of large-scale complex product scheme were researched. The extension ontology conceptual model, the construction framework of extension ontology base, the extension requirement model, the extension matching model and the extension redesign model in the extension design process of large-scale complex product scheme were analyzed, and a framework of extension design mode for complex product rapid design based on extension ontology concept was proposed. By integrating application layer, application tool layer and environment support software layer, the extension integration platform architecture for rapid design of aircraft products based on extension design mode was put forward. The results indicate that the structural extension configuration of complex product scheme design with the characteristics of multi-level, multi-attribute, creativity and complexity is realized by the establishment of the architecture of the extension integrated design platform, and a theoretical and engineering support for the smooth implementation of complex product rapid design is provided.

**Key words:** extension integration framework; extension ontology; scheme design; extension design patterns; extension design platform

收稿日期: 2019-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775272, 51005114)

作者简介: 王体春(1981-), 男, 安徽蒙城人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事知识工程、可拓工程方面的研究。E-mail: wangtichun2010@nuaa.edu.cn

## 0 引 言

由于设计理论的不完善性以及设计过程的复杂性,航天航空、发电装备等行业的复杂产品方案设计往往是基于一定理论基础和大量实践经验相结合的创造性技术劳动,是一个复杂、多层次、多属性和创造性的设计配置过程。而在配置过程中要有效地解决各种复杂设计问题,则必须解决产品方案设计中各种深层知识的存储、表示和处理问题,但已有的知识模型多是偏重于表层知识的处理,因此,如何利用设计配置过程中各种设计知识解决设计问题则具有十分重要的意义<sup>[1-4]</sup>。

本体论使得知识工程中,深层次知识建模清晰化、精细化、准确化和标准化,促进了对深层次设计知识的获取、组织和捕捉能力,使得知识推理、共享、重用和集成成为可能<sup>[5-6]</sup>。同时,本体论在软件工程、语义网、自然语言理解、知识管理等智能设计领域的应用获得巨大成功,因而具有很好的应用前景<sup>[7-10]</sup>。目前,本体论研究存在的一个突出问题是已开发出来的本体和本体库形式化程度不高,许多本体仍处于非形式化阶段,只能提供领域术语的一个自然语言或类自然语言的定义库,影响了本体技术在知识工程领域的深入应用。

可拓学用形式化工具,从定性和定量的角度研究矛盾问题的规律和方法,以基元理论和可拓数学为支柱,把解决问题的过程形式化,从而建立相应的数学模型,并在这个基础上发展新的计算方法和技术,更智能化和形式化地解决知识库中深层知识的存储、表示和处理等问题,把知识工程中的知识向更形式化、更深入、更本质的方向推进<sup>[11-14]</sup>。但在目前,针对基于可拓设计模式的产品快速设计平台体系结构的研究,还缺乏有效的复杂产品设计信息的可拓挖掘推理机,与基于产品设计信息可拓挖掘的设计平台。而这是实现复杂产品设计可拓设计模式的十分关键的组成部分,即使是有关利用机器学习与数据挖掘工具解决智能设计中信息智能获取的瓶颈问题的研究也不多见。未见有系统化、集成化、模型化和形式化的复杂产品集成设计系统开发,这不仅是复杂产品设计工程应用的短板,也是影响复杂产品设计理论向更深层次研究的关键因素。

本文在已有研究成果的基础上,通过对复杂产品方案设计本体概念进行拓展<sup>[15-16]</sup>,给出可拓本体构建的一般形式,并在此基础上,对复杂产品基于可拓设计模式的产品快速设计平台体系结构框架进行研究,从应用层、应用工具层以及环境支撑软件层的角度,进行

基于可拓设计模式的产品快速设计平台体系架构分析,为复杂产品设计提供理论和技术支持。

## 1 复杂产品方案设计可拓本体建模

### 1.1 可拓本体模型构建

为了解决本体论与可拓论发展过程中存在的问题,在已有本体概念的基础上,对产品设计过程中存在的可拓关系进行拓展,建立可拓本体模型  $O_E$  为:

$$O_E = \{C_E, S_{E_0}, S_{E_c}, A_{E_0}, A_{E_c}, X_E, T_E, F_E, CA_E\} \quad (1)$$

式中: $C_E$ —可拓本体概念; $S_{E_0}$ —可拓本体概念层次关系集; $S_{E_c}$ —可拓关系集; $A_{E_0}$ —可拓本体概念属性集; $A_{E_c}$ —可拓关系属性集; $X_E$ —可拓本体公理集; $T_E$ —可拓约束与可拓变换集; $F_E$ —可拓本体函数集; $CA_E$ —可拓本体实例集。

在进行可拓本体建模时,一般可基于领域知识将产品、设计行为、设计关系等进行可拓类别划分,并基于基元模型表述  $C_E$ ,形成基元特征、量值与对象名称的有机整体。 $S_{E_0}$  用于表征可拓本体概念之间的层次关系或者概念集之间的层次关系; $S_{E_c}$  用于表征可拓本体概念内外部的可拓关系集合以及可拓关联性; $A_{E_0}$  用于表征具有同一基元特征的同类对象集合; $A_{E_c}$  用于表征不同类别可拓关系的属性表述; $X_E$  用于表征指导可拓设计的各种公理、定理、原则、标准和规范等相关内容的集合,既包括描述可拓本体的公理,也包含解决矛盾问题的公理; $T_E$  中的可拓约束用以表征对可拓本体概念、概念集或者可拓关系的约束与限制,并以规则的形式进行表述。可拓变换集是对可拓本体概念、概念集或者可拓关系进行操作的可拓变换方式集合,是对可拓本体概念行为状态的表征,可拓变换方式往往需要基于可拓约束关系进行选取; $F_E$  用于表征可拓本体概念的映射关系以及可拓逻辑关系。

由此可以看出,可拓本体模型是对本体模型的拓展,除了考虑已有本体的基本概念、属性和关系之外,更引入了可拓关系、可拓变换、可拓公理等概念,在处理复杂产品方案设计中的可拓关系具有更好的适应性,从而进一步深化表征产品方案设计中的深层知识以及对其进行可拓分析,为复杂产品方案设计中各种设计问题,特别是矛盾问题的解决提供支持。

### 1.2 多类型知识的本体基元表示

可拓关系是复杂产品方案设计拓展性以及适应性能力提升的表征。对可拓本体概念可拓关系进行形式

化、模型化表述,清晰地映射出其逻辑关系,将能有效地提升复杂设计问题求解的可拓推理能力。设计对象的可拓本体概念可以通过基元或者基元系统进行表述,使得复杂产品方案设计知识表达的形式化和模型化程度更高。

在公理化设计框架下,可以建立其对应的基元模型  $J_E$ <sup>[17]</sup>,一般表示为:

$$J_E = \begin{bmatrix} N(J_E) & \text{需求 } C_{re} & V(C_{re}) \\ \text{功能特性 } C_{fu} & V(C_{fu}) \\ \text{结构特性 } C_{st} & V(C_{st}) \\ \text{工艺特性 } C_{pr} & V(C_{pr}) \\ \text{服务特性 } C_{se} & V(C_{se}) \\ \dots & \dots \\ \text{约束条件 } C_{co} & V(C_{co}) \\ \text{矛盾参数 } C_{cp} & V(C_{cp}) \\ \text{相关概念 } C_{rc} & V(C_{rc}) \\ \dots & \dots \end{bmatrix} = R_E \vee I_E \vee G_E \vee M_E \quad (2)$$

式中: $R_E$ —可拓本体概念的物元或物元系统; $I_E$ —可拓本体概念的事元; $G_E$ —可拓本体概念的关系元; $M_E$ —可拓本体概念的复合元。

由此可以看出:复杂产品设计的可拓本体概念的基元模型可以看成是由物元或物元系统、事元、关系元、复合元组成的一个广义基元系统。基元模型的可拓

属性一般包括论域可拓、名称可拓、特征可拓、量值可拓、特征元可拓、关联函数可拓等。若可拓属性符号表示为  $\Theta$ ,则论域可拓、名称可拓、特征可拓、量值可拓、特征元可拓、关联函数可拓可分别表示为: $\Theta\Omega(J_E | O_E)$ 、 $\Theta N(J_E | O_E)$ 、 $\Theta C(J_E | O_E)$ 、 $\Theta V(J_E | O_E)$ 、 $\Theta CV(J_E | O_E)$ 、 $\Theta K(J_E | O_E)$ 。

根据基元模型可拓属性或者可拓关系类型的不同,可获得相应的可拓逻辑结构形式。如基于相关关系,可以获得可拓本体概念相关网;基于蕴含关系,可以获得可拓本体概念蕴含系;基于共轭关系,可以获得可拓本体概念共轭对等。

### 1.3 可拓本体知识库构建的一般框架

为了使得已建立的各种设计信息的基元模型能够更好地支持面向快速设计的复杂产品方案设计,需要在设计信息单元进行基元形式化表述形成可拓本体,建立与可拓本体基元系统/模型相对应的知识库、规则库、实例库、工程数据库等。可拓本体库是基于设计对象领域可拓本体进行的知识库的建立,即除了考虑本体构建的相关概念、关系和属性之外,还需要考虑设计对象的可拓关系、可拓变换、可拓公理等概念;而且,设计领域不同对应的这些概念往往也不同,即可拓本体知识库的构建需要基于具体的设计对象和对应的领域知识。

复杂产品方案设计可拓本体库构建的一般框架如图1所示。

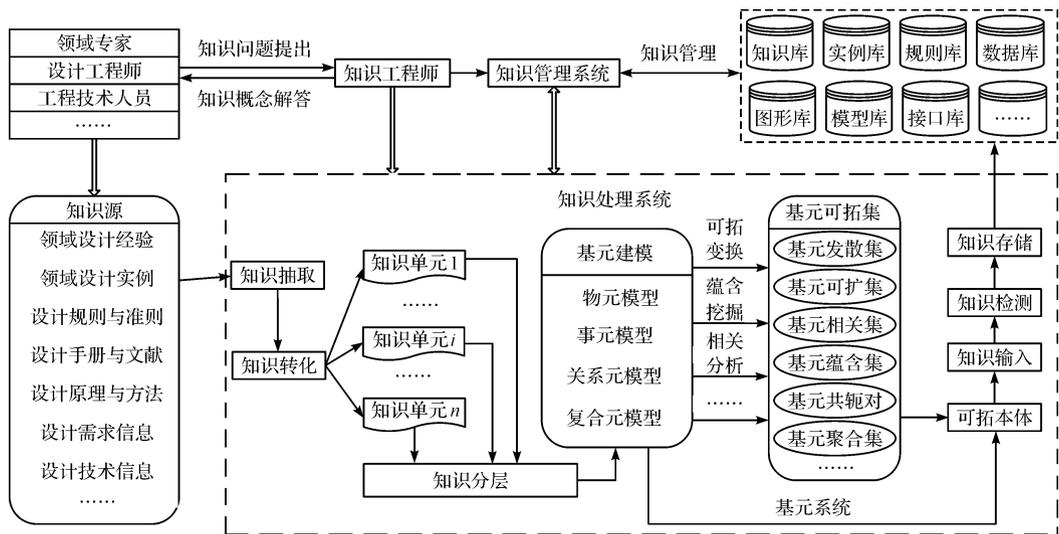


图1 可拓本体库构建的一般框架

由于复杂产品设计领域内的知识源包括领域设计经验、领域设计实例、设计规则与准则、设计手册与文献、设计原理与方法、设计需求信息以及相关技术信息等,需要借助于领域专家、设计工程师、工程技术人员

等多种途径相结合的方式,进行多类型设计知识的获取。对于获取的知识需要经过知识处理系统,进行知识抽取和知识转化,将蕴含于知识源中的知识转换成适合基元知识库存放的知识。其中,需要完成的两个

关键步骤为:(1)将抽取的设计知识形成知识单元,并且能够用基元进行形式化和模型化描述;(2)将基于基元模型的设计知识,通过知识编译系统转化为计算机系统可直接利用的内部形式。

同时,对于复杂产品方案设计来说,抽取出来的各种知识单元并不是孤立存在的,而是通过设计属性进行设计对象的内部或者外部的关联,因此,这将导致各种知识单元可能不属于同一知识层面。为了能够使得基元模型进行有效的可拓变换、蕴含分析、相关分析、共轭分析等,需要对其进行知识分层,并形成相应的基元发散集、基元可扩集、基元相关集、基元蕴含集、基元共轭对、基元聚合集等,然后基于知识编译系统进行知识检测,将基元存储到可拓本体库中。

## 2 基于可拓本体的复杂产品方案设计可拓模式分析

### 2.1 方案设计可拓需求模式

对于复杂产品方案设计来说,客户需求一般具有

抽象性、模糊性、变动性、多样性、层次性与关联性等特点,这往往使得设计者在正确理解客户设计意图方面存在困难,影响产品的设计质量与效率。因此,基于可拓理论对客户需求进行可拓分析,将设计需求转换为一种形式化、模型化的产品需求信息的客观性表达,可清晰地反映出客户需求的层次关系和关联特性,有效地使得设计需求信息转化为指导产品方案设计的技术要求等信息,从而使得产品方案设计的需求分析更加合理、完备和规范。

产品方案设计需求分析的最终结果就是有效地映射出后续的产品设计参数,包括功能设计参数、结构设计参数以及工艺设计参数。基于可拓理论的产品方案设计需求分析可拓设计,实质上就是有效地将需求基元转化为设计参数基元,形成一个可拓式的设计框架。本文基于可拓理论、公理化设计给出一种新的将客户需求转化为设计参数的需求分析可拓设计模式,并运用改进的质量功能配置 QFD 获取指导和贯穿于产品全生命周期的设计信息。

产品方案设计需求分析可拓设计模式如图 2 所示。

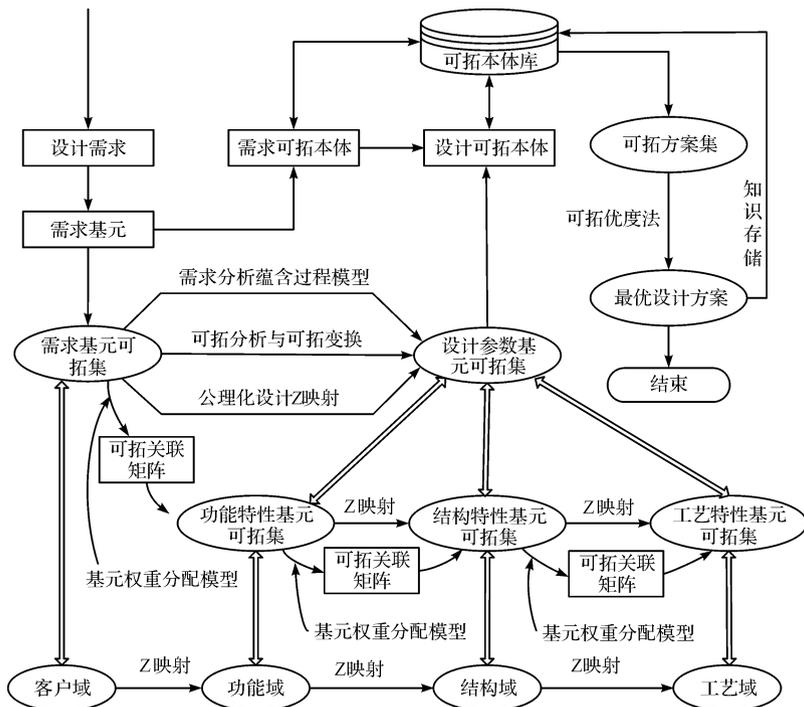


图 2 产品方案设计需求分析可拓设计模式

从图 2 可以看出:基于可拓本体概念的产品方案设计需求分析可拓设计模式包含几个关键组成部分:(1)基于公理化设计的客户域、功能域、结构域、工艺域的划分,以及对对应基元可拓集的构建<sup>[18]</sup>;(2)需求基元/系统、需求基元可拓集以及需求可拓本体的构建。在这里需要说明的是,需求基元/系统、需求基元可拓集以及需求可拓本体均是对需求信息以及设计需求关

系的描述。需求可拓本体是表征设计需求关系,其构建形式如 1.1 节所示。需求基元/系统是对需求可拓本体概念的表征,其构建形式如 1.2 节所示。需求基元可拓集是对设计需求信息的可拓关系表征,其构建形式如 1.1 节所示;(3)需求信息与设计参数之间的映射关系,包括基于公理化设计的设计域间的 Z 映射、需求分析蕴含过程模型、可拓分析与可拓变换方法

等主要内容<sup>[19]</sup>; (4)设计参数基元、设计可拓本体以及本体库构建; (5)基于基元权重分配模型的需求基元与设计参数基元间的可拓关联矩阵的构建<sup>[20-21]</sup>; (6)可拓方案集的获取以及基于可拓优度法的优选方案生成<sup>[22-23]</sup>。

### 2.2 方案设计可拓配置模式

产品配置设计是实现大规模定制的重要设计方法之一,它以客户需求为驱动并贯穿产品的整个设计过程。所以,为了能够快速地对复杂产品进行配置设计,需要将基于产品方案设计需求分析映射的后续产品设计参数进行有效的规划和快速的组合。

目前,国内外针对产品快速配置设计的研究已有很多,并取得了相应的研究成果。但是,已有的产品配置设计方法存在以下问题: (1)产品配置设计方法缺乏定量与定性相结合的一致化的配置设计问题描述,一旦提供的配置设计特征较少,将很难通过局部配置设计特征生成产品,影响了后续的产品快速设计工作

的展开; (2)在产品配置设计过程中往往产生大量的配置变量,现有的知识模型和知识推理方法多是基于表层知识的推理来进行配置变量的收敛分析和解决配置矛盾问题;而对配置设计过程中设计可拓展性的推理支持不够,影响了深层知识处理的效果,从而限制了设计可拓重用的范围。

在复杂产品快速配置设计过程中,根据设计需求获得产品设计的目标基元,在可拓本体库中与设计基元进行匹配,符合匹配要求的设计基元将重用到新产品设计中,不符合设计要求的设计基元将不被重用,或者利用基元的可拓性重新进行可拓分析与变换使其达到要求。产品快速配置设计的可拓设计模式能够基于可拓变换方法获得领域内丰富的设计知识,通过可拓推理模型实现对设计对象的匹配,通过可拓重用模型将匹配的最佳设计对象重用到新产品的设计中,为复杂产品的可拓设计的顺利实施提供支持。

产品快速配置设计的可拓设计模式如图3所示。

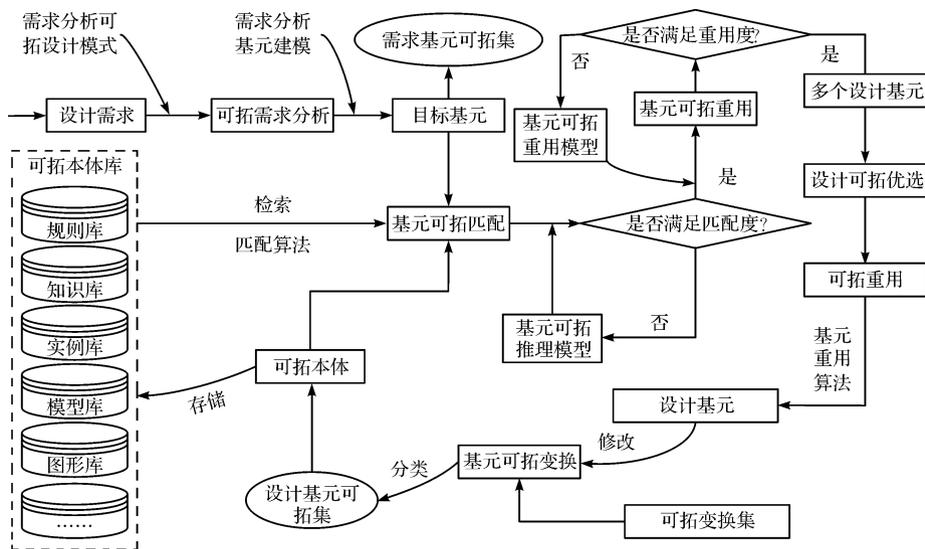


图3 产品方案设计快速配置的可拓设计模式

从图3可以看出:基于可拓本体概念的产品方案设计快速配置的可拓设计模式包含有几个关键组成部分: (1)基于可拓需求分析获得目标基元,并建立相应的需求基元可拓集以及相应的可拓本体; (2)在可拓本体库中对目标基元进行可拓本体检索,获得相匹配的设计对象,可拓本体检索可以对可拓本体特征进行匹配,由于可拓本体概念是基于基元模型/系统而建立的,可拓本体特征匹配算法和基元特征匹配算法是一致的,笔者在文献<sup>[24-25]</sup>中给出了相应的基元特征匹配算法; (3)在匹配集中基于对应的可拓重用算法和模型获得满足设计要求的重用对象集<sup>[26]</sup>; (4)对多设计重用对象进行可拓优选,获得最佳设计对

象<sup>[27-28]</sup>。

### 2.3 方案设计可拓再设计模式

可拓适应性设计是一种基于可拓理论的解决产品全生命周期中设计矛盾问题的有效拓展途径。可拓适应性设计通过可拓变换和可拓推理的方式对已有产品的部分功能、原理、结构的变异获得新的设计方案,能够充分重用已有的设计、制造、管理等资源,提高产品设计效率,降低设计成本,是企业快速响应市场和应对市场竞争的有效设计手段。

目前,虽然已有一些学者开展了可拓适应性设计的研究,并取得了一定的研究成果,但可拓适应性设计的研究还处于初级阶段,存在很多的不足和缺陷,如多

数研究仅是采用了基元的形式进行了设计问题的可拓模型建立,初步搭构了产品适应性设计的框架模型,而对基于可拓变换的可拓适应性设计过程的设计修改支持不够,从而限制了可拓推理的实施;再者,多数研究仅从结构配置变换的角度和配置结果评价优化的角度考虑可拓适应性设计,而未将适应性设计评价优化作为实现适应性设计的首要条件,并将其融入到配置过程中,使得新的耦合关联关系和矛盾问题无法得到有效的解决,导致可拓适应性设计具有局限性。

可拓本体的提出对复杂产品方案设计可拓再设计具有较好的适应性:(1)能够对复杂产品方案设计过程中的深层设计知识进行有效的描述,进而建立形式化和模型化的知识模型;(2)对于适应性设计过程中的复杂问题可拓求解、可拓推理以及矛盾问题可拓变

换处理具有较好的针对性和融合性,更容易获得有效的最优解,进而支持复杂产品的方案设计。

复杂产品方案设计可拓再设计模式的实施,一般情况下首先基于领域知识建立产品方案设计可拓本体概念模型,并通过基元或者基元系统的形式建立对应的产品方案设计可拓适应性设计的过程模型;基于设计对象可拓本体的特征关联度和权重获得适应性设计的可拓展方向,采用可拓本体特征和特征量值的可拓变换,并建立相应的可拓本体特征可拓关联函数,然后基于可拓适应性设计的目标函数进行设计条件与设计目标的相容性分析,由此获得可拓适应性设计方案;通过领域设计专家给定方案优选的评价指标,基于可拓优选模型获得最优设计方案。

产品方案设计可拓再设计模式如图 4 所示。

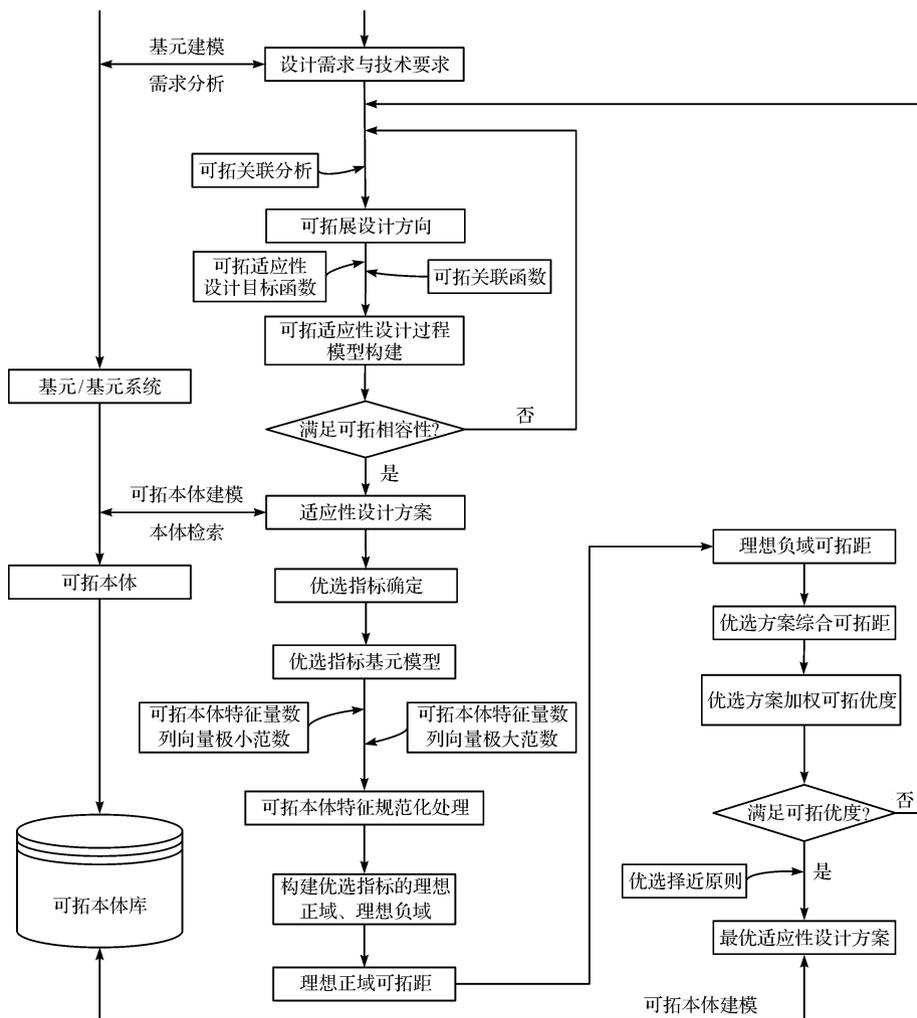


图 4 产品方案设计可拓再设计模式

从图 4 可以看出:基于可拓本体概念的产品方案设计可拓再设计模式包含有几个关键组成部分:(1)基于需求分析进行产品方案设计可拓展设计方向的生成。可拓展设计方向的获取,一方面需要基于设计域

进行划分,即是否面向客户域、功能域、结构域和工艺域进行拓展,并需要确定其拓展的基元论域、基元特征以及基元特征量值,另一方面需要对拓展的设计方向进行有效的收敛性分析<sup>[29-30]</sup>;(2)产品方案设计可拓

适应性设计过程模型的构建<sup>[31]</sup>; (3) 产品方案设计可拓适应性的基元系统以及可拓本体库的构建; (4) 产品方案设计可拓再设计多方案多属性决策分析模型的构建<sup>[32-33]</sup>。

### 2.4 方案设计可拓集成框架搭构

从本质上来说,基于可拓设计模式的产品快速设计就是建立知识可拓推理技术与产品快速设计技术的融合与集成,将基于本体论、可拓理论和基元理论的可拓变换、可拓推理、可拓重用、可拓优选等可拓方法与技术综合应用到产品的设计过程中,由此形成面向全生命周期的产品各个设计环节的设计模式,即需求分析的可拓设计模式、快速配置的可拓设计模式和适应性设计的可拓设计模式。

产品快速设计的可拓设计模式的实施是以复杂产品的工程设计为应用背景的,因此,产品快速设计可拓设计模式的框架搭构需要从产品设计需求分析、产品快速配置设计、产品适应性设计以及面向产品设计工

程的设计系统开发等4个方面进行分析;不仅要建立各自的设计模式,更要同时确立它们相互之间的关联作用。

可拓快速设计是在已有快速配置设计的基础上发展起来的。对于复杂产品方案设计而言,由于其方案设计过程的复杂性,往往会存在多种设计矛盾问题,而通过在产品配置设计过程中引入可拓理论,不仅可使产品设计知识建模更加形式化和模型化,而且可拓变换以及可拓推理模型和算法的应用,使得基于知识的产品方案快速配置设计推理能力提升,特别是在处理设计矛盾问题方面具有较好的适应性。此外,可拓本体概念模型是将本体论与可拓理论相融合,使得基于可拓本体的复杂产品方案可拓快速设计在处理设计矛盾问题方面,能够解决配置设计过程中深层知识的存储、表示和处理问题。

基于可拓本体概念的产品快速设计可拓设计模式框架组成如图5所示。

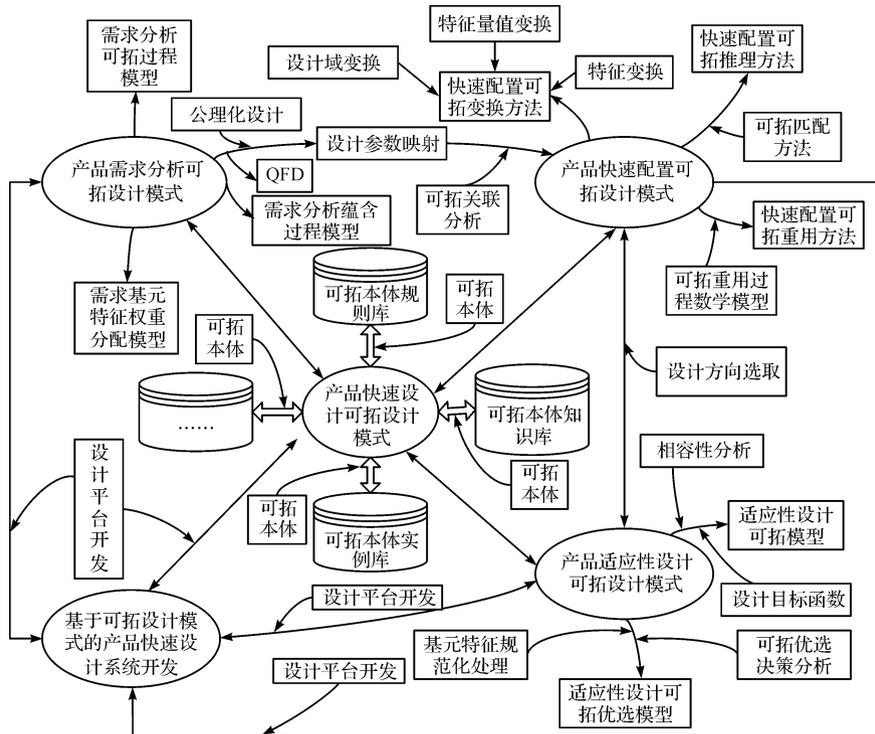


图5 基于可拓本体概念的产品快速设计可拓设计模式框架组成

从图5可以看出:基于可拓本体概念的产品可拓设计模式的实施,统一采用基元或者基元系统对领域内产品设计过程中各个环节的深层次设计知识进行形式化和模型化表述,建立产品方案设计可拓本体概念,并形成相应的可拓本体库,包括可拓本体知识库、可拓本体实例库、可拓本体规则库、可拓本体可拓集等。

在进行新产品设计时,首先基于设计需求分析的

可拓设计模式对设计需求信息进行分析,通过公理化设计和QFD进行设计需求信息的映射和转化;同时,基于需求分析蕴含过程模型在需求基元知识库中进行设计需求信息蕴含性分析,基于可拓本体特征权重分配模型进行设计对象基元特征权重分配,并结合设计需求分析的可拓过程模型进行已有设计需求基元向已有设计基元的映射的搜索与匹配,获得支持产品快速

配置设计的初步设计参数。然后,基于产品快速配置设计的可拓设计模式,运用设计域变换、基元特征变换、特征量值变换等可拓变换方法对设计对象进行拓展,基于可拓推理模型进行设计对象与拓展对象的可拓匹配分析,并通过可拓重用模型进行已匹配的设计对象的重用分析;对于满足设计要求的设计对象,将其应用到新产品的设计中,从而快速地获得产品初步设计方案。而对于获得的初步设计方案,可能会含有不满意的局部的设计参数或者需要对一些设计参数进行再设计分析,为此需要基于适应性设计的可拓设计模式,找到设计方案相应需要改进的部分即获得可拓设计方向,对需改进的部分进行变换改进,最后产生多个满足目标变化的再设计方案,基于可拓优选模型对设计方案进行多属性优选分析,获得最优的可拓设计方案。

由于适应性设计过程是产品设计方案所产生的客观效果相对于预定目的的检验和修正过程,产品设计可拓变换和设计方案可拓优选技术需紧紧围绕领域内产品设计知识和评价知识来展开。

### 3 应用案例

基于本体论和可拓理论进行复杂产品可拓配置设计支持平台的开发是沟通客户、企业(主要包括企业产品设计部、专业设计小组、设计工程师等设计主体)、市场的信息桥梁,也是产品快速设计实现的关键支撑环节。从功能实现的角度来说,基于可拓设计模式的产品快速设计平台体系需要实现设计知识建模、可拓需求分析、设计可拓变换、设计可拓推理、设计可拓重用、设计可拓优选、可拓适应性设计以及基于上述技术的产品设计实例验证。基于可拓设计模式的复杂产品快速设计平台体系结构一般需要包括 3 个关键组成部分:

(1)应用层。是直接与客户关联的部分,是设计人员利用基于可拓设计模式的产品快速设计平台体系进行产品方案设计的应用功能集,包括面向可拓设计的知识获取与建模、知识推理与重用、适应性设计、设计需求分析以及其他智能设计技术等;同时,应用层还负责使用者和支持系统间的数据交互,接受客户的输入,并将客户需要的数据以适当的形式输出给客户;

(2)应用工具层。是基于可拓设计模式的产品快速设计平台体系实施的基础,由知识建模工具、知识挖

掘工具、产品再设计工具、融合型知识推理工具、知识编译工具、设计优选工具等组成,通过上述应用层工具的有机融合,实现复杂产品可拓设计的智能化;

(3)环境支撑软件。主要指数据库连接技术、数据管理系统、操作系统、网络环境和计算机硬件等为基于可拓设计模式的复杂产品快速设计平台体系正常运行提供基础条件的软件与硬件环境。

上文已对基于可拓本体的复杂产品方案设计可拓集成框架的几个关键组成部分,如可拓本体建模、方案设计可拓需求模式、方案设计可拓配置模式、方案设计可拓再设计模式等进行了阐述,包括相应关键环节的模型、算法以及架构。以上述分析模型、算法和架构为理论基础,笔者在应用层、应用工具层和环境支撑软件层的层次结构下,以某型号飞机产品设计为工程应用验证,说明在进行复杂产品方案可拓快速设计时对应的产品设计可拓集成平台的基本形式。由于型号飞机产品设计的可拓集成平台设计是一个非常复杂的系统工程,包含有较多的子级系统和功能模块,限于篇幅,本文不再赘述。

基于可拓本体的型号飞机产品设计平台与系统如图 6 所示。

从图 6 可以看出:应用层是直接面向用户操作的,包括型号飞机产品设计的多设计域划分模块、可拓本体建模模块、设计知识可拓本体推理模块、方案设计可拓优化模块、方案设计可拓挖掘模块以及方案设计可拓变换模块等,在各个组成模块的子系统实现过程中,涉及到可拓本体模型、可拓变换方法、可拓本体推理算法、可拓优化算法、可拓挖掘算法、可拓重用模型等多种模型和算法的综合运用。

应用工具层则是实现型号飞机产品方案设计平台的技术支撑,包括面向型号飞机产品方案设计知识运用的可拓本体编辑工具、支持可拓推理的可拓本体推理机、支持可拓挖掘的可拓本体挖掘工具、支持可拓重用的可拓本体再生器、支持可拓优化的决策与优化工具等组成部分,通过各种应用接口的内部关联,实现型号飞机产品方案设计各功能模块的综合集成。

环境支撑层则是构建型号飞机产品方案可拓设计平台的底层支撑环节,开发了面向型号飞机产品方案可拓设计过程中各种设计知识可拓应用的知识库、接口以及网络协议,从而为型号飞机产品方案可拓设计平台的顺利实施提供支持。

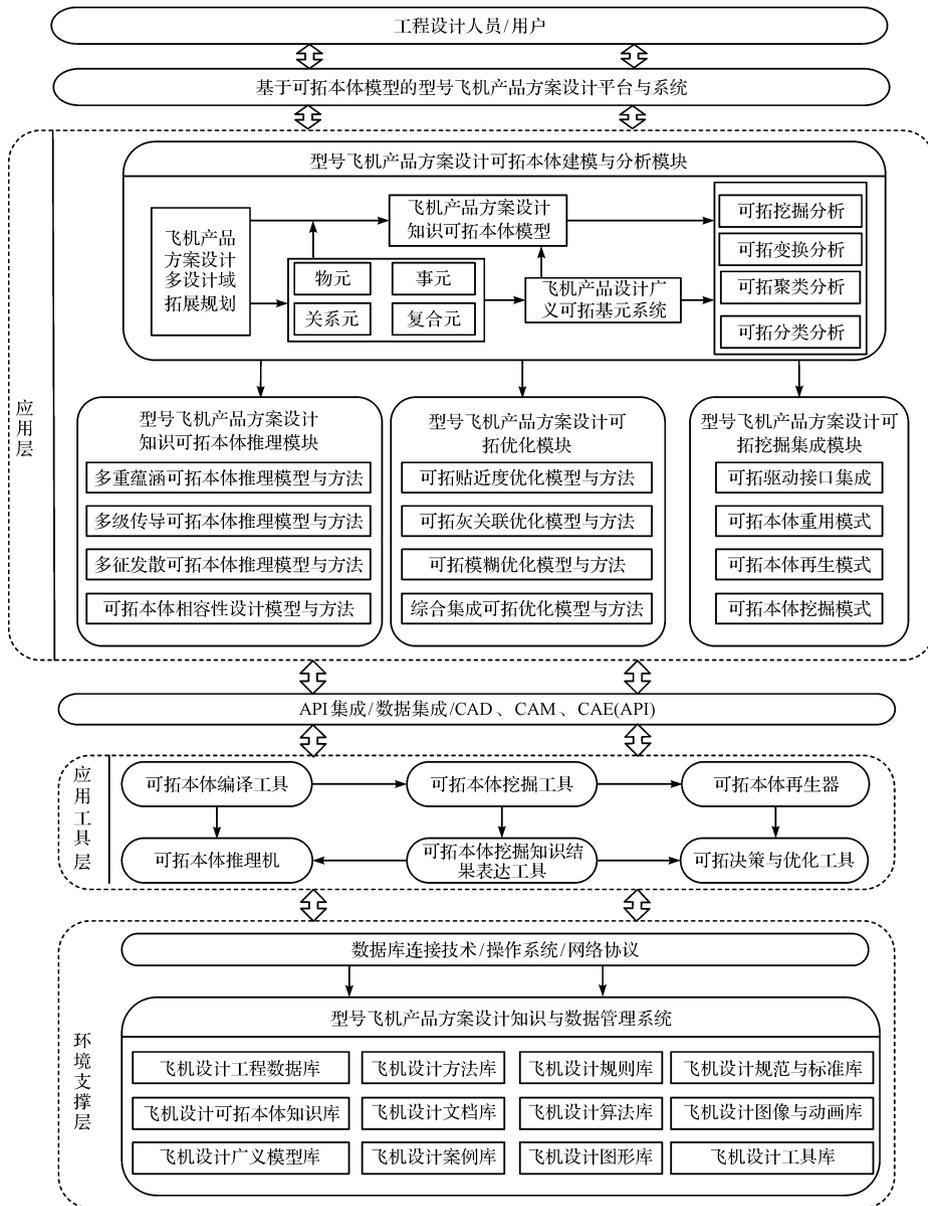


图6 基于可拓本体模型的型号飞机产品设计平台与系统

## 4 结束语

本文针对复杂产品多层次、多属性、创造性的产品结构配置过程,研究了复杂产品基于可拓设计模式的产品快速设计平台体系结构开发工作,构建了复杂产品可拓本体概念模型,提出了基于可拓本体概念的复杂产品、可拓设计模式的产品快速设计平台体系结构。

该体系结构将基于本体论、可拓理论和基元理论的可拓变换、可拓推理、可拓重用、可拓优选等可拓方法与技术综合应用到复杂产品的方案设计过程中,由此形成了面向全生命周期的复杂产品各个设计环节的可拓设计模式,形成复杂产品的可拓需求分析设计模块、可拓快速配置设计模块、可拓适应性设计模块等关键组成部分;同时,笔者以某型号飞机产品设计为例,从应用层、应用工具层以及环境支撑软件层的角度,给

出了基于可拓设计模式的产品快速设计平台体系搭构框架,从而为复杂产品计算机辅助快速设计的顺利实施提供了理论和工程应用支持。

## 参考文献 (References):

- [1] 杨东,柴慧敏. 基于 QFD 和案例推理的绿色产品设计方案选择研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(16): 251-259.
- [2] 杨涛,杨育,张东东. 考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(4): 875-884.
- [3] 郭丰. 产品方案设计中的近似建模与知识处理方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2017.
- [4] MA Hong-zhan, CHU Xue-ning, XUE De-yi, et al. A systematic decision making approach for product conceptual design based on fuzzy morphological matrix[J]. *Expert Systems with Applications*, 2017(81): 444-456.

- [5] 文家富,郭伟,邵宏宇. 基于领域本体和 CBR 的案例知识检索方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(7): 1377-1385.
- [6] ELISE G, FRÉDÉRIC D, OLIVIER D, et al. A formal ontology-based spatiotemporal mereotopology for integrated product design and assembly sequence planning[J]. **Advanced Engineering Informatics**, 2015, 29(3): 495-512.
- [7] EMILIO M, SANFILIPPO, FAROUK B, et al. Ontology-based knowledge representation for additive manufacturing[J]. **Computers in Industry**, 2019(109): 182-194.
- [8] 代风,翟翔,施国强,等. 面向航天产品研制的知识网络本体建模方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2018, 52(10): 192-203.
- [9] SARA N, GOLNAZ Z, SIMONE K, et al. Knowledge representation and management based on an ontological CBR system for dementia caregiving[J]. **Neurocomputing**, 2019(350): 181-194.
- [10] DANNI C, CHEN C. Product concept evaluation and selection using data mining and domain ontology in a crowdsourcing environment[J]. **Advanced Engineering Informatics**, 2015, 29(4): 759-774.
- [11] 蔡文,杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1190-1199.
- [12] 赵燕伟,周建强,洪欢欢,等. 可拓设计理论方法综述与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(5): 1158-1167.
- [13] ZHOU Ying-ying, SHI Ji-lei, WU Lei-lei. Application of extension theory in emotion management[J]. **Procedia Computer Science**, 2017(122): 502-509.
- [14] REN Jing-zheng. Technology selection for ballast water treatment by multi-stakeholders: a multi-attribute decision analysis approach based on the combined weights and extension theory[J]. **Chemosphere**, 2018(191): 747-760.
- [15] 杨国为,朱荣成,张小锋,等. 可拓本体的定义与性质[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(13): 215-225.
- [16] 温树勇,李卫华. 本体知识拓展分析树在可拓策略生成系统的应用[J]. 智能系统学报, 2014, 9(1): 1158-1167.
- [17] 钟诗胜,王体春,王威. 基于基元与改进 HOQ 的复杂产品方案设计需求分析[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(6): 705-710.
- [18] 王体春,陈炳发,卜良峰. 基于公理化设计的复杂产品方案设计可拓配置模型[J]. 中国机械工程, 2012, 23(19): 2269-2275.
- [19] 周建强,赵燕伟,洪欢欢,等. 基于需求驱动的性能冲突可拓传导变换协调方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(6): 1205-1215.
- [20] 王体春,卜良峰,王威. 基于基元的大型复杂产品方案设计多层次灰色关联配置模型[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(6): 978-982, 987.
- [21] 王体春,卜良峰. 基于灰色关联分析的复杂产品方案设计多属性权重分配模型[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(7): 1187-1190, 1195.
- [22] 张健,邱采芹,起雪梅. 基于可拓理论的定制类汽车产品概念设计方案评价[J]. 机械设计, 2018, 35(S1): 97-100.
- [23] 楼炯炯,桂方志,任设东,等. 基于可拓创新方法的改进 TRIZ 研究[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 130-138.
- [24] 钟诗胜,王体春,王威. 基于子空间法的多级实例分类检索与匹配模型[J]. 中国机械工程, 2009, 20(7): 767-772.
- [25] WANG Ti-chun, CHEN Xiao-yi, ZHONG Shi-sheng, et al. Complex mechanism scheme design based on knowledge extension reuse model[J]. **Computer Modelling & New Technologies**, 2014, 18(12): 1089-1094.
- [26] 王相兵,童水光,钟崑,等. 基于可拓重用的液压挖掘机结构性能方案设计[J]. 浙江大学学报:工学版, 2013, 47(11): 1992-2002.
- [27] 曹霞,张路蓬. 基于改进信息熵的创新合作伙伴多级可拓优选决策分析[J]. 统计与决策, 2016(5): 61-64.
- [28] 王体春,黄翔. 基于知识重用的复杂产品可拓方案设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(4): 548-552.
- [29] WANG Ti-chun, YANG Ai-jun, ZHONG Shi-sheng, et al. Extension adaptive design model of scheme design for complex mechanical products[J]. **Tehnički Vjesnik/Technical Gazette**, 2014, 21(1): 123-133.
- [30] WANG Ti-chun, YANG Ai-jun, ZHONG Shi-sheng. Products extension adaptive design based on case reuse[J]. **International Journal of Control and Automation**, 2014, 7(1): 295-306.
- [31] WANG Ti-chun, XIE Yu-zhu, YAN Hao. The extension adaptive design model for mechanical product lifecycle[J]. **Review of Computer Engineering Studies**, 2015, 2(4): 7-13.
- [32] WANG Ti-chun, YANG Ai-jun, ZHONG Shi-sheng. Multi-attribute extension fuzzy optimized decision-making model of scheme design[J]. **Tehnički Vjesnik/Technical Gazette**, 2014, 21(2): 239-247.
- [33] 王体春,杨爱军,卜良峰. 基于多属性可拓灰关联决策模型的产品方案设计[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(9): 2321-2329.

[编辑:方越婷]

## 本文引用格式:

王体春,秦家祺,华洋. 基于可拓本体的复杂产品方案设计可拓集成框架研究[J]. 机电工程, 2020, 37(5): 461-470.

WANG Ti-chun, QIN Jia-qi, HUA Yang. Extension integration framework for complex product scheme design based on extension ontology[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(5): 461-470.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>