

# 基于智能化配置的产品方案设计方法

李玉梅 万 立 熊体凡

华中科技大学国家企业信息化支撑软件 Engineering 研究中心, 武汉, 430074

**摘要:**提出了多领域设计知识模型的特征参数表示方法;通过对智能化配置技术的分析,研究了智能化配置在产品方案生成过程中的应用,构建了面向产品方案设计的智能化配置框架,建立了特征参数配置知识库,并给出了多领域特征参数求解推理过程。给出了产品方案设计平台的总体框架,并以此为基础开发了一个原型系统。

**关键词:**方案设计;智能化配置;多领域知识;特征参数

**中图分类号:**TP391.72;TH122

**文章编号:**1004—132X(2009)19—2274—06

## An Approach to Product Conceptual Design Based on Intelligent Configuration

Li Yumei Wan Li Xiong Tifan

National CAD Support Software Engineering Research Center,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

**Abstract:** On the basis of analyzing design knowledge in the multi-fields, an approach to product conceptual design based on intelligent configuration was put forward. Firstly the parametric knowledge models were described. Secondly an intelligent conceptual design configuration framework was constructed. A configuration knowledge base was discussed, then the reasoning process of the parameters in the multi-fields were presented. Finally the conceptual design process of a controllable reducer was used as an example to show the feasibility of the configuration platform.

**Key words:** conceptual design; intelligent configuration; knowledge in the multi-fields; characteristic parameter

## 0 引言

产品方案设计是产品开发周期中最重要的环节,它决定着产品的质量、成本、性能、可靠性、安全性、环境友好性等各个方面<sup>[1]</sup>。研究表明,产品的研发成本大部分用于产品方案设计阶段<sup>[2]</sup>,因此,如何快速进行产品方案设计,同时降低产品开发成本是当前迫切需要解决的问题。随着计算机

技术的发展,计算机辅助产品方案设计技术得到了快速的发展。Zhang 等<sup>[3]</sup>建立了面向功能方法的产品方案专家系统;舒启林等<sup>[4]</sup>提出了基于遗传算法的机械方案计算机辅助设计系统模型;张建明等<sup>[5]</sup>从能量转换的角度提出了基于知识的产品概念设计启发式求解;Mao 等<sup>[6]</sup>提出了基于实例原型的产品方案开发系统;方峻等<sup>[7]</sup>提出了基于知识的产品方案支持系统。上述方法虽然借用了人工智能和数据库技术,但是在表达和利用产品方案设计知识方面还存在不足。

收稿日期:2008—12—05

基金项目:国家 863 高技术 研究 发展 计划 资助 项目  
(2007AA040603)

[4] 岳吉祥.深水半潜式钻井平台钻机系统选型与布局优化研究[D].东营:中国石油大学,2009.

[5] CB—Z319—1982.运输船重量分类及重心计算—中华人民共和国国家标准—船舶标准(2008)网络版标准[S/CD].北京:中国标准出版社,2008.

[6] 岳吉祥,綦耀光,肖文生,等.深水半潜式平台钻井材料输送系统配置与布局研究[J].船海工程,2008,37(4):31-36.

[7] 刘海霞.深水半潜式钻井平台的总布置[J].中国海洋平台,2007,22(3):7-12.

[8] 岳吉祥,綦耀光,肖文生,等.半潜式钻井平台双联

钻机钻台布局设计研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(6):113-117.

(编辑 张 洋)

**作者简介:**陈 平,男,1972 年生。中国石油大学(华东)机电工程学院博士研究生。主要研究方向为油田开发管理、石油机械、钻井工艺。发表论 文 9 篇。岳吉祥,男,1971 年生。中国石油大学(华东)机电工程学院博士研究生。綦耀光,男,1957 年生。中国石油大学(华东)机电工程学院教授、博士研究生导师。肖文生,男,1966 年生。中国石油大学(华东)机电工程学院教授、博士研究生导师。杨 磊,男,1982 年生。中国石油大学(华东)机电工程学院博士研究生。

智能化配置技术已在产品管理领域得到成功应用,是当前实现产品快速定制的关键技术。笔者提出一种基于智能化配置的产品方案设计方法,该方法以产品方案设计多领域知识模型为基础,以基于知识的协同优化引擎为驱动,通过输入的需求参数,配置推理出合理的产品方案。

1 多领域知识模型

产品方案设计是一个知识驱动创新的过程,涉及多个学科领域(如几何特征装配领域、运动学领域、控制学领域等)的各种知识信息。一个具体领域的知识信息有不同的表现形式,包括数学公式、图形图表、结构化知识等,并且,随着产品方案设计过程的深入,这些知识信息又不断分裂、聚合和优化。因此,如何综合这些复杂多变的知识信息,实现多学科协同优化设计,成为产品方案设计师面临的一个难题。

为了全面描述产品方案设计的多领域知识信息,便于智能化配置求解器推理求解,本文构建了多领域知识模型,它通过开放的集成架构,以特征参数为纽带,将各领域的知识模型联结起来,构成全面描述产品特征信息的知识模型。

1.1 特征参数

特征参数是描述知识信息的一种重要手段。在产品方案设计过程中,每一个领域的知识信息都可以用一组具有相同特征属性的特征参数来描述。如减速器产品的动力学知识模型可以用特征参数集{功率,工作寿命,转速,输出转速,输入转矩,效率,应力}来表示。

定义1 产品方案设计的每一个领域知识模型都可描述为  $KM = \{k_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ , 其中,  $k_i$  为描述该领域知识信息的特征参数,  $n$  为特征参数的个数。

从宏观上说,描述领域知识模型的特征参数分为输入参数、输出参数。根据输入参数,知识模型通过内嵌的知识库推理出输出参数。从微观上说,这些特征参数又可分为自由参数、被动参数。自由参数是描述一个领域知识信息的关键参数,它不受本组内其他参数的驱动,在智能化配置时,它需要来自外界的赋值,如齿轮的模数、齿数、啮合角等几何参数都是齿轮几何装配知识模型中的自由参数。而被动参数则受到自由参数的约束,自由参数通过特征驱动规则来驱动被动参数,如齿轮的分度圆直径、齿顶、齿根等形状参数是被动参数,受模数、齿数等自由参数的驱动来决定取值。

各组特征参数相互独立而又互相约束,其独立性表现在一组特征参数构成的领域知识模型具有独立的逻辑表达功能,它不会受到其他知识模型的影响而失去逻辑表达能力。但是,由于各组特征参数同时描述一个产品,所以它们必然具有互联性,且相互约束。比如几何装配知识模型中的结构尺寸、位置参数不但决定着产品的制造成本,而且还制约着产品在材料强度、动力学、传动学等方面的知识参数。因此,通过特征参数的互联及映射,产品方案设计的多领域知识信息能有效集成在一起。

1.2 多领域知识模型

定义2 多领域知识模型指以特征参数为纽带,将各领域知识模型联结在一起,形成的一个能同时描述产品多个领域相互驱动、相互约束的立体智能模型网络。

在多领域知识模型网络中,任何一个特征参数的改变,都可通过互联参数波及到其他关联的领域知识模型中,以便于这些模型作出相应的更改或反馈。基于多领域知识模型,可实现多学科协同产品优化。

对于现代复杂的机电产品,其涉及的各领域学科知识一般包括几何学、电气电子、控制学、运动学、动力学、流场、强度等。基于上述领域,本文构建了图1所示的产品多领域知识模型网络。该模型具有以下特点:

(1)参数驱动特性。多领域知识模型是由各个领域知识模型通过特征参数互联在一起的,由于每个领域知识模型都有输入输出参数,所以联

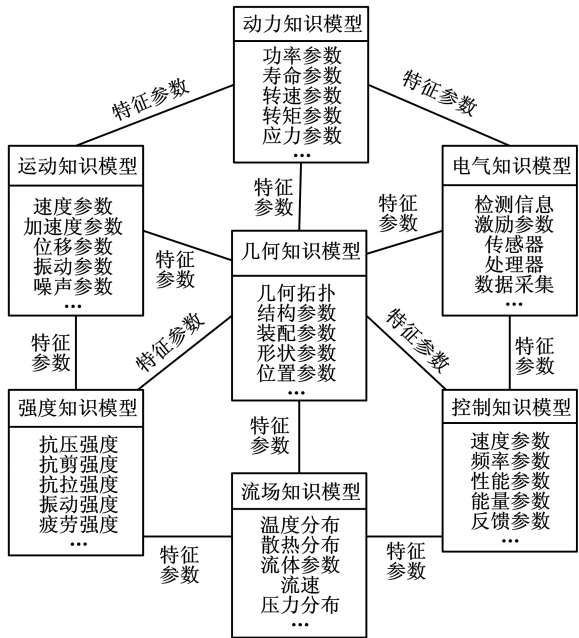


图1 多领域知识模型网络

结后形成的多领域知识模型也有输入输出参数。通过输入参数,多领域知识模型经过智能化配置知识库推理计算各项输出参数。

(2)可扩展性。该模型的可扩展性表现在:任何一个领域的知识模型都可通过特征参数与其他领域的知识模型相联,而网络中的任何一个领域知识模型联网或脱网,都不影响多领域知识模型的行为方式。

(3)局部功能封装性。在多领域知识模型网络中,任何一个领域的知识模型节点都具有独立的逻辑功能表达能力,而且这种能力与该领域知识模型是否在多领域知识模型网络中无关。

产品方案设计是一个由模糊的产品功能需求过渡到功能设计、产品整体结构设计的过程。在这个过程中,各领域知识信息将随之不断深化,因此,相应的特征参数也会发生变化,这种变化用特征参数的属性来表示。

**定义 3** 对于多领域知识信息来说,有特征属性域  $U_{KM} = \{u_{k_j} \mid j = 1, 2, \dots, p\}$ ,其中,  $u_{k_j}$  为知识域的特征参数属性,  $p$  为知识领域个数。

特征参数属性  $u_{k_j}$  的值域用  $Y_j$  表示,则多领域知识模型的特征参数值域为  $R(U_{KM}) = F(u_{k_j}) = Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_j$ ,其中,  $F$  为特征参数属性域在值域上实现时要满足的约束条件。

因此,特征参数属性域可以用一个通用的三元组模型来表示,即  $(U_{KM}, R, F)$ 。

## 2 面向方案设计的智能化配置框架

### 2.1 智能化配置框架

产品配置技术是实现产品系列化和快速变型设计的重要手段。一般的产品配置是以客户需求为输入,通过对配置模型的实例化,以产品的最终配置结果为输出的一类设计活动<sup>[8]</sup>。传统的产品配置按照产品开发阶段可分为:面向销售的配置、面向工程的配置、面向工艺的配置、面向生产调度的配置、面向制造的配置、面向装配的配置。这些产品阶段配置虽然缩短了产品的开发周期,但一般是基于预期的市场需求进行冗余方案设计,并基于设计的方案建立可配置的产品模型,如图 2 所示。

而实际上,产品方案设计的结果在很大程度上是超过市场预期需求的,所以传统的配置技术在产品方案设计方面存在不足。针对此,本文提出一种面向方案设计的智能化配置方法,如图 3 所示。该方法以产品方案设计的多领域知识模型为基础,在产品功能实例库及配置知识库的支持

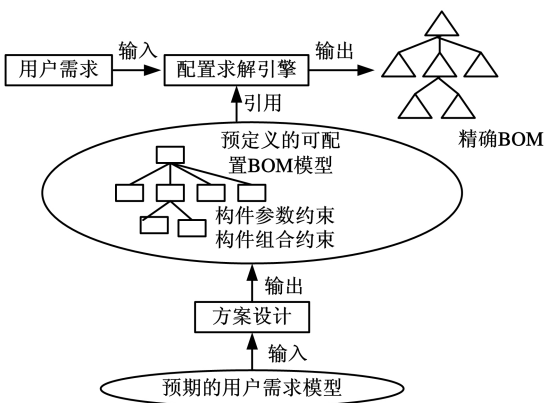


图 2 传统的配置框架

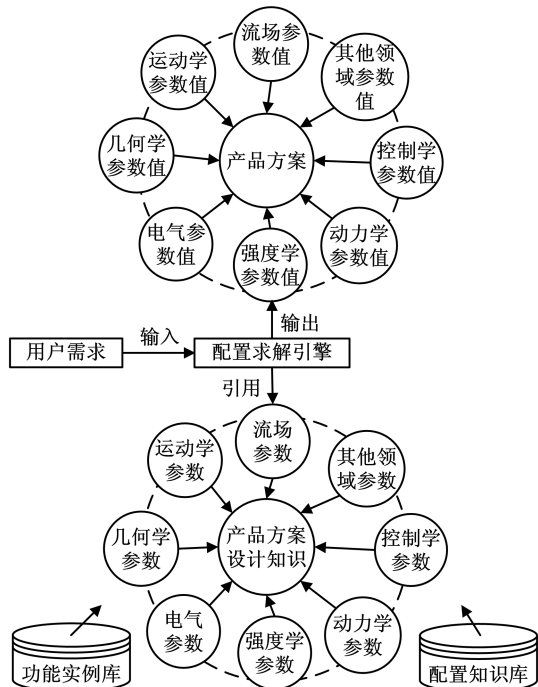


图 3 面向方案设计的智能化配置框架

下,通过智能化配置求解引擎对各领域的知识特征参数推理及求解,得出满足客户需求的各领域特征参数值,并通过这些特征参数的互联和约束,完成产品方案的配置。

### 2.2 配置求解模型

在面向方案设计的智能化配置求解模型中,每一个知识领域都有一个配置求解器。产品方案的配置实质上是一个基于多领域知识特征参数的求解、协同、优化处理的过程。由于面向用户需求的功能抽象条件不同,功能配置生成的可行解可能不是唯一的,因此,面向产品方案的智能化配置的目标就是找出满足约束条件的可行解。配置求解模型主要涉及以下两个方面:

(1)用户需求。用户需求一般是模糊不清的,不能直接作为配置求解模型的输入参数,因此在产品方案设计的多领域知识模型确定后,定义一



组特征参数变量,抽象描述用户需求,作为配置求解的输入参数。

(2)配置约束。产品方案配置过程的约束条件主要包括:①产品方案设计各领域特征参数的取值范围;②各领域内特征参数的约束关系;③各领域间特征参数的约束关系;④变量配置规则;⑤特征参数值版本的有效性规则。

假定某产品方案有  $m$  个特征变量,记为  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 。该产品方案涉及  $p$  个领域知识模型,记为  $\mathbf{KM} = (KM_1, KM_2, \dots, KM_p)^T$ ,其中领域知识模型  $KM_j$  的特征参数记为  $\mathbf{K}_j = (k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jn})^T (j = 1, 2, \dots, p)$ 。 $\mathbf{K}_j$  实例化的取值范围构成产品方案设计结果的集合  $PS = \{s_1, s_2, \dots, s_r\}$ ,其中,  $s_q (q = 1, 2, \dots, r)$  是  $\mathbf{K}_j$  不同版本序列的组合。

假定变量配置规则集为  $R_{\text{var}}$ ,功能构件装配约束规则为  $R_c$ ,各领域内各特征参数的约束规则集为  $R_{\text{DI}}$ ,各领域间特征参数的约束规则集为  $R_{\text{DE}}$ ,各领域特征参数版本的有效性规则集为  $R_{\text{ef}}$ 。

根据上述假定,智能化产品方案配置问题的求解模型可描述如下:

条件变量  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$

集成的多领域知识模型  $\mathbf{KM}$

功能实例库  $B_f$

配置约束  $\left. \begin{matrix} R_{\text{var}} \\ R_c \\ R_{\text{DI}} \\ R_{\text{DE}} \\ R_{\text{ef}} \end{matrix} \right\}$  配置知识库  $B_{\text{con}}$

目标变量记为

$\mathbf{y} = (KM_1, KM_2, \dots, KM_p, s_1, s_2, \dots, s_r)^T$

产品方案配置过程可表示为  $\mathbf{x}, \mathbf{KM}, B_f, B_{\text{con}}$  的函数:

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}, \mathbf{KM}, B_f, B_{\text{con}})$$

其中,  $f$  为配置求解过程。

### 3 基于多领域知识模型的配置知识库

#### 3.1 配置知识的表示

由于产生式规则能够很好地描述各领域知识,并且可较容易地实现知识的获取,因此本文用规则来表示配置知识。

#### 3.2 配置条件的设定

在面向方案创新的智能化配置平台中,每一个知识领域,都对应一个配置求解器。配置条件的设定关键在于用户需求的规范化、参数化,为便于这些配置求解器的读取,每一个知识域都构建一

个特征参数集  $\{f_1, f_2, \dots, f_p\}$ ,代替非标准化的用户需求。为了方便配置推导运算,根据每一个特征参数集导出一个相应的配置变量集  $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_w\}$ ,并且特征与变量的关系是多对多的关系。在配置过程中,用户根据特征参数集输入一组特征参数作为配置条件,智能配置系统自动映射一组配置变量。

#### 3.3 配置约束规则的创建

配置规则表达描述领域知识模型的特征参数之间的存在性约束,特征参数取值范围以及特征参数取值版本之间的约束关系。

(1)变量配置规则。如前所述,用户需求最终映射为对应各领域知识信息的多组配置变量的取值,在产品方案功能配置时,根据配置变量的取值,依据配置变量约束规则,实例化各知识领域的特征参数。配置变量可以有多种表现形式,如字符、数字、日期、逻辑型等。与配置变量类型相对应,变量配置规则也有多种逻辑运算法则,如“=”、“<”、“>”、“like”、“and”等。

(2)特征参数的约束规则。特征参数之间的约束规则包括两个层次:一个是组内约束,该层次的约束规则表达了领域内自由参数与被动参数之间的驱动规则;一个是组间约束,该层次的约束规则表达了领域间各组特征参数之间的约束关系。特征参数在这两个层次上的约束关系表示为驱动关系、互斥关系、组合关系等。

(3)版本有效性规则。产品方案配置完成之前,一组特征参数可能有多个版本状态,这就存在特征参数版本选择的问题。因此,对于每一个版本的特征参数集,应定义一些有效性属性。在产品方案配置时,系统根据配置变量的取值,选取合适的有效性版本。

#### 3.4 配置知识库的构建

基于多领域知识模型的产品方案配置知识库的构建过程如图4所示,具体的构建步骤如下:

(1)根据各领域知识信息,建立集成的多领域知识模型,确定各组特征参数中的自由参数及被动参数,并使各组特征参数与功能实例库建立关系。

(2)根据用户需求,对每个知识领域都建立特征参数集  $\{f_1, f_2, \dots, f_p\}$ ,并映射为相应的配置变量集  $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_w\}$ 。

(3)建立各个领域的问题求解器,如几何装配领域问题求解器、运动学领域问题求解器等。

(4)建立特征参数的约束规则,包括  $R_{\text{DE}}$ 、 $R_{\text{DI}}$ 。

(5)建立版本有效性规则  $R_{\text{ef}}$ 。

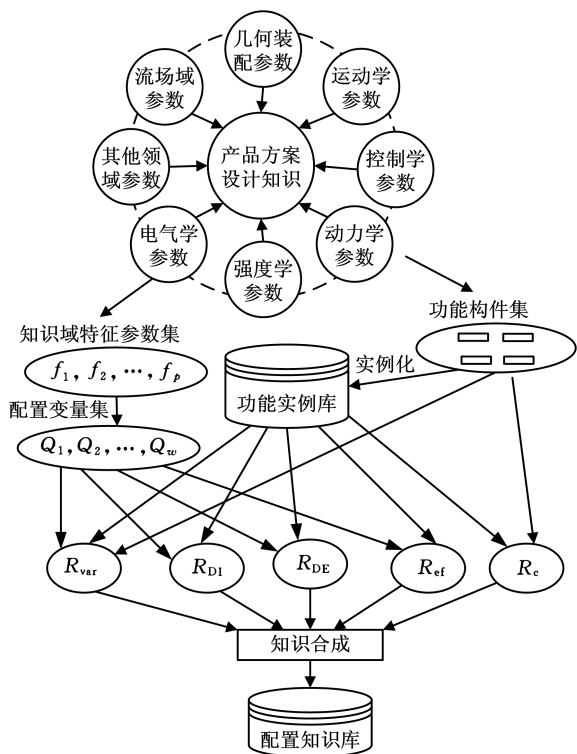


图 4 产品方案配置知识库

- (6) 建立变量配置规则  $R_{var}$ 。
- (7) 合成多个配置规则, 构成配置知识库。

4 基于智能化配置的产品方案求解过程

由前述配置求解模型可知, 产品方案的生成过程实质上是一个在给定产品特征参数初值的基础上基于智能化配置知识库推理求解的过程。我们利用智能配置知识库, 采用正向推理的方法, 推理求解最合适的产品方案。在正向推理求解过程中, 首先输入某一领域自由特征参数初值作为推理求解的初始事实条件, 然后在规则的约束下, 经过知识域问题求解器, 推理求解出其他特征参数值, 并根据冲突规则, 进行冲突检查。各领域特征参数推理循环进行, 直至输出合理的配置结果。基于智能化配置的产品方案推理求解过程如图 5 所示。

5 系统开发与总体框架

以课题组现有的产品协同开发平台 IntePLM 为基础平台, 开发了产品方案设计平台。该系统开发环境为 VC 2005, 后台数据库系统为 Oracle 10g, 本地数据库为 MS Access2000, 使用 IIS5.0 提供 Web 与 FTP 服务, 通信 API 为 WinSock2.0。

产品方案设计平台总体架构如图 6 所示。该平台以数据库和知识库为底层支持, 并无缝嵌入

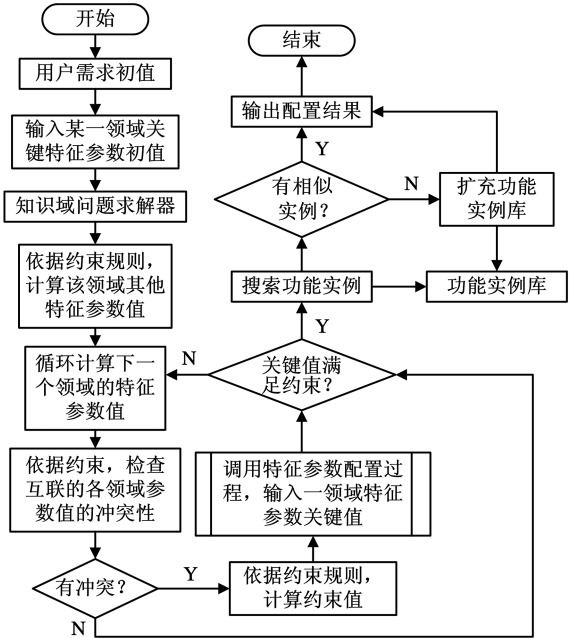


图 5 基于智能化配置的产品方案推理求解过程

到 IntePLM 环境中, 所以它可以直接利用协同平台的知识资源及各种应用工具。知识库中储存了产品设计的各种知识, 产品模型库中保存了已有的成功的产品模型, 约束规则库和配置策略库中则保存着配置过程中所用到的各种约束规则和配置策略。设计人员以 PLM 平台为工作环境, 通过对产品进行市场分析、用户需求分析, 获取并输入产品方案需求特征参数。然后系统自动在约束规则和配置策略库的约束下, 通过配置求解引擎, 利用各领域问题求解器, 求解各特征参数, 并利用推理机, 推理出几种产品方案。在这个过程中, 用户通过各种知识工具, 可以挖掘重用各种设计知识。最后, 系统通过与产品模型库交互, 并利用配置方案验证、配置方案评价模块, 输出最合理的产品方案。此外, 企业可通过平时的设计和生产, 不断扩充各种知识库和产品模型库。

6 结论

在产品方案设计中, 如何综合各领域设计知识, 实现产品多学科协同优化设计是产品方案设计者面临的难点和瓶颈。本文提出了一种基于智能化配置的产品方案设计方法, 建立了基于多领域知识模型的智能化配置框架, 通过智能配置及推理引擎, 实现多领域知识特征参数的优化取值, 通过这些特征参数值的约束, 可实现产品方案的快速配置设计。这种快速的产品方案设计方法对提高企业的产品快速设计能力、加快其产品创新速度具有重要意义。

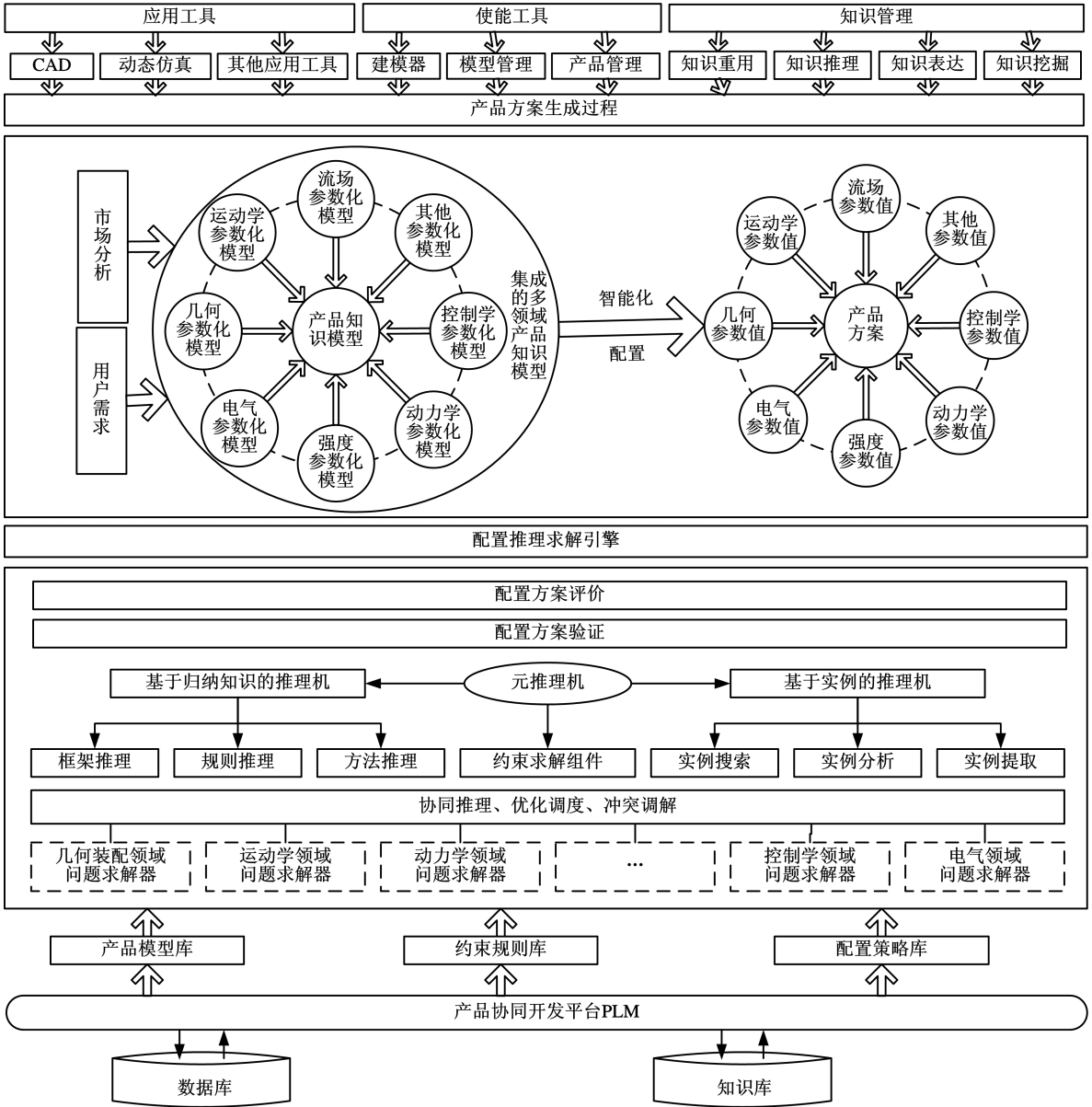


图6 基于智能化配置的产品方案设计系统总体框架

参考文献：

[1] Hsu W, Woon I. Current Research in the Conceptual Design of Mechanical Product[J]. Computer — aided Design, 1998,30(5) :377-389.

[2] Ullman D G. The Mechanical Design Process[M]. 2nd ed. New York:McGraw— Hill, 1997.

[3] Zhang W Y, Tor S B, Britton G A. FuncDesigner—a Functional Design Software System[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003,22(3):295-305.

[4] 舒启林,郝博. 机械产品方案设计自动化研究[J]. 中国机械工程,2002,13(19):1676-1678.

[5] 张建明,魏小鹏,滕弘飞. 基于知识的机械产品概念设计启发式求解[J]. 中国机械工程,2006,17(13):1411-1416.

[6] Mao Q, Qin J, Zhang X, et al. Case Prototype Based

Design Support Tool for Mechanical Product Conceptual Design[C]// The Fourth International Conference on Computer — aided Design and Computer Graphics, Wuhan,1996:36-38.

[7] 方峻,聂宏. 一种基于知识的产品方案设计支持系统[J]. 中国制造业信息化,2005,34(5):118-121.

[8] 张劲松,王启付,刘清华,等. 基于模型的产品智能化配置研究[J]. 机械工程学报,2003,39(6):128-134.

(编辑 卢湘帆)

作者简介:李玉梅,女,1979年生。华中科技大学国家企业信息化支撑软件工程研究中心博士研究生。主要研究方向为产品数据管理、产品全生命周期管理等。万立,男,1963年生。华中科技大学国家企业信息化支撑软件工程研究中心教授、博士研究生导师。熊体凡,男,1973年生。华中科技大学国家企业信息化支撑软件工程研究中心讲师、博士。