

知识集成环境下产品设计过程动态组织方法^{*}

石浩然¹ 王维锐¹ 吴参² 江威¹

(1. 浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室, 杭州 310027; 2. 杭州电子科技大学机械工程学院, 杭州 310018)

【摘要】 提出一种基于条件设计结构矩阵 DSM 的过程动态组织方法。首先分析了设计过程中考虑条件约束的必要性, 通过对设计知识及条件参数的引用建立条件约束模型, 然后在传统的参数级 DSM 模型中引入条件知识维, 构成条件 DSM 三维模型。进而在该模型基础上利用设计过程中时变的条件 DSM 叠加视图, 动态地进行后续过程重构。以汽车等速万向节传动轴设计过程为例, 将上述思想用于通用变型设计过程支持系统, 结果表明该方法可行, 并且有利于提高产品设计的自动化程度。

关键词: 设计过程管理 动态组织 设计知识 条件约束 设计结构矩阵

中图分类号: TH122; TH166 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)11-0183-06

Dynamic Reconstructing of the Product Design Process in Knowledge Integrated Environment

Shi Haoran¹ Wang Weirui¹ Wu Can² Jiang Wei¹

(1. State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract

A dynamic process management approach based on conditional design structural matrix was proposed. Considering the possibility of the conditional constraints during the design process, the conditional constraint model was constructed based on the references of the design knowledge and condition parameters, the conditional knowledge dimension was brought into the traditional DSM model, and then the 3D conditional DSM model was obtained. Using the dynamical superimposed conditional DSM view in the model mentioned above, the consequence of the reconstruction in the design process could be reconstructed again and again. The approach presented was finally used in the general variant design system supporting the vehicle CVJ shafts design process modeling, an example was provided and the results demonstrated the higher efficiency and automation degree of the approach presented.

Key words Design process management, Dynamic reconstructing, Design knowledge, Condition constraint, Design structural matrix

引言

近年来, 在基于设计结构矩阵 (design structure matrix, 简称 DSM) 模型的产品开发过程管理研究中, 以 Eppinger 等^[1~3]为代表的国外学者以及较多国内学者^[4~6]在知识集成、过程模型的重组及仿真等方面进行了大量研究, 而总体上说, 上述研究均偏

重于行为层, 亦即偏重描述和分析设计任务, 而对设计对象的要素分析不够, 使得过程模型限制到零件级的粒度上, 不能进行更深层次的优化。

文献[7]深入分析了产品对象的设计要素, 将过程建模与产品设计知识紧密集成, 借助对设计知识的重用, 能更少地依赖设计师的经验, 提高过程规划的自动化程度, 但该方法对具有条件约束的两个

收稿日期: 2011-01-04 修回日期: 2011-03-07

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51005206)和浙江省重大科技专项(2008C01037)

作者简介: 石浩然, 博士生, 主要从事产品开发过程管理、协同设计研究, E-mail: haoranshi@gmail.com

通讯作者: 王维锐, 助理研究员, 博士, 主要从事设计方法学、车辆可控悬架研究, E-mail: wwrzju@126.com

以上活动间的迭代过程不能进行有效支持,其应用具有局限性。

本文在文献[7]的基础上,充分考虑设计过程中的条件约束,在原有参数级 DSM 基础上引入条件知识维,提出一种设计过程动态组织方法,以期适用于知识集成环境下系列化产品变型设计的过程管理。

1 知识集成环境中的过程条件约束

变型设计,或称适应性设计,是指在工作原理、功能结构基本不变的前提下对已有产品的结构、零部件、尺寸、材料等进行变更而形成新产品的一种设计方法。可配置产品结构模型是变型设计中的一种结合了扩展与或树、装配有向图以及可扩展属性集的产品模型^[8]。通过引用可配置产品模型中零件节点的属性,可建立设计知识模型,并在此基础上推理得到设计参数之间的关联关系及迭代敏度,进而得到描述开发过程的设计结构矩阵。在对设计结构矩阵进行优化以后,在任务流程引擎的支持下,将该类产品的过程模型转换为任务流,进而在设计过程支持系统中进行协同设计^[7]。当流转到某设计任务时,系统会提取过程模型中关联的设计知识,自动计算该任务中需要计算的参数值,对于没有设计知识或设计知识不能形式化表达的设计任务,系统会提示设计人员进行交互输入。然而,从多类汽摩配产品的应用实践中发现,上述方法仍存在以下几点不足:

(1)在一些产品对象的实践中,对设计知识的提取并非简单的查询调用,而是存在一定选择条件的。比如计算摩托车制动器的分泵缸径,在整车质心已知或未知的情况下,计算公式是不同的。

(2)由于涉及过程上游不同或节点的选取,当

前下游需要选取的知识并不相同。比如,在等速万向节传动轴设计中,对于上游设计过程中选择的是钟形壳与传动轴一体或分体两种不同形式,下游若干个计算公式有所不同。

(3)在机械设计的计算中,经常会遇到校核计算结果的情况,在原有系统中是通过任务流程引擎中的条件分支来实现流程的动态流转的。这样的方法仍然停留在行为层的分析处理上,没有深入到参数层的数据驱动,这不符合增加任务搭接程度的初衷,制约了过程流转效率的提高。

由于原有系统中过程模型具有静态性,亦即在设计过程流转当中,过程模型本身是不再变化的,在这样的特性制约下,无法对上述几个场合的计算提供有效支持。

分析发现,上述 3 种场合均体现了设计条件的约束,分别代表了产生条件的 3 种常见来源:设计需求的变化、产品配置结构的变化、校核结果的变化。任何一条设计知识的提取都必须在满足一定条件的情况下进行,即便在原有系统中,也是有隐含条件的,即无论是公式知识还是产生式规则,在提取时都要求其引用的设计参数存在(非空),相当一部分知识还隐含要求参数满足一定约束条件,如非负值等。因此,在过程模型中必须考虑知识提取的条件。

条件约束的基本形式可以概括为:某设计参数存在值;某设计参数的值在期望区间内;由某设计参数构成的条件表达式为真。可作如下表达:

- x_c IS NOT NULL
- (第 1 类条件约束)
- $x_c \in [x_{c0}, x_{c1}]$
- (第 2 类条件约束)
- $R(x_c)$ IS TRUE
- (第 3 类条件约束)

一个基本的条件约束,可以表示为五元组 $c = \{A, K(X_i), x_g, x_c, R(x_c)\}$,其数据结构如图 1 所示

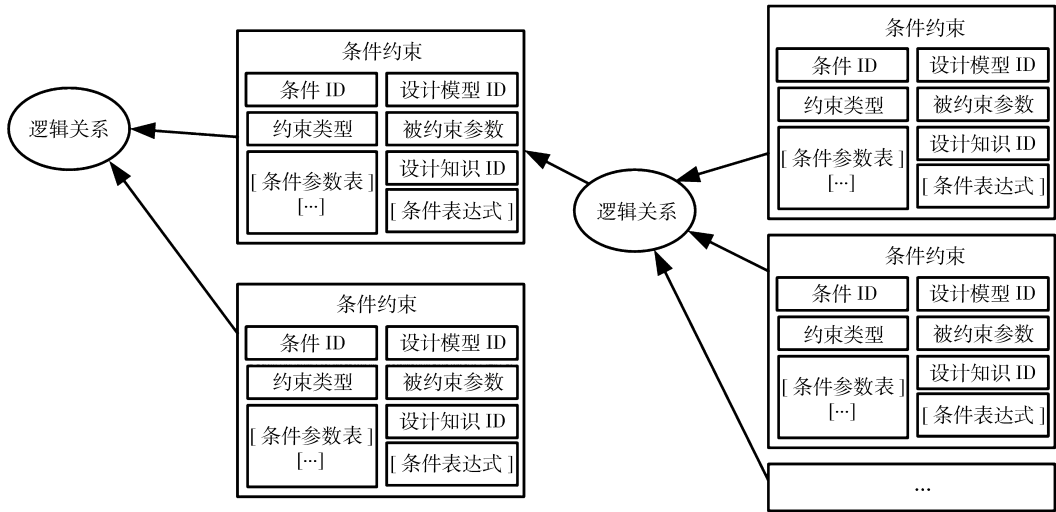


图 1 设计条件约束的数据结构

Fig. 1 Data structure of design conditional constraints

示。五元组中 $A = \{CID, CType, ClassID\}$ 为条件约束的固有属性: ID、条件类型、产品模型分类等; $K(X_i)$ 为与条件 c 关联的设计知识, K 表示知识映射, X_i 表示决策参数矢量; x_g 为以 c 为目标参数; x_c 为条件参数; $R(x_c)$ 为关于条件参数的条件表达式。该五元组描述了这样一种情形: 当设计过程流转到要计算 x_g 时, 如果 x_c 和 $R(x_c)$ 能够使条件 c 满足要求, 则可通过调用知识 $K(X_i)$ 及 X_i 的值来得到 x_g 。

可以通过具有一定逻辑关系的基本条件约束的组合得到复杂条件约束, 如图 1 中所示。逻辑关系一般为 OR、AND、XOR。将复杂条件约束记为 $C = \{A, K(X_i), X_g, X_c, R(X_c)\}$, 其中 X_g 为 x_g 集合构成的目标参数矢量, X_c 为 x_c 构成的条件参数矢量。由于多数情况下, 条件约束是由若干基本条件构成的, 所以后文将条件约束的一般形式记为 C 。

在逻辑层次上, 条件约束的嵌套可以是无限层的, 由于可配置产品结构模型中零件节点之间的泛化传递不存在环结构, 因此在保证了产品嵌套结构不会死循环的同时, 可以保证这里的泛化节点间的条件约束不会出现互为条件的循环。需要指出, 由于公式中参数引用一般是单向的, 则正常情况下条件的嵌套不会出现循环, 但在实践中无法系统地保证用户输入的合理性, 因此仍然开发了死循环检查功能, 在用户输入的条件与已存在的条件产生循环引用时, 报错给用户。

2 条件 DSM 三维模型

通过对设计参数的引用建立设计知识, 能够形式化表达并由计算机自动处理的设计知识多为公式类知识和产生式规则类知识。无论形式怎样, 设计知识可以被抽象地概括为

$$X_g = K(X_i)$$

K 既能描述目标参数 X_g 的计算方法, 又可以通过对 K 的推理得到可配置产品结构模型中参数的依赖关系。设产品设计过程模型中的全部设计参数有 n 个, 对一条设计知识 K 进行推理, 可以得到一组设计参数关联信息: $\text{rel}(i, j) = f(x_i, x_j)$, 表示参数 x_i 的获得需要依赖于参数 x_j , 其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。进而可以得到初始设计结构矩阵 $M_{n \times n} = [f(x_i, x_j)]$ 。

定义: 若对于设计知识 $X_g = K(X_i)$, 存在提取该知识的条件约束 $C = \{A, K(X_i), X_g, X_c, R(X_c)\}$, 则称 X_c 为知识 $X_g = K(X_i)$ 的条件依赖参数矢量。

如果 C 为第 1 类基本条件, 那么显然有 $X_c = X_i$ 。

定义: 在有 n 个设计参数的产品设计过程模型中, 若对设计知识 $X_g = K(X_i)$ 进行推理可以得到参数关联 $\text{rel}(i, j) = f(x_i, x_j)$, 且 K 存在条件依赖参数矢量 X_c , 则记 X_g 和 X_i 之间存在一组条件关联

$$\text{rel}(i, j)_k = f(x_i, x_j)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, n; x_k$ 属于 X_c 中的参数集合。这些关联表示参数 x_i 的获得在 x_k 满足一定条件下需要依赖于参数 x_j 。

根据上述定义, 可以开始建立条件 DSM 三维模型。首先对每一条知识建立条件约束, 这时需要设计工程师的交互输入, 需要分别输入该知识的各个基本条件约束以及它们间的逻辑关系。当全部知识的条件约束输入以后, 再反查每个参数作为条件参数时所对应的 rel_k , 进而可得到

$$\begin{aligned} M_1 &= [\text{rel}(i, j)_1] \\ M_2 &= [\text{rel}(i, j)_2] \\ &\vdots \\ M_k &= [\text{rel}(i, j)_k] \\ &\vdots \\ M_n &= [\text{rel}(i, j)_n] \end{aligned}$$

上述方阵分别表示 x_k 满足一定条件时, 产品设计过程模型中的参数的依赖关系。由 $M_1, M_2, \dots, M_n$ 构成的 $n \times n \times n$ 的三维矩阵, 称为条件 DSM 三维模型, 如图 2 所示。该立方离散阵的 3 个维度都是设计参数, 分别是决策参数、目标参数、条件参数。图中每个小方块代表三维矩阵的元素, 每个元素是一个非负整数。

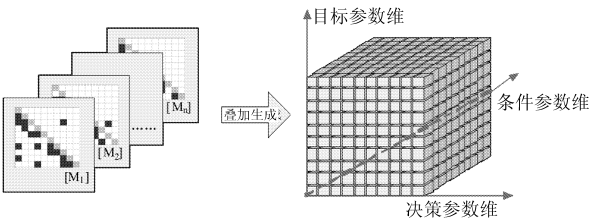


图 2 条件 DSM 三维模型
Fig. 2 3-D traditional DSM model

综上, 在传统二维参数级 DSM 模型中引入条件参数维, 构成条件 DSM 三维模型。与原有方法相比, 对设计知识的条件分析更加深入, 增加了知识提取和调用的条件信息, 其优势在于对产品开发过程中条件约束下不同任务流程变化的支持。流程引擎在提取设计知识之前可以先判断条件约束是否满足, 使条件分支在设计流程中得以动态实现。

3 过程的动态组织策略

在产品开发过程中,随着时间推移,设计参数不断变化,三维 DSM 模型中所有条件的满足状态也在不断变化。模型中的所有条件,在某一时刻,存在一种满足状态,有些条件是成立的,另外一些则是不成立的。每当设计参数发生变化时,根据当前参数值计算条件的满足状态,在三维模型的条件参数维,遍历所有条件参数,找到当前满足的条件所对应的参数,将这些参数对应的 M_k 视图在条件维上叠加起来,构成当前的参数依赖关系矩阵 $\{M_k\}$,并在此矩阵的基础上进行后续过程的重构,有关重构计算过程参见文献[7]。然后根据当前的条件来选择设计知识,进行参数计算,每次计算一轮参数后马上再重新遍历条件列表,找到新的符合条件的参数依赖关系矩阵,由此实现过程的动态组织,上述策略如图 3 所示。

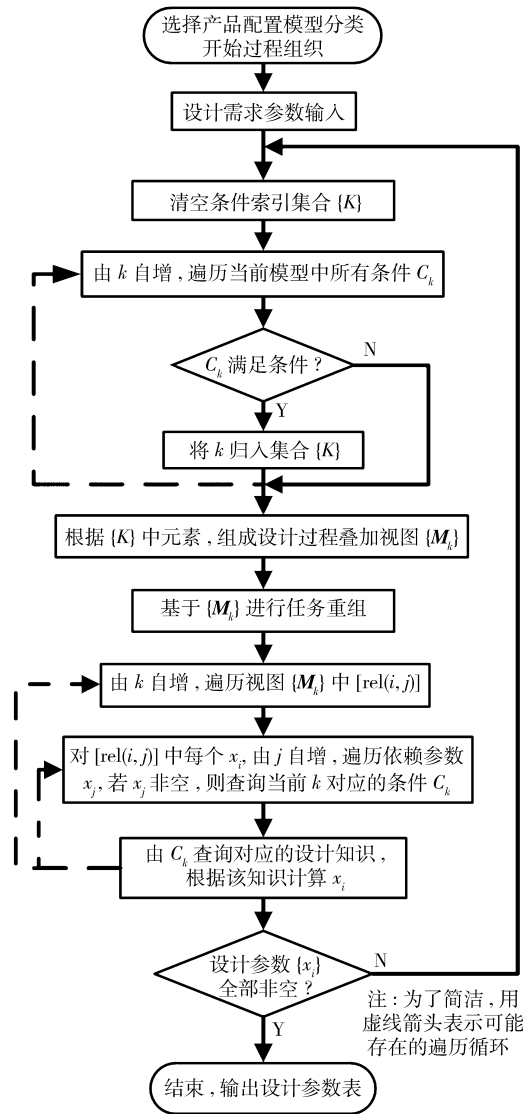


图 3 动态过程组织策略

Fig. 3 Strategy of dynamic process organizing

在这种策略下,过程的驱动来源不再单纯是任务状态变化或条件分支的变化,而加入了数据的变化以及设计条件的状态变化。因此,在设计流程启动之前无法明确地知道哪些任务要执行,也不能明确知道反复迭代的次数,这些是在过程执行过程中动态确定的。为了控制迭代次数,在实践应用中,一方面设计了死循环的检查,另一方面还允许在过程中手动修改设计参数值。

4 应用实例与系统实现

以 CVJ-LJ-VWN*** 型等速万向节传动轴总成成为对象,应用本文方法进行条件输入和设计过程建模,产品对象的部分设计参数的公式知识及知识应用的条件如表 1 所示。

分析表 1 中的 40 条设计知识,可以发现,编号 01~12 及编号 18 等 13 个参数是设计需求,不需计算也没有知识提取条件;编号 22 及编号 28~37 等 11 个参数为一般的中间参数,它们的计算方法是唯一的,不存在条件变化,但其计算都有隐含的条件,即计算所需的参数不能为空;编号 13~17 表达了设计需求变化带来的条件约束;编号 19~21、编号 23~27、编号 38~39 等表达了 4 个参数的计算需要不同的条件约束,其中编号 38~39 表达了产品结构配置的不同而带来的条件约束,在轴间极限夹角为零和不为零时,钟形壳沟道有效长度的计算公式不同,钟形壳沟道直径等另外几组参数的设计知识都表达了校核结果的不同而带来的条件约束变化,如表 1 所示,在知识库中可以预定义不同的校核结果下,参数的调整方向及步长,以及初始的试凑值,这样均便于设计计算及优化的自动进行。实际工程应用中, CVJ-LJ-VWN*** 系列的不同型号产品,由于其具体设计流程中条件状态的动态变化,计算的迭代次数及调用知识步骤都各自不同。

上述分析内容在表 2 中均概括列出,本例中没有因设计需求不同而带来的条件约束变化。限于篇幅,保持架宽度、厚度、内外球直径等无条件约束的一般计算及后续计算的参数及相关知识没有列出。

采用微软 .NET 开发工具和 SQL Server 数据库,开发了 Windows 环境下的产品设计过程支持系统。将上述设计知识依赖的条件录入到每条知识下,由数据库统一存储,当过程流转时自动根据知识的条件状态进行知识查询和调用。条件 DSM 模型以及过程的规划在后台自动计算。知识数据、条件数据、过程数据与产品结构模型的数据都存入 PDM 系统中,进行统一维护,程序界面如图 4 所示。

表 1 设计参数及知识实例

Tab. 1 Example of design parameters and knowledge

编号	目标参数	参数名称	知识内容	条件
01	Dbe	钟形壳外径 D_{be}	(设计需求输入)	(无条件)
02	Dsei	星形轮内花键大径 D_{sei}	(设计需求输入)	(无条件)
03	Epsilon	沟道间隙 ε	(设计需求输入)	(无条件)
04	M_max	万向节最大扭矩 $M_{\max}$	(设计需求输入)	(无条件)
05	Beta	接触角 β	(设计需求输入)	(无条件)
06	Sigma_H	许用接触应力 $[\sigma_{\text{H}}]$	(设计需求输入)	(无条件)
07	Miu_s	星形轮材料泊松比 μ_s	(设计需求输入)	(无条件)
08	Es	星形轮材料泊松比 E_s	(设计需求输入)	(无条件)
09	Miu_b	钟形壳材料泊松比 μ_b	(设计需求输入)	(无条件)
10	Eb	钟形壳材料弹性模量 E_b	(设计需求输入)	(无条件)
11	Miu_w	钢球材料泊松比 μ_w	(设计需求输入)	(无条件)
12	Ew	钢球材料弹性模量 E_w	(设计需求输入)	(无条件)
13	Alpha	设计轴间极限夹角 α	$\alpha = 15^\circ$	α IS NULL
14	Alpha	设计轴间极限夹角 α	$\alpha = 0$	α IS NOT NULL AND $\sigma_{\max} \geqslant 10[\sigma_{\text{H}}]$
15	Alpha	设计轴间极限夹角 α	$\alpha = \alpha - 1^\circ$	α IS NOT NULL AND $\sigma_{\max} \geqslant 5[\sigma_{\text{H}}]$ AND $\sigma_{\max} < 10[\sigma_{\text{H}}]$
16	Alpha	设计轴间极限夹角 α	$\alpha = \alpha - 0.5^\circ$	α IS NOT NULL AND $\sigma_{\max} \geqslant [\sigma_{\text{H}}]$ AND $\sigma_{\max} < 5[\sigma_{\text{H}}]$
17	Alpha	设计轴间极限夹角 α	$\alpha = \alpha + 0.5^\circ$	α IS NOT NULL AND $\sigma_{\max} < 0.05[\sigma_{\text{H}}]$ AND $\alpha \leqslant 15^\circ$
18	EpsilonPri	沟道长度盈余量 ε'	(设计需求输入)	(无条件)
19	Dpw	球组节圆直径 D_{pw}	$D_{pw} = 60.522$	D_{pw} IS NULL
20	Dpw	球组节圆直径 D_{pw}	$D_{pw} = D_{pw} + 0.5$	D_{pw} IS NOT NULL AND $D_{pw} < 0.51(D_{be} + D_{sei})$
21	Dpw	球组节圆直径 D_{pw}	$D_{pw} = D_{pw} - 0.5$	D_{pw} IS NOT NULL AND $D_{pw} > 0.53(D_{be} + D_{sei})$
22	Dw	钢球直径 D_w	$D_w = 0.22D_{be}$	D_{be} IS NOT NULL
23	Db	钟形壳沟道直径 D_b	$D_b = 1.03D_w$	D_w IS NOT NULL AND $D_w < 18$
24	Db	钟形壳沟道直径 D_b	$D_b = 1.04D_w$	D_w IS NOT NULL AND $D_w \geqslant 18$ AND $D_w < 24.5$
25	Db	钟形壳沟道直径 D_b	$D_b = 1.05D_w$	D_w IS NOT NULL AND $D_w \geqslant 24.5$
26	Ds	星形轮沟道直径 D_s	$D_s = D_b$	D_b IS NOT NULL AND D_b 圆整值 < 24
27	Ds	星形轮沟道直径 D_s	$D_s = 1.02D_b$	D_b IS NOT NULL AND D_b 圆整值 $\geqslant 24$
28	Dpg	钟形壳沟道底径 D_{pg}	$D_{pg} = D_{pw} + D_w + \varepsilon$	D_{pw} IS NOT NULL AND D_w IS NOT NULL ε IS NOT NULL
29	Dg	星形轮沟道底径 D_g	$D_g = D_{pw} - D_w$	D_{pw} IS NOT NULL AND D_w IS NOT NULL
30	SigmaRho	沟道曲率 and $\sum \rho$	$\sum \rho = 4/D_w - 2/D_s$	D_w IS NOT NULL AND D_s IS NOT NULL
31	FRho	沟道曲率差 $F(\rho)$	$F(\rho) = -\frac{2}{D_s \sum \rho}$	$\sum \rho$ IS NOT NULL AND D_s IS NOT NULL
32	p	法向接触力 p	$p = \frac{M_{\max}}{\varepsilon(D_g + D_w) \cos \beta}$	$M_{\max}$ IS NOT NULL AND D_g IS NOT NULL AND ε IS NOT NULL AND D_w IS NOT NULL
33	a *	系数 a^*	根据 D_w 查赫兹应力公式系数表	D_w IS NOT NULL
34	b *	系数 b^*	根据 D_w 查赫兹应力公式系数表	D_w IS NOT NULL
35	a	接触椭圆长半轴 a	$a = a^* \left[\frac{\varepsilon p}{2 \sum \rho} \left(\frac{1 - \mu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \mu_b^2}{E_b} \right) \right]^{1/3}$	a^* IS NOT NULL AND p IS NOT NULL AND ε IS NOT NULL AND $\sum \rho$ IS NOT NULL AND μ_s IS NOT NULL AND E_s IS NOT NULL
36	b	接触椭圆短半轴 b	$b = b^* \left[\frac{\varepsilon p}{2 \sum \rho} \left(\frac{1 - \mu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \mu_b^2}{E_b} \right) \right]^{1/3}$	b^* IS NOT NULL AND p IS NOT NULL AND ε IS NOT NULL AND $\sum \rho$ IS NOT NULL AND μ_s IS NOT NULL AND E_s IS NOT NULL
37	Sigma_max	沟道最大接触应力 $\sigma_{\max}$	$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon p}{2 \pi a b}$	p IS NOT NULL AND ε IS NOT NULL AND a IS NOT NULL AND b IS NOT NULL
38	Hb	钟形壳沟道有效长度 H_b	$H_b = (D_g + 2D_w) \tan \alpha + 2\varepsilon'$	D_g IS NOT NULL AND D_w IS NOT NULL AND α IS NOT NULL AND $\alpha > 0$ AND $\alpha < 25$ AND ε' IS NOT NULL
39	Hb	钟形壳沟道有效长度 H_b	$H_b = D_b + \varepsilon'$	α IS NOT NULL AND $\alpha = 0$ AND ε' IS NOT NULL
40	Hs	星形轮沟道有效长度 H_s	$H_s = H_b + \varepsilon$	D_w IS NOT NULL AND ε IS NOT NULL

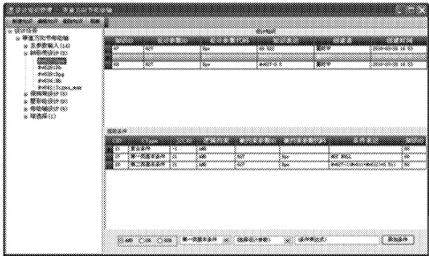
表 2 实例中知识的条件分析

Tab.2 Analysis of knowledge conditions
in former example

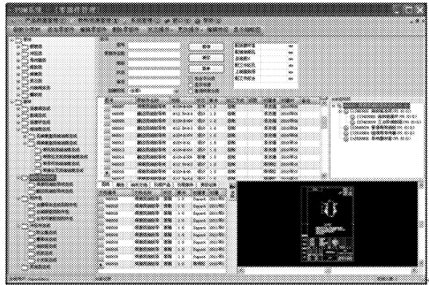
知识编号	知识提取条件	条件来源
01 ~ 12, 18	无条件	
22, 28 ~ 37	仅隐含条件	所需参数不为空
13 ~ 17	隐含条件及设计条件	设计需求变化
38 ~ 39	隐含条件及设计条件	产品配置变化
19 ~ 21, 23 ~ 27	隐含条件及设计条件	校核结果变化

5 结束语

在原有设计知识集成过程管理方法基础上,增加了考虑知识调用的条件,研究了更为一般情况下的设计知识与设计过程建模及重组的集成技术,适用于具有完备设计知识的系列化产品变型设计。实际工程实践表明,对于等速万向节驱动轴这类结构较为简单且知识较易形式化表达的产品,能够实现设计过程的自动流转,中间不需要人工干预,较大地提高了企业响应客户的速度,而对于汽车制动系统总成等复杂对象,也能够动态地实现传统意义上的



(a)



(b)

图 4 系统界面

Fig.4 System user interface

(a) 知识维护界面 (b) 数据集成界面

任务组织,由于一部分任务是由数据自动驱动的,因此也能在一定程度上提高软件对设计过程支持的自动化水平。

参 考 文 献

1 Cho S H, Eppinger S D. A simulation-based process model for managing complex design projects [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2005, 52(3): 316 ~ 329.

2 Chen Li, Ding Zhengdong, Li Simon. A formal two-phase method for decomposition of complex design problems [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2005, 127(2): 184 ~ 195.

3 Wang K L, Jin Y. Managing dependencies for collaborative design [C] // Proceedings of 2000 ASME Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference, Baltimore, Maryland, 2000.

4 张太华,顾新建,白福友. 基于产品知识模块本体的产品知识集成[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 214 ~ 221. Zhang Taihua, Gu Xinjian, Bai Fuyou. Integration of product knowledge based on modular ontologies of product knowledge [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 214 ~ 221. (in Chinese)

5 郭峰,武建伟,潘双夏,等. 基于设计结构矩阵族的过程建模方法研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(9): 1 609 ~ 1 613. Guo Feng, Wu Jianwei, Pan Shuangxia, et al. Product development process modeling based on design structure matrix family [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40 (9): 1 609 ~ 1 613. (in Chinese)

6 姚咏,范文慧,熊光楞. 复杂产品开发过程仿真及其优化方法研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 726 ~ 730. Yao Yong, Fan Wenhui, Xiong Guangleng. Research on complex product development process simulation and its optimization [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18 (3): 726 ~ 730. (in Chinese)

7 石浩然,武建伟,李靓,等. 设计知识集成的过程管理方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(3): 527 ~ 535. Shi Haoran, Wu Jianwei, Li Jing, et al. Process management approach with design knowledge integration [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16 (3): 527 ~ 535. (in Chinese)

8 江伟光,武建伟,潘双夏. 支持变型设计的可配置产品结构模型[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5): 849 ~ 854. Jiang Weiguang, Wu Jianwei, Pan Shuangxia. Configurable product structure model for variant design [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2008, 14 (5): 849 ~ 854. (in Chinese)