

# 基于 CBR 的机械产品智能设计方法研究

张晓丽\*, 李鑫, 郭智春, 胡东明

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024)

**摘要:** 为快速有效地设计机械工程产品, 提出基于实例的机械工程产品设计方法, 可实现重用以往设计知识进行新产品的快速设计. 该法应用 CBR 技术依据共享模型的基础构建智能设计平台, 以解决实例的检索和修改问题为重点, 最终实现了相似匹配计算及最佳实例; 并将技术层面的设计问题归属于人机交互的情感设计, 避免或减少重复性劳动, 改善了工程技术人员的工作环境. 给出基于实例的智能设计方法, 以桥式起重机产品为例说明了这一方法实现的可行性.

**关键词:** 基于实例的推理; 实例模型; 共享模型; 智能设计; 实例检索

**中图分类号:** TP39      **文献标志码:** A

## 0 引言

随着科学技术的不断进步, 信息科学、智能科学和技术正在向各个学科和领域渗透, 机械工程学科也在相关技术的影响下发生着巨大的改变. 尽管目前机械工程产品设计也有很多设计方法, 但是产品的设计, 尤其是机械工程产品方案的设计手段, 则显得力不从心, 跟不上时代发展的需要, 满足不了市场竞争机制的要求. 目前机械工程产品的开发还没有脱离人工设计阶段, 尽管在产品开发中也应用了计算机辅助设计, 但是真正的计算机辅助智能设计还没有实现, 大多数设计者往往被大量重复性劳动占用了宝贵的时间, 工作强度大、效率低, 设计质量因人而异. 而将三维造型技术与实例推理技术在产品设计领域内很好的融合, 实现智能设计是研究工作的重点. 因此研究基于实例的推理(case-based reasoning, CBR)的机械工程产品的智能设计方法, 可有效支持产品概念设计与方案设计等创造性设计活动及产品快速设计, 将计算机三维造型技术与专家知识有效地结合, 利用 CBR 资源库可以使设计者享用以往的技术储备, 避免或减少大量的重复性劳动, 使工程技术人员有精力投入到创新研究工作中.

## 1 CBR 在机械工程产品设计中的应用思路

基于 CBR 的核心思想是人类经验的再利用, 因此非常适用于一些弱理论的领域. 机械工程产品的设计是一个复杂的、弱理论支持的过程<sup>[1]</sup>, 所以, CBR 技术在机械工程产品设计领域的研究、应用和发展具有可行性, 并且是极富希望和发展前途的研究和应用方向. CBR 是人工智能由表层的机器模仿向深层的机器思维发展中的一种形式, 较之于传统的专家系统, 其优点是: (1) 避开了获取规则或模型这一瓶颈, 只需收集过去的实例, 就可建立 CBR 系统; (2) 实施时只需确定相关实例特征, 而且 CBR 系统的实例库可在应用中不断地扩充、完善, 只要有部分实例就可使用; (3) 求解时, 不需要从头推导而是直接从一套完整的方案开始推理, 可以迅速提供解答; (4) 易于维护, 通过增加新实例, 不仅达到了学习的目的, 还可以反映用户需求特性.

目前 CBR 已经被运用于部分机械产品的零件设计和工艺设计中, 作为 CBR 三大关键技术(实例表达、实例检索、实例修改)中的实例表达、实例检索的研究已取得了较大的进展, 但是在机械工程产品整体设计特别是对于装配体而言,

CBR 的应用研究还很少,在实例修改方面迄今仍缺乏较好的解决办法.因此,本文提出基于实例的机械产品智能设计方法,即在基于 VB.NET 智能设计平台和 SolidWorks 三维造型软件的基础上,建立三维机械工程产品实例库;研究智能推理模块,通过重用以往的机械产品设计方案和设计结果来辅助新产品的方案设计,实现机械工程产品的智能设计;并以桥式起重机为例说明其实现的可行性.

## 2 基于实例的产品智能设计原理

### 2.1 产品设计实例与查询实例

将机械工程产品设计的结果由产品类型的选择方案、模块组合清单、零部件清单及三维模型的生成、装配路线等知识和经验以一种结构化的形式进行组织,可形成产品设计实例.

**定义 1** 设计实例:产品设计实例是在满足特定设计要求下所获得的产品方案设计结果的结构化组织形式,包括产品类型设计实例、模块设计实例,可表示为

$$C_{j,k} = \{a_{j,k1}, a_{j,k2}, \dots, a_{j,kn}\};$$

$$j = 1, 2, k = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中: $C_{j,k}$  表示设计实例,其中  $C_{1,k}$  表示产品类型设计实例, $C_{2,k}$  表示模块设计实例; $n$  表示  $C_{j,k}$  所

包含属性的个数; $m$  为当前实例库中的实例数; $a_{j,ki}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 是实例  $C_{j,k}$  的属性,当它是单值时,可表示为 1 个二元向量组  $(p_{j,i}, x_{j,i})$ ,其中  $p_{j,i}$  表示属性名, $x_{j,i}$  表示属性值,当  $a_{j,ki}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 是一组数据的集合时,它可以用结构体、类等数据结构来表示.

**定义 2** 查询实例:查询实例是产品性能参数与尺寸参数等设计要求的集合.它反映了客户对产品设计所提出的要求,包括产品类型查询实例、模块查询实例和零部件查询实例,可表示为

$$P_{j,0} = (a_{j,01}, a_{j,02}, \dots, a_{j,0l}); j = 1, 2 \quad (2)$$

式中: $P_{j,0}$  表示查询实例( $j = 1, 2$ ),其中  $P_{1,0}$  表示产品类型查询实例, $P_{2,0}$  表示模块查询实例; $l$  表示  $P_{j,0}$  包含的属性的个数; $a_{j,0i}$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ ) 是  $P_{j,0}$  的属性,可以表示为 1 个三元向量组  $(p_{j,i}, w_{j,i}, x_{j,i})$ ,其中  $p_{j,i}$  表示属性名, $w_{j,i}$  表示属性的权值(权值表示该属性在设计工作中的重要程度,权值越大,该属性越重要,且  $\sum_{i=1}^l w_{j,i} = 1$ ), $x_{j,i}$  表示属性值.

### 2.2 基于 CBR 的机械工程产品设计流程

基于 CBR 的机械工程产品智能设计主要流程如图 1 所示.本系统提出了一条设计原则:产品

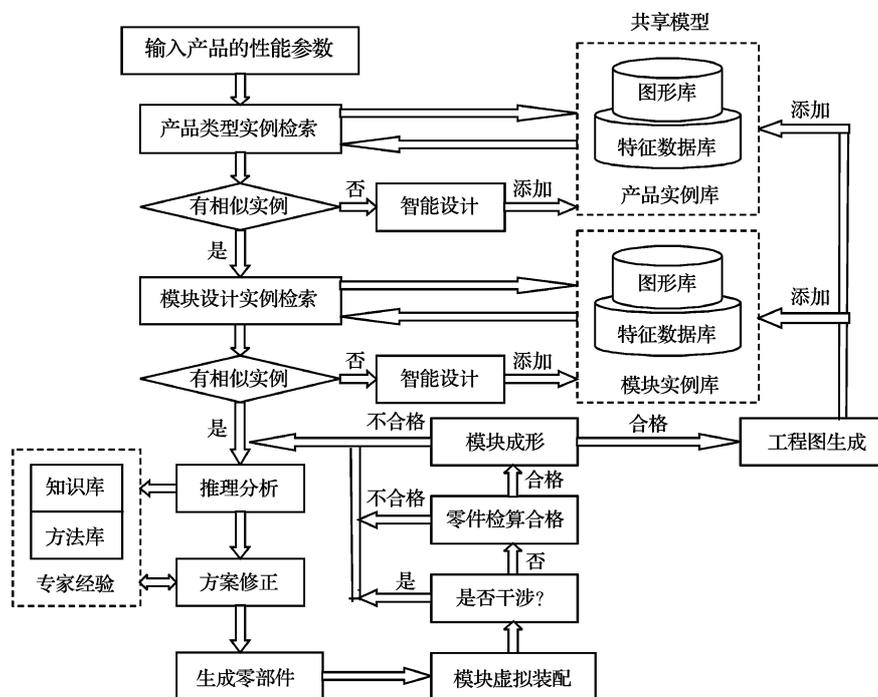


图 1 机械工程产品设计流程图

Fig. 1 Flow chart of the designs in mechanical engineering products

先从整体到部分检索,再从部分到整体设计组装.输入所需产品的性能参数信息,智能设计系统可根据关键词首先对产品类型设计实例库进行一级搜索,从中找出若干个相似实例并判别,选中最相似的一个实例作为依据;若无相似实例,系统将根据产品的性能参数信息,把产品分成几个标准模块,再根据关键词对模块设计实例库进行二级搜索,选择最相似实例为设计依据.在选出的最相似实例中,用户可通过基于专家经验库的实例推理,得出对模块实例中的零部件相应修改建议的指导信息,建立三维几何模型,进行虚拟装配、运动学分析、干涉检查、结构件力学分析等,最后模块组装及生成二维工程图纸,同时将设计完成的新产品作为新的二维和三维实例再存储到各个实例库中.而各个实例库以共享模型的形式保存在主服务器上,以方便设计人员的自由检索和调用,并对各设计人员的使用权限进行合理分配,保证共享模型的正常运行.

### 3 实例库的建立和检索

#### 3.1 机械工程产品三维实例库的建立

实例库中实例数量及实例库的完善程度是利用 CBR 技术进行辅助设计的基石.实例库的建立要考虑实例的内容、实例的表达和实例库的组织等问题.考虑到软件 SolidWorks 具有三维实体造型功能,建立的几何模型可实时显示实体的三维外貌,通过对模型进行操作可简洁地完成对形体的修改,并能够在此基础上对产品模型进行剖切、干涉检测、运动仿真、有限元分析等<sup>[2]</sup>.因此在软件上进行二次开发建立机械工程产品(包括标准模块、零部件)的三维实例库,同时构建的智能设计系统是实例库应用必备的平台.

针对机械工程产品的特点,为了便于实例检索和匹配,本系统提出了“实例=实例三维图形+实例特征数据”的实例描述方法,特征数据是指对于产品设计具有决定性影响的因素,可从实例中抽取出来.在 SolidWorks 中建立实例的三维图形,然后将实例的特征数据输入到数据库中,在实际应用中,针对实例三维图形库和实例特征数据不同的存储要求,对两者分别建库并实现各自不同的存储管理功能,然后集成到一个界面上进行操作.这样,一个实例就对应于实例三维图形库中

的一套三维图形与相关子部件层次结构和实例特征库中的多个数据元.实例的查询、检索对应于相应的数据库操作,方便了实例推理的检索.

实例特征的表达如图 1 所示,本系统将实例特征按照实例对象的不同,主要分成 3 种方式表达:(1)每个实例对象是一套完整的机械工程产品,该实例的特征首先考虑产品设计的类型.这里以桥式起重机为例,产品类型有桥式、抓斗桥式、吊钩桥式、电磁桥式、抓斗电磁桥式等<sup>[3]</sup>.(2)把组成机械工程产品的模块作为实例,对于吊钩桥式起重机,它主要由运行模块、控制模块、起升模块、吊钩滑轮组模块、结构模块组成,实例特征表达按照起重量范围、造型特征、关键配合尺寸进行表达.(3)以组成各模块的零部件作为实例,对于吊钩桥式起重机的结构模块,主要考虑主梁、端梁和小车架等零部件,主要表达其几何参数尺寸及加工工艺<sup>[4,5]</sup>.

#### 3.2 相似度<sup>[6,7]</sup>

实例相似度是判别实例间相似性的尺度,用于判定实例库中与新问题最相似的实例.但相似度不是一成不变的,它与人们考虑问题的侧重点密切相关.

**定义 3** 相似度:即 2 个对象的相似程度.如果对象  $x, y$  的相似度用  $sim(x, y)$  表示,那么  $sim(x, y) \in [0, 1]$ , 且满足以下条件:对称性  $sim(x, y) = sim(y, x)$ ;自反性  $sim(x, x) = 1$ ;非负性  $sim(x, y) \geq 0$ .

则查询实例  $P_{j,0}$  与实例库中设计实例  $C_{j,k}$  的加权平均相似度的计算公式为

$$sim(P_{j,0}, C_{j,k}) = \frac{\sum_{i=1}^m W_i \cdot sim(P_i, C_i)}{\sum_{i=1}^m W_i} \quad (3)$$

式中: $P_{j,0}$  即查询实例, $P_i$  为  $P_{j,0}$  中第  $i$  个属性; $C_{j,k}$  即设计实例库中的源实例, $C_i$  为  $C_{j,k}$  中第  $i$  个属性; $m$  为问题描述部分的属性数; $W_i$  为第  $i$  个属性的局部相似度权重.

2 个对象的相似度表现为对象之间的差值,即对象之间的概念距离,2 个对象的相似度通过 1 个概念距离函数将其值域限定于区间  $[0, 1]$ .通常 1 个对象有数值、范围和模糊值 3 种取值类型,这 3 种取值类型形成 6 种不同的相似度计算问题,各种相似度计算问题的计算公式如表 1 所示.

表1 加权平均法相似度求解公式表

Tab.1 Formulae table counting the degree of similarity by the weighted average method

编号	对象	相似度求解公式	说明
1	确定数值 $x, y$	$sim(x, y) = 1 - \frac{ x-y }{\beta-\alpha}, x, y \in [\alpha, \beta]$	$\alpha, \beta$ 为 $x, y$ 取值范围的下限和上限
2	数值与范围	$sim(\alpha, [b_1, b_2]) = \frac{\int_{b_1}^{b_2} sim(\alpha, x) dx}{b_2 - b_1}$	$sim(x, y) = 1 - \frac{ x-y }{\beta-\alpha}, x, y \in [\alpha, \beta]$
3	数值与模糊值	$sim(\alpha, X) = \frac{\int_{\alpha}^{\beta} X(x) sim(\alpha, x) dx}{\int_{\alpha}^{\beta} X(x) dx} \cdot \max_{x \in (\alpha, \beta)} \{X(x)\}$	$\alpha, \beta$ 为模糊值 $X(x)$ 取值的下限和上限
4	区间之间	$sim([a_1, a_2], [b_1, b_2]) = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \int_{b_1}^{b_2} sim(x, y) dy dx}{(a_2 - a_1)(b_2 - b_1)}$	
5	区间与模糊值	$sim([a_1, a_2], X) = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \int_{\alpha}^{\beta} sim(x, y) dy dx}{(a_2 - a_1) \int_{\alpha}^{\beta} X(x) dx} \cdot \max_{x \in [\alpha, \beta]} \{X(x)\}$	
6	模糊值 $X_a, X_b$	$sim(X_a, X_b) = \frac{\int_{\alpha}^{\beta} \int_{\alpha}^{\beta} X_a(x) X_b(y) sim(x, y) dy dx}{\int_{\alpha}^{\beta} X_a(x) dx \int_{\alpha}^{\beta} X_b(x) dx}$	函数 $X_a, X_b$ 的具体形式依据具体情况来确定
7	由多个属性构成的 2 个对象	$sim(X, Y) = \sum_{i=1}^m [\tau w_i \cdot sim(x_i, y_i)]$	$w_i$ 为第 $i$ 属性对 $X, Y$ 相似度的影响程度, 即权重

### 3.3 产品设计实例的相似匹配算法

根据机械工程产品设计的特点及应用领域实际状况, 本文采用基于相似度的实例检索算法. 算法描述如下:

(1) 生成查询实例  $P_{j,0}$ , 设定查询实例  $P_{j,0}$  中检索条件中各属性的权值为  $(\tau w_1, \tau w_2, \dots, \tau w_l)$ .

(2) 选权值最高的  $N$  个属性作为检索项, 检索实例库中与查询实例的实例类型相似的所有实例, 找出满足约束条件的设计实例.

(3) 假设实例检索到  $M$  个满足条件的实例, 将  $P_{j,0}$  分别与  $M$  个实例进行相似匹配计算. 求解  $P_{j,0}$  与  $M$  个实例中某个实例  $C_{j,k} = (a_{j,k1}, a_{j,k2}, \dots, a_{j,kn})$  的相似度. 首先, 计算检索条件对应属性的相似度, 然后依据属性相似度计算实例的相似度.

① 依据相似度求解公式, 计算  $P_{j,0}$  的检索条件  $a_{j,0i}$  与  $C_{j,k}$  中的对应属性  $a_{j,ki}$  的相似度  $sim(a_{j,0i}, a_{j,ki}), i = 1, 2, \dots, l$ , 属性的相似度可应用表 1 中公式 1 ~ 6 进行求解.

② 重复执行步骤 ① 操作, 依次求出  $l$  个属性的相似度.

③ 依据  $l$  个属性的相似度, 采用加权平均法求查询实例  $P_{j,0}$  与库存实例  $C_{j,k}$  的相似度, 求解公式见表 1 中公式 7.

④ 重复第 ③ 步分别求出查询实例  $P_{j,0}$  与  $M$

个设计实例的相似度.

⑤ 判断是否存在相似实例. 如果不存在相似实例, 算法结束; 如果存在, 进行下一步工作——选取最佳匹配实例.

⑥ 选取最佳匹配实例. 比较实例相似度  $S_1, S_2, \dots, S_M$  的大小, 选取相似度最大的实例, 若  $S_j = \max(S_1, S_2, \dots, S_M)$ , 则库存实例  $P_{j,0}$  是查询实例的最佳匹配实例.

## 4 应用实例分析

文中以 32/5 t-19.5 m 吊钩桥式起重机主梁钢结构设计为例进行实例分析.

(1) 根据吊钩桥式起重机钢结构的设计要求生成查询实例  $P_{2,0}$ , 设定查询实例  $P_{2,0}$  中检索条件中各属性的权值为  $(\tau w_1, \tau w_2, \dots, \tau w_l)$ . 如表 2 所示.

表 2 32/5 t 吊钩桥式起重机主梁查询实例属性表

Tab.2 Search case attribute table for the 32/5 t claw bridge crane girder

属性	属性值	权值
起重量	32 t	0.3
跨度	19.5 m	0.3
工作级别	A6	0.2
主梁形式	正轨	0.2

(2) 从  $C_{2,k}$  中选取主梁必须满足设计要求 (29

$t \leq Q \leq 35 \text{ t}, 16.5 \text{ m} \leq L \leq 22.5 \text{ m}$ , 即起重量取  $\pm 10\%Q$ , 跨度取  $\pm 3 \text{ m}$  进行检索), 检索设计实

例库中所有的实例类型为主梁模块的实例, 找出满足设计要求的实例, 如表 3 所示。

表 3 吊钩桥式起重机主梁模块设计实例属性表

Tab. 3 Module design case attribute table for the claw bridge crane girder

序号	实例名	起重量/t	跨度/m	桥架形式	工作级别	材料
1	主梁 1	35	16.5	偏轨	A6	16Mn
2	主梁 2	35	16.5	偏轨	A5	Q235
3	主梁 3	32	16.5	正轨	A5	Q235
4	主梁 4	32	16.5	偏轨	A5	16Mn
5	主梁 5	30	19.5	正轨	A6	Q235
6	主梁 6	30	22.5	偏轨	A5	Q235

(3) 查询各主梁模块的起重量、跨度、工作级别及主梁形式, 可知表 3 中序号 3 和序号 5 满足约束条件“ $29 \text{ t} \leq Q \leq 35 \text{ t}, 16.5 \text{ m} \leq L \leq 22.5 \text{ m}$ , 主梁形式为正轨”。分别求出查询实例  $P_{2,0}$  与两个满足条件的设计实例  $C_{2,k}$  进行相似匹配计算。

① 计算各对应属性的相似度(以主梁模块实例 3 为例)

a. 起重量的相似度计算是一个确定数值与数值范围的匹配问题, 应用表 1 中公式 2, 即

$$sim(32, [29, 35]) = \frac{\int_{29}^{35} sim(32, x) dx}{35 - 29} = 1$$

b. 跨度相似度计算也是一个确定数值与数值范围的匹配问题, 应用表 1 中公式 2, 即

$$sim(16.5, [16.5, 22.5]) = \frac{\int_{16.5}^{22.5} sim(16.5, x) dx}{22.5 - 16.5} = 0.5$$

c. 工作级别相似度: 起重机工作级别与结构的利用等级和应力状态有关, 这也就决定了起重机结构的静刚性要求  $Y_L$  (A5 及 A5 以下:  $Y_L \leq \frac{L}{700}$ ; A6:  $Y_L \leq \frac{L}{800}$ ; A7、A8:  $Y_L \leq \frac{L}{1000}$ ),

$$sim(A5, A6) = 1 - \frac{\left| \frac{L}{700} - \frac{L}{800} \right|}{\frac{L}{800}} = 0.86.$$

d. 主梁形式相似度:  $sim = 1$ .

② 计算整体相似度

采用加权平均的相似度计算公式, 计算查询实例与设计实例的相似度  $S_3$ :

$$S_3 = S(P_{2,0}, C_{2,3}) = \frac{\sum_{i=1}^m W_i sim(P_i, C_i)}{\sum_{i=1}^m W_i} = 0.82$$

(4) 重复步骤(3) 求出查询实例  $P_{2,0}$  与主梁

模块实例 5 的相似度  $S_5$ :

$$S_5 = S(P_{2,0}, C_{2,5}) = \frac{\sum_{i=1}^m W_i sim(P_i, C_i)}{\sum_{i=1}^m W_i} = 0.9$$

(5) 提取最佳匹配实例. 比较主梁模块实例与查询实例  $P_{2,0}$  的相似度  $S_3$ 、 $S_5$ , 可知主梁 5 是查询实例  $P_{2,0}$  的最佳匹配实例。

实例检索过程如图 2 所示, 生成的实例三维模型如图 3 所示。

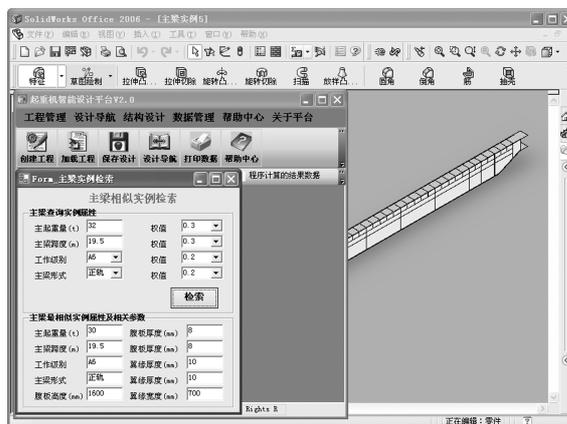


图 2 主梁相似实例检索

Fig. 2 Similar case search for the girder

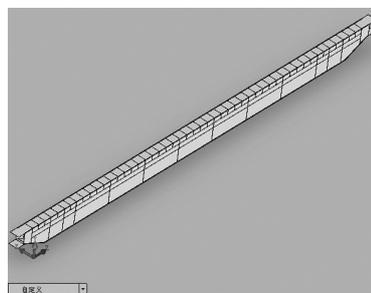


图 3 主梁智能修改后生成的设计实例

Fig. 3 Design case after the intelligent revising of the girder

## 5 结 语

三维绘图软件的普遍应用使基于实例的研究工作迫在眉睫,文中提出基于实例的机械工程产品设计方法,可实现重用以往设计知识进行新产品的快速设计.本文重点探讨产品设计实例的检索和修改问题,采用基于相似度的产品设计实例检索算法,经过实例相似匹配计算得到产品部件查询实例的最佳匹配实例,并通过智能修改完成新的机械产品设计.该方法可实现快速设计满足市场竞争的需求,应用基于实例的智能设计平台可缩短设计周期二分之一.这种知识资源的重用及共享,节省了大量的技术能源,极大地改善了工程技术人员的工作环境,将技术层面的问题归属于人机交互的情感设计,使工程技术人员有时间有精力投入到创新研究工作中.

## 参考文献:

- [1] 王玉,邢 渊,阮雪榆. 机械产品设计重用策略研究[J]. 机械工程学报, 2002, **38**(5):145-148
- [2] 王宗彦,吴淑芳,秦慧斌,等. SolidWorks 机械产品高级开发技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2005
- [3] 张质文. 起重机设计手册[M]. 北京:铁道出版社, 2001
- [4] ZHANG Xiao-li, LIU Yue-ji. Research on remote design system for mechanical products based on XML web services [C] // 欧亚先进工程设计及制造全球化国际会议论文集. 西安:西北工业大学出版社, 2004:373-383
- [5] 张晓丽,迟国政. 主梁截面设计的一种优化方法[J]. 起重运输机械, 2002(2):14-16
- [6] 戚占龙,许建新,田锡天. 基于实例推理的模具设计技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, **20**:83-85
- [7] SLONIM T Y, SCHNEIDER M. Design issues in fuzzy case-based reasoning [J]. **Fuzzy Sets and Systems**, 2001, **117**(2):251-267

### Study of intelligent design method for mechanical engineering product based on CBR

ZHANG Xiao-li\*, LI Xin, GUO Zhi-chun, HU Dong-ming

( School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Because the designs of mechanical engineering products are numerous and complicated, it is necessary to study a smart and effective design method. The method based on cases was introduced for mechanical engineering products design, and it can speedily complete new products design by knowledge reused. The intelligent design platform was built by CBR (case-based reasoning) and model sharing, and the aim of this platform was to solve the problem of searching and revising the case, finally it can ultimately realize similar-matching computing and the best case researching. This platform translates the design problem of technique into emotion design about human-computer interaction, and also avoids or reduces repeated work and improve engineering-technique workers' work conditions. An intelligent design technique based on the case is presented and an example of bridge crane design is given to show the feasibility of the proposed method.

**Key words:** case-based reasoning (CBR); case model; share model; intelligent design; case retrieval