

# 基于图论的产品实例检索结构相似度分析\*

胡伟<sup>1,2</sup> 胡国清<sup>1</sup> 魏昕<sup>2</sup> 谢小柱<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641; 2. 广东工业大学机电工程学院, 广州 510006)

**【摘要】** 针对机电产品各子系统之间的复杂作用关系, 提出了基于有向模糊图的产品系统结构相似度计算模型, 以实现产品概念设计的实例检索。扩展定义了有向模糊图概念, 建立机电产品系统有向图模型, 利用积和式矩阵对有向图模型进行描述; 通过积和式函数多项式对产品系统进行结构分析, 将主观权重和客观权重组合计算产品系统有向图结构相似度。以 SF2005 型加速度传感器的实例检索为例证明了该结构相似度计算模型的可行性。

**关键词:** 产品系统 实例检索 结构相似度 有向模糊图

中图分类号: TH112 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0184-05

## Structural Similarity Analysis in Case Retrieval Using Graph Theory

Hu Wei<sup>1,2</sup> Hu Guoqing<sup>1</sup> Wei Xin<sup>2</sup> Xie Xiaozhu<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

2. Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

### Abstract

To deal with the functional relationship between mechanical product subsystems, a structural similarity computation model of product system by using directed fuzzy graph was proposed for product case retrieval during conceptual design. The concept of directed fuzzy graph was defined, and a directed graph model of product system was created and then represented by permanent matrix. Structural analysis of product system was conducted by using permanent function and the structural similarities of product system directed models were computed by combining subjective and objective weights. Finally, the case retrieval of SF2005 proved the applicability and effectiveness of the proposed similarity computation model.

**Key words** Product system, Case retrieval, Structural similarity, Directed fuzzy graph

### 引言

在产品概念设计过程中, 基于实例推理(cased-based reasoning, 简称 CBR)的方案设计符合设计人员的传统习惯和思维方式, 是解决产品方案设计决策问题的一种有效途径<sup>[1~2]</sup>。CBR 方法的中心环节是实例检索, 而相似度计算是实例检索的关键技术, 直接影响实例检索的效率、质量及可靠性。因此, 实例相似度计算是 CBR 系统的关键所在。

目前, 专家学者从不同角度对相似度计算进行了研究: 文献[1]采用向量空间模型, 求解需求向量与特征向量之间的相似程度; 文献[3]建立了基于

统计特征的属性相似度计算模型和区间值属性相似度计算模型; 文献[4]从集合论的角度出发, 建立了相似度计算模型, 提出了产品配置过程中相似度的计算流程和方法。总体看来, 上述方法均基于数值型的用户需求参数和实例参数进行属性相似度计算。这种属性相似度在 CBR 实例检索过程中存在以下问题: ①实例属性具有不对称性, 即部分实例具有某些属性参数, 另一部分则缺少该参数, 基于属性相似度的计算方法未必能获得理想的实例检索结果。②实例属性具有多样性, 某些属性无法采用数值型参数直接描述, 相应的属性相似度无法求解。

针对实例属性的不对称性和多样性问题, 结合

收稿日期: 2011-01-06 修回日期: 2011-04-18

\* 国家重大工程资助项目(X2JQB1100060)

作者简介: 胡伟, 博士生, 广东工业大学讲师, 主要从事 MEMS 产品建模研究, E-mail: huweigdut@126.com

机电产品系统的特点,本文提出一种基于有向模糊图的产品实例检索结构相似度计算方法,通过建立产品系统的有向图模型,并将主客观权重加以组合,求解产品系统的结构相似度,从而为产品概念设计的实例检索提供依据。

## 1 问题的描述

机电产品是一个复杂系统,包括环境、设计、材料、制造及封装等诸多子系统。由于材料、制造及封装等相关技术存在一定局限性,因此,各子系统之间存在较为严格的依赖及制约关系,最终影响产品性能<sup>[5~6]</sup>。

图1为SF2005型微加速度传感器<sup>[7]</sup>的系统结构示意图,各子系统之间作用关系主要表现为:设计方案依赖于SF2005的工作环境,还需考虑微加工技术的限制及后期的封装工艺;制造系统直接依赖于设计系统,工艺流程及加工方法取决于设计方案和要求;材料必须满足特定的工作环境要求,且与微加工技术、封装工艺相兼容;封装需在设计过程中予以考虑,封装材料必须能提供必要保护及隔离,且不会对工作环境造成不良影响;SF2005要感知工作环境的参数变化,同时工作环境可能改变材料和产品性能。

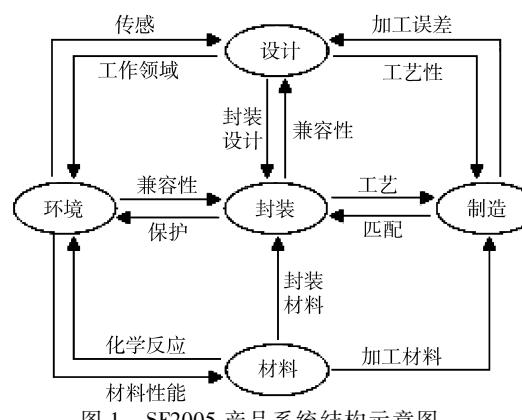


图1 SF2005产品系统结构示意图

Fig.1 System structural schematic of SF2005

不同类型机电产品对应的各子系统之间作用关系会发生变化,导致产品系统结构及其性能也存在差异<sup>[5~6]</sup>,因此产品系统的结构相似度可取代传统的属性相似度,为CBR系统的实例检索提供一种新的途径。

## 2 产品结构相似度计算模型

### 2.1 产品系统有向图模型

根据机电产品系统的特点,利用有向图来表达系统结构是一种有效的方法。但传统的有向图在表达系统结构时,连接两个结点的边只表达了相关结

点之间有或无路径信息,而对于结点之间的作用关系则无法精确描述,因此,需将有向图扩展为有向模糊图。

设  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$  是一个由  $n$  个结点构成的集合(称为论域),则论域  $V$  上的有向模糊图  $G$  可定义为一个三元组  $G = (V, \tilde{V}, \tilde{E})$ 。 $\tilde{V}$  是论域  $V$  上的一个模糊集,隶属函数  $\mu_{\tilde{V}}(V_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 表示结点  $V_i$  的模糊度  $v_i$ (或称存在度),则模糊集  $\tilde{V}$  可表示为  $n$  阶对角线矩阵形式

$$\tilde{V} = \begin{bmatrix} v_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & v_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & v_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\tilde{E}$  是论域  $V \times V$  上的一个模糊关系,可表示为  $n$  阶非对角线矩阵形式

$$\tilde{E} = \begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ e_{n1} & \cdots & e_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $e_{ij}$  表示结点  $V_i$  与结点  $V_j$  之间的有向连接强度(或称为该边的有向模糊度),定义域为  $e_{ij} \subseteq [0, 1]$ 。显然,当  $e_{ij} \in \{0, 1\}$  时,有向模糊图退化为传统的有向图。

根据SF2005产品系统结构示意图(图1),采用结点  $V_i$  分别表示产品子系统,有向边表示各子系统之间的作用关系,可得图2所示的SF2005产品系统

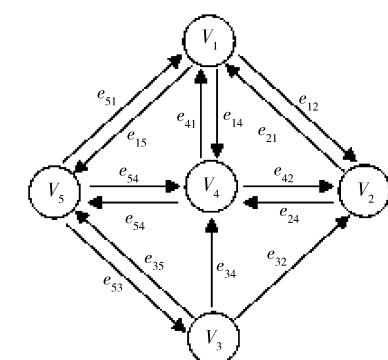


图2 SF2005产品有向图模型

Fig.2 Directed graph model of SF2005

有向图模型(为了简化模型,省略作用权值为0的有向边),相应的矩阵为

$$\tilde{V} = \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\widetilde{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} 0 & e_{12} & 0 & e_{14} & e_{15} \\ e_{21} & 0 & 0 & e_{24} & 0 \\ 0 & e_{32} & 0 & e_{34} & e_{35} \\ e_{41} & e_{42} & 0 & 0 & e_{45} \\ e_{51} & 0 & e_{53} & e_{54} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$v_i$  和  $e_{ij}$  取值由产品设计与制造等领域专家共同参与确定。

孤立的矩阵  $\widetilde{\mathbf{V}}$ 、 $\widetilde{\mathbf{E}}$  不足以描述有向图模型信息。为了有效融合结点及有向边的信息,保证数据的完整性,采用积和式矩阵  $\mathbf{P}$ <sup>[8-9]</sup> 来统一描述产品有向图模型,即

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} v_1 & e_{12} & 0 & e_{14} & e_{15} \\ e_{21} & v_2 & 0 & e_{24} & 0 \\ 0 & e_{32} & v_3 & e_{34} & e_{35} \\ e_{41} & e_{42} & 0 & v_4 & e_{45} \\ e_{51} & 0 & e_{53} & e_{54} & v_5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

矩阵  $\mathbf{P}$  的对角线元素  $v_i$  表示子系统  $i$  对产品系统性能的影响值;非对角线元素  $e_{ij}$  表示子系统  $i$  对子系统  $j$  的作用权值,因此,积和式矩阵  $\mathbf{P}$  同时包含各子系统及其相互关系对产品系统性能的影响,信息更加完整。矩阵  $\mathbf{P}$  的积和式函数表达式为

$$\begin{aligned} \text{per}(\mathbf{P}) = & v_1 v_2 v_3 v_4 v_5 + (v_1 v_2 v_3 e_{45} e_{54} + v_1 v_3 v_5 e_{24} e_{42} + \\ & v_1 v_2 v_4 e_{35} e_{53} + v_2 v_3 v_4 e_{51} e_{15} + v_2 v_3 v_5 e_{14} e_{41} + \\ & v_3 v_4 v_5 e_{12} e_{21}) + (v_1 v_2 e_{53} e_{34} e_{45} + v_2 v_3 e_{41} e_{15} e_{54} + \\ & v_2 v_3 e_{51} e_{14} e_{45} + v_3 v_5 e_{21} e_{14} e_{42} + v_3 v_5 e_{41} e_{12} e_{24}) + \\ & (v_1 e_{32} e_{24} e_{45} e_{53} + v_2 e_{41} e_{15} e_{53} e_{34} + v_3 e_{21} e_{15} e_{54} e_{42} + \\ & v_3 e_{51} e_{12} e_{24} e_{45} + v_4 e_{21} e_{15} e_{53} e_{32}) + (v_1 e_{42} e_{24} e_{35} e_{53} + \\ & v_2 e_{41} e_{14} e_{35} e_{53} + v_3 e_{21} e_{12} e_{45} e_{54} + v_3 e_{51} e_{15} e_{24} e_{42} + \\ & v_4 e_{21} e_{12} e_{35} e_{53}) + (e_{21} e_{15} e_{53} e_{34} e_{42} + e_{21} e_{14} e_{45} e_{53} e_{32} + \\ & e_{41} e_{15} e_{53} e_{32} e_{24}) + (e_{21} e_{14} e_{42} e_{53} e_{35} + e_{41} e_{12} e_{24} e_{53} e_{35} + \\ & e_{21} e_{12} e_{53} e_{34} e_{45}) \end{aligned} \quad (6)$$

## 2.2 有向图模型结构分析

异构的产品系统有向图模型所对应的积和式函数表达式存在差别<sup>[9]</sup>,因此本文基于积和式函数表达式  $\text{per}(\mathbf{P})$  对产品系统结构进行分析。

积和式函数表达式  $\text{per}(\mathbf{P})$  由多个结构组件构成。这些组件均可赋予一定的物理含义,如式(6)的  $v_i$  表示子系统  $V_i$  的影响值,  $e_{45} e_{54}$  表示子系统  $V_4$  和  $V_5$  两者之间相互作用而形成的封闭环(记作  $L_{45}$ ),  $e_{41} e_{15} e_{54}$  则表示子系统  $V_4$ 、 $V_1$  和  $V_5$  三者之间作用而形成的封闭环(记作  $L_{415}$ ),以此类推。需要注意的是,虽然封闭环  $e_{41} e_{15} e_{54}$ ( $L_{415}$ )和  $e_{51} e_{14} e_{45}$ ( $L_{514}$ )均由  $V_1$ 、 $V_4$  和  $V_5$  形成,但环方向不同,故属于异构环,这里采用  $L_{ijk}$  表示由结点  $V_i$ 、 $V_j$  和  $V_k$  形成的封闭环集合。

根据图 2 中有向图结点数( $n=5$ ),可将式(6)中的所有项划分为如表 1 所示的( $n+1$ )组。由于各子系统不存在自依赖关系,即图 2 的有向图模型不存在  $L_{mm}$  自环,故 II 组的项数为 0。根据封闭环的组成结构,V、VI 组又可进一步细分为 2 个子组。

表 1 中每组包含的项数是衡量产品有向图模型结构及性能的重要属性,积和式函数表达式(6)可表示为属性集合

$$\begin{aligned} C_q = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8\} = \\ \{1, 0, 6, 5, 5, 5, 3, 3\} \end{aligned} \quad (7)$$

表 1 积和式函数表达式的结构表

Tab. 1 Structural table of permanent function

序号	单元结构	项数
I		1
II		0
III		6
IV		5
V		5
VI		3
VII		3

## 2.3 基于权重的有向图模型相似度计算

如前所述,产品概念设计需要考虑各子系统之间的作用关系,即表 1 所示的各种闭环。但这些环对有向图模型性能的影响程度存在差别,属性  $T_i$  包含的闭环结构越复杂,影响程度越大,因此必须合理分配属性权重。

属性权重按性质包含两部分:主观权重,反映决策者对各属性的偏好或属性本身的重要程度,通常采用专家直接赋权法确定,用  $\mathbf{W}^{(1)} = \{w_1^{(1)}, w_2^{(1)}, \dots, w_m^{(1)}\}$  表示;客观权重,反映属性所含的信息量对决策结果的贡献,此类权重与其属性值对方案的区分能力呈正比,而与属性本身的重要程度无关,用  $\mathbf{W}^{(2)} = \{w_1^{(2)}, w_2^{(2)}, \dots, w_m^{(2)}\}$  表示。

设  $C_q, C_i$  为两个设计的实例积合式函数属性集合,  $T_{qj}, T_{ij}$  分别表示实例  $C_q, C_i$  第  $j$  组属性,采用线

性归一化方法将属性值转换为 $[0, 1]$ 区间的值, 则属性相似度 $s_{ij}$ 可表示为<sup>[3]</sup>

$$s_{ij} = 1 - |T_{qj} - T_{ij}| \quad (8)$$

设 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 是以前的实例集合, 则实例 $C_q$ 与集合 $C$ 中所有实例的属性相似度构成相似度矩阵

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

基于相似度离差信息的客观权重计算表达式为<sup>[3]</sup>

$$w_j^{(2)} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n (s_{ij} - s_{kj})^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^m \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n (s_{ij} - s_{kj})^2 \right]^2}} \quad (10)$$

其中 $\sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n (s_{ij} - s_{kj})^2$ 表示所有实例第 $j$ 个属性的相似度离差平方和。

根据属性权重的实质, 权重是主观权重和客观权重的组合。采用乘法合成计算组合权重

$$w_i = w_i^{(1)} w_i^{(2)} / \sum_{j=1}^m w_j^{(1)} w_j^{(2)} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

根据属性相似度的加权和, 实例 $C_q$ 和 $C_i$ 的有向图模型相似度表达式为

$$\text{sim}(C_q, C_i) = \frac{\sum_{j=1}^m w_j s_{ij}}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (12)$$

综上所述, 基于有向模糊图的实例检索结构相似度计算过程如下:

(1) 根据用户需求及产品功能, 确定产品子系统及其相互作用关系示意图, 建立产品系统有向图模型。

(2) 对有向图的积和式函数表达式 $\text{per}(P)$ 进

行结构分析, 构建积和式函数表达式的属性集合 $C_q$ 。

(3) 计算设计实例与现有实例有向图模型的属性相似度 $s_{ij}$ , 形成相似度矩阵 $S$ 。

(4) 根据主观权重集合 $W^{(1)}$ 及相似度矩阵 $S$ , 依次求解各属性客观权重、组合权重。

(5) 根据相似度矩阵 $S$ 和组合权重集合 $W$ , 求解产品实例 $C_q$ 和 $C_i$ 有向图模型相似度 $\text{sim}(C_q, C_i)$ 。

### 3 实例

SF2005型加速度传感器可用于测量拖拉机座椅振动, 以改善驾驶员乘坐舒适性<sup>[10]</sup>。本文以SF2005型加速度传感器设计为例, 通过产品系统结构相似度进行概念设计的实例检索。

表2为加速度传感器概念设计实例库部分内容<sup>[8]</sup>。显然, 实例属性存在明显的不对称性, 例如实例1、2具有频率响应参数, 其他实例则不具备该参数, 且部分实例属性采用区间值的形式描述。直接利用传感器的属性参数难以计算实例相似度, 因此, 只能从传感器的系统结构方面着手, 求解结构相似度。

表2的4个传感器分别用于一般工业控制、建筑物监测、石油勘探和航空电子领域<sup>[8]</sup>。根据它们的使用场合及设计要求, 通过对不同实例的各子系统交互关系分析, 利用产品系统有向图建模方法, 建立如图3所示的加速度传感器概念设计实例有向图模型, 并得到相应的积和式函数表达式属性集合:  $C_1 = \{1, 0, 5, 5, 5, 2, 3, 1\}$ ,  $C_2 = \{1, 0, 5, 3, 3, 4, 2, 2\}$ ,  $C_3 = \{1, 0, 7, 6, 7, 7, 6, 6\}$ ,  $C_4 = \{1, 0, 8, 8, 10, 10, 7, 8\}$ 。

图2为SF2005型传感器的系统结构有向图模型, 式(7)为对应积和式函数的属性集合。经线性归一化处理后, 利用式(8)计算属性相似度, 得到设计问题与各实例有向图模型的属性相似度矩阵

表2 加速度传感器概念设计实例库

Tab. 2 Case library of accelerometer conceptual design

实例	测量范围 /m·s <sup>-2</sup>	灵敏度 /V·g <sup>-1</sup>	频率响应 /Hz	动态范围 /dB	谐振频率 /kHz	温度 /(°)	偏置温度系数 /μg·(°) <sup>-1</sup>	抗震性 /m·s <sup>-2</sup>
1	[ -50, 50 ]	0.8	DC ~ 1 000	112		[ -40, 85 ]		15 000
2	[ 30, 30 ]	1.2	DC ~ 1 500	117		[ -40, 85 ]		15 000
3	[ -100, 100 ]	0.1			3.7	[ -40, 125 ]	500	100 000
4	[ -20, 20 ]	1.0			1.4	[ -55, 125 ]	100	60 000
设计问题	[ -40, 40 ]	0.9		115		[ -10, 100 ]	1 000	10 000

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.6667 & 1.0 & 1.0000 & 0.625 & 1.0 & 0.7143 \\ 1 & 1 & 0.6667 & 0.6 & 0.7143 & 0.875 & 0.8 & 0.8571 \\ 1 & 1 & 0.6667 & 0.8 & 0.7143 & 0.750 & 0.4 & 0.5714 \\ 1 & 1 & 0.3333 & 0.4 & 0.2857 & 0.375 & 0.2 & 0.2857 \end{bmatrix} \quad (13)$$

综合考虑不同专家意见,确定主观权重向量  $W^{(1)} = \{0.05, 0.075, 0.1, 0.12, 0.15, 0.135, 0.2, 0.17\}$ 。根据相似度矩阵中的数据,按式(10)计算可得客观权重向量  $W^{(2)} = \{0, 0, 0.1461, 0.3507, 0.4563, 0.2397, 0.7014, 0.3131\}$ ,按式(11)可求得组合权重向量  $W = \{0, 0, 0.0416, 0.1199, 0.1950, 0.0922, 0.3996, 0.1517\}$ 。计算结果表明,考虑相似度离差信息后,权重发生了变化,原因在于组合权重包含属性本身信息量对决策结果的贡献。从相似度矩阵可看出,各实例的  $T_1$  和  $T_2$  属性相似度相等,因此该属性对实例检索无贡献,则赋予零权值是合理的。

最后,根据式(12)求得设计问题和各实例有向图模型的相似度  $\text{sim}(C_q, C_i) = \{0.9082, 0.7693, 0.5786, 0.2754\}$ 。结构相似度计算结果表明,设计问题与第4个实例的有向图模型相似度最小,原因在于第4个传感器用于航空电子领域,产品性能要求明显高于 SF2005,各子系统之间的作用关系更为复杂。

在 CBR 设计系统中,可根据实际情况设定一定的阈值,取有向图模型相似度大于该阈值的实例或直接取相似度较大的几个实例,对检索出的实例按一定的修改策略进行调整,最终得到新设计问题的求解方案。

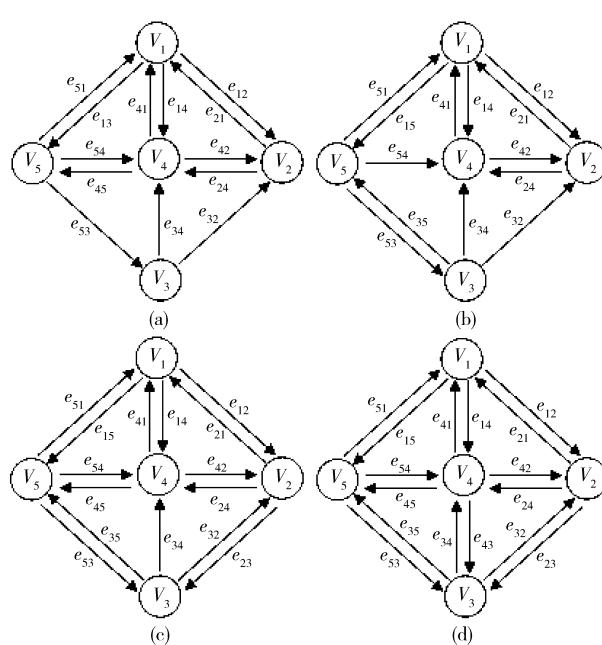


图3 加速度传感器设计实例有向图模型

Fig. 3 Directed graph models of accelerometers

(a) 实例1 (b) 实例2 (c) 实例3 (d) 实例4

## 4 结束语

结合机电产品系统的特点,提出了一种基于有向模糊图的产品系统结构相似度计算模型,取代传统的属性相似度计算方法。首先建立机电产品系统有向图模型,通过相应的积和式函数多项式对产品系统进行结构分析与相似度求解。该方法能较好避免属性相似度计算方法中实例属性不对称性和多样性的特点,为 CBR 系统的实例检索提供了一种新的途径。

## 参 考 文 献

- 1 闫向彤,江平宇. 基于实例和设计目录的微器件原理方案设计[J]. 计算机集成制造系统,2005,11(7):953~958,1006.  
Yan Xiangtong, Jiang Pingyu. Micro-component principle scheme design based on case & design catalog [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005,11(7):953~958,1 006. (in Chinese)
- 2 Cobb C L, Agogino A M. Case-based reasoning for the design of micro-electro-mechanical systems[C]// Proceedings of IDETC/CIE 2006, Pennsylvania, USA, 2006: 1~10.
- 3 蒋占四,陈立平,罗年猛. 最近邻实例检索相似度分析[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(6):1 165~1 168.  
Jiang Zhansi, Chen Liping, Luo Nianmeng. Similarity analysis in nearest-neighbor case retrieval [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(6):1 165 ~ 1 168. (in Chinese)
- 4 周宏明,薛伟,詹永照. 面向产品配置的相似度计算模型及实现方法[J]. 中国机械工程,2007,18(13):1 531~1 534.  
Zhou Hongming, Xue Wei, Zhan Yongzhao. Similarity calculation modeling and implementation method oriented to the product configuration[J]. China Mechanical Engineering, 2007,18(13):1 531 ~ 1 534. (in Chinese)
- 5 温诗铸. 关于微机电系统研究[J]. 中国机械工程,2003,14(2):159~163.  
Wen Shizhu. Researches on the micro-electromechanical system[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(2): 159 ~ 163. (in Chinese)

Technology, 2007. (in Chinese)

- 3 Lee P, Altintas Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(9) : 1 059 ~ 1 072.
  - 4 Kim G M, Cho P J, Chu C N. Cutting force prediction of sculptured surface ball end milling using Z-map [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(2) : 277 ~ 291.
  - 5 Gradisek J, Kalveram M, Weinert K. Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(4) : 401 ~ 414.
  - 6 Chung-liang Tsai, Yunn-shiuan Liao. Prediction of cutting force in ball-end milling by means of geometric analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1 ~ 3) : 24 ~ 33.
  - 7 倪其民,李从心,阮雪榆. 基于实体造型的球头铣刀三维铣削力仿真[J]. 上海交通大学学报,2001, 7:1 003 ~ 1 007.  
Ni Qimin, Li Congxin, Ruan Xueyu. Cutting forces simulation of ball-end milling based on solid modeling [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 7 : 1 003 ~ 1 007. (in Chinese)
  - 8 Fontaine M, Moufki A, Devillez A, et al. Modeling of cutting forces in ball-end milling with tool-surface inclination part I : prediction force model and experimental validation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189(1 ~ 3) : 73 ~ 84.
  - 9 Wang J J, Zheng C M. Identification of shearing and ploughing cutting constants from average forces in ball-end milling [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(6) : 695 ~ 705.
  - 10 李英松. 基于傅里叶级数的铣削力建模及实验研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.  
Li Yingsong. Milling force modeling and experiment research based on the Fourier series [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- 

(上接第 188 页)

- 6 Senturia S D. 微系统设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- 7 Colibrys (Switzerland) Ltd. MEMS capacitive accelerometers [EB/OL]. (2009-03-30) [2010-07-05]. <http://www.colibrys.com/e/page/109/>.
- 8 Abhishek Kumar, Shibu Clement, Agrawal V P. Structural modeling and analysis of a effluent treatment process for electroplating - a graph theoretic approach [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 179(3) : 748 ~ 761.
- 9 Prince A A, Agrawal V P. Structural modelling and integrative analysis of microelectromechanical systems product using graph theoretic approach [J]. Microsystem Technologies, 2009, 15(7) : 1 083 ~ 1 096.
- 10 楼少敏,许沧粟. 车载式拖拉机座椅舒适性测试系统的研究[J]. 农业机械学报,2004,35(2):35 ~ 36,61.  
Lou Shaomin, Xu Cangsu. Measurement system for ride comfort of tractor seats [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2):35 ~ 36,61. (in Chinese)