

文章编号:1001-9081(2006)12-3004-04

## 支持协同 CAD 的拓扑实体永久命名机制

李伟平,谷正气,邓彪

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南长沙 410082)

(lwpzlb@yeah.net)

**摘要:**在特征参数化定义域直接引用 B-Rep 域中的拓扑实体是以往永久命名方法固有的缺陷。提出了基于特征的解决方案:为特征面建立统一的命名方法,并规定在建模过程中特征面的名字不变;建立拓扑实体与特征面之间的表达关系,在特征参数化定义过程中引用由特征面表达的拓扑面,解决基于特征的协同 CAD 中拓扑实体永久命名问题;给出提出参考面的概念,用于解决拓扑面、拓扑边分裂和多重交线等问题引起的引用模糊问题。在此基础上,详细讨论了拓扑面、拓扑边匹配的方法。

**关键词:**协同 CAD;永久命名;参考面;特征面

**中图分类号:**TP391.72 **文献标识码:**A

## Mechanism of persistent naming topological entity supporting collaborative CAD

LI Wei-ping, GU Zheng-qi, DENG Biao

(Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body of China, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

**Abstract:** Direct referring to topological entity of B-Rep domain in feature's parametric definition domain is inherent limitation of previous persistent naming topological entity method. Therefore, a feature-based solution for topological entity naming was proposed. Firstly, uniform naming method for feature face was established and its name remained invariable during the modeling procedure. Secondly, the expression between topological entity and feature face was established and topological entity expressed by feature face was referred to during the course of feature's parametric definition, and as a result, the problem of persistent naming topological entity for feature-based collaborative CAD was solved. Thirdly, the concept of reference face was proposed and utilized to solve ambiguous referring problem, which arose from topological face splitting, topological edge splitting and multiply intersection edges. Based on the above mentioned, topological face and topological edge matching method was discussed in detail.

**Key words:** collaborative CAD; persistent naming; reference face; feature face

### 0 引言

异构 CAD 系统之间的数据交换,是产品协同设计的关键问题。为了实现协同设计,首先要求数据交换所传递的模型在不同系统环境下保持几何拓扑关系的一致性;其次要求转换后的模型在特征级别上可编辑,即接收模型的用户可以对特征进行各种操作。鉴于目前大多数 CAD 软件的核心是基于特征的参数化造型系统,同时基于特征的数据交换是实现 CAD 模型增量传输、更新和减少协同过程中网络负荷的有效手段,将数据交换粒度定位在参数化的特征级别是最可行的方案<sup>[1]</sup>。

在特征参数化表达中,有一类参数是实现数据交换的关键:特征创建过程中用户交互选择的拓扑实体。对于孔、凸台等特征,需要引用模型中已存在的拓扑实体,作为特征的依附面或定位参数的基准面;对于倒角、混合等特征,需要引用操作本身所指向的拓扑实体。为了保证实体模型在命名机制不同的异构 CAD 系统中求值重建的正确性,关键是维护实体模型修改前后拓扑结构的对应关系,因此需要统一的拓扑实体永久命名和辨识机制。

### 1 现有方法存在的问题

拓扑元素的命名和辨识是 CAD 领域重要且相当困难的问题。文献[2]把它归结为目前基于历史的参数化特征造型系统需要解决的六大问题之一<sup>[2]</sup>。

文献[3,4]在特征设计技术研究早期就观察到特征模型编辑过程中拓扑元素的记录问题。由于建立特征模型时,面是主要的被引用元素,文献[5,6]分别提出了面的命名和辨识方法,但他们的方法不能辨识边和点。文献[7]等用前、后、左、右等方向性信息来确定拓扑元素,但该方法不完全适合基于约束的特征造型。虽然人们意识到了拓扑元素命名和辨识的重要性,也提出了部分解决方法,但是直到 20 世纪 90 年代中后期,文献[8~10]才把拓扑元素命名和辨识作为独立的问题提出,并给出了系统的解决方法。

文献[8]设计了一个拓扑标识系统,对每个拓扑元素给一个 ID 号,每个元素的 ID 的构造利用了它的相邻拓扑元素及其边界表示的方向信息,且用一个有向图记录了面的合并与分割历史。当模型编辑后,把被引用的拓扑元素的 ID 从拓扑标识系统映射到新模型中的相应元素,这个映射把新旧模

收稿日期:2006-06-19;修订日期:2006-08-17 **基金项目:**长沙市科技局重大科技攻关开发项目(K042012-12)

**作者简介:**李伟平(1971-),男,湖南邵阳人,博士研究生,主要研究方向:现代 CAD 技术、基于网络的协同设计技术;谷正气(1963-),男,湖南长沙人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:计算机图形学、CAD/CAE/CAM 集成技术;邓彪(1982-),男,湖南宁乡人,硕士研究生,主要研究方向:基于网络的协同设计技术、PDM 技术。

型中的拓扑元素对应起来。

文献[9,10]详细分析了特征编辑导致设计结果的改变和拓扑元素的一般命名及其他之间的关系。他们根据拓扑元素的局部拓扑关系特性、边与点的局部方向性以及特征方向等信息对拓扑元素进行命名,通过比较新旧模型拓扑元素的名字建立起新旧元素间的对应关系。

文献[11]提出了一个简单的面和边的编码方法,该方法的核心思想是按照子面参数域在父面参数域上的顺序对子面排序以区分分裂面。该方法依赖于曲面参数的确定方法。另外,子面排序虽能区分具有相同父面的分裂面,但当模型修改后物体的拓扑结构发生变化时,基于这样的编码则难以正确辨识相应的拓扑元素。

上述方法的出发点都是致力于追踪和辨识在特征建模过程中时刻变化的 B-Rep (Boundary-Representation, 边界表达) 实体,包括创建、删除、分裂(点除外)和合并等情况。但即使是相同的操作在不同的模型状态下可能产生不同的 B-Rep 实体变化。同时,我们无法了解和利用 CAD 系统内部的拓扑实体命名机制的实现方法;通过 API 接口获得的拓扑实体指针是瞬态变化的,无法在不同的 CAD 系统之间互相引用。综上所述,上述方法在基于特征的协同设计环境下无法解决拓扑实体永久命名和辨识的问题。

## 2 特征分类

目前大多数 CAD 系统是参数化、基于设计历史的特征建模系统,实体模型采用混合表达方式:特征采用参数化定义,结果模型采用基于 B-Rep 的表达,建模过程如图 1 所示。特征参数化定义依赖于已经生成的边界实体,同时又确定了特征创建后的实体 B-Rep 模型,这种相互依赖关系是拓扑实体永久命名问题的主要原因。

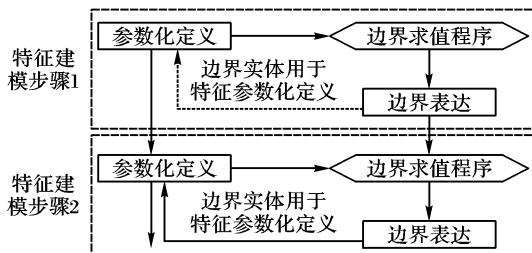


图 1 参数化 CAD 系统中模型的混合表达

提出了一种在保持系统参数化特征定义基础上,又能够取消这种相互依赖关系的方法,核心思想是:

1) 在特征参数化定义域(不是在 B-Rep 域)为实体提供永久命名机制,即:面的名字由特征名以及面在该特征内部的命名确定,边的名字是面的名字确定,以此类推。不同于 B-Rep 域的拓扑实体,参数化域实体的名字在建模过程中始终不变。

2) 特征参数化定义需要引用拓扑实体时,以参数化域实体为媒介引用 B-Rep 域的拓扑实体。

3) 为了有效地实现基于特征的实体命名,引入了参考类、成形特征类和操作特征类。

### 2.1 参考类

参考类是具有预定义几何形状的辅助实体,它本身不构成 B-Rep 模型的边界,在特征参数化定义时,以几何约束的方式与其他特征实体关联。参考类可作为特征的依附面或定位参数的基准面,更为重要的是:在特征的参数化定义域内定义半空间,用于解决拓扑面和拓扑边分裂时产生的引用模糊问

题。典型的参考类是平面参考类和直线参考类。图 2(b)是圆孔特征参考面和参考轴线。

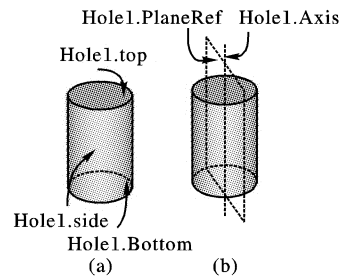


图 2 圆孔的特征面、参考面和和参考轴线

### 2.2 操作特征类

操作特征类指的是依赖于已有特征而存在的特征,如倒角、倒圆等。它们的特点是:本身不能单独存在,必须依赖于已有特征;在创建过程中,引用的拓扑实体是边,用于指定操作的对象;操作的结果在模型求值后的 B-rep 模型中仅有一个面,且所操作的边被删除。

### 2.3 成形特征类

成形特征类由 CAD 系统预定义的特征,如孔、凸台等,以及在二维草图的基础上以旋转、扫略或拉伸等方式生成的特征。它们的特点是:在创建过程中,引用的拓扑实体是面,用于确认其在 CAD 模型中的位置或位置基准。成形特征类包含以下实体,用于解决拓扑实体引用问题:

1) 特征面:构成特征封闭空间所包含的面,注意特征面可能不是 CAD 模型的边界面。命名规则是:Feature\_Instance\_Name.ElementID。约定与特征的依附面重合的是特征底面,与其相对的面是特征顶面。以圆孔为例(图 2),它包含 Hole1.Bottom, Hole1.side 和 Hole1.top 三个特征面。

拉伸特征侧面的命名规则是:根据特征草图在其依附面局部坐标系(为了便于论述,这里假设为 X-Y 坐标系)下每条边的起始点的 X 坐标值大小进行比较,X 坐标值最小的分配 ID 号 1(若有 X 坐标值相等,则以同样的方式比较 Y 值坐标),以该边起点、终点旋向遍历所有边, ID 号依次加 1。以图 3 的拉伸特征(设特征 ID 号 3)为例:它的侧面名字分别为:Sweep3.side1, Sweep3.side2, Sweep3.side3, Sweep3.side4, Sweep3.side5。扫略特征侧面的定义与拉伸特征类似。

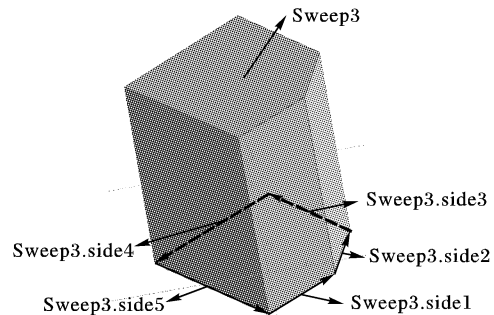


图 3 拉伸特征侧面命名的规则

旋转特征侧面的命名规则是:对于边环中的每条边,确定它们到旋转轴线投影距离的最大值;将该最大值与其他边的最大值比较,确定最大值中的最小值,将该最小值所属的边作为参考边;按照参考边的起点、终点旋向遍历每条边,并按如下方式逐个定义面:

Rotation.side\_n-2 → Rotation.Bottom → Rotation.side\_1 → Rotation.side\_2 → Rotation.siden\_n-3 → Rotation.Top(若参考边与旋转轴重合,则 Rotation.side\_n-2 不存在)。

以图 4 的旋转特征(设特征 ID 号 5)为例:它的侧面名字分别为: rotation5. side1, rotation5. side2, rotation5. side3, rotation5. side4, 内侧面(通过参考边的面)的名字为 rotation5. side5。

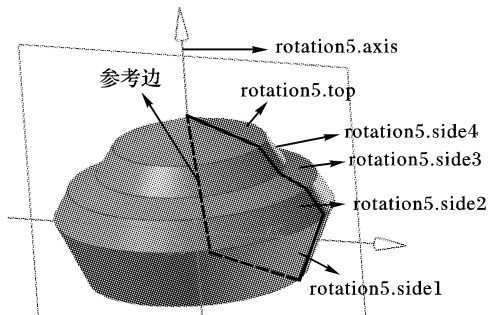


图 4 旋转特征侧面的命名规则

2) 依附面或定位参数基准面(这里仅考虑以引用拓扑实体作为依附面的情况): 引用已存在的特征面或参考面。例如,一个孔依附在一个块特征(设特征 ID 号为 6)的上表面,依附面的表达如下: Attaching\_Ref; Bolck6. Top。利用特征面作为其他特征的定位参数基准面或依附面的优点是: 依赖关系通过特征参数化定义建立; 特征面的命名是唯一和永久的。

通过建立特征面与 B-Rep 模型中的拓扑面之间的联系, 就可以在用户通过人机界面交互地拾取模型的拓扑面时, 将相应的特征面存储到特征的参数化定义中去, 实现拓扑面的永久命名和匹配。建立联系的方法如下:

为每个拓扑面分配一个 Owner 属性, 用于指定与其相对应的特征面的名字, 当拓扑面在建模过程中被分裂时, 将该名字传播到每个被分裂的拓扑面, 并添加其他信息(见第 3 节); 当两个或多个拓扑面共面时, 不允许这些拓扑面合并, 除非它们的 Owner 属性相同。

如图 5 所示, 为了在模型中加入一个圆孔, 首先选择 Block3. Top 作为依附面, 然后选择 Slot5. Left 和 Block3. Side1 作为定位参数的基准面。操作所引用的面均为被永久命名特征面, 都能在特征参数化定义中找到; 同时, 圆孔特征与 Slot5 和 Block3 的依赖关系也通过参数化定义中的引用关系建立起来。

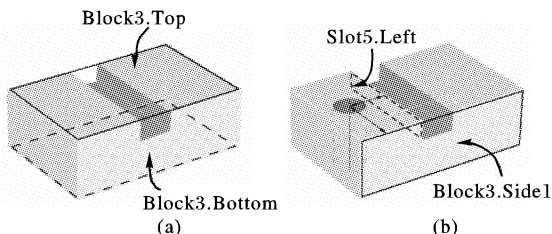


图 5 选择特征面作为定位参数的基准面

### 3 面辨识

建模过程经常发生面分裂的情况, 如图 6 所示: Block 特征的顶面被两个 Slot 特征分裂为四个面, 这四个面的 Owner 都是 Block. Top, 引入参考类可以辨识这四个面。在创建两个 Slot 特征时分别建立垂直平分 Slot 底面的参考平面, 每个参考平面定义了一对半空间, 分别为 Positive 和 Negative(半空间的正负属性与 CAD 系统的世界坐标系相同)。拓扑面的 Owner 属性除了包括相应特征面的名字外, 增加其所属的半空间信息, 就可以辨识分裂后的每个拓扑面, 格式如下:

```
Owner: (Feature_Instance_Name. ElementID), (discriminator)
//如果拓扑面没有分裂, 则 discriminator 项为空
```

如图 6 被分裂的四个面的 Owner 属性分别为:  
 (Block. top), (RefPlane1. Positive, RefPlane2. Positive)  
 (Block. top), (RefPlane1. Positive, RefPlane2. Negative)  
 (Block. top), (RefPlane1. Negative, RefPlane2. Positive)  
 (Block. top), (RefPlane1. Negative, RefPlane2. Negative)

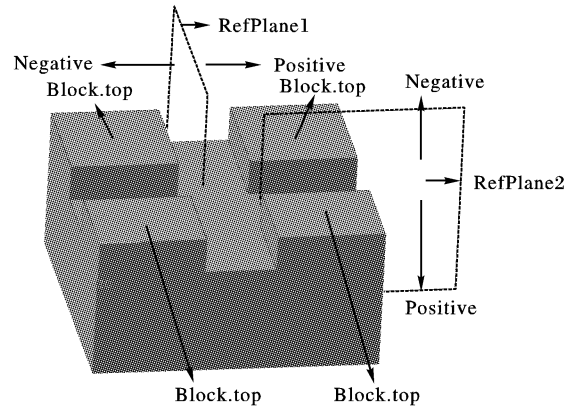


图 6 特征相交产生的面分裂

### 4 边辨识

引用拓扑边是永久命名最复杂的问题, 首先, 在建模过程中拓扑边的变化是最频繁的; 其次, 拓扑边的生成依赖于特征相交的方式, 特征参数的微小变化都可能影响拓扑边的形态。如图 7 所示, 当两个圆柱特征相交时, 直径由相等变为不相等, 交线的形态发生了很大的变化。

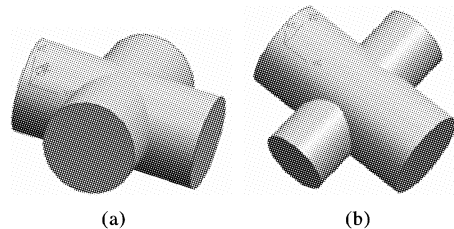


图 7 圆柱特征直径变化引起的相交边形态的变化

在仅包含平面的流形(manifold) B-Rep 模型中, 每一条拓扑边有且仅有两个相邻拓扑面; 在边的两个端点处, 都有一个拓扑面与相邻面相交。如前所述, 这四个拓扑面的 Owner 属性表示在参数化定义空间中, 具有永久名字的特征面, 因而 B-Rep 模型中的拓扑边可以通过拓扑面由特征面表示:

```
(adjacent_feature_face1, adjacent_feature_face2), (discriminator)
// discriminator 用于表示拓扑边的起始面和终止面
```

如图 8 所示, 图 8(a) 中特征面 Block. top 和 Block. side2 的交线被分裂为两条, 为了对其中一条边进行倒圆(在模型中添加倒圆操作特征), 需要确定其中一条倒圆边(假设是图 8(b) 中的边), 可以通过四个特征面唯一确定:

```
(Block. top, Block. side2), (Block. side1, Slot. left)
```

如果 B-rep 模型中存在曲面, 拓扑面两个之间可能有超过一条交线, 如图 9 所示, Block 特征的底面与 RoundSlot 特征的圆柱面有两条交线。与面分裂相似, 通过上述方法的基础上引入参考类, 辨识这两条交线。基本思想是: 通过在 CAD 系统环境中定义一个或多个参考面, 每个参考面定义了一对半空间, 每条分裂的拓扑边被参考面分割在不同的半空间内, 从而辨识被分裂的每条拓扑边。以图 9 为例, 通过定义一个通过 RoundSlot 特征圆柱面的轴线且垂直于 Block 特征的侧面的参考面, 拓扑边 e1 和 e2 就可以被特征面和参考面

命名并被辨识:

e1: (Block. bottom, RoundSlot. side), (Block. side1, Block. side3, RefPlane1. positive)

e2: (Block. bottom, RoundSlot. side), (Block. side1, Block. Side3, RefPlane1. negative)

当 RoundSlot 特征从图 9(b) 的位置移动到图 9(c) 的位置时,它与 Block 特征的交线仅保留了 e2,依赖于 e1 的特征 Blend1 也被删除。通过对 e1、e2 正确的命名,不会如图 9(d) 所示,错误的引用了 e2 边,违反了设计意图。

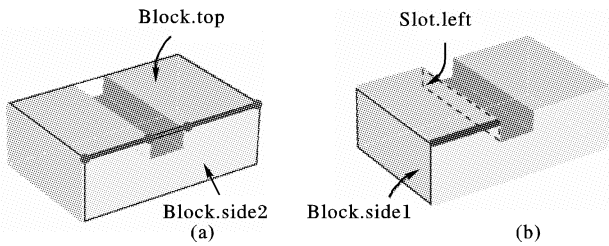


图 8 特征相交产生的边分裂

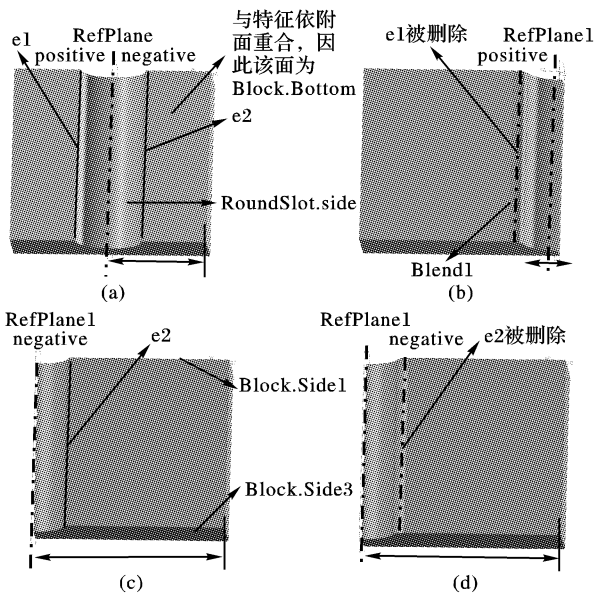


图 9 特征相交产生的多条交线

图 10 说明了两个圆孔特征相交的情况,定义通过直径较大的圆孔特征的轴线,且垂直于直径较小的圆孔特征的轴线的平面为参考面 RefPlane1,可以辨识这两条交线:

e1: (hole1. side, hole2. side), (RefPlane1. negative)

当需要对 e1 进行混合操作时,就可以通过引用特征面和参考面唯一地确定该边。因为引用的特征面和参考面的名字是永久的,所以 e1 的名字也是永久的。

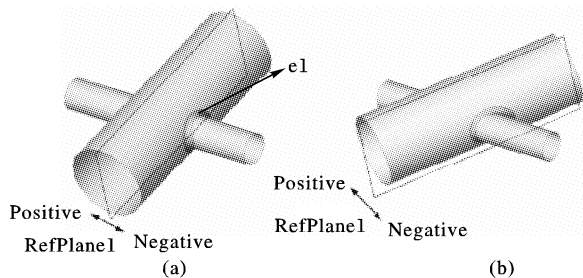


图 10 直径不相等的圆柱特征相交

由以上例子可以知道,参考面的定义方式对于面分裂,边分裂以及存在多条交线等情况非常重要,即参考面必须能够将拓扑实体分割在不同的半空间,每个半空间有且只有一个拓扑实体。限于篇幅,这里仅说明参考面定义的原则:

1) 参考面的定义必须与特征的某些基准面、基准轴线或对称面关联,如通过或垂直于轴线、与基准面重合或垂直等,当特征的位置发生变化时(如图 10(b)),参考面位置相应的变化。

2) 对于一个特征与多个特征相交产生边分裂的情况,如图 11 所示,需要多个参考面唯一的命名各分裂边:

e1: (Block1. bottom, Block1. side3), (Block1. side2, Block1. side4, RefPlane1. positive)

e2: (Block1. bottom, Block1. side3), (Block1. side2, Block1. side4, RefPlane1. negative, RefPlane2. positive)

e3: (Block1. bottom, Block1. side3), (Block1. side2, Block1. side4, RefPlane2. negative)

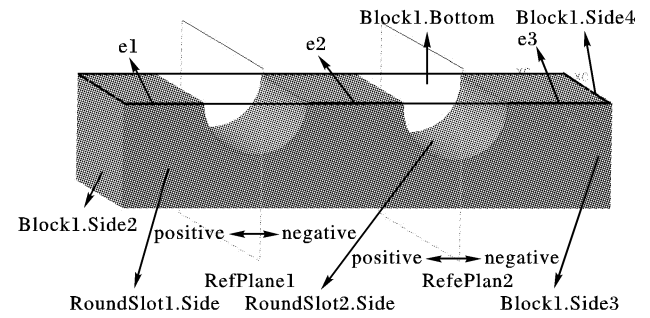


图 11 一个特征与多个特征相交的情况

## 5 结语

与以往提出的拓扑实体永久命名问题解决方案不同,本文利用特征参数化空间定义特征面和参考面,并通过它们命名和辨识 B-Rep 域中时刻变化的拓扑实体,解决协同 CAD 过程中基于特征的数据交换问题。

### 参考文献:

- [1] 欧阳应秀. 基于 CSCW 的 CAD 系统关键技术研究[D]. 浙江大学, 博士, 2004.
- [2] BIDARRA R, BRONSVOORT WF. Semantic feature modeling[J]. Computer Aided Design, 2000, 32(3): 201 - 225.
- [3] ROSSIGNAC JR, BORREL P, NACKMAN LR. Interactive design with sequences of parameterized transformations[R]. IBM Research Division, T. J. Watson Research Center, York town Heights. New York: Technical Report RC 13740, 1988.
- [4] ROSSIGNAC JR. Issues on feature-based editing and interrogation of solid models[J]. Computers & Graphics, 1990, 14(2): 149 - 172.
- [5] REQUICHA AA, CHAN SC. Representation of geometric features, tolerance and attributes in solid modellers based on constructive geometry[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1986, 2(3): 156 - 166.
- [6] TURNER GP, ANDERSON DC. An object-oriented approach to interactive, feature based design for quick turnaround manufacturing [J]. ASME Computers Engineering, 1988, 1: 551 - 555.
- [7] VARADY T, GAAL B, JARED G. Identifying features in solid modeling[J]. Computer Industry, 1990, 14: 43 - 50.
- [8] KRIPAC J. A mechanism for persistently naming topological entities in history-based parametric solid models[J]. Computer Aided Design, 1997, 29(2): 113 - 122.
- [9] CAPOYLEAS V, CHEN X, HOFFMANN CM. Generic naming in generative, constraint-based design [J]. Computer Aided Design, 1996, 28(1): 17 - 26.
- [10] CHEN X, HOFFMANN CM. On editability of feature-based design [J]. Computer Aided Design, 1995, 27(12): 905 - 914.
- [11] 苏晓锋, 黄正东, 朱林, 等. 形状特征中的拓扑元素编码体系 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(2): 137 - 141.