论 文

一种以特征线为中心的曲面特征表示方法

何坤金, 冯贵波, 陈正鸣*, 蒋俊锋

河海大学物联网工程学院, 常州 213022

* 通信作者. E-mail: zmchen@hhuc.edu.cn

收稿日期: 2012-05-24; 接受日期: 2012-10-30

国家自然科学基金 (批准号: 61073066) 和河海大学博士基金 (批准号: XZX/09B005-03) 资助项目

摘要 由于自由曲面特征形状复杂多样, 难以有效地进行参数化表示. 本文提出了一种以特征线为中心的曲面特征层次参数化的表示方法. 该方法将特征线作为曲面构建的基本单元, 将特征线划分为几何层、约束层、语法层和语义层, 利用特征线信息对曲面特征进行参数分层, 实现曲面特征的整体形状和局部形状的层次控制; 在参数化表示上, 按不同自由度分为半自由和完全自由曲面特征, 并对曲面特征进行了统一的定义表示. 实验结果表明, 本文方法能够表达多种形状的自由曲面, 在高层语义参数层面上方便地编辑曲面特征, 是一种有效的曲面特征表示方法.

关键词 曲面特征 特征线 参数化设计 特征分类 语义参数

1 引言

曲面特征定义与表示是曲面特征技术的基础, 关键问题是曲面特征的参数化. 但不管曲面特征如何复杂, 其特征参数个数不能太多, 否则无法使用. 而曲面特征不同于常规特征能用长、宽、高等少量参数严格确定其几何形状. 因为曲面特征几何形状有太多的自由度, 很难用有限的几个参数决定; 太多的参数表示又导致用户实质上去操作底层的几何元素, 即参数功能弱, 缺少高层语义. 因此, 曲面特征参数化表示就成了一个研究重点.

目前, 曲面特征参数化有如下几种主要方法. Vergeest 等^[1]提出了一个曲面特征参数化的形式化方法, 并用该方法定义了脊与孔特征, 它通过截面线来定义曲面特征, 该方法适用于拉伸或旋转等生成的半自由曲面特征. Van den Berg 等^[2,3]通过他们所谓的 FFDPs (free-form feature definition points) 来定义特征线, 通过特征线定义和控制特征形状, 并提出了一种基于曲线 (curve-based) 的自由曲面特征表示和设计方法, 其特征参数定义在这些特征点上. Nyirenda 等^[4]提出了用数值参数和曲线参数表示曲面特征, 将数值参数作为高层参数描述曲面的一般属性, 用于全局形状, 曲线参数用于修改局部形状, 但 Nyirenda 未提出数值参数和曲线参数间的映射关系. Pernot 等^[5]利用 B 样条曲面性质, 通过边界线和目标线限定曲面变化范围, 提出了一个用户驱动的曲面特征变形方法, 同时提供预定义的模板特征; 随后, 进一步提出了全自由变形特征的概念^[6], 同时提供了特征生成和操作的方法和工具, 其方法的特点是在特征形状控制和设计自由度之间找到一个较好的平衡点. 不久前, 他们把原有的工作扩展到了参数化自由特征模板上^[7]. 不过, Pernot 等的自由曲面特征主要限定在一张曲

引用格式: 何坤金, 冯贵波, 陈正鸣, 等. 一种以特征线为中心的曲面特征表示方法. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 374-385, doi: 10.1360/112012-382

面上. Langerak 等^[8]提出了一种采用三元组表示曲面特征的形式化方法, 以 NURBS 的控制点作为曲面特征构建的基本元素, 并在特征参数与控制点间直接建立映射关系, 但映射关系过于复杂且难以实现.

针对曲面特征参数化设计的困难, 本文提出了一种以特征线为中心的曲面特征表示方法. 该方法将特征线作为曲面造型中的关键元素, 以特征线为核心对曲面进行定义、表示和参数化, 利用特征线信息实现对曲面特征总体形状和细节形状的控制, 使得用户能通过少数具有语义的高层参数编辑曲面特征, 避免用户从底层进行复杂的造型操作; 并能有效地实现不同自由度曲面特征的统一表示.

2 特征线的定义与分层表示

在传统的曲面造型中, 点、线、面分别从不同的粒度和层次上对曲面特征的几何属性进行描述, 并具有各自相对明确的意义和内涵^[9,10]. 其中, 线在造型中具有“承上启下”作用, 它包含了可以联系底层的点和上层的面间重要的造型信息, 却没有点的繁琐(点的数量过多)也没有面(面包含由点、线、面不同层次的几何数据, 甚至相同数据)的冗余, 线表现为具有明确的结构约束和形态内涵, 它是点和面的中间层, 起到桥梁作用, 对曲面特征的造型具有重要意义, 因此, 对特征线的处理比对点和面更具有优势. 而点主要强调细节的形态位置, 但对整个形状描述不充分; 面为由特征线围合成的具有特定功能的形状, 虽然最能表示形态的全部内容, 但过于复杂, 不易被表达.

2.1 特征线的层次结构

特征线是曲面构造的关键元素, 是曲面上最为主要的感知特征, 它由主曲率关于其对应的主曲率方向的偏导数所定义, 在概念上包括显著的脊线和谷线. 特征线是曲面上的一个局部特征, 但所有的特征线组合可以在结构上描述该曲面和定义曲面的骨架. 特征线的生成涉及到特征线的几何、约束、参数等定义问题^[11]. 为便于设计者更容易地创建和操作特征线, 本文采用多视图、多形态方法定义特征线, 将特征线从底层的几何建模层到高层的语义层划分为: 几何层、约束层、语法层、语义层, 如图 1 所示.

该方法充分利用特征线的性质, 从底层到高层, 跟踪了特征线的整个定义过程. 特征线各层定义含义如下:

- 几何层是特征线的几何造型层, 也是特征线的最底层, 一般由控制点、节点向量或插值点组成, 并可在特征线上指定一些特征点.
- 约束层是特征线目标生成过程所受到的各种约束限制, 以及是否达到目标的衡量标准, 一般由几何约束、尺寸约束、拓扑约束构成.
- 语法层是分析实例化特征线是否符合约束层中定义的约束规则.
- 参数语义层是用户设置特征线参数并指定相关语义功能.

2.2 特征线的定义

在设计曲面特征中, 合理设计特征线显得非常重要, 它不仅影响曲面特征造型的难易程度, 而且影响曲面特征的精确度和光顺性. 在进行特征线设计时应该考虑以下几个基本原则: (i) 特征线的语义性, 用特征线反映曲面特征的大致形状、尺度、空间位置等; (ii) 特征线的编辑性, 用特征线的控制点

图 1 特征线分层表示及实例

Figure 1 A characteristic curve divided into four levels. (a) Multi levels; (b) interpolation points; (c) interpolation points; (d) semantics parameters; (e) α is bigger whereas L is fixed

图 2 三维特征线及其参数示例

Figure 2 A characteristic curve and its parameters set up

或插值点来完成特征线的交互操作; (iii) 特征线设计的简洁性, 为降低造型难度, 用尽可能少的特征线描述曲面形状.

基于以上设计原则, 本文将特征线的定义为 $C = \{D, R, P\}$. 其中, C 为特征线名称; D 为插值点 (或控制点) 集合; R 为约束规则; P 为特征线的语义参数.

如图 2 所示为一个具有一般性的特征线的定义实例, 语义参数包括长 (L)、宽 (W)、高 (H)、某位置的弯曲角 (α). 该特征线的定义如下:

$C = C_1 = \{D, R, P\}$, 曲线的名称为 C_1 ;

$D = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$, 曲线 C_1 上的插值点包括 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 ;

$R = \{L = 1.5W, H = 2L\}$, 在特征线 C_1 上定义了约束关系, 长 $= 1.5 \times$ 宽, 高 $= 2 \times$ 长;

$P = \{L, W, H, \alpha\}$, 在特征线 C_1 上定义语义参数长、宽、高和角度.

特征线的语义参数由用户根据实际需要进行定义, 用于方便编辑特征线, 如长度、高度、宽度、曲率半径、两点长度、弯曲度、扭曲度、定位与朝向等参数.

3 曲面特征的定义

考虑特征线在曲面造型中的重要性, 本文将以特征线为中心, 并结合其他相关信息, 提出一种曲面特征的表示方法. 该方法将特征线作为曲面构建和参数化的核心, 曲面形状由特征线和生成方式

图 3 以特征线为中心的曲面特征表示方法

Figure 3 A representation of freeform feature based on characteristic curves

决定, 曲面特征参数由特征线间的关系进行设置.

如图 3 所示以特征线为中心的曲面特征表示方法的关系图, 其中, 高层参数间接影响曲面特征的基本形状 (包括整体形状和局部形状), 特征线直接决定曲面特征的基本形状, 高层参数通过映射关系影响特征线; 底层参数控制特征线的细节形状, 并间接影响曲面特征的细节形状. 特征线是曲面特征定义的核心部分.

以特征线为中心的曲面特征主要包括特征线集合、曲面生成方式、特征参数、参数与曲面形状间映射关系, 其定义为:

$SF = \{C, G, P, \mu\}$, SF 为曲面特征名称.

- C 为特征线集合, 包括边界线、轮廓线、截面线、约束线等, 每个特征线由一些特征点组成.
- G 为曲面生成方式, 包括有一定规律曲面的拉伸、旋转、扫掠等生成方式, 完全自由曲面的蒙皮、放样、填充、覆盖等生成方式.
- P 为特征参数, 表示曲面特征的语义参数, 如长、宽、高、角度等, 用来表示曲面的整体形状.
- μ 为特征参数 P 与特征线 C 间的映射关系. 其中, 特征线和生成方式决定曲面形状, 参数 P 的变化先改变特征线形状, 再通过特征线改变曲面特征形状.

在以特征线为中心的曲面特征参数化的表示上, 有两个主要任务:

1) 确定曲面特征参数 (高层参数) 如何影响特征线.

$\mu_i^j(P_i, C_j^0) = C_j$, 每个特征参数将会影响特征线, 其中, P 为高层语义参数, C 为特征线, μ 为映射关系. 任一参数 P_i 的变化对原特征线 C_j^0 产生影响, 通过两者的映射关系 μ_i^j 生成新的特征线 C_j .

2) 确定特征线和生成方式如何决定曲面特征形状.

$SF(C, G) = F$, 特征线集 C 与一种适合的曲面生成方式 G 构建一新的曲面特征形状 F , 参数 P 和映射关系 μ 保留.

如图 4 所示, 采用上述曲面特征定义表示一个曲面特征, 其中, 该曲面包括特征线 C_1, C_2, C_3 , 曲面生成方式为蒙皮法, 特征参数为 W, W_1, W_2, W_3 , 参数与曲面形状间映射为 $\mu_1: W$ 与 (W_1, W_2, W_3) 间关系, $\mu_2: \alpha$ 与 (W_1, W_2, W_3) 间关系. 其表示如下:

$C = \{C_1, C_2, C_3\}$, C_1, C_2, C_3 分别为表示曲面的 3 条特征线.

$G = \{\text{skinning}\}$, skinning 为蒙皮曲面生成方式.

图 4 以特征线为中心的曲面特征定义

Figure 4 Definition of freeform feature based on characteristic curves

图 5 曲面特征自由度类型及参数化

Figure 5 Types of freeform features by freedom degree and parameterization. (a)(b) Semi-freeform features; (c) fully freeform feature

$P = \{(\alpha, W), (W_1, W_2, W_3)\}$, 其中, (α, W) 为曲面特征参数, (W_1, W_2, W_3) 分别为 3 曲线特征参数.

$\mu = \{\mu_1 : W \rightarrow (W_1, W_2, W_3), \mu_2 : \alpha \rightarrow (W_1, W_2, W_3)\}$, μ_1 为曲面特征参数 W 和曲线特征参数 W_1, W_2, W_3 间的映射关系, μ_2 为曲面特征参数 α 和曲线特征参数 W_1, W_2, W_3 间的映射关系. 特征参数层次间的具体映射关系我们在文献 [12] 中较详细描述.

4 以特征线为中心的曲面特征分类及参数化表示

特征参数化的目的是确定并利用少量的参数来定义设计特征的几何形状, 这些参数具有一定的设计语义. Poldermann 等 [13] 指出曲面特征参数需满足两个方面的要求: 一是它必须有明确的语义, 使工程人员易于理解, 如长度、高度、半径、角度等; 二是它必须与表示特征几何形状的元素相关联, 即映射关系. 如何合理设置语义参数及其与几何元素关联将是曲面特征参数化表示的关键.

根据曲面特征的自由度和曲面形状的表达精度, 本文将曲面特征分成两类: 半自由曲面特征、完全自由曲面特征. 其中, 半自由曲面特征的几何形状具有一定的共性: 都可通过特征线精确表示曲面的内部形状, 与规则形状特征类似, 已有相关文献介绍 [14,15], 如某脊特征、凸特征等, 如图 5(a) 和 (b) 所示; 而完全自由曲面特征难以直接通过特征线精确表示曲面内部所有位置的形状, 在完全自由曲面特征表示上, 需要结合基本形状 (设置语义参数) 和细节形状 (设置曲面控制点和权因子等) 表示, 如图 5(c) 所示. 由此, 将曲面特征参数化分类为: 半自由曲面特征和完全自由曲面特征.

4.1 半自由曲面特征形状的参数化表示

半自由曲面特征的形状具有一定的规律性和同向性, 它的自由度介于规则特征与完全自由特征之

图 6 脊特征定义

Figure 6 Definition of one ridge feature. (a) Definition of section curve; (b) feature parameters definition

间, 通常由曲线通过拉伸、旋转、扫略等方式生成, 曲面特征决定于特征线和曲面生成方式. 半自由曲面特征的参数实质上是对特征线进行参数设置完成的, 其参数化过程如下:

1) 设置坐标中心点 P_r . 在局部坐标系下, 定义曲面特征或特征线时, 先设置局部坐标系的中心点 P_r , $P_r = \{x, y, z\}$;

2) 设置特征线参数. 特征线参数是从不同角度上定义特征线的相关语义, 图 6(a) 所示定义特征线的局域位置的宽度参数 W , 高度参数 H ;

3) 设置特征参数. 用少数具有高层语义的参数表示曲面整体形状, 如图 6(b) 所示定义脊特征的宽度参数 W , 高度参数 H , 以及拉伸长度参数 L . 其中, 部分特征线参数反映了曲面特征参数, 如特征线参数 W, H 同时也为曲面特征参数的宽度和高度.

半自由曲面的参数化相对简单, 一般在单曲线上进行. 如图 6(a) 的脊特征的截面线, 截面线上的宽度参数 W 以 P_r 为中心点在 y 方向上进行等比变换; 高度参数 H 以 P_r 为固定点在 z 方向上进行等比放缩.

4.2 完全自由曲面特征参数化表示

在以特征线为中心表示完全自由曲面特征时, 将特征线作为中间桥梁, 先在高层特征参数与特征线间建立映射关系, 然后在特征线与底层的几何元素间建立映射. 对其参数化分两个过程: 首先, 在曲面特征的整体形状上, 设置高层语义参数, 从整体形状上对曲面进行编辑; 其次, 在曲面局部形状, 通过特征线参数编辑曲面局部形状. 在细节形状上, 通过底层的几何元素修改局部细节形状, 如控制顶点、节点向量等, 但耗时耗力. 本文着重研究在特征参数层上编辑基本形状 (整体形状和局部形状), 具体过程如下:

1) 在曲面特征的整体形状上, 通过曲面特征参数编辑曲面整体形状.

曲面特征参数往往设置在多个特征线间或某单曲线上, 在特征线上设置了适合的特征点, 特征参数以特征点为元素依附其上, 如图 7(a) 所示. 参数 W_1, W_2, W_3 分别依附于 3 条曲线 L_1, L_2 和 L_3 的端点上, 表示曲面特征不同处的局部位置宽度; 参数 α 依附于特征线 L_1, L_2 和 L_3 上的 3 个特征点上, 表示曲面的整体弯曲程度, 当弯曲度 α 变化时, L_1 和 L_3 分别以中心点 P_r 向内或外旋转 $(\alpha' - \alpha)/2$, 如图 7(b) 所示.

2) 在曲面特征的局部形状调整上, 通过特征线参数编辑局部形状.

在以特征线为中心的曲面特征表示方法上, 曲面特征参数表达了曲面特征的整体属性, 而特征线参数反映了曲面特征的局部形状属性, 由此, 通过特征线参数实现曲面特征的局部形状修改. 如图 8 所示曲面特征中一特征线的角度参数 β 变化引起的局部形状变化. 当特征线参数 β 变化到 β' 时, 特征点 P_1, P_3 分别以 P_2 为中心点向内或外旋转 $(\beta' - \beta)/2$ 度, 如图 8(b) 所示.

图 7 曲面特征参数及角度参数变化

Figure 7 Parameterization of freeform feature and angle α changing. (a) Skinning surface and its parameterization; (b) global shape changing when parameter α changes

图 8 特征线参数 (角度参数) 变化

Figure 8 Parameter of characteristic curve (angle β) changing. (a) Parameter β set up; (b) local shape changing when parameter β changes

图 9 曲面特征模型实例

Figure 9 Examples of surface feature models. (a) Button switch part of shaver; (b) one ring part

在曲面特征的细节调整上, 利用已生成曲面的控制点和权因子进行调整, 已有相关文献介绍^[16], 它们的变化同时会改变特征线和曲面特征参数.

从特征意义上而言, 对完全自由曲面特征表示的层次参数化的目标是使得用户能通过少数具有语义的高层参数编辑曲面特征的整体形状和局部形状, 避免用户从底层的几何元素进行复杂的造型操作.

5 参数化设计实例与比较

在 VC++ 2005 和几何造型引擎 ACIS R20 平台上对本文提出的方法进行了实例测试, 并将该方法与已有曲面特征参数化表示方法进行相关比较. 如图 9(a) 显示了某剃须刀上的开关部件, 含有旋转特征 (高亮显示); 图 9(b) 显示了一振铃器的模型实例, 含有多个完全自由曲面特征.

5.1 实例

例 1 为旋转曲面特征 (半自由曲面特征), 如图 10 所示. 其中, 特征线包括截面线 C_1 和旋转轨迹线 L_1 (或旋转轴 A), 特征线 C_1 上设置特征点 P_1 , P_2 , P_3 . 在曲面特征参数化过程中, 高度参数 H

图 10 一旋转曲面特征及其参数化

Figure 10 One revolving surface feature and its parameterization. (a) Its two characteristic curves; (b) its parameterization; (c) its shape changing when parameter W_1 changes

图 11 一覆盖曲面特征的参数化

Figure 11 One covering freeform feature and its parameterization. (a) Demonstration interface; (b) its characteristic curves and its parameterization; (c) its shape changing when parameter W changes

为特征点 P_1 和 P_3 间在 z 方向上的长度, 上端宽度参数 W_1 为 P_1 到轴 A 的两倍距离, 下端宽度参数 W_3 为 P_3 到轴 A 的两倍距离, 中间宽度参数 W_2 为 P_2 到轴 A 的两倍距离. 当曲面特征参数变化时, 实质上是对特征线 C_1 的变化, 这需要建立曲面特征参数与特征线间的映射关系, 以及特征线参数与底层几何元素间的映射关系. 如当曲面特征参数 W_1 变小时 (其他参数不变), 特征线 C_1 以 P_r 为固定点且 P_2, P_3 不变, P_1 在 y 方向上向内收缩, 引起 C_1 变化, 如图 10(a) 和 (b) 所示.

例 2 为覆盖曲面特征 (完全自由曲面特征), 如图 11(a) 所示, 通过在振铃器上定义了一凸块的完全自由曲面特征, 对其用特征参数进行编辑, 生成不同需求的曲面特征. 该特征的特征线包括边界线 C_1, C_2 和约束线 L_1 , 特征线 C_1 上设置特征点 P_{11}, P_{12}, P_{13} , 特征线 C_2 上设置特征点 P_{21}, P_{22} ,

表 1 常见曲面特征参数化表示方法的比较 *

Table 1 Comparison of parametric representation of several surface features

Several methods	Parameters on point	Parameters on curve	Parameters on surface	Feature parameters	Mapping relations
Nyirenda P.J	+	+	+	On curves and surfaces	Mappings between feature parameters and curve parameters, between feature parameters and geometric points
Van den Berg	+	±	+	On surfaces	Mappings between feature parameters and curve parameters, between feature parameters and characteristic points
Pernot J. P	+	+	+	On surfaces	Mappings between feature parameters and curve parameters, between feature parameters and characteristic points
Vergeest	+	—	+	On surfaces	Mappings between feature parameters and characteristic points, it is suitable to semi-freeform features
Langerak	+	—	+	On surface	Mappings between feature parameters and characteristic points
This method	±	+	+	On curves and surfaces	Mappings between feature parameters and curve parameters, between curve parameters and characteristic points

* + means NEED, — means NOT NEED, ± means NEED or NOT NEED

P_{23} , 特征线 L_1 上设置特征点 P_{31} , P_{32} , P_{33} , 如图 11(b) 所示. 在曲面特征参数化过程中, 高度参数 H 为以中心点 P_r 和 P_{32} 间在 y 方向上的距离, 宽度参数 W 为以特征线 C_1 上 P_{12} 到特征线 C_2 上 P_{22} 间距离, 长度参数 L 为以 P_{11} 到 P_{13} 间距离, 其中 P_{11} , P_{21} , P_{31} 共点, P_{13} , P_{23} , P_{33} 共点. 当曲面特征参数变化时, 实质上是对特征线 C_1 , C_2 , L_1 的变化, 这需要建立特征参数与特征线间的映射关系. 如当曲面特征参数 W 变大时 (其他参数不变), 特征线 C_1 , C_2 两端点和 P_r 固定, 且 L_1 不变, C_1 , C_2 上的特征点 P_{12} , P_{22} 在 x 方向上向外侧按比例变化, 带动曲线的插值点相应向外扩展, 图 11(c) 所示特征线 C_1 的情况.

5.2 方法比较

自由曲面特征的标识和修改难以通过简单的参数来完成, 往往以曲线描述的形式来实现形状定义, 因而形状控制曲线和限定曲线常被用于描述自由形状特征的定义. 本文将特征线作为关键元素表示曲面特征, 曲面特征形状由特征线和一种适合的曲面生成方式决定; 曲面特征参数由在一或多个特征线上的特征点来约束定义. 在曲面特征参数的表示与映射关系上, 本文提出的方法与引言中介绍的表示方法进行比较, 如表 1 所示.

可见, 以特征线为中心表示曲面特征的特点有: 1) 没有过多地依赖几何点元素, 而转向更有意义的特征线; 2) 不需要在曲面特征参数与底层控制点间直接建立映射, 而在两者间添加了特征线参数层, 使原有的复杂映射关系转换为两个相对简单的映射关系, 即曲面特征参数与特征线参数间、特征线参数与特征点间的映射; 3) 将对曲面特征形状的控制分解为两部分: 整体形状和局部形状, 曲面特征参数表达整体形状, 特征线参数对应局部形状, 有利于对曲面特征进行编辑; 4) 扩大了曲面特征表示的适用范围, 即可适用于完全自由曲面的参数化表示.

利用特征线为单元表示曲面特征与传统的曲面造型的区别在于: 1) 传统的曲面造型侧重于曲面的几何属性, 从几何的点、线、面逐层递进, 直到曲面生成为止, 本文方法注重于曲面的特征语义参数与几何形状的关系; 2) 在传统曲面造型生成的曲面编辑时, 通过对底层的控制点或插值点进行操作实现, 本文方法侧重于通过特征线上设置的高层语义参数对曲面进行编辑; 3) 本文方法是在传统的曲面造型方法的基础上, 建立了更高层次的设计和封装, 通过高层次的有语义的参数用以实例化特征及对其进行编辑, 一旦曲面特征生成, 可方便以后重用.

6 结论

针对曲面特征的参数化表示, 本文提出了一种以特征线为中心的曲面特征参数化表示方法, 通过绘制特征线及其编辑, 并结合曲面的生成方式构造曲面几何形状, 利用特征线中的特征点作为基本元素, 实现曲面参数化. 相比于已有的研究成果, 本文研究工作的特征表现在:

- 1) 拓展了曲面特征的表示方法, 通过中间层的特征线参数作为底层与高层参数的桥梁, 避免了从底层开始的繁琐编辑、以及直接建立从高层到底层的复杂映射.
- 2) 将特征线作为曲面造型的中间桥梁, 通过特征线的操作, 使得曲面能够快捷到达目标形状.
- 3) 将不同自由度的曲面特征进行统一表示, 扩大了曲面特征的表示范围, 在参数化表示上按不同自由度的曲面特征分为半自由和完全自由曲面特征.

实验结果表明, 本文方法能够快捷、达意地表示曲面特征的参数化, 同时支持用户使用少量高层参数编辑曲面特征, 是一种有效的曲面特征表示方法. 但在曲面特征参数化设计过程中, 曲面特征的一般性映射和约束关系有待进一步研究和完善; 对复杂的多个曲面生成的特征, 需要建立面与面间的更高层次的约束与映射关系; 对完全自由曲面特征的编辑时, 难以通过高层参数控制其细节形状.

参考文献

- 1 Vergeest J S M, Horvath I, Spanjaard S. Parameterization of freeform features. In: Proceeding of the International Conference on Shape Modelling and Applications, Genova, 2001. 20-28
- 2 Van den Berg E, van der Meiden H A, Bronsvort W F. Specification of freeform features. In: Proceedings Solid Modeling'03, 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, Seattle, 2003. 56-64
- 3 Van den Berg E. Free form feature modeling and validity maintenance. Ph.D. Thesis. Delft: Delft University of Technology, 2007
- 4 Nyirenda P J, Mulbagal M, Bronsvort W F. Definition of freeform surface feature class. Comput Aided Des Appl, 2006, 3: 665-674
- 5 Pernot J P, Guillet S, Leon J C, et al. A shape deformation tool to model character lines in the early design phases. In: International Proceedings Shape Modeling, Banff, 2002. 165-174
- 6 Pernot J P, Falcidieno B, Giannini F, et al. Fully free-form deformation features for aesthetic shape design. J Eng Des, 2005, 16: 115-133
- 7 Pernot J P, Giannini F, Falcidieno B, et al. Parameterised free-form feature templates. In: IEEE proceedings SMI'09, Beijing, 2009. 140-147
- 8 Langerak T R. Local parameterization of freeform shapes using freeform feature recognition. Comput Aided Des, 2010, 42: 682-692
- 9 Chen X T. Research and application of domain task in automobile styling design. Ph.D. Thesis. Changsha: Hunan University, 2009. 19-24 [陈宪涛. 汽车造型设计的领域任务研究与应用. 博士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2009. 19-24]

- 10 Qin S F, Wright D K. Progressive surface modelling scheme from unorganised curves. *Comput Aided Des*, 2006, 38: 1113–1122
- 11 Cheutet V. 2D semantic sketcher for car aesthetic design. In: 5th International Conference of Integrated Design and Production, Rabat, 2007. 1–13
- 12 He K J, Chen Z M, Zhao L H. A new method for classification and parametric representation of freeform surface feature. *Intl J Adv Manufact Technol*, 2011, 57: 271–283
- 13 Poldermann B, Horváth I. Surface-based design based on parametrized surface features. In: Horváth I, Varadi K, eds. *Proceedings of the International Symposium on Tools and Methods for Concurrent Engineering*, Budapest, 1996. 432–446
- 14 Van den Berg E, Bronsvort W F. Parameterised constraint-based wrapping of freeform shapes. *Comput Graph*, 2007, 31: 89–99
- 15 Liu Y J, Lai K L, Dai G, et al. A semantic feature model in concurrent engineering. *IEEE Trans Autom Sci Eng*, 2010, 7: 659–665
- 16 Zhang H, Sun J G. Weight-based direct manipulation of FFD. *Chin J Comput*, 2002, 25: 910–915 [张慧, 孙家广. 基于 NURBS 权因子调整的 FFD 直接操作. *计算机学报*, 2002, 25: 910–915]

A representation of freeform features based on characteristic curves

HE KunJin, FENG GuiBo, CHEN ZhengMing* & JIANG JunFeng

College of Computer Science and Information Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China

*E-mail: zmchen@hhuc.edu.cn

Abstract Owing to the diversity and complexity of freeform surface shapes, it is difficult to parameterize surface features and express their shapes effectively. A parametric approach for layering freeform surface features is proposed based on characteristic curves. A characteristic curve is a key element and is regarded as the basic unit for building surface shapes. A characteristic curve can be divided into four levels, comprising, from the lowest to the highest level, geometry, constraints, grammar, and semantics. The information is used to layer the parameters of a freeform surface feature so that the global and local shapes of the surface feature can easily be manipulated by the layered parameters. The global shape is controlled by the high parameters between multi characteristic curves, while the local shape is manipulated by these parameters with a single curve. According to the degrees of the surface and its parametric representation, freeform surface features can be divided into two types: semi-freeform and fully freeform. Then, the freeform surface feature is combined in the representation. Using various examples we show that the proposed method can fully express complex surfaces and is effective in defining freeform surface features, making it convenient for designers to edit freeform features from higher-level semantic parameters. Moreover, it provides an efficient way of representing freeform surface features.

Keywords freeform surface feature, characteristic curve, parametric design, feature classification, semantics parameter

ing, and computer graphics.

HE KunJin was born in Wuhu, Anhui Province, China in 1974. He received his Ph.D. degree from the College of Computer Science and Information Engineering, Hohai University in 2012. He is an Associate Professor at the College of Computer Science and Information Engineering, HoHai University, Changzhou, China. He is a senior member of CCF. His research interests include CAD/CAM, geometric model-

CCF TCCADCG. Currently his research interests are focused on feature modeling and recognition, CAD/CAM integration, computer graphics, and virtual reality.

CHEN ZhengMing was born in Dongyang, Zhejiang Province, China in 1965. He is a Professor and the Director of the Department of Computer Science at the College of Computers and Information Engineering, Hohai University, Changzhou. He received his Ph.D. degree from Zhejiang University, China, in 2001. As a visiting scientist, he spent one year working at the City University in Hong Kong in 2003. He is a senior member of CCF and a member of