

文章编号: 1000 - 582X(2002)07 - 0148 - 04

# 基于特征的曲面模型重建方法\*

杜 静, 何玉林

(重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 曲面重建就是根据曲面实物模型的点云, 重建其几何和拓扑信息, 并再现特征的过程。复杂曲面重建质量直接影响曲面产品的性能, 影响后续设计分析和制造加工。为了提高重建曲面质量, 满足产品对其光顺和精度要求, 文章对曲面重建中的几何建模技术和光顺、连续性约束条件进行了系统地分析研究, 对基于特征的曲面模型重建方法进行了探讨。最后结合摩托车车身覆盖件 3D 模型设计给出了应用实例。

**关键词:** 特征; 几何建模; 曲面; 逆向工程

**中图分类号:** TP391.72

**文献标识码:** A

创建产品模型一般有两种途径: 一种是由正向 CAD 系统创建, 另一种是通过实物模型/样件重建产品模型。基于实物模型/样件建立曲面产品几何建模的关键在于曲面重建的建模技术。对此, 国内外学者进行了大量的研究, 从不同侧面提出了各种曲面模型的重建技术。纵观这些建模技术, 不难发现这些建模技术侧重于讨论单独的曲面片建模, 忽略了曲面产品的整体属性<sup>[1-6]</sup>。因此, 笔者以复杂曲面为对象, 系统地研究曲面产品重建的建模方法, 以期获得满足要求的高质量曲面产品。

## 1 曲面模型重建建模技术

曲面重建过程实际上就是根据实物模型的几何拓扑信息重建、再现曲面产品的特征过程。由于曲面的复杂、多样性, 重建曲面的模型不可能由一个曲面模型完成, 而是由一组子曲面模型按一定的约束条件组成一起, 构成完整的重建曲面模型。重建的曲面模型为:

$$S = \bigcap_{i=1}^m S_i(p) \quad s. t. : C_k(p) \leq \Gamma_k$$

其中  $S_i(p)$  为曲面片几何模型,  $\Gamma_k$  为约束  $C_k(p)$  容许的误差。约束有连续性约束、光顺约束等。

重建曲面片的几何建模方法有 Bezier 曲线曲面与 NURBS 方法、散乱数据插值曲面、偏微分方程方法和能量优化法、小波技术、自由型变形技术等方法。Bezier 方法采用逼近原理构造曲面, 具有交互设计方便, 运算

速度快等优点, 但不具备局部性, 修改特征网格的任一控制顶点都会影响整张曲面, 局部修改比较困难。NURBS 方法采用矩形域参数曲面拟合技术, 具有优良的局部形状控制能力和几何不变性等优点, STEP 中就采用了 NURBS 作为产品几何描述的主要方法, 是目前逆向工程中重建曲面建模的主流方法。散乱数据插值方法以三角 Bezier 曲面为理论基础, 具有构造复杂曲面灵活、方便等优点, 广泛用在数据的可视化, 快速原型制造等方面。由于三角域曲面的拓扑结构和表达形式和现有的 CAD/CAM 系统采用的矩形域拓扑曲面表达形式不一致, 因此它和现有的 CAD/CAM 系统集成需要专用接口。它的基本方法是对给定的散乱数据点进行三角剖分, 在三角网格上构造三角 B - B 曲面片, 并使各曲面片满足 G1 连续。偏微分方程(PDE)方法和能量优化法、小波技术、自由型变形技术等是目前逆向工程曲面重建几何建模研究中的热点。PDE 方法在构造过渡曲面和功能曲面设计应用较多, 用 PDE 方法构造自由曲面, 曲面的形状由所选择的偏微分方程和边界条件确定, 给定曲面的边界和跨界导矢, 就可以生成一张光顺的曲面。另外, 可以通过修改边界条件和跨界导矢中的形状参数来调整曲面, 曲面调整、修改灵活方便。能量法的基本原理为在满足给定的约束条件下, 以“能量函数”为目标函数, 构造具有最小变形能的曲线

\* 收稿日期: 2002 - 04 - 01

作者简介: 杜静(1964 - ), 女, 重庆人, 重庆大学讲师, 重庆大学硕士。主要研究方向为自由曲线曲面造型方法、CAD/CAE、虚拟设计。

曲面。控制曲线曲面形状的约束条件有型值点、切矢和法矢、几何连续性、材料特性参数以及外载荷等。能量优化法常用在非四边域曲面构造、网格曲面构造以及曲线曲面插值等方面。

### 1.1 NURBS 曲面重建方法

NURBS 方法是一种很有前景的曲面重建建模方法。NURBS 采用统一数学模型定义产品几何形状，解决了自由曲线曲面与初等解析曲线曲面描述的不相容问题，通过调节非均匀节点矢量和权因子对曲线曲面的形状进行更加有效的控制，为设计提供了较大灵活性。另外，NURBS 具有完善的几何计算工具（如节点的插入与删除、加密、升阶和分割等），能用于设计、分析、加工等环节，大大增强了曲面产品 CAD/CAE/CAM 的集成性，在逆向工程中获得了广泛的应用。NURBS 曲线曲面的数学模型如下：NURBS 曲线定义：对于给定的三维空间控制顶点  $D_i[x_i, y_i, z_i]$ ，及其相应的权因子序列  $\omega_i (\omega_0, \omega_n > 0, \text{其余 } \omega_i \geq 0)$ ，在三维空间可定义一条  $k$  次 NURBS 曲线

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u)\omega_i d_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,k}\omega_i}$$

式中  $N_{i,k}(u)$  为  $k$  次 B 样条基函数， $V_{i\omega}$  为控制顶点， $\omega_i$  为权因子。基函数由递推公式定义：

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & (u_i \leq u \leq u_{i+1}) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases}$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - u_i)N_{i,k-1}(u)}{u_{i+k} - u_i} + \frac{(u_{i+k+1} - u)N_{i+1,k-1}(u)}{u_{i+k+1} - u_{i+1}}$$

从 NURBS 曲线定义可知，可以通过调节控制顶点  $D_{i\omega}$ 、权因子  $\omega_i$  和节点矢量  $U$  三个参数来修改 NURBS 曲线，为设计的提供了灵活性。

在 NURBS 曲线的基础上，可以采用四边围面法、扫掠、放样、旋转法等方法构造 NURBS 曲面。

NURBS 曲面定义：对于给定的三维空间控制顶点  $D_i[x_i, y_i, z_i]$ ，及其相应的权因子序列  $\omega_i (\omega_0, \omega_n > 0, \text{其余 } \omega_i \geq 0)$ ，在三维空间可定义一张  $k * 1$  次 NURBS 曲面  $S(u, v)$ 。

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{ij} d_{ij} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{ij} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}$$

式中  $D_{i\omega}$  为矩形域上特征控制网格的控制顶点， $\omega_{ij}$  为相应控制点的权因子， $N_{i,k}(u)$  和  $N_{j,l}(v)$  是  $k$  阶和  $l$  阶的 B 样条基函数。 $U$  向和  $V$  向的节点矢量分别为：

$$U(0, 0, \dots, 0, u_0, u_1, \dots, u_{m+k+1}, 1, 1, \dots, 1) \quad \text{和} \\ V(0, 0, \dots, 0, v_0, v_1, \dots, v_{n+k+1}, 1, 1, \dots, 1)。$$

### 1.2 连续性约束

当曲面比较复杂时，使用单张曲面片往往难以达到设计要求，需要首先按曲面特征区域进行分块，构造光滑的 NURBS 曲面片，然后再对曲面片进行拼接，构成完整的曲面模型。各曲面片在拼接处需要满足一定的连续条件，逆向工程中重建曲面常采用  $G^1$  和  $G^2$  几何连续条件，其定义为：

$G^1$  连续 若两曲面沿公共边界的每一点都有相同的切平面，并且公共切平面的单位法矢是公共边界点位置的连续函数，则两相邻  $C_1$  连续曲面  $S_1(u, v)$  和  $S_2(u, v)$  称为  $G^1$  连续。

$G^2$  连续 若两曲面沿公共边界  $G^1$  连续，沿边界的法曲率是公共边界点位置的连续函数，并且指向公共切平面，则两相邻  $C_2$  连续曲面  $S_1(u, v)$  和  $S_2(u, v)$  称为  $G^2$  连续。

### 1.3 光滑约束

复杂曲面在汽车、摩托车、船舶等工业产品的外覆盖件中大量存在，这些复杂曲面往往由若干自由曲面片组成，各自由曲面片以及它们之间的过渡曲面就有很高的光滑要求。也就是说这些重建曲面既要在数学上实现  $G^1$  或  $G^2$  连续，又能满足视觉美学、制造加工工艺等要求。曲线的光滑准则为：曲线二阶光滑；不存在多余拐点；曲率变化比较均匀；不存在多余变绕点；挠率变化比较均匀。曲面的光滑准则较为复杂，通常根据曲线上的  $u$  线、 $v$  线或曲面的截交线等关键曲线是否光滑以及曲面的主曲率、高斯曲率、平均曲率等的变化是否均匀来判断。曲面的光滑准则为：关键曲线光滑；网格线无多余拐点及变绕点；主曲率在节点出的跃度和足够小；高斯曲率变化均匀。

导致曲线、曲面不光顺常常由于形成曲线、曲面的控制点、型值点中存在“坏点”，曲线、曲面的参数化不合理，采用了不恰当的曲线、曲面生成方法等因素。曲线、曲面的光滑方法主要有选点修改法、优化光滑法等。选点修改法主要用在控制点、型值点中出现个别“坏点”，通过对“坏点”进行判别、修改，达到光滑目的。优化光滑法主要有最小二乘法、能量法、小波分析等方法。最小二乘法采用样条薄板的剪力跃度的平方和最小作为目标函数，以控制点为未知量，使光滑后曲线的曲率变化比较均匀。能量法是应用最为广泛的一种曲线、曲面光滑处理方法，其基本思想是使曲线、曲面的能量在一定约束条件下达到最小。曲面能量法的

数学模型为:

$$\text{Min: } E(D)$$

$$\text{S.t.: } W(D) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (D_{ij} - D_{ij}^0)^2 < \epsilon$$

式中  $E(D)$  为能量函数, 自变量  $D$  为曲面控制点矢量,  $D_{ij}^0$  为原曲面控制点,  $D_{ij}$  为曲面待求控制点,  $W(D)$  反映了光顺后逼近曲面与原曲面的偏离程度,  $\epsilon$  为允许的偏差。

能量函数  $E(D)$  的选取是能量法的关键, 主要考虑计算复杂性和光顺效果。常采用的能量函数有薄板应变能的简化形式和 Moreton 公式等, 采用薄板应变能作为能量函数  $E(D)$ , 光顺后的曲线曲面趋于平坦, 采用 Moreton 公式作为能量函数  $E(D)$ , 光顺后的曲线曲面曲率变化比较均匀、曲线曲面趋于圆滑, 但计算复杂, 计算量大, 应用中常采用薄板应变能的简化形式。

小波技术近年来发展比较迅速, 小波光顺法通过去除原曲线、曲面高频成分保留低频成分达到光顺目的。光顺后的逼近曲线曲面能很好保留原曲线曲面的总体形状, 控制点数目比原曲线曲面少, 具有压缩数据的作用。因此, 对于控制点数目较多的曲线曲面, 有较好的光顺作用。

#### 1.4 光顺与精度检测

从工程的观点来看, 重建曲面的光顺与精度是评价重建曲面质量的重要指标。不同类型产品的曲面, 对曲面的光顺与精度要求不一样, 如传动件、汽轮机叶片等, 曲面的精度就直接决定产品的性能, 这种曲面在设计时就要求保证有较高的精度, 光顺要求则是次要的。汽车、摩托车等工业产品的外覆盖件, 曲面的尺寸精度相对弱化, 有很高的光顺要求, 需要对重建曲面的光顺进行检测, 以满足产品外观美学要求。

曲面的光顺检测方法大致可分为曲率分析法、光照模型法、等高线法和辅助曲面法四种。曲率分析法是曲面分析的一种重要方法, 借助它可以方便地了解

曲面曲率分布情况, 找出曲面的主曲率  $k_1$ 、 $k_2$ , 判断相邻曲面片间的  $G^1$ 、 $G^2$  连续性。主要有曲率颜色映射法、等曲率线法、截交线曲率法等。

光照模型法反映了曲面法矢的变化情况, 可以判断相邻曲面片间的  $G^0$ 、 $G^1$  连续性。光照模型法在汽车、摩托车覆盖件的光顺检测中经常使用, 也是曲面分析的一种常用方法。

等高线法是用一组平行的平面去截曲面得到等高线, 若等高线光顺, 曲率变化比较均匀, 那么曲面比较光顺。

在使用中可根据具体情况选择一种, 也可以综合使用多种曲面光顺检测方法。

## 2 应用实例

图 1(a) 为采用 ATOS 三维扫描仪获得的某款摩托车尾座后扶手处三维点云数据, 图 1(b) 为三维点云数据的可视化图形。根据三维点云重建曲面, 首先要根据曲面特征进行数据分块, 然后运用逆向软件 Surfer 和三维造型软件 Pro/E 进行曲面片的重建和拼接, 在重建过程中需要选择恰当的建模方法, 反复检测曲面的光顺和精度, 才能保证重建曲面的光顺性, 保证重建曲面能够再现原模型特征。

几何特征对控制几何形体的形状具有极为重要的作用。在点云分块和曲面建模时要注意特征线和具有明显曲率特征的过渡曲面。由图 1(b) 结构来看, 车尾座后扶手曲面重建中过渡角域重建是难点, 如图 1(c) 所示。用过渡角域拼接的 6 个面曲率变化大, 角域曲面比较复杂。如果这 6 个面以及角域的建模方法不恰当, 重建的角域就可能产生扭曲、畸变, 很难保证光顺, 重现原模型的结构特征。图 1(d) 为在上述建模方法指导下重建的 NURBS 尾座后扶手曲面, 满足了光顺和精度要求, 提高了设计效率。



图 1 摩托车尾座后扶手曲面重建

## 3 结论

复杂曲面重建质量直接影响曲面产品的性能, 影响后续设计分析和制造加工。对复杂曲面重建方法的研究, 能够指导设计者系统考虑曲面产品重建的全部

过程, 有效地提高重建曲面质量。如何对获取的曲面三维数据进行特征自动识别, 寻找重建曲面求交、延伸、过渡的高效算法以及曲面质量综合评估是今后曲面产品模型重建值得研究的课题。

**参考文献:**

- [1] 孙家广, 杨长贵. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [2] 苏步青, 刘鼎元. 计算几何[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- [3] 马利庄, 石教英. 曲线曲面的几何光顺法[J]. 计算机学报, 1996, 10: 53 - 56.
- [4] MORETON H P, SEQUIN C H. Functional Optimization for Fair Surface Design[J]. Computer Graphics, 1992, 26(2): 167 - 175.
- [5] VARADY T, MARTIN R R, COX J. Reverse Engineering of Geometric Model—An Introduction [J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(4): 255 - 268.
- [6] LAI J Y, LU C Y. Reverse Engineering of Composite Sculptured Surfaces[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1996, 12(3): 180 - 189.

**Feature - based Surface Model Reconstruction Technique***DU Jing, HE Yu - lin*

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Surface reconstruction is reproduction process of geometric topology information and feature bases on surface practicality model. The quality of surface reconstruction directly influences performance of production, analysis and manufacture. To improve quality of design and meet requirement of fair, precision, it's researched by the numbers the geometric modeling and constraint of surface reconstruction. Feature - based surface model reconstruction technique is discussed in this article. Combine with 3D model design of motor body covering, an engineering application is given finally.

**Key words:** feature - based; geometric model; surface; reverse engineer

(责任编辑 张小强)

~~~~~  
(上接第 147 页)

**Multiresolution Wavelet Transform  
for Detection of EEG Abnormal Rhythms***Ji Zhong, CAO Yi, QIN Shu - ren*

(Test Center, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The signal of brain activity is a non - stationary random signal including lots of physiology and disease information, which is of important action for doctors to judge pathological changes in brain. So the analysis and process of the EEG signals are always attended. In this paper, the authors take account of the time - frequency localization of wavelet transform and use multiresolution wavelet transform to detect EEG abnormal rhythms. The signals of different scales after EEG signals are transformed by multiresolution wavelet transform not only reflect the frequency information of the signals, namely the more great scale is the lower of the frequency of the signals, but also reflect the time information of the signals, namely EEG state at that time. The test results indicate that the abnormal rhythms of the EEG signals can be detected effectively if right wavelet basis is selected.

**Key words:** EEG; abnormal rhythms; multiresolution wavelet transform; wavelet basis

(责任编辑 张小强)