

# 曲面造型研究

吴艳萍<sup>1</sup>, 俞智昆<sup>1</sup>, 吴东生<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 云南电力职工大学, 云南 昆明 650041)

**摘要:** 阐述了曲面造型的发展史, 分析了其现状、发展趋势及研究热点, 指出了曲面造型技术的研究领域已从传统的研究曲面表示、曲面求交和曲面拼接, 扩充到曲面变形、曲面重建、曲面简化、曲面转换和曲面等距性; 在曲面的表示方法上, 以网格细分为特征的离散造型优于传统的连续造型。

**关键词:** NURBS; 曲面造型

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)02-0052-04

## Research on Surface Modeling

WU Yan-ping<sup>1</sup>, YU Zhi-kun<sup>1</sup>, WU Dong-sheng<sup>2</sup>

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University Science and Technology, Kunming 650093, China;  
2. Yunnan University of Electric Power Worker and Staff Members, Kunming 650041, China)

**Abstract:** The developing history of surface modeling is clarified. Its present state, developing tendency and the heating points of the research are analyzed. The paper points out that the research field of surface modeling technology has been extended from traditional expressing surface, surface intersection and putting surface together to shape blending, reconstruction, simplification, conversion, offset for surface, and in the expressing surface way, the scattered construction in the character of mesh subdivision is better than the traditional continuous construction.

**Key words:** NURBS; surface modeling

## 0 引言

曲面造型(Surface Modeling)是 CAD/CAM, CG、计算机动画、计算机仿真、计算机可视化等众多领域的一项重要内容, 主要研究在计算机图像系统的环境下对曲面的表示、设计、显示和分析。它起源于汽车、飞机、船舶、叶轮等的外形放样工艺, 由 Coons、Bezier 等大师于 20 世纪 60 年代奠定其理论基础。如今经过 30 多年的发展, 曲面造型现在已形成了以有理 B 样条曲面(Rational B-spline Surface)参数化特征设计和隐式代数曲面(Implicit Algebraic Surface)表示这两类方法为主体, 以插值(Interpolation)、拟合(Fitting)、逼近(Approximation)这三种手段为骨架的几何理论体系。

## 1 曲面造型的历史

形状信息的核心问题是计算机表示, 即要解决既适合计算机处理, 且有效地满足形状表示与几何设计要求, 又便于形状信息传递和产品数据交换的形状描述的数学方法。1963 年美国波音飞机公司的 Ferguson 首先提出将曲线曲面表示为参数的矢函数方法, 并引入参数三次曲线。从此曲线曲面的参数化形式成为形状数学描述的标准形式。1964 年美国麻省理工学院的 Coons 发表一种具有一般性的曲面描述方法, 给定围成封闭曲线的四条边界就可定义一块曲面。但这种方法存在形状控制与连接问题。1971 年法国雷诺汽车公司的 Bezier 提出一种由控制多边形设计曲线的新方法。这种方法不仅简单易用, 而且很好地解决了整

收稿日期: 2002-10-15.

第一作者简介: 吴艳萍(1964~), 女, 硕士, 副教授; 主要研究方向: CAD 和 CG.

体形状控制问题,把曲线、曲面的设计向前推进了一大步,为曲面造型的进一步发展奠定了坚实的基础.但 Bezier 方法仍存在连接问题和局部修改问题.到 1972 年,de - Boor 总结、给出了关于 B 样条的一套标准算法,1974 年 Gordon 和 Riesenfeld 又把 B 样条理论应用于形状描述,最终提出了 B 样条方法.这种方法继承了 Bezier 方法的一切优点,克服了 Bezier 方法存在的缺点,较成功地解决了局部控制问题,又在参数连续性基础上解决了连接问题,从而使自由型曲线、曲面形状的描述问题得到较好解决.但随着生产的发展,B 样条方法的明显不足之处是不能精确表示圆锥截线及初等解析曲面,这就造成了产品几何定义的不唯一,使曲线、曲面没有统一的数学描述形式,容易造成生产管理混乱.为了满足工业界进一步的要求,1975 年美国 Syracuse 大学的 Versprille 首次提出有理 B 样条方法.后来由于 Piegl 和 Tiller 等人的研究,终于使非均匀有理 B 样条(NURBS)方法成为现代曲面造型中最为广泛流行的技术.NURBS 方法的提出和广泛流行是生产发展的必然结果.NURBS 方法的突出优点是:①可以精确地表示二次规则曲线曲面,从而能用统一的数学形式表示规则曲面与自由曲面,而其它非有理方法无法做到这一点;②具有可影响曲线、曲面形状的权因子,使形状更便于控制和实现;NURBS 方法是非有理 B 样条方法在四维空间的直接推广,多数非有理 B 样条曲线、曲面的性质及其相应算法也适用于 NURBS 曲线、曲面.由于 NURBS 方法的这些突出优点,国际标准化组织(ISO)于 1991 年颁布了关于工业产品数据交换的 STEP 国际标准,将 NURBS 方法作为定义工业产品几何形状的唯一数学描述方法,从而使 NURBS 方法成为曲面造型技术发展趋势中最重要的基础.

## 2 曲面造型的现状、发展趋势及研究热点

随着计算机图形显示对于真实性、实时性和交互性要求的日益增强,随着几何设计对象向着多样性、特殊性和拓扑结构复杂性靠拢这一趋势的日益明显,随着图形工业和制造工业迈向一体化、集成化和网络化步伐的日益加快,随着激光测距扫描等三维数据采样技术和硬件设备的日益完善,曲面造型近几年得到了长足的发展,这主要表现在研究领域的急剧扩展和表示方法的开拓创新两方面.

(1)从研究领域来看,曲面造型技术已从传统的研究曲面表示、曲面求交和曲面拼接,扩充到曲面变形、曲面重建、曲面简化、曲面转换和曲面等距性.

曲面变形(Formation or Shape Blending).传统的 NURBS 曲面模型仅允许调整控制顶点或权因子来局部改变曲面形状,至多利用层次细化模型在曲面特定点进行直接操作;一些简单的基于参数曲线的曲面设计方法,如扫掠法、蒙皮法、旋转法和拉伸法也仅允许调整生成曲线来改变曲面形状.计算机动画业和实体造型业迫切需要发展与曲面表示方式无关的变形方法或形状调配方法,于是产生了自由变形(FFD)法、基于弹性变形或热弹性力学等物理模型的变形法、基于求解约束的变形法、基于几何约束的变形法等曲面变形技术,以及基于多面体对应关系或基于图象形态学中 Minkowski 和操作的曲面形状调配技术.

曲面重建(Reconstruction).在轿车车身设计或人脸类雕塑曲面的动画制作中,常先用油泥制模,再作三维型值点采样.在医学图像可视化中,也常用 CT 切片来得到人体脏器表面的三维数据点.从曲面上的部分采样信息来恢复原始曲面的几何模型,称为曲面重建.采样工具为激光测距扫描器、医学成像仪、接触探测数字转换器、雷达或地震勘探仪器等.根据重建曲面的形式,它可分为函数型曲面重建和离散型曲面重建.前者的代表工作有 Eck 于 1996 年建立的任意拓扑 B 样条曲面自动重建法和 Sapidis 于 1995 年创造的离散点集拟和法.后者的常用方法是建立离散点集的平面片逼近模型,如 Hoppe 于 1992 年和 1994 年先后创造的分片线性或分片光滑的曲面模型.对于离散型重建,要求输出曲面具有正确的拓扑结构并且随着采样密度的增加而收敛到原始曲面.当重建曲面为闭曲面时,Miller 等人发展出一种基于可变形模型的曲面重建方法.1998 年 Amenta 等人又提出了基于计算几何中 Voronoi 图和 Delaunay 三角化的全新的曲面重建算法,称为外壳(Crust)算法.这种算法的优点在于输出的离散曲面在细节区域具有密集点,而在无特征的区域具有稀疏点.最近几年,曲面重建的研究国际图学界形成了热潮.

曲面简化(Simplification).与曲面重建一样,这一研究领域目前也是国际热点之一.其基本思想在于从三维重建后的离散曲面或造型软件的输出结果(主要是三角网络)中去除冗余信息而又保证模型的准确度,以利于图形显示的实时性、数据存储的经济性和数据传输的快速性.对于多分辨率曲面模型而言,这一

技术还有利于建立曲面的层次逼近模型,进行曲面的分层显示、传输和编辑.具体的曲面简化方法有网格顶点剔除法、网格边界删除法、网格优化法、最大平面逼近多边形法以及参数化重新采样法.

曲面转换(Conversion).同一张曲面可以表示为不同的数学形式,这一思想不仅具有理论意义,而且具有工业应用的现实意义.例如,NURBS这种参数有理多项式曲面虽然包括了参数多项式曲面的一切优点,但也存在着微分运算繁琐费时、积分运算无法控制误差的局限性.而在曲面拼接及物性计算中,这两种运算是不可避免的.这就提出了将一张NURBS曲面转化成近似的多项式曲面的问题.同样的要求更体现在NURBS曲面设计系统与多项式曲面设计系统之间的数据传递和无纸化生产的工艺中.再如,在两张参数曲面的求交运算中,如果把其中一张曲面的NURBS形式转化为隐式,就容易得到方程的数值解.近几年来,国际图形界对曲面转换的研究主要集中在以下几方面:NURBS曲面用多项式曲面来逼近的算法及收敛性;Bezier曲线曲面的隐式化及其反问题;CONSURF飞机设计系统的Ball曲线向高维推广的各种形式比较及互化;有理Bezier曲线曲面的降阶逼近算法及误差估计;NURBS曲面在三角域上与矩形域上的互相快速转换.

曲面等距性(Offset).它在计算机图形及加工中有着广泛的应用,因而成为这几年的热门课题之一.例如,数控机床的刀具路径设计就要研究曲线的等距性.但从数学表达式中容易看出,一般而言,一条平面参数曲线的等距曲线不再是有理曲线,这就超越了通用NURBS系统的使用范围,造成了软件设计的复杂性和数值计算的不稳定性.为解决这一问题,十几年来国际图形界提出了用简单曲线来逼近等距曲线的种种算法,这又带来了收敛性考核、计算不稳定、误差难控制等问题.那么,是否存在具有精确有理等距曲线的某种参数曲线(OR曲线)呢?1990年美国学者Farouki首次找到某一类特殊的平面参数多项式曲线具有这种性质,称之为PH曲线.而到1993年,浙江大学的吕伟利用复分析法、重新参数化和代数几何技术,完整地给出了OR多项式和有理参数曲线的一般形式,彻底解决了平面曲线的等距线的有理化问题.在曲面等距性问题上,吕伟于1996年证明了常用二次曲面的有理等距曲面均可用有理参数样条精确表示的结论;同年他与奥地利学者Pottmann等揭示出有理直纹面的等距面可以有理参数化,同时证明了脊线为有理样条曲线的管道曲面可以精确表示为有理样条曲面.曲线曲面的等距性还与机械学中的形位公差理论及几何设计中的区间曲线曲面有着密切的关系.

(2)从表示方法来看,以网格细分(Subdivision)为特征的离散造型与传统的连续造型相比,大有后来居上的创新之势.

从1998年SIGGRAPH会议的报告中,我们可以看出,网格细分产生离散曲面的方法(以下简称C-C法)已成为当今国际图形界在曲面造型理论研究和实际应用中的热点所在.其原因在于NURBS尽管早已被国际标准化组织作为定义工业产品数据交换的STEP标准,在工业造型和动画制作中得到了广泛的应用,但仍然存在着局限性.单一的NURBS曲面与其他参数曲面一样,仅限于表示在拓扑上等价于一张纸、一张圆柱面或一张圆环面的曲面,不能表示任意拓扑结构的曲面.为了表达特征动画中更复杂的形状,如人的头、手或服饰,我们可以用最普通的复杂光滑曲面的造型方法,例如对NURBS的修剪来对付.目前确实已经存在一些商用系统,诸如Alias-Wavefront和SoftImage等可以作到这一点,但是它们存在的问题是:修剪的费用是昂贵的,而且有数值误差;要在曲面的接缝处保持光滑,即使是近似的光滑也是困难的,因为模型是活动的.而细分曲面能够解决以上两个问题,它们无须修剪,活动模型的平滑度被自动地保证.事实上C-C细分曲面的构造与传统的Doo-Sabin(1978年)细分曲面异曲同工,都是从一个被称之为控制网格(网格多半可用激光从手工模型上输入)的多面体开始,递归地计算新网格上的每个顶点,这些顶点都是原网格上某几个顶点的加权平均.如果多面体的一个面有 $n$ 条边,细分一次后,这个面就会变成 $n$ 个四边形.随着细分的不断进行,控制网格就逐渐逼近一张自由曲面.它是无缝的,因而是平滑的,即使模型是活动的.这种方法显著地压缩了设计和建立一个原始模型的时间.更重要的是允许原始模型局部地精制化.这就是它优于连续曲面造型方法之处.

(下转第64页)

家建立了一个实验室,试图通过相互合作并利用高科技设备,充分发挥想象力,创造一个“虚拟人”,或叫“数字化人”。“虚拟人”是一个在某时刻获得生命并可以发展自己个性的人造物,将有虚拟的头脑、虚拟的身体和虚拟合成的嗓音等。它能体察和分析人的情绪,包括表情、语调和语言的细微变化并做出相应的反应,能学习人类的意识、行为,最终可以成为人类的助手或代理。但由于对人脑思维和人体行为的基础研究难以在短时期内突破,故“虚拟人”还有虚拟技术都还有一个较长的发展时期。尽管如此,虚拟技术及其广泛应用还是给人们创建了一个未来技术的框架,随着计算机软硬件技术、通信技术以及网络技术的飞速发展给虚拟技术的发展提供了广阔天地,虚拟技术将使 CAD/CAM/CAF 技术向更深入、更高级的阶段发展,将由现在的与传统设计系统连接使用,逐渐过渡到取代传统的设计系统。预计未来 10 年左右,虚拟技术将成为工程和产品设计的主要形式,并出现可以推广使用的商品化系统,头盔式显示器、数字手套等可视化设备,人体(或四肢)方位跟踪系统、触觉系统等专用硬件将全面上市,其性能价格比会迅速提高,这将为世界机械工业带来更为全新的改观,同时也给我国相对不发达的机械工业创造了一个迎头赶上千载难逢的发展良机。

#### 参考文献:

- [1] 盛晓敏,邓朝晖.先进制造技术[M].北京:机械工业出版社,2000.9.
- [2] 李荣彬,李建广,张志辉.虚拟精密加工系统开发的研究[J].机械工程学报,2001,37(6):66~70.
- [3] 沈斌,丁玉兰,张曙等.虚拟制造技术对企业生产和组织结构的影响[J].同济大学学报,1998,26(4):453~456.
- [4] 李有堂,赵玉侠等.虚拟现实技术及其在机械工程中的应用[J].机械,2001,28(5):31~33.
- [5] 抑卓之.虚拟制造系统的结构[J].长沙铁道学院学报,1998,16(4):74~78.
- [6] 沈斌,周衍赞.在虚拟企业中的产品设计与制造[J].中国纺织大学学报,1998,24(5):23~26.
- [7] 刘继红.以虚拟世界中获得现实效益:介绍虚拟制造技术及其应用[J].中国机电工业,2000(2):36~37.
- [8] 仇晓黎.应用虚拟制造技术提升车间制造水平[J].制造自动化,2000,22(1):9~12.
- [9] 邵立.虚拟制造中仿真技术的应用[J].工业工程与管理,2000,5(4):21~25.
- [10] 张卫波.虚拟环境下产品的开发技术[J].吉林工学院学报,2000,21(1):23~25.
- [11] Mark Mine. ISAAC: a Meta - CAD System for Virtual Environments[J]. Computer Aided Design, 1997, 29(8): 547 ~ 553.
- [12] Ikaqa N, et al. Ultra - precision Metal Cutting - The Past, the Present and the Future[J]. Annals of the CIRP, 1991, 40(1): 587 ~ 594.
- [13] Thshar H Dani, Rajit Creation of Concept Shape Design Via a Virtual Reality Interface[J]. Computer Aided Design, 1997, 29(8): 555 ~ 563.

(上接第 54 页)

### 3 结束语

总之,曲面造型是一个十分活跃的研究课题,也是一个有广阔应用前景的技术,同时,也有待进一步发展,希望本文能起到抛砖引玉的作用。

#### 参考文献:

- [1] N Amenta, M Bern, M Kamvysselis. A New Voronoi - based Surface Reconstruction Algorithm[M]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Orlando, Florida, 1998. 415 ~ 421.
- [2] Eck M, Hoppe H. Automatic Reconstruction of B - spline Surfaces of Arbitrary topology type[M]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, New Orleans, Louisiana, 1996, 325 ~ 334.