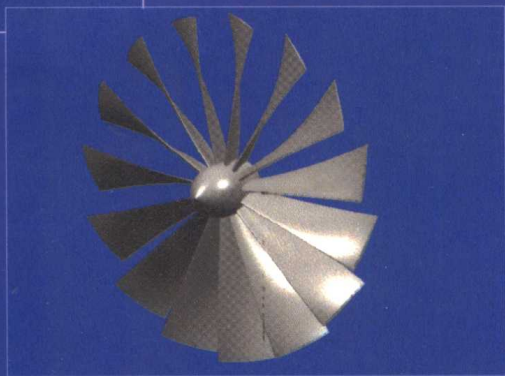
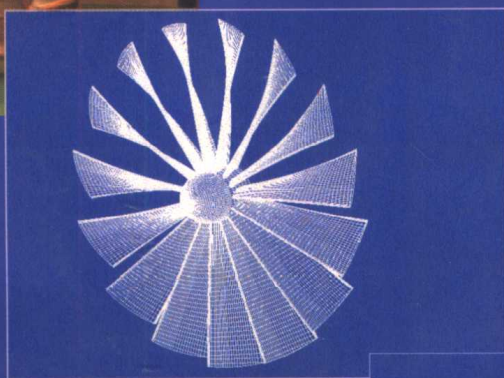




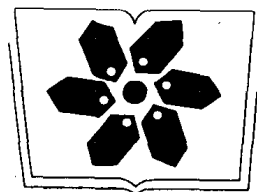
全国高技术重点图书·自动化技术领域

自由曲线曲面造型技术

朱心雄 等著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

自由曲线曲面造型技术

朱心雄 等著

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书从应用角度论述 CAD/CAM 中的自由曲线曲面造型方法. 内容包括微分几何基础、孔斯曲面、贝齐埃方法和 NURBS 方法、散乱点插值曲面、求交和光顺以及在 21 世纪的 CAD/CAM 系统中有望采用的自由型变形、偏微分方程、能量优化和小波技术等新的造型方法. 本书全面地反映了作者 25 年来在自由曲线曲面造型领域从事教学和研究的成果.

全书共十八章. 第一章至第三章为基础部分; 第四章叙述孔斯构造跨界连续自由曲面的原理; 第五章为贝齐埃方法; 第六章至第十章论述 B 样条方法的原理与应用, 强调 B 样条基函数的生成、性质及其对曲线曲面形状的影响, 详细介绍作者关于 NURBS 曲面的研究成果; 第十一章至十五章依次论述三角域曲面、散乱点插值曲面、自由型变形、偏微分方程方法以及能量法曲面造型, 强调这些方法的原理、算法步骤与适用范围; 第十六章论述小波技术在自由曲线曲面多分辨率表示、光顺及数据压缩方面的应用. 最后两章分别论述曲线曲面求交和光顺问题.

本书可供高等学校宇航、汽车、船舶、计算机、机械、模具、地质、气象、医学以及工业造型等领域有关专业作为教材. 同时, 对从事 CAD/CAM/CAE 系统开发与应用或对曲面造型有兴趣的研究人员和工程技术人员也具有重要的参考价值.

图书在版编目(CIP)数据

自由曲线曲面造型技术/朱心雄等著. —北京: 科学出版社, 2000

ISBN 7-03-007440-8

I. ①自… II. 朱… III. 自动绘图-造型设计 IV. TP391.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 08779 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

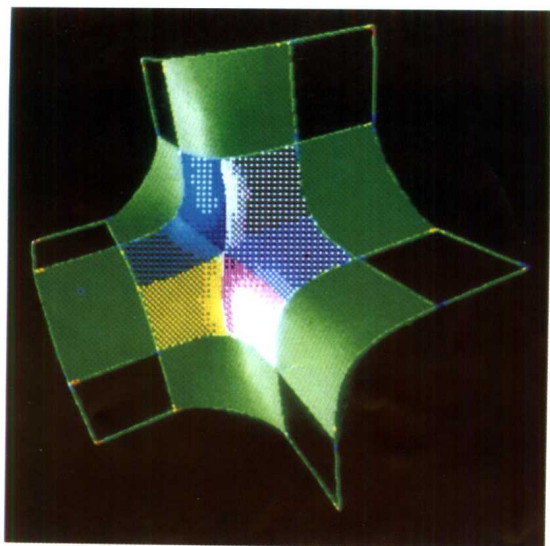
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

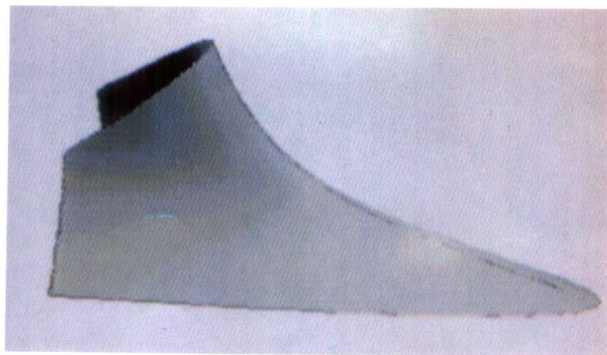
2000 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
2000 年 1 月第一次印刷 印张: 25 1/2 插页: 1
印数: 1—3 000 字数: 580 000

定价: 48.00 元

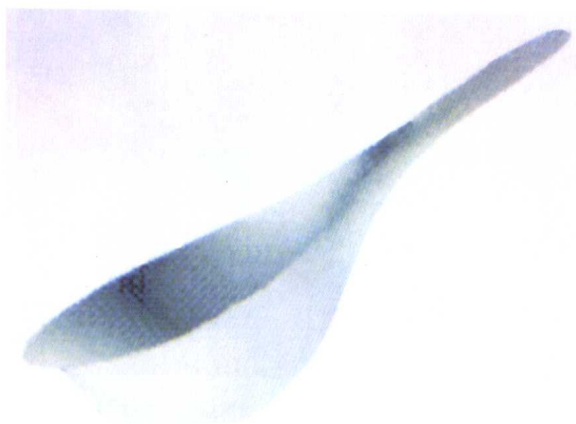
(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)



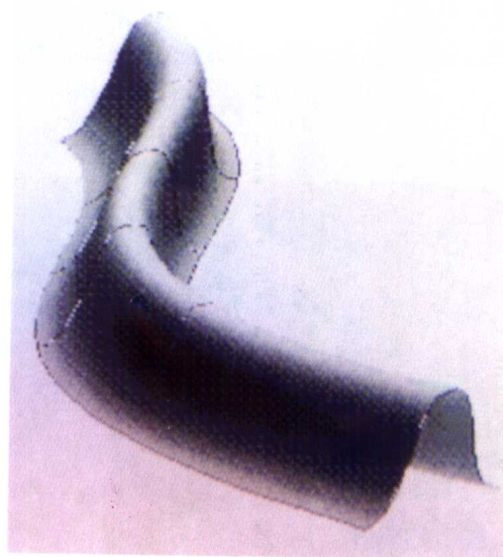
彩图1 用 CNSBS 方法构造的六边曲面 (王拉柱, 1995)



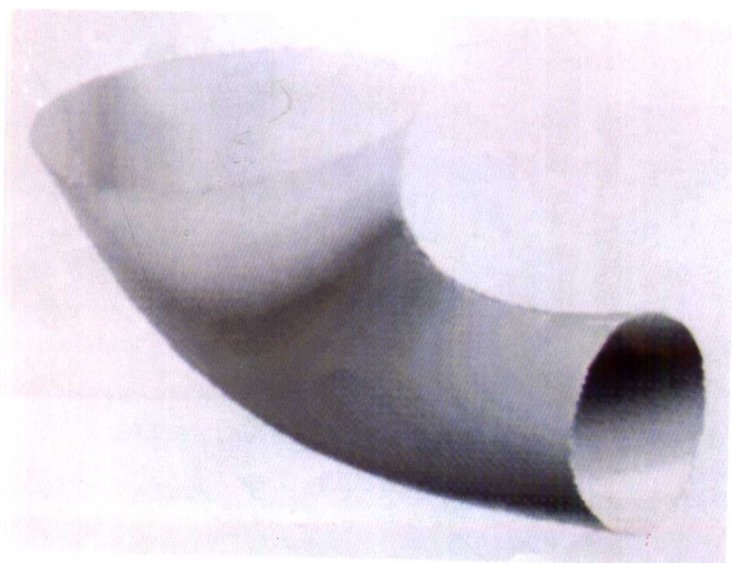
彩图2 用能量优化方法构造的曲面 (宋德军, 1998)



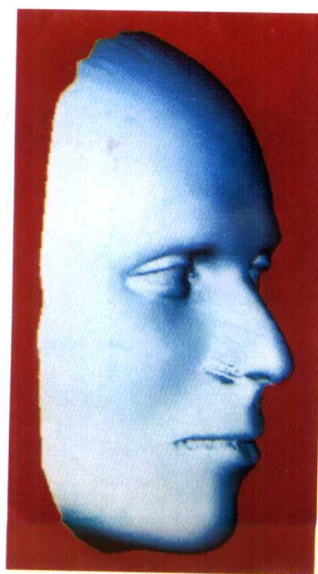
彩图3 用能量优化方法构造的曲面 (宋德军, 1998)



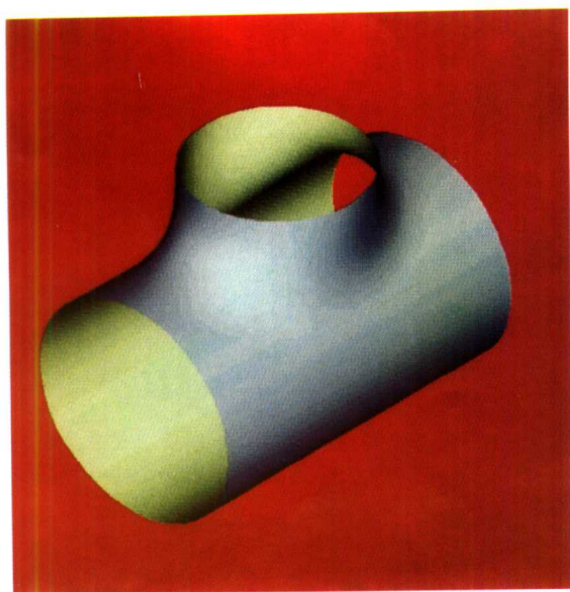
彩图4 用能量优化方法构造的曲面 (宋德军, 1998)



彩图5 用能量优化方法构造的曲面 (宋德军, 1998)



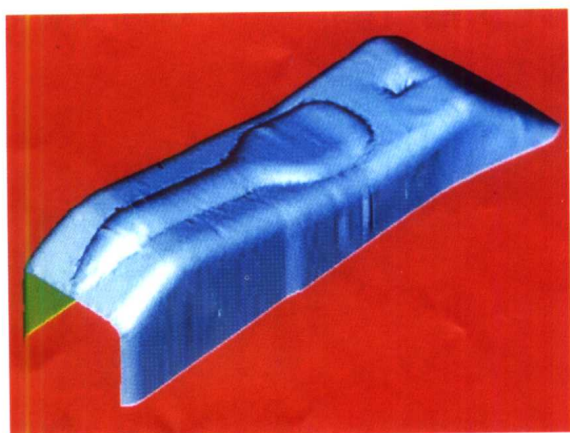
彩图6 用散乱点插值方法构造的脸部模型 (朱本富等, 1997)



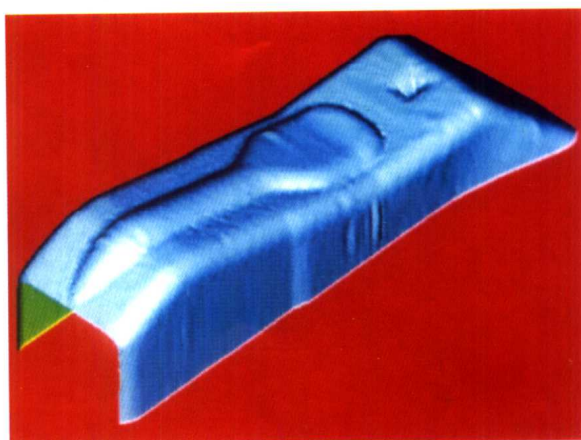
彩图 7 用偏微分方程方法构造的三通过渡面 (马岭, 1995)



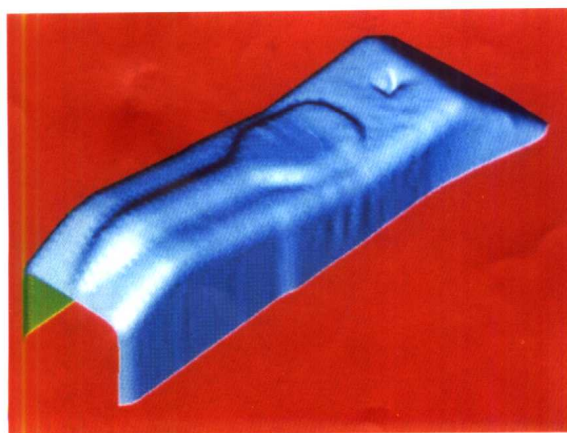
彩图 8 用偏微分方程方法构造机身、翼面间的过渡面 (马岭等, 1997)



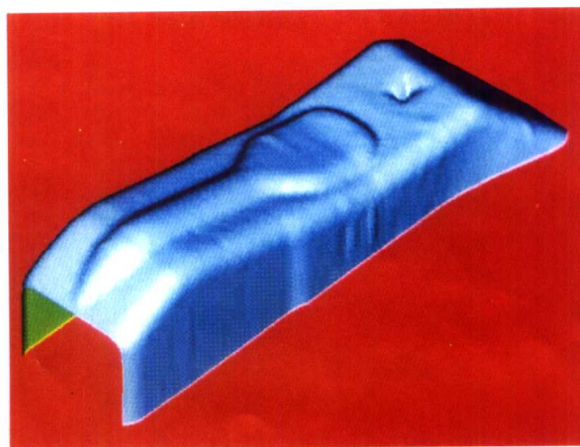
彩图 9-1 原始曲面, 控制顶点数 122×112



彩图 9-2 逼近曲面, 控制顶点数 67×131



彩图 9-3 逼近曲面, 控制顶点数 35×67



彩图 9-4 计及逼近容差的逼近曲面, 控制顶点数 67×131

彩图 9 小波技术用于曲面的分层表示和光顺 (孙延奎, 1999)

序

计算机辅助设计(CAD)的根本任务是为产品的开发和生产建立一个全局信息模型,而曲线曲面的精确描述和灵活操作能力是评定 CAD 系统功能强弱的重要因素.从 CAD 和计算机图形学的应用全局看,自由曲面造型的作用远远超过了实体造型.这是因为传统意义下的实体造型技术至今还限制在操作圆锥体、椭球体等规则曲面形体,而地形地貌描述、矿藏储量图示、铁路勘察设计与环境工程、人体器官造型与 CT 图像三维重建、服装设计、制鞋、虚拟视景生成等都要用到不规则曲面的拟合和生成技术.这些问题的覆盖域要宽广得多,求解的技术难度也更大.

自由曲面理论的发展经历了长期的应用实践酝酿.早在第二次世界大战期间,飞机工业就成功创造了成套的飞机外形及其主要结构件的数字定义方法.60 年代孔斯和贝齐埃通过长期从事飞机、汽车的外形设计和加工,提出了更加完美、通用的曲线曲面表达形式,将 CAD 中的参数曲面理论引向正确的发展道路,最终导致了完备的非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面理论体系的诞生.这一过程前后不过十几年的历史.但是要将这些理论研究成果转化为 CAD 应用软件,直接为各行各业的产品开发、生产服务,需要投入的人力又何止千百万倍.以实体造型的规则形体拼合运算为例,从 60 年代末到 80 年代中,产生了多种多样的技术方案和算法,但是由此开发的 CAD 软件真正经得起应用实践考验的,只剩下 ACIS 和 Parasolid 两种几何造型平台.今天,我们面临的任务是要创建自由曲面实体造型平台,为各行各业的 CAD 应用系统开发提供更强有力的几何功能支持,因此必须准备付出更大的代价.

CAD 属于高技术,必须不断创新,才能立于不败之地.而创新的不竭源泉在于深入生产实践,体察 CAD 应用中不断出现的新问题和新需求,认真寻求新对策.谁能比别人更深入一步钻研问题,思路更开阔,产品性能胜人一筹,而且持之以恒,锲而不舍,谁就能在市场竞争中取得更大的主动权.一个值得深思的问题是,实体造型通用平台 ACIS 和 Parasolid 都是发源于英国剑桥大学 1973 年 Ian Braid 的博士论文.而 ACIS 一词正是 Braid 的剑桥同窗 Alan Grayer、导师 Charles Lang、Ian Braid 本人以及实体 Solid 的第一个字母的组合.无独有偶,剑桥大学的另一位高足 John Owen 创建的二维、三维约束求解程序 DCM 2D 和 DCM 3D 又正在成为参数化特征造型系统的一个标准模块.人们不禁要问,世界之大,难道没有更多新人能与他们一争高低?

书不可不读,从书本可以获取知识,启迪思路.本书既简要介绍了经典的参数曲面理论和应用方法,又总结了在 21 世纪可望得到广泛应用的某些新造型技术,这是有远见的.全书内容面向工程应用,力求简化数学推导过程,突出数学方法的几何意义,目的就是使本书能更好地为 CAD 应用工程服务,从而提高我国各行各业的 CAD 应用和软件开发水平.朱心雄老师主编的本书记录了作者们为简化曲面形状控制和提高曲面外形质量所做的系列研究成果,从中可以了解到当前国内外在曲面应用基础研究中带有代表性的若干重要探索方向和进展,为进一步的应用开发研究提供重要借鉴.同时,也希望读者能更多

地亲身参加到应用实践中去,针对生产中的新要求不断寻求新方法和新处理技巧,不断前进,不断创新,在点滴积累中持续发展曲面造型理论和技术,发展 CAD 软件.我们还希望,这些创新积累最终能形成自主创建的自由曲面实体造型通用平台,使我国 CAD 技术的应用开发提高到一个新的境界,为国争光.

唐荣锡

中国工程图学学会第四届理事长

1999 年 3 月 1 日

前 言

CAD/CAM 技术起源于航空工业,正是由于飞机的外形复杂,含有大量的自由曲面.因此,CAD/CAM 技术从一开始就与自由曲线曲面造型技术紧密地联系在一起.至今,曲线曲面造型模块仍是 CAD/CAM 系统的最关键的部分之一.

许多年来,人们不断地探索方便、灵活、实用的曲线曲面构造方法.从提出样条函数至今的 50 余年间,曲线曲面造型经历了参数样条方法、Coons 曲面、Bézier 曲线曲面和 B 样条方法,已取得了辉煌的成果.但人们并不满足于现状,仍在继续探索新的造型方法.80 年代中期以来,相继出现了自由型变形造型、偏微分方程造型和能量法造型等新技术,并取得了许多研究成果.关于小波技术在曲线曲面造型中的应用,亦正在开展研究.这些方法目前还处于深入研究阶段,有望于 21 世纪得到广泛的应用.

自 70 年代开始,北京航空航天大学一直在从事曲线曲面造型方法的应用研究和 CAD/CAM 软件的开发.为了与国内外同行共享我们的成果,我们总结了 25 年来的工作,写成此书,奉献给读者.

本书共十八章,内容包括以下五方面:

(1) 基础部分.第一章至第四章为基础部分,分别叙述微分几何的基本知识、曾在 CAD/CAM 中发挥重要作用的样条函数和参数样条方法以及 Coons 提出的构造 i 阶 ($i=0,1,\dots,n$) 跨界导矢连续曲面的原理.

(2) 当前 CAD/CAM 中曲面造型的主流方法,即 Bézier 曲线曲面和 NURBS 方法.第五章阐述 Bézier 曲线曲面的原理和应用.第六章至第十章详述 B 样条方法的原理和应用,依次论述了 B 样条基函数的来源与计算、均匀和非均匀 B 样条曲线曲面、NURBS 曲线曲面以及 NURBS 方法在曲面拼合中的应用.

(3) 散乱点插值曲面的构造.第十一章和第十二章分别论述三角域曲面造型和散乱点的三角剖分及其插值曲面的构造.

(4) 新的造型方法,即自由型变形造型、偏微分方程曲面、能量法以及小波技术等.第十三章至第十六章分别论述上述四种方法的基本原理、算法步骤、运行实例及其相应的适用范围.

(5) 曲线曲面求交与光顺.最后两章分别阐述曲面求交与光顺这两个经典专题.

此外,为便于查阅,书中还有三个附录:追赶法、差分与差商和英汉 CAD/CAM 词汇表.

本书的特点如下:

(1) 具有雄厚的实践基础.所论述的内容都经历了学习、消化吸收、编制计算机程序、实例验证、总结归纳和创新等阶段.绝大部分插图都是作者们用计算机计算和绘制的.

(2) 兼顾传统方法与最新研究成果,内容新颖全面.为了保持内容的完整性,并有助于国内 CAD/CAM 系统的开发与应用,本书论述了 60 至 70 年代出现的 Coons 曲面、Bézier 曲线曲面和 B-样条曲线曲面等方法.也论述了 80 年代中期以来兴起的一些新方

法如自由型变形、偏微分方程曲面、能量法造型和小波技术等。

(3) 注重几何概念,侧重原理和应用。本书各章均由三部分构成:引言、主体部分和结语。引言部分用以说明相应方法的发展历程和相关的主要文献;主体部分阐述相应方法的原理、几何意义和应用情况;结语部分强调相应方法的优缺点及其应用范围。

(4) 兼顾不同需求,适用面较宽。本书可分为基础、中级和高级三个部分。基础部分包括第一章至第八章、第十七章及附录;中级部分为第九章至第十三章;高级部分为第十四章至第十六章、第十八章。基础部分适用于高等院校本科生及广大工程技术人员;高级部分可作为研究生教材,对研究开发人员有重要参考价值;中级部分则同时适用于各类人员。

为便于读者应用本书,提出如下建议供参考:

本书第一章(微分几何基础)和第六章(B样条的定义和性质)侧重于基本理论。对于初学者,可从第二章开始,依次学习第三、四、五章。在遇到微分几何概念时,再学习第一章。关于B样条方法,可先学习第七章。在掌握B样条曲线曲面的基本概念后,再学习第六章和其他章节。按上述顺序学习,可收到事半功倍之效。

至于高级部分的内容,均系独立的专题,相关的内容非常丰富,但限于篇幅,本书仅叙述各种方法的原理、算法步骤和应用实例,而不能对其做更为详尽的介绍。因此,欲深入掌握这些新方法,读者尚需学习必要的预备知识和参阅更多的文献。

此外,在学习过程中,若能辅以编写计算机程序实现各种造型方法,则有助于读者切实掌握所学理论,这也是我们的深切体会。

我们在70年代中期开始涉足CAD/CAM技术,曾编写过构造飞机外形和计算数控加工刀具轨迹的程序,并用数控机床加工了飞机钣金件的模胎。70年代后期,开始研究B样条方法,编写了“B样条曲线曲面的原理和应用”(合作者吴瑞祥,北京航空学院,1980)。我在访美期间,撰写了“Lecture Notes on Representations of Curves and Surfaces”和“Principles and Applications of B-Spline Curves & Surfaces”两本讲稿(明尼苏达大学,1981),作为讲授研究生课程“Advanced Computer Graphics”的教材。在对NURBS进行应用研究的基础上,我们于1985年撰写了《复杂曲线曲面造型方法——B样条方法的原理和应用》(合作者吴瑞祥、雷毅,北京航空学院,1988)。经历了数年CAD/CAM系统开发以后,我们从90年代初对自由曲线曲面造型方法开始了新一轮的研究,并取得了可喜的成果,发表了一批论文,这些成果为本书的创作奠定了坚实的基础。

本书由朱心雄主持撰写,七位博士参加了写作和绘图整理工作。其中,王拉柱(第九章和第十章);朱本富(第十一章和第十二章);马岭(第十三章和第十四章);宋德军(第十五章和第十七章);孙延奎(第十六章);穆国旺(第十八章);朱心雄执笔其余各章及附录,并校订全书。赵罡按出版要求制备书中插图及整理全文文稿。

国家自然科学基金委员会资助了“能量优化法整体构造可调曲面”和“小波技术在曲线曲面造型中的应用”两个项目的研究,航空科学基金资助了偏微分方程曲面造型的研究,中国科学院科学出版基金资助了本书的出版,为本书的面世提供了强有力的支持。

唐荣锡教授自始至终热情关心和积极支持本书的创作,提出许多宝贵的建议。中国科学院刘慎权教授、北方工业大学齐东旭教授、西北工业大学蔡青教授和南京航空航天大学周儒荣教授给予了我们非常热情的鼓励和支持。许鹤峰研究员和戴全辉研究员积极支持

了我们的研究工作.在此谨向各位教授和研究员致以深切的谢意.

本书还凝聚了我的同事、朋友和其他研究生的心血.谨向所有帮助过我们的老师、同事、朋友和学生表示感谢.

在本书出版之际,谨向参加本书创作的七位博士的父母和夫人们致谢,感谢她(他)们对我国科学事业的支持.

我个人深切地感谢我的父母、兄长和姐妹们,她(他)们对我的无私关爱和热情鼓励为我在学业上的进步提供了可靠的保证.感谢我的妻子和儿女,她(他)们艰苦奋斗、自强不息的精神激励我努力完成本书的创作.

最后还应说明的是,虽然我们尽了最大的努力,但限于水平,书中仍难免存在缺点以至错误.恳请广大读者批评、指正和帮助.

朱心雄
北京航空航天大学
于1999年元旦

目 录

第一章 微分几何基础	(1)
1.1 曲线论预备知识	(1)
1.1.1 曲线的参数方程和矢量方程	(1)
1.1.2 矢函数	(3)
1.1.3 导矢在曲线、曲面造型中的应用	(4)
1.1.4 弧长参数化	(7)
1.2 曲线论基本公式	(8)
1.2.1 活动标架	(8)
1.2.2 曲线论的基本公式	(10)
1.2.3 曲率的几何意义及其计算	(12)
1.2.4 挠率的几何意义及其计算	(13)
1.2.5 曲线论基本公式的应用	(14)
1.3 曲面论预备知识	(16)
1.3.1 曲面的参数方程和矢量方程	(16)
1.3.2 曲面上参数曲线的切矢	(18)
1.3.3 二元函数的全微分	(19)
1.3.4 复合函数的偏导数	(20)
1.3.5 曲面上曲线的切矢和曲面的法矢	(20)
1.3.6 曲面的等距面	(22)
1.4 曲面论基本公式	(23)
1.4.1 曲面的第一基本公式	(23)
1.4.2 曲面第一基本公式的应用	(23)
1.4.3 曲面的局部坐标系	(25)
1.4.4 曲面的第二基本公式	(25)
1.4.5 法曲率, Meusnier 定理	(26)
1.4.6 主曲率、主方向、曲率线	(28)
1.4.7 Gauss 曲率和平均曲率	(29)
1.4.8 Euler 定理	(31)
参考文献	(31)
第二章 插值样条函数	(32)
2.1 插值三次样条函数的物理背景	(32)
2.2 插值三次样条函数	(33)
2.2.1 基本概念	(33)
2.2.2 用型值点处的一阶导数表示插值三次样条函数—— m 关系式	(34)
2.2.3 插值三次样条函数的计算步骤	(38)
2.2.4 实例	(38)

2.2.5 用型值点处的二阶导数表示插值三次样条函数—— M 关系式	(40)
2.2.6 插值双三次样条函数	(42)
2.3 插值三次样条函数的局限性	(42)
参考文献	(42)
第三章 参数样条曲线、曲面	(44)
3.1 Ferguson 曲线	(44)
3.1.1 Ferguson 曲线的表达式	(44)
3.1.2 合成 Ferguson 曲线	(46)
3.2 参数样条曲线	(49)
3.2.1 累加弦长三次参数样条曲线	(49)
3.2.2 参数样条曲线的端点条件	(50)
3.2.3 参数样条曲线的计算步骤	(51)
3.2.4 切矢模长对曲线形态的影响及其选择	(51)
3.3 Ferguson 曲面	(52)
3.3.1 曲面片	(52)
3.3.2 Ferguson 曲面片表达式的推导	(52)
3.3.3 构造 Ferguson 曲面的步骤	(54)
3.4 参数样条曲面	(55)
参考文献	(55)
第四章 Coons 曲面	(57)
4.1 具有给定边界的 Coons 曲面	(57)
4.1.1 曲面表示法与记号	(57)
4.1.2 插值四个角点的双线性曲面	(58)
4.1.3 线性插值两条边界的曲面	(58)
4.1.4 双线性 Coons 曲面	(58)
4.1.5 插值给定边界的 Coons 曲面的一般形式	(59)
4.2 具有给定边界和跨界切矢的 Coons 曲面片	(59)
4.3 具有给定边界及其跨界切矢、跨界二阶导矢的 Coons 曲面	(61)
4.4 双三次 Coons 曲面	(62)
4.5 建立混合函数的一般方法	(64)
参考文献	(65)
第五章 Bézier 曲线与曲面	(66)
5.1 Bézier 曲线的定义	(66)
5.1.1 Bézier 曲线的原始定义	(66)
5.1.2 Bernstein-Bézier 曲线	(67)
5.2 Bézier 曲线的性质	(68)
5.2.1 Bernstein 多项式的性质	(68)
5.2.2 Bézier 曲线的性质	(69)
5.3 Bézier 曲线的几何作图法及其应用	(71)
5.3.1 Bézier 曲线的几何作图法	(71)
5.3.2 Bézier 曲线的递归分割算法	(71)

5.4 Bézier 曲线的操作	(72)
5.4.1 Bézier 曲线的修改	(72)
5.4.2 Bézier 曲线的拼接	(72)
5.5 Bézier 曲线的升阶与降阶	(74)
5.5.1 升阶	(74)
5.5.2 降阶	(75)
5.6 有理 Bézier 曲线	(75)
5.6.1 有理 Bézier 曲线	(75)
5.6.2 二次有理 Bézier 曲线	(75)
5.6.3 有理 Bézier 曲线的递归分割算法	(77)
5.6.4 有理 Bézier 曲线的升阶和降阶	(78)
5.6.5 有理 Bézier 曲线的应用	(78)
5.7 Bézier 曲面	(80)
5.7.1 Bézier 曲面的表达式	(80)
5.7.2 Bézier 曲面的拼接	(82)
5.7.3 有理 Bézier 曲面	(85)
参考文献	(87)
第六章 B 样条的定义和性质	(88)
6.1 基本概念	(88)
6.2 Clark 关于 B 样条的定义	(89)
6.2.1 基函数	(89)
6.2.2 约束条件	(90)
6.2.3 n 阶连续性要求的 B 样条基函数	(92)
6.3 用截尾幂函数的差商定义 B 样条	(93)
6.3.1 截尾幂函数	(93)
6.3.2 用截尾幂函数的差商定义 B 样条	(93)
6.3.3 几点结论	(104)
6.4 B 样条的递推定义	(104)
6.4.1 B 样条的递推定义	(104)
6.4.2 用递推定义构造 B 样条	(105)
6.4.3 B 样条基函数的递推算法	(106)
6.5 B 样条的性质	(106)
6.5.1 讨论 B 样条性质的必要性	(106)
6.5.2 B 样条的局部支柱性质	(107)
6.5.3 B 样条的凸组合性质	(108)
6.5.4 B 样条基函数与 Bernstein 基函数的关系	(109)
6.5.5 B 样条在节点处的连续特性	(109)
6.5.6 高次与低次 B 样条函数之间的关系	(110)
6.5.7 B 样条函数求导的递推性质	(111)
参考文献	(112)
第七章 均匀 B 样条曲线与曲面	(113)

7.1	二次均匀 B 样条曲线	(113)
7.1.1	二次均匀 B 样条曲线的表达式	(113)
7.1.2	二次均匀 B 样条曲线的几何特性	(114)
7.1.3	用重节点端点条件控制曲线的首、末端点	(116)
7.2	三次均匀 B 样条曲线	(118)
7.2.1	三次均匀 B 样条曲线的表达式	(118)
7.2.2	三次均匀 B 样条曲线的几何特性	(119)
7.2.3	三次均匀 B 样条曲线形状的控制	(121)
7.3	三次均匀 B 样条曲线边界的控制	(122)
7.4	三次 B 样条曲线的插值	(125)
7.4.1	问题的提出	(125)
7.4.2	基本方程组	(126)
7.4.3	端点条件和构造插值三次准均匀 B 样条曲线的方程组	(127)
7.5	高次 B 样条曲线	(129)
7.6	B 样条曲面	(129)
7.6.1	B 样条曲面概述	(129)
7.6.2	B 样条曲面的插值	(132)
	参考文献	(136)
第八章	非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线和曲面	(138)
8.1	非均匀 B 样条曲线与曲面	(138)
8.1.1	非均匀基 B 样条基函数的导出	(138)
8.1.2	非均匀基 B 样条节点矢量的确定	(140)
8.1.3	非均匀 B 样条曲线及其插值	(142)
8.1.4	非均匀 B 样条曲面	(145)
8.2	有理 B 样条曲线曲面	(145)
8.2.1	有理 B 样条曲线和曲面	(145)
8.2.2	二次有理 B 样条曲线和曲面	(146)
8.2.3	三次有理 B 样条曲线	(150)
8.3	非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线和曲面	(152)
8.3.1	NURBS 曲线、曲面的定义与性质	(152)
8.3.2	NURBS 曲线曲面的基本算法	(154)
8.3.3	NURBS 曲线和曲面的应用	(160)
	参考文献	(168)
第九章	Coons 类混合 B 样条(CNSBS)曲面及其向 NURBS 曲面的转化	(170)
9.1	插值于四条边界曲线及 $i(i=1,2,\dots,n)$ 阶跨界导矢的 CNSBS 曲面 ..	(171)
9.2	CNSBS 曲面向 NURBS 曲面的转化	(173)
9.3	奇异性	(178)
9.4	一个重要的定理及其证明	(179)
9.4.1	引理 1 及其证明	(179)
9.4.2	引理 2 及其证明	(181)
9.4.3	引理 3 及其证明	(182)

9.4.4 定理及其证明	(183)
9.5 关于 CNSBS 曲面的若干结论	(184)
参考文献	(185)
第十章 NURBS 方法的其他应用	(187)
10.1 应用 NURBS 构造 N 边域曲面	(187)
10.1.1 概述	(187)
10.1.2 构造 N 边域曲面的 Gregory 方法	(188)
10.1.3 应用 NURBS 构造 N 边域曲面	(190)
10.1.4 算法的讨论及其实现	(191)
10.2 根据给定的 $(N-1)$ 条边界曲线及其跨界导矢构造 N 边域曲面	(192)
10.2.1 概述	(192)
10.2.2 根据给定的三条边界曲线及其跨界导矢构造矩形域曲面	(192)
10.2.3 曲面 $F(u,v)$ 和 $G(u,v)$ 向 NURBS 形式的转化及其奇异性的消除	(193)
10.2.4 根据给定的 $(N-1)$ 条边界曲线及其跨界导矢构造 N 边域曲面	(195)
参考文献	(196)
第十一章 三角曲面	(198)
11.1 三角 Bernstein-Bézier 曲面	(198)
11.1.1 三角 B-B 曲面的原理	(198)
11.1.2 三角 B-B 曲面的构造	(205)
11.2 三角 B-B 曲面片间参数连续拼接条件	(206)
11.2.1 参数连续的定义	(206)
11.2.2 C^0, C^1 和 C^2 连续的拼接条件	(207)
11.2.3 C^1 连续三角 B-B 曲面的构造及相容性问题	(208)
11.3 三角 B-B 曲面片间几何连续拼接条件	(209)
11.3.1 几何连续的定义	(209)
11.3.2 n 次三角 B-B 曲面片的 G^1 拼接条件	(209)
11.3.3 三角 B-B 曲面片 G^1 拼接的相容性问题	(211)
参考文献	(213)
第十二章 散乱数据插值曲面	(215)
12.1 散乱数据三角剖分的基本概念	(215)
12.1.1 与三角剖分有关的若干定义	(215)
12.1.2 三角剖分优化准则	(216)
12.2 平面和开曲面散乱数据的三角剖分	(218)
12.2.1 平面散乱数据的三角剖分	(218)
12.2.2 曲面上散乱数据的三角剖分——Choi 算法	(221)
12.3 封闭曲面上散乱数据的三角剖分	(227)
12.4 三角网格边界条件计算	(228)
12.4.1 顶点上法矢的计算	(229)
12.4.2 顶点处沿边界方向切矢的计算	(230)
12.5 散乱数据插值曲面	(230)
12.5.1 构造散乱数据插值曲面	(230)

12.5.2 G^1 连续四次插值曲面	(230)
参考文献	(233)
第十三章 变形造型技术	(236)
13.1 非自由形变形	(236)
13.1.1 数学通式	(237)
13.1.2 几种简单的变形公式	(237)
13.2 自由变形造型(FFD)	(239)
13.2.1 基本原理	(240)
13.2.2 连续性控制	(241)
13.2.3 局部变形	(242)
13.2.4 其他参数(如体积)的控制	(242)
13.2.5 FFD 方法的特点与适用范围	(243)
13.3 直接控制的自由变形造型(DFFD)	(244)
13.3.1 DFFD 算法的提出	(244)
13.3.2 最小二乘法与矩阵广义逆	(245)
13.3.3 单点约束	(246)
13.3.4 多点约束	(246)
13.3.5 DFFD 方法的特点与适用范围	(247)
13.4 其他自由变形造型技术	(247)
13.4.1 扩展自由变形造型技术(EFFD)	(247)
13.4.2 有理自由变形造型技术(RFFD)	(248)
参考文献	(249)
第十四章 用偏微分方程构造曲面	(250)
14.1 基本原理	(250)
14.1.1 椭圆型偏微分方程	(250)
14.1.2 椭圆型偏微分方程的求解	(251)
14.1.3 用偏微分方程构造曲面的基本原理	(253)
14.2 用偏微分方程构造过渡面	(254)
14.2.1 笛卡儿坐标系下构造过渡面	(255)
14.2.2 曲面坐标系下构造过渡面	(256)
14.2.3 构造一阶连续的过渡面	(257)
14.2.4 小结	(262)
14.3 用 PDE 方法构造自由曲面	(262)
14.3.1 简单船体设计	(263)
14.3.2 用 PDE 方法构造 N 边域曲面	(265)
14.4 用偏微分方程数值解构造曲面	(269)
参考文献	(271)
第十五章 能量优化法曲线曲面造型	(273)
15.1 能量优化法曲线曲面造型的基本原理	(274)
15.1.1 能量优化法的基本原理	(274)
15.1.2 能量模型的处理	(276)

15.1.3	四条边界曲线约束的能量优化法造型	(278)
15.2	能量优化法的数学处理方法——数学规划	(280)
15.2.1	数学规划问题	(281)
15.2.2	无约束二次规划的处理方法	(281)
15.2.3	线性约束二次规划的处理方法	(281)
15.3	几何约束条件的处理	(283)
15.3.1	控制顶点约束	(283)
15.3.2	型值点约束	(285)
15.3.3	(偏)导矢约束	(286)
15.3.4	法矢约束	(287)
15.3.5	参数曲线约束	(288)
15.3.6	参数曲面片约束	(291)
15.4	能量优化法的几个关键问题	(293)
15.4.1	材料特性参数的作用	(293)
15.4.2	施加外载荷调整曲线曲面形状	(295)
15.4.3	有理曲线曲面的处理	(298)
15.5	能量优化法的应用	(300)
	参考文献	(304)
第十六章	小波技术在曲线、曲面造型中的应用	(306)
16.1	小波和多分辨率分析简介	(307)
16.1.1	离散信号多分辨率表示的基本概念	(307)
16.1.2	函数多分辨率表示的关键问题	(308)
16.2	B 样条小波	(309)
16.2.1	B 样条小波的定义	(309)
16.2.2	B 样条小波的计算	(311)
16.2.3	B 样条小波的性质	(313)
16.3	B 样条曲线的多分辨率表示	(313)
16.3.1	函数多分辨率表示的几何意义	(313)
16.3.2	准均匀三次 B 样条曲线的小波分解与重构	(314)
16.3.3	准均匀三次 B 样条曲线的多分辨率表示	(318)
16.3.4	任意 B 样条曲线的多分辨率表示	(320)
16.3.5	B 样条曲线多分辨率表示的意义	(321)
16.4	B 样条曲面的多分辨率表示	(321)
16.4.1	准均匀双三次 B 样条曲面的小波分解与重构	(321)
16.4.2	任意 B 样条曲面的多分辨率表示	(323)
16.4.3	曲面多分辨率表示的特点与应用	(324)
16.5	基于小波的曲线曲面光顺误差控制	(327)
16.5.1	曲线光顺误差的控制	(327)
16.5.2	曲面光顺误差的控制	(328)
	参考文献	(330)
第十七章	曲面求交算法	(332)