

计算机辅助设计 与制造中的 外形分析

(美) 尼古拉斯 M. 巴利卡拉克斯 (Nicholas M. Patrikalakis)

(日) 前川卓 (Takashi Maekawa)

著

冯结青 叶修梓 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



计算机辅助设计与制造 中的外形分析

(美)尼古拉斯 M. 巴利卡拉克斯(Nicholas M. Patrikalakis) 著
(日)前川卓(Takashi Maekawa)
冯结青 叶修梓 译



机械工业出版社

外形分析是从几何模型中提取有用信息的过程,它是计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)系统的基本组成部分。本书在几何造型领域和实体造型领域之间架起了一座桥梁,为各种外形分析问题提供了统一的数学基础和算法,主要包括非线性多项式的求解、求交问题、交线的微分几何、距离函数、曲线和曲面的外形分析、脐点和曲率线、测地线、等距线和等距面等内容。本书既可以作为几何造型高级教程的教科书,也可以作为CAD/CAM研究者和工业产品设计人员的参考书。

Translation from the English language edition:

Shape Interrogation for Computer Aided Design and Manufacturing by Nicholas M. Patrikalakis and Takashi Maekawa

Copyright© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002

Springer-Verlag is a company in the BertelsmannSpringer publishing group
All Rights Reserved

本书中文简体字版由机械工业出版社和德国施普林格出版社合作出版,未经出版者书面许可,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

本书版权登记号:图字:01-2002-6637

图书在版编目(CIP)数据

计算机辅助设计与制造中的外形分析/(美)尼古拉斯 M.巴利卡拉克斯(Nicholas M. Patrikalakis)等著;冯结青,叶修梓译.北京:机械工业出版社,2004.8

ISBN 7-111-14976-9

I. 计... II. ①尼...②冯...③叶... III. ①计算机辅助设计—几何造型—数学分析②计算机辅助制造—几何造型—数学分析 IV. TP391.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 074763 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:周国萍 责任编辑:舒雯 版式设计:张世琴

责任校对:樊钟英 封面设计:王伟光 责任印制:施红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

890mm×1240mm A5·13 印张·2 插页·386 千字

0 001—3 000 册

定价:36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

译者序

自由曲面在工业产品设计中的大量应用可以追溯到 20 世纪 70 年代。当时正值飞机和汽车工业的蓬勃发展，在飞机及汽车制造中遇到了大量的自由曲面问题。当时只能采用多截面视图、特征纬线的方式来近似表达所设计的自由曲面。由于三视图方法表达的不完整性，经常发生在设计完成后，制作出来的样品与设计者所想象的有很大差异，甚至完全不同的情况。设计者对自己设计的曲面形状能否满足要求也无法保证，所以还经常要按比例制作油泥模型，作为设计评审和方案比较的依据。曲面造型带来的技术革新，使汽车开发手段比旧的模式有了质的飞跃，新车型的开发速度也大幅度提高。

为应付日益激烈的市场竞争，CAD/CAM 技术在工业产品开发中被越来越广泛地采用，外观设计在现在产品开发中越来越得到重视，自由曲面也得到了越来越广泛和深入的应用。现在，即使日用产品，如家用电器的外形也采用自由曲面。CAD/CAM 系统的发展、计算能力的提高以及网络的快速发展也使这样的应用在质量、速度和价格等各方面成为可能。对于设计者来说，产品的外观设计固然重要，但分析和评估所设计出的形体是否符合功能和美观的要求也同样重要。这就要求用计算机对所设计的产品外形进行自动评估，而不只是用制作油泥模型的方式对设计进行人工评估。

由美国麻省理工学院(MIT)的 M. Patrikalakis 教授和 T. Maekawa (前川卓)研究员(现为日本横滨国立大学工学院教授)合作撰写的《计算机辅助设计与制造中的外形分析》(Shape Interrogation for Computer-Aided Design and Manufacturing)为设计者提供了多种外形评估的手段。作为几何造型和实体造型领域之间的桥梁，本书以外形分析，即对几何模

IV 计算机辅助设计与制造中的外形分析

型进行各种各样的信息提取为主要内容,所涉及的内容包括微分几何、距离函数、曲线曲面的法向、曲率线和脐点、测地线和等距面以及对上述外形手段的基于区间算法的鲁棒性分析。

书中大部分内容为 Patrikalakis 的 MIT 设计实验室多年来的研究成果,内容严谨、分析深入透彻。本书原为 MIT 研究生课程《计算几何》的教科书,受 Springer 出版社之邀在此基础上整理而成。译者之一(Xiuzi Ye,叶修梓)曾在 Patrikalakis 的 MIT 设计实验室从事博士后研究工作。他曾荣幸地与二位原作者合作研究,发表多篇合作论文,并合作指导博士和硕士研究生多名,研究成果也有幸成为本书的一部分。因此,他也责无旁贷地担负起本书的翻译任务,将本书同时也包括部分合作成果(如本书的第六章)呈献给国内读者。本书既可作为研究生几何造型方面高级课程的教材,也可作为 CAD/CAM 专业人员和工业产品设计人员的参考书。

衷心感谢机械工业出版社和 Springer 出版社为我们提供了将本书介绍给国内读者的机会,同时感谢郑国贤、李放在本书排版与校对方面所做的工作。翻译这样的书籍难免会出现不准确和错误,热忱欢迎广大读者就译作中的问题与我们进行交流和探讨。

译者

2004 年 4 月于求是园

前 言

本书的目的与特点

外形分析(Shape Interrogation)是一个对几何模型进行信息提取的过程,它是计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)系统的一个基本组成部分。在20世纪60年代,CAD/CAM的创始人之一——M.Sabin首先提出了这个概念,I.Braid和A.Geisow则采用了曲面检测(Surface Interrogation)这个术语,而该领域的另一个创始人R.E.Barnhill采用了一个等价的术语——几何处理(Geometric Processing)。本书重点研究由自由曲面所围成的几何模型的外形分析。自由曲面也称为雕塑曲面,在科学和工程领域得到了广泛应用。举例来说,基于流体动力学外形的螺旋桨叶片在船舶工业中有着重要的应用,而基于空气动力学外形的涡轮叶片决定了航空发动机的性能。自由曲面在具有功能和美观外形要求的设计中得到广泛应用,如轮船、汽车和飞机的外形设计。许多外形美观的家用电器中也用到了自由曲面。

当工程师和外观设计人员采用自由曲面设计几何模型时,他们需要外形分析工具来确定所设计的物体是否符合功能和外形的要求。本书提供了各种外形分析手段的数学基础及其相应算法,主要包括非线性多项式的求解、求交问题、交线的微分几何、距离函数、曲线曲面的外形法向、曲率线和脐点、测地线、等距线和等距面等内容。

本书可以作为研究生和相关专业人员的几何造型高级教程,它是麻省理工学院(MIT)研究生课程“计算几何”的教科书之一。目前,在几何造型和实体造型领域有几本很好的参考书,本书可以作为这两个领域之间的一个桥梁。本书除了所涉及的微分几何内容之外,其它全部内容都是基于这样一个概念:将所有的外形分析问题归纳为非线性系统的求解问题。

本书的结构与概述

第 1 章概述了曲线曲面在计算机内部的解析表示方法, 主要讲述 CAD 系统中广泛采用的曲线曲面的参数表示。然后, 介绍了 Bernstein 多项式的理论和相关算法, 以及它们在 Bézier 曲线和曲面片中的应用。本章最后介绍 B-样条基函数的理论和相关算法, 以及它们在 B-样条与非均匀有理 B-样条曲线和曲面片中的应用。对于本书涉及的 Bernstein 多项式和 B-样条基函数以及所表示的曲线曲面性质, 将不会作详细的证明, 这些证明都可在几何造型参考书中找到。

第 2、3 章简要介绍关于显式、参数和隐式曲线曲面的经典初等微分几何的基本知识, 而本书所需要的较高级微分几何知识将在第 6、8、9 和 10 章介绍。除隐式曲面的曲率之外, 第 2、3 章的大部分内容可在微分几何的参考书中找到, 但为了方便读者和本书的完整性, 本书还是给出了微分几何初步知识。

第 4 章主要介绍基于几何的非线性方程组求解方法以及相关的数值鲁棒性(可靠性)问题。本书中所涉及的大部分外形分析问题, 都可以简化为求解具有 l 个未知量的 n 个非线性多项式方程, 其中每个未知量位于一个特定的区间内。本书着重介绍基于区间投影多面体(Interval Projected Polyhedron, 简称 IPP)算法的非线性多项式方程求解, 该算法是于 20 世纪 90 年代初期由 MIT 的设计实验室(Design Laboratory)提出的。有些外形分析问题涉及更为一般的非线性函数, 如多项式的根。这类问题可以通过引入辅助变量的方法, 转化为更高维空间的非线性多项式组。IPP 算法的一个基本思想是: 将自由外形的几何造型和处理中的外形分析连续问题转化为计算平面点集的凸包, 以及这些凸包与另外一些沿特定轴向的凸包的交。这种方法将两个很不相关的领域之间, 即自由外形(主要基于数值分析和逼近论)的几何造型领域和离散计算几何领域(主要基于算法和组合学理论), 建立起了一座桥梁。为了解决在 CAD/CAM 系统中具有十分重要地位的数值鲁棒性和可靠性问题, IPP 算法采用了舍入区间算术。区间方法是数值分析的一个分支, 它在几何造型和处理中有着巨大的潜在应用。目前, 区间方法并没有在实际中大量应用, 这是因为不加改进的区间算法, 会导

致区间的放大从而降低数值计算的精度。但是,当结合基于凸组合(例如 de Casteljau 算法)的几何造型算法使用时,区间的增长就不会太大,从而在实际应用中比较有效,而且可得到高精度的解。IPP 可以鲁棒地消除定义域中不含有根的子区域,有效地将非线性系统的根限定在一个给定的包围盒中,而具有典型尺寸的包围盒比当前 CAD/CAM 系统允许的实际精度高得多。

第 5 章介绍了本书中第一个重要的外形分析问题。在实体造型的边界表示中,求交是生成几何模型的一个基本操作。在几何处理中,实体模型中的交点、交线对于模型的可视化、分析和制造都十分重要。本章提出了一个统一的求交方法,该方法将各种求交问题转化为求解非线性多项式方程组的问题,并用第 4 章中所述的方法进行求解。本章同时提出了一种新的求交问题的分类方法,该方法考虑了求交问题的维数、所包含的几何表示类型以及用于描述和求解该问题的方程个数。书中详细描述了点与点、点与曲线、点与曲面、曲线与曲线、曲线与曲面、曲面与曲面的求交问题。对于读者感兴趣的一些特殊情形,例如隐式或参数多项式形式表示的几何体素(点、曲线、曲面),本书作了深入讨论。

第 6 章介绍了如何有效地跟踪两个相互横穿或相切曲面之间的交线。本章给出了可以用于高效鲁棒跟踪算法的一阶、二阶和高阶导数计算方法,而其中曲面的形式可以是参数的、隐式的,也可以是混合的。

第 7 章给出了点与点、曲线与曲线、曲面与曲面(或者它们之间的任意组合)之间的距离函数稳定点的计算方法,所涉及的曲线曲面可以由分片有理多项式定义。这个问题又可以简化为求解非线性方程组问题,并可以采用第 4 章介绍的 IPP 算法进行求解。距离函数与求交问题密切相关,同时它在诸如基于中轴变换的特征识别、动画、碰撞检测和被加工物体的定位和检测等领域中有着广泛的应用。

第 8 章讨论了另外一类涉及位置向量和高阶导数的曲线曲面分析方法,重点讨论曲率分布图中稳定点的鲁棒抽取,以及它在曲率等值线鲁棒抽取中的应用。这个问题再一次可以简化为采用第 4 章介绍的 IPP 算法来求解的非线性方程组。本章中讨论的分析方法有着许多应

用,例如具有美观和功能性要求的曲面设计和分析、振动形状的光顺、曲面片的网格化以及自动加工等问题。

第9章讨论了利用脐点和曲率线作为外形分析和辨识(Identification)的方法。脐点可以通过采用第4章中的IPP算法求解非线性多项式方程组得到;曲率线可以通过自适应数值积分一个微分方程组得到,该数值积分方法在脐点附近进行特殊处理。在曲面扰动条件下的脐点稳定性问题也可以应用于曲面辨识和特征识别问题。

第10章主要介绍与参数和隐式曲面的测地线相关的外形分析问题。书中首先介绍了经典微分几何中的测地线方程,然后给出了曲面上两点之间或一点与一条曲线之间测地线的快速数值算法,此算法中包含了边值问题的打靶(Shooting)或松弛迭代求解方法。测地线在许多问题中有着广泛的应用,如基于中轴变换的特征识别、机器人中的路径规划、设计和制造中的测地等距线的表示等。

本书的最后一章(第11章)着重讨论曲线曲面的等距(或称为平行)问题。等距在诸如数控加工、基于中轴变换的特征识别和公差域指定等问题中有着很重要的应用。本章深入讨论了平面等距线和等距曲面中奇异情况(特别是自相交)的表述和计算问题。书中提出的方法部分是解析的,部分是基于第4章中的IPP算法的数值方法,并在最后统一为一个非线性微分方程组。本章中还介绍和分析了基于等距线和等距面理论的Pythagorean速端曲线、广义等距和管状曲面等概念。

在第11章之后,列出了供采用本书作为教材的老师使用的一些习题。MIT的研究生课程中使用了其中许多习题。

错误报告

像这样篇幅的一本书难免存在疏漏和错误,欢迎读者指正。任何建设性的意见或是发现的错误,请直接告知本书的作者N.M.Patrikalakis, MIT Room 5-428, 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139-4307, USA (e-mail: nmp@mit.edu)和T. Maekawa, MIT Room 5-426A, 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139-4307, USA (e-mail: tmaekawa@mit.edu)。

致谢

我们想要感谢下列已毕业和在读的 MIT 学生们，他们帮助完成了此书。他们是 Panos G. Alourdas、Christian Bliek、Julie S. Chalfant、Wonjoon Cho、Donald G. Danmeier、H. Nebi Gursoy、Andreas Hofman、Chun-Yi Hu、Todd R. Jackson、Kwang Hee Ko、George A. Kriezis、Hongye Liu、John G. Nace、P. V. Prakash、Guoling Shen、Evan C. Sherbrooke、Stephen Smyth、Krishnan Sriram、Seamus T. Tuohy、Marsette A. Vona、Guoxin Yu 和 Jingfang Zhou。我们还想感谢 Stephen L. Abrams 在软件开发上的帮助和 Fred Baker 在编辑方面予以的帮助。

我们还要感谢 Chrysostomos Chrysostomidis、David C. Gossard、Malcolm Sabin、Takis Sakkalis、Nickolas S. Sapidis、Franz-Erich Wolter 和 Xiuze Ye (叶修梓) 以及由 Springer 出版社选定的匿名评阅人，感谢他们有益的讨论和建议。

我们还要感谢来自 MIT 工程分院教务处的 Bernard M. Gordon 工科课程发展基金的资助和来自 MIT 海洋工程系的其它资助。

最后，谨将此书献给我们的家人、我们的妻子 Sandra Jean 和 Yuko、孩子们 Alexander, Andrew, Nikki 和 Takuya。她们的爱、耐心、理解和鼓励使我们最终完成了本书的写作。

Cambridge, MA, June, 2001

Nicholas M. Patrikalakis

Takashi Maekawa

目 录

译者序

前言

第 1 章 曲线和曲面的表示	1
1.1 曲线的解析表示	1
1.1.1 平面曲线	1
1.1.2 空间曲线	3
1.2 曲面的解析表示	4
1.3 Bézier 曲线和曲面	6
1.3.1 Bernstein 多项式	7
1.3.2 Bernstein 多项式的算术运算	9
1.3.3 Bernstein 多项式的数值条件	9
1.3.4 Bézier 曲线的定义和性质	12
1.3.5 Bézier 曲线的算法	15
1.3.6 Bézier 曲面	18
1.4 B-样条曲线和曲面	20
1.4.1 B-样条	20
1.4.2 B-样条曲线	21
1.4.3 B-样条曲线的算法	24
1.4.4 B-样条曲面	29
1.5 B-样条到 NURBS 的推广	30
第 2 章 曲线的微分几何	34
2.1 弧长和切向量	34
2.2 主法向和曲率	38
2.3 副法向和挠率	42

2.4 Frenet-Serret 公式	46
第 3 章 曲面的微分几何	48
3.1 切平面和曲面法向	48
3.2 第一基本齐式(度量)	51
3.3 第二基本齐式(曲率)	54
3.4 主曲率	58
3.5 高斯曲率和中曲率	62
3.5.1 显式曲面	63
3.5.2 隐式曲面	64
3.6 欧拉定理和丢潘标形	68
第 4 章 非线性多项式求解和鲁棒性问题	72
4.1 引言	72
4.2 局部求解方法	73
4.3 整体求解方法的分类	75
4.3.1 代数与混合方法	75
4.3.2 同伦(homotopy)(连续)方法	77
4.3.3 剖分方法	77
4.4 投影多面体算法	77
4.5 具有平方根的非线性多项式方程组的辅助变量方法	87
4.6 鲁棒性问题	89
4.7 区间运算	92
4.8 舍入区间运算及其实现	94
4.8.1 双精度浮点运算	95
4.8.2 在二进制表示中提取指数部分	98
4.8.3 两种计算最终精度单位方法的比较	101
4.8.4 硬件实现的舍入区间运算	102
4.8.5 舍入区间算法的实现	104
4.9 区间投影多面体算法	105
4.9.1 控制多项式方程的公式化(formulation)	106

4.9.2 软件和硬件实现舍入的比较	107
第5章 求交问题	110
5.1 求交问题概述	110
5.2 求交问题的分类	113
5.2.1 基于维数的分类	113
5.2.2 基于几何类型的分类	114
5.2.3 基于计算机中数字表示方法的分类	114
5.3 点/点求交	115
5.4 点/曲线求交	116
5.4.1 点/隐式代数曲线求交	116
5.4.2 点/有理多项式参数曲线求交	118
5.4.3 点/过程参数曲线求交	121
5.5 点/曲面求交	122
5.5.1 点/隐式代数曲面求交	122
5.5.2 点/有理多项式参数曲面求交	122
5.5.3 点/过程参数曲面求交	125
5.6 曲线/曲线求交	126
5.6.1 有理多项式参数/隐式代数曲线求交(情形 D3)	126
5.6.2 有理多项式参数曲线/有理多项式参数曲线求交 (情形 D1)	130
5.6.3 有理多项式参数曲线/过程参数曲线和过程参数曲线 /过程参数曲线的求交问题(情形 D2 和 D5)	132
5.6.4 过程参数曲线/隐式代数曲线求交(情形 D6)	133
5.6.5 隐式代数曲线/隐式代数曲线求交(情形 D8)	133
5.7 曲线/曲面求交	134
5.7.1 有理多项式参数曲线/隐式代数曲面求交(情形 E3)	135
5.7.2 有理多项式参数曲线/有理多项式参数曲面求交 (情形 E1)	135
5.7.3 有理多项式参数/过程参数曲线与过程参数 曲面求交(情形 E2 和 E6)	136

5.7.4	过程参数曲线/隐式代数曲面求交(情形 E7)	136
5.7.5	隐式代数曲线/隐式代数曲面求交(情形 E11)	137
5.7.6	隐式代数曲线/有理多项式参数曲面求交(情形 E9)	137
5.8	曲面/曲面求交	138
5.8.1	有理多项式参数曲面/隐式代数曲面求交 (情形 F3)	138
5.8.2	有理多项式参数曲面/有理多项式参数曲面求交 (情形 F1)	148
5.8.3	隐式代数曲面/隐式代数曲面求交(情形 F8)	153
5.9	曲线和曲面的重叠	155
5.10	曲线曲面的自相交	157
5.11	总结	159
第 6 章	交线的微分几何	161
6.1	引言	161
6.2	进一步的曲线微分几何知识	162
6.3	横截交线	164
6.3.1	切线方向	164
6.3.2	曲率与曲率向量	165
6.3.3	挠率和三阶导数向量	167
6.3.4	更高阶导数向量	168
6.4	相切交点处的交线	169
6.4.1	切线方向	170
6.4.2	曲率和曲率向量	173
6.4.3	三阶和更高阶导数向量	176
6.5	例子	177
6.5.1	参数-隐式曲面间横截相交	177
6.5.2	隐式-隐式曲面间相切相交	179
第 7 章	距离函数	181
7.1	引言	181

7.2 问题表述	182
7.2.1 点集间距离的定义	182
7.2.2 距离函数稳定点的几何解释	184
7.3 关于稳定点的进一步讨论	185
7.3.1 稳定点的分类	185
7.3.2 非孤立稳定点	190
7.4 例子	192
第8章 曲线和曲面的外形分析	195
8.1 外形分析方法的分类	195
8.1.1 0阶外形分析方法	196
8.1.2 一阶外形分析方法	197
8.1.3 二阶外形分析方法	200
8.1.4 三阶外形分析方法	205
8.1.5 四阶外形分析方法	208
8.2 自由参数曲面的曲率稳定点	209
8.2.1 高斯曲率	209
8.2.2 中曲率	212
8.2.3 主曲率	213
8.3 显式曲面上的曲率稳定点	215
8.4 隐式曲面的曲率稳定点	220
8.5 常数曲率的等值线	222
8.5.1 等值线层次	222
8.5.2 起始点计算	223
8.5.3 等值线的数学描述	226
8.5.4 例子	227
第9章 脐点和曲率线	231
9.1 引言	231
9.2 脐点附近的曲率线	232
9.3 转化为 Monge 型	237

9.4 曲率线的积分	242
9.5 脐点处的主曲率局部极值	244
9.6 一般脐点的扰动	251
9.7 可展曲面的折线(inflexion lines)	256
9.7.1 可展曲面的微分几何	256
9.7.2 折线附近的曲率线	263
第 10 章 测地线	266
10.1 引言	266
10.2 测地方程	267
10.2.1 参数曲面	267
10.2.2 隐式曲面	271
10.3 两点边值问题	273
10.3.1 引言	273
10.3.2 打靶法	274
10.3.3 松弛法	275
10.4 初始逼近	276
10.4.1 线性逼近	276
10.4.2 圆弧逼近	278
10.5 点与曲线之间的最短路径	280
10.6 数值应用	282
10.6.1 两点间的测地路径	282
10.6.2 点与曲线间的测地路径	284
10.7 测地等距线	287
10.8 可展曲面上的测地线	289
第 11 章 等距曲线和等距曲面	293
11.1 引言	293
11.1.1 背景和动机	293
11.1.2 NC 加工	295
11.1.3 中轴	299

XVI 计算机辅助设计与制造中的外形分析

11.1.4 公差域	306
11.2 平面等距线	307
11.2.1 微分几何	307
11.2.2 奇异情形分类	307
11.2.3 奇异点的计算	311
11.2.4 逼近	313
11.3 等距面	316
11.3.1 微分几何	316
11.3.2 等距面的奇异性	318
11.3.3 隐式二次曲面等距面的自相交线	319
11.3.4 显式二次曲面等距面的自相交线	329
11.3.5 多项式参数曲面等距面的自相交线	338
11.3.6 自相交线的跟踪	344
11.3.7 逼近	345
11.4 Pythagorean 速端曲线曲面	349
11.4.1 曲线	349
11.4.2 曲面	351
11.5 广义等距	352
11.6 管道曲面	354
11.6.1 引言	354
11.6.2 管道曲线的局部自相交	355
11.6.3 管道曲面的全局自相交	356
习题	365
附录 彩图	375
参考文献	379