

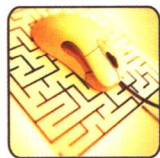
普通高等学校教材

 TEXTBOOK
HIGHER
FOR EDUCATION



JISUANJIFUZHU JIHE SHEJI JISHU JIYINGYONG

计算机辅助几何设计 技术及应用



李原 张开富 余剑峰 编

西北工业大学出版社

TP391.72

414

2007

高等学校教材

计算机辅助几何设计 技术及应用

李 原 张开富 余剑峰 编

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书从原理、算法和应用三个方面论述计算机辅助几何设计技术,形成了基础篇、高级篇和应用篇共三篇 14 章的内容。基础篇系统地介绍了曲线、曲面的基础理论、基础知识,包括常用的参数曲线、参数曲面和高级曲面;高级篇主要介绍了近年来计算机辅助几何造型技术新的研究成果,包括三角曲面、曲面造型、实体的三参数表示、逆向工程和虚拟环境下的精确造型技术等;应用篇以几何造型系统和飞机曲面为例,介绍了计算机辅助几何造型技术的应用。以上内容与科研工作紧密结合,力求反映国内外研究的新成果和学科的发展动态。

本书可作为高等院校宇航、汽车、船舶、计算机、机械及工业造型等有关专业的研究生教材,也可作为从事 CAD/CAM/CAE 研究与应用的科技工作者和工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机辅助几何设计技术及应用/李原,张开富,余剑峰编. —西安:西北工业大学出版社, 2007. 1

ISBN 978 - 7 - 5612 - 2196 - 9

I. 计… II. ①李… ②张… ③余… III. 计算机辅助设计—几何造型 IV. TP391. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 033545 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西丰源印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:15.125

字 数:364 千字

版 次:2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

定 价:22.00 元

前 言

计算机辅助几何设计是 CAD/CAM 的主要关键技术基础,是国外工科院校普遍设置的高新技术应用基础课程。在我国近年来随着 CAD/CAM 技术的不断普及和推广,许多高等院校对有关学科专业的教学计划作了调整,增设了相应的计算机辅助几何设计课程及实践环节。

计算机辅助几何设计作为一门综合性的学科,涉及解析几何、矢量代数、拓扑、集合论、计算方法以及程序设计技艺等方面的内容。一般来说,计算机辅助几何设计主要研究三方面的内容,即自由曲线曲面几何造型、实体造型以及它们的计算机表示和应用。20 世纪 80 年代以来,作者所在的西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部(重点)实验室一直从事计算机辅助几何设计的应用研究和相关软件开发工作,在该领域具有较高的学术水平和丰富的应用研究经验。我们总结了 20 多年来的工作成果,参考国内外数十本同类书籍,同时吸收近十年来最新的科研成果,在广泛征求国内同行意见和建议的基础上,写成此书奉献给广大读者。

本书从原理、算法实现和应用三个方面论述计算机辅助几何设计,使学生能够全面了解最新的进展和应用。全书分为基础篇、高级篇和应用篇,共 14 章。

(1) 基础篇侧重于自由曲面的基本理论,包括曲线参数表示的基础知识、常用的参数曲线、曲面参数表示的基础知识、常用参数曲面、Bézier 曲面、B 样条曲面和非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面,共 7 章。

(2) 高级篇集中介绍当前的先进技术,包括三角曲面、曲面造型技术、实体的三参数表示、逆向工程与虚拟环境下的精确造型,共 5 章。

(3) 应用篇关注于现代 CAD 技术的开发应用,包括基于 CATIA 的曲面造型以及飞机的曲面造型技术,共 2 章。

教材内容与国防科研实际紧密结合,内容由浅入深,突出介绍了航空产品几何造型技术、虚拟现实中的精确曲面造型技术等关键技术,具有鲜明的国防专业领域特色和重要的实际应用价值。

本书出版的特点和意义如下:

(1) 前沿性。内容新颖全面,力争把握最新研究成果和学科发展动态,以及当前最新的技术信息。

(2) 深度与广度。从面向工程的实际应用出发,依托行业应用实例,在广度方面内容涵盖了计算机辅助几何造型技术的主要技术点;在深度方面具有严密清晰的数学推理论证和很高的理论水平,满足了本科生和研究生教材的需要。

(3) 工程应用性。结合航空产品应用现状,引入行业实例,重点介绍了航空产品的造型技术以及虚拟现实中的精确曲面造型技术等关键技术。

(4) 专业性。紧密结合行业特点,以多年从事的国防和航空领域科研成果作为应用实例,使本书具有鲜明的国防专业领域特色和重要的实际应用价值。

本书由李原负责全书总体规划和提纲审定,张开富、余剑峰组织具体编写,参与编写的人员有:杜江(第3章),史琦(第5章),刘平和李鹏(第2,11,14章),种永民(第12章),薛鹏(第13章),张开富、余剑峰编写了其余各章内容,并负责全书内容的筹划和审稿。欧阳君涛、柳振兴和唐水龙做了大量的编程工作,王莉和温如冰按出版要求制备书中插图。

国家自然科学基金委员会和航空科学基金委员会资助的“复杂曲面设计、显示和数控加工理论及其应用”项目,教育部青年教师基金资助的“虚拟设计与虚拟环境下的物理数字模型”项目、国家重点科技攻关资助的“微机工作站计算机辅助工业造型设计软件系统”项目和国防预研资助的“航空 CAD/CAM 集成系统工程”项目的研究,为本书的面世提供了强有力的支持。

在本书出版之际,谨向所有对本书创作有所帮助的老师、同事、朋友和学生表示感谢。

计算机辅助几何造型技术博大精深,由于本书编写人员的时间、知识和经验有限,书中难免存在缺点和不足,恳请广大读者批评、指正。

编者

2006年8月

目 录

绪论	1
第一篇 基础篇	9
第 1 章 曲线参数表示的基础知识	9
1.1 显式、隐式和参数表示	9
1.2 参数曲线的定义及其度量性质	10
1.3 插值、逼近、拟合和光顺	16
1.4 参数曲线的代数形式和几何形式	17
1.5 曲线段的连续性	18
1.6 重新参数化	18
1.7 数据点的参数化	19
第 2 章 常用的参数曲线	22
2.1 Bézier 曲线	22
2.2 B 样条曲线	30
2.3 非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线	39
2.4 圆锥曲线	49
第 3 章 曲面参数表示的基础知识	50
3.1 参数曲面的定义及其度量性质	50
3.2 双三次参数曲面的代数形式	52
3.3 双三次参数曲面的几何形式	52
3.4 双三次参数曲面的代数形式与几何形式相互转化	53
3.5 曲面数据点的参数化与参数曲面的重新参数化	53
3.6 常用曲面的参数表示	55
第 4 章 常用的参数曲面	57
4.1 平面、二次曲面和直纹面	57
4.2 双线性曲面	60

4.3	Coons 曲面	61
4.4	张量积曲面	64
4.5	Gordon 曲面	64
第 5 章	Bézier 曲面	66
5.1	Bézier 曲面的定义	66
5.2	Bézier 曲面的性质	67
5.3	de Casteljau 方法	67
5.4	Bézier 曲面的分割与升阶	68
5.5	Bézier 曲面片的拼接	69
5.6	一般的 Bézier 曲面拟合	70
5.7	拟球面	70
第 6 章	B 样条曲面	72
6.1	B 样条曲面定义及性质	72
6.2	均匀 B 样条曲面	72
6.3	B 样条曲面的计算	73
6.4	B 样条曲面的节点插入、升阶、分裂与组合	73
6.5	B 样条曲面的插值	73
6.6	蒙面法(Skinning)设计曲面	75
第 7 章	非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面	77
7.1	NURBS 曲面定义及其性质	77
7.2	常用曲面的 NURBS 表示	78
7.3	NURBS 曲面的反插节点算法	81
7.4	改变 NURBS 曲面的权因子	81
7.5	修改曲面控制顶点	82
第二编	高级篇	83
第 8 章	三角曲面	83
8.1	三角 Bernstein - Bézier 曲面	83
8.2	三角 B - B 曲面片的拼接条件	88
8.3	基于散乱数据插值曲面的应用	90
第 9 章	曲面造型技术	93
9.1	曲面的求交	93
9.2	曲面的变形	96
9.3	曲面的重建和简化	100

9.4	曲线、曲面的光顺处理	103
9.5	新的曲面造型方法	112
第 10 章	实体的三参数表示	116
10.1	实体的超曲面片表示	116
10.2	实体的代数与几何形式	118
10.3	实体的切矢与扭矢	120
10.4	正则实体与实体中的曲线曲面	120
10.5	三参数 NURBS 实体	121
第 11 章	逆向工程	126
11.1	逆向工程的概述	126
11.2	数据采集技术	128
11.3	数据预处理技术	134
11.4	逆向工程软件	152
第 12 章	虚拟环境下的精确造型技术	161
12.1	虚拟模型表示	161
12.2	基于约束的三维直接操作	179
12.3	虚拟实体造型	189
12.4	虚拟装配造型过程	198
第三篇	应用篇	205
第 13 章	基于 CATIA 的曲面造型	205
13.1	CATIA 曲线曲面造型数学方法	205
13.2	创成式外形风格造型设计(GSD)	208
13.3	自由风格造型	216
第 14 章	飞机的曲面造型技术	221
14.1	飞机曲面造型的发展历程	221
14.2	飞机外形造型	223
14.3	应用 CATIA 的飞机曲面造型	226
参考文献		230

绪 论

随着计算机技术的发展和普及,计算机辅助设计与制造(Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing,简称 CAD/CAM)技术也得到了迅猛的发展,它们推动了许多领域的设计革命,计算机辅助设计与制造技术的发展和水平已经成为衡量一个国家现代化水平的重要标志之一。其中计算机辅助几何设计(Computer Aided Geometric Design,简称 CAGD)是它的理论基础和关键技术,CAD/CAM 的快速发展离不开 CAGD 的产生和发展,CAGD 中一种新的几何造型方法的出现,往往就能很快地反映到使用的 CAD/CAM 系统中。

1. 计算机辅助几何设计

计算机辅助几何设计这一术语最早由巴恩希尔(Barnhill)与里森费尔德(Riesenfeld)在美国犹他(Utah)大学的一次国际会议上提出,它是用来描述计算机辅助设计中有关外形的数学方法的研究。自此,计算机辅助几何设计开始以一门独立的学科出现,随着贝齐尔(Bézier)等大师为其奠定理论基础,计算机辅助几何设计开始蓬勃发展。

1963年,美国波音(Boeing)飞机公司的弗格森(Ferguson)首先提出了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,弗格森所采用的曲线曲面的参数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(Massachusetts Institute of Technology,简称 MIT)的孔斯(Coons)在 MIT 发表了“空间图形(Space Figure)CAD 曲面”的研究报告,提出了构造曲面的几种方法,引起了国际学术界的重视。他给出了一个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以定义一块曲面片,但他和弗格森的方法都存在形状控制和连接问题。

法国雷诺(Renauslt)汽车公司的贝齐尔于 1971 年发表了一种由控制多边形定义曲线的方法。设计员只要移动控制顶点就可以方便地修改曲线的形状,而且形状的变化完全在预料之中。贝齐尔方法简单易用,又出色地解决了整体形状控制问题,在 CAGD 学科中占有重要的地位,广为人们接受,为 CAGD 的进一步发展奠定了坚实的基础,但贝齐尔方法仍存在连接和局部修改问题。

德布尔(de Boor)于 1972 年给出了关于 B 样条的一套标准算法。美国通用汽车公司的戈登(Gordon)和里森费尔德(Riesenfeld)于 1974 年将 B 样条理论应用于形状描述,提出了 B 样条曲线曲面。它几乎继承了贝齐尔方法的一切优点,克服了贝齐尔方法存在的缺点,较成功地解决了局部控制问题,又轻而易举地在参数连续性基础上解决了连接问题。

B 样条方法较成功地解决了自由型曲线曲面形状的描述问题。但是,随着生产的发展,B 样条方法显示出明显不足,将其应用于圆锥截线及初等解析曲面时只能给出近似表示,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,容易造成生产管理的混乱。为了满足工业上进一步的需要,1975 年美国锡拉丘兹(Syracuse)大学的弗斯普里尔(Versprille)在他的博士论文中首先提出了有理 B 样条方法。以后,由于皮格尔(Piegl)、蒂勒

(Tiller)和法林(Farin)等人的功绩,到20世纪80年代后期,非均匀有理B样条(Non-Uniform Rational B-Spline,简称NURBS)方法成为用于曲线曲面描述的最广为流行的数学方法。非有理和有理贝齐尔曲线曲面和非有理B样条曲线曲面都被统一在NURBS标准形式之中,因而可以采用统一的数据库。

由于NURBS的潜力,未待其完全成熟,美国国家标准局在1983年制定有初始图形交换规范IGES(Initial Graphis Exchange Specification)第2版中已将它列为优化类型;1991年国际标准组织(International Standardization Organization,简称ISO)正式颁布的工业产品几何定义的STEP(Standard For The Exchange of Product Model Data)标准中就以NURBS作为自由型曲线曲面的表示标准,亦即NURBS已成为产品数据交换的国际标准,与此同时,CAD商品软件纷纷推出NURBS功能,并且NURBS的理论迅速转化为生产力。可以说,不懂得NURBS方法就无法真正进入当代的CAGD技术领域。

随着计算机辅助设计和制造技术的发展,CAGD的应用也日趋广泛。其应用范围除了围绕汽车、航空、造船这三大工业部门的几何外形设计问题和一般机械零部件的设计这些传统领域外,正在扩展到越来越多的技术领域,例如,人体器官造型与CT图像三维重建、建筑设计、生物工程、医疗诊断、航天材料、电子工程、机器人、服装鞋帽外形设计等。随着计算机图形学的发展,CAGD还广泛应用于计算机视觉、地形地貌、军事作战模拟、动画制作、多媒体技术等领域。

2. CAGD的研究对象、核心问题和重要进展

计算机辅助几何设计主要研究对象是工业产品的几何形状。工业产品的形状大致分为两类:一类是仅由初等解析曲面(例如平面、圆柱面、圆锥面、球面、圆环面等)组成,大多数机械零件属于这一类,可以用画法几何与机械制图的方法完全清楚表达和传递所包含的全部形状信息;第二类是不能由初等解析曲面组成,而以复杂方式自由变化的曲线曲面即所谓的自由型曲线曲面组成,例如飞机、汽车、船舶的外形零件。由于后一类形状单纯用画法几何与机械制图不能表达清楚,因此,自由曲线曲面的表示、设计、显示、分析以及规格、处理等问题,是计算机辅助几何设计的主要研究内容。

实际工业中,传统上采用模线样板法表示和传递自由曲线曲面的形状。这种设计制造方法所表示与传递的几何形状因人而异,生产周期长,制造精度低,互换协调性差,设计差错多,改型困难,不能适应现代航空、汽车等工业的发展。随着计算机的出现,采用数学方法定义自由型曲线曲面达到了实际应用的地步。CAGD应运而生,并逐渐形成了自己独特的体系和特点。它是由函数逼近论、微分几何、代数几何、计算数学、数控技术、计算机图形学等学科交叉形成的边缘学科^[1],主要研究对几何外形信息的计算机表示、分析和综合。

在形状信息的计算机表示、分析与综合中,核心问题是计算机表示,即要找到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。

关于实体造型的理论的发展落后于曲线曲面,虽然这几年来已取得很大进展并进入实际应用,但仍不及曲线曲面理论那样成熟。本书仅限于介绍曲线曲面的数学描述。即使对于曲线曲面,也将主要介绍曲线曲面表示与设计的基本方法及一些应用,不能涉及实践中遇到的所有问题。

随着计算机图形显示对真实性、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种趋势的日益明显,随着图形工业和制造工业迈向一体化、信息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,计算机辅助几何设计得到了长足的发展,表现在研究领域的急剧扩展,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、曲面重构、曲面转换和曲面等距性^[2]。

当今 CAD 系统几乎都是定义在矩形域上的,主要原因是当初设计的汽车与飞机机身等物体的外形曲面均具有内在的结构,这导致早期系统都围绕矩形曲面片建立。后来,在一些更复杂的零件造型中,矩形曲面片与矩形拓扑的局限性就暴露出来。然而,修改现有的系统要比完全地集成性的方案容易得多。这使得非矩形曲面片即所谓 N-边曲面片难以在 CAD/CAM 系统中普及。N-边曲面片一直是一个广泛研究的题目。巴恩希尔(Barnhill,1973)给出了三角域上的超限插值曲面。萨宾(Sabin,1976)的三边贝齐尔曲面片是最为流行的曲面片,它具有与张量积贝齐尔曲面片相类似的性质。三边曲面片受到特别关注的原因之一是满足有限元分析中广泛应用的三角形元素的需要。在三角剖分基础上,组合三边贝齐尔曲面是构造散乱数据曲面拟合的常用方法之一^[3]。由于 N-边曲面片具有构造复杂形状的潜力,它可能在将来获得较广泛的应用。

有很多企业其产品开发过程的起始阶段往往都要生成 CAD 模型,但这在某种程度上常常并不切实可行。在许多领域往往是先构造出一个产品的原型,然后对其从产品的性能、美学以及其他准则进行评价,在证实其设计的可行性后才能进行 CAD 建模来完成设计的后续阶段。这种从现有物理模型或实物零件,利用数字化及计算机辅助几何设计技术重新构造原形 CAD 模型的过程称为反向工程或逆向工程(Reverse Engineering)。在逆向工程里,物理零件首先被测量,所生成的数字化数据随后被转换成为几何模型。在朱心雄等人所著的《自由曲线曲面造型技术》^[3]里较集中地总结了国内外本领域内出现、研究并取得进展的其他造型方法有:自由变形造型、偏微分方程构造曲面、能量优化法曲线曲面造型等。它们有望在 21 世纪应用于 CAD/CAM 系统,并获得广泛的应用。

求交、光顺、等距等是 CAGD 领域经典的几何处理问题,有着广泛的应用。采用何种算法,其精度、效率与可靠性存在很大的差异,对造型结果的曲线曲面质量有直接的甚至是决定性的影响,是衡量曲线曲面造型系统功能的重要方面。多年来,许多学者为此付出了大量的心血和努力,做了许多探索和研究,取得了丰富成果。但是,由于问题的复杂性和难度,迄今还未得到系统性的结论,还没有像贝齐尔在形状描述数学方法上所取得的那样的突破性进展,只是出现了大量的特定算法。巴恩希尔(1992)编辑了关于几何处理问题的会议的专题论文集^[4],朱心雄(2000)等在参考文献^[3]里介绍了在曲面求交、光顺和小波技术应用方面的研究进展。可以看到,一些成功的算法趋向于利用问题的几何方面。几何算法相关理论的发展有可能使几何造型这个领域成为一门独立学科。

3. 曲面造型的软件支持

曲面造型起源于汽车、飞机、船舶、叶轮等的外形放样工艺,由孔斯(Coons),贝齐尔(Bézier)等大师于 20 世纪 60 年代奠定其理论基础。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^[2]。理论的成熟伴随着应用的发展,可用于构造曲面造型的 CAD 软件也经过了好几个阶段的发展,历经几次重大的技术突破,到目前为

止,已演变为高中低档三层并举,工作站和微机平台齐头并进的发展格局。

最早出现的三维造型系统是在 20 世纪 60 年代,那只是简单的线框式系统,它只能表达基本的几何信息,不能有效地表达几何数据间的拓扑关系。进入 20 世纪 70 年代,正值飞机和汽车工业蓬勃发展的时期,此间飞机及汽车制造中遇到的大量的自由曲面问题,在当时只能用多截面视图和特征纬线的方式来表达。由于三视图方法表达的不完整性以及工业上应用的需求的推动,此时法国人提出了贝齐尔曲线使得用计算机处理曲线及曲面问题变得可行。同时,法国达索飞机制造公司也基于此算法,在二维绘图系统 CADAM 的基础上,开发出以表面模型为特点的三维造型系统 CATIA。CATIA 的出现,标志着计算机辅助设计技术从单纯模仿工程图纸的三视图模式中解放出来,首次实现以计算机完整描述产品零件的主要信息。曲面造型系统 CATIA 为人类带来了第一次 CAD 技术革命,改变了以往只能借助于油泥模型来近似表达曲面的工作方式。

20 世纪 70 年代末到 80 年代初,由于计算机技术的大跨步前进,CAD,CAM 技术也开始有了较大发展。尽管有了表面模型,CAM 的问题可以基本解决。但由于表面模型只能表达形体的表面信息,难以准确表达零件的其他特性,如质量、重心、惯性矩等,对 CAE 十分不利,最大的问题在于分析的前置处理特别困难。基于对于 CAD/CAE 一体化技术发展的探索,SDRC 公司于 1979 年发布了世界上第一个完全基于实体造型技术的大型 CAD/CAE 软件——I-DEAS。由于实体造型技术能够精确表达零件的全部属性,在理论上有助于统一 CAD,CAE,CAM 的模型表达,给设计带来了惊人的方便性,它代表着未来 CAD 技术的发展方向。可以说,实体造型技术的普及应用标志着 CAD 发展史上的第二次技术革命。

实体造型技术带来了算法改进和未来发展的希望的同时,也带来了数据计算量的极度膨胀。因此,在当时的硬件条件下,实体造型的计算及显示速度很慢,在实际应用中作设计显得很勉强。由于以实体模型为基础的 CAE 本身就属于高层次技术,普及面窄;另外,在算法和系统效率的矛盾面前,许多赞成实体造型技术的公司并没有下大力气去开发它,而是转去开发相对容易的表面造型技术,各公司的技术因此再度分道扬镳,实体造型技术因此没能在整个行业迅速推广。在此后的十年里,随着硬件性能的提高,实体造型技术又逐渐为众多 CAD 系统所采用。

进入 20 世纪 80 年代中期,CAD 技术的研究又有了重大发展。如果说在此之前的造型技术都属于无约束自由造型的话,CV 公司内部以高级副总裁为首的一批人提出了一种比无约束自由造型更新颖、更好的算法——参数化实体造型方法,这种算法主要有以下特点:基于特征、全尺寸约束、全数据相关、尺寸驱动设计修改。

由于种种原因,CV 公司内部否决了参数化方案,策划参数化技术的这些人在新设想无法实现的情况下集体离开了 CV 公司,并成立了参数化技术公司(Parametric Technology Corp,简称 PTC),开始研制名为 Pro/ENGINEER 的参数化软件。早期的 Pro/ENGINEER 软件性能很低,只能完成简单的工作,但由于第一次实现了尺寸驱动零件设计修改,使人们看到了它给设计者带来的方便性。

20 世纪 80 年代末,计算机技术迅猛发展,硬件成本大幅度下降,CAD 技术硬件平台成本从二十几万美元降到几万美元,很多中小企业也开始有能力使用 CAD 技术。由于其设计工作量并不大,零件形状也不复杂,更重要的是他们无钱投资大型高档软件,因此他们把目光投向了中低档的 Pro/ENGINEER 软件。PTC 也正是因为瞄准了这一中档市场,才迎合了众多

中小企业在 CAD 上的需求,一举取得成功。进入 20 世纪 90 年代,参数化技术变得比较成熟起来,充分体现出其在许多通用件、零部件设计上存在的简便易行的优势。踌躇满志的 PTC 也因此先行占领了低端 AutoCAD 市场,继而 PTC 公司又试图进入高端 CAD 市场,与 CATIA,SDRC,UG 等群雄在汽车及飞机制造业市场逐鹿。目前,PTC 在 CAD 市场份额排名已名列前茅。可以说,参数化技术的应用主导了 CAD 发展史上的第三次技术革命。

参数化技术的成功应用,使它几乎成为 CAD 业界的标准,许多软件厂商纷纷起步。但是技术理论上的认可并非意味着实践上的可行性。由于 CATIA,CV,UG,EDCLID 都在原来的非参数化模型的基础上开发集成了许多其他应用软件,在 CAD 方面也做了许多应用模块开发;重新开发一套完全参数化的造型系统将花费很大的人力财力。因此他们采用的参数化系统基本上是在原有模型基础上进行局部、小块的修补,这样的技术称为复合建模技术。

这种复合建模技术并非完全基于实体,难以全面应用参数化技术。由于参数化技术和非参数化技术内核有本质不同,用参数化技术造型后进入非参数化系统后还要进行内部卷转换,才能被系统接受,而大量的转换极易导致数据丢失或其他不利条件。这样的系统由于在参数化和非参数化两方面都不占优势,系统整体竞争力不高,只能依靠某些实用性模块上的特殊能力来增强竞争力。

SDRC 公司的开发人员积数年的参数化研究经验,发现参数化技术有许多不足。首先,全尺寸约束的硬性规定干扰和制约着设计者创造力和想象力的发挥;其次,如在设计中关键的拓扑关系发生改变,失去了某些约束特征也会造成系统数据混乱。因此,他们大胆地提出了一种更为先进的实体造型技术——变量化技术,作为今后的开发方向。从 1990 年到 1993 年,SDRC 公司投资 1 亿美元,于 1993 年推出了全新体系结构的 I-DEAS Master Series 软件。在早期的大型 CAD 软件中,这是唯一一家在 20 世纪 90 年代将软件彻底重写的厂家。

变量化技术既保持了参数化技术的原有优点,同时又克服了它的许多不足之处。它的成功应用,为 CAD 技术的发展提供了更大的空间和机遇。SDRC 几年来业务的快速增长,证明了它走的这条充满风险的研发道路是正确的。无疑,变量化技术成就了 SDRC,也驱动了 CAD 发展史上的第四次技术革命。

长期以来,国内 CAD 软件市场一直被国外软件所垄断,在国外 CAD 软件一统天下的情况下,技术垄断形成商业垄断,其价格十分昂贵,很大程度上限制了我国企业应用 CAD/CAM 技术实现制造业信息化的跨越式发展。在这一情况下,国家开始大力扶持自主知识产权 CAD/CAM 软件的开发,促使许多科研成果快速转化,经过近 10 年的发展,国产优秀 CAD 软件层出不穷,国产软件的性价比也显著提高,其功能更为强大,价格也更加优惠。国产二维 CAD 软件在功能、性能、系列化、售前售后服务等方面都有了较大的提升,软件功能已与国外知名产品相当,具备了与国外知名产品相匹敌的实力,并拥有了广泛的用户群,具备相当的品牌知名度,出现了清华英泰、北航海尔、浙江大天、武汉天喻和武汉开目等一批 CAD 软件企业,打破了国外产品一统天下的局面。

企业应用三维 CAD 进行产品创新设计已经是一种必然的趋势,三维设计符合人的思维习惯。在二维 CAD 普及的今天,三维 CAD 也就成为我国加快实现工业化和现代化的必然选择,其对制造业企业增强产品创新开发能力起到了巨大的推动作用,是制造业信息化建设不可或缺的工具。然而目前在我国制造业中普及三维 CAD 还存在很多现实的问题,三维 CAD 软件的产业化开发水平远不如二维 CAD 软件,因此,发展具有自主知识产权的三维 CAD 软件,

打破国外产品的垄断局面,成为一项非常迫切的任务^[5]。

CAD 技术经过几十年的发展,先后走过大型机、小型机、工作站、微机时代,每个时代都有当时流行的 CAD 软件。现在,工作站和微机平台 CAD 软件已经占据主导地位,并且出现了一批比较优秀、比较流行的商品化软件。下面分别介绍一些流行的可用于曲面造型的软件。

美国 SDRC 公司的 I-DEAS Master Series 软件采用 VGX(超变量化)技术,用户可以直观、实时地进行三维产品的设计和修改。VGX 有如下好处:不必像参数化造型系统那样要求模型“全约束”,在全约束及非全约束的情况下均可顺利地完成任务;模型修改不必拘泥于造型历史树,修改可基于造型历史树,亦可超越造型历史树;可直接编辑任意 3D 实体特征,无须回到生成此特征的 2D 线框初始状态;可就地对拖动方式随意修改 3D 实体模型,而无须仅以“尺寸驱动”一种方式来修改模型;模型修改许可形状及拓扑关系发生变化,而并非像参数技术那样仅仅是尺寸的数据发生变化;所有操作均为“一拖一放”方式,操作简便。该软件的 Master Surface 模块是建立复杂雕塑曲面的快捷工具,它基于双精度 NURBS,与实体模型完全集成。它支持各种曲线曲面造型方法,如拉伸、旋转、放样、扫掠、网格、点云等,强大的变量扫掠支持变截面、多轨迹线以及尺寸驱动,其结果是一个曲面集合或具有拓扑关系的曲面实体模型。该模型可参与全部几何造型操作、干涉检查、物性计算等。I-DEAS 提供了独特的变量成形工具,它基于最小能量法,使用先进的高层次操作,例如对直观的几何形状进行推挤、弯扭、相斥、吸引等,使底层的曲面曲线成型。也可以对真实的几何体直接进行交互修改,从而得到光顺的形状,而不像传统的那样对控制点、权及节点进行交互操作。该软件较完整地解决了主要的曲面造型问题。

美国优集(Unigraphics Solutions)公司的 UG 源于航空业、汽车业,以参数化实体几何造型核心为基础,采用基于约束的特征建模和传统的几何建模为一体的复合建模技术。其曲面功能包含于 Freeform Modeling 模块之中,采用了 NURBS、B 样条、Bézier 数学基础,同时保留解析几何实体造型方法,造型能力较强。其曲面建模完全集成在实体建模之中,并可独立生成自由形状形体以备实体设计时使用。而许多曲面建模操作可直接产生或修改实体模型,曲面壳体、实体与定义它们的几何体完全相关。UG 软件实现了面与体的完美集成,可将无厚度曲面壳缝合到实体上,总体上,UG 的实体化曲面处理能力是其主要特征和优势。

美国 PTC 公司的 Pro/Engineer 以其参数化、基于特征、全相关等新概念闻名于 CAD 界,其曲面造型集中在 Pro/SURFACE 模块。其曲面的生成、编辑能力覆盖了曲面造型中的主要问题,主要用于构造表面模型,实体模型,并且可以在实体上生成任意凹下或凸起物等。尤其是可以将特殊的曲面造型实例作为一种特征加入特征库中。Pro/Engineer 自带的特征库就含有如下特征:复杂拱形表面、三维扫描外形、复杂的非平行或旋转混合、混合/扫描、管道等。该软件的曲面处理仅适合于通用的机械设计中较常见的曲面造型问题。

美国 IBM 公司的 CATIA/CADAM(Dassault Systems 公司开发)是一个广泛的 CAD/CAM/CAE/PDM 应用系统。该系统有关曲面的模块包括:曲面设计(Surface design)、高级曲面设计(Advanced surface design)、自由外形设计(Free form design)、整体外形修形(Global shape deformation)、创成式外形修形(Generative shape modeling)、白车身设计(Body-in-white templates)等。CATIA 外形设计和风格设计解决方案对设计零件提供了广泛的集成化工具,该系统具有很强的曲面造型功能。

法国 Matra-DataVision 公司的 Euclid 集成系统是一个集机械设计与工厂设计于一身的

企业级并行工程解决方案,其曲面功能在“ASD 高级曲面设计”之中。曲面由 NURBS 和 Bézier 数学形式表达,通过强大的蒙皮、扭曲、放样、裁剪、联合等运算,系统能够形成复杂的外形。其实体造型功能可直接用于曲面,表现出突出的拓扑运算能力。例如,多曲面间的交、并、差运算;在多曲面间的空隙处填充成保持一致切矢、曲率的新曲面;构造相切于已知曲面的曲面等。Euclid 动态自由造型功能,实现了以曲面曲率进行动态曲面跟踪、编辑、控制的设计修改过程,很好地体现了交互技术的应用。Matra 公司的另一专业应用系统 Strim 专门针对复杂曲面 CAD/CAE/CAM,其曲面设计和模具制造能力优于 Euclid 系统。这主要表现在曲面模型质量检查器、曲面重建、逆向工程与工业造型设计等专业模块上。尤其是其数字化点加工能力,即可以根据坐标测量机测得的数据点直接进行加工程序的编制,而不必构造曲面模型。总之,这两个软件的曲面能力实力最强。Matra-DataVision 公司现已与 Dassault Systems 公司开展了合作。

美国 CV 公司的 CADDS5 软件的 NURBS 曲面设计模块是 CV 公司用以完成大型复杂曲面造型的专用工具。NURBS 模块集成于清晰造型的数据库结构中,但其强大的曲面裁剪使得曲面构成的实体可贯穿于参数设计、详细设计、加工、分析的全过程。其特点主要如下:允许由较少的低阶曲线和曲面构造复杂形体,使得曲面编辑和修改操作快速而稳定;交互地连续修改曲线曲面;局部编辑能力;多个连接曲面形成复合曲面并缝合成实体;曲线和曲面的质量评估。CADDS5 软件全面地解决了曲面造型中的主要问题,计算稳定,使用灵活,对于精确复杂的曲面设计具有较强功能。

随着像 WINDOWS/NT 这样的 32 位操作系统的流行和微机性能的提高,使得在这些环境下实现高级曲面造型已经成为可能。现在主要有两种形式的软件:一种是从 UNIX 平台移植到 NT 平台的,如 EDS 开始将 UG 向微机移植;另一种是从 WINDOWS 环境向上发展的系统,如 MDT(Autodesk 公司),SolidWorks,Solid Edge(此为 UG 公司并购 Intergraph 的机械软件产品)。

Solid Edge 采用 Parasolid 造型内核,零件设计应用全参数化及基于特征造型的技术,提供了如扫描、提拉、筋板、螺旋、切割、薄壁等功能,钣金设计可自动折弯工艺孔、自动展开和回折。这些高档微机 CAD/CAM 系统以其使用灵活、性价比高而广受注目。像 MATRA 的 Prelude 系统包含了 EUCLID 和 STRIM 80%的命令和功能,能够解决大部分曲面造型、分析、加工问题。MDT 以 ACIS 模型为核心,可以对 NURBS 曲面进行多种几何处理并且结合到统一的实体环境中。

纵观 CAD 技术近 40 年的发展历程,众多厂商的成败无不与其技术发展密切相关。CAD 技术基础理论的每次重大进展,无一不带动了 CAD/CAE/CAM 整体技术的提高以及制造手段的更新。技术的发展永无止境,没有一种技术是常青树,CAD 技术将一直处于不断的发展和探索之中。正是这种此消彼长的互动与交替,造就了今天 CAD 技术的兴旺与繁荣,促进了工业的高速发展。

第一篇 基础篇

第 1 章 曲线参数表示的基础知识

曲线有显式、隐式和参数表示,但从几何造型的角度看,参数表示较为理想。对于参数曲线,涉及的基本问题有曲线的度量、连续性、重新参数化及相应的数据点的参数化。本节将围绕这些参数曲线的基础问题进行讨论。

1.1 显式、隐式和参数表示

曲线有参数表示和非参数表示之分,非参数表示又分为显式表示和隐式表示。

1.1.1 显式表示

对于一条平面曲线,显式的非参数方程的一般式是 $y = f(x)$ 。其中, x 值与 y 值是一一对应的,所以它不能表示封闭或多值曲线。

1.1.2 隐式表示

隐式的非参数方程可以表示封闭或多值曲线,一般式为 $f(x, y) = 0$ 。

所有非参数方程(无论显式还是隐式)都有以下特征:① 与坐标轴相关的;② 会出现斜率为无穷大的情况(如垂线);③ 对于非平面曲线难以用常系数的非参数化函数表示;④ 不便于计算和编程。鉴于此,考虑用参数方程表示曲线。

1.1.3 参数表示

在曲线的参数表示中,曲线上每一点的坐标均表示成参数式。如:令参数为 t ,则曲线上一点的矢量表示为

$$p(t) = [x(t) \quad y(t) \quad z(t)], \quad t \in [t_1 \quad t_2], \quad \text{且 } t_1 \leq t_2$$

最简单的参数曲线是平面直线段,如已知其两个端点坐标分别是 $[1, 2]$ 、 $[4, 3]$,此直线段的参数表达式为

$$p(t) = [1 \quad 2] + [3 \quad 1]t, \quad 0 \leq t \leq 1$$