

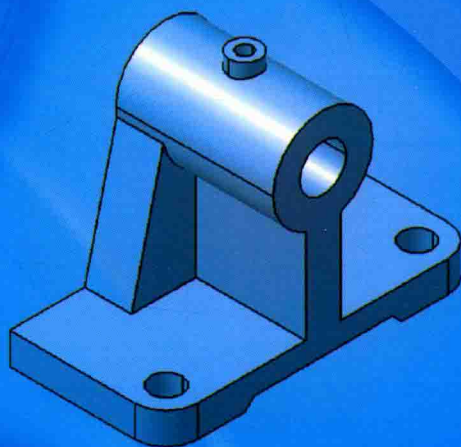


高等学校通用教材

CAD技术及其应用 (MATLAB版)

CAD JISHU JIQI YINGYONG

刘 浩 刘胜兰 张 臣 编著
王小平 审校



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



高等学校通用教材

CAD 技术及其应用 (MATLAB 版)

刘 浩 刘胜兰 张 臣 编著
王小平 审校

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书基于 MATLAB 编程训练,对 CAD 建模的基本理论进行介绍,同时结合 CATIA 软件操作介绍其在工程中的应用。第 1 章,介绍 CAD 建模技术的发展历史;第 2 章,讲述工件的三维几何模型在计算机内存储的基本方式,包括基本原理、数据结构和典型存储方式(STL 网格);第 3~8 章,讲述自由曲线曲面造型的相关理论和算法,并在每个算法后都给出了 MATLAB 程序;第 9~11 章,介绍特征建模、参数化建模的基本概念和 CATIA 软件的相关功能;附录,介绍 MATLAB 编程的入门知识。

本书既可以作为机械工程类专业本科高年级 CAD 课程的教材,也可以作为 CAD、CAGD 和计算机图形学领域学习者和研究者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

CAD 技术及其应用: MATLAB 版 / 刘浩,刘胜兰,张臣编著. -- 北京:北京航空航天大学出版社,2018.12

ISBN 978-7-5124-2876-8

I. ①C… II. ①刘… ②刘… ③张… III. ①计算机辅助设计—AutoCAD 软件 IV. ①TP391.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 261925 号

版权所有,侵权必究。

CAD 技术及其应用(MATLAB 版)

刘 浩 刘胜兰 张 臣 编著

王小平 审校

责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82317026

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:15 字数:384 千字

2019 年 2 月第 1 版 2019 年 2 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2876-8 定价:48.00 元



若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前言

1. 编写背景

本书是为飞行器设计与制造专业的本科课程编写的,同时也适用于船舶、汽车及其他复杂外形工业产品的设计与制造的相关专业。它包含三个部分:CAD 建模基础理论、MATLAB 编程实验和 CATIA 软件相关功能的介绍。编者在 CAD 课程多年的教学过程中发现,仅仅讲述算法原理很难让学生理解,特别是机械类专业的学生,因为这类专业的学生在学习中很少接受数值计算类的思维训练和专业训练。因此,我们迫切需要一本把数值计算编程训练和 CAD 基础理论教学两个内容融汇在一起的教材,同时该教材也应该体现飞行器设计与制造专业的特点,这正是编写本书的初衷。

2. 基本内容

从各级各类学校开设的各种以“CAD 技术”为主题的课程来看,我们认为其讲授内容可以分为两类:第一类是针对某一款软件(如 CATIA、UG、Solidworks 等)围绕本专业的应用需求讲述该软件的操作方法;第二类是讲述 CAD 建模的基本原理和基础技术,以便学生能初步具备 CAD 软件的研发能力和对 CAD 基础理论深入学习的能力。本教材面向的使用对象是第二类的学习者,但也可以作为所有 CAD 学习者的参考书。

本书论述的核心内容是经典自由曲线曲面造型理论,这部分内容也是 CAGD(Computer Aided Geometric Design)的基础性内容。笔者认为,这种关于算法的学习内容具有很强的实践性,即需要学习者编程实现所学算法才能更好地理解这些算法,对于初学者更是如此。因此,本书在每个算法后均给出了其 MATLAB 语言程序,以供读者参考。这样,读者在学习 CAD 几何建模基础理论的同时,也学习了 MATLAB 语言,提高了自己的编程能力。

对应于罗列的几何建模基础理论,本书还介绍了 CATIA 软件的相关功能,以便让读者体会到这些基础理论在 CAD 软件中的应用。与介绍专业 CAD 软件用法的书籍不同,本书对软件功能的介绍是围绕所罗列的基础理论进行的,目的是让读者根据软件操作更好地理解基础理论体系中的基本概念和算法。

3. 教学建议

本书的内容应该尽量在多媒体教室讲授。其中所有算例的计算结果(包括数据和图形)都应该尽量在教学现场实时产生,以便学生能亲眼目睹教师的操作,感受操作过程;对于涉及 MATLAB 内容较多的章节,不宜采用 PowerPoint 制作的幻灯片作为电子讲稿,编者建议学生直接阅读课本,听教师讲解其中的程序结构和语句,并观看教师的程序操作演示;学习本书的每个学生都应该在计算机上亲手演练其中的算例。在掌握和理解算法原理的基础上,要特别重视调试程序的技巧和方法。

全书的理论授课时间为 28~36 小时,教师编程辅导时间为 8 小时左右,学生独立编程训练时间不少于 20 小时。

课程考核以基础理论考试为主,学生须全面掌握这些基础知识,为后续学习打下基础。本书在有关自由曲线曲面造型内容的每章后给出了练习题,教师应让学生独立完成,使其把握基础理论的重点和相关解题方法。

4. 致 谢

为了编写本书,张丽艳、刘胜兰、张臣老师提供了他们多年教学用的幻灯片以及在教学过程中使用的相关资料,刘浩、刘胜兰和张臣老师拟定了本书的内容和章节安排,刘浩老师根据给定的章节安排对教学幻灯片和相关资料进行了分析和整理,重新编写了理论内容、MATLAB 程序和 CATIA 软件操作的内容。王小平老师对本书的内容进行了审校。本书的初稿先后在五年的教学中使用,并根据教学效果进行了修改和补充。在编写和修改的过程中,本课程的教师与学生以及其他相关课程的教师提出了宝贵意见。硕士研究生刘睿、刘磊对全书的内容进行了初步排版和查错。本书在编写过程中,先后得到江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (Top-notch Academic Programs Project of Jiangsu Higher Education Institutions, 英文简称: TAPP, 项目号 PPZY2015A021)、校级“十三五”重点教材建设项目、机电学院 2017 年课程与教材资源建设项目的支持。

感谢北京航空航天大学出版社对本书的支持!北京航空航天大学出版社联合 MATLAB 中文论坛 (<http://www.iLoveMatlab.cn>) 为本书设立了在线交流板块,地址: <http://www.ilovematlab.cn/forum-273-1.html> 欢迎广大读者在此交流!编者会第一时间在 MATLAB 中文论坛勘误 (地址 <http://www.ilovematlab.cn/thread-562063-1-1.html>), 也会根据读者要求陆续上传更多的示例程序和相关知识链接。希望这本不断“成长”的书能最大限度地解决您在学习、研究和工作中遇到的 CAD 几何建模算法和编程问题。

由于编者的阅历、水平和时间有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请广大读者不吝指正。

编 者

2018 年 9 月

常用符号说明

斜体: 普通变量。

黑斜体: 矩阵或者向量。在本教材中, 我们认为点的坐标是向量(或称矢量), 表示坐标原点与该点连接形成的有向线段。在很多文献中, 也用 $\vec{\bullet}$ 表示向量, 例如, $\vec{r}$ 。本书约定, 在手写条件下, 例如, 练习题、考卷或者教师板书中向量用 $\vec{\bullet}$ 表示。如果是矩阵, 在手写条件下, 斜体字符前面用“矩阵”二字说明, 例如, 矩阵 M 。

$r(\cdot), r(\cdot, \cdot)$: 曲线或者曲面的参数矢量方程, 如 $r(u), r(u, v)$, 其中 u, v 表示参数变量, 即参变量。

s : 曲线的弧长参数。

$\dot{r}, \ddot{r}$: 曲线的弧长参数矢量方程对弧长的一阶导数和二阶导数(特指参数是弧长)。

r', r'' : 曲线的一般参数矢量方程对参数的一阶导数和二阶导数(一般参数可以是弧长, 也可以不是弧长)。

t 或 T : 曲线或者曲面的切矢量。

n 或 N : 曲线或者曲面的法矢量。

B : 曲线的副法矢量。

κ (希腊字母): 曲线的曲率。

τ (希腊字母): 曲线的挠率。

$B_{i,n}(u)$: Bernstein 基函数。

$N_{i,k}(u)$: B 样条基函数。

$N_{i,k}^j(u)$: 均匀 B 样条基函数。在本书中, 最常用的是 $N_{i,3}^j(u)$, 其次是 $N_{i,2}^j(u)$ 。这个符号是本书特别提出的, 主要是方便初学者从理论证明的角度理解“ $N_{i,k}^j(u)$ 是 $N_{i,k}(u)$ 的特例”这个事实。

$U=[u_0, u_1, \dots, u_n], V=[v_0, v_1, \dots, v_n]$: 递推定义中 B 样条基函数用到的节点向量。通常把 U 作为定义 B 样条曲线和 NURBS 曲线的基函数的节点矢量, U, V 作为定义 B 样条曲面和 NURBS 曲面的基函数的节点矢量。

$V_0, V_1, \dots, V_n$: Bézier 曲线和曲面、B 样条曲线和曲面、NURBS 曲线和曲面的控制顶点。在本书和很多文献中, 曲面的节点矢量和控制顶点都用到 V , 其含义是比较容易区分的。在表示控制顶点时, V 带有下标。如果没有下标, 通常是节点矢量。

ω : NURBS 曲线和曲面控制顶点的权因子。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 CAD 技术的内涵	1
1.2 CAD 技术的产生和发展	2
1.2.1 CAD 技术的诞生	2
1.2.2 制造工业对复杂曲线曲面造型技术的需求	3
1.2.3 曲线曲面造型方法的探索	4
1.2.4 三维形体表示方法的发展	5
1.2.5 参数化建模和特征建模	5
1.3 CAD 技术在我国的应用和发展	6
1.4 CAD 的相关技术	8
1.5 数字化设计制造软件之间的数据交换	9
1.6 本书的内容及特点	10
思考与练习	10
第 2 章 几何模型的计算机表示	11
2.1 三维形体的计算机表示	11
2.1.1 线框模型	11
2.1.2 表面模型	12
2.1.3 实体模型	14
2.1.4 半边数据结构	17
2.2 STL 网格	18
2.2.1 STL 网格数据的基本格式	18
2.2.2 STL 网格数据的 MATLAB 程序读取和显示	19
思考与练习	23
第 3 章 自由曲线曲面造型的数学基础	24
3.1 参数方程和矢量	24
3.2 曲线曲面的 MATLAB 绘制	27
3.2.1 曲线的绘制原理和方法	27
3.2.2 曲线的参数方程与曲线绘制	29
3.2.3 曲面的 MATLAB 绘制	31
3.3 矢函数的导数及其应用	33
3.4 曲线的自然参数方程和曲率	35

3.5	曲线活动标架	38
3.6	参数曲线段拼接的连续阶	38
3.7	曲面上的曲线	40
3.8	曲面上的几何量	42
3.9	曲面的法线方程和切平面方程	43
3.10	曲面的曲率	44
3.10.1	曲面曲率的描述	44
3.10.2	高斯曲率和平均曲率的实例	45
3.11	高斯曲率和平均曲率的计算	47
3.11.1	曲面的第一基本形式	47
3.11.2	曲面的第二基本公式	47
3.11.3	法曲率的极值	48
	思考与练习	48
第 4 章	Ferguson 曲线和参数三次样条曲线	50
4.1	参数样条曲线的应用和起源	50
4.2	预备知识:多项式与向量空间	51
4.3	参数三次曲线段	51
4.3.1	曲线段表达式的推导	51
4.3.2	绘制 Ferguson 曲线段的 MATLAB 代码	54
4.4	参数三次曲线段的拼接	54
4.5	Ferguson 曲线的程序实现	58
4.6	参数三次样条曲线	62
4.6.1	任意区间的参数三次样条曲线段	63
4.6.2	切矢量的计算	63
4.7	“大挠度”问题	67
4.8	MATLAB 中的插值三次样条函数	69
	思考与练习	74
第 5 章	Bézier 曲线	75
5.1	Bézier 曲线的产生和应用	75
5.2	预备知识:凸包与二项式定理	76
5.3	Bézier 曲线的定义	77
5.4	Bézier 曲线的 MATLAB 绘制	77
5.5	Bézier 曲线的性质	79
5.6	Bézier 曲线的递推算法	81
5.7	Bézier 曲线递推算法的程序实现	83
5.8	Bézier 曲线的分割	86
5.9	Bézier 曲线的拼接	87

思考与练习	88
第 6 章 B 样条曲线	90
6.1 均匀三次 B 样条曲线	90
6.1.1 均匀三次 B 样条曲线段	90
6.1.2 均匀三次 B 样条曲线段的拼合	92
6.1.3 均匀三次 B 样条曲线的程序实现	93
6.1.4 控制顶点与造型效果	95
6.1.5 均匀三次 B 样条曲线插值	96
6.2 均匀二次 B 样条曲线	97
6.3 B 样条基函数	98
6.3.1 B 样条基函数的卷积定义	98
6.3.2 B 样条基函数的递推定义	100
6.3.3 非均匀 B 样条基函数	101
6.3.4 非均匀 B 样条基函数的 MATLAB 程序	106
6.4 非均匀 B 样条曲线	107
6.4.1 非均匀 B 样条曲线的定义	107
6.4.2 节点矢量的确定	109
6.4.3 非均匀 B 样条曲线的特例	110
6.4.4 非均匀 B 样条曲线的 de-Boor 算法	113
6.4.5 de-Boor 算法的程序实现	113
6.4.6 B 样条曲线的插值	116
6.4.7 MATLAB 中的 B 样条函数	117
思考与练习	123
第 7 章 NURBS 曲线	125
7.1 NURBS 曲线的表达式	125
7.1.1 NURBS 曲线与非均匀 B 样条曲线	125
7.1.2 NURBS 曲线的程序实现	126
7.2 齐次坐标和透视投影	127
7.2.1 齐次坐标的几何意义	127
7.2.2 NURBS 曲线的几何意义	127
7.3 权因子的几何意义	129
7.4 圆锥曲线的 NURBS 表示	131
7.5 圆弧的 NURBS 表示	132
7.6 IGES 文件中的 NURBS 曲线	134
7.7 数控加工中的 NURBS 插补	135
7.8 CATIA 软件中的自由曲线构造	137
7.8.1 草图模式下的曲线构造	137

7.8.2 线架构下的曲线构造	139
7.8.3 FreeStyle 下的曲线构造	141
思考与练习	143
第 8 章 自由曲面造型方法	144
8.1 张量积曲面	144
8.1.1 Ferguson 曲面片	144
8.1.2 Ferguson 曲面片的构造代码	148
8.1.3 Bézier 曲面片	150
8.1.4 均匀双三次 B 样条曲面片	157
8.1.5 非均匀 B 样条曲面	159
8.2 参数样条插值曲面	163
8.2.1 Ferguson 曲面的构造原理	163
8.2.2 参数双三次样条曲面的构造原理	165
8.2.3 参数样条插值曲面的程序实现	167
8.3 NURBS 曲面	167
8.3.1 NURBS 曲面方程	167
8.3.2 NURBS 曲面的程序实现	170
8.4 Coons 曲面	172
8.4.1 简单 Coons 曲面片	173
8.4.2 双三次 Coons 曲面片	177
8.4.3 定义曲面的三种基本方法	179
8.5 CATIA 中的曲面创建和操作	181
思考与练习	187
第 9 章 特征建模	189
9.1 特征建模概述	189
9.2 基础特征	192
9.2.1 创建凸台	192
9.2.2 创建凹槽	192
9.2.3 创建旋转体	194
9.2.4 创建旋转槽	194
9.2.5 创建孔	194
9.2.6 创建肋	196
9.2.7 创建开槽	196
9.2.8 创建多截面实体	196
9.3 特 征	198
9.3.1 创建分割	198
9.3.2 创建厚曲面	198

9.3.3 创建封闭曲面	199
9.3.4 创建缝合曲面	199
9.4 修饰特征	200
9.4.1 创建倒圆角	200
9.4.2 创建倒角	201
9.4.3 创建拔模	201
9.4.4 创建箱体	202
第 10 章 参数化建模	204
10.1 参数化建模技术概述	204
10.2 草图中的参数化建模	205
10.3 特征建模与参数化	210
10.4 利用用户参数和公式驱动图形	211
第 11 章 MBD 技术	216
11.1 MBD 技术概述	216
11.2 MBD 建模过程介绍	217
11.2.1 视图的确定	217
11.2.2 三维标注	218
附录 A MATLAB 编程入门	222
A.1 初识 MATLAB 界面	222
A.2 子函数及其调用	225
A.3 断点设置与程序调试	226
参考文献	227

第1章 绪论

本章在论述 CAD 技术内涵的基础上,详细介绍了国内外 CAD 技术的发展历史以及在数字化设计制造技术体系中 CAD 技术与其他相关技术的联系。通过本章的学习,读者不但可以了解本书的学习内容和学习要求,还可以了解 CAD 技术的发展历程以及在相关工程领域中的应用。

1.1 CAD 技术的内涵

CAD (Computer Aided Design)是面向产品设计或者工程设计,使用计算机系统辅助设计者进行建模、修改、分析和优化的技术。它是随着计算机的出现而兴起的一门多学科综合应用的技术,主要包含以下两个方面:

(1) 产品或者工程几何外形的计算机描述、编辑和显示。例如,在计算机内部采用某种方式表示和显示一个立方体,或某个零件的外形,或某架飞机的外形;采用一定的方法对工件的外形根据需要进行修改;对于计算机中的几何模型,以某种方式显示在计算机屏幕上使得用户以最直观的视觉方式获得关于零件的尽可能多的信息,包括零件的显示颜色、放置方位和尺寸标注等。

这方面的内容为 CAD 软件的研发人员和相关科研人员所重视。他们通常在工程应用需求的基础上,综合相关学科的知识(例如,微分几何、解析几何、计算几何、数学分析、线性代数,以及某些特定学科的专业知识),设计一定的算法(例如曲线和曲面的构造算法),再用相关计算机语言写成程序模块,最后在诸多程序模块的基础上形成面向某些特定领域的 CAD 软件或者通用 CAD 软件。

目前,CAD 软件的研发分工已经非常精细,一般可以划分为两个主要领域:几何核心的开发和面向工程需求的软件开发。几何核心开发的一个主要内容是基于几何造型理论设计相关算法(例如曲线、曲面的等距,求交和裁剪的算法),再用计算机语言编程形成函数库。现在常用的几何核心有:Parasolid、ACIS 和 OpenCASCADE。Parasolid 为 UG、SolidWorks、CAXA 等 CAD 软件所用;ACIS 为 AutoCAD、CATIA 等软件所用;与前两款几何核心相比,OpenCASCADE 是开源、免费的函数库,可以用来开发中、小型软件。几何核心是 CAD 软件最重要的组成部分,决定着 CAD 软件的性能。面向工程需求的 CAD 软件运行的基本过程是:通过用户交互构造几何核心中相关函数所需要的运行条件,再调用这些函数进行计算,从而建立和修改所需要的工程对象的几何模型。

(2) 以描述某个具体有形的对象(如工件、建筑物、服饰、动画形象等)为目的,利用相关的软件进行绘图或者建立三维的几何模型。例如,利用 AutoCAD 绘制工程图,利用 CATIA 软件建立某个零件的三维模型,利用 3D MAX 软件建立某个动画形象的三维模型等。

这方面的内容是某些特定领域的工程技术人员需要掌握的技能。例如,机械工程领域的相关人员可能需要熟练掌握 UG 或者 CATIA 的用法,土木工程领域的技术人员则需要利用

AutoCAD 软件绘制工程图,服装设计师则可能需要利用 Dress Assistant 软件完成某款时装的设计和修改。这些特定工程技术领域的人员通常不需要掌握软件几何核心的基础理论,也无须编写开发软件,他们只需要掌握这些软件的使用法,完成他们所构想的几何模型的设计即可。

1.2 CAD 技术的产生和发展

1.2.1 CAD 技术的诞生

CAD 技术最基本的任务是在计算机系统中建构和修改产品的几何模型,因此,CAD 技术起源于计算机交互式图形学。1946 年研制成功的第一台电子计算机 ENIAC 仅仅以数值运算为目的,而将计算机应用于生成图形和精密加工则滞后了一段时间。1950 年,美国麻省理工学院(简称 MIT)在旋风 I 型计算机显示器上生成了简单图形,接着又参与了美国国防部战术防空系统 SAGE 的研制。为了保护美国本土不受敌方远程轰炸机携带核弹的突然侵袭,设想在美国各地布置一百多个雷达站,将监测到的敌机进袭航迹用通信网迅速传送到空军总部。空军指挥员从总部的计算机显示器上跟踪敌机的行踪,命令就近军分区进行拦截。SAGE 系统有很多公司参与开发,整个技术方案由 MIT 林肯实验室负责制定,于 1957 年投入试运行。当时使用的显示器是 19 英寸阴极射线管,即在大屏幕真空中用加热的灯丝发射电子束,经过聚焦和加速,轰击屏幕上的荧光粉涂层,产生亮点。该显示器用两对偏转线圈分别控制电子束沿水平和垂直方向的偏移。将需要在屏幕上显示的飞机航迹的各点坐标通过显示处理器转换成两对偏转线圈的控制电压,就可以精确制导电子束在屏幕上的落点位置,画出航迹线。当时还设计了一种人机交互工具,称作光笔。用手握住光笔对准屏幕上的某一显示线条或标注的字符,光信号脉冲就进入笔端镜头,通过光导纤维束传向主机,发出中断申请,同时冻结显示处理器中对应光点在屏幕上的坐标位置,就可以进一步查询屏幕上某一显示对象的其他信息或向计算机输送指令。这种交互操作方式很像我们现在使用鼠标来选择菜单和拾取图形。

SAGE 计划并未完全实施,到了 20 世纪 60 年代中期就下马了,但是它的研究成果却在民用工业中得到发扬,使传统的工程设计绘图方法发生了革命性变化。将 SAGE 计划中的光笔交互图形技术应用到工程绘图中来,要归功于伊凡·萨瑟兰德 (Ivan E. Sutherland)。他在 MIT 进一步完善了光笔系统,并于 1963 年完成了题为《Sketchpad:人机图形通信系》的博士论文,提出了使用键盘和光笔在计算机屏幕上进行交互设计绘图的一系列操作技术,以及将图形分解为子图和图元的层次数据结构,为 60 年代中至 70 年代末计算机辅助绘图技术的大发展奠定了原型示范基础。

1964 年秋,IBM 公司着手开发交互图形终端的第一代产品 IBM2250,采用刷新式随机扫描原理,用光笔作为交互输入手段,并且配有一组 32 个功能键,以便执行画直线、圆弧、虚线、标注尺寸、提取子图等宏命令。IBM 公司还与美国通用汽车公司合作,开发出 DAC-1 计算机辅助设计系统。洛克希德飞机公司和麦克唐纳飞机公司也各自独立在 IBM2250 上开发了二维绘图系统,前者称为 CADAM,后者称为 CADD。从 20 世纪 60 年代末起,相关公司逐渐在这些系统中增加曲线和曲面功能、数控加工编程功能等,形成了最早的计算机辅助设计/制造(简称 CAD/CAM)系统。从 1974 年起,CADAM 正式作为商品向外界转让,成为 20 世纪

70年代至80年代中期IBM主机上应用最广的第一代CAD/CAM软件产品^[1]。

1.2.2 制造业对复杂曲线曲面造型技术的需求

当光笔图形显示器和数控绘图机、数控机床应用于设计和加工规则形状的产品时,现有的三角、代数等数学工具已经足以应付编程中的算法设计需要。直线、圆、圆柱面、圆锥面和球面等的计算方法已经相对定型。而对于飞机、汽车、船舶、叶轮等的复杂外形曲面设计,恰好是最能体现CAD/CAM技术优越性的领域,20世纪80年代以前还缺乏一种新的数学表达工具,以改变当时生产中普遍采用的利用模线、样板、主模型、标准样件等一整套物理模型来保证曲面外形准确度和相关零部件装配协调性的手工操作。

现以飞机制造为例来说明模线、样板和主模型的概念。用小比例尺绘制设计的图纸只能粗略决定飞机的外形轮廓线和重要的剖面线,这些曲线必须以实际尺寸画到由大张铝板拼成的桌面上。把图纸上的一条曲线放样成实际尺寸曲线的大致过程是:首先在图纸上采集该曲线的一批样点,测出样点坐标,把这些样点刻画在铝板上。再取一根样条(扁木条或塑料条)和数块压铁,用压铁在样点的位置固定样条,使样条成为通过样点的光顺曲线,即样条曲线。然后用刻刀将样条曲线刻画到铝板上,成为飞机外形的最终标准依据,称作模线。有了飞机外形的完整理论模线后,再在外形轮廓内绘制飞机的内部结构,称作结构模线,按照结构模线锉出样板以供生产零件使用。样板的品种很多,提供外形、内形、切面等标准依据,以便制造各种工艺装备,即成形模、加工夹具、检验夹具、装配夹具和型架等。标准工艺装备中还有一类表面标准样件,是用硬木或可塑树脂制造的1:1飞机局部外形,用来翻制蒙皮的成形模。在汽车工业中往往制作1:1的整车外形模型,称为主模型,也是用来翻制外表面钣金件(称为覆盖件)冲压模的型面。

根据以上简单介绍,我们来总结一下,这种建立在模线、样板、标准样件之上的生产方法有哪些缺点?第一是生产周期长。因为标准工艺装备必须从模线定型开始,一环扣一环的逐步投产。有了理论模线才能绘制结构模线,有了结构模线才能制造样板,有了成套样板才能启动标准样件的制造。机翼、机身、尾翼等所有样件和量规必须配套检查,这是一个复杂而庞大的协调体系。因此,一架新设计的飞机,从开始研制到投入稳定的成批生产,一般需要数年时间。第二是零部件之间的协调精度低。模线绘制以及样板和标准样件加工都是手工劳动,外形的复制环节多,误差积累大,导致部件铆接中经常使用垫片来消除缝隙。在20世纪80年代美国汽车制造业首先提出“5毫米工程”,力求提高车身冲压件的制造质量,使装配中的最大缝隙从原来的十多毫米降低到5毫米以内。90年代后又提出“2毫米工程”和“亚毫米工程”,获得成功,并在汽车工业推广应用这些新的技术措施。不过,只有从根本上改变原来的外形协调体系,全面推行产品数字化定义和数控技术,才有可能达到零件之间的配合要求。第三是设计差错多,改型困难。传统的设计绘图技术很难表达三维空间的几何关系。新机型研制中要用木料搭出模拟真实飞机的样机来布置驾驶员座舱内的仪表和操纵系统,铺设机身内的电缆、管道等。即使这样,图纸中的设计差错仍难以避免,经常发生尺寸不协调,零件、组合件相互干涉等问题。这种刚性的工艺装备结构和刚性的协调体系不利于飞机进行改型,而一种成功的飞机型号,必然会有多种衍生的改型机种,由此更加重了生产组织、管理上的困难。另外,全部生产工装占用了大量生产面积,而且很笨重,搬运和使用起来都很费力。一个飞机工厂一般都同时

有两三个以上型号在生产,增加了仓库保管和使用周转中的负担^[1]。为了克服上述困难,研究以复杂曲线曲面造型方法为基础的 CAD 几何建模技术,必须把实物模型改为数字化模型。

1.2.3 曲线曲面造型方法的探索

早在第二次世界大战期间,为了适应大批量生产战斗机的需要,国外飞机制造厂设计了一种用二次代数曲面构造飞机机身外形的方法。一般形式的三元二次代数方程可以写成:

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fzx + Hx + Iy + Jz = 1$$

式中包含了 9 个独立系数。这些系数的几何含义很难解释清楚,曲面形状无法显式控制,也不便于局部修改,所以后来发展了一种更直观的作图方法。如图 1.1(a)所示,首先构造二次曲线段。曲线 AEC 的首末点通过 $\triangle ABC$ 的底边端点,并与三角形的其他两边相切。 D 是底边的中点,曲线的拱高用肩点 E 通过 h 值控制。已知三角形底边的两点、两腰的斜率和二次曲线的拱高 h 这 5 个条件,就可以写出二次曲线的代数方程。在此基础上可以用分段二次曲线来逼近光滑曲线,图 1.1(b)中两条二次曲线的首末切边共线,这两条二次曲线形成一条光滑的曲线。从第二次世界大战中后期到 20 世纪 50 年代末,飞机工厂就是用这种方法建立飞机的数学模型来提高外形设计和模线绘制的精度和效率的。当时只有手摇计算器,整个计算方法很烦琐,通用性很差,因此还需要寻求更灵活简洁的曲线表达形式。

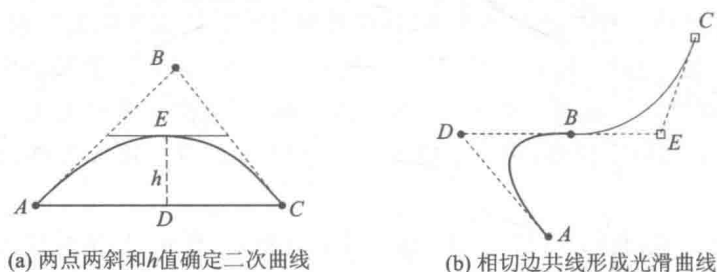


图 1.1 构造二次曲线段

1963 年,美国工程师弗格森(J. C. Ferguson)在波音公司进行飞机外形构造时首先使用了参数三次曲线和曲面,这是 CAD 几何建模技术中里程碑式的工作。在弗格森使用的曲线和曲面表达式中,每个系数都具有了明显的几何意义。此外,美国麻省理工学院教授孔斯(Steven A. Coons)和法国雷诺汽车制造公司的工程师贝齐埃(Pierre Bézier)的工作也是奠基性的。孔斯原来在 MIT 机械系执教,从事工程制图和画法几何的教学、研究工作,在很多飞机公司参与过飞机外形设计和曲面构造的工程实践,积累了丰富的经验。1964 年,他在 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。1967 年,英国飞机公司用孔斯方法来描述机翼、机身、螺旋桨的外形,开发出 NMG(数值主几何)的曲面造型软件,之后这套软件经过扩展后还应用于英国当时的舰船设计。美国麦克唐纳飞机公司将孔斯方法纳入到他们开发的“计算机辅助设计与绘图”CADD 系统中,不断充实曲线曲面操作功能,并逐步应用于 F15 战斗机的研制和生产中。1967 年,孔斯发表了另一篇题为《空间形状(Space form)CAD 曲面》的报告,发展了 1964 年的研究成果。此后,陆续出现了大量对于这一方法应用和推广的文献。1974 年 3 月在美国盐湖城犹他大学召开了第一届计算机辅助几何设计国际大会。大会的主题是“图形学与数学”,集中展示了计

计算机图形学的最新研究、开发和应用成果。建立在犹他州盐湖城的 Evans & Sutherland 公司也展出了他们的高档计算机图形显示器产品。这次大会发言中,被引用最多的开拓性研究成果有两方面,即孔斯曲面和贝齐埃曲线。大会公认孔斯和贝齐埃在计算机辅助几何设计中起了奠基性作用^[1]。

1.2.4 三维形体表示方法的发展

1968—1973 年,CAD 中的二维绘图和曲面造型已经取得了突破性进展,形成了公认的比较满意的技术体系,并开发了相应软件,已经小规模运用于生产中。于是,人们的注意力开始转入怎样才能更完整地表达产品的三维几何形状,使计算机能够“理解”产品数据的意义,从而获得一定程度的智能化分析和计算能力。线框模型是当时比较有代表性的三维零件表示方法,可以理解为用空间线条搭成铁丝笼状的框架。在计算机辅助设计中,为了方便设计人员的交互输入,需要首先定义一个工作平面,在工作面上构造二维图形,然后通过坐标变换,将画在工作面局部坐标系中的二维线条变换成产品总体坐标系中的三维线条。通过二维构图与三维变换相结合,在计算机里建立起零件的三维模型。这种建模方法原始而粗糙,没有脱离传统画法几何的范畴,完全靠人来一步一步操作。在计算机辅助设计中,计算机所起的作用与在二维绘图系统中相近,基本上处于同一水平。

在线框模型发展的同时,人们也在分别尝试使用曲面和基本体素(立方体、圆柱、圆锥等)表示三维形体的方法。在曲面表示三维形体方面,比较有代表性的工作是日本的 TIPS(技术信息处理系)。TIPS 用代数方程表示机械零件的规则曲面形状。例如,若判别一个空间点是在曲面之外、之内还是之上,只要将点的 (x, y, z) 坐标值代入曲面的代数方程中,计算方程的值是大于零、小于零,还是等于零即可得知。又如,用垂直于 x, y, z 坐标轴的三组密集平面去切割零件模型的所有表面,将求得的交线消除隐藏部分后就可得到零件立体图。当时的 TIPS 系统已是一个 CAD/CAM 集成系统的原型,可以自动计算零件的质量、惯性矩,自动生成有限元网格,产生数控加工的粗铣和精铣走刀轨迹。在基本体素表示三维形体方面,比较有代表性的工作是美国的 PADL 系统(零件与装配描述语言)。PADL 系统通过基本体素两两相加或相减来产生规则形状的机械零件,这种方法发展成为现在通称的 CSG(构造实体几何)表示法。

1973 年前后,剑桥大学 CAD 实验室开发了用体素表面求交的方法建立几何形体的边界表示法(Boundary Representation,简称 B-rep),并开发了试验系统。B-rep 表示法就是显式表示拼合形体的每张表面的有效边界范围,在体素拼合过程中,求出各个相交表面的交线,并沿交线将参与运算的两个体素的表面进行组合,从而形成一个整体。从 1968 年起至今,在实体造型技术几十年的发展历程中,世界各国曾经提出了各种各样的实现方案,也涌现出品种繁多的商品系统,但是经过应用实践的筛选,B-rep 和 CSG 成为两种非常有代表性的表示法,尤其是 B-rep 表示法,在具有复杂曲面外形的几何形体表示方面具有极大的优势^[1]。

1.2.5 参数化建模和特征建模

在几何建模的过程中,人们发现交互式的绘图方式很不利于几何模型的快速生成,而且几何模型一旦形成,修改起来也很不方便。为了克服这种困难,在 1987 年美国参数化技术公司

(简称 PTC)推出了参数化特征造型软件 Pro/Engineer,这在当时的 CAD 界引起了轰动。这种参数化设计方法是先在某一基准面上进行二维草图设计,可以随意设定和修改尺寸标注值,让计算机自动生成正规图;然后通过拉伸命令,将二维轮廓提升为三维柱体;再不断更换作图基准面,以二维轮廓为构架,最后扫成各种曲面形状。这时,设计零件的组成单元不再是单纯的几何体,而是赋以工程语义,例如箱体、凸缘、螺孔、销钉孔等,统称为特征(feature)。

与最初出现的 CSG 表示法中的构成几何模型的基本体素相比,基于参数化技术所设计的特征建模技术具有诸多优点,主要体现在:

(1) 突出了基准面的概念。因为一切尺寸标注都需要有计量的参考点,例如在零件图上标注尺寸公差和形位公差,在加工机床上定位毛坯和测量加工精度,在装配中分析装配尺寸链误差和检查工作面配合精度,都要用基准作为参照依据。设计过程中使用的基准面都要明确记录下来,并且给以唯一的标识号。

(2) 特征造型的建模过程实际上是让设计人员在工作面上绘制二维图,再让计算机自动产生三维边界模型。前者继承和发展了线框造型的人机界面优点,后者则隐蔽了实体的拼合过程。凡是添加凸台,一定是加法运算;凡是开出凹槽,一定是减法运算,这是由特征的语义所约定的。

(3) 通过详细记录设计对象的交互构建过程,可以方便地对三维模型进行修改。设计人员可以修改某些尺寸参数,让计算机自动生成更改尺寸后的零件形状。

参数化建模技术和特征建模技术不但为几何模型的修改提供了方便,使设计人员从烦琐的几何元素的形状调整中摆脱出来,而专注于零件的整体形状和性能的构思,而且极大地拓展了 CSG 表示法中基本体素的内涵,扩大了基本体素的范围,为构成几何模型的几何单元赋予了工程含义,使零件的建模过程更加符合工程技术人员的思维习惯。因此,这两种技术已经为现有 CAD 建模软件所普遍接受,成为 CAD 几何建模技术的重要组成部分^[1]。

1.3 CAD 技术在我国的应用和发展

我国 20 世纪 70 年代初以苏步青先生为代表,深入船厂开展数学放样和曲线光顺的应用研究,以中国科学技术大学常庚哲先生和北京航空学院熊振翔先生为代表,深入飞机工厂从事飞机外形曲面数学模型构造的研究,为我国 CAD 技术的研究和发展奠定了基础。1972 年,我国一些大学的教师先后到日本北海道大学冲野教郎教授的实验室访问,得到了 TIPS 源程序磁带和全套手册的馈赠,并成功地移植到 IBM 主机上运行。不过,我国 70 年代的计算机应用尚处于萌芽阶段,二维 CAD 图纸设计是我国最早应用的 CAD 技术。从 80 年代初,我国 CAD 技术应用经历了“六五”初步探索,“七五”技术攻关,“八五”普及推广,“九五”深化应用四个阶段^[2-3]。

“七五”期间机械工业部组织一些大学和科研院所分别开发了四套 CAD 通用支撑软件,并由相关厂、所、校合作开发了 24 种重点产品的 CAD 应用系统。1983 年 8 个部委在南通联合召开首届 CAD 应用工作会议,会上高校要求自主开发软件的呼声很高。1986 年我国启动 863 高技术计划,其中提到进一步深入研究 CAD 的可实施计划。1991 年,当时的国务委员宋健提出“甩掉绘图板”(后被简称为“甩图板”)的号召,我国政府开始重视 CAD 技术的应用推广,并促成了一场在工业各领域轰轰烈烈的企业革新。“甩图板”工程推动了二维 CAD 的普及和应用。该工程的推广不仅大大提高了设计质量、生产效率,而且通过多方案的比选优化,