

计算机图形学

孙立鏊 编著
惠 丽 主审

哈尔滨工业大学出版社
哈 尔 滨

内 容 提 要

本书主要介绍计算机图形学的基本原理和算法。全书共分七章，其内容包括：基本图形的生成算法、二维与三维几何变换、图形裁剪算法、曲线与曲面、消隐和真实感图形显示的基本原理及各种处理技术、几何造型与 HUST CAD 系统简介等。本书的特点是取材新颖、内容丰富，结合作者多年承担国家重点科技攻关项目开发 CAD 软件的实践体会，介绍国内外有关的最新研究成果，并给出 HUST CAD 系统有关数据结构、拼合算法、消隐和真实感显示等部分的实际程序。

本书可作为高等院校本科生和研究生学习计算机图形学和计算机辅助设计课程的教材，也可以供从事 CAD 和计算机图形技术研究的科技人员和其他有关的工程技术人员参考。该书的编写也参照了国务院学位委员会办公室编写的同等学力人员申请硕士学位有关《计算机图形学》综合水平全国统一考试大纲及指南，涵盖了大纲和指南所列的全部主要内容，因此该书也可作为同等学力人员申请硕士学位综合水平考试的学习参考书。

计算机图形学

Jisuanji Tuxingxue

孙立镛 编著

哈尔滨工业大学出版社出版发行

肇东市粮食印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 416 千字

2000 年 5 月第 1 版 2000 年 5 月第 1 次印刷

印数 1~3 000

ISBN 7-5603-1519-4/TP·147 定价 19.80 元

前 言

计算机图形学是近 40 年来飞速发展并取得巨大成就的新兴学科,自麻省理工学院林肯实验室 Ivan.Sutherland 发表的博士论文确定了计算机图形学作为一个崭新科学分支的地位以来,计算机图形学的基本理论、算法和技术不断完善和发展,新的概念和技术也不断涌现出来,例如特征造型、变量化设计和超变量几何技术(VGX)、支持网络环境的并行设计、PDM 技术等进一步推动了计算机图形学迅猛发展,并产生了新一代的 CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM 集成的商品化软件系统,推动了先进制造技术的革命。如今计算机图形学已广泛地应用于计算机辅助设计(CAD)、可视化(Visualization)、计算机艺术及娱乐、多媒体技术、管理办公自动化、地理信息系统、过程监控和指挥系统、计算机辅助教学等领域,发挥了巨大的作用。

本书作者在“七五”、“八五”、“九五”三个五年计划期间连续承担了 6 项国家重点科技攻关项目,进行三维 CAD 软件的开发及应用工程研究,其中两项成果分别获省部级科技进步一等奖和三等奖,作者所领导的计算机应用技术研究所 1996 年被国家科委等三单位授予全国 CAD 应用工程先进单位。现已形成一套在小型机、工作站和微机上具有自主知识产权的三维计算机辅助设计系统(HUST CAD 系统)。本书是作者在高校长期从事该领域的教学和科研工作的基础上,结合自主开发的三维 CAD 软件的经验,并参阅大量国内外有关文献资料编写而成的。

本书介绍的主要内容有:计算机图形学的确立、发展及应用,基本图形生成算法、区域填充算法,窗视变换和图形裁剪,二维和三维几何变换,三维投影及观察变换、曲线和曲面、几何造型理论方法及 HUST CAD 系统,图形消隐处理,光照模型及图形真实感显示技术。曲线和曲面部分介绍了三维参数样条曲线、Bezier 曲线、B 样条曲线,并给出了三次 Bezier 曲线与三次参数样条曲线与三次参数样条曲线及 B 样条曲线之间的转换,还介绍了双三次曲面、Bezier 曲面、B 样条曲面,给出双三次 Bezier 曲面与双三次 Coons 曲面表达式之间的关系及三次 B 样条曲线的反算。在图形真实感显示技术方面详细介绍了简单光反射模型、增量式光反射模型、简单光透射、光线跟踪技术和阴影生成

技术。同时给出用 Visual C++编写的几何变换、消隐、真实感显示的实现程序,供读者参考。在几何造型中介绍了实体造型 CSG、B-rep、曲面离散表示、特征造型技术、几何求交的主要算法及拼合运算,同时重点介绍了基于参数化设计和变量化特征造型的 HUST CAD 系统,还介绍了基于 CSG、B-rep 和 FDT(特征描述树)相结合的混合数据结构、基于特征的参数化实体模型及约束求解、特征编辑和面向装配的设计等。

本书可作为高等院校本科生和研究生学习计算机图形学和计算机辅助设计课程的教材,也可供从事 CAD 和计算机图形技术的科技人员及其他有关工程技术人员参考。本书的编写参照了国务院学位委员会办公室编写的同等学力人员申请硕士学位有关《计算机图形学》综合水平全国统一考试的大纲及指南,涵盖了大纲和指南所列的全部主要内容,故本书还可作为同等学力人员申请硕士综合水平考试的自学参考书。

本书由孙立鏊编著,并完成第一章、第四章、第七章的撰写工作,第五章由唐良红撰写,第二章由满志强撰写,第三章由孙大松撰写,第六章由宋双柱撰写。全书由惠丽主审。在本书编写过程中,董峥、任志才、杨长伟、张春祥、胡立坤等同学校对了文稿,满志强和李胜利认真绘制了全书的插图,许鹏帮助录入文字,在此对他们的辛勤劳动表示感谢,此外也对该书作为教材使用时提出宝贵意见和建议的同志表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点和不足,恳切希望广大读者和同行不吝指正。

作者
1999年12月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 计算机图形学的研究内容	1
1.2 计算机图形学的确立	1
1.3 图形显示软件包及其标准化	2
1.4 计算机辅助几何设计	3
1.5 CAD/CAM/CAE 软件	4
1.6 计算机图形学的应用	7
第二章 图形算法基础	10
2.1 画线算法	10
2.1.1 DDA 画线算法	10
2.1.2 Bresenham 画线算法	11
2.1.3 中点画线法	13
2.1.4 并行画线算法	14
2.2 画圆弧算法	14
2.2.1 一般方法	14
2.2.2 中点画圆算法	15
2.2.3 Bresenham 生成圆弧算法	17
2.3 区域填充算法	18
2.3.1 区域填充的基本方法	18
2.3.2 扫描线多边形填充算法	20
2.3.3 边填充算法	26
2.4 窗视变换	28
2.4.1 坐标系	28
2.4.2 窗口和视区	28
2.4.3 窗视变换	29
2.5 图形裁剪	30
2.5.1 点的裁剪	30
2.5.2 直线的裁剪	30
2.5.3 多边形裁剪	36
2.5.4 曲线和文字的裁剪	37
2.5.5 三维裁剪	38
第三章 图形变换	40
3.1 二维图形几何变换	40
3.1.1 二维几何变换的基本原理和解析表示	40
3.1.2 齐次坐标与二维变换的矩阵表示	43
3.1.3 复合变换	44
3.2 三维图形几何变换	45
3.2.1 齐次坐标	45

3.2.2	平移变换	46
3.2.3	局部比例变换	46
3.2.4	整体比例变换	47
3.2.5	错切变换	47
3.2.6	旋转变换	47
3.3	三维投影变换	49
3.3.1	投影分类	49
3.3.2	正投影	50
3.3.3	透视投影变换	53
3.4	三维观察变换	54
3.4.1	三维观察坐标系	54
3.4.2	观察体	55
3.4.3	规范化观察体	56
3.4.4	世界坐标系到观察坐标系的变换	56
3.5	HUST CAD 几何变换程序	58
第四章	曲线与曲面	68
4.1	平面规则曲线	68
4.1.1	圆锥的曲线	68
4.1.2	平摆线	70
4.2	三次参数样条曲线	72
4.3	Bezier 曲线	75
4.3.1	二次 Bezier 曲线	76
4.3.2	三次 Bezier 曲线	77
4.3.3	三次 Bezier 曲线与三次参数样条曲线间的关系	80
4.4	B 样条曲线	80
4.4.1	二次 B 样条曲线	81
4.4.2	三次 B 样条曲线	84
4.4.3	三次 B 样条曲线的反算	87
4.5	双三次曲面	89
4.5.1	双三次曲面代数形式	89
4.5.2	双三次曲面的几何形式	89
4.6	Bezier 曲面	96
4.6.1	Bezier 曲面的数学表达式	96
4.6.2	双二次 Bezier 曲面	97
4.6.3	双三次 Bezier 曲面	97
4.6.4	双三次 Bezier 曲面与双三次 Coons 曲面表达式之间的关系	104
4.7	B 样条曲面	105
4.7.1	双二次 B 样条曲面	105
4.7.2	双三次 B 样条曲面	106
4.8	Bezier 曲线和 B 样条曲线之间的转换	112
第五章	几何造型与 HUST CAD 系统	114
5.1	几何造型中物体的定义及性质	114
5.1.1	物体的定义	114
5.1.2	物体的边界及其拓扑关系	115
5.1.3	正则物体的性质、欧拉公式及欧拉操作	117

5.2 几何造型的理论基础	118
5.2.1 线框模型	119
5.2.2 曲面模型	120
5.2.3 实体模型	120
5.2.4 特征模型	121
5.2.5 产品模型	121
5.3 物体的常用表示方法	122
5.3.1 八叉树表示法	123
5.3.2 曲面离散化近似表示法	125
5.3.3 构造的实体几何表示法(CSG 树表示)	129
5.3.4 边界表示法(B-rep)	130
5.3.5 CSG 与 B-rep 的混合表示	131
5.3.6 特征表示	132
5.4 实体表示的数据结构	133
5.4.1 边界表示的翼边结构	133
5.4.2 改进的翼边结构	134
5.4.3 基于 B-rep、CSG 和 FDT 的混合表示模型	135
5.5 几何求交中的主要算法	139
5.5.1 点与各几何元素的位置关系和判断	139
5.5.2 直线与各几何元素的位置判断法	142
5.5.3 面与面的位置判断关系	143
5.6 拼合运算	144
5.6.1 拼合运算的描述	145
5.6.2 法矢投影法	146
5.6.3 多面体 HUST CAD 系统的拼合运算实现	150
5.6.4 HUST CAD 造型系统特点	156
5.7 基于参数化设计的特征造型	156
5.7.1 特征定义、分类	158
5.7.2 基于特征参数化产品实体模型	160
5.7.3 特征生成	160
5.7.4 变量命名机制	162
5.7.5 约束关系求解	164
5.7.6 特征编辑	164
5.7.7 面向装配的特征编辑	170
第六章 图形消隐处理	173
6.1 Roberts 消隐方法	174
6.1.1 后向面判别	174
6.1.2 Roberts 方法	175
6.1.3 消隐算法的加速	176
6.2 一般多面体的消隐处理	176
6.2.1 一般多面体模型的数据结构	176
6.2.2 一般平面立体的消隐过程	177
6.3 深度缓存算法	179
6.4 扫描线算法	180
6.4.1 扫描线 Z 缓存算法	180
6.4.2 扫描线间隔连贯性算法	182

6.5	列表优先算法	182
6.6	基于 CSG+Brep 模式的高效可靠隐藏线消除算法	184
6.6.1	基于 CSG+Brep 模式的隐藏线消除算法	184
6.6.2	子线段中点可见性判断	185
6.6.3	隐藏线消除算法的时间复杂度	186
6.7	HUST CAD 消隐程序	186
第七章 光照模型与真实感显示		197
7.1	简单光反射模型	197
7.1.1	基本光学原理	197
7.1.2	漫反射	198
7.1.3	光的镜面反射、Phong 模型的导出与实现	199
7.2	增量式光反射模型	200
7.2.1	双线性光强插值法	201
7.2.2	双线性法向插值法	202
7.2.3	加速算法	203
7.3	简单光透射模型	204
7.3.1	透明效果的简单模拟	204
7.3.2	Whitted 光透射模型	205
7.3.3	Hall 光透射模型	206
7.4	光线跟踪显示技术	207
7.4.1	基本光线跟踪算法	208
7.4.2	光线与物体求交	209
7.4.3	光线跟踪中的简单阴影	213
7.5	阴影生成技术	214
7.5.1	阴影多边形算法	214
7.5.2	阴影扫描线算法	215
7.5.3	阴影深度缓存算法	215
7.6	HUST CAD 系统中真实感图形绘制的研究与实现	216
7.6.1	光照模型	216
7.6.2	扫描线数据结构与算法	217
7.7	HUST CAD 真实感显示程序	219
参考文献		241

第一章 绪 论

1.1 计算机图形学的研究内容

1982年,国际标准化组织 ISO 给计算机图形学下的定义是:研究用计算机进行数据和图形之间相互转换的方法和技术。计算机图形学是研究怎样用计算机生成、处理和显示图形的一门新兴学科。

计算机图形学涉及和研究的主要问题是利用计算机进行图形信息的输入、表达、存储、显示、检索、变换、图形编辑等,具体地说,大致包括以下主要内容:

- (1) 二维图形的数据结构及直线、圆、椭圆等基本图形元素的生成;
- (2) 产生图形的基本算法;
- (3) 图形的数据结构,包括三维形体的数据结构,图形在计算机内的表示方法;
- (4) 窗口和视区,图形裁剪算法;
- (5) 图形的二维及三维几何变换;
- (6) 图形编辑算法,包括图形的并、交、差运算及图形的编辑功能;
- (7) 三维图形的隐藏线消除算法;
- (8) 三维图形的真实感显示;
- (9) 设计开发与实际应用相结合的计算机辅助设计应用系统。

计算机图形学具有广阔的发展前景,是一个多学科交叉的新兴学科,它不仅涉及到计算机的各个学科,也涉及到计算几何、工程制图、机械设计、光学、线性代数、工业造型等多门学科。

1.2 计算机图形学的确立

光笔和交互式图形显示原理的工程应用,最早可以追溯到 50 年代。1950 年,美国麻省理工学院(MIT)的旋风一号计算机通过控制 CRT,生成和显示了一些简单的图形。随后陆续推出了绘图仪等一些简单的图形设备,但这些为计算机所配置的各种图形输出设备仅具有图形输出功能。50 年代中期,美国战术防空系统 SAGE(Semi Automatic Ground Environment)建立了一个实时信息控制系统,以便监视美国的整个陆海空域,具体部署是研制计算机通信网和在全国 100 多个图形显示站,使用 19 寸阴极射线管显示各个军分区的地理边界、雷达搜索目标的位置和航迹、拦截点位置及其他信息。整个技术方案由 MIT 的林肯实验室负责,这一尝试对于交互式图形学的发展产生了巨大的推动作用。

1962 年,第一台光笔交互式图形显示器在 MIT 林肯实验室研制成功,这是 Ivan.Sutherland 以博士论文形式完成的研究课题。

1962 年,MIT 林肯实验室 Ivan.E.Sutherland 发表了一篇题为“SKETCHPAD:A Man-

Machine Graphical Communication System” (SJCC 1963, Spartan Books Baltimore, Md. pp.329) 的论文。在他的论文中首次使用“Computer Graphics”这个术语，并指出他所开发的通信系统是一个功能完善的交互式图形系统，从而确立了计算机图形学作为一个崭新的科学分支的地位。

此后，计算机图形学得到迅猛发展，并得以迅速推广应用。

1.3 图形显示软件包及其标准化

计算机图形显示程序包是显示软件中最基本的部分，是用现有的某种高级语言编写的一套子程序包，用户使用时可用相应的高级语言调用该程序包的子程序而生成图形。

70年代前后，研制的图形软件如CALCOMP, Plot 10 TCS等软件包均为为某种类型显示设备开发的专用的图形软件包，功能强、执行速度快。由于这些图形软件都是与设备有关，难于在其他设备上使用。为了克服上述矛盾，要求研制一种与设备无关的通用的图形软件。为此，1977年美国计算机协会(ACM:Association for Computing Machinery)提出了核心图形系统(Core Graphics System)。

1974年，ACM SIGGRAPH在美国国家标准局召开了独立于设备的计算机图形专题讨论会，会上讨论并确定了图形标准化的基本原则，并把研究的范围限制在只有图形输出功能和具有交互功能的二维三维直线图形、字符及其视图变换上。较高级的图形功能(例如隐藏线面的消除以及光栅扫描显示器等)均不包括在内，会后成立了图形标准化委员会(GSPC)，选择了8个在国际上被广泛使用的图形软件进行比较分析，发现这些软件有许多类似的功能，因此可以设计一个图形标准。

西德标准化组织(DIN)定义设计了一个图形核心系统，称为GKS，1979年DIN又将GKS定为图形软件标准的基础。GKS采用虚拟设备接口、虚拟显示文件以及工作站概念，受到普遍重视，几经修改补充。1982年，国际标准组织(ISO)通过将GKS作为计算机图形软件包的二维国际标准草案，1985年，ISO公布了GKS的正式文本ISO9742。

随着三维图形应用的迅速增加，在二维国际标准GKS的基础上，拟定了三维图形软件标准GKS-3D，并保证其与GKS的完全兼容性。但是，GKS-3D只包含了三维图形技术中最常用的一些功能，特别是它把几何模型的构造与图形生成分开，着重考虑与图形生成有关内容，导致其在三维应用中的局限性。

1986年，ISO公布了计算机图形系统标准PHIGS(Programmers's Hierarchical Interactive Graphics System)，其标准号为ISO IS 9592。该标准克服了GKS-3D的局限性，向程序员提供了控制图形设备的图形系统接口，其图形数据按层次结构组织，使多层次的应用模型能方便地应用PHIGS进行描述。另外还提供了动态修改和绘制显示图形数据的手段。后来ISO公布了PHIGS+，其编号为ISO/IEC9592，在PHIGS基础上又增加了曲线、曲面、光线与曲线真实感显示等功能。

GL(Graphic Library)是90年代在工作站SUN、SGI、IBM、HP等上广泛使用的一个工业标准图形程序库，GL在UNIX操作系统下运行，有C、Fortran、Pascal三种语言联编形式。GL比上述其他图形标准更具优越性，其图元丰富，具有RGB和颜色索引两种方式，Gouraud和Phong光照模型采用Z缓冲技术，提高消隐和真实感显示的效率，保证

镜面反射和漫反射效果，由于 GL 具有完整的光源处理能力，能使用户得到具有真实感显示的图像。GL 既可以单独运行，也可以在 X 窗口环境下运行，进而支持网络上的用户。

由于计算机的速度和性能迅速提高，计算机图形显示的硬件设备也从大型机、中型机、小型机、工作站向微型计算机过渡，这就要求在微机上提供一套图形软件标准。SGI 工作站开发的 IRIS GL 是一个工业标准的三维计算机图形软件接口，为了便于向微机等其他平台移植，开发了 OPEN GL，它适合于多种硬件平台和操作系统，它可创建出接近光线跟踪的高质量静止或动画的三维彩色图像，包括半透明效果的混合操作、纹理处理，绘制反走样图形，对物体的抖动操作，利用累加缓冲区产生的运动模糊，得到景深效果，并采用了 NURBS 曲线、曲面技术。1992 年 7 月，SGI 发布了 OPEN GL 的 1.0 版本，后来又与微软共同开发了 Windows NT 下的新版本，该版本在原功能的基础上，又引进了一些新的功能。Microsoft 利用 Visual C++ 把 OPEN GL 集成到 Windows NT 中，后来又将其新版本集成到 Windows95(OEM Service Release2)、Windows98 中，这样用户既可以在 Windows95/98、Windows NT 下使用 Visual C++ 开发基于 OPEN GL 的应用程序，又可以很方便地把工作站上已有的程序移植过来。

1.4 计算机辅助几何设计

从 50 年代到 60 年代中期，麻省理工学院积极从事现代计算机辅助设计/制造技术的开发研制，1964 年，Steve Coons 提出用块曲面片组合表示自由型曲面，且使曲面边界上达到任意高次连续阶的理论方法，被后人称为 Coons 曲面。Pierre Bezier 给出 Bezier 拟合曲线、曲面的方法。Steve Coons 和 Pierre Bezier 两人并列被称为现代计算机辅助几何设计技术的奠基人。

1964 年，Steve Coons 提出一个非常一般化的曲面片理论，他指出如何用四条任意的边界曲线调配成一个光滑的曲面片，并且说明了如何使曲面片之间的梯度和曲率达到连续变化。

1971 年，Pierre Bezier 引进了 UNISURF(Bezier 在雷诺汽车公司提出的曲面程序系统)。该系统是在一个原属费格森系统的基础上，进行巧妙的数学改造而成的，它完全使用初等几何概念，便可自由地对曲线曲面的剖切进行设计，是第一个实用的曲面设计系统。

最早的一种曲面分片系统是由 Ferguson 在 1963 年提出的，与传统方法最大区别是在定义曲线和曲面时，使用了参数方法，从此参数方法就变成描绘曲线和曲面的标准方法。

1972 年，de Boor 给出了关于 B 样条的一套标准算法，1974 年，美国通用汽车公司的 Gordon 和 Riesenfeld 将 B 样条理论应用于形状描述，提出了 B 样条曲线曲面，几乎继承了 Pierre Bezier 方法的一切优点，克服了其缺点，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续问题，1980 年 Boehm 和 Cohen 给出的节点插入技术是 B 样条方法中最重要的配套技术，而 Forest 在 1972 年和 Prautzsch 1984 年给出的升阶技术也是 B 样条的重要发展。

上述各种方法，尤其是 B 样条方法成功地解决了自由型曲线曲面形状描述问题，然而应用于圆锥截线及初等解析曲面却不成功，都只能给出其近似表示，不能适应绝大多数的机械产品的要求。

人们希望找到一种统一的数学方法,既能解决自由型曲线曲面形状描述问题,又能适用圆锥截线和初等解析曲面,美国锡拉丘兹(Syracuse)大学的 Versprille 于 1975 年在博士论文中首先提出了有理 B 样条方法。后来,主要由于 Piegl 在 1986~1989 年和 Tiller 在 1983~1992 年的工作,到 80 年代后期,非均匀有理 B 样条方法成为曲线和曲面描述的最广为流行的技术。利用 NURBS 这种统一的数学描述,可以实现实体造型和曲面造型的统一,国外著名的 CAD/CAE/CAM 集成软件系统(如 SDRC 的 Ideas Master 和 PRO/E 软件等)均采用此种统一的数学方法。

国际标准组织(ISO)继美国的 PDES 标准之后,于 1991 年颁布了关于工业产品数据交换的 STEP 国际标准,把 NURBS 作为定义工业产品几何形状的唯一数学方法。

1.5 CAD/CAM/CAE 软件

随着计算机图形学的发展,CAD/CAM 软件逐渐走向实用化和商品化。尤其是 70~80 年代初期,Autodesk 公司开发的 AutoCAD 软件得到了广泛应用。该软件是一个二维绘图系统,广泛应用于机械设计、建筑设计等计算机绘图方面,其数据结构是基于二维的线框结构。80 年代初期又产生了 Medusa 软件,这是一个二维半的 CAD 软件。后来以 SDRC 公司的 Ideas 软件为代表,开发了三维实体造型软件,与其同类型的软件有 PTC 公司的 Pro/engineering、EUCLID 软件、UG 软件等。这些软件均为三维的 CAD/CAM/CAE 集成系统,最早是在小型机、工作站上使用。随着计算机硬件的迅猛发展,在 90 年代中期,这些大型软件已在 P586、PⅡ及 PⅢ等微型计算机上广泛使用,这样大大降低了硬件成本,宜为一般中小企业所接受,为 CAD/CAE/CAM 集成软件系统的推广应用打开了广阔空间。

近年来先进制造技术对计算机图形学与 CAD 技术的发展提出了新的要求,美国青年学者 Joseph Harrington 提出的计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System,简称 CIMS)在全世界得到广泛承认和应用。10 多年来,CIMS 技术综合并发展了企业生产各个环节的计算机辅助技术及其集成,即计算机辅助决策、经营与管理技术、计算机辅助设计与分析技术、计算机辅助制造技术、计算机辅助质量管理与控制技术等将企业生产全部过程中有关的人、技术、经营管理、机器设备及其信息流、物流有机集成并优化为大系统,即企业对外 Internet 联接、企业内部 Intranet 联接等。

如何加速新产品的开发周期,一个自然而朴素的想法是把原来串行进行的开发设计尽可能地并行进行,把整个开发过程集成起来。实现并行工程的优点在于:

- (1) 缩短开发周期;
- (2) 减少反复及变更设计的次数;
- (3) 及时地解决设计开发过程中的矛盾和冲突;
- (4) 减少作原型的次数;
- (5) 不同的专业密切交互合作,易于产生新的思想和概念。

并行工程是 1986 年美国国防分析研究所在 R-338 报告中提出的,报告中把并行工程解释为产品及其生产与支持过程设计的系统方法,并行工程也可看成支持过程设计的传统方法,也可看成 CIMS 的第二阶段产品开发过程的集成。

敏捷制造(Agile Enterprise)是美国 R.N.Nagel 和 S.L.Goldman 于 1991 年提出的,它要

求建立全面的企业网，以推动企业间的动态集成，如跨组织、跨地区或跨企业的分布式开发组，并行开发新产品，以至动态联盟等，引进插入兼容式企业，并指出动态联合公司是未来企业的最高形式，发起公司只抓总体设计、部分关键部件的制造、总装及销售，而其他制造则分布在其他各个工厂中。在一个产品的生命周期内，各分企业互相合作，就以产品形成一个联合体，并以合同方式分享利润。

CIMS、CE(并行工程)、AM(敏捷制造)对 CAD 技术提出了新要求，即现代 CAD 软件应该体现现代理论与方法学，适应近年来提出来的并行设计、协同设计、虚拟制造大规模定制设计(Mass Customization Design)、分形设计(Fractal Design)、超变量几何(VGX)、快速原型机等。要研究与设计环境相关的技术、协同设计环境的支撑技术、协同设计的管理技术(如产品共享信息的变换，异构 PDM 系统间的数据变换)、设计过程建模及冲突消解等问题，还要研究基于 PDM 的产品数据库管理与 workflow(过程)管理技术。近几年来，国际大型商品化软件，如 SDRC 公司的 I-DEAS Master 软件，已逐步在解决这些方案，提出了合理的解决方案，这些都为计算机图形学在 CAD/CAE/CAM/MIS/CIMS/CE/AM 的应用奠定了良好的基础。

以 SDRC 的 Ideas Master 软件为例，其主要内容有：

建模(Master Modeler)

I-Deas Web 数据访问(I-DEAS Web Access)

装配(Master Assembly)

机械设计(Mechanism Design)

装配公差分析(Tolerance Analysis)

曲面造型(Master Surfacing)

二维绘图(Drafting)

审图与标证(View & Markup)

仿真建模(Simulation Modeling)

有限元模型(FEM-Finite Element Modeling)

高级有限元建模(Extended FEM)

梁建模(Beam Modeling)

仿真解算(Simulation Solution Set)

仿真顾问(Simulation Advisor)

线性求解器(Model Solution Linear)

模型响应(Model Response)

优化(Optimization)

变量化分析(Variational Analysis)

非线性求解器(Model Solution Non-Linear)

快速成型机数据转换器

非线性求解器(Model Solution Non-Linear)

核心测试(Core Test)

标准测量(Standard Measurement)

瞬态测量(Transient Measurement)

有序追踪(Order Tracking)

声强测量(Acoustic Intensity Measurement)

- 标准后处理(Standard Post-Processing)
- 瞬态后处理(Transient Post-Processing)
- 模态测试(Modal)
- 结构修正(Structural Modification)
- 相关分析(Correlation)
- 声音质量分析(Sound Quality Engineering)
- 疲劳强度分析(Fatigue)
- 开放式体系结构(Open Architecture Products)
 - 开放式 I-DEAS(Open I-DEAS)
 - 开放式项目管理(Open Item Manager)
 - 图形化用户界面(I-DEAS UserGUI)
- 数据产品(Data Products)
 - 二维绘图符号库, 三维标准件库和材料数据库
- 加工系列(Manufacturing Set)
 - 创成式加工(Generative Machining)
 - 标准后处理(Standard Post-Processing)
- 高级加工系列(Advanced Manufacturing Set)
- 应用方案(Application Products)
 - 逆向工程(Imageware)
 - 钣金设计(Sheet Metal Design)
 - 电缆布线设计(Harness Design)
 - 管道设计(Sumpipe)
 - 注塑模架库设计(Moldbase Design)
 - 复合铺层设计(Laminate Composites)
 - 电子系统冷却仿真(Electronic System Cooling)
 - 复杂热交换仿真(TMG)
 - 注塑冷却仿真(Moldflow)
 - 产品寿命预测(Durability)
 - 振动声场仿真(Vibro-Acoustics and Rayon System)
 - 材料特性(Material Data System)
- 数据交换(Data Exchange Products)
 - 标准格式(STEP,IGES,DWG)
 - 专用软件接口(AutoCAD,CADAM,CATIA,CADDS5,Pro/E,UG,ANSYS, NASTRAN 等)

在 I-DEAS Master Series 中,无论是单个模块还是成组应用,都是以 Core Master Modeler 为核心来运行。这种先进的核心式体系结构决定了它必然是以主模型(Master Modeler)为单一数据库,并且所有的模块之间的数据全部并行关联。

(1) 完全一体化的变量化设计环境支持统一的线框、裁剪曲面和实体造型。

(2) 先进的超变量几何(VGX-Variational Geometry eXtended)技术既可进行全几何约束的参数化设计,又可进行任意几何与工程约束的自由创新设计。

VGX 技术贯穿于二维草图设计、三维零件造型,直至装配体设计全过程。它具有提

供变量化草绘、建立变量方程、设计变量特征的能力。直接修改与基于设计历程修改相结合。可随时灵活地修改原约束、建立新约束和删除旧约束,或进行与造型顺序无关的尺寸标注,而无须关心设计顺序,可在欠约束情况下进行创新设计。另外还可在复杂的曲面边缘上自动生成凸缘。

(3) 基于特征的设计。提供特征库(预定义特征、表驱动特征和用户自定义特征)特征操作和特征管理(历史图形树浏览、特征重排序、特征删除、特征消隐等)能力。

(4) 多种复杂形体设计与修改能力。进行复杂几何形状设计与修改,自动隐藏线消除,物性的直接计算。

(5) 独创的集产品几何信息(变量特征、设计历程、工程约束方程)、工艺信息(尺寸、坐标系、公差配合、形位公差、材料及物理属性)和加工工艺信息等为一体的完整的信息主模型。

(6) 一体化的项目组级产品数据管理环境。通过 IDM(项目数据管理)、TDM(团队数据管理)和并行相关性(Concurrent Associative)进行全过程统一数据管理,支持团队协同工程。

(7) 基于独创的动态引导器(Dynamic Navigator)和动态图表的最易学、易用的界面,可随时捕捉设计者的意图,用预增亮和符号提示各种尺寸和位置关系,操作简单直观,可为设计者准备下一步骤所用工具,引导设计过程,使设计者集中精力于设计思路和创新。

I-DEAS Web 数据访问(I-DEAS Web Access)——经由 Web 直接访问 I-DEAS 数据

(1) 强化 TDM(团队数据管理)功能。无论您是否在 I-DEAS 环境下工作,无论您是否在工作现场,您均可通过 I-DEAS Web 数据访问功能进入 TDM 系统,为设计添属性或文件。

(2) 通过 Internet 直接浏览装配,获取最新的设计版本。

(3) 通过标准格式交换数据、获取数据,并进行数据管理。

(4) 无须经由其他绘图管理系统便可直接访问 I-DEAS TDM,且查看或绘制图纸。

(5) 由于本模块基于 JAVA 技术编写,因此可直接用于 Internet 和 Intranet,易于对软件进行维护、管理及二次开发。

1.6 计算机图形学的应用

随着计算机图形学基本原理的不断完善和新技术的不断产生,使其几乎深入到国民经济各个部门(科研、教学、生产等)。目前,主要应用领域有:

1. 计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)和计算机辅助制造(CAM)

计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)和计算机辅助制造(CAM)是计算机图形学最广泛、最活跃的应用领域,国际上已利用计算机图形学的基本原理和方法开发出 CAD/CAE/CAM 集成的商品化软件系统,广泛地应用于建筑设计、机械产品设计。大到飞机、汽车、船舶的外形设计,小到传感器的结构设计,同时对上述产品进行有限元分析、应力彩色云图输出、动态仿真和模具设计制造,在产品的设计阶段即可对其关键部件进行结构分析和优化设计,并实现 CAD/CAM 一体化,从而缩短产品设计周期,节省原材料,提高产品设计质量。此外计算机图形学还应用到集成电路、印刷电路板、电子线路及网络

分析上,其效益十分明显。

CAD 已从早期的二维绘图开始到现在的变量化、参数化设计,使创新设计成为可能。零件设计全参数化的实现及基于特征造型的技术,提供了如拉伸、旋转、扫描、提拉、筋板、螺旋、切割、旋转切割、扫描切割、螺旋切割、拔模斜度、落壁、倒角、圆角、特征阵列和镜像等功能。装配设计带有智能装配引导器,适合于大型装配件的设计和装配,可对装配关系和装配特征进行有效的控制和管理。通过电子数据表格 EXCEL 或 VB 程序可在装配中驱动装配尺寸,也可自动或手动生成爆炸图并拖动爆炸后的各个零件,且可进行干涉分析及零件、部件或总成的物理属性分析,用户能自定义并生成材料清单。钣金设计可智能地设计落板和折弯及自动折弯工艺处理,在电工仪表柜体设计方面应用广泛。渲染工具为用户提供产品真实效果的渲染和各种特殊的渲染——彩色光源、阴影、背景图像、透明、反射及纹理。机械设计(Mechanism Design)可模拟机构的复杂运动并进行动力学分析。

CAD/CAE 集成系统具有有限元分析的前处理和后处理模块,利用这样的系统,不仅可以准确地给出机械产品所测部件各点的各种应力的分布,而且可以直观形象地使用彩色云图输出,直观地反映出应力分布规律,还可以准确地确定需要优化设计的区域。有限元分析软件还可以快速地完成多个载荷组的应力分析,并方便地比较它们之间的作用效果。优化(Optimization)分析结果,改进设计,包括:设计目标和几何形状的优化,各种物理属性和材料的优化变量化分析(Variational Analysis)。一次迭代、一次网格剖分、一次解算变量化分析均可提供相应设计参数的重复变化的分析结果,实现一次解算,可得到多种方案的最佳结果。

现在 CAD/CAM 集成化软件系统可实现创成式加工(Generative Machining),在一个统一的环境中完成加工工艺计划、工具定义和 VC 编程任务。面向团队加工,基于 CAD/CAM 集成化软件提供的强大框架,可以设计和加工同步工程。可以在设计进行到一定阶段后开始加工工艺编程,保证零件的工艺性,缩短新产品的开发周期。创成式加工能够将成熟的加工工艺内存为加工规则和方法,并在同类加工中调用,从而实现标准化加工,实现三轴、五轴和多轴加工。有标准化的后处理使 CAD/CAM 的集成化极大地改变了机械制造行业的面貌,从而走向先进制造技术之路。

2. 可视化(Visualization)

科学家、工程师和其他工程技术人员经常要分析大量信息。摄像机等以比解释快得多的速度积聚大量的数据文件,扫描这么多的数据以确定其趋势及相互关系是一件乏味和低效的事情,但如果将这些数据转换成可视形式,则其趋势和模式可以立即显现。可视化(Visualization)就是在这种背景下发展起来的,它把数据转换成易于被人接受和理解的形式——图形。可视化技术是在计算机图形学的基础上发展起来的,今天它已经发展成为研究用户界面、数据表示、处理算法、显示方式等一系列问题的一个综合性领域,成为人们分析自然现象、社会经济发展规律和态势、认识客观事物的本质及变化规律的得力助手。

根据所研究对象的领域不同,可视化可分为科学可视化(Scientific Visualization)、数据可视化(Data Visualization)和信息可视化(Information Visualization)。科学可视化侧重于科学和工程领域数据的可视化,如数学家、物理学家使用可视化技术来分析数学函数和进程或简单地生成有趣的图形表示;数据可视化比科学可视化具有更广泛的内涵,不仅包含工程技术领域数据的可视化,还包含其他领域,例如经济、商业、金融、证券中数据的可视化;信息可视化一般是指 Internet 网上超文本、目录、文件等抽象信息的可视化。上述可视化