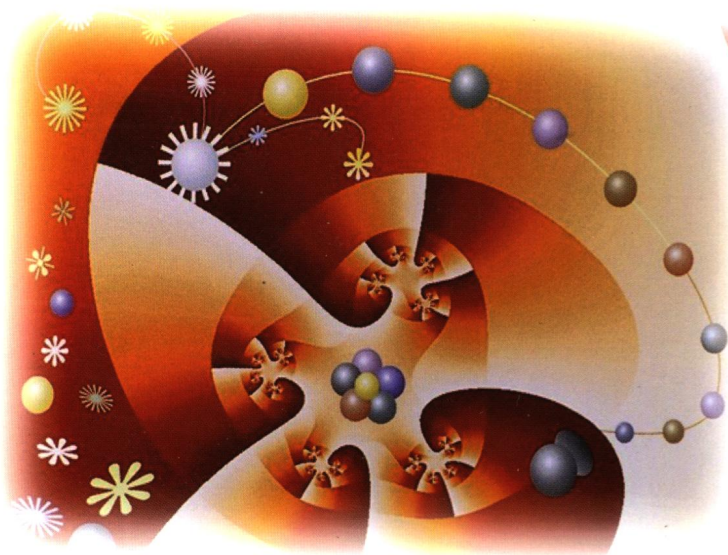




清华大学计算机基础教育课程系列教材

计算机辅助设计技术 基础教程

唐 龙 许忠信 徐玉华 孙延奎 编著



01.72-43



清华大学出版社

清华大学计算机基础教育课程系列教材

计算机辅助设计技术基础教程

唐 龙 许忠信 徐玉华 孙延奎 编著

本书附盘可从本馆主页 <http://lib.szu.edu.cn/>
上由“馆藏检索”该书详细信息后下载，
也可到视听部复制

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了计算机辅助设计(CAD)技术的基础知识及应用。内容包括计算机辅助设计技术的初步知识、计算机图形学的基本概念、图形几何变换和二维图形生成技术、交互与接口技术、三维图形显示和产品造型基本原理与实现方法,并结合流行软件,介绍了实用二维、三维绘图软件的功能和使用方法,在本书附录中还提供了教学实验指示书,在配书光盘中提供了教学实验工作平台软件包。

本书选材深度和广度适当,既包含经典的理论基础知识,也反映了近年来计算机辅助设计技术发展的新动向。本书面向的主要读者为高等院校理工科学生,同时也适合工科硕士研究生阅读,还可作为已在工作岗位的设计师、工程师及技术人员的培训教材。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

书 名: 计算机辅助设计技术基础教程

作 者: 唐龙 许忠信 徐玉华 孙延奎 编著

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

责任编辑: 王敏稚

印 刷 者: 北京通州区大中印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 **印张:** 17 **字数:** 392 千字

版 次: 2002 年 8 月 第 1 版 2002 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-900637-21-4

印 数: 0001~8000

定 价: 21.00 元(配光盘)

序

计算机科学技术的发展不仅极大地促进了整个科学技术的发展,而且明显地加快了经济信息化和社会信息化的进程。因此,计算机教育在各国备受重视,计算机知识与能力已成为 21 世纪人才素质的基本要素之一。

清华大学自 1990 年开始将计算机教学纳入基础课的范畴,作为校重点课程进行建设和管理,并按照“计算机文化基础”、“计算机技术基础”和“计算机应用基础”三个层次的课程体系组织教学:

第一层次“计算机文化基础”的教学目的是培养学生掌握在未来信息化社会里更好地学习、工作和生活所必须具备的计算机基础知识和基本操作技能,并进行计算机文化道德规范教育。

第二层次“计算机技术基础”是讲授计算机软硬件的基础知识、基本技术与方法,从而为学生进一步学习计算机的后续课程,并利用计算机解决本专业及相关领域中的问题打下必要的基础。

第三层次“计算机应用基础”则是讲解计算机应用中带有基础性、普遍性的知识,讲解计算机应用与开发中的基本技术、工具与环境。

以上述课程体系为依据,设计了计算机基础教育系列课程。随着计算机技术的飞速发展,计算机教学的内容与方法也在不断更新。近几年来,清华大学不断丰富和完善教学内容,在有关课程中先后引入了面向对象技术、多媒体技术、Internet 与互联网技术等。与此同时,在教材与 CAI 课件建设、网络化的教学环境建设等方面也正在大力开展工作,并积极探索适应 21 世纪人才培养的教学模式。

为进一步加强计算机基础教学工作,适应高校正在开展的课程体系与教学内容的改革,及时反映清华大学计算机基础教学的成果,加强与兄弟院校的交流,清华大学在原有工作的基础上,重新规划了“清华大学计算机基础教育课程系列教材”。

该系列教材有如下几个特色:

1. 自成体系:该系列教材覆盖了计算机基础教学三个层次的教学内容。其中既包括所有大学生都必须掌握的计算机文化基础,也包括适用于各专业的软、硬件基础知识;既包括基本概念、方法与规范,也包括计算机应用开发的工具与环境。

2. 内容先进:该系列教材注重将计算机技术的最新发展适当地引入教学中来,保持了教学内容的先进性。例如,系列教材中包括了面向对象与可视化编程、多媒体技术与应用、Internet 与互联网技术、大型数据库技术等。

3. 适应面广：该系列教材照顾了理、工、文等各种类型专业的教材要求。

4. 立体配套：为适应教学模式、教学方法和手段的改革，该系列教材中多数都配有习题集和实验指导、多媒体电子教案，有的还配有 CAI 课件以及相应的网络教学资源。

本系列教材源于清华大学计算机基础教育的教学实践，凝聚了工作在第一线的任课教师的教学经验与科研成果。我希望本系列教材不断完善，不断更新，为我国高校计算机基础教育做出新的贡献。



1999 年 12 月

注：周远清，现任教育部副部长，原清华大学副校长、计算机专业教授。

前言

计算机辅助设计(computer-aided design, CAD)是计算机最早的、最重要的应用之一,也是计算机科学与技术发展最主要的推动力之一。半个世纪以来,伴随着人类科学技术发展史上的奇葩和硕果——计算机的产生、发展和成熟,计算机辅助设计技术也经历了产生、发展和成熟的过程。目前,计算机辅助设计已成为现代社会各行各业都不可缺少的技术基础和可持续发展的必要手段,并已创造出极其巨大的社会财富。理所当然地,“计算机辅助设计技术基础”这门课程作为理工科学生必修或选修的计算机技术基础课程,受到广大师生的高度重视,并已纳入高等院校计算机基础教育课程的范畴。十多年来,清华大学计算机科学与技术系每学期都开出面向全校本科生的“计算机辅助设计技术”课程,教学效果甚好,颇受欢迎。

为满足实际教学的迫切需要,我们立足于将本书作为理工科本科生学习计算机基础知识的主要教材之一,根据较准确而合理的教学定位要求,吸纳了近几年相关科学技术的新成果,结合长期教学所积累的实践经验,编写出这本教材。虽然本书面向的主要读者为理工科本科生,但也同时考虑到工科硕士生有关的教学需求。从近年来已广为重视的终身教育观念和我国推广 CAD 技术应用的实际要求出发,编写时还充分考虑了继续教育的需要,因此,本书也可作为培训已在工作岗位的设计师、工程师及技术人员的教材。“计算机辅助设计技术”课程是一门实用性很强的课程,对学生的实践动手能力应有所要求,为此本书附有上机实验指示书,并提供教学实验框架软件,可满足基本教学需要。

此外,还有必要指出,作为本科生的“计算机辅助设计技术”课程教学的主要参考书,本书的第 5 章、第 6 章及第 7 章有部分内容难度比较高,教学中可以适当降低要求,在课堂上也可以只作粗浅的介绍,或简略之。若选本书作为大专班课程教学参考书,实际教学内容更应有所调整,可完全精简掉三维真实感图形、参数造型以及 OpenGL 编程等难度比较高的内容。至于更广义的 CAD 技术知识,例如可视化技术、CIMS 和 PDM 等,已超出本课程的教学要求,不必纳入本书,可参阅相关的专著。

为配合教学需要,在本书的配书光盘中提供了教学实验框架的软件,任课教师可根据具体情况选定题目作为课后作业,学生可直接利用光盘所提供的实验框架完成作业。

本书第 1 章由唐龙和许忠信编写;第 2 章由许忠信编写;第 3 章由徐玉华编写;第 4 章由许忠信、徐玉华编写;第 5 章由唐龙编写;第 6 章由孙延奎编写;第 7 章由徐玉华、许忠信和孙延奎编写;附录由徐玉华编写。全部书稿经集体讨论审定。限于作者水平、精力和时间,书中难免有疏漏或差错之处,恳请读者指正。

作 者

2001 年 10 月

目 录

第 1 章 CAD 概论	1
1.1 CAD 系统发展概况	1
1.1.1 什么是 CAD 技术	1
1.1.2 CAD 技术的发展	1
1.1.3 CAD 系统的分类	5
1.1.4 CAD 系统的应用	6
1.2 CAD 系统硬件基础	7
1.2.1 计算机主机	7
1.2.2 图形输入设备	7
1.2.3 图形显示设备	10
1.2.4 图形硬拷贝输出设备	16
1.3 CAD 系统软件基础	18
1.3.1 CAD 软件的技术特点	19
1.3.2 CAD 软件对硬软件环境的要求	19
1.3.3 CAD 系统中的软件	20
1.4 小结	22
习题	22
第 2 章 图形变换	23
2.1 预备知识	23
2.1.1 世界坐标系和设备坐标系	23
2.1.2 矢量运算	24
2.1.3 矩阵运算	24
2.1.4 齐次坐标	26
2.1.5 仿射变换与几何不变性	26
2.2 窗口视图变换	27
2.2.1 窗口区和视图区	27
2.2.2 窗口视图变换	27
2.2.3 二维图形输出流水线	28
2.3 二维几何变换	29
2.3.1 几种基本的二维几何变换	29
2.3.2 二维几何变换的齐次坐标表示	32

2.3.3	二维几何变换的组合	35
2.3.4	二维变换矩阵的功能分块	36
2.4	三维几何变换	37
2.4.1	右手系与左手系	37
2.4.2	基本三维几何变换	37
2.4.3	三维几何变换的组合	39
2.4.4	三维变换矩阵的功能分块	40
2.5	二维裁剪	41
2.5.1	线段裁剪	41
2.5.2	多边形裁剪	42
2.5.3	字符裁剪	43
2.6	小结	45
习题		45
第3章	二维图形生成技术	47
3.1	图素及其属性	47
3.2	常用直线图形生成算法	49
3.2.1	逐点比较法	49
3.2.2	数值微分法(DDA法)	50
3.2.3	布雷森汉姆(Bresenham)直线生成算法	51
3.2.4	常用直线图形生成举例	52
3.3	剖面线与填充	56
3.3.1	不含小岛的封闭多边形内画剖面线的矢量求交算法	56
3.3.2	含小岛的封闭多边形内画剖面线的矢量求交算法	57
3.3.3	像素区域填充算法	58
3.3.4	扫描线区域填充算法	59
3.4	字符及符号	61
3.4.1	概述	61
3.4.2	矢量汉字和矢量字符的存储与显示	61
3.5	二次曲线	62
3.5.1	圆弧和椭圆弧的拟合法	62
3.5.2	二次曲线的参数拟合法	66
3.6	自由曲线	68
3.6.1	曲线的光滑连接	69
3.6.2	抛物线参数样条曲线	69
3.6.3	Hermite 曲线	70
3.6.4	贝塞尔(Bezier)曲线	71
3.6.5	B样条曲线	75

3.7 小结	78
习题	79
第4章 交互技术与用户接口	80
4.1 交互技术	80
4.1.1 交互设备	80
4.1.2 交互任务	82
4.1.3 交互技术	83
4.2 用户接口	84
4.3 实际交互系统的构造	86
4.3.1 有关原则说明	86
4.3.2 交互式用户接口的实现	88
4.4 小结	100
习题	100
第5章 三维图形显示	101
5.1 三维图形处理过程	101
5.2 投影变换	103
5.2.1 投影变换概述	103
5.2.2 透视投影	105
5.2.3 平行投影	108
5.3 观察空间的定义和转换	113
5.3.1 观察空间的定义	113
5.3.2 空间转换	116
5.4 三维裁剪	123
5.5 消隐技术	124
5.5.1 基本概念	124
5.5.2 深度缓存算法	126
5.5.3 扫描线算法	127
5.6 真实感图形生成技术	129
5.6.1 真实感图形	129
5.6.2 简单光反射模型	130
5.6.3 增量式光反射模型	134
5.6.4 整体光照模型	136
5.6.5 光线跟踪算法	138
5.6.6 反走样	140
5.6.7 阴影生成技术	141
5.7 小结	142

习题.....	142
第 6 章 三维几何造型基础.....	143
6.1 概述	143
6.2 三维几何造型	145
6.2.1 线框模型.....	145
6.2.2 表面模型.....	146
6.2.3 实体模型.....	157
6.2.4 参数化几何造型.....	165
6.3 特征造型	168
6.3.1 特征造型的特点和作用.....	168
6.3.2 特征的定义.....	169
6.3.3 特征的分类.....	170
6.3.4 参数化特征造型.....	171
6.4 小结	171
习题.....	173
第 7 章 计算机辅助设计常用软件介绍.....	174
7.1 AutoCAD 2000 应用软件	174
7.1.1 AutoCAD 2000 简介	174
7.1.2 二维图形的绘制.....	177
7.1.3 图形的编辑.....	181
7.1.4 尺寸标注.....	185
7.1.5 设计中心.....	187
7.1.6 图纸的布局与打印输出.....	188
7.1.7 三维图形的绘制.....	190
7.2 3DS MAX R3 使用指南	200
7.2.1 3DS MAX R3 概述	200
7.2.2 3DS MAX R3 主要术语和概念	202
7.2.3 3DS MAX R3 的建模	211
7.2.4 3DS MAX R3 的材质和贴图	213
7.2.5 3DS MAX R3 的灯光、摄像机与环境设定	214
7.2.6 3DS MAX R3 的动画	215
7.2.7 3DS MAX R3 的应用实例	216
7.3 OpenGL	224
7.3.1 OpenGL 概述	224
7.3.2 OpenGL 的基本操作	225
7.3.3 Windows 系统下的 OpenGL 函数	226

7.3.4 OpenGL 的基本程序结构	227
7.3.5 OpenGL 的状态机制	229
7.3.6 OpenGL 中的图元绘制	230
7.3.7 坐标变换	233
7.3.8 应用变换的一个实例	239
7.3.9 光照处理	242
7.4 小结	245
附录 A 上机实验指示书	246
附 A.1 实验内容和要求	246
附 A.2 用 C++ 语言编程	246
附 A.2.1 上机环境简介	246
附 A.2.2 用 C 语言编程上机题	248
附 A.2.3 源程序中的作业环境及其他相关代码	249
附 A.2.4 有关的 CDC 类中的成员函数	251
附 A.3 交互技术和用户接口实验	257
附 A.3.1 实验要求	257
附 A.3.2 使用的函数补充说明	258
参考文献	261

第 1 章

CAD 概论

1.1 CAD 系统发展概况

本章讲述什么是计算机辅助设计技术及其发展历史和现状。首先叙述了计算机辅助设计技术的产生和发展过程及其应用,其次介绍 CAD 硬件的有关基础知识,最后介绍 CAD 软件的有关知识。

1.1.1 什么是 CAD 技术

CAD(computer-aided design)是指借助于计算机完成设计并产生图形图像的一种方法和技术。CAD 是工程技术人员以计算机为工具,用自己的专业知识对产品或工程进行总体设计、绘图、分析和编写技术文档等设计活动的总称。

CAD 技术涉及了诸多领域的基础技术,概括起来有以下几个方面:

(1) 图形图像处理技术,如计算机图形学中的诸多技术。计算机图形学是 CAD 技术主要的理论和技术基础,而 CAD 是计算机图形学的主要应用领域。

(2) 专业学科技术,如曲线曲面的分析、有限元分析、数值分析、最优化设计以及力学分析等各学科知识。

(3) 数据管理技术,如数据库管理和各种数据的规范和接口技术。

(4) 文档处理技术,如各类说明文档的设计制作和幻灯片演示的制作。

(5) 软件设计技术,如人机交互、软件工程、人工智能、模拟与仿真技术等。

一个完整的辅助设计过程可以大致描述如图 1-1 所示。

在该过程中,首先要进行前期详尽的需求分析,选择合适的理论原理作为依据,对产品作初步方案设计,依照该方案对产品进行几何造型和特征造型,然后对产品模型进行诸如有限元分析、应力分析、优化分析等一系列专业分析工作,得到该设计方案的评价结果;最后如果评价显示该结果满足用户需求,就将整个设计整理输出,否则对原设计方案进行修改重新进行设计。

1.1.2 CAD 技术的发展

计算机辅助设计是随着计算机软硬件的发展而发展的,我们将全过程划分为 5 个阶段:

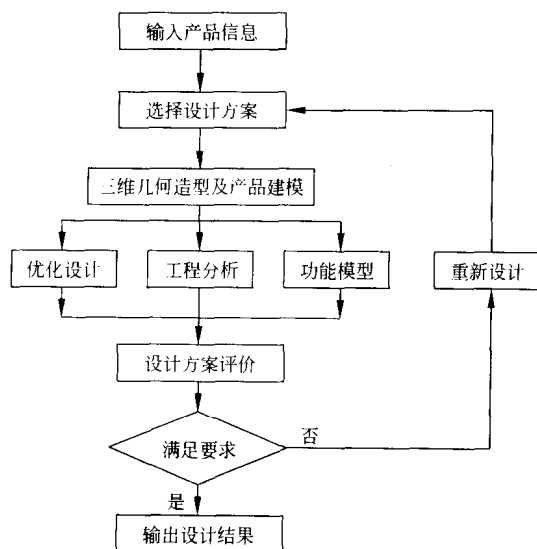


图 1-1 计算机辅助设计流程

1. 酝酿时期(20 世纪 50 年代)

1950 年美国麻省理工学院(MIT)研制出图形设备“旋风一号”(Whirlwind I),这是个类似于示波器的设备,用它可以显示简单图形。1958 年,美国 Calcomp 公司开发出滚筒式绘图仪。这些设备的出现成为 CAD 发展的物质基础。

2. 学科建立和投入应用时期(20 世纪 60 年代)

1962 年,美国 MIT 林肯实验室 I. E. Sutherland 在博士论文“Sketchpad: 一种人机通信的图形系统”中,首次提出了计算机图形学、交互技术、分层存储符号的数据结构等新技术和新思想,为 CAD 技术的发展打下了理论基础。在 20 世纪 60 年代末期出现了廉价的随机存储器、光栅显示器、光笔、图形输入板等多种形式的图形输入设备,使 CAD 系统的成本一下子降低了许多,变得能为许多企业所接受。于是很快形成了 CAD/CAM (computer-aided manufacturing)产业。

3. 广泛使用时期(20 世纪 70 年代)

计算机交互图形技术日渐成熟并在工业界中日益得到应用。此时各种论文、文献、教程及学术会议大量涌现。1974 年举行了第一次国际 SIGGRAPH 会议,1979 年提出了图形交换标准 IGES。同时,在 20 世纪 70 年代,已有一些商用软件系统具有三维几何建模能力,但其应用仅仅向设计师提供几何建模和图形绘制的功能,而且一般只采用线框模型或表面模型。

4. 飞速发展时期(20 世纪 80 年代)

这个时期是 CAD/CAM 技术最重要的发展时期。软件方面的成就表现在:(1)将设计与制造的各种单个软件集成起来,使之不仅能绘制工程图形,而且能进行三维造型、有限元分析、注塑模设计等各种工程应用;(2)实体造型和特征造型理论与系统的发展及应用;(3)专家系统技术开始应用于 CAD 中。同时,随着计算机系统软硬件价格下降以及

性能提高,CAD 得以广泛普及。

5. 标准化、集成化、智能化、网络化的 CAD 时期(20 世纪 90 年代)

(1) 标准化

计算机图形接口 CGI(computer graphics interface)、计算机图形文件标准 CGM(computer graphics metafile)、计算机图形核心系统 GKS(graphics kernel system)、面向程序员的层次交互式图形规范 PHIGS(programmer's hierarchical interactive graphics standard)、基本图形转换规范 IGES(initial graphics exchange specification)和产品数据转换规范 STEP(standard for the exchange of product model data)等图形标准的相继出现使 CAD 技术日趋标准化。

(2) 集成化

CAD 的集成化表现为以下几个方面:

- 计算机辅助设计、计算机辅助制造、计算机辅助工程、计算机辅助工艺和数据管理等诸多模块集成出计算机集成制造系统 CIMS (computer integrated manufacturing system);
- 由于标准的统一使得很多原来需要手工编程实现的软件算法现在可以固化在电路芯片的功能模块上,大大提高了设计效率;
- 网络技术使得 CAD 资源可以共享,使设计工作可以异地同步地进行;
- 并行处理使得工作速度大幅度提高;
- 并行工程(CE, concurrent engineering)思想的出现。并行工程又称为并行设计,这是相对于串行设计而言的。其特点是在信息集成的基础上强调过程集成。图 1-2 显示了并行设计和串行设计的区别,以及二者生命周期的优劣。

(3) 智能化

智能 CAD 即 ICAD(intelligent CAD),是指由多个专家系统与多种 CAD 模块有机集成的支持产品设计的复杂系统。该系统的发展经历了两个阶段,即初级阶段——设计型专家系统和高级阶段——集成化智能设计系统。

在初级系统中与 CAD 模块集成的只有一个专家系统,又称为设计型专家系统。该专家系统中只包含了单一领域的知识,如产品可装配性的分析和评价、有限元分析的网格划分、数值计算中的搜索步长和收敛精度的选取等需要专家咨询的信息。

集成化智能设计系统又称为 IICAD(integrated intelligent CAD),它与设计型专家系统的主要异同如表 1-1 所示。

(4) 网络化

随着科学技术和经济水平的快速发展,在最近 20 年中不断出现超大型项目和跨国界项目,这些项目的一个突出特点是参与工作的人员众多,且地理分布较广泛。而项目本身却要求各类型的工作人员要紧密合作。为了解决这个矛盾,便出现了 CSCW 这个新的概念。多个设计者通过联网的计算机进行图形、图像、文字和声音的交流,讨论方案、协同工作,可以大大提高设计质量和进度。而实现这一协作的基础就是计算机网络和多媒体技术。

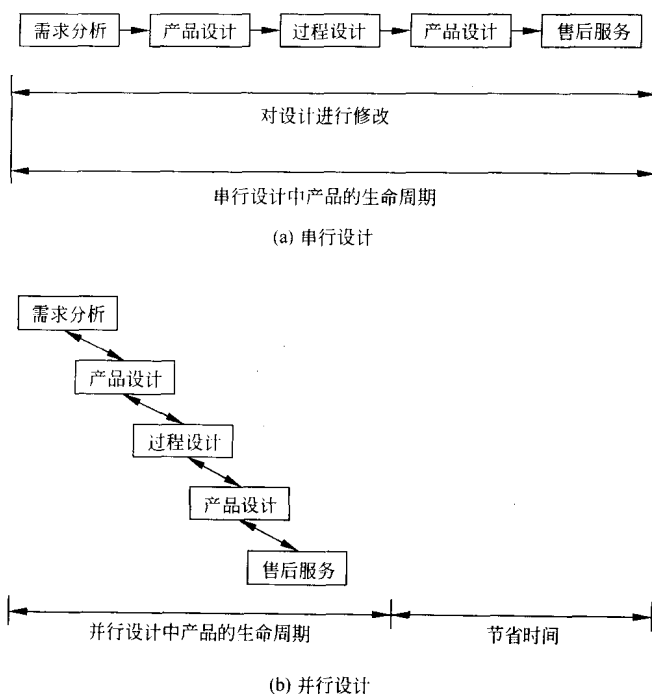


图 1-2 串行设计和并行设计的生命周期

表 1-1 ICAD 与 IICAD 的异同点

特 性	设计型专家系统(ICAD)	IICAD 系统
系统物理分布	集中在一台计算机上	分布在网络结点上
包含领域知识	单一领域的知识	多领域综合性知识
内嵌智能体数量	一个专家系统	多个专家系统
使用阶段	覆盖各设计阶段	
工作环境	单机	网络
设计过程管理	无	规划、控制、解决涉及过程中的冲突
产品数据管理	无	集成在系统中
通信能力	无	可以基于 Web 进行网络传输和通信
人的作用	强调人的创造性、主动性,主张人机协同	

CSCW(computer supported cooperative work)的概念是 Iren Greif 和 Paul Cashman 在 1984 年提出的。经过 20 年的研究与发展,CSCW 技术在军事、医疗、教育、商业、金融、生产制造等诸多领域得到了广泛应用。

在 CAD/CAM 中采用的协作工程设计是 CSCW 的重要分支。它用于支持群体成员交流设计思想、讨论设计结果、发现成员间接口的矛盾和冲突,及时地加以协调和解决,减少以至避免设计的反复,从而进一步提高设计工作的效率和质量。

目前市场上已经出现了一些使用这种概念的 CAD 软件,如德国 Fraunhofer 图形研究所在 1994 年开发的分布式 CAD 系统 Distribution Sketchpad,该系统利用了 CSCW 思想,在一定程度上支持多个合作者的协同设计。在国内,已经有一些实验系统建成,如清华的“综合业务多媒体通信终端和系统”及西安交通大学的“DMCS 系统”等。

但这类系统要想更具有实用性,还必须解决以下几个问题:成员间多媒体信息交换的实时性;设计软件的可移植性;成员间交互手段的多样性和方便性。

1.1.3 CAD 系统的分类

1. CAD 系统的三个层次结构

一套 CAD 系统可分为三个层次结构:基础层、支撑层和应用层。

基础层包括计算机主机(CPU 和内存等微机主要设备)、图形显示终端(包括显示器和显卡)、外围输出输入设备(包括键盘、鼠标、打印机、绘图仪、扫描仪)、系统软件(Windows 系统、Linux/UNIX 系统)。

支撑层包括 CAD 支撑软件、网络应用软件、可以开发 CAD 应用软件的编程工具(如 VC++)、数据库系统、人机界面的开发系统等除专业 CAD 以外的软件和系统。

应用层包括了针对不同领域需求的 CAD 专业应用软件,如机械 CAD、建筑 CAD、广告 CAD、影视 CAD 等。

它们之间的关系可用图 1-3 来描述。

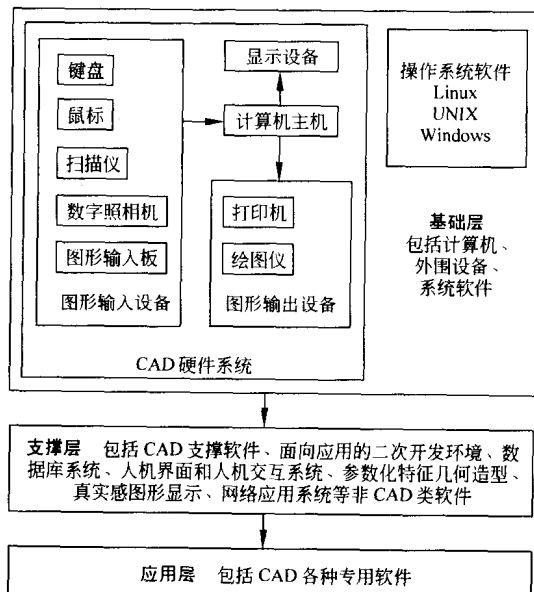


图 1-3 CAD 系统的三层结构

2. 从硬件角度进行的系统分类

(1) 单机式

高档的个人计算机系统,价格低,使用方便。全系统有一定的运算能力和图形处理能

力。该系统的特点是随着计算机及其相关设备的发展而发展,更新速度快,当前较高档的计算机组成的系统已经能处理很多 CAD 工作。

(2) 集中式

一台主机连接若干台图形终端,要求主机功能较强,一次性投入较大,使用不灵活。该系统在 20 世纪 80 年代中期以前应用比较广泛,如图 1-4 所示。

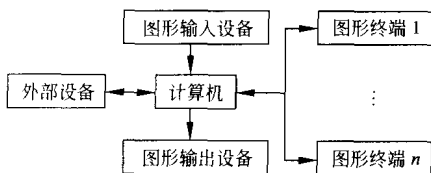


图 1-4 集中式 CAD 系统

(3) 工作站网络

由若干台工作站互联成网络,具有开放式的系统结构,图形功能强,处理速度快,内存大,可以进行并行计算,如图 1-5 所示。

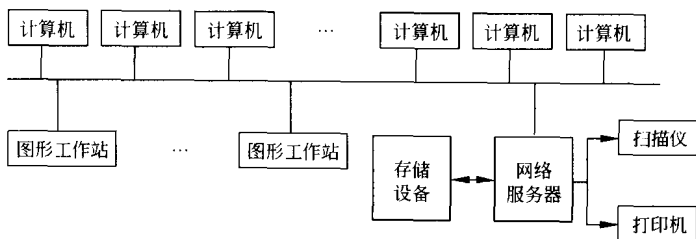


图 1-5 CAD 工作站网络系统

1.1.4 CAD 系统的应用

CAD 应用从绘制二维工程图开始,逐步深入到图纸文档电子化管理、三维造型、装潢设计、工艺设计、数控加工、仿真模拟、虚拟设计制造和各类资源管理。其应用归纳起来主要有以下几个方面:

(1) 产品和工程设计

- 产品:机械、电子、轻工(装潢装饰设计和服装设计)、纺织(服装花纹设计)……
- 工程:建筑(室内外装修设计)、桥梁、电站、冶金、石化、铁道……

(2) 仿真模拟和动画制作

- 机械零件的加工仿真,装配仿真;
- 飞机的飞行驾驶模拟和船舶进出港模拟;
- 训练部队的战场模拟系统;
- 物体受力后的变形、破坏过程;
- 机器人运动模拟;
- 动画片、电影特技、真实图形生成。