

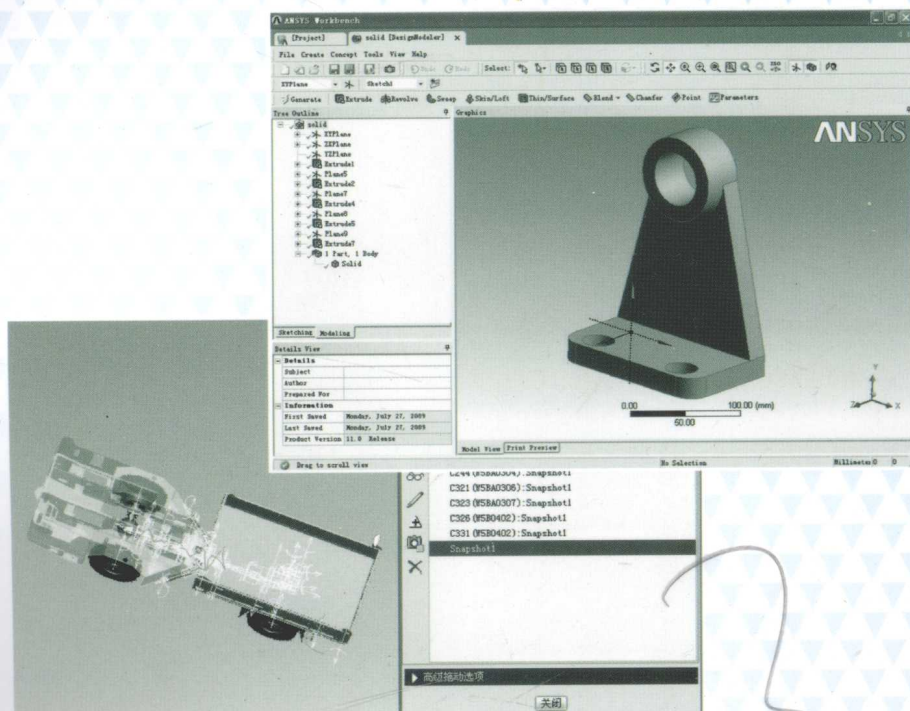


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械工程CAD基础

第2版

熊鹰 肖世德 王小强 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TH122/1029

2010

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械工程 CAD 基础

第 2 版

熊鹰 肖世德 王小强 编著

机械工业出版社

机械 CAD 是帮助机械工程设计技术人员解决实际机械工程设计与分析问题的技术。随着我国经济的快速发展,对于机械 CAD 人才的需求越来越迫切。以三维 CAD 为特征的机械 CAD 技术,作为机电产品现代设计与制造的核心支撑技术,对于提高机电产品设计、分析、制造技术水平、质量与效率具有关键作用。

本书基于微机化平台,介绍了机械工程 CAD 有关的思想基础、算法基础和数字图形基础,介绍了以 AutoCAD、Pro/Engineer、ANSYS、OpenGL 等软件平台为应用引导的三维 CAD 建模与应用技术。本书是一本精炼的融会贯通的机械工程 CAD 基础教材,可引导学生掌握机械 CAD 的理论基础知识、基本应用技能和二次开发技术。

本书不仅适合机械工程、电气工程、土木工程等本科、专科学生选用作为参考教材,还可作为相关工程设计技术人员知识更新培训的教材。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程 CAD 基础/熊鹰,肖世德,王小强编著. —2 版. —北京:机械工业出版社,2010.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-29780-2

I. ①机… II. ①熊… ②肖… ③王… III. ①机械设计:计算机辅助设计—高等学校—教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 027542 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:刘小慧 责任编辑:白刚 版式设计:霍永明

封面设计:张静 责任校对:张晓蓉 责任印制:洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2010 年 4 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.5 印张·384 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-29780-2

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

第 2 版前言

大规模工程问题的设计与分析软件现在已经成为衡量一个国家技术水平的标志之一。我国机电产品和装备制造业、建筑和土木工程业在普及二维 CAD 技术以后,迫切需要掌握三维 CAD 技术的优秀人才。三维 CAD 技术对于提高产品和工程的设计、分析、制造质量与效率具有关键作用。在机械、土木、交通装备(汽车、火车、飞机、轮船)工程设计软件和民用产品设计软件、广告设计软件中,数值分析技术和数字化图形技术发挥着举足轻重的作用。

本书基于微机化平台,介绍了机械工程 CAD 有关的思想基础、算法基础和数字图形基础,介绍了以 AutoCAD、Pro/Engineer、ANSYS、OpenGL 等软件平台为应用引导的三维 CAD 建模与应用技术。本书是一本精炼的融会贯通的机械工程 CAD 基础教材,可引导学生掌握机械 CAD 的理论基础知识、基本应用技能和二次开发技术。

本书共分 9 章。

第 1 章,机械工程 CAD 概述。介绍数字图形技术的简要历史,指出机械工程 CAD 的价值在于彻底地把机械工程设计分析人员从繁琐的数值分析和图样绘制的脑力劳动中解放出来。介绍了工程问题模型的主要分类。

第 2 章,机械工程 CAD 算法基础。介绍线性方程组与非线性方程组的求根问题、特征值问题、最优化问题、微积分问题、初值边值问题和非数值问题及其代表性数值算法,如高斯消元法、牛顿迭代法、复合形法、欧拉法等,并附带 MATLAB 示范程序。

第 3 章,机械工程 CAD 图形学基础。指出 CAD 的本质在于实现计算机内数字信息与外界可视信息的相互变换。介绍了有关数字图形的数据结构、表达方法、几何变换和显示处理基本算法。

第 4 章,AutoCAD 应用基础。介绍了 AutoCAD 二维、三维标准图元创建命令,三维坐标系及三维建模步骤,Visual LISP 和 VB (VBA) 二次开发方法。

第 5 章,Solid Edge 应用基础。介绍了 Solid Edge 三维特征建模、实例应用及二次开发方法基础。

第 6 章,SolidWorks 应用基础。介绍了 SolidWorks 三维特征建模、实例应用及二次开发方法基础。

第 7 章,Pro/Engineer 应用基础。介绍了 Pro/Engineer 特征建模、装配建模、运动分析和仿真应用。

第 8 章,ANSYS 应用基础。介绍了有限元分析的基本思路,有限元模型建立、加载和求解与结果观察的基本分析过程。

第 9 章,OpenGL 开发基础。介绍了在 VC 软件平台上,利用 OpenGL 函数库进行数字图形应用开发的基本流程。

本书第 1、2、3 章和附录由肖世德编写,第 5、7、9 章由王小强编写,第 4、6、8 章由熊鹰编写,全书由熊鹰负责汇总和定稿。西南交通大学博士生导师许明恒教授、四川大学博

士生导师殷国富教授审阅了本书，并提出了宝贵建议，在此表示衷心感谢。限于编著者水平有限，难免存在不足，敬请批评指正。

作者联系方式：xiongying@home.swjtu.edu.cn

作 者

第 1 版前言

工程软件,顾名思义指适用于工程领域,帮助工程设计技术人员解决实际工程设计、分析问题的软件。大规模工程问题的设计与分析软件现在已经成为衡量一个国家技术水平的标志之一。中国制造业在普及二维 CAD 技术以后,迫切需要掌握三维 CAD/CAE/CAM 集成技术的优秀人才。三维 CAD/CAE/CAM 作为制造业信息化的核心技术,对于提高产品设计、分析、制造的质量与效率具有关键作用。在机械、土木、交通工程设计软件和民用产品设计软件、广告设计软件中,数值分析技术和数字化图形技术发挥着举足轻重的作用。

本书基于微机化平台,以工程问题数值算法和数字化图形技术为理论基础,以 AutoCAD/Solid Edge/ANSYS/MasterCAM 软件平台为应用引导,融会贯通工程软件基础通用知识,引导学生掌握工程软件的理论基础知识,掌握主流 CAD/CAE/CAM 基本应用技能和开发技能。本书共分八章:

第 1 章 工程软件概述。介绍数字图形技术的简要历史,指出工程软件的价值在于彻底地把工程设计分析人员从烦琐的数值分析和图样绘制脑力劳动中解放出来。介绍了工程模型的主要分类。

第 2 章 工程软件算法基础。介绍线性方程组与非线性方程组求根问题、特征值问题、最优化问题、微积分问题、初值边值问题和非数值问题及其代表性数值算法,如高斯消元法、牛顿迭代法、复合形法、欧拉法等。附带 MATLAB 示范程序。

第 3 章 工程软件数字图形学基础。指出 CAD 本质在于实现计算机内数字信息与外界几何可视化信息相互变换。介绍了有关数字图形的数据结构、表达方法、几何变换和显示处理基本算法。

第 4 章 AutoCAD 应用基础。介绍 AutoCAD 二维、三维标准图元构筑,ZOOM 视觉变换和 UCS 坐标变换,布尔模型构筑。

第 5 章 Solid Edge 应用基础。介绍 Solid Edge 三维基本体素的构筑,特征建模方法,装配模型。

第 6 章 ANSYS 应用基础。介绍有限元分析的基本思路,ANSYS 实现单元、节点、网格划分、约束和载荷施加、求解与结果观察基本分析过程。

第 7 章 MasterCAM 应用基础。介绍了机械加工环境设置,CNC 计算机数控加工仿真和 NC 代码生成。

第 8 章 OpenGL 开发基础。介绍在 VC 软件平台上,利用 OpenGL 函数库进行数字图形应用开发的基本流程。

本书第 1、2、3 章由肖世德编写,第 4、6、7 章由熊鹰编写,第 5、8 章由王小强编写。全书由肖世德负责统稿。本教材由许明恒教授主审。黄慧萍同志在文字、图形整理方面作了不少工作。限于编著者水平有限,这本教材一定存在不少缺点和错误,敬请批评指正。

联系电话:(028) 87601967 电子邮件:sdxiao@home.swjtu.edu.cn

肖世德
于西南交通大学东园

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

第 1 章 机械工程 CAD 概述	1
1.1 机械工程 CAD 的基础	2
1.2 软硬件技术结合的应用系统	4
1.3 工程问题建模及其模型分类	6
第 2 章 机械工程 CAD 算法基础	9
2.1 零值求根问题	9
2.1.1 方程求根	9
2.1.2 线性方程组	11
2.1.3 非线性方程组	14
2.2 极值优化问题	16
2.2.1 线性规划极值问题	16
2.2.2 非线性规划极值问题	17
2.3 初值仿真问题	24
2.3.1 初值仿真工程背景	24
2.3.2 微分方程组求解	25
2.3.3 时域动态仿真	26
2.4 边值有限元问题	28
2.5 非数值搜索问题	28
第 3 章 机械工程 CAD 图形学基础	30
3.1 图形分类与图形标准	30
3.2 工程问题的图形建模	32
3.3 数字图形基本表达	34
3.3.1 枚举占位表达	34
3.3.2 边界参数表达	35
3.3.3 过程表达	39
3.4 三维数字几何图形数据模型	43
3.5 图形求交	44
3.5.1 线段与线段求交	44
3.5.2 线段与圆弧(圆)求交	45
3.5.3 圆弧与圆弧求交	45
3.5.4 直线与平面求交	46
3.6 点的运算	46
3.6.1 点与点	47
3.6.2 点与直线	49
3.6.3 点与圆(弧)	50

3.6.4 点与矩形	50
3.7 图形变换	52
3.7.1 几何变换	53
3.7.2 观察变换	55
3.7.3 动画显示	57
3.8 图形显示	58
3.8.1 线框显示	59
3.8.2 消隐处理	59
3.8.3 着色处理	59
3.8.4 光照处理	60
3.8.5 剪裁处理	60
3.8.6 可视化显示	61
3.9 计算机图形学逆问题	62
第 4 章 AutoCAD 应用基础	65
4.1 二维标准图元创建	65
4.1.1 绘制点	66
4.1.2 绘制直线	66
4.1.3 绘制圆	66
4.1.4 绘制圆弧	67
4.1.5 绘制多段线	67
4.1.6 绘制多重平行线	68
4.1.7 绘制矩形	69
4.1.8 绘制正多边形	69
4.1.9 绘制样条曲线	69
4.1.10 绘制椭圆	70
4.1.11 绘制圆环	70
4.1.12 创建图案填充	70
4.1.13 创建文字	71
4.1.14 创建标注	72
4.2 三维坐标与观测	74
4.2.1 三维坐标系统	74
4.2.2 定义用户坐标系	75
4.2.3 设置观测点	76
4.2.4 设置相机位置	77
4.2.5 三维动态观察	78
4.2.6 设置多视口	78
4.3 三维建模基础	79

4.3.1 创建实体模型的方法	80	7.1 Pro/Engineer 基础	146
4.3.2 标准 3D 实体	80	7.1.1 Pro/Engineer 简介	146
4.3.3 拉伸实体	80	7.1.2 Pro/Engineer 工作环境	147
4.3.4 旋转实体	81	7.1.3 Pro/Engineer 工作环境定制	149
4.3.5 布尔操作	81	7.2 Pro/Engineer 建模实例	149
4.4 绘制弯管实例	82	7.2.1 十字轴建模	149
4.5 Visual LISP 二次开发	88	7.2.2 万向节叉建模	154
4.5.1 简介	88	7.3 Pro/Engineer 装配	161
4.5.2 Visual LISP 基础	88	7.3.1 从零件到部件	164
4.5.3 Visual LISP 开发实例	91	7.3.2 从部件到系统	168
4.6 VBA 二次开发	92	7.4 运动分析和仿真	170
4.6.1 VBA 二次开发简介	92	7.4.1 伺服电动机的定义	171
4.6.2 使用 AutoCAD 对象	94	7.4.2 定义分析	172
4.6.3 VB (VBA) 二次开发流程	97	7.4.3 分析结果保存和过程动画 输出	175
4.6.4 VB (VBA) 二次开发实例	98	7.4.4 数据结果的处理	175
第 5 章 Solid Edge 应用基础	103	第 8 章 ANSYS 应用基础	178
5.1 Solid Edge 基础概念	104	8.1 ANSYS 一般分析过程	179
5.1.1 Solid Edge 的特点	104	8.1.1 建立有限元模型	179
5.1.2 Solid Edge 的用户界面	105	8.1.2 加载与求解	181
5.1.3 特征造型	107	8.1.3 结果处理	182
5.1.4 零件装配	109	8.2 ANSYS 几何模型创建	182
5.2 Solid Edge 交互式建模实例	111	8.2.1 二维标准图元生成	182
5.2.1 双角弯模零件 (底座) 建模	111	8.2.2 三维标准图元生成	184
5.2.2 零件装配	114	8.2.3 布尔操作	185
5.2.3 爆炸视图	116	8.2.4 Workbench 环境	186
5.3 Solid Edge 二次开发	116	8.3 ANSYS 分析实例	188
5.3.1 Solid Edge 二次开发方法	117	8.3.1 刚架	188
5.3.2 Solid Edge 类库	117	8.3.2 平面结构分析	198
5.3.3 Solid Edge 二次开发实例	118	8.3.3 三维实体分析	206
第 6 章 SolidWorks 应用基础	121	第 9 章 OpenGL 开发基础	214
6.1 SolidWorks 基础概念	122	9.1 OpenGL 的基本概念	214
6.1.1 SolidWorks 的特点	122	9.1.1 OpenGL 工作流程	215
6.1.2 SolidWorks 的用户界面	126	9.1.2 OpenGL 具体功能	215
6.1.3 特征造型	128	9.1.3 OpenGL 坐标系	216
6.1.4 装配建模	129	9.1.4 OpenGL 坐标变换	217
6.2 SolidWorks 交互式建模实例	131	9.2 OpenGL 编程基础	219
6.2.1 连接管零件建模	131	9.2.1 OpenGL 数据类型	219
6.2.2 装配建模	134	9.2.2 OpenGL 函数形式的约定	219
6.3 SolidWorks 二次开发	137	9.2.3 图元与命令	220
6.3.1 SolidWorks 二次开发方法	137	9.2.4 绘制方式	220
6.3.2 SolidWorks 类库	139	9.2.5 帧缓存和动画	221
6.3.3 SolidWorks 二次开发实例	140	9.3 OpenGL 与 Visual C++ 编程	221
第 7 章 Pro/Engineer 应用基础	146		

9.3.1 OpenGL 编程基本框架	221	附录 A 常见机械 CAD 缩写术语表	230
9.3.2 使用 MFC 进行 OpenGL 编程	222	附录 B 常用机械 CAD 词汇表	233
9.3.3 OpenGL 应用实例——OpenGL 光源 小球动画	224	参考文献	236
附录	230	读者信息反馈表	

第1章

机械工程 CAD 概述

追求数学形式简洁完美，探求大自然奥妙是科学发展的动力，是科学发现的源泉。对比之下技术发明的动力则似乎是人类“好逸恶劳”的趋向。人类社会在了解认识自然和改造自然的历史过程中，在自主设计、制造工具和工程构筑物，改善自己衣食住行用的历史进程中，在实现物质、能源、信息的时空变换和形态变换中，发展出人类特有的科学、技术文明，同时也改造了人类自身，实现了人类自身的物化和异化。

人类从屈服自然、了解自然、征服自然、改造自然到融入自然，走过了漫长的岁月。原始社会的居民面临自然界各种灾害威胁、疾病和饥饿的现实，神秘的自然力崇拜由此而生。大约在公元前三千年左右（中国炎帝黄帝时代），文明第一次爆发，人类学习掌握了家庭养殖、植物耕作技术，饮食得到了保证，学会人工取火，制造车船，构筑房屋，发明纺织、青铜、铁器、天文、历法、文字、水利，人类获得第一次大解放，免除了饥饿。人类学会了利用火力、风力、浮力，减少摩擦力，文明传承有了语言文字载体，人类社会从采集狩猎时代进入定居农业养殖畜牧时代，农业文明持续了几千年。

在第一次文明发展时期，东方远远超出西方，中国成为超级大国，主宰东亚，出现秦、汉、唐、宋、元、明、清等强盛王朝。从科学技术的角度分析原因，在于东方比西方早出几百、几千年拥有了四大发明，秦始皇在中央集权体制组织下可以统一文字，组织修建水利、道路、大运河、长城、直道。中华文明区域从黄河核心区域扩张到汉、唐、元、清和今日中国版图，最盛时代为元亚洲帝国疆域。以儒教文明立国的东亚文明和中国一直没有消亡，对比西方的埃及、希腊、两河、印度文明和罗马帝国、波斯帝国则一个个中断或灭绝了。东亚儒教农业文明是以行政集权、天人合一、五行循环论、数学算法思维为表征的。

宋元时代东方四大文明传入西方，与0~9阿拉伯记数符号体系、古希腊罗马演绎科学体系结合，唤醒了西方希腊罗马文明，科学最终战胜了神权，日心说代替地心说，开创了牛顿时代。西方科技精密演绎实证体系超越东方科技直观经验算法体系，经过百余年科学沉淀，以1784年瓦特蒸汽机发明为标志，人类迎来了第二次大解放——解放体力劳动，文明第二次大爆发，欧洲的英国成为世界的主宰。从技术角度出发，应归功于工业文明，轮船、火车、汽车、飞机彻底改变了有形物体运输速度和运输方式，蒸汽机、内燃机、电动机，人类获得超出风力、浮力、畜力多倍的化学力（矿物燃料）和水力，其本源还是太阳能。电磁波的发现使得人类跨越电信时代，无形信息传输有了光速的翅膀，电报、电话、电传、电视代替农业文明的烽火台、邮驿系统，西方文明殖民全球，武力征服。这个工业文明以

1910 年大英日不落帝国为发展顶点，随两次世界大战而衰落。

科技大跨越，人类解放体力的同时，换来艰辛的脑力劳动，微积分用于工程设计计算带来海量数值计算。人类似乎摆脱了大地的束缚，可以上天、入地、下海，却带来大脑的不自由。西方的推理演绎抽象文明似乎到达极限。

在人类追求脑力计算解放的过程中，西方的解析体系和东方的算法体系优势互补，终于结下今日信息时代的果实。发源东方的八卦和算盘启发西方莱布尼兹和帕斯卡发明二进制、机械计算器，原子时代的电子晶体二极管、三极管奠定了计算机物质储备，巴比奇差分机、维纳控制论、冯·诺依曼的顺序存储计算机体系结构理论，1946 年催生第一台 ENIAC 电子计算机，宣告人类开始第三次大解放——脑力劳动，文明第三次大爆发。风水轮流转，原先位于地球偏僻角落的美国，由于大洋环绕，免除两次世界大战威胁，反而大发战争财，跃进成为世界超级大国。如果说工业时代是英国时代，是以模拟技术、大工业生产、纸张媒介有形物质流动为特征，那么信息时代是美国时代，是以数字技术、无形信息流动、个性化制造享受为特征。

知识在爆炸，技术在革命，文明在加速。中国处在超级大国地位几千年，英国处在超级大国地位几百年，美国处在超级大国地位仅仅几十年，2001 年 9 月 11 日恐怖袭击宣布以原子弹、卫星、经济征服、文化影响、制造小国为特征的美国信息文明开始衰落。

现在人类身处信息时代，那么未来的第四次人类大解放，文明大爆发在哪里？未来的超级大国在哪里？人类解除了饥饿、体力、脑力约束以后，还需要解除什么约束呢？

人类幻想穿越时空局限，让时间倒流、摆脱空间引力约束，在感受宏观世界以外能感受微观世界和宇观世界，能在固体、液体、气体、真空中自由穿行运输。基因技术、克隆技术已经掀起生物时代的曙光，长生不老，没有疾病威胁，能量型智能机器人，也许不再是梦。虚拟现实技术昭示虚幻的时空也许可以再现。超越光速的旅行，反物质与正物质结合获得无限的能源动力，也许可能存在。

现代科技使得人类已经从单调的局部的活动区域走到地球之外，从单一纸张媒介静止文字记录走向电磁媒介动态多媒体记录，从个体的读书、看报、听故事获取知识信息走向群体的网络的跨越地理隔绝来源获取信息。

1.1 机械工程 CAD 的基础

图形符号是人类的共同语言，图画、示意符号是没有国界的。语言在一定意义上可看做一群人的图符。工程图样是工程界的“世界通行语言”。人类生活处处离不开图形、图像的存在，电影、电视、书报都是图形化信息。

人类是利用五官来感受世界，实现与外界沟通，获得信息，并反作用于外界，实现智慧与经验的传承。达尔文理论——生物自然选择进化后果使得人类依靠视觉通道获得信息占据了优势主宰地位，人类主要通过视觉来获得外界的信息和理解外界的信息。人的长处是擅长直观形象思维，一幅图胜过万语千言。计算机擅长的是“数值运算”，高速准确和没有遗忘。计算机绘图实质上是实现外在直观图形与内在数字化图形的相互表达。同样一个公式、一个算法流程、一个三视图、一篇文章描述，要读懂、明白并使用，需要几十年的学习积累，知识的获取可以依靠专家，知识的使用发挥威力则需要大众。即使是一个专家面

对自己熟悉的领域,面对数字数值符号的海洋,要分析归纳抽象总结出规律也是苦难的差事。

工程 CAD 的本质是实现外部的具有真实感的图形图像信息、文字信息、公式符号模型信息在计算机内部作数字化处理(满足数学、物理、化学、图形学规律)并传输到异地再现。表面上工程 CAD 不过是解决工程问题的计算机程序集合,本质上工程 CAD 的设计、实现、使用,是沉淀了千百年的优秀科技人员智慧的结晶。工程 CAD 研制和应用开发,它的过去和未来都需要站在科技巨人的肩膀上。

计算机数字绘图技术的出现,彻底完美地实现了数与形的有机统一,解析建模、过程建模等抽象思维工具获得图形建模直观思维工具的配合,使得工程 CAD 走出象牙宝塔,实现了工程问题求解的智能化、非专业化,从根本上改变了传统的工程用制图方法、设计方法、分析方法、仿真方法、制造方法、艺术方法和思路模式,改变了科技人员的工作环境和习惯,使得工程设计人员第一次从繁琐的“爬图板”工作中解放出来,可以从事创造性的设计工作。

在二维工程制图中,核心工作是如何依据几何学和制图学的基本知识,依据图形特性和尺寸计算绘图需要的关键点坐标,然后按照线段、圆弧、圆、曲线、文字等图元绘制命令一个个单独绘图。这些图元拓扑关系(相连、重合、相切、平行、垂直、长对正、高平齐、宽相等)等依据坐标计算和捕捉来保证。绘图的中心是单一图元的点坐标计算。

现实世界的物体(零件、机器)是三维的,采用图纸制图是因为缺乏强有力的表达工具。计算机二维绘图解放了二维制图中重复繁杂性的工作,但是工作模式和思维方式仍然是电子图板化的工作。对于设计师而言,在他头脑中构思的三维物体仍然需要通过制图学理论转化为三视图等形式,阅读他人图样,与其他人交流仍然需要在大脑中重构三维图形,这两次转换对于设计师的大脑是一件痛苦的工作,计算机绘图只有从二维层次上升到三维层次,CAD 才能真正从绘图意义上升成为设计意义。

传统绘图方式受限于纸张油墨等媒介的物理限制,受到人类先天局限,要实现曲线曲面绘制已经很难,实现三维透视绘制更是梦想,实现真实感三维动态彩色图形则是幻想。重复的繁琐劳动,修正错误的艰难,单调的绘图、描图、保管工作和黑白线条图样式,随着计算机辅助机械二维三维 CAD 技术问世宣告结束了。在工程设计和图样绘制方面,计算机交互绘图有以下无可比拟的优越性:

1) 绘图工具不再是图板、直尺、三角尺、圆规和铅笔等,而是面对计算机,眼看屏幕,手按键盘、鼠标或数字化仪,劳动强度大大减轻。

2) 绘图实现了标准化、一体化。设计员、绘图员、描图员可以集为一身,线型、颜色、层次、文字、剖面可以统一风格,为图样交流和修改带来了便利,设计绘图质量大为提高。可按实际尺寸绘图,不用考虑比例。

3) 复用能力。对于借用图样、类比设计,设计员可以把已有图形文件和别人的图形文件调出来稍作修改,对于重复、阵列、对称几何拓扑相似图素可只需绘一次和作成图块,然后可多次复制引用插入,绘图效率极大地提高。

4) 修改能力,设计绘图员再也不用担心绘错图,可以从草图设计,分步细化,生成最终工程图样,Undo 和删除能力充分满足了设计绘图人员的愿望。

5) 智能设计绘图能力。标尺寸、画剖面线、开孔、剪切在计算机绘图中已成为轻轻一

按命令键、菜单而已,利用计算机,可以引进和开发出本行业设计、分析、绘图一体化专业软件,把程序性、检索性的重复工作编成程序,用户只须调用即可。

6) 管理方式发生革命性变革。电子化图样可以通过计算机网络进行分发、存储,复制到磁盘、光盘上,进行电子化检索,再也不需要图纸柜、防火、防盗、防蚀和晒蓝图。工厂档案处和描图员的工作可以削减了。

7) 三维设计能力。现实中的产品、人脑中的产品设计构思均是三维的,只是由于图样等表达工具是二维的,才出现三视图、剖视图等各种方式,这种 3D 与 2D 概念转换极不自然。计算机绘图技术现在已发展到三维设计水平(三维建模、装配和仿真制造,参数化,并行化,特征化设计),三维数字产品模型可以投影生成各类视图,可以自动编制工艺文件、数控文件。

8) 多彩性。传统的图样是黑白线条图,计算机图可以具有多种颜色、线型、视图、多个层次、多个视角和矢量点阵混合图、着色图、动态图、爆炸图等特性,创造出多姿多彩的计算机图形世界。

在不远的将来,计算机和网络技术的发展,将从根本上改造现有制造工厂的技术层、管理层、制造层的现状,实现从三无设计(无图板、无绘图工具、无描图)到三无生产(无纸设计、无纸管理、无纸制造)的飞跃。计算机绘图技术作为基础技术,从二维绘图上升到三维设计,CAD 上升到 CIMS 层次。CAD 软件进一步升级换代,其新版本将在微机群上实现三维并行特征设计,工作站和微机 CAD 软件将走向融合统一。

CAD 技术催生了基于三维图形实体建模的 CAE 技术和 CAM 技术,实现工程问题可视化建模和工程分析结果可视化输出和仿真,在虚拟装配、虚拟制造、虚拟仿真方面,图形技术是不可缺少的。

三维几何造型技术是机械三维 CAD/CAE/CAM 的基石,也是扩张占据广阔市场,成为工程 CAD 产业台柱的所在。计算机的出现替代了算盘,计算机二维 CAD 技术替代了描图员,计算机三维 CAD 技术则替代了效果设计师,CAE 技术使得人人都是工程分析大师,CAM 技术使得 NC 编码不再神秘,CAI 技术使得知识的传授在工程 CAD 领域可以以多媒体远程方式做示范,未来的学生或许只需要在大脑中种植一个芯片就可以获得知识;生病的时候专家名医名师不再陌生而遥远,他们通过网络随时随地在等待为病人诊断服务。

1.2 软硬件技术结合的应用系统

工程 CAD 顾名思义是应用于工程领域的计算机辅助设计软件。现代社会中工程含义比较广泛,如机械工程、电气工程、液压工程、水利工程、土木工程、管理工程、扶贫工程、希望工程。从软件层次看,工程 CAD 是位于操作系统、基础语言平台之上的支撑应用型软件,是以数值分析和图形输入、输出为特征的工程设计与分析软件。

工程 CAD 的使用与开发离不开计算机硬件与软件技术的发展。近年来以 GUI 图形界面输入、输出为交互特征,以三维特征建模技术为内核的 CAD 软件已经成为机械工程 CAD 的主流,一方面由于人类图形视觉信息为主的先天天性,另一方面由于计算机图形学理论与图形硬件、软件的完善和成熟,硬件价格低廉,大幅度降低了应用开发成本。

工程设计技术人员主要通过图形来表达设计思想和设计意图,指导工作,与人交流,但是人类直觉形象思维在宏观上快速总体把握,而存在在微观细节上难以精细准确的缺点。现代工程设计与分析需要高度精确的信息数据,不允许模糊信息存在。可是工程问题采用语言文字描述问题无法准确直观,采用数学物理符号则高度抽象和专业。各种解析模型的建立解决了描述准确问题,但是造成人类理解交流的障碍。例如要理解素数理论、抽象代数记号需要专业知识。采用过程建模,研究数字算法和数值分析技术,可以针对现实工程问题获得高度精确的数值解答,但是输出海量的数值,使得工程人员分析起来繁琐不堪,理解把握上存在障碍。图形建模方法,尤其以三维几何参数化特征建模为代表的工程 CAD 软件,由于找准了直观与准确互补的人机结合点,因此成为主流工程 CAD。

图形化工程 CAD 需要强有力的硬件和软件支撑。在硬件方面,对于计算机速度内存和彩色动态显示性能要求苛刻,另外还有价格要求、可靠性要求。从输入设备来看,一维键盘发展到二维鼠标,输入方式以文字界面字符输入发展到以交互选择对话框图标输入,要求操作系统从字符界面 DOS 系统层次上升为图形界面的 Windows 系统层次。从显示器发展来看,原来的单色灰度显示器 CRT 发展到大屏幕的真彩色 CRT、LCD 为主。它们对于内存的需求和外存的需求、硬件速度的需求,都呈现几何级数的增长。同样一个 640×480 大小屏幕,存储 25 行 80 列汉字,需要 $25 \times 80 \times 2B$ 的存储空间,而同样的像素信息,假设灰度 256,则需要 $640 \times 480 \times 256B$ 空间。若要求彩色信息、动态信息则存储需求更加庞大,巨量的数据、输出输入速度、计算速度、交互速度离不开硬件支持。图形硬件(硬件消隐、硬件剪裁、硬件着色、硬件变换)对于三维图形化机械工程 CAD 实际应用是不可缺少的。

曲线曲面造型技术是随着航空、汽车等现代工业发展与计算机的出现而产生与发展起来的一门新兴学科,是现代数字图形技术的核心之一。

形状信息的核心问题是计算机表示,即要解决既适合计算机处理,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。1963 年,美国波音飞机公司的 Ferguson 首先提出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。从此曲线曲面的参数化形式成为形状数学描述的标准形式。1964 年,美国麻省理工学院的 Coons 发表一种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定义一块曲面。但这种方法存在形状控制与连接问题。1971 年,法国雷诺汽车公司的 Bezier 提出一种由控制多边形设计曲线的新方法。这种方法不仅简单易用,而且漂亮地解决了整体形状控制问题,把曲线曲面的设计向前推进了一大步,为曲面造型的进一步发展奠定了坚实的基础。但 Bezier 方法仍存在连接问题和局部修改问题。到 1972 年,de-Boor 总结、给出了关于 B 样条的一套标准算法。1974 年, Gordon 和 Riesenfeld 又把 B 样条理论应用于形状描述,最终提出了 B 样条方法。这种方法继承了 Bezier 方法的一切优点,克服了 Bezier 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,从而使自由曲线曲面形状的描述问题得到较好解决。但随着生产的发展, B 样条方法显示出明显不足,如不能精确表示圆锥截线及初等解析曲面等。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,容易造成生产管理混乱。为了满足工业界进一步的要求,1975 年美国 Syracuse 大学的 Versprille 首次提出有理 B 样条方法。后来由于 Piegl 和 Tiller 等人的功绩,终于使非均匀有理 B 样条(NURBS)方法成为现代曲面造型中最为广泛流行的技术。NURBS 方法的提出和广泛流行是生产发展的必然结果。

NURBS 方法的突出优点是：可以精确地表示二次规则曲线曲面，从而能用统一的数学形式表示规则曲面与自由曲面，而其他非有理方法无法做到这一点；具有可影响曲线曲面形状的权因子，使形状更易于控制和实现；NURBS 方法是非有理 B 样条方法在四维空间的直接推广，多数非有理 B 样条曲线曲面的性质及其相应算法也适用于 NURBS 曲线曲面，便于继承和发展。由于 NURBS 方法的这些突出优点，国际标准化组织（ISO）于 1991 年颁布了关于工业产品数据交换的 STEP 国际标准，将 NURBS 方法作为定义工业产品几何形状的唯一数学描述方法，从而使 NURBS 方法成为曲面造型技术发展趋势中最重要的基础。

1.3 工程问题建模及其模型分类

工程技术人员要处理的现实问题是丰富多彩、变化万千的。工程问题建模就是要从现象抓住本质。解决好工程问题建模是求解工程问题的第一步。

任何一个复杂的系统及其周围环境的关系均可抽象成为激励（输入）、处理（系统）、响应（输出）的三个环节。如果输出反作用于输入，则构成反馈闭环控制系统，否则为开放系统。如果这种反馈作用是依靠人的五官四肢来实现，就是人机交互控制系统。如果通过设备传感器来实现，就是自动化控制系统。

工程 CAD 按照输入、系统、输出已知的不同情况，相应可以分为工程分析类、工程仿真类、工程控制类、工程预估类、工程设计类、工程辨别类软件。如果已知输入激励和系统参数，则是工程分析问题，属于正向求解。如果已知系统特性和输出响应，则是工程控制问题，寻求最优输入控制量和控制规律。如果已知输入与输出，则是系统辨识和工程设计问题。工程分析模块是所有工程 CAD 的基础模块。工程控制与工程设计软件实际上就是假设各种输入、各种系统特性，来评价假设条件下的输出满足要求与否。显然工程分析与工程综合是彼此相关的一个问题。工程建模则是软件开发的基础前提条件。工程模型与真实情况的符合程度，决定了工程 CAD 研制的成败。

现实的工程问题是复杂的、动态的、非线性的，存在离散性和随机性。在工程建模的时候，一个总体的原则就是抓住主要矛盾，遵循由简单到复杂、由低维到高维、由线性到非线性、由常数到变数、由静态到动态、由外观到细节的认识问题、解决问题的思路。

工程模型按照工程问题的维数，可以分为零维质点形心问题、一维线棒问题、二维面壳问题、三维体块问题。维数可以按照系统输入变量（自变量，函数定义域）和输出变量（因变量，函数值域）分类。同样的工程问题，输入维数和输出维数可能是不一样的。习惯上对于工程几何建模类（零件、装配、机器、系统）问题，认为输入与输出关系都是坐标分量对等关系，按照结果空间分为平面图形和空间图形。对于以物理分析为主的工程问题，按求解空间分类，可分杆件问题、平面问题（壳问题）、空间问题。其可视化输出结果一般认为是附属在几何形体上的外观属性（颜色密度）。按照物理信息的特性，又可分为标量问题（温度、密度、能量）、矢量问题（位移、速度、加速度）、张量问题（应力、应变）。

工程模型按照模型的数学特性，从大的方面可以分为线性系统与非线性系统（二次系统、高次系统）；稳态问题与瞬态问题；常微分问题与偏微分问题；线性方程组和非线性方程组；无约束问题和有约束问题；线性规划和非线性规划（二次规划）；线性收敛、超线性收敛、平方收敛问题。对于曲线可以分为一次直线、二次圆锥曲线（圆弧、椭圆、双曲线、

抛物线)、高级曲线(样条曲线、插值曲线、拟合曲线);对于曲面,可以分为一次平面、二次曲面、三次曲面和高级曲面。对于实体可以分为平面立体、二次曲面立体、三次曲面立体。

为了减少工程问题求解难度,经常需要对工程问题及其求解进行简化,如采用泰勒展开进行线性化、二次化、多项式化近似处理;采用 FFT 和 LAPLACE 变换把时间域微积分卷积问题转化为频率域代数式乘积问题;把高阶问题在一个局部区域进行一阶梯度展开和二阶牛顿展开,把非线性问题转化为线性问题和二次问题;把连续无穷自由度问题转化为离散有限自由度问题,从而把积分、变分方程转化为线性方程组来解。按照存储数据性质分类,可分为标量问题、向量问题、矩阵问题、记录问题、高维单元数组问题。按照数据结构组织形式,可分为线性表结构、层次树结构、网络图结构、关系表格结构等。

按照表达问题的方式,作者认为把工程建模方法从总体上分为数学解析建模、过程算法建模、数字图文建模三大类是合理的。

数学解析建模经常用于工程问题的抽象描述。它采用各种数学工具、数学符号、数学原则,利用代数、微分、积分、变分、级数、整数、实数、复数、矩阵、等式、方程、不等式、函数等数学概念,实现实际工程问题的高度符号抽象化描述。描述的客体一般也是高度抽象化的,如质点、弹簧、阻尼、刚体、集中力、分布力、网架、杆、面等。数学解析建模可以认为是实际工程问题遵循的物理、化学变化规律的形式化、方程化表达。各种专业基础课程的理论抽象与公式表达可以划入这个范畴。

数学解析建模是西方现代科技文明的精髓,它具备高度抽象、简洁、精确的特点,形式化描述系统,并在一些理想假定的情况下能得出系统封闭形式的解析答案。但是这种源于古希腊、罗马的演绎思维方法并不是万能的。

实际的工程问题由于存在高维性、复杂性、非线性、知识性,不仅难以用数学符号形式描述,而且有时即使描述出来,要得到解析解答也是不可能的。由高等数学可知,不是每个初等函数的不定积分都可以用初等函数来表达。常微分方程、偏微分方程、积分方程,甚至一些非线性方程除了一些理想的简单的情况,都没有通用解析解答。对于高维问题比如矩阵方程,即使理论上 CRAMER 法则,实际上也是不实用的。

东亚文明的算法萌芽思想,今天在计算机时代已经发展成为不可或缺的过程算法建模。计算机具备快速、循环计算简单数值问题的长处,使得把连续问题离散化,把解析问题数值化,成为当代工程 CAD 研制的共同道路。

采用过程算法建模,不仅解决了一些无法用数学符号建模的智能知识推理问题,而且给出了获得实际问题答案的求解途径。循环、递归、递推、分治策略的使用,使得工程问题建模可以充分考虑工程问题的细节,少作简化或不作简化,从而获得相当真实的解答,当然带来的后遗症就是计算机输出海量的数据集,从中寻找出规律性、指导性、结论性的成果比较困难。

对于实际的工程问题,一般在理论上采用数学解析方法描述问题,采用算法过程方法获得数值化解答。工程 CAD 编程依据就是过程算法,当然如何选择合适的过程算法离不开依赖解析模型进行工程问题定性判别。

数学解析建模和过程算法建模仍然无法满足各种工程问题的准确叙述和自动求解。如三维构造问题、图像识别问题,从海量数据集中寻找结论问题。利用人类的直觉领悟特性、视

觉特性和经验知识，在寻求解答的过程允许人类参与，这就是现代工程 CAD 为什么采用数字图形技术作为输入、输出的原因所在。这也可以归纳为第三种工程问题建模技术——数字图文建模方法。

总体而言，现代工程 CAD 软件研制需要采用数学解析建模、过程算法建模、数字图文建模三位一体技术。