

工 程 师 应 知：
计算机辅助设计与
辅助制造 (CAD/CAM)

〔美〕 约 翰 K. 克 劳 斯 著

机械工业出版社

工程师应知： 计算机辅助设计与辅助制造 (CAD/CAM)

(美) 约翰K. 克劳斯 著

金祖芬 译

吴亢 校



机械工业出版社

2-15-08

本书系统地阐述了CAD/CAM 的基本原理及其诞生和发展情况。主要内容有CAD/CAM 系统硬件、CAD/CAM 的功能、几何模型的建立、有限元法及计算机制造的基本原理等。本书还详细叙述了当前美国正在使用的CAD/CAM 系统,包括航空工业、汽车工业以及一般工业部门的情况,也介绍了美国、西欧、日本等国政府和企业界协作开发CAD/CAM 系统的情况,以及当前正在为把CAD/CAM 综合为一项统一的技术而作出的努力。

本书可供从事设计、工艺和计算机工作的工程技术人员以及大专院校有关工科专业师生阅读和参考。

What Every Engineer Should

Known About Computer-Aided Design

and Computer-Aided Manufacturing

The CAD/CAM Revolution

John K. Krouse

MARCEL DEKKER, INC. 1982

* * *

工程师应知:

计算机辅助设计与辅助制造 (CAD/CAM)

(美) 约翰K. 克劳斯 著

金祖芬 译 吴亢 校

*

责任编辑 邱锦来

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $4^{7/8}$ · 字数 103 千字

1987年6月北京第一版·1987年6月北京第一次印刷

印数 0,001~7,750 · 定价 1.20 元

*

统一书号: 15033·6698

译 者 的 话

计算机辅助设计 (CAD) 与计算机辅助制造 (CAM) 在工业发达国家内发展的速度很快, 对工业生产的影响也越来越大。不仅是少数大型公司, 而且是在众多的中、小型企业, 近年来也比较广泛地应用CAD和CAM。为了更进一步发挥CAD及CAM的作用, 在美国、西欧、日本等国家, 正在致力于将CAD、CAM技术的许多不同方面综合和统一起来, 为此进行了一些协作项目。

为了迅速发展和提高我国的生产技术水平, 更快地扩大产品品种和不断提高产品质量, 我们需要在工业生产中逐步应用和发展CAD与CAM。更需要在理论上武装广大工程技术人员, 并相应地进行研究试验工作。

关于计算机辅助设计的参考书籍和资料, 近年来出版和发表的不少, 但是对计算机辅助制造以及综合叙述CAD与CAM的书并不多。本书比较全面地阐述了CAD与CAM的基本原理、沿革情况以及其他有关的问题。包括系统硬件、几何模型的建立、有限元法的基本原理等。本书详细叙述了当前美国正在使用的CAD、CAM系统, 包括航空工业、汽车工业和一般工业的情况, 以及美国、西欧、日本等国政府和企业界协作开发CAD及CAM、并把它们综合为一项统一的技术所作的努力。

本书可供从事设计和工艺工作、计算机工作以及其他有关工程技术人员阅读, 亦可供大专院校工科专业和管理专业

的师生作为教学用书或教学参考资料。

本书作者约翰K·克劳斯系美国《机器设计》杂志的编辑部成员，曾在维脱罗研究室（Vetro, Laboratories）、古尔德公司（Gould Inc.）及贝利控制公司（Bailey Controls Co.）内工作，具有设计导弹、鱼雷及核动力系统的控制部分的经验，专长于CAD/CAM，在这方面出版了大量的文章，并因“填补设计与生产的缝隙”等文章而获得优秀编辑奖。

该书计量单位采用英制，其与我国法定计量单位的换算关系如下：

$$\begin{aligned} 1 \text{ ft} &= 0.3048 \text{ m} & 1 \text{ in} &= 0.0254 \text{ m} \\ 1 \text{ lb} &= 0.4536 \text{ kg} & 1 \text{ ton} &= 1016.05 \text{ kg} \\ 1 \text{ mile} &= 1.61 \text{ km} \end{aligned}$$

承蒙吴亢同志对译稿作了仔细的校审，并提出了一些宝贵的意见，在此深表感谢。由于译者水平有限，译文中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

序 言

计算机辅助设计 (CAD) 及计算机辅助制造 (CAM) 正在影响着工业界的几乎每一个领域。CAD/CAM 装置的数量以每年超过40%的数字增长。到1985年, 预计全部机械制图的90%由CAD来执行, 全部制造工作的30%也许将采用某些形式的CAM。

多数专家认为, 像CAD/CAM一样的计算机系统将继续其通常干的工作, 使工程人员从冗长、费时、不需要技术才智的工作中解脱出来。经验显示, CAD/CAM加速了工艺过程, 去掉抑制生产率和创造性的艰辛劳动和文书工作。

美国国家生产率科学基础中心指出:“从根本上提高生产率来看, CAD/CAM较之从电力以来的任何进展有着更大的潜力”。很多人把CAD/CAM看作提高制造的生产率的关键和克服世界范围内的经济萧条的最好方法。

虽然CAD/CAM是一种比较新的技术, 但已经对工程具有巨大的影响。而且, 未来系统的能力和影响肯定会更大。工程界的变化通常是缓慢和渐进的。甚至重要的发明, 通常在作为整体的工程界中所造成的影响, 不过是一阵微波细浪。但是CAD/CAM在过去没有过的行业中的每一个角落发展着, 它的影响可以在工程的每一个方面感觉出来。如果说在工程界中过去从来没有任何东西可以称为一次革命的话, 那么CAD/CAM就可以称作是一次革命。

正如工业革命的机器扩展了人们的肌力一样, CAD/

CAM 将扩大人们的智力。然而，这一变化的浪潮，不是依赖于会枯竭的自然资源，而是取决于人类思维的无限创造性。我们当前正在看到工程的这一新方法的开始。

工程师和管理人员学习这一新技术时，往往会遇到困难。专门论述CAD/CAM 系统和计算机技术各个领域的文献是很多的。但是经过周密考虑，懂得所有不同领域如何配合在一起的专家并非很多，并且很少能够用初学者容易理解的词汇来解释CAD/CAM。此外，由于CAD/CAM 对于许多人意味着不同的事物，而在术语和定义中存在一些基本问题。一些人认为CAD/CAM 是自动制图和NC 磁带录制。其他人则认为包括用一个如CAD/CAM 的计算机来进行实际上的全部工作。工程师和管理人员明显需要更为中肯的解释。

有必要加以澄清的是本书的目的，本书的意图是能作为CAD/CAM 中主要工作的一个有用的指南。本书突出和详细说明了主要的CAD/CAM 领域，说明它们如何配合在一起，说明主要的CAD/CAM 用户，和概述为开发统一的系统而进行的协作努力。本书意欲作为初学者可以进一步掌握有关CAD/CAM 知识的一个坚实的基础。它也能对那些与这一技术有密切关系的人们，提供一个CAD/CAM 的发展远景。

约翰K. 克劳斯

目 录

第一章	CAD/CAM 的 诞生和发展.....	1
第二章	系统硬件.....	21
第三章	CAD/CAM 的 功能.....	37
第四章	几何模型.....	57
第五章	有限元的功效.....	67
第六章	计算机制造.....	90
第七章	系统在工作.....	112
第八章	协作的力量.....	130

第一章 CAD/CAM的诞生和发展

长时期内，计算机是一种庞大的，昂贵的机器，它只能由那些熟悉程序设计和有关工作的人来运用。但是，技术的惊人进步已经使得计算机更小型化、更有效、更便宜和更易于应用。结果是，计算机迅速扩大到许多不同的领域并且改变了我们的世界。

工业、教育、医学、科学及社会的其他部门都受益于计算机。但是，最依赖于计算机和发展最迅速的唯一领域是CAD/CAM——计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）的综合技术。这一飞跃技术是几年来计算机系统不断演变发展的结果。将近40年的早期工作，奠定了今天的CAD/CAM系统的基础。

数字电子计算机首次出现在40年代。它们是巨大的电动机，应用微小的继电器实行计算。这一代计算机的第一台并且是最大的一台为5 ton的自动程序控制计算机或马克1号（MARK 1）如图1.1所示。电动计算机进行运算比早期的机械式计算器及计算机快得多。例如，马克1号能在0.3s内加或减两个23位数，在0.6s内将其相乘。

不久，继电器和其他的机械运动零件为电子管所取代。由电子管制造的电子触发器象电子脉冲信号开关那样进行开和关。这种电子管计算机的第一台是ENIAC（电子数字积分计算机）系1946年美国军队研制的。接着，在四十年代后期其他许多电子管计算机迅速陆续出现。其中功率最大的是

IBM（国际商用机器公司）的海军军用研究计算机如图1.2所示

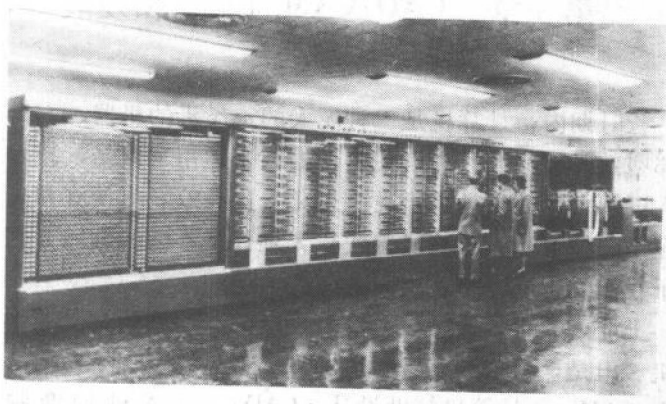


图1.1 曾经制造的第一台也是最大的电动计算机为马克1号，完成于1944年，这台计算机重5 ton，含有用500mile导线连接的3300多个继电器

由于电子脉冲及电路的反应要比机械零件快几千倍，计算速度急剧提高。在四十年代中期，一台电子管计算机乘两个10位数要 $1/40s$ ，到五十年代中期只要 $1/2000s$ 。计算速度也随着磁性设备诸如数据存贮用的磁盘、磁鼓以及程序存贮用的磁芯的出现而提高。这些代替了早期计算机的穿孔卡和其他人工数据输入方法。

五十年代后期，在计算机电路内用晶体管替代了电子管，产生了新一代更快、更小型化的设备。这一时期最大功率的计算机是IBM的STRETCH计算机如图1.3所示。这种固体装置的应用使计算机急剧地改观。晶体管的大小是电子管的 $1/200$ ，由于它产生的热量只是电子管的几分之一而能紧

密地封装。这样，计算机变得紧凑得多。而且，信号传输距离短及固体装置响应的时间快；因此计算速度也加快。晶体管计算机能够在 $1/100000\text{s}$ 内乘两个10位数。此外，固体晶体管远比电子管稳定和可靠得多。



图1.2 五十年代中期功能最强的计算机是海军军用研究计算机，它包括了9000个电子管

在七十年代，集成电路使计算机的尺寸和价格进一步下降而计算速度则增加。由成千个晶体管和其他元件组成的整个电路紧缩在糖果大小的硅片上。一个计算机逻辑电路上的这种芯片之一示于图1.4。这些芯片转换信号的速度允许计算机每秒钟能作几百万次的计算。它也将计算机的尺寸减少到由分立元件组成电路的正常需要尺寸的几分之一。

由于集成电路技术，今天的计算机要比它们早先的同类产品更紧凑更快，而且便宜得多。现在最大的大型计算机处

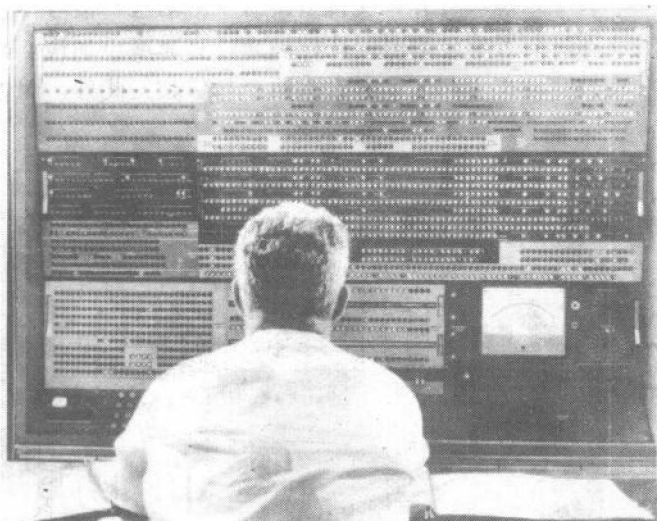


图1.3 1960年制造的功能较强的STRETCH计算机，
含有150000晶体管，每天可以执行1000亿条指令

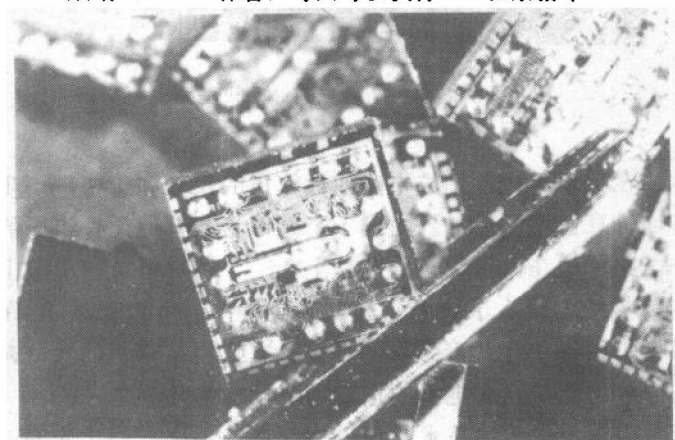


图1.4 这个硅芯片具有小型化电路可以放在针眼内，
在大约几个ns内转换计算机的电子信号

理巨大的数据量，它们的功能使早先的装置相形见绌。另外，大约一张书桌大小的较小的小型计算机，现在可以处理象应力分析那样的复杂工作。这在几年以前，还需要一台大型机。并且，如图 1.5 所示的一个打字机大小的台式计算机，具有几年前能装满一个房间的庞大系统的计算机功能。最小的是所谓微型电子计算机，它具有全部基本计算机必需的电路，



图1.5 IBM 5120型台式计算机，具有20年前可放满一个
 $20 \times 30\text{ft}$ 房间，重 1 ton 的设备的功能

在一个书写板大小的印刷电路板上容有几个集成电路芯片和其他元件。计算机电路的急剧缩小已能使烤箱、工具、收款机和汽车等产品配有机内智能装置。

所有计算机从巨大的大型机到极小的微型计算机都可以是CAD/CAM的一部分。许多CAD/CAM系统中的装置，如智能终端和绘图机设有内部微型计算机，这些微型计算机在综合系统中承担某些计算任务并赋予外部设备以较大的独立工作能力。现在在高级网络中，将台式计算机和较大的主机一起应用，以完成计算工作。多数组成CAD/CAM系统最主要部分的成套系统应用微型计算机。功能较强的大型机进行结构分析，处理巨大的数据矩阵并完成最高级计算机系统中的其他复杂任务。

为了未来的计算机更快、更加紧凑，研究人员正在使电路进一步小型化，一些专家甚至预计到2000年，可能用图1.6所示的可以握在手上的计算机进行分

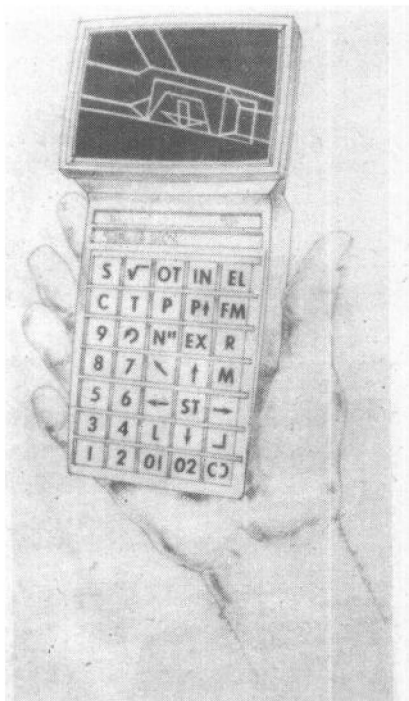


图1.6 未来的计算机系统可能是可以握在手上的型式，与今天的袖珍计算器一样紧凑，经济

析。预测这些装置是如此紧凑和经济，以至可供工程人员日常应用。象今天应用袖珍计算器一样。交互式绘图。

计算机较以前更紧凑、更便宜以及功能更强。但是，CAD/CAM系统迅速扩大使用的主要原因之一是由于使用者与计算机的联系日益方便。以往，用户用成组的数码穿孔卡或纸带盘将数据及指令输入计算机，并从计算机取出由大量穿孔纸打印出成列的未经处理的数字结果。这样，用户必须具有计算机编程和操作应用机器的经验。并且通常需要相当多的时间去执行一个程序及解释其结果。

但是，这些计算机操作的早期限制（今天，很多人想到计算机时，在他们的头脑中仍然这样认为）已随着交互式绘图的出现而消除。这里，用户在显示屏幕图象上与计算机通话。操作这些所谓的友好系统，实际上不需要什么计算机知识。而且，在人和计算机之间的通话是实时的，也就是计算机响应其用户的指令几乎是瞬时的。

交互式计算机绘图的一个例子示于图1.7。终端显示一个应力梯度分析的结果为等应力线。很容易地正确定出高应力区域是那些高度集中的应力线。这一曲线所代表的长长的数值数据以表格的形式打印输出，实际上是难以搞懂的。

交互式绘图成为一个把人类的思维形象，很方便地翻译成计算机语言的手段，并且反之亦然。在计算机内部，以二进制方式处理数据，也就是所有的数字、字母、符号及指令用一系列的两个数字—0与1来表示。例如字母表的一个简单字母可用11010001表示，这称为机器语言。

机器语言采用二进制形式是由于二进制数据在计算机中容易运算。简单地用计算机电路的开或关来表示机器语言的0与1。在今天的计算机内，使紧凑的集成电路开和关。但

是早期用分立的晶体管、电子管或电动继电器的计算机表示数据，也采用同样的基本原理。

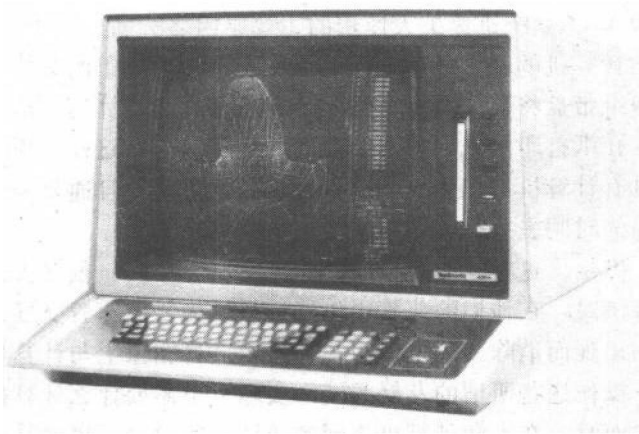


图1.7 Tektronix 4054 型交互式绘图终端显示的曲线可以精确地测定应力线集中的可能的疲劳区域。曲线所代表的大量数据如用表格形式说明将是令人生厌的

早先，一个用户与计算机的联系是直接用机器语言。就是，甚至执行一个如乘或除这样简单的指令，也要列出长长的0与1程序清单。

然而，在五十年代中期，用符号编码简化了编程工作。程序员应用一组代表某些标准计算机指令的英语语句。而后这些语句通过一个翻译程序自动转换为机器语言，并馈入计算机。最初的高级程序语言之一是FORTRAN（公式翻译），它是为了科学和工程数据而开发的，今天仍在广泛地应用。其他语言例如用于管理的COBOL及BASIC也出现了，并仍在应用。

这些程序语言提高了用户与计算机相互联系的速度。但是通常需要操作计算机的编程技术训练以及熟悉机器内部的工作。并且冗长的含有从计算机输出结果的数字打印输出是令人生厌的，其解释也是耗费时间的。

而后在六十年代初期，开发了交互式绘图，使用户不需要经过编程、耗费时间的编码及其他计算机工作训练而得到计算机的好处。早期开发的交互式绘图之一是麻省理工学院的Sketchpad Project，在这个系统中，和那时用以鉴定飞机相似的一个阴极射线管（CRT）显示屏幕，与一台计算机连接。数据输入是用一支手持的光笔，光笔是一个圆柱体，在其末端系有一个光电管。计算机感受到光笔在显示屏上的位置并在屏上照射处作一亮点以示响应，同时在其存储器中存贮坐标的数据。

通过在屏幕上指定的点，并执行简单的计算机指令，用户可以很快地生成直线、圆、弧及其他几何图形。例如要作圆，用户只要规定半径和圆心的位置。应用这些方法，用户能在显示屏上很快地作出完整的图形。可以用贮存于计算机内的坐标数据库以处理显示屏的图象，作出图形的硬拷贝，或作为某些几何分析形式的输入。使交互式绘图如此具有吸引力的一个特点是：它与计算机联系是实时地进行的。这样，没有计算机批式计算工作的长的等待时间。计算机的反馈几乎是瞬时的，交互作用几乎是在谈话的方式中发生。

某些交互式绘图系统是在六十年代开发的。然而多数只限于在一些极大的公司中使用。如通用汽车公司及波音公司开发了他们自己的内部系统。这些公司能够提供这个系统的开发费用及这系统运行所需的昂贵的大型计算机。然而在七十年代初期，交互式绘图可以在费用较少的小型计算机上进