

HOPE

CAD/ CAM

实用技术及应用

北京希望电脑公司



CAD/ CAM实用技术及应用

冬青 肖绪生 任旭战 编译

- * Preface
- * Representing objects
- * Representing relations
- * Graphical techniques
- * Draughting systems
- * Wire-frame modelling
- * Surface modelling
- * Geometry of curves
- * Geometry of surfaces
- * Solid modelling
- * Finite element analysis
- * Kinematic analysis
- * Electronics - logic and layout
- * Architecture - spatial layout
- * Realism in computer graphics
- * Geometry in motion
- * Shape grammars and the generation of designs
- * Integrating databases and data transfer
- * Computer - aided manufacture

北京希望电脑公司

一九九一年八月

内 容 简 介 和 说 明

本书主要根据英国空中大学(Open University)的《Principles of Computer-aided Design》一书进行编译的。它主要讨论了CAD/CAM的数学基础、几何造型的基本原理,辅助设计(CAD)和分析(如FEA等)、辅助制造(CAM)和发展前景等方面的内容。其中CAM部分是我们根据实际开发PCADM系统的经验而增加的。

尽管本书是一本CAD/CAM的入门教材,但有些技术和算法是很实用的。阅读本书要求有一定的计算机基础知识。它可以作为机械、建筑、电子、计算机及应用数学等工程类专业学生或工程技术人员的教材或参考书。

本书有肖绪生同志编第6、7、8、10、11、12、13、14、15和16章,任旭战同志编译了第1、2、4章,东青同志编译了第3、5、9、17、18章的前言部分并对全书进行了校核。由于时间、水平和经验等方面的因素故书中肯定存在不少问题,恳请读者批评指正。

愿本书的出版能对CAD/CAM 技术的普及和推广起到积极的作用,在此谨向关心本书出版工作的同行、老师和有关人员表示感谢。

编者

一九九一年七月一日

§ 1. CAD/CAM系统的起源

迄今为止, 计算机辅助设计/辅助制造 (CAD/CAM) 技术的发展只不过才有三十年的历史。八十年代初它已发展成为工程界实用的工具, 目前, 它在世界范围内得到了广泛地普及和应用。

如果我们真正寻找CAD技术的起源, 这将追溯到 Ivan Sutherland 在美国麻省理工学院(MIT)于1962/63年研究开发成功的 SKETCHPAD 系统 [Sutherland 1965]。在此之前, 计算机还仅仅用于工程设计的分析计算上。SKETCHPAD系统第一次允许设计人员使用光笔和显示屏交互操作计算机图形。

在设计阶段, 使用上述系统初步在计算机上实现了图形的直接输入。计算机可根据所设计的物体形状自动作它们的性能分析。例如, 能够显示和计算梁式结构的单元强度, 或者是模拟印刷电路板的电流和电压变化情况。

SKETCHPAD系统的第一个版本仅能绘出二维的图形, 由 T.E. Johnson [1963] 开发的更新版本允许物体在三维空间中造型并可以从不同的视点观看所设计物体的投影图。(如图 0.1)

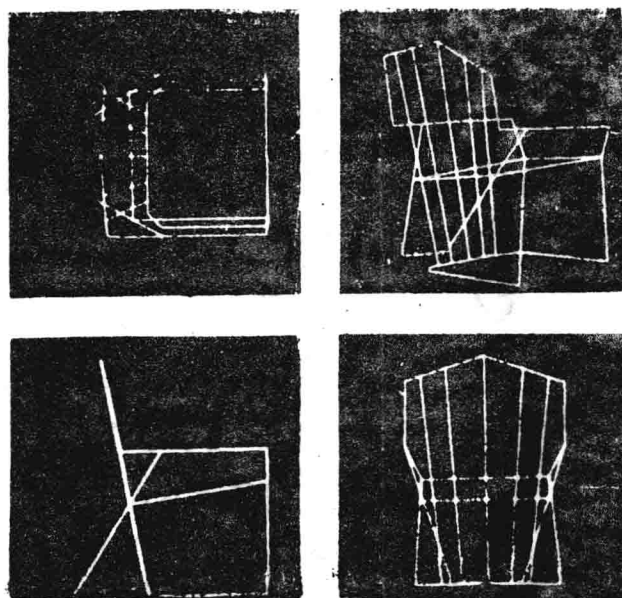


图 0.1 SKETCHPAD III系统显示的图形, 一个椅子的立体图和三面视图

几年以后，又是在美国的麻省理工学院，世界上第一台数控加工机床问世了。它具有读取穿孔纸带上加工指令和数据，自动加工机械零件的能力。初期，这些指令和数据是工艺人员根据传统的工程图手工准备的，后来研究开发的自动编程语言（APT），提高了零件编程效率，在此之前用手工编程往往很费时间。

开始的时候，CAD和CAM系统是分别独立发展的。然而，当它们各自发展到一定水平以后，两个系统的联接就成为很必要的了。再往后，就出现了计算机辅助设计/制造（CAD/CAM）系统。在该类系统中，首先在计算机里建立所设计物体的几何模型，数控加工纸带是由系统根据存贮的几何模型自动生成的。然而，在六十年代要真正实现CAD与CAM系统的联接是相当困难的，只是当进入八十年代以来，计算机和工程界才研究开发出实用的商品化系统。

大部分现代流行的CAD系统初期的研究工作都可以追溯到五十年代或六十年代，它们都经历了类似的发展过程：二维计算机绘图系统；三维计算机几何造型系统；设计特性的自动分析；设计和制造的集成化系统——CAD/CAM。

六十年代初，由于计算机硬件价格昂贵的原因，首批CAD系统用户都是一些大的汽车、飞机公司。例如，美国的通用汽车公司、波音公司和洛克希德公司等。同时一些大的电子公司也将计算机技术用于印刷电路板和集成电路设计之中，如：海尔加德和莫托洛拉公司。

后来，CAD技术就普及到了一般工程和建筑设计之中，特别是一些大的工程项目的应。七十年代，CAD系统在图案和纺织品设计、电视节目的动画模拟和印刷等行业都得到了广泛的应用。

§ 2. 设计和制造过程的总体结构

怎样将设计和制造作为一个整体来看，充分发挥计算机的各种特长呢？许多作者试图描述一个设计过程的典型结构，并在设计人员完成工作过程中建立一些计划准则和各种活动的标准流程。[Archen 1965; Jonco 1970, March 1976; Pabls-Beitz 1984] 这些作者所使用的术语有很大差别，其中主要的原因是不同专业的设计过程和所要得到的结果本身就有很大差异。例如：人工制品的几何类型在每一种特定情况下会有什么性质，加工特性的变化反过来会影响到设计过程；在某些工程领域，设计的技术条件是需要严格定义的，而其它领域的设计人员（如建筑工程设计）则可以有大的选择自由。进一步说，同一个专业不同的设计员完成他们的工作也可能有许多不同的方法。

然而，尽管各个行业之间的产品生产存在着很多差异，但还是能从中抽象出一些公共步骤的。（如图0.2）

商品生产活动中，第一项任务就是制定项目计划书和技术规范。这是设计人员根据所要设计的产品而制定的实施计划和技术性能参数或标准。在此阶段需要收集大量的不同类型的资料、信息和参数，并注意与现存同类型的产品进行比较，它的市场情况如何，加工条件的限制，还要考虑到技术标准和技术条件的要求等等。

第二阶段是新产品的综合设计阶段，这是设计过程的主要步骤，设计者的想像力和创造力在这个阶段得到充分地发挥。事实上经常存在这种情况，新产品的的设计往往

是老产品的改型。我们也可以称之为产品换代。经过对老产品局部或整体的修改以后产生新一代产品。另外一种情况就是全部采用新的结构、零件和标准件组成新的产品。如果在新结构、外形或原理其它方面做得好就可以获得发明专利权。

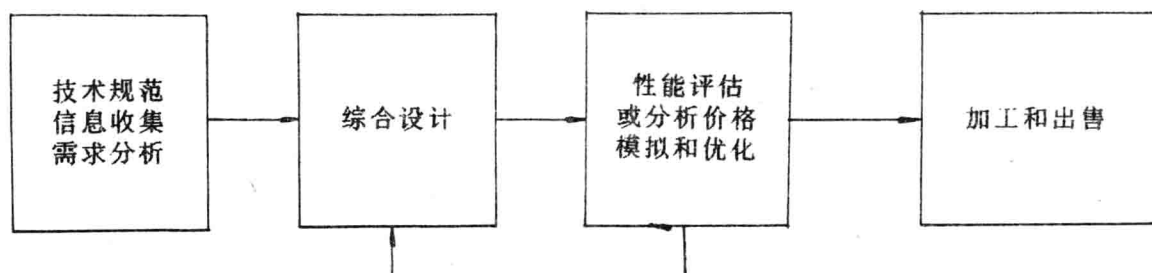


图 0.2 设计和制造的总体框图

第三是计算和分析阶段，在该阶段对设计的结果进行计算和检查看能否满足技术规范的要求。首先，应该进行理论计算和概念上的检查，接着可做物理模型或样品的实际测试来验证理论模型和技术条件的正确性与合理性。

不同产品的性能标准可能不同，也可以提出很多。但起码对机械类零件或结构可以检查它的强度和刚度，对建筑物来说可以检查热流通过房屋和墙流动情况。电气工程师可以模拟或测试电路的特性。机械工程师能够模拟机械零件在空间的几何轨迹。消费型产品的设计者可能更注意外观特性并且可能作一些美学方面的评估。对所有的产品来说，材料和加工的费用也是相当重要的考虑因素之一。最后才是产品的加工和销售。

将综合与分析，设计与测试关联起来的概念是很有用的。事实上它们并不能截然分开，在图 0.2 所示的流程图里，它们构成了一个循环体。设计员可以考虑多方面的变化因素，经过计算分析舍去或固定某些因素，对设计进一步更改，再计算检验它们直到得到满意的结果为止。许多作者都同意上述观点，其中最著名的是 Herbert Simon [1969] 的论述。他将一个产品的设计过程描述为：首先设计一个产品并考虑多种可变因素，然后改变这些因素检测它的效果如何，同时考虑到各种需求和约束条件。这是一个修改—检测的循环，但可以作为整体流程的一个步骤来考虑。

在实际设计工作中，设计—测试是最基本的过程，然而它受各种条件约束，测试的环境和标准近似影响的因素，各种误差的积累，最终产品只能近似满足人们的要求，设计的艺术很大程度取决于合理熟练地组织和平衡设计—测试过程之中。若想用计算机实现某类产品的自动设计，就应该想办法把设计—测试过程公式化和具有固定的流程，这样就可以在计算机环境里实现设计的自动化。

§ 2.1 设计问题的层次特性

如果把全部设计问题作为一个整体看待，测试施加对象也是整个产品，那么你就

错了。相反地，设计人员总是想把整个设计问题分解成若干个子问题来处理，这样可以使问题变得简单化易于解决。例如，对一个机械产品总是想办法把它们分解成组件或子结构，分别设计这些相对独立的部分并分别调整和检测它们，最后再装配起来，整体测试。若有不能令人满意的地方再对设计进行修改或重新设计组件或子结构，改进其性能，直到得出满意的结果为止。

大的工程项目和非常复杂的产品（如飞机和建筑群）不是一个设计人员而是多个设计部门之间协作才能完成。这就需要将一个大的工程项目分成相对独立的子项目，由各个部门或设计小组分别协调完成。在部门或小组里再将子项目分给设计人员，这是一个典型的层次组织结构。

在机械行业里经常将产品的设计问题分解成对组件或零件的设计，而在其它行业也可能又有另外的特点。例如在建筑业，建筑工程师、结构工程师和机械工程师都是工作在整个设计问题的子系统里或不同的侧面（如房屋布局，整体结构，加热致冷和通风系统等）。但它们有一定的关联不是能截然分开的，它有点象是解剖专家在分解人体的肌肉组织而不是各种器官。

整个设计过程可以分解成几个层次：总体层，分系统或组件层和两者的中间层。设计人员或设计部门总是要在这些层次之间上下协调，不可能完全遵循下述两种设计类型，即至底向上和至顶向下的风格。至底向上的设计方法是首先详细设计产品的零组件，然后以此为基础再进行总体设计将它们组合成最后的产品；至顶向下的方法是首先确定总体方案，然后根据该方案再详细设计或选用标准零部件。Simon [1969] 比较了上述两种设计风格，最后选择了其它制造性职业常用的组合方式。例如音乐家作曲的过程就是采用的组合模式。计算机程序员也面临着同样的选择问题：是至底向上由执行语句组成子程序，由子程序构成主程序；还是至顶向下由主程序分解成若干个子程序，子程序又分解成若干个可执行语句，或者两种模式都有之。

在比较至底向上与至顶向下的方案的同时建立综合的概念是很重要的。上述两种风格之间不是绝对的，孤立的，而是相对的，相互有一定联系的。高层次对整体设计方案的决策很大程度依赖于产品的外形、特性、功能和低层组件的可靠性。这一步是很重要的，如果决策不好就有可能出现下例情况：设计技术条件要求不合适，原理上行不通；产品的造价太贵过于复杂而买不出去；必要的成件或标准件还没有发明或生产不出来。

类似地低层次的决策是根据零组件的详细设计和它们之间的相互联系和协调关系来进行的。同时也要考虑到所需要的外型，零组件的特性，功能的稳定性，高层和次低层在本层的结构合理性，即组件或成件间与装配件或分组件之间的协调关系如何。低层的设计工作者不能擅自更改某个组件或装配接合部件，否则将影响整个产品的协调性和稳定性。

从某种意义上说，至底向上的设计方法可能更为常用，因为严密的协调和装配技术条件要求能够使产品具有较高可靠性。然而，外观形状和协调关系和成组件的类型要在高层技术规范之中明显正确地表示。

设计工作从草案到优化方案的确定有一个逐步细化过程。开始设计人员有可能草拟一个设计大纲或绘制一些草图，这个阶段的工作往往是粗略的非正式的。接着可能做一些详细设计、性能和造价的精确计算等。这个流程对 CAD 系统的开发来说是相当

重要的，因为在计算机程序中实现对简明性、随意性和含糊概念的描述相当困难，正是由于这个还有其它方面的原因，大部分 CAD 程序都是在详细设计阶段才建立精确的数学模型。

看图 0.2 设计和制造总体框图的最后一步，是 CAD 系统的设计结果传送到 CAM 部分进行加工和装配，最后投放市场。

§ 2.2 人在设计和制造过程中的作用

对照图 0.2 可以组成一个新的结构框图（如图 0.3）来表示人在设计加工过程中的各种活动和信息交互的关系。设计活动主要集中在综合设计和分析上。如上所述，在许多工业设计上，它是一个设计部门，部门中某些设计员可能在某个专业范围是技术专家，他们之间必须不断地交换信息。项目计划书和技术规范来自高层决策人员或市场研究部门。它们一般是根据流行产品的款式、客户的订单、大公司的建筑项目和某个工程计划作出的。

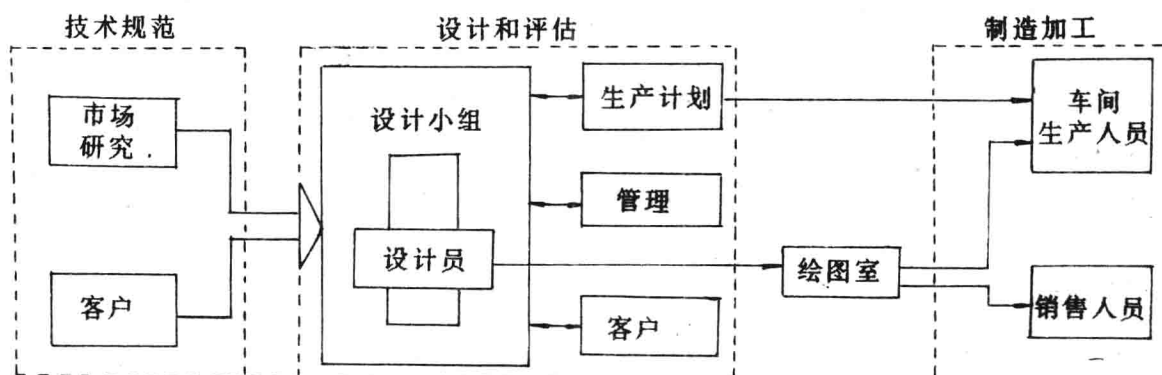


图 0.3 人在设计和制造过程中的活动和他们之间信息交换的关系

在设计过程中，设计承包商一般要经常同用户接触，向他们解释设计进度，听取改进意见。设计人员也可能要同经理接触，讨论产品的加工计划、市场及造价方面的情况等。在传统的设计和加工过程中，设计员将设计信息传递给绘图员，由绘图员绘出详细工程图。若是机械产品图将它传递给生产线或车间作为实际加工依据，若是建筑图纸则将它发往建筑工程公司。

§ 2.3 设计信息的传递

设计信息可以用多种方式传递。很多信息可以用口头和文字形式传递，对于产品的几何信息和外观特性，传统方法则是以工程图纸的方式传递的，但有时也选用物理模型。工程图纸有很多类型，选用哪一种取决于所要表示物体的特性和信息接收的对象如何。

设计员在概念设计阶段可能使用草图来扩展想像力；设计员之间也许采用同样的

方法传递有用的信息。这些草图能够表示许多设计特性：组成、外观、结构和动态特性等等。图纸和模型的选择取决于客户或市场的需求，模型更易于传递外观特性。工作图纸将发送到生产车间和工段，或者是建筑工程公司。显然这些图纸应该传递详细准确的形状和尺寸、材料和加工方法的信息。

§ 3. CAD/CAM的准则

上一节我们用几个简单的框图简要说明了设计和制造过程中的主要步骤流程，以及人在这些活动当中所占的地位和传统方式的协调关系。本节将结合上述内容介绍计算机的应用。

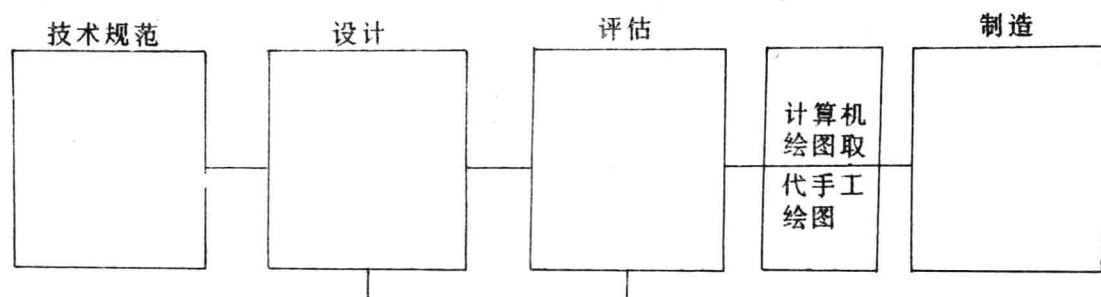


图 0.4 计算机绘图在设计 and 制造过程中的位置

计算机绘图系统是计算机在传统工业中首先应用的领域之一，今天它已广泛地应用于工程界。（如图0.4）当设计完成之后，由计算机绘图系统自动产生详细工程图提供给加工或实施场所。综合设计和分析阶段是设计工作的中心。尽管在设计过程后阶段设计员自己可能采用绘图系统，但不会影响到流程图中的其它部分。然而，计算机内的图形表示是严格二维的，机器并没有“理解”所设计物体的三维几何模型和其物理特性。

CAD系统的下一步是开发多种用途的计算机程序或称其为软件包，它们可以完成产品的多种性能分析。（如图0.5）用于结构分析、热应力分析、动态分析、立体投影图和许多其它方面应用的软件包已被成功地开发出来，并逐渐趋于成熟。另一种能让设计人员在计算机上模拟某种物理行为的软件包也不断问世。例如，电子线路的模拟，机器人手臂活动空间的模拟，高层建筑楼层升高的模拟和在各种地振谱型中的反应等等。在这样的场合设计的约束可以被明确地提出，可以验证产品的某些特性，使用某些数学方法能够对设计方案进行优化。

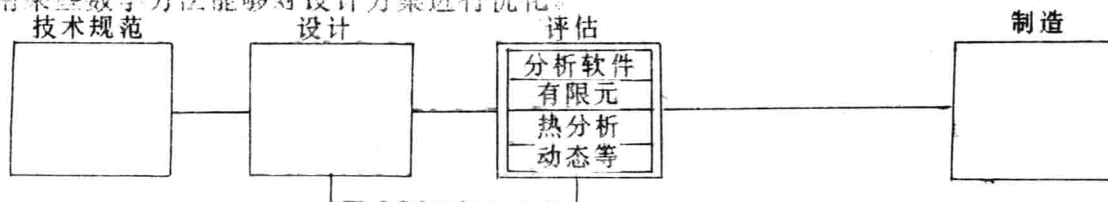


图 0.5 在设计和制造过程中分析软件包的位置

这些程序不是在初期概念设计阶段运行的，它们的运行结果主要是为详细设计提供依据。一般这些软件包的输入数据是形状、尺寸和材料等等，而输出则是高质量的分析结果。然而，一个严重的问题是这些相互独立的软件包的输入都是靠手工从图纸上整理得来的，这是一个烦琐费时、效率很低的方法。一个彻底解决这个矛盾的方法是进入 CAD应用的高级阶段——在计算机内部建立整个设计的模型，在集成系统上自动作各种分析。（如图0.6）

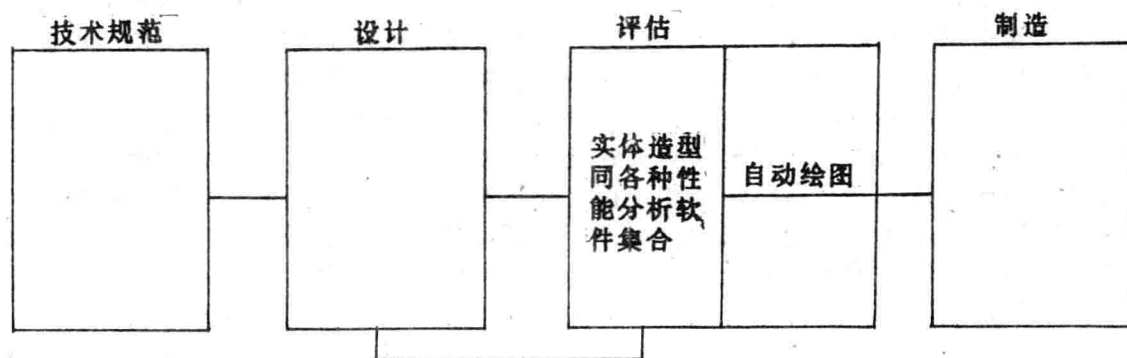


图 0.6 实体造型、分析和绘图在设计 and 制造过程中的位置

实体造型系统是建立所设计对象的三维几何或物理模型的计算机应用系统。它起初是为机械工业而开发的，后来得到了广泛的应用，例如，在建筑行业设计师使用造型系统可建立起整个楼房的三维立体模型，其过程与拼接建筑物的实体模型类似，它可在计算机内部用基本的“体素”形状拼接成一个复杂的三维模型。在实体造型系统中，对于不同的工业所涉及的基本体素的几何外形也不同。建筑物的几何外形大都是矩形，许多机械零件的几何外形可用简单的立方体、多面体、圆柱和椭球体等组合而成。某些工业产品具有复杂的雕塑曲面外形，比如：汽车车身和飞机外形、船体、瓶子和鞋子的外形等等。这些几何特性的差别会在不同用途的造型系统中得到反映和解决。

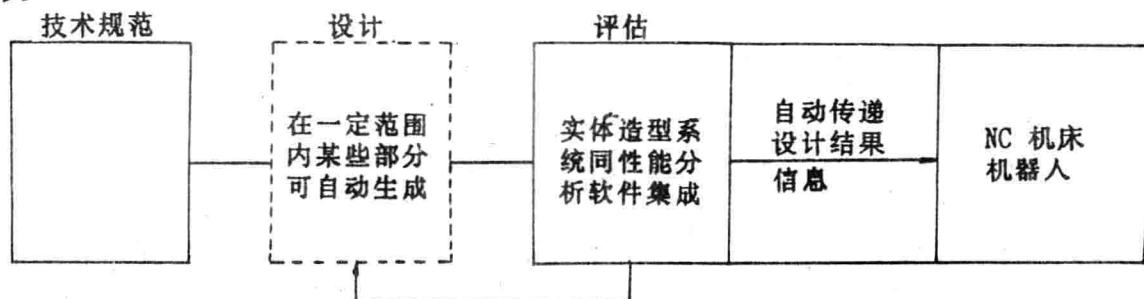


图 0.7 八十年代中期的CAD/CAM集成系统框图

从原理上讲，一旦在计算机内部建立了设计的三维模型，它的几何数据可以自动传送到任一分析软件包。同样这些数据也可以用于存贮或绘制工程图，其中立体图或用于加工的详图都是计算机自动绘制的。

计算机辅助设计 (CAD) 发展的另一个重要步骤是同计算机辅助制造部分 (CAM) 的联接。(如图0.7)。在这样的系统中, 不需要纸带设计信息就可以自动传送到加工制造环境。如前所述, 到八十年代初这样相互联接的CAD - CAM系统才逐步成熟, 实际上这些系统的应用范围仍然受到一定限制。比如, 它已成功地应用在机械零件加工的刀具生成和显示、印刷电路板和集成芯片的设计和加工、报纸和印刷业的制板等场所。也可以看到某些辅助设计系统同可编程机器人联合演示的实例, 但是要完成具有许多复杂零件的产品装配还需要很长的时间才有可能。然而, 在建筑业要用计算机控制自动建造房屋的过程几乎是不可能的, 起码目前还看不到这种希望实现的可能性。类似这样的场合, 传统的工程图纸的使用还要持续相当长的时间。

CAD/CAM集成系统将实体造型系统、分析软件包和八十年代中期最先进的商品化计算机辅助类程序采用公共数据库集成到统一的软硬件环境之中。然而即便是使用功能极强的集成系统, 当产品在造型和分析之前某些资料仍然要用手工整理, 例如有关产品情况的信息、开发计划和概念设计等。尽管计算机已广泛深入地应用在设计和加工的各个阶段, 但仍需要设计人员的干预, 特别是他们的想象力及设计概念的产生这样人类的创造性活动, 计算机几乎无法替代。在某些约束严格的范围如: 动态设计、房屋的自动布局、电路板自动布线和跟踪等, 在某种程度上说设计工作已实现了自动化。但在更大的应用范围里计算机辅助综合设计的自动化有待更深一步研究。

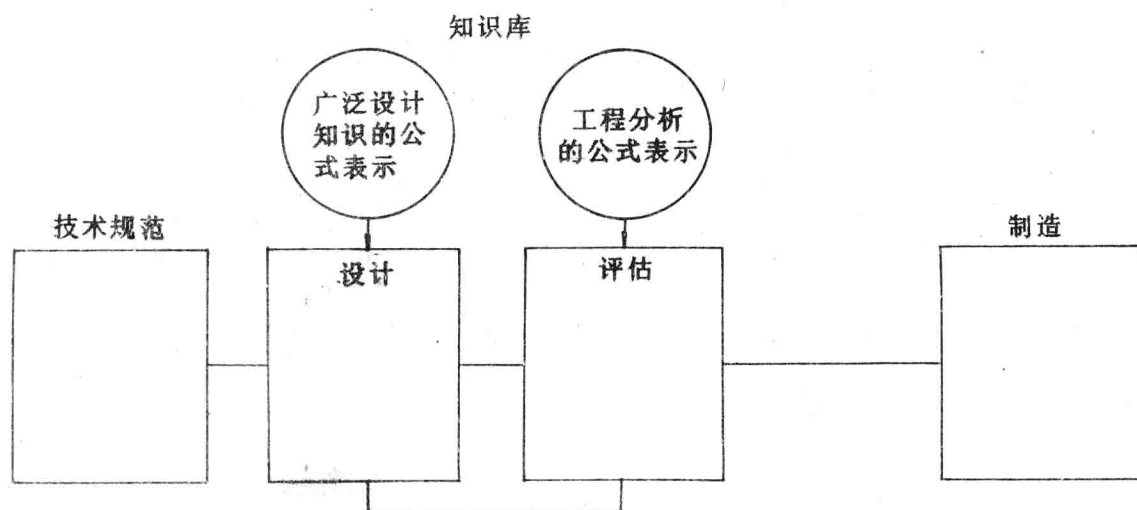


图0.8 基于知识库的CAD/CAM集成系统框图

正如前面所讨论的那样, 自动化设计的困难是由设计初期的概念和含糊性引起的, 另外一些困难则来自设计结构的复杂性。在分层协作的设计体系结构中, 设计员总是在综合设计或设计修改和分析计算的多次循环中试图得到满意的结果。在设计和检测过程中, 如果检测能够全部实现自动化, 那么将会有力地推进大型复杂结构产品的分析模型在计算机中的正式表示。综合设计的自动化描述需要多种不同类型的知识表示。(如图0.8) 其中一些类型的知识应该具有下述特点: 设计人员容易掌握、能够正式表示并有一定规律、具有普遍意义并能够通用、所有知识组合在一起遵循一定的规

则、将这些基本部分组合在一起易于用程序实现。这样的知识很难写出来或用显式表示,比如类似人们经验表示等等。必须研究一种专用程序将设计员的这类知识引导并存储起来,作为设计人工制品的研究或参考内容。用计算机的术语表示,上述内容涉及到了“专家系统”和“人工智能”的范畴。在这些新的研究领域,一些计算机专家试图用计算机模拟人类心理的创造性机能。

§ 4. 本书的结构

前几节我们简要介绍了CAD和CAM系统的发展历史,概述了现存系统的功能特点和发展前景。下面将谈谈本书的组成和结构。

同本书的书名一样,我们主要侧重于原理性叙述。读者将会发现本书对计算机硬件的介绍是很粗浅的,甚至没有介绍当前流行的硬设备和商品化软件系统。因为在任何正式的计算机科学杂志上,这些内容都不是一段小文章和一些演示程序所能介绍得了的。本书把讨论的焦点集中在:计算机辅助设计(CAD)的理论和实践上;在CAD系统中怎样构成不同的程序来完成相应的任务;在计算机内怎样表示所设计物体的几何特性及其它属性。不管是工程界的实际应用,还是理论上的研究,有关计算机辅助设计技术的发展非常迅速。本书涉及原理性的内容都是比较成熟的。

本书可以分成五个部分:

第一部分(第一 ~ 三章)阐述了基本概念和本书所要用到的数学基础。其中基本概念部分涉及到在计算机内物体的描述方法、物体几何的视图表示和操作。

第二部分(第四 ~ 九章)介绍了几何造型的基本原理。其中有一章将二维绘图系统与三维线架模型分开而单独讨论。还用两章篇幅论述了曲线曲面的数学构造方法,其它章节用计算机的专业术语详细讨论了复杂实体模型的构造,不同形状的体素拼合和多种造型技术。

第三部分(第十 ~ 十三章)概述了分析和综合有关方面的应用,较侧重于分析部分的介绍。该部分可分成四个方面的内容:有限元分析方法,初期开发它的目的是为了做结构分析,后来得到了广泛的应用。例如它被成功地用于流体和机械振动的分析等场合;动态分析;电子工业的逻辑电路模拟和印刷线路板的布局;建筑工业的空间布置方法。这一部分最后一章引出了自动化综合设计实现的困难所在和今后的发展前景。

第四部分(第十四 ~ 十七章)介绍了当前CAD方面几个新的研究领域。其中最热门是用计算机图形技术产生真实感图形。

第五部分(第十八章)概述了计算机辅助制造(CAM)中图像编程的有关问题。

目 录

前 言

1. CAD/CAM 系统的起源.....	(1')
2. 设计和制造过程的总体结构.....	(2')
2.1 设计问题的层次特性.....	(3')
2.2 人在设计和制造过程事的作用.....	(5')
2.3 设计信息的传递.....	(5')
3. CAD/CAM 的准则.....	(6')
4. 本书的结构.....	(9')

第一章 物体的表述

§ 1.1 引言.....	(1)
§ 1.2 物体及其属性.....	(1)
§ 1.3 表示和建立模型.....	(3)
§ 1.4 状态表示法和过程表示法.....	(6)
§ 1.5 数学概念和方法.....	(7)
§ 1.5.1 图.....	(7)
§ 1.5.2 坐标.....	(9)
§ 1.5.3 矢量.....	(13)
§ 1.5.4 矩阵.....	(16)
§ 1.5.5 变化率.....	(18)

第二章 表达关系

§ 2.1 引言.....	(21)
§ 2.2 物体的移动.....	(21)
§ 2.2.1 平移.....	(22)
§ 2.2.2 旋转 90°	(23)
§ 2.2.3 绕Z轴的一般旋转.....	(24)
§ 2.3 物体间的关系.....	(27)
§ 2.3.1 局部坐标系.....	(27)
§ 2.3.2 局部坐标系.....	(28)
§ 2.3.3 两个局部坐标系间的关系.....	(29)
§ 2.3.4 移动和目标位置关系.....	(30)
§ 2.4 物体的合成.....	(32)
§ 2.4.1 形体操作.....	(33)
§ 2.4.2 合成物体的结构.....	(33)
§ 2.5 装配关系.....	(33)
§ 2.5.1 可变的关系.....	(34)
§ 2.5.2 依存关系.....	(35)
§ 2.5.3 关系的合成.....	(35)

第三章 图形技术	
§ 3.1 介绍	(37)
§ 3.2 计算机图形	(37)
§ 3.2.1 屏坐标	(37)
§ 3.2.2 矢量图形	(38)
§ 3.2.3 光栅图形	(38)
§ 3.2.4 矢量显示器与光栅显示器的比较	(39)
§ 3.3 二维图形	(40)
§ 3.3.1 变换	(40)
§ 3.3.2 窗口和视区	(45)
§ 3.3.3 剪裁	(46)
§ 3.4 三维图形	(48)
§ 3.4.1 立体图	(48)
§ 3.4.2 立体投影和平行投影	(49)
§ 3.4.3 多视图的正交投影	(52)
§ 3.4.4 截面图	(55)
§ 3.4.5 用截面图表示的双曲面	(56)
§ 3.4.6 立体投影和正交投影的比较	(56)
第四章 绘图系统	
§ 4.1 绘图系统配置	(59)
§ 4.2 绘图系统的功能	(59)
§ 4.2.1 几何图形的生成	(60)
§ 4.2.2 标准符号	(62)
§ 4.2.3 尺寸的自动标注	(63)
§ 4.2.4 层次结构	(63)
§ 4.2.5 零件图的参数	(64)
§ 4.2.6 二维图形和三维模型的一体化	(65)
§ 4.3 传统绘图法与计算机绘图法的比较	(65)
第五章 线架模型	
§ 5.1 介绍	(68)
§ 5.2 线架模型的表示	(68)
§ 5.2.1 用线性边表示的线架模型	(69)
§ 5.2.2 带曲线边的线架模型	(72)
§ 5.3 真实物体和线架模型	(74)
第六章 曲面造型	
§ 6.1 背景	(77)
§ 6.2 参数曲线和曲面几何的性质	(78)
§ 6.3 曲面造型系统的实际应用方面	(81)
第七章 曲线几何	
§ 7.1 介绍	(84)

§ 7.2 二维曲线的表示	(84)
§ 7.2.1 直线	(84)
§ 7.2.2 一般平面曲线	(86)
§ 7.2.3 曲线的性质的推导	(87)
§ 7.3 三维曲线的参数表达式	(88)
§ 7.3.1 Frenet--serret公式	(90)
§ 7.4 曲线设计	(91)
§ 7.4.1 三次多项式曲线段	(91)
§ 7.4.2 有理多项式曲线段	(96)
§ 7.4.3 曲线和样条的拼接	(96)
§ 7.4.4 组合曲线的参数化	(98)
第八章 曲面几何	
§ 8.1 曲面表示	(99)
§ 8.1.1 平面	(101)
§ 8.1.2 一般的曲面方程	(101)
§ 8.2 参数曲面的设计方法	(103)
§ 8.2.1 双三次多项式曲面片	(104)
§ 8.2.2 设计曲面的一般曲线插值方法	(107)
§ 8.2.3 曲面拼接	(110)
§ 8.2.4 其它定义参数曲面形式	(110)
第九章 实体造型	
§ 9.1 背景	(112)
§ 9.2 实体模型的表示方法	(112)
§ 9.3 单元分解法	(116)
§ 9.4 构造的实体几何	(120)
§ 9.5 边界表示法	(122)
§ 9.5.1 B--rep造型的实体类型	(124)
§ 9.5.2 B--rep方法的数据结构	(125)
§ 9.5.3 边界表示(B--rep)方法的造型运算	(126)
§ 9.5.4 视觉	(133)
第十章 有限元分析	
§ 10.1 简述	(134)
§ 10.2 弹性梁问题	(134)
§ 10.3 一维元素	(136)
§ 10.3.1 线性元素	(136)
§ 10.3.2 二次元素	(142)
§ 10.4 变分原理	(145)
§ 10.4.1 一维情况	(145)
§ 10.4.2 二维情况	(146)
§ 10.4.3 三维情况	(146)

§ 10.5 二维元素	(147)
§ 10.5.1 三角元素	(147)
§ 10.5.2 矩形元素	(152)
§ 10.5.3 二维问题的较高次元素	(153)
§ 10.6 三维元素	(155)
§ 10.7 有限元方法的应用	(155)
§ 10.7.1 应力问题	(155)
§ 10.7.2 温度场问题	(156)
§ 10.7.3 无涡旋流体流动	(157)
§ 10.7.4 静电势	(157)
§ 10.7.5 弹性薄膜	(157)
§ 10.7.6 机械振动	(158)
§ 10.7.7 流体力学	(158)
第十一章 运动分析	
§ 11.1 简介	(159)
§ 11.2 机构表示	(160)
§ 11.2.1 连杆、铰接和变换	(160)
§ 11.2.2 机构的连杆造型	(164)
§ 11.3 开环机构	(165)
§ 11.4 闭环机构	(166)
§ 11.5 动力学问题	(168)
§ 11.6 应用	(169)
第十二章 逻辑电路设计与排版	
§ 12.1 概要	(171)
§ 12.2 逻辑设计	(173)
§ 12.2.1 设计实例	(175)
§ 12.3 逻辑模拟	(177)
§ 12.3.1 模拟实例	(178)
§ 12.3.2 故障模拟和测试生成	(180)
§ 12.4 实物布局	(181)
§ 12.4.1 PCB 设计	(181)
§ 12.4.2 集成电路布局	(183)
第十三章 建筑设计——空间	
§ 13.1 概要	(187)
§ 13.2 建筑物几何的特性	(187)
§ 13.3 平面图布局	(188)
§ 13.3.1 造价估算和距离测量	(189)
§ 13.3.2 地板图案网格表示	(191)
§ 13.3.3 一个研究实例	(192)
§ 13.4 随机试样布局方法	(195)

§ 13.5 布局方法的改进	(195)
§ 13.6 加法布局方法	(198)
§ 13.7 电动布局方法失败的原因	(200)
第十四章 计算机图形真实感	
§ 14.1 介绍	(202)
§ 14.2 隐藏线和隐藏面的消除	(204)
§ 14.2.1 扫描线相关和面积相关	(208)
§ 14.2.2 在影象上面的深度特性	(212)
§ 14.3 亮度和阴影的效应	(215)
§ 14.3.1 光滑阴影	(217)
§ 14.3.2 阴影	(218)
§ 14.3.3 光路	(219)
§ 14.4 面的细节和纹路	(220)
第十五章 运动几何	
§ 15.1 介绍	(222)
§ 15.2 运动学问题的总述	(222)
§ 15.3 总体形式和瞬时状态	(225)
§ 15.4 离散与连续	(229)
第十六章 形状规则和设计生成	
§ 16.1 简介	(231)
§ 16.2 表示	(231)
§ 16.3 模型生成	(232)
§ 16.4 形状	(233)
§ 16.5 总体关系	(234)
§ 16.6 形状法则	(235)
§ 16.7 设计生成	(237)
§ 16.8 建筑例子	(242)
§ 16.9 设计语言	(243)
§ 16.10 设计的功能描述	(243)
§ 16.11 结论	(245)
第十七章 集成数据库和数据交换	
§ 17.1 介绍	(246)
§ 17.2 数据的灵活性	(246)
§ 17.3 数据交换规范	(246)
§ 17.4 几何造型系统间数据的交换	(247)
§ 17.4.1 应用接口	(248)
§ 17.4.2 边界文件试行标准	(249)
§ 17.4.3 应用接口到边界文件试行标准的转换器	(251)
§ 17.4.4 边界文件试行标准到应用接口的转换器	(252)
§ 17.4.5 边界文件试行标准到数据库的转换器	(254)