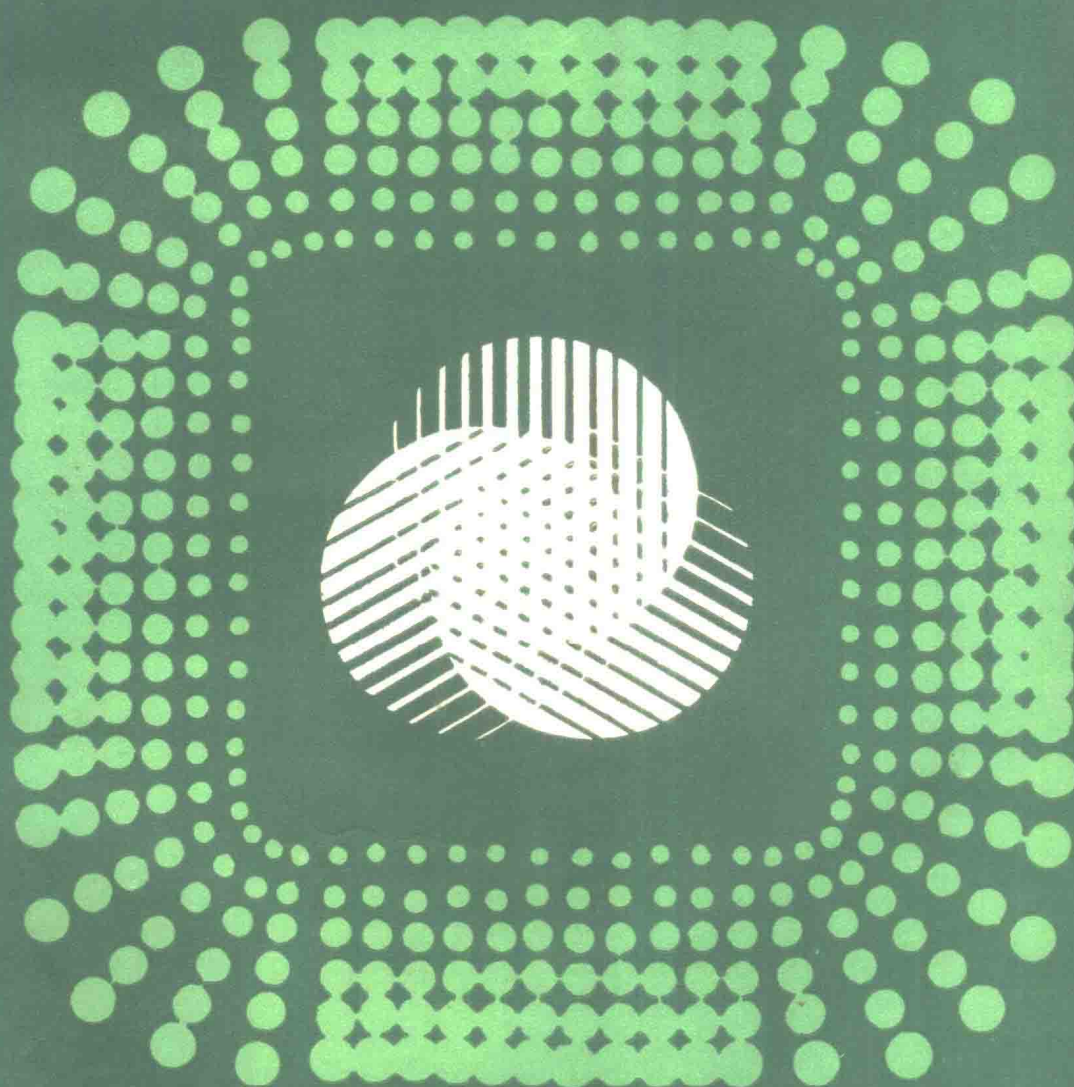


计算机 辅助机械设计技术基础

黄少昌 曹为宁 童秉枢等 编著



清华大学出版社

计算机辅助机械设计技术基础

黄少昌 曹为宁 童秉枢

清华大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了计算机辅助机械设计的基础知识。全书分为五部分。内容包括：计算机辅助设计系统的基础知识和人机交互设计系统的组成及使用方法；数据、图表资料的处理方法和建立设计模型的方法；基本图形的程序设计和应用软件的设计方法；优化设计的数学模型；以及计算机辅助设计系统的设计方法等。

本书可作为高等工科院校有关专业教材。也可供有关科研人员 技术人员等学习计算机辅助设计时参考。

计算机辅助机械设计技术基础

黄少昌 曹为宁 童秉枢

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

昌平县振南排版厂排版

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16 印张：25 1/4 字数：640 千字

1988年2月第1版 1988年2月第1次印刷

印数：00001—10000 定价：4.20元

ISBN 7-302-00194-4/TP·78 (课)

出版说明

计算机辅助设计简称为 (CAD), 即 Computer Aided Design 的缩写, 至今已有二十多年历史。近几年呈现了突飞猛进的发展, 特别是计算机硬件, 图形技术、智能模拟等方面的巨大进步使 CAD 技术成为工程设计及科学研究不可缺少的重要组成部分。CAD 技术可以理解为用计算机来模拟工业产品的试制加工和调试检测过程, 以及自动选择最优参数, 从而达到工业产品一次设计成功。因此 CAD 可以使产品更新换代的周期缩短、质量寿命提高、成本价格成倍下降。CAD 在促进科学研究与生产进程中已发挥了巨大的作用, 今后 CAD 将与 CAM (Computer Aided Manufacturing 计算机辅助制造), CAT (Computer Aided Test 计算机辅助检验) 结合成 CADMAT 系统, 那时将显示不可估量的作用。

CAD 是计算机与工程设计紧密结合的综合应用技术。尽管各学科领域的 CAD 都是采用数值计算方法解决高精度高速度工程设计, 然而由于 CAD 是和各学科专业内容紧密相关的, 因此其技术特点及侧重面又有很大不同。例如, 电子电路主要用节点网络表示其拓扑结构; 微波电路则较多研究数学模型及矩阵方程; 机械类学科领域内的重点在于图形技术, 利用屏幕显示及人机对话组装出复杂的三维几何结构; 自动控制专业则需解决多变量图解及系统动态过程的数学仿真。因此, 开发 CAD 系统的技术人员必须具备专业理论、数学、计算机软件三方面的知识。

为了推进与发展 CAD 应用技术, 我们编著了一套计算机辅助设计丛书, 其中包括微波电路、机械、建筑、控制系统、图形学等学科的 CAD 技术。每册书将针对不同学术领域把专业理论、数学方法与软件技术紧密结合起来阐述 CAD 技术的原理及应用。我们希望这套丛书能在实现我国工业与科学技术现代化进程中起到一些微薄的促进作用。

前 言

机器在国民经济的各个部门,以及在人民生活的各个方面都起着十分重要的作用。为实现我国社会主义建设的四个现代化,机械工业必须迅速赶上世界先进水平。因此当前及今后一个长时期内机械设计工作就显得十分繁重。首先是老产品要更新换代,再就是发展新产品,还要提高机器的质量,降低生产成本,以获取更好的经济效益。为了达到这些要求,关键是抓好机器的设计工作,既要保证设计的高质量,又要缩短设计周期,做到早投产制造,使产品提前使用或投入市场销售。为此,必须努力把我国机械设计提高到一个新的水平。除了充实和加强设计队伍的数量和质量外,还要不断地研究和采用新的设计理论和新的设计方法。其中计算机辅助设计技术的研究和应用就是一个重要的方面。

当前在工业发达的国家中,电子计算机已普遍应用到各个技术部门,计算机辅助设计在一些部门中已经收到效益。对它们的应用和研究仍在不断扩大和发展。电子计算机的应用已成为衡量一个国家科学技术水平的标志之一。

在我国随着计算机技术的发展和电子计算机数量的增多,在各个部门中计算机的应用日益受到重视。计算机辅助设计技术也将成为促进我国生产发展的重要手段之一。

为适应这种形势,我们在1983年编写了计算机辅助机械设计基础讲义,供机械类专业学生在学习了一门计算机语言课程后,学习辅助设计使用。本书就是在这套讲义的基础上,结合两年来的教学及科研工作经验,并吸取一部分国内外资料,经过充实,改写而成的。

本书各章的内容都是相互独立的,所以使用或阅读本书时,可以不依编排的章次顺序来进行,更可以根据学时的情况,对其中的一些章节不作教学要求。

本书大体上分为五个部分。第一、二两章介绍计算机辅助设计系统的概念、基本知识及人机交互设计系统的组成和使用方法;第三、四、五章讲述设计手册的数据、图表资料的处理方法,和建立机内模型的数据结构方法;第六章讲述基本图形软件和应用图形程序的设计;第七章叙述建立优化设计数学模型的方法;第八章说明设计一个辅助设计系统的过程和方法。

本书的第一、二、四和第八章由黄少昌编写,第三、六章由曹为宁编写,第五章由李学志编写,第七章由童秉枢编写,全书由黄少昌负责汇总和整理。由于我们对计算机辅助设计技术及有关知识了解有限,实践经验也不多,所以书中难免有错误和不足之处,望读者批评指正。

作 者

1985年7月12日

目 录

第一章 计算机辅助设计系统	1
§ 1.1 计算机辅助设计的概念	1
§ 1.2 辅助设计系统的组成	3
一、设计系统的基本能力	3
二、计算机辅助设计技术的发展历史概况	5
三、系统的组成	6
§ 1.3 主机	8
一、中央处理机	8
二、主存储器	9
三、控制器的动作	11
§ 1.4 外存储器	12
一、磁性记录原理	12
二、磁带机	13
三、磁盘	15
§ 1.5 输入输出设备	17
一、输入设备	17
二、输出设备	17
§ 1.6 计算机系统软件	18
一、语言及语言加工程序	19
二、操作系统	20
第二章 人机交互图形系统	24
§ 2.1 图形显示的基本原理	25
一、阴极射线管	25
二、图形显示器的分类	27
§ 2.2 图形显示器的组成	29
一、管头部分	30
二、功能产生器	30
三、缓冲存储器	33
四、显示控制器	33
§ 2.3 显示器指令	33
§ 2.4 输入设备	34
一、键盘	34
二、光笔	35

三、图形感应板、数字化仪·····	38
四、操纵杆、轨迹球·····	41
§ 2.5 坐标系·····	42
一、用户坐标系·····	42
二、设备坐标系·····	43
§ 2.6 窗口与视区·····	43
一、窗口·····	43
二、视区·····	44
三、窗口/视区变换·····	44
§ 2.7 剪取·····	47
§ 2.8 交互图形软件·····	49
一、图形软件的结构·····	49
二、使用交互图形软件的形式·····	50
三、交互图形软件的功能·····	53
第三章 常用数学方法的计算机处理·····	54
§ 3.1 求方程的根·····	54
一、对半法·····	55
二、弦截法·····	56
三、牛顿法·····	58
四、区间内有多根时的求根方法·····	60
§ 3.2 线性方程组求解·····	61
一、三角形方程组解法·····	62
二、高斯消去法·····	62
三、主元素消去法·····	65
四、赛德尔迭代法·····	67
§ 3.3 数值积分·····	71
一、梯形法·····	72
二、辛普森法·····	73
§ 3.4 计算机解常微分方程·····	77
一、欧拉法·····	77
二、改进的欧拉法·····	78
三、龙格-库塔法·····	79
§ 3.5 数据表格在程序中的处理方法·····	81
一、数据表格的输入和查取·····	81
二、一元函数的插值·····	83
三、二元函数的插值·····	86
§ 3.6 求经验方法·····	91
一、用最小二乘法求线性方程·····	93

二、用最小二乘法求多项式	95
第四章 图形变换原理	101
§ 4.1 图形处理的矩阵方法	101
一、点的向量表示	101
二、点的齐次坐标表示	101
三、变换矩阵	102
§ 4.2 二维图形的几何变换	103
一、比例变换	103
二、反射变换	104
三、错移变换	105
四、旋转变换	105
五、平移变换	106
六、逆变换	107
七、组合变换	108
§ 4.3 三维图形的几何变换	109
一、比例变换	109
二、反射变换	110
三、平移变换	110
四、错移变换	111
五、绕坐标轴旋转变换	111
六、逆变换	113
七、绕任意轴旋转变换	114
§ 4.4 三面投影变换	116
一、正面投影	116
二、水平投影	117
三、侧面投影	117
四、三个投影面展平	117
§ 4.5 正轴测投影变换	119
一、变换矩阵	120
二、轴向变形系数与轴间角	121
三、正等轴测投影	122
§ 4.6 透视变换	123
第五章 数据结构	133
§ 5.1 概述	133
一、数据和数据结构	133
二、数据的逻辑结构和物理结构	133
§ 5.2 线性表	134

一、线性表的逻辑结构·····	134
二、线性表的物理结构·····	135
§ 5.3 数组·····	144
一、数组的逻辑结构·····	144
二、数组的物理结构·····	144
三、对数组元素的访问·····	145
四、三角矩阵的存储结构·····	146
§ 5.4 栈和队列·····	147
一、栈的逻辑结构·····	147
二、栈的物理结构·····	147
三、栈的应用举例·····	148
四、队列·····	153
五、循环队列·····	153
六、队列应用举例·····	153
§ 5.5 树·····	156
一、树的逻辑结构·····	156
二、树的物理结构·····	157
三、树的应用举例·····	157
§ 5.6 二叉树·····	167
一、二叉树的逻辑结构·····	167
二、二叉树的物理结构·····	168
三、遍历二叉树·····	169
四、应用举例·····	170
§ 5.7 图·····	174
一、图的逻辑结构·····	174
二、图的物理结构·····	175
三、网·····	177
四、应用举例·····	178
§ 5.8 文件·····	183
一、文件的逻辑结构·····	183
二、文件的物理结构·····	184
§ 5.9 查找和排序·····	190
一、基本概念·····	190
二、查找·····	190
三、排序·····	192
四、查找和排序举例·····	198
第六章 计算机自动绘图·····	200
§ 6.1 概述·····	200

§ 6.2 自动绘图机工作原理	201
一、工作原理	201
二、插补原理	203
三、直线的逐点比较法插补	204
四、圆弧的逐点比较法插补	207
§ 6.3 自动绘图机结构	211
一、滚筒式自动绘图机	212
二、平台式自动绘图机	212
三、平面电机型式自动绘图机	213
§ 6.4 绘图软件介绍	214
一、初始化子程序	214
二、画直线子程序	215
三、比例因子子程序	216
四、不同比例因子子程序	217
五、图形平移子程序	219
六、画圆弧子程序	219
七、图形旋转子程序	220
八、画圆子程序	220
§ 6.5 绘图程序编制	221
一、参量法	221
二、图形元素组合法	225
三、用算法来绘制图形	231
§ 6.6 基本软件编制方法	243
一、影响基本软件的因素	244
二、程序的编制	246
第七章 CAD 中优化设计的数学模型及实用方法简介	249
§ 7.1 优化设计中数学模型的一般描述	249
一、设计变量	249
二、目标函数与它的几何表征	250
三、约束条件与可行域	251
四、优化设计数学模型的一般表述	252
五、局部最优解与全域最优解	254
§ 7.2 解无约束优化问题的方法简介	255
一、优化策略概述	256
二、一维搜索的方法	257
三、单纯形法	263
四、Powell 法 (共轭方向法)	269
五、共轭梯度法	271

六、变尺度法·····	273
§ 7.3 解有约束优化问题的方法简介·····	278
一、方法概述·····	278
二、复合形法·····	279
三、罚函数法·····	288
§ 7.4 建立数学模型的几个有关问题·····	299
一、关于数学模型的若干问题·····	299
二、多目标问题的处理方法·····	305
三、整型和离散型设计变量的优化设计问题·····	310
§ 7.5 优化设计数学模型举例·····	312
一、无约束优化问题举例	
——曲柄压力机齿轮传动比分配的优化设计·····	312
二、部分采用近似拟合方法的优化问题举例	
——机床齿轮变位系数的优化设计·····	314
三、采用参数凑整解的优化问题举例	
——2K-H 行星轮系优化设计·····	318
四、具有复杂目标函数的连杆机构优化问题·····	323
五、避免出现最优面的优化问题	
——二级圆柱齿轮减速器的优化设计·····	328
§ 7.6 交互式优化设计·····	332
一、概述·····	332
二、程序系统的结构·····	332
三、实例·····	334
第八章 设计系统的设计方法·····	337
§ 8.1 设计系统的类型·····	337
一、自动设计型系统·····	337
二、信息检索型系统·····	337
三、逐步逼近型系统·····	338
§ 8.2 设计系统的软件·····	339
一、操作系统·····	339
二、支撑软件·····	339
三、数据库·····	341
四、应用程序·····	341
§ 8.3 程序设计的意义·····	342
一、分阶段进行设计·····	342
二、程序设计的质量指标·····	343
§ 8.4 程序系统分析·····	343
§ 8.5 总体设计·····	343

一、程序系统结构设计·····	343
二、确定数据的流通途径·····	345
§ 8.6 详细设计·····	345
一、使问题模型化·····	346
二、算法设计、画流程图·····	347
三、组织好数据信息的输入与输出·····	348
四、确定手册数据、资料的处理方法·····	348
§ 8.7 实例一——齿轮减速箱设计系统的设计·····	349
一、设计任务分析·····	349
二、设计系统的功能·····	350
三、划分模块和确定功能·····	351
四、算法、流程图·····	357
§ 8.8 实例二——人机交互方法设计多轴传动箱传动图·····	371
一、多轴箱的传动设计概述·····	371
二、人机交互设计系统的设计·····	372
三、记录传动关系的数据结构·····	382
参考文献 ·····	387

第一章 计算机辅助设计系统

电子计算机是现代科学技术的重大成就之一，它是用电子技术实现数学运算的计算工具。它除了做数值计算之外，还可作数据处理及自动控制等方面的工作。在工业技术先进的国家中计算机已普遍应用到各个科学和技术部门，它的应用大大减轻了人的脑力劳动和体力劳动，完成了人所不能及的工作，大大促进了科学技术和生产的发展。计算机应用于辅助设计开始于六十年代初期或更早一些，七十年代是辅助设计技术迅速扩展的时期。八十年代以来它受到更为广泛的重视。

应用计算机辅助设计技术，将使产品的设计质量大为提高，缩短产品设计周期，提高工程技术人员的创造性。据报导，在国外计算机辅助设计一个汽车变速箱，与原来的人工设计相比，设计周期缩短五分之四，费用节省七分之六。计算机的广泛应用，将大大加速社会生产力的发展。

计算机辅助设计(Computer Aided Design)简称CAD。在国外，有的企业已经把CAD与计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing简称CAM)结合起来，形成CAD/CAM系统。

§ 1.1 计算机辅助设计的概念

什么叫“CAD”，迄今对它没有一个一致公认的定义。那么，读者自然首先会问，计算机是以什么方式辅助设计呢？在说明这个问题之前，我们先回顾一下用传统的方法完成一项机械设计的完整过程，见图1-1。

在机械设计过程中，设计者的职责是寻求一个较好的设计方案，为此，首先构思设计模型，然后作一系列有关的数值计算，例如计算速度、行程、运动轨迹、力和扭矩，以及几何尺寸、强度和刚度等。在作结构设计时还要考虑与结构有关的许多其它问题。设计者对计算结果进行比较、判断，然后画图。为得到较优的设计结果，通常将设计分为四个阶段，即计算分析阶段，结构设计阶段，样机制造及试验分析阶段和产品使用考验阶段。每一阶段，尤其是前两阶段常常要经过几次循环反复，即本次设计计算结果不能满足要求时，要重新修改设计模型，直到满意为止。一般地讲，在人工设计中，设计者花费的精力和时间愈多，设计质量也就更理想。可见手工设计是一件耗费时间的工作，其中不少工作是重复性的繁琐计算、检索资料数据等劳动。如能应用新的高工效的设计方法来缩短设计时间，显然可以大大提高产品的经济效益。随着新技术，新材料，新工艺的不断涌现，机械产品的更新换代周期将日益缩短，因此更为迫切地要求缩短新产品的的设计周期。

电子计算机的特点表现为：

1. 能够存贮程序（指令）和大量数据信息；
2. 能快速自动地逐条执行程序，并能快速存入或取出数据、检索数据；

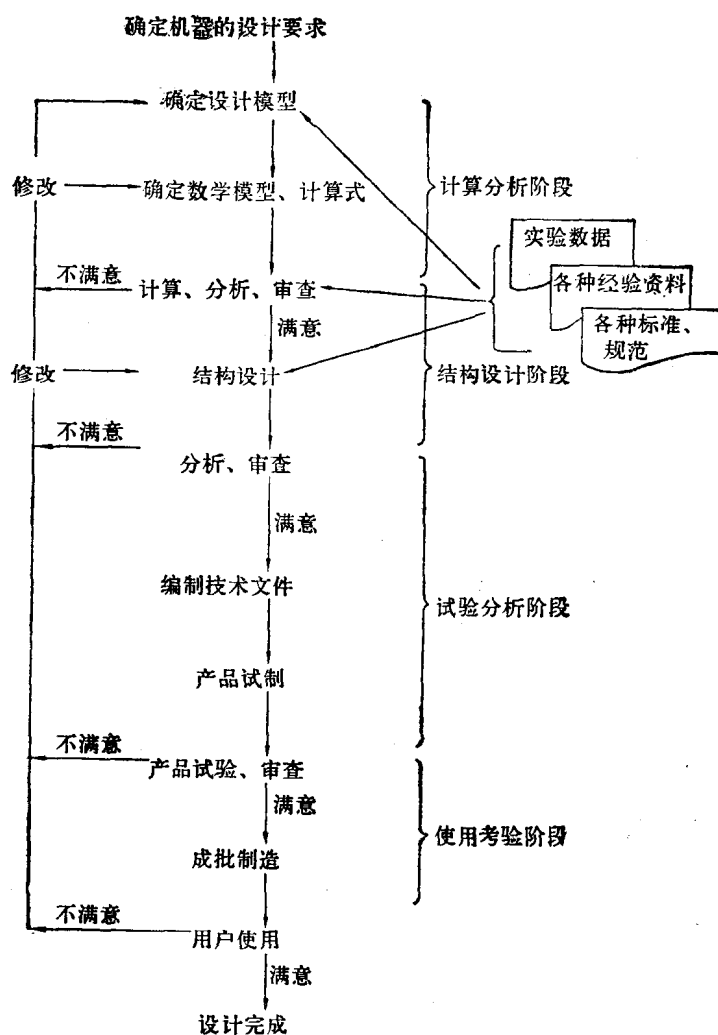


图 1-1

3. 能做数值计算和逻辑判断，其运算速度之快令人难以想像；

4. 计算精度高，即使多次重复同样的一个计算也不出差错，即可靠性高。

计算机的这些特点正可以弥补人的短处。计算机辅助设计就是将人的创造性与组织作用和计算机的特长结合起来，从而使传统的设计技术和方法产生巨大的变革。

那么计算机如何帮助人做设计呢？我们仍以上述的人工做设计过程为例加以说明。从图1-1可知，设计者定出设计模型后，列出有关计算公式，然后一步一步地作数值计算，再根据计算结果判断设计模型或机器结构是否满足设计要求。一般是将计算结果与一个允许的数值比较，看它是否超过或小于许可值，此即为逻辑判断。当不能通过时，设计者要修改设计模型或改变初始参数，重新计算。如果我们将数值运算和判断这两项工作交给计算机来做，就能够充分发挥计算机的长处，大大缩短设计周期。为此，模仿设计者的思维过程和计算步骤，用计算机能接受的语言编写程序，然后将程序输入并存

储在计算机内。做设计时，设计者只要启动计算机，输入准备好的初始数据，计算机就能完成计算和判断，并打印出结果，它完成工作的速度一般比人工快一百倍以上。

上面所说的应用电子计算机完成设计工作的过程就是一个计算机辅助设计的过程。图1-2表示了它的工作流程。需要着重指出的是，计算机只是人的助手，正如计算尺、计算器只是工具一样，设计工作中起主导作用的仍然是人。例如确定或修改设计模型和数学模型的工作，就需要设计者创造性地去解决。所谓数学模型，就是把交给计算机去解算的问题归纳为确定的数学问题，列出计算式子。可见找不出描述问题的数学模型，那就无法将它交给计算机做了。

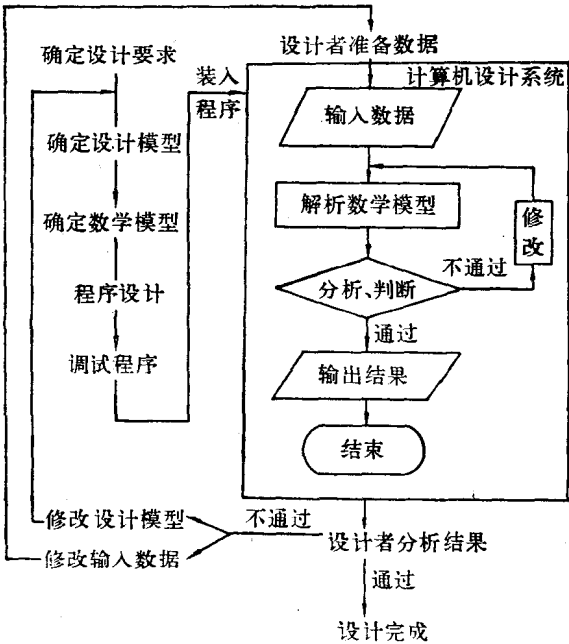


图 1-2

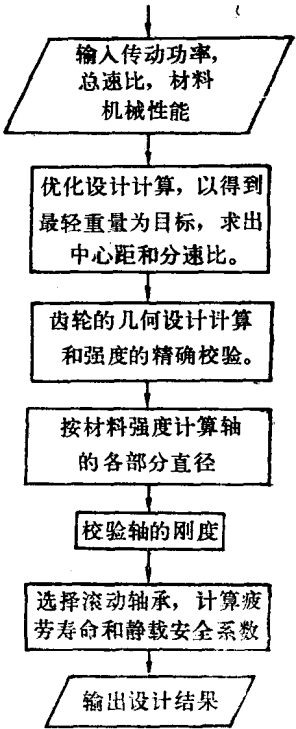


图 1-3

图 1-3 表示的是计算机设计齿轮减速箱的流程图。关于齿轮、轴、滚动轴承等零件的尺寸、强度、刚度及承载能力等方面的设计计算都已经有了明确的数学计算式和许用值。所以减速器传动元件的设计计算就可以交给计算机来完成。采用的设计方法中还应考虑优化设计计算，以得到最轻的重量，最小的外形尺寸为优化目标，经过计算机运算确定最合理的设计参数。使用这组程序，完成全部计算大约只需要十五分钟时间。这个速度不算是快的，因为使用的计算机是小型机，但比起手工计算已是快了很多。只就优化部分而言，如果由手工来解算，其工作量就难以估计了。

§ 1.2 辅助设计系统的组成

一、设计系统的基本能力

以上所述只是一个计算机辅助设计的简单例子,计算机只为设计者做了数值的求解运算。实际上,设计者完成设计任务要做的事不仅限于数值计算。通常做设计就要画图,设计者通过图形对设计方案进行思考、分析和判断,以确定满足设计要求和工艺要求的方案,直至得到较优方案为止。因此,计算、画图、改图是机械设计传统的过程。这是因为一些设计问题不可能用列出计算式,然后计算求解来得到答案。由此可见,一项设计常常要依赖设计者的经验来完成,即使应用计算机辅助设计,也仍然如此。因此一个辅助设计系统应能显示设计图形,提供对图形修改的操作能力。

机械设计的结果,还需要以图纸和文件形式表示,以供施工制造使用。据统计,绘制图纸与编写技术文件的工作一般占整个设计工作量的50%至70%,即设计者要用很多时间从事于非创造性的工作。因此设计系统具有自动绘图的功能就有重大的意义。计算机图形技术成了计算机辅助设计技术中的一个重要组成部分,它是一个关键问题。

七十年代以来,自动绘图技术和交互图形显示技术研究在实用上获得很大进展。它解决两方面问题,一是辅助设计技术和人的实际经验如何配合;二是设计者怎样与设计系统互相通讯,即人机交互问题。所谓人机交互,是在一个应用程序运行过程中,人与计算机之间,一方传送一个信息给另一方,并接收一个信息。人机交互技术的实现和应用使计算机辅助设计得到广泛应用。

设计者进行设计,通常是不能随心所欲地确定尺寸参数,要受许多的标准、规范数据的约束。没有一个设计是全新的,大多是在原有设计基础上修改做出的。因此在设计过程中,设计者要查阅手册、图纸。由计算机做设计,计算机就需要存储大量数据资料,还应提供检索的方便。

通常的设计方法有两种,第一种是直接地套用已知或相似的处理过程就可完成设计。第二种是在设计者对设计的发展过程或发展情况未知的情况下进行设计。减速箱设计则属于第一种设计情况,比较容易实现设计自动化。理想的计算机辅助设计系统应提供进行第二种设计的条件。即提供灵活操作,以及通讯自由度和足够的设计选择自由度。

人们按是否具有人机交互功能把设计系统分为两种类型,即非人机交互型设计系统和人机交互型设计系统。前者是在进行作业过程中无需人的参与,计算机按照程序自动完成整个计算分析或作图过程。人机交互型系统又称会话型设计系统,是以图形显示器作为计算机的输入和输出设备。在这样的系统中,存储器存储着设计方面的各种计算程序、图形程序、资料数据等。进行设计时由计算机计算分析、检索资料数据。运算的结果以图形或数据形式快速地显示在荧光屏上,设计者观察和判断,用光笔或键盘向计算机发出修改指示,计算机立即执行,将新的运算结果显示出来。这就是人与计算机交互作用进行设计作业的一般过程。图1-4是人机交互方法设计组合机床多轴传动箱的流程框图。

通过以上讨论,我们可以看到一个完善的计算机辅助设计系统应具有的基本能力是:

1. 作快速计算的能力和形成图形的能力;
2. 存储大量程序和数据信息的能力,并可实现快速检索;
3. 有人机交互通讯的操作功能;

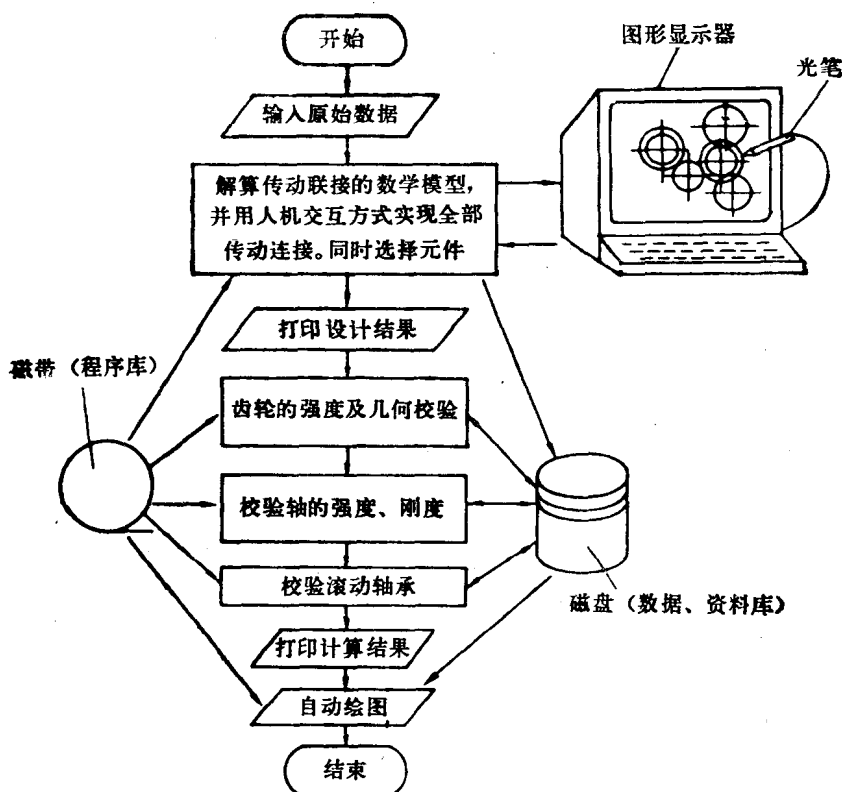


图 1-4

4. 输入图形的形状、尺寸、设计参数的手段;
5. 输出数据信息及输出图形的能力。

二、计算机辅助设计技术的发展历史概况

在这里我们回顾一下辅助设计技术的发展历史,这对想在这个领域内创造性工作的人是有益的。

1946年世界上第一台用电子管元件的电子计算机诞生在美国。1950年,第一台图形显示器“旋风1号”作为计算机的附件又在美国问世。整个五十年代计算机还处在真空管元件时代,它的运算速度和存储能力受到很大限制,程序语言也很原始,使用困难,只能做简单的设计计算。但人们已经用它来解决实际问题。大约在1954年美国就建立了设计变压器、电动机、发电机、齿轮等的计算程序,大概这就是自动设计的开始。欧洲是在1956年左右,日本是在1959年左右,同样是从变压器的设计开始。

五十年代初期在美国,数控机床开始实用,它为以后的平板绘图仪的诞生奠定了基础。1958年美国CALCOMP公司制成滚筒式绘图仪,而GERBER公司则制成平板式绘图仪。

五十年代末,研制成功晶体管元件的计算机,磁芯存储器也在那时候出现。计算机体积大为缩小,能力飞跃提高。随后程序语言也容易使用了。从此开始了设计工作计算机化的阶段。