

计算机辅助 电子线路设计

史 浩 山 主 编



西北工业大学出版社

计算机辅助电子线路设计

史浩山 主编

史浩山 徐孝涵 廉保旺 编著

西北工业大学出版社

1994年6月 西安

内 容 简 介

本书着重介绍电子线路分析与设计的计算机方法和具体实现。全书共分九章, 主要包括线性、非线性电路的计算机辅助分析技术, 最优化设计技术, 图形产生与输出技术。此外还介绍了电子CAD系统的软、硬件组成方法。各章除介绍与本部分内容相应的模型选取、算法原理外, 并配有程序实例及适量的例题和习题, 供上机及练习用。

本书可作为电子、无线电技术类各专业本科高年级的必修或选修课教材, 亦可供相关工程技术人员参考。

计算机辅助电子线路设计

主 编 史浩山

责任编辑 郑永安

责任校对 钱伟峰

*

©1994 西北工业大学出版社出版发行

(西安市友谊西路127号 邮编:710072 电话:5261952)

陕西省新华书店发行

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0202-4/TP·35(课)

*

开本 787×1092毫米 1/16 17.75印张 432千字

1989年11月第1版 1994年6月第2次印刷

印数:4501-6500册 定价:10.50元

前 言

本书是根据“高等工业学校电子线路计算机辅助课程教学基本要求”编写的，并由原航空工业部航空专业教材编审委员会推荐出版。

计算机辅助设计技术是 70 年代以来逐步发展成型的一门新兴学科，是电子计算机在工程技术领域的一个重要应用方面。它对电子系统设计技术的介入引起了设计领域的一场深刻革命，促成了电子线路设计技术的重大变革。CAD 与 CAM 技术的结合，以及 CIMS 系统的问世，将使计算机辅助技术在更广阔的领域中占有重要的地位。

本书旨在系统地阐明计算机辅助设计在电子线路设计方面的基本理论、基本方法及程序实现。全书共分九章，主要内容包括线性、非线性电路的计算机辅助分析技术，最优化设计技术，图形生成与输出技术，此外还介绍了电子 CAD 系统的软硬件组成方法。由于所涉及的内容比较广泛，读者可根据已有的基础在内容上决定取舍。上机条件较好的院校，应尽可能多的从每章所附的习题中选取题目上机练习，以加深对各章所述内容的理解。

本课程的参考学时数为 50 至 70 学时。要求的先修课程为“电子线路”、“程序设计基础”、“计算机原理及其应用”及计算机高级语言。

本书由西北工业大学史浩山担任主编，西安电子科技大学吴大正教授对书稿内容进行了详细审阅，并提出了宝贵意见。

本教材第九章由廉保旺同志编写，徐孝涵同志提供了第二、六章的初稿，其余各章由史浩山同志编写。

在本书编写过程中，得到了西北工业大学陈鑫根教授、毕治芬教授的鼓励和指导，葛福德、赵乃煌副教授给予了指教和帮助；赵守清、李渝青、王玮、杨亚军、扶庆华、符忠宇等同志也分别承担了部分绘图、抄写或程序调试工作，在此一并表示谢意。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编 者

1988 年 9 月于西北工业大学

目 录

第一章 概论	1
§ 1-1 计算机辅助技术及 CAD.....	1
§ 1-2 电子线路 CAA 的过程与基本要求.....	3
§ 1-3 CAD 系统配置及发展趋势.....	7
习题.....	10
第二章 网络拓扑与基本概念	11
§ 2-1 网络拓扑的基本概念.....	11
§ 2-2 关联矩阵.....	13
§ 2-3 回路矩阵.....	14
§ 2-4 割集矩阵.....	17
§ 2-5 支路变量间的基本关系.....	20
§ 2-6 拓扑矩阵 A , B , C 的计算机形成.....	23
附录 2 A 定理 2-1 的证明.....	29
附录 2 B 定理 2-2 的证明.....	30
附录 2 C 将矩形矩阵简化为阶梯矩阵的一种方法.....	31
习题.....	36
第三章 线性电路的频域分析	38
§ 3-1 电路元件的数学模型.....	38
§ 3-2 节点分析法.....	41
§ 3-3 直接列写增广矩阵 $[Y_n; J_n]$ 的方法.....	53
§ 3-4 对节点法中一些问题的处理.....	58
§ 3-5 节点法分析程序.....	62
§ 3-6 改进的节点分析法.....	74
附录 3 A 解线性代数方程组的 LU 分解法子程序.....	79
习题.....	81
第四章 线性电路的时域分析	84
§ 4-1 状态变量法.....	84
§ 4-2 混合分析法.....	96
§ 4-3 常微分方程的数值解法.....	99
§ 4-4 伴随模型法.....	103
习题.....	111
第五章 非线性电路分析	113
§ 5-1 非线性器件的数学模型.....	113

§ 5-2 非线性电路的直流分析方法	119
§ 5-3 非线性代数方程的求解	126
§ 5-4 非线性电路中的伴随模型分析法	133
§ 5-5 分段直线化法	150
§ 5-6 非线性电路的时域分析	153
习题	154
第六章 稀疏矩阵技术	156
§ 6-1 引言	156
§ 6-2 方程排列次序对长运算次数的影响	158
§ 6-3 处理稀疏矩阵时“填元”的出现及确定	161
§ 6-4 减少填入元素的节点重序法	165
§ 6-5 存贮稀疏矩阵的数据结构	171
§ 6-6 用稀疏矩阵技术解结构对称的线性方程组	174
附录 6 A SPARSE 程序	179
习题	184
第七章 灵敏度与容差分析	186
§ 7-1 概述	186
§ 7-2 增量网络法	189
§ 7-3 伴随网络法	200
§ 7-4 容差分析	210
习题	216
第八章 电子线路的最优化设计技术	218
§ 8-1 最优化设计引论	218
§ 8-2 多变量函数的最优化方法	221
§ 8-3 电路优化设计	230
习题	237
第九章 图形生成与输出技术	238
§ 9-1 概述	238
§ 9-2 电路分析曲线的图形生成技术	239
§ 9-3 交互式电路原理图形的生成与表示技术	243
§ 9-4 存储电路原理图形的数据结构及检索方法	258
§ 9-5 图形输出的操作与处理方法	263
§ 9-6 图形通信与传输技术	275
习题	276
参考文献	277

第一章 概 论

§ 1-1 计算机辅助技术及CAD

电子计算机以其运算速度快、计算精度高、能存贮信息、能进行逻辑判断,以及能按程序进行自动运算和处理等特点,使它在工农业生产、科学研究、军事技术等各个领域得到了广泛的应用。

微型计算机的出现,则使计算机技术的发展形成了一次重大突破。它给计算机科学的发展提供了强有力的推动,为计算机应用的范围开拓了更为广阔的领域。由于大规模、超大规模集成电路的发展异常迅猛,使高性能、低价格的微机系统在许多方面与大、中型机并行使用,其应用领域得到不断扩展。比如在工业中即已涉及从管理到工程分析与设计的各个方面。

自60年代以来,逐步采用了计算机系统做为人们的辅助工具,支持人们在自动化方面向更高阶段发展。目前在电子工业中,如电子产品设计、电路分析、印刷电路板(PCB)设计、集成电路(IC)掩膜设计、结构系统分析、软件开发、系统评价、电路或系统模拟、可靠性模拟与鉴定、可维修性和可测试性模拟、故障诊断、仪器校准、自动测试与控制、实验室自动化及电子产品车间生产管理等方面,都是计算机辅助系统(Computer Aided System,CAS)大显身手的领域。在其它工业方面,如飞机、船舶、机械的设计制造,水利建筑工程、情报检索查询、绘图出版、教学、医学诊断、系统工程、生物物理、人工智能、专家系统、地质资源、办公自动化等,通常工作量或工作质量非人力所能直接完成的,都能凭借计算机辅助技术实现。

计算机辅助设计(Computer Aided Design,CAD)是在计算技术、应用数学和模拟理论的基础上发展起来的一门新的、独立的学科。它是计算机辅助技术的一个重要方面。而电子线路的计算机辅助设计则又是CAD技术中发展最早、最成熟的一部分,它已成为电子技术的一个重要分支,也是电子计算机在电子技术领域的一个重要应用方面。由于CAD技术用于电路设计的效益显著,故世界各国竞相普及。目前复杂电路的设计,特别是大规模、超大规模集成电路的设计,都已离不开CAD技术的应用。

计算机辅助电子线路设计一般是指:计算机根据设计人员的指令(例如源程序中包含的各种指令)执行各种数据分析和模拟实验过程(例如电路特性分析、考察元件参数变化对电路性能的影响等),并输出有关结果。

显然,计算机的上述“辅助设计”过程尚无力完成电路设计全过程的任务。例如对设计方案的提出和完善,对计算结果的分析 and 判断,对电路图形的再产生等过程,还都需要设计人员介入。

但是,一种新的计算机自动设计电路的技术,正由于各国科学家的不懈努力而日渐推向

实用阶段。这种自动设计技术，仅需设计者根据技术指标要求提出初步方案，计算机即可完成自动识图、形成电路方程并求解，调整设计方案、输出设计结果等全部任务。

根据计算机在设计过程中担任工作的多少，CAD 在电子线路设计中的应用大致有这样两种情况：一种是较为简单的，即由设计者列出电路方程，计算机仅承担数值计算并输出有关结果的任务；第二种是由设计者将电路图及其参数转化为计算机的输入数据，由计算机形成电路方程并求解，进行电路优化设计，生成和输出电路图形，以至完成印制版设计等任务。

能够标志 CAD 的理论和算法的研究水平及其应用程度和范围的，是世界各国（包括我国）先后研制出来的大量的通用分析程序。在电路分析方面，以美国加州大学柏克莱分校开发的 SPICE 2G.6 为最新、最流行的版本；在 IC 设计方面，美国 Tek 公司的 MERLYN-G 设计软件，其扩展能力可达一万个门电路；在印制版 (PCB) CAD 方面，已经历了四代并正向第五代智能设计系统发展，并在第五代 PCB CAD 中将引入专家系统去解决自动布线问题。日本也已在电视机外围电路设计上普遍采用了 CAD。

即使是早期的通用电路分析程序，当其运行时也已相当于使计算机变成了一个现代化的大型实验室，可以在其中进行各种逼真的电路模拟实验。这些实验包括：直流分析、交流分析、瞬态分析、灵敏度分析、最坏情况分析；还可以选择温度分析、噪声分析、失真度分析、传递函数响应分析等。此外，还可以进行信号分析、优化处理、或对非电系统进行电模拟分析。可见，这样的通用分析程序已可满足各种电路分析和设计过程的需要，从而给 CAD 技术的广泛应用提供了坚实的基础。

为具备各种分析、设计能力而设计的各种 CAD 系统的出现，更为 CAD 技术的发展增加了新的活力。例如 CAD 图形工作站，印刷电路板生产 CAD 系统等，已都有很强的功能。而由计算机通信技术和 CAD 技术相结合而产生的局部网络型的 CAD 系统，则更具有多功能和可大范围运用的特点。以 APOLLO DOMAIN 微型机 CAD 系统为例，其应用范围可包括下述十个方面：

- ①电子的计算机辅助设计 (ECAD)；
- ②机械的计算机辅助设计 (MCAD)；
- ③计算机辅助制造 (CAM)；
- ④计算机辅助软件工程 (CASE)；
- ⑤技术出版；
- ⑥建筑工程/构造 (AEC)；
- ⑦人工智能 (AI)；
- ⑧结构和有限元分析；
- ⑨财务模型、模拟和统计分析；
- ⑩计算机科学和研究。

大家知道，传统的电子线路设计过程，一般都是采用试凑法。即由设计者根据设计指标，试选一个设计方案，并确定电路元件参数。再根据已知参数用解析的方法，或者搭成电路进行试验，将所得的测试数据与技术指标进行比较。若不满足，改变元件参数或电路结构后，再重复上述过程，直到满意为止。这种设计方法重复、繁琐、费时、设计效果差。远不能与 CAD 方法相比。

将上述 CAD 方法和传统的试验方法进行电子线路设计的流程用一个框图表示，如图

1-1 所示。

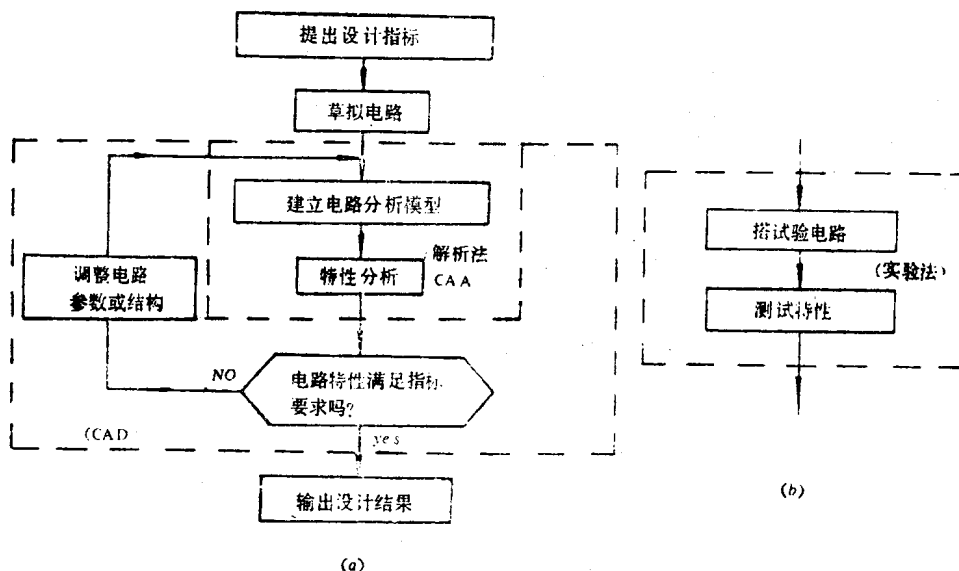


图 1-1 电子线路设计流程

电子线路的 CAD 技术与传统的设计方法相比，可概括出下述几个优点：

- ①迅速，可靠；
- ②可选用较复杂的电路模型，使设计结果更接近于实际情况；
- ③可采用通用分析程序，使同类问题的解决过程变得简单；
- ④可定出各电路元件允许的公差；
- ⑤可获得最优设计方案；
- ⑥使用 CAD 系统进行电路设计时，用户可直接与屏幕上显示的电路图进行对话，易于与 CAM 技术相结合。

计算机辅助电子线路设计，其内容可分为 CAA (Computer Aided Analysis) 和电路优化设计两部分：CAA 是在给定电路结构和元件参数的条件下，计算电路的性能指标；而优化设计则是在给定电路结构和有关性能指标的条件下，求电路中各元件的最佳值。实际上，一个 CAD 过程往往是多个 CAA 过程的重复，也可以说 CAA 是 CAD 的主体。本书将要介绍的大部分内容均属于 CAA 的内容。故在下一节里，我们准备对电子线路 CAA 的过程和基本要求作简要说明。

§ 1-2 电子线路 CAA 的过程与基本要求

利用 CAA 进行电路性能分析的过程可由图 1-2 来表示，其主要步骤可归纳为如下几点：

- ①建立电路的数学模型；
- ②选择算法，编写程序；

③程序调试过程;

④数据输入, 程序正式运行;

⑤以适当的形式输出有关结果。

实际上, 在已经掌握电路理论、电子线路、程序设计语言、计算方法等先修课程有关知识的基础上, 通过编制专用程序来解决一些电子线路的机助分析与设计问题, 并不是很困难的事情。下面我们通过一个简单例子来说明利用专用程序来解决特定电路分析问题的方法和步骤。

【例 1-1】 有单级晶体管放大电路如图 1-3(a) 所示。试编程考察各电阻元件及晶体管 β 值对放大器工作点发生的影响。

当环境温度改变或调换管子时, 可能会引起放大器工作点的变化。图 1-3(a) 所示实际也表明常用偏置电路的组成情况。为简单计, 有时把图 1-3(a) 中的一些电阻开路或短路, 可组成如图 1-4(a)~(f) 等各种情况。图 1-4 各种电路的取得, 在编程实现时, 我们只要对图 1-3(a) 的电阻作特殊取值, 比如用 $R = 0$ 和 $R = \infty$ (可用一大电阻例如 $R = 30M\Omega$ 代之) 代之就可以实现了。故在计算机编程时, 只要分析 R , β 取不同值时图 1-3(a) 的 I_c , V_o 的不同输出, 即可达到考察放大器工作点稳定性的目的。

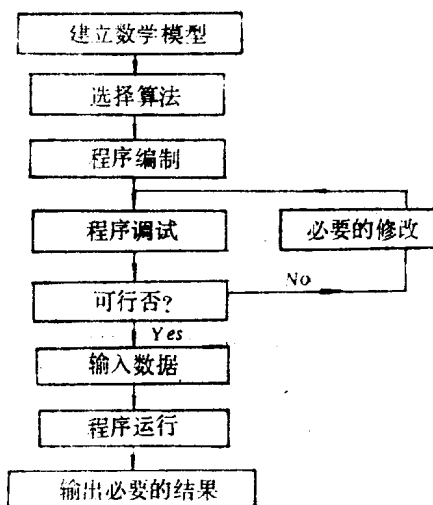


图 1-2 用CAA进行电路性能分析的流程图

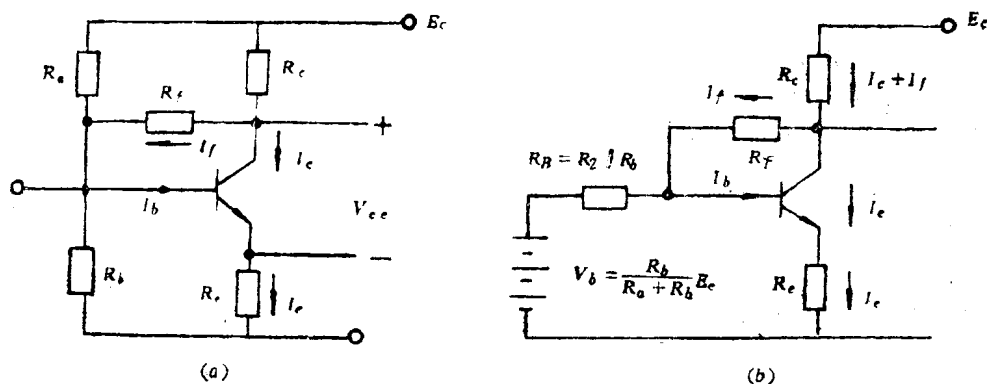


图 1-3 晶体三极管放大器及其等效电路

下面我们程序实现这一分析过程。

由戴维南定理可将图 1-3(a) 等效为图 1-3(b)。然后可据 KCL 写出下述方程式

$$E_c - R_c(I_c + I_f) - R_f I_f - V_{be} - R_e I_e = 0 \quad (1-1)$$

$$V_b - R_b(I_b - I_f) - V_{be} - R_e I_e = 0 \quad (1-2)$$

我们知道, 晶体管各极电流间有如下关系

$$I_e = I_b + I_c \quad (1-3)$$

$$I_c = I_{c0} + \beta I_b \quad (1-4)$$

由(1-4)式可得:

$$I_b = (I_c - I_{ce0})/\beta \quad (1-5)$$

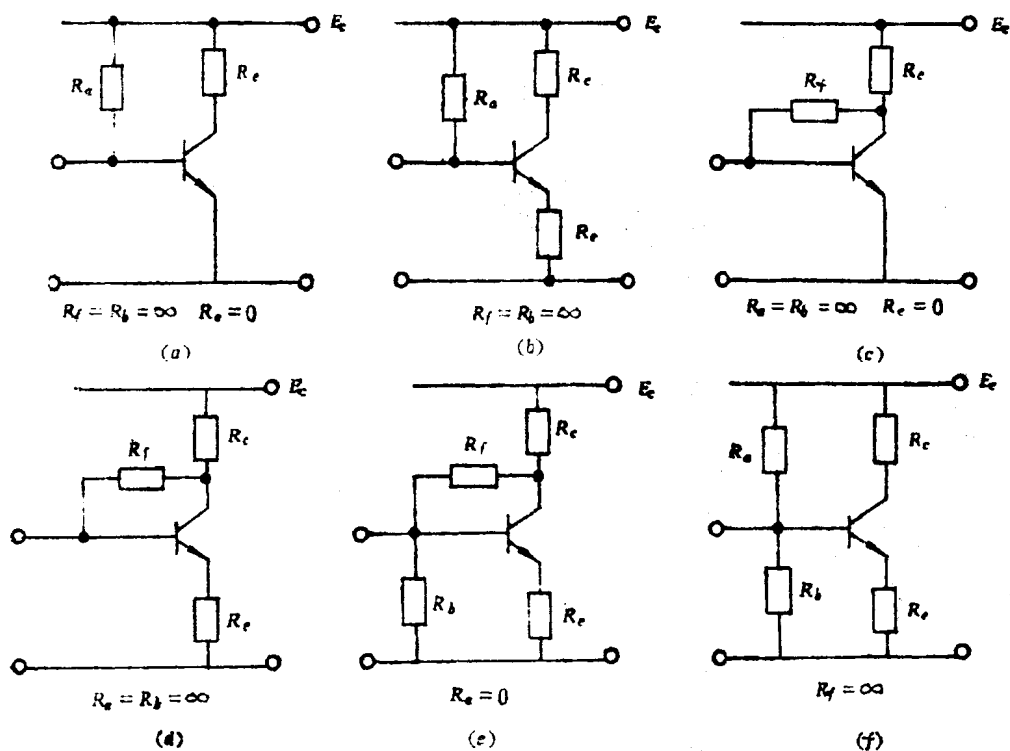


图 1-4 单级放大器常用各种偏置电路

将式(1-5)代入(1-2)和(1-3)式, 可得

$$\left. \begin{aligned} -R_B I_f + \frac{R_B}{\beta} I_c + R_e I_e &= V_b - V_{be0} + \frac{I_{ce0}}{\beta} R_B \\ -\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) I_c + I_e &= -\frac{I_{ce0}}{\beta} \\ (R_c + R_f) I_f + R_c I_c + R_e I_e &= E_c - V_{be0} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

如果我们令

$$\begin{aligned} A &= R_B R_e I_{ce0}/\beta + (R_c + R_f)(V_b - V_{be0} + I_{ce0} R_B/\beta) \\ B &= R_e(R_c + R_f) I_{ce0}/\beta + R_B(E_c - V_{be0}) \\ C &= R_B R_e(1 + 1/\beta) + (R_B/\beta)(R_c + R_f) + R_e R_B \\ D &= R_e(R_c + R_f)(1 + 1/\beta) \\ E &= (V_b - V_{be0} + I_{ce0} R_B/\beta)[-(1 + 1/\beta)R_e - R_c] \\ F &= I_{ce0}/\beta \cdot (R_B R_e/\beta - R_e R_e) \\ G &= (E_c - V_{be0})[R_B/\beta + R_e(1 + 1/\beta)] \end{aligned}$$

则由(1-6)式可将 I_c 、 I_f 简单表示成

$$I_c = (A + B)/(C + D) \quad (1-7)$$

$$I_f = (E + F + G)/(C + D) \quad (1-8)$$

并可将管子的集电极电压 V_c 表示为

$$V_c = E_c - R_c(I_c + I_f) \quad (1-9)$$

如果我们希望考察 β 、 V_{be} 、 I_{c0} 等参数的变化对放大器工作点所发生的影响,即考察上述参数变化时对 I_c 、 V_c 值产生的影响,则可根据已有关系式编制出计算机 FORTRAN 程序如下:

```
C  A GENERAL TRANSISTOR BIASING PROGRAM
REAL ICEO, IC, IFO
READ (105, 1) RC, RF, RA, RB, RE, BETA, EC, VBE, ICEO
1  FORMAT (9F12.6)
RBB=RA*RB/(RA+RB)
VB=RB*EC/(RA+RB)
A=RBB*RE*ICEO/BETA+(RC+RF)*(VB-VBE+ICEO*RBB/BETA)
B=RE*(RC+RF)*ICEO/BETA+RBB*(EC-VBE)
C=RBB*RE*(1+1/BETA)+RBB*(RC+RF)/BETA+RC*RBE
D=RE*(RC+RF)*(1+1/BETA)
E=(VB-VBE+ICEO*RBB/BETA)*(-1*(1+1/BETA)*RE-RC)
F=(ICEO/BETA)*(RBB*RE/BETA-RC*RE)
G=(EC-VBE)*(RBB/BETA+RE*(1+1/BETA))
IC=(A+B)/(C+D)
IFO=(E+F+G)/(C+D)
VC=EC-RC*(IC+IFO)
WRITE (108, 2) RC, RF, RA, RB, RE, BETA, EC, VBE, ICEO
2  FORMAT (5X, 9(1PE12.8))
WRITE (108, 3) IC, VC
3  FORMAT (3X, 'IC=', 1PE12.8, 'VC=', 1PE12.8)
STOP
END
```

显然,这个程序由于结构简单而很容易理解。它只有16个可执行语句,包括数据输入、计算过程和数据输出三部分。所使用的变量名与电路图中的指示基本相同,例如 ICEO 为 I_{c0} , IF 为 I_f 等。

程序使用时,只要按 READ 语句为各变量所规定的格式输入 R 、 β 等变量的具体取值,即可得到 I_c 、 V_c 的相应打印结果。例如,我们若要分析电阻误差或电源波动对工作点的影响,那么只要将变动后的数据输入计算机内进行运算,就能很快得到相应的 I_c 、 V_c 值。如果感兴趣的话,还可增加少许语句,用以计算 I_c 、 V_c 与正常情况下产生的误差 ΔI_c 、 ΔV_c 或相对误差 $\Delta I_c/I_c$ 及 $\Delta V_c/V_c$ 等。

通过对输出数据的分析,可以很快知道工作点的稳定性情况;并可正确地指出影响工作点稳定的最敏感的因素,迅速找出关键性元件。

以上数据输入、程序运行、数据输出、数据分析及得出结论的过程,完全可以代替在实验室搭试电路并进行繁琐的调试、记录过程,故可叫计算机模拟实验。

值得指出的是,上述简单例子给出了一个通过一段专用程序及其输入数据的变化进行计算机模拟实验,并获得有关数据的实例。专用程序的特点是比较简捷,然而需要使用者事先

做大量的工作，且程序的适用面很窄。在下面几章里，本书将较多地研究通用程序的编制和使用方法。

一般说来，可以对一个 CAA 程序的编制提出下述基本要求：

- (1) 程序的通用性。
- (2) 计算的准确性。包括努力克服由于下面三种原因而造成的误差：
 - ① 元件模型和参数带来的误差；
 - ② 计算机本身带来的误差；
 - ③ 计算方法带来的误差。
- (3) 计算的快速性（评定标准为包含长运算次数即乘、除运算次数的多少）。
- (4) 占用内存单元要少。

§ 1-3 CAD 系统配置及发展趋势

前已述及，电子线路 CAD 技术已由单机完成科学计算的单一功能发展到多机相连、组成 CAD 局网，并在功能上与计算机辅助制造 (CAM) 相结合的阶段。特别是微型计算机 CAD 系统 (μ CADS) 更是在性能/价格比上展示了强大的生命力。鉴于 CAD 系统的软、硬件配置及相关专题还未成为当今电子线路 CAD 教科书的基本内容，故本书只准备在本节简要介绍 CAD 硬、软件系统的组成概况及发展趋势，并在第九章专章介绍单机及系统的一个重要功能——图形生成及输出技术。

一、CAD 系统的配置

一个 CAD 系统的基本硬件配置框图可如图 1-5 所示。其中 CRT 用来显示各种设计图形和人机交互中系统反馈给用户的各种信息；键盘和数字化仪让用户用来向 CAD 系统输入操作命令、图形数据及其它各种信息；绘图仪及打印机用来输出以图形和文字表达的设计图纸、产品文件、生产计划等；计算机则用来处理各种数据、管理各种输入输出设备。计算机的机型多为小型机和微型机，而随着各类微机 CAD 系统的大量涌现，一些性能优良的超级微机 CAD 系统已向 CAD 技术领域中的统治地位的小型机 CAD 系统提出了有力的挑战，大有取而代之之势。这些各类不同档次计算机的共同特点是要求有具有一定容量和速度的外存储器、输入输出设备。

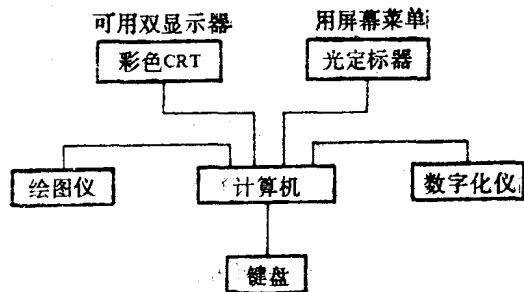


图 1-5 一个 CAD 系统的基本硬件配置

CAD 系统的软件功能模型可分为四个部分：数据库及其管理系统 (DBMS)、图形系统、方法库和应用程序。其配置框图如图 1-6 所示。其中，任一模块的运行均离不开数据库的操作，因此数据库及其管理系统 (DBMS) 是 CAD 系统的核心。图形系统由一系列嵌套在某种高级语言中的图形输入/输出 (I/O) 函数构成，主要倾向于采用国际标准图形核心系统

(GKS) 作为 CAD 的基础。方法库则用以完成设计的分析、计算工作。应用程序往往随着系统的应用领域不同而不同。

在图 1-5 所示的 CAD 系统中, 由于其计算机系统由单一的主机来担任, 故常叫做“独立型” CAD 系统。这种系统随主机的功能不同而使其应用效果受到限制。以独立型 μ CADS 为例, 其操作系统通常是 MS-DOS 单用户、单任务、双 8 位或 16 位 CPU; 内存 512K 以内, 外存 10M 字节以内。故在此系统上运行的实用程序和应用程序都较受局限。有鉴于此, 目前功能较强的 CAD 系统多采用局部网络型结构。

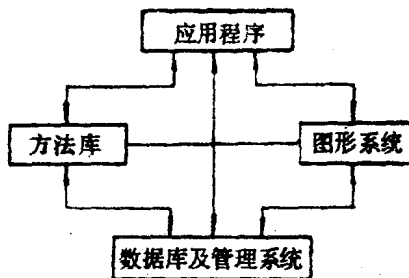


图 1-6 CAD 系统软件模块框图

局部网络型 CAD 系统是计算机通信技术与 CAD 技术相结合而形成的产物, 是对单用户单任务 CAD 系统的一个重要改进。此类系统的组成方法是建立工作站, 其典型工作站的硬件组成框图如图 1-7 所示。它除了具有独立型 CAD 系统的基本配置外, 并通过一定的软、硬件装置连接到网络系统上去。还可设置专门的前端通信处理机, 用以担负通信任务和控制各工作站之间的信息流。

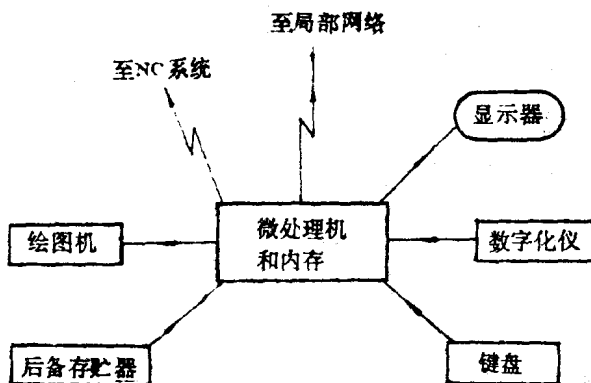


图 1-7 局网型 CADs 的典型工作站

此类系统的先进性在于它可提供一定程度的智能。允许用户有一个合适的响应时间来准备数据和进行简单的计算, 这样更多的计算工作和大的数据存贮文件的访问完全可以由网络来执行。

整个 CAD 网络的结构可以是星形、环型、总线型等多种。以 § 1-1 中提及的 APOLLO DOMAIN 微机 CAD 系统为例, 其整体结构如图 1-8 所示。它以一个典型工作站做为一个节点 (每节点一台 32 位微处理机, 1~4M 字节主存, 34M~500M 字节外存及其它外部设备等), 以多个节点组成一个令牌环网。使用基带传输, 建立了一个 12M 位/秒的高度灵活的通信信道。其节点间距离可达 1 公里, 全网可有几百个节点。该系统完全可以和不少小型机的 CAD 系统相匹敌, 而价格还不及这些系统的一半。由此可以看到局网型 CAD 系统的优越性和良好的应用前景。

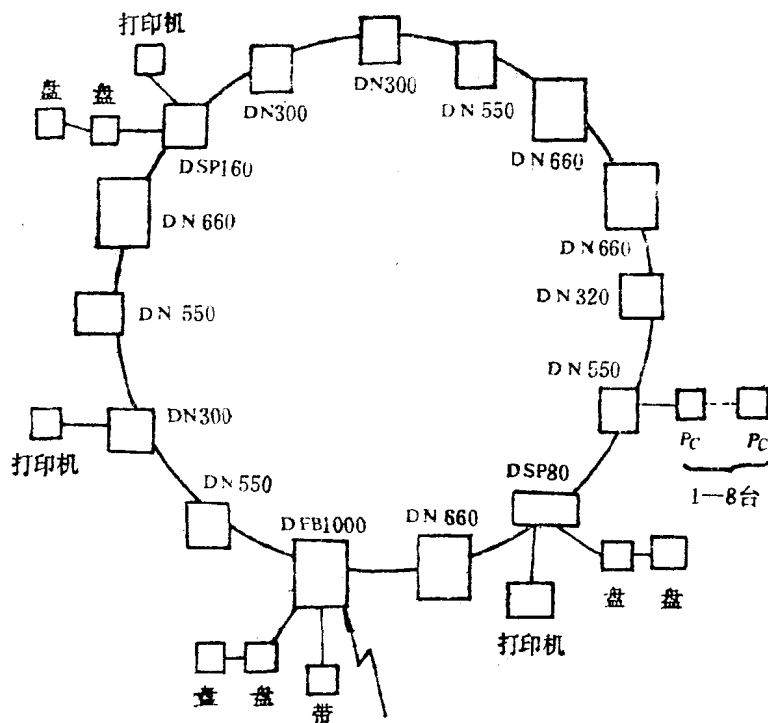


图 1-8 APOLLO DOMAIN 环网型 CAD 系统

还有一种挂靠式 CAD 系统。它是把简单 CAD 系统挂靠到大、中型计算机系统中，从而充分享用大、中型机的资源。比如将复杂的计算和图形变换等由大型机完成，再将处理后的数据送至 CAD 系统进行再处理，从而扩展了 CAD 系统的功能。

二、CAD 系统的发展趋势

正如前面所述，70 年代中期以来，由于信息技术和人工智能方面的进步，CAD 系统已由孤立的单机系统发展为局部网络型系统及与大、中型机挂靠的系统。计算机辅助设计 (CAD) 在功能上已由一般的制图到高维复杂设计。用于支持电子产品设计的系统，从原理图的设计、分析与输出，到印制版图的制作以及电路或系统模拟、故障诊断、自动测试、电子产品管理等都已能独立完成。亦即已把 CAD 和 CAM 结合起来，构成更为复杂的自动化系统。

然而 80 年代以来，各国科学家付出巨大精力进行研究和发展的，是一种综合自动化系统，或叫 CIMS——计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System)。它是把孤立的、局部的自动化技术和子系统，在新的管理模式和制造工艺的指导下，综合运用信息技术、自动化技术，通过计算机及其支持软件，灵活而有机地综合起来，构成一个同时涉及市场及生产过程的完整的系统。CIM 系统的结构框图如图 1-9 所示。

详细介绍 CIMS 的全部理论与实践，这不是本书的任务。有兴趣的读者可参阅有关文献。在这里，我们只想说明下面两点：

(1) 据有关资料统计，CIMS 主要效益为：

提高产品质量 (即减少废品数量) 2 ~ 5 倍

缩短交货时间 30~60%
 提高生产率 40~70%
 提高主要设备利用率 2~3 倍
 减少工程设计费用 15~30%
 增强技术人员分析问题的广度和深度 3~35 倍
 减少人力 5~20%

(2) 在今后十年左右的时间, 我国也将建成第一条示范性 CIMS 生产线。

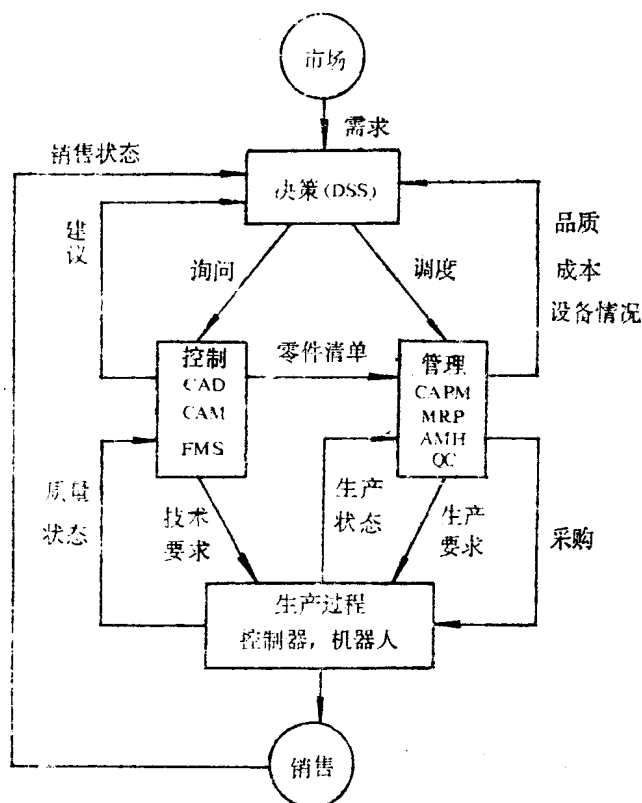


图 1-9 CIMS 的结构框图

图中: CAD: Computer-Aided Design and Drafting (计算机辅助设计及制图)
 CAM: Computer-Aided Manufacture (计算机辅助制造)
 FMS: Flexible Manufacturing system (柔性制造系统)
 DSS: Decision Support System (决策支持系统)
 CAPM: Computer-Aided Production Management (计算机辅助生产管理)
 MRP: Material Requirements Planning (物料需求规划)
 QC: Quality Control (质量控制)

习 题

1.1 设有一带电流负反馈的单级放大器, 若要通过计算机模拟实验考察反馈电阻的取值对输出特性的影响, 试说明一种实现方法。

1.2 电子线路 CAD 有哪些特点? 与传统的电子线路设计相比有哪些优点?

1.3 试述电子线路 CAA 的过程及基本要求。

1.4 试述 CAD 系统的软、硬件配置情况。

第二章 网络拓扑与基本概念

§ 2-1 网络拓扑的基本概念

任一集中参数网络均服从下述三个基本定律：克希荷夫电压定律(KVL)，克希荷夫电流定律(KCL)及伏安关系(支路特性)。其中KVL和KCL定律是对所连支路的电压和电流的线性代数约束。它取决于支路的互连情况，而与支路的特性无关。

网络拓扑主要研究集中参数网络中与节点和支路有关的一些性质。它是数学中图论的一个分支。本章不准备介绍网络拓扑的全部内容，而只介绍与通用计算机模拟程序发展有关的一些基本概念和性质。并将导出KVL及KCL方程计算机形成方法的实际应用。

大家已经知道，各种集中参数网络(线性的和非线性的)均可表示为具有特定元件特性的二端元件连成的模型。而完整的描述网络的模型必须包含下述信息：

- ①支路的连接情况；
- ②支路电压和电流的参考方向；
- ③支路的伏安特性。

用来描述第①及第②两项的一个自然而简单的方法是画出有向图 G_s 。 G_s 与给定网络 N 有关，一般按下述规则画出：用带箭头的线段标出每个二端元件，称为支路。其箭头方向与假定通过该支路的电流的参考正方向一致。且与支路电压的参考方向相关联。采用了这样的参考方向就无需分别表示电压及电流的参考方向了。由此，有向图 G_s 就给出了第①及第②项的完整信息。例如，由图2-1(a)所示的集中参数网络，可对应得出图2-1(b)所示的有向图 G_s 。

当我们不关心支路的电压及电流的方向时，可将 G_s 上所有箭头都去掉，即形成一种无向图。它亦与给定的网络 N 有关，并表示为 G_u 。例如，与图2-1(a)相对应的无向图 G_u 可表示为图2-1(c)。人们将网络模型 N ，有向图 G_s 及无向图 G_u 作为三个密切相关的实体来考虑，且常将 G_s 或 G_u 称为 N 的网络图。

下面，我们将导出网络拓扑的一些基本概念。

首先给出几个有关定义。

1. 通路(Path)

对于 G_u 中支路的集合

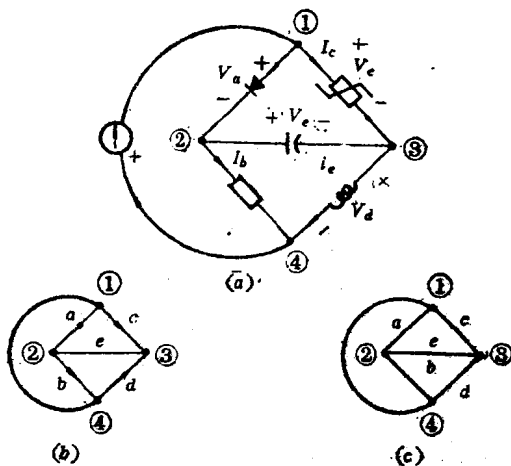


图 2-1 由网络得到相应的有向图