

高等学校教学参考书

电子线路的 计算机辅助设计

上 册

张惠廉 庄镇泉 主编

人民教育出版社

电子线路的计算机辅助设计

上 册

张惠廉 庄镇泉 主编

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了利用电子计算机对电子线路进行分析和设计的基本理论和具体的方法。全书共分上、下两册。上册主要包括：电子线路的稳态交、直流分析、瞬态分析和状态空间分析方法；下册包括：容差分析、非线性分析、信号的计算机分析、最优设计、混合分析方法、符号网络函数的产生方法，以及稀疏矩阵技术在网络分析中的应用等。

本书具有理论分析和计算方法并重的特点。书中选编了大量的具体程序和相应的计算例题，以便于加深读者对算法的理解和掌握。其中，上册着重于程序的叙述，下册则侧重于算法的介绍。

本书可作为高等院校无线电以及相近类型专业高年级学生的选修课教材，也可供从事电路与系统分析和设计的科技工作者或工程技术人员参考。

高等学校教学参考书

电子线路的计算机辅助设计

上 册

张惠廉 庄镇泉 主编

*

人民邮电出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民邮电出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张20.25 字数 460,000

1979年5月第1版 1979年12月第1次印刷

印数 00,001—17,000 册

书号 15012·0167 定价 1.70 元

前 言

电子线路的分析与综合是设计电子线路不可分割的两个环节。这门学科已有较长的发展历史,随着电子技术的发展,它也在不断发展。近年来,由于采用了电子计算机技术,其面貌焕然一新。它把计算机的快速计算、优良的数据处理能力与人的创造性思维充分结合起来,缩短设计周期,提高设计质量,并使设计人员从繁复的计算、查数据及繁重的绘图工作中解放出来,形成了计算机辅助设计这样一门日益发展的新学科。

本书系统地阐述电子计算机辅助分析和设计电子线路方面的基本理论和方法。全书分上、下两册。上册主要包括:电子线路的稳态交、直流分析,瞬态分析和状态空间分析方法;下册包括:容差分析,非线性分析,信号的计算机分析,最优设计,混合分析法,符号网络函数的产生方法以及稀疏矩阵技术在网络分析中的应用等。本书并非计算数学,但为了便于自学,凡涉及到有关的计算方法和数学基础,均做了必要的介绍。

为了使读者不仅能够掌握有关的基本原理与分析方法,而且还能学会一些常用的算法。因此,书中除了对所涉及的基础理论作较详细的介绍外,还特别注意具体程序的编制和说明,由浅入深,由简到繁。并附有相应的例题,以便增强对算法的理解。为了慎重起见,书中绝大部分程序和例题均在国产 DJS-130 或 DJS-8 型计算机上调试通过并进行运算。

书中采用 BASIC 和 FORTRAN 两种算法语言,采用前者是考虑到初学者易于掌握以及目前国内 DJS-130 型计算机比较普及。采用后者则是因为在科学计算方面广泛采用 FORTRAN 语言。

为了掌握本书内容,读者应具备线性代数,计算数学, BASIC 和 FORTRAN 等算法语言的基本知识,以及诸如电路理论,电子线路和脉冲技术等课程方面的基础。

本书曾在 1977 年全国高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上被定为教学参考书。参加全书编写工作的有张惠廉、庄镇泉、戴英侠、赵守忠等同志。由张惠廉、庄镇泉两位同志负责主编。在编写过程中,承校、系各级领导积极支持。中国科学院高能物理研究所计算机组和我校 KD-3 计算机组及 320 机组许多同志给予我们大力协助。西安交通大学邱关源同志、中国科学院电子所陆志刚同志和我校王文涛同志热情地对本书的初稿进行了审阅,王长富、郭从良、王荣生等同志对原稿提供了不少宝贵的意见。在此,仅致以衷心的感谢。

由于我们的学识水平有限,编写时间仓促,各方面征求意见还不够充分,因此书中一定有不少错误和不妥之处。殷切希望读者批评指正。

编 者

一九七八年十一月于中国科学技术大学

目 录

第一章 电子线路的计算机辅助设计入门.....	1
第一节 概述.....	1
第二节 实例.....	7
第二章 线性代数方程组的求解.....	37
第一节 行列式.....	37
第二节 矩阵.....	41
第三节 线性代数方程组的求解.....	60
第三章 线性网络的稳态分析.....	86
第一节 网络拓扑的基本原理.....	86
第二节 节点分析法.....	102
第三节 直流分析程序.....	121
第四节 直接列出节点电导矩阵的直流分析程序.....	137
第五节 线性网络的交流分析程序.....	155
第四章 线性网络的瞬态分析.....	178
第一节 瞬态响应的数值分析方法.....	178
第二节 差分方程的稳定性问题.....	198
第三节 无源元件的“瞬态伴随模型”.....	204
第四节 网络的瞬态节点电压方程.....	208
第五节 线性网络瞬态分析程序.....	212
第五章 状态空间分析.....	226
第一节 由微分方程式导出状态方程.....	228
第二节 由传递函数导出状态方程.....	232
第三节 由网络图形直接导出状态方程.....	238
第四节 利用计算机自动导出状态方程的一种方法.....	252
第五节 状态方程的时域解.....	278
第六节 状态空间分析程序.....	286
附录一 BASIC 语言简介.....	298
附录二 FORTRAN 语言简介.....	304

第一章 电子线路的计算机 辅助设计入门

第一节 概 述

现代电子计算技术的迅猛发展, 为我们提供了强有力的现代化计算工具。电子计算机的日益广泛应用使得系统的分析与设计发生了新的变革, 使电路设计走向更高级阶段——自动设计阶段。

为了说明使用计算机实现电子线路设计过程自动化, 我们先从电子线路的传统设计过程谈起。

以往, 设计一个电子线路的过程是: 首先根据实际需要, 提出设计指标; 然后由设计人员参考有关资料, 初步确定电路方案和元件参数; 最后根据已知参数, 用解析法或者搭成电路进行试验, 检验电路指标, 看其是否与预定指标相符合。如果不符合, 就对原来的电路方案或元件参数进行修改。修改后再次用解析法或试验法进行检验。如此反复循环, 直至电路指标达到预定要求为止。这一过程示于图 1-1。

近年来, 由于电子技术的飞速发展, 各种电子设备与系统日益复杂, 规模不断扩大, 对它们的准确度、稳定性、可靠性以及其它质量指标的要求也愈来愈高。传统的设计方法已不能适应要求。譬如, 当选定方案之后, 要计算其指标, 就要解成百上千个方程。用计算尺、手摇或电动计算工具, 不仅工作繁复, 而且结果也不准确。此外, 即使按上述方法得知其性能与指标不一致, 在电路复杂的情况下, 也很难判断产生误差的根源及影响性能指标的关键元件或部件。因此在修改方案时, 必然带有一定的盲目性。为此, 就必须借助于电子计算机, 采用计算机辅助设计的方法。

电子线路的计算机辅助设计, 内容十分广泛。应用的深度也有初级和高级之分。最初, 人们只是将计算机作为一个计算工具; 设计者列出电路的代数方程或微分方程, 编制专用的程序, 用电子计算机求解。随后, 则发展为编制各种通用程序, 设计人员只要把网络的拓扑信息和各种参数输入计算机, 即可由计算机自动列出方程并求解。这是目前计算机辅助分析的主要形式, 并已经发展到比较成熟的阶段。至于更高级的阶段则是采用显示设备, 用光笔在计算机显示设备上作图, 由计算机自动识图并求解。

下面举例说明计算机是如何帮助我们进行电路分析的^[17]。

以简单的半导体三极管放大器为例, 如图 1-2(a)所示。要求分析: (1)当元件和器件参数与标称值完全一致时, 放大器的直流工作点; (2)当元件值与标称值不相一致时, 放大器直流工作点的最大、最小偏差值; (3)各元件、器件参数变化时对直流工作点的影响程度, 亦即计算电路

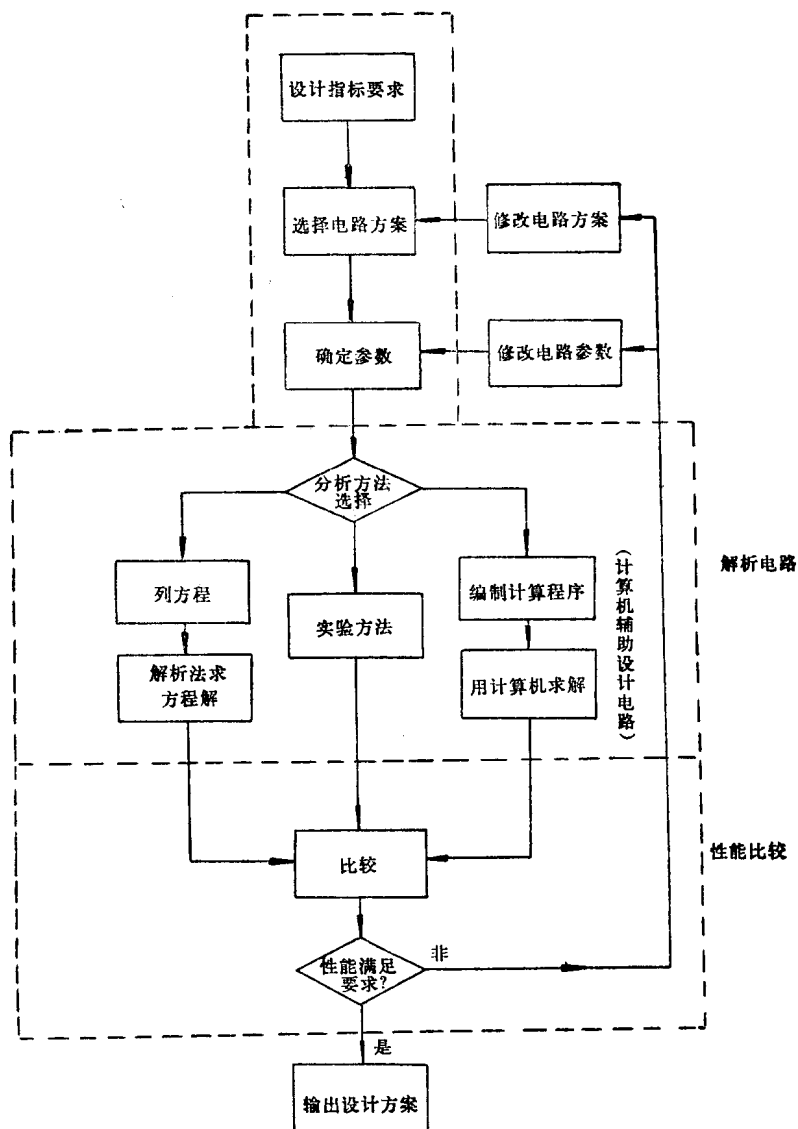


图 1-1 设计电子线路过程框图

的灵敏度*。

采用计算机分析这个电路的过程如图 1-3 所示。其大致步骤如下：

* 灵敏度 S_{ij} 是指电路第 j 个参数 p_j 变化 1/100 时, 电路的第 i 项指标 e_i (在本例中是节点电压 V_{ni}) 的变化。其数学表达式为

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial e_i}{\partial p_j} \right) | p_j | / 100$$

关于灵敏度的概念详见本书第六章。

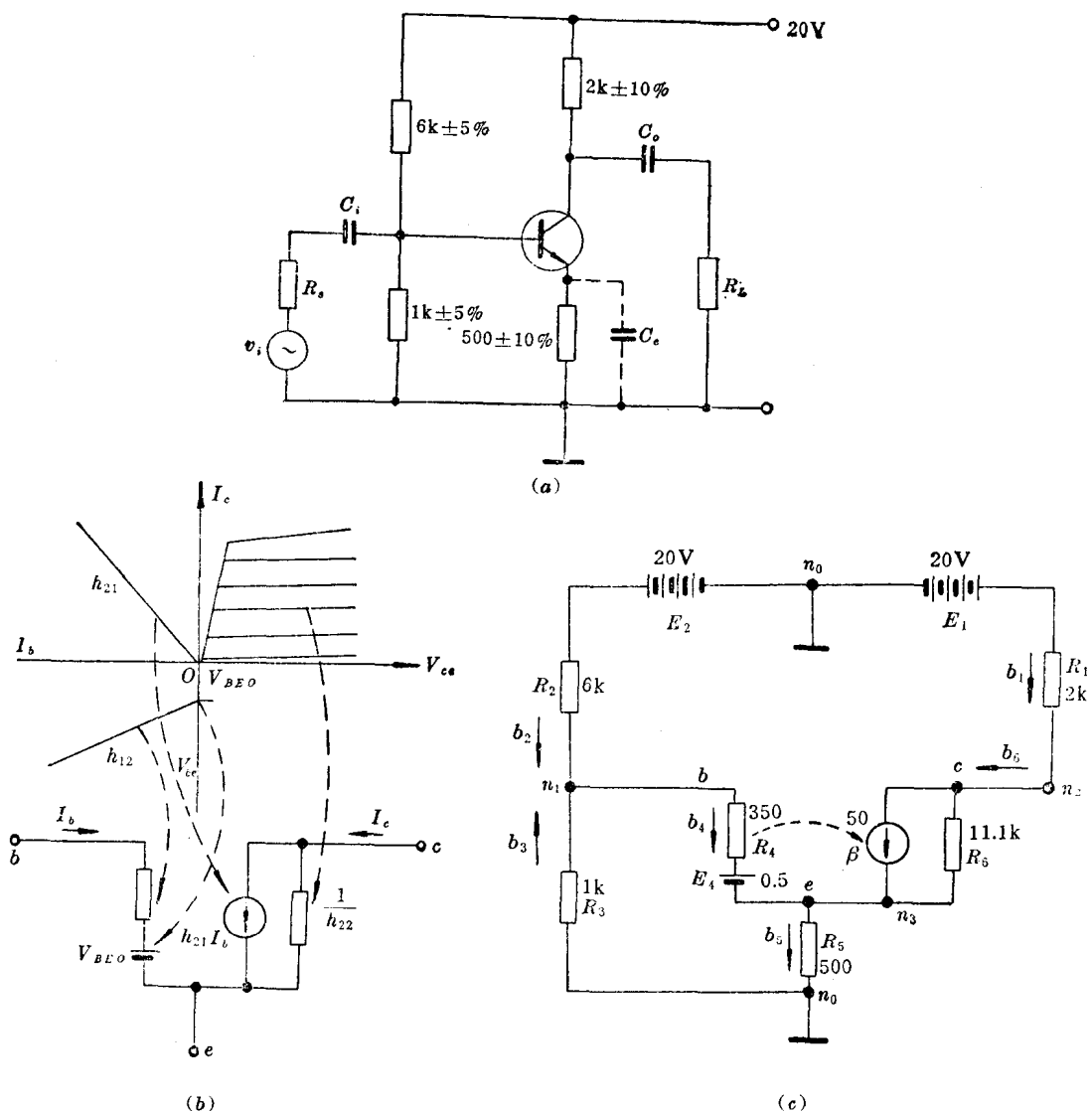


图 1-2 半导体三极管放大器

(a) 放大器 (b) 半导体三极管等效电路 (c) 放大器等效电路

一、根据待解决的问题建立数学模型

在电路问题中，一般总是用理想元件和器件组成的等效电路代替实际电路，然后，按等效电路中各物理量之间的关系建立数学模型。本例的等效电路如图 1-2(c) 所示。图中每个节点和支路都标以序号，如节点 1 表示为 n_1 ，支路 2 表示为 b_2 ，并用箭头表示假定的电流方向。

确定了等效电路后，根据电路的基本定律，写出等效电路的节点电压方程，便可建立该电路的数学模型。

二、选择计算方法，编写计算程序

建立数学模型后，即可选择运算简单、速度快、准确度高的计算方法。例如，选用高斯主元消

去法解节点电压方程。计算方法确定后,就可开始编制计算程序。

程序大致包括以下内容: 将电路的拓扑信息和元件参数存入计算机的存贮器中;按选定的分析方法列出方程并求解;最后将计算结果按规定格式打印出来。

三、调试程序并输入数据进行计算

先将编好的程序由穿孔机穿成纸带,编成数码,输入计算机中,进行调试。

调好程序,确认正确后,然后将等效电路中的电源、元件和器件的参数及其偏差值,支路起始、终止节点号等数据穿成纸带,输入机器,进行运算。本例运算结果列于表 1-1。

由结果看到,晶体管的集电极功耗值为 39.298521 毫瓦,第三支路电流为 -2.7942205 毫安,其中负号表明电流的假设方向与真实方向相反。

从电路灵敏度一栏可看到,第二支路电阻对第二节点电压(即输出电压)影响最大。如果电阻值变化 1%,则电压 V_2 变化 90.721607 毫伏。可见,为了保证输出的稳定,对第二支路应该选择精度较高的电阻。

由于元件参数的偏差引起的直流工作点偏差,可由最后一栏说明。每个节点电压列出三个数值,分别表示参数为标称值时的电压、参数有偏差时的最小和最大电压值。我们称后两种情况为“最坏情况”。例如,表 1-1 中,第二节点电压最大值是 13.392029 伏,最小值是 7.9797068 伏,两者之差有 5.4 伏之多。可见,元件和器件参数偏差对工作状态影响确实不小。

以上介绍利用电子计算机分析一个简单电路的直流工作状态的例子。至于复杂的电路,方法也是一样的。除此之外,还可对电路的交流、瞬态工作状态等,进行计算机辅助分析。

由上述例子还可以看出,在分析电路过程中的大量繁复运算已由电子计算机所代替。但是,整个设计过程,即分析—修改方案—再分析的循环过程,还必须有人工参与。机助设计的更高级阶段是将上述循环过程完全由机器来完成,即无人工参与的自动设计阶段。下面我们设计一个滤波器为例加以说明。

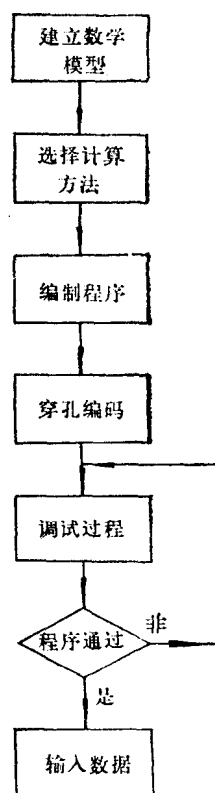


图 1-3 电路分析框图

表 1-1 计算机的计算结果

NODE VOLTAGE	NUMBER	BRANCH VOLTAGE	BRANCH CURRENT	BRANCH POWER
0.27942206 D	01	-0.11072701 D	02	0.39848323 D-01
0.11072701 D	02	-0.27942206 D	01	0.49339807 D-01
0.22685275 D	01	-0.27942206 D	01	0.78076685 D-02
	4	0.52569313 D	00	0.18861143 D-05
	5	0.22685275 D	01	0.10292433 D-01
	6	0.88041734 D	01	0.39298521 D-01

WITH RESPECT TO RESISTANCES

BRANCH	NODE	PARTIALS	SENSITIVITIES
1	1	-0.63667241D-05	-0.12733447E-03
1	2	-0.44129251D-02	-0.88258445E-01
1	3	-0.89664696D-05	-0.17932939E-03
2	1	-0.39376788D-03	-0.23626063E-01
2	2	0.15120275D-02	0.90721607E-01
2	3	-0.38727802D-03	-0.23236673E-01
3	1	0.23021249D-02	0.23021244E-01
3	2	-0.88399192D-02	-0.88399172E-01
3	3	0.22641826D-02	0.22641819E-01
4	1	0.28480791D-05	0.99682738E-05
4	2	0.27094676D-03	0.94831339E-03
4	3	-0.69398054D-04	-0.24269312E-03
5	1	0.16955143D-03	0.84775686E-03
5	2	0.16797459D-01	0.83987236E-01
5	3	0.23878493D-03	0.11939243E-02
6	1	-0.11313362D-05	-0.12557828E-03
6	2	0.90129801D-05	0.10004404E-02
6	3	-0.15932984D-05	-0.17685609E-03

WITH RESPECT TO BETAS

BETA	NODE	PARTIALS	SENSITIVITIES
1	1	0.11622489D-02	0.58112410E-03
1	2	-0.92592519D-02	-0.46296231E-02
1	3	0.16368339D-02	0.81841648E-03

WITH RESPECT TO VOLTAGE SOURCES

BRANCH	NODE	PARTIALS	SENSITIVITIES
1	1	0.14263504D-02	0.28526993E-03
1	2	0.98863674D 00	0.19772726E 00
1	3	0.20087767D-02	0.40175510E-03
2	1	0.13731476D 00	0.27462941E-01
2	2	-0.52727434D 00	-0.10545480E 00
2	3	0.13505162D 00	0.27010310E-01
4	1	-0.38796733D-01	-0.19398348E-03
4	2	-0.36909202D 01	-0.18454581E-01
4	3	0.94536127D 00	0.47268011E-02

WORST CASE SOLUTIONS FOR NODE VOLTAGES

NODE	WCMIN	NOMINAL	WCMAX
1	0.25532942E 01	0.27942200E 01	0.30516226D 01
2	0.79797068E 01	0.11072701E 02	0.13392029D 02
3	0.20247192E 01	0.22685270E 01	0.25281411D 01

图 1-4 所示为一个有源滤波器电路, 要求滤波器的频率特性 $\hat{H}(j\omega)$ 如图 1-5 中曲线 a (实线) 所示。我们来说明如何用计算机自动选择电路参数 G_1, G_2, G_3, C_1, C_2 及 K , 使其频率特性得到满足。

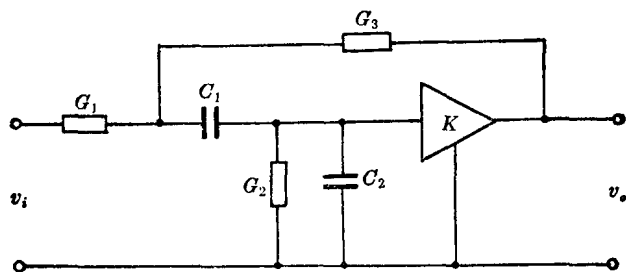


图 1-4 有源滤波器电路

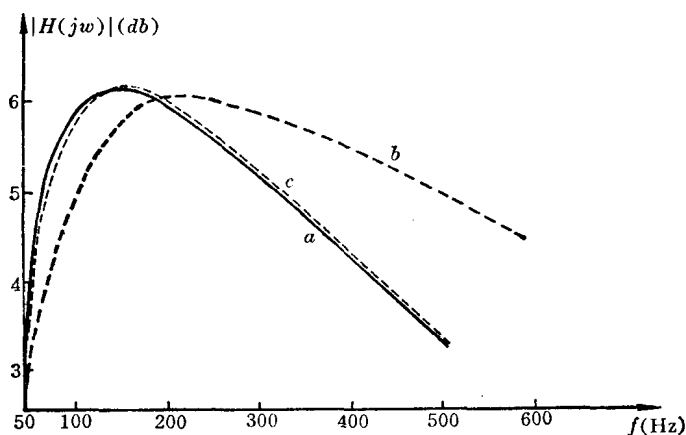


图 1-5 滤波器的频率特性

电路的传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{j\omega K C_1 G_1}{-\omega^2 C_1 C_2 + j\omega [G_1(C_1 + C_2) + G_3(C_1 + C_2 - K C_1) + G_2 C_1] + [G_2(G_1 + G_3)]}$$

在设计开始时, 滤波器的元件值可根据估计选取。假定初选参数值后, 其频率特性如图 1-5 中的曲线 b (虚线) 所示。我们可以在给定带宽内取频率点 $\omega_i (i=1, 2, \dots, n)$, 用最小二乘法来估算这两个频率特性之差值:

$$P = \sum_{i=1}^n (|\hat{H}(j\omega_i) - H(j\omega_i)|)^2$$

我们规定, 选择元件值, 使 $P < \varepsilon$ (ε 为给定的数值) 时, 就认为设计的电路满足要求。为此, 我们可以编制一个程序, 逐步地自动选择元件值, 使指标逐渐靠近, 即 P 渐渐地减小, 直至 $P < \varepsilon$ 为止。

这个程序的具体步骤如下:

1. 根据设计人员的经验或参考有关资料, 提出元件的初步假定值, 例如, 假定电容 $C_1 = 1\mu\text{F}, C_2 = 1\mu\text{F}$ 。(为了简化讨论, 设已选定 $G_1 = G_2 = G_3 = 0.001\text{S}, K = 10$, 只需改变电容 C_1

和 C_2 之值)。

2. 按给定的参数值进行计算 $P = \sum_{i=1}^n (|\hat{H}(j\omega_i) - H(j\omega_i)|)^2$ 。若 $P < \epsilon$, 说明这次“猜测”已成功, 否则, 要进行下一步计算。

3. 将电容元件 C_1 和 C_2 改变一微小量 δC_1 和 δC_2 。改变的原则是, 保证改变元件数值后, 计算出的 P 不但比以前的小, 而且下降的梯度应为最大。

4. 用改变后的元件值再次计算 P 。如果 $P < \epsilon$, 则完成设计。否则, 按第三步继续选择元件值, 再计算 P , 如此循环直至满足 $P < \epsilon$ 为止。

这就是自动设计的简单过程。这个例子开始选 $G_1 = G_2 = G_3 = 0.001\text{S}$, $C_1 = C_2 = 10^{-6}\text{F}$, $K = 10$ 。经过自动设计后, 当 $P < \epsilon$ 时, 得到 $C_1 = 1.583\mu\text{F}$, $C_2 = 1.627\mu\text{F}$ 。最终设计的滤波器频率特性为图 1-5 中的曲线 c , 实际上可以把它看作曲线 a 。

在电子线路中, 给定直流工作点、瞬态响应等指标后, 也能用类似方法来实现自动设计的目的。

如果采用光笔, 计算机即可根据设计者给定的指标, 直接在显示设备上完成上述过程, 自动设计出电路的结构, 并给出电路参数。但自动设计目前仅局限于一些较简单的电路。至于复杂电路的自动设计, 预计不久的将来一定会得到解决。

借助计算机还能设计出电子线路的最佳布局。众所周知, 构成电子线路的集成电路, 是将半导体管等许多元件按一定电路形式制作在半导体基片上。若用人工去进行版图设计, 则工作量很大, 既费时, 质量又得不到保证。借助于计算机, 则只需将电路结构、元件尺寸、排列要求等信息输入计算机, 它就能很快地将基片上的元件布局及走线设计出来。对于大规模集成电路的掩模图, 也可以采用类似的方法进行自动设计, 并配合图形显示, 直接进行照像和制版。

第二节 实 例

作为入门, 下面列举几个实际的例子, 说明如何用算法语言编制具体程序, 并由计算机求解简单的电路问题。

例 1-1 半导体三极管偏置电路的计算

由于环境温度改变或调换管子, 将使半导体三极管放大器的工作点发生变化。为了稳定工作点, 在偏置电路上采取了一定的措施。图 1-6(a) 是一个综合的偏置电路。如果我们将这个电路中某些电阻开路或短路, 就可以得到图 1-7 中几种常用的偏置电路。所以只要推导出图 1-6 中 I_e 的表达式, 就可以分析图 1-7 中任何一个偏置电路的工作点。

由戴维南定理可以将图 1-6(a) 简化为图 1-6(b)。然后根据克希荷夫定律写出下列两个方程:

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

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

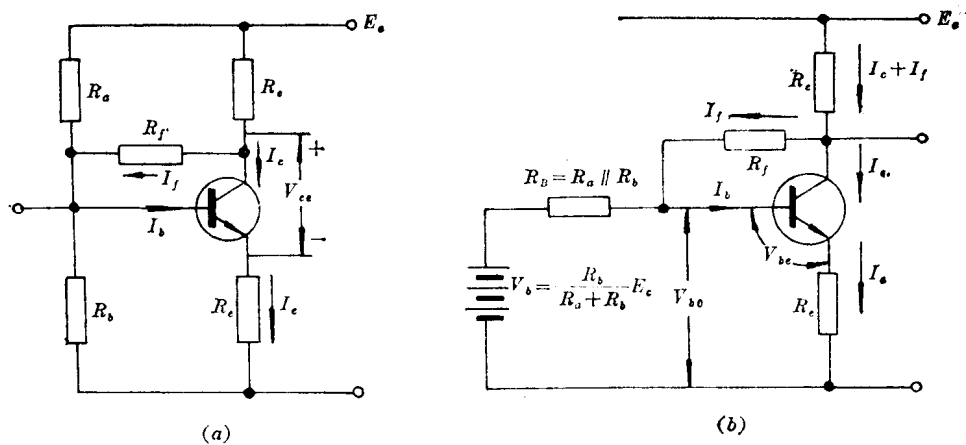


图 1-6 半导体三极管放大器综合偏置电路

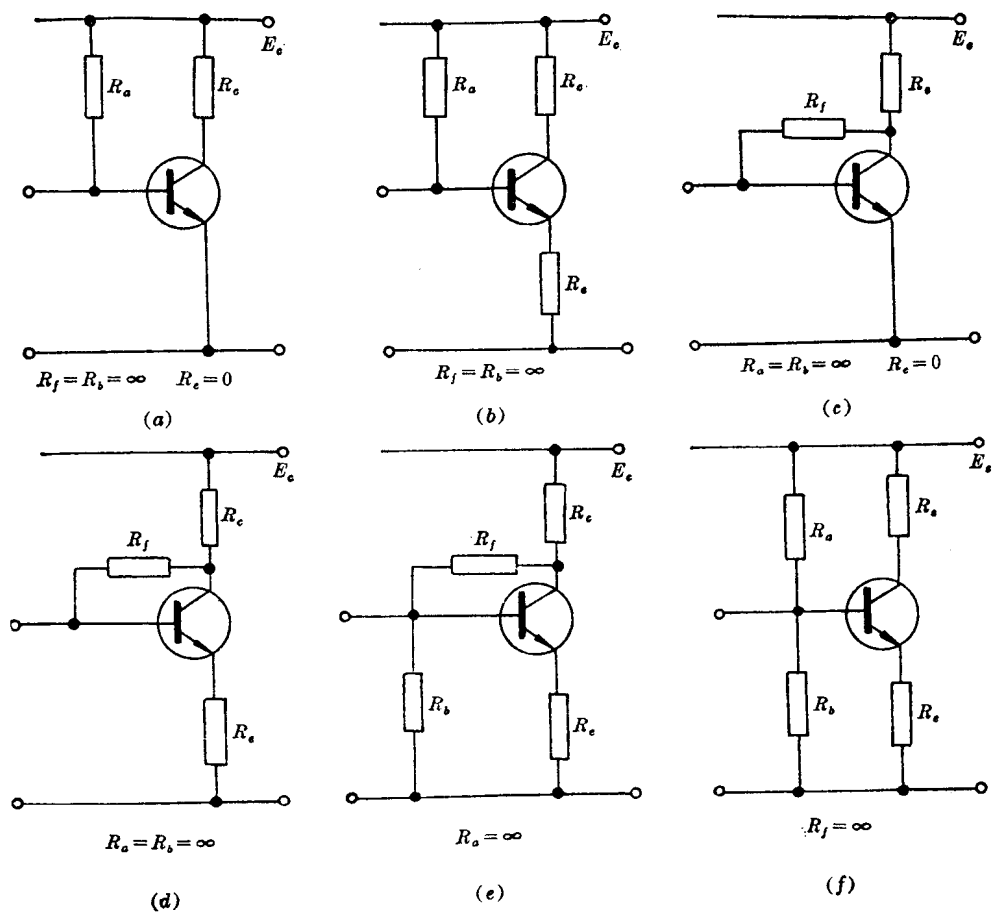


图 1-7 半导体三极管放大器各种偏置电路

在半导体三极管中 I_e , I_b 和 I_c 有如下的关系:

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

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

故

$$I_b = \frac{I_c - I_{CEO}}{\beta} \quad (1-5)$$

将式(1-5)代入式(1-2)和式(1-3), 得到下列联立方程:

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

用行列式求解 I_c , I_f , 则得

$$I_c = \frac{\begin{vmatrix} -R_B & V_b - V_{be} + \frac{I_{CEO} R_B}{\beta} & R_e \\ 0 & -\frac{I_{CEO}}{\beta} & 1 \\ R_c + R_f & E_c - V_{be} & R_e \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -R_B & \frac{R_B}{\beta} & R_e \\ 0 & -\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) & 1 \\ R_c + R_f & R_c & R_e \end{vmatrix}} = \frac{A+B}{C+D} \quad (1-7a)$$

$$I_f = \frac{\begin{vmatrix} V_b - V_{be} + \frac{I_{CEO} R_B}{\beta} & \frac{R_B}{\beta} & R_e \\ -\frac{I_{CEO}}{\beta} & -\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) & 1 \\ E_c - V_{be} & R_c & R_e \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -R_B & \frac{R_B}{\beta} & R_e \\ 0 & -\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) & 1 \\ R_c + R_f & R_c & R_e \end{vmatrix}} = \frac{E+F+G}{C+D} \quad (1-7b)$$

式中

$$A = \frac{R_B R_e I_{CEO}}{\beta} + (R_c + R_f) \left(V_b - V_{be} + \frac{I_{CEO} R_B}{\beta} \right)$$

$$B = R_e (R_c + R_f) \frac{I_{CEO}}{\beta} + R_B (E_c - V_{be})$$

$$C = R_B R_e \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) + \frac{R_B}{\beta} (R_c + R_f) + R_c R_B$$

$$D = R_e (R_c + R_f) \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

$$E = \left(V_b - V_{be} + \frac{I_{CEO} R_B}{\beta} \right) \left[-\left(1 + \frac{1}{\beta} \right) R_e - R_c \right]$$

$$F = \frac{I_{CEO}}{\beta} \left(\frac{R_B}{\beta} R_e - R_e R_e \right)$$

$$G = (E_c - V_{be}) \left[\frac{R_B}{\beta} + R_e \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]$$

根据上述关系式即可编制综合偏置电路的计算程序如表 1-2 所示。其中语句 20 是读数语句，它将 DATA 语句中所给出的有关数据读入计算机存贮单元。语句 30 到 40 是计算戴维南等效电路的等效电阻和等效电源。语句 50 到 110 是用来计算 A, B, C, D, E, F, G 七个量的。语句 130 到 140 计算半导体三极管工作点的电流 I_c 及电压 V_c 。最后将电路参数以及计算结果由语句 160 到 170 打印出来。程序中的符号说明见表(1-3)。

表 1-2 半导体三极管放大器偏置电路的计算程序

```

10  REM A GENERAL TRANSISTOR BIASING PROGRAM
20  READ R1, R2, R3, R4, R5, H, V1, V2, I0
30  LET R6 = R3*R4/(R3 + R4)
40  LET V3 = R4*V1/(R3 + R4)
50  LET A = R6*R5*I0/H + (R1 + R2)*(V3 - V2 + I0*R6/H)
60  LET B = R5*(R1 + R2)*I0/H + R6*(V1 - V2)
70  LET C = R6*R5*(1 + 1/H) + R*(R1 + R2)/H + R1*R6
80  LET D = R5*(R1 + R2)*(1 + 1/H)
90  LET E = (V3 - V2 + I0*R6/H)*(- (1 + 1/H)*R5 - R1)
100 LET F = (I0/H)*(R6*R5/H - R1*R5)
110 LET G = (V1 - V2)*(R6/H + R5*(1 + 1/H))
120 LET I1 = (A + B)/(C + D)
130 LET I2 = (E + F + G)/(C + D)
140 LET V0 = V1 - R1*(I1 + I2)
150 PRINT "R1": R1, "R2": R2, "R3": R3, "R4": R4
160 PRINT "R5": R5, "H": H, "V1": V1, "V2": V2, "I0": I0
170 PRINT "I2": I2, "V0": V0
180 END

200 DATA 10000, 1E+7, 20000, 5000, 4000, 200
201 DATA 25, 0.65, 0.000005

```

表 1-3 程序表 1-2 中所用符号对照表

公式中符号	V_c	E_c	V_{be}	V_b	I_{CEO}	I_c	I_f	R_c	R_f	R_a	R_b	R_e	R_B	β
程序中符号	V0	V1	V2	V3	I0	I1	I2	R1	R2	R3	R4	R5	R6	H

现在我们利用这个程序来计算图 1-7(f)所示的半导体三极管放大器的工作点。设图 1-6(a)所示电路中电阻 $R_f = 10$ 兆欧，它比别的电阻大得多，相当于开路。这样就把图 1-6(a)等效成图 1-7(f)。用表 1-2 中的程序，输入参数及计算结果如表 1-4 和表 1-5 所示。输入数据共

有五组,它们代表五种不同的情况。第三组数据表示半导体三极管放大器在室温条件下工作。第一、第四两组数据是为了计算半导体三极管电流放大倍数 β 变化时对工作点的影响。第二组数据表示半导体三极管漏电流变大的情况。第五组表示在高温下工作时,电流放大倍数 β 变大,电压 V_{be} 变小的情况。分别进行五次计算。每次计算时,用语句 200 到 201 将该组数据读入计算机中。在表 1-2 中,是将第一组数据读入机器的。

表 1-4 计算图 1-7 (f) 所示半导体三极管放大器工作点的输入数据

R1	R2	R3	R4	R5	H	V1	V2	I0
10000	1E+7	20000	5000	4000	200	25	0.65	0.000005
10000	1E+7	20000	5000	4000	100	25	0.65	0.00002
10000	1E+7	20000	5000	4000	100	25	0.65	0.000005
10000	1E+7	20000	5000	4000	50	25	0.65	0.000015
10000	1E+7	20000	5000	4000	200	25	0.45	0.000005

表 1-5 图 1-7 (f) 所示半导体三极管放大器工作点计算结果

I2	V0
1.0777E-3	14.223
1.06749E-3	14.3251
1.06719E-3	14.3281
1.04679E-3	14.5321
1.12715E-3	13.7285

同样,如果要分析电路中的电阻误差或电源波动对工作点的影响,只要将这些变化数值输入计算机内进行计算,就能很快地得到需要的数据。

过去,电路设计工作者通常是采用增加电阻 R_e 或减小电阻 R_a 、 R_b 的方法,反复进行环境温度实验,逐步确定工作点稳定的电路参数。现在,采用电子计算机之后,用不同的数据去模拟半导体三极管放大器的工作环境或参数变化,并将这些数据输入计算机进行计算,就能很快地知道工作点的稳定性情况。这样做不仅可以得到大量的计算数据,还能正确地指出影响工作点稳定的最敏感因素,迅速找出关键性元件。

例 1-2 一般形式传递函数的频率特性和相位特性计算

在电路和系统分析中,经常要对传递函数进行分析计算,借助于电子计算机,可以大大地提高运算速度和工作效率。下面我们举一个计算一般形式传递函数的例子。

系统的一般形式传递函数表达式^[3]如下:

$$G(j\omega) = \frac{\prod_{i=1}^Q S_i [(1 + j\omega T_i) - (\omega^2 B_i)]^{R_i}}{(j\omega)^N} \quad (1-8)$$

式中 N 为传递函数在复平面坐标原点的极点数(或零点), Q 为传递函数的因子数, S_i 表示第 i 个因子的增益, R_i 表示第 i 个因子的指数, ω 为角频率, T_i 、 B_i 为实型常数。任一个传递函数的零

点或极点分布情况,都可用上述公式表达出来。例如,当 $N=+2$ 时,说明该系统在复平面原点处有两个极点;当 $N=-3$ 时,说明在原点处有三个零点。而指数 R_i 为正,说明这个网络传递函数中第 i 个因子相应于一个零点;反之,若 R_i 为负,则相应于一个极点。如果 $B_i=0$,就表明第 i 个因子在复平面上是实数的零点; $B_i \neq 0$,就表明这个因子是一个复数零点或极点。

例如,当 $T_i=5, B_i=0$,第 i 个因子为

$$1+j\omega 5 \quad \text{或} \quad 1+5s$$

表示在 s 平面上有一个实数极点(或零点),位置在 $s=-\frac{1}{5}$ 。如果 $B_i=2, T_i=2$,则第 i 个因子为

$$1+j2\omega-2\omega^2 \quad \text{或} \quad 1+2s+2s^2$$

在 s 平面上,这个因子将代表 $s=-\frac{1}{2} \pm j\frac{1}{2}$ 的一对共轭极点(或零点)。

上述传递函数表达式适用于线性系统。根据实际的网络结构,将传递函数因子相应的 S_i, T_i, B_i, R_i 及 Q, N 等数值代入式(1-8),就可得到具体的网络传递函数。

例如对于某反馈控制系统,其传递函数为

$$G(j\omega) = \frac{99(1+j0.1\omega)}{(1+j0.01\omega)^2(1+j0.2\omega)(1+j1.5\omega)} \quad (1-9)$$

我们只要令

$$\begin{array}{llll} N=0 & Q=4 & & \\ S_1=99 & T_1=0.1 & B_1=0 & R_1=1 \\ S_2=-1 & T_2=0.01 & B_2=0 & R_2=-2 \\ S_3=1 & T_3=0.2 & B_3=0 & R_3=-1 \\ S_4=1 & T_4=1.5 & B_4=0 & R_4=-1 \end{array}$$

代入式(1-8),便可得到式(1-9)所示的传递函数。

用计算机来计算传递函数的频率和相位特性的方框图如图 1-8,而计算程序的符号说明及程序如表 1-6 和表 1-7 所示。

表 1-6 程序表 1-7 的符号说明

W	角频率 ω	G	传递函数的分贝数
W0	初始角频率 ω_0	P	传递函数的相角
W1	终止角频率 ω_1	G2	存贮各因子的增益乘积
W2	每循环一次的角频率增量 ω_2	$\begin{array}{l} S(I), T(I) \\ B, I), R(I) \end{array}$	传递函数第 i 个因子的 S_i, T_i, B_i, R_i 参数