

面向21世纪课程教材



电子 电路

基础

谢沅清 解月珍 编著



人民邮电出版社

面向 21 世纪课程教材

电子电路基础

谢沅清 解月珍 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本教材是根据目前电子电路技术的发展和教学的需求而编写的。作为一门技术基础课教材,在选材时着眼于最基本的内容,即原理上有其独立性、代表性的电路。

本书主要包括:半导体元器件、放大器的基础、放大器的反馈和频率特性、场效应管及其放大电路、功率输出级、集成电路的基础、集成运算放大器应用、电压比较器和模拟相乘器、逻辑门电路、谐振放大器、正弦波振荡器、张弛振荡器、单稳态触发器与双稳态触发器等。

本书的讲述,较为注重物理方面的描述,力求避免繁琐的数学推导,着重基本概念的介绍;对于计算,采取手工计算和计算机辅助分析互补,体现了现代技术与传统分析方法的结合。

本书可作为高等学校电子类、通信类和自动化类的专业教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

面向 21 世纪课程教材 电子电路基础

-
- ◆ 编 著: 谢沅清 解月珍
责任编辑: 滑 玉
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
北京朝阳展望印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 787×960 1/16
印张: 31.5
字数: 659 千字 1999 年 9 月第 1 版
印数: 3001-6000 册 2000 年 6 月北京第 2 次印刷
- ISBN 7-115-07245-0/TN·1386
-

定价: 42.50 元



面向21世纪课程教材



普通高等教育“九五”
国家级重点教材

编者的话

电子电路课程是70年代初期开始设置的。20余年来，随着科学技术的发展，课程内容不断调整，课程名称几度更换。时至今日，各门课程名不副实。这种名不副实的状况，影响教学效率的提高，而且导致学生产生一些模糊概念。

电子线路系列课程设置的初期，是按照无线电发信机和接收机的电路结构来划分的。本书作者在70年代末80年代初编写的一套《低频电子电路》和《高频电子电路》等书中，曾经把以电阻为负载的放大器（由于它在广播接收机中用于放大语音信号）归属为低频电路，以谐振回路为负载的放大器（由于它因其放大载频及其边带信号）归属为高频电路。在广播接收机中，属于高频电路的中频放大器，其工作频率为 (465 ± 5) kHz；而在电视接收机中，放大视频信号的低频放大器，其工作频率的上限达若干兆赫。这就在学生中引出一个问题，怎么低频电路的工作频率反而比高频电路的工作频率还要高？事实上，不仅放大电路中有低频放大器的工作频率可能比高频放大器的工作频率高的“怪现象”，像归属于高频电路的其它电路，如LC振荡器、变频、调制、解调等，也时有发生在某一类机器中，其工作频率要比在另一类机器中工作的所谓低频电路的工作频率低得多的“怪现象”。在许多教科书中，或是教师的讲课中，对此是避而不谈的，致使读者稀里糊涂地接受了这个模糊不清的称谓。显然，对培养学生的素质是十分不利的。

后来，将高频电路和低频电路合称模拟电路，于是电子线路分成了模拟电路和数字电路两大块。又因为电子线路属于技术基础课，故又有模拟电子技术基础和数字电子技术基础之称。被称为模拟电路的器件、放大、反馈、振荡等内容，实际上是模拟电路和数字电路的共同基础。而数字电路课程讲述门电路的电路原理，脉冲信号的产生与整形，必须分析电流、电压的连续变化，所用到的概念和方法，和模拟电路中讲放大、反馈、振荡等内容所用到的概念和方法是相同的。类似的内容，合在一起讲，既节省时间，也能讲得深入一些。

基于以上所述，为使得课程名称和内容名副其实，避免出现模糊概念，也为了提高教学效率，我们对属于电子线路范畴的几门课程的内容进行了优化组合。本书是将原模拟电子线路中的器件、放大(含谐振放大)、反馈、正弦波振荡和模拟相乘器，与原数字电路中的“电路级”内容，如门电路、脉冲波的产生和整形组合在一起，定名《电子电路基础》。

作为一门技术基础课教材，在选材时着眼于最基本的内容。所谓最基本的内容是指原理上有其独立性、代表性的电路。一些可以由基本电路构成的电路则在取材时舍去。例如有源滤波器是由运算放大器加RC选频网络构成的反馈网络组成的。在讲述了运算放大器、反馈和频率特性的分析方法后，再审视有源滤波器，便没有多少新内容了。又如功率放大集成块

多数是由差放输入级和互补推挽输出级再加反馈构成的。讲清楚差放和互补推挽电路，就不必详细地讲解功率放大集成块了。讲述运算放大器，只介绍最基本的电路，而不必每一代运算放大器逐一予以介绍。这样，就可避免将教材写成器件手册。

有两个问题需要读者十分重视。其一是分立元件和集成电路之间关系的处理。随着电子电路的集成度越来越高，教学内容以集成电路为主，是没有问题的。但是如何适当地处理分立元件电路，存在有不同看法。我们的认识是：集成电路的基本单元是分立元件电路，由学生在从事硬件工作——包括本科生毕业设计、研究生论文工作以及用人单位对毕业生的反映中可以看出，他们感到棘手的是：器件的工作点是否选得合适、动态运用范围应该多大、各集成块之间的电平怎么配合(输出-入阻抗以及带负载能力)、影响电路工作速度的因素是什么等问题。这些问题的解决，都有赖于对单元电路的透彻了解。因此，对分立元件电路，是不可以马虎，更是不可以取消的，而是要将上述基本问题切实讲清楚。当然，在选择分立元件电路的类型时，应注意从集成电路的子电路中挑选那些具有代表性的电路。

另一个问题是关于电路的分析与设计计算。本书以分析为主，对于设计，只求解决局部设计，而不求解决全面设计。这是因为对大多数大学本科毕业生的读者，他们在实际中很少会碰到做电路的全面设计。本科毕业生的知识面有限，要求他们对电路做一个全面的工程设计，未免要求过高。

对于计算的处理，我们采取手工计算和计算机辅助分析互为补充。手工计算着重介绍工程简化分析计算，目的不在于得到精确的结果，而着眼于获得清晰的定性的概念与结论。这些概念和结论，用来指导构成电路系统时，能根据各个部分电路连接后的相互关系，正确处理连接处的电平配置，有助于在实验中迅速判断电路出现故障的原因。计算机辅助分析是介绍应用 SPICE 电路分析程序对电路进行分析，以补偿手工估算的不足。书中不讲述 SPICE 电路分析程序本身，因为读者可以在有关手册中查知。本书仅是应用该电路分析程序分析电路，作为示范，以得出难以直接地从物理概念或从简化电路得出的数值结果。同时布置适量的习题，让读者练习，以培养学生应用计算机分析电子线路的能力。值得指出的是，计算机辅助分析所得结果的准确程度，与器件和电路模型的准确性有关。在分布参数起作用的高频段，分布参数很难在电路模型中精确地表示出来。往往是计算机辅助分析所得结果，和实验结果大相径庭。在这种情况下，求助于运用基本概念对寄生参数给予电路特性影响的定性分析，可能更为有效。

集成块内部电路的设计，不是本课程的任务，但求学生通过本课程的学习，能合理配置集成块外围电路。要做到这一点，了解集成块引出端的内部电路，并对器件工作状态有充分了解是十分必要的。

根据作者多年从事电子线路方面教学与科研的工作经验，在编写本书时，注意到了下述问题。

一、教学内容方面^①

1. 工程简化法的处理

电子电路是一门工程性很强的课，重要任务之一是给学生传授简化处理问题的方法。在工程上对分析计算的简化处理，主要依据是简化处理造成的相对误差是多少。传统的讲授方法很少强调相对误差，往往是抽象地讲某个量很大或很小，因而可以忽略不计。对教科书的作者或课堂教学的讲授者来说，实际上考虑的是相对误差，他脑子里有丰富的可用的和可被忽略量数据，但并未在书中写上，或者在讲课时没有说出来。初学者就不知道究竟大要大到多大、小要小到多小，方能将某些量略去，以作简化处理。他看到教师在课堂上三下五去二，将一个电路简化，戏称老师在“变戏法”。轮到自己处理问题时，就不知怎么办了。要么该简化不简化，要么不能简化的随意简化。

运算放大器的理想化便是一个明显的例子。在许多教科书中，将运算放大器理想化的条件表述为：开环增益为无限大、输入阻抗为无限大、输出阻抗为零，有时还添上开环带宽为无限大。实际上，利用这些理想化条件来分析计算运放构成的电路，是要受一系列条件约束的。但是教科书的作者和课堂教学的讲授者，并不讲约束条件。其结果是导致学生不问场合、不问条件地应用理想化条件对运放构成的电路进行分析计算，以致得出错误结论而自己还莫名其妙。最常见的错误是当工作频率超过容许理想化的频率范围时，在大信号激励下，运放进入强非线性状况，仍对运放作理想化处理，以致得出不符合实际的结论。本书采用负反馈条件下，根据相对误差大小来简化电路进行分析，可收到同样的效果，而又不致对初学者造成误导。

2. 线性电子电路中的非线性问题

工作于线性电子电路中的电子器件，本质上具有非线性。线性电子电路工作于大信号时，往往会因工作延伸至非线性区，而使按线性条件导出的结论不适用。

在电路分析理论中，负载电阻等于信号源内阻时，负载得到最大功率输出的原理，对于工作在大信号的功率输出级，不再适用。这是因为在功率输出级中，为了不致产生过大的非线性失真，当负载改变时，等效信号源不能保持为常数，而后者正是电路分析理论得出有关结论的前提条件。

另一个例子是引入负反馈改善放大器工作于大信号情况下的非线性失真或是容性负载下的高频失真，如果器件的动态运用范围没有富余量，则不可能达到预期的目的。针对这个问题，我们在本书中提出这样的论点：即引入负反馈来改善放大器的特性，不但要付出牺牲增益的代价，而且在大信号工作条件下，有时(不是一切)还要牺牲电子器件的动态运用范围。

^① 以下纯属阐明学术观点，并非针对某个人。文中提到的某些不妥的论点，本书作者早期编写的教材和在课堂上的讲授也有过，实际上是作者在反省自己，供同行参考。

3. 防止误将有条件成立的结论当作普遍原理

在电子线路中，有不少结论，其成立是有条件的。某些教材中，没有把这些条件讲清楚，往往导致学生误当成普遍原理应用，铸成错误结果。这是学生认为电子线路难学，教学效果不好的重要原因之一。

例如：引入负反馈稳定增益，必须搞清楚反馈是电压反馈还是电流反馈、负载是否变化等问题。加负反馈使放大器的上截止频率提高至无反馈时的 $1 + AB$ 倍，必须放大函数是单极点函数，且反馈系数 B 是常数。加负反馈并不一定能扩展通频带，弄得不好也可能使通频带缩窄。在许多教材中，对这些问题作了过分简单的处理，给学生以绝对化的结论。

4. 试图更正某些概念不明确的名词、术语、电路

下面举三个例子。不少教材中，在没有给电压和电流控制以明确定义的情况下，称场效应管是电压控制型器件，双极型晶体管是电流控制器件。对前者初学者易于接受，因为场效应管的输出电流不能用输入电流的变化来控制；可是对于双极型晶体管，输出电流并非不能用输入电压来控制，而且它们之间的指数律关系，是实现指数、对数、相乘、相除等运算功能的重要特性。又如电压反馈和电流反馈这两个名词本已赋予明确的定义，是用来说明反馈信号在放大器输出端采样的方式。可是我们又看到，将新近发展的电流模型运算放大器称为电流反馈运算放大器，而将传统的运算放大器称为电压反馈运算放大器，致使初学者困惑不解。

555 时基电路的逻辑方框图不能正确反映“2”端优先控制的功能。对此本书作了修正。

5. 根据实际需要，提出了双极型晶体三极管进入饱和区的实际值与理论值的差别

过去在教学中，只提出晶体管有一个死区，发射结加正向电压，并不立即进入放大区。但我们却说集电结加正向电压，晶体管立即进入饱和区。这种讲法给后续章节的教学以及实验教学造成了困难。因为有些运算放大器，例如超 β 管输入级运放、电流模型运放，是在集电结处于零偏压下进行正常放大的。单电源供电的 324 型运放，若在反相输入端加一个幅度不大的负极性信号，仍能基本上不失真地放大，而此时输入级晶体管的集电结，进入了正偏压工作状态，本书提出晶体管集电结必须加有一定大小的正偏压，方在实际上进入饱和状态。其原因与发射结必须加有一定的正偏压方在实际上进入放大状态是相同的。这样讲述就能消除学生对上述问题的疑惑。

二、教学方法方面

1. 提出问题由个别到一般，难点分散

作为一本教材，其对象是初学者，写作时的考虑和参考书或学术专著有所区别，这是因为人们认识事物的规律是从个别到一般，故本书的叙述采取由个别到一般的顺序，问题逐个引出。根据我们的教学经验，如果在一章的开头立即讲一般的分析方法，学生很难接受。而如果将普遍性的规律用总结的形式，在讲完一些个别问题后提出，则效果好得多。难点分散

的做法，往往和系统性有矛盾，当二者有矛盾时，我们将“系统性”割爱。所造成的不足是可以依靠读者自己去弥补的，而且更有利于培养他们总结概括的能力。

2. 注重物理概念的描述

电子线路这门课程，物理方面的描述是十分重要的。从我们的教学经验中体会到，概念搞清楚了，计算问题往往不大；而概念不清楚，可能会因前提条件弄混而得出错误的计算结果。特别是对于一些灵活性的计算和实验中出现的问題，往往难以应付。因此，本书力求避免因繁琐的数学推导而掩盖事物的物理实质。章末所附思考题和习题，加大了概念题的比重。

3. 行文力求简洁

本书文字叙述力求简洁。一个重要的目的是为了锻炼学生的阅读能力。从培养学生的素质这一观点着眼，为今后学生阅读论文打下一点基础，这样做是十分必要的。因此对那些前面章节已交待过的问题，后续章节力求避免重复。一些经简单逻辑推理就能理解的过程，也就略而不提。

标*号的内容为选学内容，课时不够的情况下可以灵活掌握。

书稿承北京大学王楚教授、东南大学谢嘉奎教授审阅。他们提出了许多宝贵意见，对提高本书质量有很大帮助，谨向他们表示诚挚的谢意。

由于我们的水平有限，本书的体系虽然在教材正式出版前经我校试点班试用过，毕竟不成熟。书中的某些与传统提法不尽相同的观点，也不一定全面。敬祈使用本教材的师生，不吝指正。

编者

1999年于北京

常用符号表

一、基本符号

I, i	电流
U, u	电压
P, p	功率
R, r	电阻
G, g	电导
X, x	电抗
B, b	电纳
Z, z	阻抗
L	电感
C	电容
M	互感
A	放大倍数
t	时间、摄氏温度
T	绝对温度(热力学温度)
f, F	频率
ω, Ω	角频率
$S = \sigma + j\omega$	复频率
BW	带宽(通频带)

二、不同书写体的电压、电流

小写 $u(i)$ 小写下标表示交流电压(电流)瞬时值(例如 u_{be} 表示基极发射极之间的交流电压瞬时值)

大写 $U(I)$ 大写下标表示直流电压(电流)值(例如 U_{BE} 表示基极发射极之间的直流电压)

大写 V 大写双字母下标表示直流供电电源电压(例如 V_{CC} 表示集电极直流供电电源电压)

小写 $u(i)$ 大写下标表示含有直流电压(电流)的瞬时值(例如 u_{BE} 表示基极发射极之间含有直流电压的瞬时值)

大写 $U(I)$ 小写下标表示正弦电压的有效值(例如 U_{be} 表示基极发射极之间的正弦电压有效值)。

三、正弦信号作用下，电压、电流、阻抗、导纳、复数、模值、相角等符号如下所示
(以电压为例)：

$U(j\omega) = U(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$	正弦电压复数值
$U(\omega), \varphi(\omega)$	电压的模值和相角
$U(S)$	电压的拉氏变换

四、下标意义

- i 输入量(例 u_i 为输入电压)
- o 输出量(例 u_o 为输出电压)
- L 负载(例 R_L 为负载电阻)
- f 反馈量(例 u_f 为反馈电压)
- s 信号源量(例 u_s 为信号源电压)
- d 直流分量(例 U_d 为电压直流分量)
- R 基准值(例 U_R 为基准电压)

五、频率

- f_l 3dB 下限(截止)频率
- f_h 3dB 上限(截止)频率
- $BW_{0.7}$ 3dB 带宽
- f_o 振荡回路固有谐振频率

六、器件符号及参数

1. 二极管

- VD 二极管
- VD_w 稳压管
- U_D 导通电压
- I_S 反向饱和电流
- C_T 势垒电容
- C_D 扩散电容
- U_Z 稳压管的击穿电压
- $U_T (= \frac{kT}{q})$ 热电压

2. 三极管

VT 三极管

- I_{CBO} 发射极开路时的集电结反向饱和电流
 I_{CEO} 基极开路时, 集电极与发射极之间的穿透电流
 I_{CES} 发射结短路时, 集电极与发射极之间的电流
 I_{CER} 基极与发射极之间接有电阻时, 集电极与发射极之间的电流
 I_{CM} 集电极电流最大容许值
 I_{cm} 集电极正弦电流振幅值
 U_{CES} 集电极发射极之间的饱和压降
 BU_{CBO} 发射极开路时的集电结击穿电压
 BU_{CEO} 基极开路时, 集电极发射极之间的击穿电压
 U_A 欧拉电压
 P_{CM} 集电极最大容许功率损耗
 g_m 跨导
 α 共基极短路电流放大系数
 β 共发射极短路电流放大系数
 f_α 共基极短路电流放大系数的截止频率
 f_β 共发射极短路电流放大系数的截止频率
 f_T 特征频率(双极型晶体管)
 $r_b(r_{bb'})$ 基极体积(欧姆)电阻

3. 场效应管

- I_{DSS} $U_{GS}=0$ 时的饱和漏极电流
 $U_{GS(off)}$ 夹断电压
 $U_{GS(th)}$ 开启电压
 BU_{DS} 漏源间击穿电压
 f_c 特征频率(场效应管)

七、差动放大及运算放大器

- U_{IO} 输入失调电压
 I_{IO} 输入失调电流
 U_{id} 差模输入电压
 U_{ic} 共模输入电压
 A_d 差模放大倍数
 A_c 共模放大倍数

CMRR 共模抑制比

SR 摆动速率(压摆率)

八、其它符号

γ 非线性失真系数

η 效率

τ 时间常数

k 耦合系数

n 变压器变比

Q 静态工作点

A 放大倍数

B 反馈系数

$T = AB$ 环反馈系数

$F = 1 + AB$ 反馈深度

目 录

第一章 半导体元器件	1
第一节 半导体的基础知识	1
一、半导体的特性	1
二、本征半导体	2
三、杂质半导体	3
第二节 PN 结	4
一、PN 结的基本原理	4
二、外加直流电压下的 PN 结	6
三、温度特性	7
第三节 二极管	7
一、符号及特性曲线	8
二、特性的解析式	9
三、参数	11
第四节 晶体三极管的工作原理	11
一、晶体三极管的结构及符号	11
二、晶体三极管中的电流	12
第五节 晶体三极管的放大作用	17
一、共基极放大电路	17
二、共发射极放大电路	18
第六节 晶体三极管特性曲线	18
一、输出特性曲线族	19
二、输入特性曲线族	20
第七节 晶体三极管的主要参数	20
一、电流放大系数	20
二、电流参数	22
三、输入电阻	23
四、输出电阻	25
五、极限参数	26
* 第八节 集成化元器件及其特点	27
一、集成电路工艺简介	27

二、集成电路中的晶体管	30
三、集成化元器件的特点	31
习题与思考题	31
第二章 放大器基础	33
第一节 基本单管放大电路	33
第二节 放大级的图解分析	35
一、静态特性	35
二、动态特性	37
第三节 放大级的等效电路分析法	43
一、双极型晶体管的 Ebers-Moll 模型	44
二、小信号交流等效电路	46
三、用小信号混合 π 等效电路分析放大器	48
四、放大倍数的对数表示法	50
第四节 共基极放大电路	51
第五节 共集电极放大电路	52
一、电路说明	52
二、基本特性	53
第六节 有源负载放大电路	55
一、图解分析	56
二、小信号交流特性分析	57
第七节 基本放大级直流工作状态与放大倍数的计算机辅助分析	57
习题与思考题	60
第三章 放大器的反馈	67
第一节 反馈电路的识别和正、负反馈的区分	67
一、单级反馈电路	67
二、两级反馈电路	68
第二节 反馈元件的作用	69
第三节 反馈电路的连接方式及工程计算	72
一、反馈电路在放大器输入端的连接方式及其对输入阻抗的不同影响	72
二、反馈电路在放大器输出端的连接方式及其对输出阻抗的影响	74
三、深负反馈电路放大倍数的工程计算	77
第四节 负反馈对放大器特性的影响	79
一、放大器静态工作点的稳定	79
二、放大倍数的稳定性	83

三、负反馈对非线性失真的影响	84
四、负反馈对噪声的影响	86
习题与思考题	89
第四章 放大器的频率特性	94
第一节 频率特性的分析方法	94
一、放大器不产生频率失真的条件	94
二、分析频率特性的工程简化法	97
第二节 晶体管的高频参数及等效电路	98
一、PN 结电容	99
二、晶体管的瞬态模型	102
三、共射极混合 π 等效电路	103
* 四、共基极高频 T 型等效电路	105
五、等效电路诸参数的确定方法	107
第三节 单级放大器的高频特性	107
第四节 扩展放大器通频带的方法	117
一、负反馈法	118
二、不同组态电路混合连接法	124
三、外接电感补偿元件法	128
第五节 电容耦合放大器的低频特性	131
第六节 放大器的时域特性	133
第七节 晶体管放大器的开关特性	135
一、晶体管从饱和状态转为截止状态	136
二、晶体管从截止状态转为饱和状态	136
习题与思考题	136
第五章 场效应管及其放大电路	139
第一节 结型场效应管	139
一、结型场效应管的工作原理	139
二、结型场效应管的特性	141
第二节 绝缘栅场效应管	145
一、绝缘栅场效应管的工作原理	145
二、绝缘栅场效应管的特性	147
第三节 场效应管的偏置电路	150
一、偏置变量的选择	150
二、电路形式	150

第四节 场效应管放大电路	152
一、场效应管小信号共源等效电路	152
二、共漏放大电路——源极跟随器	154
三、有源负载放大级	156
习题与思考题	158
第六章 功率输出级	160
第一节 功率输出级的主要问题	160
一、非线性失真	160
二、器件的安全运用	161
三、集电极功率转换效率	164
第二节 互补推挽功率输出级	165
一、电路工作原理	165
二、输出功率与负载电阻的关系	167
三、能量关系	169
四、放大器的工作类别	170
五、乙类推挽放大级的分析	172
第三节 功率输出级的其它电路	177
一、准互补推挽电路	177
二、单电源供电互补输出级	179
三、桥式电路	180
* 四、保护电路	180
* 五、提高输出电压幅度的自举电路	180
* 六、变压器耦合输出级	182
七、场效应管功率输出级	187
八、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	189
习题与思考题	191
第七章 集成电路基础	193
第一节 恒流电路	193
一、基本电流镜	193
二、改进型电流镜	194
三、压控电流源	196
第二节 恒压电路	197
一、通用恒压电路	197
* 二、基准电压源	198