

916671

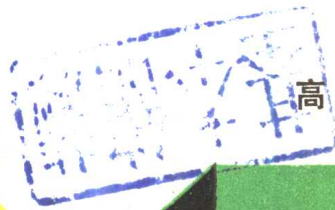
高等学校试用教材

电子线路原理

器件、电路和系统

上册

彭龙商 邓亚美 合编



高等教育出版社



高等学校试用教材

电子线路原理

器件、电路和系统

上册

四川大学无线电系 彭龙商 邓亚美 合编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是根据高等学校理科无线电教材编审委员会1983年11月在成都会议上制定的无线电电子学和无线电物理专业的电子线路教学大纲，并参照理科和工科其他专业电子线路教学大纲编写而成。

本书为《电子线路原理》上册，内容包括：电路理论基础、晶体二极管及波形变换电路、晶体三极管和场效应管、晶体管放大器分析基础、基本放大电路、差动放大器与集成运算放大器、放大器中的反馈。可作为理科无线电、计算机、自动控制及物理等专业电子线路课的教材或参考书，以及供从事电子技术及实验物理的工程技术人员参考。

责任编辑 郭玉凤

高等学校试用教材

电子线路原理

器件、电路和系统

上 册

四川大学无线电系 彭龙商 邓亚美 合编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

复旦大学印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 19.75 字数 462,000

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数 0001—1,200

ISBN 7-04-002834-4/TN·136

定价 4.05 元

序 言

——什么是近代电子线路？

“电子线路”是综合性大学物理专业教学计划中一门必修课程。它的特点是：它是一门偏于工程技术的课程，初学者往往会感到了解其原理，似不困难，但要利用其原理来分析处理一些实际设计课题，则又不知所措；由于最近30年来，它的发展极其迅速，对于什么是其最基本的内容，可能会引起无休止的争论。为了提高这门课程的教学质量，学以致用，是认真考虑其基本内容的时候了！要解决这一难题，必须从“电子线路”的过去、当前与远期谈起，还必须针对我国的工业水平与毕业生的去向，精选内容，制订出适合我国情况的教学大纲。我们不能因为其内容庞大而盲目乱砍，这样，会走弯路。我们也不能因为我国的电子工业还比较落后，忽视其长期发展趋向而固步自封。而是要有长期的战略措施，把教学大纲的“布朗运动”，转变为有计划的、沿某一方向的正向运动，使“电子线路”的教学更好地和四化建设的需要结合起来。

“电子线路”的过去

电子技术是由本世纪初开始发展起来的一门技术性学科。20年代，电子真空管出现了。30年代左右，各校在电机系中开设一门无线电工程的课程，主要讲授整流、放大、振荡、调制、解调等电子管线路以及其在通信、广播中的应用。40年代初期，又增加了充气管与闸流管的内容。解放前，我国各大学所开设的无线电基础课的内容，基本上也是如此。

1952年院系调整后，全面学习苏联。苏联的物理专业教学计划中的“电工与无线电电子学”，除了上述内容外，还包括电工的基础知识。由于学时紧，我们摒弃了电工部分内容，改名为“无线电基础”，并确定以“电路的基础理论与放大器”为此课重点。

自从1948年晶体管发明以来，电子管逐步为晶体管所代替。60年代初期，我国已有一些大专院校开设“晶体管线路”一课。此外，脉冲与数字电子技术的应用也日益重要。因此，1977年以后，这门课程的主要内容是：晶体二极管的基本特性，晶体三极管和低频放大器，晶体管低频功率放大器，负反馈放大器，场效应管放大器，直流放大器与运算放大器，选频放大器，正弦波振荡器，频率变换，直流电源，脉冲与数字电路。显然，这门课程的教学内容和文革前相比，已发生很多变化。

当前“电子线路”的主要内容

从上面的讨论，显然可见，电子线路的教学内容和元、器件的发展分不开的。自从1948年晶体管问世以来，随着半导体工艺的发展，电子设备已由分立元件电路变到集成电路，由低集成度到高集成度，发展十分迅速。用集成电路制成的电子设备具有功耗低、可靠性高、体积小、重量轻等优点。因此，有人说：“近代电子线路主要就是半导体线路”是有一定道理的。

另一方面，数字电路的概念也在发生变化。在使用分立元件时，元件的制造技术、电路

设计技术和系统结构技术，是截然不同的三件事，因此电路的概念与设计及电子管时期没有什么明显的不同。集成电路的出现，集成度的不断提高，MOS器件的广泛使用以及电荷耦合器件、磁泡等新型器件的出现，已使数字电路的概念发生深刻的变化。例如，采用大规模集成电路制造技术做出的单片计算机就反映了这一变化。即元、器件制造技术、电路设计技术和系统结构技术融成一体，难以截然分开了。从电路角度来看，这个单片集成电路是元件，还是器件，还是系统，三者的界限已经趋于模糊了。这种变化必然要在电路中反映出来，那么教材中如何反映？这是当前“电子线路”课的教师应予以注意的问题之一。

其次一个问题是：数字电子技术的应用日趋广泛，它已渗透到科研、生产以及其他社会经济活动的各个领域，而且这种势头正方兴未艾。数字电路和设备也在花样翻新，变得多种多样。因此，如何才能系统地把握学生对数字电子技术必须掌握的基础知识，恰当地把范围很广的数字电子技术的内容加以整理，以便于学生学习和掌握，便成了教师应考虑的另一问题。

还有一个问题是，“电子线路”是一门技术性很强的课程，学习它不仅要掌握其原理并能应用于具体电路设计，而且还要能把各个元、器件联接起来，进行调试，以达到原来的设计要求。因此，实验课是非常重要的一个教学环节。实验课应包括一些什么内容？如何培养学生的动手能力？实验课和讲课时之比应是多少？这些也都是应予考虑的问题。

远期打算

当前，近代电子线路的发展特点是：

1. 高功率、宽频带、低噪声、长寿命、超快速、高可靠性、体积小、重量轻是近代电子器件的共同要求。当然，不是所有电子设备都能满足上列的全部要求。除高功率条件外，集成电路比分立元件电路都要优越，因此，当前“电子线路”的教材，应以集成电路为主的思想贯穿全书。至低限度，应对集成电路有所介绍。在电子线路实验中，也应使学生学会使用一些常见的集成电路。

2. 数字电路技术已渗透到国际、科研、工业、农业以及其他社会经济活动的各个领域。因此，在“电子线路”的教材中，应逐步改变以模拟电路为主的倾向，至低限度，对数字电路应予适当阐述。

3. 由于新型器件与新技术不断涌现，在电子线路的教材中，除一般晶体二极管与晶体管外，应对场效应管及其他新型器件（如 CCD、磁泡等）做适当介绍。

当然，电子线路教材内容的确定，除应密切注意国际动态外，还必须结合我国的实际。所谓我国的实际，是指我国现在电子工业水平的实际和毕业生在工作中遇到的实际。例如，在50年代后期，国外已把电子线路的重点由电子管线路移到晶体管线路，而当时我国的大量电子设备还是采用电子管。如果我们当时就跟着外国走，同学毕业后会遇到“学用不一致”的困难。如果大多数毕业生的去向是科研机构，则学了“电子线路”课程后，不仅要能正确挑选和使用现有的半导体器件，而且还要能适应和理解将来可能出现的新器件。

以上一些不成熟的看法，抛砖引玉，希读者予以批评指正。

鲍家善

1988年9月

前 言

本书是根据高等学校理科无线电教材编审委员会 1983 年 11 月在成都会议上制定的无线电电子学和无线电物理专业电子线路教学大纲，并参照理科和工科其他专业电子线路教学大纲编写而成的，可作为理科无线电、计算机、自动控制及物理等专业电子线路课的教材或参考书，以及供从事电子技术及实验物理的工程技术人员参考。

电子技术是本世纪发展最迅速的学科之一，并日益广泛地渗透到科学和技术的许多领域，它的应用早已不只局限于通信技术，凡是涉及到测量、控制、数据处理等的地方，电子技术都是必不可少的一门基本技术。因此，电子线路在理科和工科大学的许多专业里，都是学生必学的一门基础课程。

随着集成电路的飞速发展和普及，电子线路在最近十余年来经历了革命性的变革，那么什么是近代电子线路课程的基本特征呢？我们认为最基本的是应从根本上改变电子线路以器件为基础，着眼于电路的旧体系，而应当以模型为基础，着眼于系统。因为随着电子技术的发展，器件的更新越来越快，仅围绕着某一种器件来讲远不能适应形势的发展。现在学生在学校里学过的某些电路和原理，在他们踏上工作岗位不久之后就已经陈旧和过时。所以为了使教学更紧密地结合实践，更富有生命力和启发性，在近代电子线路教材中一方面应选择最能代表当今电子技术发展水平的器件及电路作为典型电路，同时还应当从模型和系统的高度来组织内容和阐述原理。例如，运用于小信号状态下的电子管、晶体管、场效应管及集成运算放大器等，都是实现受控电源这种模型的具体器件；而在大信号运用时，它们又都可以等效为开关这样一种模型。如果通过本课程的学习能够建立起这种分析问题的观点，那么当另外一些新的器件出现时，就会比较顺利地理解和分析它们了。

为了体现以模型为基础，着眼于系统的观点，本书在教材内容的选择和组织上，本着基础性、先进性和可读性的原则，有以下一些基本的考虑：

一、为了加强有关模型、系统和电路的概念，增强电路分析的能力，在第一章中比较全面和系统地讲述了模型、系统和电路分析的内容。为了适应电子线路分析的需要，在选材和讲述的角度方面都做了较多的考虑，使这一部分内容紧密结合电子线路的内容。

二、器件是构成电子线路的基础，为了掌握电子线路的原理和应用，就必须首先掌握各种电子器件和半导体器件的原理和性能。然而近代科学技术的进步使器件的更新加快，新器件不断涌现，同时电路的集成度越来越高，已经使电路和器件的界限越来越模糊。因此，本书在讲述器件这一部分内容时，更多地着眼于器件的模型和外部特征，以使读者适应当代电子技术的发展。

三、模拟电路近年来集成化的速度非常之快，并且大多以集成的功能块出现。因此从整体的着眼点看，应以集成电路为主，但为了弄清楚集成块的工作原理，单元电路的分析仍必须讲透。然而从集成电路的角度来分析单元电路不同于过去的分立元件电路，应以集成电路

中所常用的电路为主，而对于主要用于分立元件电路的单元电路，则不做重点分析，甚至可以删去。为此本书以共发射极放大器、射极跟随器、镜象恒流源、差动放大器、场效应管放大器及互补对称功率输出器等作为基本单元电路，着重加以分析，从而把单元电路的分析纳入到集成电路的轨道上来。

四、在模拟电路的典型应用方面，除了传统的多级放大器、反馈放大器、自激振荡器及非线性变换电路之外，加强了以集成运算放大器为代表的模拟集成电路的介绍。例如，信号运算电路，电压-电流及电流-电压变换电路、集成稳压器、有源滤波器、数-模及模-数转换器、由集成运放构成的自激振荡器及波形变换电路等，目的是使读者更多地了解近代模拟集成电路的原理和应用。

五、以微型计算机的兴起为代表的数字集成电路的广泛应用，是近代电子技术发展的重要方向，从目前形势来看，微机的开发和应用正朝着深入和普及的方向发展。因此，本书作为电子技术的基础教材，着重加强了围绕着微机的数字集成电路的内容。

在数字电路的讲述中，以集成逻辑门和集成触发器为基础，突出系统的逻辑功能，减少内部电路的分析。在数字电路的应用中，加强中大规模集成电路，如ROM，RAM、PLA及MOS集成电路的介绍。鉴于微型计算机目前已经深入到科学和技术的许多领域，本书还对微型计算机的基本原理和结构做了初步介绍，以便读者能在此基础上深入学习有关专业知识。

近代电子线路的发展十分迅速，上述考虑和安排是否符合客观事物的规律，还有待实践检验。为了推动我国电子教育事业的发展，我们将本书奉献给从事电子线路教学的同志们和广大电子技术工作者，希望它能够成为你了解和学习近代电子线路的工具和助手，同时也切望得到广大读者的批评指正。

本书第一章至十章由彭龙商编写，第十一章至十五章和十七章由邓亚美编写，第十六章由骆成熙编写，冯晓滨同志选编并演算了部分习题，全书由彭龙商、邓亚美整理定稿。

理科无线电教材编委会主任鲍家善教授为本书撰写了序言，鲍教授关于近代电子线路的精辟阐述是本书写作的基本指导思想。

本书由理科无线电教材编委会编委、兰州大学席先觉副教授审阅。席教授于百忙之中认真细致地审阅了全书，提出了许多中肯的意见，并具体修改书稿，使本书质量有进一步的提高。

西北大学姚长安副教授在本书编写过程中也认真阅读过部分原稿，并提出宝贵修改意见。

四川大学无线电系的领导和电子线路教研室的广大教师、研究生和同学们，在本书的编写和试用过程中都曾给与热情支持和具体帮助，为本书编写工作创造了有利条件。

由于有关领导和同志们的大力支持和帮助，使本书得以早日问世，在此一并深致谢忱！

编者

1989年4月于成都

常用符号表

一、基本符号

(1) 电压和电流

I, i	电流通用符号
V, v	电压通用符号
E	直流电源电压
V_i, v_i	输入电压有效值、瞬时值
V_o, v_o	输出电压有效值、瞬时值
V_s, v_s	信号源电压有效值、瞬时值
V_m, I_m	正弦电压、正弦电流幅值
V_Q, I_Q	静态工作点 Q 的电压、电流值
$\dot{V} = V(j\omega)$	正弦电压的相量值 (或称为复振幅值)
$\dot{I} = I(j\omega)$	正弦电流的相量值 (或称为复振幅值)
V_{OS}, I_{OS}	输出失调电压、输出失调电流
V_{LT}, V_{HT}	下限触发电平、上限触发电平

符号和下标的定义:

1. 小写 v, i , 大写下标, 表示电压和电流的瞬时值, 即既包含直流成分, 又包含交流成分的瞬时值。例如, v_{CE} 表示晶体管 c-e 极间直流与交流电压总和之瞬时值。

2. 小写 v, i , 小写下标, 表示电压和电流中, 交流成分的瞬时值。例如, v_{ce} 表示 c-e 极间电压中交流成分的瞬时值。

3. 大写 V, I , 大写下标, 表示电压和电流中, 直流成分的数值。例如, V_{CE} 表示 c-e 极间电压中的直流电压值。

4. 大写 V, I , 小写下标, 表示电压和电流中交流成分的正弦有效值。例如, V_{ce} 表示 c-e 极间电压中的交流正弦有效值, 若加点 \dot{V}_{ce} , 则表示正弦相量 (或复振幅) 值。

(2) 增益 (放大倍数)

A	增益通用符号
$\dot{A} = A(j\omega) = A(j\omega) e^{j\varphi(\omega)} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$	增益的相量 (复振幅) 值
$A(\omega), \varphi(\omega)$	增益的幅值和相角
\dot{A}_v, \dot{A}_{vs}	电压增益, 源电压增益
\dot{A}_i, \dot{A}_{is}	电流增益, 源电流增益
$\dot{A}_{vf}, \dot{A}_{vst}$	反馈放大器电压增益, 反馈放大器源电压增益
\dot{A}_g, \dot{A}_{gt}	互导增益, 反馈放大器互导增益

A_r, A_{rt} 互阻增益, 反馈放大器互阻增益
 A_{ds}, A_{es} 差动放大器差模源电压增益, 共模源电压增益
 $A_{vsM}, A_{vsL}, A_{vsH}$ 中频源电压增益、低频源电压增益、高频源电压增益

(3) 频率和周期

f_L, ω_L 放大器下限频 (低截频) 率和角频率
 f_H, ω_H 放大器上限频 (高截频) 率和角频率
 $BW, 2\Delta f_{0.7}$ 通频带 (3dB 带宽)
 f_0, ω_0 谐振回路中心频率, 角频率
 f 频率
 T 周期

(4) 阻抗

R, r 电阻通用符号
 C 电容
 L 电感
 M 互感
 $Z = R + jX$ 阻抗
 $Y = G + jB$ 导纳
 R_s 信号源内阻
 R_L 负载电阻
 r_i, r_{it} 输入电阻, 反馈放大器输入电阻
 r_o, r_{of} 输出电阻, 反馈放大器输出电阻

(5) 功率和效率

P 功率
 P_v 电源消耗的功率
 P_o 输出功率
 P_c 集电极耗散功率
 P_i 输入功率
 η 效率

(6) 二极管

e_i 自建电场 (内电场)
 I_r 反向电流
 I_f 正向电流
 v_D, i_D 二极管两端所加电压、电流
 C_T PN 结势垒电容
 C_d PN 结扩散电容
 V_{th} 门限电压 (接通电压、死区电压)
 R_D, r_D 二极管直流电阻, 交流电阻

I_{max}	最大整流电流
V_{BR}	反向击穿电压
D_I	理想二极管
Γ_Z	稳压二极管
I_{Zmax}, I_{Zmin}	稳压二极管允许最大电流值, 最小电流值
P_Z	稳压管最大允许功耗
(7) 晶体管	
r_b	基区体电阻
r_{be}	b-e 极等效输入电阻
r_{ce}	c-e 极等效输入电阻
r_e	发射结交流电阻
g_m	跨导
$\beta, \bar{\beta}$	共发射极交流、直流电流放大倍数
$\alpha, \bar{\alpha}$	共基极交流、直流电流放大倍数
I_{CBO}	发射结开路时 c-b 结反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路时的穿透电流
I_{Cmax}	集电极最大允许电流
P_{Cmax}	集电极最大允许功耗
$V_{(BR)CBO}$	发射极开路时, 集电结反向击穿电压值
$V_{(BR)EBO}$	集电极开路时, 发射结反向击穿电压值
$V_{(BR)CEO}$	基极开路时, 集电极-发射极间反向击穿电压值
$V_{CE(sat)}$	晶体管的饱和压降
$I_{C(sat)}$	集电极饱和电流
$I_{B(sat)}$	基极临界饱和电流
(8) 场效应管	
g_m	跨导
V_T	开启电压
V_P	夹断电压
W/L	导电沟道宽长比
$I_{DS(sat)}$	$V_{GS}=0$ 时的饱和漏电流
R_{GS}	栅-源极间直流输入电阻
$V_{(BR)DS}$	漏-源极间击穿电压
$V_{(BR)GS}$	栅-源极间击穿电压
r_{ds}	漏-源极间输出电阻
r_{on}	导通电阻
C_{GS}, C_{DS}, C_{GD}	栅-源极间电容, 漏-源极间电容, 栅-漏极间电容
(9) 其他符号	

F	反馈系数
K_{CMR}	共模抑制比
$D=1+FA$	反馈深度
τ	时间常数
(10) 数字电路符号	
F	触发器
Q	触发器输出端
R	触发器置 0 端
S	触发器置 1 端
CP	触发器的时钟脉冲端
C	进位端
G	逻辑门
$V_{\text{IL}}, V_{\text{IH}}$	输入低电平, 输入高电平
$V_{\text{OL}}, V_{\text{OH}}$	输出低电平, 输出高电平
$V_{\text{ON}}, V_{\text{OFF}}$	开门电平, 关门电平
$I_{\text{IS}}, I_{\text{ID}}$	输入短路电流, 输入漏电流
N_o	扇出系数
t_{pd}	平均延迟时间
t_d, t_r, t_s, t_f	延迟时间, 上升时间, 存储时间, 下降时间
$t_{\text{off}}, t_{\text{on}}$	关闭时间, 开启时间

目 录

第一章 电路理论基础	1	一、正弦信号激励下线性电路的全响应	41
第一节 电路、系统和模型	1	二、正弦稳态下线性电路的符号解法	42
一、什么是电路和系统?	1	三、复数阻抗和导纳	44
二、模拟和数字系统	2	第八节 LC 谐振电路	46
三、理想化电路模型的建立和条件	2	一、并联谐振电路	46
第二节 基本电路元件	4	二、串联谐振电路	51
一、电阻器	4	第九节 双口网络基础	53
二、电容器	5	一、网络方程式	54
三、电感器	6	二、双口网络的等效电路	58
四、独立电源	7	三、双口网络参数的互换	59
五、相关电源(受控电源)	9	四、双口网络的互联方式	61
第三节 线性和非线性电路	11	五、双口网络的传输特性	65
一、线性和非线性元件	11	习题	68
二、线性电路的基本特征	12	第二章 晶体二极管及波形变换电路	76
三、非线性电路的基本特征	14	第一节 半导体的导电特性	76
第四节 基尔霍夫定律和常用定理	15	一、半导体的电气特性	76
一、基尔霍夫电流定律	15	二、本征半导体的导电机构	77
二、基尔霍夫电压定律	16	三、N型半导体	78
三、线性电路的叠加定理	17	四、P型半导体	79
四、等效电源定理	18	五、载流子的漂移运动和扩散运动	81
五、置换定理	21	第二节 PN 结	82
六、密勒定理	22	一、自由状态下的PN结	82
七、密勒对偶定理	24	二、PN结的伏安特性	83
第五节 线性网络的一般分析方法	25	三、PN结的电容效应	85
一、支路电流法	25	四、PN结的击穿特性	87
二、节点电压法	26	第三节 晶体二极管	88
三、回路电流法	29	一、二极管的制造工艺及类型	88
第六节 一阶 RC 电路的阶跃响应	31	二、二极管的特性曲线	89
一、一阶 RC 电路的零输入响应	31	三、二极管的主要参数	90
二、一阶 RC 电路对阶跃激励的零状态响应	33	四、二极管的等效模型	91
三、一阶 RC 电路的全响应	34	第四节 理想二极管及波形变换电路	94
四、三要素法	35	一、整流电路	94
五、一阶 RC 电路应用举例	38	二、平滑滤波电路	97
第七节 正弦稳态下线性电路的符号解法	41	三、稳压二极管及稳压电路	99

四、限幅电路	103	方式	153
五、钳位电路	105	一、静态工作点对波形失真的影响	153
习题	107	二、温度变化对静态工作点的影响	155
第三章 晶体三极管和场效应管	112	三、稳定静态工作点的电路	156
第一节 晶体三极管的结构和电流分配关系	112	第四节 微变等效电路及放大器的交流分析	161
一、晶体三极管的结构	112	一、晶体管的 h 参数等效电路	161
二、晶体管的功率放大原理	113	二、放大特性的分析	162
三、晶体管的电流分配关系	114	三、晶体管的物理等效电路及它与 h 参数的关系	165
四、直流电流放大倍数 $\bar{\alpha}$ 和 $\bar{\beta}$	115	四、晶体管的简化 h 参数等效电路	167
第二节 晶体管的特性曲线	117	五、具有电流负反馈的共发射极放大器	170
一、晶体管共发射极组态的特性曲线	117	第五节 放大器的频率特性	172
二、晶体管共基极组态的特性曲线	118	一、晶体管的 π 型等效电路	173
三、晶体管特性曲线上的三个工作区域	119	二、放大器的频率特性	174
第三节 晶体管的主要参数	120	三、晶体管电流放大的高频特性	179
一、低频小信号参数	120	习题	181
二、晶体管的极限参数	122	第五章 基本放大电路	190
第四节 二极管和晶体管的开关特性	123	第一节 共集电极放大器(射极输出器)	190
一、二极管的开关特性	123	一、静态工作点计算	190
二、晶体管的开关特性	124	二、微变等效电路及交流分析	191
第五节 场效应晶体管	127	三、提高射极输出器输入电阻的措施	193
一、绝缘栅型场效应管的结构和工作原理	127	第二节 共基极放大器	195
二、结型场效应管的结构和工作原理	131	一、静态工作点计算	195
三、场效应管的主要参数	132	二、微变等效电路及交流放大特性	196
习题	135	第三节 场效应管放大器	198
第四章 晶体管放大器分析基础	140	一、静态工作点计算	198
第一节 放大器概述	140	二、微变等效电路及交流分析	201
一、放大器的基本参数	140	三、共漏极放大器(源极跟随器)	202
二、放大器及理想放大器的等效电路	141	第四节 放大器的功率输出级	203
三、放大器中的失真	142	一、功率输出级的典型电路——互补对称电路	203
第二节 共发射极晶体管放大器原理及图解分析	143	二、实际应用中的功率输出级电路	206
一、原理电路	143	三、集成功率输出级	209
二、直流负载线及静态工作点	144	第五节 多级放大器	210
三、交流放大过程的讨论	146	一、级间耦合方式	210
四、放大器中的能量关系	148	二、直耦放大器静态工作点的设置和计算	211
五、交流负载线及输出动态范围分析	150	三、多级放大器的交流放大特性	214
第三节 静态工作点的稳定和偏置			

四、多级放大器的频率特性	217
习题	219
第六章 差动放大器和集成运算放大器	228
第一节 直耦放大器中的零点漂移现象	228
一、零点漂移现象对放大器的影响	228
二、输入失调电压值	229
第二节 差动放大器的工作原理	229
一、静态工作点的计算方法	230
二、交流放大特性分析	230
第三节 长尾式差动放大器	231
一、静态工作点的估算	232
二、交流放大特性分析	233
第四节 差动放大器的改进电路	237
一、晶体管恒流源电路的应用	237
二、采用共模负反馈的两级差动放大器	239
三、提高差动放大器输入电阻的措施	240
第五节 集成运算放大器	242
一、集成运放的一般性质	242
二、集成运放内部电路的特征	244
三、F001 内部电路分析	245
四、BG305 内部电路分析	247
第六节 集成运放的主要参数	249
一、开环特性参数	249
二、输入失调特性参数	249
三、输出特性参数	249
四、共模特性参数	250
五、上升速率 SR	250
习题	251
第七章 放大器中的反馈	255

第一节 反馈的基本概念	255
一、反馈的基本关系式	255
二、反馈的极性——正反馈和负反馈	257
第二节 反馈的基本组态和特性	259
一、电压串联反馈	260
二、电流串联反馈	262
三、电压并联反馈	264
四、电流并联反馈	266
第三节 负反馈对放大器性能的改善	268
一、对增益的影响	269
二、增益稳定性的提高	269
三、减小非线性失真	270
四、展宽通频带	272
第四节 负反馈放大器的近似估算	274
一、电压串联负反馈	274
二、电流串联负反馈	275
三、电压并联负反馈	275
四、电流并联负反馈	276
第五节 反馈放大器的网络分析法	277
一、电压串联负反馈放大器的分析	277
二、电流串联负反馈放大器的分析	279
三、电压并联负反馈放大器的分析	281
四、电流并联负反馈放大器的分析	283
第六节 负反馈放大器的自激振荡	285
一、自激产生的原因	285
二、克服自激振荡的办法	287
习题	288

第一章 电路理论基础

电路理论是研究各种电信号在电路中的传输、变换、产生及测量等的一门学科，其内容相当广泛，对当今电子科学技术的各个领域都有重要的影响。数字和模拟电路就是以电路理论为基础，结合半导体器件的应用发展起来的。当前，随着半导体集成技术的飞速发展以及电路和系统理论的进一步深入，数字和模拟电路均已逐步过渡到以集成电路为主的时代。一块集成电路实际上包含着成千上万个元器件，它们本身就构成了一个独立的系统。因此，在学习数字和模拟电路之前，重温电路理论的一些最主要的基本概念，并从系统的角度建立分析问题和处理问题的观点和方法，是很有必要的。本章将从电路、系统和模型的基本概念开始，讨论基本电路元件、电路定律和常用定理、基本计算方法、一阶 RC 电路的分析和计算及符号分析法、谐振回路及双口网络等电路理论的基本内容，并以此作为全书的基础。

第一节 电路、系统和模型

电子技术的基本任务是利用电路和系统实现各种电信号的产生、变换、传输、计数和测量等，因此电子技术的研究课题可分为两个主要方面：对电信号的研究和对电路及系统的研究。

电信号可区分为模拟信号和数字信号两大类：模拟信号是指时间上及数值上连续变化的信号，又称连续信号，典型的模拟量为正弦函数；数字信号是指时间上和数值上离散的不连续信号，又称离散信号，典型的数字量为单位阶跃函数。本书对信号不予论述，而主要是研究为实现模拟信号和数字信号的产生、变换、传输、计数和测量等所需要的各种电路和系统。

一、什么是电路和系统？

在具体分析电路之前，先对电路和系统的基本概念做一些介绍。从一般的意义上讲，系统是为了实现一定的目的，由一些基本单元（或称元件），按照一定的规律，互相连接组合而成的一个整体。然而，用来组合系统的单元（元件）与系统的概念却又是相对的。从某种目的和功能看，被认为是系统的整体，从另一种观点看，却又可认为是元件。例如，一个声频放大器是由晶体管、电阻、电容及变压器等组成的系统，但从整个扩音系统看，也可视为扩音系统的一个部件或元件。因此，元件和系统两词，在不同的场合赋予的含义不同。这主要根据所研究问题的范围和人们通常的习惯来决定。

系统这个概念包含着十分丰富的内容。例如，通信系统、自动控制系统、检测系统……等。现在，系统的概念还在不断发展，已经逐渐形成一门叫系统工程的学科，其研究对象可以是电力系统、生物系统等。它们不仅越出了电气范围，而且越出了自然科学的范围，从而进入了社会科学的领域。

如果一个电系统仅仅是由一些电阻、电容、电感及晶体管等基本元件构成，则又可称为电网络或电路。按通常概念，常把系统看成比电路更为复杂、规模更大的组成体，但实际上却很难从复杂程度或规模大小上确切地区分什么是电路，什么是系统。准确地讲，两者的区别主要并不在于规模的大小或复杂的程度，而是表现在分析问题的观点上。从电路的观点看，所要解决的问题是确定电路中各支路或回路的电压和电流值；而从系统的观点则着重于分析输入与输出之间整体的功能。例如，由一个电阻和一个电容构成的简单 RC 电路，也可以说是一个信号处理系统，它在一定条件下具有微分和积分的运算功能。在现代电子技术中，仍需要从电路的观点计算电压及电流值，但越来越多地是侧重于从系统的角度去分析输出与输入之间所表现出来的各种功能。

二、模拟和数字系统

在电子技术中，根据所传输和处理的信号是连续波形还是离散序列，可以把系统分为连续时间系统（又称模拟系统）和离散时间系统（又称数字系统）。事实上，自然界中许多物理量都是模拟量，例如时间的变化、运动物体的位移、温度的变化等。而在研究微观世界里物质的结构时，构成物质的基本单元分子和原子则为离散量。

在处理方式上，人们常习惯用数字量表示连续变化的模拟量，即称为“量化”。例如，时间本来是连续变化的模拟量，但在数字显示手表中却以秒为单位数字表示。即表示时间的数字在一秒钟内没有变化，而是每隔一秒变化一次来表示新的时间。一般说来，将模拟量数字化是人类在长期的生产和生活中认识到这样可使问题变得更简单统一和标准化而导致的结果。目前，模拟和数字量都同样得到应用。例如，在进行数量的运算时，可采用模拟式的计算工具——计算尺，也可采用数字式的计算工具——算盘。到底用哪一种方式，取决于所研究问题的精确程度，规模大小、速度要求及难易程度等因素。

三、理想化电路模型的建立和条件

在电子技术（以及任何工程技术）的研究中，要分析任何一个真实的物理系统，首先必须对此系统的性质做一定的简化（或称理想化），用一些简化的（理想化的）模型来描述这个真实的系统。因为在建立所研究的物理系统的数学方程式时，只可能考虑那些对此物理系统的性质影响最大、关系最密切的起决定性作用的因素，而不应当也不可能全面地、一个不漏地把所有可能的因素都考虑到，否则将使其研究工作变得复杂，以致无法求解。在经典力学中，熟知的质点和刚体就是两种理想化的模型。严格说，在自然界并不存在质点和刚体这样的东西，然而这些理想化模型却能成功地解释许多物理现象和进行工程设计。同样在电子技术的研究中，也必须建立若干理想化模型来代替真实的电路元件和系统。

既然对真实的物理系统的理想化是不可避免的，那么在一个具体的研究课题中应当对系统做哪些假设才合理呢？实践说明这种理想化假设不仅和系统本身的性质有关，还和研究时所希望得到的解答有关。例如，一个钢球垂直地落在水平钢板上，如果研究作为一个整体的钢球的运动，则可将钢球看作是一个在重力作用下运动的质点；如果关心的是碰撞时钢球中所产生的弹性应力及形变，则不能视钢球为质点，而必须把钢球理想化为弹性体。因此，同

一个理想化模型是否合理，既与研究对象有关，也与所研究的问题有关。从所给出的真实物理系统的同一个理想化模型，可以得到关于系统的某些性质的正确答案，但却不一定能够正确地回答同一个系统的另一些性质的问题。归根结底，只有实践才是检验理论分析的唯一标准，最终只有对某一问题所做的理想化模型和实验结果进行对比，才能判断是否合理，以及在哪些场合下才合理。

在电路理论中，根据电路的几何尺寸与所传送的电信号的波长之间的关系，把电路简化为集中参数电路和分布参数电路两大类。本书只讨论集中参数电路的性质，关于分布参数电路的问题可参阅有关资料。

集中参数电路系由集中参数元件所组成，其主要特点是它们的几何尺寸很小，与所工作的信号波长相比可略而不计。集中参数元件有两端的，如电阻器、电容器、电感器等；也有多于两端的，如变压器和晶体管等。对于两端的集中参数元件，可以证明，在任何时刻从元件一端流入的电流恒等于另一端流出的电流，而两端之间的电压则可用物理的方法准确地测量。

集中参数电路是由集中参数元件连接而成。在集中参数电路中，二端元件称为支路，支路的连接点称为节点。图 1-1 表示有四个节点（记为①、②、③、④）和六条支路（记为 1、2、3、4、5、6）的集中参数电路。支路两端的电压（称支路电压）和流经支路的电流（称支路电流）是分析电路时所关心的基本变量。例如， i_3 是支路 3 的电流， u_3 是支路 3 的电压等等。

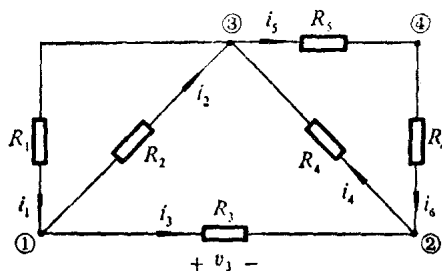


图 1-1 集中参数电路

为表明支路中电流和电压的极性，必须预先规定它们的参考方向。参考方向的选择就象坐标原点的选择一样重要，只有指定了坐标的原点位置后，坐标上任一点的位置才有确切含义，同样也只有指定了电压和电流的参考方向，才能确定例如 $i_3 = 3\text{mA}$ 或 $i_2 = -2\text{mA}$ 的确切含义。电流和电压的参考方向完全可以任意指定，而且它本身并不表示支路中电流和电压的真实极性，正如坐标原点如何选择并不会改变坐标上某一点的真实位置，同样电压和电流参考方向的规定也不会影响支路中电压和电流的真实方向。

常见的理想化集中参数元件有电阻器、电容器、电感器、变压器、电源等，设计各种理想化元件的目的是为了利用它们的某种物理特性，可是制造出来的实际元件通常不可能做到只具有一种单一物理特性。例如电阻器，它的物理特性应该是变电能为热能，然而仔细分析其内部的电过程就可发现，这个特性只能近似成立，因任何电流都要建立磁场，故任何一个电阻器都要储存一些能量于磁场之中。当然在一般情况下这种储存的磁能很小，可以忽略不计，即可近似地用一个服从欧姆定律的理想化模型来表示电阻器。

上述理想模型说明一个基本事实：为了分析和设计电路，必须采用近似方法，并用适当的理想化模型来近似地表示真实电路及元件。下面将介绍在电路理论中具有代表性的两端理想电路元件（以后简称电路元件）：电阻器、电容器、电感器和电源。