

教育出版社
中等专业学校教材

低频电子线路

陆根源 编

内 容 简 介

本书是根据国家教育委员会审定的中等专业学校《模拟电子线路(I)(II)教学大纲》编写而成的。

本书除绪论外共八章。包括半导体器件、放大电路基础、放大电路的负反馈、线性集成电路、线性集成电路的应用、放大电路的频率特性、功率放大电路和直流稳压电源。每章均有复习题、小结和习题。

本书加强了集成电路内容,适当地压缩了分立元件电路的内容,以适应电子技术的发展趋势。

本书可作为中等专业学校工科电子、通信类专业的通用教材,也可以作为从事电子技术工作的技术人员的参考书。

(京)112号

中等专业学校教材

低频电子线路

陆根源 编

*

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

青浦任屯印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 13.375 字数 819.000

1991年4月第1版 1992年2月第2次印刷

印数 5.231—7.730

ISBN 7-04-003343-7/TN·155

定价 4.15 元

前 言

根据《中共中央关于教育体制改革的决定》的精神，受国家教委委托，电子线路课程组负责组织制定《中等专业学校模拟电子线路(I)、(II)教学大纲》，并经教学大纲审定会审订通过。该大纲已于1989年7月由高等教育出版社出版。

本教材是按照该大纲要求编写的。可以作为中等专业学校工科电子、通信类专业的通用教材。

由于集成电路的迅速发展，集成电路正迅速地取代分立元件电路，在低频电子电路中更是如此。因此，本教材对分立元件电路的内容作了压缩，集成电路常用的电路结构提前在分立元件电路中介绍，集成电路不用的电路结构则不介绍或简单介绍。

为了用好集成电路，了解集成电路的内部电路是有好处的。只有了解内部电路，才能清楚为什么需要这些外部元件，以及这些元件参数对电路性能的影响。

本教材力图用物理概念说明问题的本质，尽可能注意概念的准确性。尽量避免容易使学生产生误解的一些不确切的提法。

本书由东南大学谢嘉奎教授主审，他认真审阅了初稿，指出了初稿的错误和不妥之处，提出了详细的修改意见。审阅了本书并提出修改意见的还有陈传虞副教授、戴辅仁、姜邈、王家继、邹厚义等高级讲师。姚玉洁同志对书稿也提了不少宝贵意见。在此对上述同志的指导和帮助表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,加之时间过于仓促,书中一定存在不少错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

1990年7月于南京后半山园

目 录

绪论	1
第一章 半导体器件	9
§ 1-1 半导体的基本知识	9
1-1-1 原子结构	9
1-1-2 本征半导体和掺杂半导体	11
1-1-3 PN 结及其单向导电性	16
1-1-4 PN 结的电容效应	22
§ 1-2 晶体二极管	25
1-2-1 晶体二极管的伏安特性	25
1-2-2 整流和整流二极管	30
1-2-3 其他二极管	32
§ 1-3 晶体三极管	36
1-3-1 晶体三极管的结构特点	36
1-3-2 晶体三极管中电流分配关系和电流放大作用	38
1-3-3 共发射极输出特性曲线	42
1-3-4 共发射极输入特性曲线	45
1-3-5 晶体三极管的交流参数——H 参数	47
1-3-6 晶体三极管的极限参数	52
1-3-7 温度对参数的影响	54
§ 1-4 场效应晶体管	56
1-4-1 结型场效应晶体管(JFET)	56
1-4-2 MOS 场效应晶体管	64
1-4-3 场效应晶体管和双极型晶体管的比较	72
本章小结	75
习题	77
第二章 放大电路基础	81
§ 2-1 共发射极电路	81

2-1-1	共发射极电路的直流分析	82
2-1-2	共发射极电路的交流分析	89
§ 2-2	三种基本放大电路	98
2-2-1	共基极放大电路性能分析	98
2-2-2	共集电极放大电路性能分析	104
2-2-3	三种基本组态的比较	113
§ 2-3	差分放大电路	116
2-3-1	差分放大电路的直流分析	118
2-3-2	差模输入时的交流分析	120
2-3-3	共模输入时的交流分析	122
2-3-4	共模抑制比 K_{CMR}	125
2-3-5	失调与调零	127
§ 2-4	场效应管放大电路	131
2-4-1	场效应管放大电路的直流分析	131
2-4-2	场效应管放大电路的交流分析	137
2-4-3	使用有源负载的共源极电路	142
2-4-4	MOS 差分放大电路	147
2-4-5	E/E 型源极跟随器	148
§ 2-5	多级放大电路	151
2-5-1	级间耦合方式	152
2-5-2	电平移动电路	154
2-5-3	多级差分放大电路	158
2-5-4	多级放大电路的增益	163
	本章小结	165
	习题	166
第三章	放大电路的负反馈	173
§ 3-1	负反馈放大电路的基本概念	178
§ 3-2	四种负反馈放大电路的分析	178
3-2-1	电流串联负反馈放大电路	178
3-2-2	电压并联负反馈放大电路	180
3-2-3	电压串联负反馈放大电路	181

3-2-4 电流并联负反馈放大电路 ..	183
§ 3-3 负反馈对放大电路性能的影响	185
3-3-1 反馈电路的方框图	185
3-3-2 负反馈对闭环增益的影响	188
3-3-3 负反馈对输出阻抗的影响	190
3-3-4 负反馈对输入阻抗的影响	194
3-3-5 负反馈对非线性失真的影响	198
本章小结	198
习题	199
第四章 线性集成电路	203
§ 4-1 集成电路简介	203
4-1-1 集成电路的类型和发展概况	203
*4-1-2 集成电路的生产工艺	205
*4-1-3 双极型集成电路工艺	208
*4-1-4 MOS 集成电路工艺	214
4-1-5 集成电路的特点	217
§ 4-2 集成运放的内部电路分析	218
4-2-1 原始型集成运放 F001	218
4-2-2 第二代集成运放 F007	222
4-2-3 第四代集成运放	229
4-2-4 MOS 集成运放	231
§ 4-3 集成运放的主要参数	236
§ 4-4 开关电容的概念	240
本章小结	241
第五章 线性集成电路的应用	244
§ 5-1 集成运算放大器的理想化条件和基本接法	244
§ 5-2 运算电路	248
§ 5-3 有源滤波电路	254
§ 5-4 比较器和波形发生电路	271
§ 5-5 集成运算放大器的应用常识	280

本章小结	281
习题	282
第六章 放大电路的频率特性	285
§ 6-1 放大电路的频率特性	285
6-1-1 符号	286
6-1-2 放大电路的频率响应	287
6-1-3 晶体管的混合 π 等效电路	290
§ 6-2 共发射极、共集电极、共基极电路的频率特性	294
6-2-1 共发射极电路的频率特性	294
6-2-2 共基极电路的频率特性	298
6-2-3 共集电极电路的频率特性	301
§ 6-3 多级放大电路的频率特性	303
6-3-1 电容负载时共发射极电路的频率特性	305
6-3-2 共射共基放大电路	308
6-3-3 共射共集放大电路	310
§ 6-4 负反馈放大电路的频率响应	311
§ 6-5 负反馈放大电路的稳定性	321
§ 6-6 共发射极放大电路的低频响应	327
本章小结	334
习题	335
第七章 功率放大电路	338
§ 7-1 功率放大电路的任务、特点和要求	338
§ 7-2 单管甲类变压器耦合功率放大电路	340
§ 7-3 无输出变压器功率放大电路	348
7-3-1 乙类推挽放大电路	348
7-3-2 无输出变压器功率放大电路的分类	350
7-3-3 互补对称的 OCL 电路分析	354
7-3-4 互补对称的 OTL 电路	360
§ 7-4 功率管的安全使用	363
§ 7-5 集成功率放大电路举例	367

本章小结	371
习题	372
第八章 直流稳压电源	376
§ 8-1 整流和滤波	376
8-1-1 纯电阻负载的整流电路	376
8-1-2 滤波电路	384
§ 8-2 稳压电路	392
§ 8-3 集成稳压电路	402
8-3-1 单片集成稳压电路 5G14	402
8-3-2 W7800 系列	405
§ 8-4 开关稳压电源	410
本章小结	413
习题	414

绪 论

§ 0-1 电子技术发展与应用概况

1865年英国 J. C. 麦克斯韦集以往电磁学研究之大成,建立了麦克斯韦方程,从理论上预言了电磁波的存在,1887年赫兹证实了电磁波的存在,从此就出现了无线电电子学,简称为电子学。电子学是研究电子运动、电磁传播时产生的许多物理现象的学科,以应用为其主要目的。研究和应用电子学的技术称做电子技术。

使电子技术兴旺发达的一个重要事件是电子管的发明。1904年英国 J. A. 弗莱明发明了二极电子管,为无线电报的接收提供了一种灵敏可靠的检波器。1906年美国 L. 德福雷斯特新发明了具有放大能力的三极电子管,从而解决了电磁波发射和接收的关键器件。为了改善三极电子管的性能,又陆续出现了四极电子管、五极电子管、更多极电子管和复合管。电子管也叫做真空管,它利用的是电子在真空中的运动,电子管是电子器件的第一代。这一阶段中,还出现了充气管,它利用的是离子的运动。1895年意大利 G. 马可尼成功地发射了电磁波,并在 2.5 公里外检测到了它。无线电报是人类利用电磁波的第一个巨大成就。紧接着无线电报之后,发明了无线电话,继而出现了无线电广播。1919年第一个播送语言和音乐的无线电广播电台在英国建成,无线电广播在世界范围内迅速普及。

电磁波的下一个应用领域是电视。1923年和1924年美国 V. K. 兹沃雷金相继发明了摄像管和显象管,解决了电视系统的核心器件。1931年他组装了世界上第一个全电子的电视系统,

1937 年英国也开始了黑白电视广播。电视的普及因第二次世界大战而推迟, 50 年代初期黑白电视在世界各国普及。

在战争推迟了电视的普及的同时, 战争大大地推进了电子技术的发展。雷达、导航和计算机在第二次世界大战中都得到了迅速的发展。

1936 年英国的警戒雷达最先投入了运行。随着飞机、导弹用于战争, 各国都致力于发展性能优良的雷达。在二次世界大战中得到迅速发展的另一个领域是无线电导航, 双曲线导航系统就是在这时期出现的。同时, 各国也开始致力于计算机的发展。1941 年德国制成全自动继电器计算机, 同一时期美国也制造出了类似的计算机, 1943 年英国制成“巨人”电子计算机, 1946 年美国又制成大型电子数字积分机。

在晶体管出现之前, 通信、广播、电视、导航、雷达、计算机都以各式各样的电子管作为核心部件, 因此可以说, 电子管的发明是电子技术进入极其兴旺时期的标志。但是, 随着电子设备的日趋复杂, 电子管的缺点也日益明显, 它的体积大、份量重、耗电多, 这就迫使人们去寻找更好的电子器件。

1948 年美国 J. 巴丁、W. H. 布喇顿、W. B. 肖克莱宣布制成了点接触晶体三极管。1951 年出现了合金结晶体管, 1956 年又出现扩散型晶体管, 使晶体管工作频率提高了两个数量级。1960 年成功地制成了平面晶体管, 工作频率从超高频一直伸展到微波。和电子管相比, 晶体管具有体积小、重量轻、寿命长、耗电少、不需要灯丝电源、直流电压低等优点, 所以一出现就受到人们的广泛重视。在通信、广播、电视、导航、雷达、计算机以及其他电子技术领域中, 晶体管迅速成功地取代了电子管, 只是在高频大功率领域中, 电子管仍然占有优势地位。

晶体管的广泛使用, 开始了电子设备小型化和微型化的研究

发展,但是一直到集成电路出现之后,这方面的发展才得以突飞猛进。1958年集成振荡器研制成功,1961年集成触发器问世,从此进入了集成电路的发展阶段。

在一小块硅片上,制造许许多多晶体管、电阻、电容等元器件,并将它们联接成能完成一定功能的电子系统,这就是集成电路。集成电路体积更小,重量更轻,外接元件少,可靠性高,便于安装调试。因此,集成电路一出现,便受到高度重视,发展十分迅速,从小规模发展到中规模、大规模,直到现在的超大规模。芯片上元件数小于100的集成电路称做小规模集成电路,元件数为100~1000的是中规模集成电路,元件数大于1000的是大规模集成电路,元件数大于10万的是超大规模集成电路。集成电路的发展极大地推动了电子计算机的发展,集成电路计算机迅速取代了电子管计算机和晶体管计算机。

通信、广播、电视、导航、雷达在小型化的同时,本身也在不断发展。

首先,从通信使用的电磁波频率来看,由中波、短波向微波发展。频率为30 kHz~300 kHz的电磁波称做长波,频率为300 kHz~3 MHz的电磁波称做中波,频率为3 MHz~30 MHz的电磁波称做短波,频率为30 MHz~300 MHz的电磁波称做超短波,频率为300 MHz以上的电磁波称做微波。随着电子设备的微型化和航天技术的发展,出现了卫星通信,1963年发射了第一颗定点同步通信卫星。卫星和地球相对静止,定位于赤道上空35786 km处。1964年借助于定点同步卫星首次实现美欧非三大洲的通信和电视转播。

彩色电视是1950年左右开始发展的,到60年代后期,各国先后转向彩色电视广播。

随着飞机性能大大提高和导弹迅速发展。对雷达性能要求也

越来越高。现在已经把电子计算机、微处理器、微波集成电路等先进技术广泛应用于雷达之中。

导航系统也在一代一代地更新。一直发展到现在的奥米加导航系统、子午仪卫星导航系统、同步测距的全球定位系统。

除了上述领域之外,电子技术也在不断地向其他领域渗透。电子技术向自动控制领域渗透,大大地推进了自动控制的发展,出现了机械手、机器人、自动生产线和生产过程的自动控制。电子技术也极大地推动了遥测、遥感技术的发展,利用人造卫星进行遥测,可以得到全球大范围的气象云图,准确地进行天气预报,可以得到大范围的农作物生长情况,进行产量预测,可以用遥测探矿,可以确定森林火灾等自然灾害的地点等。电子技术极大地推动了仪器和测量设备的发展,高精度高灵敏度的测量设备是各领域中科研工作的必不可少的工具,天文学家使用巨型的射电望远镜,化学家使用超高压的电子显微镜使分辨能力达到分子水平。除此之外,电子技术渗入医疗领域,出现大量的医用电子设备;电子技术渗入教育,出现了许多电化教学设备;电子技术渗入军事,不但提高了武器装备的性能,而且深刻影响着军事行为方式;电子技术渗入家庭,家用电器迅速普及。

1949年以前,电子技术在西方已经有了迅速的发展,并取得了辉煌的成就,但是旧中国却基本上处于电子学发展的洪流之外,只有少数几家修造厂和器材厂,只有少数几所大学能培养少量电信人材。1949年中华人民共和国成立后,电子技术和电子工业才得以创建和发展。

1949~1952年是中国的经济恢复时期,国家成立了电信工业管理局,制造出一批无线电台和军用步谈机,成套地生产接收电子管。

1953~1957年是第一个五年计划时期,建设了一批以元器

件、通信、雷达为重点的骨干企业,研制生产了广播设备、通信电台和军用雷达。与此同时,在一些高等学校中建立了无线电电子学专业,创建了研究所和研究院,并制定了发展电子科学的十二年规划。

1958~1965年完成为研制原子弹、导弹及进行试验所需的电子配套工程;研制并生产了军用雷达、电台和其他通信设备;广播电台和电视台得到发展和普及;建立了邮电科学研究院、电子工业研究院。同时,许多高等学校普遍地建立了无线电电子学专业,大规模地培养电子技术人才。

1966~1976年是动乱的十年,在极其困难的条件下,第一颗人造地球卫星发射成功,第一台集成电路计算机研制成功,巨型雷达投入使用。

1977年以来进入振兴时期,电子工业获得了极其迅速的发展。成功地发射了定点同步通信卫星;建成全国的卫星测控网;研制了亿次计算机;建成京沪杭1800路同轴电缆通信系统;光纤通信达到了实用阶段;建立了全国电视网;制定了发展电子科学的十年规划。与此相适应,各级学校也培养了大量的电子技术人才。

§ 0-2 课程的性质和主要内容

如前所述,电子技术已经渗透到各个领域之中,不同领域里使用的电子设备千变万化,但是构成电子设备的基本单元电路却是大同小异的。

基本单元电路可以分为两大类:模拟电子电路和数字电子电路。取值随时间连续变化的信号是模拟信号,产生、传输和处理模拟信号的电路统称为模拟电子电路,简称为模拟电路。时间上和取值上都不连续的信号是数字信号,产生、传输和处理数字信号的电路统称为数字电子电路,简称为数字电路。

介绍基本单元电路是专业基础课的任务,而介绍各专业中使用的电子设备则属于专业课的内容。

在一些非电子专业中,将所有基本单元电路都放在一门课里讲授,称为“工业电子学”或“无线电电子学”。但是随着电子技术的迅速发展,各专业所需的基本单元电路不断发展,而且模拟电子电路和数字电子电路的分析方法也有很大差异,所以越来越多的专业开设两门专业基础课:模拟电子电路和脉冲与数字电路。对于通信、电子类专业,还把模拟电子电路分为两门课讲授,一门课称为高频电子线路,一门课称为低频电子线路。一般地说,低频电子线路中介绍的电路工作频率比较低,一般情况下信号较小,电路可以用线性理论分析。高频电子线路中介绍的电路工作频率比较高,要用非线性方法分析。有些电路难以用高频、低频严格区分,也难以用线性和非线性严格区分,所以不同的教材对这两门课的区分可能有所不同。

本书的选材以模拟集成电路为核心。模拟集成电路种类繁多而且分散,目前应用较多的主要有运算放大器、稳压、电视和音响等专用集成电路。本书的第四章介绍了运算放大器,第六章介绍了音响集成电路,第八章介绍了稳压集成电路,至于电视集成电路由于涉及很多电视知识,本书没有选入。

为了介绍线性集成电路,本书中用前三章作准备。第一章介绍半导体器件,介绍了晶体二极管、晶体三极管和 MOS 场效应管。第二章介绍放大电路基础,介绍了直流工作点的估算方法,着重分析了共射、共基、共集和差分等四种基本放大电路的交流性能。由于 MOS 放大电路在超大规模集成电路中广泛使用,本章也用较大篇幅介绍 MOS 放大电路。这一章还介绍了多级放大电路。尽管这一章是以分立电路形式介绍的,但是目的是为集成电路服务。前两章是非常重要的基础,而且同学们是第一次接触电子电路,建议

共用 36~40 学时讲授。第三章介绍负反馈放大电路,建议用 8 学时讲授。

有了这三章作基础,第四章讲线性集成电路,介绍了运算放大器的发展历史,介绍了集成电路生产工艺,介绍了运算放大器内部电路,介绍了运算放大器的参数,建议用 12 学时讲授。第五章介绍集成运算放大器的应用,介绍了运算电路、有源滤波电路、比较电路和波形发生电路。建议用 12 学时讲授。

第六章介绍放大电路的频率特性,目的是如何展宽频带,介绍了几种宽带集成电路。这一章还着重研究了负反馈电路的稳定性。建议用 14 学时讲授。

第七章以集成功率放大电路为目标。建议用 12~14 学时讲授。

第八章介绍了整流、滤波和稳压。重点介绍了集成稳压电路,特别是三点式稳压电路。建议用 12 学时讲授。

§ 0-3 本课程的基本要求和学习方法

“低频电子线路”是电子、通信类专业的专业基础课。通过本课程的学习应达到如下要求:

1. 了解常用电子器件的工作原理,着重掌握它们的外部特性和主要参数。
 2. 掌握常用的基本的分立单元电路的组成和工作原理。
 3. 掌握放大器的小信号等效电路法。
 4. 熟悉常用的模拟集成电路的工作原理、性能特点及其基本应用。
 5. 具有阅读和分析简单电子线路原理图的初步能力。
- 学习方法有共性之处,有些学习方法对各种课程都适用,当然

也适用本课程的学习。例如,课前预习、认真听讲、阶段小结等等。

不同课程的学习方法也各有其特点,从低频电子线路来看,有如下一些特点:

1. 掌握电路的工作原理时要抓住核心器件。例如,理解整流电路原理时,要抓住晶体二极管的单向导电性。再如,理解放大电路原理时,要抓住晶体三极管的受控电流源的概念,要掌握电流分配关系。

2. 进行工程估算时,要合理近似,近似以后不但使计算简单,而且使物理概念更清楚。例如,在计算整流电路时,可以近似地认为二极管正向导通时电阻为零,反向截止时电阻为无穷大。近似是否合理,取决于工程上要求的精度,只要能得到合乎要求精度的结果,近似就是合理的。

3. 要建立数量级的概念。如果两个数相差不超过 10 倍,就说它们是同一数量级。晶体管电路中晶体管的电流、电压、外部元件的大小都要有一个数量级的概念。

4. 要重视实验,要通过实验加深对工作原理解的理解,通过实验验证估算是否正确,而且也应用工作原理解释实验中出现的现象。