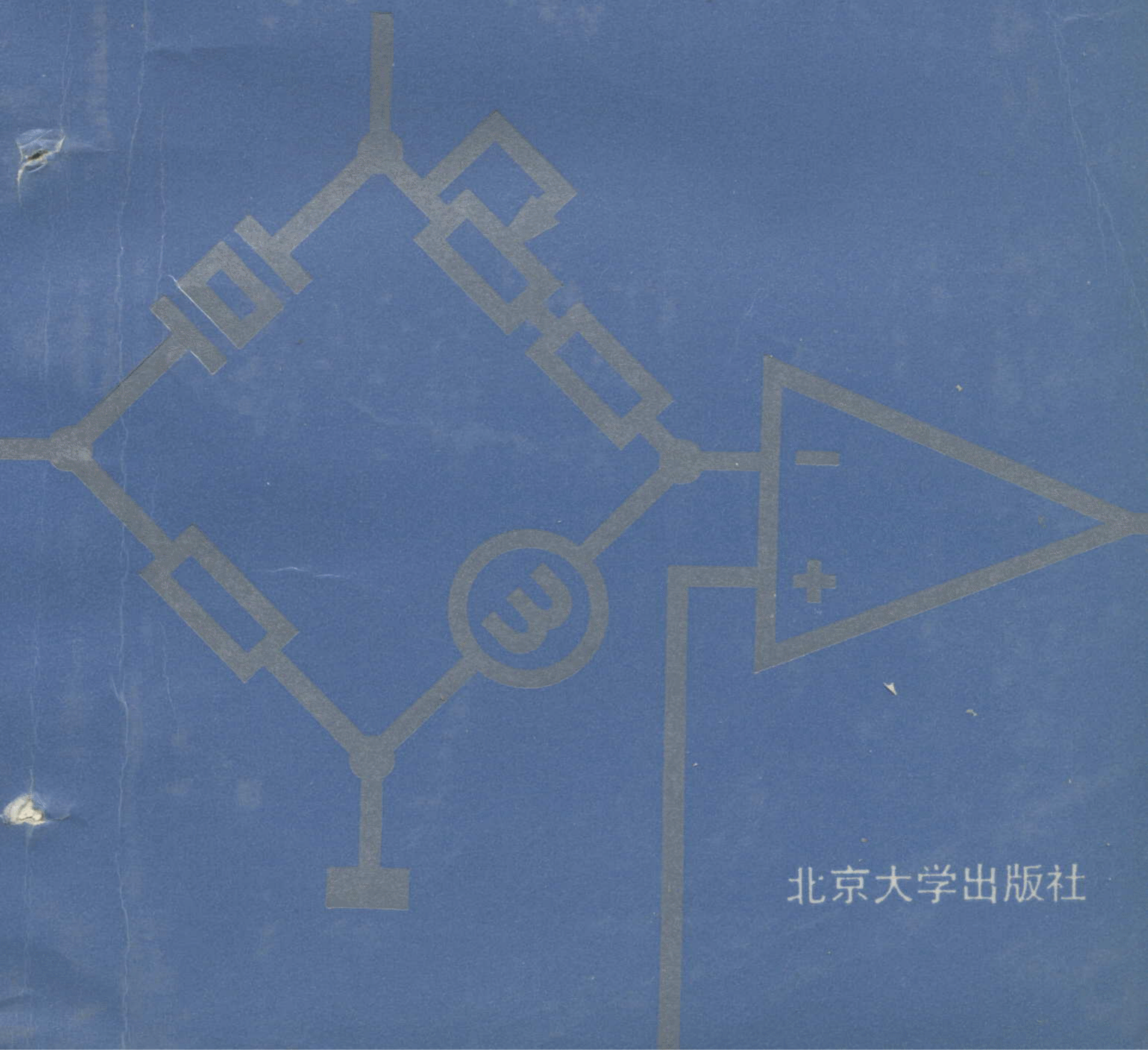


电子线路原理

下册

王楚 余道衡



北京大学出版社

电子线路原理

下 册

王 楚 余道衡

北京 大学 出版社

新登字(京)159号

内 容 简 介

电子线路原理是从事无线电物理和技术工作的基础,本书结合当前电子技术的发展情况,在原有讲义的基础上反复补充修改而成。

上册为线性电路基础,包括双端口网络、频谱分析、拉氏变换、传输线和无源滤波器等内容。下册为模拟电子线路,包括各种放大电路、振荡电路、电源、有源滤波器、脉冲电路以及模拟乘法器、门电路和触发器等。

本书力图从物理概念和数学规律来说明电子线路的原理。书中附有一定数量的习题。

本书适合综合大学无线电电子学系学生作教材使用,也可供工科、师范院校有关专业大学生、研究生及从事无线电方面工作的工程技术人员参考。

电 子 线 路 原 理 (下)

王 楚 余道衡

责任编辑: 李采华

*

北京大学出版社出版发行

(北京大学校内)

中国科学院印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

850×1168毫米 32开本 18印张 400千字

1987年11月第一版 1995年2月第二次印刷

印数: 4001—5500册

ISBN: 7-301-00206-8/O·37 定价: 15.30元

下册目录

第十三章 放大器概论	(577)
§ 13.1 放大电路的基本问题	(577)
13.1.1 放大电路的分类	(577)
13.1.2 放大电路的主要技术指标.....	(578)
13.1.3 放大电路的组成	(579)
§ 13.2 放大电路的响应	(581)
13.2.1 输入阻抗与输出阻抗的影响	(581)
13.2.2 耦合电路的影响	(585)
13.2.3 管子的极间电容与参量的频率响应	(586)
§ 13.3 晶体管的高频等效电路	(588)
13.3.1 混合 Π 型等效电路.....	(588)
13.3.2 高频 Y 参量与 Π 型等效电路	(592)
§ 13.4 放大器频率响应的描述方法	(595)
13.4.1 波特图——对数频率特性	(595)
13.4.2 多级放大器的通频带	(597)
§ 13.5 非线性失真	(599)
§ 13.6 噪声	(601)
13.6.1 基本概念	(601)
13.6.2 常见的噪声	(604)
13.6.3 信噪比	(607)
13.6.4 噪声系数	(608)
§ 13.7 干扰与干扰的抑制	(610)
习题.....	(613)
第十四章 反馈	(617)
§ 14.1 反馈的基本概念	(617)
14.1.1 什么是反馈	(617)

14.1.2	反馈放大器的分析方法	(619)
14.1.3	正反馈与负反馈	(620)
14.1.4	反馈深度	(622)
14.1.5	反馈对电路稳定性的影响	(623)
§ 14.2	串接反馈放大器	(625)
14.2.1	串接反馈放大器的结构	(625)
14.2.2	串接反馈放大器的参量	(628)
14.2.3	反馈对电路参量的影响	(630)
14.2.4	典型的串接反馈放大器	(631)
§ 14.3	并接反馈放大器	(641)
14.3.1	并接反馈放大器的结构	(641)
14.3.2	并接反馈放大器的参量	(643)
14.3.3	并接反馈放大器举例	(646)
§ 14.4	小结	(653)
14.4.1	研究反馈的意义	(653)
14.4.2	应该注意的问题	(654)
14.4.3	反馈对非线性失真的影响	(655)
	习题	(656)

第十五章 宽带放大器 (664)

§ 15.1	放大器中的阻容滤波器	(664)
§ 15.2	放大器的低频响应	(669)
15.2.1	耦合电容与旁路电容的计算方法	(669)
15.2.2	直耦放大器与零位漂移	(671)
§ 15.3	放大器的高频响应	(673)
15.3.1	极间电容与分布电容的影响	(673)
15.3.2	基本的组合电路	(676)
15.3.3	负反馈对频率响应的影响	(678)
§ 15.4	差分放大器	(680)
15.4.1	差分放大器的工作方式与增益	(680)
15.4.2	影响增益的因素	(684)
15.4.3	偏置与零位调节	(687)

15.4.4	输入阻抗与输出阻抗	(688)
§ 15.5	宽带放大器一例	(692)
	习题	(695)
第十六章	集成线性放大器	(700)
§ 16.1	集成线性放大器的分类与参量	(700)
16.1.1	集成线性放大器的分类	(700)
16.1.2	集成电路中的元、器件	(701)
16.1.3	集成线性放大器的参量	(703)
§ 16.2	集成线性放大器的内部电路	(709)
16.2.1	输入级	(709)
16.2.2	恒流电路	(713)
16.2.3	单端化电路	(720)
16.2.4	电平移位电路	(722)
16.2.5	输出级电路	(724)
§ 16.3	集成线性放大器的外部辅助电路	(728)
16.3.1	基本放大电路及偏置电路	(728)
16.3.2	零位调节电路	(730)
16.3.3	频率响应补偿电路(消振电路)	(733)
16.3.4	保护电路	(736)
16.3.5	性能扩展电路	(738)
§ 16.4	模拟运算电路	(742)
16.4.1	比例求和运算电路	(742)
16.4.2	积分电路	(745)
16.4.3	微分电路	(748)
16.4.4	指数和对数电路	(750)
16.4.5	模拟乘(除)法器简介	(753)
	习题	(757)
第十七章	有源滤波器与调谐放大器	(761)
§ 17.1	有源滤波器	(761)
17.1.1	低通滤波器	(761)

17.1.2	高通滤波器	(765)
17.1.3	带通滤波器	(767)
17.1.4	带阻滤波器	(774)
17.1.5	梳状滤波器	(776)
§ 17.2	LC选频放大器	(778)
17.2.1	选频放大器的响应	(778)
17.2.2	选频放大器的组成	(780)
§ 17.3	单调谐放大器	(782)
17.3.1	单调谐放大器的响应	(782)
17.3.2	耦合电路	(783)
17.3.3	调谐放大器的稳定性	(785)
17.3.4	多级单调谐放大器	(788)
17.3.5	参差调谐放大器	(789)
§ 17.4	双调谐放大器	(792)
17.4.1	双调谐回路简介	(792)
17.4.2	双调谐放大器	(796)
§ 17.5	收音机、电视机的集成中频放大电路	(797)
17.5.1	收音机集成中放电路	(797)
17.5.2	电视机集成中放电路	(798)
	习题	(800)

第十八章 功率放大器 (803)

§ 18.1	功率放大器的特点	(803)
18.1.1	放大器的输出功率与效率	(803)
18.1.2	功率管	(807)
§ 18.2	变压器耦合甲类功率放大器	(812)
18.2.1	晶体管甲类功率放大器	(812)
18.2.2	场效应管甲类功率放大器	(816)
§ 18.3	乙类功率放大器	(817)
18.3.1	乙类放大器	(817)
18.3.2	对称互补乙类功率放大器	(820)
18.3.3	复合管电路	(825)

18.3.4	变压器耦合乙类放大器	(827)
18.3.5	集成功率放大器	(831)
§ 18.4	丙类放大器	(832)
18.4.1	放大管偏置于截止区的放大器	(832)
18.4.2	谐波的抑制	(836)
18.4.3	丙类放大器简介	(838)
	习题	(840)
第十九章 简谐振荡器		(846)
§ 19.1	产生自激振荡的条件	(846)
19.1.1	自激振荡的形成	(846)
19.1.2	反馈式振荡器	(848)
19.1.3	自激振荡条件的计算方法	(851)
19.1.4	负阻式振荡器	(860)
§ 19.2	自激振荡的建立与稳定	(862)
19.2.1	建立过程的非线性理论	(862)
19.2.2	软激励与硬激励	(867)
19.2.3	自生偏置	(871)
§ 19.3	典型的 <i>LC</i> 振荡器	(873)
19.3.1	互感反馈式振荡器	(873)
19.3.2	三点式振荡器的原理	(875)
19.3.3	电容三点式振荡器	(877)
19.3.4	电感三点式振荡器	(885)
19.3.5	受控电压源组成的振荡器	(887)
§ 19.4	典型的 <i>RC</i> 振荡器	(890)
19.4.1	文氏桥振荡器	(890)
19.4.2	相移振荡器	(893)
19.4.3	双 T 桥振荡器	(900)
§ 19.5	简谐振荡器的非简谐振荡	(902)
19.5.1	非简谐振荡现象	(902)
19.5.2	谐波对振荡频率的影响	(905)
§ 19.6	应该注意的几种现象	(908)

19.6.1	频率牵引现象	(908)
19.6.2	频率迁移现象	(910)
19.6.3	寄生振荡	(912)
§ 19.7	振荡器的频率稳定性	(913)
§ 19.8	晶体振荡器	(915)
	习题	(919)

第二十章 触发器与门电路 (927)

§ 20.1	触发器概论	(928)
20.1.1	双稳态电路之组成	(928)
20.1.2	宽带强正反馈系统的触发过程	(930)
20.1.3	滞后(回差)	(933)
§ 20.2	基本的逻辑关系	(934)
20.2.1	分立元件双稳态电路	(934)
20.2.2	电路状态与信号的数字表示	(936)
20.2.3	逻辑等式及“非”运算	(937)
20.2.4	“或”运算	(939)
20.2.5	“与”运算	(942)
20.2.6	摩根定理和逻辑运算的一些重要性质	(945)
§ 20.3	门电路	(946)
20.3.1	门电路的组成	(946)
20.3.2	电子器件作为开关	(950)
20.3.3	传输延迟时间	(953)
20.3.4	阈值电平	(960)
20.3.5	分立元件组成非门	(963)
§ 20.4	触发器逻辑	(964)
20.4.1	基本的R-S触发器	(964)
20.4.2	时钟脉冲R-S触发器	(967)
20.4.3	状态信息的保持	(973)
20.4.4	几种集成触发器	(977)
§ 20.5	单稳态与多谐波振荡器	(982)
20.5.1	利用延迟线的电路	(982)

20.5.2	积分型单稳态与多谐波振荡器	(985)
20.5.3	微分型电路	(988)
	习题	(991)
第二十一章 常用的脉冲数字电路及负阻电路 (993)		
§ 21.1	编码与译码	(993)
21.1.1	编码	(993)
21.1.2	基本的译码电路	(997)
21.1.3	约束与单项译码函数的化简	(1000)
§ 21.2	计数器	(1002)
21.2.1	异步计数器与同步计数器	(1002)
21.2.2	可逆计数器	(1007)
21.2.3	非二进制计数器	(1009)
21.2.4	数字频率计与集成计数器	(1012)
21.2.5	可预置计数器	(1016)
§ 21.3	数据传输的基本电路	(1018)
21.3.1	数据传输简介	(1018)
21.3.2	接收与发送电路	(1020)
21.3.3	数字-模拟(D/A)转换	(1022)
21.3.4	模拟-数字(A/D)转换(比较法)	(1026)
§ 21.4	直线形电压发生器	(1029)
21.4.1	锯齿波发生器	(1029)
21.4.2	扫描与同步	(1032)
21.4.3	双积分模拟-数字转换原理	(1033)
§ 21.5	负阻脉冲电路	(1035)
21.5.1	两种典型的负阻特性	(1035)
21.5.2	BNRT的基本结构	(1037)
21.5.3	BNRT的直流特性及电参数规范	(1038)
21.5.4	张弛振荡电路	(1039)
21.5.5	振铃振荡电路	(1041)
21.5.6	压控脉冲振荡电路	(1042)
21.5.7	锯齿波信号发生器	(1043)
21.5.8	单稳态电路和脉冲分频电路	(1045)

习题	(1045)
第二十二章 直流电源	(1048)
§ 22.1 直流电源的参量	(1048)
§ 22.2 电源滤波器	(1050)
22.2.1 电容滤波器	(1050)
22.2.2 电感滤波器	(1053)
22.2.3 RC 滤波器与有源滤波器	(1055)
§ 22.3 稳压、稳流电路的组成	(1057)
22.3.1 稳压管电路	(1057)
22.3.2 反馈式稳压电路原理	(1059)
22.3.3 自动调节系统简介	(1061)
22.3.4 稳流电路的组成	(1063)
§ 22.4 常用的稳压电路	(1064)
22.4.1 基本电路	(1064)
22.4.2 过载保护电路	(1067)
22.4.3 参量选择	(1071)
22.4.4 信号线与供电线	(1074)
§ 22.5 集成稳压器	(1076)
22.5.1 多端稳压器	(1076)
22.5.2 三端稳压器	(1079)
§ 22.6 其他重要电源	(1080)
22.6.1 开关稳压器	(1080)
22.6.2 变换器电源	(1083)
22.6.3 倍压整流	(1085)
22.6.4 三相整流电路	(1087)
22.6.5 晶闸管简介	(1089)
习题	(1090)
第二十三章 非线性电路	(1093)
§ 23.1 非线性电路的基本性质	(1093)
23.1.1 非线性电路中信号的相互作用	(1093)

23.1.2	非线性电路的组成	(1096)
23.1.3	倍频与变频	(1097)
§ 23.2	模拟乘法器及其应用	(1099)
23.2.1	平方律电路及乘法器(二极管电路)	(1099)
23.2.2	集成乘法器(三极管电路)	(1001)
23.2.3	变频与相敏检波	(1003)
23.2.4	调幅及其解调	(1004)
§ 23.3	开关电路及其应用	(1005)
23.3.1	乘法器的性质	(1005)
23.3.2	开关滤波器	(1007)
23.3.3	逻辑门鉴相器	(1010)
§ 23.4	变参量电路及其应用	(1113)
23.4.1	非线性电路的分析方法	(1113)
23.4.2	变电抗元件中的能量转换	(1114)
23.4.3	振荡器中的变参量现象与非线性现象	(1116)
§ 23.5	接收机简介	(1117)
23.5.1	调幅信号的解调	(1117)
23.5.2	放大-检波式接收机	(1119)
23.5.3	外差式接收机	(1120)
23.5.4	调频、调相及其解调	(1121)
	习题	(1126)
	参考文献	(1128)
	名词索引	(1130)

第十三章 放大器概论

提 要

本章扼要地说明分析和设计放大器应注意的基本问题。§ 13.1 只是提出这些问题，然后在其他各节中作较详细的说明。

§ 13.2 讨论影响放大器响应的主要因素，读者应特别注意分布参量和极间电容的影响，这是上册中被略去的因素。还应该注意本节提出将放大器分解为受控源和滤波器的分析方法，以及把频率响应问题归结为增益对于频率的稳定性的观点。

§ 13.3 只是给出晶体管的等效电路，与上册的差别仅在于进一步描述了极间电容的作用。§ 13.4 介绍放大器频率响应的图示法和多级放大器频率响应的工程计算方法。

§ 13.5 扼要地说明产生非线性失真的原因，并说明失真度也与管外电路有关。还应注意非线性失真也可归结为增益的稳定性问题。

§ 13.6 和 § 13.7 介绍关于噪声和干扰的基本知识，对于实际电路这是两个重要问题。因限于篇幅，本书不再作进一步的论述。读者若有需要，应再查阅专著或有关资料。

§ 13.1 放大电路的基本问题

13.1.1 放大电路的分类

放大电路简称放大器，使用放大器的目的在于放大信号。在不同的情况下，有不同的使用目的，有的是为了放大电压信号，有的是为了放大电流信号，有的是为了获得大的信号形态的功率。按使用目的，放大器可分为电压放大器、电流放大器和功率

放大器等类。

放大器的输入信号和输出信号可以是不同物理性质的信号，例如输入电流信号，输出电压信号。在一些特殊装置中，要求将输入的电荷信号变换为输出电压信号。换句话说，放大器可以具有变换信号的物理性质的能力。

有的线性元件也可以增大电压或电流，变换器就是一个例子。放大器与这类元件或电路的根本区别是放大器可以有功率增益。因此放大器中必含有能转换能量形态的非线性元件。按放大器中非线性元件的不同，放大器可分为以下三类：(1)用晶体管、FET等三端受控元件组成的放大器，这类放大器往往是将直流电源提供的电能转换为信号形态的电能；(2)用二端负阻元件组成的放大器，这类放大器也常用直流电源为能源；(3)用非线性电抗组成的放大器，通常是以交流电源为能源，参量放大器就是非线性电容组成的放大器。本书只着重讨论由受控元件组成的放大器。

放大器也常按耦合电路不同，分为电容耦合放大器、变压器耦合放大器和直接耦合放大器等类。也可以按其频率特性或静态工作点分类，这些问题将在以后的章节中讨论，在此不再累述。

13.1.2 放大电路的主要技术指标

放大器的技术指标因其使用目的而异，对于多数情况，主要指标有下列五项：

(1) 放大器的频率响应。任何放大器都不是理想的不失真系统，为了避免严重的线性失真，放大器的通频带应与信号的频带相适应。在有些装置中，为了实现波形变换、滤除噪声或其他目的，要求放大器有特定的频率响应。许多测量设备的频率响应都用通频带来描述，被测信号的频带应在设备通带内，否则不能得到正确的测量结果。

(2) 非线性失真。组成放大器的受控元件或负阻元件都是非

线性元件，只是对于小信号可近似地视为线性元件，并相应地引进了“线性区”的概念。实际的放大器总是存在非线性失真的，在输入信号为简谐信号时，非线性失真表现为输出信号中含有谐波，可以用谐波的相对含量来度量非线性失真的大小。由于简谐信号能明确地反映出非线性失真，故规定以简谐信号为输入信号，定义度量非线性失真的物理量为失真度。失真度的定义是

$$\text{失真度} = \frac{\text{输出信号的谐波有效值}}{\text{输出信号的基波有效值}} \quad (13.1.1)$$

非线性元件没有理想的线性区，所谓“线性区”是指失真度小于某额定值的区域，失真度的额定值不同，线性区的范围也不同。放大器的一个重要指标是：在失真度小于额定值的条件下，可以有的最大输出电压、输出电流或输出功率值。

(3) 输入阻抗、输出阻抗和增益。这三项是第十章已提出的放大器的基本参量。在本章的第二节中将进一步说明放大器的频率响应和这三项参量的关系。

(4) 噪声系数。本章的第六节将对这一问题作进一步的说明。

(5) 稳定性。在技术指标中，稳定性是指在环境温度、湿度、振动或电网电压变化时，上述各项技术指标变化的情况。有时这项指标也表示为在什么环境下，放大器具有额定的技术指标，例如用在 $-20 \sim +60^\circ\text{C}$ 的范围内，增益为 $40\text{dB} \pm 1\text{dB}$ 来表示放大器增益的稳定性。

除了上述五项指标之外，放大器的体积、重量、消耗功率等也是应注意的问题。

13.1.3 放大电路的组成

放大电路常由多级放大器组成，第一级常称为前置级或输入级；末级称为输出级；其余各级称为中间级(图13.1.1)。放大电路虽应有一些共同的技术指标，但各级常有不同的特点。

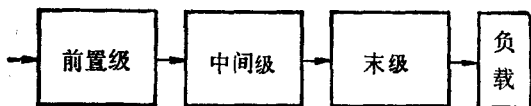


图13.1.1 放大电路的组成

前置级的输入阻抗就是放大器的输入阻抗，在设计前置级时，应该着重考虑如何使输入阻抗符合要求，而不一定要求有高增益。在许多装置中，要求放大器有高输入阻抗，因而常用共集电极电路或共漏极电路。此外，一般还要求前置级有尽可能小的失真度。对于微弱信号放大器，则要求前置级有较小的噪声系数。

末级着重于在不超过失真度额定值的条件下，获得足够的输出信号，还要有能与负载相适应的输出阻抗。对于其他指标，则不一定要有过高的要求。

中间级是在保证放大器有符合要求的带宽、失真度、噪声系数等条件下，获得高增益。为了满足这些条件，有时不惜降低每一级的增益，而增加中间级的级数。

以上简述了在常见电路中各级放大器的特点。上面的说法不一定对所有情况都适用，只是提请读者注意认识放大电路各级的差别。

在第十章中已介绍过放大器的四种增益(K_v, K_i, Y_m, Z_m)，使用较多的是电压增益 K_v 。设放大电路由 n 级放大器链联组成，其中第 j 级的电压增益为 K_{vj} ，则放大电路的增益为

$$K_v = \prod_{j=1}^n K_{vj} \quad (13.1.2)$$

应该注意， K_{vj} 是第 j 级 ($j < n$) 以第 $j+1$ 级的输入阻抗为负载时的增益，不是把第 j 级与第 $j+1$ 级切断时，在第 j 级输出测得的增益。

若把第 $j+1$ 级与第 j 级切断而不另加负载，则测得的第 j 级

的增益，是第 j 级输出端开路时的增益 $K_{v\infty j}$ 。若第 j 级的输出阻抗为 Z_{oj} ，第 $j+1$ 级的输入阻抗为 $Z_{i(j+1)}$ ，则

$$K_{vj} = \frac{K_{v\infty j} Z_{i(j+1)}}{Z_{oj} + Z_{i(j+1)}} \cdot$$

若放大电路的负载为 Z_L ，则

$$K_{vn} = \frac{K_{v\infty n} Z_L}{Z_{on} + Z_L} \cdot$$

实际上，只要知道 K_v ，就可以依据放大电路的基本参量得到其他形式的增益 (K_i , Y_m 和 Z_m)。

以上指出在多级放大器中，不能把一级孤立出来计算其增益。实际上每一级的响应、失真度等也都和前、后级有关，这一点是不能忽视的。

§ 13.2 放大电路的响应

13.2.1 输入阻抗与输出阻抗的影响

在放大电路与信号源相联时，其输入阻抗 Z_i 是信号源的负载(图13.2.1)。放大器的输入电压为

$$\Delta V_i = \frac{E_{ox} Z_i}{Z_{ox} + Z_i} = \frac{E_{ox}}{1 + Z_{ox}/Z_i} \cdot$$

在 $|Z_i| \gg |Z_{ox}|$ 时, $\Delta V_i \simeq E_{ox}$, 即使 Z_i 有些变化, ΔV_i 的变化也较小。因此, 输入阻抗高有助于获得较大的输入电压, 即有助于提高输入电压的稳定性。同理输入阻抗低有助于获得较大的输入电流, 有助于提高输入电流的稳定性。

许多放大器要求有高输入阻抗。但应注意, 由于存在分布电