

电子学基础及应用

集成和分立系统

[美] 约翰·D·赖德 著
林圣灿 主译 姚海彬 校订

高等教育出版社

本书原著作者是美国密执安州立大学教授。该书重视器件的外特性及电子电路的分析、计算和应用,加强对信号处理的分析,将器件、电路和系统融为一体。全书共分十七章,内容丰富,着重介绍了有源网络、反馈、频率响应、运算放大器、数字电路等。全书概念清晰、计算简明、教法讲究、译文通顺。本书可作为我国高等工科学学校电子技术、电子线路、电工学课程的教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

参加本书翻译工作的还有黄两一、宋耀平。

责任编辑 王缉惠

ELECTRONIC FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS

Integrated and Discrete Systems

fifth edition

John D. Ryder

Prentice-Hall, Inc.

电子学基础及应用

集成和分立系统

[美] 约翰·D·赖德 著

林圣灿 主译 姚海彬 校订

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷二厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 18.5 字数 448,000

1983年5月第1版 1984年6月第1次印刷

印数 00,001—13,000

书号 15010·0496 定价3.50元

目 录

前言

第一章 固体导电	1
1.1 电子	1
1.2 电场中电荷的能量	2
1.3 电子伏特	3
1.4 原子模型	3
1.5 固体	7
1.6 金属导电	8
1.7 半导体和绝缘体导电	8
1.8 本征半导体	11
1.9 n 型和 p 型材料	13
1.10 n 型和 p 型材料中的电荷浓度	16
1.11 电荷漂移导电	18
1.12 电荷扩散导电	20
1.13 pn 结	23
1.14 pn 结二极管方程	25
1.15 霍尔效应	29
1.16 公制数量级	31
第二章 作为电路元件的二极管	35
2.1 pn 结二极管的正向电阻	35
2.2 pn 结电容	37
2.3 二极管开关	38
2.4 理想二极管	39
2.5 限幅和箝位电路	40
2.6 齐纳二极管	42
2.7 光电二极管	44
2.8 发光二极管	45

第三章 双极型晶体管与场效应晶体管	49
3.1 双极面结型晶体管	49
3.2 电流和电压表示法	52
3.3 电流和电流增益	53
3.4 双极面结型晶体管的伏安特性	55
3.5 负载线; 小信号工作要求	59
3.6 电压击穿	60
3.7 埃伯斯-莫尔模型	60
3.8 场效应晶体管	62
3.9 面结型场效应晶体管	63
3.10 MOS 场效应晶体管	65
3.11 场效应晶体管的电路特性	67
3.12 半导体材料	69
3.13 半导体加工	69
3.14 集成电路	74
3.15 无源元件	76
第四章 有源网络与晶体管	80
4.1 双口网络分析	80
4.2 受控源	85
4.3 有源电路模型	87
4.4 转移阻抗	88
4.5 用分贝表示增益	90
4.6 双极面结型晶体管的等效电路	91
4.7 转移电导模型	94
4.8 共射极放大器	95
4.9 共基极放大器	97
4.10 共集电极放大器	100
4.11 放大器性能提要	102
4.12 h 参数的换算	104
4.13 场效应晶体管的等效电路	105
4.14 共源极放大器	106
4.15 源极跟随器电路	108

第五章 反馈原理	115
5.1 有反馈的放大器“黑盒”	115
5.2 用负反馈稳定增益	119
5.3 用负反馈减小非线性失真	121
5.4 反馈对输出电阻的影响	123
5.5 反馈对输入电阻的影响	125
5.6 电压串联反馈	127
5.7 电压并联反馈	128
5.8 电流串联反馈	131
5.9 增益系统的分析	133
5.10 输出的选存失真	139
第六章 晶体管放大器的偏置	146
6.1 双极型晶体管静态工作点的设置	146
6.2 偏置电流的变化	147
6.3 固定偏置	149
6.4 射极反馈偏置	150
6.5 射极反馈偏置电路的设计	153
6.6 场效应晶体管的偏置	156
6.7 电压反馈偏置	158
6.8 射极跟随器的偏置	160
6.9 集成电路的偏置源	160
第七章 线性放大器的频率响应	167
7.1 放大器的通频带	167
7.2 共射极级联时的中频响应	169
7.3 高频等效电路; 密勒效应	171
7.4 高频响应	174
7.5 阻容耦合的共发射极放大器	175
7.6 RC 放大器的频率响应	178
7.7 放大器响应的增益-频率图	182
7.8 相位图	187
7.9 级联放大器的带宽	188
7.10 晶体管的带宽指标	189

7.11	增益-带宽乘积	192
7.12	用负反馈扩展带宽	193
7.13	复合放大器设计	195
7.14	场效应晶体管的自举	200
7.15	多级反馈	201
7.16	反馈放大器的稳定性	203
7.17	增益和相位的裕度	207
7.18	稳定性的解析条件	209
7.19	放大器的噪声指数	210
7.20	放大器中的噪声	213
第八章	运算放大器	221
8.1	集成放大器	221
8.2	差动放大器	223
8.3	共模信号的抑制	227
8.4	用恒流源替换 R_E	239
8.5	直流电平移动电路	230
8.6	互补输出级	231
8.7	运算放大器	232
8.8	输入阻抗与输出阻抗	235
8.9	频率补偿	237
8.10	转换速率	239
8.11	输入失调电压	240
8.12	输入失调电流	242
8.13	定义	243
第九章	运算放大器的应用	249
9.1	运算放大器	249
9.2	单位增益缓冲器	251
9.3	加法运算	252
9.4	积分运算	253
9.5	比较器	255
9.6	模拟计算	257
9.7	对数放大器	259

9.8	非线性函数发生器	260
9.9	斩波器稳零放大器	261
9.10	应用集成放大器的稳压器	263
9.11	用增益元件的有源滤波器	265
9.12	双T反馈滤波器	268
9.13	模拟电感	271
第十章	调谐及宽频带放大器	276
10.1	带通放大器	276
10.2	并联谐振电路	277
10.3	频率接近谐振时阻抗的变化	279
10.4	并联谐振电路的带宽	281
10.5	串联电阻形式的变换	282
10.6	极-零点图	284
10.7	单调谐放大器——根轨迹	286
10.8	感应耦合电路	290
10.9	初级调谐放大器	291
10.10	次级调谐的场效应晶体管放大器	293
10.11	抽头调谐电路的阻抗调整	295
10.12	双调谐变压器	297
10.13	参差调谐放大器	301
10.14	脉冲响应	305
10.15	脉冲放大对带宽的要求	307
10.16	脉冲放大器中的上升时间	309
10.17	脉冲的斜降	311
10.18	并联补偿的视频放大器	313
10.19	并联补偿放大器的上升时间	317
第十一章	功率放大器	323
11.1	功率放大器的工作状况	323
11.2	功率关系式	324
11.3	理想变压器	327
11.4	晶体管的电压极限	328
11.5	非线性失真	329

11.6	相互调制失真	332
11.7	甲类功率放大器	333
11.8	晶体管的工作温度	337
11.9	功率晶体管的热稳定性	340
11.10	推挽原理	344
11.11	无输出变压器电路	346
11.12	乙类推挽放大器	347
11.13	推挽输入的倒相器	351
11.14	乙类线性射频放大器	352
11.15	谐振负载的丙类放大器	354
11.16	调谐负载的条件	355
11.17	中和	356
第十二章 振荡器原理		363
12.1	振荡对反馈的要求	363
12.2	振荡对电路的要求	365
12.3	基本振荡器分析	366
12.4	压电频率控制	369
12.5	阻容振荡器	372
第十三章 调制与变频		376
13.1	调制原理	376
13.2	调幅的频谱	379
13.3	调幅波的功率	381
13.4	调幅方法	381
13.5	受调的丙类放大器	383
13.6	效率调制	385
13.7	调幅信号的线性解调	386
13.8	自动音量控制	388
13.9	频率变换	390
13.10	单边带系统	392
13.11	平衡调制器	393
13.12	单边带信号的滤出	396
13.13	乘积检波器	397

13.14	调频波的频谱	398
13.15	二极管调频器	401
13.16	限幅器	401
13.17	用鉴频器为调频波解调	403
13.18	调频波积分检波器	406
13.19	调频波的比例检波器	408
13.20	调幅与调频传输	409
13.21	接收系统	411
13.22	射频接收中的干扰	413
13.23	锁相	415
13.24	频率合成	416
13.25	信息量与信道容量	418
第十四章	数字电路	425
14.1	二进制制与其它代码	425
14.2	二进制算术	430
14.3	二进制数的串行与并行运算	431
14.4	加法运算逻辑	432
14.5	逻辑基础	434
14.6	布尔定理	438
14.7	布尔函数的综合	440
14.8	异-或运算	442
14.9	卡诺图	443
14.10	加法的逻辑电路	448
14.11	逻辑门	451
14.12	非或求逆运算	453
14.13	二极管-晶体管逻辑(DTL)	454
14.14	电阻-晶体管逻辑(RTL)	456
14.15	晶体管-晶体管逻辑(TTL)	457
14.16	射极耦合逻辑门	458
14.17	互补型金属氧化物半导体(CMOS)倒相电路	459
14.18	CMOS 开关组成的与非电路和或非电路	461
14.19	传输门	462

第十五章 用集成电路的数字开关	470
15.1 晶体管开关	470
15.2 多谐振荡器	472
15.3 <i>RS</i> 触发器	474
15.4 <i>D</i> 触发器	476
15.5 <i>T</i> 触发器或翻转触发器	477
15.6 <i>JK</i> 触发器	478
15.7 施密特触发器	480
15.8 单稳态多谐振荡器	484
15.9 无稳态多谐振荡器	485
15.10 移位寄存器	487
15.11 计数	489
15.12 译码矩阵	492
15.13 二进制数的比较	495
15.14 模拟信号的采样	496
15.15 采样的数字变换	497
15.16 数模变换	501
15.17 宽频带多工制	504
第十六章 整流和控制	510
16.1 半波整流电路	510
16.2 全波整流电路	511
16.3 桥式整流电路	513
16.4 波纹系数	514
16.5 旁路电容滤波器	515
16.6 π 型滤波器	520
16.7 <i>RC</i> 滤波器	521
16.8 倍压整流电路	522
16.9 二极管的额定值	524
16.10 三相半波整流电路	526
16.11 <i>m</i> 相整流电路	528
16.12 变压器漏抗的影响	531
16.13 变压器利用系数	532

16.14	可控整流器	535
16.15	可控整流	538
16.16	单结晶体管	540
16.17	可控硅整流器的触发	541
16.18	逆变器	545
第十七章	真空管	551
17.1	电子发射和逸出功	551
17.2	热电发射	553
17.3	光电发射	554
17.4	空间电荷	555
17.5	用栅极做控制极	556
17.6	真空管电路的标记	557
17.7	三极管特性	558
17.8	五极管	560
17.9	等效电路	562
17.10	共阴极电路	564
17.11	偏置电路	565
17.12	栅极接地放大器	566
17.13	阴极跟随器	568
17.14	阴极射线管	569
17.15	射束偏转	570
附录 A	贝塞尔函数值选辑	577
附录 B	基本物理常数	577
附录 C	若干通用符号定义	578

第一章 固体导电

电子的科学研究是在 1883 年爱迪生观测到真空灯泡内的炽热灯丝与带正电的金属板之间竟然有电流通过时开始的。到 1897 年 J·J·汤姆逊爵士才辨认出这种电流是一股负电荷流。稍后, 约翰·斯通·斯托尼就把这种电荷命名为电子。弗莱明则把这种在爱迪生效应中固有的检波特性应用到无线电信号传输上。1906 年, 李·德·福雷斯特在这股电子流中间放入控制栅, 制成了第一只电子控制器件,真空三极管。约在 1940 年才开始研究各种天然晶体导电特性, 如今真空管和充气管却已渐被更加可靠的固体族器件所取代。

在爱迪生效应中, 电流由负电子引起; 而固体半导体的电流则可能是电子和正电荷(空穴)两者运动的结果。若在半导体的硅元素和锗元素中注入选定的杂质元素, 我们就能控制自由电荷的类别和密度。本章中, 我们要研究固体的导电特性以利于理解 pn 结, 即固体整流二极管。pn 结二极管还为随后推演出晶体管提供了基础。

1.1 电 子

我们以电子的电荷作为基本电荷元。电子的电荷量用符号 e 表示, 它代表 -1.602×10^{-19} 库仑(C); 或者说要把 6.249×10^{18} 个电子的电荷合在一起才等于 1 库仑的负电荷。

电子的实体无法测定, 但我们常把它看作是半径约为 10^{-13} 厘米(cm)质量约为 $m = 9.109 \times 10^{-31}$ 千克(kg)的粒子。电子还被发现有波的性质; 现今还无法恰当地解释这种波粒二象性。波的特

性与运动着的电子有关。波长与运动速度的关系是

$$\lambda = \frac{h}{mv} \text{ m} \quad (1.1)$$

其中 h 是普朗克常数, 它等于 6.625×10^{-34} 焦耳秒, m 是电子质量, 速度 v 的单位为米/秒。常规的电子波长在射谱中位于可见区和 X-射线区之间。

研究电子时, 究竟是用粒子概念还是用波的概念可以随意抉择。我们只简单地择取其中最便于说明所观察现象的一种。

1.2 电场中电荷的能量

单位正电荷在电场中某点所受的力被定义为该点的电场强度 $\mathcal{E}$, 即

$$\mathcal{E} = -\frac{dV}{dx} = \frac{f}{q} \text{ V/m} \quad (1.2)$$

$\mathcal{E}$ 的正方向即是作用于正电荷的力的方向, 或者说从高电位指向低电位。

一电子的电荷已知是 $-e$, 则从上式可知在电场 $\mathcal{E}$ 中一电子受的力为

$$f_e = -e\mathcal{E} \quad (1.3)$$

负号表明此力与 $\mathcal{E}$ 方向相反, 或者说是指向高电位的。

电场对质量为 m 的电子所做的功是

$$E = \int_A^B f_e \cos \theta ds = \int_A^B (-e\mathcal{E}) \cos \theta ds \quad (1.4)$$

其中 θ 是 f_e 正方向与动距元 ds 之间的夹角, A 和 B 则代表电场中电子动程的界限。对电子而言, 动距元 ds 指向高电位电极而 θ 为零。在力 f_e 的作用下运动的电子获得动能

$$E = \frac{m(v^2 - v_0^2)}{2} = -e \int_A^B \mathcal{E} ds$$

$\mathcal{E}$ 的积分是电场中 B 点相对于 A 点的电位 V 的负值, 即

$$V = - \int_A^B \mathcal{E} ds$$

由此我们得出电子从零电位的 A 点移动到电位为 V 的 B 点所获得的能量是

$$E = eV \text{ J} \quad (1.5)$$

在该守恒电场中所做的功与途径和沿途电场差异的情况没有关系。

若使运动着的电子在电场中减速, 或者把它引向负电极就可从中获得能量。电子撞击电极时, 它的能量便以热和其它辐射形式放出。对于高速电子, 这种辐射有一部分出现在能谱的 X 射线区。

1.3 电子伏特

一个电子电位升高 1 伏特(V) 所获得的能量被定义作 1 电子伏特(eV)。由方程 1.5 得

$$1\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19} \times 1 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1.6)$$

一个电子若越过 500V 的电位差而升高了电位, 它就获得 500 eV 的能量。这种数值对等的关系使电子伏特成了计量能量的方便的单位。电子得到 500eV, 就相当于得到 8×10^{-17} 焦耳(J)。

术语“伏特”和“电子伏特”有时也被当作当量通用, 如称“0.1 伏特热能”就是指粒子含有 0.1eV 的热能。

1.4 原子模型

原子被设想成具有质子和中子组成的带正电的中心核以及其周围环绕着沿轨道运动的一些电子。核子的正电荷由一个或多个质子生成, 每个质子的电荷是 $+e$, 它的质量约等于氢(^1H)原子核

的质量。中子不带电荷,质量约与质子相等。

原子序数为 Z 的元素,原子核有 Z 个质子,它的核电荷是 $+Ze$ 。常态原子在它周围相距大约 10^{-8} 厘米的轨道中有 Z 个电子。总核电荷 $+Ze$ 和总电子电荷 $-Ze$ 使常态原子呈电中性。

现以简单的氢原子 ^1H 为例,它的原子核有一个质子,周围轨道中有一个电子。用库仑定律测算出核电荷 $+e$ 与电子电荷 $-e$ 的吸引力 $f_e = e(-e)/(4\pi\epsilon_v r^2)$, 其中 ϵ_v 是作用空间的介电常数,它等于 $10^7/(4\pi c^2)$ 。原子结构稳定时,此力被电子绕行速度 v 引起的向外的力所平衡,故

$$f_e = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_v r^2} = \frac{mv^2}{r} = f_c \quad (1.7)$$

与原子核的距离为 r 处,电子的位能是

$$\text{P. E.} = - \int_{\infty}^r f_e dr = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_v r} \quad (1.8)$$

它的动能则是 $mv^2/2$,

$$\text{K. E.} = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_v r}$$

故在原子半径 r 处,电子的总能量是

$$E = \text{K. E.} + \text{P. E.} = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_v r} \text{ J} \quad (1.9)$$

式中负号是把无穷远当作计算能量的参考点的结果;电子在 r 处具有的能量要少于把它移到离原子核无穷远处时具有的能量。

电子绕轨道运动意味着有向心的加速作用,但根据经典电动力学,电荷被加速就应当有辐射,而辐射接连引起的能耗会使轨道半径缩短。这样,电子必定从一开始就会失去全部能量而跌入原子核。我们知道这是不会发生的事情。

为了解决原子模型存在的这个难点,玻尔在 1913 年假设:

1. 电子在稳定轨道上具有的能量是离散值;此时它并不辐射

能量。

2. 稳定轨道的角动量也是离散值; 它的确定值是

$$mrv^2\omega = mvr = \frac{nh}{2\pi} \quad (1.10)$$

其中 n 只取整数值 $1, 2, 3, \dots$ 。

已知运动电子的波长是 $\lambda = h/mv$, 我们得出

$$mvr = \frac{hr}{\lambda}$$

应用玻尔假设中的方程 1.10, 可以导出

$$n\lambda = 2\pi r \quad (1.11)$$

假定轨道是圆, 我们发现稳定轨道的周长必定等于波长的整倍数。任何其它情况, 波的模式都可能被干扰所破坏。

把方程 1.7 和 1.10 结合起来, 我们得出氢原子轨道半径的表达式

$$r = \frac{n^2 \hbar^2 e_v}{\pi m e^2} \quad (1.12)$$

轨道半径与 n^2 成正比; 整数 n 称作主量子数。氢电子可以占据上述算得的许多轨道的任何一个, 而占据第一轨道最为稳定, 因为这种情况要求具有的能量最少。氢的第一轨道半径有 0.53×10^{-10} 米 (m); 第二轨道则是它的 4 倍。

应用方程 1.9, 可以写出容许的氢轨道的能量

$$\begin{aligned} E &= -\frac{me^4}{8\varepsilon_v^2 n^2 \hbar^2} \text{ J} \\ &= -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV} \end{aligned} \quad (1.13)$$

1901年, 普朗克提出辐射能量是量子化的, 或者说是称作光子的离散射束携带的。光子携带的能量和它的频率有关, 即

$$E = hf \text{ J} \quad (1.14)$$

玻尔把这一概念应用到他的第三点假设:

3. 当电子从能量为 E_2 的轨道转移到较低能量 E_1 的轨道时释放出的能量是以单粒光子的形式辐射出去的。它的辐射能量

$$hf = E_2 - E_1 \text{ J} \quad (1.15)$$

如同电子一样，光子也可看作既是粒子又是波。它发射光的颜色（频率）取决于它所携带的能量。

光子被看作粒子时，具有当量辐射质量，因为根据爱因斯坦的质能关系式

$$E = mc^2 \text{ J} \quad (1.16)$$

其中 c 是空间光速，数值约等于 3×10^8 米/秒(m/s)。

在它被设想成波时，光子的波长可从能量 hf 算出。

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E_2 - E_1} \text{ m} \quad (1.17)$$

当轨道中的电子与粒子，也许是高速电子碰撞时，或者吸收光子时，会得到能量。如果所获的能量相当于两轨道间的能量差，电子就能转移到较高能级的轨道而处于受激状态。若继续得到更多能量，绕轨道运行的电子就能脱离原子，或者说被提升到无穷远处的能级。移出电子所需的能量用 eV 值表示称作游离电位。这时，留下的原子就缺少一个负电荷元而成了正离子。

正离子能够重新捕获电子，该电子跌入到未占用的稳定轨道中来，并以闪光释放出一粒携带着能量差额的光子。电子也能从受激的能级跌回较低的能级而释放出满足方程 1.15 的光子。气体放电时就有大量电子在进行这样的转移，并且可以观察到由元素谱线组成的连续的辉光放电。

针对轨道有圆也有椭圆的事实作了若干修正后，用方程 1.15 测算出氢谱线的频率是玻尔理论的主要成就。更为复杂的原子结构，虽然不能完备地计算，但也还可以从氢的简例中推论出来。