

高级电子电路

[德] U. 梯策 Ch. 胜克 著

王祥贵 周 旋 等译

人民邮电出版社

Halbleiter-Schaltungstechnik

U. Tietze Ch. Schenk

Springer-Verlag 1980

内 容 提 要

本书主要讲述以国际上通行的各种模拟集成电路, 数字集成电路和微处理器来实现各种用途的电子电路的方法。第一部分为“基础”, 是半导体电路技术的导论, 包括无源网络、晶体管、运算放大器、触发器、基本逻辑电路、光电器件等。第二部分为“高级电子电路”, 叙述集成电路的各种应用, 包括: 运算电路、可控电源和阻抗变换器、有源滤波器、宽带放大器、功率放大器、电源、模拟开关和比较器、信号发生器、组合逻辑电路、时序逻辑电路、微处理器、数字滤波器、数据的传输和显示、 D/A 和 A/D 变换器、测量电路、电子控制器等。

高 级 电 子 电 路

[德] U. 梯策 Ch. 胜克 著

王祥贵 周旋 等译

责任编辑: 林秉方

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32

印张: 23 页数: 368

字数: 609 千字

1984年9月第一版

1984年9月河北第一次印刷

印数: 1—13,000册

统一书号: 15045·总2838—有5349

定价: 3.55元

译 者 前 言

半导体器件的一个重要特点是集成化。随着半导体器件工艺技术的发展, 半导体集成电路的集成规模从小规模、中规模进而发展到大规模, 目前正向超大规模进军。而微处理器件和微型计算机的出现, 则是电子工业发展上具有革命性的变革。电子元件的突变, 必然给电路设计工作者提出一系列的新课题。当代电路设计的特点是可以利用适当的电子元件, 尤其是利用集成电路, 以获得更优越的电路性能。西德的U.梯策、Ch.胜克所著的这本书比较全面地反映了上述特点。

本书的德文版本“*Halbleiter—Schaltungs-technik*”系1980年出版的第五版; 英文版本“*Advanced Electronic Circuits*”则是德文版1978年第四版的后半部的英文译本。本译稿的第一部分—基础, 主要译自德文版本; 第二部分—高级电子电路, 主要译自英文版本, 但已参照了德文的1980年版本作了相应修改。其中第二十一章微型计算机则系全部根据德文版本译出的。

在本书的翻译工作中, 译稿的第十一章至二十章和第二十二章由王祥贵翻译, 第一章至第十章由周旋、张执中翻译, 第二十一章由周旋翻译, 第二十三章至二十六章由王昌泰翻译, 全书由王祥贵统一整理。由于译者水平所限, 译文中难免有错误之处, 敬请读者给予指正。

译者 1983年3月

第四版 序 言

电子学日益广泛地渗透到科学和技术的许多领域，它的应用早已不再局限于通信技术和数据处理，凡在需要解决测量、控制、调节任务的地方，电子学成了不可缺少的一门知识。本书会有助于你了解业已成熟的电路的工作原理，并使你能够独立地进行设计。

这部书分成两个部分。第一部分打算作为半导体电路技术基础的引论，适合于大专院校学生和自然科学研究人员阅读。其内容包括两个学期的工程电子学基础课程的材料。我们从器件的特性曲线出发，而有意略去了对半导体中物理过程的阐述。属于这方面的内容可参阅有关文献。

在进行电路分析时，我们从一开始就忽略掉次要的效应，借以使读者对电路的内在联系获得定性的了解。由于这种理解是进行任何创造性工作的先决条件，因此它要比作一个特别精确的电路计算重要得多。更何况由于存在很大的制造容差，这种精确计算几乎是没有什么意义的。

本书第二部分是面向应用的。它为从事实际工作的专业人员以及大学高年级学生提供了有关各种电路应用可能性的详尽评述。在这方面集成电路的应用处于重要地位。考虑到现在已有许多大规模集成电路可应用于数字技术，现在形成的新的设计思想不再特别强调使逻辑连接的数目减至最小，而是着眼于如何将各种适用的器件组合得最好。

如果不要求特别高的处理速度，则采用微处理器常常可得到最简明的电路。因此电路研究越来越转移到程序方面。这种技术的一个很大的优点是，某一个以及类似的电路配置能够以最为简单的方式适应提出的任务。为了从传统的数字电路技术过渡到微处理器技

术，我们在一章中同时对硬件和软件这两方面作了详细的处理。

为了便于阅读，撰写第二部分各章时已经考虑到它们可以独立成章。借此我们想使部分学习优秀的读者能更快地熟悉各个特殊的领域。为了通过尽可能短的途径达到实际应用的目的，我们根据已为实验所验证的实例来阐明各个电路原理。在此我们要感谢 D. Seitzer 教授提供了便利的实验工作条件。

从许多来信得知，无论对于正在学习还是从事实际研制工作的人员，本书第三版深受他们的好评。所以我们仍然希望，现在的第四版会更好地满足读者的要求。

衷心感谢出版社为本书所作的装帧设计和密切的合作。

U. 梯策 Ch. 胜克

爱尔兰根 一九七八年夏

第五版 序 言

我们感到高兴，原书第四版的迅速售出使我们有可能将本书重新修订出版。为适应最新的技术水平，各章主要内容已予充实。

目前，在微型计算机领域取得的进展最为迅速。为此，对有关章节作了重新改写。考虑到对硬件和软件都熟悉的读者的需要，新版详细介绍了迄今大规模集成微型计算机组件的组合电路，并根据具体情况编程序示例阐明其运用。这样，对这一新领域的入门似应变得容易一些。

我们谨向广大读者提出的许多建议表示衷心感谢，并将根据这些意见对本书的进一步改进不断作出努力。

U.梯策 Ch.胜克

爱尔兰根和慕尼黑

一九八〇年一月

目 录

第一部分 基 础

第一章 定义和术语	(1)
第二章 无源RC和LRC网络	(9)
2.1 低通滤波器电路	(9)
2.2 高通滤波器电路	(14)
2.3 补偿分压器	(17)
2.4 无源RC带通滤波器	(17)
2.5 维恩—罗宾逊电桥	(18)
2.6 并联—T型滤波器	(20)
2.7 振荡回路	(21)
第三章 二极管	(23)
3.1 特性曲线和特征参数	(23)
3.2 稳压二极管(齐纳二极管)	(26)
3.3 变容二极管	(27)
第四章 晶体管及其基本电路	(28)
4.1 特性曲线与小信号参数	(29)
4.2 共发射极电路	(32)
4.3 共基极电路	(48)
4.4 共集电极电路(射极跟随器)	(49)
4.5 晶体管恒流源电路	(52)
4.6 达林顿电路	(55)
4.7 差分放大器	(58)
4.8 几个小信号参数的测量	(66)
4.9 晶体管噪声	(67)
4.10 极限参数	(71)
第五章 场效应晶体管	(75)
5.1 场效应晶体管分类	(76)

5.2	特性曲线和小信号参数	(76)
5.3	极限参数	(79)
5.4	基本电路	(80)
5.5	场效应晶体管恒流源电路	(84)
5.6	场效应晶体管差分放大器	(85)
5.7	用作可调电阻的场效应晶体管	(89)
第六章	运算放大器	(91)
6.1	运算放大器的特性	(91)
6.2	负反馈原理	(98)
6.3	非倒相放大器	(100)
6.4	倒相放大器	(104)
第七章	运算放大器内部结构	(106)
7.1	基本观点	(106)
7.2	最简单的结构	(107)
7.3	标准集成运算放大器	(108)
7.4	频率特性校正	(112)
7.5	运算放大器参数的测量	(122)
第八章	简单触发电路	(124)
8.1	晶体管开关	(124)
8.2	双稳态多谐振荡器	(128)
8.3	单稳态触发电路	(131)
8.4	非稳态多谐振荡器	(132)
第九章	基本逻辑电路	(134)
9.1	基本逻辑函数	(134)
9.2	逻辑函数的确定	(138)
9.3	导出的基本函数	(142)
9.4	实现基本逻辑函数的电路技术	(143)
9.5	集成触发器	(158)
9.6	半导体存储器	(165)
第十章	光电器件	(176)
10.1	光度学基本概念	(176)

10.2 光敏电阻	(178)
10.3 光电二极管	(180)
10.4 光电晶体管	(181)
10.5 发光二极管	(183)
10.6 光耦合器	(184)

第二部分 高级电子电路

第十一章 线性和非线性运算电路	(185)
11.1 加电路	(185)
11.2 减电路	(186)
11.3 两种极性系数电路	(191)
11.4 积分器	(192)
11.5 微分器	(198)
11.6 微分方程的解	(201)
11.7 函数网络	(203)
11.8 模拟乘法器	(219)
11.9 座标变换	(233)
第十二章 可控电源和阻抗变换器	(236)
12.1 电压控制的电压源	(236)
12.2 电流控制的电压源	(237)
12.3 电压控制的电流源	(239)
12.4 电流控制的电流源	(251)
12.5 负阻抗变换器 (NIC)	(252)
12.6 回转器	(255)
12.7 循环器	(259)
第十三章 有源滤波器	(262)
13.1 低通滤波器的基本理论	(262)
13.2 低通/高通转换	(285)
13.3 一阶低通和高通滤波器的实现	(286)
13.4 二阶低通和高通滤波器的实现	(289)
13.5 高阶的低通和高通滤波器的实现	(296)
13.6 低通/带通转换	(299)

13.7 二阶带通滤波器的实现	(304)
13.8 低通/带阻滤波器转换	(310)
13.9 二阶带阻滤波器的实现	(311)
13.10 全通滤波器	(314)
13.11 可调节的通用滤波器	(320)
第十四章 宽带放大器	(325)
14.1 频率与电流增益的关系	(325)
14.2 晶体管电容和杂散电容的影响	(327)
14.3 共射—共基放大器	(329)
14.4 用作宽带放大器的差分放大器	(330)
14.5 对称的宽带放大器	(331)
14.6 宽带电压跟随器	(336)
14.7 宽带运算放大器	(338)
第十五章 功率放大器	(341)
15.1 作为功率放大器的发射极跟随器	(341)
15.2 互补射极跟随器	(343)
15.3 限流器	(349)
15.4 用达林顿电路的互补发射极跟随器	(352)
15.5 功率输出级的元件额定值的计算	(353)
15.6 有电压增益的驱动电路	(356)
15.7 集成运算放大器输出电流的提升	(359)
第十六章 电源	(361)
16.1 主变压器的性质	(361)
16.2 整流器电路	(362)
16.3 串联稳压器	(368)
16.4 参考电压的产生	(381)
16.5 开关电源	(387)
第十七章 模拟开关和比较器	(394)
17.1 原理	(394)
17.2 电子开关	(394)
17.3 使用放大器电路的模拟开关电路	(400)

17.4 取样—保持电路	(404)
17.5 模拟比较器	(407)
17.6 施密特触发器	(410)
第十八章 信号发生器	(416)
18.1 LC振荡器	(416)
18.2 石英振荡器	(424)
18.3 RC正弦振荡器	(427)
18.4 函数发生器	(435)
18.5 多谐振荡器	(440)
第十九章 组合逻辑电路	(450)
19.1 编码电路	(451)
19.2 多路转换器和多路输出选择器	(462)
19.3 不用时钟的移位寄存器	(465)
19.4 数字比较器	(466)
19.5 加法器	(469)
19.6 乘法器	(481)
19.7 数字函数网络	(484)
第二十章 时序逻辑电路	(487)
20.1 直接二进制计数器	(488)
20.2 8421编码的BCD计数器	(498)
20.3 可预置计数器	(501)
20.4 移位寄存器	(503)
20.5 伪随机序列的产生	(506)
20.6 非同步信号处理	(510)
20.7 时序电路的系统设计	(515)
第二十一章 微型计算机	(524)
21.1 微型计算机的基本结构	(524)
21.2 微处理器的工作原理	(525)
21.3 指令系统	(531)
21.4 开发辅助手段	(545)
21.5 微处理器类型概况	(550)

21.6 微型计算机的组件结构	(553)
21.7 外部电路	(565)
21.8 最小的系统	(586)
第二十二章 数字滤波器	(593)
22.1 取样定理	(593)
22.2 数字转移函数	(597)
22.3 双线性变换	(600)
22.4 数字滤波器设计	(604)
第二十三章 数据的传输和显示	(615)
23.1 传输线	(615)
23.2 差错的检测和校正	(617)
23.3 静态数字显示	(622)
23.4 多路显示	(628)
第二十四章 D/A和A/D 变换器	(633)
24.1 D/A变换器的设计原理	(633)
24.2 使用电子开关的D/A变换器的设计	(638)
24.3 专用D/A变换器	(643)
24.4 A/D变换器的基本原理	(648)
24.5 A/D变换器的精确度	(651)
24.6 A/D变换器的设计	(654)
第二十五章 测量电路	(666)
25.1 电压测量	(666)
25.2 电流测量	(671)
25.3 AC/DC变换器	(673)
第二十六章 电子控制器	(689)
26.1 基本原理	(689)
26.2 控制器的类型	(690)
26.3 非线性系统的控制	(701)
26.4 锁相环路	(704)
参考资料	(717)

第一部分 基 础

第一章 定义和术语

我们希望下面列出的定义表将有助于避免混淆和更好的理解其含意，凡是可能的地方，均尽量采用国际电气技术委员会（IEC）所推荐的定义。

电压 x 和 y 两点之间的电压用 U_{xy} 表示。如果 x 点相对于 y 点是正的，则定义 U_{xy} 为正的；如果 x 点相对于 y 点是负的，则定义 U_{xy} 为负的。因此， $U_{xy} = -U_{yx}$ ，我们讲

$$U_{EB} = -5V$$

或

$$-U_{BE} = 5V$$

或

$$U_{BE} = 5V$$

表明E和B之间存在5V的电压，而且E相对于B是正的。在电路图中常常省略掉重复的符号，以从节点 x 指向节点 y 的电压 U 来代替符号 U_{xy} 。

电位 电位是一个节点相对于公共基准节点 0 的电压

$$V_x = U_{x0}$$

在电路图中基准电位用一个接地符号来表示。两个节点（ x 和 y ）之间的电压为

$$U_{xy} = V_x - V_y$$

电流 电流用电路连线上的电流矢量表示。如果按人们的习惯观念（传输正电荷）沿箭头的方向流动的电流 I 定义是正的，则由

较高电位经过负载流向较低电位的电流是正的。只要 U 和 I 的实际值已用正确的符号给定，那么电流和电压在电路图中的箭头指向就不再重要了。

如果一个电路元件上的电流和电压的箭头具有相同的方向，根据上面的定义，欧姆定律是 $R = U / I$ 。如果电压和电流的方向相反，则欧姆定律变成 $R = -U / I$ 。图 1.1 具体说明了这一事实。

电阻 如果电阻和电压或电流相关，那么可定义静态电阻为 $R = U / I$ ，增量电阻为 $r = \partial U / \partial I \approx \Delta U / \Delta I$ 。如果电压和电流的箭头同一方向，则上述公式是正确的；如果方向相反，则必须象图 1.1 那样增加一个负号。



图 1.1 欧姆定律

电压源和电流源 一个实际的电压源可用方程

$$U_o = U_0 - R_{int} I_o \quad (1.1)$$

来描述，式中 U_0 是无负载时的电压， $R_{int} = -dU_o / dI_o$ 是电源的内阻。图 1.2 给出了电压源的等效电路。一个理想的电压源的特点是 $R_{int} = 0$ ，即输出电压与电流无关。

改写式 (1.1)，可对一个实际的电压源推演出不同的等效电路：

$$I_s = \frac{U_0 - U_o}{R_{int}} = I_{sc} - \frac{U_o}{R_{int}} \quad (1.2)$$

式中 $I_{sc} = U_0 / R_{int}$ 是短路电流。对应的电路如图 1.3 所示，当 $R_{int} \rightarrow \infty$ 时，即得到一个理想的电流源。

根据图 1.2 和 1.3，一个实际的电压源能够用一个理想的电压源来表示，也可以用一个理想的电流源来表示。选择哪种表示电路取

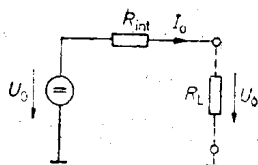


图 1.2 实际电压源的等效电路

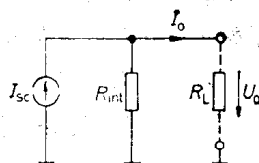


图 1.3 实际电流源的等效电路

决于内阻 R_{int} 是小于还是大于负载电阻 R_L 。

克希霍夫电流定律 (KCL) 在计算许多电子电路的参数时，我们都要用到克希霍夫电流定律，该定律可描述为：流进一个节点的所有电流的和等于零。流向节点的电流算作正的，从节点流出的电流算作负的。图1.4表明了这一定律，从图中可以看到，在节点 N 有

$$\sum I_i = I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

克希霍夫电压定律 (KVL) 克希霍夫电压定律的内容为，电路中任何闭合回路上的所有电压之和等于零。在所考虑的问题中，如果电压的箭头指向与环绕回路前进的方向相同，在方程中引进的电压的符号为正；如果电压的箭头方向与此绕向相反，则引进的电压的符号为负。例如，在图1.5中

$$\sum U_i = U_1 + U_4 - U_2 - U_3 = 0$$

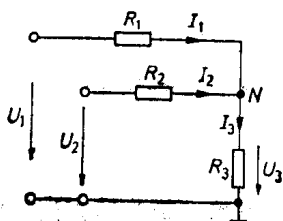


图 1.4 说明克希霍夫电流定律(KCL)的例子

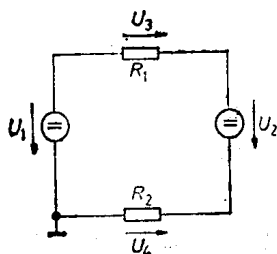


图 1.5 说明克希霍夫电压定律(KVL)的例子

交流电压 如果一个电路能够用直流传输特性 $U_o = f(U_i)$ 来描述, 只要输入电压的变化是准稳定的 (即变化不是太快), 那么这一关系也必然适用于任何随时间变化的电压, 即 $U_o(t) = f(U_i(t))$ 。由于这一原因, 我们也把用以表示直流的大写字母来表示随时间变化的量, 例如 $U = U(t)$ 。

可是, 事实上存在着传输特性仅对没有直流成分的交流电压是有效的情况。因此, 必须有一个用来区别这种交流电压的特殊符号。我们用小写字母 u 来表示它们的瞬时值。

一个特别重要的特殊情况是正弦交流电压, 即

$$u = \hat{U} \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (1.3)$$

式中 $\hat{U}$ 为电压的峰值 (振幅)。表示电压大小特性的另一个值是均方根值 $U_{rms} = \hat{U} / \sqrt{2}$ 或峰-峰值 $U_{pp} = 2\hat{U}$ 。

三角函数的计算方法是相当复杂的, 但指数函数的计算方法却十分简单。欧拉定理

$$e^{j\alpha} = \cos\alpha + j \sin\alpha \quad (1.4)$$

使一个正弦函数能够用一个复数指数函数的虚部来表示,

$$\sin\alpha = \text{Im}\{e^{j\alpha}\}$$

因此, 式(1.3)也可写成

$$\begin{aligned} u &= \hat{U} \cdot \text{Im}\{e^{j(\omega t + \varphi_u)}\} = \text{Im}\{\hat{U} e^{j\varphi_u} \cdot e^{j\omega t}\} \\ &= \text{Im}\{\underline{U} e^{j\omega t}\} \end{aligned}$$

式中 $\underline{U} = \hat{U} e^{j\varphi_u}$ 是复数振幅, 它的绝对值为

$$|\underline{U}| = \hat{U} \cdot |e^{j\varphi_u}| = \hat{U} (\cos^2\varphi_u + \sin^2\varphi_u) = \hat{U}$$

即它的绝对值等于正弦波的峰值。也可用类似的方法来表示随时间变化的电流。那么, 对应的符号应是

$$I, I(t), i, \hat{I}, \underline{I}$$

也可用箭头来标明交流电压和电流。当然, 箭头的方向这时已不是表示极性, 而是表示必须将其数值代入公式的数学符号。图 1.1 中所表示的直流电压的法则也适用于交流情况。

和直流电路中的电阻相类似，可以定义一个复数电阻，并把它称为阻抗 $\underline{Z}$ 。

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{\hat{U} e^{j\varphi_u}}{\hat{I} e^{j\varphi_i}} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = |\underline{Z}| e^{j\varphi}$$

式中 φ 为电流和电压之间的相角。如果电压超前于电流，则 φ 是正的。在纯欧姆电阻的情况下 $\underline{Z} = R$ ；一个电容的阻抗为

$$\underline{Z} = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}$$

一个电感的阻抗为 $\underline{Z} = j\omega L$ ，直流电路中各参量所满足的定律也能够很好地用于复数参量(1.1, 1.2)。

我们还可以定义一个复数增益

$$\underline{A} = \frac{\underline{U}_o}{\underline{U}_i} = \frac{\hat{U}_o e^{j\varphi_o}}{\hat{U}_i e^{j\varphi_i}} = \frac{\hat{U}_o}{\hat{U}_i} e^{j(\varphi_o - \varphi_i)} = |\underline{A}| e^{j\varphi}$$

式中 φ 为输入电压和输出电压之间的相角，如果输出电压超前于输入电压，则 φ 是正的；而输出电压落后于输入电压时它是负的。

对数电压比 在电气工程中常常用一个对数值 $|\underline{A}|^*$ 来表示电压比 $|\underline{A}| = \hat{U}_o / \hat{U}_i$ ，即电路的增益。 $|\underline{A}|^*$ 和 $|\underline{A}|$ 之间的关系为

$$|\underline{A}|^* = 20 \text{ dB} \lg \frac{\hat{U}_o}{\hat{U}_i} = 20 \text{ dB} \lg |\underline{A}|$$

图 1.6 的表中列出了某些数值。

线性电压比 $ \underline{A} $	对数电压比 $ \underline{A} ^*$
0.5	-6 dB
$1/\sqrt{2} \approx 0.7$	-3 dB
1	0 dB
$\sqrt{2} \approx 1.4$	3 dB
2	6 dB
10	20 dB
100	40 dB
1000	60 dB

图 1.6 电压比的换算表