

电子电路问答

DIANZI
DIANLUWENDA

71.26
410

电子电路问答

[日] 茂木 晃 著

《电子电路问答》翻译组 译

王祥贵 李大义 校



机械工业出版社

1110550

本书用标准问题和解答的方式对组成电子线路的元器件作了扼要的介绍,对各种电子线路的工作原理进行了基本的说明。全书共分十一章,包括晶体管及其特性、SCR UJT、半导体放大电路、振荡器、调制器和解调器、开关及数字电路、微波电路、电源电路等,最后还列出了电子学常用数学公式。

本书可供具有中等文化程度从事电子技术工作的工人和技术人员参考。

本书第六章和第九章曾请姬文越同志复校,表示感谢。

エレクトロニクス回路

标准问题と解说

茂木 晃 著

技報堂 1972

* * *

电子电路问答

[日] 茂木 晃 著

《电子电路问答》翻译组 译

王祥贵 李大文 校

* * *

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南路一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张 14 1/2·字数 322 千字
1983 年 1 月北京第一版·1983 年 1 月北京第一次印刷
印数 00,001—40,000·定价 1.50 元

*

统一书号: 15033·5370

目 录

第一章 电路	1
1.1 物质的构造及电现象	1
1.2 电路定律	6
1.3 恒压源及恒流源	7
1.4 交流电路	13
1.5 互感耦合电路	24
1.6 四端网络	27
1.7 滤波器	35
第二章 晶体管及其特性	45
2.1 双极型晶体管	45
2.2 晶体管的制造方法	48
2.3 晶体管的特性	52
2.4 晶体管的偏置电路	57
2.5 晶体管的额定值	64
2.6 小输入信号时的晶体管特性	67
2.7 场效应晶体管	91
2.8 MOS 晶体管	97
2.9 双极晶体管的高频特性	112
2.10 开关晶体管	122
第三章 SCR UJT 及其他	127
3.1 晶闸管	127
3.2 单结晶体管	132
3.3 电子管	142
3.4 再结型场效应管(FET)	149
第四章 半导体放大电路	154
4.1 放大器的种类	154

4.2 放大器的耦合	155
4.3 直流放大器	168
4.4 反馈放大器	175
4.5 功率放大器	183
4.6 音频放大器	217
4.7 运算放大器	227
第五章 振荡器	231
第六章 调制器和解调器	255
6.1 调制	255
6.2 解调	275
附录 在线性电路中的应用	285
第七章 开关及数字电路	289
7.1 晶体管多谐振荡器	289
7.2 数字电路	297
第八章 信号传输电路和电磁波	307
8.1 信号传输线路的问题	307
8.2 电磁波	335
8.3 天线和电磁辐射	339
第九章 微波电路	364
9.1 微波电路	364
9.2 微波电子管	364
9.3 同轴线和波导管	366
9.4 微波测量	380
9.5 脉塞和激光	384
第十章 电源电路和稳压器	387
10.1 整流电路	387
10.2 稳压器	394
10.3 变流器和逆变器	417
第十一章 电子学常用数学公式	434

11.1	平面三角	434
11.2	对数	437
11.3	双曲线函数	440
11.4	复数	441
11.5	微分	442
11.6	积分	442
11.7	傅立叶级数	445
11.8	实用常数	448
11.9	级数展开式	449
11.10	拉普拉斯变换法	450

第一章 电 路

1.1 物质的构造及电现象

问题 1.1 试说明物质的构造及导电作用。

解答 存在于自然界的一切物质(由人工制造的放射性物质除外)是由 102 种以上的元素组成的。这些元素如铁、碳、氧等是以游离状态存在的;也有作为化学的结合体,即化合物的状态存在的。保持元素本质的最小单位叫做原子。

几个原子结合在一起,或者由于化合物分解而形成的另一个基本单位是分子。所谓分子就是任意化合物的最小单位。一切活泼的元素在气体状态时都是由两个或两个以上的原子结合成分子状态而存在的,而惰性气体元素(氦、氖、氩、氪、氙、氡等)在常温下都是以稳定的单个原子的气体状态存在的。

原子的构造

众所周知,原子是由带正电的原子核和一些包围着原子核的带负电的粒子构成的。这些粒子在原子核周围的椭圆形轨道上旋转,我们把这些粒子叫做轨道电子。如果这些轨道电子摆脱了原子核的束缚,变成自由的电子(即所谓自由电子),这就是本书将要讨论的主要对象。

原子核还可以分为更小的一些粒子,但这是量子力学和原子物理学等领域的问题,不在本书讨论范围。如果从电学的观点考虑,原子核是一种带正电的粒子,围绕原子核旋转的这些电子带有和原子核同样多的负电荷。因此,对整个原子来说,可以认为它是电中性的,也就是不带电的。

1110559

102种不同元素的原子核所带的正电荷数量(或包围原子核的电子数目)是不一样的。例如氢原子核周围的电子只有一个,铀原子核周围的电子却有92个(对应于原子核所带正电荷数量)。我们把原子核周围的电子数目叫做该元素的原子序数。

导体、非导体及半导体

在原子核外围的电子不是无规则地围绕原子核旋转的,而是被分成一定数目的几组,在几层环形轨道上旋转。如果这些轨道全被规定数目的电子占满时,就成了前面所说的惰性气体的原子。除惰性气体以外,所有元素都有一个或一个以上未被电子占满的轨道。如果这种未被电子占满的轨道上几乎是空的,则该元素就具有金属的性质。最外层轨道只有一个电子的元素,是最富有金属性质的元素。

如果这个未被电子占满的轨道只缺少一、二个电子,则这些元素多为非导体。介于二者之间的,即这个未被电子占满的轨道上只有约半数电子时,该元素就叫做半导体。碳、硅、锗、砷等就是其中的例子。

金属元素原子外层轨道上的电子同原子的结合非常松,很容易从一个原子向另一个原子移动。在物质内部能作这种移动的电子叫做自由电子。电子从一个原子向另一个原子流动,便产生了电流。

电位和电流

为了使电流在导体中沿一定的方向连续地流动,必须在导体的两端加以电位差。

能够产生这样的电位差的东西是电源。电池就是一种电源,它由于化学的作用,造成负极电子过剩,而正极却缺乏电子。在这种状态下,如果用导线把电池的两个极连接起来,则

缺乏电子的正极就会通过导线把电子吸引过来,使其成为中性状态。负极多余的电子在整个导体中移动,使电流源源不断地流过。

从负极出来的电子并不是都移动到正极的,实际上这些自由电子只移动一个很短的距离就同其他原子发生碰撞,其结果是把一个或一个以上的电子从这个被撞的原子里打出去。这个被打出去的电子也是移动一个短距离又碰撞别的原子,照此不断地进行下去。对于整个导体来说,在该导体的一端电子过剩和在另一端电子不足的程度逐渐平衡。

关于电流方向的规定

电量的单位是库仑(C),1库仑等于 6.28×10^{18} 个电子所具有的电量,即一个电子所具有的电量为 1.6×10^{-19} 库仑。

电荷流动的速率叫做电流。当每秒钟内流过1库仑电量时,其电流为1安培(A)。

前面所说的导体中的电流,是电子从电源负极向正极的流动。同电子流相反,在气体或电解质中正离子是向负极流动的。所谓离子指的是由于缺少一个或一个以上电子而带正电,或者由于多余一个或一个以上电子而带负电的原子、分子等。从上面可以看出,存在着与带负电荷的电子流方向相反的正向电流。

在电工学等领域,把电流和电子流作为同义词考虑的倾向逐渐多起来了。可是多数人对“电流是从电源正极流向负极”的传统概念还没有改变。因此,虽然电流和电子流方向相反,而我们却把从电源正极流向负极的电流规定为正方向电流。

在电位差一定时,由于物质不同,通过电子流会有难有易,容易通过电子流的物质能有较大的电流流过。为了定量

地描述这一性质,我们采用电阻这个词。

问题 1.2 试说明在真空中电子的发射。

解答 在金属中的电流是由于自由电子的迁移造成的。在所给定的电场强度下,这些自由电子由于电场的作用,在金属中以某个速度移动,在移动时由于同金属原子碰撞而失去了运动的能量,这在金属导体的外部以电阻的形式表示出来。自由电子从开始自由运动到发生碰撞的平均距离叫做平均自由行程。

单位电场作用下的电子迁移速度是电子迁移率 Θ ,单位电场作用下的电流密度是电导率。电导率 σ 同电子迁移率 μ 的对应关系如下:

$$\sigma = ne\mu \quad (\text{S/m})$$

式中 n ——电子的密度;

e ——电子的电荷量。

许多电子设备进行工作,是靠在真空中的电子流。在这些设备里,实现高度的真空是维持电子流的最重要条件。

在真空中发射电子有多种形式,除了象 β 射线那样自发地发射外,为了使电子能够发射,还需要有一些发射源。由发射源提供能量,克服发射物质的表面势垒(即所谓功函数)后才能发射出电子。这个发射源物质(阴极物质)是金属或 n 型半导体(见第二章)。电子在发射初期的能量一般是比较小的。

发射电子的形式有热电子发射、冷阴极(电场)发射、光电发射和二次电子发射等。

$$\Theta \text{ 迁移率} = \frac{\text{电子速度}}{\text{电场强度}} = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}}}{\frac{\text{V}}{\text{m}}}$$

问题 1.3 试说明电子在电场中的运动。

解答 电子在电场中所受的力 F_e 为

$$F_e = eE \quad (\text{N}) \quad (1)$$

式中 E ——电场强度(V/m)。

另外,在磁场中运动的电子所受的力为

$$F_m = euB \quad (\text{N}) \quad (2)$$

式中 u ——电子的速度(m/s);

B ——磁通密度(Wb/m²);

F_m ——垂直于 u 和 B 方向的力。

因而,电子加速,产生半径为 $R = mu/eB$ 的圆周运动。电子旋转一周所需的时间(周期 T)为

$$T = \frac{2\pi m}{eB} \quad (\text{s})$$

式中 m ——电子的质量。

如果在电位差 V 的作用下,电子运动的初始速度由 u_1 变为最终速度 u_2 ,则运动能量的变化为

$$Ve = \frac{1}{2} m(u_2^2 - u_1^2) \quad (3)$$

如果初始速度 u_1 为零,则最终速度 u_2 为

$$u_2 = \sqrt{\frac{2Ve}{m}} \quad (3a)$$

在电子枪的阴极和阳极间加以电压 V , 其电子的速度就如上式所示。

注 1 通常采用电子伏(eV)作为能量的单位。1 电子伏就是在电位差为 1 伏的电场中电子所获得的能量。

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

注 2 公式(1)和(2)本来是向量关系式,由于公式(1)的力 F_e 与电场 E 所用的方向相同,因此应该写作 $F_e = -eE$, 公式(2)的力 F_m 与电

子的运动速度 u 和磁通密度 B 两个向量所组成的平面相垂直, 因此可以表示为 $F_m = -eu \times B$ 。式中符号 $\times$ 表示向量积(图 1.1)。

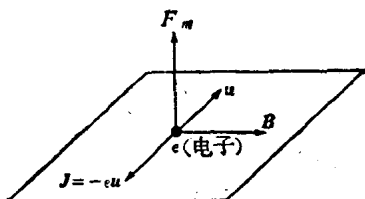


图 1.1 在磁通密度为 B 时, 电子的运动速度 u 同作用力 F_m 的关系
 J —由于电子运动而形成的电流

1.2 电路定律

问题 1.4 试说明欧姆定律和基尔霍夫定律。

解答

(1) 欧姆定律

$$I = \frac{E}{R}$$

由电阻 $R(\Omega)$ 组成的电路, 当加上电压 $E(V)$ 时, 流过的电流 $I(A)$ 如上式所示, 意思就是电流同所加的电压成正比, 同电路的电阻成反比, 这就是欧姆定律。这个定律不仅适合于直流电路, 而且也能扩大到交流电路(见 1.4 节)。在交流电路里, 可用电路的复数阻抗 $z(\Omega)$ 代替电阻 R , 则欧姆定律可写成

$$i = \frac{e}{z}$$

(2) 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律有以下两个要点:

1) 在电路的任何一个节点, 流进去的电流等于从这个节

点流出的电流。

2) 在构成电路的任何一个闭合回路里, 电压降的总和等于这个回路的电源电压总和。

在节点 N 处, 可用下式表示:

$$\sum i_n = 0$$

对于回路 M , 可用下式表示:

$$\sum i_n z_n = \sum e_n$$

以图 1.2 为例, 在节点 N 处:

$$i_1 + i_2 - i_3 + i_4 = 0$$

另外, 在回路 M 中:

$$i_2 z_2 - i_4 z_4 + i_5 z_5 = e_5$$

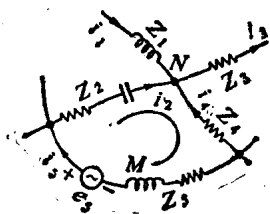


图 1.2 网络的基尔霍夫定律

1.8 恒压源及恒流源

问题 1.5 什么是恒压源及恒流源?

解答 电路主要由电源、电阻、电感(包括互感)、电容等元件构成, 其中电源能够自身产生电能, 叫做有源元件, 其余的都是自身不能产生电能的无源元件, 它们或者是能够积蓄能量的电感、电容, 或者是只会消耗能量的电阻。

电路中电源的作用是把它所产生的能量提供给电路的其他各部分。为了方便, 可分为以下两类:

(1) 恒压源

(2) 恒流源

恒压源的内部阻抗为零, 这就是说其输出电压(无论是交流电压或直流电压)始终不变, 与电源的外部负载没有关系。这是理想的恒压源, 可是在实际的恒压源(如发电机)中由于存在一些内部阻抗, 其输出电压的大小是随负载而变的, 不能做到完全恒压。

图 1.3 是具有内部阻抗 Z_i 的发电机等效电路。如图所示, 用理想的(没有内部阻抗的)恒压源和内部阻抗 Z_i 串联, 近似地表示实际发电机。

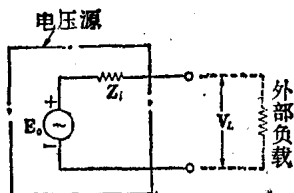


图 1.3 恒压源的等效电路

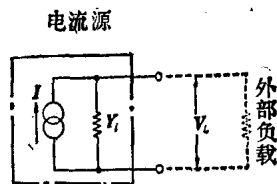


图 1.4 恒流源的等效电路

其次, 所谓恒流源, 是一种内部阻抗无限大, 输出电流(无论是交流或直流)始终不变, 与外部负载大小没有关系的电源。这是理想的恒流发电机的概念。实际上, 由于发电机的内部导纳并不是没有的, 因此发电机的输出电流会随着负载的变化而变化。

图 1.4 是实际发电机的等效电路, 即用理想的恒流发电机和一定导纳 Y_i 并联来表示实际的发电机。

问题 1.6 试说明戴维南等效电路及诺顿等效电路。

解答 对复杂的电路(也可包括电源在内), 如果采用适当的

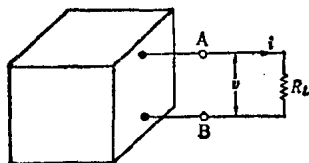


图 1.5 从外部用两个端子 (A, B) 连接的网路

方法, 以简单的等效电路代替该电路, 则要方便得多。

图 1.5 所示的箱子是一个复杂的网络, 由箱子外部的两个端子 A、B 与这个网络连接。若在端子 A、B 之间接上负载 R_L 时,

端子间的电压为 v , 则通过端子 A、B 流过负载的电流为 i 。

为了了解该网络的电特性, 必须测定两端子间的两个重

⊖ 黑体字 Z_i 是以复数表示的阻抗(见 1.12 节)。

要参数,即开路电压 v_0 及短路电流 i_0 。开路电压 v_0 是负载电阻 R_L 为无限大(即开路)时在两端子间所显示出的电压。短路电流 i_0 则是端子间短接($R_L=0$)时所流过的电流。

对于直流电路,当负载电阻在零和无穷大之间时,其电压及电流数值应该在图 1.6 的伏安特性(V-I 特性)直线上,即在

$v = V_0$ 和 $i = I_0 = \frac{V_0}{R_0}$ 这两点连接

起来的直线上。 R_0 就是网络的内部电阻,可以认为它是一个从外部来描述网络时的特性参数。

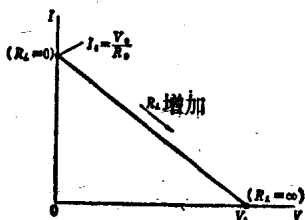


图 1.6 网络的伏安特性

为了求出 R_0 , 可以使网络的内部电源全部为零, 把网络接在端子 A 和 B 之间直接测定。

为使电源成为零, 可用一个内部阻抗相同的无源元件来代替, 即把电压源的两端短路, 如果是电流源, 则可以把它从电路中断开。这样做之后, 如果知道 V_0 、 I_0 及 R_0 的话, 上述的网络(箱)可以用下面将谈到的戴维南等效电路或诺顿等效电路代替它。

很容易证明: 在两个端子之间的等效电路具有与原网络相同的特性。

上述法则不仅适合于直流电路, 而且也适合于交流电路。

归纳以上说明可得如下两条定理。

戴维南定理 任何一个含有发电机和阻抗的二端网络, 都可以用一个发电机同一个阻抗相串联的等效电路(图 1.7a)来代替。其中, 发电机的电压等于二端网络开路时的输出电压; 串联阻抗等于将二端网络中所有发电机用等效内部阻抗

代替时, 在二端网络输出端间测得的阻抗。

诺顿定理 任何一个具有若干电压源(或电流源)及阻抗的有源二端网络, 都可用一个电流源与一个阻抗相并联的等效电路(图 1.7b)来代替。

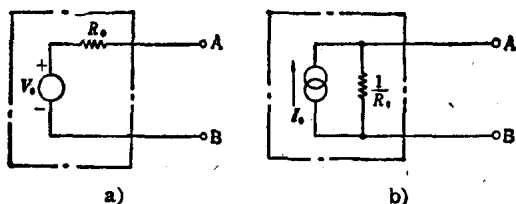


图 1.7 戴维南定理等效电路及诺顿定理等效电路

a) 戴维南定理等效电路 b) 诺顿定理等效电路

诺顿定理中电流源的电流和输出端短路时从二端网络流出的电流相等; 并联阻抗和网络中所有电流源开路时[⊖], 或将所有的电压源短路时在网络输出端测得的阻抗相等。

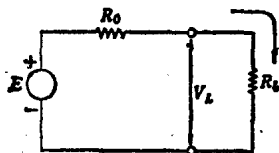


图 1.8 试求输出最大电功率的条件

问题 1.7 在图 1.8 的电路里, 为了给负载 R_L 提供最大的电功率, 应满足怎样的电路条件?

解答 这是具有内部电阻 R_0 的电源给负载 R_L 提供电功率的情况。

在负载 R_L 上所消耗的功率为

$$P_L = I_L^2 R_L = \left(\frac{E}{R_0 + R_L} \right)^2 R_L$$

为了研究该功率 P_L 在什么情况下为最大, 需要计算 $\partial P_L /$

[⊖] 说得更确切一些: 电流源是一种用并联内部导纳来代替阻抗的电源, 该导纳非常非常小时, 可认为它处于几乎开路的状态。

∂R_L , 其结果是 $\partial P_L / \partial R_L = 0$ 时为最好:

$$\frac{\partial P_L}{\partial R_L} = \left(\frac{E}{R_0 + R_L} \right)^2 - \frac{2 R_L E^2}{(R_0 + R_L)^3} = 0$$

即

$$R_0 = R_L$$

这就是输出最大电功率的条件。

上面讨论的是恒压源的情况, 对于恒流源 (见问题 1.5) 也可以进行同样的计算。设恒流源的内部电导为 G_0 , 则输出最大电功率的条件为 $1/G_0 = R_L$ 。

总之, 负载电阻等于电源的内部电阻时, 负载可以从电源获得最大的电功率。

上述的电路中, 当 R_L 比 R_0 大得多时, 则端电压 V_L 近似等于电源电压。

$$V_L = \frac{R_L E}{R_0 + R_L} \approx E \quad R_L \gg R_0$$

而且, 如果负载电阻 R_L 越大, 则对恒压源的恒压性质影响越小。反之, 如果 R_L 比 R_0 还小, 则端电压 V_L 容易随负载电流的变化而显著变化, 很难保持恒压的特性。

对于恒流源也有同样的情况, 即如果负载电阻大, 除非电源的内部电导非常小, 否则在负载上要流过恒定的电流是困难的, 很难保持恒流源的恒流特性。

问题 1.8 试说明有源元件是什么?

解答 象电子管、晶体管或者光电池、发电机等具有产生电压、电流功能的各种元件, 它们可用等效四端网络来表示。这些元件的输出都可以由输入信号的大小来控制 (最简单的情况是输出和输入的大小成正比), 我们把这些元件叫做可变电源 (受控电源、非独立电源等)。

图 1.9 所示的就是这样的可变电源。这四个有源元件有