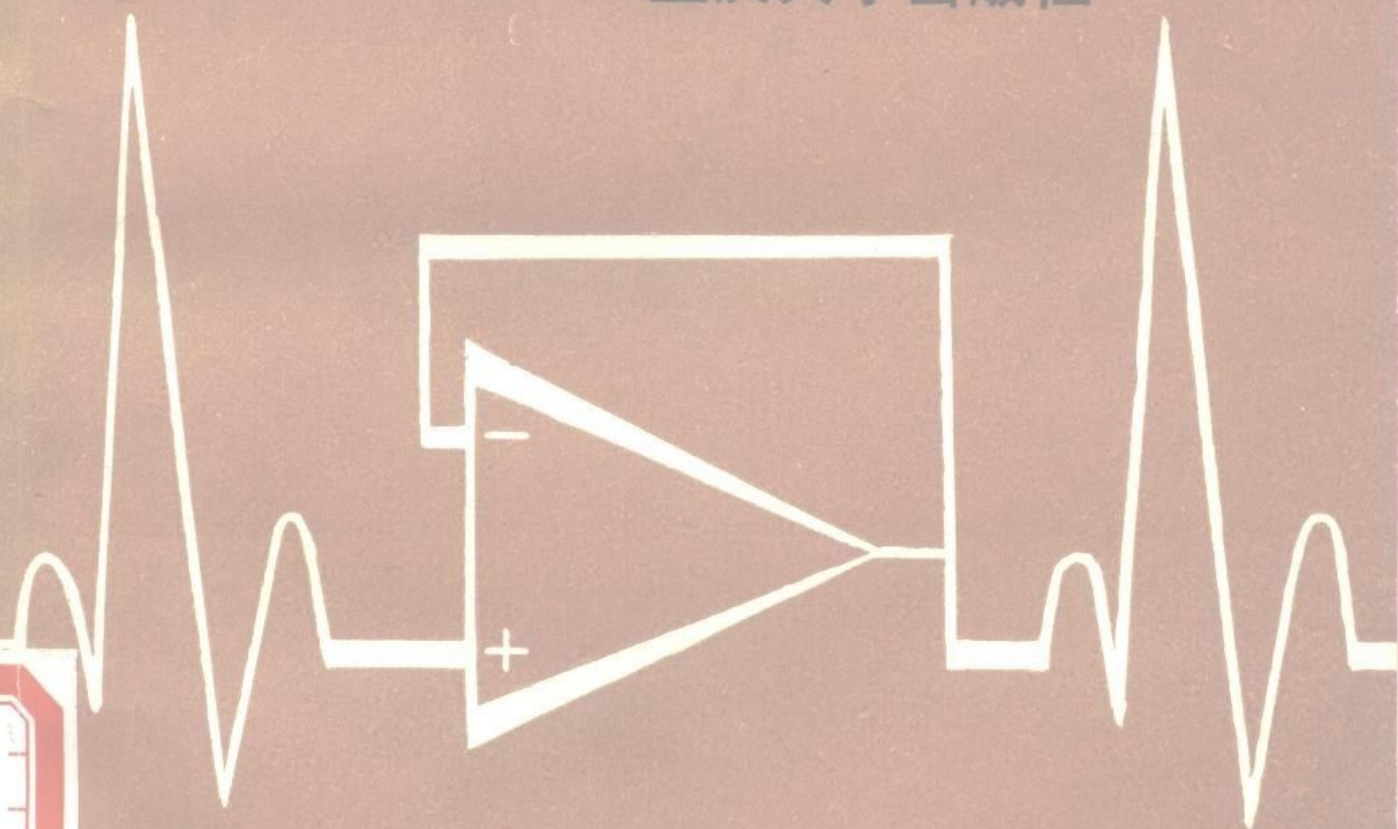


医学电子学

胡国虎 主编

重庆大学出版社



61.53
387

医学电子学

胡国虎 主编

重庆大学出版社

1911252

内 容 简 介

本书分十五章,内容包括电路基础知识、复杂电路的计算、一阶网络的三要素分析法、正弦稳态的相量分析法、晶体管基本放大电路、负反馈与振荡、差动放大电路、功放电路、场效应管放大器、集成运算放大器、逻辑代数、数字集成电路及其应用、读仪器电路图与维修。书中通过各种基本单元电路、实用电路和医用仪器的部分电路;阐述电子技术中基本概念、原理和分析方法;并配有一定数量的实验、例题和习题。

本书可供医药院校各专业作为“医学电子学”课程的教材。也可作为广大医务工作者、医用仪器使用和维修人员的参考用书,以及各种电子技术培训班教材。

医 学 电 子 学

胡 国 虎 主 编
责任编辑 梁 涛

重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆建筑专科学校印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 15.5 字数: 387 千
1989年8月第1版 1989年8月第1次印刷
印数: 1—5000

标准书号: ISBN 7-5624-0172-1 定价: 3.11元
TN·3

前 言

现代电子技术的高速发展,促使工业、农业、国防和医学事业的飞跃前进。电子科学的新理论、新技术、新工艺不断涌现,并广泛渗透到生物医学工程各领域,大大加速了医用电子技术发展的步伐。先进的诊断、治疗、检验和监护新方法,即将取代传统的手工操作,仅靠听诊器诊病的时代已经一去不复返了。近代雷达技术的发展和原子武器的出现,促使了医用超声和核医学技术的发展;特别是70年代以来,现代电子计算机与传统的医用X射线诊断术相结合,产生了“CT断层术”,这是现代医学诊断技术上的重大突破。现代医用电子仪器设备正朝着高灵敏、高精度、高效率、高速度、多功能、自动化方向发展,已经显著地提高了临床诊断和治疗水平。

随着电子科学技术的飞速发展,特别是智能诊断(电子计算机)和各种医诊仪器日新月异的出现,迫使各医学院校先后开设了医学电子学课程,为学生掌握现代电子技术打下良好基础。

重庆医科大学曾受四川省电子学会和四川省《电子报》社委托,自1982年以来连续举办几届“医用电子技术”培训班,本教材是培训班主要教材之一。1984年根据学校开课需要,由胡国虎执笔重新编写了本教材。经该校检验、医学、儿科各系使用,几年来的教学实践取得了一定的经验;同时吸收了兄弟院校同行们使用本教材的宝贵意见,对原来大纲进行了修订,并由重庆医科大学和泸州医学院联合编写成本书。本教材以基础理论为主,同时有理论联系实际的内容。对已经过时的内容和即将淘汰的电子电路尽量少写或不写入教材,注意选取与医学实际有关联的内容和医用仪器电路。对基本概念、单元电路以及对解决实际问题有重要意义的环节着重阐明。从分析电路入手,较系统地计算电路参数,最终目的使学生看、会分析、会计算一般电子电路。教材编写采用开门见山、一目了然、短小精干;语言力求精练、概念正确、深入浅出;公式推导尽量使用简便新颖的方法。为了配合边学边练的环节,教材编写有一定数量的例题和练习题,并附有答案。每章之后也附有与本章内容紧密联系的实验。本教材可供医药院校各系科和专业使用,并可酌情增减。根据教学实践表明,授课时数约72~108学时(包括实验教学在内)。

本书由重庆医科大学吕昌祥主审,重庆医科大学检验系主任康格非审阅了有关结合专业部分的内容。参加编写的同志有:胡国虎(第三、十二、十四、十五章),杨柏森(第五、十三章,并与胡国虎合编第十章),邓必中(第六、八、九、十一章),王学文(第七章),曾照芳(第四章),刘泽民(第一、二章)和李志明(实验教材),最后由胡国虎定稿。在编写中得到华西医科大学、第三军医大学、贵阳医学院和川北医学院同行们以及陈宏同志的大力支持,谨此一并表示衷心感谢。

由于我们水平有限,对先进医用电子技术了解不够,教学实践不多,故书中错误和不当之处有所难免,欢迎批评指正。

编 者

1988.2.

目 录

第一章 电路基础知识	(1)
§1-1 电 源	(1)
§1-2 参考方向 线性电路	(4)
§1-3 电路中各点电位的计算	(5)
习 题 一	(7)
第二章 复杂电路的计算	(8)
§2-1 复杂电路的全解析法——方程组法	(8)
§2-2 复杂电路的部分解析法	(12)
§2-3 复杂电路解析法在计算机电路中的应用	(20)
习 题 二	(22)
实验一 基尔霍夫定律的验证	(24)
实验二 叠加定理和戴维南定理	(25)
第三章 一阶网络的分析——三要素法	(27)
§3-1 电容和电感	(27)
§3-2 三要素法——过渡过程公式	(29)
§3-3 三要素法的应用	(31)
习 题 三	(34)
实验三 电容的充电和放电	(36)
第四章 正弦稳态分析——相量法	(37)
§4-1 正弦交流电	(37)
§4-2 相量法	(39)
§4-3 高通、低通与谐振电路	(47)
习 题 四	(51)
实验四 研究交流电路中的 RLC	(53)
第五章 基本放大电路	(54)
§5-1 晶体二极管和三极管	(54)
§5-2 三极管基本放大电路	(59)
§5-3 放大电路的基本分析方法	(62)
§5-4 三种基本放大电路的比较	(73)
§5-5 阻容耦合多级放大器	(76)
习 题 五	(79)
实验五 晶体三极管的特性曲线	(81)
实验六 单管放大电路	(82)
第六章 负反馈与振荡	(83)
§6-1 负反馈放大器	(83)
§6-2 晶体管正弦振荡器	(89)
§6-3 医学应用举例	(95)
习 题 六	(96)
实验七 两级负反馈放大电路	(98)

实验八 LC 正弦振荡器	(99)
实验九 文氏桥振荡器	(100)
第七章 差动放大电路	(101)
§7-1 直流耦合放大电路	(101)
§7-2 基本型差动放大电路	(102)
§7-3 典型的差动放大电路	(104)
§7-4 医学应用举例	(110)
习 题 七	(110)
实验十 直流差动放大电路	(112)
第八章 功率放大器	(113)
§8-1 普通功率放大器	(113)
§8-2 新型功率放大器	(116)
§8-3 医学应用举例	(119)
习 题 八	(120)
实验十一 功率放大器——OTL 电路	(121)
第九章 场效应管放大器	(122)
§9-1 场效应管	(122)
§9-2 场效应管放大器	(126)
§9-3 医学应用举例	(129)
习 题 九	(130)
实验十二 场效应管差动放大电路	(131)
第十章 集成运算放大器	(132)
§10-1 集成运算放大器的主要技术指标	(132)
§10-2 集成运放的模拟运算电路	(134)
§10-3 模拟运算应用于医学	(142)
§10-4 生理参数的获取与放大	(144)
§10-5 信号波形产生与处理	(148)
习 题 十	(153)
实验十三 集成运算放大器应用(一)	(155)
实验十四 集成运算放大器应用(二)	(156)
实验十五 集成运算放大器应用(三)	(156)
第十一章 直流电源	(158)
§11-1 整流和滤波电路	(158)
§11-2 直流稳压电源	(160)
§11-3 实用稳压电源	(162)
习题十一	(165)
实验十六 可调式稳压电源	(166)
第十二章 逻辑函数及其化简	(167)
§12-1 基本逻辑门	(167)
§12-2 逻辑函数和逻辑图	(172)
§12-3 逻辑代数	(175)
§12-4 卡诺图化简法	(177)
习题十二	(182)

第十三章 数字集成电路	(184)
§13-1 集成门电路.....	(184)
§13-2 触发器.....	(190)
§13-3 不同类型触发器之间的转换.....	(193)
习题十三.....	(195)
实验十七 门电路和触发器.....	(197)
第十四章 数字集成电路的应用	(199)
§14-1 振荡与整形.....	(199)
§14-2 组合逻辑电路.....	(205)
§14-3 时序逻辑电路.....	(212)
§14-4 模拟—数字的相互转换.....	(215)
习题十四.....	(219)
实验十八 多谐振荡器及单稳态触发器.....	(221)
实验十九 计数器.....	(221)
实验二十 门电路应用实验分析.....	(222)
第十五章 读仪器电路图与维修	(224)
§15-1 传感器与电路方框图.....	(224)
§15-2 读仪器电路图.....	(229)
§15-3 电子仪器的一般维修方法.....	(233)
参考资料	(237)

第一章 电路基础知识

电路理论是各种电子技术的基础，因此在学习电子电路之前，有必要介绍电路的基础知识。

§1-1 电 源

由电阻、电容、电感、**电源** (source) 和开关元件 (例如，晶体管、集成电路) 等组成各种各样的**电路** (circuit)。

电荷 (自由电子、离子等) 在电场力的作用下，有规则地定向运动形成电流。电流又分直流和交流。习惯上规定，正电荷运动的方向为电流的流动方向。

电路中所说的**电位** (electric potential) 是相对于公共参考点而言，图 1-1 中 A 点的电位 (对参考点 O) 是 +5V，B 点的电位是 -3V，C 点是 +10V。而 A、B、C 任何两点电位之差称电位差。显然，A 到 B 点的电位差 $U_{AB} = 8V$ 。在电路中，还常使用电压这个名称，它同电位差没有本质区别。实际上，A 点的电位 U_A 就是对参考点 O 的电位差 (电压)，因此电路中所说的电位、电位差和电压，不可能绝对区分开。

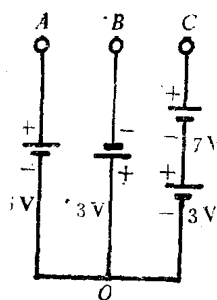


图 1-1 电位和电位差

电流通过导体所受到的阻力，称之电阻。**电导** (conductance) 是衡量导体传导电流的物理量，在数值上等于电阻的倒数，用字母 G 表示，即 $G=1/R$ 。显然，欧姆定律可写为 $I=U/R=GU$ 。

电流的常用单位有安 (A)、毫安 (mA) 和微安 (μA)。它们之间的换算关系是

$$1A=10^3mA \quad 1mA=10^3\mu A$$

电压、电位和电位差的单位一样，常用单位有千伏 (kV)、伏 (V)、毫伏 (mV) 和微伏 (μV)，它们之间的换算关系是

$$1kV=10^3V \quad 1V=10^3mV \quad 1mV=10^3\mu V$$

电阻的常用单位有兆欧 ($M\Omega$)、千欧 ($k\Omega$) 和欧 (Ω)，它们之间的换算关系是

$$1M\Omega=10^3k\Omega \quad 1k\Omega=10^3\Omega$$

电导的实用单位姆欧 ($\mathcal{U}$)。在国际单位制中电导的单位是西门子，简称西 (用符号 S 表示)。

$$1\Omega^{-1}=1S$$

一、电压源和电流源

电源是维持回路中电流流动的能源。电池 (具有电动势和内阻) 是直流电源。电源向外电路既能提供电压，又能提供电流，因此引入电压源和电流源的概念。

理想电压源 (ideal voltage source)：端电压保持定值的电源叫做理想电压源。与电阻元件不同，理想电压源的电压与通过它的电流无关。要满足这一点，理想电压源的内阻必

须恒等于零, 理想电压源的符号和伏安特性如图 1-2 所示。

理想电压源实际上是不存在的, 即使全新电池也存在内阻, 内阻电压降与电流有关, 电流越大, 压降也越大, 端电压就越低, 这就不再具有端电压为定值的特点。在这种情况下, 可以用一个理想电压源 U_S 和内阻 R_S 相串联的模型来表征实际电压源。如图 1-3(a) 所示。从该模型可求得实际电压源端电压 U

$$U = U_S - U_{RS}$$

$$\text{即} \quad U = U_S - IR_S \quad (1-1)$$

实际电压源内阻越小, 就越接近于理想电压源。习惯上, 人们常把理想电压源和实际电压源简称为电压源, 在实际电路中, 仍能区分它们。从式 (1-1) 可以看出, 当 $I = 0$ 时, $U = U_S$, 这就是说电源的开路电压, 正是它所包含理想电压源的端电压值。

例 1-1 电路如图 1-4 所示, $R_{S1} = 1\Omega$, $R_{S2} = 3\Omega$, $U_{S1} = 5V$, $U_{S2} = 3V$, 求 U 。

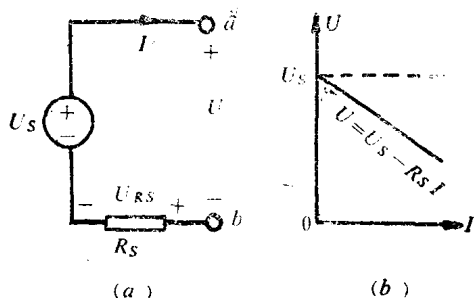


图 1-3 实际电压源

(a) 电压源模型 (b) 伏安特性(实线)

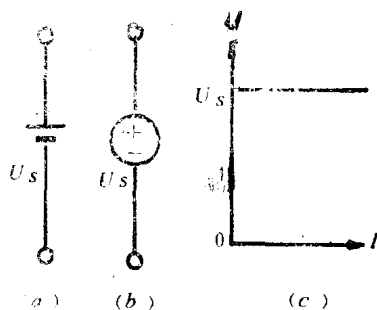


图 1-2 理想电压源

(a) 直流符号(电池) (b) 一般符号
(c) 直流伏安特性

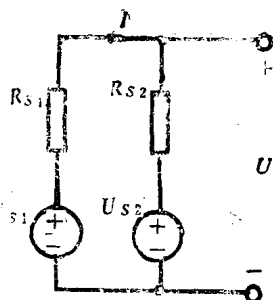


图 1-4 例 1-1 电路图

解 设回路电流为 I , 并联后端电压为 U , 根据欧姆定律可得

$$I = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}} = \frac{2}{4} = 0.5 \text{ A}$$

$$\text{即} \quad U = U_{RS2} + U_{S2} = IR_{S2} + U_{S2} = 1.5 + 3 = 4.5 \text{ V}$$

倘若将两个实际电压源串联起来, 可等效看成一个实际电压源, 该电压源的内阻等于二实际电压源内阻之和, 它所含的理想电压源端电压为二实际电压源中理想电压源之代数和。见图 1-5 所示。

理想电流源 (ideal current source): 理想电压源是端电压恒定 (即内阻为零) 的电源, 流过它的电流大小只取决于外电路。就是说, 理想电压源的端电压与流过它的电流无关。

除此之外, 人们还设想了一种理想电流源。理想电流源是电流为定值的电源, 与它的端电压无关。若能满足这一点, 理想电流源内阻应为 ∞ , 于

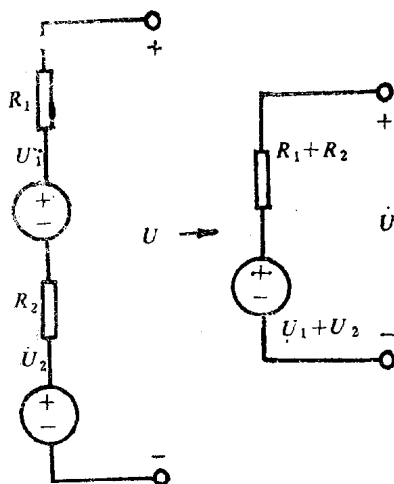


图 1-5 电压源串联

是它的端电压不是由电流源本身确定，而由与之相联接的外电路来决定的。

理想电流源用一个中间带箭头的圆圈表示，箭头即表示该定值电流的方向，用 I_s 表示定值电流，图 1-6 表示理想电流源的符号和直流伏安特性。

然而，象理想电流源那样的实际电源不存在的，实际的电流源可以用一个理想电流源 I_s 和内阻 R_s 相并联的模型来表征，内阻 R_s 表明了电源内部的分流效应，见图 1-7(a)。当电源与外电阻相连接，由图 1-7(b) 可计算出电源往外输送的电流 I 为

$$I = I_s - \frac{U}{R_s} \quad (1-2)$$

实际电流源的内阻越大，内部分流作用就越小，也就越接近于理想电流源。以后，经常把理想电流源和实际电流源都简称为电流源。

例 1-2 电路如图 1-8 所示，求电阻 R 和电流源 I_s 的端电压。

解 电阻 R 的电压降为

$$U_R = I_s R = 2 \times 1 = 2 \text{ V}$$

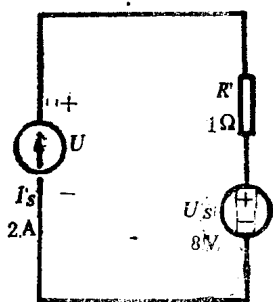


图 1-8 例 1-2 电路图

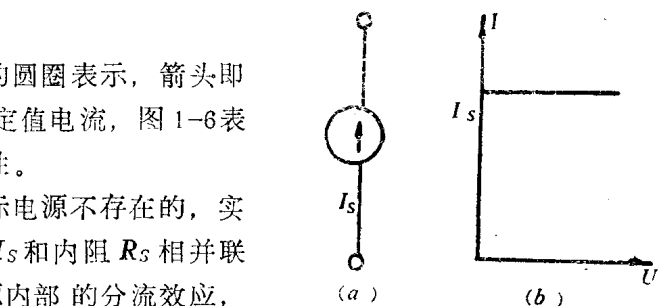


图 1-6 理想电流源
(a)符号 (b)直流伏安特性

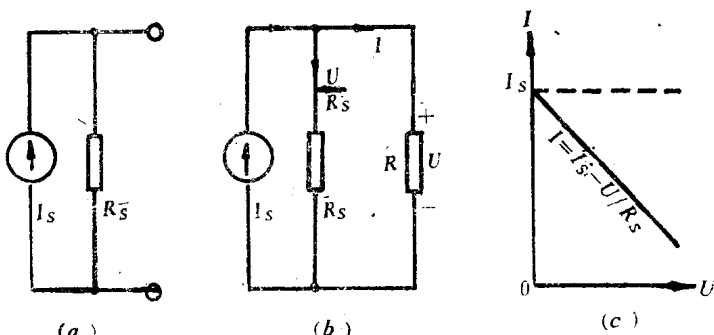


图 1-7 实际电流源
(a)模型 (b)与外电阻相接 (c)直流伏安特性(实线)

电流源两端电压为

$$U = U_R + U_s = 2 \times 1 + 8 = 10 \text{ V}$$

这个例子说明，电流源和电压源串联时，对外电阻是电流源起作用，而电流源的端电压取决于外电路。

二、受控源

电源可分为两类：**独立电源** (independent source) 和**受控源** (controlled source)。电压源和电流源是独立源，它们的电压或电流是定值，或是一定的时间函数；而受控源（又称非独立源或相关电源）的电压或电流却受电路中其他部分的电压或电流的控制。就是说，受控源的电压或电流是电路中其他部分的电压或电流的函数。受控源有输入和输出两对端钮，施加于输入端的控制量（电压或电流，能够控制输出电压或电流的大小）。显然，有四种可能的受控源，如图 1-9 所示，受控源用菱形符号表示。

受控源主要用来模拟某些电子器件的内部控制过程。在后面晶体管电路学习中会看到在交流小信号工作条件下的晶体三极管和场效应管等，可以用电阻及受控源来模拟。中学物理学已经学过，晶体三极管的集电极电流 I_c 受基极电流的控制，并满足 $I_c = \beta I_b$ 关系，即输出电流受输入电流的控制。因此，晶体三极管，如图 1-10(a) 所示，可用电流控制的电流源模拟，如图 1-10(b) 所示。

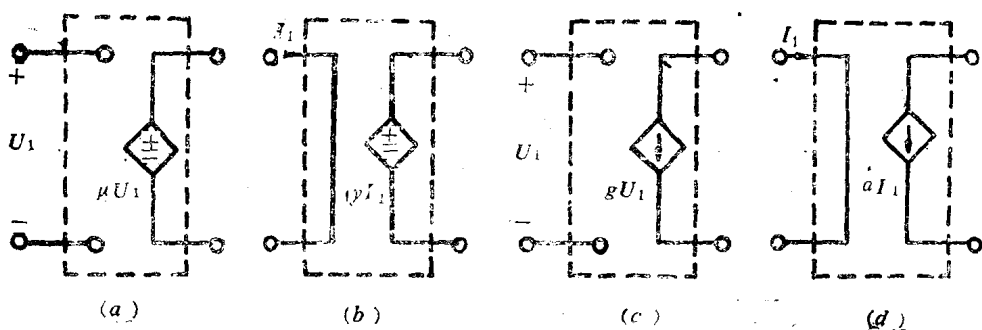


图1-9 受控源

(a)电压控制电压源 (b)电流控制电压源 (c)电压控制电流源 (d)电流控制电流源

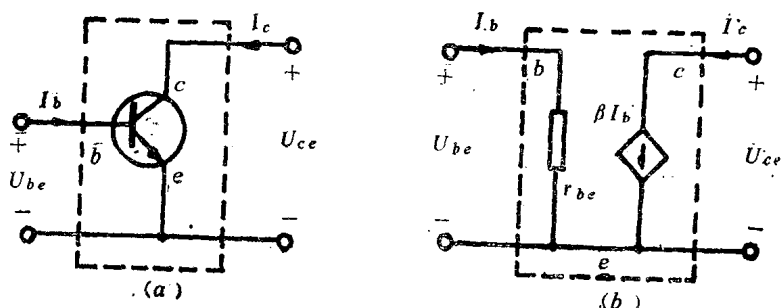


图1-10 晶体三极管的小信号等效电路

(a)晶体三极管 (b)电流控制的电流源

§1-2 参考方向 线性电路

一、参考方向和参考极性

用万用表测电路中的电流和电压时，稍为粗心大意，就会使表针反偏转，无法读得正确值。只要将二表笔对换就能使表针正偏转，从而读得真实的电流、电压值。这就说明，开头测量是假设了电流方向、电压极性，表针偏转说明这种假想的东西也可能与真实情况相同，这种设想只具有参考意义。

在实际电路中，电流的真实方向和电压的真实极性往往难以在电路图中标出，在交流电路和以后求解较复杂电路更是如此。为了解决这样的困难，于是引用**参考方向** (reference direction) 这一概念。电路中，电流的参考方向可以任意选定，在电路图里用箭头表示，如图1-11(c)所示。规定如果电流的真实方向与参考方向一致，电流为正值；如果两者相反，电流为负值。这样，就可利用电流的正负值结合着参考方向来表明电流的真实方向。今后，电路图中所标的电流箭头方向，不一定就是电流的真实方向。电流的参考方向又叫电流的正方向。

电流需要规定参考方向，电压也需要规定参考极性。电流的参考方向用箭头表示，电压的参考极性则在元件或电路的两端用“+”“-”符号表示，“+”号表示高电位端，“-”表示低电位端，如图1-11(b)所示，图中的方框代表一个元件或一段电路。一般规定，如果

电压 U 为正值时, 则此电压的真实极性与所标的参考极性相同; 如果电压 U 为负值时, 则此电压的真实极性与所标的参考极性相反。值得注意的是, 在未标示电压参考极性和电流的参考方向的情况下, 电压的正负和电流的方向都是毫无意义的。电压的参考极性也可称为电压参考方向或正方向。

根据上述在分析电路时, 必须为通过元件的电流假设参考方向, 又要为元件两端的电压假设参考极性。为了简便, 人们常采用关联的参考方向, 认为电流参考方向与电压参考 (“+”极到“-”极) 方向应该一致, 即电流与电压降参考方向保持一致, 如图 1-11(a) 所示。因此, 以后在电路图上就只需标出电流的参考方向或电压的参考极性中任何一种就行了。如图 1-11(b)、(c) 所示。

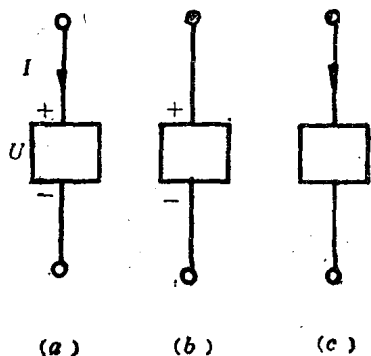


图 1-11 关联参考方向

二、线性和非线性电路

按照电路元件上电流与电压的关系, 可将元件划分为**线性 (linear)** 元件和**非线性 (non-linear)** 元件两大类, 线性元件是指元件的端电压与流经元件的电流之间的数学表示式为线性代数方程或线性微分方程式。全部由线性元件构成的电路称线性电路。

人们常说的电阻 R 、电容 C 、电感 L 就是线性元件, 因为 R 、 C 、 L 的值不随时间变化, 又可称为线性定常元件。

例如: 线性电阻器满足欧姆定律。

$$U = R \cdot I$$

对 t 时刻, 上式仍然成立。即

$$U(t) = R \cdot I(t)$$

与此相对应, 非线性元件的定义要广泛得多, 通常人们把 $U-I$ 之间的数学表示式不是线性关系的元件, 都称为非线性元件。例如晶体二极管的伏安特性说明它是非线性元件。如果电路中包含一个以上的非线性元件, 则称为非线性电路。

§1-3 电路中各点电位的计算

在电路的分析计算中, 特别是在电子电路中, 常常需要计算电路中某点到任选的一个“参考点”的电压降, 这就是该点电位。计算电路中任两点之间的电位差 (即电压) 更为频繁。求电位、电位差都是指两点间的电压降之代数和, 只是前者对选定的某一参考点而言, 参考点又叫“零电位点”, 工程上一般选大地作为参考点, 即认为地为零电位。在电子电路中则常选一条特定的公共线作参考点, 很多元件的一端要汇集于公共线上, 该线与机壳相联接, 这条线人们也称“地线”。所以, 电子电路中的参考点用接机壳符号 “⊥” 表示。必须指出, 在电路图中不标定参考点而谈论电位是没有意义的。

如何计算电位差 (即电压)、电位呢?

求电路中任意两点 (如 A 点和 B 点) 间的电位差 U_{AB} , 就是计算从 A 点到 B 点 (与所选路径无关) 之间各电压降之代数和, 符号规定为从 A 到 B 路径中, 电压降取正, 电压升取

负。如果把 B 点选为参考点, 那末 U_{AB} 可写成 U_A , 它表示电路中 A 点的电位。

例1-3 如图1-12所示, $R_1=9\Omega$, $R_2=6\Omega$, $U_{S1}=10V$, $U_{S2}=25V$, 求 U_{AB} 。

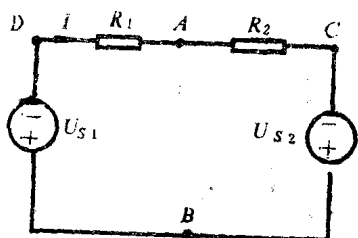


图1-12 例 1-3 电路图

解 设电流为 I , 参考方向如图中所示, 因为

$$U_{AB} = -U_{R1} - U_{S1} = -IR_1 - U_{S1}$$

其中
$$I = \frac{U_{DC}}{R_1 + R_2} = -\frac{U_{S1} + U_{S2}}{R_1 + R_2} = 1 \text{ A}$$

所以
$$U_{AB} = -1 \times 9 - 10 = -19 \text{ V}$$

如果从 A 到 B 选另一条途径, 则

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_{R2} - U_{S2} = IR_2 - U_{S2} = 1 \times 6 - 25 \\ &= -19 \text{ V} \end{aligned}$$

由此说明, 求电路中任意两点间的电压值, 仅与始末两点有关, 而与所选路径无关。

电子电路的习惯画法: 在以后章节中会看到, 电子电路中的电源、信号输入和信号输出的公共端接在一起作为参考点(通称接地)。习惯上, 电子电路中的电源不再用电池或电压源符号表示, 而改为标出其电位的极性和数值。按照这种画法, 凡接到参考点的电压源一端不在电路图中标出, 而电压源的另一端极性(正或负)及其电压源的数值一道标于电路图上, 如图1-13(b)所示。

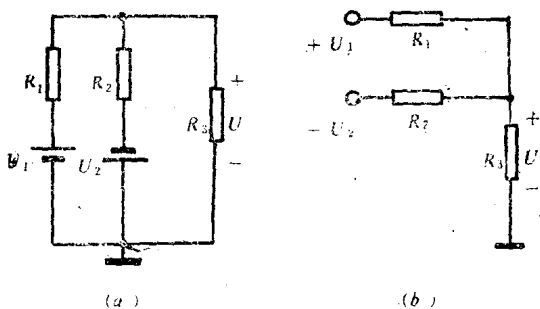


图1-13 电路的习惯画法

例1-4 如图1-14所示, 求 U_a 、 U_b 和 U_{ab} 。

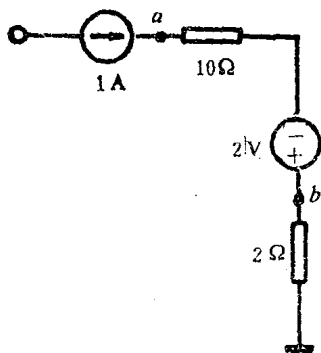


图1-14 例 1-4 电路图

解 显然, 通过固定两只电阻的电流是电流源提供的。

因此

$$U_b = 1 \times 2 = 2 \text{ V}$$

$$U_a = 1 \times 10 - 2 + 1 \times 2 = 10 \text{ V}$$

$$U_{ab} = 1 \times 10 - 2 = 8 \text{ V}$$

分压和分流: 在图1-15(a)分压电路中, 总电压 U 的(部)分电压 U_1 、 U_2 可写为

$$U_1 = IR_1 = \frac{U}{R_1 + R_2} R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$$

同理
$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$$

由此可知, 在 n 只串联电阻与总电压 U 组成的串联电路中, 第 i 只电阻上的分电压(电压降) U_i 应为

$$U_i = \frac{R_i}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} U \quad (1-3)$$

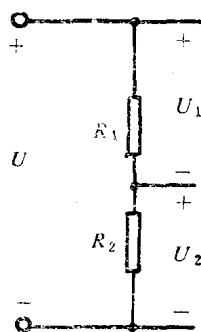
在图1-15(b)分流电路中, 总电流 I 被分为两个分支电流 I_1 和 I_2 , 分支电流与总电流的关系为

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{I \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)}{R_1}$$

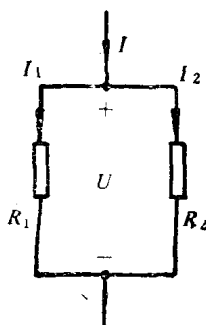
$$= \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

同理 $I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$ (1-4)

分压公式(1-3)和分流公式(1-4)广泛用于电子电路的计算。



(a)



(b)

图1-15 分压和分流电路
(a)分压电路 (b)分流电路

习 题 一

- 1-1 理想电压源和电源电动势有何相同点和不同点。
- 1-2 电位、电位差、电压三个电学量有何区别？如何计算。
- 1-3 参考极性、参考方向和关联方向三者有何关系。
- 1-4 电压源、电流源和受控源有何区别。
- 1-5 比较分压和分流公式。
- 1-6 在图1-7(b)中, $R_5=3\Omega$, $R=6\Omega$, $U=6V$, 求 I 和 I_5 。 [1A; 3A]
- 1-7 某一电路由 10 只 90Ω 电阻与 1 只 1Ω 电阻相并联而成, 如果 1Ω 电阻通过的电流为 9A, 求每只 90Ω 电阻通过的电流和并联电路的总电流。 [0.1A; 10A]
- 1-8 在图 1-12 电路中, 选择 C 为参考点, 求 U_B 、 U_A 、 U_D 、 U_{AD} 、 U_{CD} 。 [25V; 6V; 15V; -9V; -15V]
- 1-9 阻值为自然数 1Ω 、 2Ω 、 $\dots$ 、 101Ω 共计 101 只电阻相串联, 该电阻串联电路的总电压为 1V, 求中间电阻 51Ω 上的电压降。 [0.0099V]
- 1-10 求图 1-16 电路中 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 和 U_2 、 U_3 、 U_4 。 [15A; 5A; 10A; 7.5A; 2.5A; -90V; -60V; 30V]

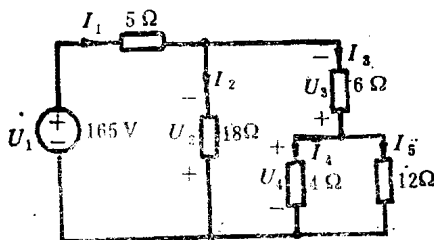


图1-16 习题 1-10 电路图

第二章 复杂电路的计算

在中学物理学中,大家已经熟悉了由串、并联组成的简单电路的求解方法,本章着重讨论复杂电路的解析方法。

什么是**复杂电路**(complex circuit)呢?就是指那些包含有非串联也非并联成份的电路。复杂电路的分析方法适合于任何线性电路。在实际电路分析中,有时需要对电路全面求解;也有时仅需要求解一、二个支路(branch)的电压或电流,所以对它们采取的分析方法也可以不同。

§2-1 复杂电路的全解析法——方程组法

一、基尔霍夫定律(Kirchhoff's law)

这是一种以支路电流为求解对象的线性网络分析法,运用基尔霍夫两个定律列出足够的独立方程。解方程组就能求出各支路电流,如有必要,还可进一步求出各支路电压。因物理学中已经详细讨论,故简述如下:

基尔霍夫第一定律:对于电路中任一节点(即三条或三条以上支路的会合点)来说,任何时刻流入该节点的电流等于流出该节点的电流,用数学式表达为

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (2-1)$$

如果规定流入节点的电流为正,流出节点的电流为负,则

$$\sum I = 0 \quad (2-2)$$

即节点处,电流的代数和等于零,称为基尔霍夫第一定律,又叫基尔霍夫电流定律。

基尔霍夫第二定律:在任一时刻,沿闭合回路电压降的代数和为零。即

$$\sum U = 0 \quad (2-3)$$

基尔霍夫第二定律又称为基尔霍夫电压定律,它很容易从求电路中任一点对自己的电位差为零来论证。

在具有 b 条支路和 n 个节点的线性电路中,以支路电流为求解量,应用基尔霍夫电流定律列出 $(n-1)$ 个独立节点方程;再根据基尔霍夫电压定律列出 $b-(n-1)$ 个独立电压方程,所以总共列出 b 个独立方程,解方程组就能求出 b 条支路电流的值,还可相应求出各支路电压值。因此,基尔霍夫定律是一种能完全解析一个线性网路的一般方法。这种方法,不管求解一条支路电流或所有支路电流,都必须列出所有的独立方程,方程个数等于支路条数。然而,求解这些方程组是十分困难的。因此,它常用于公式推导和较简单的线性网路计算。

例2-1 在图2-1电路中,已知 $U_{S1}=4V$ 、 $U_{S2}=6V$ 、 $R_1=2\Omega$ 、 $R_2=4\Omega$ 、 $R_3=1\Omega$,试求各支路电流。

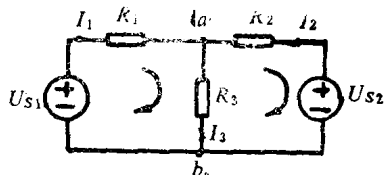


图2-1 例2-1电路图

解 该电路共有两个节点，故可列出一个电流定律方程，设在 a 点列方程，则得

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

为求解三个未知量还需列两个电压定律方程。设选该电路的两个网孔（即最小闭合途径）为独立回路，并以顺时针方向为绕行方向，代入已知条件可得

$$2I_1 - I_3 - 4 = 0$$

$$I_3 - 4I_2 + 6 = 0$$

求解联立方程组可得 I_1 、 I_2 和 I_3 。求解时，可以用代入消元法，加减消元法或行列式法。

求解得出 $I_1 = 1\text{A}$ ， $I_2 = 1\text{A}$ ， $I_3 = -2\text{A}$

最后，可根据未曾用过的回路列电压定律方程对答案进行校核。必须指出，基尔霍夫电流定律 $\sum I = 0$ ，不仅适合于线性电路，也适合于非线性电路，不仅应用于节点，也可推广运用于任一假设的封闭面，即流入封闭面的电流等于流出封闭面的电流。

例2-2 求图 2-2(a)、(b)所示电路中 I_e 和 I_3

解 图2-2(a)是求解晶体三极管的发射极电流 I_e ，将三极管用一封闭面包围起来（如虚线所示），则

$$I_e = I_c + I_b = 1.01\text{A}$$

同理，图2-2(b)中 $I_3 = I_1 - I_2 = 0.5\text{A}$

二、网孔分析法

基尔霍夫定律能够全解任何线性网路问题。然而，当电路包含支路较多时，联立方程数也较多，求解就很麻烦，因此需要研究如何减少联立方程数目的办法。其实，例 2-1 中无需列三个方程，它的任何一条支路电流都可从其他两条支路电流得到（如 $I_1 = -I_2 - I_3$ ），由此说明，可以丢掉节点方程，只列出两个回路电压方程就足够了，这就是建立网孔分析法的指导思想。

在回路内部不含有支路的回路叫做网孔（mesh）、网孔是人们最容易识别的一些小闭合途径。求解电路时，设想在电路的每个网孔里有假想的网孔电流沿着网孔的边界流动，并且以这些网孔电流作为直接求解对象（称为求解量），则联立方程的数目就可以减少，一旦求得了网孔电流，所有的支路电流也可以随之求得。

将前面讨论过的图2-1，画成图2-3的形式，讨论网孔法的求解方法。

在图 2-3 所示电路中，有两个网孔，设沿 R_1 、 R_3 、 U_{S1} 顺时针流动的网孔电流为 I_1 ，沿

R_3 、 U_{S2} 、 R_2 反时针流动的网孔电流为 I_2 。显然，二网孔电流就是图 2-1 中相对应的两个支路电流。因此，作为求解量的网孔电流是完备的，所谓“完备”就是所有的支路电流(电压)都可由它进一步求出。

用网孔分析法计算电路时，对于平面电路，均按网孔设回路电流。在列方程时，把网孔电流

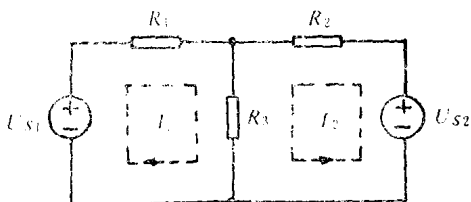


图2-3 网孔电路图

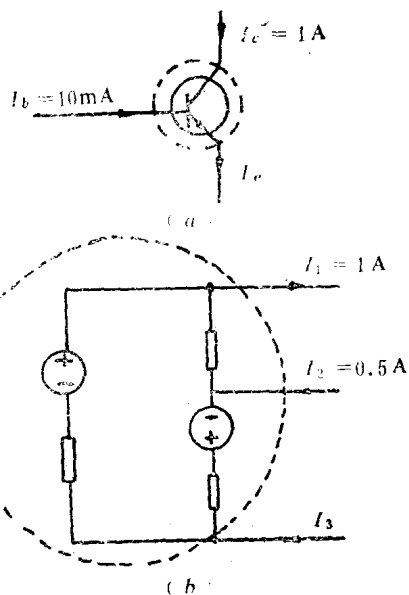


图2-2 例 2-2 电路图

任一标定的参考方向作为列方程的绕行方向。把电压定律和欧姆定律相结合, 列出以网孔电流为求解量的基尔霍夫电压定律方程组。根据以上所述, 由图2-3电路可得

$$R_1 I_1 + R_3 I_1 + R_3 I_2 - U_{S1} = 0$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_2 + R_3 I_1 - U_{S2} = 0$$

以上二式经过整理可得网孔方程

$$(R_1 + R_3) I_1 + R_3 I_2 = U_{S1} \quad (2-4)$$

$$R_3 I_1 + (R_2 + R_3) I_2 = U_{S2} \quad (2-5)$$

如果已知各电压源电压及电阻, 就可解出网孔电流 I_1 和 I_2 。列网孔方程有何规律呢? 以下讨论第一个网孔方程

$$(R_1 + R_3) I_1 + R_3 I_2 = U_{S1}$$

上式中 $(R_1 + R_3)$ 是第一个网孔的总电阻, 称为第一网孔的自电阻。 R_3 又是第一网孔与其它网孔的公共电阻, 称之互电阻。等式左端压降项的正或负也有规律, 任何网孔自电阻的压降项必然为正, 这是因为把网孔电流的方向作绕行方向(正方向)的必然结果。互电阻压降项的正或负, 取决于流过互电阻的二网孔电流方向是否一致。一致时取正, 否则取负。等式右端为该网孔中全部的电压源所引起的电压升的代数和, 即顺着网孔电流的绕行方向, 电压源为电压升取正, 电压降取负。

例2-3 用网孔分析法求解例2-1。

解 例2-1的电路图2-1在前面用基尔霍夫求解时, 列了三个方程, 因它只有两个网孔, 故用网孔分析法列两个方程求解就足够了, 由于图2-3电路就是图2-1电路, 并已得到网孔方程式(2-4)和式(2-5), 代入其电阻和电压源数值, 化简得

$$3I_1 + I_2 = 4$$

$$I_1 + 5I_2 = 6$$

求解得 $I_1 = 1\text{A}$ 、 $I_2 = 1\text{A}$

利用求得的网孔电流, 可算出图2-1电路中通过 R_1 、 R_2 和 R_3 的支路电流分别为 1A 、 1A 和 -2A 。

校核: 用网孔分析法时, 不能用电流定律来校核, 因为各支路电流就是从各网孔电流相加减而求得的, 它们自动满足电流定律, 应该用电压定律来校核。

例2-4 求图2-4电路中 $I = ?$

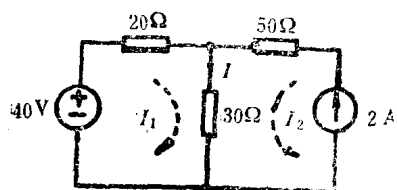


图2-4 例2-4电路图

解 本题电路含有电流源。电流源电流就是该支路电流; 沿电流源方向设网孔电流, 显然网孔电流就等于电流源电流, 当然也是含电流源的支路电流, 故第二个网孔方程

$$I_2 = 2\text{A}$$

$$\text{网孔方程} \quad 50I_1 + 30I_2 = 40$$

$$I_2 = 2$$

解得

$$I_1 = -0.4\text{A}$$

故

$$I = I_1 + I_2 = 1.6\text{A}$$

三、节点分析法

网孔分析法用于网孔个数少于独立节点个数的电路较简便。然而, 有不少电路独立节点个数少于网孔个数, 这时节点分析法成为一种较简便方法。节点分析法是以“节点电位”作