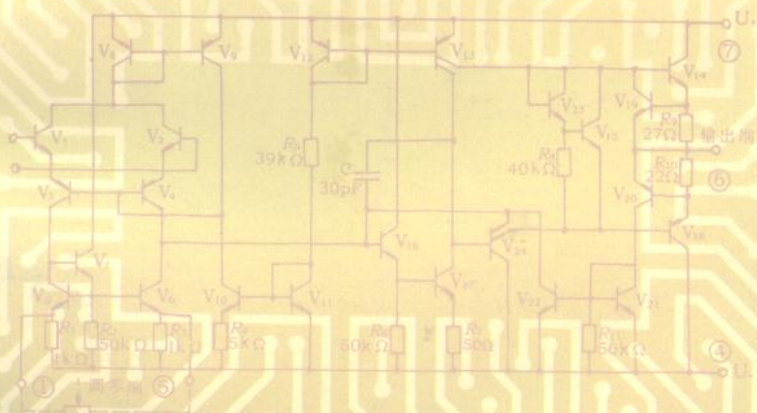


电路与模拟电子技术

石人珠 戚火彬 编著



同济大学出版社

内 容 提 要

本书由“电路理论”和“模拟电子技术”两部分组成。

电路理论内容包括:电路的基本概念和基本定律、定理,电阻电路计算,交流正弦和非正弦周期电流电路的稳态分析,以及一阶 RC 电路和 RL 电路的暂态响应。模拟电子技术部分的内容包括:半导体基础知识,电子元件,单管放大电路,直耦放大电路,多级放大电路和负反馈放大电路,集成运放及其应用,波形发生与变换,以及其他通用模拟集成电路如集成稳压器、变跨导模拟相乘器等。

本书适用于介于电类与非电类之间的专业(如计算机专业)的本科生使用。

责任编辑 郑元标
封面设计 李淑云

电路与模拟电子技术

石人珠 戚火彬 编

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号 邮编 200092)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:13.75 字数:400千字

1998年4月第1版 1998年4月第1次印刷

印数:1—3000 定价:11.50元

ISBN 7-5608-1802-1/TP·30

目 录

第一篇 电路理论基础

第一章 电路的基本概念和基本定律	(3)
1-1 电路组成和功能	(3)
1-2 电路的基本物理量	(4)
1-3 元件模型和电路模型	(13)
1-4 欧姆定律和基尔霍夫定律	(28)
习题	(33)
第二章 电阻电路的分析方法	(37)
2-1 电路的等效变换	(37)
2-2 戴维南定理和诺顿定理	(45)
2-3 叠加原理	(51)
2-4 支路电流法	(55)
2-5 节点电压法	(57)
习题	(59)
第三章 正弦交流电路	(67)
3-1 交流电的基本概念	(68)
3-2 交流电的有效值	(74)
3-3 正弦交流电的相量表示法	(77)
3-4 电阻元件的交流电路	(84)
3-5 电感元件的交流电路	(87)
3-6 电容元件的交流电路	(93)
3-7 电阻、电感和电容串联的交流电路	(97)
3-8 功率因数的提高	(109)
3-9 谐振电路	(113)
3-10 一般正弦交流电路的分析与计算	(121)

习题	(127)
第四章 非正弦周期电流电路	(134)
4-1 非正弦周期电流的产生	(134)
4-2 非正弦周期函数分解成傅里叶级数	(136)
4-3 非正弦周期量的有效值和平均功率	(140)
4-4 非正弦周期电流电路的计算	(143)
习题	(145)
第五章 电路暂态过程分析	(149)
5-1 电路暂态过程概述和换路定律	(149)
5-2 RC 电路的阶跃响应	(154)
5-3 一阶线性电路暂态分析的三要素法	(164)
5-4 RC 电路的矩形脉冲响应	(168)
5-5 RL 电路的阶跃响应	(175)
习题	(179)

第二篇 模拟电子技术基础

第六章 半导体分立器件	(189)
6-1 半导体基础知识	(189)
6-2 半导体二极管	(194)
6-3 整流电路	(199)
6-4 滤波电路	(206)
6-5 稳压管和稳压电路	(213)
6-6 双极型晶体管	(216)
6-7 场效应晶体管	(228)
习题	(240)
第七章 单管交流放大电路	(244)
7-1 放大概述	(244)
7-2 基本共射电路	(245)
7-3 工作点稳定的实用共射电路	(257)

7-4 共集(射极输出)电路	(264)
7-5 共基电路	(267)
7-6 场效应管放大电路	(268)
7-7 放大电路的频率特性	(276)
习题	(284)
第八章 直耦放大电路	(287)
8-1 直耦电路的漂移现象	(287)
8-2 差动放大电路	(288)
8-3 直耦功率放大输出级电路	(300)
习题	(308)
第九章 多级放大和反馈放大电路	(310)
9-1 多级放大电路	(310)
9-2 反馈放大电路	(313)
习题	(327)
第十章 集成运放及其应用	(328)
10-1 集成运放	(328)
10-2 运放的线性应用	(335)
10-3 运放的非线性应用	(353)
10-4 运放应用中的一些实际问题	(364)
习题	(372)
第十一章 波形发生和变换	(377)
11-1 正弦波发生器	(377)
11-2 非正弦波发生器	(389)
11-3 波形变换	(396)
习题	(399)
第十二章 其他通用模拟集成电路应用	(402)
12-1 集成稳压器的应用	(402)
12-2 电流型和跨导型集成运放	(413)
12-3 变跨导模拟乘法器	(420)

习题.....	(426)
习题答案.....	(428)

第一篇

电路理论基础

第一章 电路的基本概念和基本定律

本章主要介绍电路的组成、功能和电路基本物理量,特别提出了各种物理量的一致参考正方向。本章从基本物理量的完备关系的观点出发,提出并着重分析了四种基本元件模型。最后介绍了基尔霍夫两条定律,并且进一步阐述了对基尔霍夫定律的本质理解。

1-1 电路组成和功能

大家知道,要点亮一盏照明灯,必须从电源、开关到灯泡,用导线将它们连接成一条通路,合上开关,通路中有电流流过时灯泡就点亮了(见图 1-1)。如果需要起动一台电动机,也必须将电源、开关、起动设备、保护装置和电动机等设备,用导线连接成通路,合上开关,按下按钮后,有电流流过通路,电动机就起动了。可见,实际电路是电流的通路,是由一些电气设备和电器件,为达到一定的功能要求按一定的方式连接起来的实际装置。

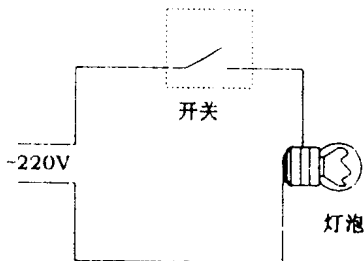


图 1-1 实际电路的例子

实际电路的形式是千变万化的,但基本组成不外乎三大部分:电源、负载(灯泡、电动机等)以及从电源到负载之间的中间环节。在上面两个例子中,开关、导线、起动设备和保护装置等是中间环节。对于更为复杂的电路,中间环节可能是很复杂的系统。

显然,电源是产生电能的器件,例如发电机、各类电池等,它们把机械能、热能或化学能等转变成电能。负载是取用电能的器件,它们把电能转换成光能、机械能和热能等。中间环节则起到了传输和分配电能的作用。所以说,电路的第一个功能是完成能量的转换和传输。

电路的第二个功能是执行信号的传递和处理。例如收音机和电视机,它们的接收天线接收到载有声音和图像信息的电磁波后,将其转换成相应的电信号送到后级的各相应电路部分进行调谐、变频、检波和放大等一系列处理,最后传递到扬声器和显像管,把电信号还原成声像信息。

1.2 电路的基本物理量

为了描述和分析电路的工作情况,需要引出一些物理量:电荷、电流、磁通、电压、电位、电动势、电功和电功率等。早在物理学里,我们就接触过这些物理量,这里再来介绍,是想从电路理论的角度,强调这些物理量对电路的本质描述,建立它们之间的关系,并说明各量的一致正方向的概念和功率正负号的意义。

一、电荷与电流

物体经摩擦后能吸引其他轻小物体,我们就说物体带了电,或有了电荷。电荷有两类,一类为正电荷,另一类为负电荷。从物质结构来看,电子是最小的带电粒子,它所带的电荷 e (负电荷) 是电荷的最小单元,而原子核内的质子带等量正电荷。

电流是电荷在电场的作用下规则的定向移动。度量电流大小的物理量称为电流强度,用符号 i 表示。电流强度定义为在单位时间内通过某导体截面的电荷量,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

式中, dq 是时间 dt 内通过的电荷量。电流强度简称电流。所以, 电流既表示一种物理现象, 又表示对这种物理现象的度量。

在国际单位制(SI)中, 电量的单位为库仑(C)。电子、质子所带的负、正电荷量为 $(1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19} \text{C}$ 。如果在 1 秒(s)时间内流过某导体截面的电荷是 1 库仑(C)的话, 该电流(强度)为 1 安培(A)。

电学上规定正电荷的运动方向为电流的实际方向, 简称电流的流向。习惯上电流的流向又常称为电流的方向。

如果电流的大小和方向随时间作周期性变化且在一个周期内平均值等于零, 则称为交流电流。常见的交流电流有正弦交流电流, 它随时间作正弦律变化, 我们将在第三章中专门讨论正弦交流电路。

如果电流不随时间而变化, 其大小和方向始终保持恒定, 称为直流电流或恒定电流。直流电流常用大写字母 I 表示, 这时, 式(1-2-1)应改写为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2-2)$$

直流是交流的一种特殊情况。

在简单的直流电路中, 可以容易地直接确定电流的方向, 见图 1-2。但是, 在大多数情况下, 很难预先判定电流方向, 特别在交流电路中, 电流的方向是随时间而改变的。在这种情况下, 可以事先任意假定电流的正方向, (对于交流电路来讲, 是任意假定某一瞬间电流的正方向)或称为参考方向。

根据假定的电流正方向列出电路方程, 求得的电流是个代数量, 不仅有大小(表示电流的强度), 还有正负号(表示电流的实际方向)。当电流为正时, 说明电流的实际方向与假定正方向一致, 当电流为

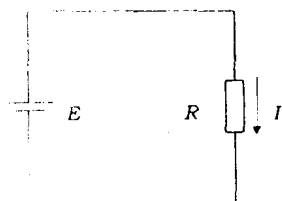


图 1-2 电流的实际方向

负时,电流的实际方向与假定正方向相反,参见图 1-3。



(a) 当 $I > 0$, 实际方向与正方向一致 (b) 当 $I < 0$, 实际方向与正方向相反

图 1-3 电流的正方向(实线)和实际方向(虚线)



图 1-4 电流正方向的标示方法

电流的正方向可在电路中用箭标表示,并标出电流的名称,或者在一段电路的两端标以英文字母,并以相同的英文字母作为电流的双下标。电流的正方向

从第一个字母端流向第二个字母端,见图 1-4。用箭头加字母 i 表示电流的正方向,等效于电流 i_{ab} 所表示的意思。

二、电位、电压与电动势

1. 电位与电压

电荷周围存在着电场,电场对电场内的其他电荷有力的作用。电荷在电场力的作用下作定向运动而形成电流,这时电场力对电荷作了功。可见电场内部蕴藏着能量。由于电场力是一种保守力,电场内部蕴藏着的是电位能,或称电势能。我们用某点电位(或称电势)来度量单位正电荷在该点所具有的电位能。它在数值上等于电场力将单位正电荷沿任意路径从该点移到参考点所作的功。如 a 点的电位记作 v_a 。用两点间的电压这个概念来度量单位正电荷在该两点所具有的电位能之差,它在数值上等于电场力将单位正电荷沿任意路径从一点(例如 a 点)移到另一点(例如 b 点)所做的功,记作 u_{ab} ,显然有

$$u_{ab} = v_a - v_b \quad (1-2-3)$$

而电路中任意一点的电位,就是该点与参考点之间的电压。这就是电压与电位两者之间的联系,它们本质上都是功和能的概念。另一方面,电位与电压是有区别的:讲电位,特别要强调参考点的选择,并规定参考点电位为零,电路中某点的电位可因为参考点选择不同而有不同的值;而电压则与参考点无关。参考点原则上可以任意选取,但工程上通常选择大地为参考点,电路中用符号“ $\perp$ ”表示;在电子技术中则选择若干导线连接的公共点或机壳作参考点,电路中用符号“ $\perp$ ”表示。

根据定义,有

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-2-4)$$

式中, dq 为由 a 点移到 b 点的电荷变化量,单位为库仑(C); dW 为电荷 dq 在移动过程中电位能的变化量,也就是电场力对电荷 dq 所做的功,单位是焦耳(J); u_{ab} 为电压,单位是伏特(V)。

2. 电动势

在图 1-5 中, ab 是个电源,它的两个电极分别带有正负电荷。正电荷在电场力的作用下沿外电路由高电位端 a 移向低电位端 b ,使 ab 两极之间的电位差逐渐减小降低为零,而电流也逐渐减小为零,正电荷本来所具有的电位能则消耗在负载(灯泡)上。

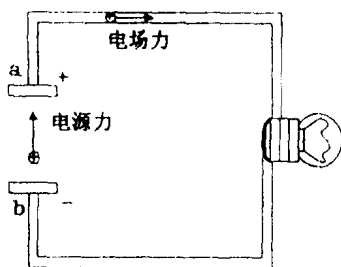


图 1-5 电场力和电源力作功

要使电路维持持续电流,必须将到达 b 极的正电荷运送到 a 极。电源就是这样一种装置,它所具有的电势,能克服电源内部电场阻力,将电荷源源不断地从低电位端运送到高电位端,消耗了自身所具有的非电能(如机械能、化学能等),转化为电荷的电位能。为了衡量电源的这种能力,

引出电动势这一电量,它定义为:电源力把单位正电荷从电源的低电位端经由电源内部移到高电位端所做的功,也就是单位正电荷所获得的电位能。显然,电动势与电压有相同的单位。

如果电动势和电压的大小和方向随时间作周期性变化且在一个周期内平均值等于零,则称为交流电动势和交流电压,用小写字母 e 和 u 表示。例如正弦交流电动势和正弦交流电压,它们随时间作正弦律变化。如果电动势和电压不随时间变化,其大小和极性始终保持恒定,称为直流电动势和直流电压,或恒定电动势和恒定电压,用大写字母 E 和 U 表示。

3. 正方向(参考方向)问题

电压和电动势都有方向问题,习惯上将电压的实际方向(简称电压的方向)定义为从高电位端指向低电位端,即电位降低的方向,而将电动势的实际方向(简称电动势的方向)定义为电源内部从低电位端指向高电位端,即电位升高的方向,正好与电压相反。由此可见,对同一个电源,按实际方向,用其电动势 e 表示,或用其端电压 u_s 表示,见图 1-6 所示,有关系

$$u_s = e \quad (1-2-5)$$

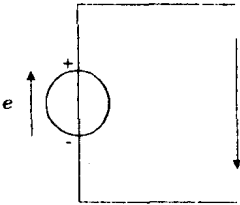


图 1-6 e 与 u_s 的关系

通常,电压和电动势的实际方向也难以断定,所以也要像对电流一样,事先规定它们的正方向(或称参考方向)。这样,电压和电动势就可用代数量来表示了;绝对值表示其高低,正负号表示其正方向是否与实际方向一致。特别要说明的是:为方便分析,电路变量和磁量往往

采用“一致正方向系”,就是将电流、电压、电荷与磁通的正方向取得一致,见图 1-7 所示。

a, b 两点间电压正方向的标示,可用箭头加字母 u 表示,或用“+”,“-”号分别标在高、低电位端来表示,也可直接用带双下标

的 u_{ab} 表示, 正方向是由 a 指向 b, 见图 1-8。

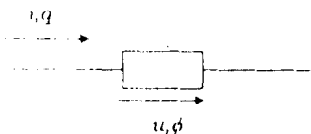


图 1-7 电路变量一致与正方向系

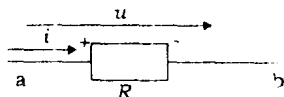


图 1-8 电压的标志方法

在分析电子线路时, 采用电位的概念讨论问题要比用电压的概念来得方便和清楚。只要选定一个参考点, 算得电路中各点的电位, 那么, 电路中任何两点间的电压也就得到了。

下面举个例子来说明电路中各点电位的计算和电路图的电位表示。

例 1-2-1 图 1-9 是一个单管交流放大电路, 在某一瞬间加上信号 $u_i = 1V$ 。已知 $E_C = 12V$, $E_B = 6V$, 求该瞬间电路中 e, m, n, p 各点电位及 mn, pm 和 pe 之间的电压。

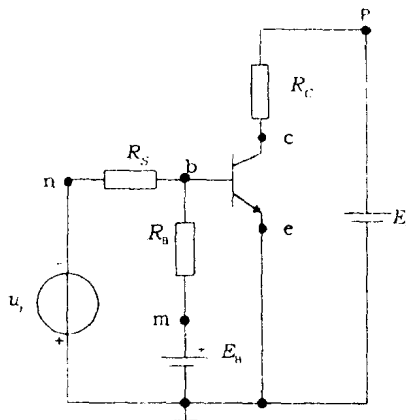


图 1-9 例 1-2-1 的电路图

解:要求电路中某点的电位,必须先选定参考点。当选 e 为参考点时,有 $V_e = 0$ 。

m 点电位比参考点高出 $E_B = 6V$, 故 $V_m = 6V$;

p 点电位比参考点高出 $E_C = 12V$, 故 $V_p = 12V$;

n 点电位比参考点低 $U_i = 1V$, 故 $V_n = -1V$ 。

这时

mn 两点间的电压为 $U_{mn} = V_m - V_n = 6 - (-1) = 7V$;

pm 两点间的电压为 $U_{pm} = V_p - V_m = 12 - 6 = 6V$;

pe 两点间的电压为 $U_{pe} = V_p - V_e = 12 - 0 = 12V$ 。

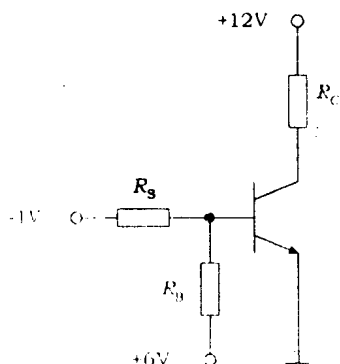


图 1-10

我们常常习惯于将电子电路中的电源用电位值表示(如图 1-10 所示)。

如果改选 m 点为参考点,那么有 $V_m = 0$,

e 点电位低于参考点 $E_B = 6V$, 即 $V_e = -6V$,

p 点电位高于 e 点电位 $E_C = 12V$, 即 $V_p = -6 + 12 = 6V$,

n 点电位低于 e 点 $V_i = 1V$, 即 $V_n = -6 - 1 = -7V$,

这时, mn 两点间电压 $U_{mn} = V_m - V_n = 0 - (-7) = 7V$; p, m 两点间电压 $U_{pm} = V_p - V_m = 6 - 0 = 6V$; p, e 两点间电压 $U_{pe} = V_p - V_e = 6 - (-6) = 12V$ 。

可见,参考点选得不同,电路上某点电位值也是不同的,而电

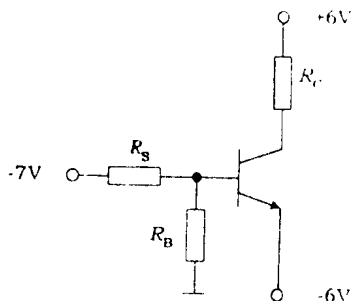


图 1-11

路中任意两点间的电压仍保持不变。

以 m 点为参考点的电路电位图如图 1-11 所示。

三、磁通与磁链

在电流的周围存在磁场。如果以磁力线描述磁场,以其疏密程度反映磁感应强度(表示磁场强弱和方向的物理量)的大小,则通过某一面积的磁力线总数就称为该面积的磁通 ϕ ,单位为伏秒,即韦伯(Wb)。由于磁通的连续性,磁力线是闭合的空间曲线。

当电感线圈中通以电流,在线圈内部就会产生较集中的磁场。设线圈的匝数为 N ,通过每匝线圈的磁通为 ϕ ,则

$$\psi = N\phi \quad (1-2-6)$$

称为线圈的磁链。

根据电磁感应定理,在一致正方向选择下,线圈两端的电压(数值上等于线圈的感应电动势)的大小正比于磁通的变化率:

$$u = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} \quad (1-2-7)$$

四、电功与电功率

从前面的叙述可以看到,电流是电荷在电场力或电源力的作用下在电路中的移动,那么,电场力或电源力就要做电功。实际上,电路的作用之一就是进行电能和其他形式能量之间的转换。我们用电功率来描述这一能量变换的速率,简称功率,它在数值上等于电场力或电源力在单位时间内所做的功。

下面来推导电功率与电压、电流的关系。在图 1-12 电路中,采用一致正方向系。由式(1-2-1)可得

$$dq = idt \quad (1-2-8)$$

由式(1-2-4)可得

$$dW = u dq = ui dt \quad (1-2-9)$$

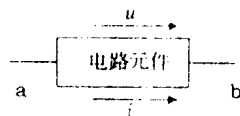


图 1-12 电路的功率