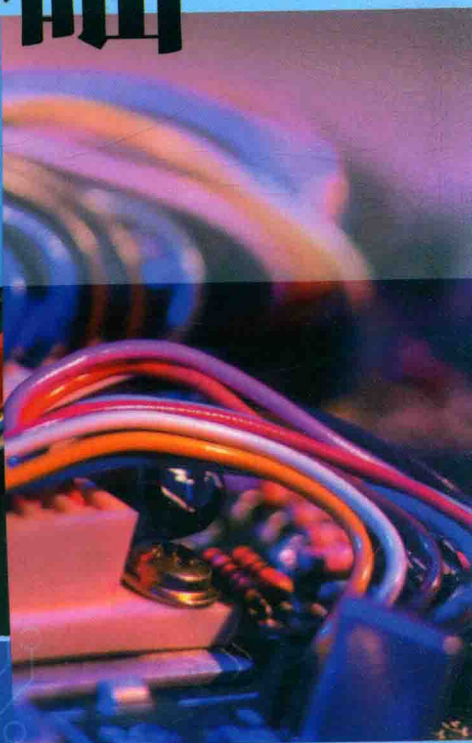
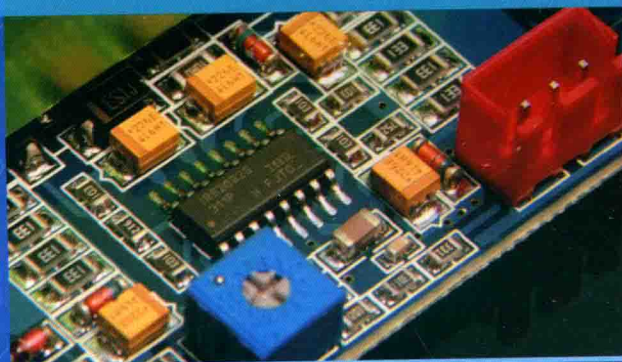


普通高等教育“十三五”规划教材

电路基础

DIANLU JICHU



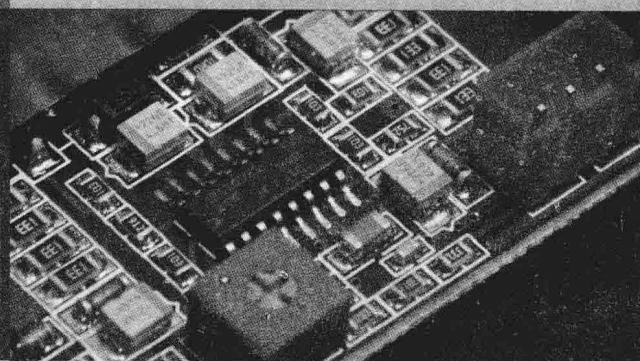
主编 张玉伽 姜莹莹 郑笔耕

 吉林大学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

电路基础

DIANLU JICHU



主 编 张玉伽 姜莹莹 郑笔耕
副主编 丁 翠

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/张玉伽,姜莹莹,郑笔耕主编. —长春:
吉林大学出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5677-7252-6

I. ①电… II. ①张… ②姜… ③郑… III. ①电路理
论 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 193568 号

书 名:电路基础

作 者:张玉伽 姜莹莹 郑笔耕 主编

责任编辑:陈颂琴 责任校对:刘守秀

吉林大学出版社出版、发行

开本: 787×1092 毫米 1/16

印张: 13 字数:235 千字

ISBN 978-7-5677-7252-6

封面设计:孙雪丽

北京市彩虹印刷有限责任公司印刷

2016 年 07 月 第 1 版

2016 年 07 月 第 1 次印刷

定价:33.00 元

版权所有 翻印必究

社址:长春市明德路 501 号 邮编:130021

发行部电话:0431-89580028/29

网址:<http://www.jlup.com.cn>

E-mail:jlup@mail.jlu.edu.cn



前 言

本书根据教育部最新颁布的高等学校电类专业“电路分析基础”和“电路理论基础”课程的基本要求,结合新的课程体系和教学内容的需要,在充分考虑了现代电子科技日新月异的发展及其取得的成果并结合编者多年来教学实践经验,特地编写而成的。

本书以电路理论中的经典内容为核心,文理渗透、启发诱导,旨在提高学生的电路理论水平,提高其分析问题和解决问题的能力。在教材内容的组织和讲解方面,力求做到符合教学规律和认知特点,在突出主要概念的同时,更加贴近实用,增强了学生对所学知识的系统性、规律性的认识。为提高学生的学习效果,增强学生自主解决问题的能力,在精选了丰富的例题和习题的同时,增加了典型例题的仿真内容,开拓了学生的视野,激发了学习兴趣。在例题解析上力求方法多样和步骤完整,使学生对所学知识有一个细致全面的了解,在精讲电路内容的同时,兼顾学生解题能力的提高,解决了学生“上课听得懂,下课解题难”的问题,从而较好地解决了教学学时减少给电路教学带来的不利影响,使电路教学能够适应大学教学体系和内容的改革。

本书可按 60~70 学时(不含实验)安排教学,根据教学需要可增删有些内容。本书可作为高等工业学校本、专科电气信息类和机电一体化类等有关专业的电路理论课程的教材或教学参考书。

本书主编为张玉伽(哈尔滨远东理工学院)、姜莹莹(黑龙江工业学院)、郑笔耕(荆楚理工学院电子信息工程学院),副主编为丁翠(北京京北职业技术学院)。其中张玉伽编写第 1、2 章节;姜莹莹编写第 3 章节;郑笔耕编写第 4、5、6 章节;丁翠编写第 7、8 章节。

限于编者水平,本书在内容取舍、编写方面难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。



目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
第一节 电路和电路模型	1
第二节 电路的物理量及参考方向	3
第三节 电阻元件	8
第四节 基尔霍夫定律	11
第五节 电路中的电位分析及其计算	14
第二章 电路的分析方法	21
第一节 电阻串并联连接的等效变换	21
第二节 电压源与电流源及其等效变换	27
第三节 支路电流法的分析与应用	32
第四节 节点电压法的分析与应用	33
第五节 叠加原理的分析和应用	35
第六节 戴维南定理和诺顿定理的分析和应用	37
第三章 正弦交流电路	44
第一节 认识交流电路中的基本物理量	44
第二节 正弦量的相量表示	49
第三节 电路基本定律的相量形式	54
第四节 单一参数的正弦交流电路	56
第五节 正弦交流电路中的功率	73
第四章 三相正弦交流电路	79
第一节 认识三相电压	79
第二节 负载星形连接的三相电路分析	83
第三节 负载三角形连接的三相电路分析	88
第四节 三相功率的计算	91



第五章 耦合电感电路的分析	95
第一节 互感	95
第二节 含有耦合电感电路的计算	100
第三节 变压器	108
第六章 电路的频率响应	120
第一节 网络函数	120
第二节 RLC 串联电路的谐振	123
第三节 RLC 并联电路的谐振	131
第四节 滤波器简介	136
第七章 二端口网络参数	143
第一节 二端口网络的方程及其参数	144
第二节 二端口网络的等效电路模型	155
第三节 二端口网络的连接	158
第八章 电路的暂态分析	165
第一节 电路的过渡过程及其初始条件	165
第二节 一阶电路的零输入响应	169
第三节 一阶电路的零状态响应	174
第四节 一阶电路的全响应	178
第五节 一阶电路的阶跃响应	183
第六节 一阶电路的冲激响应	186
第七节 二阶电路的暂态响应	191
参考文献	202

第一章 电路的基本概念和基本定律

随着科学技术的飞速发展,现代电工设备的种类日益繁多,规模和结构更是日新月异,但无论怎样设计和制造,这些设备大多仍是由各种不同的电路所组成。电路的结构不论多么复杂,它们和最简单的电路之间还是具有许多基本的共性,遵循着相同的规律。本章主要介绍电路与电路模型的概念,电路的基本物理量,电压、电流参考方向的概念,电阻元件及电源元件,基尔霍夫定律及电位的分析与计算。

第一节 电路和电路模型

一、电路

电路是由元器件按一定方式连接起来的整体,它提供电流流通的路径。图 1-1 所示是一个简单的实际电路——手电筒电路,它由电池、白炽灯、开关及连接导线组成。

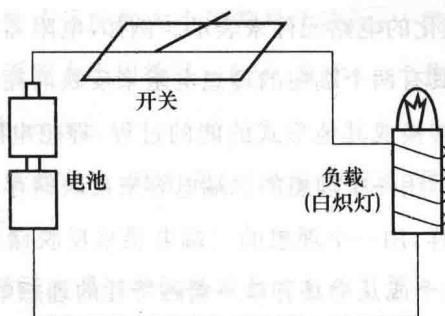


图 1-1 手电筒电路

电路的结构有多种形式,不同电路的作用也是各不相同的,按照完成的基本功能,电路



可分为两类:一类是能够进行能量转换和传输的电路,如电力系统,该系统是将发电机所发出的电能通过变压器和输出线路远距离传输给用户,用户将电能转换成光能、机械能和热能等。在这类电路中,要求在传输和转换过程中尽可能减少能量损耗,提高传输效率。另一类是能够实现信号的产生、传递和处理的电路,如扩音系统,该系统中话筒将语音信号转换为电信号,经过放大器进行放大处理,并传递给扬声器,以推动扬声器发声。对于这一类电路,虽然也有能量的传输和转换问题,但是更关心的是信号传递的质量,如快速、准确、不失真等。

一般来说,无论电路具有什么功能,都是由三部分组成的,即电源、负载和中间环节。

电源是提供能量的设备。除发电机外,电池是常见的电源,它们分别将其他形式的能转换为电能。

负载是耗用电能的设备,将电能转换成其他形式的能量。例如照明灯、电动机、电炉等都是负载,它们分别将电能转换为光能、机械能和热能;扬声器也是负载,是接收和转换信号的设备。

中间环节是连接电源和负载的,包括导线和控制设备等。例如为电流提供通路的导线,控制电路通、断的开关,保障安全用电的熔断器、漏电保护器等。这些设备不仅保证了电路安全、可靠地工作,而且能使电路自动完成某些特定工作。

二、电路模型

实际电路中存在着各种各样的电气元器件,如电阻器、电容器、电感器、灯泡、电池、晶体管、变压器等。实际的电路部件虽然种类繁多,但在电磁现象方面却有许多共同的地方。进行电路分析计算时,如果要考虑一个器件的所有电磁性质是十分困难的,因此,对于实际电路的各种器件,应忽略其次要性质,只抓住主要的电磁特性,把工程实际中的各种设备和电路元件用有限的几个理想化的电路元件来表示。例如,电阻器、灯泡、电炉等,它们都是消耗电能的,这样可以用一个具有两个端钮的理想电阻来反映消耗电能的特征,当电流流过它时,在它内部进行着将电能转换成其他形式的能的过程,理想电阻模型如图 1-2(a)所示;各种电容器主要是储存电能的,用一个理想的二端电容来反映储存电能的特征,理想电容的模型符号如图 1-2(b)所示;同样,用一个理想的二端电感来反映储存磁场的特征,其模型符号如图 1-2(c)所示。这种由一个或几个具有单一电磁特性的理想电路元件所组成的电路就是实际电路的电路模型,图 1-3 就是图 1-1 的电路模型。

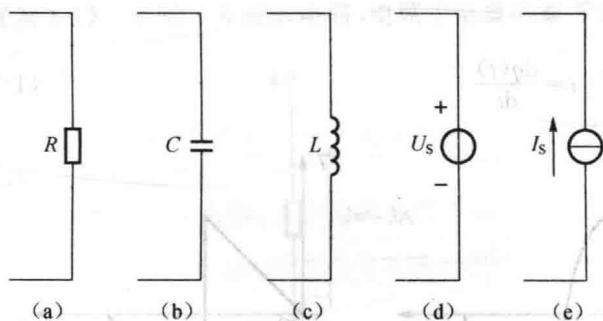


图 1-2 理想电路元件模型

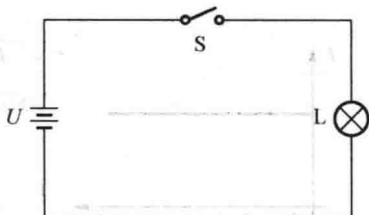


图 1-3 电路模型

理想电路元件简称电路元件,通常包括电阻元件、电感元件、电容元件、理想电压源和理想电流源。前三种元件均不产生能量,称为无源元件;后两种元件是电路中提供能量的元件,称为有源元件,如图 1-2(d)、(e)所示。

第二节 电路的物理量及参考方向

一、电流及参考方向

电荷的定向移动形成电流,通常把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度,简称电流,用符号 I 或 i 表示。

电流主要分为两种:一类是大小和方向均不随时间变化的电流,称为恒定电流,简称为直流,简写为 DC 或 dc,其电流强度的大小用符号 I 表示;一类是大小和方向均随时间变化的电流,称为变动电流,其强度大小用符号 i 表示,其中,一个周期内电流的平均值为零的变动电流称为交流,用 AC 或 ac 表示。

图 1-4 给出了几种常见的电流,其中图(a)所示为直流,图(b)所示为正弦交流电流,图(c)所示为锯齿交流电流。

对于直流电流,单位时间内通过导体横截面的电荷量是不变的,其电流强度定义为

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

对于变动电流,假设在很小的时间间隔 dt 内,通过导体横截面的电荷量为 dq ,则该瞬间



电流强度为

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

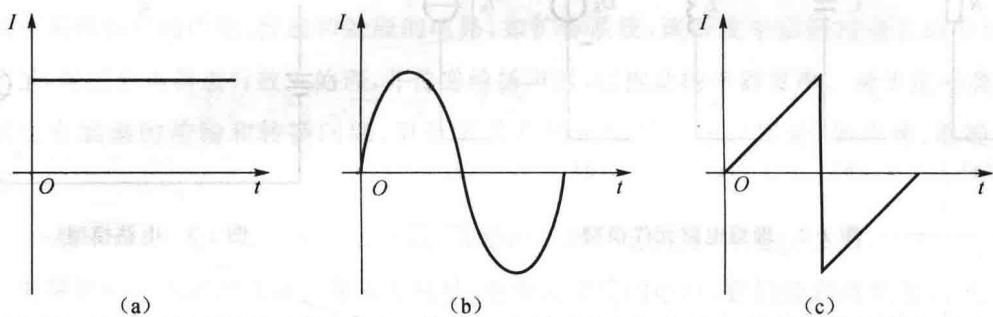


图 1-4 常见的电流

国际单位制(SI)中,电流的单位是安培,符号是 A。电力系统中安培单位小,有时取千安(kA)为电流强度的单位;而在无线电系统中(如晶体管电路中),安培这个单位又太大,常用毫安(mA)或微安(μA)作为电流强度的单位。它们之间的换算关系为

$$1\text{kA} = 10^3 \text{A}$$

$$1\text{mA} = 10^{-3} \text{A}$$

$$1\mu\text{A} = 10^{-6} \text{A}$$

电流有大小也有方向,通常把正电荷的运动方向定义为电流的实际方向。但是电路较复杂时,很难确定电流的实际方向,为了分析电路方便,在一段电路中,事先任意假定一个电流方向称为电流的参考方向,电流的参考方向可以任意假设,但电流的实际方向客观存在,因此,假设的电流参考方向并不一定是电流的实际方向,在对电路中的电流设定了参考方向后,若经计算得出电流为正值,说明所设参考方向与实际方向一致;若经计算得到电流为负值,说明所设参考方向与实际方向相反。

在本书中,电路图上所标的电流方向均为参考方向。电流的实际方向和参考方向的关系可以用图 1-5 表示。

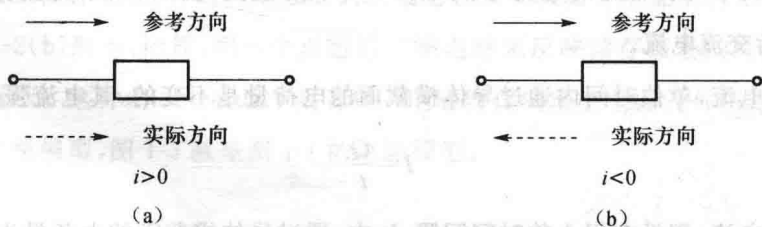


图 1-5 电流参考方向和实际方向的关系



【例 1-1】如图 1-6 所示电路, 电路中电流的参考方向已经选定, 指出电流的实际方向。

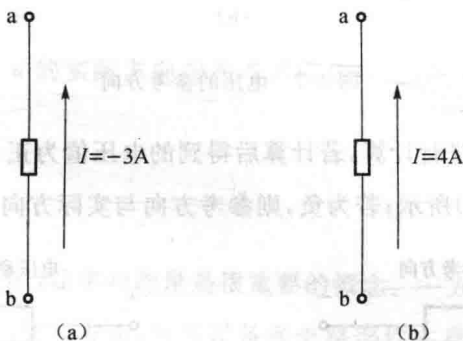


图 1-6 例 1-1 图

解 图 1-6(a)中, $I < 0$, 电流 I 的实际方向与参考方向相反, 因此 I 的实际方向由 a 流向 b , 大小为 3A 。

图 1-6(b)中, $I > 0$, 电流 I 的实际方向与参考方向相同, 因此 I 的实际方向由 b 流向 a , 大小为 4A 。

二、电压及参考方向

在物理学中已经讲过, a, b 两点间的电压定义为电场力把单位正电荷由 a 点移动到 b 点所做的功, 电压的实际方向就是正电荷在电场力中受电场力作用移动的方向。

在直流电路中, 电压为一恒定值, 用 U 表示, 即

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-3)$$

在变动电流电路中, 电压为一变值, 用 u 表示, 即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-4)$$

在国际单位制(SI)中, 电压的电位是伏特, 简称伏, 符号为 V ; 在电力系统中, 会用到千伏(kV)的概念; 在无线电系统中, 还会用到毫伏(mV)和微伏(μV)的概念。

和分析电流相同, 电压也有大小和方向。规定电位真正降低的方向为电压的实际方向。在分析电路时, 也需要事先选择电压的参考方向, 电压的参考方向也是任意选择的, 在电路中通常用“+”、“-”极性表示, 如图 1-7(a)所示; 电压的参考方向还可以用双下标 u_{ab} (电压参考方向由 a 点指向 b 点)表示, 如图 1-7(b)所示; 也可以用实线箭头表示, 如图 1-7(c)所示。

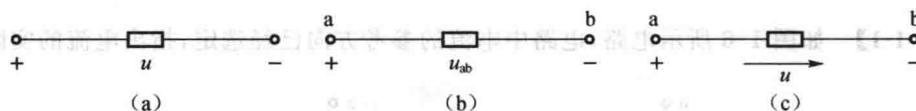


图 1-7 电压的参考方向

在设定的参考方向下进行计算,若计算后得到的电压值为正,则说明电压的参考方向与实际方向一致,如图 1-8(a)所示;若为负,则参考方向与实际方向相反,如图 1-8(b)所示。

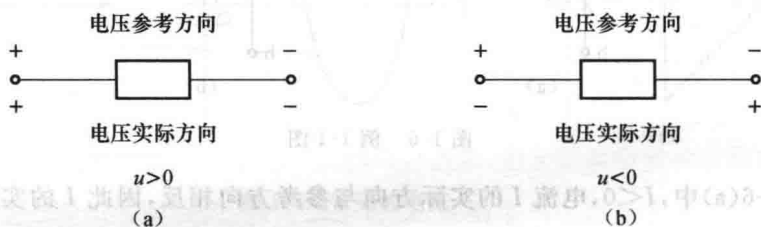


图 1-8 电压的实际方向和参考方向的关系

在电路分析中,电流和电压的参考方向可以任意单独假设,但是为了分析电路方便,通常将一段电路或一个元件的电压和电流设成关联参考方向,即电流从电压的“+”极流向“-”极,如图 1-9 所示。

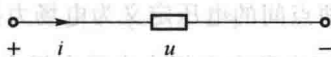


图 1-9 电压和电流参考方向关联

【例 1-2】 电路如图 1-10 所示,电路上各电压的参考方向已经设定,指出各电压的实际方向。

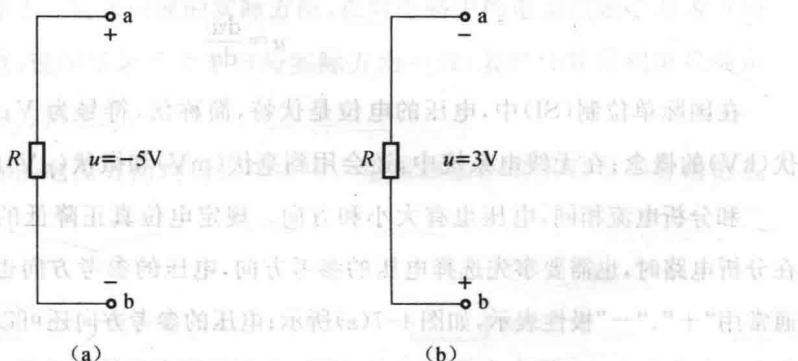


图 1-10 例 1-2 图



解 图(a)中, $u < 0$, 电压 u 的实际方向与参考方向相反, 因此 u 的实际方向 b 端为“+”, a 端为“-”, 大小为 5V。

图(b)中, $u > 0$, 电压 u 的实际方向与参考方向相同, 因此 u 的实际方向 b 端为“+”, a 端为“-”, 大小为 3V。

三、电功率

在电路的分析和计算中, 功率和能量是很重要的概念。一方面, 电路在工作时总伴随有其他形式能量的互相交换; 另一方面, 电气设备和电路部件本身都有功率的限制, 在使用时要注意是否超过其额定值, 避免造成设备损坏或者不能正常工作。

电功率定义为单位时间内电路吸收或消耗的能量, 即

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1-5)$$

在直流电路中, 式(1-5)可写成

$$P = UI \quad (1-6)$$

上面两个式子计算功率时, 电压和电流选择为关联参考方向。若电压与电流选择为非关联参考方向, 则

$$p = -ui \text{ 或 } P = -UI \quad (1-7)$$

在国际单位制(SI)中, 功率的单位是瓦特, 简称瓦, 符号为 W。

【例 1-3】 已知电路如图 1-11 所示, $I_1 = -1\text{A}$, $I_2 = 2\text{A}$, $I_3 = -1\text{A}$, $U_1 = 6\text{V}$, $U_2 = -8\text{V}$, $U_3 = 2\text{V}$, $U_4 = 2\text{V}$ 。求各元件的功率。

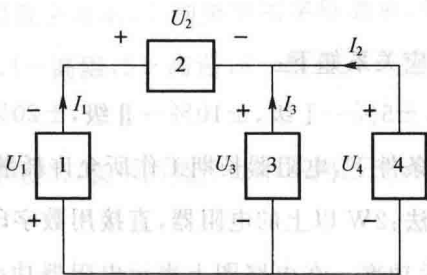


图 1-11 例 1-3 图

解 元件 1 电压和电流为关联参考方向, 故元件 1 的功率为:

$$P_1 = U_1 I_1 = 6 \times (-1) = -6\text{W}$$

即元件 1 产生的功率为 6W。



元件 2 电压和电流为关联参考方向,故元件 2 的功率为:

$$P_2 = U_2 I_1 = (-8) \times (-1) = 8\text{W}$$

即元件 2 消耗功率为 8W。

元件 3 电压和电流为非关联参考方向,故元件 3 的功率为:

$$P_3 = -U_3 I_3 = -2 \times (-1) = 2\text{W}$$

即元件 3 消耗的功率为 2W。

元件 4 电压和电流为非关联参考方向,故元件 4 的功率为:

$$P_4 = -U_4 I_2 = -2 \times 2 = -4\text{W}$$

即元件 4 产生的功率为 4W。

第三节 电阻元件

一、电阻元件

1. 电阻器的主要参数

(1) 标称阻值:电阻器上面所标示的阻值。

(2) 允许误差:标称阻值与实际阻值的差值跟标称阻值之比的百分数称为允许误差,它表示电阻器的精度。

允许误差与精度等级对应关系如下:

$\pm 0.5\%$ —0.2(或 0)级, $\pm 5\%$ —I 级, $\pm 10\%$ —II 级, $\pm 20\%$ —III 级。

(3) 额定功率:在正常的条件下,电阻器长期工作所允许耗散的最大功率。

额定功率有两种标志方法:2W 以上的电阻器,直接用数字印在电阻体上;2W 以下的电阻器,以自身体积大小来表示功率。在电路图上表示电阻器功率时,采用如图 1-12 所示的符号。

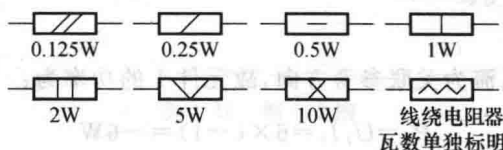


图 1-12 电阻器功率符号



(4)额定电压:是指由阻值和额定功率换算出的电压。

(5)最高工作电压:是指允许的最大连续工作电压。在低气压工作时,最高工作电压较低。

(6)温度系数:是指温度每变化 1°C 所引起的电阻值的相对变化。温度系数越小,电阻器的稳定性越好。阻值随温度升高而增大的为正温度系数,反之为负温度系数。

(7)老化系数:是指电阻器在额定功率长期负荷下,阻值相对变化的百分数,它是表示电阻器寿命长短的参数。

(8)电压系数:是指在规定的电压范围内,电压每变化 1V 电阻器的相对变化量。

(9)噪声:是指产生于电阻器中的一种不规则的电压起伏,包括热噪声和电流噪声两部分,热噪声是由于导体内部不规则的电子自由运动使导体任意两点的电压不规则变化产生的。

二、电阻的型号命名方法

国产电阻器的型号由四部分组成(不适用敏感电阻),如图 1-13 所示。

第一部分:主称,用字母表示,表示产品的名字。如 R 表示电阻, W 表示电位器。

第二部分:材料,用字母表示,表示电阻体用什么材料组成。如 T—碳膜, H—合成碳膜, S—有机实心, N—无机实心, J—金属膜, Y—氮化膜, C—沉积膜, I—玻璃釉膜, X—线绕。

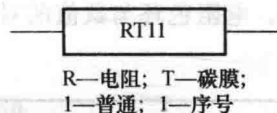


图 1-13 电阻器型号表示方法

第三部分:分类,一般用数字表示,个别类型用字母表示,表示产品属于什么类型。1—普通, 2—普通, 3—超高频, 4—高阻, 5—高温, 6—精密, 7—精密, 8—高压, 9—特殊, G—高功率, T—可调。

第四部分:序号,用数字表示,表示同类产品中不同品种,以区分产品的外形尺寸和性能指标等。

三、电阻器标注法

1. 直标法

用数字和单位符号在电阻器表面标出阻值,其允许误差直接用百分数表示,若电阻上未注偏差,则均为 $\pm 20\%$ 。



例如:47K $\pm 5\%$ 、75K $\pm 1\%$ 。

2. 文字符号法

用阿拉伯数字和文字符号两者有规律的组合来表示标称阻值,其允许偏差也用文字符号表示。符号前面的数字表示整数阻值,后面的数字依次表示第一位小数阻值和第二位小数阻值。

例如:3R3K 表示阻值 3.3Ω ,误差为 $\pm 10\%$;5K1J 表示阻值 $5.1k\Omega$,误差为 $\pm 5\%$ 。

3. 数码法

数码从左到右,前面的为有效值,最末位为指数,即零的个数,单位为欧。偏差通常采用文字符号表示。

$100J = 10 \times 10^0 \Omega = 10\Omega$,误差 $\pm 5\%$;

$472K = 47 \times 10^2 \Omega = 4.7k\Omega$,误差 $\pm 10\%$;

$3321F = 332 \times 10^1 \Omega = 3.32k\Omega$,误差 $\pm 1\%$ 。

最末位为 9 是例外,应该乘 10^{-1} 。

4. 色标法

色标法是用四环或五环颜色表示元件的标称阻值和允许偏差。国外电阻大部分采用色标法。电阻色环与数值的对应关系见表 1-1。

表 1-1 电阻色环与数值的对应关系

颜色	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	金	银	无色
表示数值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10^{-1}	10^{-2}	—
表示误差(%)	± 1	± 2	± 3	± 4							± 5	± 10	± 20

图 1-14 表示出了色标法的具体标注方法。

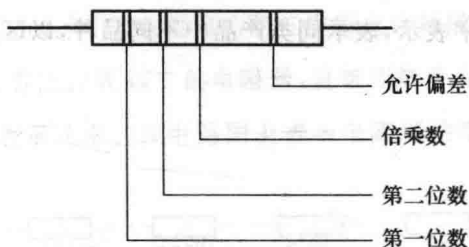


图 1-14 电阻器的阻值和误差的色标法

(1) 四环普通型电阻,电阻体上有四条色环,前两条表示数字,第三条表示倍乘,第四条



表示误差。

(2)五环精密型电阻,电阻体上有五条色环,前三条表示数字,第四条表示倍乘,第五条表示误差。

下面以四环表示法为例来具体说明电阻是如何用色环表示的。

第一色环、第二色环、第三色环分别表示数值 X 、 Y 、 Z ,则电阻阻值为 $R = XY \times 10^Z \Omega$,第四色环仅表示该电阻的误差,如图 1-15 所示。

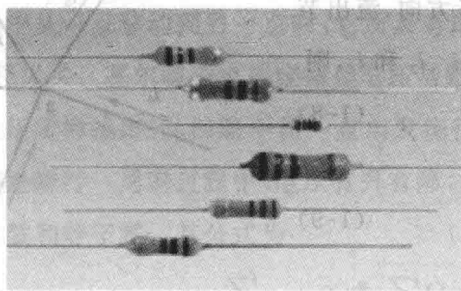


图 1-15 电阻的四环表示法

第四节 基尔霍夫定律

一、复杂电路的几个术语

支路:电路中一段无分支且电流相等的电路。

节点:电路中三条或三条以上支路的连接点。

回路:电路中的任意一个闭合路径叫回路。

网孔:电路中不含有支路的回路,即单孔回路叫网孔。

思考:图 1-16 所示的电路叫作电桥电路,它是一种用途很广的复杂电路,特别是在测量仪表中,电桥电路是最常见的电路之一。请分析一下电路中有几条支路,几个节点,几个回路和网孔。

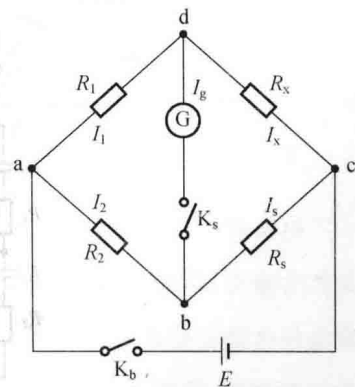


图 1-16 电桥电路