

理疗医师进修试用教材

理 疗 机 械 学

汤 岗 子 理 疗 医 院

1 9 8 1 · 5

编写说明

《理疗学》总论、各论，《理疗机械学》等，是根据卫生部(80)卫医教字第80号文件“关于下达一九八一年全国进修班补充招生计划的通知”，为培训全国疗养院理疗医师而编写的内用教材。在编写过程中我们努力用辩证唯物主义作指导，贯彻理论联系实际并针对疗养院的特点和培训目标的实际需要，着重编入了专业基础理论、基本知识和应用技术方面的内容。使它不仅适合于教学需要而且也可以作为理疗医生的参考读物。

鉴于我们经验不足，时间仓促、对全国疗养院的实际情况又缺乏调查研究，尽管编写的同志作了积极努力，但教材中还会存在不少问题，我们欢迎读者提出批评指正，以便在今后应用中进一步修订。

目 录

上篇 基础知识

第一章 电的基本知识	1	第四节 自感与互感	21
第一节 直流电	1	一、自感现象	21
一、电路	1	二、互感现象	22
二、电流	1	第五节 变压器	23
三、电位、电压、电动势	2	一、常用小型变压器的结构和形式	23
四、直流电	3	二、变压器的工作原理	23
五、电阻和电阻器	3	第四章 交流电路	25
第二节 交流电的基本概念及其 参变量	4	第一节 矢量图示法	25
一、直角坐标系	4	一、矢量与矢量图示法	25
二、正弦交流电	5	二、矢量的合成	26
三、交流电的周期和频率	5	三、旋转矢量法	27
四、交流电的瞬时值、最大值和		第二节 纯电阻电路	28
有效值	6	第三节 电容器及存电容电路	29
五、交流电的相位和相位差	7	一、电容器的结构和充放电作用	29
第二章 直流电路	9	二、电容器的串联和并联	32
第一节 欧姆定律及其应用	9	三、电容器的使用	33
第二节 电功和电功率	10	四、纯电容电路	33
第三节 电阻的串联和并联	11	第四节 电感器及纯电感电路	34
一、电阻的串联	11	一、电感器的感抗	35
二、电阻的并联	14	二、电感器的串、并联	35
第三章 磁和电磁	17	三、纯电感电路	35
第一节 磁 场	17	第五节 RLC电路计算	36
第二节 铁磁材料	18	一、电阻、电感和电容串联电路	36
一、铁磁材料的磁化	18	二、电阻、电感和电容并联电路	38
二、常用铁磁材料	19	第六节 串联谐振和并联谐振	40
第三节 电磁感应	20	一、串联谐振	40
一、电磁感应	20	二、并联谐振	42
二、电磁感应定律	20	第五章 电子管	44
		第一节 什么是电子管	44

一、二极管	44	三、晶体管的输入特性和输出特性	62
二、三极管	45	四、晶体管的主要参数	65
三、四极管	47	五、温度对晶体管参数的影响	68
四、五极管	48	第七章 交流放大器	69
五、束射四极管	48	第一节 简单的交流放大电路和	
第二节 电子管放大电路	48	静态工作点的设置	69
一、什么叫放大	48	一、简单的交流放大电路	69
二、电子管的放大作用	49	二、不设置静态工作点行不行	70
第六章 半导体和晶体管	50	三、怎样才能使放大器不失真	71
第一节 半导体的导电性	50	四、电源的简化和放大电路的表	
一、什么是半导体	50	示方法	72
二、半导体中的另一个载流子—空穴	51	第二节 放大电路的基本分析方	
三、P型和N型半导体	52	法	74
第二节 PN结的特性	53	一、计算法	74
一、PN结的单向导电性	53	二、图解法	78
二、PN结的扩散运动	54	第三节 工作点的稳定	84
三、PN结的导通	54	一、温度对放大器工作点的影响	84
四、PN结的截止	55	二、工作点稳定的典型电路	85
第三节 半导体二极管的特性和		第八章 脉冲电路基础知识	91
参数	56	第一节 直流电路的复习	92
一、半导体二极管的结构	56	一、简单直流电路计算	92
二、二极管的特性和参数	56	二、复杂电路的计算	92
第四节 稳压管	57	第二节 电容器的光放电	93
一、PN结的击穿与二极管的稳压作用	57	一、电容器的充放电过程	93
二、稳压管的特性和参数	58	二、时间常数 τ 的求法	97
第五节 晶体管	59	第三节 微分电路	98
一、晶体管的结构	60	第四节 积分电路	99
二、晶体管的电流放大作用	61		

下篇 理 疗 机 械

第一章 光线治疗机	101	第二节 紫外线灯	102
第一节 红外线灯	101	一、紫外线灯管的构造	102
一、白炽灯	101	二、电路工作原理分析	102
二、辐射式红外线灯	101	三、紫外线灯的正常参数	104
三、矽化碳红外线灯	101	四、常见故障分析	105

第一章 电的基本知识

第一节 直 流 电

一、电 路

电路是提供电流的途径和组成电功设备的总体。随着电流的通过,进行着能量的转换、传输、分配、信号的处理以及把电能转换成其它能量的过程。如水力发电,将水能转换成电能,再通过变压器、输电线输送给用电单位;又如将电能通过各种复杂的电路或系统转换成我们治疗上所需要的激光、红外线、高频电场等,无一不是由电路组成的整体。

当我们检验小电珠时,常用导线把干电池与小电珠联接起来,接通后小电珠就会发光,这就构成了一个简单的电路。如果将这一简单电路绘成电路图,极少数是用实物图来表示,而是采用“符号”来表示。如图(1—1)所示,就是这一简单电路的电路图。图中“E”代表电源(干电池),“R”代表小电珠,称为负载,负载一般指将电能转换为其它能量的用电器具,简单的说:电路由电源、负载和导线组成。

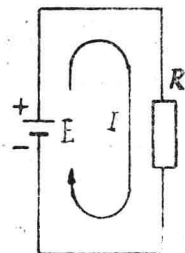


图 1—1 电路图

二、电 流

带电质点有规律的运动称为电流。任何物质都是由组成它的最小粒子——分子组成的,而分子又是由原子组成的,原子中有带正电荷的原子核和带负电荷的电子。在通常情况下由于原子中电子所带负电荷的总和等于原子核所带正电荷,故物体呈现中性,即不带电。如果由于某种原因获得或失去部分电子,则该物体就变为带电体。物体带电量的多少用电荷量来表示,简称电量,用字母“Q”表示,它的单位是库伦,每库伦电量相当于 6.25×10^{18} 个电子所带电荷量。

如图 1—1 当小电珠与电池接通后就会发光,这是由于在电池作用下使电流流过灯丝的缘故。单位时间内通过灯丝的电流多一些,灯就亮一些;通过灯丝的电流少一些,灯就暗一些。单位时间内通过导体横截面的电荷量称为电流强度,简称电流,用字母“I”表示。电流强度的单位是安培,用字母“A”表示。电流强度的表示式:

$$I = \frac{Q}{t}$$

式中, Q——电量,单位为库伦;

t——时间,单位为秒。

从上式可以看出,如果在 1 秒钟内,通过导体截面电量是 1 库伦,其电流强度就是 1 安培。度量电流比安培小的单位有毫安,用“mA”表示,比毫安还小的单位是微安,用“ μ A”表示,它们之间的换算关系式:

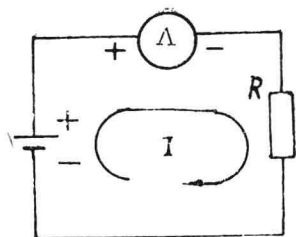


图 1—2 电流的方向和电流表的接法

$$1\text{A (安培)} = 1000\text{mA (毫安)}$$

$$1\text{mA (毫安)} = 1000\mu\text{A (微安)}$$

电荷有“正”与“负”两种，通常把“正”电荷流动的方向定义为电流的方向；负电荷流动的方向定义为与电流的方向相反。图 1—2 电路，电流的方向是：对外电路来说，从电源正极经过外电路负载 R 流回电源负极；对内电路来说，从电源负极经过电源内部流向电源正极，如图中箭头所示。

三、电位、电压、电动势

为便于理解电流、电位、电压和电动势的基本概念，我们先以水的流动类比方法加以说明。人们都非常熟悉水总是由高水位的地方流向低水位的地方。我们来分析图 1—3 (a) 所示的甲、乙两个相连的水池，当我们将连接管中间的阀门 K 打开时，甲池的水便通过阀门 K 流向乙池，在连接管中形成了水流。这是由于甲池的水位比乙池水位高的缘故。当水流开始形成后，甲池水位逐渐下降、而乙池水位逐渐上升，直至两池水位相等时，连接管中水流便停止。如要使水流继续流动，就必须保持两池一定的水位差。如图 1—3 (b) 所示，用水泵将乙池水不断注入到甲池，保持甲池水位高于乙池，这样甲池水将不断流入乙池，这里，水泵就起了维持一定水位差的动力作用。

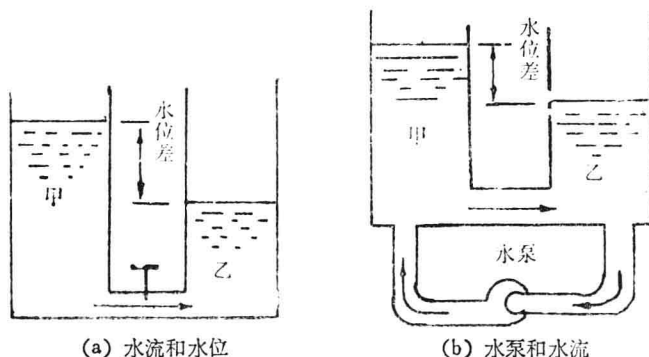


图 1—3 水 流

物体带电后有一定电位，这和水位是很相似的。一般说，物体带正电荷越多电位越高，带负电荷越多电位越低。如果我们把两个电位不同的带电体用导线连接起来，电位高的带电体中的正电荷便向电位低的带电体流去，导线中便产生了电流。换一句话说，要想在电路中产生电流，就必须在电路两端形成一个电位差。而负载两端的电位差是通过电源来实现的。

电路中任意两点间的电位差称为该两点的电压，负载两端的电位差称为负载的端电压，负载的端电压又是由电源来产生和维持的。由此可见，电路中电流的产生是由于电源内部具有产生和推动电路中电荷流动的动力的缘故。我们把这种动力称为电源的电动势。

电源的电动势，是将电池“—”极的正电荷推向电池“+”极，以产生和维持电池“+”、“—”极之间的电位差所做的功。电源所具有的能量，是由其他形式的能量转换来

由(1-1)式可知：周期与频率是成反比的，周期越小，则频率越高；周期越大，则频率越低。

我国所用的交流电（习惯上叫市电或工频）频率是50赫芝，也就是说一秒钟内变化50周，而变化一周所需要的时间是1/50秒，这就是它的周期。我们习惯上所称呼的“千周”(KC)，实际上应该是“千周/秒”，即“KHz”。990千周就是990KHz，它的周期为：

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{990 \times 10^3} \approx 0.00000101 \text{秒} = 1.01 \times 10^{-6} \text{秒}$$

四、交流电的瞬时值、最大值和有效值

交流电的方向和大小都在不断地改变，随着时间的不同，电流或电压的数值都不一样，在某一瞬时的交流电数值，叫做瞬时值。电压、电流的瞬时值分别用小写字母“u”、“i”来表示。

在图1-7中，交流电流在时间为 t_1 的瞬间达到最大值 I_m ，在 t_3 的瞬间达到负的最大值 $-I_m$ 。这里， I_m 就是交流电流的最大值，也称辐值或峰值。同样，交流电压的最大值即 U_m 。如果我们在交流电路上接一盏灯，当第一瞬间时（见图1-9）因电流等于零，所以电灯不亮；到第2瞬间时，电流就比较大，电灯也比较亮；到了第3瞬间电流达到最大值，所以灯最亮；但到了第4瞬间电流又减小了，电灯又不太亮了；到了第5瞬间电流又等于零，和第1瞬间一样电灯又不亮了。在第5到第9瞬间正个负半周内，虽然电流方向相反，但效果与正半周时相同。因此，交流电路中的电灯亮暗程度是在不断的变化着，但由于交流电的频率变化较快，我们就感觉不到电灯的一亮一暗。

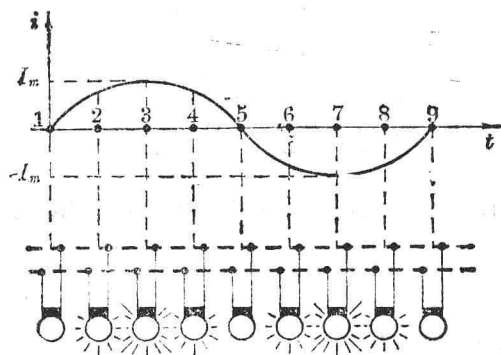


图1-9 交流电和电灯亮的情况

由于交流电的瞬时值是不断地变化的，因此常以热效应相等的直流电来表示交流电的大小。也就是说，在同样的两个电阻内，分别通以交流电和直流电，通电的时间是相等的，如果它们产生的热量相等，这个直流电的数值就是该交流电的有效数值。例如有效值是3安的交流电流通过电阻所发出的热量和3安直流电在相同时间内所发出的热量是相同的。按着规定，有效值用大写字母表示，例如电压和电流的有效值分别用“U”、“I”来表示。

正弦交流电的有效值和最大值的关系如下：

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m = 0.707 U_m \quad (1-2)$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 0.707 I_m \quad (1-3)$$

有效值应用得很普遍，我们平常所说的电压或电流的数值，一般都是指有效值。电流表和电压表所测得的数值，也都是有效值。

〔例1〕 已知电压的有效值为220V，问其辐值是多少？

两个同频率正弦波初相之差，称为相位差用字母“ φ ”表示。图 1—12(a) 中， u_1 与 u_2 的相位 $\varphi = 90^\circ - 0^\circ = 90^\circ$ 。

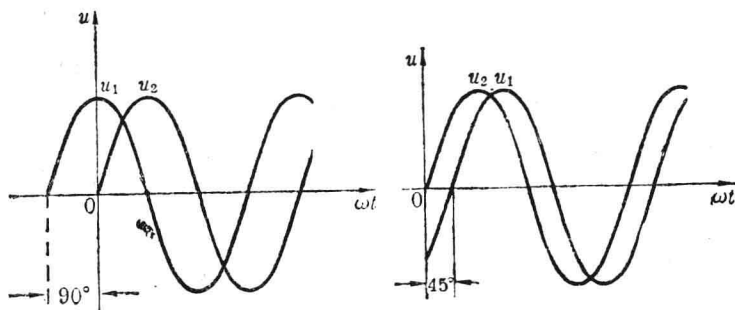
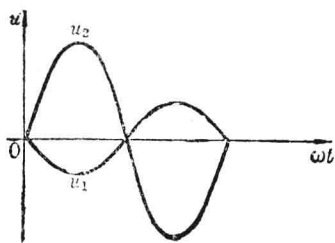


图 1—12 两个同频率交流电的相位差

当一正弦交流电比另一正弦交流电先到达最大值，则前者称为“超前”，后者称为“落后”。如图 1—12(a) 中， u_1 比 u_2 先到达最大值，故称 u_1 比 u_2 超前 90° 。又如图 1—12(b) 中， u_1 比 u_2 落后 45° 。

再如图 1—13(a)、(b) 分别为两个频率相同、但大小不同的交流电波形 ($u_1 < u_2$)，



(b)

图 1—13 两个不同相位交流电

比较可知：在图 (a) 中， u_1 与 u_2 相位差为 0° ，我们称为“同相”，在图 (b) 中， u_1 与 u_2 相位差为 180° ，我们称为“反相”。

图 1—12 是表示两个交流电的相位关系，如果有三个或三个以上的交流电，只要频率相同也可以划在一起比较它们之间的相位关系。但是一般只有频率相同的交流电才能比较它们之间的相位关系。相位，表示了某一瞬时交流电所处的进程；而相位差，则表明了几个交流电所处进程的先后。

前面我们学习了交流电瞬时值的三个参量；最大值（或有效值）、频率（或周期）及相位。两个交流电相比，只要有一个参量不相等它们就不同。交流电的三个参量、表示了交流电的三个特性。最大值和有效值表示交流电数值的大小；频率和周期表示了交流电的变化速度；相位表示某瞬时交流电所处的进程；而相位差则表示几个交流电所处进程的先后。三者之间的关系如用正弦函数式表示则：

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

式中： i ——交流电流的瞬时值；

I_m ——交流电流的最大值；

ω ——交流电的角频率；

φ ——交流电的初相位 ($t = 0$ 时的相位)；

$\omega t + \varphi$ ——交流电在 t 时刻的相位角。

习 题

1. 电位和电压有什么区别？如果两点电位都很高，两点间的电压是否就很大？

电压、电流、电阻的这一关系，又可以用下式来表示：

$$I = \frac{U}{R} \quad (2-2)$$

$$U = I \cdot R \quad (2-3)$$

欧姆定律不仅适用于直流电的场合，同样也适用于交流电的场合。

〔例1〕某电路中，电阻两端的电压是12V，通过的电流是0.05A，求该电阻的阻值。

解：根据： $R = \frac{U}{I} = \frac{12}{0.05} = 240\Omega$

〔例2〕已知手电筒的小电珠电阻是10Ω，电池的电压是3V，试求通过小电珠的电流是多少？

解：根据： $I = \frac{U}{R} = \frac{3}{10} = 0.3A$

〔例3〕有一只高灵敏继电器，线圈的阻值是4000Ω，工作电流是5.4mA，试问在线圈两端要加上多大电压才能正常工作？

解：根据： $U = I \cdot R = 4000 \times 5.4 \times 10^{-3} = 21.6V$

第二节 电功和电功率

电动机的转动、电灯的发光、扬声器的放声等，所有这些都是电流作用的结果，也就是电流作了功，我们把电流所做的功称为电功，用字母“N”表示、它的单位是瓦特秒，可用公式表示如下：

$$N = I \cdot U t \quad (2-4)$$

式中：I——电流，单位是安培；

U——电压，单位是伏特；

t——时间，单位是秒；

N——电功，单位是瓦特秒。

比瓦特秒大的单位还有“千瓦小时”，也称“度”。但电功不能表示电流做功能力的大小，因为不知道这些功是在多长时间内完成的。所以我们把单位时间内电流所做的功叫做电功率，简称功率，用字母“P”表示。其表示式为：

$$P = \frac{N}{t} = I \cdot U \quad (2-5)$$

功率的单位是“瓦特”，简称“瓦”，用字母“W”表示。比瓦特大的单位还有“千瓦”(KW)，马力(HP)。比瓦特小的单位还有“毫瓦”(mW)，“微瓦”(μW)，它们之间的换算关系是：

$$1KW \text{ (千瓦)} = 1000W \text{ (瓦)}$$

$$1W \text{ (瓦)} = 1000mW \text{ (毫瓦)}$$

$$1mW \text{ (毫瓦)} = 1000\mu W \text{ (微瓦)}$$

$$1HP \text{ (马力)} = 735W \text{ (瓦)}$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots \quad (2-7)$$

根据欧姆定律, 电阻 R_1, R_2 上的电压降是:

$$U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2$$

因为 $U = I \cdot R, \quad R = R_1 + R_2$

所以 $U = I(R_1 + R_2) = U_1 + U_2$

这表明, 总电压等于各电阻上的电压降之和。如果两个以上的电阻相串联起来, 那么可写成如下公式:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots \quad (2-8)$$

由此可知, 各电阻上的电压降与该电阻值成正比, 电阻值越大, 其电压降越大; 电阻值越小, 其电压降越小。也就是说所加的电源电压与各电阻上电压降之比, 等于总电阻与各电阻之比, 即:

$$U : U_1 : U_2 = R : R_1 : R_2$$

因为 $R = R_1 + R_2$

$$\text{所以} \quad \frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$$

$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$$

它们之间的比就称为“分压比”, $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 和 $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 称为“分压系数”。电阻的串联在电路中常作分压或限流用。

我们知道:

$$P = IU$$

如将 (2-8) 式两边各乘以 I :

$$IU = IU_1 + IU_2 + IU_3 + \dots$$

$$\text{即} \quad P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \quad (2-9)$$

由上式可知, 整个电路的功率等于各电阻上消耗功率之和。

〔例 1〕某治疗机时控继电器电压为 6 V, 线圈直流电阻为 200Ω 而电源电压是 24 V, 因此, 不能直接接电源使用, 需串入一个降压电阻 R_1 才能工作, (如图 2-3 所示) 试求降压电阻值是多少?

解: 先求出继电器的工作电流:

$$I = \frac{U_2}{R_2} = \frac{6}{200} = 30\text{mA}$$

再求出总电阻:

$$R = \frac{24}{30 \times 10^{-3}} = 800\Omega$$

因为 $R = R_1 + R_2$

所以 $R_1 = R - R_2 = 800 - 200 = 600\Omega$

又解:

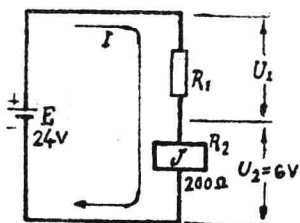


图 2-3 降压电阻的用法

上式说明，各支路电流与各支路电阻成反比。即支路内电阻越大，电流越小，电阻越小，电流越大。

如将上两式代入 (2—11) 式中得：

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

等式两边各除以 U 得：

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2-12)$$

(2—11) 式和 (2—12) 式的结论对两个以上电阻的并联电路同样适用。即：并联电路总电流等于各路电流之和。

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \quad (2-13)$$

并联电路总电阻倒数，等于各支路电阻倒数之和即：

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (2-14)$$

利用 (2—12) 式可以求出两个电阻并联后的总电阻即：

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2-15)$$

也就是说，总电阻等于两个电阻的乘积除以两个电阻的和。公式 (2—15) 必须熟记，实际工作中经常会碰到两个电阻的并联问题。

若将 (2—13) 式两边各乘以 U 得：

$$IU = I_1 U + I_2 U + I_3 U + \dots \quad (2-16)$$

这说明整个电路的功率等于各支路所消耗功率之和。如已知并联电路的总电流，各支路电流也可以求出。由于各支路电压均等于电路两端的电压即

$$IR = I_1 R_1; \quad IR = I_2 R_2$$

故

$$I_1 = I \cdot \frac{R}{R_1}; \quad I_2 = I \cdot \frac{R}{R_2}$$

将 (2—15) 式代入得：

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

它们之间的比称为“分流比”， $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 、 $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 称为“分流系数”。电阻的并联在电路中常作分流用。

〔例 5〕某电路急须要一只 10KΩ 电阻，但眼前只有比 10KΩ 大的电阻，必须采用二只或二只以上的电阻并联使用，现已知一只电阻是 47 KΩ，那么另一只电阻应取多大的合适？

解：根据两电阻并联公式 (2—15)：

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

值各为多少？

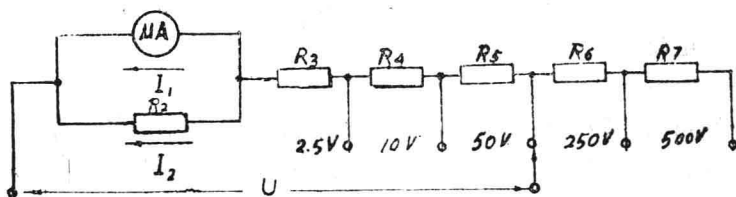


图 2—9

第三章 磁 和 电 磁

第一节 磁 场

一、导磁系数

穿过某一横截面积的磁力线条数，叫做穿过这个面积的磁通量，用字母“ Φ ”表示，单位是麦克斯韦，简称麦。

磁通量只能表示穿过某个横截面积磁力线的多少，但不能表示磁力线的疏密程度，即不能表示磁场的强弱。磁场的强弱由垂直穿过单位面积的磁力线条数来表示，叫磁感应强度（又称磁通密度），用字母“ B ”表示。如果用“ Φ ”表示垂直穿过某个面积 S 的磁通，量则磁感应强度

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

在实际应用当中， Φ 和 B 常用绝对电磁单位： Φ 为麦克斯韦， B 为高斯， S 为厘米²。

1 高斯 = 1 麦克斯韦/厘米²。

〔例 1〕 有一电磁铁，其横截面积为 8 厘米²，已知垂直穿过此面积的磁通量为 88000 麦克斯韦，求其磁感应强度。

解：因为 $S = 8$ 厘米²， $\Phi = 88000$ 麦

$$\text{所以 } B = \frac{\Phi}{S} = \frac{88000}{8} = 11000 \text{ 高斯}$$

〔例 2〕 在铁芯线圈中，已知平均磁感应强度为 8000 高斯，铁芯的横截面积为 15 厘米²，求通过铁芯截面中的磁通量。

解：因为 $B = 8000$ 高斯， $S = 15$ 厘米²

$$\text{所以 } \Phi = B \cdot S = 8000 \times 15 = 120000 \text{ 麦}$$

要使电路产生电流，必须有电势，同样，要使线圈产生磁通，必须要有磁势。我们把电流与线圈匝数的乘积叫做磁势。磁势越大产生的磁通愈大，说明磁场愈强。磁势的单位是安培匝数，简称“安匝”。

例如有两个线圈，甲线圈有 100 匝，通过为 0.4 安；乙线圈有 200 匝，通过电流为

铁磁材料磁化后，如果断开线圈，外磁场虽然消失，但由于铁磁材料内部已经排齐的分子磁铁，不会立即恢复到原来杂乱无章的状态，因此还会剩留一部分附加磁场，称为剩磁。要消除剩磁，可在线圈中通入一定的反方向电流来产生反向的磁场强度，这个反向磁场强度的大小称为铁磁材料的矫顽力，用字母“ $H_{\text{矫}}$ ”表示。

线圈通入交流电，铁芯被反复磁化，由于其内部的分子磁铁要不断克服阻力，交替改变方向，就要消耗能量，并使铁芯发热，这种消耗的能量叫做磁损耗。

下面我们分析铁磁材料的磁化过程。图 3—1(a) 表示铁心的磁化电路。电位器滑动点从最低点逐渐向上滑动，线圈电流由零逐渐增大，因此 H 由零逐渐增大，用磁通表测量铁芯中的 B 值，这时也随 H 的增大而迅速增大。当 H 增大到一定数值后， B 的增加开始显著减慢，这种现象就称为饱和。用横坐标表示外磁场 H ，用纵坐标表示铁心内的磁通密度 B ，就可以作出 B 随 H 变化的曲线，图 3—1(b) 就是铁磁材料的磁化曲线（ $B-H$ 曲线）。

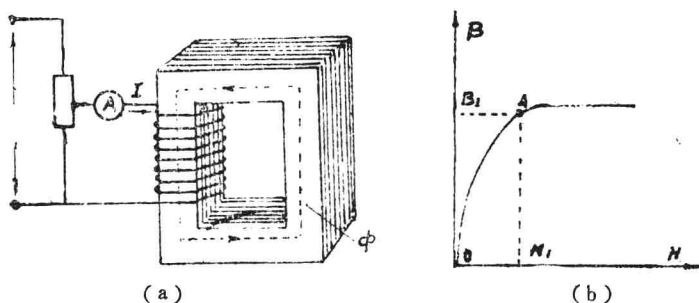


图 3—1 磁铁材料的磁化过程

为什么铁磁材料在磁化过程中会出现饱和现象呢？因为磁铁材料在开始磁化阶段，如图 3—1(b) 中曲线的 OA 部分，铁磁材料中有很多分子磁铁在外磁场作用下按一定方向偏转排齐，因此附加磁场显著增强，曲线 OA 显著上升；当磁化到一定程度时（如在 A 点附近），分子磁铁基本上已按一定方向排齐，这时再增大 H ，附加磁场的增加就非常有限，这就是饱和现象。

二、常用铁磁材料

1. 软磁材料：如硅钢片、铸铁、铸钢等。这样的材料导磁系数 μ 大，剩磁与矫顽力小，易于磁化和去磁，因而磁滞损耗小。用于电机、变压器铁芯的硅钢片有两种：含硅量在 2.8% 以下的称为低硅钢片；在 2.8% 以上的称为高硅钢片。高硅钢片的损耗比低硅钢片低，但质脆，机械强度差，一般用于静止的变压器中。低硅钢片用于旋转电机。含镍量较大的铁镍合金（坡莫合金）导磁系数极大，矫顽力很小，常用来做高频变压器及脉冲变压器的铁芯，或用在交流仪表中。

2. 硬磁材料：如碳钢、钴钢、铁钴镍合金以及恒磁性瓷等。这类材料的剩磁与矫顽力大，有很强的剩磁场，生产中常用的磁钢就是用此类材料制成的。

铁磁材料反复磁化的频率（每秒改变线圈电流方向的次数）愈高，铁芯的损耗愈大。为了减少损耗，在频率很高的电子电路中，用铁氧体作磁性材料。如收音机中的磁棒等。

$$u_2 = u_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2)$$

这两个交流电压就可以用矢量图来表示：如图 4—8(a) 所示。

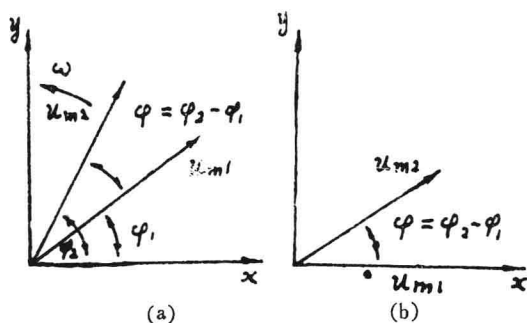


图 4—8 矢量图

在矢量图中，当所有矢量的角速度 (ω) 都相等时（即频率都相同），则它们相互间的相对位置（即彼此间的夹角）始终保持不变。若几个矢量的 ω 不同，则不能画在同一矢量图上加以比较。如果考虑矢量间的相位差，则在画矢量图时，第一个矢量的方向可以任意选定，而其他矢量与第一个矢量间的夹角必须等于它们之间的相位差 φ ，如图 4—8(b) 所示。如果是超前，则按逆时针方向旋转 φ 角度；如果是落后，则按顺时针方向旋转 φ 角度。

【例 2】试作出： $u_1 = 3\sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ)$ 和 $u_2 = 14.1 \sin(\omega t + 60^\circ)$ 的矢量图，并求出其合成矢量。

解：因为 u_1 u_2 的角频率相同，所以可画在同一矢量图上。这里矢量的大小均为正弦量的有效值：

$$U_1 = \frac{3\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 3$$

$$U_2 = \frac{14.1}{\sqrt{2}} = 10$$

根据矢量法可作出合成矢量 U 。如图 4—9 所示。

由三角函数得： $\varphi = 41.5^\circ$

$$U = \sqrt{3^2 + 10^2} = 10.48$$

$$U_m = \sqrt{2} \times 10.48 = 14.8$$

则 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = 14.8 \sin(\omega t + 41.5^\circ)$

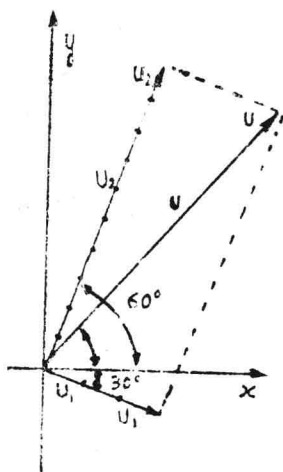


图 4—9 求合成矢量

第二节 纯电阻电路

只有电阻而没有电感和电容的交流电路称为纯电阻电路，如图 4—10 所示。

直流电路的欧姆定律，同样适用于纯电阻的交流电路。

$$i = \frac{u}{R}$$

上式中的 i 和 u 是瞬时值，计算起来很复杂，我们把它改为有效值来计算，则

$$I = \frac{U}{R} \quad (4-2)$$

其使用单位都与第二章讲的相同 I 以安为单位， U 以伏为单位， R 以欧为单位。

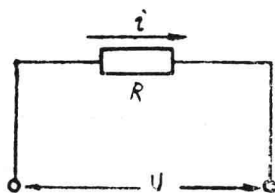


图 4—10 纯电阻电路

作用,故称为电感性电路。因为矢量 U_L 与 U_C 方向相反,且 $U_L > U_C$,故它们的合成矢量 U_x 的方向与 U_L 相同,其大小为 $U_L - U_C$ 。再利用直角三角形的勾股定理可求得矢量 U_R 与 U_x 之和 U (即电路的总电压),如图 4-23 所示。由图可见,电感性电路中的电压 u 比电流 i 超前 φ , u 的数值大小为:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_x^2} = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad (4-10)$$

在式 (4-10) 中用电流及阻抗的乘积代替电压后,又可得到:

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{(IR)^2 + (IX_L - IX_C)^2} \\ &= I \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \\ &= I \cdot Z \end{aligned}$$

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (4-11)$$

$$I = \frac{U}{Z} \quad (4-12)$$

式 (4-12) 就是交流电路的欧姆定律表示式,其中 Z 是交流电路的阻抗,单位为欧姆。

合成矢量 U 与矢量 I 的夹角:

$$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} \quad (4-13)$$

下面我们再研究电路中的感抗 X_L 小于容抗 X_C 的情形,这种电路是由电容起主要作用,故称为电容性电路。和电感性电路一样,我们可作出它们的合成矢量图如图 4-24 所示。由图可见,电容性电路中的电压 U 比电流 i 落后 φ ,由于 $(U_C - U_L)^2 = (U_L - U_C)^2$ 和 $(X_C - X_L)^2 =$

$(X_L - X_C)^2$,经过相似的计算所得的结果与 (4-10)、(4-11)、(4-12) 式相同。而矢量 U 与矢量 I 的夹角:

$$\varphi = \arctg \frac{U_C - U_L}{U_R} = \arctg \frac{X_C - X_L}{R} \quad (4-14)$$

〔例 1〕 已知由电阻 $R = 40\Omega$, 感抗 $X_L = 90\Omega$ 和容抗 $X_C = 60\Omega$ 组成的串联电路接在电压 $U = 220V$ 的交流电源上,试求电路的总阻抗 Z 和电流 I ,并确定电流比电压超前还是落后。

解: 先按 (4-11) 式求出总阻抗:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{40^2 + (90 - 60)^2} = 50\Omega$$

再根据 (4-12) 式求出电路中的电流:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{50} = 4.4A$$

因为感抗 X_L 大于容抗 X_C , 所以是电感性电路, 电流落后于电压。

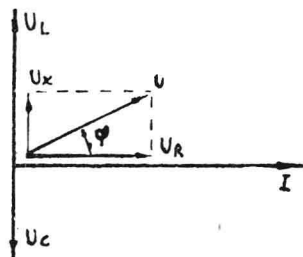


图 4-23 当 $X_L > X_C$ 时 u_R 与 u_C 的合成矢量

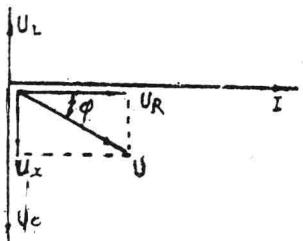


图 4-24 当 $X_C > X_L$ 时 u_R 与 u_L 的合成矢量

谐振电路中所用的R是LC的损耗电阻，而不是外接电阻，务必注意。

〔例1〕在图4—32所示电路中， $R = 5\Omega$ ， $L = 0.1\text{H}$ ， $C = 100\mu\text{F}$ ，当外加某频率电压时，回路发生串联谐振；若所加电压为220V，试求回路电流I，谐振频率 f_0 ，电感上电压与总电压之比。

$$\text{解： } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{0.1 \times 100 \times 10^{-6}}} = 50.4\text{Hz}$$

$$X_C = X_L = 2\pi f_0 L = 2 \times 3.14 \times 50.4 \times 0.1 = 31.6\Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{5} = 44\text{A}$$

$$U = U_R = 220\text{V}$$

$$U_C = U_L = IX_L = 44 \times 31.6 = 1390\text{V}$$

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{1390}{220} = 6.3$$

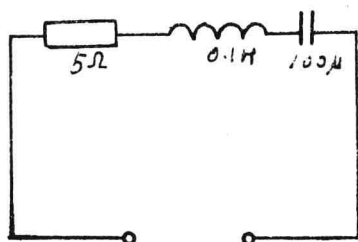


图4—32 RLC串联电路

二、并联谐振

图4—33(a)为RLC并联电路，其中R为L的损耗电阻，阻值很小。其阻抗表示式为：

$$Z \approx \frac{\frac{L}{C}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

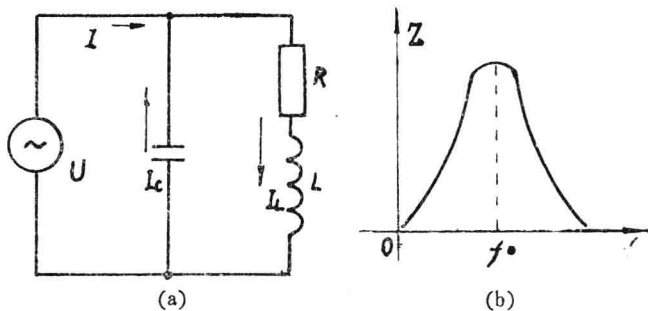


图4—33 RLC并联电路

当 $f = f_0$ 时，满足 $X_L = X_C$ 电路达到谐振，这时：

$$\text{谐振频率} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$\text{谐振阻抗} \quad Z_0 = Z_{\max} = \frac{L}{CR} = QX_C = QX_L$$

$$\text{谐振电流} \quad I_C = \frac{U}{X_C} = QL \approx I_L$$

并联谐振时总阻抗达到最大值，且为电阻性，图4—32(b)表示了并联谐振电路的阻抗Z与频率f的关系。通过电容C的电流 I_C 和通过电感L的电流 I_L 近似相等，且方

向相反，都达到最大值，是外电路电流的 Q 倍，因此并联谐振又称电流谐振。

并联谐振被广泛应用于电子技术，经常利用它的选频特性组成滤波电路， LC 正弦波振荡器等。

〔例2〕如图4—34所示电路， $R = 3\Omega$ 、 $L = 0.2H$ 、 $C = 50\mu F$ ，当外加电压为交流220V时，回路发生并联谐振。试求谐振频率 f_0 和回路总电流 I 。

解：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.2 \times 50 \times 10^{-6}}} = 50\text{Hz}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 50 \times 10^{-6}} = 63.6\Omega$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{220\text{V}}{63.3\Omega} = 3.46\text{A}$$

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{0.2}{50 \times 10^{-6}}} = 20$$

$$I = \frac{I_C}{Q} = \frac{3.46}{20} = 0.17\text{A}$$

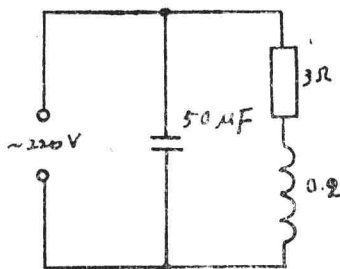


图 4—34

习 题

1. C_1 和 C_2 均为 $30\mu F$ ，耐压450V，问串联后总电容量是多少？
2. 1题中两电容并联时的总电容量是多少？
3. 一个旁路电容器， $C = 0.01\mu F$ ，求它对550KHz的高频信号及对5KHz的音频信号的容抗分别是多少？
4. 把一个电感量为20mH的线圈，接在11V的交流电压上，如果通过的电流是0.1mA，求线圈的感抗和交流电的频率（设线圈电阻忽略不计）。
5. 计算 5Ω 电阻与 12Ω 感抗串联电路的阻抗。
6. 有一电阻和电容串联电路，已知电阻 $R = 7\Omega$ ，容抗 $X_C = 24\Omega$ ，电路中电流为2A，问电阻两端电压降 $U_R = ?$ 电容两端电压降 $U_C = ?$ 电路中总的电压 $U = ?$ 并用矢量图表示。
7. 将由电容 $C = 40\mu F$ 及电阻 $R = 60\Omega$ 串联组成的电路接在频率 $f = 50\text{Hz}$ ，电压 $U = 220\text{V}$ 的电源上，试求：容抗 X_C 、电路的阻抗 Z 和电路中的电流 I 。
8. 已知由电阻 $R = 30\Omega$ ，电感 $L = 382\mu H$ 和电容 $C = 0.04\mu F$ 组成的串联电路接在电压 $U = 5\text{V}$ ，频率 $f = 50\text{KHz}$ 的电源上。试求①感抗 X_L ；②容抗 X_C ；③阻抗 Z ；④电流 I ；⑤电阻两端的电压 U_R ；⑥电感两端的电压 U_L ；⑦电容两端的电压 U_C 。并用矢量图表示。
9. 串联谐振的阻抗表达式是如何得来的？
10. 并联谐振和串联谐振的特性有何不同？