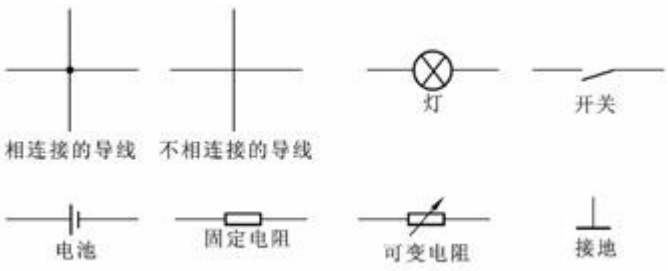
教师授课方案

课题	1.1 电路、1.2 电流、电压、电位和电动势				
班级		课时	2	课型	理论课
教学目标	掌握： 1．电路的组成及其作用。 2．理解电流产生的条件和电流的概念，掌握电流的计算公式。 3．掌握电位，电压的概念及之间的关系，电压的方向 4．理解和掌握电动势的概念，方向、电动势与电源电压的关系				
德育渗透	培养学生科学探究的态度				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	电流、电压参考方向				
掌握双语教学	电压 voltage、电流 current、参考方向 reference direction				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课]电路是怎样组成的？电路的基本概念有些什么？	提问
听讲	[教学内容] 第一节电路 一、电路的组成 1．电路：由电源、用电器、导线和开关等组成的闭合回路。 2．电路的组成：电源、用电器、导线、开关（画图讲解）。 (1)电源：把其他形式的能转化为电能的装置。如：干电池、蓄电池等。 (2)用电器：把电能转变成其他形式能量的装置，常称为电源负载。如电灯等。 (3)导线：连接电源与用电器的金属线。作用：把电源产生的电能输送到用电器。 (4)开关：起到把用电器与电源接通或断开的作用。 二、电路图 1．电路图：用规定的图形符号表示电路连接情况的图。 2．几种常用的标准图形符号。  第二节电流、电压、电位和电动势 一、电流的形成 1．电流：电荷的定向移动形成电流。（提问） 2．在导体中形成电流的条件： (1)要有自由电荷。 (2)必须使导体两端保持一定的电压（电位差）。 二、电流 1．电流的大小	

	等于通过导体横截面的电荷量与通过这些电荷量所用时间的比值。 $I=\frac{q}{t}$ 2．单位：1A = 1C/s；1mA = 10–3A；1μA = 10–6A 3．电流的方向 实际方向—规定：正电荷定向移动的方向为电流的方向。 提问：金属导体、电解液中的电流方向如何？ 参考方向：任意假定。 如果计算结果I>0，表明电流的实际方向与参考方向相同； 如果计算结果I<0，表明电流的实际方向与参考方向相反。 4．直流电：电流方向和强弱都不随时间而改变的电流。（画图说明） 5.电流的测量（实验部分） （1）对交、直流电流应分别使用交流电流表和直流电流表测量。 （2）电流表必串接到被测量的电路中。 （3）直流电流表表壳接线柱上标明的“+”、“－”记号，应和电路的极性相一致，不能接错，否则指针要反转，既影响正常测量，也容易损坏电流表。一般电流表不直接接电源。 （4）要合理选择电流表的量程。 每个电流表都有一定的测量范围，称为电流表的量程。 一般被测电流的数值在电流表量程的一半以上，读数较为准确。因此在测量之前应先估计被测电流大小，以便选择适当量程的电流表。 若无法估计，可先用电流表的最大量程挡测量，当指针偏转不到1/3刻度时，再改用较小挡去测量，直到测得正确数值为止。 三、电位、电压、电动势 电位：是衡量单位正电荷在电场中某点电位能的大小的物理量。 1.电位的定义：单位正电荷在电场中某点所具有的电位能，用V表示 V=W/q= 2.参考点：电场中不同点的电位值的大小不一样，为了方便比较，需要指定一个参考点， 参考点的电位为零，参考点不同，电路中各点的电位有不同的数值。 电压：用来衡量电场做功能力大小的物理量，用字母U表示 1.定义：电场力把单位正电荷从a点移到b点，所做的功	

Uab=Wab/q=

2.电压与电位的关系：可见，电压就是电场或电路中两点之间的电位差。电压与路径无关。可见电位就是电路中某点与参考点之间的电压。

3.电压的方向

电压的方向是指电场力作正功时，正电荷的运动方向，即由高电位指向低电位。电路图上标出的电压方向为参考方向。

如果计算结果 U>0，表明电流的实际方向与参考方向相同；

如果计算结果 U<0，表明电流的实际方向与参考方向相反。

电压方向为参考方向的表示方法

（1）用双下标表示，例 U_{AB} 方向 A 指向 B，$V_A > V_B$

（2）用“+、－”极性表示

(3)用箭头表示

电源和电动势

1.电源：是将其它形式的能转换成电能的装置，主要的参数电动势

2.电动势：用以反映电源内部非静电力做功本领强弱的物理量

定义：指非静电力把正电荷从复寂静电源内部已送到正极所做的功与被移送的电荷量的比值。用 E 表示不同的电源，电动势不同

E=W/q=

E 的单位是：V

3.电动势的方向：是指非静电力做正功时，正电荷的运动方向，即由电源的负极指向正极。

4．电源电压与电动势的关系如图

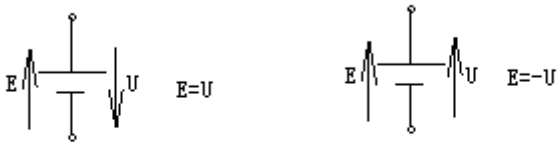


图 1－3－4

电压的测量（实验部分）

（1）对交、直流电压应分别采用交流电压表和直流电压表测量。

（2）电压表必须并联在被测电路的两端。

	（3）直流电压表表壳接线柱上标明的“+”“－”记号，应和被测两点的电位相一致，即“+”端接高电位，“－”端接低电位，不能接错，否则指针要反转，并会损坏电压表。 （4）合理选择电压表的量程，其方法和电流表相同。 关于电流、电压、电动势三者之间的关系： 1、在电路中，电源有电动势而实现电荷的积累，产生电压，由于有了电压，负载中的自由电荷才会呈现有规则的运动而形成电流； 2、强弱、方向均不随时间而变得电流、电压、电动势统称为稳恒直流电，简称直流电，用 DC 表示；相应地大小、方向随时间而变的电流、电压、电动势统称交流电，用 AC 表示。	
讨论	**[教学小结]** 1．电路的组成及其作用。 2．形成电流的条件，电流的大小和方向。 3．电压、电位、电动势的概念。	提问
记录	**[布置作业]** 课后习题 1-2	

教师授课方案

课题	1.3 电阻元件和欧姆定律 1.4 电能和电功率				
班级		课时	8	课型	理论+实践课
教学目标	1.熟练掌握欧姆定律。 2.理解电能和电功率的概念。 3.掌握电能、电功率的计算以及功率正负的意义。 4.6 课时实验详见实验指导书				

德育渗透	培养学生科学探究的态度，将科学与生活有机联系
教学方法	讲授法
新知识 新技术或 参阅资料	通过功率判断电源、负载
双语教学	欧姆定律 ohm's law
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课]初中我们已学习过欧姆定律，因为参考方向的引入，我们再来了解一下欧姆定律。	提问
听讲	[教学内容] **第三节 电阻及欧姆定律** **一、电阻** 1．导体对电流所呈现出的阻碍作用。不仅金属导体有电阻，其他物体也有电阻。 2．导体电阻是由它本身的物理条件决定的。 例：金属导体，它的电阻由它的长短、粗细、材料的性质和温度决定。 3．电阻定律：在保持温度不变的条件下，导体的电阻跟导体的长度成正比，跟导体的横截面积成反比，并与导体的材料性质有关。 $$R=\rho\frac{l}{S}$$	

式中：ρ－导体的电阻率。它与导体的几何形状无关，而与导体材料的性质和导体所处的条件有关（如温度）。

单位：R－欧姆（Ω）；l－米（m）；S－平方米（m^2）；ρ－欧·米（Ω·m）。

4．电阻率的大小反映材料导电性能的好坏，电阻率愈大，导电性能愈差。

导体：$\rho < 10^{-6}\Omega\cdot m$

绝缘体：$\rho > 10^{7}\Omega\cdot m$

半导体：$10^{-6}\Omega\cdot m < \rho < 10^{7}\Omega\cdot m$

二、电阻与温度的关系

1．温度对导体电阻的影响：

(1)温度升高，自由电子移动受到的阻碍增加；

(2)温度升高，使物质中带电质点数目增多，更易导电。随着温度的升高，导体的电阻是增大还是减小，看哪一种因素的作用占主要地位。

2．一般金属导体，温度升高，其电阻增大。少数合金电阻，几乎不受温度影响，用于制造标准电阻器。

三、万用表测量电阻（实验部分）

测量时注意以下几点：

1.准备测量电路中的电阻时应先切断电源，切不可带电测量。

2.首先估计被测电阻的大小，选择适当的倍率挡，然后调零，即将两支表笔相触，旋动调零电位器，使指针指在零位。

3.测量时双手不可碰到电阻引脚及表笔金属部分，以免接入人体电阻，引起测量误差。

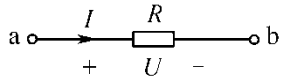
4．测量电路中某一电阻时，应将电阻的一端断开。

欧姆定律

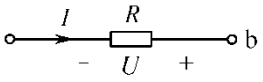
一、欧姆定律

引入内容：关联参考方向：电压与电流的参考方向相同

非关联参考方向：电压与电流的参考方向相反



(a)**关联参考方向**

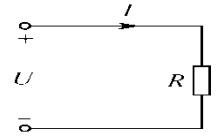


(b)**非关联参考方向**

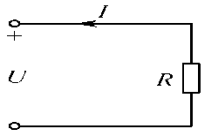
注意：1.分析电路前必须选定电压和电流的参考方向。

2.参考方向选定之后，在计算过程中不能改变。

欧姆定律：导体中的电流，与导体两端的电压成正比，与导体的电阻成反比。



(a)关联参考方向



(b)非关联参考方向

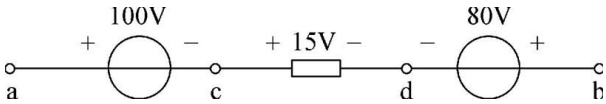
U=IRU=-IR

表达式中有两套正负号：

① 式前的正负号由U、I参考方向的关系确定；

②U、I值本身的正负则说明实际方向与参考 方向之间的关系。

一段有源电路的欧姆定律（举例）



$U_{ad}=U_{ac}+U_{cd}=100V+15V=115V$

全电路欧姆定律

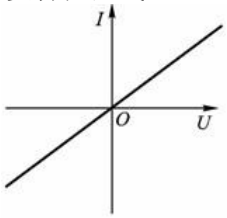
闭合电路中的电流与回路中全部电源的电动势之和成正比，与回路中全部电阻之和成反比。

公式：

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

二、伏安特性曲线

1．定义：以电压为横坐标，电流为纵坐标，可画出电阻的 $U-I$ 关系曲线，叫电阻元件的伏安特性曲线。



2．线性电阻：电阻元件的伏安特性曲线是直线。

$$K=\frac{I}{U}；\ R=\frac{U}{R}=\frac{1}{K}$$

3．非线性电阻：若电阻元件的伏安特性曲线不是直线，例：二极管。

第四节 电能和电功率

一、电能

1．设导体两端电压为 U，通过导体横截面的电量为 q，电场力所做的功为：$W = q\,U$ 而 $q = It$，所以

$$W = U\,I\,t$$

单位：W－焦耳（J）；U－伏特（V）；I－安培（A）；t－秒（s）。

1 度 $= 1\,\mathrm{k\,W\cdot h} = 3.6 \times 10^6\,\mathrm{J}$

2．电场力所做的功即电路所消耗的电能 $W = U\,I\,t$。

3．电流做功的过程实际上是电能转化为其他形式的能的过程。

二、电功率

1．在一段时间内，电路产生或消耗的电能与时间的比值。

$$P = \frac{W}{t}$$

或 $P = U\,I$

单位：P－瓦特（W）。

2．额定功率、额定电压：用电器上标明的电功率和电压，叫用电器的额定功率和额定电压。若给用电器加上额定电压，它的功率就是额定功率，此时用电器正常工作。若加在它上面的电压改变，则它的实际功率也改变。

三、功率的正负

引入内容电源与负载的判别

1.根据 U、I 的实际方向判别

电流流过电源时，是从电源的负极到正极；

电流流过负载时，是从负载的高电位到低电位。

2.根据 *U*、*I* 的参考方向判别

U、I 参考方向选择相同，

P=UI>0，消耗功率负载；

P=UI<0，产生功率电源。

U、I 参考方向选择相反，

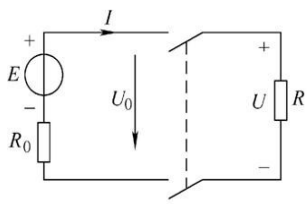
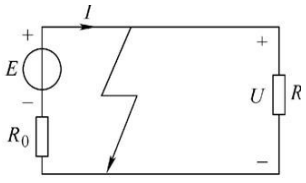
P=UI>0，产生功率电源；

P=UI<0，产生功率负载。

讨 论	**[教学小结]** 1．电阻性能与测量 2．电路欧姆定律。 3．伏安特性曲线。 4．电能和电功的计算。 5．功率正负的意义	提 问
记 录	**[布置作业]** 课后习题 1-1	

教师授课方案

课题	1.5 电路的三种工作状态 1.6 电源				
班级		课时	2	课型	理论课
教学目标	1．掌握电路三种工作状态。 2．建立电压源和电流源的概念。 3．掌握电压源与电流源的等效变换。				
德育渗透	热爱生活，关注用电安全				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	电压源、电流源				
双语教学	电压源 voltage source、电流源 current source				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课]电路有三种工作状态，我们很多时候都听到过不能让电路短路，短路就是电路的一种工作状态，剩下的两种工作状态是什么？	提问
听讲	[教学内容] **第五节 电路的三种工作状态** **电路的状态（画图说明）** 1．通路（闭路）：电路各部分连接成闭合回路，有电流通过。 2．开路（断路）：电路断开，电路中无电流通过。 3．短路（捷路）：电源两端或者电路中某些部分被导线直接相连，这时电源输出的电流不经过负载，只经过连接导线直接流回电源，这种状态叫做短路状态，简称短路 注意：短路时电流很大，会损坏电源和导线，应尽量避免。 图 a 的开关合上，电源就向负载供电，电路处在有载工作状态。在图 a 中，将开关打开，电源与负载断开，这时电路处在空载状态(也称开路状态)。在图 b 所示的电路中，当电源两端被电阻接近为零的导线短接时，电路就处于短路工作状态。  a) 开路  b) 短路 **电器设备的额定值讲解** 电气设备安全工作时所允许的最大电流、最大电压分别称为它们的额定电流、额定电压。额定电压下的电功率称为额定功率；额定功率通常标示在电器设备的铭牌数据上，作为用电器正常工作条件下的最高限值。 电气设备在额定功率下的工作状态称为额定工作状态，也称满载； 低于额定功率的工作状态称为轻载； 高于额定功率的工作状态称为过载或超载。 由于过载很容易烧坏用电器，所以一般不允许出现过载。 **第六节 电源** **一、电压源** 1．电压源：为电路提供一定电压的电源。	

2．恒压源：电源内阻为零，电源提供恒定不变的电压。

3．恒压源的特点

（1）它的电压恒定不变。

（2）通过它的电流可以是任意的，且决定于与它连接的外电路负载的大小。

4．符号

二、电流源

1．电流源：为电路提供一定电流的电源。

2．恒流源：电源内阻为无穷大，电源将提供恒定不变的电流。

3．恒流源的特点

（1）它提供的电流恒定不变，不随外电路而改变。

（2）电源端电压是任意的，且决定于外电路。

4．符号

三、电压源与电流源的等效变换

1．电压源＝理想电压源串联内阻 R_0

电流源＝理想电流源并联内阻 R_0

2．电压源

$$U = U_S - I R_0$$

$$I = \frac{U_S - U}{R_0}$$

电流源

$$I = I_S - \frac{U}{R_S}$$

对外等效

$$\frac{U_S - U}{R_0} = I_S - \frac{U}{R_S}$$

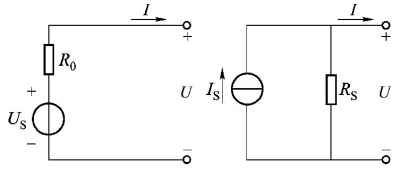
所以

$$I_S = \frac{U_S}{R_0} = \frac{U_S}{R_S}，\ R_0 = R_S$$

3．结论

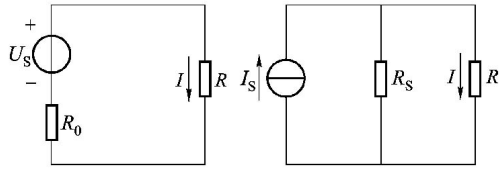
（1）一个电压源与电阻的串联组合，可用一个电流源与电阻的并联组合来等效代替。

条件：$I_S = U_S / R_0$，$R_S = R_0$，如下图



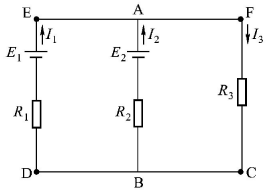
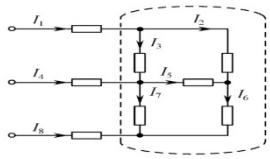
（2）一个电流源与电阻的并联组合，可用一个电压源与电阻的串联组合来等效代替。

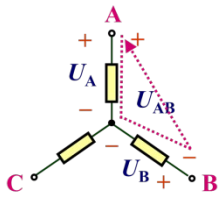
条件：$U_S = I_S R_S$，$R_0 = R_S$ 如下图。

	 注意： （1）I_S与U_S的方向一致。 （2）等效变换对外电路等效，对电源内部不等效。 （3）恒压源和恒流源之间不能等效。 **五、电源等效变换及化简原则** 1．注意点（3） 2．两个并联的电压源不能直接合并成一个电压源，但两个并联的电流源可以直接合并成一个电流源。 3．两个串联的电流源不能直接合并成一个电流源，但两个串联的电压源可以直接合并成一个电压源。 4．与恒压源并联的电流源或电阻均可去除；与恒流源串联的电压源或电阻均可去除。（电压源与电流源串联，电压源无作用；电压源与电流源并联，电流源无作用）	
讨 论	**[教学小结]** 1、电路三种状态及特点 2、电源等效变换及化简原则	提 问
记 录	[布置作业] 习题 1-9、1-10	

教师授课方案

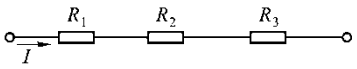
课题	1.7 基尔霍夫定律习题				
班级		课时	3	课型	理论+实践课
教学目标	1．掌握节点、支路、回路、网孔的概念。 2．熟练掌握基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。				
德育渗透	热爱生活，关注用电安全				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	基尔霍夫定律				
双语教学	基尔霍夫定律 kirchhoff’s law				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课]给出两个电路，请学生分析两电路的不同之处，从而导入新课，引入电路基本概念、复杂电路。	提问
听讲	[教学内容] **第七节 基尔霍夫定律** **一、基本概念** 1．复杂电路。 2．支路：由一个或几个元件首尾相接构成的无分支电路。 节点：三条或三条以上的支路汇聚的点。 回路：电路中任一闭合路径。 网孔：没有支路的回路称为网孔。 3．提问：图 3-1 中有几个节点、几条支路、几条回路、几个网孔？  4．举例 **二、基尔霍夫电流定律** 1．形式一：电路中任意一个节点上，流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和。 $$\sum I_{入}=\sum I_{出}$$ 形式二：在任一电路的任一节点上，电流的代数和永远等于零。 $$\sum I=0$$ 规定：若流入节点的电流为正，则流出节点的电流为负。 2．推广：应用于任意假定的封闭面。流入封闭面的电流之和等于流出封闭面的电流之和。 **例：在图中，若 I_1=6A，I_3=4A，I_4=2A，I_7=3A，求 I_2、I_5、I_6、I_8。**  三、基尔霍夫电压定律 1．内容：从一点出发绕回路一周回到该点时，各端电压的代数和等于零。 $$\sum U=0$$ 2．注意点： （1）在绕行过程中从元器件的正极到负极，电压取正，反之为负。	

	（2）绕行方向可选择，但已经选定后不能中途改变。 3．推广 KVL 不仅适用于闭合回路，也可推广到求解电路中任意两点之间的电压。  $U_A - U_B - U_{AB} = 0$ 第一章课后习题解答	
讨 论	**[教学小结]** 1．基尔霍夫电流定律的内容、表达式。 2．基尔霍夫电压定律的内容、表达式。	提 问
记 录	**[布置作业]** 课后 1-13，课堂抄写作业两题	

教师授课方案

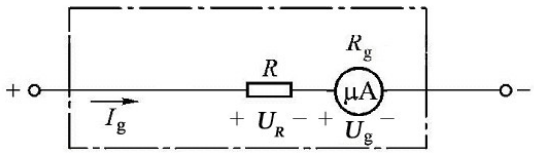
课题	2.1 电阻的连接				
班级		课时	2	课型	理论课
教学目标	1．熟练掌握电阻串、并联的性质和作用。 2．掌握简单混联电路的分析和计算。 3．掌握星形--三角形联结之间的等效变换				
德育渗透	热爱生活，关注用电安全				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	星形-三角形联结				
双语教学	电路元件 circuit element				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课]给出两个电路，请学生分析电阻的串并联关系，从而导入新课	提问
听讲	[教学内容] **第一节电阻的串联** 一、定义 （1）电阻的串联——把两个或两个以上的电阻依次连接起来，使电流只有一条通路。  （2）特点 ①电路中电流处处相等。 ②电路总电压等于各部分电路两端的电压之和。 **二、重要性质** 1．总电阻 $$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$ 结论：串联电路的总电阻等于各个电阻之和。 2．电压分配 $$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \cdots = \frac{U_n}{R_n} = I$$ 结论：串联电路中各电阻两端的电压与它的阻值成正比。 3．功率分配 $$\frac{P_1}{R_1} = \frac{P_2}{R_2} = \frac{P_3}{R_3} = \cdots = \frac{P_n}{R_n}$$ 结论：串联电路中各电阻消耗的功率与它的阻值成正比。 **例 1：**有 4 个电阻串联，其中 $R_1 = 20\Omega$，$R_2 = 15\Omega$，$R_3 = 10\Omega$，$R_4 = 10\Omega$，接在 110V 的电压上。求 （1）电路的总电阻及电流；（2）R_1 电阻上的电压。 **例 2：**例 1（《电工基础》黄忠琴主编）。 **三、电压表（略）**	

（1）常用的电压表是用微安表或毫安表改装成的。
（2）毫安表或微安表的重要参数：

I_g——满偏电流

R_g ——表头内阻



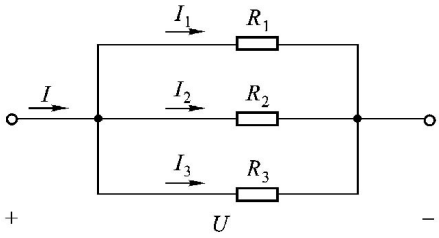
（3）电流越大，毫安表或微安表指针的偏角就越大。由于 $U=IR$，则毫安表或微安表两端的电压越大，指针偏角也越大。
（4）如果在刻度盘上直接标出电压值，就可用来测电压，但这时能测的电压值很小。为了能测较大的电压，可串联一电阻，分担部分电压，就完成了电压表的改装。
（5）测量时要与被测电路并联。
（6）关键：会计算串联的电阻 R 的大小。设电流表的满偏电流为 I_g，内阻为 R_g，要改装成量程为 U 的电压表，求串入的 R

$$R=\frac{U_R}{I_g}=\frac{U-I_gR_g}{I_g}$$

第二节 电阻的并联

一、定义

1．电阻的并联：把若干个电阻一端连在一起，另一端连接在一起。



2．特点：
①电路中各支路两端的电压相等；
②电路中总电流等于各支路的电流之和。

二、重要性质

1．总电阻
设电压为 U，根据欧姆定律，则

$$I=\frac{U}{R}；\ I_1=\frac{U}{R_1}；\ I_2=\frac{U}{R_2}；\ \cdots；\ I_n=\frac{U}{R_n}$$

因为

$$I=I_1+I_2+I_3+\cdots+I_n$$

所以

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\cdots+\frac{1}{R_n}$$

结论：并联电路总电阻的倒数等于各个电阻的倒数之和。

2．电流分配

$$U=I_1R_1;\ U=I_2R_2;\ U=I_3R_3;\ \cdots;\ U=I_nR_n$$

$$I_1R_1=I_2R_2=I_3R_3=\cdots=I\,R_n=U$$

结论：并联电路中通过各个电阻的电流与它的阻值成反比。

当只有两只电阻并联时 $I_1=\dfrac{R_2}{R_1+R_2}\ I$；$I_2=\dfrac{R_1}{R_1+R_2}\ I$

3．功率分配

$$P_K=U\,I_K=\frac{U^2}{R_K}$$

$$P_1R_1=P_2R_2=P_3R_3=\cdots=P_nR_n$$

结论：并联电路中各个电阻消耗的功率与它的阻值成反比。

例 1：$R_1=24\ \Omega$，$R_2=8\ \Omega$，$U=12\text{V}$，求总电阻及各电阻上的电流。

例 2：5 个 25 Ω的电阻并联，总电阻为多少？

例 3：两只电阻并联，其中 R_1 为 100 Ω，通过 R_1 的电流 I_1 为 0.4A，通过整个并联电路的电流 I 为 1A，求 R_2 和通过 R_2 的电流 I_2。

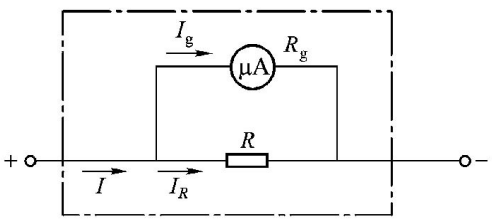
例 4：在 240 V 的线路上并接 15 Ω、30 Ω、40 Ω电热器各一个，求（1）各电热器上的电流；

（2）总电流及总电阻；

（3）总功率及各电热器消耗的电功率。

三、电流表（略）

利用并联电路的分流原理，在微安表或毫安表上并联一分流电阻，按比例分流一部分电流，则可以利用微安表和毫安表测量大的电流（扩大量程）。



$$R=\frac{U_R}{I_R}=\frac{I_gR_g}{I-I_g}$$

其中：I_g为电流表的满偏电流；R_g为电流表内阻；I为电流表的量程；R 为分流电阻。

第三节 电阻的混联

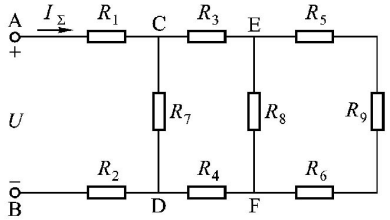
一、混联

既有电阻的串联又有电阻的并联，叫电阻的混联。

二、混联的计算步骤

1．把电路进行等效变换；
2．先计算各电阻串联和并联的等效电阻值，再计算电路的总的等效电阻；
3．由电路的总的等效电阻值和电路的端电压计算电路的总电流；
4．利用电阻串联的分压和电阻并联的分流关系，计算各部分电压及电流。

例 1 ： 已知：$R_1=R_2=8\ \Omega$，$R_3=R_4=6\ \Omega$，$R_5=R_6=4\ \Omega$，$R_7=R_8=24\ \Omega$，$R_9=16\ \Omega$，$U=224$ V，求：通过 R_9 的电流和 R_9 两端的电压。



第四节星形电阻网络与三角形电阻网络以及等效变换

图 1（a）（b）所示三端电阻网络分别称为星形（Y 形）电阻网络和三角形（△形 ）电阻网络。

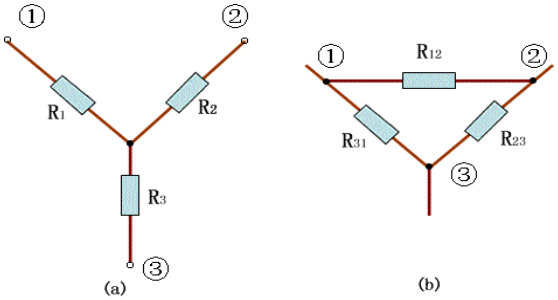


图 1 星形电阻网络与三角形电阻网络

星形电阻网络与三角形电阻网络可以根据需要进行等效变换。

互换条件是流入流出的电流一一对应，对应端间电压也一一对应相等，那么星形电阻网络与三角形电阻网络可以根据需要进行等效变换，变换后，电路其他部分的电压和电流不变。

（1）由三角形电阻网络变为等效星形电阻网络

星形网络中①、②两端间的端口等效电阻（③端开路）由 R_1 与 R_2 串联组

成，三角形网络中①、②两端间的等效电阻（③端开路）由R_{23}与R_{31}串联后再与R_{12}并联组成。令此两等效电阻相等，即得

$$R_1+R_2=\frac{R_{12}(R_{23}+R_{31})}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}$$（③端开路）（2-2-1）

同理 $$R_2+R_3=\frac{R_{23}(R_{31}+R_{12})}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}$$（①端开路）（2-2-2）

$$R_3+R_1=\frac{R_{31}(R_{23}+R_{12})}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}$$（②端开路）（2-2-3）

由式（2-2-1）至（2-2-3）联立得

$$R_1=\frac{R_{12}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}$$（2-2-4）

$$R_2=\frac{R_{23}R_{12}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}$$（2-2-5）

$$R_3=\frac{R_{31}R_{23}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}$$（2-2-6）

以上三式是由三角形电阻网络变为等效星形电阻网络时计算星形网络电阻的公式。这三个公式的结构规律可以概括为：星形网络中的一个电阻，等于三角形网络中联接到对应端点的两邻边电阻之积除以三边电阻之和。

（2）由星形电阻网络变为等效三角形电阻网络

可将式（2-2-4）、（2-2-5）、（2-2-6）对R_{12}、R_{23}和R_{31}联立求解得

$$R_{12}=R_1+R_2+\frac{R_1R_2}{R_3}$$（2-2-7）

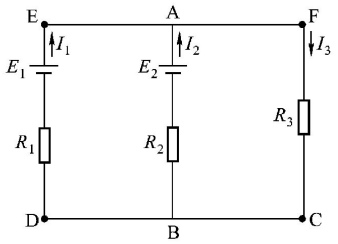
$$R_{23}=R_2+R_3+\frac{R_2R_3}{R_1}$$（2-2-8）

$$R_{31}=R_1+R_3+\frac{R_1R_3}{R_2}$$（2-2-9）

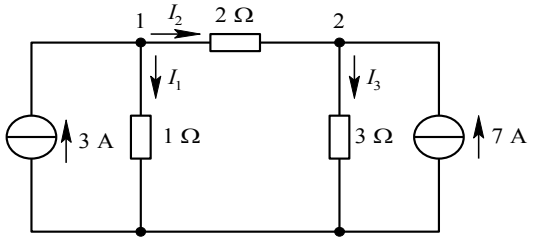
	这是由星形电阻网络变换为等效三角形电阻网络时计算三角形网络电阻的公式。这三个公式的结构规律可以概括为：三角形网络中一边的电阻，等于星形网络中联接到两个对应端点的电阻之和再加上这两个电阻之积除以另一电阻。	
讨论	**[教学小结]** 1．电阻串、并联的性质和特点。 2．简单混联电路的分析和计算。 3．星形--三角形联结之间的等效变换并联电路的特点	提问
记录	**[布置作业]** 课后习题 2-3	

教师授课方案

课题	2.2.1 支路电流法 2.2.2 节点电压分析法				
班级		课时	2	课型	理论课
教学目标	1．掌握支路电流法并能运用它解题。 2.掌握节点电压法并能运用它解题。				
德育渗透	热爱生活，注意用电安全				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	支路电流法、节点电压法				
双语教学	电路元件 circuit element、结点电位法 node voltage analysis				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课] 旧知识点复习强化，导入新课先复习基尔霍夫定律。（提问）基尔霍夫第一定律——电流定律：经过任意节点的电流代数和为零。吉尔霍夫第二定律——电压定律：任意闭合回路内的电压与电动势代数和为零。	提问
听讲	[教学内容] 支路电流分析法 **一、支路电流法** 1．以支路电流为未知量，应用基尔霍夫两定律列出联立方程，求出各支路电流的方法。 2．对于 n 条支路，m 个节点的电路，应用支路电流法解题的步骤： （1）选定各支路电流为未知量，并标出各电流的参考方向，并标出各电阻上的正、负。 （2）按基尔霍夫电流定律，列出（$m-1$）个独立的节点电流方程式。 （3）指定回路的绕行方向，按基尔霍夫电压定律，列出 $n-(m-1)$ 个回路电压方程。 （4）代入已知数，解联立方程式，求各支路的电流。 （5）确定各支路电流的实际方向。 3．举例 **例 1：**本节例题 **例 2：**如图，已知 $E_1=E_2=17\ \mathrm{V}$，$R_1=1\ \Omega$，$R_2=5\Omega$，$R_3=2\Omega$，用支路电流法求各支路的电流。  ## 2.2.2 节点电压分析法 参考点：在电路中任意选择的一点，假设该点的电压为零。 节点电压：其他独立节点与参考点之间的电压。 节点电压法：节点电压法是以节点电压为求解电路的未知量，利用基尔霍夫电流定律和欧姆定律导出（n-1）个独立节点电压为未知量的方程，联立求解，得出各节点电压。 适用范围：结构复杂、非平面电路、独立回路选择麻烦，以及节点少、回路多的电路。 一、节点电压方程式的一般形式	

步骤：1、选择最佳参考点，标在电路图中。
2、按照节点电压方程的一般形式，根据实际电路直接列出个节点电压方程。
3、联立求解，解出各节点电压。
4、根据节点电压，再求其他待求量。
注意：
1、自电导一定为正，互电导一定为负。
2、方程右边流入节点的电流为正，流出为负。
3、电路中有电压源支路：
（1）只有一个电压源支路，把参考节点选在电压源支路的一端，以充分利用已知电压。
（2）有两个以上电压源支路时，对于跨接于两个独立节点之间的电压源支路，一定要假设电流。或者将电压源与电阻的串联等效成电流源与电阻的并联。
4、电路中含有受控源支路时，一定要写补充方程，即控制量与节点电压的关系式。
例 3.3 试用节点电压法求（图中）所示电路中的各支路电流。



解取节点 O 为参考节点,节点 1、2 的节点电压为 U1、U2,列出节点方程，得

$$(\frac{1}{1}+\frac{1}{2})U_1-\frac{1}{2}U_2=3$$

$$-\frac{1}{2}U_1+(\frac{1}{2}+\frac{1}{3})U_2=7$$

解之得

$$U_1=6V,U_2=12V$$

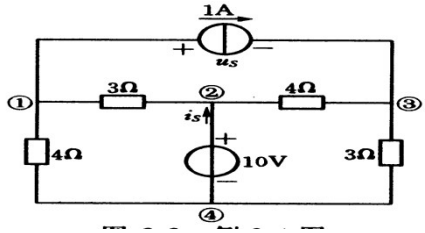
取各支路电流的参考方向,根据支路电流与节点电压的关系,有

$$I_1=\frac{U_1}{1}=\frac{6}{1}=6A$$

$$I_2=\frac{U_1-U_2}{2}=\frac{6-12}{2}=-3A$$

$$I_3=\frac{U_2}{3}=\frac{12}{3}=4A$$

二、电路中含有理想电压源支路的处理方法

	例 3.4 用节点电压法求（下图）所示电路中电流源两端电压 uS 和电压源支路中的电流 i_S。  解：适当选择参考点，使理想电压源正好跨接在参考点与某一节点之间，该节点电压就是理想电压源的电压。 选择节点 4 作为参考点，理想电压源正好跨接在参考点与节点之间，各节点电压方程为： 节点 1：（1/3+1/4）u_1-1/3u_2=-1A 节点 1：u_2=10V 节点 1：-1/4u_2+（1/3+1/4）u_3=1A 联立求解，得： u_1=4Vu_3=6V 电流源两端电压为： u_S=u_1-u_3=-2V	
讨 论	**[教学小结]** 1．支路电流法、节点电压法解题步骤。 2．用支路电流法、节点电压法解题的注意点。	提 问
记 录	[布置作业] 习题 2-4、2-6	

教师授课方案

课题	2.2.3 叠加定理 2.2.4 戴维南定理与诺顿定理				
班级		课时	7	课型	理论+实践课
教学目标	1．掌握叠加定理、戴维南定理、诺顿定理的内容。 2．正确应用叠加定理、戴维南定理计算电路。				
德育渗透	利用戴维南的小故事对学生进行学习兴趣教育，让学生产生以服务人民为荣的人生观				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	叠加定理、戴维南定理				
双语教学	叠加原理 superposition theorem 戴维宁定理 thevenin’s theorem				

指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课]将叠加定理的举例电路图先用支路电流法先求解，为叠加定理的引入提供数据。而后引入叠加定理、戴维南定理的求解	提问
听讲	[教学内容] 2.2.3 叠加定理 一、叠加原理 1．运用叠加定理可以将一个复杂的电路分为几个比较简单的电路，然后对这些比较简单的电路进行分析计算，再把结果合成，就可以求出原有电路中的电压、电流，避免了对联立方程的求解。 2．内容：在线性电路中，任何一个支路中的电流（或电压）等于各电源单独作用时，在此支路中产生的电流（或电压）的代数和。 3．步骤： （1）分别作出由一个电源单独作用的分图，其余电源只保留其内阻。（对恒压源，该处用短路替代，对恒流源，该处用开路替代）。 （2）按电阻串、并联的计算方法，分别计算出分图中每一支路电流（或电压）的大小和方向。 （3）求出各电动势在各个支路中产生的电流（或电压）的代数和，这些电流（或电压）就是各电源共同作用时，在各支路中产生的电流（或电压）。 4．注意点： （1）在求和时要注意各个电流（或电压）的正、负。 （2）叠加定理只能用来求电路中的电流或电压，而不能用来计算功率。 二、举例 例 1：本节例题 2.2.4 戴维南定理与诺顿定理 当有一个复杂电路，并不需要把所有支路电流都求出来，只要求出某一支路的电流，在这种情况下，用前面的方法来计算就很复杂，应用戴维南定理求解就较方便。 一、二端网络 1．网络：电路也称为电网络或网络。 2．二端网络：任何具有两个引出端与外电路相连的电路。 3．输入电阻：由若干个电阻组成的无源二端网络，可以等效成的电阻。 4．开路电压：有源二端网络两端点之间开路时的电压。	

二、戴维南定理

1．内容：对外电路来说，一个含源二端线性网络可以用一个电源来代替。该电源的电动势 E0 等于二端网络的开路电压，其内阻 R0 等于含源二端网络内所有电动势为零，仅保留其内阻时，网络两端的等效电阻（输入电阻）。

2．步骤：

（1）把电路分为待求支路和含源二端网络两部分。

（2）把待求支路移开，求出含源二端网络的开路电压 Uab。

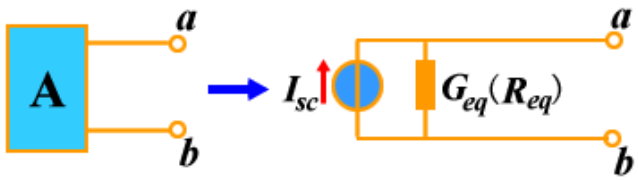
（3）将网络内各电源除去，仅保留电源内阻，求出网络二端的等效电阻 Rab。

（4）画出含源二端网络的等效电路，并接上代求支路电流。

3．注意：代替含源二端网络的电源极性应与开路电压 Uab 的极性一致。

三、诺顿定理

诺顿定理表述为：任何一个含源线性一端口电路，对外电路来说，可以用一个电流源和电导(电阻)的并联组合来等效置换；电流源的电流等于该一端口的短路电流，而电导(电阻)等于把该一端口的全部独立电源置零后的输入电导(电阻)。以上表述可以用下图表示。



诺顿定理

诺顿等效电路可由戴维宁等效电路经电源等效变换得到。诺顿等效电路可采用与戴维宁定理类似的方法证明。

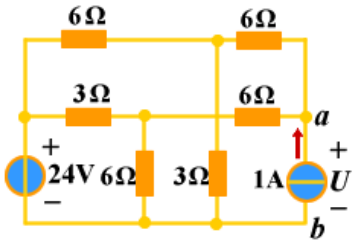
需要注意的是：

（1）当含源一端口网络 A 的等效电阻 $R_{eq}=0$ 时，该网络只有戴维宁等效电路，而无诺顿等效电路。

（2）当含源一端口网络 A 的等效电阻 $R_{eq}=\infty$ 时，该网络只有诺顿等效电路而无戴维宁等效电路。

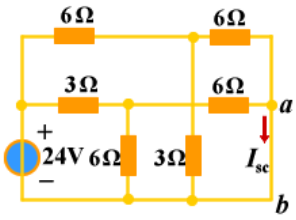
诺顿定理的应用

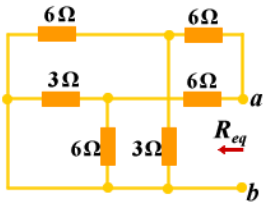
例求图示电路中的电压 U。



例图（a）

解：本题用诺顿定理求比较方便。因 a、b 处的短路电流比开路电压容易求。





例图（b）　　例图（c）

(1) 求短路电流 ISC，把 ab 端短路，电路如图(b)所示，解得：

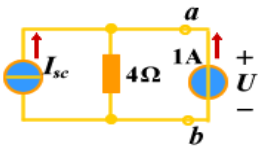
$$I_{sc}=\frac{24}{6//6+3}\times\frac{1}{2}+\frac{24}{3//6+6}\times\frac{3}{3+6}=3A$$

(2)求等效电阻 Req，把独立电源置零，电路如图(c)所示，为简单并联电路。

$$R_{eq}=[6//3+6]//[3//6+6]=4\Omega$$

（3）画出诺顿等效电路，接上待求支路如图(d)所示，得：

$$U=(3+1)\times4=16V$$

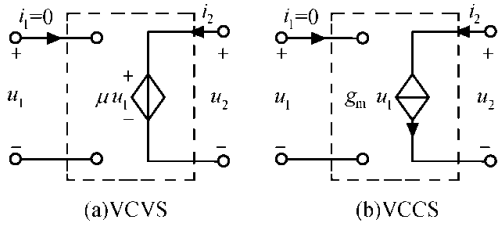
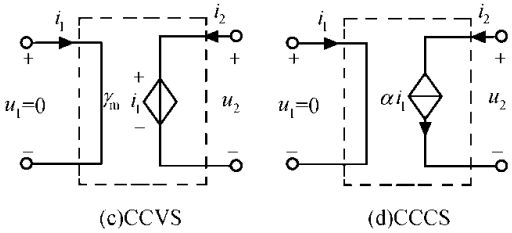


	图（d）	
讨论	**[教学小结]** 1．叠加定理、戴维南定理与诺顿定理的内容。 2．应用叠加定理、戴维南定理与诺顿定理解题的步骤。	提问
记录	**[布置作业]** 课后习题 2-7、2-8、2-12、2-15、2-16	

教师授课方案

课题	2.3 受控源电路的分析 2.4 最大功率传输定理				
班级		课时	2	课型	理论课
教学目标	1．理解受控电源的模型，了解含受控源电路的分析方法。 2．在戴维南定理的基础上,理解负载获得最大功率的条件				
德育渗透	用受控源的引入，希望大家要严格按照规章制度办事				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	四种受控源				
双语教学	受控源电路 Controlled source circuits				

指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课] 引入不同独立电源符号引出受控电源符号	提问
听讲	[教学内容] **2.3 受控源电路的分析** **一、受控源的介绍** （1）定义：受控源的电压或电流不象独立源是给定函数，而是受电路中某个支路的电压（或电流）的控制。 （2）电路图符号  (a)VCVS (b)VCCS  (c)CCVS (d)CCCS （3）受控源的分类 ①电压控制电压源，简称 VCVS 如图(a) ②电压控制电流源，简称 VCCS 如图(b) ③电流控制电压源，简称 CCVS 如图(c)	

④电流控制电流源，简称 CCCS 如图(d)

（4）受控源和独立源的异同

1、受控源和独立源的相同点：两者都是电源，可向负载提供电压或电流。

2、受控源和独立源的不同点：独立电源的电动势或电流是由非电能量提供的，其大小、方向和电路中的电压、电流无关；受控源的电动势或电流，受电路中某个电压或电流的控制，它不能独立存在，其大小、方向由控制量决定。

二、含有受控源电路的分析

含有受控源的电路分析要点

1、可以用两种电源等效互换的方法，简化受控源电路。但简化时注意不能把控制量化简掉。否则会留下一个没有控制量的受控源电路，使电路无法求解。

2、如果一个二端网络内除了受控源外没有其他独立源，则此二端网络的开路电压必为 0。因为，只有独立源产生控制作用后，受控源才能表现出电源性质。

3、求含有受控源电路的等效电阻时，须先将二端网络中的所有独立源去除(恒压源短路处理、恒流源开路处理)，受控源应保留。含受控源电路的等效电阻可以用“加压求流法”求解。

三、练习（章节例题 2-13、2-14）

2.4 最大功率传输定理

功率传输最大条件

一个含有内阻 r_0 的电源给 R_L 供电，其功率为：$P=I^2 \cdot R_L = \left(\frac{E_0}{R_L+r_0}\right)^2 \cdot R_L$

为求得 R_L 从电源中获得最大功率的最佳值，我们可以将功率 P 对 R_L 求导，并令其导数等于零：

$$\frac{dP}{dR_L} = \frac{(r_0+R_L)^2-2(r_0+R_L)R_L}{(r_0+R_L)^4} \cdot E_0^2$$

$$= \frac{r_0^2-R_L^2}{(r_0+R_L)^4} \cdot E_0^2 = 0$$

解得：$R_L=r_0$

	得最大功率：$P_{max}=\left(\frac{E_0}{r_0+R_L}\right)^2 R_L=\frac{E_0^2}{4r_0}$ 即：负载电阻 R_L 从电源中获得最大功率条件是负载电阻 R_L 等于电源内阻 r_0。	
讨 论	**[教学小结]** 1．受控源电路解题分析要点。 2．负载电阻 R_L 从电源中获得最大功率条件是负载电阻 R_L 等于电源内阻 r_0	提 问
记 录	**[布置作业]** 习题 2-13	

教师授课方案

课题	3.1 正弦量的三要素正弦量的向量表示				
班级		课时	4	课型	理论+实践课
教学目标	掌握正弦量的三要素； 相位差的基本概念及其物理意义 正弦量的向量表示				
德育渗透	通过正弦信号三要素的引入引导学生要透过现象看本质。				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	正弦量的三要素；正弦量的向量表示				
双语教学	有效值 effective value；瞬时值 instantaneous value				

指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）

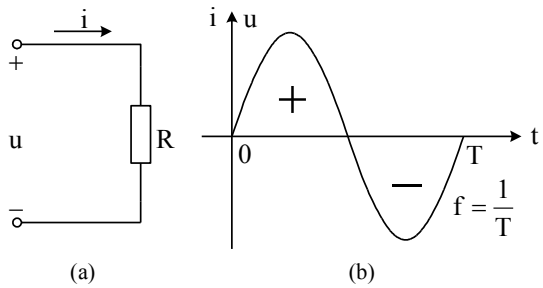
学生活动	授课内容	教 师活动
思考	[**导入新课**]提问现实生活中常常接触到电路发现很多均是交流电路而后对物理正弦知识的复习引入正弦量的W,T,初相位等	提问

听讲

［教学内容］

3.1正弦量的三要素

正弦交流电：电动势、电流、电压的大小和方向都随时间作正弦规律变化。



$$\begin{cases} u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \\ i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \end{cases}$$

u，i有方向，表示正负。

(1)u，i为正时，表示此时交流电的参考方向与实际方向相同；

(2)u，i为负时，表示此时交流电的参考方向与实际方向相反。

下面介绍表示正弦量特征(即变化的快慢、大小及相位)的参数，它们分别由频率(周期)、幅值(或有效值)和初相位来确定，这三个物理量也称为正弦三要素。

一频率与周期

1．周期*T*

正弦量变化一次(周)所需要的时间。单位：秒

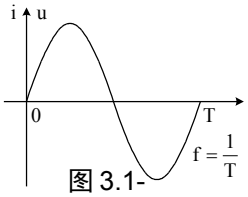


图 3.1-

(s)

2．频率*f*

每秒钟正弦量变化的次数。单位：赫兹(Hz)，1Hz=1/s。

$$f = \frac{1}{T} \qquad (3.1\text{-}0)$$

$$\begin{cases} \text{电力工频：} f = 50\text{Hz。有些国家} f = 60\text{Hz（如美国、日本等）} \\ \text{广播电台：中波：} 530 \sim 1600\text{KHz；短波：} 2.3\text{MHz} \sim 23\text{MHz} \\ \text{电视信号：几十MHz}\sim\text{几百MHz。} \end{cases}$$

3．角频率ω

每秒钟正弦辐角的变化值，单位：rad/s。

一周期内，辐角：$\omega T = 2\pi \Rightarrow \omega = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi f$ (3.1-0)

市电工频：$\omega = 2\pi f = 100\pi = 314 \text{rad/s}$

可见，T，f，ω都反映了正弦量的变化的快慢，只要知道其中之一，则其余两个均可求出。

二幅值与有效值

1．瞬时值

正弦量在任一瞬间的值，用小写字母表示：i，u，e。

2．幅值

瞬时值中的最大值：用下标m的大写字母表示：I_m，U_m，E_m。

3．有效值

正弦量的瞬时值大小和方向不断变化，最大值是正弦量瞬间出现的，正弦量的平均值$\bar{I} = 0,\ \bar{U} = 0$，正弦量的大小和做功能力常用有效值来表示，我们常说的市电电压380V/220V就是指电压的有效值。

有效值是从电流的热效应推出和定义的。

(1)有效值的定义：在相等时间里，如果交流电i与某一强度直流电I通过同一电阻R所产生的热量相等，那么这一交流电的有效值就等于这个直流电流I。

在图3.1-3交流与直流电路中，设交流电$i = I_m \sin \omega t$，则

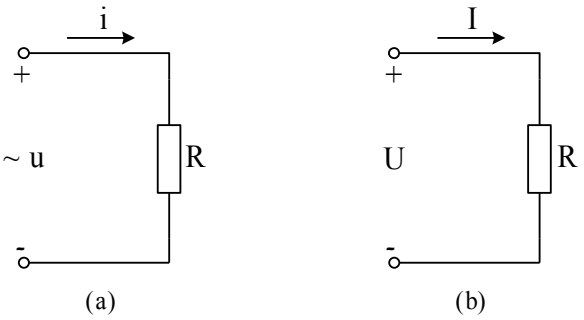


图3.1-

直流电在一个周期T所产生的热量：$Q = I^2RT$

交流电在一个周期T所产生的热量：$Q_i = \int_0^T i^2 R dt$

按有效值的定义：$Q_i = \int_0^T i^2 R dt = I^2 RT$

(2)有效值的计算：$I=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}$ (3.1-0)

同理：$U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2 dt}$ (3.1-0)

i的平方在一个周期内积分的平均值再去平方根，适用于周期性变化量求有效值。

若$i=I_m \sin \omega t$，则

$$I=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}=\sqrt{\frac{I_m^2}{T}\int_0^T \sin^2 \omega t dt}=\sqrt{\frac{I_m^2}{T}\int_0^T \frac{1-\cos 2\omega t}{2} dt}=$$

$$=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

(3)正弦交流电有效值：$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}, U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}, E=\frac{E_m}{\sqrt{2}}$ (3.1-0)

符号：幅值：(I_m，U_m，E_m)，有效值：(I，U，E)，瞬时值：(i，u，e)。

在电子技术中所说的交流电及仪表所测值均为有效值，如：市电220V/380V，电气铭牌标出的额定电压、电流，交流电压、电流表的读数等，均指有效值。

三初相位

$$\begin{cases} i_1=I_m \sin \omega t \\ i_2=I_m \sin(\omega t+\psi) \end{cases}$$

其波形为图3.1-4，这两个正弦量幅值、频率相同，但所取的计时起点不同。i_1的初始值为0，i_2的初始值为$I_m \sin \psi$，两个正弦量的步调不一致。

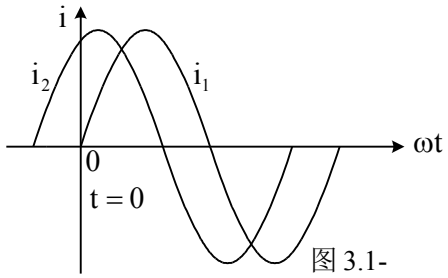


图 3.1-

1．初相位

(1)相位：正弦量的辐角ωt和$\omega t+\psi$，称为相位或相位角。它反映了正弦量随时间变化的进程。一周期相位角变化为2π。

(2)初相位：t=0时的相位，i_1的初相位为0，i_2的初相位为ψ，$i_1(0)=0$，$i_2(0)=I_m \sin \psi$，因此，初相位决定了正弦量的初始值。单位：rad，有时候也用“°”，取值范围：$(-\pi \sim +\pi)$。

若$\psi=\frac{5}{4}\pi$，不在取值范围内，可用加、减2π的方式得到：

如$\psi=\frac{5}{4}\pi-2\pi=-\frac{3}{4}\pi$。

【例3.1-1】如图3.1-5，试读出二波形的初相位。

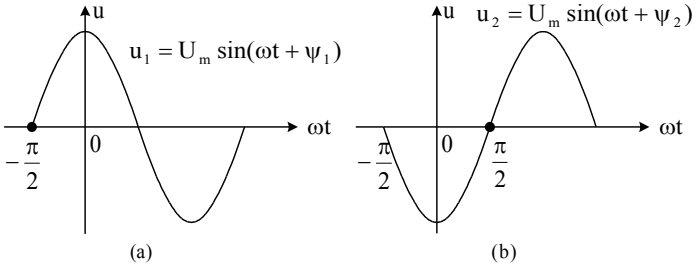


图3.1-

解：

(1)方法1：通过初始值，求出初相位。

$$\begin{cases} u_1(t=0) = U_m \sin\psi_1 = U_m \\ u_2(t=0) = U_m \sin\psi_2 = -U_m \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sin\psi_1 = 1 \\ \sin\psi_2 = -1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \psi_1 = \dfrac{\pi}{2} \\ \psi_2 = -\dfrac{\pi}{2} \end{cases}$$

(2)方法2：从波形上直接看出

引入一概念，即正值零点：下一时刻为正值的零点。

a图中，正值零点在左边，初相位为正；

b图中，正值零点在右边，初相位为负。

为什么呢？

a图中，对于正值零点有 $\omega t_1 + \psi_1 = 0$，$\because \omega t_1 = -\dfrac{\pi}{2}$，$\Rightarrow \psi_1 = \dfrac{\pi}{2}$。

b图中，对于正值零点有 $\omega t_2 + \psi_2 = 0$，$\because \omega t_2 = \dfrac{\pi}{2}$，$\Rightarrow \psi_2 = -\dfrac{\pi}{2}$。

【例3.1-2】画出 $u_1 = U_m \sin(\omega t - 120^o)$ 和 $u_2 = U_m \sin(\omega t + 120^o)$ 的波形。

解：如图3.1-6所示，u_1为图中的虚线，u_2为图中的实线。

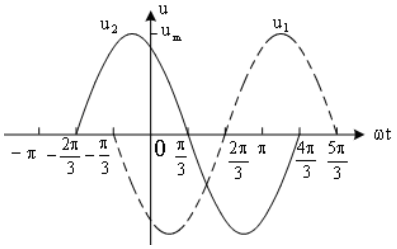


图3.1-

2．相位差

两个同频率正弦量的相位之差。

$$\begin{cases} u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \\ i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \end{cases}$$

u和i的相位差：$\varphi = (\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i) = \psi_u - \psi_i$ ----(3.1-0)

(1)可见，两个同频率正弦量相位差恒定，等于初相位之差。

(2)
- $\varphi = 0$，表示u、i同步，即它们可同时达到最大值或零。
- $\varphi \neq 0$，表示u、i不同步，不能同时达到零或最大值。
- $\varphi > 0$，表示电压相位比电流超前φ角，即u先达到正的最大值。
- $\varphi < 0$，表示电压比电流滞后φ角，或电流超前电压φ角。
- $\varphi = \pm\pi$，表示电压与电流反相。

(3)规定：$|\varphi| \le \pi$

【例3.1-3】下面三组正弦量，分别求相位差，并比较其超前和滞后关系。

(1) $\begin{cases} u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + 30^o) \\ u_2 = U_{2m} \sin(2\omega t + 45^o) \end{cases}$ (2) $\begin{cases} i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + 45^o) \\ i_2 = I_{2m} \cos(\omega t + 45^o) \end{cases}$ (3) $\begin{cases} u = U_m \sin(\omega t + \frac{3}{4}\pi) \\ i = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases}$

解：

(1)正弦量频率不同，不能比较相位差。

(2)$\varphi \neq 0$，$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + 45^o + 90^o) = I_{2m} \sin(\omega t + 135^o)$

$\Rightarrow \varphi = \psi_1 - \psi_2 = 45^o - 135^o = -90^o$

表示i_1滞后$i_2 90^o$，或i_2超前$i_1 90^o$。

(3)$\varphi = \frac{3}{4}\pi - (-\frac{\pi}{2}) = \frac{5}{4}\pi$

由于规定$|\varphi| \le \pi$，我们不能直接得出u比i超前$\frac{5}{4}\pi$的结论。应做处理：

$\varphi = \frac{5}{4}\pi - 2\pi = -\frac{3}{4}\pi$，故u滞后i$\frac{3}{4}\pi$，或i超前u$\frac{3}{4}\pi$。

关于超前、滞后问题，下节课讨论了相量法后就会更清楚了。

正弦量的相量表示法

一个正弦量具有幅值、频率和相位三个特征。这些特征可以用一些方法表示出来。

正弦量表示方法：

(1)三角函数$(u = U_m \sin(\omega t + \psi))$

(2)波形图

(3)相量
- 相量图
- 复数式
  - 三角函数式
  - 代数式
  - 极坐标式
  - 指数式

用相量表示正弦量，将会使对于正弦量的分析大为简化。

1．相量图

设一个正弦量$u=U_m\sin(\omega t+\psi)$，任何一个正弦量都可用一个旋转的有向线段来表示。如图3.2-1(a)u的波形图，右边为一旋转的有向线段A。

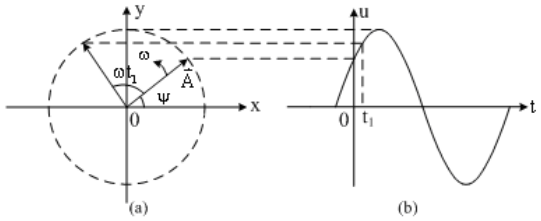


图 3.2-

有向线段的长度为U_m(幅值)，以角速度ω逆时针旋转，初始角度φ，它在y轴上的投影为：t=0，$u=U_m\sin\psi$；$t=t_1$，$u=U_m\sin(\omega t_1+\psi)$，它的旋转描出了正弦波形，因此它在y轴的投影是正弦量的瞬时表达式。可见，一个旋转的有向线段表示了正弦量的三要素及瞬时值。

我们把长度等于U_m，与实轴夹角为初相位角ψ的有向线段称为幅值的相量图；若长度等于U，与实轴夹角为初相位角ψ的有向线段称为　．有效值的相量图。相量图用符号$\dot{U}_m$、$\dot{U}$表示。例如：

$$u=U_m\sin(\omega t+\psi)\Leftrightarrow \dot{U}(或\dot{U}_m)彼此对应$$

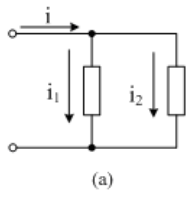
那么，用相量表示正弦交流量有什么意义呢？

【例3.2-1】如图3.2-2(a)，已知

$i_1=10\sin(\omega t+30^o)$，

$i_2=10\sin(\omega t+45^o)$，

求i



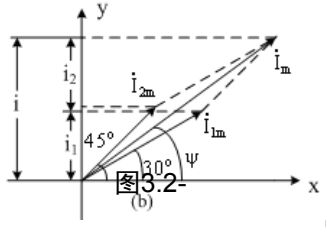


图3.2-

图3.2-

解：

(1)三角函数法：

$$i_1=10\sin(\omega t+30^o)$$

$$i_2=10\sin(\omega t+45^o)$$

两个相同频率的正弦函数相加、相减、相乘或相除后仍然为同一频率的正弦函数。利用三角函数法运算繁杂。

(2)利用相量法：

如图3.2-2(b)，先作出$\dot{I}_{1m}$，$\dot{I}_{2m}$的相量图，利用平行四边形法则，作出$\dot{I}_{1m}$，$\dot{I}_{2m}$的合矢量$\dot{I}_m$，在y轴上的投影为$i = i_1 + i_2$，因此，对相量按矢量合成原则求的合矢量就是$i = i_1 + i_2$的相量。

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m}$$

$$\Rightarrow I_m = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2 + 2I_{1m}I_{2m}\cos(45^o - 30^o)}$$

$$= \sqrt{10^2 + 10^2 + 2\times 10^2 \cos 15^o}$$

$$= 19.8(A)$$

$$\Rightarrow tg\psi = \frac{I_{my}}{I_{mx}} = \frac{I_{1my} + I_{2my}}{I_{1mx} + I_{1mx}} = \frac{I_{1m}\sin 30^o + I_{2m}\sin 45^o}{I_{1m}\cos 30^o + I_{2m}\cos 45^o}$$

$$= 0.67$$

$$\Rightarrow \psi = 37.5^o$$

所以，$i = 19.8\sin(\omega t + 37.5^o)(A)$

注意：

(1)相量求和：$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$，在相量图中可按矢量合成求合矢量，但是$I_m \neq I_{1m} + I_{2m}$，$I \neq I_1 + I_2$。

(2)相量图：长度为幅值(或有效值)，与实轴夹角为初相位角ψ的有向线段(矢量)。可以省去x、y，只做一条参考线，表示角度为0，如图3.2-4。

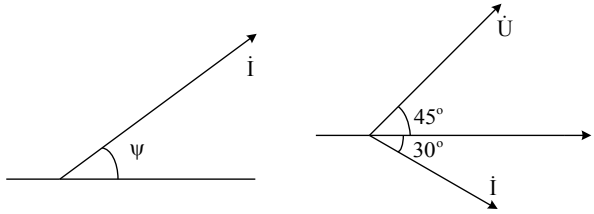


图3.2-图3.2-

(3)作相量图时，应注意到初相位角的正负。

如$u = U_m\sin(\omega t + 45^o)$，$i = I_m\sin(\omega t - 30^o)$，见图4.2-5。

(4)只有正弦量才能用相量表示，只有同频率的正弦量才能画在同一个相量图上。

(5)相量≠正弦量($\dot{I} \neq i$)，相量只是正弦量一种表示方法。

2．相量的复数表示法

相量的复数表示法的基础是复数，就是用复数来表示正弦量。

复习复数的有关知识：

复数：$A = a + jb$，a为实部，b为虚部，$j = \sqrt{-1}$

复数可在复平面用一有向线段表示，在实轴的投影a，在虚轴的投影为b。而正弦量可用一有向线段表示，因此，正弦量可用 图4.2- 复数表示。复数的模r为正弦量有效值或幅值，复数的幅角为正 弦量的

初相位。

根据复数知识，有三种表示形式：

（1）$\dot{A}=a+jb=r\cos\psi+jr\sin\psi=r(\cos\psi+j\sin\psi)$……（代数式）(4.2-0)

(2) $\dot{A}=re^{j\psi}$（指数式）……(3.2-2)

上式利用了欧拉公式

$$\cos\psi=\frac{e^{j\psi}+e^{-j\psi}}{2}\text{和}\sin\psi=\frac{e^{j\psi}-e^{-j\psi}}{2}$$

(3) $\dot{A}=r\angle\psi$（极坐标式）……(3.2-0)

其中，r为幅值或有效值；ψ 为正弦量的初相位。

如：正弦电压 $u=U_m\sin(\omega t+\psi)$ 的相量式为：

$$\dot{U}=U(\cos\psi+j\sin\psi)=Ue^{j\psi}=U\angle\psi$$

以上三种表示形式可以互相等效，又可以互相转换(每一种都表示了幅值和初相位)。

正弦量用复数表示只具有两个特征，即大小和相位，而频率不必考虑。这是由于分析线性电路时，正弦电路各部分的电压、电流为同频率的正弦量，频率是已知或给定的。

运算时，相量的加、减化为代数形式，乘除化为极坐标或指数形式计算比较简便。

$j=\sqrt{-1}$，$j^2=-1$，j称为90^o旋转因子

$a=r\cos\psi$，$b=r\sin\psi$

$r=\sqrt{a^2+b^2}$，$tg\psi=\frac{b}{a}$

$e^{j90^o}=j$，$e^{-j90^o}=-j$

$e^{j\psi}=\cos\psi+j\sin\psi$

【例3.2-2】如3.2-3(a)所示电路，设 $i_1=I_{1m}\sin(\omega t+\psi_1)=100\sin(\omega t+45^o)$，$i_2=I_{2m}\sin(\omega t+\psi_2)=60\sin(\omega t-30^o)$，求i。

解：(1)用相量图解

$$I_m=\sqrt{I_{1m}^2+I_{2m}^2+2I_{1m}I_{2m}\cos(45^o-(-30^o))}$$
$$=\sqrt{100^2+60^2+2\times100\times60\times\cos75^o}$$
$$=129.3(A)$$
$$\psi=\text{arctg}\frac{I_{1m}\sin45^o+I_{2m}\sin(-30^o)}{I_{1m}\cos45^o+I_{2m}\cos(-30^o)}$$
$$=18.35^o$$
$$i=129.3\sin(\omega t+18.35^o)(A)$$

(2)用复数式解

	$$\dot{I}_m = \dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m}$$ $$= 100\angle 45^o + 60\angle -30^o$$ $$= 100(\cos 45^o + j\sin 45^o) + 60(\cos(-30^o) + j\sin(-30^o))$$ $$= 122.7 + j40.7$$ $$= 129.3\angle 18.35^o (A)$$ $$\Rightarrow i = 129.3\sin(\omega t + 18.35^o)(A)$$ **【例3.2-3】**已知 $A = -8 + j6$和$B = 3 + j4$，试求 $A + B$，$A - B$，AB和$\frac{A}{B}$。 解： $$A + B = -8 + j6 + 3 + j4 = -5 + 10j$$ $$A - B = -8 + j6 - (3 + j4) = -11 + 2j$$ $$AB = 10\angle 143.1^o \cdot 5\angle 53.1^o = 50\angle 196.2^o = 50\angle -163.8^o$$ $$\frac{A}{B} = \frac{10\angle 143.1^o}{5\angle 53.1^o} = 2\angle 90^o = 2j$$	
讨论	**[教学小结]** 正弦量的三要素；正弦量三种表示方法：三角函数、波形图、相量。 在交流电路的分析计算时，都用相量式运算。对正弦交流电路的分析方法：相量图法和相量式法。 $i = 10\sqrt{2}\sin(\omega t + 45^o)(A) \Leftrightarrow \dot{I} = 10\angle 45^o = 10e^{j45^o} = 5\sqrt{2} + j5\sqrt{2}(A)$	提问
记录	[布置作业] 习题 3-2、3-3	

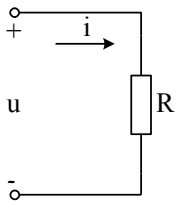
教师授课方案

课题	3.3 单一参数的交流电路				
班级		课时	4	课型	理论+实践课
教学目标	掌握单一参数的电阻元件、电感元件和电容元件在正弦交流电路中的电压、电流关系，理解即时元件、动态元件的区别和由来；熟悉单一参数元件上的功率关系，深刻理解有功功率、无功功率的概念及其不同点。				
德育渗透	无功功率的引入让学生了解有失有得，自然心对待。				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	无功功率 Q（乏）				
双语教学	电抗 reactance 感抗 inductive reactance 容抗 capacitive reactance				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[**导入新课**]分析交流电路工业方面考虑功率问题，涉及计算我们通常用向量形式表示。首先看电流、电压关系。分三种单参数电路分析	提问

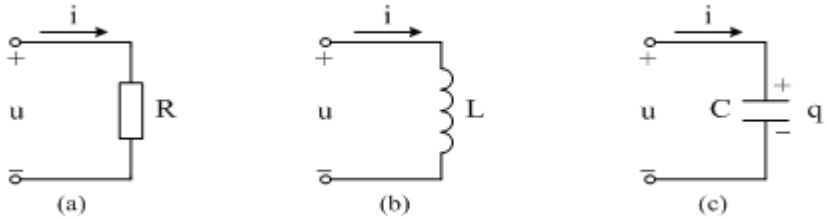
听讲

[教学内容]



分析各种正弦交流电路，不外乎要确定电路中电压与电流的关系(大小、相位关系)，以及讨论电路中能量的转换和功率问题。

各种交流电路无非是由电阻、电感、电容单一参数元件组合而成。因此需要先掌握单一元件的u、i



关系与功率问题

复习：

电压电流关系：$u = Ri$　　$u = L\frac{di}{dt}$　　$i = C\frac{du}{dt}$

参数：$R = \frac{u}{i}$　　$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\Phi}{i}$　　$C = \frac{q}{u}$

能量：$\int_0^t i^2 R dt$　　$\frac{1}{2}Li^2$　　$\frac{1}{2}Cu^2$

注：以上电压和电流关系是在规定u和i参考方向一致的情况下得出的。

对于正弦电路的分析，一般用相量表示正弦量。

一、电阻与元件的交流电路

1．电压和电流的关系

取u、i的参考方向相同，即 $u = iR$，

设 $i = I_m \sin \omega t$，

$u = Ri = RI_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t$ (3.3-0)因此：

(1)电阻元件的交流电路中，电压和电流是同相的。

(2)电压的幅值(或有效值)与电流的幅值(或有效值)之比值，

图 3.3-

就是电阻R：$\frac{U_m}{I_m}=\frac{U}{I}=R$ (3.3-0)

(3)$\dot{U}=Ue^{j0^o}$，$\dot{I}=Ie^{j0^o}\Rightarrow\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=\frac{U}{I}=R\Rightarrow\dot{U}=\dot{I}R$（欧姆定律的相量形式）

2．功率

瞬时功率：

$$p_R=ui=U_m\sin\omega t\cdot I_m\sin\omega t=U_mI_m\sin^2\omega t$$

$$=\frac{U_mI_m}{2}(1-\cos 2\omega t)$$

$$=UI(1-\cos 2\omega t)$$ ----------(3.3-4)

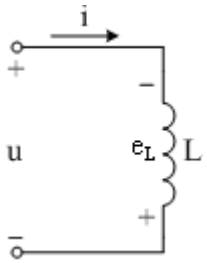
电阻的电压和电流同相，u、i同时为正、同时为负，故$p_R>0$恒成立。说明电阻元件从电源取用能量，转换为热能(即电阻是耗能元件)。

平均功率P：即一周期内消耗电能的平均值。

图3.3-2

$$P=\frac{\int_0^T pdt}{T}=\frac{\int_0^T UI(1-\cos 2\omega t)dt}{T}=UI$$

$$P=UI=I^2R=\frac{U^2}{R}$$(用有效值的乘积) (4.3-5)



二、电感元件的交流电路

本节分析线性电感元件(非铁心线圈)的正弦交流电路。

1．电压和电流的关系

电感线圈中通过交流i时，其中会产生自感电动势e_L。

规定：u、e_L与i参考方向一致。

由于$u=-e_L=L\frac{di}{dt}$，令$i=I_m\sin\omega t$，则

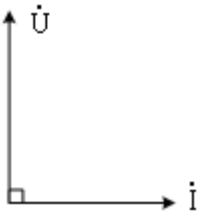
$$u_L=L\frac{d(I_m\sin\omega t)}{dt}=\omega LI_m\cos\omega t=\omega LI_m\sin(\omega t+90^o)$$

(3.3-3)

$= U_m \sin(\omega t + 90^o)$ (3.3-6)

因此：

(1)在电感元件电路中，电压相位比电流超前90°(或电流滞后电压90°)。



(2)大小上：

$$U_m = \omega L I_m 或 \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = \omega L \qquad (3.3\text{-}7)$$

ωL单位为：“Ω”，ωL越大，电流越小，具有对交流电流起阻碍作用。

引入感抗：

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

感抗表示了电感对电流阻碍能力的大小。电感的性质为：通直流、隔交流。

注意： $\frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = X_L \neq \frac{u}{i}$

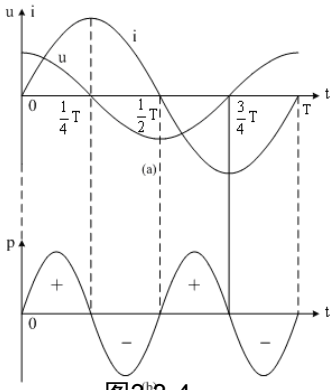


图3.3-4

(3)用相量表示电感的电压和电流关系

$\dot{U} = Ue^{j90^o}$ $\quad \dot{I} = Ie^{j0^o}$，

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j90^o}}{Ie^{j0^o}} = X_L e^{j90^o} = jX$$

$\Rightarrow \dot{U} = jX_L\dot{I} = j\omega L\dot{I}$，即

$$\dot{U} = \dot{I}Z_L \qquad (4.3\text{-}8)$$

引入电感的复阻抗

$$Z_L = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = jX_L = j\omega L \qquad (4.3\text{-}9)$$

复阻抗的大小为X_L，称为模，表示U与I的大小关系；辐角为90°，表示u与i的相位关系。

2．功率

(1)瞬时功率：

$$p_L = ui = U_m I_m \sin\omega t \sin(\omega t + 90^o)$$

$$= U_m I_m \sin\omega t \cos\omega t = \frac{U_m I_m}{2}\sin 2\omega t = UI\sin 2\omega t \qquad (3.3\text{-}10)$$

可见，p_L是一个幅值为UI，并以2ω的角频率随时间而变化的交变量，在一个周期内，电感的瞬时功率时正、时负，如图3.5-2。当p_L

为正时，电感从电源取用电能；当p_L为负时，电感把电能归还电源。在$0\sim T/4$, $T/2\sim 3T/4$内，电流i增大，线圈磁能增大，取用电源能量；在$T/4\sim T/2$, $3/4T\sim T$内，电流减小，线圈磁场减小，释放出磁场能量归还给电源。

(2)平均功率：

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T pdt=\frac{1}{T}\int_0^T UI\sin 2\omega t dt=0 \text{ ----------(3.3-11)}$$

电感元件不消耗功率，只存在与电源的能量交换。

(3)无功功率：

定义：电感与电源能量交换的最大瞬时功率，等于瞬时功率的幅值，称为无功功率。

$$Q_L=UI=I^2X_L=\frac{U^2}{X_L} \qquad (3.3\text{-}12)$$

单位：var，Kvar。

【例3.4-1】把一个0.1H的电感元件接到频率为50Hz，电压有效值为10V的正弦电源上，问电流是多少?如保持电压值不变，而电源频率改变为5000Hz，这时电流将为多少？

解：

$$X_L=2\pi fL=2\times 3.14\times 50\times 0.1=31.4(\Omega)$$

当f = 50Hz时 $I=\frac{U}{X_L}=\frac{10}{3.14}=0.318(A)=318(mA)$

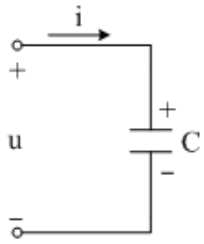
当f = 5000Hz时

$$X_L=2\pi fL=2\times 3.14\times 5000\times 0.1=3140(\Omega)$$

$$I=\frac{U}{X_L}=\frac{10}{3140}=318\times 10^{-3}(A)=3.18(mA)$$

可见，频率越高，电感元件通过的电流越小。

【例3.4-2】指出下列各式哪些是对的，哪些是错的？



(1) $\frac{u}{i}=X_L$　　(2) $\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=j\omega L$　　(3) $\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=X_L$

(4) $u=L\frac{di}{dt}$　　(4) $\dot{I}=-j\frac{\dot{U}}{\omega L}$　　(6) $\dot{I}=\frac{\dot{U}}{j\omega L}$

解：(4)、(6)正确，其余错误。

三、电容元件的交流电路

1．电压和电流关系

取u、i参考方向一致，由于 $i=\frac{dq}{dt}=C\frac{du}{dt}$，　　图3.3-5

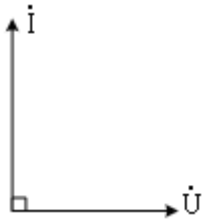
令 $u=U_m\sin\omega t$，则

$$i=C\frac{d(U_m\sin\omega t)}{dt}=\omega CU_m\cos\omega t=\omega CU_m\sin(\omega t+90^o)$$

$$=I_m\sin(\omega t+90^o)\ (3.3\text{-}03)$$

因此：

(1)电容两端电流超前电压90°相位(或电压滞后电流90°)。



(2)大小上：

$$I_m=\omega CU_m \text{ 或 } \frac{U_m}{I_m}=\frac{U}{I}=\frac{1}{\omega C}\quad (3.3\text{-}14)$$

引入容抗：$X_C=\frac{1}{\omega C}$　　(3.3-15)

容抗单位：“Ω”，当电压一定时，X_C越大，电流越小，可见它具有对电流起阻碍作用的物理性质，称为容抗。其具有隔直、通交流的性质。

(3)用相量表示电容的电压和电流关系

$$\dot{U} = Ue^{j0^o} \qquad \dot{I} = Ie^{j90^o}$$

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j0^o}}{Ie^{j90^o}} = X_C e^{-j90^o} = -jX_C$$

$$\Rightarrow \dot{U} = -jX_C\dot{I} = \dot{I}Z_C \text{ (3.3-16)}$$

引入电容的复阻抗 $Z_C = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = -jX_C = -j\frac{1}{\omega C}$ (3.3-17)

2．功率

(1)瞬时功率：

$$p = ui = U_m I_m \sin\omega t \sin(\omega t + 90^o)$$

$$= U_m I_m \sin\omega t \cos\omega t = \frac{U_m I_m}{2}\sin 2\omega t$$

$$= UI\sin 2\omega t \text{ (3.3-18)}$$

可见，p 是一个幅值为UI，并以2ω的角频率随时间而变化的交变量，在一个周期内，电容的瞬时功率时正、时负，电容元件与电源之间不停地交换能量，在一个周期内电容元件从电源取用的能量等于它送还给电源的能量，电容不是耗能元件。

(2)平均功率(有功功率)P

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T pdt = \frac{1}{T}\int_0^T UI\sin 2\omega t dt = 0 \text{ (3.3-19)}$$

电容元件不消耗功率，只存在与电源的能量交换。

(3)无功功率Q：

无功功率表示了储能元件与电源间交换电能的最大瞬时功率，为了与电感元件电路相比较，我们也设$i = I_m \sin\omega t$，则

$$u = U_m \sin(\omega t - 90^o)$$

$$p = ui = -UI\sin 2\omega t$$

$$Q = -UI = -I^2 X_C = -\frac{U^2}{X_C} \qquad \text{(3.3-20)}$$

即电容元件无功功率取负值，而电感无功功率取正值，以示区别。

【例3.6-1】把一个25μF的电容元件接到频率为50Hz，电压有效值为10V的正弦电源上，问电流是多少？如保持电压值不变，而电源频率改为5000Hz，这时电流将为多少？

解：当f = 50Hz时，

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\times 3.14\times 50\times(25\times 10^{-6})} = 127.4(\Omega)$$

$$I=\frac{U}{X_C}=\frac{10}{127.4}=0.078(A)=78(mA)$$

当 f = 5000Hz时,

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\times3.14\times5000\times(25\times10^{-6})}=1.274(\Omega)$$

$$I=\frac{U}{Xc}=\frac{10}{1.274}=7.8(A)$$

讨论

电路参数		R	L	C
u i 关系式	瞬时值	$u = iR$	$u_L = L\frac{di}{dt}$	$i_C = C\frac{du}{dt}$
	u、i相位	u、i同相	u超前i90°	u滞后i90°
	有效值	$U = IR$	$U = IX_L$	$U = IX_C$
	相量式	$\dot{U} = \dot{I}R$	$\dot{U} = jX_L\dot{I}$	$\dot{U} = -jX_C\dot{I}$
	复阻抗	$Z_R = R$	$Z_L = jX_L = j\omega L$	$Z_C = -jX_C = -j\frac{1}{\omega C}$
功率	p	$p = ui > 0$	$p_L = u_L i$，时正时	$p_L = u_C i$，时正时负
	P	$P_R = UI =$	$P_L = 0$	$P_C = 0$
	Q	$Q_R = 0$	$Q_L = U_L I = I^2X$	$Q_C = -U_C I = -I^2X_C$

提问

记录

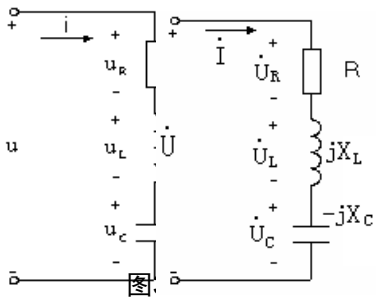
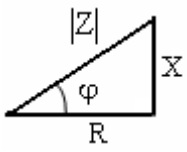
[布置作业]

习题 3-4、3-5

教师授课方案

课题	3.4 电阻、电感、电容的串联电路				
班级		课时	2	课型	理论课
教学目标	掌握应用相量图法对正弦交流电路画出相量图分析电路的方法，熟悉根据相量图运用几何知识和电路基本计算公式求解电路待求量的方法				
德育渗透	定律的广泛应用引导同学们点到面看问题，细致学习				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	基尔霍夫的向量形式应用				
双语教学	阻抗 impedance				

指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课]基尔霍夫的提问？引入基尔霍夫的向量形式应用引入新课。	提问
听讲	[教学内容] 分析含有三种参数的交流电路具有实际意义，许多实际电路都是由二个或三个参数的元件组成。例如：电动机、继电器等设备都含有线圈和电阻，可以等效成为一个电感和电阻的串联；电子设备的放大器、信号源等电路都含有电阻、电容等元件。 **一、RLC串联电路的电压和电流关系** 如图3.4-1RLC串联电路，各电压与电流参考方向取相同。 根据KVL定律 $u = u_R + u_L + u_C$ $= Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int idt$ (3.4-1)  图 对于正弦电路的分析，一般用相量表示正弦量，求解最方便。 **1．复数法** 由KVL定律，对于RLC串联电路，可得 $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$ 由于$\dot{U}_R = \dot{I}R$，$\dot{U}_L = \dot{I}Z_L = jX_L\dot{I}$，$\dot{U}_C = -jX_C\dot{I}$，得 $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I}(R + j(X_L - X_C))$ (3.4-2) $\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + j(X_L - X_C)$，称为电路的阻抗，等于各元件阻抗之和，用Z表示。 则$\dot{U} = \dot{I}Z$ $Z = R + j(X_L - X_C) = \lvert Z\rvert e^{j\varphi}$ (3.4-3)  其中，$\lvert Z\rvert = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$，	

$$\varphi = arctg\frac{X_L - X_C}{R}$$

①阻抗的实部为“阻”，虚部为“抗”，它表示了$\dot{U}$、$\dot{I}$的关系：$\dot{U} = \dot{I}Z$。

②阻抗的模$|Z|$，表示了电压和电流的大小关系：$U = I|Z|$；阻抗的辐角φ(简称阻抗角)，表示了电压、电流的相位差。

③阻抗是一个复数、不是正弦量，所以它不是相量，符号上面不要打“●”。

2．相量图法

取电流相量为参考线，作出各部分电压的相量图。

①合电压$\dot{U}$：

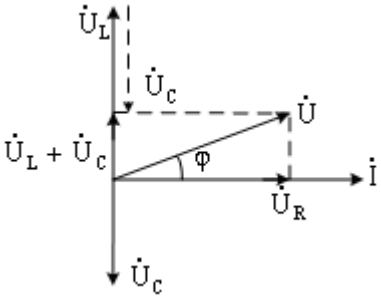


图 3.4-2

$$\dot{U} = \sqrt{\dot{U}_R^2 + (\dot{U}_L - \dot{U}_C)^2} = \dot{I}\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.4\text{-}4)$$

②$U = I|Z|$

阻抗模：$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

③电压三角形和阻抗三角形

$\dot{U}$、$\dot{U}_R$、$\dot{U}_L$、$\dot{U}_C$关系；$|Z|$、R、X_L、X_C关系可用一个直角三角形表示，分别称为电压三角形和阻抗三角形，这两个三角形是相似三角形，如图4.4-3所示。

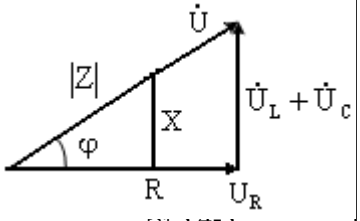


图 3.4-3

因为$\text{tg}\varphi = \dfrac{U_L - U_C}{U_R} = \dfrac{X_L - X_C}{R}$，所以u、i的相位差：

$$\varphi = \text{arctg}\frac{U_L - U_C}{U_R} = \text{arctg}\frac{X_L - X_C}{R}$$

$$\begin{cases} \text{当} X_L > X_C \text{时，} \varphi > 0\text{，u超前i，是电感性电路} \\ \text{当} X_L < X_C \text{时，} \varphi < 0\text{，u滞后i，是电容性电路} \\ \text{当} X_L = X_C \text{时，} \varphi = 0\text{，u、i同相，是电阻性电路} \end{cases}$$

注意：

在分析与计算交流电路的时候，必须时刻具有交流的概念，要有相位的概念。由于不同参数U_R、U_L、U_C相位不同步，所以

$U \neq U_R + U_L + U_C$，而应该是 $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$。

小结：1．复数法：

$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$，$\dot{U} = \dot{I}Z$，注：$Z \neq R + X_L + X_C$

$Z = R + j(X_L - X_C) = |Z|e^{j\varphi}$，$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$，$\varphi = arctg\dfrac{X_L}{}$

2．相量图法

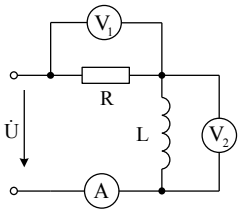
主要相量图画法，注意相位关系。

$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I|Z|$，$I = \dfrac{U}{|Z|}$，注：$i \neq \dfrac{u}{|Z|}$，$U \neq U_R + U$

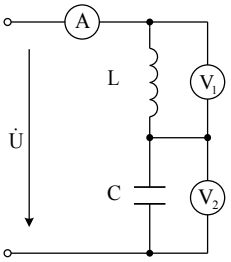
$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$，注：$|Z| \neq R + X_L + X_C$

$\varphi = arctg\dfrac{U_L - U_C}{U_R} = arctg\dfrac{X_L - X_C}{R}$

【例3.4-1】图(a)、(b)中，已知各电表读数：电流表A的读数为0.2A，V_1的读数为30V，V_2的读数为40V，求：总电压的有效值，以及$|Z|$、R 、X_L、X_C。

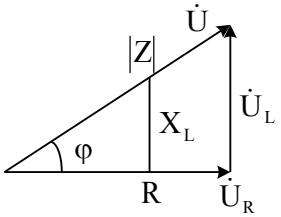


(a)

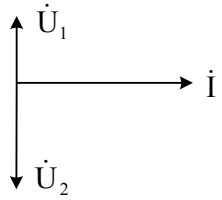


(b)

解：(a)$U \neq U_1 + U_2$(因相位不同)，串联电路后，画出相量图，如下图（a）所示。



(a)



(b)

$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50(V)$

$|Z| = \dfrac{U}{I} = \dfrac{50}{0.2} = 250(\Omega)$，$R = \dfrac{U_1}{I} = 150(\Omega)$，

$X_L = \dfrac{U_2}{I} = 200(\Omega)$

(b)L、C电路作相量图(b)。

$$U = U_2 - U_1 = 40 - 30 = 10(\Omega)$$

$$|Z| = \frac{U}{I} = \frac{50}{0.2} = 250(\Omega),\quad X_L = \frac{U_1}{I} = 150(\Omega),$$

$$X_C = \frac{U_2}{I} = 200(\Omega)$$

此外，也可用复数计算，令 $\dot{I} = 0.2\angle 0^o\, A$。

二、功率计算

(1)瞬时功率

令 $i = I_m \sin \omega t$，$u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$，$\varphi$ 为u、i的相位差。

$$p = ui = U_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot I_m \sin \omega t$$

$$= \frac{U_m I_m}{2}[\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]$$

$$= UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \varphi) \text{ ----------(3.4-5)}$$

其中，$UI\cos\varphi$ 是恒定分量，$UI\cos(2\omega t + \varphi)$ 是周期性变化的分量。

(2)有功功率(即平均功率)和功率因数。

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T [UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \varphi)]dt$$

$$= UI\cos\varphi \text{ (3.4-6)}$$

对于RLC串联电路，由电压三角形可知

$$P = UI\cos\varphi = U_R I = I^2 R = \frac{U_R^2}{R} \text{ (3.4-7)}$$

①交流电路有功功率等于电阻元件消耗的功率，电感、电容只是转换能量，并不消耗能量。

② $P = UI\cos\varphi$，不仅与U、I大小有关，还与U、I相位差有关，$\cos\varphi$ 称为电路的功率因数(阻抗角的余弦)。φ 也称功率因数角。

$$\begin{cases} \text{纯电阻：}\varphi = 0,\ \cos\varphi = 1,\ P = UI \\ \text{纯电感：}\varphi = 90^o,\ \cos\varphi = 0,\ P = 0 \\ \text{纯电容：}\varphi = -90^o,\ \cos\varphi = 0,\ P = 0 \end{cases}$$

(3)无功功率Q

电感元件和电容元件不消耗功率，它们与电源之间存在能量交换，单位：var、Kvar。

$$Q = Q_L + Q_C = U_L I - U_C I = (U_L - U_C)I = UI\sin\varphi \quad (3.4\text{-}8)$$

(4)视在功率S

在交流电路中，平均功率一般不等于电压与电流有效值的乘积。电压与电流有效值的乘积称为视在功率S。它只表示电源可以提供的最大平均功率。

图 3.4-4

$$S = UI = I^2|Z| \quad (3.4\text{-}9)$$

单位：VA或者KVA，以示与P、Q两种功率的区别。

归纳： $P = UI\cos\varphi = S\cos\varphi$，

$$Q = UI\sin\varphi = S\sin\varphi$$

$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$ 这是计算交流电路功率普遍成立的公式。

显然P、Q、S可以用一直角三角形来表示，即功率三角形，如图3.4-4所示，它与电压、阻抗三角形是相似的。

概念：交流电源设备(发电机、变压器)的额定视在功率

$$S = U_N I_N \quad (3.5\text{-}0)$$

S_N 称为电源设备的容量，它表示电源设备允许提供的最大有功功率。

$P = S_N\cos\varphi$，一个电源输出的功率，不仅与输出的端电压及其输出电流有关，而且还与电路的参数有关。电路的参数不同，φ 也不同，这时P、Q不同。

讨论		提问

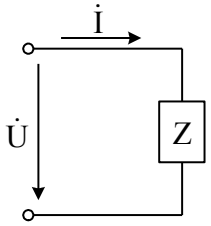
电路	电路图	瞬时性	相位关系	大小关系	复数式	功率
电阻 R		$u = iR$	$\varphi =$	$U = IR$	$\dot{U} = \dot{I}R$	$P = UI$ $Q = 0$
电感 L		$u = L$	$\varphi = +$	$U = IX_L$ $X_L = \omega$	$\dot{U} = jX$	$P = 0$ $Q = UI$
电容 C		$i = C$	$\varphi = -$	$U = IX_C$ $X_C = \frac{1}{\omega}$	$\dot{U} = -$	$P = 0$ $Q = -U$
R L 串联		$u = iR$	φ $\varphi >$	$U = I\lvert Z\rvert$ $\lvert Z\rvert = \sqrt{R^2}$	$\dot{U} = \dot{I}Z$ $Z = R$	$P = UI\cos$ $= IU_R = I^2$ $Q = UI\sin$ $= U_L I$ $S = UI$
R C 串联		$u = iR$ $+\frac{1}{C}\int i$	$\varphi <$ φ	$U = I\lvert Z\rvert$ $\lvert Z\rvert = \sqrt{R^2}$	$\dot{U} = \dot{I}Z$ $Z = R$	$P = UI\cos$ $= IU_R = I^2R$ $Q = UI\sin$ $= -U_C I$ $S = UI$
R L C 串联		$u = iR$ $+$		$U = I\lvert Z\rvert$ $\lvert Z\rvert = \sqrt{R^2}$ $X = X_L -$	$\dot{U} = \dot{I}Z$ $Z = R$ $-$	$P = UI\cos$ $= IU_R = I^2$ $Q = UI\sin$ $= (U_L - U$ $S = UI = I^2$

记录	[布置作业] 本节例题跟做	

教师授课方案

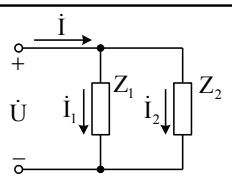
课题	3.5 阻抗的串联与并联电路的谐振				
班级		课时	4	课型	理论+实践课
教学目标	深刻理解阻抗 Z 和导纳 Y 的定义及其物理意义，熟悉计算电路阻抗与导纳的方法及其它们之间的相互等效变换，掌握阻抗的串联、导纳的并联及其它们的串并联分析方法。谐振电路分析				
德育渗透	通过观察实验现象,培养学生严谨的科学作风和具体问题具体分析的能力,通过提问、练习培养学生理论联系实际的能力。				
教学方法	讲授、实践				
新知识 新技术或 参阅资料	谐振				
双语教学	串联谐振 series resonance 并联谐振 parallel resonance				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[**导入新课**]大家都用过收音机吧？普通收音机如何调台？调台时到底调的是什么？为什么有的收音机杂音较大，而有的却很小？	提问

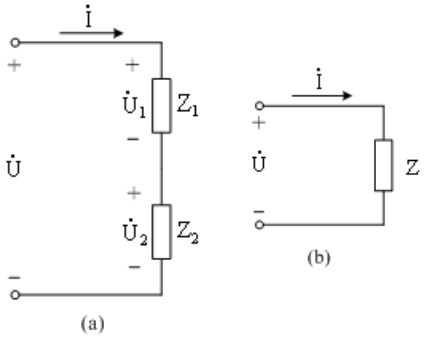
听讲	[教学内容] 阻抗的定义：一段电路两端电压相量与通过它的电流相量之比称为阻抗。 $\begin{cases} Z=\dfrac{\dot{U}}{\dot{I}} \\ \dot{U}=\dot{I}Z \end{cases}$  图3.5-1 这是二端无源网络交流电路欧姆定律。 $Z=\begin{cases} \text{纯电阻：}\ Z=R \\ \text{纯电感：}\ Z=jX_L=j\omega L \\ \text{纯电容：}\ Z=-jX_C=-j\dfrac{1}{\omega C} \\ \text{RLC串联：}\ Z=R+jX_L-jX_C \end{cases}$ **一阻抗的串联** 如图 3.5-1 为二个阻抗的串联电路。 由 KVL 定律可得 $\dot{U}=\dot{U}_1+\dot{U}_2=Z_1\dot{I}+Z_2\dot{I}=(Z_1+Z_2)\dot{I}=Z\dot{I}$ Z 为二个阻抗串联的等效阻抗。 (1) $Z=Z_1+Z_2$ 阻抗串联等于各串联电阻之和。**注：** $\lvert Z\rvert \neq \lvert Z_1\rvert+\lvert Z_2\rvert$。 令 $Z_1=R_1+jX_1$，$Z_2=R_2+jX_2$，其中 X 为电抗，感抗取正，容抗取负，则 $Z=(R_1+R_2)+j(X_1+X_2)=\Sigma R_i+j\Sigma X_i=\lvert Z\rvert e^{j\varphi}$ 其中，$\lvert Z\rvert=\sqrt{(\Sigma R_i)^2+(\Sigma X_i)^2}$，$\varphi=\text{arctg}\dfrac{\Sigma X_i}{\Sigma R_i}$。	

(2)

$\dot{U} = \dot{I}Z$，$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$，$U \neq U_1 + U_2$，$u \neq Zi$



(3)



$$\dot{U}_1 = \dot{I}Z_1 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}\dot{U}, \dot{U}_2 = \dot{I}Z_2 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}\dot{U}$$

二阻抗的并联

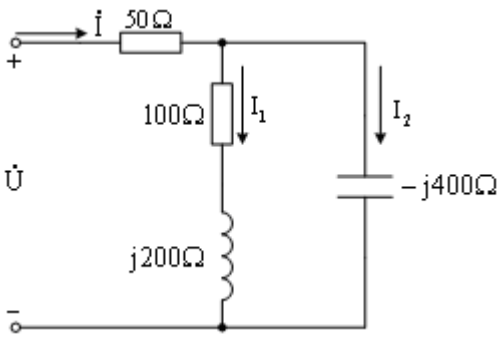
如图 3.5-2 二个阻抗的并联电路，由 KCL 定律得

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{Z_1} + \frac{\dot{U}}{Z_2} = \dot{U}(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}) = \frac{\dot{U}}{Z}$$

Z 为二阻抗并联的等效阻抗。

(1) $\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$

阻抗并联，等效阻抗的倒数等于各个并联阻抗的倒数之和，但



$$\frac{1}{|Z|} \neq \frac{1}{|Z_1|} + \frac{1}{|Z_2|}$$

(2) $\dot{I} = \dot{U}/Z$，$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$，$i = i_1 + i_2$，但$I \neq I_1 + I_2$

(3) $\dot{I}_1 = \dfrac{\dot{U}}{Z_1} = \dfrac{Z_2}{Z_1 + Z_2}\dot{I}$，$\dot{I}_2 = \dfrac{Z_1}{Z_1 + Z_2}\dot{I}$

图3.5-3

【例 3.5-1】如图 4.5-3，

$\dot{U} = 220\angle 0^{o}\,V$，

求(1)Z；(2) $\dot{I}$、$\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$。

解：(1)等效阻抗

$$Z = 50 + \frac{(100 + j200)(-j400)}{100 + j200 - j400}$$

$$= 370 + j240$$

$$= 440\angle 33^{o}(\Omega)$$

(2)电流

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{220\angle 0^{o}}{440\angle 33^{o}} = 0.5\angle -33^{o}(A)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{-j400}{100 + j200 - j400}\dot{I} = \frac{400\angle -90^{o}}{224\angle -63.4^{o}} \times 0.5\angle -33^{o} = 0.89\angle -$$

$$\dot{I}_2 = \frac{100 + j200}{100 + j200 - j400}\dot{I} = \frac{224\angle 63.4^{o}}{224\angle -63.4^{o}} \times 0.5\angle -33^{o} = 0.5\angle 93.$$

【例 3.5-2】在图 3.5-4(a)的电路中，已知 U=100V，f=50Hz，$I=I_1=I_2=10A$，$\cos\varphi = 1$，求 Z_1，Z_2。设 Z_1 为电感性，Z_2 为电容性。

解：令$\dot{U}=100\angle 0^o(V)$，由$\cos\varphi=1$，即$\dot{U}$与$\dot{I}$同相，

$$\therefore \dot{I}=10\angle 0^o(A)$$

又$\because \dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2$，$I=I_1=I_2$

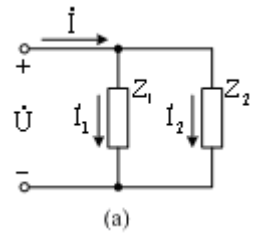
$\therefore \dot{I}$、$\dot{I}_1$、$\dot{I}_2$相量图为一等边三角形，则有

$$\dot{I}_1=10\angle -60^o(A)$$

$$\dot{I}_2=10\angle 60^o(A)$$

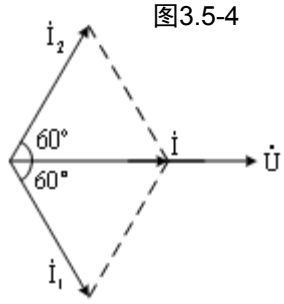
$$Z_1=\frac{\dot{U}}{\dot{I}_1}=10\angle 60^o(\Omega)$$

$$Z_2=\frac{\dot{U}}{\dot{I}_2}=10\angle -60^o(\Omega)$$



(a)

图3.5-4



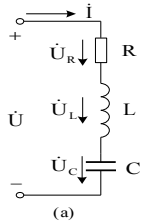
(b)

串联谐振

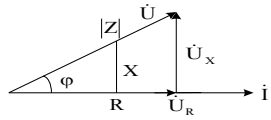
在具有电感和电容元件的电路中，电路两端的电压与其中的电流一般是不同相的。如果我们调节电路的参数和电源的频率而使它们同相，这时电路就发生谐振现象。

电路谐振具有某些特征，本节的目的就是要认识这种现象产生的条件和特点，以便在生产中加以利用，同时又要预防它所产生的危害。按谐振电路形式不同可分为两类(串联谐振和并联谐振)。

串联谐振：如图(a)RLC 电路，加正弦电压$\dot{U}$，相量图如图(b)所示。



(a)



(b)

图3.7-

1．谐振条件

当 $\dot{U}$ 与 $\dot{I}$ 同相时，电路发生谐振，即 $\varphi = 0$。

由 $\varphi = \text{arctg}\dfrac{X_L - X_C}{R} = 0$

$$\Rightarrow X_L = X_C \text{或} 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \qquad (3.7\text{-}0)$$

谐振频率 $f = f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (3.7-0)

f_0 称为电路发生谐振时的频率，由电路参数所决定。

2．串联谐振的特点

(1)谐振时，电路阻抗 $Z = R + j(X_L - X_C) = R$，总阻抗最小，显现出纯电阻性，电压与电流同相。在输入电压U不变下，电路发生谐振时，电流最大，$I = I_0 = \dfrac{U}{R}$。

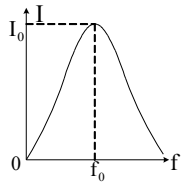


图 4.7-

(2)谐振时，由于电路呈电阻性，电源供给电路的能量全被电阻消耗。电源与电感、电容不发生能量交换，能量的互换只发生在电感线圈与电容之间。

(3)电压谐振和品质因数

由于 $X_L = X_C$，所以 $U_L = U_C$，而 $\dot{U}_L$ 与 $\dot{U}_C$ 相位相反，互相抵消，对整个电路不起作用，因此电源电压 $\dot{U} = \dot{U}_R$。

但是，$\dot{U}_L$ 和 $\dot{U}_C$ 的单独作用不能忽略，因为

$$\left.\begin{aligned} U_L &= X_L I = X_L \frac{U}{R} \\ U_C &= X_C I = X_C \frac{U}{R} \end{aligned}\right\} \qquad (3.7\text{-}0)$$

当$X_L = X_C >> R$时，$U_L = U_C >> U$，可能会出现$U_L(U_C) >>$电源电压U的现象，使电感和电容绝缘击穿。在电力工程中应避免发生串联谐振，但在无线电工程中常利用串联谐振以获得高电压，电感或电容元件上的电压常高于电源电压几十倍或几百倍。

品质因数Q：谐振时，U_L或U_C与电源电压U之比，称电路的品质因数。

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \qquad (3.10\text{-}0)$$

Q值表示在谐振时电感或电容上电压是电源电压的Q倍。

3．串联谐振的应用

在无线电工程中，利用串联谐振现象可用来选择信号。例如，收音机(电视接收机)的天线输入电路是天线线圈和由电感线圈L与可变电容C组成的串联谐振电路。

各电台不同频率的无线电波被天线 图4.7- L_1接收经电磁感应作用，在线圈L上感应出不同频率的电动势$e_1(f_1)$、$e_2(f_2)$、$e_3(f_3)$……等。这些电动势就是RLC串联电路的信号源。

调节电容，对所需信号频率调到串联谐振，这时LC回路中该频率的电流最大，在可变电容的两端的这种频率的电压也就最高。例如要接收f_2频率的信号，调节C，使谐振频率$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_2$，此时电路中$f_2$频率的电流最大($I_0 = \frac{U}{R}$)，其输出电压也最大，

图3.7-

而其它频率的信号虽然也在LC电路里出现，但由于没有发生谐振，在回路中电流很小，输出电压也较小，这样就达到了选择信号和抑制干扰的目的。

三并联谐振

如图3.7-10是电容器与线圈并联的电路，R为线圈的电阻。

1．谐振条件

$\dot{U}$ 与 $\dot{I}$ 同相，$Z=\dfrac{\dot{U}}{\dot{I}}$ 应表现出纯电阻性

$$Z=\frac{(R+j\omega L)\dfrac{1}{j\omega C}}{R+j\omega L+\dfrac{1}{j\omega C}}=\frac{R+j\omega L}{1+j\omega RC-\omega^2 LC}$$

由于线圈的内阻R很小，$\omega L >> R$，则上式子可写成

$$Z\approx\frac{j\omega L}{1+j\omega RC-\omega^2 LC}=\frac{1}{\dfrac{RC}{L}+j(\omega C-\dfrac{1}{\omega L})} \quad (3.10\text{-}0)$$

由于发生谐振时 $\varphi=0$，$X_L=X_C$，所以

$\omega C-\dfrac{1}{\omega L}\approx 0\Rightarrow\omega_0\approx\dfrac{1}{\sqrt{LC}}$，故并联谐振频率为

$$f=f_0\approx\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

图3.7-

2．并联谐振的特点

(1)并联谐振时，电路的阻抗

$$Z_0=\frac{L}{RC} \quad (3.7\text{-}0)$$

其值最大，且是纯电阻性。电压和电流同相。在输入电压U不变时，电路谐振时电流最小。

$$I = I_0 = \frac{U}{\frac{L}{RC}} = \frac{U}{|Z_0|}$$

(2)电流谐振

谐振时各并联支路的电流为

$$I_1 = \frac{U}{|Z_1|} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi f_0 L)^2}} \approx \frac{U}{2\pi f_0 L} = \frac{U}{X_L}$$

$$I_C = \frac{U}{1/(2\pi f_0 C)} = \frac{U}{X_C}$$

而 $|Z_0| = \frac{L}{RC} = \frac{2\pi f_0 L}{R(2\pi f_0 C)} \approx \frac{(2\pi f_0 L)^2}{R}$

$$I = I_0 = \frac{U}{(2\pi f_0 L)^2 / R}$$

由于 $2\pi f_0 L >> R$，$2\pi f_0 L \approx \frac{1}{2\pi f_0 C} << \frac{(2\pi f_0 L)^2}{R}$，所以

$I_1 \approx I_C >> I_0$，即在谐振时并联支路的电流比总电流大许多倍，因此，并联谐振也称为电流谐振。

品质因数 Q：定义为并联支路中的电流 I_1 或 I_C 与总电流 I_0 之比。

$$Q = \frac{I_1}{I_0} = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \qquad (4.7\text{-}0)$$

$$Z_0 = \frac{(\omega_0 L)^2}{R} = Q\omega_0 L = QX_L \qquad (4.7\text{-}0)$$

也就是并联谐振时，支路电流 I_1 或 I_C 是总电流 I_0 的 Q 倍，也就是谐振时电路的总阻抗是支路阻抗的 Q 倍。

(3)并联电路改为恒流源供电时，当电源的频率 图 3.7-

为f_0时，电路发生谐振，电阻总阻抗$|Z|$最大，那么在电路两端产生的电压$U=I|Z|$也最大；当为其它频率时，电路不发生谐振，$|Z|$较小，$U=I|Z|$也较小，这就是并联电路的谐振选频作用。电路的品质因数 Q 越大，阻抗谐振曲线越尖锐，选择性越好。

两种谐振电路比较：

表 3.7-

谐振电路	串联谐振	并联谐振
共同点	$\varphi=0$，呈电阻性，$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$，$Q=\frac{\omega L}{R}=\frac{1}{\omega RC}$	
不同点	低阻抗$\|Z\|=R$	高阻抗$\|Z\|=\frac{L}{RC}$
	电压谐振(L、C电压大)	电流谐振(L、C电流大)
	$U_L=U_C=QU$	$I_L\approx I_C=QI_0$

讨论	**[教学小结]** **两种谐振电路比较**	提问
记录	[布置作业] 课后复习、实训指导书	

教师授课方案

课题	3.7 功率因数的提高				
班级		课时	3	课型	理论+实验课
教学目标	了解功率因数的概念，熟悉提高功率因数对工程的实际意义和提高功率因数的方法				
德育渗透	节约能源，反对浪费				
教学方法	讲授法、实验法				
新知识 新技术或 参阅资料	日光灯电路				
双语教学	功率因数 power factor；功率因数补偿 power-factor compensation				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课] 我们知道，电路中的有功功率P、视在功率S、功率因数$\cos\varphi$三者之间的关系是$P = UI\cos\varphi$，即当负载的额定功率P一定时，负载的视在功率S随$\cos\varphi$的增大而减小，S随$\cos\varphi$的减小而增大。而负载的视在功率S需要电源提供，故提高负载的功率因数与电源的负担有关。本课我们就来学习和分析负载的功率因数与电源的负担的关系，同时分析如何才能提高负载的功率因数。	提问
听讲	[教学内容] 二端网络的平均功率$P = UI\cos\varphi$，$\cos\varphi$称为电路的功率因数，φ也是电压和电流的相位差。二端网络的负载有电灯、日光灯、电风扇、电炉、电动机等组成，大都是感性负载，$\cos\varphi < 1$。不同的负载，其功率因数可能相差很大。如白炽灯，$\cos\varphi = 1$；白光灯，$\cos\varphi < 0.5$；异步电动机，$0.7 \sim 0.9$(满载)，$0.2 \sim 0.3$(空载)。 **1．功率因数低带来的问题** (1)发电设备的容量不能充分利用 电源容量$S_N = U_N I_N$，单位：VA、KVA。 输出功率$P = U_N I_N \cos\varphi$，单位：W、KW。 与电源交换功率(无功功率)$Q = U_N I_N \sin\varphi$，单位：var、Kvar。 $\cos\varphi$越小，P越小，Q越大，发电设备输出的有功功率越小，而电路中能量的互换规模越大。 例如：某变压器容量S=50KVA，可供_____盏40W的白炽灯($\cos\varphi = 1$)； 可供_____盏40W的白光灯($\cos\varphi = 0.4$)。 表3.8-	

白炽灯$\cos\varphi = 1$	白光灯$\cos\varphi = 0.4$
$P = S_N \cos\varphi = 50\times10^3$(W)	$P = S_N \cos\varphi = 18.25\times10^3$(W)
$n = \dfrac{50\times10^3}{40} = 1250$(盏)	$n = \dfrac{18.25\times10^3}{40} = 456$(盏)

因此，负载功率因数提高，同样容量的发电设备可带更多的

负载。

(2)增加线路和发电机绕组的功率损耗

电流 $I=\dfrac{P}{U\cos\varphi}$，当P、U一定时，$\cos\varphi$越小，工作电流I越大，而线路和发电机绕组的功率损耗ΔP与$\cos\varphi^2$成反比，$\cos\varphi$越小，ΔP越大。

$$\Delta P=I^2r=(\frac{P}{U})^2r(\frac{1}{\cos\varphi})^2 \qquad (3.8\text{-}0)$$

式中r为线路和发电机绕组的电阻值。

因此，提高负载的功率因数，能使发电设备的容量得到充分利用，同时也能节约大量电能，对国民经济的发展具有重要的意义。

2．提高功率因数的方法

功率因数不高的原因是由于电感性负载的存在。例如：异步电动机在满载时功率因数为0.7~0.9左右，如果轻载时其功率因数更低。工频炉、电焊、变压器及白光灯等负载功率因数都是比较低的。

按照供用电规则，高压供电的工业企业的平均功率因数不低于0.95，其它单位不低于0.9。提高功率因数常用的方法就是在电感性负载的两端并联电容器，如图4.8-1(a)。下面用相量图分析，感性负载RL并联电容器后，可以提高功率因数，又不影响负载的电流和功率。

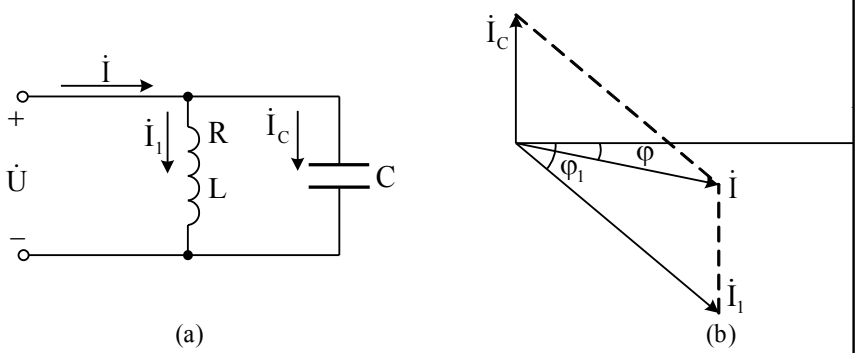


图3.8-

选电压$\dot{U}$为参考相量。

未并联电容时，功率因数$\cos\varphi_1$，功率$P = UI_1\cos\varphi_1$，负载电流$I_1 = \dfrac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$

并联电容后，$\cos\varphi_1$、$I_1 \Rightarrow \cos\varphi$、$I$，主线路中电流减小了，$\cos\varphi$变大了，但是$P = UI\cos\varphi = UI_1\cos\varphi_1$不变。

需要指出的是，这里我们所讲的提高功率因数，是指提高电源或电网的功率因数，而不是指提高某个电感性负载的功率因数。

只要选择合适大小的电容器，就可使$I < I_1$，$\varphi < \varphi_1$。

由$I_1 = \dfrac{P}{U\cos\varphi_1}$，$I = \dfrac{P}{U\cos\varphi}$，可得

$$I_C = I_1\sin\varphi_1 - I\sin\varphi$$

$$= \frac{P}{U}(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi)$$

又因$I_C = \dfrac{U}{X_C} = U\omega_C$，可得

$$C = \frac{P}{\omega U^2}(tg\varphi_1 - tg\varphi) \qquad (4.8\text{-}0)$$

由上式可计算电容器的大小。

【例3.8-1】已知：$P = 10KW$，$\cos\varphi_1 = 0.6$，$U = 220V$，$f = 50Hz$，求：(1)$\cos\varphi = 0.95$，$C = ?$，$I_1 = ?$，$I = ?$ (2)若将功率因数由0.95提高到1，所需要的电容值C?

解：(1)$\cos\varphi_1 = 0.6 \Rightarrow \varphi_1 = 53^o$；$\cos\varphi = 0.95 \Rightarrow \varphi = 18^o$

因此所需的电容值为

$$C = \frac{P}{\omega U^2}(\mathrm{tg}\varphi_1 - \mathrm{tg}\varphi) = \frac{10\times10^3}{2\times3.14\times50\times220^2}(\mathrm{tg}53^o - \mathrm{tg}18^o) = 656($$

负载电流为

$$I_1 = \frac{P}{U\cos\varphi_1} = \frac{10\times10^3}{220\times0.6} = 75.6(A)$$

并联后的线路电流为

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi} = \frac{10\times10^3}{220\times0.95} = 47.8(A)$$

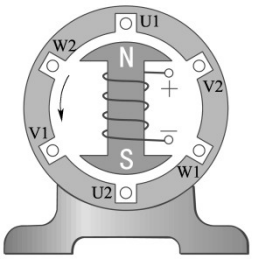
(2)如果需要将功率因数由0.95再提高到1，所需的电容值为

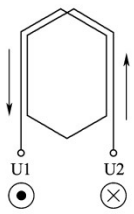
	$C=\frac{P}{\omega U^2}(tg\varphi_1-tg\varphi)=\frac{10\times10^3}{2\times3.14\times50\times220^2}(tg18^o-tg0^o)=213.6$ 可见在功率因数已经接近1时再继续提高，所需要的电容值是很大的，因此一般不必提高到1。	
讨论	**[教学小结]** 常用提高功率因数的方法，是在感性负载两端**并联**容量合适的电容。	提问
记录	**[布置作业]** 参见实训指导书	

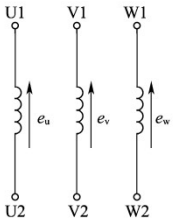
教师授课方案

课题	3.9 三相电路				
班级		课时	3	课型	理论+实验课
教学目标	三相电源的基本概念，三相负载的连接及三相四线制；三相电路功率的测量。				
德育渗透	关注生活，安全用电				
教学方法	讲授、实验法				
新知识 新技术或 参阅资料	三相四线制				
双语教学	相电压 phase voltage；相电流 phase current 线电压 line voltage；线电流 line current				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

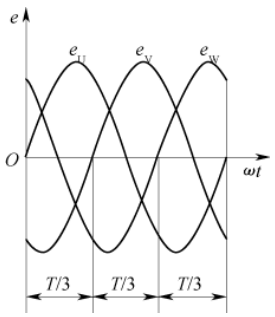
学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课]目前，电能的产生、输送和分配，基本都采用三相交流电路。	提问
听讲	[教学内容] 三相交流电 三相交流电具有以下优点： ● 三相发电机比体积相同的单相发电机输出的功率要大。 ● 三相发电机的结构不比单相发电机复杂多少，而使用、维护都比较方便，运转时比单相发电机的振动要小。 ● 在同样条件下输送同样大的功率时，特别是在远距离输电时，三相输电比单相输电节约材料。 一、三相交流电动势的产生	



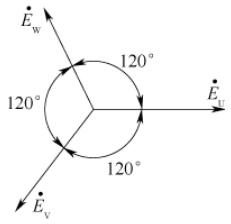




三相交流发电机示意图电枢绕组三相绕组及其电动势



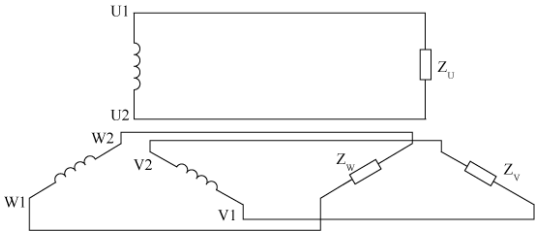
$$\begin{cases} e_U = E_m \sin(\omega t + 0^\circ)\ \text{V} \\ e_V = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)\ \text{V} \\ e_W = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)\ \text{V} \end{cases}$$



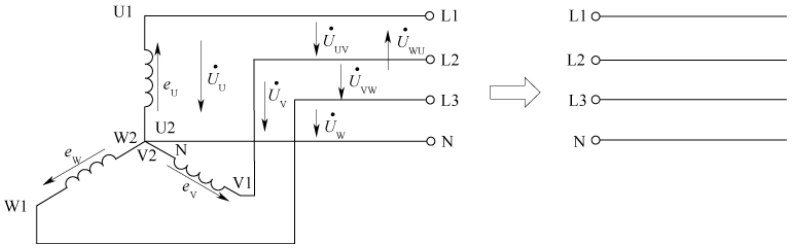
相序——三个交流电动势到达最大值（或零）的先后次序。

规定每相电动势的正方向是从线圈的末端指向始端，即电流从始端流出时为正，反之为负。

二、三相四线制



三相六线制电路



三相四线制电路

线电压——端线与端线之间的电压。

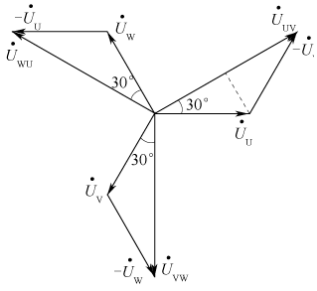
相电压——端线与中线之间的电压。

$$\dot{U}_{UV}=\dot{U}_U-\dot{U}_V$$

$$\dot{U}_{VW}=\dot{U}_V-\dot{U}_W$$

$$\dot{U}_{WU}=\dot{U}_W-\dot{U}_U$$

$$U_{线}=\sqrt{3}\,U_{相}$$



线电压总是超前于对应的相电压30°。

三相负载的连接方式

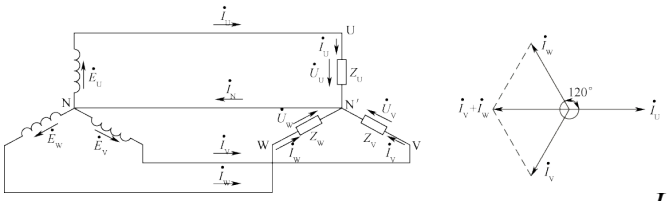
三相负载——接在三相电源上的负载。

对称三相负载——各相负载相同的三相负载，如三相电动机、大功率三相电路等。

不对称三相负载——各相负载不同，如三相照明电路中的负载。

一、三相负载的星形连接

把三相负载分别接在三相电源的一根相线和中线之间的接法（常用“Y”标记）。



$$U_{线}=\sqrt{3}\,U_{相Y}$$

$$I_{线Y}=I_{相Y}=\frac{U_{相Y}}{Z_{相}}$$

对于感性负载来说，各相电流滞后对应电压的角度，可按下式计算：

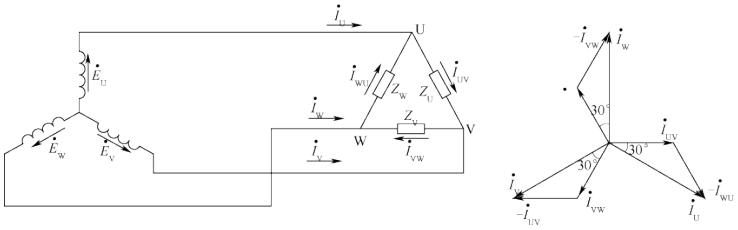
$$\varphi=\arctan\frac{X_L}{R}$$

负载星形连接时，中线电流为各相电流的相量和。在三相对称电路中，由于各相负载对称，所以流过三相电流也对称，其相量和为零，即：

$$\dot{I}_N=\dot{I}_U+\dot{I}_V+\dot{I}_W=0$$

二、三相负载的三角形连接

把三相负载分别接在三相电源每两根相线之间的接法（常用“△”标记）。



$$U_{相△}=U_{线△}$$

$$I_{线△}=\sqrt{3}\,I_{相△}$$

线电流总是滞后于相应的相电流 30°

三、三相负载的功率

在三相交流电源中，三相负载消耗的总功率为各相负载消耗的功率之和，即：

$$P=P_U+P_V+P_W=U_UI_U\cos\varphi_U+U_VI_V\cos\varphi_V+U_WI_W\cos$$

在对称三相电路中，有：

$$P=3U_{相}I_{相}\cos\varphi=3P_{相}$$

	当对称负载作星形连接时，有功功率为： $$P_{Y}=3U_{相}I_{相}\cos\varphi=3\frac{U_{线}}{\sqrt{3}}I_{线}\cos\varphi=\sqrt{3}U_{线}I_{线}\cos\varphi$$ 当对称负载作三角形连接时，有功功率为： $$P_{\Delta}=3U_{相}I_{相}\cos\varphi=3U_{线}\frac{I_{线}}{\sqrt{3}}\cos\varphi=\sqrt{3}U_{线}I_{线}\cos\varphi$$ 即三相对称负载不论是连成星形还是连成三角形，其总有功功率均为： $$P=\sqrt{3}U_{线}I_{线}\cos\varphi$$ 对称三相负载的无功功率和视在功率的计算式分别为： $$Q=\sqrt{3}U_{线}I_{线}\sin\varphi=3U_{相}I_{相}\sin\varphi$$ $$S=\sqrt{3}U_{线}I_{线}=3U_{相}I_{相}$$	
讨论	三相电源的基本概念，三相负载的连接及三相四线制；三相电路功率的测量。	提问
记录	**[布置作业]** 参见实训指导书	

教师授课方案

课题	4.1 磁路的基本物理量 4.2 磁路及基本定律				
班级		课时	2	课型	理论课
教学目标	理解磁场的基本概念 掌握磁路欧姆、安培环路定律				
德育渗透	培养学生科学探究的态度，将科学与生活有机联系				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	安培环路定律				
双语教学	磁场 magnetic field；磁感应强度 flux density				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课]从初中物理的通性相斥，异性相吸引入磁场。	提问
听讲	[教学内容] **1、磁场的基本物理** **1、　　磁感强度B** 磁感强度是表示磁场内某点磁场强弱（磁力线多少）和磁场方向的物理量。它有方向，是矢量。 $B=F/lI$ 式中：F是电磁力 l是导体的长度 I是通过磁体的电流 磁感强度的方向可用右手螺旋定律来确定，单位是特斯拉（T） **2、　　磁通 φ** 磁感强度与垂直于磁场方向的面积的乘积，称为通过这个面积的磁通。 $\phi=BS$　或$B=\phi/S$ 单位：韦伯（Wb） **3、　　磁导率 μ** 磁导率是描述磁场介质导磁能力的物理量。 单位：亨利/米（H/m） 4、　　磁场强度H $H=B/\mu$　或 $B=H\mu$	

磁场强度为磁场中某一点磁感强度与该点介质的磁导率的比值。

说明：磁场强度H只与电流大小、线圈匝数及该点位置有关，与这点介质的磁导率无关。它有单位是安/米（A/m）。

它是为了方便计算引入的物理量。

2、 磁性材料的磁性能

导磁性：磁导率可达10^{2}~10^{4}，由铁磁材料组成的磁路磁阻很小，在线圈中通入较小的电流即可获得较大的磁通。

磁饱和性：*B*不会随*H*的增强而无限增强，*H*增大到一定值时，*B*不能继续增强。

磁滞性：铁心线圈中通过交变电流时，*H*的大小和方向都会改变，铁心在交变磁场中反复磁化，在反复磁化的过程中，*B*的变化总是滞后于*H*的变化。

磁化曲线　　磁滞曲线

3、 磁路及其基本定律

磁路指由磁材料构成的磁通路径，它是一个闭合的曲线。

1.欧姆定律

由磁感强度与励磁电流I的关系

B＝μNI/l=μH

可得

NI=Hl=Bl/μ=Φl/μS

或

$\varphi==F/R_m$

式中

F　磁通势

R_m磁阻

	l 磁路的平均长度 S 磁路的截面积 2.全电流定律—安培环路定律 在磁场中延任一闭合曲线，磁场强度 H 的线积分等于与该闭合曲线所围曲面的电流的代数和。 $\oint_L H \cdot dl = \sum I$ 如果磁场均匀可化简：线圈：$\sum Hl = NI$ N 为线圈匝数；l 为磁路的平均长度。	
讨 论	**[教学小结]** 磁感应强度、磁通、磁导率、磁场强度； 磁路的安培环路定律、欧姆定律。	提 问
记 录	[布置作业] 学习例 4-1	

教师授课方案

课题	4.3 互感				
班级		课时	2	课型	理论课
教学目标	认识互感现象，掌握互感电动势的概念和计算及互感电动势方向的判定，掌握互感线圈同名端的概念和同名端的判断方法				
德育渗透	养成严谨、求是、务实的职业精神。				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	互感和自感				
双语教学	互感 mutual inductance 自感 self-inductance				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课]流过线圈自身的电流发生变化能在线圈中产生感应电动势，能否在别的线圈中也产生感应电动势呢？也就是线圈之间可否互感呢？只要有一定的条件，互感就会发生。本课我们就来学习有关的知识	提问
听讲	[教学内容] **一、互感现象** 线圈 L 中有电流 i_1 时：L_1 中有 Φ_{11}、Ψ_{11}（$\Psi_{11}=N_1\Phi_{11}=L_1I_1$），$L_2$ 中有 Φ_{21}、Ψ_{21}（$\Psi_{21}=N_2\Phi_{21}$）。线圈 L 中的电流 i_1 变化时： Ψ_{11} 变化，自感电动势 $$E_{L1}=\frac{\Delta\Psi_{11}}{\Delta t}$$ Ψ_{21} 也变化，互感电动势 $$E_{M2}=\frac{\Delta\Psi_{21}}{\Delta t}$$ 同理，当线圈 2 中电流 i_2 变化时，线圈 L 中也产生互感电动势 $$E_{M1}=\frac{\Delta\Psi_{12}}{\Delta t}$$ 互感现象：当一个线圈中电流发生变化时，在另一个线圈中将要产生感生电动势，这种现象叫互感现象。产生的感应电动势叫互感电动势。 **二、互感系数（也称互感量，简称互感）M** 1．$M=\frac{\Psi_{21}}{i_1}=\frac{\Psi_{12}}{i_2}$ 单位：亨利（H） 2．说明： （1）M 只与两个回路的结构、相互位置及媒质磁导率有关，与回路中的电流无关。只有当媒介质为铁磁性材料时，M 才与电流有关。 3．M 与 L 的关系 设 K_1、K_2 为各线圈产生的互感磁通与自感磁通的比值	

$$K_1=\frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}}=\frac{\Psi_{21}N_1}{\Psi_{11}N_2}=\frac{Mi_1N_1}{L_1i_1N_2}=\frac{MN_1}{L_1N_2}$$

$$K_2=\frac{\Phi_{12}}{\Phi_{22}}=\frac{MN_2}{L_2N_1}$$

K_1与K_2的几何平均值称为线圈的交链系数或耦合系数，用K表示。

$i=\sqrt{K_1K_2}=\frac{M}{\sqrt{L_1L_2}}$，因$0\le K_1\le 1$，$0\le K_2\le 1$

所以

$$0<K<1$$

$K=0$表示线圈之间不存在互感；$K=1$表示两线圈全耦合，无漏磁。所以$M=K\sqrt{L_1L_2}$（M决定于K、L_1、L_2）

三、互感电动势

1．i_1变化产生E_{M2}

$$E_{M2}=\frac{\Delta\Psi_{21}}{\Delta t}=M\frac{\Delta i_1}{\Delta t}$$

同理i_2变化产生E_{M1}

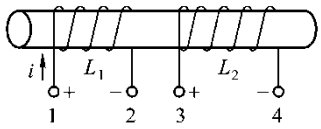
$$E_{M1}=M\frac{\Delta i_2}{\Delta t}$$

其大小等于互感系数和另一线圈中电流变化率的乘积；其方向用楞次定律判断。

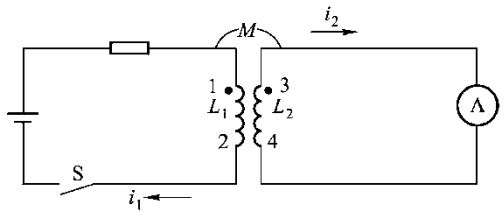
一、互感线圈的同名端

1．同名端：把在同一变化磁通作用下，感应电动势极性相同的端点叫同名端。感应电动势极性相反的端点叫异名端。用符号“•”表示同名端。

例：



2．同名端的确定

	（1）已知线圈绕法时，可用楞次定律直接判定（如上例）。 （2）不知线圈绕法时，可用实验方法来确定。如下图。  开关闭合，i_1 增大，图中电源上“+”下“–”，如 A 表正偏，表明（3）端与（1）端为同名端，A 表反偏，表明（4）端与（3）端为同名端。	
讨 论	**[教学小结]** 互感线圈同名端的概念及判别	提 问
记 录	**[布置作业]** 课后习题 4-2	

教师授课方案

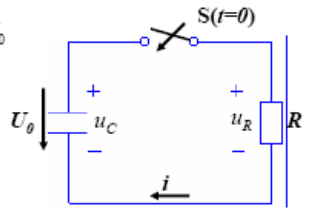
课题	5.1 换路定律和初始值的确定				
班级		课时	2	课型	理论课
教学目标	1．了解瞬态过程的概念。 2．理解换路定律，掌握电流、电压初始值的计算。				
德育渗透	瞬态过程引导同学们正确认识自己，树立正确的人生价值观				
教学方法	讲授法				
新知识 新技术或 参阅资料	换路定律				
双语教学	暂态响应 transient response；换路定理 low of switch				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课] 复习并联谐振电路并引入新课程	提问
听讲	[教学内容] **第一节 换路定律** **一、瞬态过程的概念** 1．含有动态元件（储能元件）L 和 C 的电路称为动态电路。 2．电路从一种稳定状态变化到另一种稳定状态的中间过程叫电路的瞬态过程。 3．引起瞬态过程的原因 外因：电路的接通或断开，电源的变化，电路参数的变化，电路的改变等。 内因：电路中必须含有储能元件（或称动态元件）。 4．引起瞬态过程的电路变化称为换路。 **二、换路定律** 1．具有电感的电路 在换路后的一瞬间，如果电感两端的电压保持为有限值，则电感中的电流应当保持换路前一瞬间的原有值而不能跃变。 即 $$i_L(0_+) = i_L(0_-)$$ 若对于一个原来没有储能的电感来说，在换路一瞬间 $$i_L(0_+) = i_L(0_-) = 0$$ 电感相当于开路。 2．具有电容的电路 在换路后的一瞬间，如果流入（或流出）电容的电流保持为有限值，则电容上电压应保持换路前一瞬间的原有值而不能跃变，即 $$u_C(0_+) = u_C(0_-)$$ 对于一个原来不带电压（即未充电）的电容来说，在换路的一瞬间 $$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$$ 电容相当于短路。 3．若设 $t = 0$ 为换路瞬间，则 $t = 0_-$ 表示换路前的终了瞬间，$t = 0_+$ 表示换路后的初始瞬间，从 $t = 0_-$ 到 $t = 0_+$ 瞬间，电容元件上的电压和电感元件中的电流不能跃变，这称为换路定律。	

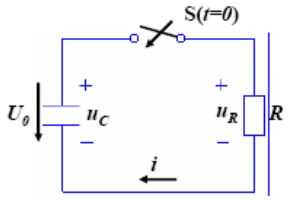
	三、电压、电流初始值的计算 **1.** 步骤： （1）根据换路定律求出 $u_C(0_+)$和 $i_L(0_+)$。 （2）作出 $t=0_+$时的等效电路。 （3）在($t=0_+$)瞬时，根据基尔霍夫定律及欧姆定律求出其它有关的初始值。 2．举例 5-1、5-2、5-3	
讨 论	**[教学小结]** 1．瞬态过程概念。 2．引起瞬态过程的原因。 3．换路。 4．换路定律。	提 问
记 录	[布置作业] 习题 5-3、5-4	

教师授课方案

课题	5.2-5.5 一阶电路的零输入、零状态、全响应以及求解一阶电路动态响应的三要素法				
班级		课时	2	课型	理论+实践课
教学目标	了解 RC、RL 电路瞬态过程中电压和电流随时间而变化的规律。 掌握三要素法分析动态电路；初始值和时间常数的计算。				
德育渗透	零输入、零状态、全响应引导大家要一分为二的看待问题，注意辨证统一性。				
教学方法	讲授、实验法				
新知识 新技术或 参阅资料	一阶电路动态响应的三要素				
双语教学	一阶电路 first-order circuit 三要素法 three-factor method				
指定参考书目	《电路》邱关源主编（高等教育出版社）				

学生活动	授课内容	教师活动
思考	[导入新课] 在一个电路简化后（如电阻的串并联，电容的串并联，电感的串并联化为一个元件），只含有一个电容或电感元件（电阻无所谓）的电路叫一阶电路。引入一阶电路概念导入新课。	提问
听讲	[教学内容] **一阶电路的零输入响应** 1、 零输入响应 零输入：输入＝0（外电源输入＝0） 能量来源　　消耗能量的元件　　最终 储能元件储存的能量 { C: $u_c(0_-)\neq 0$　R；L: $i_L(0_-)\neq 0$　R　终值为0 二、*RC*电路的零输入响应 1、推导过程： 初始：*S*合上前　$(t\le 0_-): u_c = U_0$ 换路：*S*合上($t=0$)：  $u_R - u_C = 0$ $u_R = Ri$　　$i = -C\frac{du}{dt}$ $t \ge 0_+$　$RC\frac{du_c}{dt} + u_c = 0$ 解一阶齐次微分方程： 令通解　　$u_c = Ae^{pt}$ 则：$(RCp+1)Ae^{pt} = 0$	

$(RCp+1)Ae^{pt}=0$



特征方程：

$RCp+1=0$

$\Rightarrow$ 特征根 $p=-\dfrac{1}{RC}$

$\therefore u=Ae^{-\frac{1}{RC}t}$

由初始条件定A：

$u_c(0_+)=u_c(0_-)=U_0\Rightarrow Ae^{-\frac{1}{RC}t}\Big|_{t=0_+}=U_0 \quad \Rightarrow A=U_0$

解为 $u_c(t)=u_c(0_+)e^{-\frac{1}{RC}t}=U_0e^{-\frac{t}{RC}}$

2、结论：

$$\begin{cases} u_c(t)=U_0e^{-\frac{t}{RC}}=U_0e^{-\frac{t}{\tau}} \\ i=-C\dfrac{du_c}{dt}=-C\left(-\dfrac{1}{RC}\right)U_0e^{-\frac{t}{RC}} \\ \quad =\dfrac{U_0}{R}e^{-\frac{t}{RC}}=\dfrac{U_0}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} \\ u_R=u_C=U_0e^{-\frac{t}{RC}}=U_0e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases}$$

均按同样的指数规律衰减，最终趋于0。

3、时间常数

$\tau=RC$

τ的大小反映此一阶电路过渡过程的进展速度

τ小：过渡过程短，进展快

τ大：过渡过程长，进展慢

$$\because u_c(t_0+\tau)=U_0e^{-\frac{t_0+\tau}{\tau}}=e^{-1}U_0e^{-\frac{t_0}{\tau}}$$

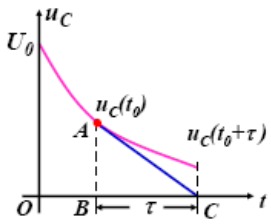
$$=\frac{1}{e}u_c(t_0)=0.368\ u_c(t_0)$$

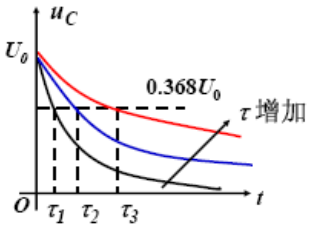
•即：零输入响应在任一时刻*t0*的值，经过一个时间常数τ后，衰减为原值的36.8%。

•工程上：换路后经过3τ～5τ后，放电基本结束。

$$\begin{pmatrix} u_c(3\tau)=e^{-3}U_0=0.05U_0 \\ u_c(5\tau)=e^{-5}U_0=0.007U_0 \end{pmatrix}$$

4、曲线：





u_c、u_R、i 的曲线上任意一点的次切距长度

$$\overline{BC}=\tau$$

τ不同，衰减快慢也不同。

三、*RL*电路的零输入响应

1、推导过程：

初始，K打开前 $(t\le 0)$

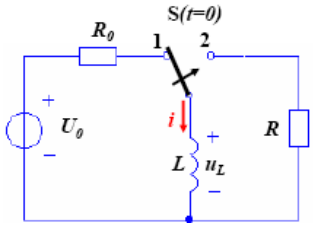
$$i_L(0_-)=I_0=\frac{U_\circ}{R_\circ}$$

换路，K打开 $(t=0)$

$$i_L(0_+)=i_L(0_-)=I_0$$

$$t\ge 0_+ : L\frac{di}{dt}+iR=0$$

求解一阶齐次微分方程：



令$i=Ae^{pt}$　　则$(Lp+R)e^{pt}=0$

特征方程：$Lp+R=0$

得特征根　$p=-\dfrac{R}{L}$

$$\therefore i=Ae^{-\frac{R}{L}t}$$

由初始条件定**A**：

$$i_L(0_+)=I_0=Ae^{-\frac{R}{L}t}\Big|_{t=0_+}\Rightarrow A=I_0$$

解为：　$i(t)=I_0e^{-\frac{R}{L}t}$

2、结论：

$$\begin{cases} i(t)=i(0_+)e^{-\frac{R}{L}t}=I_0e^{-\frac{R}{L}t}=I_0e^{-\frac{t}{\tau}} \\ u_R=iR=RI_0e^{-\frac{R}{L}t}=RI_0e^{-\frac{t}{\tau}} \\ u_L=L\frac{di}{dt}=-RI_0e^{-\frac{R}{L}t}=-RI_0e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases}$$

大小均按指数规律衰减，最终趋于0。

3、时间常数

$$\tau=\frac{L}{R}$$

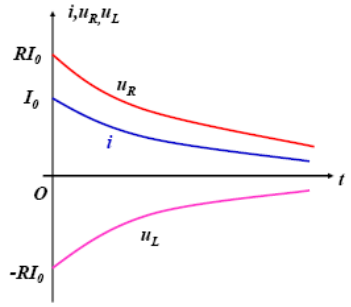
R大 τ小　　衰减快

R小 τ大　　衰减慢

与*RC*串联电路相反

$$\begin{cases} \textbf{C}：\text{电压不能突变，}\textbf{R}\text{大，}i\text{小，电荷释放慢} \\ \textbf{L}：\text{电流不能突变，}\textbf{R}\text{大，}u\text{大，释放热能快} \end{cases}$$

4、曲线：



5.3一阶电路的零状态响应

一、零状态响应

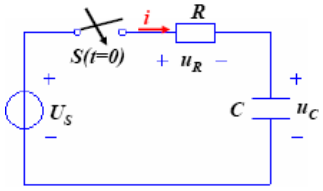
零状态：初始状态为零

$$\begin{cases} L: i_L(0_+)=0 \\ C: u_C(0_+)=0 \end{cases}$$

能量来源			最终终值
外电源输入	直流 交流	充电	与电源变化规律相同

二、*RC*电路

1、推导：



换路后：

$$(t \geq 0_+): u_c + u_R = U_S$$

$$RC\frac{du_C}{dt} + u_c = U_S$$

$$RC\frac{du_C}{dt} + u_C = U_S$$

求解一阶非齐次微分方程

$$\begin{cases} \text{非齐次方程的特解} & u_c' \\ \text{齐次方程的通解} & u_c'' \end{cases}$$

$$RC\frac{du_C}{dt} + u_C = U_S$$

特解：满足

$$RC\frac{du_C'}{dt}+u_c'=U_S$$

重新达到稳态时的值

齐次方程的通解：满足

$$RC\frac{du_C''}{dt}+u_c''=0$$

$$u_c''=Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

解得：

$$u_c=u_c'+Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{又 } \because \text{ 初始 } u_c(0_+)=u_c'(0_+)+A$$

$$\Rightarrow A=u_c(0_+)-u_c'(0_+)$$

$$\therefore u_c(t)=u_c'(t)+[u_c(0_+)-u_c'(0_+)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

适用于一阶电路各处的u，i

三要素：特解，初始值，时间常数

2、结论：

零状态响应：

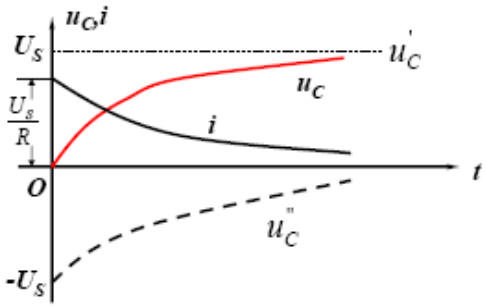
（1）直流电源U_S

特解：（又一次稳定后的值）

$$u_c'(t)=U_s \qquad \therefore u_c'(0_+)=U_s$$

$$\therefore u_c(t)=U_s+(0-U_s)e^{-\frac{t}{\tau}}=U_s(1-e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$i(t)=C\frac{du_C}{dt}=\frac{U_s}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}$$



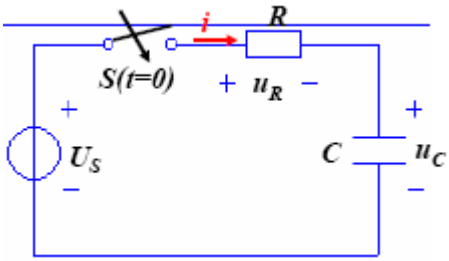
$$W_R = \int_0^\infty i^2 R dt = \int_0^\infty (\frac{U_S}{R} e^{-\frac{t}{\tau}})^2 R dt = \frac{U_S^2}{R} \int_0^\infty e^{-\frac{2t}{\tau}} dt$$
$$= -\frac{CU_S^2}{2} e^{-\frac{2t}{RC}} \Big|_0^\infty = \frac{1}{2} CU_s^2 = W_C$$

∴不论R、C如何，电源充电能量的一半被R吸收，一半转换为电容的电场能量，充电效率为50%。

（2）交流电源

$$u_S(t) = \sqrt{2} U_S \cos(\omega t + \psi_S)$$

例：



U_S=220V，R=100Ω，C=0.5μF，C未充过电。t=0时合上开关S。

求：(1)u_C、i；

(2)最大充电电流；

(3)合上S后150μs后u_C、i的值。

解：(1)

$$u_c(t) = U_S(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$
$$= 220(1 - e^{-\frac{t}{100\times10^{-6}\times5}})$$
$$= 220(1 - e^{-2\times10^4 t})(\mathrm{V})$$

$$i(t)=\frac{U_S}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}=2.2e^{-2\times10^4 t}(\mathrm{A})$$

(2)最大充电电流；

$$I_{\max}=i(0_+)=2.2(A)$$

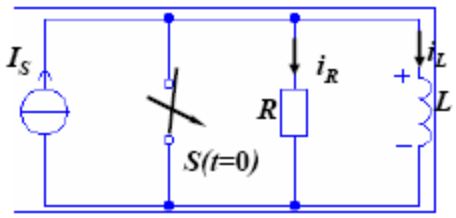
(3)合上S150μs后u_C、i的值。

$$u_c\Big|_{t=150\times10^{-6}}=220(1-e^{-2\times10^4\times150\times10^{-6}})\quad=209(\mathrm{V})$$

$$i\Big|_{t=150\times10^{-6}}=2.2e^{-2\times10^4\times150\times10^{-6}}=2.2e^{-3}=0.11(\mathrm{A})$$

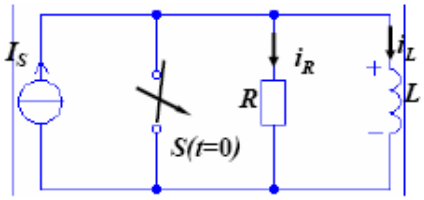
三、RL电路

1、直流电源U_S



电路方程

$$\frac{L}{R}\frac{di_L}{dt}+i_L=I_S$$



$$\frac{L}{R}\frac{di_L}{dt}+i_L=I_S$$

初始条件为$i_L(0+)=0$

方程的解

$$i_L = I_S(1-e^{-\frac{t}{\tau}})$$

2、交流电源

$$u_s = \sqrt{2}U_S\cos(\omega t + \psi_U)$$

$$Ri + L\frac{di}{dt} = \sqrt{2}U_S\cos(\omega t + \psi_U)$$

总结

•自由分量指数函数前的系数与正弦电压的接入相角有关（开关合上的时刻）

若$\psi_u = \varphi + \frac{\pi}{2}$,则:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U_S}{|Z|}\cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \frac{\sqrt{2}U_S}{|Z|}\sin\omega t$$

若$\psi_u = \varphi + \frac{\pi}{2}$,则:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U_S}{|Z|}\cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \frac{\sqrt{2}U_S}{|Z|}\sin\omega t$$

5.4一阶电路的全响应

一、全响应

当一个非零初始状态的一阶电路受到激励时，电路的响应称为全响应。

二、RC电路

设电容原有电压为U_0

1、电路方程

$$RC\frac{du_C}{dt} + u_C = U_S$$

初始条件

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = U_0$$

2、方程的解

$$RC\frac{du_C}{dt} + u_C = U_S$$

方程的通解

$$u_C = u_C' + u_C''$$

特解

$$u_C' = U_S$$

对应齐次方程的通解

$$u_C'' = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$u_C = U_S + Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

根据$u_C(0+)=u_C(0-)=U_0$，得积分常数$A=U_0-U_S$

$$u_C = U_S + (U_0 - U_S)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

全响应=稳态分量+瞬态分量

上式改写成

$$u_C = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + U_S(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

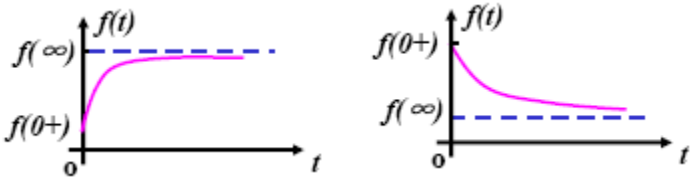
全响应=零输入响应+零状态响应

三、**RL**电路

形式上和**RC**电路一致。

5.5三要素法

（仅适用直流激励）



三要素

初始值f(0+)，稳态值f(∞)，时间常数τ

三要素公式：

$$f(t) = f(\infty) + [f(0+) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad t \geq 0$$

1．初始值f(0+)的计算

(1)uc(0+)与$i_L(0+)$按换路定则求出

C视作开路uc(0+)=uc(0-)

L视作短路$i_L(0+)=i_L(0-)$

(2)其它电路变量的初始值

应画出t=0+的等效电路，然后按电阻电路计算

2．稳态值*f*(∞)的计算

作出**t**→∞的等效电路，然后按电阻电路计算

在**t**→∞的等效电路中，因为直流作用

电容视作开路

电感视作短路

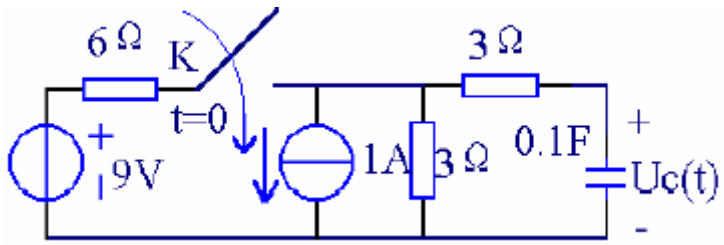
3．时间常数τ的计算

RC电路$\tau=R_0C$

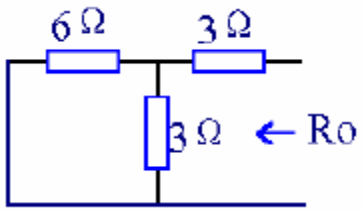
RL电路$\tau=L/R_0$

Ro为换路后的电路，从动态元件两端看进去的戴维宁等效电阻。

例：求图示电路的τ值



解



换路后的电路，从电容两端看进去的等效戴维宁电阻为：

$R_0=3+3//6=5(\Omega)$

$\therefore \tau=R_0C=5\times0.1=0.5(s)$

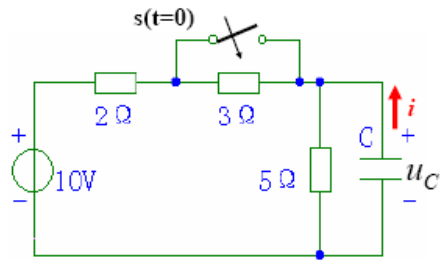
4．三要素法求完全响应

$$f(t)=f(\infty)+\left[f(0+)-f(\infty)\right]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

当正确求出$f(0+)$，$f(\infty)$及τ三要素后，即可按上式书写出变量的完全响应。

注意标注单位

例：



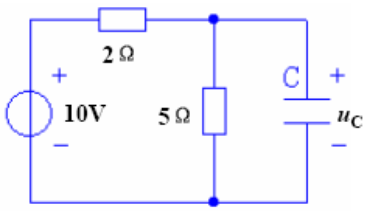
电容**C=0.1F**，求**S**闭合后电容两端的电压$\mathbf{u_C}$和电流**i**。

解：利用三要素法先求出$\mathbf{u_C}$

1、求初值

$$u_C(0_+)=u_C(0_-)=5\text{V}$$

2、求终值

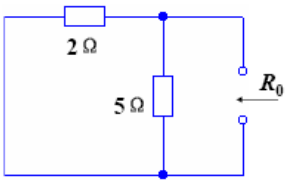


$$u_C(\infty)=\frac{5}{2+5}\times 10$$

$$=\frac{50}{7}\text{V}$$

3、求时间常数

Ro=2//5=10/7Ω

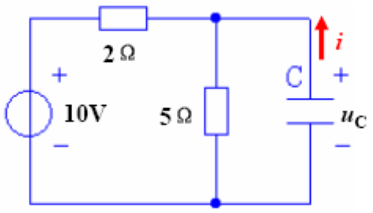


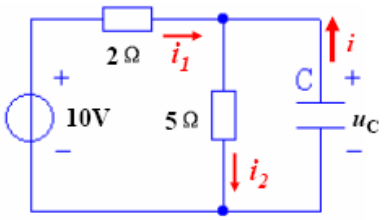
$$\tau=R_0C=\frac{10}{7}\times 0.1=\frac{1}{7}S$$

4、$u_C=u_C(\infty)+[u_C(0+)-u_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}=\frac{50}{7}+(5-\frac{50}{7})e^{-7t}\text{V}$

$$i=-C\frac{du_C}{dt}=-1.5e^{-7t}\text{A}$$

电流**i**也可以通过三要素法直接求得换路后的电路





i的初值

$$u_C(0_+)=5\text{V}$$

$$i_1(0_+)=2.5\text{A} \qquad i_2(0_+)=1\text{A}$$

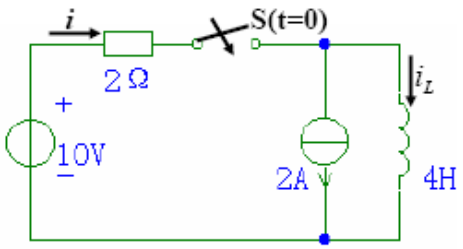
$$i(0_+)=-1.5\text{A}$$

i的终值

$$i(\infty)=0$$

$$i=i(\infty)+[i(0+)-i(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}=-1.5e^{-7t}\text{A}$$

例：



求电路中的电流**i**和$\mathbf{i_L}$。

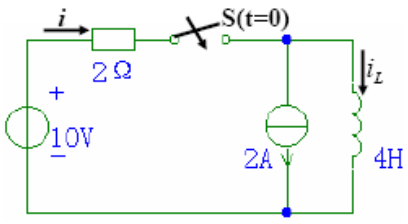
解：

1、求初值

$$i_L(0+)=i_L(0-)=-2\text{A}$$

2、求终值

$$i_L(\infty)=3\text{A}$$



3、求时间常数

	$\tau = \frac{L}{R_0} = \frac{4}{2} = 2S$ 4、 $i_L = i_L(\infty) + [(i_L(0+) - i_L(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$ $= 3 - 5e^{-0.5t}\text{A}$ $i = 2 + i_L = 5 - 5e^{-0.5t}\text{A}$	
讨论	**[教学小结]** RC、RL 电路充放电电流、电压的变化规律。 三要素法及通解	提问
记录	**[布置作业]** 习题 5-5、5-6、5-9	