

器 驗 試 質 介

里 达 著

水 利 电 力 出 版 社





第一章 普通理論及各部元

第一节 电容器	2
第二节 介質	9
第三节 阻容电路的向量及計算	14
第四节 較量法	17
第五节 介質試驗器全綫路图	20
第六节 电源供給部分	22
第七节 試驗变压器	23
第八节 空气电容器	23
第九节 調整电阻	24
第十节 电容盘电阻和警示电阻	25
第十一节 倍率器和放大器	26
第十二节 損失角表	27
第十三节 高压电纜	28
第十四节 反干扰系統	29
第十五节 干扰系統	33
第十六节 反干扰实驗	34
第十七节 放大器中的反干扰設計	36
第十八节 測不准关系	41
第十九节 关于介質試驗器中平衡电路的分析及完全的 桥路裝置	44

第二章 各部件的試驗

第三章 使用法

第四章 故障

第五章 介質試驗器的設計和計算

第一章 普通理論及各部元件的作用

第一节 电 容 器

两个导电电极中间隔以电介质，就构成了一个电容器。例如两块铜板，互不接触，中间隔以纸片则构成了一个电容器。无线电的天线与大地间，隔以空气这种电介质，也构成一个电容器。电力设备中，例如变压器高压级与低压级及地也构成一个电容器。诸如此类油开关导电部分和铁壳，均可构成一个电容器。导电部分和铁壳为两极，套管的绝缘，以及此两极间之空气及油乃电容器的介质。熟悉电容器之概念，有时对分析和观察问题极为有用。例如，搁置在地上之潮湿的破布与油开关导电部分之间，构成一个电容器，这样我们将很容易解释，为什么在试验时，试品周围不许放置破布、朽木之类的东西了。

电容器的两个金属电极上，拥有很多半自由电子，这些半自由电子可以在电极移动，当电容器的两极上加上一个电位差时，在电势的驱使下，负的电极上堆积着电子，带负电荷；正极上缺少电子，带正电荷。但负极上的电子不能冲过介质达到正极和正电中和，因为电介质是绝缘体，绝缘体很少有自由电子，也不让自由电子在它里面畅通无阻的。电荷堆积到一定数值就不再堆积了，这时就可以说电容器已经充电。

如图 1 所示。

需要指出的是，正极上堆积的电荷在数量上与负极板相等，

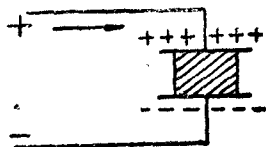


图 1 电容器充电

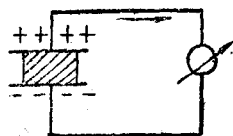


图2 电容器放电

但极性相反。將充过电的电容器兩极經导体联接，导体上將有电流流过，其方向为由正极流到負极，这叫电容器放电。放电直到最后，极板上的电荷沒有了，导体中的电流也停止了为止。

1. 电容量 电容量是表示电容器貯电能力的一个量，宛如水庫的貯水量一样，在乔麒制 (Giorgi system) 單位中，电容量的單位为法拉特 (Farad)，簡称法。因法拉特这一單位太大，地球这样大的球体，孤立在宇宙中也只有电容量一千五百分之一法拉特。因此常常取 1 法的百万分之一为單位，为微法拉特，簡写 $\mu.f.$ 或 $m.f.d.$ 。也常取微法的百万分之一作單位，为微微法拉特，簡写 $\mu.\mu.f.$ 或 $P.f.$ 。

电容器的电容量大小与兩极之面积和介質常数成正比，和兩极之距离成反比。

平行板电容器的电容量計算可以下列公式表示：

$$C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi d} \cdot \frac{10^{-5}}{9} \text{ 微法}$$

$$= 0.0884 \frac{\epsilon_r S}{d} \times 10^{-6} \text{ 微法}, \quad (1)$$

式中 C ——平行板电容器的电容量，單位：微法拉特；

ϵ_r ——介質的相对电容率即介質系数；

S ——电容器极板之有效面积，單位：平方公分；

π ——圓周率；

d ——介質厚度，單位：公分。

圓筒形电容器的电容量可以下列公式表示：

$$C = \frac{l \varepsilon_r}{1.8 \log_e \frac{R_a}{R_i}} \cdot 10^{-6}$$

$$= 0.242 \frac{\varepsilon_r \cdot l \times 10^{-6}}{\log_{10} \frac{R_a}{R_i}} \text{ 微法拉特,} \quad (2)$$

式中 C ——圓筒形电容器的電容量，單位：微法；

ε_r ——介質常數；

l ——圓筒有效長度，單位：公分；

$\log_e$ ——以 e 為底的對數即自然對數；

$\log_{10}$ ——以 10 為底的對數即常用對數；

R_a ——外圓筒半徑，
 R_i ——內圓筒半徑。 } 可用同一單位。

二平行導綫間之電容可用下列公式表示：

$$C = \frac{0.121 l}{\log_{10} \left(\frac{d}{r} \right)} \text{ 微微法,} \quad (3)$$

式中 C ——二平行導綫間之電容量，單位：微微法；

d ——二平行綫間之中心距離，
 r ——導綫半徑； } 用同一單位；

l ——導綫長度，單位：公分。

一根架空綫對地之間所形成之電容量由下式計算：

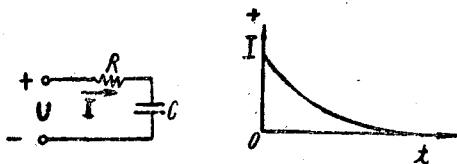
$$C = \frac{0.242 l}{\log_{10} \left(\frac{2h}{r} \right)} \text{ 微微法,} \quad (4)$$

式中 h ——架空綫與地之距離 } 用同一單位；
 r ——導綫半徑

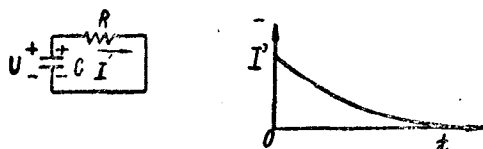
l ——導綫長度，單位：公分。

2. 电容器的充电和放电 电容器接到恒定的直流电源上，一开始电流很大，然后慢慢减至0；电容器放电时，也是一开始电流很大然后慢慢减少，电荷释放殆尽而为0。充电与放电时，电流都是按照指数函数变化，放电是充电之逆转而已。

充电时之电流公式如下：



充电时曲线



放电时曲线

图3 电容器之充电及放电曲线

$$I = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{CR}} \quad (5)$$

U ——直流电压，单位：伏特；

R ——串在回路上之电阻，单位：欧姆；

e ——自然对数的底2.71828；

t ——时间；

C ——为电容量。

放电时之电流公式如下：

$$I' = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{CR}} \quad (6)$$

式中 U ——放电前电容器上之电压，單位：伏特；

R ——放电回路中所串之总电阻，單位：欧姆。

其余同(5)式。

因此可知电容器在充电和放电的瞬間，有一相当大的冲击电流，如果要限制这种电流，使其不致太大，必須在回路上串上电阻，放电的电阻越大，放电所需的时间就越長。

3. 电容器所儲藏的能量 电容器放电时有火花和爆声，証明电容器能够儲藏能量。电容器的儲藏能力与电容量的大小成正比例。儲藏能量的多寡由下式决定：

$$W = \frac{CU^2}{2} \text{ 瓦特秒。} \quad (7)$$

式中 W ——电容器所儲之能量，單位：瓦特秒；

C ——电容器之电容量，單位：法；

U ——电压，單位：伏特。

4. 电容器在交流电作用下之电流与电压关系 在一般概念中，直流电不可以通过电容器，因为在充电时，只有一个充电电流，待兩极上堆积了很多电荷，使兩极之电位差与电源相等时，电流也就停止了。交流电則不同，仿佛交流电能够通过电容器，这是由于电荷的搬运而造成的，真正通过电容器的电子流是微乎其微的，除非电容器之絕緣电阻极低。我們可將流过电容器之电流分别来观察一下，首先，假定电容器之絕緣电阻为 R ，所加之电压为 U ，則真正通过电容器之电子流严格地遵守欧姆定律。那么这份电流 I 由公式 $I = \frac{U}{R}$ 决定。它对于直流当然是正确的，同时，对于交流也一样正

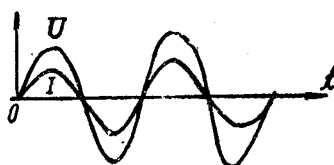


图4 电阻性负荷电流与电压波形图

确。即任何瞬间之这份电流，为此瞬间之电压除以绝缘电阻。电压小的瞬间电流小，电压大的瞬间，电流大，电压为零时电流也为零，电压达到最大值时电流也达到最大值，因此电流是随电压之变化而变化的。假若电压的波形是正弦波，电流的波形也是一个正弦，此二者都同时通过零点，同时达到最大值。它的波形曲线如图4所示。这样的关系就叫做电流与电压同相位。在这里电流与电压相乘后得出的是功率。

其次，由于电荷的搬运而造成的那一部分电流与电压的关系又是怎样的呢？在这里，我们假设电容器的绝缘电阻无穷大，按照欧姆定律电流为零，但实际上如图5中电流表将仍有指示，的确，电容器中是没有电流流过的。但上面说过，电压加上后电容器是须要积累电荷的，而引起回路中有电荷的流动，电容器在堆积电荷的同时，两极板的电位差也升高，抵抗电流的流过。电荷堆得越多，电位差越大，抵抗能力越大，那么，电流就越小。反之，电荷堆积得越少，电位差越小，抵抗能力越小，而电流就越大。另外，在任何时候电容器两极板间的电位差，在数值上都等于外加两极板上之电源

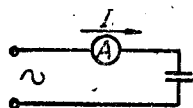


图5 交流电流过电容器

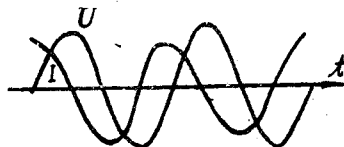


图6 电容性负荷电流与电压波形图

电压。这样，电源电压达到最大值时，流过电容器之电流为零。电压为零时，电流达到最大值。电压向着增大方向变化时，电流向着减小方向变化；电压向着减小方向变化时，电流向着增大方向变化。我們定一个周波所須要的时间为 360 度。这时电流与电压相交 90 度，也称电流与电压正交。由图 6 可以看出电流較电压超前，因此交流电中純电容电流較电压超前 90 度。两个互相正交的电流与电压的作用不产生或不損耗任何功率，因此，理想电容器是不消耗任何能量的。

另外，流过电容器的电流，还有一种叫做介質損耗电流。这主要是在电容器的介質中有一种分子，帶有极性的，叫做偶极子。它在电場的作用下轉来轉去，由互相摩擦而損耗能量，这部分損耗的能量必須由电源来負担。因此电流中必須多分出一部分与电压同相之电流来应付这种負担。但要注意，这部分电流既不是由欧姆定律来决定，也不是由电荷搬运来决定而是第三种意义的电流。在交流电作用下，在普通的介質中，这部分电流，一般地比前面所講的由絕緣电阻决定的电流要大得很多，甚至于大过一千倍。其所消耗的能量也远远超过由絕緣电阻决定的电流所消耗的能量。

用向量加法將这些电流加起来就成为普通电容器的总电流。如图 7 所示。这时的損耗由下式决定：

$$P = UI \cos \varphi. \quad (8)$$

P ——电容器之損耗功率；

U ——电压；

I ——电容器之总电流；

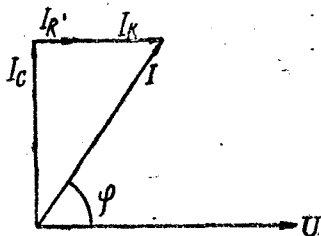


图 7 向量图

φ ——电流与电压之夾角；

I_c ——純电容电流；

I_E' ——絕緣电阻决定之电流；

I_k ——介質耗損决定之电流。

5. 电容器之阻抗 x_c 电压一定时，电容器之电容电流由电容器之阻抗及电源頻率决定。如果知道了电容器的阻抗，电流就很容易計算出来。电容器的阻抗按下公式計算：

$$x_c = \frac{1}{2\pi fc} \quad (9)$$

x_c ——电容器之阻抗，欧姆，用“ Ω ”符号表示；

π ——圓周率；

f ——电源頻率，赫芝，用“ H_z ”符号表示；

c ——电容器的电容量，法拉特，用“ F ”符号表示。

x_c 求得后， I_c 由(10)式計算：

$$I_c = U\omega C \quad (10)$$

I_c 电容电流，安，用“ A ”符号表示；

U 电压，伏；

$\omega = 2\pi f$ ；

C 电容量，法，用“ F ”符号表示。

第二节 介 質

銅鉄等金屬及石墨等导电率很高，例如銅在18°C时为 60×10^9 欧姆 $^{-1}$ 厘米 $^{-1}$ 。銀 63.3×10^9 欧姆 $^{-1}$ 厘米 $^{-1}$ 。鉄 10×10^9 欧姆 $^{-1}$ 厘米 $^{-1}$ 。这些叫做导体。云母，紙等导电率很低，例如22°C时，云母 $5 \times 10^{-10} \sim 2.5 \times 10^{-12}$ 欧姆 $^{-1}$ 厘米。玻璃 2×10^{-12} 欧姆 $^{-1}$ 厘米 $^{-1}$ ，叫做絕緣体。絕緣体用在电容器兩极板之間，叫做介質。

介質有几个电气特性須要注意的是：絕緣电阻、相对电容率，普通也叫介質常数，介質損失角，以及打穿强度，也叫介質强度。

1. 介質的絕緣电阻 介質的絕緣电阻，决定于介質的載荷者的多少以及載荷者的动率。所謂載荷者就是載有电荷的微粒点，例如电子，正負离子等。一个电子所載的电荷为 4.8×10^{-10} 靜电系單位。正負离子和質子等其他載荷者所載的电荷为电子电荷的整数倍，所以电子所帶的电荷也叫元电荷。在常温常压的情况下，空气每立方公分中約有 2,000 个載荷者，这个数值是非常之小的。所謂載荷者的动率是載荷者在电场强度为 1 伏/厘米作用下，每秒鐘所移动的行程，在干燥空气中正离子的动率是 1.35 厘米，負离子的动率是 1.83 厘米。电子的动率很大，約达到 1,700 厘米左右。

金屬中載荷者非常之多，半自由电子就是最有能力的載荷者。金屬中的电流就是电子流，但介質在常温常压下，主要的帶荷者乃是离子，而且为数非常之少，离子之动率又是如此的慢，无怪乎介質的絕緣电阻是这样的大了。

載荷者的多寡及其动率受多种因数的影响，介質的种类、純度、温度以及射线等都大大地影响着这二者，因而也就是直接影响介質的絕緣电阻。介質的絕緣电阻是一个不稳定的数，它的摆动范围是很大的。

2. 介質的相对电容率 ϵ_r 二平行极板若其面积为 S ；距离为 d ；在真空中則其电容为 $C = K \frac{S}{d}$ 。 K 是一常数，随所用

單位而定。若极板間之介質換以瀝青，則电容量增加 1.7 倍。換以硬干木增加 2 倍。換以絕緣油增加 1.2 倍。換以介質后的电容量与介質为真空时之电容量之比，为此介質的相对电

容率。符号为 ϵ_r ； ϵ_r 是一个純数，沒有單位。介質的电容率 ϵ 是真空的电容率 ϵ_0 乘以 ϵ_r 即：

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (11)$$

$$\text{真空的电容率 } \epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{4\pi \times 8.98} \text{ 法拉特/米。}$$

ϵ_r 之数值永远大于 1。干燥空气在常温常压下 ϵ_r 为 1.000585，二氧化碳为 1.000097，氮为 1.00058。因此气体之 ϵ_r ，一般可視之 1；水在 16°C 时 $\epsilon_r = 81.5$ ；-5°C 时变为 2.8；140°C 之水之蒸汽却为 1.00785。云母之 ϵ_r 由 6 到 8，紙为 2.5。絕緣油为 2.2。还有比液态水更大的 ϵ_r 的物質，硫酸就是一例。

ϵ_r 的大小，受材料的种类，純度，品質，温度頻率以及电場强度等因素的影响。普通所用的介質材料受温度及雜質的影响。特別值得注意的是：介質受潮后含有水份，因为水之 ϵ_r 很大，所以介質(例如棉紗)之 ϵ_r 就会增大。若介質中

含有空气泡，这也是雜質，会增加介質的极化，所以 ϵ_r 也会增大。介質的 ϵ_r 与温度的关系，对于各种材料都是有影响的。有些随温度升高而加大，有些随温度升高而降低，有些随温度先升高后又下降，或先下降后升高。如图 8 是

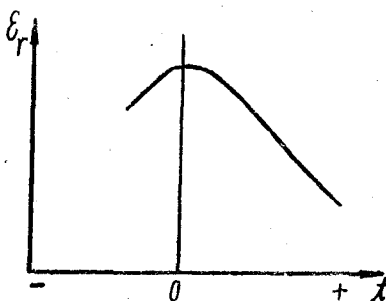


图 8 某种油之 $\epsilon_r - t^\circ\text{C}$ 曲线
表示某种油之 $\epsilon_r - t^\circ\text{C}$ 曲线图

3. 介質損失角 $\text{tg} \delta$ 图 7 中我們使能够产生損耗的电流 I'_R 及 I_K 合而为一，令为 I_R 。 I_R 与 U 同相，大小为 I'_R 及 I_K 之算术和。并且令 $\delta = 90 - \varphi$ 。因此还有 $\cos \varphi = \sin \delta$ 而 (8)

式之耗損公式可以演化如下：

$$P = I_R U = IU \cos \varphi = IU \sin \delta. \quad (12)$$

δ 即为介質損失角。但当 δ 很小时例如 0.15 弧度以下时，

$\delta \approx \sin \delta \approx \operatorname{tg} \delta$ ，因而(12)式成为：

$$P = IU \operatorname{tg} \delta. \quad (13)$$

簡略地說(13)式可为下面的形式：

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (14)$$

故电容器之損耗与 $\operatorname{tg} \delta$ 成正比，与电压的平方，頻率，以及电容量都成正比的关系。

介質損失角也隨介質的种类、純度、品質、溫度、頻率的
不同而不同。一般的是：溫度高，損失角增大；溫度低則
减小。介質損失角是表示絕緣体
特性的一个极重要的标志。由于
介質損失角的存在，在电压的作
用下，使介質不断加热，有可能
造成热击穿。套管的介質損失
角，良好的一般为百分之几。变
压器綫卷在六、七十度时，多半
为百分之几十。如图 9 所示，由該图可得：

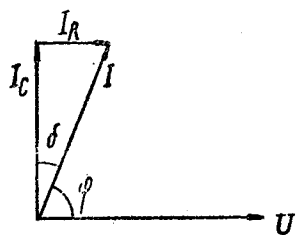


图 9 从向量图看 δ

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{I_R}{I} \quad (15)$$

(15)式十分重要，介質試驗器的 $\operatorname{tg} \delta$ 的值就是以(15)式为依据的。

4. 介質的击穿强度 击穿强度的单位为千伏/厘米，空气平常为21千伏/厘米。若空气中含有潮气，夾杂有灰尘等微

粒，打穿强度将会降低，打穿强度不但与介质的种类，纯度、温度、电压上升陡度等有关还与极的距离有关，以空气为例，电极距离1公分时空气的绝缘强度为22千伏/厘米，极距为0.0005厘米时则可高到700千伏/厘米。

从以上所述的介质各主要特性看来，它们仿佛都是些变化无常的数。它具有两方面的意义：一方面，介质的特性因为其所受影响的因素非常之多，而显得不易捉摸，我们所得到的数据，好象是一些不定数一样；另一方面，因为其中关系错综复杂，这就供给了我们活动的广阔的天地，我们可从各个方面去探测，从而获得对介质的了解。下面列出几种常见介质的若干特性，如表1。

表1 各常见物质的电气特性

绝缘材料名称	电阻系数, ρ 欧姆-厘米	相对电 容率 ϵ_r	介质损失角 δ	介质强度 千伏/毫米
空气		1.000585		2.1~3.2
氮气		1.0006		2.7
沥青		2.7		1~2
石棉纸	2×10^5			4
硬干木	$10^{10} - 4,000 \times 10^{10}$	3.0		0.4~0.6
电木		5.0	0.01~0.08	14.8
电缆纸		4	0.015~0.032	4.5~7.5
白云母	10^{15}	{ 6.6 }		40
金云母	200×10^{15}	{ 5.5 }		
云母板	$10^{12} \sim 10^{13}$		0.05	28~35
玻璃		10		9.25
瓷	10^{14}	4.8	0.02~0.025	6.35
硬橡胶	10^{17}	2.7~3.2		15~35
蒸馏水	5×10^4	76		4.6
二硫化碳 CS_2				8.7

表 2

变压器线卷的 $\tan\delta$ 值

	額定电压 千伏	溫 度 °C							
		10	20	30	40	50	60	70	80
新采用的及 曾修理的	3~10	0.028	0.04	0.058	0.085	0.12	0.18	0.26	0.37
	20~35	0.021	0.03	0.043	0.065	0.09	0.14	0.20	0.28
	110	0.014	0.02	0.029	0.045	0.06	0.09	0.13	0.19
运 行 中	3~10	0.04	0.06	0.09	0.13	0.18	0.27	0.28	0.56
	20~35	0.035	0.05	0.075	0.11	0.15	0.22	0.32	0.46
	110	0.021	0.03	0.043	0.065	0.09	0.14	0.20	0.28

表 3

各种套管之 $\tan\delta$ 值(在+20°C时)

使用电压 千伏	型 式				
	电 容 式	膠 木	充 油 式	填 料 式	瓷 套 管
6~10		0.08		0.08	
15~37	0~0.03	0.05	0~0.06	0~0.060	0~0.035
110	0~0.02	0.03	0~0.05	0~0.04	0~0.035
154~230	0~0.02	—	0~0.04	0~0.025	0~0.035

注：载波通讯和保护装置的高压电容器之介質損失角。充油式电容器不超过0.015。填料式电容器不超过0.02。

第三节 阻容电路的向量及計算

电路中之基本元件不外乎三种，就是电容、电阻及电感，这三种元件之基本联接法一共只有17种。理由如下：

1. 在此三元件中，每取一个之联接法有 $C_1^3 = \frac{3}{1} = 3$ 种。

2. 在此三元件中，每取二个串联共有 $C_2^3 = \frac{3 \cdot 2}{2!} = 3$ 种。

3. 在此三元件中，每取二个并联共有 $C_2^3 = \frac{3 \cdot 2}{2!} = 3$ 种。

4. 在此三元件中, 每取三个串联共有 $C_3^3 = \frac{1}{1} = 1$ 种。

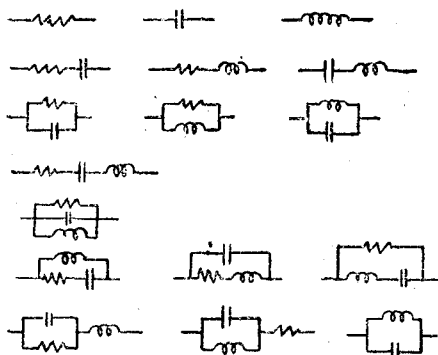
5. 在此三元件中, 每取三个并联共有 $C_3^3 = \frac{1}{1} = 1$ 种。

6. 在此三元件中, 每取二个串联一个并联共有 $C_2^3 = \frac{3 \cdot 2}{2!} = 3$ 。

7. 在此三元件中, 每取二个并联一个串联共有 $C_2^3 = \frac{3 \cdot 2}{2!} = 3$ 。

加起来为 $C_1^3 + C_2^3 + C_2^3 + C_3^3 + C_3^3 + C_2^3 + C_2^3 = 17$ 。

綫路图如下:



綫路图

除这些联接法以外, 还有更多的联接法, 不去多述了。今只就电阻与电容之串联或并联稍加讨论。

一般地电阻、电容串联的电路, 以电流为基准较为简便。电阻与电容并联的电路, 以电压为基准较为简便。

电阻与电容串联的綫路, 如图10, I 为贯穿电阻与电容的电流, 则在电阻两端之压降为 U_R 与电流同相, 在电容两

端之压降为 U ，比电流落后90度。总电压为 U_R 与 U_c 之向量和，而且有：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_R + \dot{U}_c; \\ |U| &= \sqrt{|U_R|^2 + |U_c|^2}; \\ \dot{I} &= \frac{\dot{U}}{Z}; \\ Z &= \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}; \\ \varphi &= \text{tg}^{-1} \frac{U_c}{U_R} = \text{tg}^{-1} \frac{X_c}{R}. \end{aligned} \right\} (16)$$

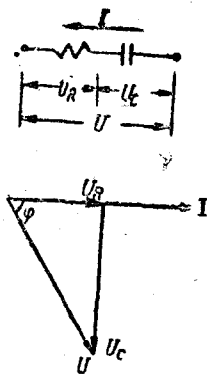


图10 电阻电容串联之向量

对于电阻与电容并联的线路如图11所示。 U 为电阻两端之电压，也为电容两端之电压。 I_R 为流过电阻中之电流，与电压 U 同相。 I_c 为流过电容器的电流，超前电压 u 90度。总电流 I 为 I_R 及 I_c 之向量和，而且有：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_R + \dot{I}_c; \\ |I| &= \sqrt{I_R^2 + I_c^2} = \frac{U}{Z}; \\ U &= I_R \cdot R = I_c \cdot X_c; \\ Z &= \frac{R}{\sqrt{1 + R^2 \omega^2 C^2}}; \\ \varphi &= \text{tg}^{-1} \frac{I_c}{I_R} = \text{tg}^{-1} \frac{R}{X_c}. \end{aligned} \right\} (17)$$

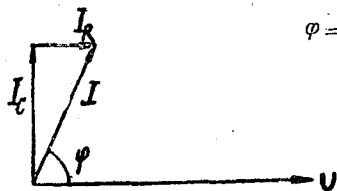


图11 电阻电容并联之向量

式中 $\omega = 2\pi f$, f ——电源频率，赫芝；