

# 高频感应加热设备 及其维修

鞍山钢铁公司钢绳厂 编  
《高频维修》编写组

机械工业出版社

5

本书系统介绍了高频感应加热设备的工作原理，讨论了整流、振荡等问题，收集了高频感应加热设备的各种常见故障及排除方法，对于高频感应加热设备的安装、使用、维护和检修都有一定的参考价值。可供高频感应加热设备的操作工人和有关技术人员参考。

## 高频感应加热设备及其维修

鞍山钢铁公司钢绳厂 编  
《高频维修》编写组

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  · 印张  $7\frac{3}{4}$  · 插页 3 · 字数 171 千字

1979 年 2 月北京第一版 · 1979 年 2 月北京第一次印刷

印数 00,001—39,000 · 定价 0.68 元

\*

统一书号：15023·4564

# 目 录

绪 论	1
第一章 电阻器、电容器及电感器	3
第一节 电阻器	3
第二节 电容器	7
第三节 电感器	24
第四节 电阻、电容及电感的分布参数	29
第二章 整流系统	34
第一节 整流元件	34
第二节 单相整流	39
第三节 三相整流	42
第四节 栅控原理	53
第五节 整流系统的调试	63
第六节 离子管的维护	66
第七节 整流系统的检修	74
第三章 电子管 LC 振荡器	81
第一节 发射管	81
第二节 发射管的特性参数和放大原理	87
第三节 LC 振荡回路	94
第四节 LC 振荡回路的参数	102
第五节 耦合回路	104
第六节 电子管自激振荡器	107
第七节 高频功率发生器的工作状态	122
第八节 强功率高频发生器典型电路	131
第四章 振荡系统的调整及维修	134
第一节 高频功率发生器的调整	134

## IV

第二节	发射管的维护	139
第三节	发射管的故障	143
第四节	发射管的检测及老炼	151
第五节	寄生振荡	154
第六节	振荡系统的故障及排除方法	159
第五章	附属设备	166
第一节	谐振式铁磁饱和稳压器	166
第二节	谐振式铁磁饱和稳压器的计算	171
第三节	谐振式铁磁饱和稳压器的制作和维修	179
第四节	高频千伏表	183
第五节	电源滤波器	187
第六节	高频熔炉的制作	188
第七节	感应器	194
第八节	其他附件	196
第六章	高频感应加热设备	199
第一节	60千瓦高频设备	199
第二节	200千瓦高频设备	205
第三节	采用可控硅的高频设备	206
第四节	高频设备的维护	212
第七章	高频感应加热设备的其他设施	215
第一节	机房设施	215
第二节	供电	217
第三节	接地设施	218
第四节	冷却系统	222
附录		
I.	带零位管的三相半控桥整流工作计算	229
II.	电感及电容的计算公式	234
III.	性能表	236
IV.	变压器各种组别接线方法	242

## 绪 论

随着电子技术的普及，高频感应加热的应用日趋广泛。经过高频表面淬火的工件具有优良的耐磨表面层，工件表面没有脱碳和严重的氧化现象。目前，高频感应加热应用在特种合金熔炼、半导体提纯、钢工件热处理、焊接、电子管除气等广泛的生产领域内。

高频感应加热的基本原理是利用高频交流电产生的电磁场，使导体产生感应电流（涡流）和导体内磁场（磁滞），引起自身发热，达到加热效果的。

交变的高频信号是一种正弦波，它振荡一周需要的时间叫做“周期”，常用字母“ $T$ ”表示。

周期的倒数叫频率，用字母  $f$  表示，单位为赫兹（Hz）

$$f = \frac{1}{T}$$

频率还常用千赫（kHz）和兆赫（MHz）表示，它们的换算关系为

$$1 \text{ 千赫} = 10^3 \text{ 赫兹} \quad 1 \text{ 兆赫} = 10^3 \text{ 千赫}$$

如果高频感应加热设备的工作频率为 250 千赫，则它的振荡周期为

$$T = \frac{1}{250 \times 10^3} = 4 \times 10^{-6} \text{ 秒 (s)} = 4 \text{ 微秒 } (\mu\text{s})$$

为了用三角函数来描述高频交流电，常用角频率  $\omega$  表示信号的振荡频率：

$$\omega = 2\pi f$$

高频电流的数学表示式为

$$i = A \sin \omega t$$

式中  $i$  ——瞬时电流；  
 $A$  ——电流幅值；  
 $\omega$  ——角频率。

如果存在两个频率相同的交流电，在起始时它们的相位不等，例如

$$\varphi_1 = 0 \quad \varphi_2 \neq 0$$

则  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$

称“ $\Delta\varphi$ ”为这两个交流电的相位差。

高频感应加热设备是能产生高频电流的一种特殊装置。它主要由交流电源、整流系统、电子管自激振荡器、输出机构及控制系统等组成，如图 1 所示。

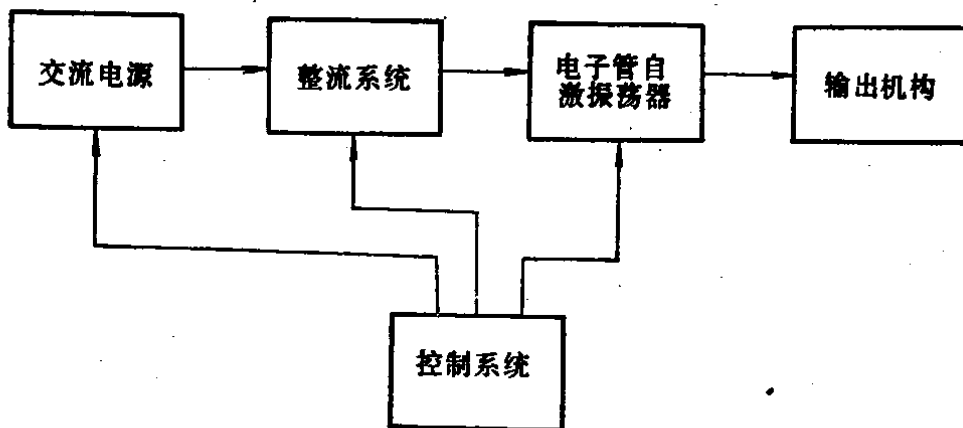


图 1 高频感应加热设备方框图

工频交流电从电网输入到高频设备的整流系统，把交流电变成直流电，作为电子管自激振荡器的能源。电子管自激振荡器把直流电能变换成高频电能，通过输出机构送到被加热工件上。操作人员通过控制系统操作设备，以满足工艺要求。

下面各章将讨论高频设备的有关元件、各种电路的性能、特点以及设备的各种故障及其排除方法。

## 第一章 电阻器、电容器及电感器

高频感应加热设备的基本元件有电阻器、电容器、电感器和电子管等。本章主要介绍高频设备上的电阻器、电容器及电感器的基本性能和使用方法。

### 第一节 电 阻 器

导体对电流起阻碍作用的能力叫做电阻。电阻器就是利用导体的这一特性制作的元件。

电阻的基本特点是，有电流（交流或直流）通过时，在电阻两端产生一定的压降，同时因消耗能量而发热。

习惯上常将“电阻器”简称为“电阻”。高频设备上应用的电阻有碳膜电阻、线绕电阻等数种。

用电阻率较大的电阻丝（例如康铜丝、锰铜丝、铁铬铝合金丝等）绕在瓷管上制成的电阻叫做线绕电阻。用非金属材料碳沉积在瓷管上制成的电阻叫碳膜电阻。

线绕电阻也可以自己绕制，计算公式是

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-1)$$

式中  $R$ ——电阻值，单位欧姆（ $\Omega$ ）；

$l$ ——电阻丝长度，单位米（ $m$ ）；

$S$ ——电阻丝截面，单位平方毫米（ $mm^2$ ）；

$\rho$ ——电阻率，单位欧·平方毫米/米（ $\Omega \cdot mm^2/m$ ）。

不同电阻丝的电阻率  $\rho$  各不相同。参看表1-1。

表1-1 几种导体的电阻率

材 料	电阻率 欧·平方毫米/米	平均温度系数 1/°C
银	0.016	0.004
铜	0.0175	0.004
铝	0.029	0.004
钨	0.056	0.0046
铂	0.106	0.003
钢	0.13~0.25	0.006
铁	0.13~0.3	0.006
黄铜	0.07~0.08	0.002
青铜	0.021~0.4	0.004
锰铜	0.42	0.000006
康铜	0.4~0.51	0.000005
镍铬	1.1	0.00015
铁铬铝	1.4	0.00005

表中“平均温度系数”是表示温度每增加1°C电阻增加的数值与原来的电阻值之比。由表可见，康铜与锰铜的温度系数很小，几乎可以忽略不计。钢铁的温度系数较大，因此在温度剧烈变化时电阻值会有较大的变化。例如，25°C时某段钢丝的电阻是0.1欧姆，在1025°C时变为0.7欧姆，电阻增加了七倍。

### 一、电阻的功率容量

已知流过电阻  $R$  的电流为  $I$ ，消耗在这个电阻上的功率  $P$  为

$$P = I^2 R \quad (1-2)$$

根据欧姆定律，功率又可以表示为

$$P = UI = \frac{U^2}{R} \quad (1-3)$$

知道了电阻允许消耗的功率  $P$ ，就可以求出允许流过的



电流，

$$I = \frac{P}{U} = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (1-4)$$

每个电阻允许消耗的功率，有一个确定的值，这就是电阻的功率容量，一般用功率单位“瓦”表示。

电阻值和功率容量是电阻的两个最基本的参数，一般都标在电阻本体上。

电阻值的基本单位为欧姆，较大的用千欧姆（ $k\Omega$ ）表示，再大的用兆欧姆（ $M\Omega$ ）表示，它们之间的数量关系为

$$1 \text{ 千欧} = 10^3 \text{ 欧}$$

$$1 \text{ 兆欧} = 10^3 \text{ 千欧}$$

## 二、电阻的串联和并联

电阻串联以后，各电阻上流过的电流都等于总回路电流，如图1-1所示。回路的总电阻等于各串联电阻之和：

$$R_{\#} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (1-5)$$

不同阻值的电阻串联

以后，由欧姆定律可知，阻值大的两端压降大，因

而消耗的功率也大。相同阻值的电阻串联以后，各个电阻上的压降相同，消耗的功率也相同。电源消耗的能量为被串联电阻消耗的能量之和（这里假设电源的内阻等于零）。

将电阻串联起来往往是为了增加电阻值。高频设备槽路电压表的外接表阻是串联应用的例子。这个表阻是用六只10

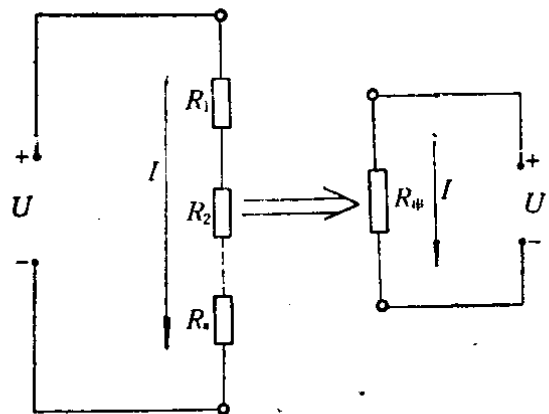


图1-1 电阻的串联

瓦 1 兆欧的碳膜电阻串联起来，和选用的电表匹配。

电阻并联以后，各并联电阻两端的电压均为电源电压，如图 1-2 所示。根据欧姆定律可得，

$$\frac{1}{R_{\#}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (1-6)$$

或

$$R_{\#} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}} \quad (1-7)$$

当所有并联电阻的阻值都相等时，有

$$R_{\#} = \frac{1}{n} R \quad (1-8)$$

式中  $n$  ——电阻的个数，

$R$  ——单个电阻的阻值。

由此可见，电阻并联以后，总阻值将减小，并且小于电路中任何一个电阻的阻值。在维修中，由于库存备品往往不能满足要求，常采用串并联来更换已经损坏的电阻，以维持正常生产。例如，闸流管 ZG<sub>1</sub>-6/15 的栅偏电阻往往容易损坏。这个电阻一般是功率容量为 10 瓦，阻值为 4 千欧。若有

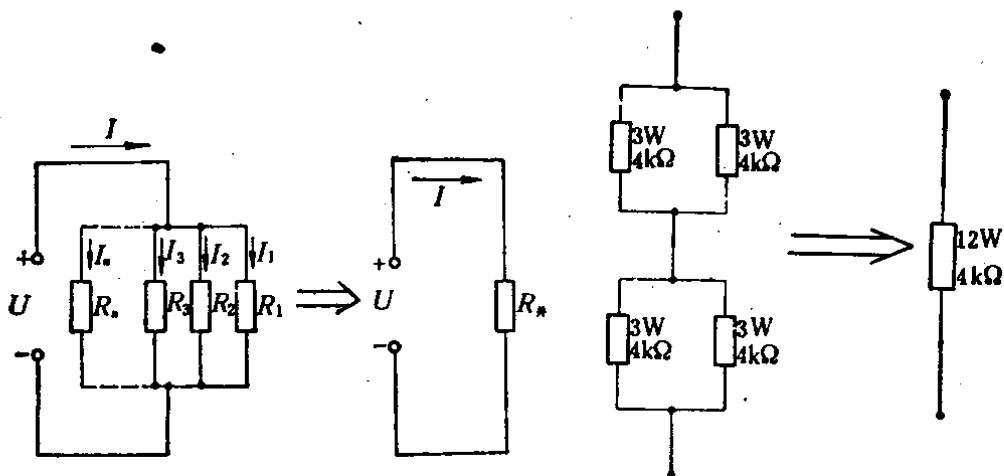


图1-2 电阻的并联

图1-3 电阻的串并联应用

2瓦1千欧的电阻四串来代替，功率容量稍为不足。如用3瓦4千欧电阻两串两并，可较好地满足要求。图1-3就是这种联接方法的图示。

## 第二节 电 容 器

互相绝缘的两块金属板相对放置，中间隔着某种介质（云母、陶瓷或空气等），就构成一个简单的平板电容器，如图1-4所示。

电容器是存放电荷的器件，由于它具有特殊的电特性，因此在电子技术中得到广泛的应用。

习惯称“电容器”为“电容”，常用字母“C”表示。

### 一、电容器的基本参数

#### （一）电容量

电容量表示在电容器两端施加电压以后，电容器两个极板上储存电荷能力的大小。

一个电容器储存电荷的多少，与电容量以及电容器两端的电压成正比：

$$Q = C U \quad (1-9)$$

当电量  $Q = 1$  库仑，电压  $U = 1$  伏特时，电容量  $C = 1$  法拉 (F)。

由 (1-9) 式可推出

$$C = \frac{Q}{U}$$

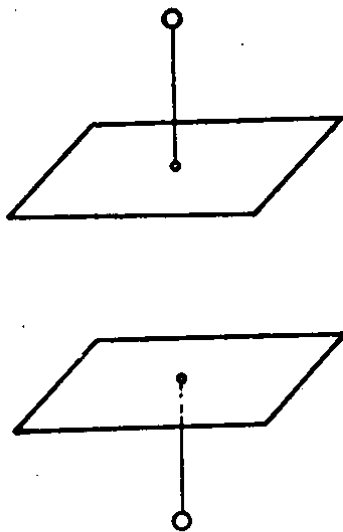


图1-4 平板电容器

这表明，对于电容量为 1 法拉的电容器，为要使端电压上升 1 伏特，必须充 1 库仑的电量。

“法拉”这个单位太大，常用“微法” ( $\mu\text{F}$ ) 和“微微法” ( $\text{pF}$ ) 作单位。它们之间的数量关系为：

$$1 \text{ 微法} = 10^{-6} \text{ 法}$$

$$1 \text{ 微微法} = 10^{-6} \text{ 微法}$$

## (二) 额定直流工作电压

额定直流工作电压是指这个电压加在电容器的两极板间时，绝缘不被击穿。电容器上标的工作电压，一般均指直流电压。当电容器用于直流电压叠加上交流或脉冲成分时，其直流与交流或脉冲电压叠加后的峰值不应超过额定直流工作电压。

## 二、电容器的并联和串联

单个电容器在使用时受到电容量、电压定额和容量的限制，所以往往把电容器并联或串联起来使用。见图 1-5 和 1-6 所示。

### (一) 电容器的并联

电容器并联以后，相当于扩大了电容器两极板之间的有效面积，使电容量增加。 $n$  个电容器并联以后，总电容量为这  $n$  个电容器的电容量之和：

$$C_{\#} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n \quad (1-10)$$

若各个电容器的电容量都相等，则并联后的总电容量为

$$C_{\#} = nC \quad (1-11)$$

式中  $C$  —— 单个电容器的电容量；

$n$  —— 电容器的个数。

### (二) 电容器的串联

电容器串联以后，总电容量变小了。总电容量与被串联电容器的电容量之间的关系为

$$C_{\#} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}} \quad (1-12)$$

当各个电容器的电容量都相等时，计算公式可以简化为

$$C_{\#} = \frac{1}{n} C \quad (1-13)$$

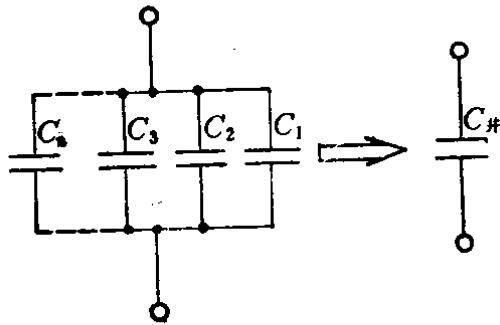


图1-5 电容器的并联

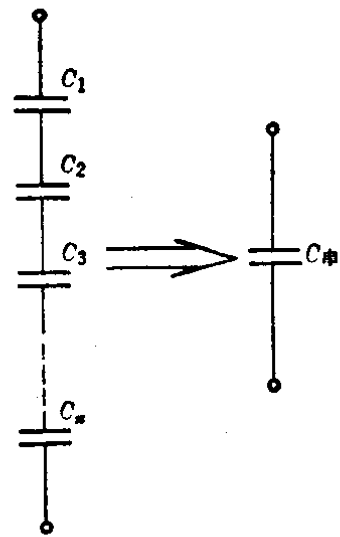


图1-6 电容器的串联

$n$  个相同电容量的电容器串联以后，只有  $\frac{1}{n}$  的电源电压加在一个电容器的两端。在电源电压很高，单个电容器的电压定额又较低时，可应用串联。

如果被串联电容器的电容量不相同，分压也不相等，电容量小的两端压降大。

### 三、电容器的充电与放电

使电容器的两个极板得到电荷叫做电容器“充电”；使电容器逐渐消失已经得到的电荷，叫做电容器“放电”。

## (一) 充电

图1-7是电容器充放电原理图。如将电键 $K$ 与 $a$ 点闭合，

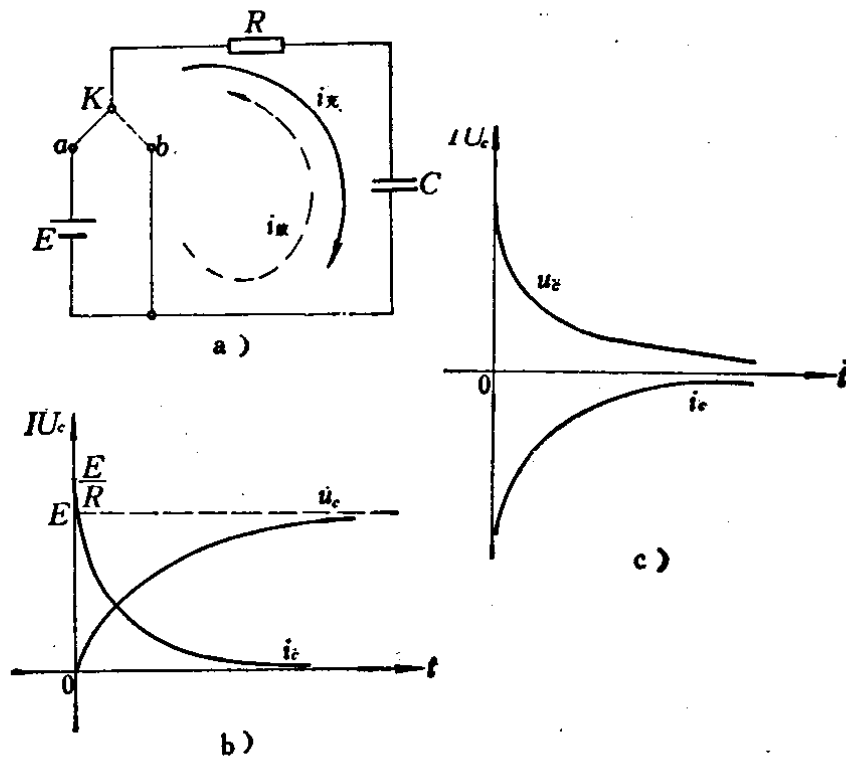


图1-7 电容器的充电与放电

a) 电路 b) 充电曲线 c) 放电曲线

$RC$  串联电路与电源  $E$  就组成闭合回路。起始时，电容器  $C$  的两个极板上没有电荷存在，等效于短路导线。所以回路产生起始电流

$$I_{\text{始}} = \frac{E}{R} \quad (1-14)$$

由于电流的出现，使电容器  $C$  积累电荷，并产生端电压  $u_c$ 。 $u_c$  的存在，使回路电流减小

$$i = \frac{E - u_c}{R} \quad (1-15)$$

当电容器端电压等于电源电压  $E$  时，回路电流消失，相当于电路已经断开。这时电容器  $C$  对电源呈现的阻抗为无限

大。

图1-7 b 中的  $u_c$  就是电容器充电时端电压的变化曲线， $i_c$  是回路电流的变化曲线。这个回路电流也就是电容器的充电电流。

## (二) 放电

待电容器充电完毕后，将图1-7 a 中的电键  $K$  从 a 转换到 b，使  $R$ 、 $C$  组成闭合回路。由于电容器存在端电压  $u_c$ ，所以立即产生回路电流

$$i_{\text{放}} = \frac{u_c}{R} \quad (1-16)$$

$i_{\text{放}}$  就是电容器的放电电流，它的方向与原充电电流的方向相反。

图1-7 c 中的  $u_c$  是电容器放电时端电压的变化曲线，负方向的  $i_c$  曲线就是电容器的放电电流曲线。从图可以看出，如果  $u_c = 0$ ，则  $i_{\text{放}} = 0$ 。

## 四、交流电路中的电容器

### (一) 电容器的电压和电流

由公式 (1-9) 可以推出

$$\Delta Q = C \Delta u_c \quad (1-17)$$

因为

$$\Delta Q = i_c \Delta t$$

得

$$i_c = C \frac{\Delta u_c}{\Delta t} \quad (1-18)$$

$\frac{\Delta u_c}{\Delta t}$  表示单位时间内电容器端电压变化了多少，叫做电容器端电压的“电压变化率”。

公式 (1-18) 说明流过电容器的电流与电容器端电压的变化率成正比。如将电容器置于交流电路中，如图 1-8 a 所

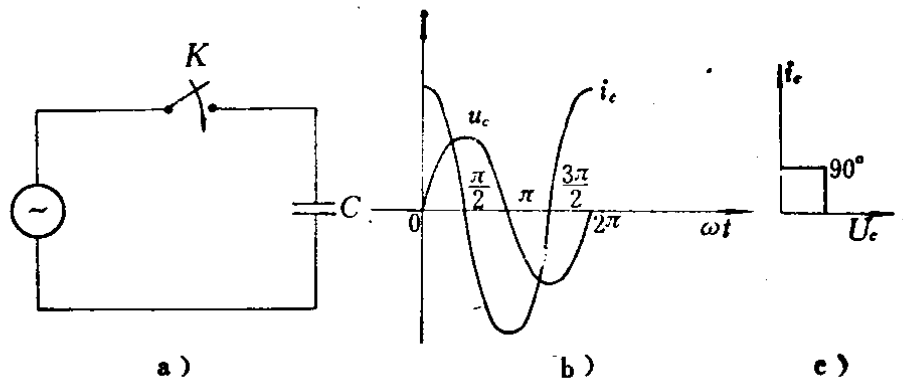


图1-8 电容器在交流电路中

a) 电路 b)  $i_c$ 、 $u_c$  曲线 c)  $i_c$ 、 $u_c$  矢量关系

示，当将电键  $K$  闭合以后，电容器的端电压就是电源电压

$$u_c = U_m \sin \omega t$$

由图1-8 b 可见，在  $0 \sim \frac{\pi}{2}$  区间，电源电压上升，流过电容器的电流为正值；在  $\frac{\pi}{2} \sim \frac{3\pi}{2}$  区间，电源电压下降，流过电容器的电流为负值；在  $\frac{3\pi}{2} \sim 2\pi$  区间，流过电容器的电流又回到正值。在  $\omega t = 0$ 、 $\pi$ 、 $2\pi$  时，电压的变化率最大，所以流过电容器的电流也就达到峰值（正峰值或负峰值）。用数学式表示为

$$i_c = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-19)$$

可见，流过电容器的电流超前于电容端电压  $\frac{\pi}{2}$ ，见图 1-8b。 $i_c$  与  $u_c$  的矢量关系见图 1-8c。

## (二) 电容器的容抗

电容器的电容量  $C$  愈大，充电时需要的电荷愈多， $i_c$  就愈大。电流角频率  $\omega$  愈高，电容器极板上电荷流动的速度就愈大，相当于电流  $i_c$  大。所以，电容器的电容量愈大，电流角频率愈高，电容器对电源的阻抗就愈小，它们的关系为



$$Z_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1-20)$$

习惯上，称电容器的阻抗  $Z_c$  为“容抗”。图 1-9 为容抗  $Z_c$  与电源频率  $f$  的关系曲线。

### (三) 无功容量

1. 电场能 当电容器两极板上有电荷储存时，极板间就存在电场。这是具有能量的一种表现。这个能量  $W_c$  在数量上可表示为

$$W_c = \frac{1}{2} C U_c^2 \quad (1-21)$$

式中  $W_c$ ——能量；

$C$ ——电容量；

$U_c$ ——电容端电压。

公式 (1-21) 对于各种情况都是适用的。当电容器的端电压是交流瞬时电压时，能量的瞬时值由该时刻的瞬时电压确定。

由于能量  $W_c$  与电场有关，所以叫做“电场能”。

2. 无功功率 在交流电路中，电容器吸收的功率为

$$\begin{aligned} P_c &= u_c i_c \\ &= U_m I_m \sin \omega t \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \\ &= U_m I_m \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (1-22)$$

可见，电容器吸收的功率也是一个正弦值，但是它的频率比电源频率高一倍。由图 1-10 可见，在第一个与第三个四分之一周期内，瞬时功率是正的，电容器处于充电状态，它的端电压由零增加到幅值  $U_m$ （不考虑方向），这时电场能由零增加到极大值；

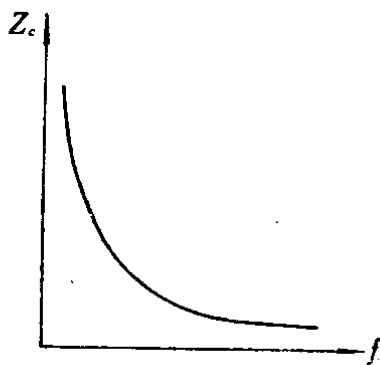


图1-9  $Z_c$ 与  $f$  的关系曲线