

# 第13章 非正弦周期电流电路 和信号的频谱

## 本章重点

- |      |              |
|------|--------------|
| 13.1 | 非正弦周期信号      |
| 13.2 | 周期函数分解为傅里叶级数 |
| 13.3 | 有效值、平均值和平均功率 |
| 13.4 | 非正弦周期电流电路的计算 |
| 13.5 | 对称三相电路中的高次谐波 |

## ● 重点

1. 周期函数分解为傅里叶级数
2. 非正弦周期函数的有效值和平均功率
3. 非正弦周期电流电路的计算

## 13.1 非正弦周期信号

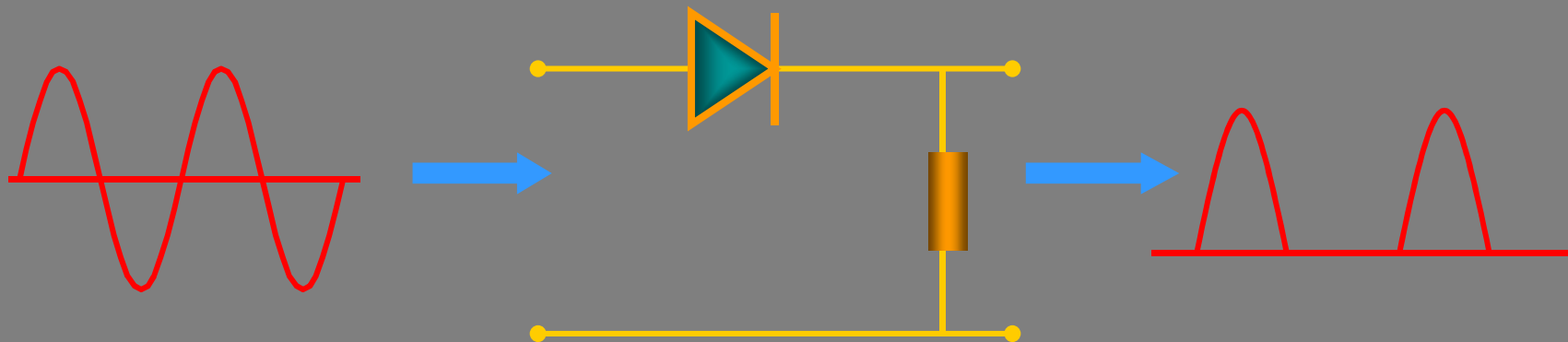
生产实际中，经常会遇到非正弦周期电流电路。在电子技术、自动控制、计算机和无线电技术等方面，电压和电流往往都是周期性的非正弦波形。

### ● 非正弦周期交流信号的特点

(1) 不是正弦波

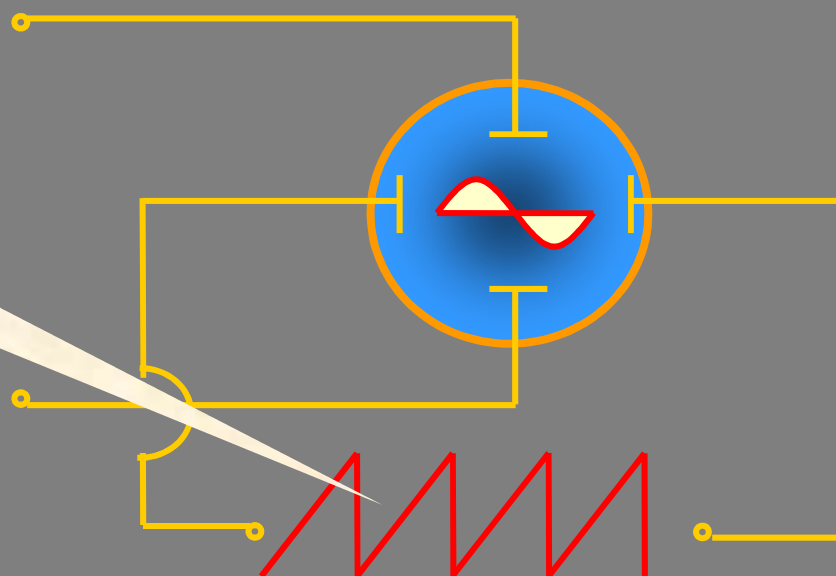
(2) 按周期规律变化  $\longrightarrow f(t) = f(t + nT)$

## 例1 半波整流电路的输出信号



## 例2 示波器内的水平扫描电压

周期性锯齿波

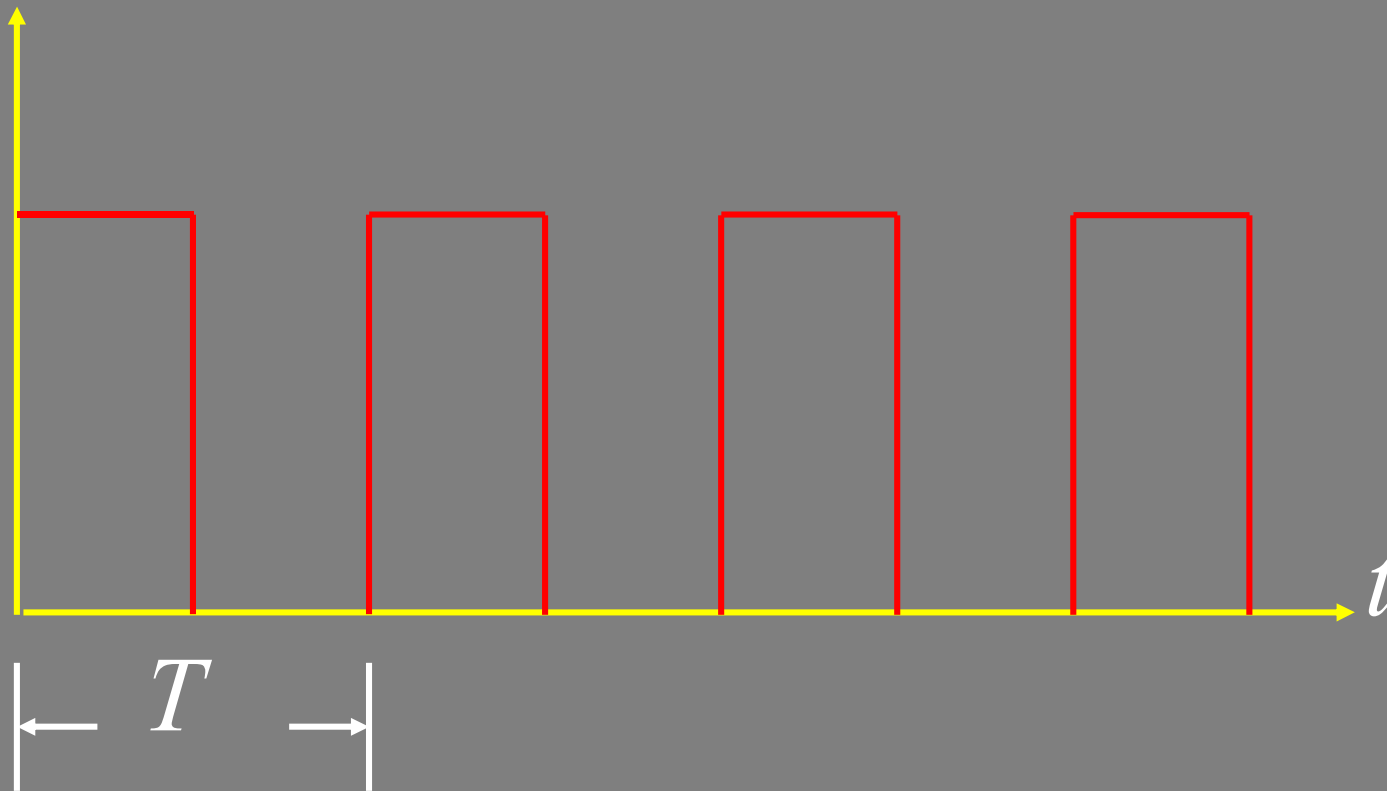


返回

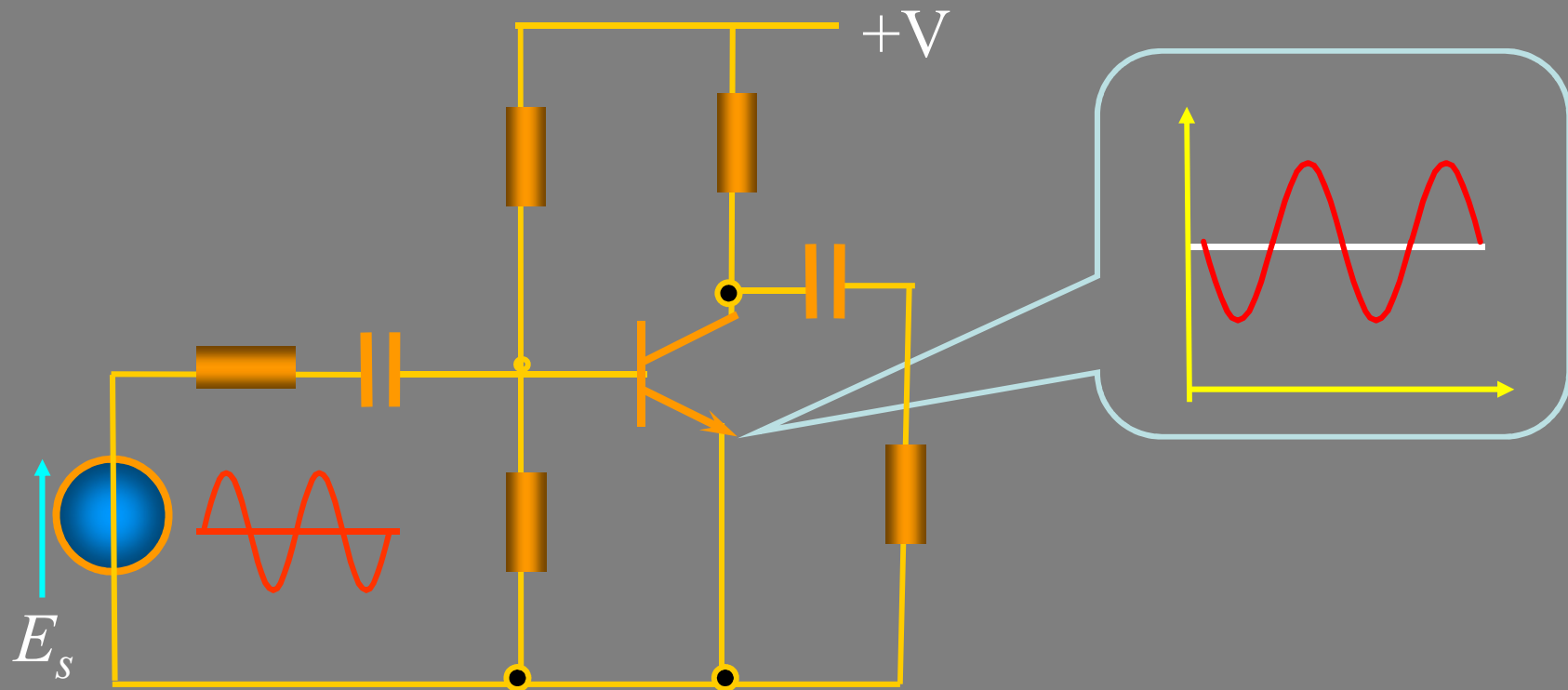
上页

下页

### 例3 脉冲电路中的脉冲信号



# 例4 交直流共存电路



## 13.2 周期函数分解为傅里叶级数

若周期函数满足狄利赫利条件：

- ①周期函数极值点的数目为有限个；
- ②间断点的数目为有限个；
- ③在一个周期内绝对可积，即：

$$\int_0^T |f(t)| dt < \infty$$

可展开成收敛的傅里叶级数



**注意** 一般电工里遇到的周期函数都能满足狄利赫利条件。

周期函数展开成傅里叶级数：

直流分量

$$f(t) = A_0 + A_{1m} \cos(\omega_1 t + \phi_1) +$$

基波（和原函数同频）

$$+ A_{2m} \cos(2\omega_1 t + \phi_2) + \dots$$

二次谐波  
(2倍频)

$$+ A_{nm} \cos(n\omega_1 t + \phi_n) +$$

高次谐波

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{km} \cos(k\omega_1 t + \phi_k)$$

返回

上页

下页



也可表示成:

$$A_{km} \cos(k\omega_1 t + \phi_k) = a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t]$$

系数之间的关系为:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = a_0 \\ A_{km} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ a_k = A_{km} \cos \phi_k \quad b_k = -A_{km} \sin \phi_k \\ \phi_k = \arctan \frac{-b_k}{a_k} \end{array} \right.$$

系数的计算:

$$A_0 = a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(k\omega_1 t) d(\omega_1 t)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(k\omega_1 t) d(\omega_1 t)$$

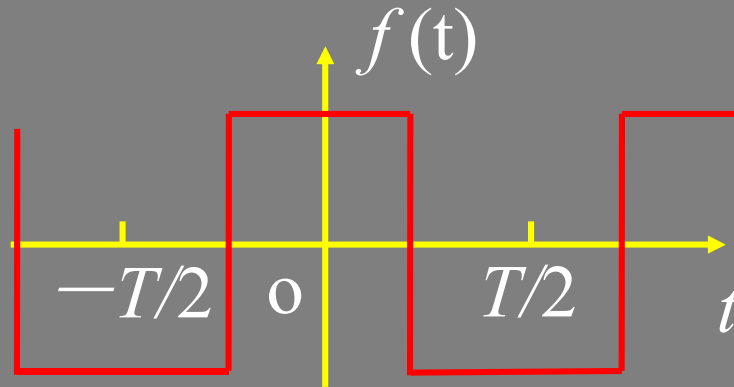
求出 $A_0$ 、 $a_k$ 、 $b_k$ 便可得到原函数  $f(t)$  的展开式。



注意 利用函数的对称性可使系数的确定简化

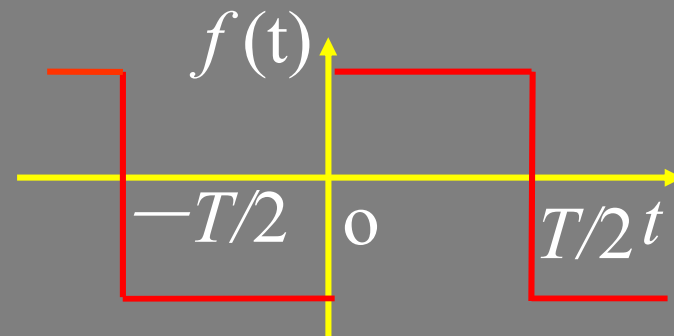
### ①偶函数

$$f(t) = f(-t) \quad b_k = 0$$



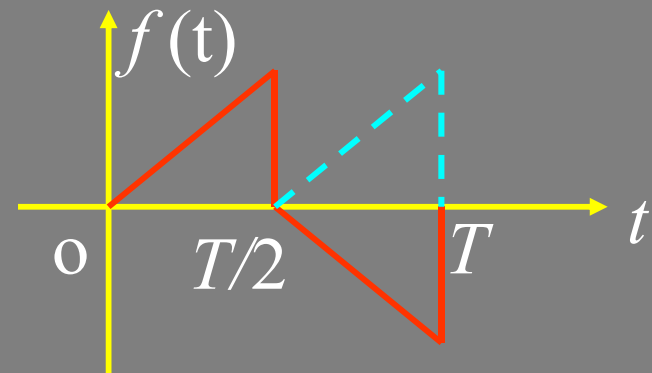
### ②奇函数

$$f(t) = -f(-t) \quad a_k = 0$$



### ③奇谐波函数

$$f(t) = -f\left(t + \frac{T}{2}\right) \quad a_{2k} = b_{2k} = 0$$



返回

上页

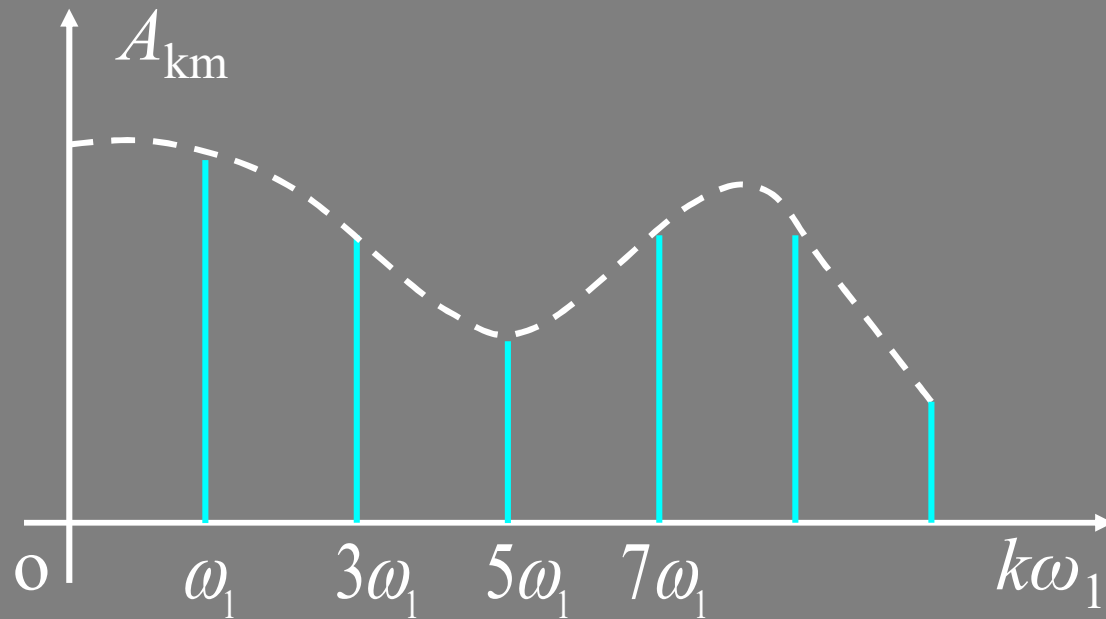
下页

## 周期函数的频谱图:

幅度频谱



$A_{km} \sim k\omega_1$  的图形

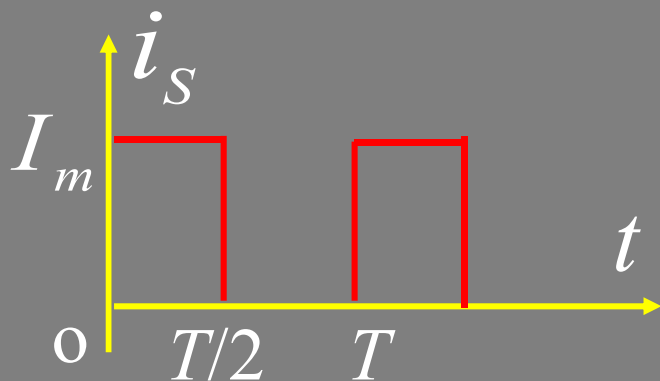


相位频谱



$\phi_k \sim k\omega_1$  的图形

## 例1 周期性方波信号的分解



$$i_S(t) = \begin{cases} I_m & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0 & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

**解**

图示矩形波电流在一个周期内的表达式为:

直流分量: 
$$I_o = \frac{1}{T} \int_0^T i_S(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m dt = \frac{I_m}{2}$$

谐波分量: 
$$b_K = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_S(\omega t) \sin k\omega t d(\omega t)$$

$$= \frac{I_m}{\pi} \left( -\frac{1}{k} \cos k\omega t \right) \Big|_0^{\pi} = \begin{cases} 0 & K \text{ 为偶数} \\ \frac{2I_m}{k\pi} & K \text{ 为奇数} \end{cases}$$

$$a_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} i_S(\omega t) \cos k\omega t d(\omega t)$$

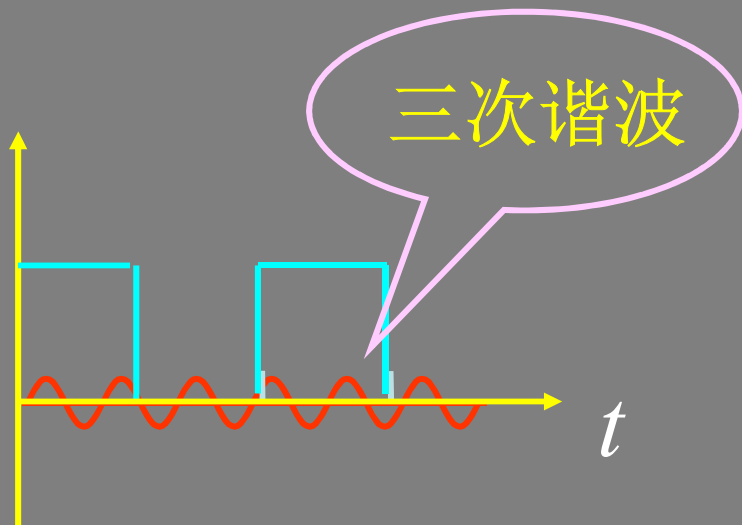
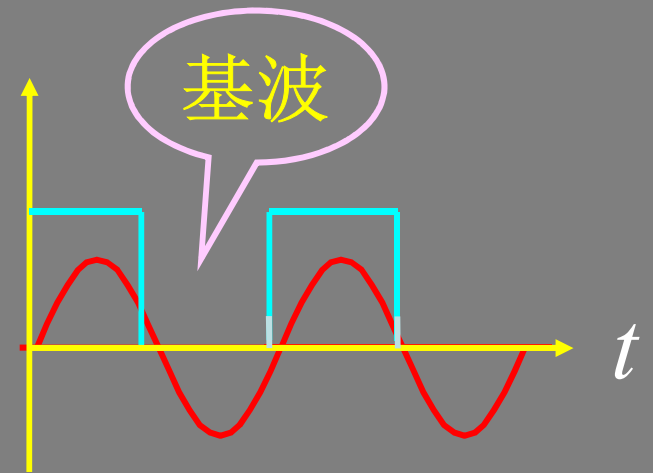
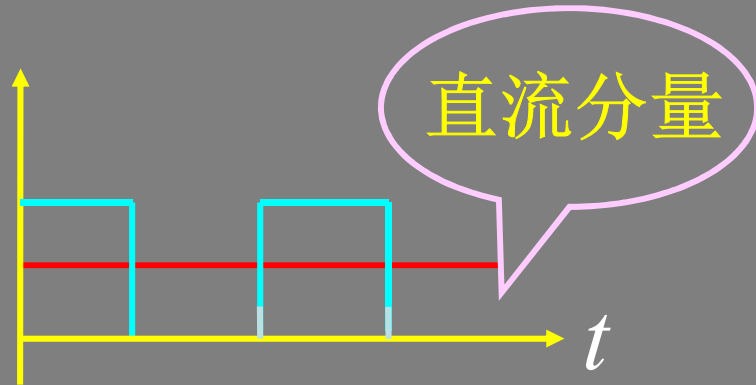
$$= \frac{2I_m}{\pi} \cdot \frac{1}{k} \sin k\omega t \Big|_0^{\pi} = 0$$

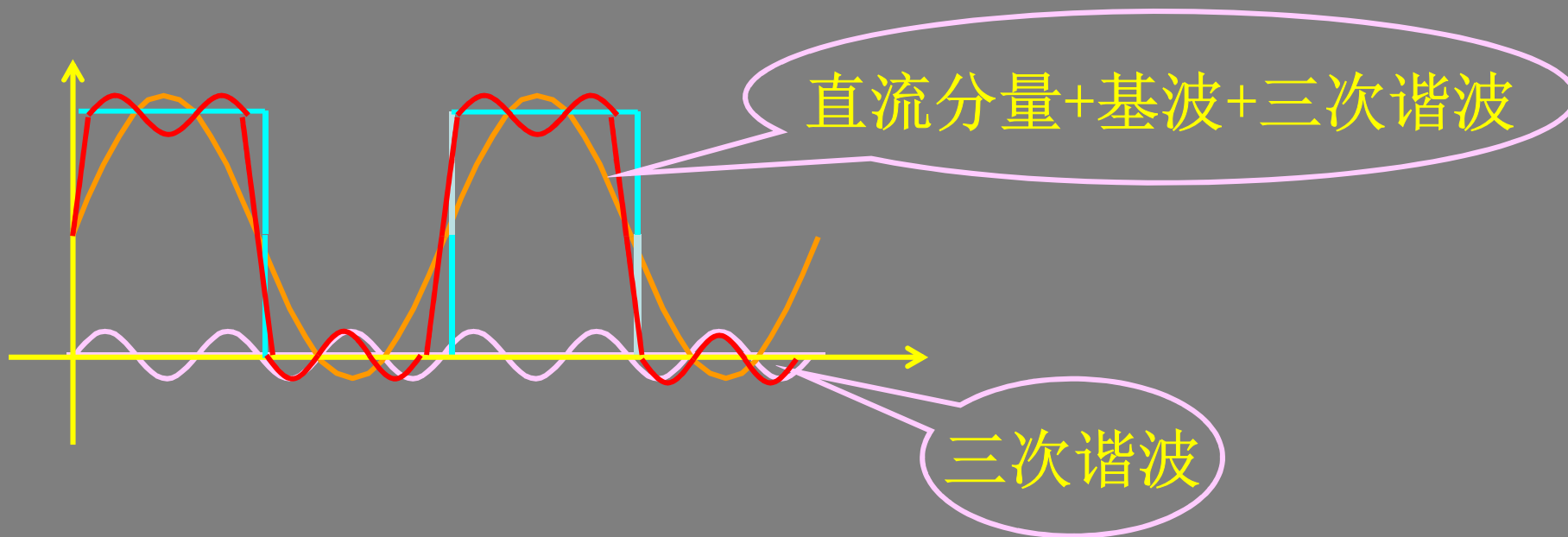
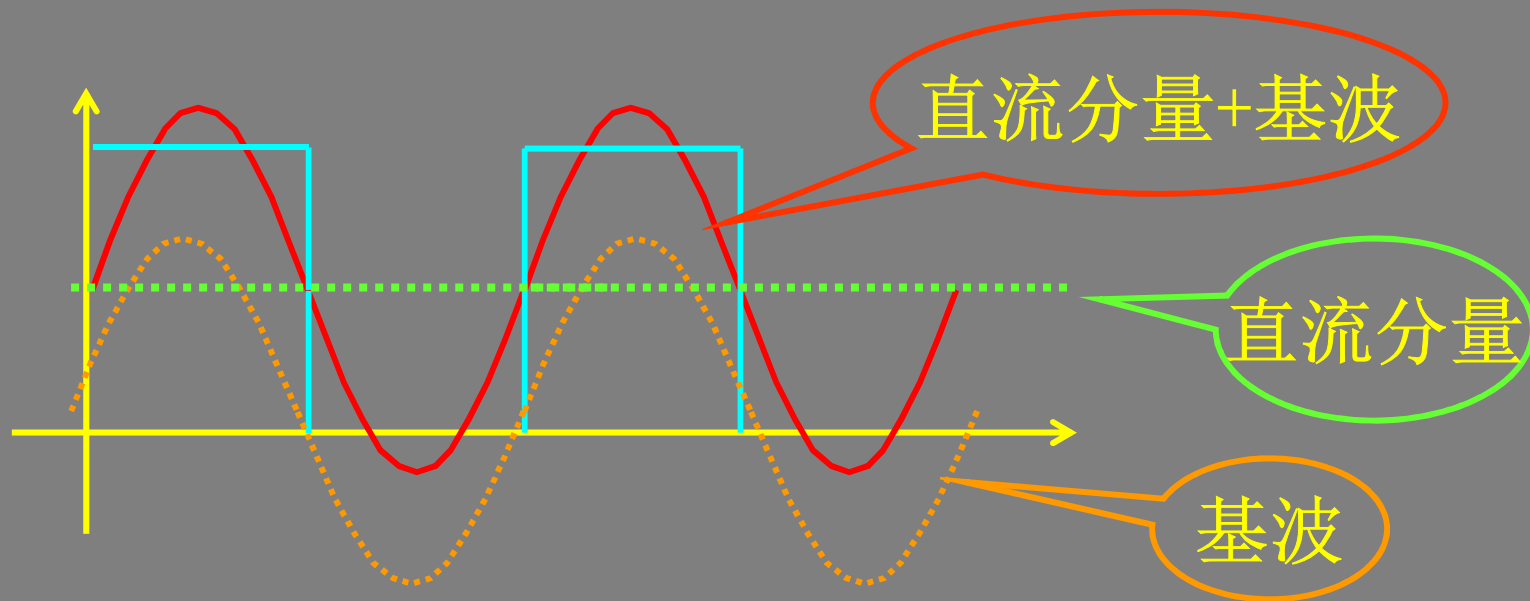
$$A_k = \sqrt{b_k^2 + a_k^2} = b_k = \frac{2I_m}{k\pi} \quad (k \text{ 为奇数})$$

$i_S$  的展开式为:

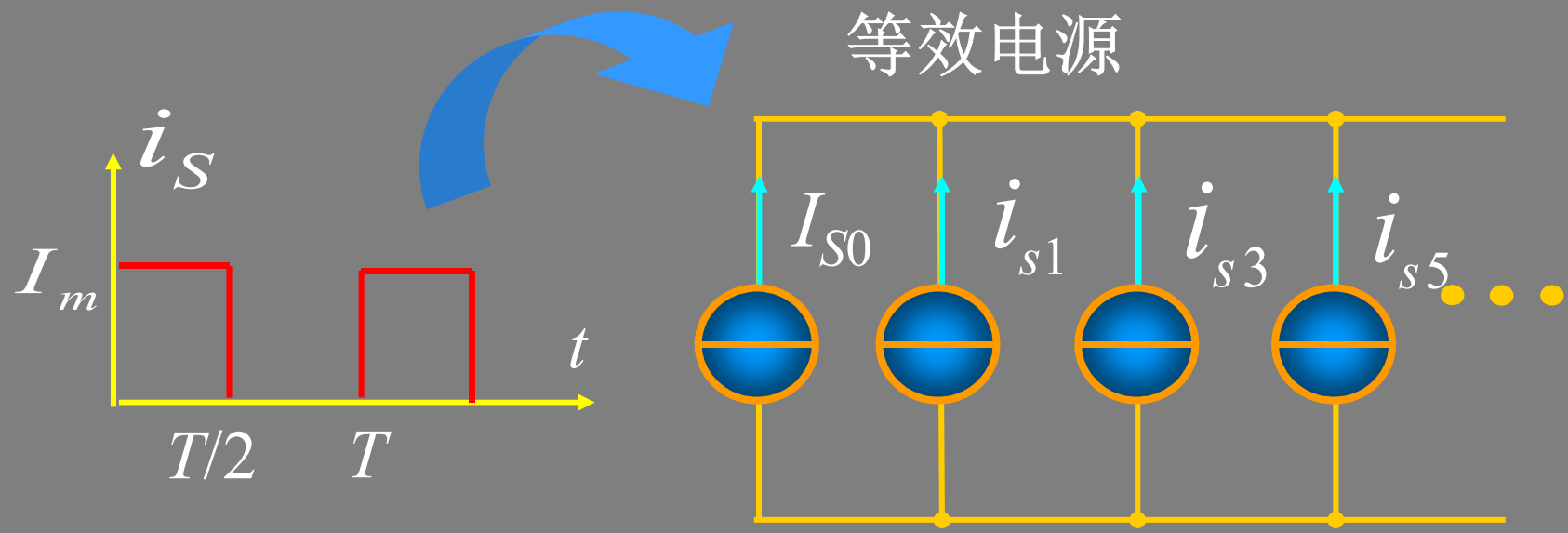
$$i_S = \frac{I_m}{2} + \frac{2I_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$$

# 周期性方波波形分解









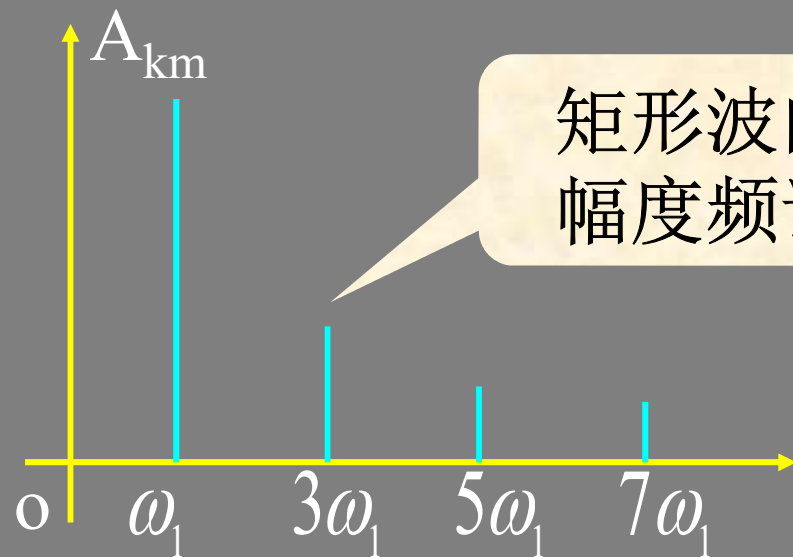
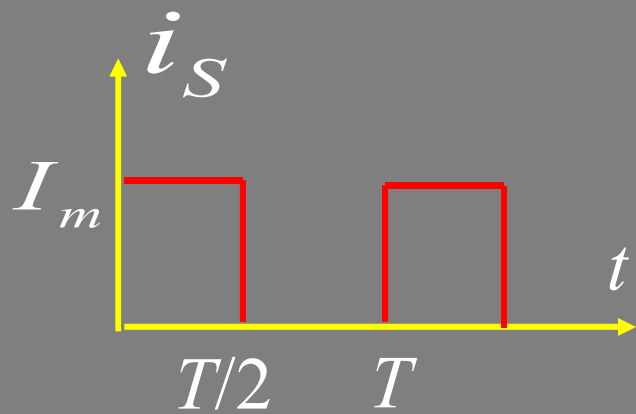
$$i_s = \frac{I_m}{2} + \frac{2I_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$$

$I_{S0}$

$i_{s1}$

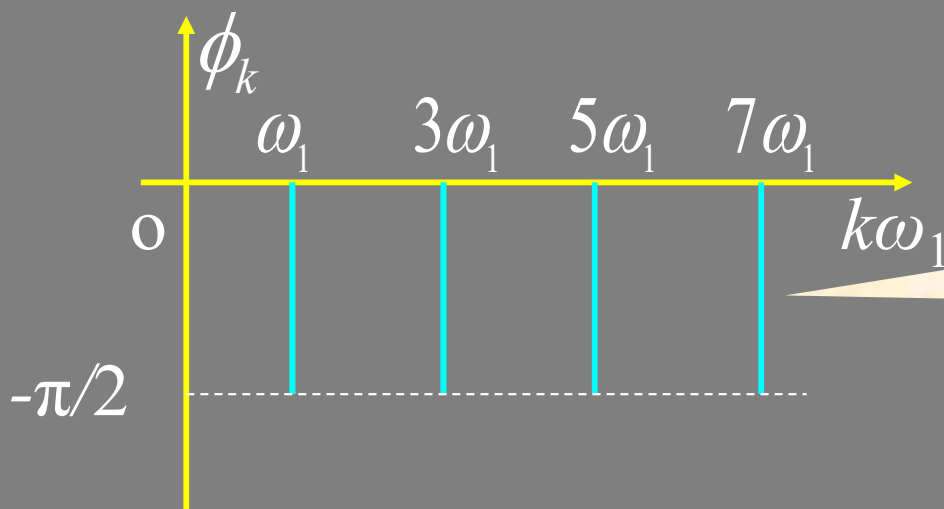
$i_{s3}$

$i_{s5}$



矩形波的  
幅度频谱

$$i_s = \frac{I_m}{2} + \frac{2I_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$$



矩形波的  
相位频谱

## 13.3 有效值、平均值和平均功率

### 1. 三角函数的性质

① 正弦、余弦信号一个周期内的积分为0。

$$\int_0^{2\pi} \sin k\omega t d(\omega t) = 0 \quad \int_0^{2\pi} \cos k\omega t d(\omega t) = 0$$

②  $\sin^2$ 、 $\cos^2$  在一个周期内的积分为 $\pi$ 。

$k$ 整数

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 k\omega t d(\omega t) = \pi \quad \int_0^{2\pi} \cos^2 k\omega t d(\omega t) = \pi$$

### ③三角函数的正交性

$$\int_0^{2\pi} \cos k\omega t \cdot \sin p\omega t d(\omega t) = 0$$

$$\int_0^{2\pi} \cos k\omega t \cdot \cos p\omega t d(\omega t) = 0$$

$$\int_0^{2\pi} \sin k\omega t \cdot \sin p\omega t d(\omega t) = 0$$

$$(k \neq p)$$

## 2. 非正弦周期函数的有效值

若 
$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \cos(k\omega t + \varphi_k)$$

则有效值:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(\omega t) d(t)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[ I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \cos(k\omega t + \varphi_k) \right]^2 d(t)} \end{aligned}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[ I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \cos(k\omega t + \varphi_k) \right]^2 dt}$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T I_0^2 dt = I_0^2$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T I_{km}^2 \cos^2(k\omega t + \phi_k) dt = I_k^2$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T 2I_0 \cos(k\omega t + \phi_k) dt = 0$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T 2I_{km} \cos(k\omega t + \phi_k) I_{qm} \cos(q\omega t + \phi_q) dt = 0$$

( $k \neq q$ )

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_{km}^2}{2}}$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}$$



**结论** 周期函数的有效值为直流分量及各次谐波分量有效值平方和的方根。

### 3. 非正弦周期函数的平均值

若 
$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \cos(k\omega t + \varphi_k)$$

其直流值为:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i(\omega t) dt = I_0$$

其平均值为:

$$I_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(\omega t)| dt$$

正弦量的平均值为:

$$I_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T |I_m \cos \omega t| dt = 0.898 I$$



#### 4. 非正弦周期交流电路的平均功率

$$\begin{cases} u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \cos(k\omega t + \varphi_{uk}) \\ i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \cos(k\omega t + \varphi_{ik}) \end{cases}$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i dt$$

利用三角函数的正交性，得：

$$\begin{aligned} P &= U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k \quad (\varphi_k = \varphi_{uk} - \varphi_{ik}) \\ &= P_0 + P_1 + P_2 + \dots \end{aligned}$$

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots$$



平均功率 = 直流分量的功率 + 各次谐波的平均功率

# 13.4 非正弦周期电流电路的计算

## 1. 计算步骤

- ①利用傅里叶级数，将非正弦周期函数展开成若干种频率的谐波信号；
- ②对各次谐波分别应用相量法计算；（注意：交流各谐波的  $X_L$ 、 $X_C$  不同，对直流  $C$  相当于开路、 $L$  相于短路。）
- ③将以上计算结果转换为瞬时值迭加。

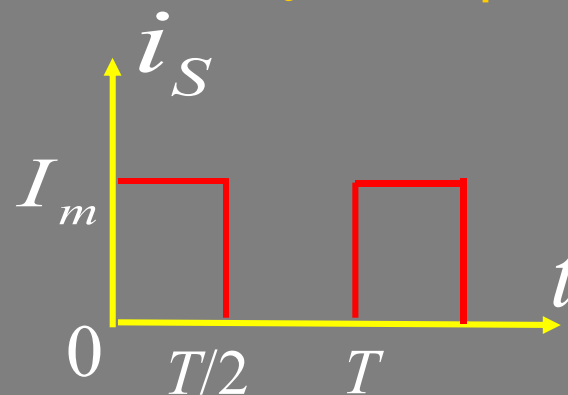
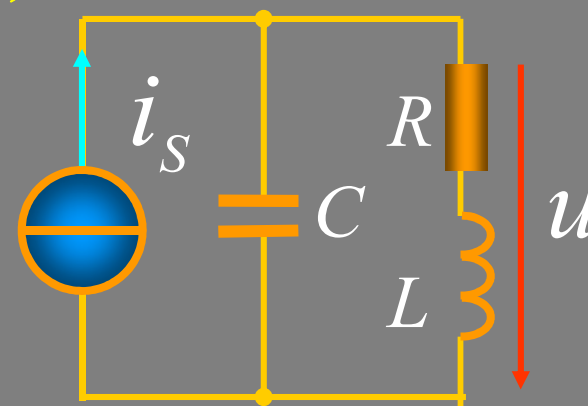
## 2. 计算举例

例1 方波信号激励的电路。求 $u$ ，已知：

$$R = 20\Omega、L = 1\text{mH}、C = 1000\text{pF}$$

**解** (1) 方波信号的展开式为：

$$i_S = 78.5 + 100 \sin 10^6 t + \frac{100}{3} \sin 3 \cdot 10^6 t$$



电流源各频率的谐波分量为：

$$I_{S0} = 78.5\mu\text{A} \quad i_{s1} = 100 \sin 10^6 t \mu\text{A}$$

$$i_{s3} = \frac{100}{3} \sin 3 \cdot 10^6 t \mu\text{A}$$

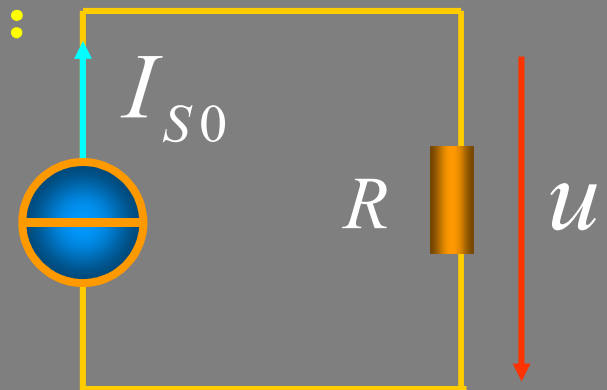
(2) 对各次谐波分量单独计算：

(a) 直流分量  $I_{S0}$  作用

$$I_{S0} = 78.5\mu\text{A}$$

电容断路，电感短路

$$U_0 = RI_{S0} = 20 \times 78.5 \times 10^{-6} = 1.57\text{mV}$$



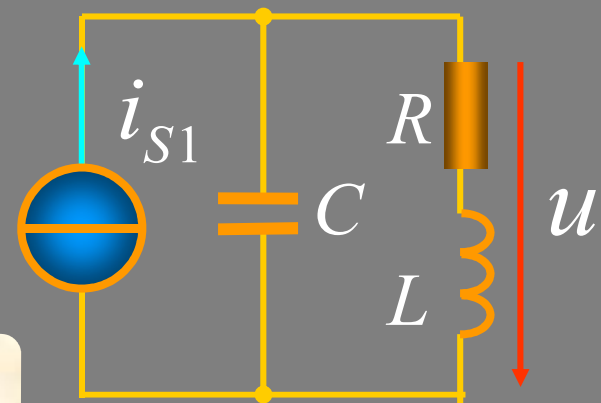
(b) 基波作用

$$i_{s1} = 100 \sin 10^6 t \text{ } \mu\text{A}$$

$$-\frac{1}{\omega_1 C} = \frac{1}{10^6 \times 1000 \times 10^{-12}} = -1 \text{ k}\Omega$$

$$\omega_1 L = 10^6 \times 10^{-3} = 1 \text{ k}\Omega$$

$X_L \gg R$



$$Z(\omega_1) = \frac{(R + jX_L) \cdot (jX_C)}{R + j(X_L + X_C)} \approx -\frac{X_L X_C}{R} = \frac{L}{RC} = 50 \text{ k}\Omega$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot Z(\omega_1) = \frac{100 \times 10^{-6}}{\sqrt{2}} \cdot 50 = \frac{5000}{\sqrt{2}} \text{ mV}$$

返回

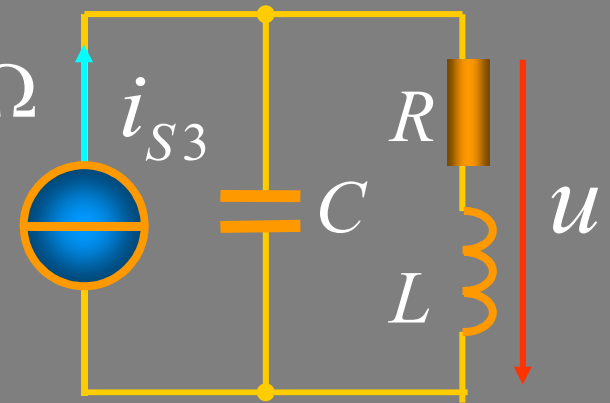
上页

下页

(c) 三次谐波作用  $i_{s3} = \frac{100}{3} \sin 3 \cdot 10^6 t \mu\text{A}$

$$\frac{1}{3\omega_1 C} = \frac{1}{3 \times 10^6 \times 1000 \times 10^{-12}} = 0.33 \text{k}\Omega$$

$$3\omega_1 L = 3 \times 10^6 \times 10^{-3} = 3 \text{k}\Omega$$



$$Z(3\omega_1) = \frac{(R + jX_{L3})(-jX_{C3})}{R + j(X_{L3} - X_{C3})} = 374.5 \angle -89.19^\circ \Omega$$

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_{s3} \cdot Z(3\omega_1) = 33.3 \times \frac{10^{-6}}{\sqrt{2}} \times 374.5 \angle -89.19^\circ$$

$$= \frac{12.47}{\sqrt{2}} \angle -89.2^\circ \text{mV}$$

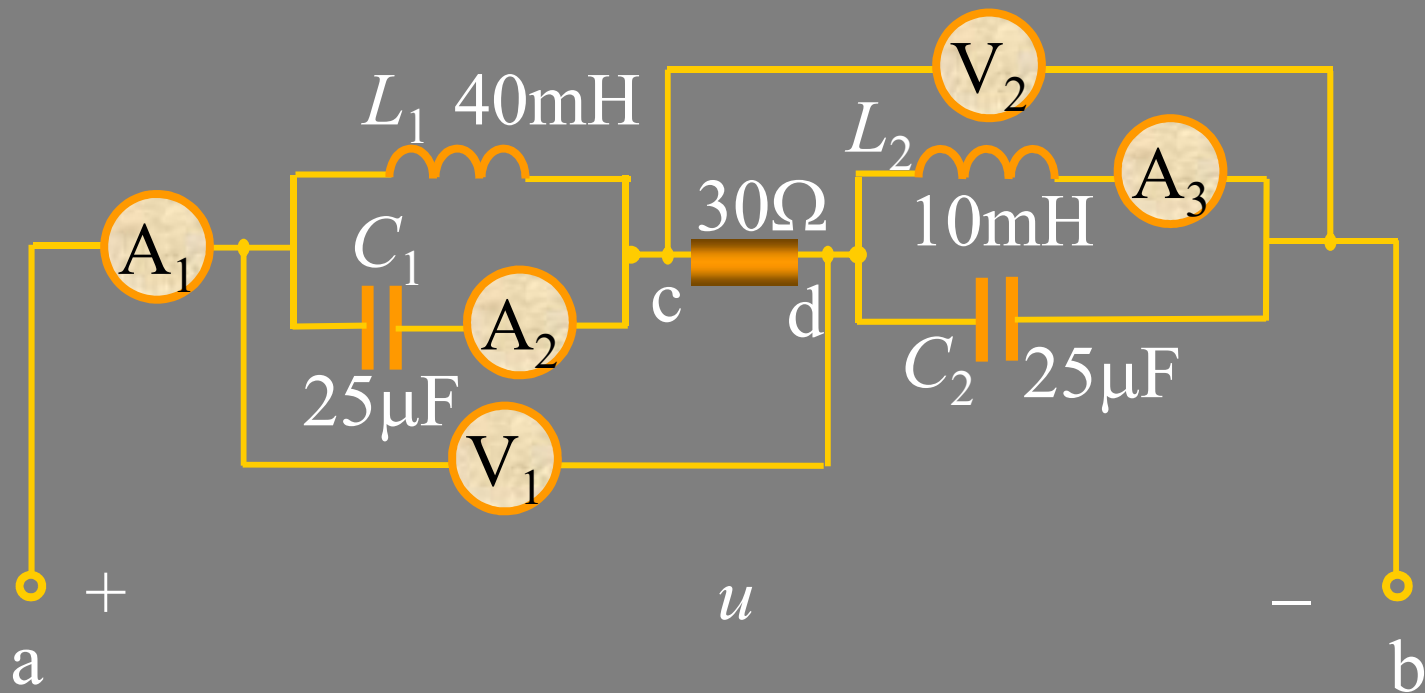
(3) 各谐波分量计算结果瞬时值迭加:

$$U_0 = 1.57 \text{ mV} \quad \dot{U}_3 = \frac{12.47}{\sqrt{2}} \angle -89.2^\circ \text{ mV}$$
$$\dot{U}_1 = \frac{5000}{\sqrt{2}} \text{ mV}$$

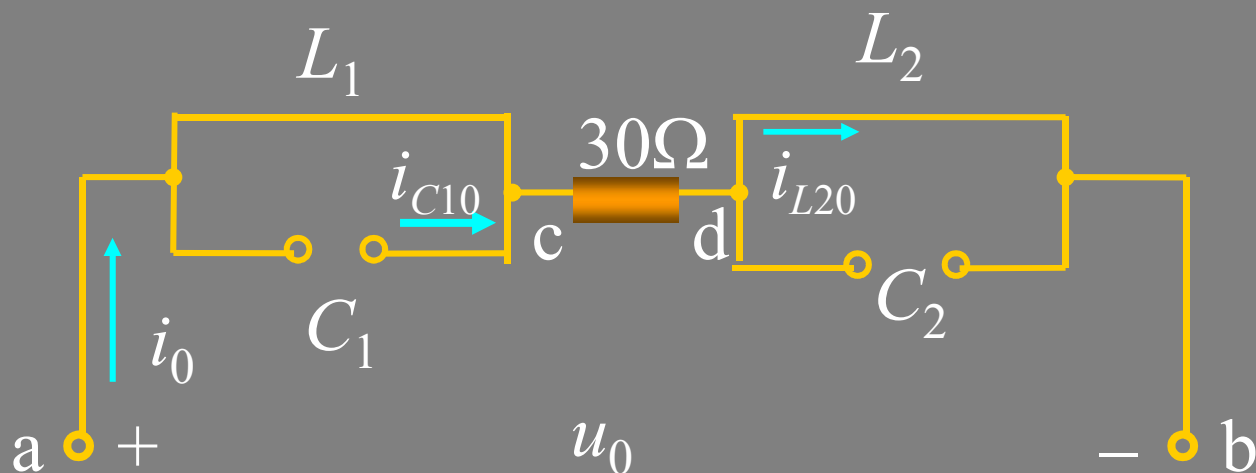
$$u = U_0 + u_1 + u_3$$
$$\approx 1.57 + 5000 \sin \omega t$$
$$+ 12.47 \sin(3\omega t - 89.2^\circ)$$



例2 已知： $u = 30 + 120 \cos 1000t + 60 \cos(2000t + \frac{\pi}{4}) \text{ V}$ 。  
 求电路中各表读数(有效值)。



解



(1)  $u_0=30\text{V}$  作用于电路,  $L_1$ 、 $L_2$  短路,  $C_1$ 、 $C_2$  开路。

$$i_0 = i_{L20} = u_0/R = 30/30 = 1\text{A},$$

$$i_{C10} = 0,$$

$$u_{ad0} = u_{cb0} = u_0 = 30\text{V}$$

(2)  $u_1=120\cos 1000t$  V作用

$$\omega L_1 = 1000 \times 40 \times 10^{-3} = 40\Omega \quad \omega L_2 = 1000 \times 10 \times 10^{-3} = 10\Omega$$

$$\frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{1000 \times 25 \times 10^{-6}} = 40\Omega$$

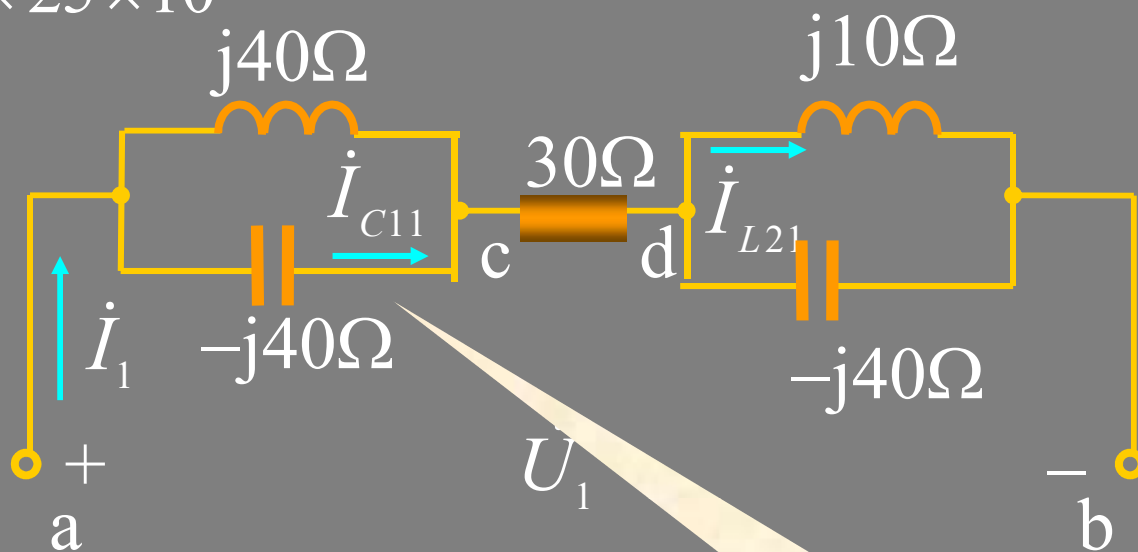
$$\dot{U}_1 = 120 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{L21} = 0$$

$$\dot{U}_{cb1} = 0$$

$$\dot{U}_{ad1} = \dot{U}_1 = 120 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\dot{I}_{C11} = j\omega C_1 \dot{U}_1 = \frac{120 \angle 0^\circ}{-j40} = 3 \angle 90^\circ \text{ A}$$



并联谐振

(3)  $u_2=60\cos(2000t+\pi/4)\text{V}$ 作用

$$2\omega L_1 = 2000 \times 40 \times 10^{-3} = 80\Omega, \quad 2\omega L_2 = 2000 \times 10 \times 10^{-3} = 20\Omega$$

$$\frac{1}{2\omega C_1} = \frac{1}{2\omega C_2} = \frac{1}{2000 \times 25 \times 10^{-6}} = 20\Omega$$

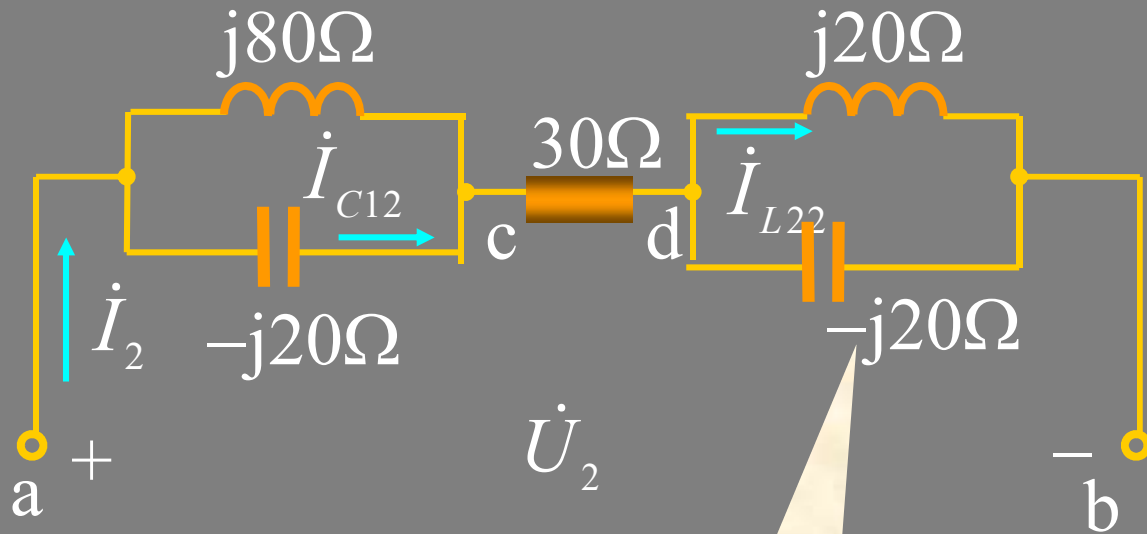
$$\dot{U}_2 = 60 \angle 45^\circ \text{V}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{C12} = 0$$

$$\dot{U}_{ad2} = 0$$

$$\dot{U}_{cb2} = \dot{U}_2 = 60 \angle 45^\circ \text{V}$$

$$\dot{I}_{L22} = \frac{\dot{U}_1}{j2\omega L_2} = \frac{60 \angle 45^\circ}{j20} = 3 \angle -45^\circ \text{A}$$



并联谐振

所求电压、电流的瞬时值为：

$$i = i_0 + i_1 + i_2 = 1 \text{ A}$$

$$i_{C1} = i_{C10} + i_{C11} + i_{C12} = 3 \cos(1000t + 90^\circ) \text{ A}$$

$$i_{L2} = i_{L20} + i_{L21} + i_{L22} = 1 + 3 \cos(2000t - 45^\circ) \text{ A}$$

$$u_{ad} = u_{ad0} + u_{ad1} + u_{ad2} = 30 + 120 \cos 1000t \text{ V}$$

$$u_{cb} = u_{cb0} + u_{cb1} + u_{cb2} = 30 + 60 \cos(2000t + 45^\circ) \text{ V}$$

表A<sub>1</sub>的读数： $I = 1 \text{ A}$       表A<sub>2</sub>的读数： $3 / \sqrt{2} = 2.12 \text{ A}$

表A<sub>3</sub>的读数： $\sqrt{1^2 + (3 / \sqrt{2})^2} = 2.35 \text{ A}$

表V<sub>1</sub>的读数： $\sqrt{30^2 + (120 / \sqrt{2})^2} = 90 \text{ V}$

表V<sub>2</sub>的读数： $\sqrt{30^2 + (60 / \sqrt{2})^2} = 52.0 \text{ V}$

例3

已知 $u(t)$ 是周期函数，波形如图， $L=1/2\pi$  H， $C=125/\pi$   $\mu$ F，求理想变压器原边电流 $i_1(t)$ 及输出电压 $u_2$ 的有效值。

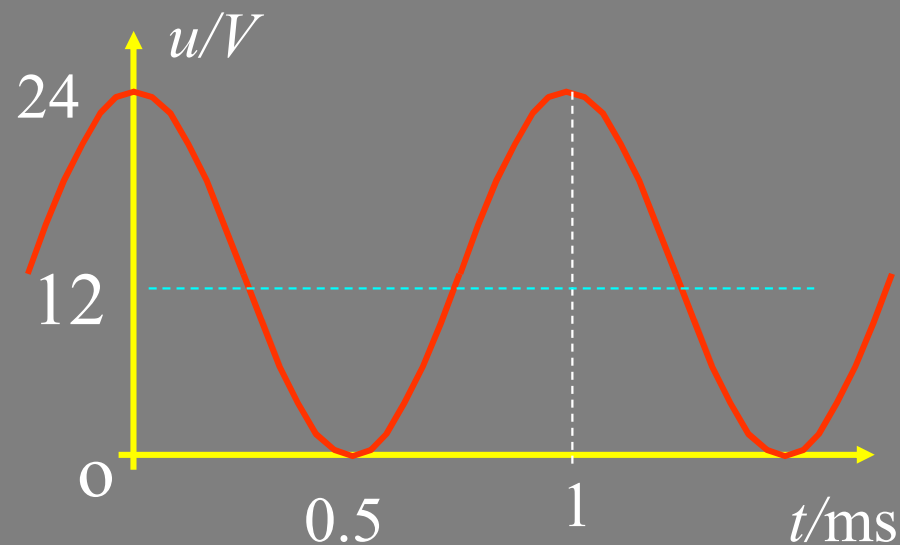
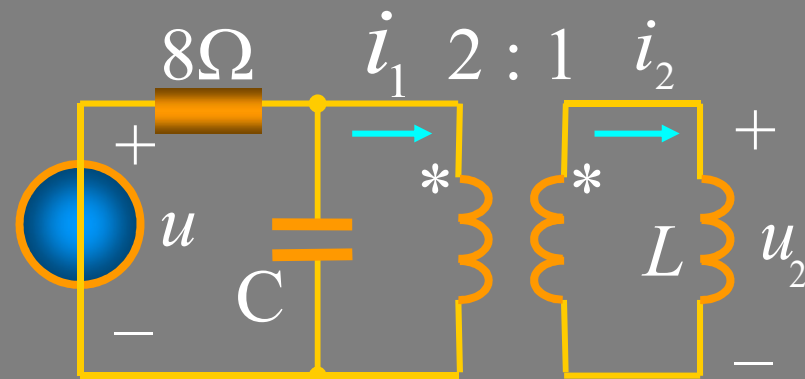
**解**  $\omega = 2\pi/T = 2\pi \times 10^3$  rad/s

$$u(t) = 12 + 12 \cos(\omega t)$$

当 $u=12$ V作用时，电容开路、电感短路，有：

$$i_1 = 12/8 = 1.5\text{A}$$

$$u_2 = 0$$



当  $u = 12\cos(\omega t)$  作用时

$$X_C = \frac{-1}{\omega C} = \frac{-\pi}{2\pi \times 10^3 \times 125 \times 10^{-6}} = -4\Omega$$

$$X_L = \omega L = 2\pi \times 10^3 \times \frac{1}{2\pi} \times 10^{-3} = 1\Omega$$

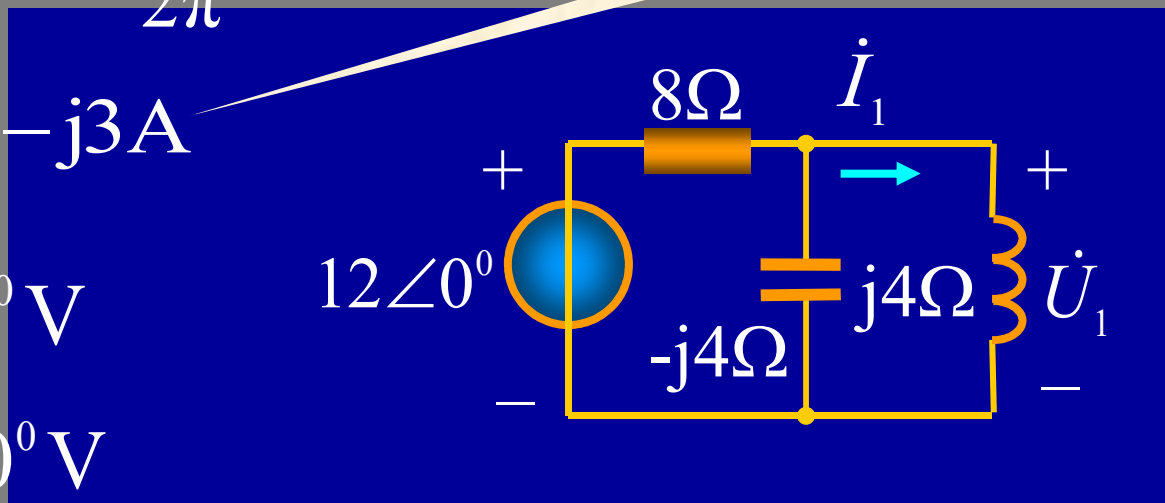
振幅相量

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{j4} = \frac{12}{j4} = -j3\text{A}$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U} = 12\angle 0^\circ \text{V}$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{n}\dot{U}_1 = 6\angle 0^\circ \text{V}$$

$$U_2 = \frac{6}{\sqrt{2}} = 4.243\text{V} \quad i_1 = 1.5 + 3\cos(\omega t - 90^\circ)\text{A}$$



例4 已知： $u_1 = 220\sqrt{2} \cos \omega t \text{ V}$

$$u_2 = 220\sqrt{2} \cos \omega t + 100\sqrt{2} \cos(3\omega t + 30^\circ) \text{ V}$$

求  $U_{ab}$ 、 $i$ 、及功率表的读数。

**解**  $U_{ab} = \sqrt{440^2 + 100^2} = 451.22 \text{ V}$

一次谐波作用： $\dot{U}_{ab(1)} = 440 \angle 0^\circ \text{ V}$

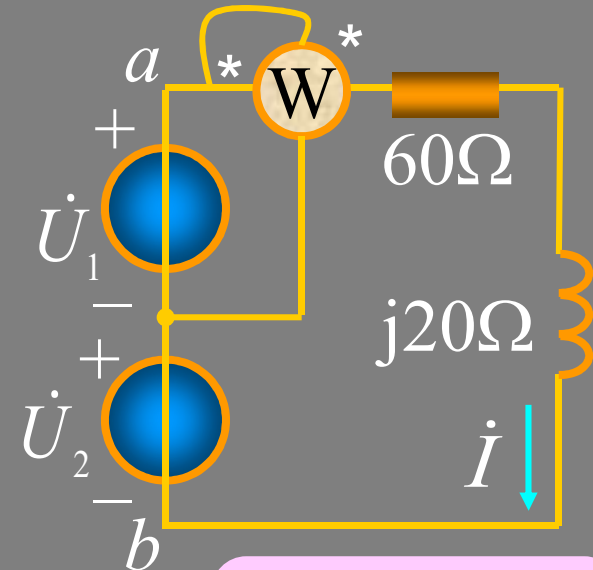
$$\dot{I}_{(1)} = \frac{440}{60 + j20} = 6.96 \angle -18.4^\circ \text{ A}$$

三次谐波作用： $\dot{U}_{ab(3)} = 100 \angle 30^\circ \text{ V}$

$$\dot{I}_{(3)} = \frac{100 \angle 30^\circ}{60 + j60} = 1.18 \angle -15^\circ \text{ A}$$

$$i = 6.96\sqrt{2} \cos(\omega t - 18.4^\circ) + 1.18\sqrt{2} \cos(3\omega t - 15^\circ) \text{ A}$$

$$P = 220 \times 6.96 \cos 18.4 = 1452.92 \text{ W}$$

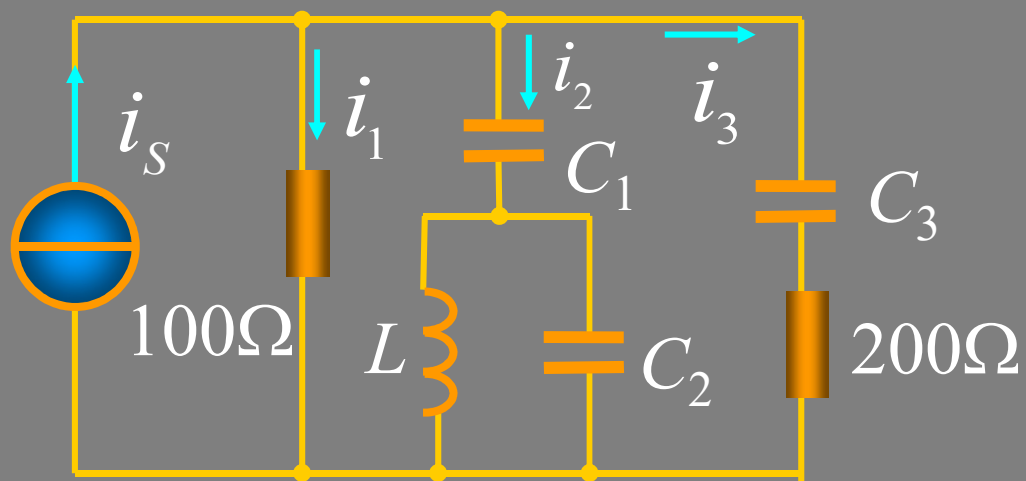


测的是  $u_1$   
的功率



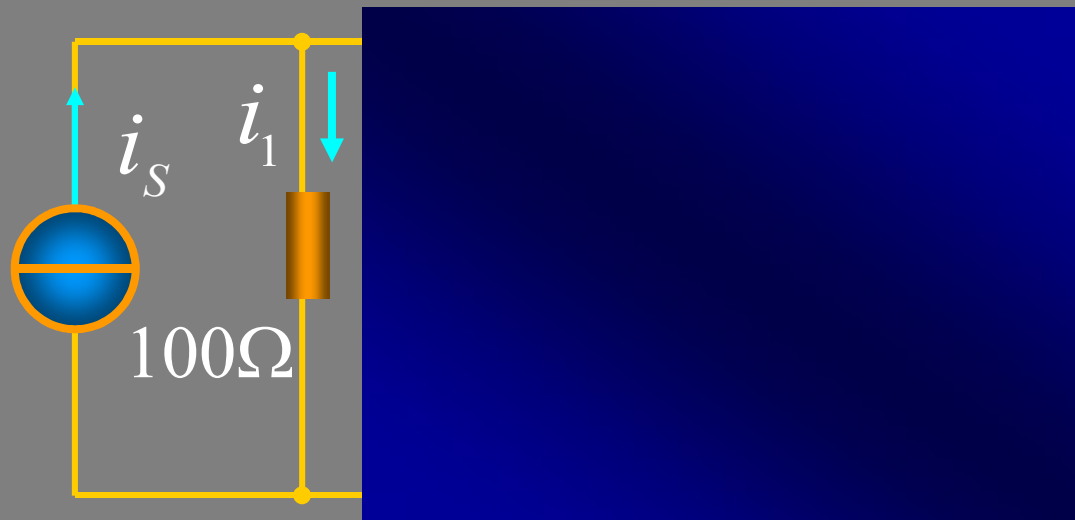
例5

已知： $i_s = 5 + 20 \cos 1000t + 10 \cos 3 \times 1000t$  A  
 $L = 0.1\text{H}$ ,  $C_3 = 1\mu\text{F}$ ,  $C_1$ 中只有基波电流,  $C_3$ 中只有三次谐波电流, 求 $C_1$ 、 $C_2$ 和各支路电流。



**解**  $C_1$ 中只有基波电流, 说明 $L$ 和 $C_2$ 对三次谐波发生并联谐振。即:

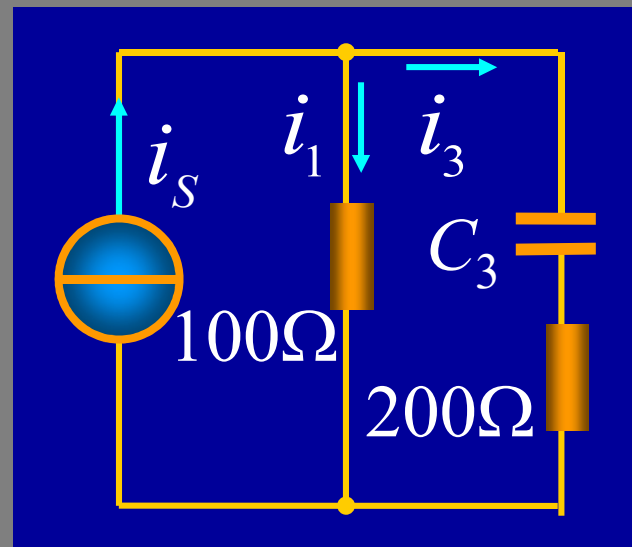
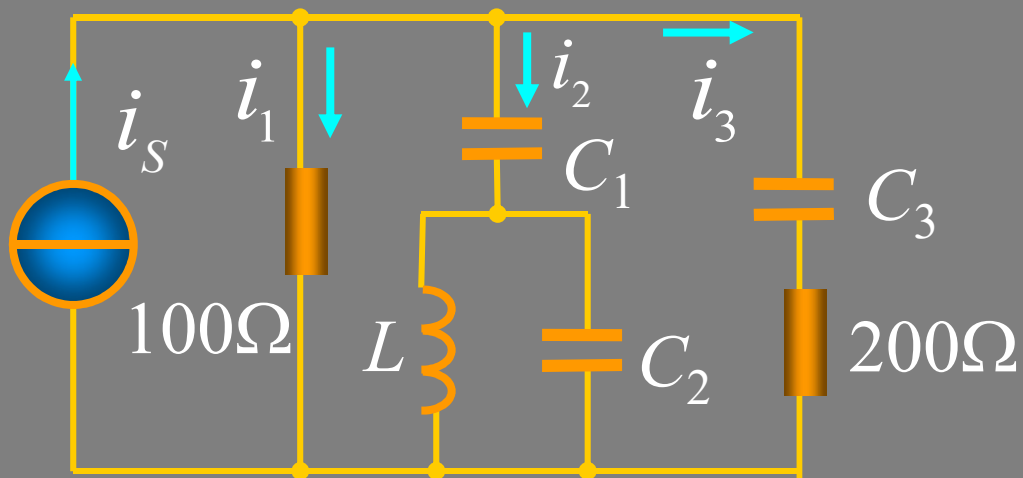
$$C_2 = \frac{1}{(3\omega_1)^2 L} = \frac{1}{9 \times 10^5} F$$



$C_3$ 中只有三次谐波电流，说明 $L$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 对一次谐波发生串联谐振。即：

$$\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{-L/C_2}{j(\omega L - 1/\omega C_2)} = 0 \quad \rightarrow \quad C_1 = \frac{8}{9 \times 10^5} \text{ F}$$

直流作用：  $i_1 = i_s = 5\text{A}$



一次谐波作用:  $i_2(t) = i_s = 20 \cos 1000t \text{ A}$

三次谐波作用:  $\dot{I}_{3(3)} = \frac{100 \times 10}{100 + 200 - j10^3/3} = 2.23 \angle 48^\circ \text{ A}$

$$\dot{I}_{1(3)} = \dot{I}_s - \dot{I}_{3(3)} = 10 - \frac{30}{9 - j10} = 8.67 \angle -11^\circ \text{ A}$$

$$i_1(t) = 5 + 8.67 \cos(3000t - 11^\circ) \text{ A}$$

$$i_3(t) = 2.23 \cos(3000t + 48^\circ) \text{ A}$$

# 13.5 对称三相电路中的高次谐波

## 1. 对称三相电路中的高次谐波

设  $u_A = u(t)$     $u_B = u(t - \frac{T}{3})$     $u_C = u(t - \frac{2T}{3})$

展开成傅里叶级数（ $k$  为奇数），则有：

$$\begin{cases} u_A = \sum U_{m(k)} \cos(k\omega_1 t + \phi_k) & \text{A相} \\ u_B = \sum U_{m(k)} \cos(k\omega_1 t + \phi_k - \frac{2k\pi}{3}) & \text{B相} \\ u_C = \sum U_{m(k)} \cos(k\omega_1 t + \phi_k + \frac{2k\pi}{3}) & \text{C相} \end{cases}$$

## 讨论

① 令  $k=6n+1$ , ( $n=0,1,2\dots$ ), 即:  $k=1,7,13\dots$

各相的初相分别为:

$$\begin{cases} \text{A相} & (\phi_k) \\ \text{B相} & (\phi_k - 4n\pi - \frac{2}{3}\pi) \\ \text{C相} & (\phi_k + 4n\pi + \frac{2}{3}\pi) \end{cases}$$

正序对称  
三相电源

② 令  $k=6n+3$ , 即:  $k=3,9,15\dots$

各相的初相分别为:

A相

$$(\phi_k)$$

B相

$$(\phi_k - (2n + 1)2\pi)$$

C相

$$(\phi_k + (2n + 1)2\pi)$$

零序对称  
三相电源

③令  $k=6n+5$ , 即:  $k=5,11,17 \dots$

各相的初相分别为:

A相

$$(\phi_k)$$

B相

$$(\phi_k - (2n + 2)2\pi + \frac{2}{3}\pi)$$

C相

$$(\phi_k + (2n + 2)2\pi - \frac{2}{3}\pi)$$

负序对称  
三相电源

## 结论

- ①三相对称的非正弦周期量（奇谐波）可分解为3类对称组，即正序对称组、负序对称组和零序对称组。
- ②在上述对称的非正弦周期电压源作用下的对称三相电路的分析计算，按3类对称组分别进行。对于正序和负序对称组，可直接引用第12章的方法和有关结论，

## 2. 零序组分量的响应

### ①对称的三角形电源

零序组电压源是等幅同相的电源

$$\dot{U}_{A(k)} = \dot{U}_{B(k)} = \dot{U}_{C(k)} = \dot{U}_{S(k)}$$

在三角形电源的回路中将产生零序环流

$$\dot{I}_{0(k)}(\text{零序}) = \frac{3\dot{U}_{S(k)}}{3Z_0} = \frac{\dot{U}_{S(k)}}{Z_0}(\text{零序})$$

电源内阻

线电压  $\dot{U}_{AB(k)} = \dot{U}_{BC(k)} = \dot{U}_{CA(k)} = \dot{U}_{S(k)} - \dot{I}_{0(k)}Z_0 = 0$

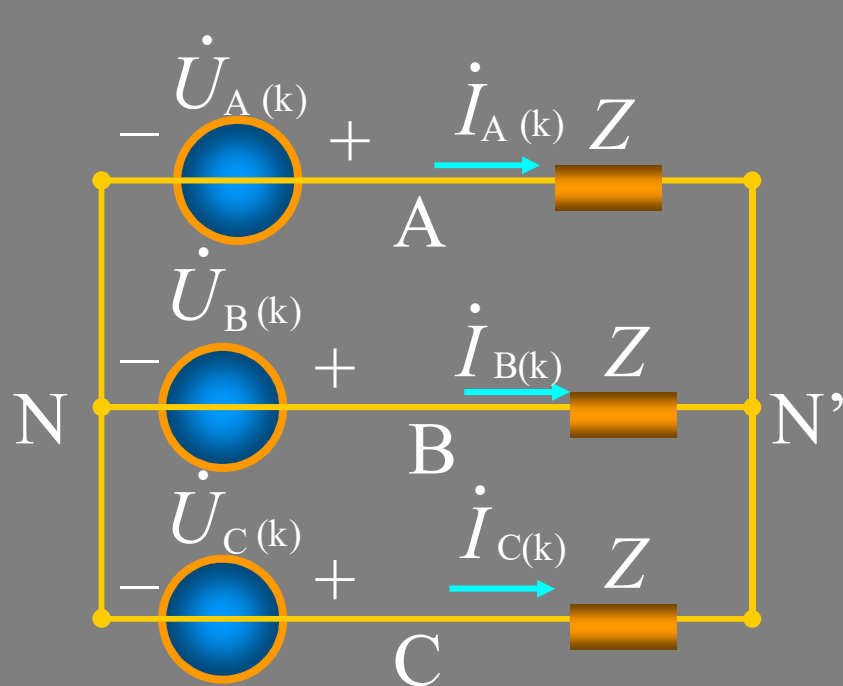


**结论** ①在环流的作用下零序线电压为零

②整个系统中除电源中有零序组环流外，其余部分的电压、电流中将不含零序组分量。



## ②星形对称电源（无中线对称系统）



$$\dot{U}_{N'N(k)} (\text{零序}) = \dot{U}_{S(k)} (\text{零序})$$

$$\dot{I}_{A(k)} = \dot{I}_{B(k)} = \dot{I}_{C(k)} = \frac{\dot{U}_{S(k)} - \dot{U}_{N'N}}{Z} = 0$$

$$\dot{U}_{AB(k)} = \dot{U}_{A(k)} - \dot{U}_{B(k)} = 0$$

$$\dot{U}_{BC(k)} = \dot{U}_{CA(k)} = 0$$



**结论** 除了中点电压和电源相电压中含有零序组电压分量外，系统的其余部分的电压、电流都不含零序组分量。

### ③三相四线制对称系统

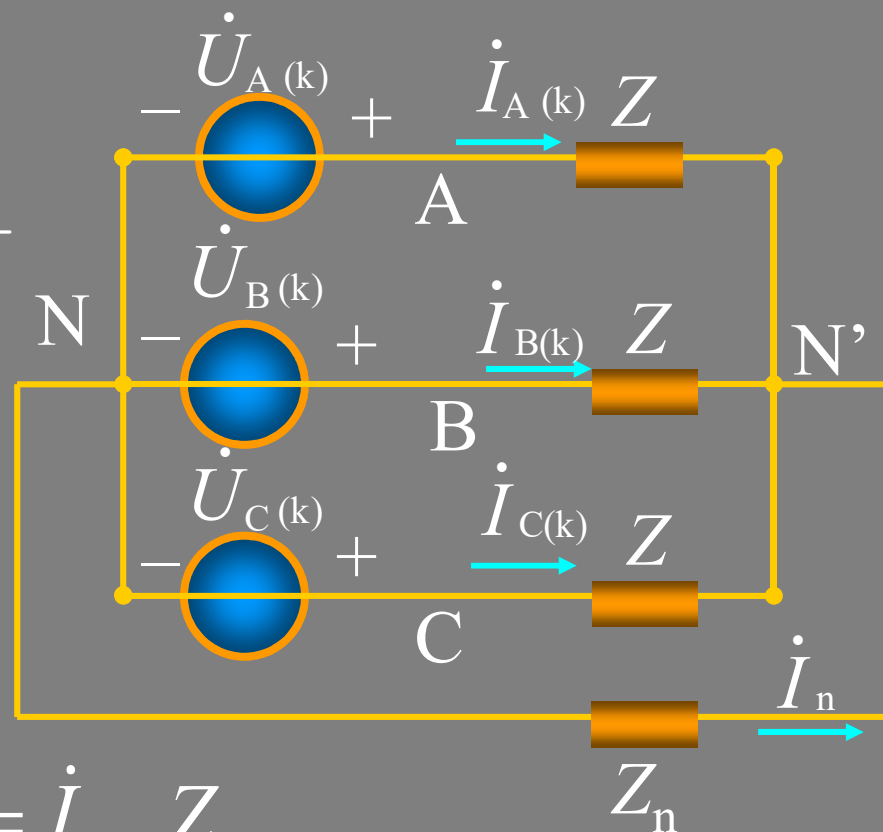
$$\dot{I}_{A(k)} = \dot{I}_{B(k)} = \dot{I}_{C(k)} = \dot{I}_{1(k)} = \frac{U_{S(k)}}{Z + 3Z_n}$$

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{3Z_n \dot{U}_{S(k)}}{Z + 3Z_n}$$

$$\dot{I}_{n(k)} = -3\dot{I}_{1(k)}$$

$$\dot{U}_{AN'(k)} = \dot{U}_{BN'(k)} = \dot{U}_{CN'(k)} = \dot{I}_{1(k)} Z$$

$$\dot{U}_{AB(k)} = \dot{U}_{BC(k)} = \dot{U}_{CA(k)} = 0$$



**结论** 除线电压外，电路中其余部分的电压、电流中都含零序组分量。