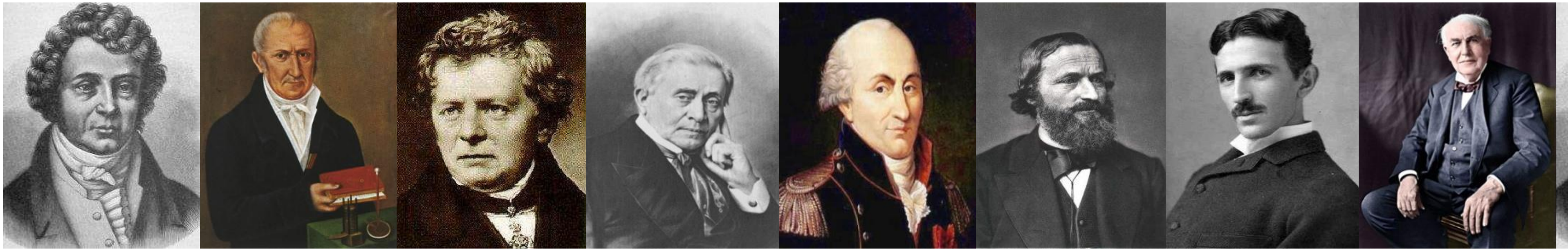
# 电 路 理 论

# Principles of Electric Circuits

## 第十四章　线性动态电路的复频域分析

2025年3月



# § 14.0 引言

## 相量分析法

时域 | 频域
---|---
正弦稳态电路 | 相量模型

两类约束的相量形式 →

线性微分方程 —相量正变换→ 相量方程（复代数方程）

求解 ↓ | 求解 ↓

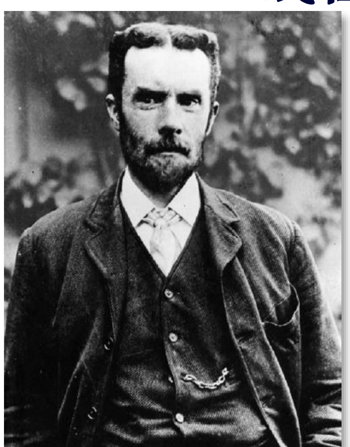
响应的时域形式 ←相量反变换— 响应的相量形式

# § 14.0 引言

**时域** → **复频域**

**线性动态电路** → **?**

**线性微分方程** —拉氏变换→ **代数方程**

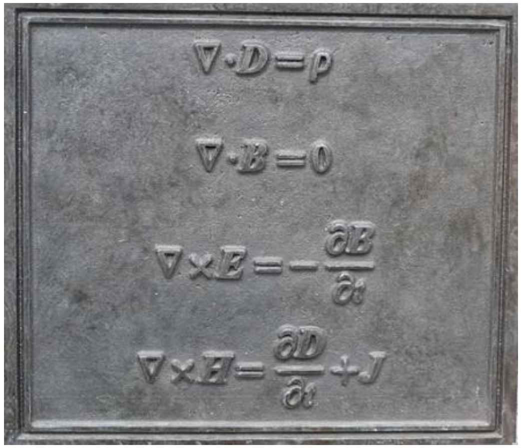


亥维赛(O. Heaviside)
英国数学家、物理学家
(1850-1925)

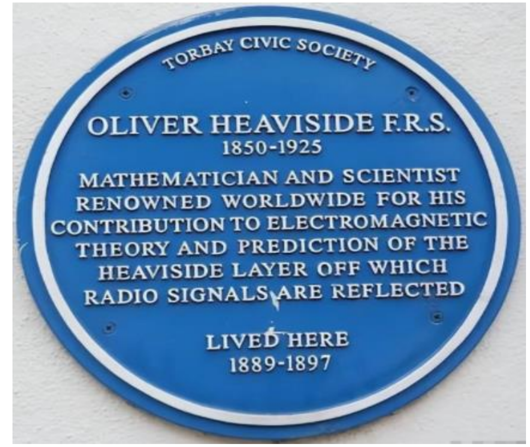
亥维赛提出了解决电路暂态计算的运算法，行之有效但缺乏证明。经多位工程师和数学家不断努力，在法国数学家**拉普拉斯**的著作中找到了依据，形成了20世纪30年代中期的“拉普拉斯变换法”。

亥维赛将**复数引入电路分析**、创造了一种**求解微分方程的新技术**、设计了**向量微积分**以及将**麦克斯韦方程**改写为今天使用的形式。

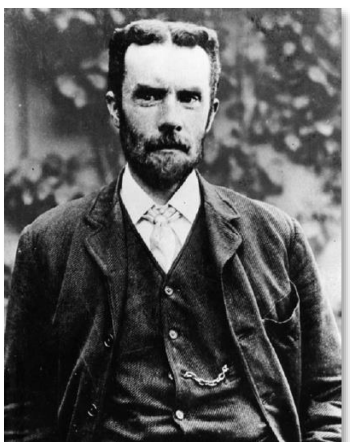
# § 14.0 引言




爱丁堡街头由亥维赛简化的“麦克斯韦方程”浮雕




纪念奥利弗·亥维赛的牌匾



亥维赛(O. Heaviside)

英国数学家、物理学家

（1850-1925）

亥维赛提出了解决电路暂态计算的运算法，行之有效但缺乏证明。经很多工程师和数学家不断努力，在法国数学家拉普拉斯的著作中找到了依据，形成了20世纪30年代中期的“拉普拉斯变换法”。

亥维赛将复数引入电路分析、创造了一种求解微分方程的新技术、设计了向量微积分以及将麦克斯韦方程式改写为今天使用的形式。

# 电 路 理 论

# Principles of Electric Circuits

## 第十四章 线性动态电路的复频域分析

### § 14.1 拉普拉斯变换

# § 14.1 拉普拉斯变换

## 一、拉普拉斯变换

拉普拉斯变换（拉氏变换）是一种函数积分变换，是傅里叶变换的推广。

拉普拉斯(Laplace)
法国数学家、物理学家
（1749-1827）

$f(t)$ 对应 $F(s)$

（时域原函数） （复频域象函数）

一个定义在$[0, \infty)$区间上的函数 $f(t)$的拉普拉斯变换定义为：

$$\begin{cases} F(s) = \int_{0_-}^{+\infty} f(t) e^{-st} dt \\ f(t) = \dfrac{1}{2\pi j} \int_{\sigma - j\infty}^{\sigma + j\infty} F(s) e^{st} ds \end{cases}$$

正变换 $F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$

反变换 $f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)]$

其中：$s = \sigma + j\omega$ 称为复频率

# § 14.1 拉普拉斯变换

## 一、拉普拉斯变换

$$\begin{cases} F(s)=\int_{0_-}^{+\infty} f(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t \\ f(t)=\dfrac{1}{2\pi \mathrm{j}}\int_{\sigma-\mathrm{j}\infty}^{\sigma+\mathrm{j}\infty} F(s)\mathrm{e}^{st}\mathrm{d}s \end{cases}$$

正变换

反变换

拉普拉斯(Laplace)
法国数学家、物理学家
（1749-1827）

★ 说明

（1）积分域

积分下限从0 _ 开始，称为0 _ 拉氏变换，便于计及冲激分量 。

$$F(s)=\int_{0_-}^{+\infty} f(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t=\int_{0_-}^{0_+} f(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t+\int_{0_+}^{\infty} f(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t$$

（2）象函数$F(s)$存在的条件：

$$|f(t)|\le Me^{ct} \quad t\in[0,\infty)$$

工程中遇到的函数一般都满足该条件

（3）象函数 $F(s)$用大写字母表示，如$I(s)$、$U(s)$;

原函数 $f(t)$ 用小写字母表示，如 $i(t)$、$u(t)$。

## 二、常用函数的拉普拉斯变换

$$F(s)=\int_{0_-}^{+\infty} f(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t$$ 正变换

**（1）单位阶跃函数的象函数**

$$f(t)=\varepsilon(t)$$

$$F(s)=\mathcal{L}\left[\varepsilon(t)\right]=\int_{0_-}^{\infty}\varepsilon(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t=\int_{0_-}^{\infty}\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t=-\frac{1}{s}\mathrm{e}^{-st}\Big|_{0_-}^{\infty}=\boxed{\frac{1}{s}}$$

**（2）单位冲激函数的象函数**

$$f(t)=\delta(t)$$

$$F(s)=\mathcal{L}\left[\delta(t)\right]=\int_{0_-}^{\infty}\delta(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t=\int_{0_-}^{0_+}\delta(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t=\int_{0_-}^{0_+}\delta(t)\mathrm{d}t=\boxed{1}$$

**（3）指数函数的象函数**

$$f(t)=\mathrm{e}^{at}$$

$$F(s)=\mathcal{L}\left[\mathrm{e}^{at}\right]=\int_{0_-}^{\infty}\mathrm{e}^{-(s-a)t}\mathrm{d}t=-\frac{1}{s-a}\mathrm{e}^{-(s-a)t}\Big|_{0_-}^{\infty}=\boxed{\frac{1}{s-a}}$$

# § 14.1 拉普拉斯变换

## 二、常用函数的拉普拉斯变换

| 原函数 | 象函数 | 原函数 | 象函数 |
| --- | --- | --- | --- |
| $\delta(t)$ | $1$ | $f(t)e^{-\alpha t}$ | $F(s+\alpha)$ |
| $\varepsilon(t)$ | $\frac{1}{s}$ | $e^{-\alpha t}$ | $\frac{1}{s+\alpha}$ |
| $t$ | $\frac{1}{s^2}$ | $te^{-\alpha t}$ | $\frac{1}{(s+\alpha)^2}$ |
| $\frac{1}{n!}t^n$ | $\frac{1}{s^{n+1}}$ | $\frac{1}{n!}t^n e^{-\alpha t}$ | $\frac{1}{(s+\alpha)^{n+1}}$ |
| $\sin\omega t$ | $\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$ | $e^{-\alpha t}\sin\omega t$ | $\frac{\omega}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$ |
| $\cos\omega t$ | $\frac{s}{s^2+\omega^2}$ | $e^{-\alpha t}\cos\omega t$ | $\frac{(s+\alpha)}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$ |

# § 14.1 拉普拉斯变换

## 三、拉普拉斯变换的基本性质

（1）唯一性质

$f(t)$ （时域原函数） $\xleftrightarrow{\text{一一对应}}$ $F(s)$ （复频域象函数）

（2）线性性质

$F_1(s)=\mathcal{L}[f_1(t)]\quad F_2(s)=\mathcal{L}[f_2(t)]$

$\mathcal{L}[\alpha f_1(t)+\beta f_2(t)]=\alpha F_1(s)+\beta F_2(s)$ 其中$\alpha$、$\beta$为任意实常数

（3）时域微分性质

若$\mathcal{L}[f(t)]=F(s)$，则$\mathcal{L}\left[\dfrac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\right]=sF(s)-f(0_-)$

【例】

$$F(s)=\mathcal{L}[\delta(t)]=\mathcal{L}\left[\frac{\mathrm{d}\varepsilon(t)}{\mathrm{d}t}\right]=s\cdot\frac{1}{s}-\varepsilon(0_-)=1$$

## 三、拉普拉斯变换的基本性质

（1）唯一性质

$f(t)$ 一一对应 $F(s)$

（时域原函数） （复频域象函数）

（2）线性性质

$F_1(s)=\mathcal{L}[f_1(t)]$ $F_2(s)=\mathcal{L}[f_2(t)]$

$\mathcal{L}[\alpha f_1(t)+\beta f_2(t)]=\alpha F_1(s)+\beta F_2(s)$ 其中$\alpha$、$\beta$为任意实常数

（3）时域微分性质

若$\mathcal{L}[f(t)]=F(s)$，则$\mathcal{L}\left[\dfrac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\right]=sF(s)-f(0_-)$

（4）时域积分性质

若$\mathcal{L}[f(t)]=F(s)$，则$\mathcal{L}\left[\int_{0_-}^{t}f(\tau)\mathrm{d}\tau\right]=\dfrac{F(s)}{s}$

## 三、拉普拉斯变换的基本性质

### （5）时域位移性质

若$\mathscr{L}[f(t)]=F(s)$，则$\mathscr{L}\left[f(t-t_0)\varepsilon(t-t_0)\right]=\mathrm{e}^{-st_0}F(s)$

【例】求矩形脉冲$f(t)=E\varepsilon(t)-E\varepsilon(t-t_0)$的象函数

$$\mathscr{L}[f(t)]=\mathscr{L}\left[E\varepsilon(t)-E\varepsilon(t-t_0)\right]=E\mathscr{L}\left[\varepsilon(t)\right]-E\mathscr{L}\left[\varepsilon(t-t_0)\right]$$

$$=\frac{E}{s}-\frac{E}{s}\mathrm{e}^{-st_0}$$

$$=\frac{E}{s}\left(1-\mathrm{e}^{-st_0}\right)$$

# § 14.1 拉普拉斯变换

## 三、拉普拉斯变换的基本性质

### （5）时域位移性质

若$\mathcal{L}[f(t)]=F(s)$，则$\mathcal{L}\left[f(t-t_0)\varepsilon(t-t_0)\right]=\mathrm{e}^{-st_0}F(s)$

### （6）频域位移性质

若$\mathcal{L}[f(t)]=F(s)$，则$\mathcal{L}\left[f(t)\mathrm{e}^{-at}\right]=F(s+a)$

### （7）卷积定理

设$u_{\mathrm{s}}(t)$和$h(t)$的象函数分别为$U_{\mathrm{s}}(s)$和$H(s)$

则 $\mathcal{L}\left[u_{\mathrm{s}}(t)\otimes h(t)\right]=U_{\mathrm{s}}(s)\cdot H(s)$

**时域卷积，频域相乘**

## 四、象函数的部分分式展开

用拉氏变换求解线性电路的时域响应时，需要把求得的响应的拉氏变换形式反变换为时间函数。

由象函数求原函数的方法：

（1）利用拉氏反变换公式 $f(t)=\dfrac{1}{2\pi \mathrm{j}}\displaystyle\int_{c-\mathrm{j}\infty}^{c+\mathrm{j}\infty}F(s)\mathrm{e}^{st}\mathrm{d}s$

太复杂

（2）对简单形式的$F(s)$可以查拉氏变换表得原函数

（3）把$F(s)$分解为简单项的组合

$$F(s)=F_1(s)+F_2(s)+\cdots+F_n(s)$$

部分分式展开！

$$\Rightarrow f(t)=f_1(t)+f_2(t)+\cdots+f_n(t)$$

## 四、象函数的部分分式展开

$$F(s)=\frac{N(s)}{D(s)}=\frac{a_0s^m+a_1s^{m-1}+\cdots+a_m}{b_0s^n+b_1s^{n-1}+\cdots+b_n}\quad(n>m)$$ 象函数的一般形式

部分分式展开为： $F(s)=A+\frac{N_0(s)}{D(s)}$ → 真分式

★ **分情况讨论：**

（1）$D(s)=0$的根为不等实根（有$n$个单根分别为$p_1$，$p_2\ldots$，$p_n$）

假设$F(s)$为真分式，可将其分解为

$$F(s)=\frac{K_1}{s-p_1}+\frac{K_2}{s-p_2}+\cdots+\frac{K_n}{s-p_n}$$

$$\longrightarrow\quad f(t)=K_1e^{p_1t}+K_2e^{p_2t}+\cdots+K_ne^{p_nt}$$

如何确定该展开式？

待定系数法

# § 14.1 拉普拉斯变换

## 四、象函数的部分分式展开

$$F(s)=\frac{N(s)}{D(s)}=\frac{a_0s^m+a_1s^{m-1}+\cdots+a_m}{b_0s^n+b_1s^{n-1}+\cdots+b_n}\quad(n>m)$$

象函数的一般形式

部分分式展开为： $F(s)=A+\frac{N_0(s)}{D(s)}$

真分式

★ **分情况讨论：**

（1）$D(s)=0$的根为不等实根（有$n$个单根分别为$p_1$，$p_2\ldots$， $p_n$）

假设$F(s)$为真分式，可将其分解为

$$F(s)=\frac{K_1}{s-p_1}+\frac{K_2}{s-p_2}+\cdots+\frac{K_n}{s-p_n}$$

$$\rightarrow\quad f(t)=K_1e^{p_1t}+K_2e^{p_2t}+\cdots+K_ne^{p_nt}$$

$$K_i=(s-p_i)F(s)\big|_{s=p_i}\quad(i=1,2,\cdots,n)$$

待定系数法

留数

$F(s)$的极点

## 四、象函数的部分分式展开

【例】 求象函数 $F(s)=\dfrac{s^2+6s+3}{s^2+4s+3}$ 的原函数。

解：$F(s)$为假分式，可分解为一个多项式与真分式之和。

$$F(s)=\frac{s^2+6s+3}{s^2+4s+3}=1+\frac{2s}{s^2+4s+3}=1+\frac{k_1}{s+1}+\frac{k_2}{s+3}$$

则：$D(s)=s^2+4s+3=(s+1)(s+3)=0 \longrightarrow p_1=-1，p_2=-3$

得：$K_1=(s+1)\dfrac{2s}{s^2+4s+3}\Big|_{s=-1}=\dfrac{2s}{s+3}\Big|_{s=-1}=-1$

$$K_2=(s+3)\frac{2s}{s^2+4s+3}\Big|_{s=-3}=\frac{2s}{s+1}\Big|_{s=-3}=3$$

$$F(s)=1-\frac{1}{s+1}+\frac{3}{s+3}\xrightarrow[\text{反变换}]{\text{拉氏}}f(t)=\delta(t)-\mathrm{e}^{-t}\varepsilon(t)+3\mathrm{e}^{-3t}\varepsilon(t)$$

$$=\delta(t)+\left(3\mathrm{e}^{-3t}-\mathrm{e}^{-t}\right)\varepsilon(t)$$

# § 14.1 拉普拉斯变换

★ 分情况讨论：

（2）$D(s)=0$的根中有重根（假设$n$个根中，$p_1$为 $l$ 阶重根，其余为单根）

即 $D(s)=(s-p_1)^l(s-p_{l+1})(s-p_{l+2})\cdots(s-p_n)$

则可将$F(s)$分解为

$$F(s)=\frac{K_{11}}{(s-p_1)^l}+\frac{K_{12}}{(s-p_1)^{l-1}}+\cdots+\frac{K_{1j}}{(s-p_1)^{l-j+1}}+\cdots+\frac{K_{1l}}{s-p_1}+\sum_{i=l+1}^{n}\frac{K_i}{s-p_i}$$

其中

$$K_{11}=(s-p_1)^l F(s)\Big|_{s=p_1}$$

$$K_{12}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left[(s-p_1)^l F(s)\right]\Big|_{s=p_1}$$

$$\cdots$$

$$K_{1j}=\frac{1}{(j-1)!}\frac{\mathrm{d}^{j-1}}{\mathrm{d}s^{j-1}}\left[(s-p_1)^l F(s)\right]\Big|_{s=p_1}\quad (j=1,2,\cdots,l)$$

$$K_i=(s-p_i)F(s)\Big|_{s=p_i}\quad (i=l+1,l+2,\cdots,n)$$

## 四、象函数的部分分式展开

【例】 求象函数 $F(s)=\dfrac{7s+8}{s^4+5s^3+8s^2+4s}$ 的原函数。

解：

$$F(s)=\frac{7s+8}{s\cdot(s+1)\cdot(s+2)^2}=\frac{k_1}{s}+\frac{k_2}{s+1}+\frac{k_{31}}{(s+2)^2}+\frac{k_{32}}{s+2}$$

则：

$$K_1=sF(s)\Big|_{s=0}=\frac{7s+8}{(s+1)\cdot(s+2)^2}\Big|_{s=0}=2$$

$$K_2=(s+1)F(s)\Big|_{s=-1}=\frac{7s+8}{s(s+2)^2}\Big|_{s=-1}=-1$$

$$K_{31}=(s+2)^2F(s)\Big|_{s=-2}=\frac{7s+8}{s(s+1)}\Big|_{s=-2}=-3$$

$$K_{32}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left[(s+2)^2F(s)\right]\Big|_{s=-2}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left[\frac{7s+8}{s(s+1)}\right]\Big|_{s=-2}=-1$$

求导部分可以避免吗？

## 四、象函数的部分分式展开

$$f(t) = 2 - e^{-t} - 3te^{-2t} - e^{-2t} \quad (t > 0)$$

【例】 求象函数 $F(s) = \dfrac{7s+8}{s^4 + 5s^3 + 8s^2 + 4s}$ 的原函数。

解：

$$F(s) = \frac{7s+8}{s\cdot(s+1)\cdot(s+2)^2} = \frac{2}{s} - \frac{1}{s+1} - \frac{3}{(s+2)^2} - \frac{1}{s+2}$$

拉氏反变换

则：

$$K_1 = sF(s)\big|_{s=0} = \frac{7s+8}{(s+1)\cdot(s+2)^2}\bigg|_{s=0} = 2$$

$$K_2 = (s+1)F(s)\big|_{s=-1} = \frac{7s+8}{s(s+2)^2}\bigg|_{s=-1} = -1$$

$$K_{31} = (s+2)^2 F(s)\big|_{s=-2} = \frac{7s+8}{s(s+1)}\bigg|_{s=-2} = -3$$

$$K_{32} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left[(s+2)^2 F(s)\right]\Big|_{s=-2} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left[\frac{7s+8}{s(s+1)}\right]\bigg|_{s=-2} = -1$$

## 四、象函数的部分分式展开

★ 分情况讨论：

（3）$D(s)=0$的根中有共轭复根

假设$D(s)=0$存在一对共轭复根 $\begin{cases} p_1=\alpha+\mathrm{j}\omega \\ p_2=\alpha-\mathrm{j}\omega \end{cases}$

$$F(s)=\frac{N(s)}{D(s)}=\cdots+\frac{K}{(s+\alpha-\mathrm{j}\omega)}+\frac{K^*}{(s+\alpha+\mathrm{j}\omega)}+\cdots$$

$$\rightarrow \boxed{f(t)=\cdots+2|K|\mathrm{e}^{-\alpha t}\cos(\omega t+\theta)+\cdots \quad (t>0)}$$

亦可把一对共轭复根作为整体考虑

$$F(s)=\frac{N(s)}{D(s)}=\cdots+\frac{A(s+\alpha)+B\omega}{(s+\alpha)^2+\omega^2}+\cdots$$

避免复数运算

$$\rightarrow \boxed{f(t)=\cdots+\left(A\mathrm{e}^{-\alpha t}\cos\omega t+B\mathrm{e}^{-\alpha t}\sin\omega t\right)+\cdots \quad (t>0)}$$

## 四、象函数的部分分式展开

【例】 求象函数 $F(s)=\dfrac{s+2}{s^2+6s+10}$ 的原函数。

解：

$$F(s)=\frac{s+2}{s^2+6s+10}=\frac{s+2}{(s+3)^2+1^2}$$

$$=\boxed{\frac{s+3}{(s+3)^2+1^2}}-\boxed{\frac{1}{(s+3)^2+1^2}}$$

经拉氏反变换

则： $f(t)=\mathrm{e}^{-3t}\cos t-\mathrm{e}^{-3t}\sin t$

$$=\mathrm{e}^{-3t}(\cos t-\sin t)$$

$$=\sqrt{2}\mathrm{e}^{-3t}\cos(t+45^\circ)\quad (t>0)$$

# 电 路 理 论

## Principles of Electric Circuits

# 第十四章 线性动态电路的复频域分析

## §14.2 运算电路

# § 14.2 运算电路

时域 —拉氏变换→ 复频域

线性动态电路 —?→ 运算电路

线性微分方程 —拉氏变换→ 代数方程

求解 ↓　　　　　　　　　　↓ 求解

时域解 ←拉氏反变换— 复频域解

能否直接由电路结构列写出**复频域的代数方程**？

# § 14.2 运算电路

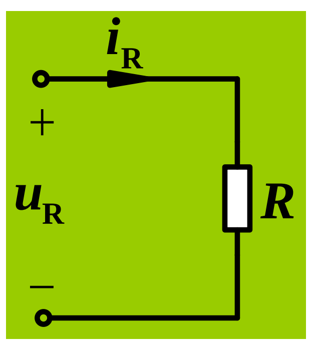
## 一、两类约束的复频域形式

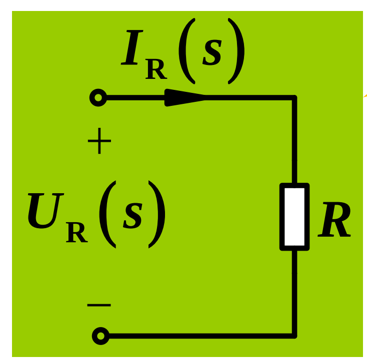
### 1. 基尔霍夫定律的复频域形式

| | KCL | KVL |
|---|---|---|
| 时域： | $\sum i(t)=0$ | $\sum u(t)=0$ |
| 复频域： | $\sum I(s)=0$ | $\sum U(s)=0$ |

### 2. 线性元件伏安关系的复频域形式

a. 线性电阻的 *s* 域模型




电阻的运算电路

时域：　$u_R=Ri_R$　　复频域：　$U_R(s)=RI_R(s)$

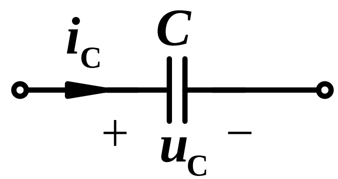
# § 14.2 运算电路

## 一、两类约束的复频域形式

### 2. 线性元件伏安关系的复频域形式

### b. 线性电容的 *s* 域模型

时域:

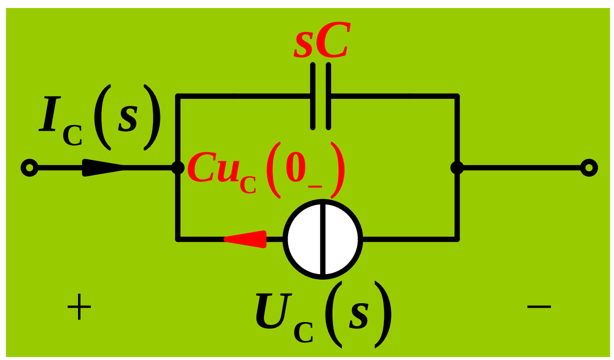



$$i_C = C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}$$

拉氏变换

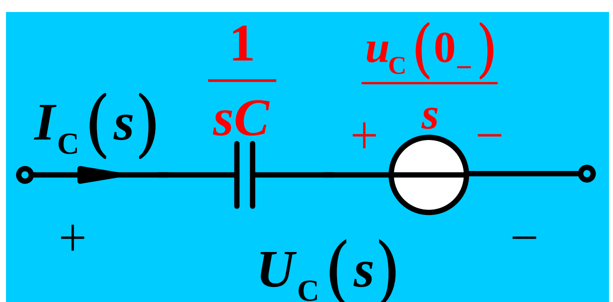
$$I_C(s) = sCU_C(s) - Cu_C(0_-)$$

复频域:




等效变换

电容的运算电路




$$U_C(s) = \frac{1}{sC}I_C(s) + \frac{u_C(0_-)}{s}$$

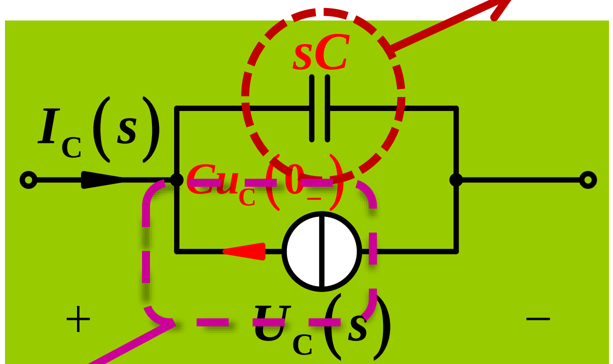
# § 14.2 运算电路

## 一、两类约束的复频域形式

### 2. 线性元件伏安关系的复频域形式

#### b. 线性电容的 $s$ 域模型

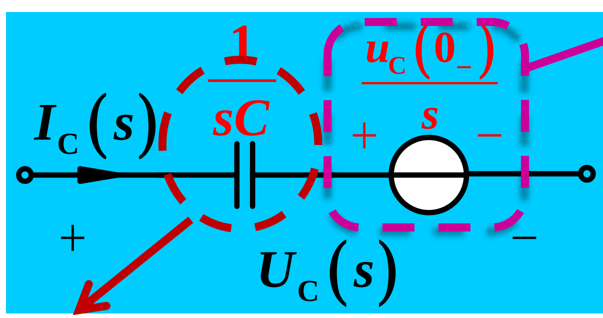
电容的复频率导纳/运算导纳




附加电流源

$$I_C(s) = sCU_C(s) - Cu_C(0_-)$$

附加电压源




$$U_C(s) = \frac{1}{sC} I_C(s) + \frac{u_C(0_-)}{s}$$

电容的复频率阻抗/运算阻抗

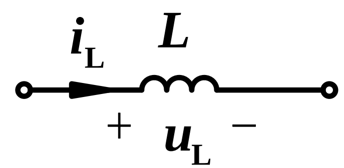
# § 14.2 运算电路

## 一、两类约束的复频域形式

### 2. 线性元件伏安关系的复频域形式

### c. 线性电感的 $s$ 域模型

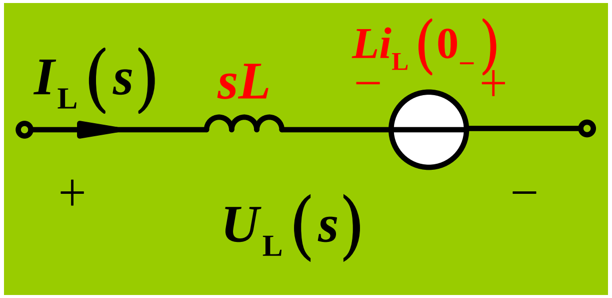
时域:



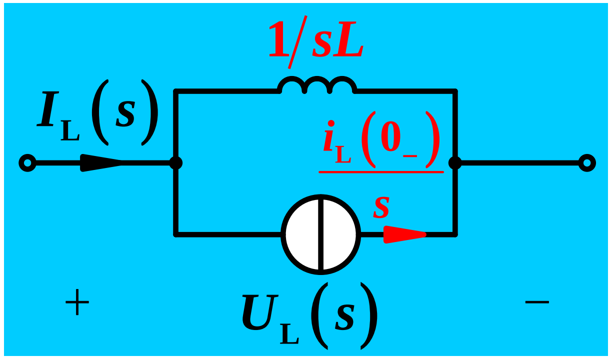

$$u_L = L\frac{di_L}{dt}$$

拉氏变换

复频域:




$$U_L(s) = sLI_L(s) - Li_L(0_-)$$




电感的运算电路

等效变换

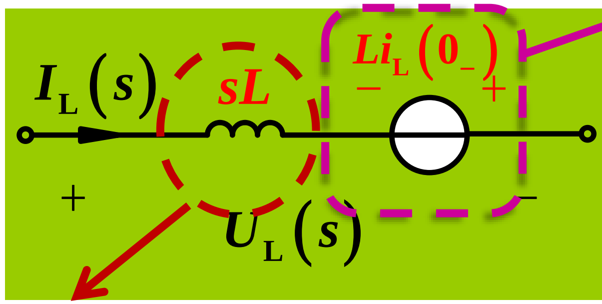
$$I_L(s) = \frac{1}{sL}U_L(s) + \frac{i_L(0_-)}{s}$$

## 一、两类约束的复频域形式

### 2. 线性元件伏安关系的复频域形式

#### c. 线性电感的 s 域模型

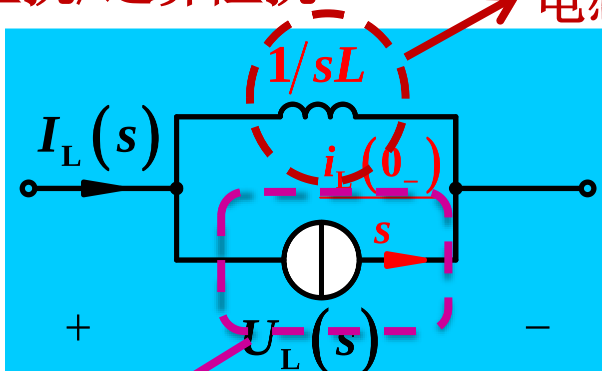
附加电压源




$$U_L(s)=sLI_L(s)-Li_L(0_-)$$

电感的复频率阻抗/运算阻抗

电感的复频率导纳/运算导纳




$$I_L(s)=\frac{1}{sL}U_L(s)+\frac{i_L(0_-)}{s}$$

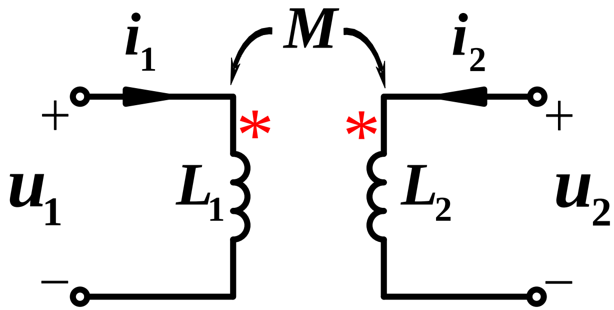
附加电流源

# § 14.2 运算电路

## 一、两类约束的复频域形式

### 2. 线性元件伏安关系的复频域形式

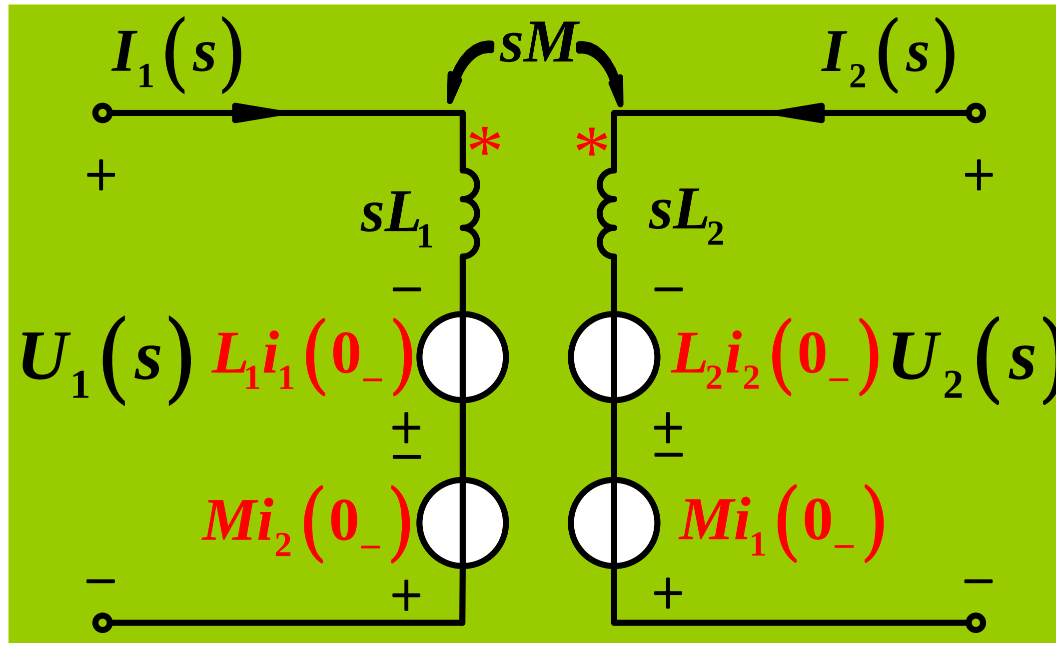
**耦合电感的 $s$ 域模型**




耦合电感

$$u_1 = L_1\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

$$u_2 = M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_2\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$




耦合电感 $s$ 域模型

拉氏变换

$$\begin{cases} U_1(s) = sL_1I_1(s) - L_1i_1(0\_) + sMI_2(s) - Mi_2(0\_) \\ U_2(s) = sL_2I_2(s) - L_2i_2(0\_) + sMI_1(s) - Mi_1(0\_) \end{cases}$$

# § 14.2 运算电路

## 二、运算电路

### 1. 元件的运算阻抗和运算导纳

在零状态下：

| 电阻 | 电容 | 电感 |
| --- | --- | --- |
| $U_R(s)=RI_R(s)$ | $U_C(s)=I_C(s)/sC$ | $U_L(s)=sLI_L(s)$ |
| 或 | 或 | 或 |
| $I_R(s)=GU_R(s)$ | $I_C(s)=sCU_C(s)$ | $I_L(s)=U_L(s)/sL$ |

运算阻抗 $U(s)=Z(s)I(s)$

$$\begin{cases} Z_R(s)=R \\ Z_C(s)=1/sC \\ Z_L(s)=sL \end{cases}$$

运算导纳 $I(s)=Y(s)U(s)$

$$\begin{cases} Y_R(s)=G \\ Y_C(s)=sC \\ Y_L(s)=1/sL \end{cases}$$

# § 14.2 运算电路

## 二、运算电路

2. 运算电路 （电路的复频域模型）

1. 动态电路中的电压、电流用象函数表示：

2. 电压源的电压和电流源的电流用象函数表示（包括受控源）：

3. 电路元件分别用 *s* 域模型替换。

线性动态电路 → 运算电路

基尔霍夫定律的*s*域形式

满足

元件伏安关系的*s*域形式

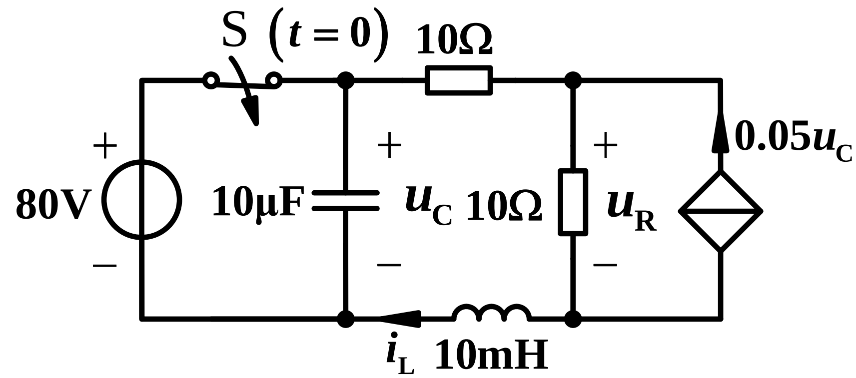
线性微分方程 $\xrightarrow{\text{拉氏变换}}$ 代数方程

直接得到~~

# § 14.2 运算电路

## 二、运算电路

【例】电路原已达稳态，试画出该电路的运算电路。

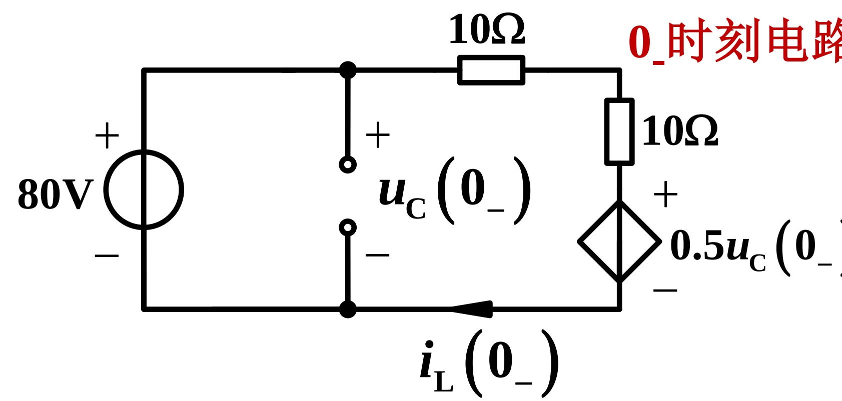


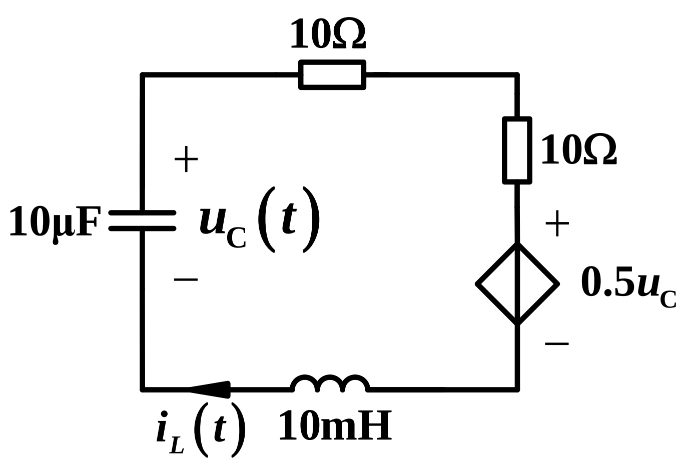

解：

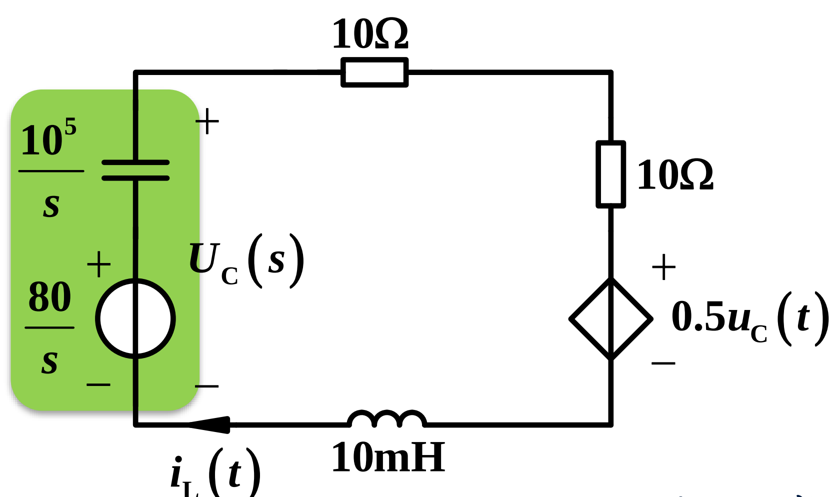
确定电容电压和电感电流**起始值**

$$u_C(0_-)=80\ \text{V}$$

$$i_L(0_-)=\frac{80-0.5u_C(0_-)}{10+10}=2\ \text{A}$$



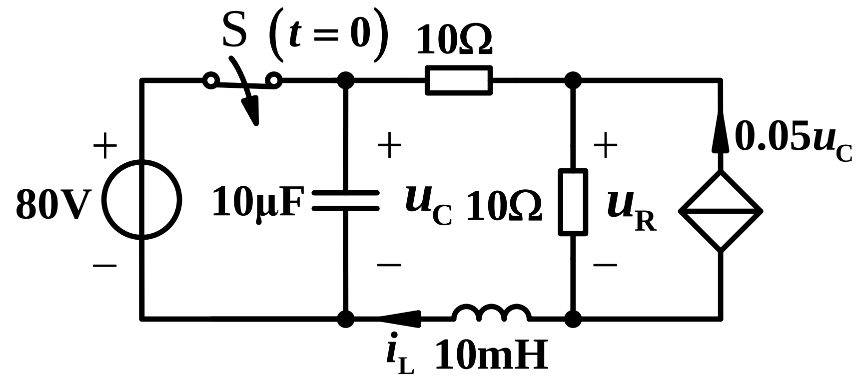



# § 14.2 运算电路

## 二、运算电路

【例】电路原已达稳态，试画出该电路的运算电路。

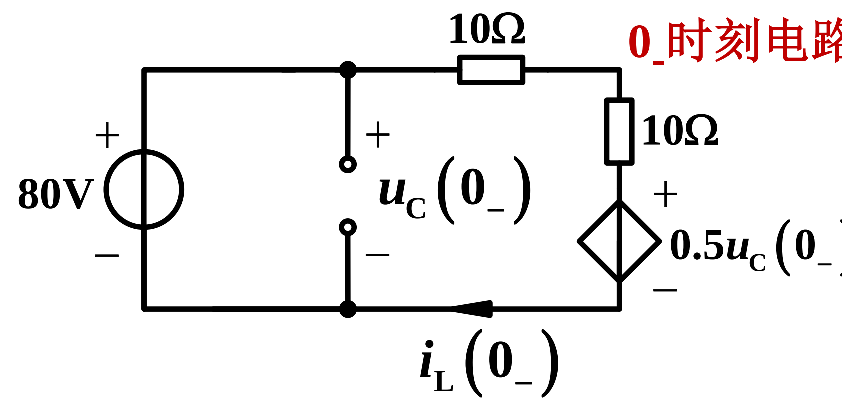



解：

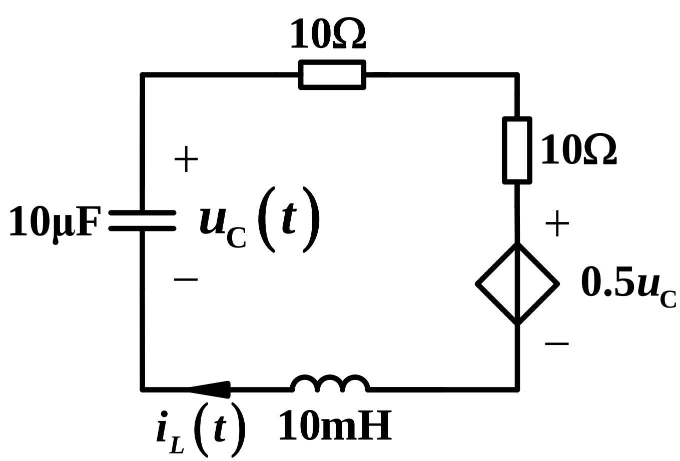
确定电容电压和电感电流**起始值**

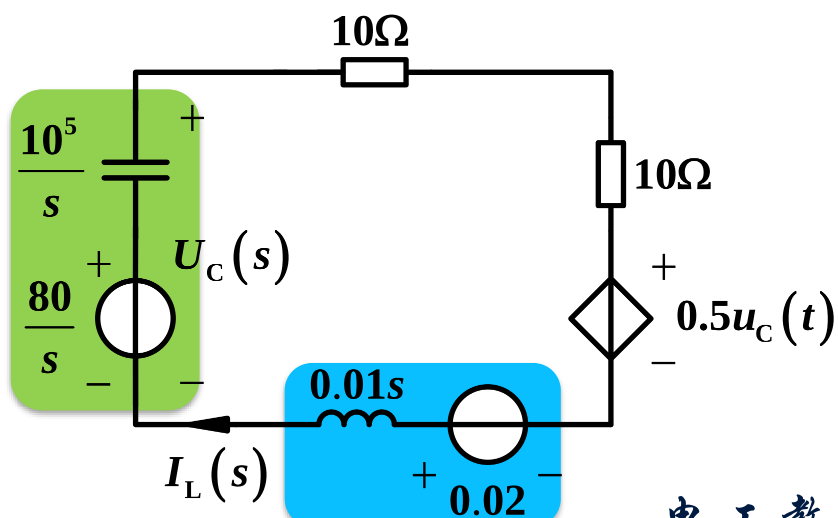
$$u_C(0_-)=80\ \text{V}$$

$$i_L(0_-)=\frac{80-0.5u_C(0_-)}{10+10}=2\ \text{A}$$



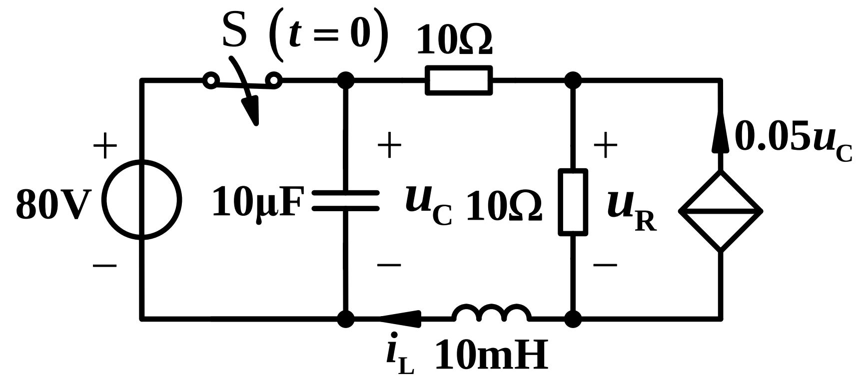

$0_-$时刻电路



## 二、运算电路

【例】电路原已达稳态，试画出该电路的运算电路。



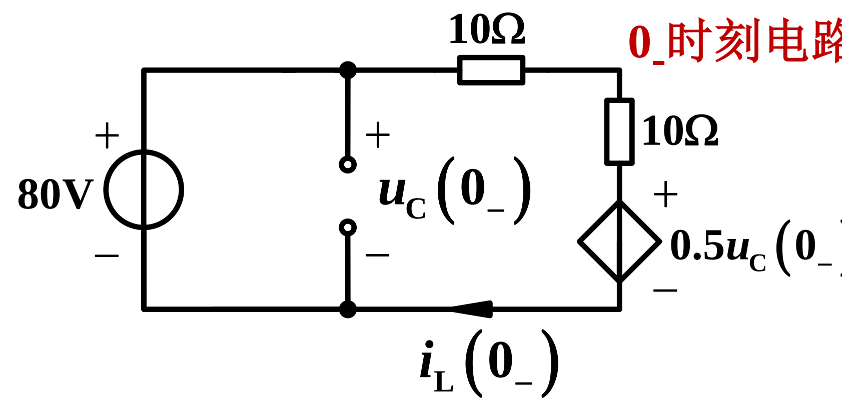

解：

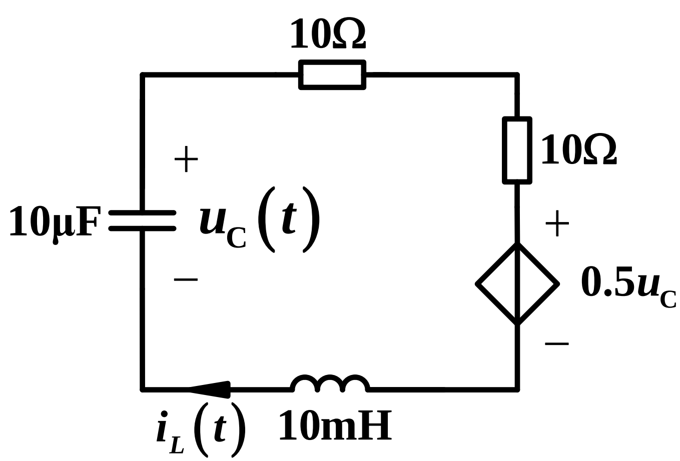
确定电容电压和电感电流**起始值**

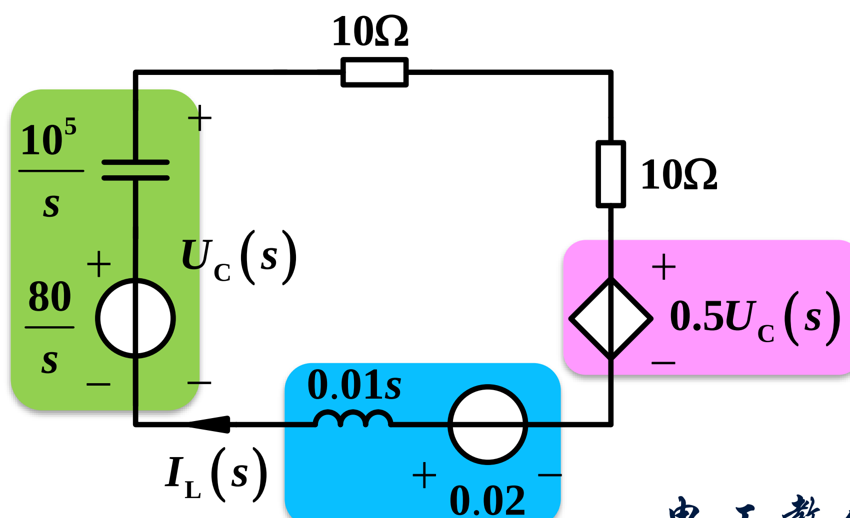
$$u_C(0_-) = 80\ \text{V}$$

$$i_L(0_-) = \frac{80 - 0.5u_C(0_-)}{10+10} = 2\ \text{A}$$

0_时刻电路

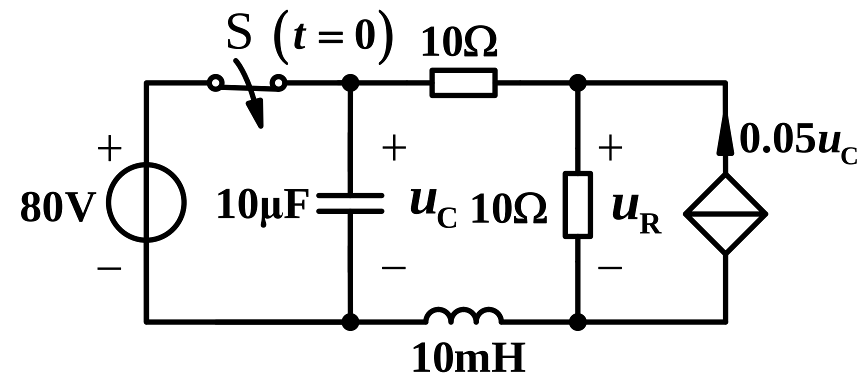


## 二、运算电路

【例】电路原已达稳态，试画出该电路的运算电路。




解:

确定电容电压和电感电流**起始值**

$$u_C(0_-) = 80\ \text{V}$$

$$i_L(0_-) = \frac{80 - 0.5u_C(0_-)}{10+10} = 2\ \text{A}$$

0_时刻电路