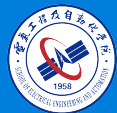




江苏师范大学
JIANGSU NORMAL UNIVERSITY

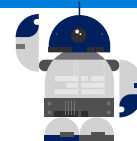


电气工程及自动化学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING AND AUTOMATION

电路理论及应用

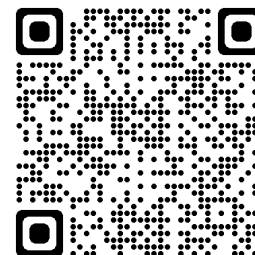


电路
分析



第9章 线性动态电路的频域分析

李灿 | 12#503A | lic@jsnu.edu.cn | <https://sslic.cn/cs>





本章内容

■ 拉普拉斯变换

◇ 定义 性质 反变换 解微分方程

■ 运算电路

◇ 基尔霍夫定律

◇ 元件的电路模型

■ 线性动态电路的复频域分析

◇ 计算电路响应



§9.1 拉普拉斯变换的定义



9.1 拉普拉斯变换的定义

■ 定义

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

 $s = \sigma + j\omega$: 复频率

 $f(t)$: 原函数

 $F(s)$: 象函数

■ 符号记法

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$$

$$I(s) = \mathcal{L}[i(t)]$$

$$U(s) = \mathcal{L}[u(t)]$$

■ 作用

✧ 时域函数 \rightarrow 复变函数, 时域 \rightarrow 复频域



9.1 拉普拉斯变换的定义

例9-1~9-3

例 求下列函数的象函数。

$$f_1(t) = e^{-at}$$

$$f_2(t) = \varepsilon(t)$$

$$f_3(t) = \delta(t)$$

解 (1) $F_1(s) = \mathcal{L}[f_1(t)]$

$$= \int_{0_-}^{\infty} e^{-at} e^{-st} dt = \int_{0_-}^{\infty} e^{-(s+a)t} dt = \frac{1}{s+a}$$

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

$$= \int_{0_-}^{\infty} 1 \cdot e^{-st} dt = \frac{1}{s}$$

(3) $F_3(s) = \mathcal{L}[f_3(t)]$

$$= \int_{0_-}^{\infty} \delta(t) e^{-st} dt = 1$$



§9.2 拉普拉斯变换的基本性质



9.2 拉普拉斯变换的基本性质

■ 线性性质

$$\mathcal{L}[k_1 f_1(t) + k_2 f_2(t)] = k_1 F_1(s) + k_2 F_2(s)$$

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

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

■ 微分性质

$$\mathcal{L}[f'(t)] = \mathcal{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = sF(s) - f(0_-)$$

$$\Rightarrow \mathcal{L}[f(t)] = F(s)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[f''(t)] &= s[F(s) - f(0_-)] - f'(0_-) \\ &= s^2 F(s) - sF(s) - f'(0_-) \end{aligned}$$

■ 积分性质

$$\mathcal{L}\left[\int_{0_-}^t f(\xi) d\xi\right] = \frac{1}{s} F(s)$$

$$\Rightarrow \mathcal{L}[f(t)] = F(s)$$



§9.3 拉普拉斯反变换



9.3 拉普拉斯反变换

■ 定义式

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\omega}^{\sigma+j\omega} F(s)e^{st} ds$$

复变函数积分，难求！

■ 解决思路

◇ 象函数分解为简单象函数（其原函数易知）的线性组合

• 例如：

$$\mathcal{L}[e^{-at}] = \frac{1}{s+a}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+a}\right] = e^{-at}$$

$$\mathcal{L}[\varepsilon(t)] = \frac{1}{s}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s}\right] = \varepsilon(t)$$

$$\mathcal{L}[\delta(t)] = 1$$

$$\mathcal{L}^{-1}[1] = \delta(t)$$



9.3 拉普拉斯反变换

■ 解决思路

✧ 象函数分解为简单象函数（其原函数易知）的线性组合

$$\frac{s}{s+1} = 1 - \frac{1}{s+1} \quad \Rightarrow \quad \text{原函数: } \delta(t) - e^{-t}\varepsilon(t)$$

✧ 下列象函数如何分解？

$$F(s) = \frac{2s+1}{s^3+5s^2+6s}$$

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



9.3 拉普拉斯反变换

■ 部分分式展开法

◇ 适用理由：电路响应的象函数通常为s的有理分式

$$F(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0} \quad n \geq m$$

◇ 化为有理真分式

$$F(s) = \boxed{A} + \frac{N_0(s)}{\boxed{D(s)}}$$

因式分解：单根、共轭复根、重根

原函数： $A\delta(t)$



9.3 拉普拉斯反变换

■ 部分分式展开法

◇ 单根情形

$$F(s) = \frac{N_0(s)}{D(s)} = \frac{K_1}{s - p_1} + \frac{K_2}{s - p_2} + \cdots + \frac{K_n}{s - p_n}$$

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



$$\begin{aligned} K_1 &= (s - p_1)F(s) \Big|_{s=p_1} \\ K_2 &= (s - p_2)F(s) \Big|_{s=p_2} \\ K_3 &= (s - p_3)F(s) \Big|_{s=p_3} \end{aligned}$$

$$f(t) = \sum_{i=1}^n K_i e^{p_i t}$$



9.3 拉普拉斯反变换

例9-10

例 求 $F(s) = \frac{2s + 1}{s^3 + 5s^2 + 6s}$ 的原函数 $f(t)$ 。

解 (1) 求特征方程的根

$$s^3 + 5s^2 + 6s = 0 \Rightarrow p_1 = 0, p_2 = -2, p_3 = -3$$

(2) 求部分分式展开式及待定系数

$$F(s) = \frac{2s + 1}{s(s + 2)(s + 3)} = \frac{K_1}{s} + \frac{K_2}{s + 2} + \frac{K_3}{s + 3}$$

$$K_1 = s \cdot \frac{2s + 1}{s(s + 2)(s + 3)} \Big|_{s=0} = \frac{1}{6}$$

(3) 求原函数

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

$$f(t) = \frac{1}{6} + \frac{3}{2} e^{-2t} - \frac{5}{3} e^{-3t}$$

$$K_3 = (s + 3) \cdot \frac{2s + 1}{s(s + 2)(s + 3)} \Big|_{s=-3} = -\frac{5}{3}$$



9.3 拉普拉斯反变换

部分分式展开法

◇ 共轭复根情形（以一对为例）

$$F(s) = \frac{N_0(s)}{D(s)} = \frac{K_1}{s - p_1} + \frac{K_2}{s - p_2}$$



$$\begin{aligned} K_1 &= (s - p_1)F(s) \Big|_{s=p_1} & p_1 &= \alpha + j\omega \\ K_2 &= (s - p_2)F(s) \Big|_{s=p_2} & p_2 &= \alpha - j\omega \end{aligned}$$

K_1 和 K_2 为共轭复数

$$K_1 = |K_1| e^{j\theta_1}$$

$$K_2 = |K_1| e^{-j\theta_1}$$

$$\begin{aligned} f(t) &= K_1 e^{p_1 t} + K_2 e^{p_2 t} \\ &= |K_1| e^{\alpha t} \left(e^{j(\omega t + \theta_1)t} + e^{-j(\omega t + \theta_1)t} \right) \\ &= 2|K_1| e^{\alpha t} \cos(\omega t + \theta_1) \end{aligned}$$

9.3 拉普拉斯反变换

例9-11

例 求 $F(s) = \frac{s+3}{s^2+2s+5}$ 的原函数 $f(t)$ 。

解 (1) 求特征方程的根

$$s^2 + 2s + 5 = 0 \quad \Rightarrow \quad p_1 = -1 + j2, \quad p_2 = -1 - j2$$

(2) 求部分分式展开式及待定系数

$$F(s) = \frac{s+3}{s^2+2s+5} = \frac{K_1}{s+1-j2} + \frac{K_2}{s+1+j2}$$

$$K_1 = (s+1-j2) \cdot \frac{s+3}{s^2+2s+5} \Big|_{s=-1+j2} = \frac{1}{2}(1-j) = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-j\frac{\pi}{4}} \quad K_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{j\frac{\pi}{4}}$$

(3) 求原函数

$$f(t) = \sqrt{2} e^{-t} \cos\left(2t - \frac{\pi}{4}\right)$$



9.3 拉普拉斯反变换

■ 部分分式展开法

◇ 重根情形（以二重根为例）

$$F(s) = \frac{N_0(s)}{D(s)} = \frac{K_{12}}{s - p_1} + \frac{K_{11}}{(s - p_1)^2} + \frac{K_2}{s - p_2} + \cdots + \frac{K_{n-1}}{s - p_{n-1}}$$



$$K_{11} = (s - p_1)^2 F(s) \Big|_{s=p_1}$$

$$K_{12} = \frac{d}{ds} [(s - p_1)^2 F(s)] \Big|_{s=p_1}$$

$$K_2 = (s - p_2) F(s) \Big|_{s=p_2}$$

$$K_3 = (s - p_3) F(s) \Big|_{s=p_3}$$

$$f(t) = (K_{11}t + K_{12})e^{p_1 t} + \sum_{i=2}^{n-1} K_i e^{p_i t}$$



9.3 拉普拉斯反变换

补充

例 求 $F(s) = \frac{s-2}{s(s+1)^2}$ 的原函数 $f(t)$ 。

解 (1) 求特征方程的根

$$s(s+1)^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad p_1 = -1 \text{ (二重)}, p_2 = 0$$

(2) 求部分分式展开式及待定系数

$$F(s) = \frac{s-2}{s(s+1)^2} = \frac{K_{11}}{(s+1)^2} + \frac{K_{12}}{s+1} + \frac{K_2}{s}$$

$$K_{11} = (s+1)^2 \cdot \frac{s-2}{s(s+1)^2} \Big|_{s=-1} = 3$$

$$K_{12} = \frac{d}{ds} \left[(s+1)^2 \cdot \frac{s-2}{s(s+1)^2} \right] \Big|_{s=-1} = 2 \quad (3) \text{ 求原函数}$$

$$K_2 = s \cdot \frac{s-2}{s(s+1)^2} \Big|_{s=0} = -2$$

$$f(t) = (3t+2)e^{-t} - 2$$



9.3 拉普拉斯反变换：解微分方程

例9-13

例 请用拉氏变换法求解微分方程。

$$2 \frac{dy}{dt} + 4y(t) = e^{-t} \varepsilon(t), \quad y(0_-) = 2$$

解 (1) 利用拉氏变换的微分性质，对微分方程两端取拉氏变换

$$2[sY(s) - y(0_-)] + 4Y(s) = \frac{1}{s+1}$$

(2) 代入初始条件得

$$Y(s) = \frac{4s+5}{2(s+1)(s+2)} = \frac{1}{2(s+1)} + \frac{3}{2(s+2)}$$

(3) 进行拉氏反变换

$$y(t) = \left(\frac{1}{2} e^{-t} + \frac{3}{2} e^{-2t} \right) \varepsilon(t)$$

9.3 拉普拉斯反变换：解微分方程

例9-13

例 请用拉氏变换法求解微分方程。

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 3 \frac{dy}{dt} + 2y = t\varepsilon(t), \quad y(0_-) = 1, \quad \frac{dy(0_-)}{dt} = 2$$

解 (1) 利用拉氏变换的微分性质，对微分方程两端取拉氏变换

$$[s^2 Y(s) - sy(0_-) - y'(0_-)] + 3[sY(s) - y(0_-)] + 2Y(s) = \frac{1}{s^2}$$

(2) 代入初始条件得

$$Y(s) = \frac{s^3 + 5s^2 + 1}{s^2(s+1)(s+2)} = \frac{1/2}{s^2} + \frac{-4/3}{s} + \frac{5}{s+1} + \frac{-13/4}{s+2}$$

(3) 进行拉氏反变换

$$y(t) = \left(\frac{1}{2}t - \frac{3}{4} + 5e^{-t} - \frac{13}{4}e^{-2t} \right) \varepsilon(t)$$



§9.4 运算电路

无需列写时域微分方程，直接通过 s 域电路模型
(即运算电路) 列写代数方程求解。



9.4 运算电路

■ KVL、KCL、VCR

$$\sum u(t) = 0$$

$$\sum i(t) = 0$$

$\xleftrightarrow{\mathcal{L}}$

$$\sum U(s) = 0$$

$$\sum I(s) = 0$$

$$u_R(t) = Ri_R(t)$$

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$$

$\xleftrightarrow{\mathcal{L}}$

$$U_R(s) = RI_R(s)$$

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

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

时域

s域

9.4 运算电路

■ VCR

$$U_R(s) = RI_R(s)$$

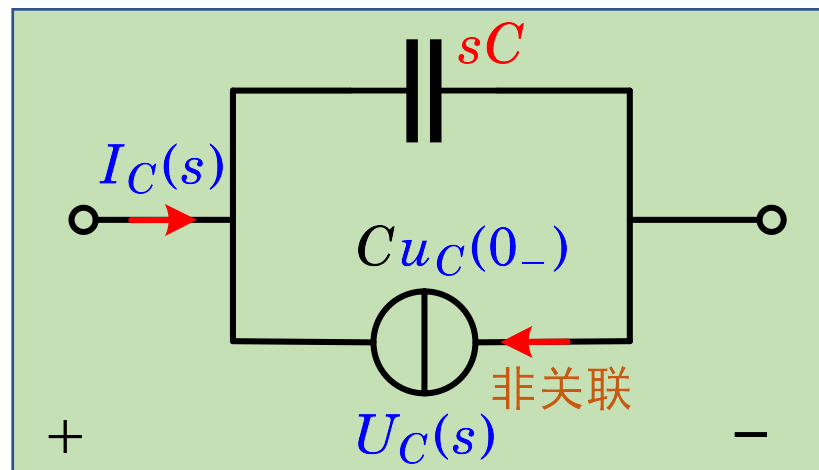
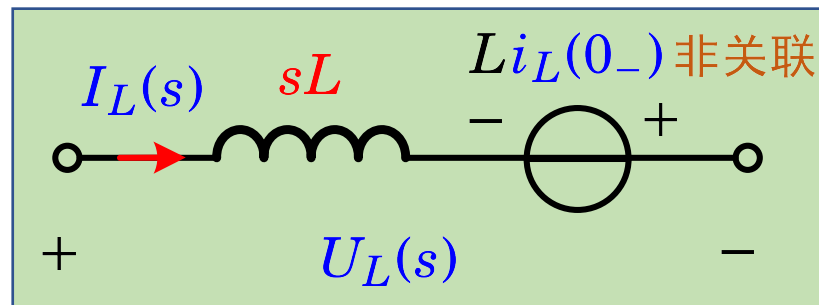
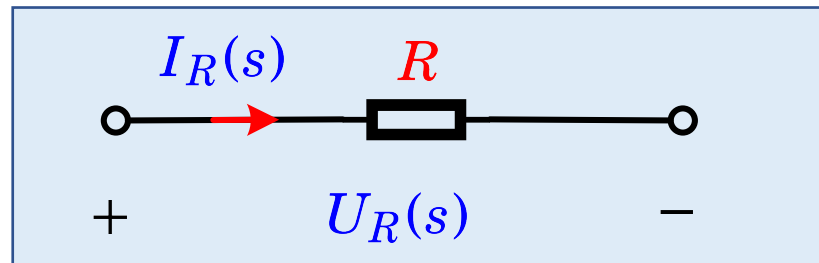
$$U_L(s) = sLI_L(s) - Li_L(0_-)$$

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

运算阻抗： sL , $\frac{1}{sC}$

运算导纳： $\frac{1}{sL}$, sC

附加电源： $Li_L(0_-)$, $Cu_C(0_-)$

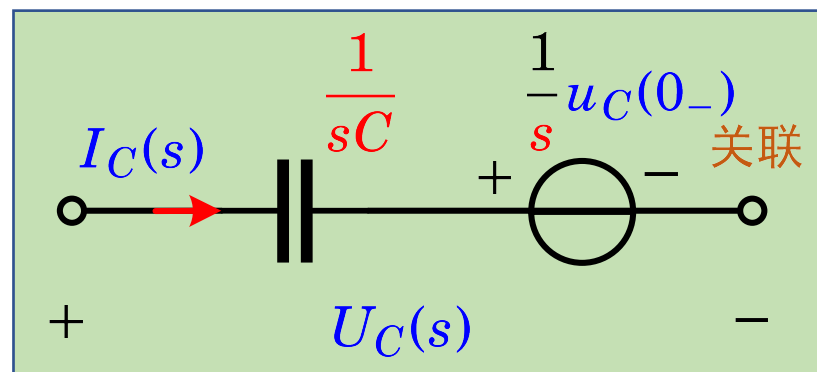
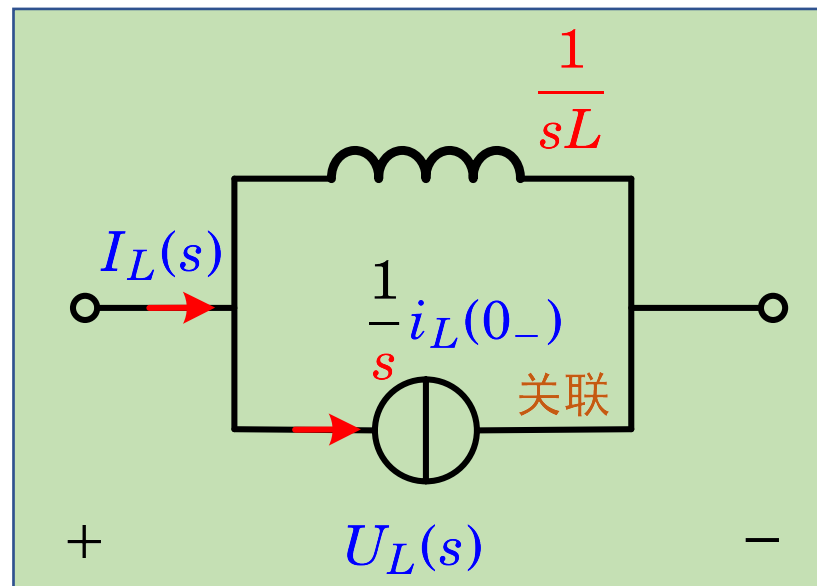


9.4 运算电路

■ VCR

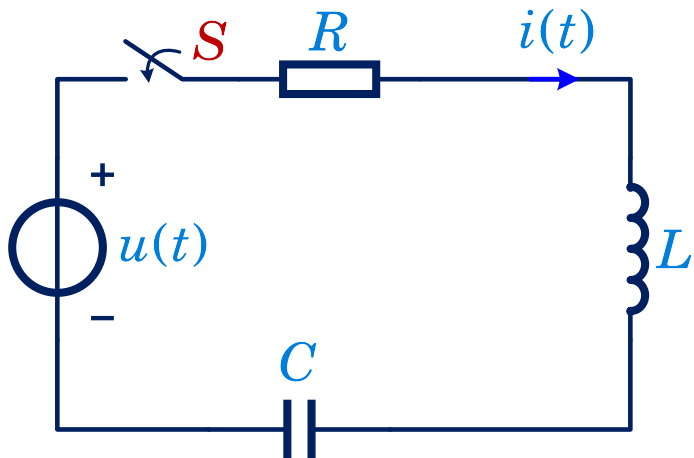
$$I_L(s) = \frac{1}{sL} U_L(s) + \frac{1}{s} i_L(0_-)$$

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

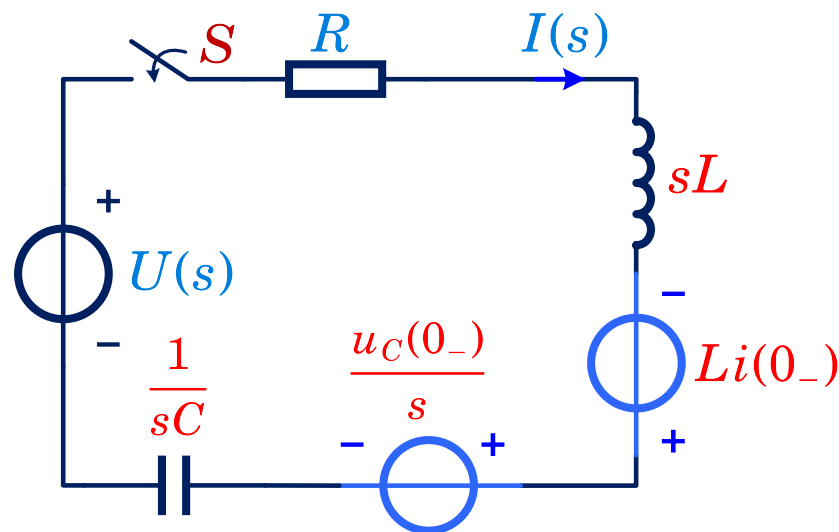


9.4 运算电路

RLC串联电路



时域电路



运算电路

$$RI(s) + sLI(s) - Li(0_-) + \frac{u_C(0_-)}{s} + \frac{1}{sC}I(s) = U(s)$$

$$\left(R + sL + \frac{1}{sC} \right) I(s) = U(s) + Li(0_-) - \frac{u_C(0_-)}{s}$$

运算阻抗

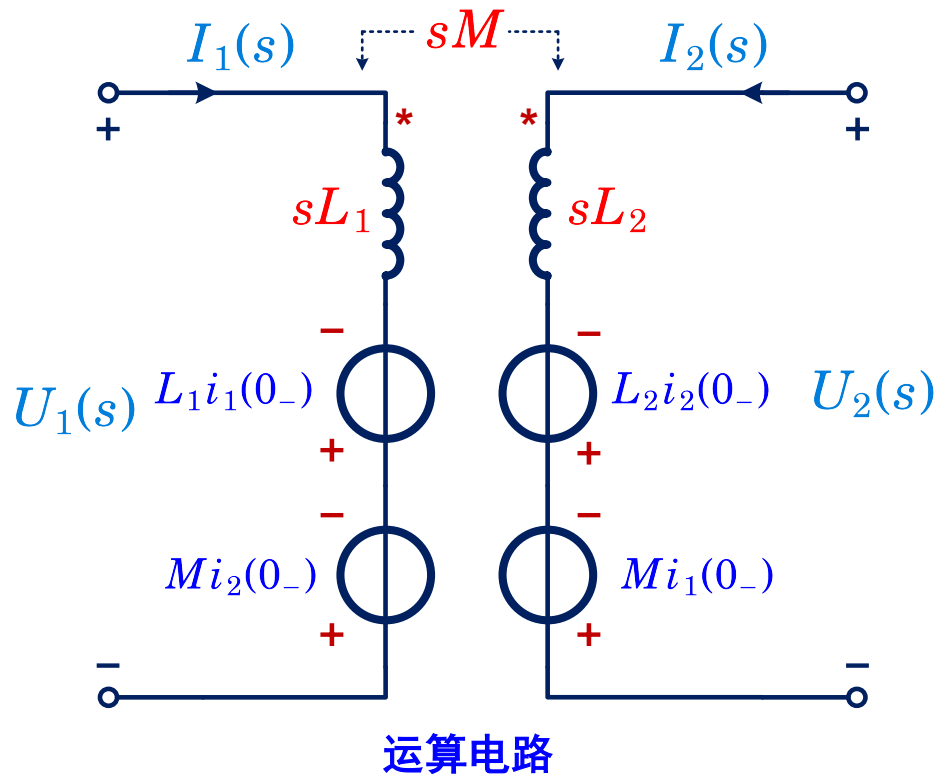
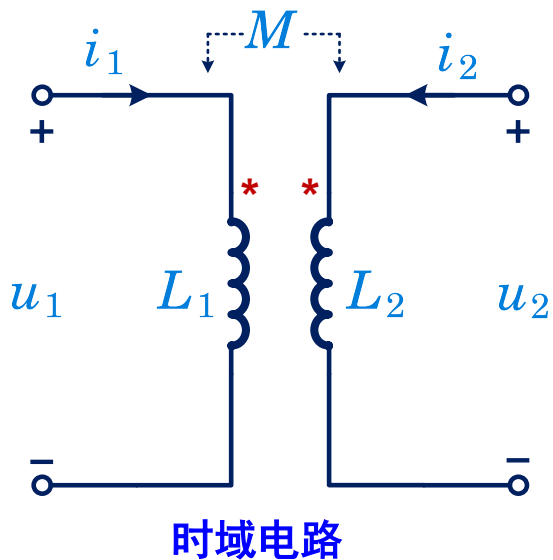
欧姆定律运算形式

$$Z(s)I(s) = U(s)$$



9.4 运算电路

■ 耦合电感元件



$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 &= L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\}$$

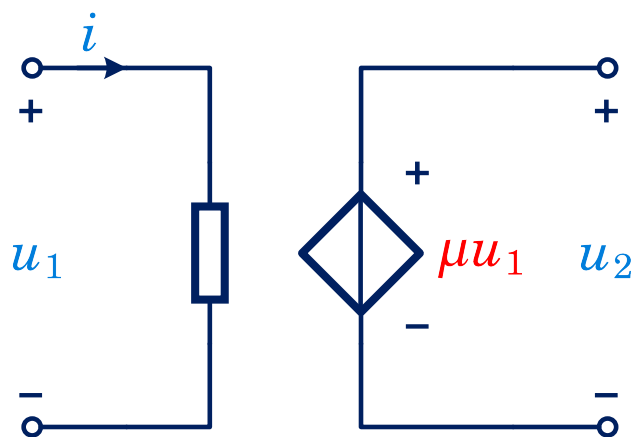
$$U_1(s) = sL_1 I_1(s) - L_1 i_1(0_-) + sM I_1(s) - M i_2(0_-)$$

$$U_2(s) = sL_2 I_2(s) - L_2 i_2(0_-) + sM I_1(s) - M i_1(0_-)$$

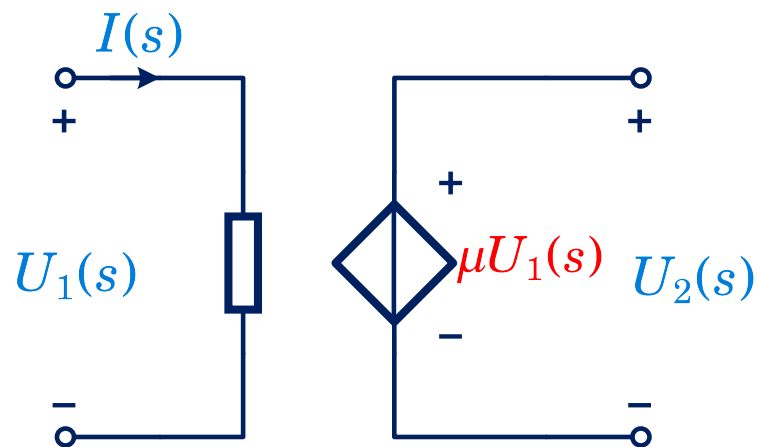
sM —— 互感运算阻抗

9.4 运算电路

■ 受控源



时域电路

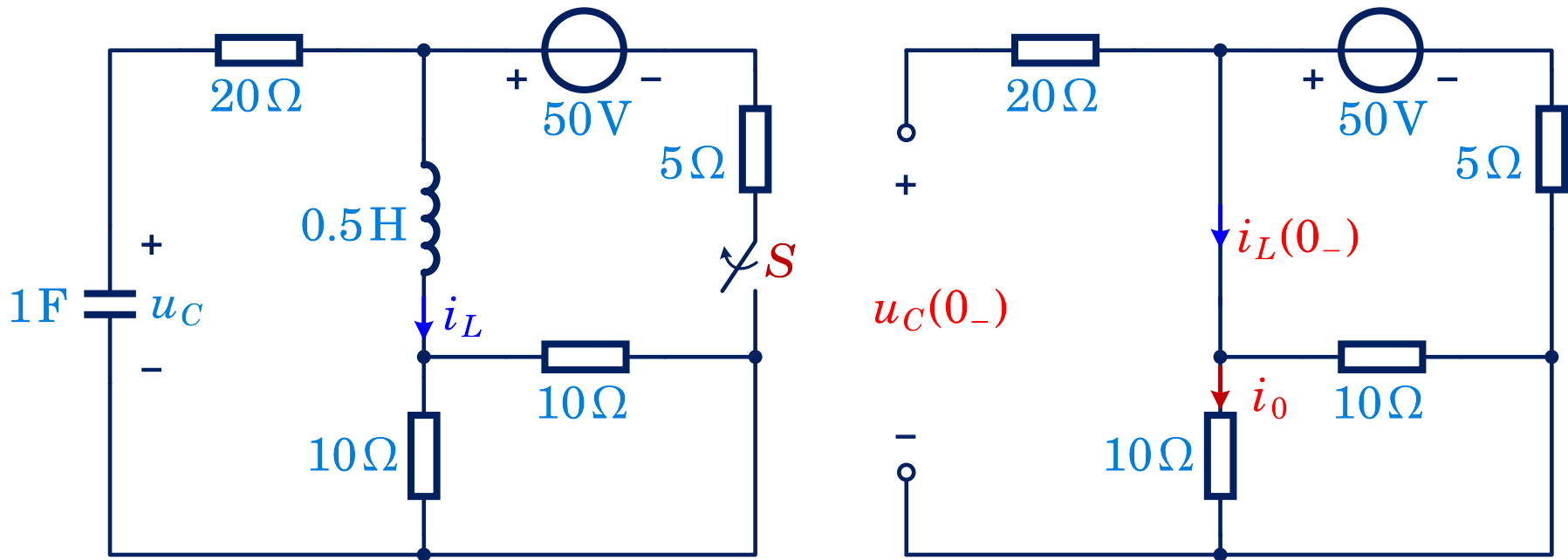


运算电路

9.4 运算电路

例9-14

例 图示电路的开关在 $t = 0$ 时打开，画出运算电路。



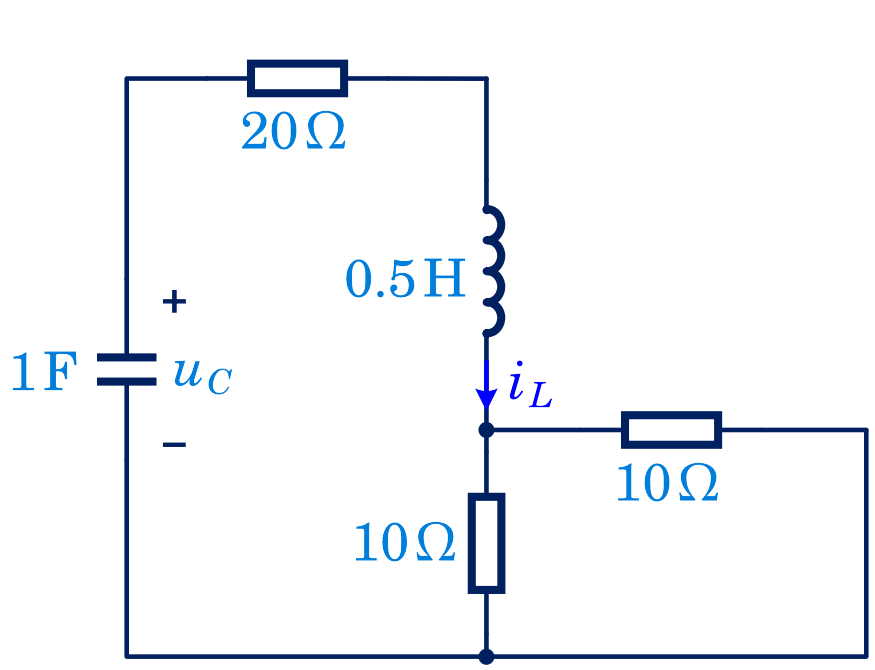
解 计算初值（先绘出换路前瞬间的等效电路图）（网孔电流法）

$$\left. \begin{aligned} 15i_L(0_-) - 10i_0 &= 50 \\ -10i_L(0_-) + 20i_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} i_L(0_-) &= 5\text{A} & i_0 &= 2.5\text{A} \\ u_C(0_-) &= 10i_0 = 25\text{V} \end{aligned}$$

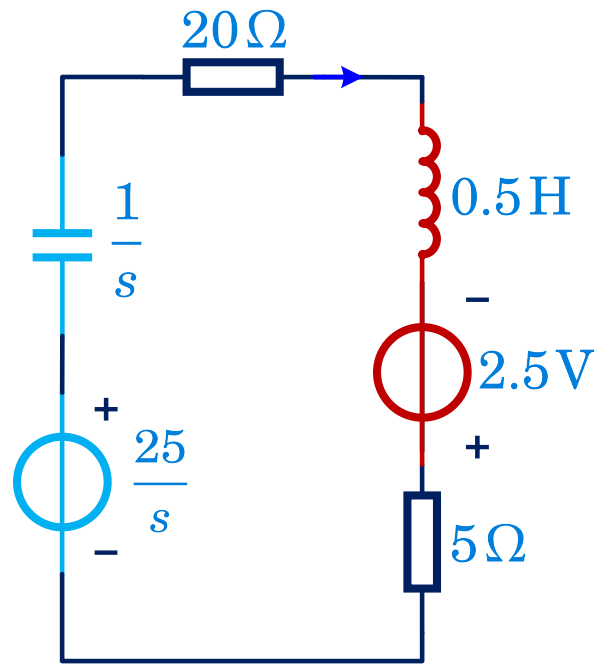
9.4 运算电路

例9-14

例 图示电路的开关在 $t = 0$ 时打开，画出运算电路。



»»»



解 开关打开后，去掉开路部分，绘制运算电路

$$i_L(0_-) = 5A$$

$$u_C(0_-) = 25V$$



§9.5 线性动态电路的复频域分析



9.5 线性动态电路的复频域分析

■ 复频域分析法的主要步骤

- ① 根据时域电路模型，计算换路前的电容电压 $u_C(0_-)$ 和电感电流 $i_L(0_-)$
确定运算电路中电感和电容的附件电源，画出换路后的运算电路
- ② 列写运算形式的电路方程，求出待求量的象函数
- ③ 部分分式展开法求象函数的拉氏反变换

9.5 线性动态电路的复频域分析

例9-15

例 图示 RC 串联电路的激励为电压源 u_s ，电容电压初始状态为 $u_C(0_-) = 0$ 。

(1) 若 $u_s = \varepsilon(t)$ ，求电路响应 $u_C(t)$ ；

(2) 若 $u_s = \delta(t)$ ，求电路响应 $u_C(t)$ ；

解 (1) 阶跃响应：

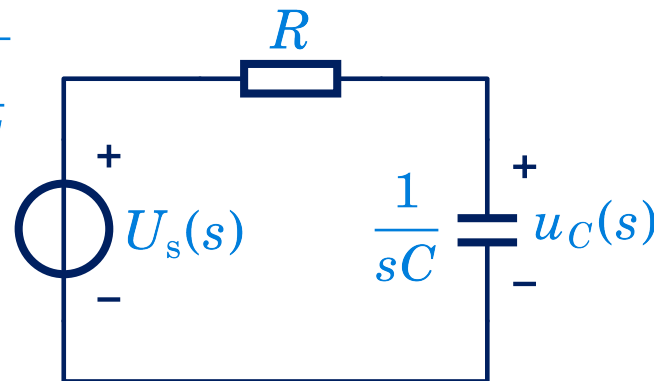
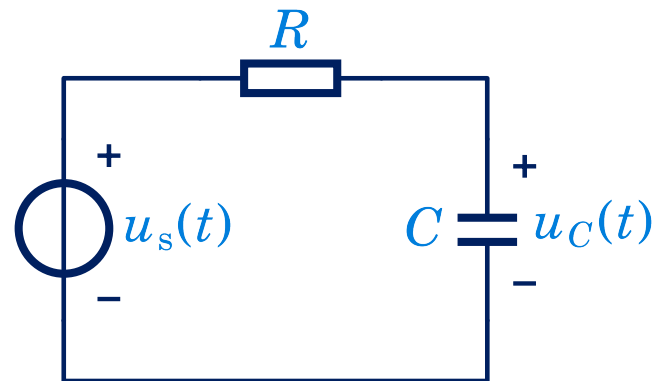
绘制运算电路图（零初值无附加电源）

分压公式

$$u_C(s) = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} U_s(s) = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} \frac{1}{s} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{RC}}$$

拉氏反变换

$$u_C(t) = \left(1 - e^{-\frac{1}{RC}t}\right) \varepsilon(t)$$



9.5 线性动态电路的复频域分析

例9-15

例 图示 RC 串联电路的激励为电压源 u_s ，电容电压初始状态为 $u_C(0_-) = 0$ 。

(1) 若 $u_s = \varepsilon(t)$ ，求电路响应 $u_C(t)$ ；

(2) 若 $u_s = \delta(t)$ ，求电路响应 $u_C(t)$ ；

解 (2) 冲激响应：

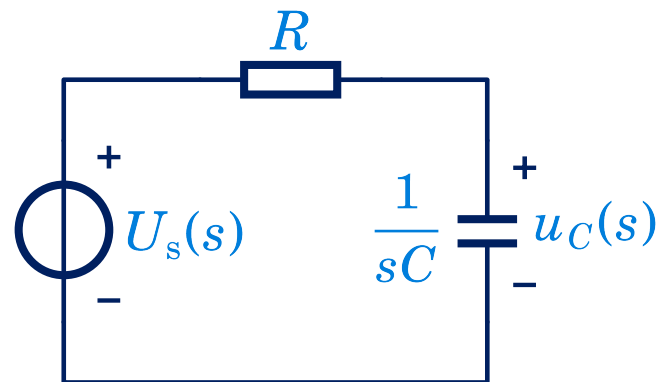
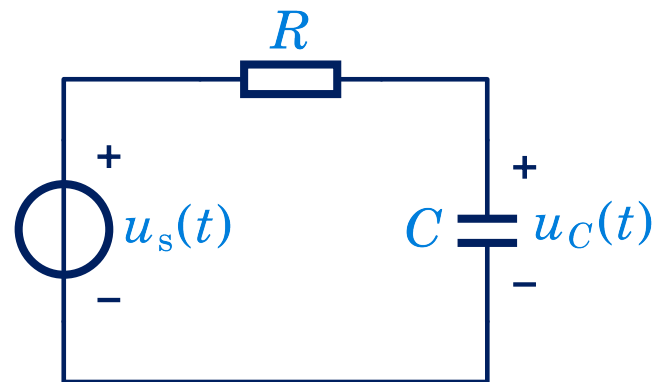
绘制运算电路图（零初值无附加电源）

分压公式

$$u_C(s) = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} U_s(s) = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} 1$$

拉氏反变换

$$u_C(t) = \frac{1}{RC} e^{-\frac{1}{RC}t} \varepsilon(t)$$



9.5 线性动态电路的复频域分析

例9-16

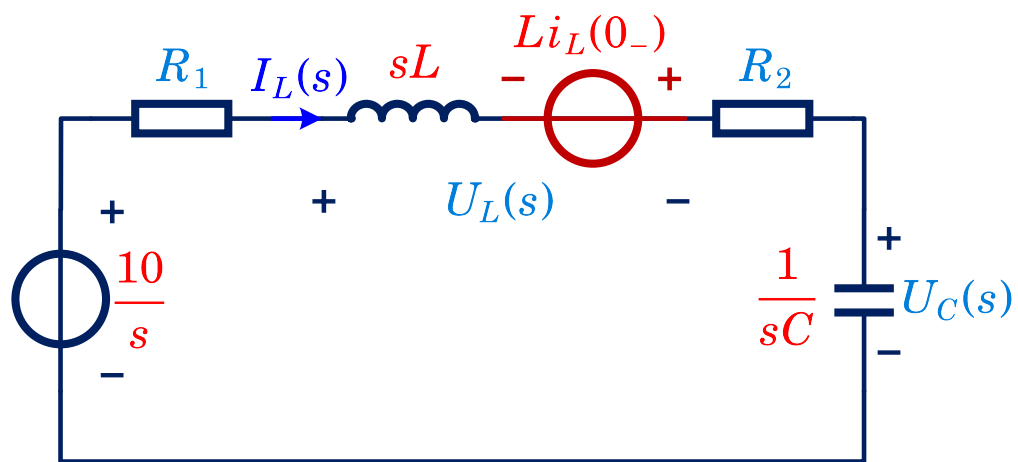
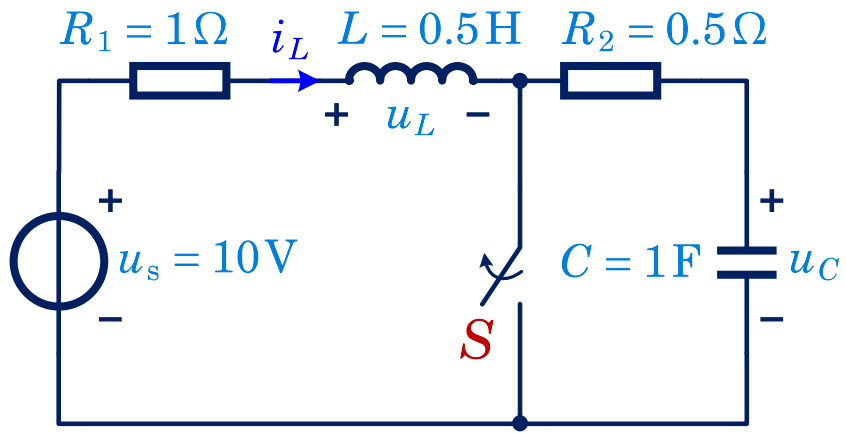
例 图示电路在开关断开前已处于稳态。设 $t = 0$ 时开关断开，求全响应 $i_L(t)$ 、 $u_L(t)$ 和 $u_C(t)$ 。

解 (1) 先求换路前电容电压和电感电流

$$u_C(0_-) = 0V$$

$$i_L(0_-) = 10A$$

绘制运算电路图



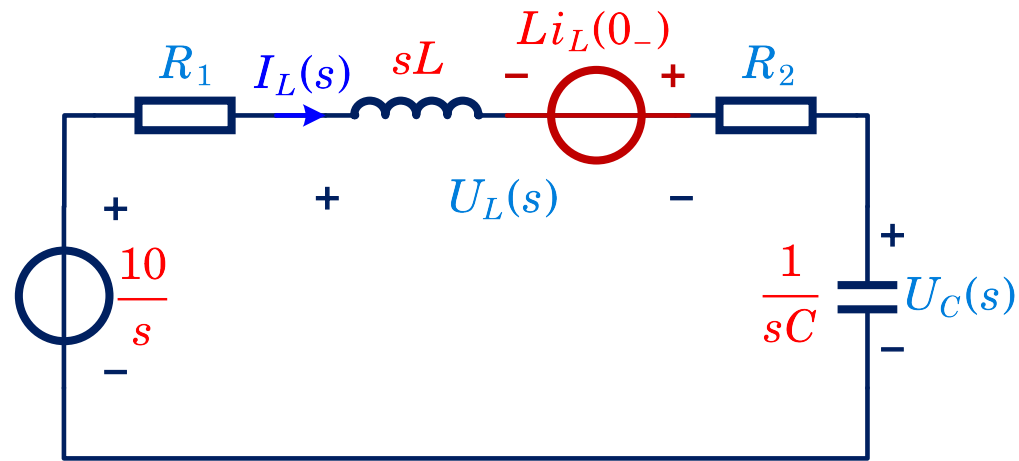
9.5 线性动态电路的复频域分析

例9-16

例 图示电路在开关断开前已处于稳态。设 $t = 0$ 时开关断开，求全响应 $i_L(t)$ 、 $u_L(t)$ 和 $u_C(t)$ 。

解 (2) 列电路方程

$$\left(R_1 + sL + R_2 + \frac{1}{sC} \right) I_L(s) = Li_L(0_-) + \frac{10}{s}$$



$$\Rightarrow \left(1 + 0.5s + 0.5 + \frac{1}{s} \right) I_L(s) = 5 + \frac{10}{s} \Rightarrow I_L(s) = \frac{10}{s+1}$$

$$\Rightarrow U_L(s) = I_L(s) \cdot sL - Li_L(0_-) = \frac{5s}{s+1} - 5 = -\frac{5}{s+1}$$

$$\Rightarrow U_C(s) = I_L(s) \cdot \frac{1}{sC} = \frac{10}{s(s+1)} = \frac{10}{s} - \frac{10}{s+1}$$

9.5 线性动态电路的复频域分析

例9-16

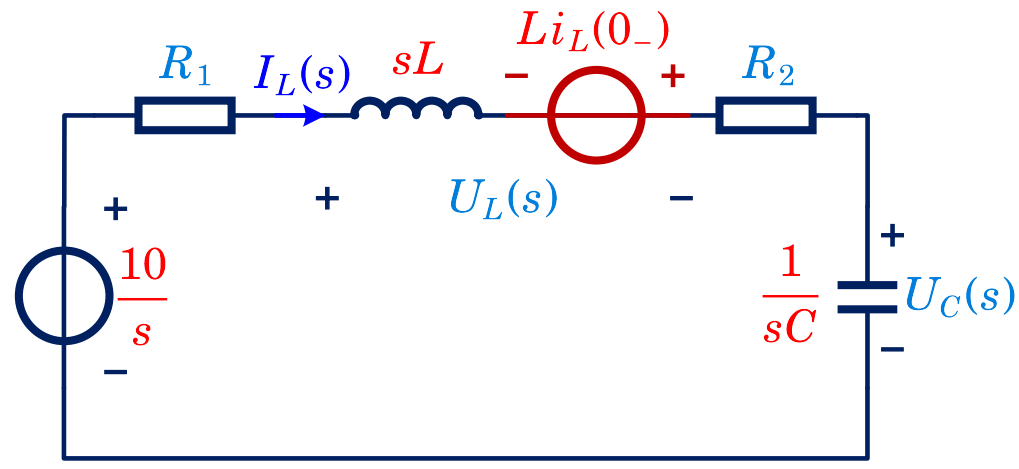
例 图示电路在开关断开前已处于稳态。设 $t = 0$ 时开关断开，求全响应 $i_L(t)$ 、 $u_L(t)$ 和 $u_C(t)$ 。

解 (2) 列电路方程

$$I_L(s) = \frac{10}{s+1}$$

$$U_L(s) = -\frac{5}{s+1}$$

$$U_C(s) = \frac{10}{s} - \frac{10}{s+1}$$



(3) 作拉氏反变换

$$i_L(t) = 10e^{-t}\varepsilon(t) \text{ A}$$

$$u_L(t) = -5e^{-t}\varepsilon(t) \text{ V}$$

$$u_C(t) = 10(1 - e^{-t})\varepsilon(t) \text{ V}$$

9.5 线性动态电路的复频域分析

例9-17

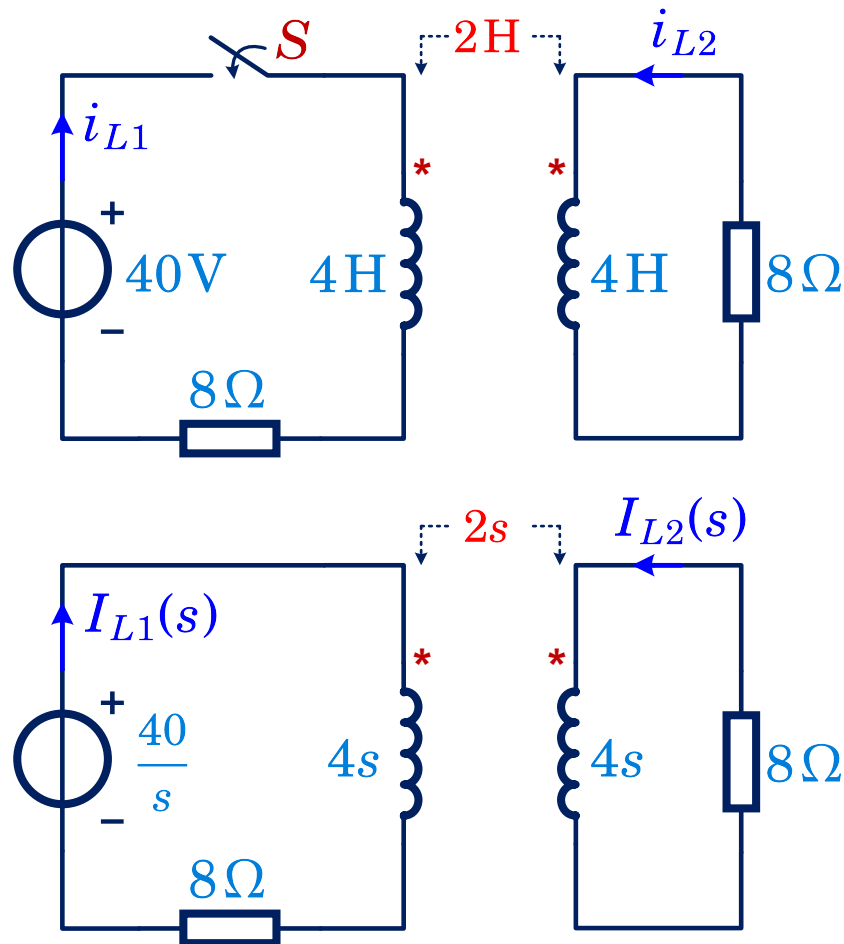
例 已知图示电路中 $i_{L1}(0_-) = i_{L2}(0_-) = 0$ 。设 $t = 0$ 时开关闭合，求 $i_{L1}(t)$ 和 $i_{L2}(t)$ 。

解 (1) 换路后电感的初始状态为零
直接绘制运算电路图

(2) 列电路方程（网孔电流法）

$$\begin{cases} (4s + 8)I_{L1}(s) + 2sI_{L2}(s) = \frac{40}{s} \\ 2sI_{L1}(s) + (4s + 8)I_{L2}(s) = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} (2s + 4)I_{L1}(s) + sI_{L2}(s) = \frac{20}{s} \\ sI_{L1}(s) + (2s + 4)I_{L2}(s) = 0 \end{cases}$$





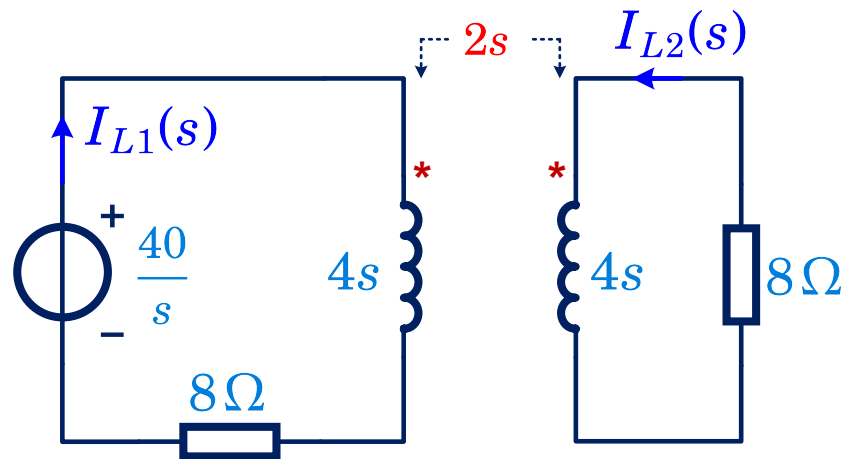
9.5 线性动态电路的复频域分析

例9-17

例 已知图示电路中 $i_{L1}(0_-) = i_{L2}(0_-) = 0$ 。设 $t = 0$ 时开关闭合，求 $i_{L1}(t)$ 和 $i_{L2}(t)$ 。

解 (2) 列电路方程（网孔电流法）

$$\Rightarrow \begin{cases} (2s + 4)I_{L1}(s) + sI_{L2}(s) = \frac{20}{s} \\ sI_{L1}(s) + (2s + 4)I_{L2}(s) = 0 \end{cases}$$



$$\Rightarrow \begin{cases} I_{L1}(s) = \frac{40(s+2)}{s(3s^2+16s+16)} = \frac{5}{s} + \frac{-5/2}{s+4/3} + \frac{-5/2}{s+4} \\ I_{L2}(s) = -\frac{20}{3s^2+16s+16} = \frac{-5/2}{s+4/3} + \frac{5/2}{s+4} \end{cases}$$

(3) 作拉氏反变换

$$\begin{cases} I_{L1}(t) = (5 - 2.5e^{-1.333t} - 2.5e^{-4t})\varepsilon(t) \text{ A} \\ I_{L2}(t) = 2.5(e^{-4t} - e^{-1.333t})\varepsilon(t) \text{ A} \end{cases}$$



9.5 线性动态电路的复频域分析

例9-18

例 图示电路换路前已处于稳态，当 $t = 0$ 时开关闭合，求响应 $i(t)$ 。

解 (1) 先求换路前电容电压和电感电流

$$i_L(0_-) = \frac{30}{2+1+3} \text{ A} = 5 \text{ A}$$

$$u_C(0_-) = 2i_L(0_-) = 10 \text{ V}$$

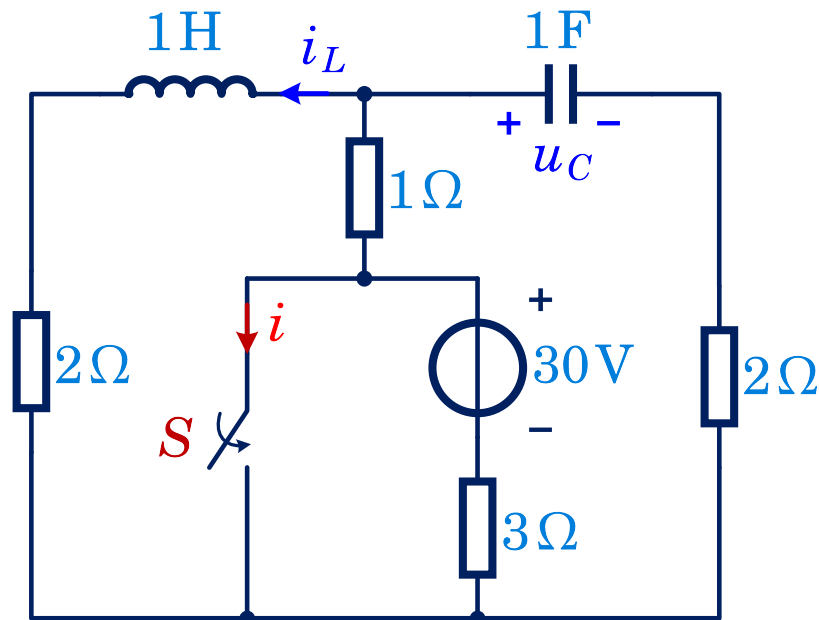
换路后 i 由两部分组成

来自 30V 电压源的电流 i_1

$$i_1 = \frac{30 \text{ V}}{3 \Omega} = 10 \text{ A}$$

来自储能元件放电的产生的电流 i_2 (采用复频域法计算 $I_2(s)$)

绘制运算电路图



9.5 线性动态电路的复频域分析

例9-18

例 图示电路换路前已处于稳态，当 $t = 0$ 时开关闭合，求响应 $i(t)$ 。

解 绘制运算电路图

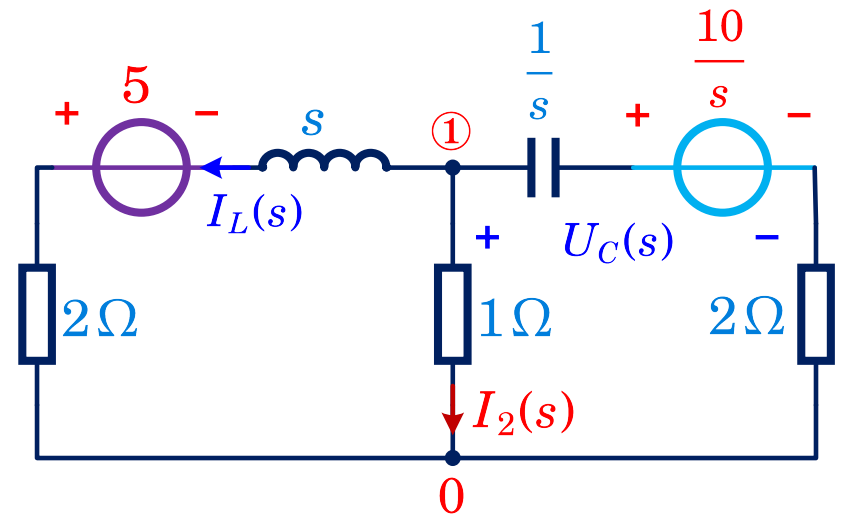
(2) 列电路方程 (结点电压法)

$$\left(\frac{1}{s+2} + 1 + \frac{1}{1/s+2} \right) U_{n1}(s) = \frac{10/s}{1/s+2} - \frac{5}{s+2}$$

$$\Rightarrow U_{n1}(s) = \frac{5}{s^2 + 3s + 1} \Rightarrow I_2(s) = \frac{U_{n1}(s)}{1} = 2.24 \left(\frac{1}{s + 0.382} - \frac{1}{s + 2.618} \right)$$

(3) 作拉氏反变换

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) = (10 + 2.24e^{-0.382t} - 2.24e^{-2.618t}) \varepsilon(t) \text{ A}$$



9.5 线性动态电路的复频域分析

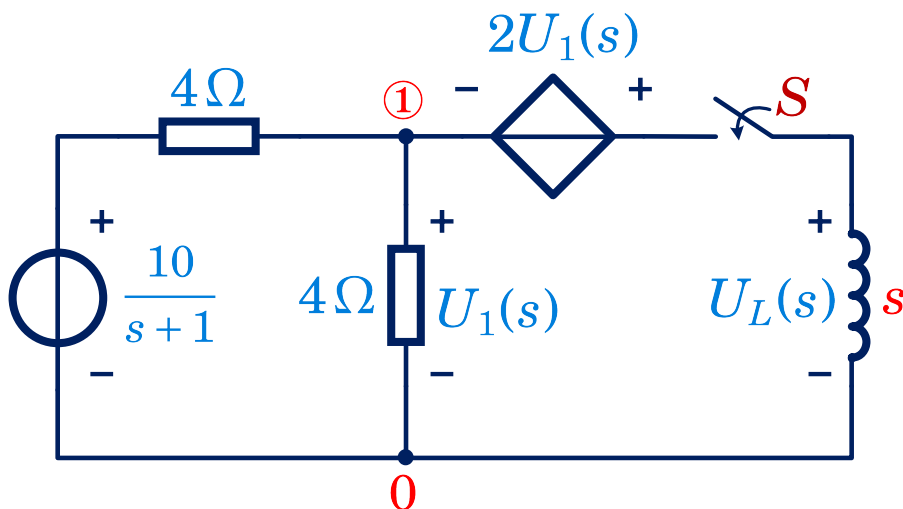
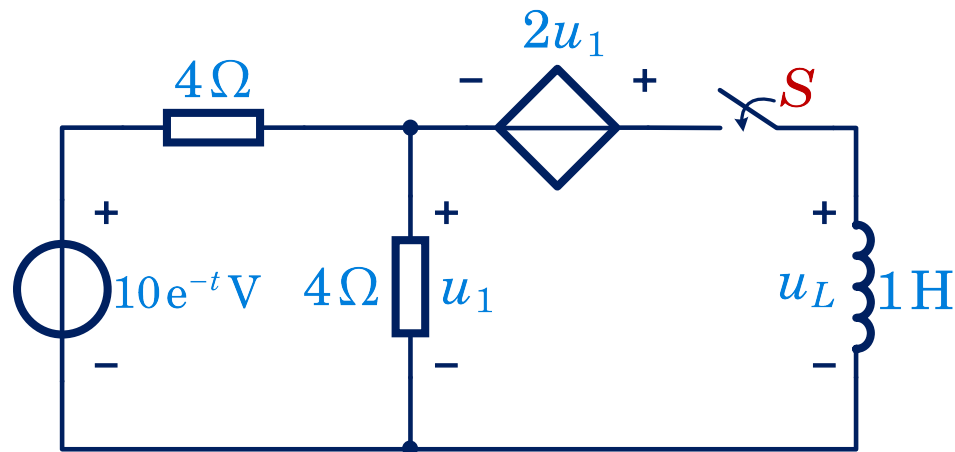
例9-19

例 已知图示电路中 $i_L(0_-) = 0\text{A}$ ，在 $t = 0$ 时开关闭合，求 $t > 0$ 时的 $u_L(t)$ 。

解 (1) 直接绘制运算电路图

(2) 列电路方程 (结点电压法)

$$\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{s}\right)U_1(s) = \frac{10}{(s+1) \times 4} - \frac{2U_1(s)}{s}$$



9.5 线性动态电路的复频域分析

例9-19

例 已知图示电路中 $i_L(0_-) = 0\text{A}$ ，在 $t = 0$ 时开关闭合，求 $t > 0$ 时的 $u_L(t)$ 。

解 (1) 直接绘制运算电路图

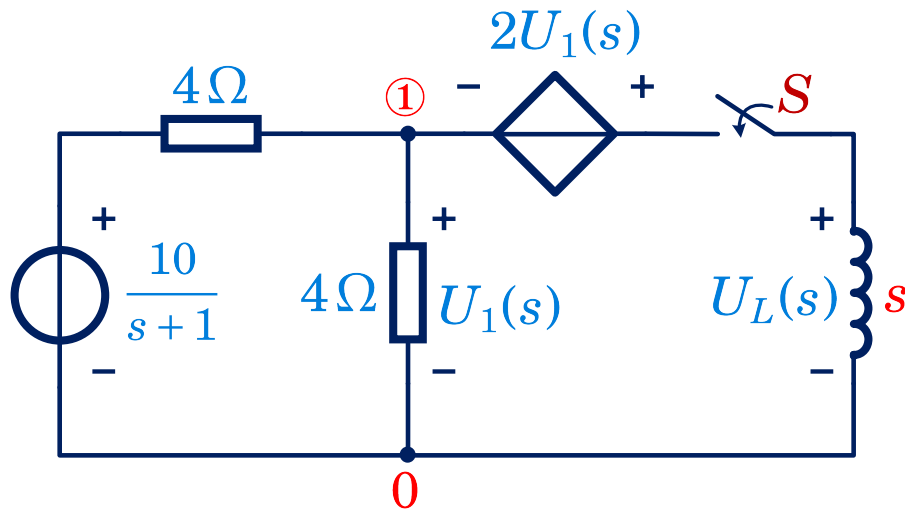
(2) 列电路方程（结点电压法）

$$\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{s}\right)U_1(s) = \frac{10}{(s+1) \times 4} - \frac{2U_1(s)}{s}$$

$$\Rightarrow U_1(s) = \frac{5s}{(s+1)(s+6)} \Rightarrow U_L(s) = 3U_1(s) = \frac{15s}{(s+1)(s+6)}$$

(3) 作拉氏反变换

$$u_L(t) = (-3e^{-t} + 18e^{-6t})\varepsilon(t)\text{V}$$





本章小结

■ 拉普拉斯变换

◇ 定义 性质 反变换 解微分方程 ▲

■ 运算电路

◇ 基尔霍夫定律

◇ 元件的电路模型

■ 线性动态电路的复频域分析

◇ 计算电路响应 ▲ ●