

# 電路卷一 . 電路的基本概念與基本定律

## 電路的組成與功能第一

### 一、電路的概念

由供電設備、用電設備及中間環節等以不同的形式連接而成的電的通路。

### 二、電路的分類

- 按電路變量的關係分
  - 線性電路【課程重點】
  - 非線性電路
- 按信號類型分
  - 直流電路（靜態電路）【第1, 2章】
  - 交流電路（動態電路）【第3, 4章】
- 按器件參數分
  - 考慮時變關係
    - 時變電路
    - 非時變電路【課程重點】
  - 考慮電磁關係
    - 集總參數電路 (Lumped Parameter Circuit)【課程重點】
    - 分布參數電路 (Distributed Parameter Circuit)

### 三、電路的功能

能量傳輸、能量轉換、信息傳輸、信息處理。

# 電路中的基本物理量第二

## 電流其一 電壓其二

- **電流強度 I (電流)**  $i = \frac{dq}{dt}$
- **電位 V (電勢)** 單位正電荷在該點所具有的电位(勢)能, 等於電場力將單位正電荷從該點移到參考點所作的功.
- **電壓 U** 電路中兩點間的電位差, 等於電場力將單位正電荷從起點移到終點所做的功.
- **電動勢 E** 反映了電源把其他形式的能轉換成電能的能力, 即使電源兩端產生電壓. 電動勢的大小等於非電場力把單位正電荷從電源的負極, 經過電源內部移到電源正極所作的功.
- **實際方向**
  - 電流的實際方向 正電荷移動的方向
  - 電壓的實際方向 電壓降的方向, 由高電位點指向低電位點.
  - 電動勢的實際方向 電源電位上升的方向, 從電源的負極經過電源內部指向電源的正極.
- **參考方向** 規定的方向, 用箭頭或雙下標表示. 引入參考方向後電流  $i$  是代數量, 即  $i > 0$  說明真實方向和參考方向一致,  $i < 0$  說明真實方向和參考方向相反. 電壓和電流的參考方向一般採用一致的方向, 即**關聯參考方向**(~).
- **參考點 (地)** 零電位點. 電工技術中, 通常選大地為參考點; 電子技術中, 通常選機殼為參考點.

## 功率其三 电能第四

电流流经电路中的元件，说明电场力对电荷做功，可认为该元件从电路中吸收了部分能量。

$t_0 \sim t_1$  时刻，某元件吸收的 **电能**

$$\begin{aligned} W &= \int_{q(t_0)}^{q(t_1)} u dq \\ &= \int_{t_0}^{t_1} u i dt \quad (\sim) \end{aligned}$$

**功率**

$$P = \frac{dW}{dt} = \begin{cases} UI & (\sim) \\ -UI & (\approx) \end{cases}$$

实际功率值与参考方向的选择无关。

功率极性的意义：

$P > 0$  表示吸收（消耗）功率

$P < 0$  表示发出（提供）功率

功率平衡  $\sum P = 0$

## 基本电路元件第三

**电路模型** 完全由理想电路元件组成，构成一个能表达实际电路主要电磁性能模型。

**基本电路元件模型** 每个理想电路元件只表示一种物理现象，在一定条件下代表实际器件的主要物理性能，且有精确的数学意义。需满足  $L \ll \lambda$ ，即集总参数元件 (Lumped Parameter Element) 构成的集总参数电路 (Lumped Parameter Circuit)。

**四大基本变量** 电压  $U$ 、电流  $I$ 、电荷  $q$ 、磁通  $\Phi$

**理想电路元件** 电阻  $R = \frac{u}{i}$ ，电容  $C = \frac{q}{u}$ ，电感  $L = \frac{\Phi}{i}$ ，忆阻元件

$$M = \frac{\Phi}{q}$$

# Single-Port Component / Two-Terminal Component

单端口元件 / 双端元件

瑞泽斯特其一

## 电阻 (Resistor)

只研究线性时不变正电阻，即伏安曲线是一条过原点的直线，且阻值不随时间变化的电阻元件，且  $R > 0$ 。

- 电路参数
  - 电阻值  $R$  ( $\Omega$  欧姆)
  - 电导值  $G = \frac{1}{R}$  ( $S$  西门子)
- 欧姆定律  $u = Ri$  ( $\sim$ )

## 坎帕斯特其二

### 电容 (Capacitor)

- 定义 **积聚电荷**、储存 **电场能** 的元件
- 电路参数
  - 电容 (量)  $C$  ( $F$  法[拉]) 表征积聚电荷的能力
- 特性
  - 相当于 **开路**, 有 **隔直** 的作用;
  - 惯性元件 (**电压不能跳变**);
  - 记忆元件, **记忆电流** 全部历史.
- 数学表达式  $q = Cu$
- 电压电流关系

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt}$$

- 功率和能量

$$p(t) = v(t)i(t) = v(t)C \frac{dv}{dt}$$

$$W(t) = \frac{1}{2} C v^2(t)$$

当  $p > 0$  时, 电容吸收功率, 储存电场能量增加; 当  $p < 0$  时, 电容提供功率, 电容释放存储的能量.

### 印達坎特其三

#### 电感 (Inductor)

- 定义 **建立磁场**、储存 **磁场能** 的元件
- 电路参数
  - 电感 (量)  $L$  ( $H$  亨[利]) 表征产生磁链的能力
- 特性
  - 相当于 **短路**, 有 **通直** 的作用;
  - 惯性元件 (**电流不能跳变**);
  - 记忆元件, **记忆电压** 全部历史.
- 数学表达式 磁链  $\Psi = Li = N\Phi$
- 电压电流关系

$$v(t) = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

- 功率和能量

$$p(t) = v(t)i(t) = i(t)L \frac{di}{dt}$$
$$W(t) = \frac{1}{2} Li^2(t)$$

当  $p > 0$  时, 电感吸收功率, 储存磁场能量增加; 当  $p < 0$  时, 电感提供功率, 电感释放存储的能量.

## 電源元件其四

- 无源器件 不能对外提供能量的电路元件，如  $R, L, C$
- 电源元件 能对外提供（能量）电压或电流的电路元件
  - 独立电源元件 电压源、电流源
  - 非独立电源元件

既可提供功率，也可吸收功率



# Two-Port Component / Four-Terminal Component

二端口元件 / 四端元件

## 理想變壓器其五

- 将变压器理想化（全耦合、无损耗、自感互感无穷大），得到理想变压器模型。
- 同名端：表示两个端口的电流同时流进（或流出）同名端时，两个线圈电流产生的磁场相互加强，反之则相互削弱。
- 性质
  - 能量守恒  $p_1 + p_2 = 0$ ，一个线圈吸收功率，另一个输出功率；
  - 全耦合特性 两个链路中的磁通相等，

$$\begin{cases} u_1 = nu_2 \\ i_1 = -\frac{1}{n}i_2 \\ R_1 = n^2 R_L \end{cases}$$

## 线性受控电源模型其六

只讨论线性受控源

- 定义 某电源提供的电压或电流受同一电路中其它某一 支路的电压或电流控制
- 类型
  - VCVS (Voltage Controlled Voltage Source 电压控制电压源) 电压传输系数  $\mu = \frac{u_2}{u_1}$ .
  - VCCS (Voltage Controlled Current Source 电压控制电流源) 转移电导  $g = \frac{i_2}{u_1}$
  - CCVS (Current Controlled Voltage Source 电流控制电压源) 转移电阻  $r = \frac{u_2}{i_1}$
  - CCCS (Current Controlled Current Source 电流控制电流源) 电流传输系数  $\beta = \frac{i_2}{i_1}$
- 与独立源的比较
  - 只是反映电压、电流间的控制关系，在电路中不能作为独立的激励

# 電路的工作狀態與元件額定值第四

电路的工作状态 开路、短路、有载

电气设备的额定值

- 额定电流  $I_N$  最大电流
- 额定电压  $V_N$  正常工作电压
- 额定功率  $P_N$  在额定电压、额定电流下工作时的功率

# 電路卷二·電路分析的基本方法

**稳态** 当电路工作了足够长的时间，电路中的电压和电流在给定的条件下已达到某一稳定值（或稳定的时间函数），这种状态称为电路的稳定工作状态，简称稳态。

**直流稳态电路** 若电路中的激励只有直流电压源和直流电流源，并且电路在直流电源的激励下已经工作了很长时间，那么电路各处的电压和电流也将趋于恒定，呈现为不随时间变化的直流量。对于直流而言，电容元件相当于开路，电感元件相当于短路。因此在直流稳态电路中起作用的无源元件 **只有电阻元件**，故也称为直流电阻电路。

## 本章目錄

- 回顾：相关概念和基本定律
  - 电路模型相关概念
  - 电路的两类约束：VCR、Kirchhoff Laws
- 简化电路方法
  - 等效电路分析法：串并联等效
  - 等效电源定理：Thevenin's Theorem、Norton's Theorem
- 求解电路方法
  - 支路电流法
  - 节点电压法
  - 叠加定理
- 技巧和其它方法
  - 替代定理
  - 最大功率传输定理

## Tips

- 核心宗旨——简化电路计算
- 注意电压、电流的方向，符号
- 始终保留受控源，从本质分析受控源

# 相關概念和基本定律第零

## 電路模型相關概念

- **Branch** (支路) 通过同一电流的每个分支
- **Loop** (回路) 任意一个闭合路径
- **Node** [节(结)点] 三条或三条以上 branch 的连接点
- **Mesh** (网孔) 不包含其他 branch 的最简单的 loop

## 電路的兩類約束

- **元件伏安特性的约束 (VCR)** 仅决定于元件本身的特性.
- **拓扑约束 (Kirchhoff Laws)** 取决于元件的联接方式, 描述集总参数电路的拓扑约束, 是电路理论最基本的定律.
  - **KCL** (Kirchhoff's Current Law) 在任一时刻, 集总参数电路中任一 node, **流入该 node 的所有 branch 的电流** 的代数和为零, 即  $\sum i_k = 0$ . KCL 是 node 电荷守恒的体现. Node 可推广为 **封闭曲面**.
  - **KVL** (Kirchhoff's Voltage Law) 在任一时刻, 集总参数电路中任一 loop, **沿该 loop 所有 branch 的电压降** 的代数和为零, 即  $\sum u_k = 0$ . KVL 是 loop 能量守恒的体现. Loop 可推广为 **开口 loop**.

# 簡化電路方法第一

## 等效電路分析法其一

网络：在电系统中，由若干元件组成的用来使电信号按一定要求传输的电路或这种电路的部分。

二端网络（单口网络）：只有两个端钮与外电路连接的网络。

如果二端网络  $N_1$  和  $N_2$  具有相同的伏安关系，则称  $N_1$  和  $N_2$  等效。即部分电路  $N_1$  和  $N_2$  分别和任意其它的电路  $N$  构成完整电路时， $N$  的工作状态完全一致。

若定义端钮上电压和电流间的关系为二端网络的外特性。具有相同外特性的两个电路互为等效电路。电路中的一部分用其等效电路替换后，电路其他部分的工作情况保持不变。

等效只能适用于外部，对于互相等效的两个电路，其内部的工作一般是不等效的。

## 阻抗、電壓源和電流源的串聯與并聯等效之一

阻抗：

- $n$  个阻抗  $Z_i$  串联，等效为一个阻抗  $Z_{\text{eq}} = \sum Z_i$
- $n$  个阻抗  $Z_i$  并联，等效为一个阻抗  $Z_{\text{eq}}^{-1} = \sum Z_i^{-1}$ ，即  $Y_{\text{eq}} = \sum Y_i$

电压源：

- $n$  个理想电压源  $U_{si}$  串联，等效为一个理想电压源  $U_s = \sum U_{si}$ 。
- **理想电压源不能并联。**
- 理想电压源与任意非电压源支路并联，等效为一个同值理想电压源。

电流源：

- $n$  个理想电流源  $I_{si}$  并联，等效为一个理想电流源  $I_s = \sum I_{si}$ 。
- **理想电流源不能串联。**
- 理想电流源与任意非电流源支路串联，等效为一个同值理想电流源。

## 电源模型的等效之二

**定理内容** 若  $\boxed{U_s = I_s R_0}$ , 则实际电压源  $(U_s, R_0)$  与实际电流源  $(I_s, R_0)$  等效.

**适用情形** 简化电源和电阻串并联为实际电源模型.

**求解方法** 若实际电压源  $(U_s, R_0)$  与电阻  $R$  并联, 先将实际电压源等效为实际电流源  $\left(\frac{U_s}{R_0}, R_0\right)$ , 再将两个电阻并联, 等效电阻  $R'_0 = R_0 // R$ , 则实际电流源为  $\left(\frac{U_s}{R_0}, \frac{R_0 R}{R_0 + R}\right)$ , 再等效回实际电压源  $\left(\frac{U_s R}{R_0 + R}, \frac{R_0 R}{R_0 + R}\right)$ . 若实际电流源与电阻串联, 类似地可以用这种方式等效, 直至化至最简电路.

**注意** 不能将控制支路等效, 始终保留受控源.



## 等效电源定理其二

**定理内容** 任何一个有源二端网络  $N$  可以用电源模型替代, 包括 **Thevenin's Theorem** 和 **Norton's Theorem**, 前者是用一个**理想电压源和内阻相串联**的支路来等效, 后者是用一个**理想电流源和内阻相并联**来等效.

**适用情形** 简化电路; 求  $N$  以外部分的电流  $I$  或电压  $U$ ,  $N$  的里外相独立.

**求解方法** 以 Thevenin's Theorem 为例:

- 记  $N$  的两端为 A, B, 把  $N$  以外的部分去除;
- 求等效电压  $U_{oc}$ , 即  $U_{AB}$ ;
- 求等效电阻  $R_0$ :
  - **直接法** (仅适用于没有受控源的情形) 独立源置零<sup>†</sup>, 只剩下一堆电阻, 求等效电阻, 即  $R_0$ ;
  - **开路短路法** 短路 AB, 保留所有独立源和受控源, 求 AB 上的电流  $I_{sc}$ , 则  $R_0 = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$ ;
  - **外加激励法** 独立源置零、受控源保留, 一般选用外加电压法, 即将 AB 中间连一个电压源  $U_t$ , 计算这条路上的电流  $I_t$ , 则  $R_0 = \frac{U_t}{I_t}$ , 外加电压的优势在于:
    - 电路中仅有一个独立源, 利于分析求解电路;
    - 开路短路法可能会出现  $\frac{0}{0}$  的情形, 这时只能使用外加激励法;
- 画出 Thevenin 等效电路, 即将  $N$  用一个理想电压源  $U_{oc}$  和内阻  $R_0$  相串联代替, 补上去除的  $N$  以外部分, 求解原问题.

<sup>†</sup> 置零: 电压源短路, 电流源开路. 即把图上那个圈圈去掉.

## 求解电路方法第二

设电路有  $N$  nodes and  $B$  branches.

若是对每条 branch 列写 VCR 方程，需要  $B$  个 VCR 方程、 $N - 1$  个独立 KCL 方程和  $B - N + 1$  个独立 KVL 方程，共  $2B$  个方程，是为 **全电路方程**，计算量巨大，故引入支路电流法。

### 支路电流法其一

以各 branch 的 **电流为未知量**，列写 **独立 KCL 方程**，并将各元件的 **VCR 直接代入 KVL 方程**。只需  $B$  个方程，计算量减半。

## 節點電壓法其二

以各 node 的电压为未知量，将各元件的 VCR 与 node 的 KCL 方程相结合。只需  $N - 1$  个方程。一般电路 node 数小于 branch 数，减少了方程数量。具体地，

- **Step 0 把受控源当作独立源**，尽可能地把电压源等效为电流源，剩下的电压源，要么是无伴的，要么是在控制支路上的。
- **Step 1 选择一个 node 接地**，即设为 **参考点**，其电位  $V_0 = 0$ 。参考点的选择：对于剩下的电压源（包括受控电压源），要么把电压源当作电流源处理，要么两端都设为节点。我们希望增设的节点或变量尽可能少，因此
  - 若只含有一个电压源，设 **电压源的一端为参考点**，则另一端所在节点（如没有，增设）的节点电压为已知。
  - 若含有不止一个电压源，且这些电压源有一个公共点时，则设 **公共节点为参考点**。
  - 如果多个电压源没有公共点，设 **任一电压源的一端为参考点**，其它电压源的电流为  $I_j$ ，**当作电流源处理** 列写节点方程。由于增加了一个电流变量，所以需要 **补充一个方程**，即 **电压源电压与节点电压的关系式**。
- **Step 2 对于其它  $N - 1$  个 nodes 列写  $N - 1$  个方程**。对于 node  $k$ ,

$$\left(\sum_{\text{电导 } i \text{ 与 } k \text{ 相邻}} G_i\right) \cdot V_k - \sum_{\text{与 } k \text{ 相邻的 node } j} \left[\left(\sum_{\text{电导 } i \text{ 在 } j \text{ 与 } k \text{ 之间}} G_i\right) \cdot V_i\right] = \sum \text{电流源 } i \text{ 流入 } k \quad I_i$$

- **Step 3 补充相应的方程**，如受控源控制量方程、与增加的变量相关的方程等。
- **Step 4 求解这个方程组**。

### 叠加定理其三

**定理内容** 在多个独立电源同时作用的线性电路中，任一支路的电流或电压，可以看成是每一个独立电源单独作用时在该支路所产生的电流或电压的代数和。

**适用情形** 求  $N$  的电流  $I$  或电压  $U$ 。

**求解方法** 将所有的独立源（不含受控源）分成  $n$  组，进行  $n$  次运算：

- 保留第  $i$  组的电源，其余组的独立源置零，求出  $N$  的电流为  $I_i$ ，电压  $U_i$ 。

则  $I = \sum I_i$ ,  $U = \sum U_i$ 。

**注意** 叠加定理只适用于线性电路，**不能求功率**。始终保留受控源。

## 技巧和它方法第四

### 替代定理其一

**定理内容** 如果有源二端网络的端口电压或电流已知，则用数值相同的电压源或数值相同的电流源代替这个有源二端网络，电路的其余部分各处工作状态不会改变。

**适用情形**  $N$  的电流  $I_0$ （或电压  $U_0$ ）已知。

**求解方法** 用数值为  $I_0$  的电流源（或数值为  $U_0$  电压源）替代  $N$ 。

## 最大功率传输定理其二

$R_L$  从有源二端网络获得的功率，当  $R_0 = R_L$  时最大，最大值为

$$P_{Lm} = \frac{U_{oc}^2}{4R_0} = \frac{1}{4} I_{sc}^2 R_0.$$

# 電路卷三.

# 電路卷四·瞬態電路分析

## 一、电路类型及特点

1. **电阻电路** 电路中仅由电阻元件和电源元件构成。KCL、KVL 方程和元件特性方程均为代数方程，即描述电路的数学方程为代数方程。特点：当电路状态发生改变时（即换路），响应很快转换到新的稳定状态。
2. **动态电路** 电路中含储能元件  $L, C$ 。元件特性方程含微分或积分形式，即描述电路的数学方程为微分方程。这种电路又称记忆电路。特点：当电路状态发生改变时（即换路），需要经历一个过渡过程才能达到新的稳定状态。这个转换过程称为电路的过渡过程。

## 二、电路转换相关概念

1. **换路** 电路结构或电路参数发生变化。
2. **过渡过程** 电路由一个稳态过渡到另一个稳态需要经历的过程。产生原因：
  - 电路内部含有储能元件  $L, C$ ，换路时能量发生变化，但能量不能跃变。
  - 电路结构或电路参数发生变化，支路接入或断开、开路、短路、电路参数变化等。



# 换路定律第一

约定

$$\begin{cases} t = t_0^- & \text{换路前最后一瞬间} \\ t = t_0 & \text{换路瞬间} \\ t = t_0^+ & \text{换路后最开始的一瞬间} \end{cases}$$

换路瞬间，若电容电流保持为有限值，则电容电压（电荷）换路前后保持不变，即

$$u_C(t_0^+) = u_C(t_0^-)$$

若电感电压保持为有限值，则电感电流（磁链）换路前后保持不变，即

$$i_L(t_0^+) = i_L(t_0^-)$$

换路前，电容等效为开路、电感等效为短路，求  $u_C(t_0^-)$ ,  $i_L(t_0^-)$ 。换路后，依**替代定理**，将**电容**用  $u_C(t_0^-)$  的**电压源**替代、**电感**用值为  $i_L(t_0^-)$  的**电流源**替代，即得到换路后瞬间（初始时刻）的等效电路。

# RC 電路的暫態過程第二

## RC 電路的零狀態響應其一

**零状态响应 (Zero State Response)** 初始状态为零，仅由独立电源（即激励，或输入）引起的响应。

换路后电路的回路方程，以电容电压为未知量

$$\begin{aligned}U_s &= Ri + u_C \\ &= R \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C.\end{aligned}$$

设通解  $u_C = u_{Ch} + u_{Cp}$ ，其中  $u_{Ch} = Ke^{-\frac{1}{RC}t}$  表示 **齐次解 (homogeneous solution)**，又称暂态分量， $u_{Cp} = U_s$  表示 **莉解 (larticular solution)**<sup>†</sup>，又称强制分量，故

$$u_C(t) = Ke^{-\frac{1}{RC}t} + U_s.$$

换路于  $t = 0$ ，此时

$$u_C(0) = 0,$$

此即初始条件，代入通解得  $K = -U_s$ ，进而 **伟解 (varticular solution)**

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

<sup>†</sup>：**莉解 (larticular solution)**，指 张莉 (Zhang Li) 在电子电路基础 (Dianzi Dianlu Jichu, *Electronic and Circuit Foundation*) 课上讲述的 **特解 (particular solution)**，即针对非齐次方程的非零右侧项而特别构造的解，与齐次解相对应；

而 **伟解 (varticular solution)**，指 陈伟 (Chen Wei) 在高等数学 (Gaodeng Shuxue, *advanced mathematics*) 课上讲述的 **特解 (particular solution)**，即在给定特定的初始条件或边界条件后，调整任意常数来满足这些条件的解。

这两者使用了相同的名词，但概念大相径庭，因此在本笔记中，用莉解和伟解分别代指这两个概念。

进一步地，电流

$$i_C(t) = \frac{U_s}{R} e^{-\frac{1}{RC}t},$$

能量关系为

$$\begin{aligned} W_s &= \int_0^{\infty} U_s i dt = CU_s^2, \\ W_R &= \int_0^{\infty} i^2 R dt = \int_0^{\infty} \left( \frac{U_s}{R} e^{-\frac{1}{RC}t} \right)^2 R dt = \frac{1}{2} CU_s^2, \\ W_C &= \frac{1}{2} CU_s^2, \end{aligned}$$

这表明，电源提供的能量一半消耗在电阻上，一半转换成电场能量储存在电容中。

## RC 電路的零輸入響應其二

**零输入响应 (Zero Input Response)** 电路中没有外加的独立电源，仅由动态元件初始值引起。

换路后电路的回路方程及初始条件

$$\begin{cases} R \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C = 0, \\ u_C(0) = U_0. \end{cases}$$

解得

$$u_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$$

## RC 電路的全響應其三

**全响应 (Complete Response)** 电路中储能元件既有初始储能又有独立电源激励引起。

换路后电路的回路方程及初始条件

$$\begin{cases} R \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C = U_s, \\ u_C(0) = U_0. \end{cases}$$

解得

$$\begin{aligned} u_C(t) &= (U_0 - U_s)e^{-\frac{1}{RC}t} + U_s \\ &= U_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC}t} + U_s(1 - e^{-\frac{1}{RC}t}) \end{aligned}$$

第一行表明，全响应 = 瞬态响应 + 稳态响应；第二行表明，完全响应 = 零输入响应 + 零状态响应，体现出线性动态电路的叠加性。

## RC 電路的时间常数

- 定义式  $\tau = RC$ ，其中  $\tau$  是希腊字母 **tau**，写作  $\tau$
- 单位 秒
- 反映电路过渡过程时间的长短， $\tau$  大则过渡过程时间长，反之则短。
- 在电压初值一定时， $R$  一定时， $C$  增大，储能  $W = C \frac{u^2}{R}$  大，放电时间长； $C$  一定时， $R$  增大，放电电流  $i = \frac{u}{R}$  小，亦有放电时间长。
- 电压的变化与时间常数的关系为  $u_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ 。理论上当  $t \rightarrow \infty$  时电路才能达到稳态，实际上一般认为经过  $3\tau \sim 5\tau$  的时间过渡过程基本结束，通常取  $t \geq 4\tau$  即可认为电路进入稳态。

# RL 電路的暫態過程第三

	RC 电路	RL 电路
零状态响应	$\begin{cases} R \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C = U_s \\ u_C(0) = 0 \end{cases} \Rightarrow u_C = U_s(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$	$\begin{cases} \frac{1}{R} \cdot L \frac{di_L}{dt} + i_L = \frac{U_s}{R} \\ i_L(0) = 0 \end{cases} \Rightarrow i_L = I_s(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$
零输入响应	$\begin{cases} R \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \\ u_C(0) = U_0 \end{cases} \Rightarrow u_C = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$	$\begin{cases} \frac{1}{R} \cdot L \frac{di_L}{dt} + i_L = 0 \\ i_L(0) = \frac{U_0}{R} \end{cases} \Rightarrow i_L = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$
全响应	$\begin{cases} R \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C = U_s \\ u_C(0) = U_0 \end{cases} \Rightarrow u_C = (U_0 - U_s)e^{-\frac{t}{RC}} + U_s$	$\begin{cases} \frac{1}{R} \cdot L \frac{di_L}{dt} + i_L = \frac{U_s}{R} \\ i_L(0) = \frac{U_0}{R} \end{cases} \Rightarrow i_L = (I_0 - I_s)e^{-\frac{t}{\tau}} + I_s$

# 一階綫性電路暫態過程的三要素法第四

三要素分析法(三要素：初始值、穩態值和时间常数)可以求解一階綫性電路任意支路的暫態響應：

設  $f(t)$  表示電路在  $t$  時刻某一支路的響應 [如  $u_C(t)$ ,  $i_L(t)$ ]，並設換路時刻為  $t = t_0$ ，有

$$f(t) = [f(t_0^+) - f(\infty)]e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} + f(\infty)$$

以下分別求解時間常數  $\tau$ ，穩態響應值  $f(\infty)$ ，初始響應值  $f(t_0^+)$ ：

## 計算時間常數

將換路後電路中除儲能元件 ( $L, C$ ) 之外的剩餘部分電路用 Thevenin 電路來等效，然後計算時間常數  $\tau$ ，其中

- 電容電路： $\tau = R_0 C$ ；
- 電感電路： $\tau = G_0 L = \frac{L}{R_0}$ 。

## 確定穩態響應值

1. 在  $t \geq t_0$  的電路中，將電容開路或電感短路；
2. 得到直流穩態電路的等效電路；
3. 在該電路中求出那條支路相應的變量，即  $f(\infty)$ 。

## 確定初始響應值

1. 在  $t < t_0$  的電路中，計算  $t_0^-$  時刻的電容電壓  $u_C(t_0^-)$  或電感電流  $i_L(t_0^-)$ ；
2. 依換路定律，確定換路後的電容電壓  $u_C(t_0^+)$  或電感電流  $i_L(t_0^+)$ ，換路後，用電壓源替代電容或用電流源替代電感；
3. 得到換路瞬間的等效電路；
4. 在該電路中求出那條支路相應的變量，即  $f(t_0^+)$ 。