电路基础
(Fundamentals of Electric Circuits, INF0120002.05)

2019年04月02日

唐长文 教授

zwtang@fudan.edu.cn

http://rfic.fudan.edu.cn/Courses.htm

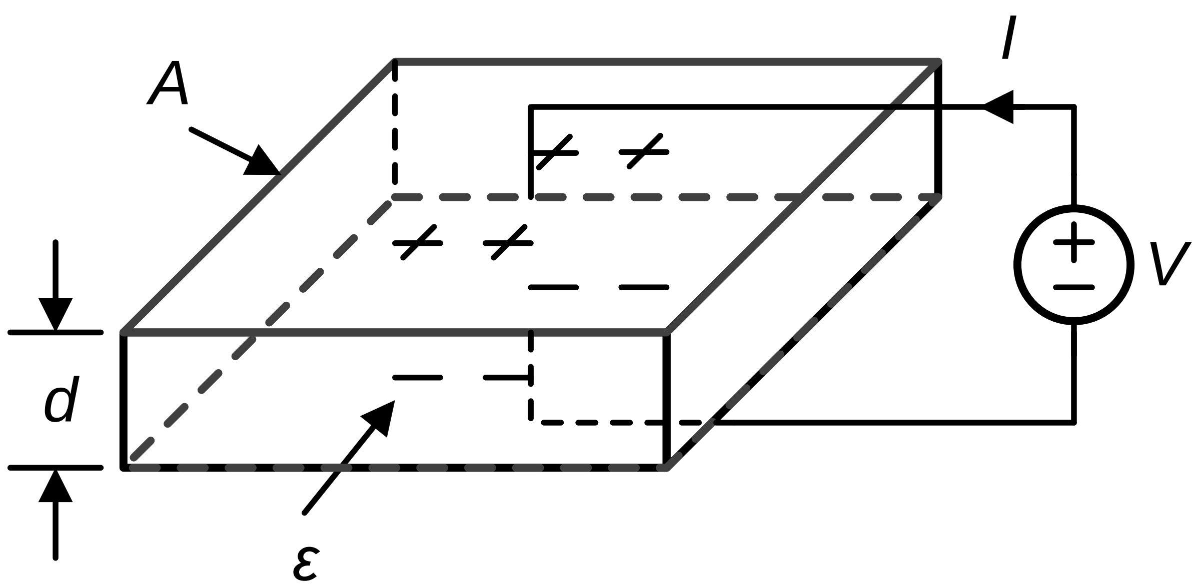
复旦大学/微电子学院/射频集成电路设计研究小组

第五章 电容和电感

- 电容元件
- 电感元件
- 耦合电感
- 理想变压器

电容元件

电容构成原理：



电容

- 电容是储能元件：储存电荷和电场能
- 线性电路：电容C是常量

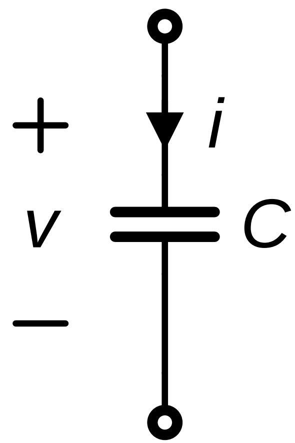
$$q = Cv$$

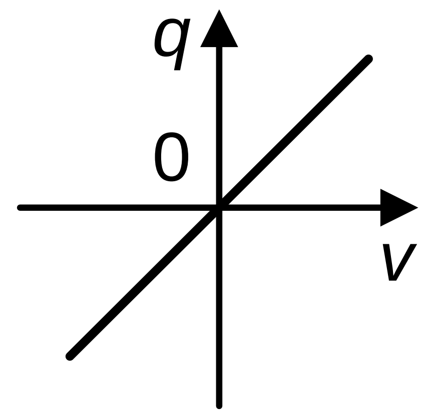
C：电容[系数]

单位：F(法拉)

常用单位：

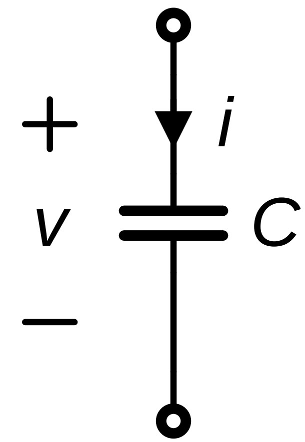
μF(微法, 10^{-6} F)
pF(皮法, 10^{-12} F)





v和i取关联参考方向，C是正值。

电容的电压电流关系



- 关联参考方向：
  - 电流流入正极板方向
- 流经电容的电流：
  - 极板电荷的变化率

$$i = \frac{dq}{dt} = C\frac{dv}{dt}$$

- 动态元件：
  - 端口电流与电压的时间变化率成正比
- 隔断直流：
  - 电压不随时间变化（直流）时，电流为零，相当于开路。

电容的电压电流关系

- 电荷q等于电流i对时间的积分
  - t时刻的电荷量：该时刻以前电流的充放电积累的结果
- 记忆元件：
  - 当前电压与t_0时刻电压有关

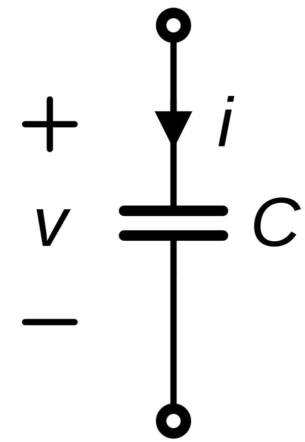
$$q(t)=\int_{-\infty}^{t} i(\xi)\mathrm{d}\xi$$

$$=\int_{-\infty}^{t_0} i(\xi)\mathrm{d}\xi+\int_{t_0}^{t} i(\xi)\mathrm{d}\xi$$

$$=q(t_0)+\int_{t_0}^{t} i(\xi)\mathrm{d}\xi$$

$$v(t)=v(t_0)+\frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} i(\xi)\mathrm{d}\xi$$

电容的功率与能量



- 关联参考方向，吸收的功率：

$$p = vi = Cv\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

- 从$t = -\infty$到t时刻吸收的能量：

$$W_{\mathrm{C}}(t) = \int_{-\infty}^{t} v(\xi)i(\xi)\mathrm{d}\xi = C\int_{v(-\infty)}^{v(t)} v(\xi)\mathrm{d}v(\xi)$$

$$= \frac{1}{2}Cv^2(t) - \frac{1}{2}Cv^2(-\infty)$$

认为当$t = -\infty$时，$v(-\infty) = 0$

$$W_{\mathrm{C}}(t) = \frac{1}{2}Cv^2(t)$$

电容的功率与能量

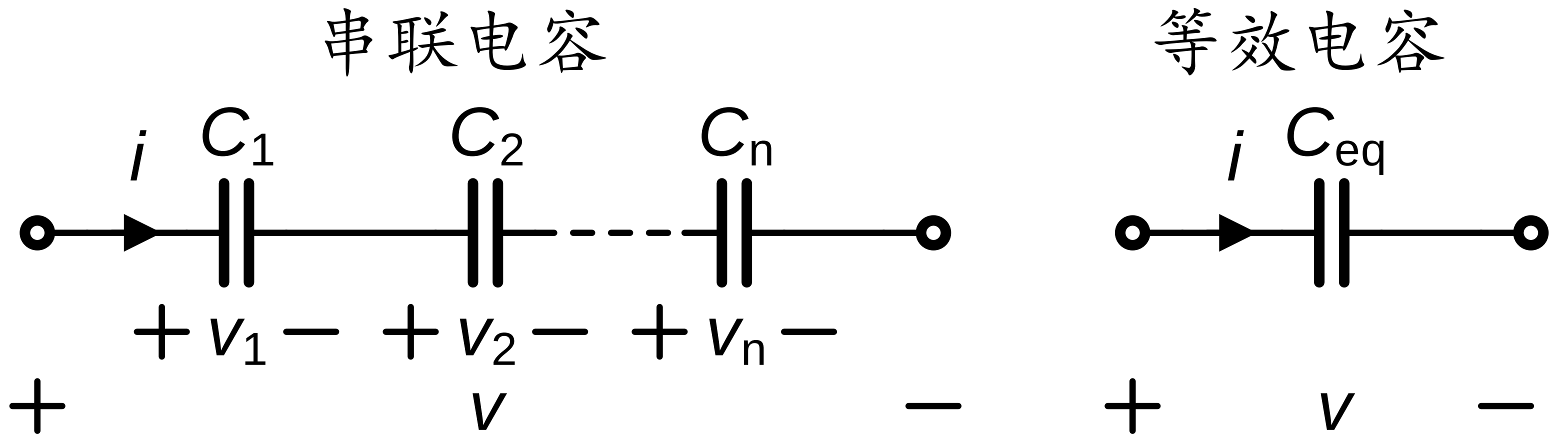
- 从t_1到t_2时刻，吸收的能量：

$$\Delta W_C = C\int_{v(t_1)}^{v(t_2)} v\mathrm{d}v = \frac{1}{2}Cv^2(t_2) - \frac{1}{2}Cv^2(t_1)$$

$$= W_C(t_2) - W_C(t_1)$$

  – 充电时吸收能量：$|v(t_2)|>|v(t_1)|$，$W_C(t_2)>W_C(t_1)$
  – 放电时释放电能：$|v(t_2)|<|v(t_1)|$，$W_C(t_2)<W_C(t_1)$
- 储能元件：
  – 不消耗电能，能量以电场形式存储
- 无源元件：
  – 不发出额外的能量

电容的串联



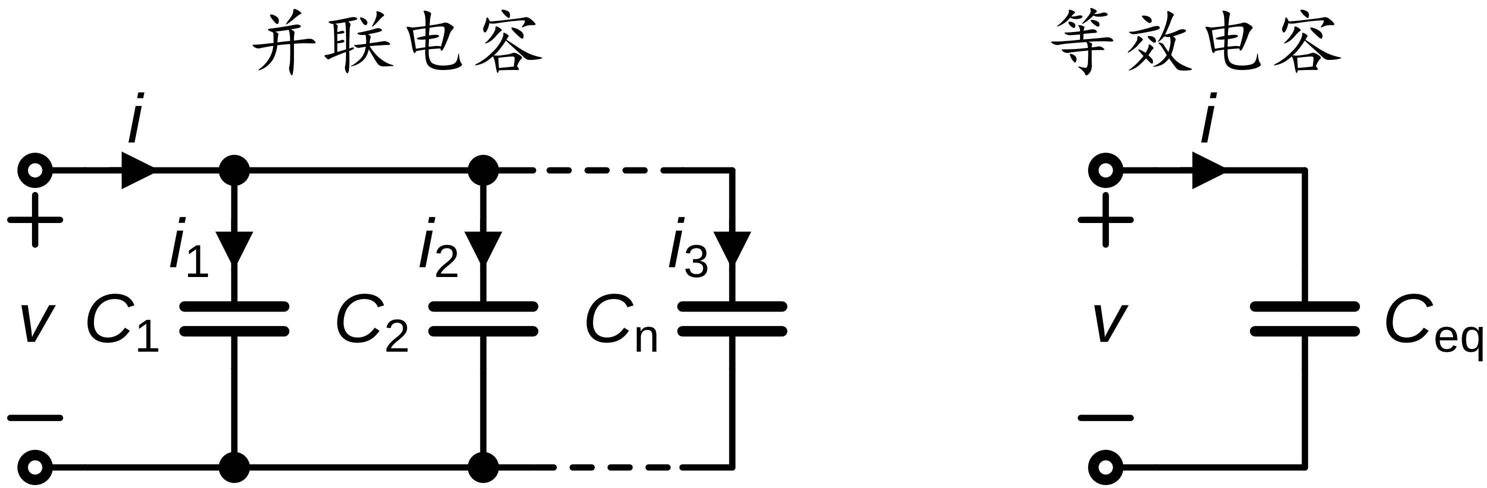
- 根据KVL

$$v = v_1 + \cdots + v_n = \frac{1}{C_1}\int_{-\infty}^{t} i\mathrm{d}\xi + \cdots + \frac{1}{C_n}\int_{-\infty}^{t} i\mathrm{d}\xi$$

$$= \frac{1}{C_{eq}}\int_{-\infty}^{t} i\mathrm{d}\xi \qquad \frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

串联等效电容的倒数等于各电容倒数之和。

电容的并联



- 根据KCL

$$i = i_1 + i_2 + \cdots + i_n = C_1 \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} + C_2 \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} + \cdots + C_n \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = C_{eq} \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \cdots + C_n$$

并联等效电容等于各电容之和。

例题1

如图所示，已知$C_1 = 1$ F，$C_2 = 2$ F，$R_1 = 4\ \Omega$，$R_2 = 6\ \Omega$，$R_3 = 12\ \Omega$，$I_S = 1$ A，电路处于直流工作状态，计算两个电容各自存储的电场能量。

在直流电路中电容相当于开路：

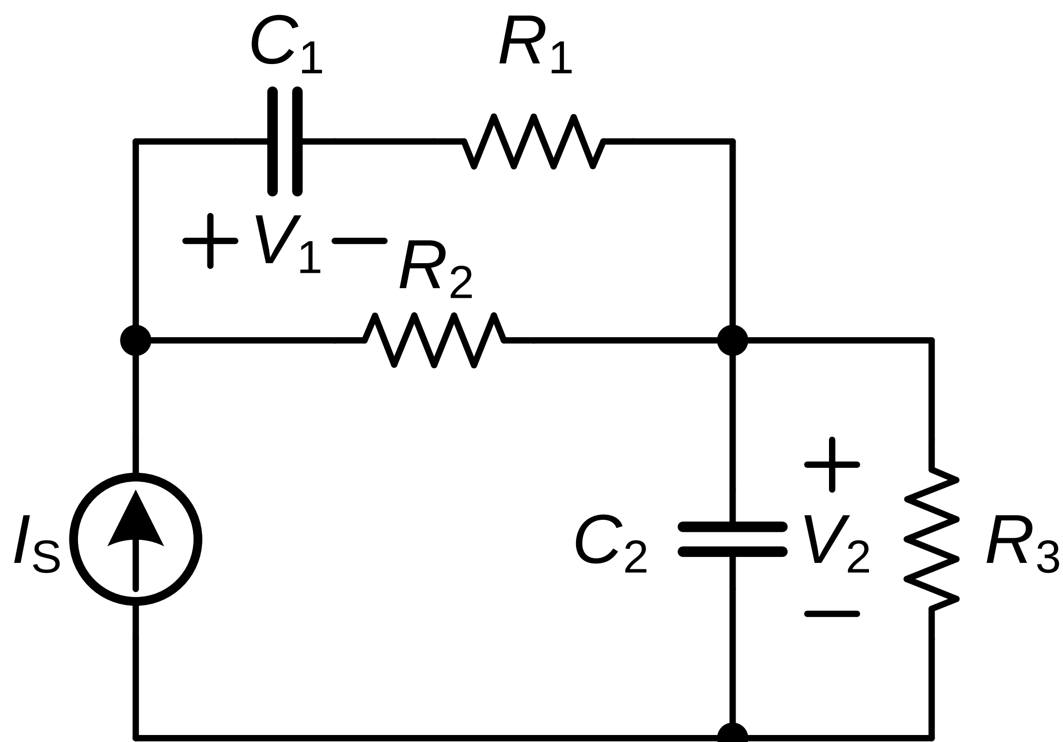
$$V_1 = I_S R_2 = 1 \times 6 = 6\ \text{V}$$

$$V_2 = I_S R_3 = 1 \times 12 = 12\ \text{V}$$

两个电容储存的电场能量：

$$W_1 = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 = 18\ \text{J}$$

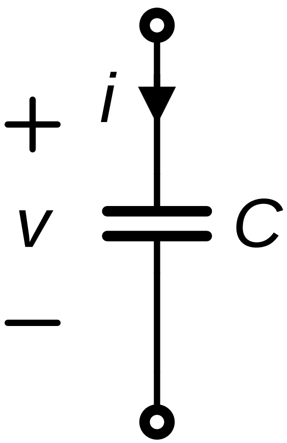
$$W_2 = \frac{1}{2} C_2 V_2^2 = 144\ \text{J}$$

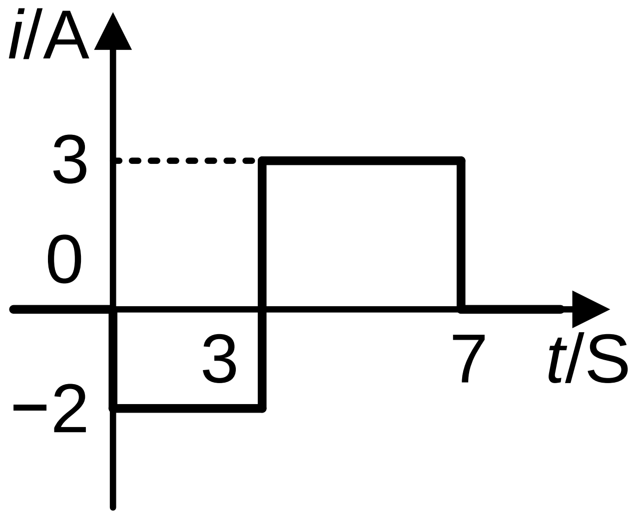


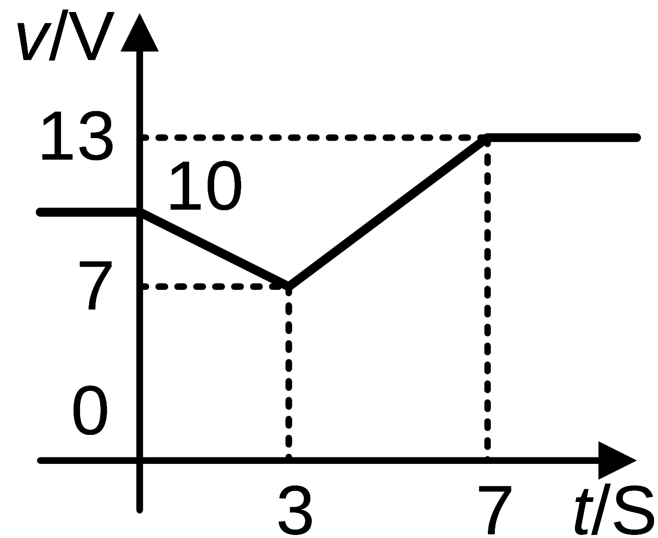
例题2

如流过电容$C = 2$ F的电流波形如下，设$v(0) = 10$ V，计算电容电压的变化波形。

$$v(t) = v(t_0) + \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} i(\xi)\mathrm{d}\xi$$







(0) $t \le 0$ S时， $i = 0$ A，保持，$v(t) = 10$ V；

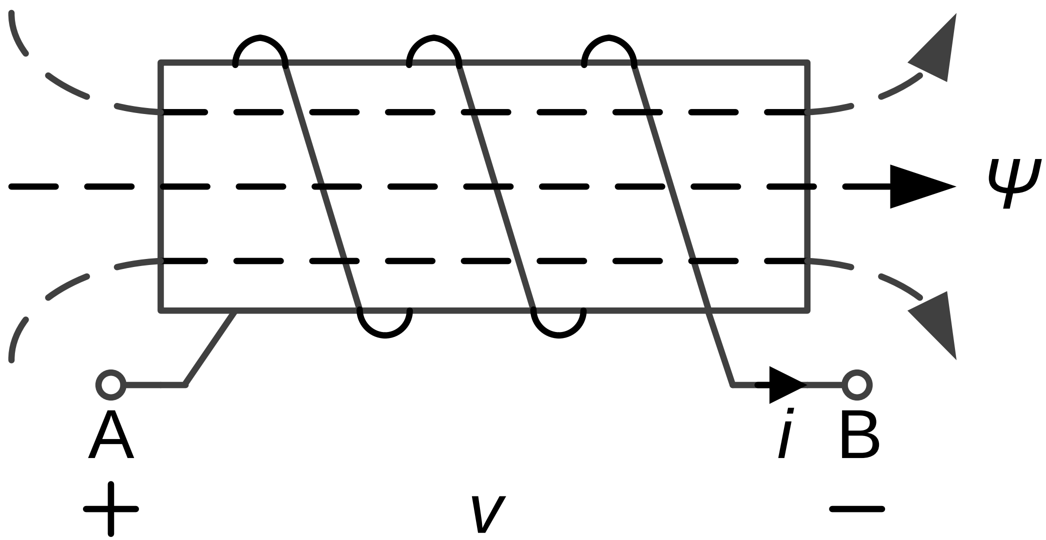
(1) $0 \le t \le 3$ S时，$i = -2$ A，放电，$v(t) = 10 - t$ V；

(2) $3\text{ S} \le t \le 7$ S时，$i = 3$ A，充电， $v(t) = 2.5 + 1.5t$ V；

(3) $7\text{ S} \le t$ 时， $i = 0$ A，保持，$v(t) = 13$ V。

电感元件

磁通量和感应电压



自感磁通链Ψ：由线圈电流i产生

感应电压：右手螺旋关系（楞次定律）

$$v = \frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}$$

电感

- 电感是储能元件：储存磁链和磁场能
- 线性电感：电感L是常量

$$\psi = Li$$

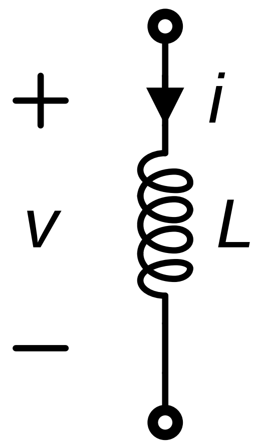
L：电感[系数]

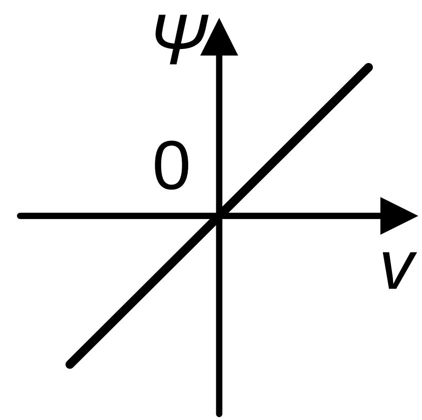
单位：H(亨利)

常用单位：

nH(纳亨, 10^{-9} H)

μH(微亨, 10^{-6} H)



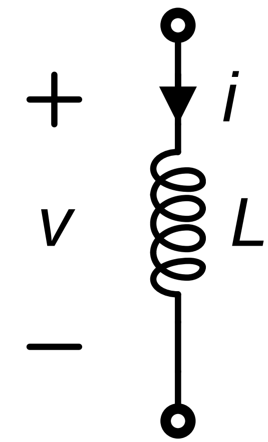


v和i取关联参考方向，L是正值。

电感的电压电流关系

- 关联参考方向：
  - 电流流入正极板方向
- 电感的电压：
  - 极板电荷的变化率

$$v=\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$



- 动态元件：
  - 端口电压与电流的时间变化率成正比
- 隔断交流：
  - 电流不随时间变化（直流）时，电压为零，相当于短路。

电感的电压电流关系

- 磁链ψ等于电压v对时间的积分
  - t时刻的磁链：该时刻以前电压的积累的结果
- 记忆元件：
  - 当前电流与t_0时刻电流有关

$$\psi(t)=\int_{-\infty}^{t}v(\xi)\mathrm{d}\xi$$

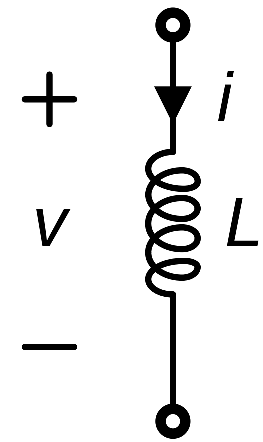
$$=\int_{-\infty}^{t_0}v(\xi)\mathrm{d}\xi+\int_{t_0}^{t}v(\xi)\mathrm{d}\xi$$

$$=\psi(t_0)+\int_{t_0}^{t}v(\xi)\mathrm{d}\xi$$

$$i(t)=i(t_0)+\frac{1}{L}\int_{t_0}^{t}v(\xi)\mathrm{d}\xi$$

电感的功率与能量

- 关联参考方向，吸收的功率：



$$p = vi = Li\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

- 从$t = -\infty$到t时刻吸收的能量：

$$W_{\mathrm{L}}(t) = \int_{-\infty}^{t} v(\xi)i(\xi)\mathrm{d}\xi = L\int_{i(-\infty)}^{i(t)} i\mathrm{d}i$$

$$= \frac{1}{2}Li^2(t) - \frac{1}{2}Li^2(-\infty)$$

认为当$t = -\infty$时，$i(-\infty) = 0$　　$W_{\mathrm{L}}(t) = \frac{1}{2}Li^2(t)$

电感的功率与能量

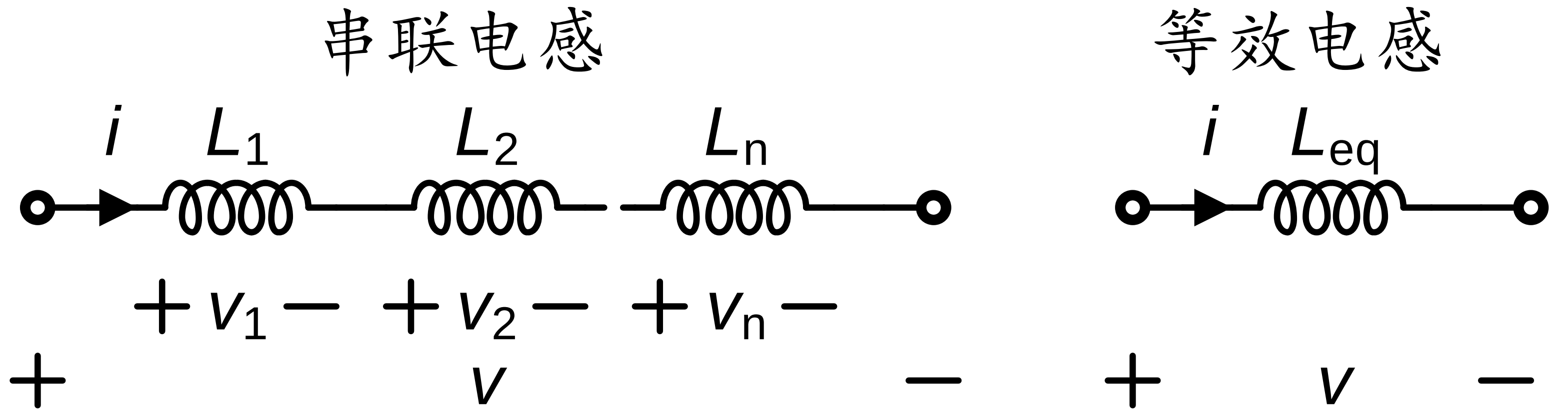
- 从t_1到t_2时刻，吸收的能量：

$$\Delta W_\mathrm{L} = L\int_{i(t_1)}^{i(t_2)} i\mathrm{d}i = \frac{1}{2}Li^2(t_2) - \frac{1}{2}Li^2(t_1)$$

$$= W_\mathrm{L}(t_2) - W_\mathrm{L}(t_1)$$

  – 充电时吸收能量：$|i(t_2)|>|i(t_1)|$，$W_\mathrm{L}(t_2)>W_\mathrm{L}(t_1)$
  – 放电时释放电能：$|i(t_2)|<|i(t_1)|$，$W_\mathrm{L}(t_2)<W_\mathrm{L}(t_1)$
- 储能元件：
  – 不消耗电能，能量以磁场形式存储
- 无源元件：
  – 不发出额外的能量

电感的串联



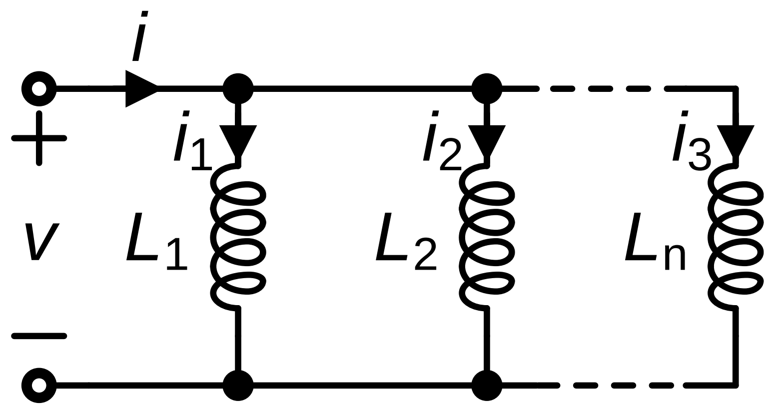
- 根据KVL

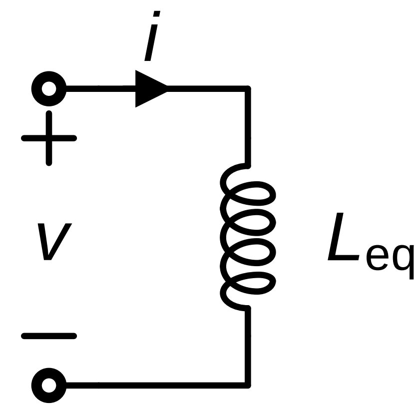
$$v = v_1 + \cdots + v_n = L_1 i\mathrm{dt} + \cdots + L_n i\mathrm{dt}$$
$$= L_{eq} i\mathrm{dt}$$

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \cdots + L_n$$

串联等效电感等于各电感之和。

电感的并联





- 根据KCL

$$i = i_1 + i_2 + \cdots + i_n = \frac{1}{L_1}\int_{-\infty}^{t} v(\xi)\mathrm{d}\xi + \cdots + \frac{1}{L_n}\int_{-\infty}^{t} v(\xi)\mathrm{d}\xi$$

$$= \frac{1}{L_{eq}}\int_{-\infty}^{t} v(\xi)\mathrm{d}\xi \qquad \frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \cdots + \frac{1}{L_n}$$

并联等效电感的倒数等于各电感倒数之和。

例题3

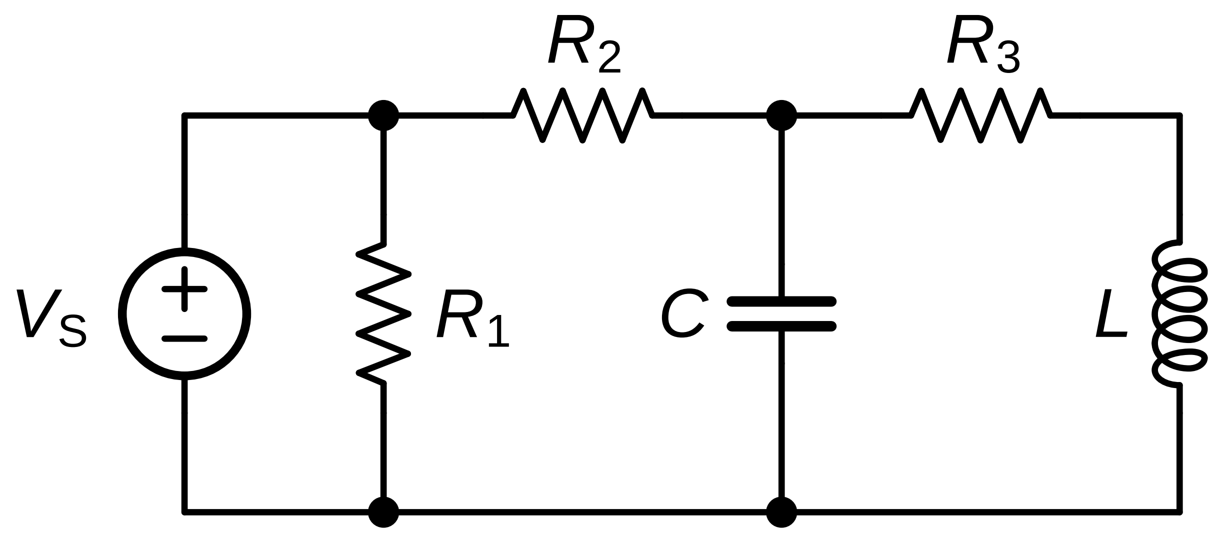
如图所示，已知$R_1 = 3\ \Omega$，$R_2 = 2\ \Omega$，$R_3 = 4\ \Omega$，$V_S = 6\ \text{V}$，$C = 1\ \text{F}$，$L = 2\ \text{H}$，求电容和电感各自存储的能量。

$$i_L = \frac{V_S}{R_2 + R_3} = 1\ \text{A}$$

$$v_C = i_L R_3 = 4\ \text{V}$$

$$W_C = \frac{1}{2} C v_C^2 = 8\ \text{J}$$

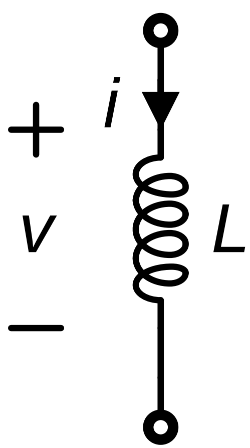
$$W_L = \frac{1}{2} L i_L^2 = 1\ \text{J}$$

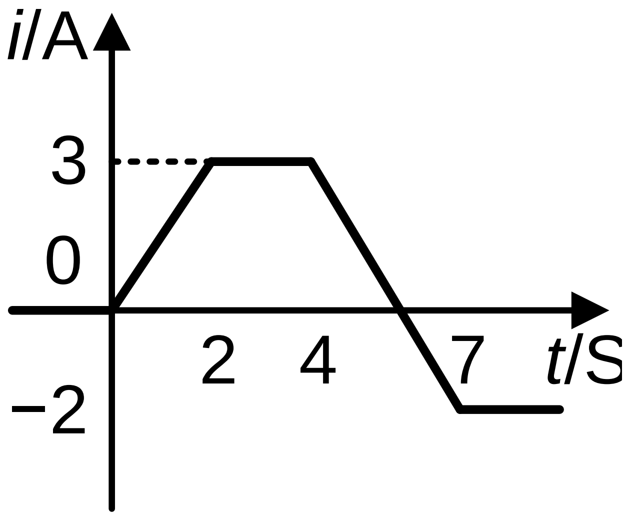


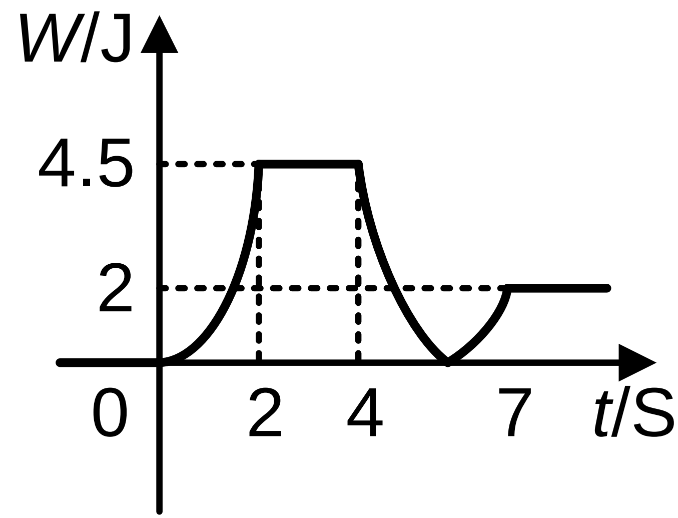
例题4

如图所示，已知流过电感$L = 1\ \mathrm{H}$的电流波形，求时间 $t > 0$时电感电压、吸收功率及储存能量的变化规律。

$$v = \frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t},\ p = vi,\ W = \frac{1}{2}Li^2$$

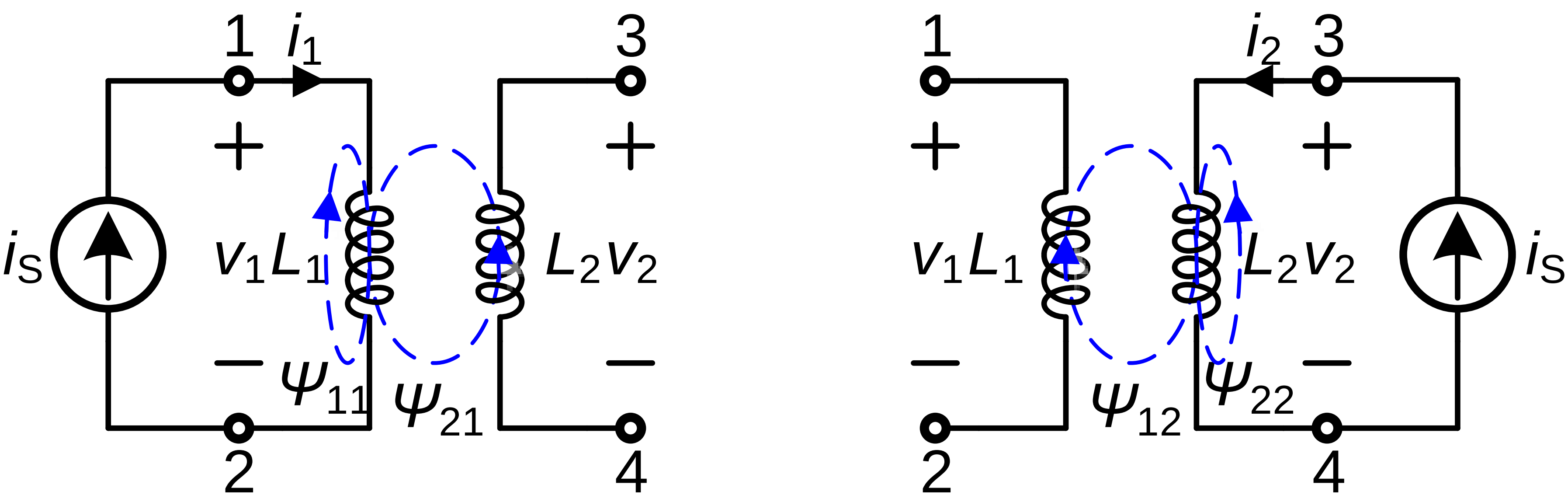






耦合电感

- 多端口电感：几个线圈之间存在着磁耦合
- 二端口电感：习惯上称为互感(元件)



耦合电感的磁链

- 总磁链：自感磁链和互感磁链的代数和
- 自感磁链和互感磁链均正比与激发它们的电流
- 电流与自感磁链的参考方向符合右手螺旋关系

$$\begin{cases} \Psi_1 = \Psi_{11} \pm \Psi_{12} = L_{11}i_1 \pm L_{12}i_2 \\ \Psi_2 = \pm \Psi_{21} + \Psi_{22} = \pm L_{21}i_1 + L_{22}i_2 \end{cases}$$

互感磁链前正负号：由自感磁链和互感磁链的方向而定，一致取“+”，否则取“−”。

耦合电感的磁链

$$\begin{cases} \Psi_1 = \Psi_{11} \pm \Psi_{12} = L_{11}i_1 \pm L_{12}i_2 \\ \Psi_2 = \pm\Psi_{21} + \Psi_{22} = \pm L_{21}i_1 + L_{22}i_2 \end{cases}$$

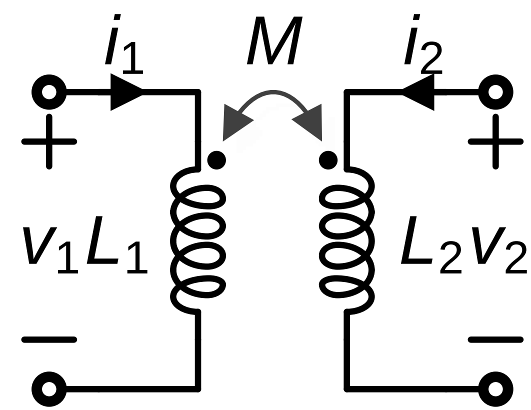
自感磁通链	Ψ_{11}	Ψ_{22}
互感磁通链	Ψ_{12}	Ψ_{21}

自感	L_{11}	L_{22}	一般简写为L_1，L_2
互感	L_{12}	L_{21}	通常实际线圈，$L_{12} = L_{21} = M$

$$\begin{cases} \Psi_1 = L_1 i_1 \pm M i_2 \\ \Psi_2 = \pm M i_1 + L_2 i_2 \end{cases}$$

耦合电感的同名端与异名端

- 互感磁通的符号+/-：
  - 取决于线圈的相对绕向和电流的流向
  - 根据电流进/出同名端的方向来判断
- 同名端：
  - 带有黑点的两个端子
  - 用来表示两个线圈的相对绕向
- 异名端
  - 黑点端子与非黑点端子



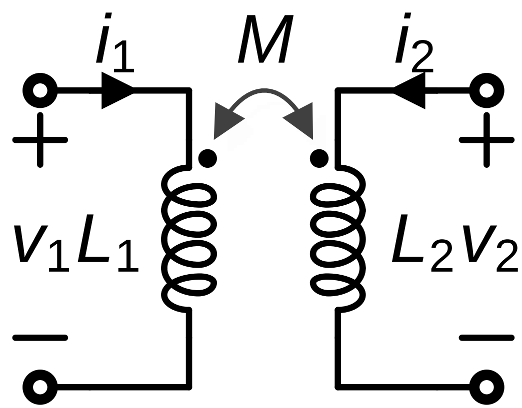
耦合电感的电路符号

耦合电感的同名端与异名端

- 两个端口电流都流进(或流出)同名端
  - 它们所激发的自感磁链和互感磁链方向一致
  - 总磁链在原自感磁链基础上增强
  - 互感磁链前应取正号
- 两个端口电流都流进(或流出)异名端
  - 它们所激发的自感磁链与互感磁链方向相反
  - 总磁链在原自感磁链基础上削弱
  - 互感磁链前应取负号

耦合电感的电压电流关系

- 自感磁通与电流符合右手螺旋关系
- 端口电压与电流为关联参考方向

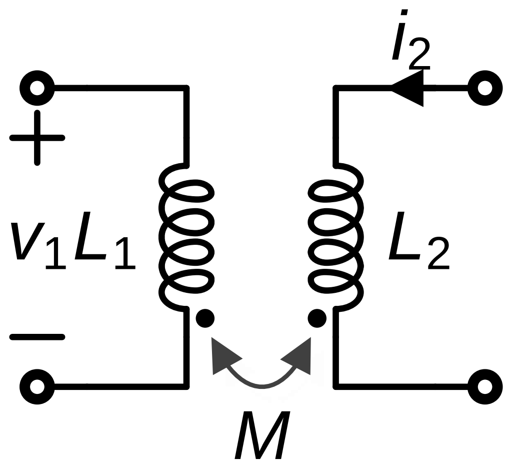


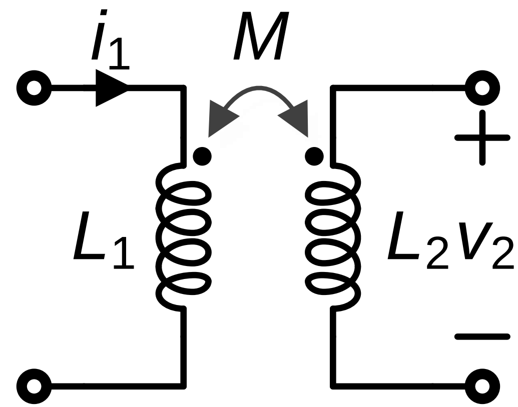
$$\begin{cases} v_1 = \dfrac{\mathrm{d}\Psi_1}{\mathrm{d}t} = L_1\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \pm M\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \\ v_2 = \dfrac{\mathrm{d}\Psi_2}{\mathrm{d}t} = \pm M\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_2\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \end{cases}$$

例题5

如图所示，电流已知，请写出电压表达式。

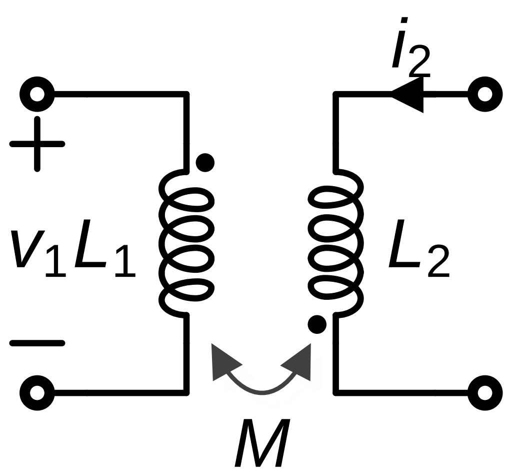
$$v_1 = M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

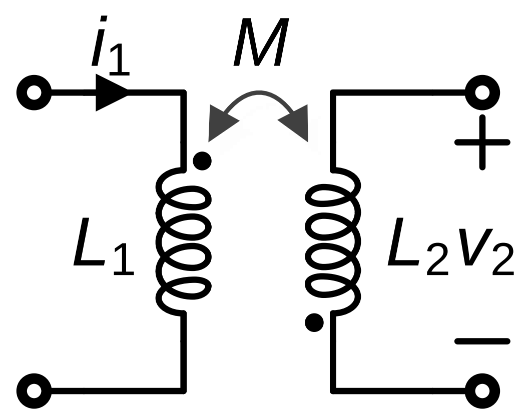




$$v_2 = M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$

$$v_1 = -M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$





$$v_2 = -M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$

耦合电感的功率和能量

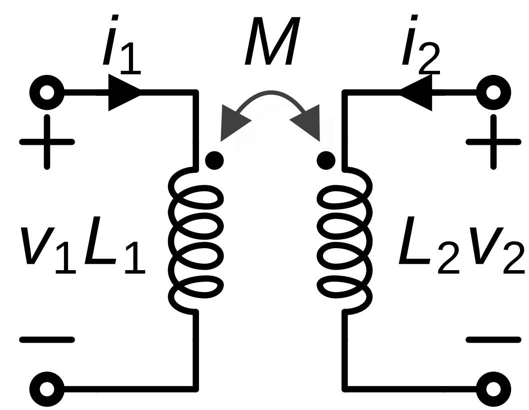
- 关联参考方向，消耗的总功率为：

$$p = v_1 i_1 + v_2 i_2 = \left(L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \pm M \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \right) i_1 + \left(\pm M \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \right) i_2$$

$$= \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2} L_1 i_1^2 \right) \pm \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(M i_1 i_2 \right) + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2} L_2 i_2^2 \right)$$

$$= \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2} L_1 i_1^2 \pm M i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 \right)$$

$$= \frac{\mathrm{d}W_\mathrm{m}}{\mathrm{d}t}$$



耦合电感的功率和能量

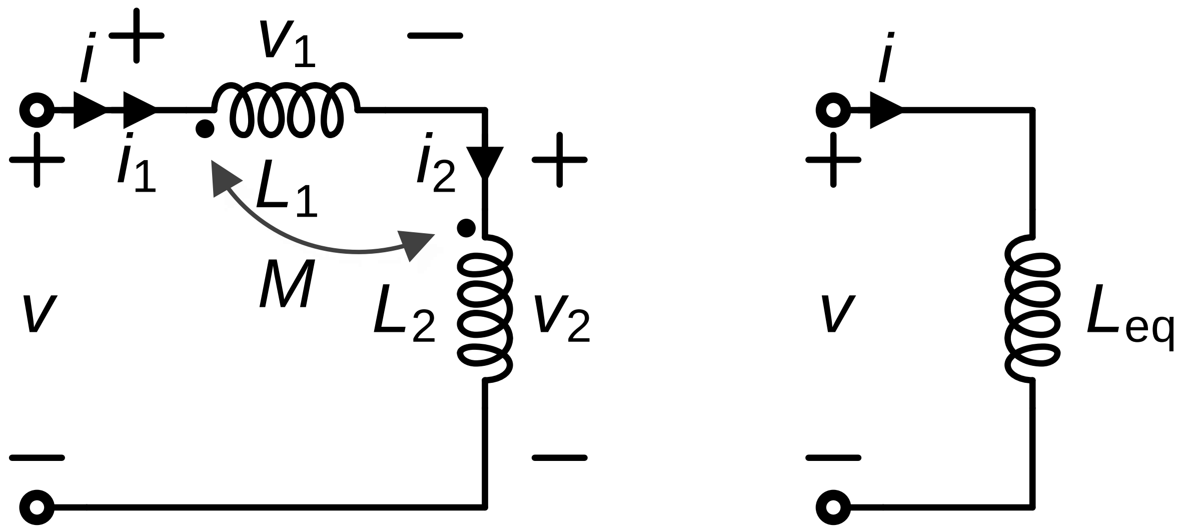
- 耦合电感的吸收能量将全部转化为磁场能量

$$W_m = \frac{1}{2}L_1 i_1^2 + \frac{1}{2}L_2 i_2^2 \pm M i_1 i_2$$

- 没有磁耦合：
  - $M = 0$，磁场能量是两个自感元件储能之和
- 存在磁耦合：
  - 要增/减一项Mi_1i_2
  - 增/减视互感的作用是使磁场增强还是使磁场减弱而定

耦合电感的串联：正串

正串：电流从同名端流入

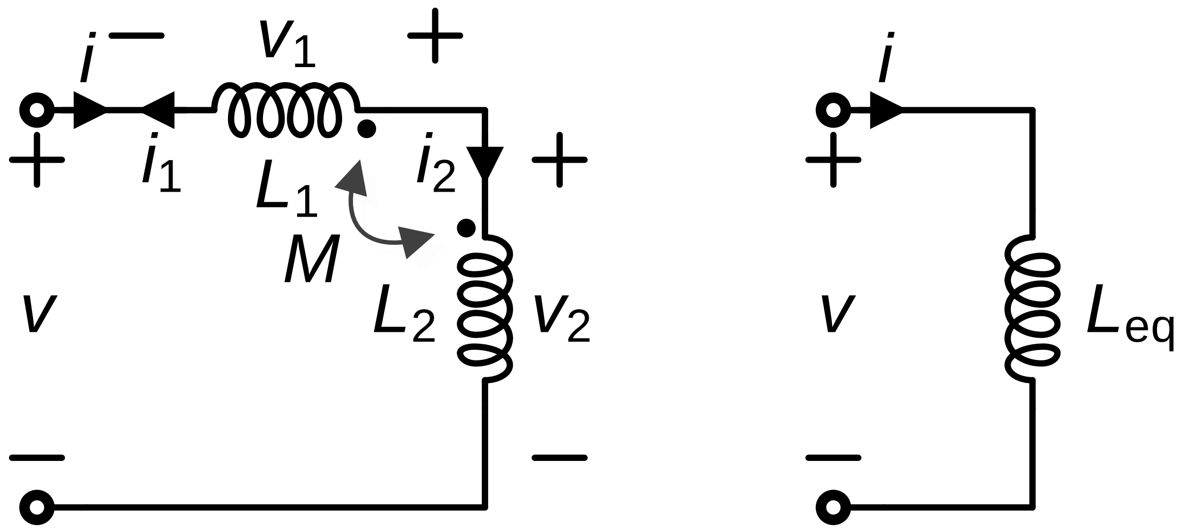


$$v=v_1+v_2=(L_1\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+M\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t})+(M\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+L_2\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t})$$

$$=(L_1+L_2+2M)\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=L_{eq}\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\longrightarrow L_{eq}=L_1+L_2+2M$$

耦合电感的串联：反串

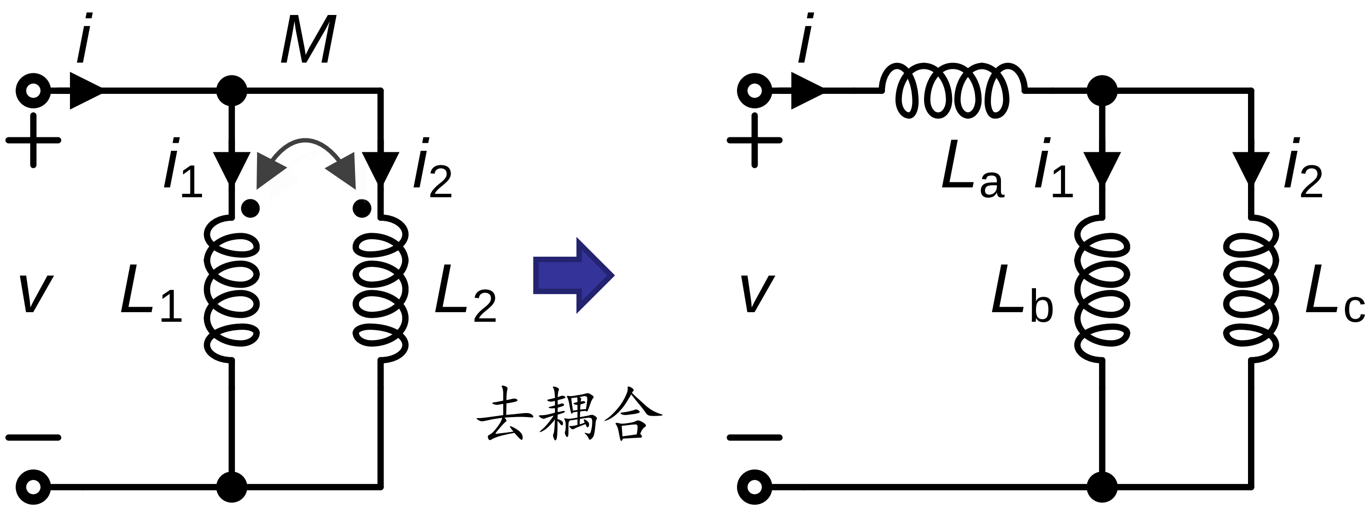
反串：电流从异名端流入



$$v = -v_1 + v_2 = -(L_1 \frac{\mathrm{d}(-i)}{\mathrm{d}t} + M \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}) + (M \frac{\mathrm{d}(-i)}{\mathrm{d}t} + L_2 \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t})$$

$$= (L_1 + L_2 - 2M) \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = L_{eq} \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \longrightarrow L_{eq} = L_1 + L_2 - 2M$$

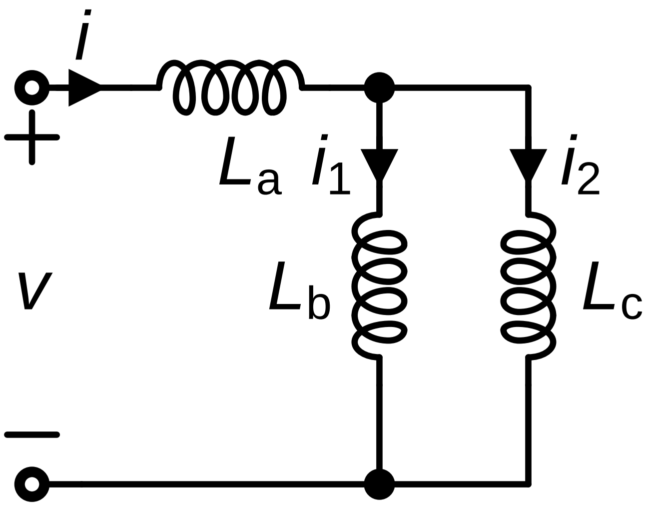
耦合电感的并联：同名端并联



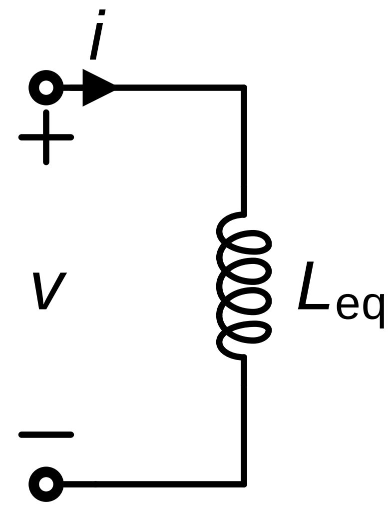
$$\begin{cases} L_a = M \\ L_b = L_1 - M \\ L_c = L_2 - M \end{cases}$$

$$\begin{cases} i = i_1 + i_2 \\ v = L_1 \dfrac{di_1}{dt} + M \dfrac{di_2}{dt} \\ v = M \dfrac{di_1}{dt} + L_2 \dfrac{di_2}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v = M \dfrac{di}{dt} + \left(L_1 - M\right) \dfrac{di_1}{dt} = L_a \dfrac{di}{dt} + L_b \dfrac{di_1}{dt} \\ v = M \dfrac{di}{dt} + \left(L_2 - M\right) \dfrac{di_2}{dt} = L_a \dfrac{di}{dt} + L_c \dfrac{di_2}{dt} \end{cases}$$

耦合电感的并联：同名端并联



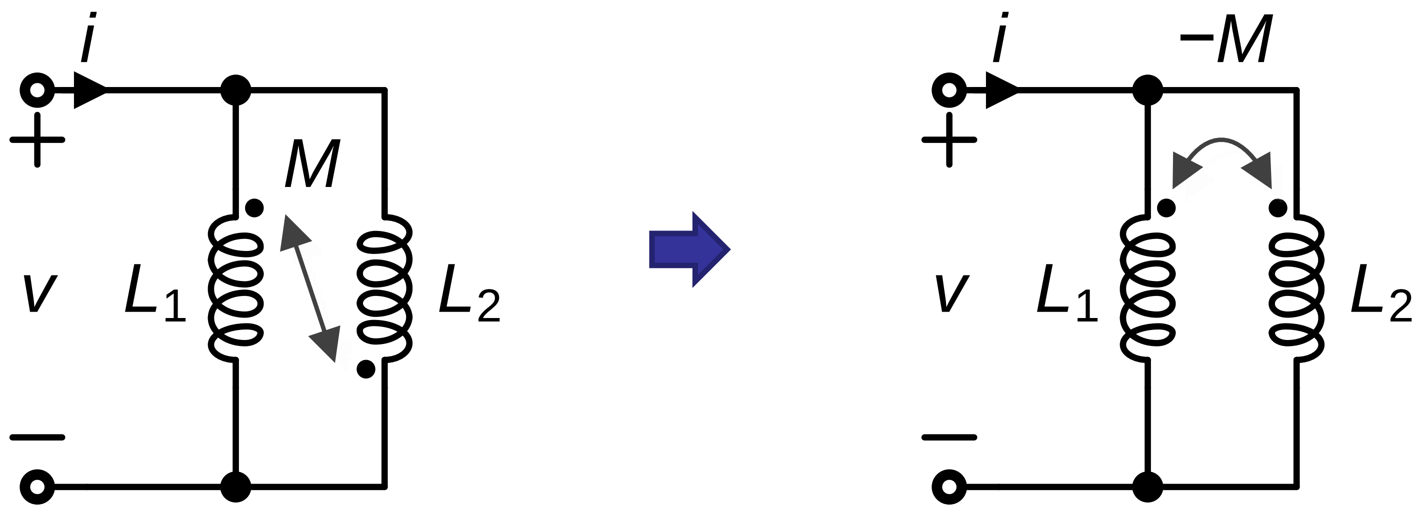
$$\begin{cases} L_a = M \\ L_b = L_1 - M \\ L_c = L_2 - M \end{cases}$$



根据电感的串/并联等效

$$L_{eq} = L_a + \frac{L_b L_c}{L_b + L_c} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$$

耦合电感的并联：异名端并联



$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}$$

耦合系数

- 耦合系数

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

- 衡量耦合的程度
  - $0 \le k \le 1$
  - $k = 1$：全耦合
  - $k = 0$：两线圈无磁耦合

耦合系数

- 实际的耦合线圈
  - 无论何种串联或何种并联，等效电感均为正值
  - 自感和互感满足如下关系：

$$M \le \frac{1}{2}(L_1 + L_2) \qquad M \le \sqrt{L_1 L_2}$$

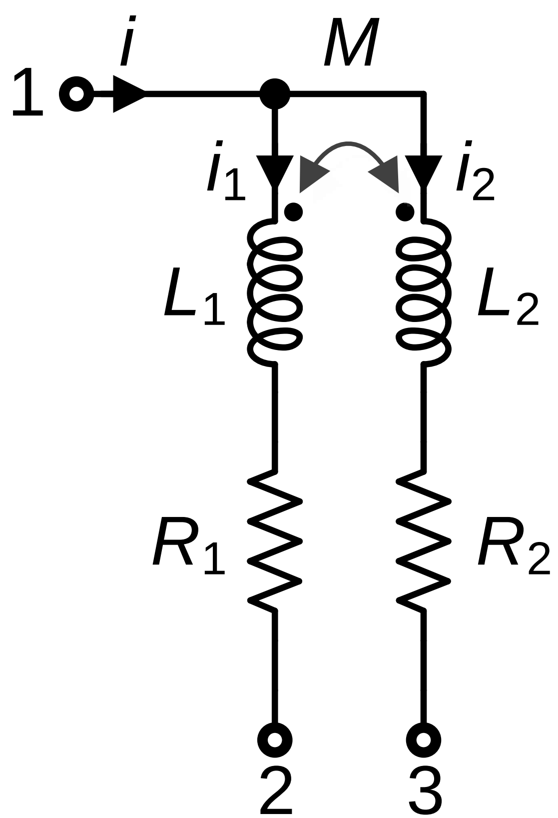
- 耦合系数满足

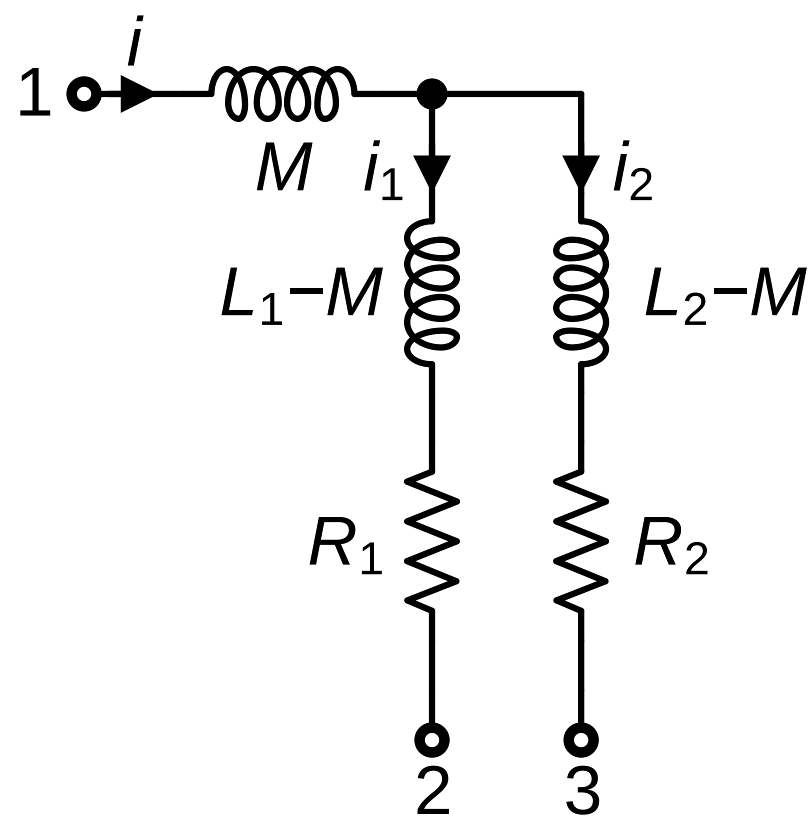
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \le 1$$

$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$$

$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}$$

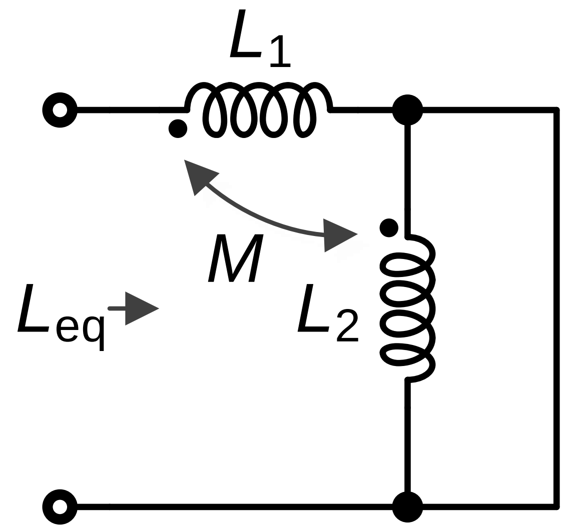
含电阻的耦合电感的去耦合等效





例题6

如图所示，求等效电感值L_{eq}。



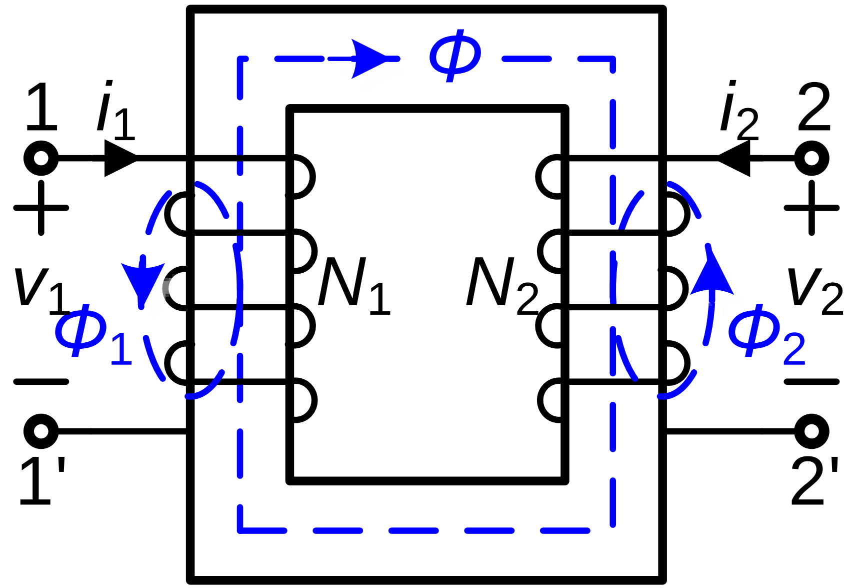
$$\begin{cases} v = L_1 \dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + M \dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \\ 0 = M \dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + L_2 \dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \end{cases}$$

$$\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} = -\frac{M}{L_2}\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

$$v = \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right)\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

$$L_{eq} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$$

理想变压器



变压器示意图

- 理想变压器的假设
  - 铁心的磁导率：$\mu \rightarrow \infty$
  - 每个线圈的漏磁通为零，两个线圈全耦合，则有磁链与铁心内磁通的关系为：$\Psi_1 = N_1\Phi \quad \Psi_2 = N_2\Phi$

理想变压器的端口方程

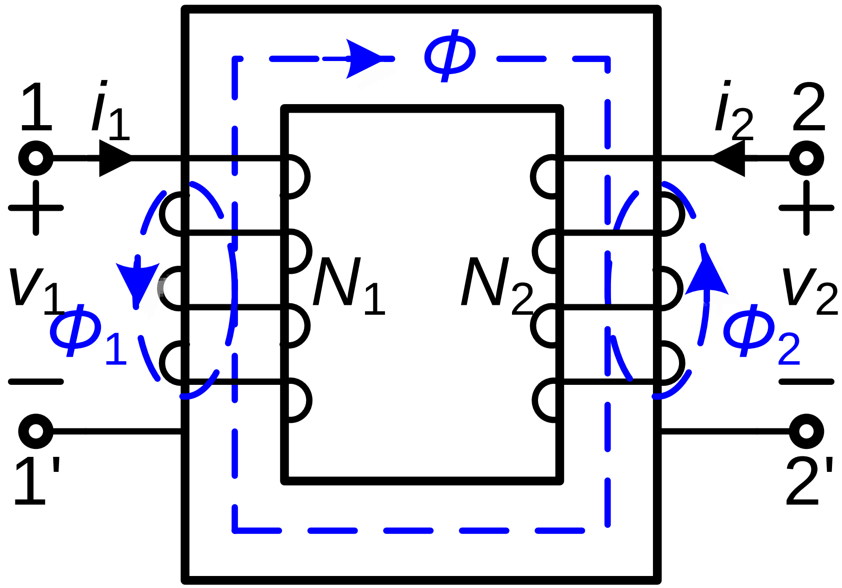
- 理想变压器的假设
  - 线圈电阻为零，关联参考方向，右手螺旋法则

$$\begin{cases} v_1 = \dfrac{\mathrm{d}\Psi_1}{\mathrm{d}t} = N_1 \dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \\ v_2 = \dfrac{\mathrm{d}\Psi_2}{\mathrm{d}t} = N_2 \dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dfrac{v_1}{v_2} = \dfrac{\mathrm{N}_1}{\mathrm{N}_2} = \mathrm{n} \\ v_1 = n v_2 \end{cases}$$

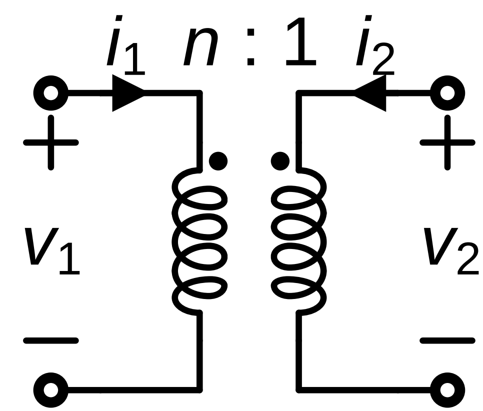
$$\int_l H\mathrm{d}l = N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0 \Rightarrow \begin{cases} \dfrac{i_1}{i_2} = -\dfrac{\mathrm{N}_2}{\mathrm{N}_1} = -\dfrac{1}{n} \\ i_1 = -\dfrac{1}{n} i_2 \end{cases}$$

n：变比(匝数比)

理想变压器的符号



变压器示意图



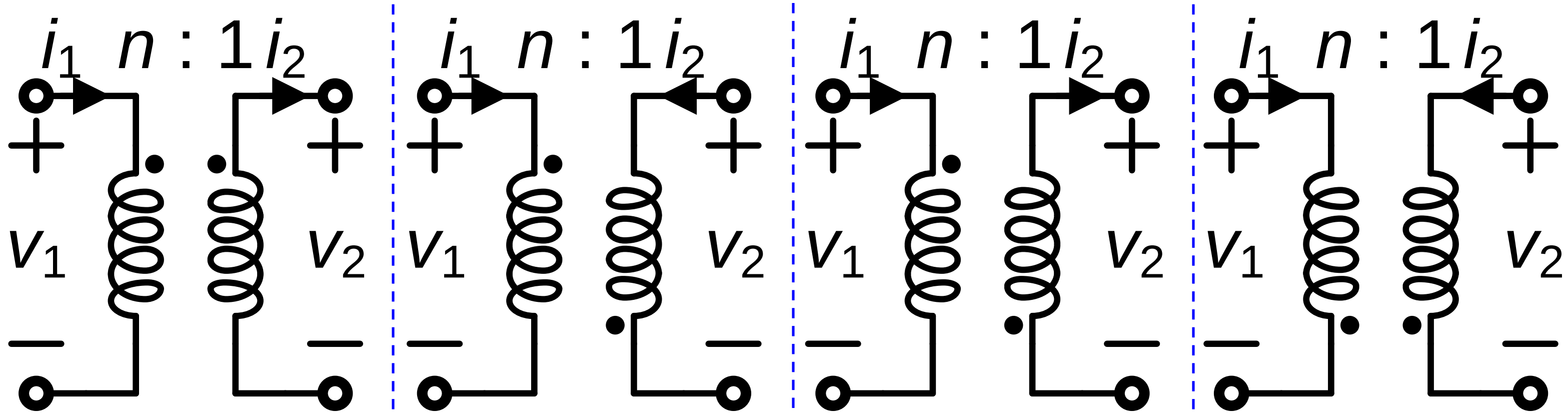
理想变压器符号

v_1和v_2的参考方向相对星标是相同的，否则要改变符号。

i_1和i_2的参考方向相对星标是相同的，否则要改变符号。

例题7

如图所示，请写出电压/电流的表达式。



$$\begin{cases} v_1 = nv_2 \\ i_1 = \dfrac{1}{n} i_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 = -nv_2 \\ i_1 = \dfrac{1}{n} i_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 = -nv_2 \\ i_1 = -\dfrac{1}{n} i_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 = nv_2 \\ i_1 = -\dfrac{1}{n} i_2 \end{cases}$$

理想变压器的功率

$$p = v_1 i_1 + v_2 i_2 = (n v_2)(-\frac{i_2}{n}) + v_2 i_2$$
$$= -v_2 i_2 + v_2 i_2 = 0$$

- 非储能元件
  - 无源元件
  - 每一瞬间输入功率等于输出功率
  - 传输过程中既无能量损耗，也无能量存储

理想变压器特性

- 电压电流特性
  - 电压和电流之间没有直接的关系

$$v_1 = nv_2 \qquad i_1 = -\frac{1}{n}i_2$$

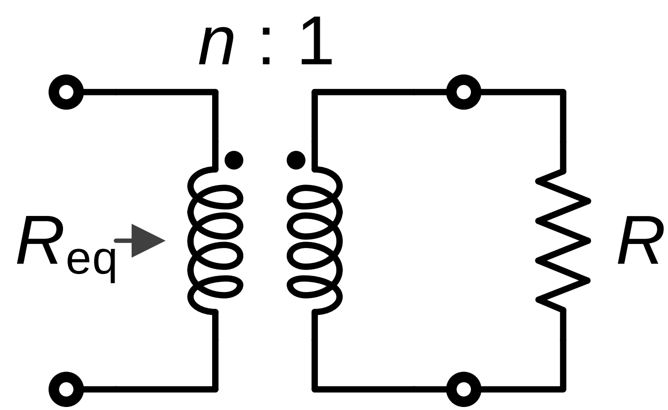
- 能量特性 $p = 0$
- 只限于交流：
  - 电压/电流必须是变化的

例题8

如图所示，求等效电阻R_{eq}。

$$R_{eq} = \frac{v}{i} = \frac{nv_2}{-i_2/n}$$

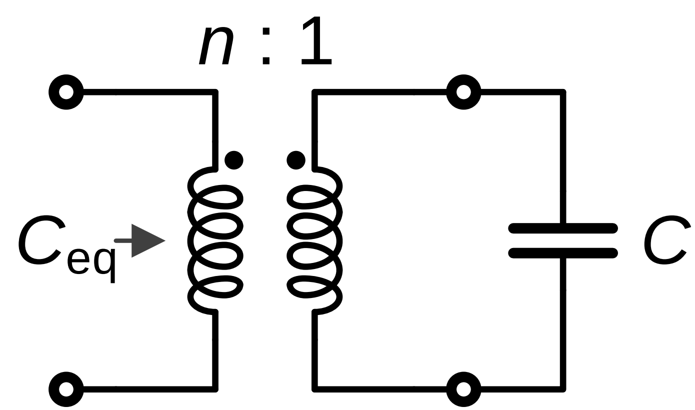
$$= n^2\frac{v_2}{-i_2} = n^2 R$$



理想变压器具有电阻变换功能。

例题9

如图所示，求等效电容C_{eq}。



$$C_{eq} = \frac{i}{\mathrm{d}v/\mathrm{d}t} = \frac{-i_2/n}{\mathrm{d}(nv_2)/\mathrm{d}t}$$

$$= \frac{1}{n^2}\frac{-i_2}{\mathrm{d}v_2/\mathrm{d}t} = \frac{1}{n^2}C$$

$$\frac{1}{2}C_{eq}v^2 = \frac{1}{2}Cv_2^2$$

$$C_{eq} = C\frac{v_2^2}{v^2} = \frac{C}{n^2}$$