磁场中磁介质：

$F = qv\times B$.

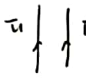
$F = \int I dl\times B = \int i\times B dS = \int j\times B dV$.

$L = r\times F$

(1) 线电流元在其附近 $B=0$.

(2) 面电流元：$B = \frac{\mu_0 i}{2}$

载流线圈在均匀磁场中受力矩：$L = m\times B$ $m = I\cdot S$



两无限长载流导线：$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r_0}$

$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

电流强度I，单位长度匝数n的无限长螺线管：

$i = nI$.

沿轴：$B_t = \mu_0 n I$（内） $B_t = 0$（外）.

AS：$Bl = \pm \frac{\mu_0 n I}{2}$

⇒ 内：$B = \frac{\mu_0 n I}{2}$ = 外

细螺绕环：

$H\cdot 2\pi r = NI$.

$H = nI$

$B = \mu H = \mu n I$.

磁化强度：$\vec{M} = \frac{\Sigma m_{分子}}{\Delta V}$ —磁矩矢量和.

分子平均磁矩：$m_a = \frac{\Sigma m_{分子}}{n\Delta V}$ n：分子数密度.

$\Rightarrow M = n m_a$

$\oint M\cdot dl = \Sigma I'$.

$i' = M\times n$.

磁矩守恒、在缓变的磁场中运动：$\mu = \frac{\frac{1}{2}m v_\perp^2}{B} = const$

$R = \sqrt{\frac{2m\mu}{q^2 B}}$ $B\downarrow$ $R\uparrow$ $v_\perp\downarrow$ $v_\parallel\uparrow$.

磁镜：$\sin^2\theta_m = \frac{B_0}{B_m} = \frac{1}{R_m}$

磁镜比

磁介质中静磁场基本方程：

$\oint_S B\cdot dS = 0$.

$\oint_L B\cdot dl = \mu_0 \Sigma I_0 + \mu_0 \Sigma I'$

$H = \frac{B}{\mu_0} - M$.

$\oint_L H dl = \Sigma I_0$

$\Rightarrow$ $M = \chi_m H$ $\mu_r \equiv 1+\chi_m$ 相对磁导率.

$B = \mu H = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0(1+\chi_m)H$.

磁质分类：$M = \frac{\mu_0 n_0 m_0^2}{3kT} H \Rightarrow \chi_m = \frac{\mu_0 n_0 m_0^2}{3kT}$

$m_0 \neq 0$.

① 顺磁质 $\chi_m>0$. $\mu>\mu_0$: $\chi_m = \frac{C}{T}$

② 抗磁质 $\chi_m<0$ $\mu<\mu_0$

$m_0 = 0$ $\chi_m = -\frac{\mu_0 n_0 Z e^2}{6m_e}\overline{r^2}$

一个分子中电子数.

↓

与T无关

③ 铁磁质：↑ ↑↑

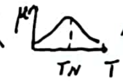
硬磁材料：磁滞回线宽：永磁体.

软磁材料：…窄：高磁导率.

$T_c\uparrow$ → 顺磁性 $\chi_m = \frac{C}{T-T_c}$

④ 亚铁磁质 ↑↓↑↓

⑤ 反铁磁质

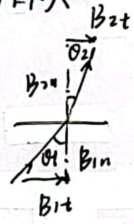


↑↓↑↓

边值关系：$n\cdot(B_2-B_1)=0$.

$i' = n\times(M_2-M_1)$ ⇒

$i_0 = n\times(H_2-H_1)$.



$B_{2n}=B_{1n}$.

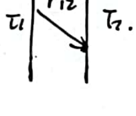
$H_{2t}=H_{1t}$.

$\tan\theta_1 = \frac{B_{1t}}{B_{1n}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}\tan\theta_2 \Rightarrow \frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$.

重合就H、E.

垂直就D、B.

安培定律：$dF_{12} = k\frac{I_2 d\vec{l}_2\times(I_1 d\vec{l}_1\times\vec{r}_{12})}{r_{12}^3}$



$k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7} N/A^2$

$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I d\vec{l}\times\frac{\vec{r}}{r^3}$ $\vec{r}$：

半径R圆形电流：

$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{\vec{m}}{(\rho^2+z^2)^{\frac{3}{2}}}$

$\vec{B} = -\frac{\mu_0\vec{m}}{4\pi r_0^3} + \frac{3\mu_0(\vec{m}\cdot\vec{r}_0)}{4\pi r_0^3}\vec{r}_0$

磁路定理：$\oint H\cdot dl=\Sigma I_0=\mathscr{E}_m$ 磁动势．$R_m=\oint \frac{dl}{\mu S}$ 磁阻．

$\mathscr{E}_m=\Phi_B\cdot R_m \Rightarrow NI_0=\Phi_B\cdot(R_{m1}+R_{m2}+\cdots+R_{mi})$

互感：$\psi_{12}=M_{12}I_1$．

$\psi_{21}=M_{21}I_2$

$M_{12}=M_{21}=M$．

自感：$\psi=LI$．　$\varepsilon=-L\frac{dI}{dt}$

串联：顺接：$\varepsilon=\varepsilon_1+\varepsilon_2=-(L_1\frac{dI}{dt}+L_2\frac{dI}{dt}+2M\frac{dI}{dt})=-\underbrace{(L_1+L_2+2M)}_{L'}\frac{dI}{dt}$．

逆接：$L'=L_1+L_2-2M$　$M<\frac{1}{2}(L_1+L_2)$．

并联：同名端：$\varepsilon=\varepsilon_1=\varepsilon_2$　$I=I_1+I_2$．

$\varepsilon=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2-2M}\frac{dI}{dt}$　$L'=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2-2M}$．　$M<\sqrt{L_1L_2}$．令 $M=k\sqrt{L_1L_2}$

异名端：$\varepsilon=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2+2M}\frac{dI}{dt}$．　$L'=\frac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2+2M}$

k 耦合系数．1：理想　0：无耦

不能将变压器原副线圈并联 $L=0$ 短路

似稳：电源周期 $T\gg$ 电场传一周用时 t．$\lambda\gg l$ 似稳条件．　电路尺寸．

$\lambda=c\cdot T$＝电源变化一周期时间里电场传的距离．

$j=\sigma E=\sigma(E_库+E_旋+K)$．

$E_库=E_源+E_阻+E_容+E_感$．

① 电源：

$E_旋=0$．$\sigma\to\infty$．$\frac{j}{\sigma}=0\Rightarrow E_库=-K$．

$\int_源 E_库\cdot dl=-\int K\cdot dl=-\varepsilon$．

② 电阻．

$E_库=\frac{j}{\sigma}$　$U_R=IR$．

$K=0$　$E_旋=0$．

③ 电容：

$U_C=\frac{Q}{C}=\int\frac{1}{C}i\,dt$

$K=0$　$E_旋=0$

$j=0$　$\sigma=0$．

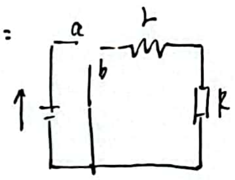
④ 电感．

$K=0$．$\frac{j}{\sigma}=0\Rightarrow E_库=-E_旋$　（$\sigma\to\infty$）

$U_L=\int_感 E_库\cdot dl=-\int E_旋\cdot dl=-\varepsilon_L=L\frac{dI}{dt}+M\frac{di'}{dt}$

似稳方程：$\varepsilon=iR+\frac{1}{C}\int i\,dt+(L\frac{di}{dt}+M\frac{di'}{dt})$

一．RL：

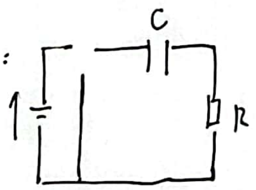


充电：$\left.\begin{aligned}&\varepsilon=iR+L\frac{di}{dt}\\&i|_{t=0}=0\end{aligned}\right\}\Rightarrow i=\frac{\varepsilon}{R}(1-e^{-\frac{R}{L}t})$　令 $\frac{L}{R}=\tau \Rightarrow i=I_0(1-e^{-\frac{t}{\tau}})$

经过时间 τ 达到 $63\% I_0$．

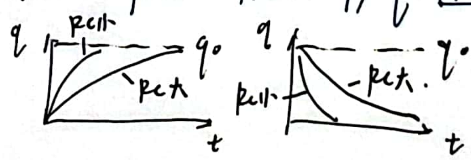
放电：$\left.\begin{aligned}&L\frac{di}{dt}+iR=0\\&i|_{t=0}=I_0\end{aligned}\right\}\Rightarrow i=I_0e^{-\frac{t}{\tau}}$．经过 τ 时间，达到 $37\% I_0$．

二．RC：

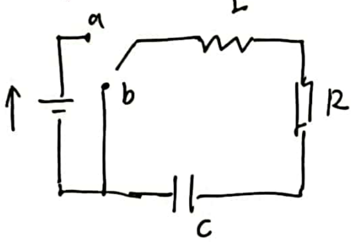


充电：$\left.\begin{aligned}&\varepsilon=\frac{dq}{dt}R+\frac{q}{C}\\&q|_{t=0}=0\end{aligned}\right\}\Rightarrow q=C\varepsilon(1-e^{-\frac{t}{RC}})=q_0(1-e^{-\frac{t}{\tau}})$ 经过 τ 达到 $63\% q_0$

放电：$\left.\begin{aligned}&\frac{dq}{dt}\cdot R+\frac{q}{C}=0\\&q|_{t=0}=q_0\end{aligned}\right\}\Rightarrow q=C\varepsilon e^{-\frac{t}{RC}}=q_0e^{-\frac{t}{\tau}}$ 经过 τ 时达到 $37\% q_0$．$\boxed{RC=\tau}$



三、RLC：



充电：$L\frac{d^2q}{dt^2}+R\cdot\frac{dq}{dt}+\frac{q}{C}=\varepsilon$.

同除L，令 $\beta=\frac{R}{2L}$，$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}$，$q_0=C\varepsilon$：

$$\begin{cases}\frac{d^2q}{dt^2}+2\beta\frac{dq}{dt}+\omega_0^2q=\omega_0^2q_0 \\ q|_{t=0}=0,\quad \frac{dq}{dt}\Big|_{t=0}=0\end{cases}$$

β：阻尼系数，ω_0：固有频率.

$\Downarrow$

(1)、欠阻尼 $\beta<\omega_0$

$q=q_0-q_0e^{-\beta t}(\cos\omega t+\frac{\beta}{\omega}\sin\omega t)$

$\omega=\sqrt{\omega_0^2-\beta^2}$

(2)、过阻尼（q随t↑而↑，β（$=\frac{R}{2L}$）↑上升越慢）$\beta>\omega_0$　当$\beta\to\infty$，即$L\to0$，回到RC电路

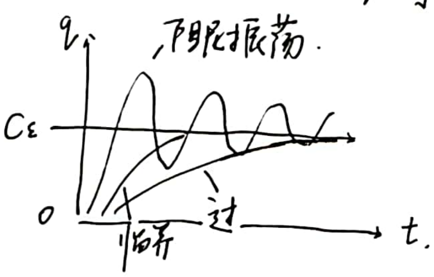
$q=q_0-\frac{1}{2\gamma}q_0e^{-\beta t}((\beta+\gamma)e^{\gamma t}-(\beta-\gamma)e^{-\gamma t})$

$\gamma=\sqrt{\beta^2-\omega_0^2}$

(3)、临界阻尼 $\beta=\omega_0$.

$q=q_0-q_0(1+\beta t)e^{-\beta t}$

q也随t↑而↑，但比过阻快



放电：$\frac{d^2q'}{dt^2}+2\beta\frac{dq'}{dt}+\omega_0^2q'=0$

$q'|_{t=0}=q_0$，$\frac{dq}{dt}\Big|_{t=0}=0$　$\Rightarrow\boxed{q'=q_0-q}$

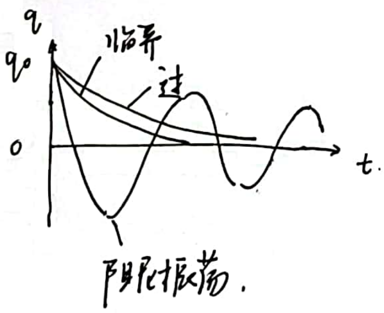
充电情况时解.

(1)：电阻$R\neq0$：($\beta\neq0$).

$\beta<\omega_0$：阻尼振荡.

$\beta=\omega_0$：临界阻尼.

$\beta>\omega_0$：过阻尼.



(2)：电阻$R=0$.

L {电容能量：$\frac{1}{2}CU^2=\frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$；线圈：无B能量. ✓ W生.

等幅自由振荡：$\beta=0$. $q=q_0\cos\omega_0t$.

介质中静磁场、静电场：

$\int_S D\cdot dS = \Sigma q_0 = \int_V \rho_0 dV$.　　$\nabla\cdot D=\rho_0$.　　$\int_S B\cdot dS=0$　　$\nabla\cdot B=0$　　一个旋×、二个散.

$\int_C E\cdot dl=0$　　$\nabla\times E=0$.　　$\int_L H\cdot dl=\Sigma I_0=\int_S j_0\cdot dS$　　$\nabla\times H=j_0$.

麦克斯韦理论基础：

①、两大胆推广　　②两假设

1)：$\nabla\cdot D=\rho_0$.　　1)、涡旋E：$\varepsilon=-\int_S\frac{\partial B}{\partial t}dS=\int_C E\cdot dl$.

2)：$\nabla\cdot B=0$　无自由磁荷　　2)、位移电流：

$$j_d\equiv\frac{\partial D}{\partial t}=\varepsilon_0\frac{\partial E}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial t}$$ 、极化电流.

$$\int_C H\cdot dl=\int_S(j_0+j_d)\cdot dS=\int_S\left(j_0+\frac{\partial D}{\partial t}\right)dS$$

介质中、非稳恒：

$\int_S D\cdot dS=\int_V\rho_0 dV$　　$\nabla\cdot D=\rho_0$

$\int_C E\cdot dl=-\int_S\frac{\partial B}{\partial t}dS$　　$\nabla\times E=-\frac{\partial B}{\partial t}$ (涡旋) ☆

$\int_S B\cdot dS=0$　　$\nabla\cdot B=0$.

$\int_C H\cdot dl=\int_S\left(j_0+\frac{\partial D}{\partial t}\right)dS$　　$\nabla\times H=j_0+\frac{\partial D}{\partial t}$ ☆.

均匀线性各向同性：

$D=\varepsilon E$　$B=\mu H$　$j_0=\sigma E$.

真空：

$D=\varepsilon_0 E$　$B=\mu_0 H$　$j_0=0$　$\sigma=0$

边值：

$n\cdot(D_2-D_1)=\sigma_0$.　　$n\cdot(B_2-B_1)=0$

$n\times(E_2-E_1)=0$　　$n\times(H_2-H_1)=i_0$.

$$\nabla\times(\nabla\times E)=\nabla(\underbrace{\nabla\cdot E}_{0})-\nabla^2E=-\nabla^2E.$$

平面电磁波：

自由空间：$j_0=0$，$\rho_0=0$，$\sigma=0$，

有：$\nabla\cdot E=0$　$\nabla\cdot H=0$　$\nabla\times E=-\mu\frac{\partial H}{\partial t}$　$\nabla\times H=\varepsilon\frac{\partial E}{\partial t}$　$j_0=0$.

$\Rightarrow$ $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2}-\frac{1}{\mu\varepsilon}\nabla^2E=0$　　$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2}-\frac{1}{\mu\varepsilon}\nabla^2H=0$

$V=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}=\sqrt{\frac{\mu_0\varepsilon_0}{\mu\varepsilon}}C$　　$C=\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$

定态电磁波的描述：

平面电磁波，即E、H只与z、t有关：$E(z)=E_0e^{jkz}$　　E_0、H_0由激发源确定

$H(z)=H_0e^{jkz}$.　　$k\equiv\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\Rightarrow\frac{\omega}{k}=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}=V\Rightarrow k=\frac{\omega}{V}=\frac{2\pi f}{V}=\frac{2\pi}{\lambda}$ 波数

$\downarrow$

$E(z,t)=E_0e^{j(kz-\omega t)}$

$H(z,t)=H_0e^{j(kz-\omega t)}$

有 $\nabla\Rightarrow jk$　$\frac{\partial}{\partial t}\Rightarrow -j\omega$.

$k\cdot E=0$　$k\times E=\mu\omega H$ ※1

$k\cdot H=0$　$k\times H=-\varepsilon\omega E$ ※2

$\Rightarrow$ 性质：$k\perp E$．$k\perp H$ 横波．

$E\perp H$，构成右手系

$\vec e_E\times\vec e_H=\vec e_k$

由※1、※2：$k^2=\mu\varepsilon\omega^2$.

$\frac{\omega}{k}=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}=V$　同时※2：$\sqrt{\varepsilon}E_0=\sqrt{\mu}H_0$.

$\Rightarrow\frac{1}{2}\varepsilon E^2=\frac{1}{2}\mu H^2$

能量密度相等.

$\frac{c}{v}=\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{\mu_0\varepsilon_0}}=n\approx\sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}$

电磁能量、动量、角动量

$w = \frac{1}{2}\vec{D}\cdot\vec{E} + \frac{1}{2}\vec{B}\cdot\vec{H}$　　总能 $W = \int_V w\,dV$

$\vec{S} = \vec{E}\times\vec{H}$ 波印廷矢量　　$\int_S \vec{S}\cdot d\vec{A} = -\frac{d}{dt}(W + W_n)$ 非电磁总能

$\vec{g} = \vec{D}\times\vec{B}$　　总动量：$G = \int_V g\,dV$

$\vec{l} = \vec{r}\times\vec{g}$　　总角动量：$L = \int_V l\cdot dV = I\omega$

某一体积V内电磁场能单位时间损失：

$$-\frac{\partial W}{\partial t} = \int_A \vec{S}\cdot d\vec{A} + \int_V (\vec{j}_0\cdot\vec{E})\,dV$$

对真空：

$$-\frac{\partial W}{\partial t} = \int_A \vec{S}\cdot d\vec{A} \leftrightarrow -\frac{\partial Q}{\partial t} = \int_A \vec{j}\cdot d\vec{A}$$

平面电磁波：

$w = \varepsilon E^2 = \mu H^2$

$S = \vec{E}\times\vec{H} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}E^2\cdot\frac{\vec{v}}{v} = \frac{\varepsilon E^2}{\sqrt{\mu\varepsilon}}\cdot\frac{\vec{v}}{v} = w\vec{v}$

$g = \vec{D}\times\vec{B} = \mu\varepsilon\vec{E}\times\vec{H} = \vec{S}/v^2 = \frac{w\vec{v}}{v^2}$

真空中：

$v = c$

$S = wc \Rightarrow w = S/c$ ($w = S/v$)　非真空

$g = w/c = \frac{\vec{S}}{c^2} \Rightarrow \vec{S} = \vec{g}\cdot c^2$. ($\vec{S} = \vec{g}\cdot v^2$)

光压：

$R \equiv \frac{S_反}{S_入}$（反射系数）$= \begin{cases} 1 & 全反射. \\ 0 & 全吸收 \end{cases}$

$(\vec{g}_入 - \vec{g}_反)\cdot\Delta A\cdot c\cdot\Delta t = \frac{\Delta A\cdot\Delta t}{c}\cdot c^2\cdot(g_入 + g_反)\cdot\hat{z} = \frac{\Delta A\cdot\Delta t}{c}(S_入 + S_反)\hat{z} = \frac{\Delta A\cdot\Delta t}{c}S_入(1+R) = \Delta A\cdot\Delta t\cdot w(1+R)\hat{z}$

$\therefore \Delta A\Delta t\,w(1+R) = p\cdot\Delta A\cdot\Delta t\cdot\hat{z}$　p：压强 $\Rightarrow p = w(1+R)$　平均光压：$\bar{p} = (1+R)\bar{w}$