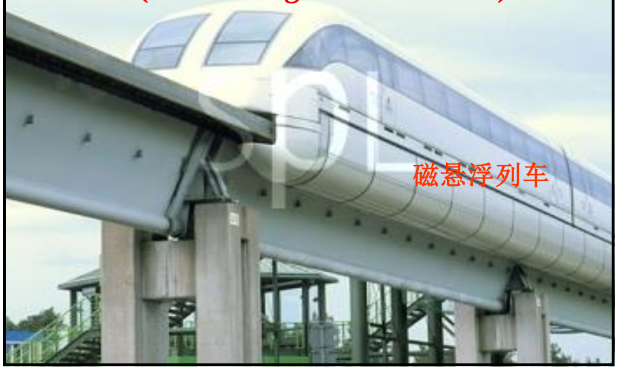
第二十章 电磁感应

(Electromagnetic Induction)



奥斯特　　　　电流磁效应

对称性 ⟶ 磁的电效应？

反映了物质世界对称的　美

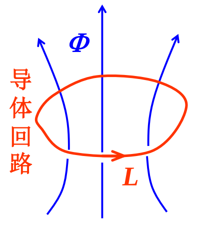
本章目录

△ 20.1法拉第电磁感应定律

(Faraday's law of electromagnetic induction)

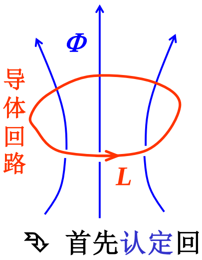
一. 感应电动势

演示　电磁感应（大线圈）
电磁感应（发光二极管）
电磁感应（单相手摇发电机）



法拉第于1831年总结出规律：

感应电动势 $\boxed{\varepsilon = -\dfrac{d\Phi}{dt}}$



$\boxed{\varepsilon = -\dfrac{d\Phi}{dt}}$

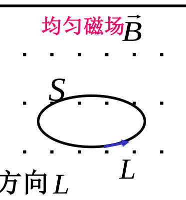
正方向约定：

- 首先认定回路的绕行方向
- 当磁力线方向与绕行方向成右螺时

规定磁通量为正（$\vec{B}$的方向与$\vec{S}$的法线方向一致）

则正电动势方向与绕行方向一致

如均匀磁场 $\vec{B}$ $\dfrac{dB}{dt} > 0$



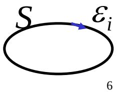
求：面积S边界回路中的电动势

若绕行方向取如图所示的回路方向L

按约定　磁通量为正　即 $\Phi = BS$

由 $\varepsilon_i = -\dfrac{d\Phi}{dt} = -\dfrac{dB}{dt}S < 0$

负号说明　电动势的方向与所设的绕行方向相反

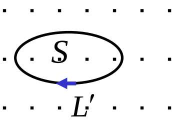


若**绕行方向**取如图所示的方向L'

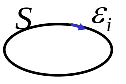
按约定　磁通量取负

$$\Phi = -BS$$

由　$\varepsilon_i = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}S > 0$



正号说明　电动势的方向与所设绕行方向一致

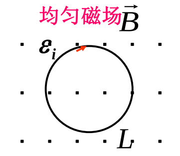


两种绕行方向得到的结果相同

电动势方向的分析 (Leading to Lenz law)

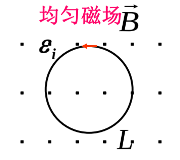
如均匀磁场 $\vec{B}$　$\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} > 0$

面积S边界回路中的电动势如图

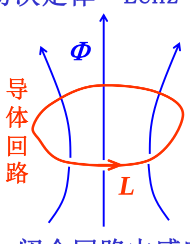


如均匀磁场 $\vec{B}$　$\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} < 0$

面积S边界回路中的电动势如图



楞次定律　Lenz law



感应电动势 $\boxed{\varepsilon = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}}$

在此约定下，式中的负号反映了楞次定律（Lenz law）。

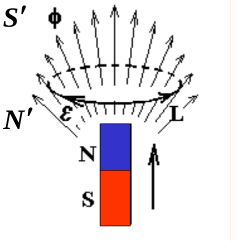
闭合回路中感应电流的方向，总是使它所激发的磁场来阻止引起感应电流的磁通量的变化。

楞次定律是能量守恒定律在电磁感应现象上的具体体现。

用楞次定律判定感应电动势的方向

- 判断$\Phi_{原}$的方向
- 判断$\Phi_{原}$增还是减
- 判断$\Phi_{感}$的方向
- 判断$I_{感}$的方向

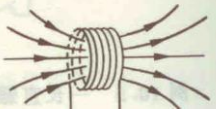
($I_{感}$和$\Phi_{感}$成右手螺旋关系)



反映了能量守恒关系

演示 楞次定律

N 匝线圈**串联**：



$$\varepsilon = \sum_i \left(-\frac{\mathrm{d}\Phi_i}{\mathrm{d}t}\right) = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\sum_i \Phi_i\right)$$

令　$\psi = \sum_i \Phi_i$　　ψ —全磁通

于是有　$\boxed{\varepsilon = -\dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}}$

若 $\Phi_1 = \Phi_2 = \cdots = \Phi_N = \Phi$，

ψ — 磁链（magnetic flux linkage）　则 $\boxed{\varepsilon = -N\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}}$

例：直导线通交流电 置于磁导率为μ的介质中

求：与其共面的N匝矩形回路中的感应电动势

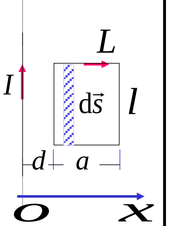
已知　$I = I_0 \sin \omega t$

其中　I_0和ω是大于零的常数

解：设当$I > 0$时，电流方向如图

设回路L方向如图　建坐标系如图

在任意坐标处取一面元 $\mathrm{d}\vec{s}$



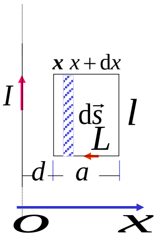
用环路定理求出距载流导线x远处的磁感应强度

$$2\pi x H = I$$

$$B = \mu H = \frac{\mu I}{2\pi x}$$

$$\psi = N\Phi = N\int_S \vec{B}\cdot d\vec{s} = N\int_S B ds$$

$$= N\int_d^{d+a} \frac{\mu I}{2\pi x} l dx$$

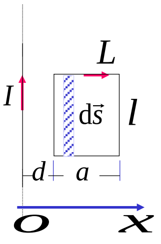


$$\Psi = \frac{N\mu Il}{2\pi}\ln\frac{d+a}{d}$$

$$= \frac{\mu NI_0 l}{2\pi}\sin\omega t \ln\frac{d+a}{d}$$

$$\varepsilon_i = -\frac{d\psi}{dt}$$

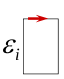
$$= -\frac{\mu_0\mu_r NI_0 l\omega}{2\pi}\cos\omega t \ln\frac{d+a}{d}$$



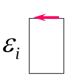
$$\varepsilon_i = -\frac{\mu_0\mu_r NI_0 l\omega}{2\pi}\cos\omega t \ln\frac{d+a}{d}$$

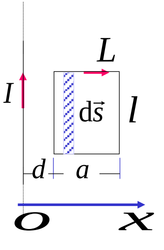
交变电动势

$t = \dfrac{\pi}{\omega}$ $\varepsilon_i > 0$



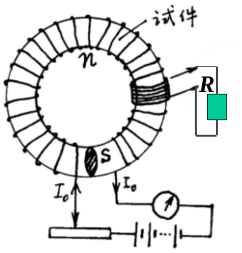
$t = \dfrac{2\pi}{\omega}$ $\varepsilon_i < 0$





二. 感应电流（induction current）

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R}\frac{d\psi}{dt}$$



时间间隔 $t_1 \to t_2$ 内，穿过回路导线截面的电量

$$q = \int_{t_1}^{t_2} I dt = \int_{t_1}^{t_2} -\frac{1}{R}\cdot\frac{d\psi}{dt}dt$$

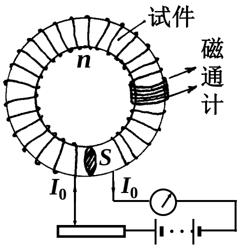
$$= -\frac{1}{R}\int_{\psi_1}^{\psi_2} d\psi = \frac{1}{R}(\psi_1 - \psi_2)$$

q 与过程进行的速度无关。

$$q = \frac{1}{R}(\psi_1 - \psi_2)$$

测 q 可以得到 $\Delta\psi$，

这就是磁通计的原理。



$$I_0 \to B_0 \to \Phi_0 = \Phi_1$$

$$-I_0 \to -B_0 \to -\Phi_0 = \Phi_2$$

$$q = \frac{1}{R}(\psi_1 - \psi_2) = \frac{2\Phi_0}{R}$$

$$\Phi_0 \to B_0 = \frac{\Phi_0}{S}$$

$$I_0 \to H = nI_0$$

由此可得到 $B \sim H$ 曲线

感应电动势 $\varepsilon = -\dfrac{d\Phi}{dt}$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B}\cdot d\vec{s}$$

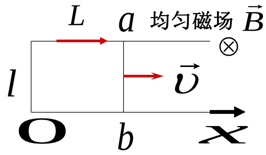
$$\text{感应电动势}\begin{cases}\text{回路动引起的动生电动势}\ \varepsilon_{\text{动}} \\ \text{磁场变引起的感生电动势}\ \varepsilon_{\text{感}}\end{cases}$$

§ 20.2 动生电动势（motional emf）

一. 动生电动势

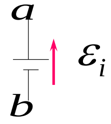
建坐标如图

设回路L方向如图



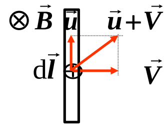
$$\Phi = Blx(t)$$

$$\varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -Bl\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -Bl\upsilon$$



负号说明电动势方向与所设方向相反

电动势只在ab导线中产生



洛仑兹力　非静电力

$$\vec{F}_m = q(\vec{V}+\vec{u})\times\vec{B}$$

非静电性场强

$$\vec{E}_K = \frac{\vec{F}_m}{q} = \vec{V}\times\vec{B} + \vec{u}\times\vec{B}$$

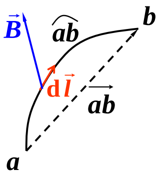
电动势

$$\therefore\ \mathrm{d}\varepsilon_{动} = \vec{E}_K\cdot\mathrm{d}\vec{l} = (\vec{V}\times\vec{B})\cdot\mathrm{d}\vec{l} + \underbrace{(\vec{u}\times\vec{B})\cdot\mathrm{d}\vec{l}}_{0}$$

$$= (\vec{V}\times\vec{B})\cdot\mathrm{d}\vec{l}$$

引起动生电动势的非静电力是洛仑兹力（沿导线方向）

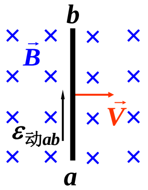
在一段导线中的动生电动势：



$$\varepsilon_{动ab} = \int_{(a)}^{(b)} (\vec{V}\times\vec{B})\cdot\mathrm{d}\vec{l}$$

若$\vec{B}=$const.，$\vec{V}=$const.，则

$$\varepsilon_{动ab} = (\vec{V}\times\vec{B})\cdot\int_{(a)}^{(b)}\mathrm{d}\vec{l} = (\vec{V}\times\vec{B})\cdot\overrightarrow{ab}$$



若 $\vec{V}$、$\vec{B}$、$\overline{ab}$ 彼此垂直，

则 $\varepsilon_{动ab} = BV\,\overline{ab}$

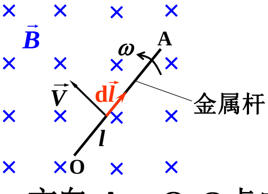
$\varepsilon_{动ab}$方向：$a\rightarrow b$ 。

[例]：如图示，$\overline{OA}=L$，$\vec{B}\perp\overline{OA}$，$\vec{B}=$const.，$\overline{OA}$绕O轴转，角速度为$\omega$ 。

求：$\varepsilon_{动OA}$

解：

$$\varepsilon_{动OA} = \int_{(O)}^{(A)}(\vec{V}\times\vec{B})\cdot\mathrm{d}\vec{l}$$



$$= -\int_{(O)}^{(A)} VB\,\mathrm{d}l$$

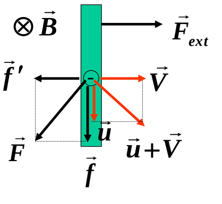
$$= -\int_0^L \omega lB\,\mathrm{d}l$$

$$= -\frac{1}{2}\omega BL^2 < 0$$

$\varepsilon_{动OA}$方向:A→O，O点电势高（积累正电荷）

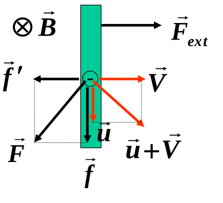
二. 能量关系

洛仑兹力产生动生电动势，即洛仑兹力沿导线推动电子要作功，这和洛仑兹力对运动电荷不作功是否矛盾？



e 受的洛仑磁力为 $\vec{F} = -e(\vec{V}+\vec{u})\times\vec{B}$，

洛仑兹力$\vec{F}$ 和 $\vec{u}+\vec{V}$ *垂直，不作功！*



$\vec{f}$ 对电子作正功，产生动生电动势。

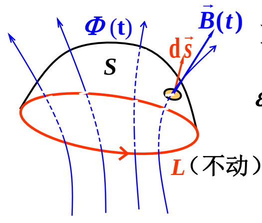
$\vec{f}'$对电子作负功，阻碍导体运动。

外力 $\vec{F}_{ext}$克服 $\vec{f}'$作功(消耗机械能)

通过 $\vec{f}$ 转换为感应电流的能量

§ 20.3 感生电动势和感生电场

一. 感生电动势 （Induced emf）



如图，L不动，$\vec{B}$变 $\to \varepsilon_{感}$

$$\varepsilon_{感} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

$$= -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

符号规定：Φ的正向与L的绕向成右螺旋关系，由此定出$\mathrm{d}\vec{s}$法线的正向。

25

$$\varepsilon_{感} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

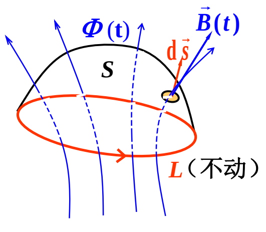
$$\varepsilon_{感} = \oint \vec{E}_{感}\cdot\mathrm{d}\vec{l}$$

$$\oint \vec{E}_{感}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

— 感生电场 $\vec{E}_{感}$。

26

二. 感生电场 （induced electric field）



$$\varepsilon_{感} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

$$= -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

$$\oint \vec{E}_{感}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

麦克斯韦（Maxwell）提出：变化的磁场可以激发非静电性质的电场 — 感生电场 $\vec{E}_{感}$。

27

感生电场 $\vec{E}_{感}$ 的性质

➢ 感生电场的环流

$$\oint_L \vec{E}_{感}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

感生电场是非保守场— 有旋电场（curl electric Field），它不存在相应的"势"的概念。

$$\vec{E} = \vec{E}_{静} + \vec{E}_{感}$$

$$\oint \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = \oint(\vec{E}_{静} + \vec{E}_{感})\cdot\mathrm{d}\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

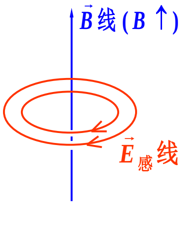
28

➢ 感生电场的通量

Maxwell假设：$\vec{E}_{感}$ 线闭合，即：

$$\boxed{\oiint_S \vec{E}_{感}\cdot\mathrm{d}\vec{s} = 0}$$

这已被实验证实。

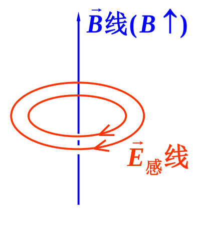


$\vec{E}_{感}$线与 $\vec{B}$线是相互套联的。

$$\oiint_S \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{s} = \oiint_S (\vec{E}_{静} + \vec{E}_{感})\cdot\mathrm{d}\vec{s} = \sum q / \varepsilon_0$$

29

实验表明，$\varepsilon_{感}$与导体回路的材料无关。



*感生电场*与该处有无导体回路无关。

30

感生电场总结：

•有旋电场 $\oint_L \vec{E}_{感}\cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot d\vec{s}$

•无源场 $\boxed{\oint_S \vec{E}_{感}\cdot d\vec{s} = 0}$

与导体回路的材料无关

与该处有无导体回路无关。

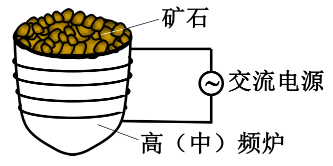
31

三．涡流　大块导体中的感应电流称“涡流”。

（eddy current）

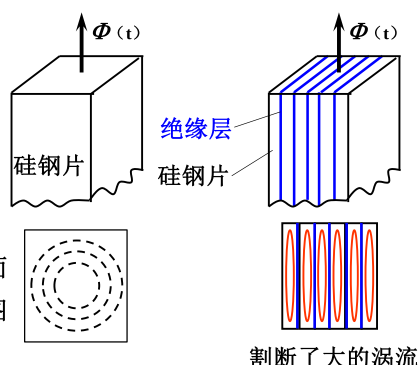
▲热效应

电磁冶炼：



32

减小涡流的措施：



涡流加热演示

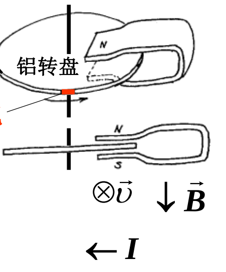
33

▲机械效应

电磁阻尼：

电度表的阻尼原理

（书中习题20.10）



演示　涡流加热

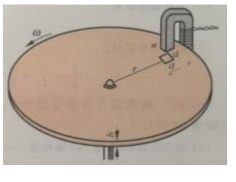
涡流阻尼摆

涡流阻尼管

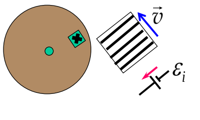
34

[例]电磁阻尼

一金属圆盘，电阻率为ρ，厚度为b，在转动过程中，在离转轴r处面积为a^2的小方块内加以垂直于圆盘的磁场B，如图所示。试导出当圆盘转速为ω时阻碍圆盘的电磁力矩的近似 表达式



解：$\varepsilon_i = \int(\vec{v}\times\vec{B})\cdot d\vec{l} = \int v\times B\cdot dl = \omega rBa$

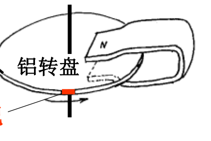


$R = \rho l/S = \rho a/ab = \rho/b$

$I = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{\omega rBa}{\rho/b} = \frac{\omega rBab}{\rho}$　　$M = rF = rIaB = \frac{\omega(rBa)^2 b}{\rho}$

35

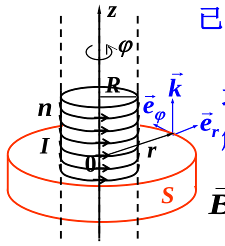
用楞次定律分析电磁阻尼



电磁阻尼的应用

36

四. 感应电场的计算举例



已知：无限长直载流螺线管

n、R、$I=\alpha\, t, \alpha=\text{const.}$。

求：$E_感$

解：无限长直载流螺线管有：

$$\vec{B}=\begin{cases}\mu_0 nI\cdot\vec{k}, & r<R\\ 0\ , & r>R\end{cases}$$

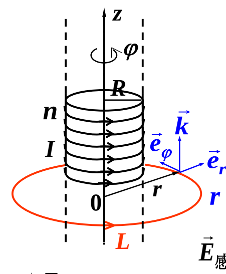
由无限长和轴对称条件，应有 $\vec{E}_感=\vec{E}_感(r)$。

由 $\oint_S \vec{E}_感\cdot d\vec{s}=0$， 有 $E_{感\,r}=0$。

该电流系统对垂直轴线的反射面反演不变，

$\vec{E}_感$是极矢量，故应有：$E_{感\,z(r)}=0$ 。

37



综上述，应有：

$$\vec{E}_{感\,(r)}=E_{感\,\varphi(r)}\vec{e}_\varphi \xlongequal{令} E_感\,\vec{e}_\varphi$$

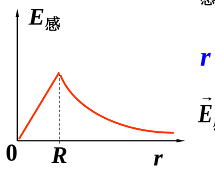
$$\oint_L \vec{E}_感\cdot d\vec{l}=E_感\cdot 2\pi r=-\frac{d\Phi}{dt}$$

$r<R$: $\Phi=B\cdot\pi r^2=\mu_0 n\alpha t\cdot\pi r^2$

$$\vec{E}_感=-\frac{1}{2\pi r}\frac{d\Phi}{dt}\cdot\vec{e}_\varphi=-\frac{1}{2}\mu_0 n\alpha\, r\vec{e}_\varphi\propto r$$

$r>R$: $\Phi=B\cdot\pi R^2=\mu_0 n\alpha\, t\cdot\pi R^2$

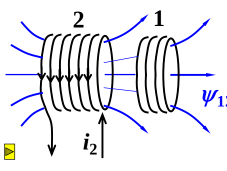
$$\vec{E}_感=-\frac{1}{2\pi r}\frac{d\Phi}{dt}\cdot\vec{e}_\varphi=-\frac{\mu_0 n\alpha R^2}{2r}\vec{e}_\varphi\propto\frac{1}{r}$$



38

△ § 20.4 互感 （mutual inductance）

一. 互感系数 （coefficient of mutual inductance）



线圈1、2不变
相对位置不变
介质不变
无铁磁质

$$\boxed{\begin{aligned}\psi_{12}&=M_{12}\cdot i_2\\ \psi_{21}&=M_{21}\cdot i_1\end{aligned}}$$

$$M_{21}=M_{12}=M=const.$$

M 称互感系数，它由两线圈的大小、形状、圈数、相对位形和介质情况决定。

39

$$\begin{aligned}\psi_{12}&=M_{12}\cdot i_2\\ \psi_{21}&=M_{21}\cdot i_1\end{aligned}\ \Rightarrow\ \begin{aligned}\psi_{12}&=M\cdot i_2\\ \psi_{21}&=M\cdot i_1\end{aligned}$$

M 的单位：H（亨利）= $\dfrac{\text{Wb（韦伯）}}{\text{A（安）}}$

互感电动势 $\boxed{\varepsilon_{12}=-\dfrac{d\psi_{12}}{dt}=-M\dfrac{di_2}{dt}}$

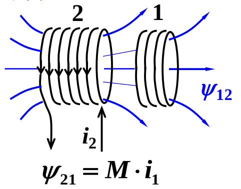
规定：i_2正向 $\xrightarrow[螺旋]{右手}$ ψ_{12}正向 $\xrightarrow[螺旋]{右手}$ ε_{12}正向。

同理互感电动势 $\boxed{\varepsilon_{21}=-\dfrac{d\psi_{21}}{dt}=-M\dfrac{di_1}{dt}}$

40

二 . 互感系数的计算：

•方法一：



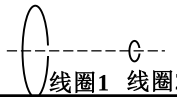
$\psi_{12}=M\cdot i_2$　　$\psi_{21}=M\cdot i_1$

或设$i_2\to B_2\to\psi_{12}\to M=\dfrac{\psi_{12}}{i_2}$

或设$i_1\to B_1\to\psi_{21}\to M=\dfrac{\psi_{21}}{i_1}$

哪条路方便，就按哪条路计算。

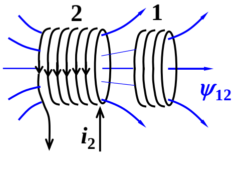
思考



哪条路计算 M 方便？

41

•方法二：



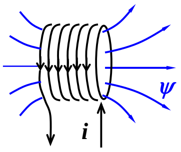
$\boxed{\varepsilon_{21}=-M\dfrac{di_1}{dt}}$　　$\boxed{\varepsilon_{12}=-M\dfrac{di_2}{dt}}$

$\boxed{\dfrac{di_1}{dt}\to\varepsilon_{21}\Rightarrow M}$　　$\boxed{\dfrac{di_2}{dt}\to\varepsilon_{12}\Rightarrow M}$

42

§ 20.5 自感（self-inductance）

一.自感系数（coefficient of self-inductance）



线圈不变形
介质不变化 } $\boxed{\psi = Li}$
无铁磁质 L= const.

L 称自感系数（电感量），它由线圈圈数、形状、尺寸、介质情况等因素决定。

L的单位：H（亨利）

为保证$L>0$，规定ψ 的正向与i 的正向成右手螺旋关系。

43

自感电动势 $\boxed{\varepsilon_L = -\dfrac{d\psi}{dt} = -L\dfrac{di}{dt}}$

ε_L 的正向与 i 的正向一致。

二.自感系数（电感）的计算

1.由$\boxed{L=\psi/i}$ 计算：设 $i \to B \to \psi \to L$

例如长直螺线管：$B \approx \mu n i \ \to \psi \approx nl \cdot \mu n i \cdot S$

$\to$自感系数 $\boxed{L \approx \mu\, n^2 V}$ ($V=lS$)

44

2.由 $\boxed{L = \left|-\dfrac{\varepsilon_L}{di/dt}\right|}$ 计算：ε_L , $\dfrac{di}{dt} \to L$

由此可知： $\dfrac{\text{V·s（伏秒）}}{\text{A（安）}} = \dfrac{\text{Wb（韦伯）}}{\text{A（安）}}$

3、由能量关系

$\boxed{W_m = \dfrac{1}{2}LI^2}$ $\boxed{L = \dfrac{2W_m}{I^2}}$

45

三.自感（电感）的特点

$\boxed{\varepsilon_L = -\dfrac{d\psi}{dt} = -L\dfrac{di}{dt}}$

自感线圈中 $\varepsilon_L \neq \infty \to \dfrac{di}{dt} \neq \infty \to i$不能突变。

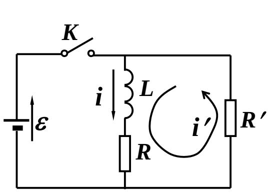
由楞次定律得知，i 的变化受到 ε_L 的阻碍，

$\therefore L$对交流电流有感抗，但对直流电流畅通。

（对比：电容器电压不能突变，可以通过交流电流，而隔断直流电流。）

自感线圈中i的变化规律：见书中例20.8

46

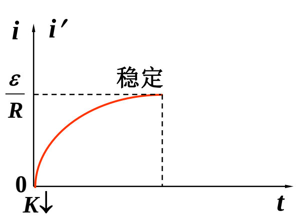


$$\varepsilon - L\frac{di}{dt} - iR = 0$$

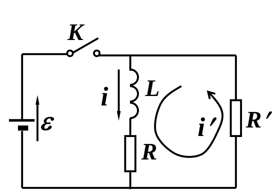
$$\frac{di}{\varepsilon/R - i} = -\frac{R}{L}dt$$

$$K\downarrow:\ i = \frac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$ — 时间常数

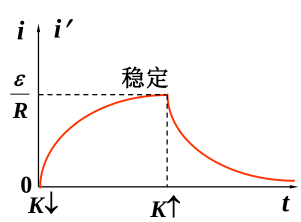


47



$$K\uparrow:\ i' = \frac{\varepsilon}{R}e^{-t/\tau'}$$

$$\tau' = \frac{L}{R+R'}$$

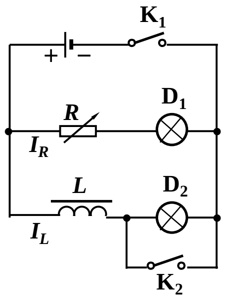


$$-L\frac{di}{dt} - iR - iR' = 0$$

$$\frac{di}{i} = -\frac{R+R'}{L}dt$$

48

演示　电感中的电流不能突变



演示的电路图

在K_2断开的情况下，

接通K_1：　D_1立刻亮

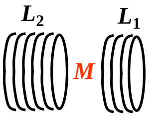
　　　　　　D_2迟些亮

K_1和K_2接通的情况下，

再断开K_1：D_1闪亮后熄灭

（需要$I_L > I_R$）

*四.自感与互感的关系



可以证明：$\boxed{M = k\sqrt{L_1 L_2}}$

k —— 耦合系数（coupling coefficient），

$$0 \le k \le 1$$

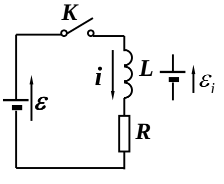
k由介质情况和线圈1、2的相对位形决定。

△ § 20.6 磁场能量

自感磁能

$$i = \frac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-t/\tau}) \qquad \tau = \frac{L}{R}$$

$$\varepsilon_i = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$



$$\boxed{W_m = \int_0^I L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}i\mathrm{d}t = \frac{1}{2}LI^2}$$

$$W_m = \frac{1}{2}LI^2 \qquad \text{类比：} W_e = \frac{1}{2}CV^2$$

可以利用 $W_m = \frac{1}{2}LI^2$ 计算自感系数L

自感磁能　$\boxed{W_m = \frac{1}{2}LI^2}$

对长直螺线管由 $B = \mu nI$ 和 $L = \mu n^2 V$，得：

$$\boxed{W_m = \frac{B^2}{2\mu}V}$$

磁能密度　$\boxed{w_m = \frac{B^2}{2\mu} = \frac{1}{2}BH = \frac{1}{2}\vec{B}\cdot\vec{H}}$

这说明磁能储存于磁场中。

上结果适用于除铁磁质外的一切线性磁化介质。

磁场能量　$W_m = \int_V \frac{1}{2}\vec{B}\cdot\vec{H}\ \mathrm{d}V$

从能量角度理解电感中电流之所以不能突变，是因为磁能不能突变，否则功率将为无限大。

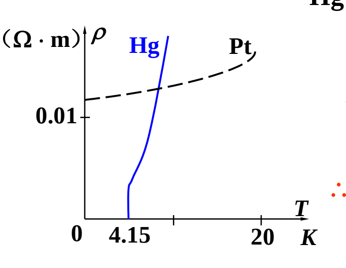
从磁能角度看，任何一个电流系统都有相应的电感量L，也可以从能量出发计算L：

$$\boxed{L = \frac{2W_m}{I^2}}$$

* △ § 20.7 超导简介

一. 基本特性

1. 零电阻现象



Hg：$T < 4.15\mathrm{K}$时，

出现超导态。

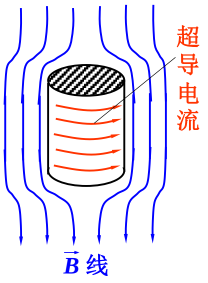
$\rho = 0 \ \rightarrow\ R = 0$

$I \ne 0$，　$U = 0$。

$\therefore$超导体内总是有

电场强度 $E = 0$

2. 完全的抗磁性（Meissner效应）



$\Phi_{内} = 0$（第一类超导体）

$\therefore$ 超导体内 $B = 0$

表面10^{-5}cm厚度内有超导电流。在此薄层内B不完全为0。

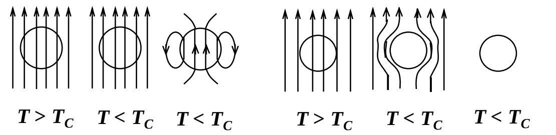
表面超导电流的磁场在超导体内与外磁场完全抵消。

零电阻现象和完全的抗磁性是超导体的两个独立的性质。

仅仅具有零电阻的导体称为完全导体。

完全导体内可以有磁通，但磁通不能改变。

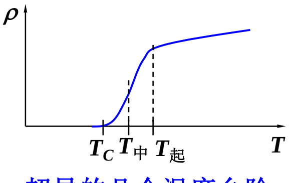
而超导体内什么情况下都不会有磁通。



一块磁铁悬浮在已进入超导态的超导材料上。⇨

二. 三个临界参量

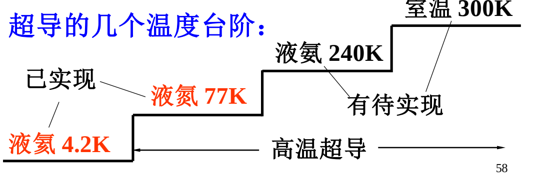
1. 临界温度T_C



$T < T_C$时，$\rho = 0$

一般高温超导体的T_C可达 ~150K。

超导的几个温度台阶：



2. 临界磁感强度 B_C

超导态的$B < B_C$， $B > B_C$时则“失超”。

$$B_C(T) = B_C(0)\cdot\left[\,1-\left(\frac{T}{T_C}\right)^2\,\right],\quad (T \le T_C)$$

$T\uparrow \rightarrow B_C\downarrow$ ， $T = T_C$时，$B_C = 0$

3. 临界电流密度 j_C

超导体中 $j > j_C$ 时则“失超”。

$$j_C(T) = j_C(0)\cdot\left[\,1-\left(\frac{T}{T_C}\right)^2\,\right],\quad (T \le T_C)$$

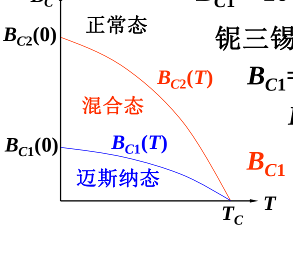
目前 $j_C \sim 10^6$A/cm^2 （薄膜中）

三. 两类超导体

第一类超导体只有一个B_C（一般金属）

$B < B_C$ 超导态 R=0 ， $B_{内}$=0

第二类超导体有B_{C1}和B_{C2}（一般合金）



$B_{C1} \sim 10^{-2}$ T， $B_{C2} \sim 10^1$ T

铌三锡（Nb_3Sn）在4.2K下

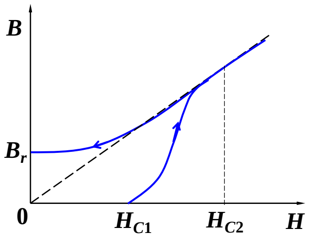
B_{C1}= 0.091T， B_{C2}= 22T

$B > B_{C2}$: $R \ne 0$， $B_{内} \ne 0$

$B_{C1} < B < B_{C2}$: R= 0 ， $B_{内} \ne 0$

$B < B_{C1}$: R = 0 ， $B_{内}$ = 0

掺杂的第二类超导体（非理想第二类超导体）有磁滞现象，所以可以倒悬浮。

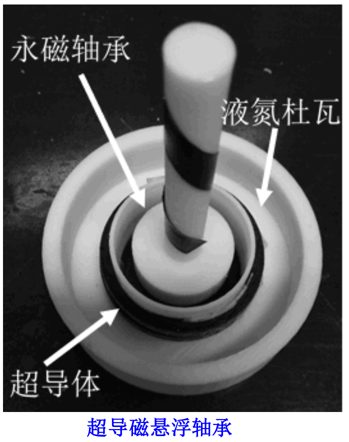


控制杂质的缺陷，可以大大地提高临界电流密度 j_C。

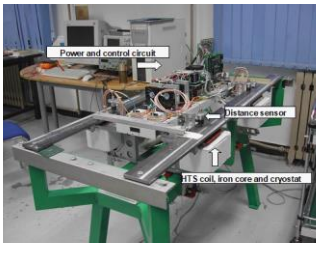
演示　超导磁悬浮和倒悬浮 超导磁悬浮轴承

四. 超导在技术中的应用

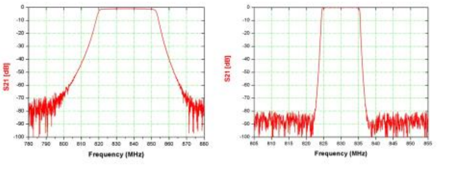
超导磁悬浮列车



超导磁悬浮轴承

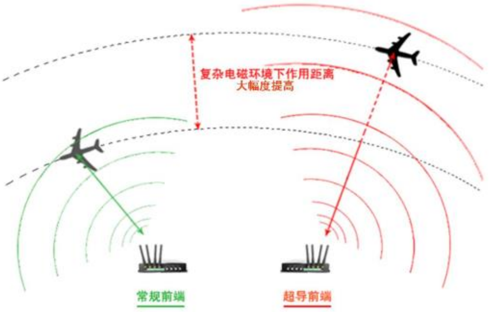


世界上第一台利用Bi系高温超导导线开发的基于EMS方式的磁悬浮小车于2004年5月成功实现悬浮。

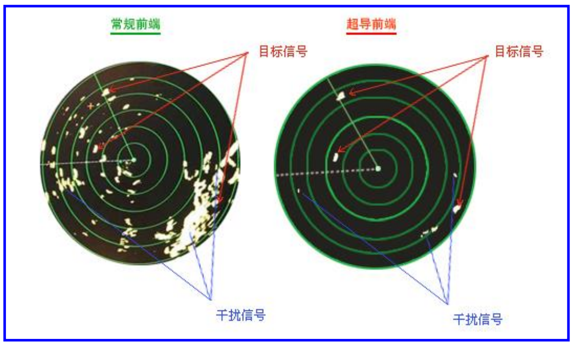


我国首台移动通信用超导滤波器的滤波特性（右）比普通滤波器的（左）大幅提高的频率响应特性比较。

➢ 军事需求



灵敏度提高50%以上(2～5 dB)侦察预警范围扩大到2倍以上



抗干扰能力提高50dB，相当于10万倍 玉树地震

68

西南交大研制的高温超导磁悬浮列车的性能：

▲ 2000年12月31日研制成功。

▲全部采用国产熔融织构法制备的YBaCuO高温超导体块材，其液氮低温容器工作时间大于6小时。

▲在自重220kg时，悬浮高度达35mm。
在承载5人（总重530kg）时，悬浮高度大于20mm。

▲最大承载大于1000kg。

▲永磁导轨用钕铁硼（NdFeB）制成，永磁导轨表面磁感强度1.2T。

第二十章结束

69