

普通物理学习题解

(电磁学部分)

下 册

天津市物理学会
南开大学物理系

天津市物理学会出版

河间印刷厂印刷

1980年7月

目 录

第五章 电磁感应和暂态过程	(1)
例题.....	(4)
思考题.....	(11)
习题.....	(22)
第六章 磁介质	(62)
例题.....	(66)
思考题.....	(77)
习题.....	(82)
第七章 交流电	(107)
例题.....	(113)
思考题.....	(124)
习题.....	(135)
第八章 麦克斯韦电磁理论和电磁波	(174)
例题.....	(177)
思考题.....	(182)
习题.....	(183)
第九章 电磁学的单位制	(188)
例题.....	(190)

习题.....	(192)
思考题解答.....	(194)
习题题解.....	(230)

第五章 电磁感应和暂态过程

电磁感应的基本规律是法拉第电磁感应定律：导体回路中感应电动势 ξ 的大小与穿过回路的磁感应通量 Φ 的变化率成正比。

$$\xi = - \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

式中负号是楞次定律的体现。楞次定律可表述为：闭合回路中感应电流的效果总是反抗引起感应电流的原因。

因为磁感应通量 Φ 等于：

$$\Phi = \iint_{(S)} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \iint_{(S)} B \cos\alpha ds \dots\dots\dots (2)$$

所以回路所围之面积 S ；此面法线方向与磁感应强度 $\vec{B}$ 的方向的夹角 α ；或 $\vec{B}$ 数值三者之中任一个因素的改变都将导致感应电动势的产生。若 S 、 α 保持不变，仅由于 $\vec{B}$ 随时间发生变化而产生的电动势称为感生电动势：

$$\xi = - \iint_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \dots\dots\dots (3)$$

对于均匀的时变磁场：

$$\xi = - \cos\alpha \frac{dB}{dt} \dots\dots\dots (4)$$

如果是线圈，各匝电动势相串联。故用磁通链数 Ψ 计算：

$$\Psi = N\Phi \dots\dots\dots (5)$$

Φ 是每匝的磁感应通量

$$\xi = - \frac{d\Psi}{dt} \dots\dots\dots (6)$$

若 $\vec{B}$ 保持不变, 导体在磁场中以速度 $\vec{v}$ 运动。此时产生之电动势为动生电动势。

$$\xi = \int_{(L)} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L} \quad \dots\dots\dots (7a)$$

当导体是长为 L 的直棒, 与磁场方向垂直, 运动速度 $\vec{v}$ 的方向与 $\vec{B}$ 的方向夹角为 θ 时:

$$\xi = vBL \sin \theta \quad \dots\dots\dots (7b)$$

如果线圈以角速度 ω 在均匀磁场中转动, (也就是交流发电机)

$$\xi = - \frac{d\Psi}{dt} = NBS \omega \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (8)$$

感应电动势是由涡旋电场所造成的。涡旋电场的存在不依赖于导体回路。变化磁场在自身周围空间激发涡旋电场:

$$\oint_{(L)} \vec{E} \cdot d\vec{L} = - \iint_{(s)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad \dots\dots\dots (9)$$

无论原因如何, 只要造成了回路中磁感应通量的变化, 回路中就产生感应电动势。当造成变化磁场的是回路自身通过之电流 I 时, 产生的感生电动势称为自感电动势。此时磁通链数 Ψ 与 I 成正比,

$$\Psi = LI \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\therefore \xi_L = - L \frac{dI}{dt} \quad \dots\dots\dots (11)$$

L 称为自感系数, 简称电感, 单位为亨利 (H)。 L 可按下列三种方法计算, 其结果均相同。

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$L = - \xi_L / \left(\frac{dI}{dt} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$L = \frac{2W_m}{I^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

应用式 (12) 时, 必须注意 I 是产生 Ψ 的那一部分电流。式 (14) 中 W_m 则是与自感相联系的那一部分磁能。

一个回路中电流 I 在另一回路中所产生的感生电动势称为互感电动势:

$$\xi = - M \frac{dI}{dt} \quad \dots\dots\dots (15)$$

M 是互感系数, 单位也是亨利。

$$M = \frac{N_1 \phi_{21}}{I_2} = \frac{N_2 \phi_{12}}{I_1} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ϕ_{12} 是回路 1 中电流 I_1 在回路 2 中产生的磁感应通量; ϕ_{21} 则为回路 2 中电流 I_2 在回路 1 中所产生的磁感应通量。

与自感及互感所联系的磁场能量为:

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k L_i I_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i \neq j)}}^k M_{ij} I_i I_j \quad \dots\dots (17)$$

若电路中除有电阻外还有电感或电容, 则此电路接通及断开电源的短暂时间内, 电路中的现象与稳恒以后情况有极大的不同。称为暂态过程。在此过程中只要按下列诸式决定电感、电容及电阻上的电压降, u_L 、 u_C 和 u_R , 基尔霍夫方程就仍然能用, 从而获得电路方程。当然, 所得为微分方程, 求解后即可获得电路中电压、电流与时间之间的关系。

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$u_C = \frac{q}{c} = \frac{1}{c} \int i dt \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$u_R = iR$$

$$\dots\dots\dots (20)$$

〔例5.1〕如图一导体框架 $abcdef$ ，与一条直长载流导线放在一起，两者相互绝缘，矩形 $abcd$ 与直长导线在同一平面内， ab 和 cd 与直长导线平行。 de 和 cf 是圆心在直长导线轴线上的圆弧，半径为 x_0 ，弧长是 S 。 ab 到直长导线的距离为 X ，长度为 L 。直长载流导线的半径为 R ，通过的电流为：

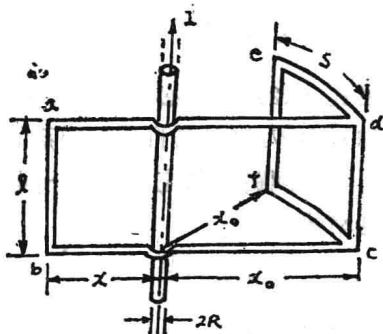


图 5.1

$I = I_m \cos \omega t$ 。已知框架 $dabc$ 这个 U 形部分电阻为 r_1 ， cd 段电阻为 r_2 。 $defc$ 电阻为 r_3 。求：

- (1) 通过 ab 的电流 I_{ab} ；
- (2) 通过 ef 的电流 I_{ef} ；
- (3) 直长载流导线上电流的磁场对边 ef 的作用力。

〔解〕利用安培环路定律可求得无限长载流直导线周围的磁感应强度为：

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

$\vec{B}$ 的方向沿围绕直长导线的圆周方向，与 I 成右手螺旋关系。因此与直长导线为同轴柱面的 $defc$ 中磁感应通量为零。

矩形 $abcd$ 中直长导线两侧通量方向相反。故总的磁感应通量为：

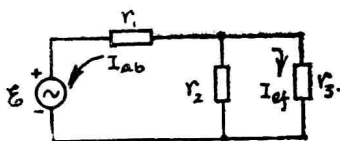
$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_R^x \frac{\mu_0 I}{2\pi r} L dr + \int_R^{x_0} \left(-\frac{\mu_0 I}{2\pi r} \right) L dr \\
&= \frac{\mu_0 L I_m}{2\pi} \ln \frac{x}{x_0} \cos \omega t
\end{aligned}$$

此回路中的感生电动势为

$$\xi = -\frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu_0 L \omega I_m}{2\pi} \ln \frac{x}{x_0} \sin \omega t$$

在defc中感应电动势为零。所以整个框架等效于附图所示之电路。图中电动势的方向对应于(图例5.1)中直长载流导线中电流 I 流向上方。而 I_{ab} 的方向是规定为由a向b的。所以电流是:



例 5.1 图

$$\begin{aligned}
(1) \quad I_{ab} &= -\frac{\xi}{r_1 + \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}} \\
&= -\frac{r_2 + r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} \cdot \frac{\mu_0 L \omega I_m}{2\pi} \ln \frac{x}{x_0} \sin \omega t,
\end{aligned}$$

(2) 电流 I_{ab} 在电阻 r_2 和 r_3 上分流。故从 e 流向 f 的电流为:

$$\begin{aligned}
I_{ef} &= -I_{ab} \cdot \frac{r_2}{r_2 + r_3} \\
&= \frac{r_2}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} \cdot \frac{\mu_0 L \omega I_m}{2\pi} \ln \frac{x}{x_0} \sin \omega t,
\end{aligned}$$

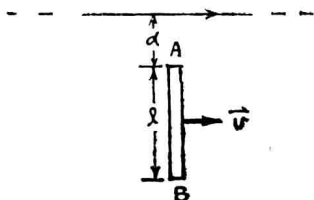
(3) 因 ef 边与直长导线平行, 即与 $\vec{B}$ 垂直, 故其所受磁力是:

$$\begin{aligned}
F_{ef} &= I_{ef} L B \\
&= \frac{\mu_0^2 L^2 \omega r_2 I_m^2}{8\pi^2 x_0 (r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1)} \ln \frac{x}{x_0} \sin 2\omega t
\end{aligned}$$

$\vec{F}_{ef}$ 方向: 当 I 向上时它沿半径方向指向外 (即离开直长导线)

的方向。)

〔例5.2〕如附图，长 $L = 0.9$ 米的金属棒AB，以 $v = 2$ 米/秒的速度相对于通以电流 $I = 40$ 安培的导线平行运动，棒与电流相距 $d = 0.1$ 米，求棒中的感应电动势。



例5.2图

〔解〕根据安培环路定律可求得直长载流导线周围的磁场是：

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

$\vec{B}$ 的方向沿着环绕载流导线的圆的切线方向，与 I 成右手螺旋关系。故 $\vec{B} \perp \vec{v}$ 。金属棒垂直于直长导线，即沿半径方向 $d\vec{L} = d\vec{r}$ 。故棒上形成之动生电动势为：

$$\begin{aligned} \xi &= \int_L (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L} \\ &= - \int_d^{d+L} v B dr = - \int_d^{d+L} v \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dr \\ &= - \frac{\mu_0 v I}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{L}{d} \right) \\ &= - \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2 \times 40}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{0.9}{0.1} \right) \text{伏} \\ &= -3.7 \times 10^{-5} \text{伏}, \end{aligned}$$

负号表示电动势是A端为正，B端为负。

〔例5.3〕在长 $L = 60$ 厘米，直径 $d = 5.0$ 厘米的园纸筒上，密绕多少匝线圈才能获得 $L = 6.0 \times 10^{-3}$ 亨利的自感量。

〔解〕近似地把螺线管当作无限长处理，即把管内磁场看作

均匀的。当螺线管中有电流 I 时，管内磁感应强度为：

$$B = \mu_0 n I$$

式中 $n = \frac{N}{L}$ 是单位长度上的匝数。因此通过每一匝的磁感应通量均为：

$$\phi = BS = \mu_0 n I S$$

$S = \frac{1}{4} \pi d^2$ 是螺线管的截面积。通过螺线管的磁通链数为：

$$\Psi = N\phi = \mu_0 n N I S = \mu_0 n^2 L S I = \mu_0 n^2 V I$$

式中 $V = LS = \frac{1}{4} \pi d^2 L$ 为螺线管体积。因此螺线管自感是

$$L = \frac{\Psi}{I} = \mu_0 n^2 V = \frac{1}{4} \mu_0 \pi n^2 d^2 L = \frac{\mu_0 \pi d^2}{4\pi} N^2$$

所要求的匝数是

$$N = \sqrt{\frac{4L}{\mu_0 \pi d^2}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.60 \times 6.0 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times \pi \times 5.0^2 \times 10^{-4}}} \\ = 1.2 \times 10^3 \text{ 匝}$$

由于螺线管长度有限，这样得到的结果是近似的。计算结果比实际要求的匝数少。这是因为螺线管终端的磁场减弱所造成的。但 $L \propto N^2$ 关系仍然是实际制作电感器时的一个依据。实际制作中可先绕 N' 匝测出所得之电感 L' ，根据 L 与 N^2 成正比的关系求所要求的匝数，然后再根据测量结果作一些修正即可。

〔例5.4〕两对相互平行的平行直导线回路 a 、 b 及 c 、 d 。设其长度为无限， a 、 b 间隔为 D_1 ， c 、 d 间隔是 D_2 ，两组之间的距离为 D_3 ，如附图。求回路 a 、 b 与回路 c 、 d 间单位长度的互感。

〔解〕设回路 a b 中有电流 I_a ，在导线 a 流入纸面，从导线 b 流出纸面。导线 a 上电流在 c d 回路单位长度上产生的磁感应通量为 ϕ 。

$$\phi_a = \iint \vec{B}_a \cdot d\vec{s}$$

$$= \iint B_a \cos \alpha ds$$

$$B_a = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi r_a}$$

对于单位长度, $ds = dy$

且由附图可见

$$dy \cos \alpha = dr_a$$

$$\therefore \phi_a = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu_0 I_a}{2\pi r_a} dr_a$$

$$= \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

同样导线 b 上电流

在 c d 回路单位长度上产生之磁感应通量 ϕ_b

$$\phi_b = \iint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \iint B_b \cos \alpha' ds$$

$$B_b = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi r_b}$$

$$ds = dy'$$

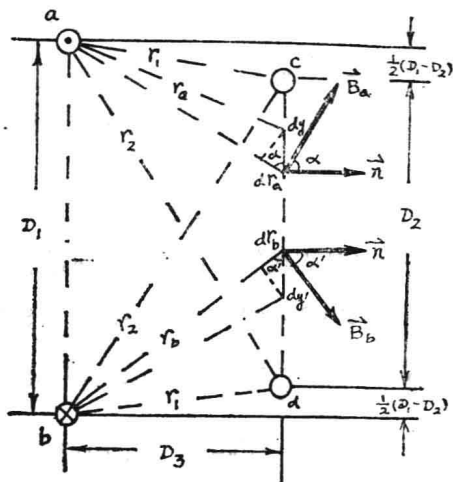
$$dy' \cos \alpha = dr_b$$

$$\therefore \phi_b = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu_0 I_a}{2\pi r_b} dr_b = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

从附图可求出:

$$r_2 = \sqrt{\left[D_1 - \frac{1}{2}(D_1 - D_2) \right]^2 + D_3^2}$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{(D_1 + D_2)^2 + 4D_3^2},$$



例 5-4 图

$$r_1 = \sqrt{\left[\frac{1}{2}(D_1 - D_2) \right]^2 + D_3^2}$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{(D_1 - D_2)^2 + 4D_3^2}。$$

回路 a b 中电流在回路 cd 的单位长度中产生总磁感应通量即为:

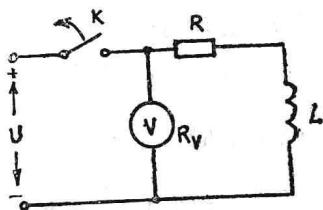
$$\phi = \phi_a + \phi_b = \frac{\mu_0 I_a}{\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} \ln \frac{(D_1 + D_2)^2 + 4D_3^2}{(D_1 - D_2)^2 + 4D_3^2}$$

而两回路单位长度的互感是

$$M = \frac{\phi}{I_a} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{(D_1 + D_2)^2 + 4D_3^2}{(D_1 - D_2)^2 + 4D_3^2}。$$

正是这种互感,使电话线之间或电话线与电力线之间发生耦合造成串音。为了克服这种耦合,通常是隔一段距离把电话线的两颗位置交换一次。即附图(例5.4)中 c 和 d 位置作一次交换。交换后感应电动势方向在回路中改变一次,于是相邻各段感应电动势可以抵消一部分,从而减小串音。

〔例5.5〕附图所示为一台300千瓦汽轮发电机的励磁回路。已知励磁绕组*的电阻 $R = 0.189$ 欧,电感 $L = 0.398$ 亨利,直流电压 $U = 35$ 伏,伏特表的量程为50伏,电表内阻 $R_V = 5$ 千欧。开关 K 未拉开前,电路已处于稳定状态。在 $t = 0$ 时,拉开开关。求: (1) 电阻、



例 5.5 图

电感回路的时间常数; (2) 电流 i 的初始值和开关拉开后电流 i 的稳态值; (3) 电流 i 和伏特表处的电压 u_V ; (4) 开关刚拉开时, 伏特表处的电压。〔* 发电机的励磁绕组就是发电机中产生磁场的电磁铁的绕组。此绕组及励磁用直流电源所构成的回路称励磁回路)。

〔解〕 (1) 时间常数: 拉开开关后励磁线圈与电压表构成一个闭合回路, 此回路的时间常数是:

$$\tau = \frac{L}{R + R_v} = \frac{0.398}{0.189 + 5 \times 10^3} \text{秒} = 76.6 \mu\text{s},$$

(2) 开关拉开前, 电路已处于稳定状态, 故通过绕组的电流是:

$$i(0_-) = \frac{U}{R} = \frac{35}{0.189} = 185.2 \text{安}。$$

因电感中电流不能跃变, 故开关拉开后电流初始值

$$i(0_+) = i(0_-) = 185.2 \text{安},$$

开关拉开后电流 i 的稳态值等于零。

(3) 开关拉开后电流 i 所满足之微分方程为:

$$-L \frac{di}{dt} = i(R + R_v)$$

即:
$$\frac{di}{i} = -\frac{R + R_v}{L} dt = -\frac{1}{\tau} dt$$

两边积分后得:

$$i = ke^{-t/\tau}$$

因 $t = 0$ 时 $i = i(0_+) = i(0_-) = \frac{U}{R}$, 故

$$i(0_+) = \frac{U}{R} = K,$$

$$i = \frac{U}{R} e^{-t/\tau} = 185.2 e^{-12579t} \text{ (A)}$$

伏特表处的电压

$$\begin{aligned} u_v &= -R_v i = -5 \times 10^3 \times 185.2 e^{-12579t} \\ &= -926 e^{-12579t} \text{ (KV)} \end{aligned}$$

(4) 开关刚拉开时 $t = 0$, 电表处电压是

$$u_v(0) = -R_v i(0_+) = -R_v \frac{U}{R} = -926 \text{ (千伏)}$$

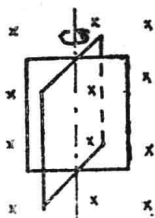
这个高压将会使电表损坏。这种情形在一切含有自感的回路断电时都会出现。 $u_v(0) = -R_v i(0_+) = -R_v \frac{U}{R}$ ，所以开关断开前电流越大，断开后回路电阻越大，产生之电压越高、越危险，这是实际工作中必须注意的。

思 考 题

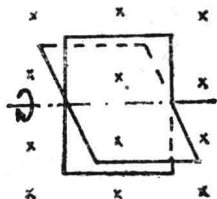
〔181〕一导体圆线圈在均匀磁场中运动，在下列几种情况下哪些会产生感应电流？为什么？

- (1) 线圈沿磁场方向平移；
- (2) 线圈沿垂直磁场方向平移；
- (3) 线圈以自身的直径为轴转动，轴与磁场方向平行；
- (4) 线圈以自身直径为轴转动，轴与磁场方向垂直。

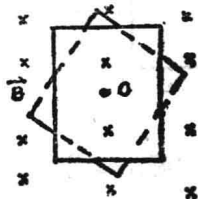
〔182〕见附图所示三种情况中，闭合线圈在均匀磁场中转动，是否会产生感应电流？并指出其方向。(1)线圈绕垂直于磁感应强度 $\vec{B}$ 的竖直轴转动，见附图(1)；(2)线圈绕垂直于 $\vec{B}$ 的



(1)



(2)

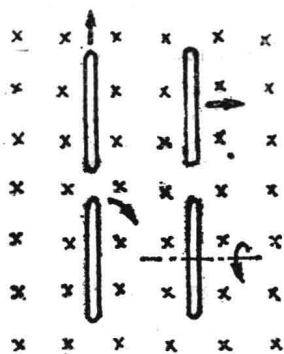


(3)

思考题 182 图

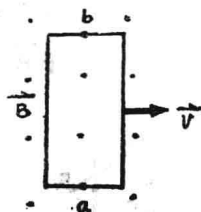
水平轴转动(图2)。(3)线圈绕平行于 $\vec{B}$ 且通过线圈平面中心的水平轴转动(图3)。

[183] 一段直导线在均匀磁场中作如附图所示四种运动。在哪种情况下导线中有感应电动势?为什么?感应电动势的方向是怎样的?

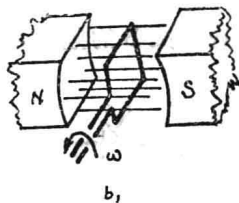
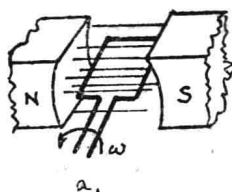


思考题183图

[184] 一矩形线圈在均匀磁场中平动,磁感应强度 $\vec{B}$ 的方向与线圈平面垂直,如附图。问在线圈中有没有感应电流?在线圈中的a点和b点之间有无电位差?



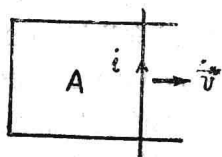
思考题184图



思考题185图

[186] 在附图中,我们使那根可移动的导线向右移动,因而引起一个如图所示的感应电流。试问:在区域A中的磁感应强度 $\vec{B}$ 的方向如何?

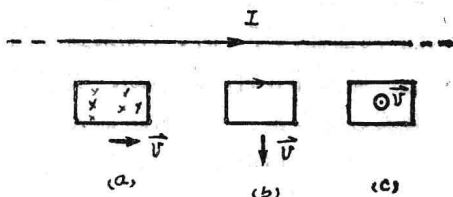
〔187〕有一水平放置的铜盘，处在均匀磁场中， $\vec{B}$ 的方向垂直于盘面向上。当铜盘绕中心轴转动时，转动的方向从上下看是反时针的，问这个铜盘是否产生感应电动势？



思考题186图

〔188〕在无限长载流直导线附近放置一矩形的线圈，开始时线圈与导线同在一平面内，且线圈中的两个边与导线平行。当线圈作下面的三种平动时，能否产生感应电流？方向怎样？参见附图：

a，线圈平动的方向与导线中电流的方向一致。

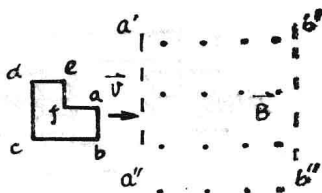


b，平动的方向与导线中电流的方向垂直，并且保持与导线在同一平面内。

思考题188图

c，平动的方向与导线中电流的方向及线圈的平面垂直。

〔189〕假设附图中 $a'a''$ 和 $b'b''$ 之间为均匀磁场， $a'a'' \parallel b'b''$ 。空间其它区域无磁场。一闭合导体回路 $abcdefa$ 以速度 $\vec{v}$ 垂直于 $a'a''$ 匀速行进，试绘出回路中感应电流的波形图。



思考题189图

〔190〕让一块磁铁顺着一根铅直放置着的铜管落下。试说明纵使空气的阻力可以忽略不计，磁铁也将达到一个恒定的收尾速度。

〔191〕如附图将一圆形回路从磁极之间的磁场中沿与 $\vec{B}$ 垂