



南京大學

稳恒磁场

(steady magnetic field)



目 录 (9.1-9.5)

- 9.1 稳恒电流和电动势
- 9.2 磁现象与磁力的规律
- 9.3 磁场的规律
- 9.4 应用基本定理分析磁场举例
- 9.5 磁力矩

2017/4/21

1

2



9.1 稳恒电流和电动势

一、恒定电流

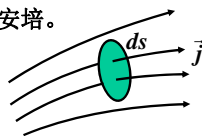
1、电流和电流密度

电流强度：单位时间内通过导体任一横截面的电量，为标量。

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$

单位：安培。

电流密度 \vec{j} 是矢量，其方向代表该点电流的方向，数值等于单位时间内通过单位垂直截面的电量。单位：A/m²。



设粒子密度为 n （即单位体积内所含的带电粒子数），每个粒子的电量为 q ，平均运动速度为 \vec{v}

$$\vec{j} = nq\vec{v}$$

2017/4/21

1

3



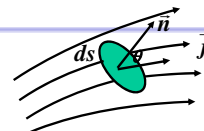
$$j = \frac{dI}{ds_0}$$

$$dI = j ds_0 = j ds \cos \theta$$

$$= \vec{j} \cdot d\vec{s}$$

通过导体任一有限截面的电流 I 为：

$$I = \iint_{(s)} \vec{j} \cdot d\vec{s} = \iint_{(s)} j \cos \theta ds$$



2、电流的连续性方程和恒定条件

$$\text{积分形式: } \iint_{(s)} \vec{j} \cdot d\vec{s} = -\frac{dq}{dt}$$

2017/4/21

1

4



$$\therefore \iint_{(s)} \vec{j} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iiint_{(v)} \rho_e dV$$

\therefore 微分形式：

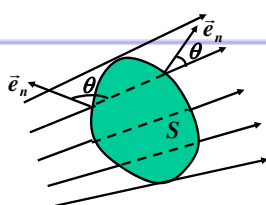
$$\nabla \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho_e}{\partial t}$$

电流的恒定条件：

$$\iint_{(s)} \vec{j} \cdot d\vec{s} = 0$$

3、欧姆定律

$$\text{积分形式: } I = \frac{U}{R} \quad \text{电阻: } R = \rho \frac{l}{S}$$



2017/4/21

1

5



$$\therefore \Delta I = \frac{\Delta U}{R} \quad \Delta I = j \Delta s$$

$$\Delta U = E \cdot \Delta l \quad R = \frac{\Delta l}{\sigma \cdot \Delta s}$$

\therefore 微分形式: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

4、电功率和焦耳定律

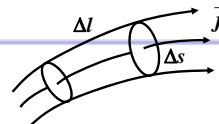
电场力所做的功: $A = qU = UI t$

$$\text{电功率: } P = \frac{A}{t}$$

$$\text{焦耳定律: } Q = I^2 R t \quad P = I^2 R$$

$$\text{焦耳定律的微分形式: } p = \frac{j^2}{\sigma} = \sigma E^2$$

热功率密度 p ：单位体积的热功率。



2017/4/21

6



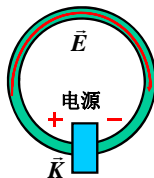
二 电动势

1. 电动势定义

普遍的欧姆定律的微分形式: $\vec{j} = \sigma(\vec{K} + \vec{E})$

电源的电动势定义为, 把单位正电荷从负极通过电源内部移到正极时, 非静电力 \vec{K} 所做的功。

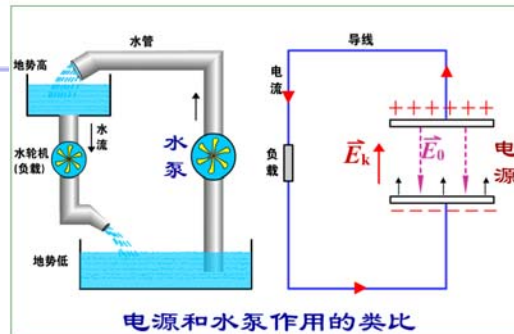
$$\text{电动势: } \varepsilon = \int_{(\text{电源内})}^+ \vec{K} \cdot d\vec{l}$$



2017/4/21

1

7



电源和水泵作用的类比

电源电动势的大小, 等于将单位正电荷从负极经电源内部移至正极时非静电力所作的功。

8



Δ2. 接触电势差与温差电动势

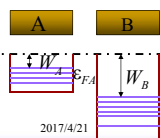
1) 接触电势差

①什么是接触电势差?

两种不同的金属紧密接触在一起时, 两金属间会出现一定的电势差, 这种电势差称为接触电势差。

②接触电势差是怎样产生的?

当A、B两种金属尚未接触



$E_0 = \varepsilon_F + W$
势阱深度 费米能量 逸出功
在自由电子的数密度相等温度相同情况下, 从金属A逸出的电子多从金属B逸出的电子少

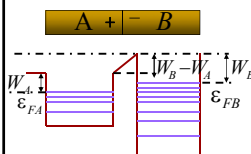
2017/4/21

1

9

当A、B两种金属紧密接触时:

$$W_B - W_A = e(\varphi_A - \varphi_B)$$



$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{1}{e}(W_B - W_A)$$

接触电势差来自两金属逸出功的不同。

当紧密接触的A、B两种金属自由电子密度不同时: 固扩散导致电荷迁移, 使两金属间出现电势差。

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

2017/4/21

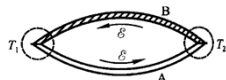
10

③接触电动势

$$\varepsilon_{AB} = \int \vec{K} \cdot d\vec{l} = \varphi_A - \varphi_B$$

2) 温差电动势 (塞贝克电动势)

当构成回路的两种不同金属连接点处于不同的温度时, 回路中有不为零的电动势。这种电动势称为温差电动势



$$\varepsilon = a(T_2 - T_1) + \frac{1}{2}b(T_2 - T_1)^2$$

3) 光电池

将光能转化为电能。

例如太阳能电池

热点为: 薄膜太阳能电池

非晶硅Si

CdTe

CIGS (铜铟镓硒), CZTS
半导体薄膜材料

<http://it.gankai.edu.cn:8080/temis/Teachers/Introduce.aspx?TID=liuwei>

11



9.1 磁现象与磁力的规律

一、基本的磁现象 (磁场):

1 磁铁的磁场

N、S极同时存在;

同名磁极相斥, 异名磁极相吸。



2017/4/21

12



2 电流的磁场

奥斯特实验

磁针和磁针；



磁铁与载流导线的相互作用；

载流导线与载流导线的相互作用。

在磁场中运动的电荷受到的磁力；

2017/4/21

13

3 磁现象的起源

电 流

磁场

运动电荷

磁场

结论

磁力与运动电荷对运动电荷的相互作用有关。

2017/4/21

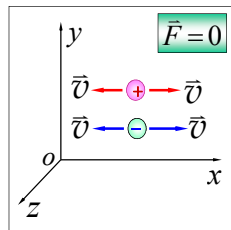
14

二. 磁力的规律

磁感强度 \vec{B} 的定义

带电粒子在磁场中运动所受的力与运动方向有关。

实验发现，带电粒子在磁场中沿某一特定方向运动时不受力，此方向与电荷无关。



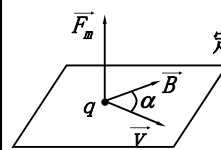
2017/4/21

15



1. 洛伦兹力-磁场对运动的电荷

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \quad F_m = qv \sin \alpha \cdot B$$



$$\text{定义 } B = \frac{F_m}{qv \sin \alpha} \quad (\alpha = 90^\circ) \quad \frac{(F_m)_{\text{最大}}}{qv}$$

$$\vec{B} = \frac{(\vec{F}_m)_{\text{最大}}}{qv} \times \vec{e}_v$$

称为磁感强度



思考 \vec{v} 电荷是相对磁场的速度，还是电荷对观察者的速度？（应是后者）

2017/4/21

16

磁感应强度B的量纲 $[MT^{-2}I^{-1}]$

单位：在国际单位制中：1[T]=1特斯拉经常用到的单位是Gauss

$$1T=10000G$$

同样可用磁力线形象地描绘磁场的分布。

注意：磁场力只是运动电荷相互作用力的一部分，不是空间又出现了新的场，而是为了处理问题方便，人为地定义了一个新的场——磁场。

电磁场是一个统一体，它们具有相对论协变性，即：磁场是电场的相对论效应。电场和磁场构成的统一实体称为电磁场

在电磁学中，无论速度多么小 ($v \ll c$)，伽利略变换都不适用，电磁场的变换必须应用相对论变换。

2017/4/21

17

应用：▲ 霍耳效应

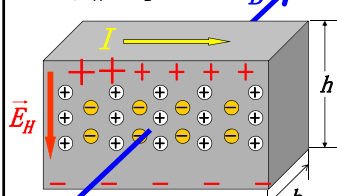
$$F_B = qvB, F_e = qE$$

$$\because I = JS = nqvS, S = bh \therefore F_B = IB/nbh$$

$$F_e = qU_H/b = F_B$$

霍耳电势差：

$$U_H = \frac{IB}{nhq} = K_H \frac{IB}{h}$$



$$K_H = \frac{1}{nq}$$

K_H — 霍耳系数

Hall效应的主要作用是：测磁场，电荷正负，载流子浓度等

霍耳电阻

$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{B}{nqh} \propto B$$

2017/4/21

18



*量子霍尔效应:

1980年**克里钦**发现,
在极低温、强磁场
(1.5K, 18.9T)下

$$R_H \propto B$$

$$R_H = \frac{R_K}{n}, n=1,2,3,$$

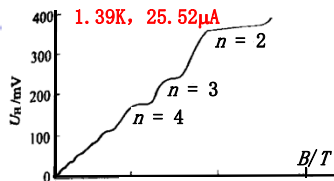
克里钦 (Klitzing) 常量 $R_K = \frac{h}{e^2} = 25812.80\Omega$

R_K 的测量准确到 10^{-10}

1990年定义 $1\Omega = \frac{R_K}{25812.80}$

2017/4/21

19



*分数量子霍尔效应:

崔琦和**施特默 (Störmer)** 发现在超低温
(0.5K) 更强 ($B > 20\text{ T}$) 磁场下, n 可以是分数,
如: $1/3, 1/5, 1/2, 1/4$ 等, 这称为**分数量子霍尔效应**。**劳克林 (Laughlin)** 成功地给出了理论解释。
该效应表明, 有携带分数电荷的准粒子存在。

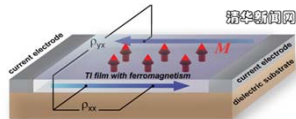
整数和分数量子霍尔效应及其理论解释是我们认识宏观量子现象的一次重要突破。**克里钦**获得了1985年诺贝尔物理学奖。**劳克林、施特默和崔琦**获得了1998年诺贝尔物理学奖。

2017/4/21

20

量子霍尔反常效应

普通量子霍尔效应的产生需要用到非常强的磁场 (通常需要的磁场强度是地磁场的几万甚至几十万倍), 因此应用起来非常昂贵和困难。而量子反常霍尔效应的最奇妙之处是不需要任何外加磁场, 因此, 这项研究成果将会推动新一代的低功耗晶体管和电子学器件的发展, 可能加速推进信息技术革命的进程。



量子反常霍尔效应的测量器件示意图: 将分子束外延生长的铁磁拓扑绝缘体薄膜制备成场效应晶体管的结构, 并对其霍尔电阻 ρ_{yx} 和纵向电阻 ρ_{xx} 进行精密测量。

——(清华大学薛其坤院士) 该成果于北京时间2013年3月15日凌晨 (美国东部时间3月14日下午) 在《Science》杂志在线发表

2017/4/21

21



• 带电粒子在均匀磁场中的匀速圆周运动

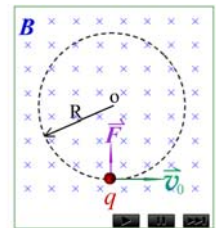
1. 回旋半径和回旋频率

洛伦兹力 $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$

回旋半径 $R = \frac{mV_{\perp}}{qB}$

周期 $T = \frac{2\pi m}{qB}$

回旋频率 $f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$



结论

匀速圆周运动的周期与速度无关。
圆周的半径与垂直于磁场的分量成正比。

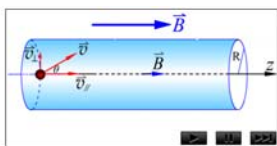
22

2 带电粒子在磁场中的螺旋线运动

\vec{v} 与 \vec{B} 不垂直 $\vec{v} = \vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp}$

$v_{\parallel} = v \cos \theta$ $v_{\perp} = v \sin \theta$ $R = \frac{mv_{\perp}}{qB}$

$T = \frac{2\pi m}{qB}$



螺距 $d = v_{\parallel} T = v \cos \theta (2\pi m / qB)$

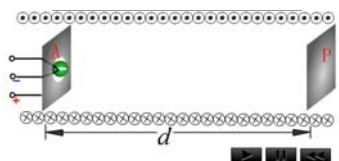
2017/4/21

23

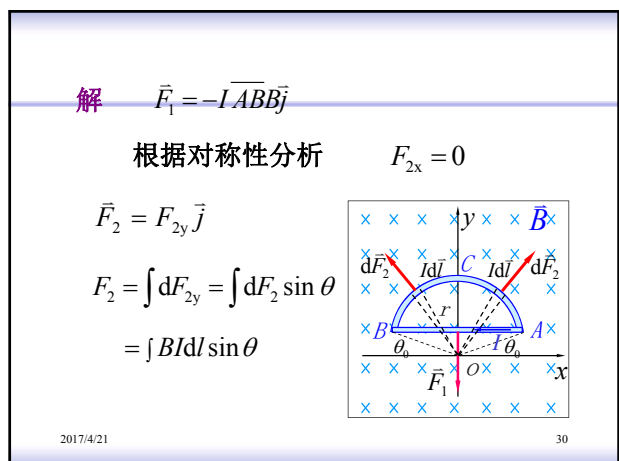
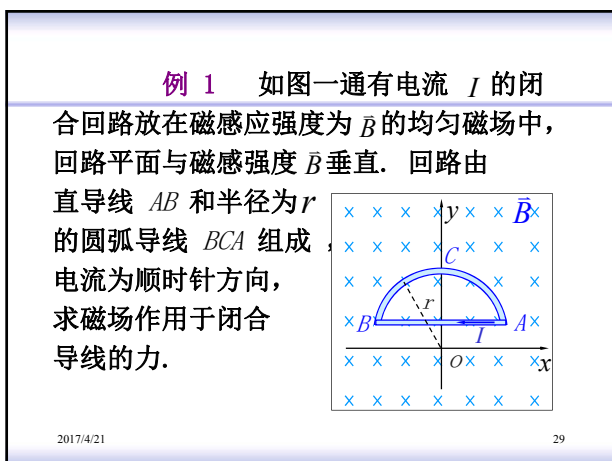
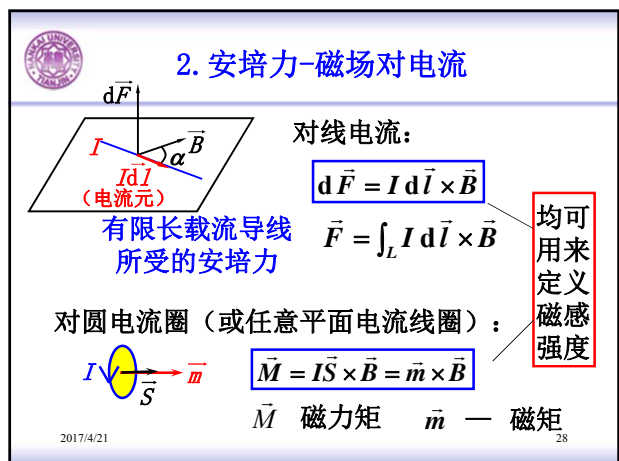
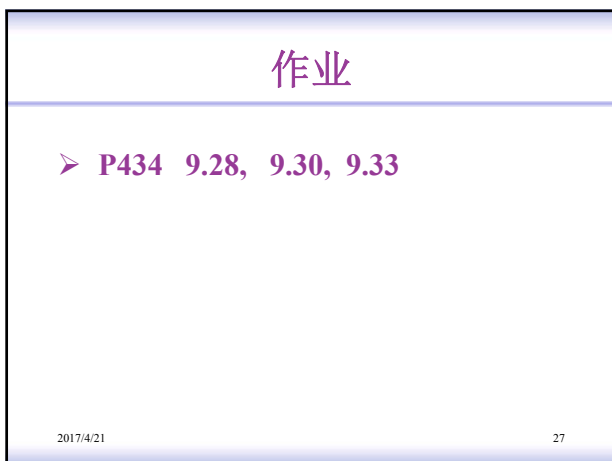
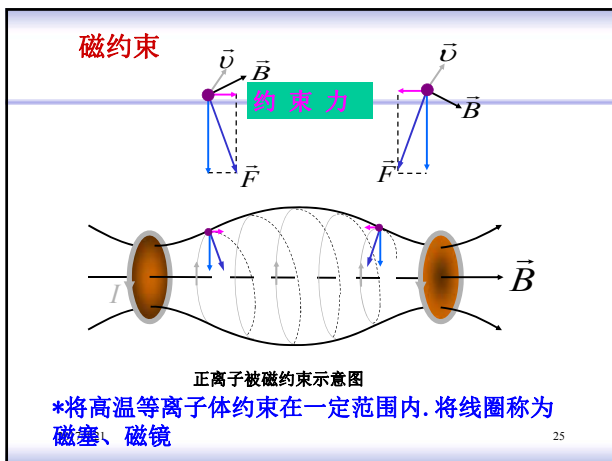
◆ **磁聚焦** 在均匀磁场中点 A 发射一束初速度相差不大的带电粒子, 它们的 \vec{v}_0 与 \vec{B} 之间的夹角 θ 不同, 但都较小, 这些粒子沿半径不同的螺旋线运动, 因螺距近似相等, 相交于屏上同一点, 此现象称为磁聚焦。

◆ 应用

电子光学, 电子显微镜等。



2017/4/21

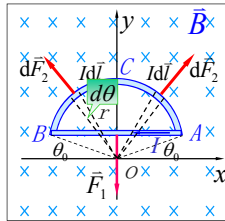


因 $dl = r d\theta$ $F_2 = B I r \int_{\theta_0}^{\pi-\theta_0} \sin \theta d\theta$

$$\begin{aligned}\vec{F}_2 &= B I (2r \cos \theta_0) \vec{j} \\ &= B I \overline{AB} \vec{j}\end{aligned}$$

由于 $\vec{F}_1 = -B I \overline{AB} \vec{j}$

故 $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$



2017/4/21

31

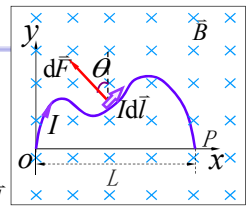
例 2 求
如图不规则的平面载流导线在均匀磁场中所受的力，已知 \vec{B} 和 I .

解 取一段电流元 $I d\vec{l}$

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$dF_x = dF \sin \theta = B I dl \sin \theta$$

$$dF_y = dF \cos \theta = B I dl \cos \theta$$



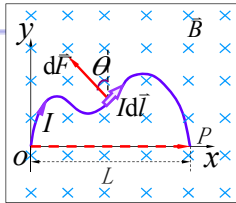
2017/4/21

32

$$F_x = \int dF_x = B I \int_0^L dy = 0$$

$$F_y = \int dF_y = B I \int_0^L dx = B I L$$

$$\vec{F} = \vec{F}_y = B I L \vec{j}$$



结论 任意平面载流导线在均匀磁场中所受的力，与其始点和终点相同的载流直导线所受的磁场力相同.

2017/4/21

33