# Physics Notes - Electromagnetism Section

### 硝基苯

- Chapter 05 Electric Field
  - 。 常量
  - 。 电荷守恒定律
  - 。 库伦定律
  - 。 电偶极子
    - 电偶极矩
    - 电场强度
  - 。 电场的形象描绘
    - 静电场的电场线
    - 等势面
  - 。 电场的参数
    - 关系
    - 决定式
      - 点电荷
      - 球
      - 无限大平面
      - 无限长直线
      - 细棒
      - 薄圆环
      - 薄圆盘
  - 。 高斯定理
    - 电场强度通量
    - 真空中静电场的高斯定理
    - 思路
  - 。 静电场的环路定理
    - 静电场力的功
    - 电势能
- Chapter 06 Conductors & Dielectrics
  - 。 静电平衡
    - 条件
    - 电荷分布
    - 导体表面外非常临近表面处电场强度

- 静电屏蔽
- 。 电容率
- 。 电极化强度
  - 极化电荷与自由电荷关系
- 。 电位移
- 。 含电介质的高斯定理
- 。 电容
  - 孤立导体
  - 孤立球形导体
  - 电容器
  - 平行平板电容器
  - 圆柱形电容器
  - 球形电容器
  - 平行长直导线
  - 串联
  - 并联
- 。 静电场的能量
- Chapter 07 Magnetic Field
  - 。 恒定电流
    - 电流
    - 电流密度
    - 漂移速度
    - 恒定电流条件
  - 。电动势
  - 。 毕奥—萨伐尔定律
    - 运动电荷产生的磁场
  - 。 决定式
  - 。 高斯定理
  - 。 安培环路定理
  - 。 磁场对电荷的作用
    - 洛伦兹力
    - 安培定律(安培力)
    - 磁力矩
    - 应用举例
      - 回旋
      - 霍尔效应
  - 。 磁介质
    - 顺磁质

- 抗磁质
- 铁磁质
  - 磁畴
  - 居里温度
  - 磁滞回线 磁介质分类 磁屏蔽
- 。 磁化强度
- 。 磁场强度
- 。 磁介质中的安培环路定理
- Chapter 08 Electromagentic Induction
  - o (法拉第) 电磁感应定律
    - 交流发电机
  - 。 楞次定律
  - 。 动生电动势
  - 。 感生电动势
    - 感生电场
  - 。 自感
  - 。 互感
  - 。 磁场的能量
  - 。 位移电流
    - 全电流
    - 全电流安培环路定律
  - 。 麦克斯韦方程组

## Chapter 05 Electric Field

场:特殊形态的物质

描述电场的物理量: 电场强度, 电势

表征静电场特性的定理: 高斯定理, 环路定理

## 常量

元电荷 
$$e=1.602 imes 10^{-19}~C$$
 真空电容率  $arepsilon_0=8.85 imes 10^{-12}~F \cdot m^{-1}$  电子伏  $1~{
m eV}=1.602 imes 10^{-19}~J$  记忆公式用代换  $k riangleq rac{1}{4\pi arepsilon_0}$ 

## 电荷守恒定律

系统的电荷的代数和不变。

## 库伦定律

$$F=krac{q_1q_2}{r^2}$$

条件: 真空、静止、点电荷

## 电偶极子

两个电荷量相等,符号相反,相距  $r_0$  的点电荷 +q 和 -q 构成的电荷系

### 电偶极矩

$$ec{p}=qec{r}_0$$

 $\vec{p}$ : 电偶极矩

 $ec{r}_0$ :轴,从-q指向+q的矢量

### 电场强度

以轴线中点为原点 O ,轴方向为  $O_x$  轴,中垂线为  $O_y$  轴

x 轴上有

$$ec{E}=rac{2kxec{p}}{(x^2-r_0^2/4)^2}\stackrel{x\gg r_0}{=}rac{2k}{x^3}ec{p}$$

y 轴上有

$$ec{E} = rac{-kec{p}}{(y^2 + r_0^2/4)^{3/2}} \overset{y \gg r_0}{=} rac{-k}{y^3} ec{p}$$

## 电场的形象描绘

### 静电场的电场线

电场强度沿电场线切线方向

电场线密度越大, 电场强度越大

电场线始于正电荷, 止于负电荷, 不形成闭合曲线, 不相交

$$E=rac{dN}{dS} riangle$$
 电场线密度

dN: 电场线数

### 等势面

某点电场强度于等势面垂直 相邻等势面间电势差相等 等势面越密,电场强度越大

电场强度

## 电场的参数

定义式	$ec{E}=rac{ec{F}}{q_0}$	$V_A = \int_{ ext{AB}} ec{E} \cdot dec{l} + V_B$
	$q_0$ : 试验电荷	$V_B$ :参考电势
		若电荷分布在有限空间,则参考点取无限远处并令其电势为零,即 $V_A=\int_{A\infty} ec{E} \cdot dec{l}$
叠加原理	矢量叠加	
	$k\sumrac{q_i}{r_i^2}ec{e}_{ri}$	$k\sum rac{q_i}{r_i}$
若电荷连续分布	$k\int rac{dq}{r^2}ec{e}_r$	$k\int rac{dq}{r}$
dq= hodV	$=\sigmadS$	$=\lambdadl$

电势

## 关系

$$ec{E} = - 
abla V$$

## 决定式

### 点电荷

$$\overrightarrow{E}=krac{q}{r^2}$$

$$V=krac{q}{r}$$

### 球

球売 / 球体 外 $\overrightarrow{E}=krac{q}{r}$ 

球壳/球体内

$$\overrightarrow{E} = k \frac{q}{R}$$

### 无限大平面

$$\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

两无限大平行平面

设两平面带等量异号电荷,电荷面密度分别为  $\pm \sigma$ 

平面外

0

平面内

 $\frac{\sigma}{2}$ 

### 无限长直线

电荷线密度为 $\lambda$ 

$$E = k \frac{2\lambda}{x}$$

### 细棒

设直线长为 2l 。以直线中点为原点 O ,直线沿  $O_y$  轴

x 轴上有

$$E=krac{q}{x\sqrt{x^2+l^2}}$$

y 轴上有

$$E = k \frac{q}{y^2 - l^2}$$

#### 薄圆环

$$E=krac{qx}{(x^2+R^2)^{3/2}}$$

x: 到环心的距离

在 
$$x=\pm rac{\sqrt{2}}{2}R$$
 处取得极值

### 薄圆盘

电荷面密度为  $\sigma$ 

 $dq = \sigma 2\pi r \, dr$ 

$$E = k \cdot 2\pi\sigma x \left(rac{1}{\sqrt{x^2}} - rac{1}{\sqrt{x^2 + R^2}}
ight)$$

## 高斯定理

### 电场强度通量

定义: 通过电场中某一个面的电场线数目

 $d\Phi_e = ec{E} \cdot dec{S} = E\cos heta\,dS$ 

 $\vec{S}$ : 面积矢量

 $ec{S} = S ec{e}_n$ 

 $\vec{e}_n$ : 单位 外 法线矢量,即方向垂直指向曲面外侧

匀强电场中有

 $\Phi_e = ES\cos\theta$ 

匀强电场穿过闭合曲面的电场强度通量为零

### 真空中静电场的高斯定理

$$arPhi_e = \oint ec{E} \cdot dec{S} = rac{1}{arepsilon_0} \sum q_{
m encl}$$

 $q_{\rm encl}$ : 高斯面包围的电荷的**代数和** 

条件: 真空, 静电场; 闭合曲面 (高斯面)

### 思路

利用积分区域对称(如果有):高斯面上电场分布的对称性 考虑  $\vec{E}$  为常量并垂直于  $\vec{S}$  时:提出 E ,积分简化为求面积

高斯面内无净电荷时,电场强度通量为零

## 静电场的环路定理

$$\oint_{l}ec{E}\cdot dec{l}=0$$

静电场中电场强度的 环流 为零

静电场力是保守力,静电场是保守场

### 静电场力的功

$$W_{AB}=kqq_0(rac{1}{r_A}-rac{1}{r_B})=qU_{AB}$$

$$U_{AB} = V_A - V_B = \int_{\overline{AB}} ec{E} \cdot dec{l}$$
:电势差

### 电势能

电荷在电场中的电势能,等于把它从该点移动到零势能处静电场力做的功

静电场力做的功等于电势能增量的负值

## Chapter 06 Conductors & Dielectrics

### 本章仅考虑静电场

静电平衡的导体内部电场强度为零,电势不一定为零接地的导体电势为零,电荷不一定为零

## 静电平衡

导体内部和导体表面电势处处相等,导体为一等势体

### 条件

导体内部任一点处电场强度为零导体表面处电场强度方向与导体表面垂直

### 电荷分布

导体所带电荷只能分布在外表面上 导体内没有净电荷 空腔内表面没有任何形式的分布电荷

### 导体表面外非常临近表面处电场强度

$$E=rac{\sigma}{arepsilon_0}$$

 $\sigma$ : 该点附近导体表面的电荷面密度

E: **合**电场强度,方向与导体表面垂直

曲率半径较小处, 电荷面密度较大, 电场较强 尖端附近电场最强

### 静电屏蔽

空腔导体(不论是否接地)使腔内空间不受外电场影响接地空腔导体使外部空间不受空腔内的电场的影响

## 电容率

• 真空电容率

$$arepsilon_0 = 8.85 imes 10^{-12} \; F \cdot m^{-1}$$

• 相对电容率

$$arepsilon_r = rac{E_0}{E} > 1$$

 $E_0$ : 两板间仅为真空时的电场强度 外电场频率 f 增大,相对电容率  $\varepsilon_r$  下降

• 电容率

$$arepsilon = arepsilon_0 arepsilon_r$$

## 电极化强度

极化现象 [瞭解]

P215

外电场作用下, 电介质表面产生极化电荷

$$\overrightarrow{P} = rac{\sum ec{p}}{\Delta V}$$

 $\Delta V$ : 宏观小体积

 $\vec{p}$ : 分子的电偶极矩

若电介质各处  $\overrightarrow{P}$  相同,则电介质被均匀极化

 $P = \sigma'$  为极化电荷面密度

条件: 两平行板间的电介质

### 极化电荷与自由电荷关系

$$\sigma' = \sigma_0 (1 - rac{1}{arepsilon_r}) < \sigma_0$$

 $\sigma'$ : 极化电荷面密度

 $\sigma_0$ : 自由电荷面密度

条件: 两平行板间的电介质

$$\overrightarrow{P} = (\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 \overrightarrow{E}$$

$$arepsilon_r-1 riangleq\chi_e$$
 为电介质的电极化率

## 电位移

$$\overrightarrow{D} = arepsilon_0 arepsilon_r \overrightarrow{E} \ = \overrightarrow{P} + arepsilon_0 \overrightarrow{E}$$

## 含电介质的高斯定理

理解用:  $\oint arepsilon \overrightarrow{E} \cdot d\overrightarrow{S} = Q_{ ext{encl-free}}$ 

敷衍用:  $\oint_S \overrightarrow{D} \cdot d\overrightarrow{S} = \sum Q_0$ 

考虑高斯面包围的自由电荷

## 电容

孤立导体

$$C = \frac{Q}{V}$$

## 孤立球形导体

$$C=4\piarepsilon_0 R$$

### 电容器

两个带等值异号电荷的导体组成的系统

$$C = \frac{Q}{U}$$

Q: 一个导体所带电荷

U: 两导体间电势差

### 平行平板电容器

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}$$

$$E_b = \frac{U_b}{d}$$

 $E_b$ : 击穿场强 (介电强度)

击穿: 电介质失去绝缘性

### 圆柱形电容器

$$C = rac{2\piarepsilon l}{\ln(R_2/R_1)}$$

$$R_2-R_1 riangleq d \ll R_1 \implies \lnrac{R_2}{R_1} pprox rac{d}{R_1}$$
 (WTF?)

$$C pprox rac{arepsilon S}{d}$$

S: 圆柱体侧面积

### 球形电容器

$$C = 4\pi\varepsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

### 平行长直导线

距离  $d\gg$  半径 R

单位长度的电容

$$C = rac{\pi arepsilon}{\ln(d/R)}$$

### 串联

$$\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_i}$$

各极板上电荷量相等

### 并联

$$C = \sum C_i$$

各电容器上电压相等

## 静电场的能量

$$W_e = rac{1}{2}CU^2$$

能量密度 
$$w_e=rac{1}{2}arepsilon E^2$$

## Chapter 07 Magnetic Field

## 恒定电流

### 电流

带电粒子定向运动 -> 传导电流带电物体机械运动 -> 运动电流

$$I=rac{dq}{dt}$$

通过某一截面 S 的电荷对时间的变化率

电流是标量,方向为正电荷移动方向

### 电流密度

单位时间内,通过一点附近,垂直于电流方向的单位面积的电荷

$$j = \frac{\Delta I}{\Delta S \cos \alpha}$$

$$dI = \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

### 漂移速度

自由电子在电场力作用下,定向移动的平均速度 宏观电流形成的原因

$$j = qnv_d$$

q: 载流子电荷量

n: 载流子数密度

### 恒定电流条件

闭合曲面上流入的电流等于流出的电流

$$\oint_S dI = \oint_S ec{j} \cdot dec{S} = 0$$

## 电动势

$$\mathscr{E} = \oint_{l} ec{E}_{k} \cdot dec{l}$$

 $ec{E}_k$ :非静电的等效电场强度,即单位正电荷所受的非静电力

若闭合回路中, 非静电场只存在于电源内部, 则

$$\mathscr{E} = \int_{ ext{in}} ec{E}_k \cdot dec{l}$$

电源电动势是标量

大小等于把单位正电荷从负极经电源内部移动到正极时,非静电力做的功 方向为电源内部电势升高的方向 电源电动势取决于电源本身的性质,于外电路无关

## 毕奥--萨伐尔定律

$$dec{B}=rac{\mu_0}{4\pi}rac{Idec{l} imes\hat{r}}{r^2}$$

 $\mu_0 = 4\pi imes 10^{-7} \; T \cdot m \cdot A^{-1}$ : 真空磁导率

 $Id\vec{l}$ : 电流元,方向为电流方向

 $\hat{r}$ : 单位位置矢量,从电流元指向所求点

### 运动电荷产生的磁场

$$ec{B} = rac{\mu_0}{4\pi} rac{q ec{v} imes \hat{r}}{r^2} \qquad (v \ll c)$$

## 决定式

P260

## 高斯定理

通过闭合曲面的磁通量为零

$$\oint_S ec{B} \cdot dec{S} = 0$$

背景:

恒定磁场的磁感线是闭合曲线

磁感线密度为磁感强度

磁通量 
$$arPhi = ec{B} \cdot ec{S}$$
 dim  $1 \, Wb = 1 \, T imes m^2$ 

## 安培环路定理

**恒定磁场**磁感强度的环流,等于真空磁导率乘以闭合路径包围的电流的代数和 电流正方向遵循右手螺旋关系

$$\oint_{l}ec{B}\cdot dec{l}=\mu_{0}I_{ ext{encl}}$$

## 磁场对电荷的作用

洛伦兹力

$$ec{F}=qec{v} imesec{B}$$

### 安培定律(安培力)

$$dec{F} = Idec{l} imes ec{B}$$

均匀磁场中,任意平面载流导线受的磁场力,等于始点、终点相同的载流直导线受的磁场力

### 磁力矩

$$ec{M} = N ec{m} imes ec{B}$$

磁矩  $\vec{m} = IS\hat{n}$ 

单位法向量的方向与电流流向遵守右手螺旋定则

磁场对载流线圈的磁力矩,使线圈转至其磁矩方向与磁场方向一致

### 应用举例

### 回旋

回旋半径

$$R = \frac{mv}{|q|B} \quad (v \ll c)$$

螺距

$$d=v_\parallel T=rac{2\pi m v_\parallel}{|q|B}$$

粒子速率增加,回旋频率减小

### 霍尔效应

$$U_{H}=rac{1}{nq}rac{IB}{d}$$

K=1/(nq): 霍尔系数

d: 磁场方向导电板厚度

## 磁介质

### 顺磁质

 $B_{\rm Min}$  与  $B_{\rm M}$  方向相同

 $B_{\rm Min} \ll B_{\rm M}$ , 弱磁性物质

### 抗磁质

 $B_{Mhn}$  与  $B_{hh}$  方向相反

 $B_{\rm Min} \ll B_{\rm sh}$ ,弱磁性物质

### 铁磁质

B附加 不是常量

 $B_{
m Min}\gg B_{
m sh}$ , 强磁性物质

### 磁畴

微小的自发磁化区域

自旋磁矩排列整齐

### 居里温度

铁磁质退化成顺磁质

### 磁滞回线 磁介质分类 磁屏蔽

P300 - P303

## 磁化强度

$$ec{M} = rac{\sum ec{m}_i}{\Delta V}$$

 $\sum \vec{m}_i$ : 小体积内分子磁矩的矢量和

 $ec{m}_i$ : 分子磁矩。包括电子的轨道磁矩和自旋磁矩

$$\| \vec{M} \| = i_s$$

 $i_s$ : 磁化电流面密度

## 磁场强度

$$ec{H}=rac{ec{B}}{\mu_0}-ec{M}$$

$$ec{M} = \chi_m ec{H} \ ec{B} = \mu ec{H}$$

 $\chi_m$ : 磁化率

 $1+\chi_m=\mu_r$ : 相对磁**导**率

 $\mu_0\mu_r=\mu$ : 磁**导**率

## 磁介质中的安培环路定理

磁介质内部分子电流相互抵消,只在边缘上形成近似环形电流,即磁化电流

$$\oint_I ec{H} \cdot dec{l} = I_c$$

 $I_c$ : 回路包围的**传导电流**的代数和

即有

$$\oint_I ec{M} \cdot dec{l} = I_s$$

$$\oint_{l}ec{B}\cdot dec{l}=\mu_{0}(I_{c}+I_{s})$$

 $I_s$ : 磁化电流

## Chapter 08 Electromagentic Induction

## (法拉第) 电磁感应定律

闭合导体回路磁通量变化 -> 产生感应电流

闭合回路磁通量变化 -> 产生感应电动势

$$\mathscr{E}_i = -rac{d(NarPhi)}{dt}$$

 $N\Phi$ : 磁通匝数 / 磁链

感应电动势方向上电势上升

$$q=rac{1}{R}|\Phi_1-\Phi_2|$$

交流发电机

设 t=0 时,线圈垂直于磁场

$${\mathscr E}_m=NBS\omega$$

$$\mathscr{E}=\mathscr{E}_m\sin\omega t$$

## 楞次定律

感应电流磁效应反抗磁通量变化

## 动生电动势

回路面积矢量的变化引发的电动势

$$d{\mathscr E}_i = (ec v imes ec B) \cdot dec l$$

## 感生电动势

磁感强度变化引发的电动势

$${\mathscr E}_i = \oint_I ec E_k \cdot dec l$$

 $E_k$ : 感生电场

若回路静止,面积不随时间变化

$${\mathscr E}_i = -\int_S rac{\partial ec B}{\partial t} \cdot dec S$$

感生电场

由变化的磁场激发

电场线闭合

非保守场 / 有旋电场

## 自感

$$L = \frac{N\Phi}{I}$$

L: 自感。与回路形状、大小,周围介质磁介质有关

$$\mathscr{E}_L = -Lrac{dI}{dt}$$
自感电动势反抗电流**变化**

## 互感

$$\Phi_{21}=M_{21}I_1$$

 $M_{21}$ : 互感。与线圈本身,周围介质磁导率,线圈间相对位置有关

### 上述参数不变时

$$M_{21}=M_{12} riangleq M$$

$${\mathscr E}_{21} = -M rac{dI_1}{dt}$$

## 磁场的能量

$$W_m=rac{1}{2}LI^2$$

### 能量密度

$$w_m=rac{1}{2}rac{B^2}{\mu}$$

## 位移电流

$$I_d=rac{d\Psi}{dt}$$

 $\Psi = arepsilonarPhi_e$ : 电位移通量

$$ec{j}_d = rac{\partial ec{D}}{\partial t}$$

 $ec{j}_d$ :位移电流密度

位移电流的实质是变化的电场 变化的电场激发有旋磁场

### 全电流

$$I_s = I_c + I_d$$

传导电流和位移电流构成电流的连续性 例:

电容器所在电路上

传导电流  $I_c$  在极板表面中断由极板间位移电流  $I_d$  继续  $I_c=I_d$ 

### 全电流安培环路定律

非恒定电流下,安培环路定律不适用 可修正为

$$\oint_L ec{H} \cdot dec{l} = I_s = \int_S (ec{j}_c + rac{\partial ec{D}}{\partial t}) \cdot dec{S}$$

## 麦克斯韦方程组

$$egin{aligned} \oint arepsilon ec{E} \cdot dec{S} &= Q_{ ext{encl-free}} \ \ & \oint ec{B} \cdot dec{S} &= 0 \ \ \ & \oint \dfrac{ec{B}}{\mu} \cdot dec{l} &= I_{ ext{s-encl}} &= \int_S (ec{j}_c + \dfrac{\partial ec{D}}{\partial t}) \cdot dec{S} \ \ \ & \oint ec{E} \cdot dec{l} &= -\dfrac{darPhi_b}{dt} &= -\int_S \dfrac{\partial ec{B}}{\partial t} \cdot dec{S} \end{aligned}$$