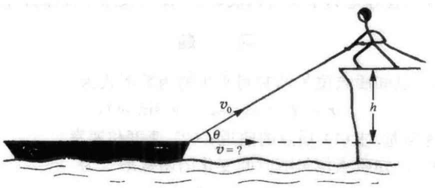
2023 级物理学期末串讲

李梓瑞

2024 年 6 月 8 日

自由度与坐标: 如何确定一个系统的位形? 状态?
思想: 选取最少的坐标, 表示整个系统
例: 直角坐标, 极坐标, 球坐标, 柱坐标, 自然坐标



习题 1.6

牛顿三定律:

- 牛顿第一定律: 惯性
- 牛顿第二定律:$\boldsymbol{F} = d\boldsymbol{p}/dt$(二阶微分方程)
- 牛顿第三定律: 反作用力

运动积分:

- 能量:$E = T + V = \frac{1}{2}\sum_i m_i \boldsymbol{v_i}^2 + V$, $\boldsymbol{F} = -\nabla V$
- 动量:$\boldsymbol{p} = \sum_i m_i \boldsymbol{v_i}^2$(三个分量)
- 角动量:$\boldsymbol{L} = \sum_i \boldsymbol{r_i} \times \boldsymbol{p_i} = \sum_i m_i \boldsymbol{r_i} \times \boldsymbol{v}_i$(三个分量)

守恒量与对称性: 诺特定理

质心系中的守恒量

- 柯尼希定理:$T = T' + \frac{1}{2}M\boldsymbol{v}_C^2$4
- 质心系动量:$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{p}_C$
- 质心系角动量:$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{L}' + \boldsymbol{L}_C$

几个典型的保守力场:

- 平方反比力场
  - 引力:$\boldsymbol{F} = -\frac{Gm_1m_2}{r_{12}^2}\hat{\boldsymbol{r_{12}}}$, $V = -\frac{Gm_1m_2}{r}$
  - 静电场:$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r_{12}^2}\hat{\boldsymbol{r_{12}}}$, $V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r_{12}}$
- 正比力场 (弹簧):

$$\boldsymbol{F} = -k\boldsymbol{r}, \quad V = \frac{1}{2}kx^2$$

相互作用系统——碰撞与散射

惯性系: 伽利略变换

非惯性系:

- 有加速度的平动
  - 速度:$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{a}t$
  - 惯性力:$\boldsymbol{F}' = -m\boldsymbol{a}$
- 转动
  - 速度:$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}$
  - 加速度 (简单定轴转动):

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}\omega^2 + 2\boldsymbol{v}' \times \boldsymbol{\omega}$$

  - 惯性力:

$$\boldsymbol{F}' = -m\left(\boldsymbol{a}' + \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}\omega^2 + 2\boldsymbol{v}' \times \boldsymbol{\omega}\right)$$

转动惯量:

$$I = \int r^2 dm$$

平行轴定理:$I_O = I_C + md^2$, 垂直轴定理 (薄片):$I_z = I_x + I_y$
运动微分方程:

$$\boldsymbol{M} = \frac{d\boldsymbol{L}}{dt} = I\boldsymbol{\beta}, \quad \text{where } \boldsymbol{M} = \sum_i \boldsymbol{r_i} \times \boldsymbol{F_i}$$

运动积分:

- 能量:$E = T + V = \frac{1}{2}I\boldsymbol{\omega}^2 + V$
- 角动量:$\boldsymbol{L} = I\boldsymbol{\omega}$

质点的运动规律与刚体的定轴转动规律的比较

质点的运动		刚体的定轴转动	
速度	$\vec{v}=\dfrac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}$	角速度	$\omega=\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$
加速度	$\vec{a}=\dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}^2\vec{r}}{\mathrm{d}t^2}$	角加速度	$\beta=\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}$
质量	m	转动惯量	$I=\int r^2\mathrm{d}m$
力	$\vec{F}$	力矩	M
运动规律	$\vec{F}=m\vec{a}$	转动定律	$M=I\beta$
动量	$\vec{p}=m\vec{v}$	动量	$\vec{p}=\sum\Delta m_i\vec{v}_i$
角动量	$\vec{L}=\vec{r}\times\vec{p}$	角动量	$L=I\omega$
动量定理	$\vec{F}=\dfrac{\mathrm{d}(m\vec{v})}{\mathrm{d}t}$	角动量定理	$M=\dfrac{\mathrm{d}(I\omega)}{\mathrm{d}t}$

质点的运动规律与刚体的定轴转动规律的比较

质点的运动		刚体的定轴转动	
动量守恒	$\sum F_i = 0$时 $\sum m_i v_i =$ 恒量	角动量守恒	$M = 0$时 $\sum I\omega =$ 恒量
力的功	$A_{ab} = \int_a^b \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{r}$	力矩的功	$A_{ab} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} M\mathrm{d}\theta$
动能	$E_\mathrm{k} = \frac{1}{2} m v^2$	转动动能	$E_\mathrm{k} = \frac{1}{2} I\omega^2$
动能定理	$A = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$	动能定理	$A = \frac{1}{2} I\omega_2^2 - \frac{1}{2} I\omega_1^2$
重力势能	$E_\mathrm{p} = mgh$	重力势能	$E_\mathrm{p} = mgh_C$
机械能守恒	$A_{外} + A_{非保内} = 0$时 $E_\mathrm{k} + E_\mathrm{p} =$ 恒量	机械能守恒	$A_{外} + A_{非保内} = 0$时 $E_\mathrm{k} + E_\mathrm{p} =$ 恒量

常见刚体的转动惯量

刚体 (质量为m)	转轴位置	转动惯量
细棒 (棒长为l)	通过中心与棒垂直	$I_C=\frac{1}{12}ml^2$
	通过端点与棒垂直	$I_D=\frac{1}{3}ml^2$
细圆环 (半径为R)	通过中心与环面垂直	$I_C=mR^2$
	直径	$I_x=I_y=\frac{1}{2}mR^2$
薄圆盘 (半径为R)	通过中心与盘面垂直	$I_C=\frac{1}{2}mR^2$
	直径	$I_x=I_y=\frac{1}{4}mR^2$
空心圆柱 (内外半径为R_1和R_2)	对称轴	$I_C=\frac{1}{2}m(R_1^2+R_2^2)$
球壳 (半径为R)	中心轴	$I_C=\frac{2}{3}mR^2$
球体 (半径为R)	中心轴	$I_C=\frac{2}{5}mR^2$

- 粘性:$f = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S$
- * 连续性方程 (质量守恒):$\nabla \cdot \boldsymbol{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$
- 伯努利方程 (能量守恒):$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} v^2 + gh(\text{势场项}) = Constant$
- 泊肃叶公式:$v = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l}(R^2 - r^2)$, $Q = \frac{\pi}{8} \frac{p_1 - p_2}{\eta l} R^4$
- 斯托克斯公式:$f = 6\pi\eta r v$
- 雷诺数:$Re = \frac{\rho v l}{\eta}$

1.16 设将两物体 A 和 B 分别以初速 $\boldsymbol{v}_A$ 和 $\boldsymbol{v}_B$ 抛掷出去. $\boldsymbol{v}_A$ 与水平面的夹角为 α,$\boldsymbol{v}_B$ 与水平面的夹角为 β. 试证明：在任何时刻物体 B 相对物体 A 的速度是常矢量.

2.14 一条均匀的绳子,质量为 m,长度为 l,将它一头拴在转轴上,以角速度 ω 旋转. 试证明:略去重力时,绳中的张力分布为

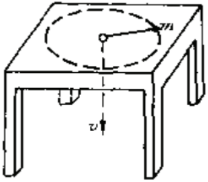
$$T(r)=\frac{m\omega^2}{2l}(l^2-r^2),$$

式中 r 为绳元到转轴的距离.

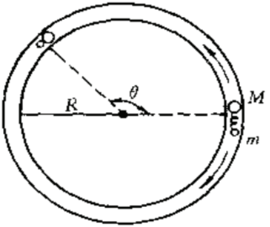
3.10 三只质量均为 M 的小船，一只跟着一只鱼贯而行，速率均为 v_0，由中间那只船上同时以水平速率 u（相对于船）把两个质量均为 m（设 m 不包括在 M 内）的物体抛到前后两只船上，当投入物体后三只船的速度如何？

3.12 一宇宙飞船以恒速 $\boldsymbol{v}$ 在空间飞行，飞行过程中遇到一股微尘粒子流，后者以 $\mathrm{d}m/\mathrm{d}t$ 的速率沉积在飞船上．尘粒在落到飞船之前的速度为 $\boldsymbol{u}$，在时刻 t 飞船的总质量为 $M(t)$，试问：要保持飞船匀速飞行，需要多大的力 $\boldsymbol{F}$？

5.5 一质量为 m 的物体，绕一穿过光滑桌面上极小的圆孔的细绳旋转(见图)。开始时物体到中心的距离为 r_0，旋转角速度为 ω_0。若在 $t=0$ 时，开始以固定的速度 v 拉绳子，于是物体到中心的距离不断减小。求(1) $\omega(t)$；(2) 拉绳子的力 F。



习题 5.5



习题 5.6

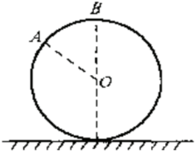
5.7 质量都是 m 的两个质点，中间用长为 l 的绳子连在一起，以角速度 ω 绕绳子的中点转动(设绳的质量可以略去不计)。

(1) 求它们对质心的角动量；

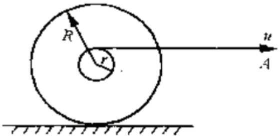
(2) 绳突然断了，求绳断后它们对中点的角动量；

(3) 绳断前后它们的角动量是否相等？

7.4 半径为 R 的轮子在水平面上作纯滚动，轮中部绕线轴的



习题 7.3



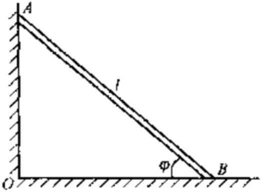
习题 7.4

半径为 r，线端点 A 以不变的速度 u 沿水平方向运动(见图)，求

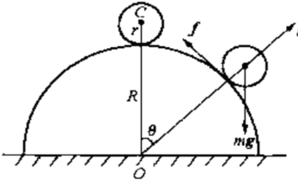
(1) 轮心的速度及轮子的转动角速度；

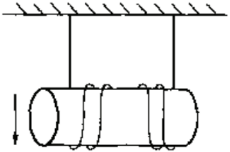
(2) 轮子与平面接触点 B 的加速度.

7.6 寻找瞬心位置的几何方法是，在平面平行运动刚体上找出速度方向不同的两点 A，B，分别作 $\boldsymbol{v}_A$，$\boldsymbol{v}_B$ 方向的垂线，两垂线的交点即为瞬心. 试据此求图示均匀直杆在墙和地面均光滑情况下滑倒时的瞬心.



7.24 如图所示，质量为 m，半径为 r 的小球从半径为 R 的固定圆柱面顶端自静止开始滚动. 为保证在 $\theta \leqslant 45°$ 的范围内小球作纯滚动，试求静摩擦因数 μ 的最小值.





麦克斯韦方程组 (微分形式)

$$\begin{cases} \nabla \cdot \boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \\ \nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \\ \nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \end{cases}$$

光速 $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$, 介质中的光速 $v = 1/\sqrt{\varepsilon \mu}$.
介质中的麦克斯韦方程组 (微分形式)

$$\begin{cases} \nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho_0 \\ \nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \\ \nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{j_0} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \end{cases}$$

另有关系 (线性介质)$\boldsymbol{D} = \epsilon \boldsymbol{E}, \boldsymbol{H} = \boldsymbol{B}/\mu, \boldsymbol{j} = \sigma \boldsymbol{E}$.
洛伦兹力:$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E} + q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$

库仑定律 (非相对论近似):

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}}$$
$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}}$$

高斯定理 (积分形式):

$$\oint_\Gamma \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{dS} = Q/\varepsilon_0$$

静电场条件:$\oint_C \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{dl} = 0.$
能量与势:

$$W = q\phi, w_E = \frac{1}{2}\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{E}; \quad \phi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r}$$

静电场中的介质

- 导体:
  - 内部场强为 0
  - 内部电势处处相等
  - 电场由边界条件唯一确定 (泊松方程)
- 电介质:
  - 极化 $\nabla \cdot \boldsymbol{P} = -\rho'$(多极矩), $\sigma' = \boldsymbol{P} \cdot \boldsymbol{n}$
  - 线性磁介质 $\boldsymbol{M} = K_m \boldsymbol{B} = \chi_m \boldsymbol{H}$, $\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{D} = \mu_0 \mu_r \boldsymbol{H}$
  - $\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0} - \boldsymbol{M}$
  - 边界条件:B 法向连续,H 切向连续 (无自由/传导电流)

物相: 铁磁、顺磁、反铁磁...

电感

- 定义:$C = Q/U$
- 串联:$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$; 并联:$C = C_1 + C_2$
- 能量:$W = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$
- 几个典型系统的电容

安培定律与毕奥-萨伐尔定律 (非相对论近似):

$$\boldsymbol{F} = \int I d\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{E}$$

$$\boldsymbol{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\boldsymbol{l} \times \hat{\boldsymbol{r}}}{r^2}$$

安培环路定理 (积分形式):

$$\oint_C \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 I$$

与电场不同, $\oint_\Gamma \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S} = 0$ 恒成立 (无磁荷).
洛伦兹力

$$\boldsymbol{f} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

能量与势:

$$W = \boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{B}, w_E = \frac{1}{2}\boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{H}; \quad B = \nabla \times \boldsymbol{A}$$

静磁场中的介质

- 电介质:
  - 磁化 $\nabla \times \boldsymbol{M} = \boldsymbol{j}'$, $\boldsymbol{i}' = \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{n}$
  - 线性电介质 $\boldsymbol{P} = \varepsilon_0 \chi_e \boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \boldsymbol{E}$
  - $\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}$
  - 边界条件:D 法向连续 (无自由电荷),E 切向连续

电感

- 自感:
  - 定义:$L = \Psi / I$
  - 串联:$L = L_1 + L_2$; 并联:$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$
  - 能量:$W = \frac{1}{2} L I^2$
- 互感:
  - 定义:$M = \Psi_{12} / I$
  - 能量:$W = M I_1 I_2$
  - 关系:$M = K \sqrt{L_1 L_2}$, K 为耦合系数

电磁感应

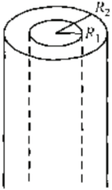
- $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$, where $\Phi = \iint \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{dS}$
- 楞次定律
- 动生电动势:$d\mathcal{E} = (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) \cdot \boldsymbol{dl}$
- 感生电动势:$d\mathcal{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot \boldsymbol{dS}$

由麦克斯韦方程组出发, 可推出电磁波

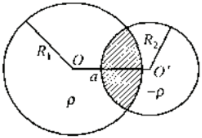
$$\begin{cases} \nabla^2 \boldsymbol{E} = \varepsilon\mu \frac{\partial E}{\partial t} \\ \nabla^2 \boldsymbol{B} = \varepsilon\mu \frac{\partial B}{\partial t} \end{cases} \quad \rightarrow \text{行波解}$$

- 电磁波是横波
- $E = vB$
- 能流密度 (坡印亭矢量):$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}$, 动量流密度 $\boldsymbol{g} = \frac{1}{c^2}\boldsymbol{S}$

1.16 如图为一无限长带电体系，其横截面由两个半径分别为 R_1 和 R_2 的圆相交而成，两圆中心相距为 a，$a<(R_1+R_2)$，半径为 R_1 的区域内充满电荷体密度为 ρ 的均匀正电荷，半径为 R_2 的区域内充满电荷体密度为 $-\rho$ 的均匀负电荷. 试求重叠区域内的电场强度.

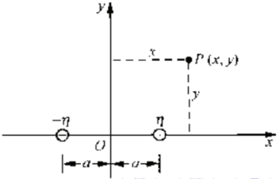


习题 1.15



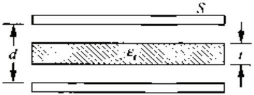
习题 1.16

1.25 如图，两条均匀带电的无穷长平行直线，电荷线密度分别为 η 和 $-\eta$，相距为 $2a$，两带电直线都与纸面垂直. 试求空间任一点 $P(x,y)$ 的电势.



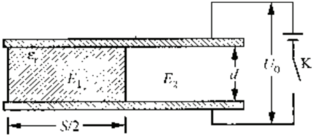
1.26 电量 q 均匀地分布在长

2.12 如图，平行板电容器两极板相距为 d，面积为 S，电势差为 U，其中放有一块厚为 t，面积为 S，相对介电常量为 ε_r 的介质板，介质两边都是空气，设空气的相对介电常数为 1，忽略边缘效应。试求：(1) 介质中的电场强度 $\boldsymbol{E}$，极化强度 $\boldsymbol{P}$ 和电位移矢量 $\boldsymbol{D}$；(2) 极板上的电量 Q；(3) 极板和介质间隙中的场强；(4) 电容 C.



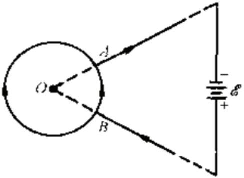
习题 2.12

2.21 如图，平行板电容器极板面积为 S，两板间距为 d，接电源，板间电压为 U_0，充电后不断开电源，插入相对介电常量为 ε_r 的均匀介质，并充满电容器的一半，忽略边缘效应. 试求：(1) 电容器中的 $E_1, E_2, D_1, D_2, \sigma_1, \sigma_2$；(2) 与未插入介质时相比，系统能量的改变 ΔW；(3) 在此过程中，电源做了多少功？



习题 2.21

4.3 如图，两根长直导线沿半径方向接到粗细均匀的金属圆环上的 A, B 两点，远处与电源相接. 试求环中心 O 点的磁感应强度.



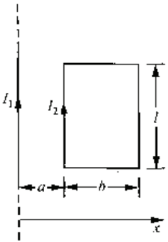
4.4 试证明：当一对电流元成镜像对称时，它们在对称面上任一点的合磁场

4.17 如图，(1) 一根无限长直导线载有电流 $I_1=30$ A，矩形回路与它共面，且矩形的长边与直导线平行．回路中载有电流 $I_2=20$ A，矩形的长 $l=12$ cm，宽 $b=8.0$ cm，矩形靠近直导线的一边距直导线为 $a=1.0$ cm，试求 I_1 作用在矩形回路上的合力．

(2) 试证明：当矩形线圈足够小时，线圈受到的合力 $\boldsymbol{F}$ 的大小为

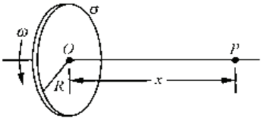
$$F=p_m\frac{\partial B}{\partial x},$$

其中 p_m 为矩形线圈的磁矩，$\dfrac{\partial B}{\partial x}$ 为直导线产生的磁场沿垂直于直导线方向（图中 x 方向）上的磁场梯度．



习题 4.17

4.9 如图，半径为 R 的圆片上均匀带电，电荷面密度为 σ，圆片以匀角速度 ω 绕它的中心轴旋转．试求：(1) 轴线上与圆片中心 O 相距为 x 处 P 点的磁感应强度；(2) 圆片转动时产生的磁矩．



习题 4.9

5.5 一铁环中心线的周长为 30 cm，横截面积为 1.0 cm^2，在环上密绕 300 匝表面绝缘的导线. 当导线中通有恒定电流 32 mA 时，通过环横截面的磁通量为 2.0×10^{-6} Wb. 试求以下各物理量的值：

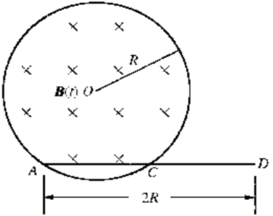
(1) 铁环内部磁感应强度 $\boldsymbol{B}$；

(2) 铁环内部磁场强度 $\boldsymbol{H}$；

(3) 铁环的磁化强度 $\boldsymbol{M}$；

(4) 相应的磁化率 χ_m 和相对磁导率 μ_r.

6.7 如图，均匀磁场 $\boldsymbol{B}$ 处于半径为 R 的圆柱体内，其方向与圆柱体的轴线平行，且 $\boldsymbol{B}$ 随时间作均匀变化，变化率 k 为常量，$k>0$，圆柱体之外无磁场. 有一长为 $2R$ 的金属细棒放在图示位置，其一半位于磁场内部，另一半在磁场外部，试求棒两端的电势差 U_{DA}.



6.12 一根圆柱形的长直导线载有恒定电流 I，电流均匀分布在它的横截面上，试证明：这导线内部单位长度的磁场能量为$\frac{\mu_0 I^2}{16\pi}$.

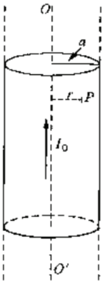
习题 8.3

8.4 如图为一无限长的圆柱形导体，其半径为 a，电阻率为 ρ，载有均匀分布的电流 I_0，试求：

(1) 体内与轴线相距为 r 的 P 点的 E 和 H 的大小和方向；

(2) P 点的能流密度（坡印亭矢量）$\boldsymbol{S}$ 的大小和方向；

(3) 计算长为 L，半径为 r 的导体圆柱内消耗的能量，说明能量从何而来.



习题 8.4

约定 $\beta = v/c,\ \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$
洛伦兹变换与四维时空

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma(t - \frac{v}{c^2}x) \end{cases}$$

庞加莱空间 (x, y, z, ict)
闵可夫斯基空间 $(+---)$or$(-++++)$

- 尺缩:$l = l_0\sqrt{1-\beta^2}$
- 钟慢:$t = \gamma t_0$
- 相对论性多普勒效应:$f = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} f_0$

相对论速度变换公式

$$\begin{cases} u'_x = (u_x - v)/(1 - \frac{v}{c^2}u_x) \\ u'_y = u_y/\gamma(1 - \frac{v}{c^2}u_x) \\ u'_z = u_z/\gamma(1 - \frac{v}{c^2}u_x) \end{cases}$$

能量，动量，质量

- 动质量;$m = \gamma m_0$
- 质能方程:$E = mc^2$
- 能量动量关系:$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2$

麦克斯韦和牛顿的矛盾：理论的协变性?

1.7 一艘宇宙飞船以速度 $0.8c$ 中午飞经地球，此时飞船上和地球上的观察者都把自己的时钟拨到 12 点.

(1) 按飞船上的时钟于午后 12:30 飞经一星际宇航站，该站相对于地球固定，其时钟指示的是地球时间. 按宇航站的时间，飞船到达该站的时间是多少?

(2) 按地球上的坐标测量，宇航站离地球多远?

(3) 在飞船时间午后 12:30 从飞船发送无线电信号到地球，问地球何时(按地球时间)接收到信号?

(4) 若地球上的地面站在接收到信号后立即发出回答信号，问飞船何时(按飞船时间)接收到回答信号?

1.13 有两个中子 A 和 B，沿同一直线相向运动，在实验室中测得每个中子的速率为 βc. 试证明在中子 A 的静止系中测得的中子 B 的总能量为

$$E = \frac{1+\beta^2}{1-\beta^2} m_0 c^2 ,$$

其中 m_0 为中子的静质量.

- 物理学在研究什么?
- 物理本科生的课程
- 北航物理