

第 29 届 CPHOS 物理竞赛联考

理论试题

本文件于 2026 年 4 月 24 日 12:00 发布，最后更新于 2026 年 4 月 23 日 10:13。

CPHOS 物理竞赛联考是开放性公益性的考试，有意向参与的教师和学生可以关注“CPHOS”微信公众号进行报名，报名后方可参与联考。请使用“CPHOS 物理竞赛联考”微信小程序完成答题卡上传、阅卷、成绩查询等操作。联系方式见试题末尾。

答题卡上传	阅卷
2026/4/25 16:00 - 2026/4/29 10:00	2026/4/29 12:00 - 2026/5/2 18:00
非正式成绩	成绩申诉
2026/5/2 20:00	2026/5/2 20:00 - 2026/5/3 18:00
	正式成绩
	2026/5/3 22:00

考生须知

1. 理论试题共 **6** 页，理论答题卡共 **8** 页，答题时间 **180** 分钟，试题满分 **320** 分。
2. 请在答题卡的指定答题区域内答题，试题和草稿纸上的内容将不会作为评分参考，不可申请答题卡加页。
3. 若发现试题存在问题，请向领队（教练）反映，由其转达至相关微信群聊。
4. 试题答案及相关分析均会在官方网站 www.cphos.cn 上发布。
5. 本次考试定位难度为决赛。

一、(40 分) 潘宁阱

潘宁阱是一种利用均匀磁场和四极电场来囚禁带电粒子的装置。它就像一个精准的“粒子牢笼”，可以长时间稳定地束缚单个离子或电子，是实现高精度测量的关键工具。

在潘宁阱内建立直角坐标系，空间中的电势分布为：

$$U = \frac{U_0}{4d^2} (2z^2 - x^2 - y^2) \quad (1)$$

空间中存在磁场 $\vec{B} = B_0 \hat{z}$ 。本题不考虑可能的量子效应。

(1) 假设原点处有一个质量为 m 、电荷量大小为 q 的带正电的质点，固定电场不变，求解能使该质点局限在阱内做周期运动的 B_0 的范围。

(2) 实际的潘宁阱形成的电磁场不可能完美符合理论，答案只需保留一阶近似项，接下来分别考虑可能的误差：

(2.1) 考虑八极势带来的扰动，不考虑其它扰动，电势修正为

$$U = \frac{U_0}{4d^2} (2z^2 - x^2 - y^2) + \frac{U_0}{2d^4} C \left[z^4 - 3z^2 (x^2 + y^2) + \frac{3}{8} (x^2 + y^2)^2 \right] \quad (2)$$

其中 $C \ll 1$ 。已知粒子 z 方向运动振幅为 A ，求解粒子 z 方向运动基频相对变化量 $\frac{\Delta\omega_z}{\omega_z}$ ，已知轴向运动主要受 ΔU 中的 z^4 项影响（径向耦合项在时间平均后贡献很小，且频率不匹配）。

(2.2) 进一步考虑小量轴向阻尼力 $-\gamma_z \dot{z}$ ，并施加一个正弦驱动力 $\vec{F} = F_0 \sin(\omega t + \theta) \hat{z}$ 进行驱动频率扫描，求解振幅关于频率的响应曲线在 $\omega = \sqrt{\frac{U_0 q}{md^2}}$ 附近出现三值区间（即在此频率区间内，对应同一频率有三个不同的振幅解）的驱动力下界。

(2.3) 潘宁阱中粒子运动速率远小于光速，但当进行驱动频率扫描时，相对论效应会对振幅关于频率的响应曲线产生影响。此时粒子在阱中做圆周运动，驱动微波电场是右旋的圆极化波，频率为 ω ，振幅 \mathcal{E}_0 ， $\vec{\mathcal{E}}(t) = \mathcal{E}_0 (\hat{x} \cos \omega t - \hat{y} \sin \omega t)$ ，存在阻力 $-\gamma_c \vec{v}$ ，求解频率 ω 和运动动量大小 u 满足的关系，并说明保留适当的阶数时是否可能出现三值区间。简单起见，忽略空间电势的作用和粒子 z 方向的运动。

二、(50 分) 卫星绕地

在普通的二体开普勒运动中，两天体的相对运动轨迹是一个不变的椭圆；当存在外界扰动（摄动）时，这个椭圆变为随时间变化的。更具体地，将小天体（质量为 m ）相对大天体（质量为 M ）的瞬时运动视作椭圆运动，而用椭圆的参数与小天体在椭圆上的位置参数（统称为轨道根数）描述小天体的瞬时运动。当存在摄动时，将小天体受力 \vec{F} 分解为引力 $\vec{P} = -\frac{GMm\vec{e}_r}{r^2}$ 与摄动力 \vec{R} ，即 $\vec{F} = \vec{P} + \vec{R}$ ，并利用运动方程求出在 \vec{R} 摄动下轨道根数的变化。

选择地球与人造卫星为考虑的两个天体，建立参考坐标系如下图，其中原点 O 为地球中心， xyz 系的方向待定。令小天体位于 C 点，以 C 为原点建立随体坐标系 $r\theta n$ ，其中 r 轴沿 \vec{OC} 方向， n 轴沿轨道平面法向， θ 轴方向与 rn 平面垂直。

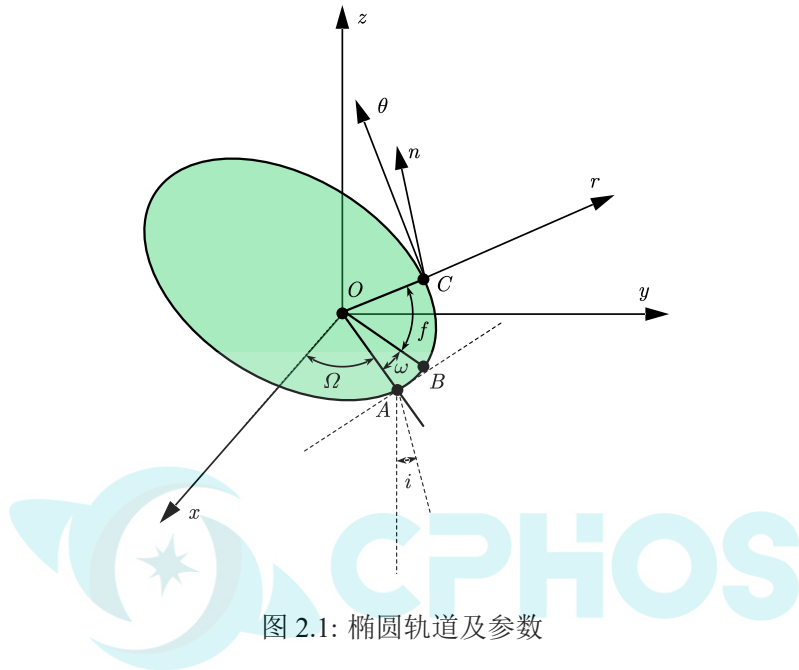


图 2.1: 椭圆轨道及参数

本题第 (1.1) (1.2) (2.1) 问解答请写在答题纸第二页。

(1) 显然，轨道根数共有 6 个。取 $(a, e, i, \Omega, \omega, f)$ 为一组轨道根数，其中 a 为轨道半长轴， e 为轨道离心率， i 为轨道平面与 xy 平面的夹角；作轨道平面与 xy 平面的交线 OA ， Ω 为 OA 与 x 轴的夹角，令轨道近心点为 B ， ω 为 OB 与 OA 的夹角， f 为 OB 和 OC 的夹角。

(1.1) 给出前四个轨道根数与能量 E ，角动量 $\vec{L} = (L_x, L_y, L_z)$ 的关系。提示：利用角动量与 n 轴平行的特点。

(1.2) 求出此时六个轨道根数的时间导数，结果可以包含六个轨道根数本身与摄动力在 $r\theta n$ 系的分量 (R_r, R_θ, R_n) 。近似到摄动力的一阶。

(2) 人造卫星在黄道面（地球的轨道平面）上绕地球沿 $e \sim 10^{-4}$ 的近圆轨道运行，轨道高度为 $h = 500 \text{ km}$ 。为计算简便，认为月球、地球的公转运动都是恒定的椭圆运动，此时月球有 $\omega_m = \frac{\pi}{2}$ ，地球是完美的球体。

已知太阳质量 $M_S = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，日地平均距离 $R_S = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$ ，月球质量 $M_m = 7.342 \times 10^{22} \text{ kg}$ ，地月平均距离 $R_m = 3.844 \times 10^5 \text{ km}$ ，月球轨道的离心率 $e_m = 0.0549$ ，地球轨道的离心率 $e_E = 0.0167$ ，月球轨道平面与黄道面夹角 $\phi = 0.0898 \text{ rad}$ ，地球质量 $M_E = 5.972 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，地球半径 $R_E = 6378 \text{ km}$ 。

(2.1) 回答：月球的摄动效应和太阳的哪个更强？本问只需要做估算。

本题第 (2.2) (3) 问解答请写在答题纸第三页。

(2.2) 只考虑上问中更强的效应，以黄道面作为 xy 平面，前三个轨道根数中变化最明显的（对应于 $(\frac{\delta a}{a}, \delta e, \delta i)$ 中最大的）是哪个？并求出它的变化量。长度量纲取 km ，角度采用弧度制，保留一位有效数字。

(3) 在近地大气中，人造卫星受到方向与速度相反的微弱阻力，大小正比于 v^n 。在按周期平均的意义下，它的半长轴 a ，离心率 e 会如何变化？已知 $e \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$ 。（回答：变大/变小/不变）

提示, 你可能会用到以下公式:

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 x \, dx = \pi, \quad \int_0^{2\pi} \frac{A + \cos x}{(1 + A \cos x)^2} \, dx = 0 \quad (1)$$

三、(40 分) 激光制冷技术

激光制冷 (Laser Cooling) 是一种利用激光与原子或分子相互作用来降低物质温度的技术, 广泛应用于原子物理、量子信息等领域。通过精确调控激光频率和强度, 可以实现对原子或分子的有效冷却, 甚至达到接近绝对零度的温度。

设原子某一能级的跃迁频率为 ν , 当一束轻微红失谐的激光照射在原子上时 (激光频率应略小于 ν , 本题中可将其近似为 ν), 原子更倾向于吸收来自与其运动方向相反的激光光子, 从而减慢其运动速度。原子吸收一个光子后会立即发生自发辐射, 在这个过程中, 原子会随机且均匀地向任意方向发射一个频率为 ν 的光子, 导致平均意义上发射过程中的动量变化为零。因此, 原子在吸收光子时动量会减小, 而在自发辐射时动量变化平均为零, 实现冷却效果。

当原子在激光射来的方向上的速度投影为 u 时, 该吸收-发射循环的频率可以表示为

$$R(u) = \Gamma(1 + \kappa u) \quad (1)$$

其中 Γ 是原子在该能级的自然衰变率, κ 是一个与激光频率 ν 和原子质量 m 相关的常数。当有多束激光从不同方向照射时, 各激光均会对应一个由该方向速率决定的吸收-发射循环频率。

注意: 原子激光制冷技术中, 激光通常在近红外/可见光/近紫外波段, 光子能量与原子相对论静能的量级关系为

$$\frac{h\nu}{m_p c^2} = \frac{h}{m_p c \lambda} \sim 10^{-9}$$

因此本题可以忽略相对论效应的影响。

- (1) 本问中只考虑原子在 z 方向上的运动, 有两束制冷激光分别从 $+z$ 和 $-z$ 方向照射原子。
(1.1) 将原子吸收光子的过程看作近似连续的, 证明原子的受到的阻尼力与速度的关系满足

$$F_z = -\gamma m u_z \quad (2)$$

并使用 ν, Γ, κ, m 以及光速 c 、普朗克常量 h 来表示阻尼系数 γ 。

- (1.2) 在真实情况下, 原子吸收光子的过程是离散的。原子的初始速度为 u_z , 当原子吸收了一个从 $+z$ 方向来的光子后, 计算原子的动能改变量 ΔE (不考虑接下来的发射过程影响)。

- (2) 本问中考虑原子在三维空间中的运动, 六束制冷激光分别从 $\pm x, \pm y, \pm z$ 方向照射原子。
(2.1) 暂不考虑发射光子产生的影响, 设原子的方均速率为 $\langle u^2 \rangle$, 表示出原子在六束激光制冷下单位时间的动能变化率 $\langle \dot{E}_c \rangle$ 。

- (2.2) 接着考虑发射光子产生的影响, 原子随机且均匀地向任意方向发射频率为 ν 的光子, 该过程可以视为动量空间中的随机游走。设原子在动量空间进行了 N 步随机游走: $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_N$, 由于是均匀随机的, 累积的动量改变为零, 但是动量改变的方均值不为零且满足

$$\Delta p = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_N = 0 \quad (3)$$

$$(\Delta p)^2 = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_N^2 \quad (4)$$

试求原子在发射光子产生的随机游走影响下单位时间的动能增加率 $\langle \dot{E}_h \rangle$ 。

- (2.3) 结合前两小问的结果, 原子的动能总变化率为 $\langle \dot{E} \rangle = \langle \dot{E}_c \rangle + \langle \dot{E}_h \rangle$, 试推导出激光制冷能达到的最低极限温度 T_{limit} 。

四、(50 分) 磁偶极矩

在静磁学当中, 磁偶极矩和电偶极矩类似, 被定义为磁矢势多级展开一阶量对应的、与系统电流分布有关的某个物理量。其具体表达式为:

$$\vec{m} = \frac{1}{2} \iiint \vec{r}' \times \vec{j}(\vec{r}') \, dV' \quad (1)$$

其中 \vec{r} 表示系统中某处电流的位矢。磁偶极矩在外场中的能量为：

$$W = -\vec{m} \cdot \vec{B} \quad (2)$$

(1) 考虑最简单的情况：一个通有电流 I 的平面圆环放在匀强磁场中，计算其磁偶极矩的大小和系统与外场的相互作用能。系统与外磁场相互作用能的公式：

$$W = \oint I d\vec{l} \cdot \vec{A} \quad (3)$$

其中 \vec{A} 是磁矢势。得到的结果与式(2)相同吗？若不同，试解释之。

(2) 计算总电量为 Q 的均匀带电球以角速度 $\vec{\omega}$ 旋转时的磁偶极矩。假设该球是匀质的且质量为 M ，给出其角动量与磁偶极矩的关系。

(3) 考虑两个位置固定的、距离为 d 的半径为 R ，带电量为 Q ，质量为 M 的带电旋转球之间的相互作用。以下小问中忽略感生电场的作用。

(3.1) 直接写出可以将两个球的相互作用看作两个磁偶极子之间相互作用的条件。

(3.2) 设球 1 的角速度为 $\vec{\omega}_1$ ，球 2 的角速为 $\vec{\omega}_2$ ，写出系统总能量的表达式。

(3.3) 固定球 1 的角速度矢量为 $\vec{\omega}_0$ 不变。忽略感生电场，给出球 2 角速度随时间的变化关系 $\vec{\omega}_2(t)$ 。球 2 的初始角速度 $\vec{\omega}_2(0)$ 已知。

(3.4) 考虑球 1 的角速度矢量也在变化的情形。忽略感生电场，给出两球角速度满足的微分方程。计算系统的总角动量和总能量的变化率。角动量守恒吗？能量守恒吗？

五、(50 分) 量子比特的制备

量子计算利用量子比特的叠加与纠缠特性，能并行处理海量数据，在特定问题上远超经典计算机。自上世纪八十年代该概念产生，到近年“量子霸权”(Quantum Supremacy)的提出，该行业迅猛发展，成为当今物理科研的热门话题。

在超导量子计算中，我们通过微波电路来人工构建二能级系统，即量子比特。本题将引导你推导并理解如何从一个简单的 LC 谐振腔，一步步演变为目前主流的 Transmon 量子比特。

在量子化过程中，物理量被视作算符，乘法交换律一般情况下不再成立。可引入算符 \hat{A} 、 \hat{B} 的对易子 $[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$ 。

(1) LC 电路的量子化

考虑一个由理想电容 C 和理想电感 L 组成的无耗散 LC 振荡电路。设电容器上的电荷为 Q ，穿过电感的磁通为 Φ 。

(1.1) 请写出该经典 LC 电路的哈密顿量 H (能量表达式)，用 Φ 、 Q 表示。

(1.2) 为了对该电路进行量子化，引入共轭变量 Q 和 Φ 的对易子 $[\hat{\Phi}, \hat{Q}] = i\hbar$ 。又该电路的哈密顿量与谐振子的哈密顿量形式相似，故引入产生湮灭算符 \hat{a}^\dagger 、 \hat{a} 满足 $[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1$ 且 $\hat{\Phi} = \Phi_0 (\hat{a} + \hat{a}^\dagger)$ 与 $\hat{Q} = iQ_0 (\hat{a}^\dagger - \hat{a})$ ，不妨设 $\frac{\Phi_0}{Q_0} = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ，请问 \hat{H} 的表达式，用 \hat{a} 、 \hat{a}^\dagger 及其他已知量表示。

(1.3) \hat{H} 的本征态为该电路的能级，已知 $\hat{a}^\dagger \hat{a}$ 的本征值为 n ($n = 0, 1, 2, \dots$)，请直接写出该电路能级 E_n 。

(1.4) 为与经典计算机保持一致，量子计算机通常构造仅在基态与第一激发态间跃迁的二能级系统作为量子比特。请问上述 LC 量子电路适合作为量子计算机的基本电路吗？若适合，请给出理由。若不适合，说明应该如何安排能级分布。

(2) 约瑟夫森结 (Josephson Junction) 的引入

为制作量子计算机，物理学家们在电路中引入约瑟夫森结，约瑟夫森结由两块超导体和中间的极薄绝缘层组成，其满足两个约瑟夫森关系

$$I = I_c \sin \phi, \quad V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

其中 ϕ 是一个随时间变化的参量。现考虑一个电容与约瑟夫森结形成闭合回路。

(2.1) 请计算该电路的哈密顿量 (用库伯对数 $n_{2e} = \frac{Q}{2e}$ 与 ϕ 及其他已知量表示，常数部分可略去不写)。

(2.2) 将该电路的哈密顿量展开至 ϕ^4 项，并由此定性说明，为什么约瑟夫森结可作为量子比特被引入。

(3) Transmon 量子比特

为解决早期超导量子比特受到环境中电荷噪声 n_{2e} 的严重干扰, 物理学家提出了 Transmon 量子比特, 其哈密顿量为

$$H = 4E_C (n_{2e} - n_g)^2 - E_J \cos \phi \quad (3)$$

其中 n_g 的引入是为了抑制 n_{2e} 的噪声。

(3.1) 引入 n_g 在抑制噪声的同时, 也带来其自身的噪音。因此, 我们该如何设定 E_J, E_C 来有效抑制噪声?

(3.2) 假设系统参数使得 $E_J \gg E_C$, 其中 $E_C = \frac{e^2}{2C}$ 是充电能。在该极限下, 系统的能级间隔对 ϕ 的涨落不敏感 (transmon regime)。已知在这种情况下, 能级可以近似为

$$E_m \approx -E_J + \sqrt{8E_J E_C} \left(m + \frac{1}{2} \right) - \frac{E_C}{12} (6m^2 + 6m + 3) + \dots \quad (4)$$

其中 $m = 0, 1, 2, \dots$ 。计算非谐性 (anharmonicity) $\alpha = (E_2 - E_1) - (E_1 - E_0)$, 为了使近似更精确, $\frac{E_J}{E_C}$ 是否可以无限大?

(4) Rabi 振荡

(4.1) 实现量子比特的反转不仅需要能级量子化的系统, 还需要外界的驱动。已知在频率 $\omega > 0$, 振幅 $a \ll E_1, E_2$ 的驱动下, 由能级 E_1 和 E_2 ($E_1 < E_2$) 构成的量子比特具有哈密顿算符:

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} E_1 & a \cos(\omega t) \\ a \cos(\omega t) & E_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

而运动方程写作

$$i\hbar \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} c_1 e^{-\frac{iE_1 t}{\hbar}} \\ c_2 e^{-\frac{iE_2 t}{\hbar}} \end{pmatrix} = \hat{H} \begin{pmatrix} c_1 e^{-\frac{iE_1 t}{\hbar}} \\ c_2 e^{-\frac{iE_2 t}{\hbar}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

求出 $\frac{dc_1}{dt}, \frac{dc_2}{dt}$ 。

(4.2) 由上问结果可以看出, c_1, c_2 的变化很缓慢, 在求平均时将它们看作不变, 求出使 $\frac{dc_1}{dt}$ 的时间平均值不为 0 的频率 ω , 此时系统的状态称为 Rabi 振荡。

(4.3) 在上述共振频率下, 求出量子比特从 $|c_1| = 1, |c_2| = 0$ 第一次演化到 $|c_1| = 0, |c_2| = 1$ 所需时间。

六、(50 分) 双折射晶体

本题中我们将研究一种双折射晶体, 其双折射率分别为 $n_o = \sqrt{\varepsilon_1}, n_e = \sqrt{\varepsilon_2}$ 。本题假设光线都在 xOz 平面内传播, 忽略介质磁导率的影响。

(1) 已知在线性介质中电位移矢量 \vec{D} 与电场强度 \vec{E} 的关系为 $\vec{D} = \vec{\varepsilon}_r \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$, 设光轴方向为 \hat{z} , 求这种晶体的相对介电张量 $\vec{\varepsilon}_r$ 。

(2) 假设一列线偏振平面波在晶体中传播, 其波矢为 \vec{k} , 圆频率为 ω , 根据麦克斯韦方程组

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{D} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

求解:

(2.1) 将光轴方向取为 \hat{z} , 求电场强度 \vec{E} 满足的线性方程, 用 $\varepsilon_{1,2}, \hat{z}, c, \vec{k}, \omega$ 与 \vec{E} 表示;

(2.2) 继 (2.1), 设 $\hat{k} = \hat{z} \cos \theta + \hat{x} \sin \theta$ 。注意到双折射介质中相速度与群速度不再相同, 因此折射率也分为相折射率和群折射率。求出这列平面波可能对应的相折射率 n 。

(2.3) 对 (2.2) 中求出的每种情况分别求解 \vec{D}, \vec{E} (可保留常系数, 不计相位), 并求出这列平面波传播的方向与光轴的夹角 ϕ 。

(3) 本问中我们将讨论光线从双折射晶体出射到各向同性介质时的行为。简化起见, 我们认为光轴在入射面内, 并且在表达式中使用 n_o, n_e 代替 $\varepsilon_{1,2}$ 。取界面法向 (朝向晶体一侧) 为 \hat{z} ,

设光轴方向为 $\hat{x} \sin \alpha + \hat{z} \cos \alpha$ ，入射光方向为 $\hat{x} \sin i - \hat{z} \cos i$ ，反射光方向为 $\hat{x} \sin r + \hat{z} \cos r$ 。

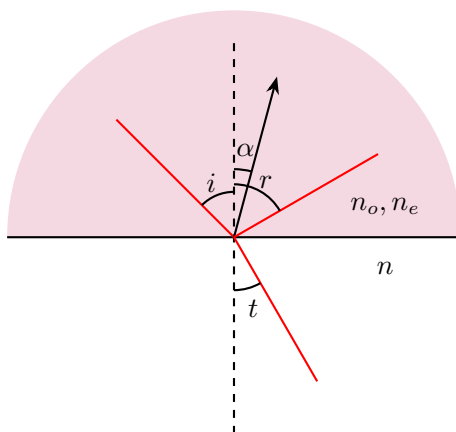


图 6.1: 双折射晶体入射出射光示意图

(3.1) 若入射光偏振方向在入射面内，试用 $\tan i, \tan \alpha, n_o, n_e$ 表示 $\tan r$ 。

提示：计算 $\tan r - \tan i$ 。

(3.2) 设各向同性介质折射率为 n ，试求出射角 t 与光强反射率 R 。 R 的结果可保留 r, t 。

七、(40 分) 啊啊啊宝宝你是一个软软的小蛋糕

笔者于某次集训的酒店吃早饭时观察到，如果使用筷子击打一小块蛋糕的底部，蛋糕会滑动并在一个新的位置停下，然后开始很可爱的摇头晃脑。本题将以一个有趣但未必正确的方式来解释这一现象。

(1) 首先可以想到的是，我们可以把蛋糕简化为一根长宽高分别为 a, b, l 的匀质刚体 (a 为垂直纸面的宽度)，其质量为 m ，且 $a, b \ll l$ 。如下图黑线所示，其底端被铰链固定，宽垂直于纸面方向。将其从 $\theta = 0$ 处静止释放，其会向下旋转，重力加速度为 g 。求出这一过程中的 $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ ，本问不考虑 a, b 的影响。

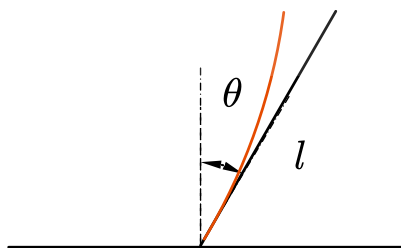


图 7.1: 蛋糕模型简化示意图

(2) 求出为了使整个刚体同步转动，其距底端 xl 处的切向应力 F 和应力矩 M 。

(3) 想必你一定注意到了上图中的红线。因为其有杨氏模量 E ，在上问的力矩 M 下，其会发生形变，如红线所示。假设形变较小，求出距底端 xl 处实际形状较原形状的偏离 y 。

(4) 由于形变，其受到的总重力矩发生了 ΔM 的变化。在最低阶近似下求出该变化。

(5) 在上述的简化情况下，求出在 $\theta = 0$ 附近振动的角频率 ω 。这需要 E 满足什么条件？譬如，取蛋糕为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ ，密度 1000 kg/m^3 ，估算临界杨氏模量 E_c 的数值。

(6) 讨论该模型有哪些问题。

版权信息

命题人

常皓凌 顿翔文 付亦轩 黄子轩 刘子言 宋安东 余 杭

审题人

赵文腾 宋安东 小 夜 常皓凌 刘子言 黄子轩 付亦轩 顿翔文

联系方式

微信公众号
CPHOS官方网站
www.cphos.cn

CPHOS 论坛

邮箱

service@cphos.cn

微信小程序

CPHOS 物理竞赛联考

