

第 22 届亚洲物理奥林匹克竞赛理论部分第 2 题试题与解答

张思遥^{1,2} 王 瑾^{1,2} 张天浩¹ 董 校¹ 宋 峰¹ 刘丽颀^{1,2} 孔勇发^{1,2}
(南开大学¹物理科学学院; ²基础物理国家级实验教学示范中心, 天津 300071)

摘 要 第 22 届亚洲物理奥林匹克竞赛理论试题共三道, 其中第二道题为相变的力学模型(A Mechanical Model for Phase Transitions)。该试题以朗道相变理论为背景, 研究旋转的环上小球的运动, 建立并分析相变的力学模型。本文介绍了该试题内容及解答, 并对试题和选手作答情况进行了简要分析。

关键词 亚洲物理奥林匹克竞赛; 朗道二级相变; 相变; IYPT

SOLUTION OF THE SECOND QUESTION IN THE 22ND ASIAN PHYSICS OLYMPIAD THEORETICAL EXAM

ZHANG Siyao^{1,2} WANG Jin^{1,2} ZHANG Tianhao¹ DONG Xiao¹ SONG Feng¹
LIU Lisa^{1,2} KONG Yongfa^{1,2}

(¹ School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071;

² National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract There are three theoretical questions in the 22nd Asian Physics Olympiad Theoretical Exam, and the second question was entitled a Mechanical Model for Phase Transitions, which used Landau phase transition theory as the background to study the motion of a bead on the rotating ring, and established the mechanical model of the phase transition. This paper introduces the content and solution of the test question, and briefly analyzes the question and the answers of the contestants.

Key words Asian Physics Olympiad Exam; Landau second order phase transition; phase transition; IYPT

2022 年 5 月 23 日至 31 日, 由印度举办的第 22 届亚洲物理奥林匹克竞赛在线上举行。本届比赛的理论试题共有 3 题, 每题 10 分, 分别是斯特恩-盖拉赫实验(The Stern-Gerlach Experiment), 相变的力学模型(A Mechanical Model for Phase Transitions), 麦克斯韦、瑞利和喜马拉雅山(Maxwell, Rayleigh and Mount Everest; THE

PROBLEM)^[1]。本文对理论第 2 题的试题和解答以及选手的答题情况进行了介绍。

1 试题介绍

一个半径为 R 的大环上有一个大小可忽略的小球, 其质量为 m , 小球可以在环上滑动。如图 1

收稿日期: 2023-01-30

基金项目: 南开大学 2022 年实验教学改革项目-开放实验类 (22NKS YKF04); 高等学校教学研究项目 (DJZW202010hb)。

作者简介: 张思遥, 女, 助理实验师, 主要从事大学物理实验教学工作, 研究方向为原子核物理, syzhang@nankai.edu.cn。

通讯作者: 张天浩, 男, 教授, 主要从事非线性光学研究, zhangth@nankai.edu.cn。

引文格式: 张思遥, 王瑾, 张天浩, 等. 第 22 届亚洲物理奥林匹克竞赛理论部分第 2 题试题与解答[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 13-17, 23.

Cite this article: ZHANG S Y, WANG J, ZHANG T H, et al. Solution of the second question in the 22nd Asian Physics Olympiad Theoretical Exam[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 13-17, 23. (in Chinese)

所示,大环绕其竖直直径以角速度 ω 旋转。滑动时,小球受到与运动方向相反、与法向支持力 N 垂直的摩擦力 F_f ,满足 $F_f = f k N$, f 的取值为 1 或 -1。建议使用如图 1 所示的极坐标系 $\{r, \theta\}$ 。并使用 $\omega_c = \sqrt{\frac{g}{R}}$ 来表示给出的答案,其中 g 为重力加速度的大小。

磁性系统相变过程的自由能 $V(M)$ (力学上等价于系统势能) 是磁矩 M 的函数

$$V(M) = a(T)M^2 + b(T)M^4 \quad (1)$$

其中, T 为温度, $b(T) > 0$, $a(T)$ 的正负符号随温度变化。我们使用如上模型来理解相变过程。

注意事项 1: 对于半径为 R 的圆周运动, 速度矢量在极坐标下的表达式为 $\dot{\mathbf{r}} = R\dot{\theta}\hat{\theta}$, 加速度矢量为 $\ddot{\mathbf{r}} = -R\dot{\theta}^2\hat{r} + R\ddot{\theta}\hat{\theta}$, 其中 $\hat{r}$ 和 $\hat{\theta}$ 分别为径向和切向的单位矢量。

注意事项 2: 摩擦力 F_f 的方向可以用 f 来表示: $f = +1$ 表示小球绕环逆时针滑动 (θ 增加), $f = -1$ 表示小球顺时针滑动 (θ 减小), 即 $f = \text{sgn}(\dot{\theta})$, sgn 为符号函数, 当其自变量为正数时, sgn 值为 +1, 当自变量为负数时, sgn 值为 -1。

注意事项 3: 在解题时, 你可能会用到如下展开式

$$\begin{aligned} \sin(\theta) &= \theta - \theta^3/6 + \dots \\ \cos(\theta) &= 1 - \theta^2/2 + \theta^4/24 + \dots \\ (1+x)^n &= 1 + nx + n(n-1)x^2/2 + \\ &\quad n(n-1)(n-2)x^3/6 + \dots \quad (2) \end{aligned}$$

其中, θ 单位采用弧度制, $|x| \ll 1$ 。

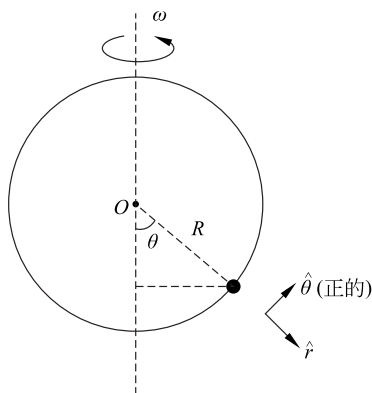


图 1 旋转圆环上的小球

下面的解题中, 我们需要理解小球在旋转的大环转动参考系中的动力学过程。小球的位置角度 θ 限定为 $-\pi/2 < \theta < \pi/2$, 小球的受力分析如图 2 所

示, 图中没有标注的力均忽略。

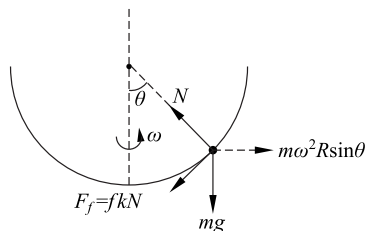


图 2 小球受力分析图

1.1 A 部分

A. 1 (0.5 分) 写出作用在小球的径向力和切向力的动力学方程。设 θ 沿逆时针方向增加。

1.2 B 部分

以下的题目 B1~B9, 不考虑摩擦 ($k=0$)。

B. 1 (1.0 分) 求出小球平衡时的那些角度 θ_0 , 用 ω, ω_c 表示。

B. 2 (0.5 分) 定性地绘制出 θ_0 (作为 y 坐标轴) 随 ω/ω_c (作为 x 坐标轴) 变化的函数图像。

B. 3 (0.5 分) 定性地绘制出稳定平衡条件下小球所受的径向反作用力的大小随 ω/ω_c 变化的函数图像。

B. 4 (1.0 分) 对应于切向力 F_θ 的势能 $V(\theta)$ 满足

$$F_\theta = -\frac{1}{R} \frac{d}{d\theta} V(\theta) \quad (3)$$

设 $\theta=0$ 时的势能为零。 $V(\theta)$ 可以表达为 $P + Q\cos(\theta) + S\sin^2(\theta)$, 求 P, Q, S 的表达式。

B. 5 (1.0 分) θ 较小时, $V(\theta)$ 可展开为 $V(\theta) = a(\omega)\theta^2 + b(\omega)\theta^4$, 求出系数 $a(\omega)$ 和 $b(\omega)$ 。

B. 6 (1.0 分) 对 ω/ω_c 小于 1 (例如, 0.9) 和 ω/ω_c 大于 1 (例如, 5) 两种情况, 画出 $V(\theta)$ 关于 θ 的函数关系示意图, 注意只需定性的示意图即可, 不需要详细计算。

B. 7 (1.0 分) 朗道二阶相变理论说明简单的磁性系统可以被分为两相。当温度在临界温度 T_c 以上时, 系统处于顺磁相; 当温度 $T < T_c$ 时, 系统处于铁磁相且系统的宏观磁矩满足

$$M(T) = M_0 (1 - T/T_c)^{1/2} \quad T < T_c \quad (4)$$

我们将上式中的指数 $1/2$ 记为参量 β 。将朗道二阶相变和小球问题做对比, 试问, 本小题中的 $M, T_c, T/T_c$ 分别对应小球问题中的哪些参量? 并求出指数 β 的值。

B. 8 (1.0 分) 小球在各平衡位置 θ_0 时, 给小

球施加微扰,求小球的振动角频率 Ω_0 。已知小角度振动情况下

$$\Omega_0 = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{V''(\theta_0)}{m}} \quad (5)$$

B. 9(1.0 分) 定性画出上一问振动角频率 Ω_0 随 ω 变化的函数关系图。

1.3 C 部分

对下面的 C 部分,摩擦力不为 0($k \neq 0$)。

C. 1(1.0 分) 取 $f=1$, 摩擦系数 $k=\tan\alpha$, 对于各平衡角度 θ_0 , 平衡条件可以表示为

$$\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 = \frac{\tan(x)}{\sin(y)} \quad (6)$$

求出 x 与 y 。

C. 2(0.5 分) 取 $f=1, k=0.05$ 。对下面两种情况,分别计算出平衡角 θ_0 的值。

1. $\omega/\omega_c=0.50$
2. $\omega/\omega_c=0.70$

2 试题解答

本题以朗道相变理论为背景,研究小球的相变问题。A 部分要求选手写出小球的动力学方程,题目中已给出小球加速度矢量表达式,选手只需结合小球受力分析给出解答,此部分较为容易。B 部分和 C 部分则以小球的动力学方程为基础,引导选手研究小球平衡角度与大环角频率相关的一系列问题,最后将小球问题与磁矩问题做类比。

2.1 A 部分

A.1 动力学方程

如图 2 所示,对小球进行受力分析,再根据加速度矢量 $\ddot{r}$ 的形式,可直接写出径向和切向动力学方程。径向为

$$mR\dot{\theta}^2 = N - mg \cos(\theta) - mR \sin^2(\theta) \omega^2 \quad (7)$$

切向可表示为:

$$mR\ddot{\theta} = mR \sin(\theta) \cos(\theta) \omega^2 - mg \sin(\theta) - \text{sgn}(\dot{\theta})kN \quad (8)$$

或者

$$mR\ddot{\theta} = mR \sin(\theta) \cos(\theta) \omega^2 - mg \sin(\theta) - fkN \quad (f=1) \quad (9)$$

2.2 B 部分

B.1 平衡角度

由于不考虑摩擦,即 $k=0$, 动力学方程的切向分量式(8)简化为

$$mR\ddot{\theta} = mR \sin(\theta) \cos(\theta) \omega^2 - mg \sin(\theta) \quad (10)$$

在平衡处, $\ddot{\theta}_0=0$ 。根据式(10)可知, $\theta_0=0$ 对 ω 取任何值均成立。除此之外,还可以计算出平衡角度为

$$\cos\theta_0 = \frac{g}{\omega^2 R} = \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \quad (11)$$

$$\theta_0 = \pm \left| \arccos \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \right| \quad (12)$$

其中, θ_0 取值为 $-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}$, $\pm$ 表示小球有两个平衡位置, 小球可以上升到图 2 所示的轴的任一侧。式(11)中, $\omega < \omega_c$ 显然不成立, $\omega = \omega_c$ 时 $\theta_0=0$ 。

B. 2 根据式(12), 可作出 θ_0 随 ω/ω_c 变化的函数图像, 如图 3 所示。

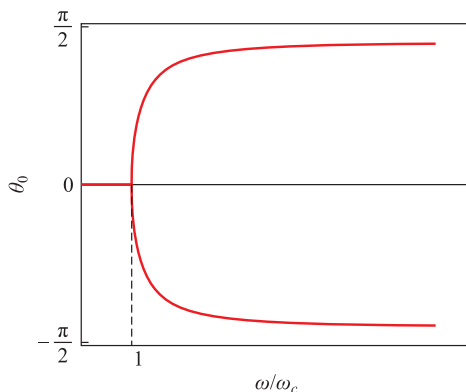


图 3 θ_0 随 ω/ω_c 变化的函数图像

B. 3 根据式(8)和式(12)可画出法向反作用力的函数图像, 如图 4 所示。

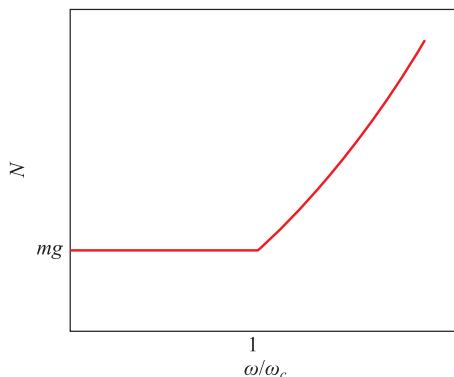


图 4 法向反作用力 N 的大小随 ω/ω_c 变化的函数图像

B.4 势能 $V(\theta)$

解法一 对式(3)进行积分, 由式(3)及 $V(\theta=0)=0$ 可得

$$-R \int_0^\theta F_\theta d\theta = \int_0^V dV = V - 0 \quad (13)$$

将式(10)代入式(13)得

$$\begin{aligned} V(\theta) &= -R \int_0^\theta F_\theta d\theta \\ &= -\frac{m\omega^2 R^2}{2} \int_0^\theta \sin(2\theta) d\theta + mgR \int_0^\theta \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{m\omega^2 R^2 (\cos(2\theta) - 1)}{4} - mgR (\cos(\theta) - 1) \\ &= mgR \left[(1 - \cos\theta) - \frac{\omega^2}{2\omega_c^2} \sin^2\theta \right] \quad (14) \end{aligned}$$

因此, $P = mgR$, $Q = -mgR$, $S = -\frac{\omega^2 mgR}{2\omega_c^2}$ 。

解法二 直接对 $P + Q\cos(\theta) + S\sin^2(\theta)$ 取微分, 并将式(10)带入可得

$$\begin{aligned} F_\theta &= mR\sin\theta\cos\theta\omega^2 - mg\sin\theta \\ &= -\frac{1}{R} \frac{dV(\theta)}{d\theta} \\ &= \frac{Q}{R} \sin(\theta) - 2 \frac{S}{R} \sin\theta\cos\theta \quad (15) \end{aligned}$$

比较等式两侧得出: $Q = -mgR$, $S = -\frac{\omega^2 mgR}{2\omega_c^2}$ 。

当 $V(0) = 0$ 时, $P + Q = 0$, 所以 $P = mgR$ 。

B.5 将式(14)中的三角函数按照式(2)展开到4阶为

$$\begin{aligned} V(\theta) &\approx mgR \left[1 - 1 + \theta^2/2 - \theta^4/24 - \frac{\omega^2}{2\omega_c^2} (\theta - \theta^3/6)^2 \right] \\ &\approx \frac{mgR}{2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \right) \theta^2 + \frac{mgR}{6} \left(\frac{\omega^2}{\omega_c^2} - \frac{1}{4} \right) \theta^4 \quad (16) \end{aligned}$$

所以, $a(\omega) = \frac{mgR}{2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \right)$, $b(\omega) = \frac{mgR}{6} \left(\frac{\omega^2}{\omega_c^2} - \frac{1}{4} \right)$ 。

B.6 势函数 $V(\theta)$ 示意图如图5所示。

或者:

B.7 将朗道二阶相变和小球问题做对比

解法一

当 $\omega \rightarrow \omega_c^+$ 时, $\theta_0 \rightarrow 0$, 将式(11)中三角函数展开成如下形式:

$$1 - \frac{\theta_0^2}{2} = \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \quad (17)$$

$$\theta_0 = \pm \sqrt{2} \left(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

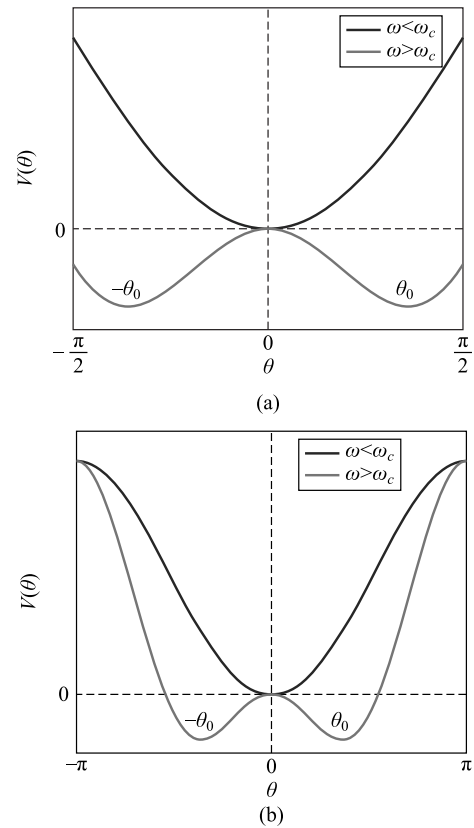


图5

(a) $V(\theta)$ 关于 θ 的函数关系示意图; (b) $V(\theta)$ 关于 θ 的函数关系示意图

在式(11)中, 当 $\omega \rightarrow \infty$ 时, $\theta_0 \rightarrow \pm \frac{\pi}{2}$ 。这可类比磁相变过程, 当温度 $T \rightarrow T_c$ 时, 磁矩 $M \rightarrow 0$ 。故 M 对应于 θ_0 , T 对应于 ω , 但增加温度 T 相当于减少 ω 。即

$$\begin{aligned} M &\rightarrow \theta \\ T_c &\rightarrow \frac{1}{\omega_c^2} \\ \frac{T}{T_c} &\rightarrow \frac{\omega_c^2}{\omega^2}, \quad (19) \end{aligned}$$

对珠子来说 $\beta = \frac{1}{2}$ 。

解法二:

当 $\omega > \omega_c$ 时, $\cos\theta_0 = \frac{\omega_c^2}{\omega^2}$, 使用正弦函数替换

余弦函数得 $\sin\theta_0 = \left(1 - \frac{\omega_c^4}{\omega^4} \right)^{1/2}$ 。类比磁相变过程, 当温度 $T \rightarrow T_c$ 时, $M \rightarrow 0$, 故 M 对应 $\sin\theta_0$, T 反对应于 ω^4 , 增加温度 T 相当于减少 ω , 即

$$\begin{aligned} M &\rightarrow \sin\theta \\ T_c &\rightarrow \frac{1}{\omega_c^4} \\ \frac{T}{T_c} &\rightarrow \frac{\omega_c^4}{\omega^4} \end{aligned} \quad (20)$$

对珠子来说 $\beta = \frac{1}{2}$ 。

B. 8 求振荡频率

式(14)二阶微分形式如下

$$V''(\theta) = mgR \cos\theta \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \cos\theta\right) + mgR \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \sin^2\theta \quad (21)$$

在平衡位置 θ_0 处, 将式(12)代入式(21)中得

$$V''(\theta_0) = mgR \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \left(1 - \frac{\omega_c^4}{\omega^4}\right) > 0 \quad (\omega > \omega_c) \quad (22)$$

故

$$\Omega_0 = \omega \left(1 - \frac{\omega_c^4}{\omega^4}\right)^{1/2} \quad (23)$$

同理, 当 $\omega < \omega_c$ 时, $\theta_0 = 0$,

$$\Omega_0 = (\omega_c^2 - \omega^2)^{1/2} \quad (24)$$

B. 9 振荡频率 Ω_0 图像如图 6 所示。

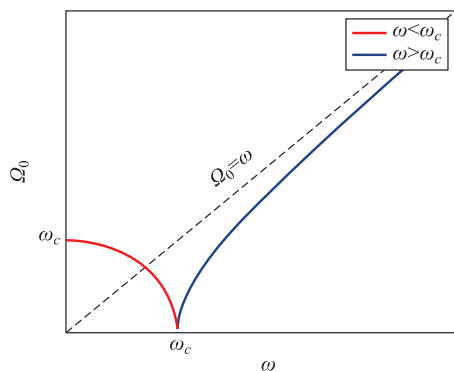


图 6 振荡角频率 Ω_0 随 ω 变化的函数关系图

2.3 C 部分

C. 1 平衡条件

将式(7)代入式(9)中得

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = \omega_c^2 \left[(\sin(\theta)) (\cos(\theta) - fk \sin(\theta)) \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 - \right. \\ \left. \sin(\theta) - fk \cos(\theta) - fk \left(\frac{\dot{\theta}}{\omega_c}\right)^2 \right] \end{aligned} \quad (25)$$

在平衡位置, $\dot{\theta} = 0, \ddot{\theta} = 0$ 。 $f = \text{sgn}(\dot{\theta}) = \pm 1$, 取决于平衡之前 $\dot{\theta}$ 的值。因此, 平衡角 θ_0 满足

$$\begin{aligned} \sin(\theta_0) (\cos(\theta_0) - fk \sin(\theta_0)) \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 \\ = \sin(\theta_0) + fk \cos(\theta_0) \end{aligned} \quad (26)$$

其中, $\theta_0 \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 。对于 $f = 1$, 摩擦系数 $k = \tan\alpha$, 可得

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 &= \frac{\sin(\theta_0) + \tan(\alpha) \cos(\theta_0)}{\sin(\theta_0) (\cos(\theta_0) - \tan(\alpha) \sin(\theta_0))} \\ &= \frac{\tan(\theta_0 + \alpha)}{\sin(\theta_0)} \end{aligned} \quad (27)$$

C. 2 平衡角 θ_0 的代表值

由于摩擦系数 $k = \tan\alpha = 0.05$ 较小, 因此将其近似为 $k = \alpha$, 即 $\sin(\theta_0) \approx \theta_0$, $\tan(\theta_0 + \alpha) \approx \theta_0 + \alpha$, 因此

$$\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 \approx 1 + \frac{k}{\theta_0} \quad (28)$$

1. 当 $\omega/\omega_c = 0.50$, $\theta_0 = -0.07\text{rad}$

2. 当 $\omega/\omega_c = 0.70$, $\theta_0 = -0.1\text{rad}$

3 分析讨论

朗道二级相变理论假设对于任何二级相变, 都有一个序参量和一个控制参量, 当控制参量达到某个临界值时会发生相变。二级相变是连续相变, 每一时刻均对应属于两相中的某一相^[1-2]。在小球问题中, $\omega > \omega_c$ 和 $\omega < \omega_c$ 分别对应两相, 图 5 直观展现了小球的相变和对称破缺的特点。B. 7 将小球问题与朗道二级相变理论做类比, 更加明晰小球的力学相变过程。2021 年第 34 届国际青年物理学家竞赛(International Young Physicists' Tournament, IYPT)第 7 题珠子动力学(Bead Dynamics)^[4]与此题异曲同工。

此试题从对小球的受力分析出发, 通过类比朗道二级相变理论落脚到小球的相变问题, 各题之间环环相扣, 联系紧密。A 部分只有 A. 1 一题, 为求解径向力和切向力的动力学方程, 整个 B 和 C 部分均以此为基础。B 部分未考虑摩擦力, B. 1 为计算小球的平衡角度, 此题只需对 A. 1 中的方程进行求解即可。B. 2 和 B. 3 均以 B. 1 为基础完成作图。B. 4 以 A. 1 为基础求解势函数, 侧重于积分和微分知识, B. 5 以 B. 4 为基础考察三角函数相关计算, B. 6 在此基础上作图势函数。B. 7 将

(下转第 23 页)

将师范院校的“固体物理”课程设为必修,从学生培养和老师培养两个方面改进现有物理教育,为解决芯片技术卡脖子问题打好基础。

参 考 文 献

- [1] 夏清华,乐毅.“卡脖子”技术究竟属于基础研究还是应用研究[J].科技中国,2020,25(10):15-19.
XIA Q H, LEY. Whether “neck-jamming” technology belongs to basic research or applied research[J]. Science and Technology in China, 2020, 25(10): 15-19. (in Chinese)
- [2] 郑永和.重视基础教育拔尖人才培养,解决我国“卡脖子”问题[J].科学与社会,2020,10(4):22-24.
ZHEN Y H. Attach importance to the training of top-notch talents in basic education and solve the problem of “neck jam” in China[J]. Science and Society, 2020, 10(4): 22-24. (in Chinese)
- [3] 杨柳春,赵军,刘天星,高福:释放创造力解决“卡脖子”与“卡脖子”问题[J].中国科学院院刊,2019,34(5):597-602.
YANG L C, ZHAO J, LIU T X. GaoFu: Release your creativity to solve the “neck jam” and “brain jam” problems [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(5): 597-602. (in Chinese)
- [4] 沈国强.中美两套高中物理教材栏目设置的比较研究[J].物理教师,2010,31(6):27-28.
SHEN G Q. A Comparative study on the column setup of high school physics textbooks in China and the United States [J]. Physics Teacher, 2010, 31(6): 27-28. (in Chinese)
- [5] 王祥委,段娟娟,彭朝阳.中美高中物理教材物理学史呈现

比较研究[J].物理教师,2017,38(10):74-76.

- WANG X W, DUAN J J, PENG C Y. Comparative study on the presentation of physics history in Chinese and American high school physics textbooks[J]. Physics Teacher, 2017, 38(10): 74-76. (in Chinese)
- [6] 课程教材研究所,物理课程教材研发中心.普通高中教科书物理[M].北京:人民教育出版社,2019.
- [7] 齐泽维茨.物理原理与问题[M].2版.杭州:浙江教育出版社,2018.
- [8] 中华人民共和国教育部制定.普通高中物理课程标准(2017年版)[S].北京:人民教育出版社,2018.
- [9] 苟清泉.固体物理学的主要成就与发展方向[J].自然杂志,1978,1(5):281-283.
GOU Q Q. Main achievements and development directions of solid state physics[J]. Chinese Journal of Nature, 1978, 1(5): 281-283. (in Chinese)
- [10] 朱邦芬.“减负”误区及我国科学教育面临的挑战[J].物理与工程,2016,26(4):3-6,17.
ZHU B F. The Misunderstanding of “reducing burden” and the challenges faced by science education in China [J]. Physics and Engineering, 2016, 26(4): 3-6, 17. (in Chinese)
- [11] 赵承祥,杨虎.教育新形势下对固体物理教学的思考[J].当代教育实践与教学研究,2019,7(19):45-46.
ZHAO C X, YANG H. Reflections on the teaching of solid state physics in the new educational situation [J]. Contemporary Education Research and Teaching Practice, 2019, 7(19): 45-46. (in Chinese)

(上接第17页)

小球问题与朗道相变做类比,B.8在B.4基础上计算振荡频率,考察微分计算,B.9依据B.8作图.C部分是考虑摩擦力时平衡角度的系列计算。

中国队选手在此试题的作答中大部分题目均能拿到满分,尤其是B.1、B.4、B.5和B.8这几个涉及解方程和微积分计算的问题,全员满分,这体现了中国选手们较强的计算能力。但B.6失分最多,B.9次之,主要失分于作图不规范、图像中的特征点和线缺少必要的标注说明、图像绘制不完整、未考虑角度为负的情况等。其他的失分因素包括A.1径向力动力学方程中没有考虑到径向加速度、B.2没有画出平衡角度取负值的情况以及其他失误。

4 结语

本届亚洲物理奥林匹克竞赛的理论试题具有丰富的物理背景,并与具体物理图像相结合。该

题从模型建立到求解计算,再到作图分析,对选手进行了多方面的考查。本届物理奥赛对大学物理及大学物理实验的教学均有一定的借鉴作用。

致谢:感谢协助试题翻译、备赛的王烁皓、胡凌等南开大学本科志愿者!感谢参与本次奥赛培训、选拔与远程考试的各位老师!感谢中国科学技术协会、中国物理学会、天津市物理学会等单位 and 部门对赛事的支持!

参 考 文 献

- [1] Problems and solutions for the 22nd Asian Physics Olympiad: <https://apho2022.in/questions-and-solutions/>
- [2] LANDAU L D, LIFSHITZ E M. Statistical Physics[M]. 3rd ed. Translated by J. B. Sykes and M. J. Kearsley, Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 1980.
- [3] 赵凯华,罗蔚茵.新概念物理教程热学[M].2版.北京:高等教育出版社,2005.
- [4] IYPT: <https://www.iypt.org/>