

第 52 届国际物理奥林匹克竞赛理论第 2 题介绍与解答

刘丽飒^{1,2} 张天浩¹ 宋峰¹ 孔勇发^{1,2}

(¹ 南开大学物理科学学院; ² 基础物理国家级实验教学示范中心(南开大学)), 天津 300071)

摘要 第 52 届国际物理奥林匹克竞赛理论部分共三道题目, 本文主要对理论第二题“詹姆斯·韦伯太空望远镜”题目进行介绍, 给出参考解答以及对中国学生答题情况的分析。

关键词 平衡温度; 单对数坐标; 等温等熵线; 国际物理奥林匹克竞赛

INTRODUCTION TO THE SECOND PROBLEM OF THE 52ND INTERNATIONAL PHYSICS OLYMPIAD THEORETICAL EXAM

LIU Lisa^{1,2} ZHANG Tianhao¹ SONG Feng¹ 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 topics in the theory part of the 52nd International Physics Olympiad. This paper mainly introduces the second theoretical question: James Webb Space Telescope, gives the reference solution and analyzes the students' answers.

Key words equilibrium temperature; single logarithmic coordinate; isotherms and lines of constant entropy; International Physics Olympiad exam

2022 年 7 月 10—17 日, 南开大学物理科学学院率领中国代表队参加了由瑞士主办的第 52 届国际物理奥林匹克竞赛 (International Physics Olympiad)。比赛采取线上形式, 理论试题总分 30 分, 试题 1“永磁体”10 分, 试题 2“詹姆斯·韦伯太空望远镜”计 12 分, 试题 3“比例法则”计 8 分。本文主要介绍理论试题 2 的题目 (包含部分答题卡内容), 结合基础知识给出参考解答。最后对中国参赛选手的答题情况进行点评。

1 题面与解答

这是一个关于詹姆斯·韦伯太空望远镜 (图 1) 物理学的问题。恒星发出的光线照射到面积为

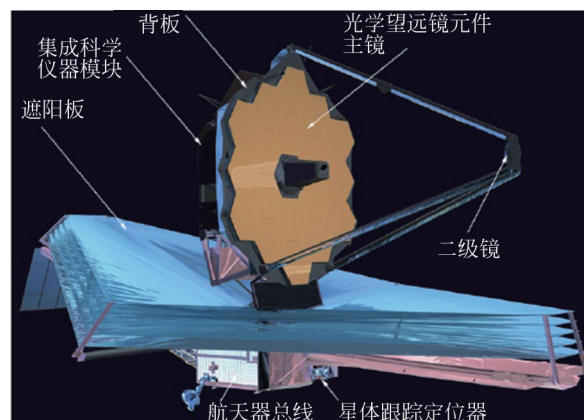


图 1 詹姆斯·韦伯太空望远镜 (来源: NASA)

$A_{\text{mirror}} = 25\text{m}^2$ 的主镜上, 然后再在二级镜上反射。该望远镜系统的焦距为 $f = 130\text{m}$ 。光线被聚焦到

收稿日期: 2023-09-26

基金项目: 天津市教学改革项目 (B231005520)。

作者简介: 刘丽飒, 南开大学物理科学学院副教授。

通信作者: 宋峰, 南开大学物理科学学院教授, fsong@nankai.edu.cn。

引文格式: 刘丽飒, 张天浩, 宋峰, 等. 第 52 届国际物理奥林匹克竞赛理论第 2 题介绍与解答[J]. 物理与工程, 2024, 34(2): 31-37.

Cite this article: LIU L S, ZHANG T H, SONG F, et al. Introduction to the second problem of the 52nd International Physics Olympiad theoretical exam[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(2): 31-37. (in Chinese)

包含 CCD(电荷耦合器)相机的 ISIM(Integrated Science Instrument Module 集成科学仪器模块)中。

1.1 A 部分:恒星成像(1.8 分)

离我们最近的红巨星与地球的距离为 89 光年,其温度为 $T_{\text{star}}=3600\text{K}$,直径为 $d_0=1.7\times 10^{11}\text{m}$

A.1 计算恒星在 CCD 相机像平面上的聚焦图像的直径 d_i 。(0.4 分)

解答:这里需要注意韦伯望远镜位于距离地球 $1.50\times 10^{10}\text{m}$ 的日地系统第二拉格朗日点(题目遗漏了这部分的介绍),最近的红巨星与地球的距离 89 光年,1 光年等于 $9.46\times 10^{15}\text{m}$,红巨星与望远镜的 D_0 距离也是 89 光年。 $D_0\gg f$,星体成像位置近似在透镜焦平面。依据天文望远镜的放大率原理,如图 2 满足下列比例关系

$$\begin{aligned}\frac{d_i}{d_0} &= \frac{f}{D_0} \\ d_i &= 26\mu\text{m}\end{aligned}\quad (1)$$

这里省略了参考解答中的具体计算过程,下面的解答也类似处理。

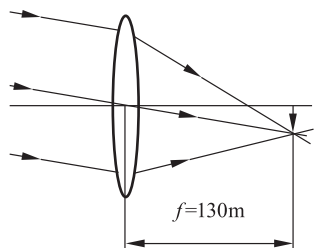


图 2 天文望远镜放大率原理

A.2 计算 CCD 相机像平面上衍射主极大光斑的直径 d_{diff} 。假设红巨星最强辐射的波长为 800nm 。(0.4 分)

解答:艾里斑是以英国皇家天文学家乔治·比德尔·艾里的名字命名的。因为他在 1835 年的论文中第一次给出了这个现象的理论解释^[1]。艾里斑是点光源通过衍射受限成像时,由于衍射而在焦点处形成的光斑。本题的情况是像面与艾里斑几乎重合。依据下面公式

$$\theta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

$$A_{\text{mirror}} = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3)$$

$$d_{\text{diff}} = 2\theta_{\min} f \quad (4)$$

$$d_{\text{diff}} = 45\mu\text{m}$$

评分标准中说明:如果学生认为 $\theta_{\min}=\lambda/D$,得出 $d_{\text{diff}}=37\mu\text{m}$ 也判定为正确。

A.3 如果 CCD 相机不被冷却,只通过其像表面顶部的热辐射散热,则 CCD 上红巨星图像所在位置的平衡温度 T_i 是多少?假设 CCD 表面是黑体。给出公式并算出数值。

解答:依据星体黑体辐射强度 $P_{\text{star}}=\pi d_0^2 \sigma T_{\text{star}}^4$,这里 σ 为 Stefan-Boltzman 常数。到达望远镜处的光强

$$I_{\text{scope}} = \frac{P_{\text{star}}}{\pi D_0^2} = \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 \sigma T_{\text{star}}^4 \quad (5)$$

主镜上接收到的辐射功率

$$\begin{aligned}P_{\text{scope}} &= A_{\text{mirror}} I_{\text{scope}} = A_{\text{mirror}} \left(\frac{d_0}{D_0}\right)^2 \sigma T_{\text{star}}^4 \\ &= A_{\text{mirror}} \left(\frac{d_i}{f}\right)^2 \sigma T_{\text{star}}^4\end{aligned}\quad (6)$$

被无损的汇聚到像面上

$$P_i = P_{\text{scope}} = \pi d_i \sigma T_i^4 \quad (7)$$

可得 $T_i = \left(\frac{A_{\text{mirror}}}{\pi f^2}\right)^{\frac{1}{4}} T_g \approx 530\text{K}$,考虑到衍射,参考解答将式(7)中 d_i 改为 $d_i + d_{\text{diff}}$ 。 T_i 修正值约为 320K 。

如果所有光能量都参与衍射,式(7)中 d_i 应改为 d_{diff} 。所以笔者认为上述修正可以看作是对光能分配权重的估计,并不是对真实像尺寸的计算。红巨星成像效果的影响因素还可能包含:成像系统的弥散斑;主镜作为光圈(物体)在二级镜后焦面上会获得傅里叶频谱(由于该望远镜主镜不是圆形,会得到 8 条光线的星芒)等。由于本题只是高中生理论题目,超出题目考核范围的内容这里不做过多分析。

1.2 B 部分:光子计数(1.8 分)

CCD 相机吸收的一个光子将导致装置中一个电子的辐射。这个过程只在光子有足够的能量激发一个电子跃迁通过能隙 ΔE_g 时发生。假设每个具有足够能量的光子都能成功激发电子。由于 CCD 相机的温度,也会导致电子泄漏,这就是暗电流 i_d ,以每秒的电子数来表示。它是温度的函数,遵循以下关系

$$i_d = i_0 e^{-|\Delta E_g|/6k_B T} \quad (8)$$

其中, i_0 是常数。

B.1 从暗电流图 3 中,估测恰能激发一个电子的远处热光子源的温度 T_{source} 数量级。(0.4 分)

解答:式(8)两边取对数以后 $\ln(i_d)$ 与 $1/T$

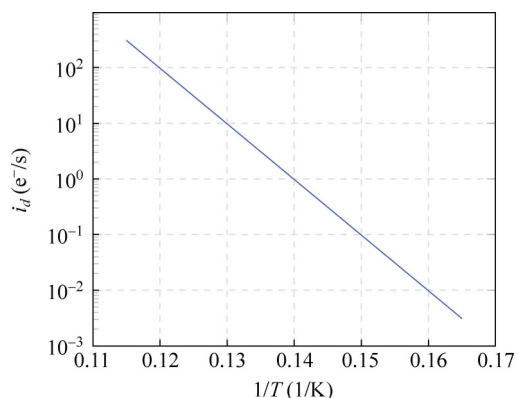


图3 暗电流数据图

是直线关系,斜率为 $-\frac{|\Delta E_g|}{6k_B}$ 。图3是 $\lg i_d$ 与 $1/T$ 关系,斜率为 $\left(-\frac{|\Delta E_g|}{6k_B}\right)/\ln 10$,从图中读取两点坐标,例如: $(-1, 0.151)$ $(3, 0.111)$ 估计出斜率 $\left(-\frac{|\Delta E_g|}{6k_B}\right)/\ln 10 = -100\text{K}$,所以产生一个光子计数的能量所对应的温度为 $T_{\text{source}} = \frac{|\Delta E_g|}{k_B} = 1380\text{K}$,数量级为3。

B.2 电子被收集在一个电容中,经过曝光时间 τ 后,对电子进行计数。该过程中有三个主要误差来源:计数过程中的恒定的不确定度,称为读出噪声;与暗电流相关的泊松分布误差;以及与探测到的入射光子相关的泊松分布误差。泊松分布误差等于计数过程中的所计数值的平方根。测量到的光子数等于电容器中的电子数减去与暗电流相关的电子数。

写出总的计数不确定度的表达式 σ_i 。假定读出噪声为 σ_r ,入射光子率(单位时间的光子)为 p ,曝光时间为 τ 。(0.4分)

解答:依据题目中的概念表述有 $\sigma_d = \sqrt{i_d \tau}$ 和 $\sigma_p = \sqrt{p \tau}$,依据不确定度合成公式可得

$$\sigma_i^2 = \sigma_r^2 + (i_d + p)\tau$$

B.3 假设曝光时间为 $\tau = 10^4\text{s}$,读出噪声为一固定值 $\sigma_r = 14$ 。工作温度为 $T_p = 7.5\text{K}$ 。计算最小光子率 p ,使光子数是计数不确定度的10倍。(0.5分)

解答: $i_d = i_0 e^{-\frac{|\Delta E_g|}{6k_B T}} = i_0 e^{-\frac{1380}{6 \times 7.5}}$, i_0 可以通过对图3数据读取进行函数回归计算准确值。但直

接读图得出 i_d 的近似结果比较便捷。从图3查横坐标 $1/T_p = 0.1333$,对应的 $\lg i_d = 0.7$, $i_d \approx 5$ 。按照题意描述列出方程:

$$\begin{aligned} (p \times 10^4)^2 &= 100 [\sigma_r^2 + (i_d + p)\tau] \\ &= 100 [14^2 + (5 + p) \times 10^4] \end{aligned}$$

解得: $p = 0.229$

由于读图有误差,评分标准指出 p 在 $0.206 \sim 0.25$ 满分。

B.4 假设所有光子都恰能激发电子跃迁穿过能带间隙,在B.3部分中主镜上探测到的光强是多少?答案以 W/m^2 为单位。(0.5分)

解答:依据定义,光强 $= p \times |\Delta E_g| / A_{\text{mirror}}$, $\frac{|\Delta E_g|}{k_B} = 1380\text{K}$,计算结果 $1.8 \times 10^{-22} \text{W/m}^2$ 。

1.3 C部分:被动冷却(4.4分)

红外 CCD 相机必须保持在低温状态。第一个实现冷却目的的工具是遮挡太阳辐射的遮阳板。遮阳板由5层分开的反射层组成,这些反射层(图4中深色)呈薄片状见图5,反射层间没有连接,每层的间隙开放至太空。为了简化,假设反射层是相互平行的。热辐射可以在反射层之间交换,也可以从周边的间隙逃逸。来自太阳的辐射能量(图4中浅色)入射到左边的第一片反射层上。作如下的简化假设:

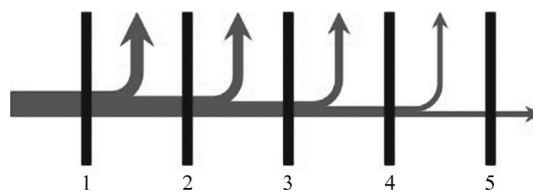


图4 遮阳板能流示意图

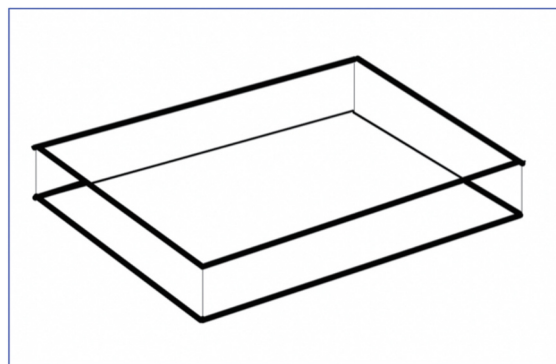


图5 遮阳板相邻反射层1和2的简单模型

(1) 反射层为正方形,每片面积为 200m^2 。

(2) 反射层相互平行,其间距均为 $h=25\text{cm}$ 。

(3) 反射层具有恒定的发射率 $\epsilon \ll 1$ 。假设反射层表面的反射都是漫反射。

(4) 反射层很薄,前后表面温度相等且均匀。

(5) 每片反射层发出的辐射通量被相邻反射层吸收的吸收率为 $\alpha < 1$ 。这表示如果上述模型中下面的反射层向上层发出一定的热量 Q_1 ,上层将从下层吸收 αQ_1 的热量。

(6) 两片反射层间辐射到外围太空的辐射通量可近似为 βQ_{12} ,这里 αQ_{12} 为两片反射层间的净通量。这相当于说两片反射层间的热损失与两反射层间的净热交换成比例。这是本题的粗略近似。

(7) 太空的背景温度可以忽略不计。

C.1 推导第一片和第五片反射层的平衡温度表达式,用入射太阳辐射强度 I_0 ,常数 α 和 β ,以及任何必要的物理参量来表示。为了简化表达式,可以用 α 和 β 等定义其他一些常量。(2.4 分)

解答:达到稳定时,从遮阳板第一层的向外发射的热量为

$$Q_{01} = \epsilon A I_0 - \epsilon A \sigma T_1^4 \quad (9)$$

其中, A 为反射层面,数值 200m^2 ; T_1 为遮阳板第 1 层稳定时的温度。

这部分热被遮阳板向第 1~2 层之间的空间辐射和被第 2 层吸收: $(\alpha + \beta)Q_{12}$

即对于遮阳板第 1 层辐射流连续性方程表达为

$$Q_{01} = (\alpha + \beta)Q_{12} \quad (10)$$

从遮阳板第 i ($i=1,2,3,4$) 层到第 $i+1$ 层的向外发射的热量为

$$Q_{i,i+1} = \epsilon A \sigma (T_i^4 - T_{i+1}^4) \quad (11)$$

其中, T_i 为遮阳板第 i 层稳定时的温度。

这部分热被遮阳板向第 $i \sim i+1$ 层之间的空间辐射和被第 $i+1$ 层吸收: $(\alpha + \beta)Q_{i,i+1}$,即对于 2~4 层,辐射流连续性方程表达为

$$\alpha Q_{i-1,i} = \alpha Q_{i,i+1} + \beta Q_{i,i+1} \quad (12)$$

从第 5 层到太空背景的外发射的热量为

$$Q_{56} = \epsilon A \sigma T_5^4 \quad (13)$$

其中, T_5 为遮阳板第 5 层稳定时的温度。

注意:这部分热全部由遮阳板第 5 层辐射到外空间,不再被下一层板吸收和从板间辐射。即对于第 5 层辐射流连续性方程表达为

$$\alpha Q_{4,5} = Q_{56} \quad (14)$$

对式(9)(11)(13)求和得

$$\sum_{j=0}^5 Q_{j,j+1} = \epsilon A I_0 \quad (15)$$

利用式(10)(12)(14)求和得

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^5 Q_{j,j+1} &= \left[1 + \frac{1}{(\alpha + \beta)} + \frac{\alpha}{(\alpha + \beta)^2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\alpha^2}{(\alpha + \beta)^3} + \frac{\alpha^3}{(\alpha + \beta)^4} + \frac{\alpha^4}{(\alpha + \beta)^4} \right] Q_{01} \\ &= k Q_{01} \end{aligned} \quad (16)$$

这里为了表达方便引入系数 k 。需要特别注意的是

$$Q_{56} = \frac{\alpha^4}{(\alpha + \beta)^4} Q_{01} \quad (17)$$

由式(15)(16)(9)得出

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{I_0}{\sigma} \left(1 - \frac{1}{k} \right)} \quad (18)$$

代入式(13)(17)得

$$T_5 = \frac{\alpha}{(\alpha + \beta)} \sqrt[4]{\frac{I_0}{k\sigma}} \quad (19)$$

C.2 利用反射层的几何信息,估算 α 和 β 的值,设发射率 $\epsilon=0.05$ 。鼓励使用前述的方形反射层模型,且外围区域可看做辐射能的完美吸收区。(1.6 分)

解答:此题不止一种估计方法,这里先介绍题中鼓励的方法。题目给出反射层为正方形,每片面积为 200m^2 。反射层相互平行,间距均为 $h=25\text{cm}$ 。图 5 中反射层间外围区域面积 $A_{\text{gap}} = 4h \times \sqrt{A}$,外围区域将辐射能的完美吸收,不必考虑效率问题。用面积之比估计 α 和 β 的值

$$\alpha = \frac{\epsilon A}{2\epsilon A + A_{\text{gap}}} = 0.3$$

$$\beta = \frac{A_{\text{gap}}}{2\epsilon A + A_{\text{gap}}} = 0.4$$

这个方法忽略了各板温度不同的影响。

这里举例介绍其他估计方法:假设封闭的板间空间是一个处于平衡状态的黑体(其实不是)温度等于: $\left(\frac{T_i^4 + T_{i+1}^4}{2} \right)^{1/4}$ 。该区域辐射出的能量

为 $Q_{\text{lost}} = \sigma A_{\text{gap}} \frac{1}{2} (T_i^4 + T_{i+1}^4)$,该区域能量流入 $Q_{\text{in}} = \epsilon \sigma A (T_i^4 + T_{i+1}^4)$ 。

$$\beta = \frac{Q_{\text{lost}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{A_{\text{gap}}}{2A} = 0.7$$

评分标准给出 α 的估计值在 0.25~0.35 之间满分, β 的估计值在 0.3~0.83 之间满分。

C.3 估算反射层 1 和反射层 5 的温度的值。设太阳光强度为 $I_0=1360\text{W/m}^2$ 。(0.4 分)

解答:将 C.2 中估计的 α 和 β 的值代入 C.1 中得到的反射层 1 和反射层 5 的温度式(18)(19)即可得到结果。以 $\alpha=0.3$ 和 $\beta=0.4$ 为例,计算得 $T_1=380\text{K}$, $T_5=102\text{K}$ 。

1.4 D 部分:制冷器(4 分)

冷却系统的最后环节是直接冷却 CCD 相机。一个封闭循环制冷系统有一条供应管道线,如图 6 所示,在该管道中氦气被以恒定压力 P_1 和温度 T_1 下输送,在通过海绵状的多孔塞后进入另一管道,该管道中的氦气再以恒定压力 P_2 和温度 T_2 被输送到 CCD。然后氦气会通过一个泵,再返回到供应管道线。

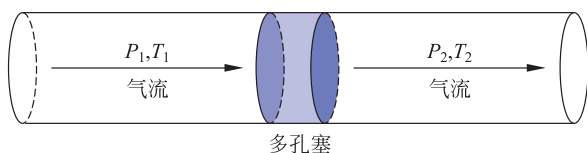


图 6 封闭循环制冷系统供应管道线

当气体通过多孔塞时,海绵中的微小孔道导致的黏滞摩擦成为重要的影响因素;然而,在这一过程中,气体与外界没有热量交换。区域 2 中(图 6 右侧)气体的整体速度仅略大于区域 1(图 6 左侧)的整体速度。氦气不是理想气体,但在输送过程中一直保持气体状态。

D.1 考虑一摩尔气体从左到右通过多孔塞。对表 1,填写“>”或“<”,以确定哪个量大,填写“=”以确定相等的量,或者填写“?”,如果无法确定哪个数更大或相等。(1.0 分)

表 1 D.1 部分的表格(需要学生对第三列作答)

参量名称	状态 1	使用“>”,“<”, “=”,或“?”比较	状态 2
内能	U_1	>	U_2
温度	T_1	?	T_2
熵	S_1	<	S_2
压强	P_1	>	P_2
体积	V_1	<	V_2

解答:(1) $P_1 > P_2$, 这个压力差是气体通过多

孔塞的力的来源。

(2) 气体通过多孔塞受黏滞摩擦影响是耗散过程,内能减少, $U_1 > U_2$ 。

(3) 一个不可逆的过程, $S_1 < S_2$ 。

(4) 区域 2 中气体的整体速度仅略大于区域 1 的整体速度,由质量守恒,区域 2 一摩尔气体的体积一定也比区域 1 一摩尔气体的体积大, $V_1 < V_2$ 。

(5) 正确答案是 $T_1 > T_2$ 。对于理想气体, $T_1 > T_2$ 因为 $U \propto T$ 。但题目说氦气不是理想气体,从答题卡中图 8 可以看出 U 是与温度和体积都有关。

D.2 当一摩尔的气体通过多孔塞时,确定一个守恒量,由 U (内能)、 P (压强)和 V (体积)来表示;给出你是如何推导出这个守恒量的。(0.6 分)

解答:如图 7 研究一部分气体(气体包裹),区域 1 周围的气体对气体包裹做功 W_1 将它推入塞子,气体包裹对区域 1 周围的气体做功 W_2 。净功为

$$W_{\text{net}} = P_1 V_1 - P_2 V_2$$

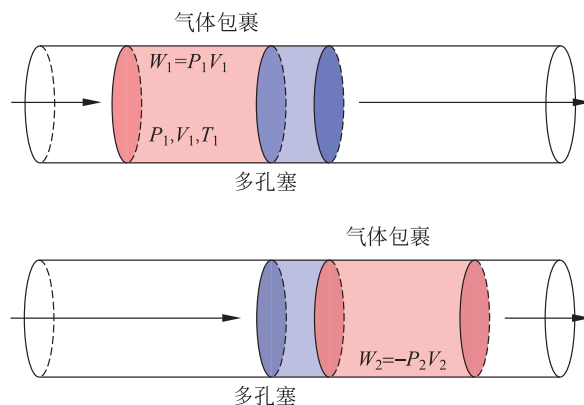


图 7 空气包裹功定义示意图

气体与外界没有热量交换。 $\Delta U = W_{\text{net}}$ 即 $U_2 - U_1 = P_1 V_1 - P_2 V_2$ 。所以 $U + PV$ 是守恒量。

D.3 假设 $V_2=0.100\text{m}^3/\text{kg}$ 和 $T_2=7.5\text{K}$,用作图法找出在 D.2 部分中得到的守恒量数值。在图 8 上画出过程(1.4 分)

答题卡上有关于氦的等温等熵线的图 8,图以单位质量内能为纵坐标,以单位质量体积为横坐标。图 8 实线(随着体积增大向下弯曲)为等熵线;加粗实线的熵值在图上方给出。虚线(随着体积增大向上弯曲)为等温线,加粗虚线的温度值在图右边给出。内能 U (每 kg)的数值在纵轴上,体积 V (每 kg)的数值在横轴上。

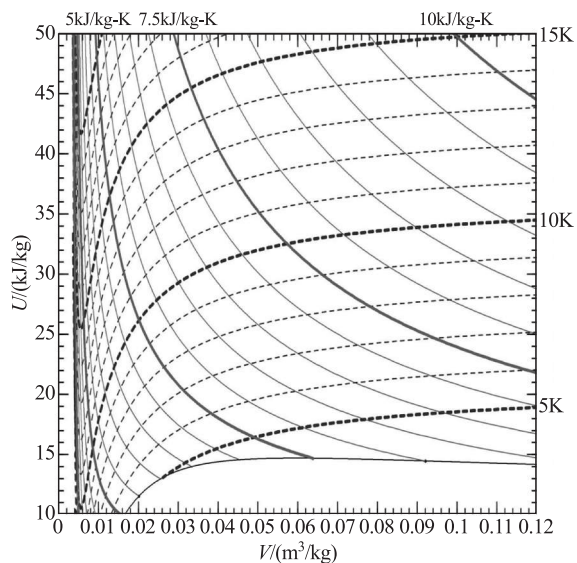


图8 D.3部分答题卡上需要学生作答的关于氩的等温线和等熵线图

解答:分析图8等温等熵线与守恒量($U + PV$)的关系,依据 $dU = Tds - PdV$

对于等熵线 $dS = 0$, $P = -\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S$ 即压强等于等熵线斜率的负值。 $-\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S V$ 对应的是所有等熵线切线, $U + PV = U - \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S V$ 是守恒量,气体在状态1到状态2的变化时,等熵线切线的截距在一个值(类似D.4部分图12)。本题给了气体状态2的参数 $V_2 = 0.100 \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $T_2 = 7.5 \text{ K}$ 的点做对应等熵线切线找到纵轴的截距即可。具体方法见图9。但图中只有温度为7K和8K的等温线,如何找对应的等熵线以及等熵线切点呢?需要进行合理的内推。参考解答给的方法如图10所示。具体做法是在图中找到7K等温线与等熵线簇交点中与 $V_2 = 0.100 \text{ m}^3/\text{kg}$ 对应竖线最接近的点作为切点,作该等熵线的切线1(图10中上方的紫色直线)。同样的在图中找到8K等温线与等熵线簇交点中与 $V_2 = 0.100 \text{ m}^3/\text{kg}$ 对应竖线最接近的点作为切点,作该等熵线的切线2(图10中下方的紫色直线)。切线1与切线2的斜率截距均不同, $V_2 = 0.100 \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $T_2 = 7.5 \text{ K}$ 的点作对应等熵线切线在切线1与切线2中间,截距在切线1与切线2的截距线段中间。切线1与切线2与右侧纵轴的截距间隔为左侧纵轴的截距间隔的

75%,将切线1与切线2 $V_2 = 0.100 \text{ m}^3/\text{kg}$ 对应竖线两个焦点之间线段(图10中浅绿色线),姑且按这个比例找到分点,经过这个分点作一条斜率在切线1与切线2之间的直线(图10中深绿色线),它与左侧纵轴的截点就是要求的守恒量数值。图10结果约为 40.7 kJ/kg 。

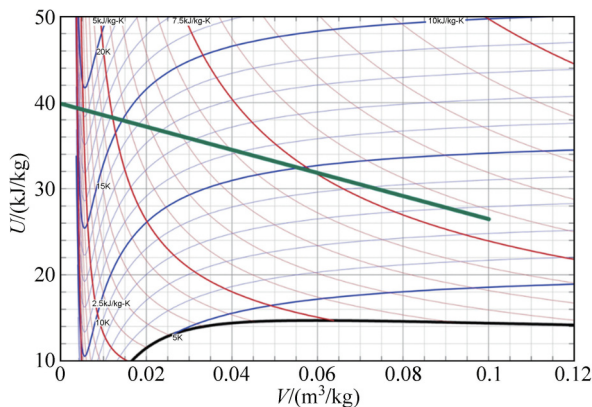


图9 D.3部分参考解答中的切线示意图

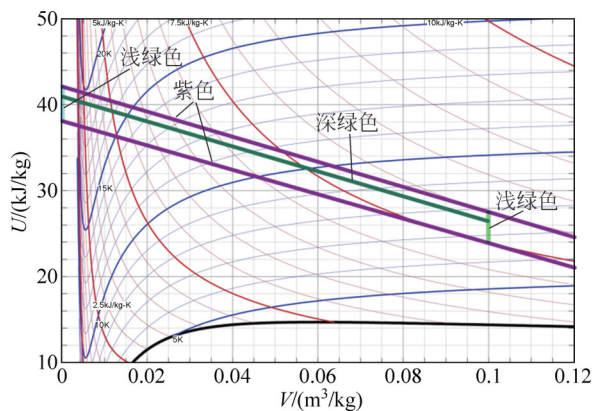


图10 D.3部分解答过程参考图

值得注意的是很多类似的作图方法都是正确的。考虑到作图和读图精度,参考答案指出结果在 $40.5 \sim 41.0 \text{ kJ/kg}$ 满分。

D.4 求出 T_1 的最大可能温度。在图11上画出如何找到的。(0.8分)

解答:在D.2部分的解答中提到气体在状态1到状态2的变化时,等熵线切线的截距在一个值。所以如图12所示,在左纵坐标轴上D.3部分求出的守恒量数值,如 40.7 kJ/kg ,以这一点为截距作等熵线簇切线(图12中绿色直线簇),然后从切点(图12中各灰色点)找出温度最高值,图12中结果为 11 K 。评分标准指出结果在 $10 \sim 12 \text{ K}$ 满分。

D.5 假设在D.4中的最大 T_1 的值,并以此

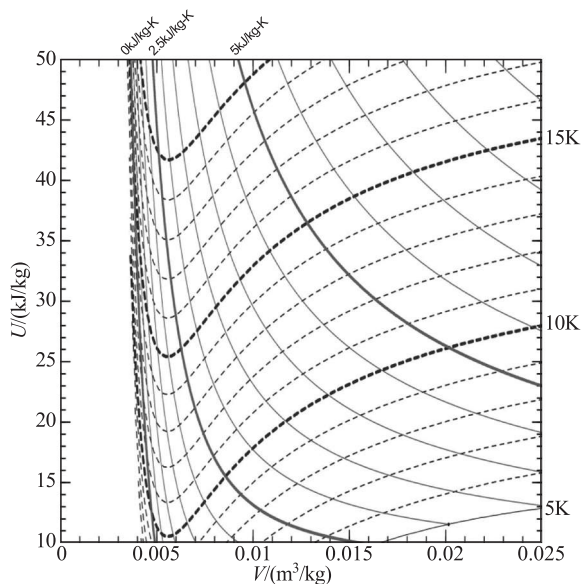


图 11 D.4 部分答题卡上需要学生作答的关于氦的等温线和等熵线图

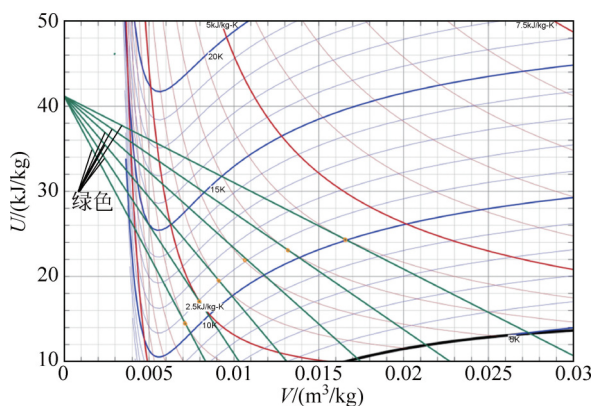


图 12 D.4 部分解答过程参考图

计算得到 P_1 的值。(0.2 分)

解答: P_1 为图 12 中最大 T_1 的值点对应的绿色直线斜率。切线簇过截距点 $(0.0000 \text{ m}^3/\text{kg},$

$40.7 \text{ kJ/kg})$, 读出对应最大 T_1 的值 11K 那个灰点所在切线的横坐标截距(图 12 中切线簇与横坐标交点中从左数第 4 个), 得到坐标 $(0.0175 \text{ m}^3/\text{kg}, 10.0 \text{ kJ/kg})$ 。用这两点坐标计算斜率的 1.75 MPa 。评分标准指出结果在 $1.6 \sim 2.4 \text{ MPa}$ 满分。

2 结语

本文对第 52 届国际物理奥林匹克竞赛理论第二题的命题和解答进行了详细介绍。本题考查内容涉及很多可从实验中锻炼得到的技能, 比如: 在 B 部分中从图 3、D 部分中从图 8 和图 11 中正确读取数据, 作辅助线以获得计算所需要的参数, 是本题的难点, 中国参赛学生在这方面失分严重。B 部分中图 3 是一个半对数坐标图, 学生接触少, 纵轴的八个不同比例的分格含义不理解, 读数出现错误。C 部分递推计算需要仔细, 特别是对第一层和第五层的特殊处理, 由于考试时间紧迫, 学生在这里也有失分。在本题 B 部分和 C 部分都出现了估计问题, 是基于高中生知识水平的简化, 并非严谨的解答, 但要求学生抓住问题的主要矛盾, 解答符合题意和物理本质。评分标准对几种学生常见解答针对性的制定了评分依据; 考虑到读图和绘图误差, 评分标准给出了满分对应的数据范围等。本题对实验数据的图形处理能力的综合考查部分设计新颖, 可为实验笔试提供新的出题思路。

参 考 文 献

- [1] AIRY G B. On the diffraction of an object-glass with circular aperture[J]. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 1835, 5: 287.