



悬臂梁的弹性

——2021年亚洲物理奥林匹克 竞赛实验第一题答案

张文理 宋峰

(1. 南京师范大学附属中学 210000; 2. 南开大学物理科学学院 300071)

A. 光路对齐

A1. 0.6分

A1部分要求选手搭建并调节实验光路,测量光路的基本信息。A1问涉及到搭建实验光路,为提高后续实验测量的准确性,这里对于调节精度有较高要求。在仿真软件中,选手需要先确定各元件的相对方位和大概位置,然后不断微调各个元件的位置,才能搭建出完整准确的光路,对选手的耐心和临场反应能力有较高要求。图1为光路图。

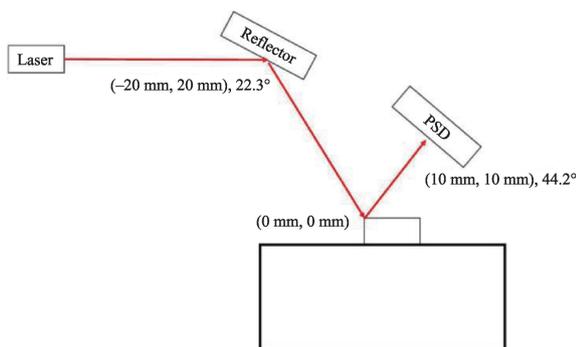


图1

A2. 0.8分

A2问需要测量悬臂梁逐渐稳定下来的过程,看似没有技术含量,实则要求选手基本将平衡位置调节至0点附近,在现场作答中,不少选手为了追求速度,没有仔细调节,导致后面连环失分。表1为时

间3 s~120 s(测量间隔为3 s)的位置数据。

A3. 1.0分

A3问是对A2问进行数据处理,见表2。如果A2问达到了实验要求的调节精度,那么A3问则较为轻松。

测量参考值(带标准差):

$$6.267 \times 10^{-5} \pm 1.88 \times 10^{-5} \text{ m}$$

B. 悬臂梁的变形和杨氏模量的推导

B问要求选手给悬臂梁“定标”,而定标是实验物理学中的常见手段。拿到一个状态未知的实验器材,如何利用手边已有的材料参数,通过相对简单的实验快速测量判断实验器材的状态和参数,很能考察选手临场的判断能力和反应速度。具体到B问中,题目给了相对详细的引导,并提供了理论公式,因此选手只需用线性递增的力的大小进行多次测量,记录实验数据即可,最终可以得到杨氏模量。

B1. 1.0分

B2. 1.0分

B3. 0.4分

$$C1 = 5.196 \times 10^{-4}$$

由于我国选手普遍对线性拟合非常熟悉,本部

表 1

| 时间(s) | 位置 d (m) | 时间(s) | 位置 d (m) | 时间(s) | 位置 d (m) |
|-------|-------------------------|-------|------------------------|-------|-----------------------|
| 3 | -6.415×10^{-4} | 48 | 1.198×10^{-4} | 93 | 6.85×10^{-5} |
| 6 | 5.261×10^{-4} | 51 | -4.46×10^{-5} | 96 | 7.36×10^{-5} |
| 9 | 4.843×10^{-4} | 54 | 1.488×10^{-4} | 99 | 8.73×10^{-5} |
| 12 | 3.349×10^{-4} | 57 | -7.70×10^{-5} | 102 | 7.93×10^{-5} |
| 15 | -5.386×10^{-4} | 60 | 8.75×10^{-5} | 105 | 6.39×10^{-5} |
| 18 | 7.91×10^{-5} | 63 | 1.604×10^{-4} | 108 | 3.22×10^{-5} |
| 21 | -2.762×10^{-4} | 66 | -1.93×10^{-5} | 111 | 6.05×10^{-5} |
| 24 | 1.398×10^{-4} | 69 | 1.159×10^{-4} | 114 | 3.20×10^{-5} |
| 27 | -2.039×10^{-4} | 72 | 7.10×10^{-5} | 117 | 4.71×10^{-5} |
| 30 | -4.42×10^{-5} | 75 | 3.6×10^{-6} | 120 | 8.26×10^{-5} |
| 33 | -1.988×10^{-4} | 78 | -1.79×10^{-5} | | |
| 36 | -2.77×10^{-5} | 81 | 9.21×10^{-5} | | |
| 39 | 1.195×10^{-4} | 84 | 6.00×10^{-5} | | |
| 42 | 1.960×10^{-4} | 87 | 1.361×10^{-4} | | |
| 45 | 2.192×10^{-4} | 90 | 5.72×10^{-5} | | |

表 2

| d(m) | \bar{d} (m) | $d-\bar{d}$ (m) | 标准差 |
|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 6.85×10^{-5} | 6.267×10^{-5} | 5.5×10^{-6} | 1.88×10^{-5} |
| 7.36×10^{-5} | | 1.09×10^{-5} | |
| 8.73×10^{-5} | | 2.46×10^{-5} | |
| 7.93×10^{-5} | | 1.66×10^{-5} | |
| 6.39×10^{-5} | | 1.2×10^{-6} | |
| 3.22×10^{-5} | | -3.05×10^{-5} | |
| 6.05×10^{-5} | | -2.2×10^{-6} | |
| 3.20×10^{-5} | | -3.07×10^{-5} | |
| 4.71×10^{-5} | | -1.56×10^{-5} | |
| 8.26×10^{-5} | | 1.99×10^{-5} | |

表 3

| F(N) | d(m) | $\bar{d}=d_0$ (m) |
|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 0 | -1.82×10^{-5} | -1.386×10^{-5} |
| | -1.09×10^{-5} | |
| | -6.69×10^{-5} | |
| | 1.72×10^{-5} | |
| | 9.5×10^{-6} | |
| F (N) | $d-d_0= \Delta d$ (m) | $\overline{\Delta d}$ (m) |
| 2.00×10^{-9} | 1.9136×10^{-4} | 2.0046×10^{-4} |
| | 2.0016×10^{-4} | |
| | 1.9766×10^{-4} | |
| | 2.0096×10^{-4} | |
| | 2.1216×10^{-4} | |
| 4.00×10^{-9} | 4.2336×10^{-4} | 4.2018×10^{-4} |
| | 4.1536×10^{-4} | |
| | 4.3526×10^{-4} | |
| | 4.0346×10^{-4} | |
| | 4.2346×10^{-4} | |
| 6.00×10^{-9} | 6.4136×10^{-4} | 6.3112×10^{-4} |
| | 6.4646×10^{-4} | |
| | 6.4256×10^{-4} | |
| | 6.2186×10^{-4} | |
| | 6.0336×10^{-4} | |
| 8.00×10^{-9} | 7.1906×10^{-4} | 7.7770×10^{-4} |
| | 7.8006×10^{-4} | |
| | 8.0506×10^{-4} | |
| | 7.7736×10^{-4} | |
| | 8.0696×10^{-4} | |
| 1.000×10^{-8} | 1.01216×10^{-3} | 1.00106×10^{-3} |
| | 1.00076×10^{-3} | |
| | 1.00336×10^{-3} | |
| | 9.7846×10^{-4} | |
| | 1.01076×10^{-3} | |

分难点不在 B2 问和 B3 问的数据处理,而是 B1 问中是否将 Δd 控制在了相对较小的数值。如果 Δd 偏大,会造成后续测量中偏转大小超过仪器量程,从而无法测得足量数据。不少考生在考场上误以为是仪器自身量程太小导致数据量不足,从而造成大量失分。

C. 双层悬臂梁

C 部分中要求选手处理双层悬臂梁,通过已知的一种材料的杨氏模量,求解未知材料的杨氏模量。C 部分在实验上的测量和数据处理方式与 B 部分完全相同,并且试题同样提供了理论公式,因此

表4

| F (N) | δ (m) | $\overline{\Delta d}$ (m) |
|------------------------|------------------------|---------------------------|
| 2.00×10^{-9} | 1.022×10^{-7} | 2.0046×10^{-4} |
| 4.00×10^{-9} | 2.044×10^{-7} | 4.2018×10^{-4} |
| 6.00×10^{-9} | 3.066×10^{-7} | 6.3112×10^{-4} |
| 8.00×10^{-9} | 4.088×10^{-7} | 7.7770×10^{-4} |
| 1.000×10^{-8} | 5.109×10^{-7} | 1.00106×10^{-3} |

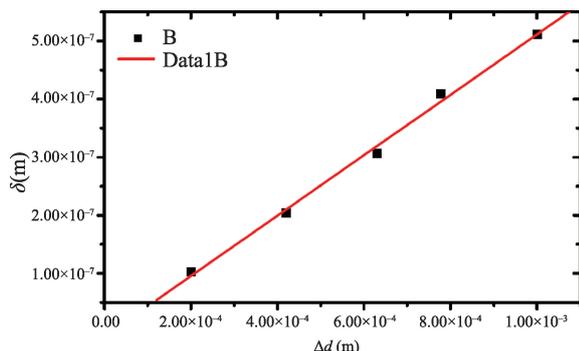


图2

选手做完B部分以后,应当可以以相同方法迅速完成C部分,本部分关键点仍在于是否将 Δd 控制在了相对较小的数值。

C1. 1.0 分

C2. 1.0 分

斜度: 1.337×10^{-7}

C3. 0.6 分

$$4.98 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)}$$

D. 悬臂梁分子吸收引起的弯曲试验

D部分中要求选手通过类似方法求解出已知材料的表面分子覆盖率。D1问和D2问在实验上的测量和数据处理方式同样与B部分相同,但不同的是D3问和D4问考察了线性插值法,要求选手根据覆盖率为0%和1%的样品,测定出覆盖率在0%到1%的其余两种样品的表面分子覆盖率。选手在操作时,按照B部分的注意事项调节即能取得较好效果。

表5

| T(K) | d(m) | $\bar{d} = d_0$ (m) |
|------|------------------------|-------------------------|
| 300 | -2.28×10^{-5} | -2.836×10^{-5} |
| | -7.24×10^{-5} | |
| | -1.61×10^{-5} | |
| | -2.84×10^{-5} | |
| | -2.1×10^{-6} | |

| T(K) | $d - d_0 = \Delta d$ (m) | $\overline{\Delta d}$ (m) |
|-------|--------------------------|---------------------------|
| 301 | 2.8506×10^{-4} | 2.7928×10^{-4} |
| | 2.7186×10^{-4} | |
| | 2.7466×10^{-4} | |
| | 2.7436×10^{-4} | |
| | 2.9046×10^{-4} | |
| 301.5 | 4.1276×10^{-4} | 4.2568×10^{-4} |
| | 4.1336×10^{-4} | |
| | 4.6276×10^{-4} | |
| | 4.3956×10^{-4} | |
| | 3.9996×10^{-4} | |
| 302 | 5.4146×10^{-4} | 5.4186×10^{-4} |
| | 5.4676×10^{-4} | |
| | 5.3386×10^{-4} | |
| | 5.6706×10^{-4} | |
| | 5.2016×10^{-4} | |
| 302.5 | 6.9866×10^{-4} | 6.7330×10^{-4} |
| | 6.6726×10^{-4} | |
| | 6.6416×10^{-4} | |
| | 6.8296×10^{-4} | |
| | 6.5346×10^{-4} | |
| 303 | 7.6026×10^{-4} | 7.9410×10^{-4} |
| | 7.7046×10^{-4} | |
| | 7.9706×10^{-4} | |
| | 8.1346×10^{-4} | |
| | 8.2926×10^{-4} | |

表6

| T(K) | $\overline{\Delta d}$ (m) | δ (m) |
|-------|---------------------------|------------------------|
| 301 | 2.7928×10^{-4} | 1.451×10^{-7} |
| 301.5 | 4.2568×10^{-4} | 2.212×10^{-7} |
| 302 | 5.4186×10^{-4} | 2.816×10^{-7} |
| 302.5 | 6.7330×10^{-4} | 3.499×10^{-7} |
| 303 | 7.9410×10^{-4} | 4.127×10^{-7} |

D1. 0.6 分

D2. 0.6 分

假设位移和覆盖率(CR)的函数形式可以表

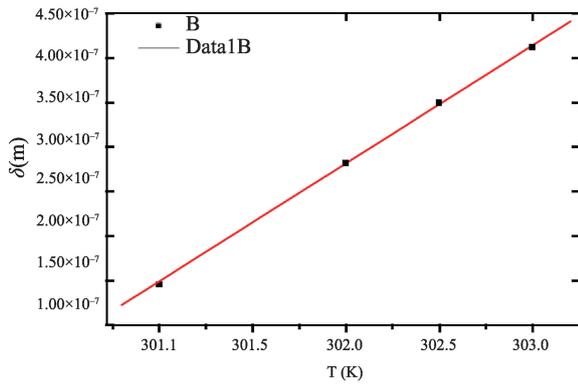


图3

表7

| | $d(m)$ | $\bar{d}=d_0(m)$ |
|-----|--------------------------|--------------------------|
| 样本0 | 3.4×10^6 | -7.2×10^6 |
| | -1.15×10^5 | |
| | -1.61×10^5 | |
| | 2.09×10^5 | |
| | -3.25×10^5 | |
| | $d-d_0=\Delta d(m)$ | $\overline{\Delta d}(m)$ |
| 样本1 | -8.2414×10^{-4} | -8.2552×10^{-4} |
| | -8.2884×10^{-4} | |
| | -8.2794×10^{-4} | |
| | -8.1934×10^{-4} | |
| | -8.2584×10^{-4} | |

示为:

$$\delta = C_2 \frac{CoverageRatio}{EI^*} L_4$$

根据A9中获得的数据估算 C_2 。可以使用A6中 δ 和 $\overline{\Delta d}$ 的相关性。

$$-7.89 \times 10^{-2}$$

D3. 0.8分

D4. 0.6分

样本2: 0.738%

样本3: 0.298%

表8

| | $d-d_0=\Delta d(m)$ | $\overline{\Delta d}(m)$ |
|-----|--------------------------|--------------------------|
| 样本2 | -6.1734×10^{-4} | -6.0866×10^{-4} |
| | -6.0434×10^{-4} | |
| | -6.0054×10^{-4} | |
| | -5.9884×10^{-4} | |
| | -6.2224×10^{-4} | |
| | $d-d_0=\Delta d(m)$ | $\overline{\Delta d}(m)$ |
| 样本3 | -2.4924×10^{-4} | -2.4588×10^{-4} |
| | -2.6224×10^{-4} | |
| | -2.4764×10^{-4} | |
| | -2.4854×10^{-4} | |
| | -2.2174×10^{-4} | |

本题分为A、B、C、D四个部分。总的来说,一旦A部分调节精确后,B、C、D问在思维难度和精度要求上都不高,但后三问层层递进,给选手展现了现代物理学测定材料性质的一种有效方式。由于本题模型新颖,不但可以考察选手的物理素养和情景阅读能力,还有利于激发选手的对物理实验的兴趣,且对调节精度要求较高,具有相当的区分度。

