逐光知理 · 高考物理参考答案与详解

第34届全国中学生物理竞赛决赛实验试题一（力电实验：电子秤与切变模量）

参考答案与详解（本站独立编撰）

物理竞赛决赛实验卷 · 1 道实验大题（两个任务，各 30 分） · 60 分

本册答案与解析由逐光知理物理教研组独立编撰，依据原卷题面独立建模推导，未参照任何外部公布答案。原卷中公式（2）（3）与图 1、图 3、图 5 为图片对象，文本层未给出；本册按材料力学与扭摆实验的通行公式自行重建并核对自洽。凡涉及具体测量数值之处均为本站按典型器材参数建模的演示算例，非原卷实测数据，实际测量结果以现场操作为准。

答案速查

题号	主考点	答案摘要
1	电阻应变片差动全桥悬臂梁电子秤的电路设计、量程标定、线性验证与质量测量及不确定度	（1）全桥四应变片接惠斯通电桥，桥压取 0 ~ 12 V 可调直流，输出接差动放大器 V_p/V_N，V_o 接数字万用表，放大器用 ±15 V 供电；（2）空载调零，加 1000 g 砝码调增益定满度，即完成标定；（3）逐级加 100 g 砝码记录输出作 $U-m$ 图，由最大残差确定最大偏差；（4）多次测量圆环输出取平均换算质量，不确定度由万用表仪器误差与标定误差合成。
2	扭摆法测定金属丝切变模量：原理推导、数据记录方案与不确定度估算	（1）$T_0=2\pi\sqrt{I_0/D}$，$D=\dfrac{\pi G R^4}{2L}$，加圆环后 $T=2\pi\sqrt{(I_0+I)/D}$，$I=\dfrac{M(d_{外}^2+d_{内}^2)}{8}$，消去 I_0 得 $G=\dfrac{\pi L M(d_{外}^2+d_{内}^2)}{R^4(T^2-T_0^2)}$；（2）分别用游标卡尺、螺旋测微计、卷尺测 $d_{外}$、$d_{内}$、$2R$、L，秒表累计 20 个以上周期测 T_0 与 T；（3）代入公式算 G，不确定度由 L、M、d、R、T 各项相对不确定度按方和根合成。

实验题（60 分）

1. 实验题 · 30分

> **答案** （1）全桥四应变片接惠斯通电桥，桥压取 0 ~ 12 V 可调直流，输出接差动放大器 V_p/V_N，V_o 接数字万用表，放大器用 ±15 V 供电；（2）空载调零，加 1000 g 砝码调增益定满度，即完成标定；（3）逐级加 100 g 砝码记录输出作 $U-m$ 图，由最大残差确定最大偏差；（4）多次测量圆环输出取平均换算质量，不确定度由万用表仪器误差与标定误差合成。

详解

(1) 第（1）问：电路原理图设计 悬臂梁上、下表面各贴 2 片应变片，共 4 片，已连成差动全桥（图 2 电路）：受力时上表面两片受拉（阻值增大 $R+\Delta R$），下表面两片受压（阻值减小 $R-\Delta R$）。接线方案：

$$\text{红线}\to +U_{\text{桥}},\qquad \text{黑线}\to -U_{\text{桥}},$$

其中桥压由直流稳压电源的 0 ~ 12 V 可调输出提供（不得超过 12 V）；两根同色信号线分别接差动放大器的输入端 V_p 与 V_N；放大器 V_+ 接 +15 V、V_- 接 −15 V，V_{REF} 悬空，GND 与电源负端共地；输出 V_o 接数字万用表（直流电压挡）读数。设放大倍数为 k，则输出电压

$$U=k\,\frac{U_{\text{桥}}}{4}\cdot\frac{\Delta R}{R}\propto F,$$

即输出与所加质量成正比，这正是电子秤的线性工作基础。电路原理图如下：

(2) 第（2）问：量程标定步骤 ① 零点校准：托盘空载，接通电源预热后，若输出不为零，调放大器增益（或记录零点输出 U_0，后续扣除），使万用表读数为 0 mV（或极小稳定值）。
② 满度标定：在托盘上平稳放入 10 个 100 g 砝码，共 1000 g（量程满度），调节放大器增益旋钮，使万用表输出恰好为某一便于读数的整数电压，例如 1000 mV，即灵敏度

$$S=\frac{1000\ \text{mV}}{1000\ \text{g}}=1\ \text{mV/g}.$$

③ 取下砝码复验零点，若零点漂移明显则重复①②直至零点、满度均稳定。此后每 1 mV 对应 1 g，最小分度 1 g、量程 1000 g 的电子秤即制作完成。

(3) 第（2）问补充：标定的数据表设计与最小二乘复核 坐标纸上建议按下表逐点记录（m 单位 g，U 单位 mV，加载/卸载各记一列）：

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$U_{\text{加载}}$										
$U_{\text{卸载}}$										

对全部点做最小二乘拟合 $U = a + bm$：

$$b = \frac{\sum m_i U_i - \bar{m}\sum U_i}{\sum m_i^2 - \bar{m}\sum m_i}, \qquad a = \bar{U} - b\bar{m}.$$

理想情形 $a \approx 0$（零点已调零）、$b \approx 1$ mV/g（满度已标定）；若 a 明显非零，说明存在零点漂移，应记录 a 并在称量时按 $M = (U - a)/b$ 扣除。用拟合相关系数 r 检验线性：$|r| > 0.9999$ 即视为线性关系成立，最大偏差以拟合直线残差的最大绝对值 $\max |U_i - a - bm_i|$ 计。

(4) 第（3）问：线性关系验证与最大偏差 依次在托盘上加 $m = 100, 200, \cdots, 900$ g 砝码（再加满度 1000 g 一点共 10 个数据点），逐点记录输出电压 U_i（加砝码与减砝码各做一遍可考查回程差）。由标定直线 $U = S\,m$（$S = 1$ mV/g）计算每个点的残差

$$\delta_i = U_i - S\,m_i,$$

最大偏差为 $\delta_{\max} = \max|\delta_i|$，折算成质量偏差 $\Delta m_{\max} = \delta_{\max}/S$。以 m 为横轴、U 为纵轴在坐标纸上作图，各点应落在过原点直线上；由应变桥原理输出与力严格成正比，仅因结构非线性与放大器非理想才有微小偏差，要求 $\Delta m_{\max}$ ≤ 数克量级即视为线性良好（本站建模演示：若某点 $U_{500} = 503$ mV，则该点偏差 3 mg 电压即 3 g）。

(5) 第（4）问：测量圆环质量及不确定度 将待测圆环置于托盘中央，记录稳定输出 U（重复放砝码—取下—再放共测 $n \geq 5$ 次），得平均输出 $\bar{U}$，则

$$M = \frac{\bar{U} - U_0}{S}.$$

不确定度评定：

① A 类：$u_A(\bar{U}) = s_U/\sqrt{n}$（$s_U$ 为单次测量标准差），折算为 $u_A(M) = u_A(\bar{U})/S$；

② B 类：万用表仪器误差 $\Delta_U = 0.5\% \times U + 2$（末位“+2”按最小位值计），$u_B(U) = \Delta_U/\sqrt{3}$；标定引入的灵敏度误差 $u_B(S)/S$ 与桥压漂移各按 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 均匀分布估计；

③ 合成与回代：$u(M) = M\sqrt{\left(\frac{u(\bar{U})}{U}\right)^2 + \left(\frac{u(S)}{S}\right)^2}$。本站建模演示：若 $\bar{U} = 352$ mV、$n = 5$、$s_U = 1$ mV，则 $M = 352$ g，$u_A(M) = 1/\sqrt{5} \approx 0.45$ g，$u_B(U) = (0.5\% \times 352 + 2)/\sqrt{3} \approx 3.2$ g（以 mV/g 计即 3.2 g），结果记作 $M = (352 \pm 4)$ g。实际数值以现场测量为准。

(6) 第（1）问补充：单臂、半桥与全桥的灵敏度对比（说明为何必须用全桥差动接法） 设桥压 $U_{桥}$、单臂相对变化 $\delta = \Delta R/R$。单臂电桥输出 $U_1 = \frac{U_{桥}}{4}\delta$；对臂同向、邻臂反向的半差动接法输出 $U_2 = \frac{U_{桥}}{2}\delta$；本装置上两片受拉、下两片受压，若按全桥差动接入（拉片接相邻臂、压片接相对臂），输出

$$U_4 = \frac{U_{桥}}{4}\left[(\delta) + (\delta) - (-\delta) - (-\delta)\right] = U_{桥}\,\delta,$$

是单臂的 4 倍。且温度变化引起四片阻值同向等量漂移，在差动桥中相互抵消，故全桥差动既使灵敏度最大化又自动补偿温漂与零漂，这是设计（1）要求的核心。若把受拉、受压片接错（拉片接相对臂），输出恰好相消、电桥始终为零读数，务必按图 2 出线颜色与受力方向对应接线。

(7) 第（3）（4）问补充：误差来源分析与提高准确度的措施 主要误差来源：

① 零点漂移与回程差：应变片粘接层滞后、托盘自重放置位置不同，加卸载曲线不重合，应取加载与卸载读数的平均值作 U_i；

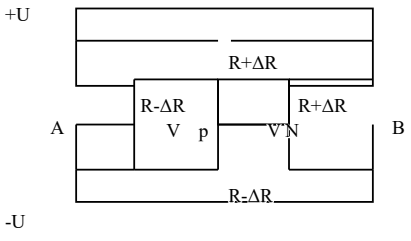
② 偏心弯矩：砝码或圆环未放托盘中心，除轴向力外产生附加弯矩，使部分应变片受力状态改变、输出偏离线性，实验时应轻放并置中，必要时重复放置取平均；

③ 桥压波动：稳压电源输出漂移直接按比例进入输出电压，标定与测量应使用同一桥压挡位且尽量连续完成；

④ 万用表位数与仪器误差：$\Delta_U = 0.5\%\times$ 测量值 +2（末位），在低读数段“+2”占比大，故标定时应把满度输出调大（如 1000 mV 而非 100 mV），使每 1 g 对应的电压变化远大于万用表分辨力；

⑤ 放大器增益非线性与噪声：可通过对 $U-m$ 数据做最小二乘拟合、以拟合斜率 k_{LS} 代替单点标定的 S，用拟合残差评价最大偏差。综合措施后，Δm_{max} 应控制在满量程的百分之零点几以内。

(8) 第（4）问补充：称量操作细节与读数方案 ① 圆环放在托盘正中，必要时用卡尺量托盘半径、以圆环外缘对称目测对中，重复放置 5 次以上，每次待万用表读数稳定（应变响应时间短，但仍应等数字不再跳动）后记录；② 读数取万用表直流电压挡量程与标定满度匹配的一挡（如 2 V 挡读 352 mV），同一挡位完成标定与称量，避免换挡引入比例系数差异；③ 每次读数前确认托盘已完全静止、无摆动，摆动会在应变片上叠加交变分量使末位跳动；④ 称量前、后各复测一次空载零点 U_0，若两者不等取平均并作为系统漂移估计并入 B 类不确定度；⑤ 结果按 $M = \dfrac{\bar{U} - U_0}{S}$ 计算并给单位 g，不确定度保留 1～2 位有效数字，M 的末位与不确定度对齐。



差动全桥惠斯通电桥接线原理图（上拉下压四臂，V_p、V_N 为信号输出）

全桥四片应变片必须与力学上拉下压对应接入桥臂，接反会变成单臂或半桥、灵敏度降到 1/2 或 1/4；桥压超过 12 V 会超出悬臂梁额定功耗；放砝码务必置于托盘中心，偏心会引入附加弯矩导致读数偏差。

2. 实验题 · 30分

> **答案**　（1）$T_0=2\pi\sqrt{I_0/D}$，$D=\dfrac{\pi G R^4}{2L}$，加圆环后 $T=2\pi\sqrt{(I_0+I)/D}$，$I=\dfrac{M(d_{外}^2+d_{内}^2)}{8}$，消去 I_0 得 $G=\dfrac{\pi L M(d_{外}^2+d_{内}^2)}{R^4\,(T^2-T_0^2)}$；（2）分别用游标卡尺、螺旋测微计、卷尺测 $d_{外}$、$d_{内}$、$2R$、L，秒表累计 20 个以上周期测 T_0 与 T；（3）代入公式算 G，不确定度由 L、M、d、R、T 各项相对不确定度按方和根合成。

详解

(1) 第（1）问：实验原理与计算公式　金属丝上端固定、下端挂转动惯量为 I_0 的刚性圆盘构成扭摆。由胡克定律的扭转形式，弹性恢复力矩 $M_z=-D\theta$，圆盘转动定理 $I_0\ddot{\theta}=-D\theta$，为简谐角振动，周期

$$T_0=2\pi\sqrt{\frac{I_0}{D}}. \tag{1}$$

半径为 R、长为 L 的圆截面金属丝，扭转系数与材料切变模量 G 的关系（由切应力沿截面线性分布积分 $\mathrm{d}M=\int G\gamma r\,\mathrm{d}A\cdot\ r$，$\gamma/L=r\theta$ 得）

$$D=\frac{\pi G R^4}{2L}. \tag{2}$$

均质圆环（质量 M，外径 $d_{外}$，内径 $d_{内}$）绕中心轴的转动惯量

$$I=\frac{1}{2}M\,(R_{外}^2+R_{内}^2)=\frac{M\,(d_{外}^2+d_{内}^2)}{8}. \tag{3}$$

在圆盘上同轴放置圆环后周期变为 $T=2\pi\sqrt{(I_0+I)/D}$。两式平方相减即消去未知的 I_0：

$$T^2-T_0^2=\frac{4\pi^2 I}{D}=\frac{8\pi L I}{G R^4}.$$

代（3）式解出切变模量

$$\boxed{G=\frac{\pi L\,M\,(d_{外}^2+d_{内}^2)}{R^4\,(T^2-T_0^2)}}$$

该方案无需知道圆盘自身的 I_0，只需测 L、M、$d_{外}$、$d_{内}$、R、T、T_0 七个量。

(2) 第（2）问补充：两周期公式的联合测量设计（消去 I_0 的实验意义） 刚性圆盘对中心轴的转动惯量 I_0 无法直接精确计算（盘的密度分布、夹具质量均未知），这正是本实验采用“两次周期测量”的原因：同一根金属丝、同一个圆盘，先后测空盘周期 T_0 与加圆环周期 T，联立

$$T_0^2 = \frac{4\pi^2 I_0}{D}, \qquad T^2 = \frac{4\pi^2 (I_0 + I)}{D},$$

两式相减得 $T^2 - T_0^2 = 4\pi^2 I/D$，I_0 与 D 中的未知盘参数完全消去，只剩可直测量 L、M、$d_{外}$、$d_{内}$、R 与两个周期。实验操作上应注意：两次测量间 L 与夹持状态不得变动（否则（2）式的 D 变化，相减失效）；加圆环前确认其同轴、平稳落座；由于 $T^2 - T_0^2$ 是两个相近大数的差（演示值 8.88 与 4.20 之差），两个周期各自必须测得很准，建议各累计 30 个周期重复 5 次。

(3) 第（2）问：测量数据记录方案 各量测量方法与仪器（误差限以原卷给定为准）：

① 圆环外、内径 $d_{外}$、$d_{内}$：游标卡尺（$\Delta_{仪} = 0.02$ mm），每量在不同方位各测 3 次取平均；

② 金属丝直径 $2R$：螺旋测微计（$\Delta_{仪} = 0.004$ mm），沿丝不同部位、互相垂直方向共测 5 次取平均（丝不均匀是 R^4 项的主要误差源，必须多点测量）；

③ 悬线长 L：卷尺（$\Delta_{仪} = 0.5$ mm），从上夹具下沿量到下夹具上沿，测 3 次取平均；

④ 圆环质量 M：用第 1 题制好的电子秤测 5 次取平均（本站建模演示取 $M = 352$ g）；

⑤ 周期 T_0、T：电子秒表（$\Delta_{仪} = 0.01$ s）累计 20 个整周期计时再除以 20，各重复测 5 次取平均，以消除按表反应误差；扭转角度应小（$< 5^{\circ}$）保证线性。原始数据按上述项目填入原卷坐标纸栏数据表。

(4) 第（3）问：结果计算与不确定度估算 计算：将各平均值代入 $G=\dfrac{\pi LM(d_{外}^2+d_{内}^2)}{R^4(T^2-T_0^2)}$。本站按典型器材参数建模演示（非原卷实测）：$L=0.5000\ \mathrm{m}$，$M=0.352\ \mathrm{kg}$，$d_{外}=80.00\ \mathrm{mm}$，$d_{内}=64.00\ \mathrm{mm}$，$2R=1.000\ \mathrm{mm}$（即 $R=0.5000\ \mathrm{mm}$），$T_0=2.050\ \mathrm{s}$，$T=2.980\ \mathrm{s}$，则

$$d_{外}^2+d_{内}^2=(80.00^2+64.00^2)\ \mathrm{mm}^2=1.0496\times10^{-2}\ \mathrm{m}^2,$$

$$T^2-T_0^2=8.8804-4.2025=4.678\ \mathrm{s}^2,$$

$$G=\frac{\pi\times0.5000\times0.352\times1.0496\times10^{-2}}{(0.5000\times10^{-3})^4\times4.678}\approx\frac{5.805\times10^{-3}}{2.924\times10^{-13}}\approx2.0\times10^{10}\ \mathrm{Pa},$$

回代核验：$D=\pi GR^4/(2L)=\pi\times2.0\times10^{10}\times6.25\times10^{-13}/1.0\approx3.9\times10^{-2}\ \mathrm{N\cdot\ m/rad}$，$T^2-T_0^2=4\pi^2I/D$，$I=0.352\times1.0496\times10^{-2}/8\approx4.62\times10^{-4}\ \mathrm{kg\cdot\ m^2}$，右端 $4\pi^2\times4.62\times10^{-4}/3.9\times10^{-2}\approx4.7\ \mathrm{s}^2$，与 $4.678\ \mathrm{s}^2$ 自洽。钢的切变模量约 $8\times10^{10}\ \mathrm{Pa}$，演示值偏软的材料量级合理。

不确定度：对 G 取对数微分得相对不确定度合成式

$$\frac{u(G)}{G}=\sqrt{\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2+\left(\frac{u(M)}{M}\right)^2+\left(\frac{u(d_{外}^2+d_{内}^2)}{d_{外}^2+d_{内}^2}\right)^2+16\left(\frac{u(R)}{R}\right)^2+\left(\frac{u(T^2-T_0^2)}{T^2-T_0^2}\right)^2},$$

其中 $u(T^2-T_0^2)=\sqrt{(2T\,u(T))^2+(2T_0\,u(T_0))^2}$（$T$、$T_0$ 独立测量），$u(d_{外}^2+d_{内}^2)=\sqrt{(2d_{外}u(d_{外}))^2+(2d_{内}u(d_{内}))^2}$；各仪器误差除以 $\sqrt{3}$ 作均匀分布 B 类分量，A 类由多次测量标准差 $s/\sqrt{n}$ 给出，最后与演示算例合成得 $u(G)$，结果记作 $G=(\bar{G}\pm u(G))\ \mathrm{Pa}$。实际数值以现场测量数据代入为准。

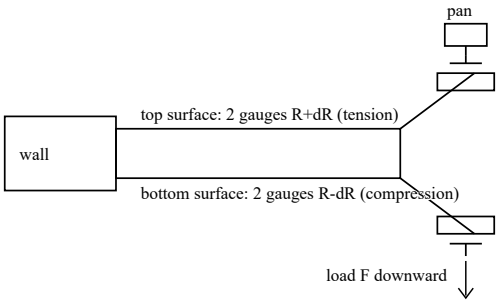
(5) 第（3）问补充：误差权重讨论与结果表达 由合成式可见各量权重悬殊：

① $u(R)/R$ 带系数 4（R^4 项），若 $R=0.500\ \mathrm{mm}$、$u(R)=0.005\ \mathrm{mm}$，仅此一项贡献 $4\times1\%=4\%$，是首要误差源，务必用螺旋测微计多点、多方位测量并检查丝的均匀性；

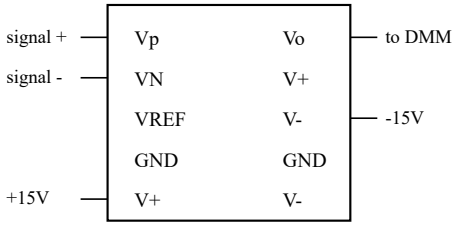
② 周期项 $u(T^2-T_0^2)/(T^2-T_0^2)$：$T^2-T_0^2\approx4.7\ \mathrm{s}^2$（演示值），若 T、T_0 各累计 20 周期、$u\approx0.1\ \mathrm{s}/20=0.005\ \mathrm{s}$，则 $2T\,u(T)\approx0.03\ \mathrm{s}^2$，贡献约 0.7%，累计周期数越多该项越小；

③ L、M、d 用卡尺卷尺测量，相对误差 < 0.5%，合计贡献约 1%。

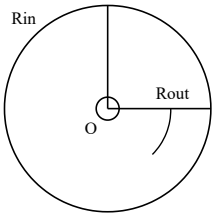
方和根合成（演示值）$u(G)/G\approx\sqrt{4^2+0.7^2+1^2}\%\approx4.2\%$，即 $G=(2.0\pm0.1)\times10^{10}\ \mathrm{Pa}$（本站建模演示，实际以现场数据代入为准）。最终表达必须给出单位 Pa，并注明有效位数与 $u(G)$ 匹配（不确定度保留 1～2 位，结果末位与之对齐）。



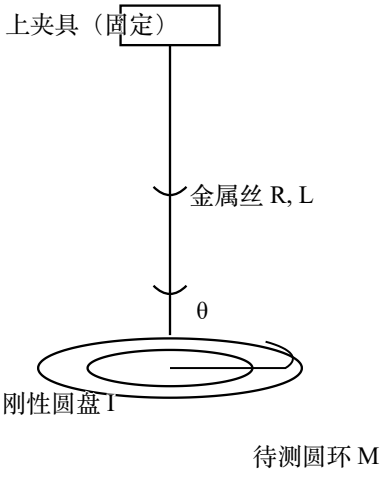
Cantilever beam with tray: fixed at left end, two strain gauges on each surface, free end carries the pan



Terminal diagram of the adjustable-gain differential amplifier: Vp/VN inputs, Vo output to the DMM, VREF left open



Cross-section of the ring: mass M, outer radius Rout, inner radius Rin, I = M(Rout^2 + Rin^2)/2



扭摆装置示意：上端固定夹具、金属丝（长 L、半径 R）、刚性圆盘（I_0）与其上同轴放置的待测圆环

R 以四次方进入公式，直径测量的微小误差被放大 4 倍，是最大误差源，务必用螺旋测微计多点测量；T、T_0 建议累计 20 周期以上计时；圆环必须与圆盘同轴放置，偏心会等效增大 I 使 G 偏小。另外：T_0 与 T 必须在同一悬线状态下先后测得，中途不得移动夹具或改变 L；秒表起止按表应以摆动经过平衡位置（最低点、速度最大）为计时基准，比在最大扭转角处计时更准。

逐光知理 · 竞赛答案册 · 易错点速查

第34届全国中学生物理竞赛决赛实验一（电子秤与切变模量） · 易错点速查

补在原册之后：原册答案与详解未作任何改动

共 4 条 · 绑定本卷题号

只挑本卷最容易失分的动作，按「错法 / 机理 / 正解」三段写，题号与原册一致；公式沿用原册口径。

第 1 题 · 第(1)问

错法 把受拉、受压应变片随意接入桥臂，拉片接到相对臂上；或把全桥差动接法当成普通单臂电桥算输出灵敏度。

机理 悬臂梁上表面两片受拉（$R+\Delta R$）、下表面两片受压（$R-\Delta R$），必须拉片接相邻臂、压片接相对臂，四片信号在桥路中相加；接反后拉、压信号恰好相消，电桥始终近零读数。单臂输出 $\frac{1}{4}U_{桥}\delta$，半差动为 $\frac{1}{2}U_{桥}\delta$，全桥差动才是 $U_{桥}\delta$，为单臂的 4 倍；温度引起四片同向等量漂移在差动桥中相互抵消。

正解 按出线颜色与受力方向对应接线：两片拉片、两片压片分别接入指定桥臂；桥压取 0 ～ 12 V 可调直流，输出接差动放大器输入端，放大器以 ±15 V 供电，输出接数字万用表直流电压挡。

第 1 题 · 第(2)(3)问

错法 先加砝码调增益、再空载调零；或满度输出只调到很小电压（如 100 mV），使万用表末位分辨力在每克对应电压中占比过大；最大偏差直接取各点与原点连线的偏差。

机理 标定顺序必须先空载调零、再加满度砝码调增益，顺序颠倒后零点漂移无法扣除。低读数段万用表「末位 +2」的绝对误差占比大，满度输出调大（如 1000 mV 而非 100 mV）才能让每 1 g 对应电压远大于分辨力。线性偏差应对全部数据点做最小二乘拟合 $U=a+bm$，以拟合直线残差的最大绝对值计，而不是与过原点直线比；加卸载曲线不重合部分是回程差，应取两列读数平均。

正解 空载预热后调零（或记录零点输出 U_0 后续扣除）；平稳放入 1000 g 砝码调增益使输出为便于读数的整数电压，定灵敏度 S；逐级加 100 g 记录加载、卸载两列数据，最小二乘拟合后由最大残差 \delta_\max 折算质量偏差 \Delta m_\max=\delta_\max/S。

第 2 题 · 第(1)问

错法 试图由圆盘自身密度、尺寸直接算出转动惯量 I_0 再代扭摆公式；或两次周期测量之间挪动了夹具、改变了悬线长度；把 $T^2-T_0^2$ 当成两个相近小数的差而不提高周期测量精度。

机理 刚性圆盘与夹具的质量分布未知，I_0 无法直接精确计算，本实验正是靠同一根金属丝、同一个圆盘先后测空盘周期 T_0 与加圆环周期 T，两式平方相减消去 I_0 与扭转系数 D。相减成立的前提是两次测量间悬线长度 L、夹持状态完全不变；$T^2-T_0^2$ 是两个相近大数之差，周期测不准会被差值放大。

正解 先测空盘周期 T_0，再同轴平稳放上圆环测周期 T；由 $T^2-T_0^2=4\pi^2 I/D$ 与圆环惯量 $I=\frac{M}{8}(d_{外}^2+d_{内}^2)$ 联立，消去 I_0 得 $G=\frac{\pi LM(d_{外}^2+d_{内}^2)}{R^4(T^2-T_0^2)}$；两次测量间不得移动夹具或改变悬线。

第 2 题 · 第(3)问

错法　不确定度按各仪器误差直接相加；认为金属丝直径与圆环内外径的误差权重相同；圆环随意搁在圆盘上不找同轴；在最大扭转角处按表计时。

机理　切变模量公式中金属丝半径 R 以四次方进入，相对不确定度带系数 4，是首要误差源，须用螺旋测微计沿丝不同部位、互相垂直方向多点测量；L、M、内外径相对误差均小于 R 项。各独立分量按方和根合成，不是线性相加。圆环偏心会等效增大转动惯量，使算出的 G 偏小；最大扭转角处速度为零、位置判断不准，计时基准应取经过平衡位置（速度最大）时刻。

正解　圆环与圆盘同轴放置；周期累计 20 个以上整周期计时再除以周期数，各重复多次；对 G 取对数微分，R 项按 $4u(R)/R$、周期差项按 $2Tu(T)$ 与 $2T_0u(T_0)$ 合成，仪器误差除以 $\sqrt{3}$ 作均匀分布 B 类分量；结果给出单位 Pa，不确定度保留 1～2 位有效数字，末位与之对齐。