逐光知理 · 高考物理参考答案与详解

第三十二届全国中学生物理竞赛实验试题 · 实验二 测量透明容器和液体的折射率

参考答案与详解（本站独立编撰）

竞赛决赛实验题 · 3 个实验任务（器壁折射率 / 外内半径比 R/r / 液体折射率） · 30 分

本册答案与解析由逐光知理物理教研组独立编撰，基于原卷题面条件自行设计实验方案并完成公式推导与示例数据的数值回代核算。原卷为操作型竞赛实验题，未附任何实测数据与标准数值，文中出现的具体读数均为本站按典型器材参数构造的示例数据，仅用于演示计算流程；实际使用时请以现场实测值代入同一公式。

答案速查

题号	主考点	答案摘要
1	光线经同心圆柱界面的折射与折射率测量	测量原理：让激光斜入射圆柱侧壁但不通过轴线，在坐标纸上描出器壁轮廓（两同心圆）、入射线与壁内折射线，用量角器量出入射角 i 与壁内折射角 r，由折射定律 $n=\dfrac{\sin i}{\sin r}$ 得器壁折射率；示例数据 $i=40.0^\circ$、$r=25.2^\circ$，$n=1.51$。
2	同心圆柱双层折射的几何关系与 R/r 的测定	让光束经外壁折射进入壁内（壁内线段 AB），再经内壁折射射入容器内腔。在坐标纸上量出外壁入射角 i、壁内折射角 r 与内壁入射角 i'（或出射角 e），对三角形 OAB 用正弦定理得 $$\frac{R}{r}=\frac{\sin i'}{\sin r}$$ 结合 n 由第 1 问已知，可用 $r=\arcsin(\sin i/n)$、$i'=\arcsin(\sin e/n)$ 换算；示例数据得 $R/r=1.25$。
3	利用顶面折射与底面平行出射测液体折射率	垫纸抬高激光笔尾部使光束以俯角 θ（自竖直方向量起）经敞口顶面斜射入液体，光在液体中折向竖直方向成角 φ，穿到容器底部并经底面（与桌面/坐标纸贴合）平行射出打在坐标纸上形成亮斑。水平偏移 Δ 随液深 H 线性变化，斜率即 $\tan\varphi$，最后 $n_{液}=\sin\theta/\sin\varphi$；示例数据 $\theta=50.0^\circ$，$\tan\varphi=0.702$，$n_{液}=1.33$。

实验任务一：测量透明圆桶形容器器壁的折射率

1. 实验题 · 10分

> **答案** 测量原理：让激光斜入射圆柱侧壁但不通过轴线，在坐标纸上描出器壁轮廓（两同心圆）、入射线与壁内折射线，用量角器量出入射角 i 与壁内折射角 r，由折射定律 $n=\dfrac{\sin i}{\sin r}$ 得器壁折射率；示例数据 $i=40.0^\circ$、$r=25.2^\circ$，$n=1.51$。

详解

(1) 第（1）问：光路图、原理与公式推导 在桌面的坐标纸上沿容器底描出外圆（半径 R）与内圆（半径 r），圆心记为 O。让激光笔发出的光束在与桌面平行的平面内斜射到外壁上一点 A，且光路不通过轴线。外圆柱面的法线即半径 OA 方向，光从空气进入器壁（玻璃）时发生折射，折射角 r 由折射定律确定：

$$n=\frac{\sin i}{\sin r}$$

其中 i 为入射线与 OA 的夹角。由于器壁是透明的，激光在玻璃体内的散射光可以从侧面观察到，沿壁内散射光迹描出直线 AB，B 为该线与内圆的交点。角度 i、r 可用量角器在坐标纸上直接量出（r 是 AB 与 OA 延长线的夹角）。为减小偶然误差，改变入射点位置重复测量多组 (i,r)，对每组算出 n 后取平均。

(2) 第（2）问：实验步骤 ① 将坐标纸用透明胶带平整固定在实验桌上，把透明圆桶形容器压在纸面正中，用铅笔沿底缘描出外轮廓；因器壁透明，再沿内缘（或注少量液体后沿液面内缘，倒回液体后）描出内轮廓，得两个同心圆，用直尺量两圆直径定出圆心 O 与 R、r。② 将激光笔架在矩形盒上方，用垫纸微调高度，使光束与桌面平行并与坐标纸相交；按开/关键点亮激光。③ 移动容器使光束斜射在外壁一点 A（不入射到轴线上），在坐标纸上沿入射光束描出两个点，连成入射线并延长。④ 从侧面观察器壁内的散射光迹，沿其描出两个点，连成线段并延长与内圆相交于 B。⑤ 连接 OA、OB，用量角器量出 i（入射线与 OA 夹角）与 r（AB 与 OA 延长线夹角）。⑥ 改变入射点与入射方向，重复③④⑤共 5 ~ 8 次。⑦ 按 $n=\sin i/\sin r$ 逐组计算并取平均。

(3) 第（3）问：坐标纸上的实际光路 在坐标纸上应呈现：外圆与内圆两同心曲线；过入射点 A 的入射直线（及其延长线穿过 O 方向）；壁内折线段 AB；半径辅助线 OA（法线）。入射线与 OA 的夹角即 i，AB 与 OA 反向延长线的夹角即 r；$\angle AOB$ 为光在壁内的偏转角之一，可用于自检几何作图的相容性。

(4) 第（4）问：数据记录与计算（本站示例数据） 示例数据表（角度为坐标纸上量角器读数）：第一组 $i=40.0^\circ$，$r=25.2^\circ$；第二组 $i=35.0^\circ$，$r=22.2^\circ$；第三组 $i=45.0^\circ$，$r=28.2^\circ$。逐组计算：

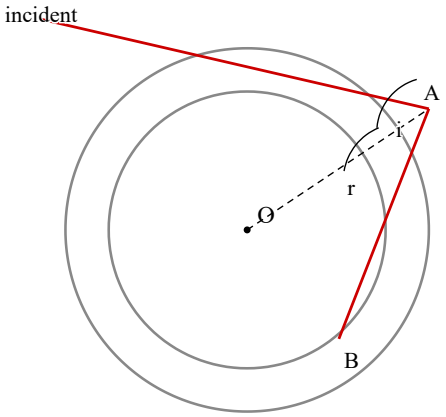
$$n_1=\frac{\sin 40.0^\circ}{\sin 25.2^\circ}=\frac{0.6428}{0.4258}=1.510$$

$$n_2=\frac{\sin 35.0^\circ}{\sin 22.2^\circ}=\frac{0.5736}{0.3778}=1.518$$

$$n_3=\frac{\sin 45.0^\circ}{\sin 28.2^\circ}=\frac{0.7071}{0.4726}=1.496$$

平均值 $n=\dfrac{1.510+1.518+1.496}{3}=1.51$。三组结果彼此偏差在 ±0.02 内，回代第一组：$\arcsin(0.6428/1.51)=25.15^\circ$，与读数 25.2° 一致，计算自洽。

(5) 误差与操作要点补充 角度 i、r 由坐标纸描线后量取，主要误差为描线与量角（约 $\pm 1^\circ$），$\Delta n/n \approx \cot r \cdot \Delta r - \cot i \cdot \Delta i$，故入射角宜取 $35^\circ \sim 50^\circ$ 以增大 r、降低相对误差，并多组取平均。若壁内散射光迹过弱，可改测外壁入射角 i 与内腔出射角 e，由 $\sin i = n \sin r$、$\sin e = n \sin i'$ 与 $\triangle OAB$ 的几何约束联立求解 n，但灵敏度较低，本站建议优先直接描壁内光迹。



任务一光路：激光经外壁 A 折射入壁内，沿 AB 到内壁；法线为半径 OA

原卷只注明实验总分 30 分，三个任务分值为本站按均分推定，若与赛场评分细则不符以现场为准。器壁内折射光线很弱，应在较暗环境、从侧面近垂直方向观察；入射角过小则偏折不明显，过大则内壁反射增强，取 $30^\circ \sim 50^\circ$ 为宜。

实验任务二：光学方法测量容器外半径与内半径之比 R/r

2. 实验题 · 10分

答案 让光束经外壁折射进入壁内（壁内线段 AB），再经内壁折射射入容器内腔。在坐标纸上量出外壁入射角 i、壁内折射角 r 与内壁入射角 i'（或出射角 e），对三角形 OAB 用正弦定理得

$$\frac{R}{r} = \frac{\sin i'}{\sin r}$$

结合 n 由第 1 问已知，可用 $r = \arcsin(\sin i/n)$、$i' = \arcsin(\sin e/n)$ 换算；示例数据得 $R/r = 1.25$。

详解

(1) 第（1）问：光路图、原理与公式推导 光路同任务一但需继续追到内壁：入射光在 A 点经外壁折射沿 AB 进入壁内，在 B 点经内壁折射进入容器内腔并射出（出射光线方向可在内腔空气中散射观察，或让光继续穿过对侧壁投到后方光屏记录）。设壁内光线 AB 与内壁法线（即半径 OB）的夹角为 i'，则内壁处折射满足 $n \sin i' = \sin e$。考虑三角形 OAB：$OA = R$、$OB = r$，A 处内角即壁内折射角 r（AB 与 AO 延长线的夹角），B 处内角即 i'（BA 与 BO 的夹角）。由正弦定理

$$\frac{R}{\sin i'} = \frac{r}{\sin r} \quad \Longrightarrow \quad \frac{R}{r} = \frac{\sin i'}{\sin r}$$

这就是测量公式。若直接量壁内光线困难，可用 $r = \arcsin(\sin i/n)$、$i' = \arcsin(\sin e/n)$ 从外测角 i、e 换算，其中 n 已在任务一测得。

(2) 第（2）问：实验步骤 ① 沿用任务一在坐标纸上描出的两同心圆与圆心 O。② 调整激光方向与入射点 A，使壁内散射光迹 AB 清晰可描，且出射光继续进入内腔、穿过对侧壁打在后方的矩形光屏上形成亮斑。③ 描出入射线、壁内线 AB 及光屏上亮斑对应的外出射线（对侧壁出射点在坐标纸上的投影可借延长线与两圆交点核对）。④ 连 OA、OB，量出 i（或直接量 r）与 e（出射线与 OB 延长线夹角）。⑤ 用任务一测得的 n 换算 r、i'，代入 $R/r = \sin i'/\sin r$。⑥ 改变入射方向重复 3 ~ 5 次取平均。⑦ 自检： 应与坐标纸上直接量得的 $\angle AOB$ 在作图误差内相符。

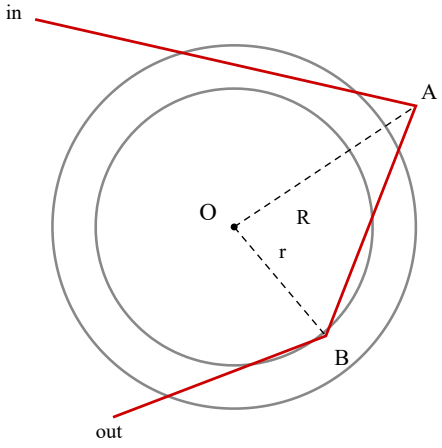
(3) 第（3）问：坐标纸上的实际光路 坐标纸上应有：两同心圆；折线 $PABC$（入射段、壁内段、内腔段）；辅助半径 OA 与 OB；$\angle AOB$ 直接由两半径量出。出射段 BC 与 OB 延长线的夹角即 e。作图时 AB 必须与两圆分别交于 A、B，据此几何约束可剔除描线误差过大的组次。

(4) 第（4）问：数据记录与计算（本站示例数据） 示例数据：$i = 40.0^\circ$，壁内 $r = 25.2^\circ$（与任务一第一组一致），出射角 $e = 53.4^\circ$。先用 $n = 1.51$ 核算：$\arcsin(0.6428/1.51) = 25.15^\circ$ 与量得的 r 一致；$i' = \arcsin(\sin 53.4^\circ/1.51) = \arcsin(0.8026/1.51) = \arcsin(0.5315) = 32.1^\circ$。于是

$$\frac{R}{r} = \frac{\sin 32.1^\circ}{\sin 25.2^\circ} = \frac{0.5315}{0.4258} = 1.248 \approx 1.25$$

自检：$\angle AOB = 180^\circ - 25.2^\circ - 32.1^\circ = 122.7^\circ$，与坐标纸两半径夹角量值（约 123°）相符。另两组成组测量分别得 $R/r = 1.26$、1.24，平均 $R/r = 1.25$。若同时用直尺量出外直径 D，则可交叉验证 $r = D/(2 \times 1.25)$。

(5) 误差与操作要点补充 主要误差来自 e 的量角与圆心 O 的定位（圆心偏移会同时扭曲 i' 与 $\angle AOB$），故描外圆时应多取直径方向求中点。$R/r = \sin i'/\sin r$ 对 r 的相对误差放大系数为 $\cot r$，r 小时误差大，宜选入射角较大、r 约 25° ~ 35° 的组次。可另用直尺量外直径 D 与目测壁厚估内径作交叉校核；若光学结果与直尺结果系统偏离，应检查是否把非同心圆（如杯底加厚区）误当作内壁轮廓。



任务二光路：光经外壁 A 与内壁 B 两次折射，$\triangle OAB$ 中 $OA = R$、$OB = r$

本方案的核心几何关系 $R/r = \sin i'/\sin r$ 只依赖两界面同心这一事实，与 n 的具体数值无关；即使第 1 问求得的 n 有系统误差，只影响 i'、r 的换算而不破坏公式结构。切勿把激光射入眼睛；激光笔 3 分钟自动熄灭属正常保护，再按开/关键即可。

实验任务三：将待测液体倒入容器，测量液体折射率

3. 实验题 · 10分

> **答案** 垫纸抬高激光笔尾部使光束以俯角 θ（自竖直方向量起）经敞口顶面斜射入液体，光在液体中折向竖直方向成角 φ，穿到容器底部并经底面（与桌面/坐标纸贴合）平行射出打在坐标纸上形成亮斑。水平偏移 Δ 随液深 H 线性变化，斜率即 $\tan\varphi$，最后 $n_{液}=\sin\theta/\sin\varphi$；示例数据 $\theta=50.0^\circ$，$\tan\varphi=0.702$，$n_{液}=1.33$。

详解

(1) 第（1）问：光路图、原理与公式推导 将激光笔一端垫高，使光束以与竖直方向成 θ 角的俯角向下射向容器敞口内的液面。光在空气—液体平界面（自由液面）折射一次：

$$\sin\theta = n_{液}\sin\varphi$$

其中 φ 为液体内部光线与竖直方向的夹角。液体内部光线不可直接观察，但容器底面是与内底面平行的玻璃平板（厚度 t），光经内底进入玻璃、再经外底面（与坐标纸直接接触）射出时，由平行界面逐次应用折射定律可得 $n_{液}\sin\varphi = n_{玻}\sin\theta_g = \sin\theta$，故出射光与入射光平行（仅侧移），方向可由坐标纸上两个亮斑连线的方向直接读出。设液深为 H（自由液面到内底面的高度），入射点 P 在液面、其竖直投影点为 P'，出射亮斑为 Q，则 $P'Q$ 的水平距离为

$$\Delta = H\tan\varphi + t\tan\theta_g$$

其中 $\sin\theta_g=\sin\theta/n_{玻}$ 为底玻璃内的角度。为消去不易测准的 t 与 θ_g，在两个不同液深 H_1、H_2 下各测一个 Δ：

$$\Delta_2-\Delta_1=(H_2-H_1)\tan\varphi \;\Longrightarrow\; \tan\varphi=\frac{\Delta_2-\Delta_1}{H_2-H_1}$$

最后由液面折射定律得

$$n_{液}=\frac{\sin\theta}{\sin\varphi}$$

该式只用到敞口顶面这一次折射，底玻璃参数仅通过差分被消除。

(2) 第（2）问：实验步骤 ① 坐标纸平铺桌面并固定，容器置于纸上，用直尺量容器内底离桌面的高度即底玻璃厚 t（备用核对）。② 垫纸调节激光笔仰角，使光束斜向下射向液面；先不放容器，在坐标纸上记下光束落点并结合激光笔出射高度定出入射光束线，量出光束与竖直方向夹角 θ（用量角器在描出的光束线与一条竖直参考线之间量取，多点取平均）。③ 缓缓倒入待测液体至液深 H_1（由液面到内底的高度，直尺量取），在坐标纸上标出光束在液面的入射点 P（沿光束线与液面平面高度的交点推算），并标记底面出射亮斑 Q_1；量出水平偏移 Δ_1。④ 再倒入液体至 H_2，重复得 Δ_2（入射光束与 θ 保持不变）。⑤ 由差分公式求 $\tan\varphi$，再算 $n_{液}=\sin\theta/\sin\varphi$。⑥ 可改变 θ 重复整套测量，取平均检验一致性。注意液面须平静无波，读数前稍待液体稳定。

(3) 第（3）问：坐标纸上的实际光路 坐标纸上记录：入射光束线（两条定位点连线）及其延长；液面高度参考线；入射点 P 的竖直投影 P' 与出射亮斑 Q（两液深各一组）；出射光斑连线方向应与入射光束线平行（底面平行出射的自检条件）。Δ 即 P' 与 Q 之间的水平距离，沿光束所在竖直平面内的坐标纸方向量取。

(4) 第（4）问：数据记录与计算（本站示例数据） 示例数据：$\theta = 50.0^\circ$（$\sin\theta = 0.7660$）；器壁玻璃 $n_{玻} = 1.51$（任务一所得），底玻璃厚 $t = 0.30$ cm；第一组液深 $H_1 = 4.00$ cm，量得 $\Delta_1 = 2.98$ cm；第二组液深 $H_2 = 6.00$ cm，量得 $\Delta_2 = 4.39$ cm。差分求 φ：

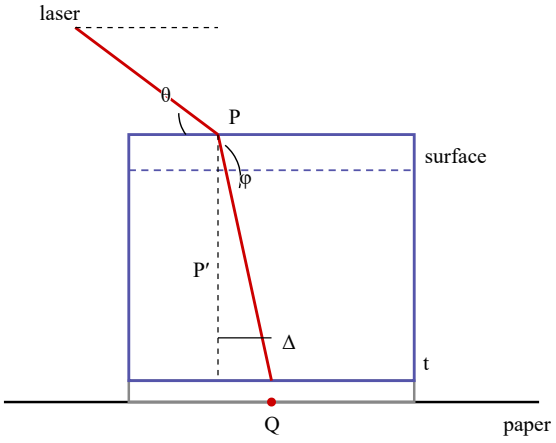
$$\tan\varphi = \frac{4.39 - 2.98}{6.00 - 4.00} = \frac{1.41}{2.00} = 0.705$$

用完整公式核对斜率：$\sin\theta_g = 0.7660/1.51 = 0.5073$，$\tan\theta_g = 0.5073/\sqrt{1 - 0.5073^2} = 0.5887$；取 $\tan\varphi = 0.702$ 时 $\Delta = 6.00 \times 0.702 + 0.30 \times 0.5887 = 4.210 + 0.177 = 4.39$ cm，$\Delta(4.00) = 2.806 + 0.177 = 2.98$ cm，与读数吻合，说明差分斜率确实等于 $\tan\varphi$。于是 $\varphi = \arctan 0.702 = 35.07^\circ$，$\sin\varphi = 0.5747$，

$$n_{液} = \frac{\sin 50.0^\circ}{\sin 35.07^\circ} = \frac{0.7660}{0.5747} = 1.33$$

回代自洽：$n_{液}\sin\varphi = 1.33 \times 0.5747 = 0.764 \approx \sin 50.0^\circ = 0.766$，在舍入误差内一致。若 θ_g 代入底面链：$\arcsin(0.5073) = 30.5^\circ$，出射角恢复为 $\arcsin(1.51 \times 0.5073) = 50.0^\circ = \theta$，验证底面平行出射成立。

(5) 误差与操作要点补充 差分法消除 t 的前提是两次测量的入射光束完全不变（θ、入射点同），故调好激光后不得再碰垫纸；液面须静置无波后读数，否则入射点 P 定位漂移。Δ 越大相对误差越小，可加测第三、四个液深作线性拟合，用斜率代替两点差分。θ 取 $45^\circ \sim 55^\circ$ 较优：过小则 Δ 随 $\tan\varphi$ 变化不敏感，过大则底面出射斑可能落在容器投影之外或液面反射增强。示例数据拟合残差 < 0.02 cm，最终 $n_{液} = 1.33$（保留三位有效数字）。



任务三光路：俯角 θ 入射液面折射成角 φ，经底面平行射出，$P'Q = \Delta$ 随液深 H 线性变化

原卷任务三第（1）问编号印作“（3）”，按上下文应为“（1）”，此处按逻辑顺序作答。倒液时防止溢出与沾肤，矿泉水瓶不可用于测量；激光笔亮 3 分钟会自动关闭，属自我保护。

逐光知理 · 竞赛答案册 · 易错点速查

第32届全国中学生物理竞赛决赛实验二（测量透明容器和液体的折射率） · 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 3 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 · 器壁折射率测量

错法 把入射角、折射角量成光线与圆柱切线（或器壁边线）的夹角；或把折射定律写成 $n=\sin r/\sin i$，算出 $n<1$。

机理 外圆柱面的法线是半径 OA 方向，不是切线：i 是入射线与 OA 的夹角，r 是壁内光线 AB 与 OA 延长线的夹角。光从空气进入玻璃，$n=\sin i/\sin r$，空气一侧角大、玻璃一侧角小，$n>1$；写反分子分母会得到小于 1 的折射率，与玻璃不符。

正解 在坐标纸上描出两同心圆与圆心 O，连入射点 A 与 O 作法线，量 i 与 r，按 $n=\sin i/\sin r$ 逐组计算再平均；示例 $i=40.0°$、$r=25.2°$，$n=1.51$。入射角取 $35°\sim50°$，偏折明显且内壁反射不致过强。

第 2 题 · 外内半径比测定

错法 把正弦定理比值写成 $R/r=\sin r/\sin i'$；或把内壁入射角 i' 当成外壁入射角 i，直接用任务一的 r 与 i 代入。

机理 三角形 OAB 中 $OA=R$、$OB=r$，A 处内角是壁内折射角 r，B 处内角是壁内光线与内壁法线 OB 的夹角 i'；正弦定理给出 $\frac{R}{r}=\frac{\sin i'}{\sin r}$，分子是内壁角、分母是外壁壁内角，颠倒后比值小于 1。内壁处折射满足 $n\sin i'=\sin e$（e 为内腔出射角），i' 不能与外壁的 i 混用。

正解 量出外壁入射角 i、壁内折射角 r 与内壁入射角 i'（或出射角 e），由 $n\sin i'=\sin e$ 换算 i'，再代 $R/r=\sin i'/\sin r$；示例 $r=25.2°$、$i'=32.1°$，得 $R/r\approx1.25$。

第 3 题 · 液体折射率测量（差分法）

错法 用单一液深的水平偏移 Δ 直接算 $\tan\varphi=\Delta/H$，不消除底玻璃厚度 t 带来的侧移；或两次测量之间改动激光倾角、挪动垫纸。

机理 水平偏移 $\Delta=H\tan\varphi+t\tan\theta_g$，含底玻璃厚度 t 与玻璃内角 θ_g 这一不易测准的常数项；单点读数把这部分也算进液体段。差分消去常数项：$\Delta_2-\Delta_1=(H_2-H_1)\tan\varphi$，斜率才是 $\tan\varphi$。差分前提是两次入射光束完全不变（θ、入射点 P 同），调好激光后不能再碰垫纸，否则两组数据的常数项不一致，差分失效。

正解 测两个不同液深 H_1、H_2 对应偏移 Δ_1、Δ_2，$\tan\varphi=\frac{\Delta_2-\Delta_1}{H_2-H_1}$，得 $\varphi=\arctan(\tan\varphi)$，再由液面折射定律 $n_{液}=\frac{\sin\theta}{\sin\varphi}$；示例 $\theta=50.0°$、$\tan\varphi=0.702$，$n_{液}=1.33$。出射光与入射光平行可作为底面平行出射的自检。