

直接读取薄透镜焦距的实验改进^{*}

李晓暄 高永伟 俞艳蓉

(宁夏大学物理学院 宁夏 银川 750021)

(收稿日期:2023-08-15)

摘要:运用传统方法测量薄透镜焦距,需人眼辨别成像位置或多次测量物距及像距,易产生较大误差,且需较大操作空间.通过避免共轴等高问题,将三维立体问题转换为二维平面问题,克服空间操作不便,缩短实验操作距离直接读取透镜焦距.实验中利用狭缝模拟激光,光路清晰,操作简便,可运用手机软件 phyphox 确定光心位置.此外,PhET 虚拟实验室可模拟该实验,实现真实实验和虚拟实验的有效结合.

关键词:透镜焦距;phyphox;GeoGebra;PhET

1 引言

透镜是光学仪器中的基本元件,在军事、医疗等众多方面有着重要应用.我国最早对透镜的使用可追溯到东汉时期,王充在《论衡》卷二《率性篇》中首次记载了利用透镜汇聚太阳光的取火方式^[1].透镜在实际应用中需根据实际目的和条件选择焦距合适的透镜或透镜组.比如配眼镜时首先要进行验光,其中焦距是反映透镜特性的一个重要参数.为了正确选用透镜,必须掌握透镜焦距的测量方法.如太阳光(平行光)聚焦法、激光测量法等^[2].现在对于透镜焦距的研究多为提高透镜焦距测量精度,比如杨俊义、沙金巧等人运用光功率计对焦距进行测量.除此之外多为对不同测量焦距方法的比较,分析得出更为精确的方法,但并没有结合各方法的优点提出一种更为完善的测量方法.

为此,本实验采用自制教具法,将传统平行光实验与激光测量法相结合,提出了一种更为简捷的方法,以为透镜焦距的测量提供参考.

2 透镜介绍及实验原理

透镜分为厚透镜和薄透镜.厚透镜如图 1 所示,该图是一个组合系统(厚透镜)的基点.

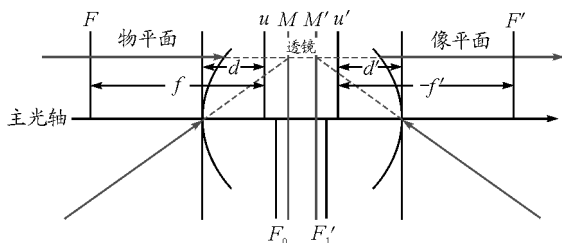


图 1 一个组合系统(厚透镜)的基点

如果 n_0, n_1, n_2 分别为 3 个区域的折射率, r_1, r_2 是这两个面在其轴点处的曲率半径.对于厚透镜而言

$$f = -n_0 n_1 \frac{r_1 r_2}{D}$$

$$f' = n_1 n_2 \frac{r_1 r_2}{D}$$

$$d = (n - 1) \frac{r_1 t}{\Delta}$$

$$d' = (n - 1) \frac{r_2 t}{\Delta}$$

$$\Delta = (n - 1)[n(r_1 - r_2) - (n - 1)t]$$

t 是透镜的轴向厚度.当透镜两侧媒介有相同折射率时

$$n_2 = n_0$$

此时
$$f = -f' = -\frac{nr_1 r_2}{\Delta}$$

厚透镜焦距公式为组合公式,超出中学生认知范围,

^{*} 宁夏自然科学基金项目,项目编号:2023AAC03045;2022 年高等学校大学物理课程教学指导委员会西北地区工作委员会教学研究项目,项目编号:XBXY202205.

作者简介:李晓暄(1999—),女,在读硕士研究生,研究方向为中学物理教学.

指导教师:高永伟(1979—),男,博士,副教授,研究方向为中学物理教学.

因而在中学所接触到的透镜被认为是薄透镜^[3].

薄透镜轴向厚度 t 可忽略,公式简化为^[4]

$$d = d' = 0$$

$$\frac{1}{f} = -\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

此时主平面透过透镜的轴点,因而通过透镜中心的光线没有任何偏转,薄透镜成像可视为对透镜中心的投影,根据这个特点可确定一条经过焦点的中央光线.理想光具组理论表明,无需知道光线在光具组中的真实路径,可假设一对共轭平面存在,如图1中的 M 、 M' 平面.对于薄透镜,可视为物方主平面和像方主平面重合,即可取两个主平面的中间平面.

根据几何学原理可得,如图2以凹透镜焦距光路示意图为例.

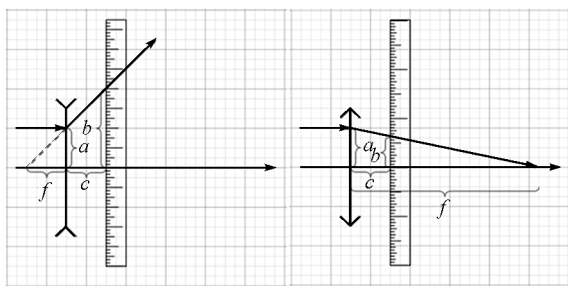


图2 透镜焦距测量光路示意图

通过数学相似性原理,即

$$\frac{a}{b} = \frac{f}{f+c}$$

可以得到焦距公式为

$$f = \frac{ac}{b-a}$$

a 为平行光线到光轴的距离, c 为透镜中心到标尺的距离,且都为已知量.因此,只需知 b 的大小,就可计算透镜的焦距^[5].同理可得凸透镜焦距公式为

$$f = \frac{ac}{c-b}$$

透镜光心的确定:一是利用几何法,在中学阶段,通常认为透镜的中心位于其几何中心.可将透镜置于方格纸上,描出其轮廓,继而确定几何中心的位置;二是利用手机软件 phyphox 中的光学传感器来测量透过狭缝的光线的光照度 E (Illuminance),通过光强度 I (Luminous Intensity) 和光照度之间的关系 $E(\text{lx}) = \frac{I(\text{cd})}{r^2}$,可以确定单位面积内光照度最大即光强最大处,即为透镜光心.

3 实验步骤

光线充足可直接将装置置于阳光下进行实验,若环境光线不充足,可增添光源补光如图3所示.

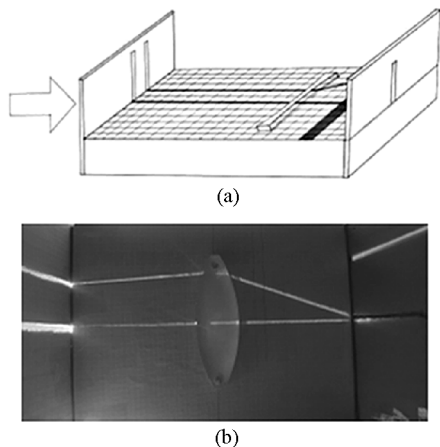


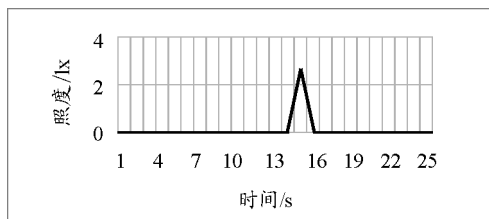
图3 光源补光实验装置

具体操作步骤如下:

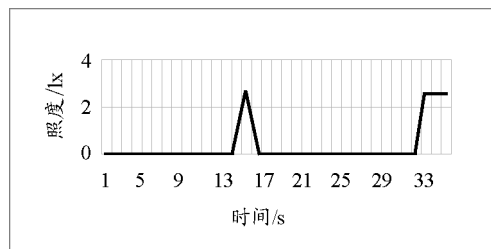
(1) 确认光线强度在手机 phyphox 软件光学传感器的检测范围内,并找到手机光学传感器的位置.移动另一部手机闪光灯,确保光线强度较小和较大时都在手机 phyphox 软件的探测范围内^[6].并观察 phyphox 光学传感器图像,峰值所对应的位置,即为光学传感器的位置,一般位于手机前置摄像头附近.

(2) 确定平行光线.首先,在装置左侧放置手机闪光灯光源,使透过狭缝的光线与水平网格线平行且宽度相近.在装置右侧放置手机 phyphox 光学传感器,为方便观察可将手机后移.移动光源和手机,寻找图像峰值.狭缝所在平面垂直于坐标纸平面,光线在竖直平面内的偏折观察不到,但在水平面内的偏折可以清晰的呈现.

(3) 确定透镜光心.将透镜从前往后移动,观察手机 phyphox 图像的变化.图4(a)为透镜移动过程中,手机 phyphox 所探测到的照度随时间变化的曲线.曲线呈单峰形状,根据理论分析可知,焦点位置为光照度最大位置,将透镜移回峰值处,如图4(b)所示.



(a)



(b)

图4 手机 phyphox 软件所得曝光值 / 照度-时间图像

(4) 将左侧的光源移动到距中央水平线距离为 a 的狭缝处, 并调整光线水平, 宽度与网格线宽度相近. 光线透过透镜后, 发生偏折, 读取右侧标尺上的数值. 为减小误差, 需进行多次测量.

本次实验, 我们选取 $a = 4 \text{ cm}$ 、 $c = 4 \text{ cm}$, 此数值并非固定不变, 可根据实际要求进行相应调整. 由于坐标纸位置有限, 根据焦距公式, 先将每个 b 值对应的焦距 f 计算出后制成对照表格. 如表 1 和表 2 所示.

表 1 凸透镜焦距对照表

距离 b/cm	凸透镜焦距 f/cm	距离 b/cm	凸透镜焦距 f/cm
3.9	160.00	1.9	7.62
3.8	80.00	1.8	7.27
3.7	53.33	1.7	6.96
3.6	40.00	1.6	6.67
3.5	32.00	1.5	6.40
3.4	26.67	1.4	6.15
3.3	22.86	1.3	5.93
3.2	20.00	1.2	5.71
3.1	17.78	1.1	5.52
3.0	16.00	1.0	5.33
2.9	14.55	0.9	5.16
2.8	13.33	0.8	5.00
2.7	12.31	0.7	4.85
2.6	11.43	0.6	4.71
2.5	10.67	0.5	4.57
2.4	10.00	0.4	4.44
2.3	9.41	0.3	4.32
2.2	8.89	0.2	4.21
2.1	8.42	0.1	4.10
2.0	8.00	0.0	4.00

表 2 凹透镜焦距对照表

距离 b/cm	凹透镜焦距 f/cm	距离 b/cm	凹透镜焦距 f/cm	距离 b/cm	凹透镜焦距 f/cm
4.1	160.00	6.1	7.62	8.1	3.90
4.2	80.00	6.2	7.27	8.2	3.81
4.3	53.33	6.3	6.96	8.3	3.72
4.4	40.00	6.4	6.67	8.4	3.64
4.5	32.00	6.5	6.40	8.5	3.56
4.6	26.67	6.6	6.15	8.6	3.48
4.7	22.86	6.7	5.93	8.7	3.40
4.8	20.00	6.8	5.71	8.8	3.33
4.9	17.78	6.9	5.52	8.9	3.27
5.0	16.00	7.0	5.33	9.0	3.20
5.1	14.55	7.1	5.16	9.1	3.14
5.2	13.33	7.2	5.00	9.2	3.08
5.3	12.31	7.3	4.85	9.3	3.02
5.4	11.43	7.4	4.71	9.4	2.96
5.5	10.67	7.5	4.57	9.5	2.91
5.6	10.00	7.6	4.44	9.6	2.86
5.7	9.41	7.7	4.32	9.7	2.81
5.8	8.89	7.8	4.21	9.8	2.76
5.9	8.42	7.9	4.10	9.9	2.71
6.0	8.00	8.0	4.00	10.0	2.67

4 通过 PhET 虚拟实验室模拟此实验

随着信息技术的发展, 物理教学也逐渐呈现出现代化、智能化的发展趋势. 可利用虚拟实验室来验证实验方法的可行性^[7]. 本文利用 PhET 来模拟此实验, 实验界面如图 5 所示.

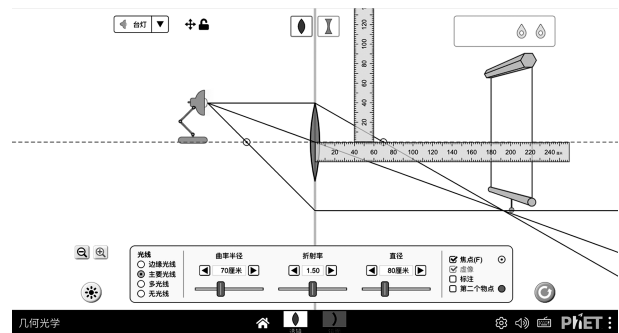


图 5 PhET 虚拟仿真实验室模拟实验界面图

PhET 虚拟实验与真实实验所需实验器材和实验步骤对比如表 3 所示.

表3 PhET 虚拟实验和真实实验实验器材、实验步骤对比

器材与步骤	PhET 虚拟实验	真实实验
实验器材	PhET 物理-光学和辐射-几何光学栏目, 实验界面如图 5, 网站地址: https://phet.colorado.edu/zh_CN/simulations/geometric-optics	硬纸壳、坐标纸、两部智能手机
实验步骤	(1) 器材选取“台灯”, 光线选取“主要光线”, 先将“竖直刻度尺”放在透镜左侧, 将水平入射的主要光线调整为距主光轴距离为 40 cm 处。 (2) 将“水平刻度尺”零刻度线放置光心, 再将“竖直刻度尺”移动至“水平刻度尺”刻度为 40 cm 处。 (3) 调节透镜曲率, 根据竖直刻度尺上所读数据乘 0.1 对照本文表 1, 得出透镜焦距	制作实验装置, 按照本文第 3 小节所示步骤进行实验

PhET 虚拟实验需注意刻度尺的边缘要和主光轴对齐, 可将页面放大操作。由于 PhET 中凸透镜所测 b 值范围在 $0 \sim 40$ cm, 对照表中凸透镜 b 值范围为 $0 \sim 4$ cm, PhET 中所给出的焦距最小值为 40 cm, 中学物理实验室所用透镜焦距一般在 10 cm 左右, 所以在进行数据处理时, 我们将 PhET 所测数据 b 值乘 0.1, 由此, 所得数值即可与实际数值相比较。数据记录如表 4 所示。

表 4 数据记录

物理量	所测数据			
已设置焦距 f_0 /cm	55	60	65	70
PhET 所得 b 值/cm	11	13	15	17
$b \times 0.1$ /cm	1.1	1.3	1.5	1.7
利用对照表 1 所得 焦距 $f \times 0.1$ /cm	5.52	5.93	6.40	6.96
焦距 f /cm	55.2	59.3	64.0	69.6
相对误差/%	0.36	1.2	1.5	0.57

虚拟实验所测结果与实际数值之间的相对误差在 $0.36\% \sim 1.5\%$ 之间, 据分析误差主要源自两个方面: 一方面, 在制作对照表格时, b 值间距选取不够小, 针对该误差可采取的方法是将 b 值进一步细分; 另一方面, 刻度尺估读时产生的误差。图 6 为运用 GeoGebra Classic 6 绘制的 $b-f$ 图像。

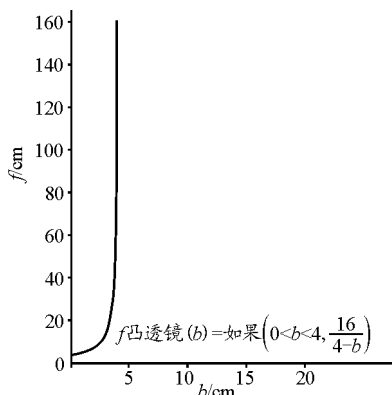


图 6 运用 GeoGebra Classic 6 所绘图像

通过运用 GeoGebra Classic 6 所绘制的横轴为 b 值, 纵轴为焦距 f 的凸透镜 $b-f$ 图像可以清晰地看到, 当 b 值越接近 4 cm 时, 图像斜率越大, 焦距 f 变化越快。

5 结束语

本文设计了一种可作为焦距尺直接读取透镜焦距的装置, 结合 PhET 虚拟实验室, 促进物理实验与信息技术相结合。在实验中学生初识 phyphox、GeoGebra Classic 等现代物理工具, 初步学会运用 GeoGebra Classic 等软件进行数据分析、图像绘制, 可以为日后的科学研究工作打下基础, 引导学生利用日常生活用品比如废弃纸箱等环保材料制造实验仪器, 用该装置所测焦距代入 $\Phi = \frac{1}{f}$ 也可用于测量学生眼镜度数, 在进行绿色化实验的同时密切关注物理同生活的联系。此外, 该实验涵盖了数学相似性知识, 可转化为数学物理问题培养学生跨学科解决问题的能力, 对学生创新实践能力的提升起着积极引导作用。

参考文献

- [1] 北京大学历史系《论衡》注释小组. 论衡注释[M]. 北京: 中华书局, 1979.
- [2] 王战先. 透镜焦距求法集锦[J]. 物理教师, 1995(1): 44-46.
- [3] M. 波恩, E. 沃耳夫. 光学原理[M]. 杨葭荪, 等译. 北京: 科学出版社, 1978: 215-219.
- [4] 陈舟, 倪敏. 平凸透镜焦距的测量与研究[J]. 物理通报, 2018(4): 71-75, 78.
- [5] 童朝阳, 董勇, 钟旭英, 等. 一种新的凸透镜焦距测量方法[J]. 物理通报, 2022(S1): 100-101, 111.
- [6] 杨俊义, 沙金巧, 樊丽娜. 一种精确测量薄凸透镜焦距的实验方法[J]. 物理教师, 2020, 41(10): 55-56.
- [7] 陶扬, 王玉婷, 邢红军. 中学物理课程数字资源简介[J]. 物理教师, 2022, 43(11): 75-78, 81.