

一组有关光学的研究性实验

邓锂强 梁一机

(广东石油化工学院 理学院 广东 茂名 525000)

(收稿日期:2015-05-19)

摘要:设计了一组符合理论—实验—理论的认识过程的有关光学的研究性实验.该实验要求学生设计出出色散对透镜焦距的影响的实验,测量出透镜在不同色光下的焦距,研究测量的数据与理论的不符合的原因.

关键词:理论—实验—理论 研究性实验 色散 焦距 色差

1 引言

高等教育是以创新教育为核心、以培养创新精神和能力为基本价值取向的教育,是培养创新人才的教育.大学物理实验课作为一门全校公共基础实验课,其涉及的学生面最广,这对全面培养和提高大学生的创新精神和创新能力具有很现实的教学基础,物理实验教学理应成为培养学生创新能力的重要环节^[1~3].

物理实验大都是先阐明物理原理,从理论上解释实验内容及实验方法,再介绍实验仪器,然后利用实验仪器完成实验测量.包括很多的设计性实验也是按这种形式完成的,只不过是实验原理、步骤等需要学生自己完成.这些实验的本质是从理论—实践的认识过程,是一种理论指导实践的验证性过程.在物理的发展史上,很多研究是从实验—理论的,遵循从理论—实验—理论的螺旋式上升的认识过程.这样的认识过程更符合大多数的自然科学发展规律,更有利于培养学生创新能力.

本文设计了一组符合理论—实验—理论的认识过程的有关光学的研究性实验,来培养学生的创新能力.这个实验是在学生经过一定的实验训练后,已经具有一定的实验技能,作为设计性实验开设.实

验要求是:

(1) 理论—实验.要求学生设计出研究色散对透镜焦距影响的实验方案,在实验室测量透镜在不同色光下的焦距.

(2) 实验—理论.由于测量数据与理论的不符合,在教师的提示下,回去查阅给出的参考资料,研究出现这种现象的理论.下面介绍具体的设计要求.

2 色散对透镜焦距的影响

2.1 透镜焦距计算公式

透镜是由两个折射球面组成的光具组,两球面间是构成透镜的介质,其折射率记作 n_L ,透镜前后介质的折射率(物方折射率和像方折射率)分别记作 n 和 n' .在薄透镜中,两球面顶点几乎重合为一点,这个点叫透镜的光心 O .薄透镜的物距 s 和像距 s' 都从光心 O 算起.可推导出薄透镜的焦距公式^[4]

$$f = \frac{n}{\frac{n_L - n}{r_1} + \frac{n' - n_L}{r_2}}$$

$$f' = \frac{n'}{\frac{n_L - n}{r_1} + \frac{n' - n_L}{r_2}} \quad (1)$$

其中 r_1 和 r_2 分别为薄透镜的两折射球面的曲率半径.在物方和像方的介质都是空气时, $n = n' \approx 1$,

由式(1)可得

$$f = f' = \frac{1}{(n_L - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (2)$$

式(2)给出薄透镜焦距与折射率、曲率半径的关系,称为磨镜者公式.

2.2 光的色散

一种介质的折射率将随波长而改变,这一现象称为色散.测量不同波长的光线对过棱镜的最小偏向角,就可以算出棱镜材料的折射率 n 与波长 λ 之间的关系曲线 $n(\lambda)$,即色散曲线.凡在可见光范围内无色透明的介质,它们的色散曲线形式上很相似,对于短波紫光的 n 值大,对于长波红光的 n 值小,且下降率在短波一端更大,这种 $n(\lambda)$ 随波长增加而减少的现象称为正常色散,如图1所示^[4~6].

科西给出了一个正常色散的经验公式^[4,6]

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (3)$$

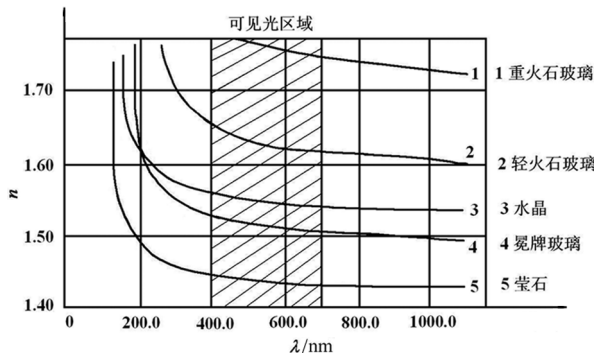


图1 几种光学材料的色散曲线

其中3个系数(A,B,C)决定于介质,它们可由3条谱线($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)对应的3个折射率(n_1, n_2, n_3)所形成联立方程解出.当 λ 变化范围不大时,科西公式可只取前两项,即

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (4)$$

表1给出一些典型光学玻璃的折射率随波长变化的数据^[4],其中谱线用的是太阳光谱中的夫琅禾费特征.

表1 典型光学玻璃的色散

谱线 λ/nm	冕牌玻璃 (K9)	轻火石玻璃 (QF3)	钡火石玻璃 (BaF1)	重火石玻璃 (ZF1)
H(蓝)404.7	1.52982	1.59968	1.56553	1.68229
G(青)435.8	1.52626	1.59280	1.56080	1.67245
F(青绿)486.1	1.52195	1.58481	1.55518	1.66119
E(绿)546.1	1.51826	1.57832	1.55050	1.65218
D(黄)589.3	1.51630	1.57490	1.54800	1.64750
C(橙红)656.3	1.51389	1.57089	1.54502	1.64207
A' (红)766.5	1.51104	1.56638	1.54160	1.63609

2.3 色散对薄透镜焦距的影响

由式(2)、(4)可得

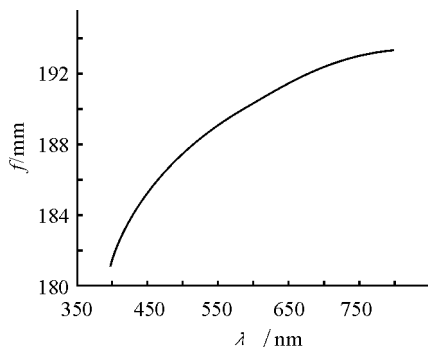
$$f = f' = \frac{1}{\left[\left(A + \frac{B}{\lambda^2} \right) - 1 \right] \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (5)$$

可见薄透镜的焦距随着入射光波长 λ 增加而增

加.例如,一个由轻火石玻璃制作透镜,当入射光为钠光D线时,其焦距为190.00 mm.当入射光波长 λ 变化时,其焦距可按磨镜者公式(2),根据表1的数据计算得到,其中汞(黄)线577.0 nm的焦距采用内插法得到,如表2所示,其 $f-\lambda$ 曲线如图2所示.

表2 不同色光下透镜焦距的理论值

谱线 λ/nm	H(蓝)404.7	G(青)435.8	F(青绿)486.1	E(绿)546.1	汞(黄)577.0	D(黄)589.3	C(橙红)656.3	A' (红)766.5
焦距 /mm	182.15	184.26	186.78	188.88	189.68	190.00	191.33	192.86

图2 透镜的 $f-\lambda$ 理论值曲线图

3 薄透镜焦距的测量

对于凸透镜焦距的测量,实验室一般采用误差较小的二次成像法测量^[7,8].要求学生采用二次成像法测量焦距标称值为190.00 mm的凸透镜焦距.光源采用光电效应实验用的GGQ-50WHg型高压汞灯,通过NG型滤色片滤光得到单色光,其透射的

波长分别为365.0 nm,404.7 nm,435.8 nm,546.1 nm和577.0 nm.使用时,将滤光片插在汞灯的出口,可获得对应的单色光.

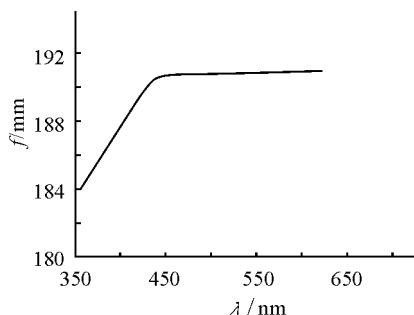
首先调节光具座上各元件等高同轴,再使物与像屏之间的距离 $L > 4f$ 且保持不变.换上波长为577.0 nm的滤光片,使凸透镜在此范围内移动,可以在像屏上观察到一个清晰的放大像和一个清晰的缩小像.反复移动透镜并仔细观察,至像最清晰时读数,测出两次成像透镜所移动的距离 d ,此时凸透镜的焦距

$$f = \frac{L^2 - d^2}{4L} \quad (6)$$

重复测量多次,取平均值,得到此波长对应的焦距 f .再换上波长为365.0 nm,404.7 nm,435.8 nm,546.1 nm的滤光片,测量对应的凸透镜的焦距,如表3所示,其 $f-\lambda$ 曲线如图3所示.

表3 不同色光时透镜焦距的实测值

谱线 λ/nm	H(紫) 365.0	H(蓝) 404.7	G(青) 435.8	E(绿) 546.1	汞(黄) 577.0
焦距 /mm	184.39	187.24	190.23	190.29	190.43

图3 透镜的 $f-\lambda$ 实测值图

从图3可见,在波长在365.0~435.8 nm范围内,透镜的焦距明显改变,与理论值相符.在波长435.8~577.0 nm范围内,凸透镜的焦距只在小范围内变动,可看作基本不变,这与如图2所示的变化趋势明显不同.为什么凸透镜焦距的实测值与理论值相差这么大呢?这里要求学生按教师给出的提示及参考资料,研究凸透镜焦距的实测值与理论值相差很大的原因.

4 色差的产生及消除

折射率 n 是波长 λ 的函数,当透镜成像时将产生色差^[4,9].如图4所示,由于折射率随颜色而变,不同颜色的光所成的像,无论位置和大小都可能不同,前者称为位置色差,后者称为放大率色差.

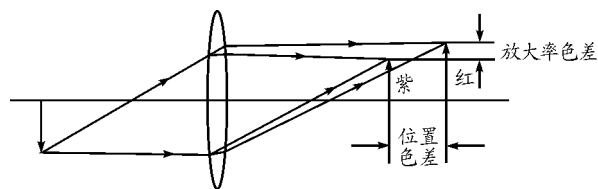


图4 色差

4.1 双胶合透镜消色差

单个薄透镜的色差是难以消除的,但将一对用不同材料做成的凹、凸透镜如图5黏合起来,可以对选定的两种波长消除色差^[4,9].

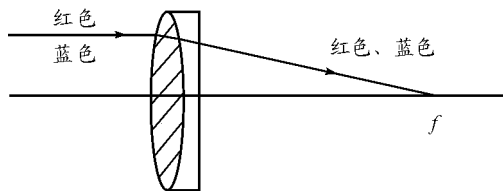


图5 胶合透镜

根据磨镜者公式(2),两透镜的光焦度可分别写成

$$P_1 = \frac{1}{f_1} = (n_1 - 1) K_1$$

$$P_2 = \frac{1}{f_2} = (n_2 - 1) K_2$$

其中

$$K_1 = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}$$

$$K_2 = \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3}$$

是与波长无关的常量.两透镜黏合起来的光焦度为

$$P = P_1 + P_2 = (n_1 - 1) K_1 + (n_2 - 1) K_2$$

对于目视光学仪器,通常在眼睛最敏感的波长555.0 nm 两侧各选一波长来消除色差,分别是氢光谱中的C线(656.3 nm,红色)和F线(486.1 nm,蓝色).胶合透镜对两个波长的光焦度分别为

$$P_C = (n_{1C} - 1) K_1 + (n_{2C} - 1) K_2$$

$$P_F = (n_{1F} - 1) K_1 + (n_{2F} - 1) K_2$$

只要适当地选择曲率半径 r_1, r_2, r_3 ,使 K_1 和 K_2 满足

$$P_F - P_C = (n_{1F} - n_{1C}) K_1 + (n_{2F} - n_{2C}) K_2 = 0 \quad (7)$$

对C线和F线的焦距色差即可消除.由于一般折射率随波长而减小

$$n_{1F} - n_{1C} > 0$$

$$n_{2F} - n_{2C} > 0$$

故满足上式的 K_1 和 K_2 正负号必相反,即只有一个凹透镜和一个凸透镜黏合起来,才能消除色差.

4.2 同材料双透镜消除色差

当光具组由两个材料相同的薄透镜组成,它们

之间相隔一定距离 d ,此时透镜的光焦度为^[4,9]

$$P = P_1 + P_2 - P_1 P_2 d =$$

$$(n - 1) (K_1 + K_2) - (n - 1)^2 K_1 K_2 d$$

取对折射率 n 的导数

$$\frac{dP}{dn} = K_1 + K_2 - 2(n - 1) K_1 K_2 d$$

由极值条件

$$\frac{dP}{dn} = 0$$

得

$$d = \frac{K_1 + K_2}{2(n - 1) K_1 K_2} = \frac{P_1 + P_2}{2 P_1 P_2} = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (8)$$

相同材料的两薄透镜,当其间距 d 等于两透镜焦距(对某波长 λ 而言)之和的一半时,便可对 λ 附近色光消除色差^[4,9,10].目镜多由这样的透镜组构成.

4.3 折衍混合单透镜消色差

目前,有光学研究人员进行二元光学透镜的色差校正研究.由包括如透镜、棱镜、反射镜等传统光学器件和含有全息光学器件(HOE)、衍射光学透镜(DOE)等衍射光学器件组成的系统,通常被称为折衍混合光学成像系统.这样的系统同时利用了光的传播中的折射和衍射两种特性,具有独特的色散性质及单色像差校正能力.在混合成像系统中,衍射光学透镜独特的色散特性可用于消色差^[11~13].

4.4 凸透镜焦距的实测值与理论值不符的原因

波长在435.8~577.0 nm 范围内,凸透镜的焦距基本不变,是因为透镜已经在眼睛最敏感的波长555.0 nm 两侧消除色差,因此测出的焦距基本相等.不过透镜消色差的范围是有限的,超出一定范围后,透镜消色差效果消失,因此波长在365.0~435.8 nm 范围内,透镜的焦距随着入射光波长 λ 增加而明显增加.

5 结束语

学生在做这个研究性实验时,先按设计要求,从

理论—实验,设计出研究色散对透镜焦距的影响的实验方案,在实验室测量凸透镜在不同色光下的焦距,会惊讶地发现焦距的变化与理论不一致.学生的第一反应是数据测量有误,但在教师的提示下,回去查阅给出的参考资料,通常能找出问题的原因.这样就培养了学生尊重实验数据思想,实现由实验—理论的研究过程,有效地培养学生的创新能力.

参考文献

- 1 刘海霞. 物理实验与培养学生创新能力的思考与实践. 实验室研究与探索, 2009, 28(7): 12 ~ 13
- 2 王铁云. 改革物理实验教学模式—培养学生创新能力. 实验室研究与探索, 2007, 26(8): 6 ~ 8
- 3 刘燕, 胡经国, 周岚. 基础物理实验与设计性实验衔接的探究与实践. 大学物理, 2008, 27(7): 34 ~ 35
- 4 赵凯华. 新概念物理教程(光学). 北京: 高等教育出版社, 2004. 14, 46 ~ 48, 343 ~ 345
- 5 袁冬媛, 徐富新. 大学物理实验教程. 长沙: 中南大学出

- 版社, 2002. 289 ~ 290
- 6 钟锡华. 现代光学基础. 北京: 北京大学出版社, 2003. 440 ~ 443
 - 7 张昌莘, 王德明, 方运良. 三级物理实验教程. 北京: 化学工业出版社, 2010. 79 ~ 81
 - 8 周殿清. 大学物理实验. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. 223 ~ 226
 - 9 林强, 叶兴浩. 现代光学基础与前沿. 北京: 科学出版社, 2010. 33 ~ 35
 - 10 侯保才. 惠更斯目镜消色差浅析. 开封教育学院学报, 1998(3): 47 ~ 48
 - 11 赵丽萍, 邬敏贤, 金国藩, 等. 衍射混合单透镜的色球差校正研究. 光子学报, 1998, 18(5): 621 ~ 626
 - 12 张国平, 叶嘉雄, 李再光. 衍射透镜的色散分析. 光电工程, 1997, 24(2): 23 ~ 26
 - 13 张国平, 李丽华, 叶嘉雄, 等. 二元光学在透镜设计中的应用. 华中理工大学学报, 1996, 24卷增刊(II): 97 ~ 99

A Set of Relevant Optical Research Experiments

Deng Liqiang Liang Yiji

(College of Science, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525000)

Abstract: The research experiment which consistent with the process of the cognition of from theory to experiment to theory is designed. The experiment requires students to design an experiment of the effects of dispersion on the focal length of lens, measure the focal length of lens in different color of light, study the reasons for the measured and the theoretical data does not conform.

Keywords: theory to experiment to theory; research experiment; dispersion; focal length; chromatic aberration

