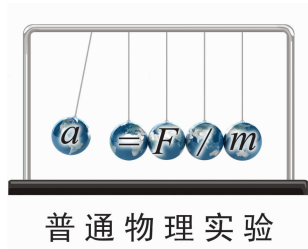


文章编号:1005-4642(2023)01-0023-05



四游标分光计的设计与实验教学应用

樊代和^{a,b}, 魏 云^{a,b}, 常相辉^{a,b}, 刘其军^{a,b}, 贾欣燕^{a,b}
(西南交通大学 a. 物理科学与技术学院;
b. 物理国家级实验教学示范中心, 四川 成都 611756)

摘 要:为丰富基于分光计的大学物理实验课程教学内容,设计并制作了四游标分光计. 该分光计以位置可固定的刻度盘的刻度线为基准,其中 1 对游标用于实现准直管旋转角度的精确测量,另 1 对游标用于实现望远镜旋转角度的精确测量. 以三棱镜折射率的精确测量为例,详细给出了四游标分光计的使用方法及操作步骤,测量得出低压汞灯绿色谱线在 ZF1 重火石玻璃材质中的折射率 $n=1.654\ 4\pm 0.000\ 7$,实验结果与理论值相符.

关键词:分光计;四游标;折射率;偏向角

中图分类号:O435.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.01.004

分光计是可精确测量角度的光学仪器. 1814 年,世界上首台分光计(结构仅包含准直管、三棱镜和望远镜)由德国物理学家约瑟夫·冯·夫琅禾费(Joseph von Fraunhofer)通过观察太阳暗线设计而成. 分光计可广泛应用于光谱^[1]、折射率^[2]、光波波长^[3]等光学参量的测量. 随着分光计结构越来越完善,基于分光计开展的实验项目也越来越多,例如三棱镜顶角和折射率的测量、光栅常量的测量等^[4-7].

目前,国内物理实验教学仪器仍以双游标结构的分光计(图 1 和图 2)为主. 双游标分光计的机械结构主要包含支撑底座、望远镜、载物台(含载物盘)、刻度盘、游标盘和准直管(含狭缝),在进行部件加工和装配时,由于刻度盘和游标盘中心轴不能共心,因此在游标盘沿某一直径的对称位置分别设置了 2 个游标以消除偏心差. 这种传统结构的分光计可实现望远镜和刻度盘保持联动,以及载物台和游标盘保持联动的功能. 在双游标设计结构下,当固定载物台和游标盘(望远镜和刻度盘)时,望远镜和刻度盘(载物台和游标盘)保持联动,此时望远镜(载物台)转过的角度可用刻度盘上的刻度线和游标盘上的游标线进行测量.

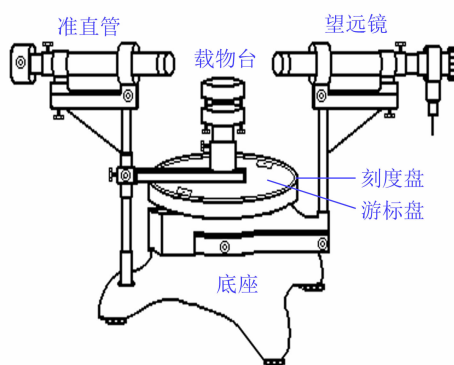
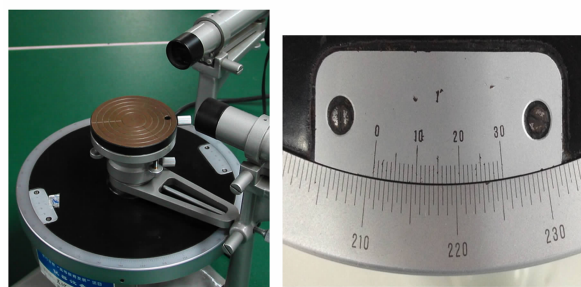


图 1 双游标分光计结构示意图



(a)实物图

(b)游标放大图 1

图 2 传统的双游标分光计

收稿日期:2022-07-22;**修改日期:**2022-09-27

基金项目:教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会 2020 年高等学校教学研究项目(No. DJZW202036xn);西南交通大学实验教学研究项目(No. 20221106, No. 20222417);四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(No. JG2021-246)

作者简介:樊代和(1981—),男,山西河曲人,西南交通大学物理科学与技术学院副教授,博士,研究方向为量子光学及大学物理实验教学. E-mail:dhfan@swjtu.edu.cn

近年来,关于分光计结构的改进主要集中在信息化技术方面.例如,利用光电编码器实现分光计读数系统的数字化^[8],利用 OpenGL 编程设计虚拟分光计^[9],等等.其中,苏学军等人以分光计为例,介绍了三维仿真技术在实验物理教学中的应用^[10].在硬件建设方面,孙存英等人从大学物理实验课堂教学出发,提出了大口径分光计的制作^[11].但是,传统双游标结构分光计,由于准直管被固定在底座上,从而无法实现绕中心轴转动,且由于准直管是分光计的光源部分,这对需要精确测量光线经过被测介质后,出射角随入射角变化关系的相关实验研究具有较大影响.尽管在需要改变入射光线与被测光学元件之间角度的实验中,可以通过旋转游标盘实现,但是游标盘一旦发生旋转,会导致与望远镜保持联动的刻度盘的初始位置发生改变,从而额外引入望远镜旋转角度的测量误差,不利于研究出射光线的角度变化情况.

基于上述问题,本文设计并制作了四游标分光计,并委托长春禹衡时代光电科技有限公司制作样机.制作出的新型分光计有利于解决上述实验测量过程中遇到的实际困难,进一步丰富大学物理实验课程中基于分光计实验仪器而开展的物理量测量相关教学内容.

1 四游标分光计的机械结构设计

四游标分光计的结构设计图如图 3 所示,实物图如图 4 所示.

四游标分光计与传统双游标分光计相比具有以下功能和特点:

1)在望远镜游标盘 21 和准直管游标盘 14 的某一直径位置各设置 1 对游标,以消除测量过程中的偏心差,即该分光计共设置有 4 个游标;

2)载物台 12 绕中心轴的旋转,可通过锁紧螺钉 16 实现与刻度盘 20 保持联动状态;

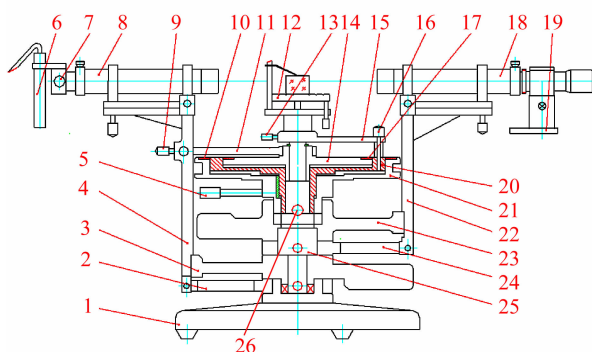
3)望远镜 18 绕中心轴的旋转,可通过锁紧螺钉 26 实现与游标盘 21 保持联动状态;

4)准直管 8 绕中心轴的旋转,可通过锁紧螺钉 9 实现与游标盘 14 保持联动状态;

5)为了使准直管 8 可以绕中心转轴旋转,在传统分光计狭缝结构的上面,增加了可放置光源(如笔形汞灯)的结构,对应图 3 中的数字符号 7;

6)为了使望远镜 18 的光源部分经久耐用,将

传统变压器供电方式改进为纽扣电池供电方式,对应图 3 中的数字符号 19.



- 1.底座 2.准直管锁紧架(含微调) 3.准直管旋转座
- 4.准直管支架 5.刻度盘锁紧螺钉 6.光源(笔形汞灯,可固定于狭缝 7 前) 7.可调狭缝 8.准直管
- 9.准直管与游标盘锁紧螺钉 10.望远镜游标 11.准直管游标盘锁紧架 12.载物台 13.载物台锁紧螺钉
- 14.准直管游标盘 15.刻度盘锁紧架 16.刻度盘与载物台联动锁紧螺钉 17.准直管游标 18.望远镜
- 19.纽扣电池开关 20.刻度盘 21.望远镜游标盘
- 22.望远镜支架 23.望远镜旋转座 24.望远镜锁紧架(含微调) 25.中心转轴 26.望远镜与游标盘锁紧螺钉

图 3 四游标分光计的结构设计图



(a)实物图



(b)游标放大图 2

图 4 四游标分光计实物图和游标放大图

因此,当被测光学元件放置于四游标分光计的载物台上,并保持载物台与刻度盘位置固定(作为基准),且准直管与游标盘 14 保持联动、望远镜与游标盘 21 保持联动时,就可以分别利用 1 对游标对准直管和望远镜的旋转角度进行精确测量.

下面以“三棱镜顶角和折射率测量实验”为例,说明四游标分光计的实验方法和操作步骤.

2 四游标分光计在实验教学中的应用

在“三棱镜折射率的测量”实验中,若采用传统双游标分光计,由于准直管(即光源部分)被固定,因此通常需要经过 2 次独立测量才能实现:首先,利用自准直法或分光束法完成三棱镜顶角的测量;然后,利用最小偏向角法或掠入射法完成最小偏向角或掠入射出射角的测量;最后,计算出三棱镜的折射率.若采用四游标分光计,则可一次性完成以上测量,而且还可以进一步探究入射光线和出射光线之间的夹角变化情况.

图 5 为利用四游标分光计开展“三棱镜偏向角随入射角变化”实验的原理图.具体的实验测量步骤如下:

1) 利用传统分光计的调节方法,使望远镜光轴和中心转轴垂直,载物盘盘面和中心转轴垂直.此时,设置载物台和刻度盘保持联动,准直管与游标盘 14 保持联动,望远镜与游标盘 21 保持联动.

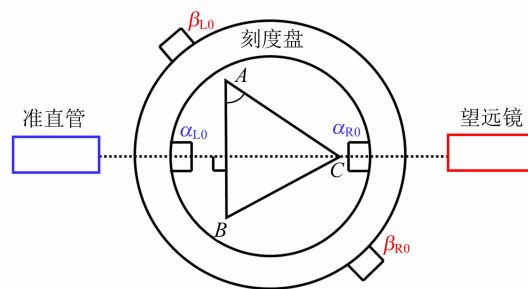
2) 在载物台上放置被测三棱镜,用望远镜的目镜替换准直管的狭缝.旋转载物台(刻度盘),使三棱镜 AB 面与准直管的光轴垂直,如图 5(a) 所示.锁紧刻度盘,并以刻度盘上的刻度为基准,记录准直管游标盘上 2 个游标的角坐标 α_{L0} 和 α_{R0} ,以及望远镜游标盘上 2 个游标的角坐标 β_{L0} 和 β_{R0} .

3) 将目镜重新装回望远镜筒,狭缝重新装回准直管,再按照传统分光计的调节方法,使准直管出射平行光,望远镜接收平行光.

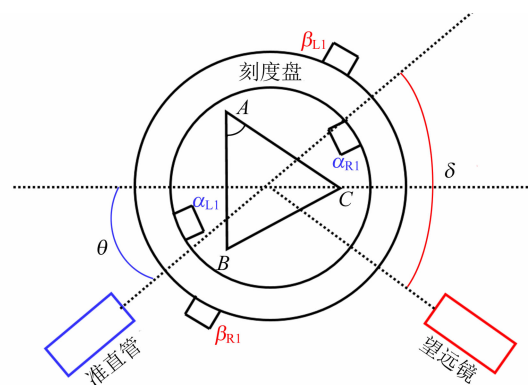
4) 如图 5(b) 所示,逆时针旋转准直管,顺时针旋转望远镜,使望远镜对准折射光线,并记录准直管旋转后 2 个游标的角坐标 α_{L1} 和 α_{R1} ,以及望远镜游标盘上 2 个游标的角坐标 β_{L1} 和 β_{R1} .

经过上述实验步骤后,即可得到光线在三棱镜处的入射角(消除偏心差后)为

$$\theta = \frac{|\alpha_{L1} - \alpha_{L0}| + |\alpha_{R1} - \alpha_{R0}|}{2}, \quad (1)$$



(a) 仪器的初始位置



(b) 仪器旋转后的相对位置

图 5 三棱镜折射率测量原理示意图

经三棱镜折射后的光线偏向角(消除偏心差后)为

$$\delta = \frac{|\beta_{L1} - \beta_{L0}| + |\beta_{R1} - \beta_{R0}|}{2} + \theta. \quad (2)$$

再根据三棱镜的折射定律,入射光线经三棱镜折射后,偏向角随入射角变化的理论关系为^[12]

$$\delta = \arcsin \left\{ n \sin \left[A - \arcsin \left(\frac{\sin \theta}{n} \right) \right] \right\} - A + \theta, \quad (3)$$

其中, n 为入射光在三棱镜中的折射率, A 为三棱镜的顶角.

通过重复实验步骤 4), 不仅可以得到偏向角随入射角的变化关系, 还可以从该曲线中直接获得被测三棱镜的顶角及折射率.

依照上述实验方法和步骤, 以低压汞灯的绿色谱线($\lambda = 546.07 \text{ nm}$) 为例, 测量了由 ZF1 重火石玻璃制作而成的三棱镜的偏向角随入射角的变化关系曲线, 结果如图 6 所示. 图 6 中的蓝色实线为利用式(3)对实验数据进行最小二乘法拟合得到的结果. 从图 6 中可以看出, 实验数据和理论曲线吻合较好, 且通过拟合曲线可以得到汞灯绿色谱线在三棱镜中的折射率 $n = 1.6544 \pm$

0.000 7,三棱镜顶角 $A=59^{\circ}51' \pm 2'$,二者的相对不确定度分别为 4.2×10^{-4} 和 5.6×10^{-4} ,说明四游标分光计测量数据的可靠性.另外,由于低压汞灯绿色波长谱线在 ZF1 重火石玻璃中的折射率为 $n_t=1.655\ 34^{[13-14]}$,因此利用四游标分光计,通过偏向角和入射角之间关系计算得到的折射率与理论值的相对误差 $E_r=0.57\%$,进一步证明了四游标分光计测量数据的准确性.

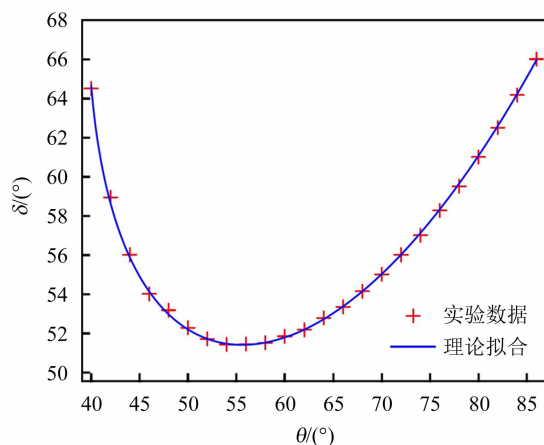


图 6 偏向角随入射角的变化关系图

3 结束语

本文设计并制作了具有四游标结构的新型分光计.其中,1对游标设置于准直管右边盘的直径对称位置,另1对游标设置于望远镜游标盘的直径对称位置,且载物台可与刻度盘保持联动状态.利用该结构的光学仪器,可以更方便地研究光线经过被测光学介质后,出射角随入射角的变化关系.在此基础上,以“三棱镜顶角及折射率的测量实验”为例,给出了四游标分光计的具体测量方法及步骤,完成了低压汞灯绿色波长谱线在 ZF1 重火石玻璃中折射率的测量.实验结果表明:利用四游标分光计,可精确测量三棱镜的折射率及顶角值.另外,四游标分光计除了可用于三棱镜折射率的精确测量外,还可用于探究光线斜入射(非正入射)到光栅时,出射角度随入射角度

的变化关系,以及数控机床刀具微小形变导致的加工误差等研究.因此,本文设计制作的四游标分光计不仅能够丰富大学物理实验课程的教学内容,同时还能在工程技术领域的相关测量分析中发挥作用.

参考文献:

- [1] 丁又也,张三军,尹亚玲.钠原子 s、p 能级量子缺的普通物理实验粗测法[J].大学物理,2021,40(12):62-66,73.
- [2] 孟赞,闫宝罗,樊代和,等.三棱镜折射率的精确测量[J].激光与光电子学进展,2017,54(12):191-197.
- [3] 从守民,袁广宇,杨保华.在分光计上做双棱镜干涉实验[J].物理实验,2008,28(12):36-37.
- [4] 樊代和.大学物理实验数字化教程[M].北京:机械工业出版社,2020:94-101.
- [5] 张映辉.大学物理实验[M].北京:机械工业出版社,2018:121-125.
- [6] 刘跃,张志津.大学物理实验[M].北京:北京大学出版社,2010:161-170.
- [7] 郝晓辉,郭伟华,张庆荣.普通物理实验[M].北京:高等教育出版社,2017:204-208.
- [8] 范淑媛,熊永红.分光计的数字化改造[J].实验室研究与探索,2011,30(9):234-236.
- [9] 侯冬曼,陈武喝,马佳洪.基于 OpenGL 的虚拟仿真实验设计[J].实验室研究与探索,2019,38(6):89-92.
- [10] 苏学军,张纪磊,邢红宏,等.分光计三维仿真实验设计[J].实验技术与管理,2015,32(5):115-119.
- [11] 孙存英,王宇兴,王锦辉,等.大学物理实验课堂教学探索[J].实验室研究与探索,2020,39(8):189-191.
- [12] 周凯宁,肖宁,陈棋,等.3种测量三棱镜折射率方法的对比[J].实验室研究与探索,2011,30(4):22-25,90.
- [13] 姚启均.光学教程[M].北京:高等教育出版社,2008:282-285.
- [14] 俞胜清,王峰,黄晓俊.重火石玻璃 ZF1 棱镜色散关系的测定[J].喀什师范学院学报,2010,31(3):44-46.

Design of four-vernier spectrometer and its application in experimental teaching

FAN Daihe^{a,b}, WEI Yun^{a,b}, CHANG Xianghui^{a,b}, LIU Qijun^{a,b}, JIA Xinyan^{a,b}

(a. School of Physical Science and Technology; b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In order to enrich the teaching content of college physics experiment course based on the spectrometer, a four-vernier spectrometer was designed and manufactured. With the help of division of the dials whose position could be fixed, one pair of verniers was used to accurately measure the rotation angle of the collimator, and the other pair of verniers was used to measure the rotation angle of the telescope. Taking the accurate measurement of the refractive index of the prism as an example, the methods and steps of the four-vernier spectrometer were given in detail. The refractive index of green spectral lines of low-pressure mercury lamp in ZF1 heavy flint glass was measured, that was $n=1.6544 \pm 0.0007$, and the experimental result was in agreement with the theoretical values.

Key words: spectrometer; four-vernier; refractive index; deflection angle

[责任编辑:郭伟]

(上接 16 页)

Design and implementation of optical standing-wave cavity experimental system

LI Linfan, WANG Jing, LI Yuyang, ZHOU Yuqi, NIU Yufan, ZHOU Haitao

(School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: An experimental system of standing-wave (SW) cavity with continuously adjustable cavity length was designed, which could realize the single-mode operation of standing-wave cavity. In order to help students easily understand the physical mechanism of longitudinal-mode resonance and the experimental method of transverse-mode mode-matching, the system was designed in an open manner. The length of SW cavity was designed to a continuous adjustment. By measuring the cavity transmission spectrum under the condition that the SW cavity changed from a confocal cavity to a near confocal cavity, the variation rules of parameters such as the free spectral region of the cavity, the linewidth of the cavity mode and the fineness with the cavity length were explored and analyzed, as well as the influence of the transmission loss of the cavity mirror on the experimental results.

Key words: standing-wave cavity; Fabry-Perot interference; eigenmode; mode matching

[责任编辑:任德香]