

文章编号: 1005-4642(2025)07-0043-05

基于面阵 CCD 的转镜法测光速实验

陆俊辰, 李朝希, 徐铖喆, 周伟杰, 杨智慧, 王晓峰

(武汉大学 物理科学与技术学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 基于几何光学原理, 利用普通物理实验室中常见的仪器和元件搭建转镜法测量光速的实验装置. 以高速旋转的反射镜为核心, 采用大焦距凸透镜+平面反射镜替换凹面反射镜, 降低了装置成本; 采用横置双电机, 提高了转动过程中装置的稳定性. 转镜法测量光速的实验装置较为简单, 可与传统的光拍法互为补充, 使学生学习和了解测量同一物理量的多种方法.

关键词: 光速; 转镜法; 几何光学; 面阵 CCD

中图分类号: O435

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.07.007

光速测量的历史最早可以追溯到 17 世纪, 彼时天文学家与物理学家普遍认为光速无限大, 伽利略为证明光速有限进行了实验, 但未能成功. 1679 年, 天文学家罗默利用木星掩食现象首次测出光速为 2.14×10^8 m/s^[1]. 1849 年, 物理学家斐索利用旋转齿轮法测得光速为 3.153×10^8 m/s^[1]. 1850 年, 傅科改进了斐索的方法, 利用转镜测量光速; 1862 年, 傅科改进了实验装置并且更精确地测量光速为 2.980×10^8 m/s^[2]. 1928 年, 迈克耳孙进一步改进傅科的实验, 测出光速为 $(3.00 \pm 0.05) \times 10^8$ m/s^[3]. 随着近代科学的发展, 越来越多的实验方法针对光速进行了更精确的测量, 如微波谐振腔法、微波干涉仪法等^[4]. 1983 年, 第 17 届国际计量大会通过了米的新定义^[5]: 1 m 等于光在真空中 $\frac{1}{299\,792\,458}$ s 的时间间隔内所经路径的长度.

在普通物理实验室中, 常用的光速测量方法是光拍法^[6]. 光拍法利用 2 束频率相近的光相叠加, 通过测量拍频波的拍频与波长来计算光速. 光拍法不仅需要利用声光晶体对光衍射产生频率相近的光, 还需要利用多重可移动反射镜产生近、远程光, 而且需要利用示波器对光拍进行分析, 实

验装置较为复杂, 并且成本较高.

转镜法测量光速仅依赖几何光学原理, 通过近代方法与现代实验仪器的结合, 实现光速的测量, 实验装置较为简单. 在普通物理实验室开展转镜法测量光速实验, 可与传统的光拍法互为补充, 使学生学习测量同一物理量的多种方法. 本文利用普通物理实验室中常见的实验室仪器(包括激光器、反射镜、透镜、电机、面阵 CCD 等), 搭建测量光速的实验装置, 光速测量偏差为 3.4%.

1 实验原理

转镜法测光速的实验原理^[7]如图 1 所示.

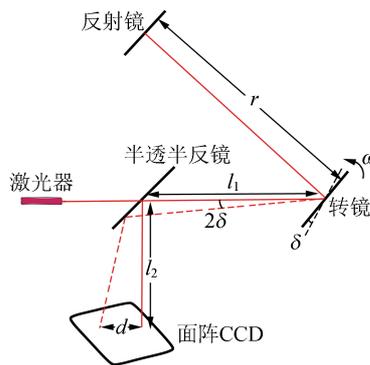


图 1 转镜法的原理示意图

收稿日期: 2024-08-02; **修改日期:** 2025-02-19

基金项目: 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会 2023 高等学校教学研究项目 (No. DJZW202329zn); 武汉大学本科教学质量建设综合改革项目 (No. 2025ZG111); 武汉大学实验技术项目 (No. WHU-2023-SYJS-14)

作者简介: 陆俊辰 (2004—), 男, 广西河池人, 武汉大学物理科学与技术学院 2022 级本科生. E-mail: logikalaxy@whu.edu.cn

通信作者: 王晓峰 (1979—), 男, 重庆涪陵人, 武汉大学物理科学与技术学院副教授, 博士, 主要从事普通物理和物理实验教学工作. E-mail: tulatin_wang@whu.edu.cn

由激光器发射的激光束经半透半反镜后照射转镜,光束经转镜反射至静止的反射镜后,再反射回转镜,此时转镜已转过微小角度 δ ,经转镜反射回半透半反镜的光束(图1中虚线)方向产生了 2δ 的偏转,在面阵 CCD 上的光斑相比转镜不动的情况将产生偏移量 d .

1.1 光路在同一平面内

设静止反射镜与转镜的距离为 r ,转镜到半透半反镜的距离为 l_1 ,半透半反镜到面阵 CCD 的距离为 l_2 ,转镜旋转的角速度为 ω ,频率为 f .若面阵 CCD 与实线所代表的光束垂直(即面阵 CCD 在半透半反镜中的虚像与激光器发出的光垂直),令 $l=l_1+l_2$,则

$$d=l \cdot 2\delta, \quad (1)$$

光在转镜与静止的反射镜之间往返的距离为 $2r$,因此光在转镜上2次反射的时间间隔为

$$\Delta t=2r/c, \quad (2)$$

转镜转过的角度可用频率表示为

$$\delta=\omega\Delta t=2\pi f\Delta t, \quad (3)$$

整理可得

$$\frac{f}{d}=\frac{c}{8\pi lr}. \quad (4)$$

将光斑位置用面阵 CCD 上的像素序号 p 表示,该面阵 CCD 1 pixel 的大小为 $2.9 \mu\text{m} \times 2.9 \mu\text{m}$,即像素宽度 $w=2.9 \mu\text{m}$,因此实际光斑位置为

$$d=wp. \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),得到

$$\frac{f}{p}=\frac{wc}{8\pi lr}, \quad (6)$$

表明 f 与 p 是线性关系.测量 f 与 p ,线性拟合得到斜率 k ,进而可计算光速为

$$c=\frac{8\pi lr}{w}k. \quad (7)$$

1.2 光路不在同一平面

光路产生变化的根本原因在于转镜,因此只需要画出转镜的光路图.图2为一般光路的空间示意图.为了更简明地阐述原理,图2中省略了表示转镜的平面,使用角速度与转镜平面的法向量来表示转镜的转动,认为转镜以 z 为轴旋转,光线从原点入射. z 轴方向为转镜角速度 ω 方向,则转镜平面的法向量 \hat{n} 将在 x - y 平面绕原点旋转. a 是与激光器入射转镜的光线(简称入射光线)共线的单位向量, b 是与在转镜与静止的反射镜之间反射的光线共线的单位向量, b^* 是 b 在 t

时刻的反射镜反射得到的向量,即 b 与 b^* 关于 \hat{n} 轴对称,如图2所示.令

$$b=\begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \\ \cos \gamma \end{pmatrix}, \hat{n}=\begin{pmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

则

$$b^*=2(b \cdot \hat{n})\hat{n}-b, \quad (9)$$

将式(8)代入式(9),得到

$$b^*=\begin{pmatrix} 2[\cos \alpha \cos(\omega t)+\cos \beta \sin(\omega t)]\cos(\omega t)-\cos \alpha \\ 2[\cos \alpha \cos(\omega t)+\cos \beta \sin(\omega t)]\sin(\omega t)-\cos \beta \\ -\cos \gamma \end{pmatrix}. \quad (10)$$

列出 b^* 端点的参数方程:

$$\begin{cases} x=2[\cos \alpha \cos(\omega t)+\cos \beta \sin(\omega t)]\cos(\omega t)-\cos \alpha, \\ y=2[\cos \alpha \cos(\omega t)+\cos \beta \sin(\omega t)]\sin(\omega t)-\cos \beta, \\ z=-\cos \gamma. \end{cases} \quad (11)$$

消去 t 得到

$$\begin{cases} x^2+y^2=\sin^2 \gamma, \\ z=-\cos \gamma. \end{cases} \quad (12)$$

式(12)是空间中圆的参数方程,可以看成是球面 $x^2+y^2+z^2=1$ 与平面 $z=-\cos \gamma$ 的截线,因此 b^* 的轨迹是圆锥.实验中调节 CCD 接收平面与 a 垂直,则 CCD 接收平面与该圆锥所截图形为椭圆,而频率为0对应的位置(即 a 的指向位置),恰好在椭圆长轴的端点上,此处是椭圆曲率最大处,对线性拟合的影响也最大.

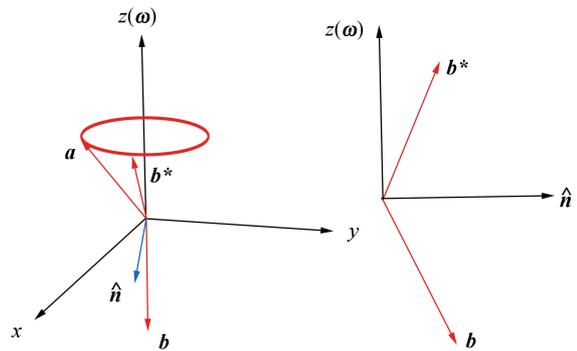


图2 一般光路的空间示意图

求 b^* 在 a 附近的偏移量,可对 b^* 进行微分,

$$db^*=2\omega dt \begin{pmatrix} -\cos \alpha \sin(2\omega t)+\cos \beta \cos(2\omega t) \\ \cos \alpha \cos(2\omega t)+\cos \beta \sin(2\omega t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

b^* 是单位向量,因此 $|db^*|$ 等于 dt 时间内向量 b^* 角度的偏移量,则在 Δt 时间内,角度偏移量可以表示为

$$\Delta\theta = 2\omega\Delta t \sin \gamma = 2\delta \sin \gamma, \quad (14)$$

γ 不仅表征 b 的 1 个方位角,还表征圆锥半顶角的大小,因此角速度方向与光路平面不垂直时,最终的偏移量含有 $\sin \gamma$ 修正因子,这对实验结果的影响非常大. 可将式(1)修正为

$$d = l \cdot 2\delta \sin \gamma, \quad (15)$$

当 $\gamma = 90^\circ$ 时,即入射光线 a 与角速度 ω 垂直时,式(15)退化为式(1).

2 实验

实验装置示意图如图 3 所示.

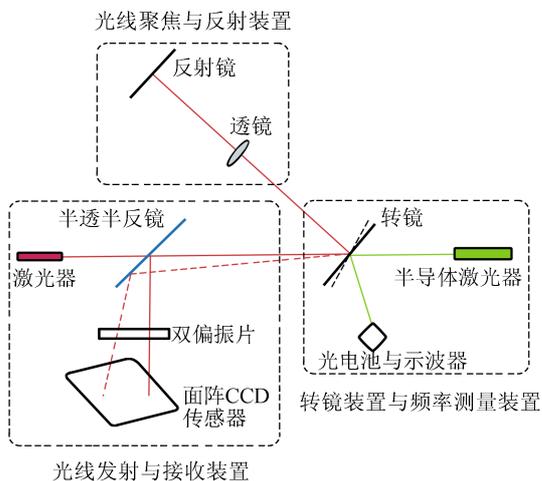


图 3 实验装置示意图

相较于图 1,对实验装置做以下改进:

1)加入大焦距凸透镜(焦距约 3 m). 由于激光器发出的光不是严格的平行光,实验中 l 与 r 较大,光束经过各反射镜反射后最终在面阵 CCD 处形成的光斑较大,以至于转镜静止时也难以判断光斑的位置. 另外,在转镜高速旋转时,由于光强的时间平均过低,导致面阵 CCD 无法有效测出光斑. 在转镜与静止的反射镜之间加入大焦距凸透镜,可以通过调节透镜的位置,使得会聚到面阵 CCD 上的光斑小且亮度高.

2)加入双偏振片. 加入大焦距透镜后,照射在面阵 CCD 上的光强过大导致 CCD 出现过曝. 在面阵 CCD 前加 2 块偏振片,通过调节偏振化方向的夹角能够有效调节光强,使 CCD 采集到合适强度的光斑图像.

3)加入转速/频率测量装置. 转镜旋转时将半导体激光器发出的光周期性反射到光电电池上,在与光电电池相连的示波器上可以读出频率 f .

实验步骤:

1)调节光路,使光线原路返回至激光器的出光孔.

2)在静止反射镜与转镜的光路上放置大焦距凸透镜,使光线在 CCD 上聚焦为一亮点,调节面阵 CCD 与光线垂直.

3)测量各距离参量后,启动转镜,调节光斑亮度,测量各转速下的光斑位置.

实验步骤 1)可保证转镜的角速度方向与入射光线保持垂直. 如实验原理所述,此时 $\sin \gamma = 1$,光斑位置散点图将会呈现更好的线性.

实验步骤 2)中调节面阵 CCD 与光线垂直,利用面阵 CCD 保护玻璃对光线的反射. 如图 4 所示,经过实验步骤 1)的调节,转镜上的入射光与反射光重合(为了方便说明,图 4 将入射光与反射光分开). 而激光器出射的部分光线被半透半反镜反射,在与面阵 CCD 相对的位置放置光屏,则该反射光在光屏形成光斑 1. 激光器出射的部分光线透过半透半反镜后经转镜反射至半透半反镜,再反射至面阵 CCD 后,由面阵 CCD 的保护玻璃反射,在光屏形成光斑 2. 调节面阵 CCD 的角度,使光斑 1 与光斑 2 重合,则面阵 CCD 与光线垂直.

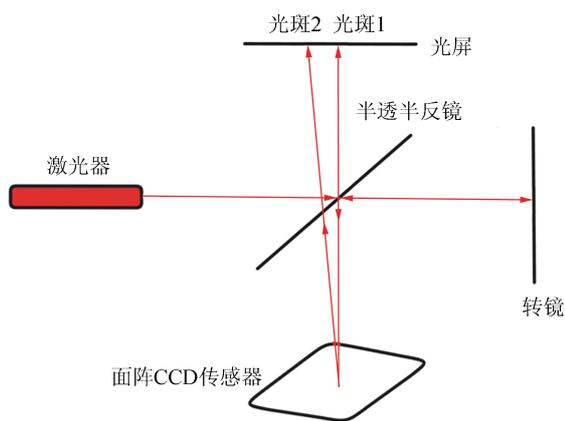


图 4 调节面阵 CCD 与光线垂直

实验步骤 3)中用马达带动转镜旋转,如果仅将转镜简单固定于转轴上,由于转镜重心通常不在转轴上,导致转镜高速旋转时,转轴受离心力影响,发生向垂直角速度方向的偏移,引起误差. 若

将转镜固定在 2 个转轴几乎在同一水平直线的电机上(图 5),即使转镜重心不在转轴上,也不会导致转镜反射光偏移.

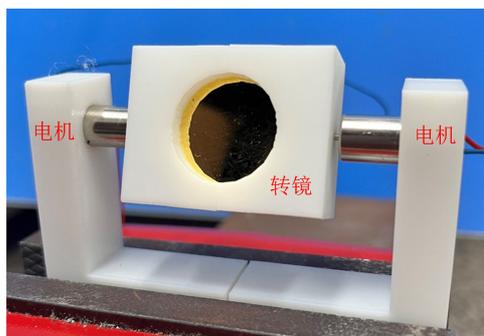


图 5 将转镜固定于 2 个转轴在同一水平直线的电机上

3 数据处理及分析

面阵 CCD 拍摄光斑后,利用 Origin 将拍摄的图像(图 6)转化为灰度图像,最后转化为矩阵,得到灰度(相对光强)分布图,并对灰度进行高斯拟合,如图 7 所示.



图 6 83.44 Hz 的光斑图像

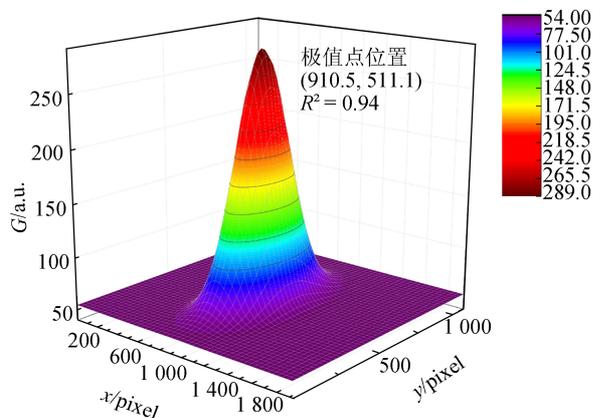


图 7 光强分布的高斯拟合

用高斯拟合的极值点位置表示光斑位置.对于给定的转镜频率 f ,面阵 CCD 可以拍摄一段视频,每隔几帧进行 1 次图像采样,得到上百幅图像,利用 Origin 批处理功能对其进行批量拟合,得到多个光斑位置数据,最后将这些位置取平均作为该频率下的光斑位置.

选取 40.30, 52.62, 63.31, 74.18, 83.44, 94.99, 105.23, 122.03 Hz 共 8 个频率,测量光斑位置,结果如表 1 所示.将表 1 的光斑位置以散点图的方式绘图,并进行线性拟合,如图 8 所示.拟合直线方程为 $y=2.0x-1355.3, R^2=0.996$.

表 1 频率与光斑位置实验数据

f/Hz	x/pixel	y/pixel
40.30	974.8	623.0
52.62	961.9	596.3
63.31	943.1	564.9
74.18	927.9	540.0
83.44	915.9	508.7
94.99	900.4	477.2
105.23	889.3	452.1
122.03	868.8	405.9

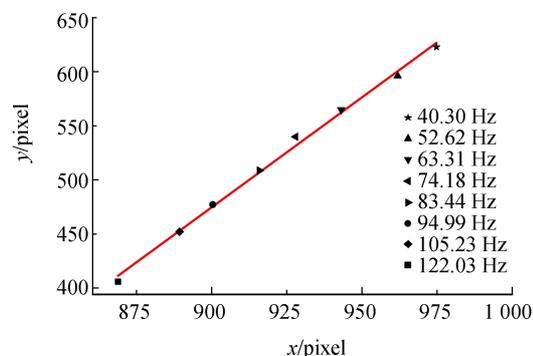
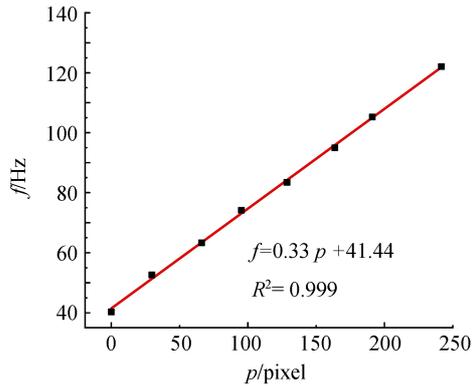


图 8 光斑位置的线性拟合

根据实验原理,光斑位置随频率的变动可以认为是在拟合直线上进行的,可以将光斑位置向拟合直线投影,以 40.30 Hz 的投影点为原点,拟合直线为坐标轴,得到与式(6)对应的等效像素序号 p ,频率 f 与像素序号 p 的数据如表 2 所示.将 f 与 p 绘制成散点图,并且线性拟合,如图 9 所示.拟合直线的斜率为 $k=(0.33\pm 0.01)$ Hz,置信度 $P=95\%$.实验中 $l=10.40$ m, $r=9.61$ m,测距仪的仪器误差为 0.01 m,单个像素的规格为 $2.9\ \mu\text{m}\times 2.9\ \mu\text{m}$,代入式(7),计算得到光速为 $c=(2.9\pm 0.1)\times 10^8$ m/s,相对偏差为 3.4%.

表2 f 和 p 的数据

f/Hz	p/pixel	f/Hz	p/pixel
40.30	0	83.44	128.6
52.62	29.7	94.99	163.7
63.31	66.1	105.23	191.1
74.18	95.2	122.03	241.6

图9 $f-p$ 的线性拟合

4 结束语

实验通过几何光学原理,利用高速旋转的反射镜实现了光速的测量,测量相对偏差为 3.4%。采用大焦距凸透镜+平面反射镜替换凹面反射镜,降低了装置成本;采用横置双电机提高了转动过程中装置的稳定性。激光器以及各反射镜所在的平台具有其本征振动模式,振动虽然微小,但随

着距离参量 l 与 r 的增大,本征振动引起光线微小的角度变化将被放大,在面阵 CCD 上看到的光斑图像将会发生抖动,距离参量越大,抖动越剧烈。除了减震,下一步实验还可以从提高马达转速(在保证稳定性的情况下)、增大转镜和静止反射镜的距离、减小 CCD 上光斑大小等方面着手提高测量精度。

参考文献:

- [1] 宁长春,冯有亮,文豪,等. 光速测定的历史概述[J]. 大学物理,2014,33(10):26-30.
- [2] FOUCAULT L. Détermination expérimentale de la vitesse de la lumière [J]. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, 1862,55:792-796.
- [3] MICHELSON A A. Experimental determination of the velocity of light [J]. Scientific Monthly, 1928, 27(6):562-565.
- [4] 沈乃激. 真空中光速的精密测量:长度单位米定义的基础[J]. 物理,2016,45(12):790-797.
- [5] 鲁绍曾. 第十七届国际计量大会通报[J]. 计量技术,1984(3):64.
- [6] 林伟华. 大学物理实验[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2023:364-367.
- [7] VÖRÖS Z, WEIHS G. Foucault's method for measuring the speed of light with modern apparatus [J]. European Journal of Physics, 2015, 36(3): 035013.

Measuring light velocity using a rotating mirror based on area-array CCD

LU Junchen, LI Zhaoxi, XU Chengzhe, ZHOU Weijie, YANG Zhihui, WANG Xiaofeng
(School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the principles of geometrical optics, an experimental setup for measuring the light velocity using common instruments and components found in a typical physics laboratory was constructed. Taking a high-speed rotating mirror as the core, the concave mirror was replaced by a large focal length convex lens and a plane mirror, the cost of the device was reduced. A horizontal dual-motor improved the stability of the device during rotation. The experiment setup for measuring light velocity based on the rotating mirror method was relatively simple and could complement traditional optical beat methods, allowing students to learn and understand various ways to measure the same physical quantity.

Key words: light velocity; rotating mirror method; geometrical optics; area-array CCD

[编辑:任德香]