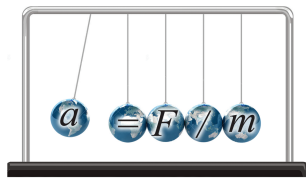


文章编号:1005-4642(2025)08-0010-05



普通物理实验

牛顿环干涉实验若干细节问题探究

翟立朋^{1a,1b},程琳²,高博^{1a,1b},张俊武^{1a,1b},张沛^{1a,1b}

(1. 西安交通大学 a. 物理学院;

b. 国家级物理实验教学示范中心(西安交通大学),陕西 西安 710049;

2. 西安工程大学 理学院,陕西 西安 710048)

摘 要:通过建立牛顿环干涉实验的数值仿真模型,分析了牛顿环干涉条纹的特性,探究了学生在理解牛顿环干涉实验现象的过程中可能存在的偏差. 结果表明:0 级暗纹的形状、条纹的宽度变化等,主要是由成像系统对亮、暗条纹的分辨阈值所导致,与透镜的挤压、光源的非单色性无关. 条纹的绝对级数无法确定主要是因为透镜与平板之间存在缝隙和灰尘污渍,当只存在灰尘污渍时可能会导致条纹混杂在一起、对比度下降,进而引起测量误差增大.

关键词:牛顿环;等厚干涉;Matlab 仿真

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.08.002

牛顿环干涉实验是大学物理实验课程中非常重要的项目^[1-2],也是新版《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2023 年版)^[3]给出的 50 个建议项目之一. 基于牛顿环干涉实验的应用和改进也是基础物理实验教学的热门研究之一^[8-10],因此频繁出现在大学生物理实验竞赛的命题类和自选类作品中^[4-7],自 2020 年以来,牛顿环干涉实验获得物理实验竞赛创新赛一等奖的数量超 30 项^[4-7],且呈逐年增加的趋势,说明该项目在基础物理实验教学领域具有重要地位. 然而,部分讲课类参赛作品对牛顿环干涉实验中一些细节问题的表述和解释存在偏差,例如中心暗斑形成的原因、干涉条纹的绝对级数为什么无法确定等,这说明教学过程中关于此类现象的解释可能没有形成完整的因果闭环.

本文通过建立牛顿环干涉的仿真模型,探究了牛顿环干涉实验中可能存在理解偏差的几个细节问题,解释了中央暗斑的形成原因、钠灯的非单色性对干涉条纹的影响以及影响干涉条纹级数不确定的主要因素. 本文通过建立仿真计算模型对干涉条纹特性进行分析,为牛顿环干涉实验教学提供了更充分的理论和模型依据.

1 牛顿环干涉的仿真模型

在大学物理实验教学场景中,一般使用钠灯作为干涉光源,将牛顿环放置在空气环境中,使用反射光形成干涉条纹.

图 1 为牛顿环干涉实验的理想模型,将平凸透镜放置在玻璃板上,在平凸透镜和玻璃板之间形成空气间隙,空气间隙的上下 2 个表面可以反射自上而下的入射光. 因 2 束反射光在空气层中的传播产生了光程差,所以不同空气层厚度对应不同的干涉条纹. 为了计算不同位置的干涉强度,建立直角坐标系,干涉后形成的条纹半径为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (1)$$

对应的光程差为

$$\Delta = 2n_0 h, \quad (2)$$

其中, n_0 和 h 分别为空气折射率和空气层厚度. 根据几何关系,空气层厚度可以表示为

$$h = R - \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}. \quad (3)$$

空气层上、下 2 个面反射光的相位差为

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} n_0 (R - \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}) + \pi, \quad (4)$$

其中, π 为空气层下表面反射光所产生的半波损失带来的附加相位.

收稿日期:2024-12-17;**修改日期:**2025-05-06

基金项目:教育部产学合作协同育人项目 2024 年第 1 批(No. 231001663263837)

作者简介:翟立朋(1987—),男,河南济源人,西安交通大学物理学院工程师,硕士,从事大学物理教学及量子信息方面的研究. E-mail:zlp_xjtu@163.com

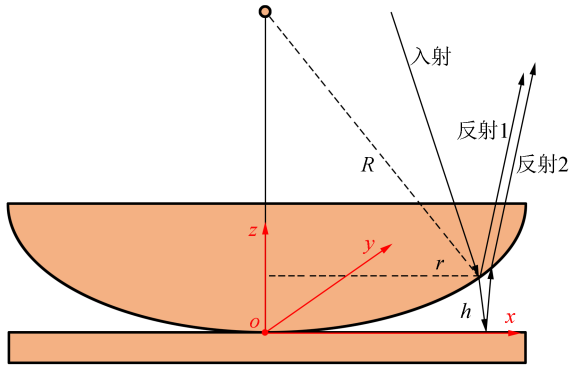


图1 牛顿环干涉的模型图

2束强度为 I_1 和 I_2 、相位差为 φ 的相干光产生的干涉条纹强度可以表示为

$$I(x, y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi. \quad (5)$$

假设入射光强度为 I_0 ，空气层和玻璃界面之间的透射率和反射率分别为 T_r 和 R_e ，则2束反射光的强度可以分别表示为

$$I_1 = I_0 R_e, \quad (6)$$

$$I_2 = I_0 T_r^2 R_e. \quad (7)$$

光在介质表面的反射率和透射率可以根据菲涅耳公式得到：

$$R_e = \frac{(n - n_0)^2}{(n + n_0)^2}, \quad (8)$$

$$T_r = \frac{4nn_0}{(n + n_0)^2}. \quad (9)$$

本文使用折射率 $n=1.56$ 、曲率半径 $R=2.000$ m的平凸透镜；光波使用理想单色光，其波长 $\lambda=589.3$ nm。对式(5)和相关参数进行仿真计算后，得到如图2所示的干涉条纹。

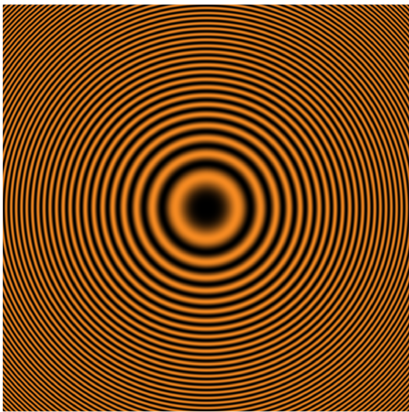


图2 牛顿环干涉条纹的理论模拟

2 干涉条纹的特性探究

2.1 中心暗斑及条纹宽度的形成原因探究

条纹的对称中心是0级暗纹，其形状是斑而不是点，但在部分讲课比赛的作品中将其表述为“由于平凸透镜和玻璃板之间不是理想点接触，导致干涉图样的中心不是理想暗点而是暗斑”。本文提供的仿真模型，是基于理想的点接触和单色光条件。图2仿真结果显示：牛顿环条纹的中心依然是斑，说明透镜和玻璃板之间是否为理想点接触，对0级暗纹的形状没有影响。

将图2所示的干涉图像取对角线数据后归一化，作干涉光相对强度随位置 r 的变化曲线，如图3所示。可以看出：中央暗斑到1级亮纹的相对强度呈现渐进式变化，这是由平凸透镜与平板之间的空气层厚度从0开始渐进式增大所导致。成像系统（包括人眼）对亮光与暗光的分辨存在阈值，阈值以上识别为亮光，阈值以下识别为暗光。分辨阈值导致了0级暗纹一定是暗斑而不是暗点，也导致了各级条纹之间具有一定宽度。光强变化越慢条纹宽度越宽，0级暗纹光强度变化就越慢、宽度越宽。

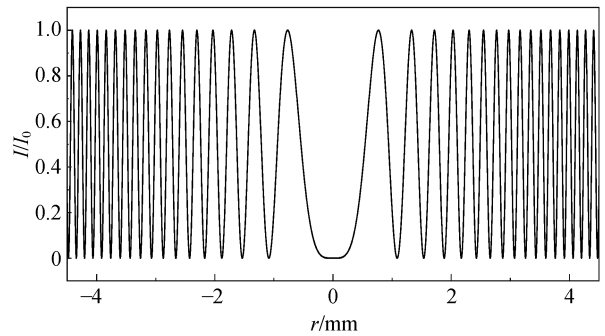


图3 牛顿环干涉条纹的相对光强分布

借用半高全宽的概念，取条纹相对强度 $I/I_0=0.5$ 为亮光与暗光的分辨界限，将该处对应的位置差值作为条纹宽度。图4中 a 和 b 分别表示亮条纹和暗条纹的宽度，将各级条纹宽度统计后以中央0级暗斑的宽度为基准归一化，得到图5所示的条纹宽度随位置的分布。随着级数逐渐升高，条纹位置从中心向外延伸，宽度逐渐降低，且降低的速率越来越慢，宽度变化越来越小。对于同级亮、暗条纹，暗条纹的宽度比亮条纹宽度更小，自第6级开始条纹宽度已降低至0.1（中央暗

纹宽度的 10%) 及以下, 此后亮暗条纹的宽度差异、条纹宽度随级数的变化均越来越小, 宽度对测量误差的影响也越来越小. 因此, 实验中要求从第 6 级及以后开始测量, 以降低随机误差, 条纹位置测量准确性更高.

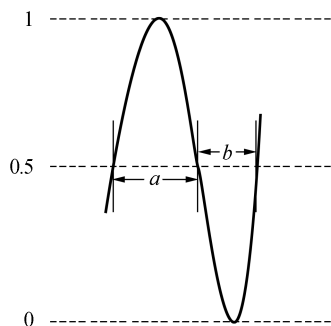


图 4 条纹宽度计算模型

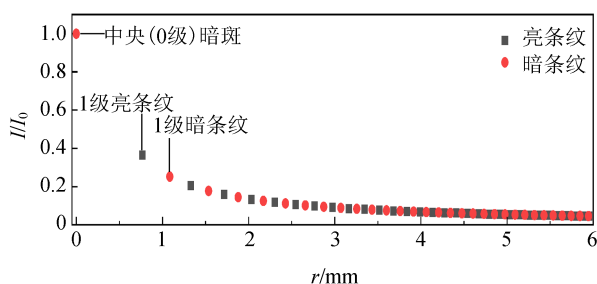


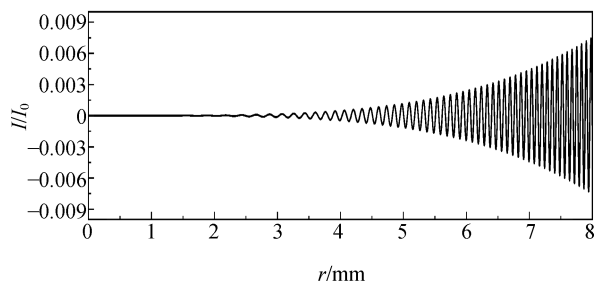
图 5 干涉条纹的宽度

2.2 钠灯非单色性对条纹的影响

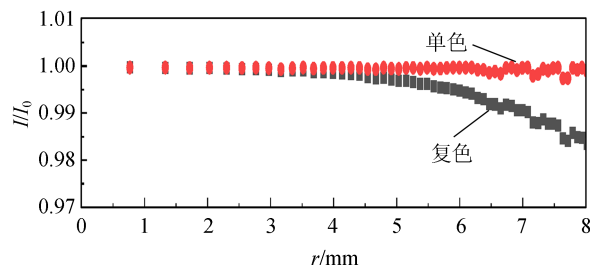
部分讲课类作品针对条纹具有一定的宽度解释为“由于钠灯不是严格的单色光, 导致牛顿环的干涉条纹具有一定的宽度”. 钠灯双黄线分别对应 589.0 nm 和 589.6 nm, 且双黄线的强度基本一致^[11], 一般在牛顿环实验中将钠灯光源近似看作是波长为 589.3 nm 的单色光. 为了探究该近似对干涉条纹的影响, 分别使用复色光 (589.0 nm 和 589.6 nm) 和单色光 (589.3 nm) 作为光源, 对 2 种光源条件下的干涉条纹进行做差对比, 并计算各级条纹的对比度.

不同位置处复色光源和单色光源产生的条纹相对强度的差值、对比度及条纹宽度的分布曲线如图 6 所示. 随着条纹位置从中心向外延伸, 牛顿环半径在 8 mm 内 (条纹级数在 60 级内), 复色光源和单色光源的相对强度差值小于 0.6%, 条纹对比度的下降不超过 2%, 条纹宽度没有明显差异. 这些差异对于人眼来说几乎无法分辨, 因

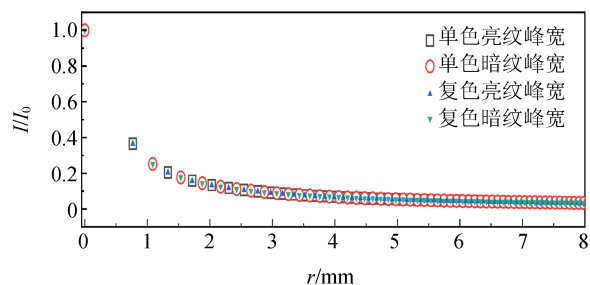
此钠灯光源的非单色性干涉条纹的影响可以忽略不计.



(a) 相对强度



(b) 对比度



(c) 峰宽

图 6 条纹的相对强度、对比度及峰宽对比

2.3 干涉条纹级数的不确定性探究

暗纹的绝对级数在某些情况下无法确定, 也无法准确确定测量的是直径还是弦长. 为了解决这 2 个问题, 实验测量过程中引入了相对级数或条纹序数的概念, 通过平方做差来计算平凸透镜的曲率半径^[1-2]:

$$R = \frac{D_{k+m}^2 - D_k^2}{4m\lambda}, \quad (10)$$

其中, k 为条纹序数, 对测量结果不产生影响; m 为条纹级数. 针对 m 无法确定的问题, 讲课类作品中的主流解释如下:

1) 透镜和玻璃板之间存在挤压或形变, 且不

是理想的点接触,导致 m 无法确定;

2) 透镜和玻璃板之间存在空隙和灰尘污渍等引起的附加光程差,导致 m 无法确定;

3) 中心暗斑可能包含低级次条纹,进而导致 m 无法确定.

针对以上解释,设计了系列实验进行探究.图7为平凸透镜和玻璃板之间存在挤压形变时,透镜的曲率半径 R 逐渐增大的图像.当 R 从 0.500 m 间隔的图像增大到 2.000 m 时,在相同的观察区域内,0 级暗斑逐渐增大,相同级数的条纹半径逐渐增大,但条纹级数 m 明确且清晰.因此,仅考虑透镜之间的挤压,不会引起 m 的不确定,也不会出现不同级次条纹混杂在一起或者条纹吞并的情况,只会引起条纹位置的变化.但在实验中应尽量避免透镜之间的挤压,透镜曲率半径的变化会引入新的系统误差.

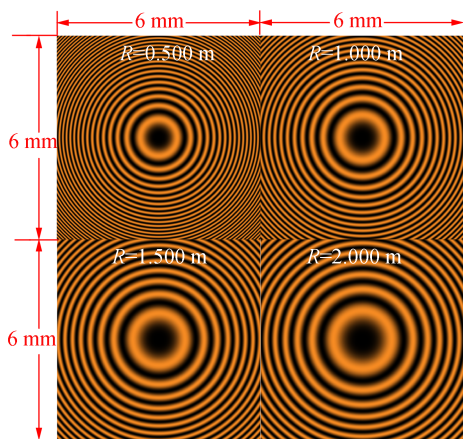


图7 中央暗斑随曲率半径 R 的改变而产生的变化

当平凸透镜和平板之间有缝隙时,条纹中央位置处的光程差不再为 0,尽管这会导致中央条纹是亮斑还是暗斑无法准确确定,但不会引起条纹之间的混杂或者吞并,式(10)给出的方案可以很好地消除由此带来的测量误差.

为了展示透镜和平板之间的灰尘污渍对牛顿环的影响,本文使用 Matlab 软件中的随机数功能,模拟在透镜和平板之间增加位置随机分布的灰尘.如图8所示,随着灰尘厚度 d 的增加,条纹的半径和级数没有变化,但条纹从光滑逐渐变得粗糙,中央暗斑和 1 级亮纹之间的界限也逐渐模糊,直到中央暗斑变为亮斑,这可能导致条纹级数 m 不易确定.同时,透镜和平板之间的污渍也导

致低级亮暗条纹混杂在一起,条纹越来越模糊,条纹的对比度逐渐降低,这可能导致测量的随机误差增大.

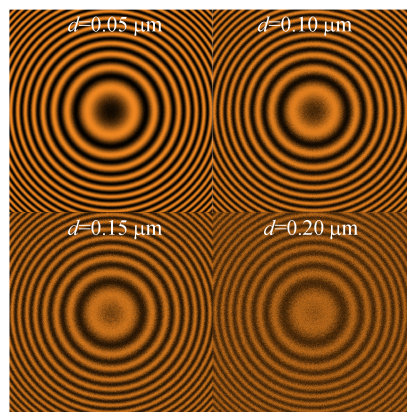


图8 不同厚度的灰尘对干涉条纹的影响

综上分析,条纹级数的不确定的可能原因是透镜与平板之间存在缝隙和灰尘污渍等,但只有存在灰尘污渍时可能引起随机误差增大,透镜与平板之间的缝隙对测量结果无影响.此外,透镜的挤压形变尽管不会影响条纹级数的确定性,但会引入系统误差.因此,实验中应确保透镜和玻璃平板清洁干净、条纹无形变.

3 结束语

本文通过计算机仿真的方法,建立了牛顿环干涉条纹的仿真模型,探究了牛顿环实验中可能存在的理解偏差.结果表明:条纹中心是暗斑而不是暗点,且干涉条纹有一定宽度主要是由于成像系统对亮暗条纹分辨阈值所导致,与透镜和平板之间是否为理想点接触以及钠灯的非单色性无关.一般在第 6 级及以后,条纹宽度的变化不再明显;条纹的绝对级数无法确定的原因是透镜与平板之间存在缝隙和灰尘污渍;当只存在灰尘污渍时可能会导致低级条纹混杂在一起、条纹的对比度降低,进而引起测量误差增大.以上探究结果纠正了部分物理实验竞赛讲课类作品中关于上述观点的理解偏差,为牛顿环干涉实验教学提供了参考.

参考文献:

- [1] 王红理,俞晓红,肖国宏.大学物理实验[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2018:191-196.

- [2] 高博. 大学物理实验[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2023:218-225.
- [3] 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会. 理工科类大学物理课程教学基本要求、理工科类大学物理实验课程教学基本要求[M]. 北京:高等教育出版社,2023:38.
- [4] 高等教育出版社,高等教育电子音像出版社. 2020 年全国大学生物理实验竞赛获奖作品集[EB/OL]. [2024-09-25]. <https://2d.hep.com.cn/1262921/4>.
- [5] 高等教育出版社,高等教育电子音像出版社. 2021 年全国大学生物理实验竞赛获奖作品集[EB/OL]. [2025-01-21]. <https://2d.hep.com.cn/1262921/489>.
- [6] 高等教育出版社,高等教育电子音像出版社. 2022 年全国大学生物理实验竞赛获奖作品集[EB/OL]. [2025-01-17]. <https://abooks.hep.com.cn/h5/resource/detail?resourceId=P3M4CEF42629&projectId=FKUPENR29>.
- [7] 高等教育出版社,高等教育电子音像出版社. 2023 年全国大学生物理实验竞赛获奖作品集[EB/OL]. [2025-01-17]. <https://2d.hep.com.cn/1262921/6451>.
- [8] 朱晓梅,向伟铭,姜向东. 牛顿环实验的数据处理改进及图像分析[J]. 物理与工程,2019,29(3):55-62.
- [9] 鲁溟峰,武进敏,杨文明,等. 基于信号处理和深度学习的牛顿环实验[J]. 物理实验,2022,42(4):17-24.
- [10] 王然,孙佳欣,吴江红,等. 复合型干涉光源在牛顿环实验中的应用[J]. 物理实验,2019,39(8):50-52.
- [11] 谭志阳,陈森,吴平. 钠原子光谱实验中双黄线谱线强度比值的讨论[J]. 大学物理,2019,38(5):63-65.

Exploration of some details in Newton's ring interference experiment

ZHAI Lipeng^{1a,1b}, CHENG Lin², GAO Bo^{1a,1b},
ZHANG Junwu^{1a,1b}, ZHANG Pei^{1a,1b}

(1a. School of Physics; b. National Demonstration Center for Experimental College
Physics Education (Xi'an Jiaotong University), Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper establishes a numerical simulation model of Newton's rings interference experiment to analyze the characteristics of interference fringes and investigate potential misconceptions in interpreting experimental phenomena. The results demonstrate that the shape of the zero-order dark fringe and variations in fringe width are primarily attributed to the resolution threshold of bright/dark fringes in imaging systems, rather than lens compression or light source non-monochromaticity. The indeterminacy of absolute fringe order mainly stems from gaps between the lens and flat plate, as well as dust/contaminants. Notably, only the presence of dust/contaminants induces fringe overlapping, contrast reduction, and consequent amplification of measurement errors.

Key words: Newton's rings; equal-thickness interference; Matlab simulation

[编辑:龙玉梅]