

杨氏双缝干涉图样的理论模拟

何坤娜 韩 萍 朱世秋 金仲辉

(中国农业大学理学院应用物理系 北京 100083)

(收稿日期:2015-11-26)

摘要:本文在未经任何理论近似的情况下,模拟了杨氏双缝干涉实验中观察屏上的干涉图样,模拟结果不但有利于学生全面掌握干涉条纹的分布规律,而且有助于学生体会实验条件的重要性.

关键词:双缝干涉 光程差 模拟

1801年,杨氏双缝干涉实验证实了光的波动性,并首次成功测量了光的波长,为光的波动学说发展奠定了坚实的基础,因此,该实验在物理学史上具有重要的地位和作用.杨氏双缝干涉实验中,双缝到观察屏上任意点的距离差,即两光束的光程差至关重要,因为它直接决定了观察屏上干涉条纹的分布情况.

现有大学物理教材在给出观察屏上条纹分布时,大都先经过理论近似给出近似的光程差表达式^[1~4],然后将光程差表达式和光的干涉加强和减弱的条件联立,得出屏幕上干涉条纹是明、暗相间的等间隔的直条纹的结论.在近似表达式基础上得到的结论毕竟不能真实反映条纹分布,所以采用近似方法处理光程差不利于学生全面了解条纹的真实分布.观察屏上实际的条纹分布应是怎样的呢?少数教材^[5]虽提到观察屏上以强度相等为特征的点的轨迹应是一组双曲线,但并未有详细说明.

本文在未经任何近似的情况下,理论模拟了观察屏上干涉明纹分布,并对条纹分布特点进行了总结.

1 明暗干涉条纹所满足的方程

图1为杨氏双缝干涉实验光路示意图.

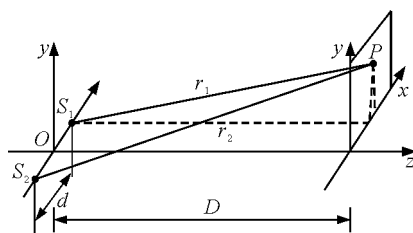


图1 杨氏双缝干涉实验光路示意图

设双缝 S_1, S_2 的间距为 d , O 为双缝 S_1, S_2 的中点,双缝所在平面与光屏平行.双缝与屏之间的垂直距离为 D ,在屏上取任意一点 P ,设定点 P 与双缝 S_1, S_2 的距离分别为 r_1 和 r_2 , Δr 为光程差,结合图1中虚线易得

$$r_1^2 = \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + D^2$$

$$r_2^2 = \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + D^2$$

所以,双缝 S_1, S_2 发出的光到达屏上 P 点的光程差

$$\Delta r = r_2 - r_1 =$$

$$\sqrt{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} - \sqrt{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \quad (1)$$

根据光的干涉的相关理论,当两光束光程差满足公式

$$\begin{aligned} \Delta r(x, y, D) &= k\lambda, \\ k &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n \end{aligned} \quad (2)$$

时,观察屏上满足公式(2)的点为亮点,同一 k 值所对应的亮点连起来构成第 k 级明纹.当光程差满足公式

$$\Delta r(x, y, D) = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n \quad (3)$$

时,观察屏上满足公式(3)的点为暗点,同一 k 值所对应的暗点连起来构成第 k 级暗纹.

2 理论模拟结果

根据公式(1)~(3),通过改变 d, D 或入射波长 λ 值,即可获得不同条件下观察屏上的干涉条纹分布.因明、暗条纹分布情况类似,我们仅给出明纹模拟结果.在模拟过程中,入射单色光波长设为 500 nm ,图2~图5中的 x 轴和 y 轴分别对应图1观察屏上的 x 和 y 轴.

2.1 D 取不同值 在较大范围内观察的情况

当 $d = 0.1 \text{ mm}$, D 取不同值时,在较大观察范围内,屏幕上干涉明纹的分布情况.

图2(a)~图2(d)给出了 $d = 0.1 \text{ mm}$, D 分别为 0.5 m , 1 m , 1.5 m 和 2 m 时,屏幕上较大观察范围(相对于杨氏双缝实验中通常的观察线度)内中央明纹及左右 ± 50 级明条纹的分布情况.图2中 x 和 y 轴坐标均在 $[-0.7 \text{ m}, 0.7 \text{ m}]$ 之间.

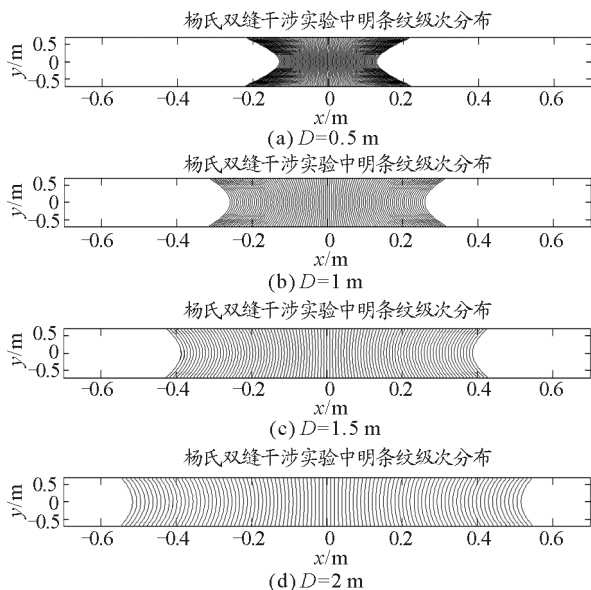


图2 $d = 0.1 \text{ mm}$, D 取不同值时,屏幕上较大观察范围内明纹分布

由图2可知,观察屏上较大范围内,当 D 分别为

0.5 m , 1 m , 1.5 m 和 2 m 时,观察屏上明条纹(除中央明纹外)确实呈典型双曲线形状且对称分布在中央明纹两侧,而不是等间距的直条纹分布,但随着 D 的增加,双曲线的弯曲程度明显减小.另外,随着 D 增加,条纹间间距加大,明纹在 x 轴分布范围逐渐加宽.当 D 为 0.5 m 时, -50 级至 $+50$ 级明纹基本上分布在 x 轴上 $[-0.2 \text{ m}, 0.2 \text{ m}]$ 之间,当 D 为 1 m , 1.5 m ,分别分布在 $[-0.3 \text{ m}, 0.3 \text{ m}]$ 和 $[-0.4 \text{ m}, 0.4 \text{ m}]$ 之间,至 $D = 2 \text{ m}$ 时,分布已扩展到 $[-0.55 \text{ m}, 0.55 \text{ m}]$ 之间.

2.2 D 取不同值 在较小范围内观察的情况

当 $d = 0.1 \text{ mm}$, D 取不同值时,在较小观察范围内,屏幕上干涉条纹的分布情况.

图3(a)~3(d)给出了 $d = 0.1 \text{ mm}$, D 分别为 0.5 m , 1 m , 1.5 m 和 2 m 时,在较小观察范围内,观察屏上明纹分布图.图3中 x 轴和 y 轴坐标均在 $[-0.06 \text{ m}, 0.06 \text{ m}]$ 之间[图3(a)~3(d)实质分别对应图2(a)~2(d)的一小部分].

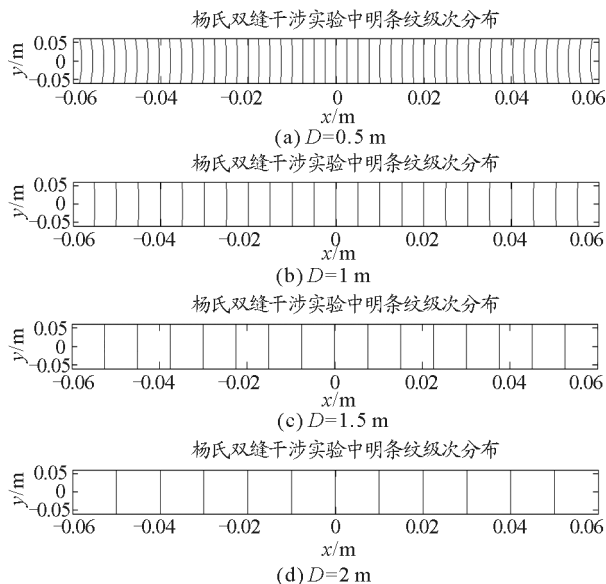


图3 $d = 0.1 \text{ mm}$, D 取不同值时,屏幕上较小观察范围内明纹分布

由图3(a)~3(d)可知,在较小观察范围内,当 D 为 0.5 m 时,较高级次明纹仍呈现双曲线形,但中央明纹附近级次已非常接近直线分布.随着 D 增加,当 D 为 1 m , 1.5 m 和 2 m 时,目测各级明纹均已呈平行等距直线分布.另外,随着 D 增加,条纹分布由密集变稀疏,条纹间距增大,观察屏上干涉明纹数量减小.当 $D = 0.5 \text{ m}$ 时,条纹比较密集,条纹数量

为 $23 \times 2 + 1$ 条; D 为 1 m 和 1.5 m 时, 条纹数量分别为 $11 \times 2 + 1$ 条, 1.5 m 时的 $7 \times 2 + 1$ 条; 而 D 为 2 m 时, 只能观察到 $5 \times 2 + 1$ 条。

2.3 d 取不同值 在较小范围内观察的情况

当 $D = 1.5$ m, d 取不同值时, 在较小观察范围内, 屏幕上干涉明条纹的分布情况。

图 4(a) ~ 4(d) 为 $D = 1.5$ m, d 分别为 0.02 mm, 0.1 mm, 1 mm 和 3 mm 时, 在屏幕上较小观察范围内的分布[图 4(c) ~ 4(d) 中只显示了中央明纹及其左右各 50 级干涉明纹]。由图 4 的模拟结果可知, 当 D 为 1.5, 在观察屏上较小范围内, 随着 d 增加, 相邻级次明纹间距变窄。当 d 为 0.02 mm 时, 在屏幕上较小观察范围内, 只能观察到 3 条明纹(包括中央明纹及其左右 ± 1 级明纹); $d = 0.1$ mm 时, 能观察到 $7 \times 2 + 1$ 条明纹(到第 7 级); 而 $d = 3$ mm 时, 条纹间距小的已无法用肉眼分辨; 当 d 大于 3 mm, 观察屏上的明纹会进一步聚集而变得更窄, 此时, 在观察屏上应只观察到一条亮线, 无法观测到干涉现象。这与干涉理论是一致的, 因为随着 d 的增加, 当 d 大到一定程度时, 两缝光源将不再满足相干光源条件, 所以也就无法观察到干涉现象。

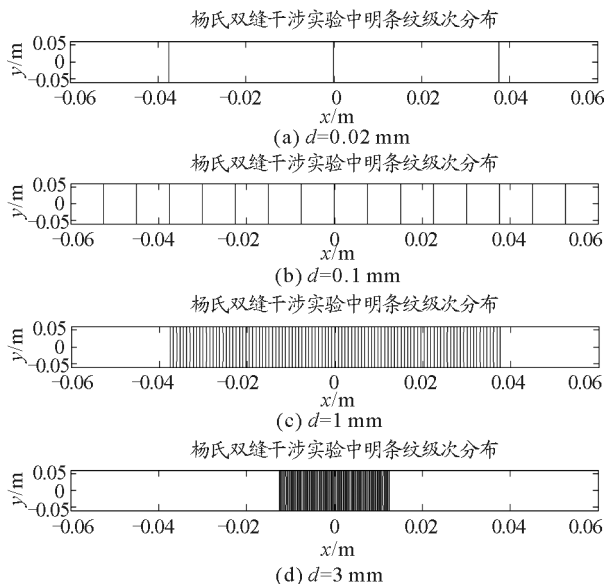


图 4 $D = 1.5$ m, d 取不同值时, 屏幕上较小观察范围内明纹分布

2.4 入射波长值取不同在较小范围内观察的情况

当 $D = 1.5$ m, $d = 0.1$ mm, 入射波长分别为 400 nm, 500 nm, 600 nm 和 700 nm 时, 在较小观察范围内, 屏幕上干涉明条纹的分布情况。

图 5(a) ~ 5(d) 为 $D = 1.5$ m, $d = 0.1$ mm, 波长分别为 400 nm, 500 nm, 600 nm 和 700 nm 时, 在屏幕上较小观察范围内的分布。由图 5 可知, 当 D 为 1.5, $d = 0.1$ mm 时, 在观察屏上较小范围内, 随着波长增加, 相邻级次明纹间距变大, 观察到的条纹数量变少。当波长分别为 400 nm, 500 nm, 600 nm 和 700 nm 时, 在屏幕上较小观察范围内, 分别能观察到 $9 \times 2 + 1 = 19$ 条、 $7 \times 2 + 1 = 15$ 条、 $6 \times 2 + 1 = 13$ 条和 $5 \times 2 + 1 = 11$ 条明纹。

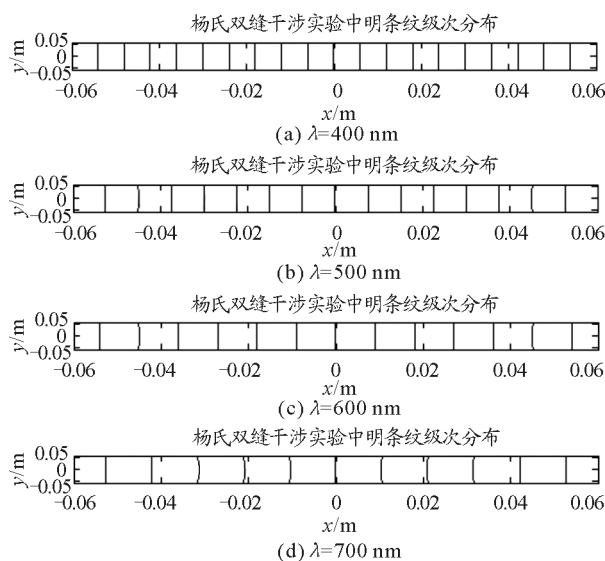


图 5 $D = 1.5$ m, $d = 0.1$ mm, 波长取不同值时,

屏幕上较小观察范围内明纹分布

由上述模拟结果可知:

(1) D 取不同值时, 在 x 轴右侧的观察屏上均能观察到干涉条纹, 由于在两相干光波叠加区域内, 处处都存在干涉的现象, 称为不定域干涉, 因而杨氏双缝干涉为非定域干涉。

(2) 严格来说, 观察屏上的条纹除中央明纹外为一系列双曲线, 并非等间距直线。只是在较小观察范围内, 才观察到平直的等间距干涉条纹, 并且, 随着 D 的增加, 条纹间距变大。

(3) 在同一 D 下, 随着 d 增加, 相邻级次明纹间距变窄, 当 d 大到一定程度, 肉眼将无法分辨干涉条纹。

(4) 在 D 和 d 一定, 入射波长不同时, 随着入射波长增加, 条纹间距变大, 可观察到的条纹数量减小。

(5) D 为 m 量级, d 为 0.1 mm 量级, 实验室可观察到清晰干涉条纹.

3 结论

本文在未经任何理论近似的情况下, 通过改变不同参数, 模拟了观察屏上干涉明纹的分布, 该模拟结果不但直观地展示了干涉条纹分布特点, 有助于学生对干涉条纹分布规律的理解和掌握, 而且可在一定程度上指导杨氏双缝干涉实验. 另外, 通过对比不同参数下的模拟结果, 可引发学生对实验条件的关注, 认识到实验条件的重要性.

参考文献

- 1 程守洙, 江之永. 普通物理学. 北京: 高等教育出版社, 1998. 175 ~ 176
- 2 张三慧. 大学基础物理学. 北京: 清华大学出版社, 2003. 592 ~ 593
- 3 马文蔚, 周雨青, 解希顺. 物理学教程. 北京: 高等教育出版社, 2006. 185
- 4 吴百诗. 大学物理. 西安: 西安交通大学出版社, 2008. 118 ~ 119
- 5 金仲辉, 柴丽娜. 大学基础物理学. 北京: 科学出版社, 2010. 260

Theoretical Simulation on Young's Double – slit Interference Pattern

He Kunna Han Ping Zhu Shiqiu Jin Zhonghui
(College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract: The paper theoretically simulated the fringe pattern on the screen in Young's double – slit interference experiment in case that the theoretical analysis is not approximated. The simulation result is not only helpful for students to master the interference fringes in an all – round way, but also helpful for students to understand the importance of the experimental conditions.

Key words: double – slit interference; optical path difference; simulation

(上接第 24 页)

Analysis on Teaching of Quasi – static Process and Related Physics Concepts

Li Shengchang Zhang Yang
(School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049)

Abstract: In this paper we adopt the analogy method and introduce the process of climbing steps as an example. We give an intuitive analogy of the quasi – static process and related physical concepts in thermodynamics through a detailed qualitative and quantitative analysis on the process of climbing steps. We reveal the difference between the conceptions of equilibrium state, non – equilibrium state, and relaxation time, and show the connection of them to the concept of quasi – static process. We give the quantitative condition for practical process approximating to quasi – static process as well.

Key words: equilibrium state; relaxation time; quasi – static process