狭缝和棱脊不平行对菲涅耳双棱镜干涉的影响

韩佩杉[1]，陆泽辉[1]，樊代和[1,2*]，贾欣燕[1,2]，魏云[1,2]，常相辉[1,2]，刘其军[1,2]

[1]西南交通大学物理科学与技术学院，四川 成都 611756；

[2]物理国家级实验教学示范中心(西南交通大学)，四川 成都 611756

摘要 利用数值仿真和实验验证方法，解释用线光源作为光源的菲涅耳双棱镜干涉实验中，狭缝必须与双棱镜棱脊平行才能观察到清晰干涉条纹的原因。基于几何光学和干涉原理，理论上得出观察屏上菲涅耳双棱镜干涉强度分布公式，通过数值模拟得到干涉条纹可见度随狭缝与棱脊夹角的变化曲线。理论分析表明，随着夹角变大，干涉可见度将出现先下降，再升高，然后再次下降的现象。最后，对理论结果进行实验验证，表明实验结果与数值模拟结果基本一致。

关键词 物理光学；干涉；菲涅耳双棱镜；可见度

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**：10.3788/LOP56.232601

Influence of Nonparallel Slot and Prism Ridge on Interference of Fresnel Double Prism

Han Peishan[1], Lu Zehui[1], Fan Daihe[1,2*], Jia Xinyan[1,2], Wei Yun[1,2], Chang Xianghui[1,2], Liu Qijun[1,2]

[1] *School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan* 611756, *China*;

[2] *National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan* 611756, *China*

Abstract In this paper, numerical simulation and experimental verification methods are presented to investigate the influence of nonparallel slot and double-prism ridge in observing clear interference fringes. This result is essentially in the Fresnel double prism interference experiment using a line source. Initially, the interference intensity distribution formula of the Fresnel double prism on the observation screen is theoretically obtained. This is accomplished using geometrical optics and the principle of interference. In addition, the visibility of the interference fringe as a function of the angle between the slot and the ridge is obtained using numerical simulation. Theoretical analysis shows that as the angle increases, the interference visibility falls, then rises, and then falls again. Finally, an attempt to experimentally verify the theoretical results is also presented. The experimental results seem to be consistent with the numerical simulation results.

Key words physical optics; interference; Fresnel double prism; visibility

OCIS codes 260.3160; 230.5480; 030.1670

1 引 言

19 世纪初，英国物理学家托马斯·杨开展了著名的杨氏双缝干涉实验[1]，为光的波动学说提供了有力的物理支持。托马斯·杨通过该实验第一个提出光是横波的假设，该假设被菲涅耳所接受并发展。菲涅耳在杨氏干涉实验基础上，在当时激光还没有问世的情况下，设计了一系列的实验装置研究干涉现象，菲涅耳双棱镜干涉实验就是其中之一[2]。所谓的菲涅耳双棱镜，是将一块平玻璃板的上表面加工成两个

收稿日期：2019-05-10；**修回日期**：2019-05-17；**录用日期**：2019-05-23

基金项目：西南交通大学个性化实验项目(GX201913167)、西南交通大学本科教育教学研究与改革项目(1904008，1802034，1801012)

* **E-mail**：dhfan@swjtu.edu.cn

对称的楔形面，楔角很小，一般在0.5°～1°之间。菲涅耳双棱镜干涉实际上是利用双棱镜对入射光线的分波前原理，将同一光源等效为两个具有相干性的虚光源，进而在观察屏上形成明暗相间的干涉条纹[3-4]。

菲涅耳双棱镜干涉实验对理解光的波粒二象性具有较好的指导意义，目前国内对双棱镜干涉实验的研究，主要有通过改变双棱镜的放置方式研究其对干涉条纹形状的影响[5-6]；通过菲涅耳双棱镜实验测定相关参数，如双棱镜楔角、折射率或光波长[7-10]；利用几何光学推导出菲涅耳双棱镜干涉实验中虚光源的位置及间距[11-13]；利用矢量折射定理推导出光束经过正交双棱镜后的偏转角度表达式[14]等。随着光学信息工程的发展，国内外也开始将菲涅耳双棱镜实验应用于各个领域，如：利用光场和光学系统脉冲响应函数的关系推导出干涉的强度公式[15]；将菲涅耳双棱镜应用于数字全息显微术中[16]；基于双棱镜干涉并利用重叠关联迭代引擎(PIE)技术实现电子显微成像[17]等。

一般情况下，大学物理实验中关于菲涅耳双棱镜干涉实验所用的光源有两种，一种采用半导体激光经聚焦后产生的点光源[18-19]，另一种为低压钠灯通过狭缝后产生的线光源[20-21]。在激光发明之后，人们普遍使用激光器作为双棱镜干涉实验的光源。但是，为了让学生能够深刻理解基于双棱镜对入射光线的分波前原理产生相干光束的方法，国内大多数高校的双棱镜干涉实验仍然沿用低压钠灯作为双棱镜干涉实验的光源。对于使用钠灯结合狭缝的装置来作为双棱镜干涉实验中光源的情况，实验中要观察到较好的干涉图样，对实验光路的调节是一个至关重要的步骤。特别是，只有调节狭缝方向使其与双棱镜棱脊完全平行时，才能观察到明显的干涉条纹。然而，在对双棱镜干涉实验的相关研究中，为什么“狭缝必须和双棱镜棱脊平行才能观察到明显的干涉图样”，或者“狭缝和双棱镜棱脊不严格平行时，对干涉现象会造成什么样的影响”等问题，到目前为止还未有一个较为全面的理论解释。进一步地，随着狭缝与双棱镜棱脊之间夹角的增大，干涉条纹可见度将会以何种方式变化的研究也未见报道。基于此，本文从菲涅耳双棱镜干涉的原理出发，利用数值仿真的方法，探讨当狭缝方向与菲涅耳双棱镜棱脊具有一定夹角时，对双棱镜干涉条纹造成的影响，最后进行实验验证。

2 理论分析

如图1所示，以狭缝的中心位置作为坐标原点 o，建立三维直角坐标系(x，y，z)。其中 y 轴为光轴方向，x 轴沿垂直于光轴方向，z 轴沿平行于双棱镜棱脊方向。狭缝放置于 xz 平面内，且可绕 o 点进行旋转。当狭缝方向旋转一定角度(假设与 z 轴的夹角为 γ)时，可考虑狭缝上任一点光源 S 发出的光，经过双棱镜后在观察屏(xz 平面)上的干涉光强分布。

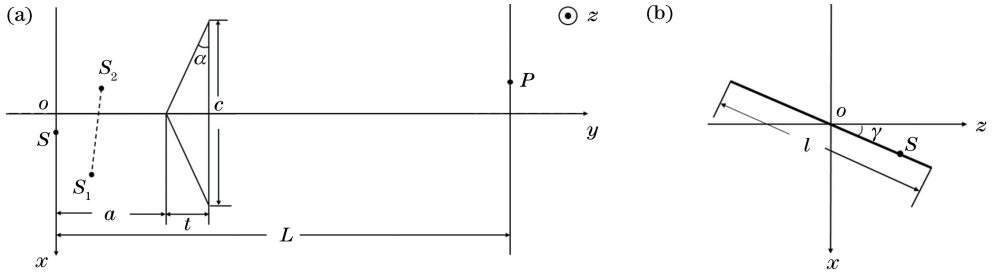

图1 菲涅耳双棱镜干涉原理图。(a)狭缝偏转一定角度后的坐标系俯视图；(b)狭缝偏转情况示意图

Fig. 1 Schematic of the Fresnel double-prism interference. (a) Top view of coordinate system after slot deflecting by a certain angle; (b) schematic of slot deflection

图1中，a 为狭缝到双棱镜的距离，t 为双棱镜底边上的高，c 为双棱镜底边长，L 为狭缝到观察屏的距离，α 为双棱镜楔角，P 为观察屏上任一点，l 为狭缝的长度，γ 为狭缝方向与 z 轴(双棱镜棱脊方向)的夹角。假设狭缝上某一点 S 坐标为(b，0，z_1)，S 的到坐标原点 o 的距离为 r，则有

$$b = r\sin\gamma, \tag{1}$$

$$z_1 = r\cos\gamma。 \tag{2}$$

光源 S 发出的光，经过双棱镜折射后，将形成虚像 S_1、S_2。此时，S_1、S_2 可认为是由同一点光源 S 经过分波前原理产生的相干光源。利用文献[11-12]给出的几何光学关系，可推导出虚光源 S_1 和 S_2 的坐标为

$$S_1(x,y,z) = \left[\alpha^2 b\left(\sqrt{n^2-\alpha^2}-1\right)+b+\alpha a\left(\sqrt{n^2-\alpha^2}-1\right),\frac{n-1}{n}(t+a)-\frac{ab}{n}\left(\sqrt{n^2-\alpha^2}-1\right),z_1\right], \tag{3}$$

$$S_2(x,y,z)=\left[\alpha^2 b(\sqrt{n^2-\alpha^2}-1)+b-\alpha a(\sqrt{n^2-\alpha^2}-1),\frac{n-1}{n}(t+a)+\frac{ab}{n}(\sqrt{n^2-\alpha^2}-1),z_1\right],\tag{4}$$

式中，n 为双棱镜的折射率。

因此，根据(3)和(4)式可计算出两虚光源间距 d 为

$$d=2\alpha(\sqrt{n^2-\alpha^2}-1)\sqrt{a^2+\frac{b^2}{n^2}}。\tag{5}$$

假设观察屏距离 S 为 L，则观察屏上任一点 P 的坐标可表示为(x,L,z)。根据(3)、(4)式可以计算出两虚光源 S_1 和 S_2 到 P 点的等效光程差 Δ 为

$$\Delta=l_{S_1P}-l_{S_2P},\tag{6}$$

式中，l_{S_1P} 表示 S_1 到 P 点的距离，l_{S_2P} 表示 S_2 到 P 点的距离。联立(1)～(4)式和(6)式，可计算出观察屏上，在 xz 平面内任一点的光强分布为

$$I_1(x,L,z)=2I_0+2I_0\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\right),\tag{7}$$

式中，I_0 为任一虚光源的光强大小，λ 为狭缝发出的光的波长。

由(7)式可以看出，对于观察屏上的任一点坐标，当满足 $\Delta=m\lambda$，$m=0,\pm1,\pm2,\ldots$时，观察屏上该点将出现光强的极大值(干涉亮纹)，当满足 $\Delta=\left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda$，$m=0,\pm1,\pm2,\ldots$时，观察屏上该点将出现光强的极小值(干涉暗纹)。

值得注意的是，(7)式得出的观察屏上任一点的光强 I_1 仅是狭缝上其中一点 S 在光屏上产生的干涉光强分布。当狭缝不同位置的点光源互不相干时，实际上观察屏上观察到的干涉强度分布应该是整个狭缝发出的光在观察屏上产生干涉的强度叠加，因此需要对狭缝长度进行积分。最后即可得出实际情况下，从狭缝发出的光经过双棱镜后，在观察屏上的干涉光强分布情况，即

$$I(x,L,z)=\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}}I_1\,\mathrm{d}r。\tag{8}$$

3 数值仿真模拟及实验结果

采用实验中常用的实验参数进行仿真，固定狭缝长度为 $l=2$ cm，双棱镜的折射率为 $n=1.5$，入射钠灯波长为 $\lambda=589$ nm，假设 $I_0=1000$ arb. units。

首先，考虑狭缝方向与双棱镜棱脊完全平行时(即 $\gamma=0°$)的情况，图 2 为观察屏平面(xz 平面)内，x 方向的光强分布。图 2(a)表示固定狭缝距离光屏的距离为 $L=60$ cm，双棱镜楔角 $\alpha=0.50°$，狭缝距双棱镜的距离 a 改变时的 x 方向的光强分布曲线。图 2(b)表示固定狭缝距双棱镜的距离 $a=10.0$ cm，双棱镜楔角 $\alpha=0.50°$，狭缝距离光屏的距离 L 不同时，x 方向的光强分布曲线。图 2(c)表示固定狭缝距离光屏的距离为 $L=60$ cm，狭缝距双棱镜的距离 $a=10.0$ cm，双棱镜具有不同大小的楔角 α 时，x 方向的光强分布曲线。

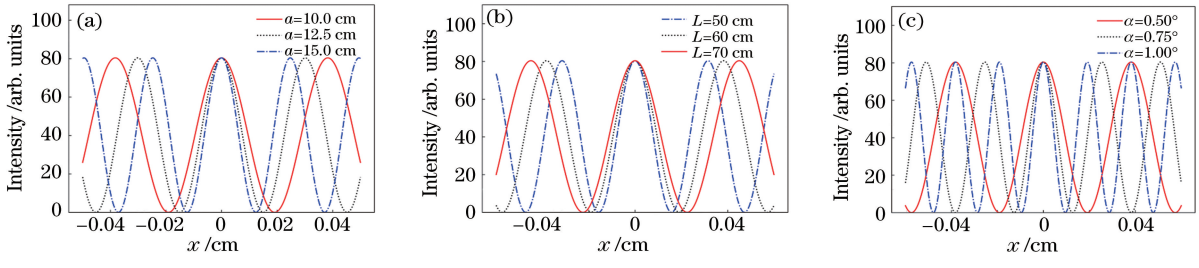

图 2 光屏 x 方向上的干涉强度变化图。(a)改变狭缝与双棱镜间距；(b)改变狭缝与观察屏间距；(c)改变双棱镜楔角

Fig. 2 Interference intensity variation diagram in x-direction of screen. (a) Changing spacing between slot and double prism; (b) changing spacing between slot and viewing screen; (c) changing double-prism wedge angle

从图 2 可以看出，在狭缝方向和双棱镜棱脊完全平行的情况下，在观察屏幕上均可观察到明暗相间的干涉条纹，且屏幕中心为干涉亮纹。但是当狭缝与双棱镜间距 a 增大，或者狭缝与观察屏间距 L 减小，或者双棱镜楔角 α 增大时，干涉明(暗)纹的间距都将减小。事实上，由(5)式可知，a 增大或 α 增大，均相当于增加了虚光源间距 d，由双棱镜干涉实验中光屏上明(暗)条纹间距公式 $\Delta x=L\lambda/d$ 可知，d 增大或 L 减小，均会使明(暗)条纹的间距减小，从而证明本文理论分析的正确性。

当狭缝方向与双棱镜棱脊成一定的夹角(即 $\gamma\neq0°$)时，采用实验室中常用的参数值：$l=2$ cm，$n=1.5$，$\alpha=0.50°$，$\lambda=589$ nm，$L=60$ cm，$a=10.0$ cm，并假设 $I_0=1000$ arb. units。只改变夹角 γ，可得到观察屏上 xz 平面的干涉条纹分布图，如图3(a)(b)(c)所示。对应地，在 $z=0$ 处，x 方向

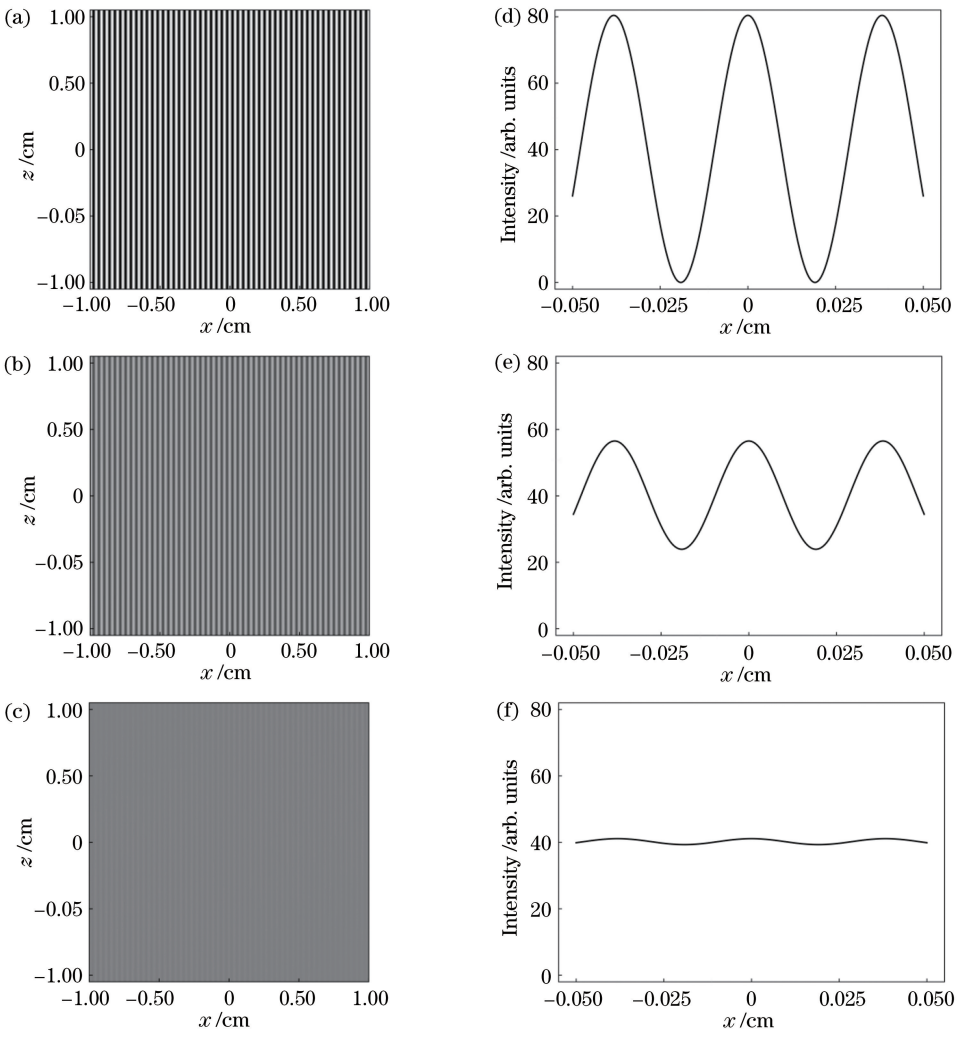

图 3 狭缝在不同偏转角时观察平面上的干涉条纹分布图和光强分布图。(a)(b)(c) $\gamma=0°$,0.11°,0.16°时干涉条纹分布图;(d)(e)(f) $\gamma=0°$,0.11°,0.16°时观察屏上 $z=0$ 处的光强分布

Fig. 3 Interference fringe distributions and intensity distributions of observation plane for different deflection angles of slot. (a)(b)(c) Interference fringe distributions when $\gamma=0°$, 0.11°, 0.16°; (d)(e)(f) intensity distributions at $z=0$ on observation plane when $\gamma=0°$, 0.11°, 0.16°

这条线上的光强分布分别如图 3(d)(e)(f)所示。

从图 3 中可以看出,随着狭缝方向与双棱镜棱脊方向之间的夹角 γ 的增大,观察屏上 xz 平面内出现的干涉条纹将从清晰变得模糊,即观察到的干涉现象将减弱。为定量描述干涉条纹的清晰程度,可用可见度 V[22]进行分析:

$$V=\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}+I_{\min}},\tag{9}$$

式中,$I_{\max}$为光强最大值,$I_{\min}$为光强最小值。

通过改变 γ 值,数值模拟出可见度 V 随 γ 的变化关系曲线,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,不论选择的狭缝长度为多少,当狭缝方向与双棱镜棱脊方向之间的夹角 γ 稍增大时,观察屏上得到的干涉条纹的可见度将急剧降低。从图 4(a)可以看出,选择狭缝长度为 $l=2$ cm,当狭缝方向与双棱镜棱脊夹角 $\gamma=0.17°$时,干涉的可见度将首次降为 $V=0$(即无干涉现象出现)。从图 4(b)可以看出,改变狭缝长度到 $l=0.5$ cm,当狭缝方向与双棱镜棱脊夹角为 $\gamma=0.65°$时,干涉的可见度将首次降为 $V=0$。因此可以得出,在双棱镜干涉实验调节过程中减小狭缝的长度值,可在一定程度上补偿狭缝方向与双棱镜棱脊不平行对观察到明显的干涉条纹造成的影响。

从图 4 也可以发现,随着 γ 的增大,干涉条纹的可见度也会出现先减小后增大再减小的现象。但可见度的次大值,均远小于 $\gamma=0°$时的值,并且随着 γ 的增大而降低。这一现象到目前为止也未见有文献报道。本文对这一物理现象首先进行定性分析:狭

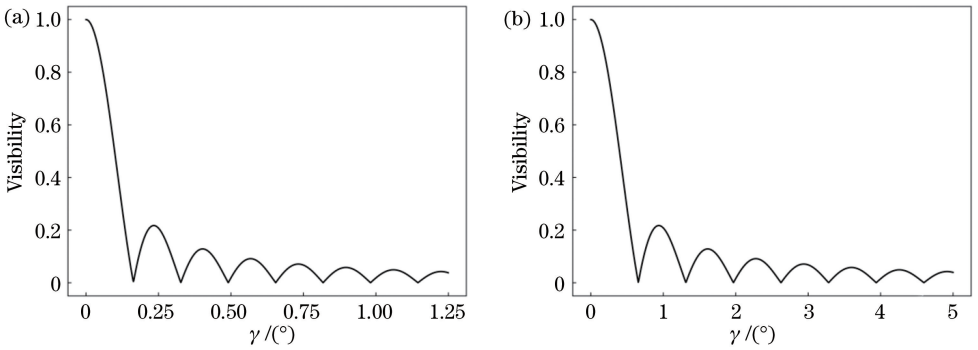

图 4 不同狭缝长度干涉条纹对比度随 γ 的变化关系曲线。(a) $l=2$ cm; (b) $l=0.5$ cm

Fig. 4 Interference fringe contrast as a function of γ under different slot lengths. (a) $l=2$ cm; (b) $l=0.5$ cm

缝可认为是由大量点光源组成的线光源，当 $\gamma=0°$ 时，狭缝上各点光源在干涉屏上产生的明(暗)条纹位置均相同，因此可在观察屏上得到可见度最大的干涉条纹；当 $\gamma\neq0°$ 时，狭缝上半部分和下半部分光源在观察屏上产生的明(暗)条纹的位置将向相反方向移动，导致观察屏上整体看到的干涉条纹的可见度急剧降低。但是，当 γ 为某一特殊值时，会出现狭缝上某一点光源的干涉明纹和狭缝上另外一个点光源的干涉明纹恰好重叠的情况，此时观察屏上就可得到干涉可见度的次极大值。但考虑到狭缝中其他点光源的贡献，可见度的次极大值将远小于 $\gamma=0°$ 时的干涉可见度值。

对图 4 所示的数值模拟结果进行定量实验验证。实验时，采用的实验装置和传统大学物理实验教材[20-21]内容中相同，因此不在本文中进行赘述，只重点分析当狭缝与双棱镜棱脊之间的夹角 $\gamma\neq0$ 时，对双棱镜干涉条纹造成的影响。但是，从图 4 的横坐标可以看出，要观察到此现象，狭缝与双棱镜棱脊之间的夹角 γ 变化应该在 1°范围内。考虑到目前的实验室条件无法满足如此精度的角度调节，因此对测微目镜上的干涉条纹以拍摄视频(30 frame/s)的方式进行实验研究。首先，调节狭缝的旋转位置，使测微目镜中的干涉条纹可见度最高，再将其逆时针旋转一定角度后的位置作为狭缝旋转角度位置的初始坐标。然后，顺时针手动缓慢旋转狭缝，并开始对干涉条纹进行拍摄，保持顺时针旋转狭缝，直到从测微目镜中完全观察不到干涉条纹为止时，停止拍摄。此过程共耗时约 3 s，从狭缝的角度刻度尺上看，狭缝的旋转角度范围约为 1°。此时，得到的视频中，就包含狭缝与双棱镜棱脊完全平行时(即 $\gamma=0°$)的干涉图样，以及当 γ 继续增大时的干涉图样。通过截取其中部分视频对应的图片(从可观察到可见度最高的干涉条纹开始，按时间顺序截取部分图片)，可以得到如图 5 所示的结果。

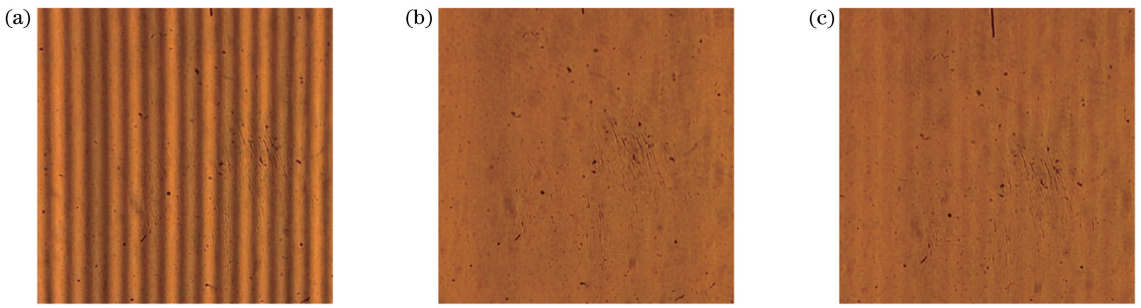

图 5 增大狭缝与双棱镜棱脊夹角 γ 时得到的图像。(a) $\gamma\approx0°$时的干涉图；(b)顺时针旋转狭缝一定角度(即 γ 增大)时的干涉图；(c)继续顺时针旋转狭缝一定角度后的干涉图

Fig. 5 Captured images obtained when angle γ between slot and double prism ridge is increased. (a) Interferogram obtained when $\gamma\approx0°$; (b) interferogram obtained when slot is rotated clockwise at a certain angle (i.e., γ is increased); (c) interferogram obtained when slot continues to rotate clockwise at a certain angle

从图 5(a)中可以看出，当狭缝与双棱镜棱脊之间的夹角 $\gamma\approx0°$时，观察屏上能够看到清晰的干涉条纹(可见度较高)。当顺时针旋转狭缝一个小角度后，从图 5(b)可以看出，干涉条纹基本消失(可见度几乎为 0)。从图 5(c)可以看出，当继续顺时针方向旋转一定角度后，可以看到干涉条纹将重新出现，但

是可见度相对图 5(a)时的情况明显降低。因此,实验结果证明了如图 4 所示的理论模拟结果。

4 结 论

利用线光源进行菲涅耳双棱镜干涉实验时,主要研究当狭缝方向与双棱镜棱脊不平行时,观察屏上得到的干涉条纹可见度的变化情况。首先利用几何光学及干涉原理,从理论上得出狭缝和双棱镜棱脊不平行时,观察屏上干涉强度分布变化情况。结果表明,随着狭缝方向和双棱镜棱脊之间的夹角 γ 的增大,干涉条纹的可见度快速降为 0。但是,减小所用狭缝的长度值 l,将在一定程度上增大 $V=0$ 时的 γ 值。因此,就双棱镜干涉实验的调节而言,选用长度较小的狭缝,可有效地降低观察到清晰干涉条纹的难度。另外,理论结果还表明,随着狭缝方向和双棱镜棱脊之间的夹角 γ 的继续增大,双棱镜干涉可见度还将出现再次增大和减小的现象,且可见度的次大值将随着 γ 的增大而继续降低。由于可见度次大值的最大值仅为狭缝方向和双棱镜棱脊平行时的 20%左右,因此在通常的实验过程中,人眼较难观察到可见度再次增大这一现象,这表明通常在双棱镜干涉实验中,要看到清晰的干涉条纹,必须调节狭缝方向和双棱镜棱脊平行这一问题。最后,本文还进行简单的实验验证,通过录制视频,并从截取的图片分析来看,随着狭缝方向和双棱镜棱脊之间的夹角 γ 增加,确实能够观察到干涉条纹从清晰到没有,然后再次出现的情况,从而证明了理论模拟的正确性。相信本文的研究,一方面有助于对菲涅耳双棱镜干涉这一经典现象有更加深入的理解,另一方面对该实验现象的调节方法提供了一定的指导。

参 考 文 献

[1] Feng G Y, Zhou S H. Wave optics[M]. Beijing: Science Press, 2013: 82-84.
冯国英, 周寿桓. 波动光学[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 82-84.

[2] Daukantas P. 200 years of Fresnel's legacy[J]. Optics and Photonics News, 2015, 26(9): 40-47.

[3] Ghatak A. Optics[M]. Zhang X G, Xi L X, Yu H J, Transl. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 263-266.
Ghatak A. 光学[M]. 张晓光, 席丽霞, 余和军, 译. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 263-266.

[4] Max B, Emil W. Principles of optics[M]. Yang X S, Transl. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 244-245.
马科斯·波恩, 埃米尔·沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭荪, 译. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 244-245.

[5] Yan H X, Wang K L. Experimental inquisition of place way of Fresnel double prism[J]. Experiment Science & Technology, 2012, 10(3): 188-190.
晏红祥, 王昆林. 菲涅耳双棱镜置放方式的实验探究[J]. 实验科学与技术, 2012, 10(3): 188-190.

[6] Ge S H, Tang Y M. Discussion on the Fresnel double being laid in two different ways in experiment[J]. Physical Experiment of College, 2012, 25(1): 35-37.
葛松华, 唐亚明. 菲涅尔双棱镜干涉实验中双棱镜两种放置方法的讨论[J]. 大学物理实验, 2012, 25(1): 35-37.

[7] Lai Y, Shen Z X, Wang Z S, *et al*. Measurement method of in-orbit small angle based on Fresnel biprism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 0317002.
来颖, 沈正祥, 王占山, 等. 基于菲涅尔双棱镜的在轨小角度测量方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0317002.

[8] Chen Y H. Measurement of wedge angle of biprism by double beam interference method[J]. Physical Experiment of College, 2017, 30(6): 65-67.
陈余行. 双光束干涉法测量双棱镜的楔角[J]. 大学物理实验, 2017, 30(6): 65-67.

[9] Zhang X. Measurement of refractive index and acute angle of Fresnel double prism[J]. Physics Experimentation, 1996, 16(4): 147, 146.
张雄. 菲涅尔双棱镜折射率和锐角的测量[J]. 物理实验, 1996, 16(4): 147, 146.

[10] Liao L X, Liu S Z, Mi X W. Simple method for measuring laser wavelength with biprism[J]. Physics Experimentation, 2007, 27(7): 34-35.
廖立新, 刘生长, 米贤武. 用双棱镜测激光波长的简单方法[J]. 物理实验, 2007, 27(7): 34-35.

[11] Ge S H, Tang Y M. Discussion on the position of two virtual light sources in Fresnel double prism experiment[J]. Physical Experiment of College, 2011, 24(2): 56-58.
葛松华, 唐亚明. 菲涅耳双棱镜干涉实验中虚光源位置的讨论[J]. 大学物理实验, 2011, 24(2): 56-58.

[12] Wang S H. Orientation and measurement of virtual light source in double prism interference experiment[J]. Physics and Engineering, 2013, 23(5): 25-26.

王素红. 双棱镜干涉实验中虚光源的定位与测量[J]. 物理与工程, 2013, 23(5): 25-26.

[13] Liu Q W, Wang X H. Measurement of distance of virtual light sources using object equaling image method in Fresnel biprism interference[J]. College Physics, 2017, 36(3): 28-31.
刘秋武, 王小怀. 物像等大法测量双棱镜干涉中虚光源间距[J]. 大学物理, 2017, 36(3): 28-31.

[14] Li A H, Sun J F, Liu L R. Design and analysis of high accuracy light beam deflection device[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(9): 1379-1383.
李安虎, 孙建锋, 刘立人. 高准确度光束偏转装置的设计与分析[J]. 光子学报, 2006, 35(9): 1379-1383.

[15] Zhang Y T, Li H G. Investigation of Fresnel biprism interference from the perspective of information optics[J]. Chinese Optics, 2019, 12(1): 122-129.
张颖涛, 李洪国. 信息光学视角下菲涅耳双棱镜干涉的研究[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 122-129.

[16] Anand A, Chhaniwal V, Javidi B. Tutorial: common path self-referencing digital holographic microscopy [J]. APL Photonics, 2018, 3(7): 071101.

[17] Li Y J, He X L, Kong Y, *et al*. Shearing interferometric electron beam imaging based on ptychographic iterative engine method [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(13): 134202.
李元杰, 何小亮, 孔艳, 等. 基于电子束剪切干涉的PIE成像技术研究[J]. 物理学报, 2017, 66(13): 134202.

[18] Yang S W, Zhao L Z, Shen G T. General physics experiment-3-optical part [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2007: 56-59.
杨述武, 赵立竹, 沈国土. 普通物理实验-3-光学部分[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2007: 56-59.

[19] Li W Z. College physics experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 76-81.
郦文忠. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 76-81.

[20] Zhang H J. Integrated and design physics experiments on optical platforms [M]. Beijing: Science Press, 2017: 74-81.
张皓晶. 光学平台上的综合与设计性物理实验[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 74-81.

[21] Shen Y, Su Y L. College physics experiment course [M]. Beijing: Higher Education Press, 2014: 357-362.
沈岩, 苏玉玲. 大学物理实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 357-362.

[22] Liang Q Y. Physical optics[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 81.
梁铨延. 物理光学[M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2012: 81.