

用波阵面图分析光阑衍射及其实用性举例*

王绍民 林 强 陈千颂 赵道木

(浙江大学物理系 杭州 310028)

提要 根据边界衍射波具有 π 位相跃变的性质, 利用波阵面图分析了平面波或球面波经光阑的衍射。该方法不仅适用于光阑半径远大于波长时的情况, 也适用于光阑半径接近于波长时的情况。从中可得到菲涅耳衍射区的许多特性。作为一个例子, 提出和验证了在发散球面波入射情况下可将菲涅耳数等于 1 的点拉至无穷远的结论。结果证实了边界衍射波中 π 位相跃变的存在, 并表明了其实用性。

关键词 波阵面图, 边界衍射波, π 位相跃变, 菲涅耳数

1 引 言

随着衍射光学和二元光学的迅速发展, 光的近场行为越来越引起人们的重视。这使得人们重新来认识和检验惠更斯-菲涅耳原理在光波近场的适用性。Depasse 等已清楚地指出光在近场时倾斜因子不存在, 且惠更斯-菲涅耳原理并不适用于在衍射距离小于波长时的情形^[1]。根据边界衍射波理论, 边界波可以解释成由入射波在衍射边缘上的散射^[2], 光阑的衍射主要是边界波的作用。衍射光场分布是两列光束相互干涉的结果, 一束是遵循几何光学传播规律传输的几何光束, 另一束是由光阑边界产生的光束, 即边界波。边界波的存在性, 最近又得到进一步证实^[3]。文献[4]指出, 边界波相对于直接入射波存在 π 位相跃变的性质。这和鲁比诺维奇边界衍射波理论倾斜因子前的负号是相对应的^[5,6]。

本文结合 π 位相跃变特性, 利用画波阵面图来分析在平面波或球面波入射下的光阑衍射, 从而说明光在菲涅耳衍射区的一些特性。

2 理论分析和实验结果

图 1 为结合 π 位相跃变特性画波阵面图法分析平面波入射圆形光阑的衍射。其中两相邻波阵面的间距为 λ , 光阑半径 $a = 2\lambda$, 菲涅耳数 $N = a^2/\lambda L$ 。对于 $N = 1$ 的点, $L = 4\lambda$ 。

从图 1 可以看出, 如果边界衍射波没有 π 位相跃变, 在轴上菲涅耳数 $N = 1$ 的地方找不到亮点, 如图 1(a) 所示。然而, 利用边界衍射波的 π 跃变这一概念则可以找到亮点, 如图 1(b) 所示。

* 浙江省自然科学基金和浙江省教委基金资助项目。

收稿日期: 1998-09-21; 收到修改稿日期: 1998-11-23

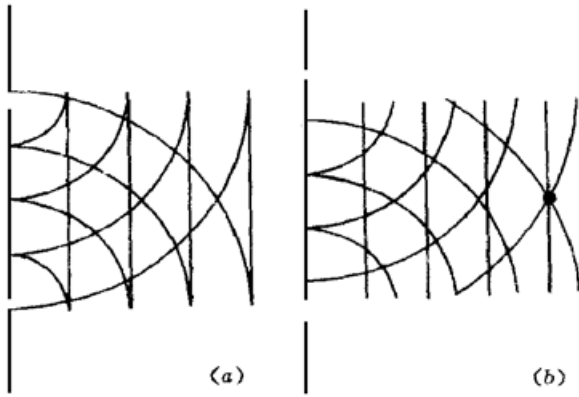


图 1 画波阵面图找菲涅耳衍射区的轴上亮点
其中黑点代表菲涅耳数为 1 的点
(a) 无 π 位相跃变; (b) 有 π 位相跃变

Fig. 1 Geometry of the axial bright point in the Fresnel diffraction region by the way of drawing the wavefront diagram
The black point stands for the one of Fresnel number.
(a) without phase jump; (b) with phase jump

利用画波阵面图可发现在菲涅耳衍射区的许多特性。从图 1(b) 中不难发现, 在 $N = 1$ 的轴上点几何波与边界衍射波之间存在一微小差异, 用轴上光程差 Δ 表示, 这是由于光阑半径只是光波波长的 2 倍。光阑半径较大时, 差异将消失。图 2 给出了当光阑半径缩小或增大时边界波与直接入射波在轴上交叉点的差异 Δ/λ 跟传输距离 z/λ 之间的关系, 在不同光阑半径时具有不同的特征。所有距离以波长为单位。

从图 2(a) 可以看出, 在 $a/\lambda = 1$ 的情况下, 当 $z/\lambda = 1$ 时, Δ/λ 达到其最小值, 这表明边界波与直接入射波有最小的相位差, 且轴上点为亮点, 在该点其菲涅耳数 $N = 1$ 。注意到 Δ/λ 的最小值并不为 0, 相对位移为 11%, 这是由于 a/λ 太小之故。若 $z/\lambda < 1$, 将不存在交叉点。

从图 2(b) 可以看出, 在 $a/\lambda = 10$ 的情况下, 当菲涅耳数 $N = 1$ 时, Δ/λ 为 0。在无限远处, Δ/λ

接近并稳定在小于 0.5 的某一定值, 这表明考虑了 π 位相跃变后将在远场形成夫琅和费衍射或 Airy 斑。在菲涅耳数 $N = 2, 3, 4, \dots$ 时, 从图中可以清楚地看出随菲涅耳数的偶奇而其暗亮交替。因而可知, 结合 π 位相跃变特性画波阵面图, 可以得到光阑衍射的许多特性。

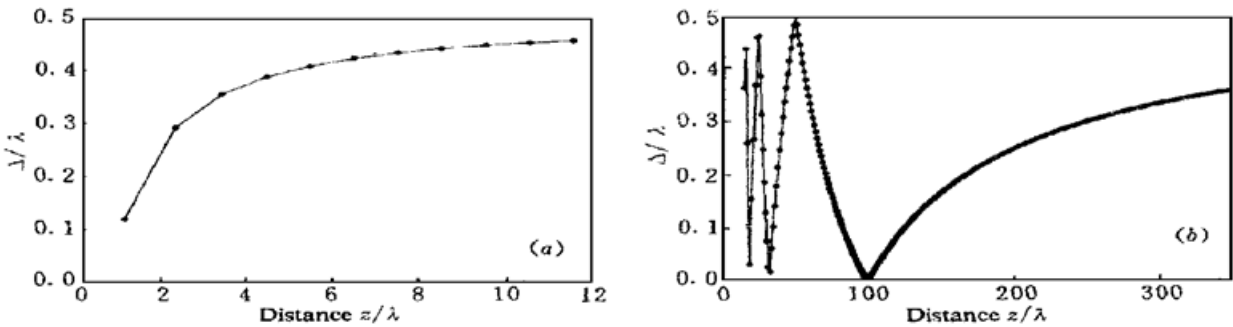


图 2 在平面波入射情况下, 边界波与直接入射波在轴上交叉点的差异 Δ/λ 与传输距离 z/λ 之间的关系
Fig. 2 Dependence of the separation between the cross points of the boundary wavefront and the incident plane wavefront Δ/λ on the distance z/λ
(a) $a/\lambda = 1$; (b) $a/\lambda = 10$

在 $a/\lambda = 2$ 的情况下(见图 1), 用简单的几何关系可以得到 Δ/λ 为 2.8%。边界波带 π 跃变的波阵面图和鲁比诺维奇公式因而也和基耳霍夫衍射积分公式完全等价。从上 3 例可知其具体的应用范围。

若入射波为球面波, 同样可用画波阵面图分析衍射问题。图 3 给出了在会聚球面波与发散球面波入射情形下, 差异 Δ/λ 跟传输距离 z/λ 的关系, 其中选取 $a/\lambda = 10, \rho/\lambda = \pm 400, a$ 为光阑半径, ρ 为入射光波曲率半径, “ \ominus ”表示发散球面波, “ \oplus ”表示会聚球面波。球面波的作图法

参见文献[4]。

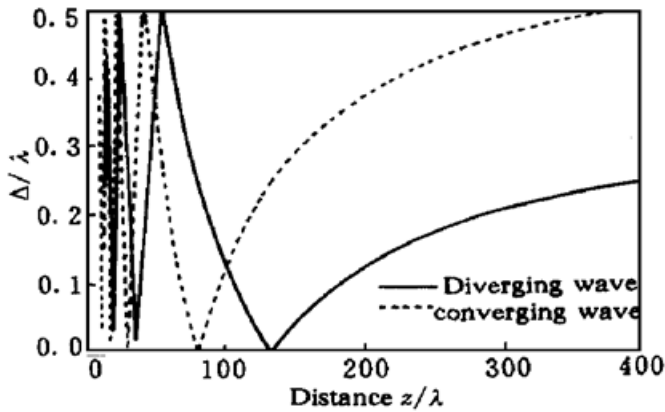


图3 在球面波入射情况下, 边界波与直接入射波在轴上交叉点的差异 Δ/λ 与传输距离 z/λ 之间的关系, 其中 $a/\lambda = 10, \rho/\lambda = \pm 400$

Fig. 3 Dependence of the separation between the cross points of the boundary wavefront and the incident spherical wavefront Δ/λ on the distance $z/\lambda, a/\lambda = 10, \rho/\lambda = \pm 400$

从图3可以看出, 在菲涅耳数 $N = 1$ 的轴上点, 差异 Δ/λ 接近最小值0, 相对于平面波而言它发生了移动。对于发散波入射, 它将向离开光阑方向移动; 对于会聚波入射, 它将向靠近光阑方向移动。对于菲涅耳数 $N = 2, 3, 4, \dots$ 时的情形, 相对于图2(b)也发生了移动。注意到当在会聚波的球面中心位置($z/\lambda = 400$)时, $\Delta/\lambda = 0.5$, 边界波与直接入射波正好反相, 为黑点。反之, 若设定入射发散波的曲率半径满足条件 $\rho = a^2/\lambda$, 在足够传输距离处 Δ/λ 将接近于0, 这表明边界波与直接入射波将是同位相, 结果如图4所示。

在球面波入射下, 其完整的菲涅耳数可表示为^[7]

$$N = \frac{a^2}{\lambda} \left[\frac{1}{\rho} + \frac{1}{z} \right] \tag{1}$$

在图4中, $N = 1 + a^2/\lambda z$ 。当 $z \rightarrow \infty$ 时, $N \rightarrow 1$, 表明菲涅耳数为1的点将被拉至无穷远, 该衍射为菲涅耳衍射, 并不是夫琅和费衍射, 这可得到实验证实。选一基模 He-Ne 激光被 $\Phi 25 \mu\text{m}$

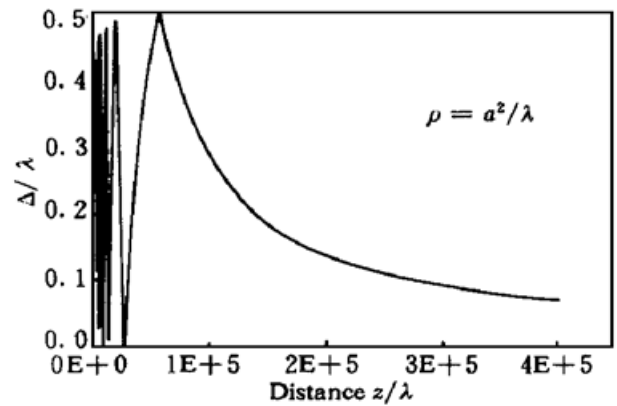
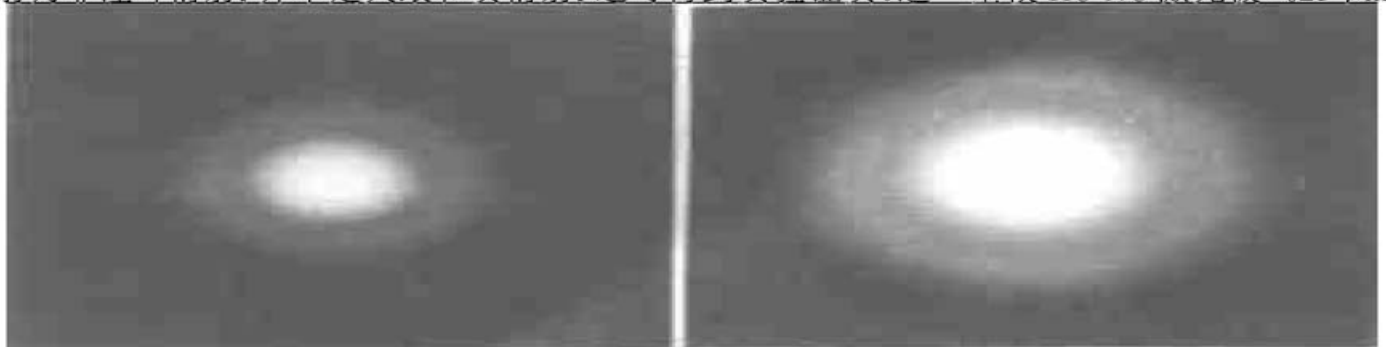


图4 选 $a/\lambda = 238$ 并满足条件 $\rho = a^2/\lambda$ 时 Δ/λ 与 z/λ 的关系

Fig. 4 Dependence of Δ/λ on the distance z/λ for a special case when the radius of curvature of the incident diverging wavefront satisfies $a/\lambda = 238, \rho = a^2/\lambda$



(a) (b)
图5 满足条件 $\rho = a^2/\lambda$ 时的实验衍射光斑

Fig. 5 Experimental demonstration of a diffraction pattern when the incident diverging spherical wave satisfies $\rho = a^2/\lambda$. (a) $N = 1.12$; (b) $N = 1.08$

的小孔强衍射产生 Airy 斑, 其后用一 $a = 0.15 \text{ mm}$ 的光阑置于 35.5 mm 处, 分别在菲涅耳数 N 等于 1.12 和 1.08 处观测其衍射图样, 实验结果如图 5 所示。

3 结 论

结合 π 位相跃变特性画波阵面图可用于分析在平面波或球面波入射下的光阑衍射, 可以方便地得到轴上亮点或暗点的位置。提出了可以把菲涅耳数等于 1 的衍射点拉至无穷远的观点, 并得到了实验的证实。同时, 在光阑半径可以跟波长相比拟的情况下, 对完全和它等价的基耳霍夫衍射理论的适用范围进行了讨论。

参 考 文 献

- 1 F. Depasse, M. A. Paesler, D. Courjon *et al.*. Huygens-Fresnel principle in the near field. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(3): 234~ 236
- 2 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics, 6th Ed.. Oxford: Pergamon Press, 1980, Chap. 8
- 3 S. Wang, Q. Lin, D. Zhao *et al.*. Zero field truncation of Airy patten and its transformation property. Submitted to Journal of Optoelectronics Laser
- 4 Wang Shaomin. On natures of diffraction. *Appl. Laser* (应用激光), 1994, **14**(3): 99~ 101 (in Chinese); S. Wang. On principles of diffraction. *Optik*, 1995, **100**(4): 107~ 108
- 5 K. Miyamoto, E. Wolf. Generalization of the Maggi-Rubinowicz theory of the boundary diffraction wave—Part I. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, **52**(6): 615~ 625
- 6 S. Wang, Q. Lin, X. Lu *et al.*. On the Nature of Diffraction and New Beam Lasers. Hangzhou: Hangzhou University Press, 1997. 7~ 12, 70~ 77 (in Chinese and in English)
- 7 S. Wang, E. Bernabeu, J. Alda. Unified and generalized Fresnel numbers. *Optical and Quantum Electronics*, 1992, **24**(12): 1351~ 1358

Diffraction of Aperture Analyzed by Wavefront Diagram and Its Applications

Wang Shaomin Lin Qiang Chen Qiansong Zhao Daomu
(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310028)

Abstract Based on the concept that there is a π phase jump property in the boundary wave, the diffraction of the plane wave and the spherical wave through an aperture is analyzed by means of wavefront diagram. This method can be used not only in the case where the aperture radius a is much larger than wavelength λ , but also in the case when a is comparable to λ . It is shown that many properties of diffraction in the Fresnel region can be obtained. As an example, a method to put the point of unit Fresnel number to infinity is suggested and demonstrated. The results of this report confirmed the existence of the π phase jump concept and its value in practical applications.

Key words wavefront diagram, boundary diffraction wave, π phase jump, Fresnel number