

①

142-146

特殊面形的菲涅尔透镜的设计与分析

桑涛 王汝笠^{*} 严义坝^{*}

(中国科学院上海技术物理研究所光电研究中心, 上海, 200083)

①

0435.2

摘要 对连续位相型菲涅尔透镜的设计, 采用简单的线性面形代替复杂的抛物面(二次)面形有可能降低控制面形的难度. 文中分析了这两种面形的差异, 通过数值模拟, 发现采用线性面形时光学传递函数和点扩散函数十分接近理想函数, 从而在理论上论证了这种代替的可行性. 文中并提出了进一步改进的措施.

关键词 透镜, 波差, 衍射, 光学传递函数, 点扩散函数.

连续位相型

引言

菲涅尔透镜

菲涅尔透镜因其结构轻巧, 复制成本低而受到人们的广泛关注. 受目前工艺条件的限制, 人们通常只能加工出台阶型位相面形. 这种面形因采用了量化的位相使得在主级次衍射效率降低的同时产生了有害的干扰级次, 限制了它的使用场合; 此外多台阶的制作受套刻误差的影响较大, 其成品率一直较低. 近些年来, 激光直写和金刚石单点车削技术的迅速发展使人们的注意力又转向了连续位相型菲涅尔透镜的制作^[1,2]. 这类透镜的显著特点是衍射效率高, 无干扰级次, 因而将成为今后研究和应用的主流. 从理论上讲, 该透镜的位相面形可由分段的抛物线表示, 这种较复杂的二次面形无疑增加了制作时对面形精度控制的难度. 我们采用抛物线两端连线构成的线性面形来代替该二次面形, 有可能降低对面形的控制难度, 减少加工时间, 提高成品率.

1 设计公式与理论分析

1.1 设计公式

菲涅尔透镜由一系列同心环带(zone)构成(见图1). 在旁轴近似下, 各环带的半径由下式决定^[3]:

$$r_n = r_1 \sqrt{n}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, N; \quad (1)$$

式(1)中 r_1 是第一个环带的半径, $r_1 = \sqrt{2\lambda F}$, λ 是波长, F 是透镜焦距, N 是环带总数(为了便于讨论, 本文假设透镜恰好包含整数个环带).

在各环带中, 人们目前所采用的抛物(二次)面形可由图1中的虚线 $\varphi_{pn}(r)$ 来表示:

* 中国科学院, 北京, 100083
稿件收到日期 1996-10-30, 修改稿收到日期 1997-12-03

$$\varphi_m(r) = 2\pi \frac{r_{n+1}^2 - r^2}{r_1^2}, \quad r_n \leq r < r_{n+1}, n = 0, 1, 2, \dots, N-1; \quad (2)$$

对于线性面形,则由图1中的实线 $\varphi_n(r)$ 来表达:

$$\varphi_n(r) = 2\pi \frac{r_{n+1} - r}{r_{n+1} - r_n}, \quad r_n \leq r < r_{n+1}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1; \quad (3)$$

式(3)就是线性面形菲涅尔透镜的位相设计公式.

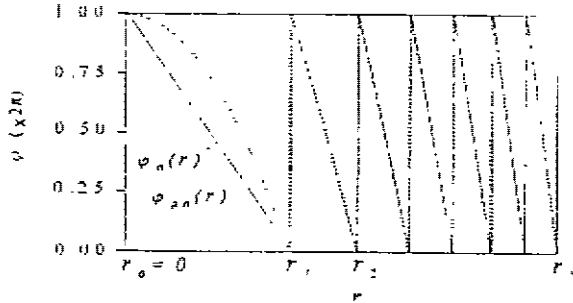


图1 线性面形和抛物(二次)面形的比较
Fig. 1 The comparison for the linear and quadratic profiles.

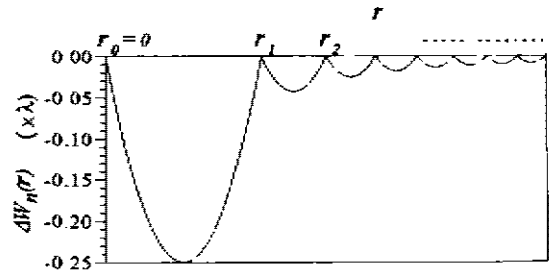


图2 波差曲线 $\Delta w_n(r)$
Fig. 2 The curve of wave aberration $\Delta w_n(r)$

1.2 波差分析

在旁轴近似下,光线通过线性面形与二次面形的光程差就是线性面形引入的波差,即

$$\Delta w_n(r) = \frac{\lambda}{2\pi} [\varphi_n(r) - \varphi_m(r)] = \lambda \frac{(r_{n+1} - r)(r_n - r)}{r_1^2}, \quad r_n \leq r < r_{n+1}, n = 0, 1, 2, \dots, N-1; \quad (4)$$

容易证明: $\Delta w_n(r) < 0$; 且当 $r = 0.5 \cdot (r_n + r_{n+1})$ 时, $|\Delta w_n(r)|$ 达到的最大值为:

$$|\Delta w_n(r)|_{\max} = \frac{\lambda(r_{n+1} - r_n)^2}{4r_1^2} = \frac{\lambda}{4(\sqrt{n} + \sqrt{n+1})^2}, \quad r_n \leq r < r_{n+1}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (5)$$

从式(5)可见,对整个透镜而言,中心环带具有最大的波差,其值也仅为 $\lambda/4$; 对于其它环带, $n \geq 1$, 从而由式(5)可知:

$$|\Delta w_n(r)|_{\max} < \frac{\lambda}{16n}, \quad r_n \leq r < r_{n+1}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (6)$$

该式(6)意味着各环带的最大波差可随环带序数 n 成反比下降; 尤其是当 $n > 5$ 时, 该波差已小于 0.01λ , 完全可以忽略不计, 此时的线性面形与抛物面面形几乎重合, 这一关系也可从图1中看出. 我们用表1给出了 $|\Delta w_n(r)|_{\max}$ 的部分值, 用图2表示了该波差曲线 $\Delta w_n(r)$.

1.3 频率特性分析

通过式(5), 可将该透镜的相干传递函数表示为^[4]:

表 1 各环带区域中的最大波差 $|\Delta w_n(r)|_{\max}$
 Table 1 The maximum wave aberration $|\Delta w_n(r)|_{\max}$ in each zone.

n	0	1	2	3	4	5	>5
$ \Delta w_n(r) _{\max}(\lambda)$	0.25	0.04289	0.02526	0.01795	0.01393	0.01139	<0.01

$$H(f_x, f_y) = \begin{cases} \exp[i \frac{2\pi}{\lambda} \Delta w_n(\lambda F \sqrt{f_x^2 + f_y^2})], & r_n \leq \lambda F \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < r_{n-1}, n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \\ 0, & r_N \leq \lambda F \sqrt{f_x^2 + f_y^2}; \end{cases} \quad (7)$$

从而获得光学传递函数^[4]:

$$OTF(f_x, f_y) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\xi, \eta) H^*(\xi + f_x, \eta + f_y) d\xi d\eta}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta}, \quad (8)$$

以及强度点扩散函数^[4]:

$$PSF(u, v) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(f_x, f_y) \exp[-2\pi(f_x u + f_y v)] df_x df_y \right|^2 \quad (9)$$

式(9)中 (u, v) 代表物面坐标.

2 模拟结果及分析

根据式(7), (8), (9), 针对设计的红外 $1.06\mu\text{m}$ 波长, 当非涅尔透镜的焦距为 150mm , 口径为 10mm 时, 我们用计算机数值模拟了光学传递函数 OTF 和点扩散函数 PSF 的分布. 我们在图 3(a)中比较了线性面形与理想面形的 OTF , 其中 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ 表示频率坐标,

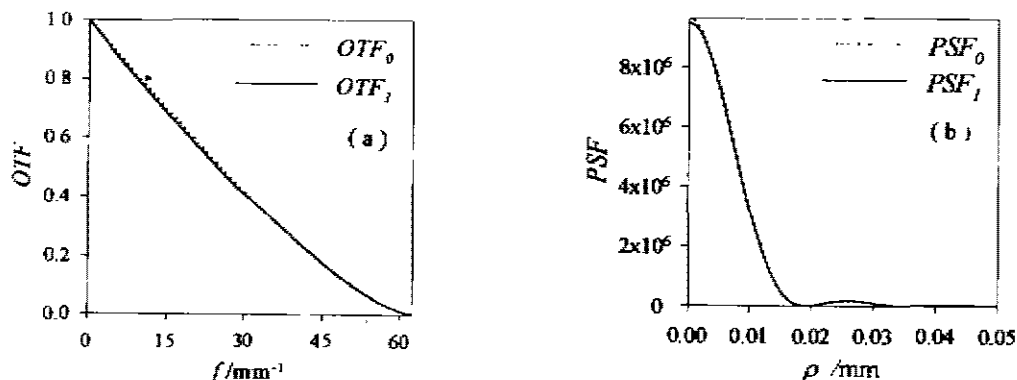


图 3 线性面形与理想面形的性能比较

(a) OTF 的比较

(b) PSF 的比较

Fig. 3 The performance comparison between the linear profile and the ideal one

(a) the comparison of OTF (b) the comparison of PSF

虚线表示理想面形的光学传函 OTF_0 , 实线表示线性面形的光学传函 OTF_1 . 可以看出, 在中低频区域, OTF_1 与 OTF_0 相比略有下降, 但在中高频区两者吻合得很好. 这一现象是由于线性面形的波差随环带序数增加而下降的结果. 我们于图 3(b) 比较了线性面形与理想面形的 PSF , 图中 $\rho = \sqrt{y^2 + u^2}$ 表示物面坐标, 虚线表示理想面形的点扩散函数 PSF_0 , 实线表示线性面形的点扩散函数 PSF_1 . 容易看出, PSF_1 只是中心区强度有略微下降, 其余部分与理想曲线 PSF_0 吻合得很好. 此外, 经计算, 我们发现采用线性面形时衍射斑中心极大的能量可高达理想值的 99% 以上.

上述事实说明, 采用线性面形时, 透镜的光学性能可十分接近理想(衍射受限)性能, 证明以这种简单面形代替复杂的二次面形是完全可行的.

3 讨论

如果需要进一步减少上述波差, 也可以将较为宽大平缓而便于制作的中心环带仍保留为二次曲面, 仅对其它环带采用线性近似, 此时透镜的相干传递函数为:

$$H(f_x, f_y) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \lambda F \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < r_1, \\ \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \Delta w_n (\lambda F \sqrt{f_x^2 + f_y^2})\right], & r_n \leq \lambda F \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < r_{n+1}, n = 1, 2, \dots, N-1 \\ 0, & r_N \leq \lambda F \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \end{cases} \quad (10)$$

在这种情况下, 透镜的光学传递函数(记为 OTF_2)及点扩散函数(记为 PSF_2)更加接近理想情况, 计算机模拟证明了这点(见图 4).

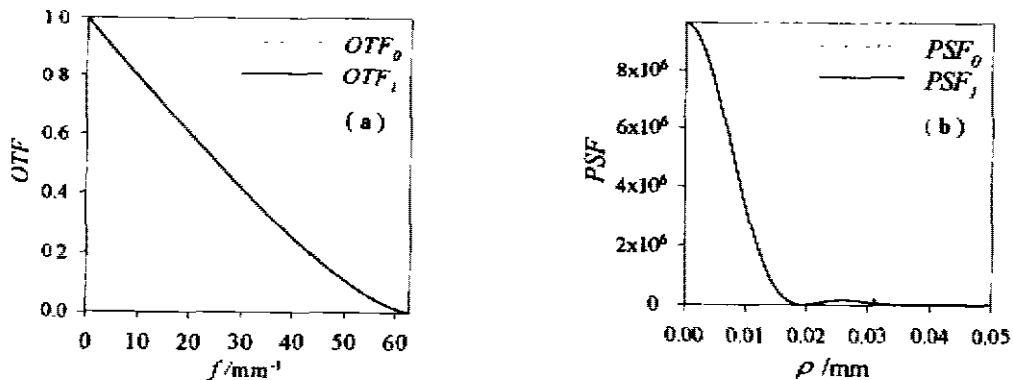


图 4 中心环带为二次曲面其余环带为线性曲面的面形与理想情形的性能比较
(a) OTF 的比较 (b) PSF 的比较

Fig. 4 The performance comparison between the ideal profile and the profile whose central zone is quadratic while the rest zones are linear:
(a) the comparison of OTF (b) the comparison of PSF

对于连续位相型菲涅尔透镜的设计, 本文从理论上分析了简单的线性面形代替较复杂的二次面形的可能性, 通过这两类面形的设计公式比较了它们差异, 给出并分析了这种差异对光学性能的影响. 计算机数值模拟表明, 这两类面形的光学传递函数和点扩散函数十分接

近,从而为这种代替提供了理论依据.本文的有关结论同样适用于菲涅尔反射镜.

致谢 本工作曾得益于同长春光机所应用光学国家重点实验室的翁志成、卢振武和廖江红三位研究员的探讨,在此表示衷心的感谢.

REFERENCES

- 1 Bowen J P, Blough C G, Wong V. in: *Optical Fabrication and Testing*, Technical Digest Series Vol13, 1994, OSA, 153~156
- 2 Clark P P, Londono C. *Opt. News*, 1994, 15: 39~40
- 3 Faklis D, Morris G M. *Applied Optics*, 1995, 34(14): 2464
- 4 Joseph W. *Introduction to Fourier Optics*, New York: McGraw-Hill Book Company, 1968, 111~123

THE DESIGN AND ANALYSIS OF FRESNEL LENS WITH A SPECIAL PROFILE *

SANG Tao WANG Ru-Li YAN Yi-Xun

(*Optoelectronics Research Center, Shanghai Institute of
Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

Abstract This paper pointed out that, for the design of continuous phase Fresnel lens, it helps to reduce control difficulty of the fabricated profile to replace the more complex quadratic profile with simpler linear one. The difference between such two kinds of profile was analyzed in details. By computer simulation, it was found that the optics transferring function (*OTF*) and the point spread function (*PSF*) of the linear profile lens are very close to the ideal ones, which provides the theoretical demonstration. At last, the further improving approach was pointed out.

Key words lens, wave aberration, diffraction, *OTF*, *PSF*.

* The present address: Chinese Academy of Sciences, Beijing 100031, China
Received 1996-10-30, revised 1997-12-03