

一种球柱面一体化透镜的几何光学设计

孙桂林 张小星 杜 玲
(北京机械工业学院, 北京, 100085)

摘要: 提出了一种可使光轴折转 90° , 利用球面的折射和反射使子午面内的光束变为平行光, 利用球面和柱面使弧矢光束会聚且有实焦点的球柱面一体化透镜, 分析讨论了其近轴光学特性, 给出了一些约束条件。这种透镜具有批量生产成本低、数值孔径大等优点, 可用于把基模高斯细圆光束变换为线光束。

关键词: 透镜 几何光学设计 高斯光束变换 球面 柱面 线光束

Geometrical optical design of a spherical-cylinder integrated lens used in line beam transformation from Gaussian laser beam

Sun Guilin, Zhang Xiaoxing, Du Ling
(Beijing Institute of Machinery, Beijing, 100085)

Abstract: A new spherical-cylinder integrated lens is proposed which can deflect the optical axis to 90° , transform laser Gaussian beam in meridian section into parallel beam through refraction and reflection of spherical surfaces, and converge the sagittal beam into a real point outside of the lens though refraction and reflection of spherical surfaces and refraction of a cylinder surface. Its paraxial optical properties are analyzed and some constraint conditions are given. The lens has the advantages of low cost with volume production, large numerical aperture which can find applications in the areas of transforming Gaussian or astigmatic laser beam into line beam such as cylinder interferometer, 3-D profile measurement.

Key words: lens geometrical optical design Gaussian beam transformation sphere cylinder line beam

引 言

在一些激光应用中, 需要把圆激光束变换成线光束, 例如, 激光柱面波干涉仪^[1]、光切法三维形面测量^[2]、X 射线激光线聚焦^[3, 4]及其它一些工业应用和科学研究。传统的柱面透镜法, 常常产生“船形”光斑, 光束形状不理想, 且数值孔径很小。已经报道了一些线光束变换方法。我们在实验中发现用一块平凸透镜的折射和反射, 可以把细激光束变换成线光束, 并报道了我们的初步实验结果^[5]。分析这种单透镜产生线光束的原因, 可以发现, 光束的大入射角使子午和弧矢方向的光焦度有很大差异, 因而产生了大像散, 小光焦度面对光束作用较弱, 因此, 光束宽度方向的变化与原入射激光束的发散相当, 而光束长度方向发散严重, 光束纵横比大。在此基础上, 我们又提出了本文所报道的这种球面-柱面一体化, 折射和反射相结合的新型透镜, 用于将基模高斯光束或椭圆激光束变换为线光束。

1 透镜结构及其近轴光学特性

众所周知, 离轴的球面反射镜可以产生像散, 柱面透镜只对一维光束进行变换。为了使一

个方向的光焦度为零,我们提出了如图 1 所示的球柱面一体,折反射相结合的新型光学系统。其中 r_1 是圆柱体 r_3 的球端面曲率半径; r_2 是球面反射镜的曲率半径,它与光轴的夹角为 α ,一般可取 $\alpha = 45^\circ$,其顶点位于光轴上; r_3 是圆柱体的曲率半径。透镜折射率为 n 。假设入射光为平行光,光线从左向右,下面推导近轴光线经此透镜的成像公式。

平行光经球端面折射,会聚于其焦点上,设其焦距为 f' ,

由几何光学可知,单折射面的像方焦距为

$$f' = [n/(n-1)]r_1 \quad (1)$$

设透镜长度为 d ,为推导方便,令 $d = k_1 r_1$ (2)

式中, k_1 为给定常数,则对离轴球面反射镜 r_2 来说,其子午和弧矢物距相等,考虑到符号规则,有

$$t = s = f' - d = nr_1/(n-1) - k_1 r_1 = mr_1 \quad (3)$$

式中, $m = n/(n-1) - k_1$ 。

反射后,其子午和弧矢像距可由杨氏公式计算,其表示式为

$$1/t' + 1/t = 2/(r_2 \cos \alpha) \quad (4)$$

$$1/s' + 1/s = 2 \cos \alpha / r_2 \quad (5)$$

柱面 r_3 只对弧矢光线起变换作用,而不改变子午光线的会聚状态。因为要求产生线光束,可令 $t' = \infty$,故可由(3)式和(4)式导出 r_2 与 r_1 的关系 $r_2 = 2mr_1/\cos \alpha$ (6)

将(3)式和(6)式代入(5)式,可以导出 $s' = -nr_1/\sin^2 \alpha$ (7)

对于柱面 r_3 来说, r_2 的弧矢焦点为物,其物距为 $l = s' + r_3$ (8)

上式已考虑到 r_3 为负值。此时对柱面仍是轴上近轴物点成像,故有

$$1/l' + n/l = (1-n)/r_3 \quad (9)$$

令 $r_3 = k_2 r_1$ (10)

式中, k_2 为给定常数。由此可以导出

$$l' = k_2(k_2 \sin^2 \alpha - m)r_1 / [(1-n)(k_2 \sin^2 \alpha - m) + k_2 n \sin^2 \alpha] \quad (11)$$

l' 即为此系统的弧矢焦截距。可见,它与三个曲率半径及 α 和 n 有关。

此光学系统子午面内的光焦度为零,相当于一个望远系统,其角放大率为

$$\gamma = f'/t = n/[(n-1)m] \quad (12)$$

可见, r_1 一定时,它只与折射率和透镜长度有关。当 $|m| > n/(n-1)$ (13)

说明它对出射光束的发散角有压缩,线光束长度(口径)变长。否则,要获得较短的焦线,光束发散变大。

2 实焦点透镜结构

在许多应用中,希望透镜有实焦点(焦线),即焦点位于透镜之外。下面推导满足 $l' > 0$ 的条件。注意,由符号规则, $r_3 < 0$ 。分两种情况讨论。

2.1 $r_1 > 0$

这时,左端面为凸球,对光线起会聚作用。由(11)式可知,它要求

$$[k_2(k_2 \sin^2 \alpha - m)] / [(1-n)(k_2 \sin^2 \alpha - m) + k_2 n \sin^2 \alpha] > 0 \quad (14)$$

经简单变换,有 $(1-n)/k_2 > n \sin^2 \alpha / (k_2 \sin^2 \alpha - m)$

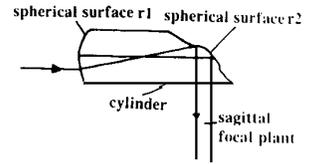


Fig. 1 Lens structure

上式还可以进一步变换为 $(n-1)/(n\sin^2\alpha) > 1/(m/k_2 - \sin^2\alpha)$ (15)

令 $m/k_2 > \sin^2\alpha$ (16)

则由上式可导出 $m/k_2 > (2n-1)\sin^2\alpha/(n-1)$ (17)

综合以上两式, 可以得出 $r_1 > 0$ 时有实焦点的透镜应满足的条件是

$$m/k_2 > \sin^2\alpha \quad m < 0 \quad k_2 < 0 \quad (18)$$

因为 $m < 0$, 由(6)式和符号规则可知, 此时反射镜为凹面, 正如图1所示。当

$$m/k_2 < \sin^2\alpha \quad (19)$$

则无论 m 为正或负, (15)式总成立。当 r_1 一定时, m 决定透镜的长度。

2.2 $r_1 < 0$

此时球端面为凹面, 它起发散作用。平行光入射时, 因 $f' < 0$, 故必有 $t < 0$, $m > 0$ (因为 $r_1 < 0$), 同理, 由(14)式可以导出 $(n-1)/(n\sin^2\alpha) < 1/(\sin^2\alpha - m/k_2)$ (20)

上式仅当 $m/k_2 < \sin^2\alpha$ (21)

时成立。因为 $r_3 < 0$, $r_1 < 0$, 故 $k_2 > 0$, 又 $m > 0$, 故 $r_2 < 0$, 此时反射面仍为凹球面。

2.3 透镜的长度

当 r_1 一定时, 由(3)式可导出透镜长度为

$$d = k_1 r_1 = [n/(n-1) - m] r_1 \quad (22)$$

由于 d 总大于零, 因此, 可以导出 m 应满足的条件是

$$m < n/(n-1) \quad r_1 > 0 \quad (23)$$

$$m > n/(n-1) \quad r_1 < 0 \quad (24)$$

因此, 我们可以把有实焦点透镜的结构归结为以下三

个约束条件 $m/k_2 > \sin^2\alpha \quad k_2 < 0 \quad m < 0 \quad r_1 > 0$ (25)

$$m/k_2 < \sin^2\alpha \quad k_2 < 0 \quad m < n/(n-1) \quad r_1 > 0 \quad (26)$$

$$m/k_2 < \sin^2\alpha \quad k_2 > 0 \quad m > n/(n-1) \quad r_1 < 0 \quad (27)$$

图2用坐标系中的不同区域表示了这些条件。由于透镜长度和柱面体曲率半径为有限值, 所以上述条件应限制在图中的矩形框内。

3 结 论

我们提出了一种利用折射和反射、球面和柱面一体的新型透镜, 推导了具有实焦点的透镜的条件。这种透镜可用于对高斯光束的线变换, 也可用于对像散椭圆光束的校正和整形(只是(3)式中 t 不等于 s), 它具有几个特点: (1)子午面内为平行光, 故输出激光束的直径或束散角可得到变换或改善; (2)像差变量多, 有利于校正弧矢方向的球差, 故数值孔径较大; (3)一般情况下(如 $\alpha = 45^\circ$), 反射面不需要镀膜, 普通的光学材料均能实现全反射; (4)可直接对激光器输出的细光束进行变换, 不需辅助的扩束准直系统; (5)与一些光束整形方法, 如吸收法、镀膜法、全息法或异形光栏法相结合, 可进一步改善输出线光束的均匀性。

这种透镜制造的可能性如何? 最近我们发现, 美国佛罗里达州葛尔特克公司已用压铸法制成了直径 2.8mm, 长 5.9mm 的类似透镜, 用于内窥镜手术仪器的变焦物镜, 因此, 其制造是不成问题的。由于是压铸成型, 不需传统的精磨抛光工艺, 因此, 可批量生产, 且成本低。

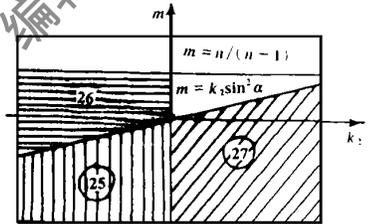


Fig. 2 Diagram of design constraints

用双折射激光频率分裂原理实现的静态与动态测量方法

邓之兵 李 岩 韩艳梅 张书练

(清华大学精密仪器系, 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京, 100084)

摘要: 讨论了用双折射激光频率分裂技术原理实现的静态与动态测量方法; 介绍了实验系统和实验结果。该方法具有诸多优越性, 例如灵敏度高、频响范围宽、有较强的抗干扰能力和较好的线性等, 尤其适用于动态测量。

关键词: 双折射 激光 频率分裂 测量

Static and dynamic measuring method based on birefringence laser frequency splitting principle

Den Zhibing, Li Yan, Han Yanmei, Zhang Shulian

(The State Key Lab. for Precision Measurement Technology and Instruments,
Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: Based on birefringence laser frequency splitting principle. This paper introduced the experimental system for static and dynamic measurements. The static measurements include the angle detection with $0.3''$ angle precision and the displacement detection with 10nm resolution. The dynamic detection can be utilize for detecting of the vibration frequency and amplitude with 15nm resolution at the range of 0.1 Hz~ 8kHz. The method has many advantages: higher sensitivity, wide frequency response range and good linearity.

Key words: birefringence laser frequency splitting measurement

引 言

双折射激光频率分裂技术从 1985 年诞生以来^[1], 经过清华大学精密仪器系以张书练教授为首的研究小组的艰苦努力, 取得了许多很有价值的研究成果。我们仅对其应用于测量领域的情况作一些介绍。

参 考 文 献

- 1 Tanigawa H, Kawai S, Nakajima S. Opt Commun, 1987; 61(5): 299~ 301
- 2 陈伟民, 王晓林, 黄尚廉. 仪器仪表学报, 1996; 17(2): 149~ 153
- 3 丘 悦, 黄宏一, 范滇元 *et al.* 光学学报, 1994; 14(11): 1198~ 1203
- 4 Lü B D, Zhang B J Modern Opt, 1995; 42(8): 1593~ 1601
- 5 Sun G L, Zhang X X, Du L *et al.* Transforming Gaussian beam into line beam by a spherical lens, The Proceedings of SPIE, 1996; 2890: 148~ 153

作者简介: 孙桂林, 男, 1962 年出生。硕士, 副教授。主要研究方向为光学测量与光学设计、激光与全息应用等。