

多光束扫描成像系统的像差分析*

陈玲华 张逸新

(无锡轻工大学机械系, 无锡 214036)

摘 要 根据几何光学理论, 导出多光束扫描成像的综合像差方程, 分析了导致离轴扫描线像差的入射光线与成像系统光轴夹角、转镜面数等因素, 并研究了各单项像差的权重因子。基于上述多光束扫描成像的综合像差方程, 分析并给出了校正离轴扫描线像差的特殊透镜所应具备的预畸变因子。

关键词 多光束扫描, 几何像差, 设计理论。

1 引 言

多光束同时扫描输出是解决光学记录领域中采用单光束激光扫描输出速度慢等问题的有效方法, 但由于多光束扫描应用了轴外光源的扫描, 给系统带来更严重的像差, 因此多光束扫描系统的像差成因分析与像差校正是该领域研究人员十分感兴趣的问题。

目前, 人们已从不同角度对多光束扫描系统像差校正进行了研究, 其中: 文献[1]校正了扫描线振动问题, 文献[2]在光盘系统中引入用于自动聚焦与寻迹的点控制方法, 校正相邻扫描线间距误差; 有两个美国专利^{3,4)}对激光点尺寸在扫描场中的均匀性问题作了探讨, 文献[5]设计了扫描透镜校正扫描线弯曲并控制扫描点形。然而, 在这些分析中, 对于多光束扫描所特有的构成离轴扫描线弯曲的各单项像差, 尚未作较全面的分析。由于不同像差需要通过不同方式进行补偿, 只有具体分析系统各单项像差的详细分布, 才能了解各单项像差的影响, 为此, 本文针对这一问题, 在推导多光束扫描综合像差的基础上, 研究各单项像差的权重因子, 分析像差校正透镜所应具备的预畸变因子, 为系统消像差设计提供理论指导。

2 离轴扫描线像差分析

为了便于分析, 假定多面转镜是一个无梯度及随机误差、无轴振动的理想转镜, 并且被扫描光束为细光束, 光束直径远远小于转镜面宽度, 这样扫描线两端的渐晕效果可以忽略不计。以多面转镜被照明反射面的几何中心为原点, 垂直该反射面的方向为 z 轴, 平行于多面转镜棱边的方向为 x 轴, 建立直角坐标系, 如图 1 所示。设转镜转角 $\theta/2$ 的符号由 z 轴方向顺时针转向转镜反射面法线时为正。当光源主光线位于中间扫描位置处(即转镜转角 $\theta/2$ 为 0)时, 入射

* 江苏省教委“青蓝工程”基金资助项目。

收稿日期: 1998-07-06; 收到修改稿日期: 1998-10-21

光线 OJ 与 $yo z$ 面夹角为 θ_x ，且光线在 $yo z$ 面内的投影 OK 与 z 轴夹角 $\angle KOH = \theta_y$ ，此时反射光线为 OL ；根据反射定律， OL 与 $yo z$ 面夹角为 θ_x ，其在 $yo z$ 面内的投影 OP 与 z 轴夹角则为 θ_y ；当反射镜转过 $\theta/2$ 角后，反射面由 OR 所在面转至 RS 所在面，此时，反射光线为 $M'W$ ；由于入射光线与 $yo z$ 面的夹角在扫描过程中保持不变，因此反射光线与 $yo z$ 面的夹角亦始终等于 θ_x ，而它在 $yo z$ 面内的投影 MN 与 OP 间夹角则为 $2 \cdot (\theta/2)$ 。根据图 1 可以作出光线在 $yo z$ 面上的投影，如图 2 所示。

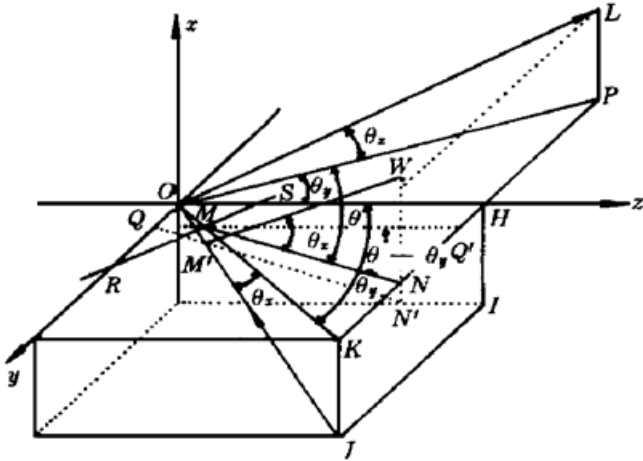


Fig. 1 Multi beam scanning optics

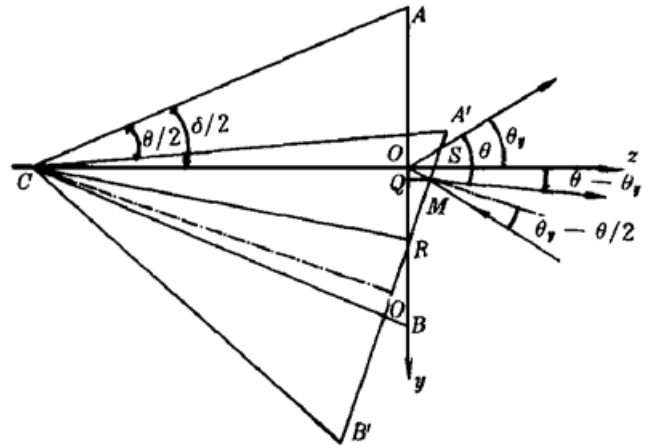


Fig. 2 $yo z$ plane projection drawing of Fig. 1

由图 2，根据简单的三角关系，可以得到以下式子：

$$OS = SC - CO = R \cos \frac{\delta}{2} \left[\frac{1}{\cos(\theta/2)} - 1 \right], \tag{1}$$

其中 R 为多面转镜外接圆半径， δ 为转镜正多边形的中心角， $\frac{\theta}{2}$ 为转镜的瞬时转角。

在 $\triangle OSM$ 中，

$$\begin{cases} OS = OM \cos \theta_y + SM \sin(\frac{\theta}{2}), \\ OM \sin \theta_y = SM \cos(\frac{\theta}{2}), \end{cases} \tag{2}$$

在 $\triangle OQM$ 中，

$$QM = OM \cos \theta_y. \tag{3}$$

解方程组(2)及式子(3)可得

$$\begin{cases} OM = \frac{R \cos \frac{\delta}{2} \left[\frac{1}{\cos(\theta/2)} - 1 \right]}{\cos \theta_y + \sin \theta_y \tan(\theta/2)}, \\ QM = \frac{R \cos \frac{\delta}{2} \left[\frac{1}{\cos(\theta/2)} - 1 \right]}{1 + \tan \theta_y \tan(\theta/2)}. \end{cases} \tag{4}$$

为了得出图 1 中扫描点的位置误差，设 $OH = f$ ，经过一系列几何与三角运算，可得

$$KJ = LP = OK \tan \theta_x = \frac{f \tan \theta_x}{\cos \theta_y},$$

$$MM' = OM \tan \theta_x = \frac{R \cos \frac{\delta}{2} \tan \theta_x \left[\frac{1}{\cos(\theta/2)} - 1 \right]}{\cos \theta_y [1 + \tan \theta_y \tan(\theta/2)]},$$

$$MQ' = QQ' - QM = f - \frac{R \cos \frac{\delta}{2} \left| \frac{1}{\cos(\theta/2)} - 1 \right|}{1 + \tan \theta_y \tan(\theta/2)},$$

$$M'N' = MN = \frac{MQ'}{\cos(\theta - \theta_y)} = \frac{f}{\cos(\theta - \theta_y)} - \frac{R \cos \frac{\delta}{2} \left| \frac{1}{\cos(\theta/2)} - 1 \right|}{\cos(\theta - \theta_y) [1 + \tan \theta_y \tan(\theta/2)]},$$

$$WN = WN' - NN' = M'N' \tan \theta_x - MM' = \frac{f \tan \theta_x - 2R \cos \frac{\delta}{2} \tan \theta_x \left| \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\cos \theta + 1}{2} \right|}{\cos(\theta - \theta_y)}.$$

由以上各式,可得到系统综合像差的表示式:

$$W(\theta) = WN - LP = \frac{f \tan \theta_x}{\cos(\theta - \theta_y)} \left[1 - \cos \theta - \sin \theta \tan \theta_y - \frac{2R \cos(\delta/2)}{f} \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \cos \frac{\theta}{2} \right]. \quad (5)$$

由(5)式可知:随 θ_x 的增大,转镜面数 M 的减小, $W(\theta)$ 增大。此外,根据(5)式可作出 θ_y 为参数时的综合像差图,见图3。由图可知,当 $\frac{R}{f}$ 为定值时,随着 θ_y 的增大,像差的不对称性与像差的绝对值增大。而在 θ_y 为定值, $\frac{R}{f}$ 为参数的综合像差图中(见图4),当 $\frac{R}{f}$ 在2.00~3.33范围取值时,像差的绝对值减小。因此,为了在不附加其它校正手段的前提下减小综合像差,应尽可能减小光束入射角 θ_x 与 θ_y 值,增加转镜面数 M ,多面转镜半径 R 与校正透镜焦距 f 之比在2.00~3.33范围取值。

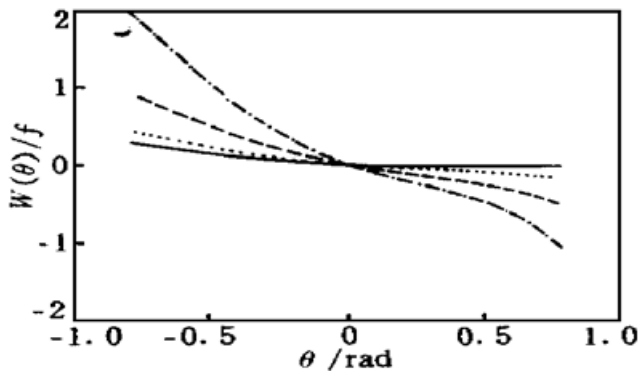


Fig. 3 The synthetic aberration versus angle θ with θ_y as a parameter, when $R = f$. — $\theta_y = \frac{1}{8}$ rad, $\theta_y = \frac{1}{4}$ rad, - - $\theta_y = \frac{1}{2}$ rad, - · - $\theta_y = \frac{\pi}{4}$

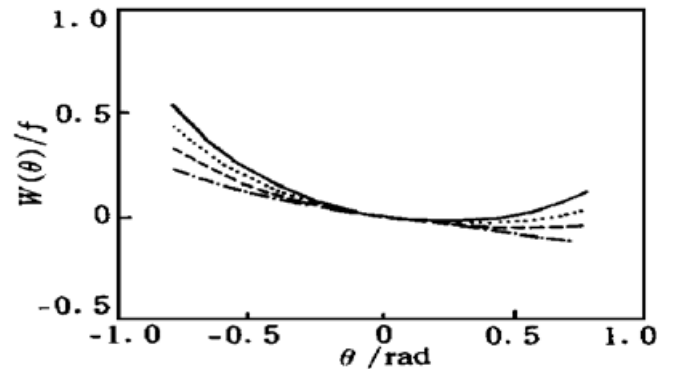


Fig. 4 The synthetic aberration versus angle θ with R/f as a parameter when $\theta_y = 20^\circ$. — $\frac{R}{f} = 0.5$, $\frac{R}{f} = 1.0$, — $\frac{R}{f} = 1.5$, - · - $\frac{R}{f} = 2.0$

由图3可见,当转镜面数 $M > 12$,反射光线偏转角度 θ 小于 $\frac{1}{2}$ rad时,为了减小像差,一般应取小于 $\frac{1}{2}$ rad的 θ_y 值;为了进一步分析(5)式单项像差的作用,本文在 θ_x, θ 小于 $\frac{1}{2}$ rad的条件下近似分析 $W(\theta)$ 。把 $W(\theta)$ 展开为 θ_y, θ 的三角函数无穷级数,并取至四次方项,可得

$$W(\theta) = f \tan \theta_x \left[1 + \frac{1}{2}(\theta - \theta_y)^2 + \frac{5}{24}(\theta - \theta_y)^4 \right] \times \left[- \left[\theta_y + \frac{\theta_y^3}{3!} \right] \theta + \left[\frac{1}{2} - \frac{R \cos(\delta/2)}{4f} \right] \theta^2 + \left[\frac{\theta_y}{6} + \frac{\theta_y^3}{18} \right] \theta^3 - \left[\frac{1}{24} + \frac{7R \cos(\delta/2)}{192 \cdot f} \right] \theta^4 \right].$$

对于特定的扫描系统, f 、 R 、 δ 、 θ_x 、 θ_y 为定值, 进一步展开上式可得

$$W(\theta) = f \tan \theta_x (a\theta + b\theta^2 + c\theta^3 + d\theta^4), \quad (6)$$

其中 a 、 b 、 c 、 d 为单项像差权重因子, 其值分别为

$$\begin{aligned} a &= - \left[\theta_y + \frac{5}{6} \theta_y^3 \right], \\ b &= \theta_y^2 + \frac{7}{6} \theta_y^4 + \left[\frac{1}{2} - \frac{R \cos(\delta/2)}{4f} \right] \left[1 + \frac{1}{2} \theta_y^2 + \frac{5}{24} \theta_y^4 \right], \\ c &= - \left[\frac{1}{3} \theta_y + \frac{23}{18} \theta_y^3 \right] - \left[\frac{1}{2} - \frac{R \cos(\delta/2)}{4f} \right] \left[\theta_y + \frac{5}{6} \theta_y^3 \right], \\ d &= \frac{2}{3} \theta_y^2 + \frac{1}{12} \theta_y^4 + \left[\frac{1}{2} - \frac{R \cos(\delta/2)}{4f} \right] \left[\frac{1}{2} + \frac{5}{4} \theta_y^2 \right] - \\ &\quad \left[\frac{1}{24} - \frac{7R \cos(\delta/2)}{192 \cdot f} \right] \left[1 + \frac{1}{2} \theta_y^2 + \frac{5}{24} \theta_y^4 \right]. \end{aligned}$$

根据像差理论, 可以发现(6)式中:

第一项正比于 $f\theta$, 说明扫描后离轴扫描线随 θ 变化有一定位移。

第二项正比于 $f\theta^2$, 对应于初级场曲像差, 它的大小随 θ_x 、 θ_y 的增大而增大, 随 R 的增大而减小。

第三项正比于 $f\theta^3$, 对应于畸变像差, 它的大小主要取决于 θ_x 与 θ_y 。

第四项正比于 $f\theta^4$, 对应于高级场曲像差, 与初级场曲相类似, 它的大小随 θ_x 、 θ_y 的增大而增大, 随 R 的增大而减小。

图 5 给出了 $R = f$ 时, 作为 θ_y 函数的各单项像差的权重因子 a 、 b 、 c 和 d 随 θ_y 变化的规律图。从图中可以看出, 在 $0 < \theta_y \leq \frac{1}{2}$ 时, θ 的单数指数项和偶数指数项引起的像差有互相抵消作用, 而在 $-\frac{1}{2} \leq \theta_y < 0$ 时, 则各项像差叠加。

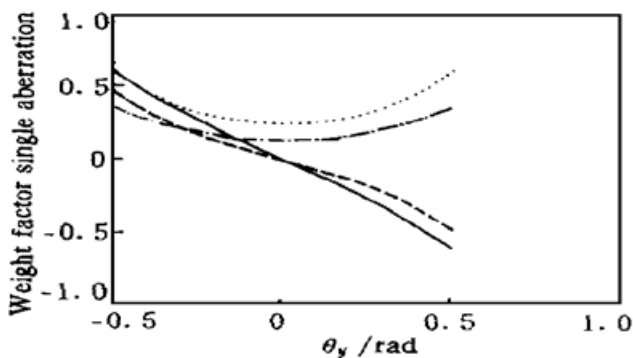


Fig. 5 The weight factor of single aberration as $R = f$.
— a , — c , - · - b , ····· d

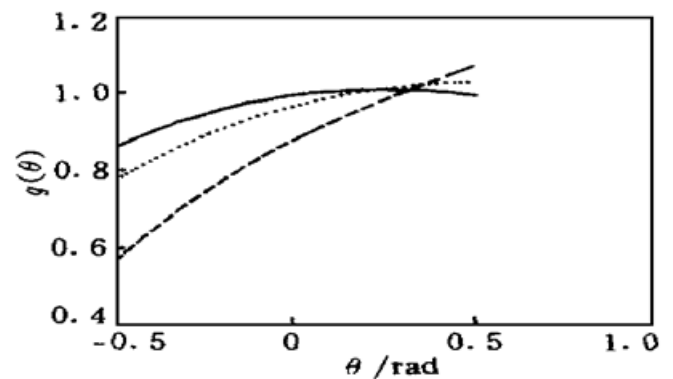


Fig. 6 The pre-correction factor $g(\theta)$ of lens. — $\theta_y = \frac{1}{8}$ rad, ····· $\theta_y = \frac{1}{4}$ rad, - · - $\theta_y = \frac{1}{2}$ rad

为了校正离轴扫描带来的像差, 可采用一种具有预纠正畸变特性的非球面物镜的特殊设计方法, 校正多光束扫描中的扫描线弯曲像差。

设非球面扫描物镜的预纠正畸变特性因子为 $g(\theta)$, 则扫描像点坐标可表示为

$$x' = WN \cdot g(\theta) = \frac{f \tan \theta_x - 2R \cos \frac{\delta}{2} \tan \theta_x \left| \cos \frac{\theta}{2} - \frac{\cos \theta + 1}{2} \right|}{\cos(\theta - \theta_y)} \cdot g(\theta), \quad (7)$$

其中, x' 为像点坐标, WN 为物高。将上式中的三角函数用无穷级数展开式替代, 由于 $\theta \leq \frac{1}{2}$ rad 时, 取扩展系列的前两项, 精确度可高达 0.3%^[6]; 因此, 为方便起见, 只取前两项, 为了校正离轴扫描线像差, 令

$$x' = \frac{f \tan \theta_x - \frac{R}{4} \theta^2 \cos \frac{\delta}{2} \tan \theta_x}{\cos \theta_y \left[1 - \frac{\theta^2}{2} \right] + \theta \sin \theta_y} \cdot g(\theta) = k (\text{定值}), \quad (8)$$

则预纠正畸变特性因子为

$$g(\theta) = \frac{\left[1 - \frac{\theta^2}{2} \right] \cos \theta_y + \theta \sin \theta_y}{f \tan \theta_x - \frac{R}{4} \theta^2 \cos \frac{\delta}{2} \tan \theta_x}. \quad (9)$$

(9) 式表明, 通过扫描透镜的异形设计, 使其具有预纠正因子 $g(\theta)$, 则可纠正离轴多光束扫描的扫描线弯曲像差。图 6 为透镜预纠正因子图。为了定性说明(9)式中各因子作用, 设

$$a' = f \tan \theta_x, \quad b' = \frac{R \cos(\delta/2)}{2f},$$

并考虑以下两种情形:

1) 当 $\theta_y = 0$ 时,

$$g(\theta) = \frac{1 - \frac{1}{2} \theta^2}{a' - \frac{1}{2} a' b' \theta^2} k. \quad (10)$$

(10) 式表明: 如果

i) $b' = 1$, 即 $\frac{R \cos(\delta/2)}{2f} = 1$, 故 $R = \frac{2f}{\cos(\delta/2)}$, 此时虽然扫描线平直, 但转镜尺寸较大。

ii) $a' = 0$, 即 $f \tan \theta_x = 0$, $\because f \neq 0, \therefore \theta_x = 0$, 此时为单光束扫描情形。

如果所设计的透镜具有这种预纠正畸变特性因子, 那么, 理论上该透镜所产生的像差可以基本与多光束扫描系统中的离轴扫描线像差相平衡。

2) 当 $\theta_y = 30^\circ$ 时,

则

$$g(\theta) = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} \theta - \frac{\sqrt{3}}{4} \theta^2}{a' - \frac{1}{2} a' b' \theta^2} k. \quad (11)$$

式(11)表示当 $\theta_y = 0.523$ rad 时, 在 $b' = 1$ 与 $a' = 0$ 的特殊情况下, 得出与 $\theta_y = 0$ 相同的结论。

结论 本文分析了影响多光束扫描中离轴扫描线弯曲像差的主要因素, 并在假设多面转镜为理想转镜, 扫描光束横截面直径远远小于转镜面宽度, 不考虑渐晕的前提下, 推导了离轴扫描线弯曲的像差公式。由公式可知, 影响像差的主要因素分别是转镜转角为 0 时, 入射光线在垂

直扫描面及扫描面内的角度分量 θ_x 、 θ_y ，多面转镜面数 M 以及外接圆半径 R 与透镜焦距 f 之比。故为了在不附加其它校正手段的前提下减小像差，应在允许范围内适当减小 θ_x 与 θ_y 值，增大转镜面数 M ，转镜相对半径 R/f 在 2.00~ 3.33 范围取值。此外，还研究了扫描透镜异形设计纠正扫描线弯曲像差问题，给出特定 θ_y 值的条件下校正离轴扫描线像差的特殊扫描透镜所应具备的预纠正畸变特性因子。

参 考 文 献

- [1] Tom T. J. Chiang *et al.*, Low-cost high-speed multibeam laser scanning system. *Proc. SPIE*, 1997, **3131**: 165~ 169
- [2] Arimot A, Saitoh S, Mochizuki T *et al.*, Dual beam laser diode scanning system for ultrahigh speed laser beam printers using a spot control method. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(13): 2554~ 2557
- [3] Minoura K. Multibeam scanning apparatus provided with a function of changing magnification. *United States. Patent*, 1981, June 4390235
- [4] Appel J J *et al.*. Multispot polygon ROS with maximized line separation depth of focus. *United States, Patent*, 1996, August 5300962
- [5] Minoura K, Suzuki M, Miyazawa S *et al.*, A study on laser scanning systems using a monolithic arrayed laser diode. *Proc. SPIE*, 1989, **1079**: 462~ 474
- [6] Leo Beiser, Design equations for a polygon laser scanner. *Proc. SPIE*, 1991, **1454**: 60~ 66

Aberration Analysis of Multibeam Scanning and Imaging System

Chen Linghua Zhang Yixin

(*Department of Mechanics, Wuxi University of Light Industry, Wuxi 214036*)

(Received 6 July 1998; revised 21 October 1998)

Abstract Based on the theory of geometric optics, the synthesis aberration equation of multibeam scanning and imaging system is derived. The primary factors, such as the angle between the incident ray and the axis of imaging system, the number of the facets of polygon, that cause bow of the off-axis scanning line are analyzed, and the weight factor of each single aberration is discussed. The specific scanning lens is analyzed to satisfy the straightness of the off-axis scanning line on the basis of synthesis aberration equation of multibeam scanning and imaging system.

Key words multibeam scanning, geometric aberration, design theory.