

文章编号: 0258-7025(2008)05-0782-06

# 激光扫描成像中旋转多面体的分析计算

许 敏<sup>1,2</sup> 胡家升<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 大连理工大学电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024; <sup>2</sup> 中国人民武装部队特种警察学院数理教研室, 北京 100621)

**摘要** 对旋转多面体激光扫描成像系统作了理论描述及定量分析。为了保证扫描像点处于同一平面, 将多面体置于成像物镜之前, 当激光束以相对于光学系统光轴为  $2\alpha$  角入射时, 确定了入射光在多面体反射面上的位置、多面体中心转轴以及光学系统光轴三者之间的相对位置关系。推导了系统光学扫描角、扫描效率和入瞳漂移等参数的数学公式, 分析了它们与入射光直径、入射角、多面体几何尺寸等因素之间的变化关系。结果表明, 为减小系统的入瞳漂移和增大扫描效率, 应以较小的入射角入射; 进行系统设计时, 若给定扫描角, 扫描效率一般选择在 0.4~0.7 范围内较合理。

**关键词** 成像系统; 激光扫描; 旋转多面体; 理论分析; 扫描效率; 入瞳漂移

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

## Analysis and Calculation of Rotating Polygonal Scanner in Laser Scanning Imaging System

Xu Min<sup>1,2</sup> Hu Jiasheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China  
<sup>2</sup> Teaching and Research Section of Mathematics and Physics in the Special Police Academy of the Chinese People's Armed Police Force, Beijing 100621, China

**Abstract** The quantitative analysis about a laser scanning imaging system for rotating polygon is theoretically described. The polygon scanner is located in front of the scan lens in order to guarantee the scanning image point in a flat field. It is important in system designing to determine the positional relationships between the incident beam at mirror, the rotation axis of the polygonal and the optical axis of the optical system when the angle of incident laser beam is  $2\alpha$  relative to the optical axis of the system. the calculation formulas of the scanning angle, scanning efficiency and the entrance pupil drift of the system are derived and the relationships between scanning angle, entrance pupil drift of system and many important factors (such as the width of the incident beam, incident angle and the geometrical size of the polygon, etc.) are discussed in details. The results show, in order to increase the scanning efficiency of the system, the incident angle of laser beam should be small. And the range of scanning efficiency from 0.4 to 0.7 is more reasonable in the system designing.

**Key words** imaging systems; laser scanning; rotating polygonal scanner; theory analysis; scanning efficiency; entrance pupil drift

## 1 引 言

激光扫描成像技术是一种动态记录、读取信息的技术, 其实质就是利用激光束的优良特性形成对被记录对象的扫描运动, 并配合光电器件、电子技术和计算机等实现对信息的动态记录或者对被测量体

的精密测量<sup>[1]</sup>。这项技术目前在遥感遥测、光学文字识别、信息存贮、高速打印、三维激光扫描测量等领域中有着不可替代的重要应用<sup>[2~6]</sup>。其中能够实现光束空间扫描运动的关键部件被称为扫描器, 目前多采用旋转多面体作为扫描器<sup>[7~11]</sup>, 因为它具有

收稿日期: 2007-05-22; 收到修改稿日期: 2007-11-06

作者简介: 许 敏(1971—), 女, 吉林人, 副教授, 博士研究生, 主要从事激光扫描成像系统总体设计方面的研究。

E-mail: d\_xu\_m@163.com

导师简介: 胡家升(1941—), 男, 辽宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电设备总体设计及数字图像处理方面的研究。

E-mail: jshu@dlut.edu.cn

扫描速度快、扫描角度大、回扫快和速度稳定性高等特点。在以多面体作为扫描器的激光扫描成像系统中,常将多面体置于成像物镜之前,被调制的激光束经多面体扫描器和成像物镜在探测面上形成扫描图样或图像<sup>[8,9]</sup>。这种物镜前扫描方式,可以通过对成像物镜的巧妙设计实现线性扫描,因此是目前最常采用的扫描方式。

本文对旋转多面体激光扫描成像系统作了理论描述及定量分析,得出了实际系统的扫描角度、扫描效率以及系统的入瞳漂移量等参数的数学公式,对影响系统扫描效率和入瞳漂移的各种因素进行了讨论。

## 2 中心转轴与成像系统光轴之间的相对位置关系

如图 1 所示,被某种信息调制了的激光束入射到多面体扫描器上,因多面体的高速旋转改变了其在空间中的方向,再经过透镜会聚,在探测面上形成一维或二维扫描图像,整个系统通常构成像方远心光路以保证出射光束的轴向平行性。在理想情况下,多面体每转过一个反射面,反射光可实现  $4\pi/N$  的扫描角度<sup>[8~10]</sup>,  $N$  为多面体反射面的面数。

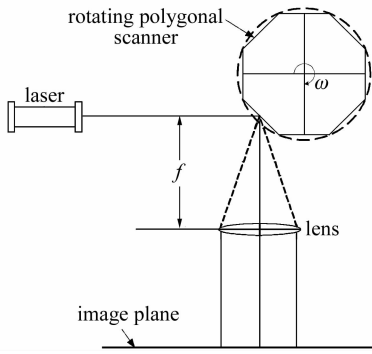


图 1 激光扫描成像技术原理图

Fig. 1 Principle diagram of laser scanning imaging technology

以多面体的中心转轴为坐标原点,建立直角坐标系  $O-XY$ ,令光学系统的光轴与  $X$  轴平行,将光轴所在位置定为一个扫描周期中反射光的中间位置,设  $r$  为多面体的外接圆半径,  $N \geq 3$ ,直径为  $D$  的激光束以相对于光轴的偏角为  $2\alpha$  入射到多面体扫描器的一个反射面上,  $P$  点是入射点,反射光线沿光轴出射的情形如图 2 所示。

根据约定,在一个扫描周期中的中间位置处时,反射光束与  $X$  轴平行,因此画一条平行于  $X$  轴,且直径为  $D$  的光束代表该反射光,如图 3 所示。其中,

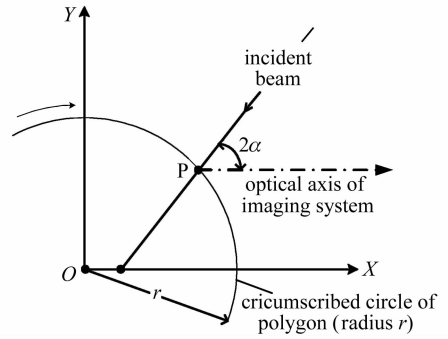


图 2 激光束入射到多面体的示意图

Fig. 2 Scheme of a laser beam incident on a polygonal surface

$OQ$  为过原点(多面体的中心转轴)的一条直线,与  $X$  轴的夹角为  $2\alpha$ ,对应于入射光的入射方向。 $OH$  为  $\angle QOX$  的角平分线,与外接圆的交点为  $H$  点。则该角平分线应为反射光沿光轴出射时多面体反射面的法线方向。反射光束的中心光线(光束的中心轴线)与  $X$  轴平行,交角平分线  $OH$  于  $C$  点,高度为  $Y_C = D/2$ ,过  $C$  点做线段  $ab$  垂直于角平分线  $OH$ ,分别过  $a$  点和  $b$  点做角平分线  $OH$  的平行线,交多面体外接圆于  $E$  点和  $F$  点,则线段  $EF$  与线段  $ab$  平行且等长并与角平分线  $OH$  垂直相交于  $G$  点。

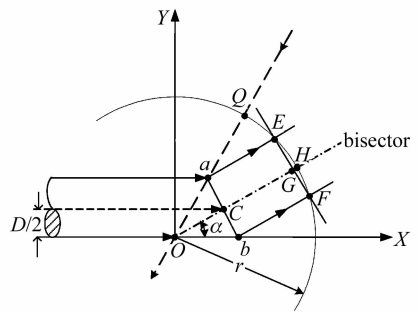


图 3 扫描中间位置处时反射光的方位示意图

Fig. 3 Scheme of the direction of reflected beam at middle position

从图 3 中的几何关系可得

$$ab = EF = \frac{D}{\cos \alpha}, \tag{1}$$

$$EG = GF = \frac{D}{2\cos \alpha}, \tag{2}$$

当多面体的外接圆半径  $r$  及多面体反射面的面数  $N$  确定时,则多面体每一反射面的宽度(线度)  $W$  可表示为

$$W = 2r\sin(\phi/2) = 2r\sin(\pi/N), \tag{3}$$

式中  $\phi$  为反射面所对应的顶角,它与多面体反射面面数的关系为  $\phi = 2\pi/N$ 。

在多面体的外接圆上做出多面体的一个反射镜

面  $AB$ , 分别交外接圆于  $A, B$  两点, 根据约定易知, 角分线  $OH$  为反射面  $AB$  的中垂线, 它与  $AB$  的交点为  $M$  ( $M$  是  $AB$  的中点), 如图 4 所示。分别过  $E, F$  点做直线  $EI$  和  $FJ$  均平行于  $OQ$ , 交反射面  $AB$  于  $I$  点和  $J$  点, 则  $EI$  和  $FJ$  之间的距离恰为入射光束的口径宽度  $D$ , 即  $EI$  和  $FJ$  可视为入射光束的两条边界光线,  $I, J$  则为入射光在反射面  $AB$  上的照亮范围, 入射光束的中心轴线与  $EI$  ( $FJ$ ) 平行且通过  $G$  点, 它与反射面  $AB$  交于点  $P$ , 因此  $P$  点就是当光以偏离光轴  $2\alpha$  角度入射到反射面上, 反射光沿光轴出射时的入射点, 显然它偏离反射面的中点  $M$ 。入射光的两条边缘光线同样被多面体的反射面反射, 相应的反射光线平行于光轴。

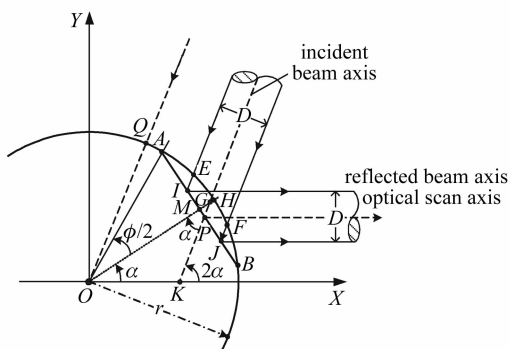


图 4 入射光、反射光在反射面上的位置示意图

Fig. 4 Position scheme of the incident beam and reflected beam

令  $MH = m, GH = g$ , 从图 4 中可以得到关系式

$$MH = OH - OM \Rightarrow m = r - r \cdot \cos(\phi/2), \quad (4)$$

$$GH = OH - OG = OH - \sqrt{(OF)^2 - (GF)^2} \Rightarrow$$

$$g = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{D}{2\cos\alpha}\right)^2}, \quad (5)$$

式中  $m$  为与多面体外形尺寸有关的因子,  $g$  为与多面体的外形尺寸及入射光束直径均有关的因子。

多面体后的成像光学系统光轴是一条过  $P$  点且平行于  $X$  轴的直线, 因此确定了  $P$  点的位置坐标也就确定了成像光学系统的光轴与多面体中心转轴之间的相对位置关系。图 5 给出的是光学系统光轴与  $P$  点位置之间的几何关系的放大示意图。

从图 5 中易知,  $H$  点的坐标  $(r\cos\alpha, r\sin\alpha)$ ,  $G$  点的坐标  $[(r-g)\cos\alpha, (r-g)\sin\alpha]$ ,  $M$  点的坐标  $(r\cos\alpha\cos(\phi/2), r\sin\alpha\cos(\phi/2))$ ,  $P$  点的坐标可写成  $(X_G - GP\cos 2\alpha, Y_G - GP\sin 2\alpha)$ 。因为在直角三角形  $GMP$  中,  $GP = MG/\cos\alpha$ , 所以  $P$  点的坐标为

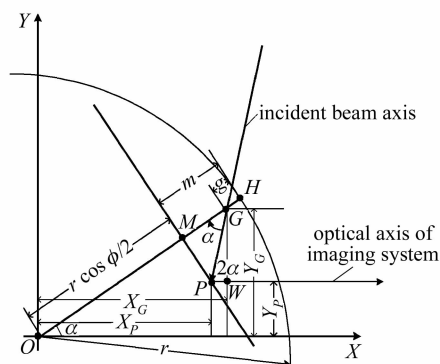


图 5  $P$  点坐标的几何示意图

Fig. 5 Geometrical diagram for determining the coordinates of point  $P$

$$\left[ \begin{aligned} &(r-g)\cos\alpha - \frac{(m-g)\cos 2\alpha}{\cos\alpha}, \\ &(r-g)\sin\alpha - \frac{(m-g)\sin 2\alpha}{\cos\alpha} \end{aligned} \right].$$

给出  $P$  点的坐标形式之后, 便可依此确定在多面体后的扫描成像透镜的光轴方位。由于一般情况下此类透镜采用的是像方远心光路设计, 因此当多面体及入射光的相对位置确定之后, 就可以相应地确定透镜的位置。

### 3 扫描角度表达式

图 6 给出的是系统完成一次全扫描的反射面的位置变化。可见, 由于入射光束具有一定的直径宽度, 当光束照射到多面体的棱角时, 反射光的强度会发生变化, 形成扫描空程。因此, 为了不使反射光束出现渐晕, 通常认为当反射面的边缘点  $A, B$  分别转到与入射光的边缘光线  $E, F$  重合, 即反射面由  $A_1F_1$  位置转到  $EB_2$  位置时即完成了一次全扫描。在这种情况下多面体完成一次扫描所转过的角度必然要小于反射面所对应的顶角  $\phi$ 。

令  $\theta_e$  为多面体在一个扫描周期内所转过的实际角度, 则该系统能实现的扫描角度即为  $2\theta_e$ 。

$$\theta_e = \frac{2\pi}{N} - 2\arcsin\left(\frac{EG}{r}\right) = \frac{2\pi}{N} - 2\arcsin\left(\frac{D}{2r\cos\alpha}\right), \quad (6)$$

给出系统完成一次全扫描的有效转角  $\theta_e$  的表达式后, 即可定义系统的扫描占空比, 也称为扫描效率, 用  $\eta$  表示。它反映的是当扫描光束的直径宽度为  $D$  时, 在不出现渐晕的有效扫描角与扫描光束宽度为无限小 (趋近于零) 时全扫描角的比值 (假设光束的直径线度小于多面体反射面的宽度), 即

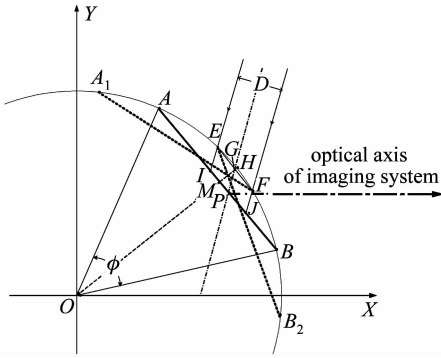


图 6 一个扫描周期内多面体反射面的位置变化

Fig. 6 Position variation of polygonal surface during a scanning period

$$\eta = \frac{\theta_c}{\phi} = 1 - \frac{\arcsin\left(\frac{D}{2r\cos\alpha}\right)}{\frac{\pi}{N}}, \quad (7)$$

系统的扫描空程角可定义为

$$\Delta\phi = \phi - \theta_c = 2\arcsin\left(\frac{D}{2r\cos\alpha}\right), \quad (8)$$

由(6),(7)式可以看出,系统实际的扫描角和扫描效率与多面体反射面面数、多面体尺寸、入射光束直径及入射角均有关系。当入射光束的直径  $D \rightarrow 0$  时,系统的扫描转角  $\theta_c \rightarrow 2\pi/N$ ,扫描效率  $\eta \rightarrow 1$ 。若给定系统的扫描角  $\theta_c$  和扫描效率  $\eta$ ,由(7)式即可求出多面体反射面面数  $N$ 。将(7)式变形,得到

$$\eta = 1 - \frac{\arcsin\left[\frac{D(\sin\pi/N)}{W\cos\alpha}\right]}{\frac{\pi}{N}}, \quad (9)$$

通过计算机数值模拟得到如图 7 所示的关系曲线。

在图 7(a)中,当给定多面体反射面面数  $N$  及光束入射角  $\alpha$ (例如设  $N = 8, \alpha = 30^\circ$ ),扫描效率  $\eta$  与  $D/W$  呈线性关系,随  $D/W$  的增加而减小;在图 7(b)中,当多面体反射面面数  $N$  及  $D/W$  确定后,扫描效率  $\eta$  随入射角的增加而减小。

因此,当入射光束的直径确定后,为了增大扫描效率,理论上应尽可能地加大多面体反射面的宽度  $W$ ,但盲目增大  $W$ ,会使系统的尺寸变大,带来成本的增加以及加工和安装的困难,结果往往得不偿失。所以在通常情况下, $D/W$  的选择在  $0.1 \sim 0.4$  之间比较合理;当  $D/W$  确定后,以较小的入射角入射对提高扫描效率有利。

在给定系统的扫描角和扫描效率  $\eta$  的情况下,便可推算出多面体反射面的面数以及多面体的尺寸大小。图 8 给出了扫描效率  $\eta$  与半径  $r$  的关系曲线。令  $D = 1$ ,可见,在  $\eta > 0.7$  之后,随  $r$  的增加, $\eta$  增加

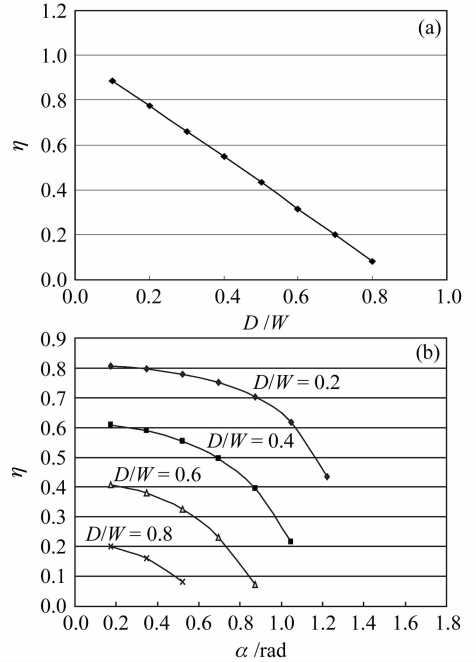


图 7 扫描效率  $\eta$  与  $D/W$  (a) 及入射角  $\alpha$  (b) 的关系曲线  
Fig. 7 Relationship of  $\eta$  and  $D/W$  (a),  $\eta$  and  $\alpha$  (b)

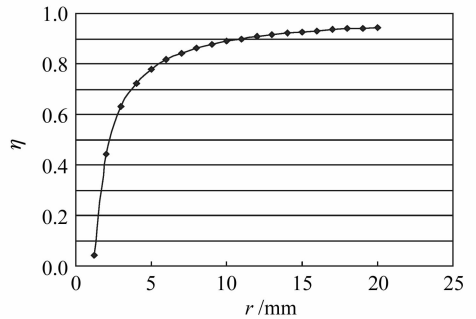


图 8 扫描效率  $\eta$  随多面体半径  $r$  的变化曲线  
Fig. 8 Correlative graph between  $\eta$  and  $r$

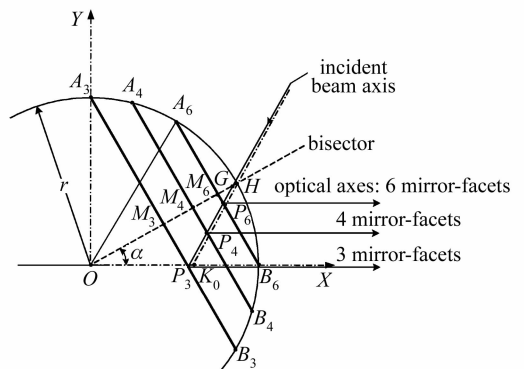


图 9  $P$  点随多面体面数的变化情况  
Fig. 9 Position variation of point  $P$  with number of reflective surface

的幅度变缓,仅当  $r \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 1$ ,因此综合各方面因素, $\eta$  在  $0.4 \sim 0.7$  范围内比较合理。

随着入射光束的直径及多面体反射面面数的变化,  $P$  点的位置及光学系统的光轴位置会随之发生变化, 图 9 给出的是  $P$  点的位置随着反射镜面的面数的变化情况, 这里仅画出三面体、四面体及六面体三种情况下的反射面, 分别对应于  $A_3B_3$ 、 $A_4B_4$  和  $A_6B_6$ 。从图中可以看出, 当入射光束的口径为零时, 若扫描效率  $\eta = 1$ , 则入射光在三面体上的入射点是  $K_0$ ; 若扫描效率  $\eta = 0$ , 对应的入射点则为  $M_3$ , 对于  $\eta$  为任意常数的情况, 则从  $H$  点出发落在  $M_3K_0$  范围内的一簇直线就为  $P$  点的轨迹范围。

#### 4 系统入瞳漂移的分析

通常物镜前扫描系统中聚焦透镜的设计是基于系统的入射光瞳始终不变来考虑的, 但当采用旋转多面体作为扫描器时, 由于入射光点的位置会随着多面体的旋转发生变化, 导致系统入瞳的位置随之变化, 形成入瞳漂移。

如图 10 所示, 当反射镜处在扫描的中间位置, 即  $AB$  处时, 此时入射光(轴)与反射面的交点为  $P$ , 将  $P$  作为系统的入射光瞳, 而当反射面  $AB$  处于一次扫描的开始位置即  $A_1F$  处时, 得到的(扫描)上边缘光线的延长线与光轴的交点为  $P_1$ , 显然  $P_1$  是系统此时的入射光瞳。这说明当反射面从位置  $A_1F$  转至  $AB$  过程中, 系统产生了入瞳漂移为  $\overline{P_1P}$ , 如图 10

(b) 所示; 同理, 当反射面再由  $AB$  转至  $EB_2$  过程中, 此时系统产生的入瞳漂移为  $\overline{PP_2}$ , 如图 10(c) 所示。

在  $\text{Rt}\triangle GNF$  中, 易知  $\angle GFN = \theta_c/2$ , 所以

$$GN = GF \tan \frac{\theta_c}{2} = \frac{D}{2\cos\alpha} \tan \frac{\theta_c}{2}. \quad (10)$$

在  $\triangle GNM_1$  中,  $\angle GM_1N = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + \frac{\theta_c}{2} = \frac{\pi}{2} - \left(\alpha - \frac{\theta_c}{2}\right)$ ,  $\angle GNM_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta_c}{2}$ , 根据三角形的正弦定理, 可得

$$\begin{aligned} GM_1 &= \frac{GN \sin(\angle GNM_1)}{\sin(\angle GM_1N)} = \\ &= \frac{\frac{D}{2\cos\alpha} \tan\left(\frac{\theta_c}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_c}{2}\right)}{\sin\left[\frac{\pi}{2} - \left(\alpha - \frac{\theta_c}{2}\right)\right]} = \\ &= \frac{D}{2\cos\alpha} \frac{\sin\frac{\theta_c}{2}}{\cos\left(\alpha - \frac{\theta_c}{2}\right)}, \end{aligned} \quad (11)$$

这样, 在  $\triangle M_1P_1P$  中

$$\begin{aligned} M_1P &= GP - GM_1 = \\ &= \frac{m-g}{\cos\alpha} - \frac{D \sin \frac{\theta_c}{2}}{2\cos\alpha \cos\left(\alpha - \frac{\theta_c}{2}\right)} = \\ &= \frac{2(m-g)\cos\left(\alpha - \frac{\theta_c}{2}\right) - D \sin \frac{\theta_c}{2}}{2\cos\alpha \cos\left(\alpha - \frac{\theta_c}{2}\right)}, \end{aligned} \quad (12)$$

$\angle P_1M_1P = 2\left(\alpha - \frac{\theta_c}{2}\right)$ ,  $\angle M_1P_1P = 2\alpha - \angle P_1M_1P = \theta_c$ , 所以由三角形的正弦定理, 能得出当多面体的反射镜面由  $A_1F$  转至  $AB$  过程中产生的入瞳漂移  $\overline{P_1P}$ ,

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \overline{P_1P} = \frac{M_1P \sin \angle P_1M_1P}{\sin \angle M_1P_1P} = \\ &= \frac{M_1P \cdot \sin 2\left(\alpha - \frac{\theta_c}{2}\right)}{\sin \theta_c} = \\ &= \frac{2(m-g)\sin(2\alpha - \theta_c) + D[\cos\alpha - \cos(\alpha - \theta_c)]}{2\cos\alpha \sin \theta_c}, \end{aligned} \quad (13)$$

当然, 也可采取类似的推导过程得到反射镜面由  $AB$  位置转至  $EB_2$  位置过程中所产生的入瞳漂移  $\overline{PP_2}$ ,

$$\Delta_2 = \overline{PP_2} = \frac{M_2P \sin 2\left(\alpha + \frac{\theta_c}{2}\right)}{\sin \theta_c} =$$

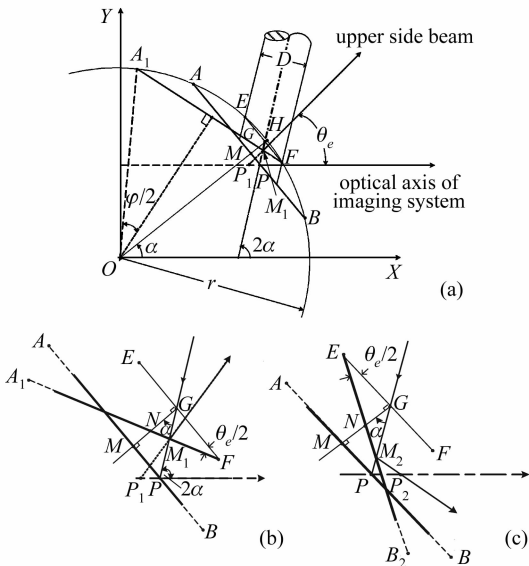


图 10 (a) 系统入瞳漂移的产生; (b) 入瞳漂移  $\overline{P_1P}$ ;  
(c) 入瞳漂移  $\overline{PP_2}$

Fig. 10 (a) Forming of entrance pupil drift of the system; (b) entrance pupil drift  $\overline{P_1P}$ ; (c) entrance pupil drift  $\overline{PP_2}$

$$\frac{2(m-g)\sin(2\alpha+\theta_e)+D[\cos(\alpha+\theta_e)-\cos\alpha]}{2\cos\alpha\sin\theta_e}, \quad (14)$$

从(13),(14) 式中可见,系统的入瞳漂移是由多面体的尺寸因子  $m$  和  $g$ ,入射光束的直径  $D$ ,初始入射角  $\alpha$  以及系统的扫描角  $\theta_e$  决定的。当系统的扫描角确定且光束以一定的入射角入射时, $\Delta_1(\Delta_2)$  与  $r$  呈线性关系,所以为了克服系统的入瞳漂移,在进行系统的实际设计时,尽可能减小多面体的尺寸;此外系统的入瞳漂移量在扫描角确定的情况下还会随着入射角的增加而增加,因此为了减小入瞳漂移对扫描精度的影响,应尽量以较小的入射角入射。

## 5 结 论

以物镜前扫描成像系统为基础,针对旋转多面体进行了定量的理论分析,给出了实际系统的扫描角度、扫描效率以及系统的入瞳漂移量等参数的公式,对影响系统扫描效率和入瞳漂移的各种因素(如光束口径、入射角、多面体尺寸等)进行了详细讨论。结果表明,减小入射角对提高扫描效率和减小系统的入瞳漂移是有利的,因此在实际应用时应尽可能以较小的入射角入射;减小多面体的尺寸可减小入瞳漂移,但会增大系统的扫描空程角,使系统的扫描效率降低,因此在进行系统设计时应综合各种因素,可在满足要求的情况下,尽量减小入射光束的光斑尺寸;在给定扫描角的前提下进行系统设计时,扫描效率的选择要综合各方面因素,一般选择在0.4~0.7范围内比较合理。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Guoguang. Modern Optical Test Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1986. 154~188  
杨国光. 近代光学测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. 154~188
- 2 Liu Liren, Wang Lijuan, Luan Zhu *et al.*. Mathematical and physical basis for pointing acquisition and tracking testing of inter-satellite laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9):1329~1334  
刘立人,王利娟,栾竹等. 卫星激光通信终端跟踪检测的数理基础[J]. 光学学报, 2006, **26**(9):1329~1334
- 3 Feng Jinyuan, Huang Jing, Liao Jihai *et al.*. Two-dimensional opto-mechanic and acousto-optic laser scanning system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, **23**(5):341~343  
冯金垣,黄静,廖继海等. 声光-光机二维激光扫描系统[J]. 半导体光电, 2002, **23**(5):341~343
- 4 He Ning, Zhou Qihua. Application of laser scanning in the underwater optical communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):128~130  
何宁,周器华. 激光扫描技术在水下光通信中的应用[J]. 中国激光, 2006, **33**(增刊):128~130
- 5 Wang Yunshan, Yang Xichen, Liu Yajun. Temperature field of laser scanning line facula [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):981~986  
王云山,杨洗陈,刘亚君. 激光扫描光斑温度场[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):981~986
- 6 Xu Zhiqin, Sun Changku, Zheng Yizhong. Structure parameters' optimization design of the color 3D laser scanning measurement system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9):839~842  
许智钦,孙长库,郑义忠. 彩色三维激光扫描系统结构参数的优化设计[J]. 中国激光, 2003, **30**(9):839~842
- 7 Leo Beiser. Key notes to the advancement optical scanning [C]. *SPIE*, 2005, **5873**:1~25
- 8 Y. Li, J. Katz. Laser beam scanning by rotary mirrors [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(28):6403~6416
- 9 Leo Beiser. Fundamental architecture of optical scanning systems [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(31):7307~7317
- 10 G. F. Marshall. Handbook of Optical and Laser Scanning [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 2004
- 11 John M. Tamkin. Evolution of catadioptric scan optics for wide field, high resolution applications [C]. *SPIE*, 2005, **5873**:38~44