

# 激光扫描镜的应用研究

刘兴占 刘向东

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京, 100084)

**摘要:** 就激光扫描技术中关键部件——扫描镜进行了应用研究, 并对其在宽片磁带表面缺陷的检测系统中所采用的旋转多面体扫描镜进行了理论分析, 推导出多面体扫描镜的设计公式及参数选择。

**关键词:** 激光扫描镜 多面体

## Using of laser scanning mirror

Liu Xingzhan, Liu Xiangdong

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract:** The optical scanning mirror is a key component in laser scanning detection system. The purpose of the paper is to introduce the theoretical analysis, parameter selection and design method of the rotatory polyhedron scanning system. The fundamental requirements to construct a rotatory polyhedron scanning system are much high geometry or manufacture accuracy, very small rotatory deformation of the rotation components. Finally, this paper discussed the scanning effectiveness, and point out that the selection of scanning effectiveness is in the range of 0.4~0.6, and how to select other relative parameters.

**Key words:** laser scanning mirror polyhedron

## 引言

随着科学技术的发展及生产中的需要, 激光扫描技术得到了广泛的应用和发展, 尤其在记录系统、光学文字识别、胶片阅读器、传真机、全息存贮和寻址等方面应用更是显示了其独特的优点, 即无接触、高精度且容易与电子技术相结合, 而扫描镜是该技术一个关键部分, 我们就从事的宽片磁带表面缺陷的检测系统中所采用的旋转多面体扫描镜的设计及参数选择进行了分析研究。

### 一、旋转多面体扫描镜<sup>[1, 4]</sup>

激光扫描无论是哪种方式, 都要有光学偏转器。实现此功能的有振镜扫描、声光扫描、电光扫描和旋转多面体扫描。目前以旋转多面体扫描应用最广泛。

1. 旋转多面体的优点: (1) 扫描角度大, 通常可大于  $30^\circ$ 。(2) 在较长的扫描宽度上具有高的分辨率, 大约为  $20 \sim 1000 \text{Line/mm}$ 。(3) 反射面镀全反射膜, 反射率高、光能损失小。(4) 实现扫描机构简单。2. 旋转多面体的缺点: (1) 多面体的加工精度要求高。(2) 与多面体相关的光学部分调整复杂, 精度要求高。(3) 扫描电机的均匀性要求严格。

在扫描过程中, 多面体的各个小平面反射面绕多面体中心  $O$  旋转, 如图 1 所示, 尽管转镜

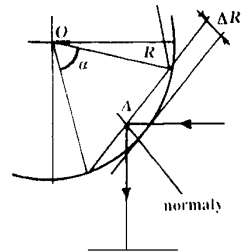


Fig. 1 The geometry relationship of the rotatory polyhedron

以匀速旋转, 反射光的扫描轨迹严格说不是匀角速度, 扫描轨迹必然产生非线性误差。这误差是由多面体反射面与其外接圆矢高  $\Delta R$  所引起的。  $\Delta R = R[1 - \cos(\alpha/2)]$  (1)

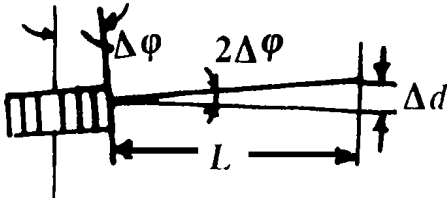


Fig. 2 An example of non-parallel of reflective plan and axis line

意两面之间的法向夹角积累误差。此误差会引起扫描起点与终点不齐, 或单线扫描纵向间隔混乱, 或多线扫描字符首尾不齐。(c) 各小平面对多面体轴线的不平行度。当其倾角为  $\Delta\varphi$  时, 则产生位移量  $\Delta d$  (如图 2 所示),  $\Delta d$  称为倾斜线性误差, 可用柱面镜修正, 修正原理如图 3 所示。由于多面体扫描镜转速很高, 如果采用单线扫描方式, 对半径 30mm, 厚度为 12mm, 材料密度为  $\rho$  的八面体, 以 20000r/min 高速旋转, 对某一小平面对其轴心线距离为 0.02mm, 将产生 0.785 $\rho N$  的离心力。(2) 多面体惯性小平面对变形的最重要因素之一, 小平面上质点径向加速度  $a_n$  与角速度  $\omega$  之间的关系为:  $a_n = R\omega^2$

3. 对旋转多面体扫描镜的要求。为了保证扫描系统的精度要求, 旋转多面体扫描镜应具有以下要求: (1) 旋转多面体的几何精度要高。多面体的几何精度对扫描的影响主要有三种情况: (a) 各小平面对多面体轴线距离的误差。此误差影响多面体的动平衡, 在高速旋转中产生很大压力, 影响扫描运动精度。(b) 相邻两小平面对法向夹角误差及任

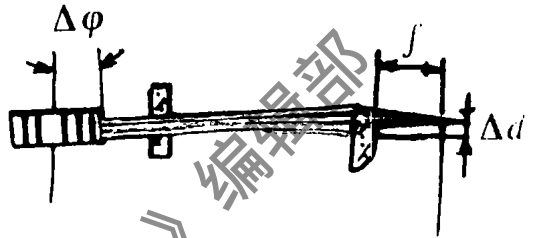


Fig. 3 Correction method of non-parallel error of reflective plan and axis line

意两面之间的法向夹角积累误差。此误差会引起扫描起点与终点不齐, 或单线扫描纵向间隔混乱, 或多线扫描字符首尾不齐。(c) 各小平面对多面体轴线的不平行度。当其倾角为  $\Delta\varphi$  时, 则产生位移量  $\Delta d$  (如图 2 所示),  $\Delta d$  称为倾斜线性误差, 可用柱面镜修正, 修正原理如图 3 所示。由于多面体扫描镜转速很高, 如果采用单线扫描方式, 对半径 30mm, 厚度为 12mm, 材料密度为  $\rho$  的八面体, 以 20000r/min 高速旋转, 对某一小平面对其轴心线距离为 0.02mm, 将产生 0.785 $\rho N$  的离心力。(2) 多面体惯性小平面对变形的最重要因素之一, 小平面上质点径向加速度  $a_n$  与角速度  $\omega$  之间的关系为:  $a_n = R\omega^2$

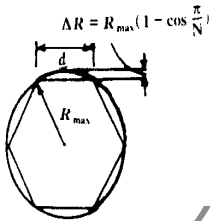


Fig. 4 Polyhedron

若  $n = 10000 \text{ Rot/min}$ ,  $R = 40 \text{ mm} = 0.04 \text{ m}$ , 则  $\omega = 2\pi n = 1500 \text{ arc/s}$ ,  $a_n = 0.04 \times 1500^2 = 90000 \text{ m/s}^2$

如多面体材料不均匀, 局部负载将引起很大径向力。故必须选择具有低变形的材料。另外, 可减小半径  $R$ , 达到减小作用在小平面上的压力变化。小平面对变形的系数为  $\Delta R$ , 如图 4 所示, 当  $\alpha = 2\pi/N$  ( $N$  为多面体面数), 由 (1) 式得  $\Delta R = R_{\max}[1 - \cos(\pi/N)]$  (2)

由上式可知, 半径的变化量是多面体面数的函数。当  $N = 3$  时,  $\Delta R = 0.5R_{\max}$ ,  $N = 4$  时,  $\Delta R = 0.3R_{\max}$ ,  $N = 5$  时,  $\Delta R = 0.05R_{\max}$ , 而  $N = 30$  时,  $\Delta R = 0.005R_{\max}$ 。

与变形有关的力主要是径向力,  $F = ma_n$ , 由上分析可得:  $\Delta F \propto \Delta m \cdot R \propto \Delta R \cdot R \propto \Delta R \cdot R_{\max}$ 。而  $\Delta R \cdot R_{\max} = R_{\max}^2[1 - \cos(\pi/N)]$

以  $R_{\max} \approx Nd/2\pi$  代入, 则有:  $\Delta R \cdot R_{\max} = (N^2 d^2 / 4\pi^2)[1 - \cos(\pi/N)]$  (3)

将余弦函数展开, 取两项近似得:  $\Delta F \propto \Delta R \cdot R_{\max} = d^2/8$

所以, 从惯性变形考虑, 多面体小平面的宽度  $d$  愈小愈好。

## 二、旋转多面体扫描镜的设计计算<sup>[2, 3, 5]</sup>

我们采用高惯性局部照明的旋转多面体作为扫描偏转元件。如图 5 所示利用反射光进行扫描, 当多面镜发生  $\Delta\theta$  角位移时, 反射光发生  $2\Delta\theta$  的角位移。当入射光照射到多面镜棱角时, 反射光被分裂为两部分, 一部分继续完成扫描, 另一部分开始新的扫描。这时扫描光的强

度是变化的,实际上照明光束遇到多面镜棱角这段时间形成扫描空程。所以,这种扫描是间断的。多面镜的面数与扫描角有关。为减小扫描空程,应加大每一反射面的线度,即加大多面体的半径,使尺寸加大,但又受到扫描电机及转速的限制,因此,合理设计多面镜就必须弄清扫描角,光斑尺寸,扫描空程,多面体半径及多面镜数等之间的相互关系。

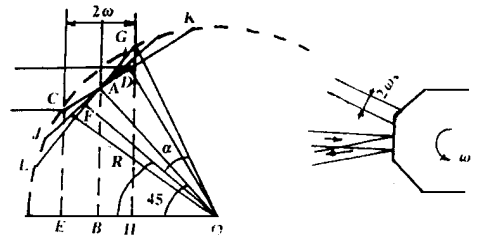


Fig. 5 Scanning principle

设光斑尺寸为  $2\omega_0$ , 旋转多面体半径为  $R$ , 面数为  $N$ , 一次扫描多面镜的角位移为  $\alpha$  (等于反射光扫描角的一半), 由图 5 所示, 旋转多面体的一个镜面从  $CK$  开始扫描, 到  $GL$  扫描结束, 它们的位置分别用它们的法线  $OD$  和  $OF$  表示。

$$\begin{aligned} \alpha &= \angle DOE - \angle FOE \\ &= \angle COE + \angle DOC - (\angle GOE - \angle GOF) \\ &= \cos^{-1}(OE/R) + 360^\circ/(2N) - [\cos^{-1}(OH/R) - 360^\circ/(2N)] \\ &= \cos^{-1}(OE/R) - \cos^{-1}(OH/R) + 360^\circ/N \\ OE &= OB + BE = OA \cos 45^\circ + \omega_0 \\ &= JO \cos(\angle JOA) \cos 45^\circ + \omega_0 = R \cos(180^\circ/N) \cos 45^\circ + \omega_0 \\ OH &= OB - BH = R \cos(180^\circ/N) \cos 45^\circ - \omega_0 \end{aligned}$$

所以  $\alpha = \cos^{-1}[\cos(180^\circ/N) \cos 45^\circ + \omega_0/R] - \cos^{-1}[(180^\circ/N) \cos 45^\circ - \omega_0/R] + 360^\circ/N$  (4)  
空程角  $\Delta\alpha$  为

$$\Delta\alpha = 360^\circ/N - \alpha = \cos^{-1}[\cos(180^\circ/N) \cos 45^\circ - \omega_0/R] - \cos^{-1}[\cos(180^\circ/N) \cos 45^\circ + \omega_0/R] \quad (5)$$

多面体半径  $R$ , 面数  $N$  和  $\alpha$ ,  $\Delta\alpha$  的关系经过换算整理后为:

$$\begin{aligned} &2(\cos \frac{180^\circ}{N} \cos 45^\circ)^2 (\frac{\omega_0}{R})^2 + 2[1 + \cos(\frac{360^\circ}{N} - \alpha) - 2(\cos \frac{180^\circ}{N} \cos 45^\circ)^2] (\frac{\omega_0}{R})^2 \\ &= 1 + 2\cos(\frac{360^\circ}{N} - \alpha) (\cos \frac{180^\circ}{N} \cos 45^\circ)^2 - 2(\cos \frac{180^\circ}{N} \cos 45^\circ)^2 - \cos^2(\frac{360^\circ}{N} - \alpha) (\frac{\omega_0}{R})^2 \\ &= \frac{1 + 2[\cos(\frac{360^\circ}{N} - \alpha) - 1][\cos(180^\circ/N) \cos 45^\circ]^2 - \cos^2(\frac{360^\circ}{N} - \alpha)}{2[\cos(\frac{360^\circ}{N} - \alpha) - [\cos(180^\circ/N) \cos 45^\circ]^2 + 1]} \quad (6) \end{aligned}$$

我们定义  $\eta = \alpha/(360^\circ/N) = N\alpha/360^\circ$  为旋转多面体的扫描效率, 则:  $N = 360^\circ \eta / \alpha$  (7)

$$\begin{aligned} \text{令 } X &= \cos(360^\circ/N - \alpha) = \cos[360^\circ \alpha / (360^\circ \eta) - \alpha] = \cos[\alpha(1 - \eta)/\eta] \\ Y &= \cos(180^\circ/N) \cos 45^\circ = \cos[180^\circ \alpha / (360^\circ \eta)] \cos 45^\circ = \cos(\alpha/2\eta) \cos 45^\circ \\ \text{则 } (\omega_0/R) &= \{ [1 + 2(X - 1)Y^2 - X^2] / [2(X - Y^2 + 1)] \}^{1/2} \quad (8) \\ R &= \omega_0 \{ [1 + 2(X - 1)Y^2 - X^2] / [2(X - Y^2 + 1)] \}^{-1/2} \end{aligned}$$

$$= \omega_0 \left\{ \frac{1 + 2[\cos(\alpha(1 - \eta)/\eta) - 1][\cos(\alpha/2\eta) \cos 45^\circ]^2 - [\cos(\alpha(1 - \eta)/\eta)]^2}{2[\cos(\alpha(1 - \eta)/\eta) - (\cos(\alpha/2\eta) \cos 45^\circ)^2 + 1]} \right\}^{-1/2} \quad (9)$$

根据给定的扫描角  $2\theta$  (相应的  $\alpha = \theta$ ) 和多面体扫描效率  $\eta$  就可以根据上面的公式求出旋转多面体的半径  $R$  和多面体的面数  $N$ 。因为是局部照明扫描, 所以多面体的厚度应大于光束的尺寸  $2\omega_0$ 。在给定扫描的情况下, 在设计多面镜时, 扫描效率多大才合理呢? 以  $\alpha = 18^\circ$  为例看一下多面镜半径  $R$  和面数  $N$  如何随扫描效率  $\eta$  变化。当  $\alpha = 18^\circ$ ,  $\omega_0 = 3.037\text{mm}$ ,  $\eta$  不同时

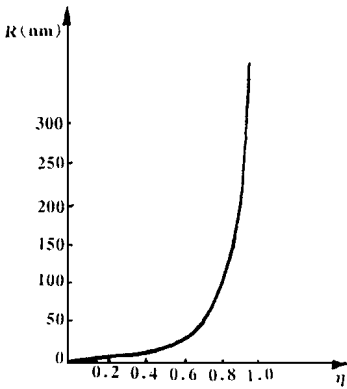


Fig. 6 Function curve of  $R$  and scanning effectiveness  $\eta$

$N$  和  $R$  列于附表。

$R-\eta$  曲线如图 6 所示, 由图可见, 当  $\eta > 0.7$  后,  $R$  随  $\eta$  增大而迅速增大。当  $\eta \rightarrow 1$  时,  $R \rightarrow \infty$ 。多面体半径太大, 面数多, 这给加工和安装调试带来很大困难, 所以我们认为在上面给定的条件下, 扫描效率在 0.4~0.6 之间比较合理。

本系统扫描宽度 200mm, 转镜扫描角  $2\theta = 22.7^\circ$ , 给出一些余量,  $2\theta$  取  $30^\circ$ , 所以  $\alpha = 15^\circ$ , 面数  $N = 12$ , 扫描效率  $\eta = 50\%$ 。  
 $X = \cos[\alpha(1-\eta)/\eta] = \cos 15^\circ = 0.9659$

$$Y = \cos(\alpha/2\eta) \cos 45^\circ = \cos 15^\circ \cos 45^\circ = 0.6830$$

$$R = \omega_0 \left[ \frac{1 + 2(X-1)Y^2 - X^2 - 1/2}{2(X - Y^2 + 1)} \right] = 9.227 \omega_0$$

而  $\omega_0 = 3.037\text{mm}$ , 所以扫描用旋转多面体半径  $R = 28.02\text{mm}$ , 而多面体厚度  $h$  应大于  $2\omega_0 = 2 \times 3.037 = 6.074\text{mm}$ , 因此, 取  $h = 8\text{mm}$ 。旋转多面体材料用铝合金。

至此, 我们所采用的扫描器参数为: 扫描范围:  $l = 2\alpha = 2 \times (15^\circ \times \pi/180) \times 503.7 = 263.6\text{mm}$ ; 扫描角:  $2\alpha = 30^\circ$ ; 扫描光点直径:  $d_0 = 0.1\text{mm}$ ; 分辨率:  $1/d_0 = 10\text{point/mm}$ ; 扫描频率: 2000Hz; 电机转速: 20000R ot/min; 多面体面数:  $N = 12$ ; 多面体厚度:  $h = 8\text{mm}$ ; 多面体小平面反射率:  $> 85\%$ ; 多面体小平面平面度:  $< \lambda/6$ ; 多面体外接圆半径:  $R =$

Table The parameter summary of scanning system

$\eta$	$N = \frac{360\eta}{\alpha}$	$x = \cos \frac{\alpha(1-\eta)}{\eta}$	$Y = \cos \frac{\alpha}{2\eta} \cos 45^\circ$	$R(\text{mm})$
0.1	2	0.9511	0	3.07
0.2	4	0.3090	0.5	5.91
0.3	6	0.7431	0.6124	9.93
0.4	8	0.8910	0.6533	15.45
0.5	10	0.9511	0.6725	22.55
0.6	12	0.9781	0.6830	30.37
0.7	14	0.9909	0.6894	54.34
0.8	16	0.9969	0.6935	93.36
0.9	18	0.9994	0.6964	212.67
1.0	20	1	0.6983	$\infty$

30mm。我们用此扫描镜在宽片磁带表面缺陷的检测系统中应用效果很好。

参 考 文 献

- 1 陈海清. 光学仪器, 1986; 8(4): 17
- 2 宋贤球, 龚育良, 徐文华. 北京钢铁学院学报, 1983; (4): 136
- 3 戚元燧, 汪麟祥. 光学仪器, 1982; 4(4): 43
- 4 郑锦辉. 应用激光, 1986; 16(3): 97
- 5 刘向东. 宽片磁带表面缺陷在线检测仪的研究. 清华大学硕士论文 10130139401, 1994

\* \* \*

作者简介: 刘兴占, 男, 1941 年出生。副教授。1967 年至 1970 年赴柬埔寨磅湛王家大学任教, 1983 年至 1985 年赴法国贝藏松大学光学与信号处理研究室进修, 并获硕士学位。1995 年~ 1996 年赴法国巴黎第六大学作高访, 从事 LIGA 纳米技术研究, 先后主持和参加十几项科学研究, 涉及计量测试技术、激光应用技术、信号处理及检测技术、纳米技术等。