

文章编号: 1001-3806(2002)01-0071-04

激光显示系统中光束行偏转器的设计与研究

王恪典 徐海波 肖剑波

(西安交通大学机械工程学院, 西安, 710049)

摘要: 首次提出并设计了适合于高速偏转场合的多柱转镜式行偏转器, 给出了加工工艺。研究了多柱转镜的扫描效果和光束入射的最优位置; 分析了多柱转镜的动力学特性。采用多柱转镜作为光束行偏转器可以简化系统结构、降低系统成本, 由于工作转速低, 简化了转镜的静平衡和动平衡, 可有效提高转镜的运转精度; 多柱转镜反射的光束经过调整透镜的调整, 提高了系统的性能。

关键词: 激光; 行偏转器; 动力学**中图分类号:** TN944.6 **文献标识码:** A

The design and study of the horizontal beam deflector in a laser scanning image display system

Wang Kedian, Xu Haibo, Xiao Jianbo

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)

Abstract: A horizontal beam deflector with a rotating polycylinder-mirror used for the situation of high scan frequency is newly designed. The material and processing technology of the cylinder body are brought forward. The optical character and the scan result of the rotating polycylinder-mirror are studied. The dynamic character of the rotating polycylinder-mirror is studied too. The lens to correct the scan light nonlinear deflection by the rotating mirror is studied. As the horizontal beam deflector, the rotating polycylinder-mirror can simplify the structure and decrease the cost of system. The static and dynamic balance is easy to be insured because of the lower rotating speed of polycylinder-mirror, and also resulted in a high rotating precision. The light deflected by the rotating mirror can be corrected by correcting lens, which increases the property of system.

Key words: laser; horizontal beam deflector; dynamics

引言

激光显示系统主要由激光器、光束调制器、光束偏转器组成, 其中光束偏转器是系统的核心^[1], 直接影响着图像的质量, 一直是设计激光显示系统的重点和难点。作为光束偏转器, 多面转镜的技术比较成熟, 但由于光束行偏转器转速太高, 必然对驱动电机及多面转镜的支撑轴承提出很高的要求, 一般需要采用磁悬浮轴承或空气动力学轴承以减小高速运转时的摩擦, 而且还需要伺服机构以保证高速运转下多面转镜的稳定性^[2~4]。如果降低转速, 必然要增加多面转镜的面数, 这既增加了多面转镜的加工难度和加工费用, 又减小了光束的偏转角度。因此对于光束行偏转器的多面转镜而言, 在保证运转平稳

的前提下, 一方面要解决光束的偏转角度问题, 大的偏转角度可以简化系统结构, 减小系统景深, 进行大屏幕图像显示; 另一方面需要解决高转速的问题, 处理高转速下系统的平稳性和动平衡。设计出更为有效的光束行偏转器, 以改善图像质量、提高系统效率、优化系统结构, 是激光显示技术发展所必须的。

1 多柱转镜光束行偏转器的设计

N 个面的多面转镜的扫描偏转角 可由下式表示:

$$\theta = 4 / N \quad (N \geq 3) \quad (1)$$

若扫描频率为 f , 则 N 面转镜所需转速为:

$$n = 60f / N \quad (\text{r/min}) \quad (2)$$

多面转镜在显示系统中作为光束行偏转器, 还有很多问题需要解决。由于行偏转器的偏转频率很高, 当多面转镜为 24 个面时, 扫描角度可达 30° , 而多面转镜的转速则高达 60000r/min 。要降低转速, 就必须增加转镜的面数。由 (1) 式、(2) 式可得, 当转速降为 10000r/min 时, 转镜的面数需达到 144 面, 这

作者简介: 王恪典, 男, 1967 年出生。讲师, 在职博士研究生。现从事机电产品设计、CAD、机械学等方面的研究。

收稿日期: 2000-05-29; 收到修改稿日期: 2001-02-23

就提高了转镜的加工难度,大大增加了转镜的加工成本,而且使光束的扫描角度减小到只有5°。由于扫描角度和转速都与转镜面数成反比,要得到大扫描角、低转速的多面转镜以满足显示系统行偏转器的要求是不容易的。

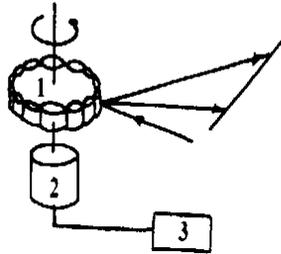


Fig. 1 The scan principle of the polycylinder-mirror
1—polycylinder-mirror 2—motor 3—driver

在改进多面转镜的基础上首次提出并设计出了多柱转镜作为光束行偏转器。多柱转镜扫描原理如图1所示。多柱转镜的扫描原理与多面转镜相同,只是用多柱转镜取代了多面转镜。多面转镜是平面反射,多柱转镜则采用柱面反射,这样就可以在相同反射面数的情况下提高光束的扫描角度。多柱转镜由电动机驱动后,可以使光束产生180°偏转而与柱体的数目和尺寸无关,这样为了降低转速,可以增加柱体数而不会减小光束的扫描角度。如柱体数为480时,转速只需3000r/min就可以达到行偏转24kHz的频率要求,这样的转速一般的电动机就可以满足要求,而且支撑轴承采用高精度滚动轴承即可。在这种转速下,比多面转镜的高速运转更容易提高偏转器的稳定性、安全性和运转精度,降低系统的复杂性,同时也降低了系统的成本。由于柱体可以很方便且精确地批量制造,故增加柱体数不会增加系统的加工难度和加工费用。综合各方面因素,采用多柱转镜作为光束行偏转器比其它几种偏转器更为有利,因此,我们选用多柱转镜式偏转器作为激光显示系统的行偏转装置。

2 扫描效果分析

如图2所示,光束入射到多柱转镜上,多柱转镜上的每一个柱体绕与柱体轴线平行的轴旋转,使光束反射产生扫描,每个柱体产生一次行扫描,多柱转镜柱体数为N时,转镜转动一周光束产生N次行扫描。当多柱转镜转动时,就会使光线在参考平面上形成一条扫描光线。

为了研究扫描光线的成像质量,设柱体轴线的方向矢量A为(0,0,1);柱体的半径r为2mm;柱体绕z轴旋转,轴线的转动半径R为310mm;参考平

面RF的参数方程为 $x = 600\text{mm}$; 设入射光线在 $x-z$ 平面内,则改变入射光线L的参数,使入射光线的方向矢量与反射柱体轴线的方向矢量成不同的角度关系,当角度分别为60°,30°,150°,120°时,得到如图3a~图3d所示各扫描光线。当角度为90°时,扫描光线如图4所示。

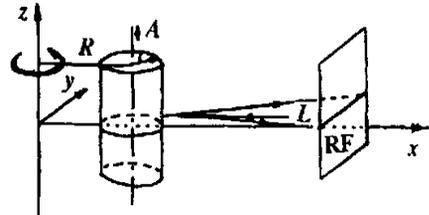


Fig. 2 Beam path of polycylinder-deflector

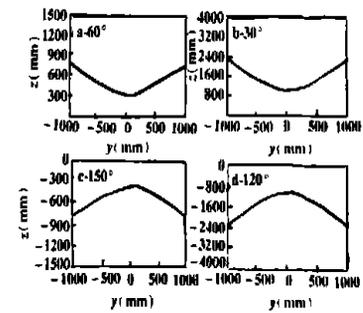


Fig. 3 The effects of different angles formed between the incident light and z axis

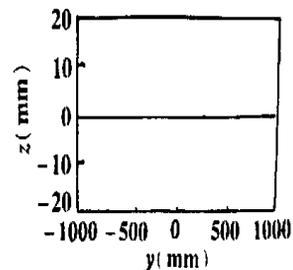


Fig. 4 The effect of 90° angle formed between the incident light and z axis

由于扫描光线的变形对于显示图像极为不利,严重影响成像的质量,必须加以避免,因此,应如图4所示使柱体在旋转的过程中轴线始终与入射光线垂直,以保证扫描光线始终保持为一条直线。图像是由点阵组成的,当对激光束以一定的频率进行调制时,经多柱转镜反射后就可以得到光束的扫描点阵。扫描点阵左右对称但疏密不均,呈现出点阵中间部分密集、两边部分稀疏的情况(如图5所示),会使图像产生水平畸变,故需要在扫描线上选取一段扫描角度适当并且点阵分布相对均匀的区域作为扫描区,以减小图像水平畸变失真。由于中间部分的点阵密集,可以选用柱体的中间区域作为反射区(如图6所示),多柱转镜绕O点旋转,转盘的半径为R,

柱体的半径为 r , O_1, O_2 分别为两个柱体截面的圆心,柱体经过加工后紧密环绕在转盘周围,则 $O_1O = R + r$,令图 6 中 $O_1OA = \alpha$, $O_1AO = \beta$,若柱体的个数为 N ,则有:

$$\dots\dots\dots$$

Fig. 5 The figure of scan lattice s effect

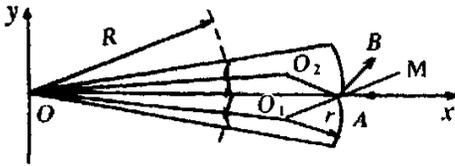


Fig. 6 The size and calculating figure of cylinder section

入射光线沿 x 轴逆向入射到多柱转镜的柱面上,图 6 中 O_1M 为柱体 O_1 在 A 点的法线, AB 为反射光线,则反射光线 AB 与 x 轴的夹角为 2α 。在 OAO_1 中有如下关系:

$$(R + r) / \sin \alpha = r / \sin \beta \tag{4}$$

柱体经过加工后柱面的实际反射区为柱面的全部有效反射区,例如取 $r = 10\text{mm}$, $N = 480$, $\alpha = 5^\circ$, $R = 123.17\text{mm}$,则柱体反射后光线的扫描角度为 4α ,即 20° ,如此放大的扫描角度可在增加柱体数量的前提下有效降低工作转速。

点阵在有效反射区域相对比较均匀而且密集(如图 5 点阵的中间部分),而且经过调整透镜的校正,完全能够满足显示系统的光束行偏转要求。我们采用的调整透镜结构如图 7 所示。调整透镜是由两个薄透镜串联而成,每一个薄透镜都是一个单面球面透镜。调整透镜置于多柱转镜之后,使光束经过多柱转镜偏转后再由调整透镜进行校正,使校正后的光束在屏幕上形成的扫描点均匀分布。

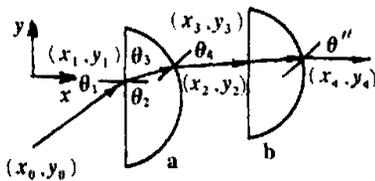


Fig. 7 The beam path of correcting lens

设调整透镜 a 的平面与 x 轴垂直,其参数方程为:

$$x = x_{fa} \tag{5}$$

透镜 a 的球面在 $x-y$ 平面上的参数方程为:

$$(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 = r_a^2 \tag{6}$$

同理可得透镜 b 的平面参数方程和球面参数方程:

$$(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 = r_b^2 \tag{7}$$

那么确定调整透镜实际就是确定其参数 $x_{fa}, x_a, y_a, r_a, x_{fb}, x_b, y_b, r_b$ 的值。

设入射角 α_1 为: $\alpha_1 = \arctan(m_0 / l_0)$ (8)

根据光线折射定律可得:

$$n_0 \sin \alpha_1 = n \sin \alpha_2 \tag{9}$$

式中, n_0 和 n 分别为空气和透镜的折射率。因此,折射角 α_2 为: $\alpha_2 = \arcsin[(n_0 / n) \sin \alpha_1]$ (10)

则出射光线的参数方程为:

$$\begin{aligned} x &= \cos \alpha_2 t + x_2 \\ y &= \sin \alpha_2 t + y_2 \end{aligned} \tag{11}$$

式中, α_2 为出射光线与 x 轴的夹角, (x_2, y_2) 为光线与球面的交点。同理可以求出透镜 b 的出射光线即调整透镜的最终出射光线与 x 轴的夹角 α_4 以及交点 (x_4, y_4) ,则修正后光束参数方程为:

$$\begin{aligned} x &= \cos \alpha_4 t + x_4 \\ y &= \sin \alpha_4 t + y_4 \end{aligned} \tag{12}$$

调整透镜的目的就是校正光束的非线性,使校正后的光束平行,这样在调整透镜之后加上不同焦距的扩束透镜,就可以得到具有不同扩散角的光束,从而使像点分布均匀,使系统具有很强的灵活性。因此,通过输入等时间间隔的 N 束光束,由以上计算求出这些光束的校正光束,通过优化,使这些光束平行且等距,从而求出调整透镜的各项参数为 $x_{fa} = 150.13\text{mm}$, $x_a = 145.12\text{mm}$, $y_a = 0\text{mm}$, $r_a = 19.96\text{mm}$, $x_{fb} = 170.01\text{mm}$, $x_b = 160.04\text{mm}$, $y_b = 0\text{mm}$, $r_b = 29.87\text{mm}$ 。

转镜高速旋转时要承受很大的离心力,从而使转镜产生变形,影响光束成像的质量,风阻产生的转镜扭矩也会使镜面变形。要提高转镜的抗变形能力,就需要选择刚性系数大的材料,且具有很高的强度-密度比、低密度、低泊松比、低热膨胀系数、可塑性好(易于加工)以及稳定性好等特性。这里选用最常用的铝合金作为转镜材料,它密度和泊松比小,可塑性好,易于加工,屈服强度高,具有很大的安全系数,而且是一种在可见光和红外光区段都能很好反射的金属。为了得到高反射率和反射同一性,采用金钢石切削。切削机床本身精度很高,其心轴使用了超高精密的气动轴承支撑,这样能完成光学表面的成形和精细加工,而且金钢石切削机床能够直接加工出光学表面。在金钢石切削加工之后,还应在柱体表面进行镀镍处理,这样可以提高多柱转镜的反射率及使用寿命,而且还为柱体表面提供保护膜

保护的作用,防止铝合金裸露在空气中产生氧化反应,从而破坏柱体表面的光学质量。在铝合金表面进行化学镀膜后,再经过抛光处理,使柱体表面不但光洁度高而且经久耐用。这里的抛光与通常的玻璃透镜一样,使用沥青研磨。

3 动力学分析

本系统转镜工作过程中的工作转速若为 3000r/min,则其圆频率为 50Hz,转子固有圆频率 $\omega_n = \sqrt{c/M}$ (c 为轴的刚度, M 为轮盘的质量),当 $\omega = \sqrt{2}/2$ [5] 时,动挠度恰好等于轮盘的不平衡偏心距 e ,这时两个轴承力之和为 ce ,工程上通常以此为界限,工作角速度 $\omega < 0.707 \omega_n$ 的转子称为弯曲刚性转子。通常情况下,此种结构固有圆频率为几千赫兹以上,所以工作频率远小于 $\omega_n/2$,故转镜系统属于弯曲刚性转子系统。由于轴的弯曲变形很小,可以将整个转子作为一个刚体,则转镜的力学模型如图 8 所示。支撑弹性各向同性,即所谓等刚度支撑,刚度为 c ,系统阻尼忽略不计,不平衡量 U 集中在轮盘上。

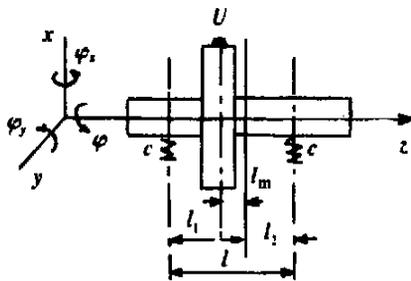


Fig. 8 The rigid rotor on the elastic support

在 xz 平面上根据力平衡与力矩平衡有:

$$\left. \begin{aligned} M \cdot \ddot{x} &= U_s \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) - 2c \cdot x - \\ &2c \cdot l_1 \cdot y + 2c \cdot l_2 \cdot y \\ - A \cdot \ddot{y} &= -U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) + \\ &2c \cdot l_1 \cdot x - 2c \cdot l_2 \cdot x + c \cdot l_1^2 \cdot y + \\ &c \cdot l_2^2 \cdot y \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

经整理后得:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2c & -c(l_2 - l_1) \\ -c(l_2 - l_1) & c(l_2^2 + l_1^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ U_m \end{bmatrix} \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (14)$$

式中, A 为转动惯量, M 为轮盘的质量, U_s 为转子静不平衡量, U_m 为转子力偶不平衡量, ω 为工作角速度, l_m 为偏心距, l 为支撑跨距, l_1, l_2 为左右支撑距

质心的距离, φ_x, φ_y , 分别为绕 x, y, z 轴的转角, 为相位角。

同理可得在 yz 平面的动力学方程。利用欧拉公式可得转子运动复微分方程:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2c & -c(l_2 - l_1) \\ -c(l_2 - l_1) & c(l_2^2 + l_1^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ U_m \end{bmatrix} 2e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (15)$$

方程的特征值(即转子系统的固有频率)可从(15)式的齐次式得到,令:

$$\begin{bmatrix} r \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_0 \\ 0 \end{bmatrix} e^{j\omega t}, \quad \ddot{r} = -\omega^2 \begin{bmatrix} r_0 \\ 0 \end{bmatrix} e^{j\omega t} \quad (16)$$

则有:

$$\begin{bmatrix} M & 0 & r_0 \\ 0 & A & 0 \\ 2c & -c(l_2 - l_1) & r_0 \\ -c(l_2 - l_1) & c(l_2^2 + l_1^2) & 0 \end{bmatrix} = 0.$$

转镜对称分布, $l_1 = l_2 = l/2$, 可得转子系统固有频率:

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{2cA + l^2 cM/2 \pm \sqrt{(2cA + l^2 cM/2)^2 - 4c^2 l^2 AM}}{2AM}} \quad (17)$$

对于不平衡响应可由方程的非齐次式求出,令:

$$\begin{bmatrix} r \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_0 \\ 0 \end{bmatrix} e^{j(\omega t + \varphi)}, \quad \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} = -\omega^2 \begin{bmatrix} r_0 \\ 0 \end{bmatrix} e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (18)$$

可得:

$$r_0 = \frac{U_s}{2cM - \omega^2}, \quad 0 = \frac{U_m}{l^2 c/2 - A - \omega^2} \quad (19)$$

若弹性支撑刚度 $C = 100N/\mu m, R = 123.17mm, d = 10mm, r = 10mm, l = 10mm$, 由(17)式,可得到转子系统的固有频率为 $\omega_1 = 2.76kHz, \omega_2 = 9.04kHz$ 。如果本系统中转镜的工作转速为 3000r/min, 即 50Hz, 远低于转子系统的第 1 阶固有频率, 因此, 转镜系统可以通过低速动平衡达到运转的平稳。

4 结论

(1) 多柱转镜具有偏转角度大、工作转速低等优点, 适合高分辨率扫描, 可作为激光显示系统的光束行偏转器。(2) 多柱转镜工作时, 选用柱体的中间区

(下转第 52 页)

高度差为:

$$h(x, y) = k[\phi(x, y) + 2m\lambda] - h_0(x, y) \quad (10)$$

$$m = n(x, y), n(x, y) \pm 1$$

显然, (10) 式中 m 必然存在一个值 $m_0(x, y) \in \{n(x, y), n(x, y) \pm 1\}$, 使得 $h(x, y)$ 为最小, 则 $m_0(x, y)$ 就是 $\phi(x, y)$ 的精确条纹数值。这样就可以得到 $P(x, y)$ 的精确的位相去包裹值。

4 实验结果及讨论

在我们的实验系统中, 全息投影条纹的宽度为 1.0mm, 周期为 0.5mm, 摄像机光轴与全息投影光轴得夹角为 45° , 两者的距离相距 250mm, 实验中采用 MTV1802-CB CCD 摄像机对图像进行采集, 并通过的 MVPCFV2A 将其量化为 512×512 个像素, 相移通过改变再现细光束的入射角度来实现。

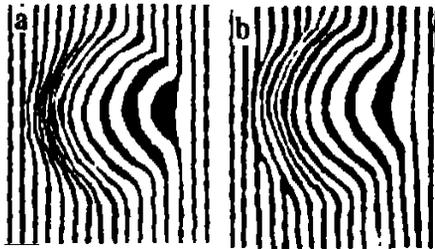


Fig. 3 Fringe pattern on the a protruding model surface with phase shifts of a—0 b— $\pi/2$

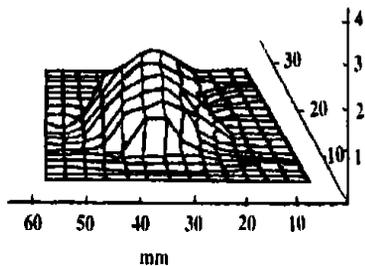


Fig. 4 Three-dimensional plot of the protruding model surface deformation

(上接第 74 页)

域作为反射区, 点阵在这一区域相对比较均匀而且密集, 而且经过调整透镜的校正, 使反射后光线在屏幕上所形成的点阵分布比较均匀, 能满足显示系统的光束行偏转要求。(3) 多柱转镜工作转速低, 属于刚性转子系统, 可以简化转镜的静平衡和动平衡提高系统的稳定性。

图 3a 是模型凸痕的变形条纹图, 图 3b 分别为条纹相移 $\pi/2$ 变形条纹图, 图 4 为位相去包裹技术处理后得到的三维面形网格图。

5 系统性能分析

由于在全息投影条纹三角法中引入相移技术, 因而提高了测量精度, 同时, 利用投影条纹多项式拟合得到的测量结果使得位相去包裹处理可以方便地进行, 且在测量中, 各点的去包裹处理是相对独立完成的, 即使在某些点出现去包裹误差, 也不会影响其它点的处理。

从以上分析可以看出, 为了能得到正确的位相测量结果, 投影条纹多项式拟合得到的测量精度应该达到位相测量精度的 0.5 级条纹, 我们的实验测量系统中投影放大率为 4, 条纹的周期为 0.5mm, 投影到被测物体表面上的条纹周期为 2mm, 通过 (6) 式可以算出位相测量的每级条纹所代表的高度值为 2mm, 即只要投影条纹多项式拟合测量精度达到 1mm 就可以。我们的实验系统中图像采集卡的分辨率为 8bit, 因此, 测量系统的分辨率达到 0.01mm 以上。

参 考 文 献

- [1] Maurice H, Liu H Ch. Optics and Laser in Engineering, 1989, 11 (3) : 185.
- [2] Dresel T, Hausler G. J Optic, 1988, 48 (4) : 215.
- [3] Creath K. Appl Opt, 1985, 24 (18) : 3053 ~ 3058.
- [4] 于美文. 光学全息及光信息处理, 北京: 国防工业出版社, 1984: 6.
- [5] 钟丽云, 杨齐民, 李川 *et al.* 激光杂志, 1999, 20(4) : 31 ~ 37.
- [6] 赵宏, 宋元鹤, 李根乾 *et al.* 光学学报, 1999, 19(4) : 497 ~ 500.
- [7] Strand X T C, Optical Engng, 1985, 24(1) : 33.

参 考 文 献

- [1] 王本, 沈树群. 激光扫描和光盘技术. 北京: 北京邮电学院出版社, 1990.
- [2] Toyen G. SPIE Laser Scanning Components & Techniques, 1972, 84: 138 ~ 145.
- [3] Minoura K. SPIE Proc, 1995, 1987: 264 ~ 273.
- [4] Beiser L. Appl Opt, 1995, 34(31) : 7307 ~ 7317.
- [5] 周仁睦. 转子动平衡——原理、方法和标准. 北京: 化学工业出版社, 1992.