

文章编号: 0253-2239(2010)08-2393-08

CR 扫描仪激光扫描光学系统设计及理论分析

郑 猛 邵双运 冯其波

(北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 设计了一种适合于计算机 X 射线扫描仪的新型激光扫描光学系统, 采用五角棱镜和聚焦物镜组成扫描臂以取代传统的 $f-\theta$ 镜头, 利用影像板的柔性成圆弧形进片。扫描臂又用做接收器件来收集激发出的荧光, 使得系统性能提高, 同时结构简单。用 Zemax 光学软件对扫描物镜的光学性能进行了分析。对机械结构进行了有限元仿真, 确定了扫描臂转速。研究了当入射光与五角棱镜入射面不垂直及五角棱镜存在安置误差时, 对系统分辨率的影响。结果显示设计的激光扫描光学系统具有一定的容差性。实验验证了所设计制造的扫描仪的性能, 扫描图像具有良好的视觉效果, 能够满足工业检测要求。

关键词 光学设计; 激光扫描光学系统; 有限元分析; 高斯光束; 扫描臂

中图分类号 TH774; R814.42 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2393

Design and Theoretical Analysis of Laser Scanning Optical System for Computed Radiography

Zheng Meng Shao Shuangyun Feng Qibo

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract To meet the requirements of computed radiographic (CR) system, a new high-performance laser scanning optical system is designed. In view of differences in performances of scanning methods, a scanning arm which is composed of pentagonal prism and scanning object lens is designed. The scanning arm is used to replace the $f-\theta$ lens. To cooperate with scanning arm, a circular imaging plate transport mechanism is designed. The scanning arm also receives stimulation fluorescence as a receiving device. The performance of object lens is analyzed using the Zemax software. The performance of mechanical structure is simulated by using the finite element method and the rotational speed of scanning arm is confirmed. The influences of the following factors that the incident light out of vertical to the pentagonal prism and there is location error of the pentagonal prism on the system's resolution are studied. The results reveal that the system is easily adaptive to the error and can be used widely. Experiments are carried out to verify the performance of the laser scanner. Moreover, the results indicate that the images have good visual effect and can meet requirements of industrial inspection.

Key words optical design; laser scanning optical system; finite element analysis; Gaussian beam; scanning arm

1 引 言

计算机 X 线摄影(CR)是一种先进的成像技术, 它采用影像板代替传统 X 线摄影技术所使用的胶片。影像板感光后在荧光物质中形成潜影, 将带有

潜影的影像板置入读出器中用激光束进行扫描读取, 使存储信号转换成荧光信号, 再用光电倍增管转换成电信号, 经模数(A/D)转换后, 输入计算机处理, 形成高质量的数字图像^[1~3]。与传统的胶片拍

收稿日期: 2009-11-12; 收到修改稿日期: 2009-11-20

基金项目: 十一五国家科技支撑计划项目(2006 BAK02B01-02-01)资助课题。

作者简介: 郑 猛(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事光电检测与信息处理等方面的研究。

E-mail: 05118305@bjtu.edu.cn

导师简介: 冯其波(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测技术方面的研究。

E-mail: qbfeng@bjtu.edu.cn

摄法相比,具有动态范围广、成像速度快和影像板能重复使用等优点。所以,CR系统在医学诊断方面得到广泛应用,近年来也不断应用于石油天然气、电力及航天领域的设备探伤方面。读出装置是CR系统的关键和核心,读出技术的发展影响着CR系统的进步,如何提高读出装置的扫描速度和收集效率,如何更简单有效的实现读出装置,降低成本,一直以来都是读出技术中最重要的问题之一。

在CR扫描仪扫描光学系统中,通常采用转镜(多面体棱镜或五角棱镜)作为扫描器,用 $f-\theta$ 镜头系统进行聚焦,使得扫描光点在影像板上的移动变为线性,从而消除扫描激励失真^[4~6]。但是多面体棱镜扫描会出现扫描间歇,使信息的传输不连续,用 $f-\theta$ 镜头聚焦增加了设计难度,使得系统的整体结构较大。在现有产品中,扫描系统和接收系统通常是分离的,需要加工设计专门的接收器件^[7,8]。针对以上问题,本文设计了一种新型的激光扫描光学系统,用五角棱镜和短焦距的扫描物镜组成扫描臂,输片机构设计成圆弧形,利用影像板的柔韧性弯曲进片。这样不使用 $f-\theta$ 镜头就能使扫描光点在影像板上的移动为线性。同时扫描臂又作为接收器件来接收激发出的荧光,使得系统结构简单,易于实现。

2 激光扫描光学系统的设计

荧光发射峰值波长为390 nm,带宽为 ± 20 nm,文中选用的激光器波长为638 nm。

2.1 光路设计

影像板激励荧光的强度与其发射方向有关,具体关系式为^[9]

$$I = I_0 \cos \theta, \quad (1)$$

式中 I_0 为影像板法线方向荧光的强度, θ 为与法线的夹角,影像板激发的荧光布局如图1所示。

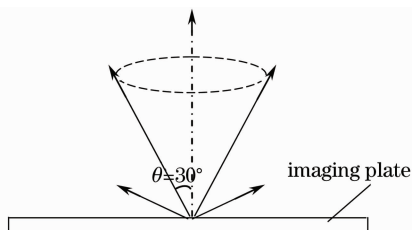


图1 影像板荧光强度分布图

Fig. 1 Intensity distribution of fluorescence on imaging plate

法线方向的荧光强度最大,激发出的荧光强度方向与法线角度越大,荧光的能量越小。由上式可知,当 $\theta=30^\circ$ 时, $I=0.866I_0$,所以荧光发射空间中,在以 30° 发射方向绕法线旋转一周的立体角范围内的能收

集到比较强的荧光。因此合理选择物镜,在图1所示立体角范围内就能收集到光强较强的荧光。

设计的激光扫描系统如图2所示。光学系统由激光器、激光扩束准直器、分光镜、五角棱镜、扫描物镜、聚焦物镜、滤光镜和光电倍增管(PMT)组成,其中五角棱镜和扫描物镜组成扫描臂。在扫描系统中影像板呈半圆弧形放置,扫描臂转轴和半圆形的圆心主轴重合,以臂长为半径作圆周扫描。这样可以保证扫描光束能垂直激发影像板,并且扫描臂扫描一周使得扫描物镜到影像板的距离处处相等,使激发光投射在影像板各处的光斑大小不变,光点在圆弧上的移动为线性,从而保证了图像分辨率的稳定性和收集效率的一致性。合理选择扫描物镜尺寸,就能在图1所示立体角范围内同收集大部分荧光。所以不需要单独设计接收器,扫描臂又可以用来接收激发出的荧光。这种方法具有体积小、结构简单等优点。

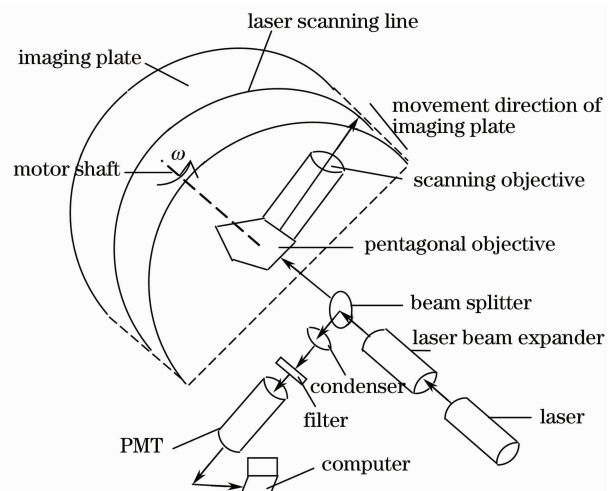


图2 激光扫描光路图

Fig. 2 Configuration of laser scanning optical system

激光扫描的工作过程为:激光器发出的光经准直,由分光镜透射后入射到五角棱镜上,旋转电机带动由五角棱镜和扫描物镜组成的扫描臂高速旋转。激发光束经五角棱镜反射,再由扫描物镜聚焦后,入射到影像板上,激发出荧光。荧光经扫描物镜收集后变成平行光,由五角棱镜反射到分光镜,分光镜再将荧光反射,由聚焦物镜聚焦、滤光镜滤掉杂散光送入光电倍增管,经模数转换后输入计算机,形成数字化图像。

2.2 扫描物镜分析

对荧光收集来讲,要求扫描物镜数值孔径较大,这样荧光的收集效率较高。扫描物镜选用双胶合透镜,透镜的参数为:焦距 $f' = 25$ mm,背焦 $f_b =$

15.6 mm, 直径 $\varphi=25$ mm, 有效孔径 $C_A=22.5$ mm。对于荧光, 激发后可以充满透镜口径, 透镜数值孔径 $NA=0.58$ 。对于激光, 要求胶合透镜有小的像差。在小视场角内测试轴上以及离轴特性, 使用 ZEMAX 软件分析得到如下结果。

场曲和畸变像差曲线如图 3 所示, 可见场曲和畸变都比较小。波像差 (OPD) 即光程差, 对光学系统而言, 波像差能够全面地反映像面成像质量的情况。光程差越小, 证明像差越小, 得到的光程差曲线图如图 4 所示, 光学系统 OPD 在 $\pm 0.2\lambda$ 以内, 胶合透镜像差校正较好。点列图如图 5 所示, 从点列图可以看出: 几何像差的尺寸小于系统艾里斑直径 (图中圆圈内为艾里斑直径), 整个像面的像质基本一致。

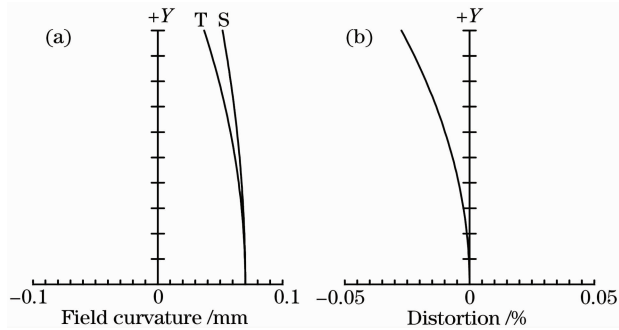


图 3 场曲 (a) 和畸变 (b) 像差曲线图

Fig. 3 Graphs of field curvature (a) and distortion (b)

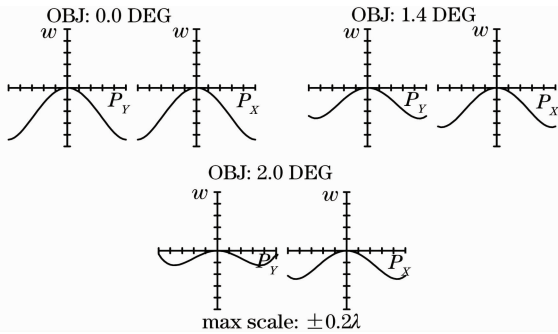


图 4 胶合透镜的 OPD 曲线

Fig. 4 OPD curve of cemented doublet

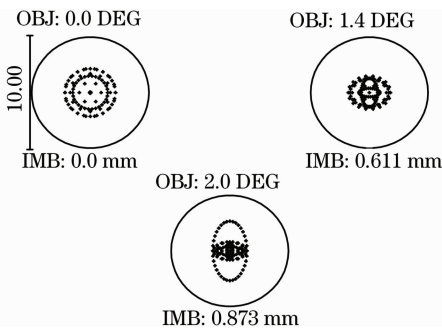


图 5 胶合透镜的点列图

Fig. 5 Spot diagram of cemented doublet

2.3 扫描臂转速分析

扫描仪的扫描臂在工作过程中高速旋转, 所以在扫描臂的反方向需要加配重, 使整个扫描部件的重心位于电机转轴轴线上, 以至于旋转过程中不会出现偏心。但是有时调整动平衡时会有偏差, 使旋转部件偏心, 以致系统产生振动。同时, 当系统的机械结构确定时, 分析结构的特性对其他器件的选择具有指导意义。以下分析机械结构的力学特性。扫描臂的结构图 (配重没有安装) 如图 6 所示。扫描臂高速旋转时, 机械结构等效成图 7 所示模型。

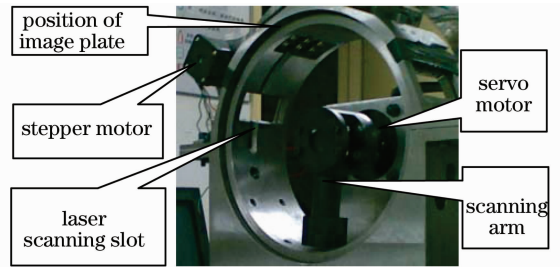


图 6 扫描臂机械结构图

Fig. 6 Mechanical structure of scanning arm

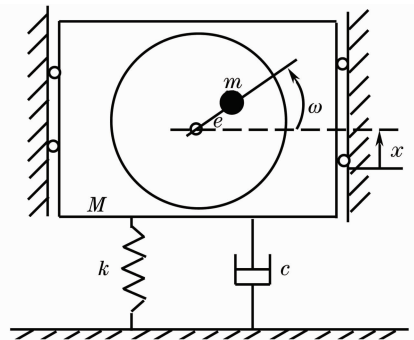


图 7 偏心质量旋转机械的力学模型

Fig. 7 Mechanical model of eccentric mass rotating machinery

设旋转机械总质量为 M , 转子的偏心质量为 m , 偏心距为 e , 转子的转动角速度为 ω , 基础视为刚度为 k 的弹簧, 振动过程中所受阻力简化为与弹簧并联的阻尼系数为 c 的阻尼器对机械的作用。

设坐标 x 表示结构离开平衡位置的垂直位移, 则偏心质量的垂直位移为 $x + e \sin \omega t$, 由达朗贝尔原理得到系统在垂直方向的运动微分方程为

$$(M - m)\ddot{x} + m \frac{d^2}{dt^2}(x + e \sin \omega t) + c\dot{x} + kx = 0, \tag{2}$$

整理得

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = me\omega^2 \sin \omega t. \tag{3}$$

式中 me 为不平衡量, $me\omega^2$ 为不平衡量引起的离心惯性力。系统的稳态响应为

$$x(t) = B\sin(\omega t - \varphi), \quad (4)$$

式中稳态响应的振幅

$$B = \frac{me}{M} \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}}, \quad (5)$$

振动物体的位移与激振力之间的相位差

$$\varphi = \arctan \frac{2\xi\lambda}{1-\lambda^2}, \quad (6)$$

固有频率 $\omega_n = \sqrt{K/M}$, 频率比 $\lambda = \omega/\omega_n$, 阻尼系数 $\xi = c/2\omega_n M$.

由(5)式和(6)式可知, 低频时($\omega \ll \omega_n$), 振幅接近于零; 高频时($\omega \gg \omega_n$), 振幅趋近于常数 me/M , 与激振频率及系统阻尼基本无关; 共振时($\omega = \omega_n$), 振幅 $B = me/2\xi M$, 阻尼越小, 振动越剧烈。 $\omega \approx \omega_n$ 前后, 相位差突然出现 180° 的反相变化。所以, 当激励力的频率即电机转子的角速度 ω 接近于系统的固有频率 ω_n 时系统出现共振, 此时电机的转速称为临界转速。

为了适当减少建模工作量及计算机的运算时间, 在建模过程中对模型做了一些处理。扫描臂材

料为铝合金, 加上镜片、五角棱镜重量很轻, 但结构复杂且材料不同, 所以在建模过程中没有画出, 而是把这部分质量加到了电机上。用三维制图软件做出扫描仪机械结构的实体模型, 然后导入有限元分析软件进行分析。机械结构材料为钢, 弹性模量 $E = 205 \text{ GPa}$, 泊松系数 $\mu = 0.3$, 密度 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, 有限元模型划分网格后共 245041 个节点, 72149 个单元。扫描仪机械结构有限元模型如图 8 所示。

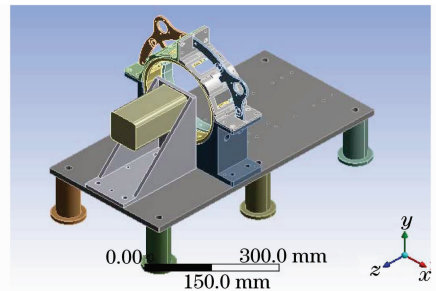


图 8 扫描仪机械结构

Fig. 8 Mechanical structure of scanner

系统的前 6 阶固有频率及系统产生共振时电机对应的转速如表 1 所示

表 1 系统固有频率与对应电机转速

Table 1 Natural frequency and corresponding servo motor rotation speed of the system

Mode order	1	2	3	4	5	6
Natural frequency /Hz	220.58	289.68	379.33	413.63	444.51	463.75
Motor rotation speed / (r/min)	2106.4	2759.7	3622.3	3949.9	4244.8	4428.5

从以上分析可知, 当扫描仪的旋转部件有质量偏心时, 系统就会产生振动, 偏心距越大, 振幅就越大; 当旋转角速度等于系统固有频率时, 会产生共振, 系统机械结构有较大变形。扫描仪中, 电机的转速与采集系统的采样频率有关, 采样频率高电机转速快, 采样频率低电机转速慢。所以在确定了采样频率后要计算电机转速, 使电机转速远离机械系统的各阶固有频率。实际中, 扫描电机选用最高转速为 3000 r/min 的电机, 因此考虑电机转速时只需参考机械系统前两阶固有频率(第三阶固有频率对应的转速超过了选用电机的最高转速)。同时, 扫描部件必须经过动平衡实验, 使质心在电机轴线上。

3 光线偏转对系统分辨率的影响

所设计的系统最大扫描宽度为 356 mm 长度不限。系统设计的空间分辨率为 10 lp/mm, 即扫描光点直径不大于 $50 \mu\text{m}$ 。CR 影像的空间分辨率与影像板的特性、激光和取样频率有关。激光光点直径小, 影像板中荧光层对激光的散射少, 取样频率高, 空间分辨率就高。在扫描仪中激光是以点扫描来完

成影像读取, 点的直径直接关系到读取影像信息量, 即影像质量。读取装置的激光光点直径越小, 读取的信息量就越多, 得到的像质也越好。所以, 激光光点大小是影响系统空间分辨率的一个重要因素。

3.1 入射光与入射面不垂直引起光线偏转

五角棱镜与反射光线的几何关系如图 9 所示。根据折射、反射定律及五角棱镜与反射光线的几何关系推导出入射光线与其经过五角棱镜后的出射光线的夹角关系式为^[10]

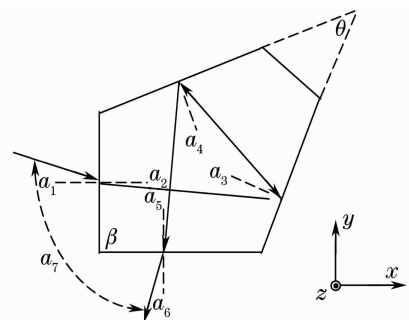


图 9 入射光线和出射光线的几何关系

Fig. 9 Geometrical relation of incident ray and emergent ray

$$\alpha_7 = 180^\circ - \beta + \alpha_1 - \arcsin\{n \sin[2\theta - \beta + \arcsin(\sin \alpha_1 / n)]\}, \quad (7)$$

$$\alpha_6 = 90^\circ - (\alpha_7 - \alpha_1), \quad (8)$$

式中 n 为五角棱镜材料折射率, β, θ 为五角棱镜的内角, α_1 为入射光线相对于棱镜在 xy 面内的角偏, 也就是入射角。代入数据可求得实际出射光线和理想出射光线之间的角度 α_6 。

3.2 五角棱镜的安置误差引起光线偏转

当扫描臂中的五角棱镜由于安装时产生安装误差或在高速旋转中产生空间微量转动时, 也会使出射光线和影像板不垂直。

当五角棱镜有制造偏差以及存在安置误差时, 如图 10 所示。此时设入射光矢量为 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4, \mathbf{A}_5$, 分别为经过五角棱镜的折射、反射矢量。五角棱镜的 I 面为入射面, II, III 为反射面, IV 为出射面, $\delta_\beta, \delta_\theta$ 分别为 β, θ 角的制造角差。五角棱镜与动坐标固联在一起, 当五角棱镜不存在安置误差时, $OX_0Y_0Z_0$ 和 $OXYZ$ 坐标系完全重合。当入射光线不变时(始终平行于 X 轴), 五角棱镜绕 Z 轴有微小转动时, 出射光线方向不会改变, 所以可以不考虑棱镜绕 Z 轴的微小变化。五角棱镜的安置误差表示为五角棱镜绕 Y 轴转 β 后, 再绕 X_0 轴转 α 角。

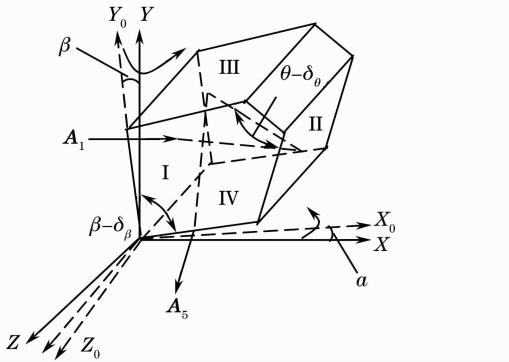


图 10 五角棱镜的空间坐标变化

Fig. 10 Spatial coordinate transformation of pentagonal prism

五角棱镜在动坐标系中各个面的法线矢量为

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{10} = \mathbf{i}, \\ \mathbf{N}_{20} = \cos 22.5^\circ \mathbf{i} - \sin 22.5^\circ \mathbf{j}, \\ \mathbf{N}_{30} = -\sin(22.5^\circ + \delta_\theta) \mathbf{i} + \cos(22.5^\circ + \delta_\theta) \mathbf{j}, \\ \mathbf{N}_{40} = \sin \delta_\beta \mathbf{i} - \cos \delta_\beta \mathbf{j}. \end{cases} \quad (9)$$

各法线矢量在定坐标系中的表达式可以经过坐标变换得到

$$\begin{vmatrix} x & y & z \end{vmatrix}^T = \mathbf{G}_{mf} \begin{vmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \end{vmatrix}^T, \quad (10)$$

式中 \mathbf{G}_{mf} 为从动坐标到定坐标的坐标变换矩阵。反射定律的矢量表达式为

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} - 2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N}, \quad (11)$$

折射定律的矢量表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{A}'' - \mathbf{A} = P\mathbf{N}, \\ P = \sqrt{(n')^2 - n^2 + (\mathbf{N} \cdot \mathbf{A})^2} - (\mathbf{N} \cdot \mathbf{A}), \end{cases} \quad (12)$$

设 $\mathbf{A}_1 = \mathbf{i}$, 代入(9)~(12)式, 则可算出出射光线 \mathbf{A}_5 的矢量表达式, 即可知光线偏转的角度。

3.3 偏转对系统分辨率的影响

由于以上两个原因, 使得入射到聚焦物镜的光线有一定角度的偏转, 因此高斯光束的轴线与系统光轴有一定偏离。从柯林斯公式出发^[11~13], 对离轴高斯光束经过光学系统的变换进行定量分析, 得出入射高斯光束与出射高斯光束各项参数间的关系。

由于要分析聚焦后高斯光束的束腰大小, 所以考虑一维情况即可。在入射面的一维高斯光束复振幅分布为

$$u(y) = \frac{1}{q(z)} \exp\left\{-jk \frac{y^2}{2q(z)}\right\}, \quad (13)$$

式中 $q(z) = z + iz_0$, z_0 为瑞利长度

当高斯光束有离轴时, 如图 11 所示。Z 轴为光学系统的光轴, y, ξ 分别为入射面和出射面的一维横坐标。

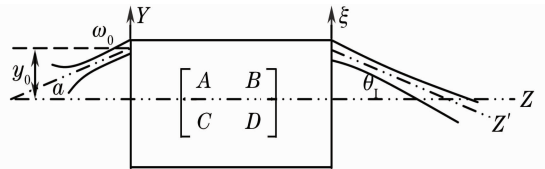


图 11 离轴高斯光束通过 ABCD 矩阵光学系统的变换
Fig. 11 Sketch of off-axis beam passing through ABCD matrix optical system

取入射面位于入射高斯光束的束腰处, 束腰半径为 ω_0 , 光束中心轴线在 Y 轴上的距离为 y_0 , 与 Z 轴的倾角为 α , 则入射面处离轴高斯光束的复振幅为

$$u(y) = \frac{1}{q_{i0}} \exp\left\{-jk \frac{(y - y_0)^2 \cos^2 \alpha}{2q_{i0}}\right\}, \quad (14)$$

将(14)式代入柯林斯公式, 略去几何相移 $\exp(jkl)$, 可得出射面激光束的复振幅为

$$u(\xi) = \left(\frac{j}{\lambda B}\right)^{\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{q_{i0}} \exp\left[-jk \frac{(y - y_0)^2 \cos^2 \alpha}{2q_{i0}}\right] \times \exp\left[-\frac{jk}{2B}(Ay^2 + D\xi^2 - 2y\xi)\right] dy. \quad (15)$$

整理得

$$u(\xi) = \left(\frac{j}{\lambda B}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{q_{i0}} \exp\left(-\frac{j\pi y_0^2}{\lambda q_{i0}/\cos^2 \alpha} - \frac{j\pi D}{B\lambda} \xi^2\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\left(\frac{j}{\lambda q_{i0}/\cos^2 \alpha} + \frac{jA}{B\lambda}\right)\pi y^2 + \left(\frac{j2y_0}{\lambda q_{i0}/\cos^2 \alpha} + \frac{j2\xi}{B\lambda}\right)\pi y\right\} dy, \quad (16)$$

对(16)式积分,简化整理得^[14~15]

$$u(\xi) = u_0 \exp\left(-jk \frac{[\xi - (\xi_d - j\xi_0)]^2}{2q_z}\right), \quad (17)$$

式中

$$q_z = \frac{A(q_{i0}/\cos^2 \alpha) + B}{C(q_{i0}/\cos^2 \alpha) + D},$$

$$\xi_d = \frac{y_0 D}{D^2 + C^2 z_{i0}^2 / \cos^4 \alpha},$$

$$\xi_0 = \frac{y_0 C z_{i0} / \cos^2 \alpha}{D^2 + C^2 z_{i0}^2 / \cos^4 \alpha}.$$

式中 u_0 为常数, z_{i0} 为入射高斯光束瑞利长度, ξ_d 为光束束腰中心在 ξ 方向上的位移, $\xi_d - j\xi_0$ 对确定的光束是常量。离轴高斯光束光强极大值相对于 Z 轴有一个夹角 θ_1 , 峰值光强轴线用 Z' 轴表示, 有 $\tan \theta_1 = \xi_0 / z_{i0}$ 。由(17)式可知该光束场分布在 ξ 方向仍是高斯分布, 但在与 Z' 轴垂直的 ξ' 方向上既不是高斯分布, 也不是轴对称的。分析偏转高斯光束通过胶合透镜的情况, 如图 12 所示。

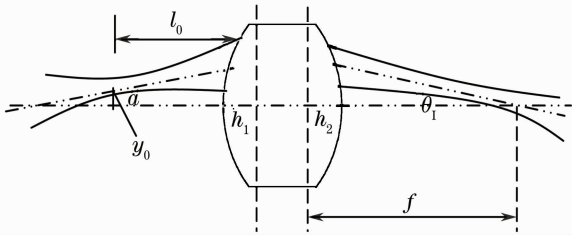


图 12 离轴高斯光束通过胶合透镜的变换

Fig. 12 Off-axis Gaussian beam conversion passing through cemented doublet

入射光束束腰在五角棱镜入射面前。已知胶合透镜的主距和焦距, 则双胶合透镜的变换矩阵 M_1 可知。五角棱镜的材料为 BK7, 其折射率 $n = 1.5168$, 则等效空气厚度 l_1 可知。光束在空气中传输的距离为 l_2 , 则高斯光束的束腰到透镜前端的

距离为 $l_0 = l_1 + l_2$, 所以传输矩阵 M_2 可知。从入射光束束腰到透镜后端面的变换矩阵为

$$M = M_1 \cdot M_2 = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (18)$$

透镜后端面出射偏心高斯光束的参数为

$$q_{out} = \frac{A(q_{i0}/\cos^2 \alpha) + B}{C(q_{i0}/\cos^2 \alpha) + D} = z + jz_0, \quad (19)$$

由上式可得出射高斯光束的瑞利长度为

$$z_0 = \frac{z_{i0} \cos^2 \alpha}{C^2 z_{i0}^2 + D^2 \cos^4 \alpha}. \quad (20)$$

束腰中心在 ξ 方向位置由 ξ_d 决定, 到透镜主距 h_2 轴向距离为 $z_c = (y_0 - \xi_d) z_0 / \xi_0$, 已知入射光波长 $\lambda = 638 \text{ nm}$, 束腰半径 $\omega_{i0} = 1.2 \text{ mm}$, 束腰到透镜前端的距离 $l_0 = 200 \text{ mm}$, 胶合透镜 $h_1 = 3.3 \text{ mm}$, $h_2 = 9.4 \text{ mm}$, $f = 25 \text{ mm}$ 。代入已知数据得表 2。

当入射高斯光束中心轴线在透镜光轴上, 即没有偏转时 ($y_0 = 0, \alpha = 0$), 可计算得束腰光斑直径为 $8.4591 \mu\text{m}$ 。设计中影像板距透镜后端面的距离为 15.6 mm , 即在胶合透镜焦面上。

当入射高斯光束相对于光轴 Z 轴有偏离 ($y_0 \neq 0, \alpha \neq 0$) 时, 聚焦后激光束腰光斑大小随倾角的增大而减小, 束腰光斑越来越靠近透镜焦面, 对系统的分辨率没有影响。但是光束与 Z 轴的夹角越来越大, 也就是说扫描光束和影像板不垂直, 和成圆弧形放置的影像板的扫描点的法线有一定的夹角, 通过实验表明这会导致收集的荧光强度减弱。高斯光束入射角度与收集的荧光强度实验结果如图 13 所示。

入射角度指入射到影像板的扫描光束与影像板法线的夹角。用设计的激光扫描光学系统扫描读取, 结果显示当入射角度逐渐变大时, 激发收集到的荧光强度逐渐减小。激光在入射到影像板时, 光轴与影像板垂直时激发出的荧光强度最大。

表 2 入射光束离轴时的计算结果

Table 2 Calculated results of off-axis beam conversion

$\alpha / (^{\circ})$	$\omega_0 / \mu\text{m}$	$z_c - h_2 / \text{mm}$	$\theta_1 / (^{\circ})$	$\xi_d / \mu\text{m}$
0.5	8.4587	15.5978	1.5996	-0.0619
1	8.4578	15.5978	3.1970	-0.1237
1.5	8.4562	15.5978	4.7899	-0.1854
2	8.4539	15.5978	6.3761	-0.2469
2.5	8.4510	15.5978	7.9536	-0.3083

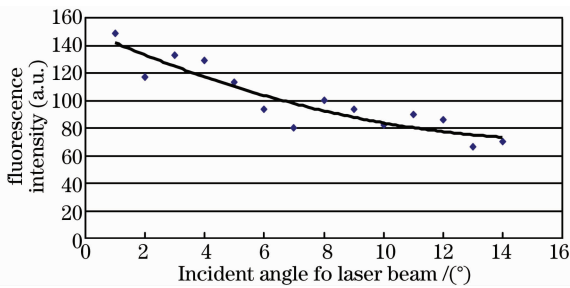


图 13 激光入射角度与激发荧光强度关系曲线

Fig. 13 Relation between incident angle and excitation fluorescence intensity

4 实验结果

用以上光学扫描系统设计方案研制的扫描仪样机如图 14 所示。实验选用钢管焊缝。钢管直径为 160 mm,壁厚为 8 mm。影像板弯曲放置在钢管内部。实验条件为: X 射线管电压为 120 kV,管电流为 4 mA,焦距为 700 mm,曝光时间为 40 s。影像板曝光后,用所研制的激光扫描仪扫描读取,结果如图 15 所示。图 15 为原始图像,没有经过图像处理。由图可见,焊缝小缺陷能够清晰地显示出来。

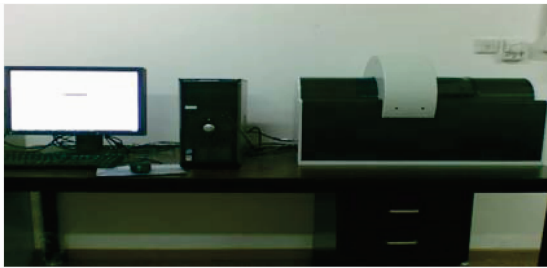


图 14 计算机 X 射线激光扫描仪

Fig. 14 Computed X-ray radiographic system



图 15 扫描的原始图像

Fig. 15 Original image of scanning

5 结 论

确定了一种新型的激光扫描光学系统的设计方案。用 ZEMAX 评价像质表明,扫描物镜成像质量较好。对机械结构的固有频率分析为扫描臂的转速(系统的采样频率)提供了参考和依据,同时表明旋转部件必须要经过动平衡实验调整。系统分辨率与

激光光点大小有关,光点越小系统分辨率越高。当入射光与五角棱镜入射面不垂直及五角棱镜存在安置误差时,光点基本不变,这说明系统具有一定的容差性,满足计算机射线扫描仪对激光扫描光学系统的设计要求。但是,要尽量避免扫描激光的离轴,否则会使收集的荧光强度减弱。用以上设计方案研制了一台激光扫描仪样机,通过实验表明,系统能够准确成像,未经处理的焊缝图像缺陷能够清晰的显示出来,能够满足工业检测要求。

参 考 文 献

- 1 A. R. Cowen, A. G. Davies, S. M. Kengyelics. Advances in computed radiography systems and their physical imaging characteristics [J]. *Clinical Radiology*, 2007, **62** (12): 1132~1141
- 2 K. Sakasai, M. Katagiri, M. Kishimoto. Readout characteristics of an imaging plate by fast laser pulses[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, **47**(3): 944~947
- 3 Hou Fangyuan. Research of computed radiography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, **6**(5): 96~99
候方源. 计算机 X 光成像仪的研究[J]. *光学精密工程*, 1998, **6**(5): 96~99
- 4 Shan Baozhong, Guo Baoping, Wang Shuyan *et al.*. Laser scanning system of large field [J]. *Shenzhen Science & Technology*, 2005, **11**(z1): 2~7
单宝忠, 郭宝平, 王淑岩 等. 大视场激光扫描系统[J]. *深圳特区科技*, 2005, **11**(z1): 2~7
- 5 Zhang Jianping, Feng Xiuheng, Huang Lianqing. Design of laser scanning optical system for computed radiography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(2): 202~207
张建萍, 冯秀恒, 黄廉卿. 数字 X 线影像仪的激光扫描光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(2): 202~207
- 6 Xiu Min, Hu Jiasheng. Analysis and calculation of rotating polygonal scanner in laser scanning imaging system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 782~787
许 敏, 胡家升. 激光扫描成像中旋转多面体的分析计算[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 782~787
- 7 S. Ralph, F. Robert, K. Peter. New high-speed scanning technique for computed radiography [C] *SPIE*, 2002, 4682: 511~520
- 8 K. Sakasai, M. Katagiri, T. Nakamura. Fast readout method for an imaging plate using wavelength shifting fibers and line-shaped laser[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, **49**(1): 156~159
- 9 Hou Fangyuan. Consideration of collection and detection with high efficiency utilizing laser scanning stimulation luminescence [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(3): 85~88
候方源. 激光扫描激励荧光高效探测的考虑[J]. *光学精密工程*, 1999, **7**(3): 85~88
- 10 Hao Qun, Zhao Yang, Cao Mang. Application of pentagonal prism in establishing the datum plane for measuring flatness in large scale dimension[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8): 1134~1137
郝 群, 赵 洋, 曹 芒. 五角棱镜在建立大尺寸平面基准中的应用[J]. *光学学报*, 1998, **18**(8): 1134~1137
- 11 Teng Shuyun, Liu Liren, Wan Lingyu *et al.*. Propagation of Gaussian beam limited by an aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 157~160
滕树云, 刘立人, 万玲玉 等. 孔径光阑限制下高斯光束的传输[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 157~160

- 12 Chen Baosuan, Pu Jixiong, Zhang Zhiming *et al.*. Focusing of partially coherent and circularly polarized Bessel-Gaussian beams through a high numerical-aperture objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1664~1670
陈宝算, 蒲继雄, 张志明 等. 部分相干圆偏振贝塞尔-高斯光束经高数值孔径透镜的聚焦 [J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1664~1670
- 13 Qu jun, Ding Peihong, Yuan Yangsheng *et al.*. Non-paraxial Hermite-sine-Gaussian beam character [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 706~711
屈 军, 丁培宏, 袁扬胜 等. 非傍轴厄米-正弦-高斯光束的特性 [J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 706~711
- 14 Shen Xueju. The conversion of off-axis Gaussian beam passing through one order optical system [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2000, **11**(6): 600~601
沈学举. 离轴高斯光束经一阶光学系统的变换 [J]. 光电子·激光, 2000, **11**(6): 600~601
- 15 Zhou Xin, Liu Xin. The decentered distribution of Gaussian beam [J]. *Laser Journal*, 1998, **19**(6): 36~38
周 昕, 刘 馨, 黄援朝. 高斯光束的偏心分布 [J]. 激光杂志, 1998, **19**(6): 36~38