

文章编号 1004-924X(2010)01-0021-08

# CR 扫描仪激光扫描光学系统的设计

郑 猛<sup>1</sup>,冯其波<sup>1</sup>,邵双运<sup>1</sup>,丁克勤<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 理学院,北京 100044; 2. 中国特种设备检测研究院,北京 100013)

**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系统,其空间分辨率为 10 lp/mm。针对常用扫描机构的不足,用五角棱镜和聚焦物镜组成扫描臂取代传统的  $F\theta$  镜头,利用成像板的柔韧性实现圆弧形进片,扫描臂同时作为接收器收集激发出的荧光,从而简化系统结构,提高系统性能。利用所设计的光学系统,分析了激光光点大小对分辨率的影响,结果显示光点越小,系统分辨率越高。分析了系统中影响激光光点大小的因素,在高转速条件下对扫描臂进行了有限元仿真,计算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,对激光光点大小的影响。结果显示光点直径最大相对变化量为 0.07%,表明所设计的激光扫描光学系统具有一定的容差性和实用性。通过实验验证了所研制扫描仪的性能,结果表明图像具有良好的视觉效果,能够满足工业检测要求。

**关键词:**激光扫描光学系统;有限元分析;五角棱镜;扫描臂

**中图分类号:**TH774;R814.42 **文献标识码:**A

## Design of laser scanning optical systems for computed radiography

ZHENG Meng<sup>1</sup>, FENG Qi-bo<sup>1</sup>, SHAO Shuang-yun<sup>1</sup>, DING Ke-qin<sup>2</sup>

(1. *School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;*

2. *China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China*)

**Abstract:** A new high-performance laser scanning optical system for the Computed Radiography(CR) with a spatial resolution of 10 lp/mm was designed. In view of the performance difference of scanning methods, a scanning arm composed of a pentagonal prism and a scanning object lens was presented to replace the  $F\theta$  lens, and then a circular imaging plate was presented to implement the transport mechanism by bending film movement. As the scanning arm can collect synchronously luminescence as a receiving device, the system designed by this method has a simple structure and good performance. The effect of spot sizes on resolution was analyzed and the results show that the smaller the spot size is, the higher the system resolution will be. Many factors effecting on the spot sizes were analyzed in this system, and the dynamic performance of the scanning arm was simulated by using the finite element method in high speed rotating. Furthermore, the influence of an incident light out of the vertical incident flat of pentagonal prism and pentagonal prism displacement errors on the spot sizes were calculated, and the calculation reveals that the largest change of the diameter for the spot sizes is 0.07%, which proves that the system has good tolerance and practicability. Experiments were carried out to

收稿日期:2009-03-25;修订日期:2009-04-18.

基金项目:十一五国家科技支撑计划 01 课题资助项目(No. 2006BAK02B01-02-01)

verify the performance of laser scanner, and the results indicate that the images obtained have good visual effects and can meet the requirements of industrial inspections.

**Key words:** laser scanning optical system; finite element analysis; pentagonal prism; scanning arm

## 1 引言

计算机 X 线摄影 (Computed Radiography, CR) 是一种先进的成像技术, 其特点在于采用影像板代替了传统 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 A/D 转换后, 输入计算机处理, 形成高质量的数字图像<sup>[1-3]</sup>。与传统的胶片拍摄法相比, 该方法具有动态范围广, 成像速度快, 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, 近年来也开始应用于石油天然气、电力及航天领域的设备探伤等。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, 如何更简单有效地实现读出装置从而降低成本, 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<sup>[4-5]</sup>。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<sup>[6-7]</sup>。针对以上问题, 文中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, 同时扫描臂又可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

通常, 影像板扫描成像过程如图 1 所示。

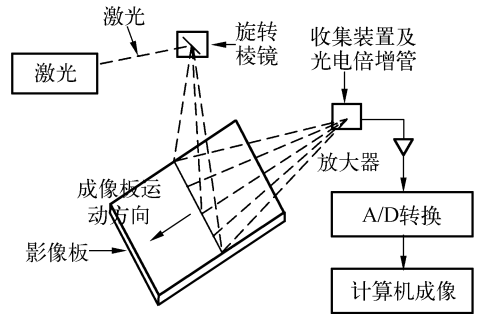


图 1 影像板扫描成像过程

Fig. 1 Readout process of IP

文中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、滤光镜、光电倍增管组成, 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, 扫描臂转轴和半圆弧形圆心主轴重合, 以臂长为半径做圆周扫描。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, 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, 而且不需要单独设计接收器, 扫描臂还用来接收激发出的荧光。通常, 为了使扫描点在平直的影像板上均匀排列, 采用的方法是使用  $F\theta$  镜头, 把光点的移动变为线性。但是  $F\theta$  镜头设计较复杂, 而且会使系统结构变大。本文采用的方法具有体积小、结构简单等优点。

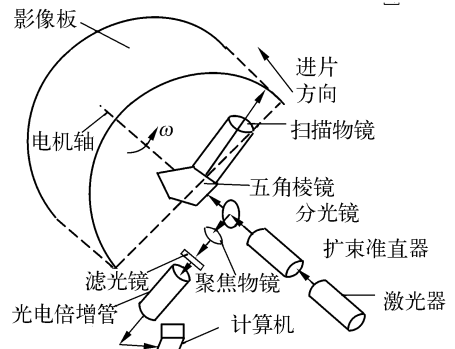


图 2 激光扫描光学系统结构图

Fig. 2 Configuration of laser scanning optical system

设计的扫描系统的工作过程为: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,再由扫描透镜聚焦后入射到影像板上,激发出荧光。激发出的荧光经扫描物镜聚焦后,由五角棱镜反射到分光镜,分光镜再将荧光反射,送入光电倍增管。荧光进入光电倍增管前,由滤波片将荧光中混入的激光和其他杂散光滤掉,光电倍增管只接收荧光。被光电倍增管接收的荧光经模数变换后输入计算机,形成数字化图像。

### 3 影响系统分辨率因素的分析

所设计的系统最大扫描宽度为 35.5 cm (14 in),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  $\mu\text{m}$ 。

#### 3.1 激光光点大小对扫描分辨率的影响

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的,点的直径直接关系到读取影像的信息量,即影像质量。读取装置的激光点直径越小,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。

图 3 为大小不同的两个激光光点扫描得到的对比图。实验采用直径依次减小的三组透度计丝共 21 根平行排列,用 X 射线在影像板上成像。采用图 2 的激光光学扫描系统,用不同的激光光点对影像板进行行扫描,得到一行的荧光强度和位置的关系图。图中曲线 1 为 0.5 mm 的光点所对应的荧光图线,曲线 2 为 0.8 mm 的光点对应的荧光图线。

图中向下的尖峰表示扫描到的透度计丝。从图 3 可以看出曲线 1 可以分辨到第 16 根丝,而曲线 2 只能分辨到第 13 根丝。所以光点越小,获得的信息量越多,分辨率也越高。

文中设计的激光扫描光学系统中影响光斑大小的因素主要有:扫描臂在高速旋转过程中的径向变形使得扫描物镜与影像板距离产生变化及入射激光束与五角棱镜入射面有偏角和五角棱镜存在安置误差使得出射光光轴与影像板不垂直。本

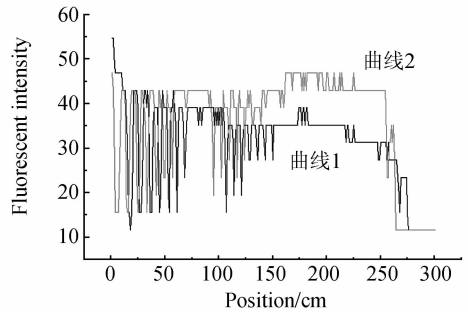


图 3 光点大小与信息量关系

Fig. 3 Relation between spot size and information

文对上述影响因素进行的较详细的分析。

#### 3.2 扫描臂高速旋转对激光光点大小的影响

当扫描臂高速旋转时,由于离心力的作用会使扫描臂产生径向变形。用三维制图软件做出扫描臂的实体模型,然后导入有限元分析软件进行分析。扫描臂的材料为铝合金 2024,用六面体单元划分网格,共 490 970 个节点,137 684 个单元,划分完成的结果如图 4 所示。图 5 为不同转速下,扫描臂的径向伸长量的曲线。

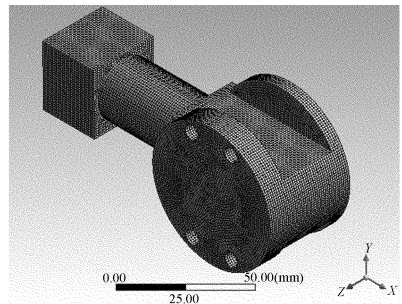


图 4 扫描臂的有限元网格划分

Fig. 4 Finite element meshing of scanning arm

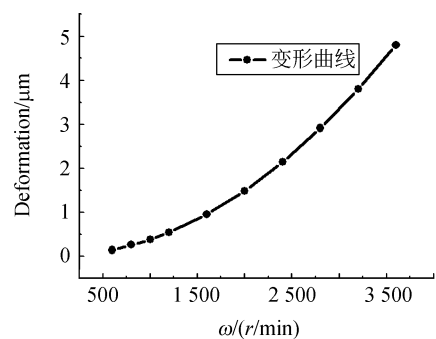


图 5 转速和变形量曲线图

Fig. 5 Effect of motor rotation speed on deformation

由图 5 可见,扫描臂在转速达到 4 000 r/min, 径向伸长量为 5 μm,所以由于高速旋转产生的扫描臂径向变形量基本不影响激光光点大小。

### 3.3 入射光与入射面不垂直对光点大小的影响

五角棱镜入射光线和入射面不垂直状态如图 6 所示,五角棱镜与反射光线的几何关系如图 7 所示。

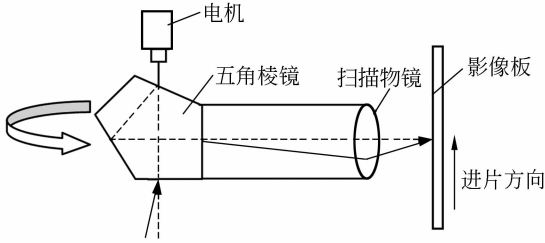


图 6 入射光与入射面不垂直

Fig. 6 Sketch of incident light out of vertical incident flat

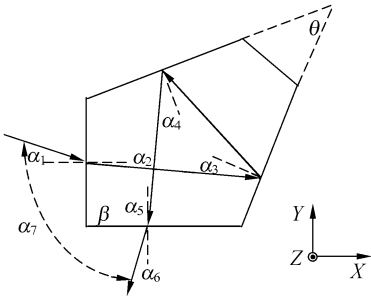


图 7 入射光线和反射光线的几何关系

Fig. 7 Relation of incident ray and emergent ray

根据折射、反射定律及五角棱镜与反射光线的几何关系,可以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<sup>[8]</sup>

$$\alpha_7 = 180^\circ - \beta + \alpha_1 - \arcsin\{n \sin[2\theta - \beta + \arcsin(\sin \alpha_1 / n)]\}, \quad (1)$$

$$\alpha_6 = 90^\circ - (\alpha_7 - \alpha_1). \quad (2)$$

式中,  $n$  为五角棱镜材料折射率;  $\beta, \theta$  为五角棱镜的内角;  $\alpha_1$  为入射光线相对于棱镜在  $XY$  面内的角偏,也就是入射角。当五角棱镜为理想情况,即  $\beta = 90^\circ, \theta = 45^\circ$  时,代入式(1)得  $\alpha_7 = 90^\circ$ 。可见,在理想情况下,五角棱镜的转向角为严格  $90^\circ$ ,且与入射角无关。但当五角棱镜本身存在加工误差时,五角棱镜的转向角  $\alpha_7$  与入射角  $\alpha_1$  及五角棱镜加工误差都有关系。由式(2)可知,不论五角棱

镜有没有加工误差,当五角棱镜有角偏  $\alpha_1$  时,实际出射光线和理想出射光线之间总会有一个角度  $\alpha_6$ ,这会导致激光出射光线和成像板不垂直,激光光点会发生变化。

激光器射出的高斯光束在空间传播的规律如下式所示

$$\omega(z) = \omega_0 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

其中,  $z$  为离开束腰位置的距离,  $\omega(z)$  为光束传播距离为  $z$  处的高斯光束的截面半径,  $\omega_0$  为高斯光束的束腰半径。高斯光束的聚焦光路示意图如图 8 所示。

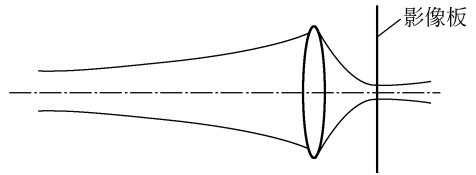


图 8 高斯光束聚焦

Fig. 8 Laser focusing

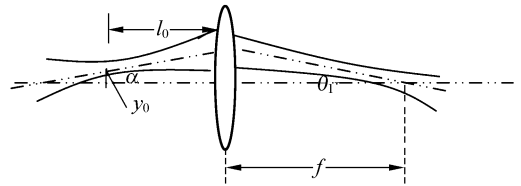


图 9 光束变化图

Fig. 9 Change of beam

图 9 为光束偏转后的情况,  $l_0$  为高斯光束束腰到透镜的距离。实际加工五角棱镜时,其加工角差在  $1'$  内是容易做到的。设五角棱镜有加工误差,加工角度为  $\beta = 90^\circ 1', \theta = 44^\circ 59'$ , 材料为 BK7,其折射率  $n = 1.5168$ 。当入射光与入射面法线夹角为  $1^\circ$  时,代入式(1)、(2)得到  $\alpha_6 = 0.94082^\circ$ 。所以出射光线与理想情况下出射光线相比偏转了  $0.94082^\circ$ 。由于设计的扫描物镜和影像板之间的距离是定值,影像板上的激光光束是束腰位置,光的直径为  $8.4591 \mu\text{m}$ ,所以当入射光线偏转时,出射光束束腰会发生变化,由文献[9]可计算出射高斯光束束腰为  $8.4578 \mu\text{m}$ ,偏移的距离为  $-0.123647 \mu\text{m}$ (即向下偏移),光点直径几乎不变。

可见当入射光与放射面不垂直及五角棱镜存

在加工角差时,对激光光点直径和出射光束偏移量几乎没有影响。即在扫描物镜焦面上,当入射高斯光束发生偏转时,对空间分辨率没有影响。

### 3.4 五角棱镜的安置误差对光点大小的影响

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,引起激光光点变化。如图 10 所示。

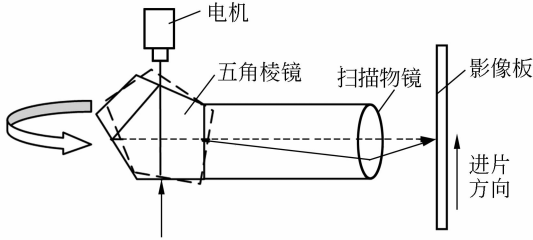


图 10 五角棱镜存在安置误差

Fig. 10 Sketch of displacement error of pentagonal prism

当五角棱镜有制造偏差以及存在安置误差时(如图 11 所示),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和反射矢量。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  $\beta, \theta$  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  $\beta$  角后, 再绕  $X_0$  轴转  $\alpha$  角。

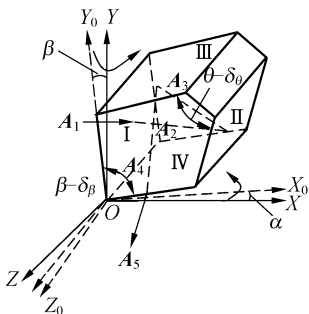


图 11 五角棱镜的空间坐标变化

Fig. 11 Coordinate transformation of pentagonal prism

设  $X_0, Y_0, Z_0$  方向的单位矢量分别为  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ , 则五角棱镜在动坐标系  $X_0Y_0Z_0$  中 I、II、III、IV 面的法线矢量为:

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{10} = \mathbf{i} \\ \mathbf{N}_{20} = \cos 22.5^\circ \mathbf{i} - \sin 22.5^\circ \mathbf{j} \\ \mathbf{N}_{30} = -\sin(22.5^\circ + \delta_\theta) \mathbf{i} + \cos(22.5^\circ + \delta_\theta) \mathbf{j} \\ \mathbf{N}_{40} = \sin \delta_\beta \mathbf{j} - \cos \delta_\beta \mathbf{k} \end{cases}, \quad (4)$$

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

$$|x \ y \ z|^T = \mathbf{G}_{mf} |x_0 \ y_0 \ z_0|^T, \quad (5)$$

其中  $\mathbf{G}_{mf}$  为从动坐标到定坐标的坐标变换矩阵, 法线矢量经坐标变换到定坐标的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{N}_1 = \cos \beta \mathbf{i} + \sin \alpha \sin \beta \mathbf{j} - \cos \alpha \sin \beta \mathbf{k} \\ \mathbf{N}_2 = \cos 22.5^\circ \cos \beta \mathbf{i} + (\cos 22.5^\circ \sin \alpha \sin \beta - \sin 22.5^\circ \cos \alpha) \mathbf{j} - (\cos 22.5^\circ \cos \alpha \sin \beta + \sin 22.5^\circ \sin \alpha) \mathbf{k} \\ \mathbf{N}_3 = -\sin(22.5^\circ + \delta_\theta) \cos \beta \mathbf{i} + [-\sin(22.5^\circ + \delta_\theta) \sin \alpha \sin \beta + \cos(22.5^\circ + \delta_\theta) \cos \alpha] \mathbf{j} + [\sin(22.5^\circ + \delta_\theta) \cos \alpha \sin \beta + \cos(22.5^\circ + \delta_\theta) \sin \alpha] \mathbf{k} \\ \mathbf{N}_4 = \sin \delta_\beta \cos \beta \mathbf{i} + (\sin \delta_\beta \sin \alpha \sin \beta - \cos \delta_\beta \cos \alpha) \mathbf{j} - (\sin \delta_\beta \cos \alpha \sin \beta + \cos \delta_\beta \sin \alpha) \mathbf{k} \end{cases}, \quad (6)$$

反射定律的矢量表达式为<sup>[9-10]</sup>

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} - 2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N}, \quad (7)$$

折射定律的矢量表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{A}'' - \mathbf{A} = P\mathbf{N} \\ P = \frac{\sqrt{(n')^2 - n^2 + (\mathbf{N} \cdot \mathbf{A})^2} - (\mathbf{N} \cdot \mathbf{A})}{n'} \end{cases}, \quad (8)$$

设  $\mathbf{A}_1 = \mathbf{i}$ , 代入折射定律公式(8)有

$$\mathbf{A}_2 = (1 + P \cos \beta) \mathbf{i} + P \sin \alpha \sin \beta \mathbf{j} - P \cos \alpha \sin \beta \mathbf{k}, \quad (9)$$

其中

$$P = \sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 \beta} - \cos \beta$$

由反射定律表达式得

$$\mathbf{A}_3 = b\mathbf{i} + c\mathbf{j} + d\mathbf{k}, \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} b=1+P\cos\beta-2a\cos 22.5^\circ\cos\beta \\ c=P\sin\alpha\sin\beta-2a\cos 22.5^\circ\sin\alpha\sin\beta+ \\ 2a\sin 22.5^\circ\cos\alpha \\ d=-P\cos\alpha\sin\beta+2a\cos 22.5^\circ\cos\alpha\sin\beta+ \\ 2a\sin 22.5^\circ\sin\alpha \\ a=\mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{N}_2 \end{cases}$$

由反射定律表达式得

$$\mathbf{A}_4 = f\mathbf{i} + g\mathbf{j} + h\mathbf{k}, \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} f=b+2e\sin(22.5^\circ+\delta_\theta)\cos\beta \\ g=c+2e\sin(22.5^\circ+\delta_\theta)\sin\alpha\sin\beta- \\ 2e\cos(22.5^\circ+\delta_\theta)\cos\alpha \\ h=d-2e\sin(22.5^\circ+\delta_\theta)\cos\alpha\sin\beta- \\ 2e\cos(22.5^\circ+\delta_\theta)\sin\alpha \\ e=\mathbf{A}_3 \cdot \mathbf{N}_3 \end{cases}$$

由折射定律表达式得

$$\mathbf{A}_5 = l\mathbf{i} + m\mathbf{j} + n\mathbf{k}, \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} l=f+P'\sin\delta_\beta\cos\beta \\ m=g+P'\sin\delta_\beta\sin\alpha\sin\beta-P'\cos\delta_\beta\cos\alpha \\ n=h-P'\sin\delta_\beta\cos\alpha\sin\beta-P'\cos\delta_\beta\sin\alpha \\ P'=\sqrt{1-n^2+q^2}-q \\ q=\mathbf{N}_4 \cdot \mathbf{A}_4 \end{cases}$$

理想五角棱镜(没有制造偏差和安置误差)的出射光线为

$$\mathbf{A}_6 = -\mathbf{j}, \quad (13)$$

所以实际出射光线与理想五角棱镜出射光线的夹角为

$$\cos\gamma = \frac{\mathbf{A}_5 \cdot \mathbf{A}_6}{|\mathbf{A}_5| |\mathbf{A}_6|}. \quad (14)$$

设五角棱镜有加工误差,加工角度为  $\beta = 89^\circ 59'$ ,  $\theta = 44^\circ 59'$ , 材料为 BK7, 其折射率  $n = 1.5168$ 。设  $\alpha = 60'$ ,  $\beta = 40'$ , 代入式(4)~(12)得出射光线

$$\mathbf{A}_5 = 0.000867397\mathbf{i} - 0.999982635\mathbf{j} - 0.005827031\mathbf{k}, \quad (15)$$

所以实际出射光线与理想五角棱镜出射光线的夹角由式(14)计算为  $0.33743^\circ$ , 即  $20'15''$ , 方向为式(15)所示矢量方向。同以上方法, 出射高斯光束偏移的距离为  $-0.06185\mu\text{m}$ (即向下偏移), 出射高斯光束束腰直径为  $8.4587\mu\text{m}$ , 光点直径几乎不变。

以上是棱镜绕 X、Y 轴按右手螺旋有微小偏差的情况。当棱镜绕 X 轴按右手螺旋有微小转动, 绕 Y 轴按左手螺旋有微小转动时, 实际出射光线与理想五角棱镜出射光线的夹角为  $1.6685^\circ$ , 所以偏移的距离为  $-0.185351\mu\text{m}$ , 出射高斯光束束腰直径为  $8.4562\mu\text{m}$ , 光点直径几乎不变。由计算结果可见当五角棱镜存在安置误差时, 对系统空间分辨率几乎没有影响。

## 4 实验

用以上光学扫描系统研制的扫描仪样机如图 12 所示。实验选用钢管焊缝, 钢管直径为 160 mm, 壁厚为 8 mm, 成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。成像板曝光后, 用所研制的激光扫描仪扫描读取, 结果如图 13 所示。

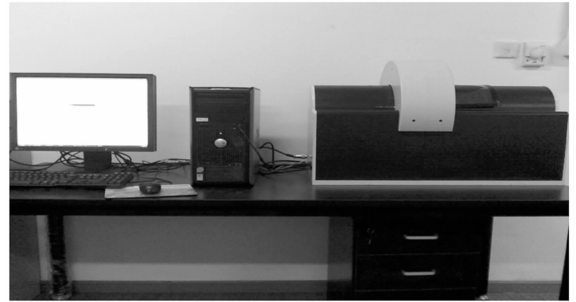


图 12 计算机 X 射线激光扫描仪

Fig. 12 Computed radiography system

图 13 为图 12 所示激光扫描仪读取的原始图像, 没有经过图像处理, 图中清晰地显示出了焊缝的微小缺陷。



图 13 扫描的原始图像

Fig. 13 Original image of scanning

## 5 结 论

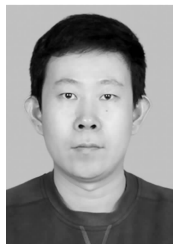
确定了一种新型的激光扫描光学系统的设计方案。利用设计的系统,实验验证了激光光点大小对空间分辨率的影响,结果显示光点越小系统分辨率越高。对系统的关键部件扫描臂进行了有限元分析,结果表明,在高速旋转时,适当选择材料,扫描臂的径向变形量非常小,在  $5\ \mu\text{m}$  以

内,可以忽略。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,计算得到光点直径最大相对变化量为  $0.07\%$ ,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。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,能够清晰地显示未经处理的焊缝图像缺陷,满足工业检测要求。

## 参考文献:

- [1] COWEN A R, DAVIES A G, KENGYELICS S M. Advances in computed radiography systems and their physical imaging characteristics[J]. *Clinical Radiology*, 2007, 62(12): 1132-1141.
- [2] SAKASAI K, KATAGIRI M, KISHIMOTO M. Readout characteristics of an imaging plate by fast laser pulses [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, 47(3): 944-947.
- [3] 侯方源. 计算机 X 光成像仪的研究[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(5): 96-99.  
HOU F Y. Research of computed radiography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 96-99. (in Chinese)
- [4] 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: 2-7.  
SHAN B ZH, GUO B P, WANG SH Y, *et al.*. Laser scanning system of large field [J]. *Shenzhen Science & Technology*, 2005, 11: 2-7. (in Chinese)
- [5] 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.  
ZHANG J P, FENG X H, HUANG L Q. Design of laser scanning optical system for computed radiography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 202-207. (in Chinese)
- [6] RALPH S, ROBERT F, PETER K. New high-speed scanning technique for computed radiography [J]. *SPIE*, 2002, 4682: 511-520.
- [7] SAKASAI K, KATAGIRI M, NAKAMURA T. A fast readout method for an imaging plate using wavelength shifting fibers and line-shaped laser[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, February, 2002, 49(11): 156-159.
- [8] 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.  
HAO Q, ZHAO Y, CAO M. 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. (in Chinese)
- [9] 葛华, 杨坤涛. 离轴高斯光束经光学系统变换后特性研究 [J]. *激光与红外*, 2003, 32(1): 68-70.  
GE H, YANG K T. The research of conversion of Off-axis gaussian beam passing through optical system. [J]. *Laser & Infrared*, 2003, 32(1): 68-70. (in Chinese)
- [10] 匡萃方, 冯其波, 刘欣. 用矢量方法分析角锥棱镜的反射特性[J]. *应用光学*, 2004, 24(2): 25-27.  
KUANG C F, FENG Q B, LIU X. Analysis of reflection property of cube-corner retroreflector with vector expression [J]. *Applied Optic*, 2004, 24(2): 25-27. (in Chinese)
- [11] 马冬梅, 刘志祥, 马磊, 等. 五角棱镜扫描系统中调整误差及制造角差的影响分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2517-2522.  
MA D M, LIU ZH X, MA L, *et al.*. Influences of alignment error in pentaprism scanning system and fabrication angle error on measuring accuracy of optical surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2517-2522. (in Chinese)

## 作者简介:



郑 猛(1977—),男,河北沧州人,博士研究生,主要从事光电检测与信息处理方面的研究。E-mail: 05118305@bjtu.edu.cn



邵双运(1972—),河南开封人,副教授,主要从事光电检测技术、光学三维测量技术方面的研究。E-mail: shao\_sy@tom.com



冯其波(1962—),男,湖北麻城人,教授,博士生导师,1983年,1986年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,1993年于清华大学获得博士学位,现为北京交通大学理学院院长,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: qbfeng@bjtu.edu.cn



丁克勤(1968—),安徽枞阳人,博士后,研究员,主要从事特种设备检测技术方面的研究。E-mail: kqding@sina.com

## ● 下期预告

## 结构光系统的周期编码光设计

许 丽<sup>1,2</sup>,张之江<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电学院 信息工程学院,河南 郑州 450011;

2. 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室 通信与信息工程学院,上海 200072)

在结构光系统中,编码光是解决对应点匹配的关键,编码光的性能直接影响结构光测量结果的精度、分辨率和实时性。在深入分析条纹图变形机理的基础上,证明了空间周期性应用到编码光设计的可行性,提出了运用空间周期的约束条件,分析了在编码光设计中引入空间周期性对测量性能的改进。分析结果表明,在编码图个数保持不变的情况下,在结构光编码中引入空间周期性,系统测量分辨率将会有很大的提高;同样在保持测量分辨率不变的情况下,应用空间周期性可减少编码模式的个数,更适合实时测量系统。结合时空编码方式,提出了一种新的实时编码光设计方案—周期时空条纹编码。该编码方式利用了空间周期性,在保证测量分辨率和精度的情况下,可减少编码模式的个数,适应实时测量的应用。对该编码方式进行了实验验证,实验结果证明了空间周期性应用于编码光设计的有效性。