

文章编号 1004-924X(2008)02-0202-06

# 数字 X 线影像仪的激光扫描光学系统设计

张建萍<sup>1,2</sup>, 冯秀恒<sup>1</sup>, 黄廉卿<sup>1</sup>, 杨词银<sup>1</sup>, 张 新<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 设计了适合于数字 X 线影像仪的激光扫描光学系统。针对数字 X 线影像仪的使用特点, 论述分析了激光扫描光学系统中的关键部件  $F\theta$  镜头、光束扩展器和扫描器, 提出并解决了其中一些关键问题, 如影响系统扫描光点大小的因素、扫描器的确定等。用 ZEMAX 光学设计软件对所设计激光光学系统的光学性能进行了模拟, 得到扫描光斑直径  $< 0.1$  mm, 像高和视场角满足线性关系的设计结果。像质评价分析结果表明: 所设计的镜头像质优良, 轴上与轴外成像质量相当, 像质达到衍射极限。

**关键词:** 激光扫描光学系统;  $F\theta$  镜头; 光学设计

**中图分类号:** TH774; R814.42 **文献标识码:** A

## Design of laser scanning optical system for computed radiography

ZHANG Jian-ping<sup>1,2</sup>, FENG Xiu-heng<sup>1</sup>, HUANG Lian-qing<sup>1</sup>, YANG Ci-yin<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

*2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** To meet the requirements of a Computed Radiography (CR) and to implement its functions, a high-performance laser scanning optical system was designed. A  $F\theta$  lens, an optical beam expander, and an optical scanner in the laser scanning optical system were discussed in detail. Then, some key issues of the scanning system were presented and resolved, such as the influence of the stop position on image quality, factors influencing spot size, and the determination of the form of optical scanner. Finally, the laser scanning optical system was designed using the ZEMAX software, and the design results show that the spot diameter is less than 0.1 mm, and the image height and field of view meet linear relationship. The design results indicate that on-axis and off-axis aberrations of the designed laser scanning lens are almost equal, and the image quality achieves the diffraction limit.

**Key words:** laser scanning optical system;  $F\theta$  lens; optical design

## 1 引言

与传统的常规X线摄影系统相比,数字X线影像仪(Computed Radiography, CR)系统<sup>[1-3]</sup>具有灰阶分辨率高、成像速度快、图片信息量大、可联网共享信息、病人接受的辐射剂量小、消除胶片对环境的污染、节省大量购置及管理胶片的费用等优点。80年代初日本富士胶片公司率先在世界上推出了第一套CR系统,其采用成像板(Imaging Plate, IP)替代传统的增感屏/胶片方式作为影像采集的载体,实现了平片数据化,为放射科无片化及医疗影像计算机联网打下了扎实的基础,为进入远程影像资料会诊开辟了道路。

IP由保护层、成像层、支持层和背衬层构成,可重复使用。成像层经X线照射后将接受的能量以潜影的方式贮存于其中的晶体内;随后,用激光束扫描带有潜影的IP,激发贮存于晶体内的能量,使之转换为荧光;继而读出并转换为数字图像信号。激光扫描系统的性能好坏决定了所得到的原始图像质量的优劣,因此,激光扫描光学系统的设计是CR的关键问题之一。

## 2 激光扫描光学系统的特点

CR中的激光扫描光学系统<sup>[4-6]</sup>以激光为光源,激光光束截面光强分布为高斯函数,光学系统性能明显地衍射受限;激光多为单色光,可以不考虑色差;激光光强很强、光密度大,故光学系统不可采用胶面。根据扫描器与物镜位置关系的不同,实现光束扫描的光学系统分为透镜后扫描方式和透镜前扫描方式。透镜后扫描方式是将扫描器置于镜头的后面,通过扫描器的转动使焦点做圆弧运动,对物镜只要求轴上像差好即可。存在的问题是:虽然镜头的设计简单,但是像面无法达到平直,后续处理比较麻烦。透镜前扫描方式是将扫描器置于镜头的前方,对镜头不仅要求轴上像差要好、轴外点也要有好的像质,并且要求像面为平面、轴上点和轴外点像质一致等。虽然透镜前扫描方式系统的镜头设计困难,但只要设计好,后续处理比透镜后扫描方式就简单得多。

图1所示为本文采用的透镜前扫描方式的光学原理图,经过准直的激光光束首先被扫描器扫

描,然后入射到扫描镜头上,通过扫描镜头在其焦面上形成一条扫描直线,完成一次扫描过程。其中,扫描镜头的功能就是将扫描器的转动转变为焦面上光点的直线运动。然而,若使用常规光学系统作为扫描镜头,则随着系统中扫描器的匀速转动,得到的扫描光点将在以扫描镜回转中心为圆心、扫描镜回转中心到IP的垂直距离为半径的圆弧上均匀排列,从而导致平直X线影像板上扫描光点排列不均匀,造成扫描激励失真。为解决这一问题,目前广泛采用的方法是使用 $F\theta$ 镜头<sup>[4-8]</sup>,它能使扫描光点在X线影像板上的移动变为线性,从而消除扫描激励失真。

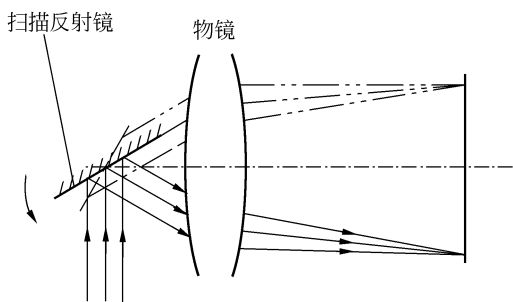


图1 透镜前扫描光学系统基本结构形式

Fig.1 Basic structure of optical scanning system in front of lens

## 3 激光扫描光学系统设计分析和讨论

所设计的激光扫描光学系统主要由半导体激光器、光束扩展器、扫描器和 $F\theta$ 镜头组成,本文中采用双五棱镜作为系统的扫描器。CR激光扫描光学系统的整体布局如图2所示。

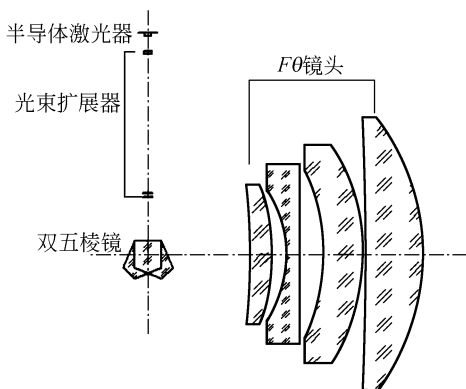


图2 激光扫描光学系统结构图

Fig.2 Configuration of laser scanning optical system

### 3.1 激光扫描光学系统技术参数及结构的确定

系统的已知条件为:最大扫描幅宽(即 IP 宽度) $2y'=300\text{ mm}$ ,有效视场 $2\theta=54^\circ=0.942\text{ rad}$ ,半视场 $\theta=0.471\text{ rad}$ ,扫描光斑直径 $0.1\text{ mm}$ 。半导体激光器的出射光束为平行光束,口径为 $1.2\text{ mm}$ ,光束准直度(发散角)为 $1\text{ mrad}$ ,波长为 $671\text{ nm}$ 。

#### 3.1.1 $F\theta$ 镜头参数计算

$F\theta$  镜头是一种具有特殊要求的光学系统,普遍应用于激光扫描装置中。在大多数  $F\theta$  镜头的设计中,光阑的位置一般都置于镜头的前焦面上,目的是使光学系统构成像方远心光路,来提高像面边缘分辨力及像面照度的均匀性,保证像点的精确定位。对于要求镜头尺寸尽量小而扫描范围又比较大的系统,采用远心光路则是不合适的。由于要使扫描光点在 X 线影像板上的移动为线性,对用于该激光扫描光学系统的  $F\theta$  镜头有以下特殊要求:

(1) 在扫描平面上,像点在像面上的位置  $y'$  (半像高)与扫描转镜的转角  $\theta$  之间应保持线性关系,即满足以下关系:

$$y' = f'\theta, \quad (1)$$

故这种镜头称为  $F\theta$  镜头,其中,转角  $\theta$  即为光学系统的半视场角。而常规照相物镜满足的成像关系为:

$$y' = f'\tan\theta, \quad (2)$$

不满足线性扫描的要求。

(2) 从式(1)和(2)可知,要想满足线性扫描要求,就必须使  $F\theta$  镜头产生一定严格量的桶形相对畸变,大小为:

$$\Delta y' = \frac{f'\tan\theta - f'\theta}{f'\tan\theta} = \frac{\tan\theta - \theta}{\tan\theta}. \quad (3)$$

(3) 要求单色光成像,无渐晕,整个像面像质一致(校正场曲);

因此,由式(1)计算得到系统的焦距为:

$$f' = \frac{y'}{\theta} = \frac{300/2}{0.471} = 318.3\text{ mm},$$

其中, $y'$ 为半像高,是 IP 的半宽度。由式(3)可得系统应产生的桶形畸变量为:

$$\Delta y' = \frac{\tan\theta - \theta}{\tan\theta} = \frac{\tan 0.471 - 0.471}{\tan 0.471} = 7.5\%.$$

#### 3.1.2 光束扩展器

光束扩展器是用于扩大或缩小激光光束出射口径的光学镜头。由于有 IP 较高的分辨力

$\geq 5\text{ lp/mm}$ ,故系统对扫描光点的大小有较高的要求。因此,必须使用光束扩展器对激光器的出射激光束进行扩束处理,得到高准直度(即小发散角)的光束,再经过扫描器进入扫描镜头进行会聚。

假定  $F\theta$  镜头像质达到衍射极限,那么对扫描光斑大小的影响主要体现在以下两个方面:

(1) 衍射极限下,Airy 斑直径:

$$\delta = 2.44\lambda \times \frac{f'}{D}, \quad (4)$$

其中, $D$ 为经扩束后激光束的口径;

(2) 准直光束发散角在像面处产生的弥散斑直径:

$$d = \alpha \times f', \quad (5)$$

其中, $\alpha$ 为平行光束的发散角。

从而,扫描光斑理论直径为  $S = \delta + d$ 。由上可知,系统扫描光斑大小与  $F\theta$  镜头焦距  $f'$  成正比。如果想要减小光斑直径,必须增加扩束光束的口径或减小激光束发散角,即增加扩束比。但增大扩束比,即增大相对孔径,结果增加了  $F\theta$  镜头的设计难度;此外,由于光束口径的增加,增大了五棱镜的质量。因此,不能无限制地增大扩束比。

表 1 给出了扩束比  $\beta$  取不同值时,系统的 Airy 斑直径  $\delta$ 、由激光发散角引起的弥散直径  $d$  及扫描光斑理论直径  $S$ 。

表 1 不同扩束比条件下像面光斑大小

Tab. 1 Spot diameter at different beam-expanding ratios

$\beta$	$\delta/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$S/\text{mm}$
7	0.062	0.044	0.106
8	0.054	0.040	0.094
9	0.048	0.035	0.083
10	0.043	0.032	0.075
11	0.039	0.029	0.068

(半导体激光器:光束口径  $\varphi = 1.2\text{ mm}$ 、光束准直度为  $1\text{ mrad}$ 、波长为  $671\text{ nm}$ )

根据已知条件中对扫描光斑直径的要求及以上分析,权衡各参量的分配关系,最后决定选取光束扩展器的扩束比为 10,光束发散角为  $0.1\text{ mrad}$ 。

### 3.2 设计结果分析与像质评价

#### 3.2.1 $F\theta$ 镜头设计

本设计中的  $F\theta$  镜头具有大视场和较大相对

孔径,为减小系统的尺寸和质量,并从光学设计<sup>[7-9]</sup>角度考虑,将光阑设置在镜头前方 1 倍焦距范围以内的适当位置上,并在此处放置扫描器。

另外,在设计中需要注意的是,扫描期间扫描器一直处于运动中,导致实际光阑的位置在扫描过程中不断变化。因此,设计的光学系统应该保证光阑在一定范围内变化时像质基本不变。

根据所要求的镜头参数:焦距  $f' = 318.3$  mm,相对孔径  $D/f' = \frac{12}{318.3} = 1 : 26$ ,视场角  $2\theta = 54^\circ$ ,单波长  $\lambda = 671$  nm,得到如下光学设计结果。图 3 所示结构为所设计  $F\theta$  镜头的光学系统图。场曲和畸变像差曲线如图 4 所示,波像差(Optical Path Difference, OPD)曲线图如图 5 所示,点列图如图 6 所示。

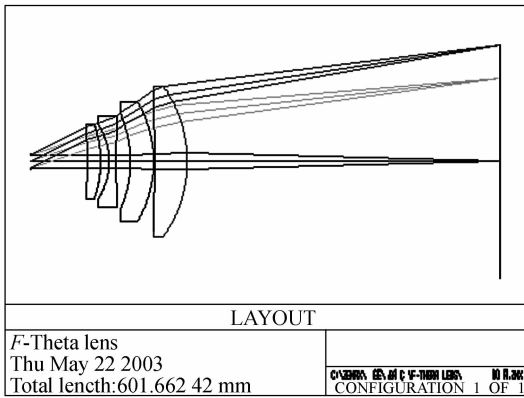


图 3  $F\theta$  镜头光学系统结构图

Fig. 3 Layout of  $F\theta$  lens

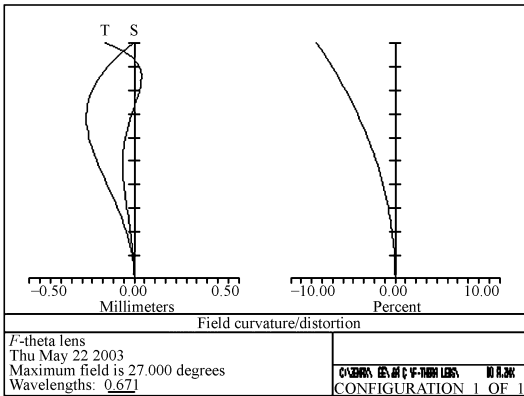


图 4 场曲和畸变像差曲线图

Fig. 4 Graph of field curvature and distortion

整个系统像差校正完成较好,光学系统 OPD 在  $\frac{1}{10} \lambda$  以内,畸变达到指定的要求,从点列

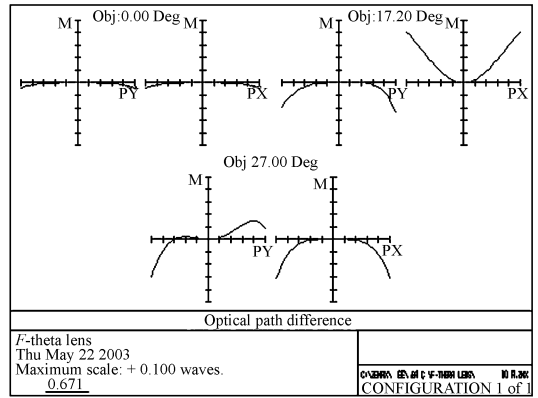


图 5  $F\theta$  镜头的 OPD 曲线

Fig. 5 OPD fan of  $F\theta$  lens

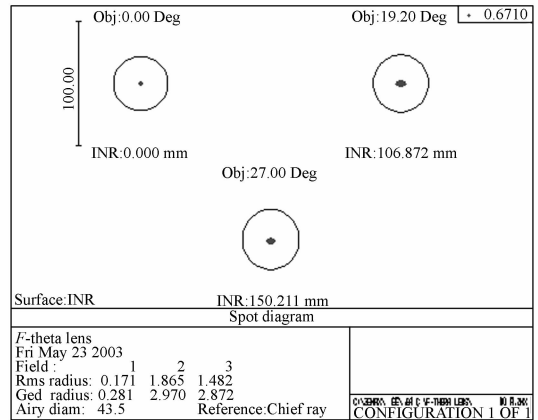


图 6  $F\theta$  镜头的点列图(注:图中黑圈为 Airy 斑直径)

Fig. 6 Spot diagram of  $F\theta$  lens

图可以看出:系统的几何像差的大小远小于系统 Airy 斑直径,整个像面的像质基本一致。

### 3.2.2 光束扩展器设计

由 3.1.2 可知,选取光束扩展器的扩束比为 10,光束发散角为 0.1 mrad,设计得到光束扩展器光学筒长为 110 mm。

光束扩展器的结构形式采用没有中间像面的伽利略式望远镜。尽管伽利略式望远镜会因为缺少中间像面而给装调带来一定的困难,但由于其具有结构简单、筒长短、轻便、系统光能损失少等诸多优点,成为本系统的最佳选择。由于该光束扩展器用于激光光路中,因此同样不可使用胶合面。

图 7、8 分别给出了光束扩展器的光学系统结构和系统的 OPD 曲线。

从像差曲线可以看出,光束扩展器像质良

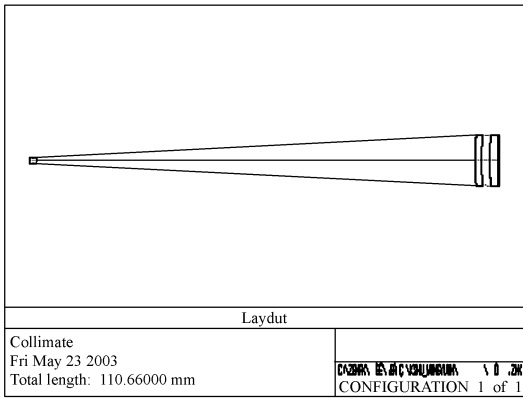


图 7 光束扩展器光学系统图

Fig. 7 Layout of optical beam expander

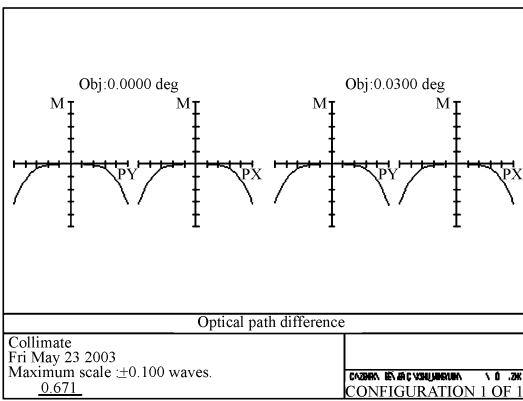


图 8 光束扩展器 OPD 曲线图

Fig. 8 OPD fan of optical beam expander

好, 其  $OPD < \frac{1}{10} \lambda$ 。

### 3.2.3 光学扫描器的确定

扫描器是激光扫描系统中的 1 个关键部件, 用它可以实现光束的空间扫描。传统的激光扫描元件一般采用多面体反射式棱镜, 它可以使光束产生大角度的偏转, 提高激光的利用率, 扫描器旋转 1 周可获得多行扫描。存在的问题是: 旋转多面体在旋转中引入的轴系晃动和偏转误差、棱镜的分度误差以及反射面的倾斜误差难以消除, 增大设计难度。

本系统中扫描器设计为双五棱镜, 图 9 所示为单五棱镜的光路原理图, 图 10 为双五棱镜的结构。双五棱镜扫描系统引入的主要误差为棱镜转轴的晃动误差, 易于校正。五棱镜的特点是: 入射光与出射光在主截面之内。无论入射角如何改变, 入射光与出射光的夹角始终保持为  $90^\circ$  不变。

因此, 从棱镜出射的光束经透镜成像后, 不会影响扫描线的均匀性。只要入射光线方向不变, 五角棱镜摆动时, 出射光线在主截面内的方向亦不变, 由此可以补偿扫描电机轴的摆动误差。

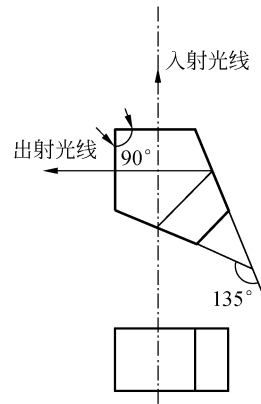


图 9 单五棱镜扫描器光路原理

Fig. 9 Principle of single-penta prism scanner

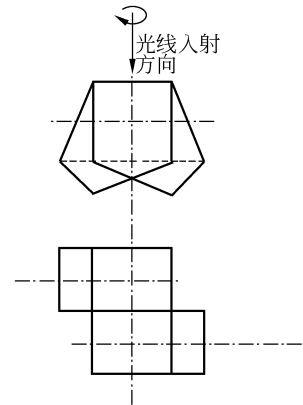


图 10 双五棱镜扫描器结构示意图

Fig. 10 Structure of double-penta prism scanner

根据上述设计, 完成了光学系统如图 2 所示的原理样机研制。实验结果表明: 成像结果完全满足实际应用中对光学系统的需求。

## 4 结论

根据数字 X 线影像仪的实际需要, 确定了光学系统的设计方案, 并分析计算得到数字 X 线影像仪激光扫描光学系统技术参数, 给出了光学系统的设计结果,  $F\theta$  镜头的焦距  $f' = 318.3 \text{ mm}$ , 视场角  $2\theta = 54^\circ$ , 得到扫描光斑直径为  $0.075 \text{ mm}$ 。

像质评价表明,系统的光学设计成像质量良好,完全满足数字X光影像仪对激光扫描光学系统的

设计要求和成像质量要求,可广泛用于激光扫描装置。

## 参考文献:

- [1] CARLSSON T E, ÖRNHED H. Evaluation of digital flash X-ray images produced using computed radiography[J]. *SPIE*, 2005, 5580:842-850.
- [2] 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 on the computerized radiography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 96-99. (in Chinese)
- [3] 刘欣悦,黄廉卿. 利用多分辨率直方图特征分类数字X光乳腺图像[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 327-332.  
LIU X Y, HUANG L Q. Classification of digital mammograms using multi-resolution histogram features[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 327-332. (in Chinese)
- [4] MURTRY E K. Laser scanning lens configurations[J]. *SPIE*, 1990, 1333:145-158.
- [5] 毕纪军. 如何设计激光扫描系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2001(4): 23-26.  
BI J J. How to design a laser scanning system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001(4): 23-26. (in Chinese)
- [6] THIBAUT S. F-Sin(theta) lens system and applications[J]. *SPIE*, 2001, 4441:98-105.
- [7] 张以谟. 应用光学[M]. 北京:机械工业出版社, 1984.  
ZHANG Y M. *Applied Optics*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1984. (in Chinese)
- [8] 杨大任.  $F\theta$ 透镜设计[J]. *长春光机学院学报*, 1981, 4(4): 1-11.  
YANG D R. Design of the  $F\theta$  Lens[J]. *Journal of ChangChun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1981, 4(4): 1-11. (in Chinese)
- [9] 杨皓明,王灵杰,冯秀恒. 一种新型复合摄像物镜的设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 486-491.  
YANG H M, WANG L J, FENG X H. Design of a new complex imaging object lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 486-491. (in Chinese)

作者简介:张建萍(1974—),女,助理研究员,主要研究方向为现代光学系统设计;E-mail:zhjp-yey@163.com

通讯作者:张新(1968—),男,博士生导师,研究员,主要研究方向为光学工程和光学系统设计。

## ●下期预告

# 光纤血氧含量和血流量变化检测处理系统

姚 钦,史仪凯,刘 霞,王 萑

(西北工业大学 机电学院,陕西 西安 710072)

提出了一种利用内耳血氧含量及血流量变化作为检测参数的系统。在波长分别为 660 nm 和 805 nm 处,利用氧合血红蛋白和去氧血红蛋白对近红外光吸光不同的原理,依据朗伯-比尔定律推导出适于血氧含量及血流量变化检测的工程公式。设计的传感器实现了测量内耳组织血氧饱和度和血流量变化两种人体生理信号的采集和转换。该系统通过输送数据到 PC 机,实时反映二者变化的曲线。实验结果表明,在 20%~100%血氧饱和度时,测量精度为 3%,从而为人体眩晕判断提供了较有力的理论依据。