

磁聚焦变像管像场弯曲的改善研究

廖昱博^{1,2}, 刘进元^{1*}, 蔡厚智¹, 白雁力¹, 付文勇¹, 陈家埝¹, 郭泉良¹

¹深圳大学光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518060;

²赣南师范大学物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000

摘要 研制大面积阴极磁聚焦分幅变像管。在 2:1 电子光学倍率下, 研究单磁透镜和双磁透镜成像的像场弯曲。基于光学透镜成像原理, 假设成像面形状不随激励微调而改变, 推导了离轴点最佳成像位置与激励变化的近似关系式, 并由此提出一种测量并减小像管像场弯曲的方法; 借助 Matlab 编程模拟了像管各离轴点的最佳成像位置, 拟合得到成像曲面方程, 并利用所提出的像场弯曲测量方法进行了测试验证。结果表明, 在一定视场范围内, 计算机模拟与实验测试结果比较接近。单、双磁透镜下的最佳成像面均为旋转抛物面, 但双磁透镜成像像场弯曲比单磁透镜有明显的改善。

关键词 超快光学; 变像管; 短磁聚焦; 空间性能; 像场弯曲

中图分类号 TN143

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1004004

Improvement of Field Curvature in Magnetic-Focusing Image Converter Tube

Liao Yubo^{1,2}, Liu Jinyuan¹, Cai Houzhi¹, Bai Yanli¹,
Fu Wenyong¹, Chen Jiayu¹, Guo Quanliang¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems, Ministry of Education,
Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²School of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

Abstract A large cathode magnetic-focusing framing image converter tube is designed and developed. The field curvatures of single magnetic lens and double magnetic lens systems are investigated at electron optical magnification of 2:1. Based on optical lens imaging principle, the approximate relational expressions of the imaging excitation variation with the best image positions of the off-axis object are derived in the cases of single magnetic lens and separated double magnetic lens systems. It is assumed that the shape of image surface does not change with excitation in a certain scope. Accordingly, a method of field curvature measurement and decrease is proposed. Then, by virtue of Matlab programming, the best image positions for off-axis point objects are simulated, and the image surface equations are fitted, which are experimentally verified by use of the proposed method of field curvature measurement. It is showed that computer simulations agree with the experimental results within a certain field of view. Both of the best image surfaces of two systems are paraboloids of revolution. But the field curvature of double magnetic lens system is obviously smaller than that of single magnetic lens system.

Key words ultrafast optics; image converter tube; short magnetic focusing; spatial performance; field curvature

OCIS codes 320.7100; 040.1490; 230.025; 110.2960

1 引 言

X 射线分幅相机利用变像管来实现图像的光电转换、脉冲选通以及图像增强, 是一种同时具有亚纳秒时间分辨率和二维空间分辨能力的高灵敏度诊断设备。其借助光电阴极实现波长转换, 响应波段覆盖紫外光到

收稿日期: 2017-05-19; 收到修改稿日期: 2017-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(11305107)、深圳市科技计划(JCYJ20160608173121055, JCYJ20170302153912966)

作者简介: 廖昱博(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事超快诊断技术方面的研究。E-mail: bobocome@126.com

* 通信联系人。E-mail: ljj@szu.edu.cn

X 射线区, 广泛应用于 X 射线激光、惯性约束核聚变(ICF)、Z-箍缩(Z-P)以及强场物理等^[1-6] 重大研究领域。

在超快诊断应用中, 时间分辨和空间分辨是衡量分幅变像管性能的两个重要技术指标。特别是 ICF 等研究的进一步发展, 对变像管相机的时空分辨提出了更高的要求, 进而加快了变像管技术的革新。传统微通道板(MCP)选通分幅像管的空间分辨率约为 20 lp/mm(50 μm), 时间分辨率为 35~100 ps^[7-9]。Hilsabeck 等^[10]将脉冲展宽技术(PDT)和 MCP 行波选通技术相结合, 成功研制了时间展宽分幅相机。这种像管的光电阴极与 MCP 在漂移区分开。当 X 光脉冲照射到阴极上, 激发的光电子信号在阴栅之间的斜坡电压脉冲的作用下产生速度梯度, 使信号前沿部分比后沿部分具有更大的速度。经过漂移区后, 光电子束在时间上被展宽, 并通过长磁透镜将其成像在 MCP 微带上, 在快门脉冲的选通作用下, 时间分辨率可达 5 ps。然而, 其动态空间分辨率约为 3.3 lp/mm(300 μm)。在此基础上改进磁透镜结构, 在电子光学设计中引入一个短磁透镜替代长磁聚焦, 研制了短磁聚焦时间展宽分幅像管^[11], 其时间分辨率达到 11 ps, 动态空间分辨率优于 10 lp/mm(100 μm)^[12]。但是, 该像管在阴极远轴区的空间分辨不理想, 存在明显的像场弯曲(简称场曲, FC), 无法用平面接收屏获取平面物体在整个视场范围的清晰成像, 进而影响其空间分辨能力, 缩小了像管的有效成像范围。因此, 深入研究像管的场曲并设法减小场曲, 具有非常重要的理论价值和现实意义。

在所研制的短磁聚焦分幅像管的基础上, 本文通过理论分析、计算机模拟与实验测试相结合的方法研究像管的场曲。基于透镜成像原理, 分别推导出表征单、双磁透镜场曲的近似关系式。结合计算机模拟与实验测试进行验证, 探讨如何减小像管场曲。

2 像管场曲的理论分析

电子束的场曲是由远轴区与近轴区的聚焦能力不同造成的^[13]。离轴越远的电子受到的电磁场作用越强, 其聚焦位置因离轴距离不同, 不同程度地偏离理想成像平面, 形成一个凹向物方的曲面, 故可以用各离轴点最佳成像位置与高斯像面的轴向距离来度量场曲。基于透镜成像原理, 结合实际测试条件, 在保持物透镜、磁透镜以及平面接收屏三者位置均不变的情况下, 根据离轴距离与其最佳成像激励的关系, 即可求出各离轴像点对应的轴向偏离。以下分别分析经单磁透镜和双磁透镜后成像缩小为原来 1/2 时的场曲, 并将磁透镜作薄透镜处理, 假设励磁电流改变较小时成像面形状不变。

图 1 给出了单磁透镜成像的分析。与光学透镜成像关系相似, 物距 s 、像距 s' 以及焦距 f 之间满足高斯成像公式:

$$1/s + 1/s' = 1/f. \quad (1)$$

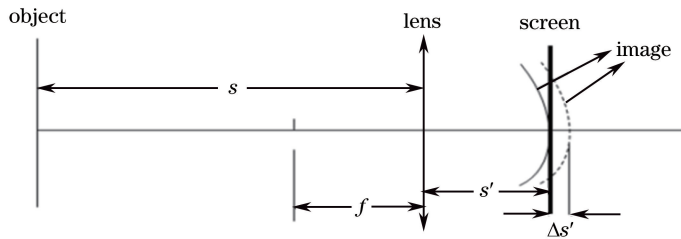


图 1 单磁透镜成像的场曲分析

Fig. 1 Field curvature analysis of single magnetic lens system

对于短磁透镜, 焦距与励磁电流之间近似满足^[14]

$$f = k/I^2, \quad (2)$$

$$k = 65VR/N^2, \quad (3)$$

式中 V 、 R 、 N 、 I 分别为电子束加速电压、磁透镜线圈的平均半径、线圈匝数以及励磁电流, 即在此条件下近轴区理想成像。(1)式、(2)式分别对励磁电流 I 求导, 且物距不随激励变化, 联立可得

$$ds'/s'^2 = -2IdI/k. \quad (4)$$

考虑到励磁电流小幅度降低, 对其积分并整理后得

$$\Delta s' = -\Delta I (s')_1 (s')_0 (I_0 + I) / k, \quad (5)$$

式中 I_0 和 I 分别是激励改变前后的电流, ΔI 代表这一过程中电流的增量; $(s')_1$ 和 $(s')_0$ 分别为励磁电流降低前后近轴区的像距, $\Delta s'$ 代表该过程中成像面的后移量。由此可见, 略微降低励磁电流, 近轴区成像面将沿轴后移。又因为成像面形状不变, “凹面”也将跟随整体后移。如果此时离轴 h 物点的最佳成像位置恰好落入接收屏, 则 $\Delta s'$ 即为该离轴 h 物点成像面的轴向偏离, 记作 $(\Delta s')_h$ 。因电流改变较小, 前后的像距差别较小, 可近似为

$$(\Delta s')_h = -\Delta I s'^2 (I_0 + I) / k. \quad (6)$$

双磁透镜成像的分析如图 2 所示, 其离轴成像面的轴向偏离可作类似分析。在此仅讨论两磁透镜中心间隔较大距离, 前透镜 L1 比较靠近物, 所成的中间像为虚像的情形。对于透镜 L1, 满足成像关系:

$$1/s + 1/s' = 1/f_1, \quad (7)$$

对于透镜 L2, 满足成像关系:

$$1/s_2 + 1/s' = 1/f_2, \quad (8)$$

其中, 中间像对透镜 L2 的物距为

$$s_2 = -s'_1 + d. \quad (9)$$

在透镜 L2 的励磁电流 I_2 不变的情况下, 略微减小 L1 的励磁电流 I_{10} 至 I_1 , 计算最终像距 s' 对 I_1 的导数, 经积分运算和近似处理, 可得双磁透镜成像离轴 h 物点成像面的轴向偏离为

$$(\Delta s')_h = -\Delta I s'^2 (I_{10} + I_1) s_1'^2 / (k s_2^2). \quad (10)$$

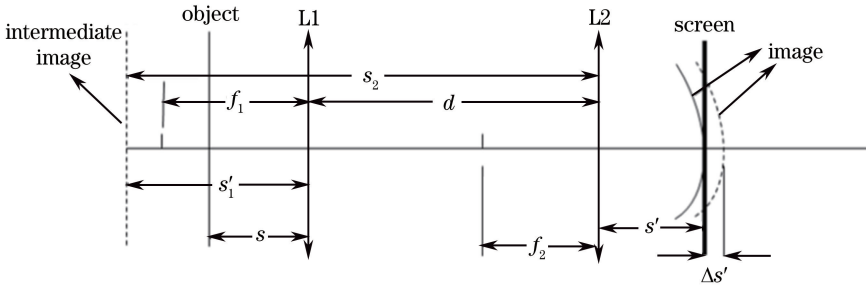


图 2 双磁透镜成像的场曲分析

Fig. 2 Field curvature analysis of double magnetic lens system

由此得到两种成像系统下离轴物点最佳成像位置偏离高斯像面的近似关系式。由(6)式和(10)式可知, 在近轴区最佳成像时, 调节励磁电流以使离轴不同距离的物点依次获得最佳成像, 从而间接测量像管的场曲。由于各离轴点的最佳成像位置难以直接测量, 故采用 Matlab 编程进行数值模拟并与其作对比。

3 变像管场曲的数值模拟

在 2:1 电子光学倍率下, 分别对单磁透镜和双磁透镜成像进行模拟。所模拟的像管结构包括光电阴极、栅网、短磁透镜、漂移管以及平面接收屏。阴极加 -3 kV 电压, 栅网接地, 阴栅加速区长 1 mm。短磁透镜的结构是线圈密绕于铝芯, 外覆软铁屏蔽罩。线圈匝数 N 为 1320, 磁透镜轴向宽为 100 mm, 内直径为 160 mm, 外直径为 256 mm, 内壳上开有 4 mm 环形空气缝隙。漂移区管长为 500 mm, 平面接收屏置于漂移管末端。建立空间直角坐标系, 将坐标原点定在漂移管中心。阴栅间加速场作匀强电场处理。当磁透镜缝隙较小时, 轴上磁感应强度分布为^[14]

$$B = 1.32\mu_0 N I \operatorname{sech}^2(2.63z/D) / D, \quad (11)$$

式中 z 为轴上点的坐标, I 为磁透镜激励电流, D 为磁透镜孔径, μ_0 为真空中的磁导率。由此, 再根据磁场的幂级数展开式, 可得轴外的磁场分布^[15]。分别从阴极中心、离轴 9, 15, 21, 27 mm 等处随机抽样发射 400 个电子。光电子发射条件、电子轨迹的分析参照文献[15]。空间分辨率采用调制传递函数(MTF)进行计算, 取 MTF 强度降至 0.1 时对应的空间频率为空间分辨率^[15-16]。

模拟过程中, 调整磁透镜激励和位置, 确定近轴区最佳成像时单磁透镜中心距离平面接收屏 173 mm, 激励电流为 0.311 A; 双磁透镜位置如图 3(a)所示, 激励电流分别为 0.218 A(前)和 0.337 A(后)。两种成像

系统轴上的磁场分布如图 3(b)所示,单、双磁透镜轴上最大的磁感应强度分别为 4.3×10^{-3} T 和 4.6×10^{-3} T。由电子轨迹追迹法统计像面落点分布的均方根半径,可得出两种系统阴极中心对应的空间 MTF 曲线,进而求得当 MTF 降至 0.1 时,单磁透镜成像阴极中心的空间分辨率为 7.1 lp/mm,双磁透镜成像为 10.3 lp/mm。各离轴点的空间分辨率如图 4 所示。可见,双磁透镜成像的空间分辨率高于单磁透镜成像。而且两种系统的轴外空间分辨率均明显低于近轴区的空间分辨率,即都存在一定的场曲。在不改变磁透镜位置和激励的条件下,沿轴负向平移接收屏,依次得到各离轴点最佳成像位置的轴向坐标及其空间分辨率,如表 1 所示。值得注意的是,单磁透镜成像下即使在最佳成像面,离轴 15 mm 以外点的空间分辨率也明显不如近轴区,这主要是由像散造成的。由最佳成像位置的轴向坐标,根据像管结构的旋转轴对称性,可以描绘最佳成像的弯曲像面,并拟合出相应的曲面方程。图 5 给出了两种成像系统弯曲像面的拟合结果,图中的小圆圈代表轴外点对应的像点位置。单磁透镜成像的像面方程为 $z = 249.001 - 0.083(x^2 + y^2)$;双磁透镜成像的像面方程为 $z = 249.044 - 0.052(x^2 + y^2)$ 。显然,两种成像条件下的最佳像面均为旋转抛物面,并且单磁透镜的场曲明显大于双磁透镜成像。

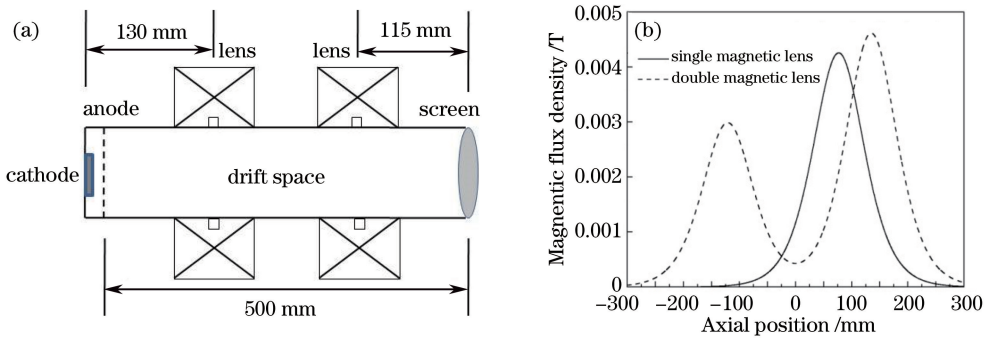


图 3 (a)幅变像管双磁透镜成像模型;(b)两种系统轴上的磁场分布

Fig. 3 (a) Imaging model of framing converter tube with double magnetic lens system;
(b) distribution of magnetic field of two systems on the axis

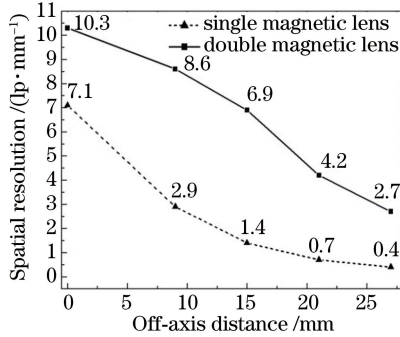


图 4 两种成像系统空间分辨率随离轴距离的变化

Fig. 4 Variation of spatial resolution with off-axis distance for two systems

表 1 离轴各点最佳成像位置与空间分辨率的模拟结果

Table 1 Simulated best image positions and spatial resolutions for off-axis point objects

Imaging system	Off-axis distance /mm	Best image position z /mm	Spatial resolution /($\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$)
Double magnetic lens	9	248.8	10.3
Double magnetic lens	15	246.7	10.3
Double magnetic lens	21	244.6	10.2
Double magnetic lens	27	237.4	9.1
Single magnetic lens	9	246.5	7.1
Single magnetic lens	15	243.0	3.9
Single magnetic lens	21	237.0	2.1
single magnetic lens	27	231.8	1.3

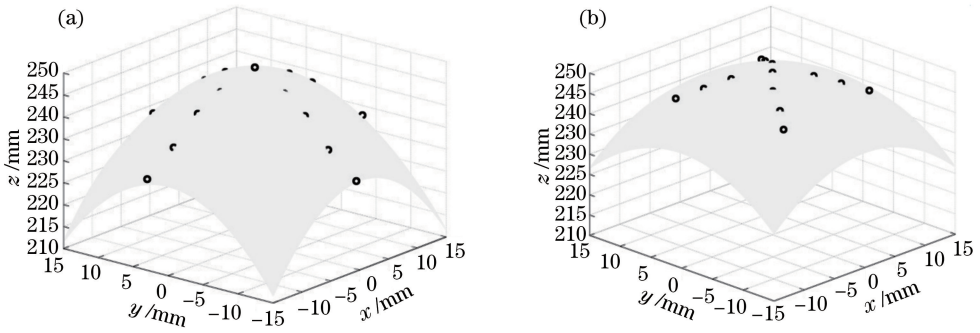


图 5 (a)单磁透镜和(b)双磁透镜成像系统计算机模拟的弯曲成像面

Fig. 5 Curved image surfaces obtained by computer simulation for (a) single magnetic lens and (b) double magnetic lens systems

4 变像管场曲的实验测试

变像管测试采用最新研制的大面积阴极像管,其基本结构如图 6 所示。大面积阴极像管的物面具有尺寸为 $72\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的镀金微带结构,像管末端装配有 MCP、荧光屏和图像采集系统(CCD)。由于 MCP 具有尺寸为 $40\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的微带结构,为确保阴极的像完全落在 MCP 上,选择 2:1 的成像倍率。为便于测试各离轴位置的空间分辨率,利用光刻技术在阴极微带上规则地刻划各种空间频率的分辨率板,每块分辨率板是尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的小方格,其线对数分别为 2, 5, 10, 15, 35 lp/mm。测试时,直接用紫外(UV)灯作为光源采集静态图像。测试条件为:阴极电压 -3.0 kV ,MCP 电压 -560 V ,屏压 $+3.4\text{ kV}$ 。磁透镜参照数值模拟的位置放置,测得单磁透镜近轴成像的励磁电流为 0.344 A ;双磁透镜近轴成像的励磁电流为 0.240 A (前)和 0.385 A (后)。实验时像管内部真空压强控制在 $1.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 以下。

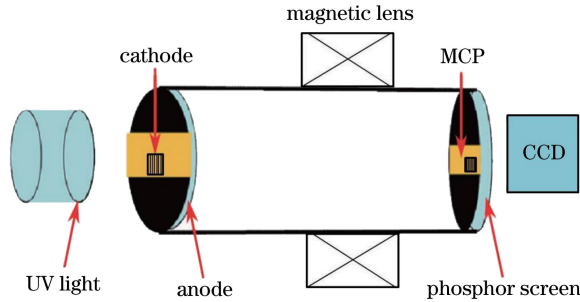


图 6 实验测试系统基本结构图

Fig. 6 Schematic of experimental system

图 7 和图 8 分别给出了不同励磁电流下单磁透镜和双磁透镜成像的测试结果。由图 7 可知,单磁透镜成像离轴空间分辨率下降较快,离轴 12 mm 以外区域就已模糊,调节激励可使离轴 15 mm 获得最佳成像,但其空间分辨率明显不如中心最佳成像时的分辨率。而离轴 20 mm 以外的最佳成像仅能观测到 2 lp/mm 条纹板模糊的轮廓,并且此时近轴区的像质较差,已不能分辨任何条纹信息。相比之下,图 8 双磁透镜成像的离轴空间分辨率变化较为平缓,离轴 9 mm 处仍有较好的空间分辨率。调整激励至离轴 15 mm 处最佳成像时,近轴区的空间分辨率基本保持不变。此外, 27 mm 处最佳成像时,仍能清楚分辨 2 lp/mm 的条纹信息。这些与数值模拟的结果一致。由离轴距离与最佳激励的实验数据以及成像条件,分别根据(6)式和(10)式,计算两种条件下各离轴点最佳成像位置,结果如表 2 所示。绘制双磁透镜成像的弯曲像面如图 9 所示,拟合的曲面方程为 $z = 249.013 - 0.0503(x^2 + y^2)$ 。比较测量值与计算机模拟结果可知,双磁透镜成像在离轴 21 mm 以内的偏差在 1.6 mm 之内;单磁透镜成像在离轴 15 mm 处的偏差为 1.7 mm 。随着离轴距离增加,其偏差逐渐增大。双磁透镜成像离轴 27 mm 和单磁透镜成像离轴 21 mm 的最佳成像位置偏差分别达到 2.6 mm 和 2.9 mm 。离轴较远位置测量偏差较大的主要原因是先前假设成像面形状不随激励的微调而改变,这只是激励相对改变较小时的合理近似。而对于远轴区来说,激励的相对改变量已较大,并且

成像点靠近视场边缘也会给最佳激励值的确定带来较大的误差。尽管如此,从测试结果来看,该测量方法基本上能够反映场曲的总体轮廓,因此,在一定视场范围内的场曲测量结果是可靠的。

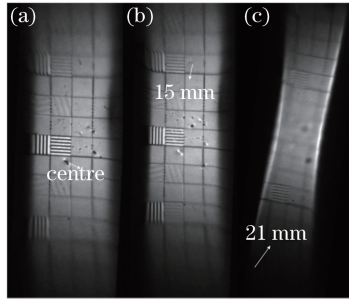


图 7 不同励磁电流下的单磁透镜成像测试结果。(a) $I=0.344\text{ A}$; (b) $I=0.341\text{ A}$; (c) $I=0.335\text{ A}$
 Fig. 7 Testing results under different excitation currents for single magnetic lens system. (a) $I=0.344\text{ A}$; (b) $I=0.341\text{ A}$; (c) $I=0.335\text{ A}$

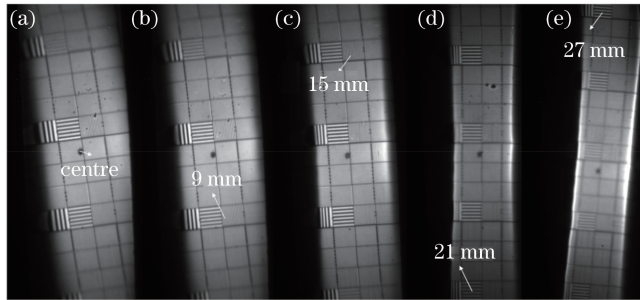


图 8 不同励磁电流下的双磁透镜成像测试结果。(a) $I_1=0.240\text{ A}, I_2=0.385\text{ A}$; (b) $I_1=0.230\text{ A}, I_2=0.385\text{ A}$;
 (c) $I_1=0.220\text{ A}, I_2=0.385\text{ A}$; (d) $I_1=0.200\text{ A}, I_2=0.385\text{ A}$; (e) $I_1=0.180\text{ A}, I_2=0.385\text{ A}$

Fig. 8 Testing results under different excitation currents for double magnetic lens system. (a) $I_1=0.240\text{ A}, I_2=0.385\text{ A}$; (b) $I_1=0.230\text{ A}, I_2=0.385\text{ A}$; (c) $I_1=0.220\text{ A}, I_2=0.385\text{ A}$; (d) $I_1=0.200\text{ A}, I_2=0.385\text{ A}$; (e) $I_1=0.180\text{ A}, I_2=0.385\text{ A}$

表 2 离轴各点最佳成像位置的测量结果

Table 2 Measurement results of best image positions for off-axis point objects

Imaging system	Off-axis distance /mm	$(\Delta s')_h/\text{mm}$	Best image position z/mm
Double magnetic lens	9	1.9	248.1
Double magnetic lens	15	3.7	246.3
Double magnetic lens	21	7.0	243.0
Double magnetic lens	27	10.0	240.0
Single magnetic lens	15	5.3	244.7
Single magnetic lens	21	15.9	234.1

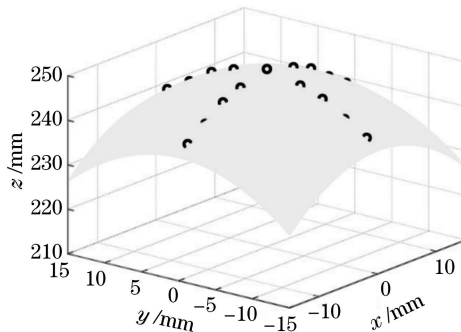


图 9 双磁透镜成像测试数据拟合的弯曲像面

Fig. 9 Curved image surfaces fitted by measuring data for double magnetic lens system

5 关于场曲的校正

从模拟和测试结果可知,场曲近似与物点离轴距离的二次方成正比,故大物面像管的场曲通常会比较大。理论上可采用球面光电阴极与球面栅网来减小场曲、像散,同时采用曲面荧光屏与场曲作适当匹配来进一步减小场曲。这势必加大对像管设计与加工的精度要求,在技术上实现起来有一定困难。采用场曲校正透镜可在一定程度上减小场曲,但同时必须注意其可能引入的附加畸变等额外像差^[17]。从实际应用的角度讲,只需将场曲控制在一定范围内就可以满足需要。本文数值模拟和实验测试结果均表明双磁透镜成像场曲比单磁透镜成像场曲有明显改善。在此基础上,深入开展多个磁透镜组合成像的研究,可为进一步减小像管场曲提供新的思路。

6 结 论

研制出大面积阴极短磁聚焦分幅变像管,从透镜成像原理出发,推导了成像倍率为 2:1 时单磁透镜和双磁透镜成像场曲的近似公式,提出了一种测量像管场曲的方法。同时利用 Matlab 编程模拟了不同离轴距离物点的最佳成像位置,并通过实验进行了验证,探讨了减小像管场曲的方法。数值模拟和实验测试结果表明,单、双磁透镜下的最佳成像面均为旋转抛物面,但双磁透镜成像场曲比单磁透镜有明显的改善。下一步工作将进行多个磁透镜组合成像场曲的研究,并同时开展像差的校正工作。

参 考 文 献

- [1] Deeney C, Douglas M R, Spielman R B, *et al.* Enhancement of X-ray power from a Z-pinch using nested-wire arrays [J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 81(22): 4883-4886.
- [2] Ze F, Kauffman R L, Kilkenny J D, *et al.* A new multichannel soft X-ray framing camera for fusion experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(10): 5124-5126.
- [3] Shan B, Yanagidaira T, Shimoda K, *et al.* Quantitative measurement of X-ray images with a gated microchannel plate system in a Z-pinch plasma experiment[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(3): 1688-1693.
- [4] Cai H Z, Liu J Y, Peng X, *et al.* Non-gain microchannel plate gated framing camera [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(5): 056102.
- [5] Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Peng Xiang, *et al.* Design of an X-ray framing camera with wide microstrip line[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0117001.
蔡厚智, 刘进元, 彭翔, 等. 宽微带 X 射线分幅相机的研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0117001.
- [6] Koga M, Fujiwara T, Sakaiya T, *et al.* Measurement of heating laser injection time to imploded core plasma by using X-ray framing camera[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 10E909.
- [7] Bradley D K, Bell P M, Landen O L. Development and characterization of a pair of 30-40 ps X-ray framing cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(1): 716-718.
- [8] Oertel J A, Archuleta T N, Schrank L S. The large format X-ray imager[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(1): 701-704.
- [9] Cai H Z, Liu J Y, Peng X, *et al.* Large-format microchannel plate gated framing camera[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2012, 677: 14-17.
- [10] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, *et al.* Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
- [11] Bai Yanli, Long Jinghua, Cai Houzhi, *et al.* Influence of double magnetic lenses on performance of pulse-dilation framing tube[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 013201.
白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 双磁透镜对时间展宽分幅变像管性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 013201.
- [12] Bai Y L, Long J H, Liu J Y, *et al.* Demonstration of 11 ps exposure time of a framing camera using pulse-dilation technology and a magnetic lens[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(12): 124103.
- [13] Yin Ming, Sun Xiaojun. A study of thick lenses of e-beam exposure system with a large object surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(4): 509-512.
尹明, 孙晓军. 电子束曝光机大物面强磁透镜的研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(4): 509-512.
- [14] Du Bingchu, Wang Jianru. *Electron optics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 188-190.

杜秉初, 汪健如. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 188-190.

- [15] Liao Yubo, Long Jinghua, Cai Houzhi, *et al.* Numerically simulated static spatial resolution of framing image converter using magnetic focusing via Matlab[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 012301.
廖昱博, 龙井华, 蔡厚智, 等. 磁聚焦分幅变像管静态空间分辨率的 Matlab 模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 012301.
- [16] Hui Dandan, Tian Jinshou, Lu Yu, *et al.* Streak tube with large work area and small size used in lidar detection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1232001.
惠丹丹, 田进寿, 卢裕, 等. 用于激光雷达的大探测面积超小型条纹管[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1232001.
- [17] Xia Shanhong, Zhu Xieqing. Design of extremely low field curvature combined focusing and deflection systems[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1991, 19(1): 65-71.
夏善红, 朱协卿. 一种极低场曲复合聚焦偏转系统的设计[J]. *电子学报*, 1991, 19(1): 65-71.