

基于线结构光视觉的燃料组件变形测量技术研究

吴康彪^{1,2}, 赵建平^{1,2}, 冯常¹, 蔡根¹, 陈志波¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对快堆燃料组件外形变形参数的测量, 设计了基于线结构光的燃料组件变形测量系统, 并考虑到辐射对电子元器件和测量精度的影响, 进行了测量系统的辐射屏蔽设计。对辐射屏蔽玻璃的折射对测量的影响进行了研究, 并在空气中线结构光测量模型的基础上提出一种折射校正的线结构光测量模型。在空气中进行测量系统标定, 然后对加玻璃的测量值进行折射校正, 通过多组测量实验表明折射校正模型校正误差为 ± 0.05 mm, 线结构光燃料组件测量系统的全局参数测量的标准差不大于 0.03 mm。组件测量系统能在一定辐照剂量下实现燃料组件变形参数的高精度测量, 对于获取燃料组件物理参数和堆芯设计具有重要的意义。

关键词: 线结构光; 视觉测量; 燃料组件; 折射校正

Research on Deformation Measurement Technique of Fuel Assembly Based on Line Structured Light Vision

Wu Kangbiao^{1,2}, Zhao Jianping^{1,2}, Feng Chang¹, Cai Gen¹, Chen Zhibo¹

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the measurement of deformation parameters of the fast reactor fuel assembly, a deformation measurement system based on the line structure light was designed. Considering the effect of radiation on the electronic components and measurement accuracy, radiation shielding design of the measurement system was carried out. The effect of refraction of the radiation shielding glass on measurement was studied. Based on the air-line structured light measurement model, a line structure light measurement model of the refractive correction was proposed. The calibration of the measurement system was carried out in the air, and then the measured value of added glass was corrected. Several measurement experiments results prove that the correction error of the refractive correction model is ± 0.05 mm, and the standard deviation of global parameter measurement of the line structured light fuel assembly measurement system is not more than 0.03 mm. The measurement system can achieve high precision measurement of the deformation parameters of fuel assembly under a certain irradiation dose, which is of great significance for obtaining the physical parameters of fuel assembly and the reactor core design.

Keywords: line structured light; vision measurement; fuel assembly; refraction correction

0 引言

相对于传统的接触式测量方法, 视觉测量作为一种非接触式测量其具有测量系统简单、操作简便、测量精度高、对待测工件外形适应性较好和不破坏待测物表面等优点, 结构光、光束平差、单目及双目视觉测量是最为常见的视觉测量, 而结构光测量除了具有上述优点外, 还具有测量稳定性较好、易于图像处理, 因此被广泛运用于各工业领域^[1-6]。燃料组件作为核电站反应堆的重要组件, 组件工作过程中受强辐照、温度变化较大及组件内外压差较大等的影响, 会使组件发生变形, 具体表现为组件的弯曲、肿胀和伸长等^[7]。组件过大的变形量会影响到燃料组件的换料、加快组件的破损等, 给核电站的生产带来安全隐患, 通过测量和计算燃料组件的外形变形参数, 可以为堆芯设计、

组件运行的可靠性和安全性提供技术参数, 对于燃料组件的设计和运行非常重要。

应用于核电领域的设备一般需要对其进行辐射屏蔽设计, 以减少辐射对电子元器件和测量精度的影响, 对于结构光视觉测量屏蔽体要留有辐射屏蔽的厚玻璃窗口才能进行测量, 此时玻璃的折射对测量的影响不能忽略, 其和水下视觉测量一样需要考虑水的折射对测量的影响。由于应用领域的不同, 大部分情况所用的玻璃厚度较薄, 一般不考虑玻璃的厚度对测量精度的影响, 但对于厚度较大、折射率较大的玻璃需要考虑其对视觉测量系统的影响。本文先讨论空气中燃料组件的线结构光测量模型, 再讨论屏蔽用的玻璃对测量结果的影响, 并在基于本文所采用的测量系统提出折射校正的线结构光视觉测量模型, 最后对校正模型进行实验验证和模拟燃料组件的测量实验。

1 空气中线结构光测量模型

快堆燃料组件为横截面如图 1 所示的六方形长杆状组件, 为了测量和评估整根燃料组件的变形程度, 需要对组

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-10-18。

作者简介: 吴康彪 (1992-), 男, 贵州安顺人, 硕士研究生, 主要从事精密机械理论与设计方向的研究。

件进行多个截面的测量, 组件多个横截面参数的测量可以通过竖直方向上精密移动平台来实现。移动平台安装在刚度较大的立柱床身上, 通过精密滚动直线导轨副和精密滚珠丝杠螺母副实现高精度运动。

本文所要进行的测量项主要包括燃料组件某一截面六边形的对边距、对角距和组件长度等参数。燃料组件测量系统的测量原理如图 1 所示, 为了能完整测量截面的轮廓,

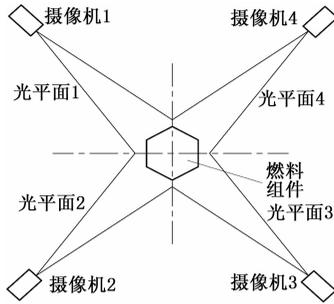


图 1 线结构光燃料组件测量原理

分别采用 4 个摄像机和 4 个线结构光投射器, 投射器投射的结构光平面与竖直方向垂直, 摄像机与投射器成一定的夹角布置。测量时通过专用机械手将组件放置至指定位置, 使整根燃料组件呈竖直状态放置, 组件下管座采用专用的夹紧机构进行夹紧和定位, 使组件上部处于自然状态, 四个摄像机及结构光投射器分别安装在辐射屏蔽腔体中, 辐射屏蔽腔体安装在精密的移动平台上。燃料组件测量系统的工作流程如图 2 所示, 在测量之前先对测量系统进行标定, 标定包括相机的内外参数标定和各个相机的参考坐标系与统一坐标系间转换关系的标定。对每一个摄像机进行图像采集并进行图像处理, 得到在各个摄像机下的燃料组件的截面轮廓, 再利用已标定的参数实现将四个摄像机所得的轮廓进行拼接得到完整的组件轮廓, 对所得到的轮廓进行参数的测量。

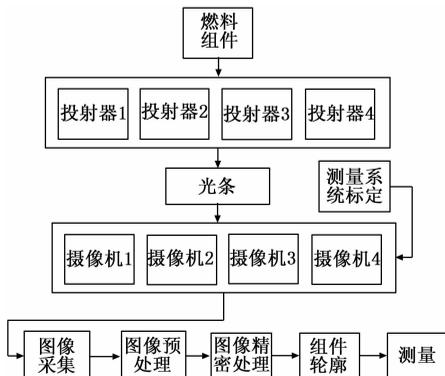


图 2 燃料组件测量系统工作流程

1.1 线结构光测量数学模型

小孔成像模型是图像传感器的成像模型的基础, 获取真实和精确的成像模型需要在小孔成像模型的基础上进行修正, 一般采用非线性因子对其进行修正^[9]。线结构光视觉测量原理如图 3 所示, 坐标系 $O_c - X_c, Y_c, Z_c$ 为摄像机坐标

系, $O_r - X_r, Y_r, Z_r$ 为参考坐标系, 平面 π 为结构光平面, (X_c, Y_c, Z_c) 为光条上任一点在摄像机坐标系下的坐标, (x, y) 为 P

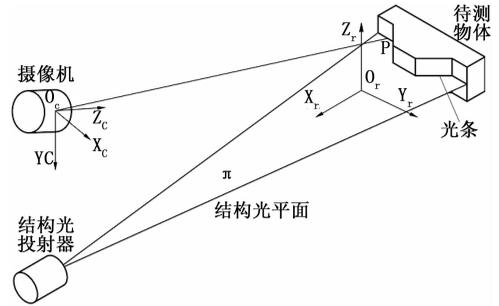


图 3 线结构光测量模型

点在摄像机上成像点的图像坐标, (x_0, y_0) 实际图像主点在像面坐标系的坐标, 由透射投影比例关系有:

$$\begin{cases} X_c = \frac{(x - x_0 + \delta_x)}{f} Z_c \\ Y_c = \frac{(y - y_0 + \delta_y)}{f} Z_c \end{cases} \quad (1)$$

式中, f 为有效焦距, δ_x 和 δ_y 为考虑主点偏移、镜头畸变等的因素的综合畸变系数, 这些参数可在通过摄像机内参数的标定获取。

假设结构光平面 π 在参考坐标系 $O - X, Y, Z_r$ 的平面方程为:

$$f(X_r, Y_r, Z_r) = 0 \quad (2)$$

参考坐标系和摄像机坐标系之间的齐次变换矩阵为 M , M 为由矩阵 R 和 T 构成的 4×4 矩阵, R 为 3×3 的正交单位矩阵, T 为 3×1 的矩阵, R 和 T 可通过标定技术获取。则可以确定参考坐标系上的点与摄像机坐标系上对应点的变换关系, 即:

$$\begin{bmatrix} -X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

联立式 (1)、(2) 和 (3) 可得到关于 X_r, Y_r, Z_r 的方程组, 求解该方程组即可求出光条上任一 P 点在参考坐标系下的坐标 $P(X_r, Y_r, Z_r)$ 。

1.2 线结构光测量系统标定

线结构光燃料组件测量系统的标定包括摄像机的内部参数标定 (内参数), 摄像机坐标系与参考坐标系间的标定 (外参数), 四个摄像机参考坐标系与统一世界坐标系的标定。摄像机内参数的标定技术相对较为成熟, 标定方法较多^[10-13], 本文主要介绍外部参数的标定, 外参数的标定方法有基于交比不变法、基于共面标定靶等多种方法^[14]。这里主要介绍文献 [9] 及 [14] 的标定方法, 其标定原理如图 4 所示, 所用的标定板为圆形孔

阵列的光学玻璃材质标定板, 标定板上各圆孔在标定

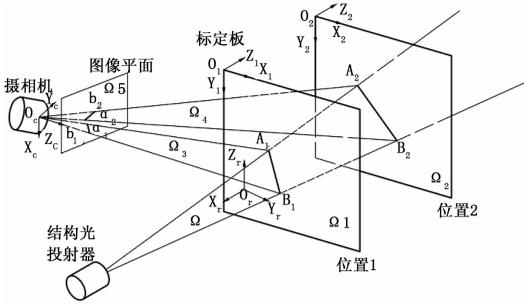


图 4 结构光平面的标定

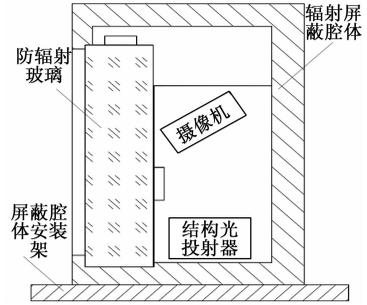


图 5 辐射环境线结构光测量系统屏蔽结构

板坐标系中的位置确定。在标定过程中摄像机和结构光投射器的位置固定不变，标定时将标定板放置在测量范围的任一位置 1，结构光平面 Ω 与标定板平面 Ω_1 在位置 1 的交线为 A_1B_1 ，在图像平面为 a_1b_1 ，经过图像处理可以得到 a_1b_1 的信息，由 O_c 及 a_1b_1 可以确定平面 Ω_3 在摄像机坐标系下的方程，又标定板各圆孔空间位置确定，可以确定 Ω_1 在摄像机坐标系的平面方程，则交线 A_1B_1 在摄像机坐标系的方程为 Ω_3 与 Ω_1 方程的解。同理，将标定板移置测量范围空间的任一位置 2，可得到直线 A_2B_2 在摄像机坐标系的方程，由两条非共线直线可确定一平面，从而完成结构光平面与摄像机坐标系相对关系的标定。

由于燃料组件某一横截面的测量采用四个图像传感器同时进行测量，因此需要将四个传感器所测的轮廓统一到世界坐标系中，方可进行测量。对于四个摄像机参考坐标系和统一的世界坐标系间的关系，可采用加工精度高的三维标定块来实现相对关系的标定。三维标定块上的各个特征点在世界坐标系中的坐标已知，分别用四个测量模块测量三维标定块并提取特征点，由摄像机的内外参可以得到三维标定块特征点在各摄像机参考坐标系的坐标，再由相应的计算算法即可求出各摄像机参考坐标系和世界坐标系间转换关系的齐次变换矩阵。

2 基于折射校正的线结构光测量模型

由于测量设备使用的环境具有一定的辐射剂量，因此需要考虑辐射对电子元器件和测量精度的影响。辐射会对图像传感器造成辐射损伤导致成像噪声增大^[15]，影响图像传感器的成像性能和使用寿命，从而影响测量的精度。本文采用的线结构光测量系统辐射屏蔽结构示意图如图 5 所示，屏蔽腔体为对辐射具有一定屏蔽作用的材料加工而成，测量模块置于辐射屏蔽用的腔体内，测量模块主要包括摄像机和结构光投射器，窗口处为核工业用的防辐射玻璃，让投射器投射的结构光平面与玻璃的前后两端面垂直，安装座处有用于微调的螺旋机构，屏蔽腔体安装在精密的可运动的平台上，通过控制系统控制平台以一定的速度移动可增加第三维坐标，从而可以重建燃料组件的三维模型、求出燃料组件的长度及弯曲度等参数。

摄像机前加防辐射玻璃的成像模型如图 6 所示，其成像模型应为空间成像模型，但考虑到结构光光条上每个待

测点所在平面的光路图类似，为了便于分析只截取中间平面，中间平面定义为截取与结构光平面垂直且过摄像机坐标系 Z 轴的平面。其中 O_c 为摄像机光心，也是摄像机坐标系的坐标原点， O_cZ_c 为摄像机坐标系的 Z 轴， OO_c 为相机的有效焦距， d 和 n 为防辐射玻璃的厚度和折射率， O_rX_r 和 O_rZ_r 分别为摄像机参考坐标系的 X 轴和 Z 轴， π_1 和 π_2 分别为摄像机的成像平面和结构光投射器投射的光平面。 P 点为光条上一点， P' 点为 P 点所在折射光线的反向延长线与结构光平面的交点。

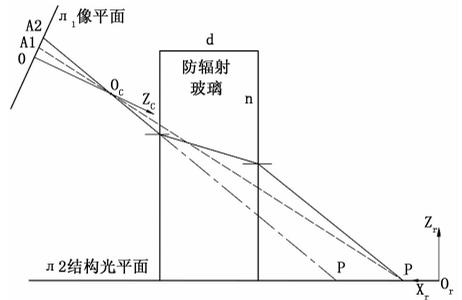


图 6 加防辐射玻璃时相机成像模型

未加玻璃时的光路图如图中虚线所示， P 点在摄像机成像平面的像点为点 A_1 ，加上玻璃后的光路图如图中实线所示，由于光的折射 P 点在相机成像平面的成像点为点 A_2 。从该成像模型可以得到，由于摄像机前加有厚度和折射率较大的防辐射玻璃，因此光条上待测量点 P 在摄像机成像平面的图像坐标会相对于未加玻璃时所测点的图像坐标发生偏移，如图中由 A_1 点偏移到 A_2 点，具体表现为在测量过程中光条上任一待测点因玻璃的折射在相对于摄像机参考坐标系 X 轴方向发生一定量的偏移量，如图中由 P 点偏移到点 P' ，则实际测量到的点为 P' 点，而不再是待测点 P 点的位置，因此不能反应出光条上待测量点的真实位置，不能直接用于进行高精度的视觉测量。

进一步的，多组测量实验表明一条与参考坐标系 Y 轴近似平行的直线光条会因加玻璃会由直线变成类似抛物线形状（如图 7 所示）。在图 7 中所用防辐射玻璃的厚度为 80 mm，折射率为 1.74729，图中第一、二、三行表示在不同位置下进行的测量，直线光条距结构光投射器的距离分别约为 220 mm、205 mm 和 190 mm。由图中的测量值可以发现不同位置时的偏移量不同，同一直线光条上的点的偏

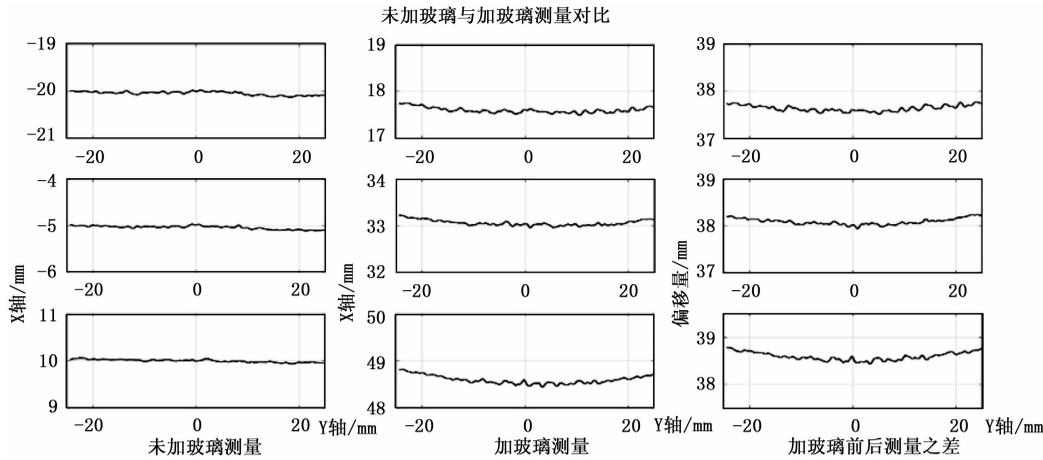


图 7 玻璃的折射使测量直线外形发生变化

移量不同, 直线两侧点的偏移量要比中间点偏移量大。因此对于待测燃料组件的轮廓会因防辐射玻璃的折射而发生外形变形, 从而影响到对组件轮廓的高精度测量, 为此在进行测量前需要对测量系统进行校正。

2.1 基于折射校正的结构光测量模型

由以上分析可知进行折射校正是该测量系统实现高精度测量的前提, 由于测量系统的布置使得结构光平面与防辐射玻璃前后端面垂直, 因此结构光平面没有发生偏转只有进入摄像机的光线发生折射而引起待测点的偏移, 只需考虑进入摄像机光线因玻璃折射而发生的偏移。通过多组测量实验可以发现空间中光条上任一点的偏移量与玻璃的折射率、玻璃的厚度及在该点处的入射角有关, 根据所采用测量系统的特点, 所用防辐射玻璃前后的两个端面相互平行, 可以看成平行平板模型, 因此采用基于平行平板折射模型的校正方法, 其校正的空间模型如图 8 所示, 图中的光条为结构光平面与待测物表面轮廓的交线, P_i 为空间中光条上任一点, P_i 为折射光线反向延长线与结构光平面的交点, 亦即摄像机实际测到的点, d 为防辐射玻璃的厚度, n 为玻璃折射率, L_i 为该测量点的偏移量。

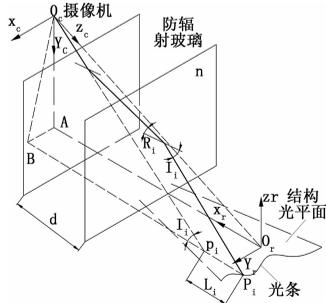


图 8 基于平行平板的折射校正模型

设光条任一点 P_i 在未加防辐射玻璃时所测的坐标为 (x_a, y_a, z_a) , 加上厚度为 d 、折射率为 n 的防辐射玻璃后所测得坐标为 $P_i'(x_g, y_g, z_g)$, 摄像机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 的坐标原点在参考坐标系 $O_r - X_r Y_r Z_r$ 的坐标为 $(a, b,$

$c)$, 在进行系统标定后可获得。由数学几何关系可以得到加上玻璃后的入射角为:

$$I_i = \arctan\left(\frac{O_c B}{B P_i'}\right) = \arctan\left(\frac{\sqrt{y_g^2 + c^2}}{a - x_g}\right) \quad (4)$$

由折射定律可以得到折射角为:

$$R_i = \arctan\left(\frac{\sin I_i}{n}\right) \quad (5)$$

则光线经防辐射玻璃后在轴线方向的偏移量为:

$$L_i = d\left(1 - \frac{\tan R_i}{\tan I_i}\right) = d\left(1 - \frac{\cos I_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 I_i}}\right) \quad (6)$$

经过校正后相当于在空气中未加防辐射玻璃的测量值, 即光条上待测点的真实值为:

$$x_{ca} = x_g - L_i \quad (7)$$

则校正误差为:

$$\delta = x_{ca} - x_a \quad (8)$$

由式 (6) 可以得出空间中结构光平面与燃料组件横截面的交线 (光条) 上任一点因玻璃折射的偏移量与所用玻璃的折射率、厚度及入射角有关。在玻璃折射率和入射角一定时, 玻璃越薄其偏移量就越小, 为此在非高精度测量中一般不考虑薄玻璃带来偏移量的影响; 当玻璃折射率和厚度确定时, 偏移量与入射角有关, 不同点的偏移量与入射角成非线性关系, 且此时的偏移量为关于在入射角定义域内的单调递增函数。因此, 相对于中间平面一条与参考坐标系 Y 轴平行的光条两侧点的入射角要比中间点的入射角大, 则光条两侧点的偏移量比中间点的大, 由于测量系统在测量时对光条采集等距的采样点, 故与参考坐标系 Y 轴平行的光条上的采样点关于中间平面对称, 从而呈现出抛物状, 也从理论上验证了上述测量实验所得出的结论。

3 实验与分析

为了测试结构光测量系统的测量精度和校正模型的校正误差, 本文分别对四个测量模块进行多组有防辐射玻璃和无防辐射玻璃的测量实验, 并加工出模拟燃料组件, 对模拟燃料组件的进行多组对边距和对角距的测量实验, 结构光测量系统及模拟组件如图 9 所示。

图 10 列出在四个不同位置对同一工件进行无防辐射玻璃和加上防辐射玻璃的测量实验, 图中各横轴上的“0”值表示该点在参考坐标系上的 Y 轴坐标为 0, 其数值为向正 Y 轴方向为正, 负向为负, 竖轴坐标表示用以上折射校正模型进行计算, 等价于未加防辐射玻璃的计算值, 然后将该计算值与无防辐射玻璃的测量值相减。由实验结果可以看

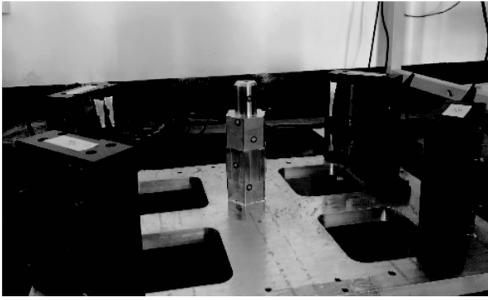


图 9 结构光燃料组件测量系统

出经折射校正模型校正后在不同位置的误差相差较小，且总体上在中间平面 ($Y=0$) 附近的点的误差要比远离中间平面的小，整体上的校正误差基本在 ± 0.05 mm 范围内。

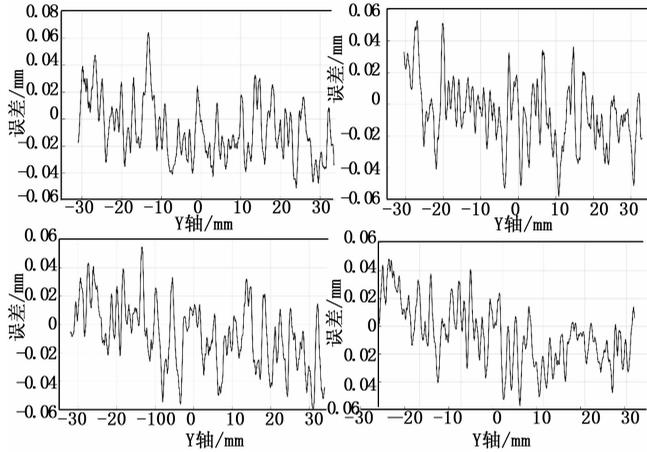


图 10 在不同位置的校正误差

图 11 为模拟组件某一截面由四个测量模块拼接起来的轮廓图，图中的 X 和 Y 坐标轴分别表示统一世界坐标系的 X 与 Y 坐标轴。为了便于测量和表述对模拟组件截面按图 12 所示进行编号，并在模拟组件上做出相应的标记。在求对边距时，分别在每一条边线上按等距取样足够多个点，后求其到对边的距离，表 1 列出其中的十组对该轮廓进行对边距和对角距的测量，表中末行列出用精度为 0.02 mm 游标卡尺进行的测量值。多组测量实验表明校正之后的燃料组件测量系统对边距测量标准差不大于 0.02 mm，对角距测量的标准差小于 0.03 mm。

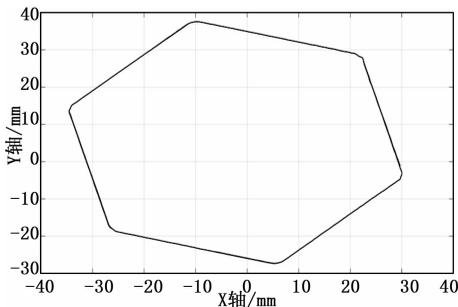


图 11 所测模拟燃料组件某一截面轮廓

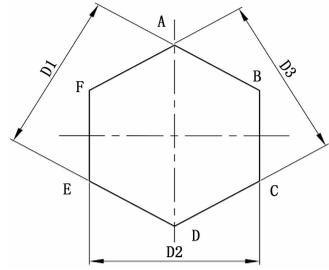


图 12 模拟燃料组件截面编号

表 1 模拟燃料组件测量实验 mm

测量次数	测量项					
	D1	AD	D2	CF	D3	BF
1	58.62	66.76	58.55	66.78	58.64	66.69
2	58.60	66.76	58.54	66.78	58.65	66.75
3	58.60	66.74	58.56	66.76	58.63	66.76
4	58.59	66.73	58.55	66.74	58.62	66.75
5	58.57	66.75	58.54	66.78	58.62	66.76
6	58.58	66.74	58.55	66.76	58.64	66.77
7	58.59	66.76	58.54	66.76	58.65	66.74
8	58.60	66.75	58.52	66.77	58.66	66.76
9	58.59	66.74	58.53	66.75	58.64	66.76
10	58.60	66.76	58.53	66.74	58.63	66.75
平均值	58.59	66.75	58.54	66.76	58.64	66.75
标准差	0.013	0.011	0.011	0.015	0.012	0.021
游标卡尺	58.60	66.72	58.58	66.72	58.64	66.74

测量实验过程中对测量精度有影响的因素主要包括系统内部和外部因素。内部因素包括系统标定精度、图像处理误差、拟合误差、结构光的光强度等，外部因素主要包括待测件的材质、待测物的表面结构、防辐射玻璃及安装座的安装误差、防辐射玻璃的缺陷及加工缺陷、测量距离等。

4 总结

本文讨论了空气中线结构光的测量模型，及燃料组件测量系统的测量原理，在测量系统中针对辐射对电子元器件和测量精度的影响进行了辐射屏蔽设计，对屏蔽用的防辐射玻璃对测量系统的影响进行深入的探讨和校正，建立线结构光折射校正的数学模型，这对于高精度测量具有重要的意义。最后，对校正模型进行实验验证和模拟燃料组件的测量实验，实验表明燃料组件的测量系统的测量标准差不大于 0.03 mm，校正模型校正误差为 ± 0.05 mm。相对于核电站对燃料组件变形参数测量的常规测量系统，该系统具有结构紧凑、对组件外形适应性好、测量系统稳定可靠、操作简单和较高的测量精度等优点，其可以作为燃料组件变形测量的一种高精度测量方法。

参考文献:

[1] 潘兵, 吴大方, 高镇同. 基于数字图像相关方法的非接触高温热变形测量系统 [J]. 航空学报, 2010, 31 (10): 1960-1967.