DOI: 10.3901/JME.2020.21.048

基于摄影测量的乏燃料组件池边检查系统设计^{*}

董凯捷^{1,2} 李端玲^{1,2} 侯妍^{1,2} 王兴泽³

- (1. 北京邮电大学自动化学院 北京 100876;
2. 北京市邮政智能装备工程技术研究中心 北京 100876
3. 北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

摘要: 乏燃料组件池边检查是核电站燃料组件必不可少的重要检测项目。针对国内外池边检查技术发展现状的不足,设计了一套基于摄影测量的乏燃料组件池边检查系统,结合接触式与非接触式测量方法,能够快速对组件的整体尺寸及变形进行检测,并能实现对燃料棒长度、直径、棒间隙与氧化膜厚度的检测。针对关键检测元件 CCD 相机在辐射环境下寿命短的问题,设计了一种耐辐射相机防护装置,通过一次反射减少进入相机的辐射剂量,可用普通 CCD 相机代替昂贵的耐辐射相机。详细介绍了燃料组件长度、燃料棒与上下管座间隙、格架宽度、组件弯曲及扭曲的视觉测量实现方法,具有理论和实际的可行性,以及重要的应用价值。

关键词: 乏燃料; 组件变形; 池边检查; 视觉检测; 辐射防护

中图分类号: TL24

Design of Poolside Inspection System for Spent Fuel Assemblies Based on Photogrammetry

Dong Kaijie^{1,2} LI Duanling^{1,2} HOU Yan^{1,2} WANG Xingze³

- (1. College of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876;
2. Beijing Post Intelligent Equipment Engineering Technology Research Center, Beijing 100876;
3. Beijing Space Vehicle General Design Department, Beijing 100094)

Abstract: Spent fuel assemblies poolside inspection (PSI) is an important test in nuclear power plants. Aiming at the shortage of pool side inspection technology at home and abroad, a pool side inspection system for spent fuel assemblies based on photogrammetry is designed. Combined with contactless and contactless measurements, the overall dimensions and deformations of the assemblies can be quickly detected, as well as fuel lengths, diameters, gaps, and oxide film thickness of fuel rods. Due to the short life of CCD camera, the key detection element, in the radiation environment, a protective device of radiation resistant camera is designed. Ordinary industrial cameras can be used instead of expensive radiation-resistant cameras by reducing the radiation dose into the camera through reflection. The visual measurement method of length, bending and distortion of fuel assembly, length between fuel rod and upper and lower tube seat and width of clearance lattice is introduced in detail. This has the theory and the practical feasibility, as well as the important application value.

Key words: spent fuel; fuel assemblies deformation; poolside inspection; visual detection; radiation protection

0 前言

核能作为一种新型能源被广泛地应用于核能发电领域^[1]。核反应堆中燃料组件的尺寸检查是保证核电安全的重要条件,包括核燃料组件出厂前的包络轮廓尺寸检查^[2]和乏燃料组件(即受辐照后的燃

料组件)的变形检查。反应堆中的燃料组件工作在高辐射剂量的环境中,燃料棒会因为辐射发生局部肿胀变形,同时反应过程中余热不断,导致整个燃料组件的外形综合尺寸发生变化。若组件变形量太大,会影响控制棒的正常插入,缩短燃料组件的使用寿命,甚至危及反应堆安全运行,影响核电的正常生产,所以对乏燃料组件变形的定期检查尤为重要。

通常将乏燃料存放于含硼水池以屏蔽放射性和散热,再对辐照后燃料组件进行各项检查,这种检

^{*} 国家自然科学基金(51775052)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JM-181)和天地互联与融合北京市重点实验室资助项目。20191204收到初稿,20200609收到修改稿

查方式称为池边检查(亦称水下检查), 包括外观检查、组件尺寸检测、涡流氧化膜测量等技术^[3]。国内的乏燃料池边检查技术日益完善, 从最初的定性检查乏燃料组件外观破损和弯扭变形^[4]到定量检测变形尺寸, 如四川大学的刘赫等^[5-7]基于激光扫描测量方法研制了组件变形测量原理样机, 用于测量组件整体轮廓形貌和整体变形量, 并对组件变形进行了评价; 刘浩^[8]基于激光三角测量原理使用激光位移传感器实现了对核燃料组件外形综合尺寸的非接触测量。上述的测量方法虽然具有非接触、精度高等优点, 但是测量对象仅限于整体组件的变形量, 未能测量燃料棒的长度、直径以及棒间间隙等因素; 而且上述的测量对象均为小型燃料组件, 若用同样的方法进行大尺寸组件测量则会耗费大量的检测时间。高永明等^[9]基于视频传感器与标定的方法设计开发了一套水下非接触变形测量系统大大地提高了检测的效率, 且具有较强的适应性, 但仍未能检测燃料棒的变形和氧化膜的形成情况。

国外核发达国家的池边检查技术相对成熟, 法国 AREVA 基于超声波检测法设计出燃料组件检测装置 ECHO330, 用于判断燃料组件的破损情况; 西班牙 ENUSA 等研发的 SICOM-DIM 测量系统不仅可以实现组件尺寸的测量, 还能测量燃料棒直径与氧化膜厚度; 韩国 KNF 设计了一套大型可拆卸式水下检查台架, 通过超声检测系统对组件的外观进行检测, 还可以实现组件上管座拆装与复装; 日本三菱提出了燃料组件水下图像法进行形变测量^[4], 但国外技术也存在燃料组件需多次转动检测, 检测速度慢, 效率低等问题。

如图 1 和图 2 所示为韩国 KNF 公司采用的组件高度、弯曲及扭曲测量方式, 这种方式操作复杂, 需要额外的标尺和铅垂线, 同时不能一次完成燃料组件四个面弯曲和扭曲的测量, 燃料组件单面弯曲检测后, 需要将组件旋转后, 依次进行其余 3 个面的检测, 效率较低。

图 1 组件高度测量及弯曲测量

图 2 组件扭曲测量

根据燃料组件池边检查的需求及现有检测技术的不足之处, 本文设计了一套基于摄影测量的乏燃料组件池边检查系统, 能够快速实现乏燃料组件的水下检测。结合接触式与非接触式测量方法, 能够快速对组件的整体尺寸及变形进行测量, 并能实现对燃料棒长度、直径、棒间间隙与氧化膜厚度的检测。针对关键检测元件 CCD 相机在辐射环境下寿命短的问题, 进行了防水耐辐射设计。

1 池边检查系统设计

本文以 17×17 型燃料组件(图 3)为测量对象, 池边检查系统主要检测量为: 燃料组件长度、弯曲、扭曲, 组件格架宽度, 燃料棒长度、与上下管座间隙、棒间距、棒直径及燃料棒最外层氧化膜厚度。

图 3 17×17 型燃料组件组成

图 4 为乏燃料组件池边检查装置, 主要由立式工作台、组件提升装置、升降导轨、检测平台及底部支座等组成。立式工作台用于为操作人员提供操

作空间；组件提升装置主要采用钢丝绳牵引方式控制检测平台的高度，并采用球栅尺精确检测平台位置；升降导轨采用高精度不锈钢直线导轨，保证检测平台平稳地上下运动；底部支座为整个装置提供支撑，通过调整螺钉可调节整个装置的垂直度。

图 4 燃料组件池边检查装置示意图

其中检测系统由平台骨架、组件夹持机构、三维移动测量工作台和水下相机组成，如图 5 所示。平台骨架与升降导轨和钢丝绳相连，同时为检测设备提供安装接口；组件夹持机构用于接触式检测时

图 5 检测系统示意图

燃料组件的固定；三维移动测量工作台可为接触式检测设备提供高精度三维移动，并通过转台可切换检测设备，无需人工更换检测设备。

检测时，首先人桥吊车通过刚性吊具将燃料组件吊运至检测区域，经导向装置导向穿过组件夹持机构；提升装置将检测平台沿导轨移动指定高度位置后，组件夹持机构将燃料组件固定；三维移动测量平台完成对燃料棒间距、定位格架宽度以及表面氧化膜厚度的检测，并多次取点测量取均值；最后吊运小车自上而下运动，水下相机构成的视觉检测系统检测燃料组件的长度、弯曲、扭转、燃料棒与上下管座间距等尺寸特征。

(1) 三维测量工作台。

三维测量工作台由三个线性运动滑台、气动转台和 LVDT 燃料棒直径测量装置、LVDT 定位格架宽度测量装置和涡流检测仪组成，如图 6 所示，LVDT 燃料棒直径测量装置、LVDT 定位格架宽度测量装置和涡流检测仪安装在气动转台上，可通过转台切换测量设备，与法国 AREVA 和韩国 KNF 设备需要在立式工作台手动更换测量设备相比，流程简化，操作简单，减少了不必要的人工操作。

图 6 三维测量工作台系统组成示意图

燃料棒直径测量对象是燃料组件外围燃料棒的直径，可通过接触式 LVDT 测量装置与视觉测量装置同时测量。完成燃料棒直径测量后，气动转台旋转 90° 测量定位格架宽度，测量对象是燃料组件所有格架的横向外形尺寸。测量完毕后，系统将自动计算燃料棒测量区域的平均直径，对比标准件可知变形情况。

燃料棒表层的氧化膜的厚度通常只有几十微米，需要较高的检测精度^[11]。采用笔式涡流探头检测仪，将探针插入组件内部来测量每段燃料棒外表面氧化膜厚度，并取平均值^[12]。

(2) 水下视觉检测系统。

图 7 所示为水下视觉检测系统，由四个水下防

护相机组成。水下相机呈“口”字排布，可完全拍摄燃料组件四个面。由于硼酸池水的屏蔽作用，乏燃料组件所发产生的辐射强度与距离呈指数下降关系，CCD 相机属于易损件，距离燃料组件应至少 1 m，同时，对 CCD 相机进行辐射防护，可尽量减小辐射对相机的损伤，延长相机使用寿命。

图 7 视觉检测系统示意图

2 相机耐辐射设计

乏燃料组件辐射主要以 γ 射线为主，主要对设备选用的材料及电子元器件提出严格要求，包括：三维运动平台所需的驱动，位置反馈所需的传感器，CCD 相机以及线缆等都受辐射环境的影响，在材料选择及电子元器件的选型时必须考虑耐辐射这个基本条件，同时，零部件的外形设计尽可能易于清除放射性沾污。

在高辐射的水下环境中，尤其是裸露在射线下的工业相机设备会由于元器件的辐射位移效应和辐射电离效应而受损伤，导致设备失效不能正常工作，并且在水下环境中对设备的密封性能有很高的要求，因此，导致一般的工业相机在高辐射水下环境中的使用寿命远远低于其在正常环境下的使用寿命。

针对这一问题，常用的解决方案是：使用耐辐射的工业相机设备。目前，专业的抗辐射工业相机设备都是采用对电荷耦合器件进行抗辐射加固，这种设备的制造涉及到精密仪器的加工，条件要求苛刻，并且生产成本高昂。

为解决上述问题，本文设计了一种相机防护装置，利用 γ 射线穿透能力强，而可见光无穿透性的特性，通过平面镜将二者分离，可达到理想的耐辐射效果，同时，结构简单，加工制造成本低。其结构组成如图 8a 所示，外防护壳是钨合金板通过专用螺钉固定在不锈钢内壳上，左侧为活动的盖体，便于 CCD 相机的取放，并留有气管和线缆接口。气管接口用于通气进行防水防护控制，气压根据测量平台位置传感器反馈实时控制，使其等于或者大于外

界水压以获得优异的密封防水性能。两片石英玻璃厚度 10 mm，能够承受部分辐照剂量。

(a) 相机防护装置结构示意图

(b) 光路原理

图 8 相机防护装置

测量装置工作时，如图 8b 所示，可见光和 γ 射线等射线(光路 a)通过石英玻璃，石英玻璃具有耐辐照特性，能够阻挡部分 γ 射线；可见光经光学平面镜的反射后，穿过第二片石英玻璃，进入 CCD 相机，由于 γ 射线具有极强的穿透能力，当到达光学平面镜，绝大部分 γ 射线穿过平面镜，极小部分经过反射，穿过石英玻璃时，进一步减弱，经过两次阻挡和一次反射镜的过程，到达 CCD 相机的 γ 射线等射线几乎为零；同时，端盖的圆筒根据设计尺寸可用于防止射线直射进入镜头(光路 b)，这样就可以防止 γ 射线等对测量相机的辐照危害。

3 池边检查摄影测量

3.1 摄影测量原理

非接触光学测量技术是机器视觉中的热点和难点。使用非接触光学测量技术可以确定任意物体的外形轮廓，并且获取对应点的三维坐标。非接触光学测量技术是基于视差原理并由多幅图像获取物体三维

几何信息的方法,它由双摄像机从不同角度同时获得被测物的两幅图像,并基于视差原理恢复出物体的三维几何信息,重建物体三维轮廓及位置。这种方法具有效率高,精度高,系统结构简单、成本低等优点,非常适合于非接触产品检测和质量控制。

如图9所示, P 点在左侧相机成像点坐标为 $P_l(x_l, y_l)$,在右侧相机成像点坐标为 $P_r(x_r, y_r)$,左侧相机像素中点 P_{cl} 坐标为 (x_{cl}, y_{cl}) ,右侧相机像素中点 P_{cr} 坐标为 (x_{cr}, y_{cr}) ,两相机距离为 T ,两相机焦距为 f 。以左侧相机焦点建立坐标系,利用三角关系, P 点的真实世界坐标可由下述公式计算得出

$$\begin{cases} x = \frac{T(x_l - x_{cl})}{x_l - x_r} \\ y = \frac{T(y_l - y_{cl})}{x_l - x_r} \\ z = \frac{Tf}{x_l - x_r} \end{cases} \quad (1)$$

图9 双目测量原理

多相机测量的基本原理与双目相机测量原理相同,通过在不同的位置和方向获取同一物体的多幅数字图像,经计算机图像匹配等处理及相关数学计算后得到待测点精确的三维坐标。如图10所示,4台相机可将 P 点处物体的三维尺寸在统一坐标系下精确测量,根据测量结果,可建立 P 点物体的数字模型。同时,多台相机测量与双目相机相比,可以得到更精确的三维坐标。

图10 多相机测量示意图

3.2 燃料组件摄影测量

燃料组件水下摄影测量根据测量方式主要分为组件长度及燃料棒与管座间隙测量、组件格架宽度测量和组件弯曲、扭曲测量。

(1) 组件长度及燃料棒与管座间隙测量。

如图11所示,将整个燃料组件根据格架分割成多个独立区域,采用球栅尺位移传感器结合CCD相机的方法进行组件长度测量,相机移动距离相当于式(1)中 T ,其观测点位置坐标可由式(1)求得。检测装置运动到起点时球栅尺记录位置,运动到组件中间区域时,记录位置且测量燃料组件的三维坐标,用于长度倾斜校正。移动视觉检测装置一个周期后,实现长度检测。

图11 组件长度检测示意图

管座间隙测量时,通过驱动视觉检测系统运动到目标位置,采集燃料棒和上下管座图像,如图12所示,通过提取燃料棒边缘和管座边缘像素坐标,结合前期相机标定参数计算间隙。

图12 燃料棒与上管座间隙

(2) 组件格架宽度测量。

格架宽度可通过LVDT传感器采用接触式测量方式测量,也可通过视觉测量方式测量。如图13所示为组件格架宽度检测的方法,利用照明光源增

图13 双目测量外形轮廓

强现场照明光强,通过左右相机拍摄到的组件格架图像,提取格架的边沿轮廓进行匹配,再利用双目视觉的三维坐标计算方法,恢复格架的宽度。图 14 所示为组件格架宽度的图像处理流程图。

图 14 数字图像处理流程图

(3) 组件弯曲、扭曲测量。

由于燃料棒局部变形情况比较复杂,导致组件整体变形情况也十分复杂,例如,仅就弯曲变形而言,组件整体的弯曲就有“S”型、香蕉型、葫芦型等多种情况,为尽可能真实完整的反应组件变形情况,将组件变形情况分解为:组件整体弯曲和组件整体扭曲两类。

组件弯曲、扭曲测量,将高分辨率面阵相机的视场范围调整到覆盖整个燃料组件,然后对检测区域的燃料组件进行连续拍摄,相机通过多次拍摄完成对整根燃料组件的测量,其中每个阴影区域为单次测量区域,如图 15 所示。

图 15 整体测量流程

弯曲量定义为燃料组件一侧边缘偏离直线的最大距离,如图 16 所示。

判定值 $S_{\max}$ 的计算公式为

$$S_{\max} = \frac{1}{2} \left[X_{A2} - \frac{(X_{A1} + X_{A3})}{2} + X_{B2} - \frac{(X_{B1} + X_{B3})}{2} \right] \quad (2)$$

图 16 弯曲测量

根据测量的特定点的空间坐标,系统在统一坐标系下建立燃料组件外形轮廓的数字模型,如图 17 所示,根据数字模型,可快速获知组件的扭曲情况。

图 17 组件外形轮廓

3.3 燃料组件摄影测量精度仿真试验验证

为检验水下摄影测量在燃料组件池边检查系统中的测量精度能否满足系统精度要求,进行精度验证试验。由于池边检测系统体量庞大,对燃料组件进行直接水下测量难度较大,选取测量项目中检测相对简易其精度要求高的燃料棒直径测量为例,搭建模拟测量装置,对精度进行评估。

测试装置如图 18a 所示,标准棒为 12 根标准直径(10.07 ± 0.02)mm 的铝棒模拟件,标准件发射光线依次经过不同介质:水、玻璃和空气进入 CCD 相机,通过误差补偿消除玻璃与水折射对测量结果的影响。

图 18 水下摄影测量模拟装置

通过测量软件,对燃料棒直径进行测量,测量结果如图 19 所示,测量结果最大值为 10.19 mm,最小值为 10.04 mm,测量精度在 ± 0.1 mm 以内,能够满足系统要求,从而验证了水下摄影测量精度的可靠性。

图 19 燃料棒直径模拟测量结果

4 结论

(1) 本检查系统结合接触式与非接触式测量方法,能够快速对组件的整体尺寸及变形进行测量,并能实现对燃料棒长度、直径、棒间间隙与氧化膜厚度的检测。与国外现有技术相比,具有操作简单,减少人工参与,效率高,精度高等显著优点。

(2) 本文针对关键检测元件 CCD 相机在辐射环境下寿命短的问题,设计了一种耐辐射相机防护装置,通过一次反射减少进入相机的辐射剂量,使测量系统能够使用普通工业相机,大大减少了使用耐辐射相机的成本,具有极大的经济意义。

(3) 根据双目及多相机水下摄影测量技术,本文设计了一种能够快速测量燃料组件长度、燃料棒与上下管座间隙及燃料组件的弯曲、扭曲的视觉测量系统,与国外池边检查视觉测量相比,操作流程大大简化,并能将测量结果在统一坐标系下转化为燃料组件的数字模型,极大提高了检测效率,并通过模拟试验,验证了水下摄影测量能够满足系统精度要求。

参考文献

- [1] 王建强,戴志敏,徐洪杰.核能综合利用研究现状与展望[J].中国科学院院刊,2019,34(4):460-468.
WANG Jianqiang, DAI Zhimin, XU Hongjie. Research status and prospect of comprehensive utilization of nuclear energy[J]. Proceedings of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 460-468.
- [2] 兰智彬,孙毓宝,郭旭林,等.大型核电站燃料组件包络轮廓尺寸全自动检查装置技术开发与应用[J].自动化与仪器仪表,2010(3):76-78.
LAN Zhibin, SUN Yubao, GUO Xulin, et al. Technology development and application of automatic inspection device for envelope contour size of fuel assemblies in large nuclear power plants [J]. Automation and Instrumentation, 2010(3): 76-78.
- [3] SHIN J C, KIM J I, KWON J T. Poolside examination techniques applied for development of an advanced PWR Fuel, PLUS7[C]// International Conference on Nuclear Engineering. 2010.
- [4] 任亮,李国云,江林志,等.压水堆燃料组件池边检查技术研究进展[J].科技导报,2015,33(18):91-95.
REN Liang, LI Guoyun, JIANG Linzhi, et al. Research progress on poolside inspection technology of pressurized water reactor fuel assemblies [J]. Science and Technology Review, 2015, 33(18): 91-95.

- [5] 刘赫. 核燃料组件变形尺寸测量系统设计[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- LIU He. Design of deformation dimension measurement system of nuclear fuel assembly [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [6] 先登飞. 核燃料组件变形检测系统样机研制[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- XIAN Dengfei. Prototype development of nuclear fuel assembly deformation detection system [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [7] 刘敬露. 核燃料组件变形的评价及其实现[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- LIU Jinglu. Evaluation and realization of nuclear fuel assembly deformation [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [8] 刘浩. 核燃料组件外形综合尺寸检测系统的开发[D]. 西安: 电子科技大学, 2010.
- LIU Hao. Development of nuclear fuel assembly appearance comprehensive size detection system [D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.
- [9] 高永明, 李声, 李丽丹. 燃料组件水下非接触变形测量方法[J]. 核动力工程, 2010, 31(4): 87-90.
- GAO Yongming, LI Sheng, LI Lidan. Measurement method of underwater noncontact deformation of fuel assemblies [J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(4): 87-90.
- [10] 屠乾磊, 王学影, 郑永军. 基于 LVDT 的在线测量系统设计[J]. 中国计量大学学报, 2018, 29(4): 373-377, 423.
- TU Ganlei, WANG Xueying, ZHENG Yongjun. Design of online measurement system based on LVDT [J]. Journal of China Metrology University, 2018, 29(4): 373-377, 423.
- [11] 熊婧, 林俊明, 李冬, 等. 压水堆核电站燃料棒氧化膜厚度涡流检测技术研究[J]. 科技视界, 2015(22): 12-13, 15.
- XIONG Jing, LIN Junming, LI Dong, et al. Research on eddy current detection technology of oxide film thickness of fuel rods in PWR [J]. Science and Technology Vision, 2015(22): 12-13, 15.
- [12] OTOMO S, SEKI T, KATAOKA K, et al. Poolside fuel inspection experience and development at NFI[J]. Smirt Eighteen, 2005, 14(3): 38-44.
- [13] 苏朝阳, 马万太, 黄磊, 等. 基于图像处理库的机器视觉检测系统的研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 193-196.
- SU Chaoyang, MA Wantai, HUANG Lei, et al. Research on machine vision detection system based on image processing library [J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2019, 48(1): 193-196.
- [14] 钦桂勤. 模拟失重环境星载天线型面水下摄影测量技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011.
- QIN Guiqin. Underwater photogrammetry technology research on spaceborne linear surface in simulated weightlessness environment [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2011.
- [15] 钱凌燕. 立体视觉三维重建相关技术研究 with 实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- QIAN Lingyan. Research and implementation of 3D reconstruction related technologies of stereoscopic vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
-
- 作者简介: 董凯捷, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机构学及机器人学。
- E-mail: dongkaijiedj@163.com
- 李端玲(通信作者), 女, 1974 出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构学及机器人学。
- E-mail: liduanling@163.com