

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.04.012

核燃料芯块几何尺寸及密度检测系统

高 潮¹, 张思超², 金 雷³, 蒋 聪⁴, 廖 宾⁵, 王 涛⁵

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 3. 中国电子科技集团 第 26 研究所, 重庆 401323;

4. 重庆市计量质量检测研究院, 重庆 401121; 5. 中核建中核燃料元件有限公司, 四川 宜宾 644000)

摘 要:针对核燃料芯块质量的特殊性和重要性, 研制了核燃料芯块几何尺寸及密度的测量系统。该系统通过光学非接触法对核燃料芯块的高度和直径进行二维同步高精度测量, 由于对直径检测的特殊要求, 采用了多点扫描方式。在完成几何尺寸测量的同时进行芯块重量测量, 进而实现了核燃料芯块几何尺寸及密度的高精度快速测量。该系统直径检测精度达到 $1\ \mu\text{m}$, 高度检测精度达到 $3\ \mu\text{m}$, 检测速度为 7 块/min, 并具有数据实时显示、超差报警、存储查询、报表生成、用户管理等功能。

关键词:核燃料芯块; 光学扫描; 几何尺寸; 几何密度

中图分类号: TL352.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)04-077-05

Geometrical scale and density measuring system for nuclear fuel pellets

GAO Chao¹, ZHANG Sichao², JIN Lei³, JIANG Cong⁴, LIAO Bin⁵, WANG Tao⁵

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. China Electronics Technology Group Corporation 26th Research Institute, Chongqing 401323, China;

4. Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 401121, China;

5. CNNC Jianzhong Nuclear Fuel Co., Ltd., Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: In view of the particularity and importance of pellets, a geometrical scale and density measuring system for nuclear fuel pellets is designed. The system realizes bi-dimensional, synchronous and high-precision measurement for pellets' height and diameter by using optical noncontact way, and uses multi-point scanning for diameter due to the particular require of diameter measurement. Measuring pellets' weight while finishing the measurement of geometrical scale, the system achieves high-precision and high-speed measurement for pellets' geometrical scale and density. It can measure the pellets with diameter over $1\ \mu\text{m}$ and height over $3\ \mu\text{m}$. Its measuring speed is 7 pellets/min and the function such as data displaying in real time, alarm, storage and inquiry, automatic report generation and user management are endowed.

Key words: nuclear fuel pellets; optical scanning; geometrical scale; geometrical density

收稿日期: 2013-11-06

基金项目: 中国核工业集团公司科研项目资助(JG2011034); 国家自然科学基金资助项目(61233007)

作者简介: 高潮(1959-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事工业测控技术及仪器研究, (Tel)023-65103152; (E-mail)gaoc@cqu.edu.cn。

张思超(1988-), 中科院沈阳自动化研究所研究实习员, 主要从事工业自动化研究, (E-mail)zhangsichao@sia.cn。

能源是人类用来维持生存活动的能量来源,也是国民经济增长的重要物质基础。随着社会经济的发展,人们对能源的需求也越来越大,随之也产生了一系列严重的后果——日益严重的气候问题、环境污染和能源危机。因此,作为新型清洁能源的核能便成为各国竞相发展的新能源。

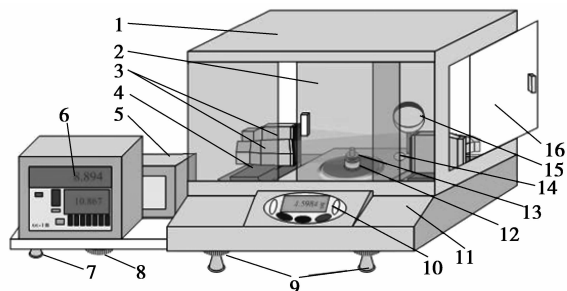
核能发电的原料是二氧化铀陶瓷芯块,一般呈小圆柱形,芯块装在两端密封的钎合金包壳管中,形成燃料棒。燃料棒的质量和燃烧效率以及燃烧的安全性与其的芯块密度参数密切相关,芯块密度也是核燃料产品质量控制的一个重要指标^[1-2]。在大批量生产过程中对核燃料芯块密度的精确测量具有重要的实用价值和现实意义^[3-5]。

目前,国内在核燃料芯块密度检测领域尚无先进的测量技术和仪器,工厂主要采用千分尺测量法或水测法测量芯块密度:千分尺测量法需接触芯块测量,易对芯块造成损坏,容易产生人眼读数误差;而水测法对测量环境要求较高,测量速度缓慢。为了解决上述问题,提高测量精度和检测速度,文中采用光学扫描方法对芯块高度和直径进行快速同步非接触式测量,采用电子天平同步测量芯块重量,经过数据处理获得芯块的几何密度。系统涉及精密机械、光学、信号处理、自动控制 and 计算机技术等,是集光、机、电、算技术一体的实现芯块尺寸和密度自动检测的先进测量系统。

1 系统构成及原理

1.1 系统构成

系统主要由 3 个部分组成:核燃料芯块密度仪、计算机和服务器。核燃料芯块密度仪用于核燃料芯块直径、高度及重量的采集,主要由直径和高度传感器、电子分析天平、显示控制器、电机驱动控制等组成(见图 1)。



注:1. 外罩;2. 前向推门;3. 直径高度测量传感器;4. 竖直升降平台;5. 电机驱动控制;6. 显示控制器;7. 支撑架;8. 固定螺母;9. 水平调节螺母;10. 电子分析天平;11. 测量平台;12. 底座;13. 待测芯块;14. 水平仪;15. 反射镜;16. 侧向推门

图 1 核燃料芯块密度仪结构示意图

计算机用于测量平台的控制,数据显示、超差报警、存储查询、报表生成等功能的实现。服务器用于测量数据的存储与管理。

1.2 测量原理

核燃料芯块外形如图 2 所示,系统需要测量的几何尺寸是芯块的直径和高度,质量采用电子分析天平来进行测量,利用密度公式计算出芯块的几何密度为

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{\pi HD^2}{4} - V_0}, \quad (1)$$

式中: M 为质量; H 为高度; D 为直径; V_0 为空腔体积。空腔体积采用其他测量系统进行测量,系统中空腔体积 V_0 为常数。

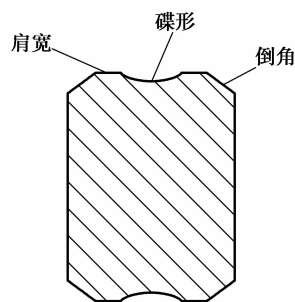
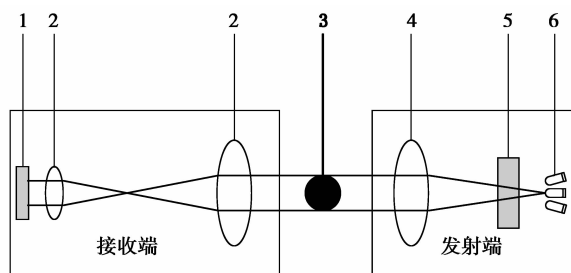


图 2 核燃料芯块外形

芯块高度和直径测量原理如图 3 所示。LED 发出的辐射光经过散射器件和准直仪镜头变成一定宽度均匀的平行光,然后投射到待测芯块上,由于芯块不透光,自身遮挡的部分呈现阴影。没有被遮挡的那部分平行光,进入接收端的远心光学系统并成像在传感器上,通过检测芯块图像的边缘来测量待测参数。由于亮区和暗区之间的界限不是很清晰,因此在输出参数之前必须进行边缘检测,系统采用 DE(数字边缘检测)处理器对边缘进行检测。边缘检测完成之后,通过 CPU 进行数据处理,再将数据



注:1. HL-CCD(高速线性 CCD);2. 远心光学系统;3. 待测芯块;4. 准直仪;5. 扩散器;6. 高亮度 LED

图 3 芯块高度直径测量原理

通过接口传输给计算机^[6-9]。

核燃料芯块质量是影响核反应堆安全的关键,为排除芯块锥度影响,对芯块直径采用扫描式测量。将步进电机安装于直径测量传感器接收端的升降平台内,从而驱动升降台完成直径的扫描式测量。在保证精度的前提下,可以满足 7、5、3 mm 3 种扫描距离选择(每种扫描距离至少可扫描 20 个点,可选择最大值、最小值、平均值)。

2 系统软件

系统软件采用 Visual C++ 编程^[10],主要由测量、查询、报表中心、用户管理、权限设置和系统设置组成(见图 4)。

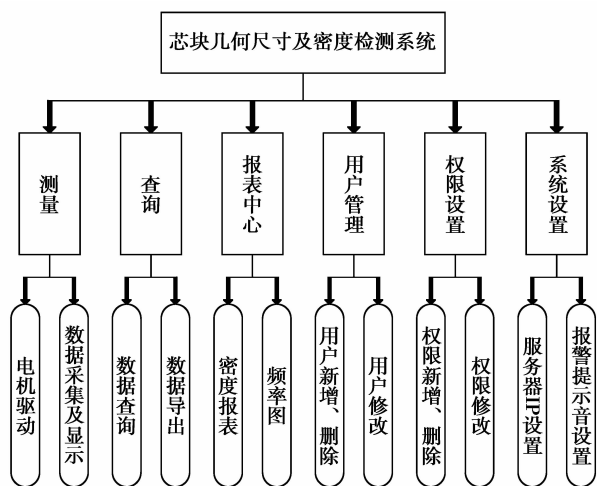


图 4 系统软件结构图

2.1 测量模块

测量模块包括电机驱动控制、数据采集^[11]、数据显示及存储^[12]、高度和直径建标(利用标准芯块建立系统测量基准)、阈值设置及超差报警等功能。

测量流程如图 5 所示。程序首先对电机、接口等进行初始化,然后对测量参数及范围进行初始化,为防止扫描过程中操作人员误触空格键对测量过程造成影响,在扫描过程中设置了键盘钩子屏蔽了空格键。测量结束后,测量数据通过接口读入计算机显示。根据预先设置的阈值范围,程序将自动检查数据是否超差并做出相应处理。该模块还实现了网络状态实时监控和测量数据存储管理功能。

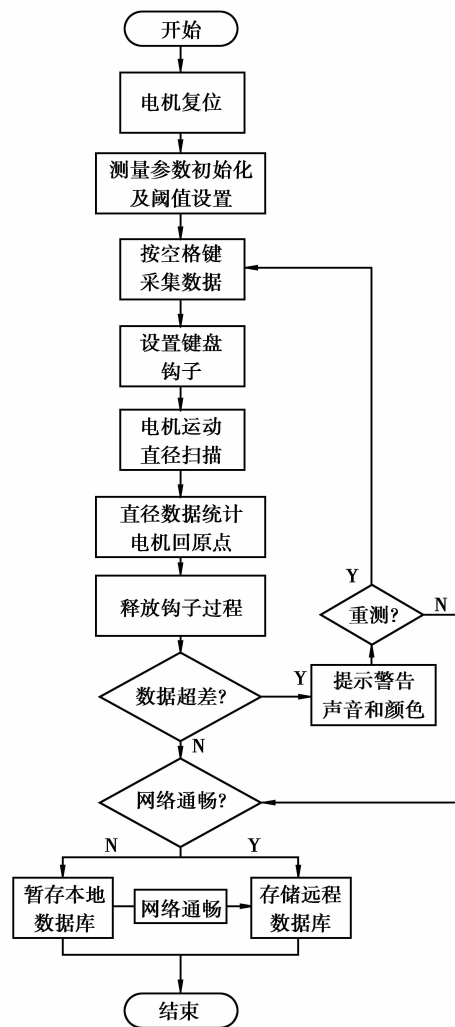


图 5 测量流程图

2.2 其他功能模块

测量数据的管理是工程测量中的重要环节。查询模块主要用于测量数据的查询及导出;报表中心模块主要根据需求定制生成报表并预览及打印,其中包括数据报表、频率图报表及波动图报表;用户管理模块主要用于操作用户的新增、修改及删除;权限设置模块主要用于操作用户权限的新增、修改及删除;系统设置模块主要用于服务器 IP、名称的设置及报警提示音设置。

3 测量系统误差分析

芯块密度主要依据直径、高度、质量 3 个测量数据进行计算得到,测量误差主要包括以下几个方面^[13-15]。

3.1 标准块建标误差

测量前,需对系统进行建标,建标采用的标准芯块有一定的加工精度,通过在同一点做旋转实验,高度和直径值有一定的变化,转完 1 周以后 2 个测量值又回到原值。根据计量监测局检定报告数据,直径误差 $\Delta_{D1} = \pm 1 \mu\text{m}$,高度误差 $\Delta_{H1} = \pm 2 \mu\text{m}$ 。

3.2 传感器误差

传感器采用高亮度氮化镓绿色 LED 作为光源,提供了稳定的光源照明,而双远心光学系统保证了光线的准直性,通过利用标准块对系统进行建标以及软、硬件等校正环节,传感器误差可控制为 $\Delta_{D2} = \Delta_{H2} = \pm 1 \mu\text{m}$ 。

3.3 底座平面平行度误差

当被测芯块所处的底座倾斜时,会造成测量光束与芯块轴线不平行,从而产生测量误差。如图 6 所示, α 为底座倾斜角, d 为芯块移动的最大距离。芯块采用标定测量,因此平行度对直径测量几乎没有影响,即 $\Delta_{D3} = 0$;底座倾斜角 α 非常小,系统可以控制为 $2'$,高度测量误差 $\Delta_{H3} = \pm 1 \mu\text{m}$ 。

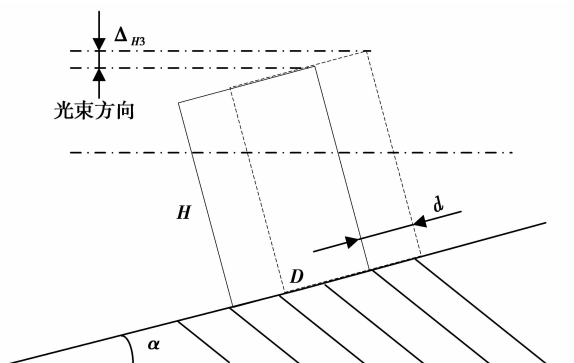


图 6 底座平面平行度误差的影响

3.4 基准位置变化误差

高度是以底座平面为基准进行测量的,而底座是直接放置在天平上的。系统是在将标准块放置在底座上之后才建标定基准,由于天平测量质量采用的是杠杆原理,其横梁的硬度足够大,当放入其他芯块进行测量时,其基准位置的变化很小,可以忽略不计。此项误差对直径和高度没有任何影响,即 $\Delta_{D4} = \Delta_{H4} = 0$ 。

上述各个误差之间相互对立,综合上述 4 项误差可以得到:

直径误差:

$$\Delta_D = \pm \sqrt{\Delta_{D1}^2 + \Delta_{D2}^2 + \Delta_{D3}^2 + \Delta_{D4}^2} = \pm 1.41 \mu\text{m}. \quad (2)$$

高度误差:

$$\Delta_H = \pm \sqrt{\Delta_{H1}^2 + \Delta_{H2}^2 + \Delta_{H3}^2 + \Delta_{H4}^2} = \pm 2.45 \mu\text{m}. \quad (3)$$

4 系统测试

4.1 精度测试

现对 1 个标准块(计量监测局检定的直径和高度值分别为:8.430 0 mm 和 10.920 0 mm,不确定度为 $\pm 1 \mu\text{m}$)重复测量 80 次,对芯块每测量 4 次后重新放置,测量 40 次后把芯块倒置再测,测量结果见表 1。

由表 1 可以得出,系统重复性好,精度高。直径标准差 $0.3 \mu\text{m}$,极限误差 $0.9 \mu\text{m}$,高度标准差 $0.8 \mu\text{m}$,极限误差 $2.4 \mu\text{m}$,与误差理论分析结果相吻合。

表 1 标准块测量数据的平均值和标准差

名称	直径/ mm	高度/ mm	几何密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
平均值	8.430 1	10.920 4	7.950 7
标准差	0.000 3	0.000 8	0.001 0
极限误差	0.000 9	0.002 4	0.003 0

4.2 速度测试

经测试,系统对核燃料芯块的检测速度分别为 7 块/min(7 mm 扫描范围),9 块/min(5 mm 扫描范围),12 块/min(3 mm 扫描范围)。

目前,该系统已正式投入使用。运行期间,系统各项指标完全符合“直径检测误差 $\leq 2 \mu\text{m}$,高度检测误差 $\leq 5 \mu\text{m}$,检测速度 ≥ 5 块/min”的设计要求。

5 结束语

核燃料芯块几何尺寸及密度检测系统利用光学传感技术、自动控制技术和计算机技术,对核燃料芯块几何密度实现了快速在线高精度测量。检测速度达到了 7 块/min,直径检测精度达到 $1 \mu\text{m}$,高度检测精度达到 $3 \mu\text{m}$;系统软件界面美观,操作简便,具有数据实时显示、超差报警、存储查询、报表生成、用户管理等功能。整个系统实现了核燃料芯块几何密度的高精度快速检测,极大地提高了芯块检测的自动化水平。

参考文献:

- [1] Newman C, Hansen G, Gaston D. Three dimensional coupled simulation of thermomechanics, heat, and oxygen diffusion in UO_2 nuclear fuel rods [J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 392(1): 6-15.
- [2] Ding S R, Huo Y Z, Yan X Q. Modeling of the heat transfer performance of plate-type dispersion nuclear fuel elements [J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 392(3): 498-504.
- [3] Yan Q, Wang A J, Wang G S, et al. Nuclear power development in China and uranium demand forecast: Based on analysis of global current situation [J]. Progress in Nuclear Energy, 2011, 53(6): 742-747.
- [4] Admantiades A, Kessides I. Nuclear power for sustainable development: Current status and future prospects [J]. Energy Policy, 2009, 37(12): 5149-5166.
- [5] 詹文龙. 安全高效是核能可持续发展的保障[J]. 能源与节能, 2011(3): 1-2.
ZHAN Wenlong. Safe and efficiency is the security for nuclear energy to carry out sustainable development[J]. Energy and Energy Conservation, 2011(3): 1-2.
- [6] 李慧鹏, 王军, 张军, 等. 一种新型非接触式线径测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(Sup1): 209-211.
LI Huipeng, WANG Jun, ZHANG Jun, et al. A novel noncontact measurement system for the diameter of wires [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(Sup1): 209-211.
- [7] 李佳列, 丁国清, 颜国正, 等. 采用 CCD 的非接触测量中提高精度的一种方法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 281-284.
LI Jialie, DING Guoqing, YAN Guozheng, et al. Method for improving precision in noncontact measurement by linear CCD [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3): 281-284.
- [8] 郭永彩, 王毅, 高潮, 等. 基于面阵 CCD 的密度测量系统研制[J]. 激光杂志, 2008, 29(5): 77-78.
GUO Yongcai, WANG Yi, GAO Chao, et al. Development of density measurement system based on panel CCD [J]. Laser Journal, 2008, 29(5): 77-78.
- [9] 马登极, 朱善安, 王长军. 线阵 CCD 在高精度测径系统中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(2): 175-176.
MA Dengji, ZHU Shanan, WANG Changjun. Application of linear CCD in high precision diameter measuring system [J]. Computer Measurement and Control, 2006, 14(2): 175-176.
- [10] 孙鑫, 余安萍. VC++ 深入详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [11] 李长林, 高洁. Visual C++ 串口通信技术与典型实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [12] 侯其锋, 李晓华, 李莎. Visual C++ 数据库通用模块开发与系统移植[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [13] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [14] 郭永彩, 李明愷, 高潮, 等. 核燃料芯块垂直度自动检测系统[J]. 核动力工程, 2010, 31(5): 39-41.
GUO Yongcai, LI Mingxing, GAO Chao, et al. Perpendicularity automatic detection system for nuclear fuel pellets [J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(5): 39-41.
- [15] 周森, 郭永彩, 高潮. 用于大尺寸工件的动态长度测量系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2017-2023.
ZHOU Sen, GUO Yongcai, GAO Chao. Dynamic length measuring system for large scale workpieces [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2017-2023.

(编辑 陈移峰)