

文章编号 : 0258-0926(2015)06-0097-04 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.06.0097

反应堆吊篮曲面水下精密测量技术

李 涛¹, 陈 梁², 侯立巍², 戚宏昶², 王 聪²

1. 中核集团三门核电有限公司, 浙江三门, 317112; 2. 中核集团中核核电运行管理有限公司, 浙江海盐, 314300

摘要: 核反应堆吊篮(下部堆内构件)筒体上安装的部件在产生缺陷需进行更换时,须对其筒体曲面进行精确测量。通过对某核电厂吊篮筒体外侧辐照监督管安装曲面进行水下精密测量技术开发及时实施过程进行分析,结果证明,采用高精度数字探规、光栅尺位移传感器和定向运动滚珠导轨的组合测量装置,可实现高辐照条件下进行空间曲面水下精密测量。

关键词: 空间曲面; 水下测量; 数字探规; 滚珠导轨

中图分类号: TL375 **文献标志码:** A

Precision Measurement Underwater Technology for Curved Surface of Reactor Lower Internals

Li Tao¹, Chen Liang², Hou Liwei², Qi Hongchang², Wang Cong²

1. CNNC SANMEN Nuclear Power Co. LTD., Sanmen, Zhejiang, 317112, China;
2. CNNC Nuclear Power Operations Management Co. LTD., Haiyan, Zhejiang, 314300, China

Abstract: Once defects occurs on the components installed on the nuclear reactor basket (lower internals), which requires repair, the curved surface for installation shall be accurately measured firstly. By analysis of the precise measurement technology and implementation process for the installation curved surface on the barrel for irradiation surveillance capsule support structures, it proved that the solution can achieve the purpose for space curved surface precise measurement underwater at high radiation conditions by the combined measuring device with high precision digital gauge, grating sensor and directional movement of the ball guide rail.

Key words: Space curved surface, Underwater measurement, Digital gauge, Ball guide

0 引 言

核反应堆吊篮对核燃料组件起着重要的承载和定位作用。吊篮的圆形薄壁筒体外壁上安装有辐照监督管支架,用以承载辐照监督管,以通过监督试样的辐照降质数据来监测反应堆压力容器的寿期^[1]。

某核电厂在某次换料大修期间,发现辐照监督管出现了严重磨损,经分析,是由于在长期运行工况下流致振动导致辐照监督管振动和摩擦所致^[2]。为彻底消除隐患,该辐照监督管支架需进行改造和更换,为确保新支架的安装质量,吊篮筒体上的安装曲面需首先进行精确测量,精度要求达到 ± 0.02 mm。

1 水下测量技术选型

1.1 工况分析

吊篮部件长期处于高辐照工况下,具有极强的放射性,其筒体外活性区接触剂量率可高达 34 Sv/h 左右,进行测量时,这种强放射性会对电子类设备的工作产生明显的干扰,进而影响设备的可靠性和测量的准确性。

由于吊篮筒体曲面在测量时须始终保持将吊篮置于水面之下,吊篮筒体的待测区域共有 12 处,位于水面以下 2~8 m,换料大厅的工作平台与待测位置最远相距约 15 m,工作人员需通过操作专用装置进行远程测量,同时由于换料水池中主冷却剂水流扰动的影响,为了保证测量精度,

测量装置需要具有很高的稳定性。

1.2 测量方式分析

适于水下测量的方法除了接触式机械测量外,还主要包括非接触式声纳测量、激光测量、电磁测量等。

声纳测量技术在大范围、远距离的水下测量中应用广泛,但其测量精度较低,不能满足以机械加工为目的的测量。激光测量具有单色性好、方向性强、测量精度高等优点,但由于堆芯中持续产生的水泡及含硼酸水扰动等影响,光束在水中传播的折射率难以保持稳定,进而会影响测量精度。电磁测量利用电场、磁场、电磁场进行计算测量,主要包括感应式、光电式、差动变压器式、电涡流式、电容式、干簧管、霍尔式等多种方式,适于近距离、高精度的测量,但其测距范围相对较小,并且电磁类设备的抗辐照干扰能力较差,通常要求小于 6 Sv/h,而实际工作区域的接触剂量率最高可达约 34 Sv/h,因此在电磁感应的有效距离内,电磁类设备会受到强放射性的严重干扰,其工作可靠性和测量精度无法保证^[3]。

接触式机械测量方法应用普遍,其测量精度很高,受水下操作影响小,且几乎不受高辐照环境的影响,但由于其测量触头需与测量面直接接触,对系统刚度及测距移动过程中的直线度要求较高,远距离水下测量时其操作控制较为复杂。

1.3 技术方案选择

由于本项测量具有高辐照、远距离水下操作、测量精度要求高等特殊性,且需精确测量的范围较大,通用的任一单一测量方式均难以满足使用要求。综合考虑各类测量方式的优点和应用条件,可通过将机械式和电磁式两种方式进行组合,从而达到吊篮曲面水下精密测量的目的。

利用光栅位移传感器进行测量的数字探规,其光电探测器在检测莫尔条纹的宽度变化并转换成电信号输出给控制装置的位移检测过程比较稳定,射线对其干扰相对较小;数字探规的感应元件不与待测曲面直接接触,而是安装于测量杆后端,与待测曲面保持约 60 mm 距离,由于剂量率与相距放射源的距离的平方成反比,且核电厂一回路水本身具有良好的屏蔽作用,以及测量箱体的保护,现场实测数据表明,数字探规测量元件位置的剂量率可降至 1.3 Sv/h,在无需延长测杆长度的情况下即可满足测量的要求。但是,数字探规的测量杆行程只有 12 mm,无法满足吊篮上

几个待测区域需进行精确测量的范围(135 mm),可利用机械式测量装置的稳定性整体驱动测量装置并对其位移量进行精确测控,将可在保证测量精度的情况下有效增大测量范围,组合实现高辐照条件下的水下精密测量。

2 组合式水下测量技术方案研究

2.1 总体技术方案

水下测量总体方案如图 1 所示。定位支架为一大型桁架结构,精确安装定位于吊篮法兰面上。定位支架侧面安装有 2 条导轨,可支撑和驱动升降小车垂直运动,定位支架具有很高的刚度,并装有精密的控制系统,水下测量装置即安装在升降小车上,通过控制升降小车可对升降小车水下垂直定位进行准确控制。

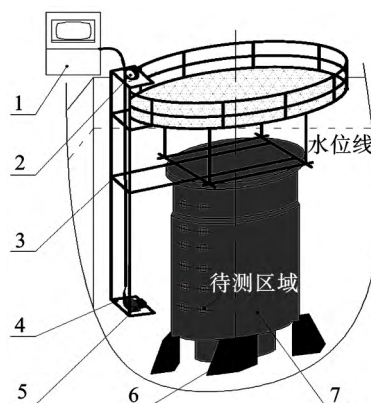


图 1 水下测量总体方案图

Fig. 1 Overall Scheme for Underwater Measurement

1—数据中心;2—数据传输系统(带有弹簧卷筒);3—定位支架;4—升降小车;5—水下测量装置;6—吊篮存放支架;7—吊篮

测量系统主要由数据中心、数据传输系统及行走驱动机构和位移检测装置组成。通过微型电机、丝杠和导轨的配合带动箱体内部的测量及驱动机构平稳运行,光栅尺及各数字探规的测量数据通过数据传输系统即时送到数据中心,经处理后转化为数据表、平面工程图及直观的三维图,并分析出与需加工得到的理想尺寸的偏差量。行走驱动机构和位移检测装置集成安装在整体密封的测量箱体内,连接部位采用氟橡胶密封,可避免含硼酸水的侵蚀及核素沾污,并可提高对其内部测控元件的屏蔽保护效果,使对辐照敏感的高精度电子元件处于剂量率可接受的安全范围。

2.2 水下测量装置

2.2.1 工作原理 测量前,将根据吊篮曲面理

论尺寸精确加工的试块准确定位于测量装置前方，通过重复定位和测试对升降小车和水下测量装置的基准面坐标进行标定，并将此基准尺寸存储在可编程逻辑控制器（PLC）工控机中。测量前将试块拆除，升降小车将水下测量装置送到测量高度并垂直定位后，水下测量装置根据控制指令驱动微型电机，通过滚珠丝杠伸缩驱动测量箱体水平运动并到达预设的测量位置。

测量前，根据数据中心发出的指令，PLC 工控程序通过电控箱内的气阀气控装置来控制气缸伸缩，驱动安装在气缸内的 7 组探规对吊篮筒体外侧曲面进行测量。同时，位移探规的伸缩尺寸被实时记录并通过数据传输系统输入 PLC。数据传输由信号电缆线、可编程逻辑控制器（PC）接口、RS232/485（通讯协议）转换接口、PC/PPI（通讯方式）通讯电缆来完成；数据分析、处理、显示、存储、打印由工控机完成。工作原理如图 2 所示。经工控机进行处理后计算出探规位移量，最后通过与基准面尺寸进行对比计算，可算出基准面与圆弧面的相对尺寸，并在数字终端的显示屏上直观地显示出所测曲面的实际形貌。

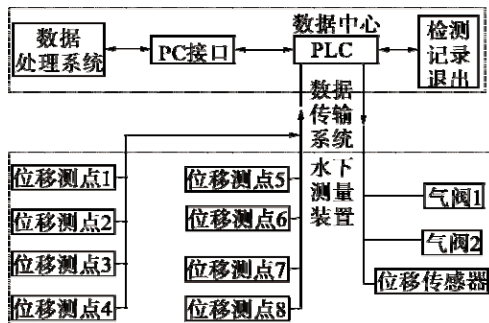


图 2 水下测量装置控制原理示意图

Fig. 2 Control Diagram of Underwater Measurement Device

2.2.2 行走驱动机构 如图 3 所示，行走驱动机构主要由测量底座、测量箱体和滚珠丝杠组成，用于驱动测量箱体整体水平移动，以实现测量范围的较大补偿，其最大行程为 150 mm。测量底座安装于升降小车上，用定位销定位，并用螺钉固定。测量底座上安装有两道滚珠导轨，用以支撑和导向测量箱体，同时，一根滚珠丝杠副（由丝杠及螺母配套组成的传动机构）贯穿测量箱体，两端固定于测量底座前后两端的挡板上。测量箱体所有开孔部位均采用氟橡胶密封材料进行可靠

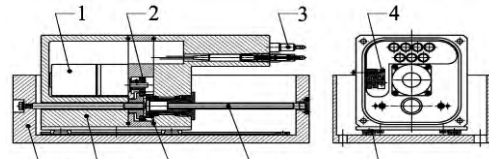


图 3 水下测量装置结构示意图

Fig. 3 Structure Diagram of Underwater Measurement Device

1—电机；2—小齿轮；3—数字探规组件；4—光栅尺测量组件；5—滚珠导轨；6—滚珠丝杠；7—大齿轮；8—测量箱体；9—测量底座

密封，实现内部整体隔离。测量箱体内部安装有直流微型电机，电机轴上固定安装有小齿轮，大齿轮安装在滚珠丝杠上，大齿轮与丝杠之间通过滚珠进行传动；大齿轮轮毂外部装有支撑环，与测量箱体轴向固定，从而在电机驱动时，通过齿轮副（由相互啮合的齿轮组成的传动机构）驱动测量箱体整体水平移动。

滚珠丝杠副通过精密加工而成，并通过对研削、组装、检查等各工序进行严格控制，可使其整体精度得到可靠保证，且具有较高的刚性和稳定性。由于滚珠丝杠副的丝杠轴与丝杠螺母之间有很多滚珠在做滚动运动，因此摩擦损失小、运动效率高，运动所需的驱动力小，特别是启动力矩相对极小，不会出现滑动运动那样的爬行现象，这对实现精确的微进给（进给量可实现微量控制）、保证测量精度是比较有利的。测量箱体可耐压 1 MPa 以上，可保证其内部的微型电机、滚珠丝杠及位移检测装置不会因含硼酸水渗入而影响工作可靠性。

2.2.3 位移测量机构 位移测量机构由一组光栅尺测量组件和 7 组数字式探规组成，均安装于测量箱体内部。光栅尺测量组件安装在测量箱体侧面，与测量箱体的滚珠丝杠轴线保持平行，主要由高精度光栅尺位移传感器及定向运动滚珠导轨组成，用于对测量箱体的整体位移量进行精确测量。其内置的高精度光栅位移传感器的测量范围为 150 mm，最高分辨率为 0.001 mm，精度可达到 ± 0.005 mm。在测量箱体水平运动时，可实时对测量箱体的位移量进行精确测量，并将测量数据传输到数据中心。

7 组数字式探规组件上下两排交叉分布，上排 4 组、下排 3 组，可使 7 组探规覆盖到整个测量曲面，有效提高测量整体精度。数字探规的测

量杆由气阀控制气缸水平伸缩,各自分别独立进行数据测量,相互之间无动作干涉,保证了各测点数据准确。高精度数字探规结构紧凑、安装方便快捷,具有较高的机械和热稳定性,测量有效行程为 12 mm、全行程测量精度为 ± 0.001 mm、分辨率为 0.0005 mm。其球形探头可承受较大的径向力,且摩擦力很小,水平方向驱动力仅为 0.5~1.7 N;在测量时,球形探头对测量区域接触点的水平压力可控制在相对很小的范围内,由此可保证各测点与所测曲面均匀接触。同时,水下视频装置可对数字探规的动作进行即时观察,方便动作监控。

进行测量时,控制气阀压力推动数字探规的活塞以驱动测量杆动作,在接触到被测表面时停止,安装于探规内的微型光栅尺通过实时监测莫尔条纹宽度变化并将其转换为电信号输出。7 组数字探规的测量数据及测量箱体的 1 组测量数据经数据中心测控软件进行处理,可计算出实际圆弧半径和测量标准误差,并在计算机屏幕上直观显示和记录。

数字探规自身的密封等级为 IP64,但整体安装于密封的测量箱体内,测量杆头部为不锈钢波纹管结构,密封可靠,与测量箱体的安装孔中通过加装氟橡胶密封来提高密封性,同时,其内部充入的 0.2 MPa 的气压也可保证整个测量装置在水下万一发生密封意外故障时,仍能可靠安全工作。

2.3 数据传输系统

所有信号电缆装在特制的防水、防腐的集束管中,两端分别与水下的测量装置及数据中心相连接,集束管中间段卷绕在密封式弹簧电缆卷筒机构上(图 1)。卷筒固定安装在定位支架上部的工作平台上,利用弹簧机构进行自动收卷,并与升降小车的升降运动保持同步收放,最大可收放长度为 8 m。气控装置安装在密封式弹簧电缆卷筒内,并接入 0.2 MPa 的压缩空气或氮气,一旦水下测量装置在工作中突发故障,其内部较高的气压可防止含硼酸水渗入而影响到探规和滚珠导轨机构的工作可靠性。

2.4 数据中心

数控终端部分包含了远程控制、数据处理、成像显示等功能,主要由工控机和 PLC 控制器组成。工控软件采用“组态王”通用的工控软件,

绘制友好界面,所测数据经过计算和处理,得出 12 块测量区域的尺寸及各测量区域的相对位置偏差,并与预先输入的理想尺寸进行对比,得出偏差量,测控界面可即时显示这些数据,并以三维图、平面工程图及源数据文件形式直观显示出来,供技术人员分析使用。

为避免工作环境的空气湿度和灰尘污染对电控系统造成危害,将整个电控系统安装在一个密闭的电气箱内,其防护等级为 IP55,满足反应堆厂房换料大厅的现场工况需求。

3 水下测量装置的应用

测量工作开始之前应设计加工模拟试验装置,可模拟吊篮筒体表面的待测曲面精加工一套圆弧面试件作为标准测量基准,通过反复测量练习来验证测量工艺和各项数据的准确性,并最终将完成验证的数据存入测控软件中作为标准参考值,同时在反复练习中也可提高工作人员的操作水平,确保测量工作进行顺利。

实际测量时可重复进行验证,并对测量结果进行选择平均处理,以降低随机因素的影响。同时,现场执行中还应需充分考虑和采取防异物措施,除了工作人员需严格按照程序和行为规范执行外,升降小车、水下测量装置等的所有紧固和连接处都需采取防松措施,吊篮上方需利用专用假盖等措施来防止异物坠入。

4 结论

通过对高辐照条件下的水下精密测量技术和工艺的研究和应用,结果表明:采用高精度数字探规、光栅尺位移传感器和定向运动滚珠导轨的组合测量装置,利用机械式测量装置的稳定性实现对测距补偿以及与筒体曲面均匀接触,利用电磁测量装置的高精度特性可实现在高辐照条件下进行空间曲面水下精密测量的需要;同时,此项技术方案可对类似高辐照条件下精密测量技术的开发和应用提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 马明泽. CP300 核电厂一回路系统/设备及运行[M]. 北京:中国原子能出版传媒有限公司. 2011.
- [2] 陈梁,李涛. 核反应堆核级设备检修工[M]. 北京:中国原子能出版社. 2014.
- [3] 董永贵. 传感技术与系统[M]. 北京:清华大学出版社. 2006.

(责任编辑:刘胜吾)