

文章编号: 0258-0926(2015)02-0127-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.02.0127

# 核电厂乏燃料池一体化测量装置设计与验证

孙益晖<sup>1</sup>, 谢晶晶<sup>2</sup>, 吴雪琼<sup>2</sup>, 文继<sup>1</sup>, 孙琳<sup>1</sup>

1. 成都中核鑫星应用技术研究所, 成都, 610041; 2. 上海核工程研究设计院, 上海, 200233

**摘要:** 根据乏燃料池环境条件, 乏燃料池液位、温度测量装置运行需求, 针对丧失外电源情况下测量装置不能使用的安全风险, 进行核电厂乏燃料池液位、温度一体化测量装置设计, 并对工程样机进行功能、性能、环境试验验证。验证结果表明, 装置测量精度高、实时, 具备丧失外电源下的数据传输功能, 满足乏燃料池的监测要求。

**关键词:** 一体化测量装置; 有线、无线测量通道; 无外电源工况运行

**中图分类号:** TL353 **文献标志码:** A

## Design and Verification of Integrated Measurement Instrument for NPP Spent Fuel Pool

Sun Yihui<sup>1</sup>, Xie Jingjing<sup>2</sup>, Wu Xueqiong<sup>2</sup>, Wen Ji<sup>1</sup>, Sun Lin<sup>1</sup>

1. Chengdu Zhonghe Xinxing Application Technology Institute, Chengdu, 610041, China;  
2. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai, 200233, China

**Abstract:** The design of an innovative and integrated instrument device for level and temperature measurement in the spent fuel pool of nuclear power plants has been proposed based on the environment and functional requirement of spent fuel pool. The validation of the prototype device has been implemented and it is demonstrated that the accuracy and response meet the specifications for the spent fuel pool monitoring, with enhanced capability to monitor the level and temperature even under the station blackout accident.

**Key words:** Integrated measurement, Wire and wireless channel, Normer working under loss all outside power

## 0 引言

乏燃料池的水位和温度监测装置类型品种很多, 但现有的这些仪表基本都只能在正常工况下运行, 在如福岛核事故那种超设计基准的严重事故工况下, 没有任何一种仪表可以正常运行。

针对异常工况下乏燃料池的水位和温度监测装置存在的外电源丧失风险, 从提高测量探头反应速度、测量位置精度, 对液位、温度参数同步测量角度出发, 开展乏燃料池液位温度一体化测量装置设计。

## 1 测量装置技术条件

根据上海核工程研究设计院相关的技术要求, 设计依据的技术条件如下:

### 1.1 环境条件

**传感器:** 被测介质: 浓度为  $2200 \times 10^{-6}$  含硼水; 温度: 5~150 ; 压力: 0.1~0.3 MPa; 辐照剂量率: 乏燃料组件顶部为 2.3 kGy/h; 抗震类别: 1 级。

**信号变送器:** 温度: 0~50 ; 压力: 36~106 kPa; 湿度: 70%; 盐份条件: 含盐空气; 辐照剂量率: 正常情况为 0.0025 mSv/h, 事故后

收稿日期: 2014-07-29; 修回日期: 2014-11-12

作者简介: 孙益晖 (1970—), 男, 工程师, 现主要从事核电厂过程仪表研发工作

为 600 kGy/h。

## 1.2 运行条件

运行条件包括：正常工作状态、乏燃料开始裸露状态、设计基准地震（OBE）工况。

## 1.3 安装条件

信号变送器的安装支架固定在池壁顶部，变送器在支架上固定。传感器的安装支架、导向筒与乏燃料池内侧壁的预埋件焊接固定，传感器从支架和导向筒插入池中，要求能承受安全停堆地震（SSE）负荷，抗震性好，装拆、调校方便。

## 2 测量装置设计

### 2.1 设计目标

2.1.1 功能设计 正常工作状态下的乏燃料池液位和温度参数监测，保证乏燃料池冷却和处理系统（PRT）运行的功能；有线和无线双通道数据传输功能；丧失一切外电源时数据传输和读取功能；传感器的原位在线自校验功能。

2.1.2 性能设计 液位测量精度为  $\pm 5$  mm，反应速度 50 ms；温度测量精度为  $\pm 1.5$ ，反应速度 5 s；寿命设计为 10 a。

### 2.2 系统设计

#### 2.2.1 测量原理设计

2.2.1.1 液位测量原理 乏燃料池水为去离子水，电阻率为  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ，池上空间的空气或水蒸气的电阻率为  $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 。利用电接点在水中可以使电路导通的原理，设计多点不连续测量水位传感器。将一系列垂直布置的电接点插入池中，当电接点位于水中时，线路设计为导通，当电接点位于空气或水蒸气中时，线路设计为不导通。根据电接点的导通状态便可精确测量出真实水位。

2.2.1.2 温度测量原理 测量元件为热电阻或热电偶，与液位电接点复合为一体探头，可同时测得同点的液位和温度。

2.2.2 装置组成设计 测量装置由传感器和信号变送器组成（图 1）。传感器将测量信号输出到信号变送器，被转换成 4~20 mA 模拟信号及关键液位的报警开关信号输出到中央控制室。在丧失外电源时可通过变送器的专用接口传输测量信号，供远端专用仪器读取。

2.2.3 传感器设计 将液位、温度参数测量微型探头纵向按测点次序，一体装入保护套管中，传感器由在内部骨架上纵向布置的一系列液位-温

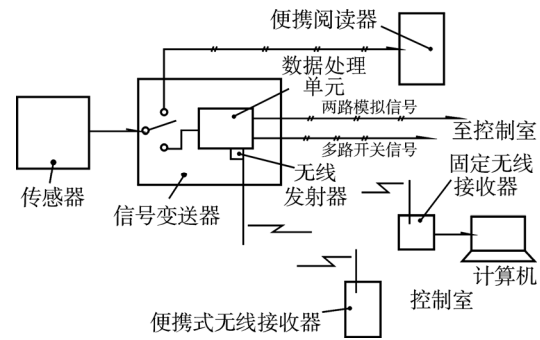


图 1 测量装置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Measurement Device

度敏感元件装入有汽水分离管的保护套管组成。这种结构不会产生凝水和挂水导致的虚假水位，信号线由顶端引出，通过插接件、信号电缆输出信号。传感器从乏燃料池顶部插入，接口处为法兰连接。

测点布置位置误差控制在设计范围内；测量装置的数据传输速度控制在设计范围内；传感器具有无须拆卸移位、控制水位与测量电极作相对运动的结构设计，能完成原位在线校验。

2.2.4 信号变送器设计 信号变送原理图如图 2 所示，主要功能如下：

(1) 接收传感器的液位、液温信号，将其分为 2 个支路，第 1 支路是正常测量回路，信号经过处理，变为模拟信号和开关信号，然后经信号电缆传输到控制室；第 2 支回路是丧失外电源的非常测量回路，把从传感器来的测量信号，经另一路信号电缆传输到便携式阅读器，在阅读器上进行测量参数的读取。两个支路自动切换，丧失电源瞬间，信号自动由正常测量回路切换到非常测量回路，恢复电源的瞬间信号又自动从非常测量回路切换到正常测量回路。

(2) 将正常测量回路的数据经无线发射器进行发射，固定设置在控制室的无线接收器将信号

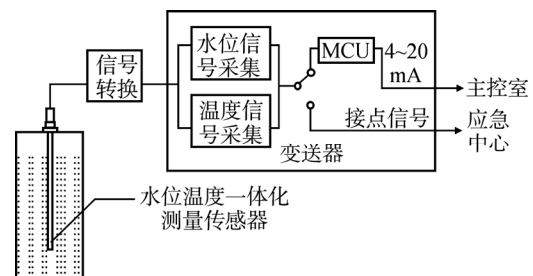


图 2 信号变送器原理图

Fig. 2 Principle Diagram of Transducer

上传到计算机。而便携式无线接收器的信号则可随人随机获取。当发生事故乏燃料池不能进入或通讯电缆故障时，设有无线传输信号载体通道，以做备用仪表通道。

2.2.5 其他 机箱要求箱体防护等级为 IP65，安装方式要求为架装。电气连接设计要求：传感器与变送器之间的连接电缆设计为低烟无卤阻燃材料。核级快速接插件设计要求：保证在特殊环境下接插件可靠快速拨插转换。

### 3 验证试验

#### 3.1 功能试验

(1) 液位、温度测量功能：将传感器装入专用台架上有标准刻度的 1:1 乏燃料池模拟测量筒内，并与信号变送器连接，组成完整的测量系统。控制筒内水位上升、下降及模拟温度变化，观察测量系统的液位、温度测量功能。结果表明样机具有液位、温度测量功能。

(2) 传感器液位在线校验功能：在不移动传感器的前提下，使专用台架上的工程样机测量筒内水位变化，观察测量系统的测量功能。结果表明样机具有传感器液位在线校验功能。

(3) 无线数据传输功能：用模拟传感器（测点数与工程样机一致）模拟小型试验测量筒中的水位变化，用计算机和手持接收仪对变送器的无线输出信号进行监测，观察无线输出功能。结果表明样机具备无线数据传输功能。

(4) 丧失一切外电源时的数据传输功能：在不接外电源的前提下，实验室试验时，按液位、温度测量功能试验程序操作信号变送器的转换接口，在信号电缆远端用专用手持阅读器进行信号监测。观察传输功能结果表明样机在丧失一切外电源情况下，具备数据传输功能。

#### 3.2 性能试验

(1) 精度试验：在液位、温度测量功能试验时，将信号变送器的示值与测量筒的刻度进行对比，检验测量精度，液位测量精度为 $\pm 5$  mm，温度测量精度为 $\pm 1.5$ 。

(2) 反应速度试验：用双线示波器测量反应速度，液位反应时间 50 ms，温度反应时间 5 s。

(3) 寿命试验：根据材料、结构同类的液位测量装置在某试验堆乏燃料池已安全运行 19 年的经验，对比分析结果表明样机寿命可达 10 年。

#### 3.3 环境试验

(1) 环境湿热条件试验条件为：相对湿度 20%~95%，温度为 -70~180。工程样机稳定运行 24 h，完成了规定的湿热试验。

(2) 电磁兼容试验，包括射频电磁场辐射抗扰度、静电放电抗扰度、电快速瞬变脉冲群抗扰度 3 项。3 项试验，测试样机均合格。

(3) 辐照试验，累积辐照剂量为  $10^7$  Gy，样机工作正常。

(4) 1 级抗震试验，根据我国通用乏燃料池地震谱进行 5 次 OBE 试验及 SSE 试验。结果为试验中和试验后样机结构完整、功能完好。

### 4 结束语

验证结果表明，核电厂乏燃料一体化测量装置功能、性能、环境适应性均达到了设计要求。装置探头反应速度快、测量精度高，能够实现同步测量，具有有线和无线两个数据传输通道，在丧失外电源的情况下仍能正常工作，具有在线校验的功能。对乏燃料池的安全运行提供了可靠的技术保障，满足国家核安全局对核电厂乏燃料池的监测要求。

(责任编辑：黄可东)