

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307050

# 核电站蒸汽发生器传热管电磁超声导波 自动化检测系统设计\*

方志泓<sup>1</sup> 王理博<sup>1</sup> 朱煜<sup>2</sup> 张寅<sup>1</sup> 王方方<sup>1</sup> 孙海漩<sup>2</sup> 徐华锋<sup>2</sup> 郭盼<sup>3</sup>

(1. 西安热工研究院有限公司 西安 710054; 2. 华能山东石岛湾核电有限公司 荣成 264399;

3. 西安益通热工技术服务有限责任公司 西安 710032)

**摘要:**蒸汽发生器传热管作为高温气冷堆核电站一回路压力边界的关键部件,承担着热交换及辐射屏障的重要作用,其结构完整性严重影响核电安全运行。针对该类特殊结构传热管的在役检查难题,设计了专用的电磁超声导波自动化检测系统,研制了内置单点检测式的磁场增强型电磁超声导波探头,开发了采用模块化组件的五轴联动多自由度自动运载装置,提出了基于机器视觉的管孔动态定位方法,建立了蒸汽发生器全尺寸模拟体试验平台并开展了定位精度测试与缺陷检测试验。试验结果表明所设计的自动化检测系统可实现任意位置目标管孔的高精度定位及自动行走,可识别模拟体上异种钢焊缝处与距离检测端约60 m处的刻槽缺陷,有效检测范围覆盖传热管全长,有望为高温气冷堆核电站蒸汽发生器特殊结构传热管的质量健康评价提供技术支撑。

**关键词:** 高温气冷堆;蒸汽发生器;传热管;电磁超声导波;自动化检测

**中图分类号:** TL38;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Design of electromagnetic ultrasonic guided wave automatic detection system for heat exchange tubes of steam generator in nuclear power plants

Fang Zhihong<sup>1</sup> Wang Libo<sup>1</sup> Zhu Yu<sup>2</sup> Zhang Yin<sup>1</sup> Wang Fangfang<sup>1</sup>Sun Haixuan<sup>2</sup> Xu Huafeng<sup>2</sup> Guo Pan<sup>3</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Co., Ltd., Rongcheng 264399, China; 3. Xi'an Yitong Technology Service Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

**Abstract:** The heat exchange tubes of the steam generator, as a key component of the pressure boundary in the primary circuit of the high temperature gas-cooled reactor nuclear power plant, plays an important role in heat exchange and radiation barrier, and its structural integrity seriously affects the safe operation of nuclear power. In response to the in-service detection difficulties of this type of special structure heat exchange tubes, a dedicated electromagnetic ultrasonic guided wave automatic detection system has been designed, a magnetic field enhanced electromagnetic ultrasonic guided wave probe with built-in single point detection has been developed, a five axis linkage multi degree of freedom automatic transport device with modular components has been developed, a dynamic positioning method for tube holes based on machine vision has been proposed, a full-scale simulation test platform for steam generator was established, and positioning accuracy test and defects detection test were carried out. The experimental results indicate that the designed automated detection system can achieve high-precision positioning and automatic walking of target tube holes at any position, and can identify the notch defects at the weld of dissimilar steel and about 60 m away from the detection end on the simulator. The effective detection range covers the entire length of the heat exchange tubes, which is expected to provide technical support for the quality and health evaluation of the special structure heat exchange tubes of the steam generator in high temperature gas-cooled reactor nuclear power plants.

**Keywords:** high temperature gas-cooled reactor; steam generator; heat exchange tubes; electromagnetic ultrasonic guided wave; automatic detection

## 0 引言

蒸汽发生器(SG)是高温气冷堆(HTGR)的关键设备之一,需保证在各种预期运行工况下,将一回路中反应堆产生的热量传递至二回路水循环中,并在规定负荷下产生合格蒸汽,驱动汽轮发电机发电,故其结构和功能的完整性将直接影响核电发电效率<sup>[1-3]</sup>。传热管作为SG完成热交换功能的核心部件,是一回路压力边界中最薄弱的部位,一旦破损将导致一、二回路“短路”,造成堆芯进水以及放射性产物泄漏,酿成重大安全事故<sup>[4-6]</sup>。因此,及时对SG传热管的质量健康状态进行检查对保障核电运行安全至关重要。

在传热管无损检测领域,氦检漏方法普遍适用于各反应堆型SG传热管的漏点缺陷检测,但该方法无法及时发现尚未形成漏点的缺陷,且检测效率较低,检测时间及辐射暴露的成本较高<sup>[7-9]</sup>。基于局部点检测的涡流、漏磁、旋转超声、阵列超声等方法检测范围有限,采用上述方法对HTGR的SG传热管进行检测时,需驱动传感器在复杂管路内移动进行逐点或逐段扫查,存在较高的传感器堵塞而造成堵管的风险<sup>[10-13]</sup>。

近年来,电磁超声导波检测技术愈发得到广大专家学者的关注和研究,该方法一般基于洛伦兹力型或磁致伸缩力型的换能机理在被检管道中激发电磁超声导波,导波在波导结构中传播时能量衰减很小,在管道端部激励即可实现长距离传播,对HTGR的SG传热管的缺陷检测具有独特优势<sup>[14-18]</sup>。Wun等<sup>[19]</sup>基于磁致伸缩型纵向模式导波分析了导波与管道缺陷的作用方式,验证了通过缺号信号的幅值、频谱等特征区分缺陷类型并确定体积型缺陷尺寸的可行性。Sun等<sup>[20]</sup>设计了一种适用于不锈钢传热管缺陷检测的纵向模式导波换能器结构,可抑制检测所需的L(0,2)模态信号中的其他模态信号。王理博等<sup>[21]</sup>针对HTGR的SG传热管的在役缺陷检测,开发了一种新型内置型电磁超声纵向导波换能器,采用挤压聚磁式换能器结构,可在管道内激励单一模式的纵向导波。然而,目前针对特殊结构传热管的电磁超声导波检测研究仍处于实验室样管缺陷检测阶段,需要手动完成检测,并且未完成全长传热管缺陷检测的可行性验证。在实际现场检测时,SG管箱检测端口处存在一定的辐射水平,温度较高,且传热管数量多达665根,完成全部SG传热管的缺陷检测需要依赖人工长时间靠近管板手动操作设备,存在较高的辐射暴露风险以及时间、人员成本。

目前,在核电SG传热管运维领域,发现缺陷管后进行堵管的自动化机械装置已相对成熟<sup>[22-23]</sup>。吴健荣<sup>[24]</sup>提出了具有“手脚互换”的准7自由度机器人构型设计并研制了相应样机,可搭载堵管工具完成自动堵管操作。

胡卉桦<sup>[25]</sup>开发了适用于HTGR的SG传热管检修工作的管板定位机器人,可搭载各种不同的堵管执行单元,对指定的工作管孔实施堵管工序。然而,封堵工作需要基于检测发现降质缺陷后进行,检测与堵管仍是两套独立的系统且需采用不同的设备装置,而目前针对HTGR的SG特殊结构传热管的在役检查,除氦检漏技术外,仍缺少一种适用、高效的自动化检测方法。因此,一种适用于SG特殊结构传热管电磁超声导波自动化检测系统的开发,既可解决复杂管路传热管的检测难题,亦可将前端检测工具更换为堵管工具后执行堵管操作,在后续工作中极具应用前景。

针对上述问题,基于电磁超声导波检测技术开发了SG传热管自动化检测系统,并通过试验验证了该系统的定位精度和检测能力,为HTGR的SG传热管的在役检修工作提供了一种技术参考。

## 1 检测原理

目前,常用电磁超声导波探头的换能机理包含磁致伸缩型和洛伦兹力型两种。其中,磁致伸缩型是通过磁致伸缩效应及其逆效应在待检部件内实现导波的激励和接收的,一般用于铁磁性材料的检测。洛伦兹力型是基于洛伦兹力在导电部件内引起质点振动而实现导波的激励和接收的,一般用于非铁磁性材料的检测。不同于压电式超声探头的换能机理,电磁超声导波探头基于铁磁结构的静态偏置磁场与线圈产生的动态交变磁场的相互作用,在待检部件内部直接引起质点振动而激发导波的,其声源位于待检部件内部,因此采用该方法进行检测时无需耦合剂,可实现非接触检测。

为满足不同管段服役温度的需要,SG传热管采用分段选材,其中出口端一侧传热管材质为Incoloy 800 H,给水端一侧传热管材质为T22,采用电磁超声导波方法对上述两种材质的SG传热管进行检测时,管内的导波可分别由洛伦兹力与磁致伸缩效应激发产生。由于SG给水端传热管入口处的节流组件阻挡,非拆卸状态下无法驱动探头伸入传热管内部进行检测,故以SG出口端传热管为检测端,并基于洛伦兹力型电磁超声导波开发适用于SG特殊结构传热管的检测探头。

洛伦兹力型电磁超声导波换能机理如图1所示。检测时,线圈加载交变电流信号,在待检部件表面集肤层产生反向感应涡流 $J_s$ ,感应涡流在永磁体提供的静态偏置磁场 $B_0$ 和线圈产生的动态交变磁场的相互作用下,形成洛伦兹力 $F_L$ 并带动质点产生周期性振动,形成导波声源,振动以波的形式沿待检部件传播,即实现了电磁超声导波的发射。信号接收即为导波发射的逆过程,此时通过监测线圈的电压信号变化即可获得待检部件内部的质量信息。

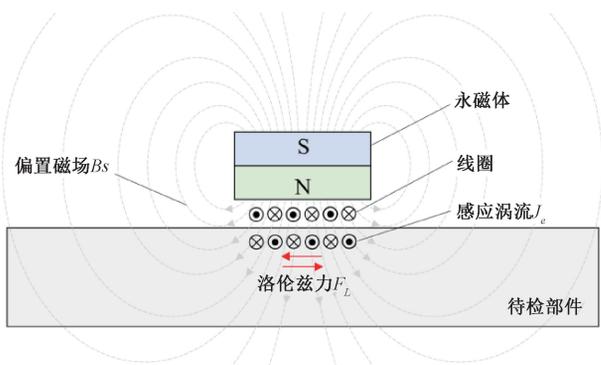


图1 洛伦兹力型电磁超声导波换能机理

Fig.1 The energy transfer mechanism of Lorentz force electromagnetic ultrasonic guided wave

## 2 自动化检测系统

SG 出口端现场工作条件恶劣,温度、辐射水平较高,待检测 SG 传热管数量较多,人工靠近管板进行长时间检测时存在较大的放射性污染风险。因此,为降低人员、时间成本以及辐射风险,建立 HTGR 的 SG 传热管电磁超声导波自动化检测系统,检测系统由导波检测模块和自动化模块组成。

### 2.1 导波检测模块

导波检测模块如图2所示,主要由上位机、连接线缆和电磁超声导波探头组成。其中,上位机用于参数调节设置、信号采集处理、波形显示以及数据存储导出等。连接线缆用于连接上位机与电磁超声导波探头,其总长度可达 15 m 以上,以满足现场远程控制需求,并增强辐射距离防护作用。



图2 电磁超声导波检测模块

Fig.2 Electromagnetic ultrasonic guided wave detection module

电磁超声导波探头由发射线圈、接收线圈、永磁体和纯铁构成,其结构如图3所示,主要用于在 SG 传热管内部激发一定强度的、长距离传播的电磁超声导波以及接

收携带介质内部质量健康信息的回波信号。探头线圈采用两发一收式结构,即两组发射线圈一组接收线圈,线圈由铜漆包线紧密绕制在纯铁的外周面上,其中两组发射线圈的相对距离为电磁超声导波波长的一半,这样基于相位控制原理可使 SG 传热管内部所激励的电磁超声导波信号产生波峰-波峰相互叠加的效果,进一步增强导波激励强度。检测时对探头施加以频率为 64 kHz 的正弦激励信号,在 SG 传热管内部产生 L(0,1) 模态的电磁超声导波信号进行缺陷检测。

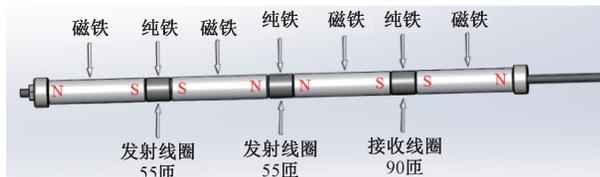


图3 电磁超声导波探头结构

Fig.3 Structure of electromagnetic ultrasonic guided wave probe

### 2.2 自动化模块

#### 1) 自动运载装置设计

SG 出口端管嘴呈水平方向,现场可操作空间狭小,难以完成复杂的检测工作。基于此,所设计的自动运载装置的总体结构如图4所示,主要由固定组件、滑轨组件、转盘组件及探头驱动组件构成,具有模块化、小型化及智能化的特点,可由单人完成全过程的组件安装、更换及拆卸。

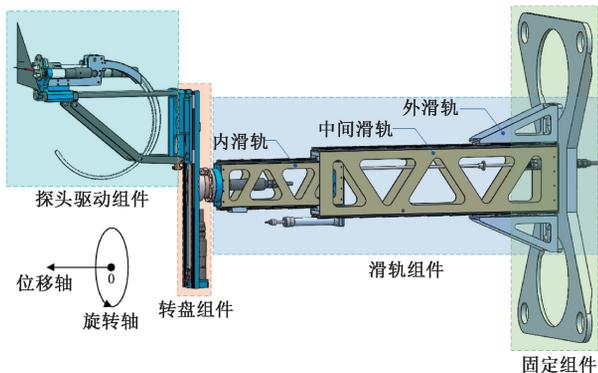


图4 自动运载装置结构

Fig.4 Structure of automatic transport device

固定组件通过连接螺栓将自动运载装置固定在 SG 出口端法兰面上,对整个装置起支撑作用,其安装示意图如图5所示。固定组件安装底板的四角设计有四个开孔,开孔位置及尺寸与 SG 出口端法兰面上的固定螺孔相匹配。设备安装时,将开孔与固定螺孔相互对准嵌套,使用螺栓旋紧固定,即可完成安装工作。

滑轨组件采用三层滑轨嵌套式结构,分别为外滑轨、中间滑轨及内滑轨,其运动自由度为横向直线伸缩。设

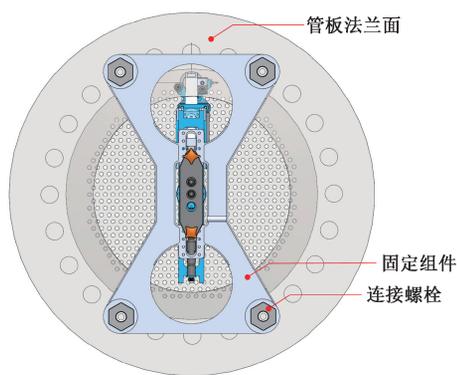


图 5 固定组件安装示意图

Fig. 5 Installation diagram of fixed components

备工作时,外滑轨处于极限伸长状态,使转盘组件与探头驱动组件靠近管板前端,然后通过中间滑轨与内滑轨的伸缩配合,控制检测所需达到的行程。

转盘组件用于搭载探头驱动组件在管板前端平面上移动,通过路径规划寻找并到达目标管孔进行电磁超声导波检测操作。根据管孔位置分布特点与电磁超声导波检测需求,转盘组件采用极坐标运动模式,通过旋转轴与位移轴配合,实现 SG 传热管管孔的全覆盖及定位。

探头驱动组件用于实现目标管孔定位后电磁超声导波探头的推拔工作。组件前端安装有 2 个定位销和 1 个探头孔,三者之间的位置呈等边三角形分布,其中心距与管孔中心距一致。具体实施时,定位销自动旋转并伸入目标管孔相邻的两个管孔中进行定位,再执行探头的推拔运动。管孔分布如图 6 所示,运动时定位销与探头之间的位置关系如图 7 所示。

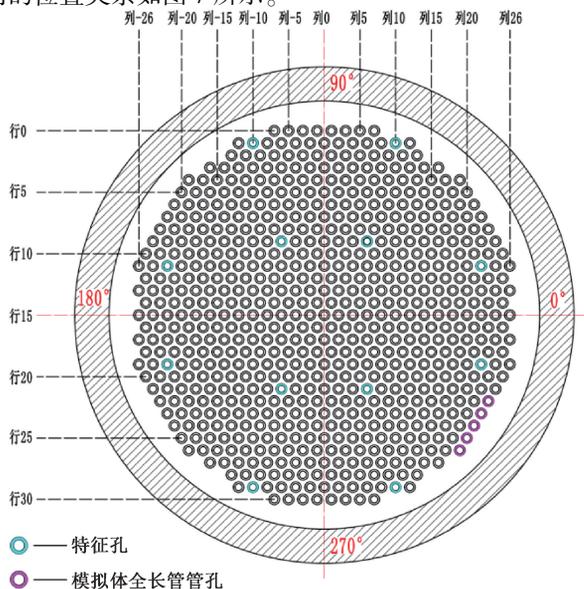


图 6 管孔分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of tube-holes distribution



图 7 定位销与探头的位置关系

Fig. 7 Position relationship between positioning pin and probe

综上所述,实际操作时,在完成设备安装后,驱动滑轨组件直线运动,搭载转盘组件和探头驱动组件靠近管板前端面,保留顶端间隙。通过旋转轴与位移轴的配合,运动至目标管孔,实现管孔的全覆盖。此时,通过探头驱动组件将探头驱动至 SG 传热管内部的指定位置,实现电磁超声导波信号的激励与接收。

### 2) 定位方法设计

为实现单孔或多孔操作时目标管孔的精准定位,采用行列号对出水端管板前端面上的管孔进行位置识别。基于图 6 所示的管孔位置分布,设置行号以第一行为 0 行,最后一行为 30 行;设置列号以中间对称轴所在列为 0 列,最左侧列为 -26 列,最右侧列为 26 列。此时中心管孔的行列号为 (15, 0)。

自动运载装置工作时,滑轨组件处于伸长状态,搭载转盘组件和探头驱动组件向前伸入一定距离。由于装置本身具有一定重量,当其一端固定在法兰面上时,其他部位均处于悬空状态,此时受重力因素及安装时可能产生的细微偏差的综合影响,将导致目标管孔的真实位置与远端控制软件的预设位置产生微小偏移,使得装置无法实现精准定位。因此,为尽可能的降低定位误差,需采用视觉定位方法进行修正补偿。

首先,采用远端控制软件对设备本体的机械零点进行初始化调零。探头驱动组件前端搭设有微型摄像头和十字激光线,设备安装后,十字激光线中心在中心管孔附近,如图 8 所示。此时,通过位移轴和旋转轴调整,使十字激光线横轴与中心管孔所在行平行,然后将设备的机械零点与中心管孔圆心进行重合,即利用前端摄像头观察十字激光线中心是否与中心管孔的圆心对齐,对齐后通过软件设置完成机械零点校正。

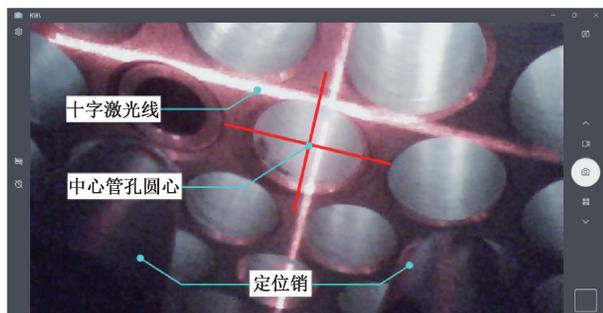


图 8 视觉前端影像

Fig. 8 Visual front-end image

其次,采用象限补偿的方法修正位置偏移。由于重力及安装时细微偏差影响,转盘组件靠近管板外围管孔时将产生微小偏移,这些坐标偏移具有一个共同特性,即由中心管孔有规律的向一个方向呈梯度变化。此时,需通过对每个象限基准孔的补偿,将补偿后的偏移适配至该象限内的全部管孔。进行象限补偿时,需在每个象限寻找 3 个基准孔作为整个象限区域的补偿,基准孔分布如图 8 所示,其行列号如表 1 所示。

表 1 基准孔行列号

Table 1 Number of rows and columns of reference holes

象限	基准孔行列号
第一象限	(1,10)、(9,6)、(11,22)
第二象限	(1,-10)、(9,-6)、(11,-22)
第三象限	(29,-10)、(21,-6)、(19,-22)
第四象限	(29,10)、(21,6)、(19,22)

然后,基于校准后基准孔的真实位置,进行最佳路径计算并自动行走至其他目标管孔。此时,通过软件的位置识别,计算出所有基准孔与目标管孔之间的距离,选择距离最短的基准孔进行路径规划。

如图 9 所示,设置水平移动一个孔位的单位向量为  $(0, \pm 1)$ ,换行的单位向量为  $(\pm 1, 0)$ ,则在同一行内水平方向上一个单位向量的长度为平均孔间距  $L$ ,换行的高度为  $L \times \sin 60^\circ$ 。

由于转盘组件采用极坐标的运动模式,故设置距离目标管孔最近的基准孔的极坐标为  $(R_i, \theta_i)$ ,则该基准孔的直角坐标为  $(R_i \times \cos \theta_i, R_i \times \sin \theta_i)$ 。设置基准孔到目标管孔的路径向量为  $(m, n)$ ,则可以获得目标管孔的直角坐标为:

$$\begin{cases} X_a = R_i \times \cos \theta_i + m \times L \times \sin 60^\circ \\ Y_a = R_i \times \sin \theta_i + n \times L \end{cases} \quad (1)$$

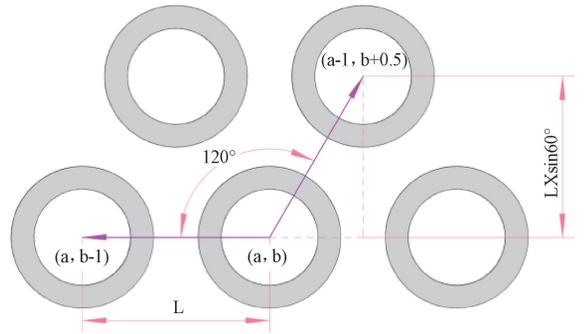


图 9 管孔移动路径向量示意图

Fig. 9 Schematic diagram of path vector of tube-holes movement

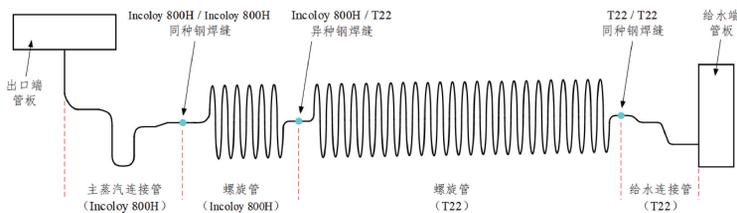
最后,基于上述计算方法和路径规划,实现管板全范围内目标管孔的精准定位及自动行走。

### 3 试验研究

基于 SG 传热管的介质材质与结构特点,建立如图 10 所示的 SG 全尺寸模拟体试验平台。试验平台主要由出口端管板、给水端管板、螺旋管支架和 5 根全长传热管组成。其中,SG 传热管总长度约为 70 m,包含主蒸汽连接管、螺旋管与给水连接管 3 部分,在 SG 传热管管身分段部位共存在 3 处焊缝,分别为 Incoloy 800H/Incoloy 800H 同种钢焊缝、Incoloy 800H/T22 异种钢焊缝以及 T22/T22 同种钢焊缝。为验证所开发的电磁超声导波自动化检测系统的检测能力,在行列号为 (25, 20)、(23, 22) 的 SG 传热管上各加工一处人工刻槽缺陷,缺陷信息如表 2 所示。



(a) 试验平台  
(a) Test platform



(b) 单根传热管结构示意图

(b) Structure diagram of a single heat exchange tube

图 10 SG 全尺寸模拟体试验平台

Fig. 10 Test platform of SG full-scale simulator

表 2 缺陷信息

Table 2 Information of defects

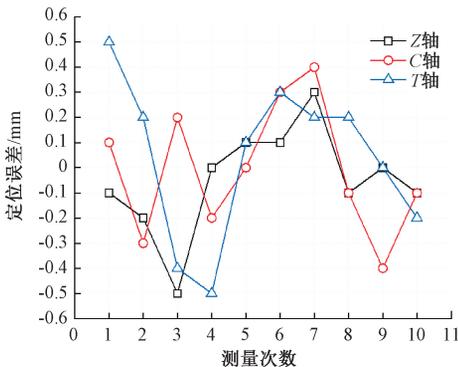
传热管行列号	缺陷编号	缺陷类型	缺陷尺寸	缺陷加工位置
(25,20)	1#	刻槽	弧长为 30 mm、宽度为 1.8 mm、平均深度为 1 mm	距出口端管板端面约为 12.8 m 处的异种钢焊缝 T22 侧熔合线部位。
(23,22)	2#	刻槽	弧长为 30 mm、宽度为 1 mm、平均深度为 1 mm	距出口端管板端面约为 60.2 m 处的螺旋管 T22 段。

为测试所设计的电磁超声导波自动化检测系统的定位精度,通过远端控制软件驱动自动运载装置各组件的运动轴在运动范围内进行位移或旋转,基于激光测距原理测量其运动数值,分时多次重复上述步骤,各运动轴的定位精度测量结果如图 11 所示,定位误差如表 3 所示。

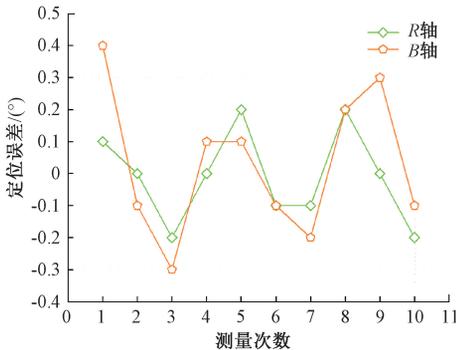
其中,Z 轴为滑轨组件的直线位移轴,C 轴为转盘组件的直线位移轴,T 轴为探头驱动组件的直线位移轴,R 轴为转盘组件的旋转轴,B 轴为探头驱动组件的旋转轴。由图 11 与表 3 可知,在各运动轴的运动范围内,位移轴的定位精度优于 0.5 mm,重复定位精度优于 0.30 mm,旋转轴的定位精度优于 0.4°,重复定位精度优于 0.22°,表明所设计的自动运载装置可实现高精度定位并驱动电磁超声导波探头至指定位置实施检测。

为验证所设计的电磁超声导波自动化检测系统的检测能力,基于 SG 全尺寸模拟体试验平台开展缺陷检测试验,检测现场如图 12 所示。通过远端控制软件锁定缺陷样管位置,并驱动探头伸入 SG 传热管端头内部一定距离,采用导波检测模块激励、接收缺陷样管内部的电磁超声导波信号,并对缺陷检测信号幅值进行归一化处理,检测信号如图 13 所示。

由图 13 可知,首先,SG 传热管的端面回波信号归一化后信号幅值约为 80%,表明所激励的电磁超声导波的传播距离可达到 70 m 及以上,可实现 SG 换热管全长缺陷检测。其次,缺陷 1#、缺陷 2#归一化后信号幅值分别为 20%、12.8%,且缺陷信号特征明显,检测信噪比较高,与无缺陷处噪声信号有明显区分,表明所开发的系统满足异种钢焊缝薄弱部位及螺旋盘管远端处缺陷的检测需求。此外,可以注意到两个同种钢焊缝结构信号明显,而异种钢焊缝结构信号难以与噪声信号区分;这是因为异种钢焊缝为出厂焊缝,焊缝成型良好,余高打磨光滑平整,且 Incoloy 800 H 与 T22 两种材料中的导波声速相近,故其信号特征不明显;而同种钢焊缝为现场预制焊缝,焊接工艺处理难度较大,故其信号特征较为明显。综上,基于上述定位精度测试与全长缺陷检测试验,表明了所设计的电磁超声导波自动化检测系统具有应用于 SG 特殊结构传热管在役检查的可行性,有望为核电机组的安全稳定运行提供技术支持。



(a) 位移轴定位精度测量结果  
(a) Measurement results of positioning accuracy of displacement axis



(b) 旋转轴定位精度测量结果  
(b) Measurement results of positioning accuracy of rotation axis

图 11 定位精度测量结果

Fig. 11 Measurement results of positioning accuracy

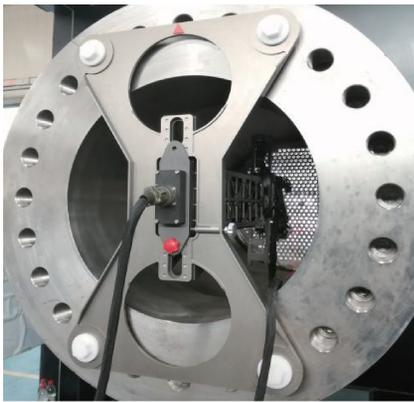
表 3 定位误差

Table 3 Positioning error

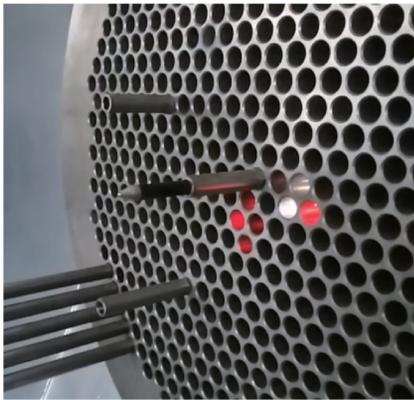
运动轴	最大误差值	重复定位误差值
Z 轴	0.5 mm	0.21 mm
C 轴	0.4 mm	0.25 mm
T 轴	0.5 mm	0.30 mm
R 轴	0.2°	0.14°
B 轴	0.4°	0.22°

## 4 结 论

针对 HTGR 的 SG 传热管的复杂管路结构与特殊服役环境,开发了适用于该类传热管在役检查的电磁超声导波自动化检测系统,建立了 1:1 的蒸汽发生器全尺寸模拟体试验平台并设计加工了一定尺寸的人工刻槽缺



(a) 自动运载装置装配示意图  
(a) Assembly diagram of automatic transport device



(b) 检测时探头在管内的位置示意图  
(b) Diagram of the position of the probe in the tube during detection

图 12 检测现场

Fig. 12 Detection site

陷,基于该平台进行了定位精度测试与缺陷检测试验研究,获得以下结论:

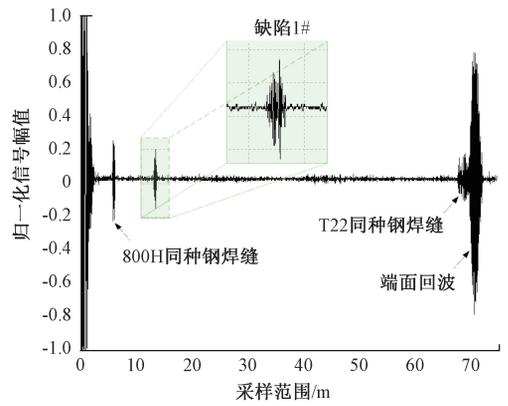
1) 研制了内置单点检测式的磁场增强型电磁超声导波探头,可使导波信号产生峰值叠加效果;开发了采用模块化组件的五轴联动多自由度自动运载装置,安装、拆卸过程简易方便;

2) 提出了基于机器视觉的管孔动态定位方法,可实现管板全范围内目标管孔的精准定位及自动行走,其中位移轴的定位精度优于 0.5 mm,重复定位精度优于 0.30 mm,旋转轴的定位精度优于 0.4°,重复定位精度优于 0.22°;

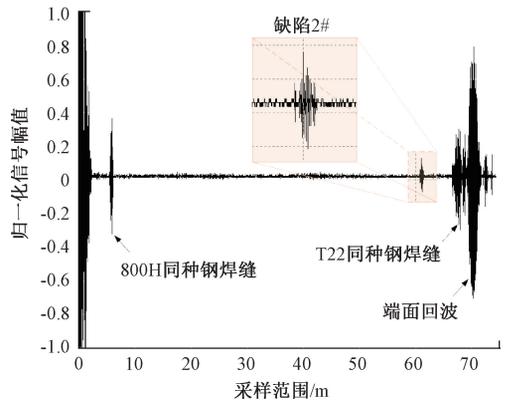
3) 所设计的电磁超声导波自动化检测系统可识别模拟体上异种钢焊缝处与距离检测端约 60 m 处的刻槽缺陷,有效检测范围覆盖传热管全长,表明该方法具有应用于 HTGR 的 SG 传热管在役检查的可行性。

参考文献

[ 1 ] 张作义, 吴宗鑫, 王大中, 等. 我国高温气冷堆发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 12-19.



(a) 缺陷1#信号  
(a) Signal for defect 1#



(b) 缺陷2#信号  
(b) Signal for defect 2#

图 13 缺陷检测信号

Fig. 13 Detection signals of defects

ZHANG Z Y, WU Z X, WANG D ZH, et al. Development strategy of high temperature gas cooled reactor in China [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 12-19.

[ 2 ] 马若群, 王臣, 盛朝阳, 等. 核电厂蒸汽发生器老化管理分析研究[J]. 核安全, 2021, 20(5): 93-99. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2021.05.016.

MA R Q, WANG CH, SHENG ZH Y, et al. Analysis and study on ageing management of steam generator for NPPs[J]. Nuclear Safety, 2021, 20(5): 93-99. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2021.05.016.

[ 3 ] HUI J, LING J, DONG H, et al. Distributed parameter modeling for the steam generator in the nuclear power plant [J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 152: 107945.

[ 4 ] 张晗, 周涛, 田晓瑞, 等. 蒸汽传热管破裂事故中颗粒物喷射的数值模拟[J]. 核技术, 2018, 41(2): 59-66.

ZHANG H, ZHOU T, TIAN X R, et al. Numerical simulation of particulate matter injection in the steam

- generator tube rupture accident[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(2): 59-66.
- [ 5 ] OBRUTSKY L, RENAUD J, LAKHAN R. Overview of steam generator tube-inspection technology[J]. CINDE J, 2009, 35(2): 5-13.
- [ 6 ] XING J, ZENG Z, ZIO E. Joint optimization of safety barriers for enhancing business continuity of nuclear power plants against steam generator tube ruptures accidents[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 202: 107067.
- [ 7 ] 钱虹, 江诚, 潘岳凯, 等. 基于时间序列神经网络的蒸汽发生器传热管泄漏程度诊断研究[J]. 核动力工程, 2020, 41(2): 160-167. DOI: 10.13832/j.jnpe.2020.02.0160.
- QIAN H, JIANG CH, PAN Y K, et al. Diagnosis of leakage degree of steam generator tube based on time series neural network[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(2): 160-167. DOI: 10.13832/j.jnpe.2020.02.0160.
- [ 8 ] 周胜. 氦检漏技术在核电站蒸发器传热管密封性试验中的应用[J]. 核科学与工程, 2017, 37(5): 818-821.
- ZHOU SH. Helium detection technology applied in NPP 60F steam generator tubes pressurization test [J]. Nuclear Science and Engineering, 2017, 37(5): 818-821.
- [ 9 ] 吴荣俊, 朱国华, 陈艳, 等. 压水反应堆蒸汽发生器泄漏监测系统优化研究[J]. 核电子学与探测技术, 2020, 40(4): 580-584.
- WU R J, ZHU G H, CHEN Y, et al. Research on the optimization of steam generator leak rate monitoring system in pressurized water reactor [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2020, 40(4): 580-584.
- [ 10 ] 韩捷, 廖述圣, 高厚秀, 等. 核电站蒸汽发生器传热管涡流自动检测系统研制[J]. 机械与电子, 2018, 36(6): 58-61.
- HAN J, LIAO SH SH, GAO H X, et al. Development of automatic eddy current inspection system for steam generator in nuclear power plant [J]. Machinery & Electronics, 2018, 36(6): 58-61.
- [ 11 ] CHI W, ZHANG Y, FENG Z, et al. Magnetic leakage internal detection device and series-parallel detection method for small diameter ferromagnetic spiral heat exchanger tubes[J]. Tehnički vjesnik, 2020, 27(3): 933-940.
- [ 12 ] 敦世钊. 核电站蒸汽发生器传热管泄漏声行为特性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2022. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000686.
- DUN SH ZH. Research on the acoustic behavior of the leakage of the heat transfer tube of the steam generator in nuclear power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000686.
- [ 13 ] XI Z, LUO X, PENG Y, et al. Simulation and performance study of circular ultrasonic array for tubes' internal inspection [J]. Ultrasonics, 2021, 116: 106508.
- [ 14 ] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713-1735. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2016.08.004.
- HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713-1735. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2016.08.004.
- [ 15 ] 邱锦川, 刘昭廷, 罗伟, 等. 基于正交试验法的电磁超声换能器梯形硅钢聚磁器优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(12): 98-106. DOI: 10.13382/j.jemi.B2306785.
- QIU J CH, LIU ZH T, LUO W, et al. Design of trapezoidal magnetic concentrator for electromagnetic ultrasonic transducer based on orthogonal test method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(12): 98-106. DOI: 10.13382/j.jemi.B2306785.
- [ 16 ] 王好贞, 杨媛, 魏小源, 等. Barker 编码激励超声导波在断轨检测中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 101-108. DOI: 10.13382/j.jemi.B2002927.
- WANG H ZH, YANG Y, WEI X Y, et al. Application of Barker code excited ultrasonic guided waves in broken rail detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 101-108. DOI: 10.13382/j.jemi.B2002927.
- [ 17 ] NARAYANAN M M, ARJUN V, KUMAR A, et al. Development of in-bore magnetostrictive transducer for ultrasonic guided wave based-inspection of steam generator tubes of PFBR [J]. Ultrasonics, 2020, 106: 106148.
- [ 18 ] 蔡瑞, 李勇, 刘天浩, 等. 金属小径管损伤电磁超声导波检测的高效混合仿真方法及导波换能器可行性研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 34-41.
- CAI R, LI Y, LIU T H, et al. A hybrid method for efficient simulation and feasibility study of guided-wave electromagnetic acoustic transducers for inspection of metallic tubes with small diameters [J]. Journal of

- Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 34-41.
- [19] WUN K, DYNES C. Long-range guided wave inspection of pipe using magnetostrictive sensor technology: the feasibility of defect characterization [J]. *Nondestructive Evaluation of Utilities and Pipelines II*, 1998, 3398: 28-34.
- [20] SUN P, WU X, LI J, et al. An EMAT for inspecting heat exchanger tubes of stainless steel using longitudinal guided waves based on non-uniform static magnetic fields [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2015, 57(4): 221-229.
- [21] 王理博, 方志泓, 王方方, 等. 蒸汽发生器换热管电磁超声纵向导波换能器设计与优化[J]. *核动力工程*, 2023, 44(1): 192-197. DOI: 10.13832/j.jnpe.2023.01.0192.
- WANG L B, FANG ZH H, WAN F F, et al. Design and optimization of electromagnetic ultrasonic longitudinal guided wave transducer for heat exchange tube of steam generator [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2023, 44(1): 192-197. DOI: 10.13832/j.jnpe.2023.01.0192.
- [22] 王仕航, 郑东宏, 范安全, 等. 核电站蒸汽发生器传热管机械堵管工艺评定[J]. *压力容器*, 2021, 38(1): 75-80, 86.
- WANG SH H, ZHENG D H, FAN AN Q, et al. Mechanical plugging procedure qualification of steam generator heat transfer tube in nuclear power plant [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2021, 38(1): 75-80, 86.
- [23] 刘福广, 杨二娟, 李勇, 等. 核电蒸汽发生器堵管技术研究进展及其在高温气冷堆的应用前景[J]. *热力发电*, 2022, 51(06): 74-81. DOI: 10.19666/j.rld.202201013.
- LIU F G, YANG E J, LI Y, et al. Research progress on tube plugging technology of nuclear power steam generator and its applicability for high temperature gas-cooled reactor [J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(6): 74-81.
- [24] 吴健荣. 蒸汽发生器检修机器人样机研制及其关键技术研究[J]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- WU J R. Research on key technology and prototype development of steam generator overhaul robot [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [25] 胡卉桦. 高温气冷堆核电站蒸汽发生器管板定位机器人[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(22): 9372-9377.
- HU H H. Tube-sheet positioning robot for steam generator in high-temperature gas-cooled reactor nuclear power plant [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(22): 9372-9377.

### 作者简介



方志泓, 2018年于南昌航空大学获得学士学位, 2021年于南昌航空大学获得硕士学位, 现为西安热工研究院有限公司工程师, 主要研究方向为电站在役检查与关键部件检验检测。  
E-mail: fangzhihong1996@163.com

**Fang Zhihong** received his B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2018 and M. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2021, respectively. Now he is an engineer in Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. His main research interests include in-service inspection and key component inspection of power plants.



王理博, 2006年毕业于西安科技大学, 现为西安热工研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为电站在役检查与关键部件检验检测。  
E-mail: wanglibo@tpri.com.cn

**Wang Libo** received his B. Sc. degree from Xi'an University of Science and Technology in 2006. Now he is a senior engineer in Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. His main research interests include in-service inspection and key component inspection of power plants.