

# 蒸汽发生器一次侧在役检查机器人 技术发展概况

吴健荣,林戈,陈怀东,李明,林忠元

(中广核检测技术有限公司,苏州 215004)

**摘要:**核电站在役检查是保证核电站安全运行的重要环节之一,在役检查技术水平很大程度取决于以机器人为核心的成套关键设备的技术水平。介绍了各主要核电国家蒸汽发生器一次侧在役检查机器人技术状况,分析其关键技术和发展趋势,对我国自主发展在役检查成套关键设备技术提供借鉴。

**关键词:**在役检查;机器人;蒸汽发生器

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2011)11-0063-04

## Development Status of In-Service Inspection Robot Technology for Steam Generator Primary Side

WU Jian-Rong, LIN Ge, CHEN Huai-Dong, LI Ming, LIN Zhong-Yuan

(CGNPC Inspection Technology Company, Suzhou 215004, China)

**Abstract:** In-service inspection (ISI) of nuclear power plant is an important link for keeping safety operation. The levels of ISI technology mostly depend on the complete key equipment. The development status of special robot for steam generator primary side was reviewed, and then their key technology and trend were analyzed. Some suggestions for Chinese independent development of ISI complete key equipment technology were given.

**Keywords:** In-service inspection; Robot; Steam generator

为保证核电厂的安全,在役检查是核电运行中必不可少的一个重要环节。由于核电站设备结构限制和辐射性,在役检查不仅受制于无损检测技术本身,还主要受制于完成无损检测的机器人设备。世界主要核电国家从 20 世纪 70 年代开始致力于高性能机器人设备的开发,推动了整个在役检查技术的进步。近年,我国在役检查技术的研究趋于活跃,无损检验方法应用方面已有较多成果和经验,但在役检查机器人技术的系统研究和讨论还较少,以机器人为核心的成套关键设备技术仍是我国在役检查自主化的主要瓶颈技术之一。

文章针对蒸汽发生器一次侧在役检查,深入调研国内外相关机构开展机器人技术研究的情况,并分析其技术发展趋势,为我国相关检查项的成套关

键设备自主化研究提供支持。

### 1 蒸汽发生器一次侧在役检查技术现状

蒸汽发生器是核电站一回路系统的一个主设备,它的作用是把一回路冷却剂从反应堆获得的热能传给二回路工质使其变为蒸汽。蒸汽发生器内包容一回路冷却剂的腔体称为一次侧,包容二回路工质的腔体称为二次侧。在一次侧,来自反应堆的冷却剂由下封头进入进口水室,然后通过数千根 U 型管将热量传递给二次侧工质,冷却剂流出 U 型管束后进入出口水室,再从下封头的出口管嘴流出,由反应堆冷却泵送回反应堆。

蒸汽发生器一次侧在役检查项主要包括各部分连接焊缝的体积和表面检查、传热管体积(涡流)检查、水室内表面堆焊层表面(视频)检查等。传热管是蒸汽发生器内最容易失效的部件,处置降质传热管的常用手段是堵管(即用特制的堵塞将 U 型管两

收稿日期:2011-05-30

作者简介:吴健荣(1982—),男,工学博士,主要从事核电站无损检测技术和设备开发。

端堵死,使之退出运行),此外还有衬管、镀镍修补、取管、喷丸处理、热处理、激光焊接等手段<sup>[1]</sup>。一次侧大部分检查工作主要在水室内进行,具有高辐射风险,检查技术水平很大程度上取决于所使用的机器人设备。

## 2 蒸汽发生器一次侧在役检查机器人

### 2.1 美国的研究概况

#### 2.1.1 美国西屋公司<sup>[2-4]</sup>

美国 Westinghouse(西屋)公司是最早从事核电检修服务的运营商之一。20世纪70年代中期,针对蒸汽发生器一次侧传热管涡流检查任务,西屋公司设计了一个两自由度的平面机器人,用于将末端的涡流探头送到指定管孔位置。1978年,针对蒸汽发生器水室内表面清洗任务,设计一个 $\gamma\theta\varphi$ 结构的三自由度机器人,用粗砂喷射的方法对水室内表面进行去污操作;1979年,研制了另一个该型三自由度机器人用于蒸汽发生器换管作业。针对大规模的衬管任务,西屋公司于1979年研制成功CTM(Coordinate Transport Manipulator)机器人,它是一个两自由度的笛卡尔坐标机器人,至1984年安装了超过14000个衬管。与此同时,西屋公司开发的第一套具有通用功能的机器人系统由SAM和M/STI两部分组成。SAM(Service Arm Manipulator)有四个自由度,其功能是安装M/STI和运送检修工具设备进出蒸汽发生器水室;M/STI(Master/Slave Tubesheet Indexer)是一个特殊的管板导引装置。系统以主从方式工作,主手安装在1:2比例的蒸汽发生器模拟体内,SAM和M/STI都跟随主手运动。该套系统能够用于涡流检查、堵管和其它检查项,工作人员用此套系统工作所受的辐照剂量相当于直接操作时的13%。此后几年,西屋公司开始专注于开发通用机器人ROSA系统。ROSA(the Remotely Operated Service Arm)是一类具有相同设计理念的检修机器人,这些机器人由模块化的关节组成。ROSA系统经多次改进,目前用于蒸汽发生器一次侧检查的是ROSA-III,它由美国梅隆大学机器人研究所和西屋公司于20世纪90年代初联合研制成功。

ROSA-III的结构和安装过程如图1所示,机器人手部和托板固定,通过手摇托板和关节联动使机器人穿过人孔,脚部的四个脚趾插入管孔后膨胀,从而将机器人固定在管板上。机器人手部与托板分离

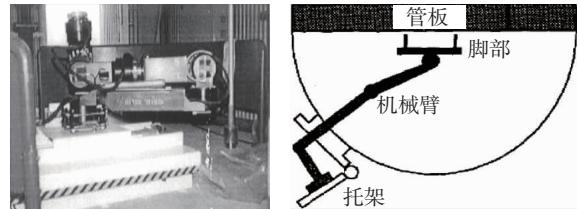


图1 机器人 ROSA-III 及其安装

后,携带工具进入水室作业。ROSA-III具有6个自由度,重量为55 kg,负载能力36 kg,重复位置精度为±1.5 mm。用于小型蒸汽发生器检查的ROSA-III C的重量为48 kg,末端有效负载为27 kg,并配备了强大的管理软件系统。

2003年,西屋公司在ROSA系统模块化、通用化基础上,改变以往串联关节机器人的设计思路,研制出管孔爬行机器人Pegasys,如图2所示。Pegasys重量14 kg,负载能力达30 kg,可以实现无死区快速定位。Pegasys控制系统简单、可靠,线缆少。Pegasys装有ANSER(TM)配套软件,用户控制界面兼容于ROSA系统,主要用于涡流检查和小规模堵管作业。

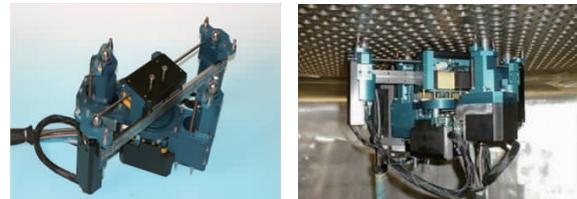


图2 机器人 Pegasys

#### 2.1.2 美国Zetec公司

美国Zetec公司研制有两类用于蒸汽发生器涡流检测的机器人——ZR和SM系列<sup>[5,6]</sup>。SM系列机器人专为辅助完成涡流检查而设计,有效负载为15kg,经改进也可用于视频、超声检查等小负载作业。机器人结构如图3所示,包括支承臂及基座、连接臂、中间臂和上臂等主要部件,共三个自由度。安装时,各部分折叠收缩沿人孔轴线方向进入,依靠基座与人孔法兰面定位。检修时,机器人在蒸汽发生

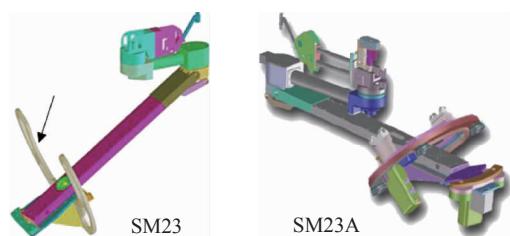


图3 机器人 SM23 和 SM23A

器水室内水平展开,然后由计算机控制精确定位。SM 系列机器人对其它研究机构开发蒸汽发生器在役检查机器人产生了较为广泛的影响。

2008 年,Zetec 公司研制成功最新款 ZR 系列机器人 ZR-100。它是一种管孔爬行机器人,重量不超过 16 kg,负载能力达 135 kg。与其它蒸汽发生器检查机器人相比,ZR-100 在结构小巧性、安装方便性、稳定性、安全性以及效率等方面都有较大的提高。ZR-100 继承了 Zetec 公司一贯的设计风格,捆绑了涡流检查、堵管、取管等一系列工具,形成一个封闭系统。

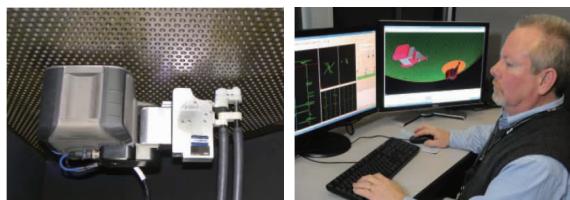


图 4 机器人 ZR-100

## 2.2 法国的研究概况

法国 AREVA 集团是核电领域内唯一能够从事全部相关工业生产过程的公司。AREVA 集团的 Framatome-ANP 公司于 1989 年研制出 COBRA 机器人。它有 4 个转动关节,结构上采用轻质、半模块化设计,中间连杆有一个锁紧装置将机器人底部和上部合成一体,每个关节均由高速电机和谐波减速器组成。COBRA 自身重量 $<68$  kg,举力 $>45$  kg,臂展达 1 828 mm。AREVA 在欧洲开发的 Armis Robot 结构与 COBRA 相似<sup>[7]</sup>,它结合仿真软件 ROBOCAD 开发了多种控制模式,如直接可视主从模式、手动单轴模式、步进模式、半自动模式、自动模式和轨迹模式等。目前,AREVA 公司使用的一款轻质、无检修死区的小负载作业机器人 ROGER<sup>[8]</sup>,其结构如图 5 所示。安装后,它可通过自身滑道使机器人末端到达管板的任意区域,而不需手工重新定位。

## 2.3 其它国家研究概况

日本有完备的核电设计、制造及运营系统。三菱重工、东芝、日立是世界有名的跨国公司,同时也是日本核工业的主要制造厂商。日本三菱重工开发了蒸汽发生器在役检查自动化系统,使用的机器人

MR-III 是一种管孔爬行机<sup>[9]</sup>,重量 18 kg,位置精度达 $\pm 0.05$  mm,能够同时携带四个涡流探头进行全自动的涡流检查,检查效率非常高。

德国 Hans Walischmille 公司<sup>[10]</sup>开发了一个半模块化的蒸汽发生器一次侧检查机器人 TELBOT。它有 6 个旋转关节,最大特点是所有驱动部件都集中在底座,其底座模块以及连杆可以根据负载力的要求进行更换。由于臂部没有驱动件,上臂结构简洁和轻巧,安装时机器人主要部件不进入水室,易于设置防辐射保护外套。

韩国原子能研究院先进机器人研究室于 2003 年研制成功蒸汽发生器检查机器人 KAEROT 系统和 ADAM(Advanced Nozzle Dam Attachment Manipulator)系统<sup>[11]</sup>。KAEROT 系统用于传热管涡流检查,机械本体包括机器人、底盘、人孔导引装置三部分,总重 84 kg,最大负载 15 kg。ADAM 系统用于封堵和打开主管道盲板,主体由钛合金制造,通过一个两自由度的辅助装置协助 ADAM 安装。ADAM 有 6 个液压驱动关节自由度,采用 R-P-P-R-Y-R 结构,是西林(Schilling)公司 Titan2.5 液压机械手的改进型号。KAEROT 和 ADAM 系统负载能力为 15 kg,控制器具有 0.3 mm 的解算精度,配有仿真软件。

印度核动力公司的第一台蒸汽发生器检查机器人 INSIS-EC 完成于 2000 年 3 月<sup>[12]</sup>,用于传热管涡流检查。它是 SCARA 类型的机器人,重量较轻,可由两人搬动。机器人上安装两个摄像机,一个监视末端涡流检查工具的作业情况,另一个用于监控水室内的作业场景。

## 2.4 国内的研究概况

2008 年,中广核检测技术公司联合西班牙 TECNATOM 公司成功开发出用于传热管涡流检查的 TESAR 系统。TESAR 也是一种管孔爬行机器人,采用直线电机和气动卡爪相结合的驱动方式实现爬行动作,定位准确,检查效率高。2008 年,中广核检测技术公司还自主开发了蒸汽发生器水室内表面视频检查系统 SG-CCTV,它包括外定位法兰总成、支承架总成、下旋臂、上旋臂、摄像机旋转臂总成、摄像机几个部分组成,能够实现蒸汽发生器水室内全范围的视频检查。中广核检测技术公司的 TESAR 和 SG-CCTV 在 2009 年岭澳 3 号核电机组役前检查和 2010 年岭澳 4 号核电机组役前检查中均取得了良好的应用业绩。



图 5 机器人 ROGER

### 3 关键技术和发展趋势分析

随着在役检查技术的发展,蒸汽发生器一次侧检查和维修手段趋于多样化。从各国研制机器人的实际经历看,以下方面的关键技术问题值得持续关注。

#### 3.1 合理的系统结构划分

早期的系统是以检查工具本身为研究重点,机器人被当作一种辅助设备,以少自由度、结构简单为特点。如机器人SM主要作为Zetec公司涡流检查设备的配套定位装置使用,韩国的KAEROT、印度的INSIS-EC等实际上也遵从了这一设计思路。这些系统经改造虽已部分用于其它检修项,但其应用范围受到原有系统结构、精度、负载能力、密封性能等制约。当前,在检修工具已有较多设计经验的前提下,以机器人为核心,按照统一接口标准构造多工具、多检修项、多功能的综合检查系统是一种趋势。美国西屋、Zetec、日本三菱重工的最新设计体现了这种技术趋势。

#### 3.2 机器人定位方式与构型选择

用于检查和维修的机器人,必须方便自身的安装和工具的更换,并同时满足运动精度、负载能力、作业范围等要求,机器人的机械结构是一个十分关键的问题。从蒸汽发生器一次侧水室的结构来看,适宜于机器人定位的部位主要是人孔法兰面和管板面。SM系列、TELBOT、KAEROT以及INSIS-EC等都以人孔法兰面定位,其特点是安装方便,自由度少,结构和控制相对简单,可靠性好,但存在的先天不足是机器人基座占据人孔通道,更换工具不方便,多检修项交替时,必须将机器人完全退出后再安装,综合效率和辐照剂量方面较难提高。ROSA-Ⅲ以人孔法兰面和管板两次定位,采用6自由度结构,有能力处理蒸汽发生器一次侧水室内的所有检查和维修项,但是,它受制于电机性能,负载能力、检查速度与机器人重量之间的矛盾还难以根本解决,在新一代管孔爬行机器人面前失去竞争力。MR-Ⅲ、PEGASYS和ZR-100都以管板面定位,采用管孔爬行技术,特别适合管板面上的检修项,如传热管检查和维修,是当前蒸汽发生器一次侧在役检查机器人设计的主要思路。

#### 3.3 操作和控制模式

在封闭的蒸汽发生器水室内,机器人的运动必须格外小心,不能对蒸汽发生器、机器人自身、检修

工具造成任何损伤。在必须远程操作的前提下,有视频监控的主从操作是较为安全的。视频监控的不足是难以获得合适的视角,不能全方位地显示机器人运动状况,对工作人员的操作技能要求很高。20世纪末,计算机图形学和虚拟现实技术的进步为机器人操作模式的改进带来契机。虚拟现实技术可以更全面地展示机器人的相对位置关系和运动状态、增强操作沉浸感、提供自动的运动避碰和碰撞保护提示等,可有效地减少操作失误和降低劳动强度,从而极大地提高检修效率和可靠性。另外,功能完备的虚拟检查和维修系统,为培训与模拟演练提供了极好的平台。近年,ROSA-Ⅲ、Armis、ADAM、Pegasys和ZR-100都在一定程度上采用了仿真和虚拟现实技术。虚拟现实和仿真技术是未来蒸汽发生器一次在役检查机器人开发过程中需要关注的重要方面。

### 4 结语

在役检查作为确保核电站安全的重要环节,日益受到各方面的关注。用于支持无损检测方法有效实施的机器人技术很大程度决定了核电站在役检查技术水平,是一项需要长期关注和持续研究的关键技术。近年来,中广核检测技术公司以及我国其它相关单位开始加大投入,致力于这一关键技术的攻关。结合目前实际的情况,检测公司初步确定“合作创新、集成创新、原始创新”三步走的自主研发战略:首先通过有针对性的技术合作与关键模块引进解决关键成套设备的有无问题,熟悉和掌握相关领域的核心技术;然后通过自身的需要吸取各家所长,具备独立自主开发关键成套设备的能力;最后,成为相关领域原创技术的一个发源地,具备持续创新和引领技术发展方向的能力。

针对蒸汽发生器一次侧在役检查机器人技术,广泛调研了各主要核电国家相关机构的研究情况。分析了系统结构、定位方式与构型、操作与控制模式三方面的关键技术及其发展趋势,为国内在役检查成套关键设备的自主研发提供第一手基础技术资料。

### 参考文献:

- [1] Obrutsky L, Renaud J, Lakhan R. Steam Generator Inspections: Faster, Cheaper And Better, Are We There Yet [C]. IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Canada, 2007:1—17.

(下转第74页)

### 3.3 缺陷定量分析

按 GB 12352—2007 标准 4.5 条规定,钢丝绳的报废项目有:钢丝绳金属断面的缩小值、断丝的局部聚集、绳股断裂以及断丝的增加率。

在确定钢丝绳金属断面的缩小值时应考虑钢丝绳断丝数、内部和外部的磨损、内部和外部腐蚀、由于其他原因造成的损坏。

#### 3.3.1 钢丝绳金属断面的缩小值缺陷定量

对于图 6(a)所示断丝性缺陷,从检测记录图读出内置感应线圈缺陷脉冲峰值  $E$ ,从所用探头提供的特性曲线查得所对应损伤部位横截面积  $S_{Fe}$ ,得缺陷位置为 1 424.5 m,断面缩小值 13.5 mm<sup>2</sup>,断面缩小值百分比为 3.3%,较 2008 年 1 月探伤数据比较所得缺陷增长率为 0。

对于磨损、大面积腐蚀性缺陷,从检测记录图读出霍尔效应传感器通道缺陷脉冲峰值  $E$ ,与本次检测开始时做的霍尔效应传感器通道校准的记录图对比,即可得到所对应对损伤部位横截面积  $S_{Fe}$ 。

#### 3.3.2 断丝的局部聚集缺陷定量

积分通道依据 GB 12352—2007 标准 4.5 条规定,在相关长度( $d$  的倍数)内,钢丝绳金属断面缩小

(上接第 66 页)

- [2] Hedtke James C. At the service of steam generator maintenance[J]. Nuclear Engineering International, 2000,45(551):37.
- [3] <http://www.westinghousenuclear.com/C2a25.as>
- [4] Petrosky L J. Innovative robot for inspection of nuclear steam generators[C]. 1st Joint Emergency Preparedness and Response/Robotic and Remote Systems Topical Meeting, Salt Lake City, UT, USA, 2006: 462—465.
- [5] <http://www.zetec.com>
- [6] <http://www.zetec.com/industries/energy/steamgenerators.as>
- [7] Philippe D, Piolain Gérard. An Overview of the Remote Handling Technologies Developed for Nuclear Hazardous Environments in France[C]. 1st Joint Emergency Preparedness and Response/Robotic and Remote Systems Topical Meeting, Salt Lake City, UT, USA, 2006: 381—388.
- [8] <http://www.framatome-anp.com>

量与钢丝绳金属断面的比值,可以检测记录相关长度( $d$  的倍数)内钢丝绳损伤总量。

#### 3.3.3 断丝的增加率定量

MD120B 钢丝绳探伤仪稳定性和重复性较好,比较两次间隔探伤数据的变化,即可得到断丝的增加率。

## 4 结语

采用 MD120B 钢丝绳探伤仪可以满足钢丝绳的在线无损检测需要,定量确定钢丝绳金属断面的缩小值(如钢丝绳断丝数、内部和外部的磨损、内部和外部腐蚀、点腐蚀等分散损伤和磨损、面腐蚀等局部连续损伤)、断丝的局部聚集和断丝的增加率。

## 参考文献:

- [1] 吴鸿启,刘京本.客运架空索道安全技术[M].北京:北京交通出版社,1996.
- [2] 吴彦,沈功田.客运架空索道无损检测技术[J].无损检测,2006,28(9):471—474.
- [3] 赵敏,张东来.钢丝绳典型缺陷的漏磁场有限元仿真[J].无损检测,2009,31(3):177.
- [9] Jinichi Miyaguchi, Kozo Tabuchi, Tetsuya Yamamoto. Towards maintenance service supporting secure nuclear energy[J]. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, 2003,40(2):1—7.
- [10] Bains N, Majarais B, Scott D A. Cleaning of steam generator tubes at the primary side using a general purpose manipulator[C]. Proceedings of the 1995 43rd Conference on Robotics and Remote Systems, San Francisco, CA, USA, 1995:94—101.
- [11] Jeong K, Choi Y, Lee S. Tele-operated robotic systems for nuclear power plants in South Korea and lessons learned[C]. 1st Joint Emergency Preparedness and Response/Robotic and Remote Systems Topical Meeting, La Grange Park, IL, USA, 2006: 497—502.
- [12] Rastogi A K, Gaur D N, Godbole U. Indigenous Development of an Integrated System for Steam Generator Eddy Current In-service Inspection[J]. Nu-Power, 2000,14(4):35—37.