

核电主管道相控阵超声扫查器的国产化改进

张晓峰,严 宇,杨建龙,杨会敏

(核工业工程研究设计有限公司,北京 101300)

摘要:介绍了进口相控阵超声扫查器系统存在的一些不足和缺陷,以及进行国产化改进的必要性。通过国产化改进实现了机械部件的国产化,减少了备品备件的采购周期和成本,同时也提高了设备的可操作性和自动化程度。

关键词:相控阵;扫查器;国产化改进

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2022)07-0010-03

Localized improvement of phased array ultrasonic scanner for nuclear power main pipe

ZHANG Xiaofeng, YAN Yu, YANG Jianlong, YANG Huimin

(Nuclear Industry Engineering Research and Design Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: This paper briefly introduces deficiencies and defects of imported phased array ultrasonic scanner system and the necessity of localized improvement. The localization of mechanical parts is realized by localized improvement, which reduces the procurement cycle and cost of spare parts. It also improves the operability and degree of automation of the equipment.

Key words: phased array; scanner; localized improvement

压水堆核电站主回路管道属于核一级管道,连接着反应堆压力容器、蒸汽发生器和主泵,是一回路反应堆冷却剂系统压力边界的重要组成部分^[1],其安装焊接质量直接关系到核设施的安全运行^[2-3]。目前,工程上主要采用射线检测和超声检测对其焊缝进行体积型缺陷的无损检测^[4]。

核工业工程研究设计有限公司从 Phoenix 公司采购的相控阵超声探伤自动扫查器在工程上经过多年的服务和使用,原设备的设计缺陷逐渐显露出来,同时设备的备品备件采购周期长、价格昂贵也严重制约着设备的后续运行。因此,有必要对该设备进行国产化改进,整改原设计中的不足和缺陷,使其更好地适应核电主管道检测的实际工况,同时国产化改进也解决了备品备件采购周期长和价格昂贵的问题,从长远使用的角度来看,可节约成本。

1 国产化改进的原因

1.1 原设计不足和不符合实际工况

Phoenix SAGE 型两轴电动扫查器经过现场多年的服役和使用后,暴露了设计上的诸多不足和不符合现场实际工况的情况,主要体现在以下 3 方面。

(1) 核电主管道存在大量的弯管,原设备采用生根装置的方式进行弯管夹持(见图 1)。该设计导致实际工作时要携带生根装置进行作业,加大了操作人员的负担,同时针对不同管径的主管道还要配合不同管径的生根装置和不同长度的丝杠。

(2) 原设计中探头的进给装置采用恒力弹簧式

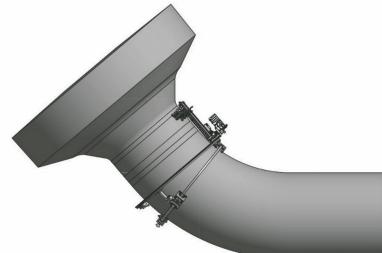


图 1 原设备弯管夹持装置示意

收稿日期:2021-12-15

作者简介:张晓峰(1984—),男,工程师,主要从事核设施无损检测技术研发及推广工作

通信作者:张晓峰,307367194@qq.com

设计,该装置通过恒力弹簧提供给探头贴合被检管道表面的压力。设计的不足在于该机构进给行程小且恒力弹簧的弹力不足以抵消探头的重力。进给行程小对导轨的安装精度要求较高,而实际工况常常难以达到这样的高要求;恒力弹簧的弹力不足会造成当主管道处于水平放置,探头在最低点检测时,探头的重力大于弹簧的弹力,探头表面无法继续贴合主管道表面。

(3) 不同堆型的主管道管径为 690~1 088 mm, SAGE 自动扫查器轨道内径仅有 1 100 mm,而固定的支撑脚需要深入轨道内,所以扫查器实际最大直径仅有约 1 000 mm。其对于不同管径的管道,尤其是大直径弯管适应性不佳。

1.2 进口备品备件的采购周期和价格因素

设备在使用过程中,主要的机械部件难免会出现老化或者损坏的情况,由于设备为进口设备,所以主要的备品备件均需进口采购。进口采购不仅周期长,价格也十分昂贵,这给进口设备的维护和使用带来了很大的不便,影响了设备的使用效率。

2 国产化改进的实施

2.1 主管道弯管夹持装置的改进

改进设计采用单轨道夹持,不采用生根装置。为了保证轨道对不同管径的适应性和夹持稳定性,将轨道分为两个系列(直径分别为 1 300 mm 和 1 050 mm),用以覆盖管径为 690~1 088 mm 的管道。 $\phi 1 500$ mm 导轨的外观如图 2 所示。



图 2 $\phi 1 050$ mm 导轨外观

为保证轨道夹持弯管时的稳定性,夹持爪采用万向脚杯(见图 3),该结构可以良好地贴合弯管处的圆弧表面,达到良好的夹持效果。

2.2 探头进给装置的改进

原设计为由弹簧直接驱动探头径向方向的进给运动,当主管道处于水平位置时,由于探头自身重力的存在,探头施加给被测管道表面的压力会随着探头沿焊缝的运动而发生变化,该情况势必会对检测精度和准确性产生一定的影响。



图 3 万向脚杯外观

国产化改进的探头进给装置为长行程恒力进给机构(见图 4),该设计很好地解决了上述提到的两个问题。国产化改进的探头进给装置由直线步进电机和压力传感器组成。直线步进电机通过电控进给来给探头施加一定的压力,再通过拉压力传感器反馈数据,最后通过算法来控制电机的进给量,达到实时调整压力的效果,以保证探头施加给管道表面的压力为恒定或者仅在某一小范围内波动。

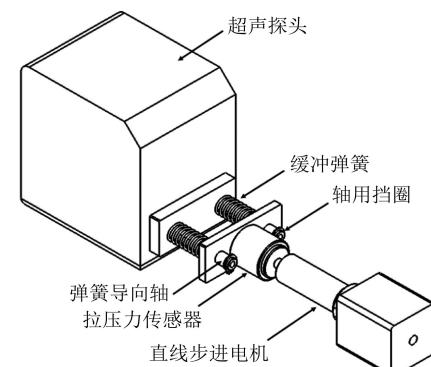


图 4 长行程恒力进给机构结构示意

2.3 探头恒力装置设计

相控阵超声探头恒力装置工作示意如图 5 所示。

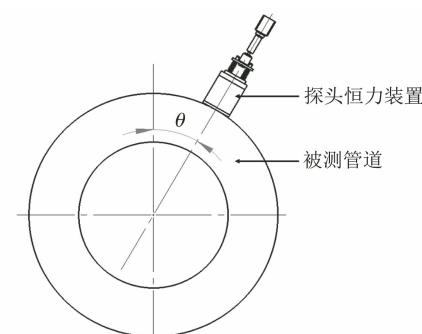


图 5 相控阵超声探头恒力装置工作示意

探头施加在被测管道表面的压力 F 与恒力装置绕被测管道圆周运动的角度 θ 之间存在一定函数关系(设探头重力为 G ,拉压力传感器示数为 F_1)。函数关系如下所述。

(1) $F = G \cdot \cos \theta + F_1 (0^\circ \leq \theta < \arccos \frac{F}{G})$, 此

时 F_1 为负值,为拉力。

$$(2) F = G \cdot \cos \theta + F_1 (\arccos \frac{F}{G} \leq \theta < 90^\circ), \text{ 此时 } F_1 \text{ 为正值,为压力。}$$

$$(3) F = -G \cdot \sin \theta + F_1 (90^\circ \leq \theta < 180^\circ), \text{ 此时 } F_1 \text{ 为正值,为压力。}$$

$$(4) F = G \cdot \cos \theta + F_1 (180^\circ \leq \theta < 270^\circ), \text{ 此时 } F_1 \text{ 为正值,为压力。}$$

$$(5) F = G \cdot \cos \theta + F_1 (270^\circ \leq \theta < \arccos \frac{F}{G}), \text{ 此时 } F_1 \text{ 为正值,为压力。}$$

$$(6) F = G \cdot \cos \theta + F_1 (\arccos \frac{F}{G} \leq \theta < 360^\circ), \text{ 此时 } F_1 \text{ 为负值,为拉力。}$$

3 现场应用

对自动扫查器进行国产化改进后,在某核电站进行了适应性试验和运动紧固带测试。课题组分别选择了大直径弯管($\phi 875$ mm)和中等直径直管($\phi 457$ mm)对扫查器的适应性和运动精度进行测试(见图 6)。测试得到自动扫查器轴向定位误差为 ± 1 mm,重复定位误差为 ± 0.5 mm。周向运动误差为 0.5 mm,重复定位误差为 ± 0.5 mm,运行精度较高。同时采用电机控制进给装置,保证探头始终能够以相对恒定的压力压紧待检部位,未出现压力过大影响运动或压力过小影响耦合的情况。

表 1 相控阵超声探头恒力装置验证数据

组别	预设压力/N	各角度下的实测压力/N							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	10	9.6	10.4	13.3	12.8	11.9	10.6	10.3	11.8
2	15	14.3	15.9	16.2	15.6	15.1	15.7	14.6	14.8
3	20	20.6	20.3	20.1	21.2	22.5	23.2	19.8	20.4

由表 1 可知,探头施加给管道表面的压力在预设压力 ± 3 N 的范围内波动。探头恒力装置能够保证探头在管道不同位置维持相对恒定的压力,避免探头自身重力导致其在管道顶部位置时压力过大影响运动,或者导致其在底部位置时重力与弹力抵消而离开待检面的情况。

经过一系列的国产化改进,相控阵超声自动扫查器在整体设计和机械部件生产方面完全实现了国产化,经过了一段时间的现场试验和实际作业,完全满足实际的使用要求,既达到了原设备的运行状况,同时提高了扫查器的适用性,降低了使用难度,也降低了更换



图 6 扫查定位精度测试现场

轨道适应性测试表明,自动扫查器通过更换不同尺寸的轨道、采用合适的万向接头,能够有效地适应不同尺寸直管和弯管的扫查,保证探头和待检部位的有效耦合,同时扫查器运动能够保证与焊缝平行且同心。扫查器弯管适应性测试现场如图 7 所示。



图 7 扫查器弯管适应性测试现场

为了验证探头恒力装置的准确性,将压力传感器与探头表面固定,通过压力传感器来直接反馈恒力机构施加给管道表面的力。相控阵超声探头恒力装置验证数据如表 1 所示。

备品备件的成本且缩短了周期,改进效果显著。

4 结语

(1) 国产化改进后,实现了机械部件的完全国产化,在实际使用和维护过程中,减少了维护成本且缩短了周期,简化了维护维修流程,提高了设备的使用效率。

(2) 国产化改进后,提高了扫查器的适应性,能够通过两种轨道结构适应管径为 688~1 100 mm 以及不同曲率半径的弯管或直管,大大简化了前期

(下转第 18 页)