

# 反应堆压力容器超声自动标定扫查装置的设计

宋 浩<sup>1</sup>, 王俊涛<sup>2</sup>, 周 文<sup>2</sup>, 王 龙<sup>2</sup>, 甘文军<sup>2</sup>

(1. 三峡大学 机械与动力学院, 宜昌 443002; 2. 中核武汉核电运行技术股份有限公司, 武汉 430223)

**摘 要:** 针对反应堆压力容器在超声检测时超声探头的标定, 设计了一种新型扫查装置。该扫查装置主要实现对超声探头的稳定夹持以及平稳带动, 同时可以精确地确定探头在标定试块上的移动位置, 调节并测出探头对试块表面的压力。着重分析了扫查装置的结构、工作原理和设计要点, 最后采用设计的扫查装置对压力容器进行了试验, 取得了良好的检测效果。

**关键词:** 超声检测; 压力容器; 标定; 扫查装置

中图分类号: TG115.28      文献标志码: A      文章编号: 1000-6656(2019)03-0068-04

## Design of an Ultrasonic Automatic Calibration Scanning Device for Reactor Pressure Vessel

SONG Hao<sup>1</sup>, WANG Juntao<sup>2</sup>, ZHOU Wen<sup>2</sup>, WANG Long<sup>2</sup>, GAN Wenjun<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
2. China Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

**Abstract:** A new type of scanning device is designed for the critical preparation of ultrasonic testing of reactor pressure vessels, the calibration of ultrasonic probes. It mainly realizes stable clamping and smooth driving of the ultrasonic probe, and can accurately determine the moving position of the probe on the calibration test block, adjust the pressure of the probe on the surface of the test block and measure the pressure value. The device can be applied to different types of calibration test blocks to serve ultrasonic testing of pressure vessels. This paper focuses on the analysis of the structure, working principle and design points of the scanning device; the test was carried out with the designed scanning device, and good detection results were obtained.

**Key words:** ultrasonic testing; pressure vessel; calibration; scanning device

随着我国核电事业的发展, 核电设备的无损检测工作日益繁重。超声波检测被广泛地应用于重要部件的检测中, 按照国家无损检测的标准, 核电无损检测的相关验收要求要高于常规工业检测的, 因此对超声检测的标定要求十分精确。其中, 反应堆压力容器无损检测时的超声探头标定工作目前为人工手动标定, 手动标定的劳动强度较大、效率低、可参考性差。笔者设计了一种超声自动标定扫查装置, 用于超声探头的自动标定, 克服了人工标定劳动强度大、效率低, 对探头移动时的压力、移动方向不稳定等难点。该装置使标定工作更加准确、方便, 超声检测标定的精度也得到了较大提高, 从而极大地提

高了反应堆压力容器无损检测的效率和质量。

### 1 超声探头的标定原理及对探头移动的要求

#### 1.1 超声探头的标定原理

超声探头的标定原理示意如图 1 所示, 探头在标定试块上移动, 晶片发出的声束经软件显示声波波形。反应堆压力容器无损检测中用到不同角度、不同频率的超声探头。在超声声束遇到通孔时, 波

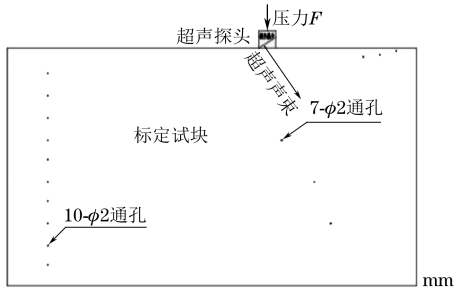


图 1 超声探头的标定原理示意

收稿日期: 2018-10-08

作者简介: 宋 浩(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无损检测设备研发

通信作者: 宋 浩, 809088864@qq.com

形有明显变化<sup>[1]</sup>。超声波的波形与通孔的位置、大小有关,也与超声探头和标定试块表面的压力、耦合状态有关<sup>[2]</sup>。软件记录某一探头的波形,以此作为基准。在压力容器的无损检测时,将某一超声探头的波形与该探头标定时的波形进行对比,便可以知道压力容器是否有缺陷(若有缺陷,可确定其缺陷的位置和大小)。

### 1.2 对超声探头移动的要求

试块的上表面为探头扫查平面,采用接触法进行超声波检测。整个过程需要让探头扫查完整整个试块,探头与试块表面耦合良好且压力保持恒定。装置可调节并实时显示探头与试块表面的压力。由于不同类型标定试块的尺寸以及通孔的大小、位置不一样,用手动操作的方法难以达到上述要求,因此需要使用专门的扫查装置,按试块(压力容器)的材料、通孔位置及大小、超声波频率及声程等参数要求进行标定,以达到最好的标定结果<sup>[3-4]</sup>。

## 2 装置的组成及工作原理

设计的反应堆压力容器超声自动标定扫查装置主要由电机与减速器组合、主动齿轮、从动齿轮、轴承、C型夹具、 $x$ 向传动机构、 $y$ 向传动机构、探头夹持器等组成,其结构如图2所示。为了保证装置便于运输携带,将C型夹具与传动机构设计为可拆式连接,不用时可拆C型夹具拆开。使用时,C型夹具支撑块放在试块表面,然后与C型夹具由螺钉连接,保证了C型夹具竖直方向的定位。C型夹具的内表面与试块侧面贴合,夹板在蝶形螺栓的驱动下顶住试块的另一表面,装置整体靠C型夹具夹紧试块而产生的摩擦力支撑。当装置固定好后拆掉C型夹支撑板,以防止其妨碍超声探头扫查完整整个试块。为了保证探头扫查行程完全覆盖试块的上表面, $x$ 向和 $y$ 向传动机构的行程都设计为大于试块

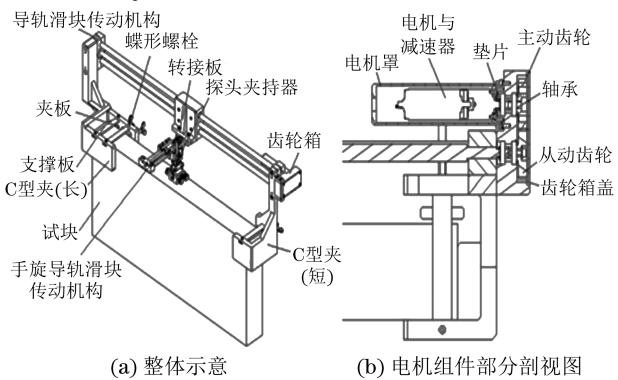


图2 扫查装置模型示意图

尺寸。工作时,伺服电机与减速器组合带动主动齿轮转动,从动齿轮与主动轮啮合传动,带动 $x$ 向传动机构中丝杆旋转,从而带动螺母与滑块前进。 $y$ 轴方向的传动由手动旋转 $y$ 向传动机构的丝杆实现, $x$ 、 $y$ 向传动机构均加有编码器,以确定传动位置。气缸通气后使超声探头贴合在试块表面(气压可调);同样贴合在试块表面的压力传感器可测出探头与试块表面贴合时的压力。

## 3 设计要点

在扫查装置的设计中,除了要满足前文所述的标定要求外,整个装置的质量应尽可能小,以便于检测人员携带和安装。装置中各零件的材料除了标准件和传动机构中渐开线齿轮选用304 SST不锈钢,以及部分销钉轴承选用9Cr18不锈钢外,其余均选用6061-T651铝合金(硬质阳极氧化以抵抗现场硼酸环境下的腐蚀)。

### 3.1 探头夹持器

探头夹持器的结构示意图如图3所示,探头夹持器的作用是带动探头在试块表面平稳地移动,并施加一定的压力。由于试块表面可能是平面也可能是圆弧面,为了保持探头与试块表面良好贴合,夹持器中铜套8与摆叉3的转动副保证了 $x$ 向的自由度,探头叉架2与摆叉3的圆弧形的滚转副保证了 $y$ 轴方向的自由度。气缸1在气压的作用下伸出气缸轴,气缸轴将探头压在试块上表面。超声波主声束与标定试块表面的贴合状态始终保持一致,两端导向轴保证了运动的平稳。气缸的气压可调,故压在探头表面的压力可调,选用的气缸压力范围为0~60 N,下端的压力传感器将压力显示在仪表上。根据超声探头接收到的信号波形调整压力。

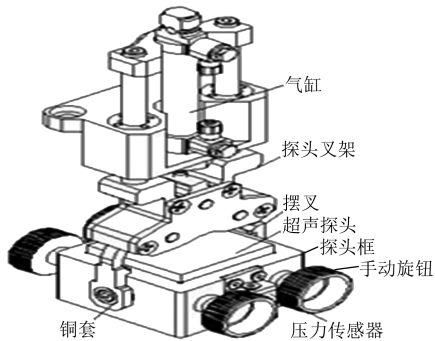


图3 探头夹持器结构示意图

### 3.2 探头的传送机构设计

#### 3.2.1 探头与试块表面摩擦力的计算

探头表面与碳钢试块表面的动摩擦因数为0.5,

由于探头夹持器可以由手动导轨滑块传动机构支撑,故探头与试块表面的压力可以认为均由气缸产生,取气缸最大气压 6 Pa 时的最大正压力 60 N 进行计算,运动过程中的最大摩擦力为 30 N。

3.2.2 扭矩的计算

自动标定扫查装置的负载为滑块、转接板、手旋导轨滑块以及探头夹持器的重力与探头在试块表面的摩擦力之和,传动机构丝杆螺母中的螺母(带动负载除去摩擦力)的质量为 1.7 kg,故传动机构中的轴向负载为 47 N。

选用的导轨滑块机构中的丝杆螺纹的类型为 TR18X24,螺纹的大径(外螺纹牙顶的直径) $d$  为 18 mm,螺距  $P$  为 24 mm,材料为聚缩醛树脂,动摩擦因数  $u$  为 0.21,螺纹的中径(沟槽和凸起宽度相等处的直径)如式(1)所示。

$$d_2 = d - 0.5P = 6 \tag{1}$$

螺纹升角的正切值如式(2)所示。

$$\tan \theta = P / (\pi d_2) = 1.27 \tag{2}$$

丝杠的传递效率如式(3)所示。

$$\eta = \frac{1 - u \tan \theta}{1 + u \tan \theta} = 0.709 \tag{3}$$

负载扭矩  $T$  为 0.253 1 N·m。

根据要求选择了 Faulhabe 直流有刷伺服电机,其直径为 32 mm,转矩为 0.119 N·m,转速为 5 560 r·min<sup>-1</sup>。为了提高扭矩与克服负载的转动惯量,在电机的前端安装了 Faulhaber 行星减速器,减速比为 14:1。由于行星减速箱的最大功效为 80%,故经过减速器之后的输出转矩为 1.332 8 N·m(大于需求负载 0.253 1 N·m),转速为 317.71 r·min<sup>-1</sup>,折算为探头前进的最大速度为 126.8 mm·s<sup>-1</sup>,符合探头扫查速度的要求;为了确定探头扫查的位置,电机后面加有编码器。

3.3 固定方案

由于试块上表面离地较高(1 m 左右),并且要

求该套装置能够频繁更换,故要求该装置的质量尽量小、固定方便、拆卸比较容易。在设计时考虑了夹紧机构的可操作性,以及便于更换、携带、拆装安全等因素,设计出了相关的机构,并进行了试验,确定了夹紧机构的方式及尺寸。

3.4 运动的控制

所选电机的额定电压为 36 V,额定电流为 2.4 A,所选编码器的分辨率为 1024×4 组脉冲。电机每转一圈,探头的前进距离为 24 mm,因此控制系统的精度为 0.01 mm;选用 gaily 控制卡。

4 试验过程及结果分析

4.1 单晶探头手动标定

选取了规格为 45T2 12-1401,0L2 12-1412,45L4 12-1446 的单晶探头在标定试块 IV-M-RV-001 上手动移动,并记录探测到的通孔的位置和超声信号波峰的大小,确定了探头合适的增益,并记录下来(见表 1)。

表 1 不同规格单晶探头探测到的通孔位置和增益

45T2 12-1401		0L2 12-1412		45L4 12-1446	
位置/mm	增益/dB	位置/mm	增益/dB	位置/mm	增益/dB
0.49	26.7	0.90	55.3	1.28	6.0
57.04	26.8	58.81	56.0	14.38	13.8
109.74	31.0	110.64	60.0	25.47	13.9
158.91	34.2	161.73	63.7	57.56	7.0
208.27	38.9	214.46	67.3	107.24	6.2
264.81	39.8	260.78	69.9	207.31	11.6
314.22	42.5	317.87	71.5	307.25	15.7

4.2 不同压力下探头扫查性能测试

在选取合适的增益之后,用超声自动标定扫查装置进行扫查,调节气缸气压,调整探头与试块表面的接触压力。鉴于压力过大时,摩擦力过大对探头的磨损严重,故选取压力在 3~21 N 之间,记录在不同的压力下测得的孔的位置和超声信号的强度(见表 2~4)。

表 2 探头 45T2 12-1401 在不同压力下测得的标定通孔的位置及超声信号的强度

3N		6N		9N		12N		15N		18N		21N	
孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%
55.58	70.6	58.97	85.1	58.79	83.9	58.07	83.5	56.08	71.0	55.80	75.1	55.94	75.3
107.38	62.0	108.96	66.3	108.83	69.0	108.87	70.6	107.15	63.1	108.60	72.9	107.83	68.2
158.72	89.4	158.68	90.2	158.50	92.5	158.54	92.2	158.41	87.1	158.23	90.2	158.27	90.6
208.58	80.4	209.75	78.8	209.53	78.8	209.62	78.4	209.48	76.9	210.07	79.6	210.21	77.6
259.11	76.5	259.07	76.1	258.84	78.0	258.12	78.0	258.79	76.5	258.61	78.8	257.89	78.4
313.71	72.5	313.57	69.4	312.63	70.6	312.67	70.6	313.39	71.0	313.21	72.5	314.03	72.2
369.62	53.7	369.53	52.9	371.02	53.7	371.02	54.1	371.02	53.3	370.80	55.7	370.75	55.3

表 3 探头 45L4 12-1446 在不同压力下测得的标定通孔的位置及超声信号的强度

3N		6N		9N		12N		15N		18N		21N	
孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%
57.57	63.9	58.88	65.1	58.02	67.5	58.02	70.6	58.18	68.6	57.98	71.4	57.81	72.9
110.70	54.5	110.83	53.3	109.68	54.5	110.42	55.7	110.42	54.1	109.60	55.7	109.35	55.3
160.15	74.5	159.99	76.1	161.34	76.5	161.34	77.6	161.34	75.3	160.56	80.0	161.34	82.1
212.27	60.4	211.44	66.7	211.20	67.1	211.20	67.8	211.94	69.8	211.94	69.4	212.00	69.0
266.15	65.1	263.68	68.6	264.30	68.2	264.30	69.0	265.08	67.8	264.26	73.3	265.08	69.4
315.80	62.4	314.07	63.1	318.63	65.1	318.63	64.7	314.64	62.4	317.77	67.5	317.65	69.4

表 4 探头 0L2 12-1412 在不同压力下测得的标定通孔的位置及超声信号的强度

3N		6N		9N		12N		15N		18N		21N	
孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%	孔深/ mm	满屏波高 /%
15.55	56.9	15.55	57.3	15.55	55.3	15.55	53.3	15.55	53.7	15.55	53.3	15.55	54.1
25.22	82.4	25.22	83.5	25.22	84.3	25.22	83.5	25.22	80.0	25.22	81.6	25.22	83.1
56.61	56.5	56.61	58.0	56.61	59.6	56.61	60.4	56.61	54.9	56.61	52.5	56.61	46.3
107.00	66.3	107.00	66.3	107.00	65.1	107.00	65.9	107.00	66.3	107.00	64.3	107.00	65.5
207.06	66.7	207.06	66.3	207.06	67.1	207.06	66.3	207.06	67.1	207.06	65.1	207.06	67.1
307.10	69.4	307.10	69.0	307.10	68.6	307.01	68.6	307.10	69.4	307.10	67.1	307.10	68.2

4.3 试验结果分析

(1) 超声探头在常规无损检测过程要求的压力下,不同的压力对超声标定信号的强弱有一定影响,但是压力的变化对信号的影响并不显著,并不是压力越大信号就越好。

(2) 设计的扫查装置可以实现超声探头的自动标定,在扫查过程中探头移动比较平稳,且探头与试块的接触压力可调,超声信号比较理想,能够实现对探头的良好标定。

5 结语

用设计的自动标定扫查装置,对标定试块进行了超声标定试验,所设计的自动扫查装置是可行的,

具有方便携带、功能可靠等特点,达到了超声自动标定要求的精度,提高了压力容器无损检测的可靠性,有效地保证了反应堆压力容器的质量。

参考文献:

[1] 褚长春.影响铸件超声检测声波衰减的因素[J]. 科技创新与应用, 2016(21): 162.

[2] 肖锋,俞卫权,桂兴亮,等.超声检测时探头压力对缺陷尺寸评定的影响[J].无损检测, 2015,37(6):74-76.

[3] 邓嘉鸣,唐大美,沈惠平,等.动车空心轴疲劳缺陷超声波探伤探头机构设计[J].机械设计与制造, 2012(1): 31-33.

[4] 张世荣,赵准,李善伟,等.串列式超声探伤扫查装置的设计[J].机械设计与制造, 2002(3):81-82.

(上接第 62 页)



图 5 射线检测底片

5 结语

利用相控阵超声探头配合合适的角度楔块可以产生大角度纵波声场的特点,完成对焊缝的扫查覆盖,采用多种成像模式分析超声信号的特征,为缺陷的定性提供了便利。

采用相控阵超声检测时,通过制定合理的检测工艺能够提高检测效率,提高缺陷检出率,为内有流体介质的在役管道焊缝检测提供一种新的检测方法。

参考文献:

[1] 刘德荣,贺潜源.利用爬波测定表面裂纹深度[J].无损检测, 1988,10(7):197-199.