

# 防振条位置的涡流检测

代勤龙

(东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455)

**摘要:** 蒸汽发生器在制造、安装和运行过程中,防振条与 U 形热交换管的相对位置可能由于二次侧水流或者外力等作用而改变,而失去防振作用。运用涡流检测的手段,可以获得防振条与 U 形管相对位置的信息。水压后防振条位置的检测,可作为蒸发器运行过程中监测的基准,对整个蒸发器的安全有效运行起着重要的作用。该方法解决了已完工的蒸汽发生器防振条与换热管相对位置如何测量的问题。

**关键词:** 涡流检测;蒸汽发生器;U 形管;防振条(AVB)

**中图分类号:** TG115.28

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6656(2016)10-0018-03

## Eddy Current Testing of AVB Position

DAI Qin-long

(Dong Fang (Guang Zhou) Heavy Machinery Co., Ltd., Guangzhou 511455, China)

**Abstract:** In the process of manufacture, installation and operation of steam generator, the relative position of the anti-vibration bar and the U-shaped heat exchange tubes may be changed due to secondary side effect such as water or outside force, thus possibly resulting to its failure. Using eddy current testing method, the information on the relative location of anti-vibration bar of U-tube can be obtained. The position detection of anti-vibration bar after the hydraulic test can be used as a benchmark during the steam generator operation, which may play an important role for the safe and effective operation of the evaporator. The application of this type of eddy current testing has solved the problem of how to measure the relative position of heat exchange tube and anti-vibration bar for the existing steam generators.

**Key words:** Eddy current testing; Steam Generator; U-tube; Anti-vibration bar(AVB)

蒸汽发生器的设计中,防振条(AVB)的主要作用在于减少 U 形热交换管弯管区的振动,避免管子之间以及管子和管子支撑板之间的碰撞和摩擦,从而降低热交换管壁厚减薄或破损的风险。在蒸发器安装完成后,由于二次侧管束区域可达性的限制,往往无法通过常规的方法测量或监测防振条的位置。

在蒸汽发生器的制造和运行过程中,常使用涡流检测的方法<sup>[1]</sup>对热交换管质量进行检验。涡流检测使用内穿探头穿过整个热交换管长度,记录各个位置涡流信号的响应,以发现和定位缺陷。涡流检

测频率与涡流信号渗入深度成反比,由于热交换管管壁较薄,较低频率的涡流信号能够穿透热交换管;位于热交换管外的金属结构,如管板、管子支撑板、防振条或含有金属碎屑的泥渣等能产生一定的响应。因此通过合理地选择涡流检测的频率,使用具有轴向编码器定位功能的涡流仪,可以获得较为精确的防振条位置信息。

## 1 检测描述

在蒸发器的制造、安装和运行中,防振条的移动主要有两种:一种是沿换热管弧线方向偏移,另一种是沿换热管竖直方向纵深移动。文章主要讨论第二种移动情况,即防振条竖直方向移动过大(按蒸发器立式放置)而导致防振条底部中心偏离其安装时的

收稿日期:2016-06-22

作者简介:代勤龙(1982—),男,本科,工程师,主要从事核岛主设备蒸汽发生器和反应堆压力容器制造过程中的无损检测。

通信作者:代勤龙,E-mail: daiqinlong\_dfhm@163.com。

理论位置,对其底部附近或最外侧的 U 形管段失去限制,或同一管子两侧防振条竖直位置相差过大,仅能从一侧限制管子的振动,如图 1 所示。当测得的防振条底部中心位置相对其理论位置高于  $D_{\max}$  或低于  $D_{\min}$  时,即认为该防振条失效,需引起关注。

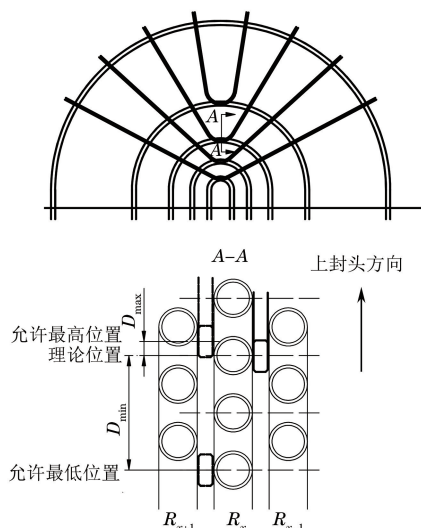


图 1 防振条底部位置升降示意

## 2 理论建模

通过数学建模,将问题简化为两种情况(见图 2)。使用涡流探头可以测出防振条与换热管交点之间的弧长,然后用三角函数进行计算,从而得出防振条底部中心的实际位置与 U 形管中心线之间的距离  $d$ 。

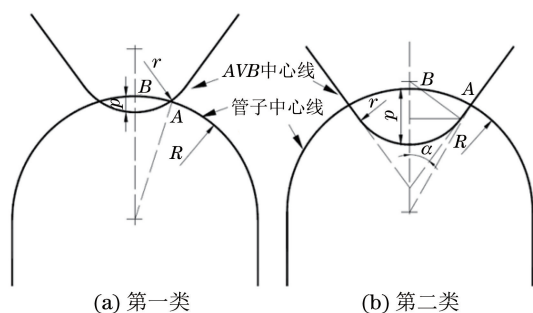


图 2 防振条升降位置计算模型

情况 1 为防振条底部圆弧段与 U 形管接触,情况 2 为防振条直段与 U 形管接触,U 形管和防振条的尺寸( $r, a, R$ )( $r$  为防振条圆弧段半径, $a$  为  $1/2$  的防振条圆弧角度, $R$  为换热管圆弧半径)可由图纸查得。弧长  $\widehat{AB}$  为热交换管同一侧防振条接触区域之间展开距离的  $1/2$ 。 $d$  为竖直方向上防振条底部中心的实际位置与 U 形管中心线之间的距离,其计算公式如下:

(1) 情况 1(底部圆弧段接触)时:

$$d = R + r - \sqrt{R^2 - [R \sin(\widehat{AB}/R)]^2} - \sqrt{r^2 - [R \sin(\widehat{AB}/R)]^2} \quad (1)$$

当同一侧两个接触区域之间的展开距离大于下述值时(注:防振条直段与圆弧段相切),使用情况 2 公式计算:

$$l' = 2 \arcsin\left(\frac{r \cos a}{R}\right) \cdot R \quad (2)$$

(2) 情况 2(直段接触)时:

$$d = R - \left(R \cos \frac{\widehat{AB}}{R} - R \sin \frac{\widehat{AB}}{R} \cot a\right) - \left(\frac{r}{\sin a} - r\right) \quad (3)$$

根据间接测量的不确定度传递规则,对  $d$  的不确定度应由弧长  $\widehat{AB}$  的测量不确定度(即  $\Delta \widehat{AB}$ ),防振条尺寸的不确定度(即  $\Delta r, \Delta a$ )及 U 形管尺寸的不确定度(即  $\Delta R$ )的合成:

$$\Delta d = \left[ \left( \frac{\partial d}{\partial \widehat{AB}} \Delta \widehat{AB} \right)^2 + \left( \frac{\partial d}{\partial r} \Delta r \right)^2 + \left( \frac{\partial d}{\partial a} \Delta a \right)^2 + \left( \frac{\partial d}{\partial R} \Delta R \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

其中,弧长  $\widehat{AB}$  的不确定度由仪器的轴向定位误差和测量方法的固有不确定度决定。仪器轴向定位误差可通过固定间距的结构信号多次测量的试验结果进行估算,约为  $0.02 \text{ mm}$ 。当使用旋转探头(MRPC)时,由于探头螺旋状扫描前进,防振条的中心线可能位于两次扫描中间,防振条的真实位置将与信号峰值位置有一定差异,如图 3 所示。

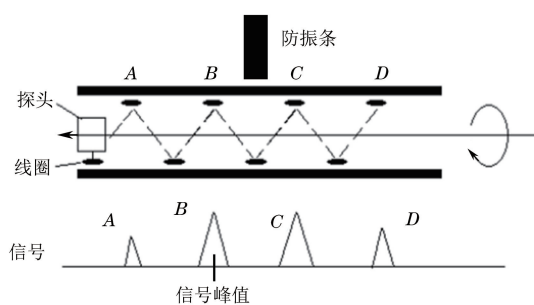


图 3 测量方法的固有不确定度

当 MRPC 探头的周向转速为  $800 \text{ rpm} \cdot \text{s}^{-1}$  及轴向速度为  $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,可计算出在此测量方法下,弧长  $\widehat{AB}$  测量的固有不确定度约为  $0.53 \text{ mm}$ 。

对防振条和 U 形管尺寸的不确定度,如原材料厂有详细的每根实际的测量值,则计算时可直接采用每根 U 形管和防振条的实际值进行计算,该项不确定度可以不予考虑。如无实际测量数据或其尺寸

已经不可追溯,则可采用采购图中的名义尺寸进行计算,并将其公差作为不确定度的最大估计。

### 3 检测方法

该项检测采用旋转探头(MRPC)涡流检测方法,使用具有轴向编码器功能和自动推拔器的涡流仪(如 ZETEC 的 MIZ-80iD)采集与防振条底部接触的换热管的涡流信号,即安装防振条时防振条中心轴线与换热管中心轴线在顶点重合。对于某 SG 列编号为 3、15、30 和 56 的 U 形管;其两侧各有一根防振条(见图 4),使用普通轴绕式内穿探头(BOBBIN)无法区分两侧的防振条信号,故使用 MRPC 探头(电机驱动的可绕轴向旋转的放置式探头)进行检测。MRPC 探头上的 Pancake 线圈在前进的同时绕探头轴向旋转,编码器记录探头轴向前进及线圈旋转的周向位置,可建立热交换管内表面涡流信号强度的三维图,进而得到防振条与管子接触区域的位置信息,如图 4 所示。

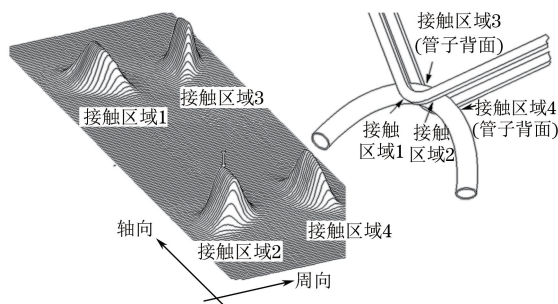


图 4 防振条与管子接触区域的涡流信号示意

由于防振条表面(平面)与管子圆周(近似圆柱面)接触区域为一平面曲线,其涡流信号的最大值位置为防振条的中心位置,如图 5 所示。

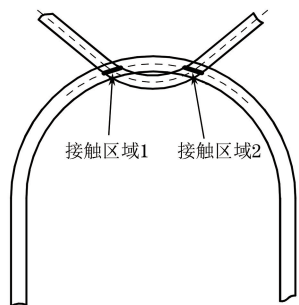


图 5 防振条表面与管子圆周接触区域示意

在对换热管采集数据前,采集如图 6 所示的对比

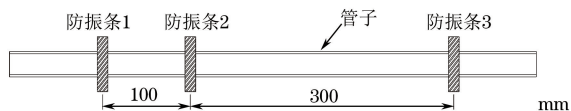


图 6 对比样管的涡流数据

样管涡流数据,以建立轴向编码器脉冲信号数与距离的对应关系。在一段直管上,垂直管子轴线方向放置 3 根防振条,两防振条间的间距分别为 100,300 mm。

主要检测工艺参数如下:

(1) 检测仪器: MIZ80-iD 多频涡流仪器,内置轴向位置编码器。

(2) 涡流探头: Pancake 探头加上 90 in (1 in = 25.4 mm) 的延长线。因该探头能探测各方向信号,无方向盲区。也可使用阵列探头,数据采集速度更快,效果与 MRPC 探头相差无几。

(3) 探头频率: 因需探测到换热管外防振条信号,故外部支撑检测频率定为 100 kHz。

(4) 采集速度设定: 在探头回收时进行数据采集。应进行调节并设置探头轴向移动速度和转速,使其螺距为 1 mm 最小,2 mm 最大。螺旋速度取决于电机类型。并且,应核查转速,其变化应保持在 10 rpm 之内。

经多次试验,阵列探头速度为  $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时误差最小。

(5) 数据分析方法: 数据分析前,应开启轴向编码器菜单,并利用对比样管对轴向编码器进行标定。如防振条 1 与防振条 2 之间有 1 000 个编码器脉冲信号,每个脉冲对应的距离为 0.1 mm;然后用防振条 1 与防振条 3 之间的脉冲信号验证标定,计算出间距,误差小于 0.5% 则认为标定正确。

数据分析时,显示所使用通道的水平和数值条状图以及李萨茹图,并打开三维扫描数据分析窗口(见图 7)。

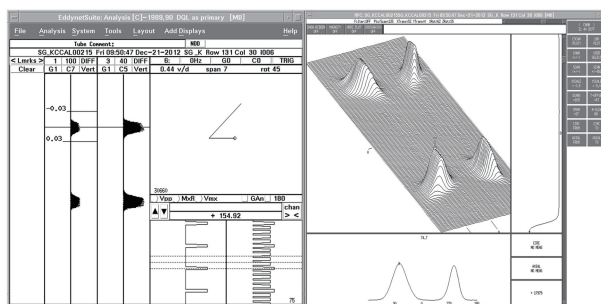


图 7 三维扫描数据分析窗口图

将光标移动至第一个防振条涡流信号的中心,初始化轴向编码器,然后将光标移动至第二个防振条涡流信号的中心,记录轴向编码器数值,获得此两个信号之间的距离。通过同一个防振条的两接触点相应的涡流信号,可以确定防振条的下沉位置。涡流信号通常为  $2 \times 2$  (成对出现,一侧会有两个信号),

(下转第 59 页)

为  $24.9^\circ$  的 S2 模式适用于氢鼓泡缺陷的检测。

表 5 内壁  $\phi 20$  mm 鼓包缺陷导波检测结果

探头位置	实际测量值/mm	导波检测数据/mm	误差/mm	误差率/%
探头前端距最近反射体的距离	外部:580	576.6	外部:-3.4	外部:-0.6
	内部:578		内部:-1.4	内部:-0.2
探头前端距最强反射体的距离	590	592.2	2.2	0.4
			—	—
探头前端距最远反射体的距离	外部:600	610.5	外部:10.5	外部:1.8
	内部:602		内部:8.5	内部:1.4
探头前端距试板左端面的距离	900	905.3	5.3	0.6
			—	—

根据 WAVE2000 软件仿真结果,采用最优检测参数对人工模拟试板进行 Lamb 检测试验,结果表明该方法检测效果不仅能够检出缺陷,而且缺陷定位精度也较高。

#### 参考文献:

- [1] 任学冲,单广斌,褚武扬,等.氢鼓泡的形核、长大和开裂[J].科学通报,2005,50(16):1689-1692.
- [2] 王杜.金属薄板的超声兰姆波无损检测[D].武汉:武汉科技大学,2007.
- [3] 张贤达,保铮.非平稳信号分析与处理[M].北京:国防工业出版社,1998:52-62.
- [4] L 科恩.时频分析理论与应用[M].白居宪,译.西安:西安交通大学出版社,1998:23-47.
- [5] PROSER W H, SEALE M D. Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes[J]. J Acoust Soc Am, 1999;105(5): 2669-2676.
- [6] 王杜,郑祥明,唐正连,等.兰姆波在薄钢板无损检测中的应用研究[J].无损检测,2007,29(4):193-196.



(上接第 20 页)

故可用来区分是管子哪一侧的防振条产生的信号,与信号的周向坐标相关。可通过三维视图窗口(见图 7)找出区别来。

当热交换管任一侧的防振条信号出现以下情况时,应在同一排半径更大的一列换热管进行采集:① 无防振条信号显示。② 防振条信号叠加,不能够显示出任一接触点。

#### 4 试验验证

用两根同规格防振条和一根换热管模拟在蒸汽发生器管束中的位置摆放,使它们的空隙刚好能放入一根宽度为 30 mm 的钢直尺(见图 8)。通过上述检测方法,测得防振条与换热管交点间的弧长分别为 171.59,173.12mm。换热管半径  $R$  为 239.5 mm,防振条半径为 130 mm,角度  $32^\circ 18'$ 。通过公式计算后得到  $d$  值分别为 44.22,45.06 mm,不确定度为 1.4 mm。实际值为  $30 + 6 + 19.05/2 = 45.525$ mm,可见测量结果与实际是吻合的。

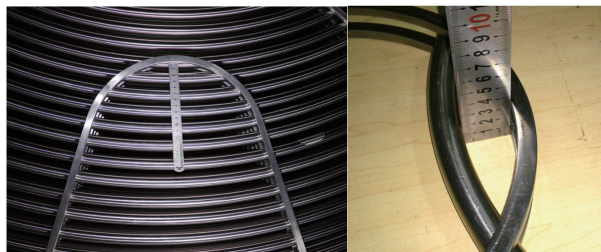


图 8 验证试验中防振条和换热管的摆放位置示意

#### 5 结语

利用上述涡流检测方法以及获得的关键参数,对某项目 2 号机组蒸汽发生器在水压后的防振条位置进行检测。检测结果表明:该蒸发器 U 形管的自由段长度以及防振条竖直方向的位置均在设计文件的要求范围之内,防振条的安装质量较高,管束受到了有效的保护。

#### 参考文献:

- [1] 《国防科技工业污水检测 资格鉴定与认证培训教材》编审委员会编.涡流检测[M].北京:机械工业出版社,2004.