

# 用于电站热交换管检测的四频涡流检测仪

林介东

(广东电力试验研究所, 广东 广州 510600)

**摘 要:** 详细介绍了四频涡流检测仪的工作原理和技术特点, 提出了制作检测线圈的具体要求。

**关 键 词:** 电站; 热交换管; 涡流; 检测

中图分类号: TM621; TK313 文献标识码: B

## 1 概述

我国电力工业于 20 世纪 80 年代中期才开始开展涡流检测工作, 与其它行业(如航空航天)相比, 起步较晚。当时仪器多为表头式便携结构, 体积小、操作简单、使用方便, 主要用于汽轮机叶片的表面近表面手动探伤, 但由于仪器容易产生零飘, 检测灵敏度低, 应用受到很大的限制。80 年代末 90 年初, 随着大型石化设备的引进, 带阻抗平面显示、微机数据处理的涡流仪也引入国内, 很快, 我国相应研制了类似仪器, 如厦门涡流研究所的 ET-551 电脑多功能涡流探伤仪, 随后不久, 出现了多频(双频)涡流检测仪, 广泛应用于电力系统冷凝器的铜管检测。1997 年开始, 我所与厦门涡流研究所合作, 开发出方便、实用的数字式电脑四频涡流检测仪。经过三年多的现场实际应用, 证明该仪器具有操作方便、检测速度快、灵敏度和自动化程度高等优点, 可用于检验铁磁性热交换管材及非铁磁性热交换管材的制造或运行中产生的缺陷, 并能够对管件的损伤程度进行较精确定量, 确定受检的管子是否应该更换, 从而可保证管件能最大限度地发挥其作用。

## 2 仪器原理及技术性能

### 2.1 仪器原理

仪器应用了电磁感应的原理, 即通过探头激励线圈的交变电流产生一个交变的电磁场, 交变电磁场在试件中激发出涡流, 而由涡流发出的含有被检信号的反磁场对高频等幅振荡的激励信号进行调制, 使通过探头接收线圈的感应电压(或阻抗)发生

变化。最后, 涡流检测仪的检出、放大电路提取出调制信号, 经过处理后指示或显示出缺陷信号。

目前普遍使用的双频涡流检测仪, 只能给探头线圈施加两种不同频率的激励电流, 电路中采用单频率鉴相技术, 最多只可以抑制一个干扰信号的影响, 可靠性、灵敏度都不能满足要求。而四频涡流检测技术可使多个不同频率的电流同时激励探头, 根据不同频率对不同的参数变化所取得的测量结果, 经过实时矢量相加和处理, 提取所需信号, 抑制更多不需要的干扰信号, 具有“去伪存真”的特殊功能, 因此, 能够解决双频涡流检测仪所不能解决的许多问题。

### 2.2 四频涡流检测仪的技术特点

四频涡流检测仪最主要的技术特点之一是采用了四个可同时用于检测的频率通道。不同频率的检测结果被“混频”处理后, 结果较单频或双频更为可靠。另外, 四频涡流检测仪仍可以当作单频或双频涡流检测仪使用, 适用于不同环境、不同条件下的现场工作和对比实验。

现场检测经常发现, 采用单频涡流检测在役热交换器冷凝管, 邻近的结构部件会产生很强的干扰信号, 如冷凝管支撑板产生的涡流信号, 与其附近的缺陷信号混合在一起, 很难分辨真伪。

若将两个不同频率的激励电流同时施加于检测线圈, 采用适时混频技术即可除去一个干扰信号。因为同一缺陷或干扰源在不同的频率下会产生不同的涡流反应, 而涡流信号是一个矢量信号, 多个迭加在一起的涡流信号可以通过矢量运算相加减, 来放大缺陷信号, 同时排除或减小干扰信号。其基本原理简单表述如下:

设  $M_1$ 、 $M_2$  分别为频率  $f_1$  和  $f_2$  下得到的检测结果,  $A_1(S)$ 、 $A_2(S)$  分别为缺陷在  $f_1$ 、 $f_2$  下的涡流响应,  $B_1(N)$ 、 $B_2(N)$  分别为干扰源在  $f_1$ 、 $f_2$  下的涡流响应, 则:

$$M_1 = A_1(S) + B_1(N)$$

$$M_2 = A_2(S) + B_2(N)$$

即某一频率下的检测结果为缺陷和干扰源涡流响应的矢量和。令  $\lambda$  为调节因子(调节增益系数), 并使  $\lambda B_1(N) = B_2(N)$ , 则:

$$\lambda M_1 = \lambda A_1(S) + \lambda B_1(N)$$

$$\lambda M_1 - M_2 = \lambda A_1(S) - A_2(S)$$

此时的检测结果只与缺陷有关, 而与干扰源无关, 即干扰信号被抑制掉了。基于这一原理, 即可采用双频涡流检测, 抑制在役检测中的支撑板信号的干扰, 提高信噪比。

实际检测中, 在选择检测频率时, 既要考虑保证有足够的分辨率, 又要考虑尽量降低管材的噪声信号, 提高信噪比。为了获得足够的缺陷分辨率, 需要较高的频率, 但是噪声信号的影响将随着频率的提高而增加, 因此又希望采用尽可能低的频率。一般情况下, 为使内外壁缺陷的涡流信号保持一定的相位差, 可按以下经验公式选择检测频率  $f$ :

$$f = 503^2 / \sigma \mu_0 \delta^2 \approx 503^2 \rho / d^2$$

式中:  $\rho$ —电阻率,  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$   $d$ —管材的壁厚,  $\text{mm}$

在此频率  $f$  下, 趋肤深度  $\delta$  与管材厚度  $d$  相当, 管材内外壁缺陷涡流信号的相位角相差较大。但是这时管材加工噪声信号和检测线圈抖动噪声信号均较高。如果同时存在支撑板信号的干扰, 双频涡流检测抑制干扰的效果就不是很理想了。而四频涡流检测仪能够较好的同时抑制多种干扰源的干扰信号。例如, 由一通道和二通道混频得到混合单元  $M_1$ , 由三通道和四通道混频得到混合单元  $M_2$ ,  $M_1$  与  $M_2$  的频率关系可由试验取得。两个混合单元的副频均为主频的  $1/2$  左右, 再将抑制了支撑板信号的  $M_1$  与抑制了加工或抖动噪声信号  $M_2$  混频得到混合单元  $M_3$ 。这样, 加工或抖动噪声信号和支撑或隔板信号都被有效抑制了。

经过实际检测可知, 经过混频技术处理后, 尽管缺陷信号的幅度有所降低, 但不致于影响缺陷的判定, 同时信噪比提高了。

另外, 四频涡流检测仪测试频率宽, 四个通道互相独立调整, 从  $0.1 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$  共 360 个频率点可任意选择调定。同时, 采用锁相环技术, 每个频率都具有石英晶体稳定度。因此, 适用于从高电导率的铜、铝至低电导率的钛、不锈钢的检测, 对钢铁等铁磁性金属同样具有优良的效能。

四频涡流检测仪可选择多模式报警方式, 包括: 框形域、窗口域、扇形域以及圆形域等。操作者因此可根据缺陷信号的特征来选择设置相应的报警区域。例如, 对管材检测时, 利用管内外壁缺陷相位差异, 采用区域扇形报警域, 就能将内壁或外壁裂纹自动区别, 予以报警。

### 3 检测线圈(探头)的设计与制作

涡流检测时, 只有当显示的缺陷信号具有足够的幅度和相位差时, 缺陷才能够精确判别。由于缺陷信号是通过涡流检测线圈直接感应出来的。因此, 设计并制作高质量的涡流检测线圈是保证高的检测灵敏度和可靠的检测结果的关键。

检测线圈主要由线圈和骨架组成。线圈形状主要为扁平状, 根据用途分为单线圈和双线圈; 骨架用圆柱形和环形等两种形状。

对于扁平检测线圈来说, 其轴线上的磁场强度的分布特性与线圈的内、外径大小以及轴向厚度有关, 而轴向磁场特性的变化又直接影响检测线圈的灵敏度和线性测量范围。因此, 选好检测线圈的尺寸大小至关重要。载流扁平检测线圈在轴线上距线圈中心距离  $x$  处的  $P$  点产生的感应强度  $B_p$  为:

$$B_p = \frac{\mu_0 NI}{2(r_a - r_b)h} \left[ (x+h) \ln \frac{r_b + \sqrt{r_b^2 + (x+h)^2}}{r_a + \sqrt{r_a^2 + (x+h)^2}} - x \ln \frac{r_b + \sqrt{r_b^2 + x^2}}{r_a + \sqrt{r_a^2 + x^2}} \right]$$

式中  $r_a$ 、 $r_b$ 、 $h$ ——分别为线圈的内、外半径及轴向厚度

$N$ ——线圈的匝数

$I$ ——线圈中通过的电流强度

分析该公式可知: 线圈外径大, 线性范围大(即轴向磁场分布平稳,  $B_p \sim x$  变化平缓), 但灵敏度低, 反之, 线圈外径小、线性范围小、灵敏度高; 线圈轴向厚度小(即线圈薄), 检测灵敏度高; 线圈内径不同时, 轴向磁场变化很小。因此, 在设计检测线圈时, 为使外径一定的线圈有较大的线性范围和尽可能高的灵敏度, 则线圈的厚度应尽量薄。如果要求线性测量范围大, 则线圈外径就要尽可能大; 若要求灵敏度高, 则线圈的外径应尽量小。这时, 线性范围和灵敏度要求是两个不能同时满足的矛盾, 在设计线圈时, 应根据实际需要满足其主要性能。但不论如何, 检测

(下转第 194 页)

由于使用矢量控制技术使得速度控制和瞬态响应的精度大大提高。系统动态响应速度快, 调节线性度好, 自动投入率高。调试运行结果表明, 采用高压变频调速技术后, 炉膛负压调整稳定, 系统响应速度提高(见图 6)。

由于采用了完美无谐波技术, 变频器的输出电流波形接近正弦波, 对自身及周边设备无任何干扰。

#### 4 结束语

高压变频调速技术已在多家电厂的送吸风机、给水泵、灰浆泵等辅机设备改造中得到推广应用, 并取得了良好的运行效果和经济效益。因此, 将高压变频调速控制技术应用到火电厂主要辅机设备的设

计和改造当中对节能降耗, 提高自动化控制水平具有重要的实际意义和广阔的推广应用前景。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 李遵基. SPEC2000 MICRO 和 SPEC200 原理及应用[ M ]. 北京: 科学技术出版社, 1992.
- [ 2 ] 李遵基. 李遵基科技论文集[ M ]. 天津: 科学技术出版社, 1996.
- [ 3 ] 李遵基. 中压变频器在火电厂送风机控制中的应用[ J ]. 中国电力, 2000(6): 75—77.
- [ 4 ] 韩安荣. 通用变频器及其应用[ M ]. 第 2 版, 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [ 5 ] 完美无谐波系列交流马达变频器用户手册[ M ]. 上海: 上海罗宾康高压电气有限公司, 1999.

(何静芳 编辑)

(上接第 190 页)

线圈的品质因子( $Q = \omega R/L$ ) 都应尽可能高。

我们对广东省内的部分有代表性的电厂进行调研, 具体了解了目前在役和在建电厂凝汽器铜管、钛管及其它热交换管普遍采用的规格型号、材质等情况。在此基础上, 有针对性地设计制作了一批探头, 应用效果令人满意。部分探头资料见表 1。

表 1 涡流探伤用部分探头

探头规格	探头型式	适用管材
$\Phi 16 \times 1$ $\Phi 16 \times 1.5$	外穿式、内穿式	黄铜、白铜
$\Phi 19 \times 1$ $\Phi 19 \times 1.5$	外穿式、内穿式	黄铜、白铜
$\Phi 20 \times 1$	外穿式、内穿式	黄铜、白铜
$\Phi 21 \times 1$	外穿式、内穿式	黄铜、白铜
$\Phi 24 \times 0.7$	外穿式、内穿式	钛管
$\Phi 24 \times 1$	外穿式、内穿式	黄铜、白铜
$\Phi 25 \times 1$	外穿式、内穿式	黄铜、白铜
$\Phi 30 \times 1$	外穿式、内穿式	黄铜、白铜
$\Phi 32$	外穿式	钢管
$\Phi 38$	外穿式	钢管
$\Phi 42$	外穿式	钢管
$\Phi 44.5$	外穿式	钢管

#### 4 数字四频涡流检测仪在电厂的应用

数字四频涡流检测仪经过不断完善, 近年来在广东电力系统得到广泛应用。通过对几十台汽轮机冷凝器、加热器、空冷器、氢冷器的热交换管和锅炉

水冷壁、过热器、再热器、经济器等锅炉热交换管的检测, 发现了一大批腐蚀、裂纹、磨损等缺陷。如 2001 年 2 月珠江电厂 1 号机组大修, 检验低加热交换管 2 484 根, 发现超标缺陷管 18 根; 检验冷凝器热交换管约 10 700 根, 发现缺陷管 51 根; 检验氢冷器热交换管 2 组 612 根, 发现缺陷管 15 根, 超标缺陷管 10 根; 检验 2 组在役空冷器热交换管, 发现超标缺陷管 15 根, 穿透裂纹管 8 根, 严重腐蚀管 7 根。以上缺陷, 厂方已决定堵管或换管, 确保发电机组安全运行。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 韩书霞, 李强. 全数字涡流检测仪在 B30 白铜管涡流探伤中的应用[ J ]. 无损探伤, 1997 (1): 41—42.
- [ 2 ] 王绪敏, 于月峰. 国产 600MW 机组凝汽器铜管的涡流检测[ J ]. 黑龙江电力, 1998 (5): 284—285.
- [ 3 ] 饶利民. 凝汽器铜管的役前涡流检测[ J ]. 无损探伤, 1999 (1): 44—45.
- [ 4 ] 林介东, 倪进飞. 数字式四频涡流检测仪研制工作总结[ R ]. 广州: 广东省电力试验研究所, 1998.
- [ 5 ] 倪进飞, 刘红文. 潮安电厂冷凝器热交换管涡流检测报告[ R ]. 广州: 广东省电力试验研究所, 1999.
- [ 6 ] 童亮, 冯活河. 珠江电厂加热器、空冷器、氢冷器、冷凝器涡流检测报告[ R ]. 广州: 广东省电力试验研究所, 2001.

(渠 源 编辑)

It is noted that pH value and dew point temperature control and the relevant component design of the desulfurization unit are the key factors ensuring the stable and high-efficiency operation of the integrated device. In connection with relevant engineering practice some technical measures are proposed to ameliorate and solve existing issues related to the wet desulfurization method. **Key words:** wet method, desulfurization, dust removal

用于电站热交换管检测的四频涡流检测仪 = **Four-frequency Eddy-current Detecting Device for the Detection Testing of Power Plant Heat Exchange Tubes** [刊, 汉] / LIN Jie-dong (Guangdong Electric Power Testing Research Institute, Guangzhou, China, Post Code: 510600) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17 (2). — 189 ~ 190, 194

The working principles and technical features of a four-frequency eddy-current detecting device are described in detail. Some specific requirements concerning the manufacture of detection coils are also presented. **Key words:** power station, heat exchange tube, eddy current, detection

高压变频技术在火电厂吸风机中的应用与研究 = **Application and Research of High-voltage Frequency Conversion Technology in Thermal Power Plant Induced-draft Fans** [刊, 汉] / ZHANG Zhen-yang (Shengli Power Plant, Dongying, Shandong Province, China, Post Code: 257087), LIU Jun-xiang (Beijing Zhongneng Great Wall Automation Equipment Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100071), LIN Zun-ji (North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 191 ~ 194

Based on the analysis of the present operating condition of a thermal power plant induced draft fan and the study of high-voltage frequency conversion technology the authors present a specific example of using a Robicon Perfect Harmony frequency converter for the modification of a thermal power plant induced draft fan. Also described is the control of the power plant main auxiliaries based on the use of high-voltage frequency conversion technology. The usage example cited above has proved that such frequency conversion technology has excellent prospects of applications in the pursuit of energy savings and higher automation control level. **Key words:** high-voltage frequency conversion technology, auxiliary equipment, energy savings, decrease of power consumption

大型机组再热汽温调节手段研究 = **A Study of the Reheat Steam Temperature Regulation Methods for Large-sized Boiler Units** [刊, 汉] / ZHANG Wen-jing, ZHANG Shu-jin, HUANG Yu-ming (Zhejiang Provincial Electric Power Test Research Institute, Hangzhou, China, Post Code: 310014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 195 ~ 197

With the electric power market steadily taking shape power plant owners are paying increased attention to the cost-effectiveness of boiler plant operation. In this regard the guarantee of a required reheat steam temperature represents one of the major links in achieving the above-cited aim. Meanwhile, there emerged a variety of problems regarding the methods used for reheat steam temperature regulation. Factors having an influence on the reheat steam temperature regulation are discussed, and the issues relating to the two most widely used methods for temperature regulation addressed. They are the regulation by flue-gas dampers and swinging burners. Based on the test results obtained on boiler No. 8 of Taizhou Power Plant and boiler No. 3 of Beilun Plant the authors give the relationship between the opening degree of two different types of flue-gas damper and the superheater and reheater-side flue-gas speed ratio. **Key words:** reheater, steam temperature, regulation method

300 MW 机组滑压运行若干问题的研究 = **A Study of Some Issues Regarding the Sliding-pressure Operation of a**