

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221885

大型水电机组全装配铸造活动导叶相控阵检测可行性研究

李 阳, 邓 韬

(国家能源集团科学技术研究院有限公司, 四川 成都 610073)

摘要: 国内早期投产的大型水电机组活动导叶多采用砂型铸造件,呈大型化异形件,处于机组空间狭小的水车室,针对在役大型水电机组活动导叶套装在轴套中埋藏区域的无损检测普遍在机组大修解体活动导叶吊出后检测的困境,采用相控阵检测技术,通过建模仿真、模拟试块测试,并在实际检测中成功应用,解决了铸造活动导叶粗晶、大声程、异形件对声能衰减和损失严重,无法接收到缺陷回波的难题,验证了在役大型水电机组全装配状态铸造活动导叶埋藏区域无损检测的可行性。

关键词: 相控阵; 铸造活动导叶; 全装配; 埋藏区域; 可行性

中图分类号: TM312; [TV734. 1]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0168-04

1 引言

大型水电机组活动导叶安装在水车室,沿水轮机转轮圆周均匀布置,上、中、下轴颈套装在轴套中固定,上端键槽与拐臂相连,通过接力器液压杆的伸缩来拉压拐臂,从而旋转活动导叶调整其开度,进而调节进水量或截断水流来调整机组的负荷变化或启停。有时或因装配工艺不当,机组运行期间活动导叶的瓣体上、下端面分别与顶盖、座环间隙不够而相互摩擦^[1],或水流中夹杂着较大异物堵塞在活动导叶之间,使得活动导叶在转动调整开度时卡涩,加剧了活动导叶轴承受的扭矩交变载荷,增加了导叶轴疲劳开裂失效风险。我国早期投产的大型水电机组活动导叶多为砂型铸造件,其生产过程中不可避免的产生冷隔、缩孔等原始缺陷,验收标准又放宽了检测验收要求,允许存在一定数量和大小的非危害性缺陷,随着机组运行工况变化,如活动导叶频繁调整开度、水流中大型异物撞击等,造成标准允许存在的未超标缺陷发展成影响机组安全运行的危害性缺陷,甚至因活动导叶转动卡涩承受较大扭矩交变载荷,加速缺陷的扩展,这就要求机组在役运行期间对此种轴类进行监督检验^[2]。目前国内对活动导叶套装在轴套中埋藏区域无损检测的普遍做法是将机组解体活动导叶整体吊出后检测,在机组临时检修活动导叶全装配状态下仅能对流道内的瓣

体和导叶轴外露区域表面检测,对套装在轴套中上、中、下轴颈埋藏区域的无损检测,无现成的有效方法和应用实例。一般大型水电机组大修周期为6~8年,为及时掌握活动导叶安全状况,本文采用相控阵检测技术,对在役大型水电机组全装配、不解体吊出状态下活动导叶埋藏区域的无损检测进行了可行性研究。

2 试验方法分析及材料声学性能

西南某水电站装设6台单机容量为600 MW的混流式机组,设计水头181 mm,3台机组活动导叶为东方电机有限公司生产,砂型铸造件,材质为ZG06Cr16Ni5Mo,每台机组24片,外形尺寸见图1。近几年机组临停期间对活动导叶轴外露部分和瓣体表面无损检测,发现24片活动导叶轴和瓣体上存在一百多条裂纹,同时机组大修解体后也发现活动导叶套装在轴套中的埋藏区域存在裂纹。

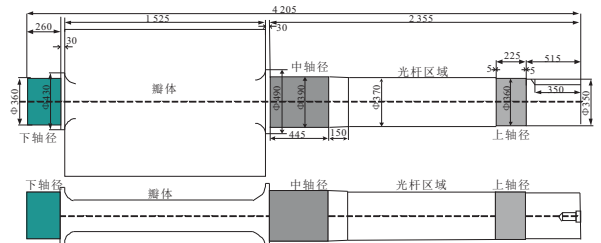


图1 活动导叶外形尺寸图(单位:mm)

Fig. 1 Outline and dimension diagram of wicket gate

图1中,阴影部分为套装在轴套中的上、中、

收稿日期: 2022-09-10, 修回日期: 2022-12-09

作者简介: 李阳(1983-),男,工程师,研究方向为电站金属材料无损检测, E-mail: 119182834@qq.com

下轴颈埋藏区域,上端连接拐臂,其余为外露部分。机组全装配不解体时,外露部分可进行表面无损检测,而套装在轴套中的上、中、下轴颈埋藏区域只能进行超声检测。上、中轴颈超声检测探头放置在光杆区域,图 2 中 a、b 位置,中轴颈超声检测探头也可放置在瓣体上相对检测,图 2 中 c 位置,下轴颈超声检测探头只能放置在瓣体上检测,图 2 中 d 位置,探头在此位置沿瓣体左右移动扫查。

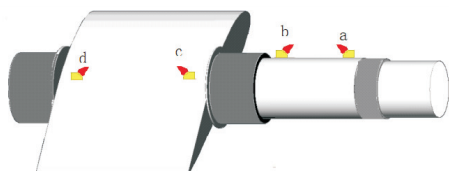


图 2 活动导叶超声检测探头放置图

Fig. 2 Placement diagram of ultrasonic testing probe for wicket gate

活动导叶外形较大且不规则,总长 4 205 mm,埋藏在轴套中的上、中、下轴颈长度分别为 225、445、260 mm,直径分别为 360、390、360 mm,中轴颈最大声程达 592 mm,常规超声无法解决铸件粗晶、大声程声能衰减和损失严重无法接收到缺陷回波的问题^[3],且异形件外表面不规则的变截面回波难以判别是缺陷回波还是由变截面引起的固有回波,增加了缺陷的判别难度。活动导叶处于水车室,空间狭小,探头移动距离有限,故考虑使用相控阵检测技术^[4]。

为掌握材料的声学 and 衰减性能,用前期更换的活动导叶制作测试试块,因不同导叶不同区域声学性能可能存在差异,选取多个活动导叶不同部位制作一组测试试块,试块制作具有两个不同声程的 R 圆弧,由于介质衰减,两个 R 圆弧回波幅值不同,但圆弧面声束反射情况相同,采用 SA11-N55S 2.25L32 相控阵线性阵列探头和相匹配的 55°横波楔块,经测量材料衰减系数约为 0.237 dB/mm,横波声速为 3 248 m/s。

3 模拟仿真

3.1 建模

为分析活动导叶铸件材料声场覆盖情况和缺陷的检出能力,对该活动导叶建立平面二维模型,见图 3(a),考虑中轴颈声程较大,将探头放置在瓣体上对中轴颈辅助检测和下轴颈探头只能放置在瓣体上检测,图 2 中 c、d 位置,为更清楚掌握中、下轴颈声场覆盖和缺陷检出情况,利用 solid-word 软件建立活动导叶立体三维模型,见图 3(b),

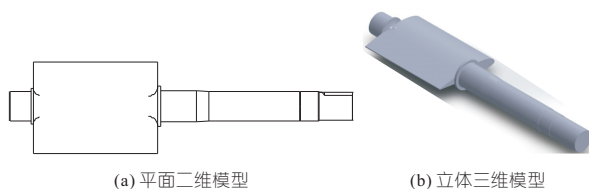


图 3 活动导叶建模图

Fig. 3 Modeling diagram of wicket gate

并采用 CIVA 仿真软件对活动导叶缺陷模拟仿真。

在以往大修中发现活动导叶密封压水圈不严,水中异物进入套筒和轴颈之间,活动导叶转动过程中致使轴颈部分区域有最深约 3 mm 磨损沟槽,故设置模拟裂纹深度 > 3 mm。在活动导叶上、中、下轴颈埋藏区域表面的声程最大、最小处和中间位置分别设置人工裂纹。活动导叶埋藏区域上轴颈表面两侧各 5 mm 台阶,可作为模拟缺陷,只在上轴颈中间位置设置模拟裂纹,在中轴颈和下轴颈表面声程最大、最小处和中间位置分别设置深 5 mm、长 20 mm 的周向模拟裂纹,裂纹锯齿高度 0.10~0.25 mm,并设置材料衰减系数 0.237 dB/mm,横波声速 3 248 m/s。

3.2 扫查方式和角度设置

根据受力情况,活动导叶轴因机组负荷变化或启停而频繁调整其开度,承受着交变往复扭矩应力,结合活动导叶轴外露光杆区域表面无损检测结果,裂纹多沿轴圆周方向,故相控阵主要检测活动导叶上、中、下轴颈沿轴圆周方向的裂纹。

轴类裂纹多与表面垂直或成较大夹角,以检测活动导叶轴沿圆周方向裂纹类危害性缺陷为主,探头沿圆周扫查,检测范围较大,为使声束尽可能与裂纹接近垂直,选择较大的声束偏转角度范围。

3.3 探头选择

根据活动导叶运行受力情况预估裂纹易产生位置和方向并结合铸件声学性能选择合适的聚焦法则,主要考虑晶片尺寸、激发数量和聚焦方式。铸件晶粒粗衰减小,选用低频探头^[5],活动导叶外形尺寸大、声程传播距离远声能损失严重,选用大尺寸、多晶片探头。活动导叶轴裂纹多为与表面垂直或成较大夹角且具有一定深度沿圆周方向延伸的表面裂纹,选择深度聚焦。

3.4 仿真结果

选择常用的型号为 SA11-N55S 2.25L32 线性阵列探头和相匹配的 55°横波楔块,激发 32 晶片,偏转角度 30°~70°,角度扫查步距 1°,主要检测埋藏区域轴颈的表面裂纹,深度聚焦分别在上、中、下轴颈表面位置,仿真结果见图 4(a),结果表

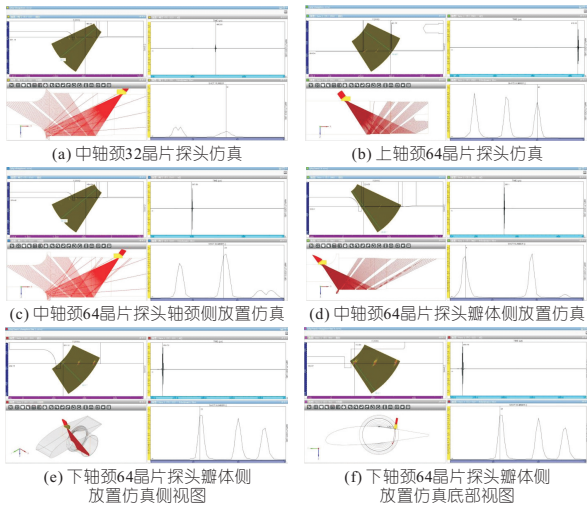


图 4 活动导叶缺陷模拟仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of wicket gate defects

明选用 SA11-N55S 2.25L32 相控阵探头和相匹配的 55°横波楔块,缺陷回波幅值小于噪声 6 dB,此探头声能不足以维持如此大声程铸件材料的衰减和损失,对活动导叶铸件材料不具有可探性。

声能与频率 f^2 呈正比,当铸件晶粒直径小于波长时,吸收衰减、散射衰减分别与频率 f 、 f^4 呈正比^[6],在保证声能足够时应尽可能减少衰减,故频率不能选择太高。探头的激活孔径越大,声能越强,故选择多晶片、大尺寸晶片探头,同时活动导叶外形较大,大尺寸探头也能保证探头的耦合效果。重新选择声能更强大的探头,频率 2.25 MHz、孔径 64 晶片、晶片尺寸 12 mm×20 mm,中心距 pitch 值 1.0 mm 和相匹配的 55°横波楔块,其余参数设置不变,仿真结果见图 4(b)~(f),结果表明,上、中、下轴颈各模拟裂纹和 5 mm 台阶均能发现,回波幅值均高于噪声 6 dB 以上,定位准确。

图 4(c)中,探头放置在轴颈侧对中轴颈仿真,在声程最大处,缺陷回波幅值低于噪声 6 dB,不具有可探性,可将探头放置在瓣体侧对中轴颈相向检测,最大声程处的回波幅值高于噪声 6 dB,见图 4(d),故对于中轴颈声程较大,声能衰减和损失严重,可将探头放置在轴颈侧和瓣体侧相结合检测,探头在相向扫查中,中轴颈中间设置的裂纹回波均较高,声场有一定的重合区。

裂纹定量通过裂纹上下端点衍射回波读取裂纹深度和高度数据,编码器记录裂纹长度信息,裂纹定位通过相对于探头位置显示的裂纹回波声程、深度、水平数据来确定裂纹位置。探头放置在瓣体侧检测时,因探头放置位置和轴颈处在不同的水平高度,裂纹深度位置需根据轴颈外表面定位,探头沿瓣体左右移动扫查时,裂纹长度是沿圆

周方向延伸,深度也与相控阵显示数据不同,探头放置在瓣体上检测时,缺陷的定量和深度定位将做下一步研究。

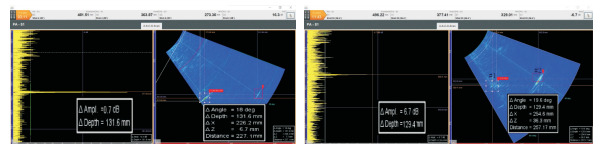
相控阵仿真试验,根据活动导叶材料声学性能、失效模式、灵敏度及结合实际检测条件,对不同探头和聚焦法则的仿真结果对比评价,进而优选出适合活动导叶轴大型铸件异形件的检测工艺,结果表明相控阵对活动导叶套装在轴套中的上、中、下轴颈埋藏区域缺陷检测具有理论可行性。

4 模拟试块测试

采用前期更换,中轴颈含有自然裂纹的活动导叶作为模拟试块,上轴颈模拟测试可利用上轴颈两个 5 mm 深的台阶作为反射点。下轴颈因声程较中轴颈小,可利用下轴颈最大声程处的底部端面作为反射点。中轴颈自然裂纹经测量长度 21 mm,深度 12 mm,距离中轴颈大小头(图 1 中直径 390 mm 与直径 370 mm 过渡处)变截面 310 mm。

根据仿真试验结果定制了频率 2.25 MHz、64 晶片、尺寸 12 mm×20 mm,中心距 pitch 值 1.0 mm,型号 PROBE-64L2.25-CUSTOM 线性阵列探头和与之相匹配的型号 W-136-CUSTOM 55°的横波楔块,并设置了活动导叶缺陷模拟仿真试验得出的参数工艺,校准编码器,对上、中、下轴颈变截面和自然裂纹进行测试。图 5(a)中,上轴颈两处 5 mm 台阶固有回波,深度分别为 363、359 mm, $\Delta A_{Angle} = 18^\circ$, $\Delta D_{Depth} = 131.6$ mm(两处台阶回波声程差), $\Delta X = 226.2$ mm, $\Delta Z = 6.7$ mm, $D_{Distance} = 227.1$ mm,所测数据与图 1 中活动导叶尺寸一致。图 5(b)中, #2 为中轴颈瓣体 R 弧面固有回波, #1 为缺陷显示,深度 378 mm,高度 12 mm,与 #2 瓣体 R 弧面固有回波 $\Delta A_{Angle} = 19.6^\circ$, $\Delta D_{Depth} = 129$ mm(#1、#2 回波声程差), $\Delta X = 254.6$ mm, $\Delta Z = 36.3$ mm, $D_{Distance} = 257.1$ mm,测试数据与自然裂纹数据一致。

通过模拟试块测试,上轴颈两处 5 mm 台阶回波和中轴颈自然裂纹、瓣体 R 弧面回波均能清晰显示,信噪比约为 18 dB。上轴颈的 5 mm 台阶回波、下轴颈底部端面回波和中轴颈瓣体 R 弧面回波可作为现场检测时系统可靠性的验证。结果



(a) 上轴颈两处 5 mm 台阶 (b) 中轴颈自然裂纹

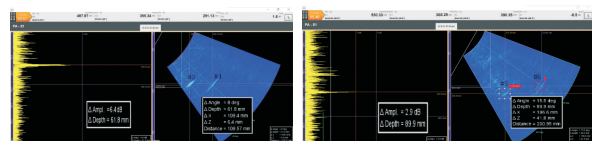
图 5 模拟试块缺陷相控阵图

Fig. 5 Phased array diagram of simulated test block defects

表明利用仿真试验数据工艺进行模拟试块测试,相控阵对活动导叶套装在轴套中的上、中、下轴颈埋藏区域缺陷检测具备实际检测可行性。

5 现场检测

2019 年 5 月西南某水电站 6 号 600 MW 机组停机 C 修期间,对活动导叶套装在轴套中的上、中、下轴颈埋藏区域进行相控阵检测,选用型号 PROBE-64L2.25-CUSTOM 线性阵列探头和与之相匹配的型号为 W-136-CUSTOM 55°横波楔块,偏转角度 30°~70°,角度扫查步距 1°,深度聚焦在上、中、下轴颈的表面位置,设置材料衰减系数 0.237 dB/mm,横波声速 3 248 m/s,校准编码器灵敏度,沿导叶轴圆周扫查,共发现 16 根活动导叶中轴颈和 1 根活动导叶上轴颈埋藏区域存在缺陷反射回波,存在缺陷的活动导叶占比 71%,典型相控阵缺陷图见图 6。图 6(a)中 #4 为上轴颈上端 5 mm 台阶固有回波, #3 为缺陷回波,缺陷深度 354 mm,高度 11 mm,与 #4 台阶回波 $\Delta A_{\text{Angle}} = 8^\circ$, $\Delta D_{\text{Depth}} = 61.8 \text{ mm}$ (#3、#4 回波声程差), $\Delta X = 109.4 \text{ mm}$, $\Delta Z = 6.4 \text{ mm}$, $D_{\text{Distance}} = 109.5 \text{ mm}$ 。图 6(b)中, #6 为瓣体 R 弧面固有回波, #5 为缺陷回波,缺陷深度 368 mm,高度 22 mm,与 #6 瓣体 R 弧面回波 $\Delta A_{\text{Angle}} = 15.5^\circ$, $\Delta D_{\text{Depth}} = 89.9 \text{ mm}$ (#5、#6 回波声程差), $\Delta X = 195.6 \text{ mm}$, $\Delta Z = 41.6 \text{ mm}$, $D_{\text{Distance}} = 200.9 \text{ mm}$ 。



(a) #3 活动导叶上轴颈 (b) #17 活动导叶上轴颈

图 6 活动导叶轴颈埋藏区域缺陷相控阵图

Fig. 6 Phased array diagram of defects in the hidden area of wicket gate shaft neck

2020 年 6 号机组大修,机组解体活动导叶吊出后,对相控阵检测存在缺陷回波的位置采用磁粉检测验证,结果与相控阵检测数据相吻合,其中中轴颈裂纹最长约 300 mm,深 60 mm,裂纹周长占比 11%,深度占比 13%。其余 2 台机组采用砂型铸造工艺生产的活动导叶,经检测也存在大量裂纹类缺陷,电站已陆续全部更换成性能更加优良材质为 ZG04Cr13Ni4Mo,采用电渣熔铸工艺制造,经机械加工热处理成型的活动导叶^[7]。

6 结论

通过对活动导叶材料声学测定、建模仿真、模拟试块测试和现场实际相控阵检测并得到验证,解决了在役大型水电机组铸造活动导叶全装配状态下对套装在轴套中埋藏区域无法检测,只能在机组大修解体吊出后检测的困境,研究出一种大型水电机组活动导叶及类似轴类铸造件套装在轴套中埋藏区域和复杂异形件裂纹的相控阵检测工艺。

参考文献:

- [1] 李永恒,吕桂萍,肖良瑜. 活动导叶刚度计算力学模型研究[J]. 大电机技术,2015(3):44-47.
- [2] 李阳,邓韬. 基于超临界火电机组铸造高压管道相控阵检测可行性研究[J]. 铸造,2022,71(10):1305-1310.
- [3] 冯小平,杨峰,李亚维,等. 铸件的超声波检测分析[J]. 热加工工艺,2014,43(3):79-80,97.
- [4] 王瑞璇,丘国平,刘宇哲. Inconel 783 螺栓超声相控阵导波检测技术研究[J]. 电力科技与环保,2021,37(5):29-35.
- [5] 刘晓睿. 超声相控阵技术检测和评价方法研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2012.
- [6] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2008.
- [7] 熊云龙. 水轮发电机组大型活动导叶电渣熔铸技术研究[C]//2020 中国铸造活动周论文集,安徽,合肥,2020.

Feasibility Study on Phased Array Test of Completely Assembling Casting Movable Guide Vane for Large Hydropower Unit

LI Yang, DENG Tao

(China Energy Science and Technology Research Institute Co. Ltd., Chengdu 610073, China)

Abstract: The movable guide vane of domestic large hydropower units in early stage was mostly made by sand casting, which had the characteristics of large abnormal shape parts and they were located in the water wheel room of the units with narrow space. At present, the nondestructive testing of the area where the movable guide vane is hidden in the shaft sleeve of large hydropower unit in service is generally carried out after the movable guide vane is lifted out during the unit overhaul period. This paper attempts to test it through phased array testing technology, modeling simulation and simulated test block test. This method is successfully applied in actual detection. Finally, the problem that coarse crystal, long sound path and abnormal shape of casting movable guide vane have serious attenuation, loss of sound energy, and difficulty in receiving defect echo is solved. The feasibility of nondestructive detection on the hidden area of casting movable guide vane in completely assembling state of large hydropower units in service is verified.

Key words: phased array; casting movable guide vane; completely assembly; area of hide; feasibility