

某核电厂上充泵非驱动端垂直向振动上涨原因分析

张刚柱

中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518124

摘 要 : 国内某核电厂上充泵非驱动端垂直向振动水平自2018年8月份开始出现缓慢爬升, 由开始的1.6mm/s随每次启泵逐渐升高, 至2019年11月19日上涨至最高3.9mm/s, 在该机组第四次大修对该上充泵进行全面解体检查, 通过更换风扇、部分导叶及转子动平衡校正等措施, 降低泵转子运行时产生的激振力, 改变转子载荷分布提升转子稳定性, 该上充泵非驱动端垂直向振动趋势异常上涨问题得到了有效处理, 同时泵整体振动水平也得到改善。

关 键 词 : 核电厂; 上充泵; 振动

Analysis Of The Reasons For The Vertical Vibration Increase Of The Non Driving End Of The Charging Pump In a Certain Nuclear Power Plant

Zhang Gangzhu

CGN Nuclear Power Operations Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 518124

Abstract : The vertical vibration level of the non driving end of the charging pump in a domestic nuclear power plant has been slowly climbing since August 2018, gradually increasing from 1.6mm/s with each pump start to a maximum of 3.9mm/s on November 19, 2019. In the fourth major overhaul of the unit, a comprehensive inspection was conducted on the charging pump, and measures such as replacing the fan, partial guide vanes, and rotor dynamic balance correction were taken to reduce the excitation force generated by the pump rotor during operation, change the rotor load distribution, and improve rotor stability. The abnormal upward trend of vertical vibration at the non driving end of the charging pump was effectively addressed, and the overall vibration level of the pump was also improved.

Keywords : nuclear power plant; charging pump; vibration

一、事件背景

2019年11月13日国内某核电站启动 RCV002PO上充泵后, 主控触发报警(泵推力轴承垂直向振动高)最大值达5.18mm/s(报警值4.5mm/s), 持续1min51s后稳定在约3mm/s, 现场就地测量振动水平为2.8mm/s, 与在线振动检测幅值接近, 该测点真实振动水平偏高。且梳理该泵历史振动数据, 发现该上充泵泵非驱动端垂直向振动水平自2018年8月份开始出现缓慢爬升, 由开始的1.6mm/s随每次启泵逐渐升高, 至2019年11月19日上涨至最高3.9mm/s(随后逐渐下降, 停泵前幅值约3.0mm/s)。泵非驱动端水平向振动一直较小, 幅值在1mm/s左右, 水平向变化趋势和垂直向变化趋势一致, 泵驱动端振动水平总体较平稳, 幅值也不高。泵组定期切换运行, 从近一年趋势看, 每次该上充泵启动非驱动端垂直向振动较上次运行周期会有小幅上涨, 启动瞬态振动尖峰幅值也较上次启动变大, 但在每个启动周期泵持续运行过程中, 振动趋势较为稳定。因此决定在该机组第四次大修期间对RCV002PO上充泵非驱动端垂直向振动趋势异常上涨进行处理, 该泵进行全面解体检查。

二、设备简介

核电站上充泵属于化学和容积控制系统, 采用三台多级卧式离心泵并联布置, 将容控箱的来水升压(绝对压力)至17.7MPa后送至一回路, 实现一回路上充功能、主泵一号轴封提供密封水功能和高压安注功能^[1]。每台安全等级为核安全2级、质保等级为Q1的机组须配置3台上充泵, 其中1号上充泵由6.6kV交流应急配电系统A列(LHA)供电, 2号和3号上充泵由6.6kV交流应急配电系统B列(LHB)供电。正常运行工况下, B列投运1台泵即可^[2]。

该上充泵组采用德国KSB设计、生产、制造的型号为RHM 100-250.12型泵如图1, 筒体式卧式多级离心泵, 泵组由6.6KV驱动电机、电机联轴器、增速齿轮箱、泵联轴器、泵及润滑油系统组成。驱动由佳木斯电机厂生产的三相交流卧式电机驱动, 泵和电机通过增速齿轮箱连接, 泵侧和电机侧联轴器均为齿式联轴器。主要由叶轮、导叶、泵轴、机械密封、轴承、平衡鼓、泵壳和泵盖等零部件组成, 12级径向叶轮加导叶单向式布置结构, 首级叶轮与其余11级不同, 首级叶轮5枚叶片, 其余11级为7枚叶

* 作者简介: 张刚柱(1992年02月—), 男, 汉族, 广东省深圳市, 中广核核电运营有限公司, 核岛转动机械设备检修工程师, 本科, 研究方向: 核电站核级水泵维修。

片。该泵设计有平衡鼓同非驱动端推力轴承共同平衡转子的轴向力，两端轴封采用集装式机械密封，每级导叶与叶轮口环配合处装有水润滑轴承（为转子提供支撑），其动环材料为碳化硅，静环材料采用浸渍硬化石墨。驱动端机封从第一级叶轮引水经悬液分离器过滤后对密封面冷却润滑；非驱动端机封冷却水来自经节流衬套逐级降压后的末级高压水，冷却润滑后经泵筒内平衡管流回吸入口，同时也起到平衡轴向推力的作用^[3]。泵驱动端为圆柱滚子轴承（承受径向力），非驱动端为双列圆锥滚子轴承（承受径向及轴向推力），泵转速4657r/min，额定流量：105m³/h，额定扬程：1245m。

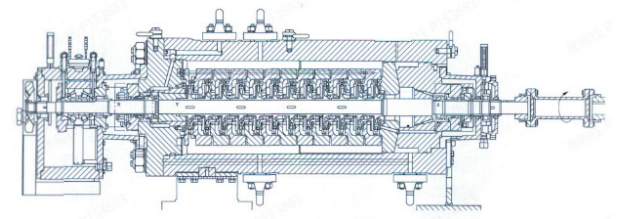


图1 德国 KSB 上充泵 RHM 100-250.12 型

三、问题处理

1.在大修开始前对该泵非驱动端轴承及其紧固件进行检查，11月28号持票进行静态相关检查，未发现明显异常，11月29日启动泵组验证，泵组启动时处于双孔板运行模式，泵非驱动端振动水平未改善，频谱特征与检查前一致，2X 频率峰值2.8mm/s。根据离线定期试验和针对性测试记录，离线测量振动数据与在线数据一致，即振动上涨真实存在。从测量的频谱特征看，频谱主要以2X为主，伴有小幅1X、3X成分，频谱趋势显示振动幅值逐渐上涨主要由2X成分上涨引起，其它分量幅值较稳定。

2.检查导叶石墨环磨损情况发现泵组运行期间，叶轮后口环与导叶石墨环相互摩擦，使导叶石墨环产生磨损（石墨环硬度低于叶轮后口环），各级导叶石墨环的磨损方位及面积均不相同，第6、8、9、10导叶石墨环尺寸超标。

3.检查泵非驱动端冷却风扇断裂缺失一叶片，挡油板松动。

4.对原始转子部件进行动平衡检查发现动不平衡量超标，其结果为驱动端不平衡量52.6克/66°，非驱动端不平衡量63.3克/29°，更换风扇备件后进行动平衡检查，其结果为驱动端为不平衡量44.6克/290°，非驱动端不平衡量63.3克/270°。通过去重法对泵转子进行动平衡处理，最终动平衡数据为驱动端不平衡量

原因可能性高低如下表格1：

序号	原因	支持证据	反对证据	可能性	处理措施
1	转子动不平衡量较大	转子动不平衡会引起振动，不平衡量越大，引起的振动也越明显。本次转子原始动不平衡量已超出标准10倍以上。	理论上转子动不平衡引起的振动分量以1X工频为主。	中	对泵转子进行动平衡校正，使其符合标准。
2	风扇叶片断裂缺失及挡油板松动	叶片缺失导致旋转部件质量分布不均，会影响转子动平衡；叶片开裂和挡油板松动，影响轴系截面刚度对称性。	无	中	更换风扇备件，将挡油板取下。
3	导叶石墨环尺寸超标	导叶石墨环的作用是对转子进行支撑，因磨损导致石墨环尺寸变化会影响转子的载荷分布。	以往解体检修导叶石墨环也存在不同程度磨损	中	对尺寸超标的导叶石墨环进行更换。
4	非驱动端垂直向固频接近转子2X 频	根据共振理论，当激励频率与系统某阶固频接近时，会导致系统振幅显著增大。	1、3号泵非驱动端垂直向固频也接近转子2X 频	低	无

1.83克/220°，非驱动端不平衡量1.95克/188°，要求动不平衡量≤4.29g。

4.泵非驱动端固频测量，本次大修三台泵全停阶段，对泵非驱动端进行了固有频率敲击试验，泵非驱垂直向固频167Hz与2X工频156Hz接近。

5.对泵水力部件解体，检查紧固件无松动，泵轴弯曲和转子跳动均合格，泵轴 PT/MT 检查无异常（确认泵轴无裂纹）。

6.更换新导叶和风扇后泵重新组装进行再鉴定，现场检查各法兰面、机封引漏管、活接无跑冒滴漏，振动温度均无异常，其中泵非驱动端垂直向振动水平1.28mm/s较处理前显著降低，频谱显示泵非驱动端垂直向振动成分占比也发生了变化，由原来的2X占主导到本次的1X占主导，2X成分幅值降低近一半。

四、原因分析

1.该上充泵的泵轴长约2400mm，外径最小处约38.4mm，泵轴较细长，刚性相对较差，更容易发生弯曲。运用有限元方法对RHM100-205.12型上充泵泵轴进行模态分析，得到其1阶固有频率为75.741 Hz。上充泵的工作转速为4657 r/min，转动频率为77.617 Hz，说明上充泵泵轴是在1阶临界转速之上工作，启动时必须穿过1阶临界区域^[4]。上充泵转子为柔性转子，在运行期间必然存在弯曲并发生扭曲变形，第6、8、9、10级导叶石墨环磨损后尺寸变化，对泵转子的载荷分布产生影响。每级导叶在叶轮后口环位置配有水润滑石墨密封环，该密封环可以作为水润滑轴承限制转子的弯曲，但静子组件以其自重就会有一个向下的自然弯曲，静子组件和转子很难同步弯曲，每级水润滑轴承所受的径向载荷也随之发生改变，如图2所示。

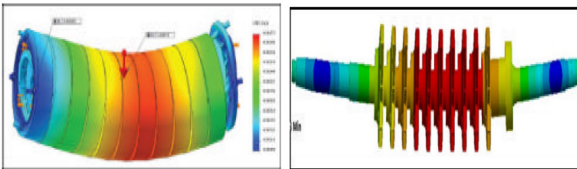


图2 上充泵静子和转子弯曲示意图（8000X）

2.泵水力部件长期运行，挠性转子在变形、磨损、流体冲击等因素下动平衡状态发生改变，泵的动不平衡量的逐渐变大。

3.泵非驱动端风扇叶片断裂缺失及挡油板松动，影响轴系截面刚度对称性，对转子运行状态造成扰动，影响其振动水平。

4.泵非驱动端垂直向固频接近2X工频，对2X工频响应敏感。

根据以上分析，泵转子动不平衡量的增大和风扇叶片断裂缺失造成泵运转时转子激振力增大；同时由于石墨口环磨损改变了泵非驱动端转子的载荷分布，导致转子稳定性降低；泵非驱动端垂直向固频接近2X工频导致垂直向振动响应敏感。在上述因素的共同作用下导致泵组非驱动端振动逐渐增大。

五、总结

综上所述，经过大修前泵非驱动端轴承及紧固件检查，大修

期间的对该泵进行全面解体检查，通过更换部分数据超标的导叶和叶片断裂的风扇，对转子动平衡进行校正等措施，降低泵转子运行时产生的激振力，改变转子载荷分布，提升转子稳定性，上充泵非驱动端垂直向振动趋势异常上涨问题得到了有效处理，同时泵整体振动水平也得到改善。根据该设备小流量及双泵运行工况下振动水平偏高问题特点，后续随泵在各种工况下进行试验切换运行，振动保持稳定不存在逐渐上涨趋势，证明该设备异常得到妥善处理。

参考文献：

[1]广东核电培训中心. 900MW压水堆核电站系统与设备, 北京: 原子能出版社, 2004: 129.
[2]姚正军, 朱惠成. 核电厂上充泵叶轮缺陷分析及处理, 大亚湾核电, 2019.No.3:18.
[3]王岩. 某核电厂上充泵驱动端轴承振动高原因分析, 水泵技术, 2022年第3期: 37.
[4]刘星, 肖书勇, 朱健. 核电厂 RHM100-205.12型上充泵驱动端轴承打滑故障分析及处理, 大亚湾核电, 2019.No.1:19.