

文章编号: 0258-0926(2021)03-0183-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.03.0183

CPR1000 机组 100D 型主泵振动故障诊断

舒相挺¹, 杨 璋^{1,2*}, 徐逸哲¹, 蒋彦龙¹

1. 南京航空航天大学飞行器环境控制与生命保障工业和信息化部重点实验室, 南京, 210016; 2. 福建宁德核电有限公司, 福建宁德, 355200

摘要: CPR1000 机组各运行模式下 100D 型主泵的振动现象表明, 当处于蒸汽发生器冷却正常停堆或余热排出冷却正常停堆工况时, 主泵电动机的瓦振幅值往往存在大范围冲击波动甚至触发振动高报警的现象。根据机械振动原理综合分析电动机瓦振、主泵轴位移信号的频域和时域特征, 诊断振幅波动受某 7~9 Hz 的低频随机振动影响; 通过分析堆内构件振动噪声监测系统采集的信号判断该低频振动对应一回路主冷却剂流动过程中诱发的堆芯吊篮梁式振动。根据流体诱发振动理论分析了影响主泵电动机振动波动的主要因素, 并通过主泵历史运行记录进行了验证。系统性提出优化 CPR1000 机组运行策略缓解主泵电动机振动波动的建议, 为主泵安全稳定运行提供参考。

关键词: CPR1000; 主泵电动机; 随机振动; 湍振; 流体诱发振动; 振动噪声

中图分类号: TL353⁺.12 **文献标志码:** A

Fault Diagnosis of Vibration Induced by Fluid of 100D Main Pump for CPR1000 Unit

Shu Xiangting¹, Yang Zhang^{1,2*}, Xu Yizhe¹, Jiang Yanlong¹

1. Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support, MIIT, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. Ningde Nuclear Power Company, Ningde, Fujian, 355200, China

Abstract: The vibration phenomenon of 100D main pump under various operation modes for CPR1000 unit show that, when the main pump motor is in normal shutdown condition of steam generator cooling or residual heat removal cooling, the amplitude value of the main pump motor tile often has a large range of impact fluctuation or even triggers high vibration alarm. According to the principle of mechanical vibration, the frequency-domain and time-domain characteristics of motor bearing vibration and main pump shaft displacement signals are comprehensively analyzed. The vibration amplitude fluctuation is affected by the low-frequency random vibration of about 7~9 Hz. The signal collected by the vibration and noise monitoring system is used to analyze the low frequency vibration corresponding to the core basket beam vibration induced by the main coolant flow in the primary circuit. According to the theory of fluid induced vibration, the main factors affecting the vibration fluctuation of the main pump motor are analyzed and verified by the historical operation records of the main pump. The suggestion of optimizing the operation strategy of CPR1000 unit to alleviate the vibration fluctuation of main pump motor is put forward systematically, which provides a reference for the safe and stable operation of the main pump.

Key words: CPR1000, Main pump motor, Random vibration, Turbulent vibration, Fluid induced vibration, Vibration noise

0 前 言

CPR1000 是中国改进型百万千瓦级三环路压水堆核电技术方案^[1], 截至 2020 年 4 月, 国内在

建在运机组数已达 28 台。CPR1000 机组大多采用法国日蒙公司 (JSPM) 技术生产的 100D 型主泵驱动主冷却剂在一回路流动, 目前共计 70 多台^[2]。主

收稿日期: 2019-11-26; 修回日期: 2020-01-06

作者简介: 舒相挺 (1975—), 男, 博士研究生, 现从事结构动力学和设备可靠运行研究, E-mail: 47888298@qq.com

*通讯作者: 杨 璋, E-mail: yangzhang17230@126.com

泵是压水堆核电站最核心的设备之一,系统性分析研究主泵运行期间的典型共性问题,积累运维经验,对提高运行可靠性,维护核安全具有重要意义。

目前已有公开发表的文献中,针对该型主泵的研究主要集中在理论计算和仿真分析等领域^[3-6],围绕其运行特性和维护经验的报道较少。据统计,当 CPR1000 机组处于蒸汽发生器冷却正常停堆(NS/SG)或余热排出正常冷却停堆(NS/RRA)运行模式时,各主泵电动机的瓦振幅值往往存在大范围冲击波动(变化量超出报警值的 25%)甚至触发振动高报警的现象,应及时诊断研究查明变化原因^[7]。本文结合 100 D 型主泵在国内各核电站历史运行记录,对这一典型共性问题进行系统性理论分析和故障诊断,提出优化运行策略。

1 主泵电动机振动波动

1.1 振动监测系统简介

100D 型主泵是立式、单级、可控泄漏的轴密封式离心泵,由水力部件、轴密封组件和电动机 3 个主要部分组成。主泵叶轮有 7 个叶片安装在泵轴下部。反应堆冷却剂从蒸汽发生器流出经主泵底部进口接管吸入,通过泵轴叶轮啮送升压后从泵壳侧的出口接管排出至反应堆压力容器。

100D 型主泵均安装有连续监测泵轴和电动机支承架振动的探头,布置规律一致。其中,监测泵轴相对位移(轴位移峰-峰值)的为 2 只 V7200J 型电涡流探头,布置在靠近电动机联轴器法兰处的同一水平面上,相隔 90°,报警值为 250 μm ,停运值为 380 μm 。监测电动机支承架振动(瓦振峰-峰值)的为 2 只 V23DA 型探头,布置在电动机机座下部法兰的同一水平面上,相隔 90°,报警值为 50 μm ,停运值为 75 μm 。各测点振动幅值在主控制室实时显示^[2]。以某 CPR1000 核电站 2 号机组 1 号主泵/电机(2RCP001PO/MO)为例,轴位移探头分别是 2RCP150MM、2RCP151MM,瓦振探头分别是 2RCP106MV、2RCP107MV,见图 1。

1.2 典型振动波动现象

CPR1000 机组按照热力学和堆物理的特性分为 6 个运行模式:反应堆功率运行模式(RP)、NS/SG、NS/RRA、维修停堆模式(MCS)、换料停堆模式(RCS)和反应堆完全卸料模式(RCD)。在 NS/SG 或 NS/RRA 时,一回路冷却剂温度和

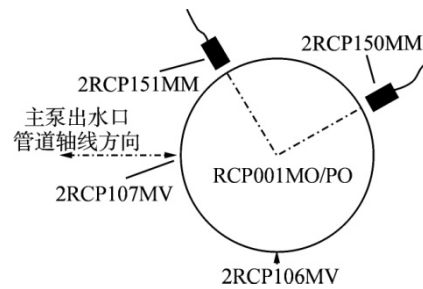


图 1 振动测点布置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Vibration Measuring Points

压力变化较快,流场较紊乱。以该机组第 4 次换料大修前依次从 RP 过渡为 NS/SG 和 NS/RRA 的降温降压过程为例:一回路压力(2RCP901KMXO11)呈阶梯状下降;一回路温度(以临近 1 号主泵入口的温度探头 2RCP029MT 为例)随之对应呈阶梯状下降;RP 模式下,主泵轴位移(2 个轴位移探头趋势接近,仅选择 2RCP150MM 说明)及电动机瓦振基本平稳;NS/SG 模式下 2RCP106MV 在旁路排放阀(GCT)打开阶段出现振幅冲击式上涨;NS/RRA 模式下,2RCP107MV 在余热排出系统(RRA)泵投运时间段出现剧烈波动,波动幅度随着一回路温度的下降而逐步减小;振幅波动期间的变化量超过了报警值的 25% (12.5 μm)^[7]。2019 年 9 月轴位移和瓦振测量值如图 2 所示。

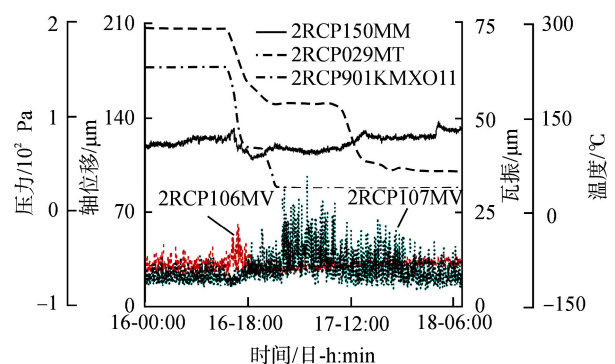


图 2 轴位移和瓦振趋势图

Fig. 2 Trends of Shaft Displacement and Tile Vibration
横坐标刻度值 16~18 表示日期,下同

2 主泵电动机振动波动故障诊断

2.1 机械振动理论

100D 型主泵泵轴和电机转子属于刚性转子系统^[2],主泵轴位移保持稳定,则电动机转子的相对振动也稳定。因此只对存在的瓦振振动波动现象,建立主泵电动机的简易双自由度线性阻尼

系统运动微分方程，如下：

$$\begin{cases} mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = F_x(t) \\ my''(t) + cy'(t) + ky(t) = F_y(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中， m 为电动机质量； c 为阻尼系数； k 为刚度系数； t 为时间； $x(t)$ 、 $x'(t)$ 、 $x''(t)$ 分别为 2RCP106MV 测到的位移、速度、加速度； $y(t)$ 、 $y'(t)$ 、 $y''(t)$ 分别为 2RCP107MV 测到的位移、速度、加速度； $F_x(t)$ 、 $F_y(t)$ 分别为电动机运行过程中各自方向上的激振力（简谐激励、非简谐周期性激励或随时间任意变化的非周期性激励的组合）。根据机械振动理论和阻尼影响，电动机运行过程中受简谐激励或非简谐周期性激励的振动响应，可通过傅里叶级数变换为不同频率成分简谐激励的响应组合；受非周期性激励的响应是一系列脉冲激励的组合。因式（1）满足线性系统叠加原理，对振动探头采集的信号进行频谱分析，可以逆向分析对应激振力的频率特征^[8]。

通过振动数据采集器从机柜输出缓冲口处采集主泵振动探头的原始输出信号，采集器的模数转换精度为 24 位；同步波形的采样率是 128 Hz，谱线数为 800；异步波形的频率采集范围是 0~1000 Hz，谱线数为 800，分辨率为 1.25 Hz；2 次线性平均采集。对不同 CPR1000 机组的不同主泵进行多次的轴位移、瓦振信号采集以及频谱分析，均发现：当电动机瓦振信号平稳时，频谱主要为 24.7 Hz 的分量，偶尔存在 7~9 Hz 低频分量和 24.7 Hz 的倍频分量；当电动机瓦振信号波动时，频谱以该低频分量和 24.7 Hz 分量为主，偶有 24.7 Hz 的倍频分量；主泵泵轴的轴位移信号基本以 24.7 Hz 的分量为主，24.7 Hz 的倍频分量为辅，在 2~10 Hz 频率区间存在不明显的低频分量。2RCP107MV 频谱见图 3。

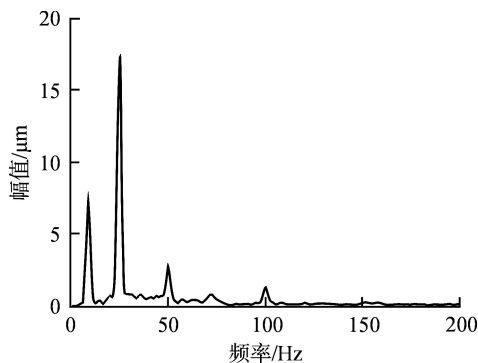


图 3 瓦振频谱图

Fig. 3 Spectrum of Tile Vibration

主泵电动机额定运行转速为 1485 r/min，对应的一倍旋转频率(X_1)为 24.75 Hz。根据式（1）和采集器的频谱分辨率分析，图 3 中 24.7 Hz 的频谱分量对应主泵轴系离心力作用的振动响应，24.7 Hz 的倍频分量即为 X_1 的谐波分量。主泵轴位移信号中 2~10 Hz 的低频分量特征分量不明显，且存在草堆状本底噪声特征，诊断为流体扰动所致且扰动力远低于轴系的离心力。主泵轴位移和电动机瓦振信号的时域特征表明该 7~9 Hz 的低频激振力属于随机激励。即 NS/SG 或 NS/RRA 模式下，主泵电动机瓦振振幅波动是由于某 7~9 Hz 的低频随机冲击振动所致（长期趋势分析显示该低频特征频率随反应堆累积运行时间的延长呈缓慢下降趋势）。

2.2 一回路主要部件的动态响应特性

理论研究和试验表明，压水反应堆正常运行期间诱发一回路主要部件产生动态响应的主要有随机激励和确定性激励 2 种。随机激励主要受下部堆内构件对应下降腔和上部堆内构件上空腔湍流诱发，由于流体压力脉动的谱密度随频率增高而迅速减小，因此一回路主要部件受流体湍流激振力诱发的振动响应主要出现在低阶频率区（0~10 Hz）。确定性激励主要受主泵转动诱发，振动响应对应主泵旋转频率、叶轮叶片通过频率以及它们的倍频。

为了分析该 7~9 Hz 低频振动分量的来源，应重点关注 CPR1000 机组一回路主要部件受湍流激振诱发的低阶模态响应。

2.3 堆内构件振动监测系统的信号分析

CPR1000 机组均安装有堆内构件（堆芯吊篮、热屏蔽和堆芯上下支撑等）振动监测系统（VMS），使用安装在压力容器上的 4 只加速度计和 8 个堆外电离室中子噪声信号联合监测反应堆及堆内构件的运行情况^[9-10]。

CPR1000 机组反应堆首次达到满功率时，技术人员会根据所采集的中子噪声信号自功率谱和互功率谱信息建立各堆内构件振动模态基准参数表，机组运行过程中每月定期监测观察变化趋势^[11]。表 1 为该机组满功率时 VMS 采集分析的堆内构件振动模态数据，各堆内构件的振幅均在允许振幅范围内，吊篮梁模式振幅同比最高。

根据工程经验和科研成果分析，压水反应堆吊篮的流致振动主要是湍流激振引起，可视为随

表 1 某 CPR1000 机组堆内构件振动模式

堆内构件模式	F_0/Hz	实测振幅/ μm	允许振幅/ μm
燃料组件一阶模式	3.4	32.8	140.3
燃料组件二阶模式	5.6	14.8	174.1
吊篮梁模式	8.0	74.5	138.1
吊篮壳模式	21.1	7.6	146.6
压力容器摆动	15.2	1.7	159.0

F_0 —特征峰频率,分辨率为 0.1 Hz;振幅均采用振动位移均方根值

机湍流激励下的强迫振动^[12-13]。主冷却剂湍流流动在吊篮表面产生的压力波动传递给吊篮并诱发振动^[14]。研究还表明,随着反应堆运行时间的延长,吊篮与压力容器下键销接触面会逐步磨损,吊篮的固有频率会缓慢下降。如果吊篮固有频率每燃料循环降低量不超过 0.1 Hz,则磨损速率可以接受^[15]。

考虑频谱分辨率的影响,图 3 中 8.7 Hz 的特征频率对应表 1 中吊篮梁模式的 8.0 Hz 特征峰频率。即主泵电动机的振动波动是由于主冷却剂湍流导致的吊篮梁模式流致振动所致,控制电动机振动波动幅度应重点关注影响吊篮最大随机振动响应的因素。

3 影响主泵电动机振动波动因素分析

研究表明,吊篮随机振动响应的最大均方根值随平均流速和湍流强度的增大而增加,且响应均方根值基本随湍流强度呈线性变化^[12, 14, 16]。

3.1 汽机旁路排放

反应堆处于 NS/SG 模式时,为了降温降压需要通过汽机旁路排放阀门(如 2GCT121VVP 等)将蒸汽发生器产生的饱和蒸汽排往冷凝器或大气进行冷却,同步隔离某蒸汽发生器主蒸汽阀。一回路上 3 个环路间的温度/压力/流量等参数不对称,导致一回路整体流量和局部流量同步变化,使得主冷却剂流速、脉动压力、湍流强度、吊篮流致振动以及电动机相应的低频随机冲击振动响应变化。尤其是旁路排放阀门开度加大时,主冷却剂局部流场紊乱更明显,更容易加剧吊篮的梁式模式振动,激发主泵电动机低频冲击振动,2019 年 9 月,GCT 阀门开度和瓦振测量值如图 4 所示。统计发现,此时主要影响垂直于主泵出口管道方向的电动机振动波动,分析认为与管道连接方向有关。

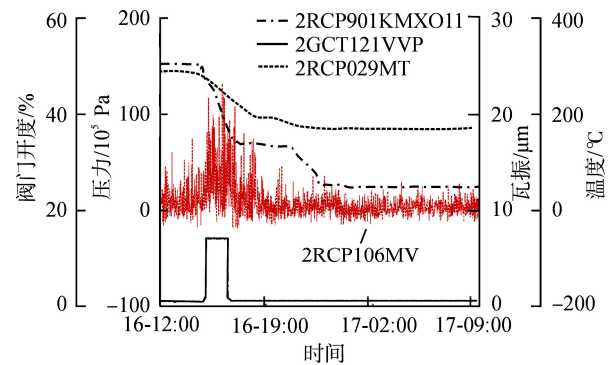


图 4 GCT 阀门开度与瓦振趋势图

Fig. 4 Trend of GCT Valve Opening and Tile Vibration

3.2 余热排出系统

反应堆处于 NS/RRA 模式下,通过启动 RRA 泵将一回路热量排出。余热排出泵 RRA001PO 和 RRA002PO 从一回路 2 环路的热段吸水;经过一段母管后分别通过 2 个热交换器冷却;然后通过中压安注的注入管线分别回到一回路 1、3 环路的冷段。RRA 的投运导致一回路局部流量变化,加剧一回路主冷却剂的湍流强度。2019 年 9 月,2RCP107MV 与 RRA 泵入口压力(2RRA037MP)、RRA 泵出口压力(2RRA004MP)、RRA 泵出口流量(2RRA006MD)的变化趋势见图 5。随着 RRA 泵的投运,2RCP107MV 波动加剧,随着 RRA 泵流量趋于稳定,振动波动幅度略有缓解。分析表明,此时主要影响平行于主泵出口管道方向的电动机振动波动与管道连接方向有关。

3.3 其他因素

此外,CPR1000 机组运行期间如发生主泵启停、稳压器喷淋等影响一回路主冷却剂流动速度和湍流强度的其他操作,也会影响吊篮梁式振动和主泵电动机低频振动冲击。

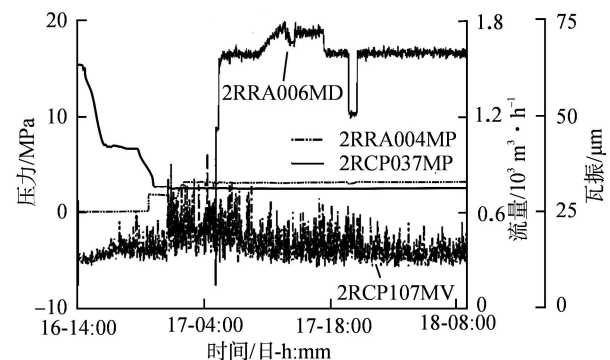


图 5 瓦振与 RRA 参数趋势图

Fig. 5 Trend of Tile Vibration and RRA Parameters

4 优化运行措施建议

对于湍流流动所激发的振动通常可采用降低湍流强度或者修改结构体（如改变结构体的形状减少流体施加的负载、提高结构体的刚度或增加阻尼等）等措施消减。对于 CPR1000 机组 100D 型主泵电动机受吊篮梁式振动影响的随机振动，在无法修改结构体的前提下，应尽可能优化一回路温度/压力平台，维持 3 个环路的对称运行，减少 NS/SG 或 NS/RRA 平台停留时间等降低主冷却剂湍流强度的措施，缓解吊篮和主泵电动机的振动响应。

当反应堆处于零功率以下时，VMS 系统已无法通过测量中子噪声信号监测吊篮固有频率以及吊篮和压力容器下部键销内接触表面的磨损情况。此时，如果主泵电动机出现明显异常的吊篮梁式冲击响应，应及时通过高分辨率振动数据采集器分析该低频分量的特征频率，与吊篮的梁式特征频率比对评估磨损状况。

5 结论

结合机械振动理论和实测的堆内构件振动模态数据对 CPR1000 机组 100D 型主泵电动机振动波动问题进行了系统性分析，得出如下结论：

主泵电动机在 NS/SG 或 NS/RRA 工况下瓦振振幅波动的原因是受 7~9 Hz 的低频随机冲击振动影响，该低频分量来源于一回路主冷却剂湍流诱发的吊篮梁式振动。运行经验表明该低频分量的响应幅值随主冷却剂平均流速和湍流强度的增加而增强。

反应堆在 NS/SG 模式下，通过汽轮机旁路系统降温、降压时容易导致主泵电动机在垂直于主泵出口管道方向上的振动波动；在 NS/RAA 模式下，投运 RRA 降温降压时容易导致平行于主泵出口管道方向上的振动波动，这与一回路管道连接方向有关。

为了缓解电动机受吊篮梁式低频振动冲击影响，反应堆启停期间应选择合适的温度/压力平台，运行过程中应尽可能维持 3 个环路对称运行，减少 NS/SG 或 NS/RRA 平台停留时间等降低主冷却剂湍流强度的措施。

针对反应堆在零功率以下无法通过中子噪声信号监测吊篮振动模态，无法分析吊篮与压力容

器下键销接触面磨损趋势的缺点，提出通过监测主泵电动机受吊篮梁式振动影响的低频振动响应，分析其特征频率变化情况辅助判断的新方法。

参考文献：

- [1] 杨璋, 蒋彦龙. 某型核电汽轮发电机组一次调频功能试验[J]. 热力发电, 2020, 34(01): 109-114.
- [2] 杨璋. 三轴承支撑主泵振动特性研究[J]. 核动力工程, 2015, 36 (03): 84-87.
- [3] 杨奥, 黄志翔, 缪惠芳, 等. CPR1000 全厂断电事故模拟及主泵轴封破口敏感性分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018, 57(05): 629-633.
- [4] 钟云, 刘毅, 周文霞, 等. 主泵惰转特性分析与设计方法研究[J]. 核动力工程, 2017, 38(04): 84-88.
- [5] 肖三平. 电网频率下降时 CPR1000 反应堆主泵和电机瞬态分析[J]. 核动力工程, 2013, 34(03): 152-155.
- [6] 张亚培, 田文喜, 秋穗正, 等. CPR1000 全厂断电事故瞬态特性分析[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(09): 1056-1059.
- [7] 国家机械工业局机械振动在非旋转部件上测量评价机器的振动, 第 3 部分: 额定功率大于 15 kW 额定转速在 120 r/min 至 15000 r/min 之间的在现场测量的工业机器: GB/T 6075.3—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 6-9.
- [8] 杨璋, 舒相挺, 蒋彦龙. 某型半转速核能汽轮发电机测振支架共振故障处理[J]. 大电机技术, 2019, 24(04): 16-20.
- [9] 赖姜, 杨杰, 席志德, 等. 反应堆堆内构件流致振动特性研究[J]. 核动力工程, 2016, 37(S2): 28-31.
- [10] 喻丹萍, 马建中, 席志德, 等. 反应堆堆内构件流致振动试验研究综述[J]. 核动力工程, 2016, 37(S2): 47-51.
- [11] 刘才学, 魏东, 房成春, 等. 中子噪声在核反应堆吊篮振动监测中的应用研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(01): 30-33.
- [12] 陆道纲, 栾霖, 张忠岳. 压水堆吊篮下部防断支承组件流致振动分析[J]. 核科学与工程, 2007(04): 333-338.
- [13] 毛庆, 张景绘. 反应堆吊篮流致振动响应分析中的理论研究[J]. 核动力工程, 2004, 25(03): 198-202.
- [14] 杨翊仁, 鲁丽, 谭晓惠. 反应堆吊篮流致随机响应理论分析[J]. 西南交通大学学报, 2001, 57(06): 557-560.
- [15] Kolbasseff A, Sunder R. Lessons learned with vibration monitoring systems in German nuclear power plants (SMORN-VIII)[J]. Prog. Nucl. Energy, 2003, 43(04): 159-165.
- [16] 徐晓, 马若群, 章贵和, 等. 反应堆压力容器上部堆内支承构件的流致振动分析[J]. 核动力工程, 2014, 35(06): 61-65.

(责任编辑: 王中强)