

Discussion on vibration classification management technology for key sensitive small branch pipes in nuclear power plants

Shengcai Zhang

Operation Department, CGN Lufeng Nuclear Power Co.Ltd, Shanwei, Guangdong, 516500, China

Abstract

Among the many aging issues in nuclear power plant pipelines, fatigue is one of the primary failure mechanisms, with vibration fatigue being particularly prominent. Based on operational feedback from nuclear power plants both domestically and internationally, there are many small branch pipes with nominal diameters equal to or less than 2 inches. When the pipeline vibrates significantly, the welds at the connection points between these small branch pipes and the main pipe are prone to vibration fatigue failure, leading to cracks or even fractures at the welds. Therefore, it is necessary to conduct a vibration survey and evaluation of important system small branch pipes in nuclear power plants before the unit is put into commercial operation. This paper summarizes and outlines the technical solution for graded management of vibration in critical sensitive small branch pipes of nuclear power units. This paper summarizes the hierarchical vibration management of key small branch pipes in nuclear power units and shares Hualong One's in-service experience feedback.

Keywords

small branch pipe; vibration; hierarchical management

核电站关键敏感小支管振动分级管理技术方案探讨

张圣才

中广核陆丰核电有限公司运行部, 中国·广东 汕尾 516500

摘要

在核电厂管线的众多老化问题中, 疲劳是主要失效机理之一, 其中尤以振动疲劳最为突出。根据国内外核电站运行经验反馈, 核电站有很多公称直径等于或小于2英寸的小支管, 当管线振动较大时, 小支管与主管连接处的焊缝容易出现振动疲劳失效, 导致焊缝处出现裂纹甚至断裂。因此在机组商运前, 有必要对核电站重要系统小支管进行振动普查和评价。本文梳理总结了核电机组关键敏感小支管振动分级管理技术方案, 并给出了现役华龙一号机组相关经验反馈信息。

关键词

小支管; 振动; 分级管理

1 引言

在核电厂管线的众多老化问题中, 疲劳是主要失效机理之一, 其中尤以振动疲劳最为突出。根据国内外核电站运行经验反馈, 核电站有很多公称直径等于或小于2英寸的小支管, 当管线振动较大时, 小支管与主管连接处的焊缝容易出现振动疲劳失效, 导致焊缝处出现裂纹甚至断裂。因此在机组商运前, 有必要对核电站重要系统小支管进行振动普查和评价。

ASME OM-2017 PART3 中明确要求核电站在役前及首次启动试验中应对管道系统进行振动测量和评估, 筛选振动过高的管线并进行振动治理, 从而避免这些敏感管发生振动疲劳失效。当前阳江、台山、防城港、惠州等电厂在役前都进行了小支管振动普查与评价。

2 振动普查工作范围

核电厂的小支管振动普查范围应包含核岛、常规岛及泵站的重要系统。具体系统清单应根据设计确定。主要对象包含核岛 8 个系统、常规岛 20 个系统及泵站 3 个系统。

核岛部分包括 ASG、EHR、PTR、RCV、REA、RRI、RCP9 个系统。

常规岛、BOP 部分包括 ABP、ACO、ADG、AHP、ARE、CEX、CVI、GCT、GFR、GGR、GME、GRE、GRV、GSS、GST、CET、CRF、SEC、CGR 等 20 个系统。

3 振动管理工作流程

3.1 任务分工

技术支持科主要负责小支管振动管理工作的整体实施, 工程安装核实处理小支管管线、支架等安装问题, 工程设计统筹振动高小支管设计复核工作。

【作者简介】张圣才(1985-), 男, 中国山东菏泽人, 本科, 工程师, 从事核电站运行与优化创新研究。

3.2 振动管理工作流程

预计在冷试前6个月成立小支管振动管理专项组，进行小支管振动管理。

3.2.1 第1阶段：清单梳理

主要根据电厂流程图等文件资料，将对象系统中所有公称直径≤80mm的小支管进行梳理，形成完整的小支管清单，并根据重要度和靠近振动源情况筛选出先天敏感小支管清单。

3.2.2 第2阶段：外观检查

①实施条件：现场核实先天敏感性分析的正确性，是否真实靠近振源。

对小支管的布置、支撑约束等情况进行检查，对于存在缺陷（约束受限、应力集中或其他任何可能的隐患）的情况需及时记录。

②焊接质量：对筛选出的先天敏感小支管焊缝，主要检验焊缝尺寸和外观质量。

焊缝余高、焊喉或焊脚尺寸、错边量等是否满足设计

文件要求，具体如下：^[1]

核岛：标准管件插套焊缝的理论喉值g的平均值为0.9t，g的最小值为0.8t。凹形焊缝要优于凸形焊缝，理论喉值取决于角焊缝截面形成的三角形的尺寸。

常规岛：焊缝不能熔化管件的边缘。对于易发生高周疲劳管线的插套焊缝，管侧和插套管件端侧的焊角高之比推荐为2:1。

3.3 第3阶段：现场振动测量

①确定需实施振动测量的小支管清单，包括：振动大(>6mm/s)的先天敏感小支管；发现振动较大的非先天敏感小支管；有内外部经验反馈的小支管。

②确定测量工况，制定测量计划。由于调试期间各系统、设备的运行窗口有限，必须合理制定小支管的振动测试计划，确保在调试期间得以测量和评估。

对于核岛系统测试工况如下表格1：^[2]

③现场振动测量。对于常规岛测试工况如表格2：

表格1：核岛系统测试工况

系统	测试窗口	工况
EHR/RIS	开盖冷试	EHR 直接喷淋流量验证及再循环喷淋流量验证；RIS 低压安注泵小流量运行
ASG/PTR/REA	冷试 + 热试	ASG 电动给水泵小流量 + 向 SG 充水；汽动给水泵小流量 + 向 SG 充水；PTR 热交换器效率试验、过滤回路试验；REA 一回路充水以及 REA 补给模式功能试验
RCV/RRI/RRA/RCP	开盖冷试 + 冷试 + 热试	安注功能试验在开盖冷试期间执行；上充功能试验在冷试和热试期间执行；RRI 根据冷却水用户投用情况进行测量，泵出入口小支管在冷试期间测量，其余小支管在热试期间测量；RRA 投运和双泵运行试验；主泵投运后测量

表格2：常规岛系统测试工况

系统代码	系统介质	工况分析
ABP/AHP/GCT/ACO/ ADG/GRE/GME/CET/VVP	汽	负荷<30%额定负荷时，开启电动阀连续疏水；负荷>30%额定负荷时，疏水器投运，间接疏水。ABP/AHP/GCT 在机组30%功率平台前、100%功率平台测量；ACO 激振源为 ACO 泵，根据系统投运情况测量；ADG 振源主要与 ADG010PO 有关，ADG 系统将在机组启动过程中关注测量/GRE/GME/CET 与机组功率有关，在 DEM33/34 平台各测量一次；VVP 在 100%Pn 时振动较大，在 100% 平台测量。
APA/ARE/CEX	水	APA 振源分布在 APA 泵出口 / 入口管，将在 APA 泵小流量时测量；APA 泵冷却水等相关管道，可以在整个调试期间进行测量；ARE/CEX 在 DEM33(30%或50%)和 DEM34(100%)各测量一次。
GFR/GGR	油	介质为油的系统，与功率平台无关，在调试期间测量一次。
GRH/GHE/GST/ GRV/GSS/CVI	气	与功率平台无关，在调试期间测量一次

3.4 第四阶段：计算与分析

3.4.1 许用有效速度计算

当小支管振动有效速度 $V_{rms} \geq 12\text{mm/s}$ 时，应计算小支管的允许振动有效速度 V_{allow}^{rms} 。

对于第1类小支管（带有不平衡质量的直管），采用 EDF 公司 SEPTEN 方法计算；第2类小支管（为除第1类小支管之外的小支管），参考 ASME - OM - PART3 并考虑峰值 - 有效值转换系数，计算得允许有效速度。

若 $V_{rms} < V_{allow}^{rms}$ ，则该支管为非敏感管；若 $V_{rms} \geq V_{allow}^{rms}$ ，对于第1类管，确定该支管为敏感管；对于第2类管，则该支管为潜在敏感管，应计算管座焊缝应力；

该计算方法中管道疲劳极限值参考 ASME BPVC-III APP-2017。^[3]

①第一类小支管允许有效速度计算方法：

$$\alpha = \frac{3(1 - \nu^2)}{2\pi} \log \left(\frac{b}{R} \right)$$

式中各计算参数如下：

t：主管壁厚；R：主管平均半径， $R = (D_{ext} - t) / 2$ ， D_{ext} 为主管外径；b：管座外半径； ν ：泊松系数 ‘’

②第二类小支管允许有效速度计算方法：

允许有效速度计算公式是以 ASME OM PART3 中相应的公式为基础，结合 EDF 经验给出，其公式为：

$$V_{adm} = \sigma_{adm} \frac{C_1 C_4}{C_0 C_3 C_5} \times \frac{\lambda}{C_2 K_2}$$

式中： V_{adm} 允许的有效速度； λ 为 13.42mm/s/MPa； C_0 峰值有效值转换系数，取 3.5； C_1 补偿特征管段集中质量影响修正系数； C_4 端部条件修正系数； σ_{adm} 单位 MPa，对应于 10^{11} 次循环最大容许交变应力； C_3 考虑管道内介质和管道保温层的修正系数； C_5 考虑非共振强迫振动的修正系数； C_2 二次应力指数； K_2 局部应力指数；

③管道振动允许峰值速度计算方法。

管道振动允许峰值速度计算方法参考 ASME OM-S/G 2017 PART3 制定，其计算公式如下，相关参数的选取与 EDF 第二类小支管计算方法中的参数一致，此处不再列出^[4]。

$$V_{allow}^{peak} = \sigma_{adm} \frac{C_1 C_4}{C_3 C_5} \times \frac{\lambda}{C_2 K_5}$$

3.4.2 交变应力计算评估

对于与母管相连的小支管，其振动主要由母管振动引起，因此将支管管座运动作为激励（位移、速度或加速度）来计算小支管的动应力分布。步骤为：①计算不同固有频率的单自由度系统对管座加速度激励的最大响应，绘出响应谱曲线；②对管道建立有限元模型，进行模态分析，求出管道固有频率和振型；③在管座施加响应谱，计算管道各阶模态下的振动交变应力响应；④对各阶模态下管道的振动交变应力响应进行模态组合，使用 SRSS 法，求出总振动交变应力响应。

实际测量分析计算得到的最大交变应力幅应不大于 ASME OM PART3 规定的允许交变应力幅度。

3.5 第五阶段：超标小支管治理

技术支持提供小支管异常初步分析报告，并负责治理方案的审核。工程调试组织协调异常管线问题处理。工程安装核实处理核岛、常规岛重要系统小支管管线、支架等安装问题，配合异常管线的现场整治工作。设计统筹振动高小支管设计复核工作。对于需要进行力学计算的，转后台进行力学计算；进行图纸升版的应及时反馈现场施工，进行现场安装调整。厂家设备自带的振动高小支管，由工程协调厂家进行治理，如需要设计院支持的，通过项目部专项安排。振动高小支管治理过程中，涉及振源降振的，由设计方给出解决方案，提供技术支持。对上述工作整理，编写振动测量分析和评估报告。

4 经验反馈

当前阳江、台山、红沿河、防城港、惠州等电厂在役前都进行了小支管振动普查与评价。现以阳江 6 号机组小支管役前检查结果为例，做出以下总结：

振动大小支管分布如表格 3：

常规岛振动超 12mm/s 小支管主要集中在：APA、GPV、VVP 等系统；核岛振动大（超 12mm/s）小支管主要

集中在 ASG、RRA、RRI 等系统。图 1 给出各系统振动大功率平台 / 工况和振动大小支管功能位置。

表格 3：振动大小支管分布

	小支管 总数	先天 敏感管	已测量 总数	超 12mm/s	超许用值
常规岛	3327	836	767	78	18
核岛	1901	812	754	43	7

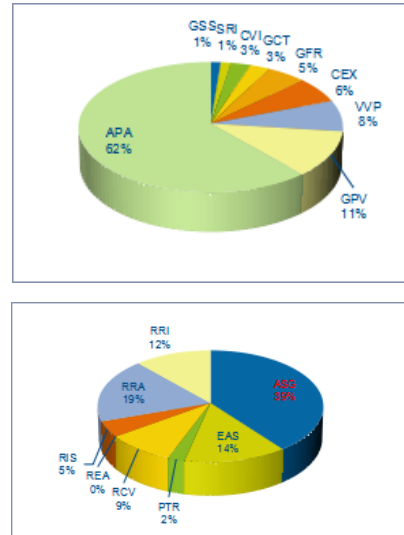


图 1：振动大小支管系统分布

5 工作计划

项目整体计划按调试进度安排，主要工作的现场测试窗口为：

核岛小支管振动普查现场工作在冷试、热试期间完成；泵站小支管振动普查现场工作在冷试、热试及冲转并网升功率期间完成；常规岛小支管振动普查现场工作在冲转至商运前完成；全部测量工作结束后二个月内：提供书面正式分析报告。

6 结语

通过系统的技术管理，核电小支管振动疲劳失效问题可以得到较好的解决。后续可以在此方法上不断更新迭代新的技术方案，从而适应核电站对小支管振动疲劳失效问题越来越高的要求。

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. 原子能出版社. 2007.
- [2] 美国机械工程师协会 (ASME) 关于核电站运行和维护的标准 ASME OM - S/G 2017.
- [3] 专利【CN110929894A】阳江核电有限公司. 核电站小支管分级管理方法和系统. 2024/07/26.
- [4] 2010中国核电产业科技创新与发展论坛文献. 核电厂工艺系统管道震动测量与评价方法初探. 柳鹏、钱立波.