

文章编号 : 0258-0926(2016)S2-0077-03 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S2.0077

基于应变与加速度响应的核电厂 小支管振动评价

沈双全, 徐昱根, 张世伟, 李 鑫

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 核电厂存在大量的仪表管、取样管、排气管等小支管, 其机械振动疲劳断裂是商业运行核电厂经常出现的问题。本文以阳江核电站二号机组 GRE023 管线的实测振动应力对其振动疲劳寿命进行了评价, 采用有限元方法以加速度时程二次积分获得的位移时程为输入对其振动疲劳寿命进行了分析, 获得了小支管振动疲劳瞬态动力分析关键参数设置方法, 同时也为类似结构的减振改造设计积累了经验, 为核电厂小支管振动治理提供了参考。

关键词: 小支管; 振动; 疲劳评价

中图分类号: TL353 文献标志码: A

Vibration Evaluation of Small Bore Pipe in NPPs Based on Strain and Acceleration

Shen Shuangquan, Xu Yugen, Zhang Shiwei, Li Xin

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract : Small bore pipes, existing in a form of large quantities of instrument pipes, sampling pipes and vent pipes, often suffer mechanical vibration fatigue fracture. Vibration fatigue life is evaluated according to measured vibration stresses for GRE023 pipes in Unit 2 of Yangjiang NPP. Measured acceleration time history were double integrated into the displacement time history for vibration fatigue life analysis by finite element method, and key parameters for transient dynamic analysis were also determined, which lays an empirical foundation for vibration reduction of analogical structure. The analytical method can provide a reference for small bore pipe vibration reduction in NPPs.

Key words : Small bore pipe, Vibration, Fatigue evaluation

0 引 言

根据法国电力集团 (EDF) 经验反馈, “小支管与主管道连接的管座焊缝发生开裂”现象主要发生在小支管管嘴处, 裂纹主要是由于支管靠近振动源 (泵、调节阀、孔板等)、小支管支承不合理、焊缝处应力集中, 最终导致疲劳失效。EDF 已要求所属核电厂对“敏感管”必须采取适当措施来消除隐患。

阳江核电厂汽轮机厂房的汽轮机调速系统

GRE023 管线原设计存在缺陷, 在运行 1~2 a 后在阀门连接位置出现裂纹。为此中国广东核电集团公司阳江核电厂对其进行了临时整改, 包括改进螺纹连接为焊接结构以及减小阀门质量、增加临时支架等措施。中国核动力研究设计院对临时整改后的 GRE023 管线进行了振动测试, 获得了结构关键位置的振动应变数据与加速度数据。首先采用实测应变数据对管线进行振动疲劳评定, 再以二次积分获得位移时程数据为输入对管线进行

有限元建模分析,最后以详细实体分析雨流法对结构进行疲劳评定。

1 应变与加速度数据测量

采用高温应变片与高温加速度计对结构的关键位置进行应变与加速度的测量。应变测点为与主管管座焊接根部、管线与阀门焊接位置、临时支架支撑位置、变径承插焊位置。加速度测量位置为主管管座焊接根部、第一支撑位置、第二支撑位置。

鉴于加速度传感器的频响特性,选择合适频响范围的加速度传感器是能否获得合理位移时程数据的关键^[1-3]。实际工程测量得到的加速度信号中包含由各种干扰因素引起的直流误差项 δ 以及时间函数 $f(t)$,所以测量得到的加速度信号 $a(t)$ 为:

$$a(t) = f(t) + \delta \quad (1)$$

对上述加速度信号进行一次积分得到速度信号 $v(t)$ 表达式:

$$\begin{aligned} v(t) &= \int a(t) dt + v_0 = \int [f(t) + \delta] dt + v_0 \\ &= \int f(t) dt + \delta t + \varepsilon + v_0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中,误差项 ε 在积分运算中被逐渐放大,同时由于积分初值无法确定,因此加速度时域一次积分速度结果中含有一次误差项 $\delta t + \varepsilon$ 以及常数项 v_0 。

通过2次积分所得位移信号 $s(t)$ 的表达式为:

$$\begin{aligned} s(t) &= \int v(t) dt + s_0 \\ &= \int [f(t) dt + \delta t + \varepsilon + v_0] dt + s_0 \\ &= \int [f(t) dt] dt + 0.5 \delta t^2 + \varepsilon t + e + v_0 t + s_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, e 、 s_0 为常数项;在二次积分得到位移信号时出现了二次误差趋势项 $\varepsilon t + e + v_0 t + s_0$,本文采用基于高通滤波去除趋势项的时域积分算法获得小支管的振动位移数据。

2 疲劳评价

分别采用测试应变折算应力和采用有限元计算分析2种方式对结构疲劳进行评定^[4-5]。评定 $S-N$ 曲线为ASME规范不锈钢材料疲劳曲线。

2.1 应变测试结果评价

依据美国机械工程师协会(ASME)规范B3650章节内容对振动应力进行疲劳评定。振动引起应力评定准则如下:

$$S_p = K_2 C_2 D_0 / 2I M_i \quad (4)$$

式中, K_2 、 C_2 为应力集中系数; D_0 为管道平均直径,m; M_i 为振动载荷引起的弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$;最大应力幅值 S_p 按 $S = E_c \varepsilon$ 计算; I 为管道抗弯模量, m^4 ;对应材料疲劳曲线的弹性模量 $E_c = 1.95 \times 10^{11}$ Pa。每次启机循环次数按照测点主振频率计算。进行累计疲劳使用因子计算时,首先依据测点应力结果插值计算出该测点位置的许用循环次数,再按照规范要求计算机组寿命期内启机测点位置的累计疲劳使用因子。评定对GRE023管线的结果见表1。

表1 GRE023 管线应变最大结果与许用循环次数
Table 1 Maximum Strain Results and Fatigue Evaluation of GRE023 Pipe

位置	应变最大值/ $\mu\varepsilon$	应力/MPa	许用循环次数
根部	856	166	2×10^5
阀前	490	95.8	1×10^9

评定结果表明该管线根部的许用循环次数小于机组寿命振动循环次数(大于 10^{11}),不能满足核电厂设计要求。而本次评价只针对振动机械载荷,忽略了循环次数较少的升温与压力瞬态造成的损伤,ASME规范中 $S-N$ 曲线具有一定的保守性,导致真实结构实际使用寿命无法估计。

2.2 有限元疲劳分析与评价

首先采用ANSYS有限元分析软件的PIPE16单元建立结构模型I(图1),输入结构3个支撑点的位移时程,计算出根部焊接位置的弯矩时程。采用SOLID45单元建立结构承插焊位置三维模型II(图2a),计算输入管道弯矩时程获得结构在振动载荷下的应力张量,采用雨流法按照ASME规范 $S-N$ 曲线进行疲劳评定。

评定关键节点按照图2b中路径进行选取,关键节点1~4的累计疲劳使用因子计算结果分别为

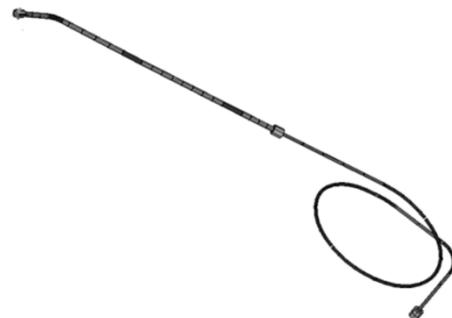


图1 管单元有限元模型

Fig. 1 Finite Element Model of Pipe

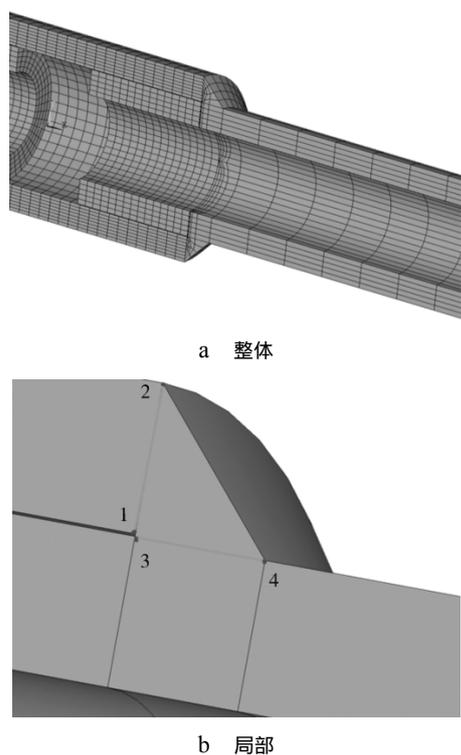


图2 三维实体单元有限元模型

Fig. 2 3D Solid Element Finite Element Model

15.88、0.64、433.6、0.016。计算结果表明,在排除应变统计时的保守性后,使用详细三维体模型计算结构应力,得到的结构疲劳寿命较应力统计评定时有所增加,但依然不能满足核电厂设计寿命要求。

3 结束语

采用实测应变结果与有限元分析结果对某核电厂汽轮机厂房 GRE023 管线临时改造措施进行了评价,证明了该临时措施未经过详细设计分析,管线结构不能满足核电厂设计使用寿命要求。

有限元仿真分析不仅可以应用于结构寿命分析评价,更是有效的改造设计手段,通过简单的参数变化可实现支架的优化设计。采用二次积分与高通滤波去趋势项方式可以获得结构位移时程,但是必然会引起一定的误差。国内也有采用振动试验台复现结构振动的先例,今后为更精确获得结构位移时程可采取此方式进行,也可以在基于振动台的试验环境模拟核电厂现场振动,对有限元优化改造设计进行验证。

参考文献：

- [1] 顾名坤. 基于振动加速度测量的振动速度和位移信号识别方法探讨[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(4): 523-525.
- [2] 刘继承, 徐庆华, 查建新. 用加速度传感器测量振动位移的方法[J]. 现代雷达, 2007, 29(5): 70-71.
- [3] 周英杰. 加速度测试积分位移算法及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2013.
- [4] 范文学. 焊接接头振动疲劳的数值模拟[D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学博士学位论文, 2014.
- [5] 修俊杰. 小支管插套焊高周疲劳失效机理与延寿技术研究[D]. 天津: 天津大学博士学位论文, 2012.

(责任编辑: 孙 凯)