

主回路滞流分支管振动超标的原因分析与设计优化

蔡坤^{1,2}, 邹建荣², 蔡奕霖², 马志才², 朱昶帆², 邱健², 郑明光^{1,2,*}

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;

2. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233)

摘要:在某核电厂热态功能试验中, 巡视发现主回路的某滞流分支管振动超标。根据实测振动随温度变化的趋势、管道固有声模态分析和模态分析等, 推测管道内流体的声振动激励引发管道共振。根据滞流管三通处流体的漩涡脱落频率计算和声振动频率计算, 推测漩涡脱落与滞流管内流体的固有声振动频率锁定, 引发声振动激励放大。综合分析计算和实测结果, 确定滞流管振动超标的原因因为流声固耦合振动。对管道支架进行了优化, 以错开声固耦合共振频率, 在三通处倒圆角削弱漩涡脱落, 以降低流声耦合的声振动幅值。优化后的分支管振动会明显降低, 以保证承压边界的安全。

关键词:滞流分支; 声频锁定; 流声固耦合

中图分类号: TL353

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)11-2194-07

doi: 10. 7538/yzk. 2020. youxian. 0194

Root Cause Analysis of Vibration Exceeding and Design Optimization of Stagnant Branch of Reactor Coolant Loop

CAI Kun^{1,2}, ZOU Jianrong², CAI Yilin², MA Zhicai², ZHU Changfan²,
QIU Jian², ZHENG Mingguang^{1,2,*}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: During the hot function test of nuclear power plant, it was found that the vibration of a stagnant branch of reactor coolant loop (RCL) exceeded the limit. According to the natural modal analysis, acoustic modal analysis and the variation trend of measured vibration with temperature, it is inferred that the acoustic vibration of the fluid in the pipeline causes the resonance of the pipeline. According to the calculation of vortex shedding frequency and acoustic vibration frequency, it is inferred that the acoustic vibration and the vortex shedding frequency of fluid at the tee are locked, which leads to the amplification of acoustic vibration excitation. Based on the analysis result

收稿日期: 2020-03-27; 修回日期: 2020-05-20

基金项目: 大型先进压水堆核电站重大专项资助项目(2018ZX06001001)

作者简介: 蔡坤(1981—), 男, 山东沂水人, 高级工程师, 博士, 核能科学与工程专业

* 通信作者: 郑明光, E-mail: zhengmg@snerdi.com.cn

网络出版时间: 2020-08-26; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200825.1604.008.html>

and measured data above, it is determined that the cause of the vibration exceeding is the fluid-acoustic-structure coupling vibration. The pipe supports were optimized to avoid resonance frequency of acoustic structure coupling. The fillet at the tee was used to weaken the vortex shedding, so as to reduce the amplitude of flow-excited acoustic resonance. The vibration of the optimized branch will be significantly reduced to ensure the safety of the pressure boundary.

Key words: stagnant branch; acoustic frequency locking; fluid-acoustic-structure coupling

在某核电厂热态试验中,发现连接主回路(RCL)的一个滞流分支管道振动明显,实测振动幅度接近 1 mm,加速度约为 2.5g,经应力和加速度评估,振动会引起疲劳累积,对管道上的隔离阀和爆破阀的功能有影响,从而危害到承压边界的安全性。因此,必须采取措施降低管道振动。

核电厂的核级管道在设计中考虑了振动工况^[1],但实际载荷比设计工况更加复杂,因此在安装调试中按照 ASME OM 测量并评估管道振动,运行中若发现裂纹或泄漏及时维修^[2]。多个核电厂由于母管振动带动仪表管振动造成焊缝疲劳失效^[3],通过加强仪表管和焊缝降低交变应力;秦山核电厂的主蒸汽管至除氧器加热管管系^[4]和田湾核电厂凝结水系统管系^[5]的设计过柔,增加刚性支架或阻尼器提高管系刚度;田湾核电厂的乏燃料水池冷却系统管道^[6]和 CPR1000 核电厂安全注入系统(RIS)管道^[7]的孔板下游空化,通过单孔孔板改多孔孔板消除孔板下游空化;1 000 MW 核电机组的再循环管道^[8]水平方向过柔,由于调节阀下游流体闪蒸造成振动超标,增加支架并提高调节阀下游压力后振动减小。核电厂中大管径管道(4 英寸以上)的振动主要是流体作用到过柔的管道引起振动超标,小管径管道(1 英寸及以下)的振动以受母管影响的振动激励为主。

本文研究 RCL 滞流分支管管道振动机理,根据振动实测、管道结构振动特性分析和声振动分析等确定激励载荷,提出管道优化方案。

1 管道振动机理

引起管道振动的机理有很多,主要是激励与固有频率共振。根据激励源的不同振动可分

为两大类:机械激励振动和流体激励振动^[9]。机械激励是由机械运动(如泵和电机)或其他部件振动传递的机械载荷产生的,如泵和电机等旋转机械由于偏心^[10]、安装偏差和轴承而产生振动^[11],管道与支架由于摩擦产生振动等。流体激励表现为压力波动,包括泵致压力脉动^[12]、输流管道流固耦合引起的管道振动^[13]、蒸汽和流体中的声压变化^[14-15]、流体结构耦合引起的压力变化^[16]、阀门作用引起的流量变化、两相流^[17]、气穴和闪蒸等。其中泵致压力脉动^[18]是泵引发的流体载荷,其频谱在特定频率下有峰值,如旋转频率、两次旋转频率和叶片通过频率等。声压载荷通常很小,较大的声压载荷通过流声耦合放大^[19]。湍流引起宽带压力波动^[20],主要在管道中由于流动不连续性造成,如弯管、三通、阀门等位置形成湍流。根据以上管道振动机理,可逐一筛查滞流管振动的原因。

2 根本原因分析

本文研究的 RCL 滞流分支管布置模型(外径 350 mm)如图 1 所示,一端连接到 RCL 的热

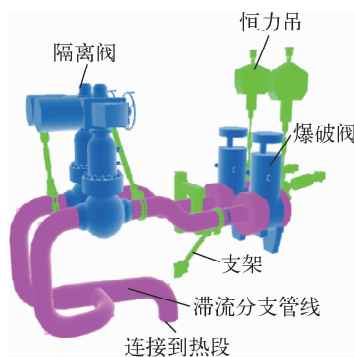


图 1 滞流分支管布置模型

Fig. 1 Stagnant branch layout model

段,另一端连接到爆破阀。在正常运行期间,爆破阀关闭,此管道为 RCL 的滞流分支。由于此管道是 RCL 压力边界的一部分,必须研究其振动的根本原因并提出解决方案。

2.1 激励引发管道结构共振

从主控室(MCR)获得了核电厂热态试验过程中爆破阀的振幅。升温过程中 RCL 的状态参数如图 2 所示,爆破阀的振幅如图 3 所示。

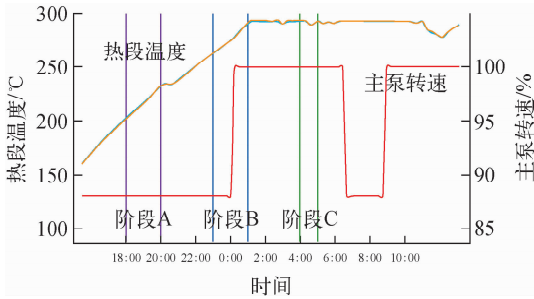


图 2 升温过程中 RCL 的温度和主泵转速

Fig. 2 RCL temperature and reactor coolant pump speed in heatup process

由图 2、3 可见:热段温度在 230~240 °C 范

围内爆破阀有一振动峰,见图 3 中的“阶段 A”;当温度接近 292 °C 时,似乎会出现另一振动峰。由图 3 可见:随着主泵(RCP)转速(相对满转速)从 88%提升到 100%,振动水平有阶跃,见图 3 中的“阶段 B”;RCL 温度稳定在 292 °C 和主泵转速稳定在 100%转速后,振幅稍有下降,见图 3 的“阶段 C”;当隔离阀关闭时,振动突然降低到可忽略的水平。热段温度为 292 °C 时爆破阀测点和振动频谱如图 4 所示。

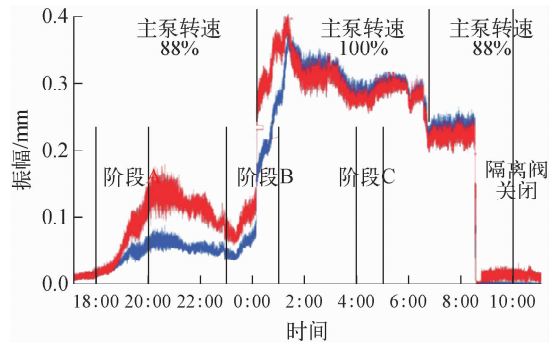


图 3 爆破阀振幅随 RCL 状态的变化

Fig. 3 Amplitude changing of squib valve with status of RCL

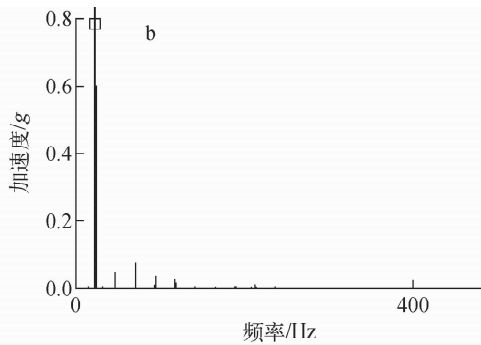


图 4 爆破阀测点(a)和振动频谱(b)

Fig. 4 Squib valve outlet (a) and acceleration spectrum (b)

由于振动频率单一,主要集中在 24 Hz,初步推测是激励载荷引发管道的固有频率振动。由滞流分支管道的模态分析可得到管道的固有频率,有限元分析模型如图 5 所示,固有频率列于表 1。

由于管道的固有频率很多,表 1 只列出 24 Hz 附近几阶固有频率。由表 1 可见,在 23~25 Hz 范围有管道固有频率,与实测振动频率接近,且有较大的参与质量,初步确定为激励引

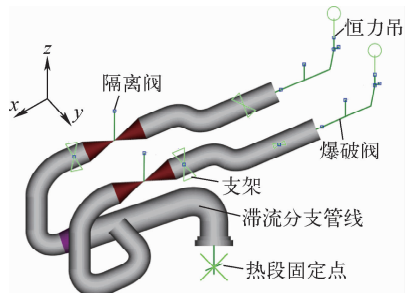


图 5 滞流分支管的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of stagnant branch

发管道共振。滞流分支管的振型如图 6 所示。

表 1 滞流分支管的固有频率

Table 1 Natural frequency of stagnant branch

固有频率 阶次	频率/ Hz	参与质量/%		
		x	y	z
8	10.41	0.00	0.13	0.05
9	18.32	0.00	0.12	0.00
10	23.33	0.03	0.00	0.11
11	25.17	0.00	0.02	0.13
12	40.63	0.00	0.00	0.03

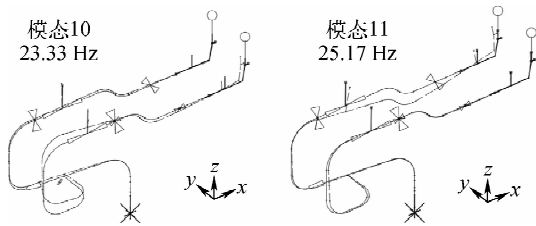


图 6 滞流分支管的振型

Fig. 6 Vibration mode of stagnant branch

2.2 激励为管道内流体的声振动

由图 2、3 可知,RCL 升温过程中爆破阀的振幅不断变化,因此管道振动与流体温度相关。滞流分支管的温度分布和 RCL 热段温度的关系如图 7 所示。

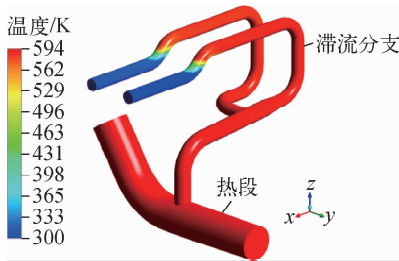


图 7 正常运行时滞流分支管的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of stagnant branch under normal operation

滞流分支管内流体的温度可简化为高温段和低温段。高温段的温度与热段温度一致,低温段的温度与环境温度一致。高温段与低温段之间有很短的过渡。

本工作测量了 3 个不同状态下爆破阀的振动数据(采样频率 1 kHz),其频率均是单频为

主。RCL 状态和爆破阀的振动频率列于表 2。

表 2 RCL 状态和爆破阀的振动频率

Table 2 RCL status and squib valve vibration frequency

状态	温度/ ℃	压力/ MPa	主泵 转速/%	振动 频率/Hz
1	240	15.5	88	27.00
2	280	15.5	88	24.25
3	292	15.5	100	23.75

根据振动机理可排除主泵机械振动、主泵产生的流体压力脉动激励和湍流激励等。按照一维管道声振动频率计算公式(式(1)),根据表 2 参数计算不同工况下的声振动频率。

$$f_a = \frac{1}{\frac{L_1}{C_1} + \frac{L_2}{C_2} + \dots + \frac{L_n}{C_n}} \quad (1)$$

式中: f_a 为声振动频率; $C_i (i=1,2,\dots,n)$ 为不同管段的声速; L_i 为不同管道的长度。

考虑到滞流分支管的温度分布不均(图 7),将滞流分支管的温度简化为两部分。由式(1)计算出声振动频率,声振动频率理论值与实测值的比较如图 8 所示。

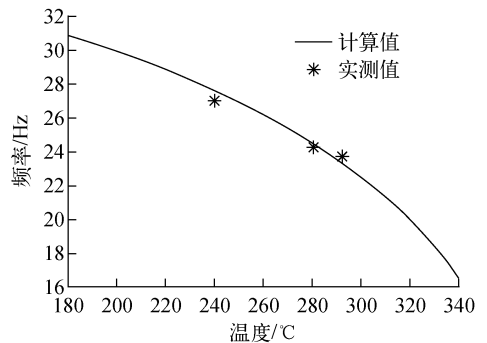


图 8 声振动频率理论值和实测值的比较

Fig. 8 Comparison of theoretical value and measured value for acoustic vibration frequency

由图 8 可见,管道声振动频率随温度变化的趋势与理论值基本一致,由此初步验证管道振动的激励为滞流分支管内流体的声振动。为进一步确认管道振动的根本原因,安装了管道振动在线监测系统,测量点(MP)如图 9 所示,每个 MP 安装 3 个方向传感器。

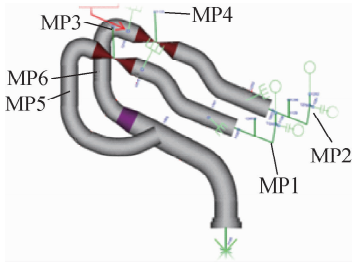


图9 滞流分支管的在线监测系统

Fig. 9 Online monitoring system of stagnant branch

在线监测系统得到滞流分支管振动的时程(采样频率 2 kHz, 数据时长 20 h), 截取升温段的部分数据。为使时频图能更好区分振动的频率成分, 对时频谱的振幅取对数, 得到爆破阀(MP1)振动的时频图如图 10 所示。由图 10 可见, 随热段温度的升高, 激振频率持续降低, 当激振频率接近管道固有频率时, 振动明显增大。当激振频率继续降低, 离开管道的固有频率时, 振动逐渐减小。由管道结构的固有频率分析结果和在线监测系统的振动数据可知, 管道结构的共振是由声激励引起的。

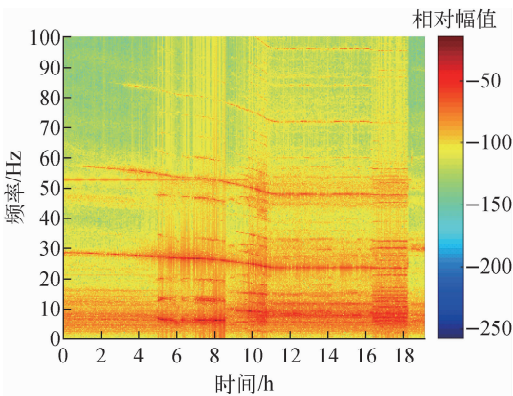


图 10 爆破阀振动的时频图

Fig. 10 Time frequency diagram of squib valve vibration

2.3 漩涡脱落与声振动频率锁定

声激励是流体的压力波动, 通常是由流动引起的压力变化造成的。在滞流分支管三通位置, 当流体漩涡脱落频率接近声振动频率时, 流体漩涡脱落频率被滞流分支管的声频率锁定^[21](简称声频锁定), 此时发生流致声共振。Ziada 等^[22-23]研究了不同布局下的流致声振动, 得到了 Strouhal 数与声频率锁定的关系。

对于本文研究的滞流分支管, 当 Strouhal 数的范围在 0.4 ~ 0.6 之间时发生频率锁定。Strouhal 数为:

$$S = \frac{fL}{U} \quad (2)$$

式中: S 为 Strouhal 数; f 为声振动频率; L 为分支管长度; U 为母管流速。

表 3 列出不同工况下的 Strouhal 数, 在温度为 274 ~ 292 °C、主泵转速为 88% ~ 100% 范围内, Strouhal 数在 0.4 ~ 0.6 之间, 在漩涡脱落被声振动频率锁定的范围内, 此时发生流致声共振, 因此声激励明显。

表 3 不同温度和主泵转速下的 Strouhal 数

Table 3 Strouhal number in different temperatures and RCP speeds

温度/°C	不同主泵转速下的 Strouhal 数	
	88%	100%
274	0.51	0.45
292	0.48	0.42

由以上实测和分析可见, 高速流体流经滞流分支管与热段连接的三通处发生漩涡脱落, 漩涡脱落频率与滞流分支管的声振动频率接近, 漩涡脱落被声振动频率锁定, 发生流致声共振。声振动频率与管道结构频率重叠, 发生声固耦合共振。综合流致声共振和声固耦合共振现象可推断, 滞流分支管振动超标的根本原因为流声固耦合。

3 设计优化

基于以上原因分析, 管道优化的目标是降低流致声振动和降低声固耦合振动。采用的方法如下: 在滞流分支管三通内侧修改倒角, 以降低流致声振动; 调整滞流分支管管道支架, 改变管道固有频率, 以避免声振动频率。经过几十次支架修改方案的尝试, 最终找到恰当的支架布置, 可使管道固有频率避开 19 ~ 28 Hz 范围内的声激励。即在管道上增加 2 个支架, 支架的位置和支承方向如图 11 所示。修改后的管道固有频率列于表 4。

修改后管道固有频率第 9 阶为 17.59 Hz, 第 10 阶为 35.91 Hz, 避开了热段温度变化范

围内的声振动频率(19~28 Hz),根据现有振动测量数据可判断不会发生声固耦合共振。考虑到三通内倒角降低了声振动幅值,修改后管道振动的振幅将会大幅下降到振动限值以下。

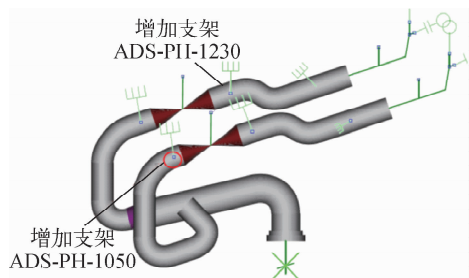


图 11 修改后的管道布置

Fig. 11 Modified layout of pipeline

表 4 滞流分支管修改后的结构频率

Table 4 Modal frequency of stagnant branch after modification

模态阶次	模态频率/Hz
8	10.427
9	17.594
10	35.912
11	37.689

4 结论

核电厂热试期间巡视发现 RCL 的某一滞流分支管道振动明显,经测量评估振动超标。根据管道固有频率分析和实测振动数据推测,振动为激励引发管道共振。根据声模态分析和实测振动随温度的变化,推测激励为管道内流体的声振动激励。根据漩涡脱落与声振动频率锁定的计算推测,流体的声振动激励为滞流分支管三通处流体的漩涡脱落频率与滞流管内流体的固有声振动频率接近,引发声振动频率锁定而产生。流致声共振放大了声振动,声振动激励管道结构共振放大了管道振动,流声固耦合的两级共振放大造成了滞流分支管振动超标。电厂实测数据反映了 RCL 升温过程中滞流分支管振动的频率变化和幅值变化,验证了流声固耦合的原因。对滞流分支管进行设计优化,根据现有振动数据可预测修改后的滞流分支管正常运行。

参考文献:

- [1] MCGEORGE R, JR L F S. The steam hammer problem; Dynamic shock loading of critical reactor piping systems[J]. Nuclear Engineering and Design, 1975, 32(1): 121-128.
- [2] IIDA K. A review of fatigue failures in LWR plants in Japan[J]. Nuclear Engineering and Design, 1992, 138(3): 297-312.
- [3] 林磊,徐德城,宋晓锋,等. 核电厂仪表管道振动疲劳耐久性性能改进研究[J]. 中国核电,2016,9(3):231-236.
LIN Lei, XU Decheng, SONG Xiaofeng, et al. Improvement of vibration fatigue durability of instrument pipes in nuclear power plant[J]. China Nuclear Power, 2016, 9(3): 231-236(in Chinese).
- [4] 李岗,梁兵兵,殷海峰. 核电厂常规岛工艺管道振动改善研究[J]. 核动力工程,2012,33(6):93-95.
LI Gang, LIANG Bingbing, YIN Haifeng. Research on process pipe vibration improvements in NPP conventional island[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(6): 93-95(in Chinese).
- [5] 管玉峰,周正平,秦贯洲. 核电厂凝结水管道振动诊断及处理[J]. 能源技术与管理,2015,40(2):125-126.
GUAN Yufeng, ZHOU Zhengping, QIN Guanzhou. Diagnosis and treatment of condensate pipeline vibration in nuclear power plant[J]. Energy Technology and Management, 2015, 40(2): 125-126(in Chinese).
- [6] 袁少波,喻丹萍,周正平,等. 田湾核电站管道振动问题处理[J]. 核动力工程,2012,33(6):6-8.
YUAN Shaobo, YU Danping, ZHOU Zhengping, et al. Assessment and reducer of pipe vibration of Tianwan NPP[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(6): 6-8(in Chinese).
- [7] 卫媛媛,李辉,朱峰,等. CPR1000 核电厂孔板汽蚀诱发管道振动分析及工程改进[J]. 核科学与工程,2016,36(6):865-868.
WEI Yuanyuan, LI Hui, ZHU Feng, et al. Analysis and improvement on vibration of pipe due to orifice cavitation in CPR1000 nuclear power plant[J]. Nuclear Science and Engineering, 2016, 36(6): 865-868(in Chinese).
- [8] 薛宪阔,候淑娟. 1 000 MW 核电机组再循环管道振动分析及治理[J]. 节能技术,2018,36(2):

- 176-178.
- XUE Xiankuo, HOU Shujuan. The cause analysis and improvement of recirculation piping's vibration for 1 000 MW nuclear power plant[J]. Energy Conservation Technology, 2018, 36(2): 176-178(in Chinese).
- [9] 胡士光,沈小要. 核电厂管道振动原因分析及对策[J]. 噪声与振动控制,2015,35(3):208-210.
HU Shiguang, SHEN Xiaoyao. Cause analysis of pipeline vibration in nuclear power plants and its improvement strategies[J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(3): 208-210(in Chinese).
- [10] JEFFCOTT H H. The lateral vibration of loaded shafts in the neighbourhood of a whirling speed; The effect of want of balance[J]. Philosophical Magazine, 1946, 219: 304-314.
- [11] 杨璋. 三轴承支承主泵振动特性研究[J]. 核动力工程,2015,3(3):84-87.
YANG Zhang. Study on vibration characteristics of three bearing supporting main coolant pump [J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 3(3): 84-87(in Chinese).
- [12] PENZES L E. Theory of pump-induced pulsating coolant pressure in pressurized water reactors [J]. Nuclear Engineering and Design, 1974, 27(2): 176-188.
- [13] 张立翔,黄文虎,TIJSSELING A S. 输流管道流固耦合振动研究进展[J]. 水动力学研究与进展: A辑,2000,15(3):104-117.
ZHANG Lixiang, HUANG Wenhui, TIJSSELING A S. Research progress of fluid structure coupling vibration of pipeline[J]. Journal of Hydrodynam; Ser A, 2000, 15(3): 104-117(in Chinese).
- [14] DIESELHORST T, KLAUI E. Root cause analysis of operational induced vibrations in a feedwater system[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 206(2): 129-137.
- [15] 张辉,张镔,顾汉洋,等. 方形封闭旁支管流致声共振实验研究[J]. 原子能科学技术,2014,48(1):86-91.
- ZHANG Hui, ZHANG Kai, GU Hanyang, et al. Experimental study of flow induced acoustic resonance in square closed side branch[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(1): 86-91(in Chinese).
- [16] TIJSSELING A S. Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems: A review[J]. Journal of Fluids & Structures, 1996, 10(2): 109-146.
- [17] MIWA S, MORI M, HIBIKI T. Two-phase flow induced vibration in piping systems[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 78(78): 270-284.
- [18] 周莹,蔡坤. 主回路泵致声振动分析[J]. 噪声与振动控制,2015,4(4):224-227.
ZHOU Ying, CAI Kun. Research on pump-induced pulsation of the principal loops of nuclear power stations[J]. Noise and Vibration Control, 2015, 4(4): 224-227(in Chinese).
- [19] MORITA R, TAKAHASHI S, OKUYAMA K, et al. Evaluation of acoustic- and flow-induced vibration of the BWR main steam lines and dryer [J]. Journal of Nuclear Science & Technology, 2011, 48(5): 759-776.
- [20] AU-YANG M K, BRENNEMAN B, RAJ D. Flow-induced vibration test of an advanced water reactor model, Part 1: Turbulence-induced forcing function[J]. Nuclear Engineering and Design, 1995, 157(1): 93-109.
- [21] HOWE M S, FEIT D. Acoustics of fluid-structure interactions[M]. USA: Cambridge University Press, 1998.
- [22] ZIADA S, SHINE S. Strouhal numbers of flow-excited acoustic resonance of closed side branches [J]. Journal of Fluids & Structures, 1995, 13(1): 127-142.
- [23] ZIADA S. Flow-excited acoustic resonance in industry[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(1): 015001.