

文章编号:1671-6833(2008)02-0048-04

防振条对蒸汽发生器 U 形管动态特性影响研究

刘敏珊, 王素珍, 董其伍

(郑州大学 河南省过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘要:应用 ANSYS 参数化设计语言对蒸汽发生器(SG)U 形管流体结构耦联系统动态特性进行了数值模拟,着重考虑了防振条对 U 形管固有频率的影响.对 U 形管在空气中和水中的固有振动特性做了比较,并用统计回归给出了半经验公式.

关键词:流体结构耦联;固有频率;振动特性;ANSYS.

中图分类号: TB 123 **文献标识码:** A

0 引言

核电站运行经验表明,传热管是一回路系统压力边界中最关键也是最薄弱的环节.一旦传热管振动破坏,就得更换蒸汽发生器,这势必造成人力、财力和时间的巨大浪费,也增加了检修人员受放射性辐照的危险.因此,解决蒸汽发生器破管事故是关系到核电站的安全性以及使核电站具有竞争力和生命力的关键问题.

要尽量消除振动产生的根源,就需知道管子的固有频率.对 U 形管而言,其特殊的几何形状使得理论计算比较困难.计算 U 形管固有频率,仅有美国 TEMA 规范推荐的半经验公式和其他几种近似估算方法,都是计算半圆环的固有频率,没有考虑 U 形弯头中间有支撑的情况.而蒸汽发生器中 U 形传热管弯头处加有防振条,利用 ANSYS 程序进行数值模拟可以得出该种 U 形管流体结构耦联系统的固有频率,对蒸汽发生器 U 形管的动态特性进行研究.

1 蒸汽发生器 U 形传热管动态特性研究

1.1 U 形传热管动态特性模型与理论计算结果

选取某大型压水堆核电站自然循环蒸汽发生器 U 形管设计参数作为计算模型. U 形管外径 19.05 mm,壁厚 1.09 mm. U 形弯头曲率半径 $r = 1.0$ m. 采用已有计算公式得到面外和面内一阶固有频率,如表 1 所示.

表 1 蒸汽发生器 U 形传热管一阶固有频率

Tab.1 First frequency of steam generator U-tube

计算公式	Hz		
	面外	面内	备注
TEMA 标准	62.8	—	—
均匀曲梁模型	18.5	47.9	—
国标 GB151	31.5	12.5	弯头有一支撑

由表 1 可看出,不同理论模型有关公式给出的结果相差很大.而且这些公式的计算模型,特别是 U 形弯头区的支撑和实际工况明显不同.目前的理论或经验公式不能给出可信的 U 形管固有频率,有必要通过数值模拟获得较准确的固有频率值.

1.2 U 形传热管弯头固有特性数值模拟

1.2.1 弯头曲率半径对弯头固有特性的影响

建立 U 形弯头模型,对不同曲率半径下固有频率进行研究.曲率半径 0.4 ~ 1 m 时,弯头加 1 个防振条,防振条与 x 轴夹角 90° ;曲率半径 0.8 ~ 1.8 m 时,弯头加 2 个防振条,防振条与 x 轴夹角分别为 60° 和 120° ;曲率半径 1.7 ~ 3 m 时,弯头加 4 个防振条,防振条与 x 轴夹角分别为 35° 、 70° 、 110° 和 145° . 模拟结果见图 1、图 2、图 3 所示.

由模拟结果可知,弯头处加 1 个防振条,前 3 阶固有频率增幅平稳,而第 4 阶固有频率突然增加.加 2 个防振条,前 5 阶固有频率增幅平稳,而第 6 阶固有频率突然增加.加 4 个防振条,前 9 阶固有频率增幅平稳,而第 10 阶固有频率突然增

收稿日期:2008-01-02;修订日期:2008-03-14

基金项目:河南省杰出人才创新基金资助项目(0221000600).

作者简介:刘敏珊(1943-),女,郑州大学教授,博士生导师,主要从事过程传热与节能方面的研究.

加。曲率半径越大,固有频率越小,因此对于大曲率半径的弯头,就要加适当的防振条,且要考虑防振条与 x 轴的夹角。

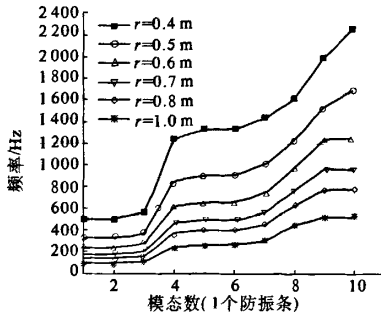


图1 弯头处加1个防振条($\theta=90^\circ$)

Fig.1 U-bent with one anti-vibration bar

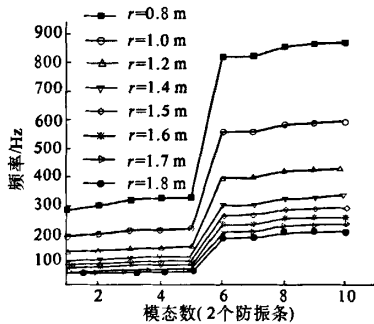


图2 弯头处加2个防振条($\theta=60^\circ$)

Fig.2 U-bent with two anti-vibration bars

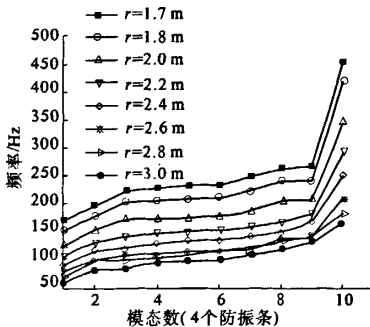


图3 弯头处加4个防振条($\theta=35^\circ$)

Fig.3 U-bent with four anti-vibration bars

1.2.2 防振条个数对弯头固有特性的影响

对同一曲率半径的弯头,加不同个数的防振条,研究其固有频率的变化,得出防振条个数对固有频率的影响。模拟结果如图4、图5所示。

由图4~5可知,同一曲率半径,弯头加2个防振条的固有频率比加1个防振条的固有频率高,加4个防振条的固有频率比加2个防振条的固有频率高,即加防振条可以提高弯头的固有频

率,但加防振条不太易实现,因此加防振条个数的多少要视弯头曲率半径大小来定,并不是加越多越好,对于小曲率半径的弯头是无须加防振条的。

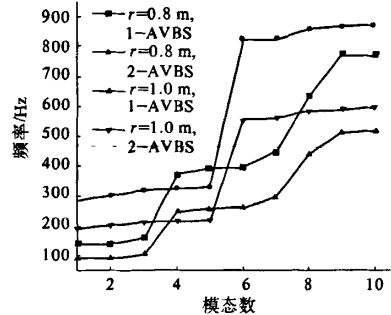


图4 弯头加1~2个防振条

Fig.4 U-bent with one or two anti-vibration bars

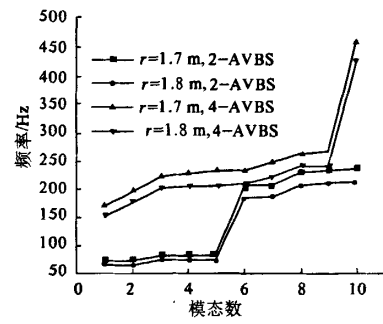


图5 弯头加2~4个防振条

Fig.5 U-bent with two or four anti-vibration bars

1.2.3 防振条与 x 轴夹角对弯头固有特性的影响

分析不同工况下面外振动变化趋势, $r=1$ m时,加2个防振条,与 X 轴夹角 $40^\circ \sim 70^\circ$, $r=1.7$ m时,加4个防振条,与 x 轴夹角范围为 $20^\circ \sim 40^\circ$,利用APDL参数化语言建立模型,对模拟出来的结果提取数据,用Origin进行曲线拟合,发现面外振动的频率变化符合Lorentz方程,拟合曲线如图6所示,方程参数的取值列于表2。

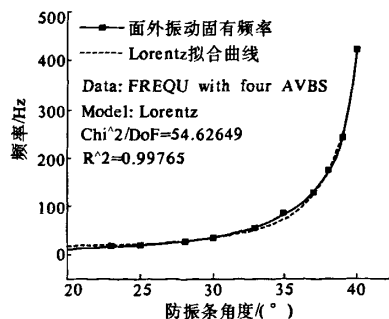


图6 $r=1.7$ m时的拟合曲线

Fig.6 The fit curve of $r=1.7$ m

表 2 Lorentz 拟合方程
Tab.2 The Lorentz fit equation

Lorentz 拟合	参数	$r=1.0\text{ m},$	
		2 个防振条	4 个防振条
$f_o = \gamma_0 + \frac{2A}{\pi}$	γ_0	4.311 5	9.296 18
	x_c	84.892 71	43.105 94
$\frac{w}{4(x-x_c)^2 + w^2}$	w	16.178 65	1.809 45
	A	49 445.368 03	44 933.974 13
Lorentz 拟合	参 数	$r=1.0\text{ m}, 2\text{ 个}$ $r=1.7\text{ m}, 4\text{ 个}$	
		防振条, FSI	防振条, FSI
$f_o = \gamma_0 + \frac{2A}{\pi}$	γ_0	0.769 16	-1.752 16
	x_c	83.255 04	44.693 33
$\frac{w}{4(x-x_c)^2 + w^2}$	w	19.402 99	3.715 35
	A	14 639.933 87	10 604.553 58

1.3 U 形传热管弯头区流体结构耦联数值模拟

笔者给出了 U 形传热管弯头在空气中和水中的前 10 阶振型图,如图 7 所示 $r=1\text{ m}$,弯头处加 2 个防振条,防振条与 x 轴夹角为 50° ,弯头两端视为固定约束。流体单元选择 Fluid30,流体和固体交界面标记 FSI 流固耦合界面。

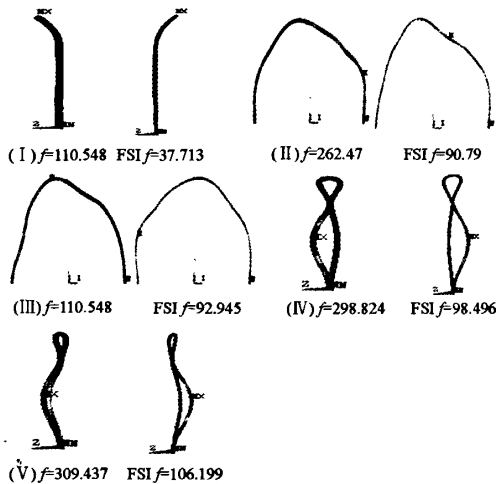


图 7 U 形管在空气中和水中的前 5 阶振型图

Fig.7 The mode shape of U-tube in air and water

从图 7 可以看出,干模态和湿模态基本形状一致,但一致的阶数及振动方向都发生了变化,如耦合振型的第 7 阶与非耦合振型的第 6 阶相似,耦合振型的第 9 阶阵型与非耦合振型的第 10 阶相似,而耦合振型的第 1 阶与非耦合振型的第 1 阶振动方向相反,耦合振型的第 10 阶与非耦合振型的第 9 阶振动方向相反,并且面外振动和面内振动并不是交替出现。为此,我们研究振动规律时不能单凭固有频率来决定,还要观察振型。通过观察振型,以面外振动为例,研究流体结构耦联条件

下面外振型的变化趋势,并进行数据拟合,发现耦合条件下的面外振动也很好的符合 Lorentz 方程。方程参数的取值如表 2 所示。

再来研究传热管在空气中面外振动固有频率和在水中面外振动固有频率随防振条与 x 轴夹角变化趋势的关系。

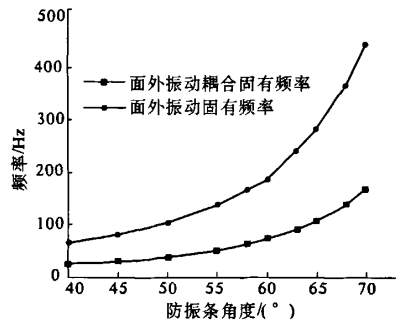


图 8 $r=1.0\text{ m}$ 空气中和水中面外振动固有频率

Fig.8 The out-of-plane frequency of $r=1.0\text{ m}$

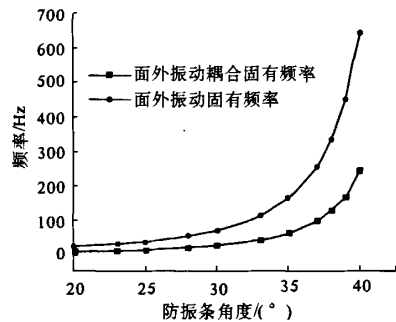


图 9 $r=1.7\text{ m}$ 空气中和水中面外振动固有频率

Fig.9 The out-of-plane frequency of $r=1.7\text{ m}$

由图 8、9 可以看到, $r=1.0\text{ m}$ 时,空气中和水中面外振动固有频率相差较大,防振条与 x 轴夹角越大,它们的差距越大,且增幅也越大; $r=1.7\text{ m}$,防振条与 x 轴夹角较小时,空气中和水中面外振动固有频率相差很小,当夹角大于 30° 以后,耦合条件下的面外振动固有频率增加迅速。

2 U 形传热管弯头实验模型

图 10 为 U 形传热管进行结构试验测量过程中的场景照片。模拟实际支撑弯头加 2 个防振条的情况,将 U 形传热管安装于试验平台上。通过测量简谐激励下关键部位的动态应变响应,推测固有频率,以验证数值模拟的正确性。试验结果与数值模拟结果的对比如表 3 所示。



图10 试验模型及采集仪器

Fig.10 The experiment model

表3 动态应变响应的实验结果与模拟结果对比

Tab.3 The Lorentz fit equation

模态	试验	模拟	误差/%
一阶	113.21	110.548	-2.351
二阶	254.68	262.47	3.059
三阶	276.52	266.74	-3.537
四阶	309.102	298.824	-3.325
五阶	321.785	309.437	-3.837

由表3可以看出,试验值与模拟值的最大误差不超过5%,具有一致性,由此可知数值模拟模型的选择具有合理性。

3 结论

(1)弯头曲率半径越大,固有频率越小,因此对于大曲率半径的弯头,要加适当的防振条,并且要考虑防振条与 α 轴的夹角。

(2)加防振条可以提高弯头的固有频率,但加防振条个数的多少要视弯头曲率半径的大小来定,并不是越多越好,对于小曲率半径的弯头无须加防振条。

(3)振动规律不能单凭固有频率决定,还要观察振型。通过观察振型得出无论传热管在空气中还是在水中,面外振动均符合 Lorentz 方程。

参考文献:

- [1] 张立翔,黄文虎. 输流管道非线性流固耦合振动的数学建模. 水动力学研究与进展. 2000,15(1):116-128.
- [2] 曹亮. 输流管道流固耦合振动特性分析[D]. 昆明理工大学硕士学位论文. 2004.
- [3] 张艳萍,徐治萍,刘土光,等. 输液管道流固耦合的响应分析[J]. 中国舰船研究,2006,1(6):66-69.
- [4] 张立翔,黄文虎. 输流管道流固耦合非线性动力稳定分析[J]. 应用数学和力学,2002,23(9):951-959.
- [5] 钱颂文,吴家声,曾文明. 换热器流体诱导振动基础[M]. 武汉:华中工学院出版社,1998.
- [6] PETTGREW M J, TAYLOR C E, FISHER N J, et al. Flow-induced vibration: recent findings and open questions [J]. Nuclear Engineering and Design, 1998,185:249-276.
- [7] SREEJITH B, JAYARA K, GANESAN N, et al. Finite element analysis of fluid-structure interaction in pipeline systems [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004,227:313-322.
- [8] 刘彤. 核电蒸汽发生器健康监测关键技术研究[D]. 郑州大学博士学位论文. 2007.

Research of Influence of Anti-vibration Bars on Dynamic Characteristic in SG U-tubes

LIU Min-shan, WANG Su-zhen, DONG Qi-wu

(Key Laboratory of Process Heat Transfer and Energy Saving of Province, Henan Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The fluid-structure interaction dynamic characteristic of steam generator U-bend tube is simulated by using ANSYS parametric design language, focusing on the influence of the anti-vibration bars of the U tube. Also the dynamic characteristics are compared when the tube is in the air and submerged in water. The empirical formulae are presented based on the numerical simulation results.

Key words: fluid-structure interaction; natural frequency; dynamic characteristic; ANSYS.