

文章编号：0258-0926(2016)S2-0028-04；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S2.0028

反应堆堆内构件流致振动特性研究

赖 姜, 杨 杰, 席志德, 孙 磊, 李朋洲

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要：以某新型工程试验堆为研究对象，采用试验分析与仿真计算相结合的手段探索该试验堆堆内构件流致振动特性。在流致振动试验中，根据相似准则建立了 1/2 的缩比试验模型，并在整体水力模拟台架上开展了 100% 额定流量工况下的堆内构件流致振动试验，测量了吊篮组件和二次支撑组件在流体作用下的动力响应；根据吊篮组件和二次支撑组件所受激励的不同，结合试验结果分别采用不同的计算方法得到了流体力作用下结构的动力响应，分别获得了 100% 额定流量工况下的最大应力值。

关键词：流致振动；反应堆；吊篮；二次支撑；涡激振动

中图分类号：O353 文献标志码：A

Analysis of Flow-Induced Vibration of Nuclear Reactor Internals

Lai Jiang, Yang Jie, Xi Zhide, Sun Lei, Li Pengzhou

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: The flow-induced vibration characteristic of a new nuclear reactor was analyzed in this paper by performing dynamic test and numerical calculation. A 1/2 scaled-down model of a new designed nuclear reactor was manufactured for performing the dynamic test with the hydrodynamics simulation system at the 100% operation condition. And the dynamical responses of core barrel and secondary core support structure were measured in the test. Based on the results of the dynamic test, a three-dimensional finite element model of the reactor internals for the numerical analysis was constructed to obtain the max strains and stresses of core barrel and secondary core support structure at the 100% operation condition.

Key words: Flow-induced vibration, Nuclear reactor, Core barrel, Secondary core support structure, Vortex-induced vibration

0 引 言

反应堆堆内构件流致振动问题属于典型的流固耦合问题，一直以来都是国内外学者的重要研究方向。早在 1973 年，Assedo^[1]就通过缩比模型试验研究压水堆堆内构件的流致振动特性。1998 年，Altstadt 和 Weiss^[2]建立了 WWER-440 反应堆完整的有限元模型，计算分析了该反应堆堆内构件的流致振动特性。Sigrist 和 Broc^[3,4]考虑了地震载荷、流体附加质量和附加刚度对反应堆堆内构件流致振动特性的影响。美国西屋公司在反应堆堆内构件流致振动方面积累了丰富的经验，先后完成了 1/7、1/8、1/22 和 1/24 缩比模型的流致振动试验。1999 年，我国首次完成了秦山核电厂 600

MW NPP 反应堆堆内构件的流致振动试验。随后，我国大量学者对反应堆堆内构件流致振动进行了相关的研究工作。喻丹萍等^[5]对秦山核电二期工程反应堆堆内构件模型进行了流致振动试验研究。席志德等人^[6]将流体和结构的作用力分为与结构运动有关的流体力和与结构运动无关的作用力，以 1/5 模型的吊篮为研究对象，计算了吊篮的时程响应。本文以某新型工程试验堆为研究对象，采用试验分析与仿真计算相结合的手段，完成了堆内吊篮组件和二次支撑组件的流致振动特性试验，基于试验结果开展了数值仿真计算，获得了吊篮和二次支撑组件在流体力作用下的最大应变和应力值。

收稿日期：2016-10-09；修回日期：2016-11-12

作者简介：赖 姜（1983—），男，博士，现从事流固耦合和结构振动相关研究

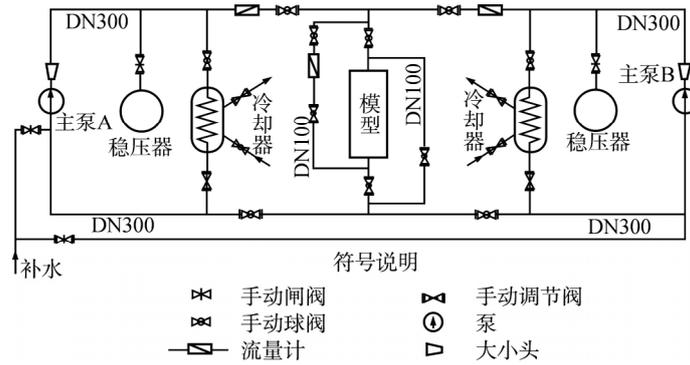


图1 整体水力模拟试验回路流程示意图
Fig. 1 Hydrodynamics Simulation System

1 堆内构件流致振动响应分析理论及动态试验原理

1.1 吊篮组件流致振动响应分析理论

该工程试验堆的吊篮组件结构和运行环境满足以下特征：

- (1) 振动系统可视为弱流固耦合系统。
- (2) 激励是平稳、各态历经和宽带的随机过程。
- (3) 系统的各阶固有频率明显分离。
- (4) 振动系统阻尼小。
- (5) 高阶响应可忽略。
- (6) 非线性因素对系统振动响应影响很小。

因此，可采用秦山核电厂二期工程吊篮响应计算的方法对该工程试验堆吊篮组件进行响应计算，本文简称该方法为“F方法”。“F方法”的关键理论基础是在同阶模态下，结构上任意两点的位移均方值与该阶模态下对应点的模态位移近似成正比。

需说明“F方法”不是常规的强迫振动计算方法，而是一种试验和计算分析结合的分析方法。它利用有限元模态分析结果，将试验测点的结构响应数据推导到结构最大响应位置，进而根据该推导结果评价结构流致振动的完整性。

1.2 二次支承组件流致振动响应分析理论

二次支承组件主要由支承筒体和支承柱组件组成，结构相对复杂。其中支承筒体受到流体的脉动压力作用，支承柱受到横向流的作用，激励形式复杂。因此，二次支承组件并不满足吊篮响应计算采用的“F方法”。通过受力分析可知，在支承柱与支承筒体连接处为应力极大值点。分别计算支承筒体在脉动压力下的响应和支承柱受到的横向流的响应，并根据叠加原理获得流场作用

下二次支承组件的应力极大值。其中，支承筒体在脉动压力下的应力极大值可通过等效静力法获得。支承柱的响应计算可简化为横向流作用下圆柱体的涡激振动问题。

需说明，该方法只有在满足不会发生漩涡脱落“锁定现象”时使用。并且与吊篮响应计算方法类似，在约束边界不确定（弹性约束条件）时，须结合试验结果，获得准确的弹性约束边界，进而根据推导结果评价管式结构流致振动的完整性。对于弹性约束位置并非在管端部的，需做类似的理论推导，获得对应的位移、应变和应力值。

1.3 流致振动水力模拟装置及测量设备

堆内构件流致振动试验在整体水力模拟试验装置上进行，该装置由2条回路并联组成。该回路由试验主泵、稳压器、各系统阀门、管路、流量计等组成，其流程如图1所示。按相似比1:2模拟原型，在100%额定流量工况下，试验模型单回路的额定流量为1260 m³/h。为了避免水力模拟系统管路振动对试验测量结果的影响，在管路悬空段和弯曲段等振动较大处加设了支承柱以减小回路的振动，并在试验模型进出口加装了波纹管段，以减小回路传递到试验本体的振动。流致振动响应测量系统主要包括传感器系统、适调放大器及数据采集分析系统。

2 流致振动响应分析及试验结果

2.1 有限元模型和试验模型

该工程试验堆堆内构件主要包括：吊篮组件和二次支承组件。其中，吊篮组件由吊篮筒体、吊篮法兰和上部支承筒体组成。为了准确获得吊篮组件的流致振动特性，在试验件上安装了适当

类型和数量的测试传感器。其中,在吊篮筒体下端沿轴向布置 5 片防水应变片(环向 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 315° 位置),测量吊篮根部的应变。在吊篮 315° 同一母线下游沿母线布置 5 个压力传感器,并在吊篮同一高度径向(315° 、 0° 、 45° 、 90° 、 135°)间隔布置 5 个压力传感器,测量吊篮筒体内表面的脉动压力响应。根据试验件的结构及尺寸,通过 ANSYS 软件建立了该吊篮组件的三维有限元仿真模型,如图 2 所示。该有限元模型采用 SOLID185 单元建立吊篮筒体、法兰和支承筒体结构,吊篮下部为自由端,吊篮上部法兰与压力容器凸台接触位置为轴向和径向位移约束。该有限元模型考虑了堆芯结构对吊篮筒体的刚度和质量的影响。

二次支承组件结构相对复杂,主要由测量板、缓冲板、二次支承筒体和二次支承柱组件组成。二次支承筒体、缓冲板和二次支承柱组件之间为刚性约束,测量板与二次支承筒体之间由 4 个定位销进行位移约束。在 90° 和 330° 的两根二次支承柱靠近支承筒体下底板根部两个方向,周向间隔 90° 沿轴向各粘贴 1 片应变片,测量二次支承柱根部应变。在二次支承组件筒体上正对出口中心高度(40°)施加 1 个脉动压力,并在筒体缓冲板中心部位和靠出口侧各布置一个脉动压力传感器,测量筒体内表面的脉动压力。由于测量板、缓冲板和二次支承筒体均开有大量的圆孔,在有限元建模之前首先进行了相应的质量和刚度等效计算,再采用 SOLID185 单元进行建模。其中,6 根二次支承柱下端均进行 3 个方向的线位移约束,测量板和二次支承筒体之间的定位销通过结点自由度耦合的方式进行模拟,如图 3 所示。

2.2 流致振动响应分析及动态试验结果

吊篮流致振动响应可根据“F 方法”进行计



图 2 吊篮组件的有限元模型

Fig. 2 FEM of Core Barrel



图 3 二次支承组件的有限元模型

Fig. 3 FEM of Secondary Core Support Structure

算。将冷态模型试验在某点测得的位移、应变响应时程转换成功率谱密度谱。在谱图上将某阶模态所对应的谱峰值区域的面积平方根作为该模态下的 RMS 响应值,即为该测点在该阶模态下的响应值。然后根据有限元模态计算,得到某阶模态下测量值与最大值之间的比例关系,外推出在该阶模态下的响应最大值。表 1 为吊篮组件的位移试验值和计算值,表 2 为吊篮组件的应变和应力响应试验值和计算值。图 4 和图 5 分别为吊篮组件的模态位移云图和模态应力云图。

表 1 吊篮组件位移响应试验和计算结果

Table 1 Displacement of Core Barrel from Test and Simulation

位置	试验值(均方值)/ μm	计算值(均方值)/ μm
吊篮底部	0.38	0.86

表 2 吊篮组件应变和应力响应试验和计算结果

Table 2 Strains and Stresses of Core Barrel from Test and Simulation

位置	应变(均方根值)/ $\mu\epsilon$		应力(峰值)/MPa	
	试验值	计算值	试验值	计算值
吊篮法兰根部	0.22	0.68	0.18	0.54

下部二次支承柱通过螺栓与二次支承筒体的下底板连接,其受到横向流的作用,须首先判断其是否出现漩涡脱落锁定现象,然后再进行响应计算。二次支承组件附近的流场分布如图 6 所示。根据流场分析获得的二次支承组件相关数据得到二次支承柱的漩涡脱落频率,如表 3 所示。从计算结果可以看出二次支承柱的漩涡脱落频率与结构静水中的固有频率相比,两者相差较大,因此下部二次支承柱不会出现漩涡脱落锁定现象。

因此,对于二次支承组件的响应计算,需综合考虑漩涡脱落激励作用和二次支承筒体对支承

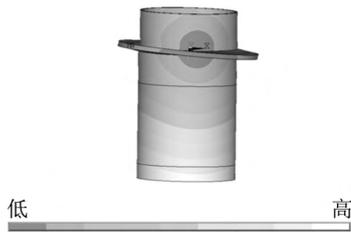


图 4 吊篮组件的模态位移云图

Fig. 4 Modal Displacement Nephogram of Core Barrel

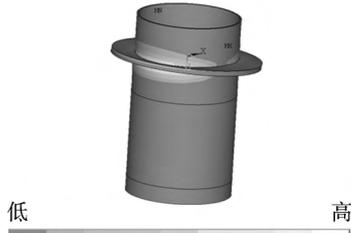


图 5 吊篮组件的模态应力云图

Fig. 5 Modal Stress Nephogram of Core Barrel

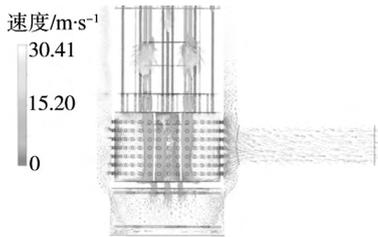


图 6 二次支承组件附近流场分布图

Fig. 6 Results of CFD Calculation

表 3 二次支承柱漩涡脱落频率和结构固有频率

Table 3 Vortex Shedding Frequencies and Natural Fundamental Frequencies of Secondary Core Support Structure

位置	漩涡脱落频率/Hz	结构固有频率/Hz
二次支承柱	2.4	62.1

柱的作用，通过静力法计算得到的二次支承筒体对支承柱作用的应力云图如图 7 所示。而漩涡脱落激励作用需要根据横向流作用下圆柱体的涡激振动理论进行求解。

通过叠加原理获得综合考虑漩涡脱落激励作



图 7 二次支承筒体对支承柱的作用应力云图

Fig. 7 Modal Stress Nephogram of Secondary Core Support Structure

用和二次支承筒体对支承柱作用时的应变和应力值，在对支承柱进行应力评定时还需考虑其根部法兰的应力集中因子以及焊缝系数因子。评定时将应力集中因子和焊缝因子取为 2。考虑上述因素后，二次支承柱应力计算结果如表 4 所示。

表 4 二次支承柱应变和应力计算结果

Table 4 Strains and Stresses at Secondary Core Support Structure

位置	应变试验值 (幅值)/ $\mu\epsilon$	应变计算值 (幅值)/ $\mu\epsilon$	应力试验值 (幅值)/MPa	应力计算值 (幅值)/MPa
支承柱法兰根部	1.26	30.0	1.01	12.0

3 结论

通过本文的试验分析和仿真计算，主要得到以下结论：

(1) 通过 1/2 缩比模型，完成了某工程试验堆堆内构件的流致振动试验，测量获得了吊篮组件和二次支承组件在流体力作用下的动力响应。

(2) 采用“F 方法”结合试验结果计算得到了吊篮组件流致振动响应的最大应变和应力值，其最大应力值小于应力强度极限值。

(3) 综合考虑湍流激励和漩涡脱落激励对二次支承柱的影响，计算得到了二次支承柱的最大应变和应力值，其最大应力小于应力强度极限值。

参考文献：

[1] Assedo R. Model experimentation and analysis of flow induced vibrations of PWR internals [J]. Nuclear Engineering and Design, 1974, 27:1540-1554.

[2] Eberhard Altstadt, Frank Peter Weiss. Finite-element based vibration analysis of WWER-440 type reactors[J]. Annals of Nuclear Energy, 1999, 26: 1037-1052.

[3] Jean Francois Sigrist, Daniel Broc, Christian Laine. Dynamic analysis of a nuclear reactor with fluid-structure interaction Part I: Seismic loading, fluid added mass and added stiffness effects[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236: 2431-2443.

[4] Jean-Francois Sigrist, Daniel Broc, Christian Laine. Dynamic analysis of a nuclear reactor with fluid-structure interaction Part II: Shock loading, influence of fluid compressibility[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237: 289-299.

[5] 喻丹萍, 胡永陶. 秦山核电二期工程反应堆堆内构件模型流致振动试验研究[J]. 核动力工程, 2003, 24(S1): 109-113.

[6] 席志德, 陈炳德, 李朋洲, 等. 输送流体的同心圆筒结构动力学特性研究[J]. 工程力学, 2008, 25(11): 218-222.

(责任编辑：方凯锐)