

文章编号：0258-0926(2018)03-0067-04; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0067

# 基于实验数据的吊篮表面脉动压力分析

王大胜, 段远刚, 刘攀, 孔小飞

深圳中广核工程设计有限公司, 广东深圳, 518124

**摘要：**基于堆内构件缩比模型流致振动实验实测得到的吊篮表面脉动压力数据，分析了吊篮表面不同位置脉动压力功率谱密度的分布特征，并对脉动压力功率谱密度的相关性进行分析得到相关长度的特性。结果表明，吊篮表面的脉动压力功率谱密度随频率的增大快速减小然后趋于平缓，是一种频率成份十分丰富的宽带衰减谱，在吊篮同一高度区域的脉动压力功率谱密度基本相同，不同高度区域的脉动压力功率谱密度的能量差别较大；脉动压力功率谱密度的相关长度随频率递增而急剧减小然后趋于常值；吊篮流致振动响应对脉动压力功率谱密度的影响较小，将吊篮流致振动简化为弱耦合问题是合理的。

**关键词：**吊篮；流致振动；脉动压力功率谱密度；相干函数；相关长度

**中图分类号：**O351.2 **文献标志码：**A

## Analysis for Fluid Pressure Fluctuation of Core Barrel Surface Based on Experimental Data

Wang Dasheng, Duan Yuangang, Liu Pan, Kong Xiaofei

China Nuclear Power Design Co. Ltd. (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong, 518124, China

**Abstract:** Based on the fluctuating pressure data obtained in the flow-induced vibration test of reactor pressure vessel internals scale model, the distribution characteristics of fluctuating pressure power spectral density are analyzed at different positions on the core barrel surface, and the correlation length characteristics of fluctuating pressure power spectral density are obtained based on the correlation analysis. The power spectrum density of the fluctuating pressure on the core barrel surface is broadband attenuation spectrum with a very rich frequency and decreases quickly with the increasing of the frequency and then tends to be gentle; The fluctuating pressure power spectral density is basically the same in the region located at the same height on the core barrel, but the differences of the PSD (power spectral density) are obvious between the regions at different heights. The correlation length of the fluctuating pressure power spectrum density decreases sharply with the increasing frequency and then tends to be constant. The flow-induced vibration response of the core barrel has little effect on the fluctuating pressure power spectral density and it is reasonable to simplify the flow-induced vibration of the core barrel into the weak coupling problem.

**Key words:** Core barrel, Flow-induced vibration, Fluctuating pressure power spectral density, Coherence function, Correlation length.

### 0 前言

反应堆吊篮是装载和支撑燃料组件及相关构件的结构，是反应堆内部重要的部件，对其进行流致振动响应分析对反应堆结构的安全评定具有重要的意义。由于反应堆结构和堆内流场的复杂

性，在进行吊篮结构流致振动分析时，将其简化为弱耦合问题，假设流体作用力可分为与结构运动相关的流体作用力和与结构运动无关的流体作用力两部分<sup>[1-3]</sup>。与结构运动有关的流体作用力可以看成与结构惯性力、阻尼力和刚度力呈线性关

系，并分别用附加质量、附加阻尼和附加刚度与结构的运动方程耦合；对于与结构运动无关的流体作用力，可以通过缩比模型实验来实测吊篮表面的脉动压力，然后通过相似理论外推到原型来分析吊篮结构的流致响应<sup>[4-6]</sup>。由于实测吊篮表面的脉动压力数据是一项大型实验，实验复杂成本高昂，目前开展的实验研究工作并不多，公开发表的文献也比较少，文献[7-8]是AU-YANG. M K在1975年和1995年开展的实验研究结果，国内秦山核电厂二期项目也开展了模型实验研究，但是公开的文献介绍相对较简略<sup>[9]</sup>。

本文基于堆内构件缩比模型流致振动实验中实测的吊篮表面脉动压力数据，分析了吊篮表面脉动压力功率谱密度的分布特征和相关性，为吊篮结构的流致振动响应计算提供载荷输入，同时通过脉动压力的特征分析了将吊篮简化为弱耦合问题的合理性。

### 1 脉动压力数据分析

对堆内构件缩比模型流致振动实验中模拟反应堆正常运行工况下实测得到的吊篮表面脉动压力数据进行分析研究。实验在吊篮表面出口管嘴高度的环线、吊篮中部和吊篮中下部环线上均布置了脉动压力测点，在吊篮母线上也布置了脉动压力测点，部分测点的脉动压力传感器以“测点花”<sup>[8]</sup>的形式进行布置。

#### 1.1 脉动压力均方根值

通过对吊篮表面各测点位置的脉动压力数据进行分析得到吊篮表面脉动压力均方根值的分布规律，如图1所示。图1中吊篮轴向高度为测点所在位置的高度/吊篮总高度，无量纲脉动压力的均

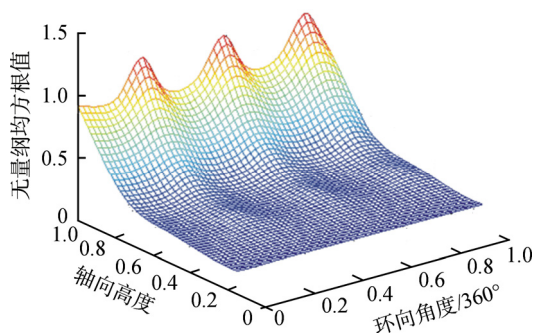


图1 吊篮表面脉动压力均方根值分布  
Fig. 1 RSM Distribution of Fluctuating Pressure on Core Barrel Surface

方根值  $\bar{P}_{RMS}$  为：

$$\bar{P}_{RMS} = P_{RMS} / (0.5\rho v^2)$$

式中， $P_{RMS}$ 为脉动压力均方根值； $\rho$ 为流体密度； $v$ 为流速。

由于结构和实验工况的对称性，脉动压力均方根值沿环向也近似对称分布，吊篮表面入口位置的均方根值最大，沿吊篮轴向脉动压力均方根值快速减小，然后趋于平缓。

#### 1.2 脉动压力功率谱密度分析

在吊篮出口管嘴高度位置，典型测点的脉动压力的功率谱密度分布如图2所示，无量纲频率  $s$  为：

$$s = fD / v$$

式中， $f$ 为频率； $D$ 为反应堆压力容器和吊篮的环腔间隙。

无量纲的功率谱密度  $\bar{S}_{pp}(f)$  为：

$$\bar{S}_{pp}(f) = S_{pp}(f) / (\rho^2 v^3 D)$$

式中， $S_{pp}(f)$ 为功率谱密度。

图2分别给出了吊篮表面入口位置和非入口位置的脉动压力功率谱密度，可以看出入口位置测点的功率谱密度在频率较低时较非入口位置的大，而频率较高时较非入口的小；随着频率增加，入口位置的脉动压力功率谱密度下降更快。

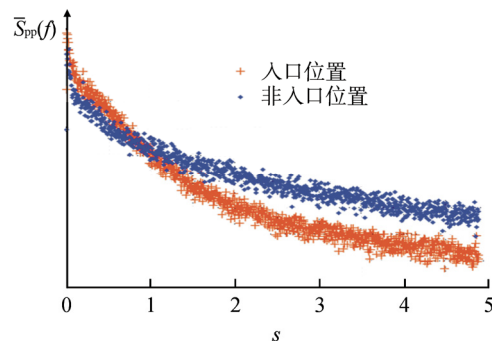


图2 吊篮出口管嘴高度上脉动压力功率谱密度  
Fig. 2 PSD of Fluctuating Pressure at Core Barrel outlet Nozzle Height

吊篮表面各位置测点脉动压力的功率谱密度分布如图3所示，从图3中可以看出，吊篮表面的脉动压力功率谱密度是一种频率成份十分丰富的宽带衰减谱；随着频率的增大吊篮表面脉动压力功率谱密度快速减小然后趋于平缓，不同区域功率谱密度的能量差异逐渐减小；在吊篮同一高

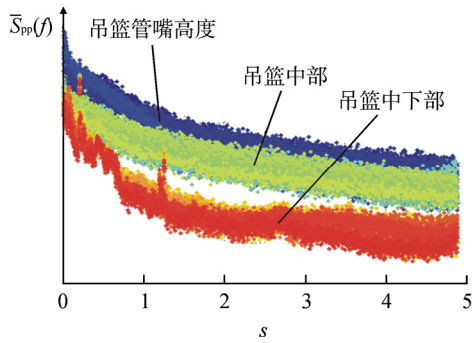


图3 吊篮表面脉动压力功率谱密度分布  
Fig. 3 PSD Distribution of Fluctuating Pressure on Core Barrel Surface

度区域内，各测点的脉动压力功率谱密度随频率的变化基本相同；吊篮表面脉动压力功率谱密度沿吊篮高度方向明显呈现分区分布，不同高度区域的脉动压力功率谱密度的能量差别很大，其中吊篮管嘴高度区域最大，吊篮中部区域居中，吊篮中下部区域最小，与各区域的脉动压力均方根值的大小对应。

### 1.3 脉动压力功率谱密度相关性分析

根据互功率谱密度与相干函数的关系，相干函数  $\Gamma(x', x'', \omega)$  为：

$$\Gamma(x', x'', \omega) = \frac{S_{pp}(x', x'', \omega)}{\sqrt{S_{pp}(x', \omega)S_{pp}(x'', \omega)}} \quad (1)$$

式中， $S_{pp}(x', x'', \omega)$  为  $x'$  和  $x''$  点脉动压力互功率谱密度； $S_{pp}(x', \omega)$  和  $S_{pp}(x'', \omega)$  分别为  $x'$  和  $x''$  点脉动压力的功率谱密度； $\omega$  为角频率。

相干函数满足如下特性：

- (1)  $\Gamma(x', x'', \omega) = \Gamma(x'', x', \omega)$ ；
- (2)  $\Gamma(x', x'', \omega) \rightarrow 1, x' \rightarrow x''$ ；
- (3)  $\Gamma(x', x'', \omega) \rightarrow 0, |x' - x''| \rightarrow \infty$ 。

假设吊篮表面同一“测点花”内的脉动压力是均匀的，则在某一给定的频率下，相干函数仅与两点间的距离  $|x' - x''|$  有关，定义相干函数的表达式如方程(2)所示<sup>[8]</sup>，满足上述相干函数的特性。

$$\Gamma(x', x'', \omega) = \exp(-|x' - x''|/\lambda) \exp(-i2\pi\omega|x' - x''|/v_c) \quad (2)$$

式中， $v_c$  为迁移速度。

假设相干函数是坐标的变量可分离函数<sup>[10]</sup>，即：

$$\Gamma(x', x'', \omega) = \Gamma(z', z'', f)\Gamma(\theta', \theta'', f) \quad (3)$$

则对于二维问题的相干函数有：

$$\Gamma(z', z'', \omega) = \exp(-|z' - z''|/\lambda) \exp[-i\omega(z' - z'')/v_c] \quad (4)$$

$$\Gamma(\theta', \theta'', \omega) = \exp(-|\theta' - \theta''|/\lambda') \exp[-i\omega(\theta' - \theta'')/v_c'] \quad (5)$$

式中， $z'$ 、 $z''$  分别是  $x'$  和  $x''$  点的轴向坐标； $\theta'$ 、 $\theta''$  分别是  $x'$  和  $x''$  点的环向坐标； $\lambda$ 、 $\lambda'$  分别为轴向和环向相关长度； $v_c$ 、 $v_c'$  分别为轴向和环向的迁移速度，这些参数由实验数据计算得到。

分析得到吊篮表面脉动压力功率谱密度的轴向和环向相关长度随频率的变化如图4所示，图中无量纲相关长度  $\lambda_d = \lambda/D$ 。

从图4中可以看出，脉动压力功率谱密度的相关长度在低频段内随频率递增急剧减小，然后随着频率增大趋于一个常值，相关长度在  $s=0.2$  处的峰值主要是由于实验主泵频率的影响导致；同一“测点花”内轴向相关长度和环向相关长度的大小随频率变化规律基本相同，结合脉动压力功率谱密度分析结果，也说明了同一“测点花”范围内脉动压力均匀假设的合理性。

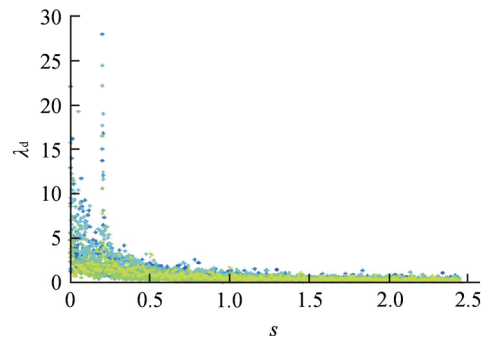


图4 吊篮中部脉动压力功率谱密度相关长度  
Fig. 4 Correlation Length of Fluctuating Pressure Power Spectrum Density at Core Barrel Central

### 1.4 吊篮流致振动对吊篮表面脉动压力的影响分析

吊篮表面中部和中下部区域脉动压力功率谱密度在低频段的分布如图5和图6所示，从图5可以看出，吊篮表面中部区域脉动压力功率谱密度在  $s=0.2$  时有一个峰值，其他频率范围比较平滑；从图6可以看出，吊篮表面中下部区域脉动压力功率谱密度在  $s=0.08$ 、 $0.2$ 、 $0.24$ 、 $0.33$ 、 $0.42$  时有峰值，特别是  $s=0.2$  位置峰值较大。

通过对实验进行分析可知,  $s=0.08$  为实验支架的频率,  $s=0.2$  是实验泵的频率,  $s=0.24$ 、 $0.33$ 、 $0.42$  为吊篮振动频率, 从图 5 和图 6 中可以看出, 除了  $s=0.2$  的峰值, 其他峰值相对较小。另外对比图 3 中吊篮表面各测点的脉动压力功率谱密度, 可知在吊篮中上部及中部区域吊篮的振动响应对流场的影响在脉动压力功率谱密度中完全无法体现, 在吊篮中下部区域, 吊篮的振动响应虽然对吊篮表面脉动压力有一定影响 (图 6 中  $s=0.24$ 、 $0.33$ 、 $0.42$  三个峰值), 但是影响不大, 与吊篮表面总体的脉动压力功率谱密度相比, 吊篮振动对吊篮表面脉动压力的影响是可以忽略不计的, 因此将吊篮流致振动简化为弱耦合问题进行分析的假设是合理的。

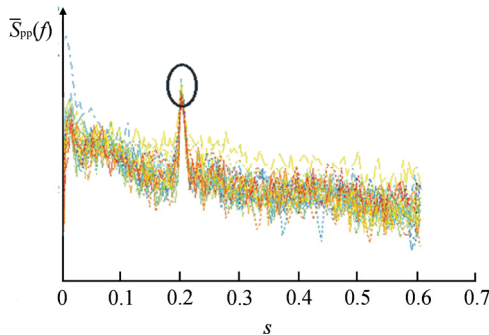


图5 吊篮表面中部区域脉动压力功率谱密度分布  
Fig. 5 Distribution of Fluctuating Pressure PSD at Core Barrel Central

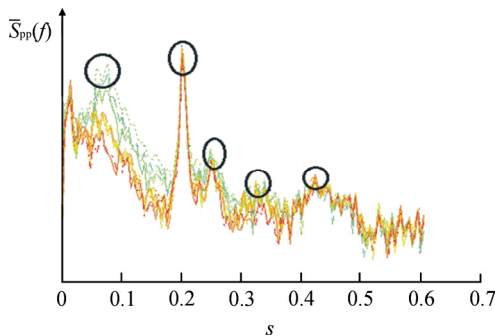


图6 吊篮表面中下部区域脉动压力功率谱密度分布  
Fig. 6 Distribution of Fluctuating Pressure PSD at Core Barrel Lower Area

## 2 结论

通过对堆内构件缩比模型流致振动实验中模拟反应堆正常运行工况下实测的吊篮表面脉动压力数据的分析, 得出如下结论:

(1) 脉动压力均方根值沿吊篮环向近似对称分布, 吊篮表面入口位置的均方根值最大, 沿

吊篮轴向脉动压力均方根值快速减小, 然后趋于平缓。

(2) 吊篮表面的脉动压力功率谱密度是一种频率成份十分丰富的宽带衰减谱, 随着频率的增大, 脉动压力功率谱密度的能量快速减小然后趋于平缓, 不同区域的脉动压力功率谱密度的差异也逐渐减小; 除进口管嘴位置外, 在吊篮同一高度区域内的脉动压力功率谱密度的特征基本相同, 不同高度区域的脉动压力谱密度差别较大。

(3) 脉动压力功率谱密度相关长度在低频段内随频率增加急剧减小, 然后趋于一个常值, 同一“测点花”内分析得到轴向相关长度和环向相关长度的大小随频率变化规律基本相同。

(4) 吊篮的振动响应对吊篮表面脉动压力有一定影响, 但是影响较小, 与吊篮表面总体的脉动压力功率谱密度相比, 其影响是可以忽略不计的, 因此, 将吊篮流致振动简化为弱耦合问题是合理的。

参考文献:

- [1] 席志德, 陈炳德, 李朋洲. 吊篮流致振动响应的数值计算[J]. 核动力工程, 2008, 29(5): 1-4.
- [2] 席志德, 陈炳德, 李朋洲. 弱耦合体系流致振动计算方法[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(S): 444-447.
- [3] 杨翎仁, 谭晓惠, 马建中. 核反应堆吊篮流致随机响应研究[J]. 固体力学学报, 2002, 23(2): 243-248.
- [4] 马建中, 杨翎仁. 秦山核电二期工程反应堆吊篮结构的流致振动响应计算[J]. 核动力工程, 2003, 24(2): 99-101.
- [5] AU-YANG M K, CONNELLY W H. A computerized method for flow-induced random vibration analysis of nuclear reactor internals[J]. Nuclear Engineering and Design, 1976, V42,257-263.
- [6] 王大胜, 段远刚, 尚尔涛. 接受积分法在吊篮流致振动分析中的应用[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(1): 151-155.
- [7] AU-YANG M K, JORDAN K B. Dynamic pressure inside a PWR-a study based on laboratory and field test data[J]. Nuclear Engineering and Design, 1980, 58: 113-125.
- [8] AU-YANG M K, BRENNEMAN B. Flow-induced vibration test of an advanced water reactor model, Part I: Turbulence-induced forcing function[J]. Nuclear Engineering and Design, 1995, 157: 93-109.
- [9] 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(S2): 109-113.
- [10] AU-YANG M K. response of reactor internals to fluctuating pressure forces[J]. Nuclear Engineering and Design, 1975, 35: 361-375.

(责任编辑: 马 蓉)