

压水堆燃料棒在轴向流作用下的 随机振动响应研究

黄 恒, 刘 彤, 周跃民

(中科华核电技术研究院有限公司 核燃料研发设计中心, 广东 深圳 518026)

摘要: 基于随机振动理论, 建立了在轴向流作用下压水堆燃料棒随机响应的纯理论分析方法。将流体力考虑为沿燃料棒轴向位置的脉冲随机荷载, 结合模态分析技术, 从功率谱分析法推导出燃料棒振动均方根响应的表达式。提供了一套不依赖燃料组件流致振动实验的纯理论分析方法, 重点分析了等效流速、湍流强度、相关长度系数等几个主要流场参数对结构均方根响应的影响。结果表明, 本文计算模型的精度满足工程分析要求, 燃料棒响应随等效流速、湍流强度和相关长度系数的增大而增大; 其中响应对于等效流速和相关长度系数的变化较为敏感, 而与湍流强度呈线性变化关系; 在压水堆运行中的燃料棒均方根幅值约处在 μm 量级。

关键词: 随机响应; 燃料棒; 流致振动; 轴向流

中图分类号: TL352

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2015)03-0468-05

doi: 10. 7538/yzk. 2014. youxian. 0006

Random Response Analysis of PWR Fuel Rod Effect on Axial Flow

HUANG Heng, LIU Tong, ZHOU Yue-min

(Nuclear Fuel R&D Center, China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen 518026, China)

Abstract: Based on random vibration theory, the random response analysis method of PWR fuel rods under axial flow was established. The fluid force along the axial of rod was treated as a fluctuant random load, and the mode shape method and power spectrum analysis method were used to derive the empirical formula of RMS response. This article provides a theoretical analysis method which does not rely on the flow induced vibration test of fuel assembly. The effects for the RMS response of fuel rods by the equivalent velocity, turbulence intensity, and correlation length factor were discussed. The method can meet the requirements of engineering analysis. The results show that the RMS response of fuel rods will increase with the equivalent velocity, turbulence intensity and the correlation length factor. The response is more sensitive to the equivalent velocity and coefficient length factor changes, and linearly with the turbulence intensity. In the operating condition of the pressurized water reactor (PWR), the RMS amplitude of fuel rods is about micrometers.

Key words: random response; fuel rod; flow induced vibration; axial flow

在压水堆核电站运行期间,因燃料棒流致振动引起的包壳结构磨损是现役核电站最主要的燃料失效机理。由于燃料棒结构在堆芯内排布的特殊性,导致燃料棒所处的流场十分复杂,因此采用纯理论的方法分析作用在结构上的流体力学是相当困难的。从目前国内研究现状来看,采用理论分析方法对压水堆燃料棒进行流致振动的分析鲜见文献,大多研究皆采用燃料组件流致振动试验来测试燃料棒的响应。文献[1]针对圆柱体结构采用功率谱分析方法研究了结构的随机响应,但这种方法所考虑的结构形式为单跨简支梁。文献[2]采用随机振动理论以及功率谱分析方法得到了任意结构形式下的广义均方根响应。本文在文献[2]方法的基础上,结合模态分析技术以及文献[1]中的功率谱试验参数,采用纯理论的分析方法来研究压水堆燃料棒在轴向流作用下的随机振动响应。考虑到压水堆燃料组件结构在堆内运行状态相当复杂,本文流体力学所采用的功率谱分析方法是一种保守的包络算法,计算值和试验值能达到同量级精度即可满足工程分析的要求。

1 模型及控制方程

试验经验以及文献[3]在前期研究表明,燃料棒在堆内运行过程中所发生的振动属于微幅振动,结构的运动对流场的影响非常小。因此本文假设燃料棒的运动不会改变周围冷却剂的流场及结构表面的流体动压力。

从结构形式上看,压水堆燃料棒可视为质量均匀的圆柱体结构,由燃料组件每层格架栅元的刚凸和弹簧片加持固定(图1),冷却剂由燃料组件下端注入。本文不考虑格架加持作用失效时燃料棒的轴向滑移,因此单根燃料棒的边界条件简化为横向的弹簧约束,图2为简化后两层格架之间的燃料棒振动示意图。图1中, p 为压力, Q 为格架刚凸与燃料棒之间的轴向和横向的切向剪力。

采用有限元方法将燃料棒结构离散处理后,其控制方程可表示为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

其中: M 、 C 、 K 分别为结构质量阵、阻尼阵和刚

度阵; \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 分别为燃料棒结构的横向加速度、速度和位移列阵; $F(t)$ 为流体的脉动压力阵,作用方向沿燃料棒轴向(图2)。

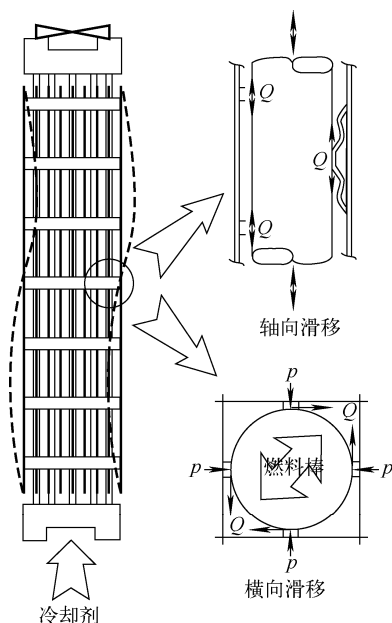


图1 格架对燃料棒的加持

Fig. 1 Contact between grid and rod

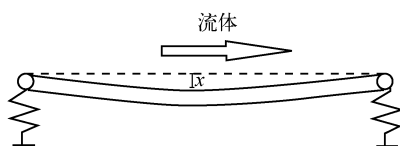


图2 单跨燃料棒振动示意图

Fig. 2 Vibration of single-span rod

2 随机振动响应的模态分析方法

将结构的响应根据几何边界条件和运动边界条件用式(2)表示,将式(1)简化为式(3)然后将式(2)代入式(3)转化为相应模态坐标下的方程,即式(4)。

$$x(z, t) = \phi(z)q(t) \quad (2)$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = F'(t) \quad (3)$$

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2q_i = \phi_i^T F'_i(t) \quad (4)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

其中: ζ 为临界阻尼比; ω 为结构固有频率。用杜哈梅积分方法求解式(4)得到:

$$q_i = \int_{-\infty}^{+\infty} h_i(\tau) \phi_i^T F(t - \tau) d\tau \quad (5)$$

对应物理坐标下的响应为：

$$x(t) = \phi q = \phi \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \phi^T F(t - \tau) d\tau \quad (6)$$

其中, $h_i(\tau)$ 为脉冲响应函数。

根据随机振动理论, 模态坐标下的频率响应函数可表示为：

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (7)$$

对于所有随机振动系统, 结构均方响应的期望值为 $\tau=0$ 时的相关函数, 有：

$$\begin{cases} E x^2(t) = R_{xx}(\tau) \\ E(\phi^2 q^2) = \phi^2 R_{qq}(\tau) \end{cases} \quad (8)$$

其中: R_{xx} 为物理坐标下结构响应的互相关函数; R_{qq} 为模态坐标下结构响应的互相关函数, 他们之间的关系由式(2)决定。 R_{qq} 的数学表达式为：

$$\begin{aligned} R_{qq}(\tau) &= E[q_1(t) q_2^T(t + \tau)] = \\ E\left[\phi \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) \phi^T F(t - \tau_1) d\tau_1 \int_{-\infty}^{+\infty} F^T(t + \tau - \tau_2) \cdot \right. \\ &\quad \left. \phi h^T(\tau_2) d\tau_2 \phi^T\right] = \phi \left[\int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) \int_{-\infty}^{+\infty} \phi^T R_{FF}(\tau + \right. \\ &\quad \left. \tau_1 - \tau_2) \phi h^T(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \right] \phi^T \end{aligned} \quad (9)$$

其中, R_{FF} 为流体外激励的互相关函数。

对式(9)进行傅里叶变换, 可得到响应的互功率谱密度函数：

$$\begin{aligned} S_{qq}(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \phi \left[\int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) \int_{-\infty}^{+\infty} \phi^T R_{FF}(\tau + \tau_1 - \tau_2) \cdot \right. \\ &\quad \left. \phi h^T(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \right] \phi^T e^{-i\omega\tau} d\tau = \phi \left[\int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) e^{i\omega\tau_1} d\tau_1 \cdot \right. \\ &\quad \left. \int_{-\infty}^{+\infty} \phi^T R_{FF}(\tau + \tau_1 - \tau_2) e^{-i\omega(\tau + \tau_1 - \tau_2)} \phi d\tau \cdot \right. \\ &\quad \left. \int_{-\infty}^{+\infty} h^T(\tau_2) e^{-i\omega\tau_2} d\tau_2 \right] \phi^T = \\ &(\phi H^*(\omega) \phi^T) S_{FF}(\omega) (\phi H(\omega) \phi^T) = \\ &|H(\omega)|^2 S_{FF}(\omega) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, S_{FF} 为流体外激励的互功率谱密度函数。

当 $\tau=0$ 时, 有 $S_{FF}(\omega) = S_F(\omega)$, 其结构在模态坐标下的随机均方根响应表示为：

$$\overline{q_i^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{Fi}(\omega) |H_i(\omega)|^2 d\omega \quad (11)$$

$$H_i(\omega) = (\omega_i^2 - \omega^2 + 2\zeta_i \omega_i i)^{-1} \quad (12)$$

其中, $|H_i(\omega)|$ 为复频响应函数。

3 燃料棒流致振动响应

对于燃料棒这类圆柱体的结构, 由 Blevins^[2] 的方法可得到每阶模态下外激励功

率谱密度函数的表达式为：

$$S_{Fi}(\omega) = \frac{S_{pi}(\omega) L^2 J_i^2(\omega)}{\left[\int_0^L m_z \phi_i^2(z) dz \right]^2} \quad (13)$$

其中: S_{pi} 为结构表面的压力功率谱; L 为圆柱体长度; 对于均匀的材料 m_z 为常数; $J_i^2(\omega)$ 为第 i 阶模态的耦合度。考虑到燃料棒间距狭小, 湍流漩涡尺寸远小于结构尺寸, 根据文献[2]的试验结果可简化为：

$$J^2(\omega) = \frac{L_c}{L} = \frac{KD}{L} \quad (14)$$

其中: K 为相关长度系数; D 为燃料棒直径。

外激励功率谱通常由试验得到, 由于压力功率谱测量需在燃料棒结构表面开槽植入传感器进行, 考虑到燃料棒包壳结构造价昂贵, 开槽工艺难度较高, 且植入传感器后对流场以及结构固有力学性能的影响, 本文采用测量速度功率谱, 通过理论分析转换得到压力功率谱。而对于圆柱体结构在湍流作用下的速度功率谱目前已有很多的试验数据可利用, 本文采用文献[1]中的试验数据对湍流作用下燃料棒流致振动响应问题进行分析。

对于燃料棒这类细长的圆柱形结构, 在流体作用下单位长度上结构的流体动压力 p 可表示为：

$$p = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D D \quad (15)$$

其中, C_D 为与结构几何外形有关的流体动压力系数。

压力增加 \bar{p} 时其速度相应脉动流速增量为 \bar{u} , 忽略 \bar{u}^2 项小量, 得到：

$$p + \bar{p} = \frac{1}{2} \rho (U + \bar{u})^2 C_D D =$$

$$\frac{1}{2} \rho U^2 C_D D + \frac{1}{2} \rho U \bar{u} C_D D \quad (16)$$

由式(15)和(16)可得到：

$$\frac{\bar{p}^2}{\bar{u}^2} = \frac{4p^2}{U^2} \quad (17)$$

通过式(9)和(10)可得到压力功率谱与速度功率谱之间的关系：

$$S_p(\omega) = \frac{4p^2}{U^2} S_u(\omega) \quad (18)$$

文献[1]给出了圆柱体结构在轴向湍流作用下的速度功率谱表达式(式(19)), 且通过大量试验给出了函数 $G(\lambda)$ 的经验关系, 如式(20)所示。

$$S_u(\omega) = \bar{u}^2 \frac{D}{StU} G(\lambda) \tag{19}$$
$$G(\lambda) = \begin{cases} \beta/\lambda^q & \lambda < 5, \beta = 0.272, q = 0.25 \\ \beta/\lambda^q & \lambda > 5, \beta = 22.75, q = 3 \end{cases} \tag{20}$$

其中: St 为斯托哈罗数; $\lambda = \omega D_h / U$, D_h 为水力直径。

$$D_h = \frac{4D}{\pi} \left[\left(\frac{p}{D} \right)^2 - \frac{\pi}{4} \right] \tag{21}$$

将式(11)根据式(12)~(14)、(18)~(21)整理可得到最终燃料棒流致振动均方根响应:

$$\overline{q_i} = \sqrt{KC_D^2 I \frac{L \rho^2 \pi D^4 D_h^3}{2 S \zeta m_0^2} \left(\frac{U}{\omega_i D_h} \right)^{3+q} \frac{\beta}{q+1} \int_0^L \psi_i^2(z) dz} \tag{22}$$

其中, $I = \bar{u}^2 / U^2$ 为湍流强度。

4 算例及讨论

以某压水堆燃料棒为例,设计参数列于表1。采用有限元方法将燃料棒离散为由123个节点构成的有限元网格,每一节点有2个线位移和1个角位移,3个节点组成1个铁木辛柯梁单元。格架的刚凸和弹簧采用弹簧单元建立,简化形式如图3所示。基于ABAQUS平台开展了燃料棒模态分析,式(4)中模态阶数 $n=5$,燃料棒前5阶固有频率及振型示于图4。最终将燃料棒模态分析计算结果代入式(22),得到模态坐标下的均方根响应,再利用模态坐标阵将其转化为物理坐标下,即可得到每个节点上的时程响应。

表1 燃料组件及堆芯设计参数
Table 1 Design parameters of fuel assembly and reactor core

设计参数	数值
燃料棒包壳外径	0.009 5 m
燃料棒长度	3.851 5 m
燃料棒质量线密度	0.620 6 kg/m
冷却剂密度	703.14 kg/m ²
相邻燃料棒中心间距	0.011 m
结构格架数目	8
斯托哈罗常数	0.3
燃料棒临界阻尼比	0.25

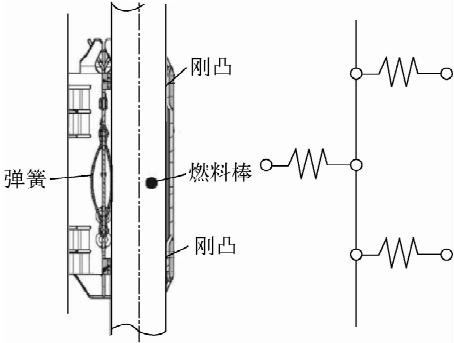


图3 格架简化示意图
Fig.3 Simplified diagram of grid

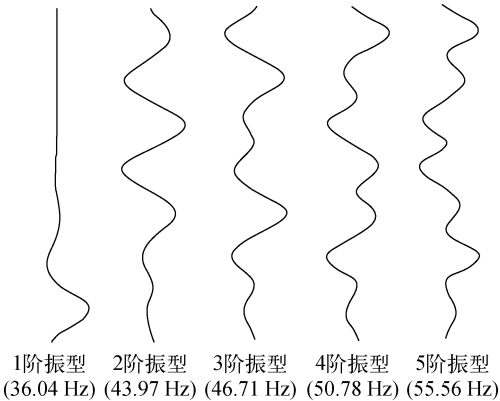


图4 燃料棒前5阶模态
Fig.4 5 mode shapes of fuel rod

由于沿燃料棒轴向上的流场数据依赖于燃料组件流致振动试验,而目前暂时缺少有效的试验数据可支持计算,因此本文未开展燃料棒整体的响应计算,而是开展某监测点的参变分析,讨论流场重要参数对结构响应的影响。经验表明,燃料棒下端部结构类似于悬臂梁,靠近冷却剂入口端的流速较高,且振动幅值较大,因此选取燃料棒最下端的节点为监测点,讨论轴向等效流速、湍流强度、相关长度系数对燃料棒随机响应的影响。根据燃料棒几何尺寸,确定流体动压力系数 C_D 为0.7。

燃料棒在堆内运行时最高流速可达13 m/s,平均流速约6 m/s(图5)。从图5可看出,燃料棒振幅随流速的增加而增大,开始时变化较为平缓,当流速超过6 m/s后振幅变化剧烈,燃料棒端部最大振幅约2.1 μm 。图6示出平均流速时振动幅值随湍流强度的变化曲线,通常情况下湍流强度取值在5%~25%之间。从图6可看出,

燃料棒振幅与湍流强度之间几乎呈线性增长关系。图 7 示出平均流速时相关长度系数与燃料棒振幅之间的关系。由文献[3]中的结论可知,对于圆柱体结构相关长度系数是一不小于 5 的值,当其数值增长到足够大时相关函数便转变为完全相关。本文分析了相关长度系数从 5 到 100 变化时对结构响应的影响,结果示于图 7。从图 7 可看出,燃料棒振幅随相关长度系数的增大而增大,对该系数的变化比较敏感。

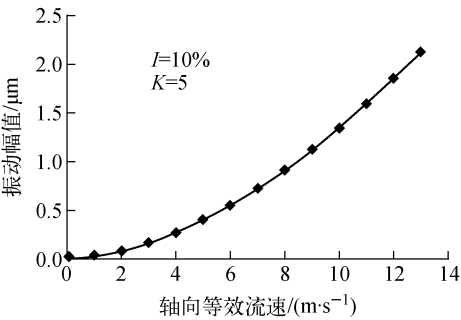


图 5 轴向等效流速对响应的影响

Fig. 5 Impact of axial equivalent velocity on response

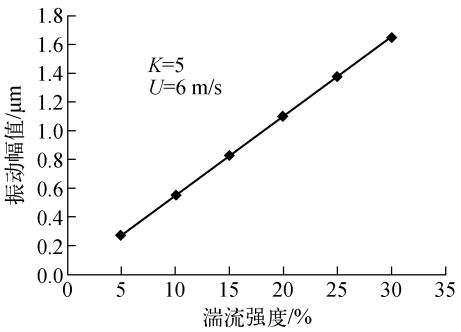


图 6 湍流强度对响应的影响

Fig. 6 Impact of turbulence intensity on response

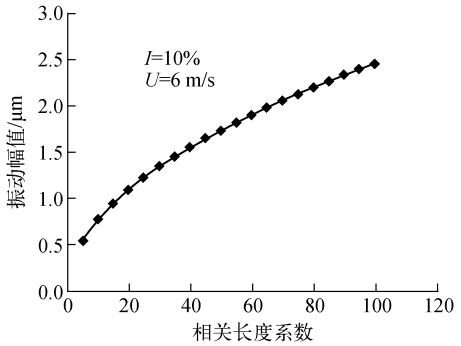


图 7 相关长度系数对响应的影响

Fig. 7 Impact of correlation coefficient on response

5 结语

基于随机振动理论,将作用在燃料棒上得到的流体力考虑为脉动随机荷载,引入湍流功率谱密度函数,通过对湍流功率谱分析并结合Chen^[1]的试验结果,从纯理论角度研究了燃料棒结构在轴向流作用下的随机振动响应,利用模态分析法推导出了模态坐标下燃料棒在轴向湍流作用下的均方根响应表达式。结合有限元离散技术分析了压水堆燃料棒的随机振动响应,重点考查了湍流场的几个重要参数对结构均方根的影响,得到如下结论:

- 1) 燃料棒均方根响应随轴向等效流速、湍流强度和相关长度系数的增大而增大;
- 2) 结构的响应对等效流速的变化以及相关长度系数的变化比较敏感,而与湍流强度的变化几乎呈线性关系;
- 3) 从本文的计算模型观察,在堆内平均运行流速为 6 m/s 或峰值流速为 13 m/s 时燃料棒的振动幅值均在 μm 量级,这和美国西屋试验中心所做的 17×17 燃料组件流致振动试验结果在同量级精度,可说明本文的计算模型基本满足工程分析需要的精度;
- 4) 从理论的角度分析,影响模型计算精度的主要原因是本文所采用的湍流功率谱来自文献[1]中的结果,其试验所模拟的圆柱体根数较真实的燃料组件中的数量少了很多,这使得通过试验拟合出的功率谱所涵盖的压力范围不够准确,从而影响了计算精度。因此,若要获得高精度的计算结果,需在真实的燃料组件上开展全组件流致振动试验,从而得到更准确的湍流功率谱。

参考文献:

[1] CHEN S S. Flow-induced vibration of circular cylindrical structure[M]. New York: Hemisphere Publishing, 1987.

[2] BLEVINS R D. Flow-induced vibrations[M]. 2nd ed. New York: Van Nostrand-Reinhold, 1990.

[3] RIGAUDEAU J. Hydrodynamic coupling in seismic response of PWR fuel assemblies and other immersed structures[S]. US: ASME, 1999: 201-208.