

快堆燃料组件抗震分析流体 附加质量计算方法研究

王万惠, 陆道纲

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 浸没在液态钠中的快堆堆芯组件在地震作用下发生振动, 可能导致组件结构损坏或堆芯结构变形, 从而影响反应堆结构完整性和安全。流体使该振动表现为强烈的非线性, 因此, 研究地震引起的流固耦合效应对快堆抗震分析十分重要。本文主要研究流固耦合问题中附加质量的计算方法, 该方法由 Westergaard 首先提出, 是一种考虑水体对结构作用的简化动力学计算方法, 它将动水压力等效成质量附加在结构上, 质量等效原则自提出在各行业得到广泛应用, 但缺乏详细理论推导。本文首先推导出附加质量公式, 并对该公式进行有效性分析; 接着对单根和两根组件用 CASTEM 在空气和水中进行建模; 最后将频率、碰撞力分别与试验值比较。结果表明, 计算值和试验值吻合。

关键词: 快堆; 燃料组件; 流固耦合; 附加质量

中图分类号: TL43.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S1-0602-07

Method of Calculating Added Mass for Seismic Analysis of Fuel Assembly in Fast Breeder Reactor

WANG Wan-hui, LU Dao-gang

(Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Ministry of Education,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Fuel assemblies of fast breeder reactor (FBR) core submerged in the liquid sodium may vibrate under the earthquake, which possibly leads to structural damage of fuel assembly or structural deformation of the core and affects structural integrity and safety qualification of the core. Fluids make the vibration of the assemblies appear severe nonlinear. So, the seismic-induced fluid-structure interaction is of great importance to seismic capability of FBR core. The calculation method of added mass is a simplified dynamic analysis method in fluid-structure interaction and was firstly proposed by Westergaard. It considers the hydrodynamic pressure of the water to the structure by the equivalent form of mass. Though the equivalent mass principle has been extensively applied in many fields, it is lack of theoretical derivation in detail. In this paper added

mass formula is deduced firstly. Then, the formula is applied for the single-fuel-assembly model and two-fuel-assembly model by CASTEM program in air and water. Finally, the frequency and shock force are compared with experimental datum. The results show that the model calculation results agree with experimental ones.

Key words: fast breeder reactor; fuel assembly; fluid-structure interaction; added mass

快堆堆芯燃料组件抗震分析对快堆安全评价极其重要。在地震作用下,由于燃料组件互相碰撞作用,以及组件与流体的耦合作用,使得抗震分析所表现出非线性动力学行为是国内外学者关注的热点和难点,附加质量模型是流固耦合研究中被广泛关注的重要模型。

涉及到流固耦合问题,要从流体附加质量和流体附加阻尼两个方面进行考虑。在此,先不研究流体附加阻尼,而流体附加质量是 Westergaard 首次针对坝体提出的,是一种考虑水体对结构作用的简化动力学分析计算方法,它是将动水压力等效成质量附加在结构上。质量等效原则自提出后,在各行业得到广泛应用,但缺乏详细理论推导。而实际的反应堆燃料组件结构复杂,且组件之间具有小间隙。在这样的复杂结构和小间隙存在的情况下,流体附加质量的 Westergaard 理论的合理性是研究人员关注的焦点,目前,在实际分析中依然使用流体附加质量的 Westergaard 理论,而本文提出一种新的计算流体附加质量的方法来解决这种燃料组件的小间隙以及碰撞问题。

国外就液态金属快中子增殖反应堆(LMFBR)堆芯抗震分析做了大量的工作,如法国 PHENIX 快堆、意大利 PEC 快堆和日本 MONJU 快堆^[1],针对这些快堆不仅做了理论分析,还进行了相关的试验模拟。为提高堆芯抗震设计,JNC 和法国原子能委员会(CEA)针对快堆 PHENIX 原堆芯做了 1 项联合试验^[1],该试验主要包括 3 部分:1) 2 根组件;2) 3 排组件;3) 最接近实际的六边形模型。每个模型均做了自由和约束试验,所有的试验皆在 AZALEE 振动台上完成。依据该试验,他们还采用有限元程序 FINAS 进行了非线性时域响应分析。用有限元程序 FINAS 建立模型进行分析,主要分以下几部分:1) 采用三维弹性梁单元;2) 堆芯栅格处的间隙采用等效线性弹簧;3) 采用

非线性间隙和弹簧模拟碰撞;4) 流固耦合采用附加质量和阻尼(该模拟过程中未考虑流体引起的附加阻尼,仅考虑结构阻尼)。最后试验与模拟分析的结果进行对比分析,所计算的碰撞力比试验所得碰撞力稍微偏高。

CEA 就流固耦合问题的研究已经做了固体在流体中的振动研究^[2]。对单管在水中的耦合分析,进行了如下 3 个方面的研究。

1) 低频率(由附加质量引起的惯性效应)

就惯性效应主要有以下几方面的研究:惯性效应基本原理,从流体方程出发,考虑边界条件,得到多自由度振动方程;1972 年,Fritz 所做的两个固体环腔流体域研究,进行了附加质量的初步分析,该研究结果表明,就 1 个无限介质的柱体而言,附加质量等于容器排开水的质量,两固体耦合的越剧烈,附加质量越高;1 固体球,其振动台和固体球是连接的,研究容器在振动台上振动及容器内放有振动台的振动,然后利用受力分析得出流固耦合的表达式。

综上所述,尽管国外就流固耦合的附加质量做了大量的工作,可是针对快堆多根燃料组件在水中的振动却未给出一个确定的计算方法,而本文的研究是寻找出量化而直接针对快堆的附加质量公式。

2) 高阻尼

耗散引起的高阻尼效应。理想流体方程的局限性是未考虑耗散,在此,依然考虑单管和管束在水中的情况,用雷诺阻尼考虑阻尼的问题。

3) 壳体的自由表面(可压缩流体)

主要是计算模型的频率和模型的质量。取流体中壳体的不同的阻尼值和波速分别进行分析,分析的结果是流体的附加质量是总质量的 60%^[2]。

国内对中国第 1 座快堆——中国实验快堆(CEFR)堆芯抗震分析陆续做了不少工作,

如鲁亮^[3]做了中国实验快堆堆本体抗震性能试验研究与分析,主要做了整个堆本体抗震性能的研究,而未涉及到具体堆芯燃料组件的振动特性的分析;李海龙^[4]采用法国有限元程序 CASTEM 做了快堆堆芯抗震模型的研究,仅限于研究燃料组件在空气中振动的分析,而未考虑燃料组件在水中的振动分析;文静等^[5]做了快堆堆芯水平抗震分析的单组件预分析,该研究主要采用日本非线性有限元程序 FINAS,以国际上快堆堆芯抗震试验为基础,针对中国实验快堆堆芯进行了抗震分析,主要工作有:采用变截面和变弯曲惯量的梁模型模拟单根组件;采用等效刚度的弹簧模拟组件下部管脚与管座之间的间隙;采用虚拟附加质量法模拟地震情况下液钠对组件的影响(采用虚拟的流体附加质量法)。文静的研究所取得的成果为:完成了 CEFR 堆芯组件在空气和液钠中的动态特性分析;完成了单根组件在刚性墙壁的碰撞分析;选取了 CEFR 堆芯中心区 3 排组件完成了运行基准地震(OBE)激励下的响应分析;最后对假设的数据进行了敏感性分析。国内就快堆所做的工作是显而易见的,但就快堆中的流固耦合问题仍然有待进一步开展。

从上述国内外的研究状况可以看出,国内与国外就流固耦合问题研究的差距比较大,国内多采用的是数值模拟,而国外不仅做了数值模拟,而且还做了很多理论分析。为了弥补国内在理论研究方面的不足,本文推导出新的流体附加质量计算方法。在推导过程中,采用窄缝的势流函数理论进行分析,主要内容分两部分:从流体力学的连续性方程出发,把流体假设成不可压缩平面无旋流动,建立边界条件,进行求解,解出势流函数,然后利用伯努利方程得到压强的关系式,最后利用流体与固体相互间的力平衡建立关系式,从而可得流体附加质量;对该流体附加质量公式进行模型讨论,当间隙趋于无穷大时,本次公式计算的结果与 Westergaard 理论计算结果相等,而实际堆芯是由带有小间隙的上百根燃料组件组成,且这个间隙非常小,故不能采用 Westergaard 方法进行计算。以国外已做的 SYMPHONY 试验^[1]数据作为依据,

用有限元程序 CASTEM 对单根和两根燃料组件在空气和水中分别进行非线性分析,所计算的频率和碰撞力分别与国外已做的试验^[1]数据进行比较。

1 附加质量模型推导

1.1 势函数的推导

在进行理论分析之前,对燃料组件进行模型简化。实际燃料组件是变截面六边形有限长棱柱体,在此采取了等效横截面法(具体的简化是以六边形对边距作为矩形的一边,以对边作为另一边构成矩形),将横截面六边形简化为横截面四边形(图 1)。

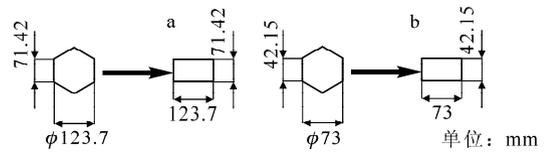


图 1 上部(a)及下部(b)横截面简化图

Fig. 1 Upper (a) and below (b) cross section

首先假设流体为不可压缩平面无旋流动,考虑窄缝进行分析计算。组件长细比大于 40,故可把燃料组件假设成沿长度方向无限长,而忽略长度方向的流体对组件的影响,这样,可把模型简化成二维(图 1)。等效之前的燃料组件是变截面六边形有限长柱体,等效之后是一横截面为矩形的变截面无限长梁单元。

图 2 所示为燃料组件计算模型图。其中, Φ_1 、 Φ_2 、 A 、 B 、 L 分别代表左侧区域势函数、右侧区域势函数、燃料组件长的一半、燃料组件宽的一半、燃料组件之间间隙。图 2 中的模型代表 3 根燃料组件横截面,中间 1 根燃料组件不固定,两侧的两根燃料组件固定。将该模型以原点 O 为中心分成左右两部分分别进行如下计算。

1.1.1 对于第 1 部分(图 2 中左边部分),有如下连续性方程:

$$\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

边界条件(以下关系式中, m 、 m_c 、 ρ 、 F 、 p 、 k 、 $\epsilon(t)$ 、 $\epsilon''(t)$ 和 t 分别代表燃料组件质量、线流体

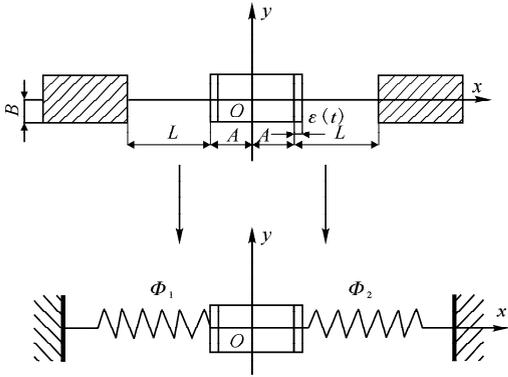


图2 燃料组件计算模型

Fig. 2 Model of fuel assembly

附加质量、流体密度、燃料组件两侧受到流体总压力、压强、弹簧弹性系数、燃料组件移动小位移量、小位移量的二阶导数和时间;下角标“1”代表左侧区域参数,“2”代表右侧区域参数)如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \Big|_{x=-A-L} = 0 \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \Big|_{x=-A} = \epsilon'(t) \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} \Big|_{y=B} = -\frac{B}{L} \epsilon'(t) \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)、(2)可解得:

$$\Phi_1 = \epsilon'(t)(x^2 - y^2)/2L + \epsilon'(t)x(A+L)/L \quad (3)$$

1.1.2 对于第2部分有如下连续性方程:

$$\frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

边界条件如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \Big|_{x=A+L} = 0 \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \Big|_{x=A} = \epsilon'(t) \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \Big|_{y=B} = \frac{B}{L} \epsilon'(t) \end{cases} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可解得:

$$\Phi_2 = \frac{\epsilon'(t)}{2L}(-x^2 + y^2) + \frac{A+L}{L} \epsilon'(t)x \quad (6)$$

1.2 新的附加质量计算方法

燃料组件的运动方程如下:

$$m\epsilon''(t) + F + k\epsilon(t) = 0 \quad (7)$$

根据伯努利方程和式(3)、(6)分别计算燃料组件所受到的压强,有:

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (8)$$

将式(3)代入式(8)得:

$$p_1 \Big|_{x=-A} = -\rho g z - \rho \left(\frac{\epsilon''(t)}{2L} (A^2 - y^2) - \frac{A+L}{L} \epsilon''(t)A \right) \quad (9)$$

$$F_1 = \int_{-B}^{+B} p_1 dy = -2\rho g z B + \frac{\epsilon''(t)}{L} \cdot \left(\frac{1}{3} B^3 + A^2 B + 2LAB \right) \quad (10)$$

用同样方法可得:

$$F_2 = \int_{-B}^{+B} p_2 dy = -2\rho g z B - \frac{\epsilon''(t)}{L} \left(\frac{1}{3} B^3 + A^2 B + 2LAB \right) \quad (11)$$

因此,有:

$$F = F_1 - F_2 = 2 \frac{\epsilon''(t)}{L} \cdot \left(\frac{1}{3} B^3 + A^2 B + 2LAB \right) \quad (12)$$

将式(12)代入式(7)得:

$$\left(m + \frac{2\rho}{L} \left(\frac{1}{3} B^3 + A^2 B + 2LAB \right) \right) \cdot \epsilon''(t) + k\epsilon(t) = 0 \quad (13)$$

令 $m_c = 2\rho/L(B^3/3 + A^2 B + 2LAB)$, 即为本计算方法中的附加质量。

1.3 模型讨论

流体附加质量 $m_c = 2\rho/L(B^3/3 + A^2 B + 2LAB)$ 中有3个变量 A, B, L , 现分别对这3个变量进行讨论。

1) 当 L 趋于零、 A 和 B 为常数时, 附加质量为无穷大, 此时, 两个燃料组件无法接近; 当 L 趋于无穷大、 A 和 B 为常数时, 附加质量 $m_c = 4\rho AB$, 相当于单根组件在大水池中的晃动, 由此式计算的结果和 Westergaard 理论计算的结果相等。

2) 当 B 趋于零、 L 和 A 为常数时, 附加质量为0。当 B 为无穷大、而 L 和 A 不变时, 相当于无限大平板, 此时的附加质量无穷大。

3) 当 A 趋于零、 L 和 B 为常数时, 附加质

量为:

$$m_c = \frac{2\rho B^3}{3L}$$

4) 当 A 为无穷大、 L 和 B 为常数时, 附加质量为无穷大。

综上所述, 只有 L 趋于无穷大时, 本工作的计算结果才与 Westergaard 理论计算 ($m_c = 4\rho AB$) 结果相同。核电厂堆芯燃料组件之间的实际间隙 L 是很小的, 所以, 通过上面的初步分析可知, 本工作的模型合理。

2 模型建立

在地震情况下, 各组件振动表现出的主要是梁的特性, 故将燃料组件简化成梁模型。燃料组件的结构如图 3 所示, 其中, 确定等效惯性矩的方法如图 4 所示。在图 4 中, $S_n = (S_i X_i + S_{i+1} X_{i+1}) / X_n$ ($i = 1 \sim n-1$), S_i 为燃料组件第 i 段的等效横截面积, X_i 为燃料组件第 i 段的长度, I_i 为燃料组件第 i 段的弯曲惯量。根据组件的实际结构, 在后面的分析中采用变截面梁

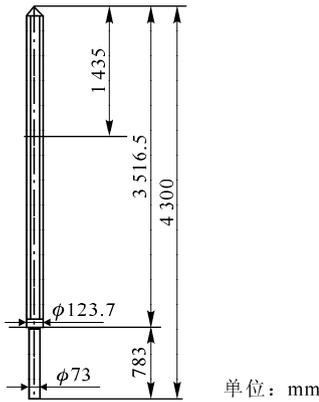


图 3 燃料组件结构图

Fig. 3 Configuration of fuel assembly

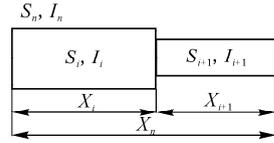


图 4 简化方法

Fig. 4 Simplified method

代替单根组件, 能足以反映出其地震情况下的响应特性。国际上所完成的各种分析和实验均证明了这样的处理方法合理。

2.1 单组件模型

该部分所采用的模型与李海龙^[4]所采用的结构相似, 不同之处在于, 这里考虑单根组件在水中的振动, 且当组件在水中振动时使用了本工作推导出的附加质量。单根组件模型的建立基于以下几点: 忽略组件下部管脚与管座之间的间隙, 假设栅板联箱处和管脚处均简支(图 5a); 栅板联箱处简支而管脚处的间隙用间隙弹簧元来代替(图 5b); 管脚处的间隙用线性等效弹簧代替(图 5c)。

当组件在水中振动时, 对该模型实现流体附加质量有以下两种方式: 1) 取梁单元上有限节点附加离散质量; 2) 沿梁单元均匀连续分布附加质量, 即均匀密度法。考虑到附加质量连续分布可更准确模拟液体对固体的作用, 故本工作采用后者。

2.2 两根组件模型

两根组件模型的建立基于以下几点: 1) 两根组件管脚处分离, 仅上部连接(图 6a); 2) 栅板联箱处简支而管脚处的间隙用间隙弹簧元来代替(图 6b); 3) 管脚处的间隙用线性等效弹簧代替(图 6c)。

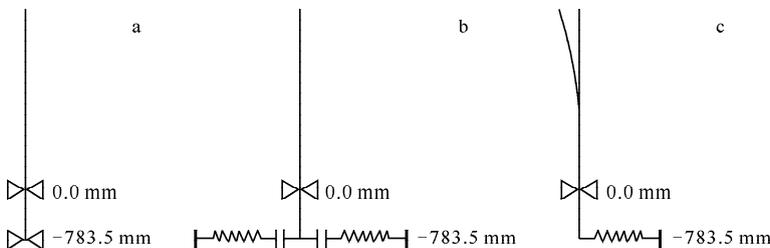


图 5 简支(a)、间隙弹簧元(b)及弹簧元(c)模型

Fig. 5 Simpless (a), gap-spring (b) and spring (c) models

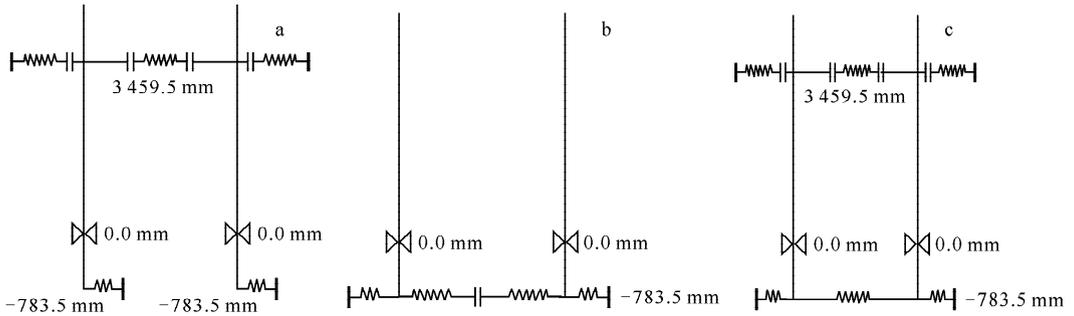


图6 两根组件计算模型(a)、底部间隙弹簧元模型(b)及底部等效弹簧模型(c)

Fig. 6 Calculating model (a), gap-spring model (b), and spring model (c) of two-fuel-assembly

3 结果分析

3.1 流体附加质量

为论证图3中计算模型的合理性,以及2.1节、2.2节中模型的正确性,选取国外SYMPHONY试验数据^[6]与1.3节中的计算结果相比较(表1)。在SYMPHONY试验中,相邻组件的中心距为127.2 mm。表1中的 m 代表单根燃料组件的质量, $m = 205 \text{ kg}$; m_a 代表单根燃料组件在水中的附加质量。

表1 流体质量

Table 1 Summary of fluid mass

模型	附加质量比 m_a/m
试验 ^[6]	0.331
Westergaard 理论 ^[6]	0.227
本工作模型(CASTEM)	0.49

根据实际燃料组件结构,将模型中的附加质量分成3部分分别进行计算如下:1) $m_{a1} = \frac{2\rho}{L_1} \left(\frac{1}{3} B_1^3 + A_1^2 B_1 + 2L_1 A_1 B_1 \right)$; 2) $m_{a2} = \frac{2\rho}{L_2} \left(\frac{1}{3} B_2^3 + A_2^2 B_2 + 2L_2 A_2 B_2 \right)$; 3) $m_a = 3.517m_{a1} + 0.783m_{a2}$, 其中: $3.517m_{a1}$ 代表燃料组件上部横截面附加质量, $0.783m_{a2}$ 则代表燃料组件下部横截面附加质量, ρ 为水的密度, $L_1 = 3.5 \text{ mm}$, $A_1 = 61.85 \text{ mm}$, $B_1 = 35.71 \text{ mm}$, $L_2 = 54.2 \text{ mm}$, $A_2 = 36.5 \text{ mm}$, $B_2 = 21 \text{ mm}$, $m = 205 \text{ kg}$ 。计算得到 $m_a = 99.78 \text{ kg}$ ($m_a/m = 0.49$)。从表1明显看出,模型计算出来的流体质量显著大于传统 Westergaard 理论计算出来的附加质量。

3.2 固有频率

采用不同程序以及不同方法计算的燃料组件在水中的固有频率列于表2。

表2 燃料组件在水中的固有频率

Table 2 Frequency of fuel assembly in water

模型	频率/Hz	与试验的相对偏差/%
试验 ^[6]	2.73	
文静 ^[7] (FINAS)	3.07	12.5
Westergaard 理论(CASTEM)	3.08	12.8
本工作模型(CASTEM)	2.78	1.8

3.3 碰撞力

1) 单根燃料组件在空气和水中的碰撞力
取单根燃料组件顶端碰撞力进行分析,结果列于表3。

表3 燃料组件在空气中的碰撞力

Table 3 Shock force of fuel assembly in air

模型	碰撞力/N	与试验的相对偏差/%
试验 ^[1]	8 735	
文静 ^[7] (FINAS)	8 331	-4.6
本工作模型	9 167.9	4.9

由表3可知,本工作模型计算的燃料组件在空气中的碰撞力比试验值以及文静的计算值偏高,这完全符合1.3节推得的附加质量,且该碰撞力与试验的相对偏差为4.9%,这也符合相对偏差在5%范围内的要求。

由单根燃料组件在水中的振动分析得到的

碰撞力为 11 220 N,水的存在使得单根燃料组件顶端碰撞力比在空气中提高了 22.4%。

2) 两根组件在空气和水中的碰撞力

用两根燃料组件在空气中的振动模型计算得到两根燃料组件在空气中的碰撞力最大值为 8 756.4 N;两根燃料组件在水中的最大碰撞力为 7 489.1 N。水的存在使得燃料组件顶端碰撞力比在空气中降低了 14.5%,原因是两根组件之间有互相的拉力,它可补偿一部分冲击力。

由以上分析可知:不管是在空气中还是在水中,两根燃料组件均比单根燃料组件的碰撞力小,推测归因于两根组件的自稳性比单根的强。由此可推知,增加组件根数可提高系统的稳定性。

4 结论

本工作主要研究流固耦合问题中附加质量的计算方法。首先应用势流函数理论,用微分法推导出流体附加质量计算公式,且用有限元程序 CASTEM 分别计算了简单支撑的单根和两根燃料组件在空气和水中的固有频率和碰撞力。计算结果与试验结果吻合得很好。由此可得出以下结论。

1) 本工作用微分法推导出附加质量计算公式,并进行了相应模型讨论。利用法国有限元程序 CASTEM 对单根和两根燃料组件在空气和水中进行模态分析,本工作的计算结果比传统方法的计算结果与试验结果吻合得好,验证了流固耦合附加质量模型的正确性及实用价值。

2) Westergaard 理论考虑的只是 1 根燃料组件在 1 个大容器中的流固耦合问题,而本工作考虑的是实际的带有间隙的两根燃料组件在大容器中的流固耦合问题,这样的考虑更符合实际。

3) 本工作把实际截面是六边形的有限长燃料组件简化成截面是四边形的无限长燃料组件,且在推导过程中又未考虑流体的黏性,认为流体是理想流体,计算模型过于简化。今后需将模型进一步完善,使其更加接近真实组件。

4) 本工作是针对流固耦合既定量又定性的一次新的尝试计算,未考虑流体引起的附加阻尼。

参考文献:

- [1] MASAKI M. Symphony a JNC/CEA joint core seismic study, ATD/OEC/JNC [R]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2004.
- [2] DANIEL B. CIAE-CEA meeting on seismic behaviour of fast reactor cores[R]. Beijing: Laboratory of Seismic Studies, 2007.
- [3] 鲁亮. 中国试验快堆堆本体抗震性能试验研究与分析[R]. 上海:同济大学,2005.
- [4] 李海龙. 快堆堆芯抗震模型的研究[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2006.
- [5] 文静,陆道纲. 快堆堆芯水平抗震分析的单组件预分析[J]. 原子能科学技术, 2007,41(2): 148-152.
WEN Jing, LU Daogang. Single assembly preliminary analysis for horizontal seismic analysis on fast breeder reactor core[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(2): 148-152 (in Chinese).
- [6] TAI A, SEIJI K, MASAKI M, et al. JNC/CEA collaborative work on core seismic study SYMPHONY-simulation of one-row mock-up tests with restrained configuration[C]//Transaction of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15). Seoul, Korea: [s. n.], 1999.
- [7] 文静. 中国试验快堆堆芯单方面水平抗震分析研究[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2006.