

弱耦合体系流致振动计算方法

席志德, 陈炳德, 李朋洲

(中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041)

摘要:弱耦合体系的流致振动的流体作用力可分成与结构运动有关的流体力和与结构运动无关的流体作用力。与结构运动有关的流体作用力可用结构的惯性力、阻尼力和刚度力的线性表达,与结构运动无关的流体力用CFD计算流场压力获得。本文介绍了一种计算弱耦合体系流致振动的方法,用该方法计算了秦山II期1:5模型吊篮,计算的结果和实验的结果保持在3.1倍范围内。因此,该方法可用于流致振动实验前的预估。

关键词:弱耦合体系;流致振动;附加质量;大涡模拟

中图分类号:O323

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)S1-0444-04

Calculation Method for Flow Induced Vibration in Weak Coupled System

XI Zhi-de, CHEN Bing-de, LI Peng-zhou

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: The fluid load exciting structure vibration in weak coupled system is separated into two parts. One is related to the structure motion which is line with the inertia, damp and rigidity of structure, the other is independent on the structure motion which can be obtained by CFD. A method to calculate flow induced vibration (FIV) in weak coupled system was introduced and applied to Qinshan II phase 1 : 5 model. The results of experiment and calculation are kept in the 3.1 times. So this method can be used to calculate FIV before experiment.

Key words: weak coupled system; flow induced vibration; added mass; large eddy simulation

流致振动在核反应堆工程中十分重要,关系到反应堆的安全运行,历来受到各国的重视。理论计算流致振动响应的难点在于如何确定流体和结构之间的相互作用力,传统的方法采用实验和理论计算相结合,通过实验的手段测得

流体脉动压力或通过经验公式确定流体载荷。该方法通过相似性准则将模型实验获得的流致振动响应数据推到原型堆,同时将实验获得激励载荷施加到原型结构计算其响应,两者相结合来评价流致振动。但是对不同类型的堆或对

同类型的堆作了局部改动后需要对改动部件进行实验,目前大多实验都是工程验证性实验^[1],由于实验的耗资大,周期长,有限的测点不一定布置到最大响应处,因此,迫切需要发展一种不依赖于实验数据的计算方法来对流致振动进行预估,进而认识解决流致振动问题。

1 流致振动数学方程

流致振动基本方程可用如下算子形式来描述:

$$\ell \mathbf{x}(X, t) = \mathbf{f}(X, t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}(X, t)$ 为响应矢量; X, t 分别是空间、时间变量; ℓ 为时间、空间变量的线性微分算子,

在动力学及有限元中的形式为 $\ell = M \frac{\partial^2}{\partial t^2} + C \frac{\partial}{\partial t} + K + \ell_1$, ℓ_1 为结构算子,其具体形式取决于结构的形状与运动形式; $\mathbf{f}(X, t)$ 为激励矢量,通过求解流场方程来获得。

由于结构的运动会影响流场从而改变流场对结构的作用力,所以,式(1)是非线性体系,不易求解,因此,将式(1)右端分解为:

$$\ell \mathbf{x}(X, t) = \mathbf{f}_s(X, t) + \mathbf{f}_i(t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{f}_s(X, t)$ 是非线性项,与结构运动有关,称为运动相关的流体力; $\mathbf{f}_i(t)$ 与结构的运动无关,仅与流体运动有关,称为流体激振力。

根据微幅振动局部线性化理论^[2],任意一个流体参数的振荡量可以看成许多个小的振荡量的叠加,即任意非定常来流可通过 Fourier 变换表示成一个定常来流和许多简谐振动的振荡流的叠加。结构以简谐振动激起的流体作用力是研究弱耦合体系下与结构运动有关的流体力的基础,其它的任意振动形式下的运动相关的流体力都可以化成简谐振动量的叠加。S. S. Chen^[3]研究了具有弹性支撑的圆柱结构在简谐振动的形式下的流体作用力,表明 $\mathbf{f}_s(X, t)$ 可线性化。将与结构运动有关的流体力 $\mathbf{f}_s(X, t)$ 写成与结构加速度、速度和位移有关系的表达式,为:

$$\mathbf{f}_s(X, t) = -M_a \frac{\partial^2 \mathbf{x}(X, t)}{\partial t^2} -$$

$$C_a \frac{\partial \mathbf{x}(X, t)}{\partial t} - K_a \mathbf{x}(X, t) \quad (3)$$

式中: M_a 、 C_a 、 K_a 分别称为附加质量、附加阻尼、

附加刚度。

通常,附加阻尼、附加刚度较小,因此可忽略,主要关心附加质量项。将式(3)代入式(1)并移项后变成新的运动方程,大幅简化了流固运动方程,有:

$$\ell'_{X,t} \mathbf{x}(X, t) = \mathbf{f}_i(t) \quad (4)$$

式中: $\ell'_{X,t} = (M + M_a) \frac{\partial^2}{\partial t^2} + (C + C_a) \frac{\partial}{\partial t} + (K + K_a) + \ell_1$ 。

2 附加质量

附加质量一般是结构的几何形状、流体粘性、流体的运动状态以及流固之间耦合振动特性等的函数,具有非线性、非定常的特性。附加质量的计算需根据具体的问题而具体分析。如吊篮和压力容器具有同轴的特点,可简化为同轴圆柱壳结构。压力容器的刚度比吊篮大,当成刚性壁面,吊篮用薄壳模型,假设流体为理想流体,用势流理论研究流场,理论推导作用在壳体上的流体压力,用模态叠加原理求解壳体 Flugge 方程可得到壳的附加质量表达式,有:

$$M_a = \rho_f \sum_{\lambda=\pi/L}^{M\pi/L} \sum_{n=1}^N \left[\frac{R_1}{\lambda} (F_{n1} - F_{n2}) \right] \pi L / 2 \quad (5)$$

式中: ρ_f 为流体密度; n 为环向波数; λ 为轴向波数; M, N 分别为参与模态阶数。

$$F_{n1} = \frac{I'_n(\lambda R_2) K_n(\lambda R_1) - K'_n(\lambda R_2) I_n(\lambda R_1)}{K'_n(\lambda R_1) I'_n(\lambda R_2) - K'_n(\lambda R_2) I'_n(\lambda R_1)}$$

$$F_{n2} = \frac{I_n(\lambda R_1)}{I'_n(\lambda R_1)} \quad (6)$$

式中: $I_n(\lambda R_1)$ 为 λR_1 的 n 阶第 1 类变型 Bessel 函数; $K_n(\lambda R_1)$ 为 λR_1 的 n 阶第 2 类变型 Bessel 函数; R_1 为吊篮半径; R_2 为压力容器内径。

吊篮的梁型边界条件详见文献^[4],在此条件下的附加质量的推导表达式为:

$$M_a = \rho_f / \lambda \cdot \pi [(F_{n2} - F_{n1}) - 2U\lambda (\xi F_{n2} + F_{n1}) / \Omega + U^2 \lambda^2 (\xi^2 F_{n2} - F_{n1}) / \Omega^2] \quad (7)$$

式中: F_{n1} 、 F_{n2} 为式(6)中 n 取 1 时的值; $\xi = R_2^2 / R_1^2 - 1$ 。

将每阶附加质量和吊篮质量之比定义为附加质量系数,该系数随环向半波数的变化示于图 1。

3 结构运动无关的流体力

流体激振力 $\mathbf{f}_i(t)$ 用 CFD 计算流场的压

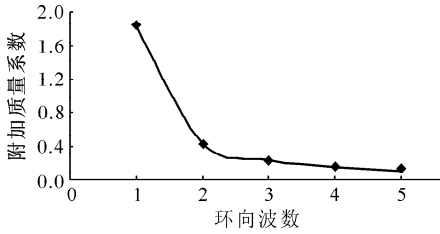


图1 附加质量系数随环向波数的变化

Fig. 1 Coefficient of added mass along number of circumferential waves

力获得。反应堆内部流体运动形式主要是湍流。湍流是漩涡运动, 涡的尺度分布很宽, 小到分子尺寸大到边界尺寸。完全模拟这些尺寸的涡对计算机的硬件要求比较高, 一般用户难以实现。基于时间平均的雷诺应力模型虽然对计算机硬件要求不高, 但其抹掉了流场的细节, 只能计算流场的时均效应, 因而有一定的局限性。介于二者之间的大涡模拟能够得到流场的动态特性, 所要求的计算机硬件条件不如直接模拟高, 因而用来计算流体激振力是合适的, 大涡模拟计算吊篮的流体激振力的详细内容参见文献[5-6]。

4 结构响应计算

计算结构响应(方程(4))的方法有3类: 频域分析方法、振型叠加法和时域分析方法。

频域分析方法是从对输入的离散化着手进行体系动力反应的分析, 较为繁琐。振型叠加法则通过对结构振动特性的离散化来实现体系动力反应的离散化, 该方法简单, 对计算机硬件要求不高, 当仅对结构的最大激励响应感兴趣时可以采用此方法, 因此, 在工程抗震分析中比较常用。

振型叠加法又称为模态叠加法, 它以系统无阻尼的振型为坐标基, 通过坐标变换使体系运动方程解耦, 进而通过叠加各阶振型的贡献以求得体系的反应。

通过CFD计算的流场压力, 可以得到时间和空间的分布。此时, 计算结构的响应时用时域的直接积分比较合适, 而且可得到更加精确的结构响应。常见的直接积分方法有中心差分法、线性加速度法、Wilson- θ 法、Newmark法和Houbolt法。

5 算例

以秦山核电站II期1:5模型的吊篮为算例, 采用文献[7]介绍的模型, 上端吊篮法兰分布有16根弹性刚度为 7.8×10^8 N/m的弹簧, 法兰外边沿用简支边界条件, 下端当成自由边界。吊篮计算模型示于图2。

吊篮振动特性的计算结果列于表1。

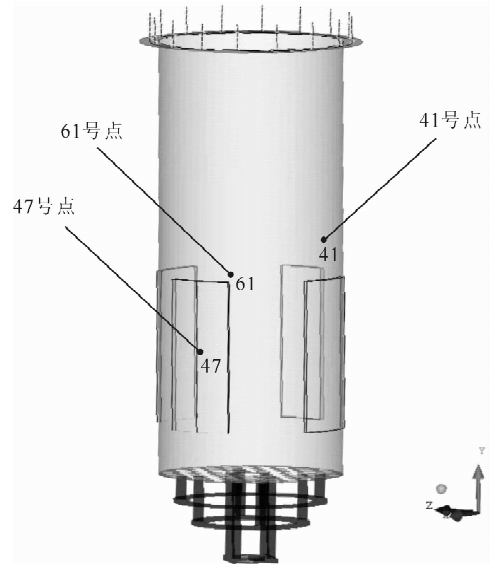


图2 计算模型

Fig. 2 Model of simulation

表1 吊篮固有频率实验值和计算值的比较

Table 1 Frequency comparison of results for experiment and simulation

振型	频率/Hz				误差/%	
	计算值		实验值		误差/%	
	空气	静水	空气	静水	空气	静水
梁式振动	61.8	31.9	58.9	36.0	0.17	11.5
$m=1, n=2$	218.8	114.5	206.8	113.0	4.5	1.3
$m=1, n=3$	236.8	124.5	239.5	147.0	8.1	15.3
$m=1, n=4$	369.7	218.0	380	238.0	1.2	8.3

采用Newmark积分对上述模型进行计算。分别取吊篮的上、中、下3个关键点来讨论计算结果, 这3点与实验测试点的通道号相对应, 关键点位置示于图2, 图3为响应时程信号。

表2列出了响应的计算值和实验值的比较。吊篮的位移响应最大值在吊篮下端, 为

93.5 mm,比实验值大。计算值和实验值保持在 3.1 倍范围内。当把流体的脉动压力作为结构的载荷时,计算的是结构对随机脉动压力作用下的响应,在加速度响应频谱上有两个明显的尖峰(图 4),峰值对应壳的一阶梁式频率和二阶壳式频率。从图 4 可看出,吊篮主要以梁式振动。

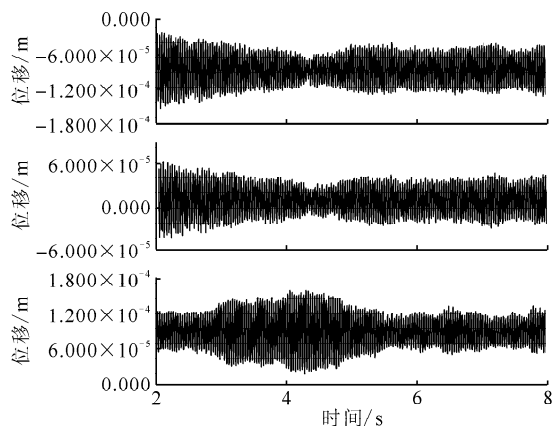


图 3 响应时程

Fig. 3 Time history of response

表 2 计算值和实验统计值的比较

Table 2 Comparison of statistical results for experiment and simulation

关键点	参数	计算值		实验统计值	
		最大值	RMS 值	最大值	RMS 值
41	加速度(m/s ²)	13.8	1.9	8.2	1.8
47		9.4	1.6		
61	位移(mm)	20.4	6.5	9.4	2.1
吊篮底部		93.5	26.9	52.0	11.6

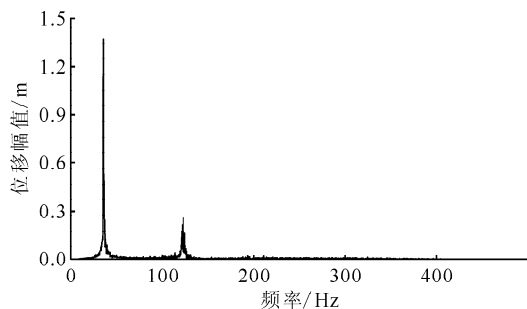


图 4 响应频谱

Fig. 4 Frequency spectrum of response

6 结论

将流体和结构之间的流体作用力分成与结构运动有关的流体作用力和与结构运动无关的流体作用力,可较好地体现流体和结构间的耦合作用。用该方法计算了秦山 II 期 1:5 模型吊篮的流致振动,计算结果和实验结果在 3.1 倍范围内。该方法可用于实验前的预估。

参考文献:

[1] 喻丹萍,胡永陶. 600 MWe 核电站反应堆堆内构件流致振动试验研究[R]. 成都:中国核动力研究设计院二所,1998.

[2] 陈佐一. 流体激振[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

[3] CHEN Shoeisheng. 圆柱结构的流动诱发振动[M]. 北京:石油工业出版社,1993.

[4] 蒋自龙. 反应堆吊篮结构梁型振动频率的计算方法[J]. 核动力工程,2000,21(3):253-255. JIANG Zilong. Calculation method of beam type vibration frequency for barrel structure of nuclear reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(3): 253-255(in Chinese).

[5] 席志德,陈炳德,李朋洲. 用大涡模拟计算吊篮流体激励力[J]. 核动力工程,2007,28(5):14-17. XI Zhide, CHEN Bingde, LI Pengzhou. Large eddy simulation of turbulent buffet forces in flow induced vibration[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(5): 14-17(in Chinese).

[6] 席志德,陈炳德,李朋洲. 大涡模拟在计算反应堆吊篮流体激励力的应用[J]. 核动力工程,2008,29(3):28-31. XI Zhide, CHEN Bingde, LI Pengzhou. Application of LES in simulation of fluid buffet on core barrel excited by FIV[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(3): 28-31(in Chinese).

[7] 马建中,杨翊仁,张继业,等. 空气中吊篮结构的振动特性分析[J]. 核动力工程,2000,21(4):323-327. MA Jianzhong, YANG Yiren, ZHANG Jiye, et al. Analysis of vibration characteristics of a core barrel in air[J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(4): 323-327(in Chinese).