

# 直管束流固耦合振动的数值模拟\*

冯志鹏, 张毅雄, 臧峰刚

(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610041)

**摘要:** 为了研究反应堆结构中的诸如燃料棒、蒸汽发生器和其它换热器传热管束等的流体-结构交互作用问题, 利用有限体积法离散大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 的流体控制方程, 用有限元方法求解结构动力学方程, 并结合动网格技术, 建立三维流体诱发振动的数值模型, 模拟直管束中流体的流动及结构振动, 实现计算结构动力学 (computational structure dynamics, CSD) 与计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 之间的联合仿真. 首先, 基于流固耦合方法对单管的流致振动特性进行了详细分析, 得到了其动力学响应与流场特性; 其次基于建立的传热管束流致振动计算模型, 研究了两并列管、两串列管以及  $3 \times 3$  正方形排列管束的流致振动行为.

**关键词:** 流致振动; 传热管束; 大涡模拟 (LES); 计算流体力学 (CFD)

**中图分类号:** O322 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.11.006

## 引言

在反应堆结构中, 流致振动的部件主要是圆柱结构和圆柱束, 例如在横向流作用下的蒸汽发生器传热管, 振动会引起部件疲劳和磨损, 给反应堆安全带来潜在危害<sup>[1]</sup>.

目前, 研究者主要围绕 4 种流体诱导振动机理 (漩涡脱离、紊流抖振、流体弹性扰动、声振荡) 做了大量的工作, 无论是理论还是数值研究都取得一定进展, 提出了一些新的理论解释与实验判别式<sup>[2-3]</sup>, 并进行了一系列数值研究, 包括用有限元法<sup>[4]</sup>或有限体积法求解 N-S (Navier-Stokes) 方程<sup>[5-6]</sup>等. 但是现有的各种流致振动机理都需要实验数据以确定湍流力、流体弹性力系数, 存在一定的局限性. 并且对管束的流致振动来说, 由于管束与流体之间及管束与管束之间强烈的交互作用, 单一的计算流体力学或计算结构动力学分析已经不能满足人们的要求<sup>[3]</sup>, 需要构建更精确的物理模型来分析结构和流体的相互作用, 以提高分析结果的工程可用性.

因此, 本文采用双向流固耦合方法, 结合动网格控制技术, 同时考虑流体-结构两个物理场之间的相互作用, 联合 CFD 和 CSD 方法来研究传热管束的流致振动特性, 为蒸汽发生器管束及燃料棒束等的流致振动设计提供参考.

## 1 数值模型

对流体诱导振动问题, 任何数值模拟都需要考虑以下 4 个基本问题: 流场模拟、结构振动

\* 收稿日期: 2013-07-08; 修订日期: 2013-07-19

作者简介: 冯志鹏 (1986—), 男, 甘肃会宁人, 工程师, 博士 (通讯作者. E-mail: zhipengfeng1@163.com).

模拟、流体-结构交互作用模拟、数据处理.控制方程包括流体的 N-S 方程和描述结构运动的动力学方程.

### 1.1 流体控制方程

本文中的流体为水,采用三维、不可压缩、非定常的流体控制方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (2)$$

其中,  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $p$  为压力,  $\text{Pa}$ ;  $\mu$  为动力粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $u_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 为速度分量,  $\text{m/s}$ ;  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 为坐标分量.

### 1.2 湍流模型

在预测管束的横掠问题中,即使较先进的 RANS 湍流模型如 Realizable  $k-\varepsilon$  和 RNG  $k-\varepsilon$  模型都极大地低估了密集管束中的湍动能强度,而精细网格下的 LES 结果可以比得上 DNS (direct numerical simulation) 和实验结果<sup>[7]</sup>,因此本文采用大涡模拟方法建立离散流体控制方程.对方程(1)和方程(2)在物理空间滤波可得到大漩涡的控制方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (4)$$

式中,  $\tau_{ij}$  为亚格子应力,  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$ , 采用 Smagorinsky-Lilly 模式.本文利用基于有限体积法的 CFD 程序 Fluent 来求解方程(3)、(4),获得流场中包含的速度和压力未知量.

### 1.3 动网格模型

本文中的网格为六面体网格,采用动态网格层变方法对网格更新.该动网格模型指定一个理想高度  $h_{\text{ideal}}$ ,当网格单元层高度  $h > (1 + \alpha_h) h_{\text{ideal}}$  时,单元将根据预定义的高度条件进行分裂;当  $h < \alpha_h h_{\text{ideal}}$  时,这个被压缩的单元层将与邻近的单元层合并成一个新层,  $\alpha_h$  是全局单元层的分裂/合并因子.

### 1.4 结构分析模型

利用有限元方法对管结构进行离散,即可得到每个管的质量矩阵与刚度矩阵.采用 Newmark 数值积分方法求解结构动力学方程,进行瞬态动力学分析:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}(t), \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵,其中阻尼采用 Rayleigh 阻尼,  $\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{x}$ ,  $\dot{\mathbf{x}}$  和  $\ddot{\mathbf{x}}$  分别为位移、速度和加速度矢量,  $\mathbf{F}(t)$  是由流体引起的载荷,通过 CFD 模型计算得到管壁面上各个节点的压力,将其施加到管束结构上即可得到  $\mathbf{F}(t)$ .

为解决管束间的流体结构交互作用,双向耦合分析必不可少,同时还需要考虑大变形以及由大变形带来的网格变形问题,尤其是流场网格的变形问题.固体域和流体域间的双向耦合作用通过采用相同时间步的流体计算和结构动力学计算依次迭代实现,流体域和固体域的计算结果通过流固耦合交界面相互传递,当迭代收敛后,再开始下一时刻的计算,如此循环直到计算结束.文献[8]对单管横流的振动结果与已有经典实验结果给出了详细对比,说明了流固耦合数值模型是可行的和正确的.

## 2 物理模型及计算参数

管的物理参数:管长 0.5 m, 外径  $D = 0.01$  m, 内径  $D_i = 0.0095$  m, Poisson 比  $\nu = 0.3$ , 密度  $\rho_s = 6500$  kg/m<sup>3</sup>, 阻尼比  $\zeta = 0.047$ , 弹性模量  $E = 10000$  MPa.

流体参数: 流体为水, 密度  $\rho = 998.2$  kg/m<sup>3</sup>, 动力粘度  $\mu = 0.001003$  Pa·s, 进口流速  $v = 0.5 \sim 4.8$  m/s, Reynolds 数达  $10^4$  量级并随流速的变化而变化.

流场区域及边界条件: 本文的流场计算区域及网格如图 1 所示,  $D$  为管子外径. 选用 ICEM CFD 作为网格划分工具, 采用六面体结构化网格. 图 1 中左边入口采用速度入口边界条件, 右端为出口采用压力出口边界条件, 其它外边界按对称边界和固定壁面处理; 管壁为流体-结构交界面, 设为动网格边界.

时间参数: 时间步长取为 0.00025 s, 计算时间为 0.5 s.

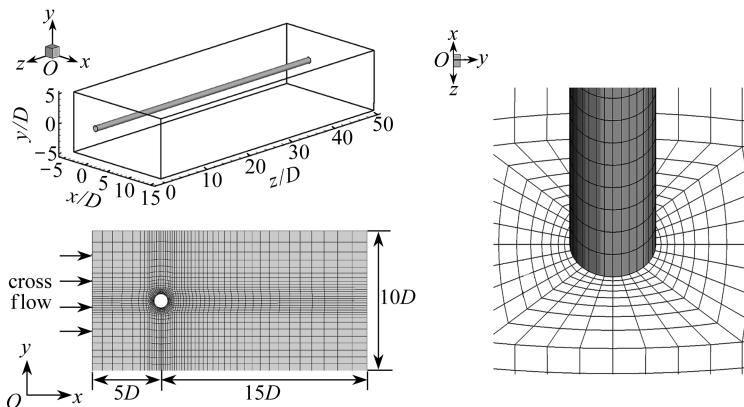


图 1 流场区域及网格示意图

Fig.1 Schematic of computational domain and mesh

## 3 单管的流致振动特性

为了表征结构振动量随速度的变化, 引入振动幅值  $A_{RMS}/D = \sqrt{x_{mean}^2 + y_{RMS}^2}/D$ , 阻力平均值  $F_{d,mean}$  和升力均方根值  $F_{1,RMS}$ , 其中  $D$  为管外径,  $x_{mean}$  与  $y_{RMS}$  分别是管在  $x$  方向和  $y$  方向振动位移的平均值与均方根值. 图 2 为管在不同流速下  $x$ - $y$  位移平面上的运动轨迹, 可以看出当流速超过某一临界值后, 管发生三维变形, 开始沿横向及流向自由振动, 运动轨迹是呈“8”字形的 Strouhal 型激振. 随着流速的增大, 平衡位置均向下游漂移; 横向变形先逐渐增大, 当流速为 3.6 m/s 时达到最大, 随后则随着流速的增大逐渐减小, 在一定的流速范围内 (2.0~3.6 m/s), 流体激励与管发生了共振, 流向振动的脉动值远小于横向振动的脉动值. 图 3、图 4 分别为阻力平均值、升力均方根值和振幅随速度变化的曲线图,  $F_{d,mean}, A_{RMS}/D, x_{mean}/D$  随着速度的增加而增

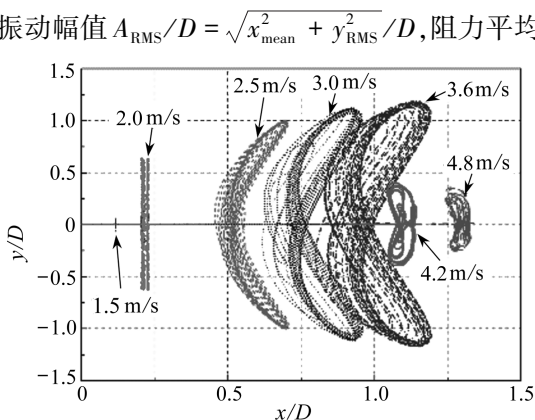


图 2 不同流速下管的运动轨迹

Fig.2 Tube trajectories vs. flow velocity

加,而  $F_{1RMS}, 2y_{RMS}/D$  则随着速度的增加先增加后减小,当流体激励频率与管的固有频率相接近时,两者发生共振,出现“频率锁定”效应。

通过对比图 5、图 6 可以发现,升力的变化频率主要有 61 Hz, 182 Hz,阻力的变化频率主要有 120 Hz, 243 Hz;相应地,横向加速度的变化频率集中于 61 Hz, 181 Hz,而流向加速度的变化频率集中于 120 Hz, 243 Hz。即:对于阻力方向的振动加速度谱线,在阻力对应的频率点是尖峰点;对于升力方向的振动加速度谱线,升力对应的频率点是尖峰点;对于其它频率点,在谱线上振动幅值突变不明显。通过以上分析说明,纵向振动频率是横向振动频率的 2 倍,流体诱发直管振动的主要成分集中在流体升力和阻力变化的频率附近,阻力的变化频率影响阻力方向的结构响应,升力的变化频率影响管在升力方向的结构响应。

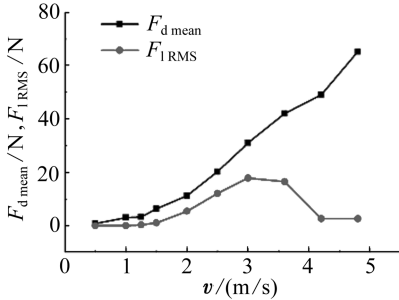


图 3 阻力、升力随速度的变化曲线  
Fig.3 Fluid loads vs. flow velocity

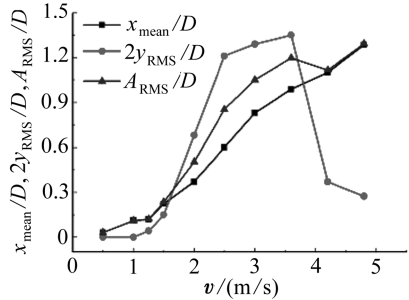


图 4 振幅随速度的变化曲线  
Fig.4 Vibration amplitudes vs. flow velocity

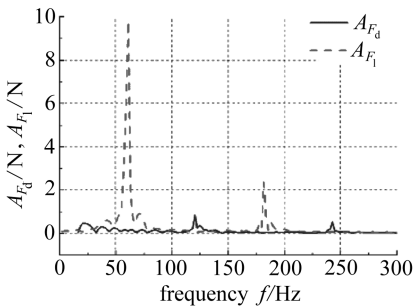


图 5 升力、阻力频谱特性  
Fig.5 FFT of fluid loads (single tube)

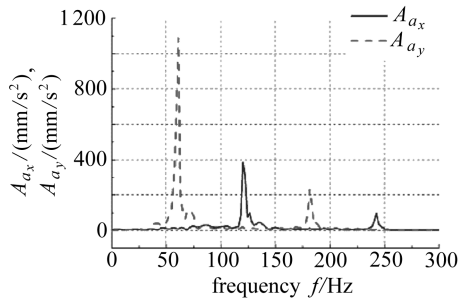


图 6 加速度频谱特性  
Fig.6 FFT of accelerations (single tube)

## 4 管束的流致振动特性

利用建立的传热管束流致振动计算模型,对定常来流流场中的串列管、并列管及  $3 \times 3$  正方形排列管束的流致振动特性进行数值模拟和分析。管束、流场区域及网格划分等均与单管流致振动的模型类似,串列管、并列管及  $3 \times 3$  正方形排列管束的节径比均取为 3,进口流速取为 1.5 m/s。

### 4.1 并列管

为了研究横流中两并列管之间的相互作用,建立了如图 7 所示的参数完全相同的两并列管,横向间距记为  $P_y$ 。图 8 为两并列管周围的瞬时速度场,可以看到,定常来流中两并列管周围的流动对称,在其尾流区形成耦合的湍流涡街,涡街频率相同而相位相反。两并列管所受的阻力基本相同,而二者的升力总是反相,但幅值相等,变化频率相同。图 9、图 10 分别为两并列管的升阻力频谱及位移频谱特性图。两并列管的横向变量如升力、横向位移、横向加速度均集

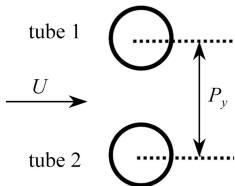


图 7 并列管示意图

Fig.7 Parallel two tubes' configuration

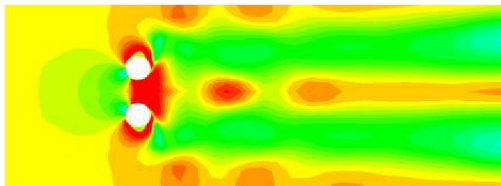


图 8 两并列管的瞬时速度场

Fig.8 Instant velocity field of parallel two tubes

中于 38 Hz,与单管的值接近;而流向变量的频谱分布则易于单管的,阻力的频谱主要分布于 38 Hz,50 Hz 和 74 Hz,对应的流向位移的频谱集中于 40 Hz,48 Hz 和 74 Hz,说明流体掠过两并列管引起的振动成分主要集中在流体升力和阻力变化的频率附近.由于两并列管的流场流动是对称的和反相的,其横向变形也呈现相同的规律,如图 11 所示.

4.2 串列管

为研究两串列管的交互作用,建立了如图 12 所示的两串列管,其中管 2 位于管 1 尾部的

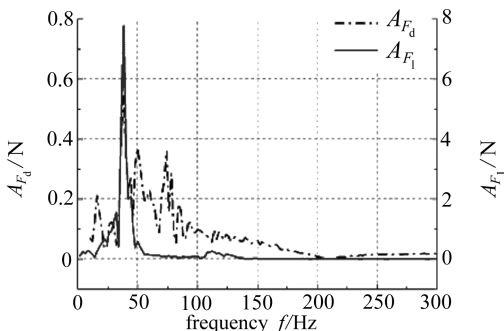


图 9 两并列管的流体力频谱特性

Fig.9 FFT of fluid loads (parallel two tubes)

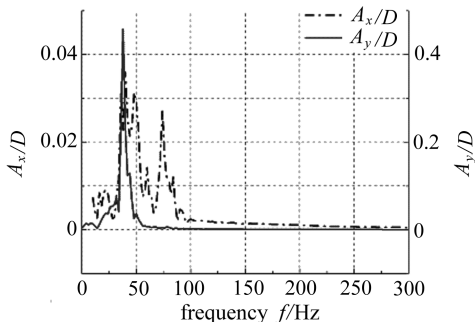


图 10 两并列管的位移频谱特性

Fig.10 FFT of displacement (parallel two tubes)

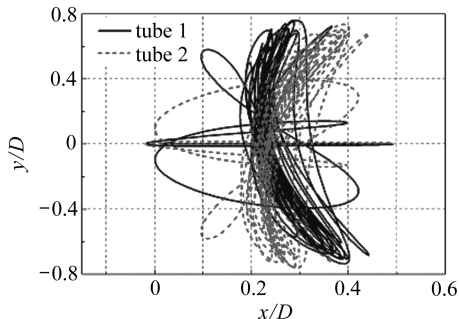


图 11 两并列管的运动轨迹

Fig.11 Trajectories of parallel two tubes

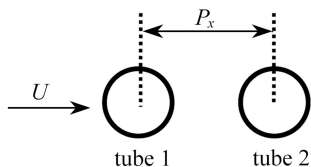


图 12 串列管示意图

Fig.12 Inline two tubes' configuration

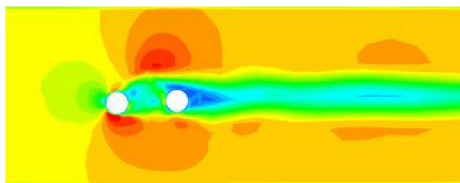


图 13 两串列管的瞬时速度场

Fig.13 Instant velocity field of inline two tubes

下游,流向间距  $P_x$ .图 13 是两串列管周围的瞬时速度场,从图中可以看出,上游管 1 尾部的漩涡发放后,附着在下游管 2 的边界层上,之后在下游管 2 尾部形成漩涡,随着漩涡的脱落并向下游扩散,在尾流区形成涡街;下游管 2 处于极不稳定的尾流中,受到上游管 1 尾流的振荡变化和涡脱落的影响,使得串列管的流场特性异于单管的情形.图 14 为两串列管的流体力频



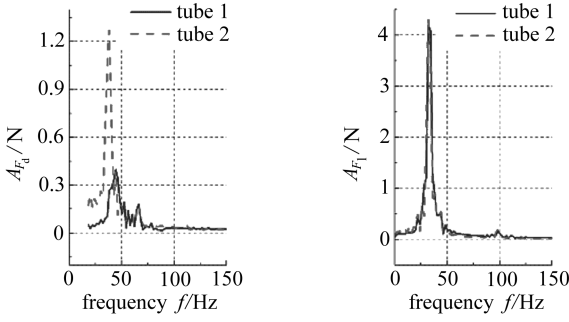


图 14 两串列管的流体力频谱特性

Fig.14 FFT of fluid loads (inline two tubes)

谱图,两串列管升力的变化频率均集中于 32.2 Hz,横向振动加速度的频率集中于 34.1 Hz;上游管阻力的变化频率集中于 44.2 Hz 和 66.4 Hz,对应地,振动加速度成分集中在阻力的变化频率附近,为 44 Hz 和 66.2 Hz,而下游管的阻力变化频率则集中于 38.2 Hz 和 66.4 Hz,与上游管相似,振动加速度成分亦集中于其对应阻力的变化频率附近,为 38 Hz 和 66.2 Hz.说明流体横掠两串列管引起的振动成分主要集中在流体升力和阻力变化的频率附近

附近,两串列管尾流具有相同的漩涡发放频率.图 15 和图 16 分别是两串列管的振动位移时程和运动轨迹.上游管 1 的阻力和流向振幅明显大于下游管 2 的,并从图 15 中可以看出,两串列管的横向位移有明显的周期性,且两管的  $y/D$  有近似相同的相位.

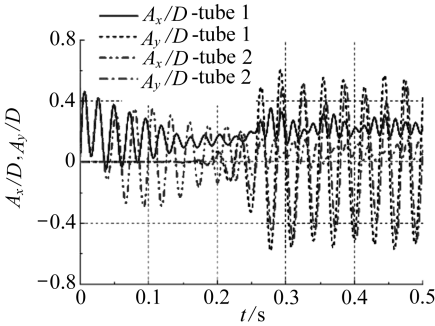


图 15 两串列管的位移频谱特性

Fig.15 FFT of displacement (inline two tubes)

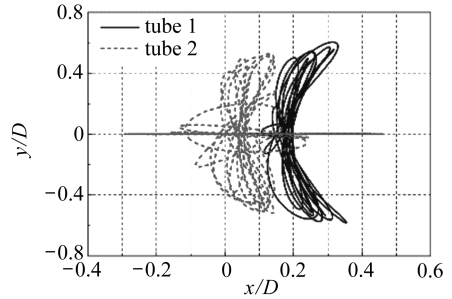


图 16 两串列管的运动轨迹

Fig.16 Tube trajectories (inline two tubes)

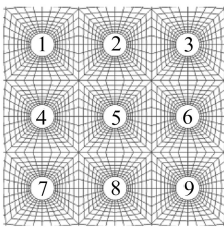


图 17 管束编号及局部网格

Fig.17 Tube numbers and local grids for a tube bundle

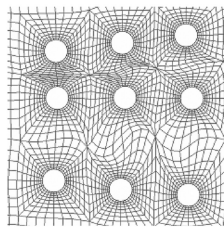


图 18 网格变形图

Fig.18 Deformed grids

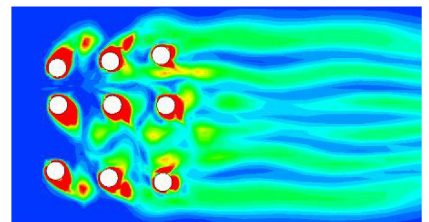


图 19 瞬时涡量场

Fig.19 Instant vorticity magnitude field

### 4.3 正方形管束

为了方便表述,将 3×3 正方形排列的管束进行标记,初始时刻各管编号以及未变形的网格如图 17 所示,图 18 和图 19 分别为 0.2 s 时刻的网格变形图和瞬时涡量场,图 20 为各个管子的运动轨迹.比较图 19 和图 20 可以发现,对每一排管子来说,相邻的两管总是反相运动的,流向第一、二排管子的表现最为明显,如管 1 与管 4、管 4 与管 7,表现在涡量场也是类似的.由于流体作用使得管子由于弯曲而首先要经历一段时间的流向振荡,随后横向振动的振幅增大,并且流向第三排管子的运动会变得相当混乱,如果与流体激振的频率产生共振,则会发生颤

振,处于横向管排中间的管 4、管 5、管 6,其横向位移总是滞后于其它两排管。通过比较各管的流向变量和横向变量可以发现,正对来流的第一排管子的阻力和流向位移最大,明显大于其它两排管的,而处于流向中心的第二排管子的横向位移最大,说明管束间存在着强烈的相互作用。

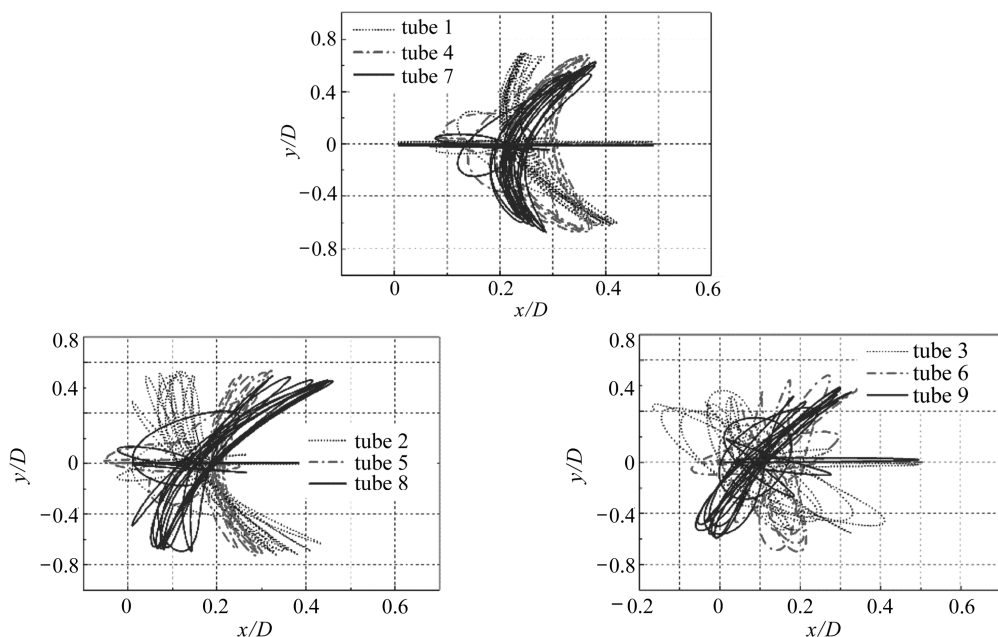


图 20 各管的运动轨迹

Fig.20 Trajectories of tubes in a bundle

## 5 结 论

本文基于双向流固耦合方法,详细研究了单根直管、两并列管、两串列管以及  $3 \times 3$  正方形排列管束的流致振动行为,主要得出了以下结论:

1) 流体诱发单管振动的主要成分集中在流体升力和阻力变化的频率附近,阻力的变化频率对阻力方向的结构响应影响较大,升力的变化频率对管的升力方向的结构响应影响较大,当流体激励频率与管的固有频率相接近时,两者发生共振,出现“频率锁定”。

2) 两并列管的升力与横向变形幅值相等、相位相反、变化频率相同、阻力相同。

3) 两串列管的升力和横向位移相差不大,有近似相同的相位和漩涡发放频率;上游管的阻力和流向振幅大于下游管的,下游管受到上游管尾流的振荡变化和涡脱落的影响。

4) 对  $3 \times 3$  正方形排列管束来说,每一排管子相邻的两管总是反相运动的;正对来流的第一排管子的阻力和流向位移最大;处于流向中心的第二排管子的横向位移最大,流向第三排管子的运动会变得相当混乱,管束间存在着强烈的相互作用。

### 参考文献 (References):

- [1] Weaver D S, Ziada S, Au-Yang M K, Chen S S, Païdoussis M P, Pettigrew M J. Flow-induced vibrations in power and process plant components—progress and prospects[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2000, **122**(3): 339-348.

- [2] Price S J. A review of theoretical models for fluidelastic instability of cylinder arrays in cross-flow[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1995, **9**(5): 463-518.
- [3] Eisinger F L, Rao M S M, Steininger D A, Haslinger K H. Numerical simulation of cross-flow-induced fluidelastic vibration of tube arrays and comparison with experimental results[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1995, **117**(1): 31-39.
- [4] Anagnostopoulos P. Numerical study of the flow past a cylinder excited transversely to the incident stream—part 1: lock-in zone, hydrodynamic forces and wake geometry[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2000, **14**(6): 819-851.
- [5] Al-Jamal H, Dalton C. Vortex induced vibrations using large eddy simulation at a moderate Reynolds number[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, **19**(1): 73-92.
- [6] Guilmineau E, Queutey P. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a circular cylinder with low mass-damping in a turbulent flow[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, **19**(4): 449-466.
- [7] Benhamadouche S, Laurence D. LES, coarse LES, and transient RANS comparisons on the flow across a tube bundle[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2003, **24**(4): 470-479.
- [8] 冯志鹏, 张毅雄, 臧峰刚, 叶献辉. 三维弹性管的涡致振动特性分析[J]. *应用数学和力学*, 2013, **34**(9): 976-985.(FENG Zhi-peng, ZHANG Yi-xiong, ZANG Feng-gang, YE Xian-hui. Analysis of vortex-induced vibration characteristics for a three dimensional flexible tube[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, **34**(9): 976-985.(in Chinese))

## Numerical Simulation of Fluid-Structure Interaction for Tube Bundles

FENG Zhi-peng, ZHANG Yi-xiong, ZANG Feng-gang

(*Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, P.R.China*)

**Abstract:** A numerical model for three-dimensional flow induced vibration was proposed. It was conducted in order to further improve the solution of fluid-structure interaction problems, occurring in the nuclear power field such as the behavior of PWR fuel rod, steam generators and other heat exchangers' tubes. A three-dimensional unsteady Navier-Stokes equation was computed with LES model. The numerical method was based on finite volume discretization large eddy simulation approach on structured grids combined with the technique of dynamic mesh. The model presented a three dimensional fully-coupled approach to solving simultaneously the fluid flow and the structure vibration, for the tube bundles in cross flows. The flow induced vibration characteristics of a single tube was first analyzed based on the FSI method. Both the dynamic response and flow characteristics were obtained. Secondly, the mutual influence of two tubes, either inline or parallel set was investigated based on the FIV numerical model for tube bundles. Finally, the flow induced vibration characteristics of 3×3 tube bundles were studied.

**Key words:** flow induced vibration; tube bundle; LES; CFD