

# 圆管绕流旋涡脱落诱导振动的数值模拟\*

赖永星<sup>1</sup> 刘敏珊<sup>2</sup> 董其伍<sup>2</sup>

(1. 郑州大学工程力学系, 郑州 450002)(2. 郑州大学化学工程学院, 郑州 450002)

**摘要** 利用计算流体力学软件 Ansys/Flotran CFD, 首先对粘性不可压缩流体的固定圆管绕流进行了数值模拟, 然后结合逐步积分法完成了同时考虑纵横两向弹性支撑圆管绕流旋涡脱落诱导振动的数值模拟, 并通过快速傅立叶变换, 得到了弹性支撑圆管和固定圆管的升力及弹性支撑圆管横向位移响应的功率谱. 通过计算结果分析, 得出了一些有价值的结论, 可供从事具有圆管绕流构件设备设计的工程技术人员参考.

**关键词** 旋涡脱落, 圆管, 数值模拟, 升力, 诱导振动

## 引言

圆管绕流问题是工程中最常见问题之一. 许多实际工程问题如高层建筑、烟囱、近海工程结构以及海底管线、架空电缆中, 经常会遇到旋涡脱落诱发的流体动力载荷和结构振动问题. 在日本近些年来发生的重水堆事故中, 多起是由于强烈的振荡导致重水堆中温度计等仪器的折断造成的. 近年来, 随着石油工业、核工业的发展, 换热器的规格急剧增大, 换热器中传热管的流体诱发振动问题日益受到重视, 作为振动源之一的旋涡脱落诱发的流体动力载荷和传热管的振动问题已成为换热器设计必须考虑的条件. 据不完全统计, 因振动损坏的换热器几乎占损坏的 30%, 可见振动已成为换热器损坏的重要因素. 由于物体的振动主要是由周期性旋涡脱落引起作用在物体上的流向和横向力造成, 而圆管的横向振动一般要比流向振动大得多, 因此目前大量研究工作都集中于横向振动问题上, 对流向振荡问题的研究还不够充分<sup>[1]</sup>. 本文利用计算流体力学软件 Ansys/Flotran CFD, 首先数值模拟粘性不可压缩流体中的固定圆管绕流旋涡的产生和演化过程, 结果与传统的卡曼旋涡分离理论趋势相同, 数值接近, 然后结合逐步积分完成了同时考虑纵横两向弹性支撑和阻尼圆管绕流旋涡脱落诱导振动的数值模拟, 并采用快速 Fourier 变换分析了固定和弹性支撑圆管的升力及位移响应. 通过计算结果分析, 得出了一些有价值的结论. 可供从事具

有圆管绕流构件设备设计的工程技术人员参考.

## 1 基本方程

### 1.1 流场的数值模拟

对不可压缩粘性流体, 在直角坐标系下, 其运动规律可用 N-S 方程来描述, 连续性方程和动量方程分别为

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

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

式中  $i, j = 1, 2$ ;  $u_1, u_2$  为流体的运动速度;  $\rho$  为流体的密度;  $\mu$  为流体的动力粘性系数;  $p$  为流体的压强. 圆管周围流场利用计算流体力学软件 Ansys/Flotran CFD 求得, 数值求解 N-S 方程时, 采用了流向迎风 (SUPG) 法. 当雷诺数  $Re > 3000$  时采用标准  $k-\epsilon$  模型.

### 1.2 圆管的运动方程

将圆管假设为支撑在弹簧和阻尼器上的刚性圆柱体, 在横掠流动产生的旋涡作用下引起振动, 其振动方程为

$$\ddot{x}_j^n + 2\delta \dot{x}_j^n + 4\pi^2 f^2 x_j^n = F_j^n / m_0 \quad (3)$$

式中  $j = 1, 2$ ; 上标  $n$  表示  $t_n = n\Delta t$  时的值;  $x_1, x_2$  表示圆管的横向和流向振动位移;  $f$  为系统固有频率;  $\delta$  为对数衰减率;  $m_0$  为包括流体附加质量的圆

管质量;  $F_1^n, F_2^n$  分别为采用计算流体力学软件 Ansys/Flotran CFD 求得在不同来流速度  $u_0$  下圆管周围流场后, 绕圆管积分求出的升力和阻力, 其表达式为

$$F_1^n = \oint (\rho_s \cos\theta + \tau_s \sin\theta) ds \quad (4)$$

$$F_2^n = \oint (\rho_s \sin\theta + \tau_s \cos\theta) ds \quad (5)$$

采用逐步积分法可计算出圆管在流体力的作用下产生的运动为

$$\ddot{x}_j^n = \frac{F_j^n - k \cdot x_j^n}{m_0} - 2\delta f \dot{x}_j^n \quad (6)$$

$$\dot{x}_j^{n+1} = \dot{x}_j^n + \ddot{x}_j^n \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$x_j^{n+1} = x_j^n + \frac{1}{2}(\dot{x}_j^n + \dot{x}_j^{n+1})\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{x}_j^n \cdot \Delta t^2 \quad (8)$$

### 1.3 圆管绕流旋涡诱导振动计算

Ansys/Flotran CFD 提供了最新功能 (ALE-CFD 分析的任意欧拉 - 拉格朗日列式), 该功能允许流体区域变形与移动, 可计算移动物体在流场中的阻尼力与弹力, 节点允许在空间移动以适应移动的物体, 用户可指定移动物体的位移与速度历史, 基于拉普拉斯平滑处理技术的网格随移. 本文利用该功能结合逐步积分法完成了弹性支撑圆管绕流旋涡脱落诱导振动的数值模拟.

首先在  $t_0$  时刻根据式 (1) 和 (2) 即利用 Ansys/Flotran CFD 软件进行圆管周围流场计算, 按照式 (4) 和 (5) 绕圆管积分求出升力和阻力, 再由式 (6), (7) 和 (8) 求出  $t_1$  时刻的位移和速度值. 然后, 再根据  $t_0$  和  $t_1$  时刻的位移和速度值在圆管上施加由  $t_0$  到  $t_1$  线性变化的位移和速度边界条件, 根据式 (1) 和 (2) 进行圆管周围流计算, 按照式 (4) 和 (5) 绕圆管积分求出升力和阻力, 再由式 (6), (7) 和 (8) 求出  $t_2$  时刻的位移和速度值. 如此重复计算即可完成圆管绕流旋涡诱导振动数值模拟. 整个过程采用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 进行.

## 2 数值模拟结果及分析

为分析高密度和低密度流体对圆管绕流旋涡诱导振动的影响, 分别研究了两种流体空气和液体水, 流体特性参数如表 1 所列. 圆管在空气和水的对数衰减率分别取为  $\delta = 0.012, \delta = 0.08$ <sup>[2,3]</sup>.

表 1 流体特性参数

Table 1 Properties of fluids

Fluid	Temperature/°C	$\rho/\text{kgm}^{-3}$	$\mu/(\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1})$
Air	0	1.29	17.9E-6
Water	20	998.20	1.005E-3

沿  $x$  方向的均匀来流绕一弹性支撑圆管流动,  $u_0$  为均匀来流的流速, 圆管的直径  $d = 0.022 \text{ m}$ , 计算区域的范围为  $0.25 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ , 上游边界距圆心  $0.125 \text{ m}$ , 下游边界距圆心  $0.375 \text{ m}$ . 在构造网格时, 充分考虑了流场速度梯度的变化. 由于圆管附近流场比较复杂, 因此在这一区域布置了较为密集的网格节点, 而在远离圆柱的区域, 则布置得较稀疏一些. 计算模型的单元数 5120 个, 节点 5284 个, 有限元网格示意图如图 1 所示. 坐标原点设在圆心. 时间步长取为  $0.001$ .

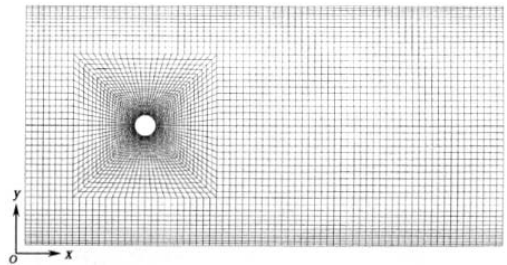


图 1 有限元网格

Fig. 1 Finite elements

图 2, 图 3 分别为固定圆管和弹性支撑圆管的升力系数  $C_L$  和阻力系数  $C_D$  随时间的变化曲线图, 图 4 为弹性支撑的圆管横向位移的时间历程. 通过快速傅立叶变换可获得升力和弹性支撑圆管横向位移的功率谱如图 5, 图 6. 图 3 至图 6 中的  $f$  表示弹性支撑圆管的自振频率.

由固定圆管和弹性支撑圆管的升力和横向位移响应的功率谱可得出旋涡脱落的频率和横向位移的主频如表 2 所列.

表 2 频率计算结果

Table 2 The result of frequency

Frequency /Hz	$v = 2 \text{ m/s water}$			$v = 5 \text{ m/s air}$		
	Static cylinder	$f = 20$	$f = 28$	Static cylinder	$f = 52$	$f = 48$
$f_v$	21.5	21.1	25.6	53.2	51.2	52.1
$f_r$	\	21.1	25.6	\	52.2	52.2, 48.8

表中  $f$  表示弹性支承的圆管的自振频率;  $f_v$  表示旋涡脱落的频率;  $f_r$  表示横向位移的主频.

根据本文计算的固定圆管旋涡脱落频率,由  $S = f_v D / u^{[4]}$  计算的斯特劳哈尔数分别为 0.236 和 0.234 与文献[4] 给出的雷诺数在  $5 \times 10^3 < Re < 10^5$  范围内斯特劳哈尔数约为 0.21 接近.

由表 2 和横向位移响应的时程图 4 可看出,弹性支承圆管的振动和绕流之间的相互作用导致旋涡脱落频率发生变化,弹性支承圆管的旋涡脱落频率基本在圆管的自振频率与固定圆管的旋涡脱落频率之间变化,表现为所谓的频率锁定.这一现象对高密度流体影响较大,使横向作用的升力振幅加大,类似于共振的现象,对于低密度流体影响较小,在自振频率偏离旋涡脱落的频率时,横向位移响应产生了拍的现象,横向位移响应大幅度减小.

由横向位移响应的时程图 4(b) 可看出,对于低密度流体,当旋涡脱落的频率与弹性支承圆管的自振频率较为接近时,其动力放大效应非常明

显.但由于升力与密度和速度的平方成正比,而空气的密度较小产生升力非常小,由此产生的静位移也非常小,即使在动力放大效应非常明显时其动力响应的最大幅值也较小.若增大流体速度,产生的静位移虽可增加,但旋涡脱落的频率也跟着大幅度增加,就会偏离自振频率,动力放大效应跟着减小,不会产生大幅值的动力响应.因此,象空气等低密度的流体,圆管绕流产生的旋涡脱落不会引起换热器传热管等刚度相对较大的圆管产生大幅值的流体诱导振动.只有刚度较小的圆管绕流问题如架空电缆,在自振频率与旋涡脱落的频率接近时,才可能产生大幅值的流体诱导振动.相反,高密度流体和弹性支承圆管的相互耦合作用较大,在自振频率与旋涡脱落的频率接近时,将会产生大幅的横向位移.在分析预测诸如换热器中传热管和海底管线等在高密度流体中圆管绕流旋涡脱落诱导振动时,应综合考虑固定圆管旋涡脱落的频率和圆管的自振频率.

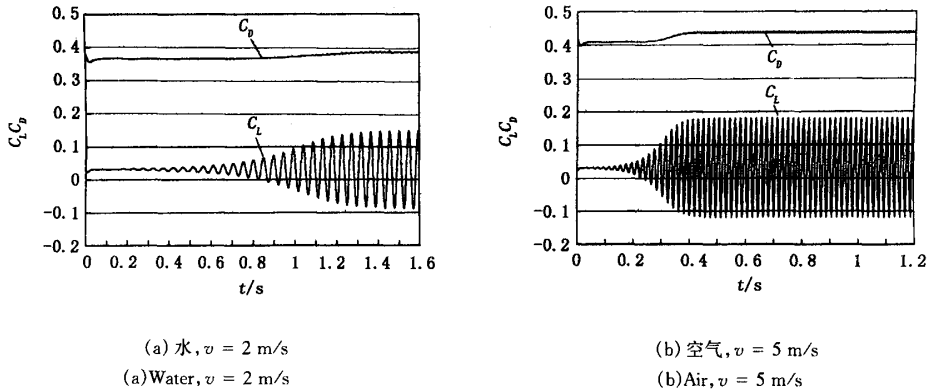


图 2 固定圆管绕流的升力、阻力系数  
Fig. 2 The lift and drag coefficient of flow past a fix circular cylinder

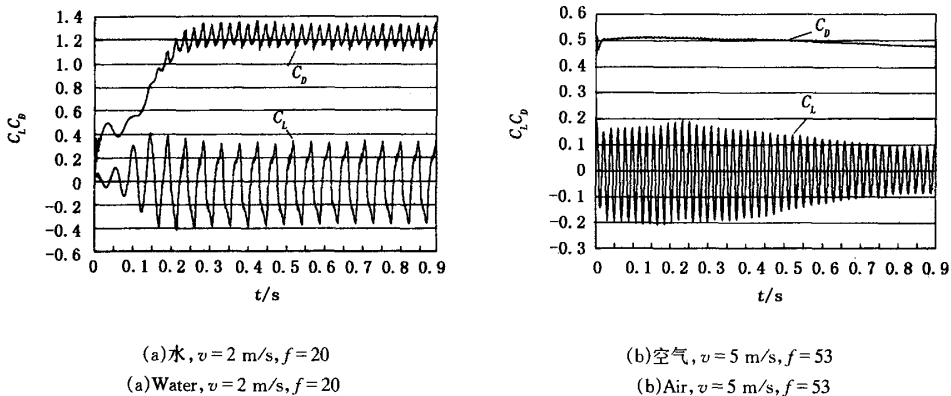


图 3 弹性支承圆管绕流的升力阻力系数  
Fig. 3 The lift and drag coefficient of flow past a circular cylinder supported by elastic spring

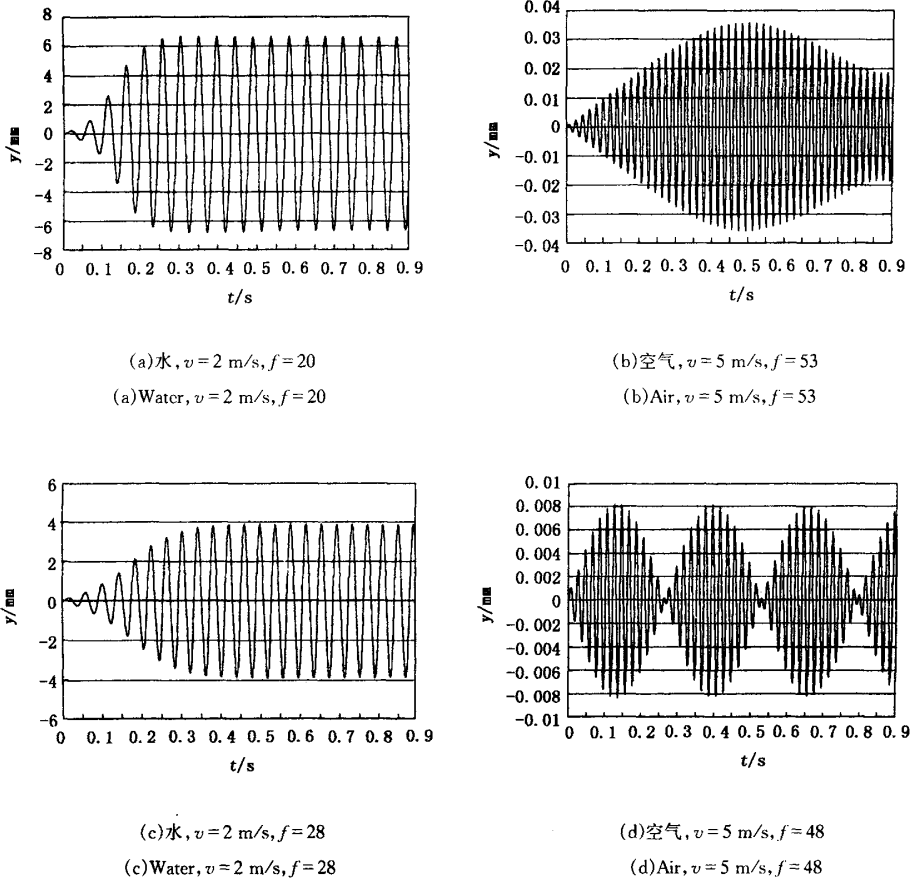
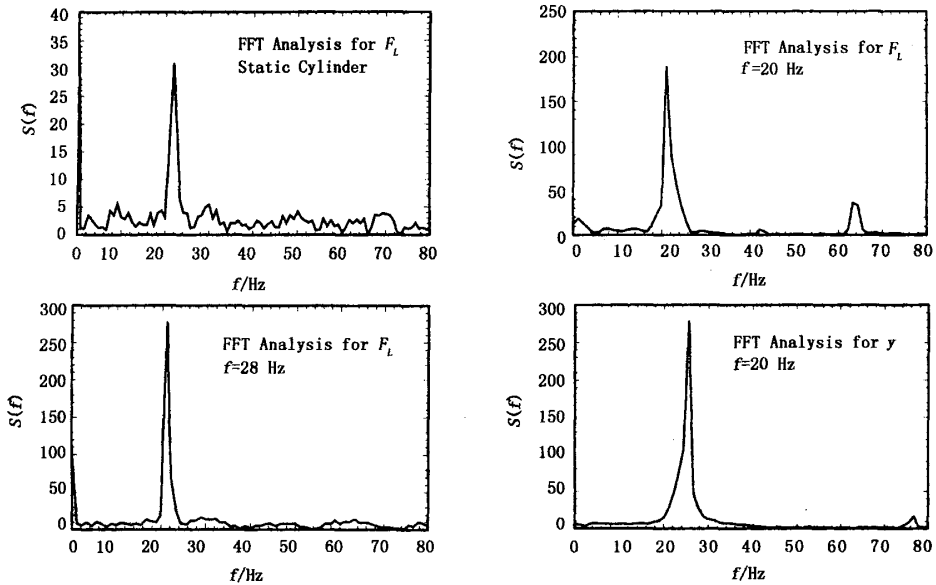
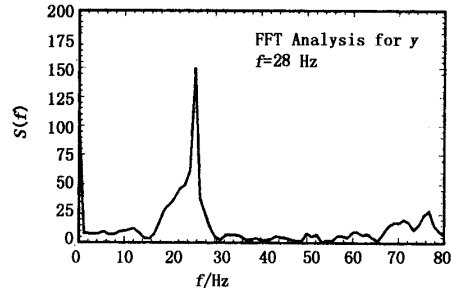
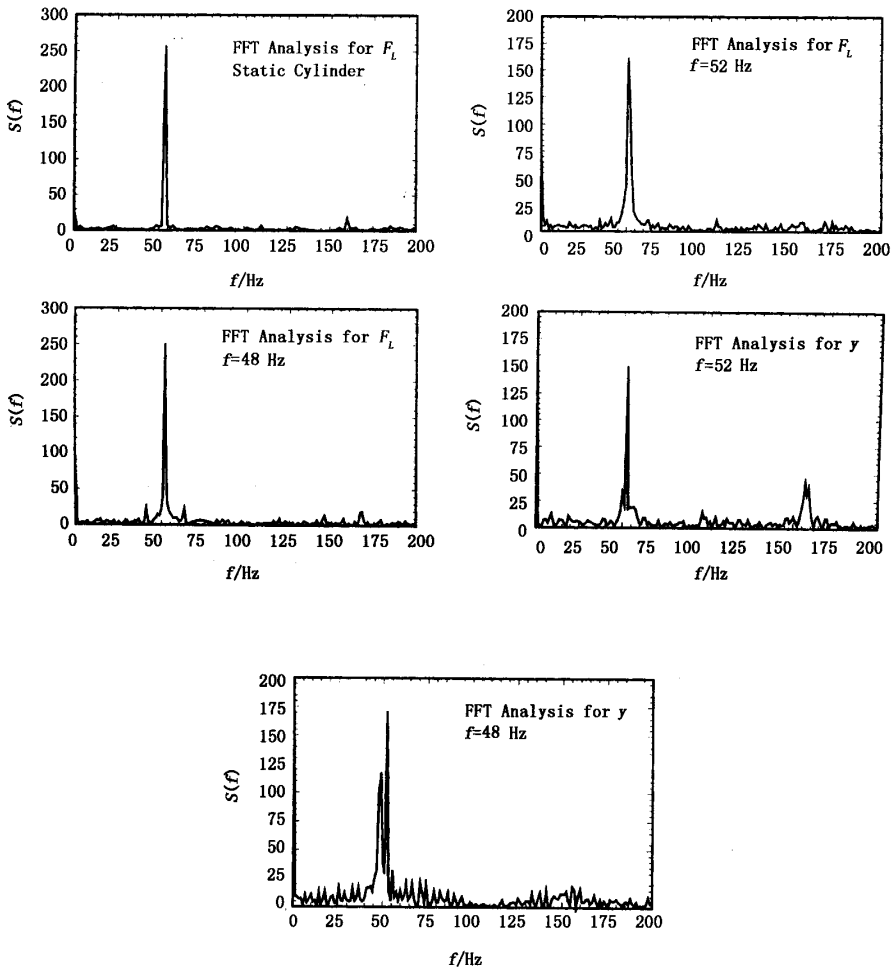


图 4 横向位移的时间历程

Fig. 4 The transverse displacement response



图5 水,  $v=2$  m/s, 升力和横向位移的功率谱Fig. 5 Water,  $v=2$  m/s, the power spectrum of the lift force and the transverse displacement图6 空气,  $v=5$  m/s, 升力和横向位移的功率谱Fig. 6 Air,  $v=5$  m/s, the power spectrum of the lift force and the transverse displacement

### 3 结论

1) 象空气等低密度的流体,圆管绕流产生的旋涡脱落不会引起换热器传热管等刚度相对较大

的圆管产生大幅值的流体诱导振动. 只有刚度较小的圆管绕流问题如架空电缆等,在自振频率与旋涡脱落频率接近时,才可能产生大幅值的流体诱导振动.

2) 弹性支承圆管的振动和流体绕流之间的相互作用,导致旋涡脱落频率发生变化,旋涡脱落频率基本在圆管的自振频率与固定圆管的旋涡脱落频率之间变化,表现为所谓的频率锁定.这一现象对高密度流体影响较大,使横向作用的升力振幅加大,类似于共振的现象.在分析预测诸如换热器中传热管和海底管线等在高密度流体中圆管绕流旋涡脱落诱导振动时,应综合考虑固定圆管旋涡脱落的频率和圆管的自振频率.

所得结论,可供从事具有圆管绕流构件设备设计的工程技术人员参考.

### 参 考 文 献

1 刘松,符松.纵向受迫振荡圆柱绕流问题的数值模拟.计算物理,2001,18(2):157~161(Liu Song,Fu Song.Com-

putational study of unsteady viscous flow around an in-line oscillating circular cylinder in a uniform flow. *Chinese Journal of Computational Physics*,2001,18(2):157~161 (in Chinese))

- 2 钱颂文,岑汉钊,曾文明.换热器流体诱导振动——机理、疲劳、磨损、设计.北京:烃加工出版社,1989.24~25(Qian Songwen,Cen Hanzhao,Zeng Wenming. Fluid induced vibration in heat exchanger-Mechanisms, Fatigue, Fretting, Design. Beijing: Hydrocarbon Process Press, 1989:24~25(in Chinese))
- 3 聂清得,郭宝玉,张明贤.换热器管束的流体弹性不稳定性.化工机械,1992,19(2):63~70(Nie Qingde, Guo Baoyu,Zhang Mingxian. Fluidelastic instability in tube arrays of heat exchangers. *Chemical Engineering & Machinery*,1992,19(2):63~70(in Chinese))
- 4 程林.换热器内流体诱导振动.北京:科学出版社,2001(Cheng Lin. Fluid induced vibration in heat exchanger. Beijing: Science Press,2001(in Chinese))

## NUMERICAL SIMULATION OF INDUCED VIBRATION FOR VISCOUS FLOW PAST A CIRCULAR CYLINDER\*

Lai Yongxing<sup>1</sup> Liu Minshan<sup>2</sup> Dong Qiwu<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

(2. College of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** First, a uniform viscous and incompressible flow past a circular cylinder was simulated by using the Ansys/Flotran CFD software, then the induced vibration for a viscous flow past a circular cylinder supported by elastic spring and dash pot was simulated with the Ansys/Flotran CFD software and stepwise integration. The lift forces and transverse responses were analyzed with the fast fourier transform(FFT). By analyzing the calculation results, some useful conclusions were given, which may be used in the designing of equipments with viscous flow past a circular cylinder supported by elastic spring and dashpot.

**Key words** vortex shedding, circular cylinder, simulation, lift force, induced vibration