

# 圆柱管排流体诱导振动及换热特性数值分析

宿艳彩, 葛培琪, 闫 柯

(山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

**摘 要:** 基于 Workbench 和 CFX 模拟技术对流体诱导不同间距( $L=1.5d$ 、 $3.5d$ 、 $4.5d$  和  $5d$ ) 顺排和叉排圆柱振动及换热特性进行了数值分析。研究表明: 流体诱导顺排圆柱振动, 其圆柱间距存在一个临界值  $L=3.5d$ , 当间距小于  $3.5d$ , 随着间距的减小, 下游圆柱振动的幅值和频率减小; 当间距大于  $3.5d$ , 下游圆柱的振动频率不再随着间距的增大而变化; 下游圆柱处于上游圆柱的尾流涡尾部时, 振动幅值较小, 但圆柱侧面平均换热效果较佳。同工况同间距下, 流体诱导顺排圆柱下游圆柱的振动幅值和频率大于叉排圆柱下游圆柱的振动幅值。当  $L>3.5d$  时, 流体诱导顺排圆柱下游圆柱的换热效果优于叉排圆柱下游圆柱的换热效果。

**关 键 词:** 顺排圆柱; 叉排圆柱; 涡激振动; 振动换热

中图分类号: TK124 文献标识码: A

## 引 言

在一定参数范围内, 换热壁面的振动能够强化传热<sup>[1~5]</sup>, 但在常规的换热器内的流体诱导振动会导致剧烈的噪声及元件的损坏, 所以在较长一段时间内, 对振动的研究多以防止为目的, 而忽略其有利的一面。近年来, 学者们开始利用流体诱导振动来强化换热, 并取得了较为理想的效果。文献[6~7]对其研发的诱导振动微翅散热器进行传热实验研究, 在相同的空气流速下比较微翅散热器和平板散热器的散热效率, 产生诱导振动的微翅散热器可以加强冷却换热效率 5.4%~11.5%。文献[8~9]对新型的弹性管束换热器进行了传热与振动实验研究, 其换热效果随诱导振动频率和振幅的增加而显著增大。弹性管束换热器和微翅散热器的设计都能够有效地利用流体诱导振动的积极方面, 其既能保证换热元件在一定范围内安全振动, 同时又能一定程度上利用流体运动所激发的自由振动来强化传热。

为了更有效的利用流体诱导振动技术提高弹性管束的换热率, 本研究通过 Workbench 建模结合 CFX 流体分析技术, 对串联双圆柱及叉排三圆柱下游圆柱流体诱导振动及换热特性进行了分析, 为弹性管束的结构设计、流体诱导振动控制等提供一定的参考。

## 1 计算模型及参数

### 1.1 计算模型

根据文献[10~12], 二维流场中横向弹性支撑, 纵向固定的圆柱在流体的绕流下产生横向振动的计算模型, 如图 1~图 2 所示。图 1 为圆柱间距为  $L$  时, 串联双圆柱流体诱导振动换热简图; 图 2 为圆柱间距为  $L$ , 叉排距离为  $0.9d$  时, 叉排三圆柱流体诱导振动换热简图。流体区的设置及计算在 CFX 中完成, 其尺寸为  $200\text{ mm} \times 280\text{ mm}$  的二维流场, 流场左侧设为速度入口, 来流为沿  $X$  轴正向的稳态流, 右侧为溢流出口, 上下为绝热固定壁面, 圆柱壁面设置为流固双向耦合壁面, 网格划分如图 3(a) 所示, 共计 12125 个单元, 24848 个节点。流固双向耦合中固体圆柱部分的受力变形计算及边界设置在 Workbench 中完成, 圆柱前后圆面沿  $Y$  轴设置自由位移约束, 沿  $X$  轴设置位移约束为零, 圆柱侧面设置为流固双向耦合边界及弹性支撑边界。圆柱直径  $d=0.01\text{ m}$ , 网格划分如图 3(b) 所示, 每个圆柱 210 个单元, 1292 个节点。流体域和固体域的网格通过不断加密, 试算后, 使得数值计算结果不再随着网格的加密而变化。以水为流动介质, 并设为常物性。利用  $k-\varepsilon$  湍流计算模型, 其湍流动能方程及耗散率方程如下。

湍流动能方程:

收稿日期: 2011-11-24; 修订日期: 2012-01-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划) 基金资助项目(2007CB206900); 山东大学自主创新基金资助项目(31360070613218)

作者简介: 宿艳彩(1978-), 女, 山东潍坊人, 山东大学博士研究生。

$$\frac{dk}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu_l}{\sigma_k} + \mu_l \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\mu_l}{\rho} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial y} - \varepsilon \quad (1)$$

湍流动能耗散率方程:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon} + \mu_l \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \mu_l}{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \times \frac{\partial u}{\partial y} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中:  $C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$ —湍流模型参数;  $\mu_l$  和  $\mu_l$ —流体在层流和湍流条件下的动力粘度;  $k$ —湍流动能;  $\varepsilon$ —湍流动能耗散率。

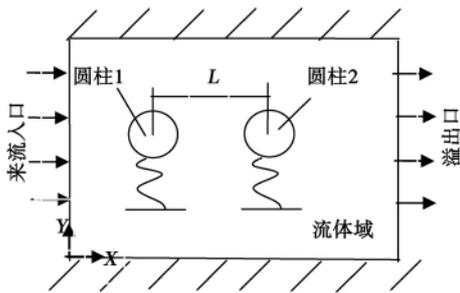


图 1 流体诱导串联双圆柱振动及换热简图  
Fig. 1 Sketch showing the tandem bi-cylinder vibration and heat transfer induced by fluids

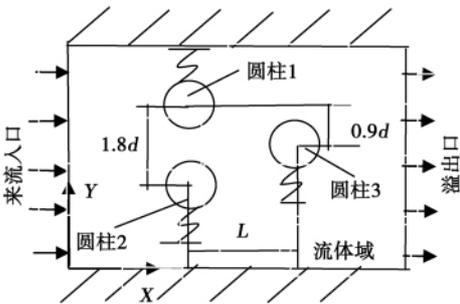


图 2 流体诱导叉排三圆柱振动及换热简图  
Fig. 2 Sketch showing the staggered tri-cylinder vibration and heat transfer induced by fluids

### 1.2 计算参数

在整个计算过程中,具体模拟参数设置如表 1 所示。

## 2 计算结果分析

### 2.1 模拟结果验证

为了验证数值模拟方法及结果的可靠性,首先对与文献 [13] 相同工况下流体诱导单圆柱振动做

了的数值模拟,并与实验结果进行比较,如图 4 所示。从图上可以看出,按以上数值模型计算的结果与实验值吻合较好,最大误差为 13.4%。通过验证,表明本研究在湍流模型的参数、网格处理的可行性及数值计算方法的可靠性。

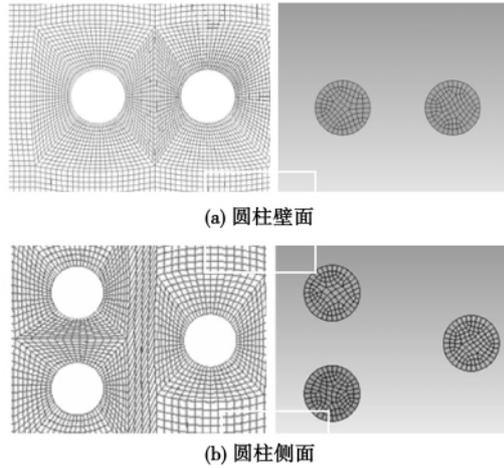


图 3 网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mesh division

表 1 计算参数

Tab. 1 Calculation parameters

|                            | 参数范围             |
|----------------------------|------------------|
| 圆柱弹性支持刚度/ $N \cdot m^{-1}$ | 0.038( $k_1$ )   |
| 刚体阻尼系数                     | 0.001( $\beta$ ) |
| 圆柱振动方向                     | 横向( $Y$ )        |
| 来流入口温度 $T_1$ /K            | 340              |
| 圆柱温度 $T_2$ /K              | 恒温 360           |
| 来流介质                       | 水                |
| 来流速度/ $m \cdot s^{-1}$     | 0.5              |
| 圆柱密度/ $kg \cdot m^{-3}$    | 3204             |

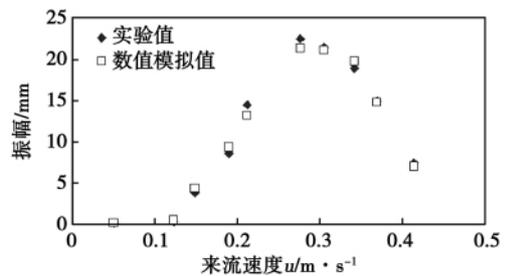


图 4 数值结果与实验结果比较

Fig. 4 Comparison of the numerical calculation results with the test ones

### 2.2 流体诱导振动特性分析

#### 2.2.1 叉排三圆柱振动特性分析

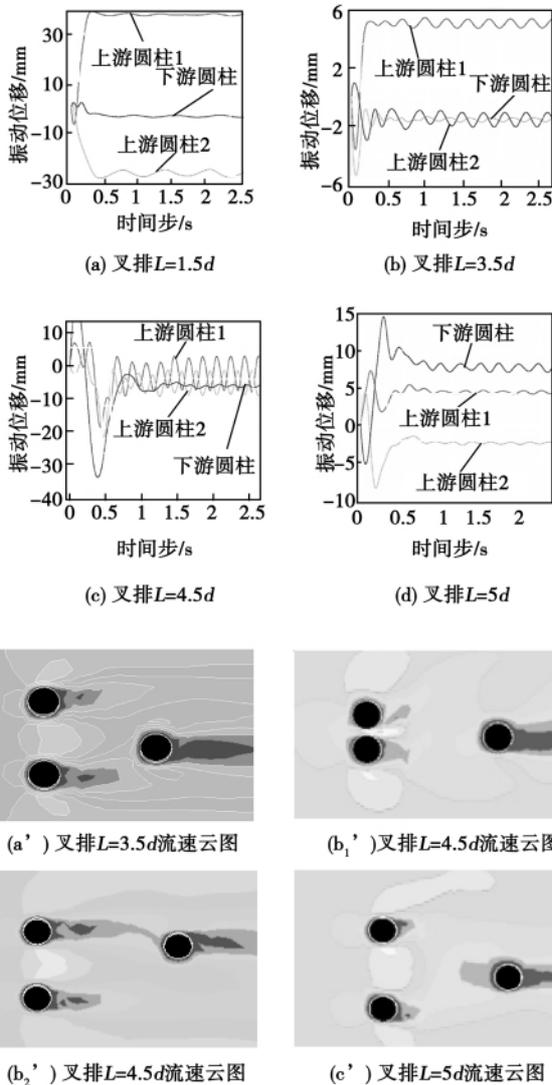


图5 叉排三圆柱流体诱导振动位移时程及流速云图

Fig. 5 Atlas showing staggered tri-cylinder fluid-induced vibration displacement time-travelling distances and flow velocities

对叉排三圆柱在不同间距下,流体诱导振动特性进行了数值分析。图5为叉排三圆柱的流体诱导振动振幅和流速云图。其中5(a)~5(d)为不同间距叉排三圆柱的流体诱导振动位移相应时程图;5(a')~5(c')为叉排三圆柱的流体诱导振动流速云图。由流体诱导叉排三圆柱振动的计算结果可知,当L值很小时(如 $L = 1.5d$ )流体冲刷下游圆柱,由于圆柱壁面的反作用力,从而部分流体回流,对上

游圆柱形成较大的流体力,使得上游双圆柱远离彼此很大距离后在新的平衡点振动,此时下游圆柱不受上游圆柱尾流的影响,下游圆柱振幅和振动频率比较低。随着间距L的增大,下游圆柱对上游圆柱流体力的影响减小;当 $L = 3.5d$ 时,如图5(b)、5(a')所示,由于下游圆柱的一部分处在上游圆柱2的尾流中,尾流涡脱落后激励下游圆柱振动,此时下游圆柱的振幅有所增加。而 $L = 4.5d$ 时,当上游圆柱振动到两圆柱最近距离时,上游两圆柱间形成射流,但是因下游圆柱离射流点较远,下游圆柱受射流的影响不大,如图5(b');上游两圆柱以频率相等,相位相反而振幅不同的振动形式振动而成的两例尾流共同作用于下游圆柱上,两例尾流涡形成的方向相反的流体力在下游圆柱上叠加后,使得下游圆柱的振动幅值变小。当 $L = 5d$ 时,如图5(d)、5(c')所示,由于叉排三圆柱的相互作用,下游圆柱处于上游圆柱1尾流中,从而形成尾流涡激振动,此时下游圆柱的振幅也相应的增大。相应的叉排三圆柱下游圆柱振动位移相应曲线进行傅里叶变化,得到各个间距下下游圆柱的振动频率,相应的结果如图7所示。当 $L = 2.5d$ 、 $L = 4d$ 时,下游圆柱为多频谐波控制振动,其合成工作频率有所下降。

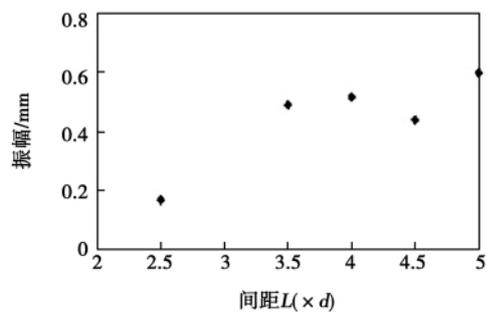


图6 叉排三圆柱下游圆柱的振幅随间距L的变化

Fig. 6 Change of staggered tri-cylinder vibration amplitudes of the downstream cylinder with the spacing L

#### 2.2.2 串联双圆柱振动特性分析

对串联双圆柱在不同间距下,流体诱导振动特性进行了数值研究。图8为串联双圆柱的流体诱导振动位移相应时程和流速云图。其中8(a)到8(d)

为串联双圆柱的流体诱导振动位移相应时程图; 8(a')到8(d')为串联双圆柱的流体诱导振动流速时刻云图。当串联双圆柱的间距比较小时,由于双圆柱间流体力的作用,稳定后两圆柱的平衡位置会错开一段距离,如图8(a)和图8(a')所示,使得上游圆柱的尾流对下游圆柱的影响相当微弱,从而下游圆柱的振动幅值不大。随着间距 $L$ 的增加,双圆柱之间的流体力的作用减小,上游圆柱的尾流可以完全包裹住下游圆柱,上游圆柱流体的附面层没有在两圆柱间脱落而是直接附到下游圆柱上,使得下游圆柱的升力增大,而阻力降低,从而增大下游圆柱的振动幅值,如图8(b)和8(b')所示。随着间距的增大,当下游圆柱处于上游圆柱后的涡区尾部时,此时阻力相对增加,升力降低,从而下游圆柱的振动幅值也相应减小,如图8(c)和8(c')所示。当间距再增大,下游圆柱刚好处于上游圆柱后的涡区外部,尾流涡脱落后打在下游圆柱上而激励下游圆柱振动,此时下游圆柱的振幅也随之增大(如图8(d)和图8(d')所示)。相应的串联双圆柱下游圆柱振幅和振动频率随间距 $L$ 的变化曲线如图9~图10所示。由图10可知,研究范围内串联双圆柱间距存在临界值 $L=3.5d$ ,当间距小于 $3.5d$ 时,下游圆柱的振动频率随着间距的增大而增大,当间距大于 $3.5d$ 时,下游圆柱的振动频率不再随着间距的增大而变化。

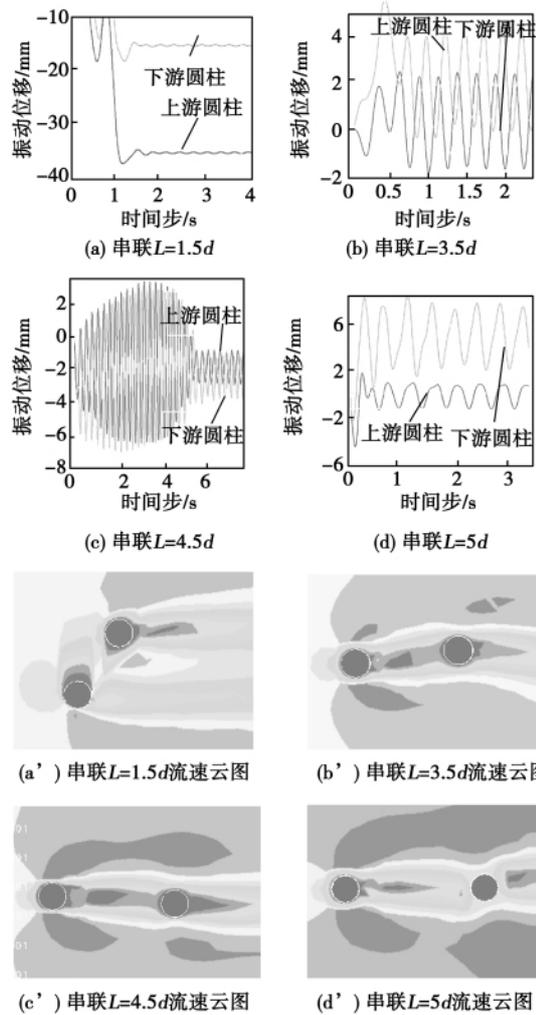


图 8 串联双圆柱流体诱导振动位移相应时程及流速云图

Fig. 8 Atlas showing tandem bi-cylinder fluid-induced vibration displacement corresponding time-travelling distances and flow velocities

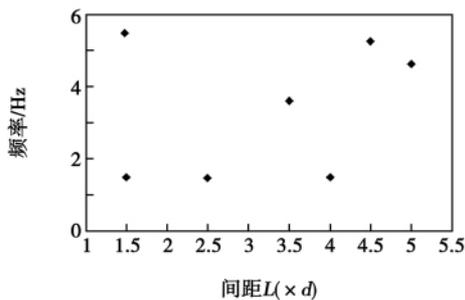


图 7 叉排三圆柱下游圆柱振动频率随间距 $L$ 的变化

Fig. 7 Change of staggered tri-cylinder vibration frequencies of the downstream cylinder with the spacing  $L$

通过图6、图7、图9及图10可知,同工况同间距下,流体诱导串联双圆柱下游圆柱的振动幅值及频率大于叉排三圆柱下游圆柱的振动幅值及频率。

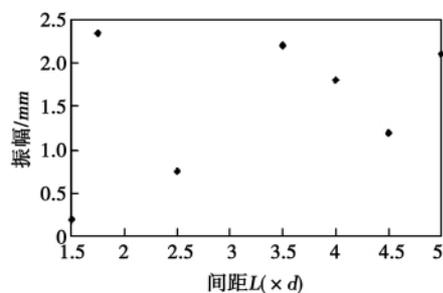


图 9 串联双圆柱下游圆柱的振幅随间距 $L$ 的变化  
Fig. 9 Change of tandem bi-cylinder vibration amplitudes of the downstream cylinder with the spacing  $L$

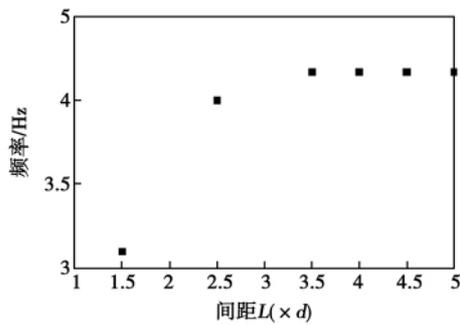


图 10 串联双圆柱下游圆柱的振动频率随间距  $L$  的变化

Fig. 10 Change of tandem bi-cylinder vibration frequencies of the downstream cylinder with the spacing  $L$

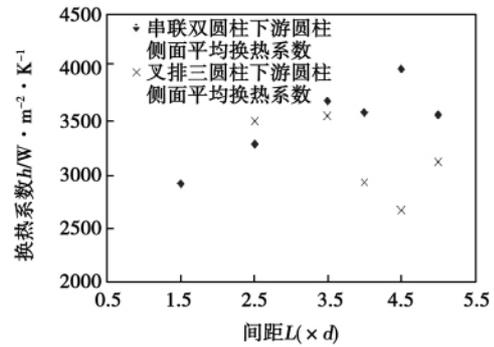


图 11 串联双圆柱及叉排三圆柱流体诱导下游圆柱侧面平均换热系数随间距  $L$  的变化

Fig. 11 Change of tandem bi-cylinder and staggered tri-cylinder surface area-averaged heat exchange coefficient of the downstream cylinder with the spacing  $L$

### 2.3 流体诱导串联双圆柱及叉排三圆柱振动换热特性分析

对图 6 和图 9 同工况下串联双圆柱及叉排三圆柱流体诱导振动换热特性进行了数值研究,结果如图 11 所示。结果表明,叉排三圆柱下游圆柱在间距  $L=3.5 d$  时的换热效果最好,原因是下游圆柱处于上游圆柱 2 的部分尾流涡区附近,尾流激励下游圆柱以较大的振幅和频率振动,从而使得下游圆柱周围流体湍流度增加,减薄了温度边界层,增加了圆柱壁面的圆柱侧面平均换热系数。而后随着间距的增大,上游圆柱的尾流对下游圆柱的影响变小,下游圆柱的振动幅值和频率下降,下游圆柱周围流体的湍流度降低,从而下游圆柱的圆柱侧面平均壁面换热系数也随之变小。当  $L=5 d$  时,下游圆柱的振动幅值和频率增大,增加了其周围流体的湍流度而增大下游圆柱的面均换热系数。 $L < 4.5 d$  时,流体诱导串联双圆柱振动圆柱侧面平均换热系数的变化与其振动的变化趋势相同,因上游圆柱尾流涡激起串联双圆柱下游圆柱振动而增加了圆柱周围流场的湍流度,从而增大了圆柱侧面平均换热系数。当  $L=4.5 d$  时,上游圆柱的形成的尾流涡即将在双圆柱间脱落,此时下游圆柱的振幅有所降低,但是由于尾流涡的一部分冲刷下游圆柱的一侧,提高了下游圆柱周围流场与温度梯度场平均的协同性,从而增大了下游圆柱的圆柱侧面平均换热系数。 $L > 3.5 d$ ,串联双圆柱下游圆柱的圆柱侧面平均换热系数大于同工况下叉排三圆柱下游圆柱的圆柱侧面平均换热系数。

### 3 结 论

(1) 在本研究范围内,流体诱导串联双圆柱振动存在一个临界间距值  $L=3.5 d$ ,当间距小于  $L$ ,随着间距的减小,流体诱导下游圆柱振动的幅值和频率减小;当间距大于  $L$ ,流体诱导下游圆柱的振动频率不再随着间距的增大而变化。下游圆柱处于上游圆柱的尾流涡尾部时,振动幅值较小,但圆柱侧面平均换热效果最佳。

(2) 同工况同间距下,流体诱导串联双圆柱下游圆柱的振动幅值和频率大于叉排三圆柱下游圆柱的振动幅值。

(3) 当  $L > 3.5 d$  时,流体诱导串联双圆柱下游圆柱的换热效果优于叉排三圆柱下游圆柱的换热效果。

### 参考文献:

[1] Lemlich R. Effect of vibration on natural convective heat transfer [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1955, 47 ( 6 ): 1175 - 1181.

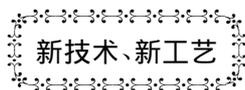
[2] Deaver F K, Penney W R, Jefferson T B. Heat transfer from an oscillating horizontal wire to water [J]. J Heat Transfer, 1962, 84: 251 - 256.

[3] Penney W R, Jefferson T B. Heat transfer from an oscillating horizontal wire to water and ethylene glycol [J]. J Heat Transfer, 1966, 88: 359 - 366.

[4] 冷学礼. 振动圆管外强化传热机理及污垢生长特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.

- LENG Xue-Li. Study of the intensified heat transfer mechanism and foul growth characteristics outside a vibration round pipe [D]. Jinan: Shandong University 2007. .
- [5] 姜波,田茂诚,冷学礼,等. 低频振动管外流动与传热特性研究[J]. 工程热物理报 2009, 30(5): 811-813.  
JIANG Bo, TIAN Mao-Cheng, LENG Xue-Li, et al. Research of flow and heat transfer characteristics outside a low-frequency vibration tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(5): 811-813.
- [6] Jeung Sang Go, Sung Jin Kim. Heat transfer enhancement using flow-induced vibration of a microfin array [J]. Sensors and Actuators Physical 2001, 90(3): 232-239.
- [7] Jeung Sang Go. Design of a microfin array heat sink using flow-induced vibration to enhance the heat transfer in the laminar flow regime [J]. Sensors and Actuators A: physical 2003, 105(2): 201-210.
- [8] 程林,田茂诚,张冠敏,等. 流体诱导振动复合强化传热的实验研究[J]. 工程热物理学报 2002, 23(4): 485-487.  
CHENG Lin, TIAN Mao-Cheng, ZHANG Guan-Min, et al. Experimental study of fluid-induced vibration complex intensified heat transfer [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2002, 23(4): 485-487.
- [9] 田茂诚,程林,林颐清,等. 管外水流诱导管束振动强化传热试验研究[J]. 工程热物理学报 2002, 23(1): 63-66.  
TIAN Mao-Cheng, CHENG Lin, LIN Yi-Qing, et al. Experimental investigation of the water flow induced tube bundle vibration intensified heat transfer [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(1): 63-66.
- [10] 方平治,顾明. 圆柱两自由度涡激振动的数值模拟研究[J]. 同济大学学报 2008, 36(3): 295-298.  
FANG Ping-zhi, GU Ming. Numerical simulation study of the vortex-excited vibration of a round cylinder in two degrees of freedom [J]. Journal of Tongji University (natural science edition) 2008, 36(3): 295-298.
- [11] 方平治,顾明,谈建国. 典型二维柱体涡激振动的数值模拟研究[J]. 同济大学学报 2009, 37(7): 862-866.  
FANG Ping-zhi, GU Ming, TAN Jian-guo. Numerical simulation study of a typical 2-dimensional pillar vortex-excited vibration [J]. Journal of Tongji University (natural science edition) 2009, 37(7): 862-866.
- [12] 方平治,顾明. 高雷诺数条件下二维方柱涡激振动的数值模拟. 同济大学学报 2008, 36(2): 161-165.  
FANG Ping-zhi, GU Ming. Numerical simulation of a 2-dimensional square pillar vortex-excited vibration at a high Reynolds number [J]. Journal of Tongji University (natural science edition) 2008, 36(2): 161-165.
- [13] 杨兵,高福平,吴应湘. 单向水流作用下近壁管道横向涡激振动实验研究[J]. 中国海上油气 2006, 18(1): 52-57.  
YANG Bing, GAO FU-ping, WU Ying-xiang. Experimental study of a lateral vortex-excited vibration of a pipeline nearing a wall under the action of a single direction water flow [J]. China Offshore Oil and Gas 2006, 18(1): 52-57.

(丛敏 编辑)



## 近零排放 IGCC 装置的启动

据《Gas Turbine World》2012年3-4月刊报道,GreenGen Power 绿色发电有限公司宣布了位于天津市滨海新区天津港工业园的IGCC(整体煤气化联合循环)装置气化器已成功启动。

这是中国首座近零排放电站,采用了HCERI(华能清洁能源研究所)的气化技术。

在供煤情况下,气化器稳定地工作,持续18h,达到60%生产率和2.2MPa反应压力。在此试验期间,测定了6000多个试验点。

2012年6月全部试验计划完成以后,天津IGCC项目将开始投入使用,供电250MW电力给电网。

预计每年将生产1470GW电力,这些电力将卖给华北电网有限公司,使用220kV中继输电线输送到现有工业园的变电所。

这将是首个IGCC清洁煤发电项目,使用现有最有效和污染最小的技术。

(吉桂明 摘译)

bility analytic programme presented was a combined cycle unit model applicable for the stability analysis of an electric power system on the basis of an analysis of the mathematical model for conventional combined cycle units. The authors have applied the genetic algorithm in the model parameter discrimination process and developed a software for discriminating a model for combined cycle units based on Delphi platform. The application cases show that the simulation results by using the model are in agreement with the actually measured signals, proving that the model under discussion and the discrimination algorithm are effective, thus laying a foundation for subsequent primary frequency modulation and dynamic characteristics analysis of a combined cycle unit. **Key words:** combined cycle unit, genetic algorithm, parameter discrimination, Delphi

圆柱管排流体诱导振动及换热特性数值分析 = **Numerical Analysis of the Cylindrical Tube Bank Fluid-induced Vibration and Heat Exchange Characteristics** [刊, 汉] / SU Yan-cai, GE Pei-qi, YAN Ke ( Education Ministry Key Laboratory on High Efficiency and Clean Manufacturing, College of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27 ( 5) . - 554 ~ 559

Based on the Workbench and CFX simulation technology, numerically analyzed were the fluid-induced lined and staggered cylindrical tube vibration at various intervals and heat exchange characteristics. The research results show that within the range of the study, the fluid induces the lined cylindrical tube vibration and there exists a critical value of the cylindrical tube interval  $L_1 = 3.5 d$ . When the interval is less than  $L_1$ , the downstream cylindrical tube vibration amplitude and frequency will decrease with a decrease of the interval. When the interval is bigger than  $L_1$ , the downstream cylindrical tube vibration frequency will no longer change with an increase of the interval. When the downstream cylindrical tube is located in the tail portion of the wake vortex caused by the upstream cylindrical tube, the vibration amplitude is relatively small and the area-averaged heat exchange effectiveness is relatively good. Under a same operating condition and at an identical interval, the fluid-induced downstream lined cylindrical tube vibration amplitude and frequency are bigger than the staggered cylindrical tube vibration amplitude and frequency. In a certain range of the interval, the heat exchange effectiveness of the fluid-induced downstream lined cylindrical tubes is superior to that of the staggered ones. **Key words:** cylindrical tubes in a line arrangement, cylindrical tubes in a staggered arrangement, vortex-excited vibration, vibration-based heat exchange

循环流化床外置换热器冷态实验研究 = **Cold-state Experimental Study of a CFB ( Circulating Fluidized Bed) Externally-installed Heat Exchanger** [刊, 汉] / MU Xiao-zhe, SONG Guo-liang, SUN Yun-kai, LU Qing-