

DOI: 10.7652/xjtuxb201509005

换热器内弹性管束流体组合 诱导振动响应的数值分析

季家东¹, 葛培琪^{1,2}, 毕文波¹

(1. 山东大学机械工程学院, 250061, 济南; 2. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 250061, 济南)

摘要: 为了探讨换热器内弹性管束在流体诱导下的振动特性,采用流固耦合的弱耦合法,研究了弹性管束在不同流速的壳程和管程两场流体组合诱导下的振动响应,并对比分析了壳程流体和管程流体对弹性管束振动响应的影响。研究表明:当壳程和管程流速一定时,弹性管束两监测点各方向的振动主频、谐频大小一致,且振动主要体现为面内振动。壳程流速较低时,监测点沿壳程流速方向的位移曲线存在明显的二倍谐频。壳程流速变化对管束振动响应的影响较大,管程流速变化对管束振动响应的影响较小,说明弹性管束的振动主要由壳程流体引起。由于流体的冲击和管束重力的影响,当壳程流速较低时,管束沿壳程流速方向的振动平衡位置较低,随着流速的增加,管束沿壳程流速方向的振动平衡位置逐渐上移。

关键词: 弹性管束;换热器;流固耦合;流体诱导振动

中图分类号: TH123;TK172 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)09-0024-06

Numerical Analysis on the Combined Flow Induced Vibration Response of Elastic Tube Bundle in Heat Exchanger

JI Jiadong¹, GE Peiqi^{1,2}, BI Wenbo¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture at Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The vibration characteristics of the elastic tube bundle in heat exchanger, under the combined induction of shell-side and tube-side cross flows at different inlet water velocities are studied using weak coupling method of fluid-structure interaction. And the influences of shell-side and tube-side cross flows on the vibration responses of the elastic tube bundle are also analyzed comparatively. Numerical results show that the flow-induced dominant and harmonic frequency vibration frequencies, at the two monitor points of the elastic tube bundle and under the same water velocity, are uniform in all directions; and the flow-induced vibration is mainly an in-plane vibration. There is an obvious second harmonic frequency in the shell-side water flow direction at the two monitor points when the water velocity is relatively low. Compared with the change of the shell-side water velocity, the variation of the tube-side inlet flow velocity has less effect on the vibration response. It shows that the vibration is mainly induced by the shell-side cross flow. Furthermore, the vibration balance position of the elastic tube bundle in shell-side water flow direction is also low when the velocity is low, due to the influences of the gravity of

tube bundle and the impact force of fluid; and the vibration balance position gradually moves up with the increase of the shell-side water velocity.

Keywords: elastic tube bundle; heat exchanger; fluid-structure interaction; flow-induced vibration

弹性管束换热器通过壳、管程两场流体的组合诱导引起内部弹性管束的振动,从而实现强化传热^[1-5]。然而,这种流体诱导而引起的弹性管束振动会导致内部管束的疲劳破坏,影响换热器的使用寿命。弹性管束换热器的设计应遵循这样一条主线:在满足强化传热的参数范围内,对流体诱导弹性管束的振动进行合理诱发和适当控制,同时兼顾管束的疲劳寿命,确保在强化传热的同时不发生疲劳破坏。因此,对实际运行条件下管束振动的合理诱发成为弹性管束换热器设计的关键^[6]。由于管束结构、壳程管程流场和换热器工作条件的复杂性,现阶段关于弹性管束流体诱导振动的研究大多是实验研究,具有较大的局限性,因此关于壳、管程两场流体组合诱导下弹性管束振动响应的分析,对研究强化传热机理、管束结构优化以及实现振动的有效控制等都具有重要意义。

为了诱发弹性管束的振动,姜波在文献[1-2]提出的弹性管束基础上进行了适当改进,设计了一种电机驱动的管程流体诱导脉动装置,建立了含管程脉动装置的恒热流传热试验台,并对改进型弹性管束的管外传热特性进行了实验研究^[7]。研究表明,管内流体介质对弹性管束的振动特性影响较大,振动特性增强使换热特性增强,在所讨论的参数范围内弹性管束的管外平均表面传热系数可以达到固定管束的3倍以上。闫柯等依据弹性管束的工作原理,提出了一种新型空间锥螺旋弹性管束,并实验测试了该管束在一定壳程流速范围内的纵向振动频率^[8-9]。研究表明,管束的工作模态频率随流速的增加而降低,在一定流速范围内,管束振幅增长较为缓慢,超过一定流速时,管束的振幅随着流速的增加迅速增大。此外,宿艳彩对单排弹性管束在壳程流体诱导下的振动响应进行了实验测试,得到了不同壳程流速条件下单排弹性管束不锈钢连接体的振动频率^[10]。研究表明,壳程流速对不锈钢连接体振动频率的影响较大,且低速流体诱导下弹性管束的振动存在谐频。

本文基于流固耦合问题的弱耦合法,采用通用CFD分析软件CFX和ANSYS Workbench软件的瞬态动力学分析模块,对弹性管束在不同流速的壳、管

程两场流体组合诱导下的振动响应进行了数值研究。

1 计算方法

1.1 几何模型

图1所示为弹性管束的几何结构。弹性管束由4根纯铜弯管(弯管半径分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ;截面外径为 d ;壁厚为 δ)和2块不锈钢连接体(III、IV)组成。I、II两处为固定端,不锈钢连接体III、IV为自由端,在换热器实际工作时,管程流体由I处端口流入,II处端口流出。

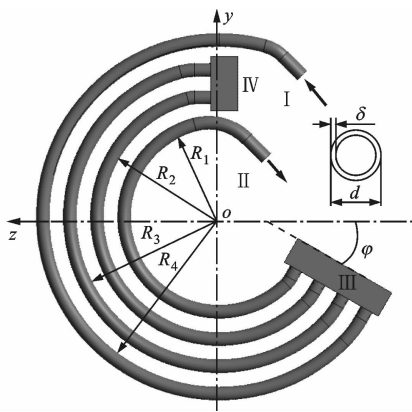


图1 弹性管束结构示意图

图2所示为弹性管束的壳程流体计算域、管程流体计算域和结构计算域网格。图2a中, x 方向为壳程流体的流动方向。图2c中,A、B两点是设立在不锈钢连接体III、IV上的监测点,用来检测壳、管程流体组合诱导弹性管束的振动情况。壳、管程流体域网格采用网格划分软件ICEM进行划分,均为结构化网格;结构部分网格采用Workbench软件的网格划分模块Mechanical平台进行划分,包含结构化网格(铜弯管)及非结构化网格(不锈钢连接体)。其中,壳程流体计算域网格包含329 708个单元,309 305个节点;管程流体计算域网格包含52 940个单元,47 880个节点;结构计算域网格包含9 366个单元,54 777个节点。经过试算,进一步增加网格数量或管束周围网格密度对计算结果的影响不大,网格独立性得到验证。

1.2 材料属性和结构参数

弹性管束弯管部分的材料为纯铜,连接体部分的材料为不锈钢,具体材料属性如表1所示。

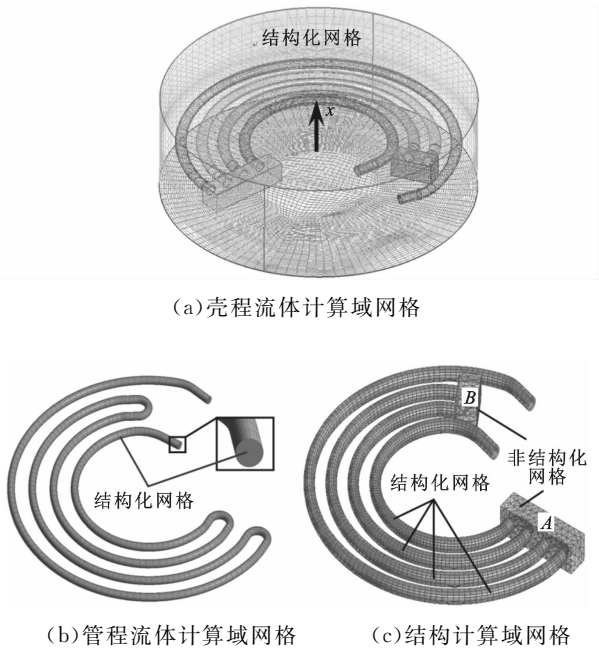


图 2 流体和结构计算域网格

表 1 弹性管束的材料属性

结构名称	属性	数值
铜弯管	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	8 900
	弹性模量/Pa	1.29×10^{11}
	泊松比	0.33
连接体	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	7 800
	弹性模量/Pa	2.10×10^{11}
	泊松比	0.30

为了研究弹性管束在不同流速的壳、管程两场流体组合诱导下的振动特性,分析过程中所用弹性管束的具体尺寸如表 2 所示。

表 2 弹性管束的具体尺寸

结构参数	数值
$R_1, R_2, R_3, R_4/\text{mm}$	70, 90, 110, 130
长 $\times$ 宽 $\times$ 高(连接体 III)	80 mm $\times$ 20 mm $\times$ 20 mm
长 $\times$ 宽 $\times$ 高(连接体 IV)	40 mm $\times$ 20 mm $\times$ 20 mm
d/mm	10
δ/mm	1.5
夹角 $\varphi/(^{\circ})$	30

1.3 数值分析方法

基于本文的研究问题,将整个求解域分成流体域(包含壳程流体域和管程流体域)和结构域,如图 2 所示。流固耦合求解采用弱耦合方法在每个时间步内按顺序进行独立求解。流固耦合计算时,分别将管程流体域的外表面和壳程流体域的内表面设置

为流固耦合面。结构部分将弹性管束内、外表面设置为流固耦合面,分别与管程流体域的外表面和壳程流体域的内表面相对应。流体域与结构域间的数据传递通过流固耦合面完成。

壳、管程流体域选择通用 CFD 分析软件 CFX 进行计算。分析过程中,壳、管程流速变化范围均设为 0.6~1.2 m/s($Re>2\ 300$),均属湍流流动,选用标准的 $k-\epsilon$ 模型对湍流进行模拟。边界条件:入口边界类型为 Inlet,并给定入口速度;出口边界类型为 Outlet,设置出口相对静压为 0 Pa,且计算环境为标准大气压(101.325 kPa)。结构部分采用 ANSYS Workbench 软件的瞬态动力学分析模块进行计算,两固定端 I、II 处截面设为固定约束。

考虑流体与结构交界面上的能量损耗,得到流固耦合系统的有限元波动方程如下

$$\boldsymbol{M}_f \ddot{\boldsymbol{p}}_e + \boldsymbol{C}_f \dot{\boldsymbol{p}}_e + \boldsymbol{K}_f \boldsymbol{p}_e + \boldsymbol{\rho} \boldsymbol{R}^T \ddot{\boldsymbol{u}}_e = \boldsymbol{0} \quad (1)$$

利用哈密尔顿(Hamilton)原理建立结构的整体运动方程。考虑流体的作用,在液体中离散后弹性体的结构力学方程为

$$\boldsymbol{M}_p \ddot{\boldsymbol{u}}_e + \boldsymbol{C}_p \dot{\boldsymbol{u}}_e + \boldsymbol{K}_p \boldsymbol{u}_e = \boldsymbol{F}_p + \boldsymbol{F}_f \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵; $\boldsymbol{C}$ 为阻尼矩阵; $\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵;下标 f、p 分别表示流体和结构; $\boldsymbol{p}$ 为流体动压力; $\boldsymbol{u}$ 为速度矢量; $\boldsymbol{R}^T$ 为流固耦合交界面上的耦合矩阵; $\boldsymbol{F}_p$ 为结构内部作用力; $\boldsymbol{F}_f$ 为流体对结构的作用力。

由式(1)和式(2)可得到完整描述流固耦合问题的有限元离散方程

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_p & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{\rho} \boldsymbol{R}^T & \boldsymbol{M}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\boldsymbol{u}}_e \\ \ddot{\boldsymbol{p}}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_p & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{C}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\boldsymbol{u}}_e \\ \dot{\boldsymbol{p}}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_p & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{u}_e \\ \boldsymbol{p}_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{F}_p + \boldsymbol{F}_f \\ \boldsymbol{0} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

求解式(3)可得到完全流固耦合条件下流体诱导弹性管束振动的频率和振型。

流固耦合计算时,首先采用 CFX 软件进行壳程和管程流体域的计算,得到两耦合面(管程流体域的外表面和壳程流体域的内表面)的压力分布,然后将此压力分布作为初始条件,采用 ANSYS Workbench 软件对结构进行瞬态动力学分析,得到两耦合面的位移,以此作为下一个时间步内流体域计算的边界条件,如此交替迭代,直至完成。

2 管束振动响应分析

为了对数值分析的正确性和准确性进行验证,基于文献[10]实验用弹性管束的结构参数,建立与之相应的数学模型,对不同壳程流速 v_{shell} (0.2、0.4

m/s)条件下不锈钢连接体 III、IV 上两监测点在 x 方向(沿壳程流速方向)的振动频率 f 进行了求解,结果如表 3 所示。其中,壳程流体介质为水,弹性管束内无流体介质。

表 3 数值解与实验值的对比情况

$v_{\text{shell}} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	监测点	f / Hz		相对误差 / %
		数值解	实验值	
0.2	A	28.6	28.0	2.14
	B	29.4	29.0	1.38
0.4	A	28.4	28.0	1.43
	B	28.8	29.0	0.69

从表 3 可以看出,不同壳程流速条件下的数值解与实验数据高度一致,求解参数范围内的最大相对误差仅为 2.14%,数值求解方法的正确性和准确性得到了验证。

2.1 流体速度对振动响应的影响

为了研究壳、管程两场流体速度对弹性管束振动响应的影响,研究了不同流速条件下,两场流体组合诱导下弹性管束的振动特性。其中,壳、管程流体具有相等的流速,即 $v_{\text{shell}} = v_{\text{tube}}$,且流体介质为水。

图 3 所示为不同流速(0.8、1.2 m/s)时,不锈钢连接体 III、IV 上监测点 A、B 在 x 、 y 、 z 方向的振动位移 S 随计算时间 t 的变化情况。从图 3 可以看

出:在壳、管程两场流体的组合诱导下,弹性管束能够实现均匀的振动;当流速较高(1.2 m/s)时,不锈钢连接体 IV(监测点 B)在 z 方向的振动异常剧烈;由于流体的冲击和管束重力的影响,当流速较低(0.8 m/s)时,管束 x 方向的振动平衡位置较低,随着流速的增加,管束 x 方向的振动平衡位置升高;当流速较低(0.8 m/s)时,监测点 A 在 x 方向的振动位移曲线存在明显的“双峰”现象。因为低速流体对弹性管束的冲击力较小,重力对弹性管束在 x 方向振动的影响较大,此时弹性管束振动控制方程中的二次方非线性项所起的作用较大,这是振动位移曲线存在“双峰”现象的原因。当流速较高(1.2 m/s)时,流体的冲击力增强,弱化了重力对振动的影响,此时振动控制方程中的二次方非线性项所起的作用较小,所以在振动位移波动图中未观察到明显“双峰”现象。

图 4 所示为不同流速时,不锈钢连接体 IV 上监测点 B 的振动位移频谱图。从图 4 可以看出:由于壳、管程两场流体的组合诱导,监测点各方向的振动主频、谐频的大小一致,当流速较低(0.8 m/s)时,相较于监测点 x 方向的主频而言,二倍谐频所起的作用明显;随着流速的增加,监测点在 x 、 y 、 z 方向的振动频率均逐渐增加,在 z 方向的振动幅值 A 也逐渐增加,而在 x 、 y 方向的振动幅值 A 则先增加后

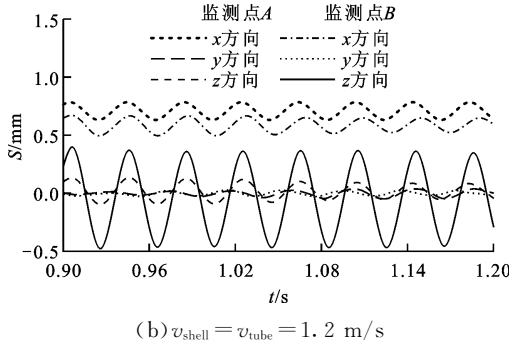
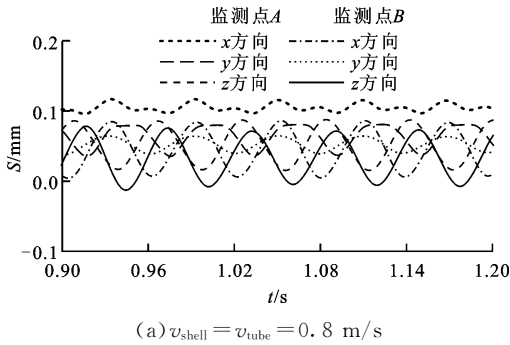


图 3 不同流速时振动位移随计算时间的变化

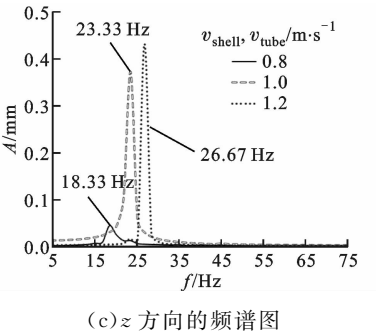
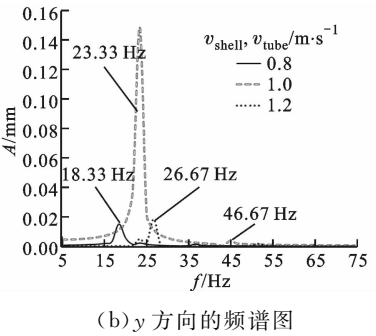
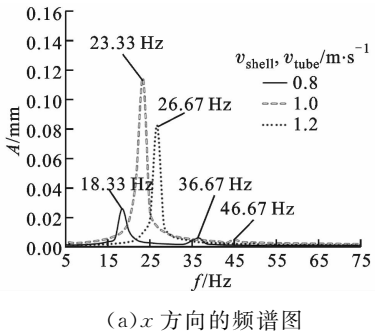


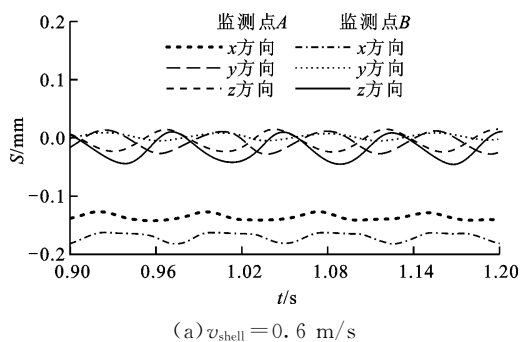
图 4 不同流速时监测点 B 的振动位移频谱图

减小;在壳、管程流体组合诱导下,监测点的振动以 z 方向的振动为主,此时弹性管束的阵型为面内振动。

2.2 壳程流速对振动响应的影响

为了研究壳程流体速度对弹性管束振动响应的影响,对不同壳程流速条件下弹性管束的流体诱导振动特性进行了研究,计算时管程流速固定为 0.8 m/s 。

图5所示为不同壳程流速(0.6 、 1.2 m/s)时,不锈钢连接体 III、IV 上监测点 A、B 在 x 、 y 、 z 方向的振动位移随计算时间的变化情况。从图5可以看出:壳程流速变化对管束振动响应的影响较大,在图示速度条件下,监测点各方向的振动幅值和频率均随着壳程流速的增加而增加,当流速为 1.2 m/s 时,不锈钢连接体 IV(监测点 B)在 z 方向的振动异常剧烈;图5b与图3b相比,监测点各方向振动位移曲线的差距不大,说明弹性管束的振动主要由壳程流体引起;壳程流体速度的变化对弹性管束 x 方向振



动平衡位置的影响较大,随着壳程流速的增加,弹性管束 x 方向的振动平衡位置升高。

图6所示为不同壳程流速时,不锈钢连接体 IV 上监测点 B 的振动位移频谱图。从图6可以看出:不同壳程流速时,不锈钢连接体 IV 上监测点 B 各方向的振动位移频谱图与图4所示壳、管程流速相同时的频谱图类似,再次表明管程流体诱导对弹性管束振动响应的影响较小,弹性管束的振动主要由壳程流体引起。

2.3 管程流速对振动响应的影响

为了研究管程流体速度对弹性管束振动响应的影响,并进一步验证壳程流体是引起弹性管束振动的主要诱因,对不同管程流速条件下弹性管束的流体诱导振动特性进行了研究,计算时壳程流速固定为 0.8 m/s 。

图7所示为不同管程流速(0.6 、 1.2 m/s)时,不

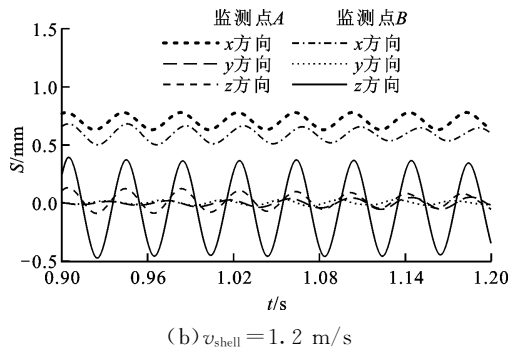


图5 不同壳程流速时振动位移随计算时间的变化

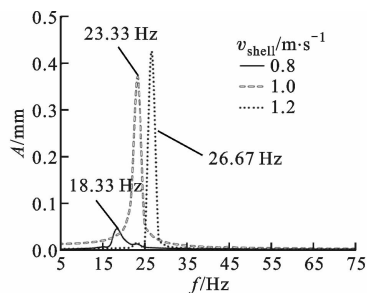
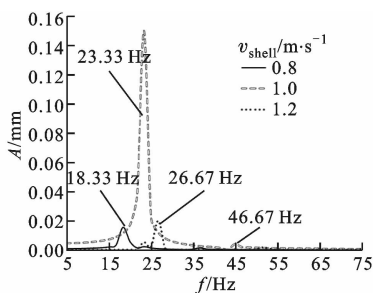
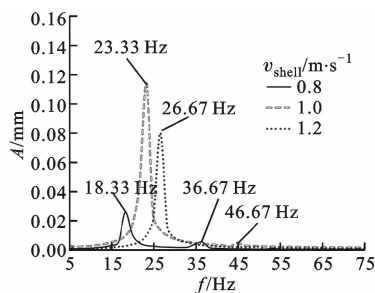


图6 不同壳程流速时监测点 B 的振动位移频谱图

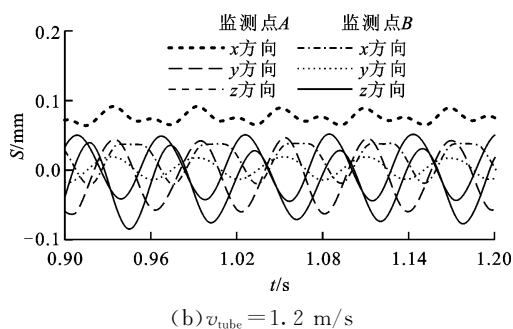
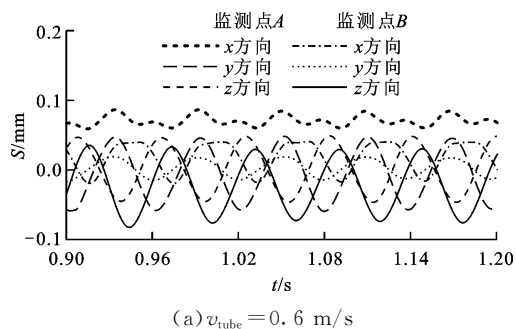


图7 不同管程流速时振动位移随计算时间的变化

锈钢连接体 III、IV 上监测点 A、B 在 x 、 y 、 z 方向的振动位移随计算时间的变化情况。将图 7 与图 3a 对比可以看出,几种管程流速下同监测点、同方向的位移曲线基本一致,说明管程流体诱导对弹性管束振动响应的影响较小,进一步验证了壳程流体是引起弹性管束振动的主要诱因。

3 结 论

本文基于流固耦合问题的弱耦合法,对弹性管束在不同流速的壳、管程两场流体组合诱导下的振动响应进行了研究。通过与实验数据对比,验证了数值求解方法的正确性和准确性,主要结论如下。

(1)随着壳、管程流速的增加,监测点在各方向的振动频率均逐渐增加,在 z 方向的振动幅值逐渐增加,在 x 、 y 方向振幅先增加后减小。综合看来,监测点以 z 方向振动为主,说明在壳、管程流体的组合诱导下,管束的振动主要体现为面内振动。

(2)由于壳、管程流体的组合诱导作用,监测点各方向的振动主频、谐频的大小一致。壳程流速较低(0.8 m/s)时,监测点沿壳程流速方向(x 方向)二倍谐频所起的作用明显。

(3)由于流体的冲击和管束重力的影响,当壳程流速较低时,管束沿壳程流速方向(x 方向)的振动平衡位置较低,随着流速的增加,管束沿壳程流速方向的振动平衡位置逐渐升高。

(4)壳程流速变化对管束振动响应的影响较大,管程流速变化对管束振动响应的影响较小,说明弹性管束的振动主要由壳程流体引起。

参考文献:

- [1] 程林. 弹性管束换热器原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 34-67.
- [2] CHENG Lin, LUAN Ting, DU Wenjing, et al. Heat transfer enhancement by flow-induced vibration in heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(3): 1053-1057.
- [3] YAN Ke, GE Peiqi, HONG Jun. Experimental study of shell side flow-induced vibration of conical spiral tube bundle [J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(5): 695-701.
- [4] JIANG Bo, TIAN Maocheng, CHENG Lin. Research on vibration and heat transfer characteristics of an optimized structure of elastic tube bundle [J]. Advanced Materials Research, 2013, 816/817: 260-265.

- [5] 闫柯, 葛梦然, 高军, 等. 空间锥螺旋管束流体诱导振动换热器及性能分析 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(11): 22-26.
YAN Ke, GE Mengran, GAO Jun, et al. Performance of flow-induced vibration heat exchanger with conical spiral tube bundle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(11): 22-26.
- [6] 闫柯, 葛培琪, 宿艳彩. 基于复模态的空间锥螺旋管管内流固耦合振动特性的有限元分析 [J]. 振动与冲击, 2011, 31(1): 204-207.
YAN Ke, GE Peiqi, SU Yancan. FEM analysis for fluid-structure interaction in a dimensional helical tube base on complex mode theory [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 31(1): 204-207.
- [7] 姜波, 郝卫东, 刘福国, 等. 流体脉动对新型弹性管束传热特性影响的实验研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(10): 59-63.
JIANG Bo, HAO Weidong, LIU Fuguo, et al. Experiments on effects of fluid pulsation on heat transfer characteristics of the new type elastic tube bundle [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(10): 59-63.
- [8] 闫柯. 换热器内锥螺旋弹性管束振动与传热特性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [9] YAN Ke, GE Peiqi, HU Ruihong, et al. Heat transfer and resistance characteristics of conical spiral tube bundle based on field synergy principle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(2): 370-376.
- [10] 宿艳彩. 弹性管束流体诱导振动及换热特性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2012.

[本刊相关文献链接]

- 张凡, 李兆辉, 李晓宇, 等. 不同材料翅片管换热器特性的实验研究. 2015, 49(5): 62-67. [doi:10.7652/xjtuxb201505010]
- 文键, 杨辉著, 王斯民, 等. 旋梯式螺旋折流板换热器优化结构的数值模拟. 2014, 48(11): 8-14. [doi:10.7652/xjtuxb201411002]
- 杨卫卫, 曹兴起, 何雅玲, 等. 一种带中间换热器的双热源高温热泵系统. 2014, 48(11): 70-74. [doi:10.7652/xjtuxb201411012]
- 文键, 杨辉著, 杜冬冬, 等. 螺旋折流板换热器换热强化的数值研究. 2014, 48(9): 43-48. [doi:10.7652/xjtuxb201409008]
- 韩辉, 何雅玲, 唐桂华. 硫酸蒸气在换热器表面沉积特性的数值研究. 2013, 47(11): 7-13. [doi:10.7652/xjtuxb201311002]

(编辑 荆树蓉)