

# 横摇运动下 U 型管内流动与传热数值分析

储玺, 陈文振, 郝建立, 章德

(海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 利用 Fluent 软件分析了横摇运动下 U 型管内湍流流体摩擦阻力系数  $f$  和努塞尔数  $Nu$  随时间的变化。计算结果表明: 横摇运动下 U 型管内流体  $f$  和  $Nu$  随着时间周期性波动, 波动周期与横摇周期相同, 波动幅度随着横摇周期的减小和横摇振幅的增大而增大;  $f$  和  $Nu$  的平均值、最大值与横摇振幅和横摇角频率近似呈线性关系; 横摇增大了 U 型管内流体流动阻力和传热系数; 横摇对 U 型管内流体流动传热的影响与直管明显不同。

**关键词:** 横摇; U 型管; 流动; 传热

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2014)S0-0292-05

doi: 10. 7538/yzk. 2014. 48. S0. 0292

## Numerical Analysis of Flow and Heat Transfer in U-tube Under Rolling Motion

CHU Xi, CHEN Wen-zhen, HAO Jian-li, ZHANG De

(Department of Nuclear Science and Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The variations of frictional resistance coefficient  $f$  and  $Nu$  with time in the rolling motion were calculated with Fluent code. The calculating results show that the  $f$  and  $Nu$  in U-tube in rolling motion fluctuate periodically with time, the oscillating period is the same as the period of rolling motion, and the oscillating amplitude increases with the decrease of rolling period and the increase of rolling amplitude. The maximum and average values of the  $f$  and  $Nu$  are in direct ratio with the rolling amplitude and angular frequency approximately. The flow resistance and  $Nu$  are enhanced in the rolling motion. The effects of rolling motion on the flow and heat transfer in U-tube are significantly different from those in straight tubes.

**Key words:** rolling; U-tube; flow; heat transfer

船用核动力装置在运行中会不可避免地受到海洋条件的影响, 而海洋条件下流体的流动传热特性也成为近年来许多学者研究的热点。文献[1]针对摇摆情况下单相自然循环的流动

传热特性进行了实验研究, 结果表明, 换热系数随摇摆频率和振幅的增加而增加。文献[2]针对摇摆状态下竖直管内单相水阻力特性进行了实验研究, 研究发现, 竖直管内单相水的摩擦阻

收稿日期: 2014-05-15; 修回日期: 2014-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11402300); 海军工程大学自然科学基金资助项目

作者简介: 储玺(1990—), 男, 安徽岳西人, 硕士研究生, 从事核反应堆安全分析研究

力系数随时间呈周期性波动,波动幅度随雷诺数的增加而减小,随管径的增加而增大。文献[3]建立了摇摆条件下单相流体流动的理论模型,推导出圆管内流体摩擦阻力系数随时间变化的表达式,与实验研究结果相一致。文献[1-3]均是独立地对摇摆条件下直管内流体的流动和传热进行研究,没有考虑流动和传热的耦合。实际工程中,摇摆运动对蒸汽发生器 U 型管内流体流动与传热的影响是同时发生的,摇摆运动对传热特性的影响必然会引起 U 型管内流体的密度发生变化,而密度的变化又会引起附加力的变化,从而会对流体的流动阻力产生影响。另外,U 型管的几何结构与直管有很大区别,摇摆产生的附加力对流体流动传热的影响也有一些差异。

本文利用 Fluent 软件,数值模拟横摇运动下 U 型管内流体流动的摩擦阻力系数和努塞尔数的变化。

## 1 理论模型

### 1.1 数学模型

船用蒸汽发生器内 U 型管的横摇运动如图 1 所示。

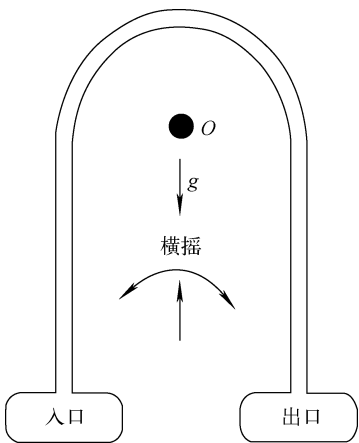


图 1 U 型管横摇运动示意图

Fig.1 Schematic of U-tube under rolling motion

摇摆条件下,湍流流体的 Reynolds 时均方程中的动量方程需修改如下<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) + F \quad (1)$$

其中: $t$  为时间; $\rho$  为密度; $p$  为压力; $x_{i,j,k}$  分别表示  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向上的坐标; $F$  为单位体积附加力; $\bar{u}$ 、 $\bar{u}'$  分别为流体平均速度和脉冲速度; $\mu$  为流体动力黏度; $\delta_{ij}$  为数学算符,当  $i=j$  时, $\delta_{ij}=1$ ,当  $i \neq j$  时, $\delta_{ij}=0$ 。

横摇条件下,流体所受附加力<sup>[5]</sup>可表示为:

$$\mathbf{F} = \rho \cdot [\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) + \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}] \quad (2)$$

其中: $\mathbf{r}$  为横摇半径; $\boldsymbol{\omega}$  和  $\boldsymbol{\beta}$  分别为横摇角速度和角加速度。

通常将横摇运动简化为简谐运动<sup>[5-6]</sup>,有:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega} &= -n\theta_m \sin nt \\ \boldsymbol{\beta} &= -n^2\theta_m \cos nt \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $n$  为横摇角频率, $n=2\pi/T$ , $T$  为简谐运动周期; $\theta_m$  为横摇最大角度,即横摇振幅。

### 1.2 湍流模型和边界条件

Fluent 软件提供的湍流模型中,应用比较广泛的主要包括  $k-\omega$  模型、 $k-\epsilon$  模型和 RSM 模型等<sup>[7]</sup>。横摇运动下,U 型管内流体存在明显的流动不均匀性,RSM 模型假设湍流流体各向异性,采用不同的流动方程计算雷诺应力,在描述二次流时有较高的精确度,但其所需计算资源较大<sup>[7]</sup>。而 Realizable  $k-\epsilon$  模型在描述二次流时同样也有很好的表现,所以本文采用 Realizable  $k-\epsilon$  模型来数值模拟横摇运动下 U 型管内高温、高压下的单相水的流动传热。

采用质量流量入口和压力出口边界条件,壁面采用恒壁温边界条件,为保证准确模拟壁面附近流体的流动传热,采用增强壁面模型,保证边界层第 1 层网格质心到壁面的无量纲距离  $y^+ < 1$ 。另外,将摇摆引起的附加力作为动量源项引入动量守恒方程,利用用户自定义函数 UDF 修正动量守恒方程的动量源项。本文主要计算参数为:工作压力 14 MPa,入口温度 550 K,壁面温度 490 K,管内直径 12 mm,管壁厚度 1.5 mm,弯管半径 300 mm。

### 1.3 网格划分

结构化网格具有计算速度快等优点,本文选用结构化网格进行计算。首先对网格进行

敏感性分析,以得到网格无关解。图2为稳态时不同网格划分计算后得到的摩擦阻力系数随质量流量 $\dot{m}$ 的变化。可以看出,当采用壁面 $y^+ < 0.4 \sim 0.8$ 的网格进行计算时,摩擦阻力系数的变化非常接近,所以本文采用壁面 $y^+ = 0.4 \sim 0.8$ (网格数310 500)的网格进行计算。

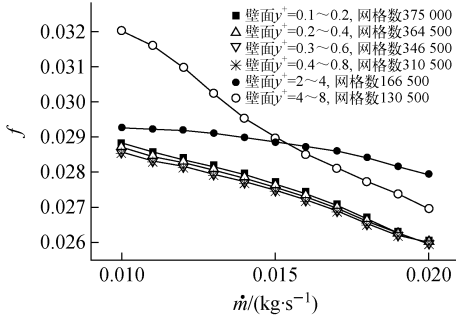


图2 网格敏感性分析

Fig. 2 Analysis of mesh sensitivity

当湍流雷诺数满足 $2\ 300 < Re < 10^5$ 时,一般采用布拉休斯经验公式计算光滑圆管内的摩擦阻力系数 $f^{[6]}$ :

$$f = 0.316\ 4/Re^{0.25} \quad (4)$$

将Fluent计算结果与经验公式计算结果进行对比,如图3所示。由图3可看出,Fluent计算结果与经验公式计算结果吻合较好,说明采用的网格划分方法可较好地模拟壁面附近的流动。

## 2 计算结果与分析

横摇运动下U型管内流体瞬态摩擦阻力系数 $f$ 与努塞尔数 $Nu$ 定义<sup>[6-7]</sup>如下:

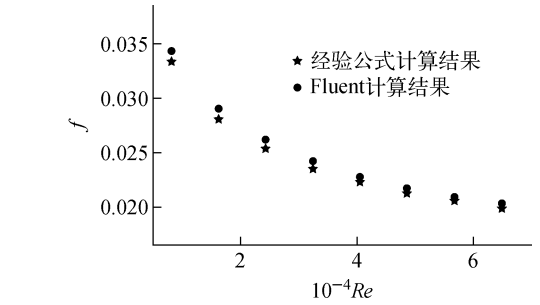
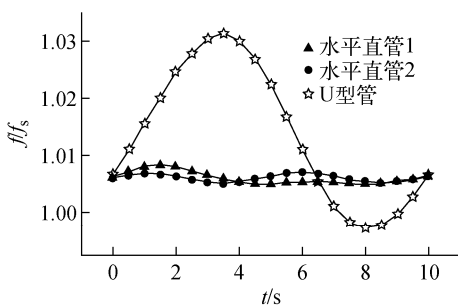


图3 Fluent与经验公式计算结果比较

Fig. 3 Comparison of calculating results of Fluent and experiential results

$$f = \frac{8\tau}{\rho u^2}$$

$$Nu = \frac{qd}{\lambda(T_w - T_f)} \quad (5)$$

其中: $\tau$ 和 $q$ 分别为壁面剪应力和单位面积热流密度,读取其瞬态的面积权重平均值进行计算; $T_f$ 为流体温度,读取其瞬态的体积权重平均值进行计算; $\lambda$ 为流体导热系数; $T_w$ 为壁面温度; $d$ 为U型管内直径。

图4示出横摇条件下直管和U型管内流体瞬时摩擦阻力系数和努塞尔数(均已用稳态值归一化)在一个横摇周期内的变化。直管和U型管的管内直径、管长相同,横摇条件均为 $\theta_m = 10^\circ$ 、 $T = 10$  s,边界条件等其他参数设置相同,水平直管1的横摇轴距离直管中点为0.3 m,直管2的横摇轴与直管中点的距离为0,U型管的横摇轴位于弯管圆心处。

由图4可看出,横摇条件下直管内的 $f$ 和 $Nu$ 波动情况与U型管相比有较大差异。由于管内直径较小,横摇对直管内摩擦阻力系数的影响很小,这与文献[2-3]得出的结论一致,但

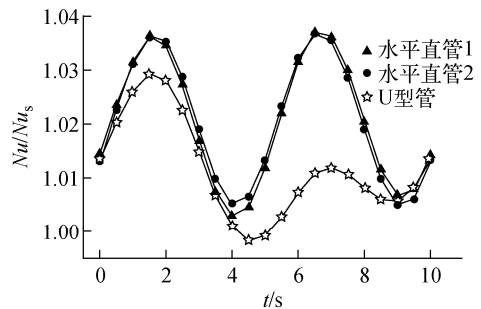


图4 直管和U型管内摩擦阻力系数和 $Nu$

Fig. 4 Frictional resistance coefficient and  $Nu$  in straight tube and U-tube

对相同条件下的 U 型管内  $f$  的影响较大。横摇条件下,直管内的  $Nu$  变化近似为正弦函数,而 U 型管内  $Nu$  的波动规律并非是标准的三角函数。

图 5 示出不同横摇振幅和横摇周期下 U 型管管壁瞬时摩擦阻力系数(已用稳态值归一化)随时间的变化。

由图 5 可看出,横摇运动下 U 型管内摩擦阻力系数随时间呈现周期性波动,波动周期与横摇运动的周期相同,变化规律近似正弦函数。最小摩擦阻力系数与稳态值比较接近,而最大摩擦阻力系数随横摇周期的减小和横摇振幅的增大而增大。

图 6 为不同横摇振幅和横摇周期下 U 型管内流体瞬时  $Nu$ (已用稳态值归一化)随时间的变化。

由图 6 可看出,横摇时  $Nu$  的波动周期与横摇周期相同,但并不是标准的三角函数,曲线存在两个大小不同的峰值。从式(2)可看出,离心力的波动周期为横摇周期的一半,而切向力

与科氏力的波动周期与横摇周期相同,这是导致  $Nu$  变化规律与横摇运动规律不同的原因。最小  $Nu$  与稳态值的差异较小,而最大  $Nu$  随横摇周期的减小和横摇振幅的增大而增大。

图 7 示出 U 型管内归一化的摩擦阻力系数  $f$  和  $Nu$  的最大值和平均值随横摇振幅  $\theta_m$ 、横摇角频率  $n$  的变化。

由图 7 可看出,U 型管内  $f$  和  $Nu$  的最大值与平均值均随横摇角频率和横摇振幅的增大而增大,近似呈线性关系,即横摇运动越剧烈,其对 U 型管内流体流动传热特性的影响越大。且平均摩擦阻力系数和平均  $Nu$  均比稳态值大,所以横摇运动增大了 U 型管内的流动阻力和增强了 U 型管内流体的传热。

### 3 结论

利用 Fluent 软件模拟了 U 型管内流体在横摇运动下的流动传热,得到了 U 型管内流体  $f$  和  $Nu$  随时间的变化,分析了横摇振幅和横摇角频率对  $f$  和  $Nu$  最大值和平均值的影响。

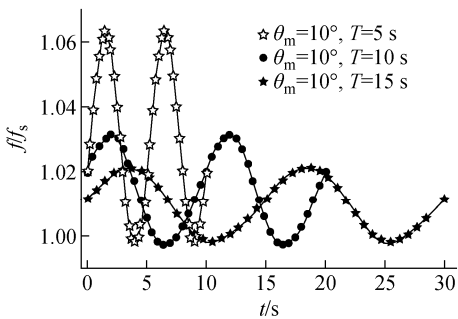


图 5 摩擦阻力系数随时间的变化

Fig. 5 Variation of frictional resistance coefficient with time

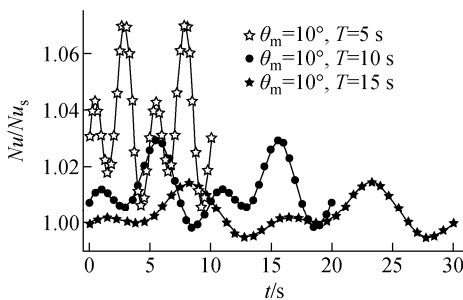
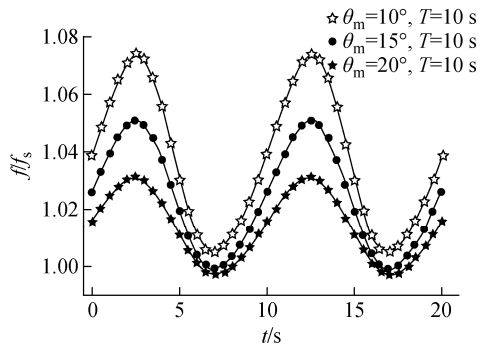


图 6  $Nu$  随时间的变化

Fig. 6 Variation of  $Nu$  with time

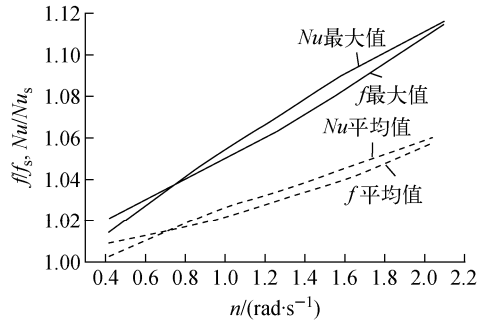
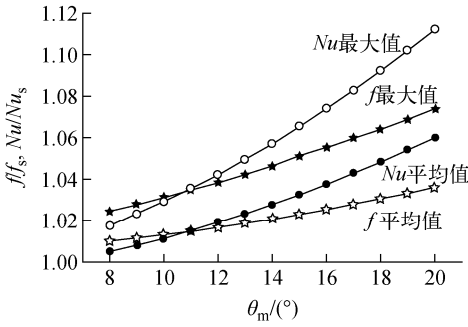


图7  $f$ 、 $Nu$  的最大值和平均值与  $\theta_m$  和  $n$  的关系

Fig. 7 Relation of maximum and average  $f$  and  $Nu$  with  $\theta_m$  and  $n$

横摇运动下, U型管内流体的  $f$  和  $Nu$  随时间周期性波动, 波动规律与直管不同, 波动周期与横摇运动的周期相同。  $f$  和  $Nu$  的最大值与平均值随着横摇振幅和横摇角频率的增大而增大, 近似呈线性关系。横摇运动增大了 U型管内流体流动阻力和传热系数, 横摇运动越剧烈, 对流体流动传热的影响越大。

#### 参考文献:

- [1] 谭思超, 庞凤阁, 高璞珍. 摇摆对自然循环传热特性影响的实验研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(5): 33-36.  
TAN Sichao, PANG Fengge, GAO Puzhen. Experimental research of effect of rolling upon heat transfer characteristic of natural circulation[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(5): 33-36 (in Chinese).
- [2] 曹夏昕, 阎昌琪, 孙立成, 等. 摇摆状态下竖直管内单相水阻力特性实验研究[J]. 核动力工程, 2007, 28(3): 51-55.

CAO Xiaxin, YAN Changqi, SUN Licheng, et al. Pressure drop characteristics of single-phase flow in vertical rolling pipes[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(3): 51-55(in Chinese).

- [3] YAN B Y, GU H Y, YANG Y H, et al. Theoretical models of turbulent flow in rolling motion[J]. Progress in Nuclear Energy, 2010, 52: 563-568.
- [4] YAN B Y, GU H Y. CFD analysis of flow and heat transfer for turbulent pulsating flow in a tube in rolling motion[J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38: 1 833-1 841.
- [5] HAO J L, CHEN W Z, CHU X, et al. Flow instability analysis in U-tubes of steam generator under rolling movement[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 64: 169-175.
- [6] 陈文振, 于雷, 郝建立. 核动力装置热工水力[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2013.
- [7] ANSYS Fluent 12: User's tutorial guide[M]. USA: ANSYS Fluent Inc., 2009.