

摇摆运动下系统空间布置对自然循环流动特性的影响

谭思超^{1,2}, 高璞珍², 苏光辉¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 基于摇摆运动条件下自然循环流动的数学模型,研究了该条件下自然循环回路的质量分布、摇摆轴心以及单双回路等系统的空间布置对自然循环流动波动特性的影响. 结果表明:由于摇摆运动产生的附加加速度具有时空特性,不同空间位置产生的加速度大小和方向都不同,所以系统的空间布置对摇摆运动条件下的自然循环流动存在较大影响,其中对摇摆轴心的影响最为显著;对于冷却剂系统而言,采用对称布置可以抵消向心力的影响,降低流动速度波动的频率;摇摆轴心位于回路外可以降低切向力的影响,降低波动的振幅,但轴心与回路距离过大时,切向力的影响又会因半径的增加而增加,造成流动波动振幅增加,采用对称双回路布置有利于消除切向力的影响,从而降低总流量的波动振幅;对称双回路布置有利于降低总流量的波动;采用适当的布置,可以有效地降低摇摆运动对自然循环流动波动特性的影响. 在设计中,还应综合考虑密度以及质量分布的因素,合理的质量分布可以有效地降低摇摆造成的流动波动.

关键词: 摇摆运动;空间布置;自然循环;流动特性

中图分类号: TL33 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1408-05

Effects of System Spatial Distribution on Natural Circulation under Rolling Motion Condition

TAN Sichao^{1,2}, GAO Puzhen², SU Guanghui¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The effects of the system spatial distribution including mass distribution, rolling axes and double loops on natural circulation under rolling motion condition were studied theoretically based on the mathematical model of natural circulation flow with rolling motion. The results show that the spatial distribution has important influences on natural circulation flow due to the time-spatial characteristic of additional acceleration caused by the rolling motion, and the effect of rolling axes is significant. For the coolant system, the effect of centripetal force may be counteracted by the symmetrical distribution of the loop; the effect of tangential force may be reduced by locating the rolling axes outside the loop, and the fluctuation of the total coolant mass flow rate may be lowered by using symmetrical double loops.

Keywords: rolling motion; spatial distribution; natural circulation; flow characteristic

船舶在海洋中航行会受到海洋条件的作用产生摇摆(横摇)、升潜等运动(见图 1),摇摆运动会对核动力系统自然循环的流动特性产生影响,造成自然循环流动特性的改变.近年来,研究者开展了摇摆运动下自然循环流动特性的实验和理论研究^[1-9].结果表明,摇摆运动造成了自然循环系统的流量波动,波动的频率和振幅受摇摆参数的影响,但由于所使用的实验系统或建模对象各有差异,各自系统的空间布置不同,因此在影响规律上也有差异.

海基条件下的自然循环与陆基条件下的自然循环不同,后者所涉及的空间参数主要是回路的有效高度.在摇摆运动下,自然循环的有效高度以及摇摆引起的附加加速度都随时间和空间位置的变化而变化,其影响程度也随之变化.因此,需要开展相关的研究,以确定系统的空间布置对自然循环流动的影响规律,进而探索降低摇摆影响的途径.

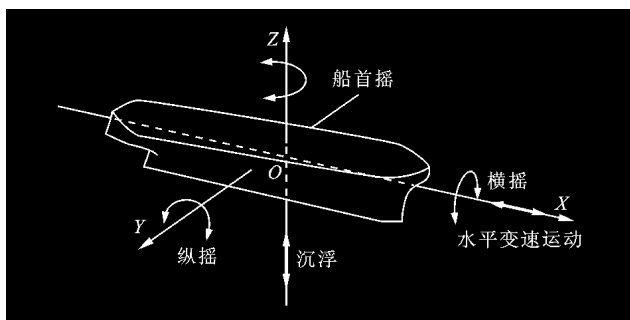


图 1 典型船舶运动(X 为航向方向)

本文在已有研究的基础上,利用建立的数学模型,计算分析了空间布置的变化对自然循环流动特性的影响规律.

1 数学模型简介及验证

图 2 为模拟研究摇摆运动条件的热工水力实验装置,可以以自然循环和强迫循环 2 种方式运行.热工水力回路简图以及摇摆台分别如图 3 和 4 所示,摇摆轴心为 O-O 轴.

设摇摆运动按正弦规律变化,即

$$\theta = \theta_m \sin(2\pi t/T) \quad (1)$$

式中: θ 为瞬时摇摆角度,rad; θ_m 为最大摇摆角度,rad; T 为摇摆周期,s; t 为时间,s.

以上述实验装置为对象,建立了如下的数学模型:

质量守恒方程为

$$\rho A v = C \quad (2)$$

动量守恒方程为

$$\sum \rho_i \frac{dv_i}{dt} = \sum \Delta p_g + \sum \Delta p_f + \sum \Delta p_a \quad (3)$$

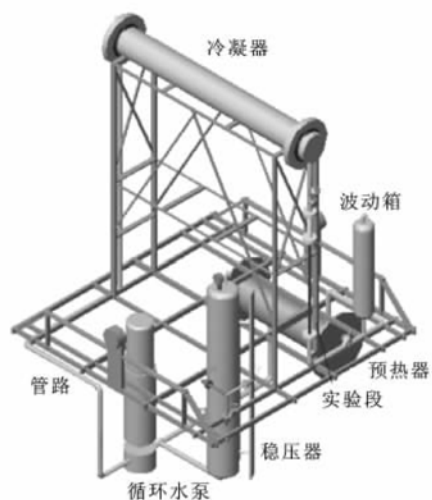


图 2 实验装置

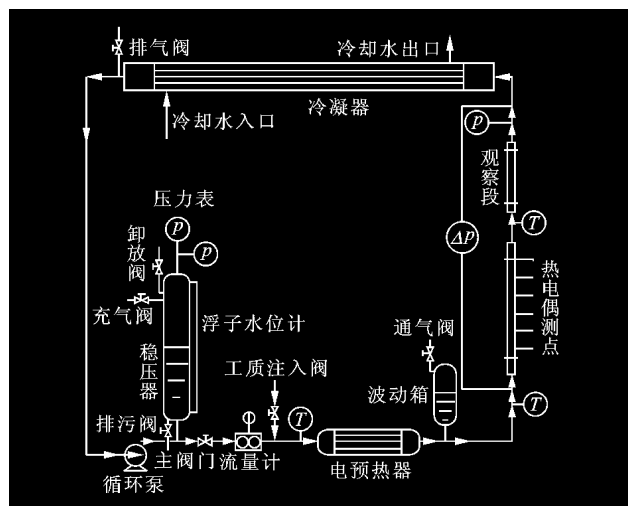


图 3 实验回路简图

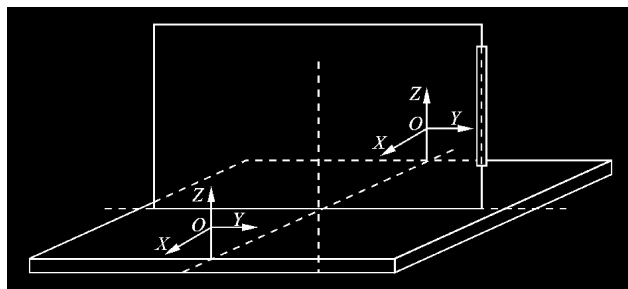


图 4 摇摆台示意图

能量守恒方程为

$$\rho_w c_{pw} V_w \frac{dT_w}{dt} = P_w - Q_{in} - Q_{out} \quad (4)$$

式(2)~式(4)中: ρ 为流体密度,kg/m³; ρ_w 为加热段管材的密度,kg/m³; A 为通道截面积,m²; v 为流动速度,m/s; C 为常数; Δp_g 为提升压降,MPa; Δp_f 为摩擦压降,MPa; Δp_a 为摇摆引起的附加压降,

MPa; P_w 为加热功率, kW; Q_{out} 为外壁对环境的散热, kW; Q_m 为管壁与流体的换热, kW; c_{pw} 为加热段管材的比热容, J/(kg·°C); V_w 为管材的体积, m³; T_w 为管壁温度, °C; t 为时间, s. 在式(2)~式(4)中, 除加热段外, 不考虑流体能量的变化.

模型中充分考虑了摇摆运动引起的附加加速度的影响, 并根据前期研究的成果对流动换热计算关系式进行了修正^[10-11]. 利用实验数据对所建立的数学模型进行了验证, 计算结果与实验结果符合良好, 如图5所示, 图中纵坐标为摇摆运动下加热段入口流动速度与相同热工参数下不摇摆工况加热段入口流动速度的比值 V_r/V , 横坐标 t 表示时间. 文献[11-12]给出了详细的模型.

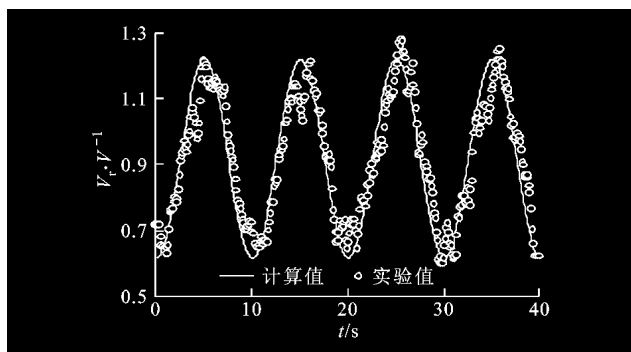


图5 计算值与实验值的比较

2 空间布置的影响

因为摇摆运动对自然循环的流动速度影响较大, 因此在上述数学模型的基础上, 改变系统空间布置的形式和参数, 针对加热段入口流速进行计算分析, 以确定空间布置对自然循环流动波动的影响. 计算参数如下: 摇摆周期为 10 s, 摇摆振幅为 10°, 实验段入口温度为 60 °C, 系统压力为 0.2 MPa, 加热功率为 4 kW.

2.1 预热器位置的影响

实验回路中预热器的体积较大, 相对摇摆轴左右对称. 将预热器的位置左右各移动 10 cm, 计算结果用加热段入口流速 v 随时间的变化来表示, 如图6所示. 从图中可以看出, 波动的振幅没有明显改变, 但右侧布置的平均流量明显降低.

预热器位置的改变造成了回路中的质量分布发生改变, 在相同的附加加速度情况下, 附加惯性力的大小和方向会改变. 由于摇摆轴心位于回路中部, 所以向心力大部分相互抵消, 其合力方向相对于流动方向固定, 变化幅度不大, 而切向力合力的方向呈周

期性改变, 变化幅度较大.

预热器只是沿水平位置左右移动, 没有竖直方向的改变, 主要造成了向心力的改变, 没有改变切向力, 因此对波动振幅没有明显影响. 同时, 预热器的流动方向为从左向右, 所以沿右侧布置的向心力合力向左, 进而造成平均流量降低.

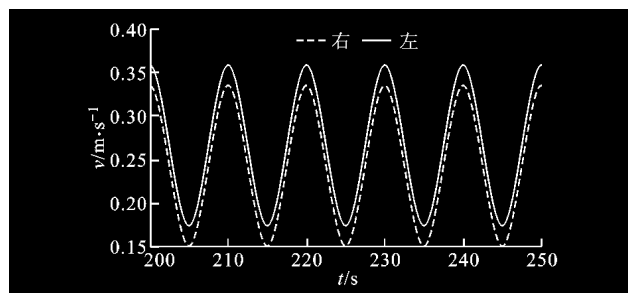


图6 预热器位置的影响

2.2 摇摆轴心的改变

摇摆轴心如图7所示. 从 O_0 点移动到 O_1 点为摇摆轴心沿中轴线降低的变化. 由于摇摆轴心仍位于中轴心位置, 大部分向心力仍然相互抵消, 其合力的影响变化不大, 而对于切向力而言, 则出现较大变化, 回路下部的切向加速度的方向改变, 回路上下部分的切向力部分抵消. 这些因素的综合作用使切向力沿回路的大小方向都发生改变.

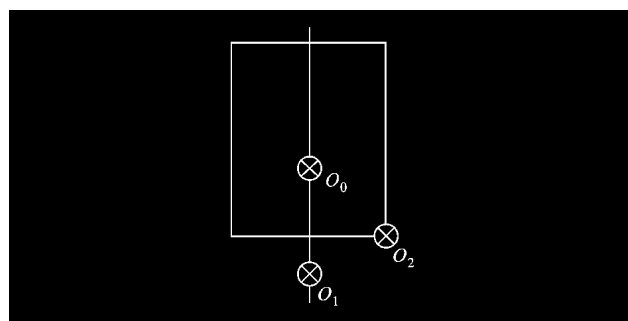
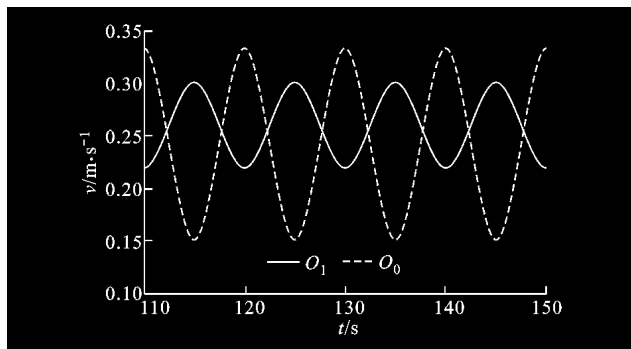


图7 摇摆轴心

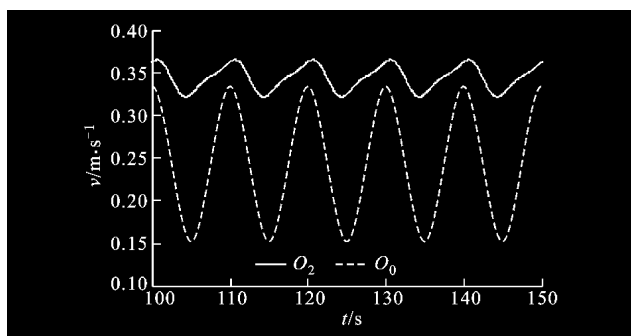
图8示出了轴心的变化引起加热段入口流速 v 随时间的变化关系. 可以看出, 改变轴心后的振幅、相位较改变前都发生了很大变化, 这也说明, 通过改变摇摆轴心可以适度调整波动的振幅, 降低摇摆运动的影响.

当摇摆轴心由 O_0 点移动到 O_2 点后, 右边回路和下部回路的切向力与流动方向垂直, 对流动不起作用, 因此切向力对流动的影响减弱, 而向心力的影响增加, 向心力合力的方向与流动方向一致, 从而引起的加热段入口流速随时间的变化如图8b所示. 可以看出, 波动振幅大幅度降低, 平均流量升高, 且波

动曲线中存在倍频变化,这也反映了向心加速度影响的增加(向心加速度的周期为摇摆周期和切向加速度周期的 $1/2$)。



(a) 摇摆轴心由 O_1 点移动到 O_2 点



(b) 摇摆轴心由 O_0 点移动到 O_2 点

图 8 摇摆轴心变化引起加热段入口流速随时间的变化

2.3 双回路的影响

在图 7 右侧增加一个对称的回路,使系统构成双回路。在双回路时,加热段入口流速 v 随时间变化的计算结果如图 9 的上图所示。增加的对称回路摇摆轴心的位置为 O_2 ,每个回路的加热段入口流速随时间变化的计算结果如图 9 的下图所示。2 个回路各自的流动波动振幅相同,相位相反。此时,总的流量波动振幅减小,频率为单回路的 2 倍,计算结果与文献[2]相似,说明采用双回路对称式布置可以有效降低摇摆的影响。

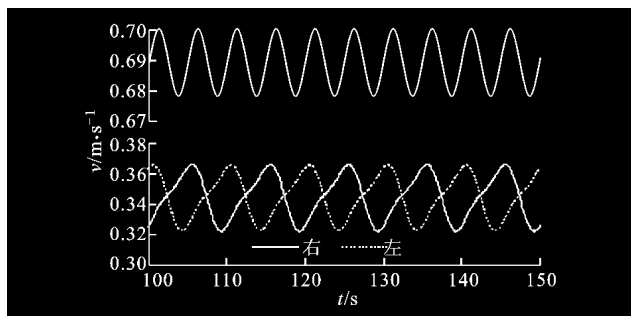


图 9 双回路对加热段入口流速的影响

尽管在实际系统中不可能实现如同简化回路那

样理想的布置,回路流体的质量分布需要考虑的其他因素也较多,摇摆轴心的选取也受到多种因素的影响,而且海洋中实际的风、浪、涌以及深海海流的作用,也不是简单的简谐运动,其影响规律十分复杂,所以如图 9 这种理想的计算结果并不容易出现。但是,考虑到实际的周期摇摆函数可以分解为三角函数的和,因此本研究的结论对于分析复杂海洋条件的影响仍具有重要意义。

3 讨论

摇摆运动对系统流动的影响主要是加速度,包括向心加速度、切向加速度和科氏加速度,其中科氏加速度的方向与流动方向垂直,对流动不产生影响。

向心加速度为

$$\omega = \theta_m (2\pi/t_0) \cos(2\pi t/t_0) \quad (5)$$

角加速度为

$$\beta = -\theta_m (2\pi/t_0)^2 \sin(2\pi t/t_0) \quad (6)$$

回路中任一微元段的向心力为 $v_i \rho_i \omega^2 r_i$,不考虑密度因素和质量分布的影响,向心力的积分与路径无关,即不管摇摆轴心位于何处,合力为 0。向心力的影响主要是由于质量分布差异形成的,且向心力合力的方向不变,对平均流量的影响较大。

回路中任一微元段的切向力为 $v_i \rho_i \beta r_i$,不考虑密度和质量分布因素,切向力合力的积分受摇摆轴心影响较大,当轴心位于回路内部时,切向力影响较大,当摇摆轴心位于回路外部时,切向力相互抵消,其影响减弱,但如果轴心与回路距离过大,切向力的影响又会因半径的增加而增加。同时,切向力合力的方向和大小随时间周期性变化。因此,切向力对波动振幅的影响较大,而采用双回路对称布置则可以有效地降低切向力的影响,降低总流量波动的振幅。

在实际运行中,回路的流体密度和质量分布不可能完全一致或对称,因此需要综合考虑回路的结构和布置,而且通过适当的质量分布可以降低附加惯性力的影响。

在摇摆运动下,冷、热中心有效位差也相应改变,同时在不摇摆工况下,对自然循环驱动压力没有影响的水平段也产生影响,如下式所示

$$\Delta p_g = \Delta \rho_v g h_v \cos \theta + \Delta \rho_h g h_h \sin \theta \quad (7)$$

式中:下标 v、h 分别指竖直段和水平段。有效位差的改变受摇摆振幅的影响,随着摇摆振幅的增加,提升压降的变化幅度也相应增大,但有效位差的变化并不受摇摆轴心变化的影响,仅与摇摆振幅 θ_m 有关。

4 结 论

本文针对摇摆运动下空间布置对自然循环流动速度以及波动振幅、频率等流动特性的影响进行了研究。由于摇摆运动的时空特性,不同空间位置产生的加速度大小和方向都不同,这就使得空间布置对摇摆运动下的自然循环流动特性产生较大影响,其中摇摆轴心的影响最为显著。对于冷却剂系统而言,采用对称布置可以抵消向心力的影响,降低流动速度波动的频率。摇摆轴心位于回路外可以降低切向力的影响,降低波动的振幅,但如果轴心与回路距离过大,切向力的影响又会因半径增加而增加,造成流动波动振幅增加。采用对称双回路布置有利于消除切向力的影响,从而降低总流量的波动振幅。在设计中,还应综合考虑密度以及质量分布的因素,合理的质量分布可以有效地降低摇摆造成的流动波动。

参考文献:

- [1] ISHIDA T, YORITSUNE T. Effects of ship motion on natural circulation of deep sea research reactor DRX [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 215: 51-67.
- [2] 杨珏,贾宝山,俞冀阳. 简谐海洋条件下堆芯冷却剂系统自然循环能力分析[J]. 核科学与工程, 2002, 22(3): 199-203.
YANG Jue, JIA Baoshan, YU Jiyang. Analysis of natural circulation ability in PWR coolant system under ocean condition [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2002, 22(3): 199-203.
- [3] 苏光辉,张金玲,郭玉君. 海洋条件对船用核动力堆余热排出系统特性的影响[J]. 原子能科学技术, 1996, 30(6): 487-491.
SU Guanghui, ZHANG Jinling, GUO Yujun. Effects of ocean conditions upon the passive residual heat removal system (PRHRS) of ship reactor [J]. Atomic Energy Science and Technology, 1996, 30(6): 487-491.
- [4] MURATA H, SAWADA K I, KOBAYASHI M. Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion and heat transfer in the core [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 215: 69-85.
- [5] 高璞珍,刘顺隆,王兆祥. 纵摇和横摇对自然循环的影响[J]. 核动力工程, 1999, 20(3): 228-231.
GAO Puzhen, LIU Shunlong, WANG Zhaoxiang. Effect of pitching and rolling upon natural circulation [J]. Nuclear Power Engineering, 1999, 20(3): 228-231.
- [6] 谭思超,庞凤阁. 摇摆运动引起的波动与自然循环密度波型脉动的叠加[J]. 核动力工程, 2005, 26(2): 140-143.
TAN Sichao, PANG Fengge. Overlapped flow of the flow oscillation caused by rolling motion and the density wave oscillation of natural circulation [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(2): 140-143.
- [7] 谭思超,张红岩,庞凤阁,等. 摇摆运动下单相自然循环流动特点[J]. 核动力工程, 2005, 26(6): 554-558.
TAN Sichao, ZHANG Hongyan, PANG Fengge, et al. Characteristic of single-phase natural circulation under rolling [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(6): 554-558.
- [8] 谭思超,高文杰,高璞珍,等. 摇摆运动对自然循环流动不稳定性的影响[J]. 核动力工程, 2007, 28(5): 42-45.
TAN Sichao, GAO Wenjie, GAO Puzhen, et al. Effect of rolling motion on flow instability of natural circulation [J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(5): 42-45.
- [9] TAN Sichao, PANG Fengge, GAO Puzhen. Experimental study on the effect of rolling motion upon single-phase natural circulation [C/CD]// Proceedings of the 13th International Conference on Nuclear Engineering. New York, USA: ASME, 2005: ICONE13-50094.
- [10] 谭思超,庞凤阁,高璞珍. 摇摆运动对自然循环传热特性的影响[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.
- [11] 谭思超,高璞珍,苏光辉. 摇摆运动条件下自然循环流动的实验和理论研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(11): 1213-1217.
TAN Sichao, GAO Puzhen, SU Guanghui. Experimental and theoretical study on natural circulation flow under rolling motion condition [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(11): 1213-1217.
- [12] TAN Sichao, GAO Puzhen. Experimental and theoretical study on natural circulation capacity under rolling motion condition [C/CD]// Proceedings of the 15th International Conference on Nuclear Engineering. New York, USA: ASME, 2007: ICONE15-10120.

(编辑 王焕雪)