

摇摆条件下非能动余热排出系统 运行特性的试验研究

李勇全^{1, 2}, 鄢炳火^{3, *}, 于雷³

(1. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430033;

3. 海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 在摇摆台架上对摇摆条件下的非能动余热排出系统运行特性进行了试验研究。分析了摇摆运动对非能动余热排出系统各主要参数的影响, 并对摇摆条件下的重力压降和附加压降对流速的影响进行了理论分析。在摇摆过程中, 各参数的波动周期与摇摆周期一致, 摇摆幅度越大, 各主要参数波动越剧烈; 凝水流量平均值与凝水温度变化趋势相同, 冷却水进出口温差平均值有所差异, 但其波动幅度却相差不大。蒸汽压力和凝水温度在摇摆过程中无波动。附加压降会使流速不断变化, 但不会对平均流速产生影响, 平均重力压降降低是造成平均流速减小的 1 个原因。

关键词: 非能动余热排出系统; 摇摆; 试验研究

中图分类号: TL33 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0222-05

Experimental Research on Operational Characteristics of Passive Residual Heat Removal System Under Rolling Motion

LI Yong-quan^{1, 2}, YAN Bing-huo^{3, *}, YU Lei³

(1. *College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;*

2. *Wuhan Second Ship Design & Research Institute, Wuhan 430033, China;*

3. *Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

Abstract: The operational characteristics of passive residual heat removal system on the rolling apparatus were investigated experimentally. The effects of rolling motion upon main parameters of passive residual heat removal system were analyzed. The effects of gravity and additional pressure drop in rolling motion upon flow velocity were also investigated theoretically. In rolling motion, the fluctuating period of the main parameters is the same with that of rolling motion. The parameters' fluctuations become more significant as the rolling motion becoming more acute. The variation trends of average condensate flow and temperate are the same. The average I/O coolant temperature is different, but their fluctuating amplitudes are nearly the same. Steam pressure and condensate temperature do not oscillate in rolling motion. Additional pressure drop can cause the response of the flow velocity, but it

收稿日期: 2010-05-11; 修回日期: 2010-06-09

作者简介: 李勇全(1979—), 男, 四川南充人, 博士研究生, 核反应堆安全分析专业

*通信作者: 鄢炳火, E-mail: yanbh1986@163.com

does not effect upon the average flow velocity. The decreasing of average flow velocity is partly caused by the reduced average gravity pressure drop.

Key words: passive residual heat removal system; rolling; experiment research

非能动余热排出系统 (PRHRS) 是在核反应堆停闭后, 依靠自然循环导出堆芯余热, 从而达到保护反应堆安全的目的。在海洋条件下, 船体运动会使流体的流动和传热特性发生变化, 从而影响到 PRHRS 的正常运行。实际海浪情况是复杂多变的, 因而船舶的运动也是非常复杂的, 其运动往往是几种简单运动的叠加。这几种简单运动包括纵荡、横荡、升沉、横摇、纵摇和首摇等 6 个自由度的摇荡运动。通常在对船体运动进行理论分析时常假定船舶在波浪中所作的自由度摇荡运动相互独立。而船舶在不规则波浪中的运动也通常可近似

用简谐运动进行分析处理, 这样可使问题大幅简化^[1]。国内外学者^[2-5]对简谐海洋条件下的核动力装置运行特性已进行了一定的理论分析与试验研究。

本工作在摇摆台架上对摇摆条件下的 PRHRS 进行试验研究。分析摇摆运动对非能动余热排出系统各主要参数的影响, 并对附加压降与重位压降进行理论分析。

1 试验介绍

1.1 试验装置

非能动余热排出系统试验装置如图 1 所示。

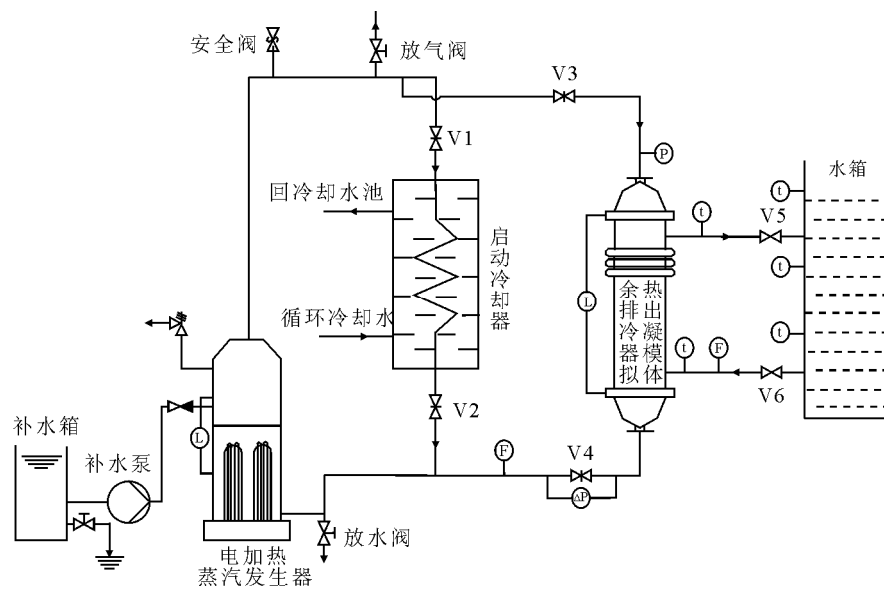


图 1 PRHRS 简图

Fig. 1 Simplified figure of PRHRS

该系统主要由电加热蒸汽发生器、非能动余热排出冷却器 (或称冷凝器)、非能动余热排出管线、阀门和冷却水箱及其管线和摇摆试验系统组成。电加热蒸汽发生器具有汽水分离器和给水下环腔; 一次侧冷凝水在电加热蒸汽发生器内加热成饱和蒸汽后经上升管路流入非能动余热排出器冷却后, 再经凝水管路从底端流回到电加热蒸汽发生器。蒸汽在非能动余热排出冷却器的传热管内流动, 二次侧的冷却水在

传热管外流动。主要测量仪表包括磁翻板式水位计、超声波流量计、铠装铂电阻温度计、压力变送器、差压变送器及电加热功率表等。系统未投入时, 非能动余热排出冷却器及上端管路充满冷却水。进行摇摆试验时, 除冷却水箱外, 电加热蒸汽发生器、非能动余热排出冷却器及其相应管路等主要设备均固连于摇摆台架上。其中电加热蒸汽发生器固定在摇摆轴上, 整个系统在系统所在的平面内进行摇摆。系统

主要参数列于表1。

表1 PRHRS 主要参数

Table 1 Main parameters of PRHRS		
设备	设计参数	数值
电加热蒸汽发生器	试验工质	纯净的除盐水
	最大电功率, kW	240
	高度, mm	3 100
	最大内径, mm	710
冷却水箱	工作压力, MPa	0.1~8.0
	容积, m ³	20
	设计压力	常压
非能动余热排出冷却器	传热管, 根	3
	传热管尺寸, mm	φ35×2.5
摇摆台架	传热管有效长度, mm	2 000
	冷却水温度, °C	8~35
	摇摆角度	0°±45° (可调)
	摇摆周期, s	7~14

1.2 试验方法

在静态试验完成后,使系统继续稳定运行。启动摇摆台控制系统,分别进行不同摇摆角度和周期的摇摆试验。摇摆台投入运行。当所有参数均呈稳定的周期性变化时,摇摆试验数据

采集系统开始记录电功率、蒸汽压力、电加热蒸汽发生器水位、非能动余热排出冷却器水位和冷却水温度等数据(冷却水温度是指流入、流出非能动余热排出冷却器的冷却水的温度),并进行整理、存储和打印。在整个试验过程中严格控制冷却水箱水量以保证其水位保持不变。

2 结果分析

主要参数响应曲线示于图2。

从图2可看出:随着摇摆振幅的增加,凝水流量波动幅度增大,凝水流量与冷却水进出口温差的平均值也越小,凝水温度也越小,这说明摇摆振幅越大,摇摆附加力越大,摇摆运动对系统的影响越明显,凝水温度降低也是凝水流量平均值降低的结果;摇摆周期越大,凝水温度平均值越大,凝水流量平均值也越大,这说明摇摆周期越大,摇摆附加力越小,摇摆运动对系统的影响越小。在整个摇摆试验中,蒸汽压力和凝水温度波动几乎无波动,凝水流量平均值与凝水温度变化趋势相同。在试验中的几种摇摆条件下,虽然冷却水进出口温差平均值有所差异,但其波动幅度却相差不大。凝水流量变化示于图3、4。

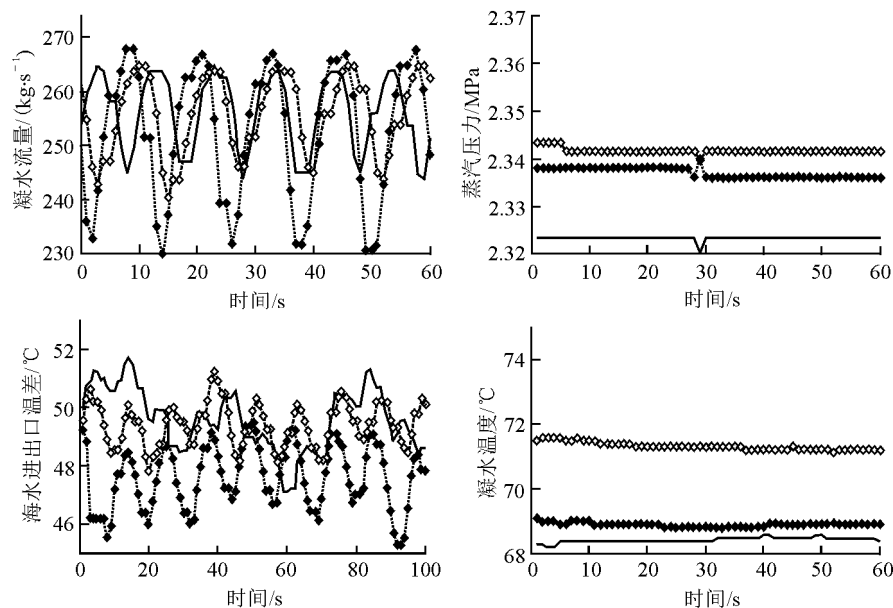


图2 主要参数响应曲线

Fig. 2 Response curves of main parameters

实线——摇摆振幅 10°, 摇摆周期 10 s; ◆——摇摆振幅 15°, 摇摆周期 12 s; ◇——摇摆振幅 10°, 摇摆周期 12 s

从图 3、4 可看出：对于相同的摇摆条件，PRHRS 的功率越高，凝水流量平均值和波动幅度越大，相对波动幅度也越大，其波动周期与摇摆周期一致。另外，在整个摇摆试验中，蒸汽压力与稳态时的值相同，在摇摆过程中也一直保持不变，几乎无任何波动，而凝水温度较之稳态值略有降低，但在摇摆过程中也无波动。

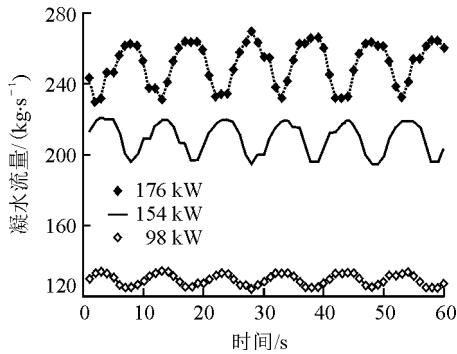


图 3 凝水流量变化

Fig. 3 Response of condensate flow rate

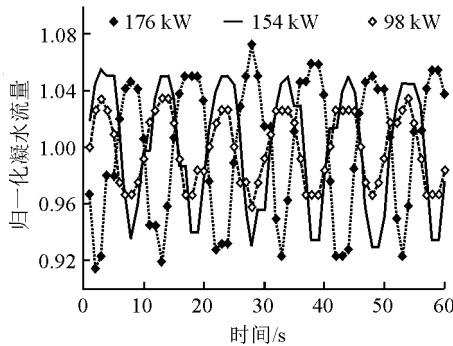


图 4 归一化凝水流量变化

Fig. 4 Response of dimensionless condensate flow rate

3 理论分析

在摇摆条件下，摇摆运动通过产生附加压降和改变环路中的重力压降对流体速度产生影响，下面以某典型自然循环系统为例(图 5)，对摇摆条件下的重力压降和附加压降进行分析。系统高为 H ，宽为 d 。冷源和热源分别位于环路的左上方和右下方。系统内冷却剂逆时针方向流动。

假设系统的摇摆运动服从简谐函数规律，其运动函数为 $\theta = \theta_m \sin(2\pi/T)$ ，其中， θ 、 θ_m

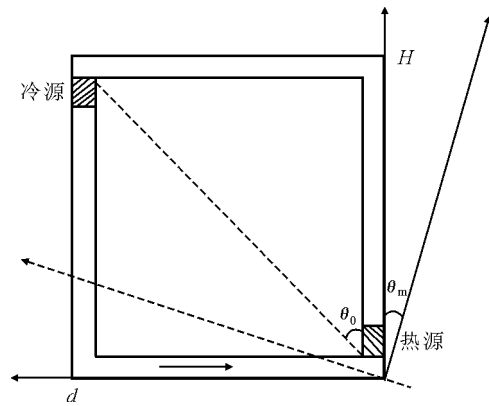


图 5 摇摆条件下自然循环系统简图

Fig. 5 Diagram of natural circulation system under rolling motion

分别摇摆角度与振幅，rad； T 为摇摆周期，s； t 为时间，s。

$$\Delta p_a = \left(\int_L F_a dL / dL \right) / A \quad (1)$$

$$F_a = F'_n + F'_t = -dm \cdot [\omega \times (\omega \times r) + \beta \times r] \quad (2)$$

式中： dm 为微元体质量，kg； ω 、 β 分别为摇摆角速度和角加速度。由式(2)可得到附加力 F_a 是 ω^2 和 β 的函数，因而可表示成：

$$F_a = \omega^2 p(x_i, m) + \beta q(x_i, m) \quad (3)$$

式中： $p(x_i, m)$ 、 $q(x_i, m)$ 均为管路位置和流体密度等的函数。将式(3)代入式(1)进行积分，可得：

$$\Delta p_a = \omega^2 p'(x_i, m) + \beta q'(x_i, m) \quad (4)$$

从式(4)可看出，环路总附加压降总可表示成 ω^2 和 β 的函数，因为：

$$\omega = \frac{2\pi\theta_m}{T} \cos \frac{2\pi t}{T}, \quad \beta = -\frac{4\pi^2\theta_m}{T^2} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (5)$$

将式(4)在 $[t, t+2\pi]$ 上积分则可以得到 $\int_t^{t+2\pi} \Delta p_a dt = 0$ 。因力与时间的乘积对应着冲量，而冲量等于动量改变。因而在 $[t, t+2\pi]$ 上动量不发生变化，又因流量也是周期性变化的，因而可认为在任意 1 个周期内附加压降不会改变流速。

如果自然循环系统中，冷源正好在热源上

方, 这时的高度差最大, 而摇摆到任意时刻, 高度差均将小于该初始值。如果冷源不在热源正上方(图5), 则在摇摆过程中, 冷热源高度差有时减小, 有时增大。这时高度差可表示成 $\sqrt{H^2 + d^2} \cos \theta_0 \cos \theta$, $\cos \theta$ 的倒数为 $-\sin \theta$, 这表明冷源向下摇摆时高度差减小得更快, 从而导致任意周期内的平均重位压降下降, 并最终导致流速减小。同时可看出, 不论摇摆轴是位于热源(或堆芯)还是其他位置, 附加压降在任意1个周期内的积分均为0, 均不会改变平均流速; 重位压降减小是使平均流速减小的1个原因。文献[3]通过试验得出: 堆芯流量随摇摆周期的变化不是直接由摇摆运动引起的惯性力引起的, 而是间接由变化的热驱动力引起的, 这与本文推导结果相一致。

综合上述理论推导和分析, 可得出如下结论: 摇摆运动通过产生附加压降和改变环路中的重位压降对流体速度产生影响。附加压降时而促进流体流动, 时而阻碍流体流动, 且在系统各部位对流体的作用也不尽相同。但对任何1个系统, 不论其摇摆轴的位置如何, 即在整个摇摆过程中, 附加压降不会对平均流速产生影响。重位压降减小是使平均流速减小的1个原因。

4 结论

1) 在摇摆过程中, 各参数的波动周期与摇摆周期一致, 摇摆幅度越大, 各主要参数波动越剧烈; 凝水流量平均值与凝水温度变化趋势相同, 冷却水进出口温差平均值有所差异, 但波动幅度相差不大。

2) 在整个摇摆试验中, 蒸汽压力与稳态值相同, 在摇摆过程中几乎无任何波动; 凝水

温度较之稳态值略有降低, 在摇摆过程中也无波动。

3) 附加压降会使流速不断变化, 但不会对平均流速产生任何影响, 重位压降减小是使平均流速减小的1个原因。

参考文献:

- [1] LEWIS E V. The motion of ships in waves[M]// Principles of Naval Architecture(1x). New york: [s. n.], 1967.
- [2] 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).
- [3] MURATA H, SAWADA K I, MICHYUKI K S. 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.
- [4] ISHIDA T, YORITSUNE T. Effects of ship motions on natural circulation of deep sea research reactor DRX[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 215: 51-67.
- [5] 鄢炳火, 李勇全, 于雷. 摇摆条件下非能动余热排出系统的试验研究[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(增刊): 123-126.
YAN Binghuo, LI Yongquan, YU Lei. Experimental research on passive residual heat remove system under rolling motion[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(Suppl.): 123-126(in Chinese).