

# 摇摆对非能动余热排出系统 自然循环能力影响的试验研究

鄢炳火<sup>1</sup>, 于雷<sup>1</sup>, 杨燕华<sup>2</sup>, 李勇全<sup>3</sup>

(1. 海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 上海交通大学 核科学与工程学院, 上海 200240;  
3. 武汉第二船舶设计研究所, 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的自然循环能力及其相关特性进行了试验研究。分析了附加压降和重力压降对流动特性的影响, 以及摇摆条件下的重力压降和流动阻力对流速的影响。结果表明: 摇摆条件下, 非能动余热排出系统自然循环能力下降。摇摆振幅越大, 平均凝水流量越小, 波动幅度越大; 凝水流量最小值随摇摆振幅的增大而下降很多, 但凝水流量最大值变化较小。系统参数变化与摇摆周期关系不大。附加压降不会对平均流速产生影响, 重力压降对平均流速的影响与周期无关。重力压降对流速的影响比流动阻力的影响小得多。随着摇摆振幅的增加, 流动阻力对平均流速的影响略有降低。

**关键词:**摇摆; 非能动余热排出系统; 重力压降

**中图分类号:** TL33      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2010)05-0543-05

## Experimental Research of Effect of Rolling Motion on Natural Circulation Capacity for Passive Residual Heat Removal System

YAN Bing-huo<sup>1</sup>, YU Lei<sup>1</sup>, YANG Yan-hua<sup>2</sup>, LI Yong-quan<sup>3</sup>

(1. Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Wuhan Second Ship Design & Research Institute, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The natural circulation capacity and related characteristics of passive residual heat removal system under rolling motion were investigated experimentally on the rolling apparatus. The effect of additional and gravity pressure drop on flowing characteristic was studied. And the influence of gravity pressure drop and flow resistance upon flow velocity was also analyzed. It is shown that the natural circulation capacity of passive residual heat removal system reduces in rolling motion. As the rolling amplitude becomes larger, the average condensate flow rate becomes smaller, and its oscillation amplitude becomes larger. Moreover, the minimum condensate flow rate decreases quickly. But the change of maximum condensate flow rate is limited. The variation of

main parameters with rolling period is not very obvious. The effect of additional pressure drop on average flow velocity is not noticeable. The influence of gravity pressure drop on average flow velocity has nothing to do with rolling period. The effect of gravity pressure drop on flow velocity is much more less than that of flow resistance. As the rolling amplitude becomes larger, the effect of flow resistance on average flow velocity diminishes.

**Key words:** rolling; passive residual heat removal system; gravity pressure drop

非能动余热排出系统 (PRHRS) 在新型核动力系统中应用比较广泛, 而在海洋条件下, PRHRS 的相关特性会受到一定影响。国内外学者<sup>[1-5]</sup>已对此进行了一定的研究。目前, 国内学者在这方面较多是进行简单的理论分析和对小型试验台架的试验研究, 在理论和试验研究方面所取得的成果还很有限。

本工作对摇摆台架上的整个 PRHRS 进行试验研究, 分析摇摆运动对其参数的影响。并从理论上分析附加压降和重位压降对流动特性的影响, 以及重位压降与流动阻力对流速的影响。

## 1 试验

### 1.1 试验装置

PRHRS 试验装置如图 1 所示。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。电加热蒸汽发生器包括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冷却器冷却后, 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定于摇摆台架上。其中, 电加热蒸汽发生器固定在摇摆轴上, 系统摇摆方向如图 1 所示。系统相关参数参见文献[3]。

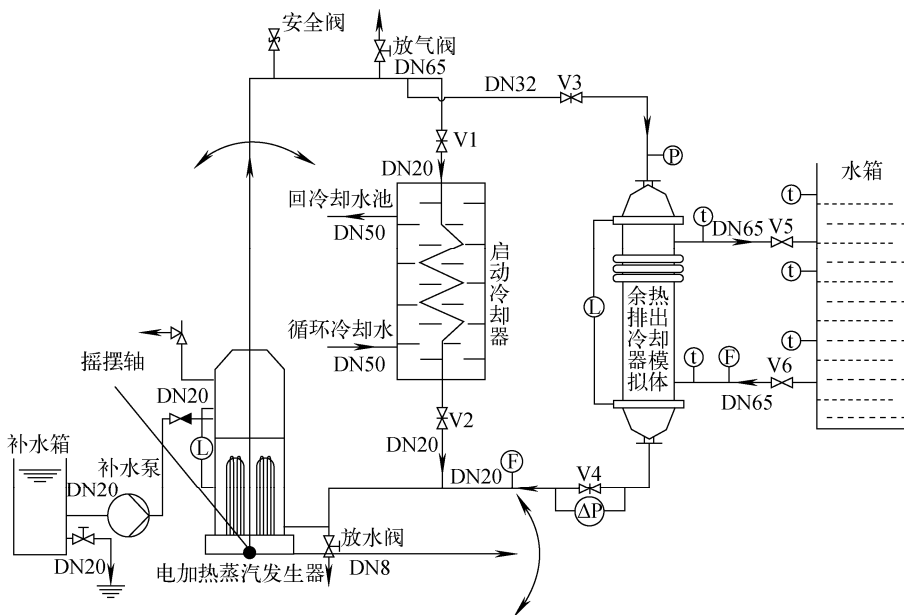


图 1 PRHRS 简图

Fig. 1 Simplified figure of PRHRS

1.2 试验方法

PRHRS 稳定运行后, 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, 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。通过调节电加热蒸汽发生器的功率控制蒸汽压力。在摇摆试验过程中, 蒸汽压力保持恒定为 2.33 MPa。稳态时, 系统主要参数列于表 1。

表 1 主要参数

Table 1 Main parameters

参数	稳态值
功率, kW	176.4
凝水流量, t/h	265.6
凝水温度, °C	75.8
蒸汽压力, MPa	2.33
冷却水入口温度, °C	19.9
冷却水出口温度, °C	70.9

1.3 试验结果

功率、平均凝水流量和凝水流量随时间变化的试验结果示于图 2。

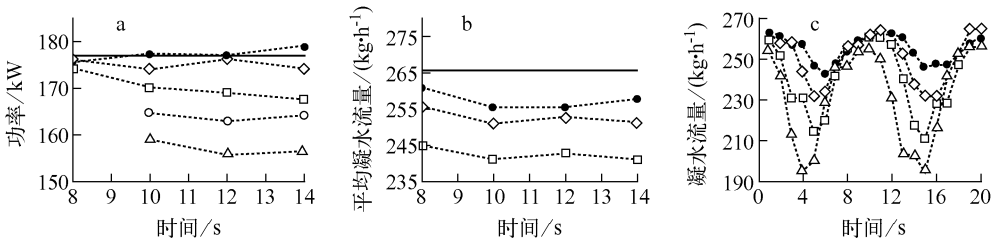


图 2 功率、平均凝水流量和凝水流量随时间的变化

Fig. 2 Power, average condensate flow rate and condensate flow rate vs. time

●——10°; ◇——15°; □——20°; ○——25°; △——30°; 实线——稳态值

从图 2a 可看出, 随着摇摆振幅的增加, PRHRS 的功率下降, 即自然循环能力下降。当摇摆振幅较小时, 功率变化较小, 甚至略微大于稳态值, 这是因为摇摆运动可增强流体内部的交混, 从而增强传热, 提高系统的自然循环能力, 图 2c 中的凝水流量降低也说明了这一点。随着摇摆周期的增大, 功率变化较小, 这说明, 对于相同的振幅, 系统自然循环能力随周期变化不明显。

从图 2b、c 可看出: 随着摇摆振幅的增大, 平均凝水流量逐渐下降, 且波动幅度也逐渐增大; 凝水流量最小值随摇摆振幅的增大而下降很多, 但凝水流量最大值则降低得较少。这是因为, 摇摆条件下系统自然循环能力下降, 导致平均凝水流量下降。随着摇摆幅度的增大, 平均凝水流量下降得越多, 波动幅度则越大。平均凝水流量的降低对凝水流量最大值的增加在一定程度上有抵消作用, 但对凝水流量最小值的减小又有一定的促进作用, 因而导致凝水流量最大值变化不大, 而凝水流量最小值下降则

极其明显。摇摆振幅相同时, 平均凝水流量随摇摆周期的变化较小。

2 理论分析

以某典型自然循环系统为例(图 3), 对摇摆条件下重位压降和附加压降进行分析。系统高为  $H$ , 宽为  $d$ 。假设摇摆运动服从简谐函数规律, 其运动函数  $\theta = \theta_m \sin(2\pi t/T)$ ,  $\theta$ 、 $\theta_m$  分别为摇摆角度与振幅, rad;  $T$  为摇摆周期, s;  $t$  为时间, s。

2.1 压降

对于附加压降, 有:

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

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

式中:  $L$  为回路长度;  $A$  为截面积;  $dm$  为微元体质量, kg;  $\omega$ 、 $\beta$  分别为摇摆角速度和角加速度;  $r$  为距离轴心的长度。

利用式(1)、(2)对附加压降在整个环路上积分可得到在任意时刻  $t$  整个环路的附加压降

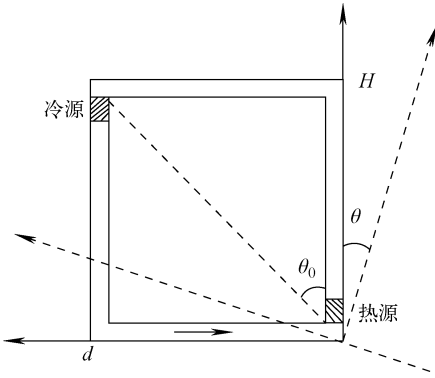


图3 摇摆条件下自然循环系统简图

Fig. 3 Diagram of natural circulation system under rolling motion

$p_a = 2\rho\beta Hd$ 。在积分过程中,向心力产生的附加压降被相互抵消。任意时刻  $t$  系统的总重位压降可表示为  $p_g = \rho g \sqrt{H^2 + d^2} \cos(\theta + \theta_0)$ 。由于摇摆体条件下参数均呈周期性变化规律,因此,可考虑 1 个摇摆周期内附加压降和重位压降的平均值,可得:

$$\overline{p_a} = \frac{1}{2\theta_m} \int_{-\theta_m}^{\theta_m} (2\rho\beta Hd) d\theta = 0 \quad (3)$$

$$\overline{p_g} = \frac{1}{2\theta_m} \int_{-\theta_m}^{\theta_m} (\rho g \sqrt{H^2 + d^2} \cos(\theta + \theta_0)) d\theta = \rho g H \sin \theta_m / \theta_m \quad (4)$$

从式(3)、(4)可看出:附加压降有时推动流体流动,有时阻碍流体流动,但在 1 个周期内。它对流体运动的作用为零;对于重位压降,在摇摆过程中,有时冷、热源高度差增加,有时又减小,但在 1 个周期内,摇摆运动会使重位压降下降,且摇摆幅度越大,下降幅度越明显。由于其他复杂的自然循环系统均可通过折算化成类似的矩形环路,这个结论因而具有普遍意义。另外,平均重位压降的变化仅与摇摆振幅有关,与摇摆周期无关。这意味着,平均重位压降对平均

流速的影响与摇摆周期无关。

## 2.2 重位压降与平均流速的关系

在非摇摆条件下的自然循环系统中,环路总重位压降等于总阻力,即:

$$\Delta\rho g H = \left( \frac{fL}{D} + K \right) \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

其中: $f$  为摩擦阻力系数; $D$  为当量直径,  $m$ ;  $K$  为局部阻力系数; $v$  为流速,  $m/s$ 。

假定流体处于充分发展状态,则  $f$  可表示为:

$$f = a/Re^b = a/(\rho D v / \mu)^b \quad (6)$$

其中: $Re$  为雷诺数; $\mu$  为动力粘度,  $N \cdot s/m^2$ ;  $a, b$  为常数,当流体处于层流状态时,  $a = 64$ ,  $b = 1$ ,当流体处于湍流状态时,  $a = 0.184$ ,  $b = 0.2$ 。

如果假定环路中总摩擦阻力与总局部阻力近似相等,则式(5)可写为:

$$\Delta\rho g H = a L \rho^{1-b} \mu^b v^{2-b} / D^{1+b} \quad (7)$$

在自然循环系统中,流体一般处于层流与湍流的过渡区,流速通常较小,因而假定  $b = 0.6$ 。这样,式(7)可简写为:

$$H \propto v^{1.4} \quad (8)$$

式(4)表明:在摇摆条件下,平均重位压降的相对减少量为  $1 - \sin \theta_m / \theta_m$ 。由式(8)可知,由平均重位压降减少引起的平均流速相对减少量为  $(1 - \sin \theta_m / \theta_m)^{0.7143}$ 。然而,试验结果表明,平均凝水流量的相对减少量比  $(1 - \sin \theta_m / \theta_m)^{0.7143}$  大得多。两者的比较结果列于表 2、图 4(平均凝水流量的单位为  $kg/h$ ,相对减少量是指不同周期、相同振幅的平均凝水流量的相对减少量)。

从表 2、图 4 可看出,随着摇摆振幅的增大,平均凝水流量的相对减少量逐渐增大,当摇摆振幅达到  $25^\circ$  时,相对减少量为  $11.2\%$ 。平均重位压降减小导致的平均凝水流量的降低也

表 2 平均凝水流量减少趋势

Table 2 Decreasing tendency of average condensate flow rate

摇摆 振幅/ $^\circ$	平均凝水流量 稳态值/ ( $kg \cdot h^{-1}$ )	不同摇摆周期(s)下平均凝水流量/( $kg \cdot h^{-1}$ )				相对 减少量/ $\%$	$(1 - \sin \theta_m / \theta_m)^{0.7143} / \%$
		8	10	12	14		
10	265.5	260.6	255.3	255.4	257.5	3.13	0.36
15	265.5	255.5	250.7	252.6	251.2	4.9	0.82
20	265.5	244.7	241.1	242.6	240.9	8.73	1.45
25	265.5	—	230.8	234.9	241.7	11.2	2.25

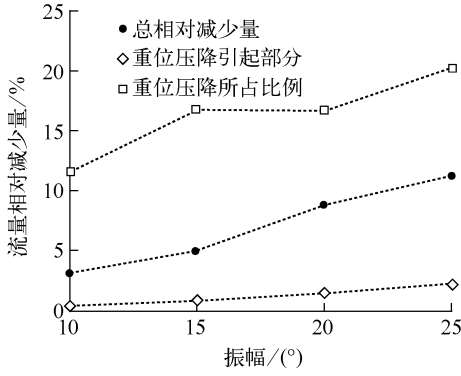


图4 凝水流量减少量

Fig. 4 Decrement of condensate flow rate

随着摇摆振幅的增加而逐渐增大。在总平均凝水流量相对减少量中,平均重位压降减少引起的部分所占比例随振幅增加逐渐增加。这意味着,随着摇摆振幅的增加,流动阻力对平均流速的影响略有降低。式(4)已表明,平均重位压降的减少与摇摆周期无关,而平均凝水流量随摇摆周期变化很小,这就说明了摇摆条件下的流动阻力随摇摆周期的变化较小,而随摇摆振幅的变化则较明显。在整个摇摆试验中,平均重位压降减少引起平均凝水流量的减少部分所占比例不到20%,其余大部分则由流动阻力增加所引起。

### 3 结论

1) 随着摇摆振幅的增加,PRHRS自然循环能力逐渐下降。当摇摆振幅较小时,摇摆运动通过增强传热使系统的自然循环能力提高。系统自然循环能力随周期的变化不明显。

2) 摇摆振幅越大,平均凝水流量越小,波动幅度越大;凝水流量最小值随摇摆振幅的增大下降显著,但凝水流量最大值变化较小。平均凝水流量随摇摆周期的变化不大。

3) 附加压降不会对平均流速产生影响,平均流速减小归因于平均重位压降降低。重位压降对平均流速的影响与摇摆周期无关。

4) 对于本试验装置,平均重位压降减少引

起的平均凝水流量减少部分所占总凝水流量减小量的比例不到20%,其余大部分则由流动阻力增加所引起。随着摇摆振幅的增加,流动阻力对平均流速的影响略有降低。

### 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试验研究[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] 于雷, 鄢炳火, 陈玉清. 海基核动力装置自然循环数学模型的建立与运行特性研究[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(增刊): 116-122.  
YU Lei, YAN Binghuo, CHEN Yuqing. Theoretical model research and operational characteristics analysis of natural circulation for nuclear machinery under ocean condition [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42 (Suppl.): 116-122 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] MURATA H, SAWADA K I, MICHIMYUKI 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.
- [5] 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.