

# 摇摆条件下非能动余热排出系统的实验研究

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

(1. 海军工程大学, 湖北 武汉 430033; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**在摇摆台架上对非能动余热排出系统进行了实验研究和数值模拟。在小摇摆振幅条件下, 摇摆对系统影响较小, 在大摇摆振幅条件下, 系统的传热能力有一定程度的降低; 摇摆条件下, 系统的传热受传热系数、摩擦阻力和流速等因素的影响, 而不是摇摆振幅和周期的简单函数。在 RELAP5/MOD3.2 程序的基础上, 用漂移流模型代替两流体模型, 通过修正混合物动量方程、提升降压、冷凝传热关系式和添加矩阵求逆模块研制了摇摆条件下非能动余热排出系统的计算分析软件。对实验进行了数值模拟, 结果与实验比较吻合。

**关键词:**摇摆; 非能动余热排出系统; 试验研究; 数值模拟

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S0-0123-04

## Experimental Research on Passive Residual Heat Remove System Under Rolling Motion

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

(1. *Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;*

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

**Abstract:** The passive residual heat remove system on the rolling roof was investigated experimentally and simulated. Under the condition of small rolling amplitude, the influence of rolling motion is limited, while the heat removed under the condition of big rolling amplitude decreases. The electrical power, which is influenced by the heat transfer coefficient, friction resistance and velocity, is not only the function of rolling amplitude and period. On the basis of RELAP5/MOD3.2, the drift flux model was used to replace the two-fluid model. The simulating and analysis program of passive residual heat remove system of rolling motion was established by modifying the mixture momentum equation, gravitational pressure drop and condensation heat transfer correlation. The module to compute the inverse of matrix was also added in the program. The simulation results are consistent with experiments.

**Key words:** rolling; passive residual heat remove system; experimental research; numerical simulation

非能动余热排出系统(PRHRS)是在核反应堆停堆后,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,流体的流动特性和传热特性均会发生变化,从而影响到非能动余热排出系统的正常运行。因此,开展这方面的研究是必要的<sup>[1-5]</sup>。

本文在摇摆台架上研究了摇摆对非能动余热排出系统的影响,并利用改进的 RELAP5/MOD3.2 程序对实验进行数值模拟。

## 1 实验介绍

### 1.1 实验装置

非能动余热排出系统试验装置示于图 1。

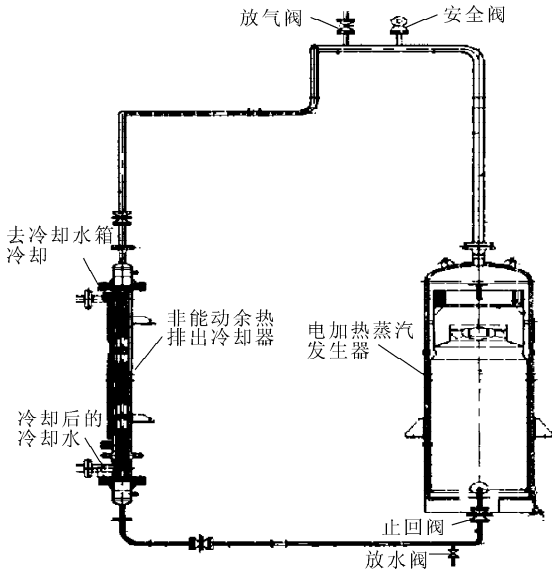


图 1 非能动余热排出系统简图

Fig. 1 Scheme of PRHRS

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。进行摇摆实验时,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连接摇摆台架。其中,电加热蒸汽发生器固定在摇摆轴上,整个系统在平行于纸面的平面内进行摇摆(也称为纵摆)。系统主要参数列于表 1。

### 1.2 实验方法

非能动余热排出系统稳定运行后,启动摆

台控制系统,分别进行不同摇摆角度和周期的摇摆实验。摇摆台投入运行。当所有参数均呈稳定的周期性变化时,摇摆实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。在整个实验过程中,严格控制冷却水箱水量以保证其水位保持不变。在摇摆实验进行过程中,通过调节电加热蒸汽发生器的功率控制蒸汽压力,蒸汽压力稳定后的电加热功率即为该摇摆条件下系统所能带走的最大功率。

表 1 非能动余热排出系统主要参数

Table 1 Main parameters of PRHRS

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

### 1.3 实验结果

通过改变冷却水管线与冷却水箱相连的管道开口型式改变冷却水侧的流动特性,进而改变非能动余热排出冷却器的传热来对系统进行调节。本实验中 3 种开口型式(下称型式 1、2、3)所对应稳态运行功率分别为 172.2、172.8 和 170.3 kW。文中所有电功率数据均已扣除了系统向环境的散热。实验结果示于图 2。

从图 2 可看出:当摇摆振幅较小时,摇摆运动对系统影响不是很大;当摇摆振幅较大时,摇摆对系统影响比较明显,系统所能带出的热量有一定幅度的下降。在某些小幅摇摆条件下,系统所能带出的热量会有所上升,这是因为摇摆运动会改变回路中流体微团的脉动速度,从而增强流体中的动量和能量交换,进而改善流体的换热,增大传热系数,使系统带出的热量增加。在摇摆条件下,流体的摩擦阻力、冷凝和对流换热系数均发生了改变,同时,流体还受到摆

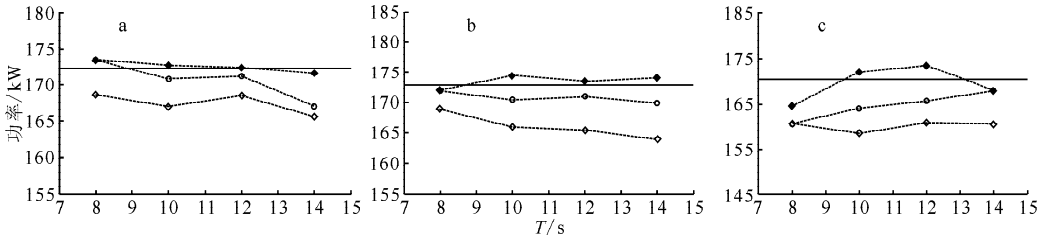


图2 摇摆条件下的功率

Fig. 2 Power of rolling motion

a—模型1; b—模型2; c—模型3

◆—振幅 10°; ○—振幅 15°; ◇—振幅 20°; 实线—摇摆前

摆附加力的影响,流动速度也发生了变化。因而摇摆状态下系统能带出的热量并不仅是摇摆振幅和周期的简单函数,同时还受到流体物性和流动特性的影响。

## 2 数值模拟

对上述非能动余热排出系统进行控制体划分,共分为 28 个控制体和 30 条流线(图 3)。

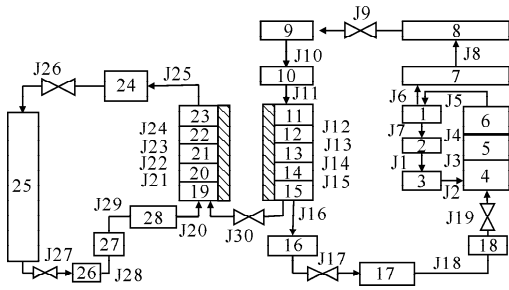


图3 非能动余热排出系统的控制体划分

Fig. 3 Nodalization of PRHRS

### 2.1 数学模型

#### 1) 混合物动量方程

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial q_m}{\partial t} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial z} [v_m q_m + \alpha(1-\alpha) \frac{\rho_g \rho_{loc}}{\rho} v_r^2 A] = - \left( \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial p_f}{\partial z} + \frac{\partial p'_{loc}}{\partial z} + \frac{\partial p'_g}{\partial z} + \frac{\Delta p_a}{\partial z} \right) + \sum S v_s \quad (1)$$

式中: $t$  为时间,  $s$ ;  $z$  为沿流动方向的位置,  $m$ ;  $\rho$  为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $q_m$  为混合物质量流量,  $kg/s$ ;  $v_r$  为汽、液相对速度,  $m/s$ ;  $v_m$  为混合物质心速度,  $m/s$ ;  $p_f$ 、 $p_{loc}$ 、 $p'_g$  分别为摩擦压降、局部阻力压降和提升压降,  $Pa$ ;  $\Delta p_a$  为摇摆引起的附加压降,  $Pa$ ;  $\sum S v_s$  为注入流量的贡献,  $S$  表

示源项,  $kg/(s \cdot m^3)$ ,  $v_s$  为注入流量速度,  $m/s$ 。 $\Delta p_a$  的计算方法同文献[3]。

$$p'_g = \rho g H \cos \theta' \quad (2)$$

式中: $H$  为控制体高度,  $m$ ;  $\theta'$  为摇摆条件下控制体与竖直线的夹角,  $rad$ 。

#### 2) 传热模型

RELAP5/MOD3.2 程序中的冷凝关系式为膜状凝结换热公式,与本系统实验结果差别大。本文采用 Chun 和 Seban<sup>[2]</sup> 推荐的公式,并对其修正:

$$\delta_{wav} = 1.33 Re_1^{-0.11} \delta \quad (3)$$

$$h_{wav} = \lambda \frac{k_1}{\delta_{wav}} = 0.822 \lambda \left( \frac{k_1^3 g \rho_1^2}{\mu_1^2} \right)^{1/3} Re_1^{-0.22} \quad (4)$$

式中: $\delta$  为液膜厚度,  $m$ ;  $Re_1$  为液相雷诺数;  $k_1$  为液相热导率,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $\mu_1$  为液相动力粘度,  $kg/(m \cdot s)$ ;  $\lambda$  为修正系数,  $\lambda$  的引入是为了考虑蒸汽夹带对冷凝换热的影响,  $\lambda = 1.5$ 。

修正后的计算结果与实验吻合较好。

在二次侧,冷却水纵向流过平行传热管束,因此,本文采用文献[6]推荐的关系式对传热系数进行修正。

$$Nu = (0.042 P/d - 0.024) Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (5)$$

式中: $P$  为传热管排列的栅距,  $m$ ;  $d$  为传热管的外径,  $m$ ;  $Re$  为雷诺数;  $Pr$  为普朗特数。

文献[1,4-5]分别提出了摇摆条件下的摩擦阻力计算公式和传热关系式,但这几个公式是根据实验数据耦合而来的,其使用范围都仅限于各自的实验中,将其应用到本实验装置后,发现其与实验结果相差很大。因而本文采用带修正的 RELAP5/MOD3.2 程序的模型进行计算。

#### 3) 矩阵求逆模块

在 RELAP5/MOD3.2 程序的多压力节点方

法中涉及到矩阵求逆的运算,而 RELAP5/MOD3.2 原程序是用初等行变换进行求解,这种解法的运算速度较快,但当遇到对角线元素为零或很小的数时,程序会因出现分母为零而导致计算无法继续进行。因此,本文先计算矩阵的行列式和伴随矩阵,再求矩阵的逆。这种方法运算量虽比前者大一些,但始终能保证程序计算的正常进行。在实际计算中,由于该模块只是计算软件的

一小部分,所以,两种方法的计算速度几乎相同。

## 2.2 计算结果

利用改造的 RELAP5/MOD3.2 程序对实验装置进行数值模拟。结果示于图 4。

从图 4 可看出,本文计算结果与实验的误差均在  $\pm 10\%$  内,与实验值相比,本文计算的功率随摇摆周期的变化较小,这主要是因摇摆条件下摩擦阻力和传热系数均发生变化。

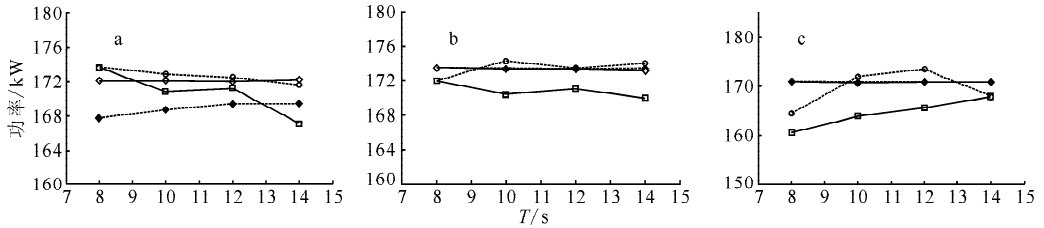


图 4 计算值与实验值的比较

Fig. 4 Comparison between calculation and experiment values

a—型式 1; b—型式 2; c—型式 3

◆——振幅  $10^\circ$ , 计算值; ○——振幅  $10^\circ$ , 实验值; ◇——振幅  $15^\circ$ , 计算值; □——振幅  $15^\circ$ , 实验值

## 3 结论

在摇摆台架上对非能动余热排出系统进行了实验研究和数值模拟,在小摇摆振幅条件下,摇摆对系统影响不大,在大摇摆振幅条件下,系统的传热能力有一定降低;在摇摆条件下的系统的传热能力受到传热系数、摩擦阻力和流速等多种因素的影响,而不是摇摆振幅和周期的简单函数。在 RELAP5/MOD3.2 程序的基础上,用漂移流模型代替两流体模型,通过修正混合物动量方程、提升压降、冷凝传热关系式和添加矩阵求逆模块研制了摇摆条件下非能动余热排出系统的计算分析软件。对实验进行了数值模拟,计算值与实验值比较吻合,误差在  $\pm 10\%$  以内。

## 参考文献:

[1] MURATA H, SAWADA K I, MICHUYUKI K S. Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion and heat transfer in the core[J]. Nucl Eng Des, 2002, 215: 69-85.  
 [2] CHUN K R, SEBAN R A. Heat transfer to evaporating liquid films[J]. J Heat Transfer, 1971, 10: 391-396.

[3] 庞凤阁,高璞珍,王兆祥,等. 海洋条件对自然循环影响的理论研究[J]. 核动力工程, 1995, 16(4): 330-335.  
 PANG Fengge, GAO Puzhen, WANG Zhaoxiang, et al. Theoretical research for effect of ocean conditions on natural circulation[J]. Nucl Power Eng, 1995, 16(4): 330-335(in Chinese).  
 [4] 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]. Nucl Power Eng, 2006, 27(5): 33-36(in Chinese).  
 [5] 曹夏昕,阎昌琪,孙中宁. 气-液两相泡状流在摇摆状态下的摩擦压降计算[J]. 核动力工程, 2007, 28(1): 72-77.  
 CAO Xiixin, YAN Changqi, SUN Zhongning. Pressure drop correlations of two phase bubble flow in rolling tubes[J]. Nucl Power Eng, 2007, 28(1): 72-77(in Chinese).  
 [6] 蔡章生. 核反应堆热工与安全分析[M]. 武汉: 海军工程大学, 2005.