

海洋条件对船用核动力堆 余热排出系统特性的影响

苏光辉 张金玲 郭玉君
秋穗正 喻真烷 贾斗南

(西安交通大学能动学院, 710049)

针对非能动余热排出系统, 研究并建立了数学模型。采用吉尔方法, 用结构化程序设计语言 FORTRAN 77 编制了程序 MISAP 02, 分析计算了起伏、倾斜、摇摆等海洋条件对船用核动力堆余热排出系统的自然循环流量和除热能力的影响。结果表明: 在海洋条件下, 自然循环流量和除热能力受到了影响。

关键词 船用核动力堆 自然循环 起伏 倾斜 摇摆

事故停堆或正常停堆时, 及时导出堆芯中的剩余衰变热对反应堆的安全是很重要的。对于轻水堆, 若停堆 2 h 后余热不能导出, 堆芯可能熔化。采用非能动余热排出系统 (PRHRS), 实现自然循环冷却, 系统将具备固有安全性。

船用核动力系统的设计较陆用的有着许多特殊的考虑。船用核动力装置在起伏、倾斜、摇摆时, 各设备的相对高度将发生变化; 蒸汽发生器内水平面产生倾斜和振荡时, 堆芯内及蒸汽发生器内的空泡分布也将随之变化。这些变化将影响系统自然循环能力、换热特性和堆芯临界热通量。船体的上下起伏不仅影响空泡分布, 还影响重力场, 从而影响传热和流动特性。系统的倾斜、摇摆、起伏等引起的堆芯空泡分布的变化, 给反应堆堆芯的反应性反馈也将带来一定影响。同样, 余热排出系统在此条件下的传热和流动特性也将受到影响。

本文讨论在海洋条件下船用堆中的余热排出系统的特性。海洋条件是复杂的, 本文仅讨论起伏、摇摆、倾斜等的影响。

1 数学模型

非能动余热排出系统的示意图示于图 1。针对该系统, 建立如下模型。

1.1 热工水力模型

对于单相流体有:

质量守恒方程

收稿日期: 1995-08-01 收到修改稿日期: 1996-12-15

$$\frac{\partial q_m}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: q_m 为质量流量, kg/s; z 为空间坐标, m。

能量守恒方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{ql}{\rho A} - \frac{q_m}{\rho A} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2)$$

式中: h 为比焓, kJ/kg; l 为加热周长, m; t 为时间, s; q 为热流密度, kW/m²; ρ 为密度, kg/m³; A 为流通截面积, m²; 其余符号同式(1)。

对于两相流体有:

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial q_m}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\rho_m = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l \quad (4)$$

式中: ρ_m 为平均密度, kg/m³; ρ_g 为汽相密度, kg/m³; ρ_l 为液相密度, kg/m³; 其余符号同式(2)。

能量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial t} = & \left\{ \frac{ql}{A} + \frac{\partial p}{\partial t} + h \frac{\partial \rho_l}{\partial t} - \frac{q_m}{A} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right. \\ & \left. - \frac{\partial}{\partial t}(\rho_l h_l) - \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g h_g - \rho_l h_l) - h \frac{\partial \rho_{gl}}{\partial t} \right] \alpha \right\} / (\rho_g h_g - \rho_l h_l - h \rho_{gl}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: p 为压力, Pa; h_g 为汽相比焓, kJ/kg; h_l 为液相比焓, kJ/kg; $\rho_{gl} = \rho_l - \rho_g$, 其余符号同前。

动量守恒方程

$$\frac{\partial q_m}{\partial t} = -A \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{q_m^2}{\rho A} \right) - \rho g A - U f_w \frac{q_m^2}{2 \rho A^2} \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度, m/s²; f_w 为摩擦系数; U 为湿周, m; 其余符号同前。

1.2 冷凝换热模型

蒸汽在冷却器内的换热为冷凝换热, 采用修正的 Dittus-Boeler 关系式:

$$H_t = 0.5 H_{t0} [1 + (\rho_l / \rho_g)^{0.5}] \quad (7)$$

式中: H_t 为冷凝换热的换热系数, W/(m²·°C); H_{t0} 为液相换热系数, W/(m²·°C), 由式(8)求出; 其余符号同前。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (8)$$

式中: Nu 为努塞尔数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数。

1.3 船舶的起伏模型

船在上升或下降时, 会产生 1 个附加加速度叠加在重力场上^[5], 从而有

$$g = g_c \pm a_g \quad (9)$$

这相当于在原来的加速度为 g_c 的重力场中线性迭加 1 个加速度为 a_g 的重力场。当船体上升时, 式中取“+”, 反之取“-”。

1.4 船舶的倾斜模型

船舶在倾斜时, 主要是改变了自然循环的有效高度^[6], 进而影响了余热排出系统的性能(图 2)。假设控制体的进、出口高度差为 H , 则倾斜时自然循环的有效高度差 H_t 为:

$$H_t = H \cos \theta \quad (10)$$

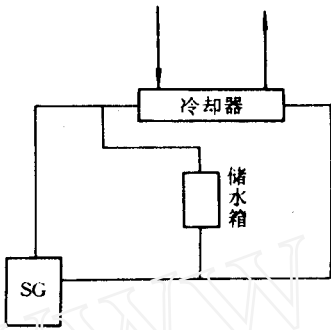


图1 非能动余热排出系统示意图

Fig.1 Diagram of passive residual heat removal system (PRHRS)

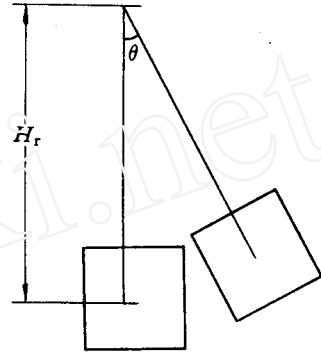


图2 倾斜模型

Fig.2 Listing model

1.5 船舶的摇摆模型

船舶在左右摇摆时,主要是改变了重力场,进而影响了余热排出系统的性能^[6]。重力场也相应地变为:

$$g = g_0 \cos \theta \quad (11)$$

1.6 物性模型

水及水蒸汽的各种物性参数的准确计算,对于余热排出系统的瞬态计算至关重要。本模型中的物性方程都经过了程序验证,并涉及到所有水及水蒸汽的物性计算。

2 模型求解及程序编制

将蒸汽发生器出口到冷却器进口的管路(称上升段)、冷却器均划分为6个控制体,冷却器出口至蒸汽发生器给水进口的管路(称下降段)也划分为6个控制体,则上述模型组成了由27个方程构成的偏微分方程组。应用向后差分将该方程组离散化。在每1个控制体内,假设各种变量只是时间的函数、不随空间坐标变化是合理的,则该偏微分方程组变为常微分方程组。这一方程组的求解采用先进的吉尔方法,用结构化程序设计语言 FORTRAN 77 编制了程序 MISAP 02。程序实现了高度模块化,每个功能都由1个模块完成,主程序只需调用各个模块。所以,程序使用方便,且便于移值。

3 计算结果与讨论

船体上下起伏时,余热排出系统的自然循环流量及除热能力受到了影响。图3示出了船体在下降过程中余热排出系统的自然循环流量随时间的变化曲线。图中选用的附加加速度值选自国际海事机构核商船安全标准。由图可知,在下降过程中,附加加速度越大,自然循环的流量越小,因为此时式(9)中取负号,重力的作用被削弱。同样,在上升过程中,由于重力的作用被加强,自然循环的流量随着附加加速度的加大而增加。

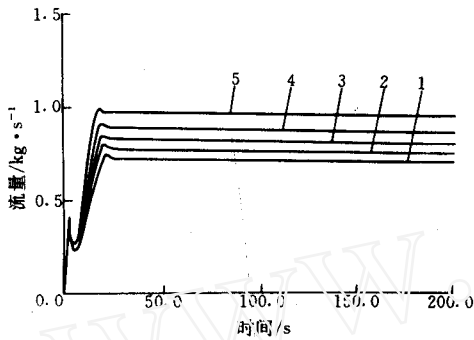


图3 余热排出系统的自然循环特性
Fig. 3 The characteristic of natural circulation flow of PRHRS

1— $a_g = 1.0$; 2— $a_g = 0.85$; 3— $a_g = 0.7$;
4— $a_g = 0.6$; 5— $a_g = 0.5$

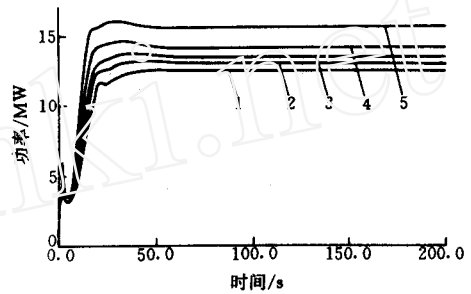


图4 余热排出系统的除热特性
Fig. 4 The characteristic of heat exchange capacity of PRHRS

1— $a_g = 1.0$; 2— $a_g = 0.85$; 3— $a_g = 0.7$;
4— $a_g = 0.6$; 5— $a_g = 0.5$

图4示出了船体在下降过程中余热排出系统的除热能力。由图可知,在下降过程中,附加加速度大,系统的除热能力小。这是流量减少所致。同样,在船体上升过程中,附加加速度大,系统的除热能力亦大。这是流量增大所致。

在系统投入运行之前,由于流量为零,上升段与下降段的密度差很大。系统一旦投入,自然循环流量急速增加,因而系统的除热能力也迅速增加。由于带入的大量热量不能及时排到环境中去,造成下降段温度上升或带汽,因而上升段与下降段的密度差减小,流量又有所降低,从而形成波动。波动几十秒之后,自然循环流量和余热排出能力方能稳定下来。

图5示出了船体倾斜对余热排出系统的自然循环流量和除热能力的影响。由图可知,倾斜角度大,有效高度改变亦大,导致系统的流量减小。系统流量的减小又导致除热能力的下降。

船体摇摆时的情况比较复杂,计算结果将在另外的文章中讨论。

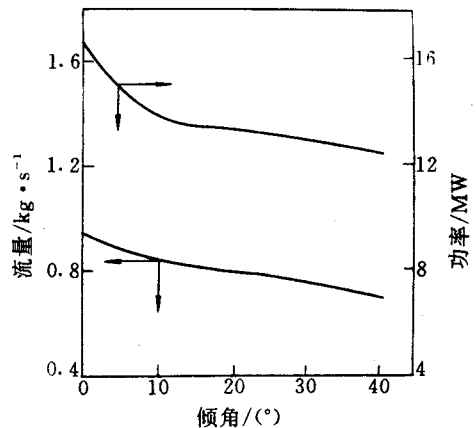


图5 倾斜对余热排出系统的自然循环流量和除热特性的影响

Fig. 5 The influence of listing on the natural circulation flow and the ability of heat transfer of PRHRS

参 考 文 献

- 1 Collier JG. Convective Boiling and Condensation. [s. l.]: MCGRAW-HILL International Book Company, 1981. 300—350.
- 2 林宗虎编著. 气液两相流沸腾传热. 西安: 西安交通大学出版社, 1987. 5—7.
- 3 马义伟编. 空气冷却器. 北京: 化学工业出版社, 1981. 62—90.
- 4 居怀明, 徐元辉, 李怀萱编著. 载热质热物性计算程序及数据手册. 北京: 原子能出版社, 1990. 21—24.
- 5 Isshiki N. Effects of Heaving and Listing Upon Thermo-hydraulic Performance and Critical Heat Flux of Water-cooled Marine Reactors. Nucl Eng Des, 1966, 4: 138—162.
- 6 Kusunoki T. Analytical Study on the Effects of Rolling on the Flow in the Core of the Marine Reactor: JAERI-M 90-181. 1990.

EFFECTS OF OCEAN CONDITIONS UPON THE PASSIVE RESIDUAL HEAT REMOVAL SYSTEM (PRHRS) OF SHIP REACTOR

Su Guanghui Zhang Jinling Guo Yujun
Qiu Suizheng Yu Zhenwan Jia Dounan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049)

ABSTRACT

The paper studies the influence of ocean conditions (heaving, listing, rolling) on the natural circulation flow and the ability of heat transfer of the ship reactor's PRHRS, and develops a mathematical model. A program, MISAP 02, is compiled with the structured FORTRAN 77 using the advanced Gear method. The program is used to calculate the above influence. The results show that the ocean conditions have effects on the natural circulation flow and the ability of heat transfer.

Key words Ship reactor Natural circulation Heaving Listing Rolling