

自然循环过渡过程 UTSG 一次侧 倒流特性研究

章 德, 陈文振, 王少明, 王 川

(海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 自然循环条件下, 立式倒 U 型管型蒸汽发生器 (UTSG) 并联倒 U 型传热管内存在非均匀流动, 部分传热管出现倒流, 倒流的发生对反应堆自然循环能力产生显著的影响。按管长对并联倒 U 型传热管进行分类, 建立分布式的结构模型。采用最佳评估程序 RELAP5/MOD3.3, 对主泵不同转动惯量下的自然循环过渡过程进行研究, 得到了转动惯量对 UTSG 倒 U 型管内非均匀流动的影响特性。研究结果表明, 转动惯量的增加可以延缓倒流的发生, 但对倒流的空间分布和倒流流量无影响。

关键词: 自然循环; 过渡过程; RELAP5/MOD3.3; 转动惯量; UTSG; 倒流

中图分类号: TL333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931 (2010) S0-0181-06

UTSG Primary Side Reverse Flow During Natural Circulation Transition Process

ZHANG De, CHEN Wen-zhen, WANG Shao-ming, WANG Chuan

(Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Under natural circulation condition, the non-uniform flow will appear in the parallel flow in the tubes of inverted U-tube steam generators. And reverse flow occurs within some tubes, which can greatly influence the characteristics of natural circulation. To study the characteristics of non-uniform flow, U-tubes were classified according to their lengths. By using the best estimate code RELAP5/MOD3.3, the transition processes of natural circulation with different coolant pump moments of inertia were studied. The results show that the increase of moment of inertia can postpone the occurrence of reverse flow, but can not change the distribution and flow rate of reverse flow.

Key words: natural circulation; transition process; RELAP5/MOD3.3; moment of inertia; UTSG; reverse flow

自然循环是指在重力作用下的闭合系统中流体不依赖外界动力源, 仅利用冷、热源流体密度差产生的驱动力而进行的循环流动^[1]。自然循环冷却可有效地增强反应堆的非能动安全性, 可减少堆芯各通道内流量分配的不均匀性,

可提高一体化反应堆的性价比, 因而自然循环技术在新一代反应堆的设计与运行中占有重要地位。

目前运行中的及新一代的压水堆核动力装置中, 广泛使用了立式倒 U 型管型蒸汽发生器

(UTSG)^[2]。然而,根据已有的文献报道^[3-6],在进行一回路系统自然循环能力研究时,发现UTSG倒U型传热管内存在显著的非均匀流动,某些倒U型传热管内的单相冷却剂会发生倒流流动,即UTSG一次侧的冷却剂从出口腔室流至入口腔室。自然循环条件下UTSG内发生倒流流动的典型特征为:1)传热管内冷却剂未建立温差且温度与二次侧饱和温度接近;2)UTSG进口腔室的压力小于出口腔室的压力(下称“进出口腔室负压差”);3)入口腔室的冷却剂温度较热段温度有一陡降。倒流的出现使UTSG的有效传热面积减少,倒流冷却剂在入口腔室内与反应堆出口的热管段来流冷却剂进行复杂的混合、耗散,使自然循环工况下的UTSG流动阻力系数较强迫循环工况明显增大;回路流动阻力的增加导致流过反应堆堆芯的流量减少,反应堆的自然循环能力受到显著的影响。

目前,国内外学者采用RELAP5等最佳估算程序对核动力装置自然循环特性进行研究时,通常将SG内不同长度的倒U型传热管等效为同一长度的倒U型管,这种方法通常无法模拟出U型管内的倒流特性。文献[7]中建立了包含两根传热管的简化的SG计算模型,该模型的计算结果反映了SG一次侧流量变化过程中倒U型传热管内的流量漂移现象。但其模型过于简单,且SG二次侧的假设与核动力装置实际运行存在较大差异,模型的适用性十分有限。

本工作利用最佳估算程序RELAP5/MOD3.3对典型核动力装置进行建模,根据长度对倒U型传热管进行分类并建立分布式的结构模型,对主泵不同转动惯量条件下自然循环过渡过程进行研究,以得到UTSG一次侧非均匀流动特性。

1 系统简介及模型验证

1.1 自然循环回路与SG

本文研究的某压水型核动力装置为典型的双环路结构,该装置的自然循环建立方式为:在强迫循环工况下依次停闭左右环路的主泵,在主泵惰转过程中,通过惯性流量为反应堆提供冷却;主泵惰转停止后,环路流量迅速下降;

当冷却剂流量、反应堆功率稳定后,系统进入自然循环工况。该型核动力装置使用UTSG,其传热管直管段长度、内外径尺寸、成分材料均相同,弯管段长度不同。

1.2 控制体划分

利用RELAP5/MOD3.3程序对SG进行结构建模时,传统的方法是将所有U型传热管进行集总参数处理,确保集总后的U型管内外总传热面积不变,进出口流动压降基本不变。这种控制体划分方法可对强迫循环进行较为精确地模拟,但无法模拟自然循环工况下并联倒U型传热管内可能存在的倒流现象。根据传热管的长度,将其分为16类,最长U型管与最短U型管长度比值约为1.42,最短U型管与最长U型管数目比值约为3.43,每类U型管沿流动方向各划分成10个控制体,单台SG一次侧的控制体个数为162个(进出口腔室各1个)。SG控制体划分图示于图1。

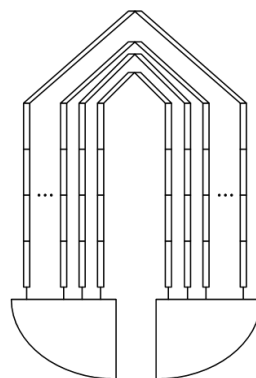


图1 SG一次侧控制体划分

Fig. 1 Nodalization of SG primary side U-tubes

1.3 离心泵模型

本文主冷却剂泵为离心泵,其主要参数有:泵的扬程、转矩、体积流量和角速度。由实验得出的这些主要参数之间对应关系的曲线称之为泵的四象限曲线,该曲线唯一地确定了作为体积流量和泵速度函数的泵的扬程和泵的转矩,但该曲线难以直接用于数值计算。在实际计算中,通常将其转换为类比曲线,包括转速比 $\alpha = \omega/\omega_r$,扬程比 $h = H/H_r$,体积流量比 $v = Q/Q_r$,转矩比 $\beta = \tau/\tau_r$,下标r表示额定值。曲线以表格的形式输入,因变量作为自变量的函数由表格查找或线性内插获得。

主泵电机所产生的电动力矩除了克服冷却剂流动所需的水力转矩和转子转动惯性力矩外，还应克服转子的摩擦力矩。RELAP5/MOD3.3 程序中的转速动力学方程为：

$$I \frac{d\omega}{dt} = \tau_{EJ} - \tau_{hy} - \tau_{fr} \quad (1)$$

式中： I 为转动惯量， $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ； ω 为转速， rad/s ， $\omega = 2\pi n$ ， n 为每秒的转数； τ_{EJ} 为泵的电动力矩， $\text{N}\cdot\text{m}$ ； τ_{hy} 为泵叶轮的水力转矩， $\text{N}\cdot\text{m}$ ； τ_{fr} 为泵的摩擦力矩， $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

该方程采用有限差分的方法进行求解，其差分方程为：

$$\omega(t + \Delta t) = \omega(t) + \frac{\Delta t}{I} [\tau_{EJ}(t) - \tau_{hy}(t) - \tau_{fr}(t)] \quad (2)$$

在求解泵的转速方程时，泵的电动力矩可根据实际电机特性给出；水力转矩根据类比曲线给出；水泵的摩擦力矩可由实验数据拟合得到^[8]。

1.4 模型验证

采用建立的模型对 4 个典型自然循环工况进行计算。具体验证数据见文献[9]，验证计算结果表明，本文建立的模型可对自然循环工况进行较好地模拟。

2 计算结果及分析

2.1 自然循环过渡过程

对 4 种不同主泵转动惯量所对应的自然循环过渡过程进行了研究。反应堆以强迫循环方式稳定运行，到达预定时间（50 s）后，依次关

闭左右环路的主泵，主泵开始惰转，系统进入到强迫循环向自然循环的过渡过程；过渡过程中，保持反应堆功率和 SG 二次侧蒸汽流量基本不变。本文研究的 4 种主泵惯量条件，均出现了 SG 内侧两类传热管倒流，发生倒流的第 1 类传热管（Type I）管长与最短管管长之比为 1.00，发生倒流的第 2 类传热管（Type II）管长与最短管管长之比为 1.028。

表 2 列出 4 种工况事件序列。

表 2 工况 1~4 事件序列比较
Table 2 Comparison of sequences for operation conditions 1-4

时间/s	转动惯量			
	1	2	3	4
关闭主泵	50	50	50	50
半流量出现	52	54	57	79
SG 进出口腔室出现负压差	52	55	63	93
第 1 类传热管倒流发生	87	103	113	176
第 2 类传热管倒流发生	109	117	130	186

表 3 列出出现进出口腔室负压差时的部分参数。表 4 列出第 1 类传热管发生倒流时的部分参数。表 5 列出第 2 类传热管发生倒流时的部分参数。图 2 示出环路流量质量流量变化，纵坐标为环路质量流量与初始环路总质量流量之比。图 3 示出 SG 进出口腔室压差。图 4 示出 SG 进出口腔室温差。

表 3 出现“负压差”时的参数

Table 3 Parameters at negative pressure difference occurring

参数	转动惯量			
	1	2	3	4
SG 进出口腔室出现负压差时间, s	52	55	63	93
回路自然循环质量流量比值	0.481	0.440	0.320	0.405
SG 进出口腔室温差, °C	14.38	14.46	14.95	22.24
反应堆热段与 SG 进口腔室温差, °C	0.13	0.13	0.27	2.76

图 5 示出反应堆出口与 SG 进口腔室温差。图 6 示出 4 类传热管内质量流量变化曲线，纵坐标表示传热管内质量流量与初始管内平均质量流量之比。

计算结果如下。

1) 随着主泵转动惯量的增加，泵的情转时间变长，主泵惰转停止后，回路流量迅速下降。在主泵停闭后的较短时间内，反应堆出口温度

与 SG 入口腔室温差很小；发生倒流后，SG 出口腔室内较低温度的流体流入进口腔室，SG 入口腔室温度明显低于反应堆出口温度，这一现象在转动惯量 4 中十分显著。

2) 随着主泵转动惯量的增加，将会延缓 SG 进出口腔室负压差的出现时间，但转动惯量对负压差的稳定值无明显的影响；另外，对比转动惯量 3、4 的计算结果可知，负压差值并非流量的单值函数，SG 进出口腔室间的温差也会对其产生影响。

3) 主泵转动惯量增加，将会延缓倒流的发生。在计算的 4 种转动惯量条件中，倒流在相同的两类传热管中发生，且倒流的稳定流量相同。

4) 倒流的发生明显滞后于进出口腔室负压差的出现，说明负压差并非发生倒流的充分条件，实际上，负压差是倒流发生的必要条件，只有当传热管内流体的提升压头不足以克服流动阻力压降时，倒流才会发生，且倒流发生后，负压差将转而成为倒流管提供驱动压头。

表 4 第 1 类传热管发生倒流时的参数

Table 4 Parameters at reverse flow of type I U-tube occurring

参数	转动惯量			
	1	2	3	4
倒流发生时间, s	87	103	113	176
回路自然循环质量流量比值	0.183	0.187	0.185	0.242
SG 进出口腔室温差, °C	19.62	27.46	33.41	52.45
反应堆热段与 SG 进口腔室温差, °C	3.63	9.99	11.29	3.38

表 5 第 2 类传热管发生倒流时的参数

Table 5 Parameters at reverse flow of type II U-tube occurring

参数	转动惯量			
	1	2	3	4
倒流发生时间, s	109	117	130	186
回路自然循环质量流量比值	0.183	0.183	0.183	0.182
SG 进出口腔室温差, °C	32.1	37.92	44.64	52.36
反应堆热段与 SG 进口腔室温差, °C	15.77	16.09	16.45	5.45

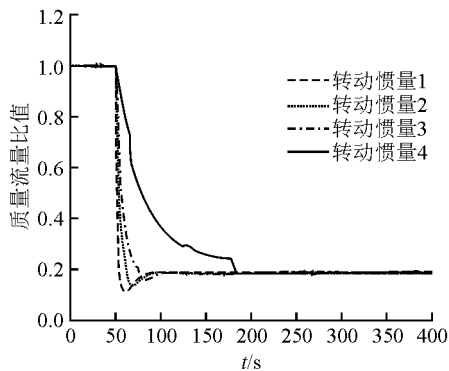


图 2 回路自然循环质量流量比值

Fig. 2 Ratio of mass flow rate in natural circulation loop

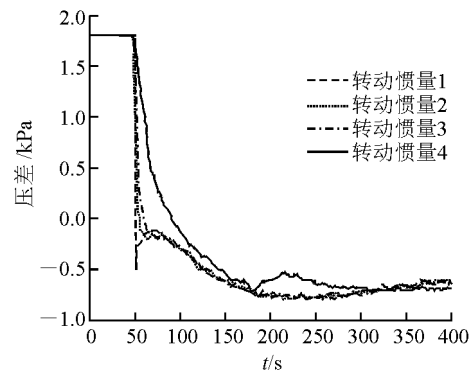


图 3 UTSG 进出口腔室压差

Fig. 3 Pressure difference between UTSG inlet plenum and outlet plenum

2.2 自然循环过渡过程倒流特性分析

强迫循环向自然循环过渡过程中，在主泵停闭后，系统回路的流量为主泵惰转提供的惯

性流量；当惰转结束后，主泵不再为冷却剂流动提供任何驱动压头，相反成为系统回路中的 1 个阻力件，回路流量迅速下降并最终稳定在

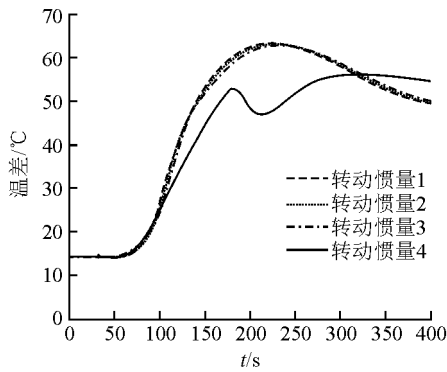


图 4 UTSG 进出口腔室温差

Fig. 4 Temperature difference between UTSG inlet plenum and outlet plenum

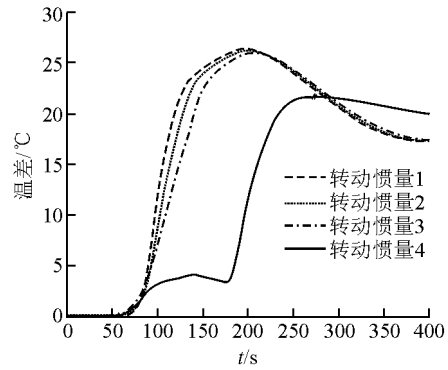


图 5 反应堆出口与 UTSG 进口腔室温差

Fig. 5 Temperature difference between outlet of core and UTSG inlet plenum

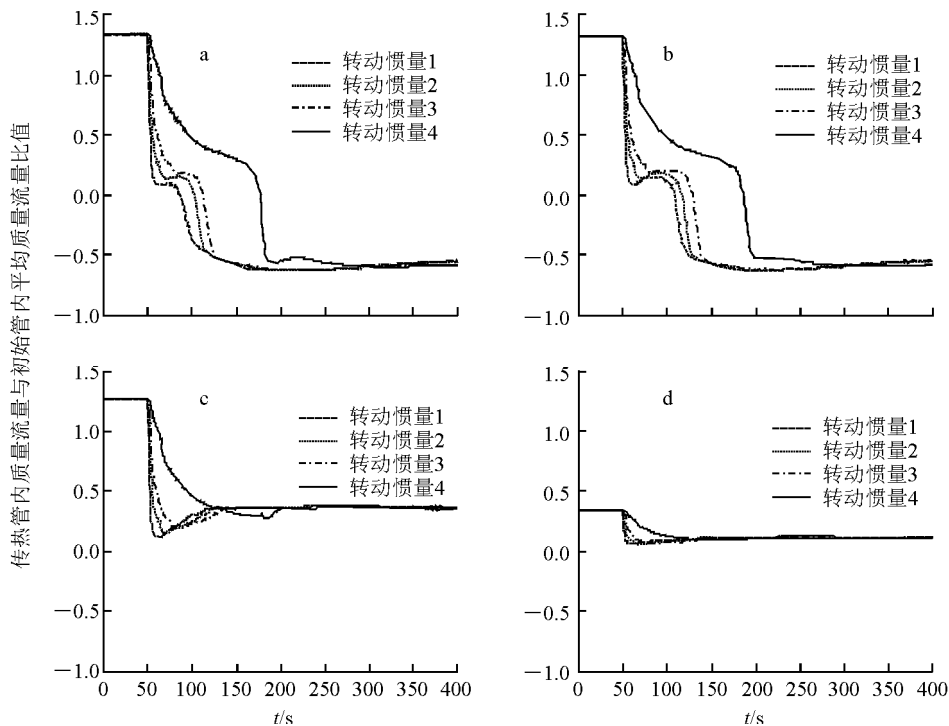


图 6 4 类传热管内质量流量比值

Fig. 6 Mass flow rate ratios of 4 types U-tubes

U 型管管长/最短管管长: a—1.000; b—1.028; c—1.084; d—1.420

某一平衡态。在上述过渡过程中，SG 传热管内的流动及传热状态剧烈变化，并联管内流量分配过程，即为管内流体温差产生的提升压头（为

流动提供驱动压头）、不可逆压降（包括沿程摩擦压降与局部阻力压降）、进出口腔室负压差间的平衡过程。

进口腔室压力低于出口腔室压力, 是 UTSG 在自然循环工况下(表现为 SG 一次侧流量小、温差大) 1 种特有的现象, 且进出口腔室负压差受到流量和温差的共同影响。对于正流传热管, 进出口腔室负压差是管内流体流动的阻力压头, 而对于倒流传热管, 则是管内流体流动的驱动压头。

对于主泵转动惯量较小、系统回路流量迅速下降的情况, 由于传热管内流体无法迅速地建立起温差, 当某些传热管内的提升压头不足以克服不可逆压降和负压差时, 根据并联管进出口压降相等的原理, 这些传热管内冷却剂必将发生倒流。而主泵转动惯量较大时, 传热管内有足够的时间建立温差, 并维持较长时间的正流流动, 但随着进出口腔室负压差值的增大, 部分传热管内的提升压头最终无法克服不可逆压降和负压差, 倒流也将必然发生。

由于并联倒 U 型管内发生倒流, 温度很低的冷却剂从 SG 出口腔室倒流回进口腔室, 造成进口腔室内的冷却剂温度发生陡降, 大幅降低了 SG U 型管进出口温差, 使得 UTSG 一次侧冷却剂的整体提升压头明显下降。然而, 部分传热管发生倒流, 避免了进出口腔室负压差值过大, 在一定程度上避免了正流传热管的流动阻力过大。

3 结论

为研究自然循环过渡过程 UTSG 一次侧倒流特性, 利用 RELAP5/MOD3.3 程序对压水堆单相流体自然循环工况进行建模计算, 将 UTSG 内并联倒 U 型传热管按不同的长度分类并划分为不同的控制体, 验证计算证明本文的计算模型可对自然循环工况进行较好模拟。研究不同主泵转动惯量条件下的自然循环过渡过程, 结果表明, 主泵转动惯量的增加会延缓 SG 进出口腔室负压差的出现时间和倒流的发生时间, 但对负压差的稳定值无影响, 转动惯量对倒流的空间分布和倒流的稳定流量无影响。

参考文献:

- [1] IAEA. Natural circulation data and methods for advanced water cooled nuclear power plant designs, IAEA-TECDOC-1281[R]. Vienna: IAEA, 2002.
- [2] IAEA. Natural circulation in water cooled nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1474 [R]. Vienna: IAEA, 2005.
- [3] KUKITA Y, NAKAMURA H, TASAKA K. Nonuniform steam generator U-tube flow distribution during natural circulation tests in ROSA-IV large scale test facility[J]. Nuclear Science and Engineering, 1988, 99: 289-298.
- [4] SANDERS J. Stability of single-phase natural circulation with inverted U-tube steam generators [J]. Journal of Heat Transfer, 1988, 110: 735-742.
- [5] LOOMIS G G, SODA K. Results of SEMISCALE MOD-2A natural circulation experiments, NUREG/CR-2335[R]. [S.1.]: NRC, 1982.
- [6] 王飞, 卓文彬, 肖泽军, 等. 立式倒 U 型管蒸汽发生器倒流现象及初步分析[J]. 原子能科学技术, 2007, 41 (1): 65-68.
WANG Fei, ZHUO Wenbin, XIAO Zejun, et al. Phenomena and analysis of reversal flow in vertically inverted U-tube steam generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(1): 65-68(in Chinese).
- [7] JEONG J J, HWANG M, LEE Y J, et al. Non uniform flow distribution in the steam generator U-tubes of a pressurized water reactor plant during single and two-phase natural circulations[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 231: 303-314.
- [8] 于雷, 蔡琦, 蔡章生, 等. 核动力装置自然循环及其过渡过程计算模型的建立[J]. 原子能科学技术, 2008, 42 (1): 58-62.
YU Lei, CAI Qi, CAI Zhangsheng, et al. Models development for natural circulation and its transition process in nuclear power plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(1): 58-62(in Chinese).
- [9] WANG Chuan, YU lei. Asymmetry investigation on single phase flow in inverted U-tubes of steam generator under the condition of natural circulation [C]//Proceedings of the 18th International Conference on Nuclear Engineering. China, Xi'an: ICONE, 2010.