

文章编号：0258-0926(2018)02-0010-04；doi：10.13832/j.jnpe.2018.00.0010

蒸汽发生器自然循环性能实验模拟准则研究

李海博，赵二雷，咎元峰，卓文彬

中国核动力研究设计院，成都，610213

摘要：开展了模拟准则的研究，基于双向多级模化（H2TS）模化研究方法，对蒸汽发生器（SG）自然循环相似准则进行深入研究。根据实验目标所关注的物理过程，建立了物理现象识别和分级表（PIRT），推导了 SG 自然循环遵守的守恒方程，通过无量纲化得到了相似准则数并结合实验对其进行了分析和简化。

关键词：蒸汽发生器（SG）；自然循环性能；模拟准则

中图分类号：TL33 **文献标志码：**A

Research on Simulation Criterion of Steam Generator Natural Circulation Experiment

Li Haibo, Zhao Erlei, Zan Yuanfeng, Zhuo Wenbin

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: The research of the simulation criterion about natural circulation was introduced based on the hierarchical two-tiered scaling (H2TS) methodology. According the physical process of experiment target, the phenomena identification and ranking tables (PIRT) was established. Steam generator(SG) natural circulation equation was deduced, dimensionless similarity criteria was obtained. The similarity criteria was analyzed and simplified based on experiment test.

Key words: SG, Natural circulation, Simulation criterion

0 引言

蒸汽发生器（SG）是核电厂中出现事故最多的核一级设备。我国设计的新型饱和式自然循环 SG 结构和运行参数与二代加的 SG 均不相同，因此有必要开展 SG 自然循环性能实验研究以验证 SG 二次侧自然循环性能。

由于原型单台 SG 蒸汽流量和热功率都很大，因此只能开展降低功率规模的缩比实验。为确保实验结果的有效性，须开展模拟准则研究。模拟准则研究是针对特定研究对象，建立基本守恒方程，并选取合适的参考量对方程进行无量纲化处理，从而推导获得与单个参数绝对值无关的无量纲准则数群。SG 作为自然循环性能实验的研究对象，其实验模型和原型通过无量纲的准则数建立对应关系，因此模拟准则是进行缩比实验的理论

基础，模拟准则研究是保证 SG 实验有效模拟原型物理过程的关键技术环节。双向多级模化（H2TS）方法是近年来成熟的模拟方法^[1-3]，其优势在于可对复杂的反应堆系统进行详细的模拟分析，主要包括以下步骤：系统分解、模拟分级、自上而下模化分析。本文采用 H2TS 方法对 SG 自然循环实验模拟准则进行研究。

1 SG 自然循环实验模拟准则研究

1.1 物理现象识别和分级表

物理现象识别和分级表（PIRT）主要用于对原型的物理现象进行分级，以便相似准则的建立和取舍。本实验研究的是 SG 自然循环过程，将影响 SG 二次侧自然循环的参数作为研究对象，逐级分解，如表 1 所示。

收稿日期：2017-09-25；修回日期：2018-03-25

作者简介：李海博（1985—），工程师，硕士，现从事核电设备设计等研究工作

表 1 自然循环 PIRT
Tabel 1 Natrual Circulation PIRT

主要部件	参数	重要性
给水管部件	质量流量	高
	给水管阻力	中
下降通道	摩擦阻力压降	中
	套筒缺口形状阻力	高
U 形管	管壁换热系数	高
汽水分离器	流动阻力	高
	分离效率	底
干燥器	流动阻力	高
	分离效率	底
U 形管	二次侧流动阻力	高

1.2 自顶向下模化分析

自顶向下分析基于 SG 二次侧自然循环分级层次，获得对自然循环过程有决定性影响的模化准则数。由于本实验重点是对二次侧自然循环过程的模拟，在实验研究时，影响自然循环过程的关键相似准则必须得到满足。

1.2.1 物理过程和基本假设 为获得自然循环过程的相似准则数，假设：流动是一维的；忽略流体能量方程中轴向导热项和粘性耗散项；忽略 SG 向环境的热损失；忽略 SG 下降通道和上升通道之间的能量传递；满足 Boussinesq 假设。

1.2.2 自然循环相关的控制方程

(1) 质量守恒方程

对于 SG 自然循环过程，瞬态过程中自由液面可能发生变化。液位变化原理仍可利用质量守恒方程来说明。取液面以下的腔室为控制体，则根据质量守恒方程的一般形式，得出如下质量守恒方程：

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = m_{sp} + m_{fd} - m_t \quad (1)$$

式中， ρ 为流体密度； V 为控制体的总体积； t 为时间； m_{sp} 为分离水质量流量； m_{fd} 为给水质量流量； m_t 为自然循环总质量流量。式 (1) 左边表示下降通道内部液体总质量变化率，单相液体的密度变化率很小，这一项实际上由液位变化所决定，液位改变由流入和流出该控制体液体质量不平衡所引起的。

(2) 动量方程

从机理上说，自然循环流量稳定是由于密度差引起重力驱动压头和摩擦阻力、形状阻力以及

加速压降达到平衡的结果；反之，驱动头和各项阻力压降不匹配正是引起自然循环流量发生改变的原因。因此动量方程对于自然循环流量或流速的模拟尤为重要。

利用一维形式动量方程沿流动方向分段积分可得：

$$-\Delta_i(p) = \frac{dm_i}{dt} \frac{l_i}{a_i} + \Delta_i(\rho u^2) - \int_{s_{i,in}}^{s_{i,out}} \rho g \cos\theta ds + \left(\frac{fl}{d_h} + K \right) \frac{1}{2} \rho_i u_i^2 \quad (2)$$

式中， $\Delta_i(p)$ 为总压降； m_i 为各段的流体质量； l_i 为各段的长度； a_i 为各段的截面积； u 为流体流速； g 为重力加速度； θ 为流体与轴向的夹角； f 为摩擦系数； d_h 为等效水力直径； K 为形状阻力系数； s 为流体的控制面积；下标 i 表示各段流道。式 (2) 表明各段压降可以分为流速瞬变压降、加速压降、提升压降以及摩擦阻力和形状阻力压降之和。

(3) 能量方程

能量交换过程主要集中在 U 形管束的区域。从自然循环层次上分析，该区域内一次侧流体、U 形管和二次侧流体间总体能量平衡。将一次侧通过对流将能量传递给 U 形管的能量方程、二次侧流体的能量方程、U 形管棒束能量的变化取决于与一次侧和二次侧流体的对流换热方程，相加就得到：

$$\frac{d}{dt}(\rho_1 V_1 h_1) + \frac{d}{dt}(\rho_{II} V_{II} h_{II}) + \frac{d}{dt}(\rho_{tube} c_{tube} T_{tube} V_{tube}) = m_1(h_{hot} - h_{cool}) - m_{II}(h_{out} - h_{in}) \quad (3)$$

式中， T 为温度； m 为质量流量； c 为比热容； h 为焓值；下标 cool 和 hot 分别表示一次侧出口和入口；下标 tube 表示 U 形管；下标 表示 SG 一次侧流体；下标 表示 SG 二次侧流体；下标 out 和 in 分别表示二次侧出口和进口。式 (3) 表示在换热区域内部一次侧流体、U 形管棒束、二次侧流体自身能量的改变率之和等于流入控制体与流出控制体的流体携带的焓值之差。

1.2.3 无量纲化方程和无量纲准则数 为得到自然循环相似准则数，必须选择合适的参考量，将上述相关控制方程无量纲化后，控制方程变成无量纲方程，变量成为无量纲变量，参数则组合形成无量纲参数组，即相似准则数。定义的变

表 2 无量纲变量表

Table 2 Dimensionless Variable

变量名称	变量表达式	变量名称	变量表达式
长度/高度	$L_i^+ = \frac{l_i}{l_r}$	流量	$m^+ = \frac{m}{m_0}$
流通面积	$A_i^+ = \frac{a_i}{a_r}$	阻力系数	$N_{f-K}^+ = \sum_i \left(\frac{f}{d_h} + K \right) / A_i^2$
速度	$U_i^+ = \frac{u_i}{u_{r0}}$	温度	$T_{\text{tube}}^+ = \frac{T_{\text{tube}}}{T_{\text{tube0}}}$
密度	$\rho_i^+ = \frac{\rho_i}{\rho_{i0}}; \rho_1^+ = \frac{\rho_1}{\rho_{10}}$	比焓	$h^+ = \frac{h}{h_0}$
密度差	$(\rho_{\text{out}} - \rho_1)^+ = (\rho_{\text{out}} - \rho_1) / (\rho_{\text{out}} - \rho_1)_0$	焓升(降)	$\Delta h^+ = \frac{\Delta h}{\Delta h_0}$

注：下标 0 代表控制体的初始热工参数；r 表示参考点热工参数；l 表示液体参数

量如表 2 所示。

将变量代入到自然循环各个控制方程中，即可以得到各个无量纲的控制方程：

(1) 无量纲质量方程：

$$U_i^+ = \left(\frac{\rho_r}{\rho_i} \right) \frac{A_r^+ \rho_r^+}{A_i^+ \rho_i^+} U_r^+ = N_\rho \cdot \frac{1}{A_i^+} \cdot \frac{1}{\rho_i^+} U_r^+ \quad (4)$$

式中， A 为面积； N_ρ 为密度比数。

(2) 无量纲动量方程：参考流动面积为 U 形管之间的二次侧流体流动面积，参考密度为底部液体密度，液相密度变化被忽略，可得：

$$\begin{aligned} \tau_{\text{circl}} \frac{dU_r^+}{dt} \sum_i \frac{L_i}{A_i^+} &= N_{Ri} \Delta \rho^+ L_{\text{hc}} - \\ N_{f-K} N_\rho \frac{1}{2} (U_r^+)^2 \sum_i \left(\frac{f}{d_h} + K \right) &+ \frac{1}{\rho_i^+} \frac{1}{A_i^2} - \\ &\left(\frac{1}{\rho_{\text{out}}^+} - 1 \right) U_r^2 \quad (5) \\ \tau_{\text{circl}} &= \frac{l_r}{u_{r0}}; N_{Ri} = \frac{g l_r \Delta \rho_0}{\rho_{r0} u_{r0}^2} \end{aligned}$$

式中， τ_{circl} 为自然循环特征时间数； N_{Ri} 为自然循环理查森数 (Richardson 数)；下标 hc 表示 SG 冷热芯高差。

(3) 无量纲能量方程：

$$\begin{aligned} N_{\text{hl}} \frac{d}{d\tau} (h_1^+) + N_{\text{hII}} \frac{d}{d\tau} (\rho_{\text{II}}^+ h_{\text{II}}^+) + \\ N_{\text{Ttube}} \frac{d}{d\tau} (T_{\text{tube}}^+) &= N_{\text{hl2II}} m_1^+ (h_{\text{hot}} - h_{\text{cool}})^+ - \\ \left[x_{\text{out}} - \frac{(h_f - h_{\text{in}})_0}{h_{\text{fg}}} \right] m_{\text{II}}^+ (h_{\text{out}} - h_{\text{in}})^+ \quad (6) \\ N_{\text{hl}} &= \frac{\rho_{10} V_1 h_{10}}{l_r \rho_{r0} a_r h_{\text{fg}}}; N_{\text{hII}} = \frac{\rho_{\text{II}0} V_{\text{II}} h_{\text{II}0}}{l_r \rho_{r0} a_r h_{\text{fg}}} \end{aligned}$$

$$N_{\text{Ttube}} = \frac{\rho_{\text{tube}} c_{\text{tube}} T_{\text{tube0}} V_{\text{tube}}}{\rho_r a_r h_{\text{fg}} l_r}$$

$$N_{\text{hl2II}} = \frac{m_{10} (h_{\text{hot}} - h_{\text{cool}})_0}{m_{\text{II}0} h_{\text{fg}}}$$

式中， N_{hl} 为一次侧流体蓄能数； N_{hII} 为二次侧流体蓄能数； N_{Ttube} 为固体温度比数； N_{hl2II} 为一、二次流体放热-吸热比数； f_{g} 表示气液混合参数。

(4) 无量纲液位控制方程：

$$N_1 \frac{d(V_1^+)}{d\tau} = \frac{m_{\text{sp}0}}{m_{t0}} m_{\text{sp}}^+ + \frac{m_{\text{fd}0}}{m_{t0}} m_{\text{fd}}^+ - m_t^+ \quad (7)$$

$$N_1 = \frac{V_{10}}{a_r l_r}$$

式中， τ 为无量纲时间； N_1 为初始液位数。

1.2.4 相似准则及其简化 为实现装置对原型重要过程的模拟，需要确保实验装置和原型各个相似准则数相等，即得到各个相似准则。由于有的相似准则不独立，有的相似准则难以满足，因此，需对各个相似准则进行分析、讨论，合并不独立的准则，指出不能满足的准则，并利用预先给定的输入条件，将相似准则简化为可供本体设计进行直接参考的形式。有关模拟准则条件下的简化形式如表 3 所示。

2 结论

采用 H2TS 模拟方法，对蒸汽发生器自然循环过程模拟准则进行了详细研究，建立了 SG 自然循环 PIRT，推导了动量、质量和能量守恒方程，将方程无量纲化获得了 SG 自然循环系统的相似准则数。研究成果可用于 SG 自然循环性能实验本体设计等后续研究工作。

表3 SG自然循环的相似准则

Table 3 Simulation Criterion of Steam Generator Natural Circulation

准则数	简化(最终)形式	备注
面积比准则	$\left(\frac{a_r}{a_r}\right)_R = 1$	流道截面面积相对大小保持不变
几何惯性数准则	$\left(\sum_i \frac{L_i}{A_i}\right)_R = 1$	影响流量瞬变过程的快慢；比几何相似要求低
系统阻力准则	$\left[\sum \left(\frac{fl}{d_h} + K\right) / A_i^2\right]_R = 1$	装置的阻力数比原型略大
Richard 数准则	$\left[\frac{g l (\rho_l - \rho_{out})}{\rho_l u_r^2}\right]_R = 1$	重力和惯性力之比；和含汽率准则等价
入口过冷度准则	$\left(\frac{h_f - h_{in}}{h_{fg}}\right)_R = 1$	试验装置给水温度应和原型相同
密度比准则	$\left(\frac{\rho_l}{\rho_i}\right)_R = 1$	表征密度的相对大小，影响局部速度的模拟。和含汽率准则近似等价
出口含汽率准则	$(x_{out})_R = 1$	初始时刻出口含汽率的大小
给水比准则	$\left(\frac{m_{fd}}{m_t}\right)_R = 1$	彼此不独立，因为： $N_{sp} + N_{fd} = 1$ ， N_{sp} 为分离比数； N_{fd} 为给水比数
分离比准则	$\left(\frac{m_{sp}}{m_t}\right)_R = 1$	彼此不独立，因为： $N_{sp} + N_{fd} = 1$
一次侧流体蓄能数准则	$\left(\frac{\rho_l V_l h_l}{\rho_l l_r a_r h_{fg}}\right)_R = 1$	影响温度或焓值的瞬变过程；如换热管尺寸不变，通过减少管子根数即可全部满足
二次侧流体蓄能数准则	$\left(\frac{\rho_{II} V_{II} h_{II}}{\rho_l l_r a_r h_{fg}}\right)_R = 1$	影响温度或焓值的瞬变过程；如换热管尺寸不变，通过减少管子根数即可全部满足
初始液位数准则	$\left(\frac{V_l}{a_r l_r}\right)_R = 1$	保持初始液位相对高度不变即可

参考文献：

- [1] Reyes J, Hochreiter L. Scaling analysis for the OSU AP600 test facility (APEX)[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 186: 53-109.
- [2] 卢冬华, 肖泽军, 陈炳德. 压水堆自然循环比例模化基本方程及相似准则数的研究[J]. 核动力工程, 2009, 30(3): 72-84.

- [3] Lu Donghua. Investigation on scaling law for reactor natural circulation under motion conditions[J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 37: 691-700.

(责任编辑：马 蓉)