

# PWR 热工水力实验研究 中的模拟问题

陈炳德

(西南反应堆工程研究设计院, 成都)

文章对常用的模拟方法、国外已建成的大型实验装置存在的模拟问题及模拟失真对计算程序的影响作了简单介绍, 并对如何避免和减少这种影响提出了建议。

关键词 压水堆, 热工水力实验, 模拟。

## 一、前言

由于压水堆一回路系统中冷却剂水的流动和传热实验研究的困难性, 到目前为止, 反应堆中重要部件和设备设计所需热工水力参数、公式及设计结果的验证、堆系统安全评审程序的发展和评价都离不开实验。但是, 除少数小型部件或设备可用原型进行实验外, 大多数情况, 特别是与系统安全研究有关的大型整体效应实验研究只能用模拟装置进行。这样, 模拟装置本身模拟的成败将对实验结果产生重大的影响, 严重时甚至可能完全不能反应所模拟对象中发生的物理现象和过程。

## 二、常用模拟方法简介

目前, 和 PWR 模拟装置设计有关的模拟准则主要有 3 种:

(1) 线性模拟准则 (减时准则); (2) 容积模拟准则 (恒时准则); (3) 理想的恒时模型。几乎所有已建大型热工水力整体效应装置设计所用的基本概念都为容积模拟(表1)<sup>[1]</sup>。1983年, M. Ishii 和 I. Kataoka 在论证 LOFT 装置是否可用于自然循环实验研究时, 推导了一组模拟准则<sup>[2]</sup>。对于单相自然循环流动, 其相似准则为:

$$(1) a_{iR}^* = \left( \frac{a_i}{a_0} \right)_R \quad \text{流动面积相似}$$

$$(2) L_{iR}^* = \left( \frac{l_i}{l_0} \right)_R \quad \text{高度或长度相似}$$

$$(3) F_R = \left( \frac{fl}{d} + K \right)_R = 1 \quad \text{部件流动阻力相等}$$

$$(4) \left( \frac{a_{si}}{a_i} \right)_R = 1 \quad \text{壁横截面积与流通面积比相等}$$

$$(5) \rho_R = c_{PR} = \dots = P_R = T_R = 1 \quad \text{流动工质和运行条件相同}$$

在上述相似准则中, Ishii 用堆芯流通面积  $a_0$  和堆芯高度  $l_0$  作参照数。当

表 1 PWR 整体模拟装置及主要特性

Table 1 PWR integral simulators and their main properties

装置名称	所在地	最大热功率/MW	容积比	堆芯高度比	蒸发器高度比	运行压力/MPa	加热元件根数	加热元件直径/mm	加热方式	一回路容积/m <sup>3</sup>	回路条数
PMK-NVH	Hungary	2.0	2070	1	水平SG	16	19	9.1			(6)
SEMISCALE	USA	2.0	1600	1	1-1.07	15	25	10.7	间接	0.2	1+(3)
MIST(2×4回路)	USA	0.34*	620	1	1	15.5	45	10.9		0.56	热2,冷4
LOBI-MOD2	CEC	5.4	700	1	1	15.5	64	10.7	表面	0.6	1+(3)
UMCP(2×4回路)	USA	0.2*	500	6.6	4	2.1	15	25.4	表面	0.6	热2,冷4
SPES	Italy	9.0	420	1	1	20	97	9.5	表面	0.63	1+1+1
PKL	F.R.G	1.5*	135	1	1	4.0	337	10.7	间接	2.9	1+1+(2)
BETHSY	France	3.0*	100	1	1	17.2	428	9.5	间接	2.88	1+1+1
LOFT	USA	50	50	2		15.5	1300	10.7	核	7.9	(2)+1
ROSA IV	Japan	10*	48	1	1	16	1064	9.5	间接	7.2	(2)+(2)

  

装置名称	堆芯流通面积比	堆芯流通面积/m <sup>2</sup>	水平管直径/mm	热段流通面积/m <sup>2</sup>	蒸发器一次侧流通面积比	蒸发器二次侧流通面积比	蒸发器中换热管根数	蒸发器中换热管内径/mm	蒸发器换热管水力直径/mm	蒸发器二次侧运行压力/MPa
PMK-NVH		2070					72	7.6		
SEMISCALE	0.0028	1700	34,(66)	0.009,(0.0034)		1600,(540)	2,(6)	19.7		6.0
MIST(2×4回路)	0.0063	725	热54,冷34	热0.023,冷0.0009		820	860	19	14.1	
LOBI-MOD2	0.0081	730	46,(73)	0.0017,(0.0042)		730,(420)	730,(240)	8,(24)	19.6	16.4(24.3)
UMCP(2×4回路)	0.124	372	热90,冷78	热0.0063,冷0.0047		123		28	30	49
SPES	0.0096	400	67	0.0035		420	445	13	15.4	23
PKL	0.047	135	80.8,(113)	0.0051,(0.01)		135,(68)	115,(75)	30,(60)	19	
BETHSY	0.043	110	118	0.0109		98	92	34	19.7	35
LOFT	0.165	25	130,(350)	0.0133,(0.095)				(1845)	10.2	
ROSA IV	0.1134	43	(207)	(0.034)		(24)	(22)	(141)	19.6	25.6

注:1) “\*”表装置无全功率模拟能力;  
 2) “( )”里的数字为有模拟原型中回路的条数的能力;  
 3) 除SPES和UMCP外,模拟元件轴向热功率分布都为COSIN形式。

$$l_{or} = 1$$

时,上述模拟准则就是容积模拟准则。

容积模拟的基本特点是模型和原型有相同的质量和能量分布,这是整体装置必须保证的。除此之外,还应保持堆芯、蒸发器和主泵的主要物理特征以保证换热过程相似。

除上述容积模拟准则外,A. Carbiener和R. A. Cudnik推导了另一种“容积模拟”方法<sup>[3]</sup>,表2为该模拟方法的主要结果<sup>[4]</sup>。表中*l*为上、下空腔的特征长度, $l_r = \frac{l_M}{l_p}$ 为比例因子。

Carbiener-Cudnik“容积模拟”与文献中常说的容积模拟不同,其特点为:(1)模型与原型有相同的单位流体体积功率;(2)破口面积模拟比例与堆芯流通面积模拟比例不同;

表 2 Carbiener-Cudnik 模拟结果  
Table 2 Carbiener-Cudnik scaling results

模 拟 量	模 拟 值
排放时间	$t_R = t_M / t_P$
上空腔容积	$v_{1R}$
下空腔容积	$v_{2R}$
堆芯高度	$l_{OR}$
堆芯流通面积	$\sigma_{OR}$
破口面积	$a_{BR}$
堆芯功率	$q_{OR}$
堆芯流动阻力	$k_{OR}$

(3) 堆芯长度和面积的模拟结果使模型有一个极大缩小了的堆芯通道；(4) 模型中堆芯流动阻力大大地高于原型堆芯中的流动阻力。

另外，A. N. Nahavandi 等根据三维守恒方程及状态方程，再引入 9 个无因次量将其无因次化，得出如本节前所述的三组模拟准则<sup>[5]</sup>。实际上一般文献中所称的容积模拟即 Nahavandi 的容积模拟，应注意的是该容积模拟方法实际上回避了模型装置中难于解决的壁面摩擦将增加这一事实，实质上对模型采用了流管方法，即认为流体在无固体边界，因而无壁面摩擦的假想管束中流动。

### 三、现有大型实验装置中存在的模拟问题

模型装置的模拟失真通常可能是：模拟准则推导中存在固有原因；模拟准则要求但在技术上难于实现；由于模拟对象、模拟研究目的变更等各种原因造成的。

#### 1. 低压模拟

通常低压装置模拟高压原型中发生的热工水力现象的过程存在有不可克服的困难。

(1) 运行条件无法保持，压力转换比例难以确定，初始条件(如压力、过冷度等)难于相似，因而动态特征和事故起始点难以模拟；

(2) 两相流动时流型转换无法保持，流动沸腾换热，相分离情况不同。

(3) 在自然循环实验中，只有当模型系统中流体贮量比原型的低时，才能在模型的热段中得到与原型热段中相同的流型，并且较低的压力将使蒸发器从两相自然循环流动至纯回流冷凝的转变时间延迟。

#### 2. 模拟装置系统回路条数及排列方式

从表 1 可知，一般模型装置回路条数为：

(1) 一条破损模拟回路，一条模拟其余完整回路的模拟回路，即 1 BL + 1 IL。

(2) 一条破损模拟回路，一条模拟一条完整回路的模拟回路，另一条模拟其余完整回路的模拟回路，即 1 BL + 2 IL。不难看出，上述模拟方式使模型系统中的回路不对称，管径大小不一。因而用这种装置进行自然循环实验时，各回路中流型分布变化和回流冷凝建立的时间都不相同。而主泵前水封段管径不同则可能造成蒸汽只通过较大管径的水封段，

引起流动间歇振荡。

### 3. 主回路管径和长度

因为比例的缩小,模型中主冷却剂管径必然减小,这将不可避免地导致系统摩擦压降和管壁金属贮热比、热损失比的增大。

(1) 摩擦压降 对整体效应装置来说,系统压降保持相等是非常重要的,在自然循环实验研究时更是如此。通常,人为增大管径并适当缩短管长来达到既降低摩擦压降又保证容积分布相同的目的。但是,这可能造成流速难以保持以及流型转换保持条件  $(L/\sqrt{D})_R = 1$  难以实现的困难。

(2) 冷却剂与边界换热 从模拟准则推导上可知,即使用原工质,以相同工作条件运行的模型装置也难于保证,即

$$(St)_R = 1$$

$$(LC)_R = 1$$

换句话说,即无法保证模型有与原型相同比例的贮热和边界热损失。这使模型和原型中流体与边界面的温差无法保持一致。模型越小,这种偏差就越大,这对瞬态工况模拟实验和两相流动实验模拟造成很大困难。虽然某些装置增加了附加热补偿器,目前还只能解决稳态和准稳态试验中的问题。

### 4. 主冷却泵

主冷却泵的行为特性在小破口、停电及机械卡泵等事故研究中是很重要的。而原型泵的惰转、压头及附加能量的带人带出是很难按比例模拟的。泵的阻力特性对自然循环流动,特别对从强迫至自然循环的过渡特性影响很大。目前主泵惰转模拟方法主要有惯性、特殊旁通阀和特殊控制几种。

### 5. 下降腔

下降腔模拟主要是几何相似要求(或容积比相似要求)和压降保持要求相冲突。对小比例装置来说,下降腔环缝隙几乎无法模拟。

除上述几点之外,还存在诸如由于技术上无法保持加压器长径比、燃料元件模拟体贮热失真等方面的模拟失真。

## 四、模拟问题对计算程序的影响

反应堆热工水力实验,特别是整体效应实验,除直接为工程设计提供数据资料外,更兼有开发计算模型、发展计算机程序及评价、验证计算机程序的任务。最终目标是开发出能用于反应堆系统设计和安全分析的实用程序。

判断程序是否能用于堆系统的设计和安全分析评审的条件是:程序中所有的数学-物理模型能对堆系统中发生的所有热工水力过程进行真实的描述,并且这种描述不应与被分析系统的尺度大小有关。一般地说,程序中的基本微分方程是与系统尺度及状态变量无关的。但为了解这些微分方程,需要引入状态方程,边界条件及一些与流体动力学和传热定

律有关的附加条件。问题在于这些附加条件中含有许多物理机理还相当不完善,因此必须通过热工水力实验求得的某些常数、经验或半经验公式。但是,有关两相流体的流动、相变、相间交换和换热等方面甚至连实验手段也不完善,实验结果相当不准确。因此,以实验结果为基础发展并用实验结果来检验的实验系数和关系式的适用性和准确性就不能不受到实验装置的几何条件和热工水力条件的影响,进而也影响了包含这些常数和关系式的程序的不变性,其后果可能是这些程序的计算结果及其准确性不仅与实验装置的大小和形状有关,而且也与所计算的动态种类,甚至与系统节点的划分也有关。

## 五、结论和建议

由于模拟方法、设计折衷、技术可行性限制和经费等各方面的原因,热工水力实验模拟装置可能存在不同程度的模拟失真。对于某一具体的实验装置进行的某些特定的实验研究项目,其模拟失真可能不会对实验结果有显著的影响,或者该影响能事先预计到并可进行定量地评价和修正。但总的说来,对一个给定的计算分析模型是否能模拟任一指定实验装置中的某一热工水力过程,以便淘汰一个与系统尺度大小有关的程序或确认该程序可直接用于真实堆系统的安全分析的信心仍是不足的<sup>[6]</sup>。毫无疑问,实验结果是程序发展、评价和改进的重要基础,但即使对于那些已经用与产生这些实验结果尺度相当的实验装置验证过的结果,还是难于直接用于真实堆上。当然,如果这些实验结果用不同模拟比例,但有相似初始条件和边界条件的对照实验验证过,则该结果的可靠性和重要性将大大地增加。

虽然已有不少相似准则,但由于各系统不同,模拟对象各异,特别是可能模拟研究的目标不同,针对本系统特点进行相似分析和模拟准则推导仍是必要的。从理论分析上可知,对于不同于原型的模拟装置来说。要同时模拟原型中所有的热工水力过程和现象是不可能的。因此,不要轻易以牺牲主要研究项目的相似为条件换取在该装置上开展多项研究。特别是工程性实验更要注意。

一般说来,模拟比例大一些,则不可避免的模拟失真就少一些,对于整体实验装置,为了模拟原型的运行条件,必须用原型工质。鉴于重力在自然循环中起主导作用,一切与自然循环有关的实验装置应为全高度。另外,除必须保证系统阻力相等外,还应尽量保持压降分布与原型一致。回路管径,特别是热段管径应特别考虑除保证容积分布外,还应综合照顾流型转换条件 $(L/\sqrt{D})_r=1$ 和流速保持条件。边界热损失和热容量可考虑铺设温差跟踪热补偿器,蒸发器模拟体。除保持容积比、换热面积-容积比外,还应保持水力阻力和高度与原型一致。在强迫循环与自然循环过渡特性的实验研究中,泵的隋转最好考虑用可控方式。如果模拟装置存在不可避免的失真时,应指明何处,因何原因模拟失真,并分析该失真将给实验结果带来多大的影响,是否有何方法加以弥补或修正。

为了最终改进和完善程序,开展某些似乎是重复性的基础实验和单项实验研究,特别是有关两相流动和传热的实验研究是十分必要的。此外,为了验证实验结果是否与产生这些结果的装置的模拟比例有关,最好能联系各有关实验室用不同比例实验装置,以相同的初始条件进行同样的实验。同样,用同一程序,相同的计算方法和程序功能选择,相同的的关系式,并尽可能采用相同的节点划分来对不同比例实验装置完成的对照实验结果进行计算,以确定该程序是否受装置尺度变化的影响。显然,这需要国内外同行的广泛合作。

## 参 考 文 献

- [1] Karwat, H., Principal Characteristic of Experimental Simulators Suitable for SBLOCA Events of LWR and Scaling Meeting, Pisa, Italy, 1985, p.399.
- [2] Ishii, M., Kataoka, I., NUREG/CR-3267, 1983.
- [3] Carbiner, A., Cudnik, R. A., *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 12, 361(1969).
- [4] Kiang, R. L., *Nucl. Sci. and Eng.*, 89, 207—216(1985).
- [5] Nahavandi, A. N., Castellana, F. S. and Moradkhanian, E. N., *Nucl. Sci. Eng.*, 72, 75(1979).
- [6] Karwat, H. and Anstergesilo, H., Scaling Effects Related to the Analysis and Interpretation of Small Brek Tests Specialists Meeting, Pisa, Italy, 1985. p.709

(编辑部收到日期: 1989年3月7日)

## THE MODELING PROBLEMS IN PWR THERMAL AND HYDRAULIC TEST RESEARCH

CHEN BINGDE

(South-West Center for Reactor Engineering Research and Design, Chengdu)

### ABSTRACT

The experimental results obtained in scaled thermo-hydraulic test facilities can provide basic data and correlations for design, operation and safety evaluation of PWR system, and verify the corresponding models used in computer codes. A scale test facility may induce modeling distortion due to improper modeling methods, incomplete design considerations, technological difficulties and some other reasons. Thus, the accuracy of the experimental results may be affected. However, for a certain test facility used for some special experiment projects its modeling distortion can not only be minimized but also predicted and modified quantitatively.

In order to reduce the distortion, it is necessary to do more effective research into the simulating methods. It is a important task to carry out some relevant experiments for verifying if the experimental results and the codes are affected by the distortion of the test facility and for determining how to eliminate this effect. The simulating methods in common use, the modeling problems existing in large test facilities in the world and the effects of modeling distortion on computer codes are briefly discribed in this paper. An approach of how to avoid and/or reduce the distortion is proposed.

Key words PWR, Thermal and hydraulic test, Modeling.