

# 考虑流固耦合效应的快堆堆本体 抗震试验模化方法

陆道纲<sup>1,2</sup>, 李奕彤<sup>1,2,\*</sup>, 刘宏达<sup>1,2</sup>, 刘雨<sup>1,2,\*</sup>

(1. 华北电力大学 核科学与工程学院, 北京 102206;

2. 非能动核能安全技术北京市重点实验室, 北京 102206)

**摘要:**为准确模拟快堆堆本体中液体晃动对主容器的作用, 本文建立了一种考虑流固耦合效应的快堆堆本体抗震试验模化方法, 不仅保证加速度相似比严格为 1, 还保证了流体与结构的质量比与原堆的相同。依照上述试验模化方法, 分别设计与快堆原型比尺为 1:25(大)和 1:50(小)两个缩比试验模型。为验证上述理论方法的有效性, 对这两个模型进行了地震动力学数值模拟, 并比较了大模型和小模型的模拟结果。比较结果表明, 大、小模型的地震动响应参数比值满足推导得到的理论准则, 从而通过数值试验方法验证了上述模化方法的有效性。该模化方法可为快堆堆本体抗震试验提供理论依据。

**关键词:**快堆堆本体; 模化方法; 流固耦合; 抗震试验

**中图分类号:** TL352.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2019)07-1324-07

**doi:** 10.7538/yzk.2019.youxian.0003

## Scaling Method for Seismic Test of Fast Reactor Vessel Considering Fluid-structure Interaction Effect

LU Daogang<sup>1,2</sup>, LI Yitong<sup>1,2,\*</sup>, LIU Hongda<sup>1,2</sup>, LIU Yu<sup>1,2,\*</sup>

(1. School of Nuclear Science and Engineering,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Key Laboratory of Passive Safety Technology for Nuclear Energy, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In order to simulate the effect of the liquid sloshing of fast reactor on the main container, a scaling method for seismic test of fast reactor vessel considering fluid-structure interaction effect was created in this paper. It not only ensures the acceleration similarity ratio is strictly 1, but also ensures the mass ratio of fluid to structure is the same as that of the original reactor. On the basis of the method, two scaled-models with the scale of 1:25 (large) and 1:50 (small) for the prototype of fast reactor were designed respectively. In order to verify the validity of the above method, the numerical simulations of the two models were carried out, and the simulation results of the large

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-04-22

作者简介: 陆道纲(1965—), 男, 江苏江都人, 教授, 博士, 核能科学与工程专业

\* 通信作者: 李奕彤, E-mail: niuatong@126.com; 刘雨, E-mail: appleplanter@gmail.com

model and the small model were compared. The comparison results show that the ratio of vibration motion response parameters of the large and small models meets the derived theoretical criteria. The above simulation method is proved to be valid by numerical experiments. This scaling method can provide theoretical basis for seismic test of fast reactor vessel.

**Key words:** fast reactor vessel; scaling method; fluid-structure interaction; seismic test

在工程实际中,储液容器液体晃动与结构的耦合振动是一个很常见并且很重要的问题,这类耦合问题由于涉及流体力学、固体力学、结构动力学、计算力学以及数学等学科,其机理和本质的探讨非常复杂和困难,但解决此类耦合问题对核电设备、化工容器、航空航天、运输等领域有着非常重要的意义。快堆堆本体抗震设计对于保证反应堆安全十分重要,按照我国核安全法规,必须对堆本体开展抗震分析和抗震工程验证试验。

考虑流固耦合效应的堆本体抗震设计是十分困难的。众所周知,地震情况下,液体的晃动和容器的振动是一种强烈的流固耦合行为,涉及到复杂的非线性力学。耦合过程中流体对结构产生的附加质量和附加阻尼用理论公式很难确定,国际上已有很多学者对其进行了研究,从研究方法上大致分为3类。第1类是通过公式计算求解,将复杂模型进行较大简化,再用公式计算进行求解。翁智远等<sup>[1]</sup>进行池式快堆主容器地震响应分析中将快堆主容器简化为一个弹簧-质量模型,然后再利用公式进行求解,这类方法对于较复杂模型,结果不够精确且无法得到液体的晃动行为。第2类是通过数值模拟求解,但对于堆本体内液体在地震情况下的复杂晃动和非线性晃动难以精确模拟,且数值模拟得到的一些参数依然需要试验确定。第3类是通过试验进行求解,然而试验求解对于快堆堆本体这种大型结构,不可能按照1:1的比例开展试验,只能采用缩比模型,而缩比模型的模化分析方法中,既要考虑流体相似,又要考虑固体相似,还要关注流固耦合效应,想要同时满足以上要求是非常困难的。目前对于快堆堆本体缩比模型的研究,大多不能严格遵循佛汝德数(即加速度相似比  $S_a = 1$ ),会出现重力失真问题<sup>[2-3]</sup>,使试验结果与实际情况产生偏差,难以达到试验验证的目的。

在振动台试验模型的模化过程中,为消除重力失真效应,国内外学者采用了不同的办法。杨旭东<sup>[4]</sup>提出在  $S_a \neq 1$  时,采用较小的  $S_a$  和较大的  $S_c$ (应变比),且  $S_a S_c \leq 1$  时才能降低重力失真的影响;杨树标等<sup>[5]</sup>在对振动台试验模型和原型相似关系的研究中提出重力失真模型在弹性阶段也可反映原型的地震行为。上述研究均分析了在特定情况下模型与原型的相似关系,无法真实反映原型在高强度地震中的行为。吕西林等<sup>[6]</sup>提出了在结构不同部位取不同相似比的方法来减小重力失真效应。文献[7]在对MYRRHA的模型研究中采用了一种改进的线性模化方法,仅考虑了液体的晃动相似准则,而忽略了结构相似。国内外对于核电厂大型设备(换料水箱等)流固耦合效应的研究多为数值模拟研究,少部分进行了实验研究,党俊杰<sup>[8]</sup>在研究地震作用下AP1000非能动安全壳冷却水贮存箱及屏蔽构筑物流固耦合振动特性研究时,并未严格按照模化理论对原型进行缩比,因此模型试验仅可观察现象,并不能将所得数据推到原型上。对于快堆堆本体的振动台试验模型的研究,国内外开展较少。鲁亮<sup>[9]</sup>在研究快堆主容器抗震试验中,利用数值模拟来对失真效应进行修正,但模型设计依然未严格满足  $S_a = 1$ ; Fujita等<sup>[10-12]</sup>在反应堆主容器模拟振动台模型试验中,将结构整体尺寸和厚度尺寸取不同的相似比,从而达到  $S_a$  近似为1,这种方法会使模型发生畸变,模型部分变“刚”,不能真实反映原型的抗震行为。

本文通过公式推导得到一套适用于快堆堆本体抗震试验的模化相似理论,并参考华北电力大学振动台参数,依照原堆结构设计比尺为1:25的试验模型,通过合适的简化方法,将主容器内体积占比小、作用不明显的构件进行适当简化。再以上述1:25的模型为原型,按照上述模化理论建立比尺为1:2的小模型。对

两个模型进行地震动力学数值模拟,提取大、小模型的频率、位移、加速度响应进行对比,并与推导得到的相似准则数进行比较。

# 1 流固耦合模型的一般动力相似关系推导

模型试验要求原型和模型满足相似学中的相似正定理、 $\pi$  定理和相似逆定理<sup>[13-14]</sup>,即原型中包含的实质问题应在模型中满足模拟的相似条件。

建立固体动力学基本方程(Lame 方程):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\lambda + \mu}{\rho_s} \text{grad div } u + \frac{\mu}{\rho_s} \nabla^2 u + F_s \quad (1)$$

其中: $\rho_s$  为固体密度; $F_s$  为固体质量力; $u$  为结构位移; $t$  为时间; $\mu, \lambda$  为拉梅弹性系数;grad、div 为梯度和散度; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。

式(1)有 5 个量:位移、尺寸、时间、质量力、物理参数。设实物与模型的比例关系为  $C_u, C_L, C_t, C_{F_s}, C_E, C_{\rho_s}$ ,如果模型与原型中固体运动相似,则须使大、小模型的固体元均满足式(1),则得到以下关系:

$$\frac{C_u}{C_t^2} = \frac{C_E C_u}{C_{\rho_s} C_L^2} = C_{F_s} \quad (2)$$

通过式(2)得到两个无量纲表达式分别为:

$$\pi_1^* = \frac{E t^2}{\rho_s L^2}, \pi_2^* = \frac{u}{g t^2} \quad (3)$$

其中: $L$  为长度; $E$  为弹性模量; $g$  为重力加速度。

建立流体动力学基本方程(N-S 方程)为:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \times \text{grad})V = F_f - \frac{1}{\rho_f} \text{grad } p + \nu \nabla^2 V \quad (4)$$

其中: $V$  为流体速度; $\rho_f$  为流体密度; $F_f$  为流体质量力; $p$  为流体压力; $\nu$  为运动黏性系数。

式(4)有 6 个量:速度、尺寸、时间、质量力、压力和黏度。实物与模型的比例关系设为  $C_V, C_L, C_t, C_{F_f}, C_p$  和  $C_\nu$ ,如果模型试验中的流体运动和实物中的流体运动相似,则须使模型和实物的流体元满足式(4),则得到的关系为:

$$\frac{C_V}{C_t} = \frac{(C_V)^2}{C_L} = C_{F_f} = \frac{C_p}{C_{\rho_f} C_L} = \frac{C_\nu C_V}{C_L^2} \quad (5)$$

根据式(5)得到 4 个无量纲表达式分别为:

$$\pi_3^* = \frac{V t}{L}, \pi_4^* = \frac{V^2}{L F_f}, \pi_5^* = \frac{p}{\rho_f V^2}, \pi_6^* = \frac{V L}{\nu} \quad (6)$$

其中: $\pi_3^*$  为斯特罗哈数; $\pi_4^*$  为佛汝德数; $\pi_5^*$  为欧拉数; $\pi_6^*$  为雷诺数。

建立流-固界面上的力、位移条件的边界条件分别为:

$$-p = \sigma_n \quad (7)$$

$$(V_x, V_y, V_z)_n = -\left(\frac{\partial u_x}{\partial}, \frac{\partial u_y}{\partial}, \frac{\partial u_z}{\partial}\right)_n \quad (8)$$

其中: $\sigma_n$  为结构应力在法线方向上的投影; $V_x, V_y, V_z$  分别为速度在  $x, y, z$  方向的分量; $u_x, u_y, u_z$  分别为结构线位移在  $x, y, z$  方向的分量。

根据式(7)、(8)得: $C_p = C_\sigma = C_E C_u / C_L, C_V = C_u / C_t$ ,然后得出两个无量纲表达式分别为:

$$\pi_7^* = \frac{E u}{p L}, \pi_8^* = \frac{u}{V T} \quad (9)$$

其中: $\pi_7^*$  表征固体的法向应力与流体的脉动压力比值为 1; $\pi_8^*$  表征法向速度与位移和时间的比相等。

针对快堆模型,既要考虑流体相似,又要考虑固体相似,且要关注流固耦合效应,因此以上 8 个无量纲表达式中要保证满足以下 4 个,分别记作:

$$\pi_1 = \frac{V^2}{L g}, \pi_2 = \frac{\rho_s}{\rho_f}, \pi_3 = \frac{E}{\rho_s V^2}, \pi_4 = \frac{V L}{\nu} \quad (10)$$

其中: $\pi_1$  为流体的佛汝德数; $\pi_2$  为固体与流体的欧拉数比值,根据  $\pi_1^*, \pi_3^*, \pi_5^*, \pi_7^*, \pi_8^*$  联立推导; $\pi_3$  为结构的柯西数; $\pi_4$  为流体的雷诺数。

Ma<sup>[15]</sup>关于流体动力学响应论述中指出,如果流体黏度小于 1 000 CP(1 CP=0.001 Pa·s),对于大型流体-容器体系,在地震激励下,晃动波高上的黏性效应一般可略去。考虑到快堆中的液态金属钠,在温度为 482 ℃ 时,仅具有约 95 CP 的黏度,故在计算其地震晃动波高时,可完全不计其影响。忽略了流体的黏性,即不计流体内摩擦力,那么模型流体与原型流体雷诺数相等的要求可放松。

依据华北电力大学地震试验台参数,确定大、小模型长度比尺为 2,大模型选用不锈钢,

小模型选用铝合金,根据  $\pi_3 = \frac{E}{\rho_s V^2}$ ,可得  $C_E = C_{\rho_s} C_V^2$ ;再由  $\pi_1 = \frac{V^2}{L g}$ ,可得  $C_V^2 = C_L C_g = C_L$ ,即

$$C_E = C_{\rho_s} C_L, \text{展开后得 } C_L = \frac{E_p \rho_m^*}{E_m \rho_p}, \text{即:} \quad \rho_m^* = C_L \frac{E_m}{E_p} \rho_p \quad (11)$$

其中: $\rho_m^*$  为小模型添加附加质量之后的密度; $\rho_P$  为大模型材料的密度; $E_m$  为小模型材料的弹性模量; $E_P$  为大模型材料的弹性模量。

可计算  $\rho_m^* = 5.58 \text{ g/cm}^3$ , 因此  $C_{\rho_s} = \frac{7.8}{5.58} = 1.41$ , 再根据  $\pi_2 = \rho_s / \rho_f$ , 可计算出流体的密度比为  $1 / 1.41 = 0.71$ 。经调研, 根据盐溶液在水中的溶解度, 并考虑安全性, 最终选用密度为  $1.41 \text{ g/cm}^3$  的氯化钙溶液为小模型内充液, 选择密度为  $1.00 \text{ g/cm}^3$  的水为大模型内充液。

再根据其他推导公式, 得到下列的相似准则数(表 1)。

表 1 相似关系		
Table 1 Similarity law		
物理量	相似关系	相似系数
长度	$C_L$	2.00
流体密度	$C_{\rho_f}$	0.71
弹性模量	$C_E$	2.83
应力	$C_\sigma = C_E$	2.83
应变	$C_\epsilon$	1.00
位移	$C_u$	2.00
速度	$C_V = \sqrt{C_L}$	1.41
时间	$C_t = \sqrt{C_L}$	1.41
调整后结构密度	$C_{\rho_s}^* = C_{\rho_f}$	1.41
结构频率	$C_f = C_t^{-1}$	0.71
加速度	$C_a$	1.00

## 2 试验模型设计

为证明上述相似模化理论的可行性, 本文利用 ANSYS 建立了 1 : 25 的大模型和 1 : 50 的小模型两个有限元模型, 大模型采用与原型相同的材料不锈钢, 并用密度为  $1.41 \text{ g/cm}^3$  的氯化钙溶液模拟液态钠; 小模型根据模化理论采用铝合金, 用水模拟液态钠。

确定相似准则数后利用 ANSYS 对大、小模型进行建模计算, 试验模型保留了体积、质量占比大对液体晃动影响大的构件, 如堆芯屏蔽、热屏蔽、主泵、热交换器等, 并严格保持堆内构件所占体积比和质量比与原堆的保持一致。对一些质量、体积占比小且对液体晃动影响很小

的构件进行适当简化, 如下支撑板等。模型如图 1 所示, 由于小模型为大模型等比例缩小后得到, 因此不做再次展示。

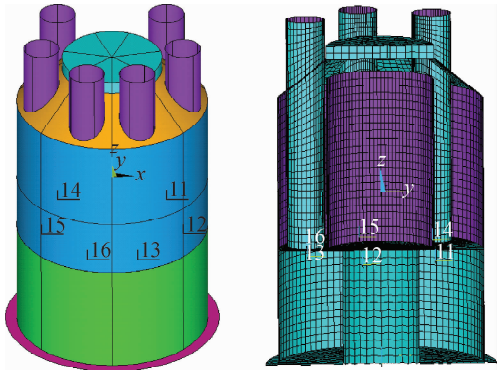


图 1 快堆堆本体简化模型(1 : 25)  
Fig. 1 Scaled-model of fast reactor vessel (1 : 25)

对大、小模型进行静态分析, 基本参数列于表 2。经分析可知, 大、小比例模型的结构与液体质量比均与原堆的比例相差很小, 符合预期要求。

表 2 静态参数				
Table 2 Static parameter				
模型	结构 质量/kg	液体 质量/kg	质量比 (结构/液体)	总质量/ kg
大模型	233.32	131.4	1.78	364.7
小模型	20.6	10.5	1.96	31.1

## 3 数值模拟计算和相似关系验证

### 3.1 模态计算

静态参数符合预期要求后, 利用 ANSYS 对大、小模型进行模态分析, 取主容器晃动最明显的 1 阶模态进行对比, 模态云图如图 2 所示。

通过计算得到, 大模型的一阶固有频率为  $163.21 \text{ Hz}$ , 小模型的一阶固有频率为  $230.60 \text{ Hz}$ , 大、小模型一阶固有频率比值为  $0.708$ , 与前面推导得到的相似系数误差为  $0.09\%$ , 二者几乎相等。因此可从模态分析的角度证明相似理论的正确性。

### 3.2 正弦十五波的动力学响应计算

分别给大、小模型输入共振正弦十五波水平激励, 频率为 3.1 节中模型模态计算得到的

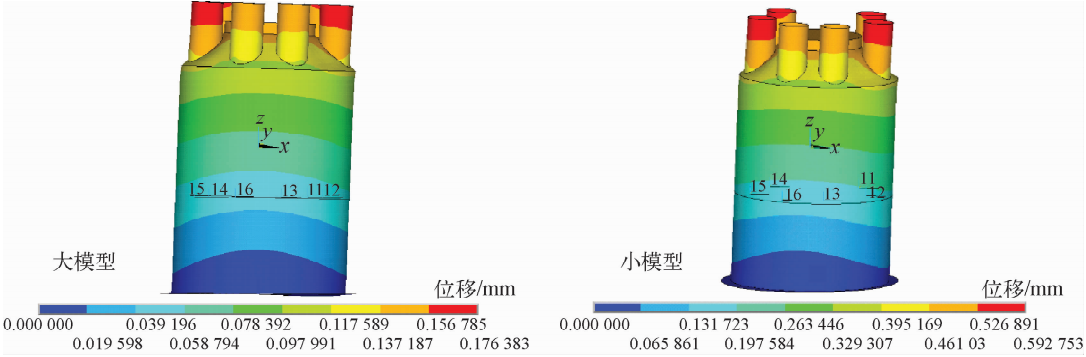


图 2 模态云图

Fig. 2 Modal picture

共振频率,其中 $a = A_m \sin 2\pi ft$ , $A_m^p = A_m^m = 1 \text{ m/s}^2$ ,结构阻尼取 0.04,进行瞬态计算。在大模型与小模型上取相同位置的 5 个测点,其中主容器外壁上取 3 个点,主泵和热交换器上各取 1 个点,如图 3 所示。分别提取 5 个点的位移和加速度响应并进行对比。

提取大、小模型各测点的位移进行比较,大、小模型测点 2 的时程曲线如图 4 所示。大、小模型各测点最大位移列于表 3。

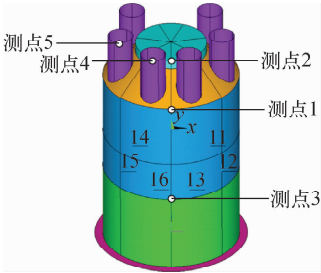


图 3 测点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measuring point

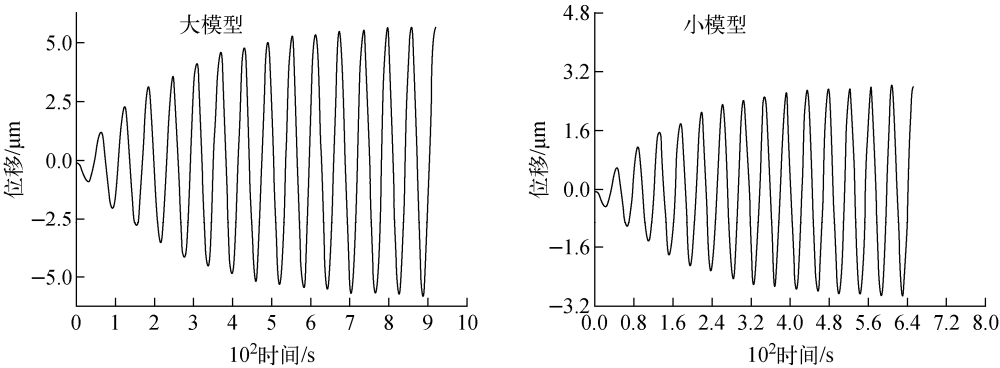


图 4 测点 2 的时程曲线

Fig. 4 Time-displacement curve for measuring point 2

表 3 各测点最大位移  
Table 3 Maximum displacement of measuring point

测点	最大位移/mm		比值	相似准则数	误差/%
	大模型	小模型			
1	$1.58 \times 10^{-2}$	$8.17 \times 10^{-3}$	1.93	2.00	3.5
2	$1.63 \times 10^{-2}$	$7.89 \times 10^{-3}$	2.07	2.00	3.5
3	$5.86 \times 10^{-3}$	$2.93 \times 10^{-3}$	2.00	2.00	0
4	$1.78 \times 10^{-2}$	$8.89 \times 10^{-3}$	2.00	2.00	0
5	$1.75 \times 10^{-2}$	$8.65 \times 10^{-3}$	2.02	2.00	1

通过对比大模型和小模型上所取的 5 个测点的位移,得到二者之间计算值的比值与理论准则数之间的误差极小,几乎等于相似关系的理论值  $S_u=2$ 。

提取大、小模型各测点的加速度进行比较,大、小模型测点 1 的加速度-时间曲线如图 5

所示。大、小模型各测点最大加速度列于表 4。  
通过对比大模型和小模型上所取的 5 个点的加速度,得到二者之间计算值的比值与理论准则数之间的误差非常小,几乎等于相似关系的理论值  $S_a=1$ 。

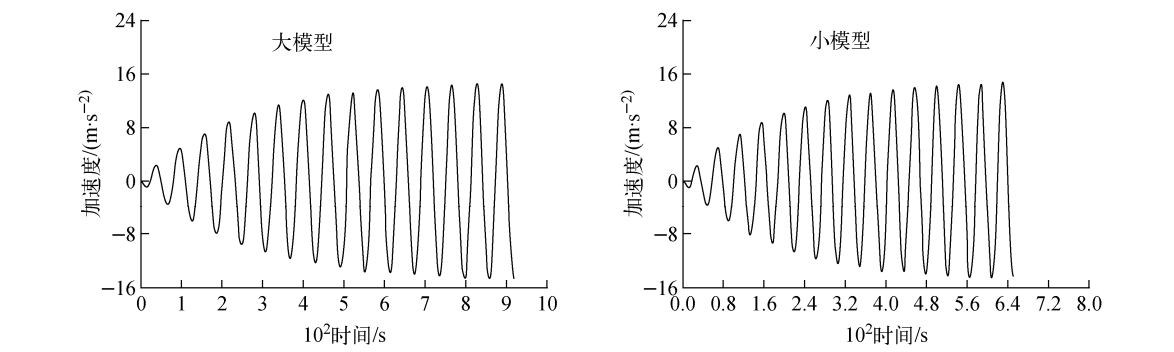


图 5 测点 1 的加速度-时间曲线  
Fig. 5 Acceleration-time curve for measuring point 1

表 4 各测点最大加速度  
Table 4 Maximum acceleration of measuring point

测点	最大加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )		比值	相似准则数	误差/%
	大模型	小模型			
1	14.62	14.48	1.009	1.00	0.9
2	17.04	16.90	1.008	1.00	0.8
3	6.08	6.05	1.004	1.00	0.4
4	20.53	20.30	1.011	1.00	1.1
5	17.95	17.76	1.011	1.00	1.1

4 结论

本文首先通过公式推导和分析,得到一套适用于快堆堆本体抗震的相似模化理论,并建立了两个不同比例尺度的有限元模型来验证该模化理论。其中,大模型选用不锈钢作为结构材料,用密度为  $1.41 \text{ g/cm}^3$  的氯化钙溶液模拟液态钠;小模型选用铝合金作为结构材料,用水模拟液态钠。利用 ANSYS 分别对大、小模型进行模态分析和瞬态分析,取模型上 5 个标志性测点,提取位移和加速度,并与相似准则数进行对比,得到如下结论:

- 1) 大、小模型一阶频率的比值与相似准则数误差极小,满足相似模化理论;
- 2) 在共振正弦十五波的激励下,大、小模

型的位移比值、加速度比值与相似准则数误差极小,满足相似模化理论;  
3) 计算数据验证了此套相似模化方法的正确性,该方法可为快堆堆本体抗震试验提供可靠的模化理论依据。

参考文献:

[1] 翁智远,钱江,徐礼存. 池式快堆主容器地震响应分析[J]. 核动力工程,2000,21(4):328-331.  
WENG Zhiyuan, QIAN Jiang, XU Licun. Seismic response analysis of the main container of the pool fast reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(4): 328-331(in Chinese).  
[2] 原朵仙,马裕超. 混凝土结构动力模型重力失真效应分析[J]. 建筑结构,2011,41(增刊):1 077-

- 1 078.  
YUAN Duoxian, MA Yuchao. Analysis of gravity distortion effect of dynamic model of concrete structure[J]. Building Structure, 2011, 41 (Suppl.): 1 077-1 078(in Chinese).
- [3] 郑伟. 关于动力极限强度模型试验中失真效应及其修正准则的探讨[J]. 工程抗震, 1992(3): 39-43.  
ZHENG Wei. Discussion on distortion effect and correction criterion in dynamic ultimate strength model test[J]. Engineering Seismic, 1992(3): 39-43(in Chinese).
- [4] 杨旭东. 振动台模型试验若干问题的研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2005.
- [5] 杨树标, 李荣华, 刘建平, 等. 振动台试验模型和原型相似关系的理论研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2007(1): 8-11.  
YANG Shubiao, LI Ronghua, LIU Jianping, et al. Theoretical study on similarity relationship between shaking table test model and prototype [J]. Journal of Hebei University of Technology: Natural Science, 2007(1): 8-11(in Chinese).
- [6] 鲁亮, 吕西林. 振动台模型试验中一种消除重力失真效应的动力相似关系研究[J]. 结构工程师, 2001(4): 45-48.  
LU Liang, LV Xilin. A study on dynamic similarity relation to eliminate gravity distortion effect in shaking table model test[J]. Structural Engineer, 2001(4): 45-48(in Chinese).
- [7] MYRILLAS K, PLANQUART P, BUCHLIN J M, et al. Small scale experiments of sloshing considering the seismic safety of MYRRHA[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(17): 7 239-7 251.
- [8] 党俊杰. 地震作用下 AP1000 非能动安全壳冷却水贮存箱及屏蔽构筑物流固耦合振动特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [9] 鲁亮. 中国实验快堆本体抗震性能试验研究与分析[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [10] SAKURAI A, KURIHARA C, NAKAGAWA M, et al. Fluid-coupled vibration analysis of reduced models of pool-type LMFBR[C]// 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Belgium: [s. n.], 1985.
- [11] FUJIMOTO S, YAMOTO S, SHIMIZU H, et al. Experimental and analytical study on seismic design of a large pool type LMFBR in Japan[C]// 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Belgium: [s. n.], 1985.
- [12] FUJITA K, ITO T, TASHIMO M, et al. Study on the seismic response of a reactor vessel of a pool type LMFBR including fluid-structure interaction [J]. Nuclear Engineering and Design, 1989, 113 (3): 455-462.
- [13] 李德寅, 王邦楣, 林亚超. 结构模型试验[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [14] 李之光. 相似与模化[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [15] MA D C. Hydrodynamic response of viscous fluids under seismic excitation[C]// 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Germany: [s. n.], 1991.