

# 核电厂非能动安全壳冷却系统储水箱的 振动特性分析

李晓蒙, 何铮

(国核华清(北京)核电技术研发中心有限公司, 北京 102209)

**摘要:** PCS 储水箱是 AP 系列核电站非能动安全壳冷却系统的重要组成部分。水体和水箱的耦合作用会影响结构的整体性能, 并可能造成水箱破坏, 因此有必要在考虑流固耦合前提下对储水箱进行振动分析。首先给出了研究水体晃动的理论模型, 得到了储水量分别为 60%、70%、80% 时水箱的 1 阶固有频率。之后运用有限元软件 ANSYS 对空水箱模型及含三种不同储水量的水箱模型进行了模态分析, 研究了储水量对结构振动特性的影响, 并将数值仿真结果与理论计算结果进行了对比。最后, 对空箱及含 60% 储水量的水箱模型进行了地震反应谱分析, 结果显示水体由于固有频率低, 在地震载荷下易被激起, 在设计中必须加以考虑。

**关键词:** PCS 储水箱; 振动特性; 水体晃动; 抗震计算

中图分类号: TL364

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0102-05

## Dynamic Characteristic Analysis of the Passive Containment Cooling System Water Tank of Nuclear Power Plant

LI Xiaomeng, HE Zheng

(State Nuclear Power Technology R & D Centre Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** PCS tank is an important part of passive containment cooling system of AP series nuclear power plants. The dynamic characteristics of the whole tank will be changed by the fluid-structure coupling effect, even worse it may be destroyed by the effect. Hence, it is necessary to take the fluid-structure interaction into consideration when addressing the dynamic analysis of the PCS tank. A theoretical method about the water sloshing analysis has been showed in the paper, and the first natural frequency of the tank with 60%、70%、80% water have been got. Then the modal analysis is preceded for the empty tank model and three different water storage models by using the finite element software ANSYS. At the same time, the influence analysis of water storage is processed. The result of the modal analysis have been compared with the result of theoretical method. Finally, the seismic response spectrum analysis have been processed. The results showed that the fluid can be excited easily by seismic load due to the lower frequency. So the sloshing effect of the water must be considered in the design of the PCS tank.

**Key words:** PCS tank; dynamic character; sloshing; earthquake-resistance computation.

AP 系列核电站是美国西屋公司开发的第三代非能动型压水反应堆核电站, 具有相对简单性、安全性和可靠性等特点。其中非能动安全壳冷却系统 (Passive Containment Cooling System, PCS) 是其设计特点之一。非能动安全壳冷却系统由一台与安全壳屏蔽构筑物结构合为一体的冷却水储水箱 (以下简称 PCS 储水箱)、管道以及相关的仪表、阀门等构

成。PCS 储水箱位于屏蔽构筑物顶部, 除了安全壳除热功能外, 还起到了代替乏燃料水池以及在地震安全停堆后为消防用储水箱补水等重要作用<sup>[1]</sup>。

由于 PCS 储水箱具有举足轻重的地位, 在设计上按安全停堆地震 (SSE) 等级, 抗震 I 类设计<sup>[1]</sup>。然而, 在地震作用下, 水箱中水体的振动与固体的振动不同, 水箱内带有自由表面的水体不但随着水箱水平运动而且由于惯性和重力作用, 其表面会出现升降而发生晃荡。同时, 水体晃荡会对限制其运动的固体壁面产生晃荡力, 从而反过来影响结构的运动。因此, PCS 储水箱在地震作用下的动力响应非常复杂, 它不仅受到结构的振动和水体的晃荡影

收稿日期: 2015-11-14

基金项目: 国家大型先进压水堆核电站重大专项关键设备设计分析技术研究课题 (2012ZX06004-012)

作者简介: 李晓蒙(1988), 女, 北京人, 工程师, 硕士, 主要从事核反应堆结构力学计算等 (e-mail) lxmcau@126.com。

响, 还必须考虑结构与水体的相互作用。而工程上有很多实例都说明了: 地震作用导致水体晃动而产生的晃荡力是导致储水结构破坏的主要原因<sup>[2-4]</sup>。因此, 研究 PCS 水箱的振动特点及在地震下的动力响应, 是十分必要的。

文中首先给出了描述水箱流体-固体耦合振动问题的简化理论模型, 之后运用大型有限元软件 ANSYS 对 PCS 储水箱的振动模态进行了计算, 分析了不同储水量对水箱固有频率的影响, 并与理论计算结果进行了对比。最后对 PCS 储水箱进行了抗震反应谱分析, 得到了水体的晃动作用对水箱结构整体的抗震性能有很大影响, 在设计中必须将其考虑在内的结论。

### 1 理论模型

流体动力学是分析储液容器内液体晃动问题的理论基础, 一般的理论方法是对 Navier-Stokes 方程直接进行理论分析。然而理论分析求解往往比较复杂, 且对于形状不规则的流动或是非线性问题不能合理简化, 大多数都不能得到解析结果<sup>[5]</sup>。为了规避求解 Navier-Stokes 方程, Housner 等人提出了简化的集中质量法<sup>[6]</sup>。这一方法将液动压力分为两部分, 一部分是随容器作同步运动的液体惯性力产生的脉冲压力, 另一部分是由容器内液体自由晃动而产生的对流压力。Housner 将流体部分简化成不同的质量单元和弹簧单元, 如图 1 所示。

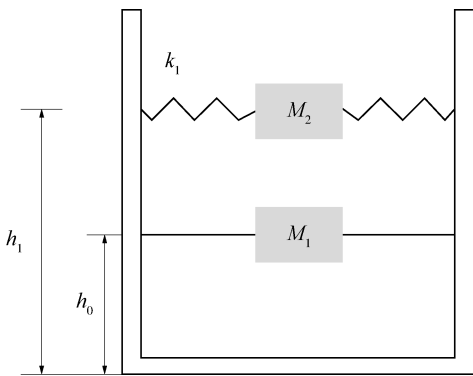


图 1 Housner 理论计算模型示意图

Fig. 1 Housner's Theoretical Calculation Model

图 1 中脉冲质量  $M_1$ , 固接在箱体上; 第一阶振动等效质量  $M_2$  弹性连接箱体上;  $k_1$  为第一阶等效弹簧刚度;  $h_0$  为等效质量  $M_1$  的作用位置;  $h_1$  为等效质量  $M_2$  的作用位置;  $f_1$  为储罐中液体晃动的第一阶模态频率。对于圆柱形储液容器有:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g\pi \tanh\left(\frac{h\pi}{2R}\right)}{2R}} \quad (1)$$

但是 PCS 储水箱并不是规则的圆柱形, 因此需要进行近似处理。液体各阶模态固有频率的理论计算公式见式(2)~式(4):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g\nu_n \tanh\alpha_n}{R_o}} \quad (2)$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (3)$$

$$\alpha_n = \frac{h_a}{R_o} \nu_n \quad (4)$$

式中:  $n$  为流体振动模态的阶数;  $g$  为重力加速度;  $\nu_n$  是下面等式(5)的第  $n$  个根。

式(5)前四阶根与  $R_i/R_o$  的函数关系曲线如图 2 所示, 可得  $\nu_1 = 1.397$ <sup>[5]</sup>。

$$\frac{J'_1(\nu)}{Y'_1(\nu)} - \frac{J'_1\left(\frac{R_i}{R_o}\nu\right)}{Y'_1\left(\frac{R_i}{R_o}\nu\right)} = 0 \quad (5)$$

式中:  $J_1(x)$  为第一类一阶贝塞尔函数,  $Y_1(x)$  为第二类一阶贝塞尔函数。

流体的等效流体深度  $h_a$  指: 将同体积的流体充入截面为矩形且有与水箱内径、外径相同的环形水箱后的流体深度, 如图 3 所示。

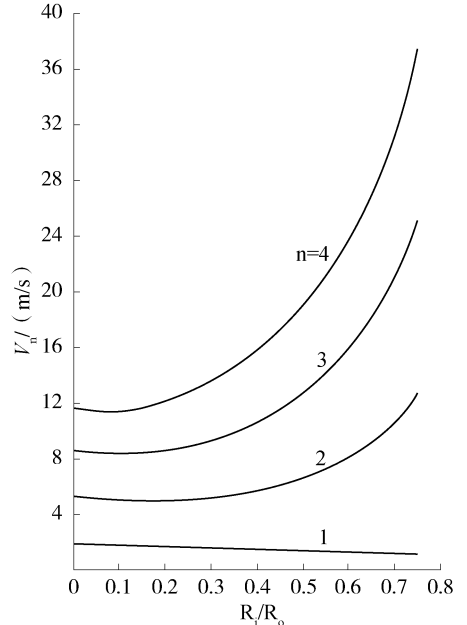


图 2 等式(5)的前四阶根与  $R_i/R_o$  的关系图

Fig. 2 The Diagram of the Relationship Between the Previous Four Roots and  $R_i/R_o$  of Equation (5)

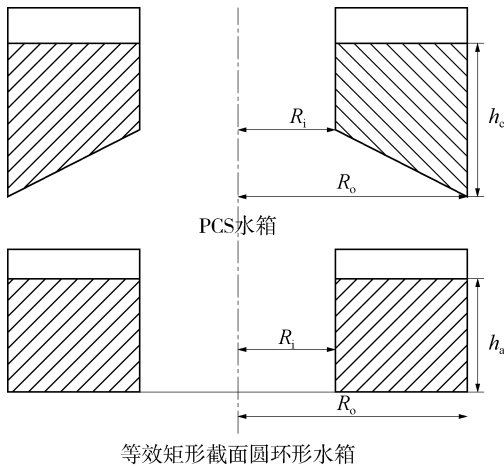


图3 等效深度示意图

Fig. 3 The Equivalent Depth Schematic

设 PCS 储水箱外半径  $R_o$  为 11.58 m, 内半径  $R_i$  为 5.3 m, 水箱内侧壁高 5.96 m, 外侧壁高 10.68 m, 壁厚 0.9 m, 水箱体积约为 2 672  $\text{m}^3$ 。为考察贮水容量对液体频率的影响, 分别计算贮水量为 60%、70% 及 80% 时液体一阶固有频率。得到的理论计算结果见表 1。

表1 理论计算结果

Table 1 Results of Theoretical Calculations

贮水量	60%	70%	80%
$h_a / \text{m}$	4.8	5.6	6.4
$f / \text{Hz}$	0.125	0.133	0.140

## 2 PCS 储水箱模态的有限元计算

虽然 Housner 简化处理方法已被国内、外学者广泛采用, 但是这种方法具有一定的局限性, 并未能真正考虑流-固之间的动力耦合关系。而 ANSYS 有限元程序在数值模拟流-固耦合方面具有较强的实力<sup>[8]</sup>。本文将采用 ANSYS 程序对 PCS 储水箱的振动模态进行计算分析。

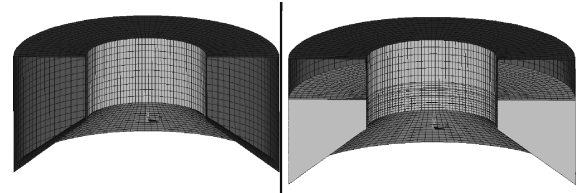
### 2.1 PCS 储水箱有限元模型

分别建立空箱及储水量为 60% 的水箱有限元模型。为了考察水体晃动对结构整体振动特性的影响, 在空箱模型中加入了 60% 的静水质量。

箱内液体假设为无旋、不可压缩的理想流体, 采用 Fluid80 单元来模拟; 箱体材料为混凝土, 采用 shell63 单元进行模拟。水箱的材料特性取值如下: 弹性模量  $E = 24.9 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.17$ ,

密度  $\rho = 2 432 \text{ kg/m}^3$ 。

一般取流体的弹性模量为结构弹性模量的 1%, 泊松比取相对很小的值<sup>[7]</sup>。基于这一原则, 水体的材料特性在常温 (20  $^{\circ}\text{C}$ ) 下取值如下: 弹性模量  $E = 2.1 \text{ GPa}$ ; 泊松比  $\mu = 0.3 \times 10^{-4}$ ; 密度  $\rho = 1 000 \text{ kg/m}^3$ , 热膨胀系数  $\alpha = 5.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。两种模型的剖面图见图 4。



(a) 空箱模型

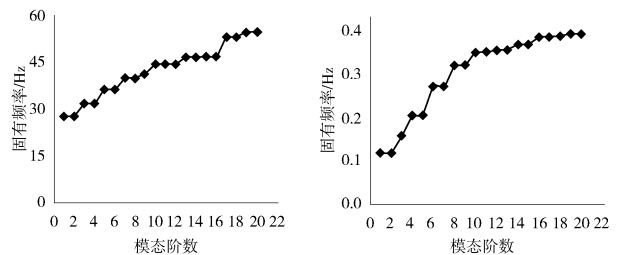
(b) 60% 储水箱模型

图4 空箱模型和 60% 储水箱模型示意图

Fig. 4 Models of Empty Tank and 60% Capacity Tank

对结构和液体共用节点或临近节点进行自由度耦合, 具体规则为: 水箱底部共用节点 Z 方向自由度耦合, 水箱壁面临近节点法向自由度耦合, 切向自由度自由。水体上表面为自由液面, 下表面为固定壁条件。

选取水箱节点的  $U_x$  自由度为主自由度, 选取水体自由表面处的  $U_z$  自由度为主自由度。施加约束后的水箱模型如图 5 所示。



(a) 空箱模态频率图

(b) 60% 储水箱模态频率图

图5 约束后的水箱模型图

Fig. 5 PCS Tank Model with All Restrictions

### 2.2 模态计算结果分析

采用 ANSYS 模态分析中的“缩减法”进行计算, 分别得到两种模型的前 20 阶固有频率, 如下表 2 所示。

从频率表中可看出, 由于空箱模型分别关于 XOZ 平面和 YOZ 平面对称, 故空箱模型的每阶模态在 X 和 Y 方向上会出现重频现象。而有 60% 储水量的水箱模型由于加入了流体的关系, 固有频率降低很多, 同样, 由于模型的对称性, 也逐渐出现了重频现象。

表 2 固有频率表

Table 1 Table of the Natural Frequency

阶数	空箱模型频率	60% 储水箱模型频率
1	27.687	0.120
2	27.687	0.120
3	31.905	0.160
4	31.905	0.208
5	36.475	0.209
6	36.475	0.277
7	39.948	0.277
8	39.948	0.324
9	41.197	0.325
10	41.197	0.356
11	44.371	0.356
12	44.371	0.361
13	46.611	0.361
14	46.611	0.374
15	46.800	0.374
16	46.800	0.391
17	53.015	0.392
18	53.015	0.394
19	54.586	0.399
20	54.586	0.399

根据频率表, 绘出两种模型的频率曲线图, 如图 6 所示。可看出, 空箱模型的固有频率的增加趋势呈线性, 而 60% 储水箱模型的固有频率的增加趋势呈二次曲线型。

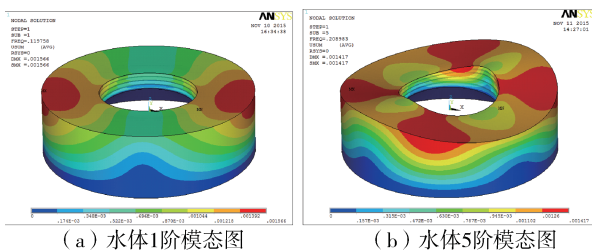


图 6 空箱和 60% 储水箱模态图

Fig. 6 The First and Fifth Mode Figures of Water

上图为 60% 储水箱模型中水体的 1 阶、5 阶模态振型图。在前 20 阶振型中, 水箱结构中没有发生明显的变形, 振型全部为流体的晃动。同时还发现, 水体的 z 方向的晃动模态比较密集且频率较小, 所以地震时储液的晃动比较容易被激发, 这也是导致水箱顶部失效的主要原因。

### 3 储水量对 PCS 水箱振动特性的影响分析

#### 3.1 储水量的影响分析

为了考虑水箱内储水量对水箱自振频率的影响,

分别计算储水量为 60%、70% 以及 80% 时, 水箱的前 20 阶自振频率。由于篇幅有限, 这里仅列出三种储水量模型的前 10 阶频率, 如表 3 所示。

表 3 三种模型固有频率表

Table 3 The Natural Frequency of Three Models

阶数	60% 储水箱模型频率/ Hz	70% 储水箱模型频率/ Hz	80% 储水箱模型频率/ Hz
1	0.120	0.129	0.137
2	0.120	0.129	0.137
3	0.160	0.177	0.186
4	0.208	0.220	0.228
5	0.209	0.220	0.228
6	0.277	0.284	0.287
7	0.277	0.284	0.287
8	0.324	0.327	0.327
9	0.325	0.328	0.329
10	0.356	0.357	0.359

将上述三种储水量的模态频率综合对比分析, 见图 7, 可以看出, 随着储水量的增多, 各阶对应的模态频率一直变大。不同储水量下, 前 8 阶的固有频率相差较大, 之后的高阶频率差距逐渐减小并越来越接近。

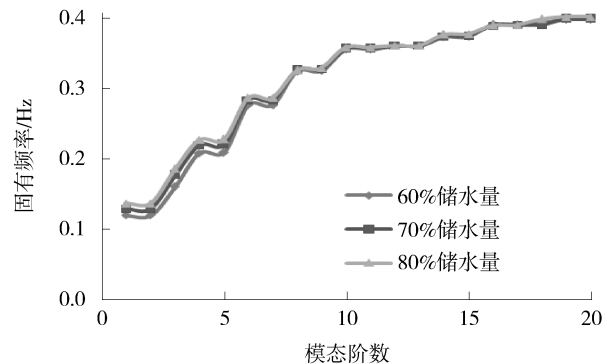


图 7 60%、70%、80% 储水箱的模态曲线图

Fig. 7 Frequency Diagram of 60%, 70% and 80% Capacity Tank

#### 3.2 仿真结果与理论计算结果对比

将仿真计算的三种不同储水量的 1 阶固有频率与理论计算结果进行对比, 记理论计算结果为  $f_r$ , 仿真计算结果为  $f_s$ , 两者对比如表 4 所示。其中  $f_s$  与  $f_r$  的偏差计算公式为:

$$\sigma = \frac{|f_s - f_r|}{f_r} \times 100\% \quad (6)$$

表4 仿真结果与理论计算对比表

Table 4 Comparison Between Simulation Results and the

Theoretical Results

储水量	60%	70%	80%
$f_r$	0.125	0.133	0.140
$f_s$	0.120	0.129	0.137
偏差 $\sigma$	4%	3%	2%

通过表4发现,数值仿真与理论计算结果相差不多,偏差在可接受范围内。仿真计算的结果要大于理论计算结果,且随着储水量的增多,两者的偏差越来越小。造成偏差主要有两点:(1)PCS水箱的形状不规则,文章中采用的理论公式是在环形水箱的基础上进行的近似;(2)理论公式中没有考虑流-固耦合之间的作用,同时有许多简化,因此会与数值仿真结果存在一定偏差。

#### 4 PCS 储水箱的抗震反应谱分析

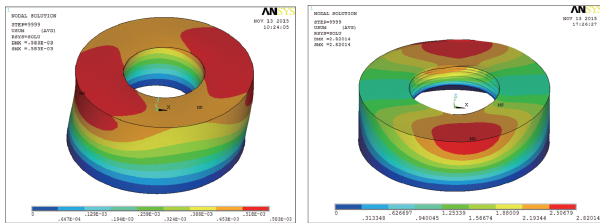
PCS 储水箱位于屏蔽构筑物顶端,距地面高度约为90米,因此需要用对应的楼层反应谱对其进行抗震分析。阻尼比为0.5%,90米处的竖直方向的楼层反应谱,如表5所示:

表5 楼层反应谱

Table 5 Floor Response Spectrum

频率 / Hz	0.100	0.135	0.138	0.174	0.522	1.035	100
谱值 / g	0.023	0.043	0.045	0.087	0.299	0.573	1.024

分别对 PCS 空水箱模型及 60% 储水量的水箱模型进行反应谱分析,结果如图8所示。



(a) 空箱模型水体位移图 (b) 60%储水模型水体位移图

图8 空箱模型和60%储水模型水体位移图

Fig. 8 Water Displacement of Empty Tank and 60% Capacity Tank

空箱模型的最大位移发生在箱体顶部,最大位移为0.58 mm;而含60%储水量的水箱模型结果则有较大不同。首先反应谱分析下,水体的晃动较为剧烈,最大晃动高度达到2.82 m,而水箱发生的位移量则较小仅为0.53 mm,与空箱模型接近。这是因为水体的固有频率小,从而很容易被激起振动,而水箱结构的固有频率高,相对稳定。综上,在地震作用下,水体晃动非常明显,在水箱设计中,必须要将其影响考虑进去,并在实际工程中对水箱水位进行严格监控,以防止水箱失效。

#### 5 结论

本文利用有限元软件 ANSYS 对核电厂屏蔽构筑物上方的 PCS 储水箱进行了模态分析及抗震反应谱分析,研究了不同储水量对水箱整体振动特性的影响。计算表明:水体由于固有频率较低,在地震载荷作用下很容易被激起,并产生较剧烈的晃动及晃动高度。因此在 PCS 水箱的设计中,必须将水体的晃动因素加以考虑。

#### 参考文献:

- [1] 林诚格,郁祖盛. 非能动安全先进压水堆核电技术(中册)[M]. 北京:原子能出版社,2010,509-510.
- [2] 程旭东. 大型储罐的抗震可靠性分析及其震害预测[D]. 北京:中国石油大学,2010:4-5.
- [3] 高晓安,陆道纲,朱玉巧,等. 考虑流固耦合的储液容器地震反应计算[J]. 工程抗震,2001,9(3):41-44.
- [4] 徐刚,任文敏,张维,等. 储液容器的三维流固耦合动力特性分析[J]. 力学学报,2004,36(3):328-335.
- [5] 赵冯. 两种圆形储液容器的动力学分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2013.
- [6] Housner G W. Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers[J]. Bull. Seism. Soc. Am, 1957, 47(1):15-35.
- [7] 鲁丽,杨翔仁,金建明. 反应堆吊篮在空气和静水中的振动特性分析[J]. 西南交通大学学报,2004,39(1):82-85.
- [8] ESMAILZADEH M, LAKIS A A, THOMAS M. Three-dimensional Modeling of Curved Structures Containing and/or Submerged in Fluid[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2008(44):334-345.

(责任编辑 林希平)