

# 考虑液晃效应的大型储罐有限元抗震分析方法

杜坤<sup>1</sup>, 初起宝<sup>2\*</sup>, 梁明邦<sup>1</sup>, 石作维<sup>1</sup>

1. 中广核工程设计有限公司, 广东深圳, 518172; 2. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京, 100082

摘要: 在美国土木工程协会规范 ASCE-4-98 的基础上, 扩展建立了大型储罐三维有限元模型, 采用质量-弹簧模型模拟液晃效应, 应用 ANSYS 软件进行抗震分析。有限元计算的液晃频率与 ASCE-4-98 规范公式计算结果一致, 验证了有限元模型的合理性和可用性。该方法可直观地从三维模型上获取大型储罐在地震下的应力分布, 是一种简单适用的工程处理方法。

关键词: 储罐; 液晃; 质量-弹簧模型; 抗震分析; ASCE-4-98

中图分类号: TL364<sup>+</sup>.2 文献标志码: A

## FEM Seismic Analysis Method of Large Storage Tank in Consideration of Liquid Sloshing

Du Kun<sup>1</sup>, Chu Qibao<sup>2</sup>, Liang Mingbang<sup>1</sup>, Shi Zuwei<sup>1</sup>

1 China Nuclear Power Engineering Co.Ltd., Shenzhen Guangdong, 518172; China

2. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing, 100082, China,

**Abstract:** According to the ASCE-4-98, the 3D FEM model of large storage tank was established. The effect of liquid sloshing was simulated by the mass-spring model. The seismic analysis was processed by ANSYS software. The FEM calculated frequency of liquid sloshing was identical to the formula result of ASCE-4-98, shown that the 3D FEM model is reasonable and usable. It is a simple and suitable engineering method, from which, the stress distribution of the storage tank can be obtained directly from the 3D FEM model.

**Key words:** Storage tank, Liquid sloshing, Mass-spring model, Seismic analysis, ASCE-4-98

### 0 引言

核电厂通常会设置一系列核安全级别的大型储罐, 用于紧急情况下为系统补水, 缓解事故。这些大型储罐一般为常压或低压的立式薄壁圆筒形容器, 直接安装在地面或楼板上, 需要评价地震作用下液晃效应引起的结构强度和稳定性问题。对于储罐液晃问题, RCC-M或ASME规范未明确具体的分析处理方法。国内部分标准, 如GB50341—2003《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》、SH3048—1999《石油化工钢制设备抗震设计规范》、GB50191—2012《构筑物抗震设计规范》等提供了一些液晃效应计算公式; 但这些标准属于石化标准或民用建筑标准, 地震输入与设备安装位置没有直接关系, 无法反映厂房对地震的放大作用, 验收准则与核级设备要求的地震载荷无关联, 因此不适用于核安全级设备。

美国土木工程协会规范 ASCE-4-98 针对核安全相关设备的抗震分析进行了详细描述和规定,

对于储罐液晃效应, 亦给出了简化的二维质量-弹簧模型和计算经验公式。因此, ASCE-4-98 规范适用于核安全级的大型储罐抗震分析。

本文将 ASCE-4-98 的二维理论模型扩展到三维空间, 建立了大型储罐的三维有限元模型, 考虑柔性壁效应, 液晃效应采用分层质量-弹簧模型模拟。地震载荷输入采用大型储罐安装厂房的楼层反应谱数据, 应用 ANSYS 进行抗震分析, 并采用 RCC-M 规范 J 篇进行应力评定和稳定性评定。

### 1 建模理论

ASCE-4-98 规范把大型储罐中的液体分为 2 部分: 一部分为水平晃动液体, 分布在大型储罐上方, 在地震的作用下产生晃动效应; 另一部分为冲击液体, 分布在大型储罐下方, 这部分液体如刚体一样固定在罐壁上。二维质量-弹簧模型如图 1 所示。

收稿日期: 2015-12-14; 修回日期: 2016-05-29

作者简介: 杜坤(1975—), 男, 高级工程师, 工学硕士, 现主要从事核设备力学研究

\*通讯作者: 初起宝, E-mail: chuqibao2005@126.com

图1中,大型储罐简化为梁模型,  $M_{S1} \sim M_{S7}$ 为罐壁质量分布。  $M_{I5} \sim M_{I7}$ 为冲击液体质量分布,该部分质量直接附加在储罐容器壁上,液体高度范围为  $l$ 。晃动液体简化为刚性梁,液体高度范围为  $l_c$ ,总质量为  $M_c$ ,通过分层的弹簧模型与罐壁连接。

本文将二维模型扩展为三维模型<sup>[1]</sup>,图2中  $W_1$ 为冲击液体总质量;  $W_2$ 为晃动液体总质量;  $X_1$ 为冲击液体质心高度;  $X_2$ 为晃动液体质心高度;  $D$ 为大型储罐外径;  $H$ 为储罐液面高度。

令  $W_T$ 为大型储罐中的液体总质量,根据ASCE-4-98,冲击液体的总质量  $W_1$ 和质心高度  $X_1$ 为:

$$W_1 = \frac{\tanh\left[0.866\left(\frac{D}{H}\right)\right]}{0.866\left(\frac{D}{H}\right)} W_T \quad (1)$$

$$X_1 = 0.375H \quad (2)$$

晃动液体的总质量  $W_2$ 和质心高度  $X_2$ 为:

$$W_2 = 0.23 \frac{D}{H} \tanh\left(\frac{3.67}{D/H}\right) W_T \quad (3)$$

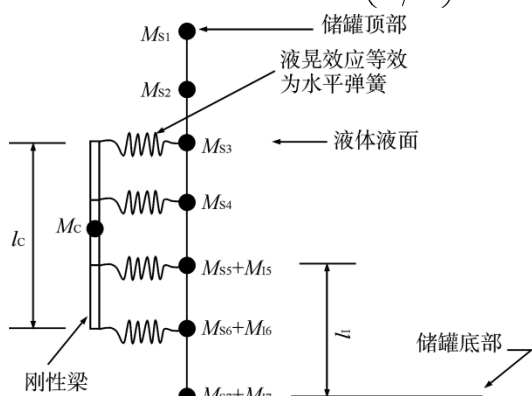


图1 大型储罐考虑液晃效应的二维质量-弹簧模型  
Fig. 1 2D Mass-Spring Model of Large Storage Tank in Consideration of Liquid Sloshing

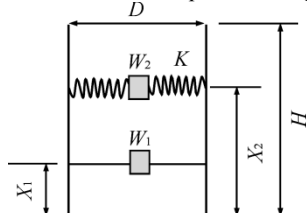


图2 大型储罐考虑液晃效应的三维质量-弹簧模型  
Fig. 2 3D Mass-Spring Model of Large Storage Tank in Consideration of Liquid Sloshing

$$X_2 = \left[ 1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67}{D/H}\right) - 1}{\frac{3.67}{D/H} \sinh\left(\frac{3.67}{D/H}\right)} \right] H \quad (4)$$

晃动液体晃动的圆频率  $\omega_2$ 和周期  $f$ 为:

$$\omega_2^2 = \frac{3.67g}{D} \tanh\left(\frac{3.67H}{D}\right) \quad (5)$$

$$f = \frac{\omega_2}{2\pi} \quad (6)$$

式中,  $g$ 为重力加速度。

把晃动液体等效为质量-弹簧模型,弹簧总刚度  $K$ 为:

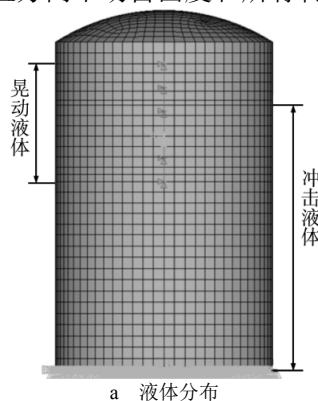
$$K = \omega_2^2 W_2 \quad (7)$$

晃动液体的质量布置在三维模型中轴位置;弹簧沿高度均匀分布层数为  $n_1$ ;每一层质量为  $W_2/n_1$ ;每一层弹簧在水平面圆周方向上分布数量为  $n_2$ 。则每一根弹簧的刚度  $k$ 为:

$$k = \frac{2K}{n_1 n_2} \quad (8)$$

## 2 三维计算模型

本文以核电厂某大型储罐为例,在ANSYS中建立了计算分析的三维有限元模型(图3)。筒体壁厚由下往上呈阶梯分布,分别为16、12、10、8mm。储罐壳体采用shell181单元;晃动液体质量单元采用mass21;在高度方向上,各质量单元采用刚性梁连接。弹簧单元采用combin14单元,一端与质量单元连接,另一端与储罐筒壁上的节点连接。对于冲击液体,将其质量等效分布到储罐罐壁上,通过调整罐壁的材料密度来实现。计算时在储罐底部约束平动自由度,晃动液体质量单元约束竖直方向平动自由度和所有转动自由度。



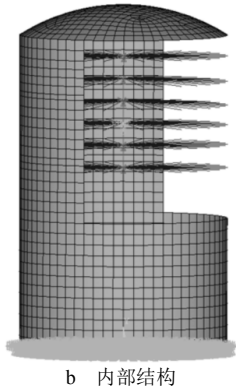


图3 大型储罐的三维计算有限元模型  
Fig. 3 3D FEM Model of Large Storage Tank

### 3 液晃周期比较

在 ANSYS 中进行模态分析，可得到大型储罐的模态频率和振型。表 1 为部分频率列表，其中前 2 阶为液体晃动频率 (0.306Hz)，其他的为储罐自身频率。图 4 为第 1 阶振型，对应液体的晃动模态；图 5 为第 3 阶模态，对应储罐的壳式模态；图 6 为第 101 阶模态，对应储罐的梁式模态。

表 1 频率列表  
Table 1 Modal Frquency

阶数	1	2	3	20
频率/Hz	0.306	0.306	1.299	2.604
阶数	50	80	101	120
频率/Hz	4.361	6.201	7.192	8.263

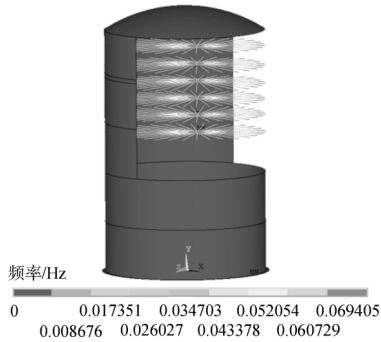


图4第1阶模态振型

Fig. 4First Modal Shape

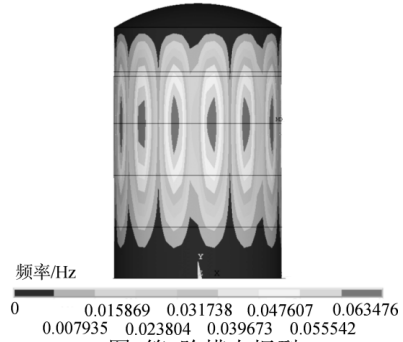


图5第3阶模态振型

Fig. 5Third Modal Shape

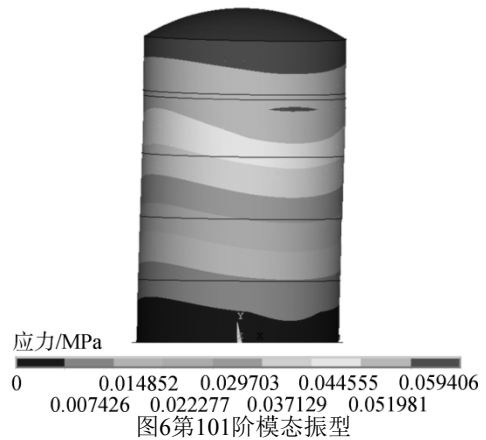


图6第101阶模态振型

Fig. 6 Hundred-and-First Modal Shape

按照 ASCE-4-98 规范的模型与方法，可计算得到液体晃动频率为 0.307Hz。有限元计算结果与 ASCE 公式计算一致，证明三维有限元计算模型是合理可用的。

### 4 抗震计算

本文采用反应谱分析方法<sup>[2-3]</sup>对上述建立的大型储罐三维有限元模型进行抗震计算，地震载荷输入储罐安装厂房对应的楼层反应谱数据。计算结果如图 7 和图 8 所示，可以直观地得到地震作用下储罐的应力分布情况。

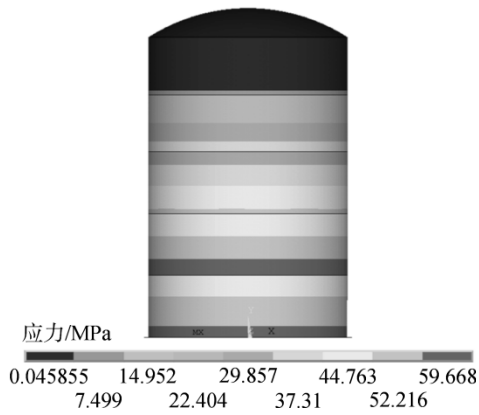


图 7 主应力云图  
Fig. 7 Principal Stress Distribution

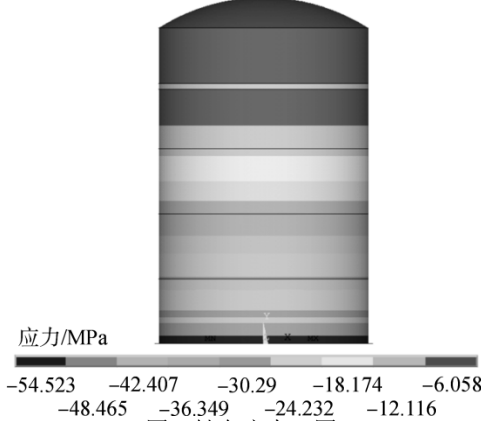


图 8 轴向应力云图  
Fig. 8 Axial Stress Distribution

大型储罐同时还承受压力、自重、外压等载荷，需要分别对这些载荷进行计算，然后与地震计算结果进行叠加，提取应力值，然后依据 RCC-M 规范 J 篇规定进行分析评定。

## 5 结论

本文对核电厂大型储罐在地震作用下的液晃效应和抗震分析方法进行了研究，结论如下：

(1) 三维有限元模型计算得到的液晃频率与 ASCE-4-98 规范公式计算结果一致，验证了有限元模型的合理性和可用性。

(2) 本研究将规范的二维理论模型扩展为实际结构的三维模型，可直观地从三维模型上获取储罐在地震下的应力分布，直接用于分析评定，是一种简单适用的工程处理方法，具有实际应用意义。

参考文献：

- [1] WEN Jing, LU Daogang, Gao Xiaolan. Mass-spring model used to simulate the sloshing of fluid in the container under the earthquake[C]. 18th International Conference on Structural Mechanics on Reactor Technology (SMiR 18). Bei jing: Atomic Energy Press, 2005: 3636-3644
- [2] R.克拉夫. 结构动力学[M]. 王光远, 译. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 王敏新. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

(责任编辑: 马 蓉)