

考虑浮顶影响的隔震储罐简化力学模型及地震响应

孙建刚^{1,2}, 崔利富¹, 郝进锋³, 王 振¹

(1. 大连民族学院 土木建筑工程学院, 116600 辽宁 大连; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 730050 兰州;
3. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 163318 黑龙江 大庆)

摘要: 为便于工程分析与应用,依据速度势理论,建立液体运动势函数、基底剪力、倾覆力矩表达式,将浮顶简化为刚性的均质板,并以板的振动方程和板与液面作用的边界条件为出发点,构造晃动分析方程和波高表达式. 并利用基底剪力等效和做功相等的方法建立了分析问题的简化力学模型,依据能量原理建立体系的运动控制方程,给出了相关参数的取值影响. 以 50 000 m³ 储罐进行反应谱和时程分析. 结果表明:剪力、弯矩以及波高等地震响应与相关研究文献及有限元解对比比较接近,研究结果是可行的,能够满足工程结构设计人员的需要.

关键词: 浮顶储罐;速度势;隔震;力学模型;时程分析;反应谱分析;地震响应

中图分类号: TU352.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)10-0118-05

The simplified mechanical model and the seismic response for isolation tank with floating roof

SUN Jiangan^{1,2}, CUI Lifu¹, HAO Jinfeng³, WANG Zhen¹

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Dalian Nationalities University, 116600 Dalian, Liaoning, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, 730050 Lanzhou, China;

3. College of Civil and Architecture Engineering, Northeast Petroleum University, 163318 Daqing, Heilongjiang, China)

Abstract: To engineering analysis and application, based on velocity potential theory, the liquid movement potential function and the expression of base shear, overturning moment were established. The floating roof was simplified as a rigid, homogeneous plate. Starting with plate vibration equation and boundary conditions of the plate-liquid surface interaction, the sloshing analysis equation and the wave height expression were constructed. A simplified analysis mechanical model was established by adopting base shear equivalent and the same way to acting energy, and the system motion equation was given according to the energy principle, given the impact of the relevant parameter. Selected 50 000 m³ storage tank, the response spectrum and time history analysis were contrasted. The results showed that: base shear force, bending moment and wave height were close to related research literature and finite element solution, the research result is feasible, it could meet the engineering design needs.

Key words: floating roof storage tanks; velocity potential; isolation; mechanical model; time history analysis; response spectrum analysis; seismic response

浮顶储罐是由浮在罐内液体表面上的浮顶、立式圆筒形罐壁、底板及其附件共同组成的. 设计

浮顶储罐时,储液的晃动因素是必须考虑的,然而在现有储罐设计中,往往忽略晃动对浮顶的冲击作用,液面边界条件假定为自由液面,这样是很不安全的,当出现超预期地震激励时,即使理论再精确,由于浮顶的存在,其液面边界条件已不满足. 在历次强震中,大量储罐遭受到了储液晃动引起的严重破坏^[1-2],尤其是2003年,Tokachi-oki地

收稿日期: 2012-08-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078063);中国石油集团公司科技专项(H201104006).

作者简介: 孙建刚(1959—),男,教授,博士生导师.

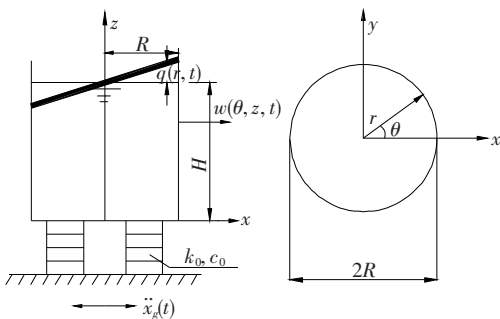
通信作者: 孙建刚, sjg728@163.com.

震导致日本 7 个浮顶储罐严重破坏, 其中 1 个浮顶罐的浮顶下沉引发整个储罐库区发生严重火灾, 这种震害在 1999 年土耳其的 Kocaeli 地震中也有发生. 关于降低储罐地震响应的措施, 国内外研究者忽略浮顶的作用^[3-7], 引入基础隔震措施, 但不能有效控制储液的晃动效应. 抗震设计过程中不仅要考虑浮顶本身的强度和稳定问题, 同时浮顶对储罐的地震动响应也有一定的作用, 特别是浮顶的存在, 直接影响晃动的振动形式^[8], 地震中浮顶的破坏是不容忽视的. 目前, 考虑浮顶影响的储罐抗震减震研究还比较少. 2007 年和 2009 年, 日本学者 Tetsuya Matsui^[1-2] 分别推导了单盘浮顶储罐和双盘浮顶储罐在水平地震激励下的地震响应方程, 给出了解析表达式. 文献[9]对考虑浮顶影响的隔震储罐进行了相应的地震响应理论和地震响应分析. 但上述关于浮顶储罐的研究, 所给出的理论稍显复杂, 同时并未建立便于工程应用的有效力学模型. 鉴于此, 从为立式浮顶储罐基础隔震工程设计提供理论支撑和技术支持的思想出发, 依据储罐速度势理论和浮顶板的振动理论, 建立考虑浮顶影响的基础隔震储罐地震响应的分析简化力学模型和地震响应分析理论. 选取 50 000 m³ 立式浮顶储罐, 采用动力积分法进行数值分析, 并与文献[10]进行对比, 验证理论及模型的适用性和可行性.

1 浮顶储罐基础隔震速度势基本理论

1.1 基本假定

浮顶储罐内部储存的液体为无旋, 无粘, 不可压缩, 浮顶假定为均质圆板, 质量为 m ; 储罐底部与地基之间为隔震基础, 隔震层仅传递水平位移 $x_0(t)$, 并且有刚度 k_0 和阻尼 c_0 ; 储罐壁为柔性, 具有位移 $w(\theta, z, t)$ 的变化, 地面输入激励为水平 $\ddot{x}_g(t)$. 罐的几何坐标及相关参数见图 1.



(a) 储罐隔震示意图

(b) 平面几何坐标

图 1 罐几何和坐标系

1.2 浮顶储罐的速度势

当储罐受水平外激励时, 罐内的液体可产生与浮顶一起运动的晃动速度势、随罐壁弹性振动的液固耦联速度势及随罐体刚性运动的刚性速度势. 假定储罐系统的总速度势 Φ , 是由随隔震层刚性运动的速度势 φ_1 , 浮顶晃动速度势 φ_2 和弹性壁径向耦联运动的速度势 φ_3 组成.

关于刚性运动的速度势 φ_1 和弹性壁径向耦联运动的速度势 φ_3 参见文献[8]. 当将浮顶假定为均质刚性圆板, 质量为 m , 假定均质刚性板振动位移 $q(r, \theta, t)$ 为

$$q(r, \theta, t) = \zeta_0(t) \frac{r}{R} \cos \theta. \quad (1)$$

作用在浮顶上的动水压力

$$P_t = -\rho \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{z=H} - \rho g q(r, \theta, t) = -\rho \left\{ R \sum_{n=1}^{\infty} b_n J_1 \left(\sigma_n \frac{r}{R} \right) [\dot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] + \sum_{n=1}^{\infty} \ddot{q}_n(t) \operatorname{ch} \left(\sigma_n \frac{H}{R} \right) J_1 \left(\sigma_n \frac{r}{R} \right) \right\} \cos \theta - \rho g \sum_{n=1}^{\infty} J_1 \left(\sigma_n \frac{r}{R} \right) \frac{\sigma_n \operatorname{ch} \left(\frac{\sigma_n H}{R} \right)}{R} q_n(t) \cos \theta. \quad (2)$$

忽略阻尼项的浮顶板的运动方程可表达为

$$m \ddot{q}(r, \theta, t) = P_t. \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3), 整理得

$$\ddot{f}_n(t) + \omega_n^2 f_n(t) = -\gamma [\dot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)]. \quad (4)$$

$$\text{式中: } \frac{\operatorname{ch} \left(\sigma_n \frac{H}{R} \right)}{R b_n} q_n(t) = f_n(t), \quad \frac{m \sigma_n}{R \rho b_n} + 1 = \bar{m},$$

$$\omega_n^2 = \frac{g}{\bar{m}} \frac{\sigma_n}{R}, \quad \gamma = \frac{1}{\bar{m}}.$$

γ 可定义为浮顶影响质量修正系数, 当储罐容积在 1 000 ~ 30 000 m³ 的小容积区域内变化时, 该影响系数变化较大. 当储罐容积大于 50 000 m³ 时, 该系数趋于定值.

此时的晃动速度势可表达为

$$\varphi_2 = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \frac{R b_n \operatorname{ch} \left(\sigma_n \frac{z}{R} \right) J_1 \left(\sigma_n \frac{r}{R} \right)}{\operatorname{ch} \left(\sigma_n \frac{H}{R} \right)} \cos \theta. \quad (5)$$

根据各速度势满足的边界条件, 由数学中的分离变量法得总速度势为

$$\Phi(r, \theta, z, t) = r \cos \theta [\dot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \frac{R b_n \operatorname{ch} \left(\sigma_n \frac{z}{R} \right) J_1 \left(\sigma_n \frac{r}{R} \right)}{\operatorname{ch} \left(\sigma_n \frac{H}{R} \right)} \cos \theta +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_1(\lambda_n r) K_n \cos(\lambda_n z)}{H \lambda_n I_1'(\lambda_n R)} \dot{w}(t) \cos \theta. \quad (6)$$

为了进一步分析不同径高比对储罐动响应的影响,由式(6)可以给出晃动、液固耦联和刚性运动所产生的液体对储罐壁的液动压分别为

$$P_0 = -\rho R [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] \cos \theta, \quad (7)$$

$$P_c = -\rho \sum_{n=1}^{\infty} \dot{f}_n(t) \frac{R b_n \operatorname{ch}\left(\sigma_n \frac{Z}{R}\right) J_1\left(\sigma_n \frac{r}{R}\right)}{\operatorname{ch}\left(\sigma_n \frac{H}{R}\right)} \cos \theta, \quad (8)$$

$$P_i = -\rho \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_1(\lambda_n r) k_n \cos(\lambda_n Z)}{H \lambda_n I_1'(\lambda_n R)} \ddot{w}(t) \cos \theta. \quad (9)$$

当 $r = R$ 时,刚性脉冲质量沿高度的冲击压为一矩形,与 ρR 的大小相关,对罐壁不产生变形作用. 当仅取晃动的一阶模态时,取 $\dot{f}_n(t) = 1$, $\cos \theta = 1$ 时,可得晃动冲击压沿罐壁的分布,当储罐为径高比很小的高罐时,晃动冲击压主要集中于上部,随着径高比的加大,晃动冲击压不断地向下延伸,矮胖罐晃动引起的底部压力加大. 这一点表明,高罐可以忽略晃动引起的底部压力,但矮胖罐不能够忽略晃动引起底部压力. 晃动引起的冲击压,在自由表面处最大. 取 $\ddot{w}(t) = 1$, $\cos \theta = 1$ 时,可得液固耦联运动沿罐壁的压力分布,随着径高比的加大,其压力分布加大,所产生的冲击压力在中部出现最大值. 这两点的表现可解释为什么储罐易于在罐顶处出现褶皱屈曲、在罐中部易出现菱形屈曲.

1.3 简化力学模型及运动方程

根据外激励作用下罐壁和底板上所作用的力和弯矩,并由流体对罐壁产生的压力做的功与等效质点惯性力所做的功相等将 $w(t)$ 的运动转化为耦合到罐体的运动中,则液动压力对罐壁所产生的基底剪力和弯矩为

$$\begin{cases} Q_w(t) = -m_0 [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] - m_c [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_c(t)] - m_s [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_i(t)] = \\ -m_0 [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] - m_c [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_c(t)] - m_s [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_i(t)], \\ M_w(t) = -m_0 H_0 [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] - m_c H_c [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_c(t)] = \\ -m_0 H_0 [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] - m_c H_c [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_c(t)] - m_i H_i [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_i(t)]. \end{cases} \quad (10)$$

式中: $m_0 = m_r - m_c - m_i, m_0 H_0 = m_r H_r - m_c H_c - m_i H_i$,
 $m_r = \alpha_1 M_l, m_c = \alpha_2 M_l, m_i = \frac{\alpha_3^2}{\alpha_7} M_l, M_l = \rho \pi R^2 H$,

$$H_r = \frac{\alpha_4}{\alpha_1} H, H_c = \frac{\alpha_5}{\alpha_2} H, H_i = \frac{\alpha_6}{\alpha_3} H,$$

$$\alpha_1 = 1, \alpha_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R \operatorname{th}\left(\sigma_n \frac{H}{R}\right)}{\sigma_n (\sigma_n^2 - 1) H},$$

$$\alpha_3 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_1(\lambda_n R) k_n (-1)^{n-1}}{H \lambda_n^2 R I_1'(\lambda_n R)},$$

$$\alpha_4 = \frac{1}{2}, \alpha_5 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2C_n}{(\sigma_n^2 - 1) \operatorname{ch}\left(\sigma_n \frac{h}{R}\right) h^2},$$

$$\alpha_6 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_1(\lambda_n R)}{H^3 \lambda_n^2 R I_1'(\lambda_n R)} \left[H \sin(\lambda_n H) - \frac{1}{\lambda_n} \right] k_n,$$

$$\alpha_7 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_1(\lambda_n R)}{R \lambda_n I_1'(\lambda_n R) H^2} k_n^2,$$

$$C_n = \frac{R h}{\sigma_n} \operatorname{sh}\left(\sigma_n \frac{h}{R}\right) - \frac{R^2}{\sigma_n^2} \left[\operatorname{ch}\left(\sigma_n \frac{h}{R}\right) - 1 \right].$$

式(10)为考虑液固耦联振动与液体的晃动不耦联的表达,为此其力学模型可表达为图2的形式. 图2中的 k_c 按浮顶振动圆频率来考虑, $k_c = \omega_c^2 m_c$, $\omega_c^2 = \omega_n^2$ 液体的阻尼比取 $\zeta_c = 0.005$, $c_c = 2\zeta_c m_c \omega_c$, k_i 取文献[3]值, $\omega_i^2 = \frac{k_i}{m_i}$, $\zeta_i = 0.02$, 则 $c_i = 2\zeta_i m_i \omega_i$. k_0, c_0 为隔震层的刚度和阻尼,初始时可考虑为单质点体系选取.

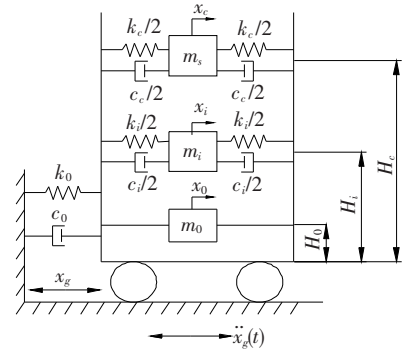


图 2 简化分析力学模型

图2的力学模型是由刚性质量 m_0 的平动,及弹性液固耦联质量 m_i 和晃动质量 m_c 组成的力学模型体系. H_0, H_i, H_c 为每一质量点对底板的高度. 由各参数与适用范围内的径高比 R/H 的变化可见,各参数的变化仅与 R/H 相关,当径高比加大时晃动质量加大,液固耦联质量和刚性质量降低,这说明,当为矮胖罐时,长周期的晃动惯性作用是不可忽略的. 当为高罐时,特别是 $R/H < 0.5$ 时,晃动冲击项的惯性作用较小. 设计时应注意径

高比的优化选择. 对应的晃动、液固耦联质量等效质点高度, 随径高比的加大而降低. 而刚性质量等效质点的高度为负值, 且较小, 所以在分析弯矩时, 可忽略刚性质量的影响.

针对简化分析力学模型, 依据 Hamilton 原理, 所得运动方程为

$$\begin{bmatrix} m_c & 0 & m_c \\ 0 & m_i & m_i \\ m_c & m_i & m_0 + m_c + m_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_c & & \\ & c_i & \\ & & c_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_i \\ \dot{x}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_c & & \\ & k_i & \\ & & k_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ x_i \\ x_0 \end{bmatrix} = -\ddot{x}_g(t) \begin{bmatrix} m_c \\ m_i \\ m_0 + m_c + m_i \end{bmatrix}. \quad (11)$$

2 数值例证

为验证考虑浮顶影响后储罐基础隔震的减震效应, 采用振型分解反应谱法和时程分析法, 地震烈度为 IX 度 (地面加速度 0.4g), 场地土取 III 类场地 (时程分析时采用 EL Centro 地震波), 液面晃动阻尼比为 0.005, 液固耦合阻尼比为 0.02. 分析 50 000 m³ 储罐 (半径为 30 m, 罐高为 19.35 m, 储液高度为 18.15 m) 的地震反应, 并与相关文献 [10] 的结果进行对比分析. 传统抗震设计和基础隔震储罐的地震响应计算结果见表 1.

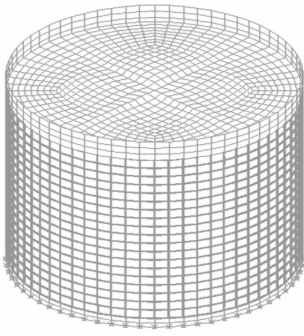
表 1 传统抗震设计和基础隔震储罐的地震响应

计算方法	刚性周期/s		耦合周期/s		晃动周期/s		剪力/10 ⁸ N		弯矩/10 ⁹ Nm		波高/m	
	非隔震	隔震	非隔震	隔震	非隔震	隔震	非隔震	隔震	非隔震	隔震	非隔震	隔震
规范 GB50341 方法	—	—	0.367 9	—	9.041 8	—	1.737 3	—	1.418 9	—	1.387 3	—
本文振型分解法	0.070 0	0.123 8	0.452 3	1.525 7	8.133 7	8.488 7	1.554 5	0.505 8	1.269 6	0.413 1	1.678 5	1.554 3
文献 [10] 振型分解法	0.045 3	0.068 4	0.403 7	1.864 6	9.032 9	9.333 9	1.792 1	0.550 0	1.463 7	0.449 2	1.389 8	1.310 2
本文时程分析法	—	—	—	—	—	—	1.026 3	0.253 0	8.274 4	0.182 4	0.868 8	0.882 7
文献 [10] 时程分析法	—	—	—	—	—	—	1.082 9	0.289 2	8.784 9	0.268 5	0.631 4	0.623 9

表 1 中的规范值是剔除综合影响系数的影响结果, 从表中可以看出, 传统抗震储罐结构在 III 类场地土情况下, 本文解、文献 [10] 解和规范计算方法计算的剪力相差较小, 而时程解低于规范解和振型反应谱法解, 但不低于反应谱法 65%, 这一结果是合理的. 分析表明, 本文解是可行的. 隔震储罐比传统抗震结构的剪力和弯矩明显降低. 在 III 类地基土的情况下, 隔震的基底剪力比传统抗震储罐的剪力和弯矩降低了 67% ~ 78%, 而波高的减震效应不明显. 本文的分析方法与文献 [10] 的结果分析比较接近, 采用基础隔震对减少基底剪力和弯矩有明显的效果, 可以在高烈度地区采用基础隔震, 从而降低地震响应, 并可采用降烈度设计以节省钢材. 关于与文献 [10] 结果的差异性可从储罐的质量参数分析给出, 本文晃动

质量、液固耦合质量、刚性质量分别为 3.271 7 × 10⁷、1.657 4 × 10⁷、2.027 5 × 10⁶ kg, 而文献 [10] 中分别为 3.078 5 × 10⁷、1.960 3 × 10⁷、1.039 7 × 10⁶ kg. 从各质量分布可知, 由于浮顶的介入加大了晃动项的参与质量, 以往的研究结果表明, 储罐的基底剪力项贡献主要来自于液固耦联项, 所以晃动项加大的直接结果是降低了储罐的基底剪力. 本文的结果与文献 [10] 的力学模型的结构有差异是由于液固耦联项的惯性质量降低引起的, 是合理的.

为了验证浮顶储罐简化力学模型的可行性, 采用 ADINA 有限元程序, 罐壁与底板采用壳单元, 流体采用势流体单元, 隔震层采用弹簧单元, 所建立的有限元模型见图 3, 其地震响应见表 2.

图3 50 000 m³ 储罐有限元模型表2 50 000 m³ 隔震储罐理论解与有限元解对比

计算方法	基底剪力/10 ⁷ N	晃动波高/m
理论解	2.530 4	0.882 7
有限元解	2.168 0	0.941 4

表2表明本文所建立的储罐隔震分析简化力学模型与有限元解相比,其基底剪力和晃动波高地震响应是比较接近的,本文所建立的储罐隔震分析简化力学模型是可行的。

3 结 论

1) 依据储罐速度势理论和浮顶板的振动理论,建立了考虑浮顶影响的基础隔震储罐地震响应的分析简化力学模型和地震响应分析理论。

2) 高罐可以忽略晃动引起的底部压力,但矮胖罐不能忽略。晃动引起的冲击压,在自由表面处最大,此处储罐易出现褶皱屈曲。液固耦联所产生的冲击压力在中部出现最大值,此处易出现菱形屈曲。

3) 当储罐的容积增加到50 000 m³时,浮顶影响质量修正系数趋于定值;当径高比加大时晃动质量加大,液固耦联质量和刚性质量降低,设计时应注意径高比的优化选择。

4) 与相关文献进行了时程分析、反应谱分析对比,并采用有限元数值方法进行了验证,结果表明剪力、弯矩以及波高等地震响应与相关文献及有限元解对比比较接近,结果是可靠的,所建立的简化力学模型是可行的,能够满足工程结构设计人员的需要。

参 考 文 献

- [1] MATSUI T. Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a single-deck type floating roof under Seismic Excitation[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009, 131:1-10.
- [2] MATSUI T. Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a floating roof under seismic excitation[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129:557-566.
- [3] 孙建刚,王向楠,赵长军. 立式储罐基底隔震的基本理论[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4):639-643.
- [4] 孙建刚. 大型立式储罐隔震——理论、方法及实验[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [5] 孙建刚,崔利富,王振,等. 立式储罐叠层橡胶隔震3阶段设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(6):118-121.
- [6] 崔利富,孙建刚,李德昌,等. 考虑SSI效应的立式储罐水平基础隔震研究[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2):135-141.
- [7] 孙建刚,李德昌,崔利富,等. 非线性隔震立式浮顶储罐双向地震作用分析[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2):70-76.
- [8] YAMAMOTO Y. The liquid sloshing and the impulsive pressures of oil storage tanks due to earthquakes[J]. Journal of High Pressure Institute of Japan, 1965, 3(1):2-8.
- [9] 孙建刚,崔利富,杜蓬娟,等. 立式浮顶储罐基础隔震地震响应研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(8):140-144.
- [10] SHRIMALI M K, JANGID R S. Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks [J]. Journal of Sound & Vibration, 2004, 275(1/2):59-75.

(编辑 魏希柱)