

# 基于虚拟激励法的隔震 LNG 储罐随机地震响应分析

刘富鹏<sup>1,2</sup>, 叶忠志<sup>2</sup>, 孙晓旭<sup>3</sup>, 秦玉良<sup>2</sup>, 王立佳<sup>2</sup>, 余建星<sup>1\*</sup>, 王晓虎<sup>2</sup>, 雷鸣<sup>2</sup>, 李浩然<sup>2</sup>

1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072

2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461

3. 大连理工大学工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连 116024

**摘要** 基于等效线性化法和虚拟激励法, 对地震激励下的圆柱形 LNG(液化天然气)隔震储罐进行了随机振动分析, 研究了隔震储罐的液位与形状对随机地震响应的影响。首先, 基于加速度反应谱, 根据 Kaul 方法得到了地震功率谱密度函数, 并建立了 LNG 储罐的 Haroun-Housner 模型。其次, 根据等效线性化方法得到了隔震系统的等效刚度和等效阻尼, 建立了等效线性系统的频域运动方程, 并应用虚拟激励法进行求解。最后, 在数值算例中, 计算了不同液位与半径下隔震储罐的随机响应, 研究了储罐半径和液位高度对响应的影响, 为隔震储罐的优化设计提供一定的参考。

**关键词** LNG 储罐; 抗震分析; Haroun-Housner 模型; 等效线性化; 虚拟激励法

LNG(液化天然气)储罐作为储存液化天然气的专业设备, 是一种大直径的薄壁壳体容器, 具有结构复杂、安全性要求高等特点<sup>[1-2]</sup>。在地震激励下, 储罐内部储存的大量液化天然气会发生晃动, 对罐壁造成严重的冲击, 一旦破坏会导致严重的环境安全问题和社会影响<sup>[3]</sup>。为了提高储罐结构的抗震性能, 降低破坏与失效的风险, 基础隔震技术得到了广泛的应用, 并进行了大量的研究<sup>[4-5]</sup>。

实际工程中的隔震储罐(图 1)是一个复杂的非线性系统, 对其进行流固耦合分析会耗费大量的计算资源。精细的分析模型适用于校核性的计算, 对于规律性的研究, 能够反映本质的简化力学模型更为有效。为了研究隔震储罐在不同条件下的动力学特性, Housner<sup>[6]</sup>假设罐壁为刚体, 推导了储罐的 2 自由度简化模型, 成为后续研究简化模型的基础。进一步, Haroun<sup>[7]</sup>采用有限元-边界元方法, 将

收稿日期: 2023-09-07; 修回日期: 2024-03-22

作者简介: 刘富鹏, 博士研究生, 研究方向为 LNG 储罐结构优化, 电子信箱: liufp6@cooec.com.cn; 余建星(通信作者), 教授, 研究方向为风险评估与控制, 电子信箱: yjx2000@tju.edu.cn

引用格式: 刘富鹏, 叶忠志, 孙晓旭, 等. 基于虚拟激励法的隔震 LNG 储罐随机地震响应分析[J]. 科技导报, 2024, 42(13): 54-61;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.09.01366

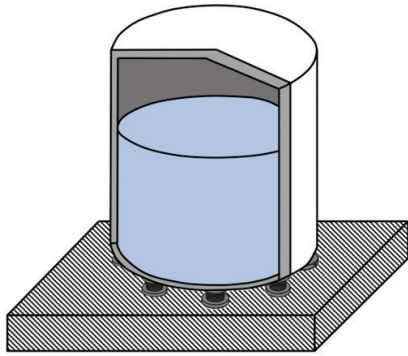


图1 隔震储罐示意

Housner的模型发展为考虑罐壁柔性的3自由度简化模型。Curadelli<sup>[8]</sup>基于Haroun-Housner模型,考虑隔震参数的不同取值,采用参数化方法研究了双线性隔震储罐的抗震性能。Safari等<sup>[9]</sup>基于Haroun-Housner模型,进行了近断层和远断层地震动作用下隔震储罐的参数敏感性研究。

上述研究建立并完善了隔震储罐的简化模型,研究了隔震储罐在多种地震激励下的随机振动分析,并进行了隔震系统的参数化研究。在此基础上,继续研究几何参数对储罐结构响应的影响,可以进行储罐结构的几何优化设计,合理降低材料的使用量和结构所受的风险。地震本质具有随机性,基于随机振动理论进行结构地震响应分析对于可靠性具有很多优势。虚拟激励法作为高效且精准的随机振动分析方法,已经被广泛应用于桥梁抗震、车桥耦合系统和结构风振等工程领域<sup>[10-11]</sup>;对于非线性系统,同样可以结合等效线性化进行有效的处理,其精度完全取决于等效线性化本身的误差<sup>[12]</sup>。通常的虚拟激励法研究对象为一般的工程结构,并未涉及储液容器的随机振动分析。针对上述问题,基于Haroun-Housner模型建立隔震储罐的等效线性系统,发展虚拟激励法对地震激励下的LNG隔震储罐进行了随机振动分析,并研究储罐半径和液位高度对结构响应的影响。

## 1 隔震 LNG 储罐简化模型

### 1.1 储罐简化模型

假定罐壁的质量可以忽略不计,并且有足够的

容量使罐顶不限制液体的晃动。此外,所含液体被认为是不可压缩的、不变的、无旋流动的。在这些假设前提下,Haroun<sup>[7]</sup>提出了简化方法对储罐进行建模,简化模型如图2所示。采用弹簧-质量块系统近似模拟液体与罐壁的流固耦合晃动作用:晃动质量 $m_c$ 与冲击质量 $m_i$ 的等效刚度分别为 $k_c$ 和 $k_i$ ,等效阻尼分别为 $c_c$ 和 $c_i$ ,刚性质量 $m_r$ 直接与罐壁刚性连接。 $u_c$ 和 $u_i$ 分别为晃动质量与冲击质量的绝对位移, $u_b$ 为储罐底部的绝对位移, $\ddot{u}_g$ 为地面横向运动加速度。由于液体水平晃动具有最大影响,本研究只考虑了地震动的水平分量。

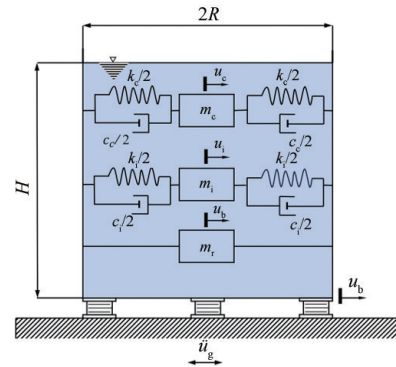


图2 Haroun-Housner模型

晃动、冲击和刚性质量可以表示为<sup>[7]</sup>

$$m_c = m\gamma_c, m_i = m\gamma_i, m_r = m\gamma_r, m = \pi R^2 H \rho_w \quad (1)$$

其中, $\rho_w$ 为液体的密度; $H$ 为罐内液体高度; $R$ 为储罐半径; $\gamma_c, \gamma_i$ 和 $\gamma_r$ 为质量系数,可以表示为

$$\begin{aligned} \gamma_c &= 1.01327 - 0.87578S + 0.35708S^2 - \\ &\quad 0.06692S^3 + 0.00439S^4 \\ \gamma_i &= -0.15467 + 1.21716S - 0.62839S^2 + \\ &\quad 0.14434S^3 - 0.0125S^4 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\gamma_r = -0.01599 + 0.86356S - 0.30941S^2 + 0.04083S^3$$

$S=H/R$ 为储罐的比例系数。

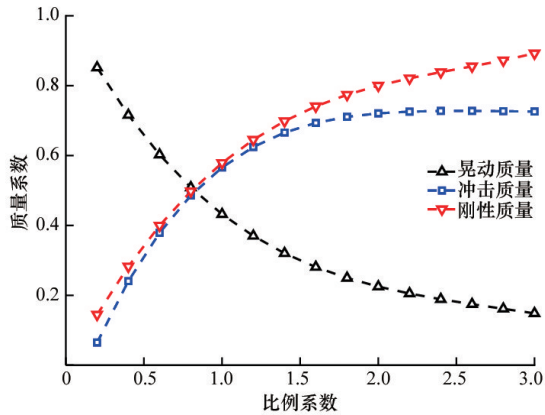
3个质量系数随比例系数 $S$ 的变化规律如图3所示。

晃动质量基频 $\omega_c$ 和冲击质量基频 $\omega_i$ 可计算为

$$\omega_c = \sqrt{1.84 \left( \frac{g}{R} \right) \tanh(1.84S)}, \omega_i = \frac{P}{H} \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}} \quad (3)$$

其中, $E_s$ 为罐体的弹性模量; $\rho_s$ 为罐体的密度; $g$ 为重力加速度; $P$ 为比例系数 $S$ 的无量纲参数

$$P = 0.037085 + 0.084302S - 0.05088S^2 + 0.012523S^3 - 0.0012S^4 \quad (4)$$

图3 质量系数 $\gamma$ 的变化

晃动剪切刚度 $k_c$ 和冲击剪切刚度 $k_i$ 可计算为:

$$k_c = m_c \omega_c^2, k_i = m_i \omega_i^2 \quad (5)$$

晃动阻尼 $c_c$ 和冲击阻尼 $c_i$ 可计算为:

$$c_c = 2\xi_c m_c \omega_c, c_i = 2\xi_i m_i \omega_i \quad (6)$$

其中, $\xi_c=0.005$ 和 $\xi_i=0.02$ 分别为晃动质量和冲击质量的阻尼比<sup>[13]</sup>。

## 1.2 隔震系统模型

采用铅芯橡胶支座隔震系统(LRB),隔震系统通过铅芯的能量吸收可以有效地减小横向位移。铅芯橡胶支座还通过铅芯的屈服提供附加的滞后阻尼。隔震系统的迟滞回线通常由Wen的方程<sup>[14]</sup>表示为双线性力-位移模型,如图4所示。

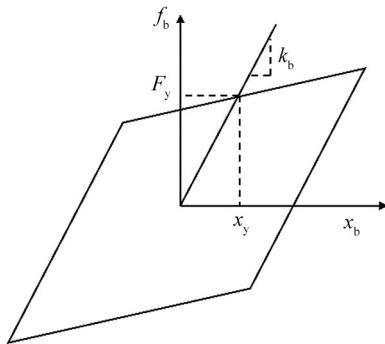


图4 隔震系统的双线性模型

隔震系统的隔震特性可以根据初始刚度 $k_b$ ,屈服后隔震周期 $T_b$ ,黏性阻尼比 $\xi_b$ 和有效质量归一化屈服力 $F_0$ 这4个参数来定义,表示为<sup>[8]</sup>

$$k_b = \frac{F_y}{x_y}, T_b = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\alpha k_b}}, \xi_b = \frac{c_b}{2M\omega_b}, F_0 = \frac{F_y}{Mg} \quad (7)$$

其中, $F_y$ 为屈服力; $x_y$ 为屈服位移; $M=m_c+m_i+m_r$ 为隔

震储罐的有效质量; $\alpha$ 为屈服后刚度比; $c_b$ 为黏性阻尼系数; $\omega_b=2\pi/T_b$ 为屈服后隔震频率。

给出隔震参数 $x_y, T_b, \xi_b$ 和 $F_0$ 后,即可根据式(7)得到计算所需的 $k_b, c_b$ 和 $\alpha$ 。

## 2 隔震LNG储罐随机振动分析的虚拟激励法

### 2.1 等效刚度系数和阻尼系数

为了使用随机振动理论计算响应的统计量,需要计算等效线性隔振系统对应的等效阻尼和刚度系数。在线性化过程中,假设隔震储罐为单自由度系统,则运动方程可以表示为

$$M\ddot{x}_b + c_b \dot{x}_b + f_b(x_b, \dot{x}_b) = -M\ddot{u}_g \quad (8)$$

其中, $\ddot{x}_b, \dot{x}_b, x_b$ 分别为储罐相对于地面的加速度、速度和位移, $f_b$ 为隔震系统在地震加速度下提供的恢复力, $M$ 与 $c_b$ 见公式(7)。

假设系统的响应可以通过等效线性模型来近似,则运动方程可以改写为

$$M\ddot{x}_b + c_{eq} \dot{x}_b + k_{eq} x_b = -M\ddot{u}_g \quad (9)$$

其中, $k_{eq}$ 和 $c_{eq}$ 分别为隔振系统的等效线性刚度系数和等效黏性阻尼系数。

根据双线性模型, $k_{eq}$ 和 $c_{eq}$ 可由Caughey提出的统计等效线性化方法计算<sup>[15]</sup>

$$k_{eq} = k_b \left( 1 - \frac{8\mu}{\pi} \right) \int_1^\infty \frac{z^2 + \lambda}{z^3 \lambda} \sqrt{z^2 - 1} e^{-\frac{z^2}{\lambda}} dz \quad (10)$$

$$c_{eq} = c_b + \frac{2\mu}{\sqrt{\pi\lambda}} \frac{k_b}{\omega_{eq}} \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \right) \right)$$

其中, $\mu=1-\alpha$ ; $\lambda=2\left(\sigma_{x_b}/x_y\right)^2$ ; $\omega_{eq}=\sqrt{k_{eq}/M}$ ; $\operatorname{erf}(\cdot)$ 表示误差函数; $\alpha$ 与 $x_y$ 见公式(7)。

式(10)中, $\sigma_{x_b}^2$ 是储罐相对于地面位移的方差,可以通过下式计算

$$\sigma_{x_b}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{eq}(\omega)|^2 S_g(\omega) d\omega \quad (11)$$

其中, $S_g(\omega)$ 为地震功率谱; $|H_{eq}(\omega)|$ 为频响函数,

$|H_{eq}(\omega)|^2$ 可以表示为

$$|H_{eq}(\omega)|^2 = \frac{1}{(k_{eq} - M\omega^2)^2 + (c_{eq}\omega)^2} \quad (12)$$

式(10)中的等效参数取决于式(11)中的 $\sigma_{xb}^2$ ,因此需要进行迭代计算。当式(11)计算得到的 $\sigma_{xb}^2$ 值与计算 $\lambda$ 时输入的 $\sigma_{xb}^2$ 值近似相等时结束迭代,此时等效线性系统的 $k_{eq}$ 与 $c_{eq}$ 即为收敛的等效参数。

## 2.2 等效线性方程及虚拟激励法求解

获得隔震系统的等效线性系统后,可以建立地震激励下的隔震储罐3自由度运动方程<sup>[8]</sup>

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_c & 0 & m_c \\ 0 & m_i & m_i \\ m_c & m_i & M \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_c & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & c_{eq} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 \\ 0 & k_i & 0 \\ 0 & 0 & k_{eq} \end{bmatrix}$$

其中, $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别为等效线性系统的质量阵,阻尼阵和刚度阵; $\ddot{u}_g$ 为地面横向运动加速度。 $\mathbf{x}=[x_c, x_i, x_b]^T$ 是相对位移向量,各自由度的相对位移分别为 $x_c=u_c-u_b$ ,  $x_i=u_i-u_b$ ,  $x_b=u_b-u_g$ 和 $\mathbf{r}=[0, 0, 1]^T$ 。

采用虚拟激励法求解运动方程(13),构造虚拟激励<sup>[16-18]</sup>

$$\ddot{u}_g = \sqrt{S_g(\omega)} e^{i\omega t} \quad (15)$$

将式(15)代入运动方程(13)的右端,则满足该方程组的虚拟响应应具有如下形式

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{B}e^{i\omega t}, \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = i\omega\mathbf{B}e^{i\omega t}, \ddot{\tilde{\mathbf{x}}} = -\omega^2\mathbf{B}e^{i\omega t} \quad (16)$$

其中,复向量 $\mathbf{B}$ 为虚拟响应的幅值向量,是 $\omega$ 的函数。

进一步运动方程(13)可以表示为

$$(-\omega^2\mathbf{M} + i\omega\mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{B}e^{i\omega t} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\sqrt{S_g(\omega)} e^{i\omega t} \quad (17)$$

令 $\mathbf{H}(\omega) = (-\omega^2\mathbf{M} + i\omega\mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1}$ ,则式(17)可以改写为

$$\mathbf{B} = -\mathbf{H}\mathbf{M}\mathbf{r}\sqrt{S_g(\omega)} \quad (18)$$

将式(18)带入式(16),即可得到虚拟响应的表达式,根据虚拟激励法,可以得到响应功率谱为

$$S_{xx} = \tilde{\mathbf{x}}^* \tilde{\mathbf{x}}^T = (-\mathbf{H}\mathbf{M}\mathbf{r})^* (-\mathbf{H}\mathbf{M}\mathbf{r})^T S_g(\omega) \quad (19)$$

根据随机振动理论,等效线性系统每个自由度的均方根响应可计算为<sup>[19]</sup>

$$\sigma = \sqrt{\text{diag} \int_{-\infty}^{\infty} |S_{xx}(\omega)| d\omega}, \quad (20)$$

$$\dot{\sigma} = \sqrt{\text{diag} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |S_{xx}(\omega)| d\omega}$$

其中, $\sigma$ 是以每个自由度的相对位移响应标准差向量 $[\sigma_{x_c}, \sigma_{x_i}, \sigma_{x_b}]^T$ 为主对角线的对角矩阵。

将式(19)和(20)得到的计算结果与现有文献方法对比,验证了本文方法的正确性。

一旦确定了储罐底部相对于地面的响应,储罐有效质量归一化底部剪力 $F_s$ 的标准差可计算如下

$$\sigma_{F_s} = \frac{\sqrt{c_{eq}^2 \sigma_{x_b}^2 + k_{eq}^2 \sigma_{x_i}^2}}{Mg} \quad (21)$$

其中, $\sigma_{x_c}^2$ 与 $\sigma_{x_b}^2$ 为储罐底部相对于地面的均方位移和速度, $g$ 为重力加速度。

## 3 数值算例

从设计的角度,储罐隔震系统有4个重要的响应量,分别为:有效质量归一化底部剪力 $F_s$ 与3个相对位移 $x_c$ 、 $x_i$ 和 $x_b$ ,它们决定了隔震储罐系统设计的关键,因此本文算例只计算以上4个响应的标准差。为了评估罐体几何参数对系统响应的影响,采用控制变量法,仅考虑单一的地震工况和隔震系统,隔震储罐参数如表1所示。

表1 隔震储罐参数

参数	$x_i/m$	$T_i/s$	$F_0$	$\xi_b$	$E_s/GPa$	$\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$	$\rho_w/(kg \cdot m^{-3})$
取值	0.025	2.5	0.1	0.1	200	7900	1000

### 3.1 地震激励功率谱模型

功率谱法由于较充分地考虑了地震发生的统计概率特性,被广泛地认为是一种较为先进合理的分析工具<sup>[20]</sup>。假设地震激励为一个零均值的平稳高斯随机过程,根据Kaul方法,地震动功率谱可根据加速度反应谱按式(22)进行转换(单边功率谱)<sup>[21]</sup>

$$S_g(\omega) = -\frac{T\xi}{\pi^2} \frac{S^2(T)}{\ln\left(-\frac{T}{2T_d} \ln p\right)} \quad (22)$$

其中, $S$ 为反应谱值; $p$ 为不超越概率; $T_d$ 为地震持续时间; $\xi$ 为阻尼比; $\omega$ 为圆频率。

按照式(22)和图5给出的加速度反应谱等效计算了相应的功率谱,如图6所示。

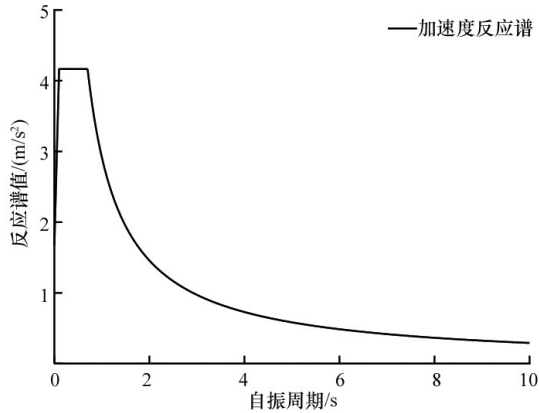


图5 加速度反应谱

### 3.2 液位高度 $H$ 对响应的影响

考虑储罐半径  $R$  不变,研究响应随液位高度  $H$  变化的规律。设置储罐半径  $R$  分别为4、6、8、10 m,设置液位高度  $H$  的范围为5~15 m,进行随机振动

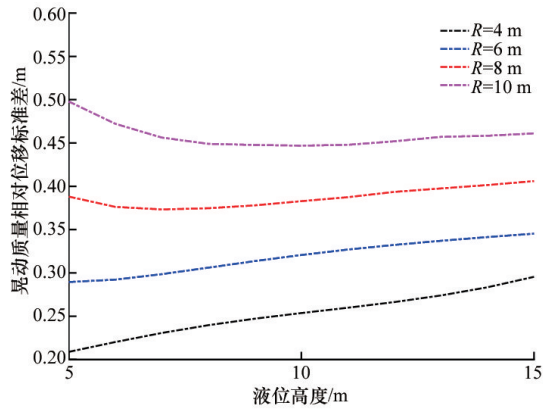


图7 晃动位移响应

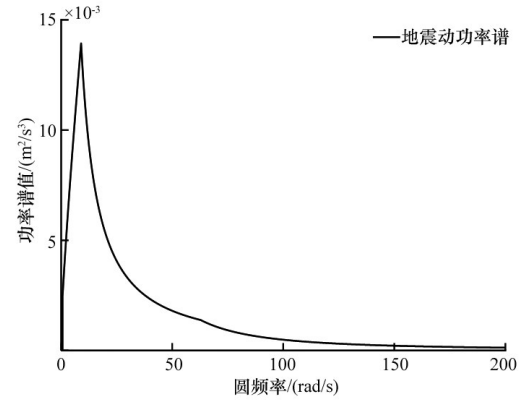


图6 地震功率谱

分析,结果如图7~图10所示。

从图7~图10的整体趋势可以看出,在储罐半径相同的情况下,液位高度越高其底部位移和底部剪力响应越小,冲击位移响应越大。从每张图中4条曲线的变化可以看出,半径越大其晃动位移响应越大,底部位移和底部剪力响应的变化越明显,冲击位移响应越不明显。

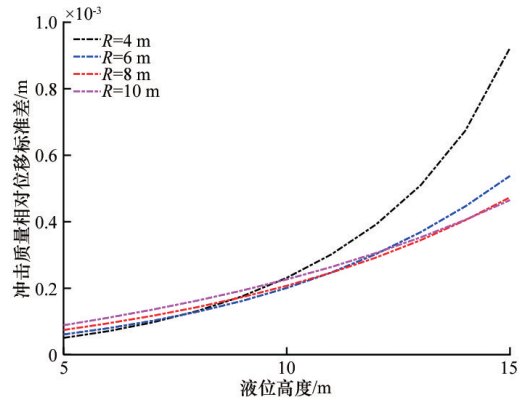


图8 冲击位移响应

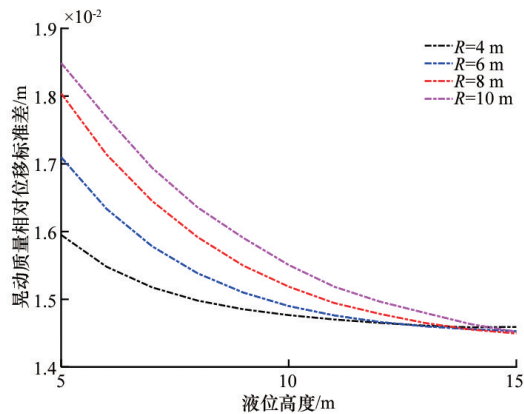


图9 底部位移响应

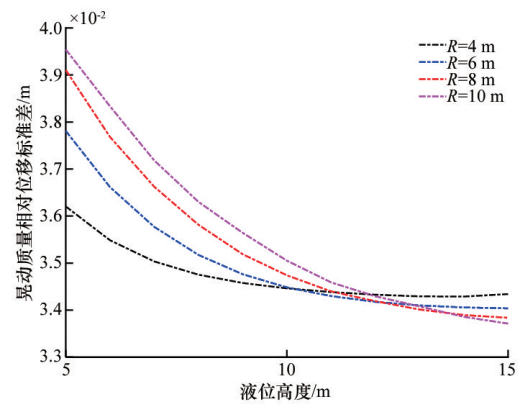


图10 底部剪力响应

从图7可以看出,晃动位移响应随半径 $R$ 变化较大,而且在半径 $R$ 不同时,晃动位移响应随液位高度 $H$ 的变化规律不同。由公式(2)可知,质量系数 $\gamma_c, \gamma_i$ 和 $\gamma_r$ 是比例系数 $S=H/R$ 的函数, $S$ 的变化改变了储罐的简化模型与系统的固有频率,从而受到了地震激励频率的影响。

### 3.3 储罐半径 $R$ 与液位高度 $H$ 对响应的影响

考虑储罐液体总质量 $m$ 不变,研究响应随储罐半径 $R$ 与液位高度 $H$ 同时变化的规律。设置储罐

液体总质量 $m$ 分别为1000、2000、3000、4000 t,设置液位高度 $H$ 的范围为5~15 m,进行随机振动分析,结果如图11~图14所示。

从图11~图14的整体趋势可以看出,在储罐内液体质量相同的情况下,液位高度越高其晃动位移、底部位移和底部剪力响应越小,冲击位移响应越大。从每张图中4条曲线的变化可以看出,液体质量越大其晃动位移、底部位移和底部剪力响应的变化越明显,冲击位移响应越不明显。

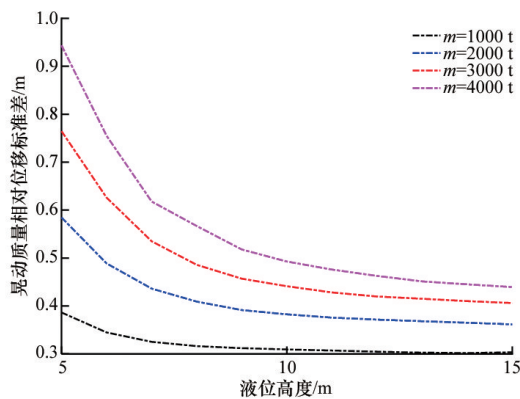


图11 晃动位移响应

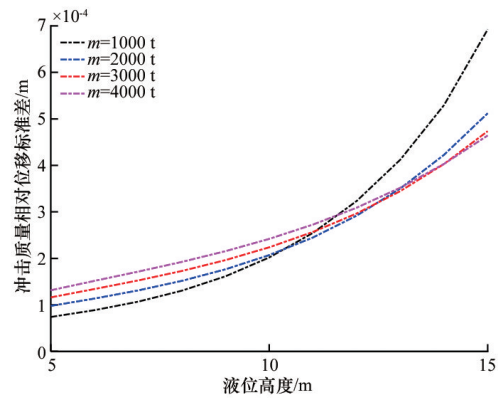


图12 冲击位移响应

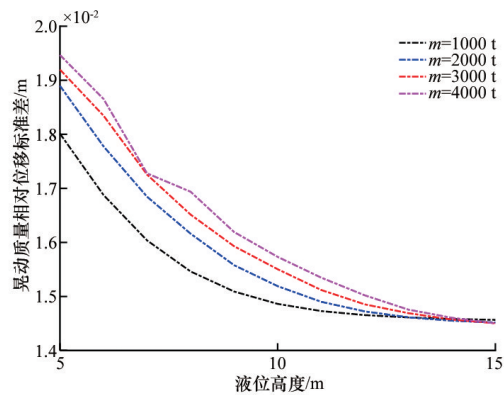


图13 底部位移响应

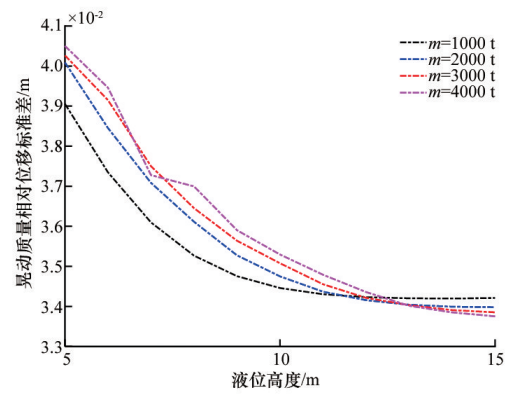


图14 底部剪力响应

## 4 结论

基于Haroun-Housner模型建立了隔震储罐的等效线性系统,基于虚拟激励法对地震激励下的LNG隔震储罐进行了随机振动分析,研究了储罐半径和液位高度对隔震储罐响应的影响,主要结论如下:(1)储罐的半径与液体质量越大,其晃动位移、

底部位移和底部剪力响应在低液位时越大,随液位变化越明显,冲击位移响应与之相反;(2)在同一地震激励下,采用相同隔振系统的不同容积的储罐在相同液位高度时性能差异不显著;(3)在储罐的容积不变时,细长型储罐的整体性能较好,虽然冲击位移响应随液位高度的升高而升高,但由于其数量级较小,造成的影响可以近似忽略。

## 参考文献 (References)

- [1] 盛锋, 黄磊. 储罐等效力学简化模型的研究[J]. 核动力工程, 2017, 38(3): 85-89.
- [2] 秦玉良. LNG 储罐建设隔震垫安装优化[J]. 化工管理, 2023(13): 105-107.
- [3] Jadhav M B, Jangid R S. Response of base-isolated liquid storage tanks[J]. Shock and Vibration, 2004, 11(1): 33-45.
- [4] Kelly J M. Aseismic base isolation: Review and bibliography[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1986, 5(4): 202-216.
- [5] Jangid R S, Datta T K. Seismic behaviour of base-isolated buildings: A state-of-the-art review[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 1995, 110(2): 186-203.
- [6] Housner G W. The dynamic behavior of water tanks[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 381-387.
- [7] Haroun M A. Vibration studies and tests of liquid storage tanks[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1983, 11(2): 179-206.
- [8] Curadelli O. Equivalent linear stochastic seismic analysis of cylindrical base-isolated liquid storage tanks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 83: 166-176.
- [9] Safari S, Tarinejad R. Parametric study of stochastic seismic responses of base-isolated liquid storage tanks under near-fault and far-fault ground motions[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(24): 5747-5764.
- [10] Xu Y L, Sun D K, Ko J M, et al. Buffeting analysis of long span bridges: A new algorithm[J]. Computers & Structures, 1998, 68(4): 303-313.
- [11] 林家浩, 孙东科. 虚拟激励法在香港青马悬索桥抖振分析中的应用(英)[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(2): 172-179.
- [12] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [13] Kim N S, Lee D G. Pseudodynamic test for evaluation of seismic performance of base-isolated liquid storage tanks[J]. Engineering Structures, 1995, 17(3): 198-208.
- [14] Wen Y K. Method for random vibration of hysteretic systems[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1976, 102(2): 249-263.
- [15] Caughey T K. Random excitation of a system with bilinear hysteresis[J]. Journal of Applied Mechanics, 1960, 27(4): 649-652.
- [16] Lin J H, Zhang W S, Li J J. Structural responses to arbitrarily coherent stationary random excitations[J]. Computers & Structures, 1994, 50(5): 629-633.
- [17] Lin J H, Li J J, Zhang W S, et al. Random seismic responses of multi-support structures in evolutionary inhomogeneous random fields[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, 26(1): 135-145.
- [18] Lin J H, Sun D K, Sun Y, et al. Structural responses to non-uniformly modulated evolutionary random seismic excitations[J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 1997, 13(8): 605-616.
- [19] Roberts J B, Spanos P D. Random vibration and statistical linearization[M]. Chelmsford: Courier Corporation, 2003.
- [20] 林家浩, 张亚辉, 赵岩. 大跨度结构抗震分析方法及近期进展[J]. 力学进展, 2001, 31(3): 350-360.
- [21] Kaul M K. Stochastic characterization of earthquakes through their response spectrum[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1978, 6(5): 497-509.

## Random seismic response analysis of LNG storage tanks based on pseudo excitation method

LIU Fupeng<sup>1,2</sup>, YE Zhongzhi<sup>2</sup>, SUN Xiaoxu<sup>3</sup>, QIN Yuliang<sup>2</sup>, WANG Lijia<sup>2</sup>, YU Jianxing<sup>1\*</sup>, WANG Xiaohu<sup>2</sup>, LEI Ming<sup>2</sup>, LI Haoran<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China

3. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

**Abstract** This paper bases on the equivalent linearization method and pseudo excitation method to conduct random vibration analysis of cylindrical LNG isolation tanks under seismic excitation and investigates the influence of the liquid level and shape of the isolation tanks on the random seismic response. First, based on the acceleration response spectrum, a seismic power spectral density function is obtained according to the Kaul method, and a Haroun–Housner model of the LNG tank is established. Second, the equivalent stiffness and damping of the isolation system are obtained according to the equivalent linearization method, and the frequency domain equations of motion of the equivalent linear system are established, and a pseudo excitation method is developed to solve them iteratively. Finally, numerical examples are given, where the random responses of isolated storage tanks under different liquid levels and radii are calculated and the effects of tank radius and liquid level height on the response are studied, so as to provide certain reference for the optimization design of isolated storage tanks.

**Keywords** LNG storage tank; seismic analysis; Haroun–Housner model; equivalent linearization; pseudo excitation method ●



(责任编辑 王微)