

# LNG 储罐基础隔震反应谱设计

孙建刚<sup>1</sup>, 郑建华<sup>2</sup>, 崔利富<sup>1</sup>, 李金光<sup>2</sup>, 徐 蕾<sup>1</sup>

(1. 大连民族学院 土木建筑工程学院, 116600 辽宁 大连; 2. 中国寰球工程公司, 100028 北京)

**摘要:** 为了给 LNG 储罐基础隔震设计提供简化方法, 结合 LNG 储罐基础隔震工程设计的需求, 基于反应谱设计理论, 建立了 LNG 储罐考虑质点弹簧阻尼参数和不考虑质点弹簧阻尼参数的两种简化力学模型, 给出了用于 LNG 储罐反应谱设计的地震影响系数曲线及 LNG 储罐基础隔震设计反应谱基本步骤, 并选取  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  LNG 储罐进行反应谱设计研究和时程分析法补充验算. 结果表明: 基于反应谱理论的简化模型是可行的, 其与传统结构体系比较, 能够有效降低基底剪力和罐壁倾覆弯矩, 计算结果可取时程法的平均值和反应谱法的较大值, 设计内罐罐壁时可仅考虑柔性脉冲质点(不考虑底板不对称振动)和对流质点作用的基底剪力和罐壁倾覆力矩, 而设计基础时要考虑外罐质点、柔性脉冲质点(包含底板不对称振动)及对流质点作用的基底剪力和基底弯矩.

**关键词:** LNG 储罐; 基础隔震; 反应谱设计; 时程分析

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)04-0105-05

## Base isolation response spectrum design of LNG storage tank

SUN Jiangang<sup>1</sup>, ZHENG Jianhua<sup>2</sup>, CUI Lifu<sup>1</sup>, LI Jinguang<sup>2</sup>, XU Lei<sup>1</sup>

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

2. China Huanqiu Contracting & Engineering Cooperation, 100028 Beijing, China)

**Abstract:** To provide base isolation design simplified method of LNG storage tank, combining base isolation engineering design requirement of LNG storage tanks, based on the response spectrum design theory, considering and not considering mass spring damping parameters 2 kinds of LNG storage tank simplified mechanical models were established. Seismic effect coefficient curve for the LNG tank response spectrum design and response spectrum basic steps of LNG storage tank base isolation were presented. Selecting  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  LNG tank response spectrum and time history analysis method supplementary checking, the results showed that: compared with the traditional structure, it could effectively reduce the base shear and the tank wall overturning moment, the simplified model was feasible based on response spectrum theory, the calculation results desirable time-history method average value and response spectrum method a larger value, tank design can only consider flexible impulse mass and the convective mass contribution to the base shear and tank wall overturning moment, the foundation design should consider all mass contribution to the base shear and base moment.

**Key words:** LNG storage tanks; base isolation; response spectrum; time history analysis

反应谱设计理论具有最大地震反应及随结构周期变化这一计算简单、概念合理的特点, 同时结合工程设计中关注地震响应最大值的需求, 相关文献<sup>[1-4]</sup>已经将反应谱理论应用于大型储罐的抗

震设计中. 在大型储罐隔震设计方面, 文献[5-7]给出了隔震储罐反应谱设计理论和振型分解反应谱法设计理论. 王金昌等<sup>[8]</sup>对大型 LNG 全容罐采用规范算法进行了内罐抗震隔震研究. 文献[9]给出了 LNG 储罐基础隔震基本理论, 通过固有特性分析和地震响应时程分析验证了隔震措施的有效性. 目前, 关于反应谱理论在 LNG 储罐的隔震设计中的应用还处于研究阶段. 鉴于此, 结合 LNG 储罐基础隔震工程设计的需求, 基于反应谱

收稿日期: 2012-07-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278089);

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.

设计理论,进一步简化文献[9]中 LNG 储罐基础隔震力学模型,结合文献[10],本文给出了 LNG 储罐基础隔震的反应谱设计方法.以  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  LNG 储罐为研究对象,进行基础隔震反应谱设计,并验证了反应谱理论的可行性.

## 1 LNG 储罐基础隔震反应谱设计理论

### 1.1 简化力学模型的提出

基于在储罐抗震设计时将刚性壁理论的冲击质量等效为柔性壁理论的冲击质量的简化思想<sup>[1-2]</sup>,同时考虑对流质量的影响,将文献[9]中的力学模型进一步简化为图1所示的三质点力学模型.图中  $M^*$ 、 $m_c$  和  $m_i$  分别为外罐质点、对流质点和冲击质点的等效质量,  $K^*$ 、 $K_c$  和  $K_i$  分别为外罐质点、对流质点和冲击质点的等效刚度,  $C^*$ 、 $C_c$  和  $C_i$  分别为外罐质点、对流质点和冲击质点的等效阻尼,  $H$ 、 $H_c$  和  $H_i$  分别为外罐质点、对流质点和冲击质点的等效高度,隔震层的刚度和阻尼分别为  $K_0$  和  $C_0$ ,地面输入加速度为  $\ddot{x}_g(t)$ ,外罐质点、对流质点、冲击质点和隔震层位移分别为  $x^*(t)$ 、 $x_c(t)$ 、 $x_i(t)$  和  $x_0(t)$ .

LNG 储罐外罐和柔性脉冲质点属于短周期运动,晃动质点属于长周期运动.根据隔震设计理论,图1可进一步简化为如图2所示的三质点隔

震筒化力学模型.

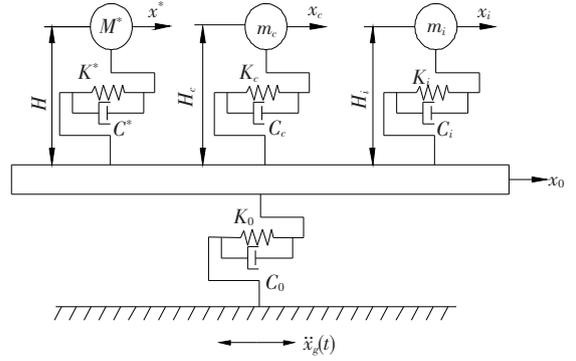


图1 三质点隔震筒化力学模型1

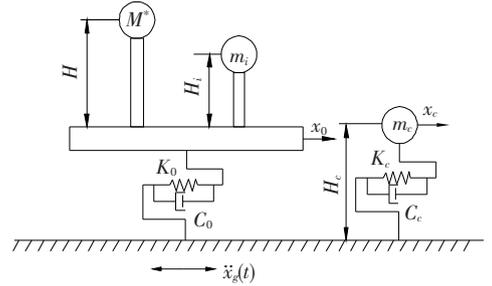


图2 三质点隔震筒化力学模型2

对 LNG 储罐行地震响应分析,与文献[9]进行对比,验证图1和图2中 LNG 两种筒化力学模型的可行性,其隔震周期为 2 s,在隔震层阻尼比为 0.1 时,峰值加速度为 0.34g 的 Elcentro 波的作用下的地震响应,见表1.

表1  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  LNG 储罐不同筒化力学模型地震响应对比

计算工况	力学模型	基底剪力/ $10^8 \text{ N}$	罐壁倾覆力矩/ $(10^9 \text{ N} \cdot \text{m})$	晃动波高/m
非隔震	三质点	5.130(4.590)	14.627(7.258)	0.643
	四质点	4.659(4.096)	13.400(6.420)	0.643
隔震	三质点1	0.826(0.596)	2.547(0.935)	0.658
	三质点2	0.834(0.583)	2.576(0.922)	0.643
	四质点	0.827(0.581)	2.620(0.800)	0.658

注:括号内数值为内罐设计值.

由表1可知,在非隔震工况下,基底剪力和罐壁倾覆力矩,图1和图2中的筒化力学模型略大于文献[9]中四质点筒化力学模型,晃动波高没有变化,从工程设计角度来讲,表明三质点筒化力学模型是偏于安全的.隔震工况下,三质点模型1与四质点模型的基底剪力和罐壁倾覆力矩较为接近,晃动波高相同,与非隔震模型相比有所放大;三质点模型1和四质点模型的基底剪力和罐壁倾覆力矩小于三质点模型2,对于工程设计来说是三质点模型2偏于安全的,三质点模型2的晃动波高与非隔震模型相同.

### 1.2 基于反应谱法的大型 LNG 储罐基础隔震地震响应

针对图1筒化力学模型,基于反应谱理论可

知动力系数  $\beta$  为

$$\beta_1 = \frac{|\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}^*(t) + \ddot{x}_g(t)|_{\max}}{|\ddot{x}_g(t)|_{\max}}, \quad (1)$$

$$\beta_2 = \frac{|\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_g(t)|_{\max}}{|\ddot{x}_g(t)|_{\max}}, \quad (2)$$

$$\beta_3 = \frac{|\ddot{x}_c(t) + \ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)|_{\max}}{|\ddot{x}_g(t)|_{\max}}. \quad (3)$$

式中:  $\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}^*(t) + \ddot{x}_g(t)$ 、 $\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_g(t)$ 、 $\ddot{x}_c(t) + \ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)$  分别为外罐质点、冲击质点和对流质点的绝对加速度.一般情况下,  $\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}^*(t) + \ddot{x}_g(t)$ 、 $\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_g(t)$ 、 $\ddot{x}_c(t) + \ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)$  的最大值不会同时发生,可采用平方和开方的方法(SRSS方法)计算 LNG 储罐地震响应的最大值.

用于内罐设计的剪力为

$$Q_{smax} = [(m_i | \ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_g(t) |_{max})^2 + (m_c | \ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_c(t) + \ddot{x}_g(t) |_{max})^2]^{\frac{1}{2}} = kg[(m_i \beta_2)^2 + (m_c \beta_3)^2]^{\frac{1}{2}} = g[(\alpha_2 m_i)^2 + (\alpha_3 m_c)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

用于基础设计的总剪力为

$$Q_{tmax} = kg[(M^* \beta_1)^2 + (m_i \beta_2)^2 + (m_c \beta_3)^2]^{\frac{1}{2}} = g[(\alpha_1 M^*)^2 + (\alpha_2 m_i)^2 + (\alpha_3 m_c)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

用于内罐设计的罐壁倾覆弯矩为

$$M_{smax} = g\{[m_i H_i \alpha_2]^2 + [m_c H_c \alpha_3]^2\}^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

用于基础设计的总倾覆弯矩为

$$M_{tmax} = g\{[M^* H \alpha_1]^2 + [m_i H'_i \alpha_2]^2 + [m_c H_c \alpha_3]^2\}^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

晃动波高为

$$h_{vmax} = 0.837R\alpha_3. \quad (8)$$

式中:  $| \ddot{x}_g(t) |_{max} = kg, \alpha = k\beta, k$  为地震系数.

针对图2简化力学模型,基于反应谱理论可知动力系数  $\beta$  为

$$\beta_1 = \frac{| \ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) |_{max}}{| \ddot{x}_i(t) |_{max}}, \quad (9)$$

$$\beta_2 = \frac{| \ddot{x}_c(t) + \ddot{x}_g(t) |_{max}}{| \ddot{x}_g(t) |_{max}}. \quad (10)$$

一般情况下,  $\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t), \ddot{x}_c(t) + \ddot{x}_g(t)$  最大值不会同时发生,采用SRSS法计算最大值.则用于内罐设计的剪力为

$$Q_{smax} = kg[(m_i \beta_1)^2 + (m_c \beta_2)^2]^{\frac{1}{2}} = g[(\alpha_1 m_i)^2 + (\alpha_2 m_c)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

用于基础设计的总剪力为

$$Q_{tmax} = kg[(M^* \beta_1)^2 + (m_i \beta_1)^2 + (m_c \beta_2)^2]^{\frac{1}{2}} = g[(\alpha_1 M^*)^2 + (\alpha_1 m_i)^2 + (\alpha_2 m_c)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

用于内罐设计的罐壁倾覆弯矩为

$$M_{smax} = g\{[m_i H_i \alpha_1]^2 + [m_c H_c \alpha_2]^2\}^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

用于基础设计的总倾覆弯矩为

$$M_{tmax} = g\{[M^* H \alpha_1]^2 + [m_i H'_i \alpha_1]^2 + [m_c H_c \alpha_2]^2\}^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

晃动波高为

$$h_{vmax} = 0.837R\alpha_2. \quad (15)$$

### 1.3 地震影响系数的确定

由于对流质量的晃动周期一般大于6s,不能应用文献[10]给出的反应谱曲线地震影响系数曲线,所以这里将文献[4]中的反应谱曲线与文献[10]给出的反应谱曲线综合考虑给出如下的  $\alpha$  曲线,如图3所示.

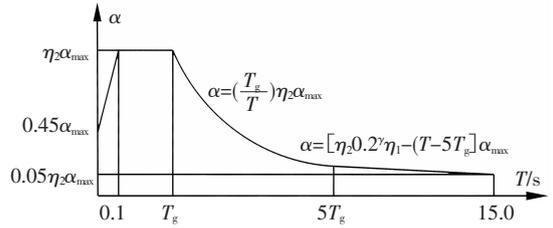


图3 综合地震影响系数  $\alpha$

### 1.4 时程分析法补充计算

从安全等级来讲,大型LNG储罐相比核电设施,应采用时程分析法进行补充计算.关于实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线选取以及计算结果的评估参见文献[10].

### 1.5 LNG 储罐基础隔震反应谱设计基本步骤

综合上述讨论,LNG储罐基础隔震反应谱设计包括:1)确定抗震设防标准(乙类设防),及抗震设防烈度;2)确定结构的自振周期及隔震设计参数;3)确定最大地震影响系数  $\alpha_{max}$  和场地特征周期  $T_g$  及地震影响系数;4)计算地震作用,并进行时程分析法补充计算.

## 2 算例分析

根据LNG储罐简化力学模型计算简图,将  $1.6 \times 10^5 m^3$  的LNG储罐相关参数列于表2中.

表2  $1.6 \times 10^5 m^3$  的LNG储罐相关参数

力学模型等效质点	质量/ $10^7$ kg	有效高度/m	基本周期/s	阻尼比
外罐质点	1.717 4	39.689	0.129 1	0.050
柔性脉冲质点	4.023 5	15.828 (27.071)	0.550 5	0.020
对流质点	4.220 3	20.337	9.767 3	0.005

注:括号内数据为考虑底板不对称振动的等效高度.

通过表2并对比图3可以看出,外罐质点振动周期为短周期振动,地震影响系数处于水平段;柔性脉冲质点振动周期为短周期振动,地震影响

系数处于曲线下降段前期;而对流质点振动周期为长周期振动;隔震后外罐质点和柔性脉冲质点隔震周期处于曲线下降段后期,地震影响系数明

显降低,能够起到降低地震作用的目的.

选取  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  LNG 储罐,设防烈度为 9 度,Ⅲ类场地,设计地震分组为第 1 组,场地特征

周期为 0.45 s,隔震周期为 2 s,隔震层阻尼比为 0.1.针对简化力学模型(图 1 和图 2)进行应用反应谱地震响应分析,见表 3 和表 4.

表 3 模型 1 的  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  LNG 储罐反应谱地震响应

力学模型等效质点及 SRSS 组合	基底剪力 减震率/%	罐壁倾覆力矩 减震率/%	基底剪力/ $10^8 \text{ N}$		罐壁倾覆力矩/ $(10^9 \text{ N} \cdot \text{m})$		晃动波高/m
			隔震	非隔震	隔震	非隔震	
外罐质点	80.26	80.26	0.299	1.515	1.187	6.012	3.180
内罐柔性脉冲质点	79.43	79.39 (79.42)	0.761	3.699	2.061 (1.205)	10.002 (5.855)	
内罐对流质点	-0.00	-0.00	0.393	0.392	0.799	0.797	
SRSS 组合	77.42 (76.99)	78.57 (75.53)	0.907 (0.856)	4.017 (3.720)	2.509 (1.446)	11.708 (5.909)	

注:括号外为 LNG 储罐系统基底总弯矩,括号内为内罐基底弯矩;减震率 = (非隔震 - 隔震)/非隔震  $\times 100\%$ .

表 4 模型 2 的  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  LNG 储罐反应谱地震响应

力学模型等效质点及 SRSS 组合	基底剪力 减震率/%	罐壁倾覆力矩 减震率/%	基底剪力/ $10^8 \text{ N}$		罐壁倾覆力矩/ $(10^9 \text{ N} \cdot \text{m})$		晃动波高/m
			隔震	非隔震	隔震	非隔震	
外罐质点	77.56	77.53	0.340	1.515	1.351	6.012	3.171
内罐柔性脉冲质点	78.45	78.42 (78.45)	0.797	3.699	2.158 (1.262)	10.002 (5.855)	
内罐对流质点	0.00	0.00	0.392	0.392	0.797	0.797	
SRSS 组合	76.33 (76.13)	76.12 (74.75)	0.951 (0.888)	4.017 (3.720)	2.668 (1.492)	11.708 (5.909)	

注:括号内数据为内罐基底弯矩,括号外数据为 LNG 储罐系统基底总弯矩.减震率 = (非隔震 - 隔震)/非隔震  $\times 100\%$ .

表 3 和 4 表明隔震 LNG 储罐基底剪力和罐壁倾覆力矩减震率达到 75% 以上,尤其是外罐和柔性脉冲质点的地震响应降低明显.从满足工程设计简化和工程安全要求的角度,LNG 储罐隔震

设计时可按图 2 进行简化,减少计算工作量.

选取 Ⅲ类场地地震波进行时程分析补充计算,见表 5,并将基底剪力与反应谱法对比,进行计算结果评估.

表 5  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  LNG 储罐时程分析地震响应

地震波	基底剪力/ $10^8 \text{ N}$		基底剪力 减震率/%	时程分析与反应谱值之比/%		晃动波高/m
	隔震	非隔震		隔震	非隔震	
CPC1	1.732	4.582	62.198 6	182.12	114.07	0.252 9
CPC2	1.238	4.724	73.80	130.18	117.60	0.351 2
EMC1	0.419	2.786	84.97	44.06	69.36	0.160 8
EMC2	0.688	3.171	78.29	72.34	78.94	0.160 5
LWD1	0.766	4.380	82.51	80.55	109.04	0.198 0
LWD2	1.082	3.320	67.41	113.77	82.65	0.142 7
PEL1	1.552	3.198	51.47	163.20	79.61	0.730 1
PEL2	0.635	4.058	84.35	66.77	101.02	0.635 6
lanzhoubo1	0.643	2.183	70.52	67.61	54.34	0.659 2
lanzhoubo2	0.729	1.864	60.91	76.66	46.40	0.577 6

表 5 表明即使场地类别相同,每条地震波的地震响应也不同,甚至差别较大.根据选波规则及计

算结果的评定规则,非隔震工况下,有效地震波的基底剪力平均值为  $3.777 \times 10^8 \text{ N}$ ,为反应谱设计值

的94.03%,介于80%和120%之间,最终取时程分析和反应谱计算值的较大值 $4.017 \times 10^8$  N,相应基底弯矩为 $11.708 \times 10^9$  N·m;隔震工况下,有效地震波的基底剪力平均值为 $0.826 \times 10^8$  N,为反应谱设计值的86.84%,介于80%和120%之间,最终取时程分析和反应谱计算值的较大值 $0.951 \times 10^8$  N,相应基底弯矩为 $2.668 \times 10^9$  N·m.对于晃动波高来说,为安全起见取反应谱值3.171 m.

### 3 结 论

1)基于工程设计的需求,建立了LNG储罐基础隔震反应谱设计简化力学模型,给出了反应谱设计理论、设计方法和基本设计流程.

2) $1.6 \times 10^5$  m<sup>3</sup> LNG储罐基础隔震反应谱设计表明,基于反应谱理论的LNG储罐基础隔震体系简化模型是可行的.

3)为安全起见,基底剪力可取时程分析法平均值和振型分解反应谱法计算值的较大值,晃动波高按非隔震结构体系的反应谱设计值取值.

4)内罐罐壁设计时可仅考虑柔性脉冲质点(不考虑底板不对称振动)和对流质点贡献的基底剪力和罐壁倾覆力矩,而基础设计时要考虑外罐质点、柔性脉冲质点(包含底板不对称振动)及对流质点贡献的基底剪力和基底弯矩.

### 参考文献

- [1] API 650 - 1998. Welded steel tanks for oil storage [S]. Washington DC: American Petroleum Institute, 1998.
- [2] CEN - EC8 - 1998 - 4. Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2003.
- [3] SH3026—1990. 常压立式储罐抗震鉴定标准[S]. 北京:中国石化出版社,1990.
- [4] GB 50341—2003. 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [5] 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.
- [6] 孙建刚,郝进峰,王振. 储罐基底隔震振型分解反应谱计算分析研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005, 37(5):649 - 651.
- [7] 孙建刚,蒋峰,张荣花. 隔震立式储罐地震反应谱分析[J]. 世界地震工程,2009,25(2):130 - 139.
- [8] 王金昌,杨森. 大型LNG全容罐抗震隔震设计[J]. 油气田地面工程,2009,28(10):53 - 55.
- [9] 孙建刚,崔利富,郑建华. 大型全容式LNG储罐基础隔震地震响应分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012, 44(8):682 - 688.
- [10] GB 50011—2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(编辑 魏希柱)