

# 立式储罐叠层橡胶隔震3阶段设计

孙建刚<sup>1</sup>, 崔利富<sup>2</sup>, 王 振<sup>1</sup>, 杜蓬娟<sup>1</sup>

(1. 大连民族学院 土木建筑工程学院, 116600 辽宁 大连, sjg728@163.com;

2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 116026 辽宁 大连)

**摘 要:** 为了研究立式钢制储罐基底隔震设计分析方法, 采用3阶段设计进行隔震的优化设计. 第1阶段从刚性理论出发, 重点考虑隔震引起的波高放大效应, 并以波高放大效应限制为界限调整隔震设计频率; 第2阶段从弹性理论出发, 分析隔震的基底剪力, 研究隔震产生的降低效应; 第3阶段将刚性理论和弹性理论所获得的基底剪力用平方和开平方的方法作为设计依据, 理论上既保证两者作用效应, 又为工程设计分析提供了易于理解的分析方法. 研究结果表明: 以此方法进行设计, 既可以达到对基底剪力降低, 又能够控制住波高的放大效应.

**关键词:** 立式储罐; 基底隔震; 3阶段设计; 基底剪力; 波高

**中图分类号:** P315.952      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2011)06-0118-04

## Vertical storage tank laminated rubber-isolated three-stage design

SUN Jian-gang<sup>1</sup>, CUI Li-fu<sup>2</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>, DU Peng-juan<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Dalian Nationalities University, 116600 Dalian, Liaoning, China, sjg728@163.com; 2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, 116026 Dalian, Liaoning, China)

**Abstract:** To study vertical steel storage tank isolation design and analysis methods, three-stage design method is used as the optimal design of base isolated for the vertical steel storage tank. In the first stage, from rigidity theory, the wave height amplification effect caused by the base isolated is considered firstly, and the wave amplification is limited to the boundaries of isolation design to adjust the frequency. In the second stage, from elasticity theory, the base shear of isolation is analyzed, and the damping effect of the base isolated is studied. In the third stage, the square and square root results of the base shear obtained by the rigid theory and the theory of elasticity are used as a design basis. In theory, the only guarantee the effect of the two effects, but also for engineering design and analysis provides a easy to understand method of analysis. The results showed that this approach to design can not only achieve the right base shear reduction, but also be capable of controlling the amplification effect of wave height.

**Key words:** vertical storage tank; base isolation; three-stage design; base shear; wave height

立式储罐作为石油化工等领域的重要设施, 一旦发生地震灾害不仅仅造成直接的经济损失, 更为危险的是易于引发次生灾害, 污染环境并对社会的稳定造成影响. 关于该类设施地震灾害的报告可见文献[1-2]. 引发储罐破坏的因素可分为液体晃动、提离、动液压力增加. 晃动冲击过大

易于引发浮顶储罐浮顶的失稳、拱顶罐的瘪顶; 提离的增加易于造成连接部位的破坏、产生附加轴向应力引起罐壁“象足”屈曲破坏; 动液压力的增加易于造成罐壁轴向应力和环向应力加大, 产生“菱形”屈曲破坏. 关于立式储罐的抗震设计, 可以采取传统抗震设计方法和结构控制方法两种途径. 传统抗震设计是以所预期的地震动产生的峰值指标为输入参数, 通过选择各构件的材料性能、几何构造来满足强度、稳定、晃动等约束量, 已被各国储罐抗震设计规范采用, 其主要控制指标是

收稿日期: 2009-11-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078063/E0808);

中石油科技创新基金项目(2009D-5006-06-03).

作者简介: 孙建刚(1959—), 男, 教授, 博士生导师.

晃动波高和轴向应力. 结构控制思想<sup>[3]</sup>源于土木工程,从控制手段来看,针对大型立式储罐而言,较为有效的方法是隔震. 关于这方面的研究,国内孙建刚等<sup>[4-6]</sup>已做了相关的理论和实验研究,国外 Chalhoub 等<sup>[7]</sup>进行了储罐地震动振动台效应的研究. Kim 等<sup>[8]</sup>进行了橡胶基础隔震的单向激励研究. Malhotra<sup>[9]</sup>研究了周边橡胶支撑的隔震储罐, Shrimali 等<sup>[10]</sup>研究了高矮罐的隔震效应. Jadhav 等<sup>[11]</sup>研究了不同隔震支撑的隔震效应. 从以上研究可以得到以下结论:隔震是立式储罐减小地震响应的有效方法之一;隔震对基底剪力控制有效,可降低罐壁的轴向应力,减少屈曲效应;隔震引入长周期,对晃动长周期效应起放大作用,但可通过优化隔震参数调整放大幅度;隔震参数对储罐的地震响应有影响,存在优化问题.

综上所述,从提高储罐抗震安全储备角度讲,隔震是一种有效的减震方法. 但目前所研究的方法,多数是将对流、液固耦联,刚性运动三者耦联来分析隔震的地震响应. 本文的思想是:由于对流晃动是长周期的,液固耦联是短周期的,在分析问题时,将两者割离开来,分别讨论,然后考虑综合效应. 从分析问题技术路线上看,这样更易于工程设计人员理解和应用.

## 1 设计思想

由于储罐为液固耦联振动体系,长周期反应对应的是表面对流晃动,其基本振动周期一般在4 s以上,短周期反应对应液固耦联振动,一般仅为0~1 s,隔震对晃动周期的影响又不大,故可将对流晃动和耦联振动考虑为不耦合. 基于这一思想将储罐的隔震设计分为3阶段. 首先以不考虑罐壁弹性的刚性晃动分析力学模型为主,如图1所示,研究隔震引起的晃动效应和基底剪力,以隔震和无隔震晃动波高的比值为控制界限调整隔震频率,优化隔震频率和阻尼比;其次以考虑罐壁弹性,忽略晃动的弹性耦联振动力学模型为主,如图2所示,研究弹性体系的基底剪力降低效应;最终考虑到两者之间的相互影响,考虑到晃动和弹性耦联振动最大值不能同时发生,以两者基底剪力最大值的平方和开平方组合值及晃动对流的波高最大值作为设计参考值.

## 2 3阶段设计分析理论

### 2.1 刚性晃动分析理论

以图1所示的简化力学模型为研究对象,其运动分析方程为

$$\begin{bmatrix} m_s & m_s \\ m_s & m_s + m_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{s}(t) \\ \ddot{x}_0(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & \\ & c_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{s}(t) \\ \dot{x}_0(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & \\ & k_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s(t) \\ x_0(t) \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_s \\ m_s + m_0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t). \quad (1)$$

式中:  $m_s$  为晃动对流质量,  $m_0$  为刚性运动质量,  $\ddot{s}(t)$ 、 $\ddot{x}_0(t)$  分别为晃动质量和橡胶支撑顶部加速度,  $s(t)$ 、 $x_0(t)$ 、 $\dot{s}(t)$ 、 $\dot{x}_0(t)$  为分别相应质量的速度、位移,  $c_s$  为晃动阻尼,  $c_0$  为隔震层阻尼,  $k_s$  为晃动刚度,  $k_0$  为隔震层刚度,  $\ddot{x}_g(t)$  为地面运动加速度.

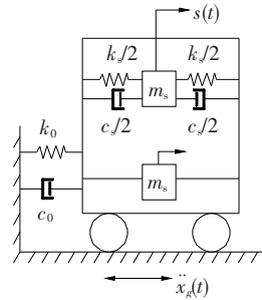


图1 晃动对流简化分析力学模型

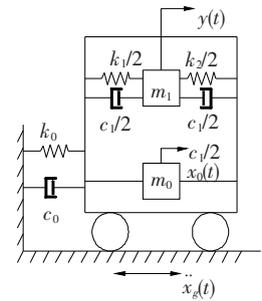


图2 弹性耦联振动简化分析力学模型

其基底剪力和波高为

$$Q_c = -m_0[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] - m_s[\ddot{s}(t) + \ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)]. \quad (2)$$

$$h_v = 0.841R \frac{\ddot{s} + \ddot{x}_0 + \ddot{x}_g}{g}. \quad (3)$$

式中:  $Q_c$  为隔震基底剪力,  $h_v$  为隔震晃动波高, 各参数的具体表达可参见文献[12].

波高控制界限值取为

$$\frac{h_v - h_{vn}}{h_{vn}} \times 100\% \leq 10\%. \quad (4)$$

式中:  $h_{vn}$  为无隔震时的波高最大值,  $h_v$  为隔震时的波高最大值.

式(4)说明选取隔震参数时,晃动波高的放大效应不应超过10%,以确保晃动冲击力不能引起浮顶的稳定破坏. 通过该式可以调整隔震设计的初始隔震频率,确保隔震产生降低罐壁轴向效应的同时,不引起晃动波高的放大.

### 2.2 弹性耦联振动分析理论

在上述晃动分析给出的隔震参数基础上,以弹性耦联振动简化分析力学模型(图 2)为研究对象,其运动分析方程为

$$\begin{bmatrix} m_1 & m_1 \\ m_1 & m_1 + m_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}(t) \\ \ddot{x}_0(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & \\ & c_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}(t) \\ \dot{x}_0(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & \\ & k_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y(t) \\ x_0(t) \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 \\ m_1 + m_0 \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t). \quad (5)$$

式中:  $m_1$  为储罐壁与液体耦联振动质量,  $c_1$  为耦联振动阻尼常数,  $k_1$  为耦联振动刚度,  $\ddot{y}(t)$ 、 $\dot{y}(t)$ 、 $y(t)$  分别为耦联振动质点相对加速度、速度和位移,其他参数的含义同式(1).

弹性耦联振动引起的基底剪力为

$$Q_s = -m_0[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] -$$

$$m_1[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{y}(t)]. \quad (6)$$

### 2.3 基底总剪力和倾覆力矩

在式(1)~(6)的分析基础上,将两者所获得的基底剪力最大值组合,即

$$Q_{\max} = \sqrt{Q_{c,\max}^2 + Q_{s,\max}^2}. \quad (7)$$

## 3 数值例证

针对工程常用系列浮顶储罐,在线性隔震状态下,分别取隔震周期  $T = 2, 3, 4, 5$  s, 隔震层阻尼比  $\xi = 0.2$ , 地震动为 El-Centro 波, 加速度峰值为 0.4 g. 典型浮顶罐的基本参数及刚性理论、弹性理论计算参数见表 1, 采用 Wilson- $\theta$  时程积分法求解式(1)和式(6), 并由相关式分析的地震响应结果分别见表 2 和表 3.

表 1 系列储罐参数表

储罐容积/ $10^3 \text{ m}^3$	刚性理论 $m_s/10^6 \text{ kg}$	刚性理论 $m_0/10^5 \text{ kg}$	弹性理论 $m_1/10^6 \text{ kg}$	弹性理论 $m_0/10^6 \text{ kg}$
2	0.54	13.32	1.15	0.18
10	3.95	52.14	4.601	0.62
50	31.08	185.78	16.574	2.02
100	66.61	305.10	27.229	3.32
150	112.38	379.55	33.824	4.16

表 2 刚性晃动理论储罐地震响应减震率

储罐容积/ $10^3 \text{ m}^3$	晃动波高减震率/%				基底剪力减震率/%			
	$T = 2 \text{ s}$	$T = 3 \text{ s}$	$T = 4 \text{ s}$	$T = 5 \text{ s}$	$T = 2 \text{ s}$	$T = 3 \text{ s}$	$T = 4 \text{ s}$	$T = 5 \text{ s}$
2	-10.76	-21.98	-6.78	21.93	70.13	81.96	85.90	90.21
10	-13.62	-12.34	-12.01	-2.37	66.34	70.47	79.43	87.16
50	0.77	-1.15	-4.05	-4.34	58.70	69.68	74.28	78.98
100	-0.90	-0.41	0.35	1.18	49.56	69.11	72.76	75.91
150	0.76	1.77	4.56	8.14	32.86	64.09	69.84	72.78

表 3 弹性理论储罐基底剪力减震率

储罐容积/ $10^3 \text{ m}^3$	弹性理论储罐基底剪力减震率/%			
	$T = 2 \text{ s}$	$T = 3 \text{ s}$	$T = 4 \text{ s}$	$T = 5 \text{ s}$
2	76.20	81.61	89.14	93.15
10	78.73	81.09	90.36	92.04
50	76.92	81.37	86.97	88.89
100	81.39	86.10	87.75	90.68
150	76.31	84.84	86.08	88.53

从表 2 可以看出, 容积不同, 隔震周期对晃动波高的影响是不同的. 对大容积的储罐, 如:  $150 \times 10^3 \text{ m}^3$  的储罐, 在所给的隔震周期范围内, 其波高均有减小, 从这一点看, 当考虑  $150 \times 10^3 \text{ m}^3$  储罐的隔震设计时, 由于波高无放大效应, 其优化的目标是基底剪力的减少幅度. 对小容积的储罐, 例如  $2000 \text{ m}^3$  的储罐, 在所给的隔震周期范围内, 其波

高有放大和减小, 这时若以波高减震率为控制指标, 只有  $T = 4 \text{ s}$  和  $T = 5 \text{ s}$  满足要求, 其刚性晃动理论的基底剪力减震率分别为 85.90%、90.21%, 弹性理论(表 3)的基底剪力减震率分别为 89.14%、93.15%. 按此思想设计,  $T = 4 \text{ s}$  和  $T = 5 \text{ s}$  满足波高减震率控制指标的储罐隔震基底剪力设计值可由(7)式给出, 由式(7)算得基底剪力最大值与 3 质点体系<sup>[12]</sup>的分析结果比较见表 4. 从表 4 给出的满足波高减震率控制指标的储罐隔震的基底剪力设计值分析可知, 采用本文所建议的方法, 在工程设计中安全裕度更大, 主要体现在两方面: 一是控制了波高的放大效应, 使得浮顶的冲击力增加幅度较小; 二是放大了基底剪力的设计值, 相当于在 3 质点体系理论基底剪力分析值的基础上又乘了一个放大系数, 这一系数在 1.3~1.7 之间.

表4 本文基底剪力设计值与3质点体系理论值

储罐容积/ $10^3 \text{ m}^3$	剪力/MN			
	3质点理论( $T=4 \text{ s}$ )	3质点理论( $T=5 \text{ s}$ )	本文理论( $T=4 \text{ s}$ )	本文理论( $T=5 \text{ s}$ )
2	0.79	0.53	1.20	0.78
10	—	2.80	—	4.05
50	19.80	16.01	24.47	22.62
100	33.92	29.49	51.71	42.30
150	44.01	40.13	69.19	59.49

## 4 结 论

1) 采用3阶段设计思想可以保证对波高的放大效应的控制,并能够确保基底剪力的隔震效果.

2) 以刚性晃动的隔震和无隔震晃动波高的比值为控制界限调整隔震频率,以弹性耦联振动研究弹性体系的基底剪力降低效应,考虑到两者之间的相互影响,以两者基底剪力最大值的平方和开平方组合值及晃动对流的波高最大值作为设计参考值的3阶段设计方法设计思想明确,分析方程简单,易于理解.

3) 3阶段设计方法所提供的设计值与3质点理论设计值比较,一方面控制了波高的放大效应,使得浮顶的冲击力增加幅度较小;另一方面放大了基底剪力的设计值,设计的结果安全裕度更大,有利于储罐抗震的安全储备.

## 参考文献:

[1] HANDAM F H. Seismic behavior of cylindrical steel storage tanks [J]. Journal of Construction Steel Research, 2000, 53: 307 - 333.

[2] 孙建刚. 立式储罐地震响应控制研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2002.

[3] 周福霖. 工程结构减震控制 [M]. 北京: 地震出版社, 1997.

[4] 孙建刚, 张丽, 袁朝庆. 立式储罐基底隔震动力反应特

性分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21 (3): 140 - 144.

[5] 孙建刚, 袁朝庆, 郝进峰. 橡胶基底隔震储罐地震模拟试验研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (6): 806 - 809.

[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 (6): 649 - 651.

[7] CHALHOUB M S, KELLY J M. Shake table test of cylindrical water tank in base isolated structures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, 116 (7): 1451 - 1472.

[8] KIM N S, LEE D G. Pseudo-dynamic test for evaluation of seismic performance of base isolated liquid storage tanks [J]. Engineering Structures, 1995, 17 (3): 198 - 208.

[9] MALHOTRA P K. New method for seismic base isolation of liquid storage tanks [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26: 839 - 847.

[10] SHRIMALI M K, JANGID R S. Seismic response of base-isolated liquid storage tanks [J]. Journal of Vibration & Control, 2003, 9 (10): 1201 - 1217.

[11] JADHAV M B, JANGID R S. Response of base-isolated liquid storage tanks [J]. Shock and Vibration, 2004, 11: 33 - 45.

[12] 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.

(编辑 魏希柱)