

16 万方 LNG 储罐的动特性分析

张 营¹, 孙建刚², 崔利富³, 赵长军¹

(1 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318 2 大连民族学院
土木建筑工程学院, 辽宁 大连 116605 3 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所,
辽宁 大连 116026)

摘 要: 以 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐为例, 应用 ADINA 有限元软件中的 Lanczos 特征值算法, 考虑液固耦合效应研究其动力特性参数。结果表明: 内罐液固耦合基本振动频率较低, 振动形式以 $\cos t\theta$ 型梁式振动为主, 液体晃动为低频的振动; 外罐基本振动频率较高, 振动形式也以 $\cos t\theta$ 型梁式振动为主。内罐的液固耦合前三阶频率分别为 1.979, 4.766, 6.491 Hz, 液体晃动前三阶频率分别为 0.104, 0.185, 0.235 Hz; 外罐前三阶频率分别为 6.509, 12.37, 22.16 Hz。

关键词: LNG 储罐; 模态分析; 液固耦合; 梁式振动

中图分类号: TU 352 **文献标志码:** A

Dynamical Characteristic Analysis of $160,000\text{-m}^3$ LNG Storage Tanks

ZHANG Ying¹, SUN Jian-gang², CUI Li-fu³, ZHAO Chang-jun¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Northeastern Petroleum University, Daqing Heilongjiang 163318, China 2. College of Civil and Architecture Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian Liaoning 116605, China 3. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract The dynamic characteristic parameters of $160,000\text{-m}^3$ LNG storage tanks were studied by considering the liquid-solid coupling effect and using the Lanczos algorithm in ADINA Finite Element Analysis Software. The result shows that the inner tank's basic vibration frequency of liquid-solid coupling is lower, $\cos t\theta$ beam vibration is the leading form of vibration and liquid sloshing is low-frequency vibration; the outer tank's basic vibration frequency is higher and $\cos t\theta$ beam vibration is also the leading form of vibration. The first three-order frequencies of the inner tank's liquid-solid coupling are 1.979, 4.766 and 6.491 Hz respectively; those of liquid sloshing are 0.104, 0.185 and 0.235 Hz respectively; those of the outer tank are 6.509, 12.37 and 22.16 Hz respectively.

Key words LNG storage tank; modal analysis; liquid-solid coupling; beam vibration

1 储罐有限元模型的建立

1.1 模型的基本数据^[1]

本文以建于中国某地区的一液化天然气储罐为原型, 建立 ADINA 有限元模型。

该罐容积为 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$, 罐内液化天然气密

度为 $450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 弹性模量为 $2.56 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。内罐材料采用 9% Ni 钢, 密度为 $7.850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 弹性模量为 $5.0 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 泊松比为 0.3。考虑材料的非线性, 采用双线性强化模型, 屈服强度取 $4.9 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 剪切模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。外罐材料为钢筋混凝土, 密度为

收稿日期: 2010-05-27

作者简介: 张营 (1984-), 女, 黑龙江大庆人, 东北石油大学土木建筑工程学院硕士研究生, 主要从事防灾减灾工程结构抗震研究。

$2\ 400\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量为 $2\ 0\times 10^{10}\ \text{N}\cdot\text{m}^{-2}$, 泊松比为 0.2。内罐液体高度为 34.26 m。内罐直径为 80 m, 沿高度方向分为 10 层, 每层高 3.543 m, 从上到下每层的厚度分别为 12.12、12.12、12.2、14.7、17.3、19.8、22.4、24.9 mm, 总高为 35.43 m。外罐和内罐间隔为 1 m。外罐厚为 0.8 m, 壁高为 38.55 m。罐顶为钢筋混凝土球面穹顶, 内径为 82 m, 厚为 0.4 m。底板为混凝土底板, 厚为 0.9 m。

1.2 单元的选择和网格的划分

内罐壁及底板采用 4 节点等参单元, 外罐壁、

底板及罐顶采用 8 节点三维实体单元, 液体采用 8 节点三维流体单元^[2], 液体表面为自由面单元, 采用势流体理论进行计算^[3]。

1.3 定义材料、边界条件和荷载

在 ADINA 建立模型过程中, 质量、长度和时间单位分别默认为 kg、m 和 s。几何模型建成后, 定义材料的密度、弹性模量、泊松比和屈服强度等量值。再定义边界条件, 将底板的下表面定义为全方位自由度约束, 即三个平动自由度和三个转动自由度, 并在罐上施加重力加速度。储罐系统采用直角坐标系。储罐的有限元模型如图 1。

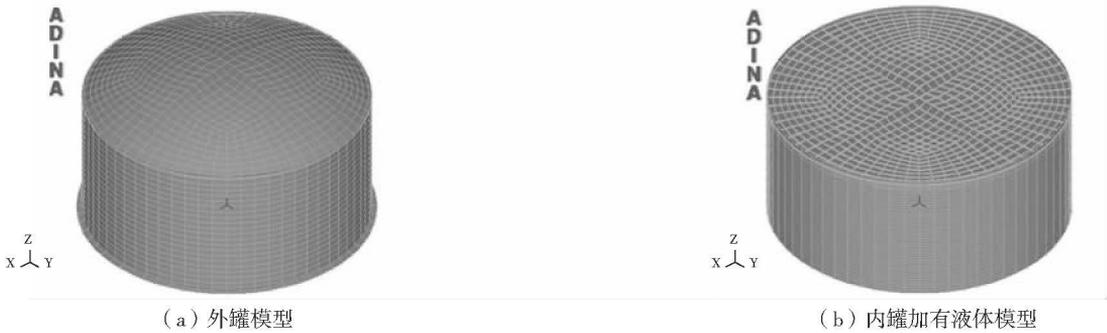


图 1 $16\times 10^4\ \text{m}^3$ LNG 储罐有限元模型

2 储罐的模态分析计算

不考虑阻尼的影响, 典型的模态分析求解过程如下:

动力方程^[4]为

$$[K]\{\phi_i\} = \omega_i^2[M]\{\phi_i\}, \quad (1)$$

式中, $[K]$ 为刚度矩阵, $[M]$ 为质量矩阵, $\{\phi_i\}$ 为第 i 阶模态的振型向量, ω_i 为第 i 阶模态的固有频率。

模态分析计算的关键在于如何提取固有频率和特征向量, 且在数值分析算法中有多种算法。针对本文有限元模型较大, 并且需要提取反应液体低频振动、罐壁耦联运动^[5]和外罐的高阶频率的振动, 因而采用 ADINA 中的 Lanczos Iteration 算

法。该算法的收敛准则^[2]为

$$\frac{y_i^{(k-1)} - y_i^{(k)}}{y_i^{(k-1)}} \leq \epsilon \quad (2)$$

式中, N 为特征模态的个数, k 为迭代次数, ϵ 为迭代容差, 通常 $\epsilon = 10^{-9}$ 。

3 储罐的频率和振型

通过 ADINA 有限元软件的分析可以看出, $16\times 10^4\ \text{m}^3$ LNG 储罐内罐液固耦合和外罐的振动形式都以 $\cos n\theta$ 型梁式振动为主。储罐内罐液固耦合梁式振动 $\cos n\theta$ $n=1$ 时的前 3 阶振型如图 2, 液面晃动的前 3 阶振型如图 3, 外罐梁式振动 $\cos n\theta$ $n=1$ 时的前 3 阶振型如图 4 与其对应的频率和周期见表 1。

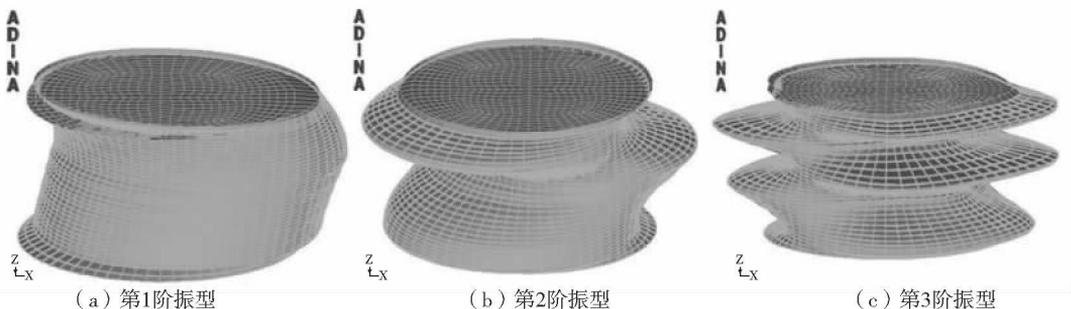


图 2 $16\times 10^4\ \text{m}^3$ LNG 储罐内罐液固耦合振动的第 1、2、3 阶振型

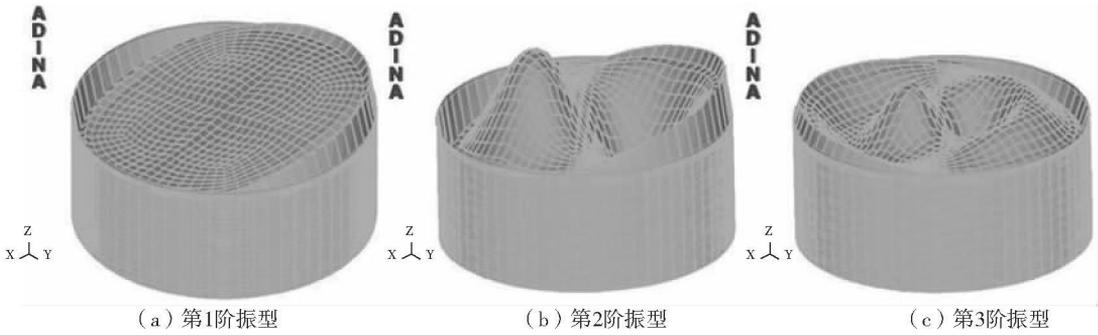


图 3 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐内罐液面晃动的第 1, 2, 3 阶振型

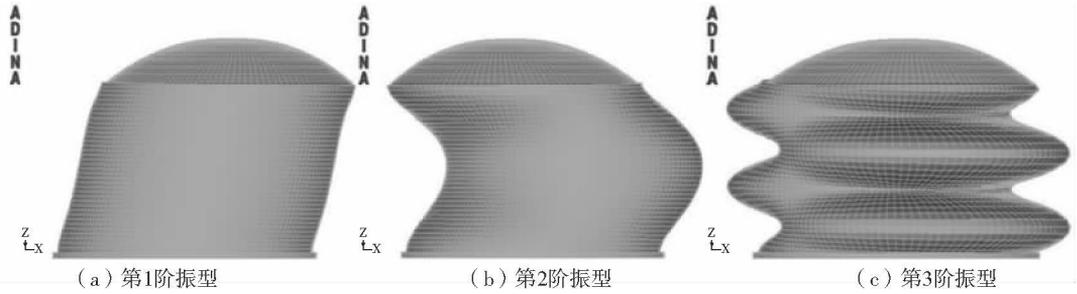


图 4 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐外罐固有振动的第 1, 2, 3 阶振型

表 1 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐固有频率及周期

振型阶数	内罐液固耦合振动		液面晃动		外罐固有振动	
	频率 /Hz	周期 /s	频率 /Hz	周期 /s	频率 /Hz	周期 /s
1	1.979	0.505	0.104	9.615	6.509	0.154
2	4.766	0.210	0.185	5.405	12.370	0.081
3	6.491	0.154	0.235	4.255	22.160	0.045

4 结 论

- (1)内罐液固耦合基本振动频率较低, 振动形式以 $\cos n\theta$ 型梁式振动为主。
- (2)液体晃动为低频的振动, 振动形式比较单一。
- (3)外罐基本振动频率较高, 振动形式也以 $\cos n\theta$ 型梁式振动为主。
- (4)内罐的液固耦合前三阶频率分别为 1.979, 4.766, 6.491 Hz, 液体晃动前三阶频率分别为 0.104, 0.185, 0.235 Hz, 外罐前三阶频率分别为 6.509, 12.37, 22.16 Hz。

参考文献:

- [1] 黄淑女, 王作乾. 我国第一座 16 万方全容 LNG 储罐 [J]. 石油工程建设, 2009, 35(4): 15-17
- [2] BATHE K J. Adina Theory and Modeling Guide VOL-UME Iiv [Z]. ADINA R&D, Inc in USA, 2004.
- [3] 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
- [4] 龙驭球, 包世华. 结构力学教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [5] HOUSNER G W. The dynamic behavior of water tanks [J]. Bulletin of the Seismological Society of America 1963, 53(1): 381-387.

(责任编辑 邹永红)