

# 支架式球形储罐子结构简化模型\*

周利剑<sup>1</sup> 孙铭阳<sup>1</sup> 王雪<sup>1</sup>

**摘要:** 近些年,地震的发生频率呈现上升趋势,而抗震研究的重要性也日益提高。作为新兴的抗震试验方法—子结构振动台试验方法,也日趋被人们所重视。采用4种方法对支架式球形储罐进行模态分析,并得到合理的简化全模型。在全模型基础上进行子结构简化模型划分求解,对比分析出从结构下两层处划分结构,为最合理的子结构简化模型形式。在支架式储罐子结构研究中,把下两层支架部分作为实验子结构,将整体划分成双质点体系进行后续抗震性能实验研究。

**关键词:** 支架式球形储罐; 简化模型; 模态分析; 子结构; 数值模拟

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.5.012

## Simplified Model Research on Framed Spherical Tank Seismic Substructure

Zhou Lijian, Sun Mingyang, Wang Xue

**Abstract:** In recent years, the frequency that the earthquakes occur shows a tendency of raising, and the importance of the seismic method is increasing gradually. As a new seismic experiment method, substructure shaking table experiment method becomes attention by people increasingly. This paper takes four methods to carry out the modal analysis of the framed spherical storage tank and get a reasonable simplified model. By deciding and solving the simplified model of the substructure on the basis of the whole model, it came to the conclusion that most reasonable simplified model form of substructure is that dividing the structure from the two layers of the structure. In the research of the substructure about the framed spherical tank, treat the two layers of the structure as test substructure, and the whole structure regard as two particle system experiments were carried out to study the seismic performance of the following.

**Key words:** framed spherical tank; simplified modal; modal analysis; substructure; numerical simulation

为了能更精确的对结构在地震响应下进行分析,越来越多的科研机构采用振动台对结构进行试验研究。振动台虽然可以反映地震对结构的影响,但是由于受到自身尺寸的限制,一般都只能进行缩比例试验,而缩尺会对结构响应产生较大影响。拟动力试验虽可以解决上述问题,但不可以进行实时控制。自从日本学者 Nakashima 提出了子结构混合实验,解决了上述问题,就有越来越多的专家学者开始研究<sup>[1-11]</sup>。

由于球形储罐有很多优越性能,在石油化工领域、环保领域中都大量应用。由于化工装备的技术水平不断提高,目前球形储罐结构向着巨型以及轻

质化方向发展。本文采用方法1、修正方法1、方法2、等效质量法以及有限元法对文献[12]中支架式球形储罐计算自振周期,通过对比分析得出最合适的全结构简化模型。并对该全结构简化模型进行子结构划分,按不同处划分并计算周期,比较分析得到最合理的划分方式。为其他相关研究提供依据。

## 1 模型基本参数

支架式球形储罐支撑结构以及壳体都采用 Q235-B 级钢材,罐内储液为水。完成了储罐的几何建模、输入材料参数以及单元选取后,需要对支架式球形储罐施加约束条件。支架式球形储罐支柱

\*基金论文:黑龙江省教育厅科学技术研究(面上)项目计划(编号:12531087)资助。

<sup>1</sup>东北石油大学土木建筑工程学院

底部与基础接触看成是刚性连接，不考虑支柱与基础间作用关系。采用全方位六个自由度约束，即三个平动自由度和三个转动自由度，液体表面设置自由液面。模型主要采用的是文献[12]中的数据，考虑罐壁与液体的耦合。

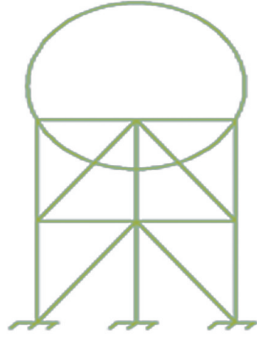


图1 结构简图



图2 单质点体系



图3 双质点体系

## 2 自振周期计算

### 2.1 方法1

按照《高耸结构设计手册》中参考《建筑结构荷载规范》的规定，支架式球形储罐结构基本周期，简化为单质点体系，可按式确定：

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{W\delta}{g}} \quad (1)$$

式中： $T_1$  为结构基本周期，s； $g$  为重力加速度， $m/s^2$ ； $\delta$  为作用在集中质点上的单位。水平力在该点引起的位移，对于筒支承结构可取弯曲变形影响确定。 $W$  为按单质点计算时，产生地震荷载的高耸球形储罐构筑物的折算总重。

对等截面支筒式及支架式储罐可近似取  $W = W_1 + W_2/4$ ；对变截面支筒式储罐可取  $W = W_1 + \sum \xi_i W_i$ ； $W_1$  为球形储罐的水柜重、水重、设备重及塔顶活荷载等； $W_2$  为球形储罐的支筒或支架重、设备重及楼梯、平台的自重、活荷载等。 $W_i$  为变截面支筒相应于高度  $h_{i-1} \sim h_i$  段加厚界面的总重。 $\xi_i$  为支筒重量移到水柜重心处的等效系数。

$$\delta = \frac{1}{3E} \sum_{i=1}^n \frac{h_i^3 - h_{i-1}^3}{I_i} \quad (2)$$

式中： $E$  为水柜支承结构材料的弹性模量； $I_i$  为各段支承结构截面的相应惯性矩； $h_i$  为由水柜重心至相应各段截面底部的高度。

### 2.2 修正方法1

本文同文献[12]对比，发现两者模型尺寸较为接近。相似的结构刚度接近，从而可得出自振周期相差不会很多。但从上述方法1的结果中发现两者存在较大差异。通过前文中关于周期折减系数的介绍，可知框架结构中斜撑、横向支承等构件对结构整体支撑有很大影响，不能忽略。下面采用文献[13]中对支架式球形储罐水平位移简化计算方法对上述方法1进行修正。

通过对不同位置支柱计算发现不论支柱摆放角度为多少，因为支柱采用的为圆筒形截面，所得到的各柱惯性矩相同。那么层间柱当量惯性矩为

$$I_c = 2I_1 + 4I_2 + 2I_3 = 8I \quad (4)$$

参考文献[13]，则一层圈梁对位移计算的贡献为：

$$\Delta\delta^* = \sum \int \frac{M_r^2}{EI_b} ds \quad (5)$$

考虑二者相等，即  $\Delta\delta' = \Delta\delta^*$ ，得出  $\eta$ 。据三维有限元分析结果，按上述原则求  $\eta = 1200$ 。

$\Delta Q_i$  则反映倾斜度  $L$  对当量剪力的影响，简化模型中各层的剪力系数为：

$$Q_i = 1 - \frac{(H + H_0 - z_i)\mu}{R_i} \quad (6)$$

按照上述简化模型，可得顶部水平单位力作用下，该处的水平位移为：

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{3EI_{ci}} (H_{di}^3 + H_{ui}^3) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{R_i}{8\eta EI_b} (Q_{i+1} H_{di+1} + Q_i H_{ui}) \quad (7)$$

### 2.3 方法2

根据《地震反应分析及实例》中计算方法求本文模型自振周期。本方法中，对支架式球形储罐进行了两质点简化，将支架式球形储罐结构转化为自由水以及固定水两部分，固定水和自由水的影响比例可按下式求得：

$$W_D = \left( \frac{T_f^2}{T_0^2} - 1 \right) W_0 \quad (8)$$

式中： $W_0$  为框架（包括塔体在内）重； $T_0$  为支架式球形储罐空水时，框架的固有周期； $T_f$  为支架式球形储罐充满水时框架的固有周期； $W_D$  为固定水的重量。

$$m_1 \ddot{y}_1 + C_1 \dot{y}_1 + k_1 y_1 + k_2 (y_1 - y_2) = -m_1 \ddot{y}_0 \quad (9)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + k_2(y_2 - y_1) = -m_2 \ddot{y}_0 \quad (10)$$

计算自振周期从强迫振动的基本公式出发, 则运动方程式 (9) 及 (10) 成立:

根据振型分析法, 则可忽略阻尼项和强迫项, 而考虑自由振动。取矩阵  $M^{-1}KM^{-1}$  的固有值为  $\lambda$ , 则固有振动周期

$$T = 2\pi\lambda^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

## 2.4 等效质量法

一般文献中, 均将液体以等效质量的方式附加在球壳壁上, 这种忽略液体晃动作用方法必定会对结果造成很大的偏差。本文将对此进行分析, 首先也利用等效质量方法建立有限元模型, 并计算了储液 50% 和 89% 球罐的自振频率, 见表 1。

## 2.5 自振周期分析

有限元模型对应的第一阶周期为结构基本自振周期, 与上述几种方法得出结果进行对比, 如表 2 所示。

通过对上述几种方法对比得出以下结论:

(1) 方法 1 和方法 2 都没有考虑其他方向支架构件对结构自振周期的影响, 而且不是针对支架式球形储罐求结构自振周期, 同时也都没有考虑液体晃动。虽然两种自振周期计算公式各不相同, 并且对于模型的简化方法也各不相同, 但最后求得的周期同模型相比相差不算很大, 而结构整体刚度差别也并不是很大。由于方法 2 主要针对满罐状态进行计算, 所以在计算空罐及 50% 储液状态下是存在比较大的误差, 仅供参考。从其他数据中可以得到的规律有: 随着储液量的增加, 周期变大。同模型相比, 在空罐及 50% 储液下等效质量法和模型数据最接近且相差非常小, 修正后的方法 1 次之, 而方法 1, 方法 2 依次偏差增大; 在满罐状态下修正后的方法 1 同模型最接近, 甚至比等效法更好, 其他偏差同之前顺序相同。

(2) 两种有限元方法比较, 在储液量 50% 和 89% 时, 有限元模型的自振周期比等效质量方法计算的自振周期分别小 4.44%、8.17%。说明考虑液体晃动后, 减小了球罐的自振周期, 但是对于球罐自振周期影响都不大, 可以对结构近似看成等效质量体系来进行简化计算;

(3) 而方法 1 之所以计算结果存在一定误差, 原因在于方法 1 并未考虑斜拉杆以及横向支承等结构构件对结构整体造成的刚度改变, 从而影响自振周期。本结构体系中斜拉杆以及横向支承设置很多, 从而对结果具有一定影响;

(4) 对方法 1 进行修正后, 同有限元结果最接近, 空罐时相差 15%, 储水 50% 时相差 7.6%, 储水 89% 时相差 3.8%, 随着液体的增多, 周期也越来越接近; 通过与规范和文献的对比, 以及结果分析, 可以验证有限元模型的可靠性。

## 3 子结构划分方式比较

该结构中液体看成等效质量进行动力响应计算是可行的, 忽略结构中液体的晃动。将上述的单质点结构体系划分成双质点结构体系, 根据上文提出的储液罐二质点简化力学模型及子结构振动台试验原理, 可将储液罐进行如下划分: 把支承结构从下部某处切开, 下部支承结构部分作为试验子结构; 罐体以及其余支承结构部分作为数值子结构, 球形储罐子结构划分示意图, 见图 5。

其中  $M_E$ 、 $K_E$  分别是试验子结构的质量、刚度,  $M_N$ 、 $K_N$  分别是数值子结构的质量、刚度, 试验子结构质量取  $M_E = m_1$ , 数值子结构质量取  $M_N = m_c$ 。

代入具体模型数值, 首先将结构从下三层处划分为两部分, 公式中各项数据都采用了修正方法 1 的计算方法。将上文中质量及刚度比值带入到结构动力学公式 (12) 中:

$$(k_1 + k_2 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - k_2^2 = 0 \quad (12)$$

表 1 等效质量法不同储液下模型前十阶固有频率

频数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
储液 50%	频率/Hz	0.510 8	0.510 8	1.616 5	5.004	5.004	5.346 2	9.031 8	9.031 8	11.851	15.224
	周期/s	1.958	1.958	0.619	0.200	0.200	0.187	0.111	0.111	0.084	0.066
储液 85%	频率/Hz	0.413 8	0.413 8	1.314 3	4.341 2	4.371 1	4.371 1	8.371 2	8.371 2	11.77	15.115
	周期/s	2.417	2.417	0.761	0.231	0.229	0.229	0.119	0.119	0.085	0.066

表 2 各种方法计算支架式球形储罐的基本自振周期

储液状态	本文模型	等效质量法		方法 1		修正方法 1		方法 2	
	周期/s	周期/s	误差/%	周期/s	误差/%	周期/s	误差/%	周期/s	误差/%
空罐	0.929	0.929	0	1.148	23.57	1.088	17.12	1.437	54.68
储液 50%	2.049	1.958	4.44	2.368	15.56	2.245	9.57	2.864	39.78
储液 85%	2.631	2.416	8.17	2.935	11.55	2.782	5.74	3.525	33.98

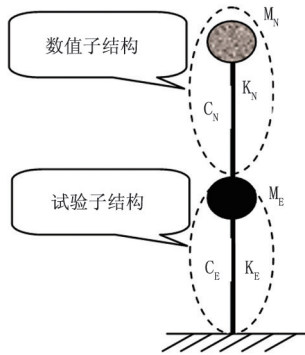


图5 球形储罐子结构示意图

得到：

$$(1.191k_1 - \omega^2 m_1)(0.191k_1 - 80.87\omega^2 m_1) - 0.0365k_1^2 = 0$$

将公式展开得到：

$$(\omega^2)^2 - 1.1934 \frac{k_1}{m_1} \omega^2 + 0.00236 \frac{k_1^2}{m_1^2} = 0$$

$$\frac{k_1}{m_1} = 2646.828 \text{ N/kg} \cdot \text{m}$$

解得： $\omega_1 = 2.27$      $\omega_2 = 56.042$

$$T_1 = 2\pi\omega_1^{-1} = 2 \times 3.14 / 2.27 = 2.768 \text{ 秒}$$

$$T_2 = 2\pi\omega_2^{-1} = 2 \times 3.14 / 56.042 = 0.112 \text{ 秒}$$

为了找到最合理的支架式球形储罐子结构划分方式，下面将分别从下2层处至下6层处分别计算比较，具体数据详见下表3。

表3 按不同位置划分为两质点结构的自振周期

	下2层	下4层	下5层	下6层
$\delta_1 (\times 10^{-8} \text{ m/N})$	2.185	5.557	7.243	8.929
$\delta_2 (\times 10^{-8} \text{ m/N})$	22.479	19.107	17.421	15.735
$m_1 (\times 10^3 \text{ kg})$	6.74	13.48	16.85	20.22
$m_2 (\times 10^3 \text{ kg})$	820.97	814.23	810.86	807.49
$\frac{\delta_2}{\delta_1}$	10.288	3.438	2.405	1.762
$\frac{m_2}{m_1}$	121.806	60.403	48.122	39.935
$\frac{k_1}{m_1} (\text{N/m} \cdot \text{kg})$	7 233.93	1 367.95	834.818	553.88
$\omega_1^2$	5.261	5.098	5.086	5.005
$T_1 (\text{s})$	2.739	2.783	2.786	2.809

由表3可知，采用结构动力学的计算方法对结构的不同划分处进行计算得到以下几个结论：(1) 随着划分层数增加，即高度增加，划分后的简化模型基本自振周期是增加的，但增加的幅度都不大。(2) 随着高度的增加，简化模型自振周期同有限元结果比较发现偏差是增大的，从4.1%到6.8%，但相差都在10%以内。(3) 几种情况相比较，可知下2层处进行划分误差最小，且下2层将来作为试验子结构，可以以更接近原尺寸的比例放在振动台上进行试验，获得更精确的数据。因此，在无阻碍的

情况下，建议对于支架式球形储罐在子结构划分时从下2层处对结构进行划分，将储罐简化为一个两质点的结构体系。

#### 4 结论

本文对不同规范中对支架式球形储罐的简化模型以及该结构的有限元模型进行模态分析，对结构最优简化模型进行子结构划分，得到以下结论：

(1) 随着储液量的增加，周期变大。同模型相比，在空罐及50%储液下等效质量法和模型数据最接近且相差非常小，修正后的方法1次之，而方法1，方法2依次偏差增大；在满罐状态下修正后的方法1同模型最接近。

(2) 两种有限元方法比较，在储液量50%和89%时，有限元模型的自振周期比等效质量方法计算的自振周期分别小4.44%、8.17%。说明考虑液体晃动后，减小了球罐的自振周期，但是对于球罐自振周期影响都不大，可以对结构近似看成等效质量体系来进行简化计算。

(3) 随着高度的增加，简化模型自振周期同有限元果比较发现偏差是增大的，从4.1%到6.8%，但相差都在10%以内。

(4) 可知下2层处进行划分误差最小，且下2层将来作为试验子结构，可以以更接近原尺寸的比例放在振动台上进行试验，获得更精确的数据。

#### 参考文献

- [1] 李海洋, 王向英, 田石柱. 地震模拟振动台子结构混合试验方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26 (2): 75-80.
- [2] Wu B, Bao H, Ou J. et al. Stability and accuracy analysis of central difference method for real-time substructure testing [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005. 34: 705-718.
- [3] Wu B, Xu G, Wang Q. Operator-splitting method for real-time substructure testing[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35 (3): 705-718.
- [4] Cheng Chen, Ricles J M. Development of direct integration algorithms for structural dynamics using discrete control theory[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134 (8): 676-683.
- [5] Cheng Chen, Ricles J M. Stability analysis of direct integration algorithms applied to nonlinear structural dynamics[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134 (9): 703-711.
- [6] Cheng Chen, Ricles J M. Real-time hybrid testing using the unconditionally stable explicit CR integration algorithm [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009, 38: 23-44.

(下转第49页)