

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201906048

# 立式锚固储液罐动力分析可视化程序开发与应用\*

崔春义<sup>1,2</sup>, 厉超吉<sup>1</sup>, 赵飞翔<sup>1</sup>, 孟 坤<sup>1</sup>, 梁志孟<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学土木工程系, 辽宁 大连 116026; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022)

**摘要:** 基于流体及储液罐动力相互作用理论, 建立与微分方程初值问题等价的积分表达式, 推导出储液罐-流体相互作用体系特征方程和动力响应求解公式。在此基础上, 采用面向对象的VB与Fortran混合编译方法, 基于VB的GUI对主界面和数据输入窗口进行设置, 通过菜单编译器及多窗体的耦合实现菜单名称设置及窗口调用功能, 开发了一款立式圆柱形储液罐动力有限元分析程序PSAST V1.0。同时利用该程序对储液罐-流体相互作用体系进行振动模态及地震作用下的动力响应分析, 通过与ADINA计算结果及解析解对比, 验证了本文所开发有限元程序应用于储液罐-流体相互作用体系动力分析的准确性和可靠性。

**关键词:** 储液罐-流体相互作用; 储液罐; 振动模态; 地震作用; 动力响应

**中图分类号:** TU311.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1177-07

## Development and Application of a Visualized Program for Dynamic Analysis of Anchored Liquid Storage Tank

CUI Chunyi<sup>1,2</sup>, LI Chaoji<sup>1</sup>, ZHAO Feixiang<sup>1</sup>, MENG Kun<sup>1</sup>, LIANG Zhimeng<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** Based on the coupled dynamic interaction theory of fluid and tank, an integral expression equivalent to the initial value problem of the differential equation is established, and the characteristic equation and dynamic response formula for tank-fluid interaction system are derived. Based on the object-oriented VB and Fortran hybrid compiling method, a visualized program for dynamic analysis of an anchored cylinder liquid storage tank PSAST V1.0 is developed by setting the main interface and input windows in terms of VB GUI, which implements the primary function of calling subroutines. Furthermore, the program is employed to analyze the vibration mode and dynamic response of a tank-fluid interaction system under earthquake. By comparing with ADINA calculation results and analytical solutions, the accuracy and reliability of the developed program in this paper for dynamic analysis of the tank-fluid interaction system are verified.

**Keywords:** tank-fluid interaction; liquid storage tank; vibration mode; earthquake action; dynamic response

\* 收稿日期: 2019-06-19; 修回日期: 2019-08-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50809009)、中央高校基本科研业务费专项资金(3132019601)、城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放基金项目(201501)资助

作者简介: 崔春义(1978—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土工程数值计算方法研究。E-mail: cuichunyi@dlmu.edu.cn

## 引言

立式储液罐作为一种储存有害有毒、易燃易爆等液体介质的重要存储结构,其动力特性的研究对储罐抗震设计具有重要的理论意义和工程指导作用。立式储罐系统是典型的非线性多场耦合问题,动力响应十分复杂,且储罐若在地震中遭到破坏,会导致严重后果。为此,国内外诸多学者对储罐结构地震动力响应展开相关研究工作,采用的方法主要包括解析方法和数值模拟两类。

在储罐-流体相互作用体系解析研究方面,A.S. Veletsos<sup>[1]</sup>最早提出了假定模态法,将储罐-流体体系简化为单自由度系统,流体惯性采用附加质量法考虑,得到柔性罐壁上液动压力的分布规律。陈世一<sup>[2]</sup>采用轴对称半解析元法,将地基简化成弹性半空间模型,分析了液-罐-土动态相互作用。此后,唐友刚等<sup>[3]</sup>通过建立轴对称半解析模型,考虑弹性地基土影响并分析了储罐提离作用。S. Pappaspyrou等<sup>[4]</sup>采用速度势理论,推导出一种用于计算储液晃动效应的数学解析模型,并分析了外部激励对该效应的影响。L.A. Patkas等<sup>[5-6]</sup>采用速度势理论推导出了球形储罐和水平圆柱形储罐线性晃动效应的数学模型,并对其进行地震动响应研究。S. Dutta等<sup>[7]</sup>把地基土简化成弹簧与阻尼元件,通过三维半解析半数值方法研究了地基土对储罐冲击横向剪切与扭转作用的影响。陈建胡等<sup>[8]</sup>采用Haroun-Housner模型,将地基阻抗简化为双自由度集中参数模型,对地基-储罐-流体动力相互作用体系进行分析。S.M. Hasheminejad等<sup>[9]</sup>采用线性势流理论及 Mehler-Fock 变换求解储罐储液晃动问题,并研究了不同储液高度对动液压力的影响。

在储罐-流体相互作用体系数值模拟方面,邓民宪等<sup>[10]</sup>建立储罐-流体相互作用体系的三维数值计算模型,对常压立式拱顶储罐地震动力响应进行分析,该方法由于计算量大无法广泛应用于实际工程中。E.Z. Ali<sup>[11]</sup>开发了一款非锚固罐动力响应分析有限元程序,对非锚固罐的非线性地震动力响应进行研究。M.K. Kima等<sup>[12]</sup>和K.H. Choa等<sup>[13]</sup>通过有限元-边界元耦合方法,进行水平地震力下三维罐液-罐体-土体系的动力时程分析。J. Schotte等<sup>[14]</sup>基于有限元方法,研究了重力对固-液耦合体系模态的影响。沈建民<sup>[15]</sup>基于ADINA建立了大型非锚固储罐-

流体数值计算模型,并采用时程法分析了体系的动水压力分布等。R. Livaoglu等<sup>[16]</sup>通过建立三维有限元数值模型,考虑了罐液晃动对整个体系的贡献,对储罐动力性能的影响因素进行较全面地分析。周利剑<sup>[17]</sup>、范喜哲等<sup>[18]</sup>、郑天心等<sup>[19]</sup>和孙建刚等<sup>[20]</sup>通过建立考虑液体晃动和罐底提离效应的储液罐有限元模型,将地基简化成有限域线弹性体,分别进行了模态分析、水平地震和竖向地震作用下有限元数值分析,探讨了储液罐地震作用下的受力变形特性与破坏机理。李文等<sup>[21]</sup>利用ANSYS软件对不同地震波激励下储罐的动力响应进行了分析。

综上所述,立式锚固储液罐在地震激励下表现为弹性罐体与液体之间的耦合运动,其涉及复杂动力耦合特性。这使得采用大型有限元分析软件对储液罐系统进行动力分析时所需计算消耗和硬件需求极大。基于此点考虑,本文依据储液罐动力简化分析理论,开发了一款面向对象的储罐-罐液相互作用体系动力计算有限元程序 PSAST V1.0,并在此基础上对储罐-流体相互作用体系进行了相关动力分析,为储液罐的抗震设计提供理论参考。

## 1 储液罐动力分析理论

### 1.1 储液罐内流体运动方程

基于理想流体假定和牛顿第二定律的流体运动欧拉方程为:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho X \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z \quad (3)$$

式中, $u$ 、 $v$ 、 $w$ 分别为流体空间内任意点处沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的流速; $\rho$ 为该点处的流体密度; $p$ 为该点处水压力; $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 分别为质量力沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的分力; $t$ 为时间。

根据流体运动中的质量守恒定律可建立流体的连续性方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$\varphi$ 为满足 $u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ ,  $v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}$ ,  $w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$ 的速度势,

则将 $\varphi$ 代入式(4)可得:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

将速度势函数  $\varphi$  代入式(1)~(3)可得:

$$p = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \rho g z \quad (6)$$

式中,  $g$  为重力加速度。

当  $z=0$  时, 即在储液罐内流体的自由表面处, 式(6)可化为:

$$p + \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

## 1.2 储液罐内流体运动边界条件

流体线性自由面边界条件:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

流体与储液罐界面边界条件:

$$\left( \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=R} = 0 \quad (9)$$

式中,  $R$  为储液罐半径。

储液罐底部刚性边界条件:

$$\left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)_{z=-H} = 0 \quad (10)$$

式中,  $H$  为储液罐高度。

建立流体的变分泛函方程为:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} (T - \Pi - W) dt \quad (11)$$

式中,  $T$ 、 $\Pi$  和  $W$  分别为流体的动能、势能和流体做功。

根据式(5)及边界条件式(8)和式(9), 可将式(11)表示为:

$$I = \frac{1}{2} \int_V \nabla^2 p dv - \frac{1}{2g} \int_F \left( \frac{\partial p}{\partial t} \right)^2 ds - \rho \frac{1}{2} \int_{\Sigma} p \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} ds = I_1 - I_2 - I_3 \quad (12)$$

对于典型的流体二维单元模型(图1), 单元中心与储液罐轴的距离为  $x_0$ 。则任意点处流体压力可表示为:

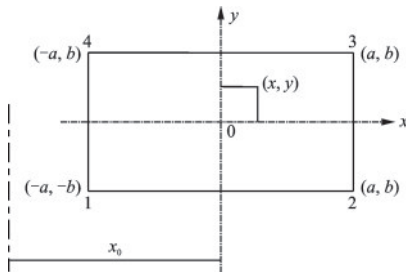


图1 流体单元坐标

Fig.1 Fluid element model coordinate

$$p(x, y) = [N] \{ \delta_p \} \quad (13)$$

式中,  $[N]$ 、 $\{ \delta_p \}$  分别为形函数和节点力向量。

将压力展开并代入式(12)可得:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{2} \{ \delta_p \}^T [K_e] \{ \delta_p \} \\ I_2 &= \frac{1}{2} \{ \dot{\delta}_p \}^T [M_e] \{ \dot{\delta}_p \} \\ I_3 &= \rho \{ \delta_p \}^T [S_e] \{ \ddot{\delta}'_u \} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中,  $[K_e]$  为单元刚度矩阵;  $[M_e]$  为单元质量矩阵;  $[S_e]$  为耦合效应力矩阵;  $\{ \dot{\delta}_p \}$  为单元节点位移向量;  $\{ \ddot{\delta}'_u \}$  为储液罐壳体节点加速度向量。

将式(14)代入式(12), 并由式(12)的第一阶变分为零可得出考虑储液罐-流体相互作用的流体运动方程为:

$$[K_f] \{ \delta_p \} + [M_f] \{ \ddot{\delta}_p \} - [S] \{ \ddot{\delta}'_u \} = 0 \quad (15)$$

式中,  $[M_f]$  和  $[K_f]$  分别表示流体整体质量矩阵和整体刚度矩阵;  $[S]$  为耦合效应力矩阵;  $\{ \ddot{\delta}_p \}$  为单元节点加速度向量。

对无阻尼条件下储液罐-流体体系的运动方程进行求解可得流体的特征方程为:

$$-\omega^2 [[M_f] + [S][K_f]^{-1}[S]^T] \{ \delta_p \} + [K_f] \{ \delta_p \} = 0 \quad (16)$$

储液罐结构受迫振动的运动方程为:

$$\left. \begin{aligned} [M] \{ \ddot{U}_d \} + [K] \{ U_d \} &= \{ P_{ef} \} f(t) \\ \{ P_{ef} \} &= \text{Peak} \cdot [M_{ef}] \cdot \{ 0 \quad -1 \quad 1 \quad 0 \}^T \\ [M_{ef}] &= \begin{bmatrix} [M_b] + [M] & \begin{bmatrix} [I_4] \\ [I_4] \\ \vdots \\ [I_4] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中,  $[M]$ 、 $[K]$  分别为储液罐结构非基础节点的质量和刚度矩阵;  $\{ U_d \}$  为结构加速度响应; Peak 为加速度幅值;  $f(t)$  为无量纲时间函数;  $[M_b]$  为基础节点的质量矩阵;  $[I_4]$  为  $4 \times 4$  的单位矩阵。

$$\{ U_d \} = [X] \{ A \} \quad \{ \ddot{U}_d \} = [X] \{ \ddot{A} \} \quad (18)$$

式中,  $[X]$  为  $(n \times k)$  模态矩阵,  $n$  代表自由度,  $k$  代表模态数;  $\{ A \}$  为模态参与因子。

利用主振型的正交性并通过时间做 Duhamel 积分可得:

$$A(i) = \frac{G_p(i)}{G_M(i, i) \omega(i)} \int_0^t f(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau \quad (19)$$

式中,  $i$  表示模态阶数;  $\{ G_p \} = [X]^T \{ P_{ef} \}$ ;  $[G_M]$  满足方程  $[X]^T [K] [X] = [\Omega^2] [G_M]$ ,  $[\Omega^2]$  为对角矩阵特征值的平方。

将式(19)及模态矩阵代入式(18)可得结构受迫振动时的动力响应。

## 2 程序开发与功能实现

### 2.1 储罐动力响应分析的程序结构化

采用VB和Fortran语言混合编译方法,基于上述储罐-流体动力分析理论,建立储罐-流体相互作用体系有限元程序,其流程如图2所示。

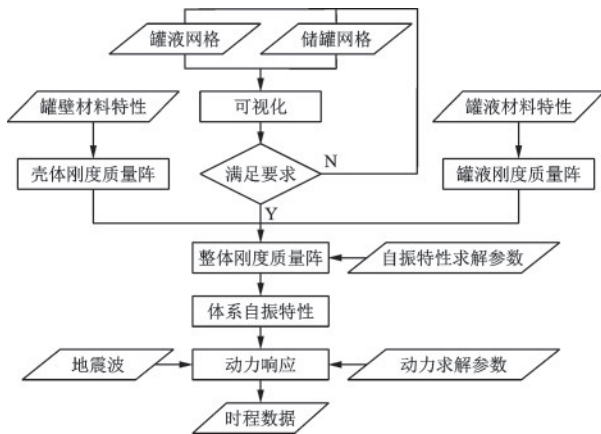


图2 动力分析程序流程

Fig.2 Flowchart of the program for dynamic analysis

### 2.2 程序编写过程与步骤

程序主要菜单项及储罐参数输入菜单分别如图3、图4所示。罐壁壳体单元程序中被离散化为一定数量的环形单元。罐液以附加质量法考虑流体作用,罐液的坐标系和离散化编号方案分别如图5、图6所示。网格可视化功能使用PictureBox控件实现,并通过定义网格单元系数控制网格密度。



图3 程序菜单

Fig.3 Program menu

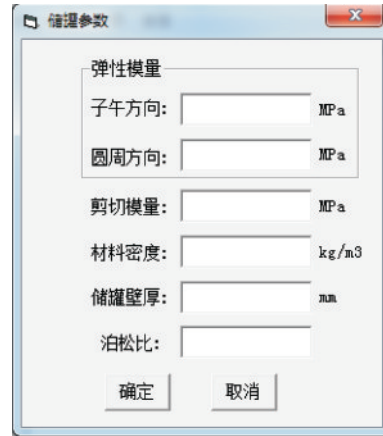


图4 罐壁材料参数窗口

Fig.4 Input window for material parameters

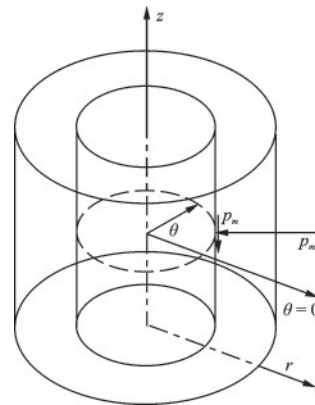


图5 流体单元的柱坐标系统

Fig.5 Cylindrical coordinate model of fluid element

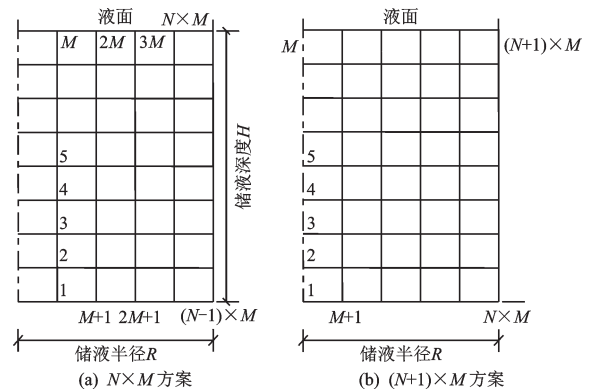


图6 流体单元编号方案

Fig.6 Number method of fluid element

## 3 程序算例分析

### 3.1 储罐-流体体系自振特性分析

储罐模型采用无穹顶储罐,直径为18 m,高度为12 m,储罐壁厚为15 mm。罐壁弹性模量、泊松

比和密度分别为 206.8 GPa、0.3 和 7 850 kg/m<sup>3</sup>，罐液的密度为 1 000 kg/m<sup>3</sup>。基于本文开发的有限元程序建立的储罐模型如图 7 所示。储罐内罐液高度分别取 12 m(满罐)、6 m(半罐)和 0 m(空罐)进行自振特性分析。

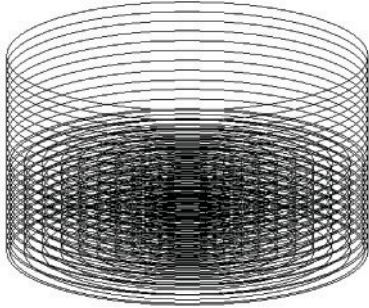


图 7 储罐有限元模型

Fig.7 The finite element model of storage tank

基于本文有限元程序计算的流体高度为 12 m(满罐)时储罐-罐液相互作用体系前 5 阶自振频率与姜英明<sup>[22]</sup>解析解及 ADINA 有限元分析平台计算结果的对比见表 1。

表 1 储罐自振频率

Table 1 Natural frequency of storage tank

振型阶次	自振频率/Hz		
	本文程序	解析解	ADINA
1	0.987	0.985	0.823
2	1.814	1.781	1.616
3	2.472	2.411	2.058
4	2.981	2.838	2.657
5	3.474	3.223	2.934

由表 1 可知,本文开发的有限元程序 PSAST V1.0 计算得到的储罐体系前 5 阶自振频率计算结果与解析解答吻合良好。这说明本文程序在对储罐-罐液体系进行振动特性分析时具有良好的精度和可靠性。此外,相对于 ADINA 程序计算结果而言,两者均偏大。这是因为 ADINA 程序三维离散的自由度较多,整体计算刚度偏小,但其对应计算消耗也更高。

本文所开发有限元程序 PSAST V1.0 计算所得不同液面高度情况下的储罐-罐液相互作用体系前五阶自振频率如图 8 所示。储罐内液面越高,储罐-罐液相互作用体系的整体刚度越大,储液罐体系自振频率越小,这与文献[21,23-24]所述规律一致。

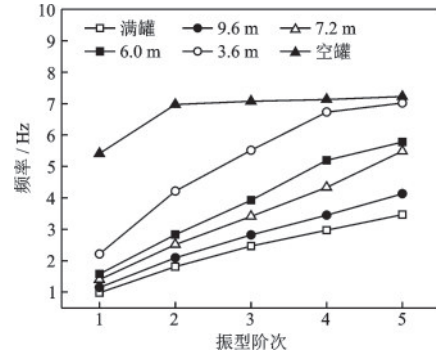


图 8 不同液高计算所得储罐自振频率

Fig.8 Natural vibration frequencies of storage tanks calculated with different liquid heights

### 3.2 储罐-罐液体系动力响应分析

基于所开发有限元程序 PSAST V1.0,针对储罐-罐液相互作用体系进行动力时程响应分析,所采用的 El-Centro 地震波加速度曲线如图 9 所示。

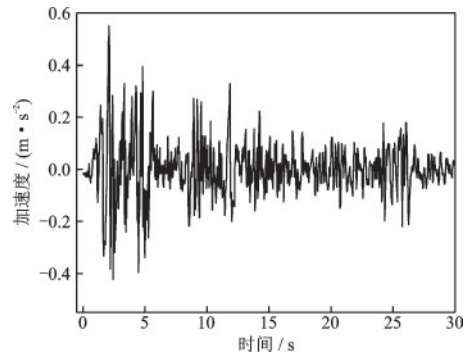


图 9 El-Centro 地震波加速度时程

Fig.9 Seismic accelerations time history of El-Centro wave

在上述既定水平地震力作用下,PSAST V1.0 程序计算所得位移峰值点处径向和轴向位移分量的动力时程曲线与 ADINA 计算结果对比情况如图 10 所示。由图可见,本文程序计算所得径向和轴向位移峰值分别为 6.6 mm(2.4 s)和 0.1 mm(2.4 s),基于 ADINA 计算所得径向和轴向位移峰值分别为 6.2 mm(2.2 s)和 0.6 mm(2.2 s),两者计算结果吻合良好,即位移峰值大小和时刻都较为接近。这亦验证了所开发 PSAST V1.0 程序计算储罐-罐液体系动力响应具有良好的精度与可靠性。

PSAST V1.0 程序和 ADINA 程序计算所得轴向、径向位移峰值沿储罐高度分布的对比情况如图 11 所示。由图可见,两者计算结果接近,本文开发程序计算得出的储罐响应位移峰值较 ADINA 计算所得结果偏大,即 PSAST V1.0 程序计算结果偏于安全。

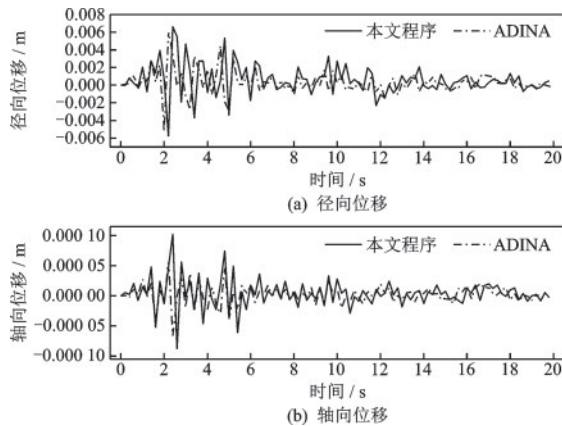


图10 径向和轴向位移时程曲线对比

Fig.10 Comparison of radial and axial displacement time history curves

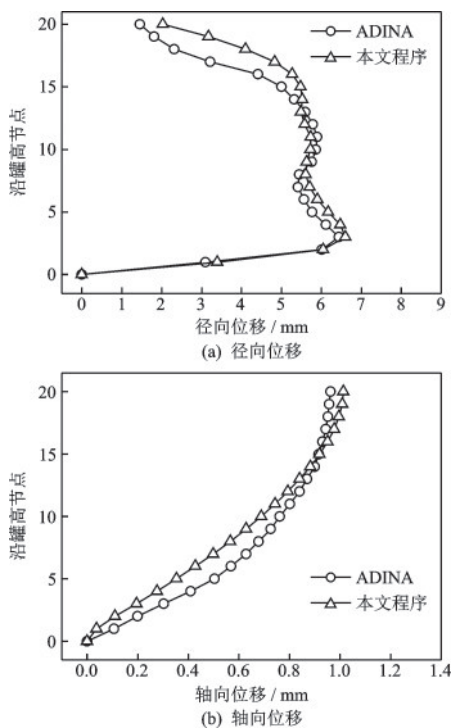


图11 径向、轴向位移峰值沿储罐高度分布曲线

Fig.11 Distribution curves of radial and axial displacement peaks along tank height

## 4 结论

依据储罐-流体动力耦合理论,采用VB和Fortran混合编译方法,开发了一款面向对象的储罐-罐液相互作用体系动力计算有限元程序PSAST V1.0,并利用该程序对储罐-罐液相互作用体系进行了动力分析,在此基础上通过与ADINA计算结果和相关解析解进行对比验证,计算结果表明:

(1)PSAST V1.0程序计算所得储罐体系前5

阶自振频率计算结果与解析解答吻合。同时,计算所得储罐体位移峰值点处径向和轴向位移分量的动力时程曲线与ADINA计算结果比较,其位移峰值大小和时刻均较为接近。

(2)PSAST V1.0程序计算所得储罐动力响应的位移峰值较ADINA计算所得结果偏大,说明其计算结果相对保守,是偏于安全的。

(3)程序变参数分析结果表明,储罐内液面越高,储罐-罐液相互作用体系整体刚度越大,储液罐体系自振频率越小,这与既有文献研究结果所述规律一致。

(4)PSAST V1.0程序计算储罐-罐体体系动力响应具有良好的精度与可靠性,且相对于大型有限元分析程序,具有更小计算消耗和硬件需求。此外,该程序可作为开发大型无锚固储罐体系计算分析平台,从而进一步考虑地基变形和界面脱空的影响。

## 参考文献:

- [1] Veletsos A S. Seismic effects in flexible liquid storage tanks[C]//Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering. Rome:[s.n.],1974: 630-639.
- [2] 陈世一. 圆柱形储液罐的液-罐-土动态相互作用分析[D]. 北京:石油大学,1992.  
Chen Sh Y. Analysis of liquid-tank-soil dynamic interaction in cylindrical liquid storage tank [D]. Beijing: Petroleum University, 1992. (in Chinese)
- [3] 唐友刚,董艳秋,项中权,等. 储液罐液-固-土耦合非线性翘离振动分析[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(1): 102-109.  
Tang Y G, Dong Y Q, Xiang Zh Q, et al. Non-linear vibration analysis of fluid-solid-soil coupling for uplift of liquid storage tanks[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(1): 102-109. (in Chinese)
- [4] Pappaspyrou S, Valougeorgis D, Karamanos S A. Refined solutions of externally induced sloshing in half-full spherical containers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(12):1369-1379.
- [5] Patkas L A, Platyrrachos M A. Sloshing effects on the seismic design of horizontal-cylindrical and spherical industrial vessels[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2006, 128: 328-340.
- [6] Patkas L A, Platyrrachos M A. Variational solutions for externally induced sloshing in horizontal-cylindrical and spherical vessels [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(6): 641-655.
- [7] Dutta S, Mandal A, Dutta S C. Soil-structure interac-

- tion in dynamic behaviour of elevated tanks with alternate frame staging configurations[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 277: 825-853.
- [8] 陈建胡,陈玲俐,叶志明.立式锚固储液罐与地基相互作用地震反应分析[J].*油气田地面工程*,2008,27(6): 7-8.  
Cheng J H, Cheng L L, Ye Zh M. Seismic response analysis on the interaction between vertical anchored fluid-storage tank and the foundation [J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2008, 27(6):7-8. (in Chinese)
- [9] Hasheminejad S M, Moshfzadeh A, Jarrahi M. Transient sloshing in partially filled laterally excited spherical vessels[J]. *Journal of Engineering Mechanics*,2013,139 ( 7 ): 802-813.
- [10] 邓民宪,张勇凯,师俊平.常压立式储油罐地震应力的有限元分析[J].*地震学报*,2000,23(3):312-320.  
Deng M X, Zhang Y K, Shi J P. Finite element analysis of seismic stress of atmospheric pressure vertical storage tank[J]. *Journal of Seismology*, 2000, 23(3): 312-320. (in Chinese)
- [11] Ali E Z. Nonlinear time-dependent seismic response of unanchored liquid storage tanks[D]. California: University of California, 2000.
- [12] Kima M K, Lima Y M, Choa S Y, et al. Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks using the BE-FE-BE coupling technique [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22: 1151-1158.
- [13] Choa K H, Kima M K, Lima Y M, et al. Seismic response of base-isolated liquid storage tanks considering fluid-structure-soil interaction in time domain [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24: 839-852.
- [14] Schotte J, Ohayon R. Effect of gravity on a free-free elastic tank partially filled with incompressible liquid[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2003, 18:215-226.
- [15] 沈建民.大型油罐的静强度及动力响应分析[D].杭州:浙江大学,2006.  
Shen J M. Study on static strength and dynamic response of the large oil storage tank[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [16] Livaoglua R, Dogangun A. Effect of foundation embedment on seismic behavior of elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27:855-863.
- [17] 周利剑.水平地震激励下立式储罐与地基相互作用动力响应分析[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.  
Zhou L J. Earthquake response analysis of liquid storage tanks under lateral excitations with soil-structure interaction [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)
- [18] 范喜哲,郑天心,王伟,等.地震作用下立式储液罐罐壁“象足”变形仿真分析[J].*地震工程与工程振动*,2007, 27(3):104-109.  
Fan X Zh, Zheng T X, Wang W, et al. Numerical analysis of elephant foot bulging for elevated liquid-storage tank under seismic ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 27(3): 104-109. (in Chinese)
- [19] 郑天心,王伟,吴灵宇.考虑液体晃动和罐底脱离储液罐的研究[J].*哈尔滨工业大学学报*,2007,39(2): 173-176.  
Zheng T X, Wang W, Wu L Y. Analysis of seismic response of liquid-storage elevated tank involving fluid sloshing and the uplift of tank bottom [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(2): 173-176. (in Chinese)
- [20] 孙建刚,崔利富,张营.全容式LNG储罐地震响应数值模拟研究[C]//中国国际建筑科技大会论文集.北京:科学出版社,2010:225-230.  
Sun J G, Cui L F, Zhang Y. Numerical simulation of seismic response of full capacity LNG storage tank [C]//Proceedings of China International Building Technology Conference. Beijing: Science Press, 2010: 225-230. (in Chinese)
- [21] 李文,张彬.内罐泄漏条件下LNG储罐预应力混凝土外墙时程分析[J].*科学技术与工程*,2010,10(14): 3349-3354.  
Li W, Zhang B. Time history analysis to prestressed concrete exterior wall of LNG storage tank with in condition of interior tank leak[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(14): 3349-3354. (in Chinese)
- [22] 姜英明.立式圆筒形储罐自振频率的计算[J].*化工设备与管道*,2004,41(6):35-39. (in Chinese)  
Jiang Y M. Calculation of natural vibration frequencies for vertical cylindrical storage tanks[J]. *Process Equipment and Piping*, 2004, 41(6):35-39. (in Chinese)
- [23] 孙艳.考虑液固耦合立式储液罐地震反应数值分析[D].大连:大连海事大学,2015.  
Sun Y. Numerical analysis of vertical liquid-solid coupling liquid storage tank subject to earthquake excitation [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese)
- [24] 周利剑.水平地震激励下立式储罐与地基相互作用动力响应分析[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.  
Zhou L J. Earthquake response analysis of liquid storage tanks under lateral excitations with soil-structure interaction[D] Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)

(本文责编:池营营)