

# 列车制动状态储油罐瞬态响应分析

孙利民<sup>1</sup>, 赵 勇<sup>1</sup>, 张庆华<sup>2</sup>

(1. 郑州大学工程力学系, 河南 郑州 450002; 2. 上海同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘 要:** 在建立储油罐液固耦合振动方程基础上, 采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 对制动状态下铁路车载容器的动态响应问题进行了实例分析和计算. 建立了车载油罐的液固耦合系统有限元模型, 并且对列车制动条件下的满载和空载储油罐进行了瞬态仿真分析, 绘出了制动时油罐不同时刻的变形图和均方应力最大点的幅值图, 将满载和空载的车载储油罐分析结果进行了比较. 分析结果可以为储油罐的结构动力学设计提供参考, 为提高车载储油罐的可靠性提供数值依据.

**关键词:** 流固耦合; 车载容器; ANSYS; 油料运输

**中图分类号:** O 351 **文献标识码:** A

## 0 引言

随着国民经济的发展, 对易燃易爆等液态介质如汽油、柴油等物质等需求量迅速增加, 并且这些危险品多数通过车辆运输, 以往对车载容器的计算仅仅局限于结构静力学的研究和分析, 已经不适应车辆运行安全性的要求. 特别是伴随着近几年来火车的大提速, 容器将会受到强烈的外载荷作用, 液体晃动问题将会变得十分突出, 液体晃动所产生的低频横振将会对车辆的运行的稳定性产生很大的影响, 同时在工程实际中, 越来越倾向于采用具有薄壁、轻质和高强等特点的结构, 晃动液体与结构的耦合振动将是一个非常重要的问题, 液固耦合振动一方面可能会导致系统的动力不稳定, 另一方面容器中液体的大幅晃动会对容器产生显著的附加动压力, 以至于造成结构破坏, 因此有必要对这一类问题进行详细分析, 但这方面的资料并不多. 1953 年 Niordson F. I.<sup>[1]</sup> 比较早的研究过储液容器的振动问题; 国内的研究主要关注立式储油罐的抵抗地震问题, 温德超等<sup>[2]</sup> 对储液罐抗震的研究进展进行过综述; 孙利民等<sup>[3]</sup> 曾应用液固耦合原理研究过铁路卧式圆形储油罐(卧式罐)动力学特征问题, 对装载不同深度有自由液面液体的卧式罐进行了模态分析与计算, 得到了不同液体深度下油罐的固有频率并且绘出了其前四阶固有频率的振形图, 得出其固有频率值随液体深度的增加而逐渐降低的结论. 随

着有限元数值计算方法的发展和大型通用有限元软件的开发, 可以利用数值模拟计算的方法代替试验方法来研究液固耦合动力学问题. 笔者利用有限元软件 ANSYS8.1, 计算了 HG60/22-3 型车载储油罐在制动状态下的动力学响应, 为车载储油罐的结构动态设计提供了基本参数. 其中, 假设车载液体为无黏、无旋、不可压缩的液体, 罐体为线弹性.

## 1 液固耦合的数值解法

采用伽辽金法建立液固耦合系统的有限元方程<sup>[4]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & 0 \\ -\mathbf{Q}^T & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{a}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \frac{1}{\rho_f} \mathbf{Q} \\ 0 & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{p}$  为流体节点压力向量;  $\mathbf{a}$  为固体节点位移向量;  $\mathbf{Q}$  为液固耦合矩阵;  $\mathbf{M}_f$  和  $\mathbf{K}_f$  分别为液体质量矩阵和液体刚度矩阵;  $\mathbf{M}_s$  和  $\mathbf{K}_s$  分别为罐体质量矩阵和罐体刚度矩阵;  $\mathbf{F}_s$  为罐体外载荷向量;  $\rho_f$  为液体质量密度. 在列车制动条件下列车的运动加速度  $\mathbf{a}(t)$  对流体和固体都引起附加的载荷项.

对固体来说, 其运动可以分解为两部分<sup>[5]</sup>:

$$\mathbf{a}(t) = \mathbf{a}_r(t) + \mathbf{a}_s(t) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{a}_r(t)$  是罐体相对于列车的相对加速度,  $\mathbf{a}_s(t)$  是随列车一起的牵连加速度. 将式(2)带入耦合方程式(1), 将引起附加的载荷项  $-\mathbf{M}_s \mathbf{a}_s$  和

$Q^T a_s$ .

对于流体来说,会将原来的固壁边界条件:

$$\frac{\partial p}{\partial n_f} = 0 \quad (n_f \text{ 为流体外法向}) \quad (3)$$

改为动边界条件:

$$\frac{\partial p}{\partial n_f} + \rho_f \ddot{a}_f n_f = 0 \quad (4)$$

由此同样会引起附加项  $F^b$ .

综上所述,在列车制动条件下,液固耦合系统的方程式(1)变为

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ -Q^T & M_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{a}_f \\ \ddot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & \frac{1}{\rho_f} Q \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_r \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s - M_s \ddot{a}_s \\ Q^T \ddot{a}_s + F^b \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 2 车载储油罐在制动条件下的动态响应模型

以型号 HG60/22-3 车载储油罐为例,在列

车制动条件下,对满载 HG60/22-3 储油罐进行液固耦合动力学分析和对空载 HG60/22-3 储油罐进行动力学分析.储油罐的尺寸见表 1<sup>[6]</sup>.储油罐的约束为:两个包角为 120°的鞍式支座,支座宽度为 350 mm,支座距封头 0.5 R (R 为罐体半径),把鞍式支座一个简化为固定绞支,另一个简化为移动绞支,见图 1. 储油罐的材料为: M16R 合金钢,弹性模量  $E = 206 \text{ GN/m}^2$ , 泊松比, 密度为  $7800 \text{ kg/m}^3$ . 储油罐中液体以汽油为例,汽油密度为  $760 \text{ kg/m}^3$ ,声音在汽油中的传播速度为  $1430 \text{ m/s}$ ,重力加速度为  $9.8 \text{ m/s}^2$ ,储油罐在制动前的速度为  $2.78 \text{ m/s}$ ,制动加速度  $1.04 \text{ m/s}^2$ ,求在制动后 10 s 的车载储油罐的动力响应.

在 ANSYS 软件中,采用直接耦合法对液体和固体进行耦合. 选用 shell63 壳单元对罐体进行网格划分,得到 1 954 个单元;选用 fluid30 流体单元对液体进行网格划分,得到 3 317 个单元. 如图 2 所示.

表 1 储油罐的结构参数

Tab.1 Structural parameters of the train-mounted container filled with oil

公称容量 /m <sup>3</sup>	封头形式	罐体			碟封头		
		内直径 /mm	长度 /mm	壁厚 /mm	球面半径 /mm	折边曲率半径 /mm	封头厚度 /mm
60	碟封头	2 800	10 040	24	2 800	400	24

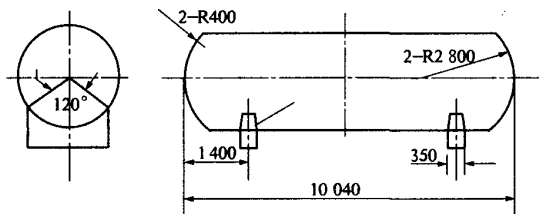


图 1 储油罐的安装简图

Fig.1 Diagram of the fixed container

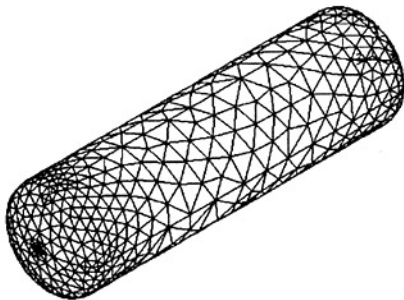


图 2 储油罐有限单元网格

Fig.2 The FEA mesh of container

对于列车的制动状态,依照孙中央的列车牵引计算数据实用教程<sup>[7]</sup>,我们在储油罐加载如图

3 所示的加速度载荷:

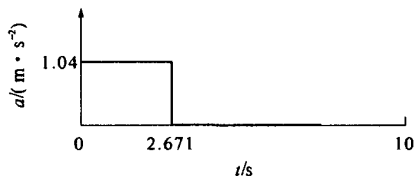


图 3 加速度载荷

Fig.3 Acceleration load

## 3 结果及分析

在 ANSYS 中,对模型施加边界条件和瞬态载荷,并用采用瞬态法在柱坐标系下进行求解,选刚度阻尼  $\delta = 0.2525$ ,质量阻尼  $\alpha = 0.505$ ,计算的总时间为 10 s,分 2 个载荷步,第 1 个载荷步从 0 s 到 2.671 s,分 30 个子步;第 2 个载荷步从 2.671 s 到 10 s,分 82 个子步.

满载储油罐在不同时刻的响应频率如图 4 所示.通过图 4 可以得出满载储油罐在施加制动力时,储油罐的响应以低频响应出现,停车后由于液体与固体得相互作用,储油罐的响应从低频响应变为高频响应.低频响应表现为流体自由表面波

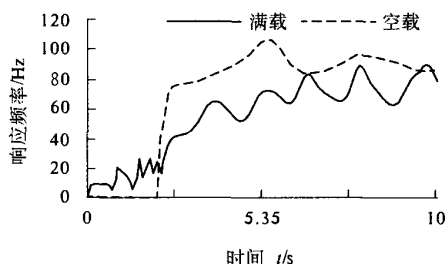


图4 储油罐频率响应

Fig.4 The response frequency of the container at various time

动(即流体低频部分)与结构的耦合作用;高频响应表现为无液结构的振动与流体的内部压力波动(即流体的高频响应)的耦合作用。

储油罐在不同时刻的变形如图5所示,(图中箭头所指位置是在圆柱坐标系下径向的最大正负位移,单位为mm,“空”表示空载储油罐,“满”表示满载储油罐).空罐的放大倍数为1500;满载罐的放大倍数为750。

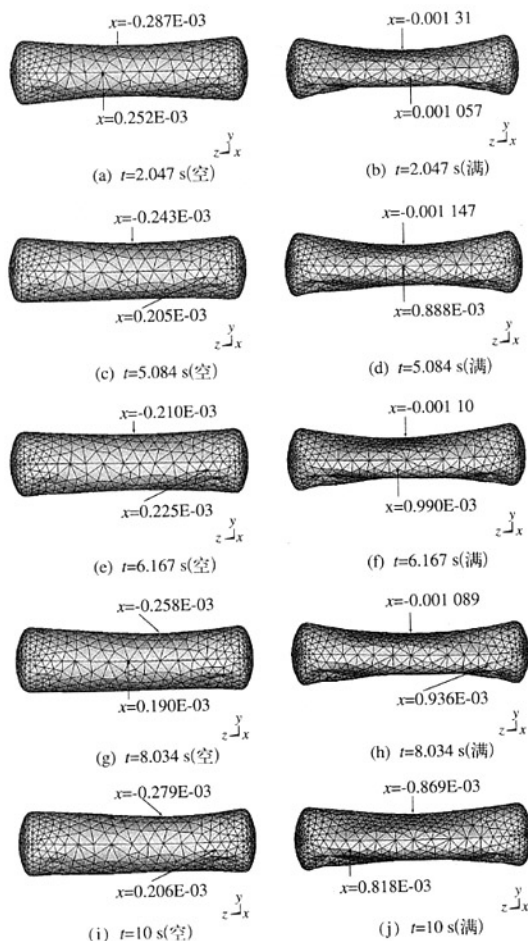


图5 空罐和满载储油罐在不同时刻的变形

Fig.5 The deformations of the container at various time

通过图5可以得出储油罐的危险区在罐体中间上部和支座边缘处交替出现。

在迪卡尔坐标系下,满载储油罐第四强度理论相当应力最大值出现在4.72s时刻的495节点上,此节点的位置及此点的应力随时间的响应如图6和图7所示。

通过上图可以得出由于液体和固体的相互作用,满载储油罐的最大危险点在4.7s时位于495节点处,应力值为 $4.11 \times 10^7$  Pa,远小于许有应力 $4 \times 10^8$  Pa.在储油罐的工程设计时应考虑液固耦合的相互作用。

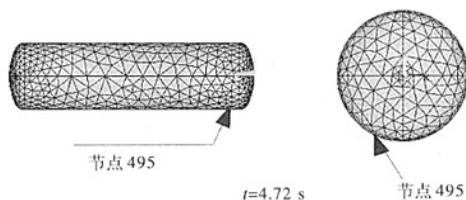


图6 节点495位置

Fig.6 Position of node 495

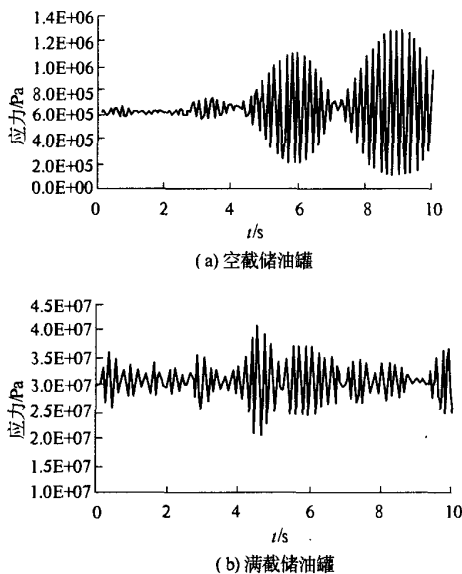


图7 495节点平均应力在不同时刻响应图

Fig.7 The stress response of node 495 at various time

## 4 结论

(1) 应用有限元程序对储油罐进行建模,通过多次划分网格、比较,得出能够满足精度要求的有限元模型.利用ANSYS程序强大的分析功能进行液固耦合瞬态响应分析,得出并直接绘出储油罐不同时刻的变形图和最大平均应力响应图。

(2) 在本次分析过程中,假设了车载液体是

密度偏低的汽油,并且是无黏性的,所以计算结果与车载高密度、高黏度液体时相比,罐体变形和应力响应幅值可能偏低,衰减时间偏长;但对估算储油罐在制动时的响应程度还是有一定的参考价值的。

(3) 在有限元分析方法中考虑了液固耦合与罐壁柔性对储油罐结构的影响,得出罐体在制动状态下,低频响应表现为流体自由表面波动(即流体低频部分)与结构的耦合作用;高频响应表现为结构的振动与流体的内部压力波动(即流体的高频响应)的耦合作用。满载储油罐的危险区在罐体中间上部和支座边缘处交替出现。危险时刻出现在制动后的 4.7 s,第四强度理论相当应力最大值为  $4.11 \times 10^7$  Pa,这为工程设计和理论研究提供了参考依据。

#### 参考文献:

[1] NIORDSON F I. Vibrations of a cylindrical tube containing

flowing fluid[J]. Kungliga Tekniska Hogskolans Handlingar(Stockholm), 1953, 73: 40 ~ 48.

[2] 温德超,郑兆昌,孙焕纯. 储液罐抗震研究的发展[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 60 ~ 76.

[3] 孙利民,张庆华,赵 勇. 卧式圆形储油罐液固耦合模态分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(2): 89 ~ 92.

[4] 王勖成. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.

[5] 李彦民,徐 刚,任文敏,等. 储液容器流固耦合动力响应分析计算[J]. 工程力学, 2002, 19(4): 29 ~ 31.

[6] 赵阳春. 货车运用常见故障分析与处理[M]. 北京:中国铁道出版社, 2000.

[7] 孙中央. 列车牵引计算规程实用教程[M]. 北京:中国铁道出版社, 1999.

## Transient Response Analysis of Oil Tanks When the Tanker is Braked

SUN Li-min<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>1</sup>, ZHANG Qing-hua<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the fluid – solid coupled dynamic equation, the fluid – solid coupled dynamic response of the train oil tankers are analyzed with finite element software ANSYS when the tanker is braked. The finite element model of the containers is built. Moreover, the simulation dynamic response of the container with full load and empty is analyzed when train is braked. Also, the deformation pattern of container and the graph of the maximum stress response are drawn. The response results of containers full load are compared with those empty. So the results provide the reference for the structural design of the train oil tankers and the numeric evidence for improving the reliability of the train container.

**Key words:** fluid – solid coupled system; railroad train oil tank; ANSYS; transport of oil