

文章编号:1671-6833(2005)02-0089-03

卧式圆形储油罐液固耦合模态分析

孙利民, 张庆华, 赵 勇

( 郑州大学工程力学系,河南 郑州 450002)

**摘 要:**以油料运输中的主要工具铁路卧式圆形储油罐(卧式罐)为研究对象,应用液固耦合原理并以有限元分析软件 ANSYS 为工具,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及其前四阶固有频率的振形图.分析结果表明,卧式罐固有频率值随液体深度的增加而逐渐降低,用耦合法与平均密度法求解系统固有频率时,所得的计算结果差异较大.

**关键词:**油料运输;储油罐;流固耦合系统;固有频率;振型

**中图分类号:** O 351 **文献标识码:** A

0 引言

在我国,成品油料的运输目前仍以铁路车载油罐运输为主.其中包括内地炼油厂、石油化工厂和各类油库油料的进出厂,全国成品油料运输的60%~70%<sup>[1]</sup>是由铁路完成的.以往对车载液体容器的计算仅仅局限于结构静力学的研究和分析,这显然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,车载容器受到了更强烈的动载荷作用,所引发的液体晃动问题将会变得十分突出.首先液体晃动所产生的低频横振将会对车辆运行的稳定性产生很大的影响,同时在工程实际中,油罐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.液固耦合系统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,以致于造成结构破坏,因此有必要对这一类问题进行详细分析.

本文作者假设车载液体为无黏、无旋、不可压缩理想流体,罐体为线弹性,根据液固耦合原理并采用有限元分析软件 ANSYS 对车载容器固有频率进行了详细的计算和分析,重点考查了容器中贮液深度的改变对车载容器固有频率的影响.

1 流固耦合问题的动力学方程

在流固耦合系统中,固体域的方程通常总是

以位移  $u_i$  作为基本未知量,而流体域的方程通常采用流场压力  $p$  作为基本未知量.采用伽辽金法建立流固耦合系统的有限元方程<sup>[2]</sup>:

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

其中: $\mathbf{p}$  为流体节点压力向量; $\mathbf{a}$  为固体节点位移向量; $\mathbf{Q}$  为流固耦合矩阵; $\mathbf{M}$  和  $\mathbf{K}_f$  分别为流体质量矩阵和流体刚度矩阵; $\mathbf{M}_s$  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; $\varrho$  为流体质量密度.

对于不可压缩流体,若不考虑自由面重力波和结构阻尼的影响,则方程(1)可简化为

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}'_s) \ddot{\mathbf{a}} + \mathbf{K}_s \mathbf{a} = \mathbf{F}_s \quad (2)$$

其中 
$$\mathbf{M}'_s = \frac{1}{\varrho} \mathbf{Q} \mathbf{K}_f^{-1} \mathbf{Q}^T,$$

式中: $\mathbf{M}'_s$  代表流体对固体的作用,现以固体附加质量的形式出现,这时流固耦合问题退化为考虑附加质量的固体动力学问题,大大简化了流固耦合分析系统的分析.

2 计算与分析

2.1 不同深度有自由液面的卧式油罐固有频率的有限元计算

卧式罐的有限元网络和流体单元网络见图 1.

收稿日期:2005-01-16;修订日期:2005-02-25

作者简介:孙利民(1956-),男,河南省开封市人,郑州大学教授,博士,主要从事结构动力学、高分子成型技术研究.  
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 结构有限元网格                      (b) 流体有限元网格

图 1 卧式油罐的有限单元网格和流体单元网格

Fig.1 The FEA mesh of cylindrical container and fluid

本文作者以设计内压为 0.04 MPa、公称容量为 60 m<sup>3</sup> 的卧式油罐为例,设计压力:正压为 0.04 MPa,

负压为 0.1kPa),其几何尺寸见表 1<sup>[3]</sup>.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).油罐的材料为 Q235 钢,弹性模量  $E=206\text{ GN/m}^2$ ,泊松比  $\mu=0.3$ ,密度为  $7\,800\text{ kg/m}^3$ .油罐中的液体以水为例,密度为  $1\,000\text{ kg/m}^3$ ,声速为  $1\,414.2\text{ m/s}$ ,重力加速度:  $9.8\text{ m/s}^2$ .分别考虑内贮有不同深度有自由液面的水,采用现有的有限元分析软件 ANSYS 进行流固耦合分析,计算流体对油罐固有频率的影响.

表 1 油罐的结构参数

Tab.1 Structural parameters of the cylindrical container

公称容量 /m <sup>3</sup>	封头形式	筒体				碟封头		
		内直径 /mm	长度 /mm	筒体壁厚 /mm	球面曲率 半径/mm	折边曲率 半径/mm	封头高度 /mm	封头厚度 /mm
60	碟封头	2 600	11 200	5	2 600	390	588	5

说明:罐内不设加强圈.

由于系统固有频率主要取决于结构质量分布和刚度分布,采用均匀网格可使结构刚度矩阵和质量矩阵的元数不致相差太大,可减小数值计算误差,故采用映射网格划分油罐.其中罐体采用 shell 63 单元液体采用 fluid 30 单元进行网格划分,在 Global Cylindrical Y 柱坐标系下,分别计算  $h$  (液面高度/油罐直径) 为 0,0.5,0.75,1 时,油罐

的固有频率,其结果见表 2.根据贮液量不同模型划分单元总数分别为:4 320、12 558、16 384、35 424.图 1 是  $h=0.5$  时卧式油罐流固耦合的有限元网格.由于篇幅所限,本文只绘出了不同深度容器中间截面振动的前四阶固有频率的振形图,见图 2、3、4 (图中虚线即为其振形).

表 2 不同液体深度卧式油罐的固有频率

Tab.2 The natural frequency of cylindrical containers with different height fluid

$h$	阶 数								Hz
	1	2	3	4	5	6	7	8	
0	10.804 0	11.417 0	13.653 0	15.163 0	15.996 0	19.288 0	19.562 0	22.117 0	
0.50	6.257 6	6.869 6	7.398 3	8.151 0	9.486 0	11.837 0	11.909 0	12.562 0	
0.75	4.050 9	5.479 4	6.016 2	6.052 4	8.382 8	8.773 6	9.447 8	10.720 0	
1.00	3.429 6	3.635 7	4.177 3	4.924 9	5.148 1	7.194 0	7.477 9	7.784 7	

从表 2 可以看出,卧式油罐的固有频率随着贮液量的增加其固有频率不断降低,和没有液体油罐的固有频率相比,流体的影响大大降低了系统的固有频率.

2.2 采用平均密度法计算系统的固有频率

由式(2)可以看出,将流体对固体的作用以固体附加质量形式出现,可使流固耦合问题退化为固体动力学问题,从而大大简化流固耦合系统的分析.现以  $h=1$  为例,将罐体中液体的质量直接附加于其壁上(即将液体质量均分在罐壁上,在计算中改变罐壁材料的密度进行简化),计算出的固有频率见表 3.

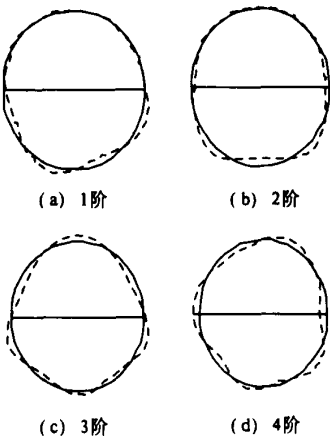


图 2  $h=0.5$  时容器前四阶频率振形图

Fig.2 Modal shape of the natural frequency of  $h=0.5$

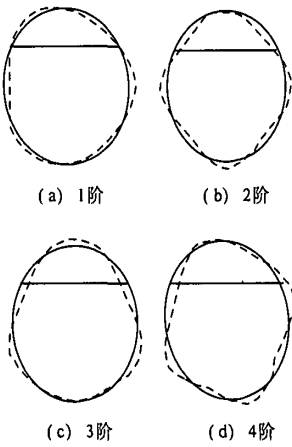


图 3  $h=0.75$  时容器前四阶频率振形图

Fig. 3 Modal shape of the natural frequency of  $h=0.75$

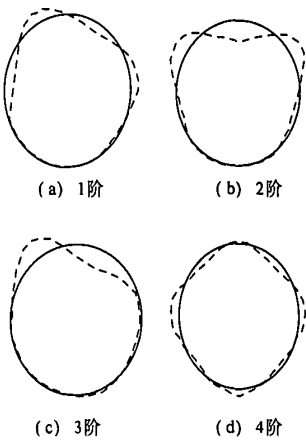


图 4  $h=1$  时容器前四阶频率振形图

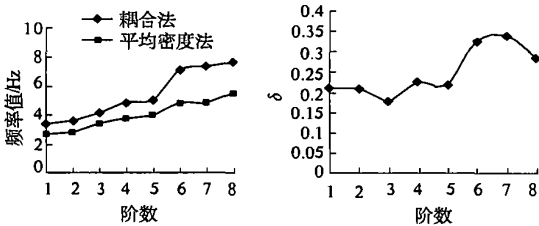
Fig. 4 Modal shape of the natural frequency of  $h=1$

表 3 平均密度法求解的系统固有频率

Tab. 3 The natural frequency solved by average density

	Hz							
阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
固有频率	2.696 3	2.849 3	3.407 4	3.784 1	3.992 0	4.813 5	4.882 1	5.519 6

将所求得固有频率值与表 2 中按流固耦合法求解得到的  $h=1$  系统的固有频率进行比较, 见图 5, 图中误差  $\delta = \frac{\text{耦合解} - \text{附加质量解}}{\text{耦合解}}$ .



(a) 两种方法计算结果 (b) 各阶误差值

图 5 满载时固有频率计算结果比较

Fig. 5 Compared the solutions of natural frequency filled with full fluid

从图 5 中可以清楚地看到, 平均密度法求得的耦合系统的固有频率低于按耦合法求得的系统的固有频率, 而且对含液车载容器其误差均超过了 15%, 可见液体晃动对结构的固有频率影响很大, 是不能忽略的. 因而按平均密度法求解与耦合法求解的固有频率差距是比较大的.

3 结束语

本文作者对车载卧式油罐贮有不同深度液体的流固耦合系统的动态特性进行了分析计算, 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. 结果表明: 随着贮液量的增加, 油罐的固有频率不断降低, 流体晃动对油罐的影响是不能忽略的. 同时本文作者又对满载时的油罐将耦合法与平均密度法求解流固耦合系统进行了比较, 得出平均密度法求解与耦合法求解的固有频率差距是比较大的. 这些计算结果为保障车载储油罐的安全运行, 为设计、生产新型车载储油罐提供相关数据和理论依据.

参考文献:

[ 1 ] 严大凡. 油气储运工程 [ M ]. 北京: 中国石化出版社, 2003.

[ 2 ] 王勖成. 有限单元法 [ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[ 3 ] 郭光臣. 炼油厂油品储运 [ M ]. 北京: 中国石化出版社, 2003.

[ 4 ] 丁遂亮, 包光伟. 任意三维贮箱内液体晃动的模态分析及其等效力学模型 [ J ]. 力学季刊, 2004, 25( 1 ): 62~68.

[ 5 ] ABRAMSON H N. The dynamic behavior of liquid in moving containers [ R ]. Washington D C : NASA - SP - 106, 1966.

[ 6 ] 邢静忠, 王永岗, 陈晓霞. ANSYS 7.0 分析实例与工程应用 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

Study on Technology of Corn Pigment by the Ultrasonic Extraction

ZHANG Qu -rong<sup>1</sup>, SHAN Li -hong<sup>1</sup>, DU Bin<sup>1</sup>, WANG Cai -fang<sup>1</sup>, HAO Dong -bo<sup>2</sup>

( 1. School of Pharmacy ,Zhengzhou University , Zhengzhou 450052, China ; 2. Plant of Amylum , Zhongyuan Pharmaceutical Factory , Zhengzhou 450066, China)

**Abstract :** The corn pigment is made from corn gluten meal which is by product in a corn starch plant .This paper studies a technological route of howto prepare corn pigment from corn gluten meal in ultrasonic extraction .The optimum experi mental condition is obtained by orthogonal design , and UV is used to determine the quiality of corn pigment . The optimum technological conditions are :the extraction 95%alcohol the ratio of solid to liquid 1g : 15 mL , ultrasonic time 1.5h and pH 7.The process of preparing corn pigment is simple but practical and the yield of product was 8.7%.

**Key words :** corn gluten meal ultrasonic ; extraction corn pigment

( 上接第 91 页)

The Mdal Analysis of Cylindrical Container Filled with Fluid

SUN Li -min ,ZHANG Qing -hua ,ZHAO Yong

( Department of Engineering Mechanics , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002, China)

**Abstract :** This paper studies the cylindrical container , which is the general tool for the transport of the oil . The modes of cylindrical container with different heights and free surface of fluid are calculated with finite element software ANSYS on the basis of the fluid -solid coupled theory . The natural frequencies and the mdal shapes are obtained . The conclusion are drawn that the values of natural frequencies are reduced with the increasing height of fluid . In the end , the solution solved by the fluid -solid coupled method is compared with the solution solved by the method of average density .

**Key words :** transport of oil ; cylindrical container fluid -solid coupled system ;natural frequency ; mdal shape