罐车转向时液体晃动的仿真分析

刘 奎 康 宁

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：采用VOF模型对罐车转向时液体晃动进行了数值模拟，对单室受力及侧倾力矩进行了计算.计算结果表明，无防波板时，随向心加速度增加，竖直、水平方向受力峰值及侧倾力矩均变大；随充液比增加，竖直方向受力峰值增大，水平方向受力峰值与侧倾力矩峰值先增大后减小；带防波板时，竖直、水平方向受力峰值减小，当防波板面积大于纵剖面积30%时防波板面积的增加能显著改善罐体受力；侧倾力矩峰值先增大后减小，在防波板面积等于纵剖面积30%时达到最大值，当防波板面积大于纵剖面积40%时防波板面积增加能提高防晃效果.

关 键 词：罐车；VOF模型；液体晃动；两相流

中图分类号：U 469.6

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)11-1403-05

Simulation of liquid slosh in turning process of tank truck

Liu Kui Kang Ning

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The liquid sloshing in turning process of tank truck was simulated by volume-of-fluid (VOF) model. The forces and turning moment of a single room were calculated. The results show that the maximum of F_y(force in direction y), F_z(force in direction z) and M (turning moment) increase when the centripetal acceleration increases without a baffle. When the liquid filling ratio increases, the maximum of F_y increases, the maximum of F_z and M increase firstly and decrease afterwards. When there is a baffle, as the area of the baffle becomes bigger, the maximum of F_y and F_z decrease and the maximum of M increases firstly and decreases afterwards.

Key words: tank truck; volume of fluid (VOF) method; liquid sloshing; two phase flow

由于液体的流动性，当罐车转向时，在离心力作用下罐内液体产生晃动，对罐壁产生冲击载荷，使罐车重心偏移，易造成车辆侧滑、侧倾从而引发交通事故.所以，对罐车转向时液体晃动及防晃装置的研究，有着重要的实际意义和工程应用价值.

国内外对液体晃动问题都做过大量一般性和基础性研究，但在实际应用中主要是研究较简单的贮箱结构[1-2]，而油罐车罐体内部结构比较复杂，有大尺度的防波板或其他阻尼元件，目前对于液体晃动问题大部分研究都应用在航空航天领域[3]，真正对罐车内介质晃动的研究很少.陈铭年等人用解析法研究了椭圆矩形油罐车转弯时的横向稳定性[4]；陈志伟用数值模拟方法研究了油罐中介质晃动，给出了4种不同充装系数下的侧翻力矩[5]；李松等人采用扫描式激光测振仪对不同充液比下水平圆柱贮箱受横向激励作用时箱内液体的晃动频率进行了测试[6].刘奎用数值模拟方法研究了罐车制动时液体的晃动，给出了不同充液比、不同减速度和不同防波板面积时液体晃动对罐体受力及整车轴荷分配的影响[7].

本文应用商用CFD软件Fluent分别对罐车转向时无防波板和带防波板两种情况下液体晃动进行了数值模拟，研究了罐车转向时，不同充液比、不同向心加速度和不同防波板面积对罐体受

收稿日期：2008-12-03

作者简介：刘 奎(1984—)，男，湖北鹤峰人，硕士生，kangning@buaa.edu.cn.

力及侧倾力矩的影响.

1 计算模型及计算方法

1.1 控制方程组

本文采用VOF模型处理罐车内气液两相非定常湍流流动.控制方程组包括连续方程和动量方程.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{2}$$

式中,u为速度;p为压强;ρ和μ分别为容积分数的平均密度和动力粘性系数.

$$\left.\begin{aligned}\rho&=\alpha_w\rho_w+(1-\alpha_w)\rho_a\\ \mu&=\alpha_w\mu_w+(1-\alpha_w)\mu_a\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中,α_w为液体的容积分数;ρ_w和ρ_a分别为液体和气体密度;μ_w和μ_a分别为液体和气体动力粘度系数.采用κ-ε模型对湍流流动现象进行模拟.

1.2 罐车模型及网格划分

本文以某型号液化石油气罐车为研究对象,罐体横截面为圆形,前后封头均为平封头,罐体总长8.6 m,内半径1.127 m,将其均匀分隔成4个独立的单室,忽略隔板厚度,每个单室长2.15 m,罐车模型示意图如图1所示.

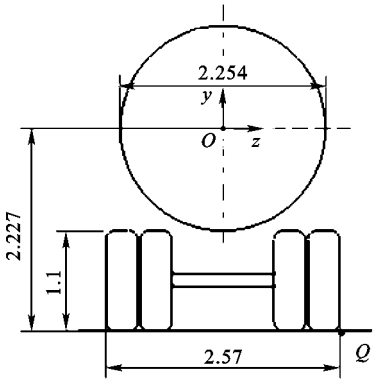

图1 罐车模型示意图

计算中,为了减少网格数量,提高计算效率,只对一个单室进行计算.坐标系固定在罐体上,原点位于单室左侧端面的圆心,x轴指向汽车前进方向且平行于地面,y轴垂直地面向上,z轴平行于地面向右.对此计算模型采用结构六面体网格,网格数在四万左右,如图2所示.在涉及到有隔板的情形时,由于隔板厚度与罐体长度方向相比很小,所以在实际网格划分时忽略隔板厚度,这样不仅减少了网格数,也可以避免在隔板厚度方向网格过密,从而提高了网格质量.

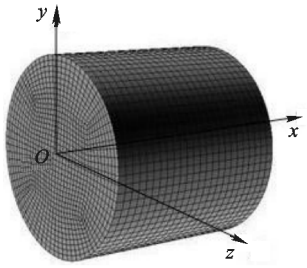

图2 单室模型及网格划分

1.3 边界条件及初始条件

罐体及防波板表面设置为无滑移壁面边界条件.初始气液交界面平行于xz平面,液体和气体相对罐体速度为0,气体压强为1.013×10^5 Pa.

1.4 求解方法及计算参数

速度和压强的耦合处理采用PISO方法,压力修正方程离散格式采用Body Force Weighted格式,对流项离散格式采用一阶迎风格式.

罐体内介质为空气和油,空气视为理想气体,动力粘性系数为1.81×10^{-5} kg/(m·s);油的密度为830 kg/m^3,动力粘性系数为3.32×10^{-3} kg/(m·s).非定常计算中时间步长为0.005 s.

2 单室的计算结果及分析

文献[7]中已对本文所用计算方法进行了验证.本文以单室为研究对象,分别对无防波板时不同加速度、不同充液比及带不同面积防波板3种情况进行研究.

2.1 无防波板时加速度的影响

罐车充液比为0.7,转向前罐车匀速前行,从$t=0$时刻开始转向,转向时向心加速度沿z轴负向,大小从$a=5$ m/s^{2}到$a=10$ m/s^{2}共6种工况.计算结果表明转向时罐体受x方向冲击力约等于0,前2 s内罐体在y,z方向所受液体冲击力绝对值大小F_y,F_z随时间的变化历程分别如图3、图4所示,其中F_y沿y轴负向,F_z沿z轴正向.

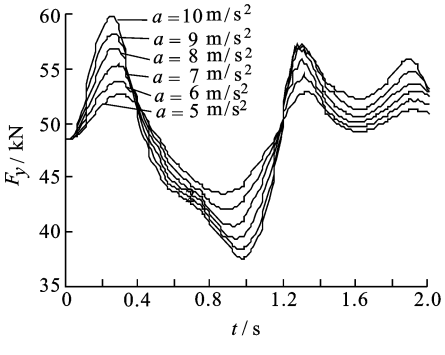

图3 不同向心加速度a下y方向罐体受力

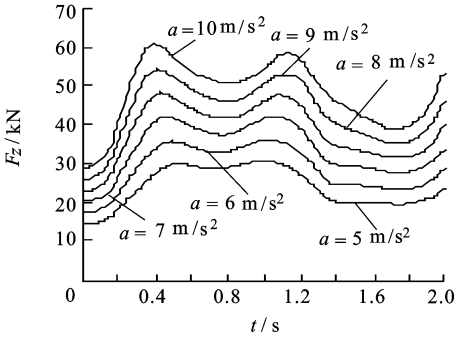

图 4　不同 a 下 z 方向罐体受力

由图 3、图 4 可见,转向开始后最初一段时间内,罐体所受 y,z 方向冲击力大小迅速增大,到达第 1 个峰值以后,受力逐渐减小,随后受力又逐渐增大,如此往复. 这是由于罐车在转向时具有向心加速度,罐车内液体受到向心力作用,使得液体发生晃动,罐体受力为峰值时,液体晃动得最为剧烈. 随后受力减小,是由于液体受到罐体一侧的阻挡开始往回运动,涌向另一侧.

同时可知,y,z 方向的受力峰值均随加速度的增大而增大. 这是由于加速度越大,罐体内液体受到的惯性力越大,液体晃动得越剧烈,因此受力峰值越大.

研究罐车转向时的横向稳定性,一个重要研究对象为转向时产生的 M,将罐体所受液体冲击力对图 1 中过 Q 点且平行于 x 轴的轴线 L 求力矩,得到不同 a 下液体对 L 产生的 M 见图 5.

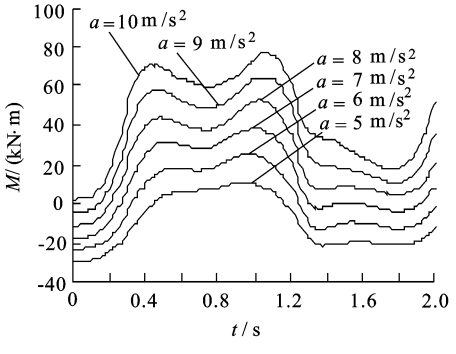

图 5　不同 a 下的 M

从图 5 可知,M 无论是整体上还是峰值都随着 a 的增加而增加.

2.2　无防波板时充液比的影响

罐车转向前匀速前行,从 $t=0$ 时刻以 $a=8\ \mathrm{m/s^2}$ 开始转向. 本文计算了充液比 Δ 从 10% 到 100% 共 11 种工况,罐体在 y,z 方向所受液体冲击力绝对值大小 F_y,F_z 随时间的变化历程分别如图 6、图 7 所示,其中 F_y 沿 y 轴负向,F_z 沿 z 轴正向.

由图 6、图 7 可见,随 Δ 增加,两个方向整体

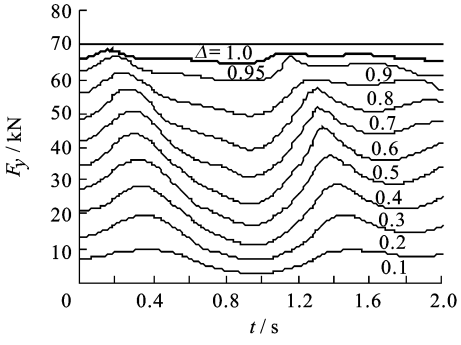

图 6　不同 Δ 时 y 方向罐体受力

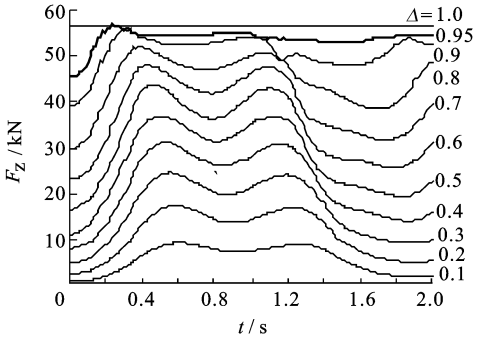

图 7　不同 Δ 时 z 方向罐体受力

受力均明显增大,y 方向受力峰值随 Δ 增加单调增大,z 方向受力峰值随 Δ 增加先增大后减小,且在 Δ 为 0.95 左右达到最大值.

不同 Δ 时液体对轴线 L 产生的 M 如图 8 所示. 由该图可知,M 峰值出现在 1.1 s 左右,随着 Δ 的增加,M 峰值先增大后减小,且在 Δ 为 0.7 时达到最大值,由此可知,对于所研究型号的液化石油气罐车,转向时 $\Delta=0.7$ 为最危险工况,实际操作中应尽量远离.

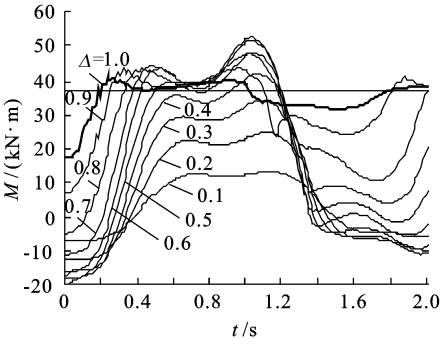

图 8　不同 Δ 时的 M

2.3　不同面积防波板的影响

本节主要讨论防波板面积对罐车转向时横向稳定性的影响. 关于罐体内横向防波板的设置,《液化气体汽车罐车安全监察规程》第 10 条第 3 款规定:"……罐体内应设置防波板,每个防波板的有效面积应大于罐体横断面积的 40%,防波板的安装位置,应使上部弓形面积小于罐体横断面

积的20%."而对于纵向防波板的设置,尚未有文献给出明确规定.在本文研究中,借鉴对于横向防波板设置的定义,如图9所示,防波板置于罐体对称纵剖面上,图中 S_1 为横截面上部矩形面积,S_2 为防波板的面积,S_3 为下部矩形面积.令 $d=S_1/(S_1+S_2+S_3)$;$c=S_2/(S_1+S_2+S_3)$.

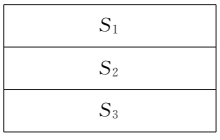

图9 防波板面积示意图

在计算不同面积防波板的影响时,为研究方便,令 d 为定值,c 为变化量,本文统一取 $d=20\%$,c 的取值范围为0～80%.

罐车 Δ 为0.85,转向前罐车匀速前行,从 $t=0$ 时刻以向心加速度 $a=8\ \mathrm{m/s^2}$ 开始转向.本文计算了从 $c=0$ 到 $c=0.8$ 共9种情况,2 s内罐体在 y,z 方向所受液体冲击力绝对值大小 F_y,F_z 随时间的变化历程分别如图10、图11所示,其中 F_y 沿 y 轴负向,F_z 沿 z 轴正向.

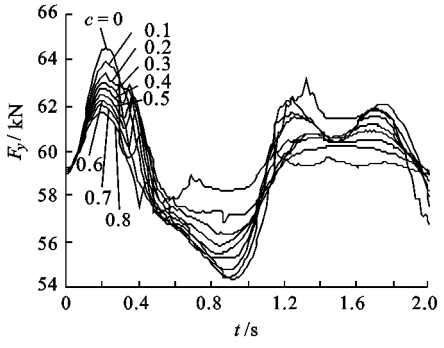

图10 不同 c 时罐体在 y 方向的受力

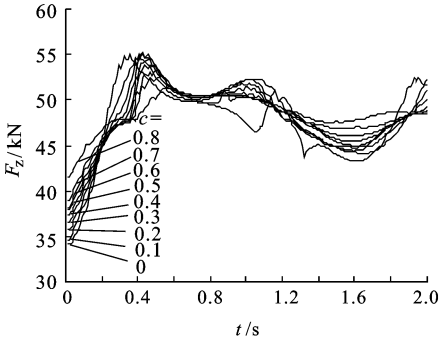

图11 不同 c 时罐体在 z 方向的受力

由图10,图11可见,随 c 的增加,y,z 方向受力峰值减小,罐体受力得到改善.

由上两图中可知,随着 c 的增加,y,z 方向受力峰值均减小,当 $0<c<0.3$ 时,z 方向受力峰值变化不大,曲线斜率在 $0.3<c<0.8$ 区间内有较大值,这说明在 $c>0.3$ 时防波板面积的增加能显著改善罐体受力.

不同防波板面积下液体对轴线 L 产生的力矩 M 如图12所示.

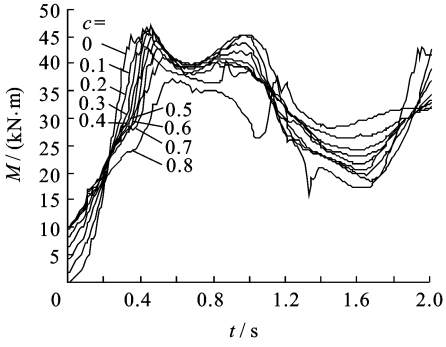

图12 不同 c 时的 M

从上图可知,随着 c 的增加,M 的峰值先增大后减小,且在 $c=0.3$ 时达到最大值,且 $c=0$ 时和 $c=0.4$ 时的力矩峰值差别不大.由此可知,对于所研究型号液化石油气罐车,转向时 $c=0.3$ 为最危险工况,而 $c=0$ 时和 $c=0.4$ 时的力矩峰值差别不大,所以实际操作中为了取得好的防晃效果,防波板的面积应大于纵剖面积的40%.

3 结 论

无防波板时,转向时随向心加速度的增加,罐体 y(重力方向)、z(横向)方向受力峰值增大;侧倾力矩峰值随着加速度的增加而增加.

无防波板时,转向时随充液比的增加,罐体 y 方向受力峰值增大,z 方向受力峰值先增大后减小,且在充液比为0.95左右达到最大值;侧倾力矩峰值先增大后减小,且在充液比为0.7时达到最大值.

带防波板时,转向时随防波板面积的增加,y,z 方向受力峰值减小,当防波板面积大于纵剖面积的30%时防波板面积的增加能显著改善罐体受力;侧倾力矩的峰值先增大后减小,且在防波板面积等于纵剖面积的30%时达到最大值,当防波板面积大于纵剖面积的40%时防波板面积的增加能提高防晃效果.

参考文献(References)

[1] Hauashi M, Hatanaka K, Lagrange K M. Finite element method for free surface navier-stokes flow using fractional step methods [J]. International Journal Numerical Methods Fluids, 1991, 13: 805－840

[2] Armenio V. On the analysis of sloshing of water in rectangular containers: numerical study an experiment validation [J]. Ocean Engineering, 1996, 23(8): 705－737

[3] Yue Baozeng, Wang Zhaolin, Li Junfeng. Liquid sloshing in

cylindrical tank with elastic spacer [J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulations, 1996, 1(2): 66－69

[4] 陈铭年,林永智,徐建全.椭圆矩形油罐车转弯横向稳定性的计算分析[J].专用汽车,2003,5:3－5
Chen Mingnian, Lin Yongzhi, Xu Jianquan. Calculate analysis of transversal stabilization for turning of oil tank truck with irregular elliptical section [J]. Special Purpose Vehicle, 2003,5:3－5(in Chinese)

[5] 陈志伟. 移动式压力容器介质晃动数值模拟及防波装置研究[D].浙江:浙江大学材料与化学工程学院,2006
Chen Zhiwei, Numerical simulation of liquid sloshing in transportable pressure vessel and research on the baffles [D]. Zhejiang: School of Material and Chemical Engineering, Zhejiang University, 2006(in Chinese)

[6] 李松,高芳清,杨翊仁,等.液体晃动有限元模态分析及试验研究[J].核动力工程,2007,28(4):54－57
Li Song, Gao Fangqing, Yang Yiren, et al. Finite element modal analysis and dynamic experimental for liquid sloshing [J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(4): 54－57(in Chinese)

[7] 刘奎,康宁.罐车制动时液体晃动的仿真分析[J].北京航空航天大学学报,2009,35(7):799－803
Liu Kui, Kang Ning. Simulation of liquid slosh in braking process of tank truck [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(7): 799－803(in Chinese)

(编　辑:张　嵘)

(上接第 1378 页)

4) 结束语句 End
功能:停止某测试程序
范式:
End::= "end" " "<pid>
pid::= letter <letter|digit>+
5) 继续执行语句 Continue
功能:继续执行某暂停的程序
范式:
Continue ::= " continue " " "<pid>
pid::= letter <letter|digit>+
6) 调用语句 Call
功能:调用某测试子程序
范式:
Call::= "call " " "<pid>
pid::= letter <letter|digit>+

3　结　论

航天器测试语言是支撑航天器自动化测试的形式体系及航天器测试工作标准.①本文总结出面向航天器自动化测试语言应具备的特征;②通过对航天器测试业务中测试操作、测试流程、测试层次和体系结构的分析,给出了航天器测试语言中专用测试语句的定义及其形式化描述.该航天器测试语言的实际试用表明,对提高航天器测试业务的效率和测试人员的工作效率、促进航天器测试自动化研究的发展起到一定的推动作用.

参考文献 (References)

[1] Clancy D A, Clyde B A, Mirantes M A. The evolution of a test process for spacecraft software[C]//Proc of the 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society,2006

[2] Yamada T. Generic software for spacecraft testing and operations based on a spacecraft model[C]//Proc of Space Ops2006. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006

[3] 王庆成.航天器电测技术[M].北京:中国科学技术出版社,2007
Wang Qingcheng. Electrical test technology of spacecraft [M]. Beijing: Chinese S & T Press, 2007(in Chinese)

[4] 余丹,叶钢,李先军,等.基于工作流的航天器测试信息化系统的建模与分析[J].武汉大学学报,2009,55(2):211－215
Yu Dan, Ye Gang, Li Xianjun, et al. Modelling and analysis of spacecraft testing informatization system based on workflow[J]. Journal Wuhan University, 2009,55(2):211－215 (in Chinese)

[5] 王宪文.航天器测试控制语言设计与实现方法研究[J].航天器工程,2007,16(2): 57－63
Wang Xianwen. Design and realization method of the test and control language for spacecraft overall checkout[J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(2):57－63(in Chinese)

(编　辑:赵海容)