基于 VOF 方法的汽车油箱燃油晃动 数值模拟分析

李望°, 卢耀辉°^b, 毕伟°

(西南交通大学 a. 机械工程学院, b. 先进驱动节能技术教育部工程研究中心, 成都 610031)

摘要:目的研究燃油在汽车油箱中的晃动规律,为汽车油箱的结构可靠性设计和汽车燃油的稳定供给提供 参考和依据。方法建立某款汽车油箱的几何模型,利用 VOF (volume of fluid)方法进行数值模拟。采用控 制变量法,对比分析有无隔板、不同冲击加速度、不同充液比对燃油晃动及油箱壁面所受压力的影响。结 果无隔板、较大冲击加速度的情况下,燃油晃动更为剧烈,吸油管出现瞬间吸空现象,导致燃油供给不稳 定,油箱受到的压力更大,影响油箱的结构可靠性。较小充液比的情况下,由于燃油晃动,吸油管容易出 现瞬间吸空现象,导致燃油供给困难。结论汽车油箱采用隔板、保持较小的冲击加速度和较大充液比有利 于防止吸油管瞬间吸空,从而保证燃油的稳定供给。充液比太大会造成油箱壁面所受压力增大,因此,应 该保持合理的充液比。

关键词:汽车油箱;燃油晃动;VOF方法;数值模拟 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.11.004

中图分类号: TK402 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)11-0019-06

Numerical Simulation of Fuel Sloshing in Automobile Fuel Tank Based on VOF Method

LI Wang^a, LU Yao-hui^{a,b}, BI Wei^a

(a. School of Mechanical Engineering, b. Engineering Research Center of Advanced Driving Energy-saving Technology, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: Objective To study the sloshing law of fuel in automobile fuel tank and provides reference and basis for structural reliability design of automobile fuel tank and stable supply of automobile fuel. **Methods** The geometric model of a certain type of automobile fuel tank was established. The VOF (volume of fluid) method was used for numerical simulation. The control variable method was used to compare and analyze the effects of different baffles, different impact acceleration and different filling ratio on the fuel sloshing and the pressure on the wall of the fuel tank. **Results** In the case of no baffle and large impact acceleration, the fuel sloshing was more intense, the suction pipe had instantaneous suction phenomenon, which lead to the instability of fuel supply and the greater pressure on the fuel tank, affecting the structural reliability of the fuel tank. In the case of small filling ratio, because of the fuel sloshing, the suction pipe was prone to instantaneous suction, which lead to the difficulty of fuel supply. **Conclusion** The use of partition, small shock acceleration and large filling ratio in the automobile fuel tank are beneficial to prevent the suction pipe from being sucked out instantaneously, thus ensuring the stable supply of fuel. However,

收稿日期: 2019-03-02;修订日期: 2019-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51275428),四川省科技厅国际合作项目(2018HH0072)

作者简介:李望(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为计算流体动力学。

通讯作者:卢耀辉(1973-),男,博士,副教授,主要研究方向为CFD及振动疲劳。

the pressure on the tank wall will increase if the filling ratio is too large. Therefore, a reasonable filling ratio should be maintained.

KEY WORDS: automobile fuel tank; fuel sloshing; VOF method; numerical simulation

燃油晃动是指载具在加速、减速过程中或受到剧 烈冲击时,燃油箱中的燃油由于自身惯性产生的晃 动。对于燃油晃动问题,大多数研究主要涉及飞行器、 油罐车、船舶等领域^[1-4],很少有学者针对汽车油箱 中的燃油晃动展开研究。

近年来,随着汽车工业的迅速发展,汽车已逐渐 成为人们日常出行必不可少的交通运输工具。同时, 人们对于汽车各项性能指标的要求也日益增长。其 中,动力性、安全性备受关注。然而,当汽车在紧急 制动、加速或转向时,会产生较大的冲击加速度,这 会引起燃油箱内的燃油剧烈晃动,影响燃油的正常供 给,对油箱的结构可靠性造成影响,甚至导致燃油泄 漏引发火灾^[5-7]。因此,有必要对汽车燃油箱中的燃 油晃动问题进行研究,分析其影响因素,为控制汽车 油箱中的燃油晃动、保证汽车稳定性提供理论依据。

文中针对某款汽车的燃油箱,建立其简化三维几 何模型,利用 VOF 方法追踪自由液面,对燃油箱中 的燃油晃动情况进行了数值模拟。对比分析了影响燃 油晃动的主要因素,提出了防止燃油晃动的改进措 施,以期为汽车油箱的结构可靠性设计和燃油的稳定 供给提供参考。

1 VOF 方法介绍

1.1 流体力学基本控制方程

在流体力学中,用来描述流体运动规律的基本 定律有3个:质量守恒定律、动量守恒定律和能量 守恒定律。把这些定律用数学方程来描述,统称为 控制方程。

质量守恒定律用连续性方程来描述,其表述为: 微元控制体在单位时间内增加的质量等于同一时间 间隔内流入与流出该控制体的净质量。即:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{U} \right) = 0 \tag{1}$$

式中: ρ 为流体密度; \overline{U} 为流体速度矢量;t为时间。

当流体为不可压缩流体时,即密度不随时间变化 时,式(1)可简化为:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \tag{2}$$

动量守恒定律用 Navier-Stokes 方程来描述,其 表述为:微元控制体中流体动量对时间的变化率等于 外界作用在该控制体上所有的力之和。即:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho \left(\vec{U} \cdot \nabla \right) \vec{U} = \rho \vec{f} - \nabla P +$$

$$\omega \nabla^2 \vec{U} + \frac{1}{3} \mu \nabla \left(\vec{U} \cdot \nabla \right)$$
(3)

式中: *µ* 为动力黏度; *P* 为压力; *T* 为温度。 当流体为不可压缩流体时,式(3)可简化为:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \left(\vec{U} \cdot \nabla\right) \vec{U} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \mu \nabla^2 \tag{4}$$

能量守恒定律用能量方程来描述,其表述为:单 位时间内微元控制体内能量的增量等于流进、流出控 制体的净热量加上所有力对流体做功之和。即:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{U}T\right) = \nabla \cdot \left(\frac{h}{C_{\rm p}} \operatorname{grad} T\right) + S_{\rm T}$$
(5)

式中: C_p 为比热容; h 为流体的传热系数; S_{T} 为流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转化为热能的部分,简称为黏性耗散项。

1.2 VOF 方法

VOF 方法是计算流体力学中处理多相流问题的 一种方法,其基本原理是通过研究网格单元中流体 和网格体积比函数 *F* 来确定自由液面,追踪流体的 变化^[8-9]。在一个给定的单元内,若 *F*=0,则说明该 单元内没有该相流体;若 *F*=1,则说明该单元内充满 了该相流体;若 0<*F*<1,则说明该单元内存在自由液 面。VOF 方法通过确定流体区域间接定义自由界面, 根据 Euler 差分网格中每个单元所含流体体积与单元 体积的比值函数的变化梯度来确定边界法向,再根据 比值和边界法向设置边界条件^[10]。

多相流模型包括气-液或液-液两相流、气-固两相 流、液-固两相流以及三相流,具有泥浆流、气泡、 液滴、颗粒负载流、分层自由面流动、气动输运、水 力输运、沉降以及流化床等多种流动模式。其中有三 种主要的多相流模型: VOF 模型(Volume of Fluid Model)、混合模型(Mixture Model)、欧拉模型 (Eulerian Model)。

VOF 模型是一种建立在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法。当需要得到一种或多种互不相融流体间的交界面时,可以采用这种模型^[11-12]。在 VOF 模型中,不同的流体组分共用一套动量方程,计算时在全流场的每个计算单元内,都记录下各流体组分所占有的体积率。VOF 模型的应用例子包括分层流、自由面流动、灌注、晃动、液体中大气泡的流动、水坝决堤时的水流、对喷射衰竭的预测,以及求得任意液-气分界面的稳态或瞬时分界面。

2 油箱模型的建立及网格划分

针对某款汽车油箱,建立其简化三维几何模型, 如图1所示。模型包括油箱外壳,位于油箱底部的隔板,位于油箱侧面的进油管道,位于油箱上部直通油 箱底的吸油管道。





b 油箱三维几何模型
图 1 油箱模型

对模型进行网格划分,主要采用非结构网格,对 吸油管和进油管内网格相对地进行加密处理。网格质 量良好,共567377个单元,95743个节点,网格模 型如图2所示。



图 2 网格划分模型

3 数值模拟结果及分析

以燃油和空气为研究对象,利用 VOF 两相流模 型进行瞬态三维数值模拟,采用控制变量法,对比分 析有无隔板、不同冲击加速度、不同充液比对燃油晃 动及油箱壁面所受压力的影响。其中,压力-速度耦 合方式选择分步(Fractional Step),梯度选择基于节 点格林-高斯(Green-Gauss Node Based),动量选择 一阶迎风格式(First Order Upwind)。

3.1 隔板

在充液比为25%的条件下,保持1g(g取9.81 m/s²) 的加速度冲击,持续时间为0.45 s。对比分析有无隔 板对燃油晃动情况的影响,数值模拟结果如图 3 所 示。可以看出,无隔板时燃油晃动更加剧烈,采用隔 板有效地减小了燃油晃动,并且无隔板较有隔板更容 易出现吸油管瞬间吸空,导致燃油不能稳定供给。



图 3 有无隔板条件下燃油的晃动情况对比

分析油箱壁面所受压力,即流体对壁面的压力, 如图 4 所示。可以看出,无隔板时壁面受到的最大 压力为 3310 Pa,有隔板时最大压力为 2380 Pa。最 大压力点都出现在油箱侧壁上,且无隔板的最大压 力更大。

3.2 冲击加速度

在有隔板、充液比为 25%、持续时间为 1.5 s 的 条件下,对比分析冲击加速度大小分别为 0.5g、1.0g、 1.5g 对燃油晃动情况的影响,数值模拟结果如图 5 所 示。可以看出,冲击加速度为 1.5g 时,燃油晃动最 剧烈,吸油管瞬间吸空,燃油供给困难。冲击加速度 为 0.5g 时,吸油管被燃油淹没,能够正常供给燃油。 结果表明,冲击加速度越大,燃油晃动越剧烈。

流体对壁面的压力如图 6 所示。可以看出,冲击 加速度为 0.5g 时,壁面受到的最大压力为 1430 Pa; 1.0g 时最大压力为 2210 Pa; 1.5g 时最大压力为 2950 Pa。最大压力点都出现在油箱侧壁和底部的交界线附 近,且冲击加速度大的最大压力更大。

3.3 充液比

在有隔板的条件下,保持 1g 的加速度冲击,持续时间为 1.5 s,对比分析充液比分别为 10%、25%、40%时对燃油晃动情况的影响,数值模拟结果如图 7 所示。可以看出,充液比为 10%和 25%时,由于燃油



图 5 不同冲击加速度下燃油的晃动情况对比



晃动,造成吸油管瞬间吸空,燃油供给困难。充液比为40%时,吸油管被燃油淹没,能够正常供给燃油。 结果表明,充液比越小,越容易出现吸油管瞬间吸空现象,燃油供给困难。

流体对壁面的压力如图 8 所示。可以看出,充液 比为 10%时,壁面受到的最大压力为 1270 Pa;25% 时最大压力为 2210Pa;40%时最大压力为 2750 Pa。 最大压力点都出现在油箱侧壁和底部的交界线附近, 且充液比大的最大压力更大。



图 7 不同充液比下燃油的晃动情况对比

为了更直观地对比以上几种工况,将其结果汇 总,见表1。由表1可算得:燃油晃动产生的流体对 油箱壁面的最大压力,有隔板比无隔板要小28%;采 用隔板后,冲击加速度每提升0.5g,的流体对壁面的 最大压力就会提高约760 Pa;充液比越大,油箱壁面 受到的最大压力也越大,影响油箱的结构可靠性。

有无隔板	冲击加速 度/g	充液比 /%	持续时间 /s	壁面最大承 受压力/Pa
无隔板	1.0	25	0.45	3310
有隔板	1.0	25	0.45	2380
有隔板	0.5	25	1.5	1430
有隔板	1.0	25	1.5	2210
有隔板	1.5	25	1.5	2950
有隔板	1.0	10	1.5	1270
有隔板	1.0	40	1.5	2750

表 1 燃油晃动情况汇总

4 结论

1)在无隔板、较大冲击加速度及较小充液比的 情况下,燃油晃动更加剧烈,导致吸油管瞬间吸空, 燃油供给困难。同时,油箱壁面受到的压力也越大, 且最大压力集中在油箱侧壁与底部的交界线附近,出 现压力的阶梯漩涡,并呈现向外扩张的趋势。因此,







在实际驾驶中,应避免急刹、突然加速等行为,油箱 中油量低于一定值后应当及时加油,以保证燃油正常 供给。

2)采用隔板后,燃油晃动现象得到有效控制, 有利于减小燃油晃动,防止在低充液比下出现燃油供 给不稳定的情况。同时,采用隔板可以减小油箱壁面 所受压力,有利于保证结构可靠性。 3)油箱在运动过程中,存在严重的燃油晃动问题。通过将大空间的油箱划分为一个个单独的且有小 孔连接的格子,从而达到小空间内充满燃油,则燃油 晃动问题将会得到改善。其次加强底座强度,也可增 强其抵抗加速、减速的油液对壁面的冲击的能力。

文中采用 VOF 方法对汽车油箱燃油晃动进行的 数值模拟和结果对燃油箱的设计具有指导意义。

参考文献:

- [1] 张恩慧,何仁.汽车油箱中油液晃动影响因素的数值 分析[J]. 江苏大学学报自然科学版,2018,39(6): 628-633.
- [2] 袁雄飞. 基于 VOF 方法的机翼油箱燃油晃动分析与防 晃研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [3] 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].杭州:浙江大学,2006.
- [4] GROTLE E L, ÆSØY V. Dynamic Modelling of the Thermal Response Enhanced by Sloshing in Marine LNG Fuel Tanks[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 135: 512-520.

- [5] 祁涛,朱天楷,朱植永,等. 轿车油箱油液晃动噪声的 仿真研究[J]. 机械制造, 2018(7): 11-13.
- [6] 董彧. 汽车燃油箱降噪的稳健设计优化[D]. 上海:上 海交通大学, 2011.
- [7] 费翔. 汽车燃油箱油液晃动噪声分析技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [8] 张健, 方杰, 范波芹. VOF 方法理论与应用综述[J]. 水 利水电科技进展, 2005, 25(2): 67-70.
- [9] YIN X, ZARIKOS I , KARADIMITRIOU N K, et al. Direct Simulations of Two-phase Flow Experiments of Different Geometry Complexities Using Volume-of-Fluid (VOF) Method[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 10: 201-229.
- [10] 赵树恩,赵灵鹤. 汽车罐车横向运动液体晃动动力学 特性模拟[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(11): 1259-1270.
- [11] 田哲文,谢鑫,戚叶峰,等.基于 VOF 方法小型赛车燃 油晃动数值仿真[J].汽车科技,2016(6):93-97.
- [12] GÓMEZ-GOÑI J, GARRIDO-MENDOZA C A, CERCÓS, J L, et al. Two Phase Analysis of Sloshing in a Rectangular Container with Volume of Fluid (VOF) Methods[J]. Ocean Engineering, 2013, 73: 208-212.