

某微车注油过程 CFD 分析及优化

CFD Simulation and Optimization of Fuel Filling

贾友昌 赵蕾 鲁建立

长安汽车工程研究总院 CAE 工程所

摘要: 本文应用 STAR-CCM+模拟软件和基于 VOF 模型的多相流对燃油加注过程进行模拟, 获得了燃油加注随时间变化的流场信息, 评估了燃油加注的顺畅性; 并根据流场信息, 进行了燃油系统的改进设计, 并将计算结果与试验结果对比, 两者吻合较好; 应用 CFD 方法能降低燃油加注过程中的反喷风险, 为燃油系统设计开发提供一种理论参考。

关键词: CFD; 多相流; VOF; 加油; 油箱

Abstract: Simulation of Fuel Filling based on VOF model was introduced in the paper by using STARCCM+. According to Fuel filling flow detail, firstly, flow unhindered extent was evaluated, then, the design of fuel system was improved, and simulation results are well agreement with the test. therefore, CFD method has particular advantage in fuel system design, it can decrease fuel spilling risk.

Key words: CFD ; Multi-phase Flow; VOF; Oiling; Fuel Tank

1 前言

在汽车开发中, 燃油箱、加油管路和通气管路是燃油系统中的重要组成部分, 该部分实现燃油系统的加油和储油等功能, 由于受到位置和空间的限制, 汽车油箱和加油口距离比较远, 加油管和通气管被设计成多个折弯段, 这就对油箱注油带来了困难。在汽车加油过程中, 往往加油速度比较快, 如果油箱设计不合理, 油箱中的空气不能及时排出, 油箱内的压力快速增大, 加油过程出现严重的“反喷”现象, 反喷的汽油或汽油泡沫就会触发所谓的“跳枪”现象。以往在油箱设计中我们常常使用试验方法对加油管进行优化, 这样不但增加了成本, 而且延长了整车开发周期, 随着 CFD 理论和软件的发展, 应用 CFD 技术模拟燃油在加油管内的流动情况对燃油系统的设计开发具有很大的实际意义。

本文使用 STAR-CCM+软件建立了某微车注油过程几何模型, 生成了多面体网格, 通过瞬态计算, 衡量了燃油系统发生反喷风险, 找到问题的所在, 并对燃油系统进行了优化, 提高了加注性能。分析结果表明: 在汽车燃油系统开发前期应用 CFD 技术, 能较形象提供燃油体积分布、速度场等流场信息, 为燃油系统的开发和设计提供了有力的依据。

2 理论基础及数学模型

在燃油加注过程中, 加油管及油箱内同时存在两种流体, 一种是燃油, 一种是空气, 在计算过程中, 认为两种流体均不可压缩, 因此加注模拟过程需要使用多相流模型, 多相流模型的基本控制方程如下:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k = \sum_{l=1, l \neq k}^n \Gamma_{kl}, \quad k=1, \dots, n$$

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot \alpha_k (\boldsymbol{\tau}_k + T_k^t) + \alpha_k \rho_k f + \sum_{l=1, l \neq k}^n M_{kl} + \mathbf{v}_k \sum_{l=1, l \neq k}^n \Gamma_{kl},$$

$$k=1, \dots, n$$

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k h_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k h_k = \nabla \cdot \alpha_k (q_k + q_k^t) + \alpha_k \rho_k q_k''' + \alpha_k \rho_k f \cdot \mathbf{v}_k + \nabla \cdot \alpha_k (\boldsymbol{\tau}_k + \boldsymbol{\tau}_k^t) \cdot \mathbf{v}_k$$

$$+ \alpha_k \frac{\partial p}{\partial t} + \sum_{l=1, l \neq k}^n H_{kl} + h_k \sum_{l=1, l \neq k}^n \Gamma_{kl}, \quad k=1, \dots, n$$

式中, α_k 是第 k 相的体积分数, $\sum \alpha_k = 1$, $\mathbf{v}_k$ 是第 k 相的速度, p 为压力, Γ_{kl} 、 M_{kl} 、 H_{kl} 分别为相间的质量、动量及能量传递。

此燃油加注还需要计算 VOF 模型的非定常问题, VOF 法是一种模拟界面的方法, 对自由界面的处理一直是两相流、多相流中数值模拟的重点和难点。两相流、多相流流场中相与相之间交接边界上各种条件的设定对整个非定常流场的数值模拟结果有直接的影响。VOF 方法的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 来确定自由面, 追踪流体的变化, VOF 方法根据体积比函数来构造和追踪自由面, 针对两种和多种不相容流体的计算模型, 假设各形态物质在容积内所占体积比的比例为 a_q , 如果 $a_q=0$, 则表示该物质所占的体积为零, $a_q=1$, 则表示该物质充满全部空间。不同物质间的界面变化是由连续方程来计算完成。

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha q}}{\rho_q}$$

3 计算模型

3.1 表面模型的建立

计算模型包括油枪嘴、加油管、通气管及油箱。为了便于划分网格, 对油枪嘴简化成了简单的圆柱体, 首先把表面数据导入到 Hypermesh 中划分表面网格, 并生成一个封闭的空间, 再导入到 STAR-CCM+ 软件里, 细化后生成表面网格, 如图1所示:

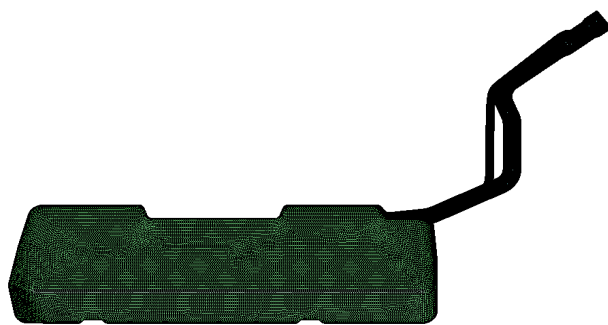


图 1 表面网格模型

3.2 体网格生成

流体网格是数值模拟的基础，网格质量对计算精度和收敛性都有着重要的影响，本次分析中体网格采用多面体网格划分，多面体是 STAR-CCM+ 的一种特有网格，其对模型的适应性和计算精度都非常高。油箱模型中体网格总数约为 40 万，边界层为 2 层，为了更好地捕捉液面细节，在油管处适当的细化，如图 2 所示。

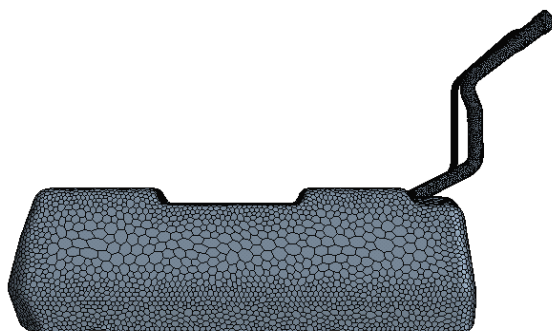


图 2 体网格模型

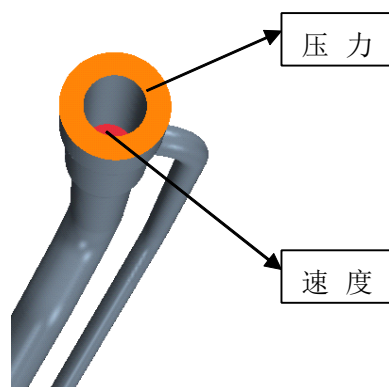


图 3 边界条件设置

计算过程中考虑主要因素，忽略一些对结果影响较小的次要因素，此次计算基于以下几点假设：1) 模拟的是从空箱开始加油；2) 假定整个加油过程为恒温状态；3) 不考虑两相交界面上的质量传递，即不考虑燃油的蒸发；4) 不考虑空气和燃油的自然对流。

本次算例在加油口的入口处采用速度进口边界，速度为 3.8m/s（约 45L/min），出口处采用压力出口边界，相对压力为零，其它为壁面，如图 3 所示

3.4 计算过程

由于分析的是非稳态工况，故采用 VOF 模型的瞬态模拟，VOF 方法可以模拟两相流的交界面的运动变化。本次模拟的物理时间为 5S, 采用 2 阶差分格式。为了提高稳定性，VOF 模型的计算时间步长应设置的尽量小一些，这里的时间步长取 0.001S。

4 原始方案计算结果分析

4.1 燃油体积分数分布

观察加油管整体在不同时刻燃油体积分数分布，如图 4 所示，可以看出，从 0.05 秒开始，加油管喉口处出现了回流现象，在整个计算时间段内，燃油在加油管内流动不是很顺畅，容易导致反¹⁷。

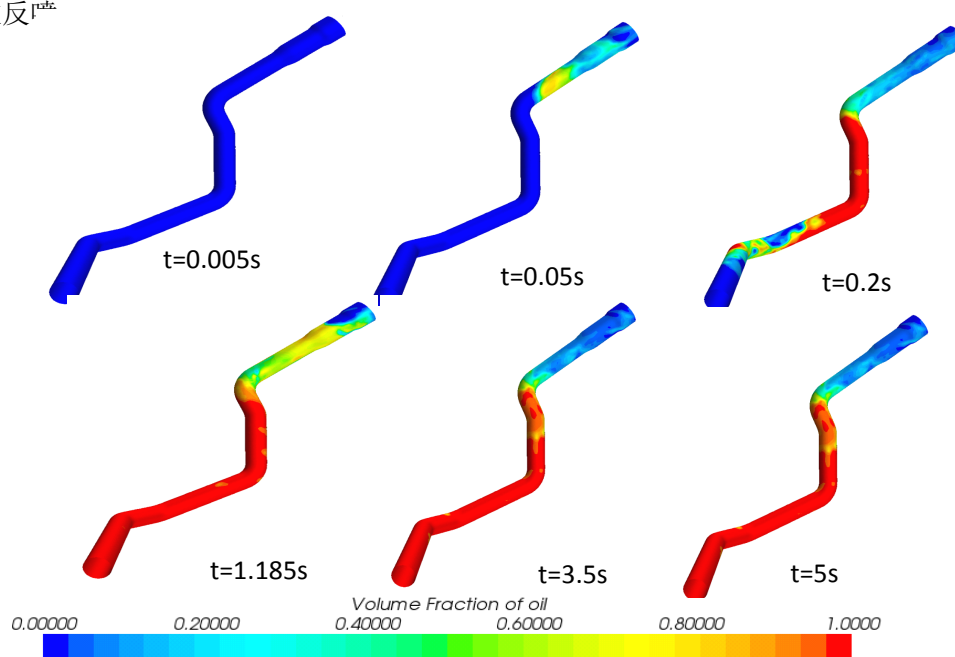
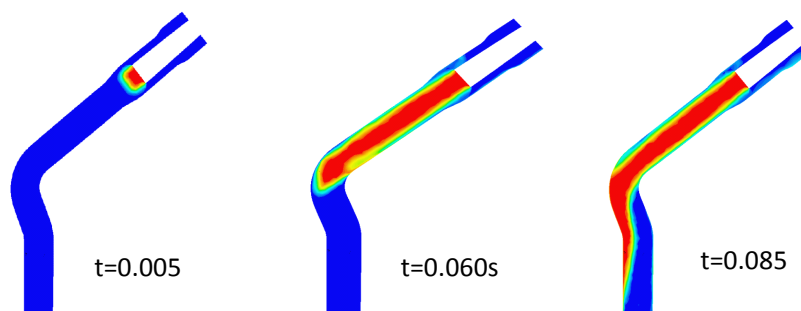


图 4 加油管整体体积分数

燃油在加油管第一个拐角处碰壁后的流动非常重要，一般提前跳枪现象都是发生在这个时候。图5所示为从加油管喉口到第一个拐角后的燃油体积分数切片图，燃油约在0.06 秒开始碰触管壁，然后沿着管壁流动，由于拐角处流动不顺畅，在0.085秒出口处即发生了明显的回流，在1.2S最明显；第一个拐角处的流动约在1.57秒基本趋于稳定。



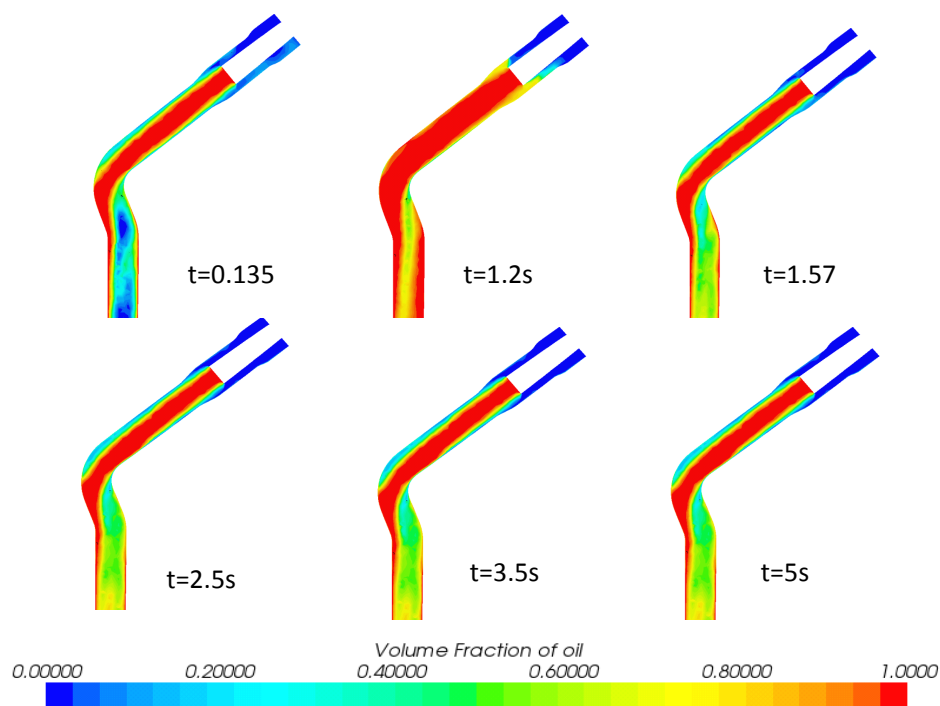


图 5 喉口附近燃油体积分数

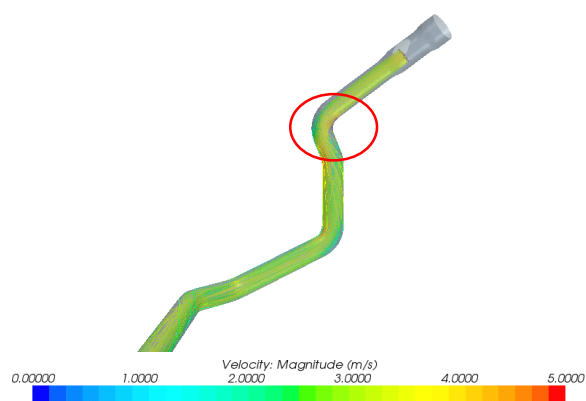


图 6 加油管内流线分布

4.2 流线分布

图6 所示为加油管内的流线分布，可以看出，燃油在经过拐角后会发生旋流，特别是在第一个拐角处（图中红圈内）。这说明加油管拐角处的设计也十分重要，如果结构不合理，燃油在拐角后的旋流就有可能造成流动不顺畅，导致燃油在拐角处堆积，从而引起燃油回流，导致反喷。

5 优化后结果分析

为了改进加油管和通气管的设计，避免反喷的风险，在不改动车身和底盘件的前提下，将加油管和通气管设计的尽可能的平滑，尽量减少折弯。

5.1 优化后燃油体积分数分布

观察优化后加油管整体在不同时刻燃油体积分数分布,如图 7 所示,可以看出,从 0.2 秒开始,加油管内的流动趋于稳定,燃油在加油管内流动顺畅,喉口处基本上没有出现回流现象。

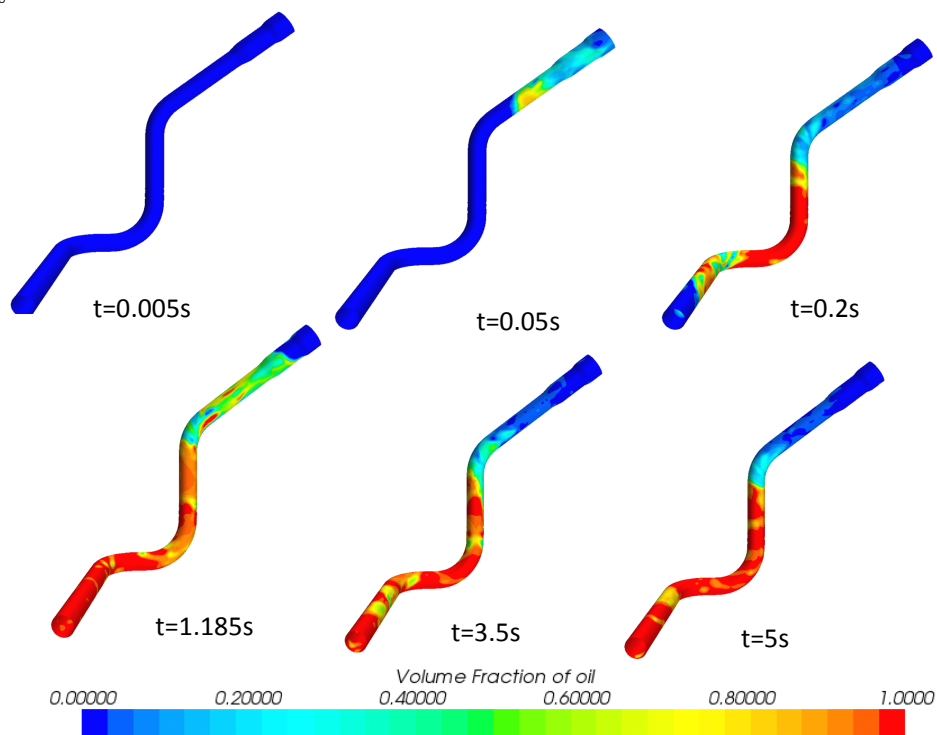
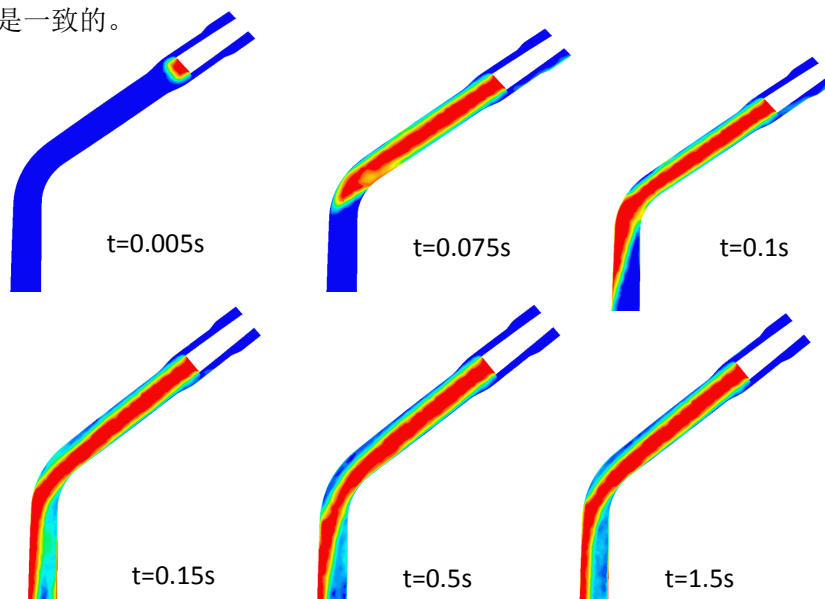


图 7 加油管整体体积分数

观察优化后的加油管在第一个拐角处碰壁后的流动,从图 8 可以看出然后在碰壁后很快就趋于稳定,喉口处的流动很顺畅,基本没有溅起油滴或发生回流,这与试验没有发生提前跳枪的结果是一致的。



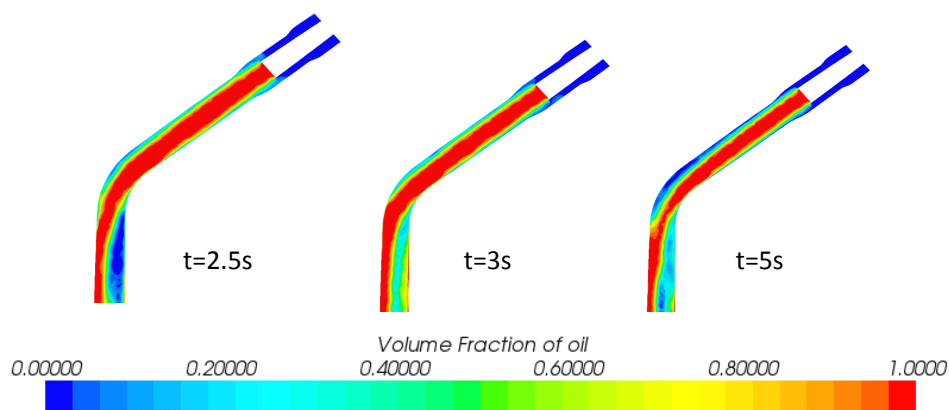


图 8 喉口附近燃油体积分

5.2 流线分布

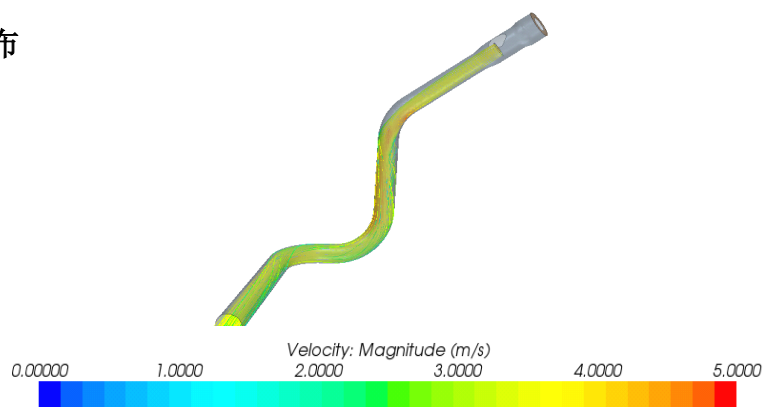


图 9 加油管内流线分布

观察优化后加油管内的流线分布，可以看出燃油流动比较顺畅，无堆积。

6 结论

(1) 将CFD分析技术应用在燃油系统设计中，可以较好地预测加油管的流动顺畅性，判断在加油过程中是否有提前跳枪的风险。

(2) 在分析两相流中采用VOF方法模拟交界面运动的变化是CFD分析的一个重要方法，VOF模型运用在燃油系统的设计和优化中具有一定的指导意义。

(3) 在前期的管路设计中，尽量走的平滑，减少折弯，不合理的结构可能会导致燃油的回流甚至反喷。

7 参考文献

- [1] STAR-CCM+帮助文档
- [2] 张健、方杰. VOF方法理论与应用综述,《水利水电科技进展》, 2005, 04
- [3] 安世亚太. 油箱晃动及传感器强度的分析研究
- [4] 陈作炳、孙巍、王学瑶. 旋转油箱内流场可视化与仿真系统的初探,《煤矿机械》, 2005, 05