喷油器瞬态两相流动的建模方法

何勇灵 丁 川

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要:为了研究柴油机喷油器内部的气穴现象,采用一种新的方法建模并进行瞬态两相流动的数值模拟. 首先求解针阀开启时刻的稳态流场,然后导入自编的程序进行瞬态流场的计算. 自编程序是基于 Fluent 提供的用户自定义函数,用于控制模型边界条件,分析针阀受力情况和计算其运动速度. 初始计算条件来自稳态流场,每一步瞬态计算都依赖之前流场的计算结果. 这种建模方法保证了数值模拟的连贯性和真实性,确定喷油器初始条件就可以完整地计算喷油过程,得到每一时刻喷油器内部的压力分布和两相流分布等数据. 研究结果表明,这种新的建模方法是可行和有效的,其数值模拟结果和实验结果相吻合,并能揭示出喷油器喷嘴入口处气穴现象的产生、发展和消失过程,是进一步深入开展柴油喷油系统两相流动特性研究的一种新的途径.

关 键 词: 柴油喷油器; 气穴现象; 瞬态特性; 数值模拟

中图分类号: TK 421

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0006-05

Method of modeling transient two-phase flow in injector

He Yongling Ding Chuan

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

Abstract: A new method was applied in modeling and numerical simulation in transient two-phase flow inside a diesel injector for cavitation study. The simulation was started in steady flow when the needle valve was just about to be lifted and then contined to compute unsteady flow with self-made program. User define function(UDF) provided by Fluent was used in definition of boundary condition, force analysis of needle valve and computation of its speed. The initial condition was from steady flow field then every unsteady computation was decided by former flow field. This method assured numerical simulation consistent and authentic. It is possible to simulate the whole fuel injection with injector's initial condition and get statistics of pressure and phase volume fraction distribution at any time inside an injector. Simulation results are close to experiment results and it evidences that this new modeling method is valid and reliable. Cavitation commencement, expansion and disappearance are revealed during fuel injection. This modeling method provides a new way to further study two-phase flow inside diesel injection system.

Key words: diesel injector; cavitation; transient characteristic; numerical simulation

柴油机喷油器内部的燃油流动过程是复杂的两相流动过程[1],而且由于喷嘴的尺寸很小,使得实验观测变得十分困难. 但随着 CFD 技术的发展,可以通过数值模拟分析的方法对喷油器内部的流场进行仿真研究.

参考文献[2]利用 Fluent 软件进行稳态流场的仿真,研究了 UDF(User Define Function)函数实现出口压力可变的程序;参考文献[3]进行瞬态流动仿真,但采用的是 AVL 的 HYDSM 软件,没有进行三维流场的分析;参考文献[4]采用

收稿日期: 2010-08-05; **网络出版时间**: 2011-12-21 09:56; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111221.0956.008

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111221.0956.008.html

作者简介: 何勇灵(1963 -),男,教授,广西藤县人,xkbhe@buaa.edu.cn.

STAR-CD 研究喷嘴的稳态特性;参考文献[5]根据 KIVA-3V 和他们实验室自己改进的代码成功进行了喷油器内部流场的瞬态仿真,并和试验对比验证了方法的可靠性. 然而,迄今为止的研究多是集中在对喷油器内部稳态流场的研究,而对瞬态流场的研究仍十分有限.

由于稳态模拟一般只讨论某一固定针阀升程时喷油器内部的流场,不考虑针阀运动对流场的影响,其分析结果不能有效地反映喷油器内燃油的真实流动过程,而燃油瞬态流的特性对喷嘴气穴现象的产生和燃油雾化过程有着重要的影响,为此,有必要深入开展对喷油器内部燃油瞬态流动规律的研究.

基于以上想法,本文在 Fluent6.2 环境下,就喷油器内燃油瞬态两相流动的建模方法和燃油瞬态流动特性进行了研究. 研究结果表明本文建模方法的有效性和准确性,为深入研究喷油器内部流场以及气穴现象提供了一个新的途径.

1　数学模型描述

本文研究中,采用混合相模型附加气穴模型和湍流模型,应用自编程序,对柴油机喷油器的喷油过程进行建模和计算模拟. 燃油采用的是$C_{16}H_{29}$,密度 830 kg/m^3, 粘度 0.003 32 kg/(m·s).

1.1　混合相模型

混合相模型是一种简化的多相模型,用于模拟各相速度不同的多相流. 喷油器内部燃油流动属于两相流范畴,由于喷油时间十分短暂,喷油器内部不会形成稳定的气液分界面,不采用 VOF 模型. 欧拉法在计算效率上不如混合相模型,过长的计算时间对于瞬态计算将是一个严重负担. 因此综合考虑混合相模型满足研究的需要,适合喷油器内燃油气相容积率很低的特点.

1.2　气穴模型

液体包含微小空气泡或核,在降压下它们会长大并形成气穴. 当局部压力小于蒸发压力时,为两种互相贯穿的流体设计的气穴模型可以模拟气泡的形成. 其中单个气泡的体积:

$$\Phi = \frac{4}{3}\pi R^3 \tag{1}$$

式中,R 为气泡半径.

蒸汽体积分数:

$$\alpha = \frac{\Phi\eta}{1+\Phi\eta} \tag{2}$$

式中,η 为单位体积内气泡数量.

假设气泡成长与破裂的过程由式(3)给出:

$$\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t} = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{2(P_B - P)}{3\rho_l}} & P_v > P \\ -\sqrt{\dfrac{2(P_B - P)}{3\rho_l}} & P_v < P \end{cases} \tag{3}$$

式中,P_B 为气泡内压力;P_v 为饱和蒸汽压力;ρ_l 为液相密度;P 为非凝结气体的部分压力. 计算中气泡半径设为 1×10^{-5} m,初始含气量设为 0.1%,工作温度在 50 ℃时柴油的饱和蒸汽压力为 1 280 Pa.

1.3　湍流模型

Fluent 提供多种湍流模型可供选择,在稳态仿真时采用标准的 k-ε 湍流模型和标准壁面函数,瞬态仿真时采用 Realizable k-ε 和非平衡壁面函数[6]. Realizable k-ε 模型对于平板和圆柱射流的发散比率有更精确的预测,尤其是在圆管射流的瞬态计算中 Realizable k-ε 模型的收敛性较好. 非平衡壁面函数主要是在有大的压力梯度或是不平衡程度很高时被使用.

1.4　求解器的选择

采用的混合相模型适用于分离式求解器,Fluent 提供了 3 种可选的压力速度耦合算法:SIMPLE,SIMPLEC 和 PISO. 对于包含湍流和附加物理模型的复杂流动,用压力速度耦合做限制,SIMPLEC 算法的收敛性比其他两种算法更好. 喷油器内部的流场仿真涉及混合相模型和气穴附加模型,选用 SIMPLEC 算法较为合适.

2　喷油器模型的建立

2.1　网格模型

喷油器的参数详见表 1. 在 Fluent 的前处理软件 GAMBIT 中取其一半建模. 动网格设定中将针阀表面与喷油器内壁的流场划分成两个区域,靠近针阀表面的部分为可动区域,另一部分为固定区域. 喷油器压力室采用四面体非结构网格,其余部分均为六面体结构化网格. 其中 2 个喷嘴出口的网格加密分别到 380 个,初始流场 560 484 个网格,如图 1 所示.

表 1　孔式喷油器基本结构参数

参数	数值	参数	数值
压力室半径/mm	0.5	喷孔直径/mm	0.3
针阀直径/mm	3	喷孔数	4
喷孔长度/mm	0.8	针阀最大升程/mm	0.25

2.2　喷射压力的设置

采用实验测得的靠近喷油器一端油管的压力变化近似作为喷油器的喷射压力. 将实验得到的

压力曲线用 Matlab 软件分段进行拟合,用得到的分段函数编程计算喷射压力值,赋给喷油器的入口网格. 这样瞬态计算中实现了每一个时间步都更新喷射压力. 流程图如图 2 所示.

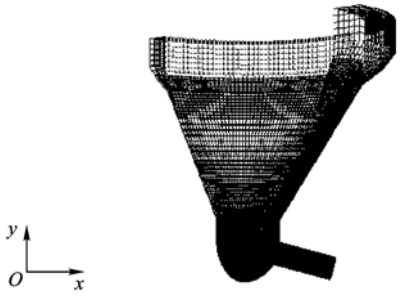

图 1 喷油器模型的网格

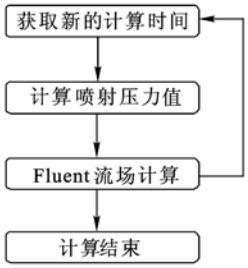

图 2 计算喷射压力流程图

2.3 针阀运动规律的求解

喷油开始时刻,作用于针阀的燃油压力高于针阀受到的弹簧压力,针阀跳起;喷油结束时刻,燃油压力迅速降低,弹簧使针阀复位落座. 针阀进行的是变速运动,根据 Fluent 瞬态计算的特点,将整个针阀运动过程分成若干相等的小时间段,每个时间段内简化为匀速运动. 平均速度为每一个时间步内中点处的速度,固定时间步长,描述针阀运动的方程为

$$a = \frac{F_{\text{燃油压力}} - F_{\text{弹簧力}}}{m} \tag{4}$$

第 1 个时间步:

$$\overline{v_{0\to1}} = v_0 + a_0 \times 0.5 \times t$$

第 2 个时间步:

$$\overline{v_{1\to2}} = \overline{v_{0\to1}} + a_1 \times t$$

第 N 个时间步:

$$\overline{v_{n-1\to n}} = \overline{v_{n-2\to n-1}} + a_{n-1} \times t$$

由此可见,计算针阀的运动速度依赖于上一步的速度值和计算结束时针阀的加速度. 其中,弹簧压力根据 Fluent 中针阀运动位移乘以弹性系数得到,燃油压力是积分针阀表面受到的压力得到,程序流程图如图 3 所示.

2.4 针阀的限位

柴油喷油器工作过程中,针阀达到最大升程后受到内部结构的限制,不会继续上升,针阀落座后会保持在升程很小的位置附近跳动. 在 Fluent 仿真中这些问题都需要特别处理,否则可能造成计算结果错误或出现负网格.

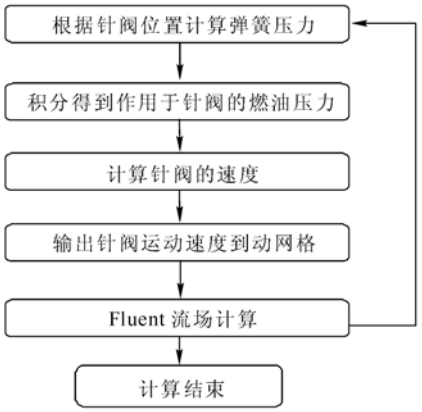

图 3 针阀运动的程序流程图

研究中对针阀最大升程和最小位移两种情况进行了限位处理,即当程序从 Fluent 计算结果中读取针阀升程超过 0.24 mm 时,将针阀速度置为 0,忽略因为针阀惯性引起的局部跳动. 当针阀落座时,即针阀升程低于 0.03 mm 时,同样将针阀速度置 0.

3 建模方法的验证

为了验证建模方法的可行性和有效性,本文根据喷油实验的初始条件,进行了喷油器内部流场的数值模拟,和实验结果进行对比. 喷油器详细参数见表 1. 综合考虑计算效率,仿真的时间步长设为 0.012 ms,是实验采集频率 0.006 ms 的 2 倍,总计算时间控制在 8 h.

喷油泵转速为 800 r/min,实验得到的喷油器喷射压力如图 4 所示,针阀升程如图 5 所示. 0.426 ms针阀到达最大升程,0.75 ms 开始落座,喷油时间约 1 ms.

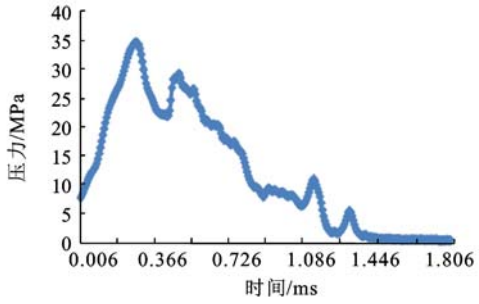

图 4 实验喷射压力

由于流场计算的需要,针阀最小升程设为 0.02 mm[7],对应图 4 和图 5 中 0.24 ms 时刻. 初始喷射压力为 32 MPa,出口边界条件保持一个大气压,仿真得到的针阀位移结果如图 6 所示.

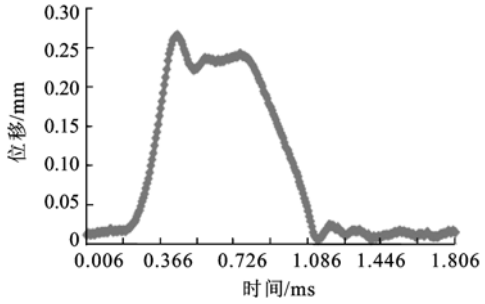

图 5　针阀位移(实验结果)

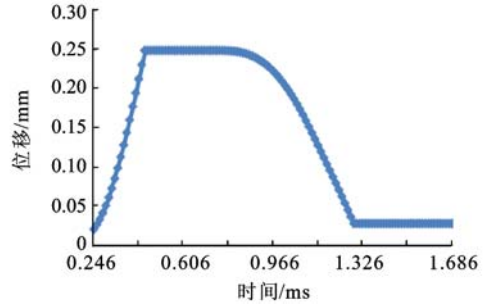

图 6　针阀位移(仿真结果)

图 6 中针阀开启和落座的时间和图 5 实验结果基本吻合. 图 5 中针阀达到最大升程时有一个小跳动,这是和喷油器壁面碰撞后反弹的结果,仿真结果是平滑的. 这个差异和限位条件的设置有关,对喷油量的影响很小,不影响针阀运动过程的整体预测.

喷油器的出口质量流量(燃油流量)如图 7 所示,针阀不断抬起,燃油流量不断上升;当针阀到达最大升程时,燃油流量最大达到 45.5 g/s;随后燃油流量逐渐下降.

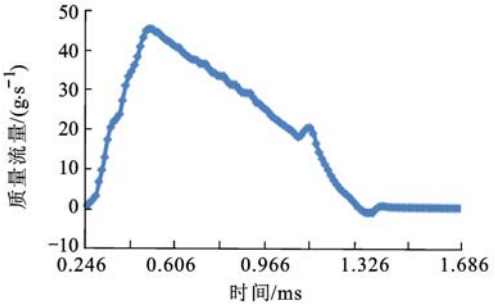

图 7　四孔喷油器的出口质量流量

根据图 7 积分燃油流量得到,800 r/min 时每循环喷油量为 0.029 g,按模型设定的燃油密度 830 kg/m^3 计算,100 循环供油量为 3.5 ml. 实验测得 100 循环的喷油量为 3.8 ml,误差为 7.9 %. 分析误差产生的原因有:①喷油过程是从针阀升程 0.02 mm 开始计算;②循环变动造成的差异.

上述实验结果和模拟计算结果的对比表明,本文提出的建模方法是可行和有效的,依据该方法所建立的计算模型和仿真结果是正确的.

4　喷油器气穴现象的揭示

通过分析数值模拟结果发现柴油机喷油器的喷嘴入口处容易产生气穴现象,受惯性影响拐角处流体与壁面分离,造成局部低压,导致了气穴现象的出现. 图 8 为在喷油泵转速 800 r/min,喷油量为 3.5 ml/100 循环的条件下喷嘴处瞬态流场的数值模拟结果,其中 1 为纯液相,0 为纯气相,即图中深色区域代表气泡聚集的区域.

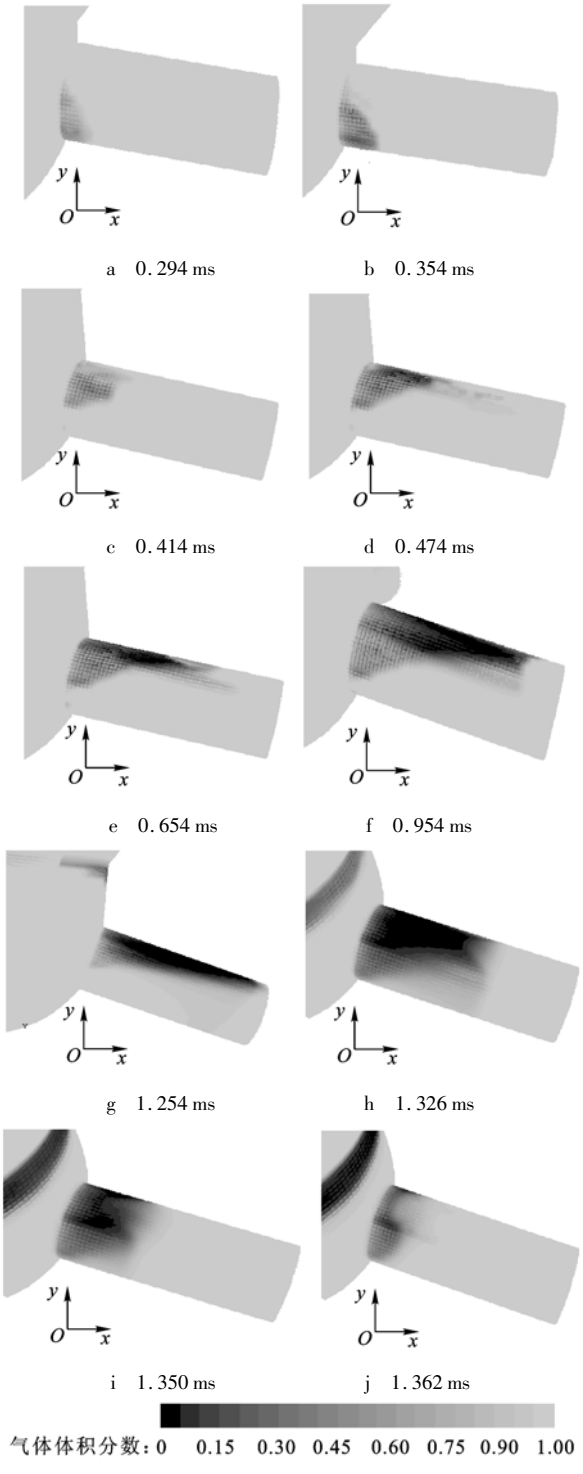

图 8　气穴分布(时间步长:0.012 ms)

从图 8 中可以清晰地看到气穴现象的产生、发展和消失过程. 对于竖直放置的喷油器,气穴现象最初出现在喷嘴的下方拐角处(见图 8a),随后发展和扩大(见图 8b);在 0.414 ms 针阀达到最大升程,气穴现象从喷嘴下部转移到上部(见图 8c);针阀保持最大升程时喷嘴上部的气穴不断发展和扩大(见图 8d ~ 图 8f);1.254 ms 时刻,针阀开始落座,此时气穴发展到喷嘴出口附近,几乎形成水击现象(空气回流到喷嘴内部);随后针阀落座,喷嘴内部的气穴现象在 0.1 ms 时间内迅速消失,但压力室中出现气穴环带(见图 8g ~ 图 8j). 这是因为针阀表面和压力室壁面形成了明显的收缩和扩张,造成局部压降产生了大量气穴. 由于压力室和针阀都是轴对称的几何体,就形成了气穴环带.

图 9 所示为在针阀开始落座时喷嘴的压力分布图. 从图中可以看出,压力分布图的低压区和图 8g 中气穴分布区域几乎是一致的.

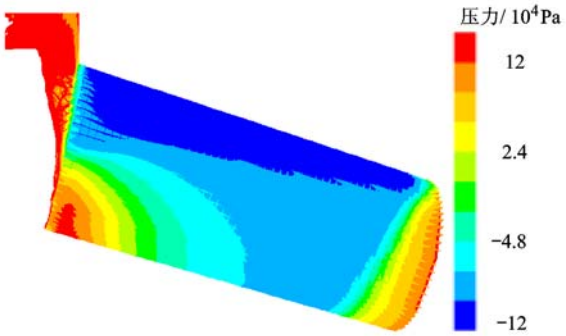

图 9 针阀开始落座时刻压力分布图

由此可见,通过瞬态建模仿真法,可以准确地模拟喷油器内部的瞬态流场,并揭示了气穴现象的产生、发展和消失过程,同时还可预测出气穴的规模(强度)以及持续时间.

5 结 论

1) 通过二次开发,在 Fluent 环境下,可以对柴油机喷油器内部的三维瞬态两相流动进行建模和仿真.

2) 模拟结果和实验结果对比表明,本文提出的建模方法是可行和有效的,它保证了数值模拟的连贯性和真实性.

3) 通过三维瞬态模拟,可以揭示喷油器喷嘴入口处气穴现象的产生、发展和消失过程.

4) 本文的建模方法可为深入研究柴油喷油系统两相流动特性提供了一种新的途径.

参考文献 (References)

[1] He Yongling, Zhao Zhihe, Liu Jianxin, et al. Two-phase flow of liquid-gas in diesel fuel injection system and their effect on engine performances[J]. International Journal of Thermal and Fluid Sciences, 2001, 10(3): 223 - 227

[2] 徐波,张宗杰,戚茂国,等. 柴油机多孔式喷油嘴中燃油三维流动分析[J]. 现代车用动力, 2005, 2: 17 - 22
Xu Bo, Zhang Zongjie, Qi Maoguo, et al. Analysis of the flow in the nozzle of a multi-hole diesel engine injector[J]. Modern Vehicle Power, 2005, 2: 17 - 22 (in Chineses)

[3] 何志霞,王谦,李德桃,等,高压共轨喷油器内非稳态流动数值模拟分析[J]. 江苏大学学报, 2007, 28(2): 142 - 146
He Zhixia, Wang Qian, Li Detao, et al. Numerical simulation of transient flow in high pressure common rail injector[J]. Journal of Jiangsu University, 2007, 28(2): 142 - 146 (in Chinese)

[4] 汪翔,苏万华. 空化过程对柴油喷嘴内流特性的影响[J]. 内燃机学报, 2007, 25(6): 481 - 487
Wang Xiang, Su Wanhua. The influence of cavitation processes on the internal flow characteristics of diesel injector nozzle[J]. Trandaction of CSICE, 2007, 25(6): 481 - 487 (in Chinese)

[5] Lee W G, Reitz R D. A numerical investigation of transient flow and cavitation within minisac and VCO diesel injector nozzles [C]//Proceedings of ASME Internal Combustion Engine Division 2009 Spring Technical Conference. Wisconsin Milwaukee, USA: ICES2009, 2009: 643 - 652

[6] Som S, Aggarwal S K, EI-Hannouny E M, et al. Investigation of nozzle flow and cavitation characteristics in a diesel injector[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132: 042802

[7] 张思超. 柴油机喷油系统油气两相流模拟研究[D]. 北京:北京航空航天大学交通科学与工程学院, 2008
Zhang Sichao. Simulation research of fuel-gas two-phaseflow in the fuel injection system of diesel engine [D]. Beijing: School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008 (in Chinese)

(编 辑:张 嵘)