

气泡模型在喷油系统模型仿真中的应用

何勇灵, 李汝宁*

(北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 为了更准确预测喷油系统中压力脉动变化, 引入了基于气泡溶解和析出的物理过程的气泡模型, 将其应用到柴油机喷油系统模型中, 并编制了喷油系统模型仿真程序。对含气率恒定和应用气泡模型的柴油机喷油系统分别进行仿真, 并将仿真结果与试验数据进行了对比。对比结果表明: 含气率恒定的喷油系统模型仿真结果曲线比较平滑, 而应用了气泡模型的喷油系统模型中, 由于气泡体积随着系统压力和时间而变化, 尤其在压力大于 45 MPa 后, 气泡体积减小速度增大, 造成压力出现震荡, 仿真结果和试验数据更加吻合。该研究不仅验证了气泡模型应用在柴油机喷油系统仿真中的可行性, 而且为以后气液两相条件下的柴油机喷油系统模拟研究提供了基础。

关键词: 柴油机, 模型, 仿真, 喷油系统, 压力脉动

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.027

中图分类号: TK421+.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0142-05

何勇灵, 李汝宁. 气泡模型在喷油系统模型仿真中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 142—146.

He Yongling, Li Runing. Application of gas bubble model to fuel injection system simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 142—146. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在农业机械中, 柴油机的应用非常广泛。国内外的实验观察和研究表明, 在柴油机喷油系统中, 都存在着由于压力变化而引起的气泡的产生和破灭, 因此气泡的产生使得柴油机传统泵-管-嘴喷油系统内所进行的液力过程不是燃油的单相流动, 而是复杂的液-气两相流动的过程^[1-2]。喷油系统中气泡的存在, 会给柴油机与喷油系统之间的正确匹配带来很大的困难。建立喷油系统中气泡数学模型, 合理的预测喷油系统压力脉动过程中气泡产生及破灭过程, 对喷油系统的设计及使用具有重要意义。

一些学者在柴油机喷油系统研究方面, 通过简化系统, 分别提出了自己的数学模型^[3-4], 然而他们的模型均未考虑气泡的影响, 因而只能对未发生气泡的工况进行模拟。

本文根据流体动力学原理, 在高压油管中建立了伴随气泡产生的波动方程, 并给出基于气泡溶解和析出物理过程的气泡模型和有效体积弹性模量数学模型。并以此模型为基础编制了计算机程序, 并通过试验进行了验证。

1 数学模型

1.1 喷油泵和喷油器端边界液力状态方程

本文视柱塞腔、出油阀增压腔和针阀腔为控制容积, 在控制容积中, 假设压力分布均匀。喷油泵泵端和喷油器嘴端的边界条件为 2 种方程, 描述控制容积内压力变

化为连续方程, 描述出油阀和针阀运动为牛顿第二定律。详见文献[5-7]。

泵-管-嘴式喷油泵泵端及喷油器嘴端边界液力状态方程为常微分方程组。常微分方程组的求解方法主要有 Runge-Kutta、Euler、改进欧拉法等。在对喷油系统理论模型仿真分析中, 因被积函数对各个未知变量未必均可导, 即所求函数有不连续点。当在出油阀、针阀运动受到限制时, 若应用理论精度较高的数值计算方法, 计算结果精度反而更差。通过对数值积分方法及实际喷油过程特点的分析, 本文的液力状态方程组的求解方法选用改进欧拉法进行求解。

1.2 高压油管内燃油流动波动方程

连接柱塞式喷油泵以及喷油器的高压油管为一长为 L 的等截面管子(如图 1 所示, 箭头方向为燃油流动方向), 燃油在管内流动时, 其压力 p 和速度 u 为时间 t 和坐标 x 的函数^[8]。

$$\begin{cases} p = p(t, x) \\ u = u(t, x) \end{cases} \quad (1)$$

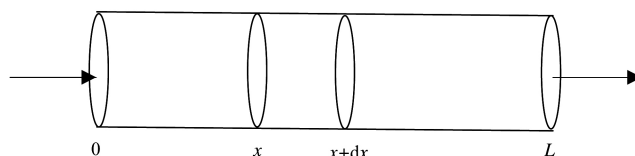


图 1 高压油管

Fig.1 High pressure fuel pipe

在图 1 中取高压油管中边界为 x 和 $x+dx$ 的微元体。根据牛顿第二定律, 该微元体在轴向受力有以下关系。

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho f = 0 \quad (2)$$

收稿日期: 2010-05-24 修订日期: 2010-07-28

作者简介: 何勇灵 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为内燃机燃油喷射技术。北京 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 100191。Email: xkbhe@buaa.edu.cn

*通信作者: 李汝宁 (1981—), 男, 博士生, 主要研究方向为内燃机燃油喷射技术。北京 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 100191。Email: liruning@foxmail.com

式中, ρ 为燃油密度, kg/m^3 ; f 为单位质量流体阻力, N 。其计算公式为

$$f = \frac{\lambda u^2}{2d} \quad (3)$$

式中, λ 为燃油流动阻力系数, 当雷诺数 $Re \leq 2000$ 时, 流动为层流, $\lambda = 64/Re$; 当 $Re > 2000$ 时, 流动为紊流, $\lambda = 0.3164/Re^{0.25}$; d 为油管直径, m 。

在该微元体中, 由于压缩前后燃油量不变有

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{a^2 \rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

式中 a 为燃油压力波传播速度, m/s 。

公式 (2) 和 (4) 组成高压油管内燃油流动的波动方程。该偏微分方程的初始条件和边界条件分别为

$$\begin{cases} p(x, 0) = p_r \\ u(x, 0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} p(0, t) = p_k \\ p(L, t) = p_n \end{cases} \quad (6)$$

式中, p_r 为系统残余压力, Pa ; p_k 为高压油管泵端压力, Pa ; p_n 为高压油管嘴端压力, Pa 。

根据特征线原理, 式 (2) 和 (4) 特征线为 2 条直线, 分别为: $dt/dx = 1/a$, $dt/dx = -1/a$ 。在这 2 个特征方向上的相容性方程为

$$\begin{cases} \frac{du}{dx} + \frac{f}{a} + \frac{1}{a\rho} \cdot \frac{dp}{dx} = 0 \\ \frac{du}{dx} - \frac{f}{a} - \frac{1}{a\rho} \cdot \frac{dp}{dx} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式 (7) 在 $x-t$ 平面进行离散差分计算, 网格划分如图 2 所示。其中 x 方向代表高压油管轴线方向, 长度间隔为 dx ; t 方向代表时间发展方向, 时间间隔为 dt , 斜线为特征线方向。沿特征线方向建立的一阶差分方程化简后得

$$u(i, j) = \frac{1}{2} \cdot [u(i-1, j-1) + u(i+1, j-1)] + \frac{1}{2a\rho} \cdot [p(i-1, j-1) - p(i+1, j-1)] - fdt \quad (8)$$

$$p(i, j) = \frac{1}{2} \cdot a\rho[u(i-1, j-1) - u(i+1, j-1)] + \frac{1}{2} [p(i-1, j-1) + p(i+1, j-1)] \quad (9)$$

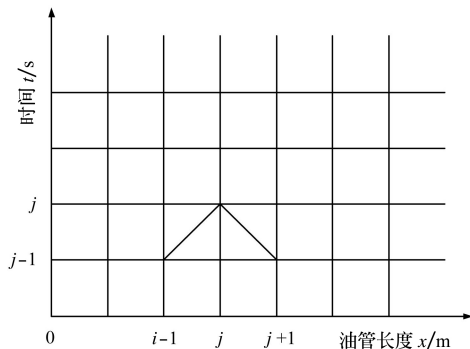


图 2 特征线正交网格图

Fig.2 Grids of feature lines

1.3 气泡模型

在高压油管中的燃油通常溶解一定量的空气, 此外还有以游离态存在的气泡。由亨利定律可知^[9-10], 在一定温度下, 初始状态下溶解于液体中的气体体积 V_{is} 正比于液体的绝对压力, 即

$$V_{is} = S \frac{p_i}{p_0} V_0 \quad (10)$$

式中, p_i 为初始压力, Pa ; p_0 为大气压, Pa ; S 为溶解度系数, 该系数随着温度的升高而降低; V_0 为压力为大气压时, 溶解于液体中的气体体积, m^3 。

当油管内压力下降到柴油的空气分离压 p_0 时, 溶解在柴油中的气体析出形成气泡, 溶解的气体体积减小, 自由气泡体积增加; 当压力升高时, 气泡又会重新溶解于柴油中, 使溶解的气体体积增加, 自由气泡的体积变小^[11-13]。

在气-液两相条件下, 燃油的密度 ρ 、弹性模量 E 和声速 a 公式为^[14-16]

$$\begin{cases} \rho = c\rho_{gas} + (1-c)\rho_{liquid} \\ E = \frac{E_{gas}E_{liquid}}{cE_{liquid} + E_{gas}} \\ a = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \end{cases} \quad (11)$$

式中, c 为燃油含气率(体积分数); ρ_{gas} 为空气密度, kg/m^3 ; ρ_{liquid} 为燃油密度, kg/m^3 ; E_{gas} 为空气弹性模量, Pa ; E_{liquid} 为燃油弹性模量, Pa 。

根据公式 (11) 可知, 燃油中的气泡体积的变化会改变柴油的有效体积弹性模量, 由于有效弹性模量的改变声速也随之变化, 因此气泡体积的变化会影响喷油系统压力脉动瞬态过程。

假设在初始条件下, 柴油处于气体溶解和析出的平衡状态, 那么 t 时刻柴油中气泡体积 V_{ib} 为

$$V_{ib} = V_{ib} + V_{is} - V_{ts} \quad (12)$$

式中, V_{ib} 为柴油中初始气泡体积, m^3 ; V_{is} 为初始状态下溶解于柴油中的空气体积, m^3 ; V_{ts} 为 t 时刻溶解于柴油中的气体体积, m^3 。

因此根据亨利定律, 假设温度不变, 喷油系统中某处压力为 p 时, 气体析出和溶解趋于平衡状态下, 溶解的气体体积 $V_{\infty S}$ 为

$$V_{\infty S} = p \frac{V_{is}}{p_i} \quad (13)$$

在 t 时刻溶解于燃油中的气体体积 V_{ts} 为

$$V_{ts} = \begin{cases} (V_{is} - V_{\infty S})e^{\frac{-t}{\tau_{out}}} + V_{\infty S} & (p < p_o) \\ (V_{is} - V_{\infty S})e^{\frac{-t}{\tau_{in}}} + V_{\infty S} & (p \geq p_o) \end{cases} \quad (14)$$

式中, τ_{out} 为气体析出时间常数, s ; τ_{in} 为气体溶解时间常数, s ; p_o 为空气分离压, Pa 。

2 模拟结果及分析

为了验证柴油机喷油仿真系统和气泡模型的合理

性,在喷油泵试验台上进行试验,图3为柴油机台架试验测试原理图,通过安装在高压油管和气缸盖上的压力传感器和安装在喷油嘴上的针阀升程传感器以及设置在飞轮处的磁电式传感器,可获得不同工况以及不同喷油系统参数条件下的泵端和嘴端压力波信号、针阀升程信号、气缸压力信号以及基准信号。试验用的喷油系统主要部件参数见表1。

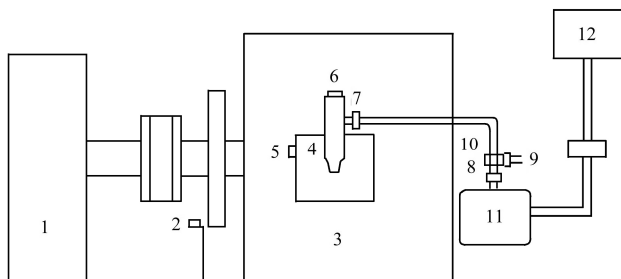


图3 柴油机台架试验测试原理图
Fig.3 Sketch of diesel engine experiment system

表1 喷油系统主要部件参数

Table 1 Main parameters of fuel injection system

类 型	参数值
凸轮类型	切线凸轮
凸轮升程/mm	8
曲轴转速/($r \cdot \min^{-1}$)	2 000
功率/kW	11
燃油消耗率/($g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$)	222.1
柱塞直径/mm	7.8
出油阀类型	等容式出油阀
出油阀最大升程/mm	3
出油阀直径/mm	5
针阀开启压力/MPa	19
针阀最大升程/mm	0.3
高压油管长度/mm	600
高压油管内径/mm	2

为进一步检验引入气泡模型的喷油泵模型的合理性,作者编制了2套喷油系统仿真程序:其中一套应用气泡模型(程序1)另一套设定含气率不变(程序2)。流程图如图4所示,运行结果如图5和图6所示。

根据试验可以观测到,当喷油泵转速1 000 r/min,开启压力19 MPa,燃油消耗率222.1 g/(kW·h)工况下,泵、嘴处和高压油管中均有气泡的存在。

通过图5和图6可以观察到,当喷油泵端和嘴端压力升高到大约45 MPa后,会出现压力的振动现象,这些现象产生主要由于气泡体积变化,引起压力变化。在程序1中,由于引入气泡模型,所以它能够模拟气泡产生和破灭过程,所以和试验数据比较吻合;而程序2由于设定气泡含量不变,在压力升高过程中没有气泡体积的变化,所以运行结果曲线比较平滑。

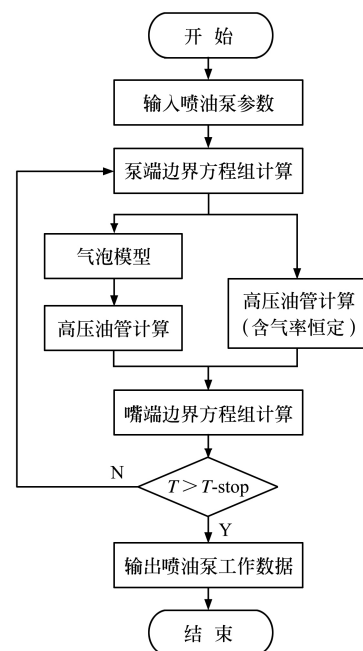


图4 喷油仿真系统流程图

Fig.4 Flow chart of fuel injection simulation system

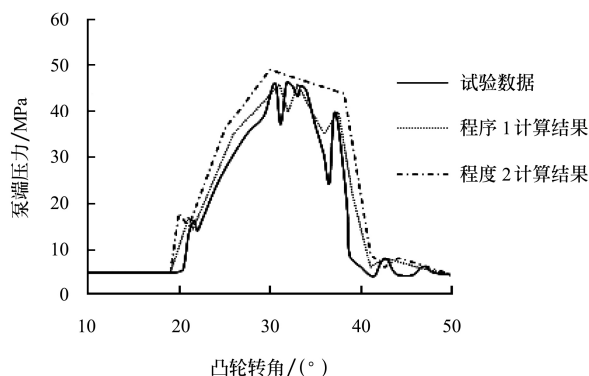


图5 高压油管泵端压力

Fig.5 Pressure of fuel pipe next to pump

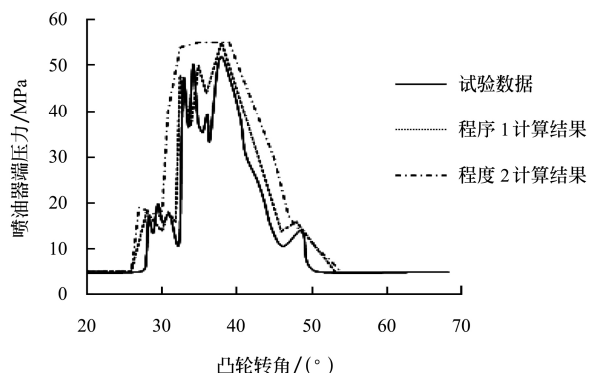


图6 高压油管嘴端压力

Fig.6 Pressure of fuel pipe next to nozzle

3 结论与讨论

1) 本文在柴油机喷油系统建模过程中,将喷油系统内所进行的液力过程视为液-气两相流动的过程,并考虑了气泡体积变化对系统特性的影响,克服了以往喷油系

统建模中假设液力过程为单相流或者液力过程为两相流, 但气泡均匀分布的缺点, 更真实的反映了实际的喷油过程, 仿真数据与试验数据更加吻合。因此利用本文编制的柴油机喷油系统仿真程序, 可以成功预测各种工况下的喷油系统燃油喷射规律。

2) 在气泡模型中, 柴油机各种工况下的初始气泡体积(V_{ib})、气体析出时间常数(τ_{out})和溶解时间常数(V_{in})将影响到燃油的弹性模量、密度和气泡析出和溶解的速度, 进而影响到喷油系统模型运行的精度。因此这些参数的确定还可以做许多深入的工作。

[参 考 文 献]

- [1] 何勇灵, 刘建民, 李民, 等. 农用柴油机喷油系统中液-气两相流动过程实验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1): 31—34.
He Yongling, Liu Jianxin, Li Min, et al. An experiment investigation on process of two-phase flow in fuel injection system of agricultural diesel engine[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(1): 31—34. (in Chinese with English abstract)
- [2] 何勇灵, 刘建新, 赵致和, 等. 一种研究柴油机喷油系统中气泡的新方法[J]. 内燃机学报, 2000, 18(3): 254—257.
He Yongling, Liu Jianxin, Zhao Zhihe, et al. A new method for study cavitation in fuel injection system of diesel engines[J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(3): 254—257. (in Chinese with English abstract)
- [3] Hountalas D T, Kouremenos A D. Development of a fast and simple simulation model for the fuel injection system of diesel engines[J]. Advancer in Engineering, 1998, 29(1): 13—28.
- [4] Kouremenos D A, Hountalas D T, Kouremenos A D. Development and validation of a detailed fuel injection system simulation model for diesel engines[J]. SAE 990527.
- [5] 毛范海. AD 型喷油泵燃油喷射系统计算机建模和仿真分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
Mao Fanhai. Modeling and Simulation Fuel Injection System of AD Type Pump by Computer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [6] 蔡梨萍. 基于 MATLAB 的柴油机高压喷油过程的模拟仿真[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
Cai Liping. Simulating Calculation of High Pressure Injection Process of Diesel Engine Based on MATLAB[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [7] Masahiro Okajima, Masaaki Kato, Hiroyuki Kano, et al. Contribution of optimum nozzle design to injection rate control[J]. SAE 910185.
- [8] 李旭林, 何勇灵. 两相条件下柴油机喷油系统的数学模型[J]. 内燃机学报, 2007, 25(5): 428—432.
Li Xulin, He Yongling. A model for diesel injection system simulation under two-phase condition[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(5): 428—432. (in Chinese with English abstract)
- [9] Shu J J. A finite element model and electronic analogue of pipeline pressure transients with frequency dependent friction [J]. Transactions of ASME, 2003, 25(1): 194—198.
- [10] Harris R M, Edge K A, Tilley D G. Suction dynamics of positive displacement axial piston pumps[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1994, 116(2): 81—287.
- [11] 蒋丹, 李松晶, 包钢. 伴随气泡和气穴低压管路瞬态的建模和分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(12): 2062—2067.
Jiang Dan, Li Songjing, Bao Gang. Modeling and analyzing of low pressure pipeline transients accompanying gas bubbles and cavitation[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(12): 2062—2067. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李松晶, 朱冬. 含气泡和气穴的液压管路瞬态实验研究[J]. 机床与液压, 2006(8): 146—147.
Li Songjing, Zhu Dong. Experiment research on the fluid transient in hydraulic pipeline including cavitation and gas bubbles[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006(8): 146—147. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李松晶, 鲍文. 采用 MATLAB Simulink 的液压管路瞬态压力脉动分析[J]. 工程力学, 2006, 23(9): 184—188.
Li Songjing, Bao Wen. Analysis of transient hydraulic pressure pulsation in pipelines using matlab Simulink[J]. Engineering Mechanical, 2006, 23(9): 184—188. (in Chinese with English abstract)
- [14] Bergant A, Simpson A R. Pipeline column separation flow regimes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(8): 835—848.
- [15] Li S J, Edge K A, Bao W. Simulation of hydraulic pipeline pressure transient using Matlab Simulink[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control. Hangzhou, China: International Academic Publishers/Beijing World Publishing Corporation, 2005: 468—471.
- [16] 蒋丹. 存在气泡和气穴时无阀微泵动态特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 20—26.
Jiang Dan. Study on Dynamic Characteristics of a Valve-Less Micropump Accompanying Gas Bubbles and Cavitation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 20—26. (in Chinese with English abstract)

Application of gas bubble model to fuel injection system simulation

He Yongling, Li Runing^{*}

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

Abstract: In order to predict pressure fluctuation of the diesel fuel injection system accurately, the gas bubble model based on gas bubble resolving and releasing physical processes was applied to the diesel fuel injection system model, and simulation program of diesel fuel injection system model was presented. The diesel fuel injection system model with the constant void fraction and the gas bubble model were simulated respectively, and the simulation results were compared with experimental data. The results showed that the simulation result curve of the diesel fuel injection system model with constant void fraction was smooth. But for the model of fuel injection system simulation with gas bubble, the simulation result was more coherent with the experimental data because the gas bubble volume varied with system pressure and time, particularly when the pressure exceeded 45 MPa, and the increasing of reduction rate of gas bubble volume caused the pressure shock. The study not only verifies the application feasibility of gas bubble model in diesel fuel injection system, but also provides reference for diesel fuel injection system model under two-phase condition.

Key words: diesel engines, models, simulation, fuel injection system, pressure fluctuation

(上接第 136 页)

二、投稿要求

(一) 论文征集截止日期

2011 年 5 月 8 日

(二) 论文格式与评审

论文请发电子邮件到 lxj7988@163.com, 论文格式参照《农业工程学报》写作规范【农业工程学会网站 www.tcsae.org 信息公告栏或中国国家农产品加工信息网 www.app.gov.cn 公报公告栏的“农产品产地初加工学术研讨会通知及征文启事(第一轮)”下载】。2011 年 7 月 20 日前为论文评审阶段, 通过评审可发录用通知, 论文版面费按照《农业工程学报》相关规定收取。

三、参会报名

参会回执见网站 www.tcsae.org 信息公告栏或中国国

家农产品加工信息网 www.app.gov.cn 公报公告栏“全国农产品产地初加工学术研讨会通知及征文启事(第一轮)”附件, 填好后发送至 lxj7988@163.com, 报名电话 010-65923855, 参会详细事项见第二轮通知。

四、联系方式

联系人: 农业部规划设计研究院农副产品加工研究所

刘晓军 孙静 张洪晶

联系电话: 010-65923855 传真: 010-65923855

Email: lxj7988@163.com

农业工程学会网站 www.tcsae.org

农产品加工信息网 www.app.gov.cn

二〇一一年一月二十六日