

高压共轨喷油器内部瞬态流动三维数值模拟

罗新浩 王谦

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘要: 喷油器的内部流动以及后续的喷雾特性直接影响了柴油机的排放和经济性能, 对喷油嘴的内部流动进行三维瞬态数值模拟分析就显得更为重要。利用计算流体力学软件 STAR-CD 建立三维动态计算网格并进行模拟分析, 得到了喷嘴内部的压力分布和喷嘴出口的平均速度变化等信息。计算结果可为缸内喷雾研究提供更真实的边界条件, 以及对喷嘴结构参数的优化设计具有指导意义。

Abstract: The investigation of the three-dimension transient flow characteristics inside the nozzle becomes more and more important because the flow status in the nozzle and fuel injection immediately influence the emission and economy performance of diesel engines. The three dimension dynamic model was performed by computational fluid dynamics software package STAR-CD. The results including pressure distributing and average velocity in the nozzle can provide more realistic boundary conditions for the spray model, which are very useful for the optimum design of the nozzle structure parameters.

关键词: 高压共轨 柴油机 数值模拟 喷嘴 CFD

Key words: High-pressure common-rail, Diesel engine, Numerical simulation, Nozzle, CFD

1 前言

燃油喷射系统对柴油机的动力性、经济性和排放性发挥着重要作用。喷嘴作为柴油机燃油喷射系统的终端, 对燃油雾化的质量、油束与燃烧室的配合、喷油持续期的长短有决定性影响, 直接影响着缸内的燃烧效果。共轨压力和喷嘴的端部结构在很大程度上影响了柴油机的经济性能和环保性能, 因此有必要对喷嘴内部的三维流动进行研究。由于喷嘴零件小, 受力复杂, 其内部的流动分析涉及到流-固耦合问题, 难以通过传统的物理模拟实验进行可视化研究。计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 是目前用于解决三维流动问题的有效手段, 以往需要通过大量试验得到的流动信息可以很方便地通过 CFD 模拟解决。本文利用 STAR-CD 软件对高压共轨喷油器的内部瞬态流动进行了三维数值模拟, 得出了大量的信息, 对了解喷嘴内部三维流动的详细情况以及如何对喷嘴的优化设计具有重要参考价值。

2 计算区域 CAD 模型的建立

STD 类型喷嘴的主要结构参数为: 喷孔直径 $D=0.24\text{mm}$, 喷孔长度 $L=0.8\text{mm}$, 喷孔倾角 $\gamma = 75^\circ$, 针阀最大行程 $h=0.30\text{mm}$, 喷孔数为 4 个。考虑到喷嘴的周期对称性, 从阀座入口上游到喷孔出口取喷嘴结构的 1/4 建立模型进行分析。利用 Unigraphics NX 软件建立三维实体模型, 如图 1 所示, 该图为瞬态求解初始时刻的三维实体模型。

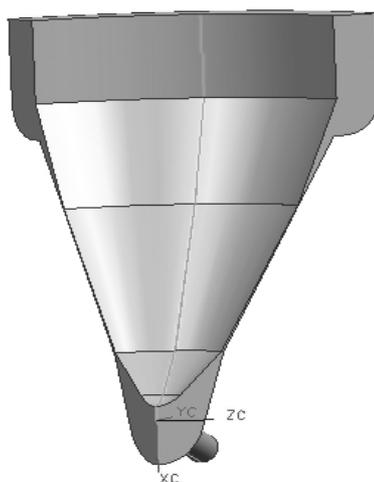


图 1 CAD 模型

3 动网格的生成

在 Unigraphics NX 软件下生成的图型文件以 IGES 格式导入 STAR-CD 的预处理模块 PROSTAR 中, 进一步采取分块耦合的方法生成三维网格, 并在块与块之间的交接处和进出口边界做局部加密处理。考虑到流体计算的

连续性要求，设针阀升程 $h=0.01\text{mm}$ 时为求解的初始时刻，此时的网格单元数最少，总数为 20661 个，如图 2；当针阀升程 $h=0.3\text{mm}$ 时，网格单元数最多，总数为 41721 个，如图 3。

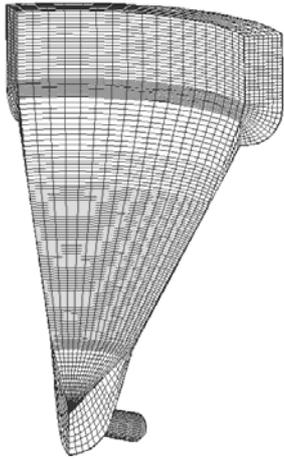


图 2 针阀升程 $h=0.01\text{mm}$ 时的计算网格图

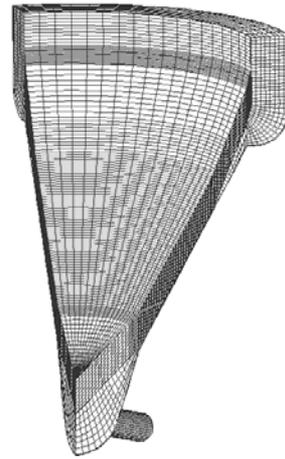


图 3 针阀升程 $h=0.30\text{mm}$ 时的计算网格图

首先，选取求解过程中会移动的网格，进行重新节点编号，编写网格改变程序 (cgrid.cgrd)，该程序控制了相关节点的运动规律。根据针阀的运动规律 (见图 4)，在一个确定的时间里，针阀下底面的节点会在一个确定的位置上。网格改变程序 (cgrid.cgrd) 将在求解的初始时刻被事件程序 (tut.evn) 调用，直至求解结束，所以说它也是事件程序的一部分。

其次，编写事件程序 (tut.evn)。在该程序中设定：当待增加的网格层的节点移动到 $1/10$ 单元层的高度时，即增加了该层网格；当待减少的网格的节点反向移动了一个单元层的高度时 (此时该层网格被压缩，体积为零)，即减少了该层网格。根据这个设定和针阀的运动规律 (见图 4)，可以确定出每层网格在何时被增加或减少。

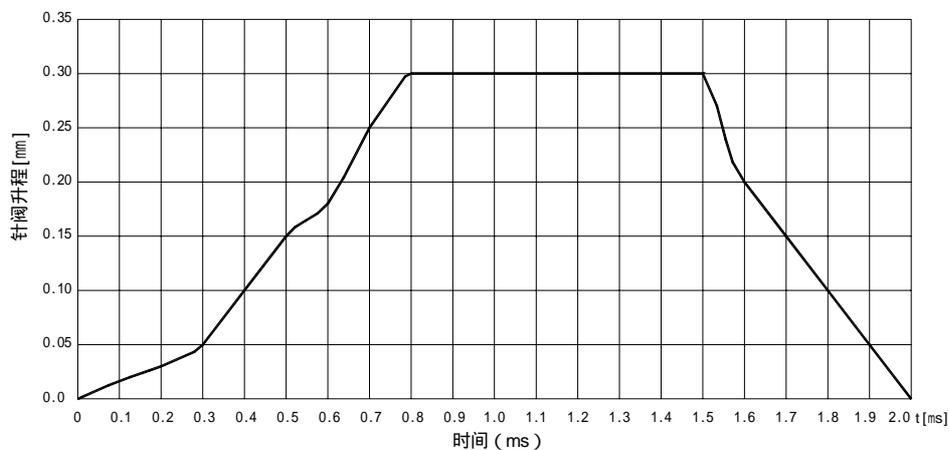


图 4 针阀运动规律

4 算法与边界条件

模型按三维流动来分析，在数值模拟中做了如下假设：

- (1) 不考虑流动中的化学反应及其影响。
- (2) 密度只是压力的函数。
- (3) 把喷嘴内部的燃油看作理想液体。
- (4) 不考虑喷嘴内壁与喷嘴之间的热传递。
- (5) 将喷嘴内的燃油看作是不可压缩流体。

在STAR-CD的预处理模块中定义热物理模型和特性：设柴油的主要成分为C16H34_1，密度为 $786.088\text{kg}/\text{m}^3$ ，分子粘度为 $0.003333\text{kg}/\text{ms}$ ，比热为 $1886.69\text{J}/\text{kgK}$ ，分子量为 $226\text{kg}/\text{kmol}$ ，湍流模型采用k-Epsilon/High Reynolds Number，并在近壁面处理中设定为标准壁面函数法。

进出口均为压力边界条件，在进出口界面上均匀分布： $p_{in} = 100\text{MPa}$ ， $p_{out} = 0.1\text{MPa}$ ；由于喷孔沿圆周

均匀分布，所以截取了 1/4 作为计算区域，而两个截面则同为旋转周期性边界条件，同时认为通过该周期性边界的平面不存在压力降。

5 计算结果与分析

图 5 至图 12 表明了针阀在上升时，压力场的瞬态变化规律：当针阀升程较小时 ($h = 0.125\text{mm}$)，每一瞬时的压力流场变化较大，当针阀升程较大时 ($h = 0.180\text{mm}$)，每一瞬时的压力流场变化较小；压降主要集中在喷孔入口处；可以发现喷孔入口上拐角处形成了一个负压区，负压区产生的原因是由于流体从压力室高速流入喷孔时流动方向变化太大，流体在压力室内壁的导向作用下高速流向喷孔的下边沿，从而在喷孔入口上拐角处形成低压，甚至负压，因此降低了喷孔的流量系数，并且容易产生空泡，引起空穴，结合考虑瞬态状态下的空穴现象对于指导喷嘴结构参数的优化设计将具有参考意义。可以发现，在针阀升程较小 ($h = 0.065\text{mm}$) 时，喷孔入口的压力值较小，喷孔出口处的压力同样也较小，即通过控制针阀升程可以控制喷油速率，但针阀升程小时，喷孔入口前的喷油压力也相应的降低，喷雾特性将会变得较差，所以采用控制针阀升程的座面节流，很难同时控制喷油速率并获得好的油束雾化，基于此，对喷嘴结构做出改进后，就有了 VCO (无压力室型) 和 IMPROVED (改进型) 喷嘴的出现。

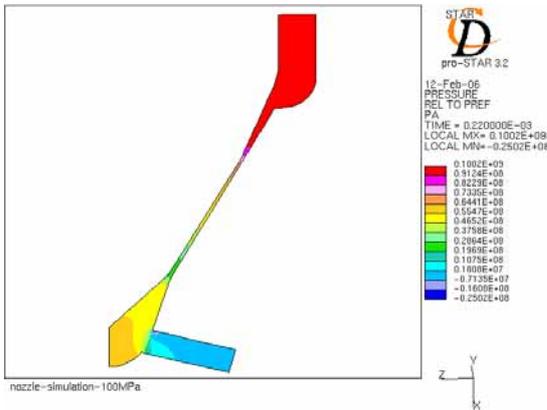


图 5 针阀升程 $h=0.033\text{mm}$ 时的压力云图

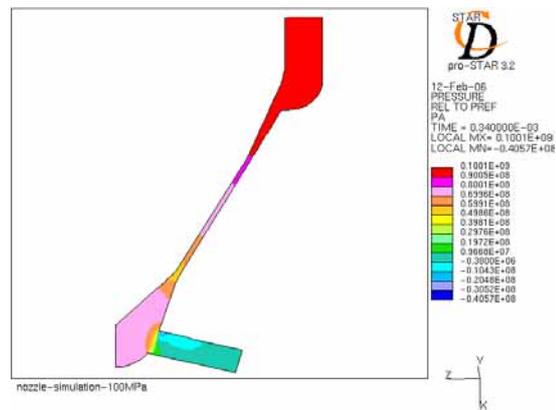


图 6 针阀升程 $h=0.065\text{mm}$ 时的压力云图

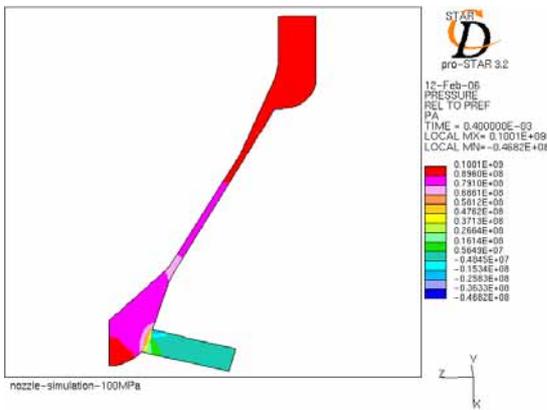


图 7 针阀升程 $h=0.099\text{mm}$ 时的压力云图

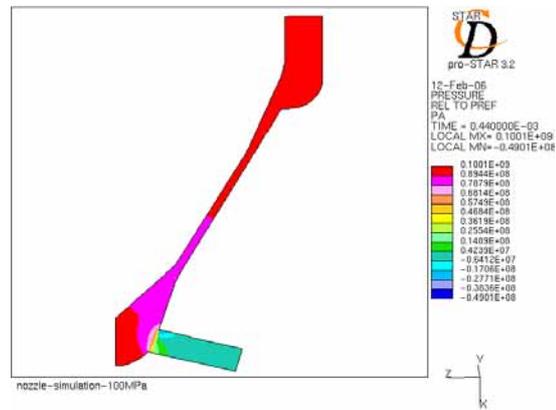


图 8 针阀升程 $h=0.125\text{mm}$ 时的压力云图

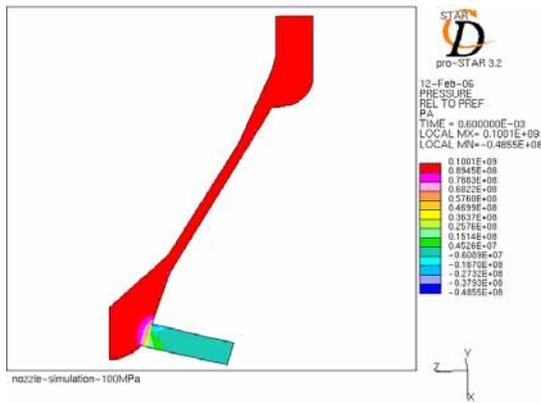


图9 针阀升程 $h=0.180\text{mm}$ 时的压力云图



图10 针阀升程 $h=0.273\text{mm}$ 时的压力云图

图 11 至图 16 表明了针阀在上升时，速度场的瞬态变化规律： 可以发现在喷孔入口的上拐点处有一个较小的涡流区； 可以发现压力室具有一定的汇流作用； 针阀升程较小 ($h = 0.033\text{mm}$) 时，喷孔入口处的速度值比较小，喷孔出口处的速度同样也较小，喷雾特性会变得较差； 针阀升程较大 ($h = 0.065\text{mm}$) 时，喷孔出口处燃油的喷出速度很高，同缸内气体形成较大的相对运动，可以实现良好的雾化与混合； 在每一个瞬时，喷孔出口都会有一个确定的质量流量，可以将这些结果做成表格文件，作为后续的喷雾模拟研究的边界条件。

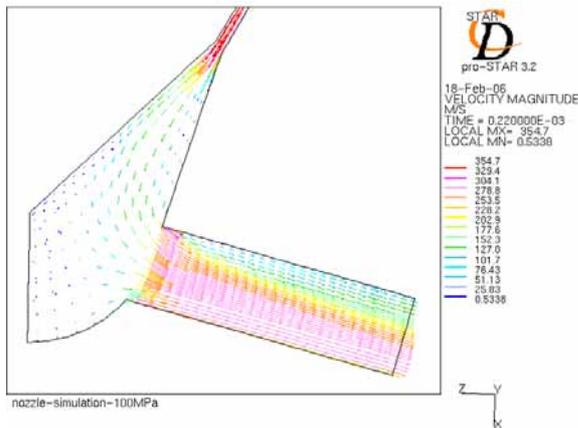


图11 针阀升程 $h=0.033\text{mm}$ 时的速度分布图

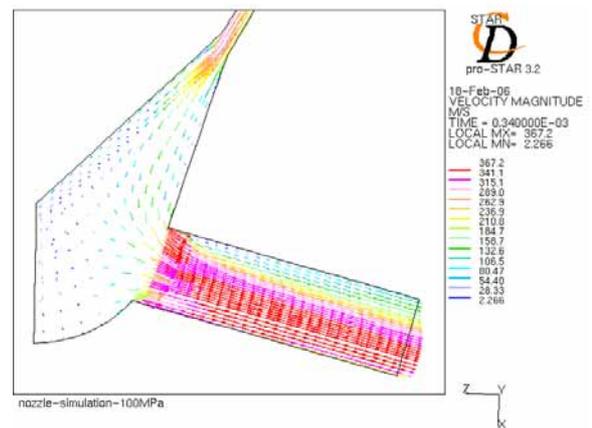


图12 针阀升程 $h=0.065\text{mm}$ 时的速度分布图

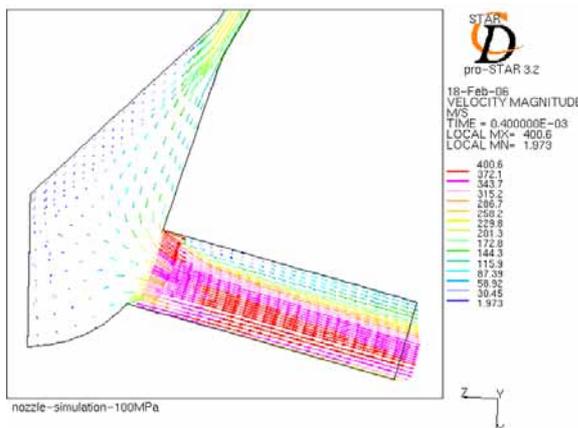


图13 针阀升程 $h=0.099\text{mm}$ 时的速度分布图

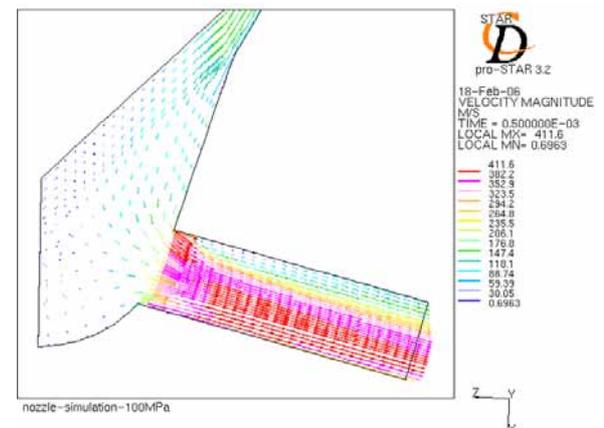


图14 针阀升程 $h=0.150\text{mm}$ 时的速度分布图

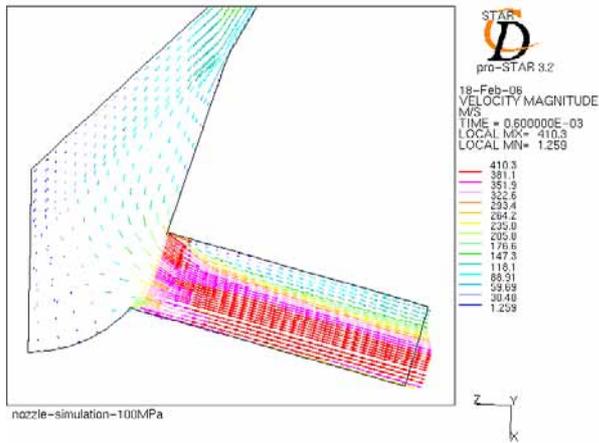


图 15 针阀升程 $h=0.180\text{mm}$ 时的速度分布图

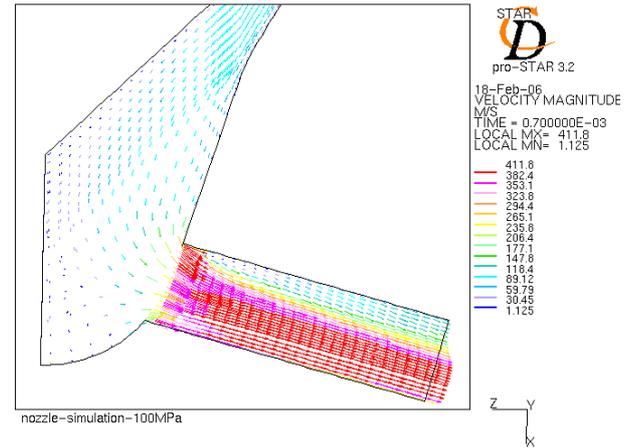


图 16 针阀升程 $h=0.250\text{mm}$ 时的速度分布图

图 17 是共轨压力不变 ($P=100\text{MPa}$), 改变喷孔直径 (分别为 $d=0.20\text{mm}$ 、 $d=0.24\text{mm}$ 、 $d=0.28\text{mm}$) 时在针阀上升过程中, 喷孔出口平均速率的数值模拟计算结果。从中可以看出, 当针阀升程较小时 ($h=0.082\text{mm}$), 在同一针阀升程下, 喷孔直径越小喷孔出口的平均速率越大; 当针阀升程较大时 ($h=0.13\text{mm}$), $d=0.20\text{mm}$ 和 $d=0.24\text{mm}$ 的喷孔出口平均速率差别细微, 而 $d=0.28\text{mm}$ 较前两者在同一针阀升程下的出口平均速率值要大得多。 $d=0.28\text{mm}$ 时, 喷孔出口的平均速率变化范围最大, $d=0.24\text{mm}$ 的次之, $d=0.20\text{mm}$ 最小。

图 18 是喷孔直径不变 ($d=0.24\text{mm}$), 共轨压力改变 (分别为 $P=80\text{MPa}$ 、 $P=100\text{MPa}$ 、 $P=120\text{MPa}$) 时在针阀上升过程中, 喷孔出口平均速率的数值模拟计算结果。从中可以发现, 在同一针阀升程下, 随着喷油压力的增大, 喷孔出口平均速率的也随着增大, 最大值也随着增大, 则喷注在同样的喷油持续期内能达到更远的贯穿距离, 这是因为喷射压力愈高, 则喷孔处的压力差愈大, 喷注的初速和具有的动能愈大, 贯穿规律曲线愈陡, 其斜率愈大。这也正是当前燃油喷射系统要求尽可能地提高喷油压力的原因所在。

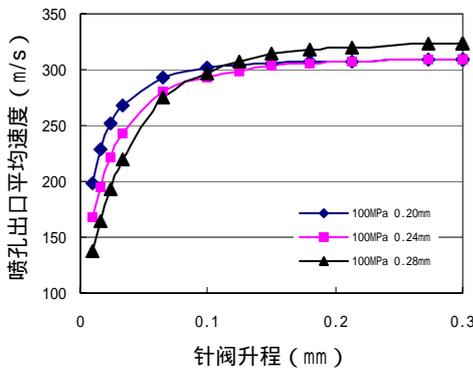


图17 改变喷孔直径时的速度变化图

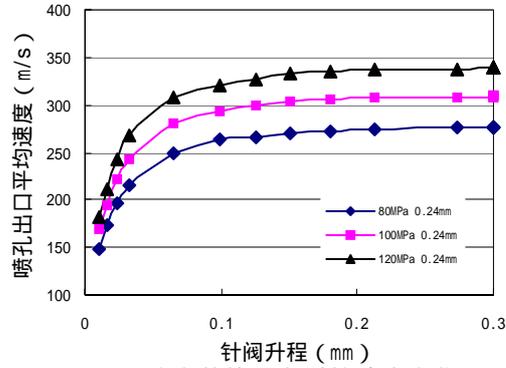


图18 改变共轨压力时的速度变化图

6 结论

- 1) 对柴油机喷嘴内部的三维流动进行 CFD 动态数值模拟研究, 在较短的时间内获取大量有用的流场信息, 从而方便了解喷嘴结构参数对流动特性的影响, 对喷嘴结构的优化设计具有指导意义。
- 2) 当针阀升程较小时, 压力流场瞬态变化较大; 当针阀升程较大时, 压力流场瞬态变化较小; 压降主要集中在喷孔入口处; 喷孔入口上拐角处形成了一个负压空穴区。
- 3) 在喷孔入口的上拐点处有一个较小的涡流区; 可以发现压力室具有一定的汇流作用; 针阀升程较小 ($h=0.033\text{mm}$) 时, 喷雾特性会变得较差; 针阀升程较大 ($h=0.065\text{mm}$) 时, 可以实现良好的雾化与混合; 将每一个瞬时喷孔出口的质量流通量做成表格文件, 为后续的喷雾模拟研究提供更为真实的边界条件。
- 4) 共轨压力不变, 喷孔直径的改变, 当针阀升程较小时, 在同一针阀升程下, 喷孔直径越小喷孔出口的平均速率越大; 当针阀升程较大时, $d=0.20\text{mm}$ 和 $d=0.24\text{mm}$ 的喷孔出口平均速率差别较小, 而 $d=0.28\text{mm}$ 较前两者

在同一针阀升程下的出口平均速率值要大得多。

- 5) 喷孔直径不变, 共轨压力改变时, 在针阀上升过程中, 在同一针阀升程下, 随着喷油压力的增大, 喷孔出口平均速率的也随着增大, 最大值也随着增大。
- 6) 进一步将喷嘴的内部流动、喷雾特性和燃烧特性三部分结合起来加以研究, 对于指导发动机的改造将具有更大意义。

- [1] Moekel Mark D. Computational Fluid Dynamic(CFD) Analysis of Six Cylinder Diesel Engine Cooling System with Experimental Correlations[c]. SAE Paper 941081, 1994
- [2] 何志霞. 柴油机高压共轨喷油系统内的瞬变流动研究[J]. 农业机械学报. 2004, 35(1): 48~51
- [3] 袁江涛等. 柴油机喷嘴流动的 CFD 分析[J]. 柴油机. 2005, 27(2): 21~23
- [4] 徐波等. 三维流场数值模拟在柴油机喷油嘴中的应用[J]. 柴油机设计与制造. 2005, 1(14): 29~33
- [5] 罗新浩. 高压共轨燃油喷射系统内部的动态喷射特性的研究[D]. 硕士学位论文. 江苏大学. 2006.6