

# 计算网格对柴油机喷雾三维数值模拟影响研究

## Effects of the Computational Mesh on Three-Dimensional Numerical Simulation of Diesel Spray

罗马吉 向梁山

(武汉理工大学汽车工程学院, 武汉 430070)

**摘 要:** 为了研究计算网格对柴油机喷雾数值模拟的影响, 从理论和数值模拟的角度进行了分析。理论研究表明喷雾计算对网格产生依赖性的主要原因是液滴碰撞算法和气液相间耦合的精度。利用 CFD 软件 STAR-CD 对柴油机喷雾特性进行了计算, 数值计算结果表明, 网格的划分直接影响到喷雾计算结果的正确性和油束的几何形状。随着网格加密, 喷雾射流的速度不断增大, 喷雾油束几何形态变得细长, 喷雾贯穿距增大。喷雾气相流场的结构直接影响液相喷雾场的特性。

**关键词:** 计算网格; 喷雾特性; CFD; 柴油机; STAR-CD

**Abstract:** In order to research the effects of computational mesh on numerical simulation results of diesel spray, theoretical analysis and numerical simulation methods were used. Theoretical studies showed that spray simulation results are very susceptible to grid dependency. The two main causes of this problem are the droplet collision algorithm and the precision of gas-liquid phase coupling. The diesel spray characteristics were calculated by the general commercial CFD code STAR-CD. The simulation results showed that computational mesh directly influenced the correctness of computational results and the geometric shape of spray. With the mesh refinement, spray jet velocity and spray penetration increased and the geometric shape of spray became slim. The gas flow field structure directly affected the characteristics of liquid spray field.

**Keywords:** computational mesh; spray characteristics; CFD; diesel engine; STAR-CD

## 1 引言

在直喷柴油机中, 燃油的喷射、雾化、蒸发及与空气的混合对发动机的燃烧和排放性能产生重要影响。因此精确地模拟柴油机的动态喷雾过程, 对于研究其燃烧和排放有着至关重要的作用。要得到精确的模拟结果, 首先需要对喷雾的整个过程, 包括燃油的雾化, 油滴的裂解、聚合、碰撞和蒸发机理有深刻的认识。同时由于喷雾过程涉及两相流、过程复杂, 使得在数值模拟计算中除了要考虑上述因素外, 还需要选择合适的计算模型以保证计算的精度, 同时在计算时对计算网格、初始条件和边界条件等作出适当的选择。只有满足上述条件才能较准确地对柴油机的喷雾过程进行模拟, 从而与试验结果对比, 进而改善柴油机的燃烧及排放性能。本文首先从理论上分析网格尺寸对喷雾计算产生影响的原因, 再利用 Star-CD 软件建立 5 种不同网格进行喷雾计算, 对比分析不同网格尺寸对喷雾模拟计算产生的影响, 以便合理地建立柴油机喷雾模拟计算的网格模型、准确模拟柴油机喷雾混合过程, 为从事发

动机喷雾燃烧计算的工程师提供借鉴作用。

## 2 理论分析

在CFD代码中, 喷雾模拟技术对网格精度产生比较大的依赖性, 导致这个问题的主要原因是气液相间耦合精度和液滴碰撞算法<sup>[1]</sup>。喷雾计算对网格产生依赖性的首要原因就是气液相间的耦合精度。发动机喷雾属于多相流, 喷雾模拟中采用DDM模型, 缸内气流运动为连续相, 离散相为燃油液滴。DDM模型属于欧拉-拉格朗日型模型, 即用欧拉观点描述气相流场, 而用拉格朗日观点描述油滴的运动, 两相间的耦合作用采用气液相互作用的源相来考虑。求解过程中, 离散相液滴的运动受到连续相气流运动的影响, 液滴的空间分布和中间相动量、传质和传热效应来影响气流运动。气相流场反过来通过速度场、温度场和压力场等来影响液滴本身状态。相互作用的强度取决于离散液滴颗粒的尺寸、密度和数密度, 且液滴数密度的计算与粒子所在网格的体积相关。所以准确的气液耦合关系包括液相到气相和气相到液相两个方面, 液相到气相要求喷雾粒子的源项在计算区域内正确的分布, 气相到液相要求气相流场为喷雾粒子提供准确的气相信息<sup>[2]</sup>。但在喷雾计算中, 喷雾模型假定喷雾粒子的源项均匀分布于粒子所在的单元, 粒子所在位置的气相属性是粒子所在单元的属性, 这种方法被称为最近节点法, 对空间而言只有零阶精度, 没有充分利用相邻节点气相属性, 没有足够的可用信息为液相的动量、热和质量传输提供准确的气相信息。并且在喷嘴出口附近区域和喷雾边缘的计算单元中, 喷雾粒子只是部分填充了这些单元空间, 而将喷雾粒子引起的源项被均匀的分配在粒子所在的计算单元中, 对于部分填充的网格单元中未填充的空白空间也能分配到喷雾源项, 这就形成了数值扩散误差, 误差的大小取决于这些单元未填充的空白空间大小<sup>[2]</sup>。随着网格加密, 这些空白空间也不断缩小, 数值扩散误差也相应地减小。为达到精度要求, 需要非常精细的网格进行计算以减小动量扩散误差, 提供准确的气相信息。此外, 由于喷雾过程的模拟是基于DDM统计方法, 液滴的破碎及液滴间的作用通过有限容积法对每个单元进行抽样统计, 故网格单元的大小直接影响液滴粒子的抽样数目及相互间的作用, 从而影响到燃油的喷雾特性如贯穿距离, 燃油浓度分布, 最终影响燃烧过程<sup>[3]</sup>。

喷雾计算对网格产生依赖性的另一个原因就是喷雾液滴的碰撞算法具有较强的网格依赖性<sup>[5]</sup>。O' Rourke碰撞算法广泛运用于液滴碰撞<sup>[5]</sup>, 但此算法有较大的空间离散误差, 没有考虑两相邻液滴之间的碰撞, 只考虑相同气相单元内的液滴发生碰撞, 但是碰撞是否发生取决于它们的物理属性和空间分布, 实际上在相邻单元边界处的液滴存在着剧烈的碰撞。同时此算法也忽略了数密度对碰撞的影响, 假设任何液滴与其他液滴碰撞的概率与其它液滴碰撞的概率正比于它们的相对速度, 位于单元两侧的液滴相对速度最大, 最有可能发生碰撞, 液滴发生碰撞发生聚合或反弹, 导致液滴向网格中心线聚集, 使液滴沿网格中心线运动<sup>[6]</sup>。

## 3 喷雾模型及其网格生成控制方法

根据前面的分析可知, 计算网格的划分直接影响到计算结果的合理性, 在计算的过程中应该高度重视。本文对某型柴油机在5种不同网格情况进行喷雾模拟计算。喷雾模型使用Huh模型, 液滴破碎模型使用Reitz / Diwakar模型, 撞壁模型使用Bai模型<sup>[7]</sup>。在Dell工作站上(志强 4CPU: 8G 内存: Linux 操作系统)上使用流体分析软件Star-CD进行计算,

在上止点前  $7.5^\circ$  CA 开始喷油，计算从进气门关闭开始计算到压缩上止点后  $60^\circ$  CA。

采用气缸网格为中心部分的O-grid 模板切割生成燃烧室基准网格，其二维模板如图1所示。其网格加密的控制方法是对其径向、周向和轴向分别控制，径向和周向在图1中标出，轴向为沿气缸轴向的方向上。本文建立了5种不同的网格模型，其网格参数见下表1。从图2可以看到，随着网格数量的增加，计算时间逐渐增加，且增大的幅度在逐渐变大。所以在保证计算精度的情况下，也要合理控制网格数量，降低计算成本。

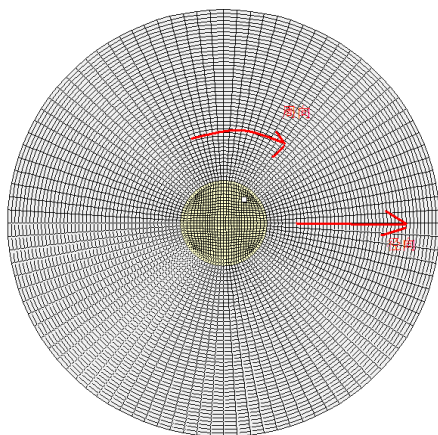


图 1 燃烧室网格生成模板

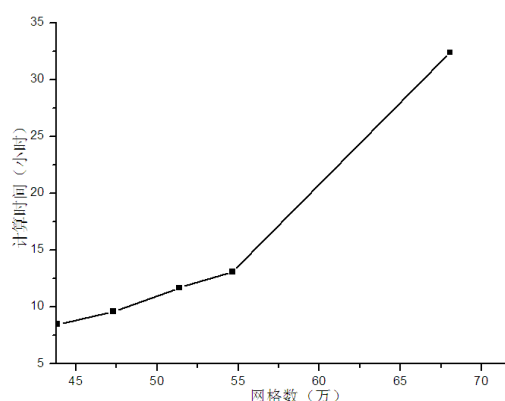


图 2 计算时间随网格数量变化

| 网格                | A      | B      | C      | D      | E      |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 径向尺寸 (mm)         | 0.85   | 0.65   | 0.6    | 0.5    | 0.4    |
| 轴向尺寸 (mm)         | 0.85   | 0.65   | 0.5    | 0.5    | 0.4    |
| 周向尺寸 ( $^\circ$ ) | 3.6    | 3.3    | 3.0    | 2.8    | 2.5    |
| 上止点网格数            | 50266  | 84513  | 125463 | 158152 | 292177 |
| 下止点网格数            | 438762 | 473009 | 513959 | 546648 | 680673 |
| 计算时间 (小时)         | 8.5    | 9.6    | 11.7   | 13.1   | 32.4   |

## 4 网格尺寸对计算结果的影响

### 4.1 网格尺寸对气相速度场分布影响

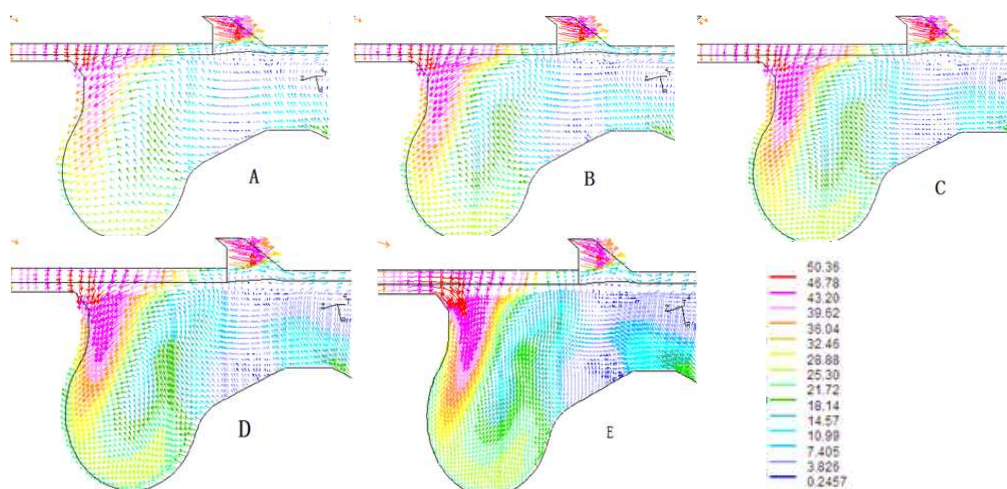
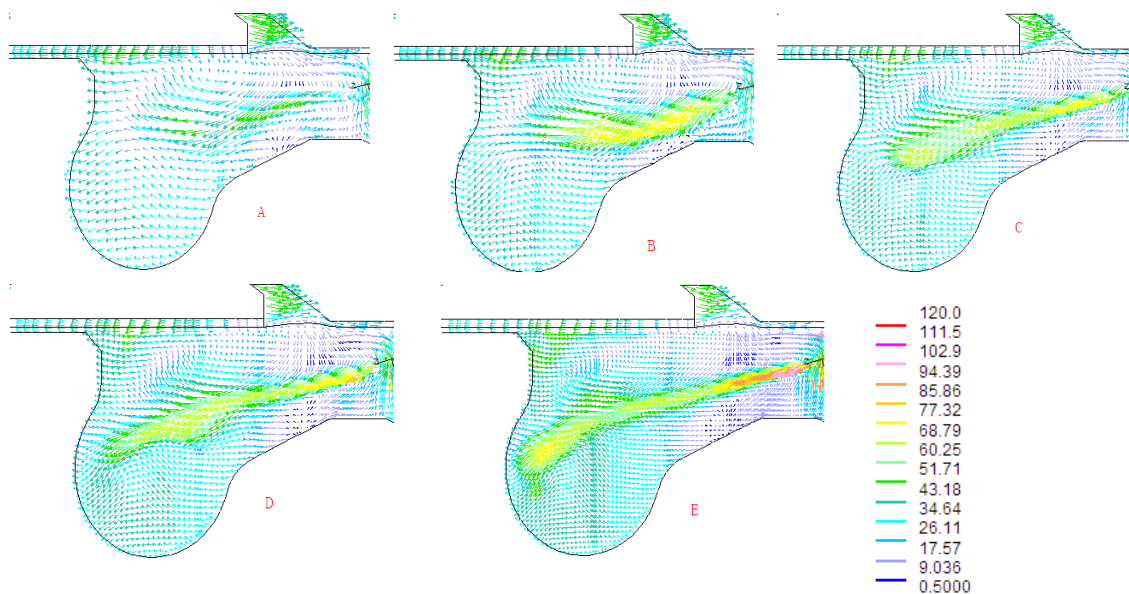
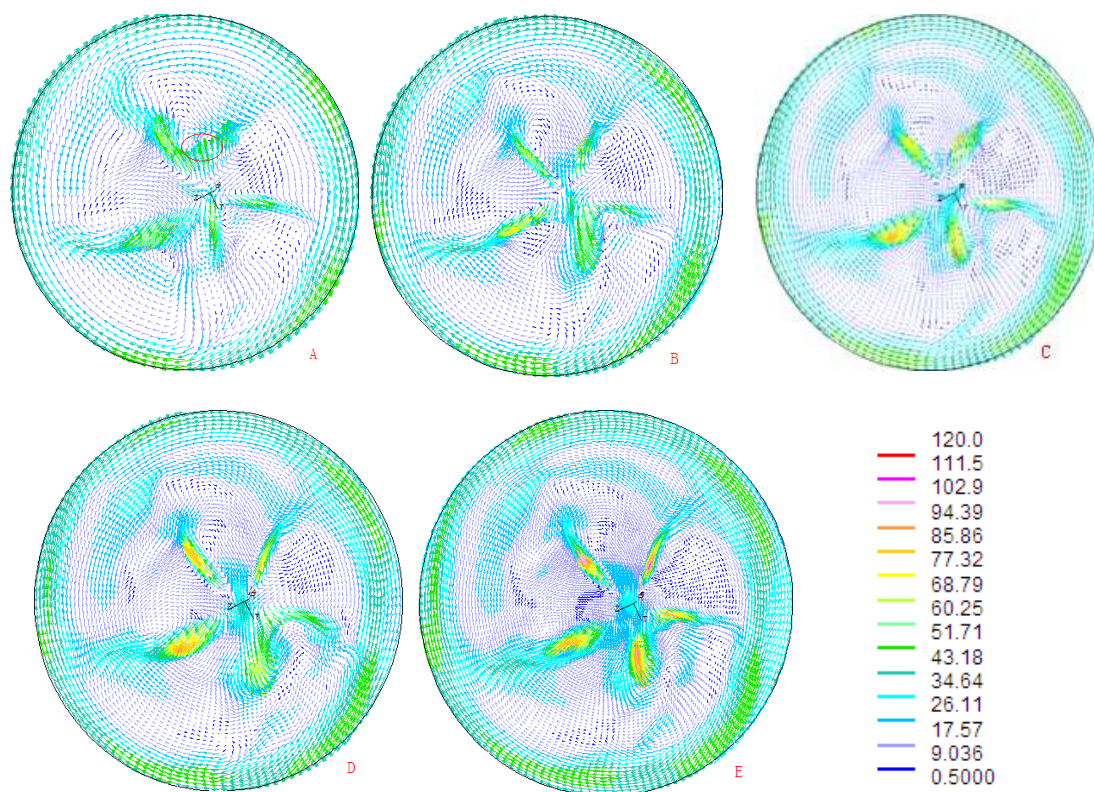


图 3  $710^\circ$  CA 三种不同网格速度矢量分布图

图 3 为喷油开始前  $2^\circ$  CA 五种不同网格密度下速度分布图, 从图中可以看出, 在喷雾开始前, 在同一曲轴转角下不同网格计算的流场结构基本一致, 都是活塞上方的喉口附近和气门座圈处的气体速度最大, 其最大速度都为  $50.36\text{m/s}$ , 燃烧室正方的气体速度最小, 从此可以看出网格尺寸对纯流动的速度场计算影响不大。



(a) 过喷孔轴线的剖面速度矢量分布图



(b)  $Z=-5$  截面的速度分布图

图 4 (a) (b) 上止点时不同截面速度分布图



图 4-a 图为沿某一喷嘴截面的速度分布图,从图中可以看出,五种不同网格密度下计算的速度场有较大的差异,网格 A 下不能看到明显的喷雾射流,在其它网格下可以看到明显的喷雾射流,其中 E 型网格下喷雾射流最为明显,其射流在 Z 向即气缸轴向方向上基本没有发生偏移,网格 B 在气缸轴线方向发生明显偏移。随着网格的加密,喷雾射流的形态基本一致,只是在喷雾射流的速度方面存在差异,从图 4-b 可看出,随着网格逐渐加密,喷雾射流的速度也在逐渐增大,在最密的网格 E 下计算的射流速度比最疏的网格 A 下大了 60%左右,在 A、B、C、D、E 5 种网格下其射流的最大速度分别为 52、61、69、78 和 86 m/s。喷雾射流的速度逐渐增大,就会导致液滴粒子的贯穿距随着网格的加密也会逐渐增大。从图 4-b 可以明显看到,在网格 A 下,两喷孔之间椭圆形区域速度较大,导致各喷孔喷雾射流不明显,在其它网格下各喷孔射流在周向没有发生偏转,这是由于网格 A 密度不够,不能为喷雾粒子提供足够的气相信息来确定喷雾粒子空间位置所致,即此时的气液相耦合精度较差。气相速度场的分布差异性将会导致燃油浓度场分布的差异性。从图 4-b 还可以看到,在网格 A 下,5 个喷孔射流速度分布不均匀,各喷孔射流结构产别较大,但是随着网格的加密,在网格 C 下各喷孔的喷雾射流形状趋于一致。随着网格密度的增加,其射流的最大速度在增大,这是由于在细密的网格条件下,其数值计算的动量扩算误差减小,导致计算的速度值较大。总之,在不同网格下进行计算,缸内速度场有较大差异,这是由于添加喷雾模型后不同的网格尺寸其气液相耦合精度不同造成的。网格越密,气液相耦合精度越高,其喷雾射流场更接近于实际情况。

#### 4.2 网格尺寸对液相喷雾形态的影响

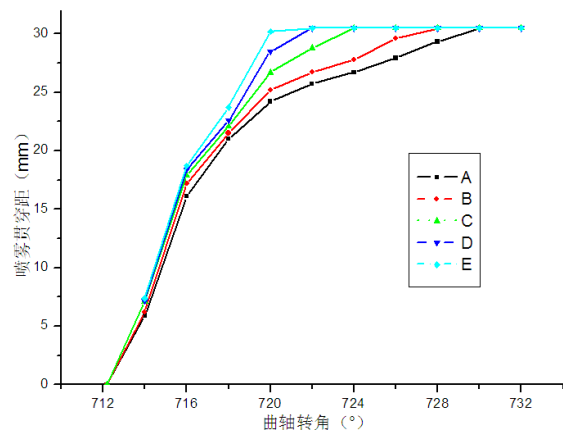


图 5 喷雾贯穿距

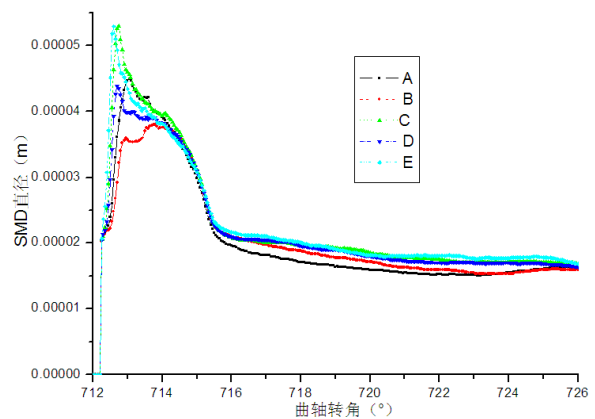


图 6 索特平均直径

图 5 为在不同网格条件下计算的喷雾贯穿距,从图 5 可以看到,在最密的网格下计算的燃油贯穿距最大,在上止点时燃油已碰到燃烧室壁面,此时的贯穿距为 30.2mm,最疏网格下的贯穿距仅为 24.2mm,相差了 6mm,导致在最疏网格下燃油在上止点后 10° 才碰燃烧室壁面。随着网格的加密,其喷雾贯穿距在逐渐增大,其增大的幅度有减小的趋势。这是因为随着网格的加密,从图 4-a 的速度分布图可以看到,油束射流随着网格加密其速度在逐渐增大,在油束的横截面上气相速度梯度在逐渐增大,轴线附近的液滴的相对速度减小,从而使液滴运动阻力减小;随着网格加密喷孔轴线上的速度不断上升,网格的加密同时使气相速度

在径向上的分布更集中于喷孔轴线附近, 径向动量分布范围减小, 轴向动量增大, 使喷雾粒子受到的运动阻力减小, 从而使喷雾贯穿距增大。图 6 为在喷雾粒子的索特平均直径随曲轴转角的变化关系, 索特平均直径整体呈先增大后减小的趋势, 在不同网格条件下其值有一定的差异。在喷雾中后期从图中可以看出网格最疏的时候其索特直径最小, 随着网格加密其索特直径逐渐增大。

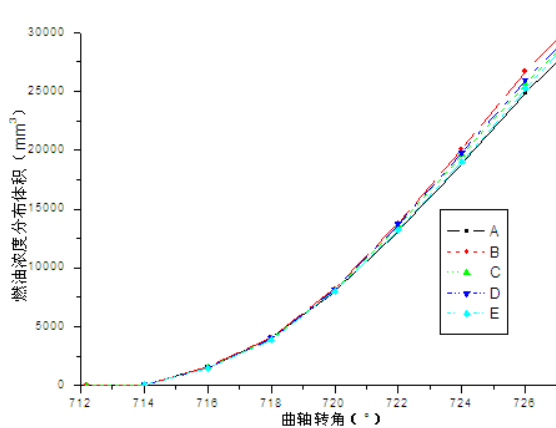


图 7 燃油空间分布大小随曲轴转角变化

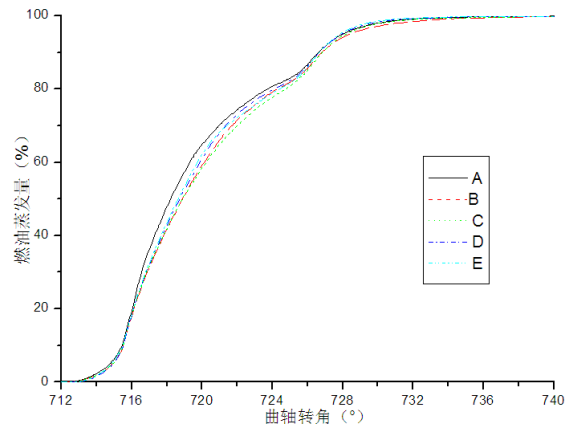


图 8 燃油蒸发量

图 7 为不同网格下燃油在燃烧室空间分布体积大小比较, 从图中可以看到, 喷油初期燃油空间分布体积大小差别不大, 随着喷油的进行, 不同网格计算的燃油在空间分布大小开始不同, 在最疏的网格条件计算的燃油空间分布体积最小。图 7 从宏观上说明了由于计算网格的原因, 导致燃油油束的形状有所差异, 从而使燃油分布体积大小不同。图 8 为燃油蒸发量随曲轴转角的变化关系, 从前面的分析可知, 网格不同, 其喷雾特性有较大的差异, 喷雾贯穿距和索特直径有区别, 这种差异性也会影响到燃油的蒸发情况, 从图 8 可以看到, 在最疏的网格下燃油蒸发的较快, 其它网格条件下燃油蒸发量差别相对较小, 这跟前面分析的索特直径结果一致, 在最疏网格下索特直径小燃油雾化蒸发情况要好, 导致蒸发快。

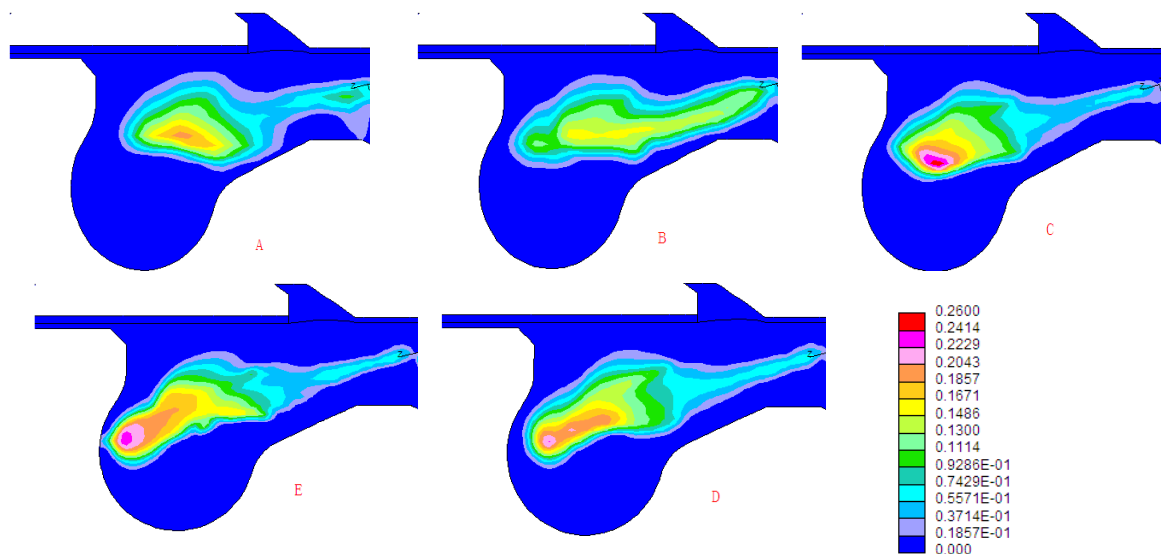


图 9 上止点沿喷孔轴线剖面燃油浓度分布图

图 9 为上止点时计算的喷雾燃油浓度分布图比较,从中可以看到,在不同网格条件下计算的喷雾形态有较大差异。总体来说,随着网格逐渐加密,喷雾形态变得细长。在不同网格条件下喷雾都形成了明显的喷柱头部,在网格 A 下,喷雾形态形成明显“锚”状,对其它网格也存在这一现象,只是没有 A 型明显,这是由于在沿喷孔轴线方向上形成明显喷雾射流,射流周围的气体不断卷入喷雾中,但到喷雾的头部位置时不再卷入气体,而是将空气向外挤,这样在喷雾体头部靠后的位置就由于卷吸速度的反向而形成了一个涡,在这个涡的作用下,喷雾头部的一些轴向动量较小的粒子被卷出喷雾体,偏离喷雾体的发展方向,并超出给定喷雾锥角的范围,随喷雾的发展就形成肥大的“锚”状喷雾形态。这一现象是由离散液滴模型计算的喷雾场气相流场所引起的。在相对粗糙 A 型网格下喷雾头部锚状更明显,这是由于在网格 A 下进行计算时其数值计算的动量扩算误差较大,导致喷雾粒子的轴向速度衰减较快,液滴受到的运动阻力增大,以至于在喷嘴口附近就有粒子发生明显的径向偏移。从图 9 还可以看到在粗糙的网格 A 条件下,喷雾形态明显比其它网格显得肥大,燃油几乎接近燃烧室斜台壁面,其它网格下燃油没有碰到燃烧室斜台的现象,网格越密,燃油离燃烧室斜台的距离越远,碰到斜台的机会越小,越接近于燃油喷雾实际情况。燃油是否碰到燃烧室斜台壁面与计算的气相流场结构有直接的关系。从前面的气相速度场分布图可以看到,网格 A 和 B 喷雾射流在气缸轴线方向上发生了明显的偏移,气相场的计算直接影响到喷雾粒子运动计算,导致在这两种网格下燃油碰到燃烧室斜台上。网格 E 下喷雾射流最为明显,且几乎在气缸轴线方向上没有偏转,轴向速度衰减较快,导致燃油形态显得最为细长,最不容易喷到燃烧室斜台上。随着网格的加密,网格 D 和 E 的喷雾形态趋于一致,只是网格 E 的喷雾形态显得更“瘦小”一些。

## 5 结论

计算网格的划分直接影响到喷雾计算结果的正确性,在做喷雾数值计算时必须根据相应的喷雾实验数据,确定合适的计算网格进行喷雾计算。本文从理论和数值模拟的结果分析了计算网格对喷雾计算的影响,数值模拟的结果主要从气相和液相场分布进行结果对比分析。

(1) 喷雾计算对网格产生依耐性主要是由于液滴碰撞算法和气液相间耦合精的低精度造成的。

(2) 数值计算结果表明,网格的划分直接影响到喷雾结构和喷雾贯穿距。随着网格加密,喷雾射流的速度不断增大,喷雾形态变得细长,喷雾贯穿距增大。喷雾气相流场的结构直接影响液相喷雾场的特性。

## 6 参考文献:

- [1] Schmidt D P, Senecal P K. Improving the numerical accuracy of spray simulations. SAE Paper, 2002-01-113, 2002
- [2] 文华. 基于 CFD 的柴油机喷雾混合过程的多维数值模拟. 博士学位论文. 武汉: 华中

科技大学, 2004

- [3] Hieber S. An investigation of the mesh dependence of the stochastic droplet model applied to dense liquid sprays. Master Dissertation. Michigan: Michigan Technology University, 2001
- [4] O' Rourke P J. Collective drop effects on vaporizing liquid sprays. Doctor Dissertation. Princeton: Princeton University, 1981
- [6] Schmidt D P, Rutland C J. Reducing grid dependency in droplet collision modeling. ASME J Eng Gas Turb Power, 2004, 127: 227—255
- [5] 张辉亚, 张煜盛, 肖合林等. 提高喷雾模拟精度的算法. 科学通报, 2007, 5( 52 ): 602-607
- [7] 吕继组, 白敏丽, 周龙. 6110柴油机喷雾过程的多维数值模拟研究. 工程热物理学报, 2007, 4 ( 28 )