

如何提高发动机喷雾数值模拟的准确性与效率

How to improve numerical simulation accuracy and efficiency of spray characteristics in engine

耿超¹, 张玉银², 徐斌¹, 吴健¹, 韩海³

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 3. 艾迪捷信息科技有限公司, 上海 200120)

摘要: 准确可靠的喷雾特性的数值模拟对于发动机缸内油气混合、燃烧的研究和发动机燃烧系统优化起着至关重要的作用。喷雾特性常用表征喷雾空间分散性的喷雾贯穿距、喷雾锥角和表征雾化程度的液滴平均直径来说明。为了快速准确地通过模拟计算获得这些喷雾特性, 需要查明影响喷雾特性计算的准确性和计算量的主要因素及其影响规律。本文利用 CONVERGE 软件对直喷汽油机的喷雾特性进行三维数值模拟。以 CONVERGE 的自适应网格功能和常用的 KH-RT 模型为例, 就模型标定方法、自适应网格参数的设置对喷雾贯穿距和液滴的 SMD(索特平均直径)计算结果的准确性和快速性的影响进行了分析研究。研究表明: 仅用喷雾贯穿距数据来标定喷雾模型会大大降低仿真的精度, 这样标定的模型不能真实地预测喷雾的雾化特性。

关键词: 喷雾贯穿距; SMD; 喷雾模型标定; 自适应网格; 计算准确性

Abstract: An accurate and reliable numerical simulation on the spray characteristics plays a vital role for numerical investigation of in-cylinder fuel/air mixture formation and in optimization of an engine combustion system. The spray penetration and the spray cone angle are usually used to characterize the spray spatial dispersibility and the mean droplet diameter is used to describe the atomization quality. To obtain reliable and accurate simulation results of the spray characteristics, it is necessary to investigate which main factors affect the simulation accuracy and calculation speed. In this paper, the adaptive mesh refinement in CONVERGE and the common KH-RT break-up model was used as an example to show how to calibrate the model and its influence on the spray calculation accuracy and speed. The results show that only using the spray penetration for the model calibration will greatly reduce the simulation reliability and possibly cannot correctly predict the spray atomization characteristics, which is the most important characteristic of a fuel spray in an engine.

Key Words: Spray penetration; SMD; Spray model calibration; Adaptive refinement mesh; Simulated accuracy

前言

为了实现发动机缸内的流动和燃烧过程的优化, CFD 仿真计算是不可或缺的工具, 而如何提高 CFD 计算的准确性和高效性是国内外发动机界的重要课题。

喷雾特性的 CFD 仿真是发动机燃烧系统优化必不可少的环节, 喷雾模型准确与否直接

影响到后续的燃烧和排放计算的可靠性。A. De Vita 等[1]对某款 GDI 喷油器通过激光测试技术获得了反映喷雾外形的图像，对喷雾的贯穿距等进行了仿真；H. Bensler 等[2]在定压容器中分别对喷孔直径不同的 5 孔喷油器进行测试，获得喷雾的数字图像，在 CFD 软件上分别使用不同的破碎模型，成功地预测了喷雾贯穿距和喷雾角的发展与变化；陈虎等[3]利用 Wave-KH 破碎模型模拟了乙醇、柴油喷雾特性，通过喷雾贯穿距和喷雾锥角的对比，发现在喷雾形态上，试验与模拟结果基本吻合；叶伊苏等[4]以某款采用均质混合气燃烧模式的缸内直喷汽油机燃烧系统的开发为例，首先对喷油器的喷雾模型进行试验标定，然后将标定好的模型应用到缸内的瞬态流动和喷雾仿真中。

由于喷雾实验条件的限制，以及同时标定喷雾贯穿距和液滴的 SMD 的复杂性，国内外的缸内过程 CFD 计算研究大多只是利用喷雾贯穿距等表示喷雾外形的宏观实验数据进行标定，很少同时利用表征喷雾雾化程度的 SMD 或粒径分布进行标定，而事实上液滴的 SMD 会直接影响缸内喷雾的蒸发速率和混合气浓度分布。

计算准确性还取决于网格划分等计算技术。一般来讲，网格尺寸越小，计算精度越高，但是计算成本也随之增高。Sibendu Som 等[5]在模拟柴油的喷雾特性时，分析了网格尺寸对喷雾贯穿距的影响，结果显示网格尺寸最小的计算结果与试验最吻合；刘斌等[6]对柴油机喷雾特性进行了 CFD 模拟计算，发现网格尺寸过大，喷雾几何形状失真，网格的加密使得计算更为准确。在如今的资源节约型社会背景下，如何在保证计算精度的情况下降低计算成本是重要的挑战之一，而国内外的研究很少考虑到一直备受关注的计算效率问题。

为了研究提高计算准确性和减少计算量，本文分别利用喷雾贯穿距、液滴的 SMD、粒径分布等实测数据对喷雾模型进行标定，研究标定方法对计算结果准确性的影响，并在模型标定完成之后，研究网格划分方法等对计算成本和计算准确性的影响。

1 喷雾模型

为了很好地描述燃油喷射、破碎、蒸发、碰撞等复杂的物理过程，大多发动机工作过程的计算软件都提供多种喷雾子模型，这里仅以 CONVERGE 软件为例对喷雾雾化和蒸发模拟过程中采用的一些子模型进行阐述。子模型包括破碎模型、粒子相互作用模型、湍流扩散模型和蒸发模型等。限于篇幅，这里仅介绍破碎模型，其他模型仅给出参考文献。

破碎模型有多种，对于多孔喷嘴，如果通过合理的标定，KH-RT 模型[7]被认为最为可靠。该模型假设 KH 表面波的不稳定主要导致油束的初次破碎，使得小液滴从液核区表面脱落；KH 表面波和 RT 表面波的不稳定共同引起了第二次分裂雾化。

KH 破碎机理主要由最不穩定波的频率 Ω_{KH} 和相应的波长 λ_{KH} 组成。KH 破碎时间 τ_{KH} 为：

$$\tau_{KH} = \frac{3.726 B_1 r_0}{\Omega_{KH} \lambda_{KH}} \quad (1)$$

式中 B_1 是 KH 破碎时间常数，其取值范围为 5—100； r_0 是破碎前的液滴半径。

在破碎过程中，液滴的半径减小至极限半径 r_c 为：

$$r_c = B_0 \Lambda_{KH} \quad (2)$$

式中 B_0 是 KH 破碎尺寸常数。

因 KH 表面波的不稳定产生的新液滴的半径 r 可以由以下方程获得：

$$\frac{r_0 - r}{dt} = \frac{r_0 - r_c}{\tau_{KH}} \quad (3)$$

RT 破碎机理中的最不穩定波的频率 Ω_{RT} 和相应的波长 Λ_{RT} 由下列方程计算：

$$\Omega_{RT} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\left[\alpha (\rho_l - \rho_g) \right]^{3/2}}{\sqrt{3\sigma} (\rho_l + \rho_g)}} \quad (4)$$

$$\Lambda_{RT} = 2\pi \sqrt{\frac{3\sigma}{\alpha (\rho_l - \rho_g)}} \quad (5)$$

式中 ρ_l 和 ρ_g 分别是燃料液滴和周围气体的密度， α 是液滴运动方向的加速度， σ 是液滴的表面张力。

RT 破碎时间为：

$$\tau_{RT} = C_\tau \frac{1}{\Omega_{RT}} \quad (6)$$

其中 C_τ 是 RT 破碎时间常数。

假设液滴的直径大于 Λ_{RT} ，RT 波长在增大，如果 RT 波增大的持续时间长于 τ_{RT} ，那么 RT 扰动就会产生新的液滴，其半径 r 为：

$$r = \pi \frac{C_{RT}}{K_{RT}} \quad (7)$$

$$K_{RT} = \sqrt{\frac{\sigma (\rho_l - \rho_g)}{3 \rho_g}} \quad (8)$$

其中 C_{RT} 是 RT 破碎尺寸常数，取值范围为 0.1—1。

喷雾场可以区分为液核区和气液混合区，在 KH-RT 模型中，用 KH 不稳定破碎理论来描述液核区的破碎现象，而在气液混合区，KH 和 RT 两种破碎模式相互竞争，共同影响液滴的破碎。液核区的长度可表示为：

$$L_b = C_{bl} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} d_0 \quad (9)$$

其中 C_{bl} 是 RT 破碎长度常数，可取范围为 0—50。

粒子相互作用模型采用 NTC 模型[8]，湍流扩散模型采用 O'Rourke 模型[9]，液滴蒸发模型采用 Frossling 模型[9]。

2 自适应网格

在 CFD 中，计算网格的质量直接影响求解精度和速度。然而，在有限的计算机内存和计算速度下，为了获得较高精度的解，需使计算域网格的大小与所求解的计算物理量梯度变化相适应，整个调整过程自动进行，以求用尽可能少的总网格数实现合适的网格精度，这类网格称为自适应网格。比如在喷雾计算中，由于液滴的高速运动而形成的速度场必须保证网格的精度，而速度等主要参数变化较小的地方采用较粗的网格，对于这些网格粗细的调整，软件可以自己判断并设置，这就是自适应网格。

近年来，研究人员探究了许多自适应网格生成方法。Berger 等[10]提出了基于有限差分格式的自适应网格加密方法，其数据结构简单，目前已经得到了广泛应用；Andreas M. Lippert 等[11]将六面体的自适应网格应用于先进发动机的喷雾计算中，使得自适应网格加密方法与气液相间耦合算法有机地结合，保证了良好的计算精度。

本文以 CONVERGE 软件中的网格自适应功能（AMR）为例，说明自适应网格的设置对计算速度的影响。对于一个标量来说，亚网格区域可以定义为实际区域 Φ 与网格可分辨区 $\overline{\Phi}$ 的

差值，亚网格标量区域 Φ' 就可以表示为：

$$\Phi' = \Phi - \overline{\Phi} \quad (10)$$

亚网格区 Φ' 还可以用一个无穷级数来表示：

$$\begin{aligned}
\Phi' = & \\
& -\alpha_{[k]} \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial x_k \partial x_k} + \\
& \frac{1}{2!} \alpha_{[k]} \alpha_{[l]} \frac{\partial^4 \bar{\Phi}}{\partial x_k \partial x_k \partial x_l \partial x_l} - \\
& \frac{1}{3!} \alpha_{[k]} \alpha_{[l]} \alpha_{[m]} \frac{\partial^6 \bar{\Phi}}{\partial x_k \partial x_k \partial x_l \partial x_l \partial x_m \partial x_m} + \\
& \dots
\end{aligned} \tag{11}$$

式中 $\alpha_{[k]} = dx_k^2/24$, 我们不可能计算出整个式子的结果, 仅仅用第一项来近似估计亚网格的级别:

$$\Phi' \cong -\alpha_{[k]} \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial x_k \partial x_k} \tag{12}$$

该方程式能方便地适用于矢量场。比如在速度场中, 当亚网格速度的绝对值超过了设定值时, 该网格就会被细化。

为了保证计算精度, 同时防止因生成过量的细化网格而增加不必要的计算成本, 需要:

(1) 优化设置自适应网格数量的界限值, 使程序自动地根据网格数目的限制来选取网格细化的区域; (2) 在 AMR 的设置中, 通过优化设置网格最大细化等级以保证网格的细化程度。

除了限定速度, 还可以通过每个网格中的粒子数目、温度、燃料种类以及边界层等参数的设置, 来达到自适应的目的。考虑到喷雾的特性, 本文中的模拟只是对速度作了限定设置。

3 结果与分析

3.1 喷雾标定方法对计算准确性的影响

喷雾仿真计算首先要根据喷油器参数和工况条件选择合适的喷雾模型, 喷雾模型中一般会含有多个待定参数, 用以与实验数据对比时进行调节。不同的喷嘴结构, 喷雾的形态和雾化特性不同, 这就需要参照实测的数据逐步调整喷雾模型中的各个参数, 使得喷雾计算结果与实测数据吻合。这个过程叫喷雾模型标定。鉴于喷雾破碎模型的复杂性, 本文以破碎模型的标定为例, 研究喷雾模型标定方法对计算准确性的影响。

本文中直喷汽油机的喷嘴实测数据中的喷雾贯穿距是从喷油器喷雾白光成像测试实验中得到, 采用相位多普勒干涉法 (PDI) 获得了喷油器轴线下方 30mm 平面的 SMD 数据。图 1 中显示了计算所用的网格, 喷雾仿真是在圆柱体形状的定容弹中进行的, 从中可以看出定容弹的直径是 140mm, 高 150mm, 基本网格尺寸为 4mm, 通过 AMR 设置得到最小网格尺寸为 0.5mm, 并且网格尺寸由小到大过度均匀。所测喷嘴的喷孔数量为 6, 喷孔直径为 0.205mm; 燃油喷射压力、燃油温度、环境压力、环境温度与喷雾测试条件保持一致。喷雾计算条件如表 1 所示。

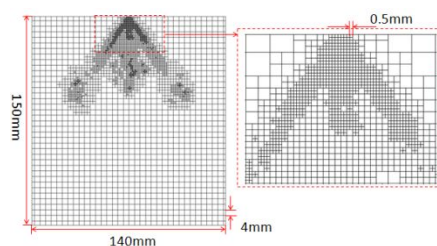
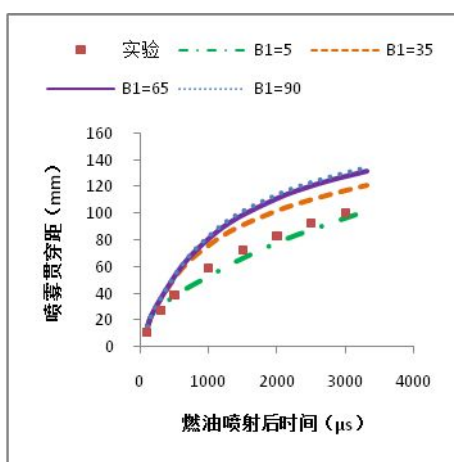


图 1 计算网格

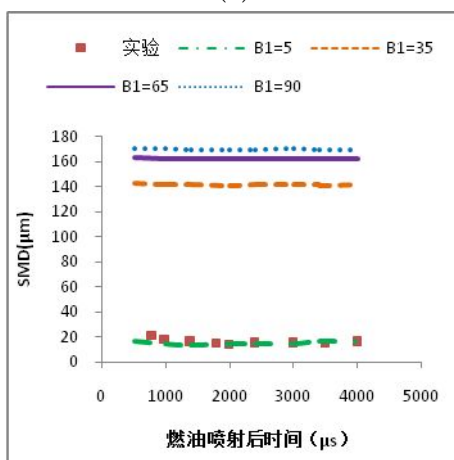
表 1 喷雾计算条件

名称	喷雾计算条件
喷嘴型式	六孔喷嘴
喷孔直径(mm)	0.205
燃油喷射压力(MPa)	15
燃油温度(K)	353.15
环境温度(K)	298.15
环境压力(KPa)	140

为了明确模型参数调整的方向,本文针对六个模型参数中的典型参数 B_1 、 C_{RT} 和 C_{bi} 进行了敏感性分析,主要观察各参数的改变分别对喷雾贯穿距和液滴的 SMD 的影响。敏感性分析计算结果如图 2 所示:



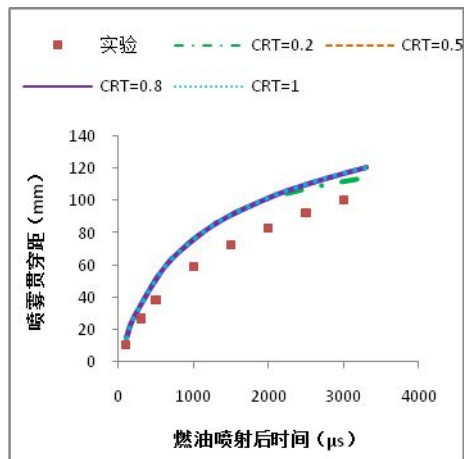
(a)



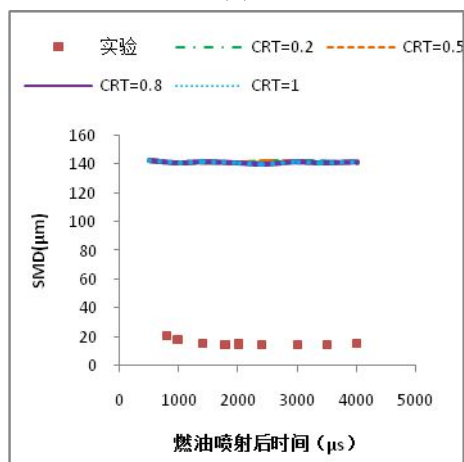
(b)

图 2 KH 破碎时间常数 B_1 对(a)喷雾贯穿距和(b)

SMD 的影响

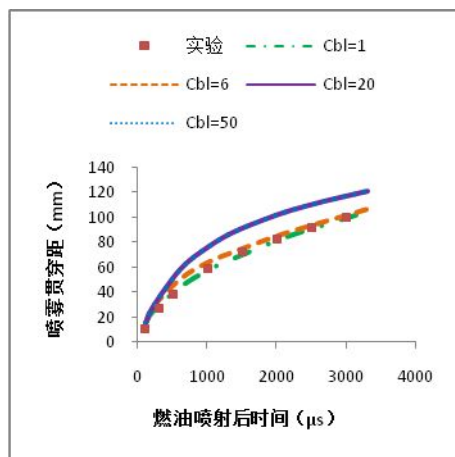


(a)

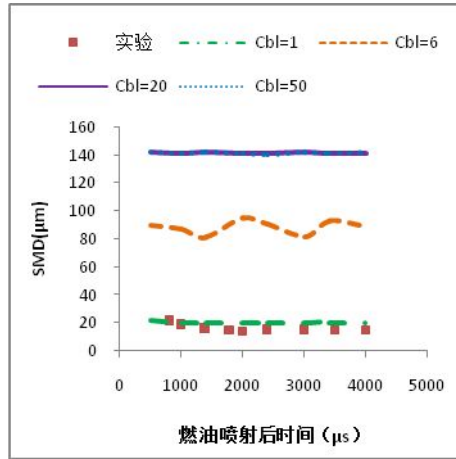


(b)

图3 RT 破碎尺寸常数 C_{RT} 对(a)喷雾贯穿距和(b)SMD 的影响



(a)



(b)

图 4 RT 破碎长度常数 C_{bl} 对(a)喷雾贯穿距和(b)SMD 的影响

从图 2 中可以看出，随着 B_1 的减小，破碎时间变短，则喷雾的贯穿距和液滴的 SMD 也随之减小。图 3 显示， C_{RT} 对喷雾贯穿距和液滴的 SMD 影响很小。从图 4 的计算结果来看，伴随着第二次分裂雾化的进行， C_{bl} 等于 20、50 时，其计算结果非常接近； C_{bl} 在较小的取值范围内，随着取值的增大，喷雾的贯穿距略微增加，而液滴的 SMD 增幅较大。

由敏感性分析的结果可以得出， B_1 和 C_{bl} 对计算结果的影响较大， C_{RT} 对计算结果影响不大。因此，在对本文这款喷嘴进行 KH-RT 模型的标定时，只需要对 B_1 和 C_{bl} 两个参数进行分析。

3.1.1 仅标定表征喷雾宏观几何特性的贯穿距

参考图 4，当 C_{bl} 从 6 减小到 5 时，可得到如图 5 所示的标定结果，贯穿距的模拟计算值与实测值非常吻合。可见，标定贯穿距只需调整 C_{bl} 就能达到预期目的。

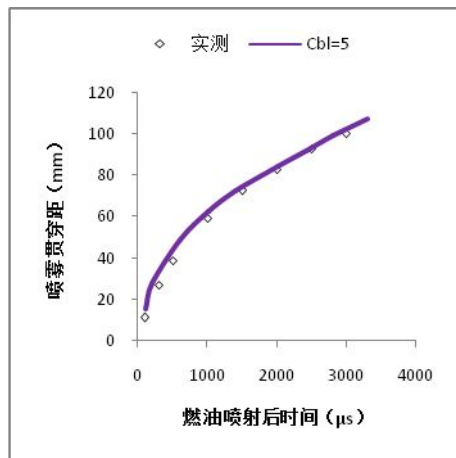


图 5 $C_{bl}=5$ 时实测与仿真贯穿距

3.1.2 同时标定表征喷雾宏观几何特性的贯穿距和表征喷雾雾化程度的液滴 SMD

粒径大小是反映喷雾雾化程度的重要参数。粒径分布对气液两相之间的传热、传质以及蒸发、燃烧过程都有重要影响，喷雾液滴直径越小，蒸发速度越快，油气混合过程就越快。为了提高喷雾仿真计算的准确性，液滴 SMD 的标定是必不可少的环节。

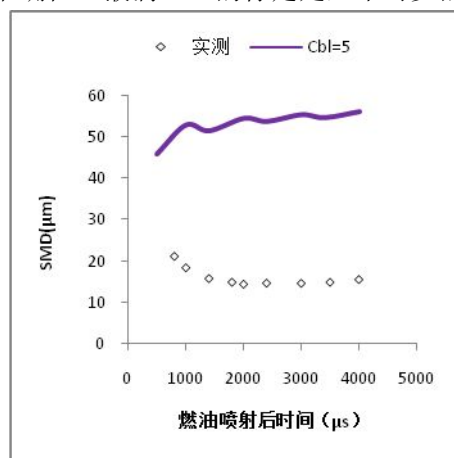


图 6 $C_{bl}=5$ 时实测与仿真 SMD

在标定好贯穿距的情况下（图 5），即： $C_{bl}=5$ 时，喷孔下方 30mm 平面内液滴 SMD 的实测值与仿真结果仍然相差很大（图 6）。从图 5 与图 6 的对比结果中可以看出，仅标定贯穿距不能够准确地模拟出实际的喷雾特性。

为了使喷雾贯穿距和液滴 SMD 的仿真结果与实测数据同时吻合，需要对两个参数一起标定。文中把两个参数看作设计变量，要使两个变量在其范围中的取值组合更为合理，这就需要采用一定的试验设计方法对设计空间进行抽样生成一定数量的样本点，常用方法有正交设计、均匀设计、拉丁超立方抽样（LHS）等。

LHS 作为一种分层抽样方法，以其良好的散步均匀性和对整个解空间的代表性，及随机的搜索功能，成为充满设计空间的重要方法，获得了广泛应用，因此本文选用 LHS 来选择所需要的样本点。

本文根据敏感性分析结果与实验数据的对比，对所标定的两个参数的范围作了进一步的缩小，得到了如图 7 所示的两个设计变量的拉丁超立方抽样结果。通过所抽取样本的计算结果对比，选取 $B_1=10$ ， $C_{bl}=1$ ，该组合获得了最接近实验的标定结果。如图 8 所示，喷雾贯穿距与实验吻合的较好，从 SMD 数据的对比中发现，在油滴刚到达 30mm 时，计算值与实测值相差大概 $5 \mu m$ ，这主要是因为在该时间段，实验中的粒子统计数目与仿真中的粒子统计数目相差较大。

在喷雾标定完成的基础上，本文还对实验测试、已准确标定和未准确标定（标定系数为缺省值）的喷雾宏观形态进行了对比，从图 9 可以看出，未准确标定的喷雾图像与实验测试图像差距较大，已准确标定的喷雾图像与实验测试图像吻合较好，这进一步验证了本文中喷雾仿真计算的准确性。

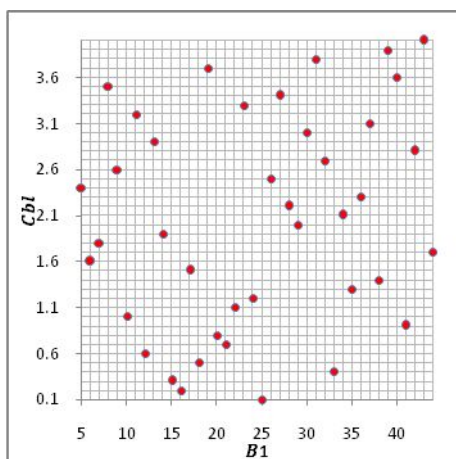


图7 利用 LHS 试验设计方法抽样得到的样本点分布

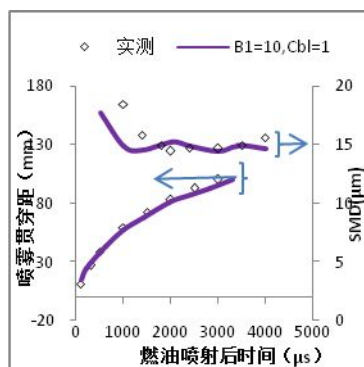


图8 $B_1=10$, $C_{bl}=1$ 时喷雾贯穿距和 SMD 的实测与仿真



图9 实验测试、已准确标定和未准确标定的喷雾宏观形态对比

3.2 计算网格划分方法对计算的影响

计算网格的划分是否合理会直接影响到计算的高效性和准确性，在计算过程中必须高度重视。

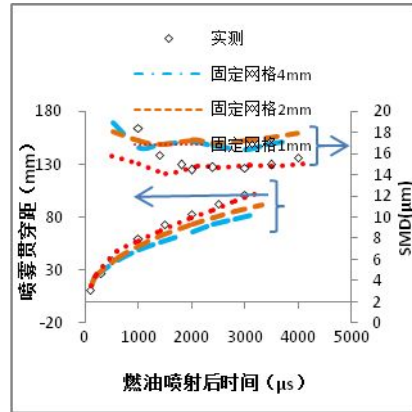


图 10 固定网格尺寸对喷雾贯穿距和 SMD 的影响

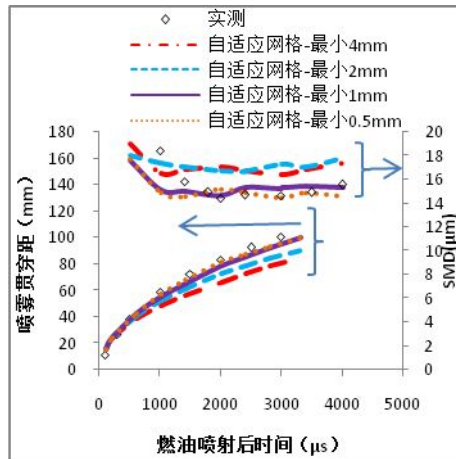


图 11 自适应网格尺寸对喷雾贯穿距和 SMD 的影响

图 10 是保证定容弹空间所有网格尺寸相同的前提下，固定网格由粗变细，喷雾贯穿距逐渐变大，30mm 平面 SMD 有变小的趋势，尤其是在网格尺寸从 2mm 减至 1mm 时，变小趋势比较明显。当固定网格尺寸为 1mm 时，计算结果与实验最为接近。在自适应网格的分析中，计算中设置的最大网格尺寸是 4mm，在喷雾速度梯度较大的区域，网格尺寸可以细化到 AMR 设置的最小网格尺寸。如图 11 所示，随着最小网格尺寸的改变，粗网格下的喷雾贯穿距较小，30mm 平面 SMD 较大，与实验偏离程度很大；当最小网格尺寸减小到 0.5mm，喷雾贯穿距最大，SMD 最小，且与实验吻合得较好。总之，仿真结果中喷雾贯穿距和 SMD 具有一定的网格依赖性，但在自适应网格划分方法下，从最小网格尺寸分别为 1mm 与 0.5mm 的对比结果中发现，随着网格精度的增加，其网格依赖性明显减弱。两种网格划分方法都可以得到较好的标定结果，选择何种划分方法就需要综合考虑计算的精度和成本。

为此，本文对两种网格划分方法所需的网格数目和计算时间做了对比，从图 12 可以发现，固定网格尺寸（1mm）的划分方法使得网格数目在整个计算时间内固定不变；而自适应网格尺寸（最小网格尺寸为 1mm）的划分方法因其本身的特点，其网格数目是随着计算时间不断变化的，并且明显少于前者，这就大大减小了计算时间（如图 13 所示），计算时间约是固定网格的十分之一；同时，利用自适应网格尺寸（最小网格尺寸为 0.5mm）的划分方法，尽管网格数目相对增加（如图 12 所示），但计算时间仅是固定网格的约六分之一。

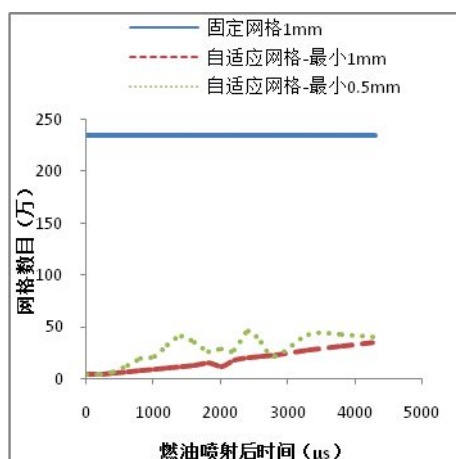


图 12 随着喷油时间变化的自适应网格数目

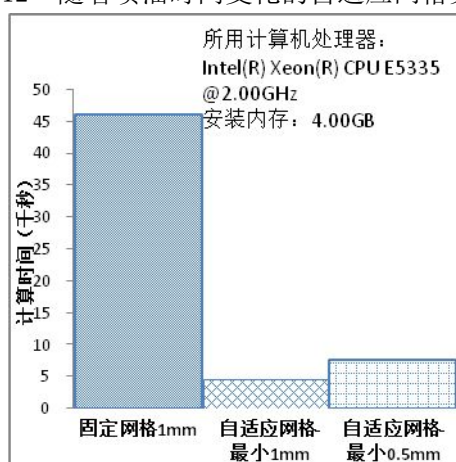


图 13 直喷喷嘴的喷雾仿真计算时间

4 结论

- 1) 通过喷雾破碎模型参数的敏感性分析，参数的标定范围进一步缩小，利用 LHS 抽样方法获得了很好的模型参数组合，标定方法的合理性得到了验证。
- 2) KH-RT 喷雾破碎模型中参数 和 对仿真结果的影响较大，仅改变 就可以完成喷雾贯穿距的标定，但 SMD 的计算结果却与实测相差很大，不能够准确地模拟出实际的雾化特性；要使喷雾贯穿距和 SMD 同时达到标定的要求，需同时标定这两个参数。
- 3) 自适应网格使网格细化区域分布更为合理，随着喷雾速度场的变化，其网格数目随着喷雾时间自动调整。在同等计算精度的情况下，采用自适应网格(最小网格尺寸为 1mm)时计算所需的网格数目明显减少，计算时间约是固定网格的十分之一；当采用更小的自适应网格尺寸(0.5mm)时所需的网格数目有所增加，但计算时间仅是固定网格的约六分之一。

参考文献

- [1] A. De Vita, L. Allocca. Experimental Analysis and CFD Simulation of GDI Sprays. SAE Paper, 2003, 2003-01-0004.
- [2] H. Bensler, F. Bühren and A. Lozet. An Experimental and Numerical Study of Diesel Injection Spray Phenomena. Internal Combustion Engines 5th International

Conference, September 23 - 27, 2001.

- [3] 陈虎, 帅石金, 王建昕, 等. 乙醇柴油喷雾特性及混合气形成数值模拟. 2006 代用燃料汽车国际学术会议论文集, 2006, No. 0615: 66-71.
- [4] 叶伊苏, 王伟民, 王兆文, 等. 基于仿真的缸内直喷汽油机燃烧系统的开发与改进. 汽车工程, 2011, 33(10): 838-844.
- [5] Sibendu Som, Gianluca D'Errico, Douglas Longman, et al. Comparison and Standardization of Numerical Approaches for the Prediction of Non-reacting And Reacting Diesel Sprays. SAE International, 2012, 2012-01-1263.
- [6] 刘斌, 欧阳光耀. 影响柴油机喷雾数值模拟精度的若干因素分析. 海军工程大学学报, 2006, 18(1): 108-112.
- [7] Reitz, R. D. and Diwakar, R.. Structure of High-Pressure Fuel Sprays, SAE Paper, 1987, 870598.
- [8] Schmidt, D. P. and Rutland, C. J., A New Droplet Collision Algorithm. Journal of Computational Physics, 2000, 164, 62-80.
- [9] Richards, K.J., Senecal, P.K., Pomraning, E.. CONVERGE User Manual (Version 1.4.1). Convergent Science, Inc., Middleton, WI.
- [10] Berger M, Colella P. Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics. J Comput Phys, 1989, 82(1): 64-84.
- [11] Andreas M. Lippert, Shengming Chang, Sasanka Are, et al. Mesh Independence and Adaptive Mesh Refinement For Advanced Engine Spray Simulations. SAE Paper, 2005, 2005-01-0207.
- [12] 成传松, 李云清, 王艳华, 等. 喷雾仿真中的网格依赖性. 航空动力学报, 2011, 26(9): 1964-1969.