

基于 Converge 进行某增压直喷发动机喷雾模型标定

Spray model calibration of a Turbocharged gasoline direct injection by Converge

郑建军 陈小东 沈惠贤 曾庆强 卿辉斌 詹樟松

长安汽车动力研究院，重庆市渝北区空港大道 589 号，401120

摘要：本文基于三维 CFD 软件 Converge 对长安蓝芯 1.5TGDI 发动机喷油器喷雾模型进行精确标定。首先对 KH-RT 破碎模型中的各个参数进行敏感性分析，找出各个参数对喷雾宏观轮廓及粒径分布的影响规律，然后基于以上分析结果对模型进行粗略标定，最后再进行精确标定。计算结果表明：KH-RT 模型中的 B0、B1 和 C3 均对喷雾贯穿距离和 SMD 有一定影响，但 Ct 参数仅对喷雾贯穿距离有影响。经过精确标定可以实现喷雾宏观形态和 SMD 的仿真值与试验结果高度吻合，可以基于该标定结果进行后续的缸内喷雾运动、混合气分布及燃油湿壁等方面的工作。

关键词：增压直喷；喷雾模型标定；喷雾贯穿距；SMD；Converge

Abstract: The spray model of the injector from a Changan Bluecore 1.5TGDI engine was calibrated accurately by Converge code in this paper. Firstly, a sensitive analysis was conducted to the parameters of KH-RT breakup model, and the effect of these parameters on the global spray structure and droplet size distribution was acquired. Then, a coarse spray model calibration was done based on the sensitive analysis. Finally, an accurate spray model calibration was conducted based on the results of the coarse spray model calibration process. The results show that B0, B1, and C3 have some influence on spray tip penetration and SMD. But Ct only has an influence on spray tip penetration, and the SMD keeps almost unchanged with the variation of Ct. After the accurate spray model calibration, the simulation results of global spray structure and droplet size distribution agree well with the experimental values. Therefore, the subsequent in-cylinder spray motion, mixture distribution, and fuel-wall wetting can be precisely predicted based on this work.

Key words: Turbocharged gasoline direct injection; Spray model calibration; Spray penetration; SMD; Converge

1 序言

日益严峻的能源短缺及环境污染问题，使得开发高效率和低污染车用发动机成为内燃机工作者的目标和当务之急。柴油机由于采用较高的压缩比及无节流损失，其燃油经济性远高于传统 PFI(Port fuel injection) 汽油机，但柴油机振动噪声较大、发动机转速范围有限、冷启动困难且 NOx 及颗粒排放物较高。因此，在过去的几十年，内燃机工程师致力于开发一款能够同时具备汽油机和柴油机优点的发动机，即发动机油耗接近柴油机水平而保持汽油机的操作特性及比功率输出。GDI

(Gasoline Direct Injection) 发动机被认为是理想的解决途径之一。因此，从上世纪 90 年代日本三菱公司开发出第一款 GDI 产品发动机以来，GDI 发动机就越来越受到人们的关注[1]。 GDI 发动机由于采用缸内直接喷射、可变喷油定时及控制缸内气流运动等方式可实现高效燃烧，使该发动机无论在燃油经济性还是在废气排放等方面都表现出比传统 PFI 发动机具有更大的发展潜力。同时 GDI 技术可以和增压技术、VVT 技术及 EGR 相结合进一步改善发动机的动力性、经济性和废气排放。

近年来，发动机小型化 (Downsizing) 已经成为一种趋势。增压发动机由于尺寸更小，强化程度更高，并因此降低了内部的摩擦、泵气损失和燃油消耗，且动力性得以提升，从而受到业界青睐。目前，将缸内直喷和涡轮增压技术相结合来改善发动机动力性、经济性及废气排放已经成为一种趋势。目前，国内外大多数汽车公司（如大众、通用、福特公司）都在致力于研究及开发增压直喷发动机产品[2]。

在开发增压直喷发动机过程中，通过缸内喷雾仿真分析进行喷油器喷雾油束方案优化是较为关键的技术之一。然而由于目前喷油器喷雾理论/子模型发展并不是很成熟，如果直接采用 CFD 软件的默认喷雾模型参数进行缸内喷雾仿真计算，计算结果往往偏离真实情况，不利于直喷发动机喷油器喷雾油束方案优化。因此，CAE 工程师必须基于喷雾测试数据对每个工况点的喷雾模型常数进行标定，获得较准确的喷雾仿真结果，才能有效进行缸内喷雾运动仿真并指导直喷发动机燃烧系统设计，从而开发出高品质的发动机。然而，喷雾模型标定工作较为繁琐，CAE 工程师需要经过多轮计算并反复调试模型参数才能获得最终的喷雾子模型参数。

为了实现增压直喷发动机的高效开发，本文基于三维 CFD 软件 Converge 对长安蓝芯 1.5TGDI 发动机喷油器喷雾模型进行快速标定。本文的大体思路是：首先对各喷雾子模型参数进行敏感性分析，找出各喷雾子模型参数对喷雾宏观轮廓及粒径分布的影响规律；然后基于以上分析结果进行模型粗略标定，最后再进行精细化标定，获得最终的喷雾子模型参数，为增压直喷发动机的高效开发奠定基础。

2 计算模型与边界

2.1 计算模型

本文采用 Converge 软件进行 Bluecore 1.5L TGDI 发动机喷油器喷雾模型标定。首先建立喷雾测试采用的高压定容容器的三维计算网格。模型尺寸为 $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ ，计算网格尺寸为 1mm ，网格总数为 100 万(如图 1)。喷雾模型标定的两个计算工况如表 1 所示。

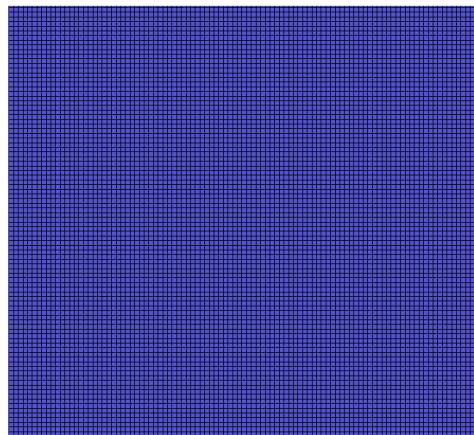


图 1 Converge 三维计算模型

表 1 喷雾模型标定计算工况

工况	喷射压力 / MPa	脉宽	环境背压 / kPa	环境温度 / °C
1	12.3	1.9ms	61.5	25
2	10.0	1.5	101.325	25

2.2 计算边界

顶部边界设置为壁面边界，壁面温度设置为试验测试时的室温设置，其余边界均设置为压力边界，压力值设为喷雾定容容器内的背景压力。

2.3 喷雾模型设置及标定流程

高压喷油器的喷雾特性参数，如喷孔直径、喷嘴流量、贯穿距、粒径分布、喷雾锥角等通过光学测试试验获得。选择 KH-RT 破碎模型模拟喷嘴出口处的初次破碎及后续的二次破碎，该模型假设 KH 表面波的不稳定主要导致油束的初次破碎，使得小液滴从液核表面脱落，KH 表面波和 RT 表面波的不稳定性共同引起二次破碎[3-4]。粒子互相作用模型采用 NTC 模型[5]，湍流扩散模型采用 O'Rourke 模型，液滴蒸发模型采用 Frossling 模型[3]。

喷雾模型标定流程如图 2 所示，首先进行网格划分及喷雾模型设置，然后对影响 KH-RT 破碎模型的各个模型参数 B0(balpha)、B1(kh_cnst2)、C3(cnst3rt)、Ct(rt_cnst2b) 进行参数敏感性分析，找出各个参数对喷雾宏观轮廓及粒径分布的影响规律；然后基于以上分析结果进行模型粗略标定，最后再进行精细化标定，获得最终的喷雾子模型参数。

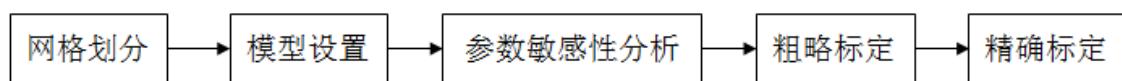


图 2 喷雾模型标定流程

3 计算结果及分析

3.1 参数敏感性分析

图 3 是工况 1 (喷油压力为 12.3MPa, 喷油脉宽为 1.9ms, 背压为 61.5kPa, 环境温度为 25°C) 条件下, 采用不同 KH 模型常数 B_0 对喷雾贯穿距的影响结果。可以看出, 随着 B_0 的增加, 喷雾贯穿距离是增加的, 但 B_0 对喷雾贯穿距离的影响并不是很明显。 B_0 对喷雾贯穿距离的影响大约是从 $t \geq 0.3\text{ms ASOI}$ 开始发挥作用。

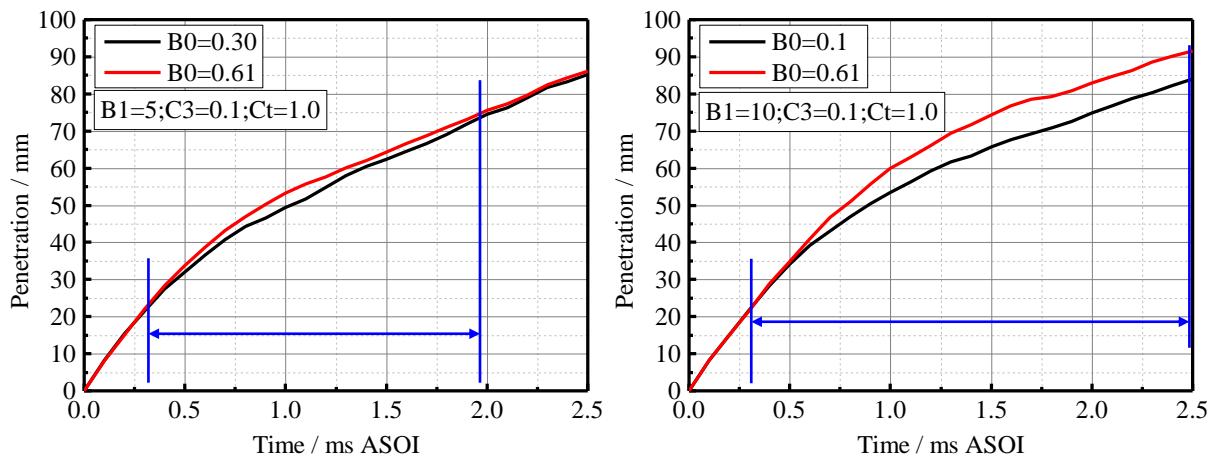


图 3 KH 模型常数 B_0 对喷雾贯穿距的影响

图 4 给出了 B_0 对 SMD 的影响规律, 可以看出, B_0 增大导致 SMD 增大, B_0 对 SMD 的影响也并不是特别显著。

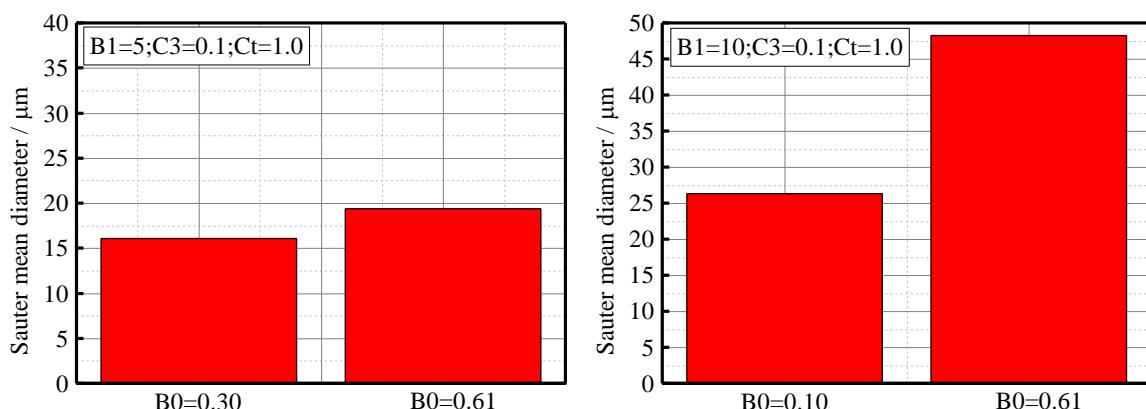


图 4 KH 模型常数 B_0 对 SMD 的影响

图 5 是工况 1 条件下, 采用不同 KH 模型常数 B_1 对喷雾贯穿距和 SMD 的影响结果。可以看出, 随着 B_1 的增加, 喷雾贯穿距离和 SMD 都是增加的, 且 B_1 对喷雾贯穿距离和 SMD 的影响比 B_0 的影响更明显, B_1 对喷雾贯穿距离的影响大约是从 $t \geq 0.3\text{ms ASOI}$ 开始发挥作用。

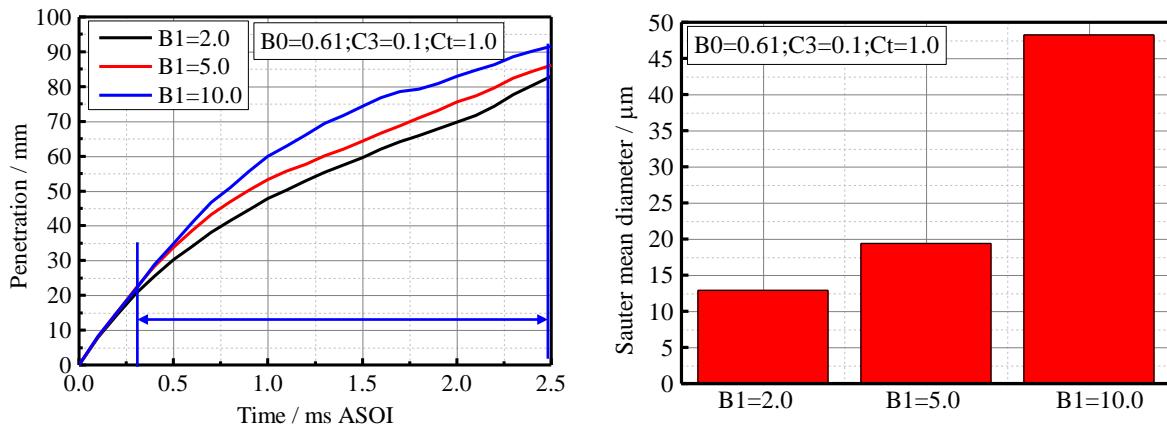


图 5 KH 模型常数 B1 对贯穿距离和 SMD 的影响

图 6 是工况 1 条件下，采用不同 RT 模型常数 C3 对喷雾贯穿距和 SMD 的影响结果。可以看出，随着 C3 的增加，喷雾贯穿距离和 SMD 都是增加的，且 C3 对喷雾贯穿距离和 SMD 的影响非常明显，C3 对喷雾贯穿距离的影响大约是从 $t \geq 0.8\text{ms ASOI}$ 开始发挥作用。

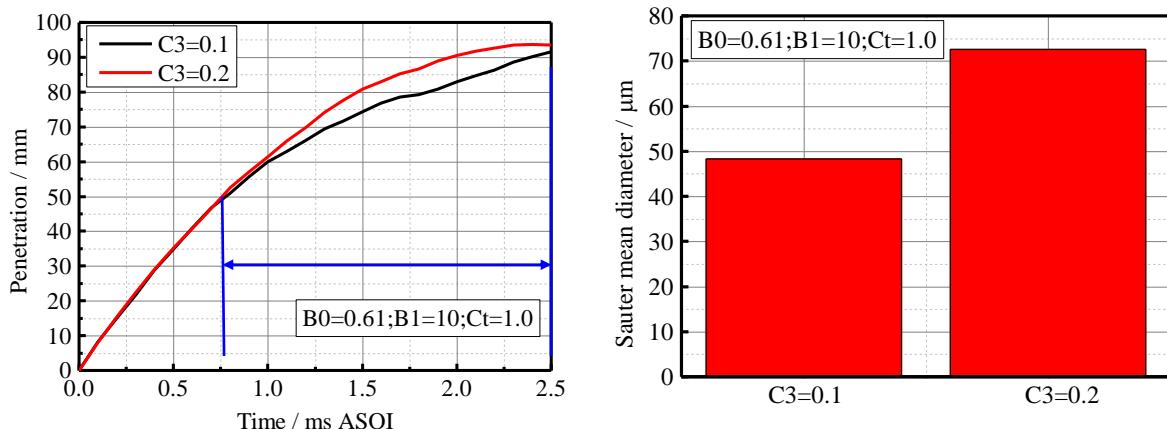


图 6 RT 模型常数 C3 对贯穿距离和 SMD 的影响

图 7 是工况 1 条件下，采用不同 RT 模型常数 Ct 对喷雾贯穿距和 SMD 的影响结果。可以看出，随着 Ct 的增加，喷雾贯穿距离是增加的，但 SMD 几乎不变，Ct 对喷雾贯穿距离的影响比 C3 的影响稍小。Ct 对喷雾贯穿距离的影响大约是从 $t \geq 0.8\text{ms ASOI}$ 开始发挥作用。

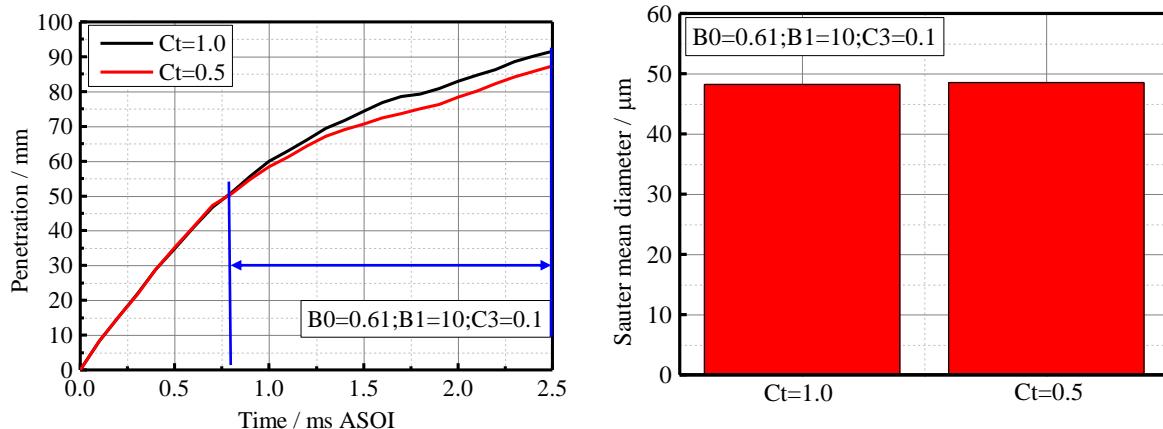


图 7 RT 模型常数 Ct 对贯穿距离和 SMD 的影响

3.2 粗略标定

基于以上的 KH-RT 破碎模型参数的敏感性分析，获得不同模型参数对喷雾贯穿距离和 SMD 的影响规律，然后进行粗略标定。图 8 是经过多轮标定后得到的喷雾贯穿距离和 SMD 的结果汇总，从计算结果可以看出当 $B_0=0.30$, $B_1=5.0$, $C_3=0.1$, $C_t=1.0$ 时，通过喷雾仿真计算得到的喷雾贯穿距离和 SMD 都与试验测试值相对较接近。

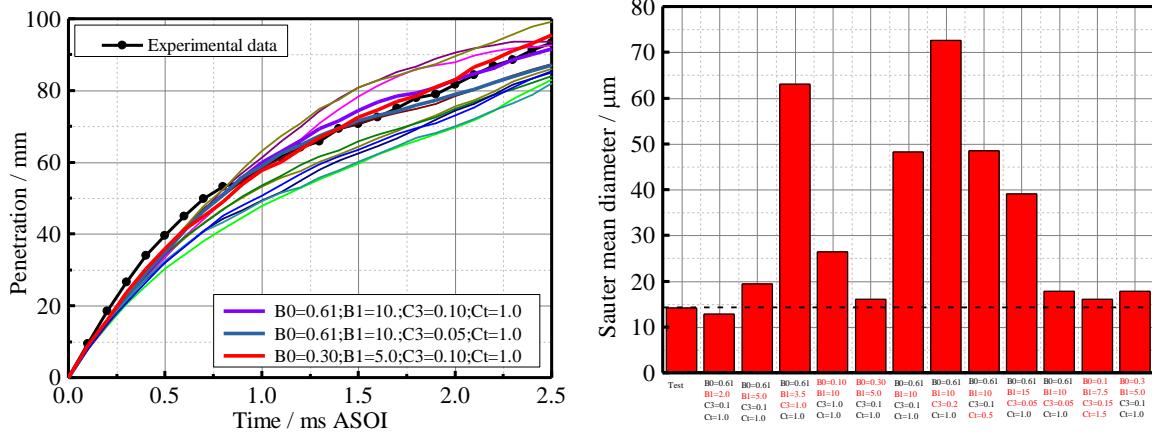


图 8 KH-RT 模型粗标结果

3.3 精确标定

基于以上的粗标结果，进行 KH-RT 破碎模型参数的精确标定。由于粗标结果对应的喷雾贯穿距离与试验值已经很接近，但 SMD 比试验值稍稍偏高。因此可以将对 SMD 影响较大的 B_1 和 C_3 调小，使 SMD 仿真值与试验值更吻合，同时将对 SMD 影响较小但对喷雾贯穿距离有一定影响的参数 B_0 和 C_t 调高，保证喷雾贯穿距离基本不变。经过精确标定后得到的喷雾贯穿距离和 SMD 与试验测试值吻合较好（如图 9 所示），可以用来进行后续的缸内喷雾运动仿真工作。

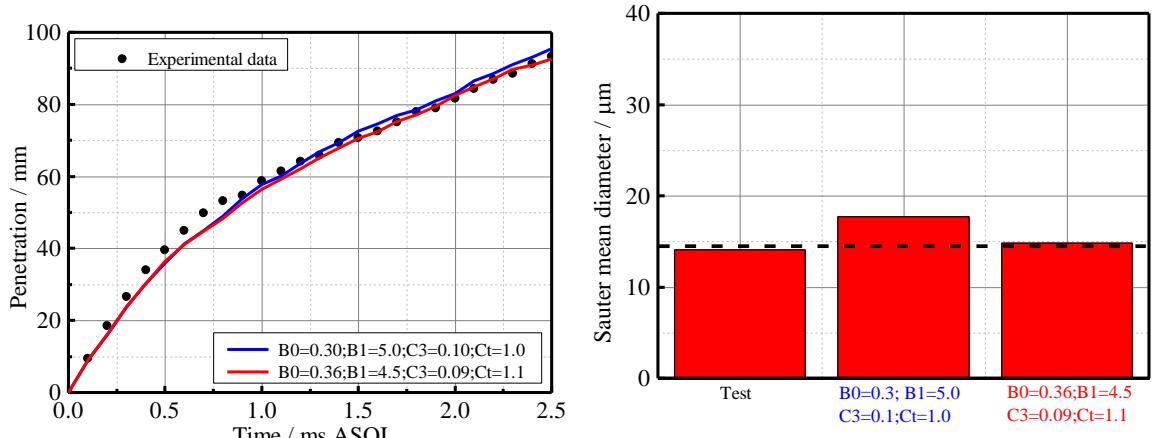


图 9 KH-RT 模型精确标定结果

基于以上喷雾标定流程，对工况 2 进行 KH_RT 破碎模型参数的快速标定。图 10 和图 11 是对工况 2（喷油压力为 10.0MPa，喷油脉宽为 1.5ms，背压为 101.325kPa，环境温度为 25℃）进行精确标

定的结果。可以看出，经过精确标定可以实现宏观形态（喷雾贯穿距离和喷嘴锥角）和 SMD 的仿真值与试验测试结果高度吻合，可以基于该标定结果进行后续的缸内喷雾运动、混合气形成及燃油湿壁等方面的工作。

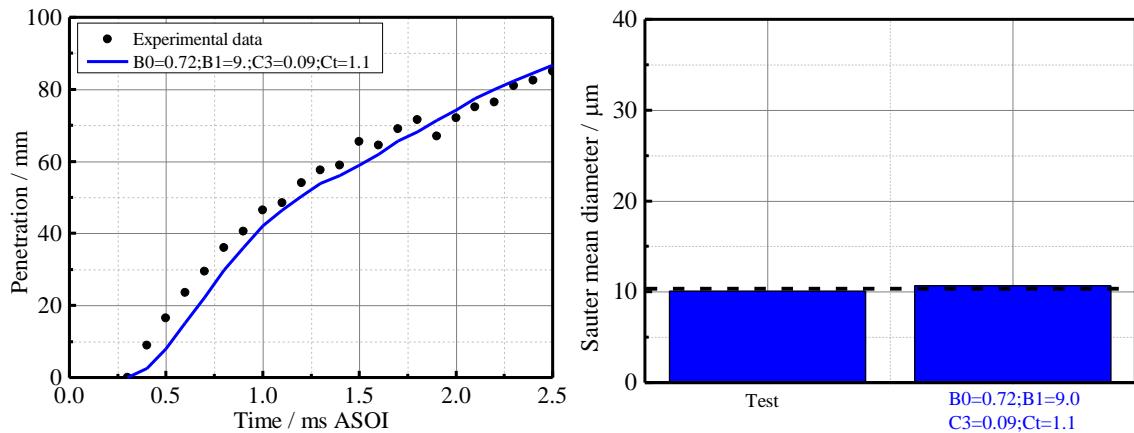


图 10 工况 2 的 KH-RT 模型精确标定结果

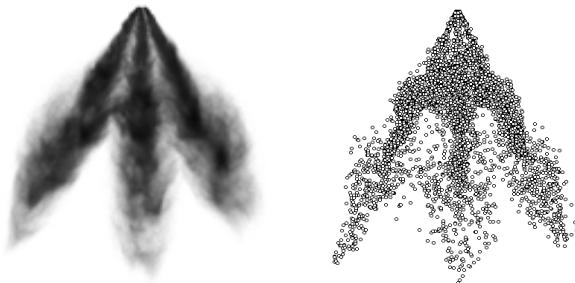


图 11 工况 2 的喷雾宏观轮廓的比较（左侧：试验测试；右侧：喷雾标定结果）

4 结论

本文基于三维 CFD 软件 Converge 对长安蓝芯 1.5TGDI 发动机喷油器喷雾模型进行快速标定，得到的主要结论如下：

1) B_0 增大导致喷雾贯穿距离和 SMD 增大，但 B_0 对喷雾贯穿距离和 SMD 的影响并不是很明显， B_0 对喷雾贯穿距离的影响大约是从 $t \geq 0.3\text{ms ASOI}$ 开始发挥作用。 B_1 增大导致喷雾贯穿距离和 SMD 增大，且 B_1 对喷雾贯穿距离和 SMD 的影响比 B_0 更明显， B_1 对喷雾贯穿距离的影响大约是从 $t \geq 0.3\text{ms ASOI}$ 开始发挥作用。

2) C_3 增大导致喷雾贯穿距离和 SMD 增大，且 C_3 对喷雾贯穿距离和 SMD 的影响非常明显， C_3 对喷雾贯穿距离的影响大约是从 $t \geq 0.8\text{ms ASOI}$ 开始发挥作用。 C_t 增大导致喷雾贯穿距离增大，但 SMD 几乎不变， C_t 对喷雾贯穿距离的影响比 C_3 的影响稍小。 C_t 对喷雾贯穿距离的影响大约是从 $t \geq 0.8\text{ms ASOI}$ 开始发挥作用。

3) 经过精确标定可以实现宏观形态（喷雾贯穿距离和喷嘴锥角）和 SMD 的仿真值与试验测试结

果高度吻合，可以基于该标定结果进行后续的缸内喷雾运动、混合气形成及燃油湿壁等方面仿真工作。

5 致谢

本论文的研究工作得到上海交通大学张玉银教授、IDAJ 公司钟修林经理及叶良春工程师的指导和大力支持，在此表示感谢。

参考文献

- [1] Zhao F., Lai M. C., Harrington D. L., Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline. Engines, Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25: 437–562 .
- [2] Wang, X., Zhan, Z., Yu, X., Hu, T. et al., "Experimental Study on Injector Spray Pattern Optimization for a Turbocharged GDI Engine Combustion System," SAE Technical Paper 2014-01-1439, 2014.
- [3] CONVERGE 2.1.0 Theory Manual, Convergent Science, Inc. 2013.
- [4] Patterson, M. A., Reitz, R. D. Modeling the Effect of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine Combustion and Emission, SAE Paper, 980131, 1998.
- [5] Schmidt, D. P., Rutland, C. J. A New Droplet Collision Algorithm. Journal of Computational Physics, 2000, 164, 62–84.