

基于 modeFRONTIER 的 CONVERGE 喷雾模型标定方法研究

Study on Calibration Method of CONVERGE spray Model Using
modeFRONTIER

钱丁超 刘耀东 段加全 王振喜 张连方
(中国第一汽车集团有限公司研发总院)

摘 要： 使用 modeFRONTIER 软件进行 CONVERGE 软件 KH-RT 喷雾子模型标定工作。在 CONVERGE 软件中建立定容弹模型，模拟某 6 孔直喷发动机喷油器的燃油喷射过程；在 modeFRONTIER 软件中建立自动优化模型，实现喷雾模型参数修改、计算提交与计算结果处理的自动化。经过两轮自动标定与一轮精细标定，喷雾模拟的贯穿距和索特平均直径与试验值的误差在 10% 以内，可以用于后续的发动机缸内喷雾模拟计算。

关键词： 缸内直喷发动机 喷雾标定 CONVERGE modeFRONTIER

Abstract : The calibration of KH-RT spray model in CONVERGE was performed using modeFRONTIER in this paper. The CONVERGE model was built to simulate the fuel injection process of a 6-hole GDI engine injector. An automatic optimization model was established with modeFRONTIER to automate the modification of spray model parameters, calculation submission and analysis of calculation results. After two rounds of automatic calibration and one round of fine calibration, the penetration distance and SMD of the spray are similar to the experimental values, which can be used for subsequent engine in-cylinder spray simulation calculations.

Key words: Gasoline direct injection engine, Spray calibration, CONVERGE, modeFRONTIER

1. 前言

随着汽车油耗和排放相关法规的日益严苛，汽油直喷（Gasoline Direct Injection, GDI）发动机以其在提升热效率、燃油经济性和降低排放方面的巨大潜力成为了未来汽油机发展的主流方向。在 GDI 发动机的产品研发过程中，计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）技术在概念设计阶段的方案制定与选择中发挥着重要作用，在产品研发如何保证 CFD 仿真结果的准确性是研发工程师非常关注的问题。

GDI 发动机的燃油通过喷油器以高压喷射的方式直接进入燃烧室，破碎成许多细小的油滴，然后经过吸热、蒸发、扩散、碰壁等一系列物理过程，形成一个由液柱、油滴、燃油蒸气和空气组成的多相混合物场。因此对燃油喷射过程的模拟，是一个涉及了两相流和统计力学理论的多相流现象数值计算问题，在进行燃油喷射的仿真时需要合理地选择喷雾子模型及其相关设置参数，才能保证喷雾模拟结果的准确性。

利用喷雾特性测试的结果对喷雾子模型进行校核的基本方法是：以喷雾特性测试获得的喷油器流量特性、贯穿距、喷雾图像、粒径分布等宏观和微观特性作为喷雾模型标定的初始条件和参照，在数值计算软件中建立与实验环境条件相同的定容弹模型，反复调整喷雾模型设置，将仿真结果与

测试数据对比，直至模拟所得喷雾的基本特征与测试结果接近。由于喷雾模型参数较多、参数可调范围较大，喷雾模型标定是较为繁琐的一项工作，一方面需要工程师具有一定的仿真经验、了解各参数对喷雾特性的影响规律，才能尽可能减少计算量；另一方面，每一次计算均需要工程师对计算结果进行分析处理，也占用了大量时间。因此本文将 modeFRONTIER 软件应用于 CONVERGE 软件 KH-RT 喷雾子模型标定工作，目的在于实现喷雾标定过程的自动化，并利用 modeFRONTIER 的优化算法找出能准确模型喷雾特性的子模型参数。

2. 喷雾标定自动化模型的建立

2.1 CONVERGE 喷雾计算模型与喷雾特性参数

本文建立了定容弹模型用于喷雾模型标定计算。定容弹模型如图 1 所示，壁面定义为 wall 边界，定容弹内初始压力为 1bar，空气温度为 293K，燃料温度为 293K。标定的喷油器为某 6 孔 GDI 喷油器，通过喷雾特性测试获取其在 10MPa 燃油喷射压力、1.5ms 喷射持续期下的贯穿距和索特平均直径(SMD)等参数作为标定参照。



图 1 定容弹模型

CONVERGE 的 KH-RT 子模型主要有 6 个参数，分别为：Balpha：KH 破碎模型尺寸常数，默认值为 0.61；kh_cnst1：KH 破碎模型速度常数，默认值为 0.188；kh_cnst2：KH 破碎模型时间常数，取值范围为 5-100；rt_cnst2b：RT 破碎模型时间常数，取值范围为 0.1-1；cnst3rt：RT 破碎模型尺寸常数，取值范围为 0.1-1；distant：RT 破碎模型长度常数，取值范围为 0-50。

2.2 modeFRONTIER 自动优化模型

如上文所述，CONVERGE 软件的 KH-RT 破碎子模型可调整的参数共有 6 个，但是根据经验，部分参数一般选择默认值即可，对喷雾贯穿距和 SMD 影响较大且取值范围较大的参数主要是 KH 破碎模型时间常数 kh_cnst2 和 RT 破碎模型长度常数 distant，因此将这两个参数设定为优化的输入变量，输入变量的变化范围如表 1 所示。

表 1 输入变量变化范围

输入变量	变化范围	变化步长
kh_cnst2	5-100	1
distant	1-50	1

喷雾标定的主要目标是喷雾贯穿距和 SMD。贯穿距是一条随喷雾时间逐渐上升的曲线，为了简化优化目标，只选择 0.5ms、1ms 和 1.5ms 时的贯穿距进行对比，其试验值分别为 0.0193m、0.0417m

和 0.0573m，对应的输出变量分别为 penetration1、penetration2 和 penetration3。SMD 的试验值为 1.5ms 时距离出油点 30mm 处的 SMD，其数值为 12 μm ，本研究将其作为油束整体 SMD 值进行对标，因此将 CONVERGE 输出结果中 1.5ms 时的 SMD 作为输出变量 SMD。各输出变量对应的目标变量及约束条件如表 2 所示。

表 2 目标变量及目标变量约束条件

目标变量	目标变量计算公式	约束条件
Objective_SMD	$ SMD - 0.000012 /0.000012$	最小值
Objective1	$ \text{penetration1} - 0.0193 /0.0193$	最小值
Objective2	$ \text{penetration2} - 0.0417 /0.0417$	最小值
Objective3	$ \text{penetration3} - 0.0573 /0.0573$	最小值

根据上述喷雾模型标定需求建立了自动优化模型，如图 2 所示。模型 A 区域为 KH 破碎模型时间常数 kh_cnst2 和 RT 破碎模型长度常数 distant 这两个输入变量。B 区域为试验设计方法和优化算法。C 区域为模型计算模块，包括变量输入文件和 CONVERGE 喷雾计算所需文件，使用 SSH 模块调用远程服务器进行计算。D 区域为后处理模块，包括输出文件、输出变量与优化目标，用于从 CONVERGE 计算文件中提取四个输出变量值，并与目标值进行对比。

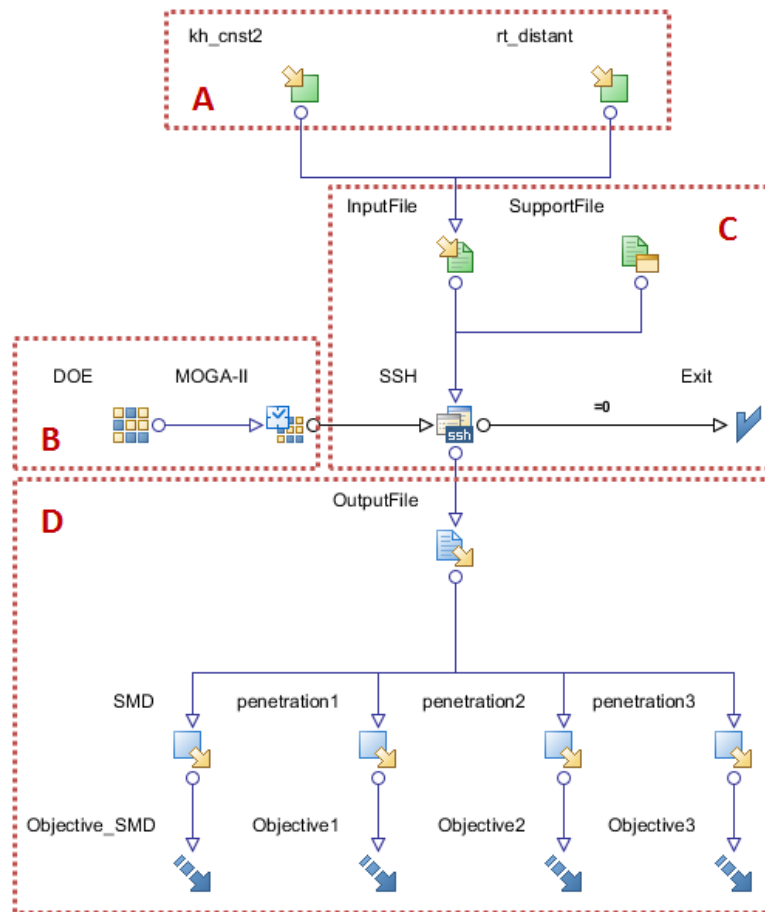


图 2 喷雾模型自动优化模型

本文 DOE 算法选择的是 Sobol 伪随机算法，它用随机数取代均一的分布，即选点的方法不是有序的也不是任意的，而是一种弱有序的取数方式，其优点就是可以通过较少的随机点来表征较大的设计空间^[1]。优化算法选择的是 MOGA-II 多目标遗传算法。MOGA-II 多目标遗传算法的优化过程为：首先使用 DOE 生成初始方案进行计算，然后根据计算结果从初始方案中选择一些相对较优的计算点，在其附近生成新一代方案继续进行计算，重复上一步骤，直至达到设定的终止条件^[2]。本文第一轮计算中，第一代计算点即 DOE 实验设计产生的点数量为 10 个，MOGA-II 遗传算法的遗传代数数为 10，总方案数为 100。

3. 喷雾模型自动标定结果分析

3.1 第一轮喷雾标定及结果分析

4 个目标值的变化历程如图 3 所示。由图可见，经过优化计算后，0.5ms 时的贯穿距误差基本在 10%以内，1.0ms 时的贯穿距误差在 34%以内，1.5ms 时的贯穿距误差基本在 20%以内，SMD 的误差在 50%以内。经过这一轮计算，还没有计算得出油束贯穿距与 SMD 均与试验值较为接近的方案，需要进行第二轮计算。

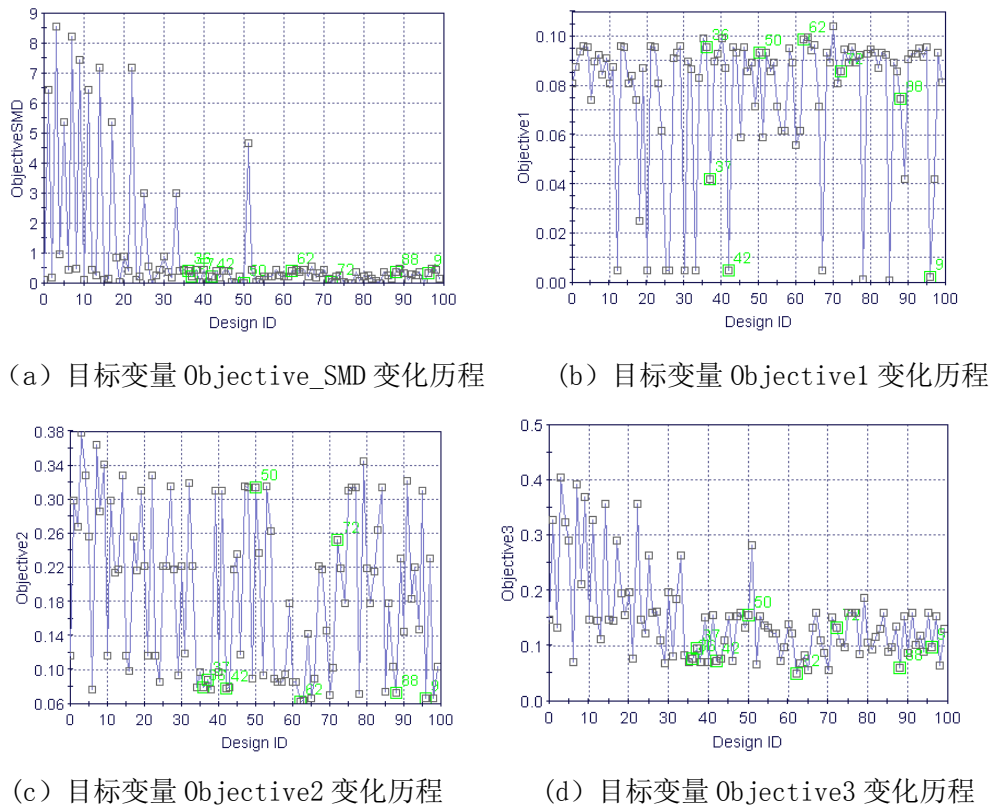


图 3 第一轮标定目标值变化历程

3.2 第二轮喷雾标定及结果分析

从第一轮计算结果中选出了 8 个贯穿距误差较小或 SMD 误差较小的方案作为第二轮计算的 DOE 样本点，选择的方案如上文图 3 中绿色点所示。为了提高计算效率，可根据第一轮计算结果缩小输入变量的变化范围。第一轮计算时输入变量 kh_cnst2 和 rt_distant 的变化历程分别如图 4 和图 5 所示，由图可见 kh_cnst2 的值基大多分布在 5-60 的范围内，rt_distant 的值大多分布在 1-15 的范围内，且选择的 8 个 DOE 样本点的输入变量值也在这两个范围内，因此第二轮计算输入变量的设置如表 3 所示。优化算法仍使用 MOGA-II 遗传算法，遗传代数数为 10，总方案数为 80。

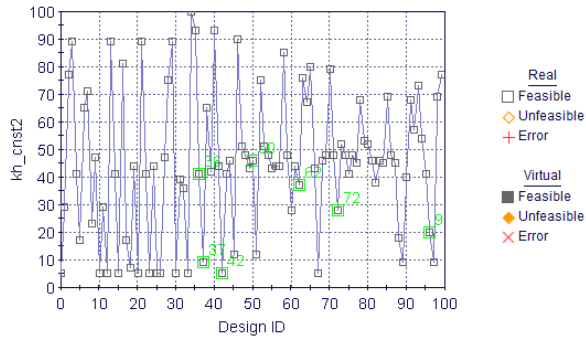


图4 输入变量 kh_cnst2 变化历程

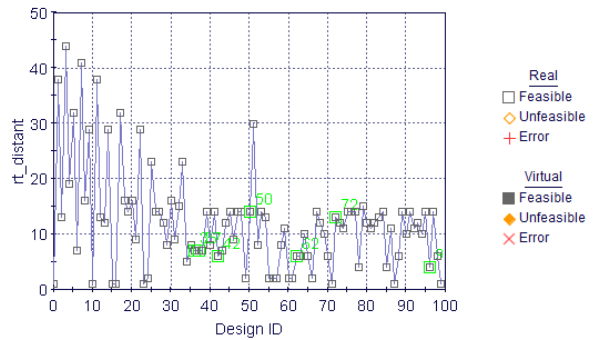
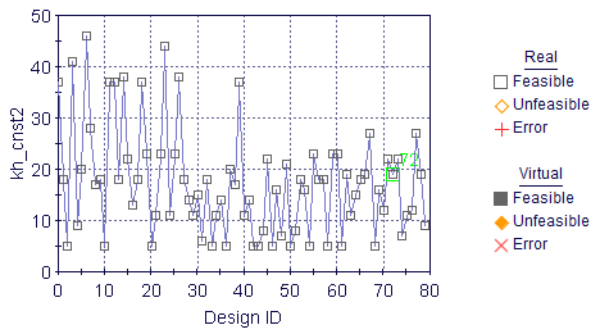


图5 输入变量 rt_distant 变化历程

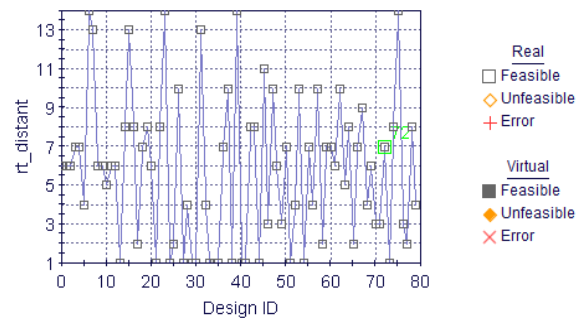
表3 第二轮标定输入变量变化范围

输入变量	变化范围	变化步长
kh_cnst2	5-60	1
distant	1-15	1

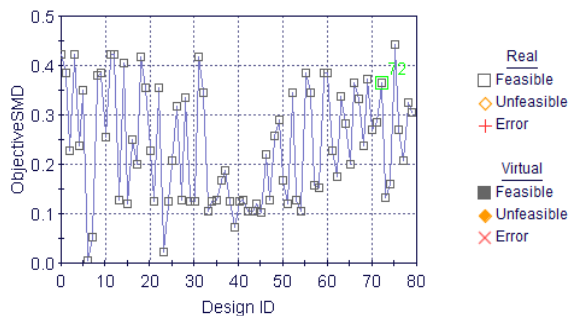
分析第二轮计算结果,如图6所示,输入变量 kh_cnst2 的值集中在 5-30 的范围内, rt_distant 的值集中在 1-10 的范围内, SMD 的误差范围在 10%-40%, 0.5ms 时的贯穿距误差在 0-10%之间, 1ms 的贯穿距误差在 0-15%之间, 1.5ms 的贯穿距误差在 0-15%之间, 输出变量的误差范围相较于第一轮计算有明显的缩小。从第二轮计算结果中可以选出贯穿距误差较小的方案,但是其 SMD 与试验值的误差较大,因此还需要通过调整其他喷雾参数进行精细标定。



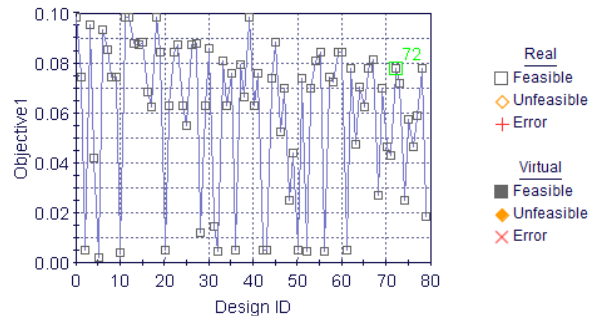
(a) 输入变量 kh_cnst2 变化历程



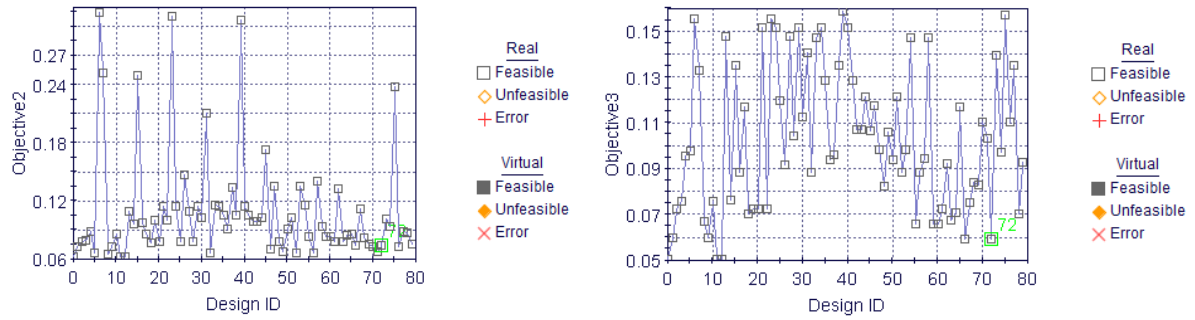
(b) 输入变量 rt_distant 变化历程



(c) 目标变量 Objective_SMD 变化历程



(d) 目标变量 Objective1 变化历程



(e) 目标变量 Objective2 变化历程

(f) 目标变量 Objective3 变化历程

图 6 第二轮计算输入变量与目标变量的变化历程

3.3 第三轮喷雾标定及结果分析

精细标定所用 modeFRONTIER 模型如图 7 所示, 输入变量增加了 RT 破碎模型时间常数 rt_cnst2b 和 RT 破碎模型尺寸常数 $cnst3rt$ 这两个参数。选择第二轮计算中 72 号方案进行精细标定, 其仿真值与误差如表 4 所示, 仿真所得的贯穿距略大于试验值, SMD 明显小于试验值。根据郑建军^[3]等人的研究结果, 喷雾贯穿距和 SMD 均随着 rt_cnst2b 和 $cnst3rt$ 的增大而增大。由于前两轮仿真中 rt_cnst2b 的值设置为 1, 已经是最大值, $cnst3rt$ 的值为 0.1, 为最小值, 因此仅调整 $cnst3rt$ 这一参数。

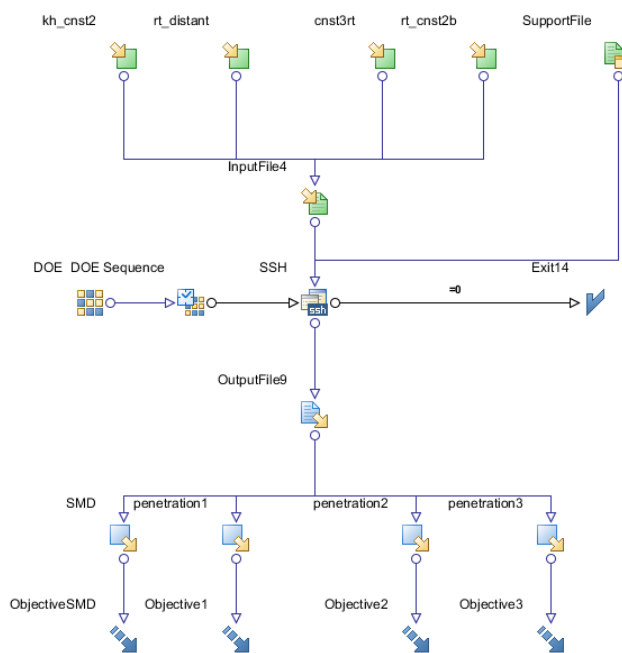


图 7 精细标定自动优化模型

表 4 第二轮计算 72 号方案 SMD 与贯穿距

	SMD (μm)	penetration1(m)	penetration2(m)	penetration3(m)
仿真值	7.63	0.0208	0.0448	0.0607
试验值	12	0.0193	0.0417	0.0573
误差	36.5%	7.8%	7.4%	5.9%

基于以上喷雾标定流程, 最终 KH-RT 喷雾子模型参数设置如表 5 所示, 该组参数下喷雾贯穿距与试验值对比如图 8 所示, 1.5ms 时喷雾整体 SMD 的值为 $11.1\mu\text{m}$, 误差在可接受范围内($<10\%$), 认为该组喷雾子模型参数可以用于下一步缸内喷雾计算。

表 5 标定后喷雾子模型参数设置

参数	取值
kh_Balpha	0.61
kh_cnst1	0.188
kh_cnst2	19
rt_cnst2b	1
rt_cnst3rt	0.13
rt_distant	7

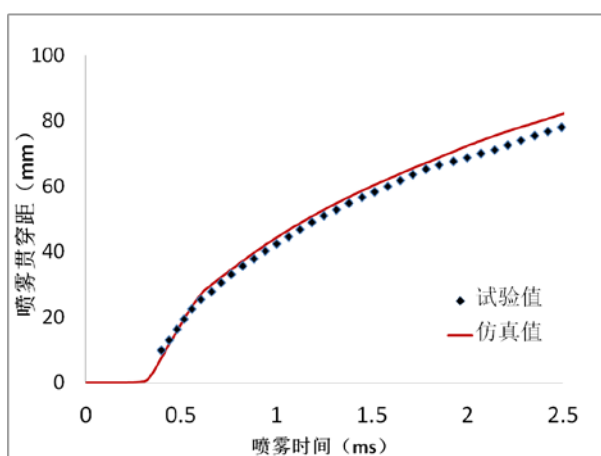


图 8 完成标定后喷雾贯穿距与试验值的对比

4. 结论

将 modeFRONTIER 软件应用于 CONVERGE 软件 KH-RT 喷雾子模型标定工作, 在 CONVERGE 软件中建立定容弹模型, 模拟某 6 孔直喷发动机喷油器的燃油喷射过程; 在 modeFRONTIER 软件中建立自动优化模型, 实现喷雾模型参数修改、计算提交与计算结果处理的自动化。通过两轮自动标定和一轮精细标定, 完成了喷雾子模型标定工作, 结论如下:

- 1) 使用 modeFRONTIER 实现喷雾模型标定自动化可以在粗略标定阶段大大减小工程师的工作量, 并获得较为接近试验数据的喷雾模型参数设置, 在精细标定阶段可以高效快速找出最终适用的参数组合。
- 2) 最终标定后的喷雾模型的贯穿距和 SMD 与试验值的误差均在 10%以内, 可以用于下一步缸内喷雾计算。

5. 参考文献

- [1] 王森. 基于模型的涡轮增压发动机设计和性能优化研究[D]. 上海交通大学, 2012.
- [2] 郭子锐. 天然气发动机的仿真优化与性能提高研究[D]. 上海交通大学, 2012.
- [3] 郑建军等. 基于 Converge 进行某增压直喷发动机喷雾模型标定[C]. 2014 年 IDAJ-China 中国用户论文集, 2014.