

基于多次喷射的柴油机燃烧过程数值模拟

韩雁鹏, 高小瑞, 朱钰

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了研究多次喷射对4190Z₁C船舶中速柴油机缸内燃烧和排放性能的影响, 设计了四种喷射方案: 方案一为2次等量喷射; 方案二为3次喷射; 方案三为2次预喷射加1次主喷射; 方案四为5次预喷射加1次主喷射。利用AVL FIRE软件进行了数值模拟。数值模拟结果表明, 采用多次喷射可以有效改善柴油机的燃烧过程, 降低NO_x的排放量, 特别是方案四, 额定工况下, NO_x的排放量仅为原机的70%。

[关键词] 4190Z₁C船舶柴油机; 多次喷射; 数值模拟

[中图分类号] U 664.121.2

Numerical Simulation on Combustion Process of Diesel Engine Based on Multi-injection

HAN Yanpeng, GAO Xiaorui, ZHU Yu

(School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to study the effects of multi-injections on the combustion and emission performance of 4190Z₁C marine medium speed diesel engine, four kinds of injection schemes were designed for this purpose. Scheme 1 is two equal injections. Scheme 2 is three injections. Scheme 3 is two pre-injections plus one main injection. Scheme 4 is five pre-injections plus one main injection. Numerical simulations were carried out by employing the AVL FIRE software. It shows that the diesel engine and reduce the emission of NO_x. Typically by adopting scheme 4, the emission of NO_x at rated output power is only 70% of that of the original engine.

Key words: 4190Z₁C marine diesel engine; multi-injection; numerical simulation

0 引言

随着世界各国对船舶柴油机排放的要求日趋严格, 改善其燃烧过程, 减少有害物排放成为研究的热点。文献[1-2]解释了传统柴油机燃烧造成高NO_x和Soot(碳烟)排放的原因, 并揭示了缸内燃烧路线控制的方向, 即低温、均混。文献[3-6]通过改变柴油喷射策略, 采用大喷射提前角, 多次喷射, 可以得到较为均匀的柴油浓度分布, 从而改变燃烧室内燃烧条件, 实现对燃烧生成物的控制, 达到降低有害物排放的目的。文献[7]通过改进燃烧室结构, 并采用多次喷射策略, 更有效地降低了柴油机的有害物排放。文献[8-9]在高速柴油机上采用多次喷射技术, 在一定的负载范围内, 大幅降低了NO_x、Soot以及CO和未燃碳氢UHC(uncombusted hydrocarbon)的排放。

综上所述, 采用多次喷射技术可以有效控制柴油机燃烧。本文以4190Z₁C船舶中速柴油机为研

[收稿日期] 2018-05-28

[修回日期] 2018-07-06

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2017J01486, 2012J01230)

[作者简介] 韩雁鹏(1993—), 男, 从事轮机工程方向的研究; 通信作者: 高小瑞(1983—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事轮机工程及流体控制研究。

究对象, 利用 AVL FIRE 软件平台, 数值模拟研究, 在额定工况下, 采用多次喷射对柴油机燃烧及排放性能的影响。

1 多次喷射方案

通过柴油机试验台和油泵试验台^[10]测量得到额定工况下柴油机原始的喷油规律, 如图 1 所示。该工况时, 喷射起始角为 698°CA, 单缸单循环喷油量为 387 mg。

为了研究多次喷射对柴油机缸内燃烧和排放性能的影响, 在保证柴油机输出功率的情况下, 增大喷射提前角, 采用总喷油量不变的原则, 设计了 2 次、3 次、6 次喷射方案, 具体如图 2 所示。

1) 方案一是在原来 1 次 100% 喷射的基础上, 改为 2 次等量喷射, 如图 2a 所示。两次喷射起始角分别为 668°CA 和 698°CA, 喷射持续角度均为 17.4°CA; 两次喷射起始角度之间的间隔约 30°CA, 在上止点 (即 720°CA) 之前完成全部燃油喷射。

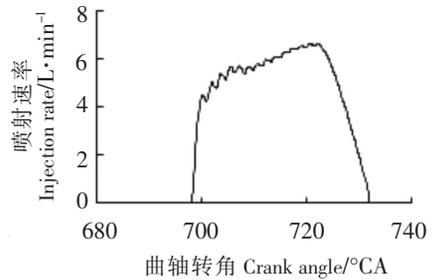
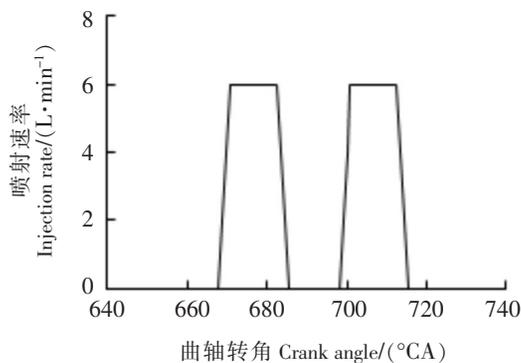
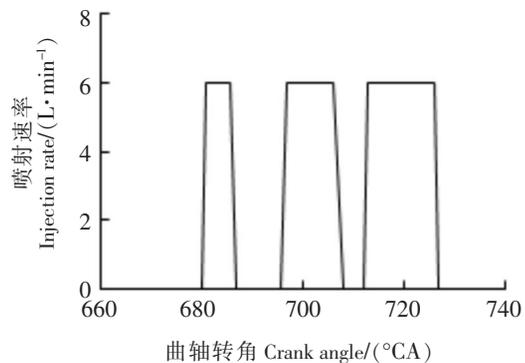


图 1 实测喷射速率曲线

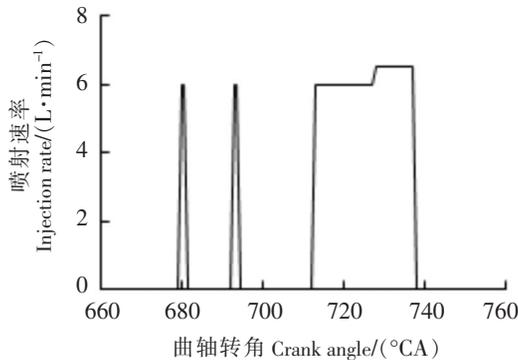
Fig.1 Measured curve for fuel injection rate



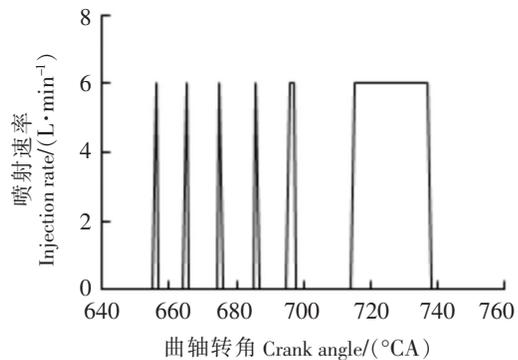
a 方案一 Scheme 1



b 方案二 Scheme 2



c 方案三 Scheme 3



d 方案四 Scheme 4

图 2 多次喷射方案

Fig.2 Multi-injection schemes

2) 为了达到减少预混合燃烧油量的目的, 方案二 (如图 2b 所示) 在方案一的基础上, 推后第 1 次喷射起始角, 由 668°CA 改为 680°CA, 喷油量为总喷油量的 18%; 为了降低燃油分布浓度, 改善缸内混合气分布, 第 2 次喷射油量约为总喷油量的 36%, 并在 712°CA 时增加一次喷射作为第 3 次喷射, 喷射持续角度为 15°CA, 喷油量占总喷油量的 46%。

3) 方案三 (如图 2c 所示) 是在方案二的基础上进一步优化得到的。继续减少第 1 次和第 2 次

的喷油量, 改为脉冲喷射, 喷油量仅为总油量的 5%, 略提前第 1 次和第 2 次的喷射起始角度, 分别为 679°CA 和 692°CA; 第 3 次喷射起始角不变, 但喷油量增加到总油量的 90%; 为减小喷油持续期, 第 3 次喷射后期增大喷射速率, 以缩短燃烧持续期, 提高效率。

4) 方案四 (如图 2d 所示) 借鉴了文献 [7] 中关于 5 次喷射控制参数的优化方法, 并在方案三的基础上, 设计了 5 次预喷射加 1 次主喷射的方案。第 1 次喷射起始角提前到 655°CA; 前 4 次喷射等油量等间隔, 单次喷射油量约为总油量的 3.47%, 第 5 次喷射油量约为总油量的 7%, 前 5 次喷射起始角度之间的间隔均约 10°CA; 第 6 次喷射为主喷射, 喷射起始角为 714°CA, 且喷射起始角度与第 5 次喷射起始角之间的间隔为 19°CA, 喷油量约为总油量的 79.12%。

2 4190Z_LC 柴油机燃烧室模型建立与求解器设定

根据 4190Z_LC 柴油机燃烧室的实际形状, 利用 AUTO CAD 进行几何建模, 再导入 AVL FIRE - ESE Diesel, 确定喷嘴位置及参数。由于燃烧室是对称形状, 喷嘴有 8 个喷油孔, 为了缩短计算机仿真时间, 选取了燃烧室的 1/8 作为计算域; 利用 ESE Diesel 模块中的网格划分工具, 完成燃烧室的静态和动态网格划分, 通过网格质量检查确认无负体积网格的出现, 图 3 为燃烧室网格模型。

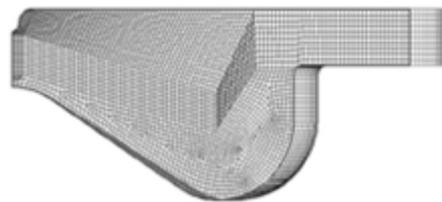


图 3 1/8 燃烧室网格模型图

Fig.3 Mesh model of 1/8 combustion chamber

求解器设置中, 激活 Species Transport 物质输运模块、Combustion 燃烧模块、Emission 排放模块和 Spray 喷雾模块; 湍流流动模型为 K-ε 模型; 喷雾破碎模型为 Wave 模型; 液滴蒸发模型选用 Dukowicz 模型; 碰壁模型选用 Walljet1 模型; 燃烧模型选用 Coherent Flame Model 模型; NO_x 排放物生成模型选用 Extended Zeldovich 模型; 碳烟模型选用 Kinetic Model 模型; 瞬态计算最大迭代次数为 60, 残差值的精度为 0.001; 模型校验、边界及初始条件设定参照文献 [11]。

3 基于多次喷射的压缩燃烧膨胀过程仿真结果分析

排气阀开启前, 曲轴转角为 836°CA 时, 方案一和原机数据 NO_x、Soot、CO 以及温度在缸内的分布云图, 如图 4 所示。

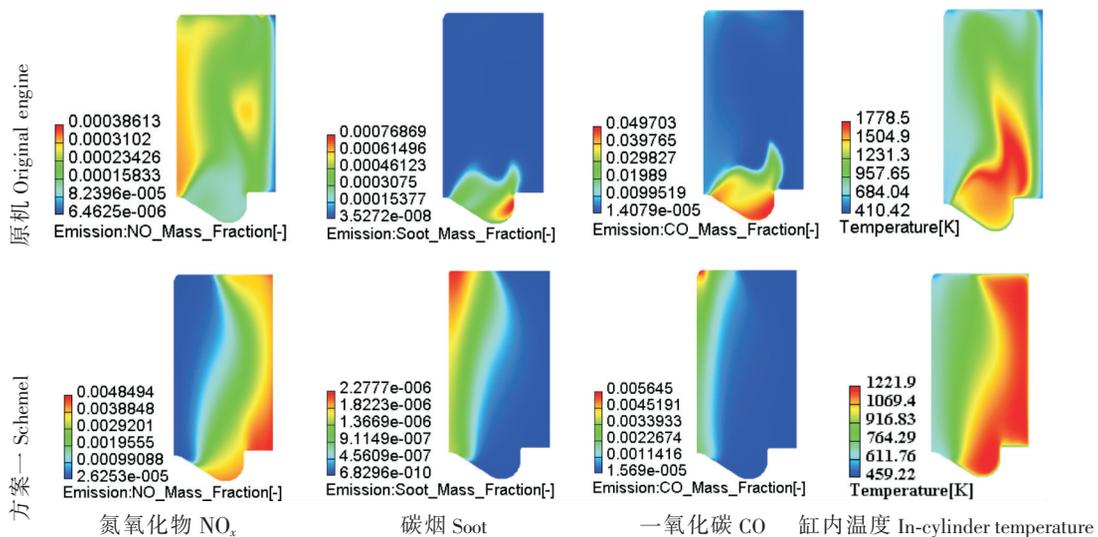


图 4 曲轴转角为 836°时 NO_x、Soot、CO 及缸内温度分布云图

Fig.4 Distribution contours of NO_x, Soot, CO and in-cylinder temperature when crank shaft angle is 836°

可以发现：采用 2 次喷射后，缸内的温度及各种生成物分布更加均匀，浓度从中心区域到缸套边缘有明显的梯度存在；而原机的一次喷射则集中在燃烧室及上方区域，说明 2 次喷射燃油分布更广，雾化更好，燃烧更加均匀。

额定工况下，采用不同喷射方案柴油机缸内压力、温度、NO_x 和 Soot 排放与原机数据的对比。结果如图 5 所示。

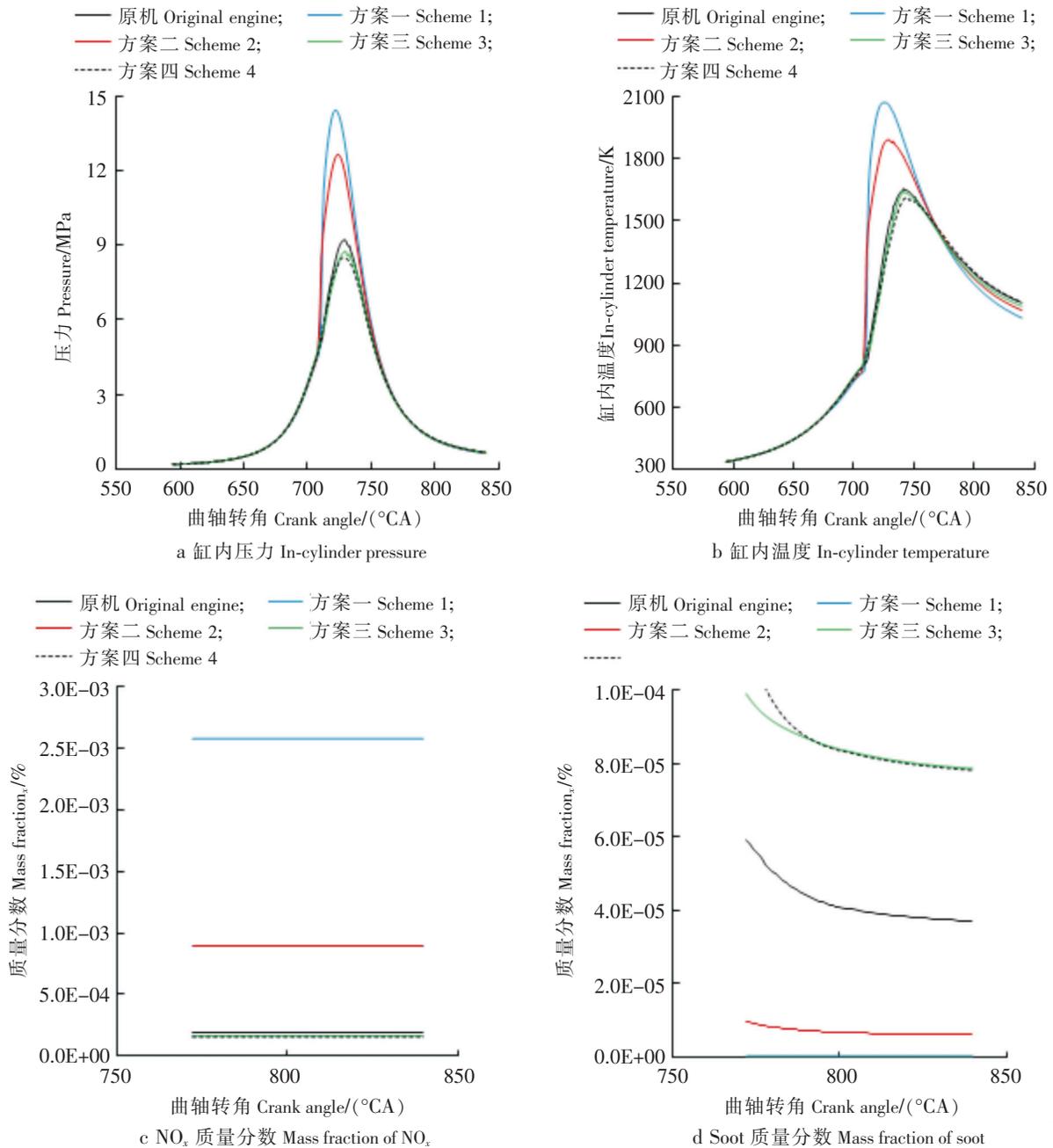


图 5 不同喷射方案仿真结果对比图

Fig.5 Simulation results for different injection schemes

为了更清楚的表示采用方案三和方案四时 NO_x 和 Soot 的排放量，绘制了如图 6。

1) 从图 5a 可以看出：采用方案一时，柴油机缸内压力较原机缸内压力有大幅增高，柴油机的机

械负荷增加,工作粗暴,最高爆发压力接近 14 MPa,超过了 4190Z_LC 柴油机的机械许用极限;采用方案二时,缸内压力有所下降,但仍高于原机压力水平,最高爆发压力下降,接近 12 MPa;采用方案三和方案四时,缸内压力有较大幅度下降,均低于原机压力;方案四的缸内压力水平最低,此时,柴油机工作最平稳。

2) 从图 5b 可以看出:采用方案一时,缸内温度比原机有大幅度的升高;采用方案二时,缸内温度水平有所下降,但仍高于原机温度水平;采用方案三时,缸内温度水平进一步下降,略低于原机缸内温度水平;采用方案四时,缸内温度水平较方案三呈现小幅度下降;此时,柴油机的热负荷最小。

3) 从图 5c 可以看出:采用方案一和方案二时,NO_x的排放量较原机均有较大幅度的增长,这是缸内温度升高导致的,虽然燃烧更完全,但 NO_x的排放量增加,不利于生态环境;与方案一和方案二比较,采用方案三和方案四,NO_x的排放量均显著降低,均低于原机 NO_x的排放量;从图 6a 可见,采用方案四时,NO_x的排放量最低,仅为原机 NO_x排放量的 70%。

4) 从图 5d 可以看出:采用方案一时,Soot 的排放量几乎为零,这是因为全部的燃油喷射在上止点之前完成的,燃油得到充分燃烧,因而,Soot 的排放量低;采用方案二时,Soot 的排放量略高于方案一时的排放量,但仍远低于原机的排放量;采用方案三和方案四时,Soot 的排放量有所上升,且高于原机 Soot 排放量;从图 6b 可见,采用方案四时,Soot 的排放量低于方案三时的排放量。

综上所述,采用多次少量喷射的策略(即预喷射+主喷射的喷射策略),可以使缸内油气分布更均匀,缸内压力和温度水平均下降,柴油机工作更平稳。

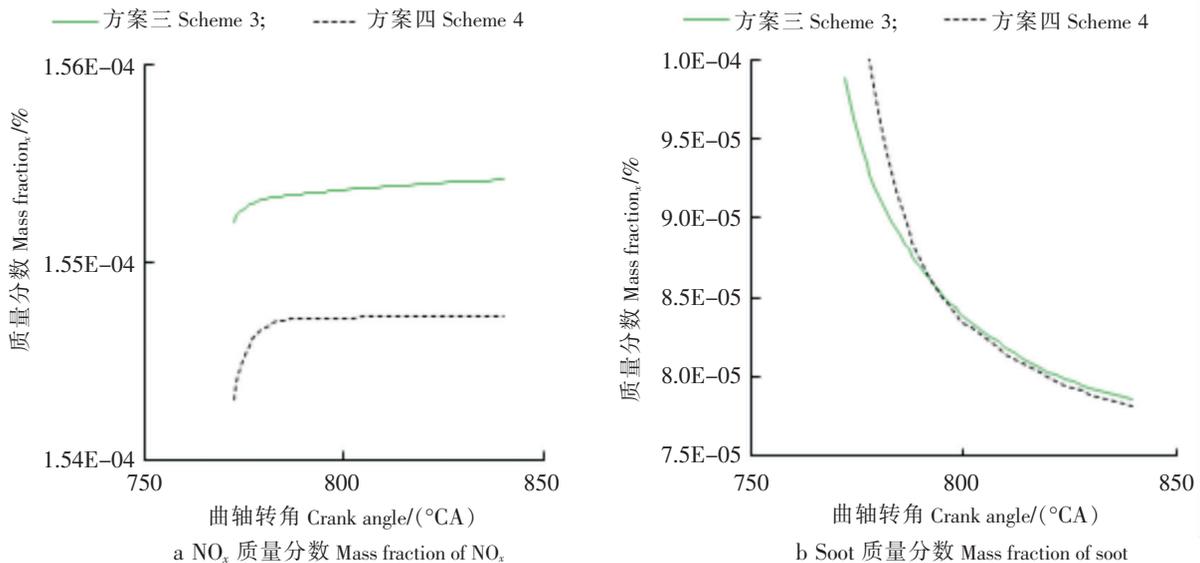


图 6 采用方案三和方案四时 NO_x 和 Soot 的质量分数

Fig.6 Mass fraction of NO_x and Soot when scheme 3 and scheme 4 are adopted

4 结论

本文以 4190Z_LC 船舶中速柴油机为研究对象,基于 AVL FIRE 平台,在额定工况下,通过多次仿真模拟,并优化多次喷射方案,得到以下结论:

1) 采用多次喷射可以有效改善柴油机的燃烧过程,降低 NO_x的排放量。通过对多个喷射方案的对比发现,方案一虽可使柴油机的经济性更好,但是最高爆发压力超过了该柴油机的机械许用极限,且 NO_x的排放量明显增多。方案二采用 3 次喷射后,最高爆发压力在柴油机的许用范围内,缸内压力

和温度较方案一有所下降, NO_x 的排放量进一步下降; 相比于方案一和方案二的多次喷射, 方案三和方案四均采用了预喷射加主喷射的喷油策略, 缸内压力和温度均有大幅下降, 且均低于原机数据。特别是方案四, 在额定工况下 NO_x 排放量大幅下降, 仅为原机的 70%。

2) 采用方案四的多次喷射规律时, 提前第 1 次预喷射起始角度 (为 655°CA), 有利于燃油与空气的均匀混合, 但预喷射量不宜过大 (总油量的 20% 左右), 推迟主喷射的起始角度 (714°CA), 使缸内燃烧温度控制在较低水平, 从而使 NO_x 排放量在四个方案中最低。

3) 要实现额定工况下 NO_x 和 Soot 的排放量同时下降, 多次喷射方案仍需进一步优化。

[参 考 文 献]

- [1] KAMIMOTO T, BAE M. High combustion temperature for the reduction of particulate in diesel engines [DB/OL]. SAE Technical Paper. DOI:10.4271/880423.
- [2] KITAMURE T, ITO T, SENDA J. et al. Mechanism of smokeless diesel combustion with oxygenated fuels based on the dependence of the equivalence ration and temperature on soot particle formation [J]. International Journal of Engine Research, 2002, 3(4): 233-248.
- [3] 王辉, 苏万华, 刘斌, 等. 调制多脉冲喷油策略的实现及对 HCCI 燃烧过程影响的研究 [J]. 内燃机学报, 2005, 23(5): 385-391.
- [4] 苏万华, 赵华, 王建昕, 等. 均质压燃低温燃烧发动机理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] LU Y, YU W, SU W. Using multiple injection strategies in diesel PCCI combustion: Potential to extend engine load, improve trade-off of emissions and efficiency [DB/OL]. SAE Technical Paper. DOI:10.4271/2011-01-1396.
- [6] 鹿盈盈, 苏万华, 裴毅强. 喷射参数对柴油机预混燃烧和排放的影响 [J]. 内燃机学报, 2016, 34(1): 9-15.
- [7] 黄豪中, 苏万华, 裴毅强, 等. MULINBUMP 复合燃烧系统多次脉冲喷油控制参数的优化研究 II: 5 次脉冲喷油控制参数的优化 [J]. 内燃机学报, 2009, 27(4): 289-297.
- [8] SUN Y, REITZ R D. Adaptive injection strategies (ais) for ultra-low emissions diesel engines [DB/OL]. SAE Technical Paper. DOI:10.4271/2008-01-0058.
- [9] 岳艳. 多次喷射对柴油机性能和排放影响的试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [10] 杨城, 陈丹, 朱钰. 船用中速柴油机性能的优化研究 [J]. 内燃机工程, 2018, 39(2): 81-86.
- [11] 王巨如. 4190Z₄C 型柴油机进气-压缩-燃烧过程的数值分析 [D]. 厦门: 集美大学, 2014.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)