# 基于RSM-NSGA-Ⅱ-EWTOPSIS的甲醇/柴油双直喷发动机喷射策略优化

谢满遥　汪映　张达

（西安交通大学能源与动力工程学院，西安 710049）

【摘要】针对甲醇-柴油双直喷发动机柴油2次喷射策略中喷射参数的协同优化问题，本文采用响应面法-非支配排序遗传算法-熵权逼近理想解排序法（RSM-NSGA-Ⅱ-EWTOPSIS）相结合的多目标优化方法，对柴油第一次喷射时刻$\theta_{D1}$、第1次喷射能量占比$R_{D1}$以及两次喷射间隔$I_D$进行了优化研究。在转速2 000 r/min、中等负荷工况下，获得最优喷射参数组合为$\theta_{D1}$= -38.9 °CA ATDC、$R_{D1}$ = 43.8%、$I_D$ = 16.8 °CA。与初始策略（$\theta_{D1}$ = -29 °CA ATDC、$R_{D1}$= 43.1%、$I_D$ = 12 °CA）相比，优化后缸压峰值提升7.72%，燃烧相位提前，放热过程更为集中。同时，指示热效率提高1.06%，$NO_x$和CO排放量分别降低9.55%与10.4%。结果表明，所提出的优化喷射策略可实现热效率提升及$NO_x$与CO的协同改善。

**主题词：双直喷发动机　柴油两次喷射　多目标优化　RSM-NSGA-Ⅱ-EWTOPSIS**

**中图分类号：**U464.173　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20260005

# Optimization of Injection Strategy for Methanol/Diesel Dual-Direct-Injection Engine Based on RSM-NSGA-Ⅱ-EWTOPSIS

Xie Manyao, Wang Ying, Zhang Da

（School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049）

**【Abstract】**To address the problem of synergistic optimization of injection parameters in the double diesel injection strategy for a methanol-diesel dual-direct injection engine, a hybrid multi-objective optimization approach coupling Response Surface Methodology, Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution with Entropy Weighted (RSM- NSGA-Ⅱ-EWTOPSIS) was employed to optimize the timing of the first diesel injection ($\theta_{D1}$), the first injection energy ratio ($R_{D1}$), and the interval time between injections ($I_D$) in this study. Under medium load conditions at 2 000 r/min, the optimal injection parameter combination was obtained as $\theta_{D1}$ = -38.9 °CA ATDC, $R_{D1}$ = 43.8%, and $I_D$ = 16.8 °CA. Compared to the initial strategy ($\theta_{D1}$ = -29 °CA ATDC, $R_{D1}$ = 43.1%, $I_D$ = 12 °CA), peak cylinder pressure increased by 7.72% after optimization, combustion phase advanced, and the heat release process became more concentrated. Concurrently, the indicated thermal efficiency improved by 1.06%, while the emissions of $NO_x$ and CO decreased by 9.55% and 10.4%, respectively. The results demonstrate that the proposed optimized injection strategy achieves synergistic improvements in thermal efficiency and pollutant reduction.

**Key words: Dual direct injection engine, Diesel double injection strategy, Multi-objective optimization, RSM-NSGA-Ⅱ-EWTOPSIS**

**【引用格式】**谢满遥，汪映，张达．基于RSM-NSGA-Ⅱ-EWTOPSIS的甲醇/柴油双直喷发动机喷射策略优化[J]. 汽车技术，2026(10): 54-62.

XIE M Y , WANG Y, ZHANG D. Optimization of Injection Strategy for Methanol/Diesel Dual-Direct-Injection Engine Based on RSM-NSGA-Ⅱ-EWTOPSIS[J]. Automobile Technology, 2026(10): 54-62.

## 1　前言

压燃式发动机的尾气排放是环境污染的主要来源之一，同时会消耗大量的化石能源[1]。因此，需要研究更加高效清洁的燃烧方式。近年来，活性控制压燃（Reactivity Controlled Compression Ignition，RCCI）模式

通信作者：汪映（1975—），女，博士学位，研究方向为内燃机高效清洁燃烧，yingw@mail.xjtu.edu.cn。

和双直喷（Dual Direct Injection，DDI）模式因其可控的燃烧过程而被广泛关注[2]。相较于RCCI模式，DDI模式通过降低泵气损失，能够进一步提高热效率[3]。此外，DDI模式下燃料的喷油方式更加灵活。研究表明，基于双直喷模式的灵活喷射策略能够较好地控制缸内的燃料浓度分层和活性分层，从而更好地控制燃烧过程，实现高效清洁燃烧[4-5]。

在双直喷模式中，高活性燃料通常被用作点火源，用来引燃缸内的低活性燃料。其喷射策略一定程度上直接决定了发动机燃烧和排放特性[6]。Long等[7]研究了柴油的喷射时刻对汽/柴油双直喷发动机的影响。研究表明，柴油喷射时刻能够有效控制着火时刻和燃烧相位。随着柴油喷射时刻的提前，燃烧持续期缩短，指示热效率提高。Bai等[8]基于单缸发动机试验台架研究了柴油喷射正时对正丁醇/柴油双直喷发动机燃烧排放特性的影响。研究结果表明，中高负荷时，随着柴油喷射时刻的提前，指示热效率得到提升，一氧化碳（CO）和碳烟排放量减少，同时最大压力升高率（$S_{pmax}$）会增加，燃烧噪声增加。针对中负荷下压升率过高的问题，Retiz等[9]指出可以采用高活性燃料两次喷射策略解决。

相较于单次喷射策略，两次喷射策略可以更加灵活地调控燃烧相位和缸内活性分层，并有助于降低压力升高率[10]。因此，有必要对两次喷射模式下的喷射参数进行优化。Qian等[6]通过试验研究了柴油两次喷射参数（柴油第一次喷射时刻、柴油第二次喷射时刻以及第一次喷射能量占比）对汽/柴油双直喷发动机燃烧和排放特性的影响。研究结果表明，两次喷射模式下，燃油经济性显著提高，最大压力升高率得到有效控制。此外，还给出了所研究工况下最佳的参数组合。Bai等[8]基于正丁醇-柴油双直喷发动机也进行了类似的研究，并指出了各参数的影响机理。

综上，现有两次喷射参数优化的研究多关注单一参数影响，优化结果局限性较大。此外，对柴油第一次喷射时刻$\theta_{D1}$、第一次喷射能量占比$R_{D1}$和两次喷射间隔$I_D$等喷射参数对燃烧与排放的交互影响机制，尚缺乏考虑。响应面法（Response Surface Methodology，RSM）提供了一种结构化的多参数协同优化途径，基于该方法能够建立燃烧与排放性能指标之间关于$\theta_{D1}$、$R_{D1}$与$I_D$的代理模型，从而在全局范围内解析各参数对性能指标的交互效应[11-12]。基于此，本文以柴油-甲醇双直喷发动机为研究对象，针对柴油两次喷射策略中的3个关键参数（$\theta_{D1}$、$R_{D1}$、$I_D$）开展多目标优化研究。采用三维CFD模型获取样本数据，并基于响应面法构建代理模型，再结合第二代非支配排序遗传算法（Non-dominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ，NSGA-Ⅱ）与熵权逼近理想解排序法（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution with Entropy Weighted，EWTOPSIS）对参数进行多目标优化，以实现指示热效率的提升及排放的降低。

## 2 仿真及优化方法

### 2.1 仿真模型的搭建与验证

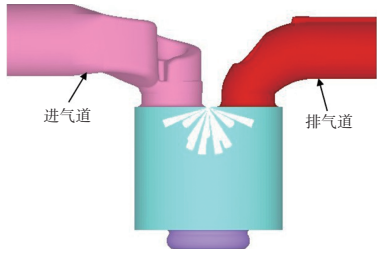
本文所使用的发动机为一台改装的单缸自吸式风冷非道路发动机（192FA），其主要参数如表1所示。基于该发动机模型，搭建了带进、排气道的三维仿真模型，如图1a所示。其中，发动机转速固定为2 000 r/min，中等负荷工况。甲醇的喷射时刻$\theta_M$固定在-60°CA ATDC，甲醇含氧量较高，其能量替代率$R_M$为21.1%。在双直喷发动机中使用甲醇能够有效改善燃烧过程，降低排放量[10]。在甲醇-柴油双直喷喷射系统中，共包含2套高压共轨系统，分别用来控制柴油和甲醇的喷油压力。柴油喷油器采用原机的6孔XinFeng NFI 3.1喷油器；甲醇使用Bosch PA66汽油缸内直喷（Gasoline Direct Injection，GDI）喷油器进行喷射。柴油和甲醇的喷射压力分别为90 MPa和15 MPa。其中柴油喷油器居中布置（原机安装位置），甲醇喷油器采取侧向安装，如图1b所示。

**表1 发动机主要参数**

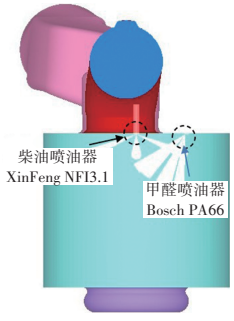
| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 缸径/mm | 92 |
| 行程/mm | 75 |
| 压缩比 | 19.0 |
| 排量/L | 0.498 |
| 额定转速/r·min$^{-1}$ | 2 500 |
| 燃烧室形状 | ω |

在该模型中，燃烧仿真采用基于化学反应动力学机理的SAGE模型，本文采用Xu等[13]的机理来模拟燃烧过程。其余子模型的选择如表2所示。图2所示为相同工况不同基础网格尺寸下的缸压曲线变化。由图2可知，基础网格尺寸为4 mm时，缸内压力峰值显著低于基础网格尺寸为1.5 mm和2 mm时，出现了显著差异。而将网格从2 mm进一步细化至1.5 mm时，缸压曲线的差异约在5%以内。综合考虑计算时间和计算精度，最终采用2 mm的基础网格尺寸。此外，在该模型中，在上止点

附近及进气过程中均采用了3级自适应加密，从而更好地捕捉速度、温度和压力变化。




(a)发动机进排气道




(b)喷油器位置

图1　发动机仿真模型

**表2　发动机主要参数**

| 模型类别 | 子模型 |
|---|---|
| 喷雾模型 | KH-RT |
| 湍流模型 | RNG k-ε |
| Soot模型 | Hiroyasu soot |
| $NO_x$模型 | Extended Zeldovich |
| 传热模型 | O'Rourke and Amsden |

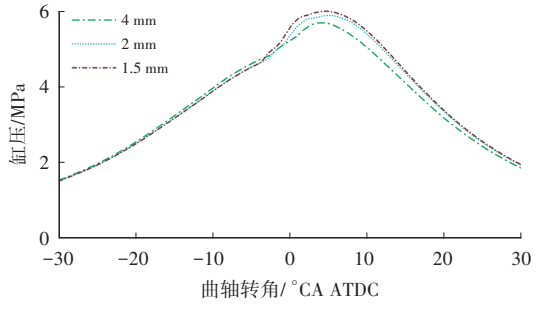
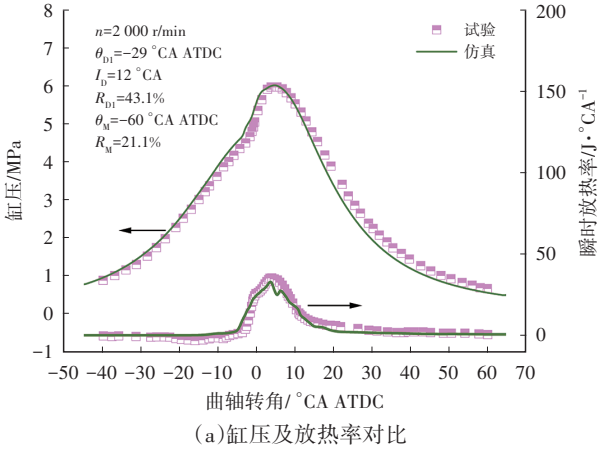



图2　不同网格尺寸下缸内压力曲线对比

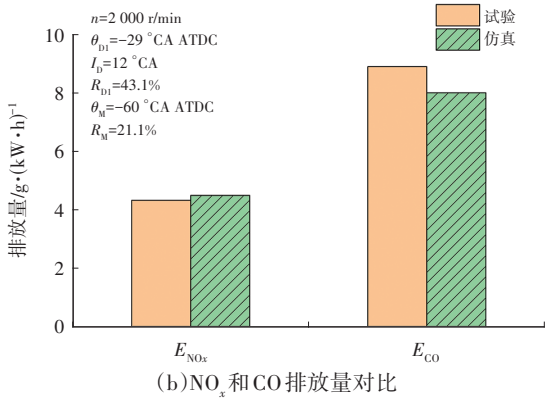
仿真模型的验证主要根据本课题组的试验数据[14]进行，如图3所示。从图3中可以看出，缸压的仿真曲线与试验测量曲线基本吻合。当前模型能够较好地预测放热始点，且放热率峰值与试验测量值相当；仿真模型所得到的氮氧化合物($NO_x$)排放值$E_{NOx}$略高于试验值，CO排放值$E_{CO}$低于试验值，但均在5%误差范围内。因此可以认为，该模型能够较好地预测柴油-甲醇双直喷发动机的燃烧和排放特性。

## 2.2　样本点的获取

本文的主要优化参数为柴油第一次喷射时刻$\theta_{D1}$、第一次喷射能量占比$R_{D1}$和两次喷射间隔$I_D$。各参数的变化范围根据尹晓军[15]的研究确定，如表3所示。根据Yin等[14]的研究，在甲醇-柴油双直喷发动机中，碳烟的排放始终能够处于较低的水平(约0.068 g/(kW·h))，而CO的排放始终处于较高的水平，因此，有必要通过优化喷射策略来降低$NO_x$和CO的排放量，并提高热效率。基于此，本文的优化目标为指示热效率$\eta_i$最大化、$NO_x$和CO的排放量($E_{NOx}$, $E_{CO}$)最小化。在进行响应面拟合之前，本文采用试验设计(Design of Experiments，DOE)方法生成样本点。为保证代理模型的拟合精度，本文共设计并计算了100组工况点。




(a)缸压及放热率对比




(b)$NO_x$和CO排放量对比

图3　缸压、放热率及$NO_x$和CO排放试验值与仿真值的对比

**表3　待优化参数的变化范围**

| 参数 | 范围 |
|---|---|
| $\theta_{D1}$/°CA ATDC | -40~-25 |
| $R_{D1}$/% | 10~50 |
| $I_D$/°CA | 8~15 |

## 2.3　集成优化方法流程

本文拟采用RSM-NSGA-Ⅱ-EWTOPSIS集成优化方法进行喷射参数的优化。该方法主要由3个部分组成：RSM建模、NSGA-Ⅱ多目标寻优、EWTOPSIS决策。其中，RSM建模阶段主要根据仿真计算结果构建各喷

射参数与优化指标之间的响应面回归模型，并对模型进行验证。随后基于RSM回归模型，采用第二代非支配遗传算法（NSGA-Ⅱ）对目标函数进行寻优，并获得帕累托（Pareto）解集。在决策阶段，首先基于熵权法来确定各优化目标（$\eta_i$、$E_{NOx}$、$E_{CO}$）的客观权重，随后根据权重，再应用TOPSIS法对帕累托解集中的各个解进行排序，选取综合最优解。其流程如图4所示。

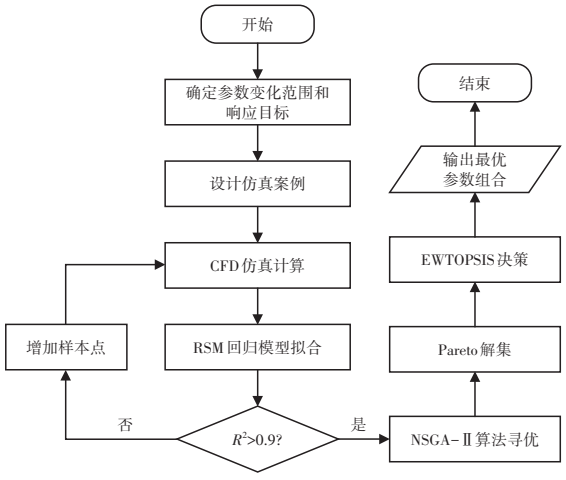



图4　优化流程

## 3　结果与讨论

### 3.1　响应面模型的构建与评估

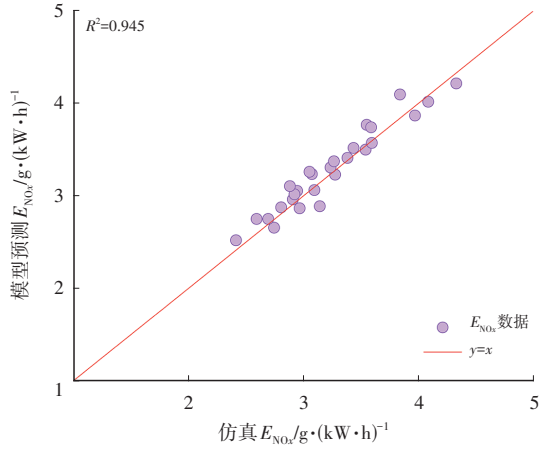
本文在构建响应面代理模型时，以$\theta_{D1}$、$R_{D1}$以及$I_D$作为输入量，$\eta_i$、$E_{NOx}$和$E_{CO}$作为响应量（即目标值）。考虑到各输入量与响应量之间关系较为复杂，本文在构建模型时采用四阶多项式模型。为评估最终的模型精度，本文采用决定系数$R^2$作为模型评估指标。当模型对各响应量的$R^2$超过0.9时认为模型有效。

图5所示为本文所搭建的响应面模型对各响应量的$R^2$值。由图5可知，$\eta_i$、$E_{NOx}$和$E_{CO}$ 3个指标的$R^2$值分别达到0.945、0.913和0.936，均大于0.9，因此，可以认为本文所构建的响应面模型能够较好地反映输入量与响应量之间的关系。

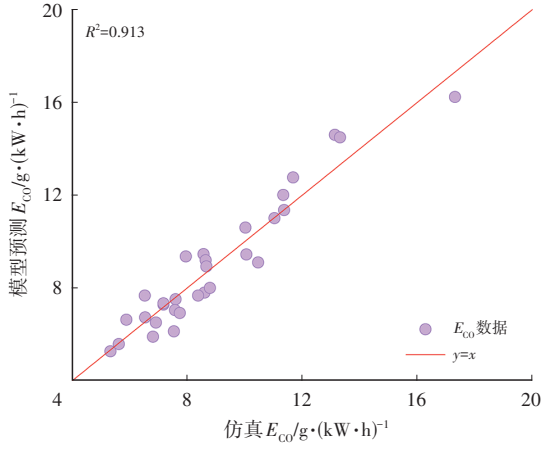
### 3.2　基于NSGA-Ⅱ的多目标优化

基于前文所搭建的RSM模型，采用NSGA-Ⅱ对两次喷射策略中的3个重要参数进行优化。优化目标为$\eta_i$最大化、$E_{NOx}$和$E_{CO}$最小化。发动机优化过程中，热效率提升与$NO_x$和CO排放量降低往往相互矛盾，需要找到最佳平衡点，以实现三者间的平衡。NSGA-Ⅱ作为一种多目标遗传算法能够很好地解决此类问题。该方法的特点在于非支配排序机制，在优化过程中能够根据个体间的支配关系将种群个体分层，并在此基础上择优。该方法能够有效地寻找多个帕累托最优解，从而实现各目标之间的最佳平衡。在本文中多目标优化算法的数学模型为：

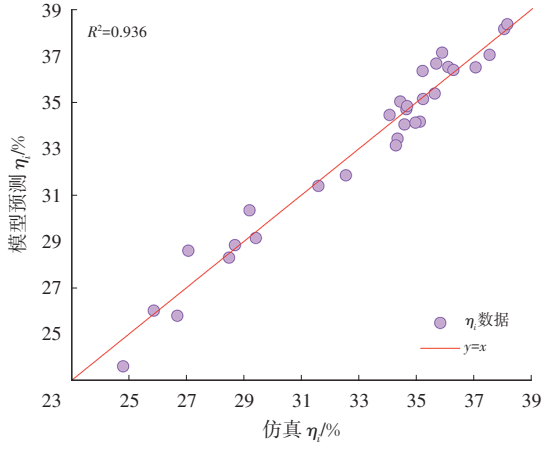
$$\begin{cases} \text{find } x=[\theta_{D1},R_{D1},I_D] \\ \min E_{CO} \\ \max \eta_i \\ \min E_{NOx} \\ \text{Subject to} \quad -40\leqslant\theta_{D1}\leqslant-25,\ 10\%\leqslant R_{D1}\leqslant 50\%,\ 8\leqslant I_D\leqslant 20 \end{cases} \tag{1}$$




（a）$E_{NOx}$模型预测值与仿真值对比




（b）$E_{CO}$模型预测值与仿真值对比




（c）$\eta_i$模型预测值与仿真值对比

图5　响应面模型验证

NSGA-Ⅱ的基本参数设置如表4所示。经过算法迭代后，得到帕累托解集，如图6所示，其中最优解为EWTOPSIS最终决策结果。

**表4　NSGA-Ⅱ基本参数设置**

| 参数 | 取值 |
|---|---|
| 种群大小 | 50 |
| 进化代数 | 500 |
| 变异概率 | 0.9 |
| 交叉概率 | 0.6 |
| 选择方式 | 锦标赛 |
| 交叉方式 | 单点 |

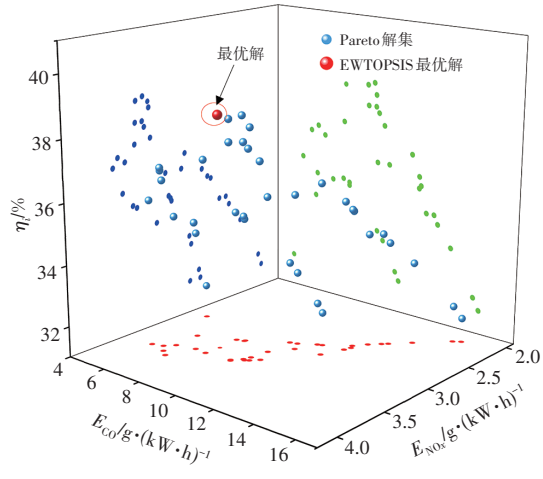



图6　NSGA-Ⅱ优化后的帕累托解集

### 3.3　基于EWTOPSIS的决策

逼近理想点排序法（Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution，TOPSIS）是一种常用的综合评价方法，最早由Yang等[16]将其应用于NSGA-Ⅱ的最优解决策中。该方法通过计算帕累托解集中各个可行解的评价指标到正理想解和负理想解的距离来确定解的相对接近度，进而对各个解进行排序。该方法也被证明是一种获取最优解的有效方法[17-18]。然而，在TOPSIS方法中，各目标的权重通常人为给定，存在较强的主观性，这也使得决策结果的客观性和可重复性大幅降低。为解决此问题，本文采用了基于熵权法的TOPSIS方法，该方法的核心优势在于熵权法能够根据各目标值在帕累托解集中的变异程度来自动计算各目标的权重，其中变异值较大的被赋予更高的权重，因为其对各个解的区分能力更强。随后TOPSIS方法在该客观权重的基础上对各个解进行排序，进而选出综合性能最优的折衷解。该方法的具体计算过程见文献[19]。

在本文中，帕累托解集中各非支配解到正负理想解的距离及相对接近度如图7所示。从图7中可以看出，第9个解的接近度最高，因此，选择其为最终的折衷解（图6中最优解）。其对应的目标函数值为：$\eta_i$=38.6%，$E_{CO}$为7.95 g/(kW·h)，$E_{NOx}$为3.36 g/(kW·h)。其所对应的输入参数的组合为：$\theta_{D1}$=-38.9 °CA ATDC，$R_{D1}$=43.8%，$I_D$=16.8 °CA。

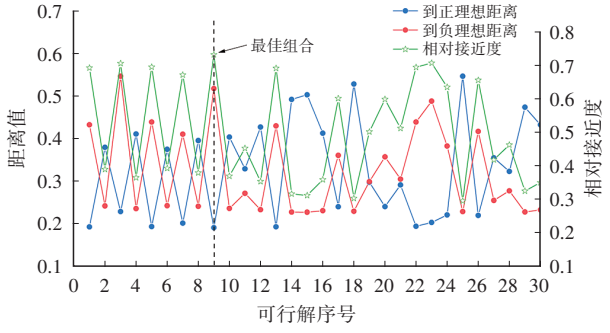



图7　EWTOPSIS结果

根据该参数组合，利用前文所搭建的三维仿真模型进一步验证代理模型的优化结果。表5所示为代理模型优化结果与三维仿真模型计算结果的对比。

**表5　代理模型结果与仿真结果对比**

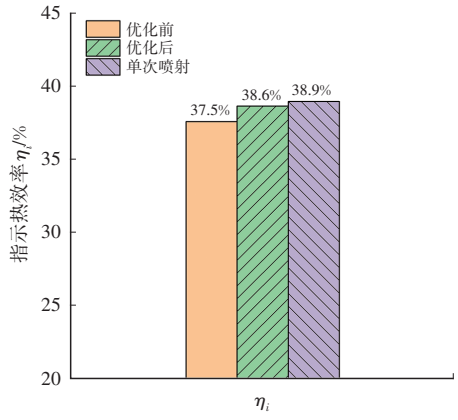
| 响应指标 | $\eta_i$ | $E_{NOx}$/g·(kW·h)$^{-1}$ | $E_{CO}$/g·(kW·h)$^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| 算法预测值 | 38.6% | 3.36 | 7.95 |
| 仿真值 | 38.46% | 3.25 | 7.53 |
| 差值 | 0.14% | 0.11 | 0.42 |

从表5中可以看出，3个响应指标的算法预测值与仿真计算结果接近，这也进一步说明了当前代理模型具有较高的精度。

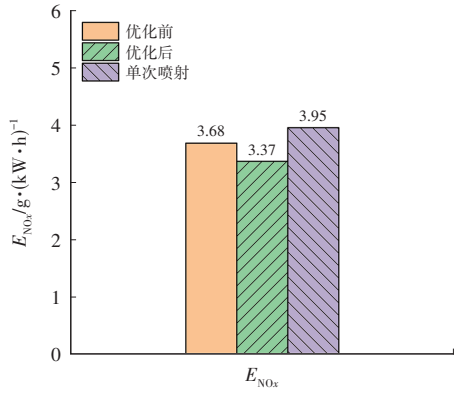
### 3.4　优化前后的对比

根据前述响应面模型、NSGA-Ⅱ多目标优化及EWTOPSIS决策流程，最终确定当前工况下柴油两次喷射策略的最优参数组合。本节重点对比分析采用初始喷射策略（优化前，$\theta_{D1}$ = -29 °CA ATDC、$R_{D1}$ = 43.1%、$I_D$=12 °CA）与EWTOPSIS优选策略（优化后）以及采用柴油单次喷射策略（柴油喷射时刻为-29 °CA ATDC）时，发动机在指示热效率$\eta_i$、$NO_x$排放量$E_{NOx}$及CO排放量$E_{CO}$ 3项关键性能指标上的综合表现，以系统评估优化方案的实际效果。

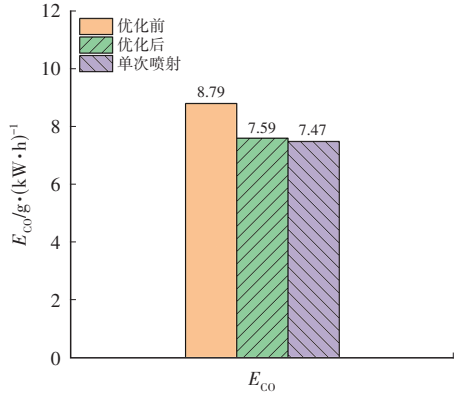
图8所示为不同喷射策略下$\eta_i$、$E_{NOx}$、$E_{CO}$的对比。相较于单次喷射模式，采用两次喷射模式时，$NO_x$排放量降低。对于CO排放，优化前CO的排放量明显高于单次喷射策略，而优化后CO的排放量基本与单次喷射模式相当。相较于优化前，采用优化后的两次喷射策略时，$\eta_i$提升了1.06%，$E_{NOx}$和$E_{CO}$分别降低了9.55%和10.4%。由此可见，优化后的柴油两次喷射策略实现了在热效率提升的同时降低了$NO_x$和CO排放量。




(a)指示热效率 $\eta_i$ 对比




(b)$E_{NOx}$对比




(c)$E_{CO}$对比

图8　不同喷射策略下 $\eta_i$、$E_{NOx}$ 和 $E_{CO}$ 的对比

为了进一步深入研究优化后的喷射策略实现热效率提升和排放降低的原理，本文基于仿真模型对比了优化前后混合气形成情况及燃烧过程。

图9对比了优化前后缸内当量比在燃烧始点(CA10)时刻的分布特征。由图9可知，采用经EWTOPSIS选定的优化喷射策略后，缸内当量比集中分布于0.1~1.0的范围内，基本消除了当量比大于1.3的局部浓混合气区域。相比之下，初始喷射策略和单次喷射策略下缸内仍存在明显的当量比大于1.2的富油区，这些区域易导致不完全燃烧，是碳烟和CO生成的主要来源。该分布差异主要源于喷射正时的优化：优化策略将第一次喷射时刻适度提前，延长了燃油在缸内的蒸发与混合时间，从而使得缸内混合分布更加均匀。均匀的混合气分布有助于改善后续的燃烧过程，不仅提高了燃烧效率，也为同时实现高热效率与低排放提供了关键条件。该结果从混合气形成层面解释了优化策略在提升指示热效率、降低 $NO_x$ 与碳烟排放量方面的内在机理。

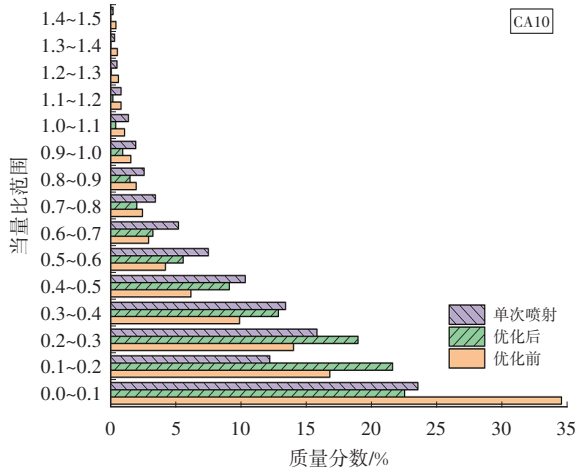
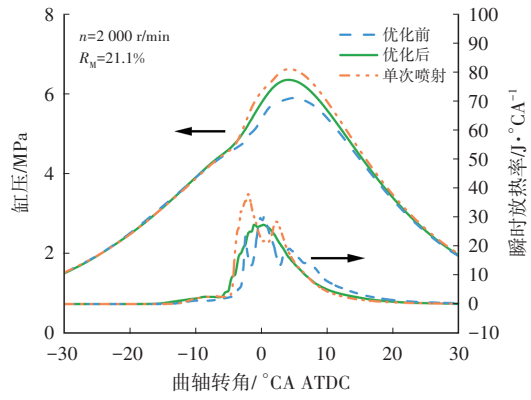
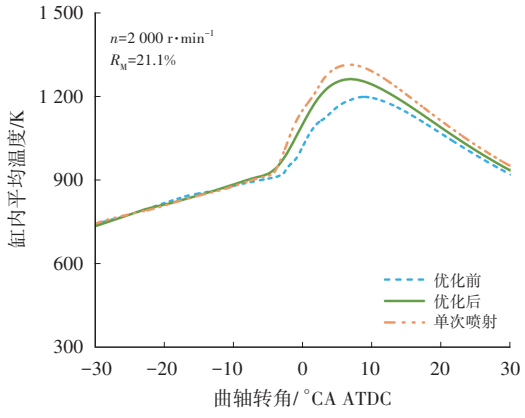



图9　CA10时刻缸内当量比分布对比

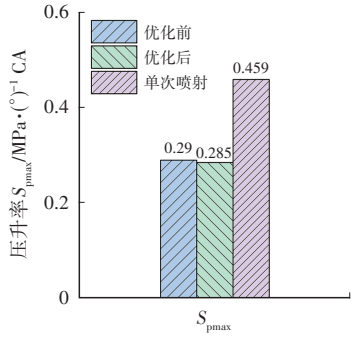
图10展示了缸内压力、放热率以及温度的对比结果。其中，优化前的参数组合来源于Yin等[14]的试验结果（$\theta_{D1}$=-29 °CA ATDC，$R_{D1}$=43.1%，$I_D$=12 °CA）。从图10a和图10b中可以看出，优化后缸内压力峰值由5.9 MPa提高至6.36 MPa，提高了7.72%。优化后的缸内平均温度升高。燃烧相位(CA50)提前了约1.5 °CA，燃烧持续期由优化前的15.2 °CA缩短至13.5 °CA，放热过程更加集中，因此指示热效率提升。相较于两次喷射模式，单次喷射模式下缸内压力峰值达6.62 MPa，放热率峰值达38 J/ °CA，显著高于两次喷射模式。整个放热过程更加集中，放热更快，缸内平均温度也较高。此外，由图10c可知，单次喷射模式下压力升高率达0.459 MPa/ °CA，远高于两次喷射模式下的压力升高率。这也进一步验证了采用两次喷射策略能够有效降低压升率。




(a)缸压、放热率




(b)缸内平均温度




(c)压力升高率

图10　缸压、放热率、缸内平均温度及压力升高率的对比

图11展示了采用不同策略时着火延迟期、燃烧持续期以及CA10-CA50的对比。其中，CA10-CA50是指CA10与CA50之间的间隔，其代表了燃烧初期的火焰发展速度。从图11中可以看出，与两次喷射策略相比，单次喷射策略下滞燃期延长，而CA10-CA50及燃烧持续期均缩短。这是由于在单次喷射策略中，全部燃料较早喷入气缸，此时缸内温度与压力较低，燃料蒸发吸热进一步抑制了缸温上升，使得滞燃期延长。同时，较长的混合时间使缸内形成了更充分的预混合气，因此着火后，燃烧速率加快，导致CA10-CA50以及燃烧持续期缩短。相较于优化前，采用优化后的喷射策略后，CA10-CA50和燃烧持续期缩短，着火延迟期有所延长。这是由于优化后的喷射策略中，柴油两次喷射时刻（$\theta_{D1}$=-38.9 °CA ATDC，$\theta_{D2}$=-22.1 °CA ATDC）均早于优化前的喷射策略（$\theta_{D1}$=-29 °CA ATDC，$\theta_{D2}$=-17 °CA ATDC），着火前柴油在缸内与空气混合得更加均匀，因此燃烧初期燃烧速度更快，CA10-CA50缩短。整个燃烧过程中，燃烧持续期也相应缩短，放热更加集中，因此，指示热效率增加。此外，由于柴油较早喷入缸内，此时缸内温度和压力并未达到着火条件，因此，柴油优先蒸发混合，柴油的蒸发会使得缸内温度进一步下降，因此，着火延迟期略有增加。

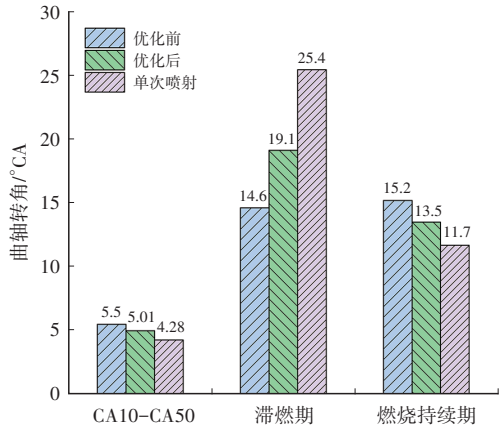



图11　CA10-CA50、滞燃期及燃烧持续期对比

图12展示了采用不同柴油喷射策略时缸内燃烧过程的对比，图中以温度$T$=1 800 K的温度等值面来表示火焰面的发展过程。从图12中可以看出，优化后的喷射策略下，在-5 °CA ATDC时，缸内已出现明显的火焰面，且在20 °CA ATDC时缸内燃烧过程已基本结束，整个燃烧放热过程更加集中，这有助于提高指示热效率。在优化前的喷射策略以及单次喷射策略下，燃烧过程持续至20 °CA ATDC之后，燃烧持续期较长，缸内高温环境持续时间较长，因此，$NO_x$排放量较高。

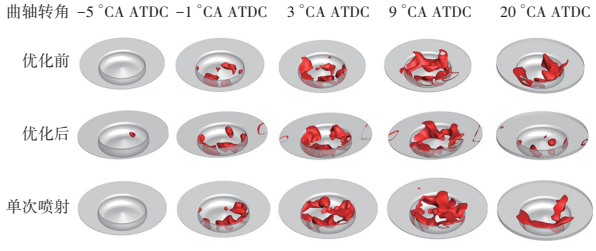



图12　缸内燃烧过程对比

图13展示了不同柴油喷射策略下缸内$NO_x$分布的对比。$NO_x$的生成主要与缸内温度和高温持续时间有关。当缸内温度较高时，$NO_x$的生成量会增加。从图13中可以看出，相较于两次喷射策略，采用单次喷射策略时缸内高$NO_x$质量分数的区域明显增加，尤其是在80 °CA ATDC和120 °CA ATDC时。这是由于单次喷射策略下，缸内的平均温度高于两次喷射策略且高温持续时间长，因此，$NO_x$的生成量较高。从前面的讨论可以看出，相较于优化前的喷射策略，采用优化后的喷射策略后，缸内平均温度会有所上升，因此，缸内$NO_x$的生成量应略高。在50 °CA ATDC之前，优化后的喷射策略下，缸内$NO_x$的量略高于优化前。由于优化后的喷射策略下，缸内高温环境持续时间较短，而优化前的喷射策略下燃烧持续期较长，高温环境持续时间长，因此，最终$NO_x$的生成量较高。

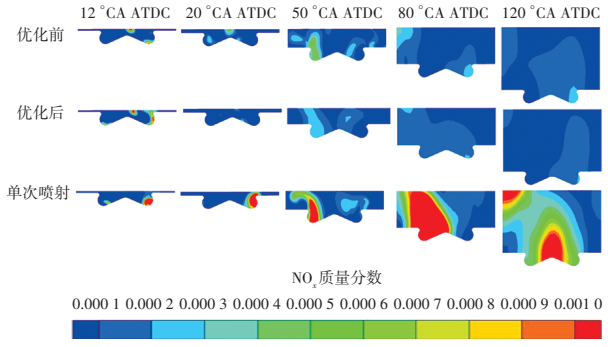



图13　缸内$NO_x$分布对比

图14所示为缸内CO分布的对比。CO的生成主要与缸内混合气分布的均匀性有关。相较于初始喷射策略工况，采用优化后的喷射策略以及单次喷射策略时，柴油更早地进入缸内，在缸内蒸发、混合，着火前缸内混合气分布更加均匀，因此，CO的生成量较低。

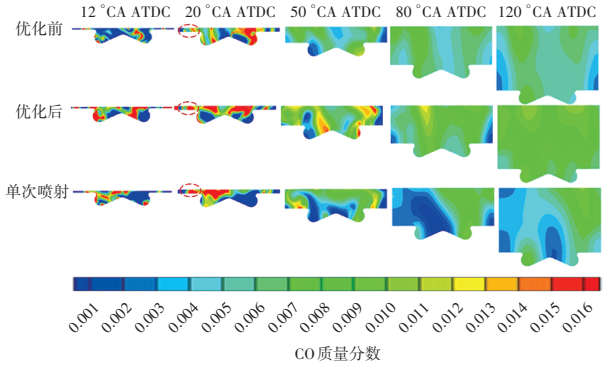



图14　缸内CO分布对比

从图14中可以看出，采用优化后的喷射策略时，挤流区（图中虚线框内）出现了较多的CO。这是由于第一次喷油时刻提前会加重湿壁现象，壁面油膜质量增加。较低的壁面温度抑制了这部分燃料的蒸发和混合。随着活塞上行，这部分燃料被挤入挤流区，因此，该区域CO的生成量较多。然而，采用优化后的喷射策略和单次喷射策略时，缸内的平均温度更高，有助于促进CO向$CO_2$转化。在两方面原因的共同作用下，最终采用优化后的两次喷射策略以及单次喷射策略时，CO的排放较低。

## 4　结论

a. 本文基于所搭建的响应面模型能够较为准确地预测各个喷射参数对甲醇-柴油双直喷发动机指示热效率、$NO_x$和CO排放量的影响规律。

b. 采用RSM-NSGA-Ⅱ-EWTOPSIS方法能够得到最优的柴油两次喷射策略。中等负荷工况下，最优的柴油两次喷射策略为：$\theta_{D1}$=-38.9 °CA ATDC，$R_{D1}$=43.8%，$I_D$=16.8 °CA。

c. 相较于优化前的两次喷射策略，采用优化后的柴油两次喷射策略后，发动机的指示热效率$\eta_i$提升1.8%，$E_{NOx}$和$E_{CO}$分别降低了9.56%和10.36%。

## 参考文献

[1] ZHAO W B, LI Z L, HUANG G, et al. Experimental Investigation of Direct Injection Dual Fuel of n-Butanol and Biodiesel on Intelligent Charge Compression Ignition (ICCI) Combustion mode[J]. Applied Energy, 2020.

[2] CAI Y K, JIA M, LI Y P, et al. Multiple Combustion Modes Switching to Realize Full-Load Efficient Energy Conversion of n-Butanol/Diesel Dual Direct Injection (DI2) Engine[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 278.

[3] 康佳明, 王谦, 相英杰, 等. 基于双直喷策略的低负荷下活性控制压燃燃烧特性的数值研究[J]. 内燃机工程, 2020, 41(3): 18-26+34.
KANG J M, WANG Q, XIANG Y J, et al. Numerical Study on Reactivity Controlled Compression Ignition Combustion Characteristics with Dual-direct Injection at Low Loads[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2020, 41(3): 18-26+34.

[4] LI Y P, CAI Y K, JIA M, et al. A Full-Parameter Computational Optimization of Both Injection Parameters and Injector Layouts for a Methanol/Diesel Dual-Fuel Direct Injection Compression Ignition Engine[J]. Fuel, 2024, 369.

[5] HUANG G, LI Z L, ZHAO W B, et al. Experimental Investigation of Injection Strategies to Improve Intelligent Charge Compression Ignition (ICCI) Combustion with Methanol and Biodiesel Direct Injection[C]// SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Meenting. krakow, Poland: SAE International, 2020.

[6] QIAN Y, MI S, WU H, et al. Towards High Efficiency of Intelligent Charge Compression Ignition (ICCI) Engine by Optimizing the High-Reactivity Fuel Injection Strategies Under Medium-High Loads[J]. Fuel, 2023, 335.

[7] LONG W Q, LI B, CAO J, et al. Effects of Dual-direct Injection Parameters on Performance of Fuel Jet Controlled Compression Ignition Mode on a High-speed Light Duty Engine[J]. Fuel, 2019, 235: 658-669.

[8] BAI Y Q, WANG Y, HAO L. Experimental Study on The Effects of Injection Timing and n-Butanol Energy Ratio on Combustion and Emissions of n-Butanol/diesel DFDI Engine[J]. Fuel, 2022, 324: 124654.

[9] REITZ R D, DURAISAMY G. Review of High Efficiency and Clean Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Combustion in Internal Combustion Engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015, 46: 12-71.

[10] YIN X J, REN X F, WANG J H, et al. Influence of Methanol and Diesel Injection Timings on The Maximum

Methanol Energy Substitution Ratio and Performance of Diesel/Methanol Dual-Direct Injection Engine[J]. Energy, 2025, 318.

[11] 刘翔, 朱帅, 朱凯. 基于汽车空调温度控制性能提升的导流板响应面优化分析[J]. 汽车技术, 2025(4): 56-62.
LIU X, ZHU S, ZHU K. Improvement of TCC Performance of Automotive Air Conditioner by Deflector Based on Response Surface Optimization[J]. Automobile Technology, 2025(4): 56-62.

[12] 查银龙, 张扬, 刘学龙, 等. 基于响应面模型的汽车气动特性优化[J]. 汽车技术, 2023(9): 55-62.
ZHA Y L, ZHANG Y, LIU X L, et al. Automotive Aerodynamic Characteristics Optimization Based on Response Surface Model[J]. Automobile Technology, 2023(9): 55-62.

[13] XU H, YAO C, XU G. Chemical Kinetic Mechanism and a Skeletal Model for Oxidation of n-Heptane/Methanol Fuel Blends[J]. Fuel, 2012, 93: 625-31.

[14] YIN X J, YUE G Z, LIU J L, et al. Investigation into the Operating Range of a Dual-direct Injection Engine Fueled with Methanol and Diesel[J]. Energy, 2023, 267.

[15] 尹晓军. 甲醇/柴油双直喷发动机高效清洁燃烧控制和性能优化研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2023.
YIN X J. Research on High-Efficiency Clean Combustion Control and Performance Optimization of a Methanol/Diesel Dual Direct Injection Engine[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2023.

[16] YANG L, WANG R, JIANG F, et al. A Reduced Ammonia/China Stage-VI Diesel Mechanism For Dual-Fuel Engine Simulations: Development, Validation and CFD Implementation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 144: 359-373.

[17] TANG Y, LONG W, XIAO G, et al. Multi-Objective Optimization of a Diesel-Methanol Dual-Direct Injection Engine Integrated with on-Board Methanol Reforming Based on RSM-MOPSO Coupled Algorithm[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 156.

[18] ZUO Q, YANG D, SHEN Z, et al. Optimization of Direct Injection Parameters for Lean-Burn Hydrogen-Ammonia Engines using Kriging Surrogate Model Coupled NSGA-Ⅱ[J]. Renewable Energy, 2026, 256.

[19] YANG L, WANG R, QIN W, et al. Development and Simulation Application of a Reduced Diesel/Methane/Hydrogen Tri-Fuel Mechanism Based on Multi-Objective Optimization and Multi-Criteria Decision-Making[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2026, 200.

（责任编辑　天下溪）

修改稿收到日期为2026年8月26日。

# 《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊，为RCCSE中国准核心学术期刊、CACJ中国应用型扩展期刊，被哥白尼精选数据库、EBSCO学术数据库、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库、J-Gate数据库收录。

《汽车工程师》以报道汽车产品设计领域的技术研究成果为主，专注于技术开发与应用层面的创新成果，提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势，努力吸收优质稿源，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。重点征稿方向包括：锂离子电池与新体系电池、动力电池热管理与热失控、燃料电池及其关键零部件、车用电机及其控制器、自动驾驶汽车环境感知与感知融合、自动驾驶汽车定位与建图、自动驾驶汽车测试、人工驾驶-无人驾驶车辆混行条件下的自动驾驶控制、智能线控底盘、一体化底盘、功能安全和预期功能安全。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表，我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神，为强大中国汽车工业作贡献！

本刊使用协同采编系统处理稿件，请登陆期刊网站注册后投稿，投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的作者指南，网址：http://tjqc.cbpt.cnki.net。

《汽车工程师》编辑部