

基于 Converge 和 Modefrontier 的柴油机国 VI 燃烧系统自动优化

Automatic optimization of a CN VI diesel engine's combustion system based on Converge and ModeFrontier

赵伟 胡芳 金华玉 包宁

(一汽解放发动机事业部)

摘 要: 为了设计一款满足国 VI 开发要求的柴油机燃烧系统, 本文应用 Converge 软件和优化软件 Modefrontier 对该柴油机的燃烧系统进行了自动优化。首先对燃烧室结构进行参数化, 并通过敏感性分析得到对燃烧系统性能影响较大的 7 个燃烧室结构参数, 连同喷油系统参数包括喷油器孔数、喷油锥角、喷油器流量、喷油压力和气道涡流比共 12 个参数作为燃烧系统自动优化的输入变量, 以燃烧系统的指示热效率、氮氧化物 (NOx) 和干碳烟 (Soot) 排放作为输出变量, 搭建了 Modefrontier 自动优化模型并实现了燃烧系统优化的自动化。优化结果表明: 找到了一种创新型的柴油机缸内燃烧组织形式, 与原方案相比, 在 NOx 比排放结果控制基本一致的情况下, 优化方案的指示热效率和 Soot 比排放都有明显优势, 说明这种创新的燃烧组织形式应用在国 VI 柴油机上非常有竞争力。

关键字: Converge; Modefrontier; 国 VI; 柴油机; 燃烧系统; 自动优化

Abstract: In order to design a diesel engine combustion system to meet the requirements of CN VI emission regulations, this paper uses Converge software and optimization software Modefrontier to optimize the combustion system of the diesel engine. Firstly, the structure of the combustion chamber is parameterized, and the seven combustion chamber structural parameters with great influence on the performance of the combustion system are obtained by the sensitivity analysis. The parameters of the fuel injection system include the number of injector holes, the fuel injection cone angle, the injector Flow rate, fuel injection pressure and port swirl were used as the input variables automatically optimized by the combustion system. The indicating thermal efficiency of the combustion system, nitrogen oxides (NOx) and dry soot emissions as the output variables were used as the output variables. The Modefrontier automatic optimization model is built and the automation of the combustion system is optimized. The optimization results show that an innovative form of combustion organization is found. Compared with the original scheme, the optimization scheme has obvious advantages in indicating thermal efficiency and Soot emission when the NOx emission control is basically the same. Indicating that this innovative form of combustion is very competitive in the CN VI diesel engine.

Key words: Converge, Diesel engine, Combustion chamber, Automatic optimization

1 引言

随着国内柴油机排放法规的日益严格, 满足国 VI 排放法规的柴油机设计工作已经展开。而在柴油机的设计工作中, 设计高效低排放的燃烧系统是决定发动机能否满足排放要求的关键要素之一。因此, 面对严苛的国 VI 排放法规要求, 设计出符合要求的燃烧系统成为现阶段国内外同行的工作重点。燃烧系统优化包括燃烧室结构优化、喷油参数优化和气道参数优化三个方面。其中, 燃烧室结构优化工作量非常大, 一般项目周期内只能完成 4-5 个燃烧室结构优化工作, 无法实现燃烧室结构的全面优化。喷油参数优化包括对喷油器喷孔数量、喷

射锥角、喷射压力和流量参数分别进行优化,优化工作量也非常大,再加上气道参数的优化使得整个燃烧系统优化工作量巨大,得到的优化方案往往也不是最优方案,而且优化过程中要进行大量的前处理、后处理以及结果对比分析工作,不仅费时费力而且由于人为因素导致的错误也是不可忽略的因素。综上所述,有必要将自动化引入燃烧系统优化过程中,不仅可以提高工作效率和降低错误率,更重要的是能够得到最优的燃烧系统方案。

本文针对某型柴油机国 VI 燃烧系统优化任务实现了燃烧系统自动优化,优化流程如图 1 所示。首先对该柴油机燃烧室结构进行参数化,并通过敏感性分析得到对燃烧系统性能影响较大的 7 个燃烧室结构参数,连同喷油系统参数包括喷油器孔数、喷油锥角、喷油器流量、喷油压力 and 气道涡流比共 12 个参数作为燃烧系统自动优化的输入变量,以燃烧系统的指示热效率、氮氧化物 (NO_x) 和干碳烟 (Soot) 排放作为输出变量,搭建了 Modefronitier 自动优化模型并实现了燃烧系统优化的自动化。优化结果表明:找到了一种创新型的柴油机缸内燃烧组织形式,与原方案相比,在 NO_x 比排放结果控制基本一致的情况下,优化方案在指示热效率和 Soot 比排放都有明显优势,说明这种创新的燃烧组织形式应用在国 VI 柴油机上非常有竞争力。

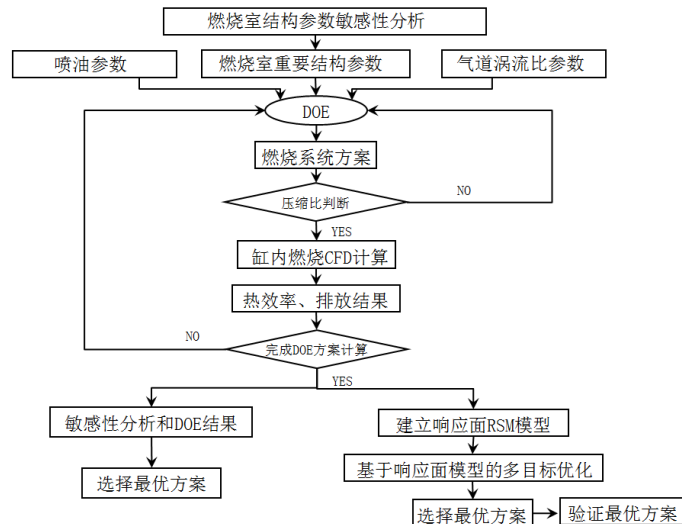


图 1 自动优化流程

2 建立 Converge 缸内燃烧模型

2.1 发动机参数

本文是基于一款中小型高压共轨柴油机进行的,该款发动机的基本参数如表 1 所示。

表 1 发动机基本参数

基本参数	单位	数值
气缸数	—	4
排量	L	3.8
缸径×行程	mm	98×126
压缩比	—	17

建立模型

本文使用 Converge 软件进行缸内燃烧计算模型的搭建。为了提高仿真效率，采用部分燃烧室模型，即采用 Sector 模型仿真方法来对柴油机缸内燃烧进行模拟计算。图 2 是导入 Converge 后的原机燃烧室 Sector 模型。

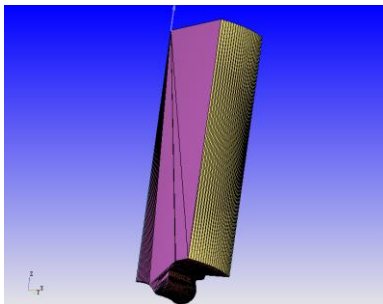


图 2 Sector 模型

本文利用正庚烷 (C_7H_{16}) 来代替柴油进行燃烧化学反应计算，其反应机理来自文献[1]，该反应机理包括 41 种组分和 124 个基元反应，计算过程中采用的模型如表 2 所示。

表 2 计算模型说明

模型类别	所选模型
燃烧模型	SAGE Model
湍流模型	RNG $k-\epsilon$ Model
雾化模型	Frossling Model
破碎模型	KH-RT Model
NOx 模型	Extended Zeldovich NOx Model
Soot 模型	Hiroyasu Soot Model

优化工况选择该机型常用工况，具体说明如表 3 所示。

表 3 工况说明

名称	单位	数值
转速	r/min	1465
负荷	%	100
EGR 率	%	10

模型标定

根据原机燃烧室台架试验数据进行模型标定，模拟计算结果与试验计算结果对比如图 3 所示。从图上可以看出模拟计算得到的缸压和瞬时放热率结果与试验结果非常吻合，说明建立的计算模型可以用来模拟所研究发动机的真实工况，可以利用该模型进行燃烧系统优化分析。

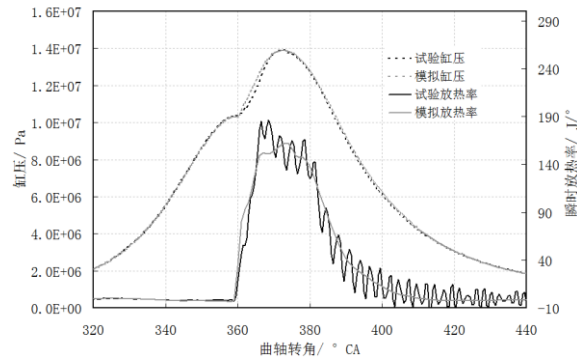


图 3 模拟与试验结果对比

3 搭建自动优化模型

3.1 输入变量

图4为燃烧室结构参数化示意图,在燃烧室型线上总共定义了7个点来控制其形状变化,分别是 $P_1(0, Y_1)$ 、 $P_2(4.5, Y_2)$ 、 $P_3(X_3, Y_3)$ 、 $P_4(X_4, Y_4)$ 、 $P_5(X_5, Y_5)$ 、 $P_6(X_6, Y_6)$ 、 $P_7(X_7, Y_7)$ 。因此,代表燃烧室结构参数的输入变量共有 12 个,分别 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 、 Y_6 和 Y_7 。代表喷油参数的输入变量共有 4 个,分别是喷油器孔数 (Hole_Number)、喷油锥角(Angle_spray)、喷油器流量(Quality)和喷油压力(P_{inj}),代表气道参数的输入变量为气道涡流比 (Swirl)。综上,燃烧系统自动优化过程中初步定义的输入变量共 17 个,各输入变量的名称及取值范围如表 4 所示。

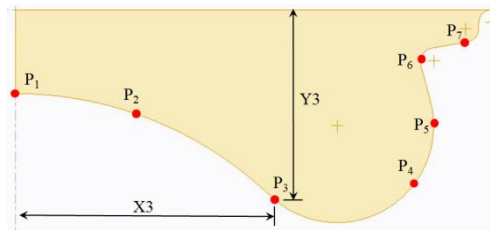


图 4 燃烧室结构参数化示意图

表 4 输入变量的名称及取值范围

	变量名称	单位	取值范围
燃烧室结构 输入变量	X_3	mm	[12, 13, 14]
	X_4	mm	[28, 29]
	X_5	mm	[30, 31, 32]
	X_6	mm	[33, 34, 35, 36, 37]
	X_7	mm	[32, 33, 34, 35, 36]
	Y_1	mm	$Y_2 - 1$
	Y_2	mm	[7, 8, 9, 10, 11, 12]
	Y_3	mm	[12, 13, 14, 15]
	Y_4	mm	[12, 13, 14]
	Y_5	mm	[7, 8, 9]
	Y_6	mm	[1, 2]
	Y_7	mm	[1, 2, 3]

喷油输入变量	Hole_Number		[6, 7, 8, 9]
	Angle_spray	度	[144, 146, 148, 150]
	Quality	ml/min	[850, 1000]
	P_inj	bar	[1120, 1300]
气道输入变量	Swirl		[0.8, 1.2, 1.6]

3.2 输出变量

燃烧系统自动优化过程中将燃烧系统的指示热效率、NO_x 和 Soot 排放量作为输出变量，其最终结果是通过 Converge 计算输出的缸压、NO_x 和 Soot 进行处理得到的，单位均为 g/(kW·h)。优化目标为在 NO_x 排放 ≤ 4.5g/(kW·h) 且 Soot 排放 ≤ 0.03g/(kW·h) 前提下追求指示热效率的最大值，具体对输出变量的要求如表 5 所示。

表 5 输出变量的约束条件及目标

输出变量	约束及目标
指示热效率	最大
NO _x 排放	≤ 4.5g/(kW·h)
Soot 排放	≤ 0.03g/(kW·h)

3.3 燃烧室结构输入变量敏感性分析

为了减少优化过程中输入变量的数目从而提高优化效率，在优化之前对 12 个代表燃烧室结构参数的输入变量进行敏感性分析，找出对输出变量影响较大的输入变量。图 5 为敏感性分析结果，如图所示为各燃烧室结构输入变量对输出变量指示热效率、NO_x 排放和 Soot 排放的影响因子。其中，对指示热效率影响较大的六个输入变量为（按影响因子从大到小排序）：X6、Y4、Y6、X4、Y5、Y7，对 NO_x 排放影响较大的输入变量为：Y6、Y4、X5、X6、X4、Y7，对 Soot 排放影响较大的输入变量为：X6、Y4、Y6、Y5、X4、X7。从敏感性分析结果可以看出燃烧室结构中的 P4、P5、P6、P7 四个点的位置对输出变量影响最大，最终从中选择 X4、X5、X6、Y4、Y5、Y6 和 Y7 共 7 个变量作为自动优化的燃烧室结构输入变量。

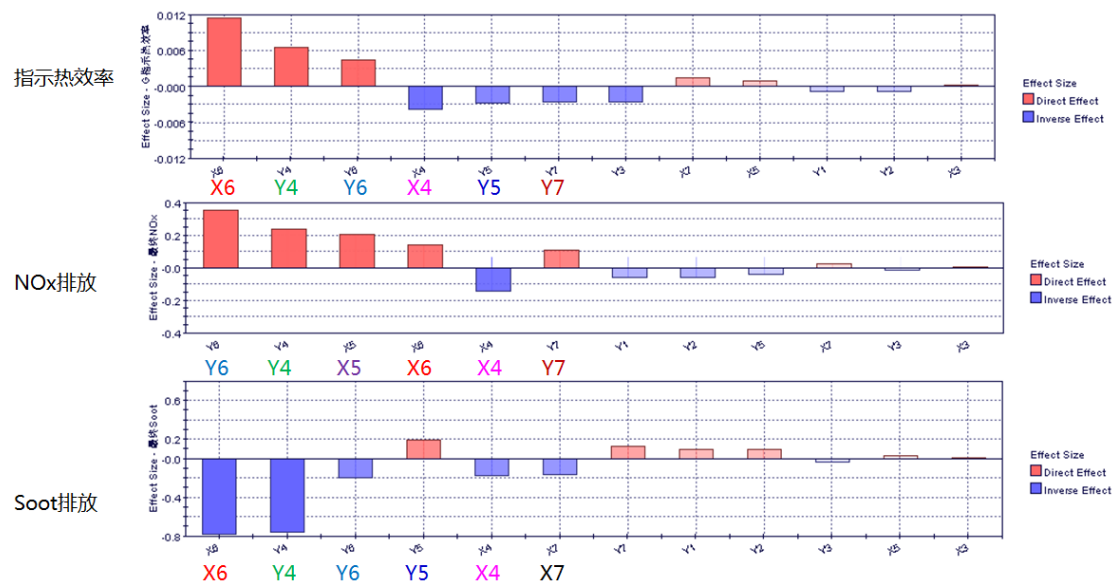


图 5 敏感性分析结果

3.4 建立燃烧系统自动优化模型

在优化软件 ModeFrontier 中搭建自动优化模型，具体过程在文献[2]中有较详细介绍。由于所研究发动机的国 VI 设计方案对缸内爆发压力有限制，优化过程中必须对自动生成的燃烧室方案压缩比进行限制，如果超过限制范围则该方案不进行计算。因此，优化过程中压缩比的变化范围限定为 16-18，最终建立的自动优化模型如图 6 所示。

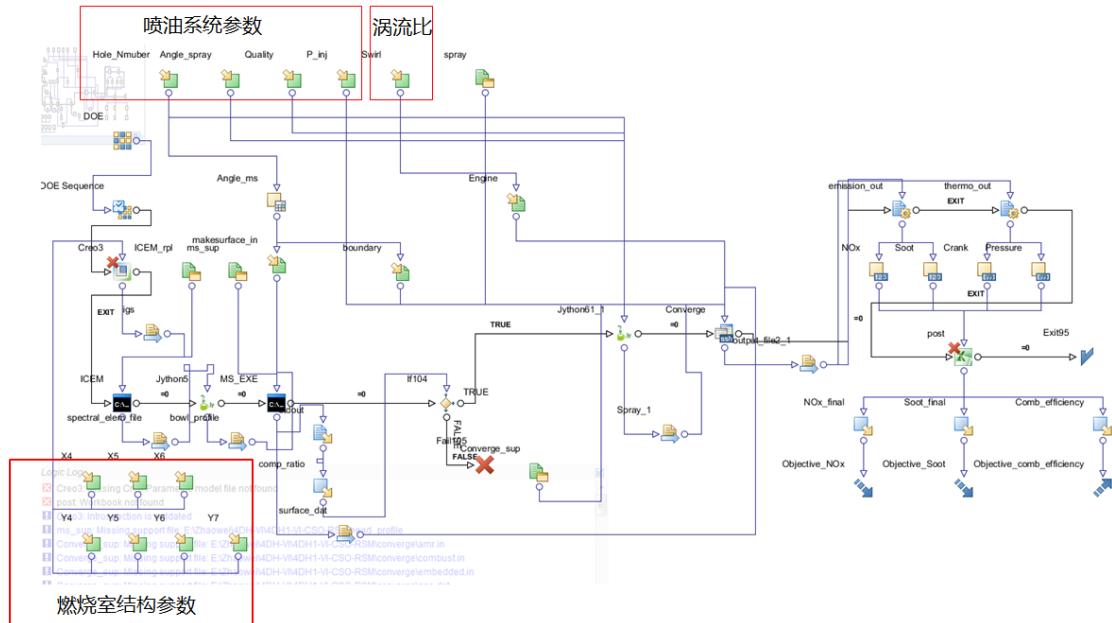


图 6 自动优化模型

4 优化结果分析

为了对比采用不同优化策略所得到的优化结果和优化效率之间的差异，从而找到一种更适合燃烧系统的优化策略，本文中采用两种优化策略分别就同一问题进行优化。优化策略 1 是基于燃烧室结构参数敏感性分析结果和燃烧系统多参数 DOE 计算结果选出最优方案；优化策略 2 是利用燃烧系统多参数 DOE 计算结果建立输出变量的响应面模型，然后基于响应面模型进行全因子优化，最终选出最优方案。

4.1 优化策略 1

优化策略 1 是基于燃烧室结构参数敏感性分析结果和 DOE 计算结果选出最优方案，总共用时 540 小时，详细情况说明如表 6 所示。

表 6 优化策略 1 详细说明

	DOE 数目	DOE 取值方法	优化模型	用时	总用时
燃烧室结构敏感性分析	100	Uniform Latin Hypercube	DOE sequence	220h	540h
燃烧系统多参数 DOE 计算	150	Uniform Latin Hypercube	DOE sequence	320h	

优化结果如图 7 和图 8 所示，图 7 是各燃烧系统方案指示热效率与 NOx 排放的对比关系，图 8 是各燃烧系统方案的指示热效率与 Soot 排放的对比关系。根据优化目标要求找出同时满足 $\text{NOx} \leq 4.5 \text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 且 $\text{Soot} \leq 0.03 \text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 时指示热效率最大的方案为最优方案，

如图所示最优方案（绿色十字标识）为燃烧室结构参数敏感性分析结果中的方案，最优方案具体取值如表 7 所示。

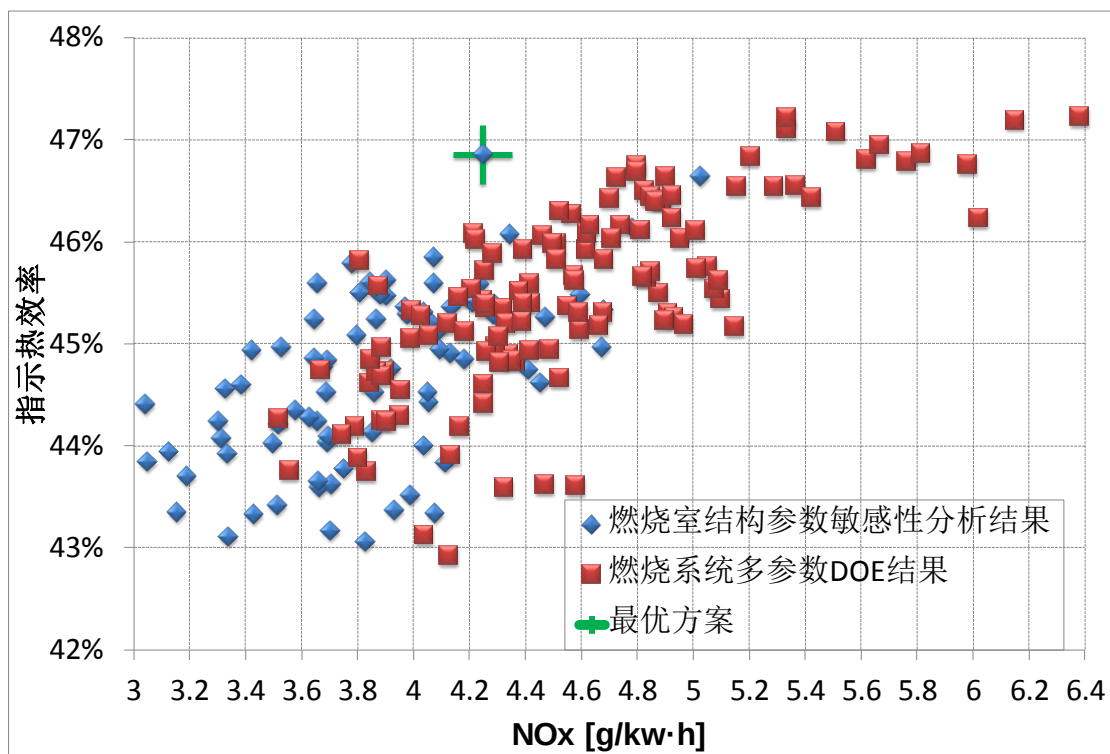


图 7 优化策略 1 结果

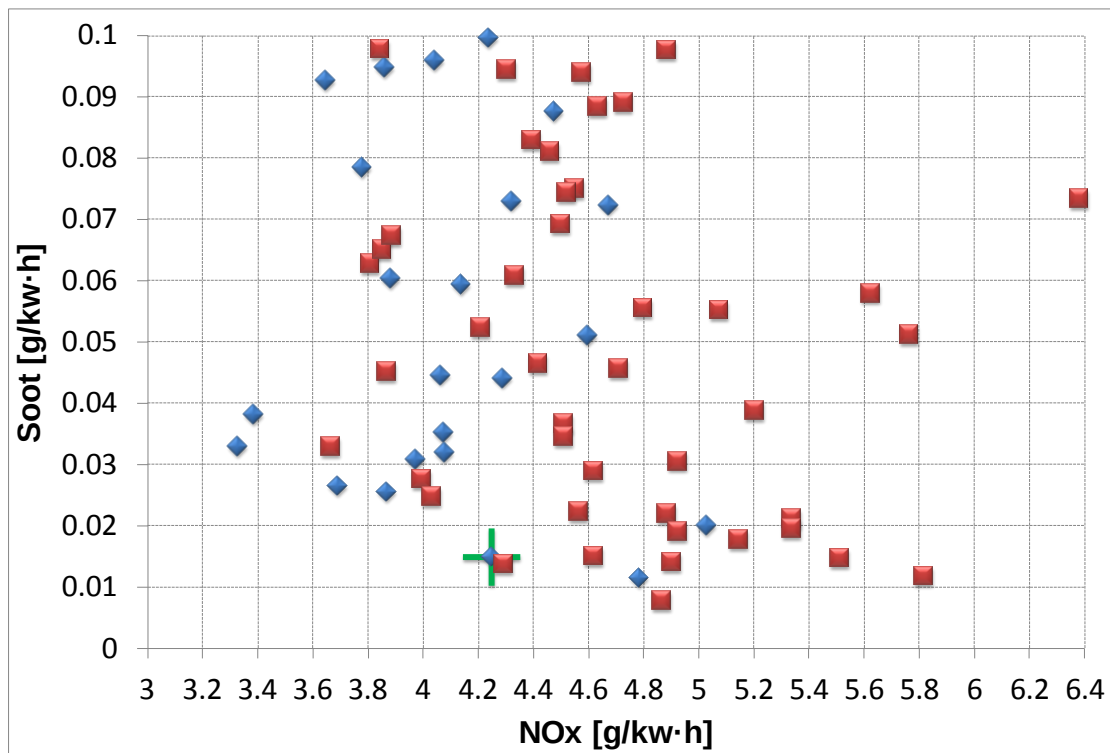


图 8 优化策略 1 结果

表 7 优化策略 1 的最优方案

	变量名称	单位	最优取值
燃烧室结构 输入变量	X3	mm	14
	X4	mm	26
	X5	mm	27
	X6	mm	32
	X7	mm	32
	Y1	mm	8
	Y2	mm	9
	Y3	mm	12
	Y4	mm	13
	Y5	mm	9
	Y6	mm	2
	Y7	mm	3
喷油输入变量	Hole_Number		7
	Angle_spray	度	146
	Quality	ml/min	850
	P_inj	bar	1300
气道输入变量	Swirl		1.2
输出变量	指示热效率	%	46.85
	NOx 排放	g/(kW·h)	4.25
	Soot 排放	g/(kW·h)	0.015

4.2 优化策略 2

优化策略 2 是利用燃烧系统多参数 DOE 计算结果建立输出变量的响应面模型,然后基于响应面模型进行全因子优化,最终选出最优方案,总共用时 541 小时,详细情况说明如下表所示。

表 8 优化策略 2 详细说明

	DOE 数目	DOE 取值方法	优化模型	用时	总用时
基于响应面优化	69120	全因子	DOE sequence	1h	540h+1h

针对输出变量指示热效率、NOx 排放、Soot 排放以及优化过程输出量压缩比共建立了 264 个响应面模型,其中以 Angle_spray 为 X 轴、以 Hole_Number 为 Y 轴,以指示热效率、NOx 排放、Soot 排放和压缩比为 Z 轴的响应面模型如图 9 所示。

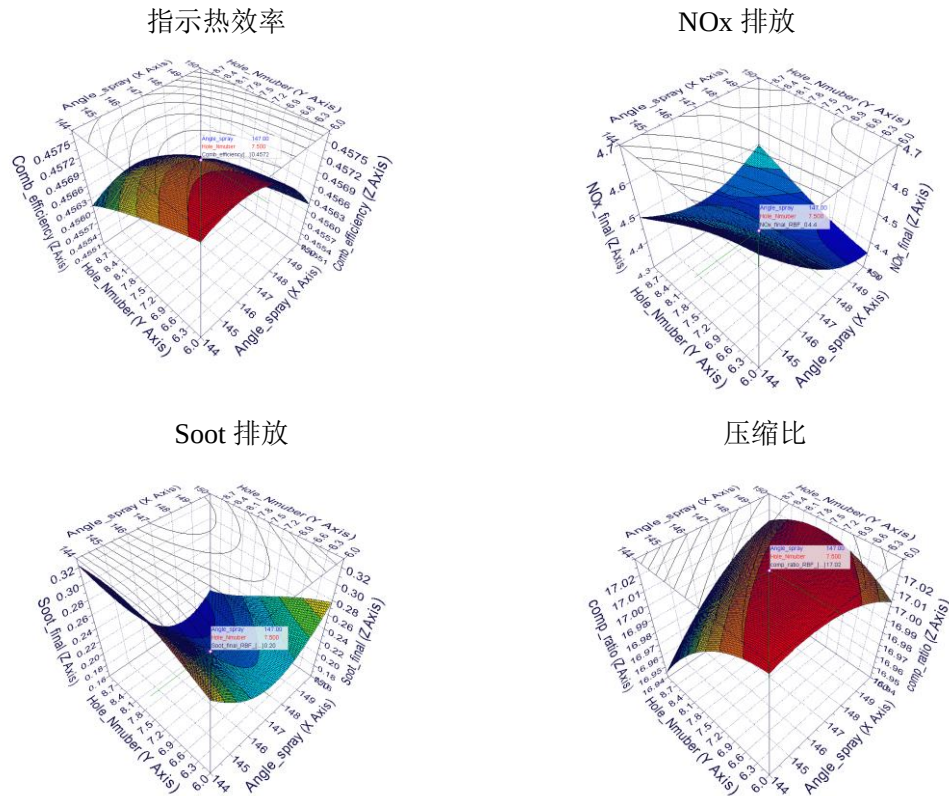


图 9 响应面模型

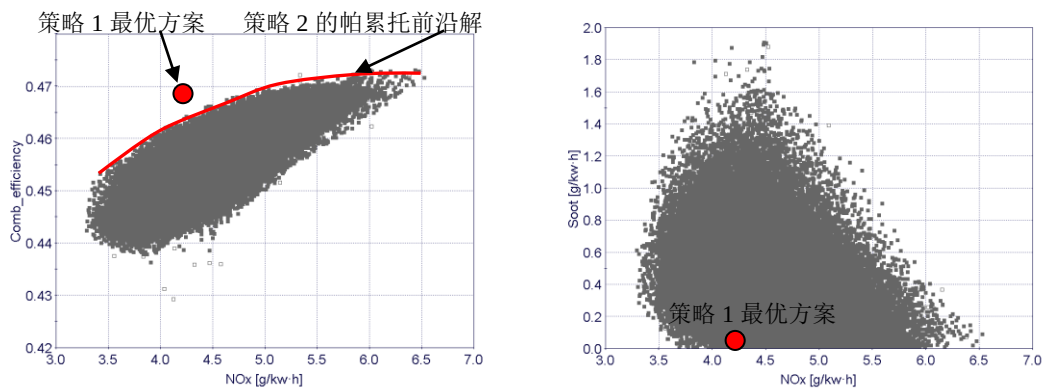


图 10 优化策略 2 结果

基于以上建立的 264 个输入变量和输出变量之间的响应面模型进行优化, 优化结果如图 10 所示。从图中可以看出策略 2 得到的帕累托前沿解中没有比策略 1 最优方案更好的方案, 这可能是由于策略 2 中建立响应面模型的 DOE 种群数量不足, 导致建立的响应面模型精度不够, 使最终优化结果没有竞争力。因此, 优化策略 1 得到的最优方案就是本次优化工作得到的最终优化方案。

通过优化策略 1 和策略 2 的优化结果对比发现: 针对燃烧系统自动优化, 在 DOE 数目较少的情况下采用响应面模型来进行优化得到的结果不佳。

4.3 优化方案性能结果分析

图 11、图 12、图 13 分别为 A100、A75、A25 和 B50 四个工况下优化方案与原方案的指示热效率、Soot 排放和 NOx 排放结果对比。如图所示，在 NOx 排放结果控制基本一致的情况下，优化方案的指示热效率和 Soot 排放都有明显优势。与原方案相比，优化方案在四个工况下的指示热效率分别提高了 1.5、0.5、0.7 和 1 个百分点，与此同时 Soot 排放分别降低了 89.5%、69.56%、12% 和 58.8%。

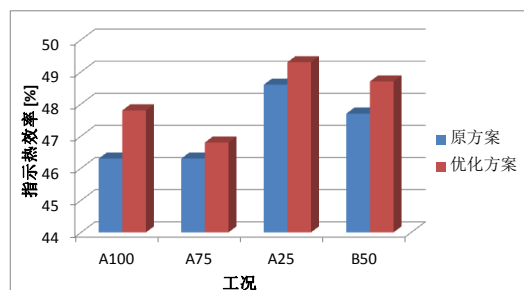


图 11 指示热效率对比

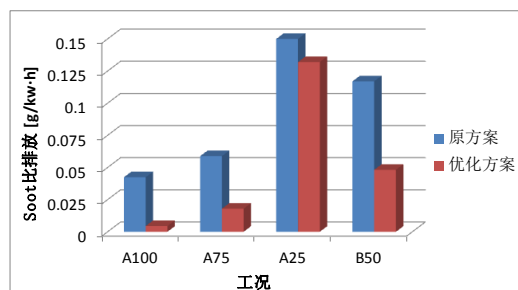


图 12 Soot 排放对比

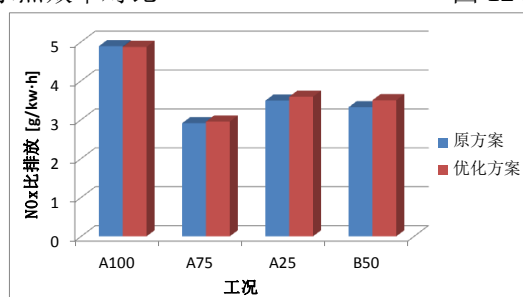


图 13 NOx 排放对比

5 结论

本文应用 Converge 和优化软件 Modefrontier 搭建了某型柴油机国 VI 燃烧系统自动优化模型，实现了该型柴油机燃烧系统优化的自动化。结果表明：找到了一种创新型的柴油机缸内燃烧组织形式，与原方案相比，在 NOx 比排放结果控制基本一致的情况下，优化方案的指示热效率和 Soot 比排放都有明显优势，说明这种创新的燃烧组织形式应用在国 VI 柴油机上非常有竞争力。

6 参考文献

- [1] 刘耀东,《基础燃料 (PRF) 及汽油表征燃料 (TRF) 化学反应动力学骨架模型的研究》, 2013
- [2] 赵伟, 胡芳等,《基于 CONVERGE 和 Modefrontier 联合仿真的柴油机燃烧室结构优化》, 2015 年 IDAJ-China 中国用户论文集: P372-380, 2015