

基于Converge和ModeFrontier联合仿真的 柴油机燃烧室结构自动优化

赵 伟
一汽技术中心
2015年11月

1 引言

2 建立Converge缸内燃烧模型

3 搭建ModeFrontier优化模型

4 优化结果分析

5 结论

燃烧室结构优化的必要性

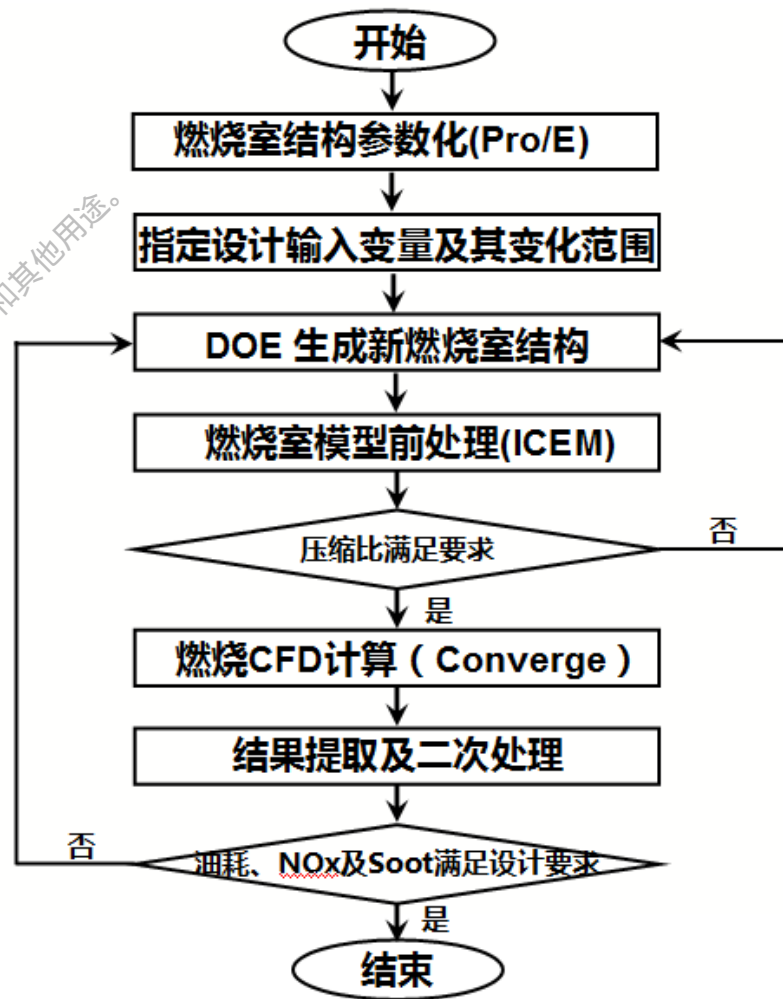
- 柴油机缸内混合气形成和燃烧与燃烧室结构关系密切
- 燃烧系统的优化改进首先从燃烧室结构入手

建立自动优化平台的必要性

- 手动优化工作量大，效率低
- 借助优化平台强大的数据分析功能，总结规律

自动优化平台的组成

- 三维设计软件Pro/E
- 发动机燃烧模拟分析软件Converge
- 优化集成软件ModeFrontier
- 模型前处理软件ICEM
- 相关脚本和结果后处理程序

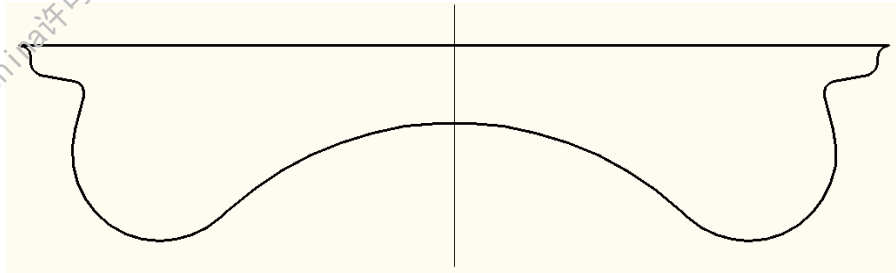


2.1 发动机参数

基于一款中小型高压共轨柴油机进行燃烧室结构集成优化，针对排放升级的问题，通过重新设计燃烧室结构降低NO_x排放，同时保证油耗和碳烟（Soot）排放不增加。

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

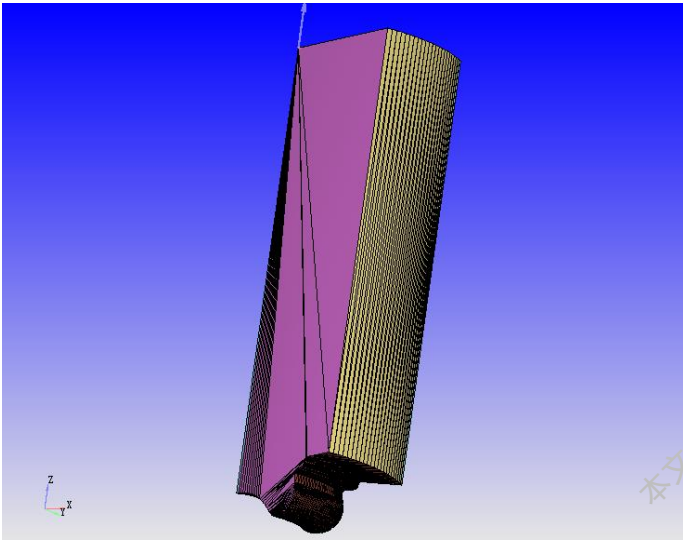
发动机基本参数



原燃烧室结构

2.2 建立模型

采用部分燃烧室模型（Sector）进行计算，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]，该机理包括41种组分和124个基元反应。



燃烧室Sector模型

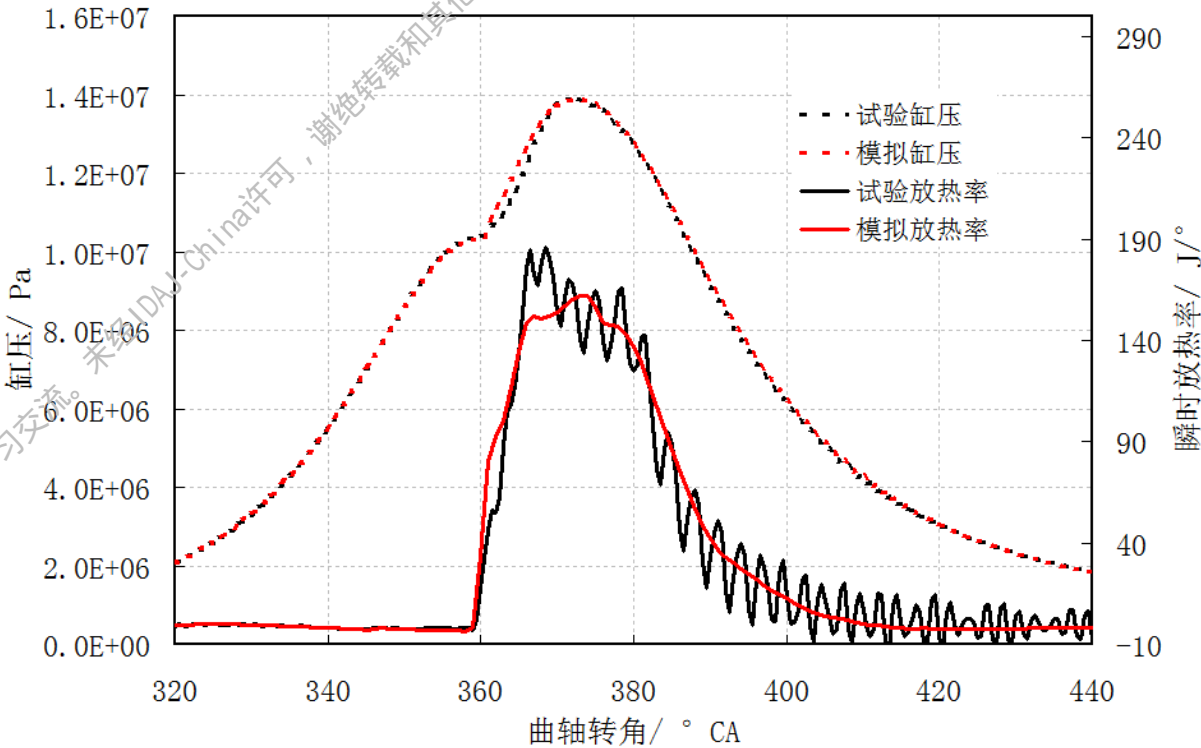
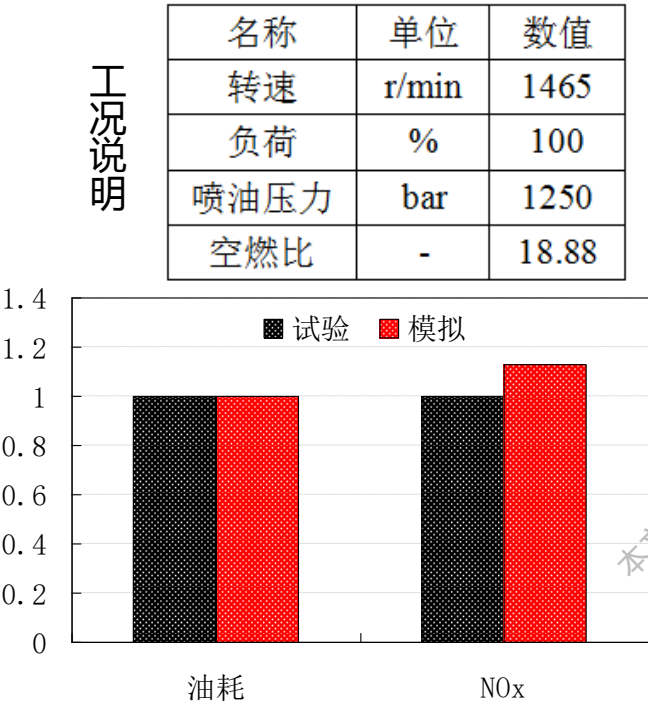
模型类别	所选模型
燃烧模型	SAGE Model
湍流模型	RNG k-ε Model
雾化模型	<u>Frossling Model</u>
破碎模型	KH-RT Model
<u>NOx 模型</u>	Extended <u>Zeldovich NOx Model</u>
Soot 模型	Hiroyasu Soot Model

计算模型说明

[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

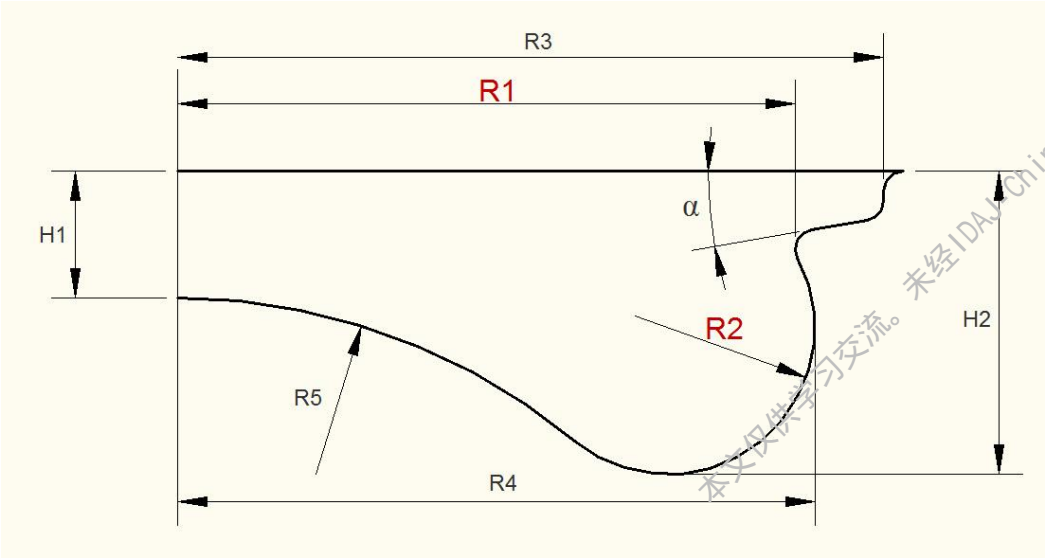
2.3 模型标定

根据原机燃烧室台架试验数据进行模型标定，模拟计算得到的缸压、瞬时放热率、油耗及排放结果与试验结果偏差小于5%。



3.1 输入变量和目标变量的选择

优化中主要针对燃烧室的缩口率和凹坑半径，设定缩口半径R1和凹坑半径R2为输入变量，目标变量为油耗（BSFC）、碳烟（Soot）和氮氧化合物（NO_x），同时对压缩比进行限制。



燃烧室结构参数示意图

输入变量

输入变量	变化范围	变化步长
R1	31mm-32.5mm	0.1mm
R2	6.5mm-8mm	0.1mm

压缩比限制范围： 16.9 ~ 18.1

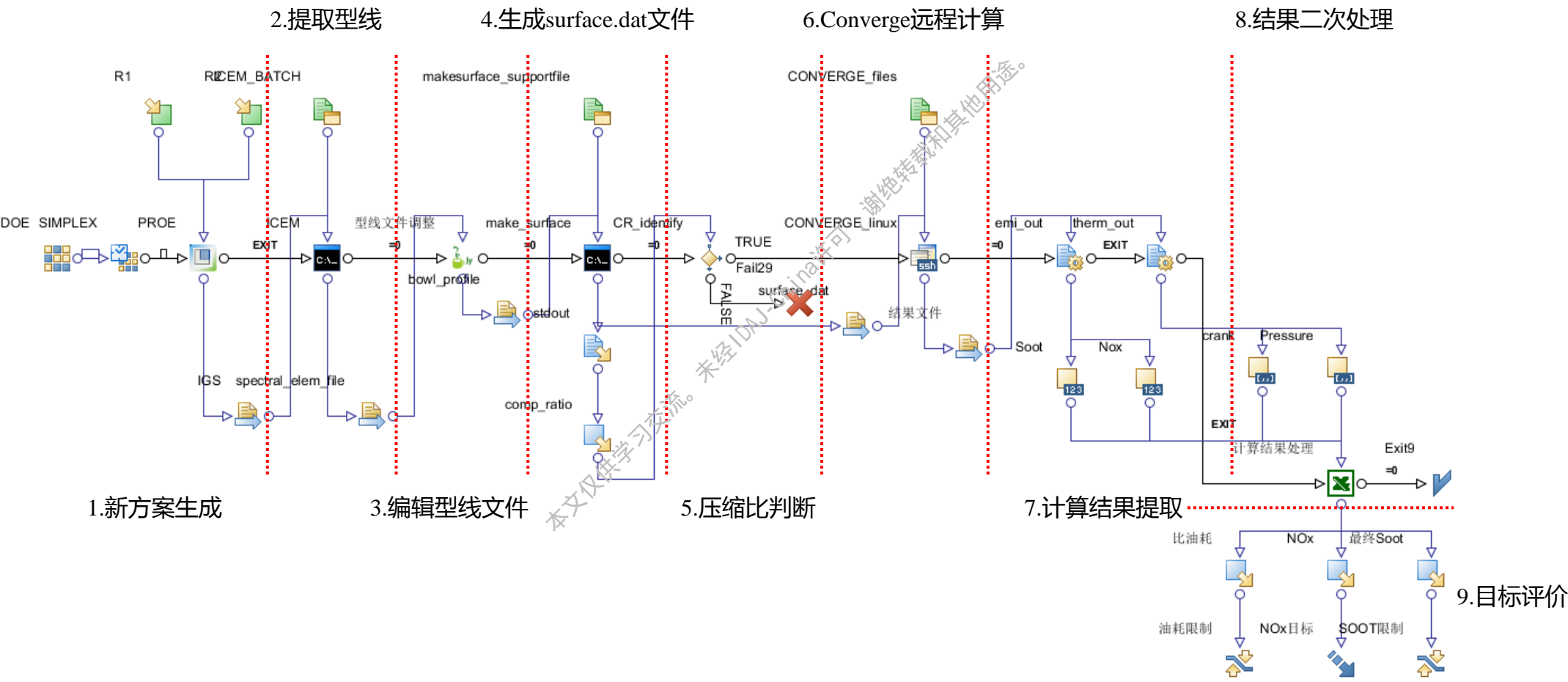
目标变量

目标变量	约束条件
油耗（BSFC）	$\leq 208.04 \text{ g/(kw} \cdot \text{h)}$
Soot	$\leq 0.04 \text{ g/(kw} \cdot \text{h)}$
NO _x	最小值

3.搭建ModeFrontier优化模型



3.2 ModeFrontier优化模型的建立



ModeFrontier优化模型

4.优化结果分析

DOE方案数：561

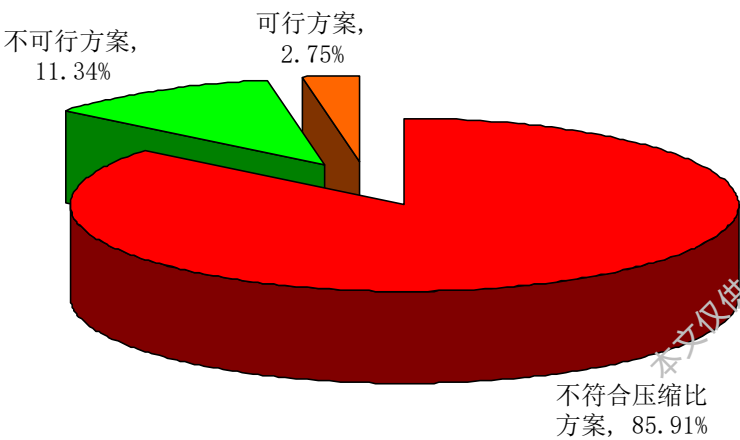
有效方案数：291

符合压缩比方案数：41

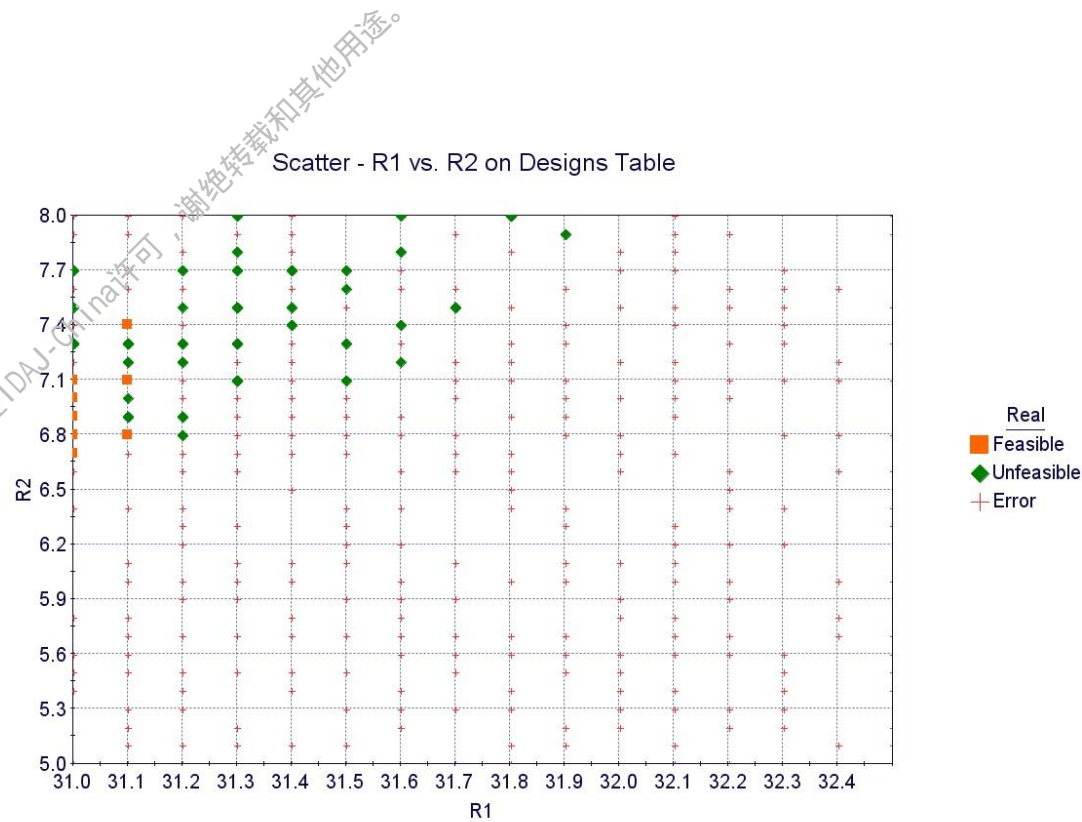
可行方案数：8

计算服务器CPU数：60

耗费时间：90小时



DOE设计方案统计

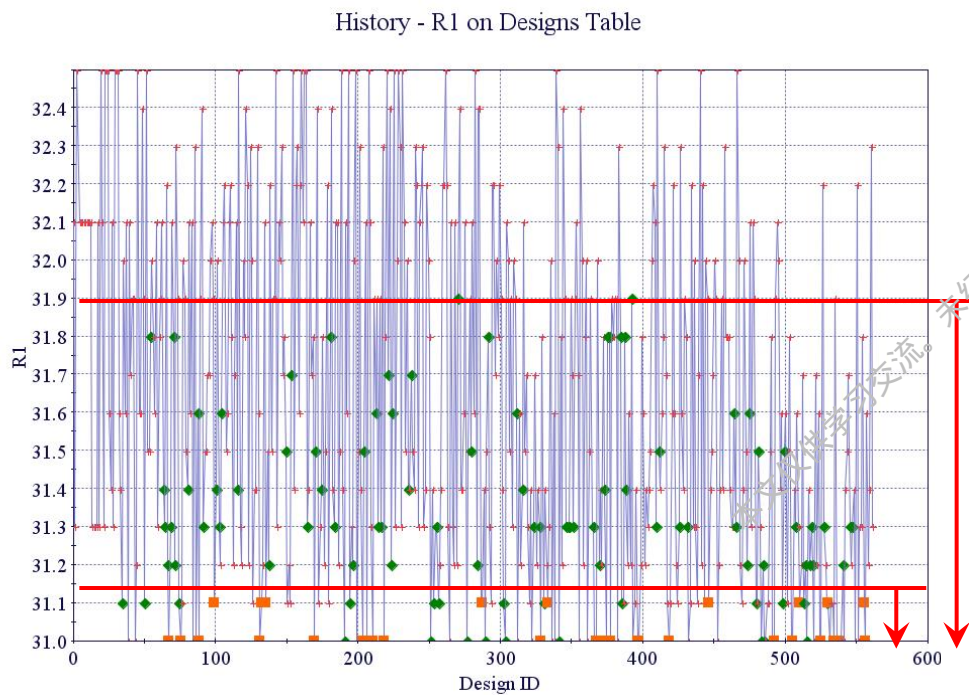


DOE设计方案分布

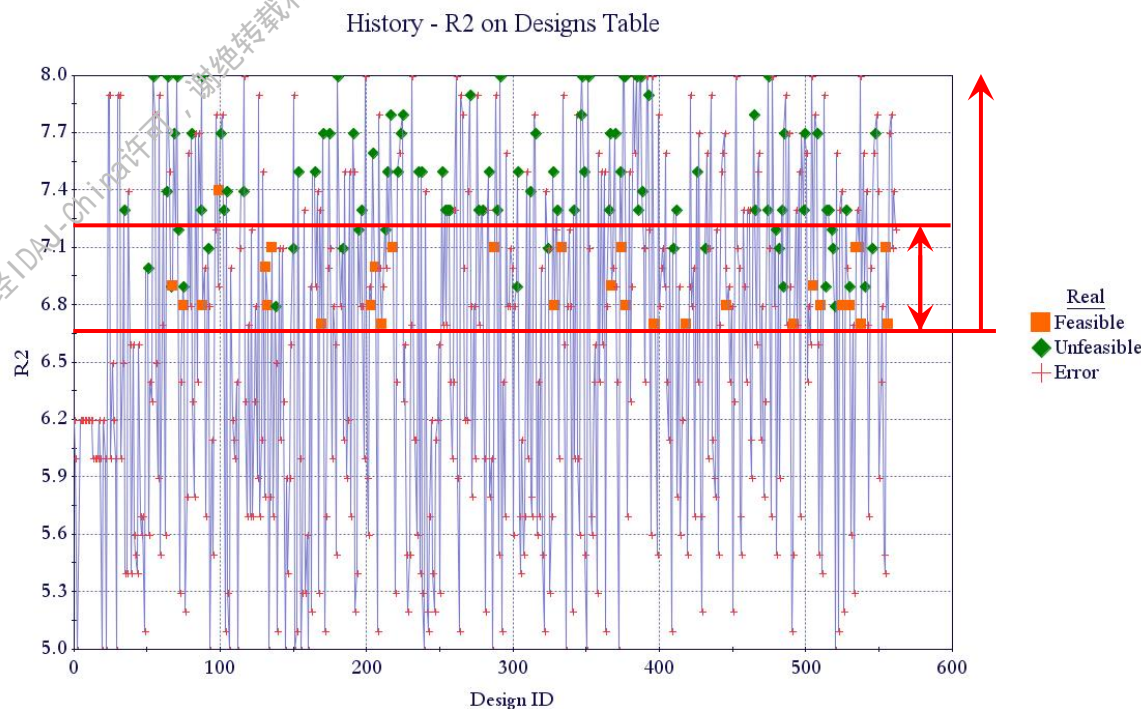
4.优化结果分析

4.1 输入变量变化历程

在限制压缩比情况下，较小的缩口半径是新燃烧室方案向低油耗、低碳烟目标发展的方向，而对于凹坑半径来说有最佳取值范围，过大或过小都会产生不利影响。



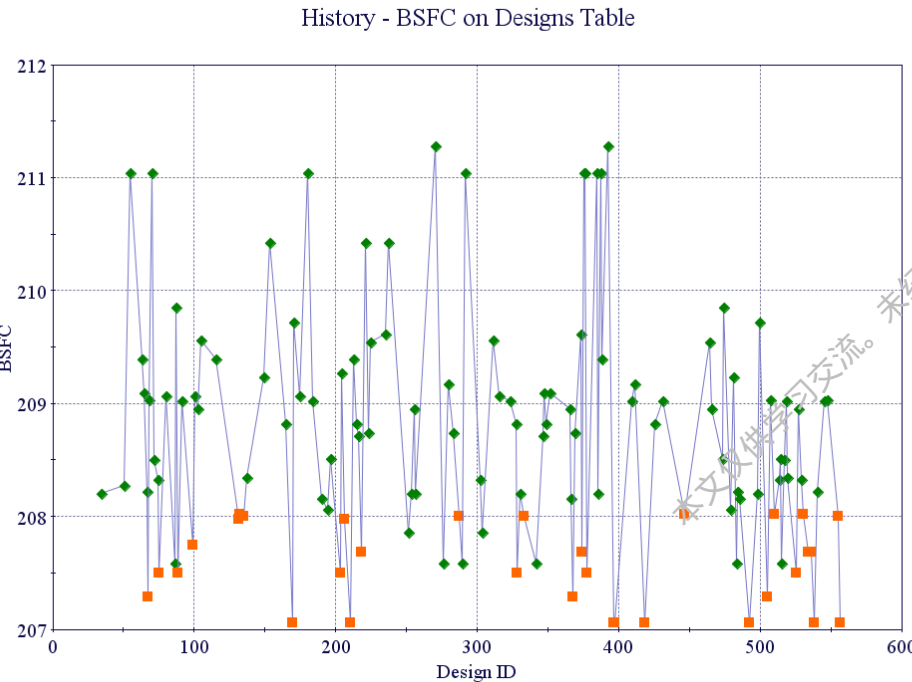
缩口半径R1变化历程



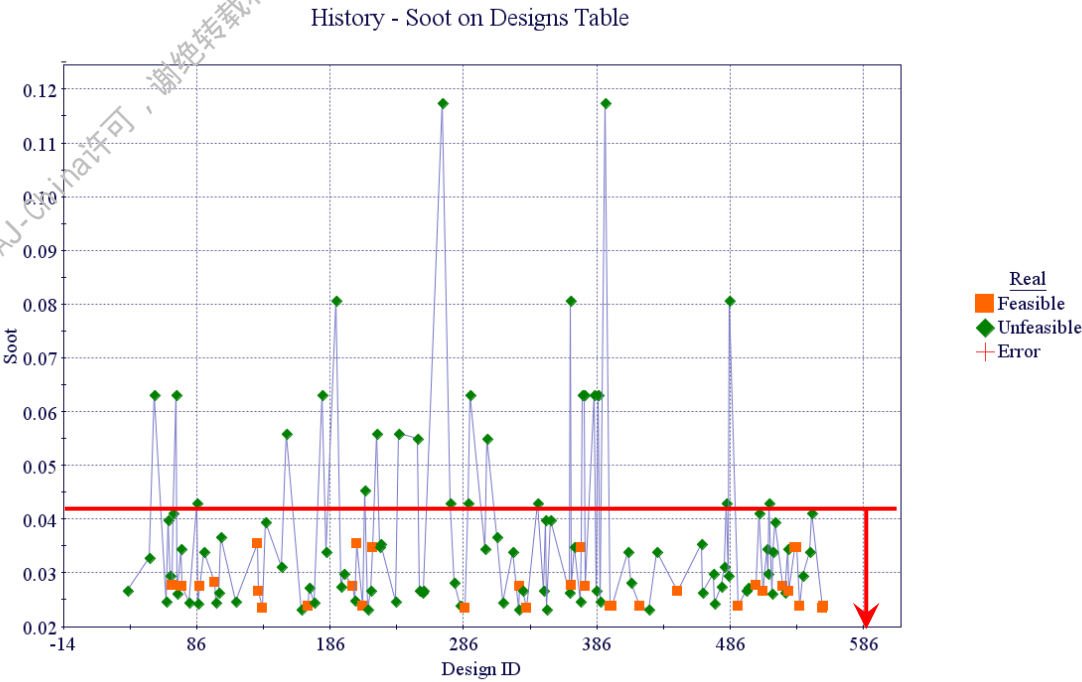
凹坑半径R2变化历程

4.2 目标变量变化历程

油耗变化范围207~211.5g/kw h，分布范围较广，而大部分方案的碳烟都在限制范围内，燃烧系统整体碳烟排放较低。



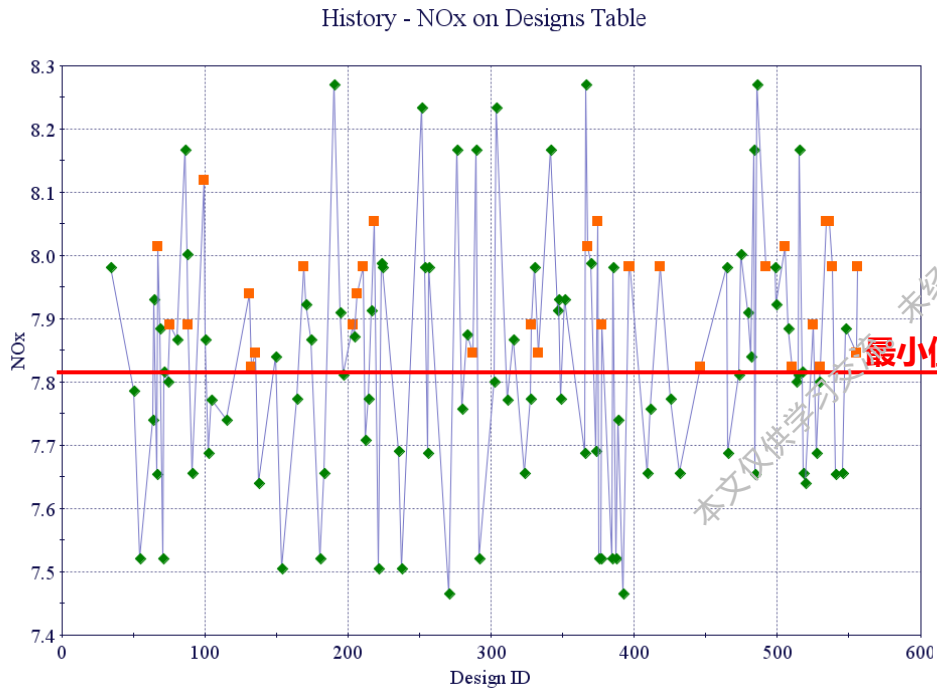
油耗 (BSFC) 变化历程



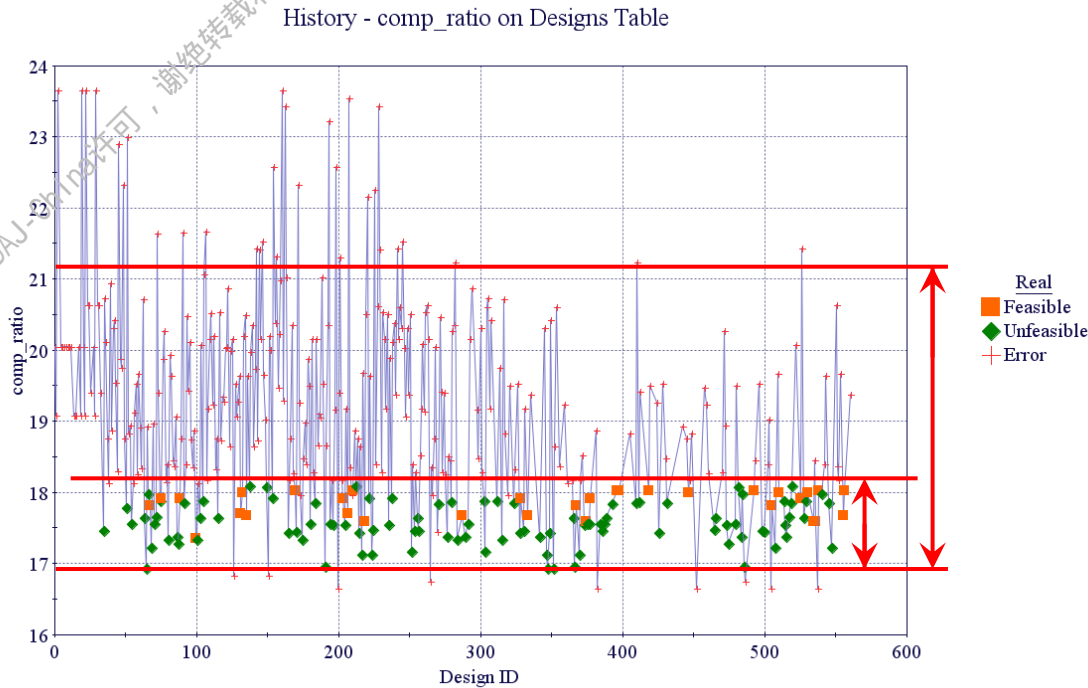
碳烟 (Soot) 变化历程

4.2 目标变量历程

氮氧化合物 (NO_x) 主要集中在7.4~8.3g/kw h之间，满足油耗和碳烟要求下NO_x最小值为7.82g/kw h；压缩比在17~21之间变化，满足压缩比要求的方案只占一小部分，有改进空间。



氮氧化合物 (NO_x) 变化历程



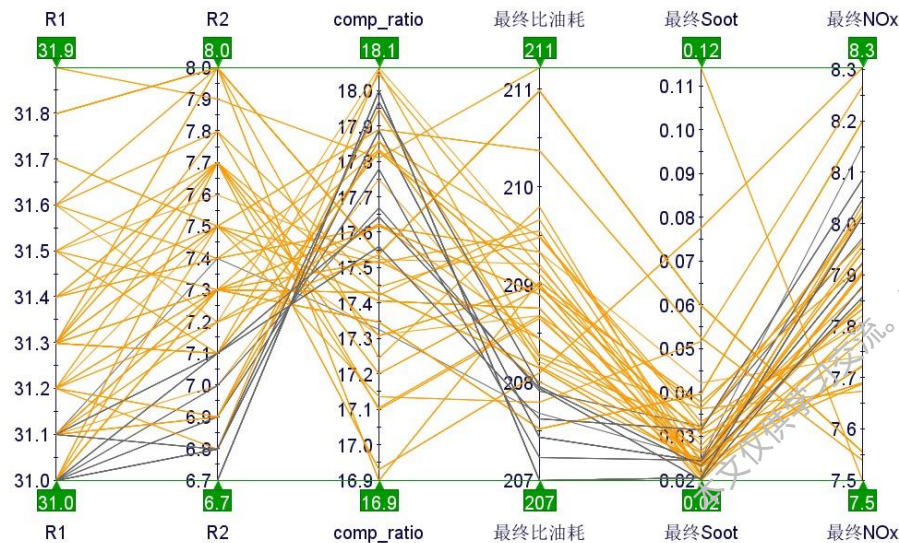
压缩比变化历程

4.优化结果分析

4.3 最优方案的选择

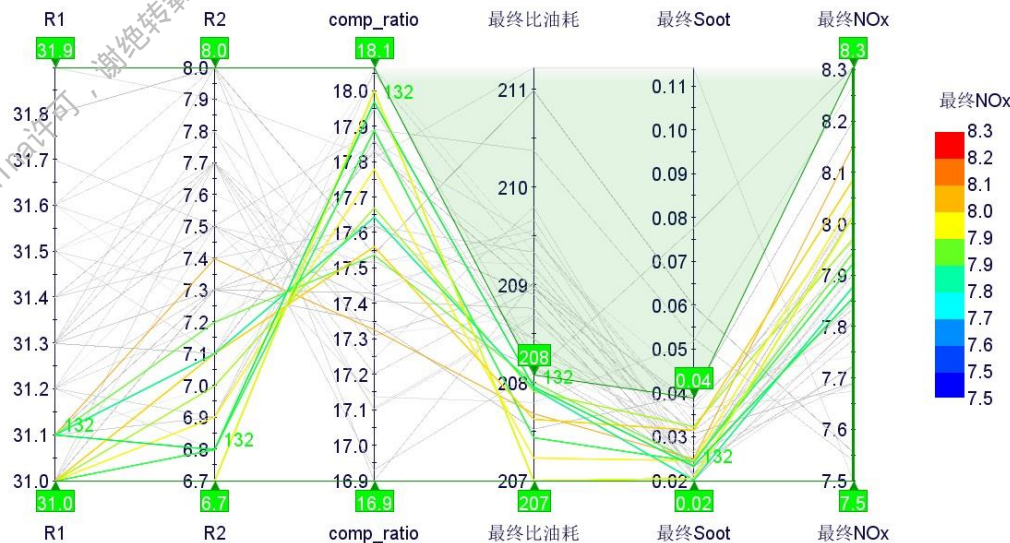
满足油耗和碳烟限制条件下，氮氧化合物（NO_x）最低的方案为132号，即R1=31.1mm、R2=6.8mm，该方案压缩比为18，NO_x降低1.4%，达到优化目标。

Parallel Coordinates - {R1 R2 comp_ratio 最终比油耗 最终Soot 最终NO_x} on Designs Table

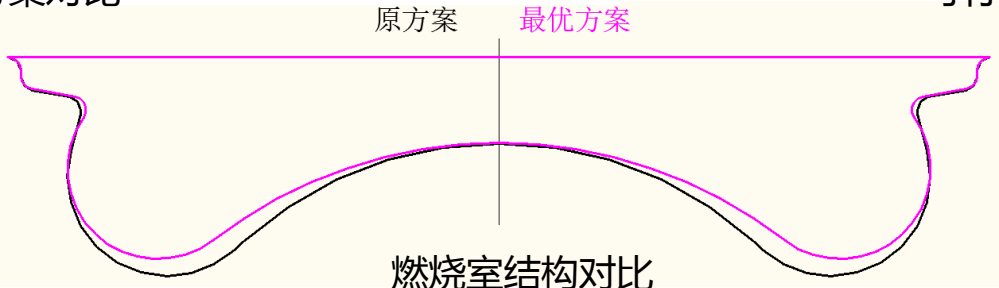


全部方案对比

Parallel Coordinates - {R1 R2 comp_ratio 比油耗 Soot NO_x} on Designs Table



可行方案对比



燃烧室结构对比

本文通过标定好的柴油机燃烧室模型，利用Converge软件联合ModeFrontier开展燃烧室结构多目标优化仿真。仿真结果显示：

- （1）基于Converge和ModeFrontier联合仿真进行柴油机燃烧室结构自动优化能够避免手动频繁迭代，流程自动化程度较高，工作效率大幅度提高；
- （2）本文通过对燃烧室结构参数的优化工作得到了优化方案，该方案能够在满足油耗和碳烟目标的前提下将NO_x降低1.4%，达到优化目的。

本文在优化过程中出现了无效方案占比较高的问题，这对最优方案的确定以及优化效率的提升是不利的。该问题的出现与优化变量的选择和定义有关系，在之后的优化工作中需要进一步改进。



关爱自然 服务社会

CARE THE NATURE AND SERVE THE SOCIETY

——让汽车更清洁 更节能

Contribute cleaner and more energy saving vehicles

