



中国一汽

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

本文仅供学习交流。未经IDAJ网许可，谢绝转载和其他用途。

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

本文仅供学习交流  
未经许可不得  
谢绝转载和其他用途

## 燃烧室结构优化的必要性

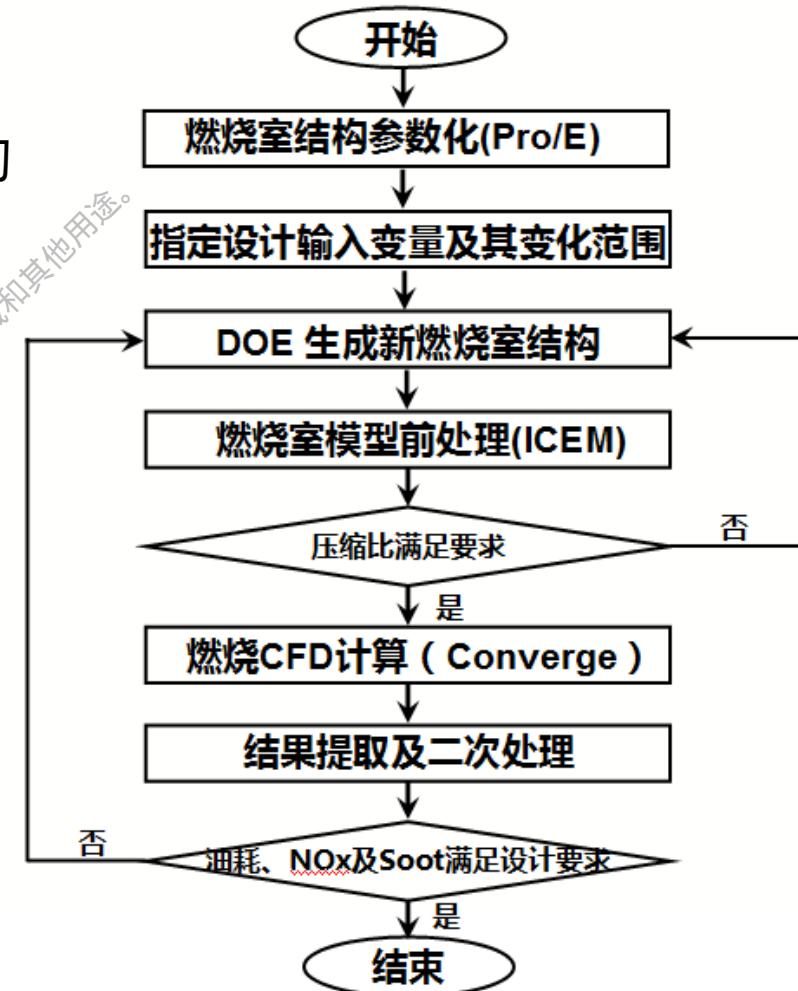
- 柴油机缸内混合气形成和燃烧与燃烧室结构关系密切
- 燃烧系统的优化改进首先从燃烧室结构入手

## 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



优化流程图

## 2.建立Converge缸内燃烧模型

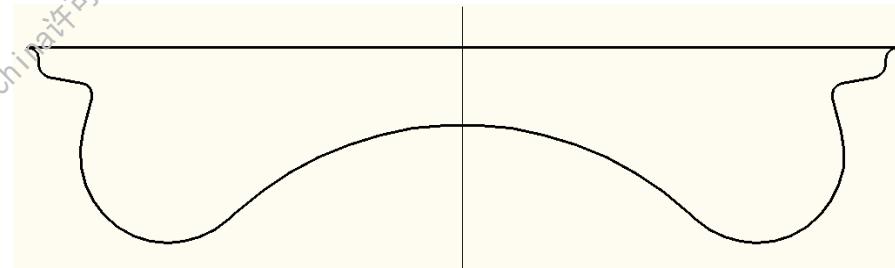


### 2.1 发动机参数

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NOx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

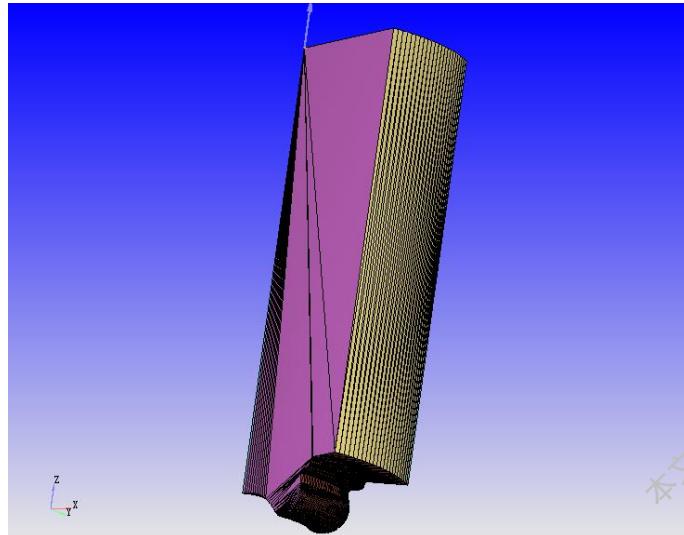
发动机基本参数



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<sub>7</sub>H<sub>16</sub>）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	Frossling Model
破碎模型	KH-RT Model
NO <sub>x</sub> 模型	Extended Zeldovich NO <sub>x</sub> Model
Soot 模型	Hiroyasu Soot Model

计算模型说明

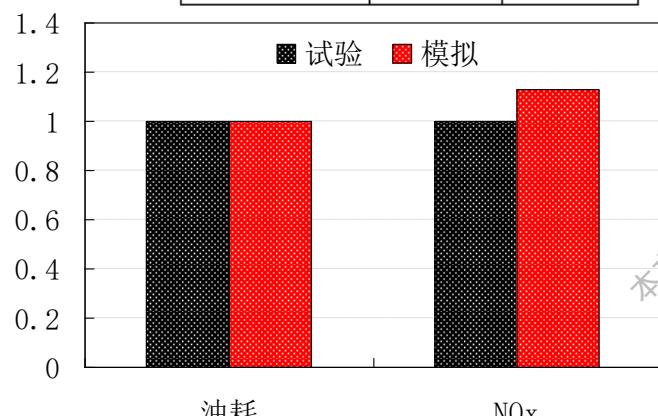
[1] 刘耀东，《基础燃料（PRF）及汽油表征燃料（TRF）化学反应动力学骨架模型的研究》，2013

### 2.3 模型标定

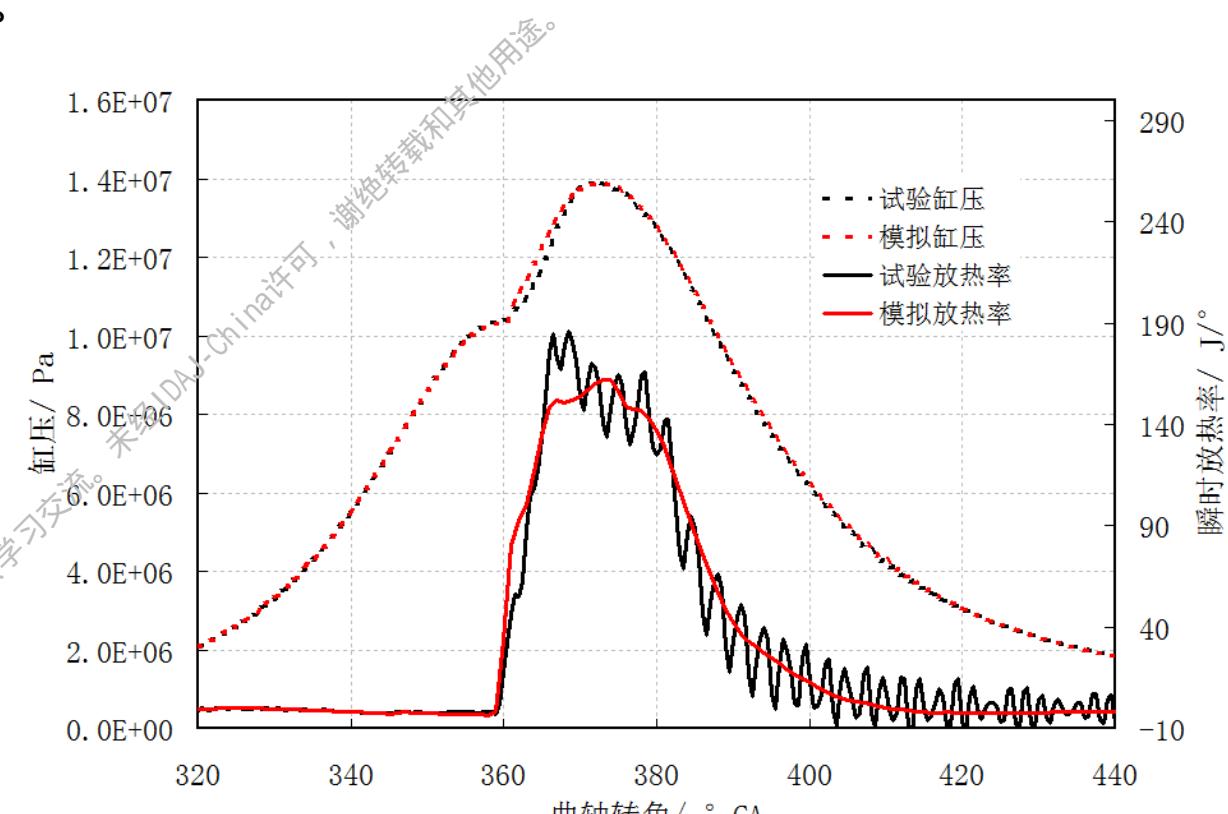
根据原机燃烧室台架试验数据进行模型标定，模拟计算得到的缸压、瞬时放热率、油耗及排放结果与试验结果偏差小于5%。

工况说明

名称	单位	数值
转速	r/min	1465
负荷	%	100
喷油压力	bar	1250
空燃比	-	18.88



油耗排放对比



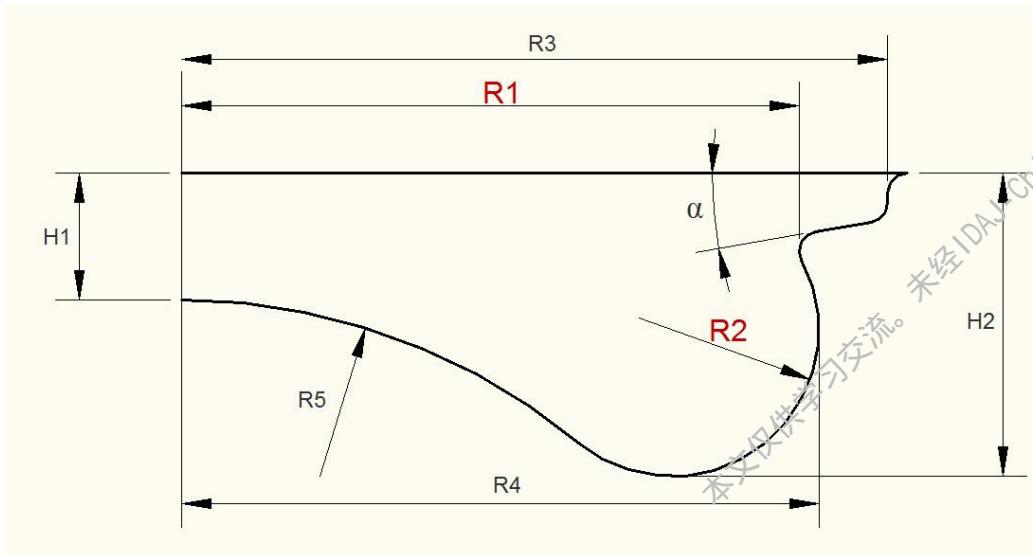
缸压放热率对比

### 3.搭建ModeFrontier优化模型



#### 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<sub>x</sub>），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

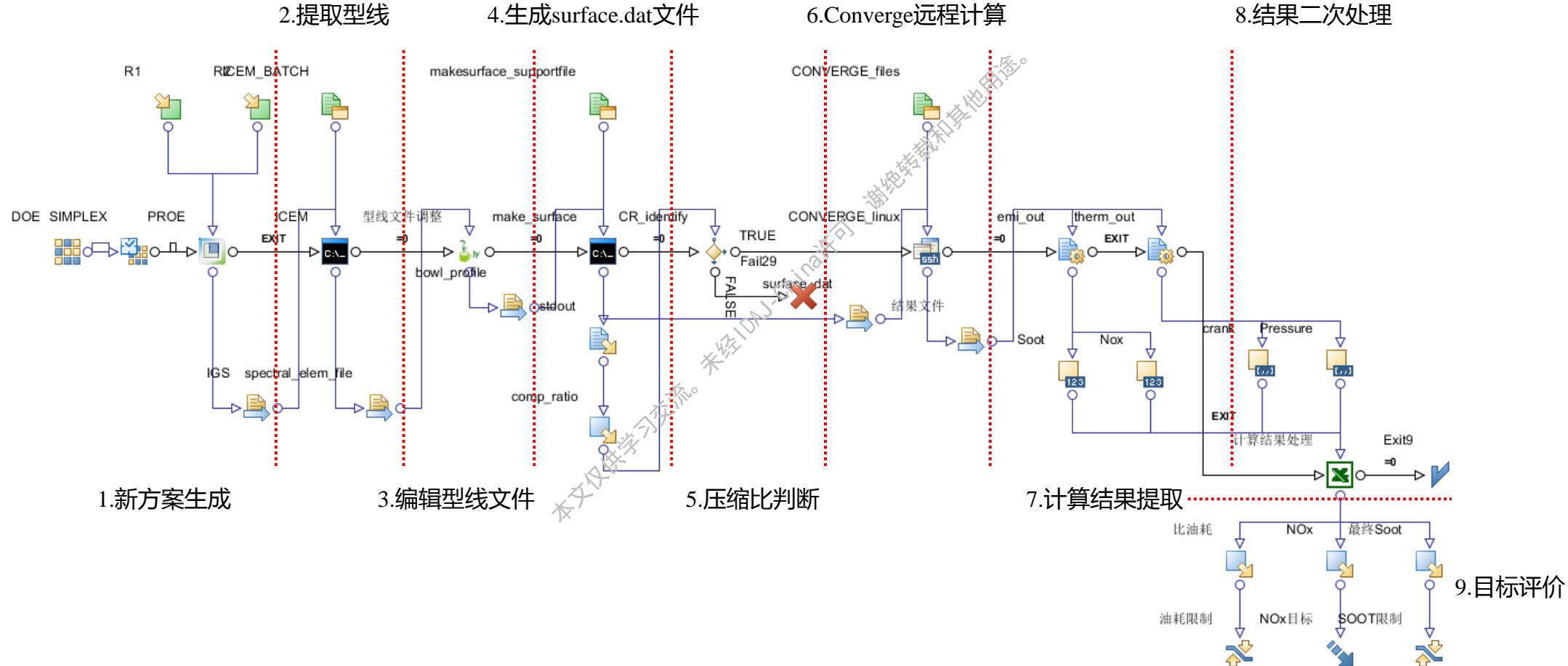
压缩比限制范围： 16.9 ~ 18.1

目标变量	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 <sub>x</sub>	最小值

# 3.搭建ModeFrontier优化模型



## 3.2 ModeFrontier优化模型的建立



## 4. 优化结果分析

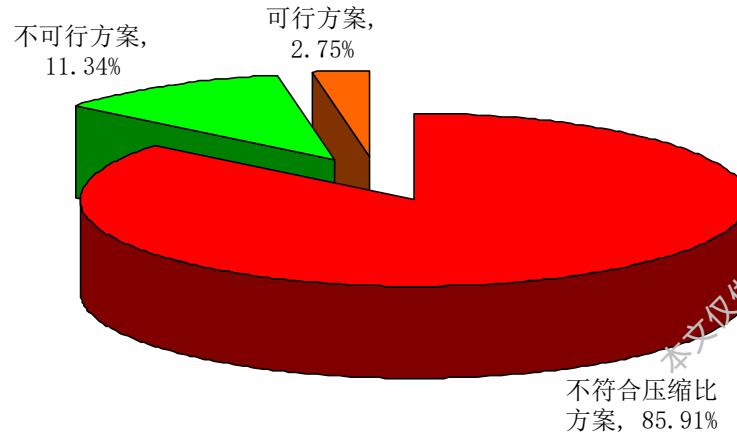


DOE方案数 : 561

有效方案数 : 291

符合压缩比方案数 : 41

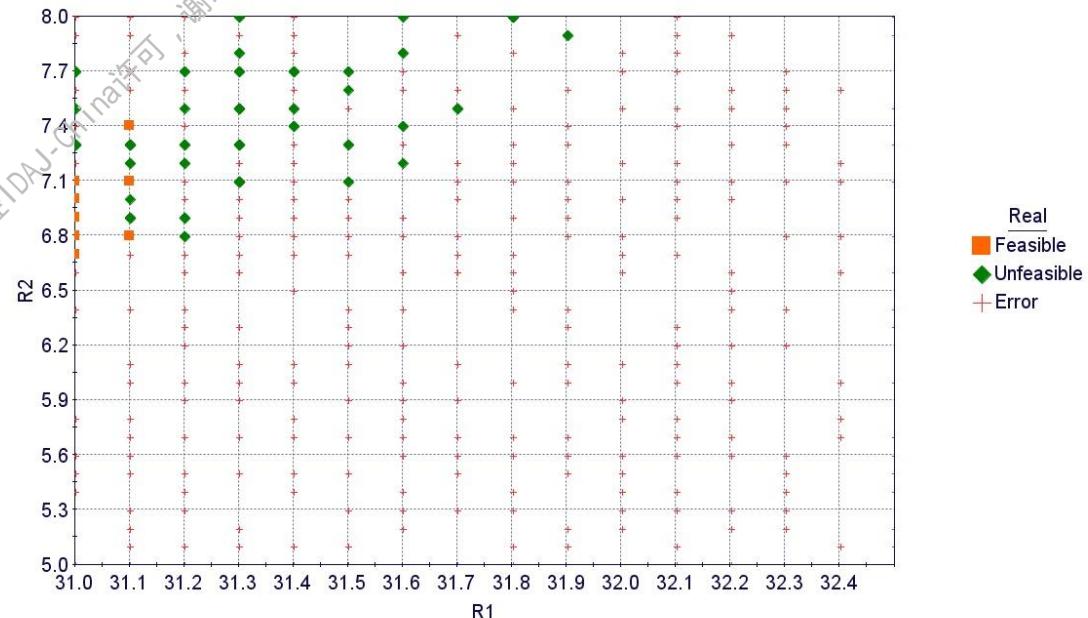
可行方案数 : 8



计算服务器CPU数 : 60

耗费时间 : 90小时

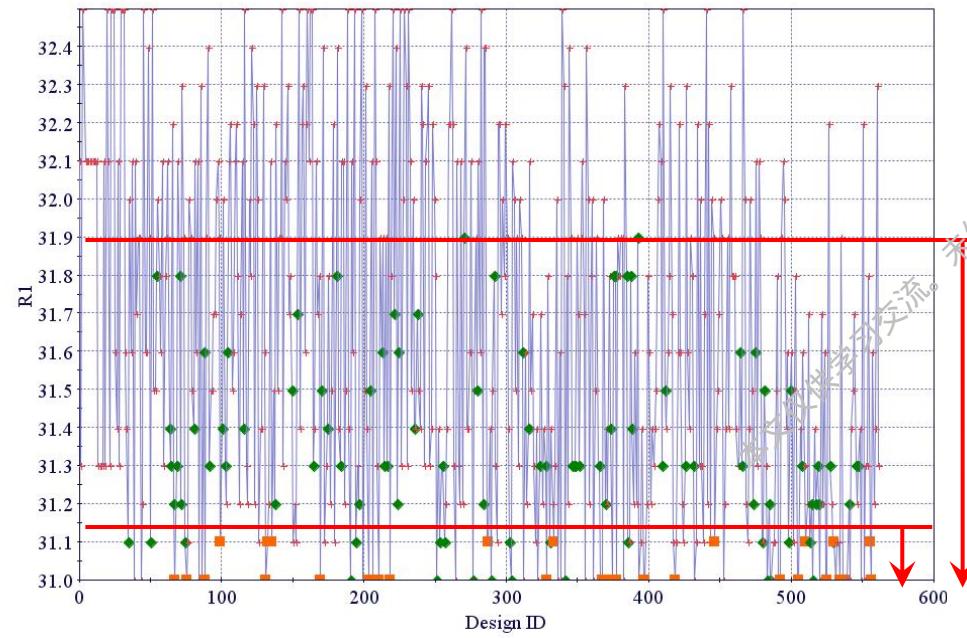
Scatter - R1 vs. R2 on Designs Table



## 4.1 输入变量变化历程

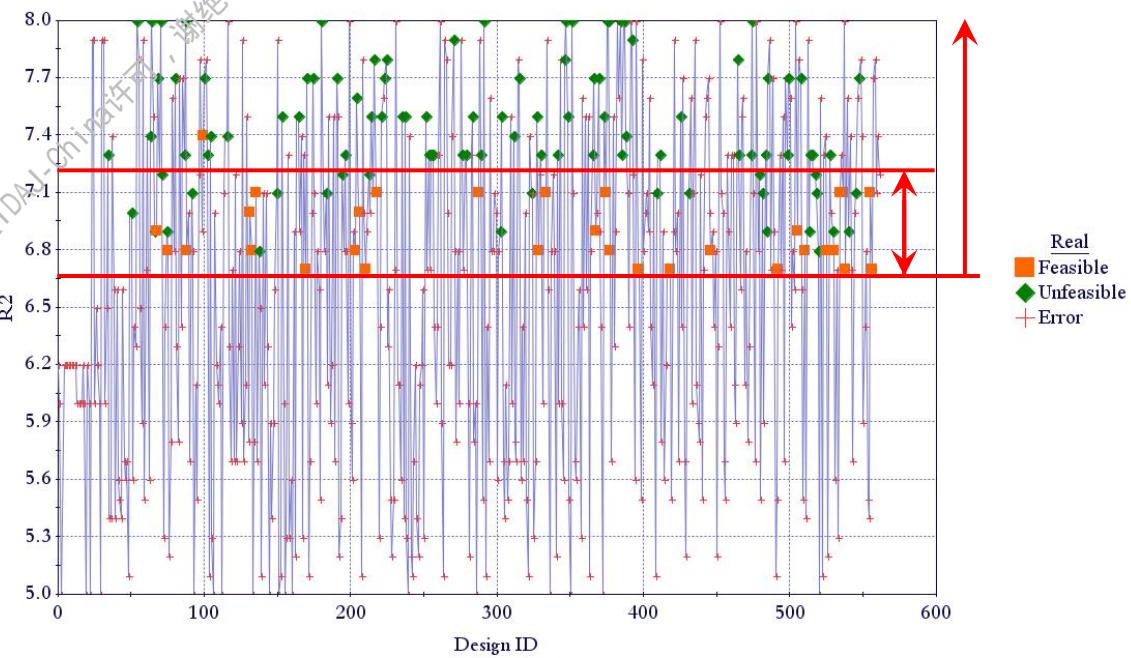
在限制压缩比情况下，较小的缩口半径是新燃烧室方案向低油耗、低碳烟目标发展的方向，而对于凹坑半径来说有最佳取值范围，过大或过小都会产生不利影响。

History - R1 on Designs Table



缩口半径R1变化历程

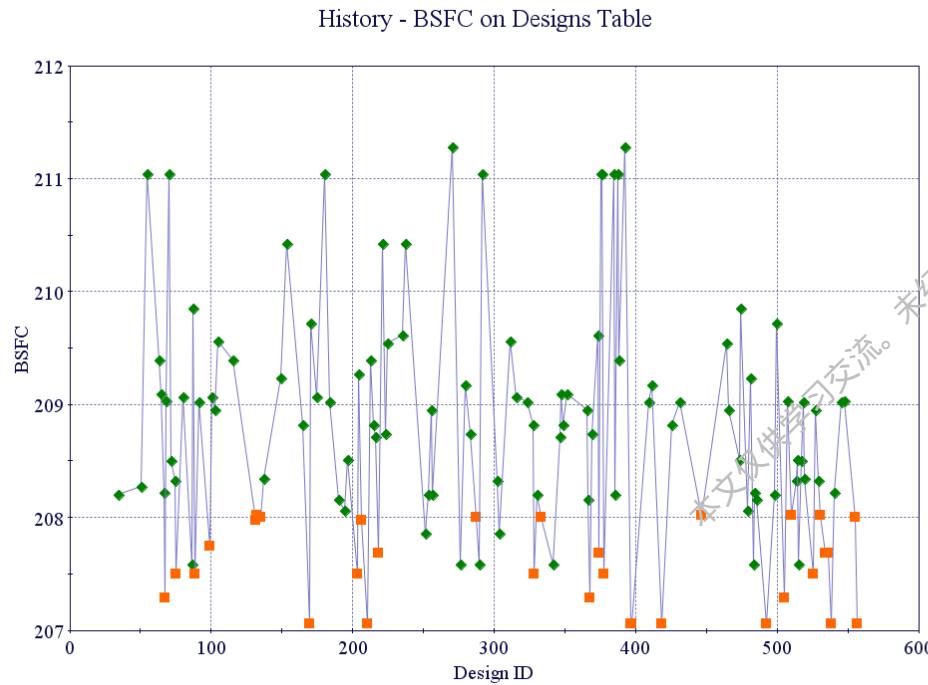
History - R2 on Designs Table



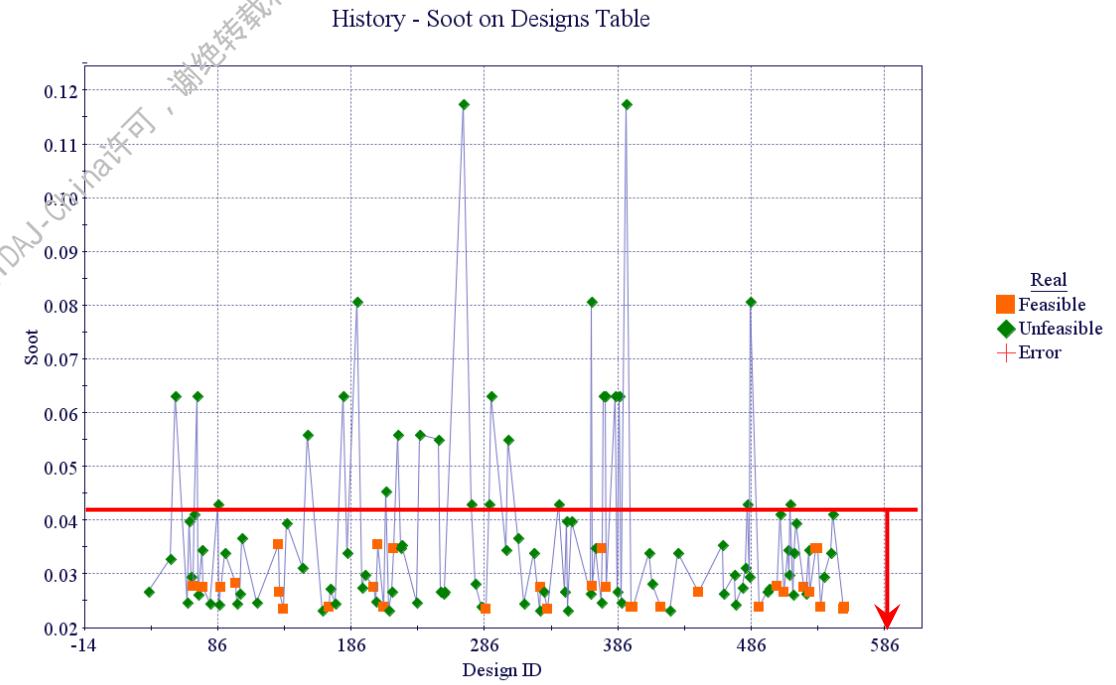
凹坑半径R2变化历程

## 4.2 目标变量变化历程

油耗变化范围 $207\sim211.5\text{g/kw h}$ ，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。



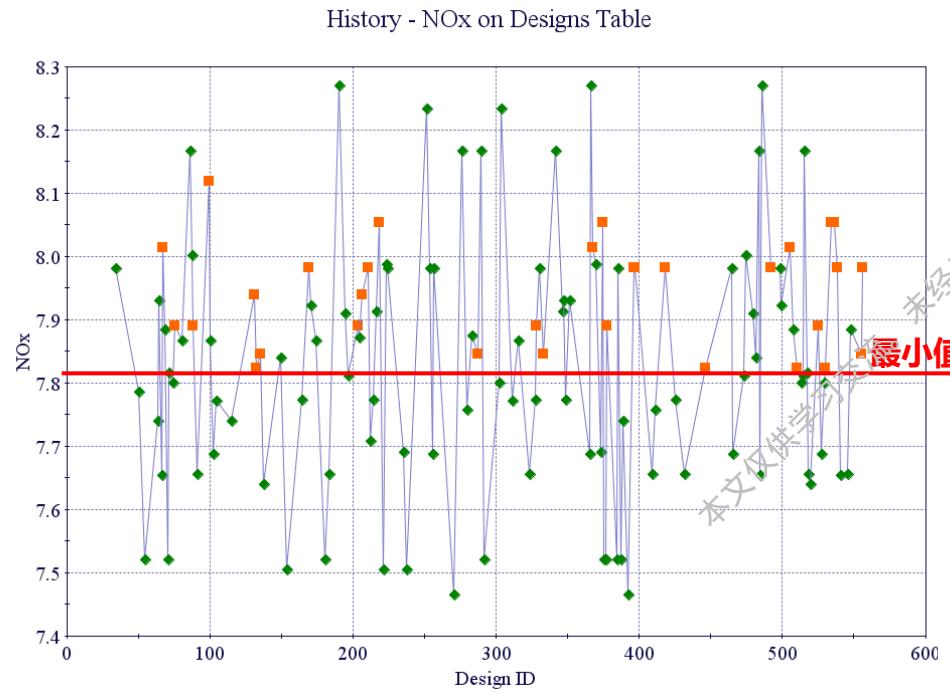
油耗 ( BSFC ) 变化历程



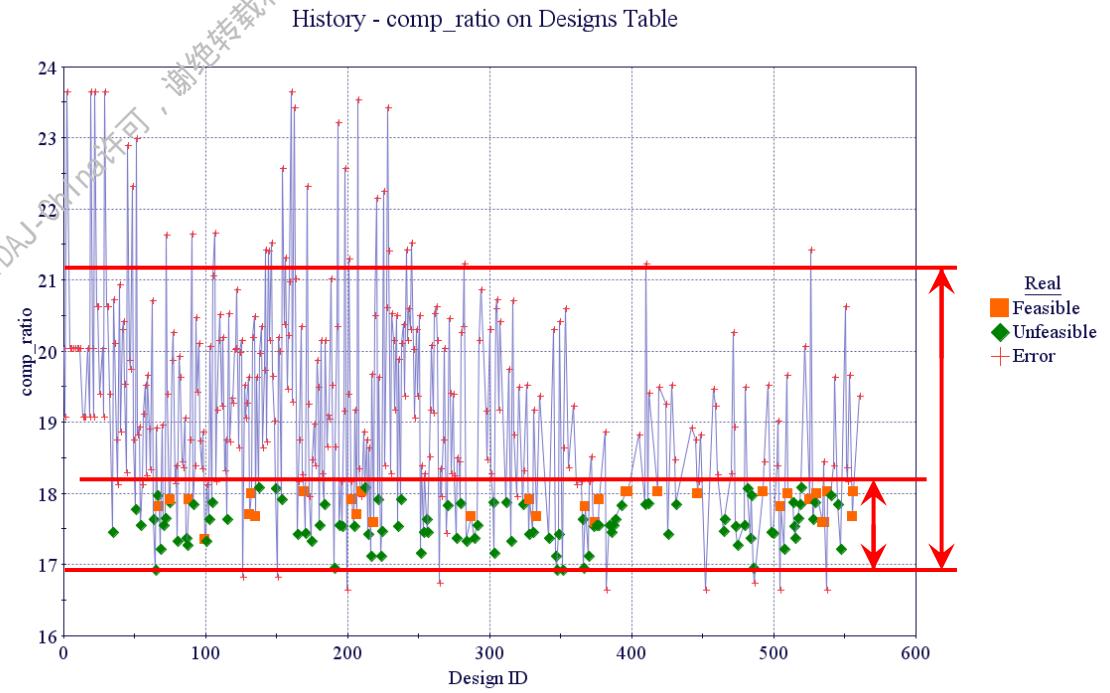
碳烟 ( Soot ) 变化历程

## 4.2 目标变量历程

氮氧化合物 ( NOx ) 主要集中在7.4~8.3g/kw h之间，满足油耗和碳烟要求下NOx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 ( NOx ) 变化历程



压缩比变化历程

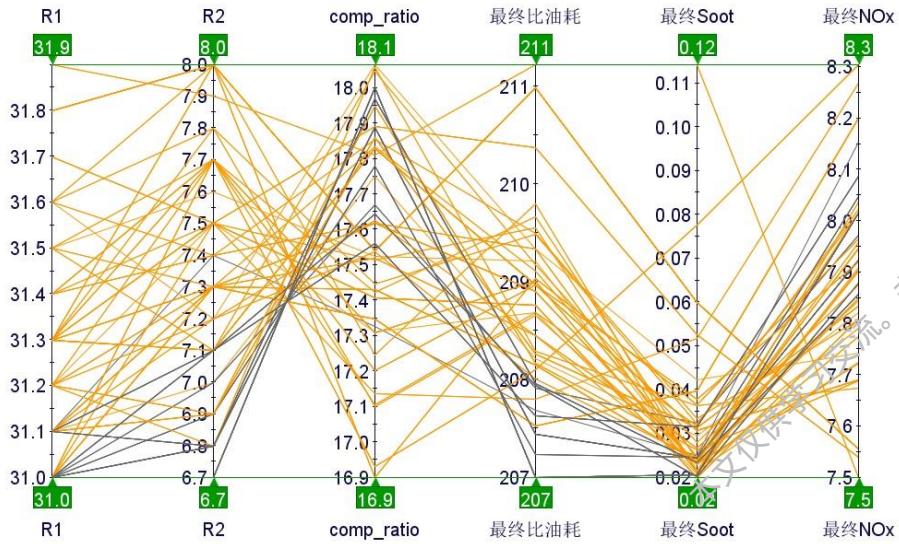
# 4.优化结果分析



## 4.3 最优方案的选择

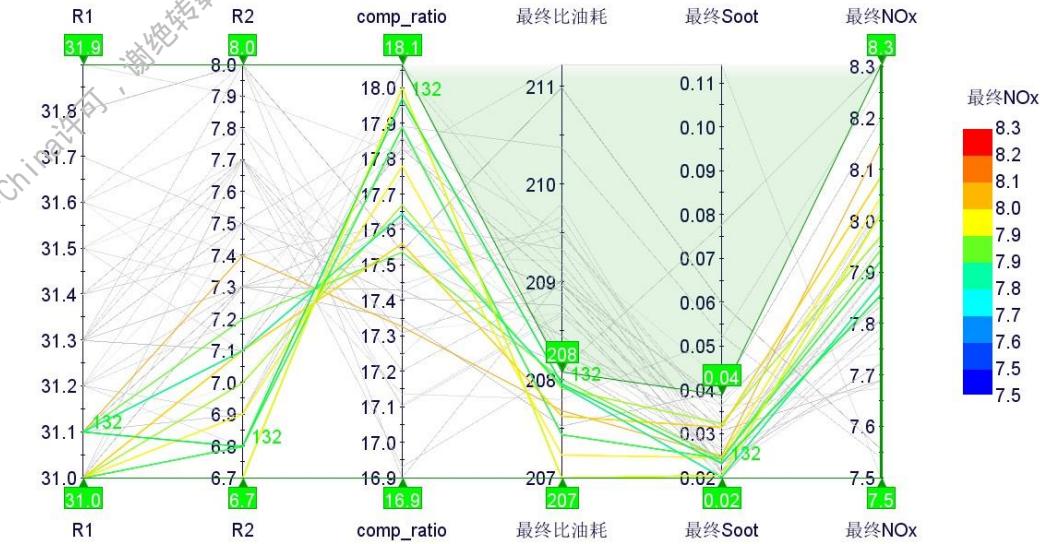
满足油耗和碳烟限制条件下，氮氧化合物（NOx）最低的方案为132号，即R1=31.1mm、R2=6.8mm，该方案压缩比为18，NOx降低1.4%，达到优化目标。

Parallel Coordinates - { R1 R2 comp\_ratio 最终比油耗 最终Soot 最终NOx} on Designs Table



全部方案对比

Parallel Coordinates - { R1 R2 comp\_ratio 比油耗 Soot NOx} on Designs Table



可行方案对比

原方案

最优方案

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NOx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

本文仅供学习交流。未经IDAJ-China许可，  
禁止转载及任何商业用途。

