



柴油微引燃天然气发动机 燃烧室优化设计

王 斌，李 铁，葛琳琳，周昕毅

海洋工程国家重点实验室

2016年11月23号



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



1 研究背景

2 基于定容燃烧弹的喷雾模型标定

3 耦合详细反应机理的三维CFD仿真建模

4 基于多目标NSGA-II算法的燃烧室形状优化

5 优化结果分析

6 结论

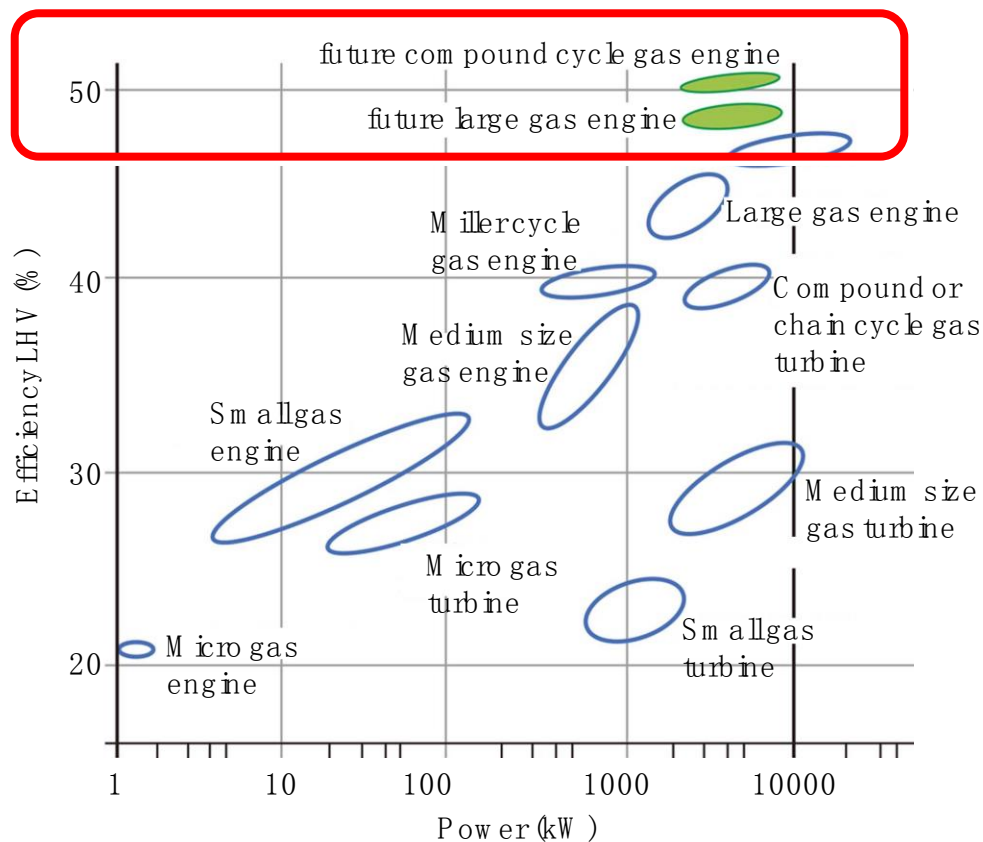


研究背景

天然气稀薄燃烧方式是船舶动力和发电机组等应用领域
实现高效低污染燃烧的新探索！

亟待解决的主要
科学问题

- CO/HC（主要是 CH_4 ）排放较高
- 高效率区域的燃烧不稳定问题



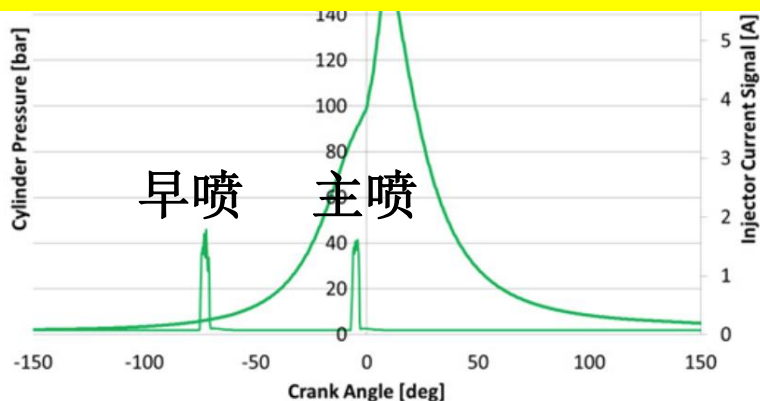
高效稀薄燃气发动机 - 研究现状



点火策略



传统的柴油机燃烧室形状未必适合天然气燃烧，因此有必要对天然气发动机专用燃烧室形状进行优化设计研究，以进一步提高天然气发动机的热效率、降低**CO/HC**等排放。

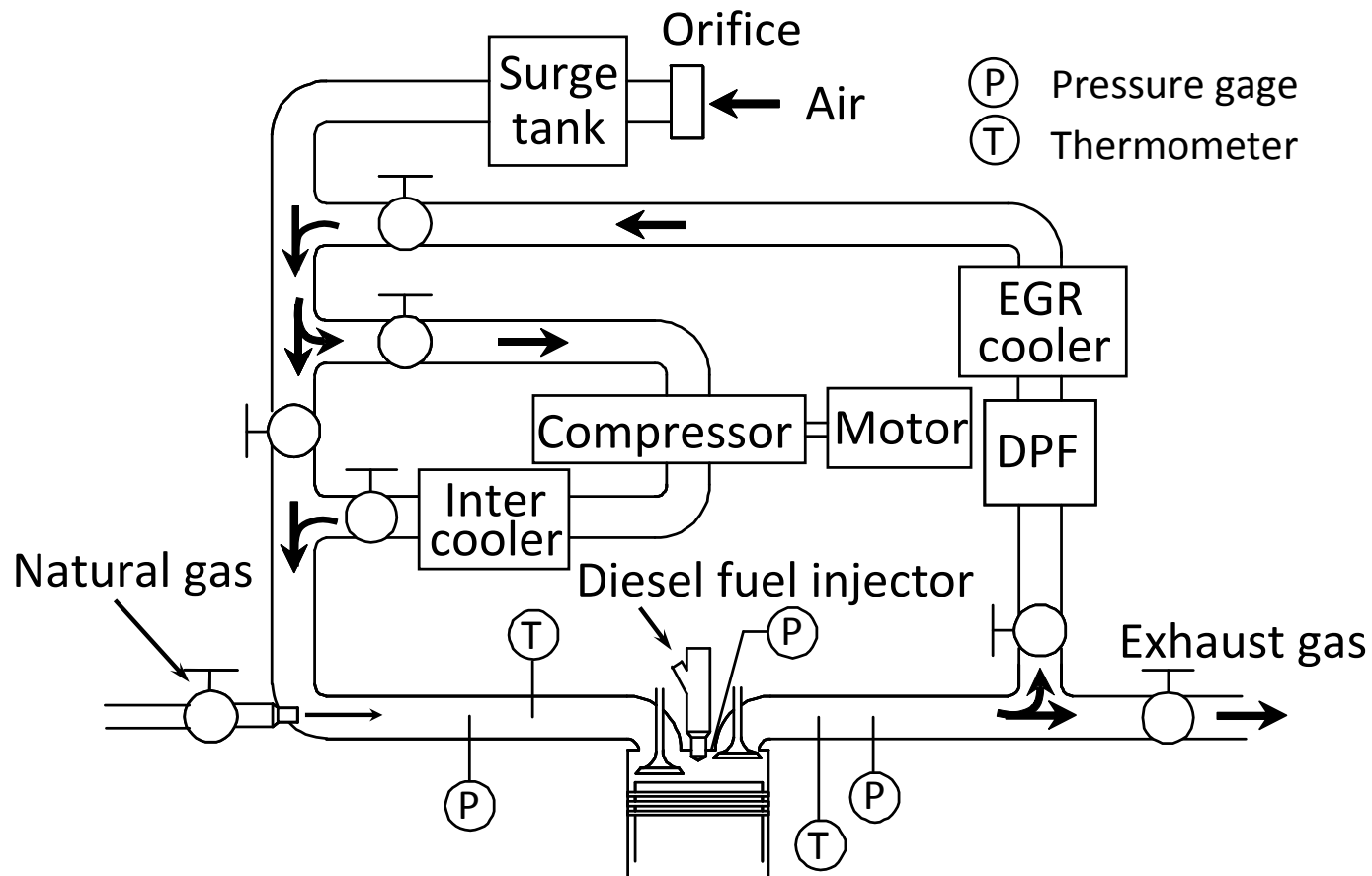


- HC排放减少 > 60%
- NO_x排放减少 > 60%
- 不使用SCR实现Euro VI NO_x排放

Source: Zhao H.. 2015, Future Powertrains

Conference

发动机基本参数



采用单缸/四冲程压燃式发动机，进气道喷射天然气，缸内直喷微量柴油

发动机基本参数



上海交通大学

国际合作项目

北海道大学

- CFD仿真建模与燃烧机理研究
- 燃烧室设计优化与性能提升

- 发动机的改造
- 台架实验：性能开发与排放测试

发动机基本参数

参 数	数 值
缸径	98 mm
冲程	110 mm
排量	830 cm ³
压缩比	16.5
发动机转速	1200 rpm
进气压力	1.6 bar
IMEP	8 bar
天然气当量比	0.51
柴油占总能量输入比	7.9%
进气门关闭时刻	-140° CA ATDC
排气门开启时刻	150° CA ATDC

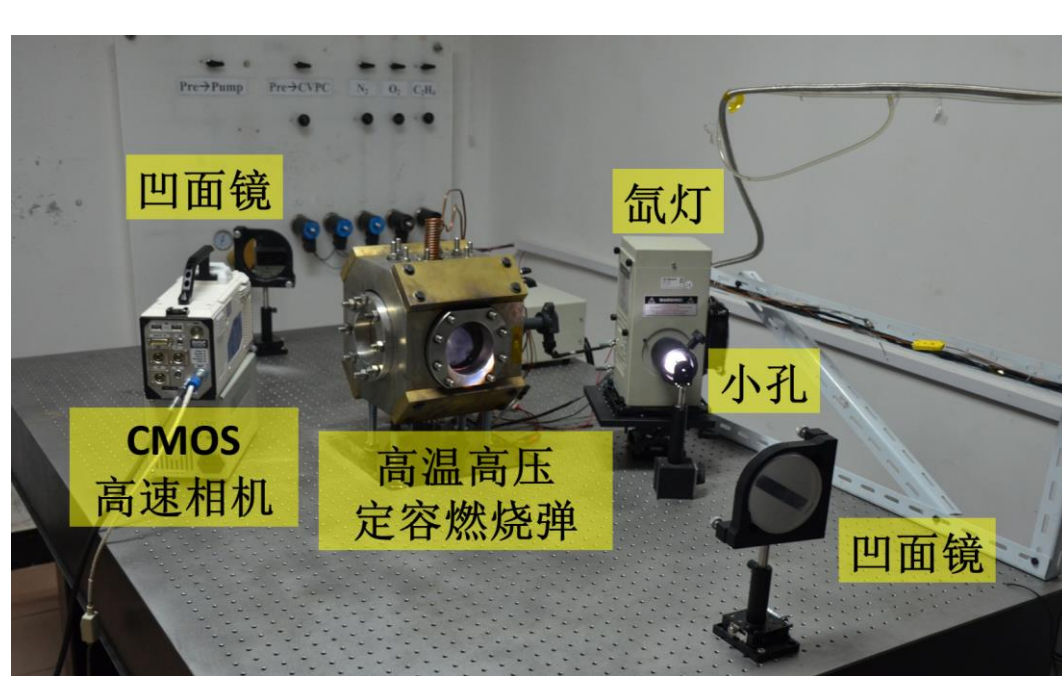
柴油喷油器基本参数

参 数	数 值
喷油方式	高压共轨
喷油压力	120 MPa
柴油喷射量	4 mm ³ /cycle
喷油孔数	9
喷孔直径	0.16 mm
喷孔间夹角	152°

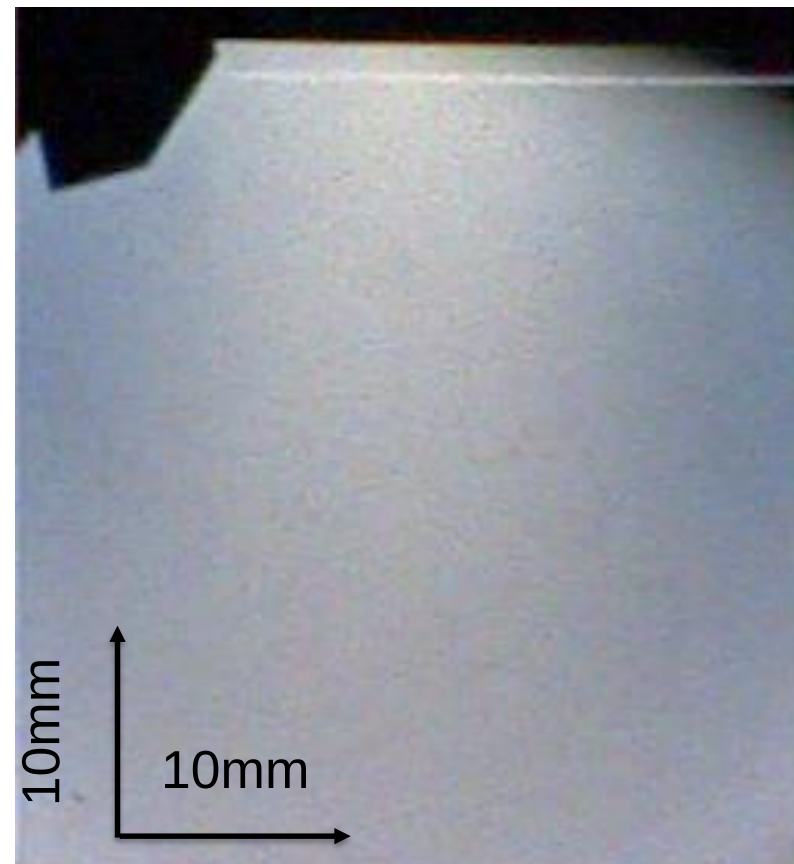
喷雾模型标定 - 喷雾贯穿距测试



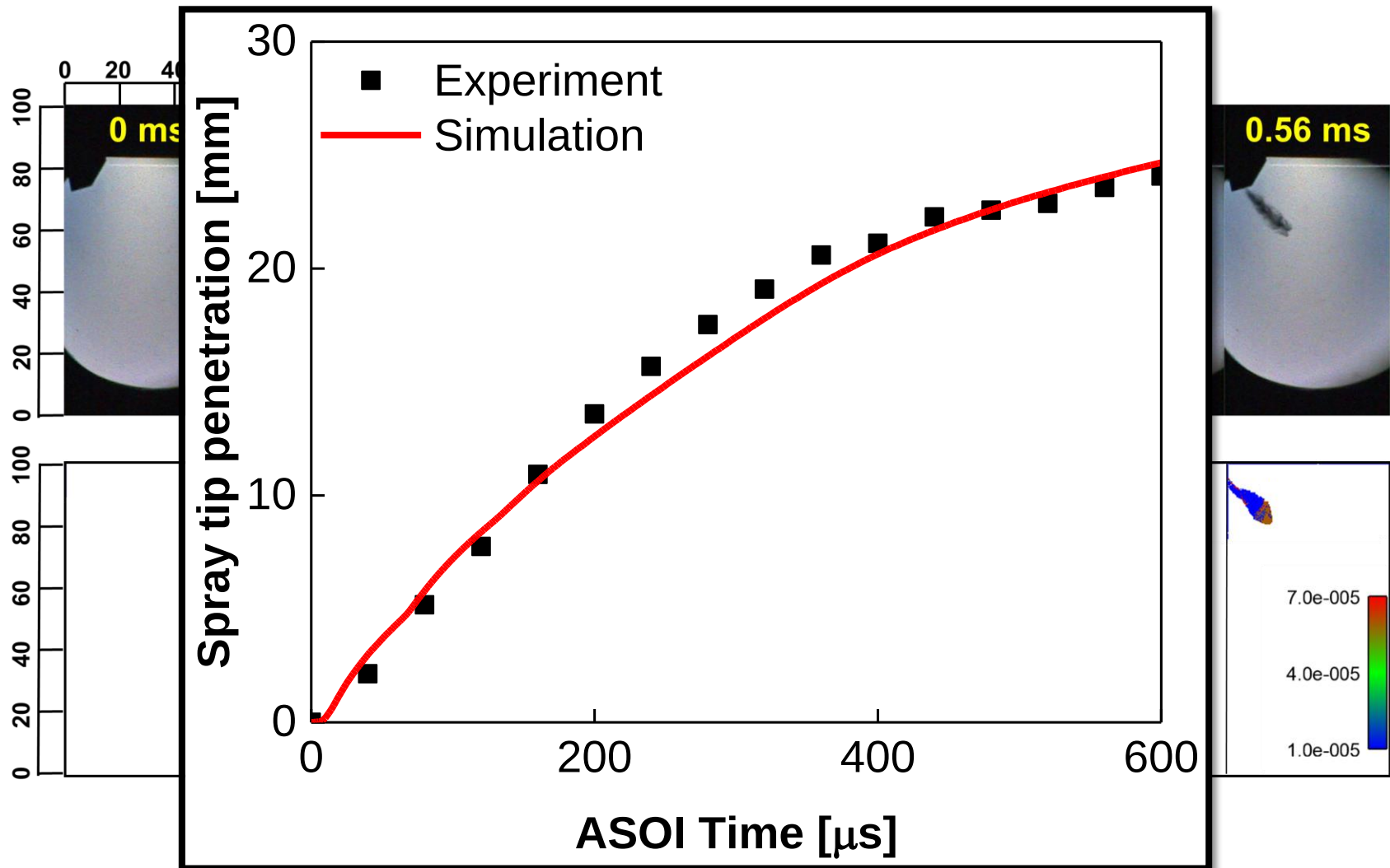
定容弹内充入 N_2 以形成 20 kg/m^3 密度的环境氛围，
采用阴影法对喷雾进行贯穿距测试。



阴影法拍摄柴油喷雾贯穿距
实验装置布局图



基于定容弹的喷雾模型的标定



基于详细耦合机理的CFD仿真建模



仿真过程从进气门关闭时刻开始 至 排气门开启时刻结束
IVC (-140° CA ATDC) 至 EVO (150° CA ATDC)

➤ 化学反应动力学机理模型

- ❑ SAGE详细瞬态化学反应求解器
- ❑ 天然气 - GRI-Mech 3.0机理
- ❑ 柴油 - 采用正庚烷替代
- ❑ 共涉及76种物质和464种反应

➤ 湍流模型: RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型

➤ 破碎模型: KH-RT混合模型

➤ NO_x排放模型: 扩展的Zeldovich模型

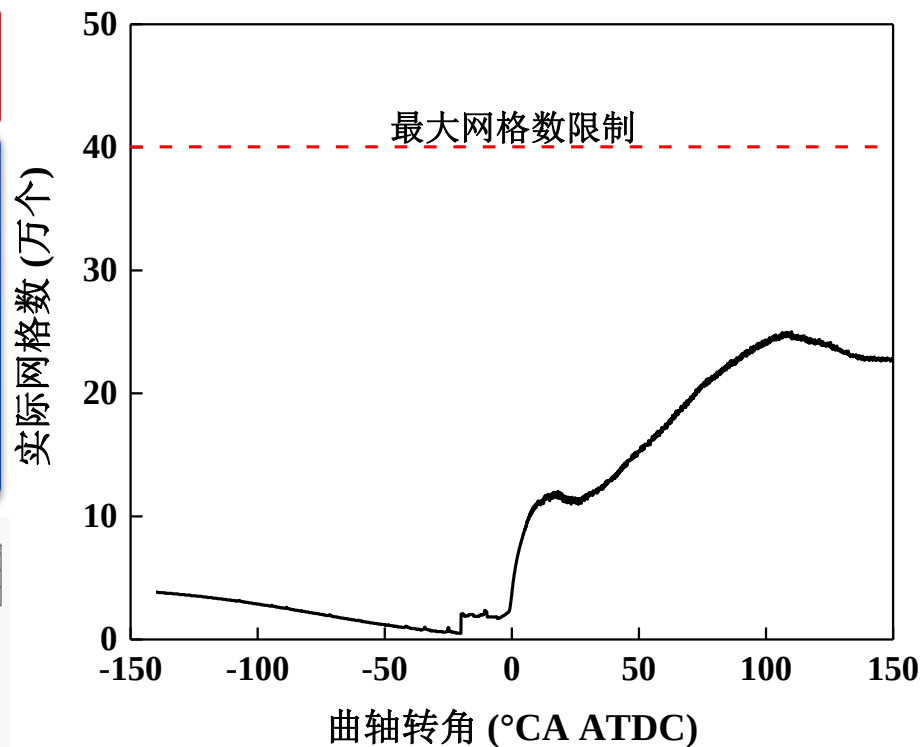
天然气成分表 (以体积记)

参 数	数 值
CH ₄	89.91%
C ₂ H ₆	4.42%
C ₃ H ₈	4.61%
n-C ₄ H ₁₀	0.51%
i-C ₄ H ₁₀	0.45%
i-C ₅ H ₁₂	0.03%
N ₂	0.07%

基于详细耦合机理的CFD仿真建模

减少计算负荷的方法

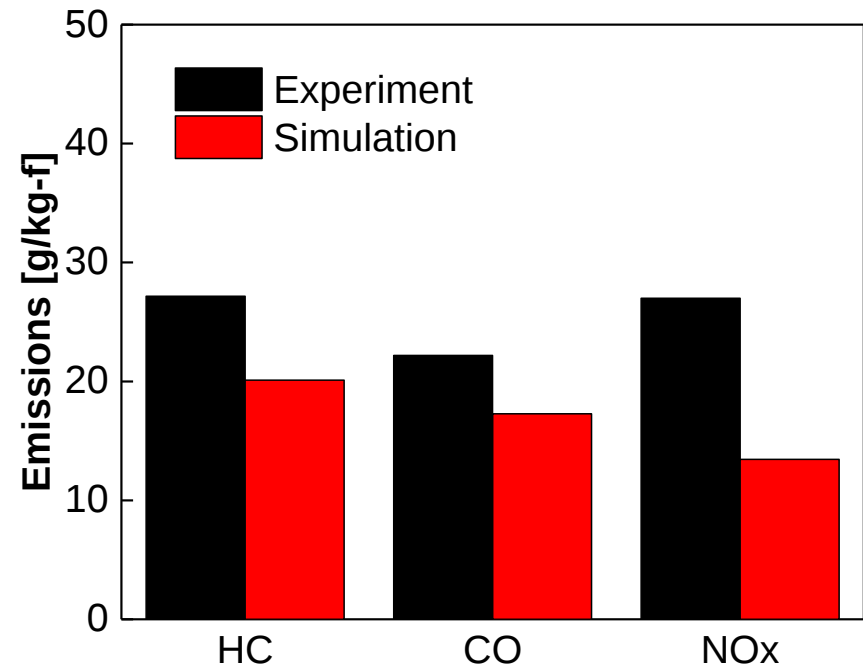
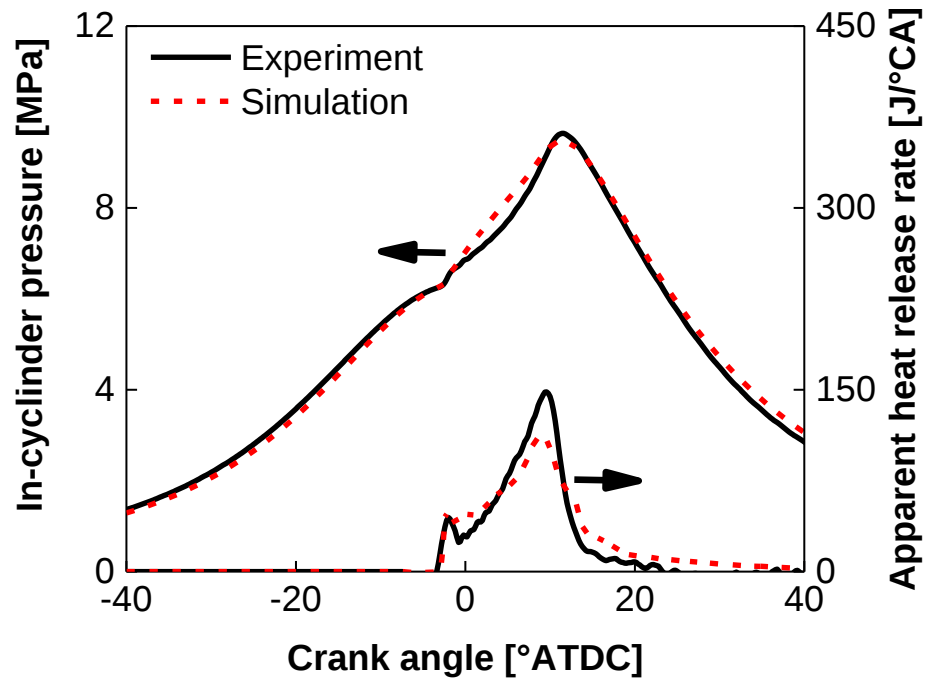
- 根据燃烧室形状的对称性，选取1/9进行仿真
- 采用AMR自适应网格划分算法，应对动网格等问题



实时网格数随曲轴转角的变化

网格划分：基础网格1.0mm，对速度梯度、温度梯度进行动态加密、喷孔处固定加密等

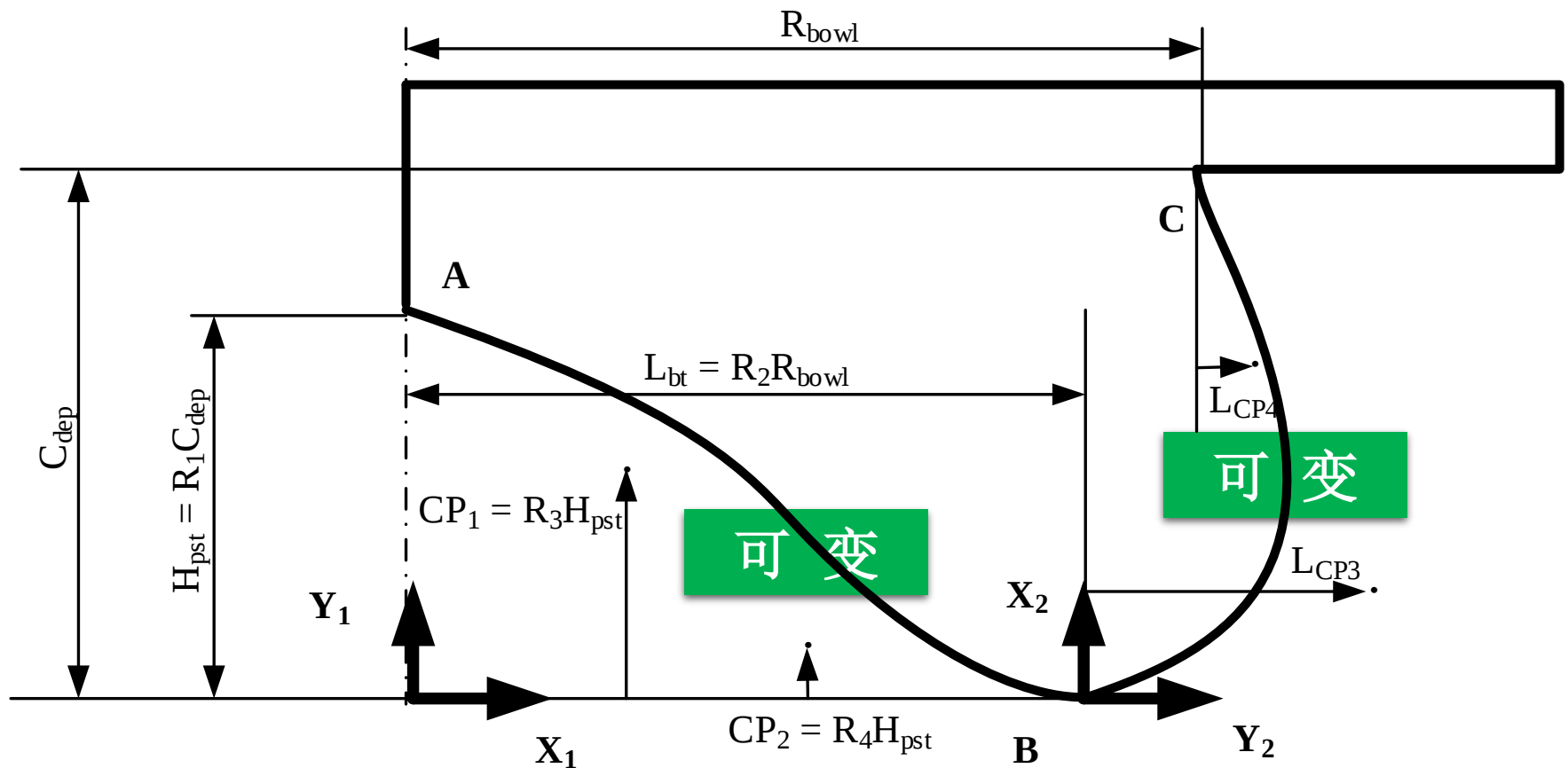
发动机仿真模型的标定结果



(IMEP=8.0 bar, $n=1200$ rpm, $V_{DF}=4.0$ mm³/cycle, $F_{NG}=0.513$)

仿真输出与实验测试结果较为一致，可以用于接下来的优化设计研究。

可变燃烧室形状的几何结构参数化建模



保持不变：燃烧室体积、缸径、冲程、余隙高度

基于Bézier曲线的几何构型参数化数学描述

Bézier曲线由**线段**与**节点**组成，节点是可拖动的支点，线段像可伸缩的皮筋。随着节点有规律地移动，曲线将产生皮筋伸引一样的变换。1962年，法国数学家Pierre Bézier第一个研究了这种矢量绘制曲线的方法，并给出了详细的计算公式，因此按照这样的公式绘制出来的曲线就用他的姓氏来命名是为贝塞尔曲线。

A-B段 曲线

$$\begin{cases} Y_1(t) = (1-t)^3 H_{pst} + 3(1-t)^2 t CP_1 + 3(1-t)t^2 CP_2 \\ X_1(t) = t \times L_{bt} \end{cases}$$

B-C段 曲线

$$\begin{cases} Y_2(t) = 3(1-t)^2 t L_{CP3} + 3(1-t)t^2 L_{CP4} + t^3 (R_{bowl} - L_{bt}) \\ X_2(t) = t \times C_{dep} \end{cases} \quad t \in [0, 1]$$

基于Bézier曲线的几何构型参数化数学描述

Bézier曲线由**线段**与**节点**组成，节点是可拖动的支点，线段像可伸缩的皮筋。随着节点有规律地移动，曲线将产生皮筋伸引一样的变换。1962年，法国数学家Pierre Bézier第一个研究了这种矢量绘制曲线的方法，并给出了详细的计算公式，因此按照这样的公式绘制出来的曲线就用他的姓氏来命名是为贝塞尔曲线。

A-B段 曲线

$$\begin{cases} Y_1(t) = (1-t)^3 H_{pst} + 3(1-t)^2 t CP_1 + 3(1-t)t^2 CP_2 \\ X_1(t) = t \times L_{bt} \end{cases}$$

B-C段 曲线

$$\begin{cases} Y_2(t) = 3(1-t)^2 t L_{CP3} + 3(1-t)t^2 L_{CP4} + t^3 (R_{bowl} - L_{bt}) \\ X_2(t) = t \times C_{dep} \end{cases} \quad t \in [0, 1]$$

基于优化技术的燃烧室改进设计方法论



提炼优化问题

优化目标

最小化：HC和CO排放

约束条件

热效率： $\eta_i \geq \eta_{i\text{baseline}}$

NO_x排放： $\text{NO}_x \leq \text{NO}_{x\text{baseline}}$

最大压力升高率：
 $(dP/d\theta)_{\max} \leq 1.2 \text{ MPa/}^\circ\text{CA}$

优化变量

C_{dep}	14 - 25 mm
R_1	0.3 - 0.7
R_2	0.5 - 0.8
L_{CP3}	10 - 20 mm
L_{CP4}	-10 - 10 mm
喷油时刻	-15 - -5 ° CA ATDC
喷孔夹角	140° - 170°

执行优化操作

详细建模

↓ CONVERGE

实验设计

↓ 拉丁超立方

近似建模

↓ RSM等

优化迭代

↓ MOGA等

结果输出

分析优化结果

优化变量



燃烧室结构



发动机性能



缸内工作过程

基于优化的拉丁超立方采样法的实验设计

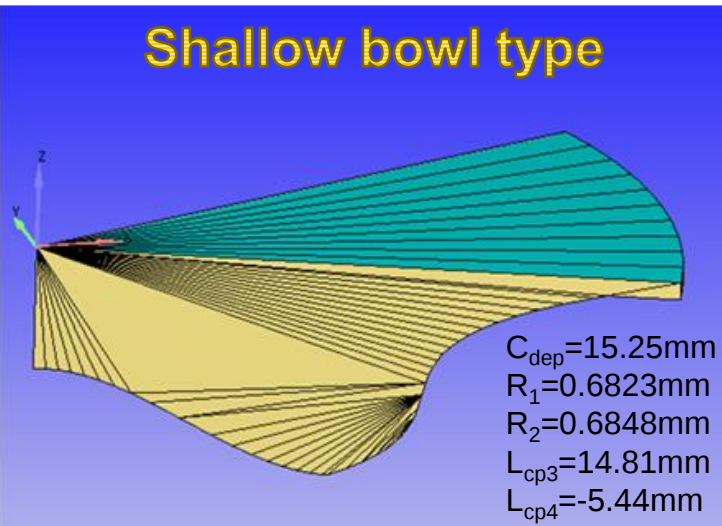
- 采用OLHS法进行设计变量的实验设计，有助于各个因子在更高阶水平上分布的更加均匀
- 设计变量的样本点数总共为80个

所涉及到的设计变量及其变化范围

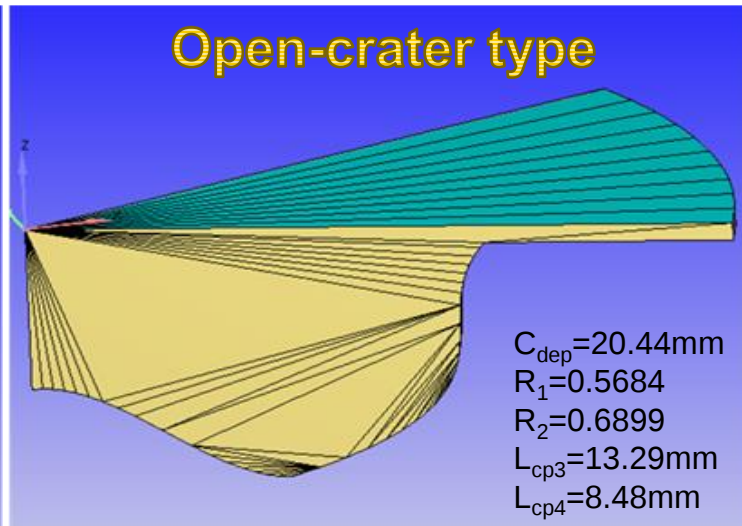
设计变量	取值范围
C_{dep}	14 - 25 mm
R_1	0.3 - 0.7
R_2	0.5 - 0.8
L_{CP3}	10 - 20 mm
L_{CP4}	-10 - 10 mm
喷油时刻	$-15^\circ - -5^\circ$ CAATDC
喷孔夹角	$140^\circ - 170^\circ$

基于优化的拉丁超立方采样法的实验设计

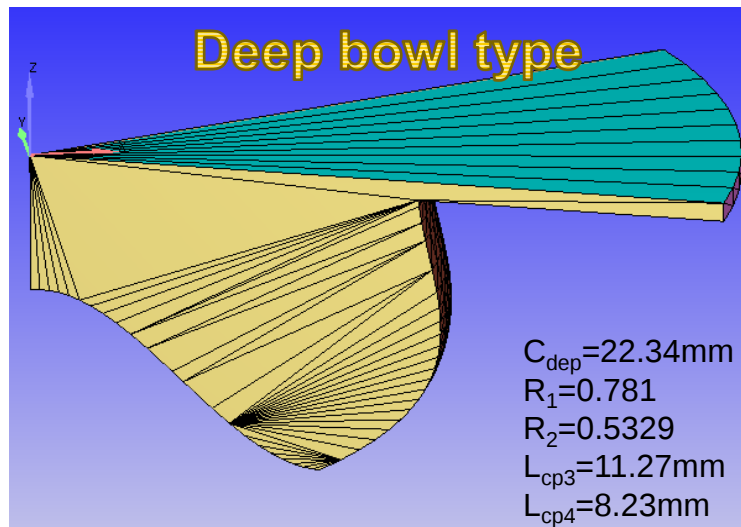
Shallow bowl type



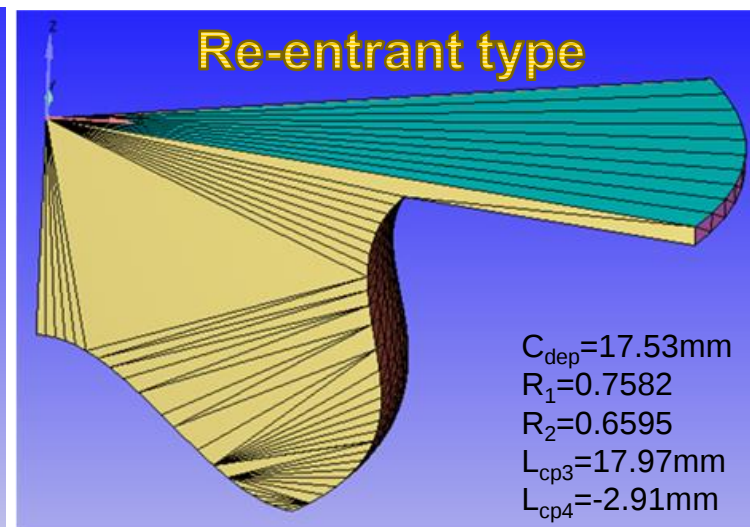
Open-crater type



Deep bowl type



Re-entrant type



近似模型建立及其精确度校核



基于实验设计所获得的80个样本点，本文分别采用 **Kriging方法**、**响应面方法**和**人工神经网络法**建立近似模型，并验证了近似模型的准确性。

近似模型	Kriging		RSM		ANN	
	RMSE	MAX	RMSE	MAX	RMSE	MAX
指示热效率 η_i (%)	0.120	0.203	0.342	0.650	0.210	0.419
HC 排放 (g/kg-f)	0.197	0.215	0.410	0.722	0.307	0.805
CO 排放 (g/kg-f)	0.181	0.216	0.269	0.509	0.250	0.492
NOx 排放 (g/kg-f)	0.102	0.213	0.201	0.458	0.304	0.775

基于NSGA-II 多目标优化结果分析

优化公式

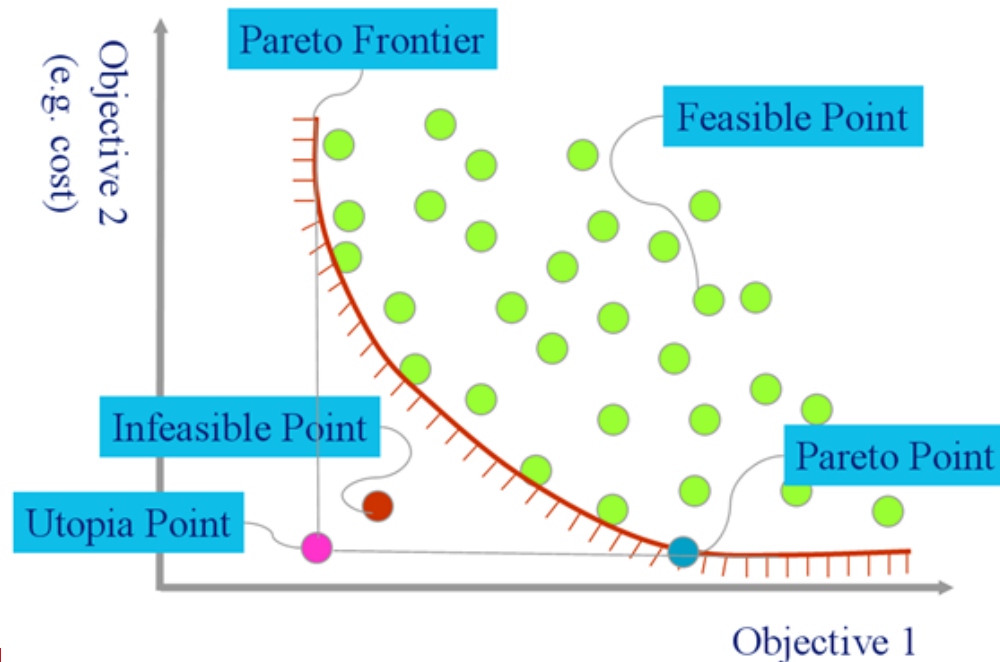
优化目标

Minimum HC and CO emissions

约束条件

$$\eta_i \geq \eta_{i\text{baseline}}, \text{NOx} \leq \text{NOx}_{\text{baseline}}, \left(\frac{dP}{d\theta} \right)_{\text{max}} \leq 1.2 \text{MPa}/^\circ\text{CA}$$

多目标优化与
Pareto解集



优化结果分析 - 优化方案的性能提升



	Item	Baseline	Optimum	Variation
优化目标	HC 排放 (g/kg-f)	16.38	7.13	-56.47 %
	CO 排放 (g/kg-f)	14.07	9.35	-33.55 %
约束条件	NO _x 排放 (g/kg-f)	10.96	10.82	-1.28 %
	指示热效率 (%)	42.77	43.31	+1.26 %
	最大压力升高率 (MPa/° CA)	1.17	1.19	+1.71 %

优化变量的结果分析

$C_{dep}=24.37$ mm

$R_1=0.6975$

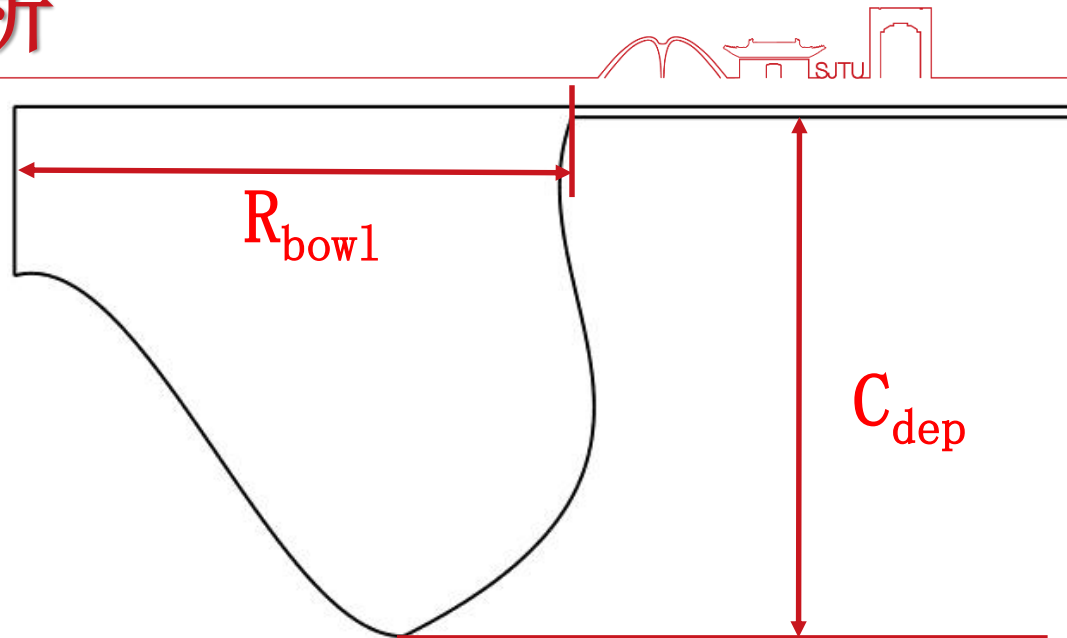
$R_2=0.6949$

$L_{cp3}=16.08$ mm

$L_{cp4}=4.68$ mm

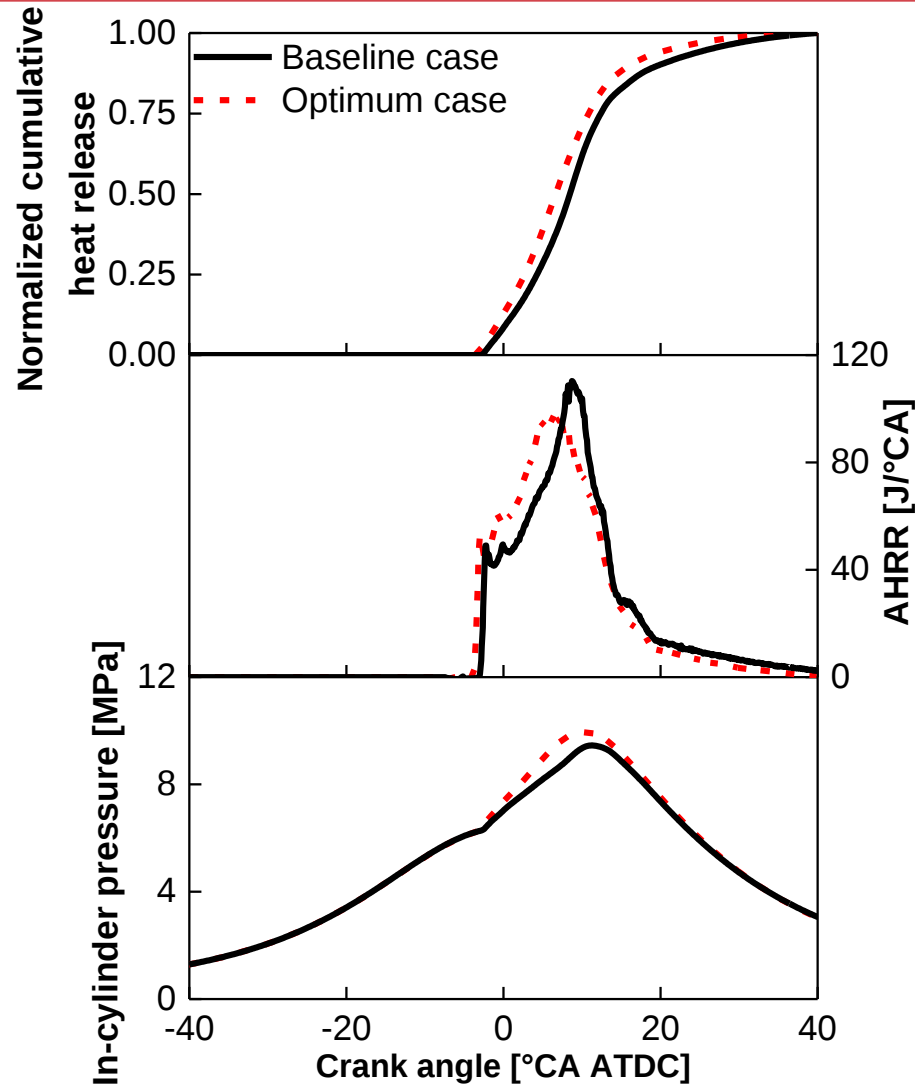
喷油时刻=-8.20 ° CA ATDC

喷孔夹角=157.47 °



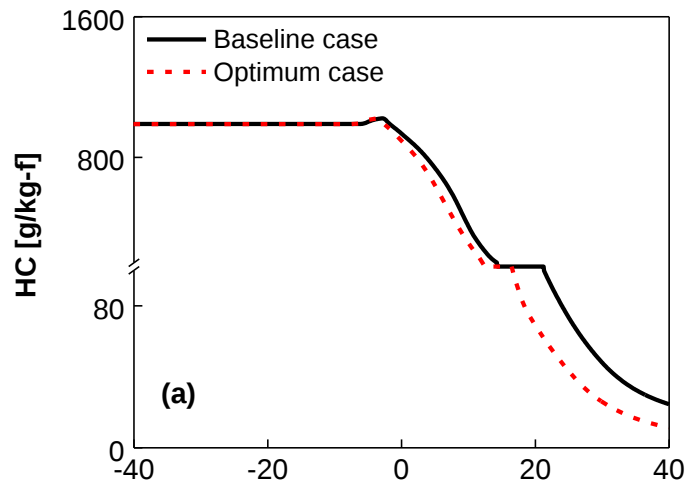
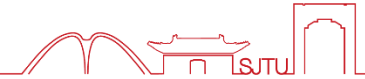
Item	Baseline	Optimum	Variation
C_{dep} (mm)	16.70	24.37	45.93 %
R_{bowl} (mm)	27.70 mm	25.87 mm	-11.06 %
喷油时刻 (° CA ATDC)	-7.30	-8.20	12.33 %
喷孔间夹角 (°)	152	157.47	3.60 %

优化前后燃烧性能的变化

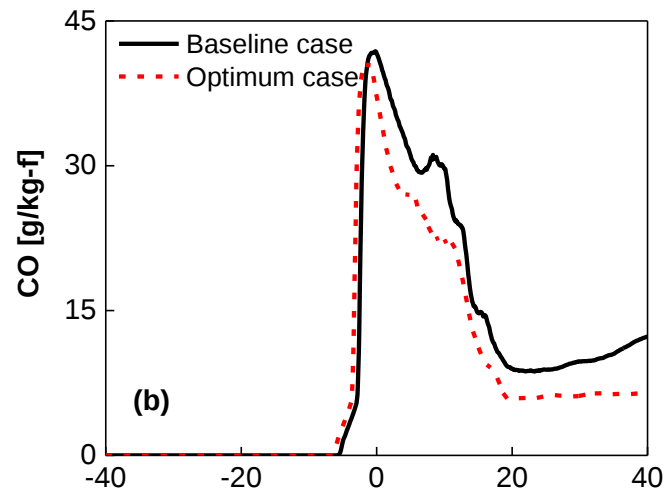


- 优化后，燃烧相位略微提前：
 - Baseline: 8.50 ° CA ATDC@CA50
 - Optimum: 6.65 ° CA ATDC@CA50
- 优化后的燃烧室面容比较小，使得热传导损失减少，有助于燃油经济性改善；
- 虽然表观瞬时放热率峰值下降了12.49%，但缸内最大压力有少许提升，这意味着发动机的热效率没有恶化。

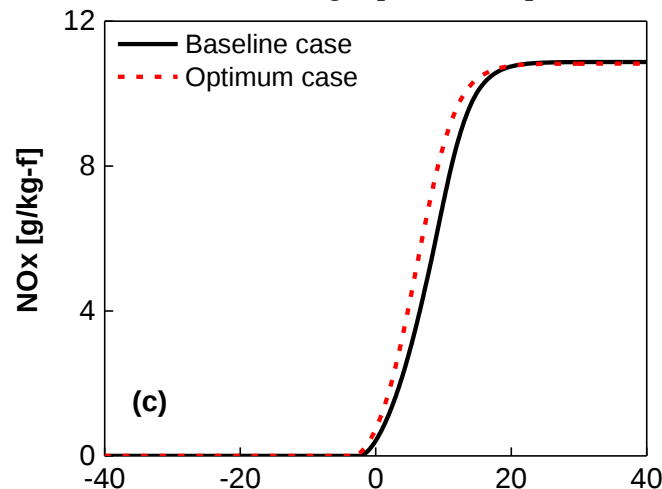
优化前后排放性能的变化



Crank angle [°CA ATDC]



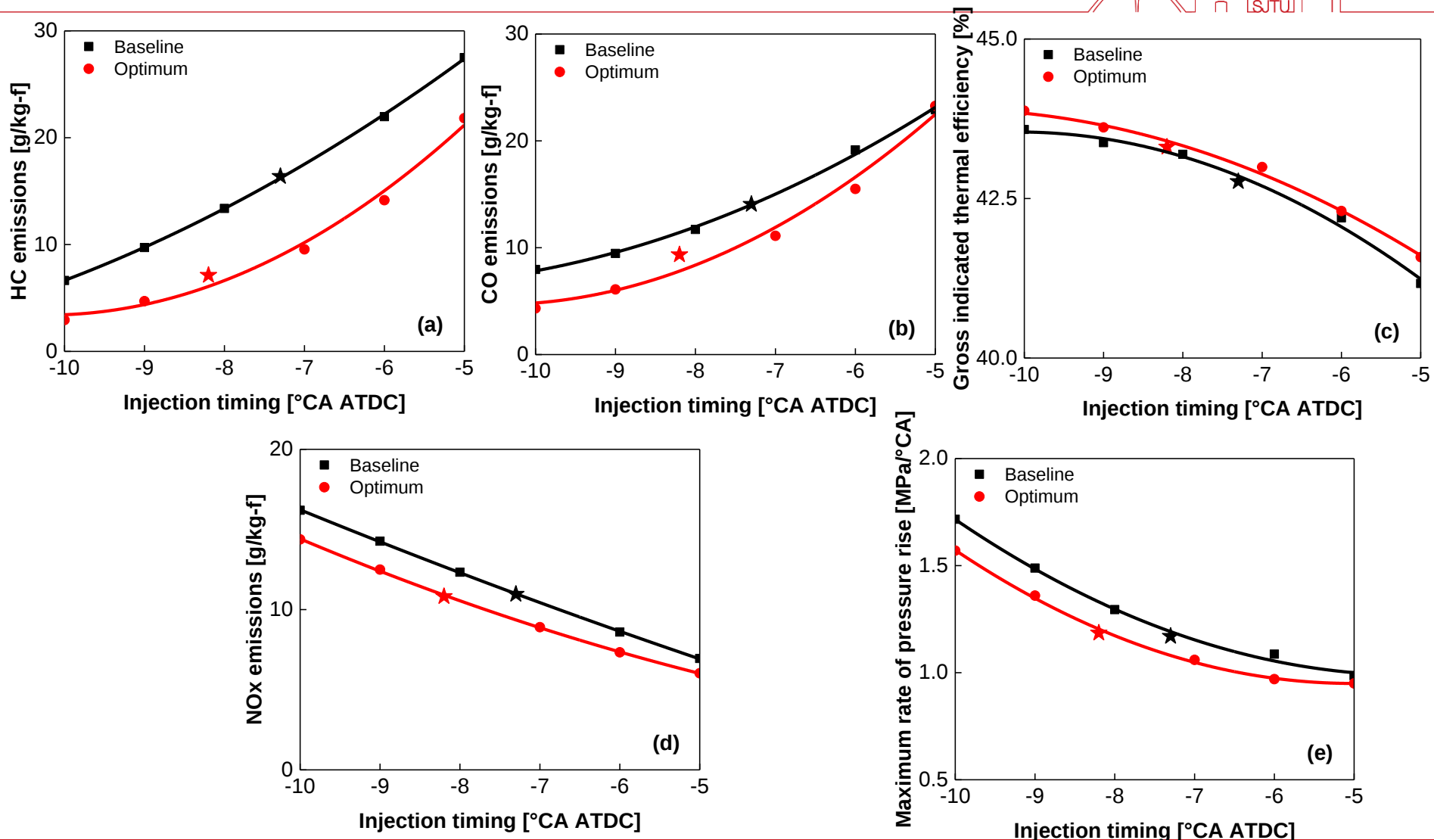
Crank angle [°CA ATDC]



Crank angle [°CA ATDC]

- 优化前后，HC与CO排放的变化趋势基本相同，但优化后的排放数值则明显减少
- 优化前后NO_x排放数值相差不大

点火提前角对优化前后发动机性能的影响

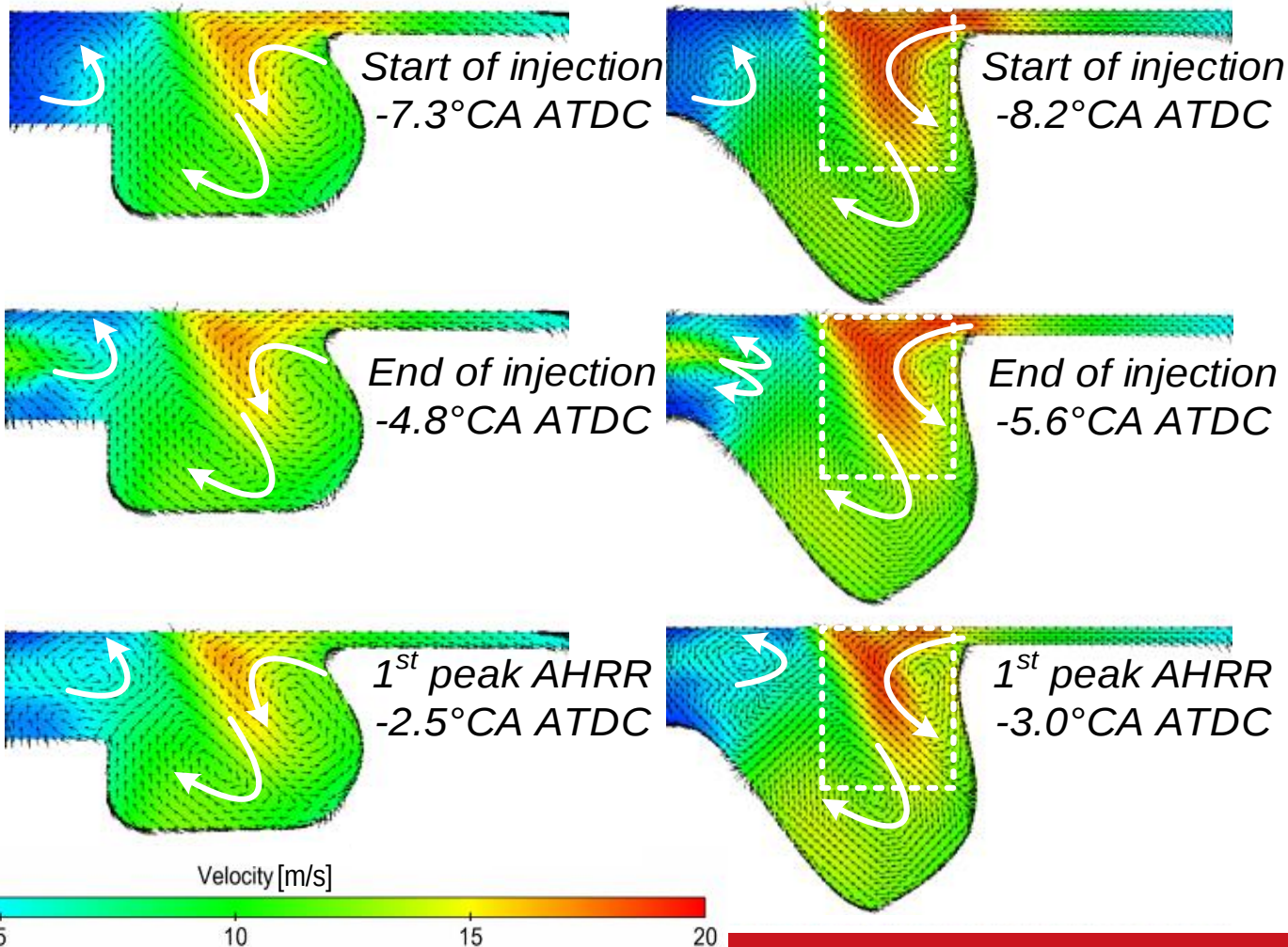


优化前后发动机缸内流动的变化

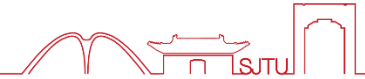


Baseline

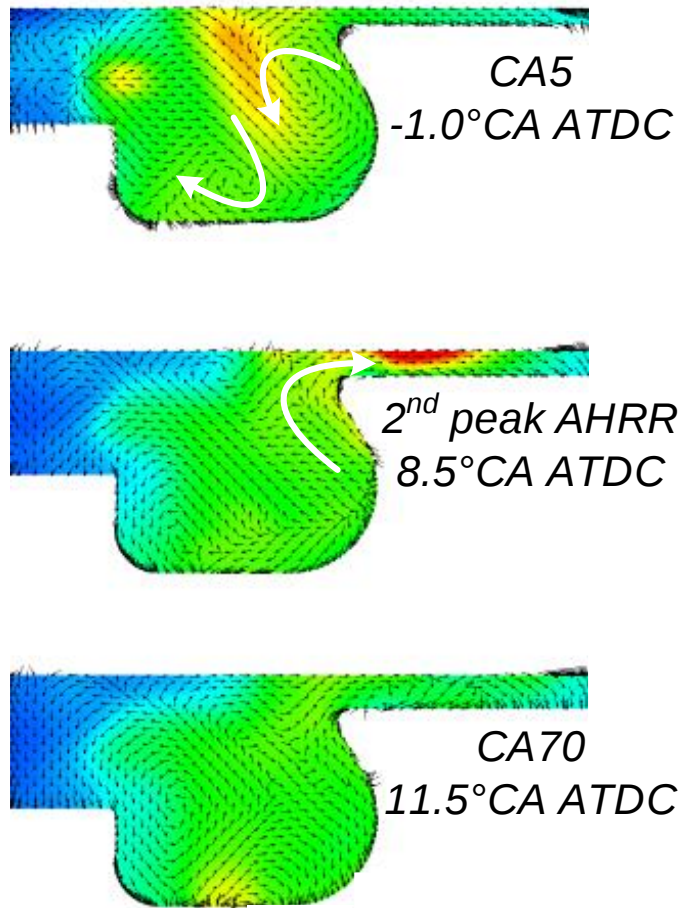
Optimum



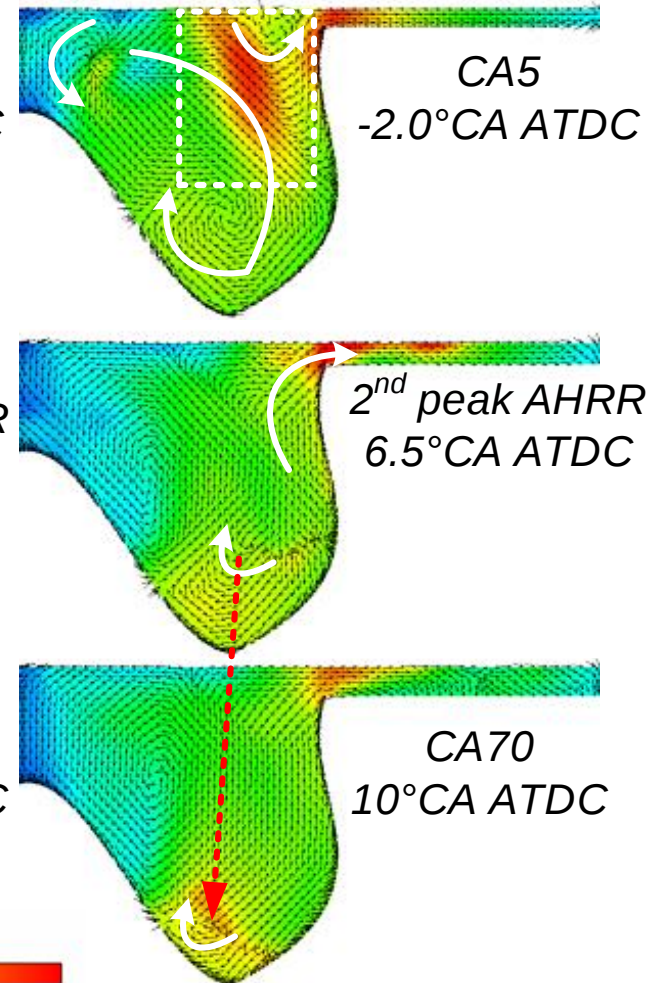
优化前后发动机缸内流动的变化



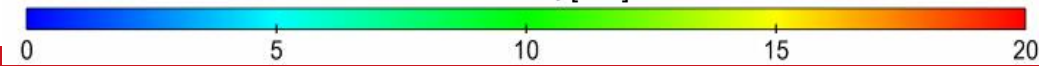
Baseline



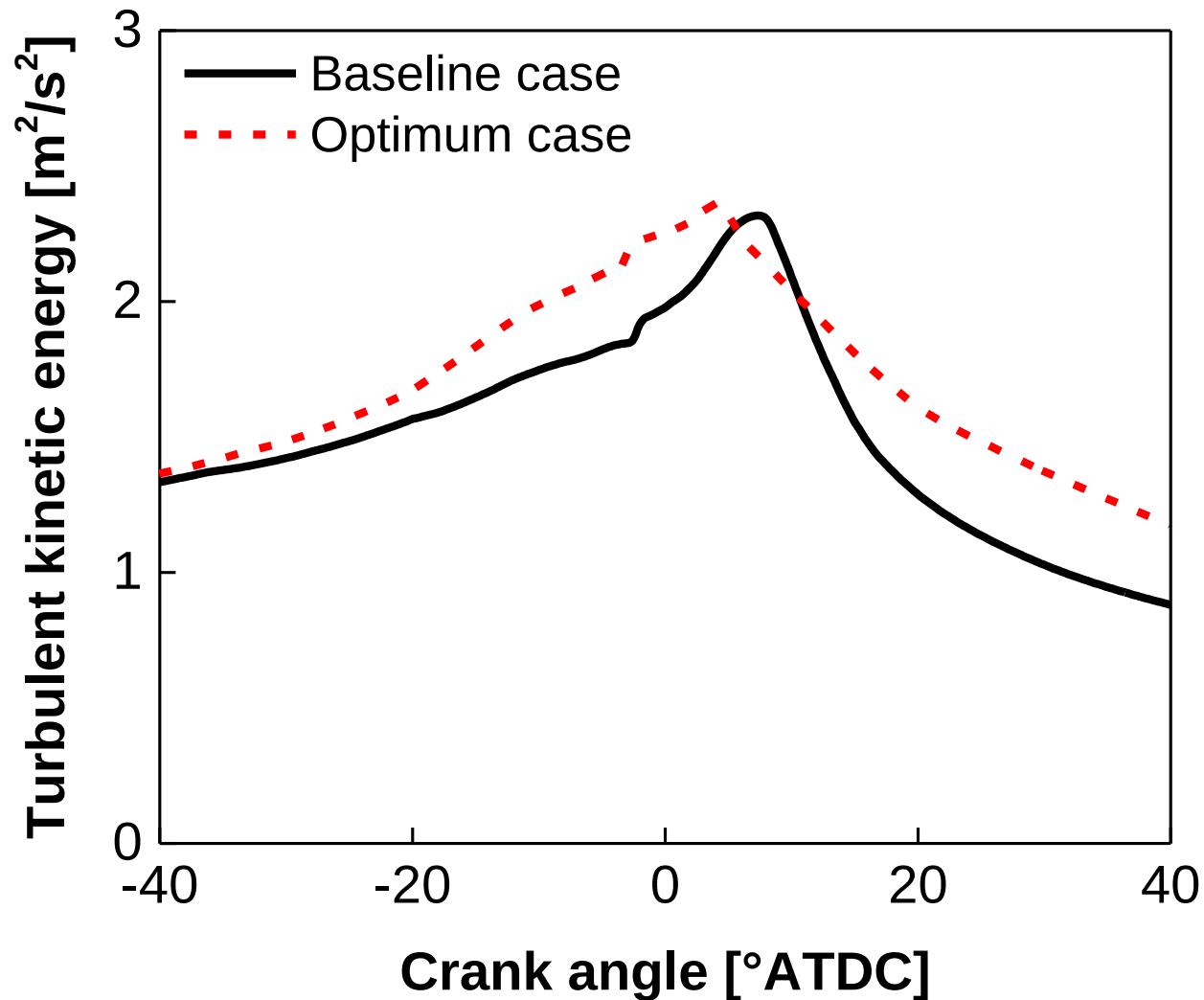
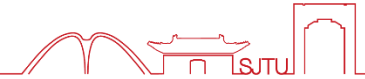
Optimum



Velocity [m/s]



优化前后发动机缸内流动的变化



总结



- ❑ 将计算流体力学（CFD）与详细化学反应机理进行了耦合，建立了柴油微引燃天然气发动机的仿真模型，并使用柴油喷雾测试数据和发动机台架测试数据对仿真模型进行了准确性标定。
- ❑ 通过优化拉丁超立方采样的实验设计与NSGA-II多目标优化方法，针对柴油微引燃天然气发动机的燃烧系统，实施燃烧室的改进设计及燃烧室与喷雾形状的优化匹配。
- ❑ 选取Pareto最优解集中热效率最高的优化设计方案与原机进行对比，热效率、HC和CO这些优化目标都有不同程度的改善，NO_x作为约束目标也得以保证，优化取得了满意的结果。

敬请各位领导与专家指正



上海交通大学发动机喷雾燃烧课题组

Website: <http://spray->