



面向汽车行业 CAE&CFD 解决方案 全国巡回研讨会

上海
6.8

重庆
6.10

武汉
6.12

北京
6.16

长春
6.18



先进仿真技术在发动机开发中的应用 和经典案例分析

艾迪捷信息科技（上海）有限公司

技术部 汪子涵

2015年 06月 12日



• IDAJ-CHINA



• IDAJ艾迪捷

- 所有的公司名称、产品名称、服务产品名称，都是相关公司的商标、注册商标或服务产品的标志。
- 本资料含有保密信息，没有本公司许可，严禁使用、散发、复制本资料的纸质版或电子版信息。



背景介绍

- **CFD**已成为现代发动机技术开发中不可或缺的要害。准确的**CFD**模拟能大大缩短产品开发的周期，并减少成本
- 良好的**CFD**软件应该能够准确地描述发动机中复杂的物理现象，包括进排气体交换，燃油喷射，点火，燃烧，排放等等。同时，还应该操作简便，从而使研发人员将大部分时间用来分析结果，改进设计，而不是调试软件

背景介绍

■ 与其他缸内CFD软件相比，CONVERGE具有以下优点：

	Converge	其它缸内CFD软件
输入文件	文本式输入，更换几何、条件非常方便、快捷。	计算设定信息依附于几何/网格模型，不易移植。
网格建模	用户无需准备网格模型，在计算过程中实时生成体网格。	网格模型创建过程复杂，用户体验要求高，且耗时很长。
	体网格为理想正交的六面体网格，质量好、计算稳定性好。	网格运动过程中易出现扭曲，计算不稳定、易发散。
	网格节点总保持静止，数值扩散小。	网格节点运动，数值扩散严重。
	灵活的疏密控制策略：AMR自适应加密，空间加密，边界加密，喷嘴加密等，网格效率高，在最小的网格数下获得最高的计算精度。	网格疏密事先确定，在计算过程中难以更改；网格效率不高。
	可直接模拟火花塞、预燃室等细节结构。	细节结构建模非常困难甚至不可能。
适用机型	四冲程，二冲程，转子式，对置式，分循环式等各种类型发动机。	专注于四冲程发动机，其它类型发动机实现困难或无法实现计算。
燃烧计算	自带详细化学反应求解器SAGE，无需另外购买；	需要借助其它专业化学反应软件/模块才能实现详细化学反应计算。
	引入了Multi-Zone加速算法，在保持精度的情况下大幅度减少详细反应计算时间，满足工程化计算要求。	详细化学反应计算量巨大，耗时太长，目前无法用于工程化计算。
	可以直接模拟点火过程、湍流火焰传播过程，计算精度高，无需校核即可吻合实验结果。	计算精度难以保证，需要大量校核工作才可能与实验结果对标。
	适用燃烧/反应现象：火花点火、自动点火、低温反应、混合支配燃烧、扩散燃烧、火焰传播、敲缸、排放等。	通过独立的经验模型来描述单个燃烧/反应现象，计算精度难以保证。
耦合计算	可与GT-POWER双向耦合，方便快捷，纯流动耦合无需License。	实现过程复杂，须有两个软件的License

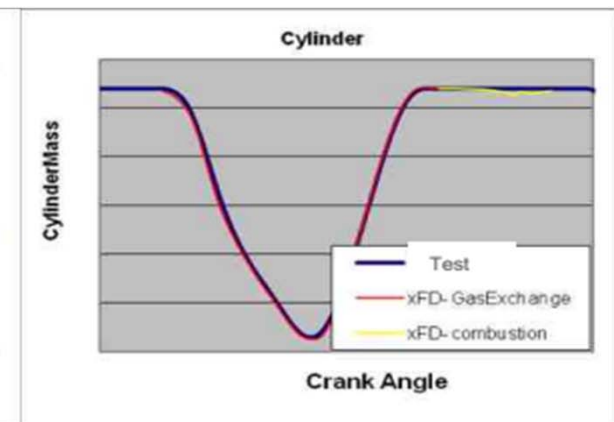
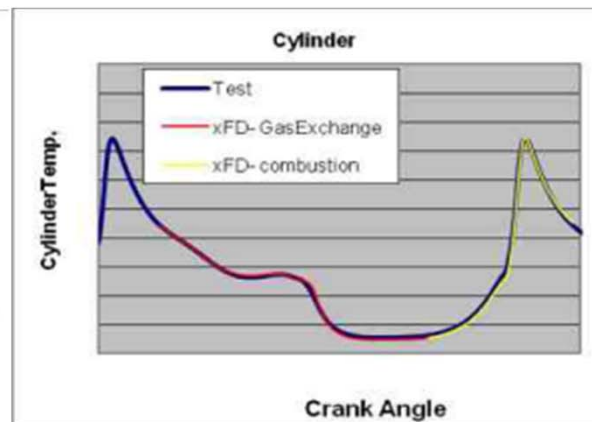
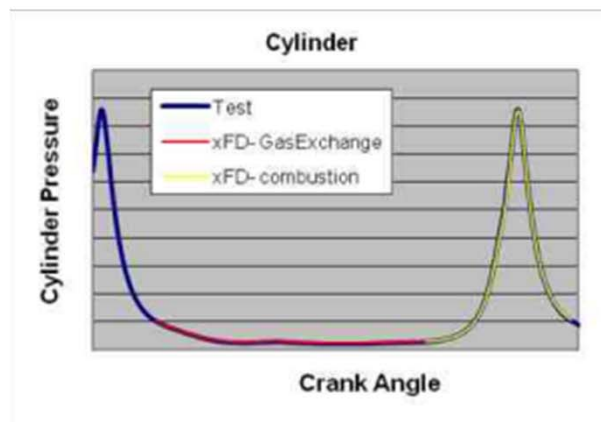
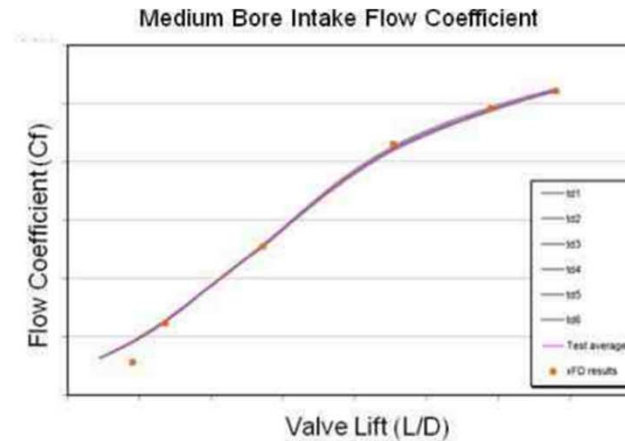
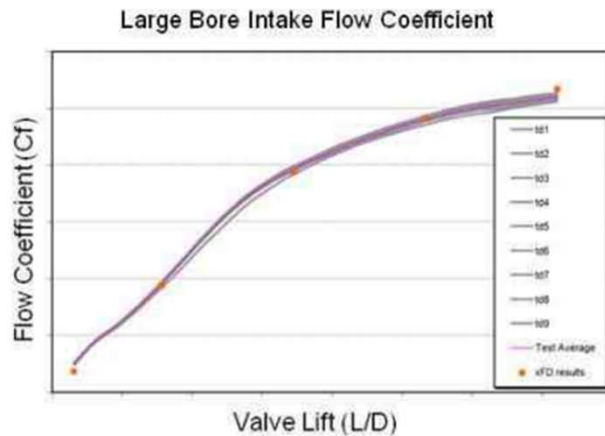
提纲

- 气体流动
- 喷雾与二相流
- 点火与燃烧
- 拓展

气体流动

■ 重型柴油机进排气门设计（卡特彼勒）

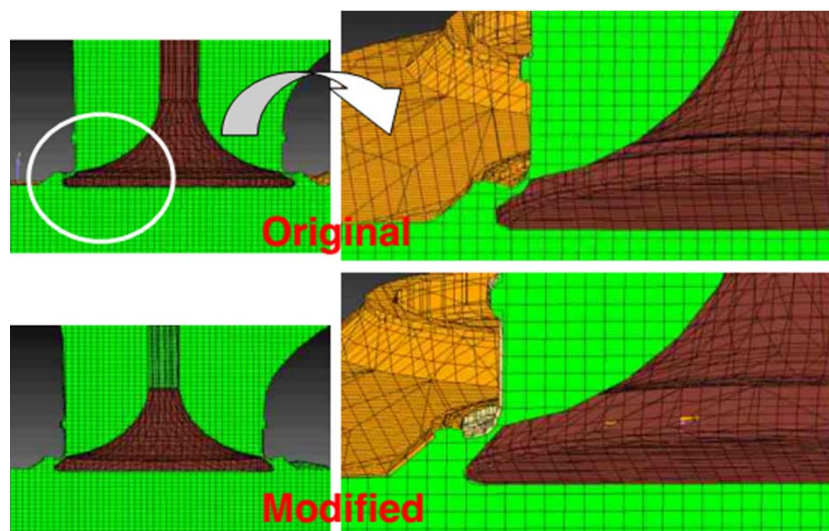
- 论证用CONVERGE代替流体力学实验的可行性（大量节省经费和时间）



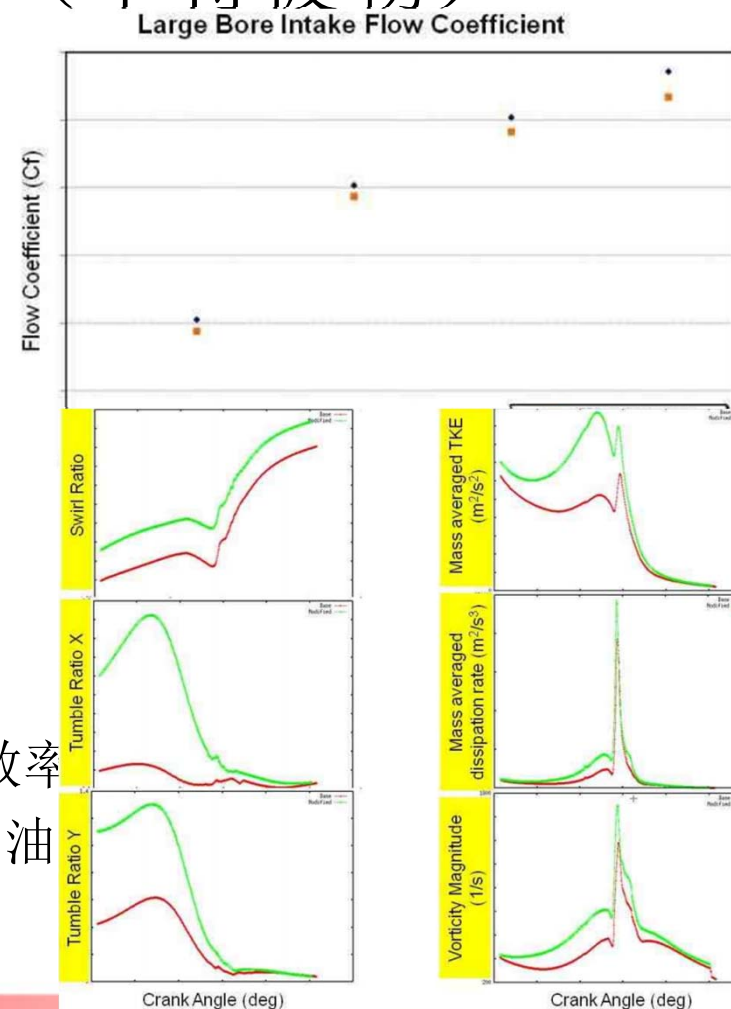
气体流动

■ 重型柴油机进排气门设计（卡特彼勒）

- 不同气门设计对缸内气体流动的影响

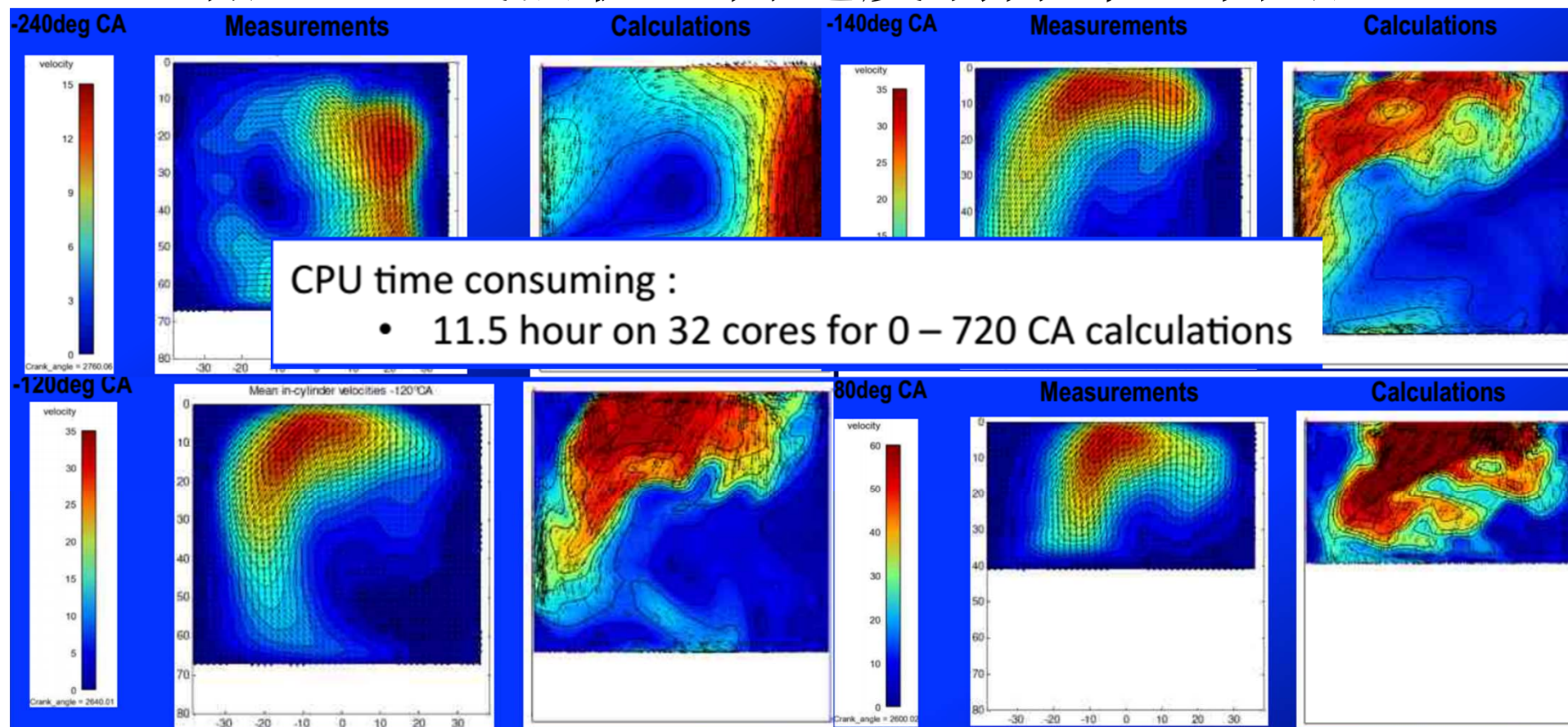


- 结论：改进后的气门形状能增强进排气效率缸内的涡流比，滚流比和湍流动能（更好的油气混合，更充分的燃烧）



气体流动

■ 增压GDI汽油机缸内速度场分布（雷诺）

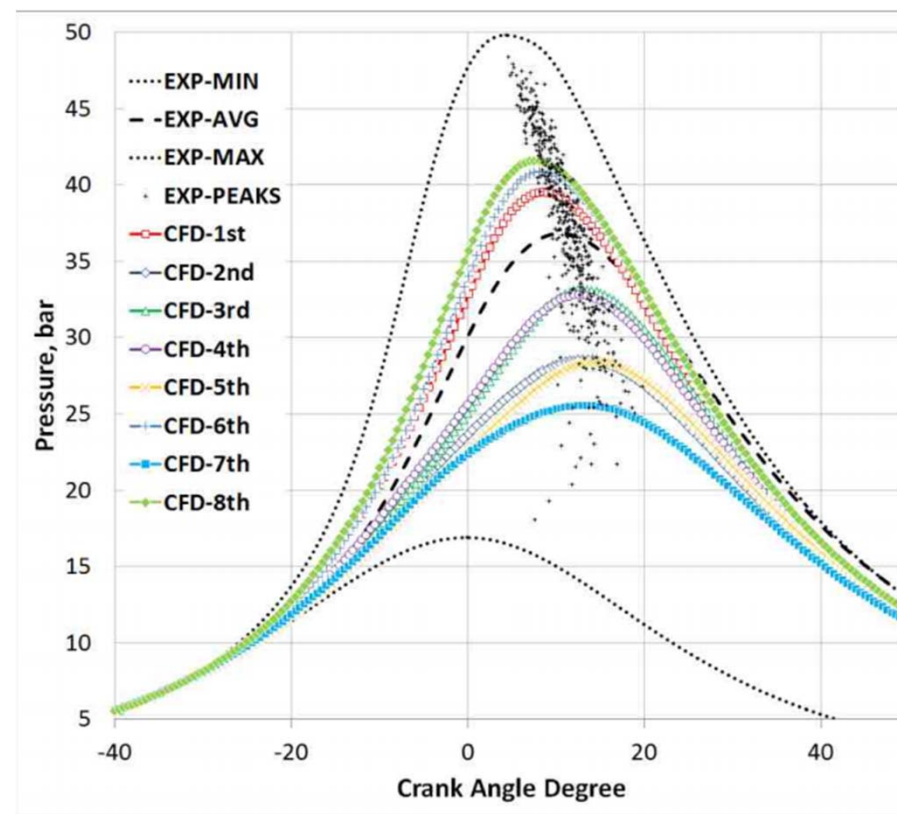


➤ 结论：CONVERGE三维模拟能可靠预测缸内速度场，从而为准确预测油气混合和燃烧过程做准备

气体流动

■ 汽油机不同工作循环间的差异（阿贡实验室）

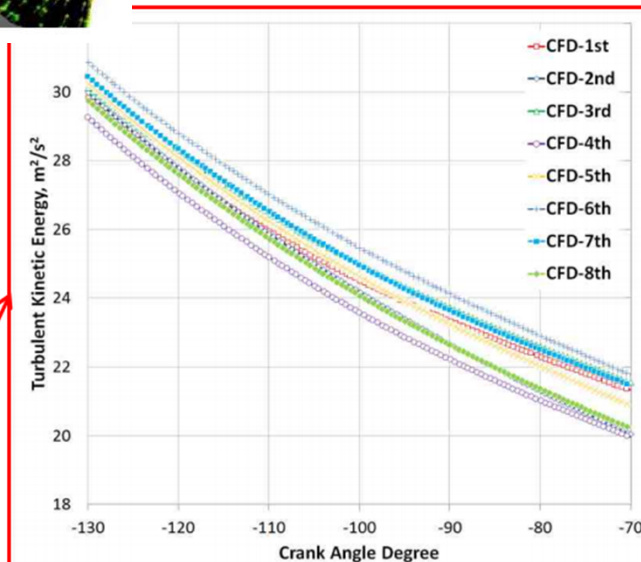
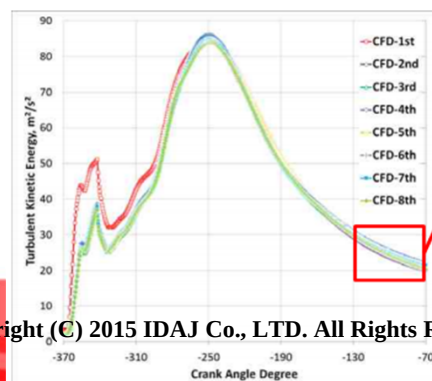
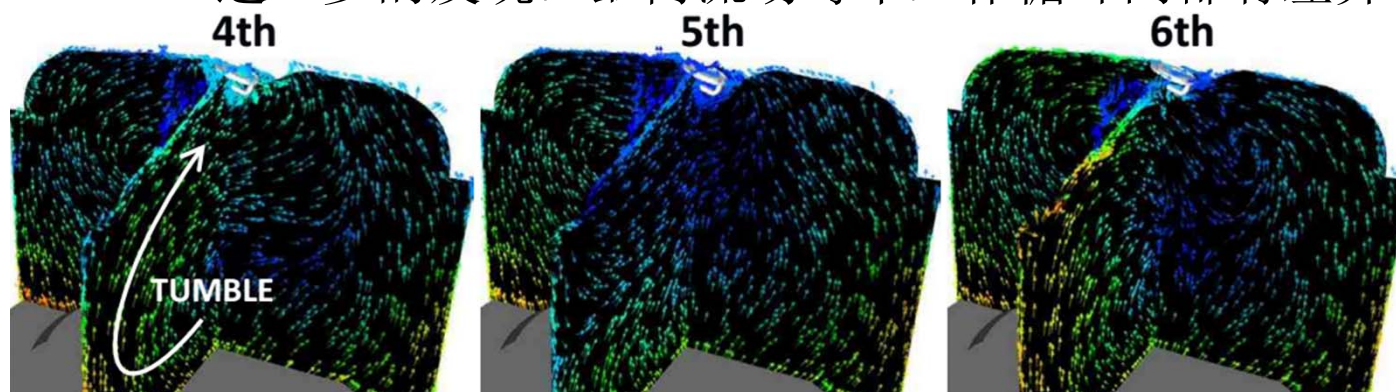
➤ 汽油机不同工作循环间有差异。模拟的缸内压力分布在实验数据范围内



气体流动

■ 汽油机不同工作循环间的差异（阿贡实验室）

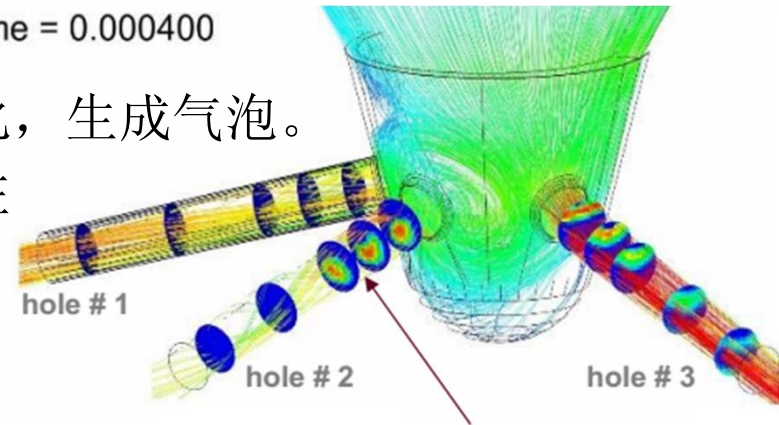
➤ 进一步的发现：缸内流场每个工作循环间都有差异



喷雾和二相流

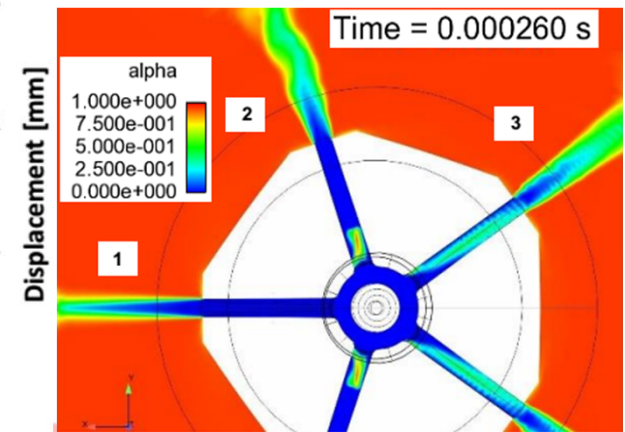
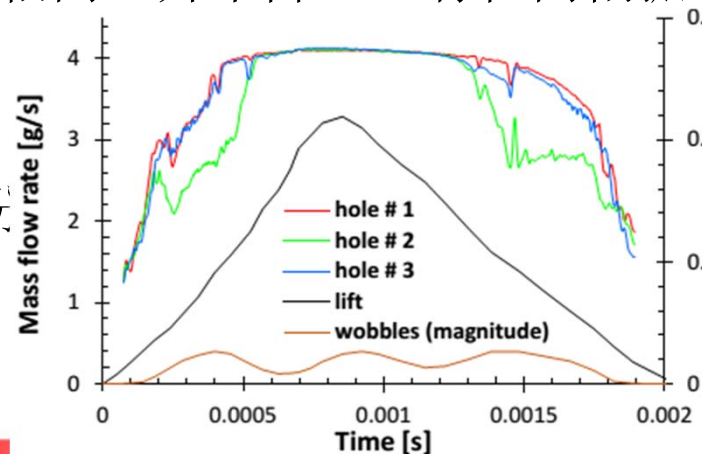
■ 喷油嘴内部和外部流体的研究（康明斯）

➤ 内部：压强下降至燃油在工作温度下的饱和蒸汽压时，燃油将会发生部分汽化，生成气泡。气泡在喷油嘴内部爆破可能损坏结构，在喷油嘴外爆破能增强燃油雾化



“String type” cavitation

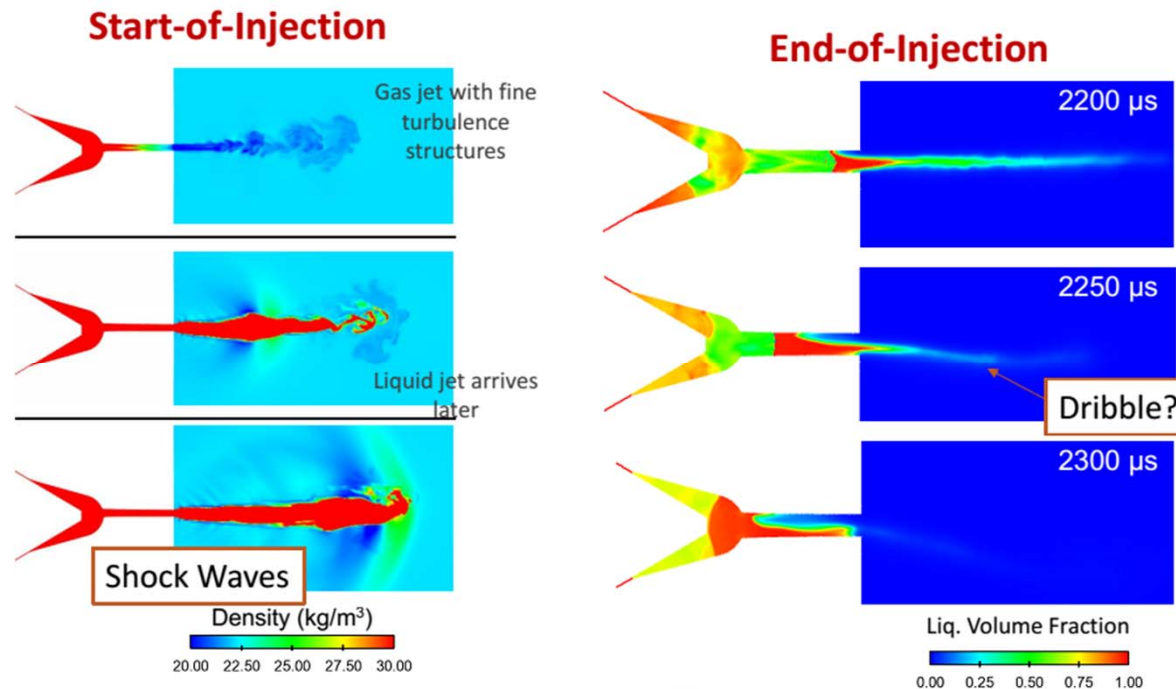
➤ 内部：针阀除了轴向上升下降，还有径向偏振（加工误差）
径向偏振能造成各个喷孔流量的不同。因此，缸内的燃油分布不如设计的那样平均



喷雾和二相流

■ 喷油嘴内部和外部流体的研究（康明斯）

- 喷油“开始”时刻，部分气体最先喷出，这部分气体是上一循环喷油结束时因为压差“吸入”喷油嘴内的
- 喷油“结束”时刻，仍会有部分油滴喷出，这会导致排放恶化

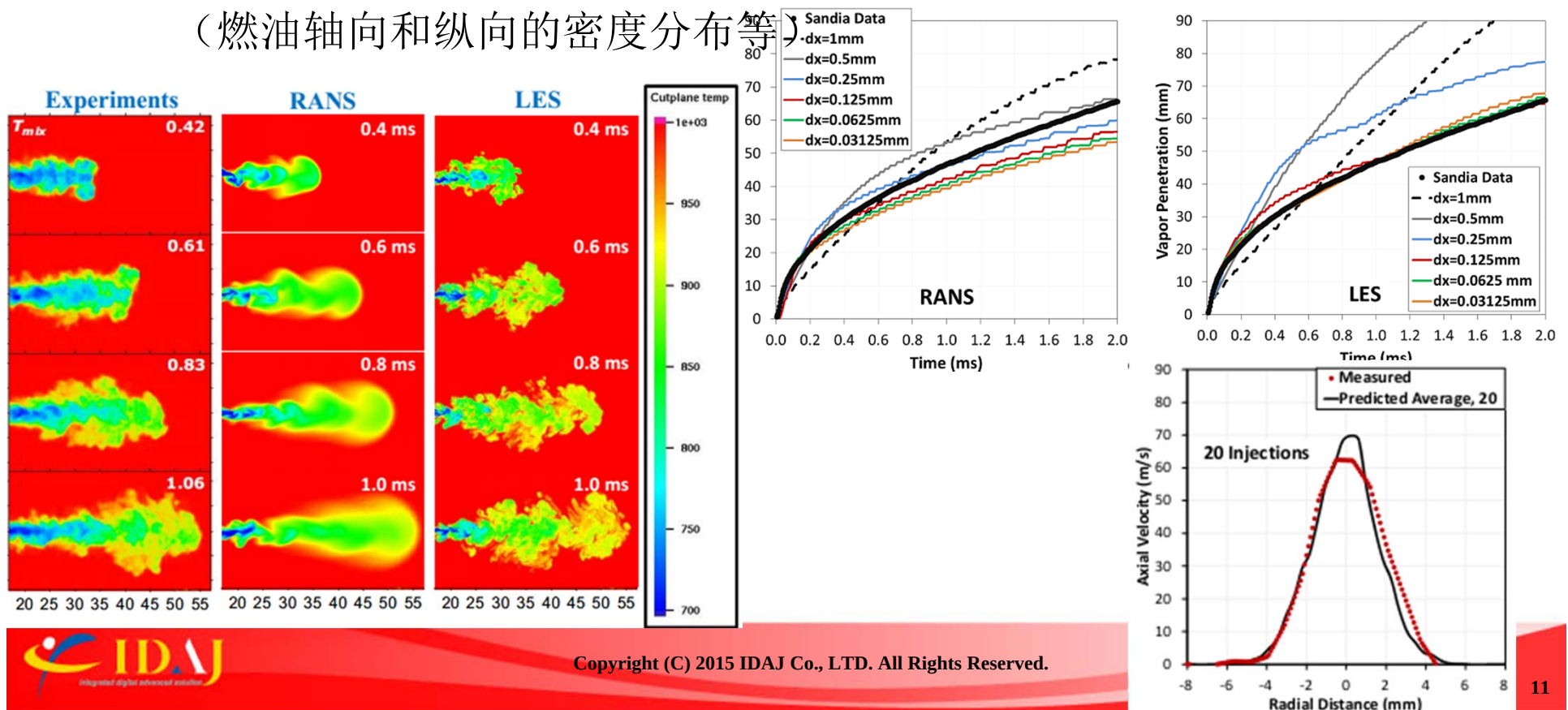


Simulation take 3-4 weeks on 100 processors

喷雾和二相流

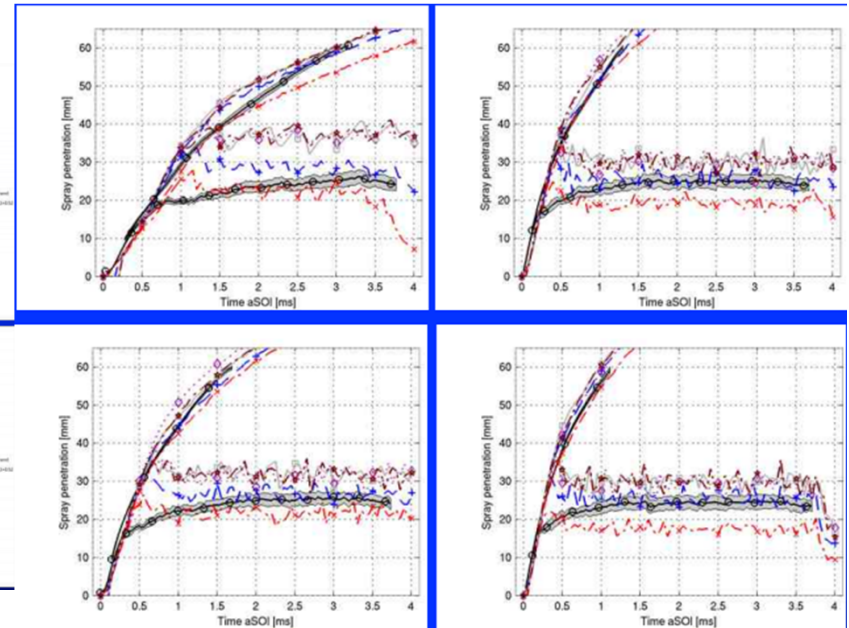
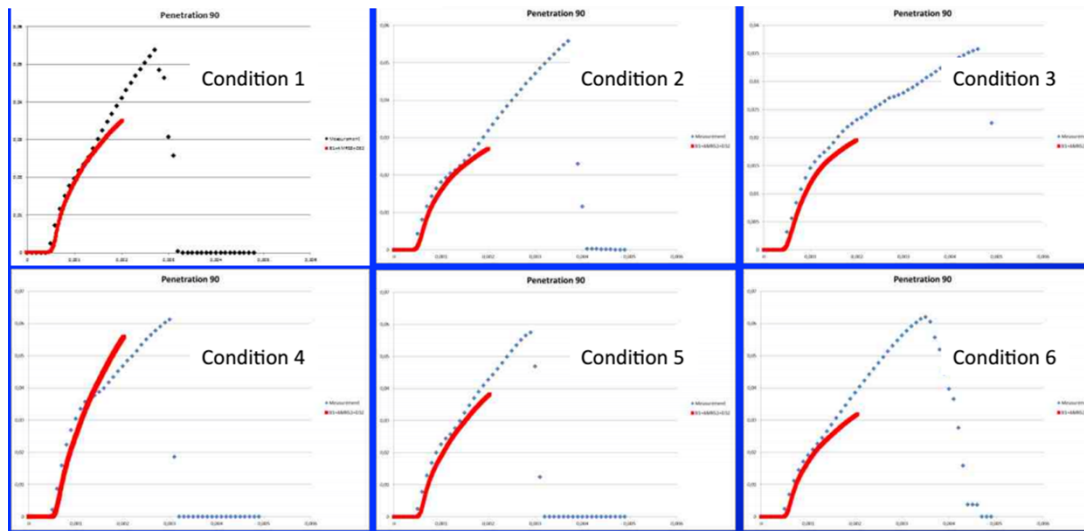
■ 喷油嘴内部和外部流体的研究（康明斯）

- 外部：大涡湍流模型（LES）预测的喷雾形状与实验数据更接（LES模型直接求解尺寸比较大的流动结构，而只模拟尺寸很小的流动结构）。LES能够捕捉到燃油分布的总体特征（贯穿距）和局部特征（燃油轴向和纵向的密度分布等）



喷雾和二相流

■ GDI汽油机和柴油喷雾分析（雷诺）



- 结论：CONVERGE三维模拟能可靠预测燃油贯穿距，从而为准确预测油气混合和燃烧过程做准备

喷雾和二相流

■ 增压GDI汽油机多次喷射分析（上汽）

- 动机：GDI可能造成缸套及活塞湿壁，导致碳烟排放问题
- 解决方案之一：灵活的多次喷射策略

项目	二次喷射方案		三次喷射方案	
	起始角/°CA	持续角/°CA	起始角/°CA	持续角/°CA
第一次喷射	420	10.88	445	10.74
第二次喷射	637.27	7.73	594.7	5.3
第三次喷射	-	-	647.43	2.57

喷雾和二相流

■ 增压GDI汽油机多次喷射分析（上汽）

➤ 多次喷射对流场的影响：细微的差别

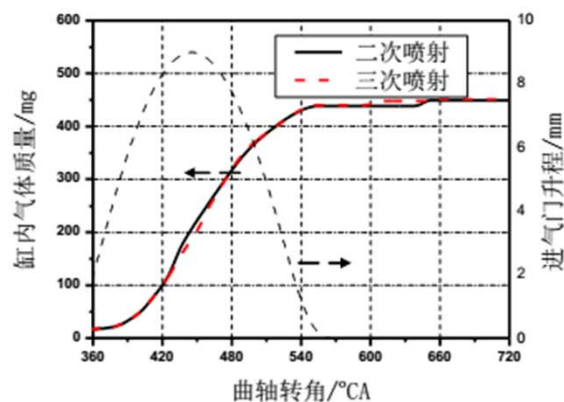


图3 缸内气体质量

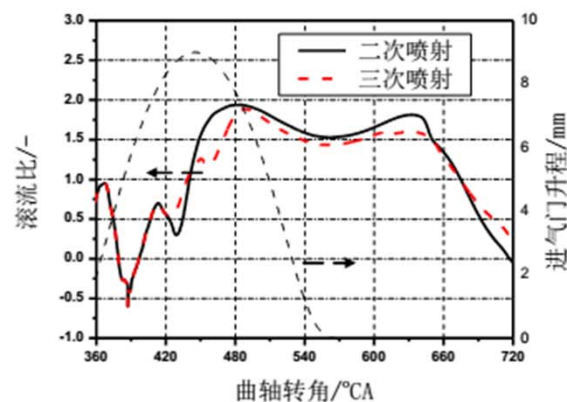


图4 缸内滚流比

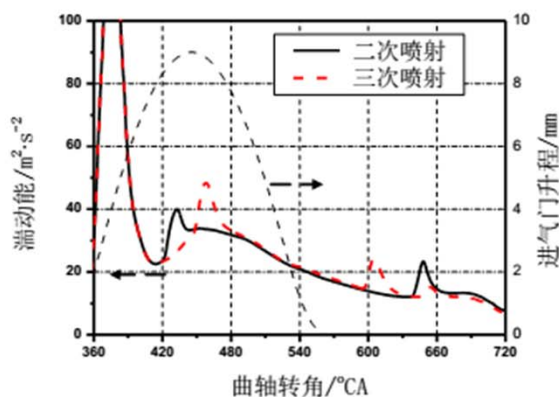


图5 缸内湍动能

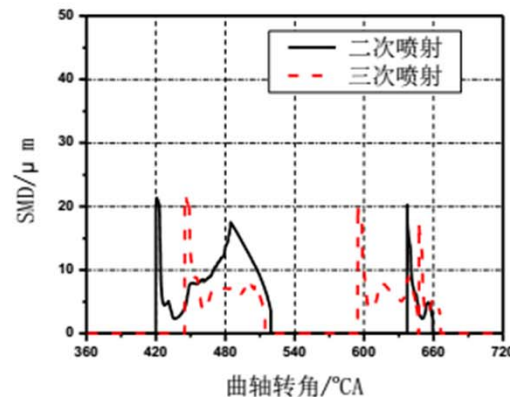
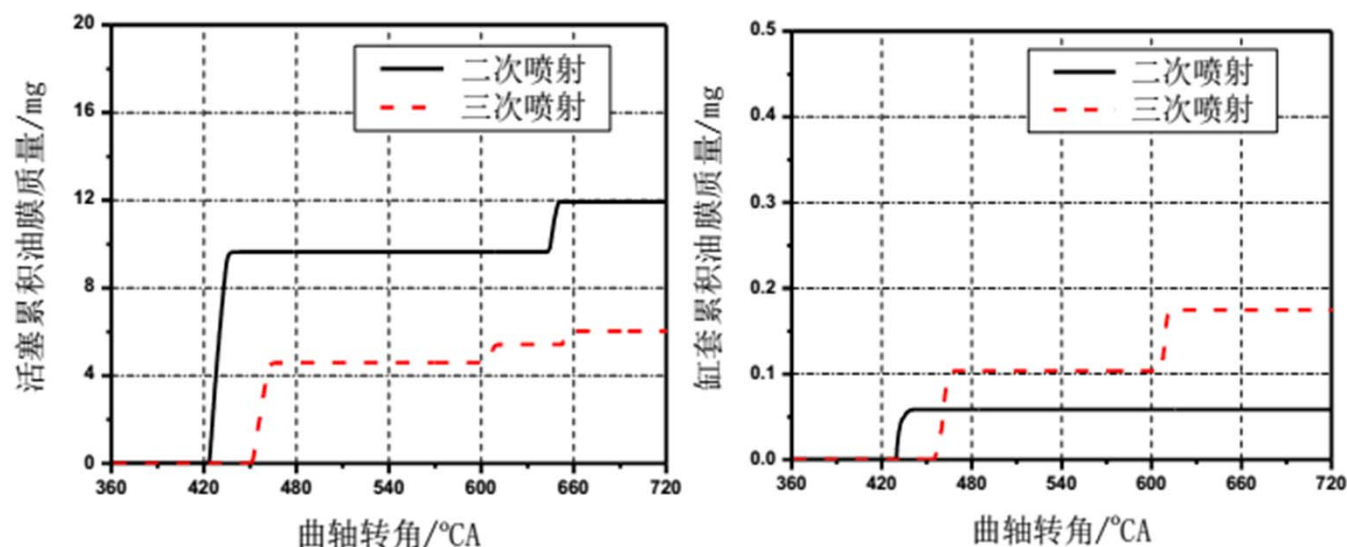


图6 缸内 SMD

喷雾和二相流

■ 增压GDI汽油机多次喷射分析（上汽）

➤ 多次喷射对活塞和缸套湿壁的影响：

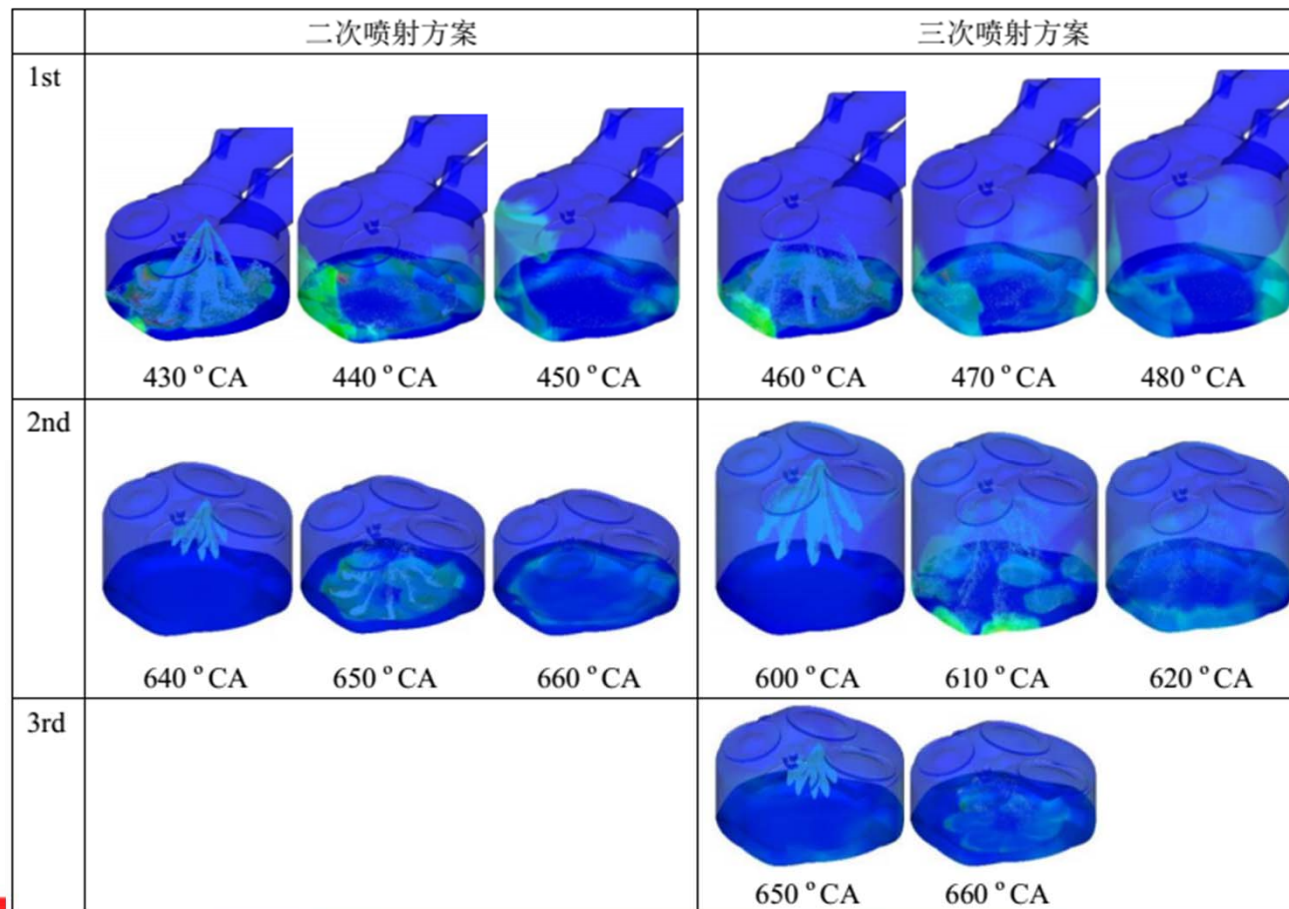


- 对活塞：三次喷射方案的第一次喷射较晚，此时活塞距喷射点较远，故产生活塞湿壁较小，而压缩行程中喷射两次降低了贯穿距离，也减少了活塞湿壁
- 对缸套：只有二次喷射方案的第一次喷射和三次喷射方案的第一、二次喷射产生了湿壁。其余的喷射由于燃油喷射量较小并未产生湿壁

喷雾和二相流

■ 增压GDI汽油机多次喷射分析（上汽）

➤ 多次喷射对活塞和缸套湿壁的影响：



喷雾和二相流

■ 增压GDI汽油机多次喷射分析（上汽）

➤ 多次喷射对燃烧的影响：

三次喷射增加燃烧放热率和缸内温度；三次喷射累计放热量高，说明三次喷射对应的燃烧充分。火焰前锋面的形状也显示三次喷射方案具有较优的混合气质量

720 °CA



730 °CA



二次喷射方案

三次喷射方案

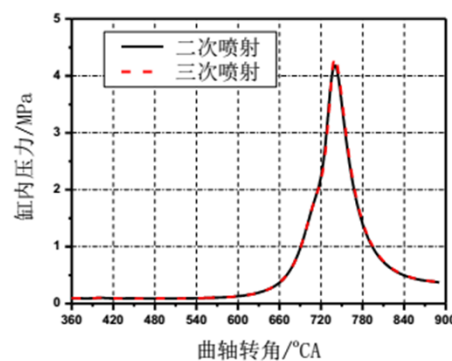


图 13 缸内压力

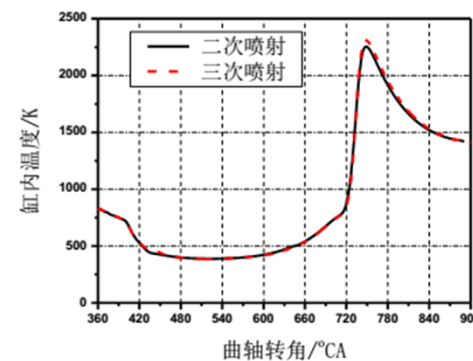


图 14 缸内温度

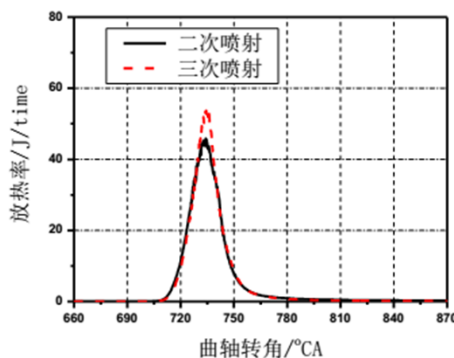


图 15 放热率

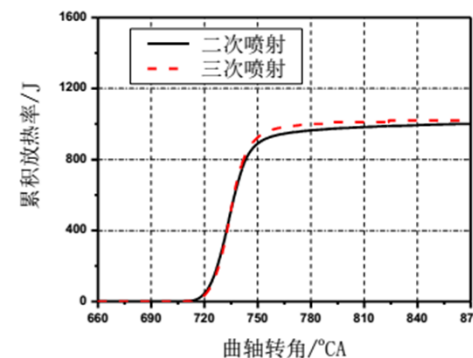


图 16 累积放热率

喷雾和二相流

■ 增压GDI汽油机多次喷射分析（上汽）

➤ 多次喷射对燃烧的影响：

三次喷射方案的 soot 和 HC 排放较二次喷射方案有所降低。二次喷射方案压缩行程喷射较晚，造成了混合气局部混合不均匀，且过多的燃油撞击活塞顶面导致了较高的活塞湿壁，均会导致更多 soot 的产生

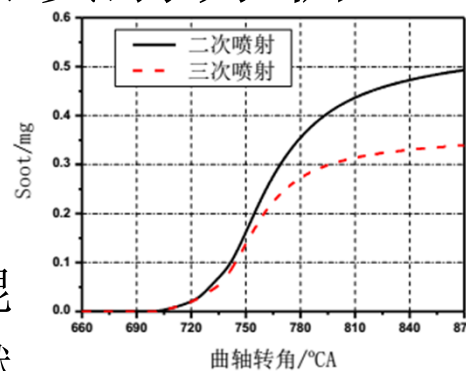


图 18 缸内 soot 排放

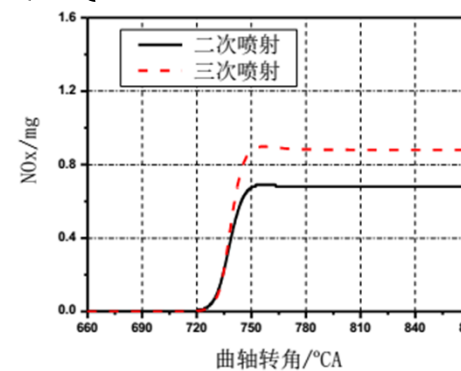


图 19 缸内 NOx 排放

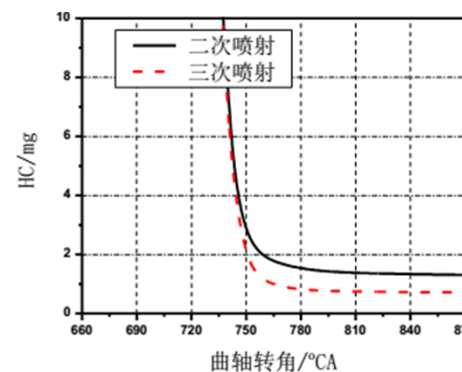


图 20 缸内 HC 排放

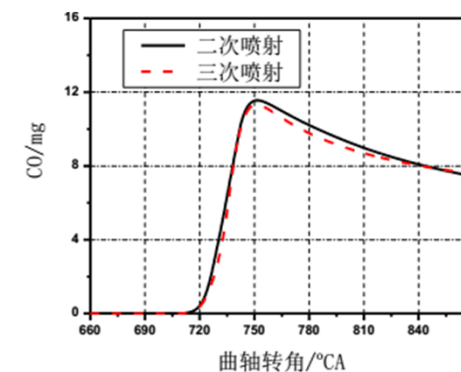
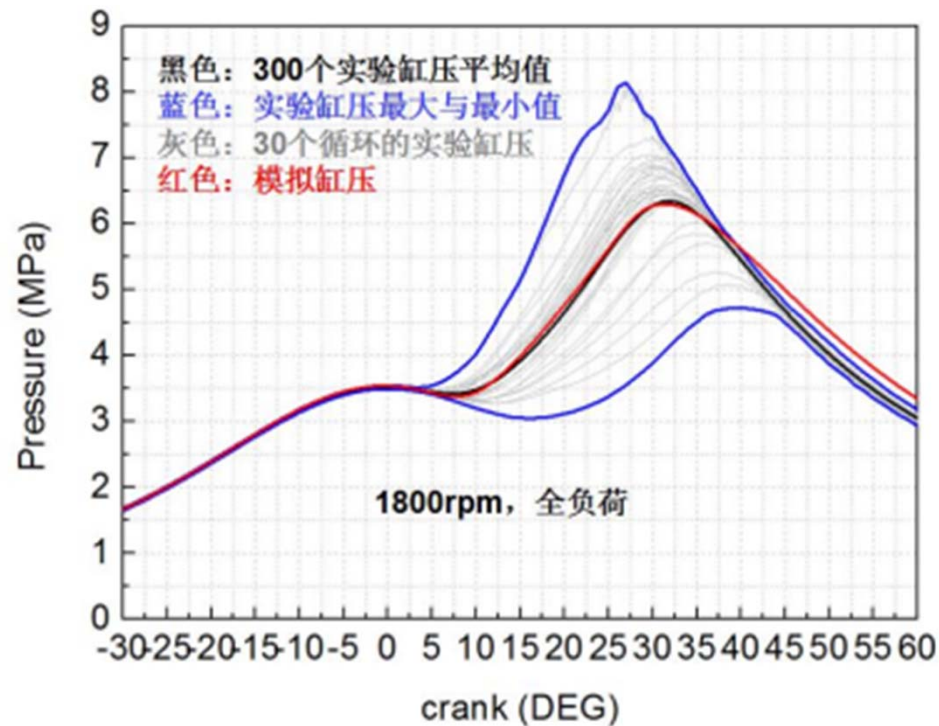


图 21 缸内 CO 排放

点火和燃烧

■ 汽油机爆震的研究（一汽）

➤ 模型标定

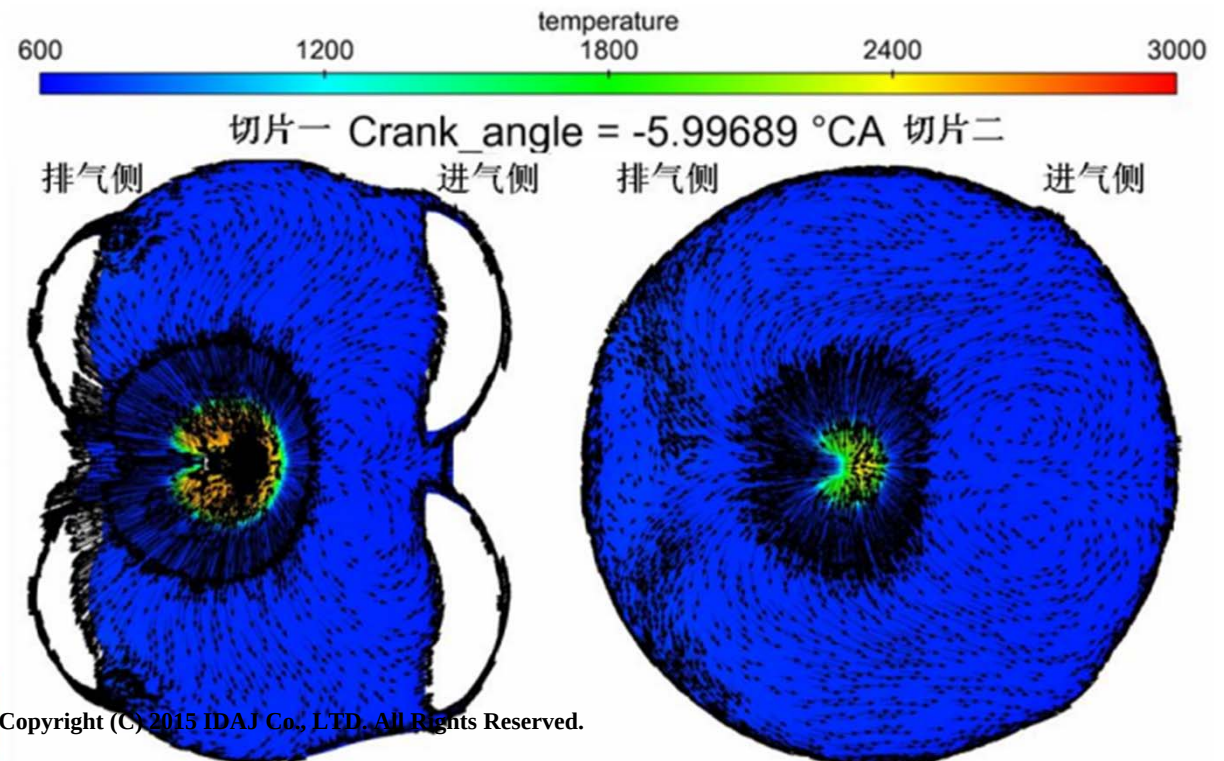


➤ 结论：模拟值与实验值吻合完好，为进一步的研究做准备

点火和燃烧

■ 汽油机爆震的研究（一汽）

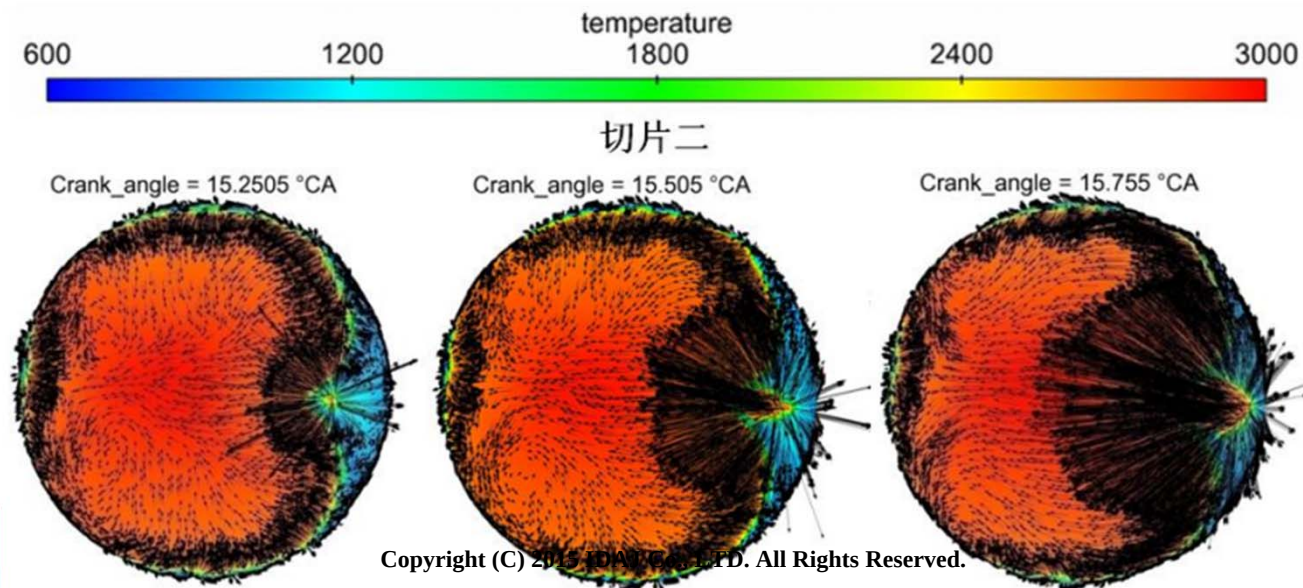
- 切片一为通过火花塞两个电极的中间点并垂直 Z 轴的平面，切片二为气缸顶向上 0.6mm 垂直 Z 轴的平面（切片一在切片二的上方）；点火时刻：-9 deg CA
- 点火时刻之后的-6 deg CA，对向漩涡回流使两个切片进气侧的流场方向都与火焰传播方向相反，排气侧的流场方向都与火焰传播方向相同



点火和燃烧

■ 汽油机爆震的研究（一汽）

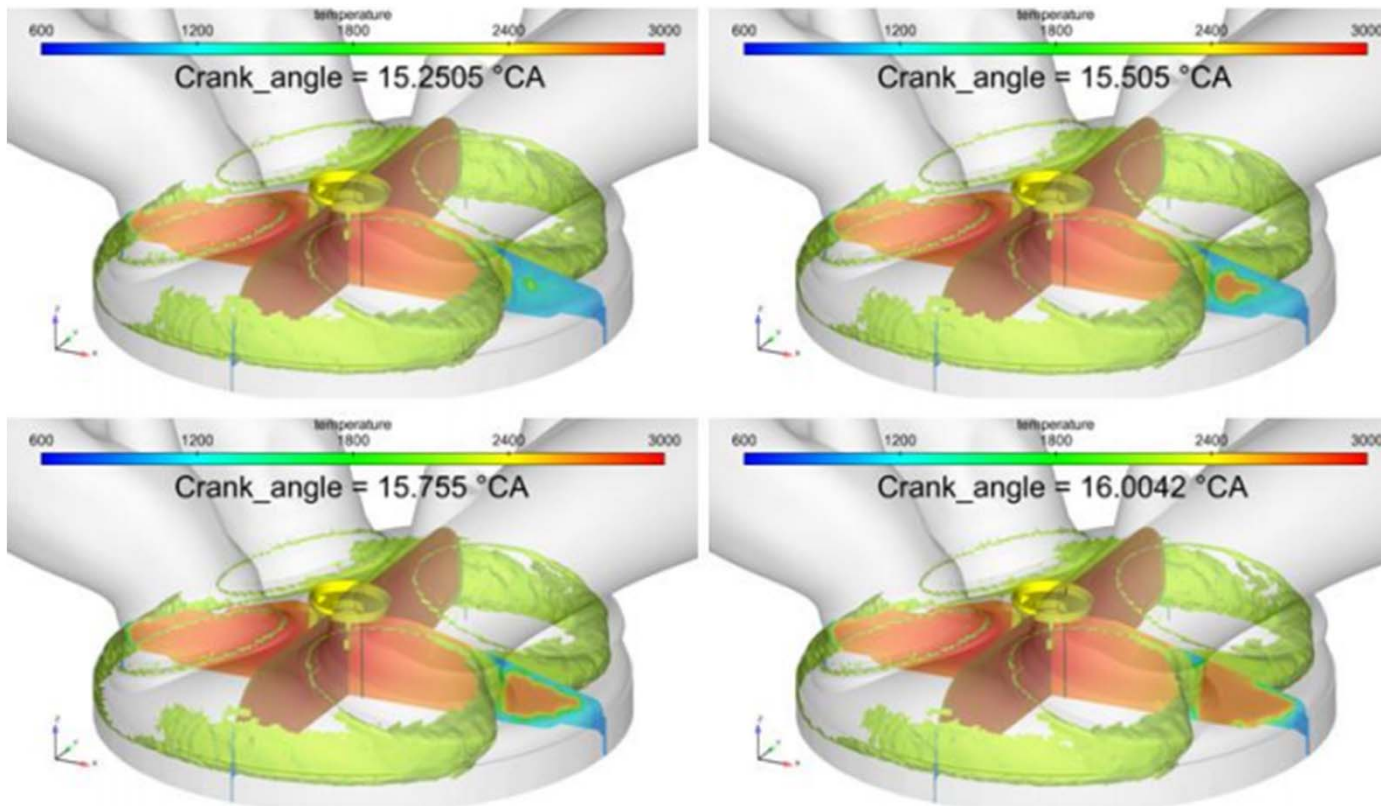
- 直到 15.25 deg CA，因为进气侧中间区域的流场方向始终与火焰传播方向相反，从而显著地抑制了火焰锋面向气缸边缘传播，此时的排气侧和其它两端的火焰前锋已经到达气缸边缘，所以形成了火焰锋面形状。由于火焰锋面和漩涡回流的双重挤压，未燃区域混合气的温度逐渐升高而开始自燃；到 15.5 deg CA，自燃区域进一步扩展，流场速度急剧增大，远远超过正常的火焰传播速度（见速度矢量箭头的大小），由此产生了爆震



点火和燃烧

■ 汽油机爆震的研究（一汽）

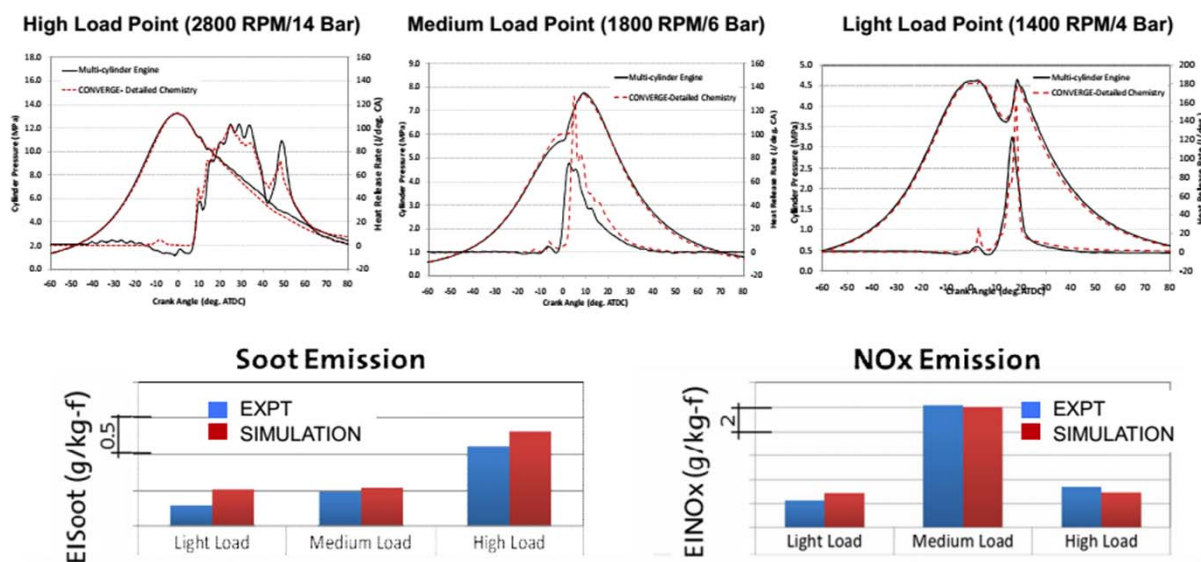
➤ 火焰锋面和温度云图



点火和燃烧

■ 涡流对柴油机燃烧的影响（通用汽车）

- 涡流能促进油气混合，减少排放；但是过于强烈的涡流也能阻碍燃烧；因此要针对每个工况找到一个最优的涡流强度
- 模型验证：高中低三个负荷

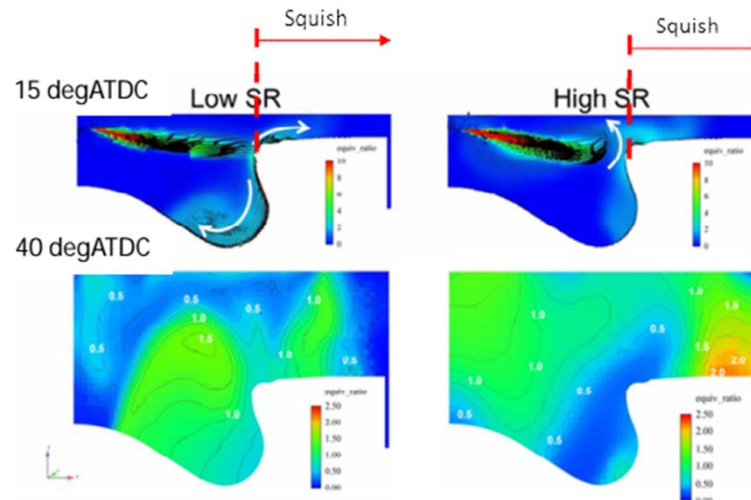


- 结论：缸内压力，放热率和排放的模拟结果与试验结果很相近，为下一步的研究提供基础

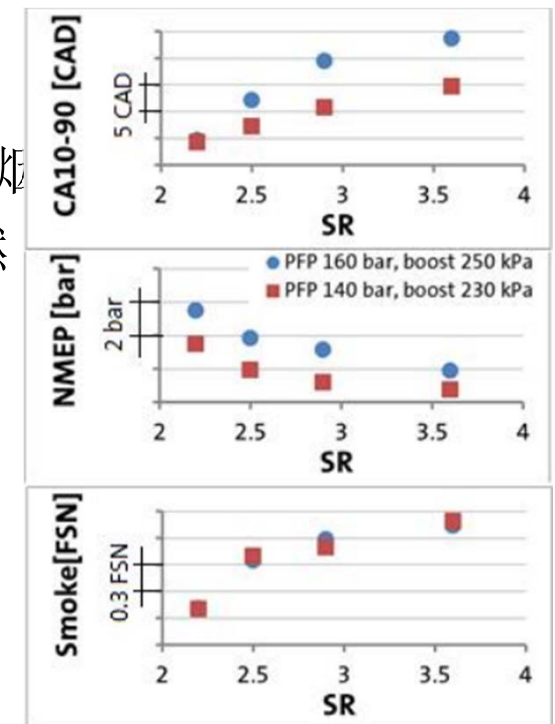
点火和燃烧

■ 涡流对柴油机燃烧的影响（通用汽车）

- 高负荷下，增加涡流能延长燃烧时间（降低有效压力），碳烟排放也会恶化
- 同时，增强涡流使燃油更多地集中到余隙。燃烧在余隙里发生，从而燃烧速率减慢，产生更多碳烟
- 相反，减弱涡流使部分燃油流向活塞附近，加快燃烧速率，更多的空气有助于减少碳烟的排放



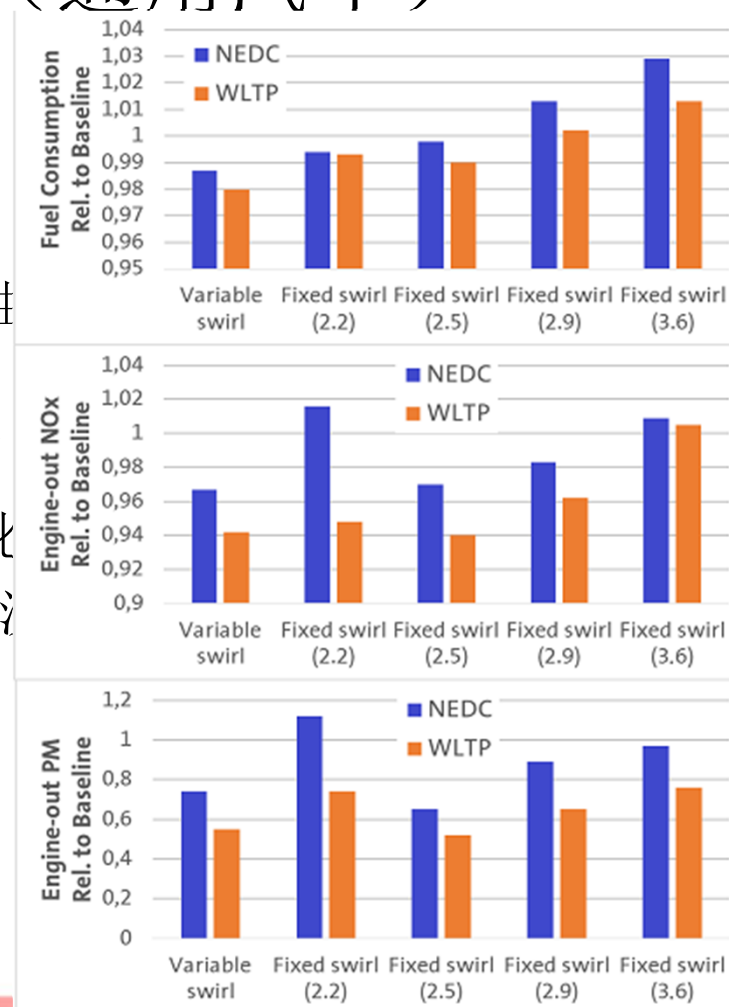
Spray penetration and equivalence ratio distribution for low and high swirl-ratio at rated-power.



点火和燃烧

■ 涡流对柴油机燃烧的影响（通用汽车）

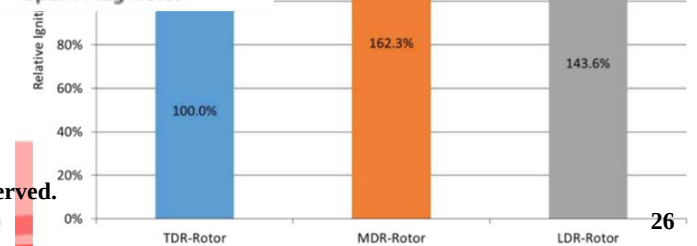
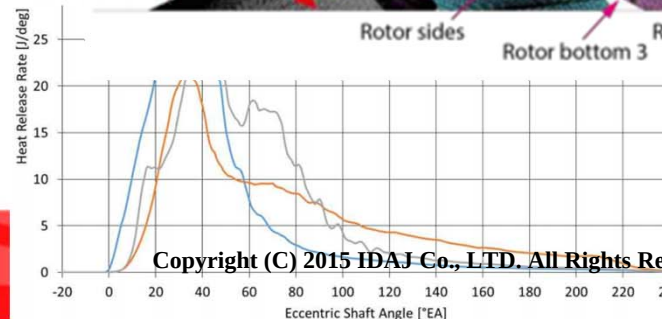
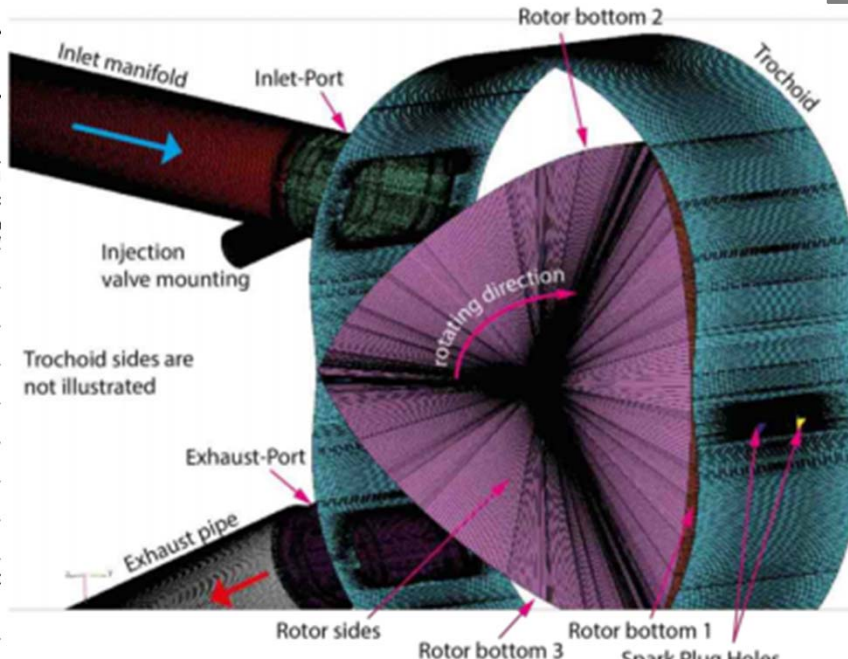
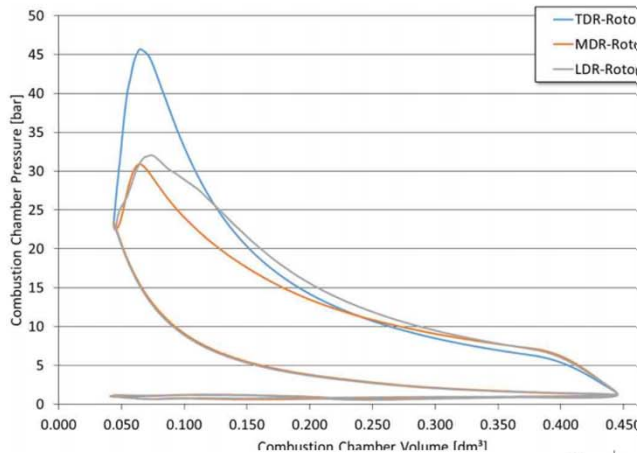
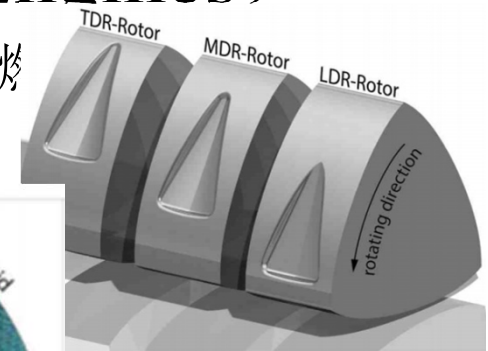
- 中负荷下，对NEDC（New European Driving Cycle）和WLTP（Worldwide Harmonized Light vehicles Test Procedures）两种测试流程，可变涡流比可以产生最优燃油经济性，和最低的氮氧化合物（NO_x）排放
- 2.5的固定涡流比产生最低的碳烟排放，同时也产生较低的燃油消耗率，和较低的氮氧化合物（NO_x）排放。综合起来，2.5的固定涡流对此款发动机的中低负荷是推荐的



点火和燃烧

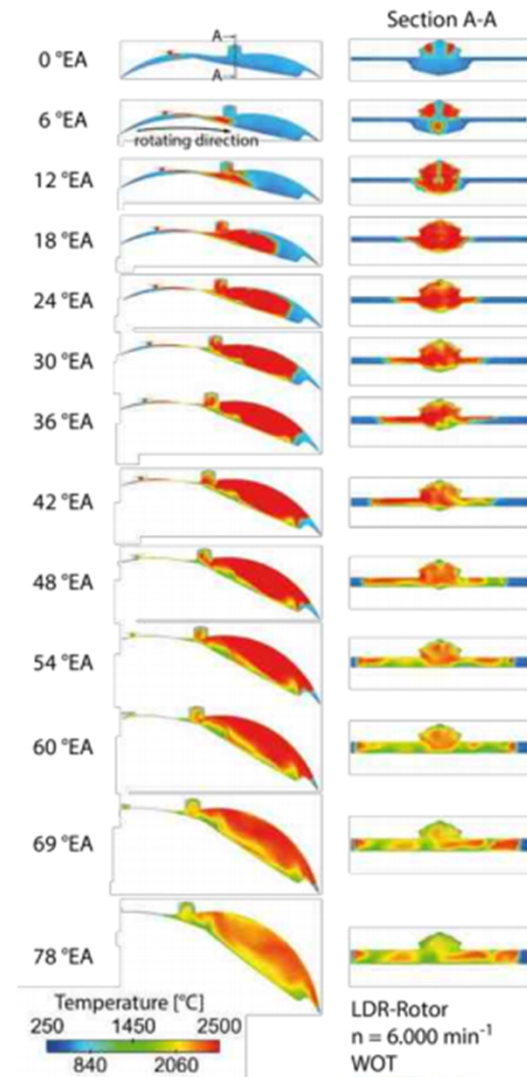
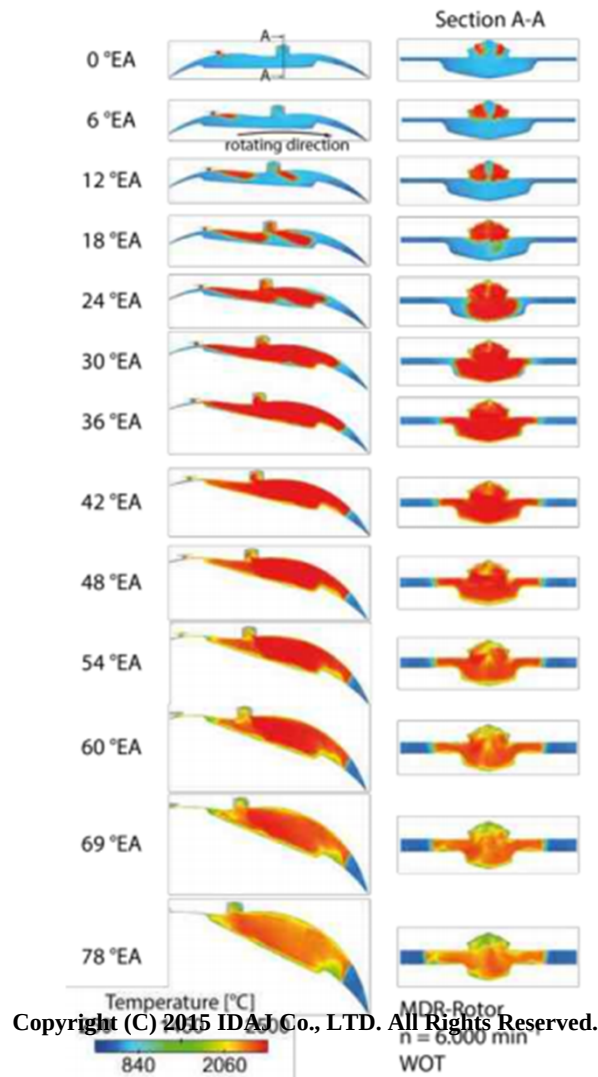
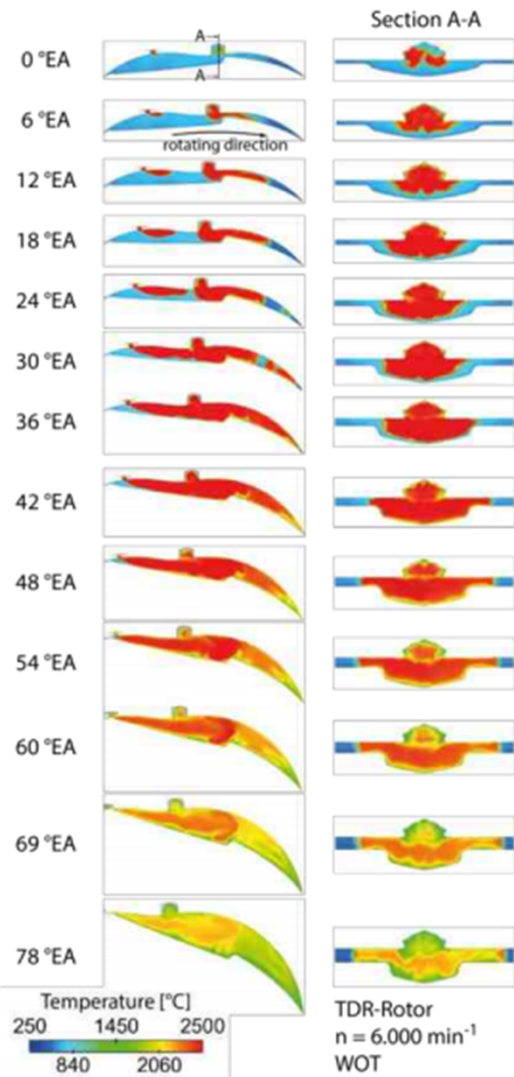
■ 转子发动机的活塞设计（Austro Engines）

- 活塞的表面形状能显著影响缸内流场，残余气体量，燃油空气混合以及燃烧
- 由于CONVERGE的仅仅是CAD画图的时间



点火和燃烧

■ 转子发动机的活塞设计 (Austro Engines)



Copyright (C) 2015 IDA J Co., LTD. All Rights Reserved.

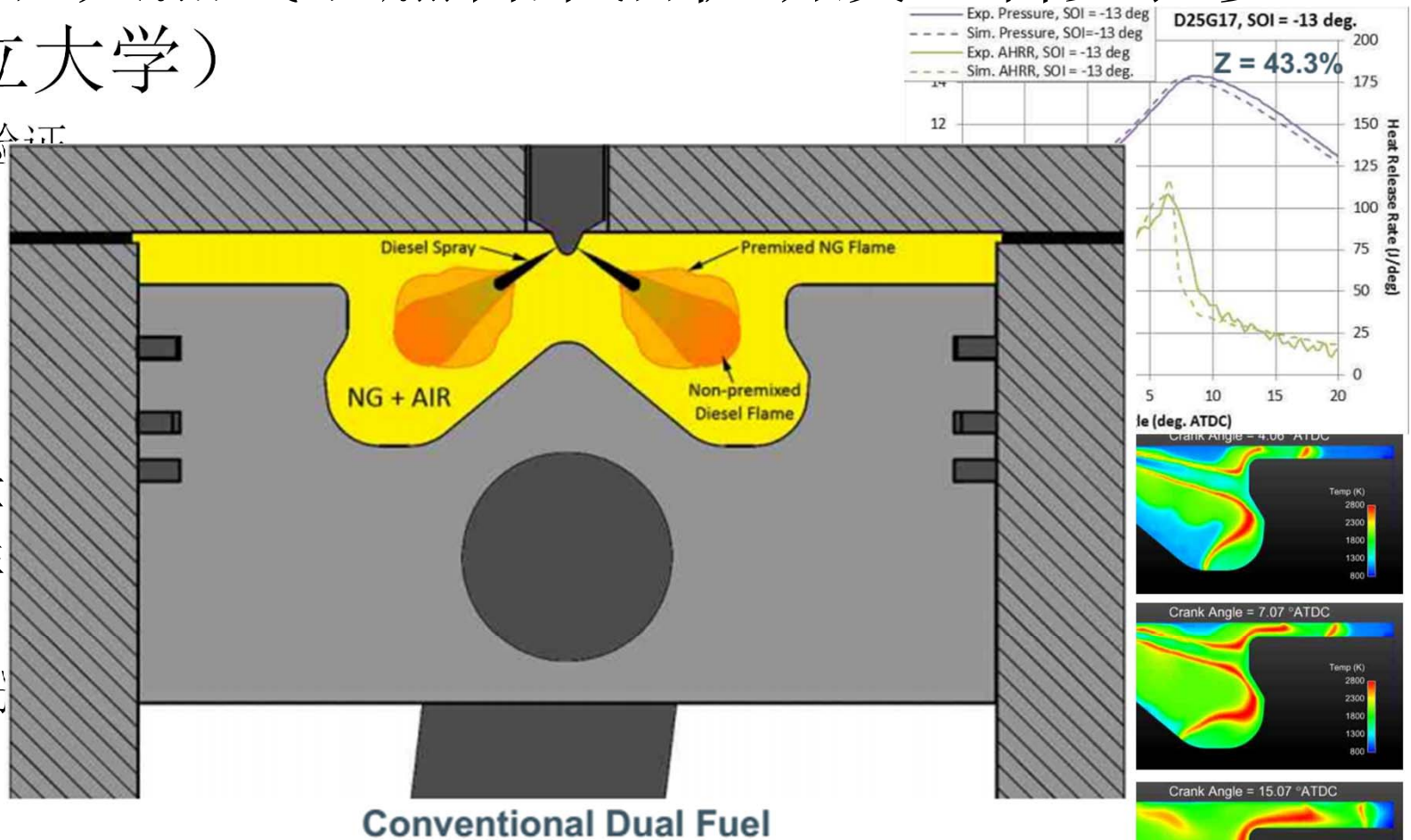
点火和燃烧

■ 柴油+天然气双燃料柴油机研发（科罗拉多州立大学）

➤ 模型验证

➤ 发现：
少量热量
反应活性

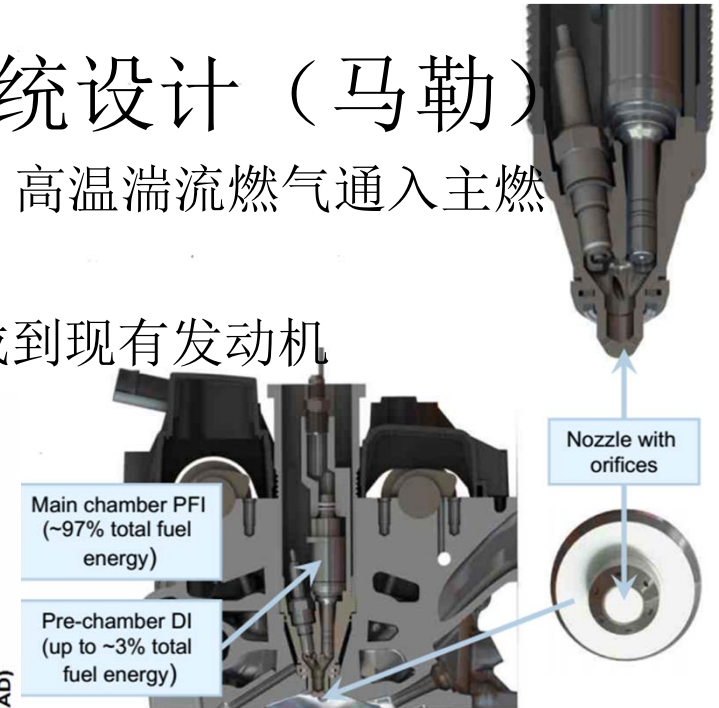
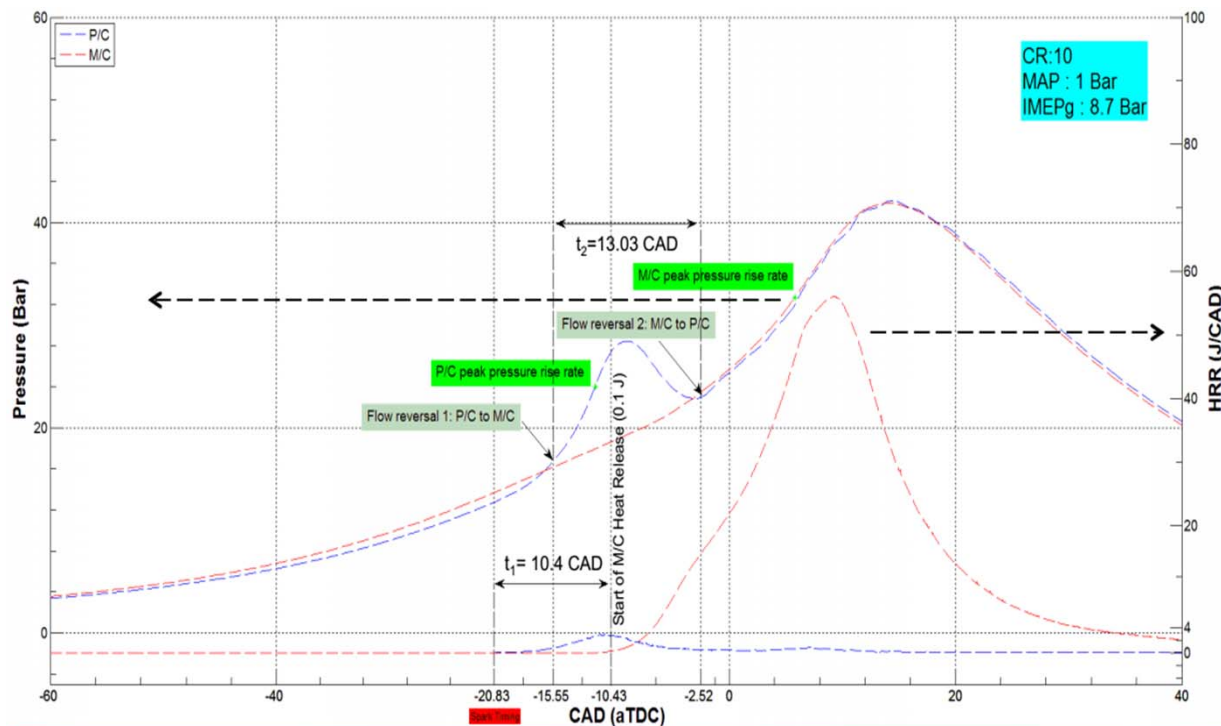
➤ 大部分



点火和燃烧

■ 超稀薄燃烧+预燃室点燃系统设计（马勒）

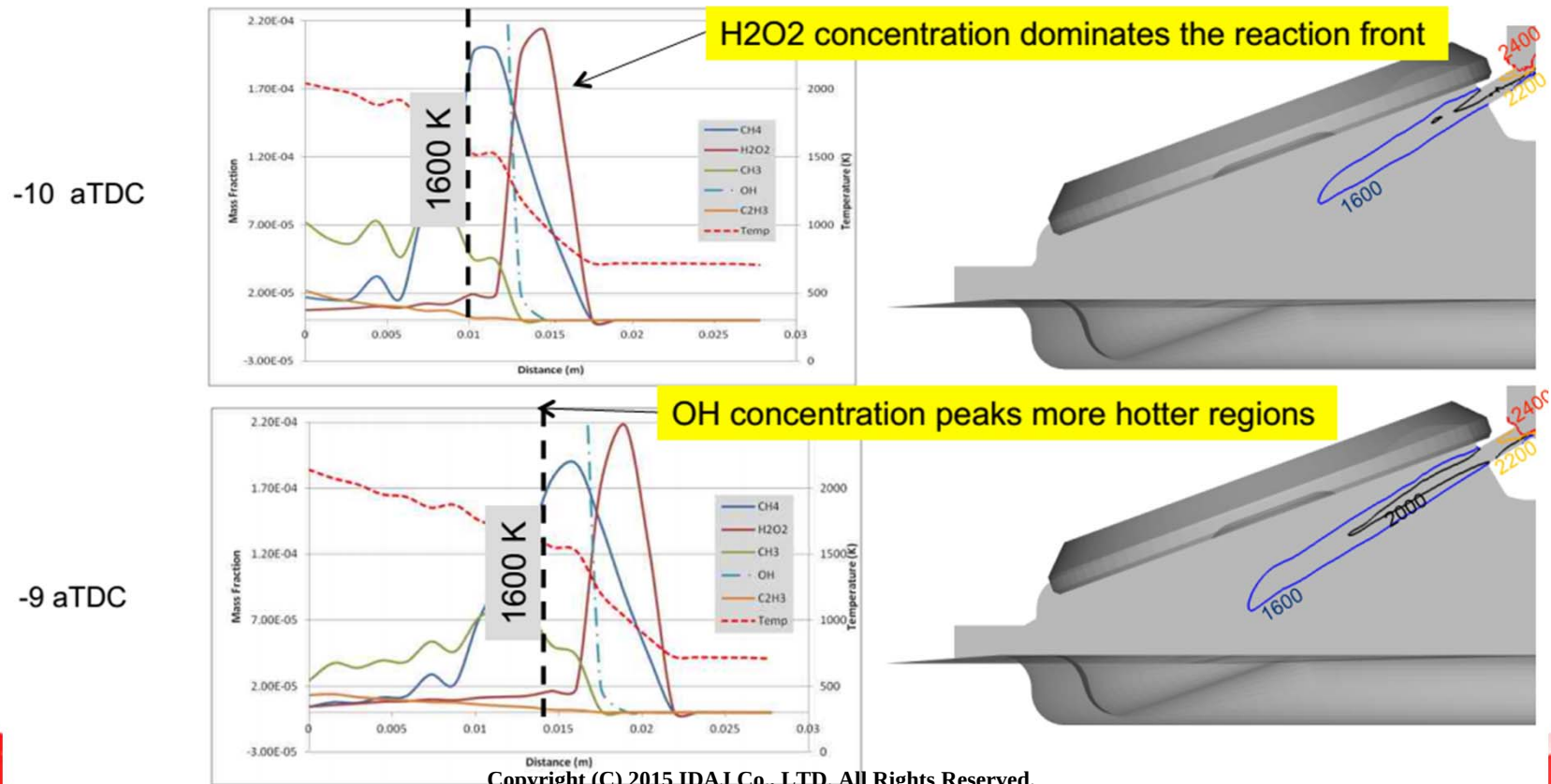
- 少部分直喷燃油在预燃室燃烧，通过喷嘴，高温湍流燃气通入主燃室引燃超稀薄（ $\lambda > 2$ ）的油气混合物
- 优势：低NO_x排放，低敲缸趋势，容易集成到现有发动机



点火和燃烧

■ 超稀薄燃烧+预燃室点燃系统设计（马勒）

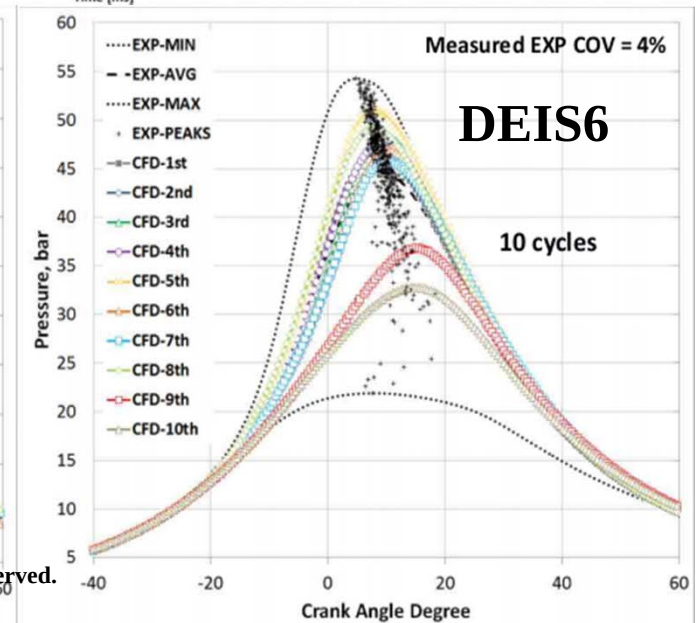
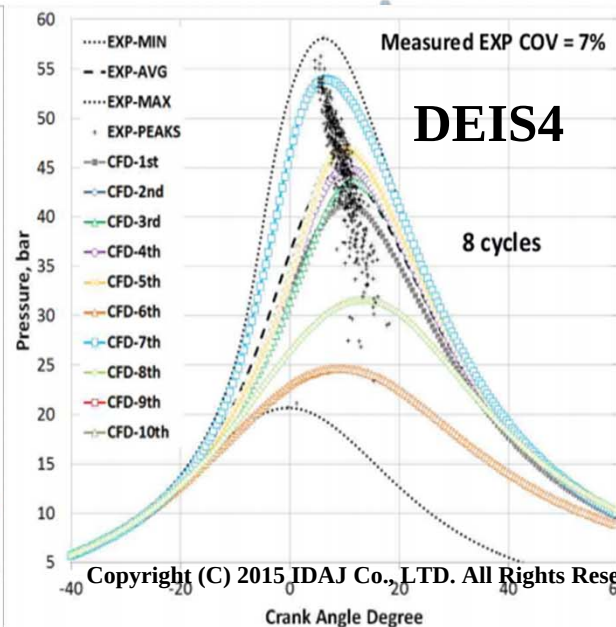
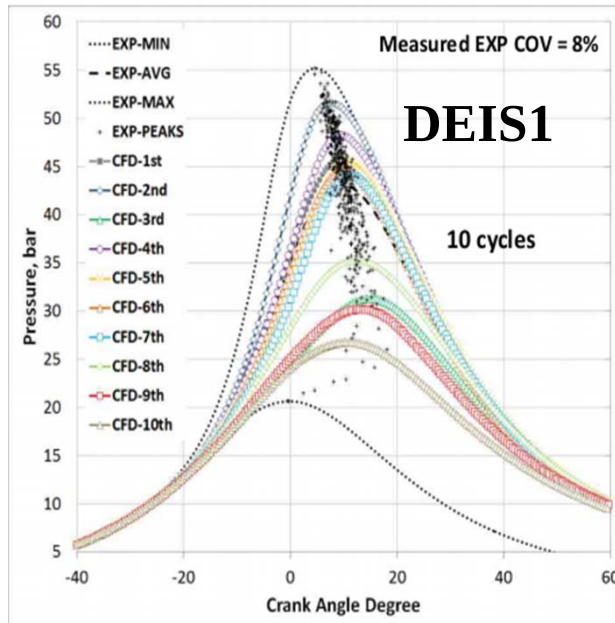
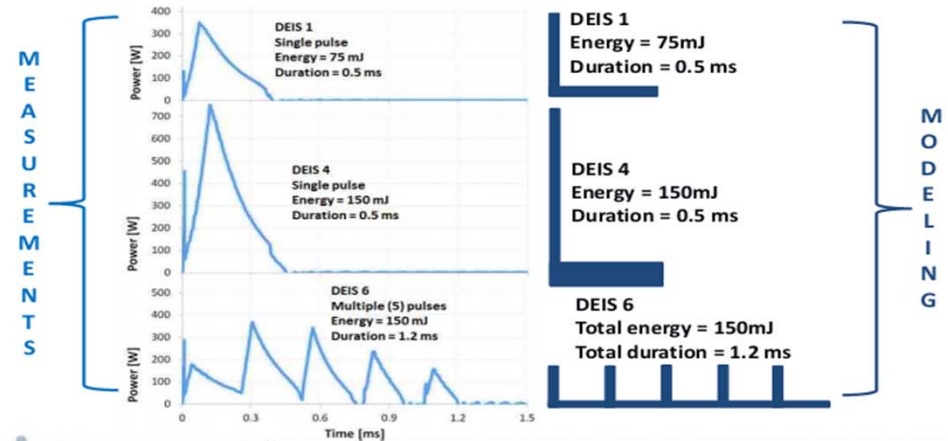
- 重要反应中间产物和温度沿预燃室喷嘴轴线的分布：OH粒子分布对应反应温度分布， H_2O_2 粒子分布对应火焰前锋面



点火和燃烧

■ 汽油机不同工作循环间的差异（阿贡实验室）

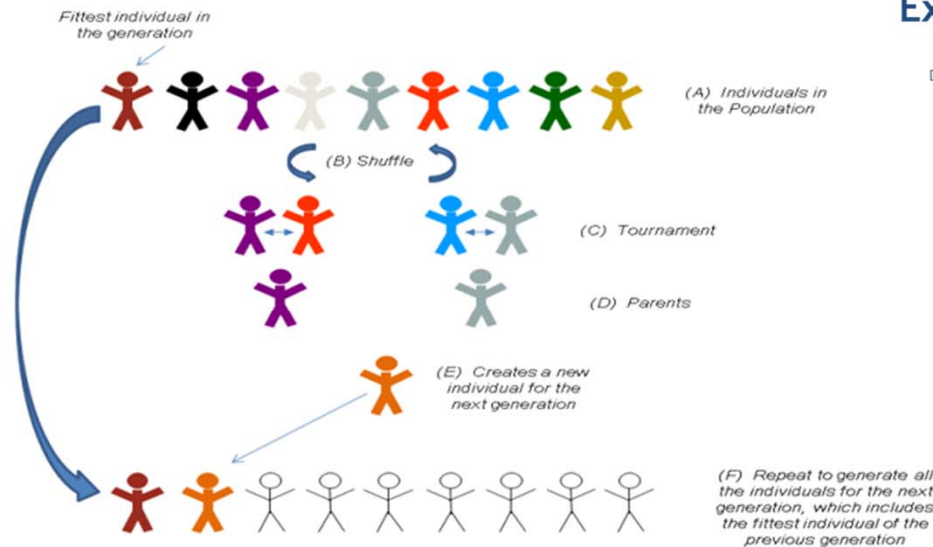
➤ 不同的点火策略能对工作循环间差异产生很大的影响



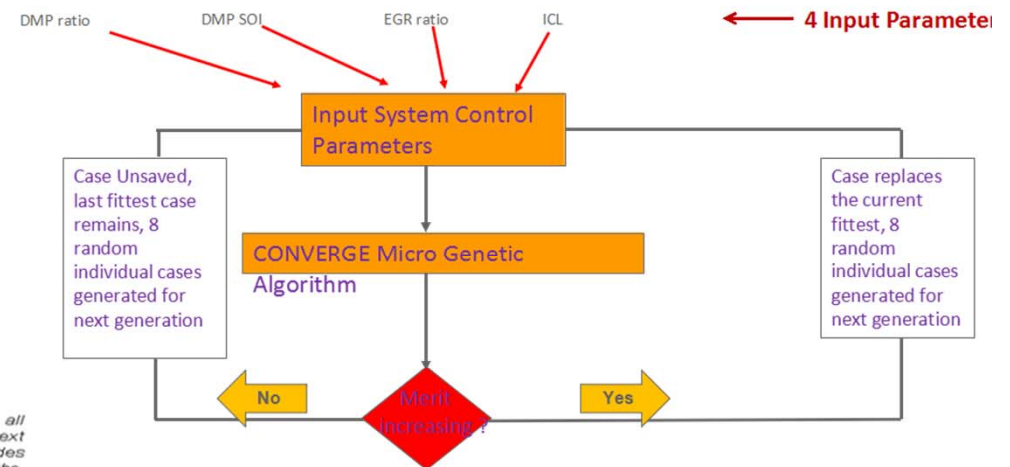
拓展-遗传算法

■ 遗传算法（Genetic Algorithm）

- 原理：模仿自然选择，优胜劣汰，保留超过设定目标函数值的参数设置，剔除无法达标的设置
- CONVERGE与遗传算法结合能大量简化和加快产品设计与优化过程；已自带遗传算法模块CONGO



Execution Flow Chart



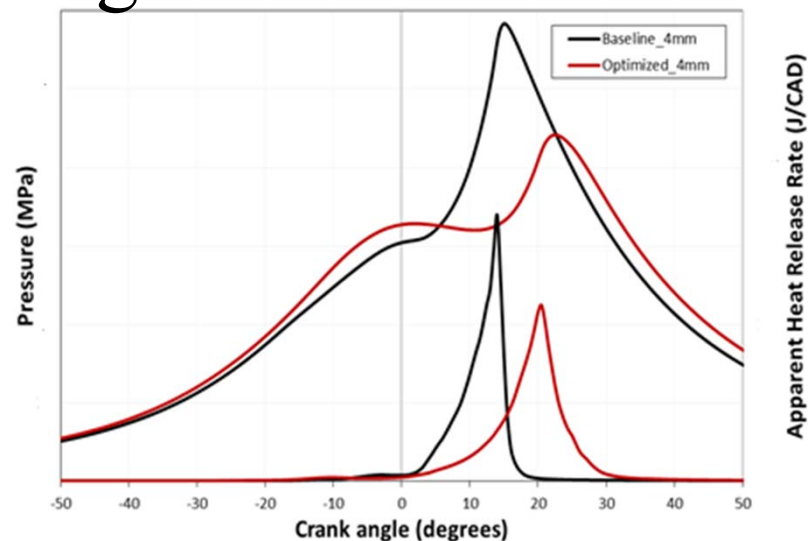
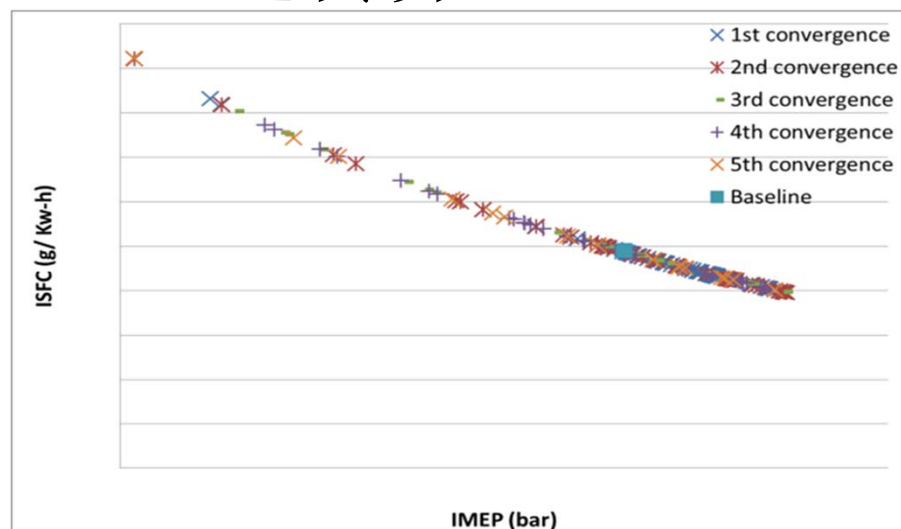
Merit = ISFC_target/ISFC - constraints (IMEP, knock index, COV_indicators)

knock index : maximum amplitude pressure oscillation for a CA window

COV_indicators : average of tke, stdev of phi

拓展一遗传算法

■ 遗传算法 (Genetic Algorithm)



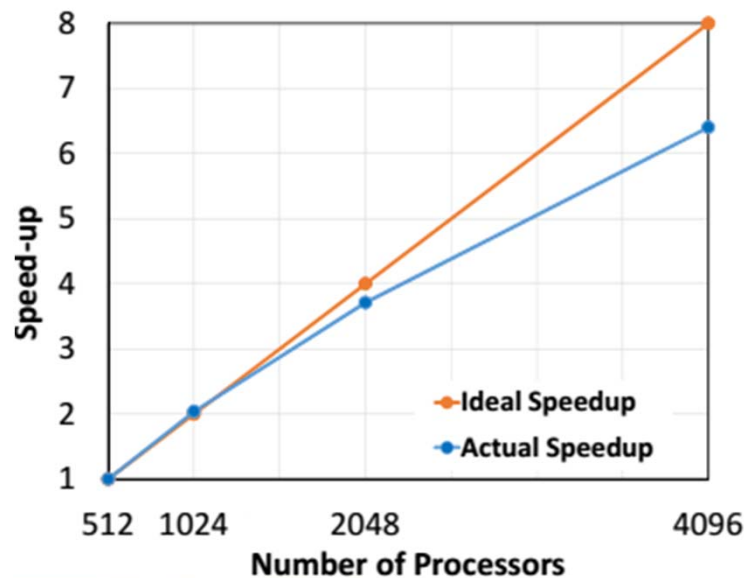
Soot (g/Kw-h)		NOx (g/Kw-h)		ISFC (g/Kw-h)	
Baseline	Optimized	Baseline	Optimized	Baseline	Optimized
4.4E-02	1.1E-02	7.6E-02	6.0E-02	197.6	183.7

- 优化后的内燃机控制参数使得：进气压力提高，着火点延时，燃烧时间延长，燃油经济性提升，排放降低

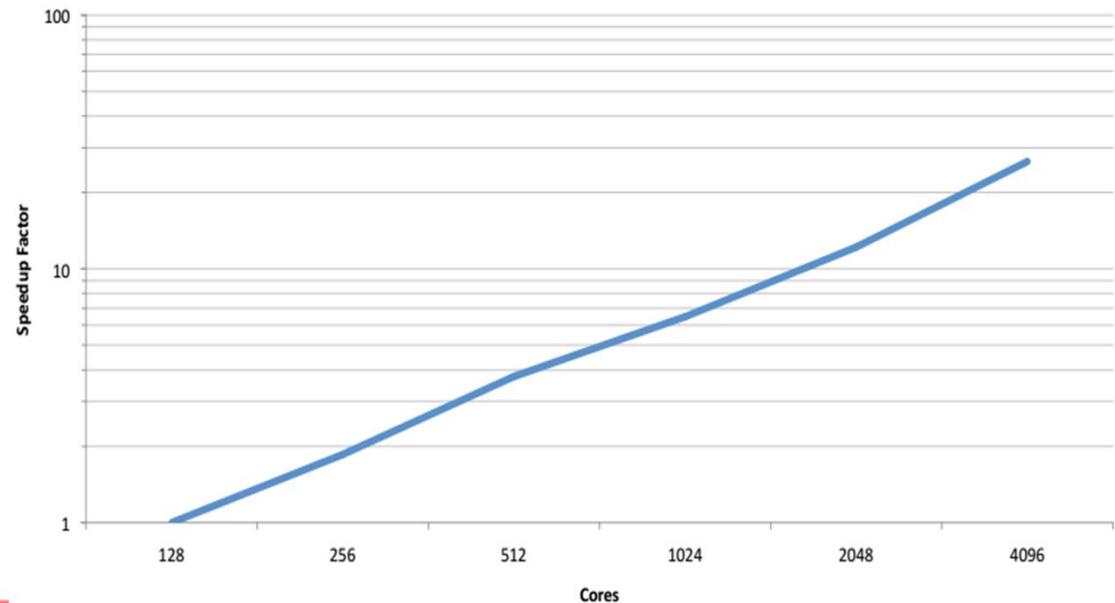
拓展—高效并行效率

■ 高性能计算（High Performance Computing）

- 模拟复杂的喷雾燃烧物理现象离不开多个CPU协同工作。理论上计算速度和CPU的数量成系数为1的线性正比。但是因为CPU任务分配的不平均，CPU之间交流所消耗的时间，实际上系数小于1
- CONVERGE能让加速系数尽量趋近于1



Scaling Performance (compute time)
SOI -35° aTDC [0.66° - 0.74° CA]



拓展—云计算

- **CSI和Rescale**合作推出云计算
- **Rescale**开发了一种易用的界面来远程运行和监控**CONVERGE**的计算
- 云端使用**CONVERGE**的两种选择:
 - 本地**license**使用**Rescale**的硬件资源
 - 以小时计费使用硬件和软件
- **Converge**的云计算还提供附加价值:
 - 需要大硬盘空间的计算（优化）
 - 对**CFD**的间歇性的大量需求
 - 新的**CONVERGE**客户端 (更低的价格)
 - 咨询服务团队



•CONVERGE User

- Download output

http://

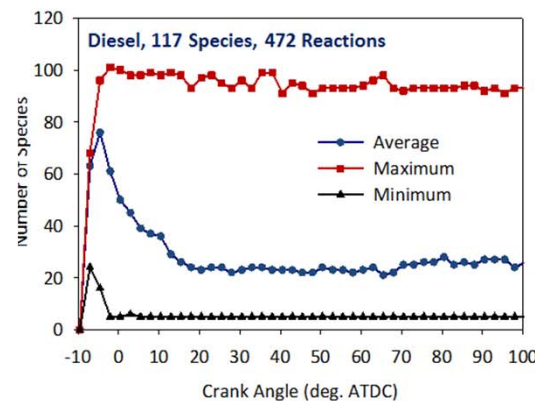
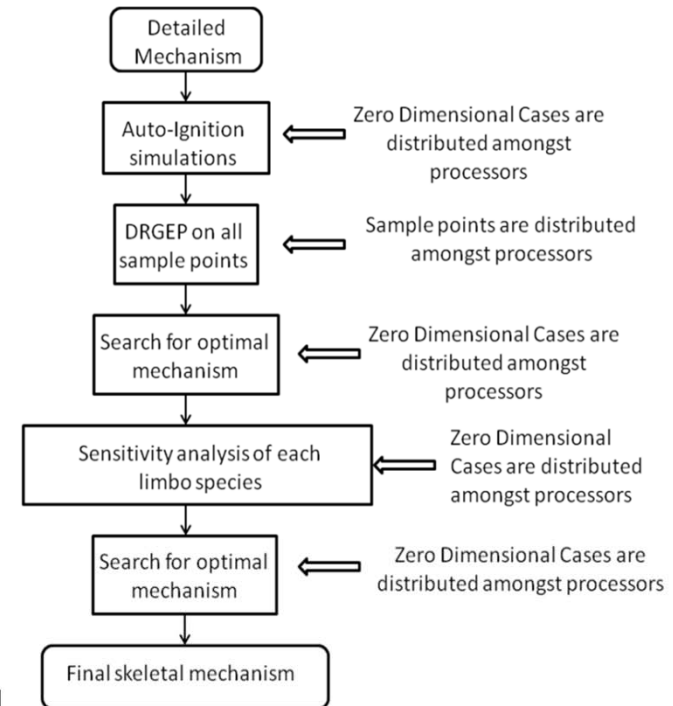
- Upload input files

- Submit/monitor simulations



拓展—动态燃烧机理简化

- 使用**SAGE**详细化学反应求解器的用户必须提供一个反应机理
- **CONVERGE**中没有组分和反应数量的理论限制
- **CSI**开发了机理简化工具旨在最大化精度最小化机理规模
- 这个工具称为**Parallel Directed Relation Graph with Error Propagation and Sensitivity Analysis (PDRGEPSA)**
- 不重要的组分和反应会被去除并生成一个精简的机理
- **v2.2**版本实现动态机理简化



• *Number of species vs crank angle showing the computational speed provided by dynamic mechanism reduction*

拓展—soot模拟

Convergent Science integrates advanced soot modeling capability into CONVERGE™

Convergent Science Inc. has announced that it is collaborating with Professor Fabian Mauss of Brandenburg Technical University in Cottbus, Germany (BTU-Cottbus) to integrate advanced soot models into the CONVERGE™ CFD software. The advanced models will improve the accuracy of emissions predictions by incorporating detailed descriptions of the soot formation processes. For example, soot inception is modeled through the prediction of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) formed from a complex set of chemical reactions.



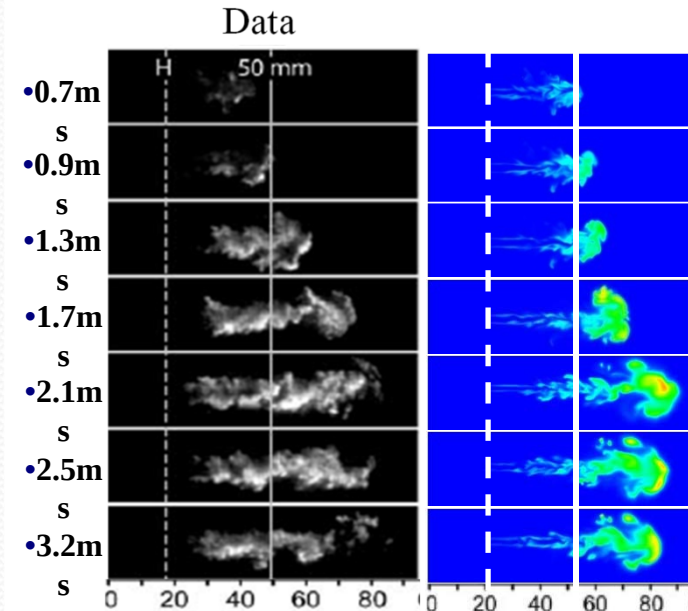
Historically, obtaining accurate predictions of soot has been one of the most challenging aspects of internal combustion engine modeling. Emissions mandates are becoming exceedingly stringent, pushing soot levels lower and increasing the level of accuracy needed in predictions. As a result, simplified two-step soot models, while still providing trends for traditional engine designs, often break down when advanced combustion strategies are employed.

Dr. P. Kelly Senecal, Vice President at Convergent Science stated "We are very pleased to integrate Professor Mauss' advanced soot models into CONVERGE™. The models are a natural extension of our SAGE detailed chemistry solver which efficiently calculates large sets of chemical reactions. Our goal is to provide our users with the most predictive combustion and emissions models available. We believe that the combination of CONVERGE™'s industry-leading CFD technology and Professor Mauss' cutting edge models will deliver this level of accuracy."

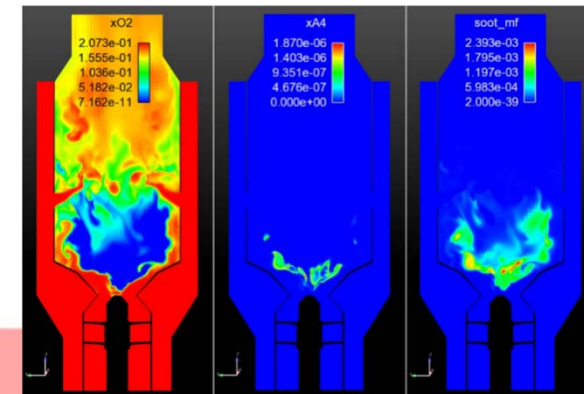
Dr. Fabian Mauss, Professor at BTU-Cottbus commented "I am glad to see the results of our research integrated in CONVERGE™. I am excited that the model integration will support engineers to meet their emission targets in the future."

CONVERGE™ is innovative CFD software that automates the meshing at runtime with a perfectly orthogonal Cartesian mesh, eliminating the need for a user defined mesh. This combined with its Adaptive Mesh Refinement technology allows for easy analysis of complex geometries and moving boundaries. CONVERGE™ is also equipped with extremely fast and efficient detailed chemistry, an extensive set of physical sub-models, a genetic algorithm optimization module, and fully automated parallelization.

•CSI公司和科特布斯工业大学（BTU-Cottbus）的Fabian Mauss 教授密切合作提供最新的soot模型



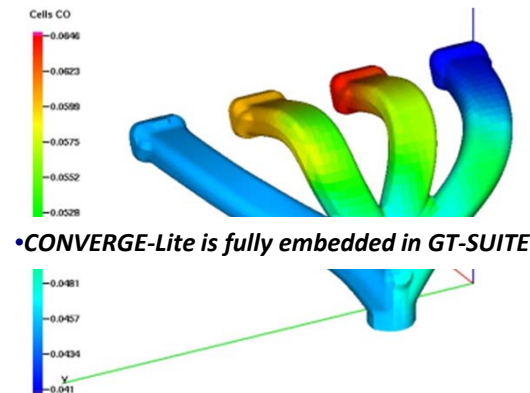
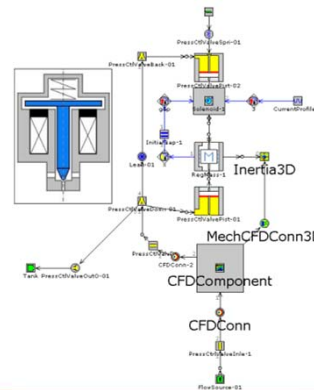
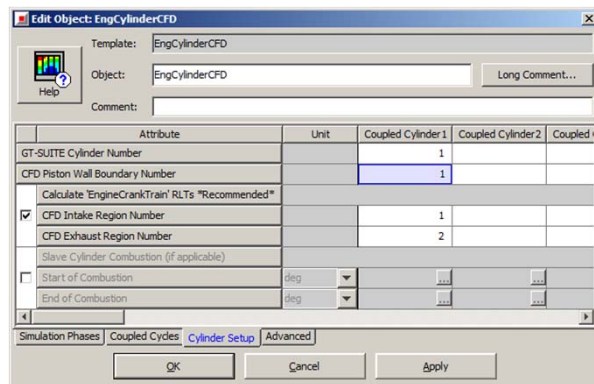
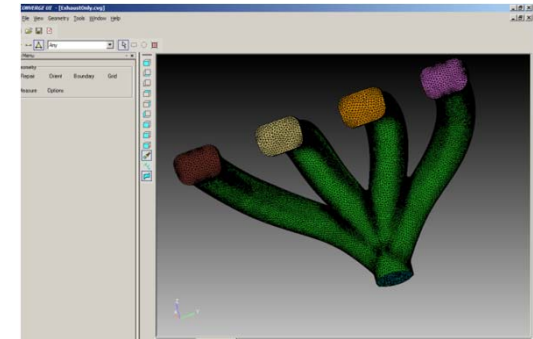
•Soot Data from LM Pickett & DE Siebers, Combustion and Flame 2004



$$\frac{\partial M_r}{\partial t} + \nabla \cdot (M_r \cdot v) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu}{SC} \nabla \left(\frac{M_r}{\rho} \right) \right) + \dot{s}_M$$

拓展一与Gamma公司合作

- CSI公司与Gamma公司合作密切：技术协作
- **CONVERGE-Lite** – 完全嵌入到GT-SUITE的CONVERGE版本，并同GT-SUITE联合发行
 - 模拟歧管、EGR混合、流量分配研究等
- 缸内耦合- 多缸计算
 - **GT** 和**CONVERGE** 可以在缸内的层面耦合，即**CONVERGE**求解缸内，**GT**求解系统的其他部分
- 液压机械耦合- **2014年秋 (V7.5)**
 - **GT** 求解**1D**流体力学以及**1D/2D/3D** 机械运动
 - **GT** 将机械位置（球阀、针阀等）传递给**CONVERGE**
 - **CONVERGE** 求解**3D**流动，将流体作用与机械单元的力和动量 传递给**GT**
- 后处理模拟- **2014秋 (V7.5)**



• **CONVERGE-Lite is fully embedded in GT-SUITE**

拓展—SCR模拟

■ 尾气处理

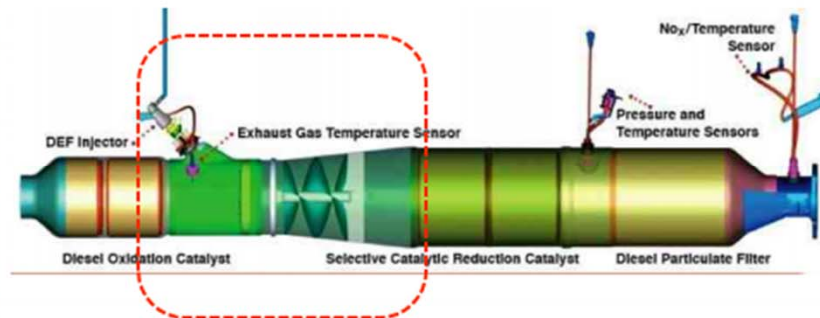
- 由于CONVERGE的自动网格生成功能，精准的喷雾，湍流和化学反应模型，它能够很方便的拓展到尾气处理装置的模拟

Putting the Pieces Together for Urea/SCR

- Complicated geometries
 - No-User Meshing and AMR
- Detailed chemistry
- Turbulence models
 - RANS and LES
- Atomization models
 - Liquid breakup
 - Spray-Wall Interactions
 - Liquid filming/evaporation
 - Urea wall deposition ← Requested feature in v2.3

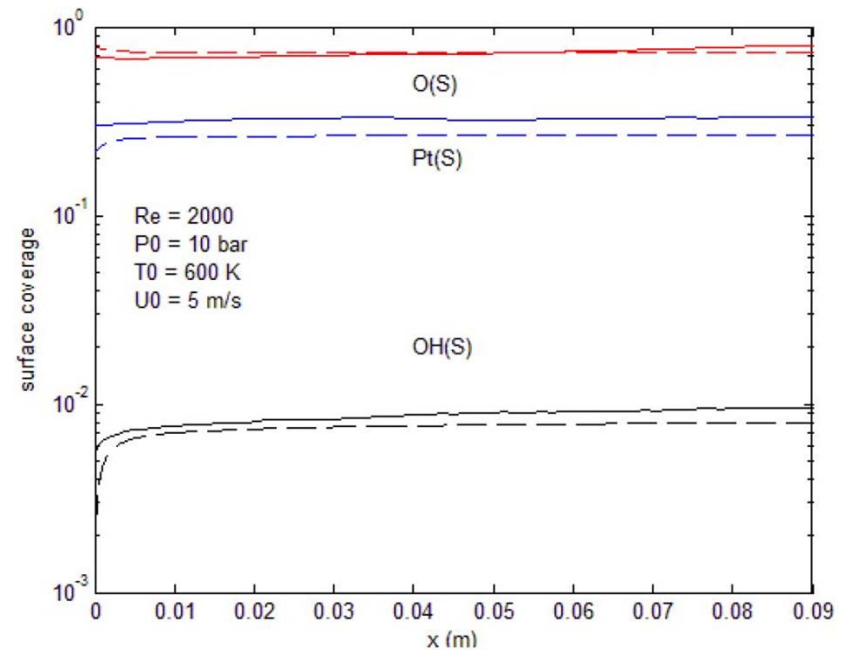
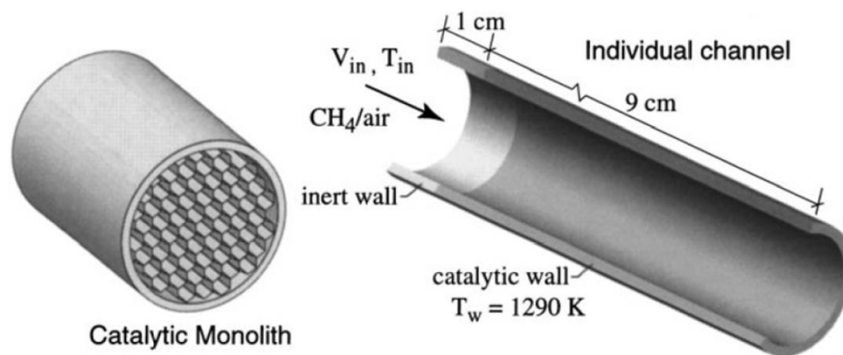
- Catalyst simulation ← With future GT-Power link and CSI surface chemistry tool

CONVERGE Capabilities Today



拓展一表面化学反应

- 反应机理导入**Chemkin**格式
 - 包括表面覆盖改性，粘附系数和大部分组分
- 反生在求解壁面以及多孔介质中的表面反应



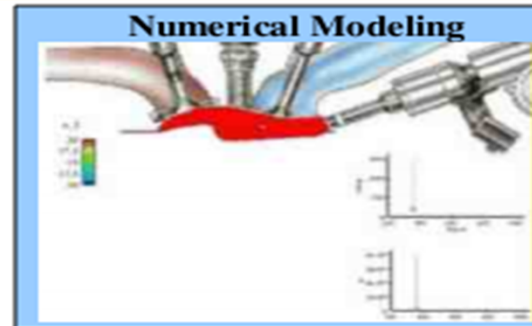
拓展—优化设计

■ 与台架试验的结合得出最优化的设计

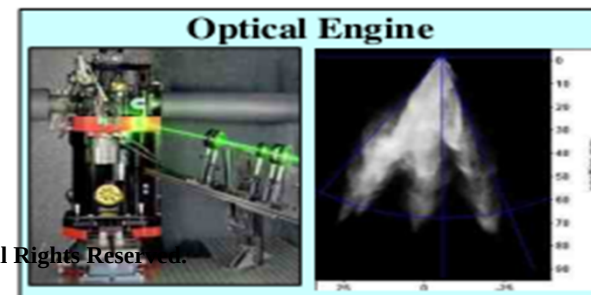
Integrated Up-front Combustion System
Optimization Methodology



Research and
Advanced Engineering



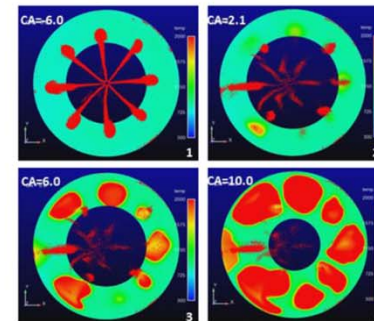
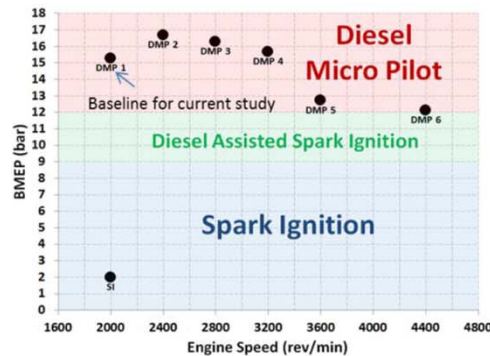
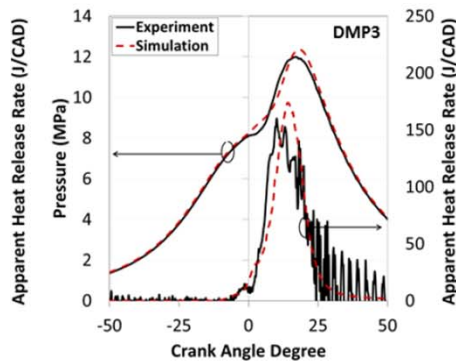
- Ford's upfront combustion system development tool integrates CFD modeling, optical experiments and dyno testing
- The CFD modeling codes leverage Ford internal development and user-friendly, highly parallel, auto-meshing commercial software.



Copyright (C) 2015 IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

拓展—ASME内燃机会议

- 2013年ASME内燃机会议上有13篇使用CONVERGE作为CFD工具的技术论文发表
- 作者包括: Cameron Compression Systems, Cummins, Argonne National Lab, Caterpillar, Sandia National Lab, Chrysler Group LLC, General Motors, University of Perugia Italy, Mississippi State University, Carnegie Mellon University
- 主题包括: 大缸径天然气燃烧模拟, 喷孔流动及气蚀, 生物柴油化学动力学, 柴油燃烧, 柴油引燃汽油发动机模拟, SI热载荷预测, RANSvsLES模拟缸内流动, LES喷雾模拟, HCCI燃烧等

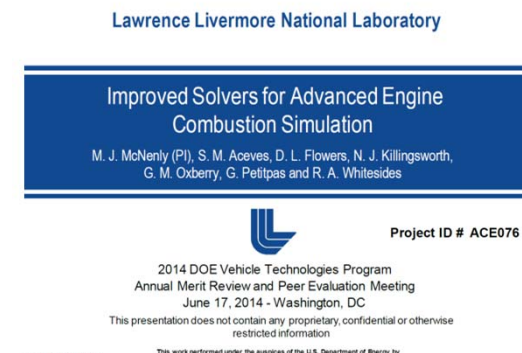


• ICEF2013-19170



拓展—美国能源部绩效评估会议

- 2014年6月，美国能源部举行年度绩效评估会议
- 17位演讲者提及CONVERGE
- 所有演讲报告均可在线搜索

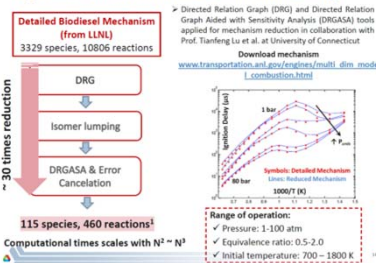


• <http://energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office-annual-merit-review-and-peer-evaluation>

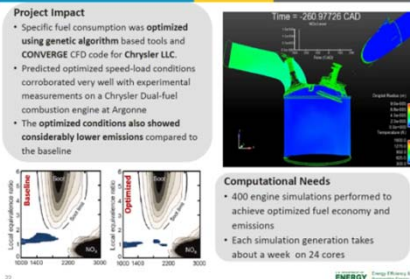
拓展—美国能源部绩效评估会议

- 研究题目包括：优化，喷雾模拟，喷孔分析，循环变动，机理简化，碳烟模拟，化学反应加速，预燃室发动机，LES，气蚀，GPU并行，柴油机，汽油机

Approach: Mechanism Reduction Methodology



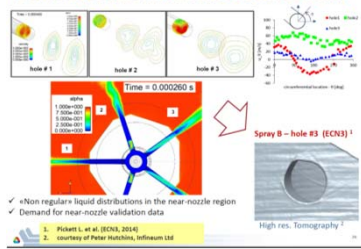
Fuel Economy Optimization with High-Fidelity Simulations



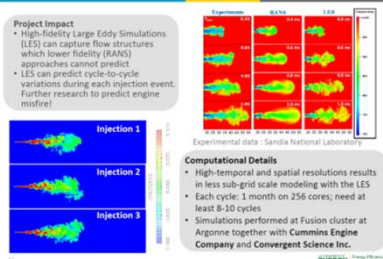
Technical Accomplishments

- Correlated Fueled Pre-Chamber Simulation
- MAHLE Powertrain
- Iso-surface temperature (1500 K)
 - Main chamber combustion primarily controlled by:
 - Pre-chamber combustion event
 - Nozzle geometry
 - Multiple, distributed ignition sites
 - Gas exchange resonance between chambers
- Crank Angle = 26 aTDC
- Spark 1: 30° ~ 30° BTDC, 31° ~ 30° BTDC

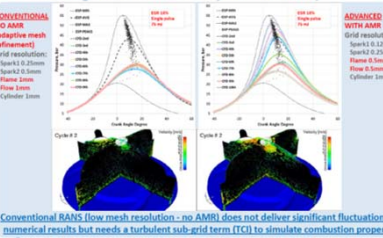
Needle wobble: near-nozzle hole-to-hole variation



Cyclic Variability with Large Eddy Simulations



Simulation Details



拓展—美国能源部绩效评估会议

- 福特，通用，橡树岭国立研究所和通用电气都使用CONVERGE进行设计开发项目



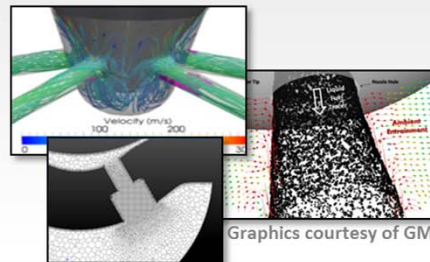
Gasoline DI fuel injector design optimization

Understand and optimize the design of GDI fuel injectors for improved efficiency and reduced emissions.

Computational framework to automate labor-intensive tasks through the iterative design process.

Coupling models of internal injector flow and cavitation with in-cylinder spray and combustion.

Enables massively parallel simulations for thorough and *rapid* investigation and optimization across *operational and geometric* design spaces.



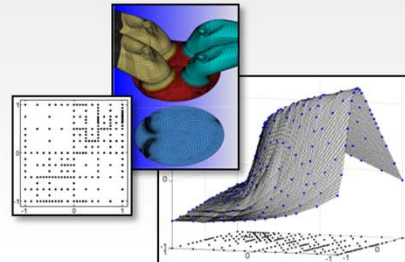
Cycle-to-cycle variation in highly dilute ICEs

Understand the stochastic and deterministic processes driving cyclic variability in highly dilute SI engines.

Novel approach to *parallel* simulation of a *serial* phenomena.

Detailed CONVERGE simulations at intelligently selected sample points in parameter space.

Enables creation of low-order metamodels that retain key dynamics of CFD model but greatly reduce computational time for thorough exploration of parameter space.



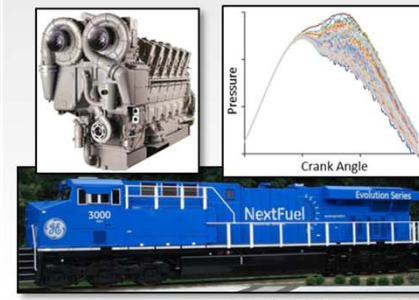
Cycle-to-cycle variation in dual-fuel locomotive engine

Investigate key factors promoting cyclic variability in a dual-fuel (NG/diesel) locomotive application.

Industry-driven with ORNL providing methodology, HPC resources, and limited support.

Similar approach to high-dilution effort with CONVERGE simulations feeding metamodel development.

Stable dual-fuel operation will enable significant displacement of petroleum-based diesel fuel with NG.



4 Edwards – ACE017

Use of logos and graphics approved by respective industry partners

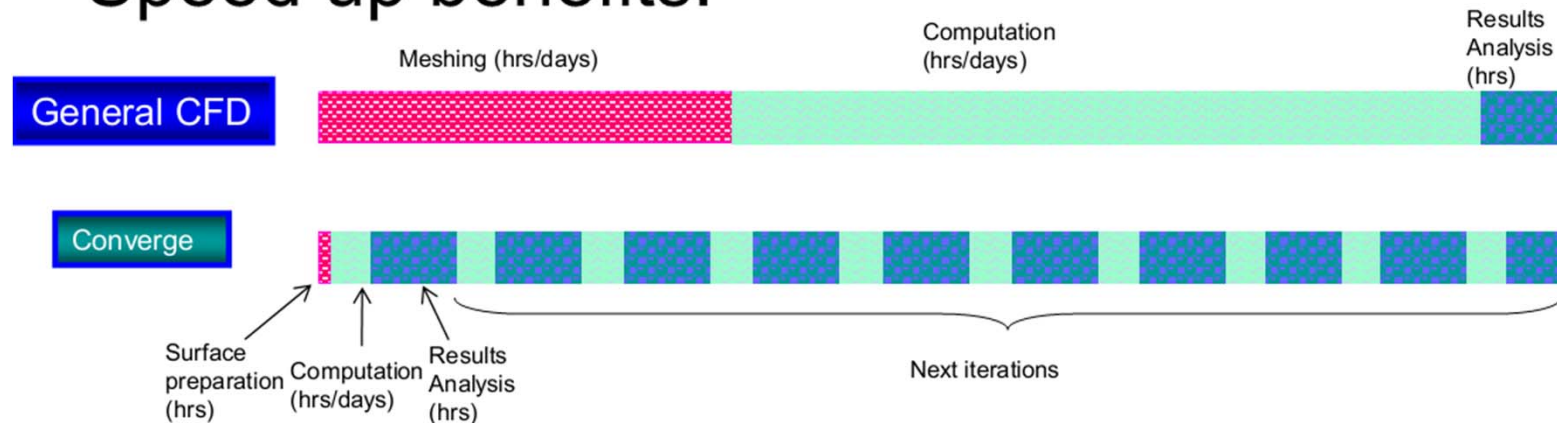
OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY
MANAGED BY UT-BATTELLE FOR THE U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace017_edwards_2014_o.pdf

总结

- 基于CONVERGE的先进仿真技术可以应用在发动机开发中的各个主要环节，包括气体流动，喷雾，燃烧，排放
- CONVERGE结合其他先进技术比如遗传算法，高性能计算，以及GT-Power能大大缩

Speed up benefits:



谢谢大家！

wang.zihan@idaj.cn

support@idaj.cn