



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



CFD仿真技术在GDI发动机燃烧系统开发解决方案

2015 Road show

IDAJ-China 技术部

钟修林



IDAJ-CHINA



IDAJ艾迪捷



- 所有公司名, 产品名, 服务名是 各个公司的商标或登记商标以及服务商标。
- 本资料包括保密信息。没有得到敝公司的同意, 请不要使用, 发布, 复制本资料或本电子档。

提纲

□ 总述

- GDI发动机优势及面临挑战
- GDI发动机开发中CFD的应用

□ 喷雾

- GDI喷雾系统关注点
- Converge解决方案
- 案例介绍

□ 燃烧

- GDI燃烧系统关注点
- Converge解决方案
- 案例介绍

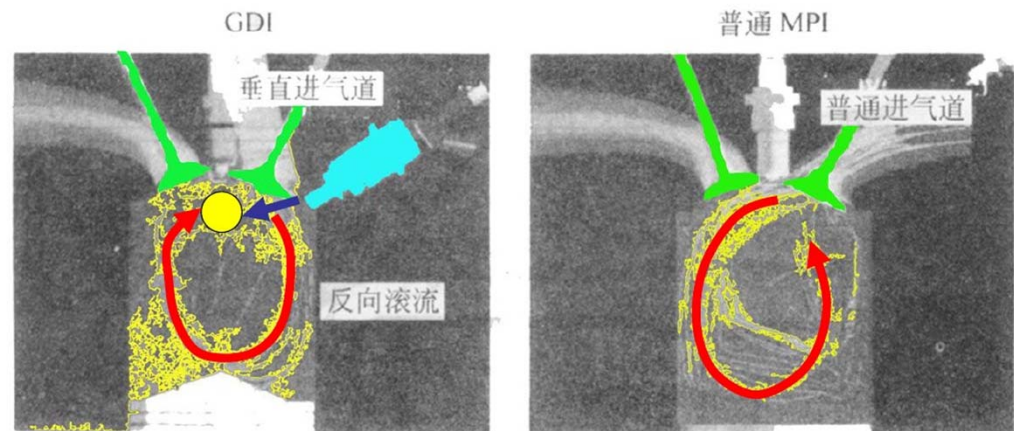
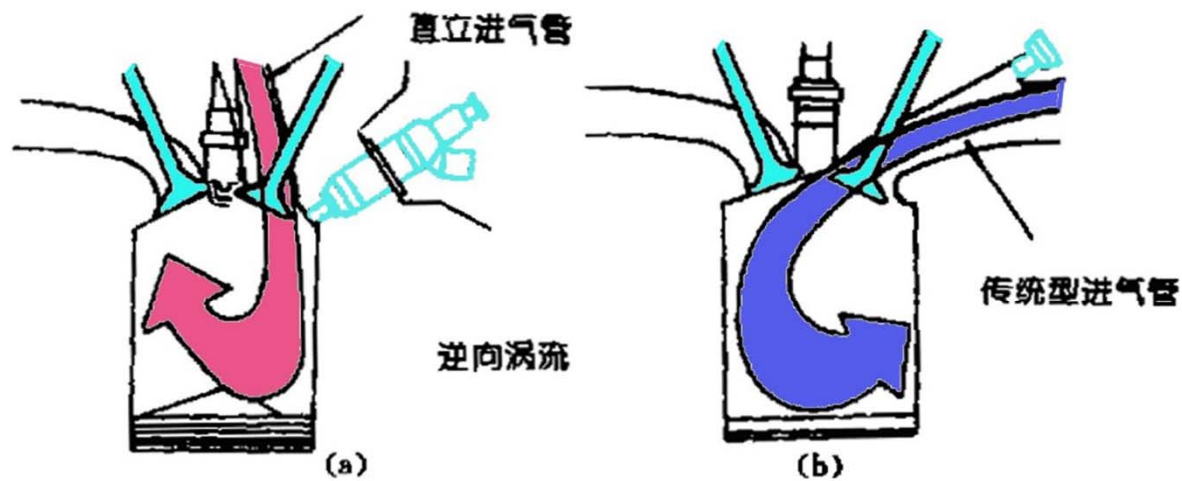


图8 缸内滚流运动
GDI与MPI发动机进气道的比较

总述

- GDI发动机优势及面临挑战
- GDI发动机开发中CFD的作用



GDI发动机优势及面临挑战

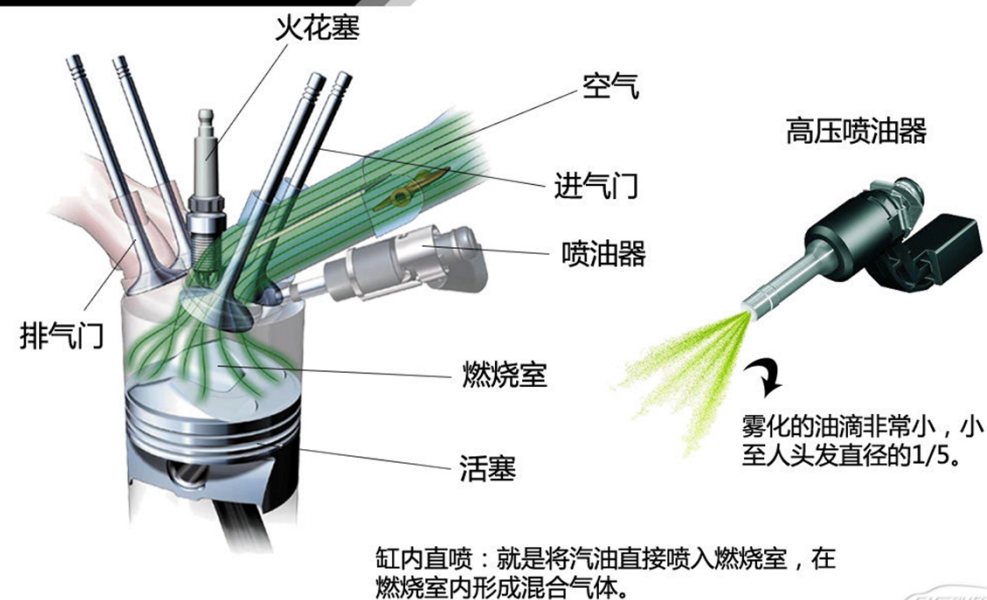
□ 优势：

- 燃油经济性
- 实现高的功率输出
- 快速响应特性

□ 挑战

- 不同负荷控制策略
- 排放问题
- 爆震问题

燃油缸内直喷原理示意图



PIC 4000
汽车电控系统

GDI发动机优势及面临挑战

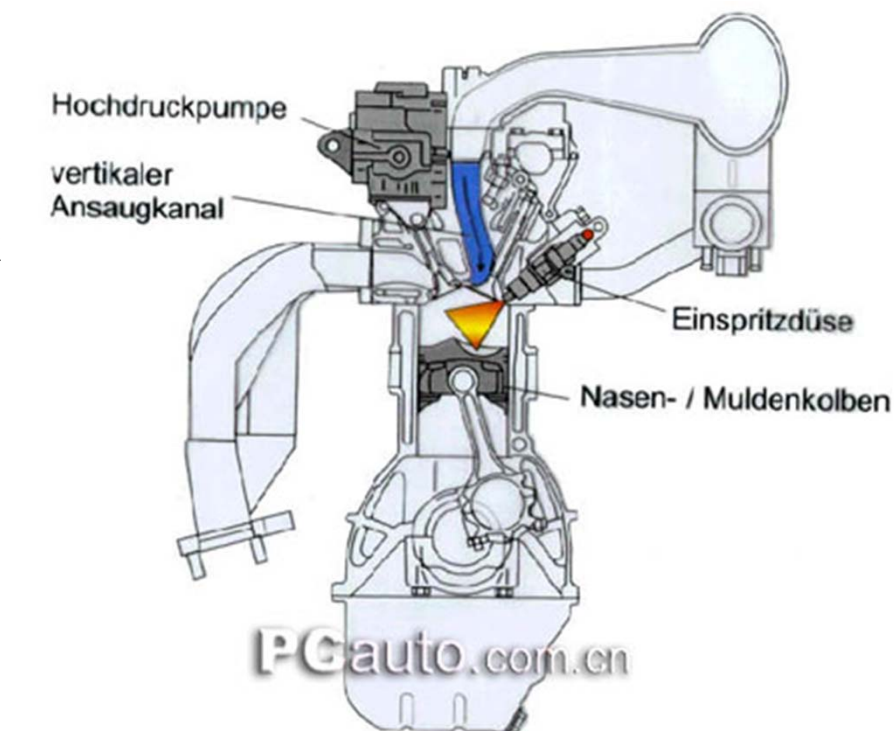
□ 优势:

■ 更好的燃油经济性

- 部分负荷时分层稀薄燃烧
- 减小节气门节流损失
- 更精确的空燃比控制
- 燃油蒸发带来更高的充气效率
- 更高的压缩比
- 更低的传热损失

■ 快速响应特性

- 冷机快速启动
- 热机状态动力响应快，无PFI发动机的响应滞后性



GDI发动机优势及面临挑战

□ 挑战

■ 不同负荷控制策略

- 从冷启动到全负荷各种工况需要不同的喷油和燃烧控制

■ 排放问题

- 部分负荷分层燃烧时局部高温带来NO_x排放较高
- 同时较低的排气温度使得三元催化器不能有效运行
- 混合不充分带来HC排放较高

■ 爆震问题

- 更高压缩比带来爆震问题

GDI发动机开发中CFD的作用

- 在GDI发动机开发过程中，CFD可以用来进行以下三个方面的分析：

流动特性

- 充气效率
- 滚流比
- 湍动能
- 平均动能
- 三维流场

喷雾特性

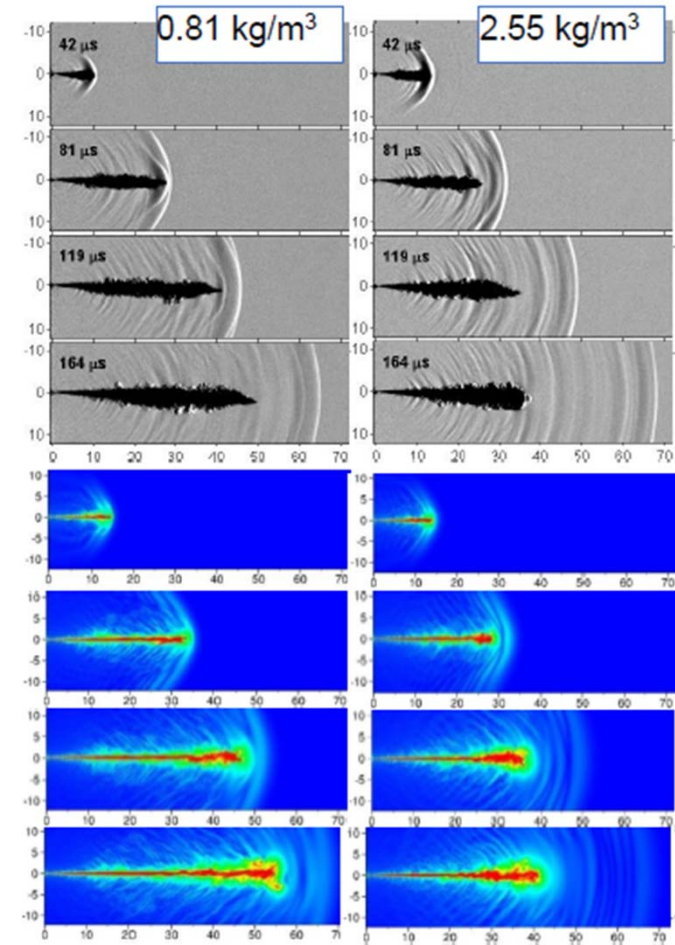
- SMD
- 贯穿距
- 蒸发速率
- 油气空间分布及均匀性
- 火花塞附近当量比
- 湿壁率

燃烧特性

- MFB
- 燃烧效率
- 热功效率
- 爆震特性
- 排放

喷雾

- GDI喷雾系统关注点
- Converge解决方案
- 案例介绍



GDI喷雾系统关注点

- 油束运动情况
- 油气空间分布
- 油气整体均匀性
- 火花塞附近油气浓度
- 湿壁情况

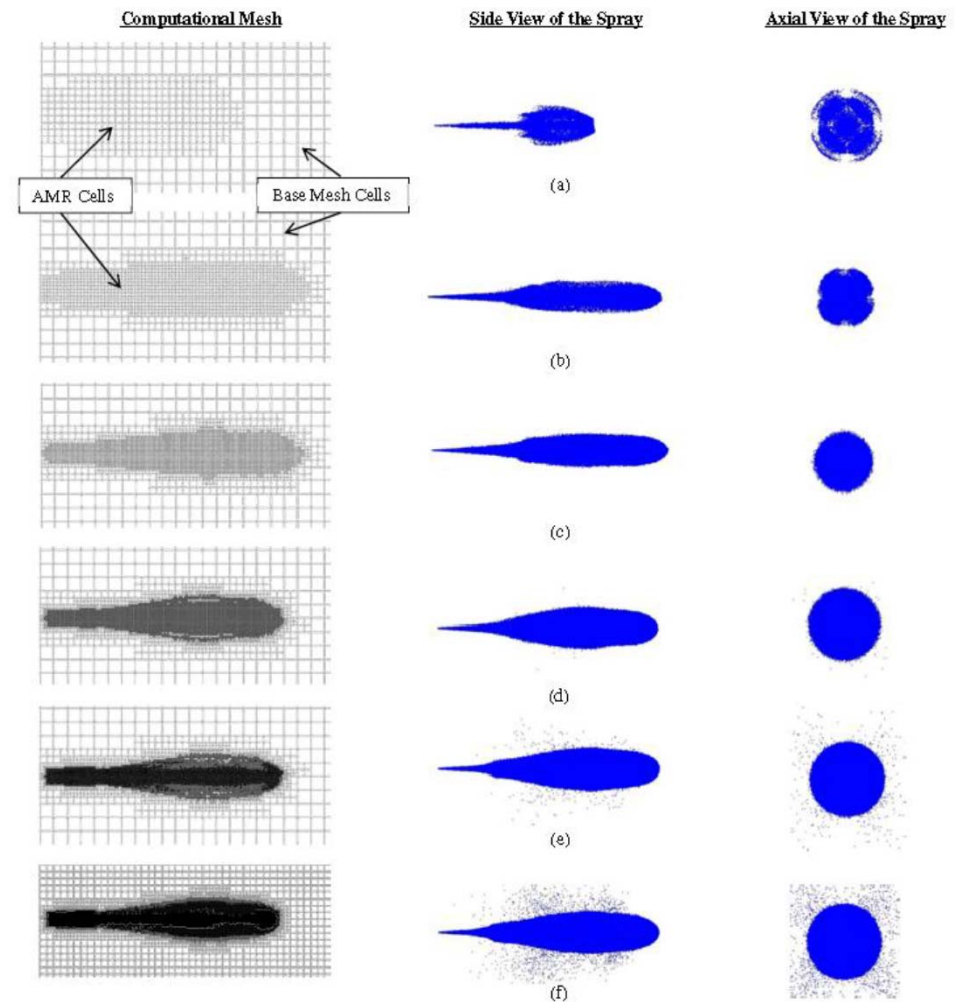
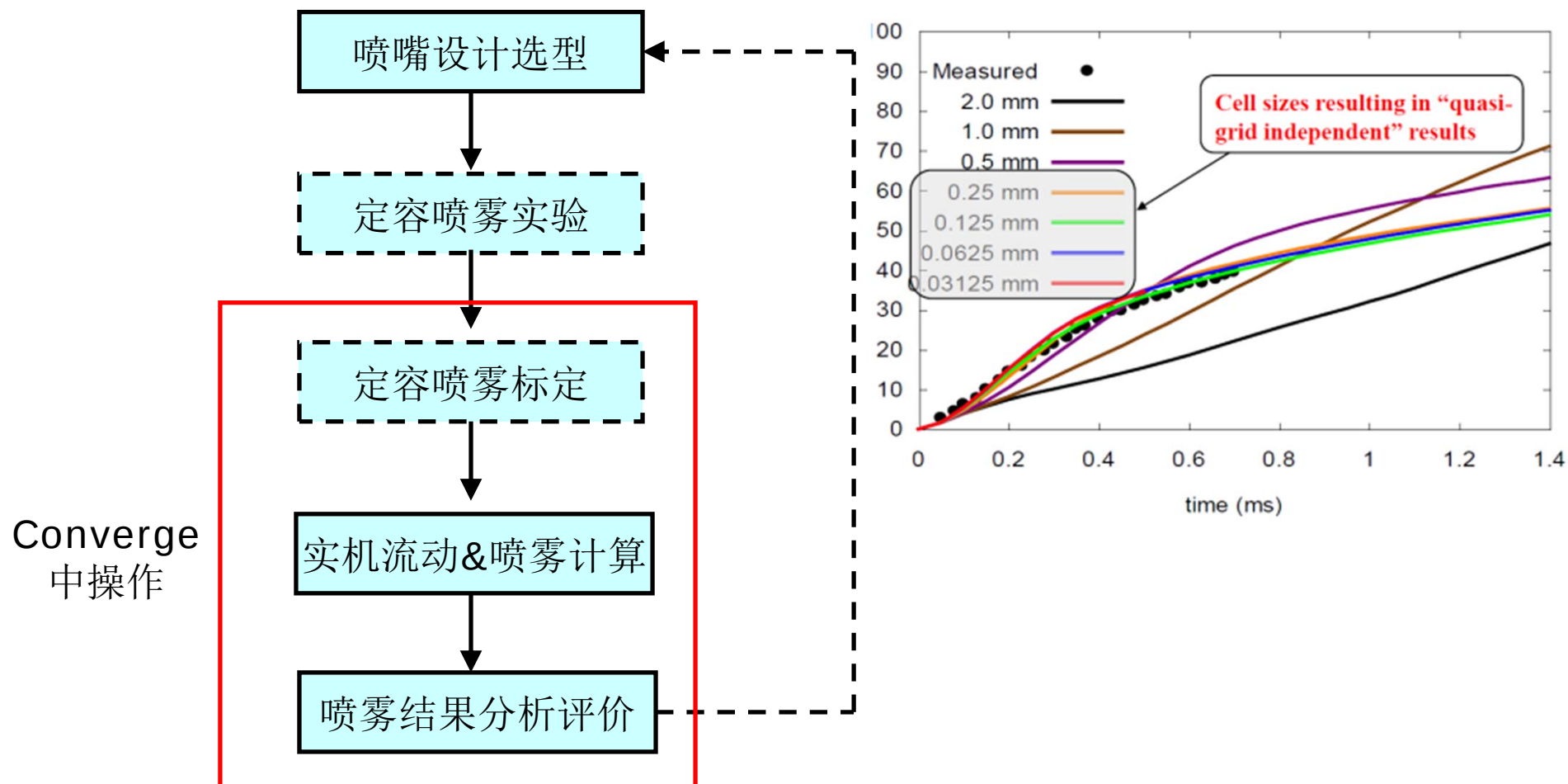


Figure 5: Comparison of computational mesh (left), side view of the spray (middle), and axial view of the spray (right) for velocity AMR cell sizes of (a) 1.0 mm, (b) 0.5 mm, (c) 0.25 mm, (d) 0.125 mm, (e) 0.0625 mm, and (f) 0.03125 mm. The results are given for a time of 0.5 ms.

Converge解决方案



--虚线：可选步骤 —实线：必选步骤

Converge解决方案

□ 定容喷雾标定

- 为了可靠模拟缸内喷雾燃烧过程，传统的做法是在实机模拟前先进行定容喷雾标定。
- 定容喷雾标定的内容是：基于定容弹喷雾实验测得的喷雾图像、SMD、贯穿距等结果，在CFD软件中通过调整相关喷雾参数，找到一套可以真实模拟实际喷雾过程的喷雾参数。
- 由于Converge中笛卡尔正交网格和AMR自适应网格的优越性，以及专门针对于发动机的各种喷嘴模型，只要采用IDAJ推荐的设定，即可得到与真实相当接近的喷雾结果。
- 如果用户有定容喷雾测试结果，在Converge中通过个别喷雾参数的适当调整，即可快速实现与测试结果高度吻合的喷雾对标。

Converge解决方案

□ 实机计算

■ Converge中可以快速实现定容喷雾设定到实机喷雾的移植。

■ 可以自动输出各项喷雾结果参数：

□ 实时SMD

□ 液相/气相贯穿距

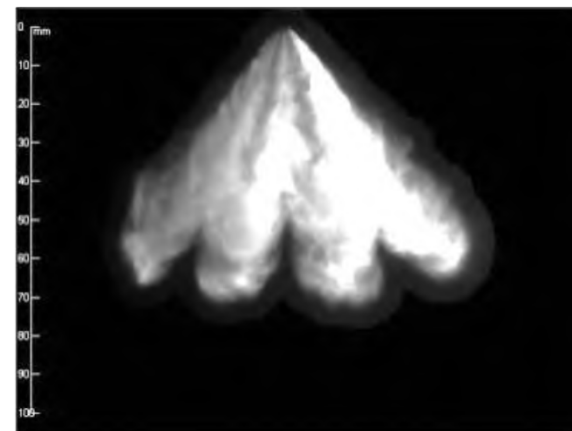
□ 各边界实时/累积油膜质量

□ 蒸发速率

□ 缸内整体/火花塞指定半径球域平均当量比

□ 缸内当量比概率分布

■ 基于以上这些参数，结合三维喷雾图像，可以实现对喷雾特性的有效评价。



实验结果



标定结果

案例介绍

- 上海交大定容喷雾标定研究：
 - 基于汽油机多孔喷嘴，采用KH-RT破碎模型，进行了喷雾结果对不同的破碎模型参数敏感性研究，可为快速定容喷雾标定提供指导：
 - 对三个参数B1，Crt和Cbl及网格尺寸进行了敏感性分析。

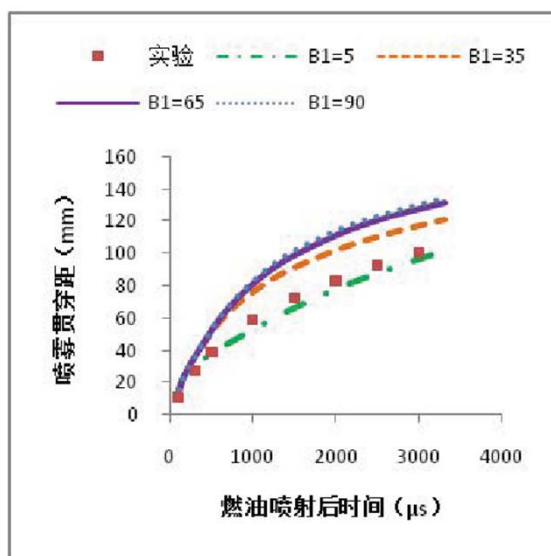
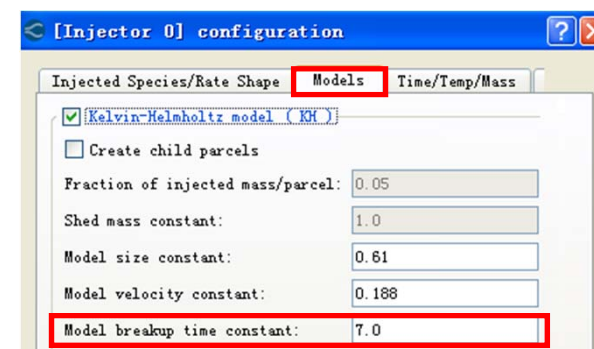
表 1 喷雾计算条件

名称	喷雾计算条件
喷嘴型式	六孔喷嘴
喷孔直径(mm)	0.205
燃油喷射压力(MPa)	15
燃油温度(K)	353.15
环境温度(K)	298.15
环境压力(KPa)	140/120

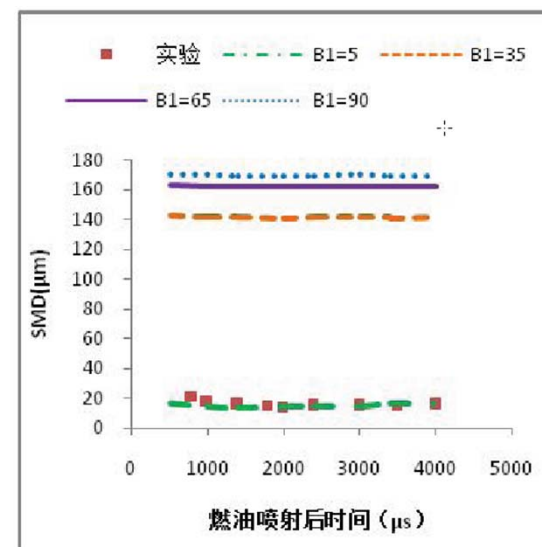
案例介绍

□ 上海交大定容喷雾标定研究:

- B1: 破碎特征时间系数, 默认为7, 推荐范围为5~100, 该值越小, 破碎进行越快, 得到的SMD越小, 对应贯穿距也越小。



- B1值越大, 贯穿距越大,
- 本例中中B1=5时与实验结果吻合较好

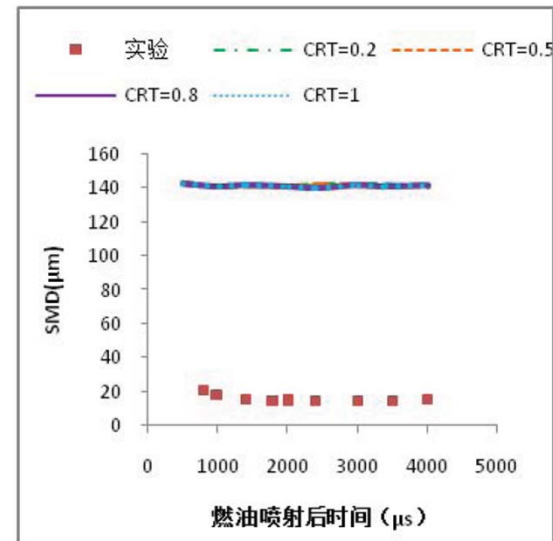
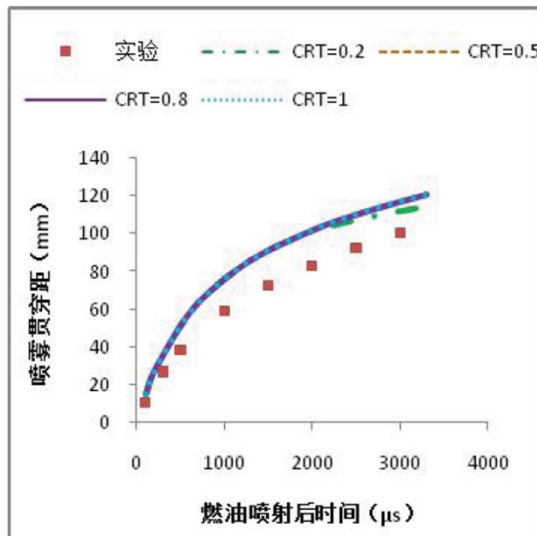
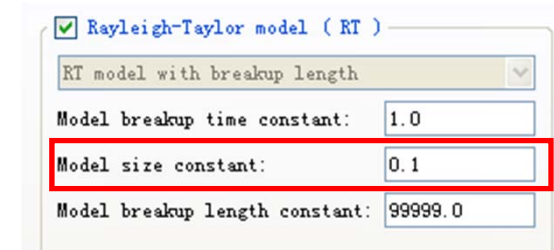


- B1值越大, SMD越大,
- 本例中中B1=5时与实验结果吻合较好

案例介绍

□ 上海交大定容喷雾标定研究:

- Crt: RT破碎模型尺寸系数, 0.1~1, 默认0.1, 该值越大, 破碎后液滴直径越大, 该值越小, 破碎后液滴直径越小。



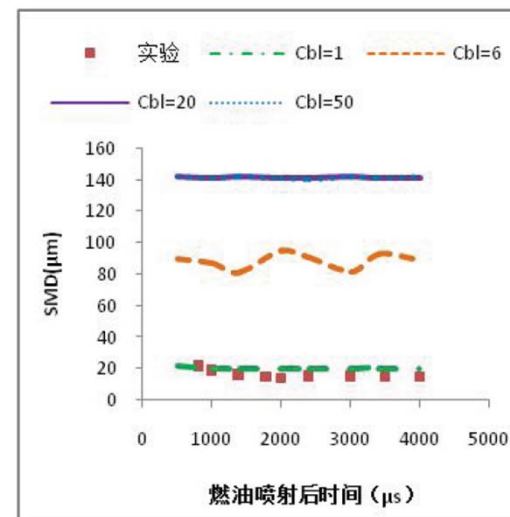
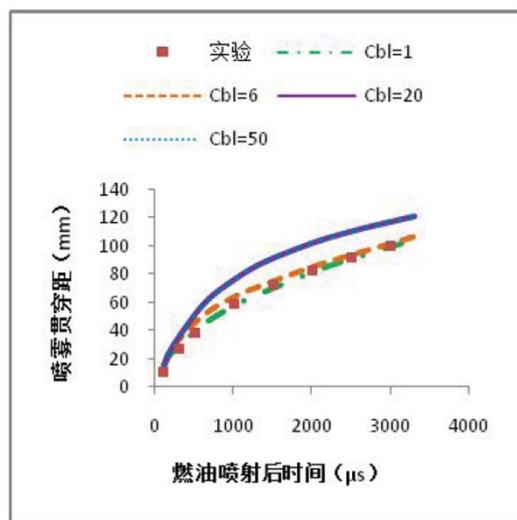
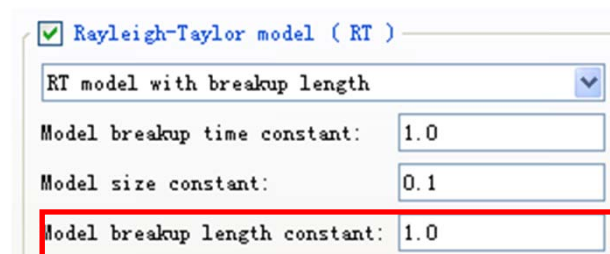
- 本例中贯穿距对Crt参数敏感性很小
- 在推荐范围内变化时, 贯穿距基本不变

- 本例中贯穿距对Crt参数敏感性很小
- 在推荐范围内变化时, SMD基本不变

案例介绍

□ 上海交大定容喷雾标定研究:

- Cbl: RT破碎模型长度系数, 推荐范围为0~50, 该值越小, 液柱越短, 破碎进行越早, 得到的SMD越小, 对应贯穿距也越小。



- Cbl越大, 贯穿距越大
- 本例中Cbl=1时与实验结果吻合较好

- Cbl越大, SMD越大
- 本例中Cbl=1时与实验结果吻合较好

案例介绍

□ 上海交大定容喷雾标定研究:

■ 自适应网格尺寸对喷雾贯穿距和SMD的影响:

- 自适应网格尺寸降至0.5mm时，网格依赖性基本消除，预测结果与实验结果吻合良好。

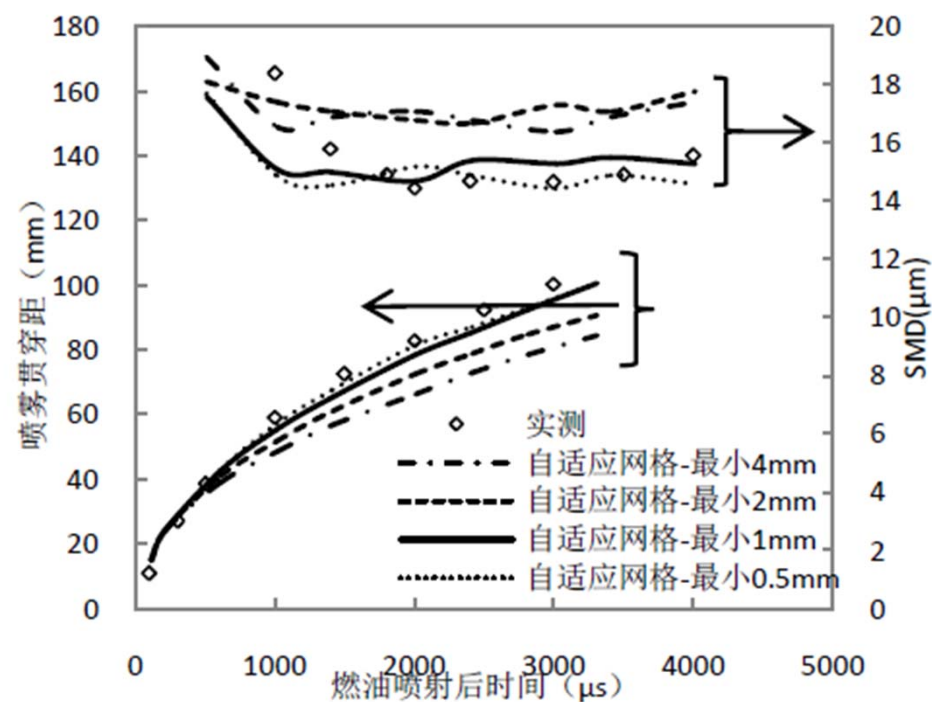
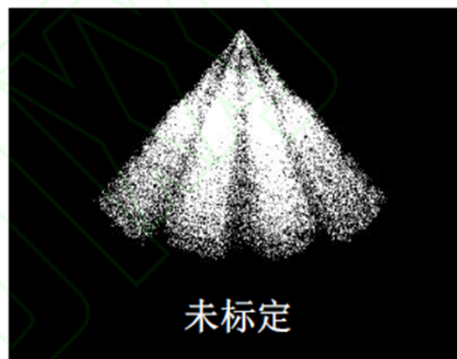
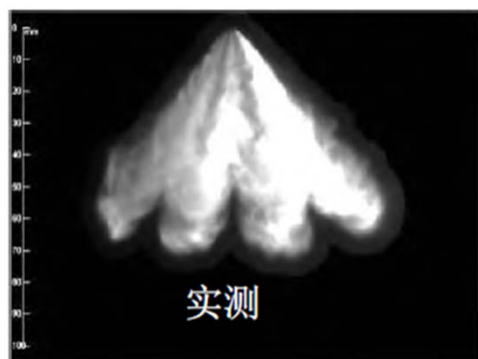


图 11 自适应网格尺寸对喷雾贯穿距和 SMD 的影响

案例介绍

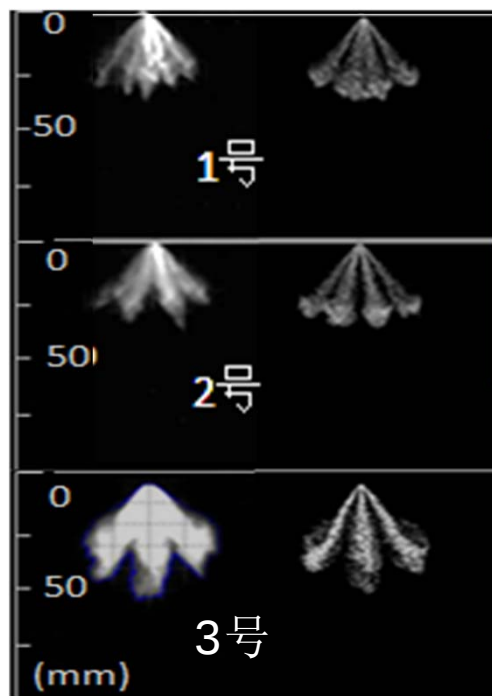
□ 上海交大定容喷雾标定研究:

■ 喷雾图像对比:



- 未标定时，喷雾形态大致与实测相似，但细节上仍有明显差别
- 完成标定后，与实测图像形态吻合

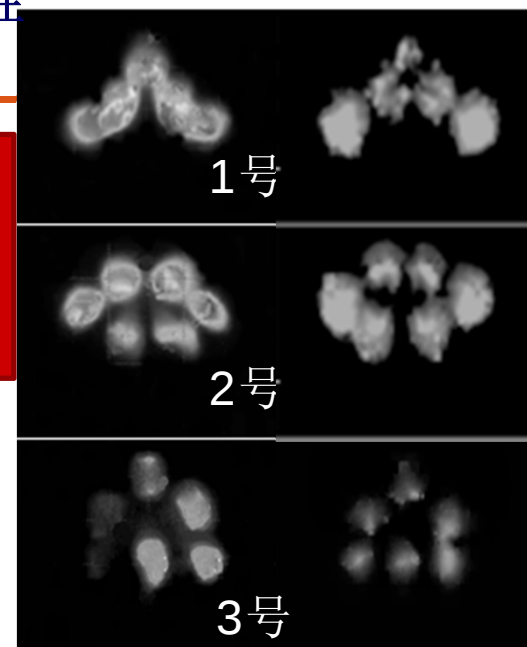
基于标定后的模型的计算结果与实测数据的对比： 吻合程度证明了模型标定的准确性



喷雾形态

落点分布

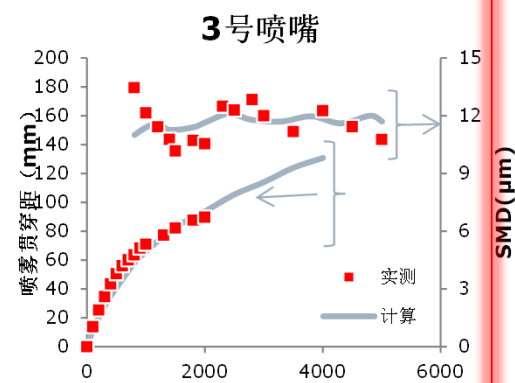
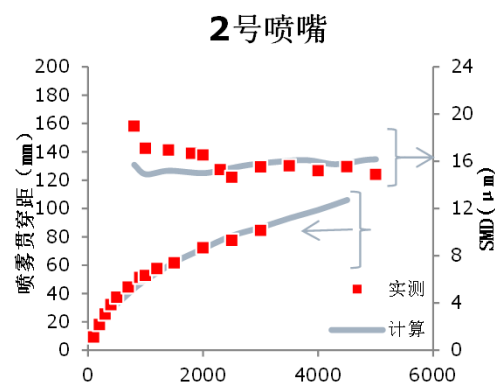
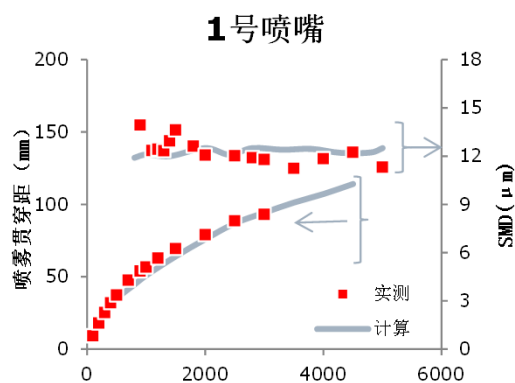
贯穿距与
SMD



实测

计算

实测 计算



燃油喷射后时间 (μs)

燃油喷射后时间 (μs)

燃油喷射后时间 (μs)

燃 烧

■ GDI燃烧系统关注点

■ Converge解决方案

■ 案例介绍

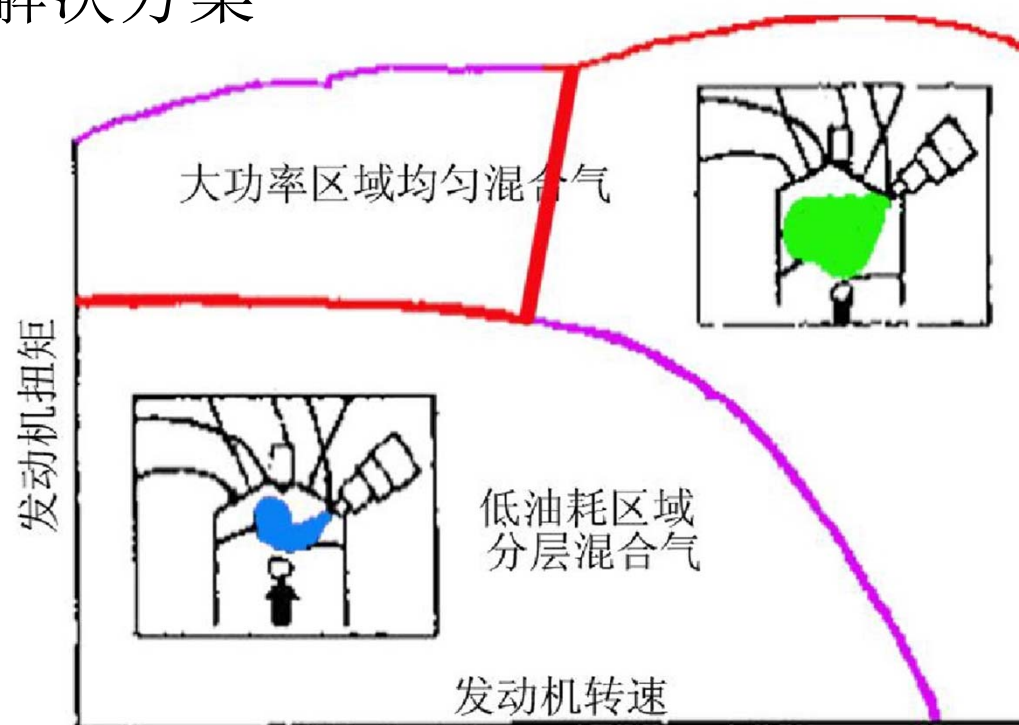
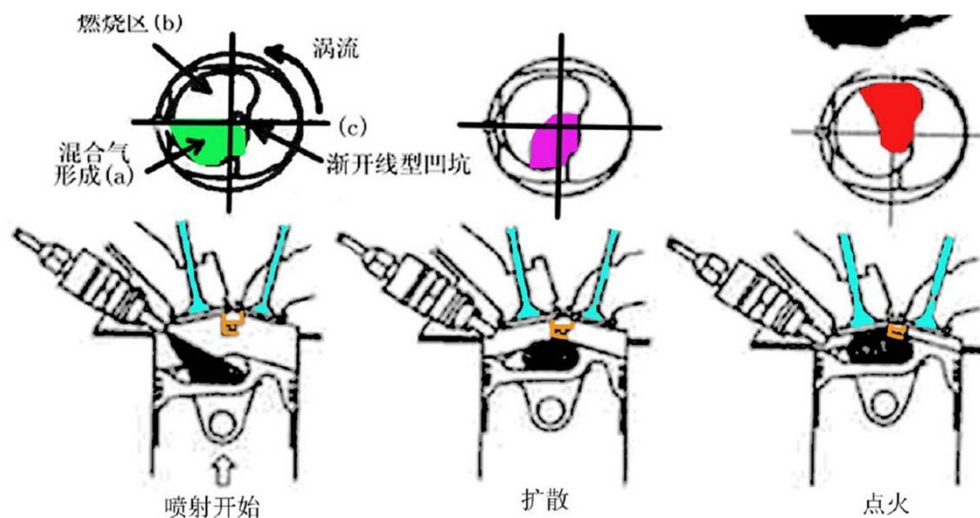


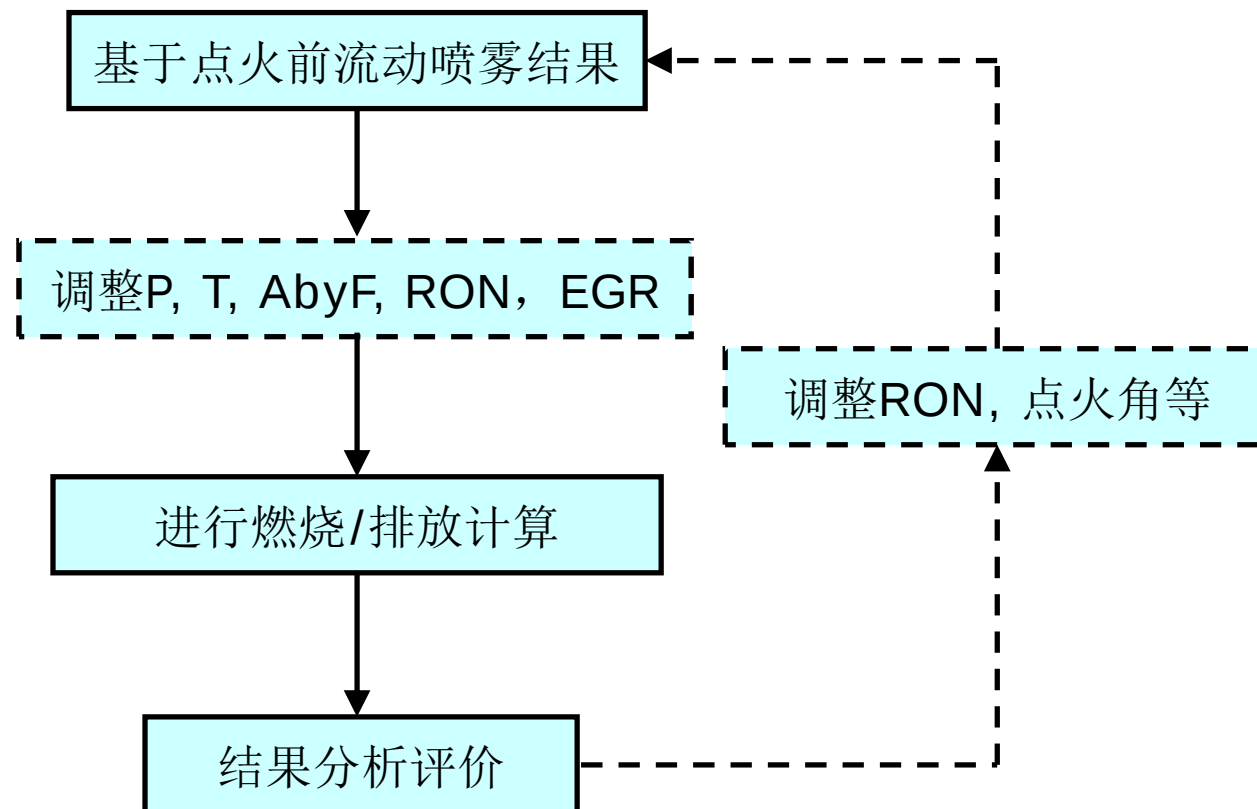
图2 不同燃烧模式的控制范围

GDI燃烧系统关注点

- 燃油经济性
- 部分负荷燃烧稳定性
- 燃烧速率和充分性
- 爆震特性
- 排放特性



Converge解决方案

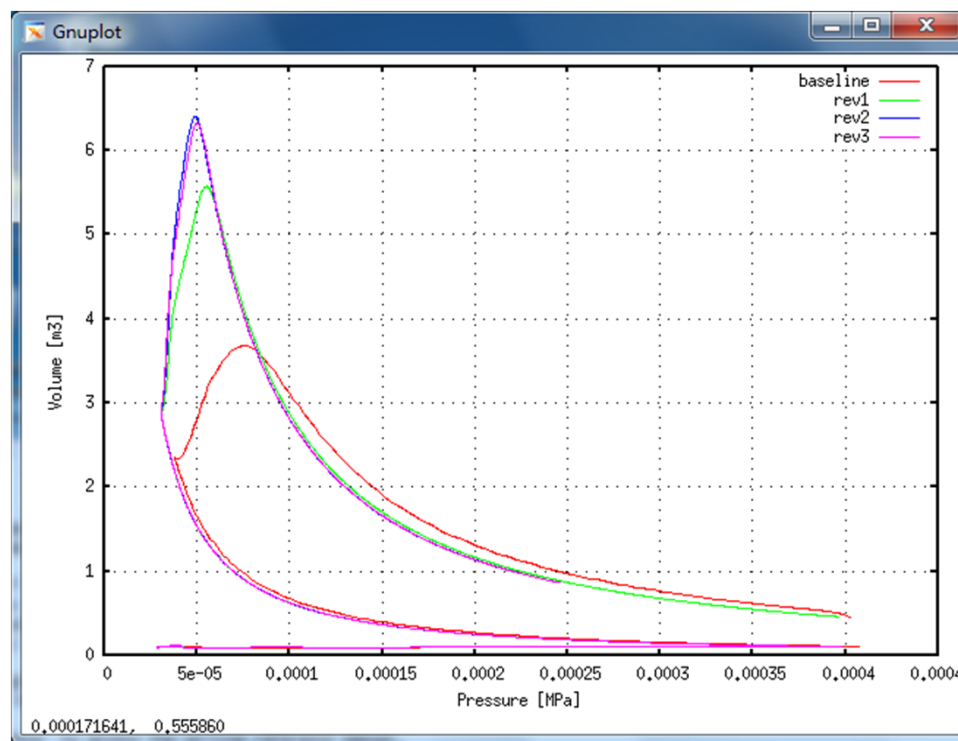


--虚线: 可选步骤 —实线: 必选步骤

Converge解决方案

□ 燃油经济性评价

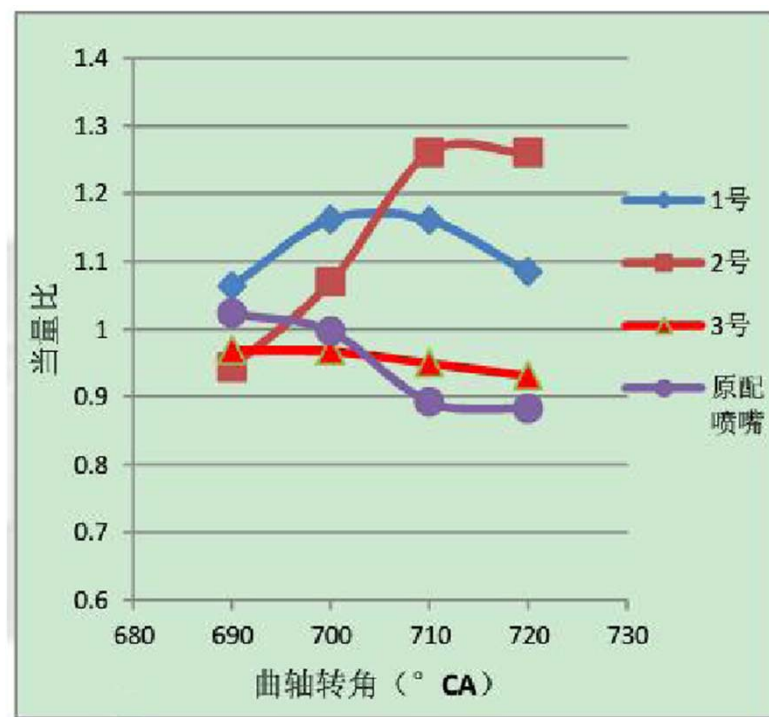
- 基于完整循环计算结果可以绘制PV图，从而判断其出力情况，及进行燃油经济性对比分析。



Converge解决方案

□ 部分负荷燃烧稳定性评价

- GDI发动机在部分负荷下经常采用分层稀薄燃烧来减少油耗。
- 为了确保可靠点火，需要在点火时刻在火花塞附近形成较浓的混合气。
- Converge通过喷雾计算可以直接获得火花塞周围指定半径球域的 λ 分布，基于此可以判断点火的可靠性。

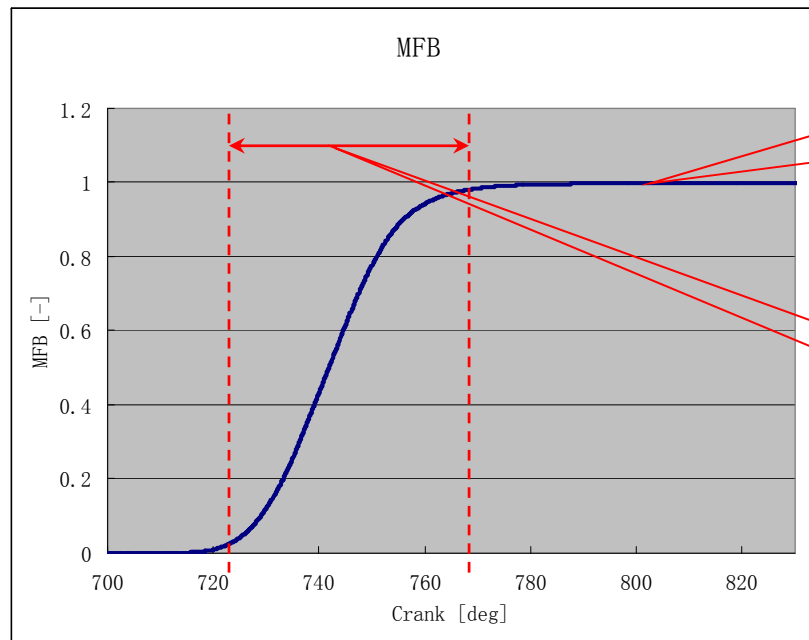


点火时刻火花塞周围当量比

Converge解决方案

□ 燃烧速率和充分性评价

- 燃烧充分性是指缸内燃烧是否完全，有无未燃油气剩余。
- 燃烧速率和充分性可用MFB曲线来评价。
- MFB定义：已燃燃料质量占缸内总燃料之比。可从缸内各组分实时质量换算得到。



最终MFB达到
1，表明燃料
已经完全燃烧

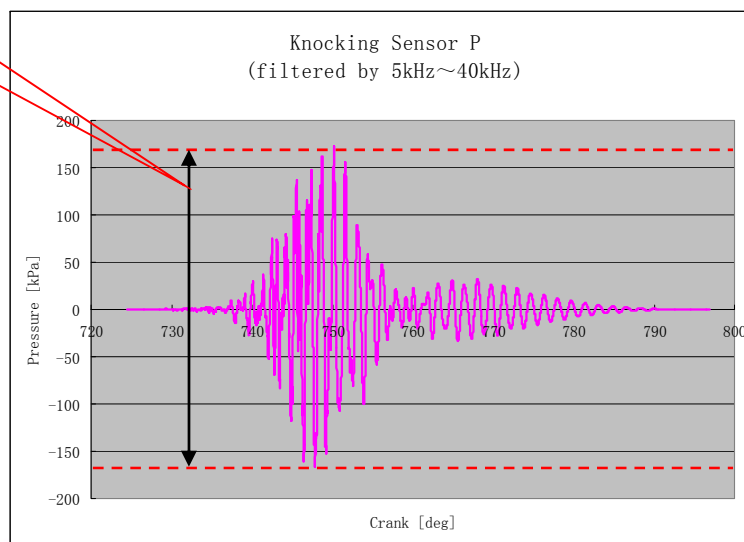
燃烧持续期，用
来判断燃烧速率

Converge解决方案

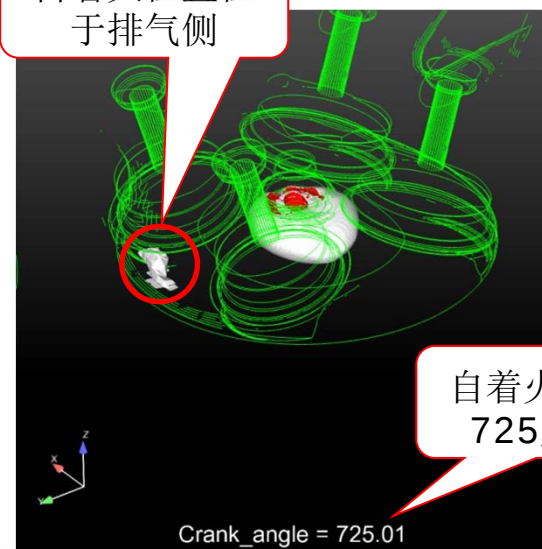
□ 爆震特性

- Converge的基于详细化学反应的燃烧模型（Sage）由于直接计算化学组分在不同压力、温度、当量比条件下的反应过程，因此特别适合爆震的预测；
- 可以直接获得缸内任意监测点位置的压力波动，通过对压力脉动的分析，可以获得爆震波频率、爆震指数(最大压力波动)等详细信息；
- 通过查看自燃反应的中间产物(如 H_2O_2)的空间分布，还可以判断出爆震发生的位置和时刻。
- 可以深入进行辛烷值、点火角、喷油策略对爆震特性的影响分析

爆震指数
340kPa



自着火位置位于
排气侧



Converge解决方案

- ❑ 排放特性: Converge中包含丰富的排放模型
- ❑ SOOT模拟方法:
 - Hiroyasu-NSC模型
 - Gokul模型——适用于低温燃烧柴油机模型
 - Dalian模型——适用于HCCI燃烧
 - Waseda模型——适用于中等负荷柴油机模拟
 - SAGE详细化学反应方法
 - UDF Soot模型
- ❑ NOx模拟方法:
 - Extended Zel'dovich 模型
 - SAGE详细化学反应方法
 - UDF NOx模型
- ❑ Converge会将所有排放物汇总在一个文件中实时输出: emissions.out

# CONVERGE Release 2.2.0/ Mar 06, 2015			Run Date: Tue May 12 18:02:48 2015			
# column	1	2	3	4	5	6
#	crank	Hiroy_Soot	NOx	HC	CO	CO2
#	(DEG)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
	8.2012928e+000	1.3582663e-007	1.1623899e-006	1.0740357e-006	2.3459032e-005	3.5784185e-005
	8.3121015e+000	1.3726471e-007	1.1731757e-006	1.0513588e-006	2.3447308e-005	3.5910163e-005
	8.4256561e+000	1.3869336e-007	1.1841245e-006	1.0284474e-006	2.3429835e-005	3.6044698e-005

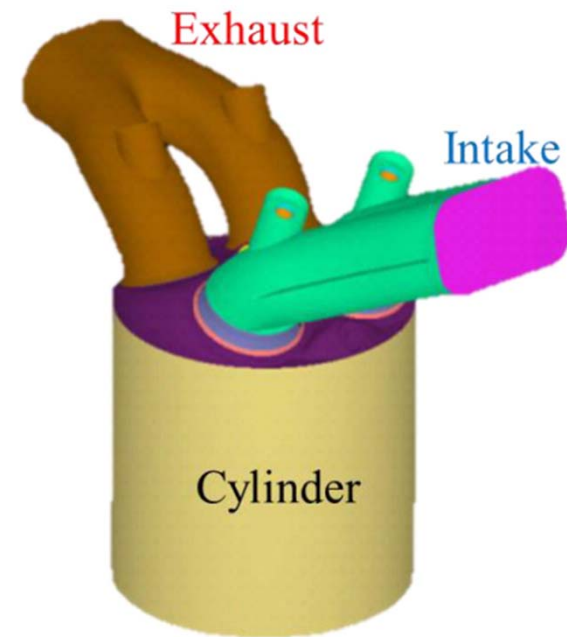
案例介绍

□ 本田某发动机爆震分析：SAE 2015-01-0750

发动机参数

Engine type	4-stroke, 4-valve
Combustion system	T/C SI
Layout	4-cyl./inline
Fuel type	RON95
Norm. displacement [cm3]	1505.8
Bore diameter [mm]	76.5
Stroke [mm]	75.6
Compression ratio	9.98
Valve train type	4V DOHC

几何模型



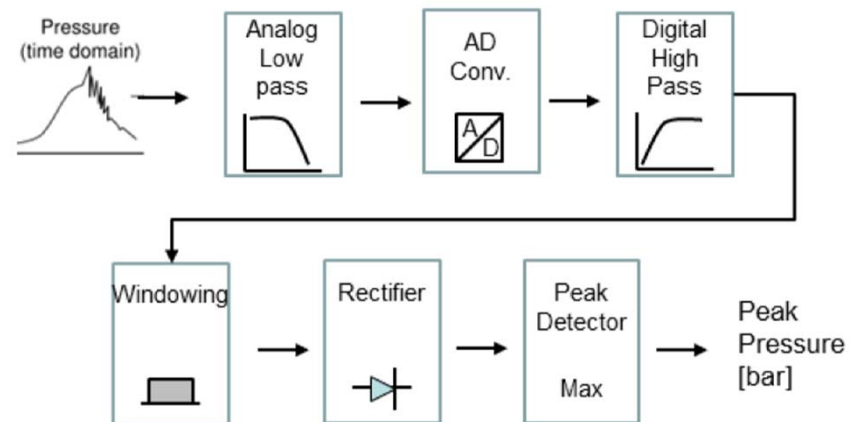
案例介绍

□ 本田某发动机爆震分析：SAE 2015-01-0750 计算工况

Case	Engine Speed [rpm]	BMEP [bar]	Injection* Inj1:Inj2	Rel. A/F
1	2250	16	80%:20%	1.1
2	2250	14	80%:20%	1.1
3	2250	16	90%:10%	1.1

*inj1:1st injection, inj2: 2nd injection

数据处理流程

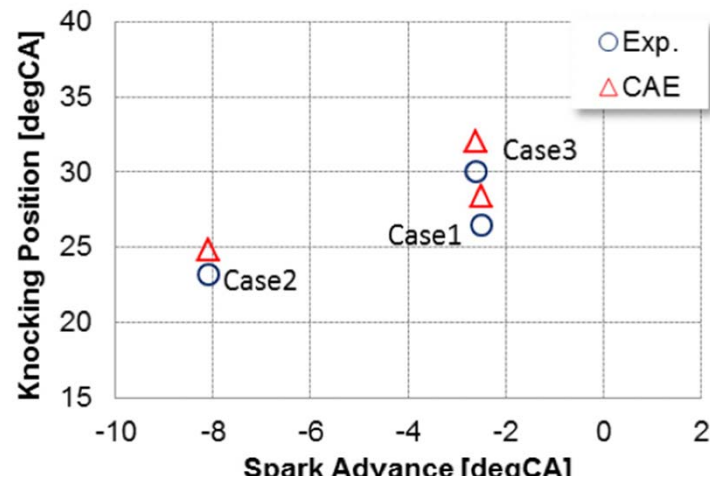


案例介绍

□ 本田某发动机爆震分析：SAE 2015-01-0750

燃烧速率对比

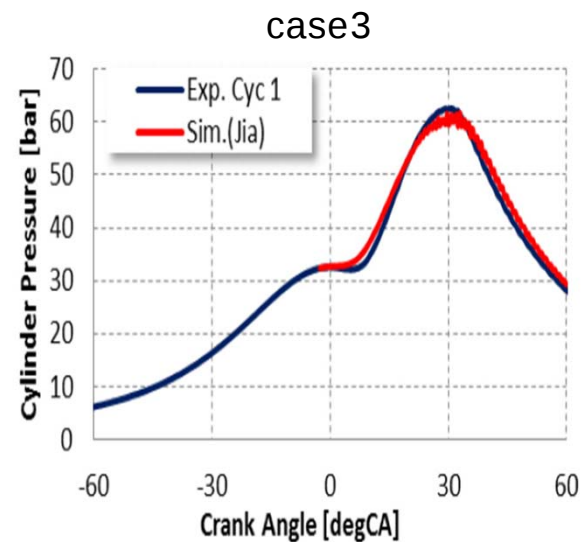
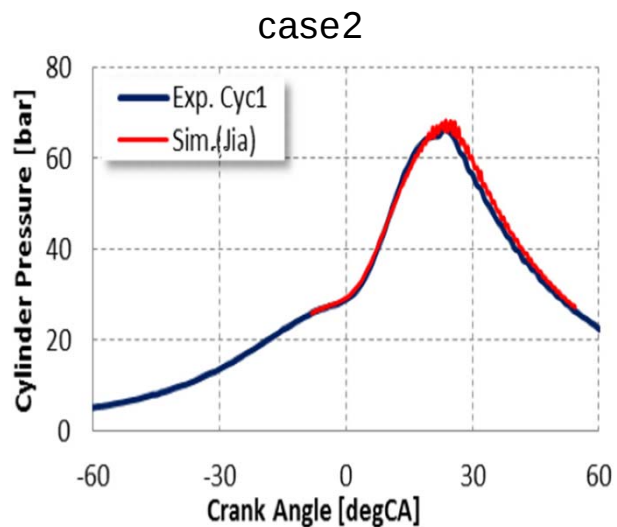
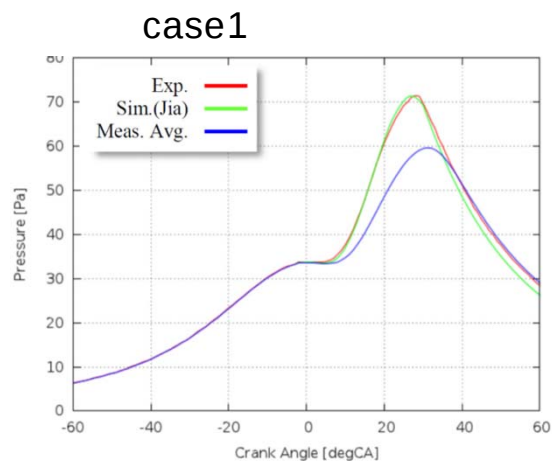
Case	IG. [degCA]	MFB50 (Exp.) [degCA]	MFB50 (Sim.) [degCA]	MFB10-50 (Exp.) [degCA]	MFB10-50 (Sim.)
1	-2.5	19.4	16.8	9.8	8.1
2	-8.1	14.1	13.5	9.1	8.5
3	-2.6	22.7	19.7	10.9	9.3



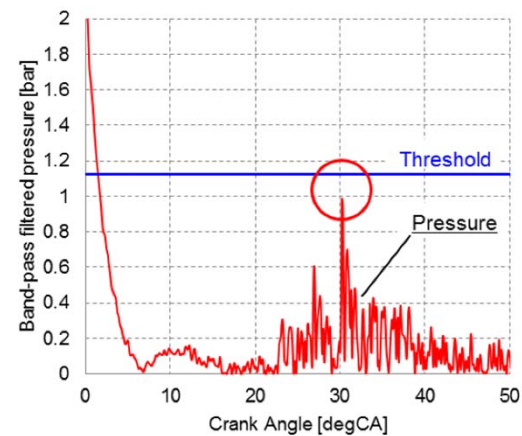
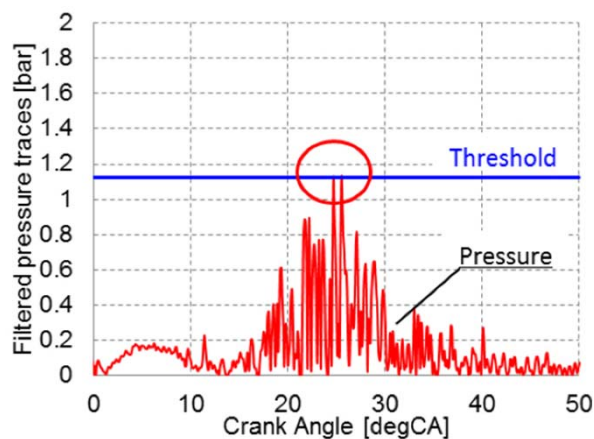
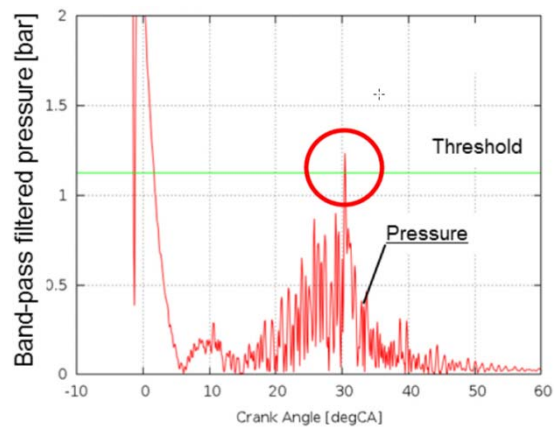
爆震发生时刻对比

案例介绍

平均缸压对比

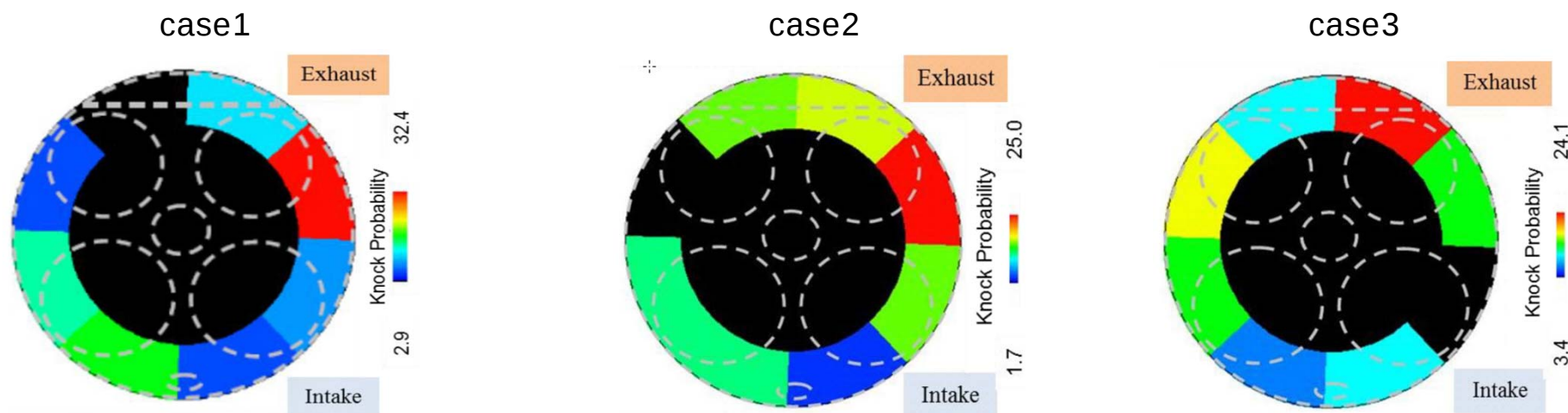


(滤波后)
爆震监测点压力

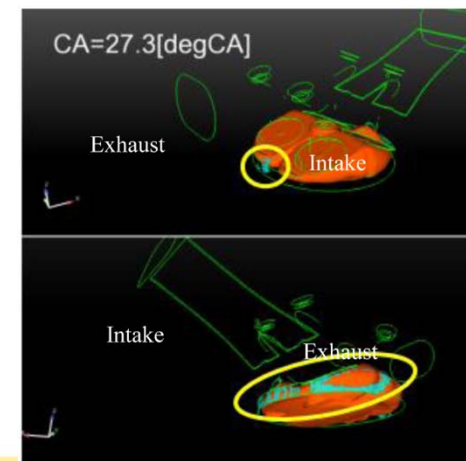
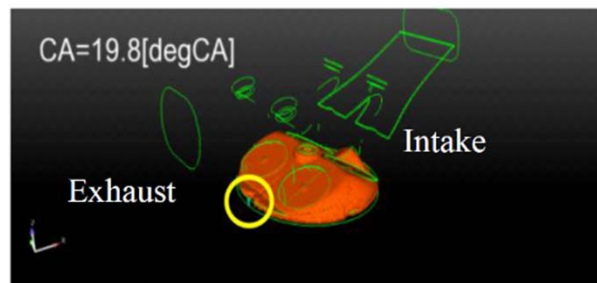
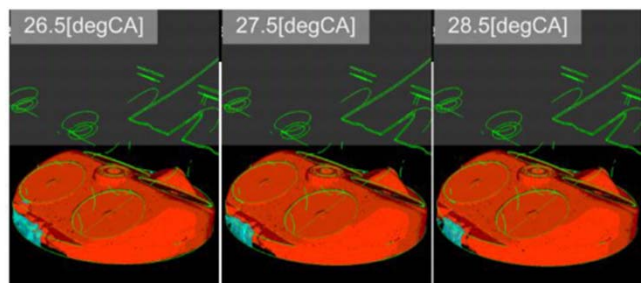


案例介绍

实测爆震分区发生概率



Converge预测爆震位置



- Converge预测的爆震发生位置与实测爆震分区发生概率基本一致

联系我们

如需了解更多详细信息,请联系我们:

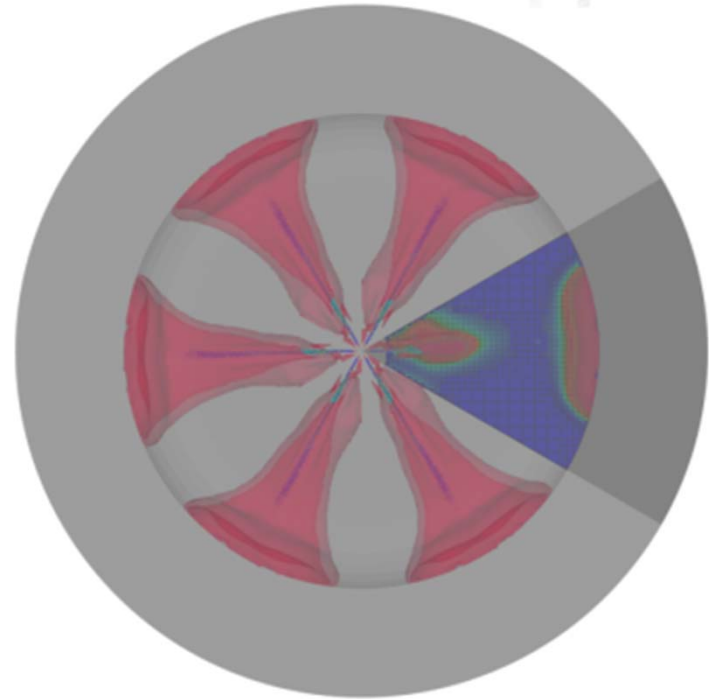
IDAJ-China

Tel: +86-10-65881497/8 (北京)

+86-10-50588290/1 (上海)

Email: support@idaj.cn;

网站地址: www.idaj.cn



Diesel Engine Analysis using CONVERGE

谢谢！