

IDAJ CAE
Solution
Conference

Your True Partner for CAE&CFD

ICSC 2015

发动机缸内涡量场的本征正交分解研究

上海交通大学 汽车工程研究院
秦文瑾

□ 背景

□ PIV测量

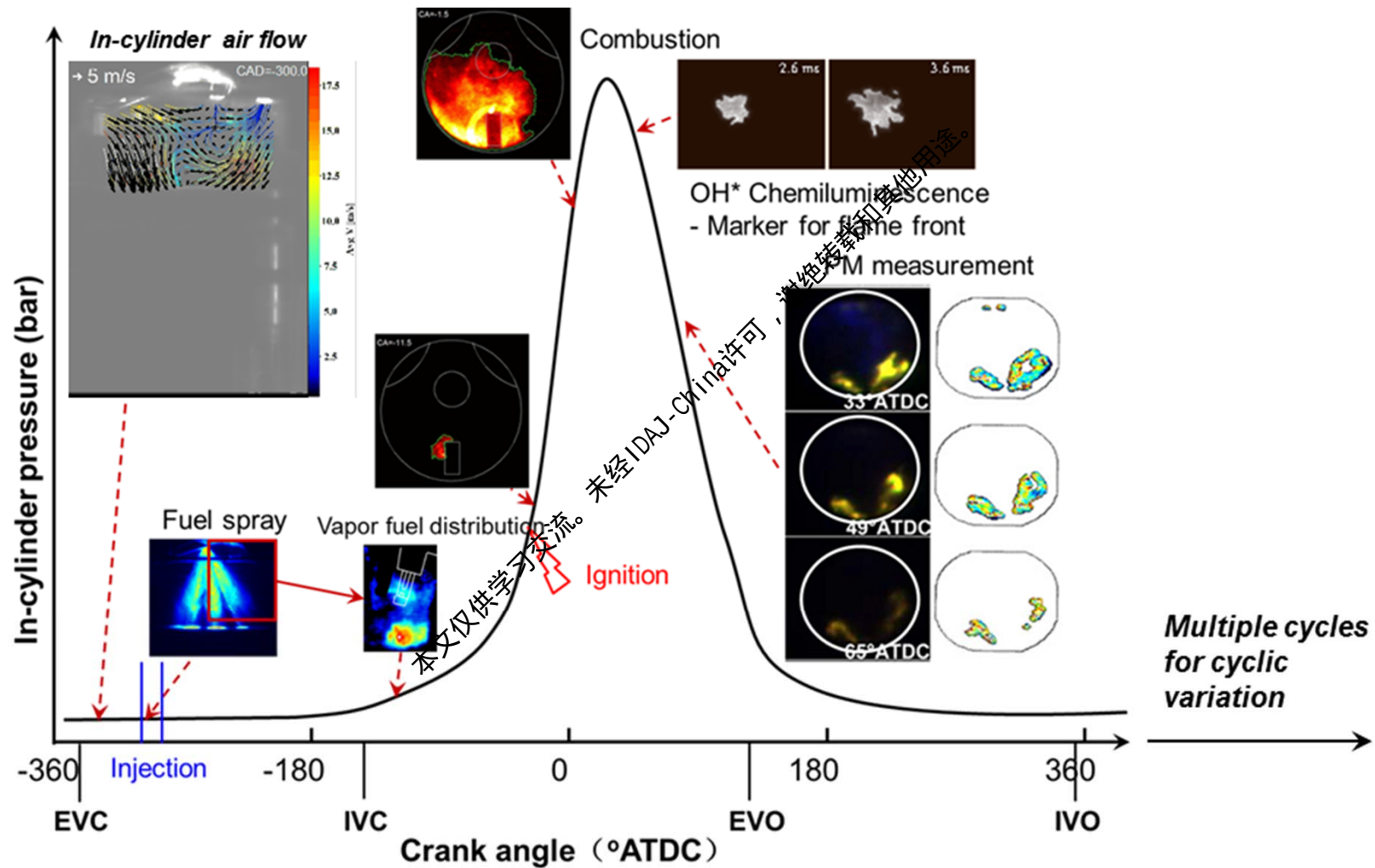
□ LES计算

□ 本征正交分解

□ 结论

本文仅供学习交流，经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。

背景(SIDI发动机缸内工作过程)



背景

缸内流场

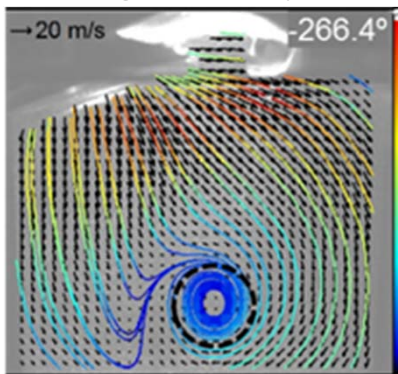
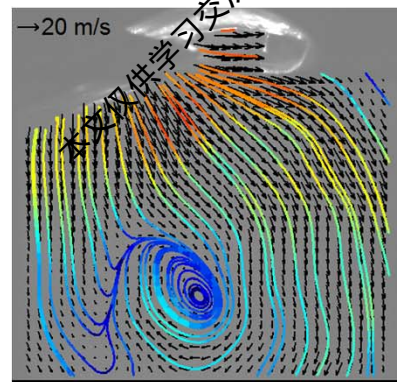
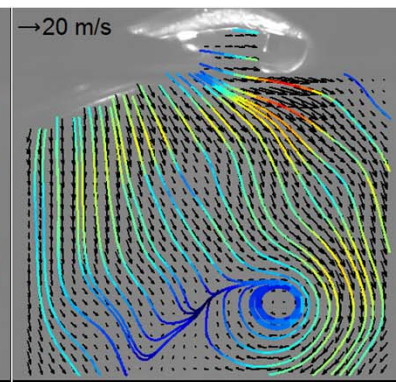
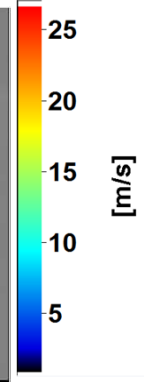
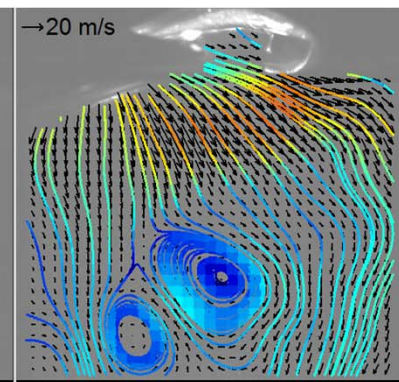
- 滚流、涡流、挤流
- 大尺度拟序结构
- 小尺度涡团
- 湍流
- 循环变动

研究方法

- 试验方法(PIV)
- 数值方法 (大涡模拟)
- 本征正交分解方法



Average of 100 cycles

1st Cycle50th Cycle100th Cycle

□ 背景

□ PIV测量

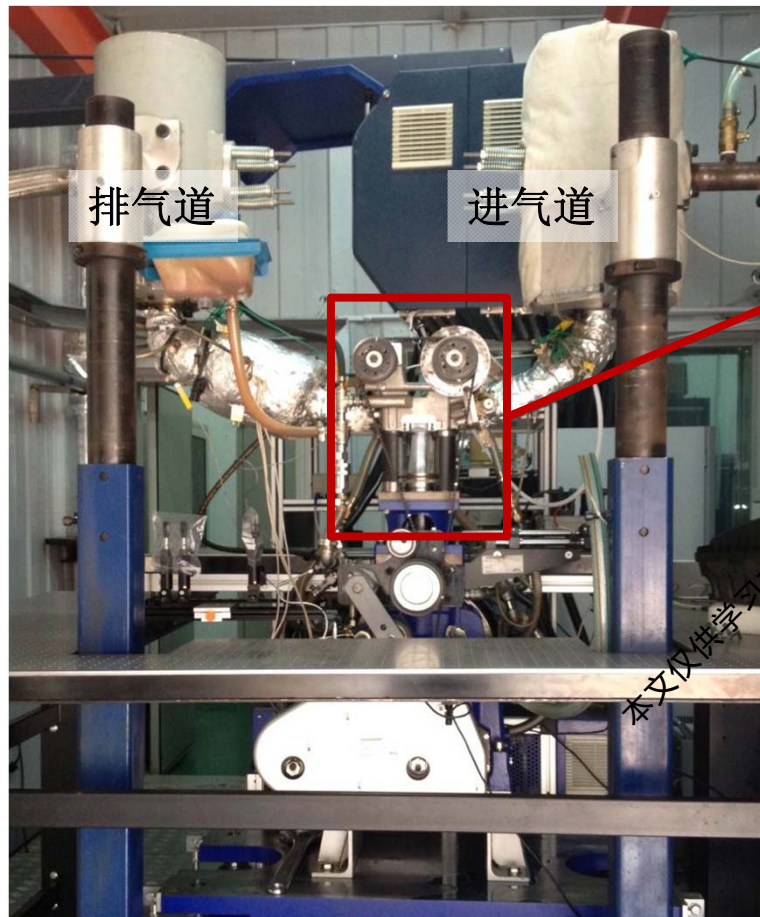
□ LES计算

□ 本征正交分解

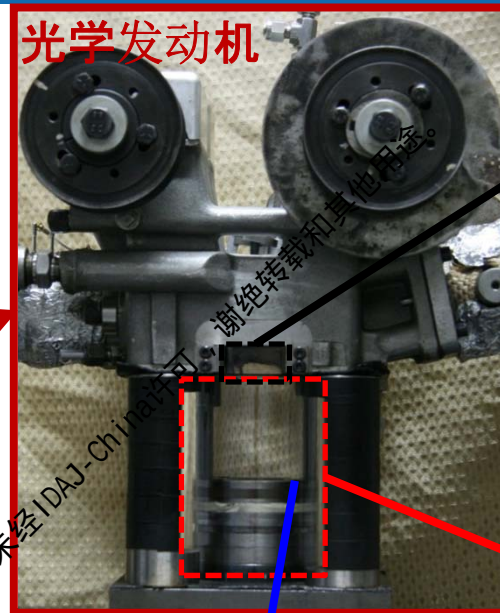
□ 结论

本文仅供学习交流，经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。

PIV测量(单缸光学发动机)



光学发动机台架



光学发动机



光学燃烧室

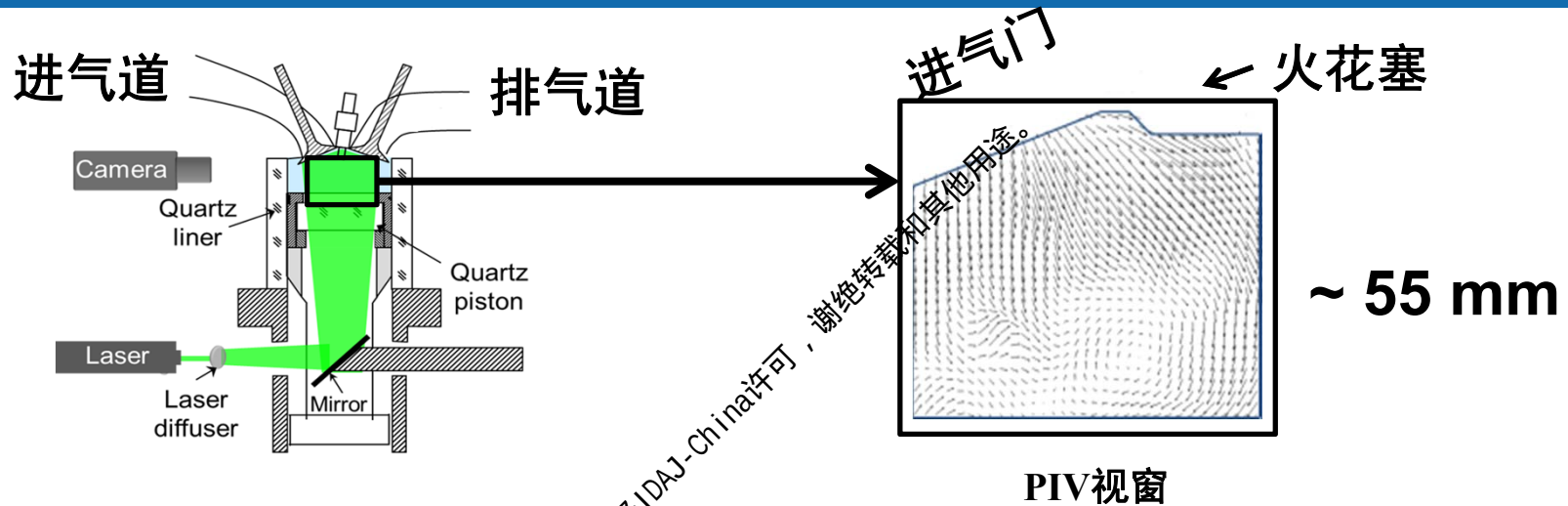


光学缸套



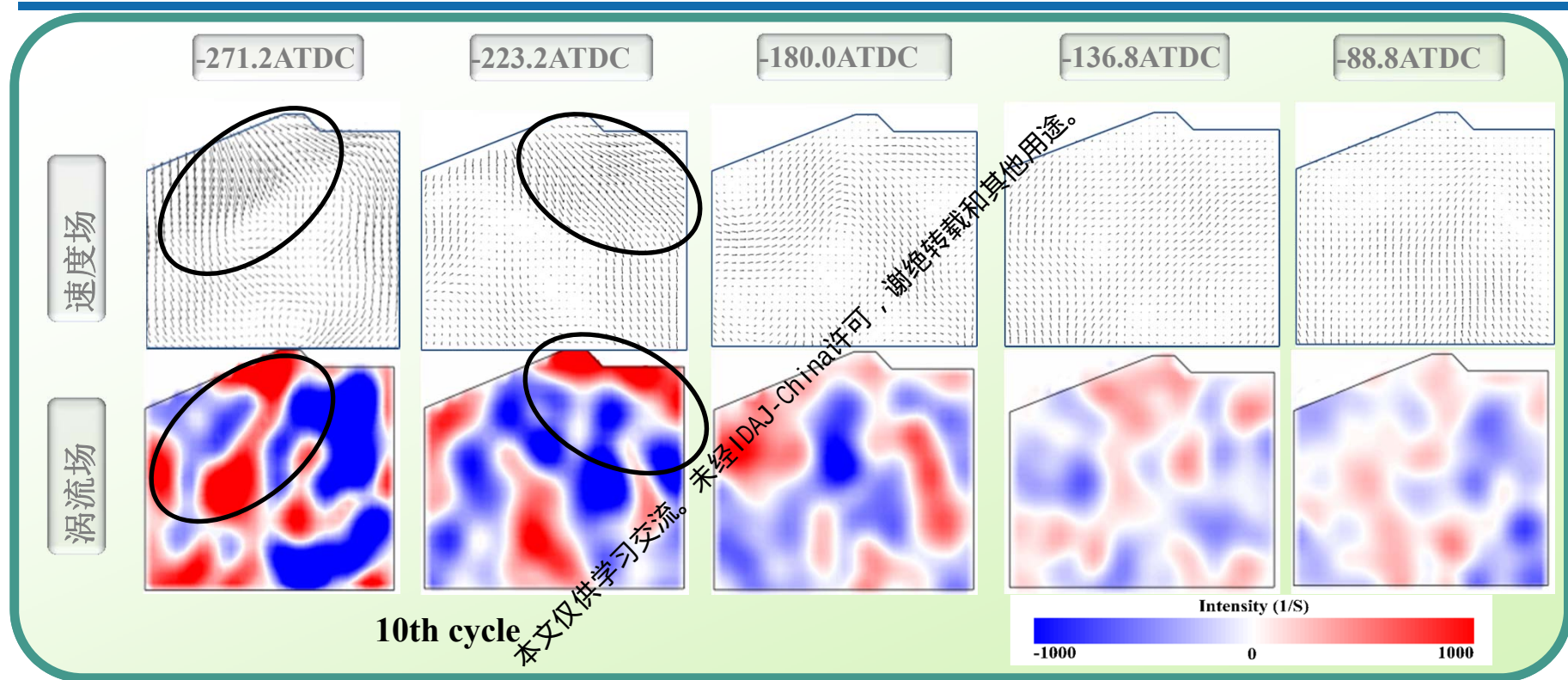
光学活塞

PIV测量(测量平面及发动机参数)



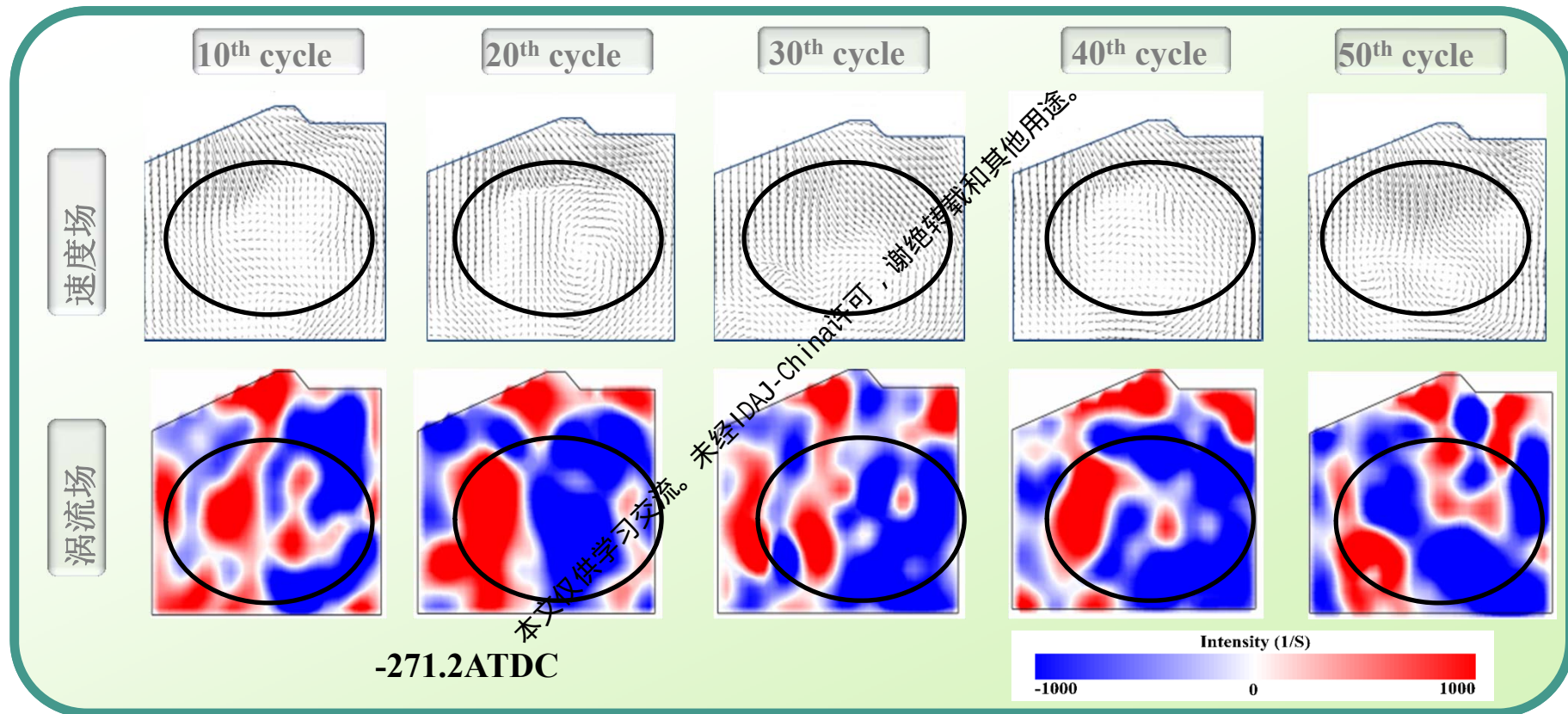
参数	值
排量	0.55L
缸径 x 冲程	86 mm x 94.6 mm
曲轴连杆长度	160 mm
压缩比	11:1
转速	800 r/min
进气涡流比	0.55
进气压力	100 kPa
进气温度	25° C

PIV测量结果(同一周期内不同曲轴转角时刻)



- 在进气冲程中，进气射流强度高，大尺度涡团主要在这个过程中产生。
- 大尺度涡团会被拉伸直至破裂，进而产生数量较多的小尺度涡团，同时，在压缩冲程过程中，涡流场强度逐渐减弱。

PIV测量结果(不同周期内同一曲轴转角时刻)



➤ PIV测量发现流场循环变动强烈

- 背景
- PIV测量
- LES计算
- 本征正交分解
- 结论

本文仅供学习交流，经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。

LES计算(数值方法)

LES控制方程
(过滤后的N-S方程)

τ_{ij} 是亚网格应力

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)$$

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$$

LES亚网格模型
(各项同性涡粘假设)

ν_t 是亚网格涡粘系数

$\bar{S}_{ij}$ 是大尺度应变率

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij}$$

$$\bar{S}_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

亚网格动能输运方程
(作为亚网格粘性的函数)

k^{sgs} 是亚网格动能

$\Delta(x)$ 是亚网格过滤尺度

c_v 模型常数设为0.67

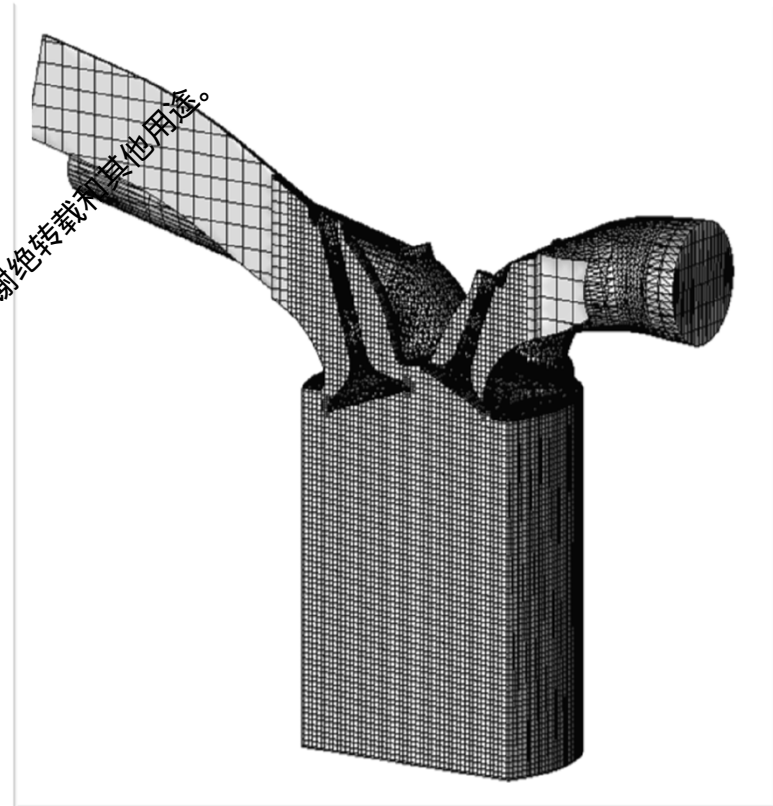
$$\frac{\partial \tilde{\rho} k^{sgs}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\rho} \bar{u} k^{sgs}}{\partial x_j} = P^{sgs} - \epsilon^{sgs} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tilde{\rho} \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial k^{sgs}}{\partial x_j} \right) + \bar{\dot{W}}$$

$$k^{sgs} = \frac{1}{2} (\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j)$$

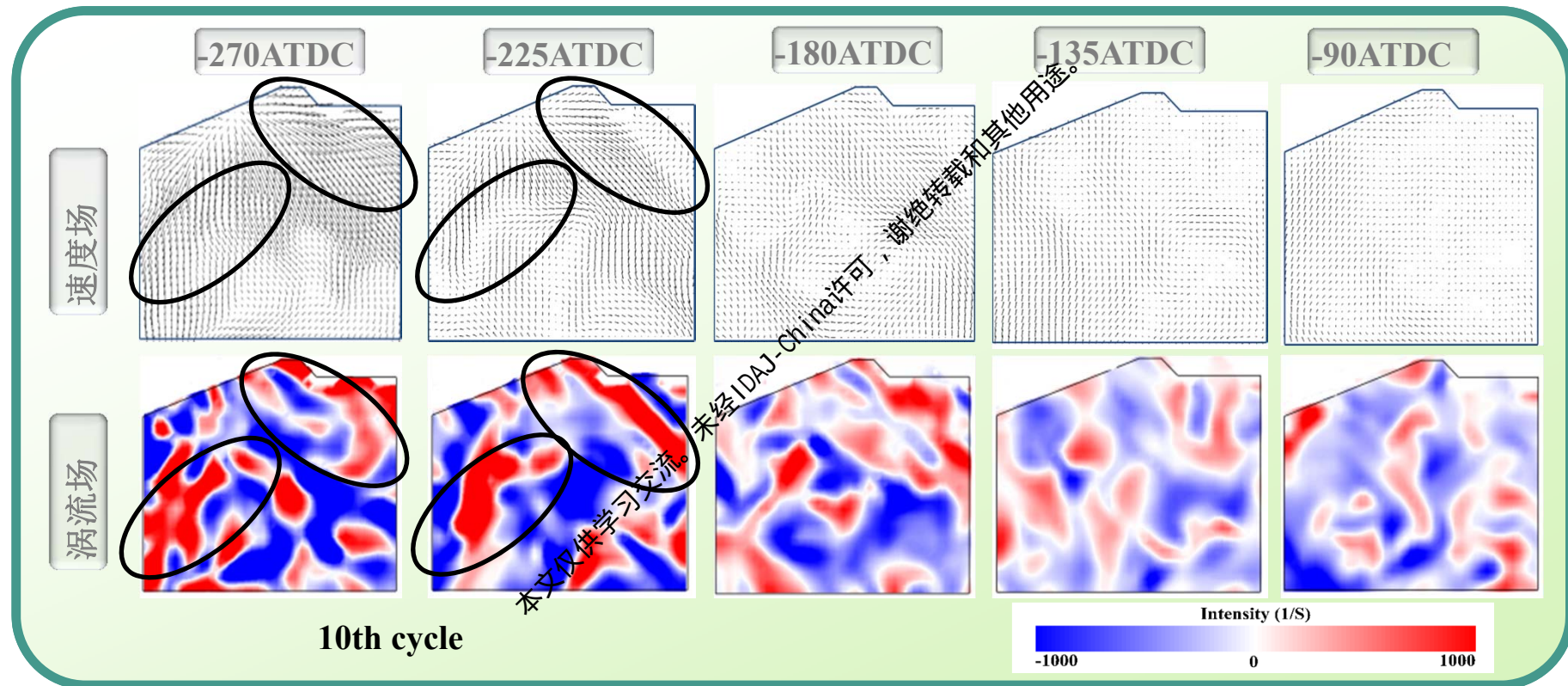
$$\nu_t = c_v \sqrt{k^{sgs}} \Delta(x)$$

LES计算（网格、边界条件）

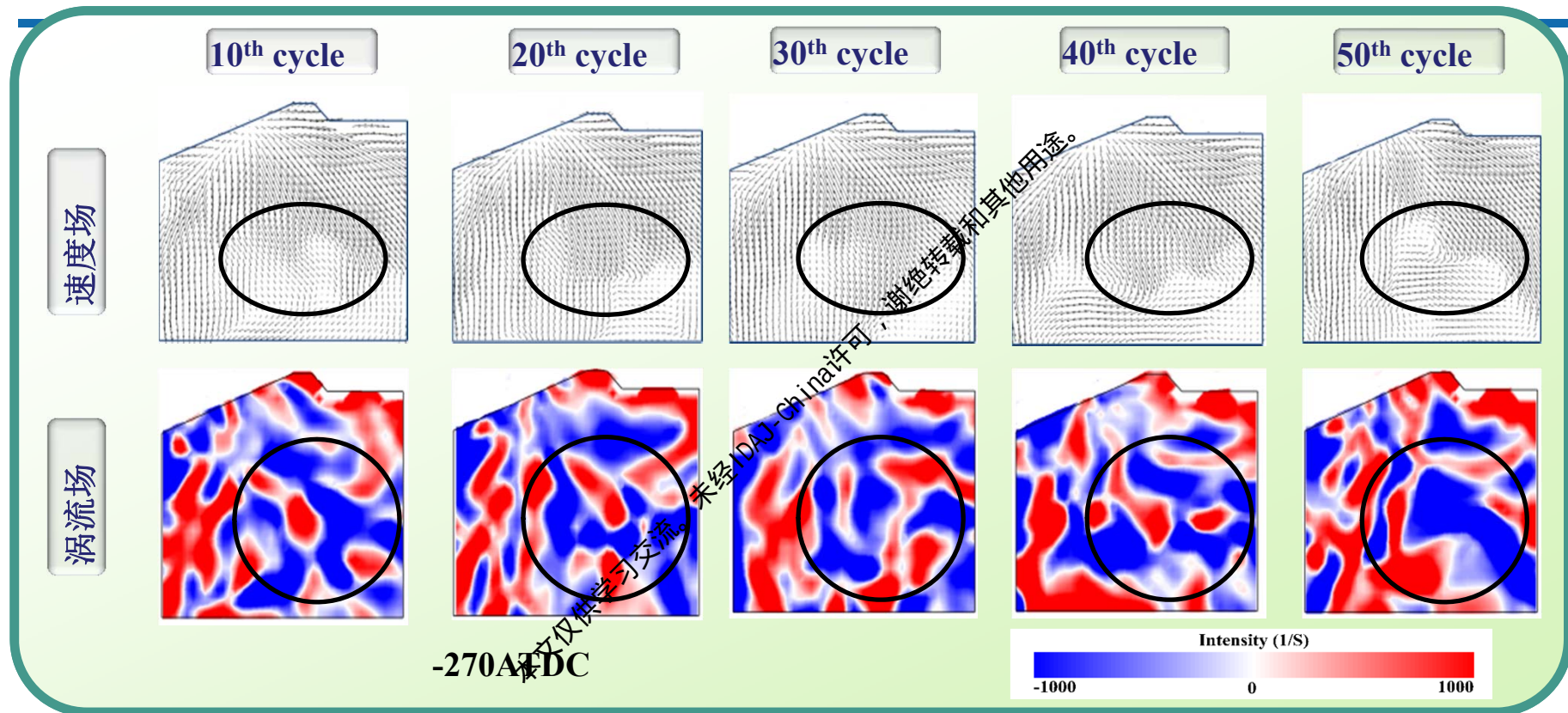
- 网格为正交化网格
- 最小网格尺度 1.5mm
- 计算程序为CONVERGE
- 计算边界条件根据实验设定



LES计算结果(同一周期内不同曲轴转角时刻)



LES计算结果(不同周期内同一曲轴转角时刻)



- LES计算结果和PIV测量结果相似, 意味着数值计算方法可以用来对缸内瞬态流场及其循环变动进行预测。
- 对于LES计算结果的评价需要更加有效合理的判断依据。

□ 背景

□ PIV测量

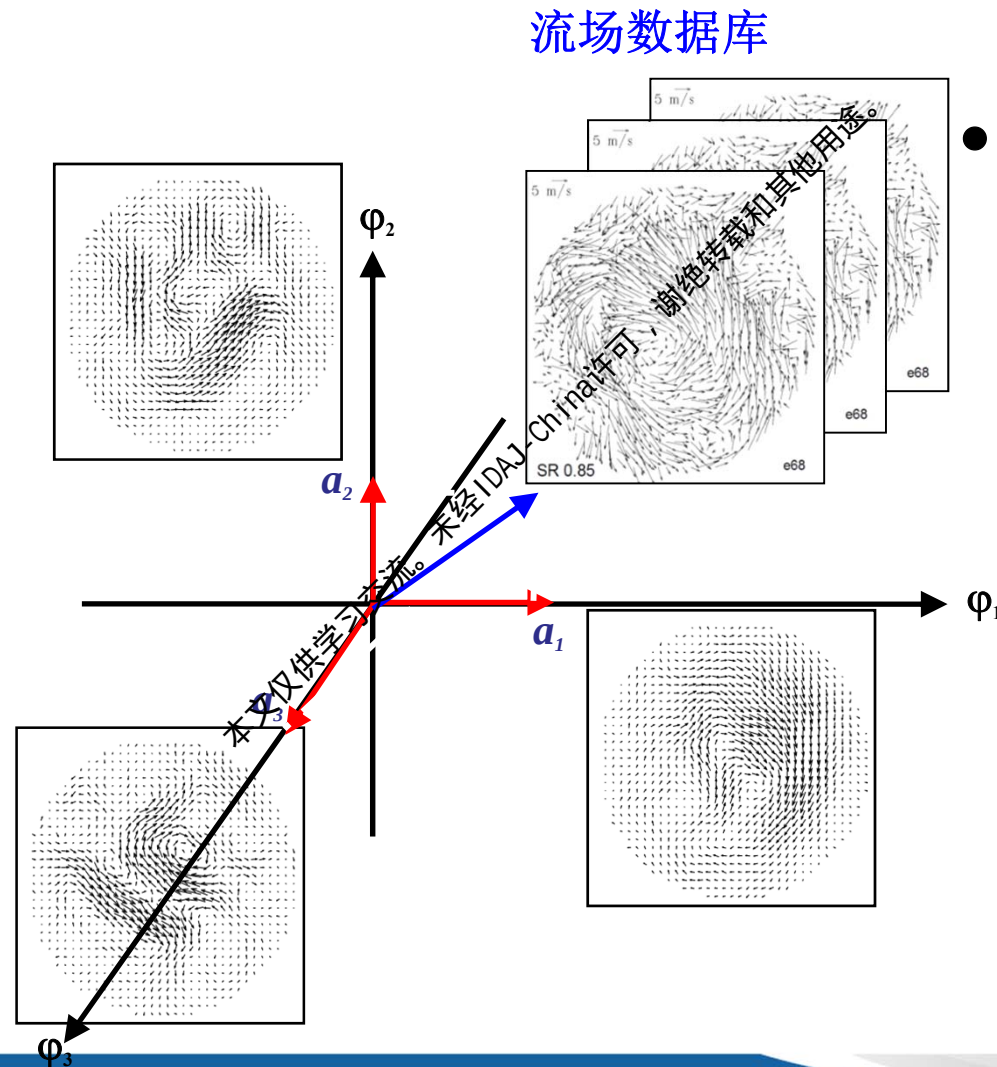
□ LES计算

□ 本征正交分解

□ 结论

本文仅供学习交流，未经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。

POD本征正交分解(概念)



POD本征正交分解(概念)

→ 5 m/s

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^{N_{node}} (a_{(k)}(t) \varphi_{(k)}(x))$$

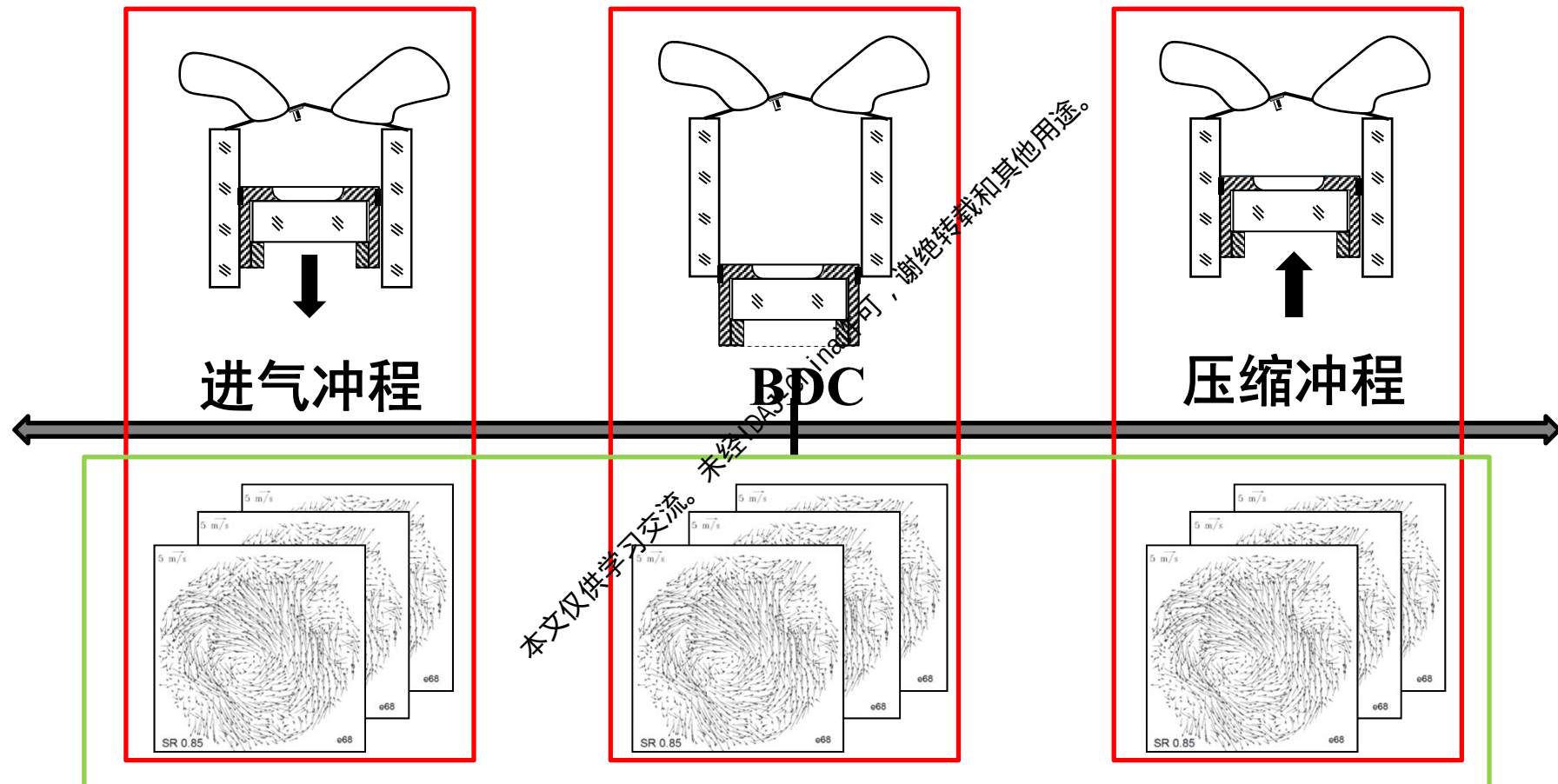
$$(u(x, t_i), u(x, t_j)) = C$$

$$C \cdot \vec{A} = \lambda \cdot \vec{A}$$

流场数据库可以被分解

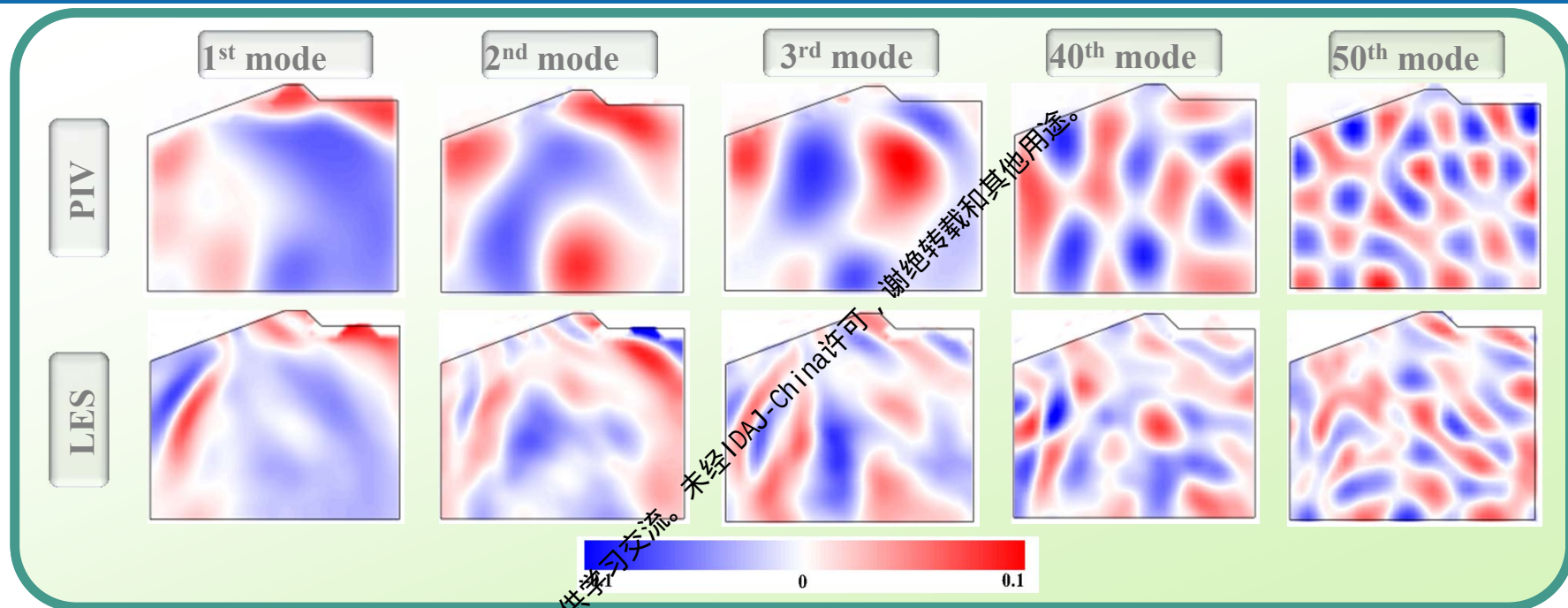
- POD不同的模态 φ 相互正交，其可以反映流场空间分布
- 不同周期流场拥有各自系数 a ，其反映流场能量或强度
- 每个 POD 模态拥有各自对应的特征值和 λ 和特征向量 $\vec{A}$
- 特征值可以反映流场能量或强度

POD本征正交分解(概念)



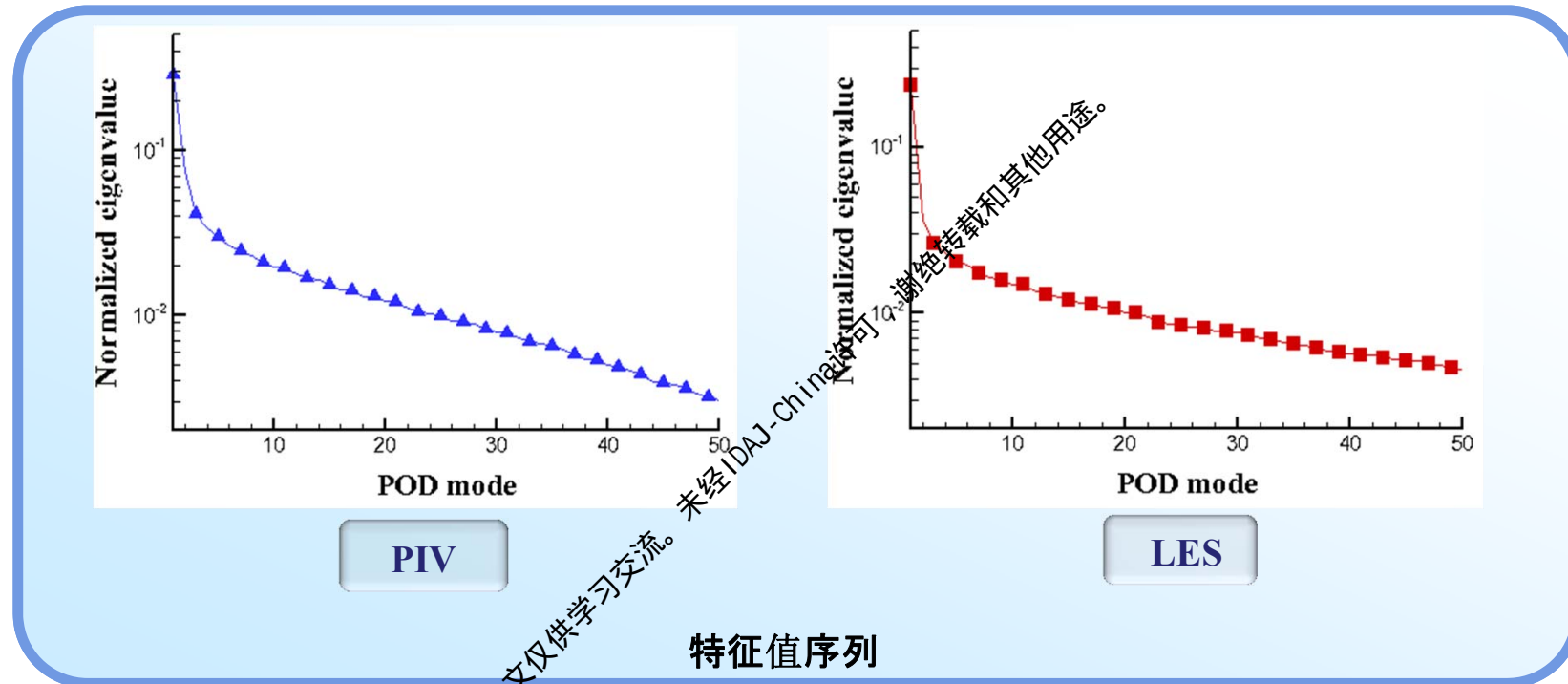
- **相依赖POD 方法**使用同一曲轴转角时刻下的流场数据
- **相依赖POD方法**使用一个范围内不同曲轴转角时刻下的流场数据

POD本征正交分解(结果)



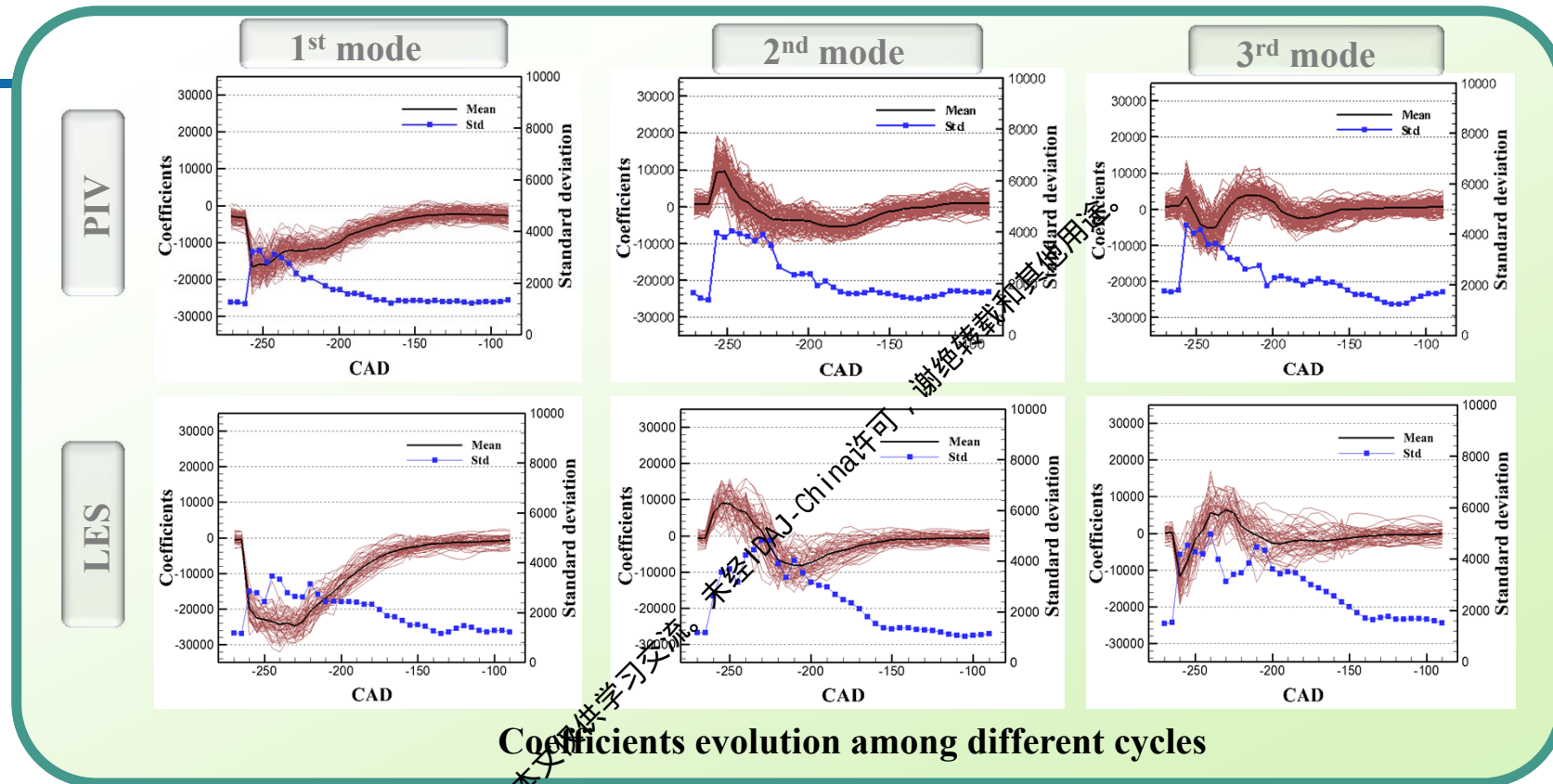
- 1850 snapshots, 50 cycles × 37 曲轴转角, (LES计算)
(从 -270°CA到-90°CA, 每5 个曲轴转角进行结果采样)
- 3900 snapshots, 100 cycles × 39 曲轴转角, (PIV测量)
(从 -271.2°CA到-88.8°CA, 每4.8 个曲轴转角进行结果采样)
- 低阶模态主要反映大尺度涡团结构, 高阶模态主要反映小尺度涡团结构

POD本征正交分解(结果)



- 在POD相不变方法中，只有一组特征值序列
- 特征值序列分布可以反映流场能量在不同的POD模态上的分布情况
- 使用POD方法可以实现对LES计算结果进行有效评价

POD本征正交分解(结果)



- 每个周期都拥有各自对应的POD系数，系数之间的差异性可以反映流场循环变动特性
- 进气冲程阶段下的缸内流场循环变动强烈
- LES计算可以有效预测缸内瞬态流场
- POD方法可以实现对LES计算结果进行有效评价。

- 背景
- PIV测量
- LES计算
- 本征正交分解
- 结论

本文仅供学习交流，经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。

结论

- 进气冲程阶段里的进气射流是产生缸内大尺度涡团的主要原因
- 在发动机整个冲程阶段里，大尺度涡团会被拉伸直至破裂成数量众多的小尺度涡团
- 进气冲程阶段里的流场循环变动最为强烈，在随后的压缩过程中，循环变动强度会逐渐减弱
- LES计算用来可以合理的预测缸内流场
- POD方法可以将流场不同尺度的涡团进行分离，从而有利于研究他们的空间分布特性和循环变动特性，同时该方法还可以实现对LES计算结果进行有效评价

致谢

- 感谢CONVERGENT SCIENCE公司对本研究的大力支持
- 感谢美国通用汽车公司对本研究的大力支持
- 感谢国家自然科学基金对本研究的大力支持

本文仅供学习交流。IDAJ-CHINA 公司，谢绝转载和其他用途。

谢谢大家！

本文仅供学习交流。未经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。