

IDAJ CAE
Solution
Conference

Your True Partner for CAE&CFD

ICSC  2015

基于CONVERGE的船用气体机仿真计算

本文仅供学习交流。未经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。

公司名称： 中船动力研究院有限公司

演讲人： 研发部 -韩连任

→ 目录

- 船用气体机发展
- 船用气体机仿真模型
- 船用气体机燃烧过程仿真
- 船用气体机点火时刻分析
- 结论

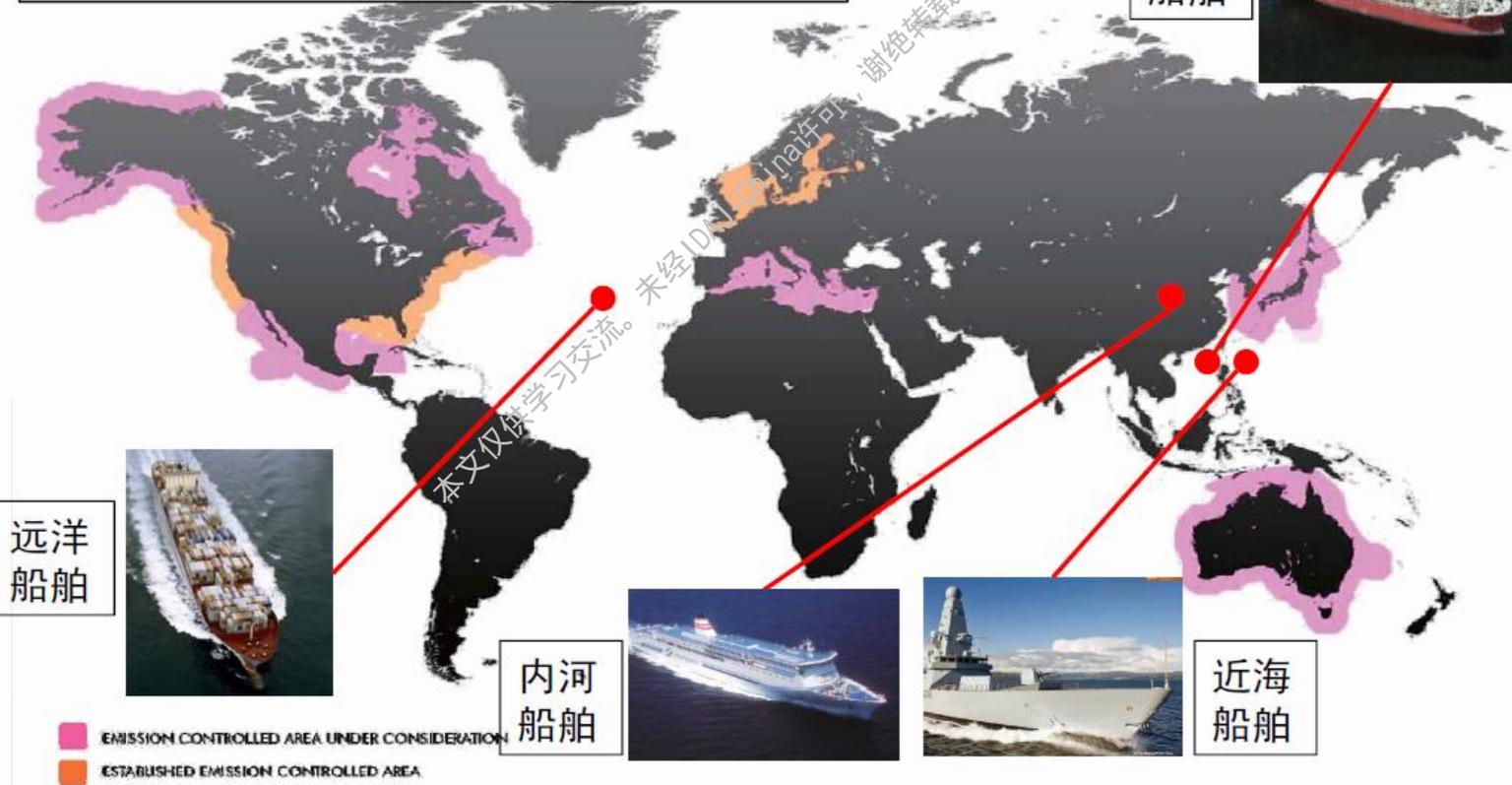
本文仅供学习交流。未经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。

→ 船用气体机发展

■ 船舶排放控制

排放控制区特点：1. 发达国家沿海区域；2. ECA逐年扩大；3. NECA+SECA；

港湾
船舶



远洋
船舶



内河
船舶



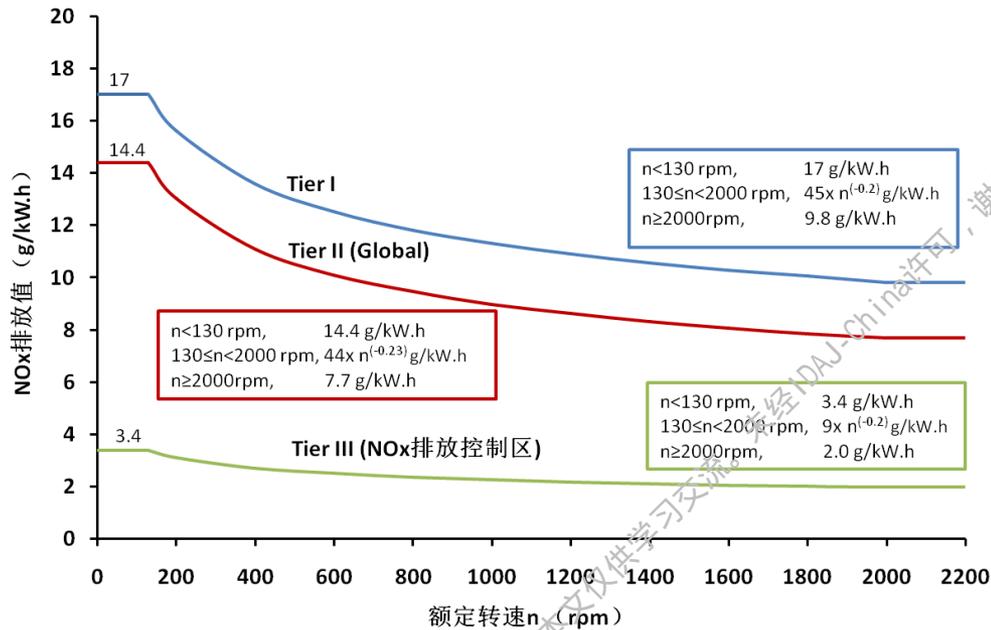
近海
船舶



EMISSION CONTROLLED AREA UNDER CONSIDERATION
 ESTABLISHED EMISSION CONTROLLED AREA

→ 船用气体机发展

■ 船用发动机排放法规

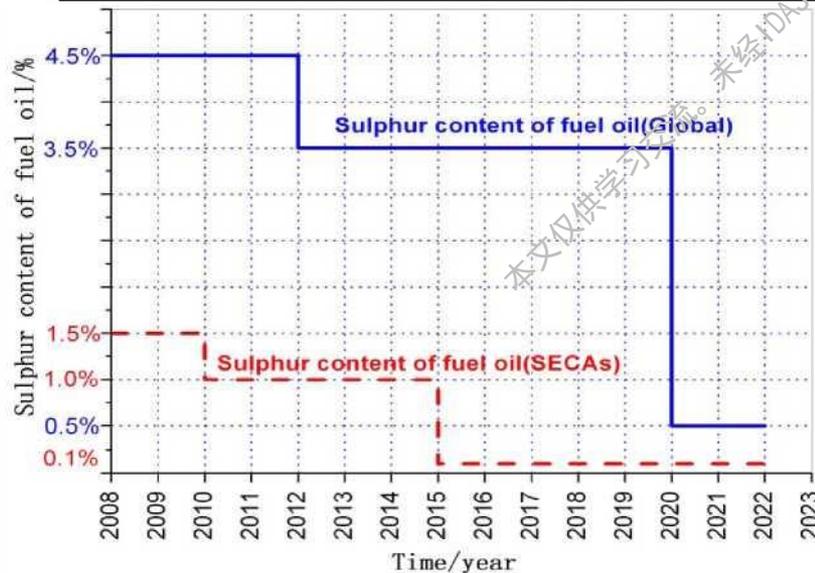


IMO Tier II排放法规已于2011年在全球开始实施，在2014年4月4日结束的MEPC第66次会议上确定2016年起将在NO_x排放控制区（NECA）实行更严格的IMO Tier III限制，排放量相对于与Tier I要降低80%。

→ 船用气体机发展

■ 船用发动机排放法规

SO _x 排放控制区域外		SO _x 排放控制区域	
硫含量 (% m/m)	执行日期	硫含量 (% m/m)	执行日期
4.5	-2012.1.1	1.5	-2010.7.1
3.5	2012.1.1-2020.1.1 (2025.1.1)	1.0	2010.7.1-2015.1.1
0.5	2020.1.1 (2025.1.1) -	0.1	2015.1.1-

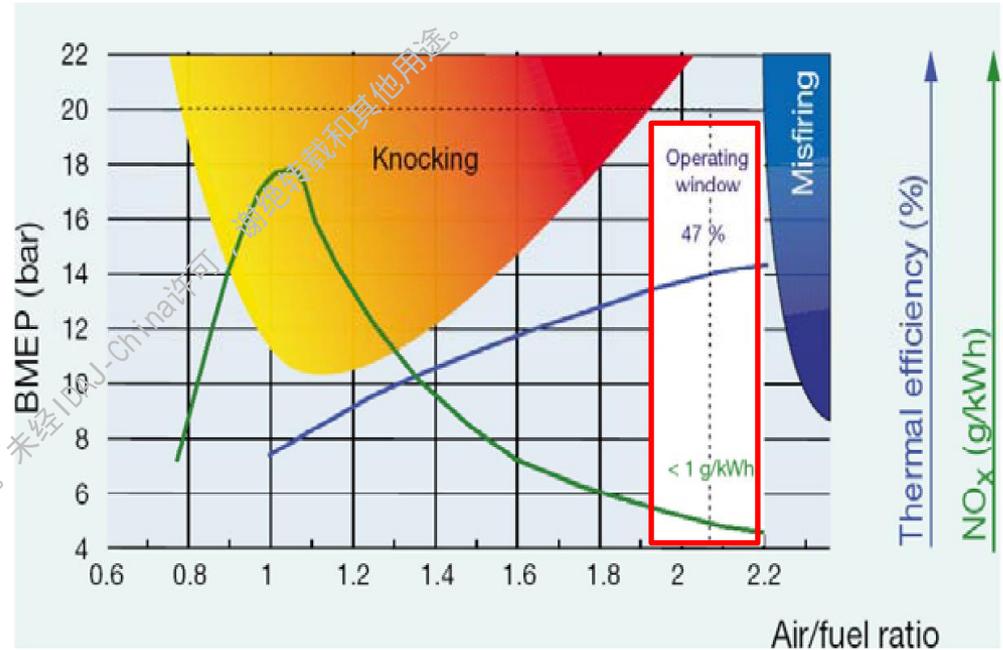
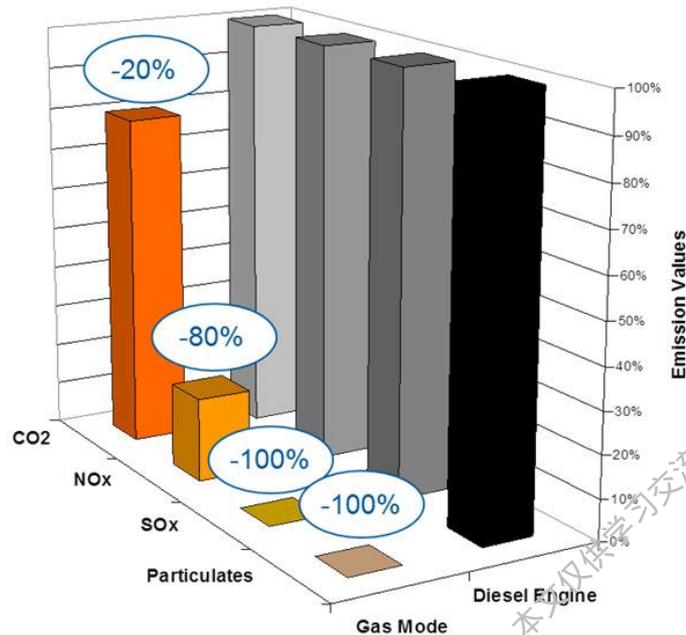


SO_x排放控制区 (SECA):

- 波罗的海区域;
- 北海区域 (包括英吉利海峡);
- 北美区域;
- 美加勒比海区域

→ 船用气体机发展

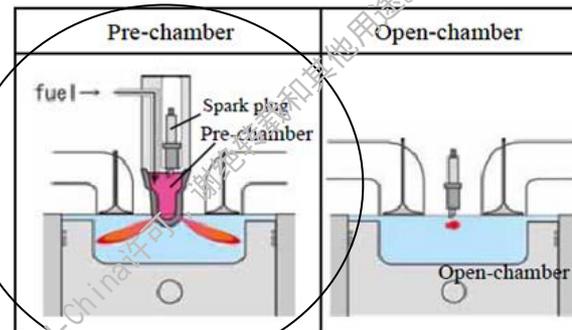
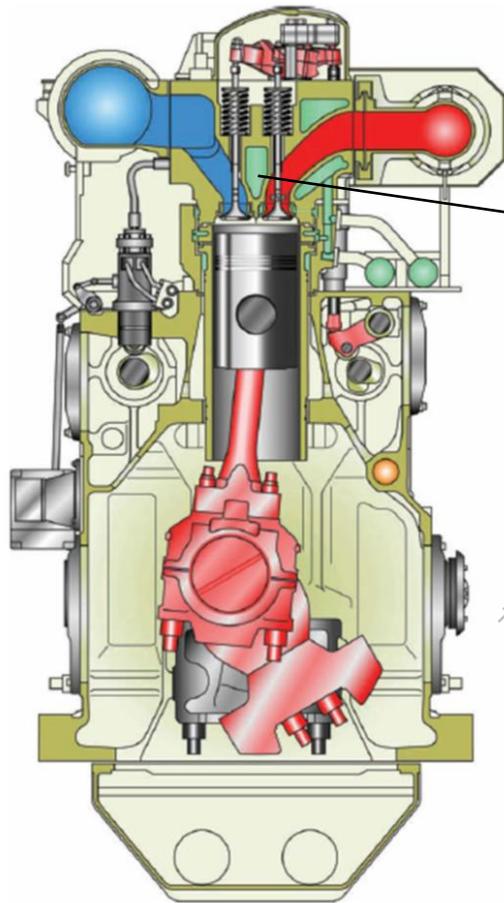
■ 船用气体发动机优势



以天然气为代表的清洁燃料发动机是减少有害物排放的一条重要途径。天然气主要成分为甲烷，被称为大自然赋予的“绿色能源”。由于天然气发动机燃烧接近奥托循环，因此其缸内最高燃烧温度将明显低于柴油机，所以天然气发动机可以比柴油发动机减少80%的氮氧化物。

→ 船用气体机发展

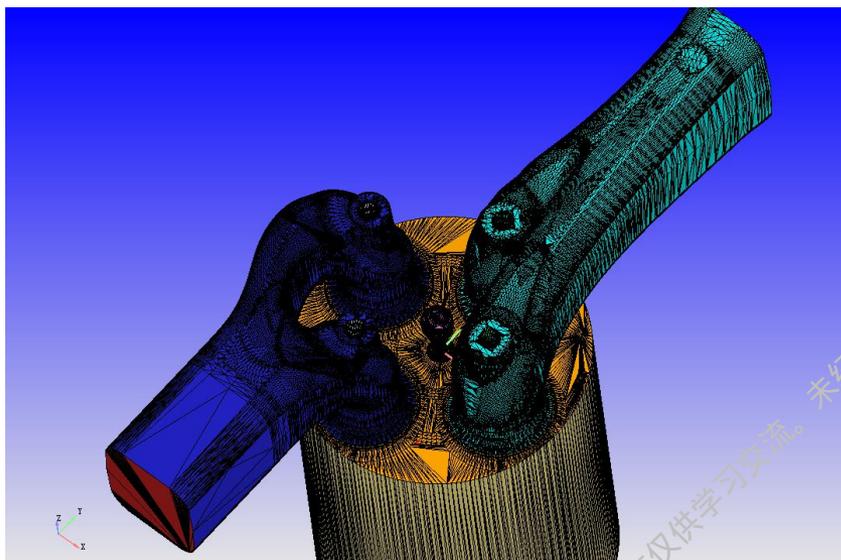
■ 船用大缸径气体发动机特点



- ✓ 开放式气体机需要使用高能量的火花塞并相应的使用相对较浓的混合气，燃烧热效率低且排放相对较高
- ✓ 预燃室式气体机可以在高稀薄天然气条件下快速燃烧，因此其热效率要高于开放式燃烧室
- ✓ 对于大缸径气体机，为避免燃烧速率慢、燃烧不稳定、循环波动大、热效率下降、甚至失火等问题，更倾向于预燃烧室气体机

→ 船用气体机仿真模型

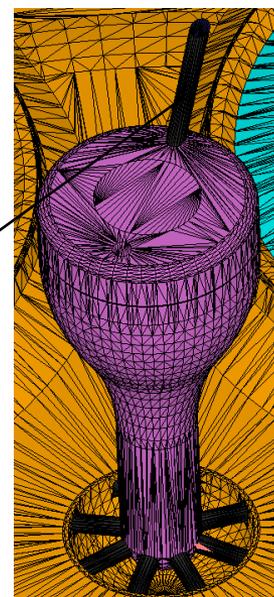
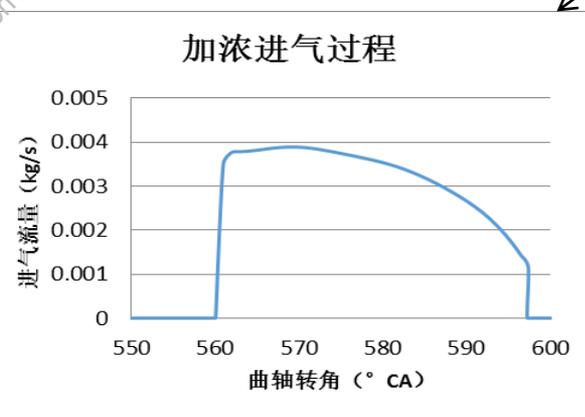
■ 计算案例



气体机缸径	320mm
冲程数	4
冲程长度	420mm
连杆长度	950mm
气体机转速	720r/min

某船用预燃式气体机

- ✓ 排气过程
- ✓ 进气过程
- ✓ 压缩过程
- ✓ 燃烧过程



预燃烧室体积约上死点燃烧室1.2%；点火时刻在火花塞附近的当量空燃比保证在0.8-1.2之间

→ 船用气体机仿真模型

■ 计算条件

➤ 排气阀开启为计算初始时刻

参数名称	参数值
缸内/预燃烧室压力	9.43bar
缸内/预燃烧室温度	1063K
进气道压力	3.4bar
进气道温度	311.2K
排气道压力	2.83bar
排气道温度	812K
计算初始时刻	145.1° CA

➤ 计算网格加密策略

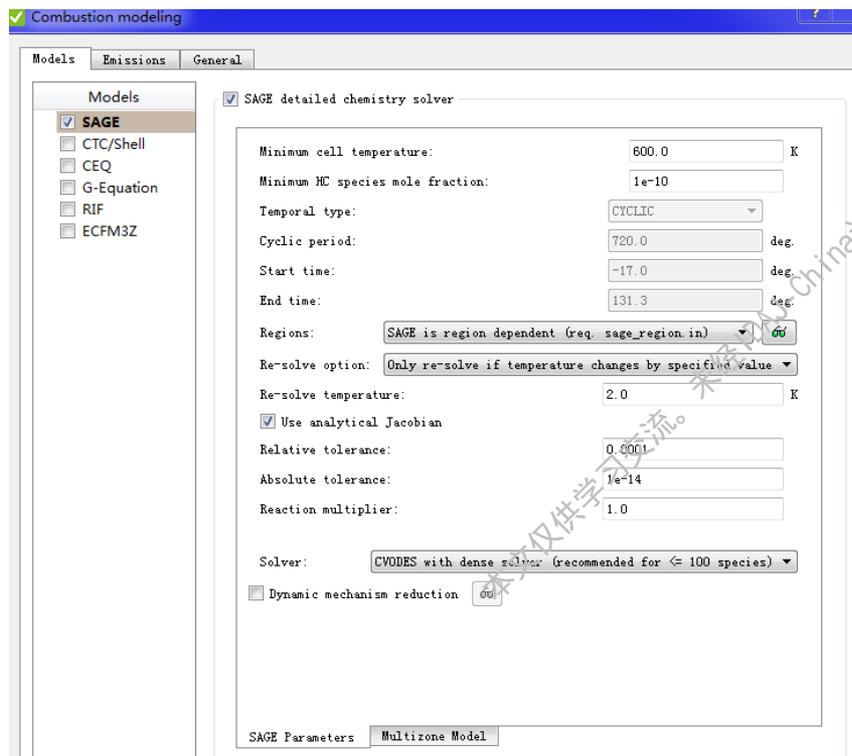


- ✓ 基本网格尺寸 16mm ；
- ✓ 温度和速度梯度自动加密3次；
- ✓ 火花塞附近加密到 0.25 mm ；
- ✓ 气阀动作时刻气阀座圈 加密3级，加密2层 ；
- ✓ 预燃烧室加密到 2mm ， 燃烧室加密到4mm

数量:700,000~1,400,000

→ 船用气体机仿真模型

■ 物理模型

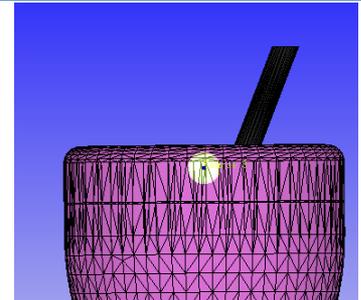


- ✓ 湍流模型选择K-Epsilon/RNG模型;
- ✓ 燃烧模型选择SAGE模型, 并导入CHEMKIN格式中的化学反应机理;
- ✓ 点火模型选择火花塞自动点火模型;
- ✓ NO_x排放选择扩展的Zeldovich机理。

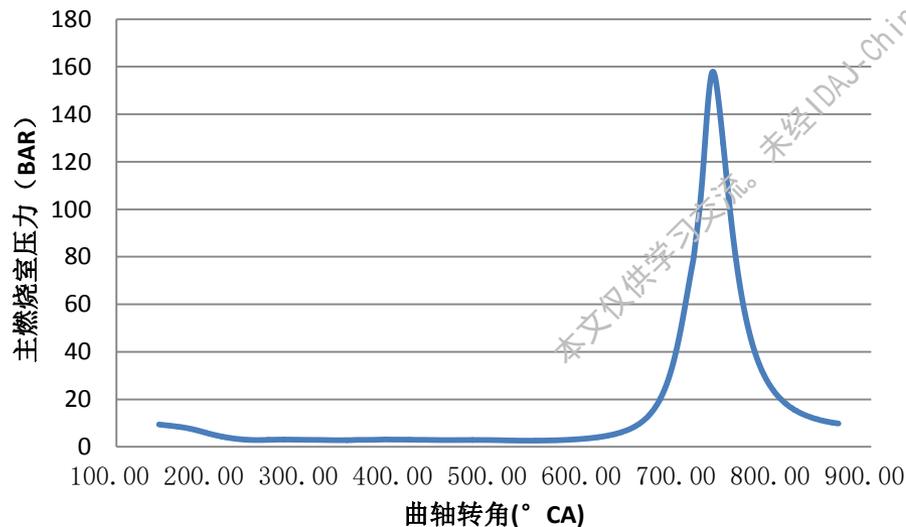
→船用气体机燃烧过程仿真

■ 缸内压力曲线

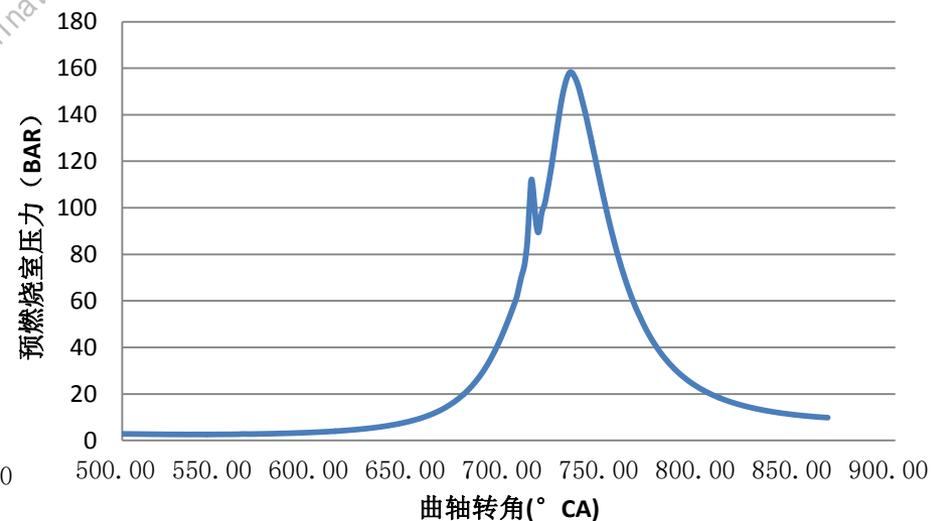
原机设计火花塞位置设置在预燃室上平面下5mm处，并采用 16° CA BTDC火花点火。通过 720° CA一个完整工作循环模拟，得到仿真计算结果。



主燃烧室压力曲线



预燃烧室压力曲线

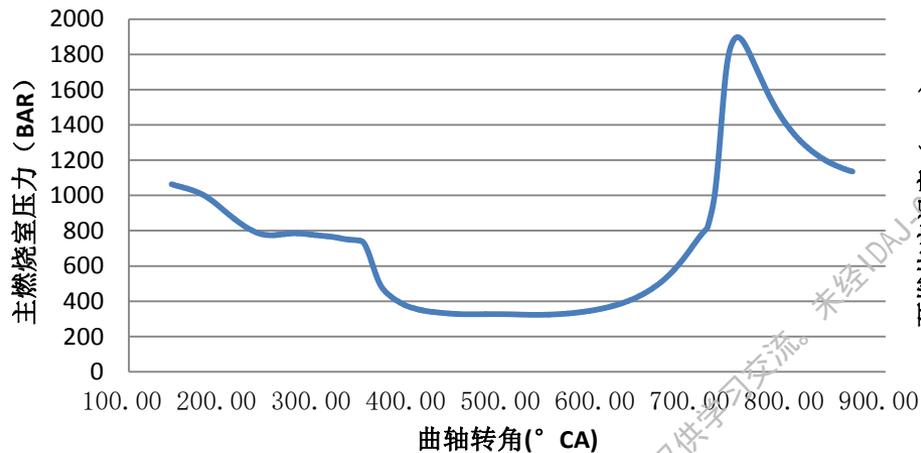


- ✓ 主燃烧室最大爆发压力达到159.4bar;

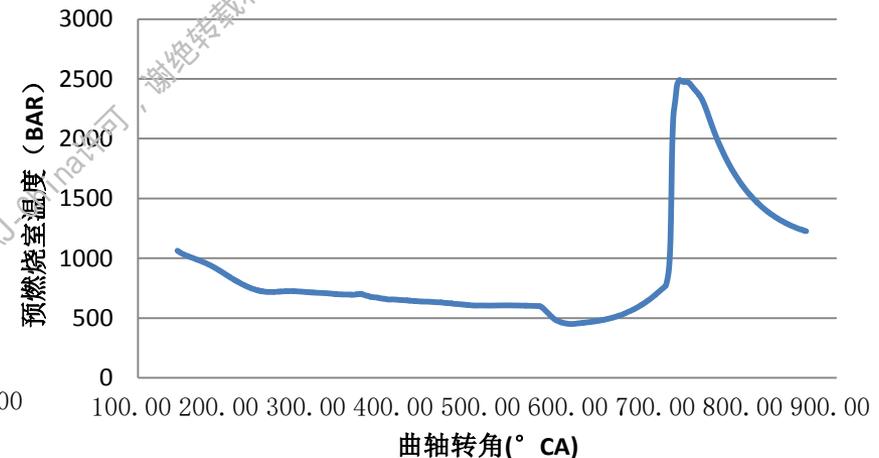
→船用气体机燃烧过程仿真

■ 缸内温度曲线

主燃烧室温度曲线



预燃烧室温度曲线

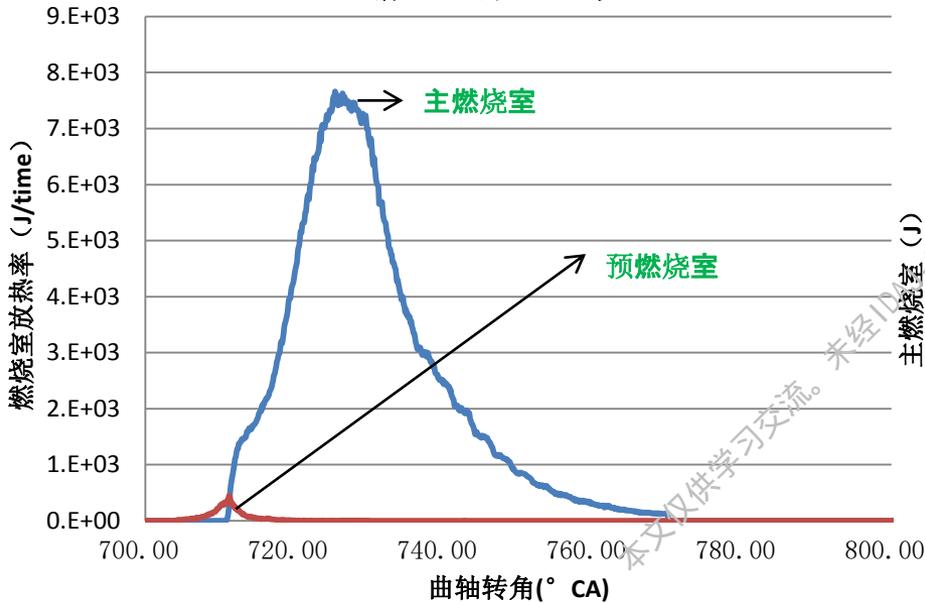


- ✓ 预燃烧室燃烧后温度急剧上升瞬时温度约为2500K，后续向主燃烧室传递温度引燃主燃烧室，此后预燃室温度逐渐降低；
- ✓ 主燃烧室在缸内气体燃烧过程中温度逐步升高，最大温度约为1900K；
- ✓ 预燃烧室由火花塞引燃并且内部燃空当量比较高，瞬时温度较高，因此需进行对预燃室加强冷却设计并做结构强度仿真验证。

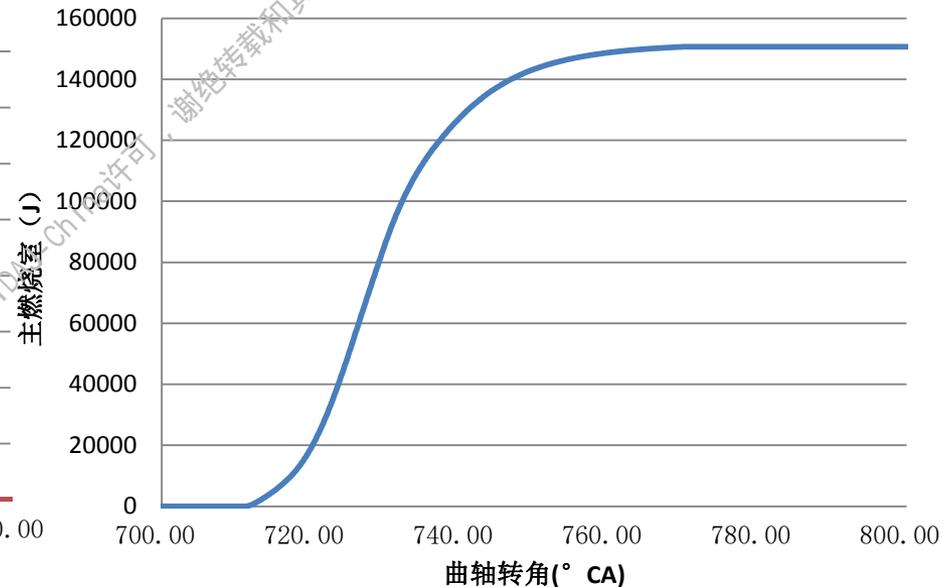
→船用气体机燃烧过程仿真

■ 缸内放热率曲线

燃烧室放热率



燃烧室累计放热率

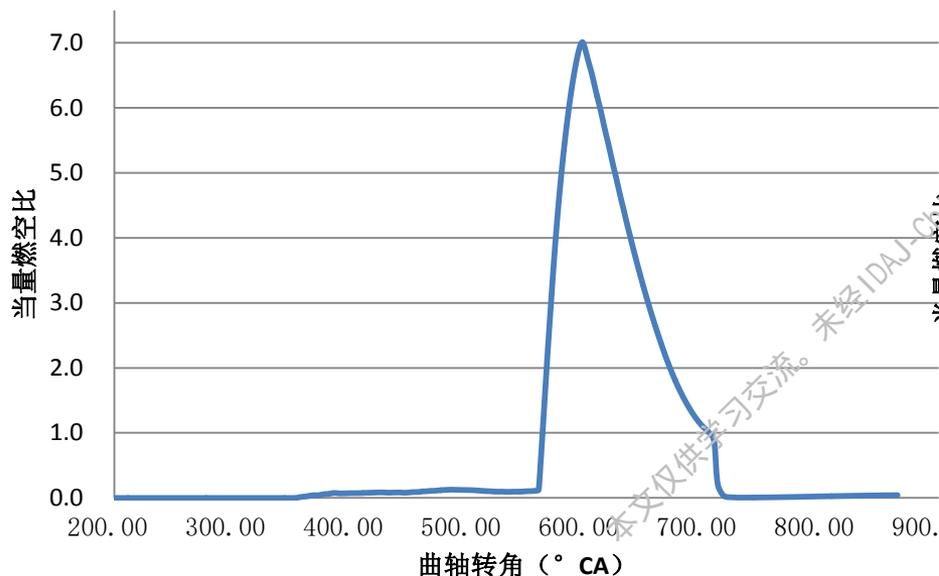


- ✓ 预燃烧室点火后，预燃烧室立即开始燃烧放热；
- ✓ 预燃烧室放热率最大的时刻引燃主燃烧室；
- ✓ 主燃烧室燃烧瞬时放热率最大值为7500J；
- ✓ 通过燃烧室累计放热率分析燃烧持续期约为715° CA到750° CA。

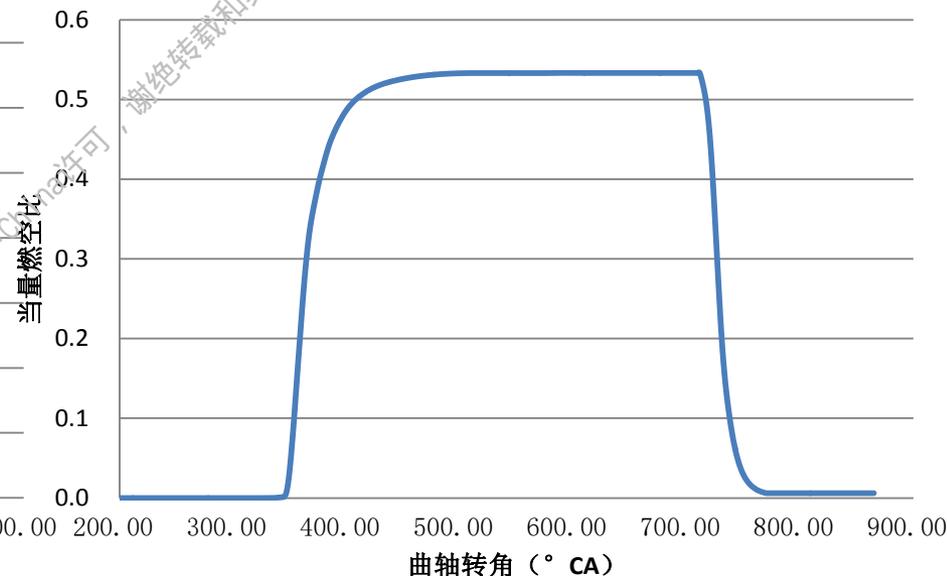
→船用气体机燃烧过程仿真

■ 缸内气体组分曲线

预燃烧室当量燃空比



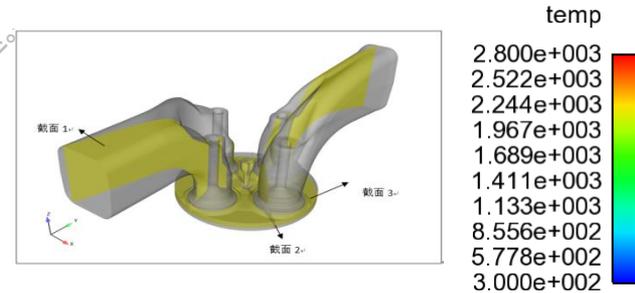
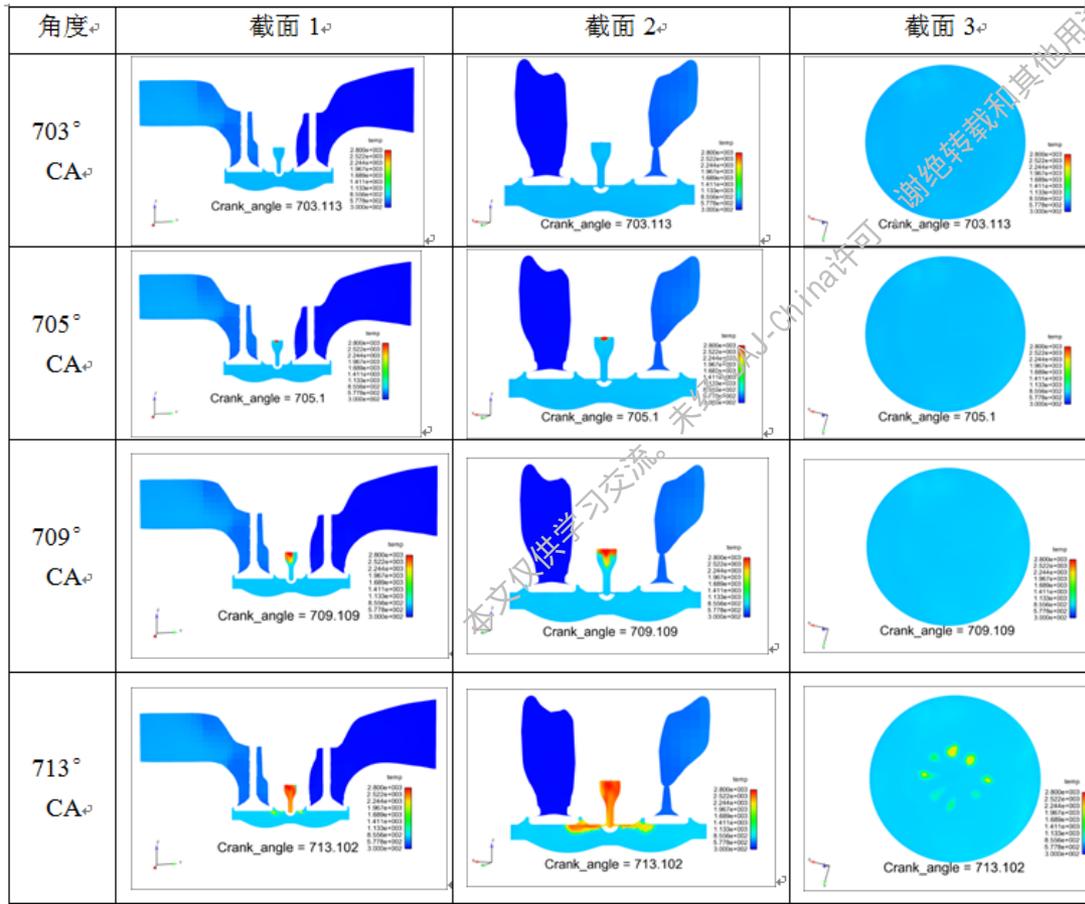
主燃烧室当量燃空比



- ✓ 进气阶段由主燃烧室燃料进入预燃烧室内使燃空比缓慢增加，加浓喷射使燃空比快速增加；
- ✓ 加浓喷射过程结束后，缸内气体从主燃烧室内经孔道进入预燃室进行稀释，预燃室内燃空当量比快速降低；到达点火时刻为1.05，满足点火要求。
- ✓ 点火燃烧预燃烧室燃空当量比急剧降低直到燃料燃烧殆尽。
- ✓ 主燃烧室内的燃空当量在进气过程逐渐增大到最大值并保持稳定，后经燃烧，消耗殆尽。。

→船用气体机燃烧过程仿真

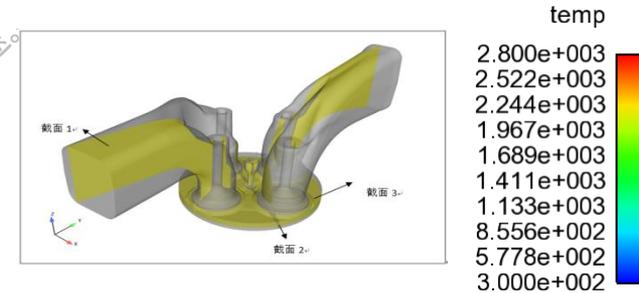
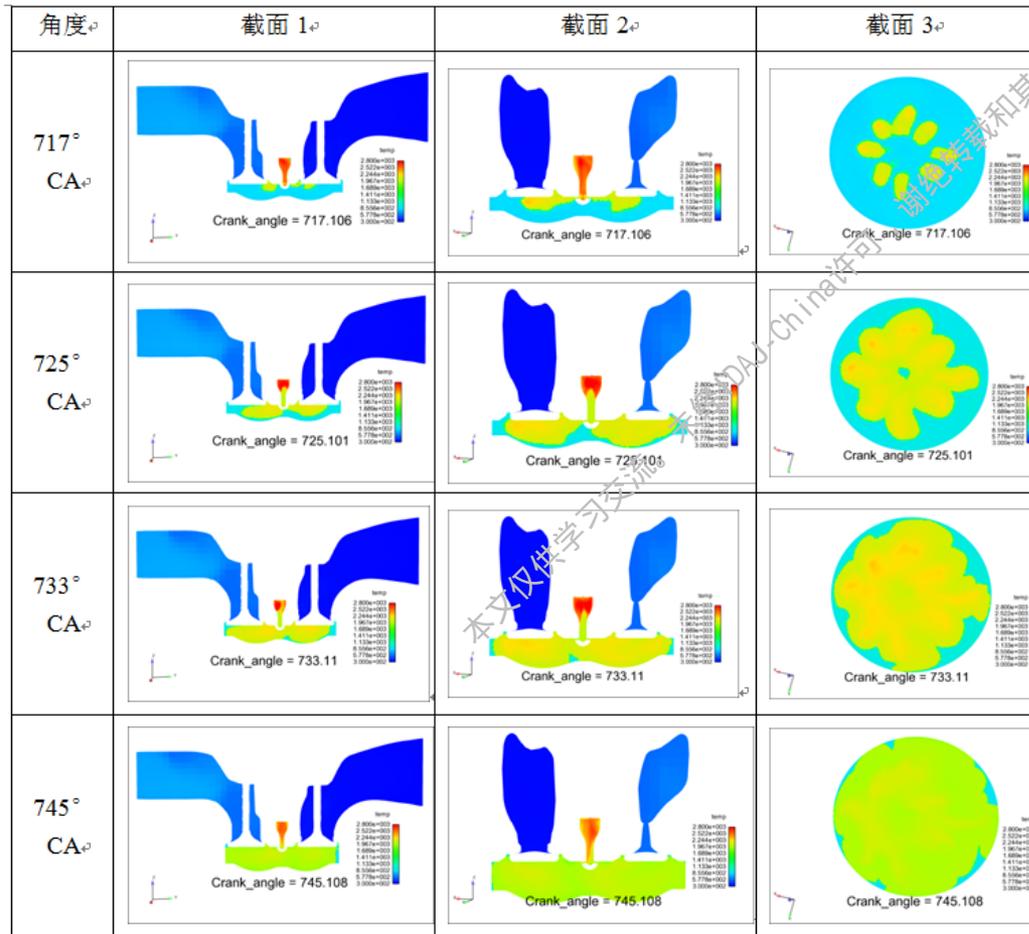
缸内温度场分析



- ✓ 704° CA开始点火；
- ✓ 705° CA在火花塞附件开始出现局部高温气体；
- ✓ 705° CA-713° CA中预燃烧室高温区域逐步扩散，高温火焰开始向主燃烧室传递；
- ✓ 713° CA开始，主燃烧室开始被预燃烧室传递的高温气体引燃

→船用气体机燃烧过程仿真

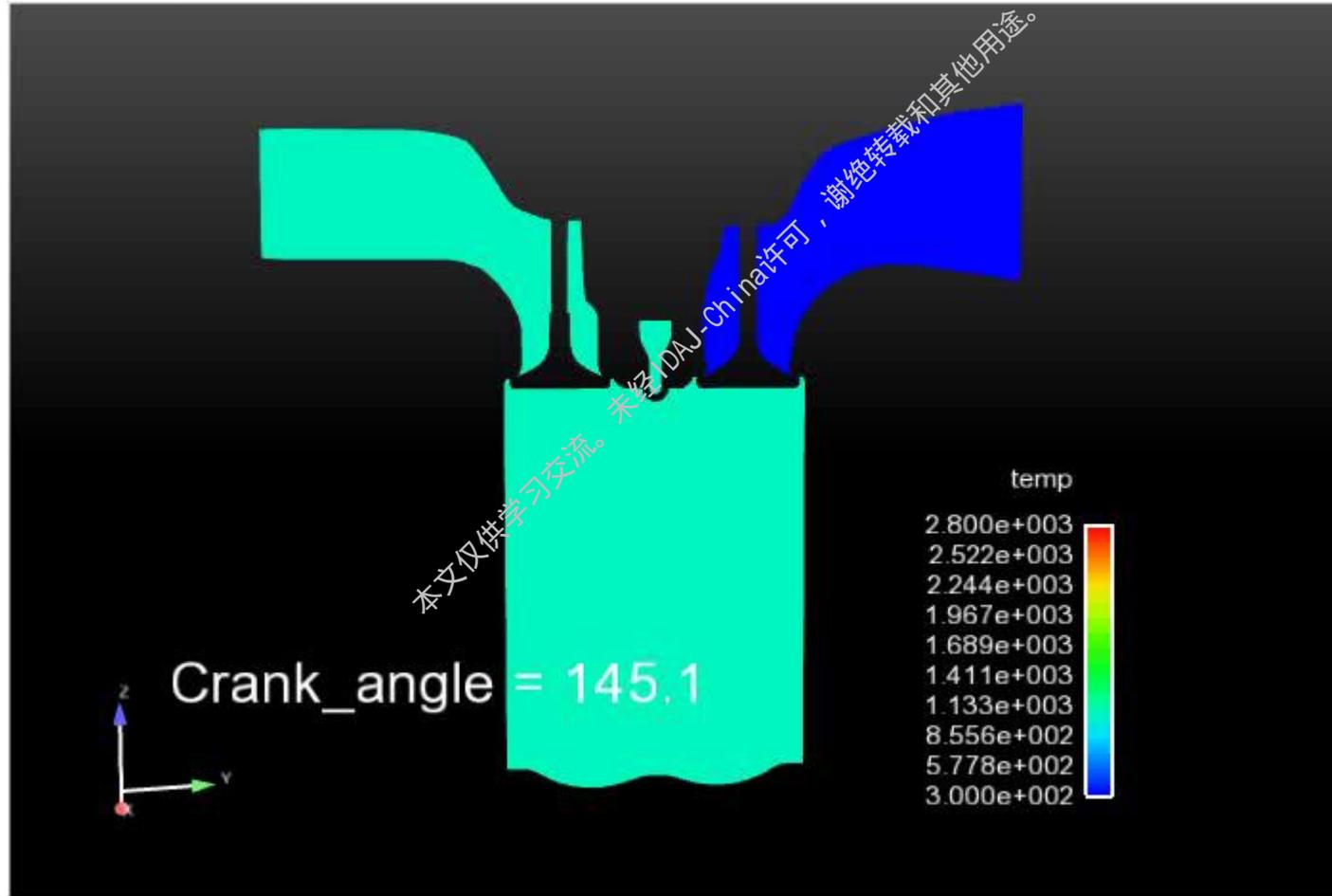
缸内温度场分析



- ✓ 713° CA-725° CA主燃烧室大面积燃烧并继续扩大主燃烧室高温区域;
- ✓ 725° CA-745° CA燃烧沿着缸壁方向发展并将剩余燃料基本消耗殆尽。

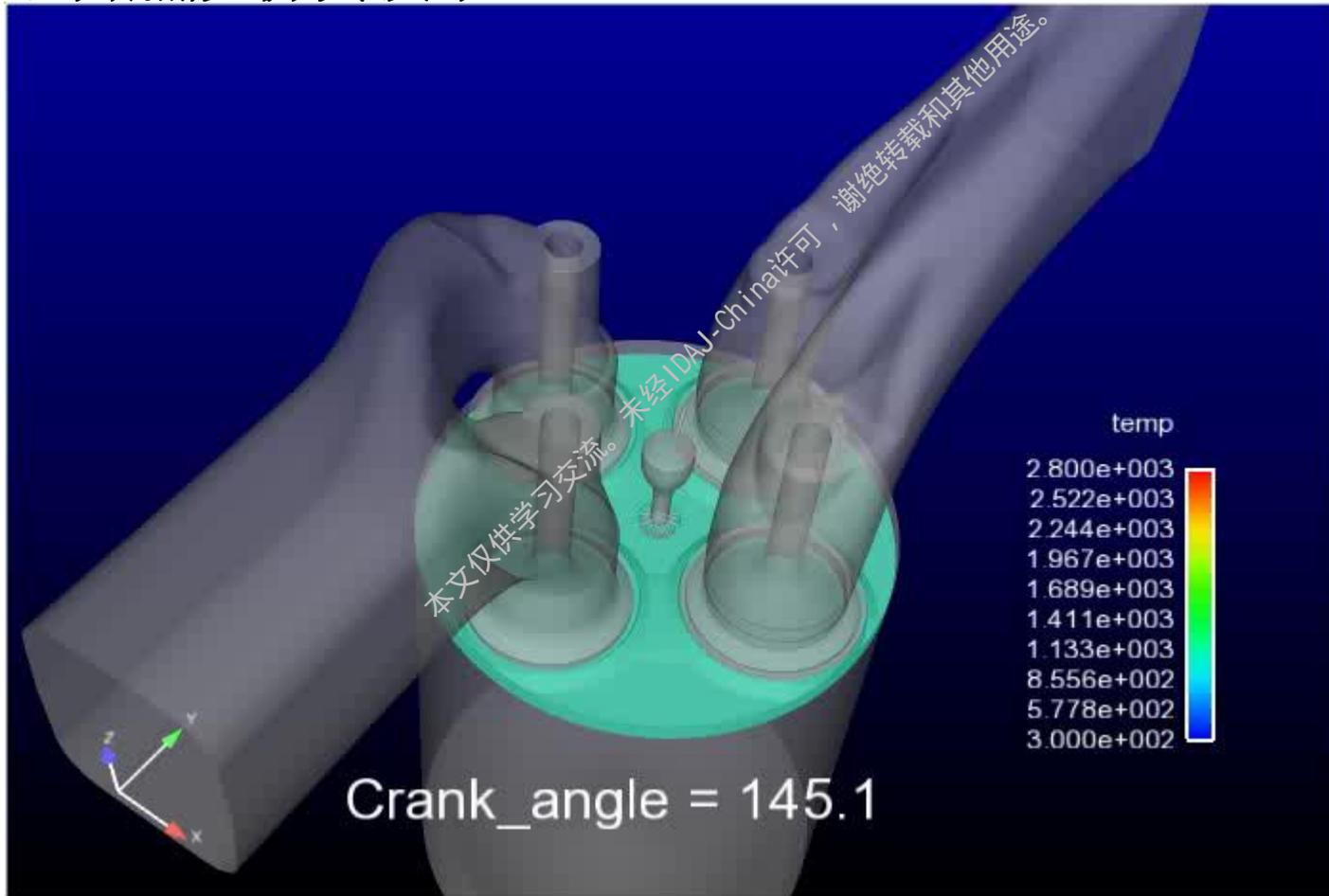
→ 船用气体机燃烧过程仿真

■ 缸内燃烧仿真演示



→船用气体机燃烧过程仿真

■ 缸内燃烧仿真演示

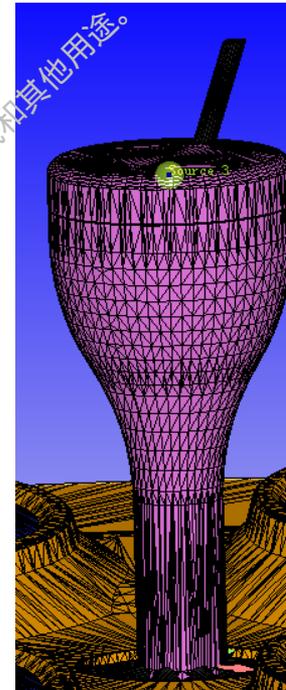


→船用气体机点火时刻分析

■ 计算方案

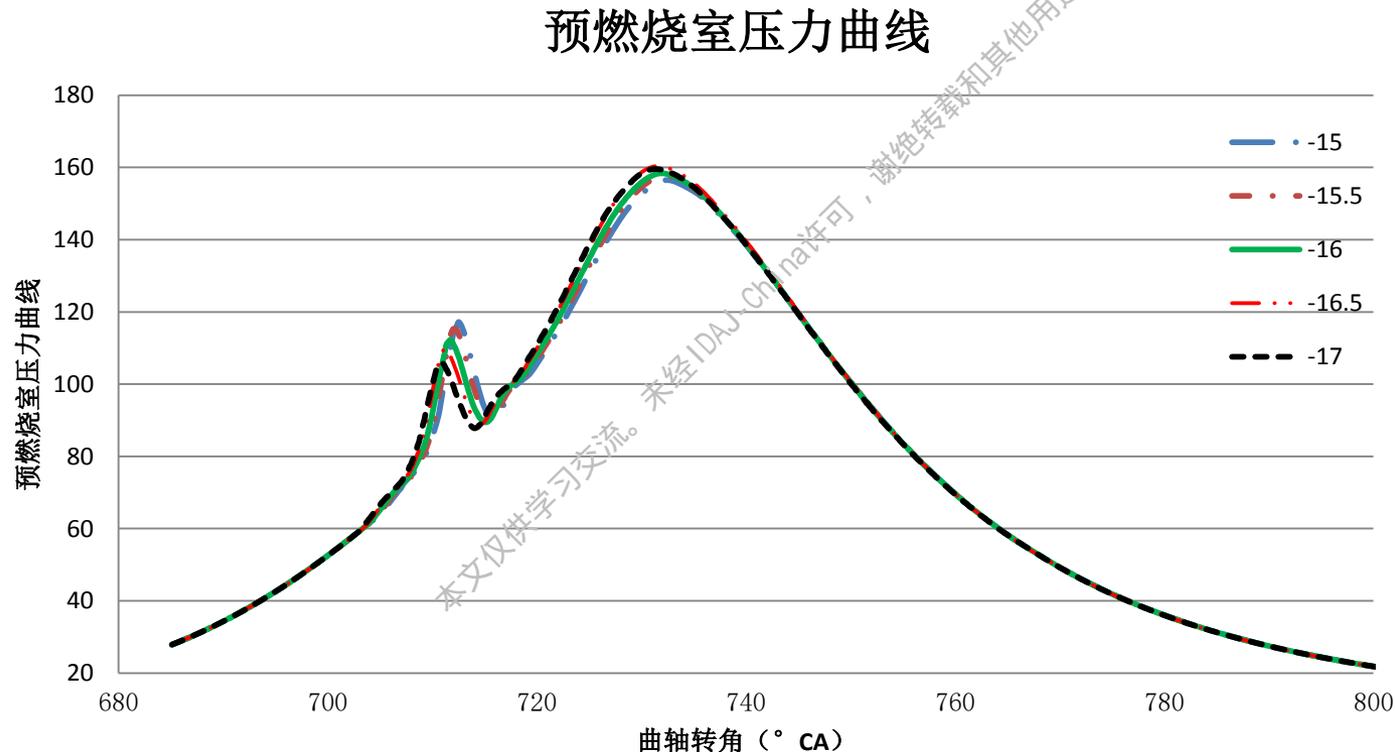
保证预燃烧室能够顺利引燃且主燃烧室开始燃烧。在不改变加浓进气曲线条件下，在 -17° CA到 -15° CA均满足点火要求

- ✓ -15° CA BTDC火花塞点火
- ✓ -15.5° CA BTDC火花塞点火
- ✓ -16° CA BTDC火花塞点火
- ✓ -16.5° CA BTDC火花塞点火
- ✓ -17° CA BTDC火花塞点火



→船用气体机点火时刻分析

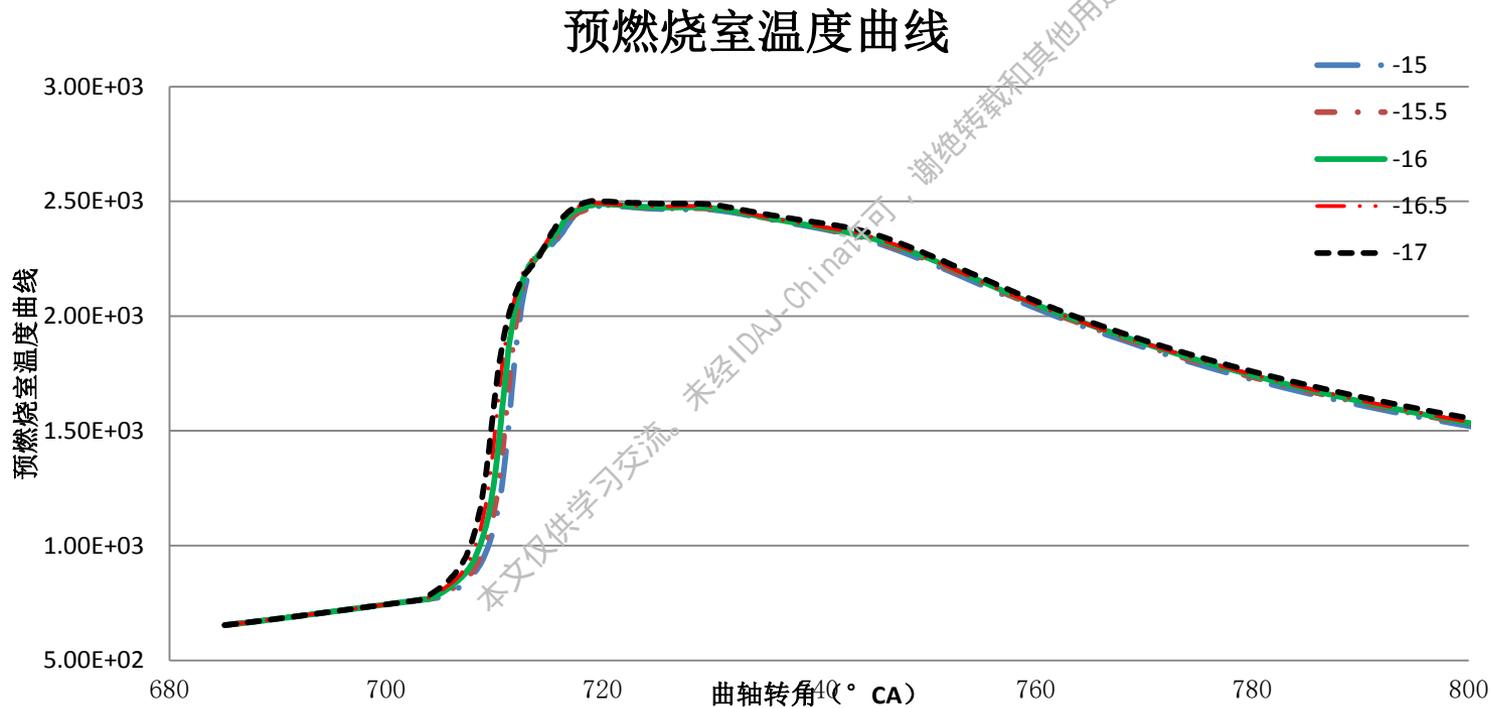
■ 预燃烧室压力曲线比较



- ✓ 随着点火时刻推后预燃烧室第一个峰值曲线逐渐增大即 -15° CA点火预燃烧室第一个峰值压力为117bar而 -17° CA点火仅为104bar，但最大压力值是由主燃烧室决定，故最大压力值基本一致。

→船用气体机点火时刻分析

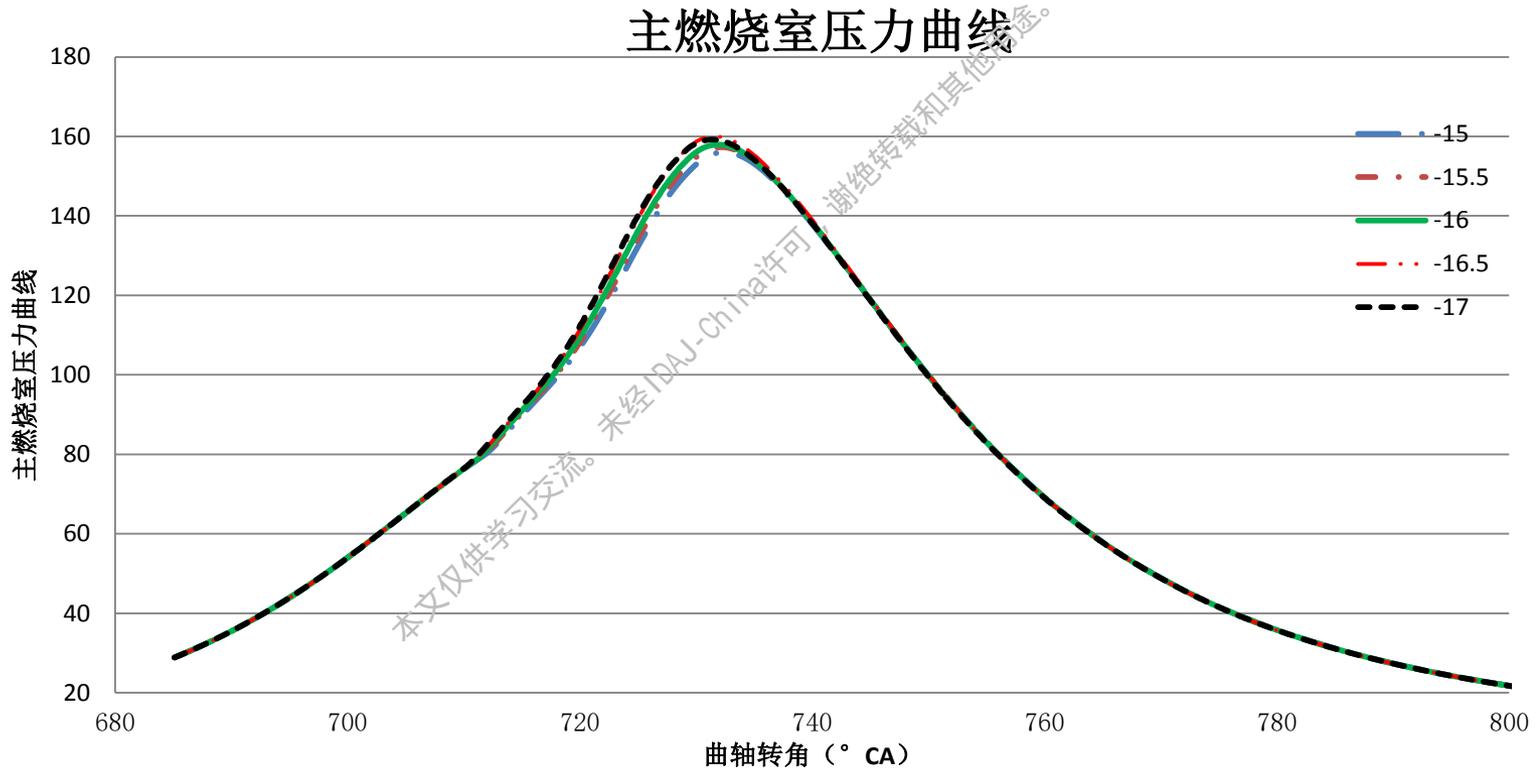
■ 预燃烧室温度曲线比较



- ✓ 随着点火时刻提前温度峰值的曲轴转角提前，但最大温度差别不大，-17CA点火的温度峰值比-15CA点火略大，差值约为20K。

→ 船用气体机点火时刻分析

■ 主燃烧室压力曲线比较

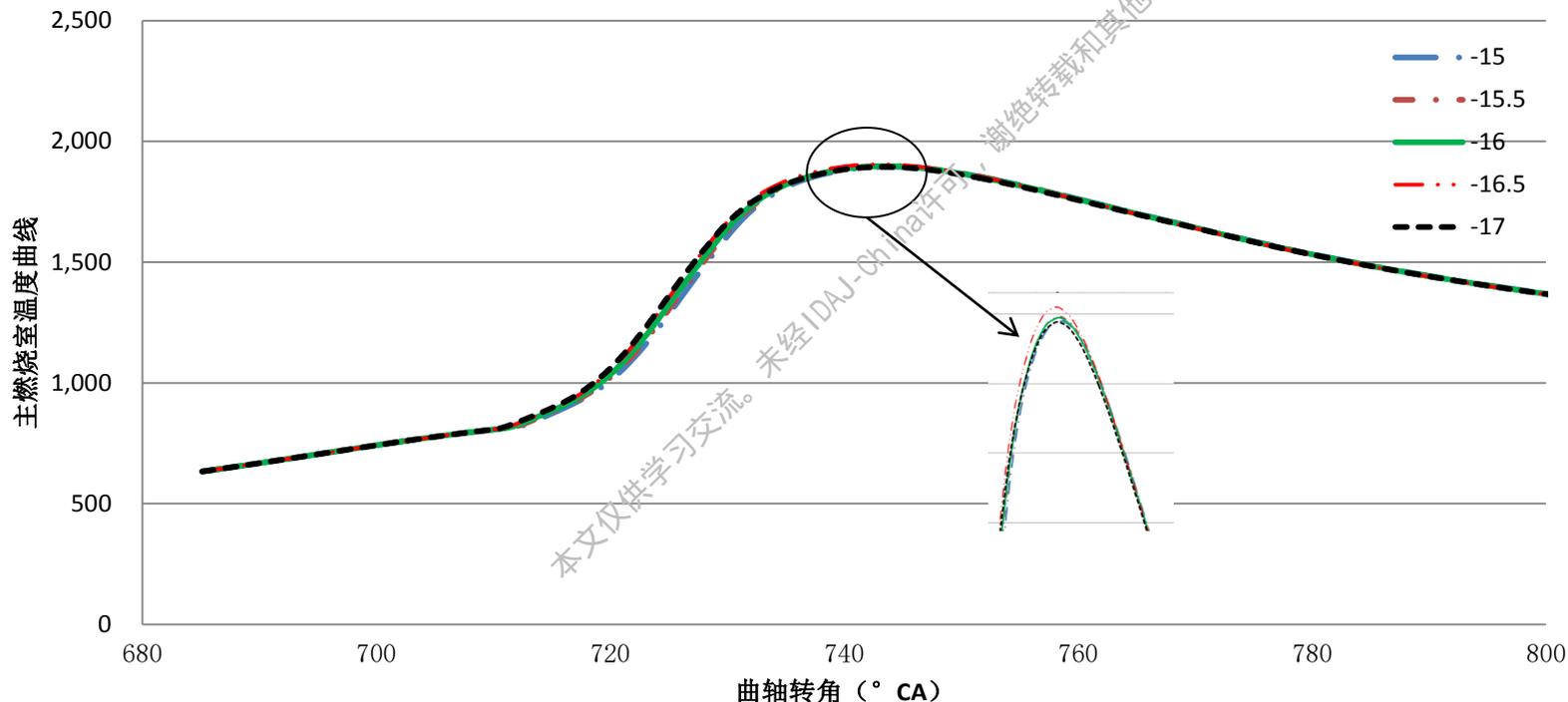


- ✓ 当点火时刻 -16.5° CA, 在 732° CA时刻时爆发压力最大达到160.1bar 而点火时刻 -15° CA, 在 732.5° CA最大爆发压力仅为156.2bar;

→ 船用气体机点火时刻分析

■ 主燃烧室温度曲线比较

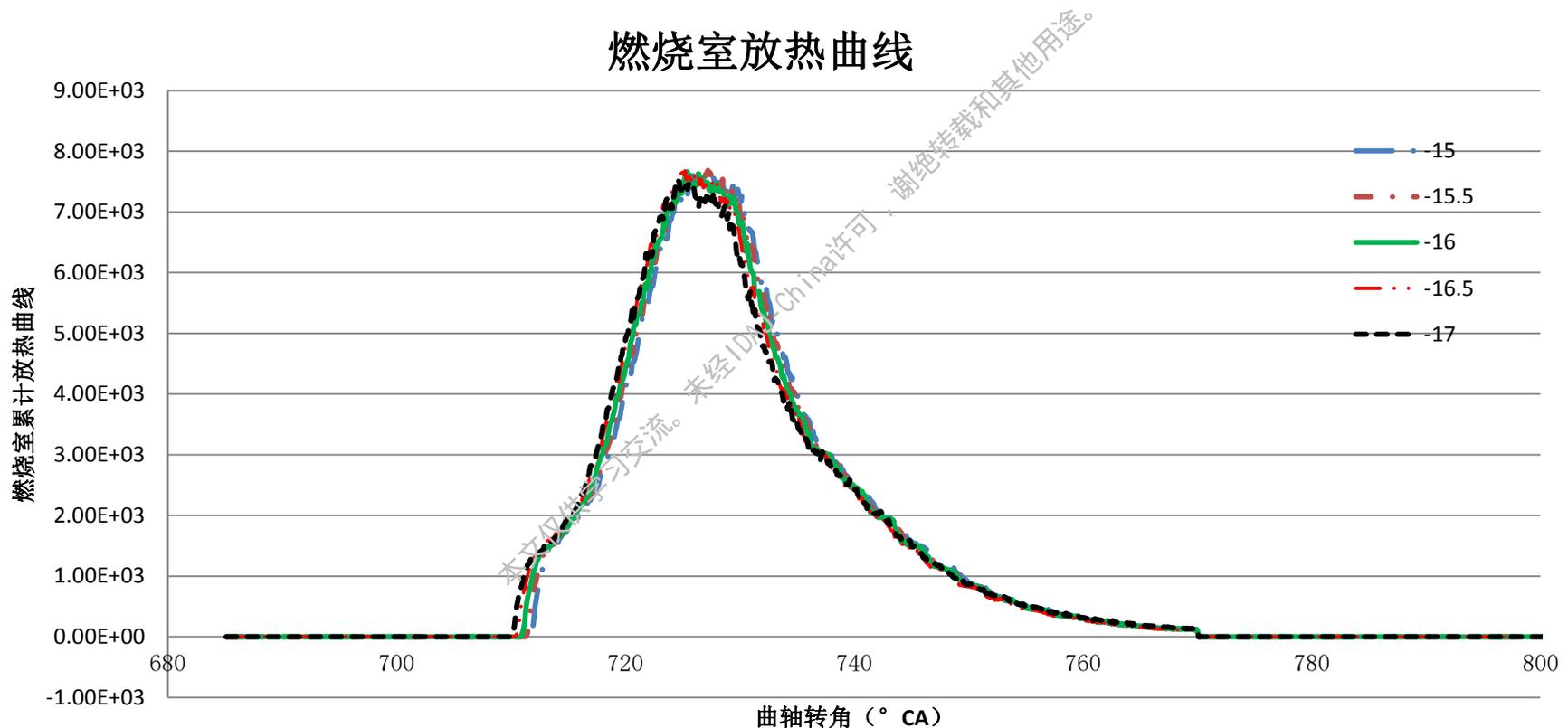
主燃烧室温度曲线



- ✓ 主燃烧室温度值比较：当点火时刻 -16.5° CA，在 743° CA时刻时温度最大达到 1905.2K ，当点火时刻 -15° CA，在 744.1° CA时刻时温度最大仅达到 1894.1K 。

→ 船用气体机点火时刻分析

■ 燃烧室放热曲线

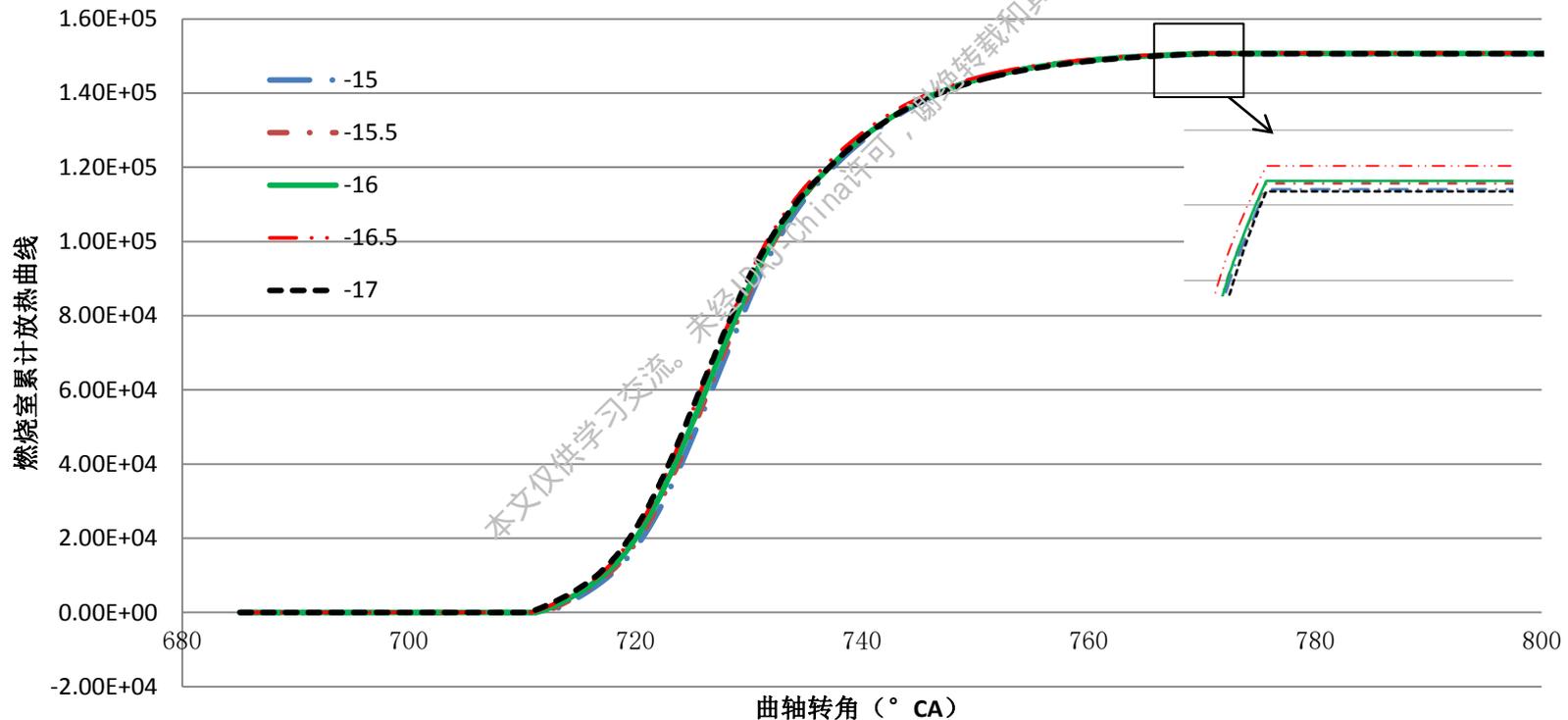


✓ 点火时刻提前燃烧放热率提前且点火时刻越靠前，瞬时放热率最大值越小。

→船用气体机点火时刻分析

■ 燃烧室累积放热

燃烧室累积放热曲线

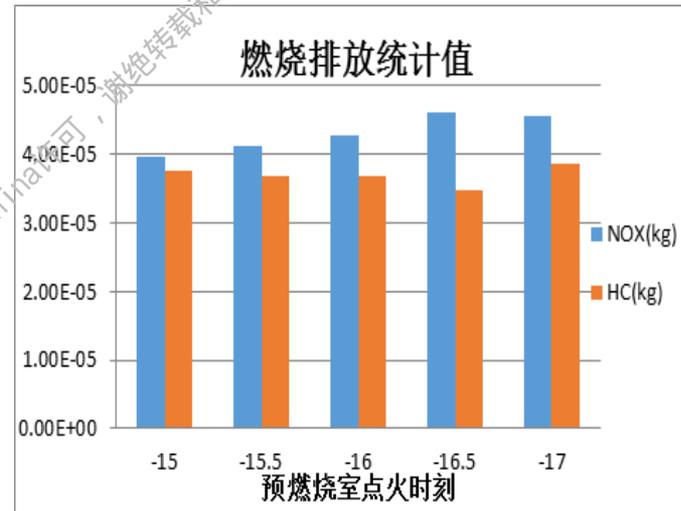


✓ 各点火时刻总体上基本一致，但-16.5° CA点火累积放热量最大。

→船用气体机点火时刻分析

■ 燃烧室累积放热

- ✓ -16.5° CA点火时刻的NOX排放最大HC排放最少，这也同缸内燃烧过程 -16.5° CA的缸内温度最高一致。
- ✓ 通过多组算例结果比较可得出：NOX与HC排放数值此消彼长，这符合排放产生过程原理。



→结论

- 通过模拟船用预燃式气体机缸内燃烧工作过程，得出原机的缸内压力、温度、空燃比曲线。所设计的预燃室及预燃室通道均满足气体燃料船用主机的工作要求，火焰射流贯穿主燃室，燃烧速率快，热效率高。
- 预燃室内加浓喷射后，在点火时刻预燃室内形成了稍浓混合气，在火花塞附近燃空当量比为1.05，有利于可靠点火和快速火焰传播。
- 预燃烧室点火后，预燃室内工质温度在相当长的持续期内保持2000 K以上的高温，考虑预燃室没有扫气，预燃室组件会受到高温的极大考验。预燃室内的高温给预燃室的可靠性带来了极大考验，相应地，预燃室冷却成为燃烧系统设计中必须考虑的重要方面。
- 比较不同点火时刻下燃烧的性能参数，点火时刻对缸内燃烧性能有一定影响，因而不同点火时刻的燃烧室缸压、温度及放热率有着一定程度的差别。
- 预燃室加浓喷射策略及点火时刻配合将会对发动机性能有更大影响。因此联合优化将会是下一步的研究重点。

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。