



# 高原变海拔柴油机增压系统研究

---

---

汇报人：刘 胜

中国兵器工业集团第七〇研究所

陆装动力产品研发部

# 主要内容

---

一、研究背景

---

二、研究现状

三、问题的提出

四、流场匹配探索

五、结束语

# 一、研究背景

我国高原地形特点：

- ※ 高原面积大
- ※ 平均海拔高
- ※ 变化范围广



海拔高度 (m)	大气压力 (kPa)	环境温度 (K)	氧气密度 (kg/m <sup>3</sup> )	水沸点 (°C)
0	101.3	288	0.251	100
1000	90	282	0.226	96.8
2000	81	275	0.204	93.8
3000	70.1	268	0.187	91.2
4000	61.6	261.5	0.169	88.8
5000	53.5	254	0.152	86.7

随着海拔的增加，大气压力下降，空气密度下降，含氧量降低。海拔每升高1000m，大气压力下降约10%，氧气密度下降8%~10%，这将对大型工程机械、重型汽车等动力设备在高海拔地区的动力性、经济性、起动性能等产生严重影响

# 一、研究背景

## 海拔对增压柴油机动力性能的影响:

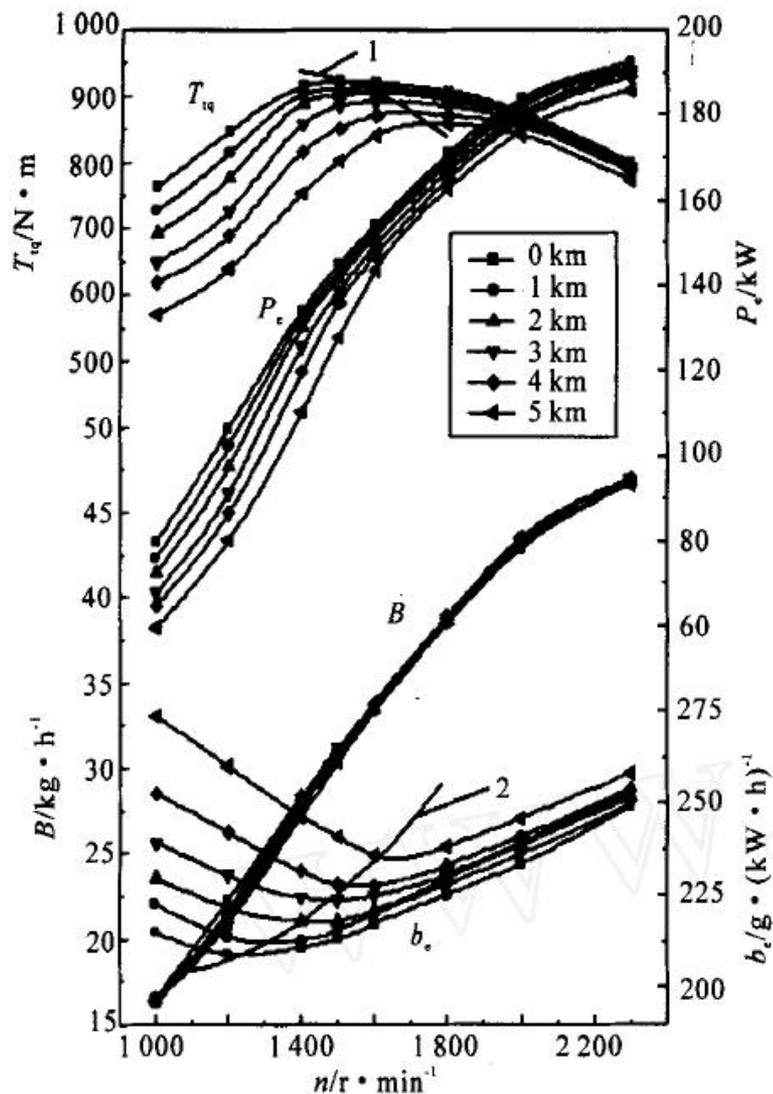
- 大气压力下降，空气密度降低，进气量下降，功率降低；
- 海拔变化对高速区的动力性能影响很小；对低速区的动力性能影响很大。

## 海拔对增压柴油机经济性能的影响:

- 油耗率随海拔高度的升高而增加，海拔越高，柴油机经济工作区域越窄；
- 海拔变化对低转速的油耗率影响较大，对高转速的影响较小。

## 海拔对增压柴油机其它性能的影响:

- 随海拔升高，进气压力下降，压缩终点压力和压缩终点温度降低、发动机着火延迟期增长，造成起动困难；
- 燃烧不充分、颗粒无法完全氧化，辐射传热份额随碳烟量的增加而增加，同时散热能力下降导致发动机热负荷增大。



不同海拔高度全负荷速度特性曲线

# 主要内容

---

## 二、研究现状

# 研究现状

---

国外在利用增压技术的优势应用于柴油机的高海拔性能提升上，但由于其高海拔性能的研究需求不足，相关技术在高原环境下的应用研究尚未大量开展

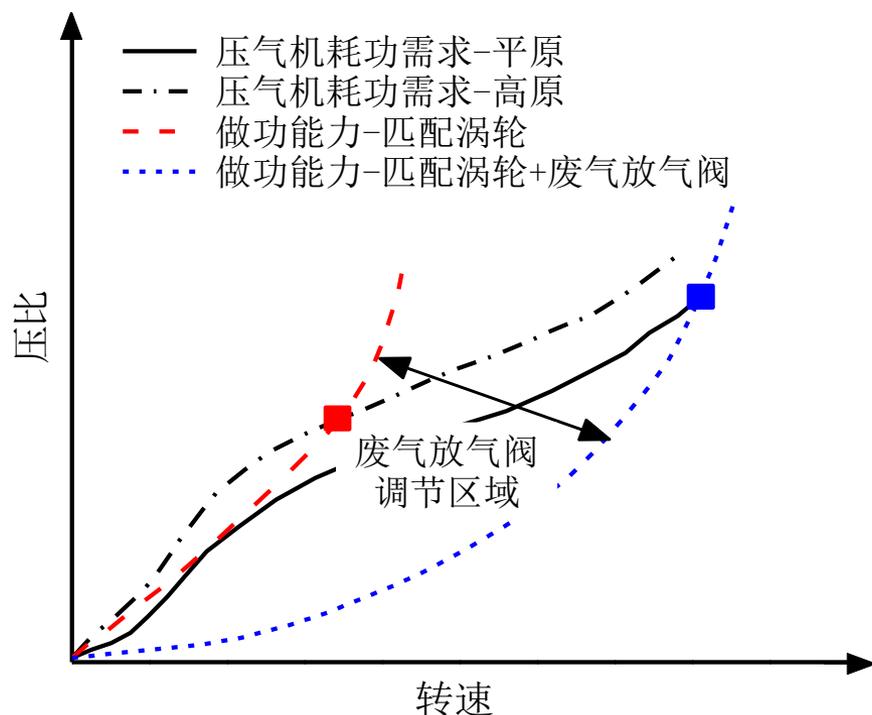
我国研究手段已由高原实地试验这种单一手段向高原实地试验、高海拔性能模拟试验和柴油机高海拔性能仿真等多种方法相结合的方向转变

为解决压气机耗功需求与涡轮做功能力的不平衡问题，国内外研究人员通过对涡轮增压器本身结构和涡轮增压系统方案不断进行改进，出现两种解决方案：

※ 单涡轮增压器系统

※ 可调两级增压系统

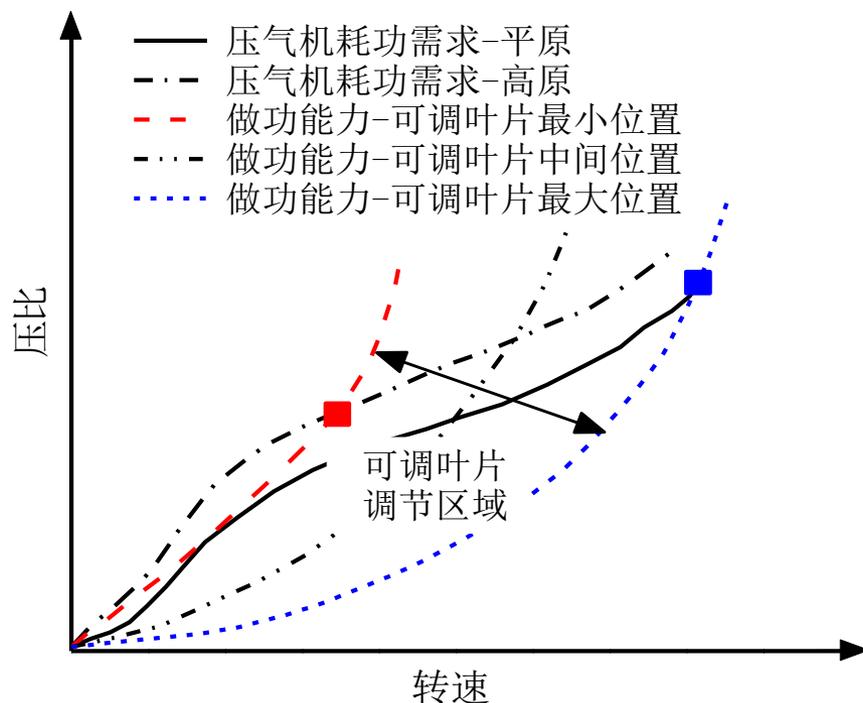
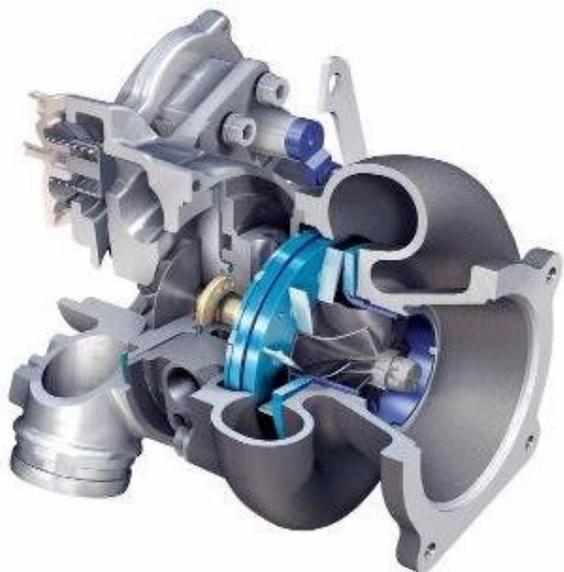
# 单涡轮增压器系统(废气放气式)



※ 针对变海拔工况，气动改为电动，将匹配点选择在高海拔的低转速工况，当柴油机转速逐渐增加或海拔高度逐渐下降时需要逐渐开启废气放气阀来调节增压系统整个涡轮端的做功能力

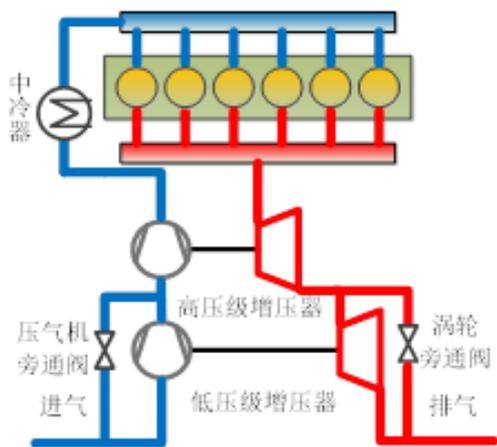
※ **不足：**旁通了废气，排气能量损失较大，降低了燃油经济性。且变海拔工况对增压系统的压比和折合流量的需求范围跨度比较大，单个压气机难以满足在较高海拔高度的进气需求，只能在较低的海拔范围内实现柴油机的功率恢复目标

# 单涡轮增压器系统(可变截面增压)



- ※ 与废气放气式类似，针对变海拔工况，将匹配点选择在高海拔的低转速工况，随着柴油机转速的增加或海拔高度的下降，通过改变可调叶片的位置来调节增压系统整个涡轮端的做功能力
- ※ 不足：一是结构相对复杂，为应对高温工作环境，制造成本较高；二是通过可调叶片仅改变了涡轮端流通特性，仍采用普通压气机，同废气放气式一样，其海拔高度的适应范围取决于压气机的压比和折合流量范围水平，现阶段只能在较低海拔范围内满足柴油机的进气需求

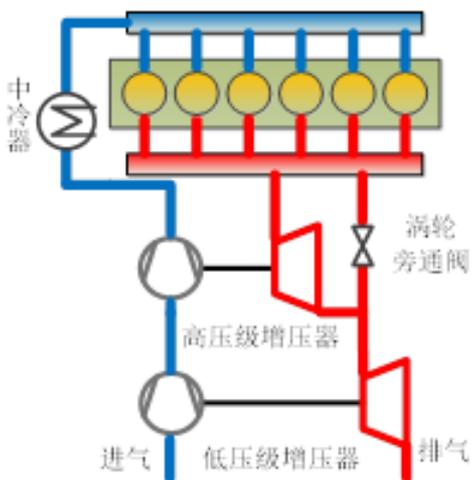
# 可调两级增压系统



旁通低压级方案

- ※ 选用较大流量的涡轮增压器作为低压级增压器，并且在低压级涡轮和压气机端分别并联一个旁通阀，可以实现单涡轮增压器系统和可调两级增压系统之间的模式转换

- ※ 不足：高压级一般为原机增压器，每级涡轮增压器尺寸都较大，对于车用柴油机没有应用优势。另外，在平原或低海拔工况旁通掉部分废气，存在较大的能量损失，影响燃油经济性



旁通高压级方案

- ※ 在高压级涡轮端并联一个涡轮旁通阀，通过调整旁通阀来改变两级涡轮的做功能力，实现从普通两级增压系统到可调两级增压系统的模式转换

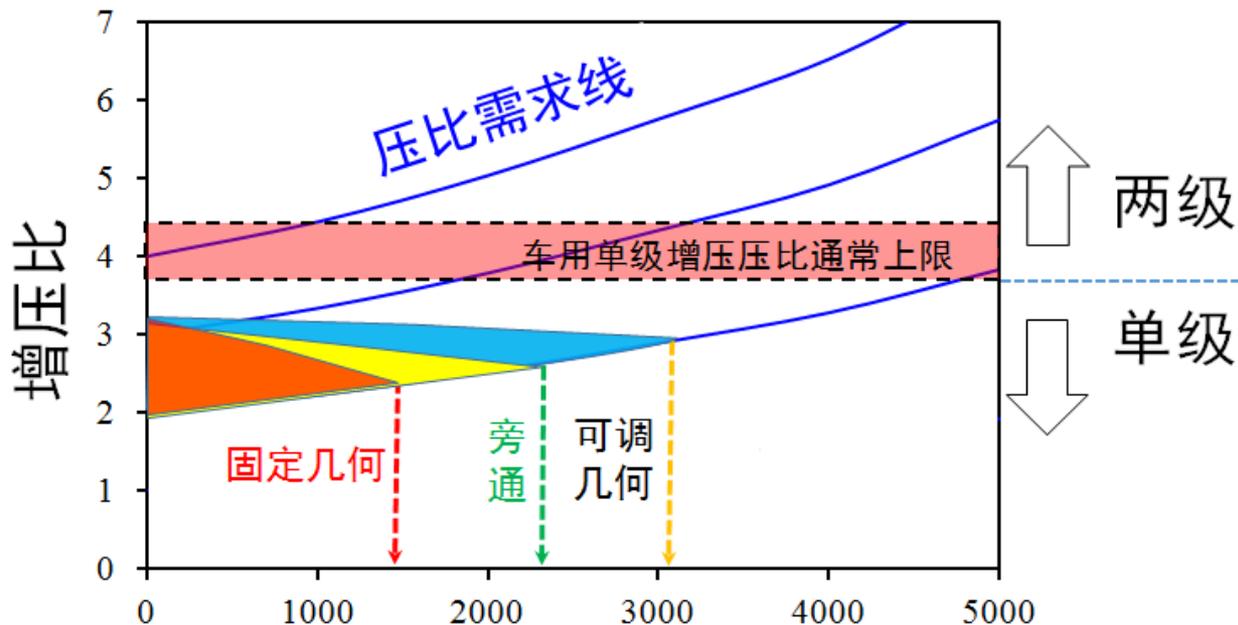
- ※ 充分考虑两级涡轮的最佳能量分配关系，可分别针对高低压级增压器进行流通特性优化。部分排气绕过高压级涡轮进入低压级涡轮膨胀做功，不存在较大的排气能量损失

- ※ 对柴油机高原功率恢复有一定的优势和应用潜力

## 三、问题的提出

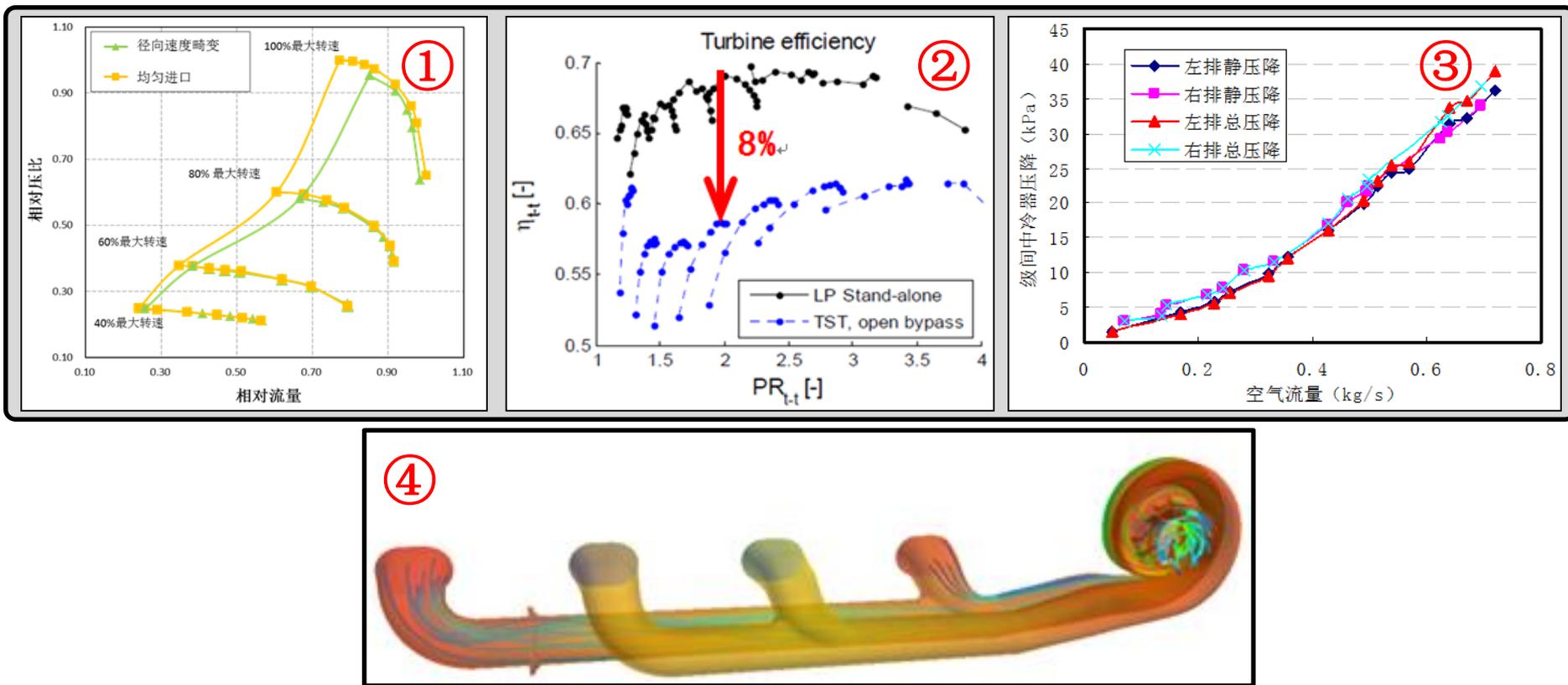
# 高原变海拔增压系统的问题

柴油机在高原变海拔工况运行，将压气机耗功与涡轮做功能力的矛盾问题从转速和转矩的二维变量问题升级为转速、转矩和海拔高度的三维变量问题，使得高原增压系统的匹配设计以变得更加复杂



- ※ 单级增压压比高于4，压气机内出现跨音速流动，稳定性急剧下降
- ※ 两级增压的进海拔适应范围优于单级增压，具有较好的综合效果

# 高原变海拔增压系统的问题

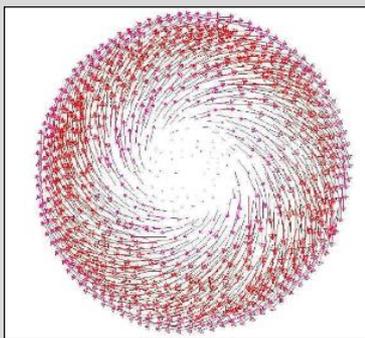


- ❖ 进气畸变导致压气机效率、压比下降，稳定工作范围变窄
- ❖ 两级涡轮增压系统低压级涡轮流通能力降低，涡轮效率最高降低8%
- ❖ 排气系统管路当量压力损失随流量呈线性增加
- ❖ 非均匀脉动流场对部件的效率影响也不容忽视

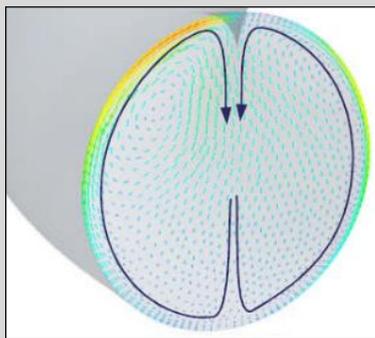
# 高原变海拔增压系统的科学问题

增加海拔维度，尤其在采用两级增压系统后，采用当前的变海拔增压系统匹配方法，能够在**增压系统宏观层面**所需的流量、压力等方面提供支撑，但受限于不能考虑**流场耦合的非线性效应**，无法通过流场匹配协调上下游部件的流动，**进一步优化**提升气动效率、降低阻力损失，为缸内燃烧过程提供高品质的循环工质和系统的高效运行

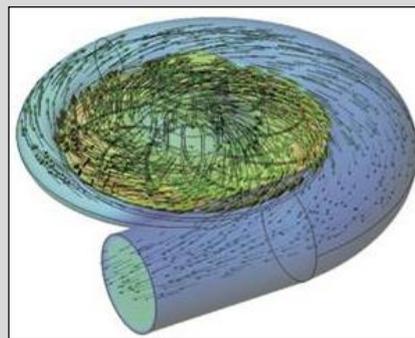
将增压系统匹配由“**流量匹配**”拓展为“**流场匹配**”。打破传统的增压器、中冷器与发动机系统匹配的子域边界线化假设，基于统一流场的先进通流匹配方法取代传统基于增压器性能MAP图的匹配方法，从而可计及增压器、中冷器与发动机系统之间的流场非线性相互作用



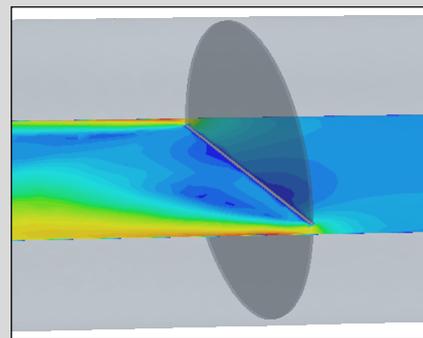
大尺度通道漩涡



弯管内二次流



级间旋转机械流场



阀门处分离流动

# 高原变海拔增压系统的科学问题

需要探明“高原变海拔增压系统流场耦合非线性”  
机制，提出相应的流场匹配与流动控制方法

- ※ 突破气动能量传递效率低、分级做功能力匹配困难、多路径空气系统动态响应慢等技术瓶颈的理论支撑
- ※ 增压柴油机实现高原气量恢复、功率恢复，满足高效全工况使用的主要科学问题

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} \\ = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S$$

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} \neq 0 \quad \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} \neq 0 \quad \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} \neq 0 \quad \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} \neq 0$$

## 四、流场匹配探索

# 整机流场仿真概述

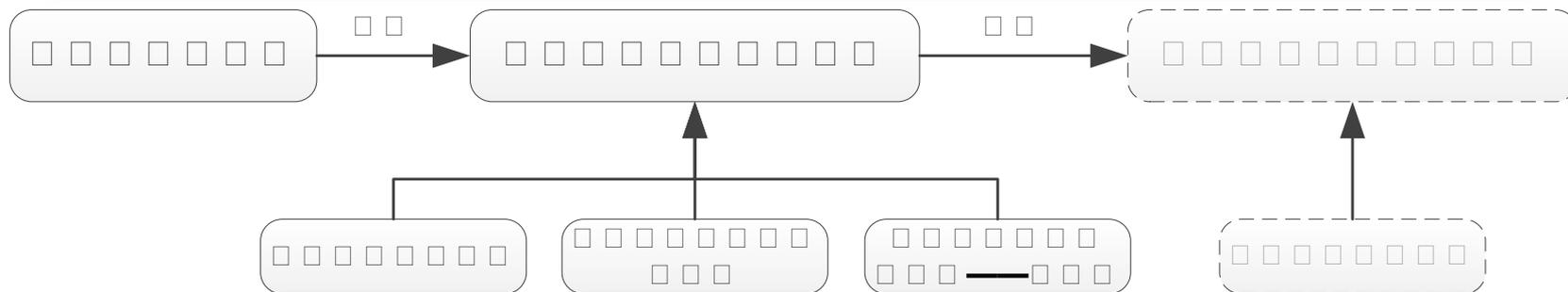
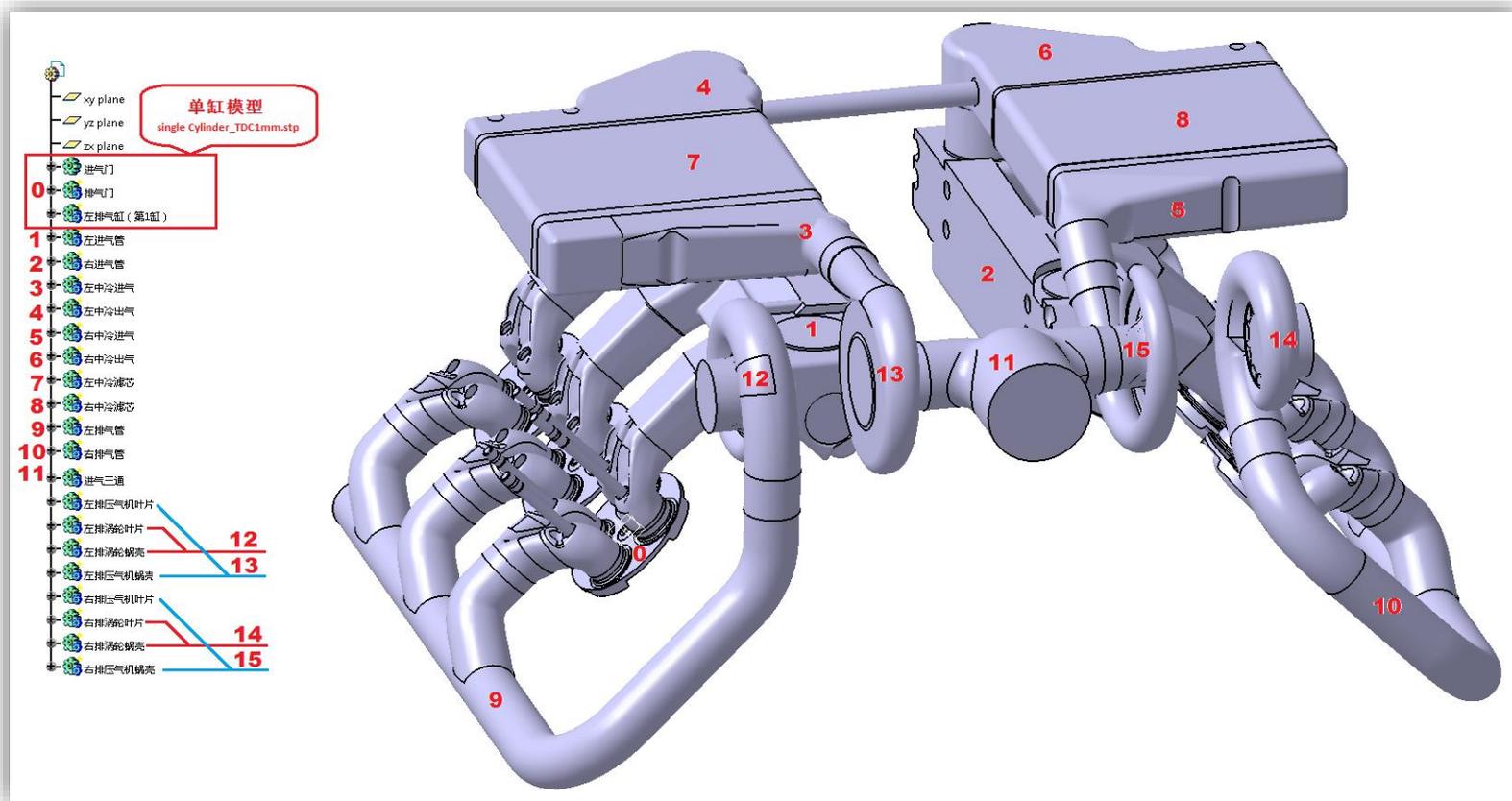
---

※ 针对某6缸柴油机建立一维性能分析软件模型，对缸内采用分区的处理方式，获得额定工况及最大扭矩工况下的三维流动、传热和燃烧计算的边界条件；然后采用CONVERGE软件，进行两个工况下不同燃烧时刻的流动与传热规律分析，对柴油机在原条件下传散热及热负荷进行预测分析，为性能提升与结构设计提供技术支撑

※ 计算内容包括：

- ❑ 单缸燃烧标定计算：缸压标定，获取缸内燃烧放热率
- ❑ 6V全模型流动分析：应用单缸放热率曲线代替缸内燃烧直接计算，做热态的流动分析

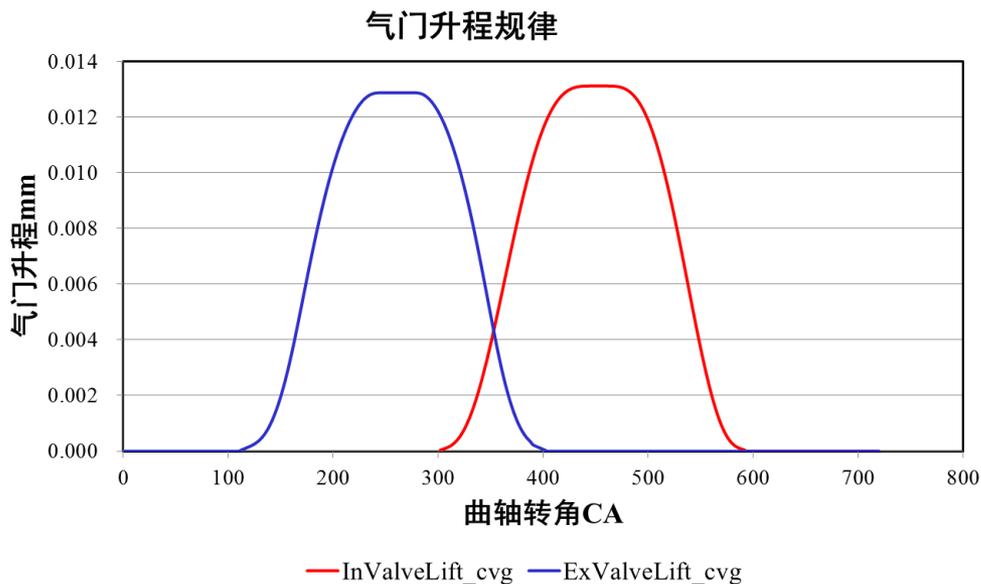
# 整机流场仿真概述



# 模型参数

## ※ 发动机单缸参数

- ❑ 缸径：150 mm
- ❑ 冲程：160 mm
- ❑ 连杆：300 mm
- ❑ 压缩比：13.5
- ❑ 转速：2200 rpm
- ❑ 周期：720 deg
- ❑ 计算角度范围：300~1020 deg

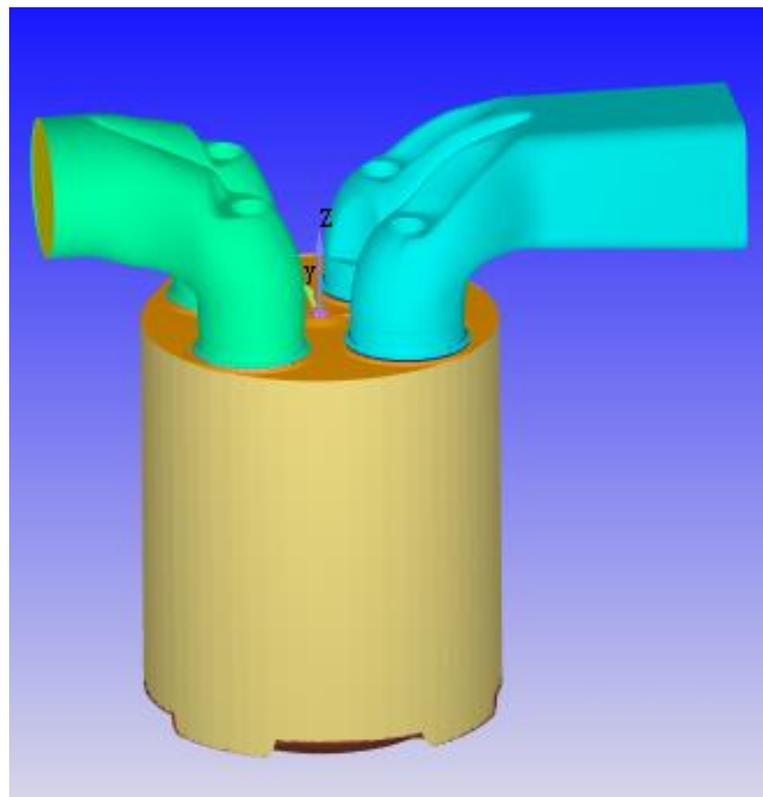


# 几何处理

## ※ 边界分割：单缸模型

□ 按常规划分为3个区域，14个边界

0		Not Assigned	Region Undefined
1	WAL	C0_piston	C0-cylinder
2	WAL	C0_liner	C0-cylinder
3	WAL	C0_head	C0-cylinder
4	WAL	C0_injector	C0-cylinder
5	WAL	C0_intakeport	C0-intakeport
6	WAL	C0_invalve_top	C0-intakeport
7	WAL	C0_invalve_angle	C0-intakeport
8	WAL	C0_invalve_bottom	C0-cylinder
9	WAL	C0_exhaustport	C0-exhaustport
10	WAL	C0_exvalve_top	C0-exhaustport
11	WAL	C0_exvalve_angle	C0-exhaustport
12	WAL	C0_exvalve_bottom	C0-cylinder
13	INF	inflow	C0-intakeport
14	OUT	outflow	C0-exhaustport

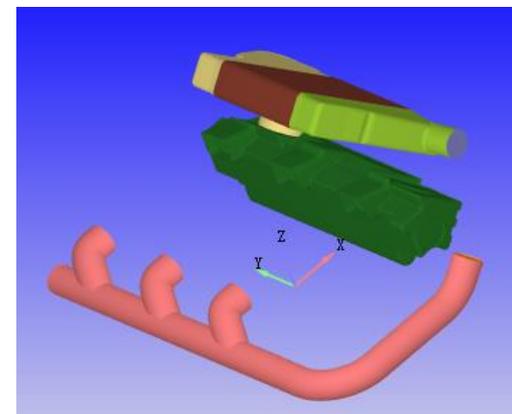
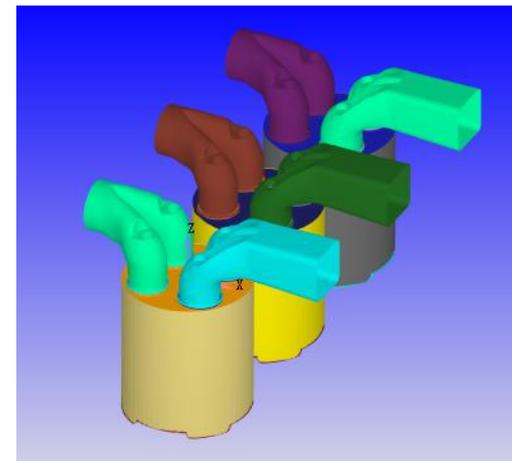


# 几何处理

## ※ 边界分割：全通路模型

- ❑ 各缸按单缸模型边界分割规则进行划分
- ❑ 下图为左侧三缸边界分割，右侧三缸方法相同
- ❑ 燃烧室上下游管路边界分割
- ❑ 下图为左侧管路边界分割，右侧方法相同

1	WAL	C0_piston	13	WAL	C1_piston	25	WAL	C2_piston	37	WAL	Left_intakeport
2	WAL	C0_liner	14	WAL	C1_liner	26	WAL	C2_liner	38	WAL	Left_exhaustport
3	WAL	C0_head	15	WAL	C1_head	27	WAL	C2_head	39	INF	Left_inflow
4	WAL	C0_injector	16	WAL	C1_injector	28	WAL	C2_injector	40	WAL	Left_porous_up
5	WAL	C0_intakeport	17	WAL	C1_intakeport	29	WAL	C2_intakeport	41	WAL	Left_porous
6	WAL	C0_invalve_top	18	WAL	C1_invalve_top	30	WAL	C2_invalve_top	42	WAL	Left_porous_down
7	WAL	C0_invalve_angle	19	WAL	C1_invalve_angle	31	WAL	C2_invalve_angle	43	OUT	Left_outflow
8	WAL	C0_invalve_bottom	20	WAL	C1_invalve_bottom	32	WAL	C2_invalve_bottom			
9	WAL	C0_exhaustport	21	WAL	C1_exhaustport	33	WAL	C2_exhaustport			
10	WAL	C0_exvalve_top	22	WAL	C1_exvalve_top	34	WAL	C2_exvalve_top			
11	WAL	C0_exvalve_angle	23	WAL	C1_exvalve_angle	35	WAL	C2_exvalve_angle			
12	WAL	C0_exvalve_bottom	24	WAL	C1_exvalve_bottom	36	WAL	C2_exvalve_bottom			



# 物理模型及网格策略

---

## ※ 流动模型

- RNS流动控制方程
- RNG k-e湍流模型
- Redlich-Kwong真实气体状态方程

## ※ 燃烧模型

- 单缸标定：SAGE-MZ燃烧模型
- 全模型流动分析：Source源项

## ※ 单缸网格策略

- Base Size:  $dx=4\text{mm}$ ,  $dy=4\text{mm}$ ,  $dz=4\text{mm}$
- AMR:
  - 启用区域: intake & Cylinder,
  - 启用流场参数: Velocity & Temperature
  - 加密级数: 3, 最小尺寸= $\text{Basesize} \times 1/2^3 = 0.5\text{mm}$
- Embedding:
  - 圆柱加密 (含气缸及气道近段): 2mm
  - 进气阀倒角边界加密: 0.5mm

# 边界条件与初始条件

项 目	4500m	3000m
进气压力 (Pa)	Intake_P. in	Intake_P. in
进气温度 (K)	361.5	361.5
进气组分	Air	Air
排气压力 (Pa)	Exhaust_P. in	Exhaust_P. in
排气温度 (K)	940	938
排气组分	Air	Air
喷油量 (Kg)	0.000199	0.000235
喷油持续期 (CA)	25.4	25.4

初始时刻 300CA	缸内		进气道		排气道	
	4500m	3000m	4500m	3000m	4500m	3000m
初始压力 (Pa)	179797	216691	168511	202790	162248	195486
初始温度 (K)	934	931	362	362	940	938
初始组分	N2, O2					

# 单缸燃烧标定

---

※ 主要对3000m和4500m两种海拔环境下的额定转速工况进行缸压标定，分别获取两种环境下缸内的放热规律

※ 依据高原模拟试验台试验数据开展缸压标定：

□ 压缩比校核

➤ 原始模型压缩比和设计值不一致，调整几何

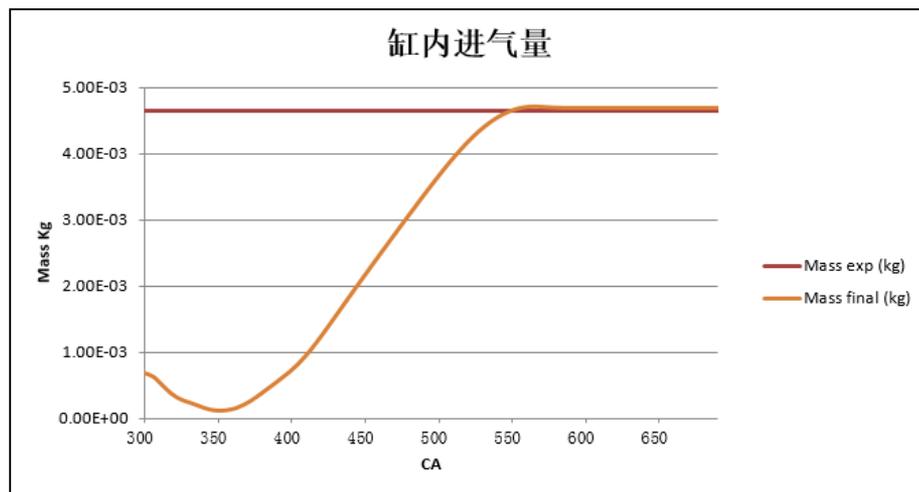
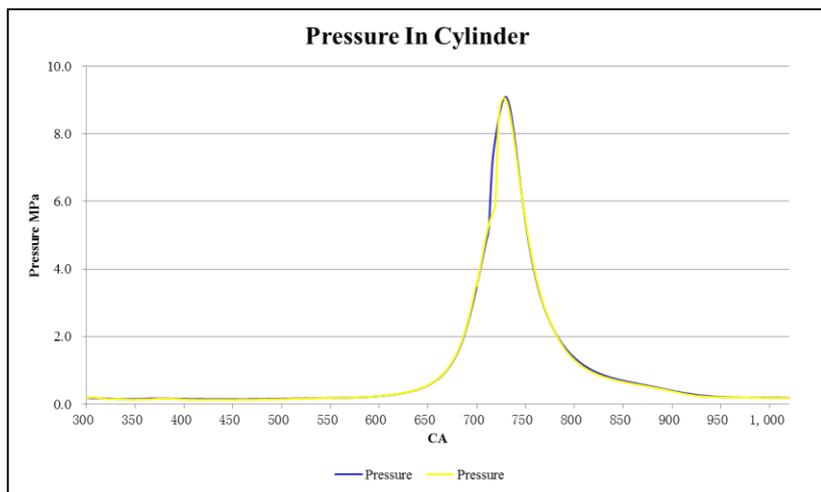
□ 进气校核

➤ 由于初始值和边界条件的不准确性，调整进气压力以校核缸内的进气量

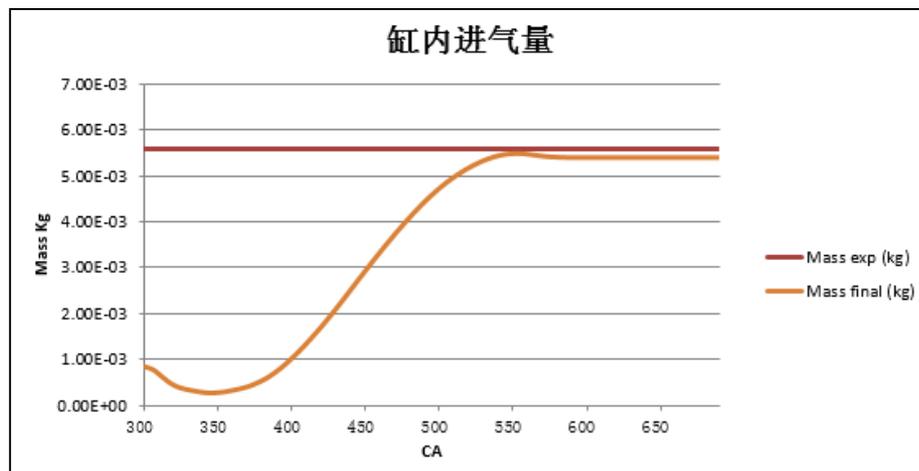
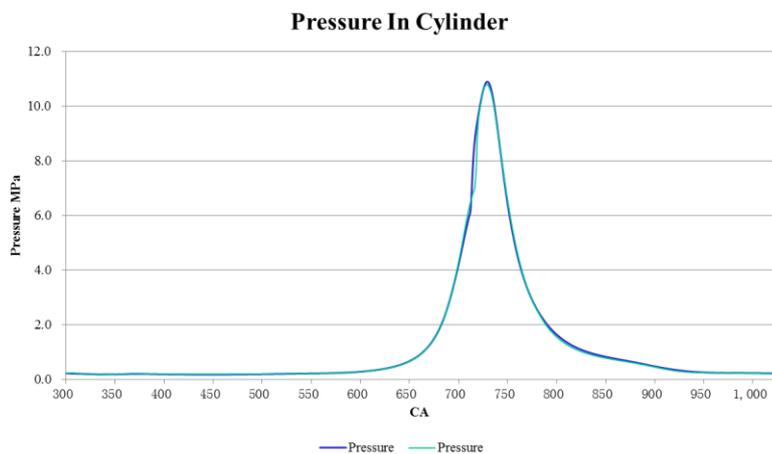
□ 燃烧校核

➤ 喷油影响的不确定性，通过调整喷油时刻来校核燃烧峰压

# 单缸燃烧标定

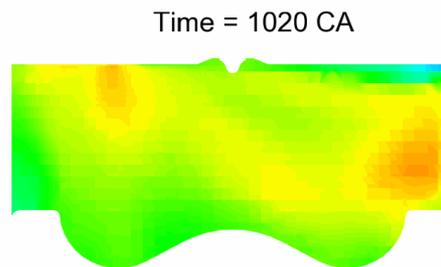
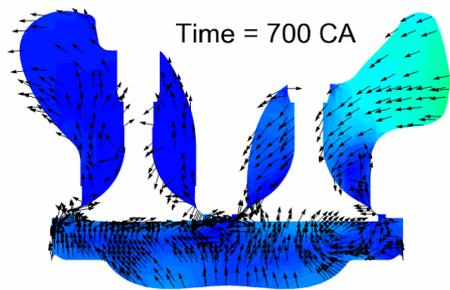


## 4500m海拔条件下标定结果



## 3000m海拔条件下标定结果

# 单缸燃烧结果



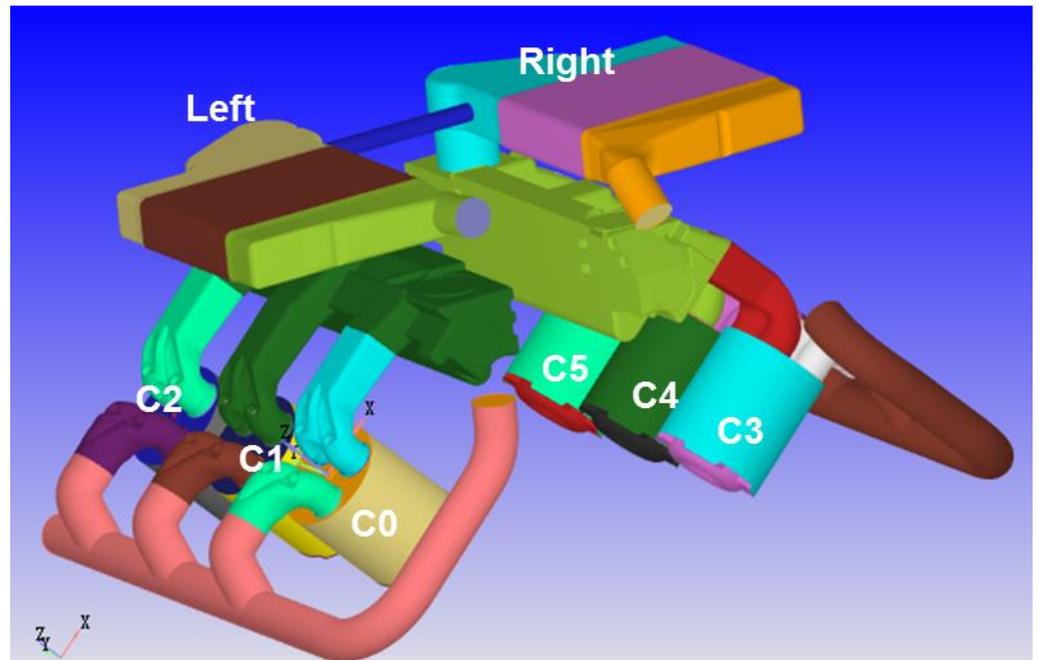
进气过程速度矢量

缸内温度云图

# 全模型流动分析

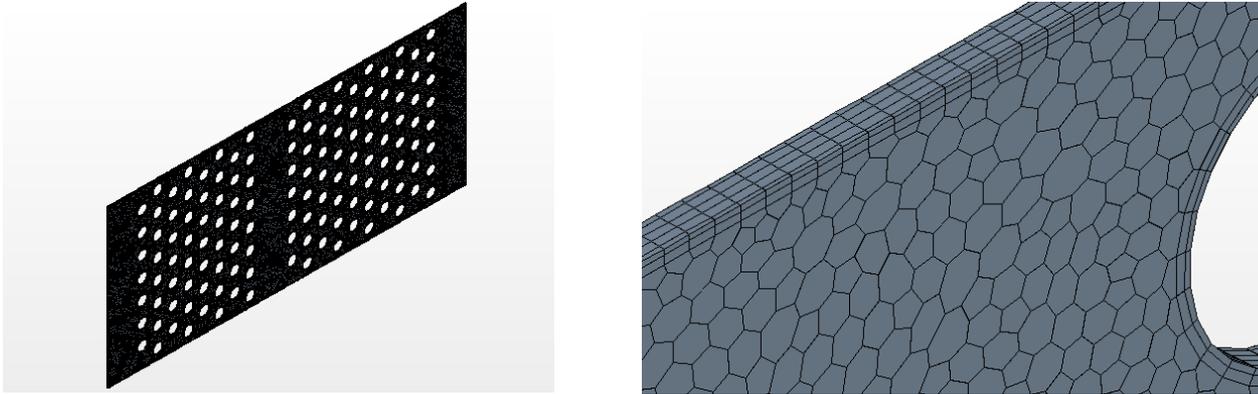
- ※ 流动分析的全模型包括从压气机入口到涡轮前的整个流路
- ※ 并考虑中冷器多孔介质的流动处理
- ※ 以缸C0为基准，各缸的相位差分别为

<b>C0</b>	<b>0 (CA)</b>
<b>C1</b>	<b>240</b>
<b>C2</b>	<b>480</b>
<b>C3</b>	<b>90</b>
<b>C4</b>	<b>330</b>
<b>C5</b>	<b>570</b>



# 中冷器多孔介质参数确定

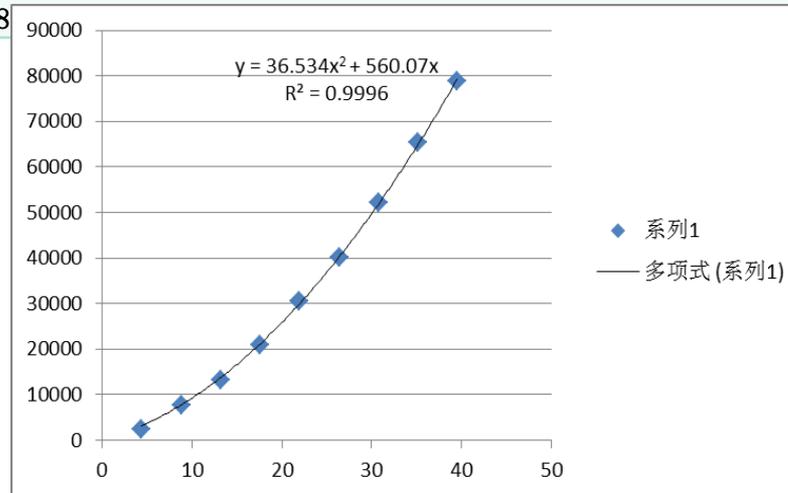
- ※ 先进行中冷器芯子中的气体流动分析，得到相应的阻力和流速对应曲线，拟合给出中冷器芯子中气体流动的粘性和惯性阻力系数



- ※ 由于多层翅片的存在，在垂直于翅片的方向上流动应该呈周期性的变化；
- ※ 因此我们可以只仿真其中一层的流动情况

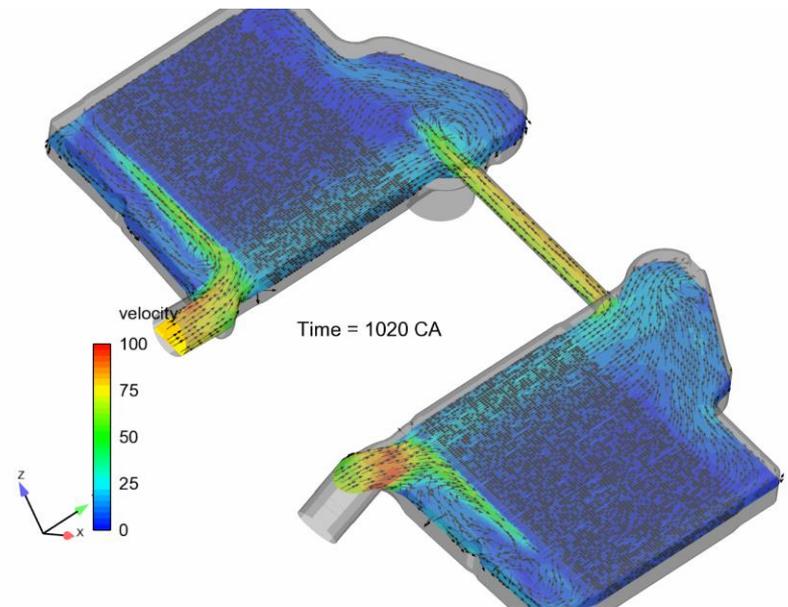
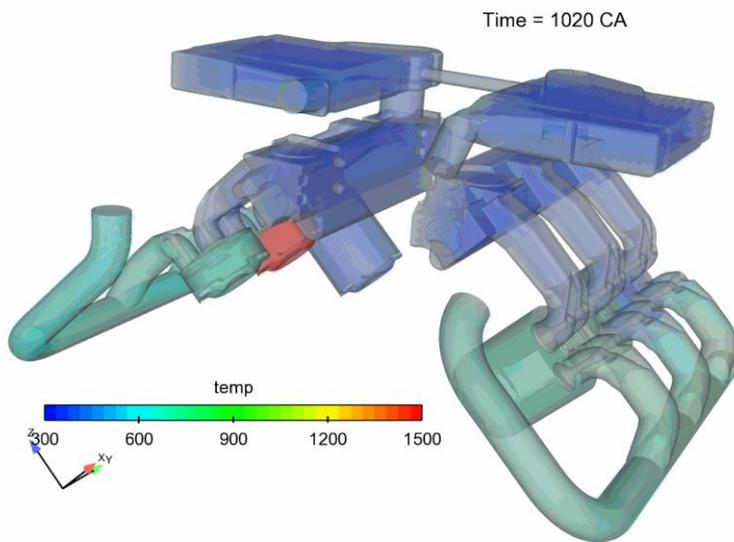
# 中冷器多孔介质参数确定

流量 (kg/s)	流速 (m/s)	进口压力 (Pa)	出口压力 (Pa)	压降 (Pa)	压降/长度 (Pa/m)
0.001	4.39837295	3.93E-01	-8.23E+02	823.595	2287.763891
0.002	8.79674591	1.06E-01	-2.75E+03	2749.109	7636.41313
0.003	13.1951189	7.53E-01	-4.78E+03	4779.354	13275.98363
0.004	17.5934918	-2.28E+00	-7.57E+03	7565.392	21014.97824
0.005	21.9918648	-5.15E+01	-1.11E+04	11015.77	30599.35314
0.006	26.3902377	3.39E+02	-1.41E+04	14467.23	40186.73833
0.007	30.7886107	1.44E+02	-1.87E+04	18814.59	52262.73694
0.008	35.1869836	9.48E+01	-2.34E+04	23522.63	65340.64758
0.009	39.58				78795.72444

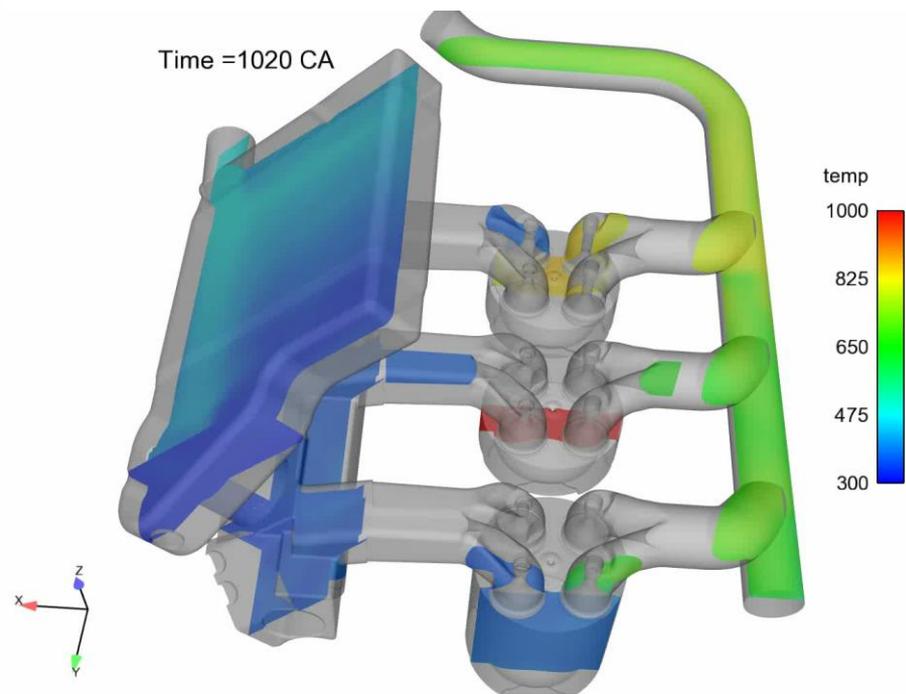
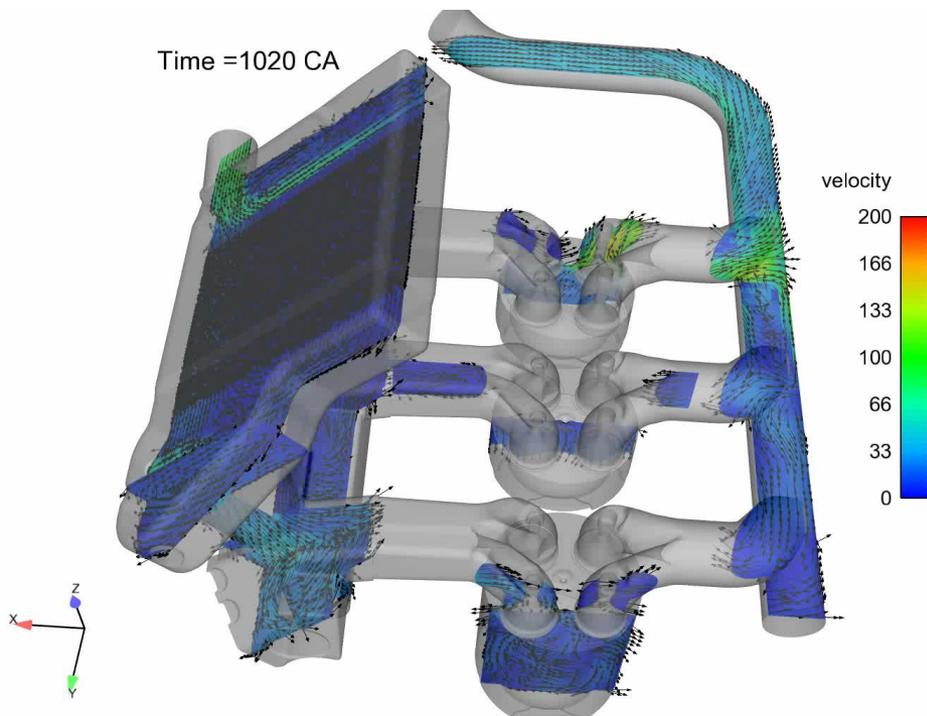


※ 惯性阻力系数为  $36.534 \text{ kg/m}^4$ ，粘性阻力系数为  $560.07 \text{ kg/m}^3\text{s}$

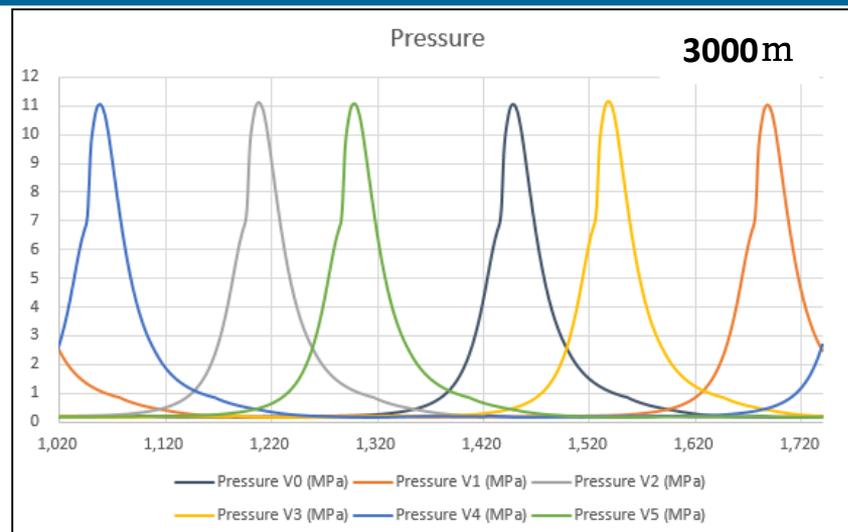
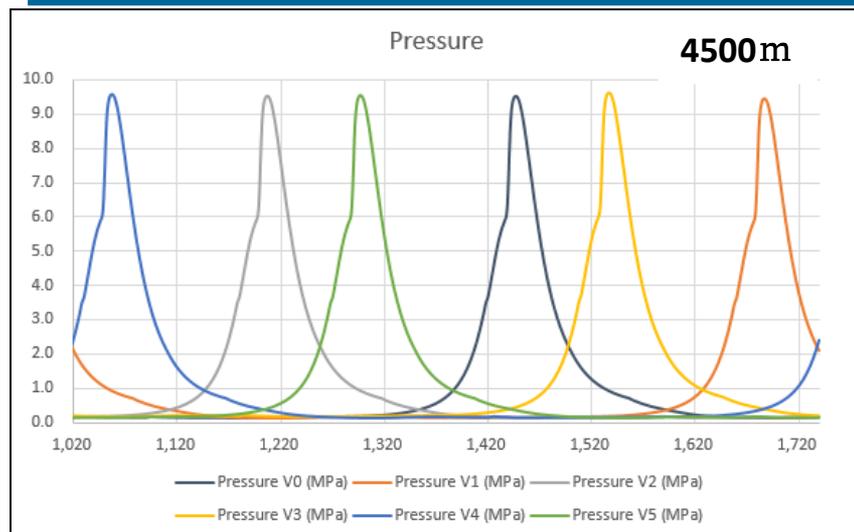
# 流场计算结果-整机及中冷器



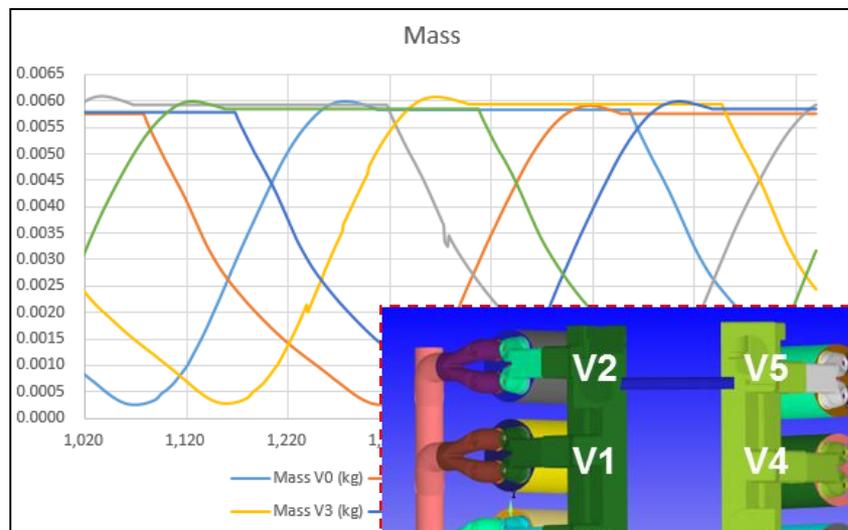
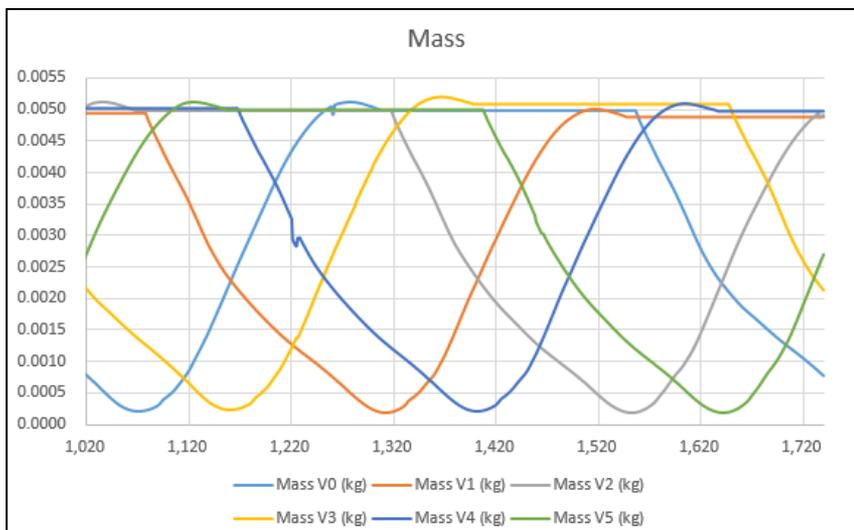
# 流场计算结果-单侧流路流动



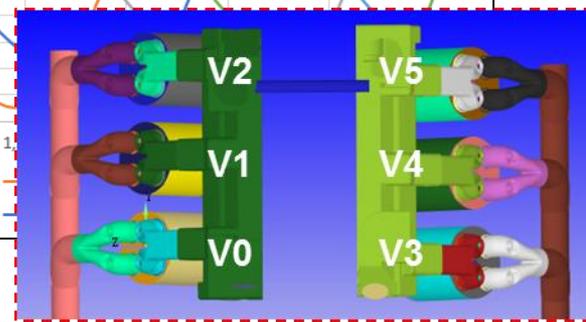
# 全模型流动分析结果



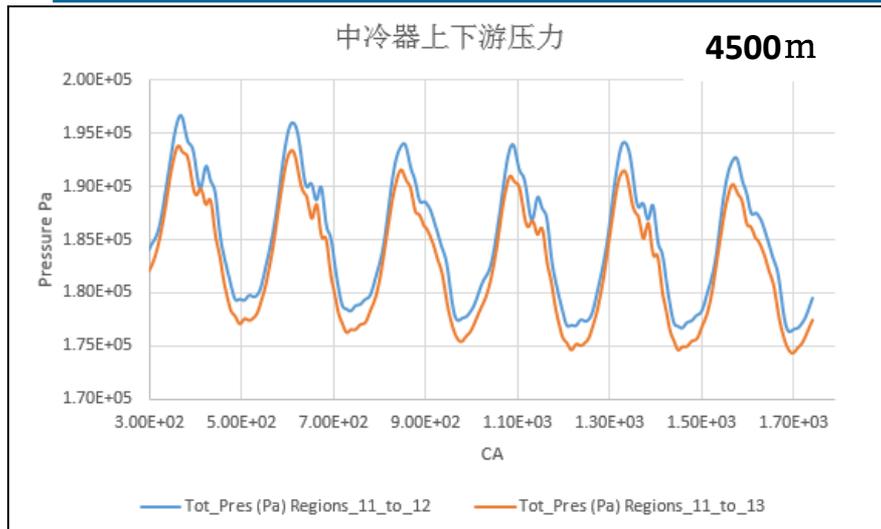
各缸平均缸压和标定保持一致



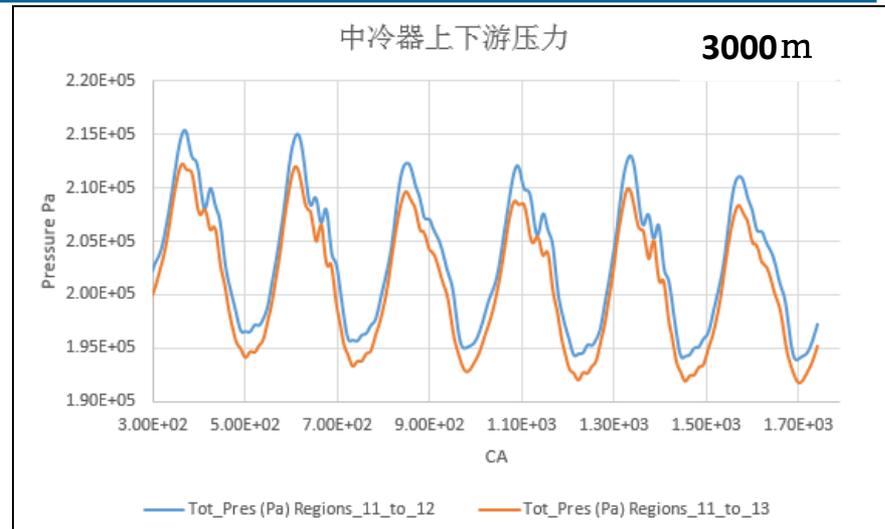
各缸流量分配情况



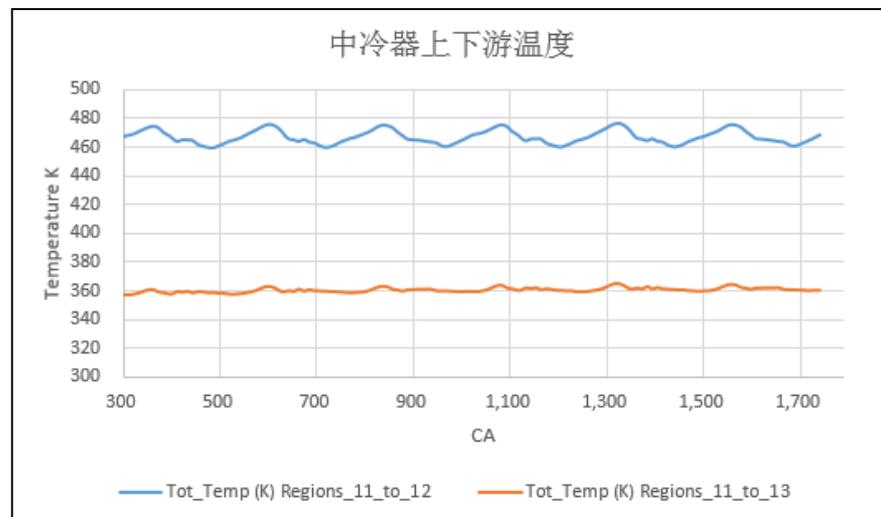
# 全模型流动分析结果



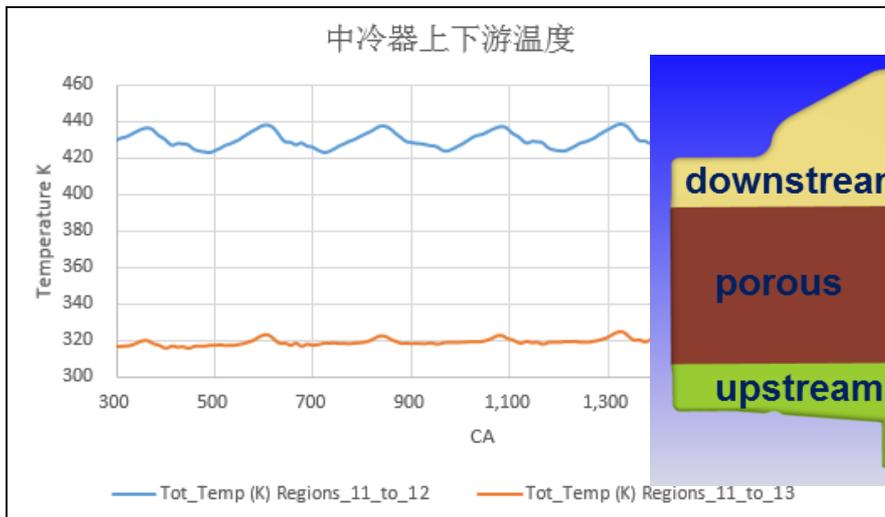
平均总压降在2000Pa左右



总压降在2300Pa左右

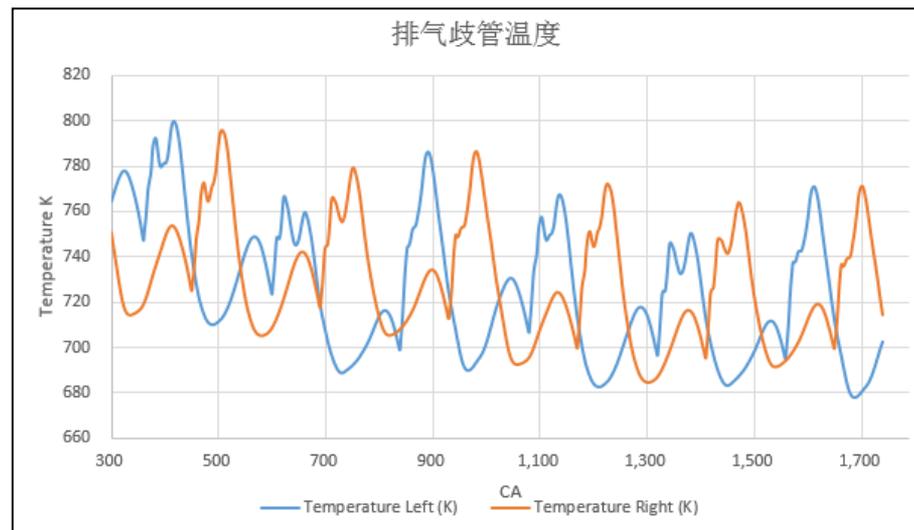
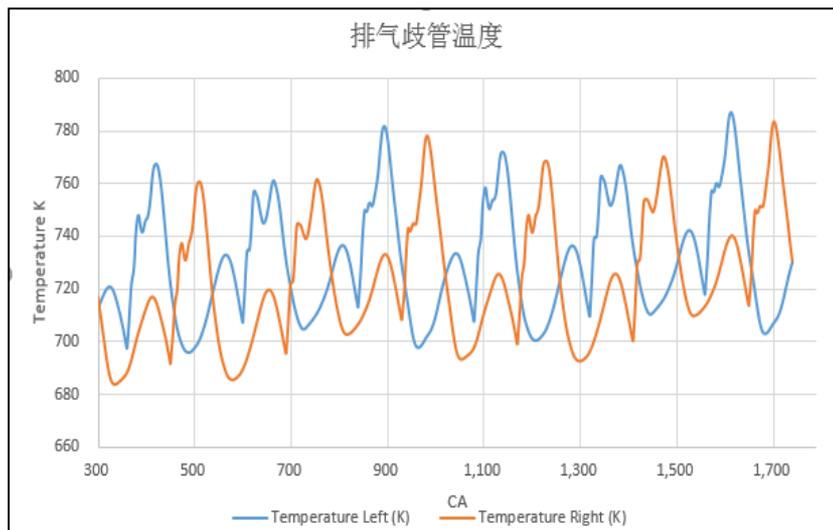
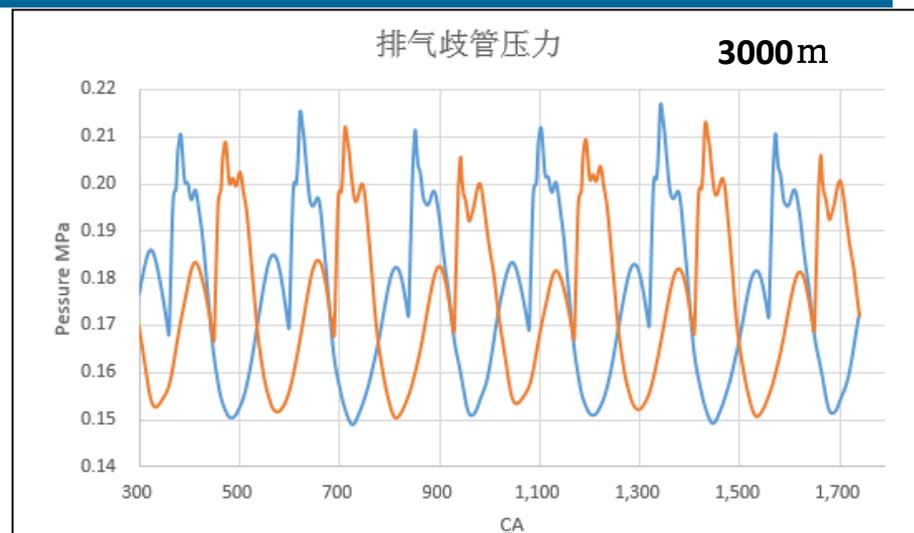
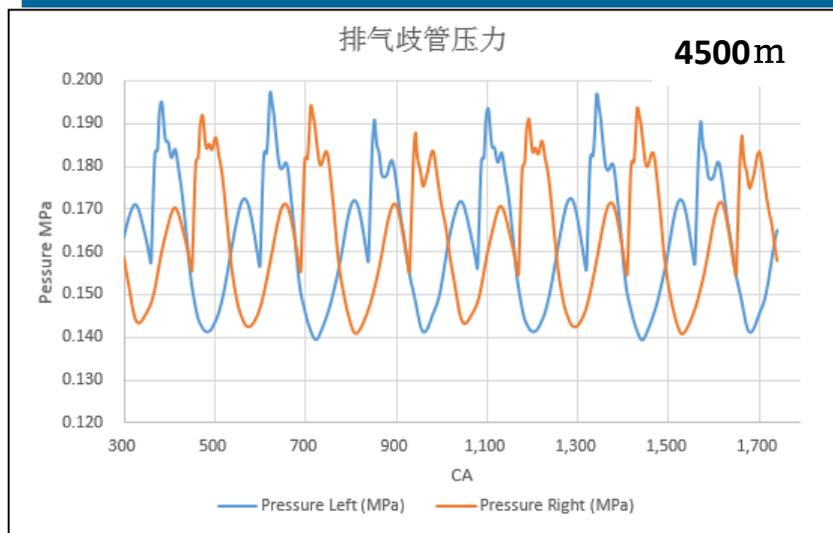


平均总温降在106K左右



平均总温降在110K左右

# 全模型流动分析结果



## 五、结束语

# 结束语

---

- ※ 采用流场匹配的方法来弥补传统流量匹配无法考虑流场非线性效应方面的不足，并将两者相结合拓展形成新的增压匹配和流动控制方法
- ※ 为实现高原气量恢复、功率功率提供了一条比较有效的技术思路
- ※ 通过CONVERGE软件开展了对某6V柴油机的流场匹配探索研究，结果可以很好的表征高原流动特性，后期将考虑增压器的流动，实现详细多缸机的热态流动
- ※ 问题虽由高原引出，也可为平原等不同工况的优化提供技术支撑

# 汇报结束

---

# 谢谢!