

IDAJ CAE
Solution
Conference

Your True Partner for CAE&CFD

ICSC 2015

可调转速复合增压技术 在高原环境中的研究

韩恺 副教授

北京理工大学 机械与车辆学院
动力系统工程研究所

2015年11月24日

主要内容



- 高原环境的影响
- 可调转速复合增压技术
- 柴油机高原性能预测模型
- 可调转速复合增压高原调节规律
- 可调转速复合增压模式切换控制方法
- 结论

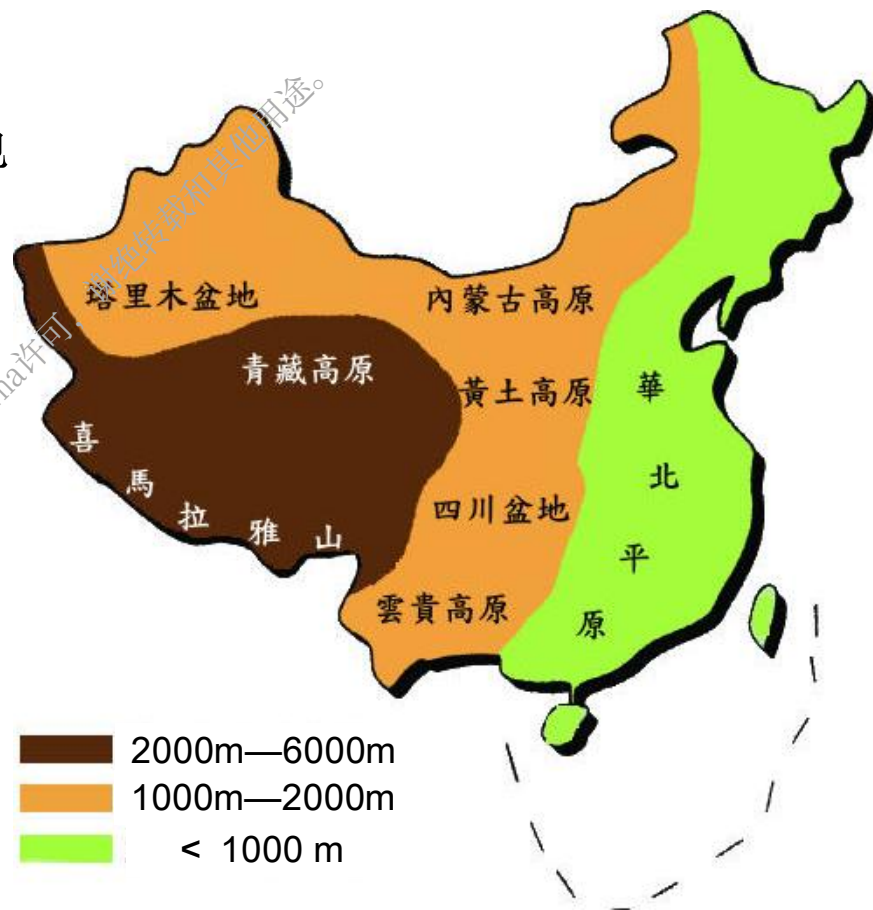
本文仅供学习交流, 未经许可, 谢绝转载和其他用途。

高原环境对发动机性能的影响

一、高原环境

- 我国的高原地形具有面积广和海拔高的特点，在2000m~4500m的高原地区约占国土面积的1/3。
- 随着海拔升高，空气密度下降，造成柴油机动力性降低，油耗升高，热负荷增大，可靠性下降等问题。

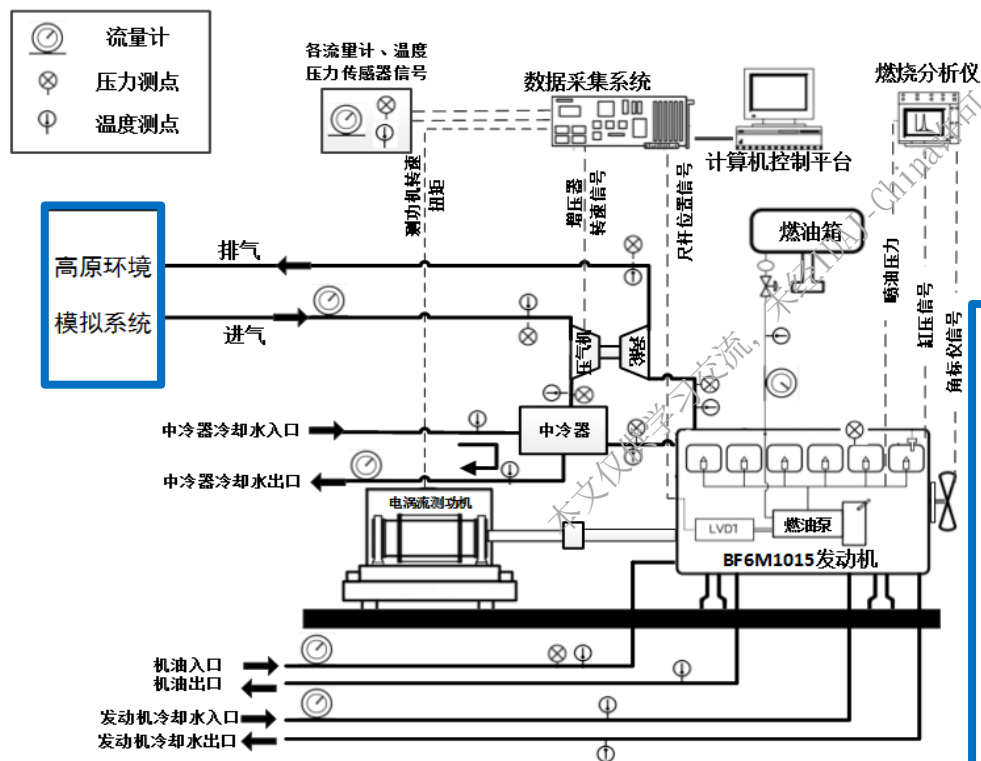
海拔高度	大气压力	空气温度	空气密度
m	kPa	℃	(kg/m ³)
0	100	24	1.19
1000	89.7	21	1.08
2000	79.2	17	0.96
3000	70.1	12	0.87
4000	61.6	6	0.78
4500	57.7	2	0.74



高原环境对发动机性能的影响

二、高原模拟试验

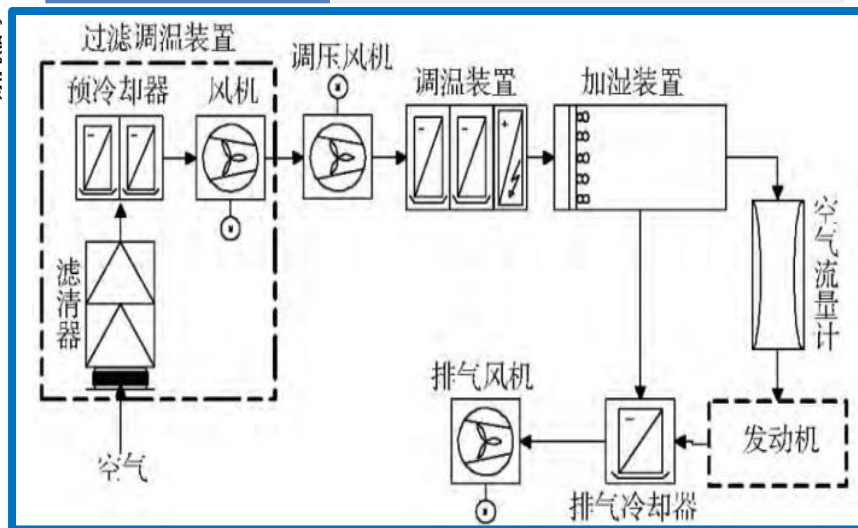
通过控制进、排气的压力和温度来模拟不同海拔高度的大气环境。



高原模拟试验台架原理图

BF6M1015发动机主要技术参数

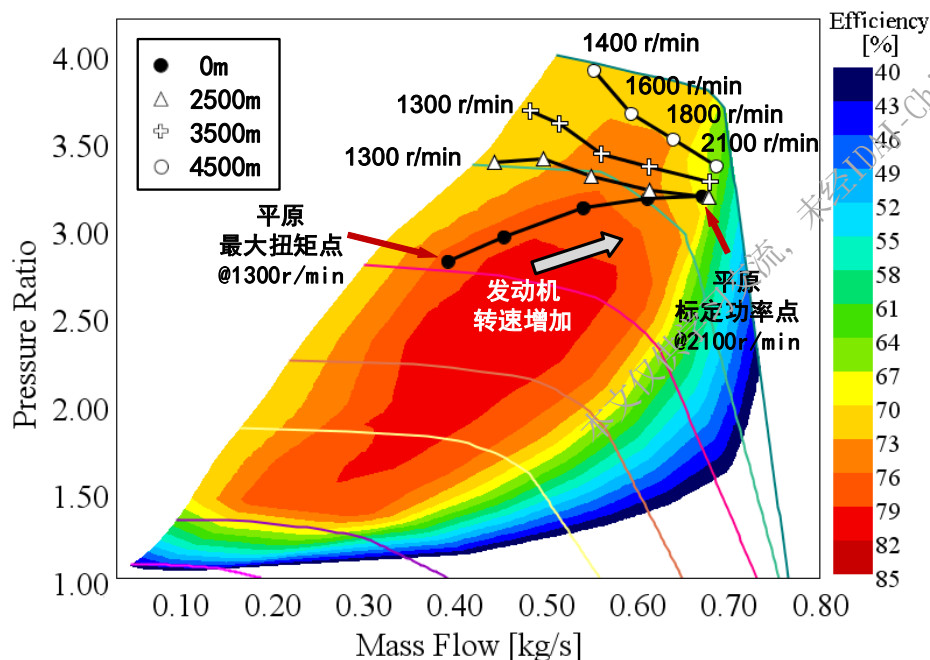
类型/参数	形式/数值
缸径×行程	132mm×145mm
型式	V型6缸涡轮增压中冷
发火次序	1-6-3-5-2-4
供油方式	电控直列泵
压缩比	17
标定功率	330kW@2100r/min
最大扭矩	1980Nm@1300r/min



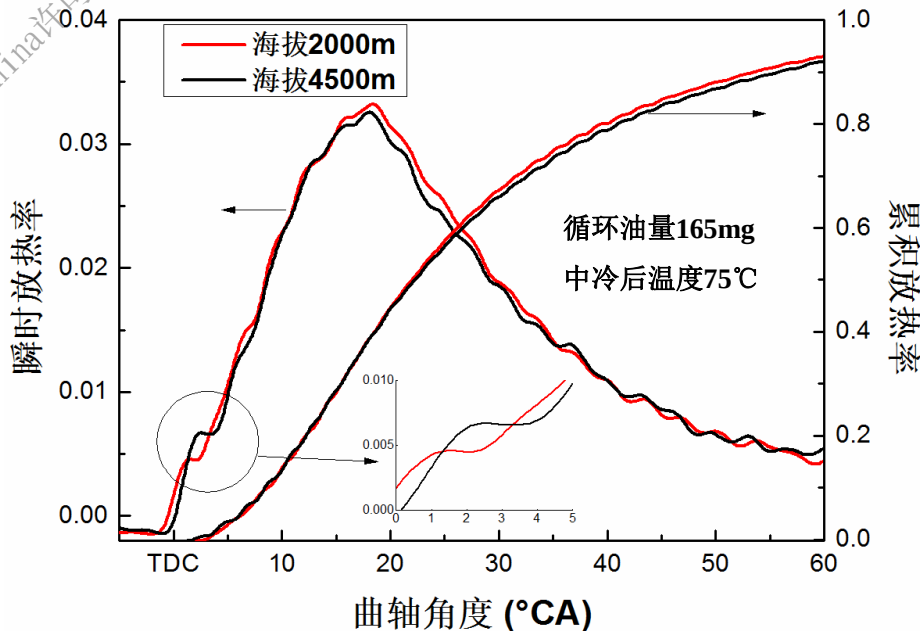
高原环境对发动机性能的影响

三、高原环境对增压匹配和燃烧的影响

- 随着海拔升高，压比增大，低速有喘振倾向，高速易超速。
- 随着海拔升高，滞燃期变长，预混燃烧比例增多，整个燃烧过程减缓。



海拔对压气机匹配点的影响 (不可调增压器)

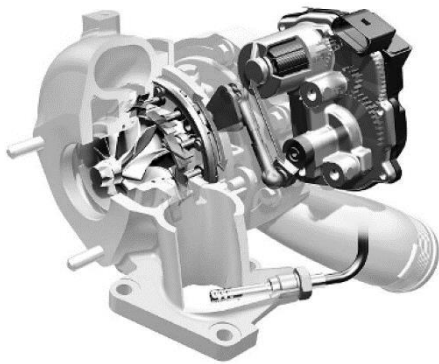


不同海拔下的燃烧放热率@2100r/min

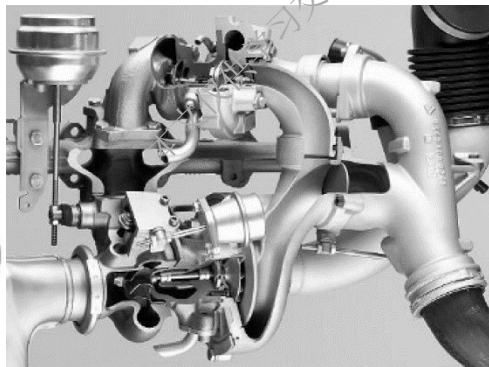
可调转速复合增压技术

一、高原适应性的措施

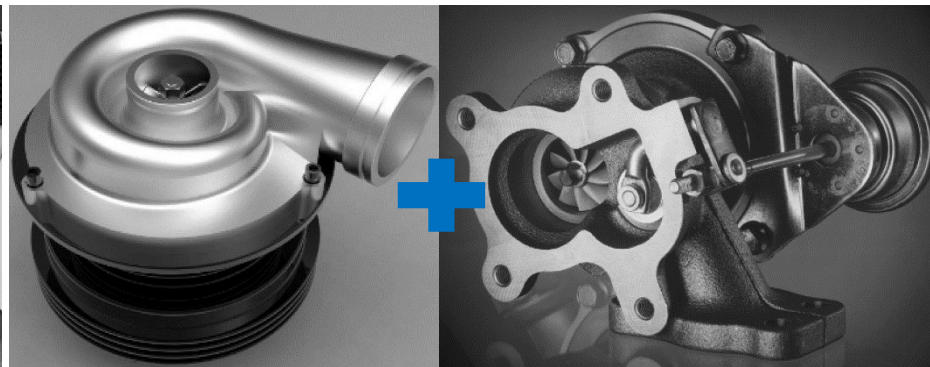
- ❑ 改善高原环境下发动机的性能：以调节进气系统增大发动机进气量为主，调节供油系统为辅。
- ❑ 考虑到柴油机BMEP不断增大的需求，可调两级涡轮增压技术和可调转速复合增压技术对柴油机高原功率的恢复更具优势。
- ❑ 可调两级涡轮增压技术对排气背压的影响较大，进而会增大柴油机的泵气损失。



可变截面涡轮增压技术



可调两级涡轮增压技术

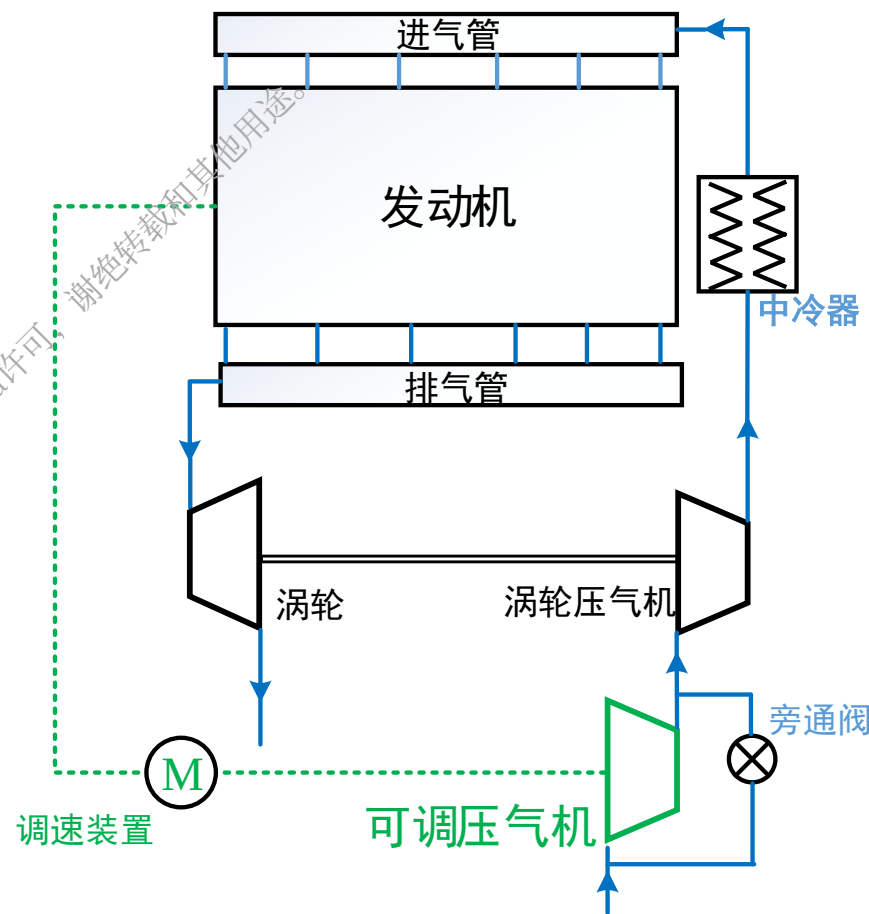


可调转速复合增压技术

可调转速复合增压技术

二、可调转速复合增压系统*

- 可调转速的复合增压系统由两级压气机和一级涡轮组成。
- 在柴油机低速工况时，旁通阀关闭，进入复合增压模式，两级压气机串联工作。
- 发动机中高速工况时，旁通阀打开，控制可调压气机停止运转，进入涡轮增压模式。
- 可调压气机驱动方式多样，转速连续可控。



可调转速复合增压系统原理图

*韩恺,朱振夏,张付军.兵工学报, 2013(02): 第129-136页.

柴油机高原性能预测模型

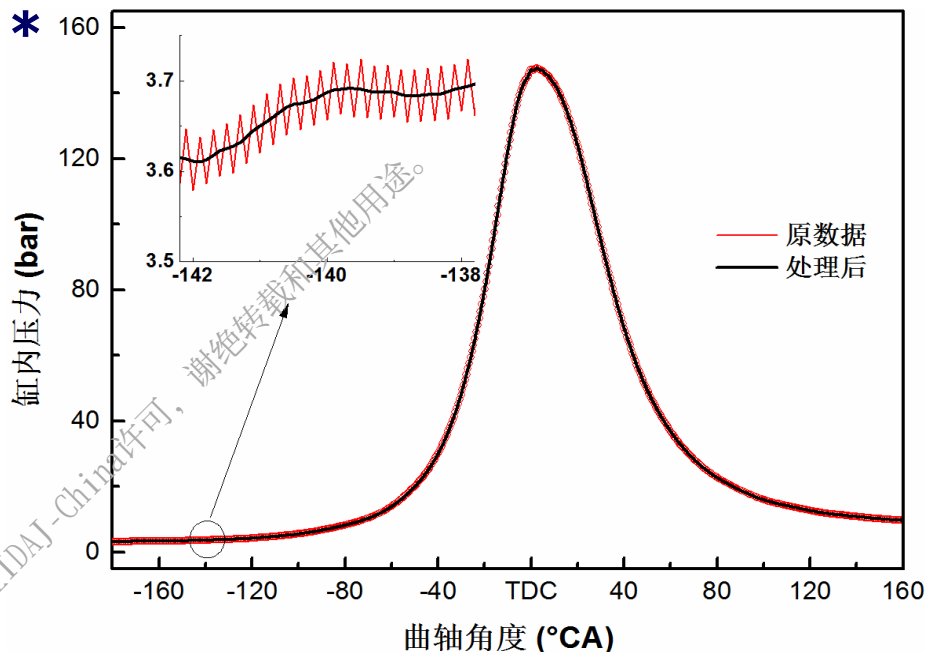
一、零维预测燃烧模型 *

□ 利用测试缸压计算瞬时放热率

瞬时放热率计算

放热率参数化

零维预测燃烧模型



中心加权滑动平均的方法处理缸压曲线

$$\text{RoHR} = \frac{dx}{d\varphi} = \frac{dQ_B}{m_0 H_L d\varphi} = \frac{1}{m_0 H_L} \left(\frac{dU}{d\varphi} + p \frac{dV}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} \right)$$

$$\frac{dQ_w}{d\varphi} = \sum_{i=1}^3 \frac{dQ_{wi}}{d\varphi} = \frac{1}{6n} \sum_{i=1}^3 A_i a_g (T - T_{wi})$$

* Taotao Wu, Changlu Zhao, Kai Han.
SAE Paper 2014-01-1093

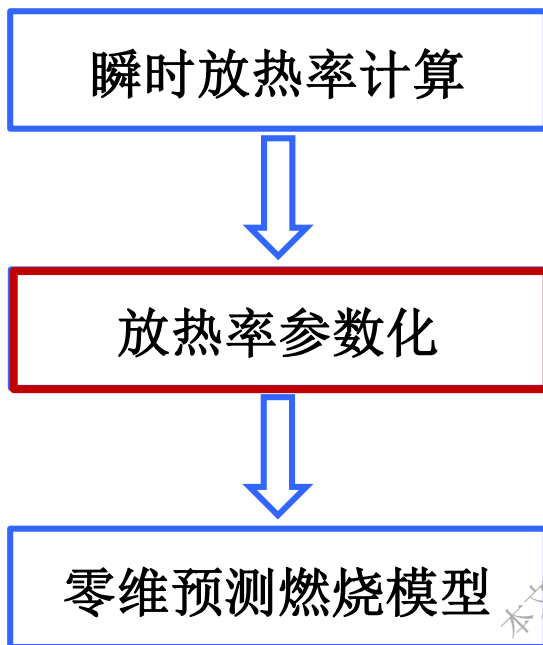
* 朱振夏, 张付军, 吴滔滔, 韩恺. 内燃机学报,
2015(02): 第163-170页.



柴油机高原性能预测模型

一、零维预测燃烧模型 *

□ 利用三韦伯函数形式拟合瞬时放热率



$$\min F(\varphi_0, \Delta\varphi_i, m_i, \beta_i) = \sum_{i=1}^n \left[(\text{RoHR}_F)_i - (\text{RoHR}_E)_i \right]^2$$
$$\frac{dx}{d\varphi} = \sum_{i=1}^3 \frac{dx_i}{d\varphi} = \sum_{i=1}^3 6.908 \beta_i \frac{m_i + 1}{\Delta\varphi_i} \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{\Delta\varphi_i} \right)^{m_i} \exp \left[-6.908 \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{\Delta\varphi_i} \right)^{m_i + 1} \right]$$

参数符号	中文名称	参数符号	中文名称
φ_0	着火时刻	β_2	主燃率
$\Delta\varphi_1$	预混燃烧持续期	β_3	后燃率
$\Delta\varphi_2$	主燃持续期	m_1	预混燃烧品质指数
$\Delta\varphi_3$	后燃持续期	m_2	主燃品质指数
β_1	预混燃烧率	m_3	后燃品质指数

* Taotao Wu, Changlu Zhao, Kai Han.
SAE Paper 2014-01-1093

* 朱振夏, 张付军, 吴滔滔, 韩恺. 内燃机学报,
2015(02): 第163-170页.

柴油机高原性能预测模型

一、零维预测燃烧模型 *

□ 利用三韦伯函数形式拟合瞬时放热率

合理约束条件:

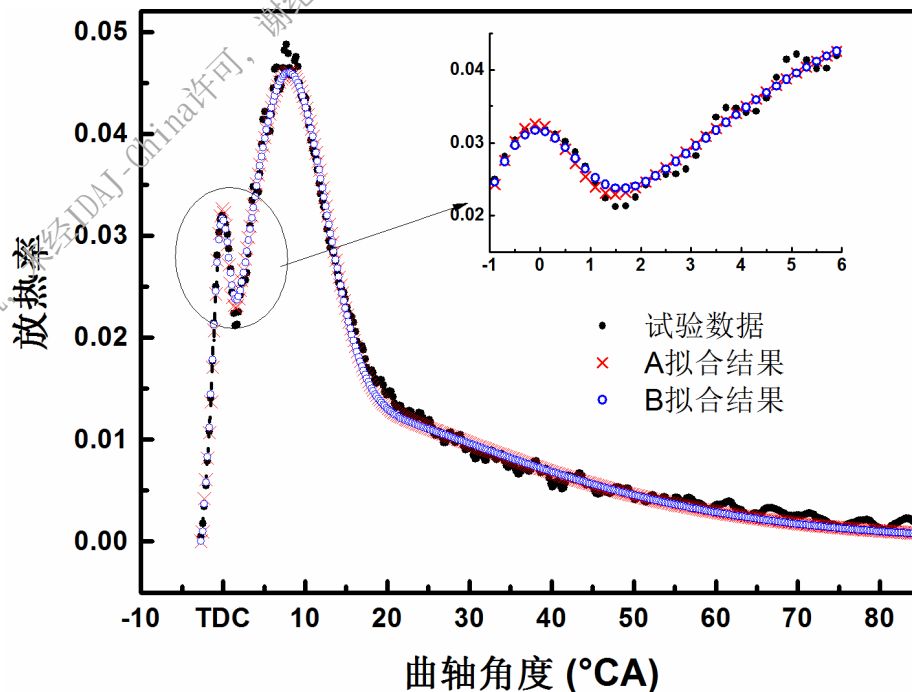
$$\Delta\varphi_3 > 110^\circ CA$$

$$\beta_3 = 1 - \beta_1 - \beta_2$$

瞬时放热率计算

放热率参数化

零维预测燃烧模型



* Taotao Wu, Changlu Zhao, Kai Han.
SAE Paper 2014-01-1093

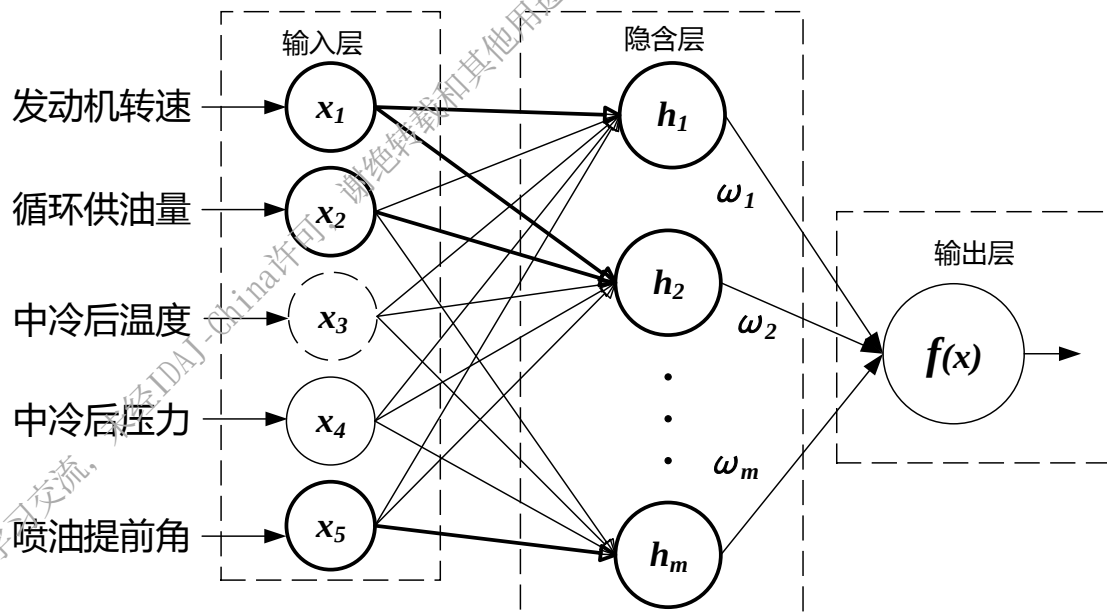
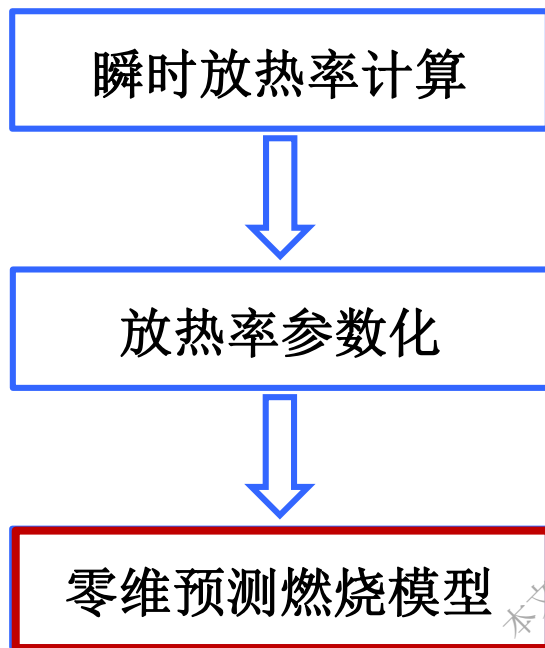
*朱振夏,张付军,吴滔滔,韩恺.内燃机学报,
2015(02): 第163-170页.

中心加权滑动平均的方法处理缸压曲线

柴油机高原性能预测模型

一、零维预测燃烧模型 *

□ 神经网络驱动的多参数零维预测燃烧模型



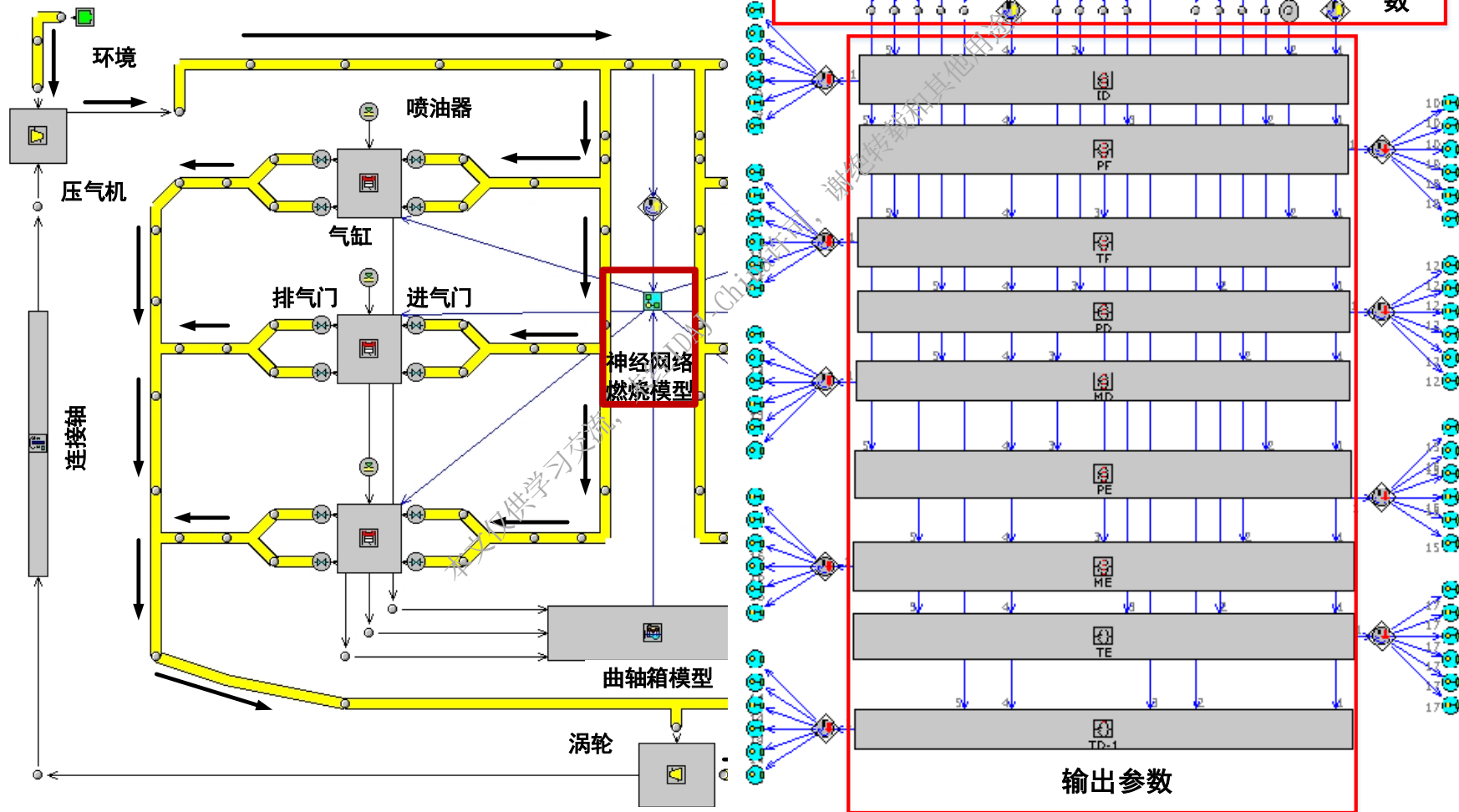
神经网络训练样本：355个试验工况。
涵盖了海拔0~4500m，转速820~2100r/min，
负荷率10%~100%，中冷后温度40~90℃的范围。
总训练次数为2840次。

* Taotao Wu, Changlu Zhao, Kai Han.
SAE Paper 2014-01-1093

* 朱振夏, 张付军, 吴滔滔, 韩恺. 内燃机学报,
2015(02): 第163-170页.

柴油机高原性能预测模型

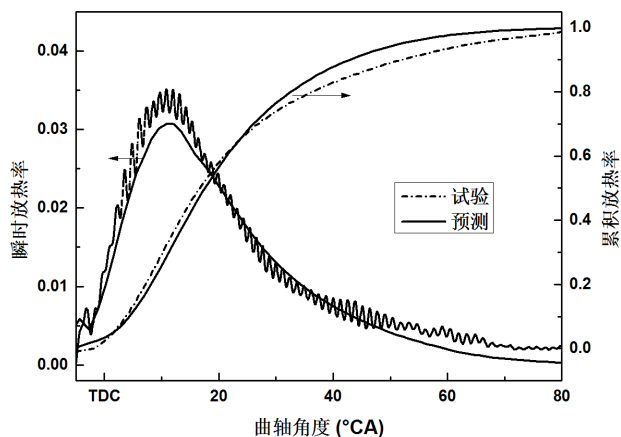
二、高原预测模型的建立



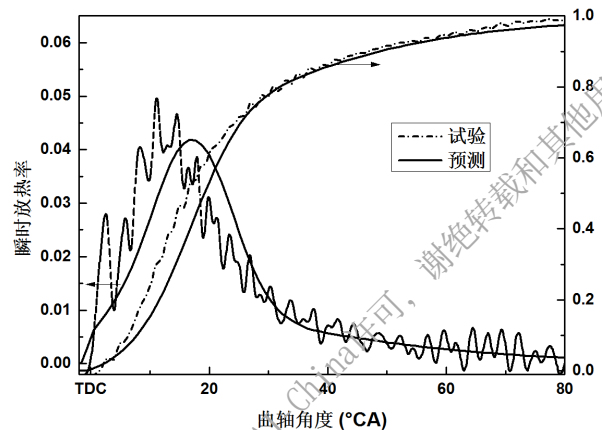
柴油机高原性能预测模型



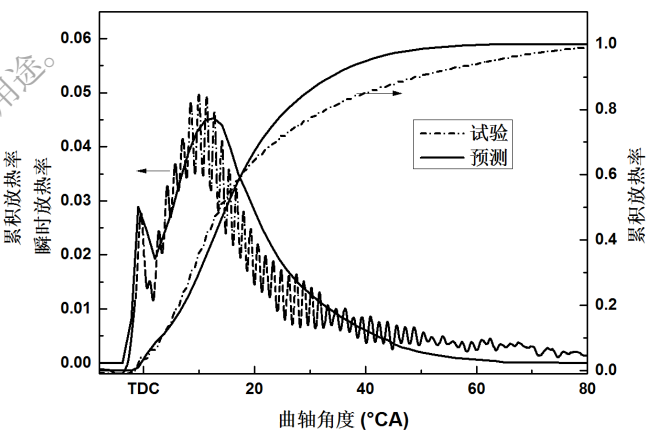
三、高原预测模型的校核



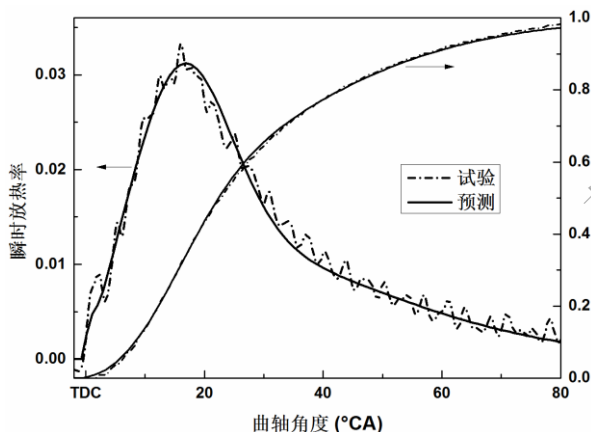
0m, 循环油量223.5mg@1300r/min



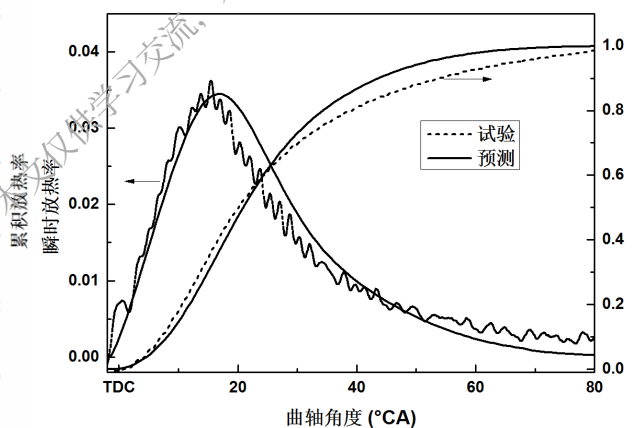
2000m, 循环油量84.5mg@2100r/min



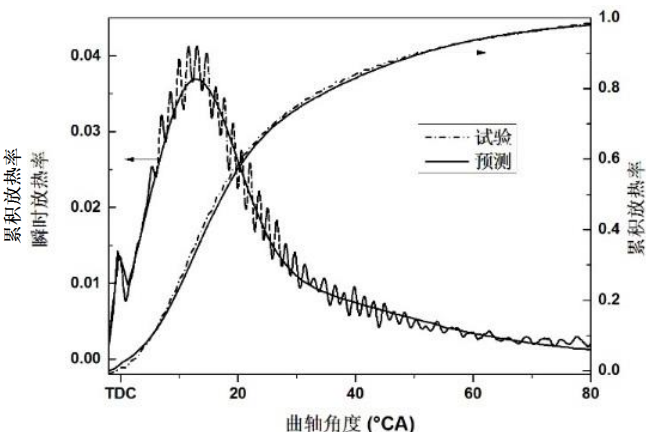
3000m, 循环油量130.5mg@1500r/min



3500m, 循环油量142.5mg@1700r/min



4000m, 循环油量162.5mg@1900r/min

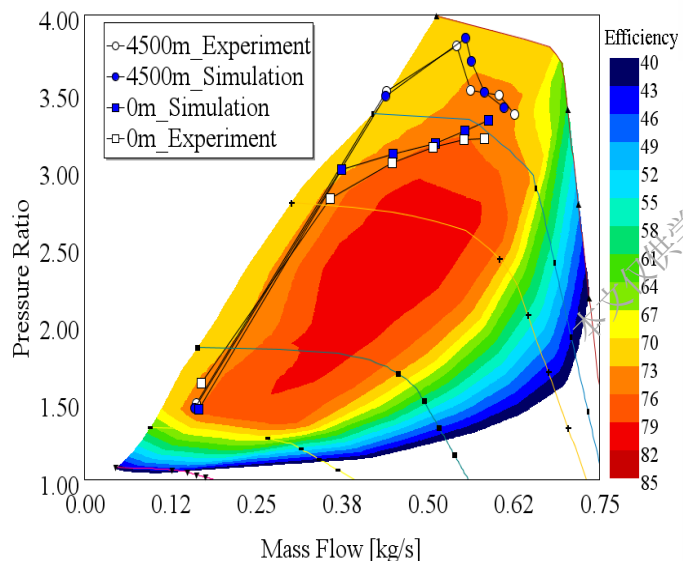


4500m, 循环油量163.5mg@2100r/min

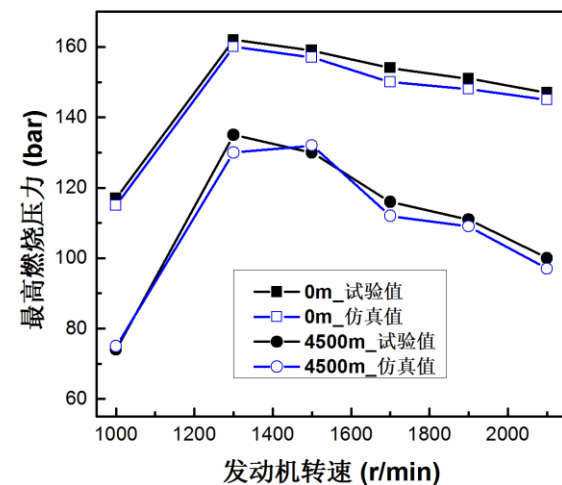
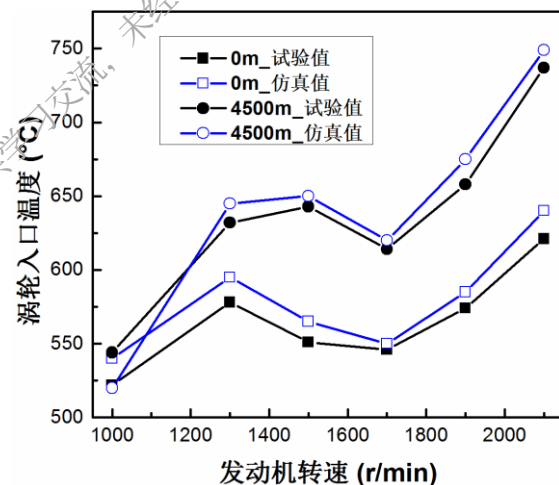
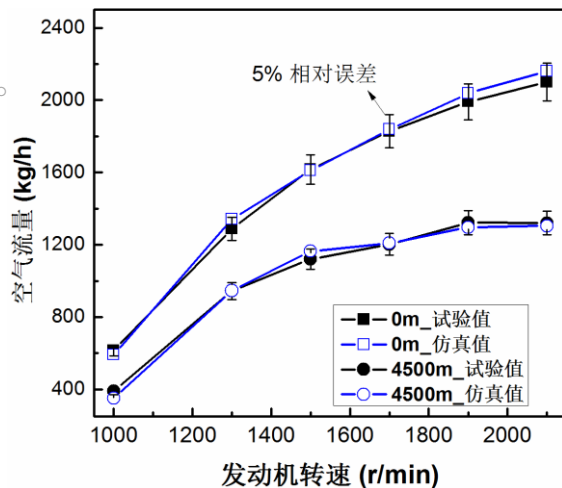
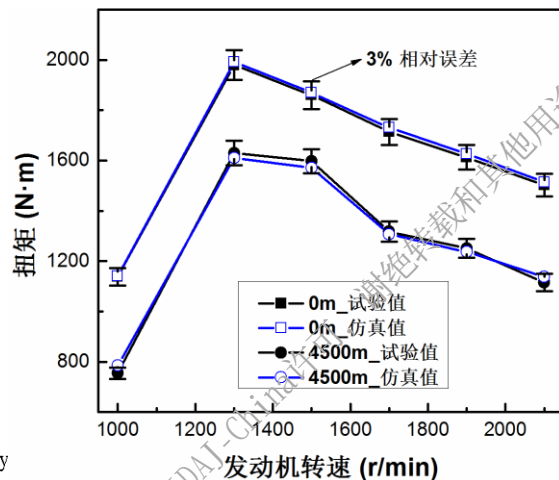
柴油机高原性能预测模型

三、高原预测模型的校核

□ 仿真模型的计算误差
<5%，模型能够真实的反映发动机在平原和高原环境下的性能



不同海拔下压气机运行点的验证



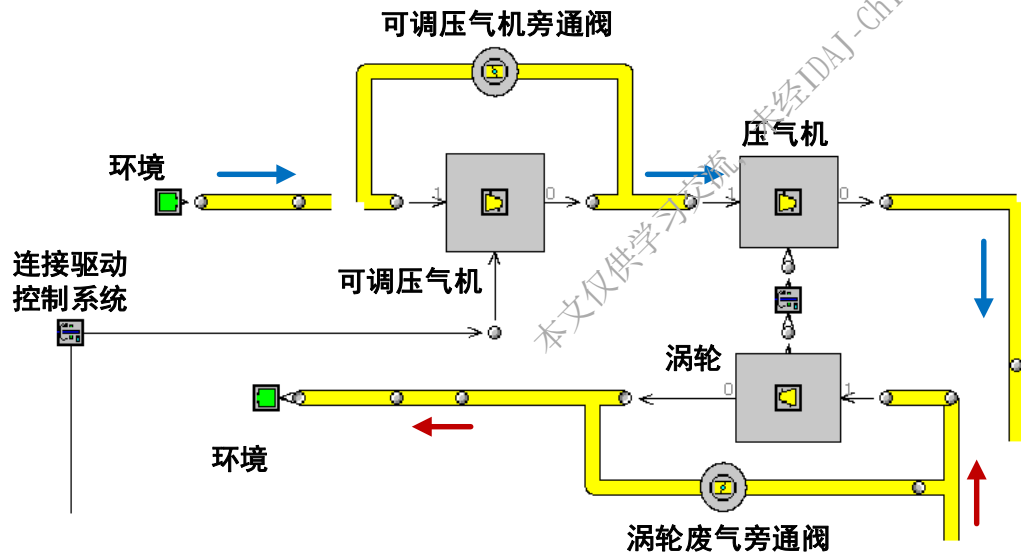
发动机性能参数仿真结果与试验数据对比

可调转速复合增压高原调节规律

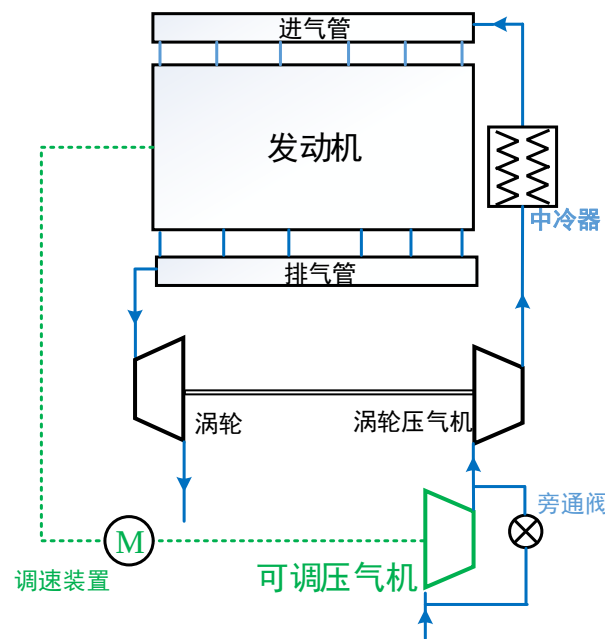


一、可调转速复合增压系统模型

- 适应不同的发动机工况。低速时调节可调压气机转速，改善扭矩特性；高转速时，以涡轮增压模式运行，减少增压系统的耗功。
- 适应不同的海拔环境。通过设计合理的参数调节策略，使可调压气机的转速能够随海拔变化做出相应的调整，增强进气系统的环境适应能力。



可调转速复合增压系统模型

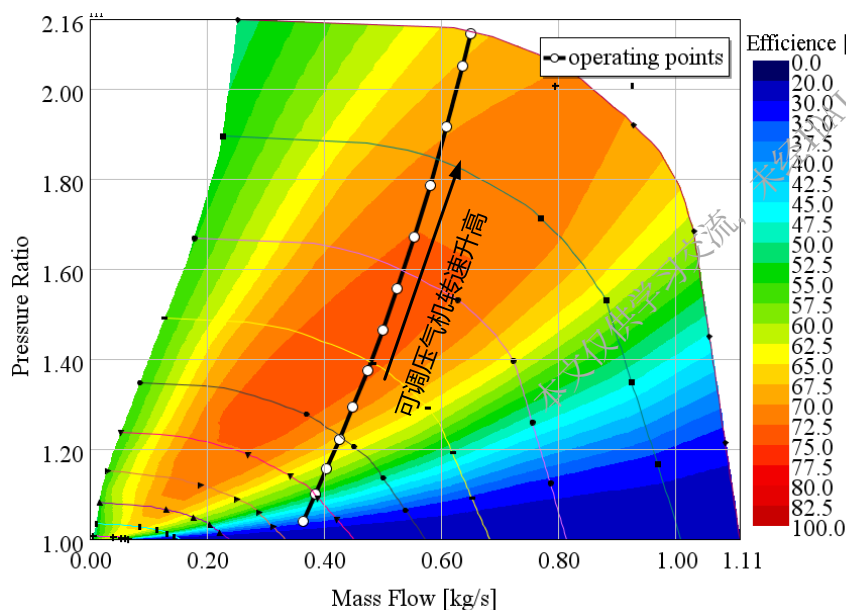


可调转速复合增压高原调节规律

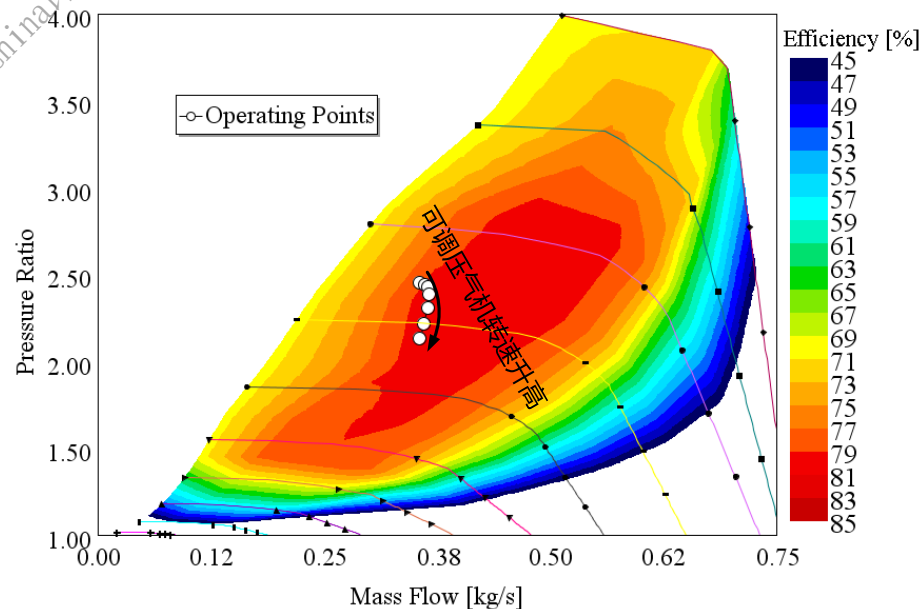


二、可调压气机转速的影响规律

- 随着可调压气机转速的升高，压比提高、折合流量增大，运行点移动的轨迹基本上与喘振边界平行。
- 随着可调压气机转速的升高，涡轮压气机压比降低，折合流量变化较小



不同压气机转速下的可调压气机运行点



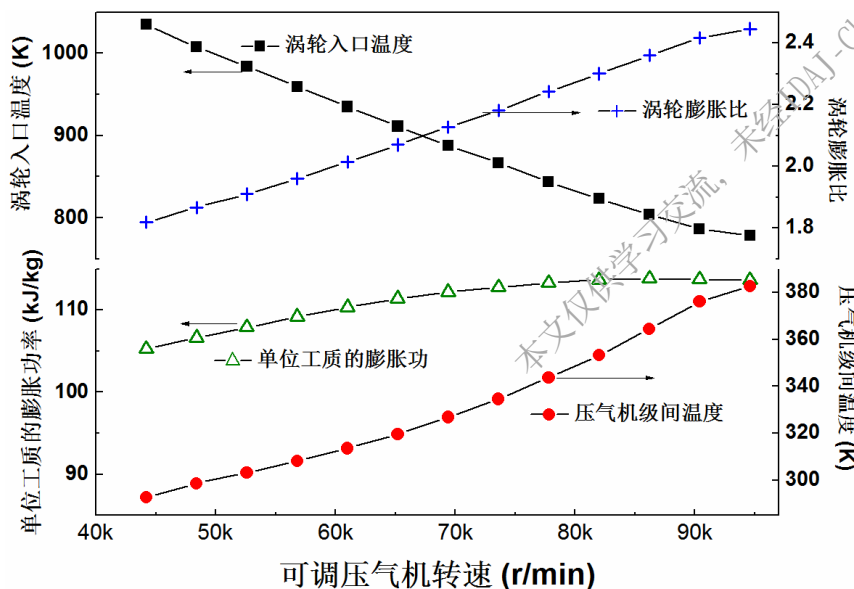
不同可调压气机转速下涡轮压气机运行点

可调转速复合增压高原调节规律

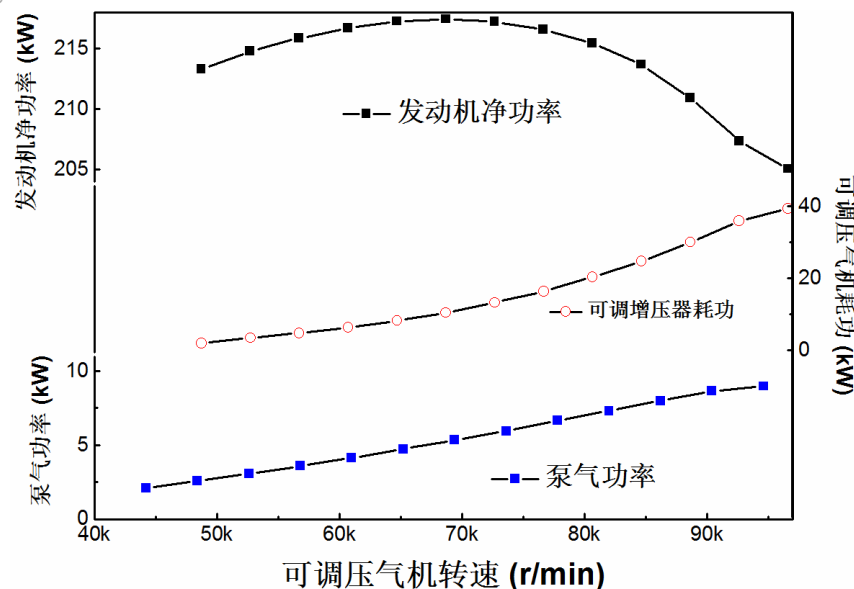


二、可调压气机转速的影响规律

- 可调压气机转速升高后，发动机进气质量增大，但工质获得的化学能并未增加（循环供油量不变），单位工质在涡轮的膨胀功没有增大，压气机入口温度的提高造成了涡轮压气机压比的降低。
- 在复合增压模式下，泵气功率始终是正值，占发动机净功率的1%~4%。



可调压气机转速对涡轮增压器工质状态的影响

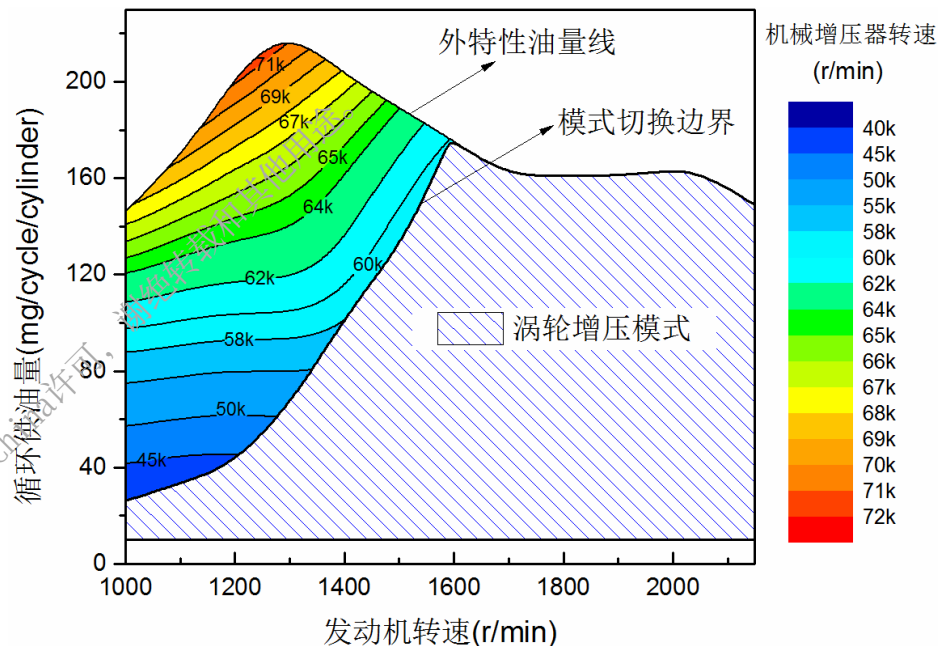


可调压气机转速对发动机净功率的影响

可调转速复合增压高原调节规律

三、可调压气机最佳转速

- 以动力性最优为优化目标确定复合增压和涡轮增压两种模式的切换边界。
- 利用GT-Power中的Optimizer模块获得不同海拔、不同工况下的最佳可调压气机转速。



4500m海拔下可调压气机转速调节规律

发动机转速	海拔4500m外特性		
r/min	原机扭矩 (Nm)	SAC扭矩 (Nm)	扭矩升高率
1000	755	998	32.2%
1300	1630	1825	12%
2100	1115	1227	10%

$$\text{Max } P(n_A) = P_E(n_A) - P_S(n_A)$$

$$\text{s.t. } p_{\max}(n_A) \leq 160 \text{ bar}$$

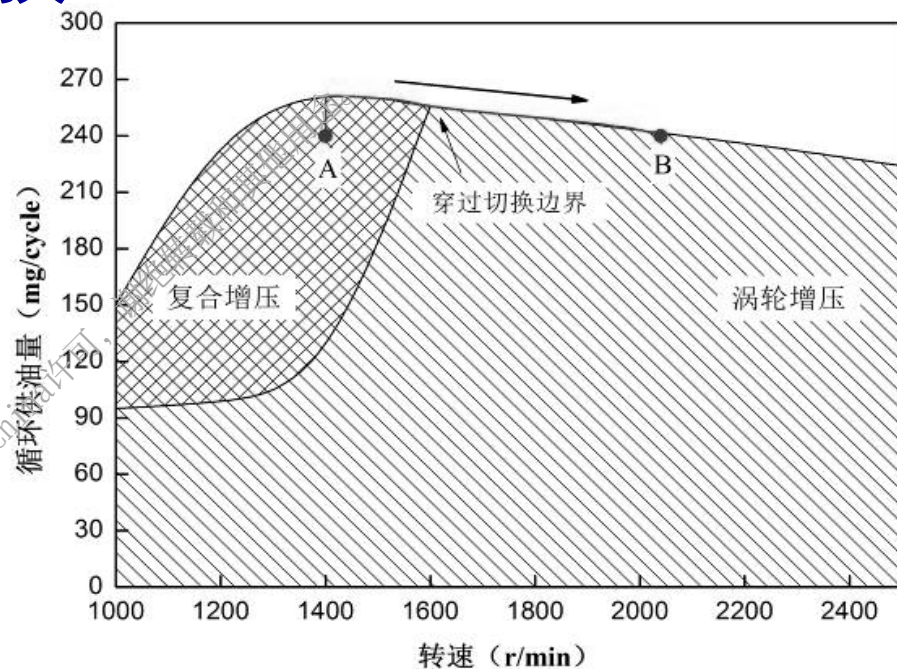
$$T_T(n_A) \leq 750^\circ\text{C}$$

可调复合增压模式切换控制方法



一、可调复合增压模式切换

- 在满负荷油量下，发动机从A点1400r/min开始加速，穿过切换边界，最终稳定在高转速区域的B工况点。
- 当发动机工况达到切换边界时可调压气机转速立即开始改变。



可调压气机动态切出工况 (@3000m)

- 1) 以可调压气机切出过程为例研究复合增压系统动态过程控制方法。
- 2) 研究旁通阀打开时刻和可调压气机转速变化率对动态过程的影响。

可调复合增压模式切换控制方法



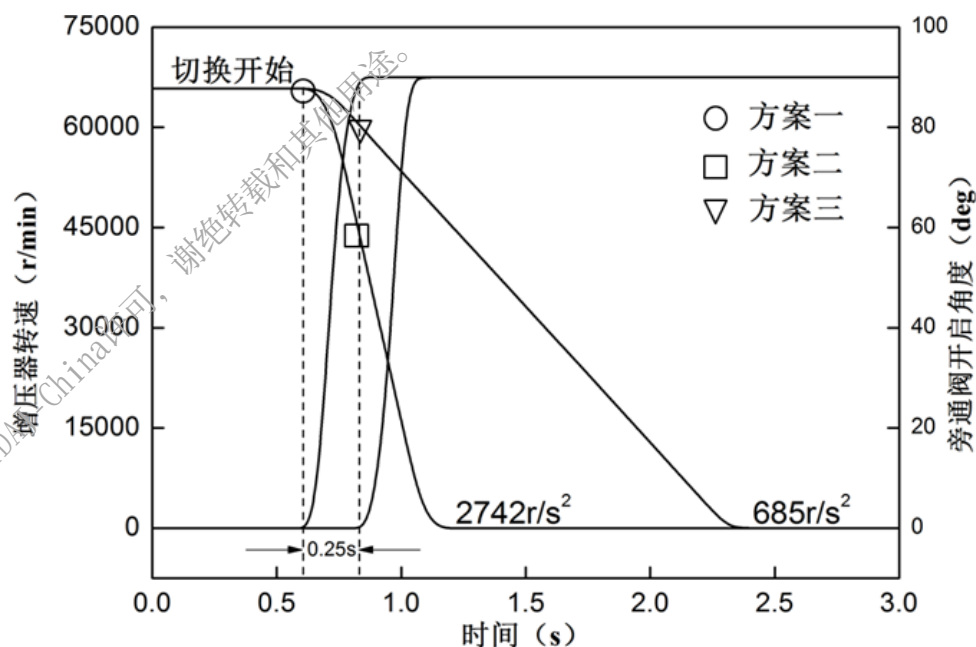
二、控制方案对比分析

□ $t=0.6\text{s}$ 时发动机到达切换边界

□ 方案一：达到切换边界的同时旁通阀打开，压气机转速按照较大的速率下降。旁通阀开启时压气机转速较高(66kr/min)

□ 方案二：达到切换边界时压气机转速按照较大的速率下降，旁通阀滞后打开，此时压气机转速较低(44kr/min)

□ 方案三：达到切换边界时压气机转速按照较小的速率下降，旁通阀滞后打开，此时压气机转速相对较高(54kr/min)。



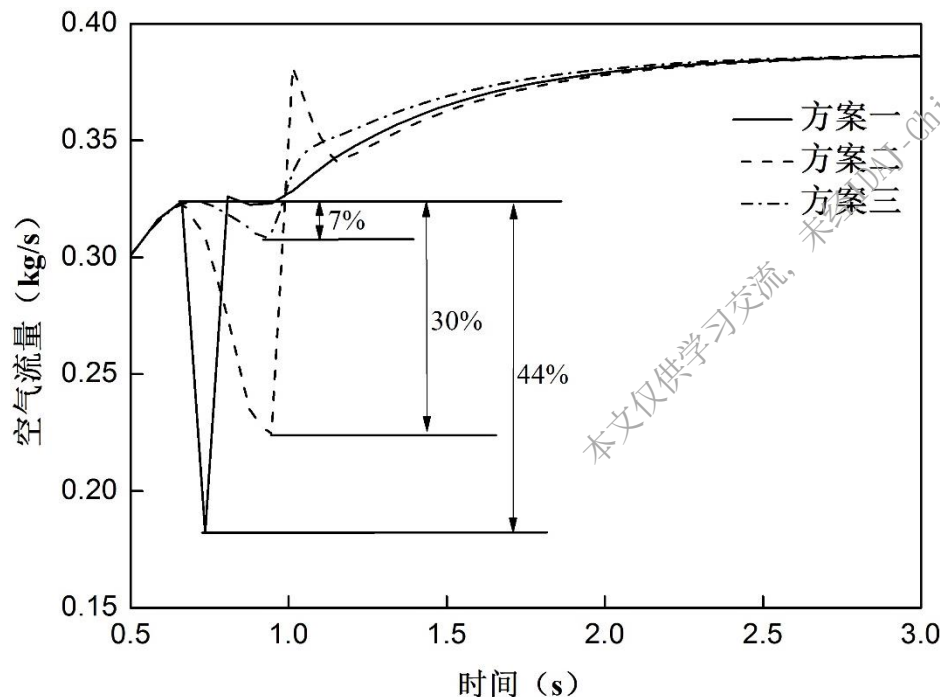
可调转速压气机切出方案设计

可调复合增压模式切换控制方法

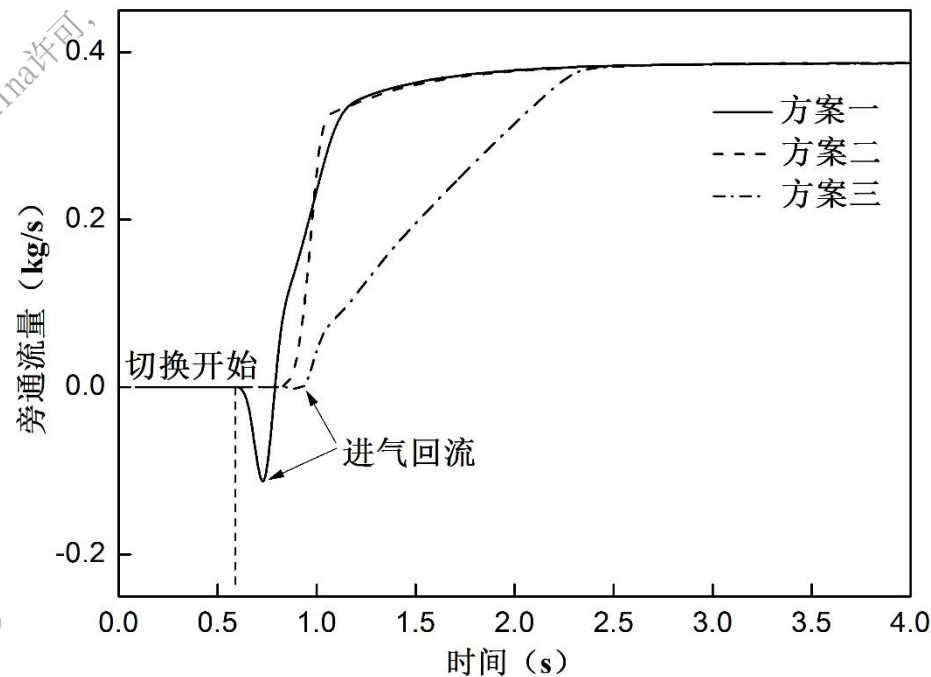


二、控制方案对比分析

- ❑ 方案一，发生进气回流，流经涡轮增压器的空气流量波动较大。
- ❑ 方案二，压气机转速较低，流经涡轮增压器的空气流量波动较大。
- ❑ 方案三，流经涡轮增压器的空气流量波动不大。



动态过程中不同切出方案的总空气流量对比

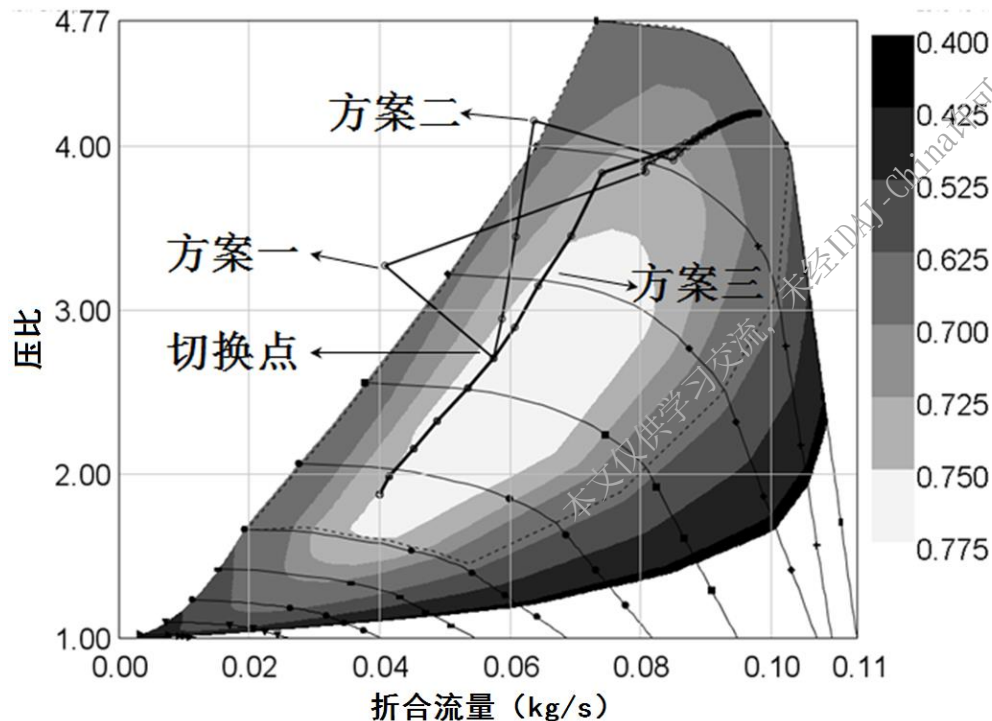


动态过程中不同切出方案的旁通空气流量对比

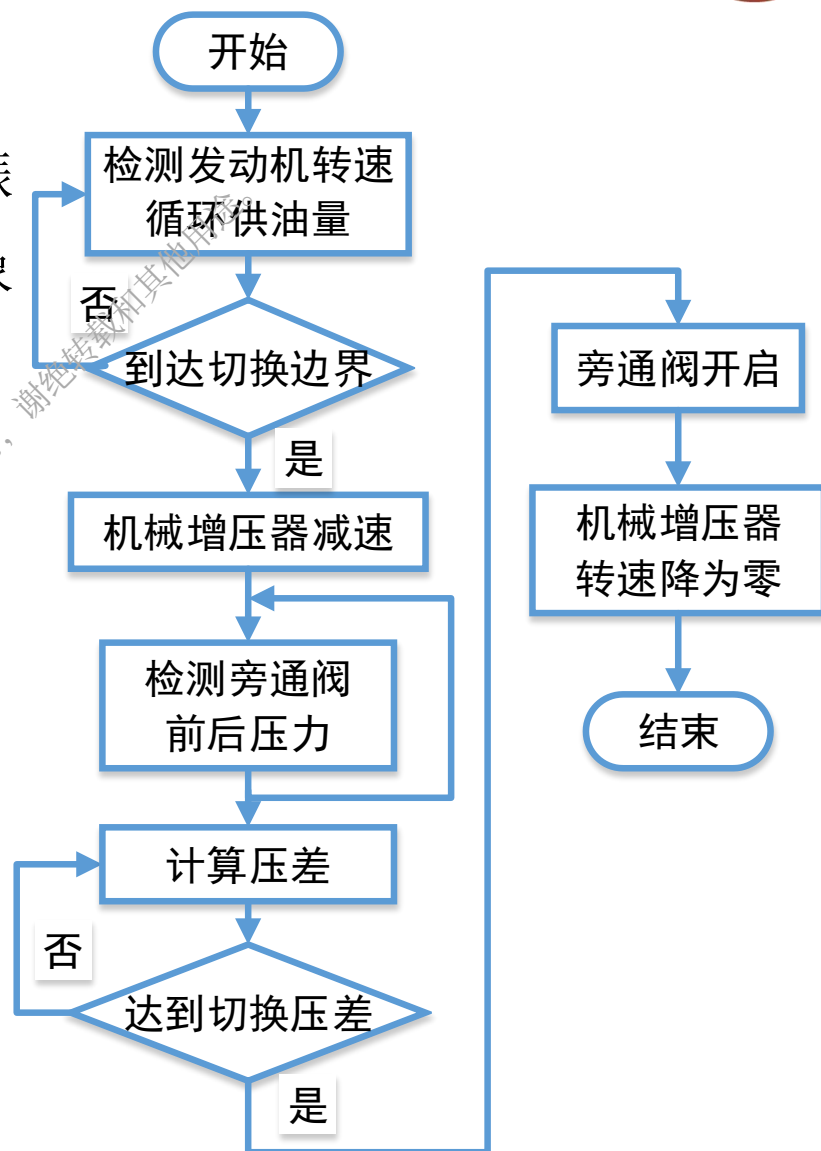
可调复合增压模式切换控制方法

三、控制方法

- ❑ 方案一和方案二涡轮增压器发生了喘振
- ❑ 方案三的涡轮增压器未发生了喘振现象



动态过程中不同切出方案的涡轮增压器匹配情况

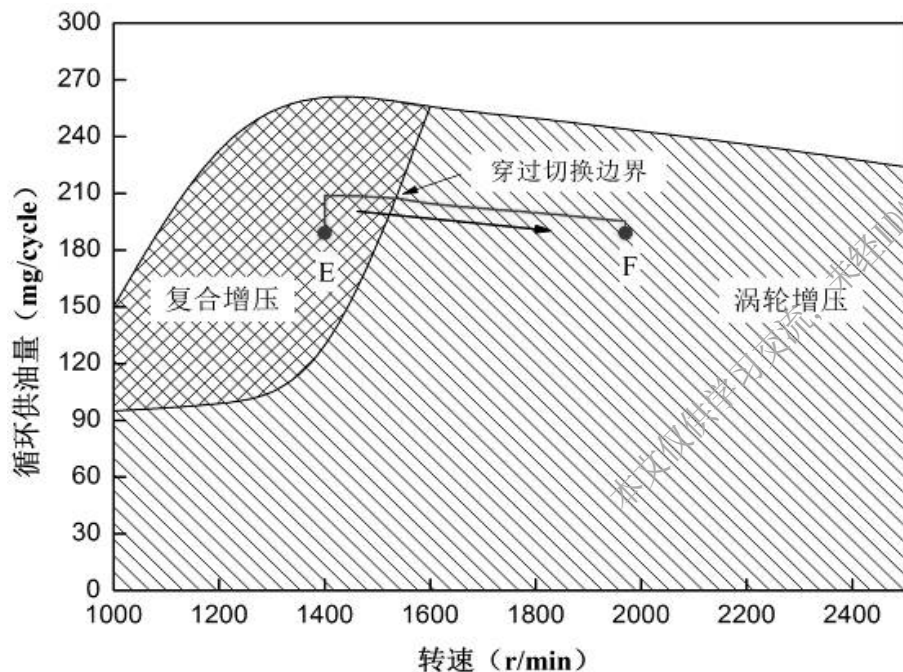


可调复合增压模式切换控制方法

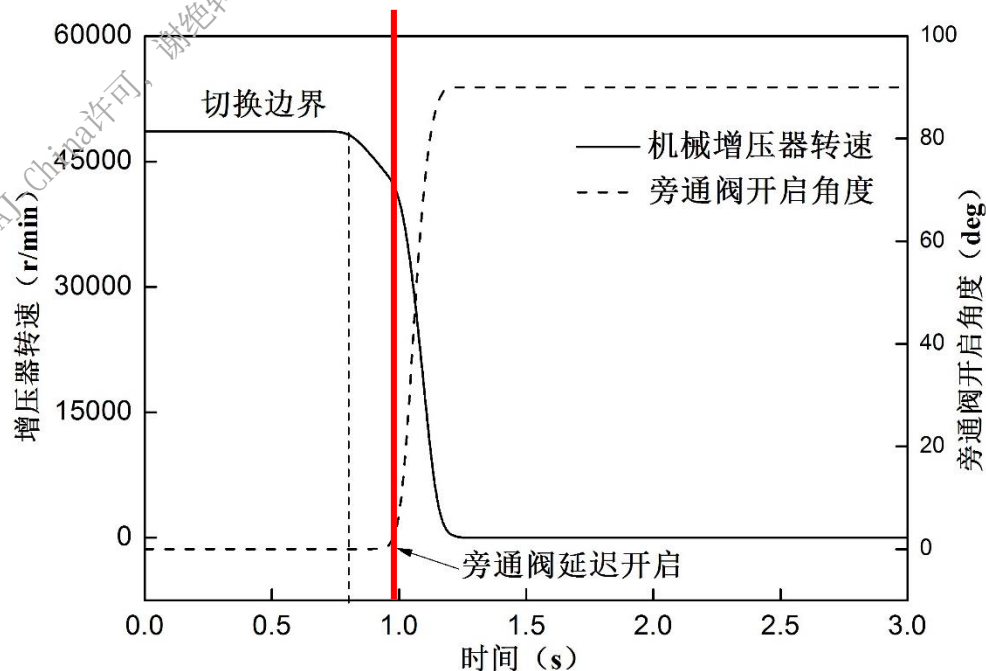


三、可调转速压气机控制方法仿真验证

- 在发动机扭矩不变的情况下，从E点80%油门位置下加速到F点穿过切换边界。旁通阀延迟0.25s开启，此时旁通阀前后压差为-0.02bar。



验证动态工况的设计



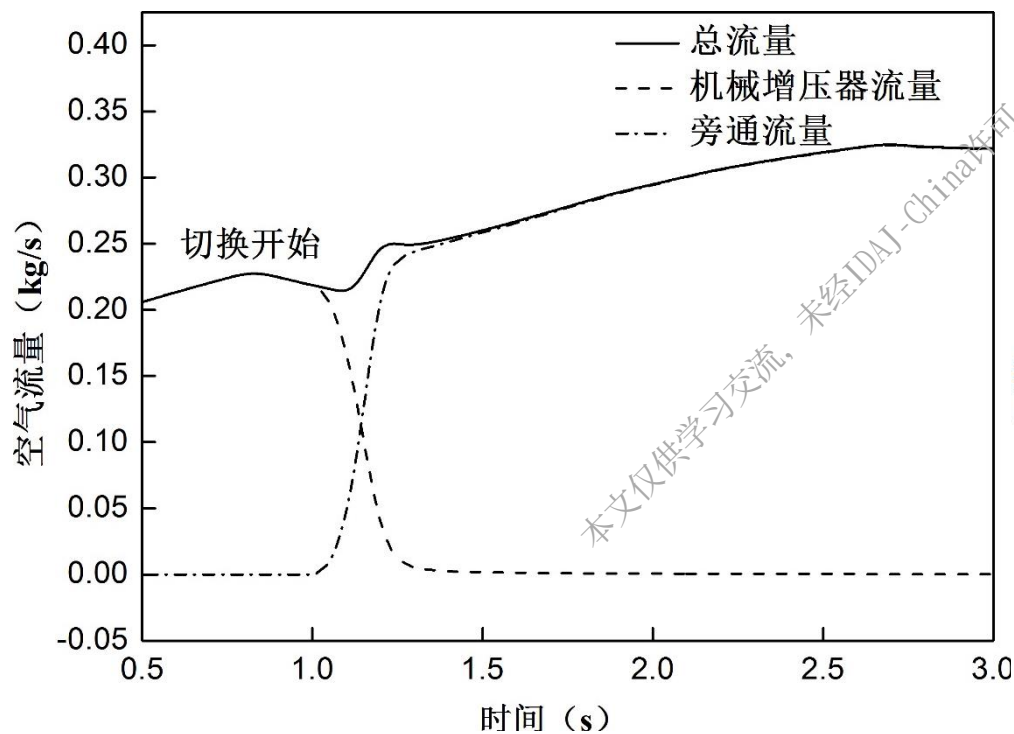
可调转速增压器的切出方案设计

可调复合增压模式切换控制方法

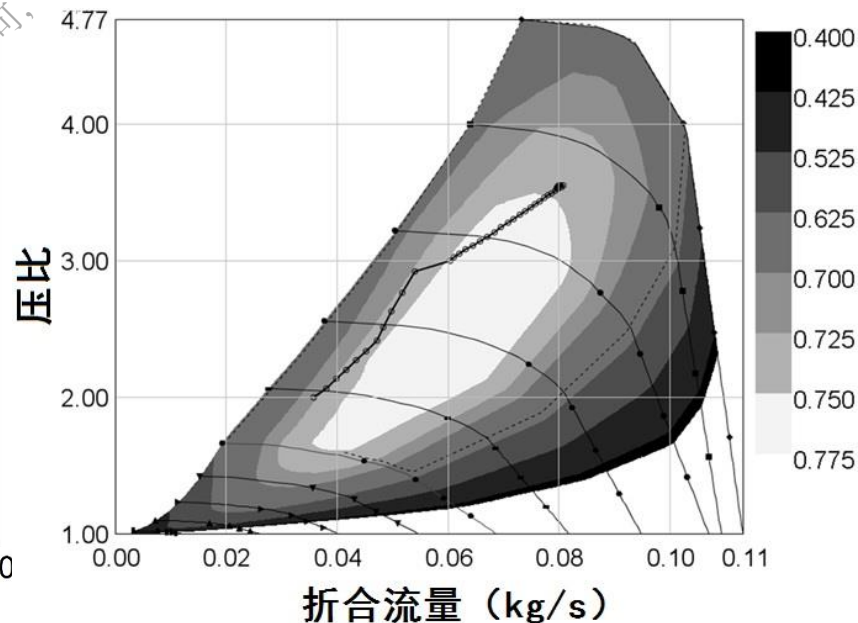


三、可调转速压气机控制方法仿真验证

- 总的空气流量在切换过程中波动不大，旁通阀没有出现进气回流现象。
- 涡轮增压器匹配点距喘振边界具有较大的余度。



可调转速增压器切出过程的空气流量变化情况



可调转速增压器切出过程的涡轮增压器匹配情况

结 论



- 将神经网络非线性预测能力与零维燃烧模型高效运算特点相结合，提出了神经网络驱动的多参数零维预测型燃烧模型和建魔方法，并利用GT-Power软件建立了具有预测高原环境下柴油机燃烧过程能力的增压柴油机动态仿真模型。
- 建立了可调转速复合增压柴油机模型，利用GT-Power软件的Optimizer模块，获得了可调转速复合方案高原环境下发动机面工况下的可调压气机转速调节规律。
- 研究了高原环境下可调压气机切出动态过程的参数影响规律，提出了可调转速复合增压模式切换的动态控制方法。

IDAJ CAE
Solution
Conference

Your True Partner for CAE&CFD

ICSC  2015

谢谢关注

本文仅供学习交流，未经IDAJ China许可，谢绝转载和其他用途。