



内燃机多涡轮增压系统设计与控制技术

Multi-turbocharger system design and control of diesel engine

石磊

2023年2月14日



上海交通大學

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

- 1** 研究背景
Background
- 2** 试验系统搭建
Experiment System
- 3** 多涡轮增压系统设计与控制
Multi-turbocharger system design and control
- 4** 增压系统变海拔适应能力
Altitude adaptability of turbocharger system
- 5** 结论
Conclusions





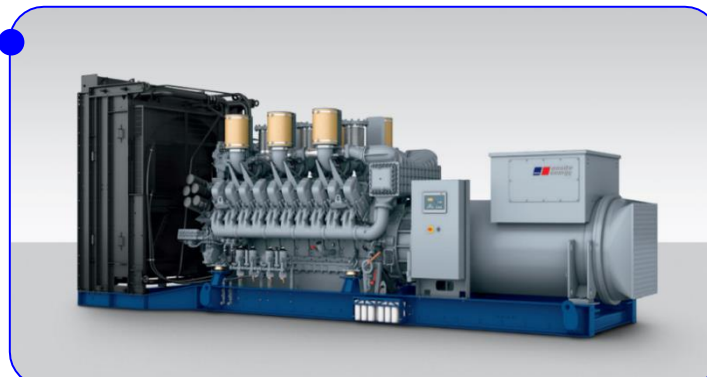
研究背景-Background



内燃机是交通运输、工程机械和军工装备的主导动力

商用车与工程机械

发电机组



船舶

装甲



对国民经济和国防建设具有极其重要的作用

研究背景-Background



兼顾高压比和宽流量范围的涡轮增压是长期以来增压技术难题

1 双扩难

定构型增压系统受流动稳定性限制，高压比和宽流量相互矛盾

2 增效难

排气强脉冲引起排气干扰、泵气功增加和涡轮效率劣化，涡轮增压系统强脉冲流动增效难

3 控制难

涡轮增压系统多变量强耦合导致控制失稳和性能恶化，多涡轮增压器耦合控制难

- 1** 研究背景
Background
- 2** 试验系统搭建
Experiment System
- 3** 多涡轮增压系统设计与控制
Multi-turbocharger system design and control
- 4** 增压系统变海拔适应能力
Altitude adaptability of turbocharger system
- 5** 结论
Conclusions



试验系统搭建 Experiment System



0.5bar 低压进气
-35°C 低温进气
环境模拟



可控模式增压系统



瞬态测功系统



基于模型
增压控制



- 压力:
0.5~1 bar
(0~4500m)
- 温度:
-35~30 °C
- 流量:
1300 kg/h (300L/s)
- 压力控制精度:
±1kPa

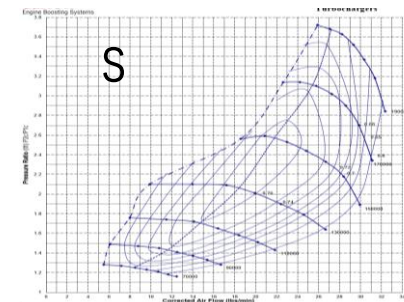
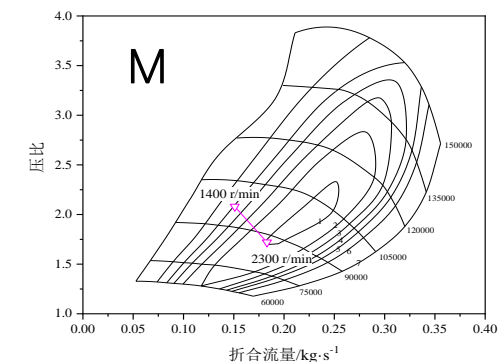
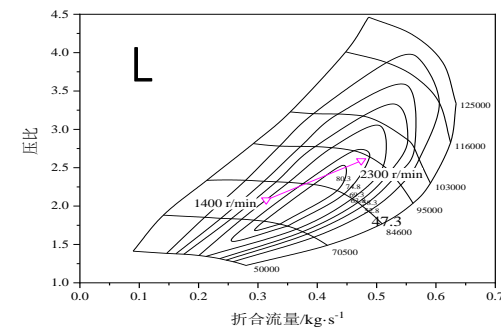
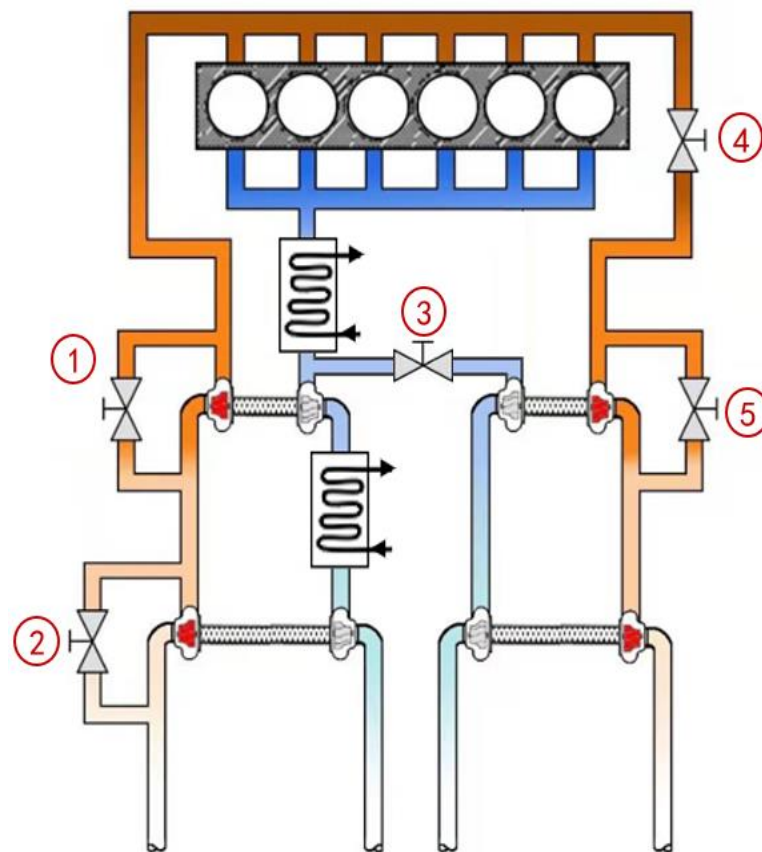
试验系统搭建 Experiment System



两级相继增压系统试验台

参数	指标
发火次序	1-5-3-6-2-4
缸径×行程 (mm)	105×124
压缩比	17.3:1
排量 (L)	6.5
额定功率 (kW)	160
额定转速 (r/min)	2300

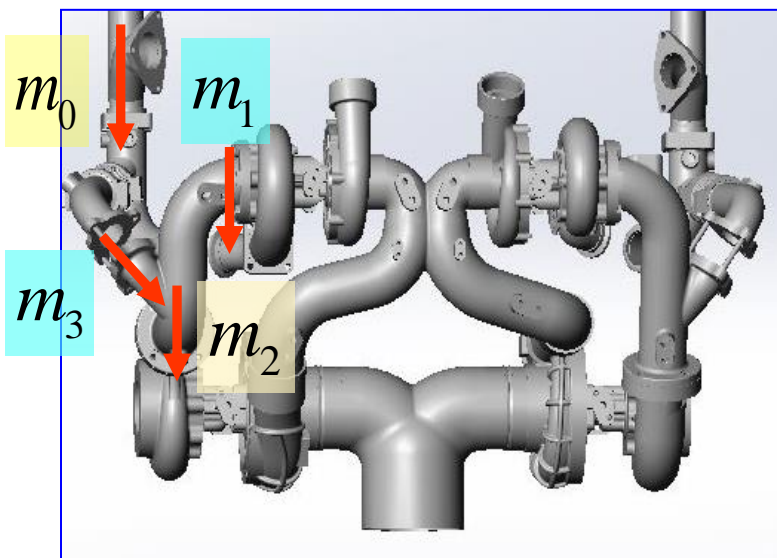
发动机参数



- 1** 研究背景
Background
- 2** 试验系统搭建
Experiment System
- 3** 多涡轮增压系统设计与控制
Multi-turbocharger system design and control
- 4** 增压系统变海拔适应能力
Altitude adaptability of turbocharger system
- 5** 结论
Conclusions

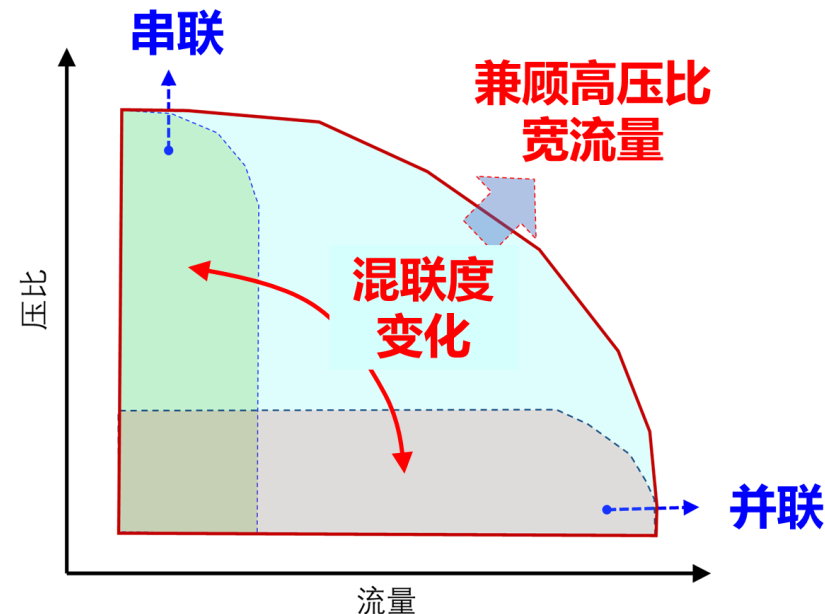


多涡轮增压系统设计与控制 Multi-turbocharger system



$$x_1 = \frac{m_1}{m_0}, \quad x_2 = \frac{m_2}{m_0}, \quad x_3 = \frac{m_3}{m_0}$$

- | | |
|--------|------------------------|
| (1) 串联 | $x_3 = 0$ |
| (2) 混联 | $x_3 \neq 0$ |
| (3) 并联 | $x_1 \cdot x_2 \neq 0$ |
| (4) 单级 | $x_1 \cdot x_2 = 0$ |



通过混联度改变多涡轮增压器系统内的能量分配，实现4种增压构型，突破了涡轮增压压比和流量范围不能兼顾的技术难题

多涡轮增压系统设计与控制 Multi-turbocharger system

多涡轮增压器耦合关系复杂，特性非线性强，调控难度大



协同控制**难**

多增压器

多流动路径

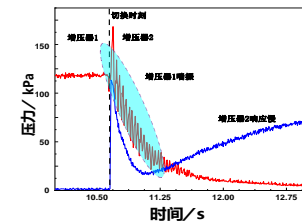
多调节阀门

性能**恶化**

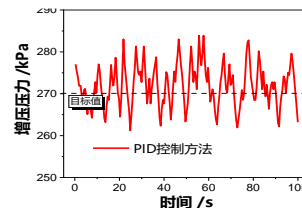
压力波动大

喘振控制难

适应性差



增压器喘振引起损坏

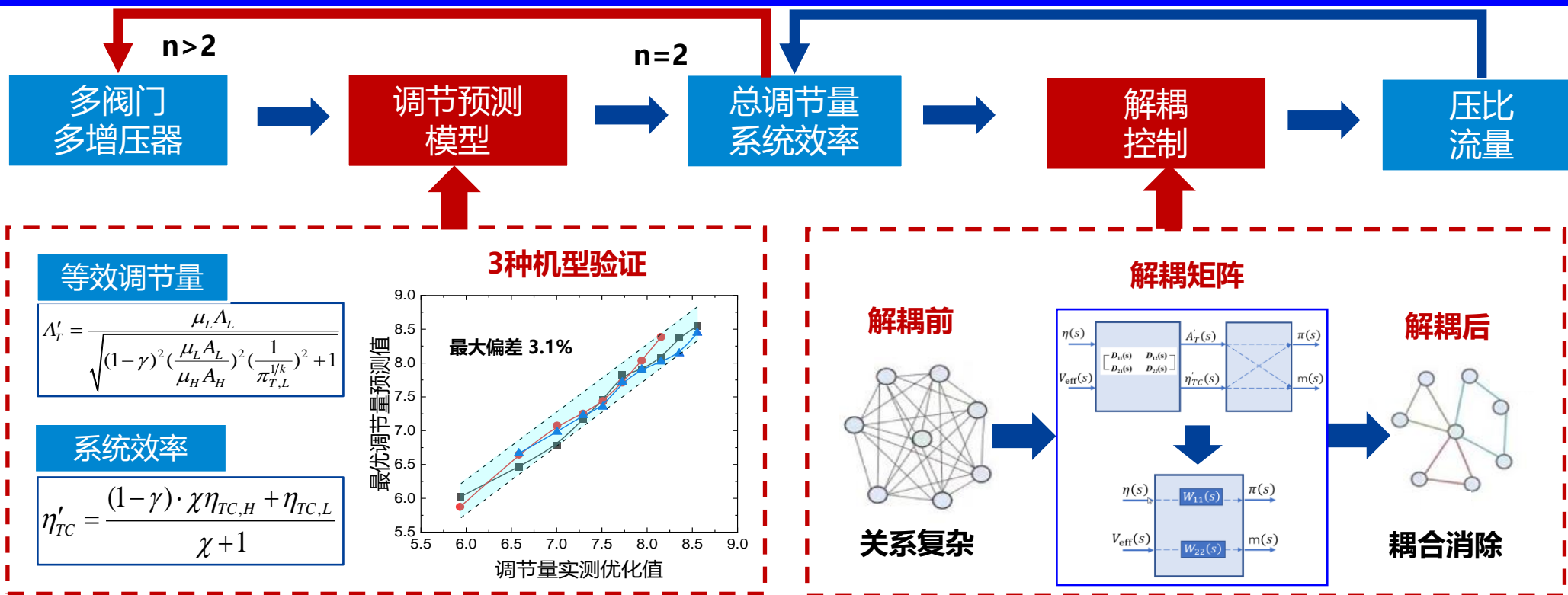


动力下降、冒黑烟

- 各增压器间流量与效率互为关联，**调节特性复杂**
- 传统喘振预测模型不能反映瞬态工况，**易出现喘振**
- 传统涡轮增压控制方法，**易超调超差**

多涡轮增压系统设计与控制 Multi-turbocharger system

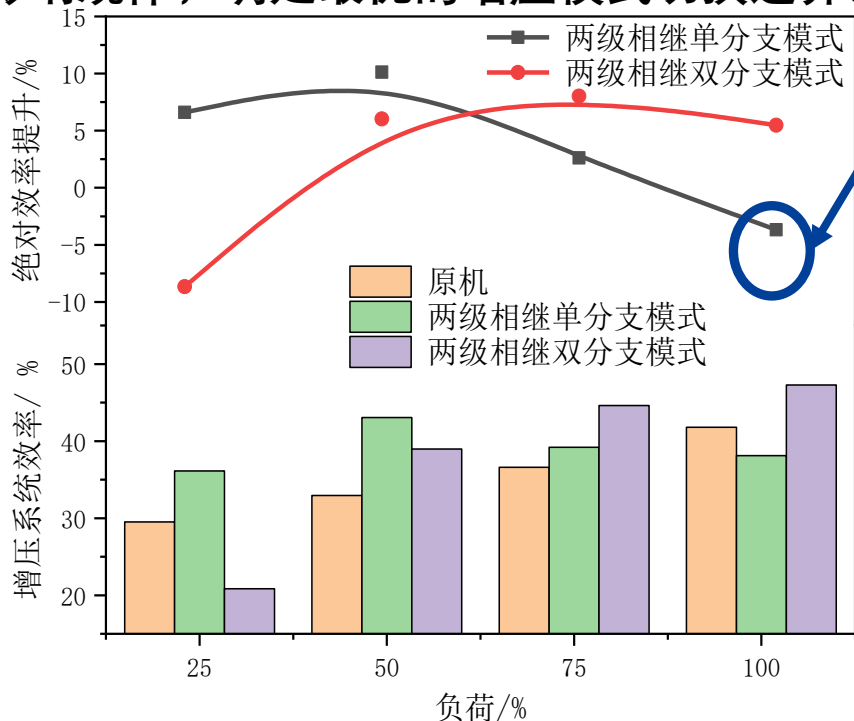
调节能力与效率的可变构型增压系统对角矩阵解耦控制方法



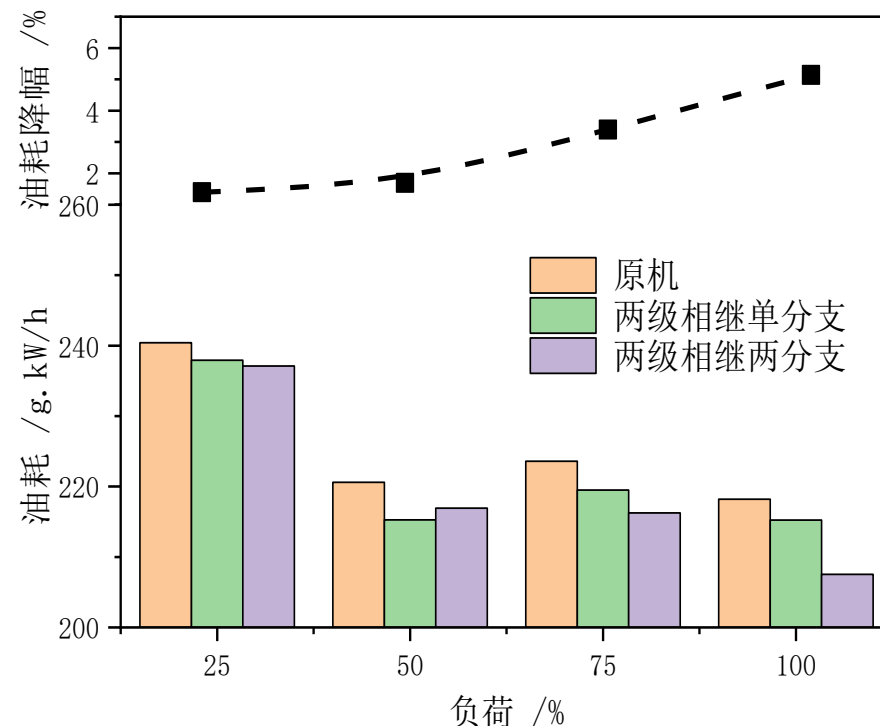
- 建立了多涡轮增压器系统调节量与效率预测模型，实现准确预测
- 提出了调节量与效率对角矩阵解耦方法，实现压比和流量精准控制

多涡轮增压系统设计与控制 Multi-turbocharger system

在两级相继增压系统试验台上进行推进特性试验，根据不同负荷下增压模式对增压系统性能和柴油机燃油经济性的影响规律，确定最优的增压模式切换边界。



为避免涡轮超速，旁通部分能量



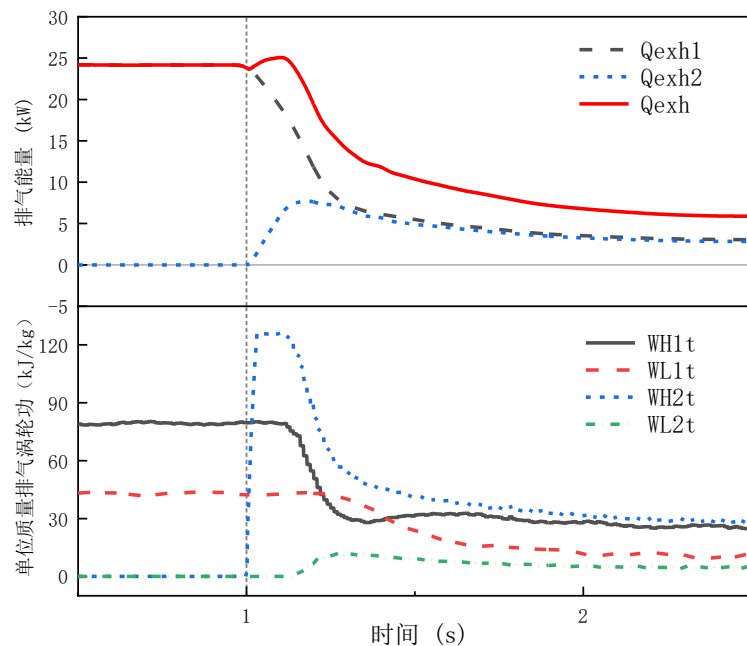
不同负荷下增压模式对增压系统效率的影响

不同负荷下增压模式对增压系统燃油消耗率的影响

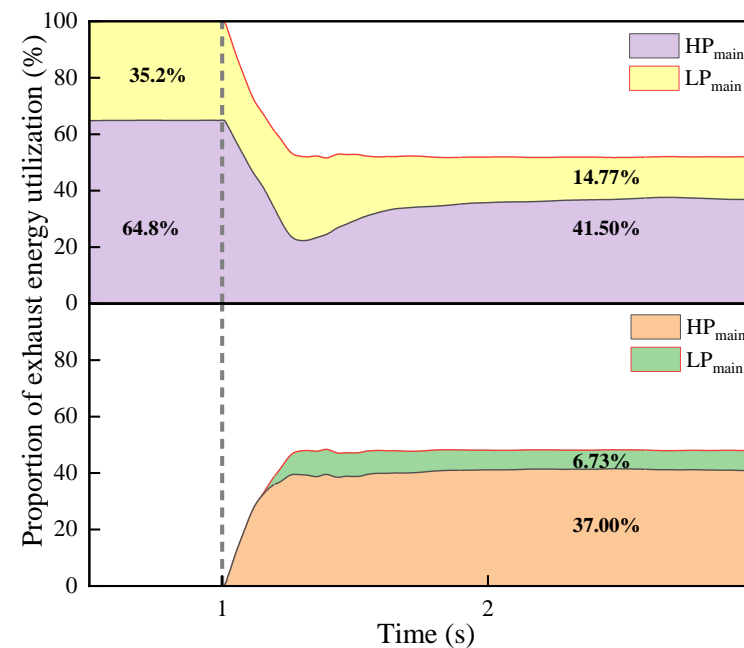
65%负荷为最优切换边界，该负荷以下，单分支两级增压增压压力较高，瞬态响应性较好，该负荷以上，两级相继双分支模式可以实现柴油机有效效率的大幅提升。

多涡轮增压系统设计与控制 Multi-turbocharger system

切换过程排气能量分配特性研究



切换过程废气能量变化规律



切换过程排气能量利用特性

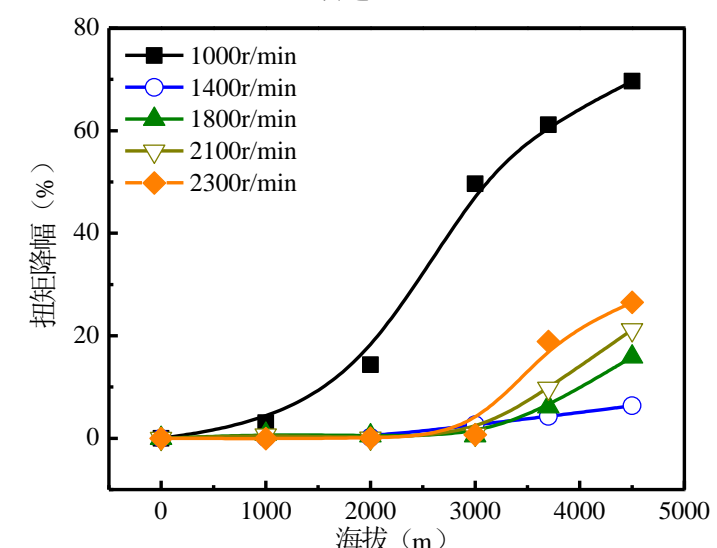
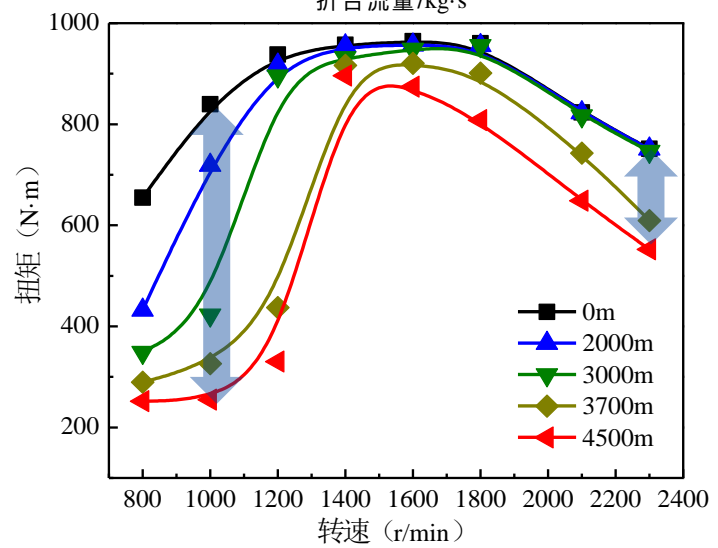
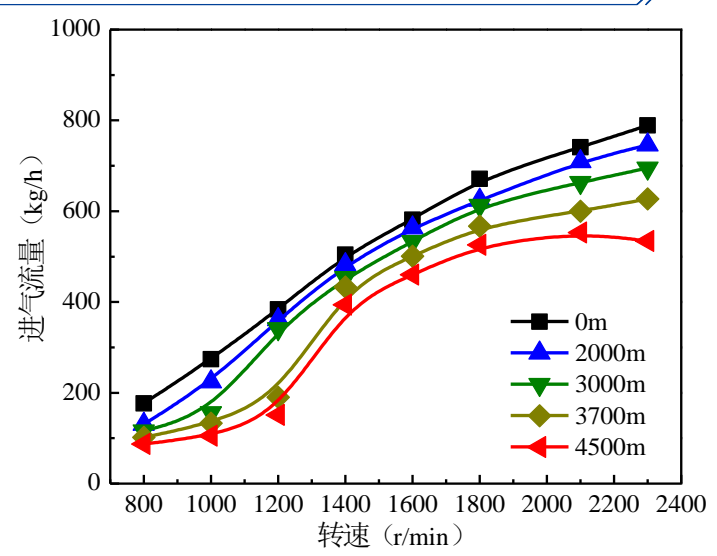
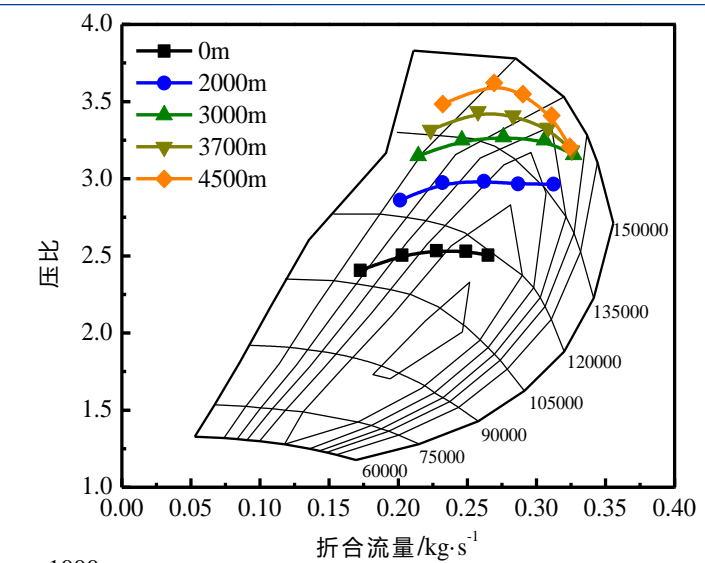
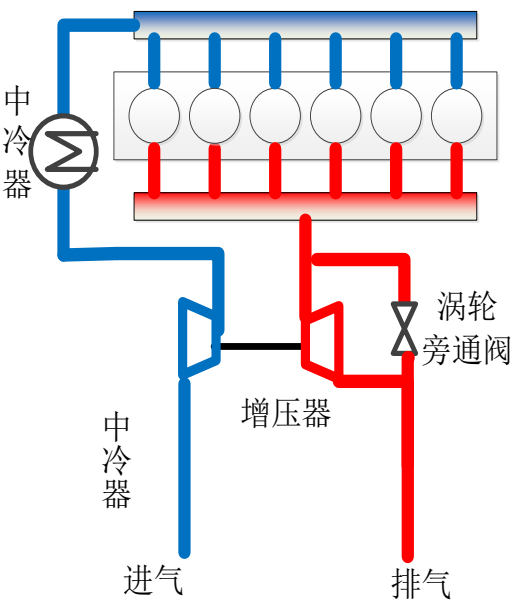
排气切换阀在1s时开启，0.1s后进气切换阀打开，两级相继增压系统各涡轮切换过程做功情况主要受排气能量变化及其在各支路分配的影响，排气能量在两支路的分配未出现明显的波动。

- 1** 研究背景
Background
- 2** 试验系统搭建
Experiment System
- 3** 多涡轮增压系统设计与控制
Multi-turbocharger system design and control
- 4** 增压系统变海拔适应能力
Altitude adaptability of turbocharger system
- 5** 结论
Conclusions



单级增压系统变海拔性能研究

Performance of 1stage Turbocharger System

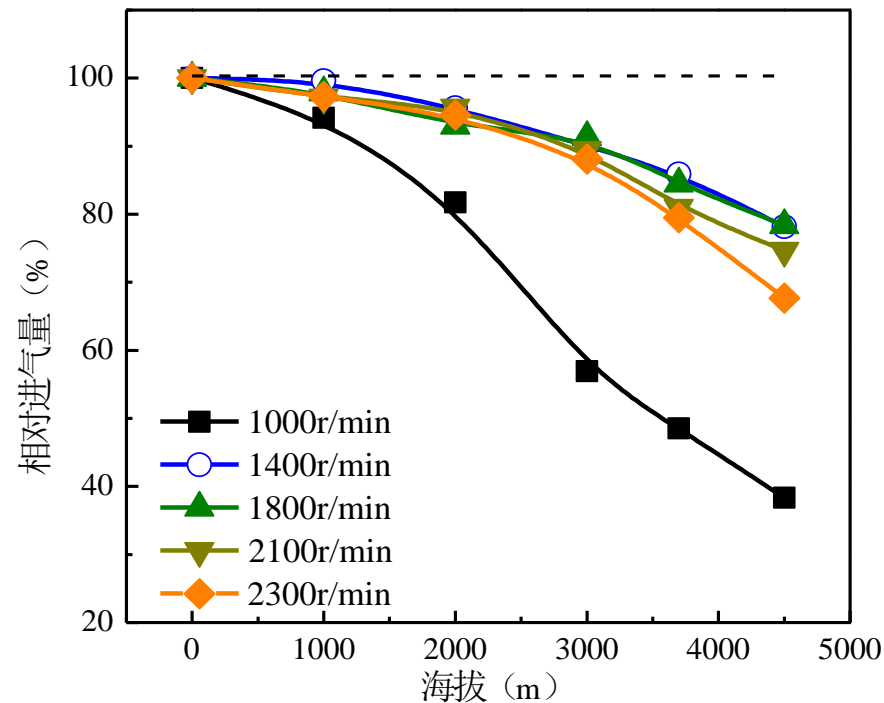
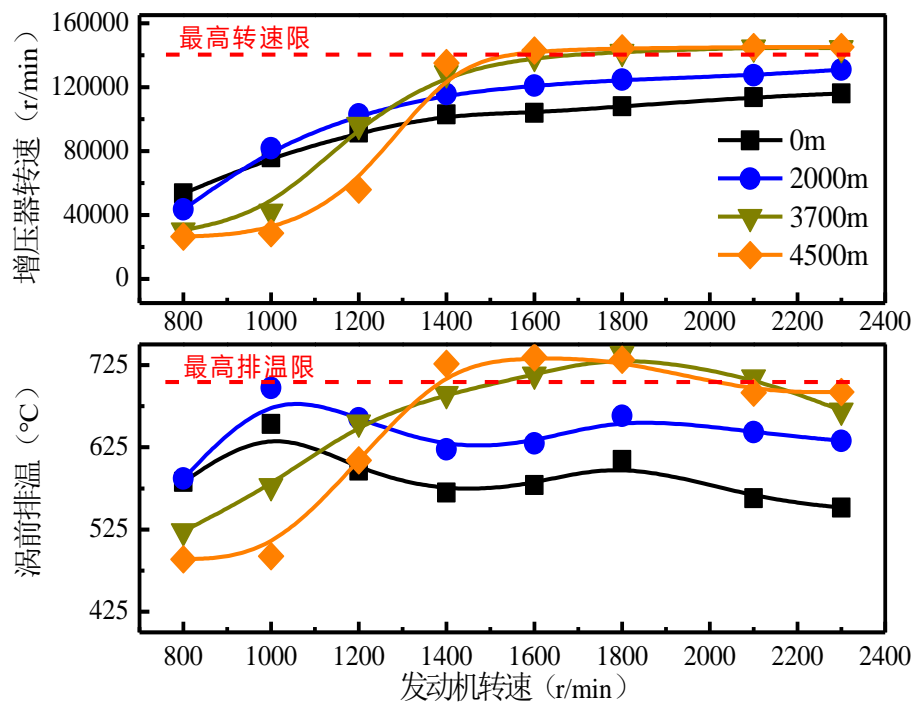


4500m 海拔

- 低速扭矩降低60%
- 中间转速降低7%
- 高速扭矩降低23%

单级增压系统变海拔性能研究

Performance of 1stage Turbocharger System



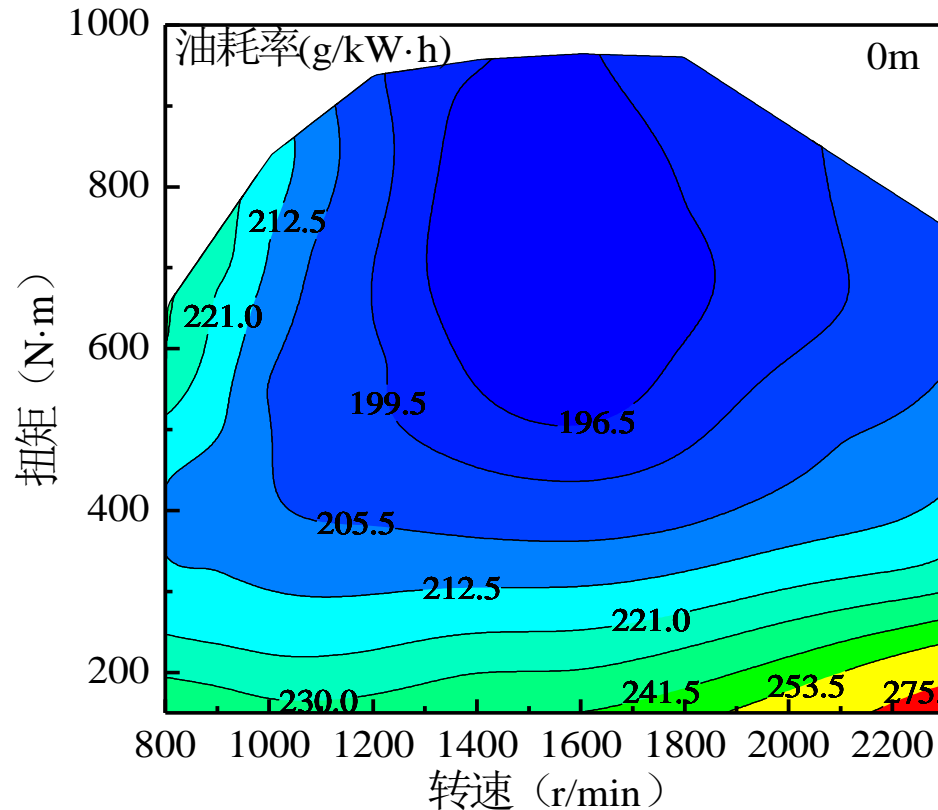
4500m海拔，中高转速工况下，增压器转速超速，排温升高约150°C，供油系统必须减少供油量。
随海拔升高，低速与高速工况进气量降幅增加。

单级增压系统变海拔性能研究

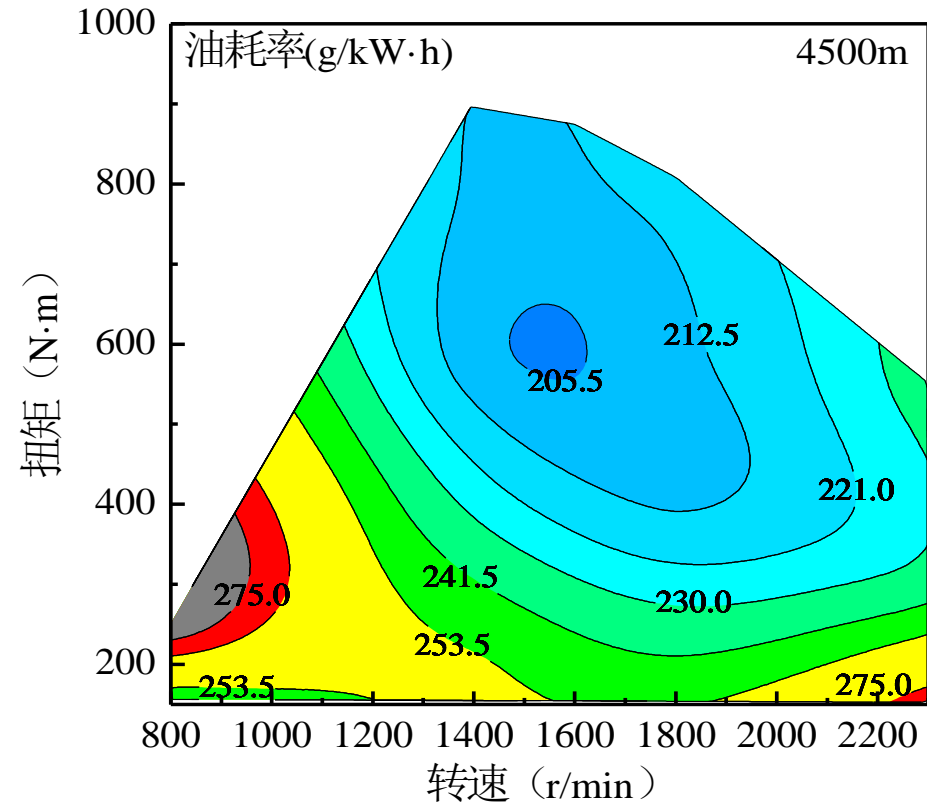
Performance of 1stage Turbocharger System



平原



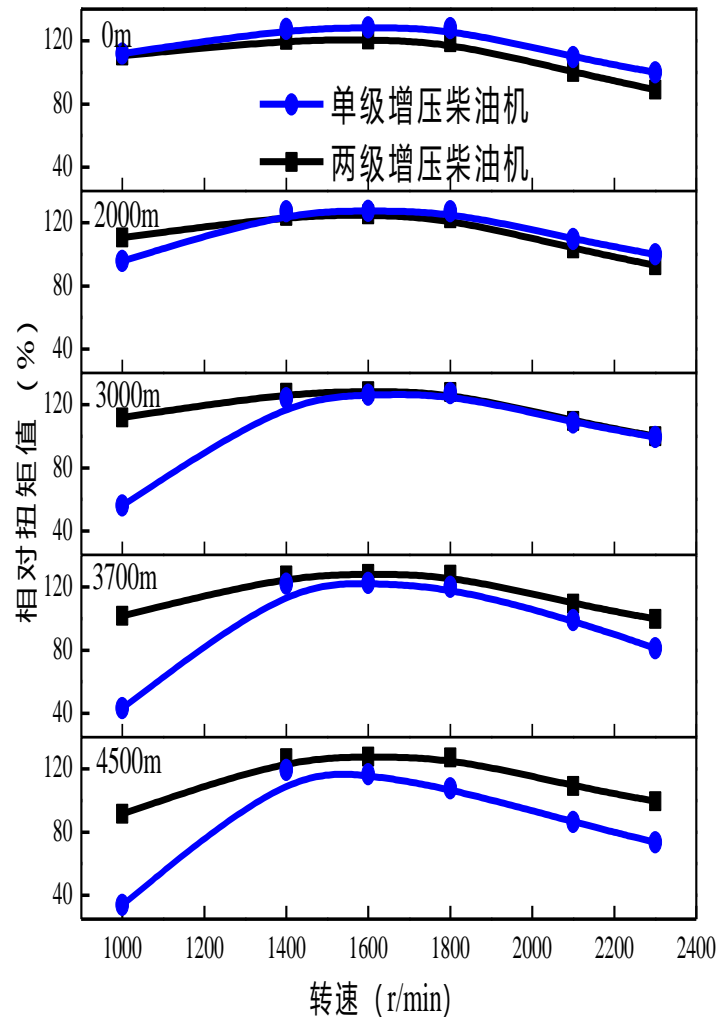
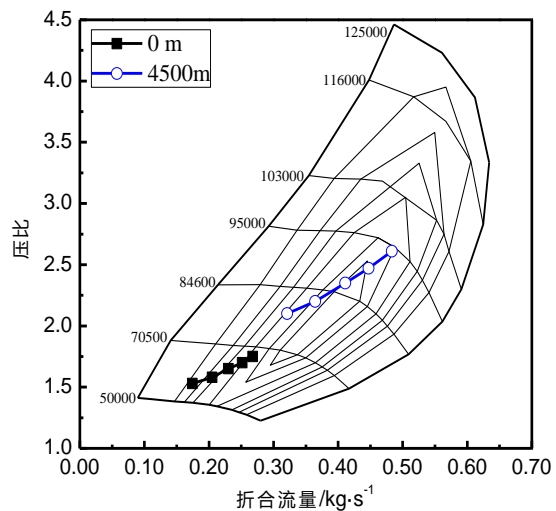
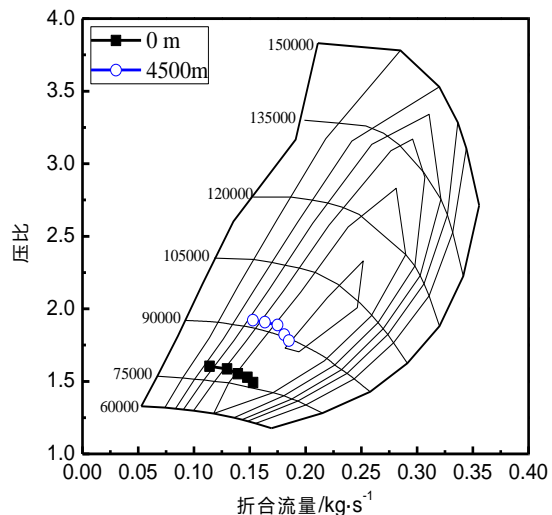
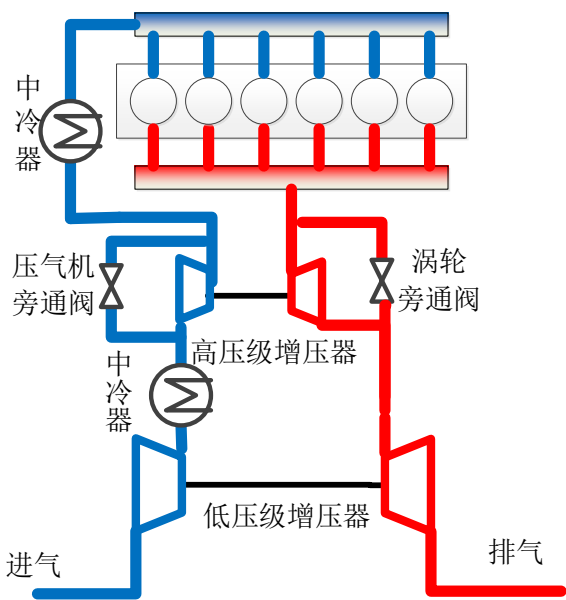
高原



单级增压系统，随海拔升高，最低油耗区域减小，并向高工况方向移动。
单级增压系统在高海拔下可用运行范围大幅缩小。

两级可调增压系统设计与控制

Design and Control of 2-stage Turbocharger System



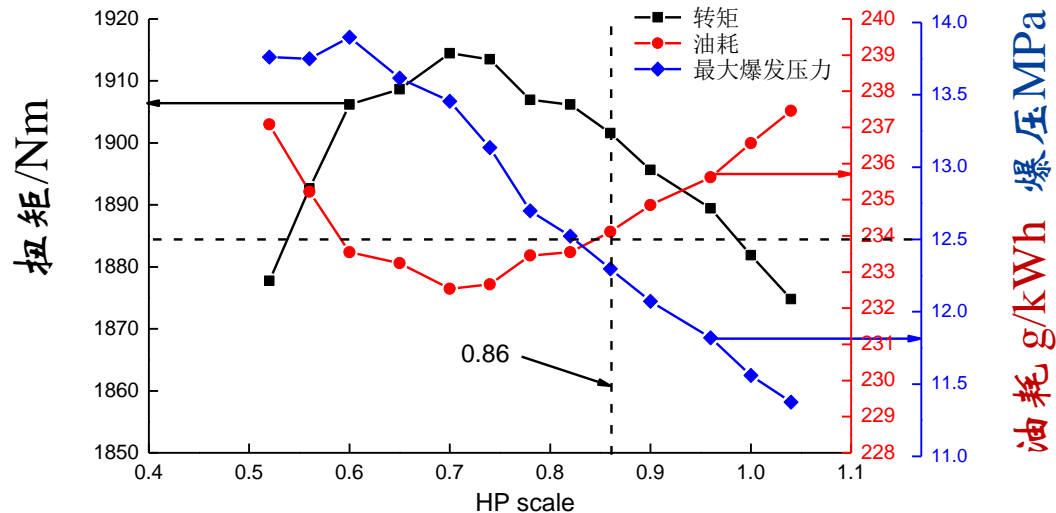
- 4500m 海拔
- 低速扭矩提升45%
 - 中间转速提升7%
 - 高速扭矩降低20%

两级可调增压系统设计与控制

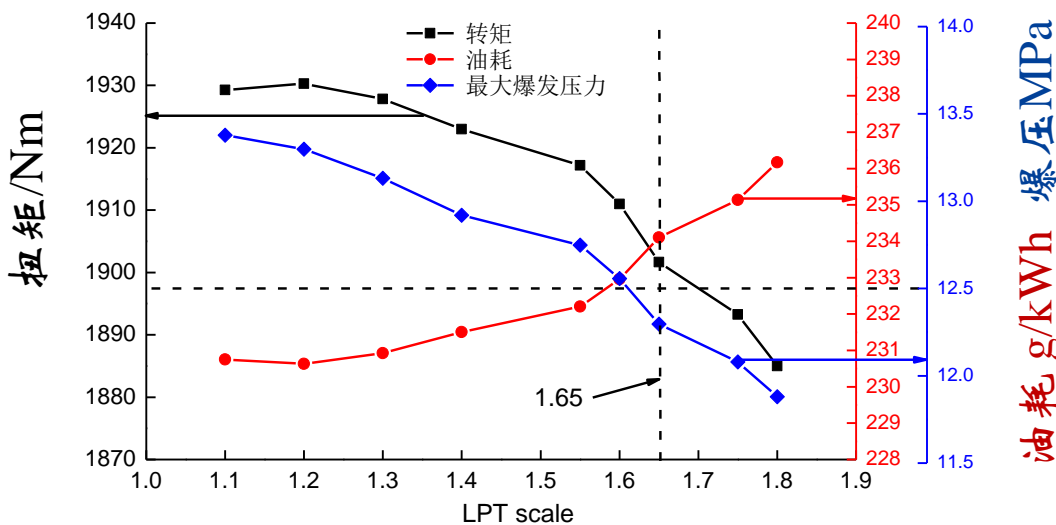
Design and Control of 2-stage Turbocharger System

增压系统	Scale系数
高压级压气机	J93
高压级涡轮	0.52→1.04
低压级压气机	J119
低压级涡轮	1.6

增压系统	Scale系数
高压级压气机	J93
高压级涡轮	0.86
低压级压气机	J119
低压级涡轮	1.1→1.8



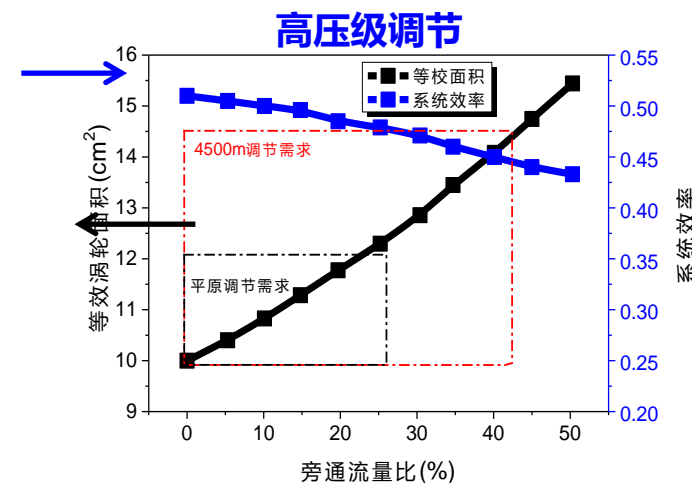
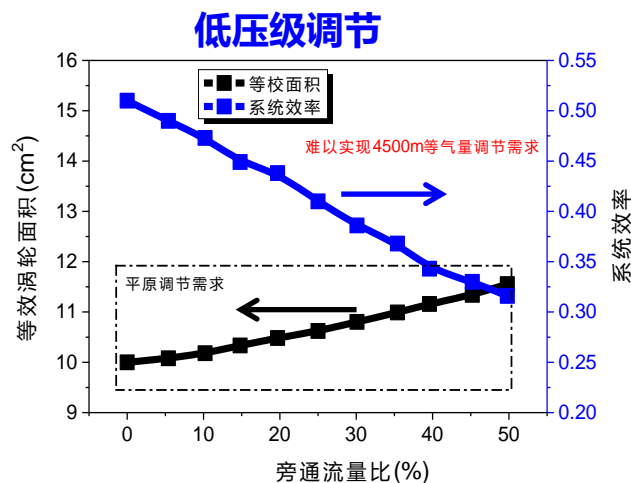
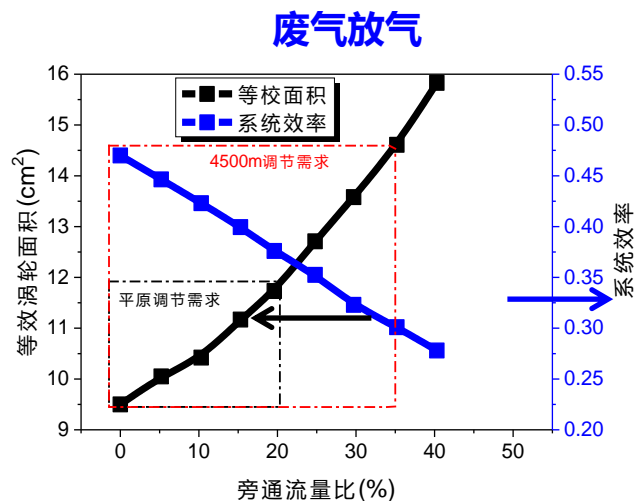
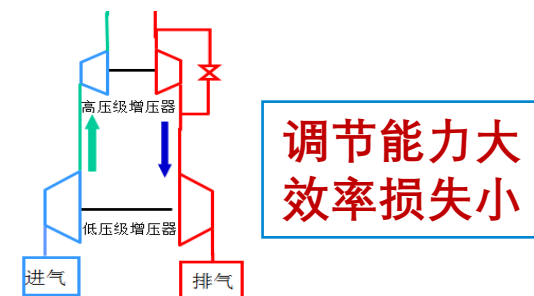
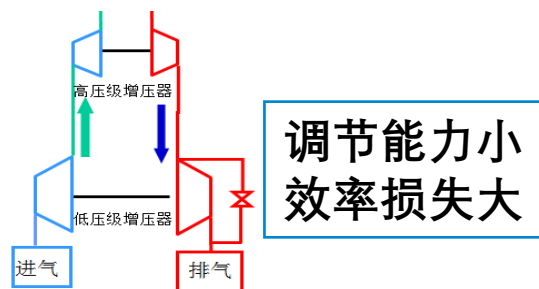
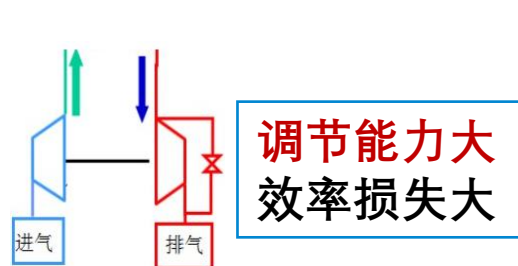
高压级涡轮选配



低压级涡轮选配

两级可调增压系统设计与控制

Design and Control of 2-stage Turbocharger System



不同分支路径系统效率下降5%范围

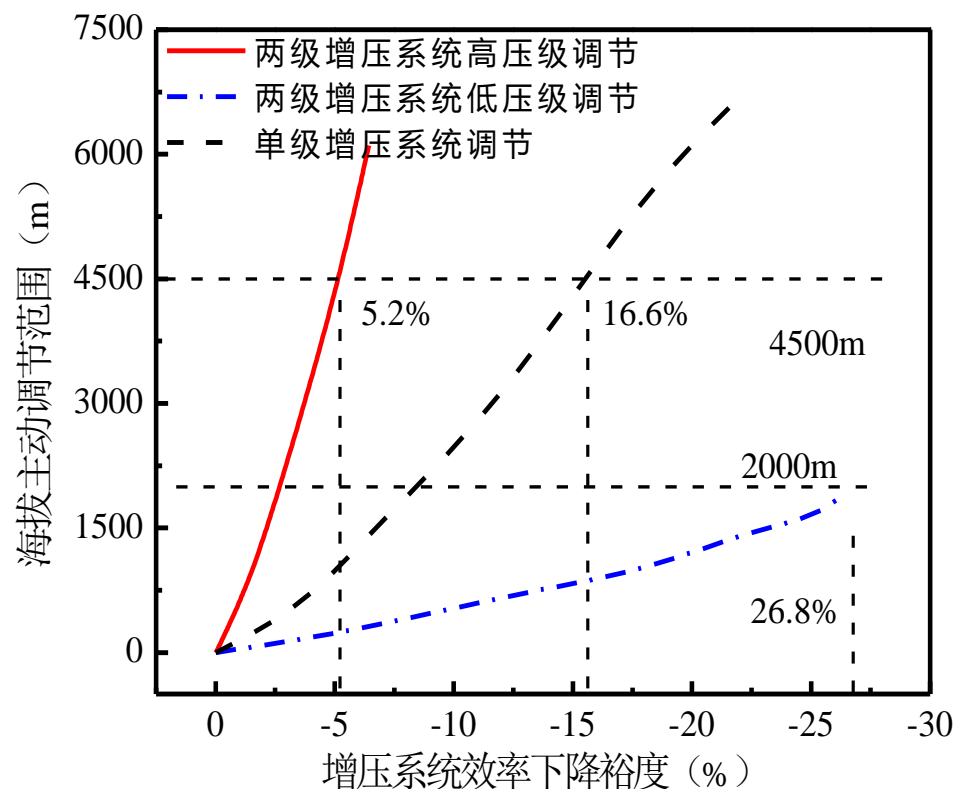
等效面积调节量
10.5%

等效面积调节量
2%

等效面积调节量
54%

两级可调增压系统设计与控制

Design and Control of 2-stage Turbocharger System

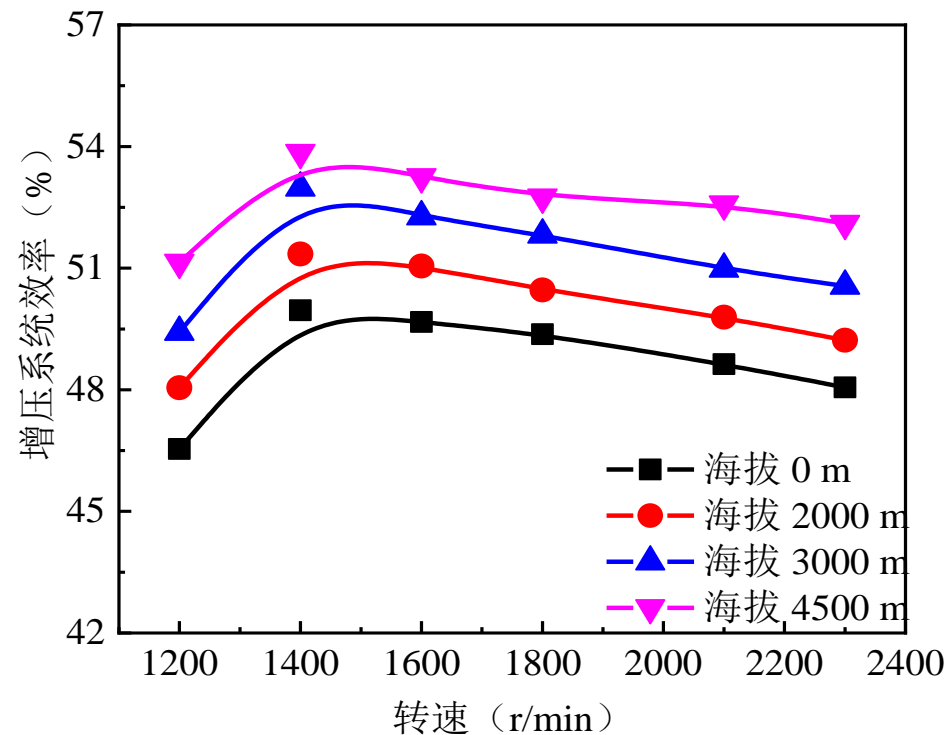
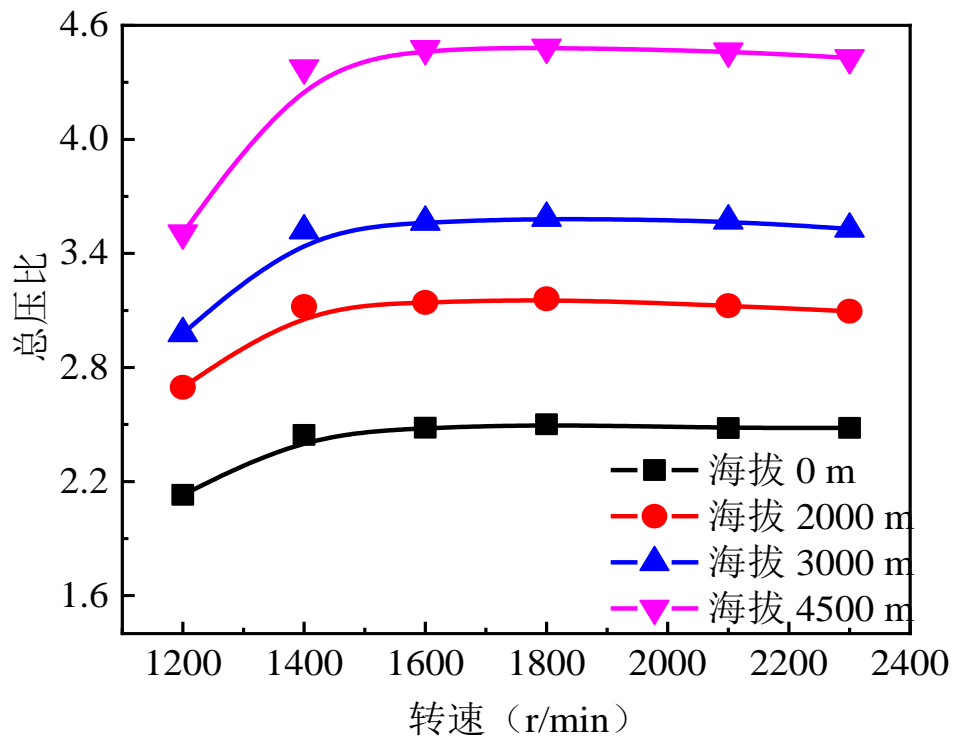


高压级调节方式的海拔调节能力最强，低压级调节方式的海拔调节能力最弱；

高压级旁通海拔调节引起的效率降幅最小，低压级旁通海拔调节引起的效率降幅最大。

两级可调增压系统设计与控制

Design and Control of 2-stage Turbocharger System

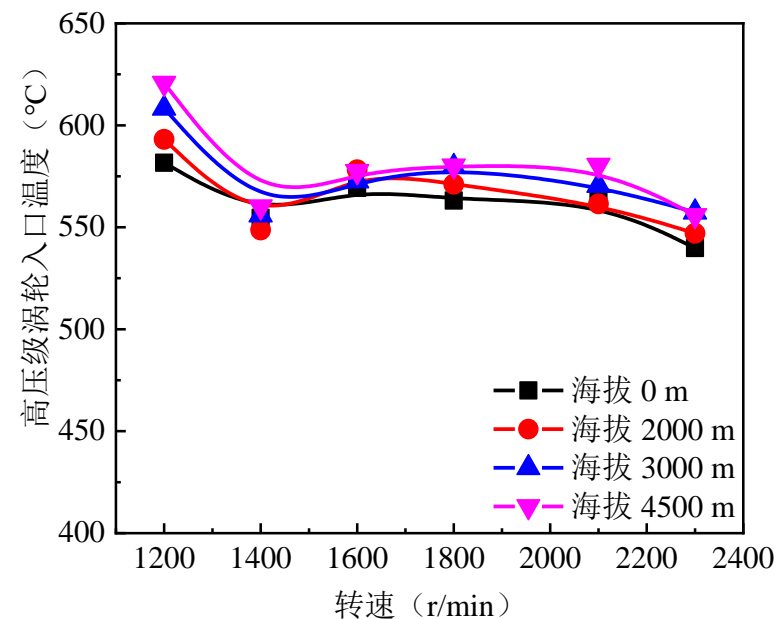
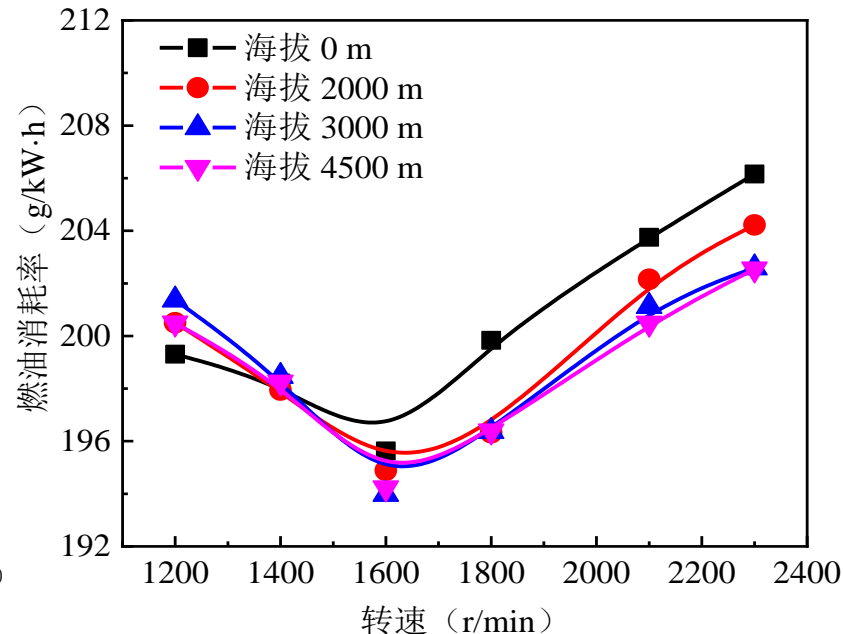
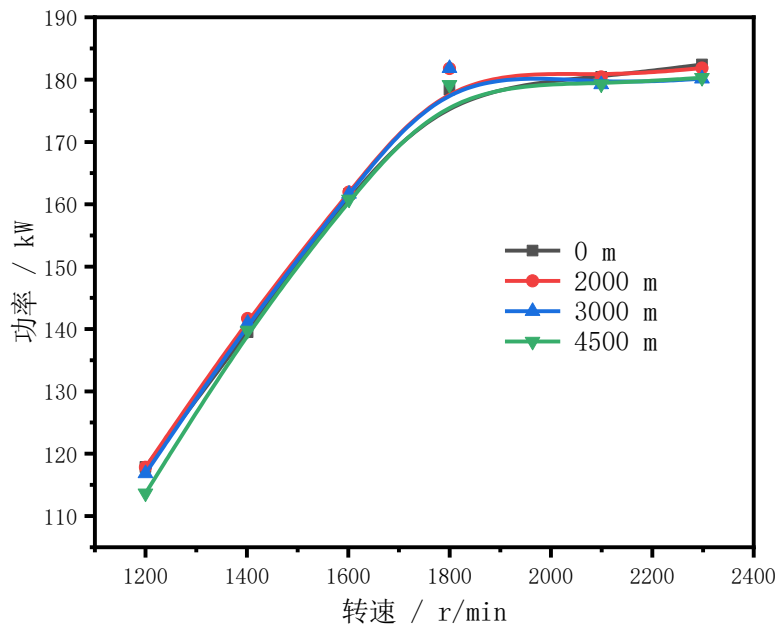


随海拔升高，柴油机增压系统压比大幅提升，以满足高原条件高压比需求。

随海拔降低，增压系统效率降低，主要是由于高压级放气造成的。

两级可调增压系统设计与控制

Design and Control of 2-stage Turbocharger System

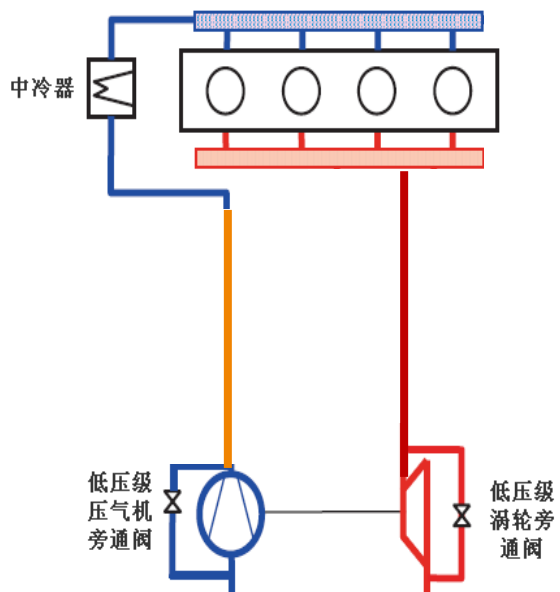


两级可调增压系统：

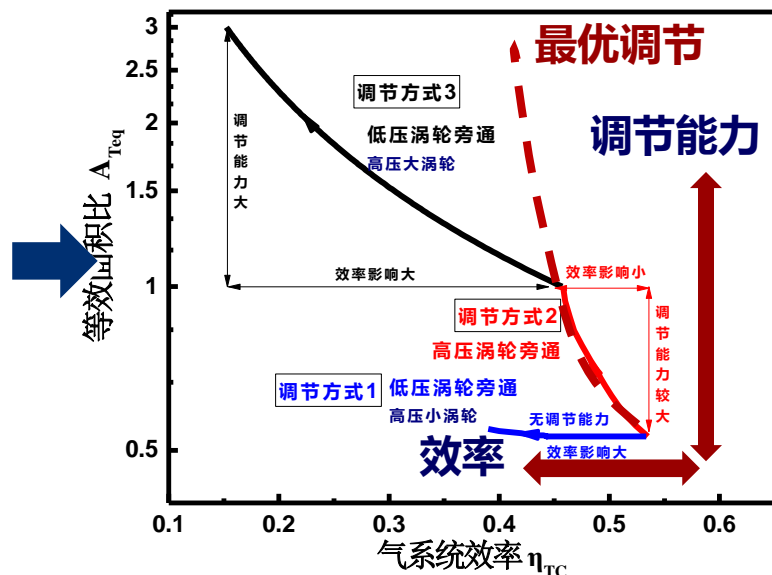
0-4500m海拔变化，整机功率基本不变，油耗略有变化，排温变化小于30°C。

两级可调增压系统设计与控制

Design and Control of 2-stage Turbocharger System

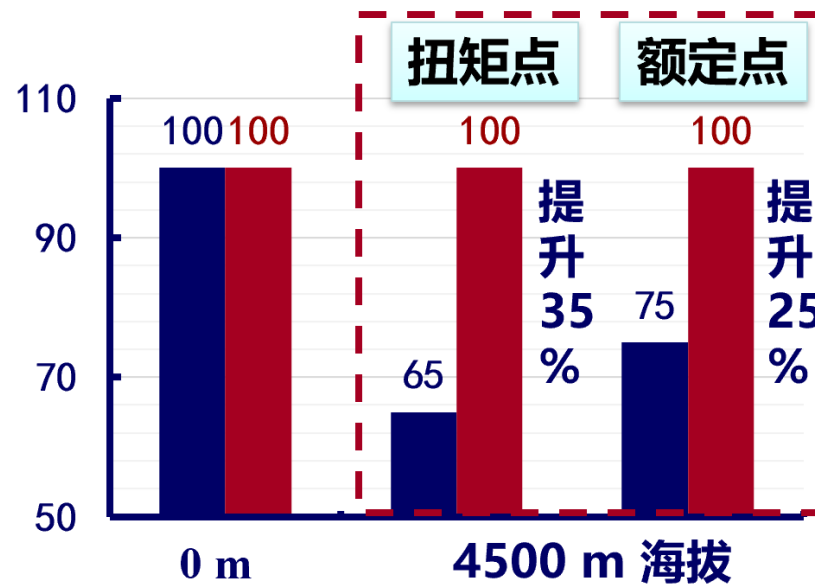


多涡轮耦合系统设计



大跨度高效调节方法

功率百分比 %

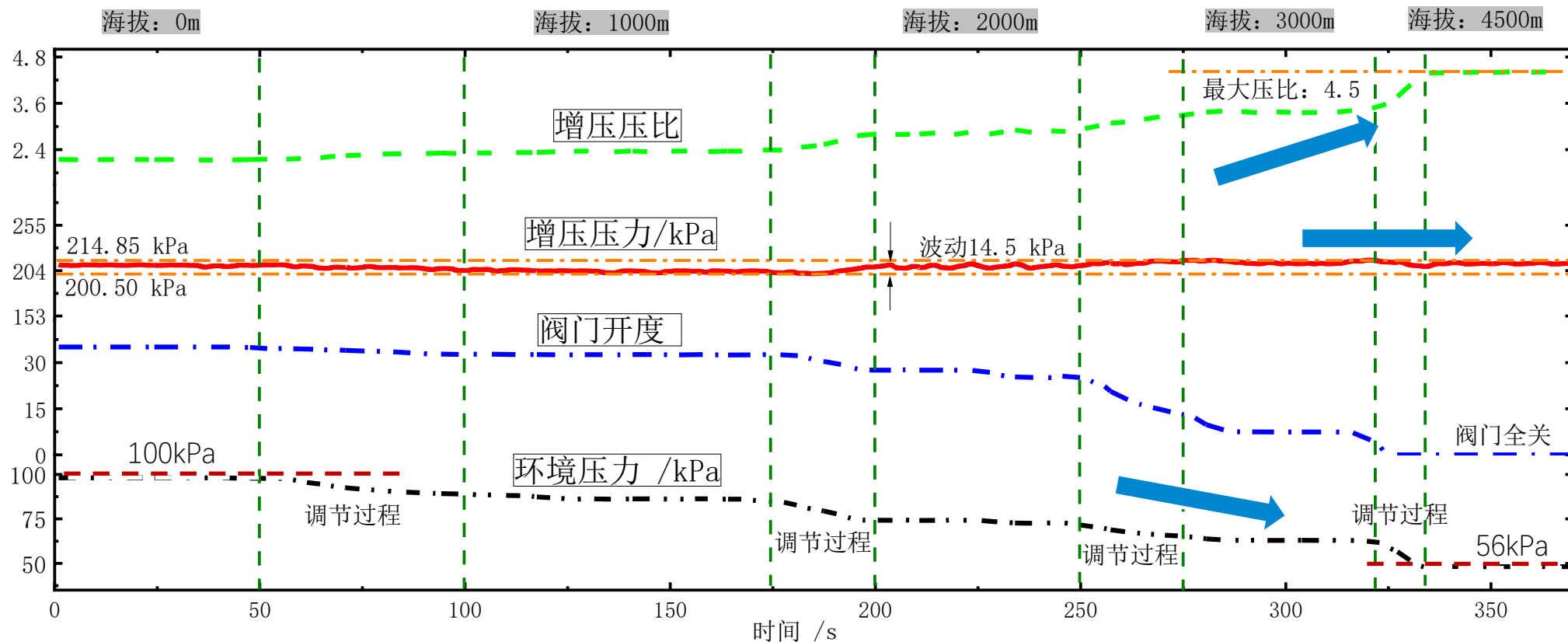


4500m 海拔:
达到了100%功率恢复

- 建立了级间能量分配的多涡轮增压系统等效模型
- 解决了调节能力、增压系统效率多参数耦合匹配难题

两级可调增压系统设计与控制

Design and Control of 2-stage Turbocharger System



增压压比：
2增至4.5

增压压力变
化 < 2kPa

环境压力下
降 44kPa

□ 通过两级增压控制，可以实现变海拔增压压力随海拔基本不变的目标

- 1** 研究背景
Background
- 2** 试验系统搭建
Experiment System
- 3** 多涡轮增压系统设计与控制
Multi-turbocharger system design and control
- 4** 增压系统变海拔适应能力
Altitude adaptability of turbocharger system
- 5** 结论
Conclusions



结论 Conclusions



- 多涡轮增压系统可以显著扩宽流量与压比范围。
- 多增压器解耦控制可以提升稳态与瞬态控制效果，增压器切换控制受阀门延迟时间影响。
- 增压系统压比决定了发动机最高海拔工作能力，涡轮能量调节水平决定了发动机变海拔适应能力。

Thanks for your attention!

