



变海拔内燃机增压系统设计与控制技术研究
Turbocharger system design and control of diesel
engine at variable altitude conditions

石磊

2021年4月24日

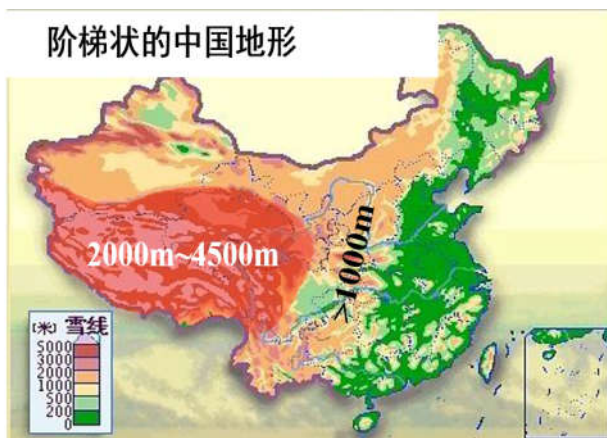


上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

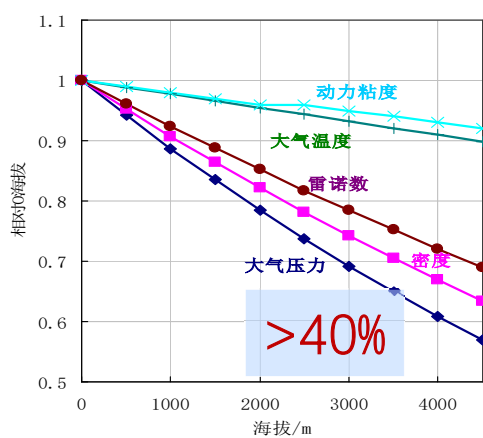
- 1** 研究背景
Background
- 2** 试验系统搭建
Experiment System
- 3** 单级增压系统变海拔性能研究
Performance of 1-stage Turbocharger System
- 4** 两级可调增压系统设计与控制
Design and Control of 2-stage Turbocharger System
- 5** 结论
Conclusions



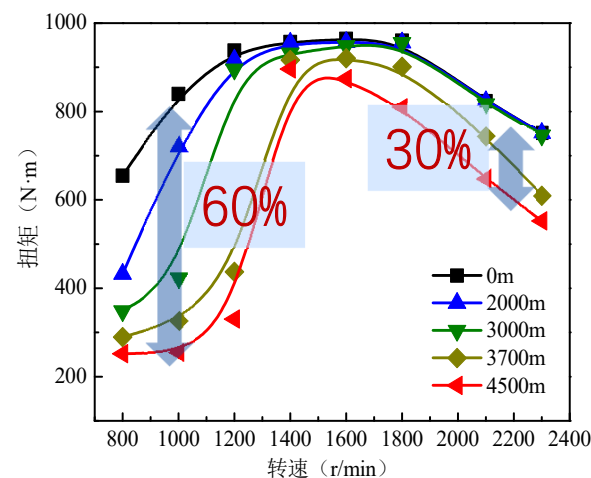
研究背景-Background



海拔变化范围大



进气密度大幅降低



性能下降



可靠性差

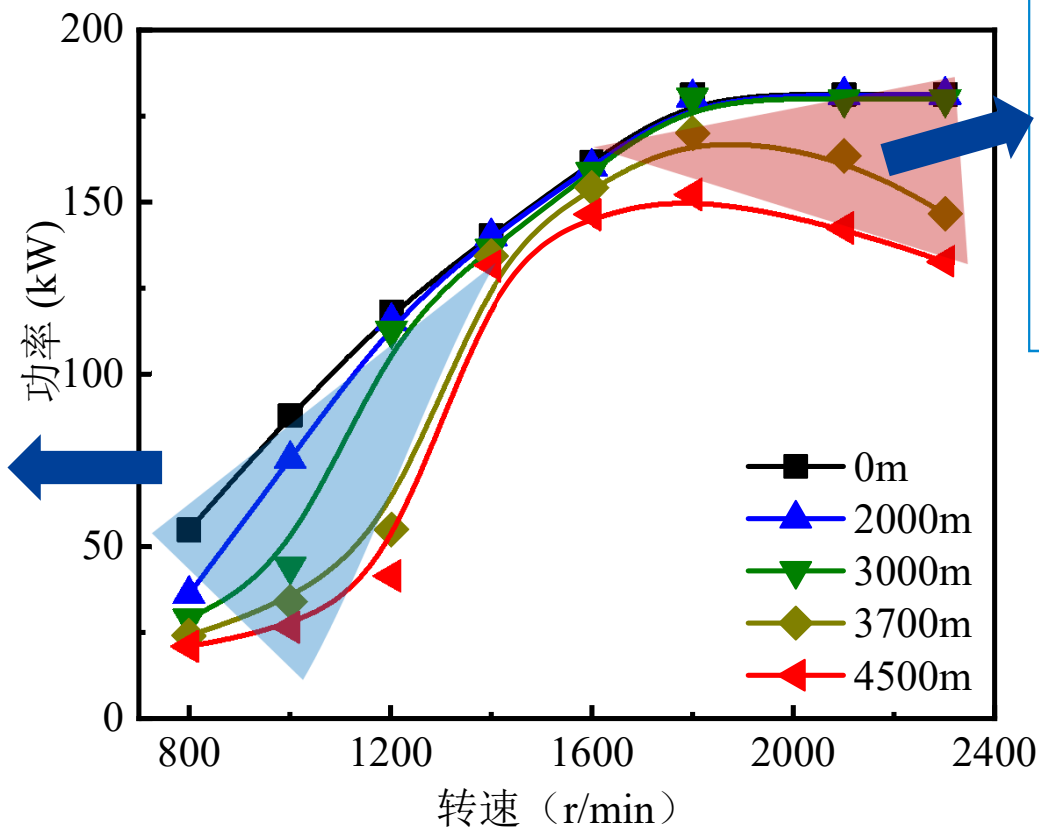
柴油机变海拔使用存在进气量不足、功率下降大、热负荷高、可靠性差等问题，实现变海拔兼顾的难度更大，柴油机存在“高原反应”+“平原反应”。

研究背景-Background

增压是影响柴油机变海拔性能的关键因素

提高压比

低转速下，排气能量不足导致增压压力降低，功率大幅下降，800r/min降幅约54%

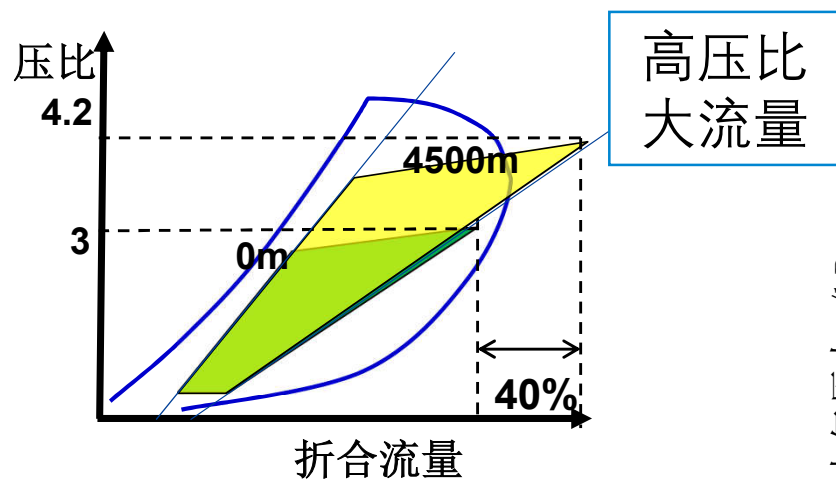


高转速下，增压系统效率降低、增压器超速限制，功率大幅下降，2300r/min降幅26%

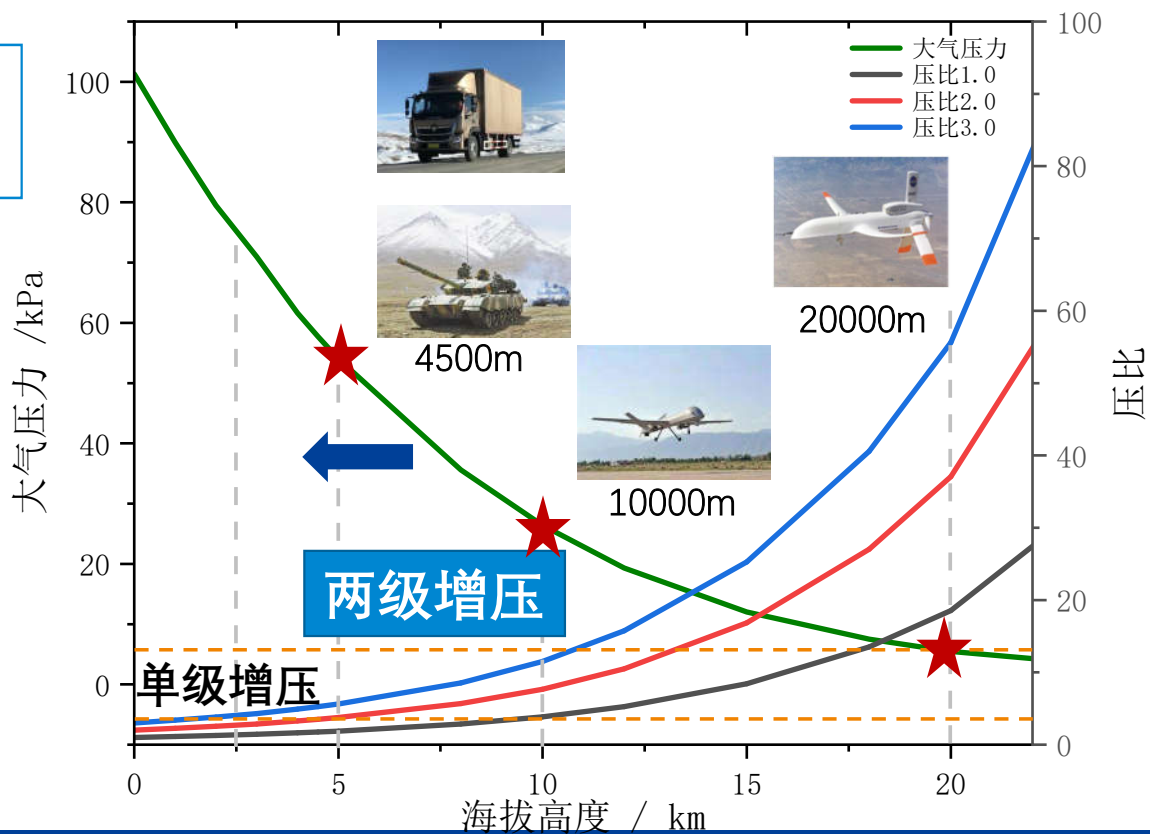
扩展流量

研究背景-Background

不同海拔发动机应对措施---功率密度与海拔高度



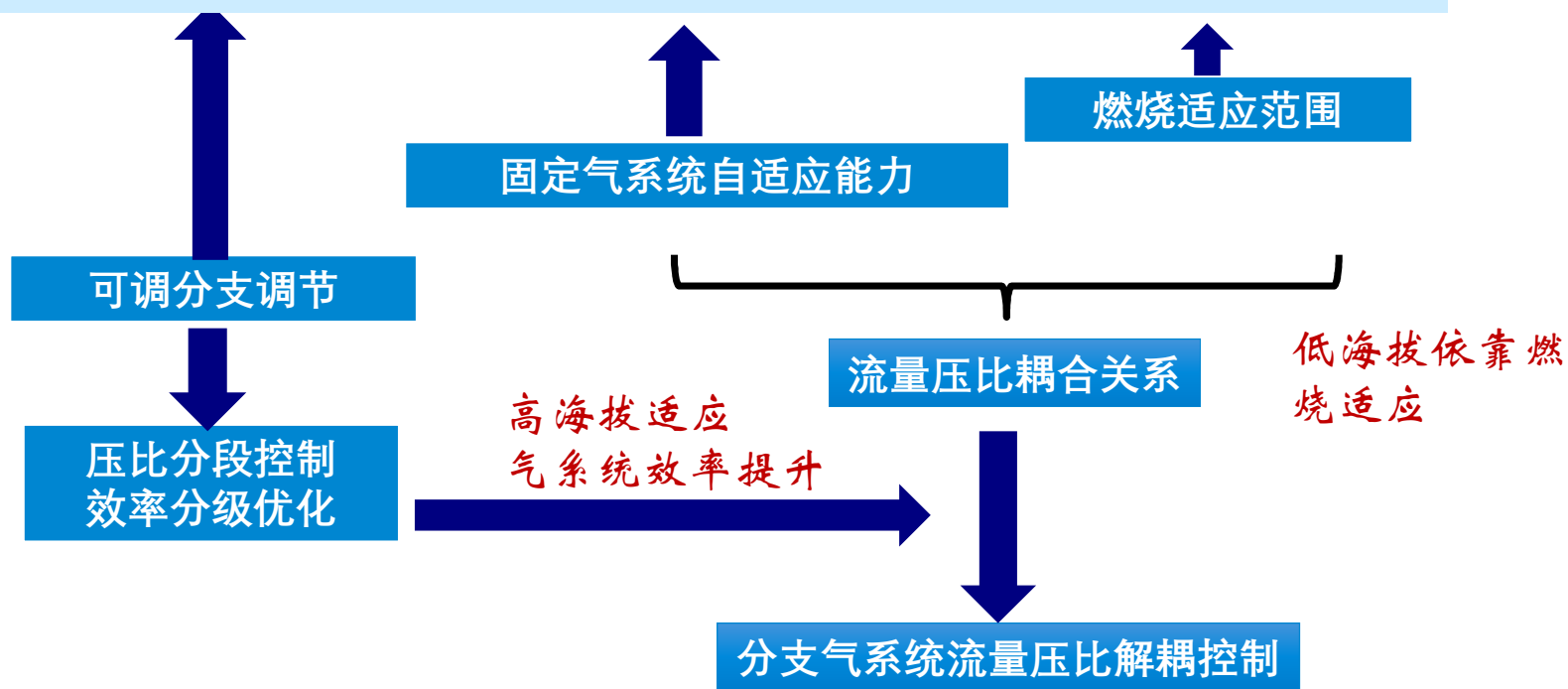
- 飞行高度25900m
- 采用三级涡轮增压
- 总压比**大于64**



研究背景-Background

变海拔柴油机适应能力评估

$$\Delta H = H_{regulation} + H_{Charging-adaption} + H_{Combustion-adaption}$$





研究背景-Background



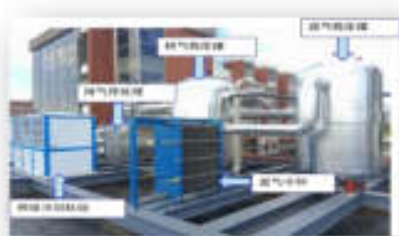
变海拔增压系统需求

- 高压比 ➡ 最高海拔适应能力
- 宽流量 ➡ 变海拔适应能力
- 大调节范围 ➡ 上的去+下的来
- 自适应控制 ➡ 减少标定工作量

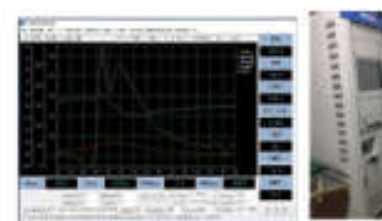
- 1** 研究背景
Background
- 2** 试验系统搭建
Experiment System
- 3** 单级增压系统变海拔性能研究
Performance of 1-stage Turbocharger System
- 4** 两级可调增压系统设计与控制
Design and Control of 2-stage Turbocharger System
- 5** 结论
Conclusions



试验系统搭建 Experiment System



可控模式增压系统



0.5bar 低压进气
-35°C 低温进气
环境模拟

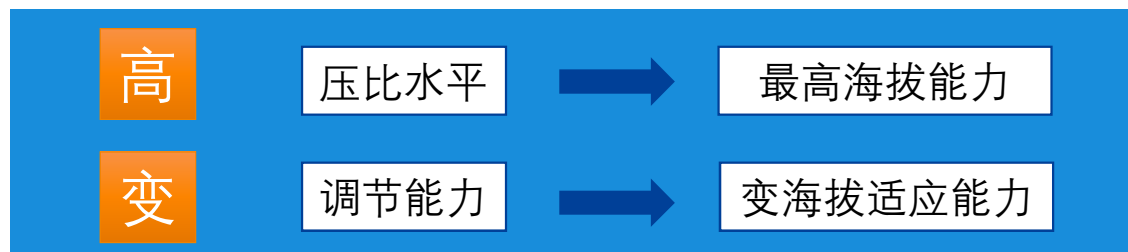
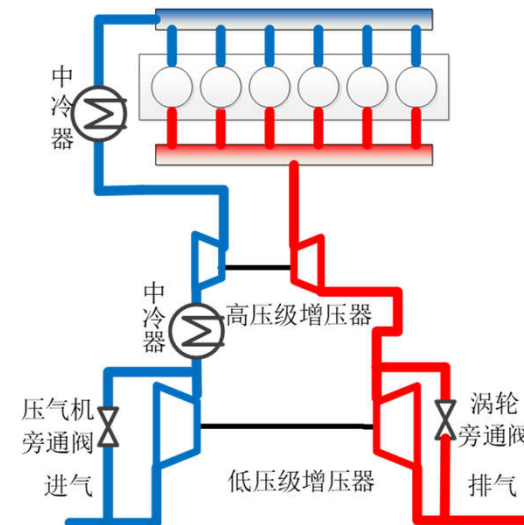
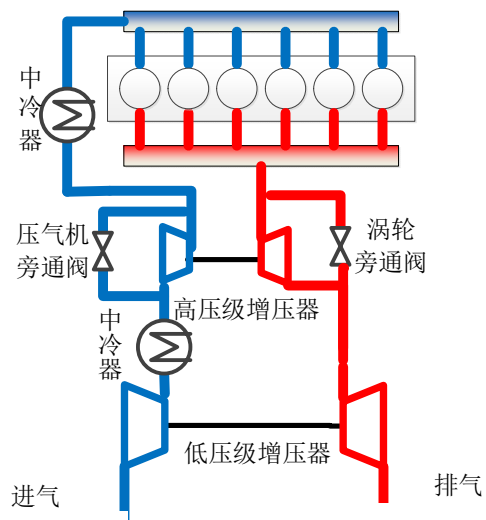
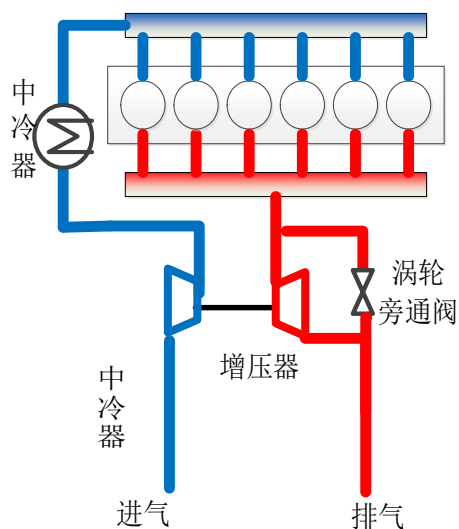
基于模型
增压控制



瞬态测功系统

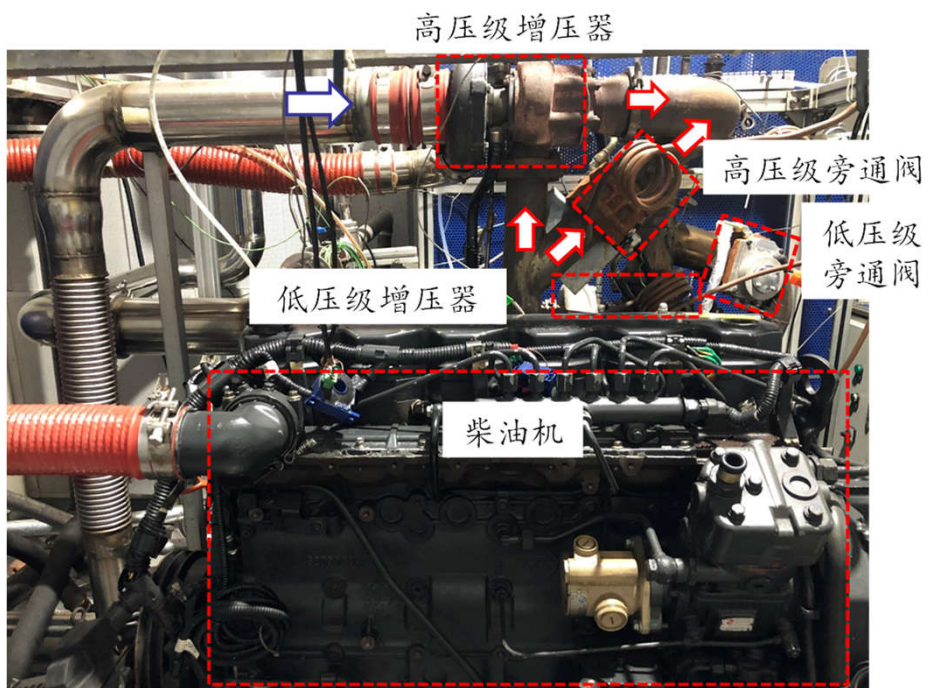
- 压力:
0.5~1 bar
(0~4500m)
- 温度:
-35~30 °C
- 流量:
1300 kg/h (300L/s)
- 压力控制精度:
±1kPa

试验系统搭建 Experiment System

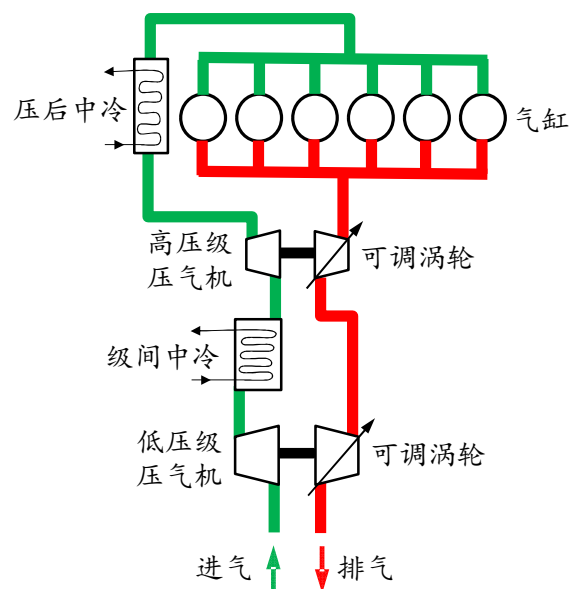


试验系统搭建 Experiment System

变海拔增压系统设计

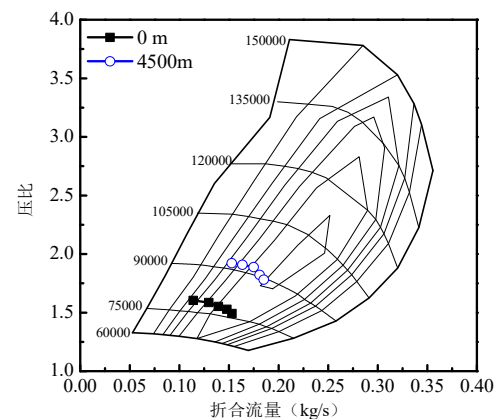


两级增压柴油机

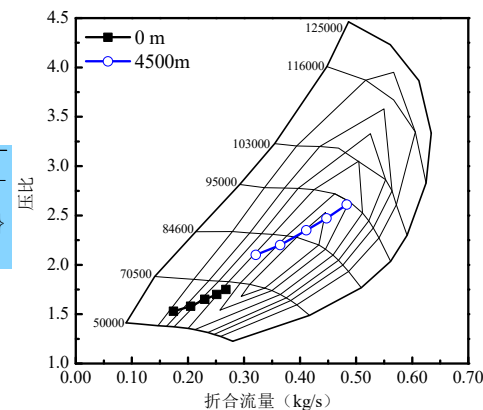


$$A_{T,S} = \frac{\dot{m}_T}{P_0} \sqrt{\frac{RT_T (\kappa_T - 1)}{2\kappa_T \left\{ \left[1 - \frac{KT_0}{T_T \eta_{TC}} \left(\pi_c^{(\kappa_c - 1)/\kappa_c} - 1 \right) \right]^{\frac{2\kappa_T - 1}{1 - \kappa_T}} - \left[1 - \frac{KT_0}{T_T \eta_{TC}} \left(\pi_c^{(\kappa_c - 1)/\kappa_c} - 1 \right) \right]^{\frac{3\kappa_T - 1}{2(1 - \kappa_T)}} \right\}}$$

高压级GT35增压器

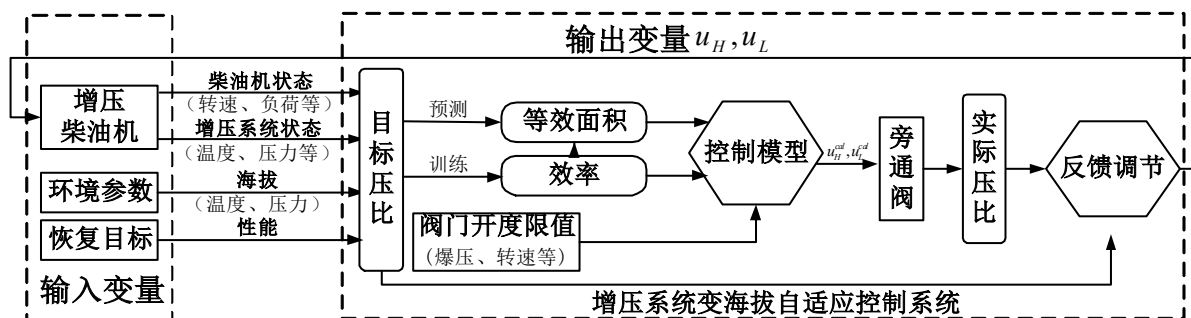
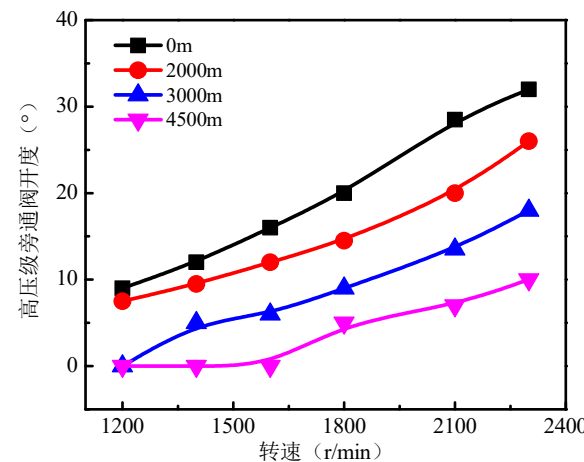
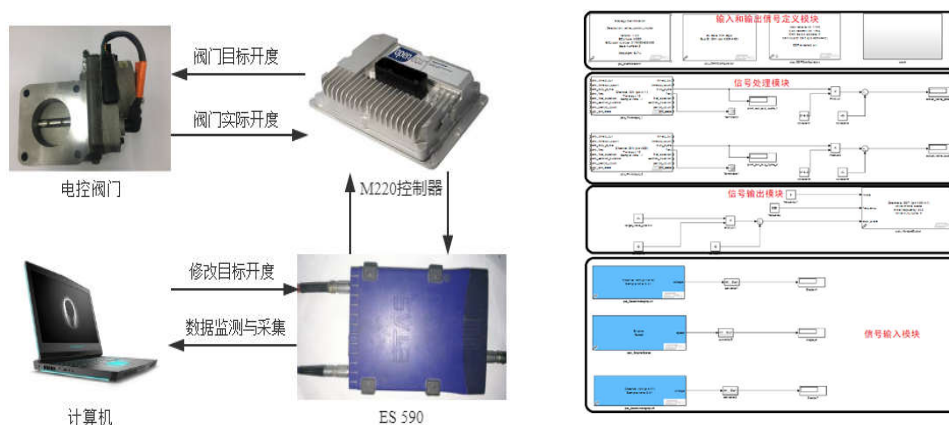
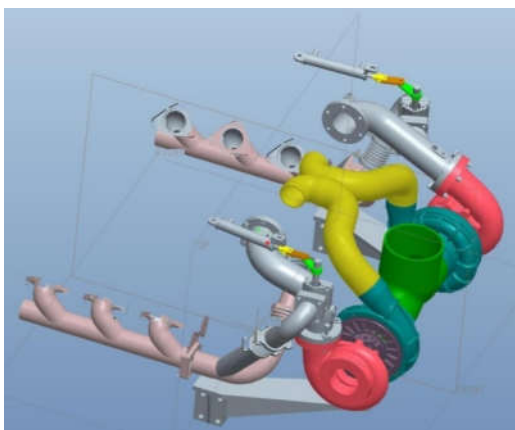


低压级GT40增压器



建立了等效增压系统模型，实现多涡轮增压器匹配。

试验系统搭建 Experiment System



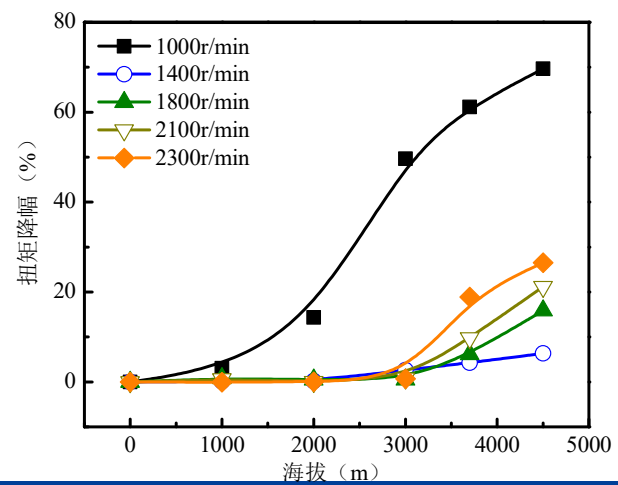
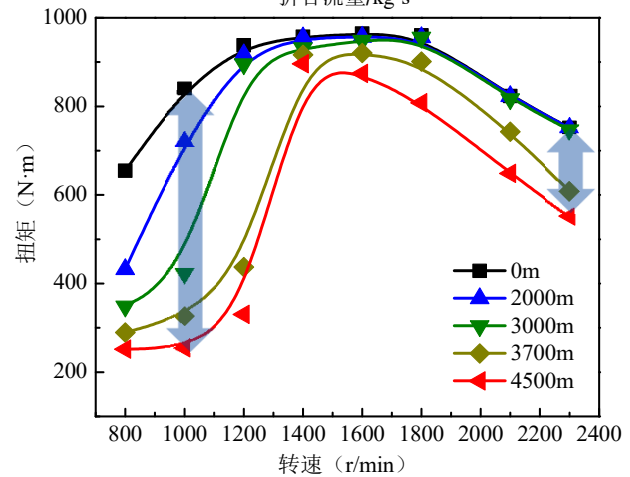
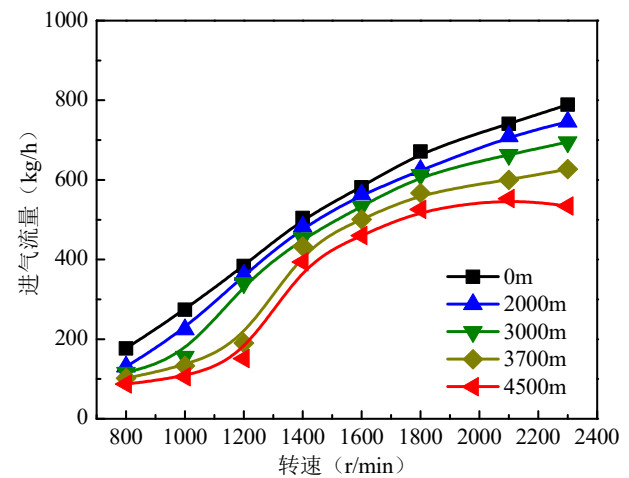
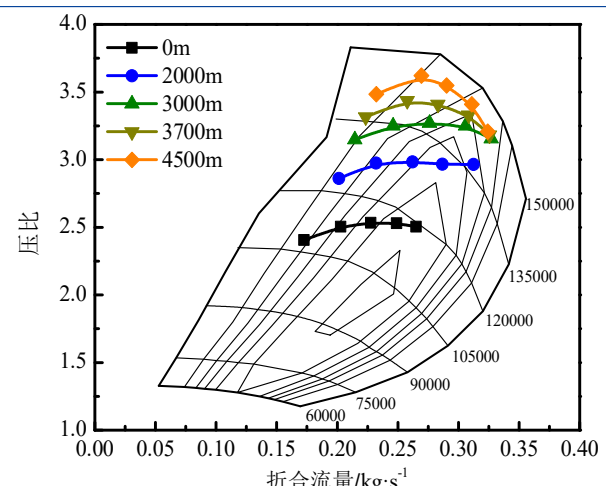
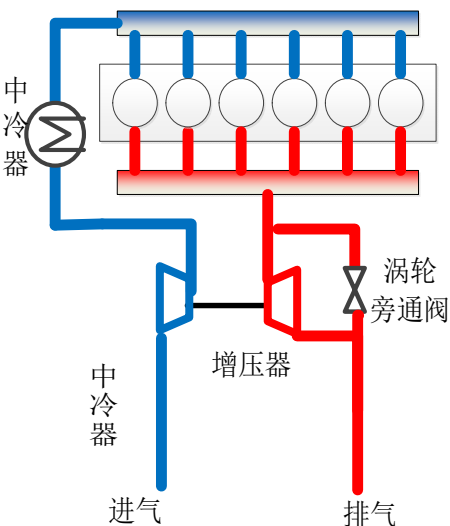
基于模型的变海拔增压系统控制系统

- 1** 研究背景
Background
- 2** 试验系统搭建
Experiment System
- 3** 单级增压系统变海拔性能研究
Performance of 1-stage Turbocharger System
- 4** 两级可调增压系统设计与控制
Design and Control of 2-stage Turbocharger System
- 5** 结论
Conclusions



单级增压系统变海拔性能研究

Performance of 1stage Turbocharger System

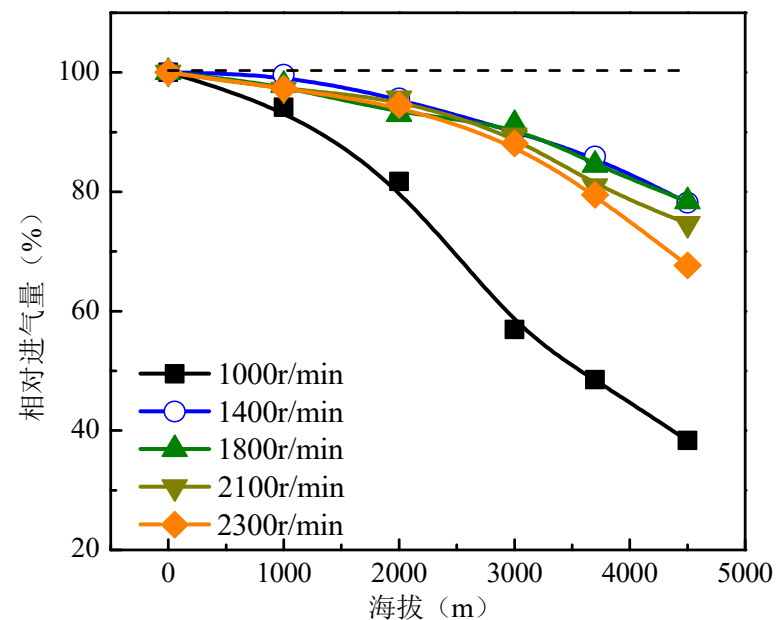
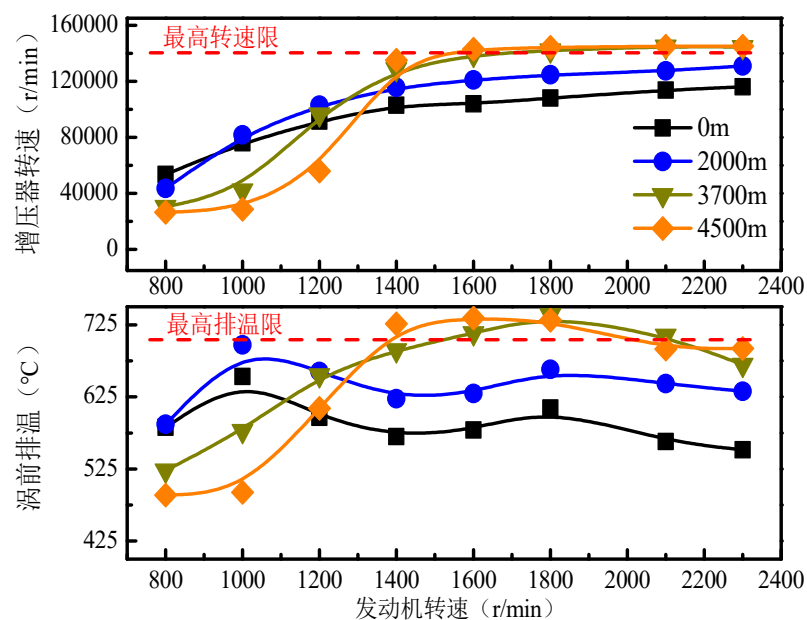


4500m 海拔

- 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



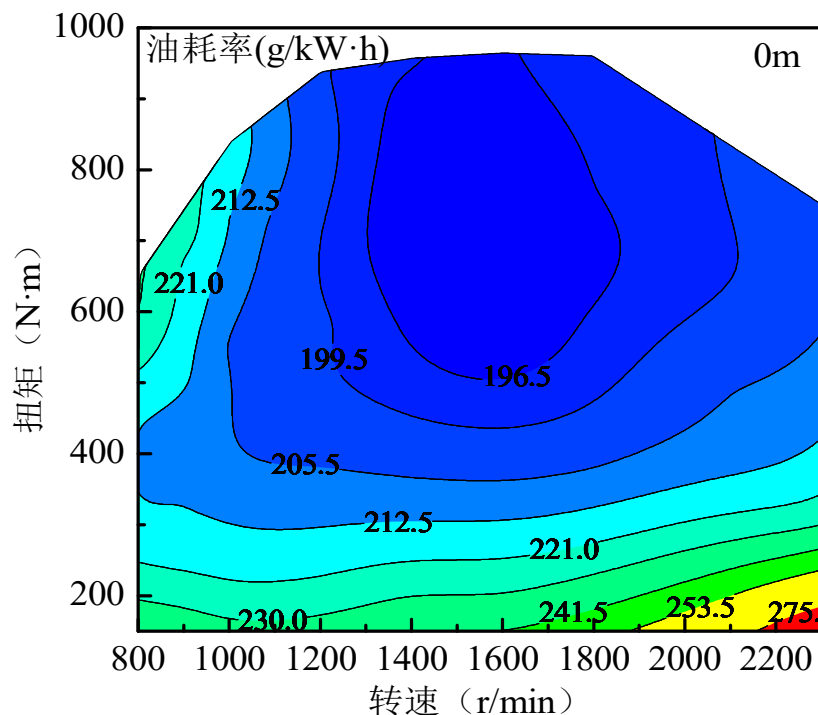
4500m海拔，中高转速工况下，增压器转速超速，排温升高约150°C，供油系统必须减少供油量。
随海拔升高，低速与高速工况进气量降幅增加。

单级增压系统变海拔性能研究

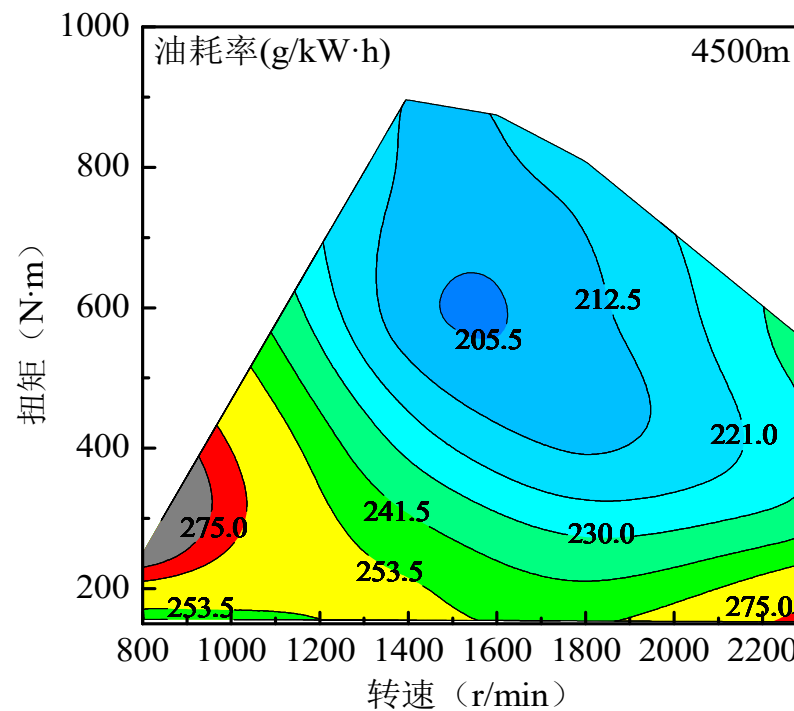
Performance of 1stage Turbocharger System



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。

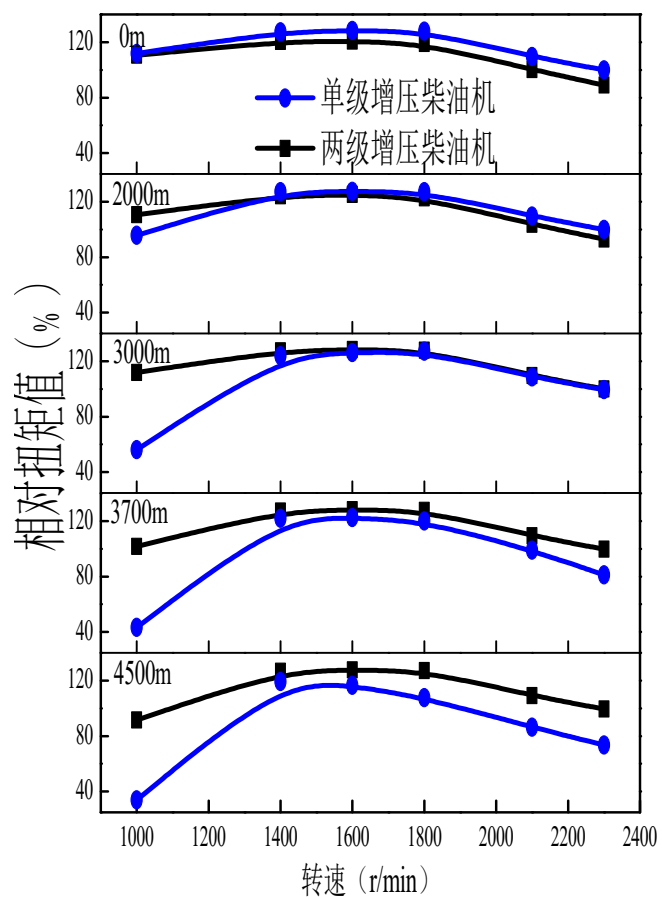
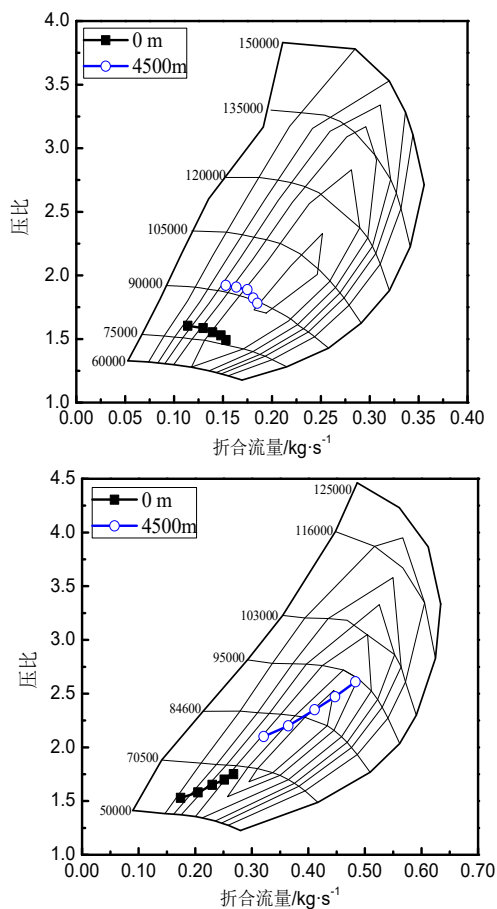
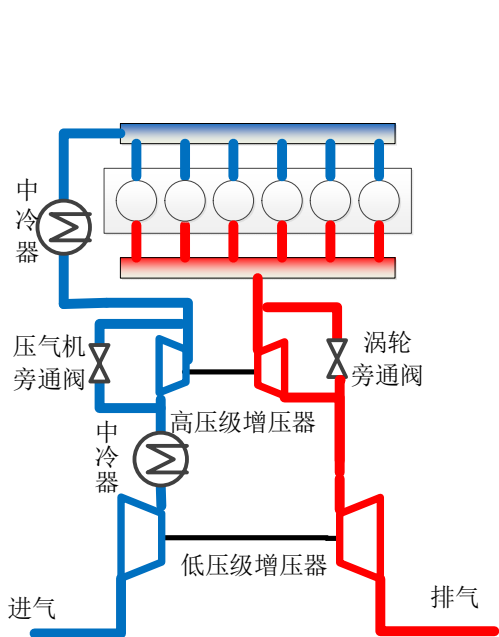
单级增压系统在高海拔下可用运行范围大幅缩小。

- 1** 研究背景
Background
- 2** 试验系统搭建
Experiment System
- 3** 单级增压系统变海拔性能研究
Performance of 1-stage Turbocharger System
- 4** 两级可调增压系统设计与控制
Design and Control of 2-stage Turbocharger System
- 5** 结论
Conclusions



两级可调增压系统设计与控制

Design and Control of 2-stage Turbocharger System



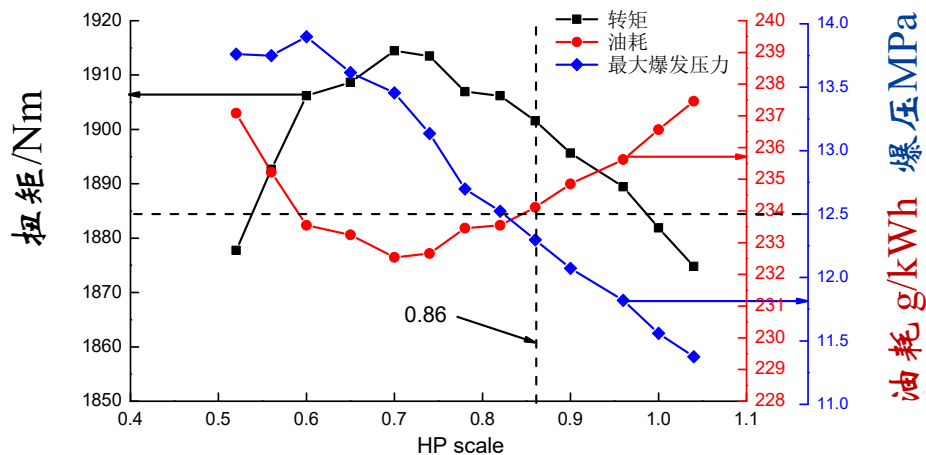
- 4500m 海拔
- 低速扭矩提升45%
 - 中间转速提升7%
 - 高速扭矩降低20%

两级可调增压系统设计与控制

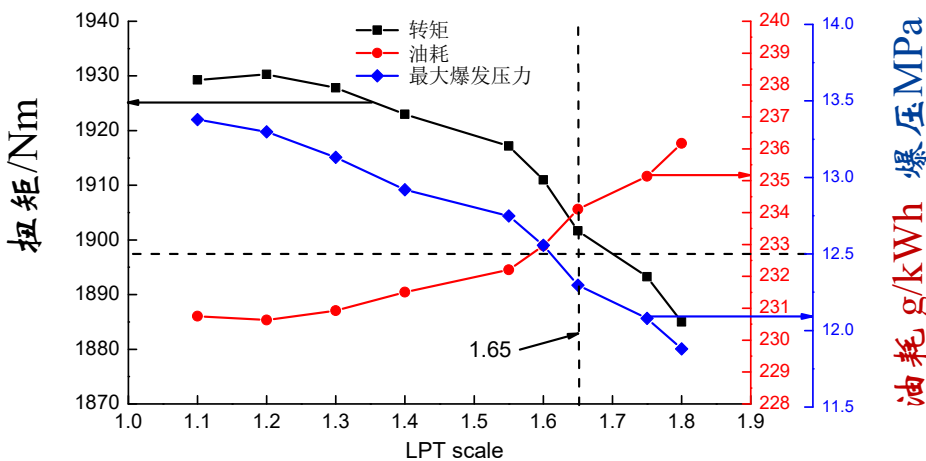
Design and Control of 2-stage Turbocharger System

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



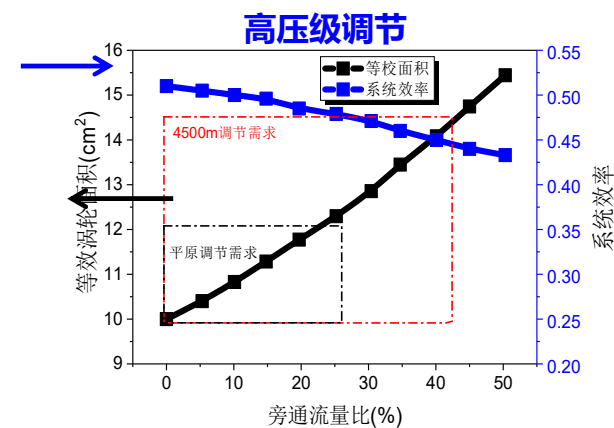
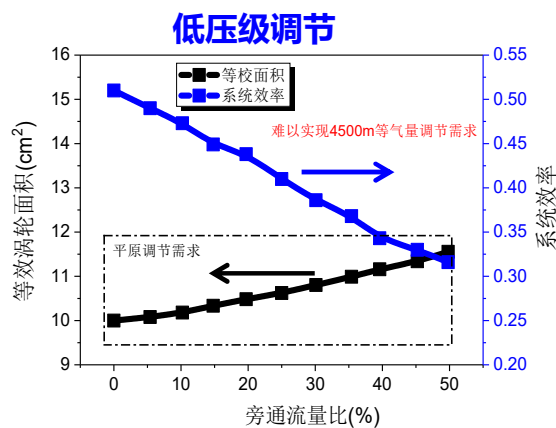
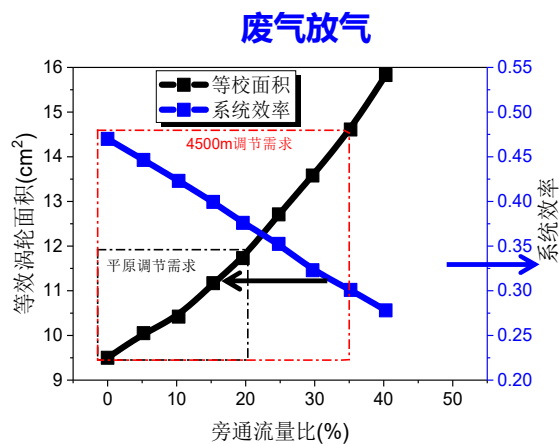
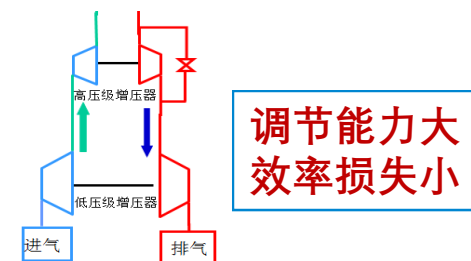
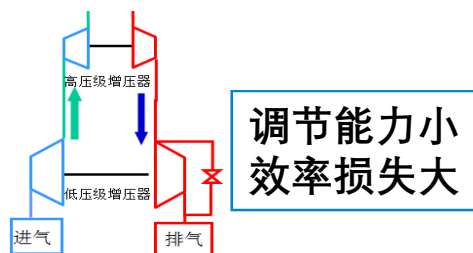
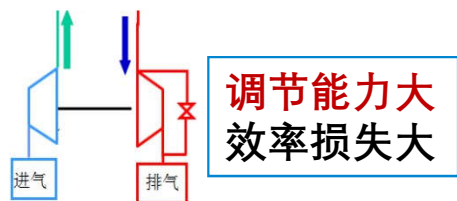
高压级涡轮选配



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

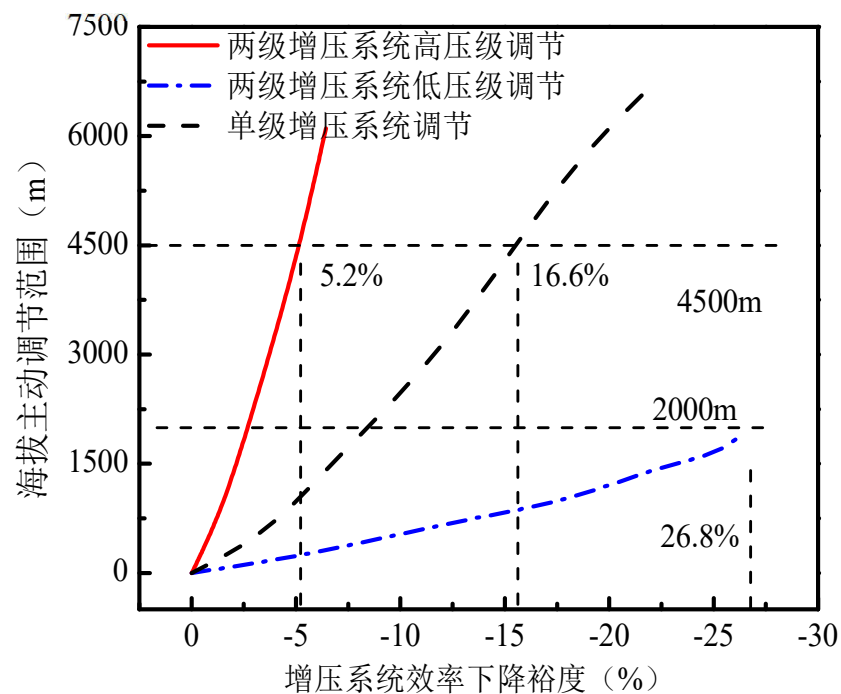
等效面积调节量
10.5%

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

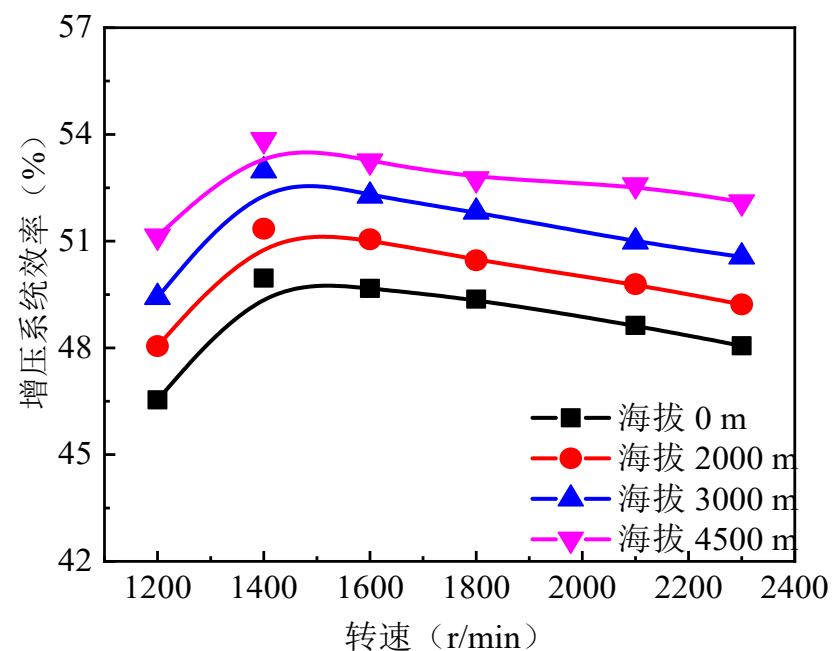
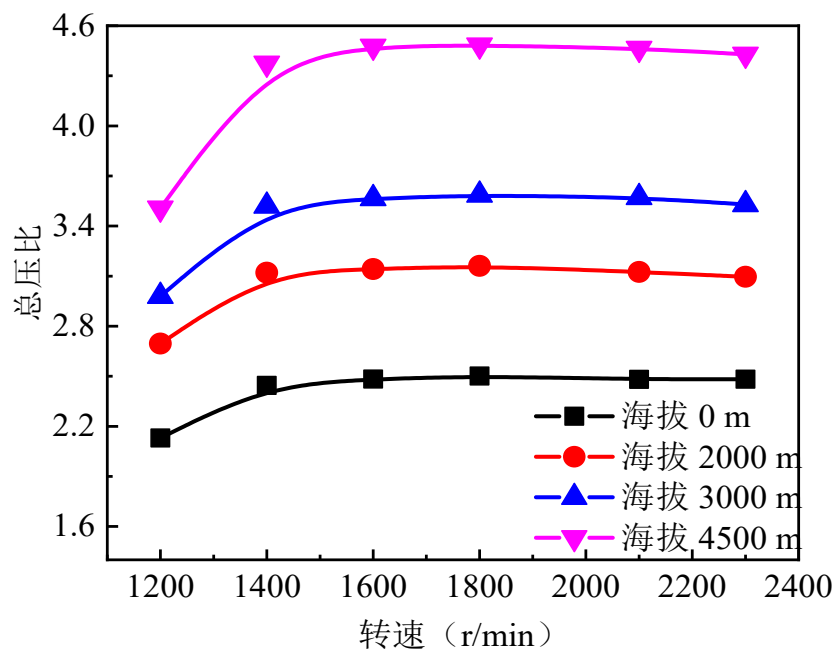


高压级调节方式的海拔调节能力最强，低压级调节方式的海拔调节能力最弱；

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

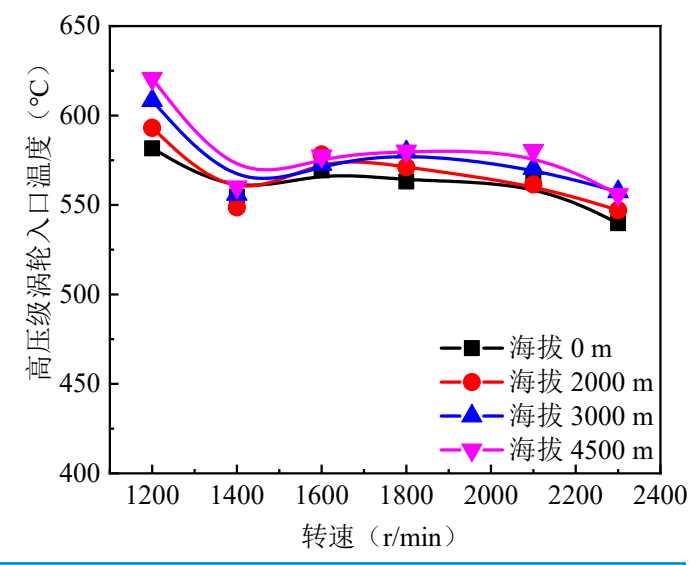
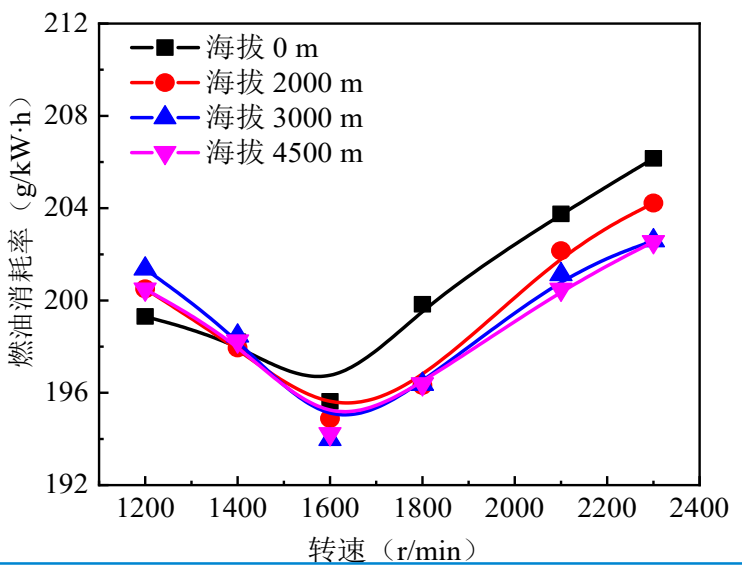
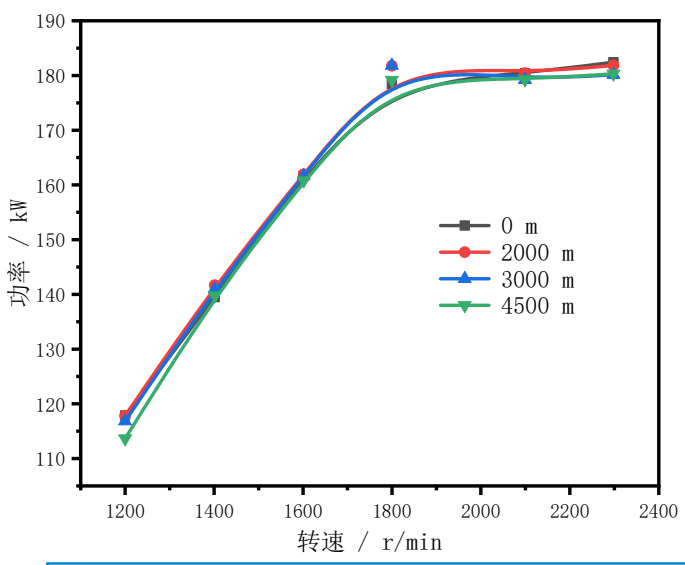


随海拔升高，柴油机增压系统压比大幅提升，以满足高原条件高压比需求。

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

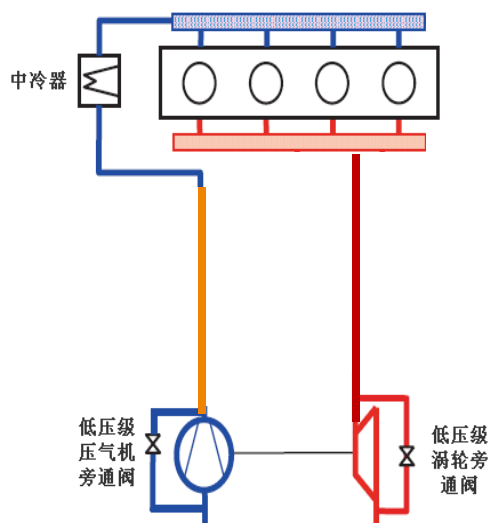


两级可调增压系统：

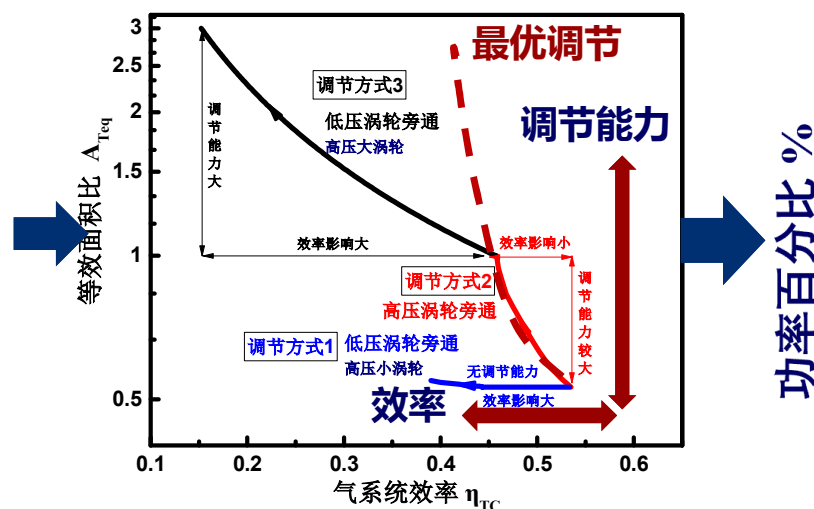
0-4500m海拔变化，整机功率基本不变，油耗略有变化，排温变化小于30°C。

两级可调增压系统设计与控制

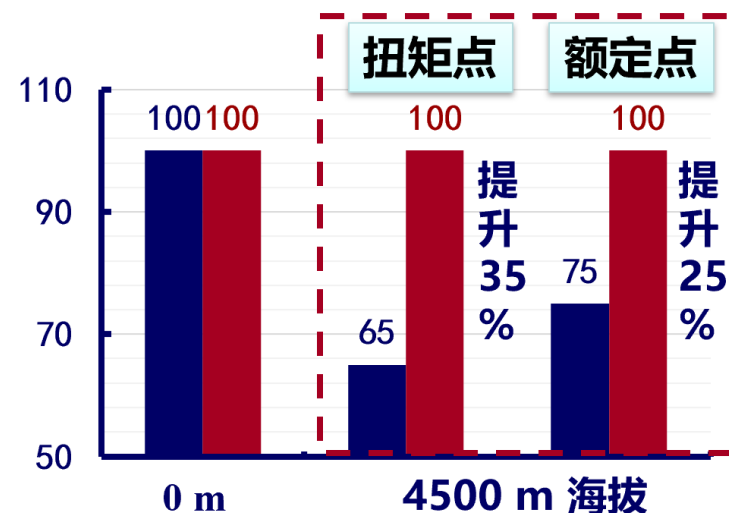
Design and Control of 2-stage Turbocharger System



多涡轮耦合系统设计



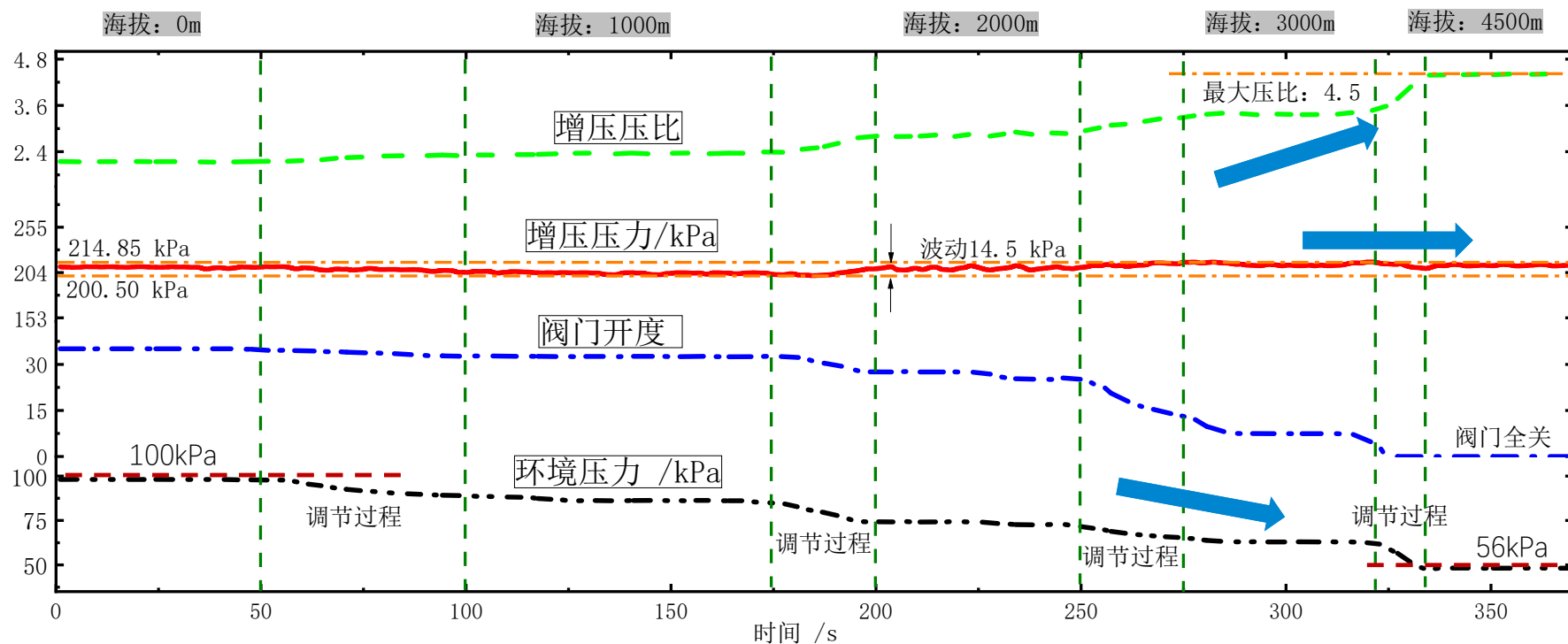
大跨度高效调节方法



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** 单级增压系统变海拔性能研究
Performance of 1-stage Turbocharger System
- 4** 两级可调增压系统设计与控制
Design and Control of 2-stage Turbocharger System
- 5** 结论
Conclusions



结论 Conclusions



- 车用柴油机变海拔增压系统选择依赖于功率密度，两级增压可以满足变海拔需求。
- 提出了变海拔柴油机增压系统设计的高原匹配与平原调节结合实现变海拔功率恢复的方法。
- 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。
- 高压级调节具有较优的调节能力和效率维持能力。

Thanks for your attention!

