

# 变海拔柴油机可变喷嘴增压系统控制策略研究

张慧龔<sup>1</sup> 李华雷<sup>2</sup> 刘 胜<sup>3</sup> 石 磊<sup>1</sup> 邓康耀<sup>1</sup> 杨震寰<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241; 3. 中国北方发动机研究所, 天津 300400)

**摘要:** 根据柴油机的变海拔性能恢复目标,通过热力学分析,对某V型6缸柴油机增压系统运行参数进行估算,确定了可变喷嘴式的增压系统方案,并选择了合适的匹配点,完成了涡轮增压器的选配。基于原机结构参数,采用GT—Power软件建立了性能仿真模型并完成了校核,分别计算了匹配可变喷嘴增压系统的柴油机外特性和部分负荷的变海拔性能,最终确定了增压系统的全工况控制策略。研究表明:在外特性工况下,基于高海拔匹配的增压系统通过采用较小的喷嘴环开度可以满足增压系统的功耗需求,实现柴油机的变海拔功率恢复目标;随着海拔的降低,增压系统可以根据进气功耗的变化适当增大喷嘴环开度来实现增压系统变海拔控制目标,同时,保证柴油机的正常运行;在全工况范围内,随着海拔的上升,柴油机对应工况点的喷嘴环开度逐渐减小,在3 000 m以上海拔的高负荷工况采用最小喷嘴环开度。随着负荷的降低,最低燃油消耗运行点从低海拔低转速区偏移至高海拔低转速区。

**关键词:** 柴油机; 变海拔; 可变喷嘴; 增压系统; 控制策略; 流量系数

**中图分类号:** TK421+.8      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0356-09

## Control Strategy of Variable Nozzle Turbocharging System for Diesel Engine at Different Altitudes

ZHANG Huiyan<sup>1</sup> LI Hualei<sup>2</sup> LIU Sheng<sup>3</sup> SHI Lei<sup>1</sup> DENG Kangyao<sup>1</sup> YANG Zhenhuan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China 2. AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China 3. China North Engine Research Institute, Tianjin 300400, China)

**Abstract:** Aiming to achieve the goal of performance recovery of diesel engine at high altitude, a V-type six-cylinder diesel engine was determined via the parameter estimation and thermodynamics analysis for turbocharging scheme. The original matching scheme was not suitable for altitude varying in large range operation condition. A variable nozzle turbocharging system was matched for diesel engine and it showed that no fallacies existed from the operation lines. A simulation model was established with GT—Power software and verified by test data. The simulation model was applied to performance prediction under different working conditions. Then the operating performance of engine at different altitudes was calculated, including the external characteristics and part load characteristics. The control strategy of variable nozzle turbocharging system for full operation conditions can be obtained in the end. It showed that the air demand of diesel engine can be satisfied with small opening of nozzle ring at high altitude and full load condition, and the goal of power restoring would be achieved. The charging system needed to increase the opening of nozzle ring to improve engine performance with the drop of altitude. The opening of nozzle ring should be deduced generally as the altitude increased in the whole operation area, moreover, it needed to adopt the minimum nozzle ring opening if the altitude was above 3 000 m except under some low load conditions. The operating point of the lowest fuel consumption would transfer from low-speed and low-altitude area into low-speed and high-altitude area with the fall of engine load.

**Key words:** diesel engine; variable altitudes; variable nozzle turbocharger; boost system; control strategy; flow coefficient

收稿日期: 2016-10-05    修回日期: 2016-11-05  
**基金项目:** 国家安全重大基础研究计划(国防973计划)项目(6132520202)  
**作者简介:** 张慧龔(1988—),男,博士生,主要从事内燃机增压系统匹配与控制研究,E-mail: dragon9999@sjtu.edu.cn  
**通信作者:** 邓康耀(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事内燃机增压与性能研究,E-mail: kydeng@sjtu.edu.cn

## 引言

涡轮增压技术可以显著提升柴油机的动力性和经济性,在提高功率密度的同时满足日益严苛的油耗和排放指标。但是,由于柴油机与涡轮增压器之间没有直接的机械连接,且往复机械与回转机械的流通特性和工作原理不同,使得柴油机和增压器无法在全工况范围内实现高效的联合运行<sup>[1-3]</sup>。通常在增压系统匹配时,选择合适的柴油机工况点作为匹配点,通过计算匹配点处柴油机的进气需求来选择合适的压气机,再根据做功能力选择能够满足压气机耗功的涡轮,使得涡轮增压器在满足柴油机需求的基础上实现较高的效率,从而完成涡轮增压器与柴油机的匹配<sup>[4-6]</sup>。

但在实际工作时,柴油机往往处于不断变化的工况之中,因此,柴油机的进气需求和排气能量并不恒定,而压气机和涡轮效率也不断变化。对于车用柴油机,全工况运行范围内发动机的进气需求和排气能量差异很大,同时,部分工况点可能出现效率过低或是靠近涡轮增压器的工作边界的现象,这就需要调节增压系统的等效涡轮面积,以适应柴油机不同工况的需求,达到性能优化的目的。近年来,可变喷嘴型涡轮增压系统(VNT)的出现并投入使用,一定程度上解决了增压器和柴油机的匹配问题<sup>[7-9]</sup>。可变喷嘴涡轮增压系统通过分段或连续改变涡轮截面积,来实现不同工况下的过量空气系数。在柴油机低速运行时,减小涡轮喷嘴流通面积,提高增压压力,从而改善柴油机的低速特性;柴油机高速工作时,增大涡轮喷嘴流通面积,使增压压力不至于过高。理论上,可以与柴油机在较宽的工况下实现良好的匹配<sup>[10-12]</sup>。但是,当柴油机运行在变海拔工况时,外界环境的变化使得柴油机的进气和排气条件都产生了很大变化,柴油机在高原运行与平原运行时的性能差异明显<sup>[13]</sup>。传统的增压器平原匹配很少考虑到海拔变化的影响,也没有针对变海拔工况制定专门的控制策略,柴油机的动力性和经济性指标随海拔升高而迅速下降,柴油机和增压系统运行甚至出现不稳定现象<sup>[14-18]</sup>。显然,在平原或固定海拔制定的控制策略不能满足柴油机变海拔高效运行的需求。

本文针对变海拔运行过程中,柴油机性能下降和增压系统的控制复杂化的问题,建立柴油机一维仿真模型,根据柴油机变海拔功率恢复目标进行增压系统的参数估算,匹配适应变海拔工况的可变喷嘴涡轮增压系统。通过柴油机变海拔仿真计算,分别研究外特性和部分负荷对应的不同

增压系统控制策略,最终确定变海拔增压系统的全工况控制策略。

## 1 仿真模型的建立与校核

发动机主要参数如表 1 所示。原机采用 V 型布置方式,普通单级增压方案,有 2 个对称安装的增压器和 2 个中冷器。采用一维性能仿真软件 GT-*Power* 建立了仿真模型,如图 1 所示。根据柴油机的管系尺寸,采用一维简化方式建立进排气管路模型;采用韦伯模型模拟缸内燃烧过程,Woschni 模型模拟传热过程,涡轮增压器通过涡轮和压气机特性图谱离散形式输入,从而建立原机仿真模型。采用原机在海拔 3 000 m 的试验数据对模型进行校核,其对比结果如图 2 所示。

表 1 发动机主要技术参数

**Tab. 1 Specifications of diesel engine**

| 参数                             | 数值       |
|--------------------------------|----------|
| 型式                             | V 型 6 缸机 |
| 冲程                             | 4        |
| 单缸排量/L                         | 2.83     |
| 升功率/(kW·L <sup>-1</sup> )      | 23.78    |
| 标定转速/(r·min <sup>-1</sup> )    | 2 200    |
| 最大扭矩点转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 1 500    |
| 进气方式                           | 单级增压中冷   |

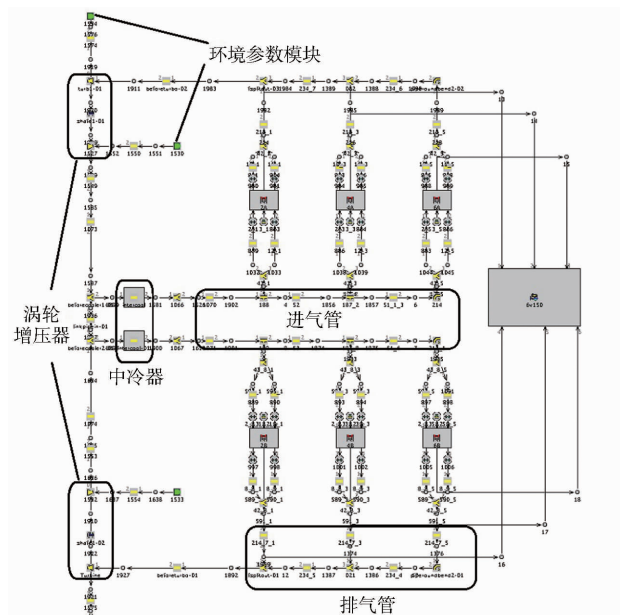


图 1 柴油机原机仿真模型

Fig. 1 Simulation model for diesel engine

可以看出,原机的动力性和经济性能参数的计算结果与试验数据可以很好地吻合,最大误差都在5%之内;标定转速的缸压计算数据与试验数据也很接近。说明所建立的仿真模型具有足够高的精度,可以满足计算分析要求。

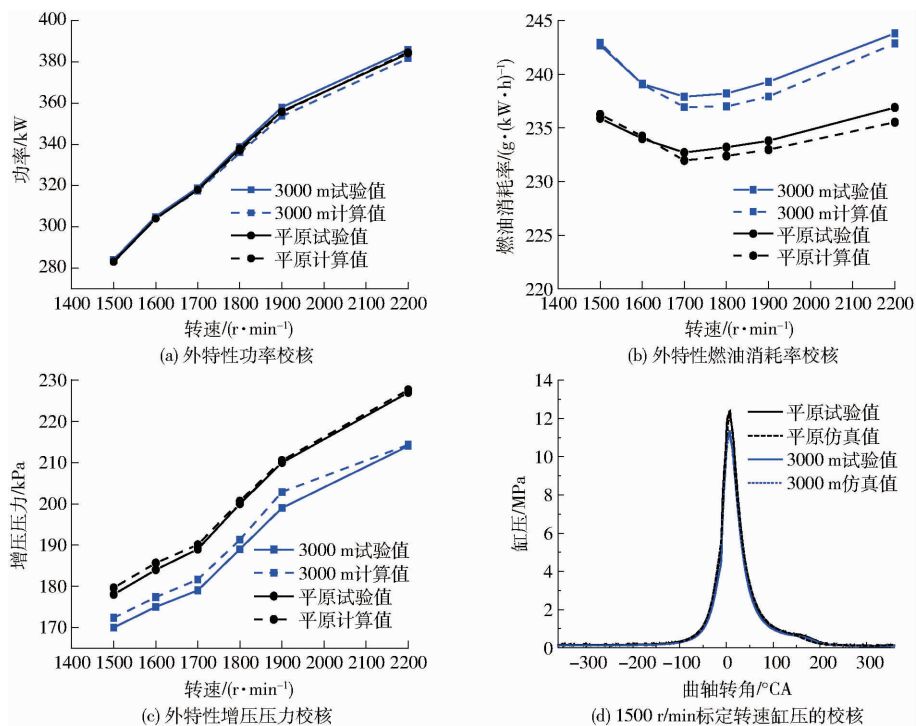


图2 平原和3000 m海拔工况仿真与原机试验数据对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured data at sea level and 3000 m altitude

2 变海拔可变喷嘴增压系统的匹配

2.1 原机变海拔压气机性能分析

随着海拔的升高,大气压力和温度逐渐降低。按照变海拔功率恢复需求,在3000 m以下海拔,需实现柴油机100%的功率恢复;在4500 m海拔,柴油机功率达到了原机的85%。根据3000 m海拔的试验数据,可以通过油耗线法得到3000 m海拔柴油机的机械效率 $\eta_{mH}$ 。机械效率定义为

$$\eta_{mH} = 1 - \frac{P_{mH}}{P_{iH}} = P_{eH} / (P_{eH} + P_{mH}) \tag{1}$$

式中  $P_{eH}$ ——变海拔条件下的有效功率  
 $P_{mH}$ ——变海拔条件下的机械损失  
 $P_{iH}$ ——变海拔条件下的指示功率

当发动机结构不变时,摩擦功率与大气状态变化关系不大,可认为 $P_{mH}$ 为常数,即不随海拔高度而变化。柴油机的变海拔燃油消耗率可通过燃油消耗率和机械效率的对应关系得到

$$b_{eH} = b_e \eta_m / \eta_{mH} \tag{2}$$

由内燃机和增压器的工作特性可知,在中冷器冷却能力足够的情况下,柴油机不同工况的进气管温度可看作定值,因此进气流量与增压压力呈正比,柴油机稳定运行时所需气量和增压压力为

$$\dot{m}_a = \frac{14.3 P_e b_e \alpha}{3600} \tag{3}$$

$$p_{iH} = p_{in} \dot{m}_{aH} / \dot{m}_a \tag{4}$$

折合流量为

$$\dot{m}_{corrected} = \dot{m}_a \sqrt{\frac{T_0 P_{in}}{T_{in} P_0}} \tag{5}$$

式中  $P_e$ ——柴油机有效功率  
 $b_e$ ——燃油消耗率  $T_{in}$ ——进气温度  
 $\alpha$ ——空燃比  $p_{in}$ ——增压压力  
 $T_0$ ——环境温度  $p_0$ ——环境压力

根据原机的性能参数和变海拔功率恢复目标,估算增压系统的运行参数。柴油机最大扭矩运行点逐渐靠近压气机喘振线,喘振裕度不断减小;而标定转速点的压比和折合流量随海拔上升增加幅度很大,并在海拔4500 m超过原机压气机最高转速线,导致压气机出现不稳定运行的情况,如图3所示。这表明在平原工况匹配的原机增压器已经不能满足柴油机变海拔工况的需求,必须调整增压系统的匹

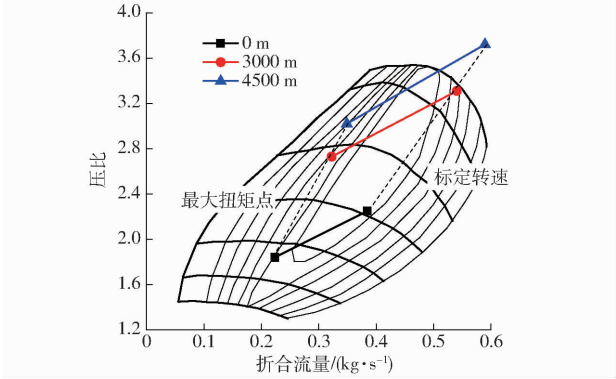


图3 原机变海拔压气机运行图

Fig. 3 Operating points on compressor map of original engine at different altitudes

配方案,以提高增压柴油机的变海拔适应性。

2.2 可变喷嘴增压系统的匹配

为满足变海拔功率恢复目标,选择海拔 4 500 m 的最大扭矩点转速作为匹配点,尽量使外特性运行点位于压气机的最高效率区,保证压气机特性满足变海拔工况柴油机标定转速的耗气特性需求。增压系统参数的估算结果与最终选配的压气机特性对比如图 4 所示。可以看出,所选配的压气机能够满足海拔 4 500 m 标定转速点的折合流量要求,而最大扭矩点在 3 个海拔下的运行点都位于压气机的高效率区,并且有一定的喘振裕度。

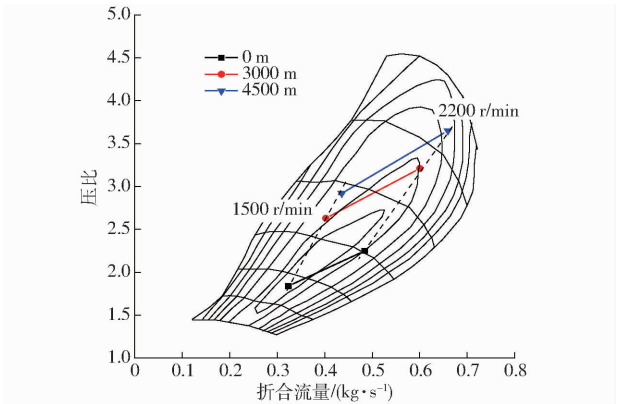


图 4 压气机匹配运行图

Fig. 4 Operation points on matched compressor map

确定压气机特性后,需要选配合适的涡轮。涡轮的匹配主要是涡轮流通能力的匹配<sup>[19-20]</sup>。根据匹配点的压比和进气流量,基于原机 3 000 m 的试验数据,选取涡轮前温度为 720℃,涡轮增压器总效率为 0.52,计算得到选配涡轮所需的膨胀比和相似流量,并根据计算得到的膨胀比和相似流量选择合适的涡轮,完成增压系统的选配。

3 外特性变海拔流动控制策略

通过性能仿真计算,柴油机外特性的功率和油耗的变海拔计算结果见图 5 和图 6。可以看出,采用所匹配的增压系统,在 0 ~ 3 000 m 海拔范围内柴油机可以维持原准机性能,实现功率不下降;在海拔 4 500 m,各转速的柴油机功率达到了原机的 85% 恢复目标。各转速下的燃油消耗率随海拔上升而逐渐增加,经济性变差。海拔从 0 m 升至 3 000 m 时,柴油机最低燃油消耗率从 233.2 g/(kW·h) 增加到 239.4 g/(kW·h),当海拔为 4 500 m 时,柴油机经济性恶化显著,最低燃油消耗率增加到了 244.0 g/(kW·h),与平原相比增加了 4.6%;海拔高度从 0 m 到 4 500 m,最低燃油消耗率对应的转速始终维持在 1 700 r/min 左右。

图 7 为外特性空燃比随海拔高度的变化曲线。

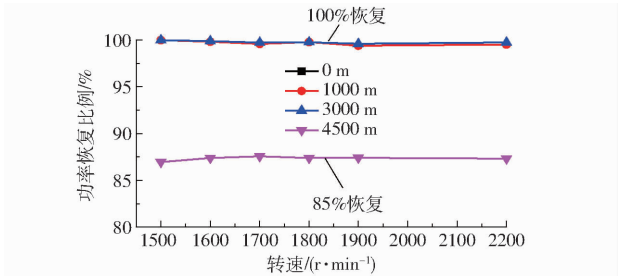


图 5 外特性功率恢复情况

Fig. 5 Power recovery of external characteristic

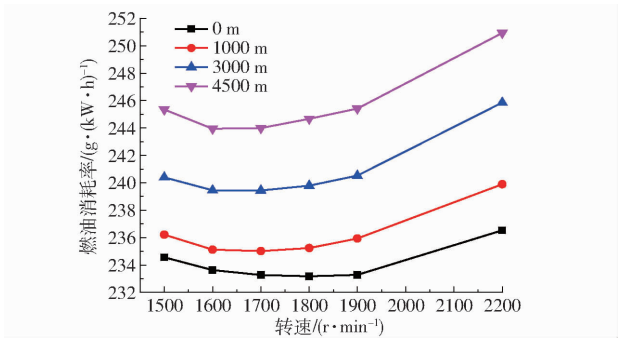


图 6 外特性变海拔经济性对比

Fig. 6 Comparison of economic performance for external characteristic condition at different altitudes

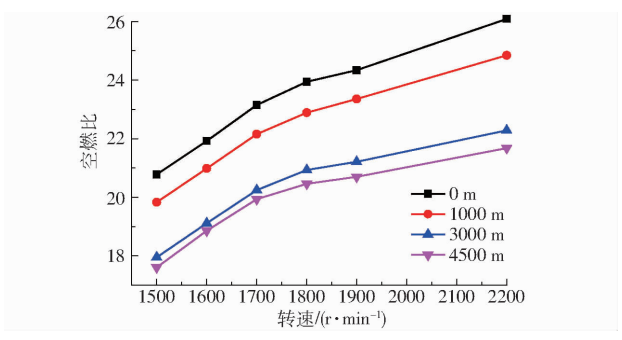


图 7 外特性空燃比变化曲线

Fig. 7 Variation curves of air-fuel ratio for external characteristic condition at different altitudes

随着海拔上升,各转速下的空燃比都逐渐减小。在同一海拔高度下,空燃比的下降幅度在不同转速下有所不同;随着柴油机转速的增加,空燃比的下降幅度逐渐增大,但不同海拔高度下高转速的空燃比仍然高于低转速。由于进气量的减小,在相同的压缩比下使得进气过程终止时气缸内温度和压力降低,这就使得柴油机热力循环  $P-V$  示功图中的高压循环部分的做功能力减小。空燃比的下降导致柴油机燃烧放热过程的有效热效率下降,使得燃油消耗率增加,经济性恶化。

外特性最大扭矩点和标定转速的增压压力和压比随海拔的变化曲线如图 8 所示。可以看出,随着海拔上升,增压压力逐渐降低;但增压系统的压比随海拔高度的上升而逐渐增加。海拔高度的升高导致压气机进口压力减小,为满足柴油机增



压的需求,需要通过减小喷嘴环截面积来提高压比。2 个转速下压比与增压系统参数估算的计算

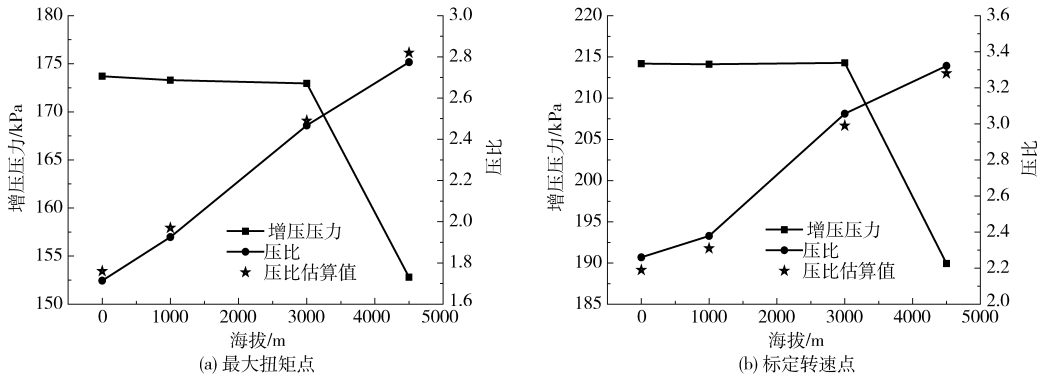


图 8 外特性增压压力和压比随海拔的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of boost pressure and pressure ratio for external characteristic condition at different altitudes

根据 VNT 的工作特性,定义不同工况下涡轮质量流量与基准涡轮质量流量的比值为涡轮流量系数,即大涡轮流量系数对应大喷嘴环开度和小膨胀比。定义海拔 4 500 m 的涡轮流量为 1,其他海拔的涡轮流量系数为其涡轮流量与海拔 4 500 m 涡轮流量的比值。相对于喷嘴环的开度,采用涡轮流量系数作为控制变量能够使控制策略更具有通用性。通过计算,变海拔外特性工况的控制策略和压气机运行线如图 9 所示。同一转速下涡轮流量系数随海拔上升而减小,在 3 000 m 以上海拔工况,由于环境压力下降明显,需要通过减小喷嘴环开度得到较小的涡轮流量系数,以满足

柴油机的进气需求。根据高海拔工况所匹配涡轮在平原工况运行时,其做功能力大于压气机的功耗需求,因此,需要通过增大喷嘴环开度,防止增压过度,避免出现过高的爆发压力和机械负荷过大的状况。低海拔地区,随转速增加,涡轮流量系数呈先减小后增大的趋势。这是因为低转速工况靠近增压系统的匹配点,运行点处在压气机的高效率区域,导致在低速时得到目标增压压力所需的压气机功耗变化较小;在高转速工况,虽然压气机运行点的效率相对较低,但此时柴油机的排气量较大,排气能量足够多,故也需要增大涡轮流量系数以防止压气机超速和增压压力过高。

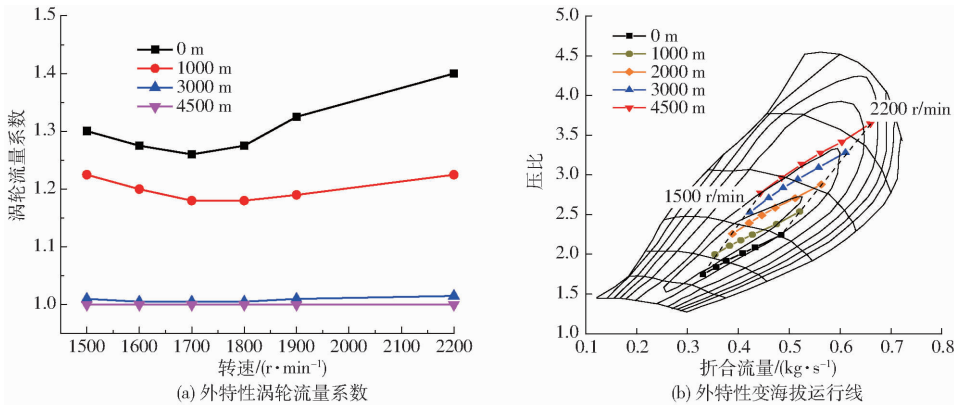


图 9 外特性工况的控制策略

Fig. 9 Control strategy for external characteristic condition at different altitudes

#### 4 部分负荷变海拔流动控制策略

在确定了外特性涡轮喷嘴环开度控制策略后,将针对高低负荷工况进行仿真计算,从而确定适用于部分负荷工况的增压器控制策略。选取每个转速外特性的 80% 负荷作为高负荷工况,20% 负荷作为低负荷工况进行研究。针对每个工况点调整涡轮喷嘴环开度,通过分析高低负荷工况下柴油机的性能变化规律,确定合适的 VNT 系统的控制策略。

#### 4.1 高负荷工况增压系统变海拔控制策略

通过仿真计算,获得合理的增压系统变海拔控制策略。在最大扭矩点转速的高负荷工况,涡轮流量系数对柴油机变海拔性能的影响规律如图 10 所示。为了达到功率恢复要求,需要保证柴油机的增压压力在 0 ~ 3 000 m 海拔范围内基本不变,从而保证满足柴油机正常燃烧所需的进气量。从图 10 中可以看出,在海拔 3 000 m 以上时,为将增压压力恢复到平原水平,需要选取较小的涡轮流量系数来提

高压比;但随着海拔高度的下降,压气机进口压力逐渐增大,增压系统不需要提供很高的压比来实现目标增压压力,因此涡轮流量系数逐渐增加。随着海拔的上升,增压压力逐渐下降,而涡前压力先升后降,柴油机泵气正功不断减小,造成经济性下降。

高负荷工况变海拔涡轮流量系数的控制策略以及相应的进排气压力比的变化情况如图 11 所示。随着海拔下降,大气压力不断升高,增压系统的压比需求逐渐减小,同一转速对应的涡轮流量系数不断加大;而同一海拔下,随着转速升高,压气机运行线

逐渐远离高效区,需适当减小涡轮流量系数以满足柴油机的进气需求;在低海拔下由于压气机进口压力逐渐增大,增压系统所提供的压比逐渐减小,同时涡轮后背压升高,因此需逐渐增大涡轮流量系数以防止增压过度,但这将使废气所做的膨胀功减小,导致增压系统效率下降。同时,在同一海拔高度,进排气压力比随着转速的增加而逐渐下降,且高海拔区下降更明显;对于同一发动机转速,进排气压力比随着海拔高度的下降逐渐增大,说明泵气过程逐渐恶化。

高负荷工况柴油机变海拔燃油消耗率如图 12

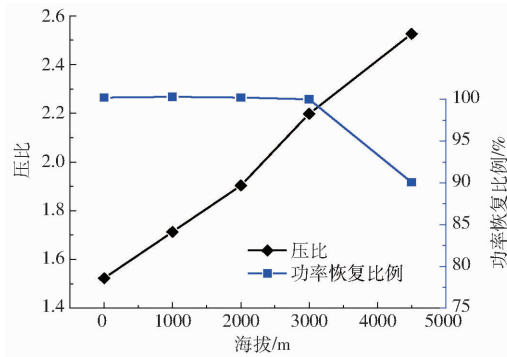
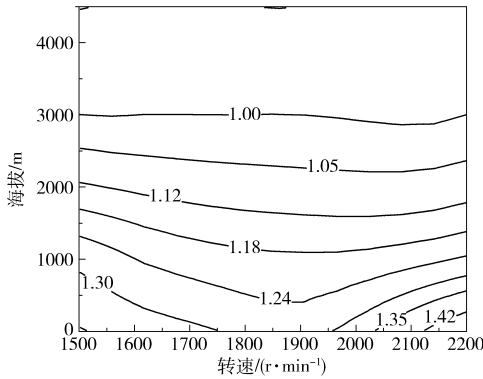
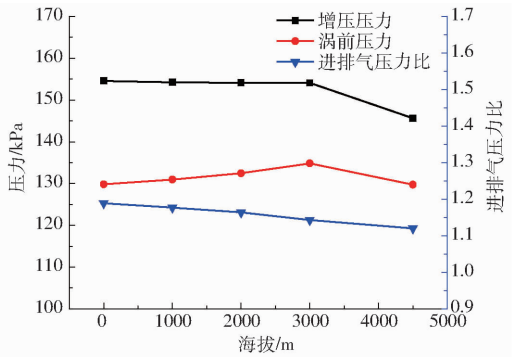
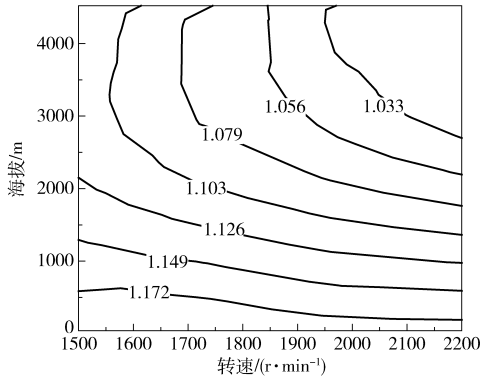


图 10 高负荷工况控制策略对柴油机性能的影响

Fig. 10 Influence of control strategy on engine performance under high load condition



(a) 高负荷工况涡轮流量系数控制策略



(b) 高负荷工况变海拔进排气压力比

图 11 高负荷工况控制策略

Fig. 11 Control strategy under high load condition

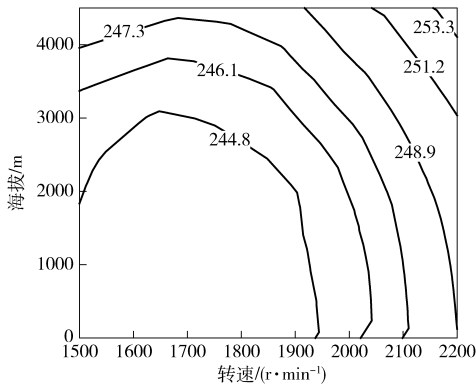


图 12 高负荷工况变海拔燃油消耗率(单位:g/(kW·h))的变化情况

Fig. 12 Fuel consumption for high load condition at different altitudes

所示。可以看出,随着转速增加柴油机的泵气正功减小,柴油机的最低燃油消耗率出现在低海拔低转速工况。此时,增压系统效率较高,泵气正功较大,空燃比较高,燃烧条件较好。可见,虽然通过增压系统喷嘴的控制使柴油机在变海拔工况的动力性能得到了改善,但在高海拔下柴油机的经济性仍相对平原或低海拔工况有所恶化。

4.2 低负荷工况增压系统变海拔控制策略

低负荷工况变海拔涡轮控制策略以及进排气压力比的变化情况如图 13 所示。与高负荷工况相似,随着海拔的升高,增压系统的压比需求逐渐增加,同一转速对应的涡轮流量系数不断减小。但是,由于低负荷工况所需增压系统的供气量较

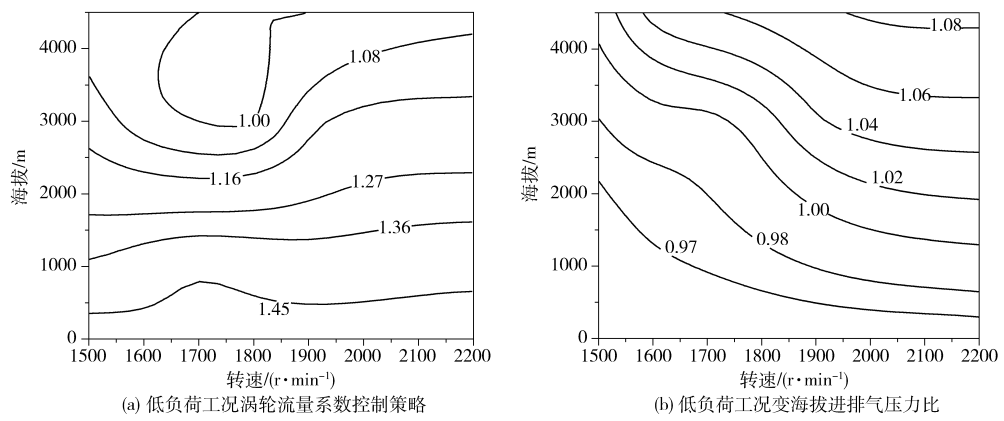


图 13 低负荷工况放气阀控制策略

Fig. 13 Control strategy under low load condition

小,尤其在低海拔运行时,不需要较高的增压压力,对应的涡轮流量系数较大。随着转速的增加,排气能量逐渐增大,涡轮做功能力加强,为降低泵气损失以提高柴油机的经济性,需增大喷嘴截面积以降低柴油机的排气背压。在相同转速下,进排气压力比也随着海拔高度的下降逐渐减小,与高负荷工况呈相反的变化趋势。在同一海拔高度,进排气压力比随着转速的增加而逐渐增大;这是因为高转速工况柴油机排气量大,排气做功能力强,导致系统的增压压力较高,同时,喷嘴环开度增大也使得高转速的排气背压下降。

低负荷工况变海拔燃油消耗率的变化如图 14 所示。在低负荷工况下,柴油机的最低燃油消耗率出现在高海拔低转速工况;这是由于只有高海拔工作区,柴油机的进气压力大于排气压力,加之增压系统效率较高,故而出现上述现象。而随着发动机转速的增加和海拔高度的下降,燃油消耗率逐渐增加。这主要是由于低负荷工况控制策略决定的。在柴油机低负荷工况时,由于循环喷油量较小,其所需提供的增压压力也较低,使得压气机压比都很小,其所对应的压气机效率变化不大。在高海拔工况下喷嘴环开度较小,随着海拔的降

低喷嘴环逐渐打开,使得涡轮增压器总效率也逐渐下降,柴油机热力循环中的泵气过程逐渐恶化,导致燃油消耗率逐渐增加。

5 全工况变海拔流动控制策略

根据外特性和部分负荷的增压系统控制策略分析结果,可以得到该柴油机应用可变截面增压系统进行变海拔功率恢复所需采取的全工况涡轮流量系数控制策略,如图 15 所示。

总体上,随着海拔高度的增加,增压系统的进气压力降低,对于相同转速、相同平均有效压力的柴油机工况点,喷嘴环开度应逐渐减小,以满足柴油对增压器的进气需求。在低海拔工况,相同平均有效压力下,随着转速的增加,喷嘴环开度呈先减小后增大的趋势。在同一海拔和转速下,随着平均有效压力增加,喷嘴环开度呈逐渐减小趋势。在平原高转速工况,增压系统的进气压力较高,而柴油机对增压系统的压比需求不高,同时,排气能量充足,因此需要较大涡轮喷嘴环面积,防止爆压过高和压气机超速;在低转速区工况,靠近增压系统匹配点,对应的喷嘴环开度较大;在 3 000 m 以上的大多数工况点,需要选取最小喷嘴环开度,以提高柴油机变海拔适应性。

6 结论

- (1)通过仿真计算,柴油机匹配的可变喷嘴增压系统,可以实现变海拔的功率恢复目标。
- (2)对于柴油机外特性,高海拔工况,需要取较小的涡轮流量系数来提高涡轮做功能力。在同一转速下随海拔下降,喷嘴环开度逐渐增大;在固定海拔工作时,随转速增加,喷嘴环开度呈增加趋势。
- (3)高低负荷工况下需要采取的涡轮流量系数控制策略不同。对于高负荷工况,在高海拔工作时,随着转速增加,应适度减小涡轮流量系数,而在低海

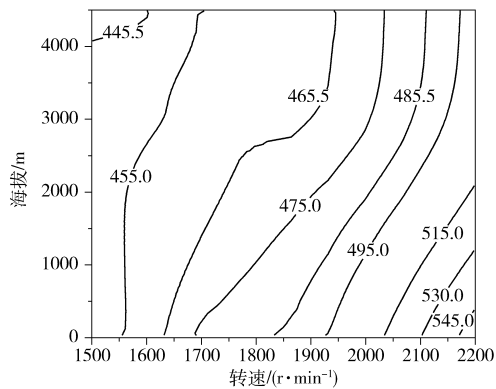


图 14 低负荷工况变海拔燃油消耗率(单位:g/(kW·h))

Fig. 14 Fuel consumption for low load condition at different altitudes

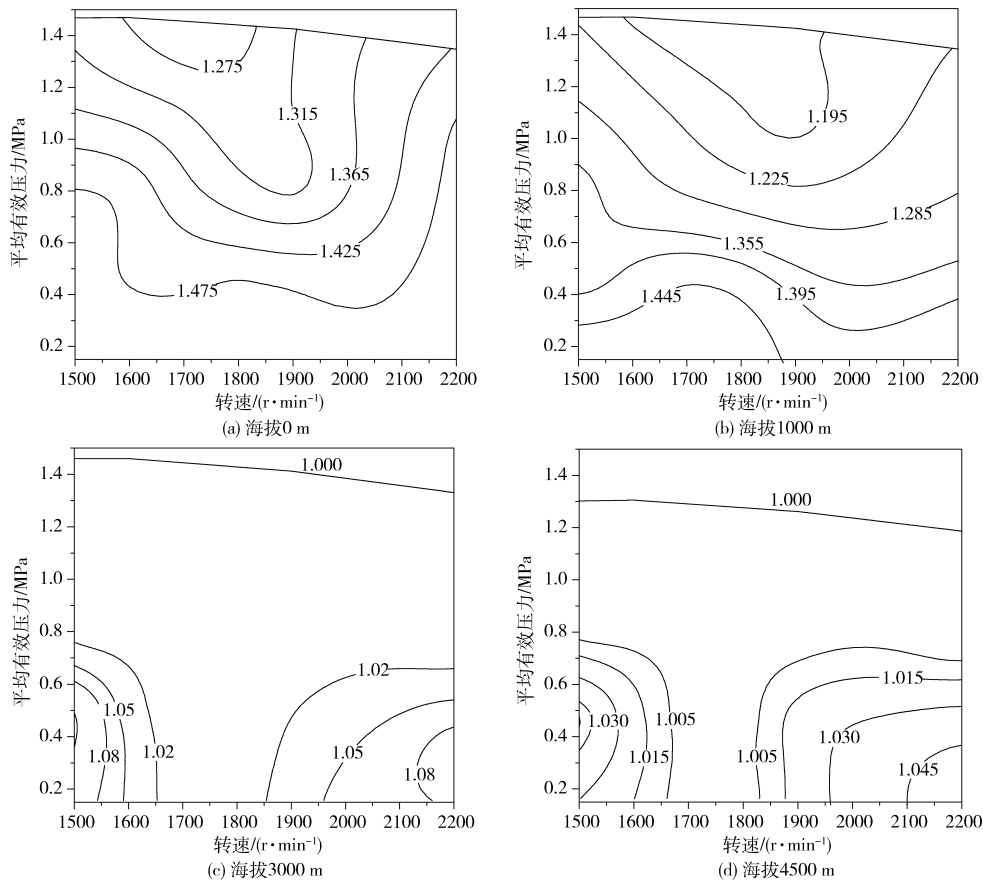


图 15 全工况变海拔控制策略

Fig. 15 Control strategy for full condition at different altitudes

拔运行时,适当增大涡轮流量系数以防止增压过度;高负荷工况的进气压力始终大于排气压力。在低负荷工况,采用涡轮流量系数较大即可满足柴油机进气需求,只有 4 000 m 以上海拔,进气压力大于排气压力。

(4)随着负荷的降低,受增压器效率、泵气功等

因素的影响,最低燃油消耗运行点从低海拔低转速区偏移至高海拔低转速区。

(5)确定了全工况 VNT 系统的控制策略。随着海拔的上升,相同工况点的涡轮流量系数逐渐减小;在 3 000 m 海拔以上工况,大部分工况点需采用最小涡轮流量系数来满足柴油机的进气需求。

参 考 文 献

1 WASTON N, JANOTA M S. Turbocharging: the internal combustion engine[M]. London:Macmillan Publishers Limited, 1982.

2 BANIES N C. Fundamentals of turbocharging[M]. Ramsey, MN: Concepts ETI, Inc,2005.

3 顾宏中. 涡轮增压柴油机性能研究[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1998.

4 HIEEWTH H, PRENNINGER P. Charging the internal combustion engine[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2007.

5 林磊. 可变喷嘴涡轮增压器(VNT)与柴油机的匹配及其控制的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010.

6 ARNOLD S, GROSKREUTZ M, SHAHED S M, et al. Advanced variable geometry turbocharger for diesel engine applications [C]. SAE Paper 2002 - 01 - 0161, 2002.

7 KAWAGUCHI J. Development of VFT (variable flow turbocharger)[C]. SAE Paper 1999 - 01 - 1242, 1999.

8 MEHMOOD A, LAGHROUCHE S, BAGDOURI M E. Modeling identification and simulation of pneumatic actuator for VGT system [J]. Sensors & Actuators a Physical, 2011, 165(2):367 - 378.

9 郭鹏江, 王天灵, 吴君华,等. 可变喷嘴涡轮增压器喷嘴环叶片位置对柴油机性能的影响[J]. 内燃机工程, 2010, 31(2): 41 - 47.

GUO P J, WANG T L, WU J H, et al. Effect of nozzle ring vane position of VNT on diesel engine performance[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(2):41 - 47. (in Chinese)

10 项旭昇, 殷勇, 陈林,等. VNT 在中型柴油机上应用试验研究[J]. 汽车科技, 2011(1):78 - 82.

XIANG X S, YIN Y, CHEN L, et al. Researches on VNT application for medium-duty diesel engine[J]. Automobile Science & Technology, 2011(1):78 - 82. (in Chinese)



11 牛志明. 可变喷嘴涡轮增压器喷嘴截面积对车用柴油机性能的影响[D]. 长春:吉林大学, 2004.

12 张海雷. 柴油机变海拔涡轮增压技术研究 [D]. 北京:清华大学,2008.

13 靳嵘, 张俊跃, 胡力峰, 等. 高原自适应柴油机涡轮增压技术研究[J]. 内燃机工程, 2011, 32(4): 27 – 31.  
JIN R, ZHANG J Y, HU L F, et al. Study on varying altitude self-adaptive turbocharging system for diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(4): 27 – 31. (in Chinese)

14 李华雷, 利奇, 石磊, 等. 柴油机可调两级增压系统高原自适应控制策略[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 335 – 342. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150949&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150949&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.049.  
LI Hualei, LI Qi, SHI Lei, et al. Research on the self-adapting control strategy of diesel engine with regulated two-stage turbocharging system at different altitudes[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 335 – 342. (in Chinese)

15 朱振夏, 张付军, 马朝臣, 等. 柴油机增压技术在高原环境下的应用[J]. 小型内燃机与摩托车, 2014, 43(4): 73 – 80.  
ZHU Z X, ZHANG F J, MA C C, et al. Application of supercharging technologies for diesel engine at plateau[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technology, 2014, 43(4): 73 – 80. (in Chinese)

16 李华雷, 石磊, 邓康耀, 等. 两级可调增压系统变海拔适应性研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(3): 1 – 5.  
LI H L, SHI L, DENG K Y, et al. Calculation Research on variable altitude adaptability of regulated two-stage turbocharging system[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(3): 1 – 5. (in Chinese)

17 刘瑞林, 刘宏威, 秦德. 涡轮增压柴油机高海拔(低气压)性能试验研究[J]. 内燃机学报, 2003, 21(3): 213 – 216.  
LIU R L, LIU H W, QIN D. An experimental study on performance of turbocharged diesel engines at high altitude (low air pressure) [J]. Transactions of Chinese Society for Internal Combustion Engines, 2003, 21(3): 213 – 216. (in Chinese)

18 李华雷, 石磊, 邓康耀, 等. D6114 柴油机高海拔功率恢复计算研究[J]. 车用发动机, 2013(4): 30 – 35.  
LI H L, SHI L, DENG K Y, et al. Calculation of high altitude power recovery for D6114 diesel engine[J]. Vehicle Engine, 2013(4): 30 – 35. (in Chinese)

19 赵长禄, 李长江, 韩恺, 等. 不同海拔下柴油机可调二级增压系统的经济性调节方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 369 – 376. 19. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160249&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160249&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.049.  
ZHAO Changlu, LI Changjiang, HAN Kai, et al. Regulated method based on fuel economy for regulated two-stage turbocharging system of diesel at different altitudes[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 369 – 376. (in Chinese)

20 李亚卓, 诸葛伟林, 张扬军, 等. 发动机增压匹配的涡轮通流模型研究[J]. 车用发动机, 2007(4): 71 – 77.  
LI Y Z, ZHUGE W L, ZHANG Y J, et al. Study on turbine through-flow model of engine turbocharging matching[J]. Vehicle Engine, 2007(4): 71 – 77. (in Chinese)