

性能与排放

高海拔可调两级增压柴油机油气协同控制研究

张立夫^{1,2}, 刘 胜³, 张慧龔^{1,2}, 石 磊^{1,2}, 邓康耀^{1,2}, 杨震寰³

(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. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240; 3. 中国北方发动机研究所, 天津 300400)

摘 要: 以某 V 型 6 缸柴油机为研究对象, 采用 GT-Power 软件开展高海拔可调两级涡轮增压柴油机油气协同控制研究。仿真模型的进气模块选用可调两级涡轮增压系统, 燃烧模块的标定采用柴油机在低过量空气系数下的试验数据进行。采用该标定后的仿真模型开展了不同过量空气系数和喷油量工况下柴油机高原性能仿真计算。结果表明: 在海拔 4 500 m, 且满足最高燃烧压力和排温限制的条件下, 采用可调两级增压并结合油气协同控制, 柴油机扭矩和功率可达到 100% 恢复; 研究同时获得了最大扭矩和最大功率恢复的油气协同控制方法。

关键词: 高海拔; 可调两级涡轮增压; 油气协同; 扭矩; 功率

中图分类号: TK421⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)03-0001-04

Study on Fuel-Air Synergistic Control of Regulable Two-Stage Turbocharged Diesel Engine Working at High Altitude

Zhang Lifu^{1,2}, Liu Sheng³, Zhang Huiyan^{1,2}, Shi Lei^{1,2}, Deng Kangyao^{1,2}, Yang Zhenhuan³

(1. Key Laboratory for Power Machinery & Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration (CISSE), Shanghai 200240; 3. China North Engine Research Institute, Tianjin 300400)

Abstract: Based on a V type 6-cylinder diesel engine, GT-Power software was used to study the synergistic control of regulable two-stage turbocharged diesel engines working at high altitude. The two-stage turbocharging system was adopted in the simulation model as inlet module. The combustion module was calibrated by the experimental data of the diesel engine at low excess air ratio. After the simulation model was verified by experimental data, the simulation of the plateau performance of the diesel engine under different excess air coefficients and fuel injection conditions was carried out. Under the conditions of satisfying maximum combustion pressure and temperature limit, the results show that with the use of regulable two-stage turbocharging technology combining with fuel-air synergy control, the diesel engine can achieve 100% torque recovery and power recovery at altitude of 4 500 m, and obtain the fuel-air synergistic control method of maximum torque and maximum power recovery.

Key words: high altitude; regulable two-stage turbocharging; fuel-air synergy; torque; power

0 引 言

我国国土辽阔, 高原分布广泛, 高原气候条件会对柴油机的正常运行产生影响^[2,3]。随着海拔高

度的增加, 环境中的大气压力、密度以及空气含氧量都下降。对于运行在高原地区的柴油机来说, 一方面, 高原较低的大气压力使得柴油机进气量不足, 导致柴油机运行在低过量空气系数工况下, 缸

收稿日期: 2016-11-01;

作者简介: 张立夫(1991-), 男, 硕士在读, 主要研究方向为发动机可调两级涡轮增压技术, E-mail: superreef@163.com。

内上止点温度及压力相对降低,进而使得缸内燃油与空气的混合效果变差,造成滞燃期延长的不良后果^[1]。另一方面,在喷油量不变的情况下,空气中含氧量的降低导致缸内燃烧不充分,造成比较严重的后燃现象,从而使柴油机功率、扭矩等动力性能下降,燃油消耗率上升^[4-6]。本研究采用可调两级增压实现过量空气系数控制,并结合循环喷油量控制,达到柴油机高原动力恢复的目的,并获得高原柴油机动力恢复控制规律。

1 试验台架

本文采用某 V 型 6 缸涡轮增压中冷柴油机进行模型校核。为充分利用排气的脉冲能量,柴油机进排气系统分成两路,即其中三缸连接一个涡轮增压器,另外三缸连接另一个相同的涡轮增压器。其总体布置如图 1 所示。该 V 型 6 缸机主要性能参数如表 1 所示。

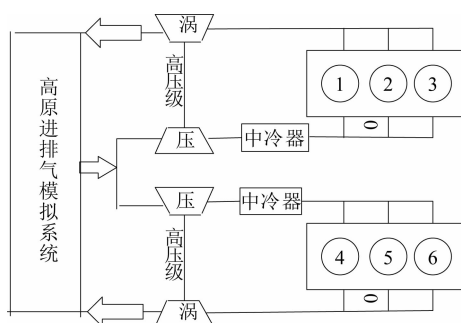


图 1 高原柴油机系统布置图

表 1 某 V 型 6 缸机主要性能参数

结构	V 型 6 缸
标定功率/kW	404
标定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	2 200
最大扭矩($N \cdot m$)	1 930
最大扭矩转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 500

2 高原油气协同控制研究

利用 GT-Power 软件开展高海拔可调两级涡轮增压柴油机油气协同控制研究,以提升柴油机的高原性能。

2.1 仿真模型建立

系统的柴油机模型包括进排气管道模块、柴油机本体模块、中冷器模块、涡轮增压器模块以及环境模块等主要模块;燃烧模型为三韦伯模型,采用低过量空气系数下柴油机试验数据进行标定。模型结构如图 2 所示。

选取原机平原外特性进行验证,所验证的参数

为扭矩、功率、油耗率和增压压力等对本研究有重要影响的关键参数。各参数仿真计算结果与试验值的误差如图 3 所示,可见各项误差均在 $\pm 5\%$ 范围内,该仿真模型具有较高的准确性,能够真实反映该柴油机的实际性能。

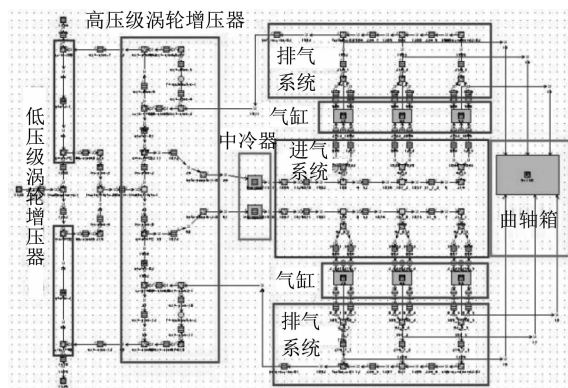


图 2 柴油机 GT-power 仿真模型

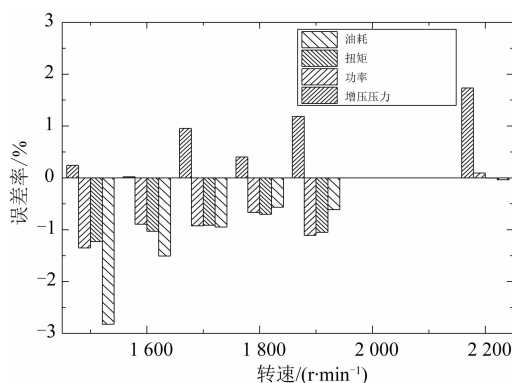


图 3 仿真模型的试验验证

2.2 最大扭矩点工况扭矩恢复及最高燃烧压力和排温控制规律

仿真计算过程中,设置不同柴油机循环喷油量,通过调节可调两级涡轮增压系统使得柴油机运行在不同过量空气系数工况下。原机在 4 500 m 最大扭矩点工况时的过量空气系数为 1.2,因此考察过量空气系数低至 1.2。柴油机运行在海拔 4 500 m 时最大扭矩点转速 1 500 ($r \cdot \min^{-1}$) 时,不同循环喷油量、不同过量空气系数下的扭矩、最高燃烧压力、排气温度如图 4 所示。

随着过量空气系数增大,柴油机进气量逐渐充足,过量空气系数对扭矩的影响减小,特别是在喷油量较小的情况下。在过量空气系数较低的情况下,增大喷油量对扭矩的提高帮助不大,当过量空气系数大于 1.6 后,增大喷油量对扭矩提高的作用逐渐明显。

过量空气系数在 1.6 以下时,最高燃烧压力随过量空气系数增大的速率变化不大,最高燃烧压力

等值线呈均匀分布；过量空气系数达到 1.6 以上时，最高燃烧压力增大速率随过量空气系数增大逐渐放缓，低喷油量工况较高喷油量工况最高燃烧压力增速更慢；等过量空气系数线最多只贯穿三条最高燃烧压力等值线，而等喷油量线几乎贯穿所有最高燃烧压力等值线，说明过量空气系数对最高燃烧压力的影响更为明显。

同一循环喷油量条件下，随着过量空气系数的逐渐增加，柴油机的排气温度逐渐减小，减幅也逐渐变小。在大油量低过量空气系数工况下，过量空气系数对排温影响最明显。

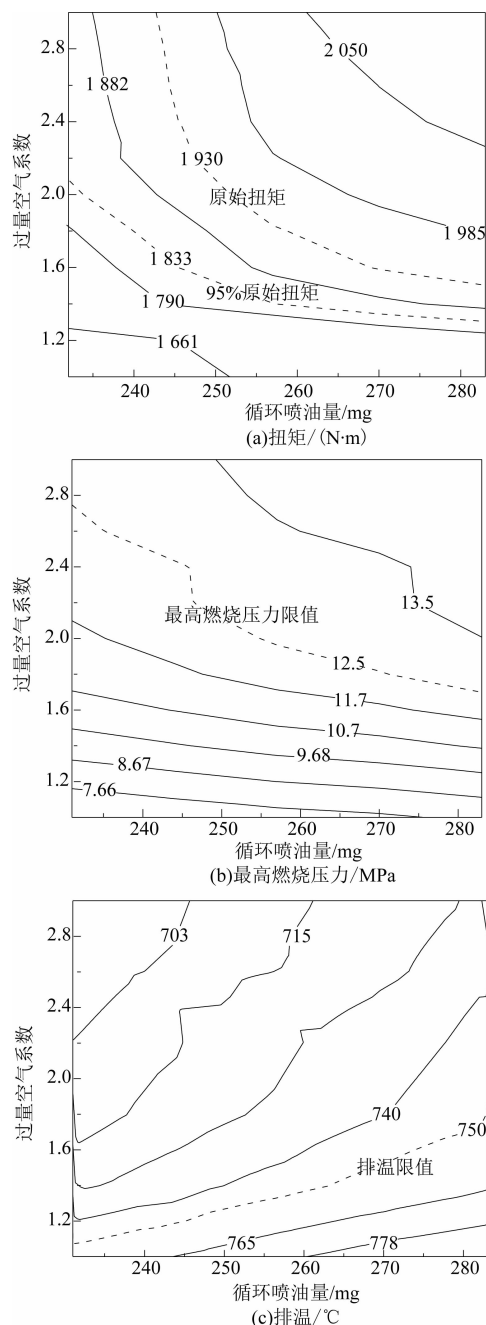


图4 海拔4500 m、最大扭矩点扭矩、最高燃烧压力、排温

2.3 标定点工况功率恢复及最高燃烧压力和排温控制规律

柴油机运行在海拔 4500 m、最大功率点、转速 2200 ($r \cdot \min^{-1}$) 时，计算得到的不同循环喷油量、不同过量空气系数下的功率、最高燃烧压力和排气温度如图 5 所示。

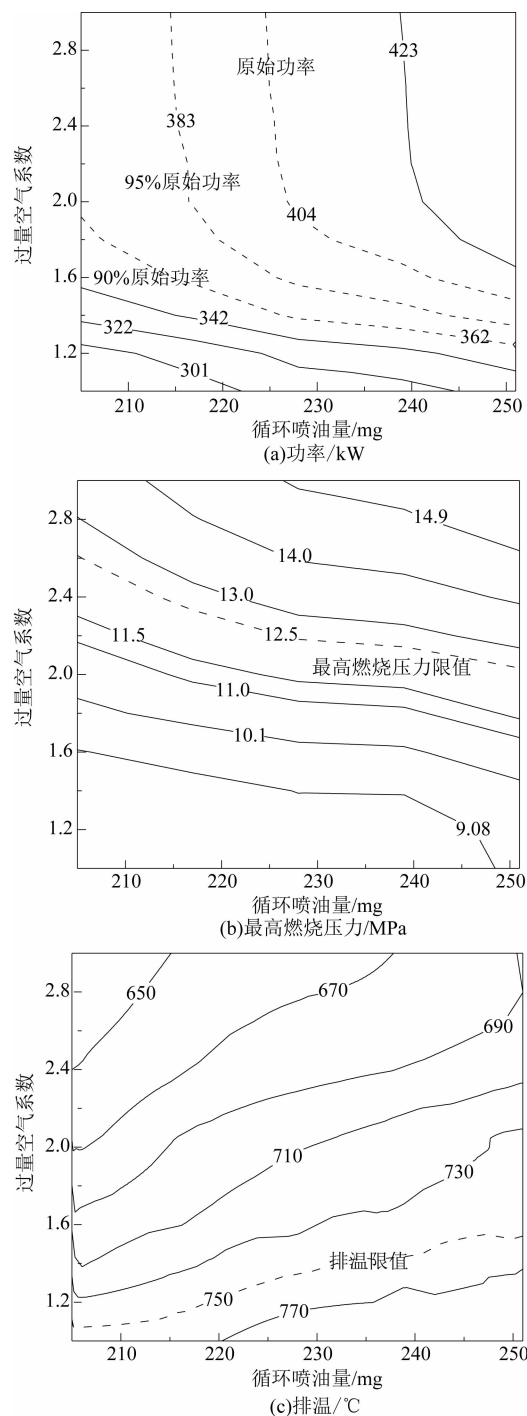


图5 海拔4500 m、标定点工况功率、最高燃烧压力、排温

标定点工况排温分布规律与最大扭矩点的不同，过量空气系数在 2.4 以下时，等值线分布较为均匀，排温随过量空气系数和喷油量的变化速率不

大;在高过量空气系数下,排温降低速度随过量空气系数增大速率降低。

同一循环喷油量条件下,随着过量空气系数的逐渐增加,柴油机的功率逐渐升高。当过量空气系数超过2时,柴油机进气量充足,缸内燃烧较充分,因而柴油机功率随过量空气系数的增加基本不变。

标定工况点最高燃烧压力分布规律与最大扭矩点的不同,等值线分布在整个区域内较为均匀,最高燃烧压力随过量空气系数和喷油量增大的速率在全工况下变化不大。

2.4 最大扭矩、最大功率恢复控制规律

在满足最高燃烧压力和排气温度不超过设计限值的条件下,柴油机在海拔4 500 m实现最大扭矩点扭矩恢复和标定工况点功率恢复如图6、图7所示。

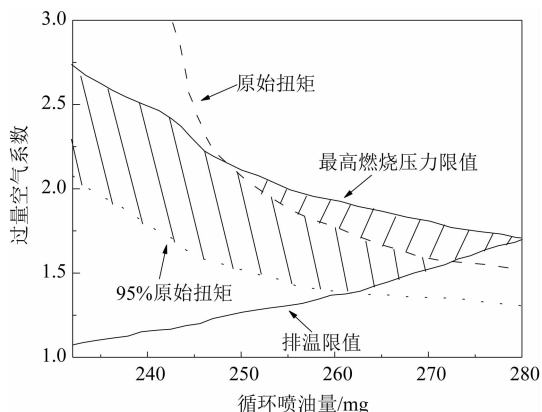


图6 最大扭矩点扭矩恢复

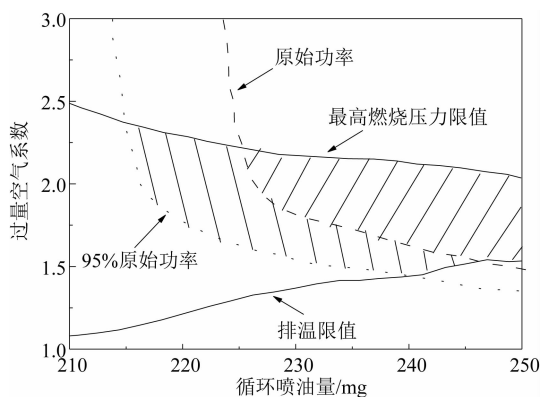


图7 标定工况点功率恢复

在最大扭矩点,在排温限和最高燃烧压力限的限制下,可用工况区域为一个三角形区域。最高燃烧压力限和排温限都对完全扭矩恢复产生限制,完全扭矩恢复的过量空气系数范围为1.6~2.2,对应的喷油量范围为272~248 mg;最高燃烧压力限对95%扭矩恢复不构成限制,而喷油量过大时,实现95%扭矩恢复会发生排温超限。95%扭矩恢复的过量空气系数范围为1.5~2,对应的喷油量范围为

261~230 mg。随着循环喷油量的增加,满足柴油机扭矩恢复要求的过量空气系数范围整体下移,在高循环喷油量工况,由于两条循环扭矩恢复线逐渐接近,范围变窄;当喷油量达到262 mg以上时,由于排温限制,过量空气系数范围逐渐收缩至一点。

在标定工况点,与最大扭矩点情况相似,可用工况区域在排温限和最高燃烧压力限的限制下,为一个三角形区域。循环喷油量较小时难以满足柴油机功率恢复要求。当循环喷油量足够大时,过高的过量空气系数会造成柴油机最高燃烧压力超过限值,过小的过量空气系数则会造成柴油机排气温度超过限值。相比最大扭矩点,此时柴油机的进气量更为充足,95%功率恢复线与完全功率恢复线同样受到了最高燃烧压力限的限制。当过量空气系数大于2.0时,两条恢复线斜率均变大,这是因为空气量相对充足,过量空气系数对功率影响较小。完全扭矩恢复过量空气系数范围为1.6~2.2,对应的喷油量范围为245~225 mg;95%扭矩恢复过量空气系数范围为1.5~2.3,对应的喷油量范围为240~215 mg。随着循环喷油量的增加,满足柴油机功率恢复要求的过量空气系数范围整体下移,当循环喷油量大于225 mg,两条功率恢复线明显接近,过量空气系数范围明显变窄。

3 结 论

本文主要针对柴油机高原性能恶化的问题,开展了可调两级涡轮增压柴油机高海拔油气协同控制研究。主要结论如下:

(1) 在海拔4 500 m,通过采用可调两级增压的方式,该柴油机可以达到100%最大扭矩恢复和最大功率恢复。

(2) 在最大扭矩点,最高燃烧压力等值线分布规律在过量空气系数较低时呈较均匀分布,而在过量空气系数较大时,分布密度明显降低;在大油量、低过量空气系数工况下,过量空气系数对排温影响最明显;可用工况区域在排温限和最高燃烧压力限的限制下为一个三角形区域。

(3) 在标定工况点,最高燃烧压力等值线在全工况下分布较为均匀;排温等值线在过量空气系数2.4以下分布较为均匀,排温随过量空气系数和喷油量变化速率在过量空气系数2.4以下变化不大,在高过量空气系数下,排温降低速度随过量空气系数增大速率有所降低;可用工况区域在排温限和最高燃烧压力限的限制下为一个三角形区域。

(下转第9页)

0.18 MPa 时, 天然气喷射流量 m_0 最高约为 1.85 ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$), 每个喷射周期内喷射量约为:

$$m = \frac{m_0 \times 60}{n} = \frac{1.85 \times 60}{482} = 0.23 (\text{g}) \quad (9)$$

式中: n 为电机驱动轴转速。

综上可知: 持续喷射 120 °CA 时, 双阀作为喷射阀组时可满足发动机在 90% 负荷时对天然气喷射量的需求。

4 结 论

(1) 试验结果表明: 针对淄柴 Z6170ZLC-1 设计的天然气供给系统的关键设备满足发动机单缸额定工况时天然气供应量的需求。

(2) 通过进气模拟喷射试验, 确定了喷射阀的控制脉宽及合适的喷射阀前压力, 为发动机在双燃料模式下运行提供了依据。

(3) 本文仅针对淄柴 Z6170ZLC-1 机型在额定

工况下的进气进行模拟, 如应用到其他机型时, 可通过调整喷射阀的控制脉宽, 或改变每缸进气道上喷射阀数量, 来满足不同机型额定工况下对耗气量的需求。

参考文献

- [1] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
 - [2] 马志超. 船舶发动机天然气应用的关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
 - [3] 苏万华, 林志强, 汪洋, 等. 气口顺序喷射、稀燃、全电控柴油/天然气双燃料发动机的研究 [J]. 内燃机学报, 2001, 19 (2): 102-108.
 - [4] 窦慧莉, 刘忠长, 李骏, 等. 电控多点喷射天然气发动机的开发 [J]. 燃烧科学与技术, 2006. 12 (3): 257-262.
 - [5] 庾汉卿. LNG/柴油双燃料发动机及其燃料管系安全监控系统研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
-
- (上接第 4 页)
- (4) 最高燃烧压力和排温的限制确定了最大扭矩和最大功率恢复油气范围。在最大扭矩点工况, 随着循环喷油量的增加, 满足柴油机扭矩恢复要求的过量空气系数范围整体下移; 在标定工况点, 随着循环喷油量的增加, 满足柴油机功率恢复要求的过量空气系数范围整体下移, 当循环喷油量大于 225 mg, 两条功率恢复线明显接近, 过量空气系数范围明显变窄。
- ## 参考文献
- [1] 刘瑞林. 柴油机高原环境适应性研究 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
 - [2] 利奇. 柴油机可调两级增压系统变海拔自适应控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
 - [3] 李文祥, 王彦岩. CA6110/125Z1A2 增压柴油机对青藏高原适应性的研究 [J]. 汽车技术, 2001 (7): 5-12.
 - [4] FOSBERRY R A C, HOLUBECKI Z. Some consideration of the effect of atmospheric conditions on the performance of automotive diesel engines [C]. SAE paper 660744.
 - [5] 张建村, 潘利群. 高原柴油机的增压器匹配性能研究 [J]. 柴油机设计与制造, 2005, 14 (3): 10-12.
 - [6] 李晓然, 许世海. 高原环境对柴油机性能的影响及解决措施 [J]. 内燃机, 2014 (3): 15-17.