

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.049

不同海拔下柴油机可调二级增压系统的经济性调节方法

赵长禄 李长江 韩 恺 夏 萌

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 在6V柴油机原机模型校核的基础上,按照高原匹配策略匹配了可调二级增压系统,并搭建了可调二级增压柴油机性能仿真模型。研究了不同海拔环境下(0 m和4.5 km)高压级涡轮旁通流量率对柴油机性能参数的影响规律,分析了旁通流量率对柴油机燃油经济性的影响机理,以及海拔环境对柴油机二级增压系统调节规律的影响。得到了不同海拔环境下(0 m和4.5 km)高压级涡轮旁通流量率的经济性调节规律和可靠性调节规律。相较于可靠性调节规律,经济性调节规律的调节范围更加宽广,能够显著降低调节区域的燃油消耗率。4.5 km海拔环境下经济性调节规律的调节区域比0 m海拔环境下经济性调节规律的调节区域窄。在低负荷时,4.5 km海拔环境下燃油消耗率比平原时低,中高负荷时比平原时高。

关键词: 柴油机; 高原; 可调二级增压; 经济性调节方法

中图分类号: TK421.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0369-08

Regulated Method Based on Fuel Economy for Regulated Two-stage Turbocharging System of Diesel at Different Altitudes

Zhao Changlu Li Changjiang Han Kai Xia Meng

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A regulated two-stage turbocharging system was matched for a 6V diesel engine for the purposes of improving its performance at plateau, as well as solving the problems of turbo surge, overspeed and overheat of exhaust when diesel engine running at high altitude (4.5 km). The simulation model of the regulated two-stage turbocharging diesel engine at different altitudes (0 m and 4.5 km) was set up based on the calibrated original diesel engine model. The influence rule of bypass flow rate of high-pressure stage turbine on the performance parameters of diesel at different altitudes (0 m and 4.5 km) was studied. And the influence mechanism of bypass flow rate of high-pressure stage turbine on fuel economy was analyzed, IMEP_g and PMEP were key factors which seriously affected the BSFC when adjusted the bypass flow rate of high-pressure stage turbine. Meanwhile, the influence rule of altitude on IMEP_g and PMEP was illuminated, which could be used to explain the influence mechanism of altitude on BSFC of diesel engine. The economic regulated law and reliability regulated law of the turbo system at different altitudes (0 m and 4.5 km) were obtained through the optimization of bypass flow rate. The range of economic regulated law was wider than that of reliability regulated law, and it could observably reduce the BSFC within its regulated area compared with reliability regulated law. At altitude of 4.5 km, the range of economic regulated law was narrower than that at altitude of 0 m. In addition, at medium and high loads, the BSFC was higher than that at altitude of 0 m; however, at low load, the BSFC was lower than that at altitude of 0 m.

Key words: diesel; plateau; regulated two-stage turbocharging; economic regulated method

收稿日期: 2015-07-06 修回日期: 2015-08-11

基金项目: 部委基础科研项目(D2220112901)

作者简介: 赵长禄(1963—),男,教授,主要从事车辆动力系统仿真、设计及控制研究,E-mail: clzhao@bit.edu.cn

引言

可调二级增压是解决柴油机在高原运行时,动力性恶化、增压器超速、喘振等问题的有效措施^[1-8]。柴油机和增压器在耗气特性上存在差异,为了使柴油机和增压系统在一定海拔跨度和发动机工况范围内均能匹配良好,需要对增压系统的增压能力进行调节。当前关于可调二级增压柴油机高原适应性的研究^[1,3,5]均以缸内最高燃烧压力不超限或增压器不超速作为不同海拔下柴油机可调二级增压系统调节的依据。这样以可靠性作为增压系统调节依据的调节方案仅需在中高转速大负荷时开启高压级旁通阀。张哲等^[9]研究发现柴油机相继增压系统最经济的策略是:发动机低转速中高负荷时仅使用小增压器(涡轮端流通面积小);中等转速中高负荷时仅使用大增压器(涡轮端流通面积中);发动机高转速中高负荷以及全转速范围的低负荷工况时,将上述大小增压器并联工作(涡轮端流通面积大)。即柴油机增压系统涡轮端流通面积的调整可实现全工况范围内的经济性优化。可调二级增压系统在全工况范围内均可通过涡轮旁通阀开度调节实现涡轮端等效流通面积的调整,涡轮旁通阀开度越大,涡轮端等效流通面积越大^[10]。因此在满足可靠性的基础上,有进一步优化旁通阀开度改善经济性的空间。

本文在单级增压柴油机校验模型的基础上,搭建不同海拔下的可调二级增压柴油机性能仿真模型,为该机型匹配满足高原适应性的二级增压系统,研究在不同海拔下涡轮旁通阀调节对柴油性能的影响规律,并得到不同海拔下的经济性调节规律。

1 仿真模型的建立

1.1 原机模型的搭建与验证

以某V型6缸柴油机为研究对象,该柴油机匹配了单级涡轮增压器(不可调),其基本参数如表1所示。

表1 柴油机主要参数

Tab.1 Key parameters of V6 engine

参数	数值
气缸数	6
缸径/mm	132
活塞行程/mm	145
压缩比	16.5
排量/L	11.9
标定功率/kW($r \cdot \min^{-1}$)	330.5(2100)
最大转矩/($N \cdot m$)($r \cdot \min^{-1}$)	1987(1300)

本文的仿真计算模型在GT-Power中搭建,包括气缸、曲轴箱、进排气系统、增压系统等子模型。采用基于神经网络的预测型燃烧模型^[11-15]。该模型能够体现进气状态(进气温度、压力、空气流量)对燃烧放热规律的影响,适用于对不同海拔下增压系统的研究。详细的建模与验证过程见文献[16],本文仅对整机性能进行验证(图1、2)。平原(0 m)和高原(4.5 km)主要性能和状态参数的仿真计算结果均能与试验数据较好的吻合,其中扭矩和空气流量的相对误差在3%以内,爆压和涡轮前温度相对误差在7%以内,满足工程研究的需要。

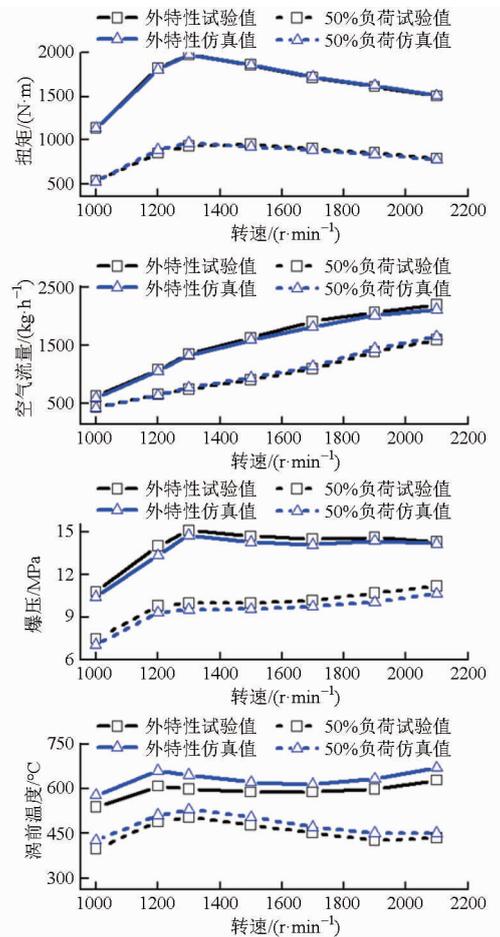


图1 0 m 仿真结果与试验数据对比

Fig.1 Comparison of simulation and experiment results at altitude of 0 m

1.2 可调二级增压系统

高、低压级增压器串联布置(图3),新鲜空气依次通过低压级、高压级压气机,经中冷器后进入各气缸;发动机废气经过高压级、低压级涡轮膨胀后进入大气环境。高压级涡轮与压气机均并联旁通管路和旁通阀,通过调节旁通阀开度可使一部分废气绕过高压级涡轮后直接进入低压级涡轮,降低高压级增压器转速,达到调节增压压力的目的;当旁通废气量过大,高压级增压器转速较低时,高压级压气机仅随

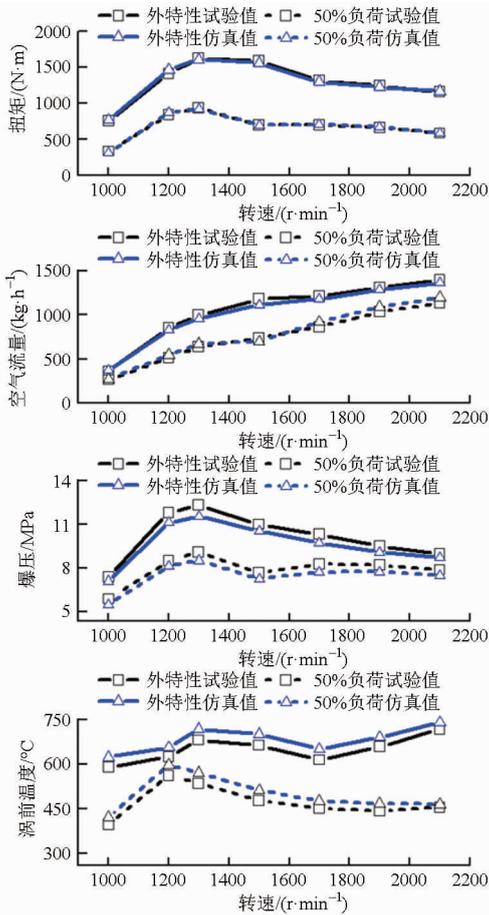


图 2 4.5 km 仿真结果与试验数据对比

Fig. 2 Comparison of simulation and experiment results at altitude of 4.5 km

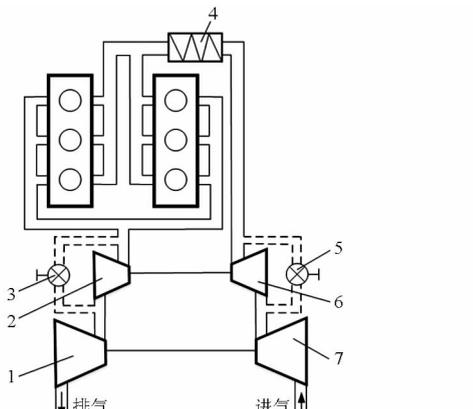


图 3 可调二级增压原理图

Fig. 3 Schematic diagram of regulated two-stage turbocharging

- 1. 低压级涡轮 2. 高压级涡轮 3. 高压级涡轮旁通阀 4. 中冷器
- 5. 高压级压气机旁通阀 6. 高压级压气机 7. 低压级压气机

着气流惰转, 丧失增压作用, 此时将高压级压气机旁通阀完全开启以减小气流在高压级压气机中的流动损失。

1.3 旁通阀模型

相关研究表明, 相较于内置式旁通阀, 外置式蝶阀的调节方式能够实现更大的旁通流量, 可实现高

压级增压器短路^[17-18], 因此本文采用外置式蝶阀的调节方式, 其流通模型为

$$\dot{m} = A_{eff} \rho_{is} U_{is} = C_D A_R \rho_{is} U_{is} \quad (1)$$

其中

$$\rho_{is} = \rho_o P_r^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2)$$

$$U_{is} = \sqrt{RT_o} \frac{2\gamma}{\gamma-1} (1 - P_r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}})^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 \dot{m} ——质量流量, kg/s

A_{eff} ——有效流通面积, m²

ρ_{is} ——喉口密度, kg/m³

U_{is} ——蝶阀入口等熵速率, m/s

C_D ——流量系数(图 4)

ρ_o ——上游滞止密度, kg/m³

A_R ——参考流通面积, m²

P_r ——出口静压与入口总压之比

R ——气体常数 γ ——比热容比

T_o ——蝶阀入口滞止温度, K

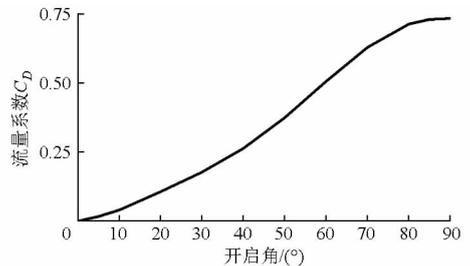


图 4 流量系数

Fig. 4 Discharge coefficient

2 柴油机高原二级增压系统匹配

以高原动力性恢复为目的进行可调二级增压系统匹配, 要求在高原(海拔 4.5 km)最大扭矩点达到原机平原水平, 标定点达到平原水平的 90% 以上。设定 4.5 km 最大扭矩点高、低压级压气机压比分配为 4:6^[19-20], 预估标定点压比分配达到 1:2。根据研究机型的技术参数和匹配目标, 结合内燃机学、热力学等理论计算得出在 4.5 km 海拔下的最大扭矩点和标定点的高、低压级压气机压比和折合流量, 进而进行高、低压级压气机初选。最终选定的高低压级压气机型号分别为 Garrett GT4088R 和 GT4718R。

涡轮的匹配主要是涡轮流通能力的匹配。通过调整高低压级涡轮箱的 A/R 值可以实现各自涡轮流通能力的调节, 进而实现对增压压力和压比分配的调节。在仿真计算中则直接调整高低压级涡轮的流通特性使系统在匹配点达到预期的增压压力和压比分配。最终得到高低压级压气机在高原和平原的匹配图如图 5、6 所示。

4.5 km 海拔环境下旁通阀全关; 平原, 由于达到爆压的限值, 从最大扭矩点(1 300 r/min)开始调

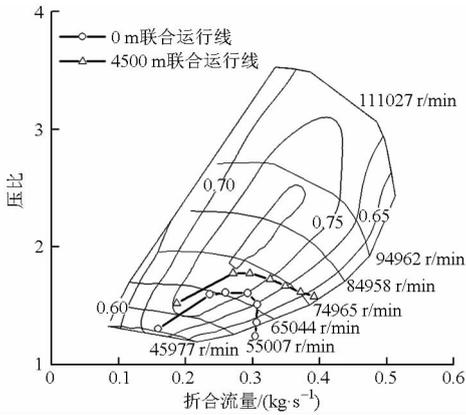


图5 高压级压气机匹配图

Fig.5 Engine operation point on high-pressure compressor's map

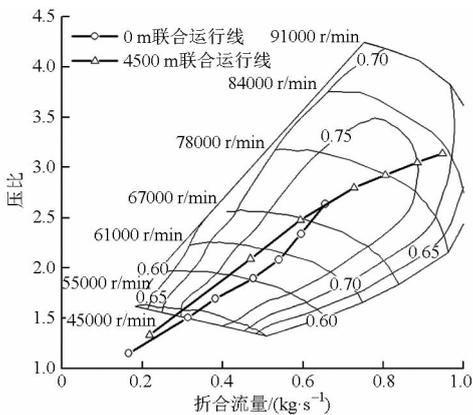


图6 低压级压气机匹配图

Fig.6 Engine operation point on low-pressure compressor's map

节涡轮旁通阀,压气机旁通阀关闭。4.5 km,最大扭矩达到原机平原最大扭矩的98.7%,标定点功率达到原机平原标定点功率的93.5%,性能达到了预期的目标要求。

3 不同海拔下的调节规律

3.1 柴油机可调二级增压系统的调节方法

为了化解高转速与低转速、平原与高原的匹配矛盾通常采用低海拔高速时旁通高压级增压器的方案。通过调节旁通阀开度使爆压和高压级增压器转速在许可范围内,以满足可靠性要求,这样的调节规律称为可靠性调节规律。

可靠性调节规律仅在中高转速大负荷时开启高压级涡轮旁通阀,忽略了泵气损失的影响,会导致燃油经济性变差,进一步优化旁通阀开度能够改善经济性。以可靠性要求为前提,通过可调二级增压旁通阀的调节,使柴油机的燃油消耗率达到最低,这样的调节规律称为经济性调节规律。

3.2 不同海拔下旁通流量对柴油机性能的影响

高压级涡轮旁通对柴油机性能的影响主要体现

在缸内燃烧和泵气损失的变化上^[10]。旁通流量率越小,增压压力和空气流量越大,缸内燃烧越充分,但泵气损失也越大。最佳的旁通阀开度受工况、匹配的增压系统和海拔环境等因素的影响。本节以前文模型为基础,仿真研究不同海拔下旁通流量对柴油机性能的影响规律。

设计如表2所示的3个仿真工况(非外特性工况),分别在0 m和4.5 km设置各工况下涡轮旁通阀开度从0°(全关)到90°(全开)范围内变化,研究旁通阀调节对柴油机性能的影响。以旁通流量率表征旁通状态,定义旁通流量率为通过旁通阀的排气流量与发动机的排气总量之比。

表2 3个仿真工况

Tab.2 Simulation operations

工况	转速/(r·min ⁻¹)	循环喷油量/mg
1	1300	33
2	1500	100
3	1900	160

在0°~60°范围内,随着旁通阀开度的增大,各工况下的旁通阀流量率逐渐增大(图7),旁通流量率几乎随旁通阀开度线性增大,当开度增大到60°以后,旁通流量率稳定在70%~75%之间。

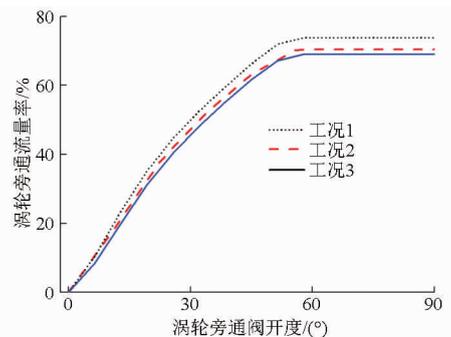


图7 旁通流量率随涡轮旁通阀开度的变化

Fig.7 Variations of bypass flow rate with bypass opening degree

3个设计工况在不同海拔下涡轮旁通流量率对柴油机性能的影响见图8。图中,PMEP为平均泵气压力:单位气缸容积在进排气行程所做的指示功,PMEP为负表示缸内气体对活塞做负功,即泵气损失;IMEPg为总平均指示压力:单位气缸容积在压缩和做功行程所做的指示功;FMPEP为平均摩擦压力。其中IMEPg与PMEP之和为IMEPn:净平均指示压力,即单位气缸容积一个循环内所做的指示功。平均有效压力为IMEPn与FMPEP之差。

首先讨论不同海拔下旁通流量率对柴油机性能的影响。工况1,0 m海拔环境下,随着涡轮旁通流量率的增大,增压压力和空燃比均逐渐减小,IMEPg有小幅下降,PMEP逐渐增大,FMPEP无变化,BSFC

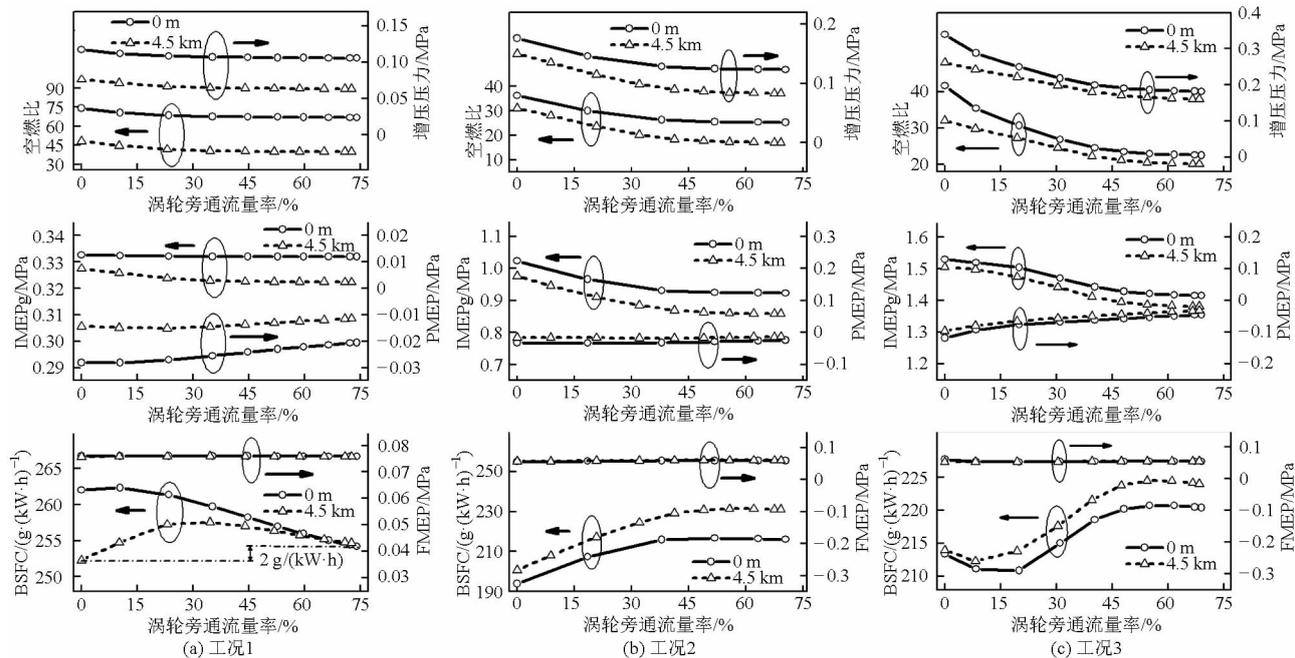


图 8 涡轮旁通流量率对柴油机性能的影响

Fig. 8 Influence of bypass flow rate on diesel performance

(燃油消耗率)逐渐减小。在工况 1 的小负荷区域,即便涡轮旁通阀全开使旁通流量率达到最大,空燃比依然相对充裕(63 以上),超出了缸内有效燃烧对空气流量的需求,因此 IMEPg 随旁通流量率的变化很小。而小负荷下空气流量小,排温低(空燃比大),涡轮增压器工作在低效率区,导致涡前压力高,进排气负压差大,此时,增大旁通流量率可降低涡前压力,对 PMEP 的提升作用相对显著,并且 FMEP 不随旁通流量率变化,因此 BSFC 主要受 PMEP 的影响,随涡轮旁通流量率的增大而减小。

4.5 km 海拔环境下,各参数(BSFC 除外)随旁通流量的变化趋势与 0 m 时相同,变化幅度有异。与 0 m 海拔时相比,4.5 km 海拔下的增压压力和空燃比大幅降低(空燃比在 46 以下),此时的空燃比变化对缸内燃烧的影响较显著,因此当空燃比随旁通流量率的增大而减小时,IMEPg 明显下降。而 PMEP 随旁通流量率的变化幅度较 0 m 时小,同样 FMEP 不随旁通流量率变化,因此 BSFC 在 IMEPg 和 PMEP 的综合作用下先增大再减小,总体而言,BSFC 在旁通流量率为 0 时最低。

工况 2,各参数在 0 m 和 4.5 km 海拔环境下随旁通流量率的变化趋势相同,变化幅度相近。随着旁通流量率的增大,增压压力、空燃比、IMEPg 逐渐减小,PMEP 有小幅增大,FMEP 保持不变,BSFC 逐渐增大。该工况下,空燃比相对工况 1 更小(0 m 时空燃比范围 36 ~ 25;4.5 km 时空燃比范围 31 ~ 18),空燃比在该范围内时,其对缸内燃烧的影响十分显著,因此 IMEPg 随旁通流量率增大而显著下

降。相对而言,PMEP 随旁通流量率的变化并不显著,同样地,旁通流量率对 FMEP 无影响,因此 BSFC 主要受 IMEPg 的影响,随涡轮旁通流量率的增大而增大。

工况 3,各参数(BSFC 除外)在 0 m 和 4.5 km 海拔下随旁通流量率的变化趋势与前 2 个工况相类似;不同的是,并非 PMEP 和 IMEPg 两个参数中某一个随旁通流量率的变化幅度明显大于另一个。当旁通流量率小于某一值时,随着旁通流量率的增大,PMEP 增大的幅度大于 IMEPg 减小幅度,BSFC 主要受 PMEP 的影响,逐渐减小;当旁通流量率大于该值时,随着旁通流量率的增大,IMEPg 减小的幅度大于 PMEP 增大的幅度,BSFC 主要受 IMEPg 的影响,逐渐增大。

综上所述:同一工况下,FMEP 不受旁通流量率的影响,因而随着旁通流量率的变化,影响燃油消耗率主要是 IMEPg 和 PMEP,IMEPg 随旁通流量率增大而减小,PMEP 随旁通流量率增大而增大。燃油消耗率最低的旁通流量率需要综合考虑旁通流量对两者的影响敏感度。随着旁通流量率的增大,如果 IMEPg 减小的幅度大于 PMEP 增大的幅度,则旁通流量率越小,BSFC 越小;反之,则旁通流量率越大,BSFC 越小。

其次,同一旁通流量率下,与 0 m 海拔时相比,4.5 km 海拔环境下各工况的增压压力、空燃比和 IMEPg 均降低,而 PMEP 上升,FMEP 不变。IMEPg 的降低是增压压力和空燃比降低导致缸内燃烧恶化的结果;由于环境背压的降低,涡前压力随之降低,

且其降低幅度大过增压压力的降低幅度,使得进排气负压差减小,PMEP 相对 0 m 时增大。类似地,同一旁通流量率下,若 IMEP_g 的降低量大于 PMEP 的升高量,则 4.5 km 海拔下的 BSFC 高于 0 m;反之,则 4.5 km 海拔下的 BSFC 低于 0 m。因此工况 2、3 在 4.5 km 海拔下的 BSFC 高于 0 m。工况 1,旁通流量率在 60% 以内时,4.5 km 海拔下的 BSFC 低于 0 m 海拔下的 BSFC;旁通流量率高于 60% 时,情况相反。且工况 1 在 4.5 km 海拔环境下的最低 BSFC (旁通流量率为 0 时)比其在 0 m 海拔环境下的最低 BSFC (旁通流量率为 75% 时)低 2 g/(kW·h)。

3.3 不同海拔下的经济性调节规律

在上述影响规律研究的基础上获得全工况范围内的调节规律,仿真计算的方法如下。①初步计算:首先在 1 000 ~ 2 100 r/min 范围内每隔 100 r/min 进行负荷特性仿真,扭矩变化步长为 200 N·m,每一个工况下旁通阀开度在 0° ~ 70° 均匀变化(变化步长 7°),按照调节依据优化得到各工况下的旁通阀开度和旁通流量率。②初步计算得到旁通阀开启与关闭边界的大致范围后,进一步缩小扭矩变化步长和旁通阀开度变化范围,获得准确的边界。

3.3.1 0 m 海拔环境下的经济性调节规律

0 m 海拔环境下的可靠性调节规律(高压级增压器限速 111 027 r/min,缸内最高燃烧压力不超过 15 MPa)和经济性调节规律的对比如图 9 所示。可靠性调节规律在中高发动机转速,大负荷区域因达到爆压的限制而调节涡轮旁通流量;转速越高,负荷越大,旁通流量率越大。经济性调节规律在 1 500 r/min 及以下转速的大负荷区域与可靠性调节规律相同,因达到缸内最高燃烧压力限制而调节旁通流量;1 500 r/min 以上工况,经济性调节规律的调节范围比可靠性调节规律宽广,延伸到了中等负荷区域,同一工况下,旁通流量率比可靠性调节规

律大。且在低负荷区域涡轮旁通阀和压气机旁通阀全开(压气机旁通阀的开启条件:压气机间压力大于或等于高压级压气机出口压力)。

全转速范围的低负荷工况下,空燃比富余,燃烧充分,而排气能量低,增压系统效率低,旁通流量率对泵气损失影响显著,因此将压气机及涡轮旁通阀完全打开有利于降低泵气损失和燃油消耗率,与前文所设计的 3 个仿真工况中的工况 1 类似。在发动机中低转速、中高负荷区域,随着负荷的增大,空燃比下降,相对旁通流量率对泵气损失的影响,旁通流量率对燃烧效率的影响更加显著,此时应该关闭旁通阀,提高缸内燃烧效率,才能降低燃油消耗率,与工况 2 类似。但在中等转速的外特性附近,由于达到了缸内最高燃烧压力的限值,需要旁通少量废气。在发动机中高转速,中高负荷区域,空气流量的增大使得泵气损失的影响更为突出,与工况 3 类似,存在某一旁通流量率,使燃油消耗率最低。随着转速和负荷的增大,泵气损失逐渐增大,燃油消耗率最低的旁通流量率逐渐增大。

将同一工况下经济性调节规律与可靠性调节规律的燃油消耗率做差运算,结果见图 10。经济性调节规律调节区域内燃油消耗率比可靠性调节规律有大幅降低,如在发动机中高转速中高负荷区域,1 900 r/min、1 200 N·m 工况降低了 4.5 g/(kW·h),标定点降低了 4.8 g/(kW·h);在低负荷区域(300 N·m 以下),1 300 r/min、250 N·m 工况降低了 6 g/(kW·h)。

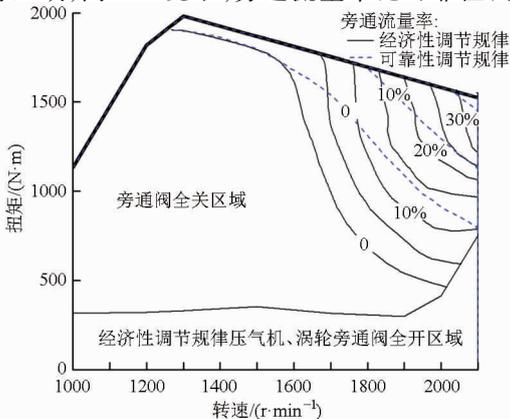


图 9 经济性调节规律与可靠性调节规律对比
Fig. 9 Comparison of two regulating laws of turbine bypass flow rate at altitude of 0 m

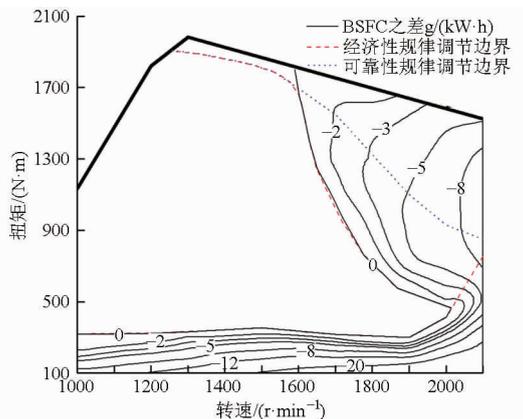


图 10 0 m 经济性调节规律与可靠性调节规律的燃油消耗率之差
Fig. 10 Comparison of BSFC between two regulated methods at altitude of 0 m

3.3.2 4.5 km 海拔下的经济性调节规律

高原环境下的可靠性调节规律在全工况范围内均关闭旁通阀。经济性调节规律:由于高原可能出现空气流量不足的情况,需要增加对涡前温度的限制(涡前温度不超过 700℃)。最终得到 4.5 km 海拔环境条件下的经济性调节规律(图 11)。

全工况范围均未达到 3 个约束条件的限值(爆压、增压器转速、涡前温度)。依然在低负荷区域完全打开涡轮旁通阀,但旁通阀全开的边界扭矩相对平原降低;在高发动机转速,涡轮旁通阀调节的区域相对平原也变窄,同一工况下的旁通流量率减小。2 种调节规律在经济性上的差异见图 12, 标定经济性调节规律的燃油消耗率比可靠性调节规律低 4.3 g/(kW·h)。

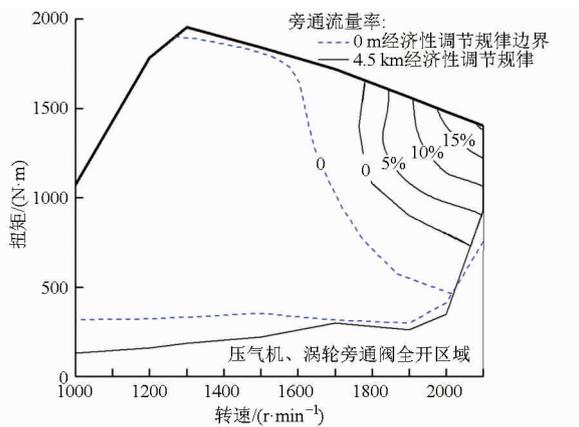


图 11 4.5 km 与 0 m 经济性调节规律对比

Fig. 11 Comparison of regulating law of turbine bypass flow rate based on fuel economy at altitude of 4.5 km and 0 m

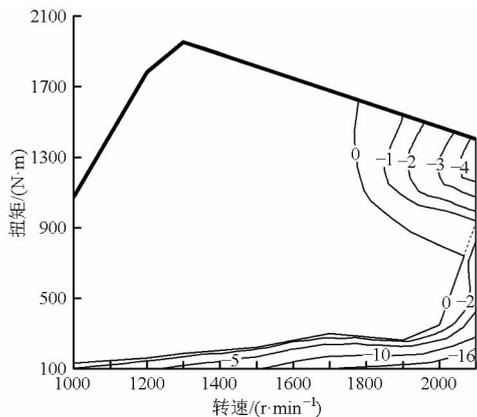


图 12 4.5 km 经济性调节规律与可靠性调节规律燃油消耗率之差

Fig. 12 Comparison of BSFC between two regulated methods at altitude of 4.5 km

由于高原空气流量的下降,导致 4.5 km 海拔环境条件下大部分工况的经济性有所恶化(图 13):低转速时尤为突出,1 000 r/min、700 N·m 工况燃油消

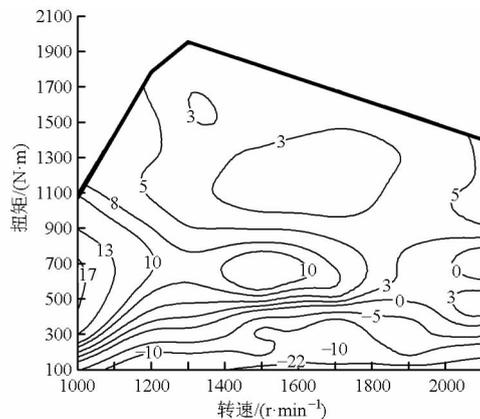


图 13 4.5 km 经济性调节规律与 0 m 经济性调节规律燃油消耗率之差

Fig. 13 Comparison of BSFC between altitudes of 0 m and 4.5 km

耗率上升了 17 g/(kW·h);最大扭矩点的燃油消耗率上升了 3.5 g/(kW·h);标定点燃油消耗率上升了 5.2 g/(kW·h)。而在低负荷区域,4.5 km 海拔环境下的燃油消耗率低于 0 m 海拔环境下的燃油消耗率,这是由于在低负荷区域,4.5 km 海拔环境下的泵气功相对 0 m 的增加量大于 IMEP_g 的下降量造成的,与工况 1 类似。

4 结论

(1) 相对可靠性调节规律,经济性调节规律有利于降低调节区域的泵气损失,改善经济性。

(2) 当调节涡轮旁通流量时,主要是 IMEP_g 和 PMEP 两因素影响整机的经济性。低负荷工况, PMEP 是影响经济性的主要因素,此时增大涡轮旁通流量率能够有效提升 PMEP、降低燃油消耗率;随着负荷的上升,IMEP_g 的影响大于 PMEP,此时应该尽可能地减小涡轮旁通流量率以降低燃油消耗率;在中高转速中高负荷区域,存在某一涡轮旁通流量率使 IMEP_g 和 PMEP 之和最大,燃油消耗率最低。

(3) 高原环境下的经济性调节区域较平原窄,同一工况下,对应的涡轮旁通流量率更小。由于环境压力的降低使 PMEP 增大,IMEP_g 下降。低负荷区域, PMEP 的增大量大于 IMEP_g 的下降量,因此燃油消耗率比平原低;中高负荷区域, IMEP_g 的降低更为显著,燃油消耗率相对平原上升。

参 考 文 献

- 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 Hualei, Shi Lei, Deng Kangyao, 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)
- 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.
- 刘系昊, 魏名山, 马朝臣, 等. 不同海拔下单级和二级增压柴油机的仿真[J]. 内燃机学报, 2010, 28(5): 447-452.
Liu Xihao, Wei Mingshan, Ma Chaochen, et al. Simulation on one-stage and two-stage turbocharged diesel engine at different

- altitudes[J]. Transactions of Chinese Society for Internal Combustion Engines, 2010,28(5):447-452. (in Chinese)
- 4 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 Zhenxia,Zhang Fujun,Ma Chaochen,et al. Application of supercharging technologies for diesel engine at plateau[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2014,43(4):73-80. (in Chinese)
- 5 施新,李文祥. 匹配二级顺序增压系统的柴油机高原特性仿真[J]. 兵工学报, 2011,32(4):397-402.
Shi Xin,Li Wenxiang. Simulation on plateau performance of diesel engine matched with two-stage sequential turbocharging system [J]. Acta Armamentarii,2011,32(4):397-402. (in Chinese)
- 6 韩恺,朱振夏,张付军,等. 可调复合增压柴油机高原功率恢复方案研究[J]. 兵工学报, 2013,34(2):129-136.
Han Kai,Zhu Zhenxia,Zhang Fujun,et al. Research on composite adjustable supercharged program of diesel engine for power recovery at plateau[J]. Acta Armamentarii, 2013,34(2):129-136. (in Chinese)
- 7 董素荣,刘瑞林,周广猛,等. 共轨柴油机高海拔碳烟形成历程的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2013,19(5):388-394.
Dong Surong,Liu Ruilin,Zhou Guangmeng, et al. Numerical simulation of soot formation histories for common rail diesel engine at high altitude[J]. Journal of Combustion Science and Technology,2013,19(5):388-394. (in Chinese)
- 8 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 Hualei,Shi Lei,Deng Kangyao, et al. Calibration of high altitude power recovery for D6114 diesel engine[J]. Vehicle Engine, 2013(4):30-35. (in Chinese)
- 9 张哲,邓康耀,钱跃华. 大小涡轮三阶段相继增压系统性能试验研究[J]. 内燃机学报, 2010,28(1):68-73.
Zhang Zhe, Deng Kangyao, Qian Yuehua. Experimental study on performances of diesel engine with 3-phase sequential turbocharging system and unequal size turbochargers[J]. Transactions of Chinese Society for Internal Combustion Engines, 2010, 28(1):68-73. (in Chinese)
- 10 刘博. 柴油机可调二级涡轮增压系统研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
- 11 吴滔滔. 面向综合控制的动力装置动态建模及性能匹配研究[D]. 北京:北京理工大学, 2014.
- 12 Wu Taotao, Zhao Changlu, Han Kai, et al. Control-oriented modeling of turbocharged diesel engines transient combustion using neural networks[C]. SAE Paper 2014-01-1093, 2014.
- 13 Serrano J R, Climent H, Guardiola C, et al. Methodology for characterisation and simulation of turbocharged diesel engines combustion during transient operation. Part 2: phenomenological combustion simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(1):150-158.
- 14 Serrano J R, Arnau F J, Dolz V, et al. Methodology for characterisation and simulation of turbocharged diesel engines combustion during transient operation. Part 1: data acquisition and post-processing[J]. Applied Thermal Engineering, 2009,29(1):142-149.
- 15 Galindo J, Lujan J M, Serrano J R, et al. Combustion simulation of turbocharger HSDI diesel engines during transient operation using neural networks[J]. Applied Thermal Engineering, 2005,25(5-6):877-898.
- 16 朱振夏,张付军,吴滔滔,等. 基于神经网络的零维预测燃烧模型及建模方法[J]. 内燃机学报, 2015,33(2):163-170.
Zhu Zhenxia, Zhang Fu jun,Wu Taotao, et al. The 0-D predictable combustion model based on neural network and the modeling method[J]. Transactions of Chinese Society for Internal Combustion Engines, 2015,33(2):163-170. (in Chinese)
- 17 魏名山,张志,何永玲,等. 带不同类型调节阀的二级增压系统结构与性能对比[J]. 内燃机工程, 2009,30(1):51-54.
Wei Mingshan, Zhang Zhi, He Yongling, et al. Configuration and performance comparisons between regulated two-stage turbocharging systems with different valves[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009,30(1):51-54. (in Chinese)
- 18 刘博,钱跃华,邓康耀,等. 蝶阀在可调二级增压柴油机中的调节特性计算研究[J]. 内燃机工程, 2011,32(2):17-22.
Liu Bo, Qian Yuehua, Deng Kangyao, et al. Computational study of regulating characteristics of butterfly valve on the regulated two stage turbocharged diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011,32(2):17-22. (in Chinese)
- 19 李胜达,石磊,邓康耀,等. 两级增压柴油机增压器匹配方法与压比分配规律的研究[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(B10):205-209.
Li Shengda, Shi Lei, Deng Kangyao, et al. Matching method and law of pressure ratio assignment on two stage turbocharging diesel engine[J]. Railway Locomotive and Car, 2011, 31(B10):205-209. (in Chinese)
- 20 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京:机械工业出版社, 1992.