

柴油机高原功率恢复供油参数仿真研究

Simulation of Injection Parameters for Turbocharged Diesel Engines Work at High Altitude

朱振夏 韩恺 吴滔滔 刘杨杨 罗国良

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要: 针对高原环境下发动机功率下降的问题, 本文通过对供油系统参数的调节实现发动机高原功率的恢复。基于 GT-POWER 软件建立了某 V 型 6 缸增压柴油机仿真模型, 以试验数据对模型进行了详细校核, 为研究高原性能重新匹配了流量和压比范围更宽广的增压器。研究了喷油提前角与功率、涡轮入口温度和缸内最高燃烧压力之间的关系, 并以此为依据提出了供油参数的调节方法。计算了 3 种不同的供油参数调整方案, 并对结果进行了对比分析。在海拔 4500m 条件下, 采用提前角和供油量联合调整的方法可将发动机标定功率恢复至平原的 75%。

关键词: 动力机械及工程; GT-SUITE; 高原功率恢复; 喷油提前角

Abstract: This study delivers a method to achieve power recovery for diesel engine on the plateau by adjusting the fuel supply parameters without the necessity of modifying the engine structures or adding any accessories. A model for a V6 turbocharged engine equipped with a new compressor, was established for the highland simulation. Through simulation, the influence of the fuel injection advance angle on the power, turbine intake temperature and maximum combustion pressure was investigated. Based on the results of the investigation, a detailed method to adjust the fuel supply parameters was put forward. Eventually, three different simulating schemes were calculated and compared in the paper. Once applied this method to adjust the injecting timing and fuel mass together, the rated power of the engine at the altitude of 4500m can reach up to 75% of its counterpart on the plain.

Key words: power machinery engineering; GT-SUITE; power recovery at plateau; fuel injection advance angle

0 引言

我国地域辽阔, 海拔高度在 3000m 以上的高原地区占全国总面积的 26%。根据地球物理学知识, 在高原环境下空气的压力和密度降低, 海拔 4500m 处大气压力为 59.3kPa, 大气密度为 0.82kg/m³, 造成发动机功率的下降, 高原运行车辆的行驶性能恶化, 研究高原环境下发动机的功率恢复具有重要意义。^[1]

高原环境下空气稀薄，导致发动机燃烧空气质量减少，缸内燃烧不充分，发动机功率和效率降低。增压柴油机具有一定的高原功率补偿能力，但是高海拔条件下易出现压气机喘振、涡轮入口温度过高、增压器超速等问题。若减少柴油机的供油量，则一定程度上能缓解气缸和涡轮的热负荷问题，但是将会进一步损失输出功率。^[2]

为此，相关的研究人员从改善进气、燃烧多角度出发，研究柴油机高原功率恢复技术。在增压技术中，先后提出过 VGT（可变几何涡轮）、可调二级增压、STC（相继增压）等可调节增压技术来满足柴油机在不同海拔的进气需求^[3]。在燃烧技术中，通过燃油高压喷射和强制卷流技术，实现燃油在低空燃比下的充分燃烧^[4]。根据实际的条件，选择某种技术或几种技术的组合，可以在一定程度上恢复发动机功率。

喷油提前角作为电控柴油机重要的供油参数，对柴油机缸内燃烧过程、发动机效率、缸内压力、排气温度等有重要影响^[5]。本文通过仿真计算，验证了不改变原发动机结构、不增加额外附件的前提下，通过 ECU 对供油参数的调整，实现高原环境下的柴油机功率恢复的方案。

1. 增压柴油机仿真计算模型

1.1 仿真模型的建立

在本文的研究中，采用某 6 缸 V 型增压中冷发动机研究高原环境下的功率恢复策略。首先建立了基于 GT-POWER 软件的柴油机仿真模型，该柴油机部分输入参数如表 1 所示。

表 1 柴油机主要参数
Table1. Part key parameters of the V6 engine

参数名称	数值
气缸数	6
排量 L	11.9
缸径 mm	132
行程 mm	145
压缩比	17
标定功率 kW (2100 r/min)	330
最大扭矩 N·m (1400r/min)	1800
缸内最高许可压力 MPa	17
涡轮入口最高许可温度 °C	750

为了保证该仿真模型能够准确计算在高原环境下的性能，对燃烧过程的计算采用了基于韦伯函数的半预测模型。该模型能够考虑在压缩冲程终了时刻缸内的温度、压力、空燃比和转速对燃烧的影响。^[6]

柴油机燃烧可分为预混燃烧和扩散燃烧，采用两个韦伯函数分别描述这两个过程的放热率^[7]。燃料的燃烧速率 $dx/d\phi$ ：

$$\frac{dx}{d\phi} = \beta \frac{dx_p}{d\phi} + (1 - \beta) \frac{dx_d}{d\phi} \quad (1)$$

β ——预混燃烧比例；

ϕ ——曲轴转角；

dx_p 、 dx_d ——预混燃烧速率、扩散燃烧速率；

$$\frac{dx_p}{d\varphi} = 6.908 \frac{m_p + 1}{\varphi_p} \left(\frac{\varphi - \varphi_{Bp}}{\varphi_p} \right)^{m_p} \exp[-6.908 \left(\frac{\varphi - \varphi_{Bp}}{\varphi_p} \right)^{m_p + 1}] \quad (2)$$

$$\frac{dx_d}{d\varphi} = 6.908 \frac{m_d + 1}{\varphi_d} \left(\frac{\varphi - \varphi_{Bd}}{\varphi_d} \right)^{m_d} \exp[-6.908 \left(\frac{\varphi - \varphi_{Bd}}{\varphi_d} \right)^{m_d + 1}] \quad (3)$$

m_p 、 m_d ——预混燃烧、扩散燃烧品质系数;

φ_p 、 φ_d ——预混燃烧、扩散燃烧持续期, °CA;

φ_{Bp} 、 φ_{Bd} ——预混燃烧、扩散燃烧起始角度, °CA;

$$\varphi_{Bp} = \varphi_i + \tau \quad (4)$$

$$\varphi_{Bd} = \varphi_{Bp} + \frac{1}{2} \varphi_p \quad (5)$$

φ_i ——喷油器起始角, °CA;

τ ——滞燃期以曲轴转角计, °CA;

$$\tau = (0.36 + 0.22 \bar{s}_p) \exp \left[E_A \left(\frac{1}{RT} - \frac{1}{17190} \right) \left(\frac{21.2}{p - 12.4} \right) \right]^{0.63} \quad (6)$$

$\bar{s}_p$ ——活塞平均速度 m/s;

R ——通用气体常数, 8.314J/mol·K;

E_A ——燃料活化能, J/mol;

预混比例:

$$\beta = 1 - \frac{0.9}{\alpha^{0.35} \tau_{id}^{0.4}} \quad (7)$$

α ——空燃比;

τ_{id} ——滞燃期以时间计, ms;

由式(1)-(7)可知, 韦伯模型参数的取值与瞬时空燃比、压力和温度等状态参数有关, 其他参数的计算公式可参见文献[8]和[9].

1.2 模型验证

华北柴油机厂在高原环境模拟试验台上开展了同系列 8 缸柴油机试验, 采集了平原状态和海拔 4000m 状态下发动机的性能。将发动机外特性的功率、机械损失和空气流量等试验数据与 6 缸机归一化处理后, 对柴油机模型的燃烧过程、进排气系统和整体性能进行了校验。

1.2.1 燃烧模型校核

首先, 验证燃烧过程的计算模型。以外特性试验采集的中冷后压力、温度和循环供油量等参数作为输入条件, 对比试验和仿真的燃烧过程。

受限于试验中缺少集缸压曲线，只对最高爆发压力和涡轮入口温度进行对比，结果如图 1 所示，两参数的计算结果可以与试验数据很好的吻合，误差小于 3%。

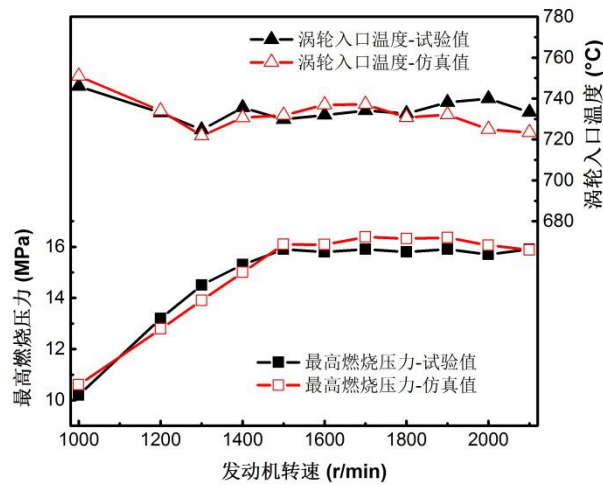


图 1 最高燃烧压力和涡轮温度的对比

Fig1. Comparison of Pmax and Intake Temperature of the Turbine between simulation and experiment results

需要开展高原环境下的仿真计算，所以对燃烧模型的环境适应能力进行验证。图 2 中的两条曲线分别表示平原和高原状态标定点的瞬时放热率，0°CA 对应活塞上止点。

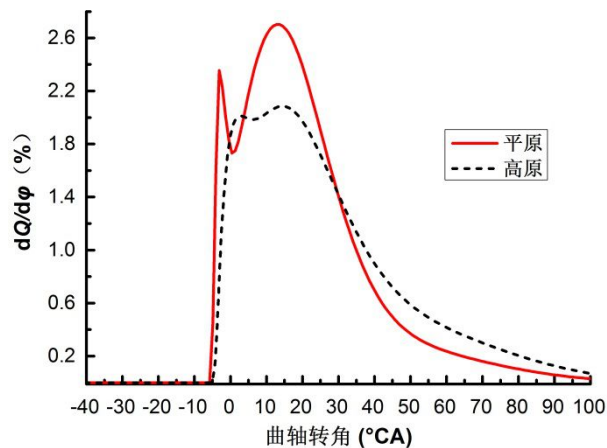


图 2 平原和高原状态的放热率

Fig2. Heat Release Curves at different altitude

从图 2 上可以看出，高原状态柴油机放热率的最高峰值下降，燃烧滞后且持续期增长。随着海拔升高，在活塞接近上止点时缸内工质的温度和压力下降，燃烧的物理、化学准备过程增长，导致滞燃期延长，预混燃烧延迟到上止点后，与扩散燃烧过程重叠较多，两个放热率尖峰不明显，10%-90% 燃料燃烧的持续期由 43°CA 增长至 58°CA。后燃比例的增加，导致混合气不能充分膨胀，排气温度会有所上升。燃烧过程的变化规律与文献[6]相符，表明该燃烧模型能体现出环境变化对柴油机燃烧的影响。

1.2.2 进排气系统

然后，对模型的进排气系统的进行验证。将计算的压气机出口压力、空气流量、中冷器进出口温度、中冷器压降、涡轮入口压力等参数与试验值进行了比较。平原和 4000m 海拔状态的外特性空气流量对比如图 3 所示。

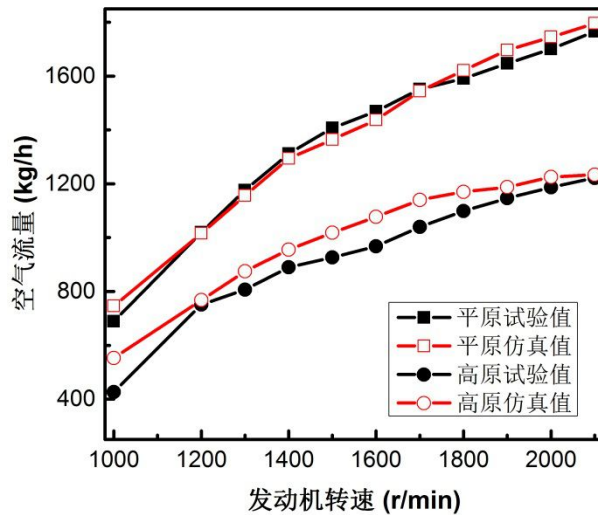


图3 空气流量的对比

Fig3. Comparison of mass flow rate of air between simulation and experiment results at different altitude

文献 [10]提到在海拔 4000m 以上压气机流量范围变窄、效率下降的规律, 导致高原状态计算的空气流量和试验值有一定的偏离。压气机性能变化对计算精度有一些影响, 但误差在允许范围之内, 而且匹配时联合运行线距离喘振线余量比较富裕。

1.2.3 发动机整体性能校核

最后对发动机整体性能进行了验证, 因仿真和试验采用了相同的循环供油量, 只需对比外特性功率, 结果对比如图 4 所示, 仿真计算的趋势正确, 误差小于 5%。

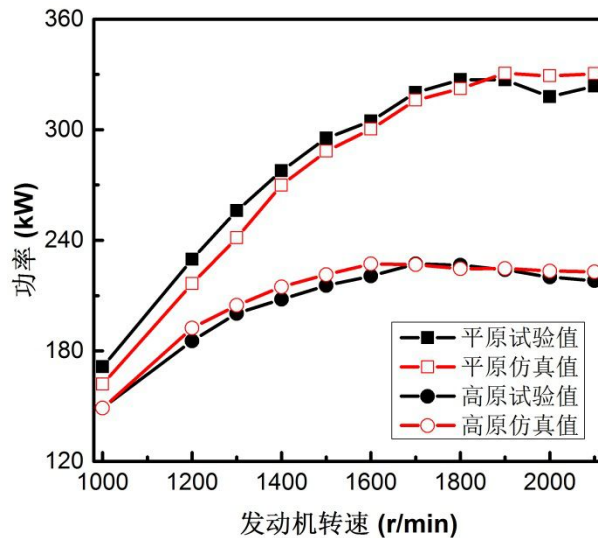


图4 外特性功率的对比

Fig4. Comparison of full-load power between simulation and experiment results at different altitude

本次仿真的主要目的是验证方案并研究参数的变化趋势, 为进一步开展高原环境试验提供参考, 校验结果表明模型的计算精度能满足要求。

1.3 压气机的重新匹配

从图 5 中可以看出, 原机采用的是低速匹配的涡轮增压器, 在低转速区间内 (1400r/min 以下)

压气机已进入高效区。当发动机工作在 1800r/min 以上转速时, 压气机达到了最高压力和最高转速限值, 需采取废气放气措施才能保证涡轮增压器的可靠工作。

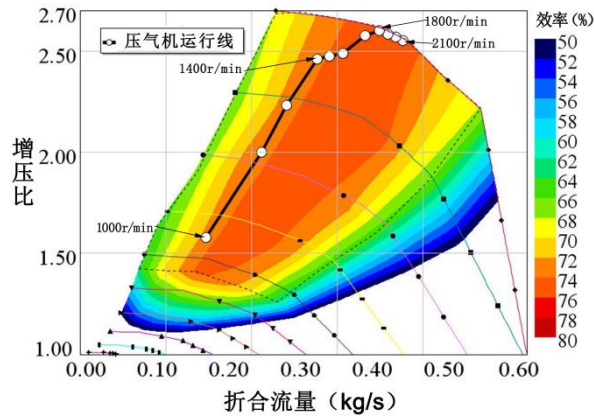


图 5 原压气机平原外特性运行线

Fig5. Full-load operation line on the original compressor map at plain

高原环境下空气稀薄, 为了保障发动机的工作需要提高压气机的压比, 另外, 高海拔下排气背压的降低易造成涡轮超速。原压气机在平原状态已经达到了最高压比和最高转速, 难以满足发动机在高原环境的功率恢复需求^[10]。为此, 重新选配了流量和压比范围更宽广的压气机进行高原性能的计算。

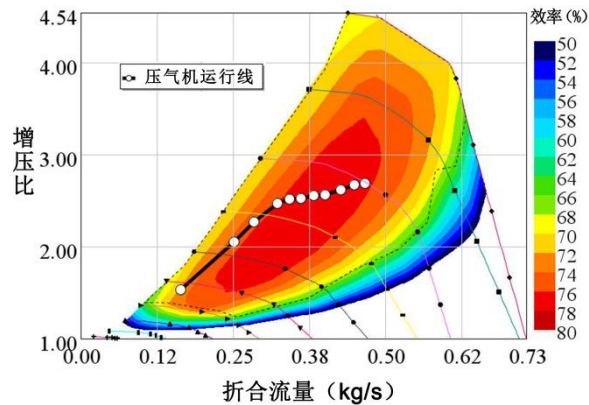


图 6 新压气机平原外特性运行线

Fig6. Full-load operation line on the new compressor map at plain

2. 高原性能仿真计算

本文中高原性能的计算均以 4500m 海拔的大气条件作为环境进行的, 大气压力为 59.3kPa, 温度为 5°C.

2.1 方案一: 空燃比与平原一致

高原仿真计算方案一: 通过供油量的调整, 保证在发动机外特性不同转速下的空燃比和平原一致。

表 2 方案一计算结果

Table2. Results of the Scheme 1

发动机 转速	循环 油量	功率	燃油消耗 率	空燃比	涡轮入口 温度	最高燃烧 压力
r/min	mg	kW	g/kW·h		°C	MPa
2100	140	214.4	246.9	20.8	730.0	9.74
1800	149	205	235.4	20.3	725.9	9.88
1600	152	189.6	231	19.6	731.4	9.53
1400	157	174.6	227.1	19.5	724.4	9.65
1200	140	132.7	227.9	19.6	694.5	8.41

从表 1 中方案一的计算结果可知（表 2），该方案相对比较保守，功率恢复能力较差。方案一采用的供油量参数可保证当量比不会超过冒烟极限，涡轮入口处的温度低，缸内热负荷低，且不易出现增压器超速的情况。

经过和平原的计算结果对比发现（表中应有平原数据），方案一的涡轮入口温度比平原降低。涡轮入口温度主要和空燃比和中冷后温度有关，方案一的空燃比与平原相当，而高原状态下气温更低。所以，方案一涡轮入口温度较低，距最高温度限值还有余量，可以增加供油量，恢复柴油机功率。

2.2 方案二：增加供油量

高原仿真计算方案二：在方案一的基础上增加发动机的供油量，并保证涡轮入口温度不高于 750 °C。

表 3 方案二计算结果

Table3. Results of the Scheme 2

发动机 转速	循环 油量	功率	燃油消耗 率	空燃比	涡轮入口 温度	最高燃烧 压力
r/min	mg	kW	g/kW·h		°C	MPa
2100	147.0	224.6	247.3	20.2	750.1	10.76
1800	159.2	218.3	236.2	19.5	749.9	11.05
1600	161.9	201.3	231.6	19.0	750	10.73
1400	172.4	191.1	227.4	18.8	749.8	10.85
1200	166.0	157.2	228.1	18.5	741.0	9.32

从方案二的计算结果表 3 可知，供油量的增加使得涡轮入口温度提高，发动机功率恢复能力有所增强。另外，虽然方案二的最高燃烧压力比方案一略高，但总体来说高原环境下发动机缸内压力下降，最高燃烧压力随之降低。

2.3 方案三：提前角与供油量联合调整

以海拔 4500m 环境下 2100r/min 的外特性工况为例，研究喷油提前角同涡轮入口温度、最高燃烧压力、发动机功率之间的影响关系。

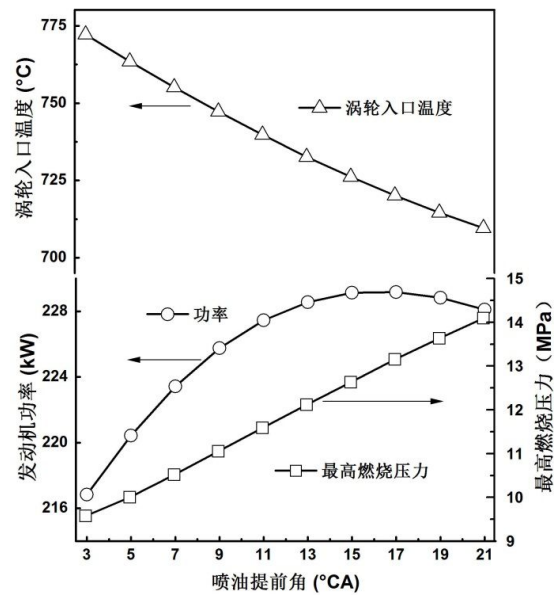


图 7 喷油提前角与涡轮入口温度、功率、最高燃烧压力

Fig7. The influence of inject timing on power, turbine intake temperature and maximum combustion pressure

从图 7 可知，随着喷油提前加大，最高燃烧压力提高，涡轮入口温度下降，发动机功率先提高后下降。

在调整范围内，提前角增大后的直接效果是整个燃烧过程的前移，涡轮入口温度降低，放热率峰值更加靠近上止点，最高压力上升，循环热效率提高。但是，过大的提前角会使活塞上行时产生更多的压缩负功，所以发动机功率先升高后降低。关于喷油提前角对滞燃期、燃烧过程、循环效率的影响机理在文献[11][12]中有充分的讨论。

从方案一、二的计算结果表 2、表 3 中可知，缸内最高燃烧压力距离许可压力限值（17MPa）还有充足的余量，可以适当增加喷油提前角。功率提高的同时还降低了涡轮入口温度，在此基础上可以继续增加供油量，提高发动机功率。

基于以上的分析，提出了高原仿真计算方案三：在方案二的基础上，通过调整供油量和提前角，保证涡轮入口温度和燃烧压力不超过限值，尽量恢复发动机的功率。考虑到喷油提前角的调整受到供油系统参数的限制（高压油泵特性等），在方案三中，喷油提前角由原机的上止点前 8°CA 提前到 20°CA，计算结果如表 4。

表 4 方案三计算结果

Table4. Results of the Scheme 3

发动机 转速 r/min	循环 油量 mg	功率 kW	燃油消耗 率 g/kW·h	空燃比	涡轮入口 温度 °C	最高燃烧 压力 MPa
2100	160	248.4	243.5	18.51	747.74	14.48
1900	170	244.7	237.6	18.1	748.81	14.89
1700	175	229.6	233.3	17.73	745.36	14.84
1500	180	210.8	230.6	17.34	743.46	14.60
1300	185	187.7	230.6	17.01	742.33	13.97

提前角和供油量联合调整后，循环供油量可以有所增加，最高燃烧压力提高至 15MPa 水平，涡轮入口温度接近 750℃，发动机的功率恢复能力得到了进一步的提升。

3. 不同方案的结果对比分析

表 5 中列出了三种方案在仿真计算时采用调整方法，图 8 和图 9 为三种方案计算结果的对比。

表 5 三种高原调节方案

	空燃比	循环油量	喷油提前角
方案一	与平原一致	少	8° CA
方案二	比平原低	中	8° CA
方案三	最低	多	20° CA

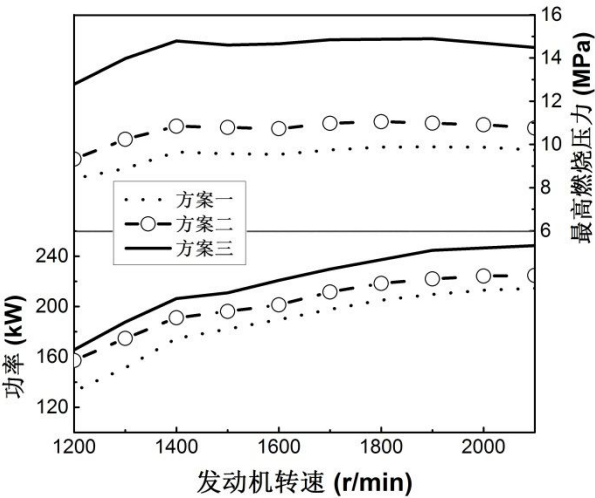


图 8 三种方案的功率和最高燃烧压力

Fig8. Power and Pmax of the three schemes

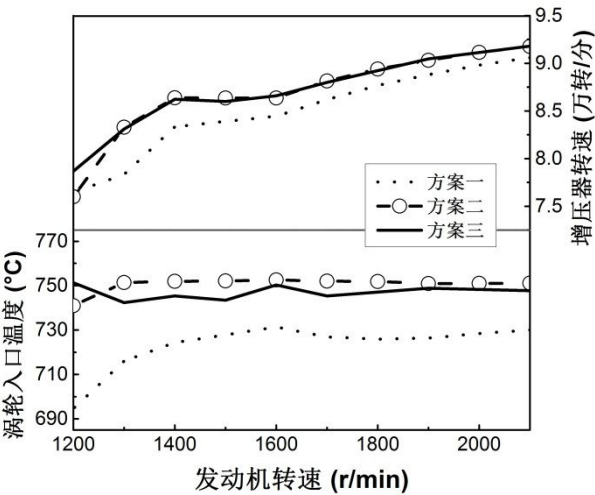


图 9 三种方案的涡轮入口温度和增压器转速

Fig9. Intake temperature of the turbine and the speed of the turbocharger among the three schemes

由图 9 可知，外特性功率曲线和最高燃烧压力曲线由高到低依次是方案三、方案二和方案一。方案三的标定功率达到 248kW，为平原标定功率的 75%，方案二和方案一的标定功率分别为 225kW

和 214kW, 为平原的 68%和 65%.方案三的不同转速下的最高燃烧压力在 13.5MPa-15MPa 之间, 而方案一和方案二在 8.5MPa-11MPa 之间, 方案二略高。

由图 9 可知方案一的涡轮入口温度较低, 不高于 730°C, 方案二和方案三的涡轮入口温度控制在 750°左右。方案二和方案三的增压器转速相当, 在 7.5 万转/分-9.5 万转/分的区间范围内, 方案一的增压器转速稍低一些。三种方案的增压器都没有达到最高转速限值 12 万转/分。

从表 2-4 和图 8-9 中的对比中可以推断, 与方案一相比, 方案二利用了高原环境下进气温度下降的特点, 通过供油量的增加, 提高了柴油机的功率。与方案二相比, 方案三利用了高原环境缸内压力降低的特点, 通过喷油提前角和供油量的联合调整, 更大程度实现了发动机功率的恢复。增加喷油提前角的主要贡献在于降低了涡轮入口温度, 允许增加供油量, 使得柴油机功率得到了进一步提高。

4. 结论

本文通过开展增压柴油机高原状态下不同供油调整方案的仿真计算, 得到了以下结论:

1. 喷油提前角加大后, 涡轮入口温度下降, 最高燃烧压力提高, 功率先升高后降低。
2. 通过仿真验证了喷油提前角和供油量联合调整方法恢复功率的有效性。在海拔 4500m, 采用喷油提前角和供油量联合调整后, 发动机标定功率恢复至平原的 75%。(结论需要重新归纳)

5 参考文献

- [1] 周广猛, 刘瑞林, 董素荣, 等. 高压共轨柴油机高海拔(低气压)燃烧特性[J]. 内燃机学报, 2012, (03): 220-226.
- Zhou Guangmeng, Liu Ruilin, Dong Surong, et al. Combustion Characteristics of Common Rail Diesel Engine Under High Altitude(Low Pressure)Conditions [J]. Transactions of CSICE, 2012, (03): 220-226.
- [2] 王完成, 郭猛超, 张晶, 等. 高原环境重型车用柴油机热负荷性能分析[J]. 内燃机工程, 2012, 33 (01): 49-53.
- Wang Xiancheng, Guo Mengchao, Zhang Jing, et al. Thermal Load Analysis of Heavy Duty Vehicular Diesel Engine in Plateau Area[J]. Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(01): 49-53.
- [3] 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 (04): 397-402.
- Shi Xin, Li Wen-xiang. Simulation on Plateau Performance of Diesel Engine Matched with Two-stage Sequential Turbocharging System [J]. ACTA ARMAMENTARII, 2011, 32(04): 397-402.
- [4] 尚勇, 刘福水, 李向荣, 等. 强制卷流燃烧室对改善柴油机油气混合研究[J]. 内燃机学报, 2010, (06): 488-493.

SHANG Yong, LIU Fu-shui, LI Xiang-rong, et al. Research on the Effect of Forced Swirl Combustion Chamber on Air – Fuel Mixture Process in Diesel Engine [J]. Transactions of CSICE, 2010, (06): 488-493.

[5] 黄粉莲, 纪威, 张禄, 等. 基于 OPTIMUS 的柴油机配气正时及喷油提前角的优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 27-32.

Huang Fenlian, Ji Wei, Zhang Lu, et al. Optimization of valve timing and injection advance angle of diesel engine based on OPTIMUS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 27 - 32.

[6] 高荣刚, 李国岫, 虞育松, 等. 高原环境对柴油机燃烧过程影响的仿真研究[J]. 兵工学报, 2012, (12): 1448-1454.

Gao Ronggang, Li Guoxiu, Yu Yusong, et al. Multi-dimensional Simulation for the Effect of Plateau Environment on Combustion Process in Diesel Engine [J]. ACTA ARMAMENTARII, 2012, (12): 1448-1454.

[7] 李照东, 王陈生. 高速直喷式柴油机高原工况模拟放热规律的研究[J]. 内燃机工程, 1989, (01): 76-82.

Li Zhaodong, Wang Chensheng. An Experimental Investigation on Simulation of Heat Release Rate for High Altitude High Speed DI Diesel Engine[J]. Internal Combustion Engine Engineering, 1989, (01): 76-82.

[8] 黄宜谅, 王志明. 高速直喷式柴油机燃烧放热规律的优化[J]. 内燃机学报, 1995, (02): 95-100.

Huang Yiliang, Wang Zhiming, The Optimum of Heat Release Rate Patterns in High Speed D.I. Diesel Engine[J]. Transactions of CSICE, 1995, (02): 95-100.

[9] John B Heywood. Internal Combustion Engine Fundamentals [M]. Singapore: McGraw-Hill Professional, 1988.

[10] 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, (02): 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, (02): 129-136.

[11] 赵奎翰, 魏建勤, 张惠明, 等. 供油提前角对直喷式柴油机喷雾、燃烧和碳粒变化历程的影响[J]. 内燃机学报, 2000, (01): 17-19.

Zhao Kuihan, Wei Jianqin, Zhang Huiming, et al. Effect of Injection Advance Angle on Spray, Combustion and Soot Formation in a Diesel Engine [J]. Transactions of CSICE, 2000, (01): 17-19.

[12] 何学良. 内燃机燃烧学. [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.