

特殊背压下高增压柴油机增压器匹配性能研究

黄 伟, 李静芬, 朱 奎, 周晓洁, 赵同宾

(七一一研究所, 上海 200090)

摘 要: 基于 GT-power 搭建了某高增压柴油机一维仿真模型, 并通过试验数据对模型进行标定。利用该模型计算分析了柴油机在不同排气背压下的性能, 利用计算结果配合试验, 分析了排气背压高且波动范围大工况下的压气机和涡轮的匹配。研究表明: 背压升高会导致柴油机性能恶化, 通过增压器的合理匹配可以实现高排气背压柴油机功率的恢复, 稳态工况下可以恢复至 59.8%, 背压波动工况可以恢复至 66%; 高排气背压工况应提高压气机低压比区域的效率和流量, 并适当控制高压比区域的压比; 涡轮喷嘴环流通面积对性能影响较大, 过大或过小均不利于功率恢复, 通过选择合适的涡轮, 可使功率恢复提升 10.9%; 柴油机性能参数随排气背压波动做规律波动, 但存在一定的延迟, 波动的幅值与该性能参数的迟滞时间负相关。

关键词: 高增压柴油机; 排气背压; 增压器; 匹配; 性能

中图分类号: TK421⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)02-0005-06

Study on Turbocharger Matching Performance of High-turbocharged Diesel Engine under Specific Back Pressure

Huang Wei, Li Jingfen, Zhu Kui, Zhou Xiaojie, Zhao Tongbin

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: Certain one-dimensional simulation model of high-turbocharged diesel engine was established based on GT-power, and calibrated by experimental data. The performances of the engine at different exhaust back pressure were predicted using the model, the results of which were then being used incorporated with the experimental data to analyze the matching between compressors and turbochargers at high and fluctuating back pressure. The results of the study showed that the rising back pressure would worsen the performance of the engine. And the performance of engine at higher back pressure was reversed by an appropriate matching of turbocharger, which recovered the engine power to 59.8% and 66%, respectively, at steady and fluctuating conditions. The efficiency and flow of compressor in the low boost ratio area should be increased, and the boost ratio in the high boost ratio area should be appropriately controlled under the high back pressure. Such recovery was strongly determined by the flow area of nozzle ring, too big or too small of which would not be effective. An appropriate selection of turbocharger increased the recovery rate by 10.9%. The fluctuation of the engine performance parameters reflected the changes in back pressure with a certain delay. And, the amplitude of fluctuates was correlated inversely with the length of delay.

Key words: high-turbocharged diesel engine; exhaust back pressure; turbocharger; matching; performance

0 引言

工作环境对柴油机和增压器的性能有很大影响^[1]。某特种设备需要长期工作在进气真空度高、排气背压高且变化范围大的环境下,柴油机的排气环境背压最高达到常背压的1.85倍,且存在最大70 kPa的波动。这对柴油机提出了特别的要求:一方面,柴油机须有较高的功率,且最高燃烧压力、涡轮前温等参数不超标,同时保证经济性;另一方面,由于排气背压的波动范围较大,为了保证柴油机稳定运行,需要其在背压波动范围内有好的背压适应性。

排气背压升高会导致涡轮膨胀比降低,进排气阻力增大,进气量减小,泵气损失增大^[2-3];同时,背压过高会导致柴油机废气倒灌,燃烧恶化。进排气难度增大和缸内燃烧恶化都会引起排气温度升高,烟度加大,排放恶化^[4-6]。

目前主要采用减小涡轮流通面积的方法解决高排气背压工况柴油机性能恶化问题^[7]。对于特种柴油机,排气背压高且波动大,高增压又限制了低背压工况压比的提升,仅靠减小涡轮流通面积难以满足性能要求。其特殊工作环境导致带放气的涡轮增压器和变截面涡轮等设备的使用受限,因此须匹配合适的常规涡轮增压系统以满足不同背压下的工作需求。

针对上述问题,利用GT-power搭建了某16V柴油机一维仿真模型,分析排气背压对涡轮增压柴油机性能的影响,并研究高排气背压环境下压气机和涡轮喷嘴流通面积对增压系统的影响;提出高排气背压工况功率恢复的增压器匹配方案,并通过改造后的实机试验来验证匹配计算的结果。

1 试验和仿真平台的建立

1.1 试验系统的建立

试验系统由16V涡轮增压柴油机、电涡流测功机、燃烧分析仪、油耗仪、冷却水温度控制装置、机油温度控制装置以及一系列压力和温度传感器等组成。为了控制柴油机的边界条件,系统中还装有进气真空度调节阀、排气背压调节阀以及进气加热器,并通过控制台控制。柴油机试验台位系统图如图1所示。

1.2 仿真平台的建立

原机为16V常背压涡轮增压发电柴油机,基于该柴油机的基础数据建立仿真模型,如图2所示。为了让模型具有预测性,采用DI-JET燃烧模

型,该模型根据广安博之模型建立^[8],并利用缸压和喷油率曲线进行标定。

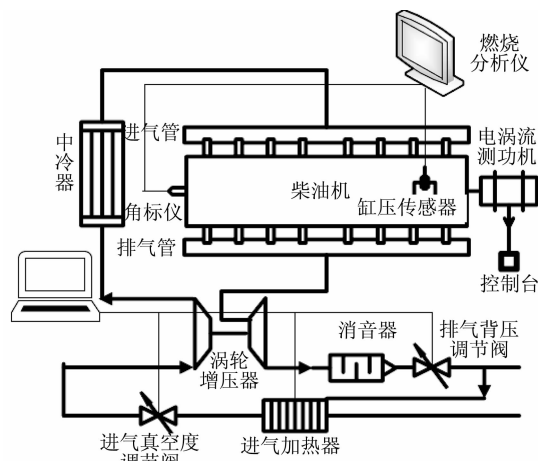


图1 柴油机试验台位系统图

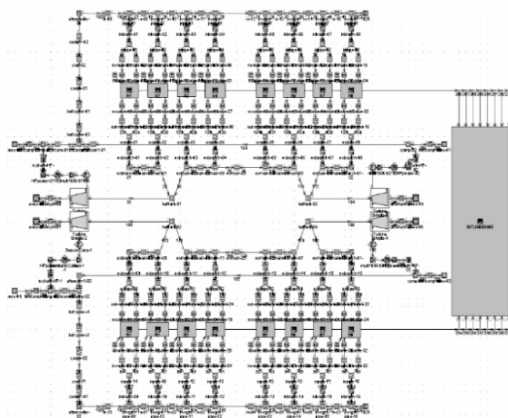


图2 原机仿真模型

对原机进行了负荷特性试验,以负荷特性的实测结果对GT-power仿真模型进行校核。试验与仿真结果的对比如图3所示。结果显示,仿真结果与试验结果吻合性较好,最大误差值为4.5%。表明仿真模型的设定与计算和实际工作过程基本一致,可以利用该模型进行下一步计算。

2 排气背压对柴油机性能影响规律

利用标定好的原机模型,选择原机额定负荷工况,根据某特种柴油机台架试验规范,改变柴油机运行的排气背压,分别计算排气背压为原机100%、115%、135%、165%、185%时的性能。

图4为不同背压下的缸压和放热率曲线。由图可知,随着排气背压升高,燃烧滞燃期增大,后燃比例增大,燃烧持续期增加。这是因为排气背压升高后缸内空燃比降低,在100%、115%、135%、165%、175%、185%背压工况时,空燃比分别为28.1、26.4、23.3、18.1、16.4、14.9,185%背

压下空燃比仅为 100% 背压下的 53%, 导致氧浓度低, 阻碍氧分子与油滴混合; 同时进气量减小导致压缩终了时缸内压力明显减小, 缸内油气混合弱化; 虽然排气背压升高后缸内残余系数增大, 但由于低背压时进气量大, 在同一压缩比下压缩终点的温度反而更高。计算显示: 185% 背压工况下压缩终点温度较 100% 背压工况下低 100.6 K。因此高排气背压工况的滞燃期增大。

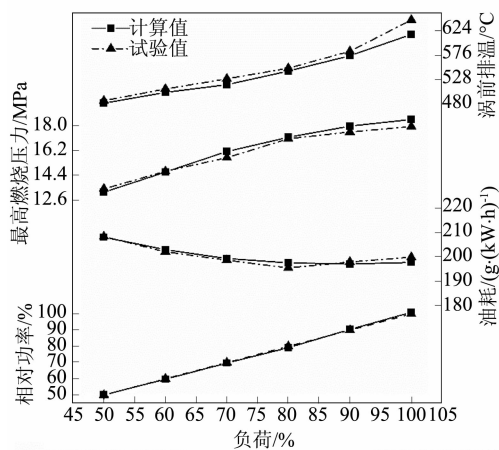


图3 原机试验与计算结果对比

些都导致燃烧恶化, 主燃期放热量减小, 平均指示压力降低, 后燃比例增加, 燃烧持续期增大, 燃油消耗率增大, 排温大幅升高。若以原机额定负荷涡轮增压器前温度为限制值, 计算得 115%、135%、165%、185% 工况的极限功率分别为原机的 94.6%、73.8%、47.1%、38.4%。因此必须对柴油机增压系统进行重新匹配, 以实现高排气背压工况下的功率恢复。

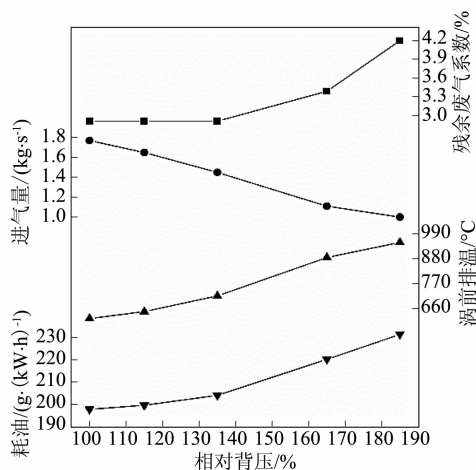


图5 柴油机不同背压下性能对比

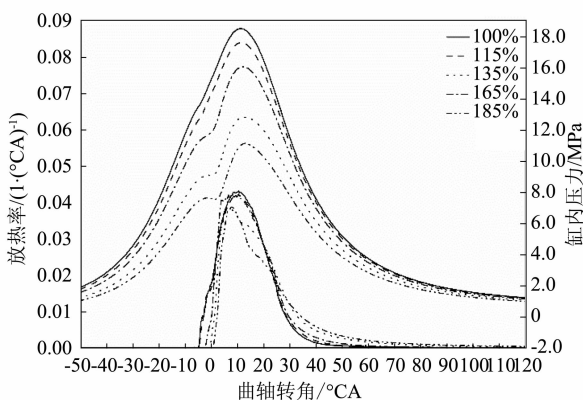


图4 缸压和放热率曲线

图5为原机额定负荷不同背压下性能对比。从图中可以看出 185% 背压工况的进气量只有 100% 背压工况的 56.5%, 过量空气系数则由 1.98 降至 1.03; 排气阶段废气倒流严重, 在低于 135% 相对背压时, 残余废气系数几乎不变, 当相对背压高于 135% 相对背压后, 残余废气系数开始急速上升, 并且背压越高, 上升速度越快, 185% 背压下残余废气系数为 100% 背压下的 1.45 倍。这样就产生内部 EGR 的效果, 降低了柴油机的热效率; 加之前文分析的排气背压升高后滞燃期增大, 燃烧相位后移, 等容度降低。由图4可以看出, 排气背压升高后缸内最高压力大幅降低, 最高压力点后移。这

3 增压系统匹配分析

采用上海交通大学顾宏中教授发展并细化了的 JTK 方法^[2], 以主要考虑 135%、165% 背压工况的工作性能, 兼顾其他背压工况的原则, 初步选定某型压气机及涡轮。将涡轮和压气机的图谱离散, 输入 GT-power 中进行计算。

分别用缸内最高燃烧压力和涡轮前排气温度衡量柴油机的机械强度和热强度, 将不同方案均调整至其在缸内最高燃烧压力不超过 18.0 MPa、涡轮前温度不超过 620 °C 时所能达到的最大功率。

3.1 压气机选配分析

依据前文分析, 选取了两个较原机更大流量的压气机, α 压气机和 β 压气机, 进行对比计算, 结果如图6、图7所示。

图6为在最高燃烧压力和涡轮前温度不超限情况下, 柴油机在不同背压下的最大功率。由图可知, 采用较大流量的 α 和 β 压气机后, 柴油机在高排气背压下的功率有较大的提升。在低背压工况 (115% ~ 160%) 时, 增压比较高, 进气量大, 导致最高燃烧压力过大, 限制了柴油机功率恢复; 在高排气背压工况 (160% ~ 185%) 时, 进气量减小, 涡轮前温度成为限制因素。由图可知, 在低背压工况两个压气机的做功能力非常接近, 在 115%、

125%、135%、145%、155% 相对背压工况, α 压气机的功率较 β 压气机的分别高 0.3%、0.2%、0.2%、0.4%、1.8%, 而在 165%、175%、185% 相对背压工况, β 压气机的功率较 α 压气机的分别高 1.6%、3%、9.2%。

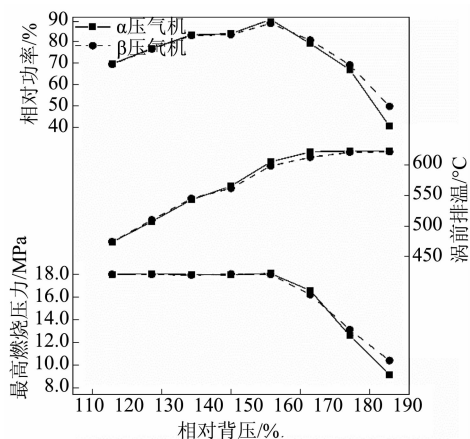


图6 两个压气机性能对比

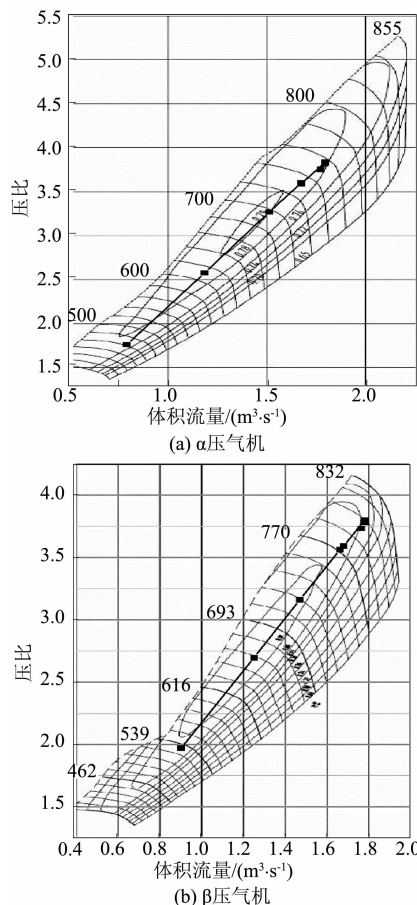


图7 两个压气机的联合运行线

图7为 α 和 β 压气机的图谱和联合运行线。对比可知, α 压气机的流量和压比范围较 β 压气机的大,效率较低。在3.0以上压比区域, α 压气机的流量较大;在2.0至3.0压比区域内,两个压气

机流量相当;在2.0以下压比区域则 β 压气机的流量较大。增压比随着排气背压的升高而降低,在低背压工况,进气量已经充足,继续增大进气量反而会由于最高燃烧压力过大而限制功率;在高排气背压工况,则需要在膨胀比一定的情况下,高效地增大进气量。

由图7中两个压气机的联合运行线可以看出:在低背压工况,柴油机的增压比处于3.0至3.8区间,虽然 α 压气机的流量略大于 β 压气机的,但是由于压气机效率较低,导致两个压气机方案的性能相当。在高排气背压工况,增压比处于2.0以下区域, β 压气机不仅进气量大,而且压气机效率较高,运行点也更靠近高效区,因此能够显著改善高排气背压工况的性能。 β 压气机的联合运行线穿过高效区,且均衡地分布在图谱中。经计算其喘振裕度为15.7%,满足柴油机稳定运行的要求。因此, β 压气机为更优方案。

通过上述对比分析可知,高排气背压柴油机压气机的选配需要增大低压比区域的流量和效率,降低高压比区域的压比和流量。压气机的图谱应尽可能“竖直”,且高效区偏向低压比区域。

3.2 涡轮喷嘴流通面积选配分析

选定 β 压气机后,分别选择涡轮喷嘴流通面积为32 cm²、35 cm²、38 cm²的三个涡轮进行匹配分析,分别记为A、B、C。不考虑背压的波动,对柴油机进行不同排气背压下稳态工况仿真。

图8为不同涡轮喷嘴环的对比结果。从图中可以看出,B涡轮在所有背压工况下性能均处于A涡轮和C涡轮之间;在低背压工况,C涡轮方案所能达到的功率最大,A涡轮最低;在高排气背压工况,A涡轮所能达到的功率最大,C涡轮最低。这是因为:柴油机在低背压工况时,最高燃烧压力较大,限制了柴油机做功;反之,柴油机在高排气背压工况下工作时,涡轮前排气温度成为限制因素。喷嘴环面积减小导致增压器压比增大,进气流量增大,最高燃烧压力升高,涡前排温降低。因此低背压时大涡轮C更佳,高排气背压时小涡轮A更好。

图8还表明,最高燃烧压力对功率影响近似线性关系,而涡前排温为限制因素时,功率下降速度随排气背压升高而加快。这是因为,随着排气背压升高,柴油机的滞燃期增大,最高燃烧压力后移,燃烧持续期增大,在保持相同的最大压力时,所能发出的功增大。在燃油消耗率变化不大的前提下,缸内最高燃烧压力、有效功率均与喷油量成近似线性关系,因此最高燃烧压力对功率影响近似线性关系。

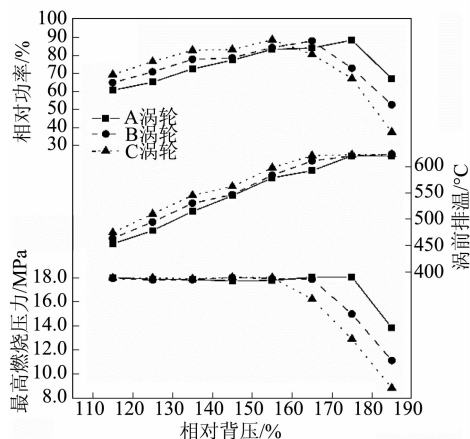


图 8 不同涡轮喷嘴环的对比结果

图 9 为过量空气系数随排气背压的变化。随着背压的升高,缸内过量空气系数逐步下降,在 A 涡轮达到 180% 背压工况、B 和 C 涡轮达到 165% 背压工况后,过量空气系数随着排气背压的升高下降速度加快,导致缸内燃烧恶化,扫气质量下降,因此涡轮前排气温度上升速度加快,极限功率下降加快。

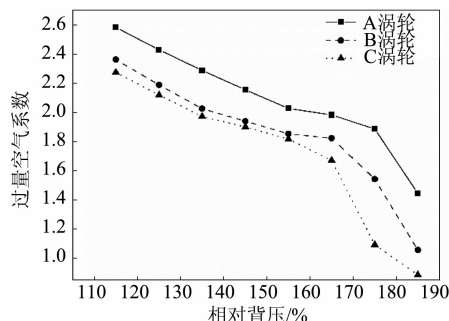


图 9 过量空气系数随排气背压的变化

从上述结果可以看出,喷嘴环面积最小的 A 涡轮使得柴油机在高排气背压工况时过量空气系数较大,因此高排气背压工况的功率恢复效果较好,整个背压范围内可使柴油机的功率恢复至原机的 60.6%,为三个方案中最优。

4 试验验证及分析

试验过程通过调节进气加热器、进气真空度调节阀和排气背压调节阀来控制不同方案的边界条件。

4.1 稳态工况下试验验证

不考虑背压的波动,对柴油机进行不同排气背压下稳态试验,采用 β 压气机分别搭配 A、B、C 三个涡轮进行试验。试验结果如图 10、图 11 所示。由图可知不同背压下功率恢复能力的试验与仿真结果趋势是一致的,在 115% 背压和 165% 以上背压,仿真与试验值接近,而在 135%、145%、155% 背压工况,仿真值较试验值略高,由于柴油

机的功率恢复能力取决于 115% 和 165% 以上背压工况的性能,因此仿真计算结果可信。对比三个方案,最优方案均为 A 方案,计算显示功率恢复能达到 60.6%,而试验结果为 59.8%。

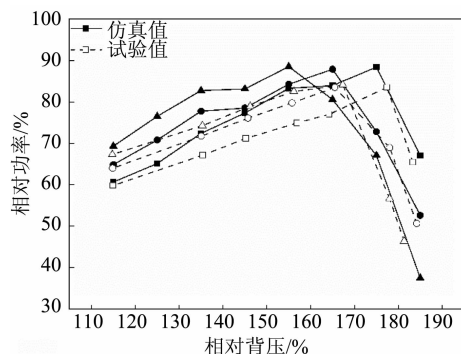


图 10 柴油机功率恢复仿真与试验对比

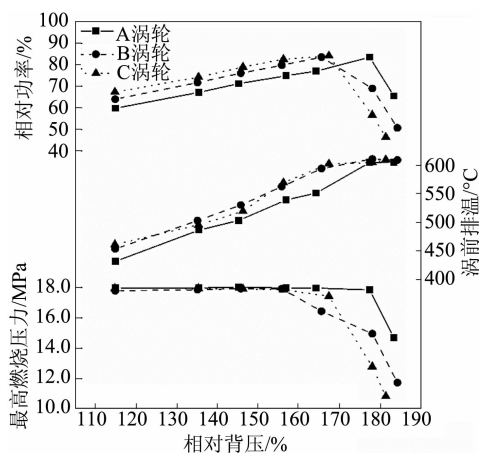


图 11 不同涡轮喷嘴环的对比试验结果

4.2 背压波动下试验分析

根据某特种柴油机台架试验规范,柴油机实际运行时,在 135% 和 165% 背压下,背压存在 $\pm 20\%$ 的波动。为此,选择 135% 和 165% 背压工况,在柴油机 66% 负荷,以排气背压波动幅值为 20% 的正弦规律波动进行背压波动试验,波动周期分别为 10、20、30 s。由于 B 涡轮性能介于 A 和 C 涡轮,分析中采用 B 涡轮方案。

由图 12 可知,随着排气背压周期性地波动,柴油机的涡轮前温、最高燃烧压力以及有效油耗等性能参数也周期性地波动。波动周期以及形状与排气背压相同,但是由于进排气系统响应延迟以及燃烧室内温度迟滞效应,各性能参数的波动规律与排气背压有一定的相位差。

对比图 10、图 12 中 B 涡轮方案的试验结果,稳定工况运行时,柴油机在 115% 背压下功率恢复为 64%,此时最高燃烧压力已经达到 18.0 MPa。在 185% 背压下,柴油机的极限功率为 50.6%,此

时涡轮前排气温度为 $608.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；而在 66% 负荷， $135\% \pm 20\%$ 背压波动试验中，柴油机的最高燃烧压力全程未超过 18.0 MPa ， $165\% \pm 20\%$ 背压波动试验中，即使功率提高到 66% ，最高的涡轮前温也未超过 $605\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对比可知，在背压波动的过程中，柴油机的最高燃烧压力和涡轮前温均较同负荷下稳定背压时的低，但最高燃烧压力的降低值较小，涡轮前温则有较大幅度的降低。这是因为背压波动时，柴油机处于极限背压的时间均减小，最高燃烧压力和涡轮前温均在中间背压的性能值附近波动。由于压力传递较快，因此在整个波动过程中极限值与稳定背压时的相差不大；温度传递速度慢，因此涡轮前温更靠近中间背压时的排温值，且波动范围很小。由图 12 可以看出， 20 s 周期时涡轮前温的最大温差只有 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

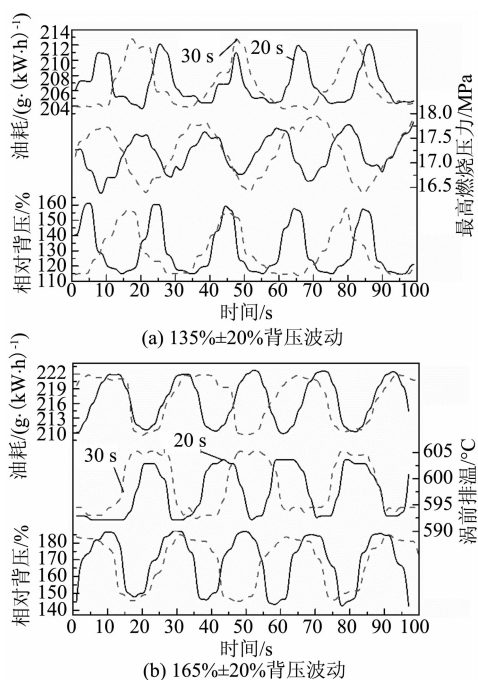


图 12 背压波动试验性能参数变化

对比图 12 中背压波动周期为 20 s 和 30 s 的试验结果可知，波动周期由 20 s 增大到 30 s 时，柴油机的最高燃烧压力以及涡轮前温的波动幅值增大。这是因为随着波动周期增大，柴油机处于波峰和波谷背压的时间增长，因此性能参数的波动幅值增大。

B 涡轮方案在 66% 功率时，柴油机的最高燃烧压力和涡轮前温均已经达到柴油机安全运行的极限值，由 3.2 节中分析可知，增大涡轮喷嘴环面积可以提高低背压工况的性能，但是会使高排气背压功率下降；反之可以提高高排气背压工况的功率，降低低背压工况的功率。因此，在背压波动下，B 涡轮方案为最优方案，柴油机的功率能恢复至原机

的 66% 。

5 结 论

本文采用一维仿真计算配合试验验证的方法，分析和预测了柴油机在不同排气背压工况下的性能，并根据使用工况要求重新匹配增压系统。得到如下结论：

(1) 通过增压器的匹配可以实现高排气背压工况下柴油机功率恢复，在 115% 至 185% 背压下，稳态工况时功率可恢复至 59.8% ，背压波动工况时可恢复至 66% ；

(2) 通过对比不同压气机（两个压气机的功率恢复值差 9.2% ）可知，高排气背压工况应选取能提高低压比区域的效率和流量，并适当控制高压比区域的压比和流量的压气机；

(3) 涡轮喷嘴环流通面积对性能影响较大，过大或者过小均不利于功率恢复，通过选择合适的涡轮可使功率恢复进一步提升 10.9% ；

(4) 背压波动下柴油机性能参数的波动幅值与该参数的迟滞时间负相关。高排气背压工况下，是否存在背压波动对柴油机功率恢复能力有较大影响。

参考文献

- [1] K Han. Calibration for fuel injection parameters of the diesel engine working at plateau via simulating [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014 (1): 110-121.
- [2] 吴义磊, 刘建祥, 乔 翌, 等. 排气背压预测及其对发动机性能的影响研究 [J]. 内燃机, 2012 (3): 10-12.
- [3] 郭仲海. 柴油机性能对排气背压的敏感性研究 [J]. 内燃机, 2010 (4): 47-49.
- [4] Cong S, Garner C P, McTaggart-Cowan GP. The effects of exhaust back pressure on conventional and low-temperature diesel combustion [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 225 (2): 222-235.
- [5] F Jan, G Jinke, Y Wenhua, et al. Study on the exhaust Back-pressure threshold-value map for the diesel particulate filter regeneration [C]. International Conference on Measuring Technology & Mechatronics Automation, 2011 (3): 557-560.
- [6] 张丽芳, 李 志. 柴油发动机排气背压设计计算 [J]. 船电技术, 2012 (增刊1): 57-58.
- [7] 梁辰, 崔毅, 邓康耀, 等. 排气背压对增压柴油机功率的影响分析及其改进方法 [J]. 柴油机, 2013, 35 (3): 16-24.
- [8] 顾宏中. 涡轮增压柴油机热力过程模拟计算 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.