

基于 GT-POWER 的两级相继增压柴油机性能仿真研究

Simulation Study of a Diesel Engine's Performance which Used Two Stage of sequential pressurization Turbocharging System Based on GT-POWER Software

杨书乔 仲杰 胡志龙 李先南

中国船舶重工集团公司第七一一研究所

摘 要： 在一台船用柴油机上进行了两级相继增压性能仿真研究，以原机单级相继增压柴油机计算数据为对比基准，通过对配气正时、压比分配的优化，与原机相比压比提高了 30%，额定功率提升 10%，油耗降低 2%-3%，实现推进特性全工况性能的优化。

关键词： 柴油机，两级相继增压，性能，仿真研究

Abstract : This paper discusses the performance simulation investigation of two stage turbocharging based on a marine diesel engine and analyses the the influence on the performance of two stage turbocharging of sequential pressurization turbocharging marine diesel engine. With the original single stage turbocharge diesel engine machine date as comparison benchmark ,By optimizing the distribution of the pressure ratio, compared with the original machine ,the pressure ratio is increased by 30%, rated power is increased by 10%, fuel consumption is reduced by 2%-3%.

Key words: diesel engine, Two Stage of sequential pressurization Turbocharging, Performance ,Simulation Study

0 引言

随着我国船用柴油机功率密度的不断提高以及广泛采用米勒循环等技术降低油耗和排放，迫切需要进一步提升增压压力。现有单级增压所能达到的最高压比已接近极限，已无法满足未来性能指标更高的柴油机对增压压力的需求，因此必须采用两级增压技术。

两级增压技术的不足之处在于难以同时兼顾高、低工况性能，两级相继增压技术是将相继增压技术和两级增压技术结合应用的高增压技术，同时具有相继增压和两级增压技术的优点。两级相继增压系统为柴油机提供高增压压力和大空气流量的同时，可很好的兼顾高、低工况性能，使柴油机在整个运行工况内都能和增压系统达到良好匹配。可在提高柴油机功率密度和功率储备的同时，提高经济性、降低排放、提高低速大扭矩特性和动态特性，能够满足未来更高性能指标船用柴油机发展的需求。

本文针对某船用柴油机，应用 GT-Power 软件，采用仿真计算的手段对配气正时、高低压级增压器压比分配对柴油机性能影响的仿真分析，使其显著改善柴油机性能。

1 计算模型的标定

本文的研究对象是某型船用两级相继增压柴油机，增压方式为 MPC 系统，两级相继增压系统装

备 4 台涡轮增压器，A、B 两列分别有一台低压级增压器和一台高压级增压器串联布置，在低压级压气机和高压级压气机之间设置有中间冷却器。

仿真计算模型使用柴油机仿真软件以模块化建模的方法建立，燃烧模型采用可预测的 DI-Jet 模型，在原机试验数据的基础上，对原机的仿真模型进行标定，标定后的计算和试验结果对比如图所示。

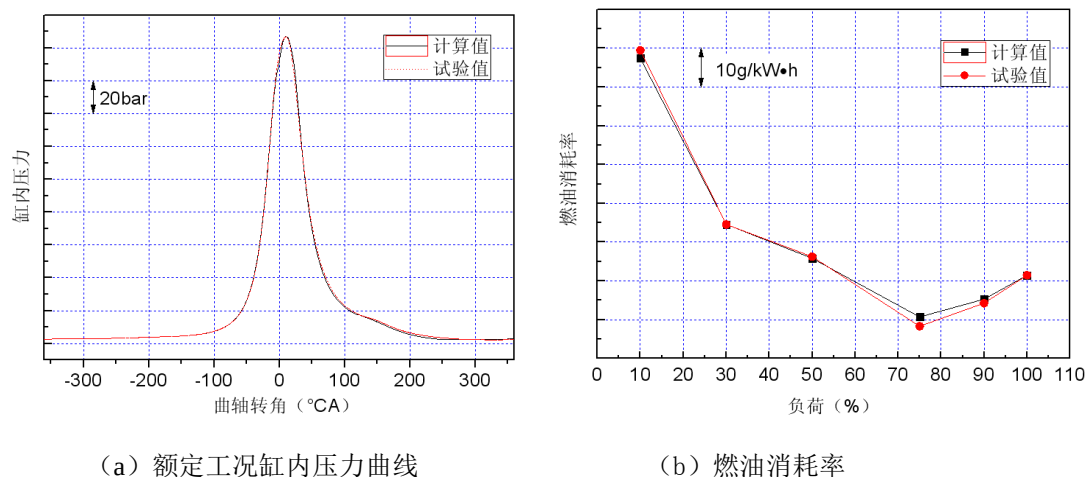
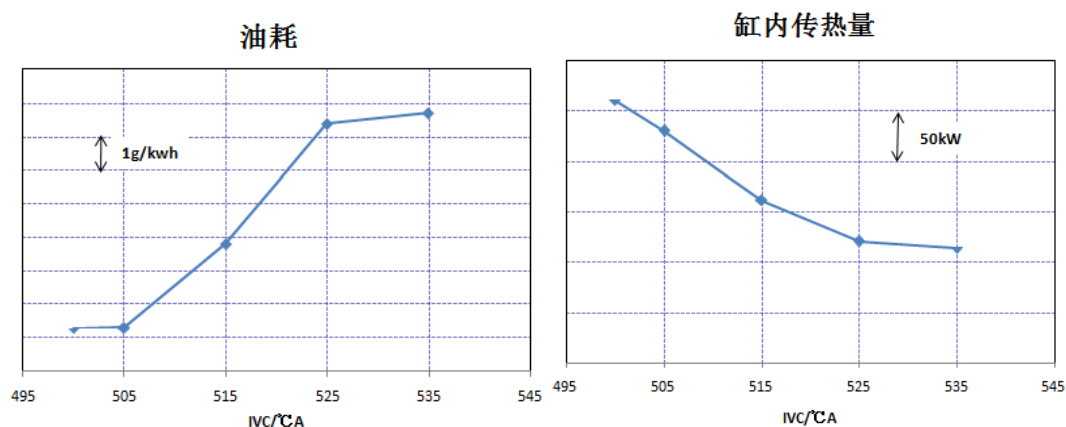


图 1 模型计算和试验结果对比图

2 配气正时的优化

2.1 进气阀关（IVC）正时

进气阀关闭正时主要影响发动机的充气效率、泵气功、燃油经济性等，根据气阀不与活塞发生碰撞以及气阀加速度不超过原机设计值的原则，计算了不同进气阀关闭正时对性能的影响，利用仿真模型计算时，两级相继增压系统采用简单涡轮增压器模型。从 2 中可以看出，随着 IVC 正时增加，油耗逐渐增大，涡前排温逐渐降低；综合考虑，当 $IVC=515^{\circ} CA$ 时，油耗、排温、过量空气系数满足性能要求，因此进气阀关闭正时初步确定为 $515^{\circ} CA$ ，原型机为 $535^{\circ} CA$ 。



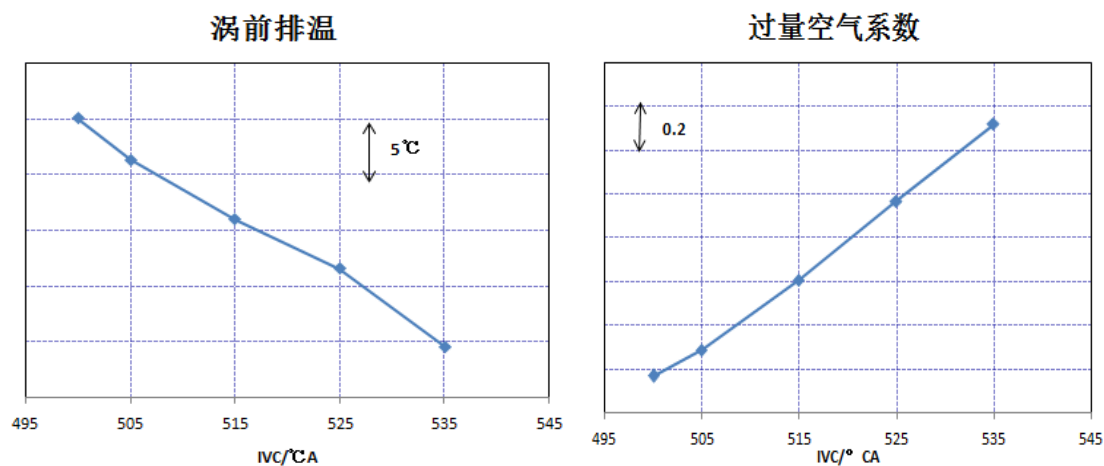


图 2 IVC 正时对油耗、过量空气系数、排温的影响

2.2 排气阀关 (EVC) 正时

进气阀开 (IVO) 正时一定时, EVC 正时决定了扫气重叠角, 扫气重叠角过大会影响燃油经济性, 过小会影响扫气系数, 增加零部件的热负荷。根据排气阀不与活塞发生干涉以及其加速度不超过原机的原则, 计算了 IVC 为 515°CA , EVC 正时的变化对燃油经济性、过量空气系数、扫气系数的影响规律, 结果如图 3 所示。从图中可以看出, 油耗和扫气系数随着 EVC 正时的推迟而增加, 涡前排温随着 EVC 正时的推迟而减小, 考虑采用两级相继增压系统后, 功率有较大幅度的提升, 热负荷会有所上升, 应采用较大的扫气系数方案, 另外考虑到燃油经济性的因素, EVC 正时初步确定为 415°CA , 同原型机。

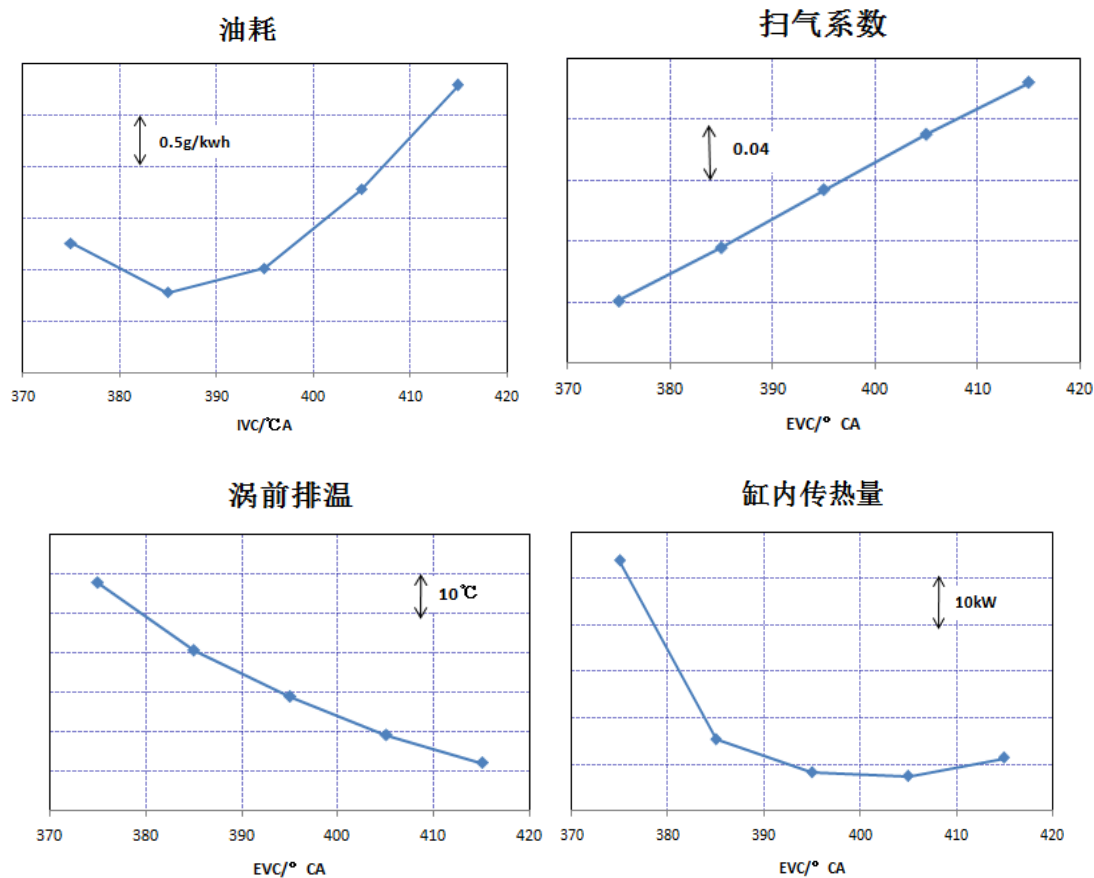


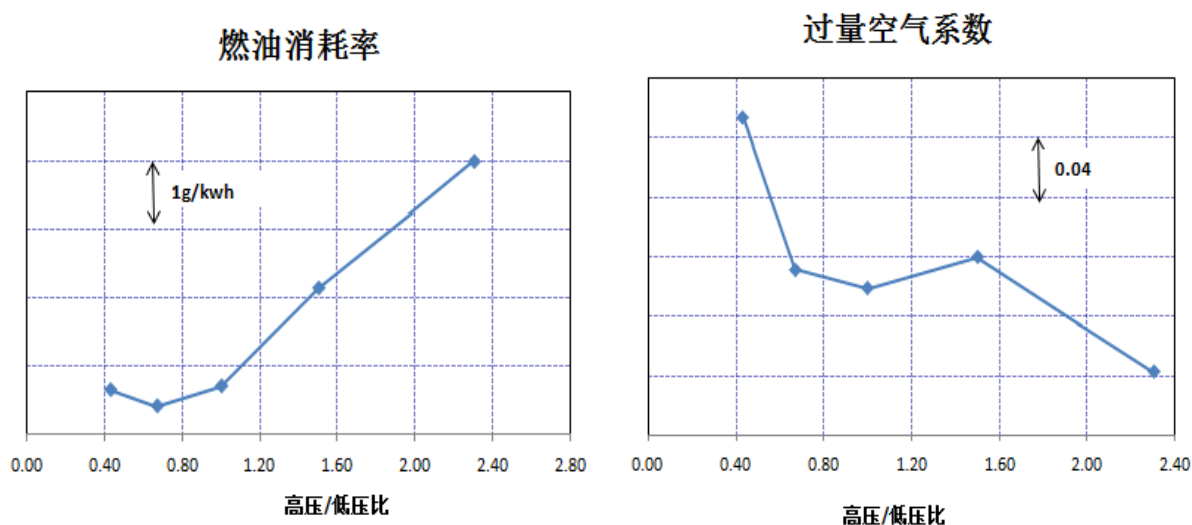
图 3 EVC 正时对油耗、过量空气系数、排温的影响

3 压比分配的影响分析

两级增压高低压级压比分配决定排气能量的分配，影响增压系统效率，又影响着高低压级涡轮增压器的尺寸和重量。在总压比一定时，高压级压比分配越低，可选用较小的高压级增压器，转动惯量也相对减小，柴油机在加载过程中，增压器转速上升快，能快速建立起增压压力，有利于提高柴油机瞬态性能。在相继增压切换过程中，较小的高压级涡轮增压器能较快的建立起增压压力，提高切换过程的平顺性。但高压级压比分配过小，会降低两级增压系统效率，影响经济性，所以高低压级压比分配直接影响柴油机的经济性、动力性、增压系统布置。进行两级增压匹配时，应统筹考虑动力性、经济性以及空间布置等因素。

选取 85% 负荷作为匹配点在推进特性各工况都能满足约束条件，因此选取该工况点作为匹配点，进行高低压级增压系统压比分配对柴油机性能影响的研究。选取高压级压比：低压级压比=3:7、4:6、5:5、6:4、7:3 作为计算方案，高低压级不同压比分配对性能影响如图 4 所示，50% 负荷为相继增压初步确定的切换工况，计算结果的分析主要针对 50% 以上负荷。

从图 4 可知，高、低压级压比分配为 4:6 时，油耗最低；从过量空气系数、扫气系数、A 列高压涡轮前排温可看出，压比分配为 4:6 时，这些参数能满足发动机性能要求，且有较大裕度。两级相继增压系统匹配计算时，高低压级按压比分配按 4:6 选取。



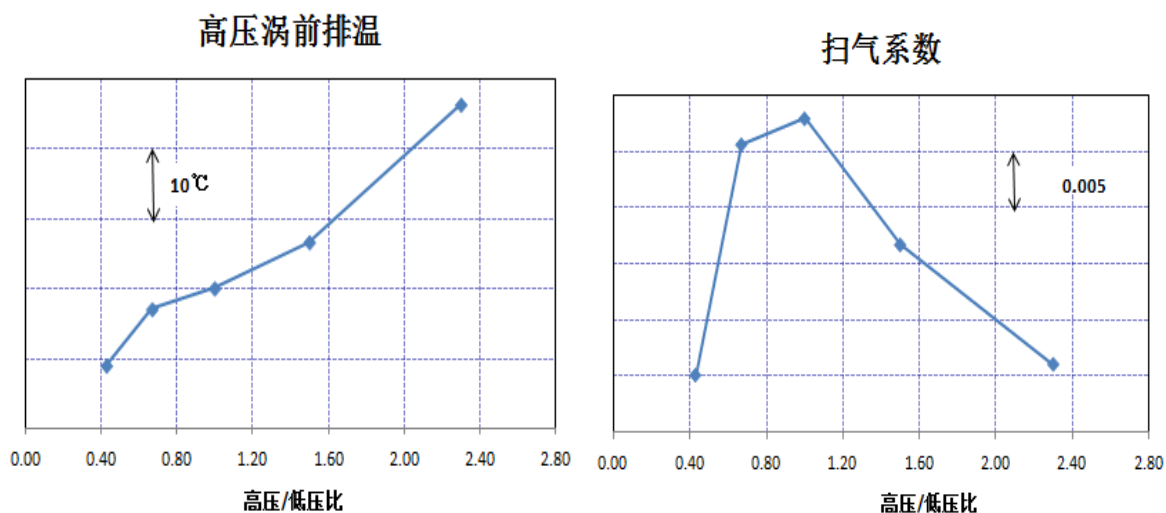
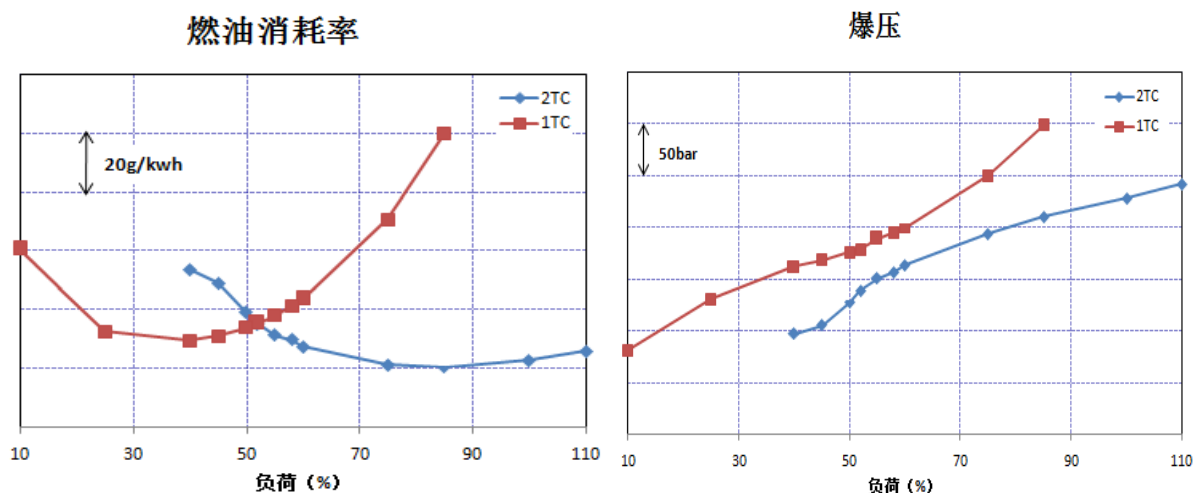


图 4 不同压比分配对两级相继增压性能的影响

4 相继增压切换边界的确定

根据初步选配的涡轮增压器，进行两级相继增压系统切换边界计算，切换边界按以下原则确定：柴油机按推进特性运行，在排温、爆压、过量空气系数等满足约束条件下，以油耗最优确定切换边界。柴油机按一组增压器（1GTC）和两组增压器（2GTC）运行时计算结果如图 5 所示。

从图 5 可知，50%以下负荷，1GTC 的经济性较 2GTC 更好；负荷大于 50%时，2GTC 的油耗较 1GTC 的更低。50%以下负荷，2GTC 的过量空气系数无法满足的要求。从爆压和高压涡轮排温计算结果可以看出，在 85%以下负荷，1GTC 和 2GTC 的爆压都能满足设计要求，在 45%—85%负荷，1GTC 和 2GTC 在整个运行区域均能满足涡轮排温的要求。综上所述，以 50%负荷作为两级相继增压系统切换工况。



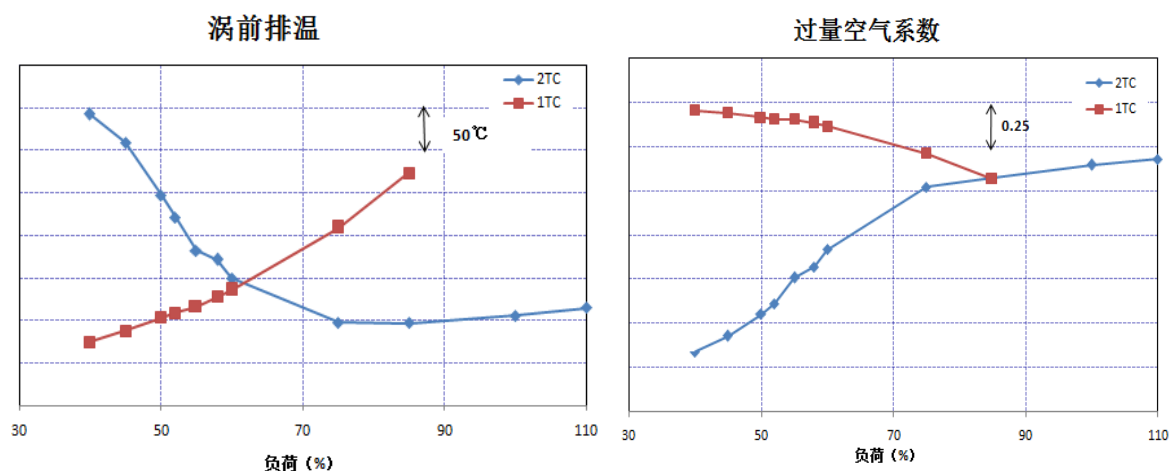
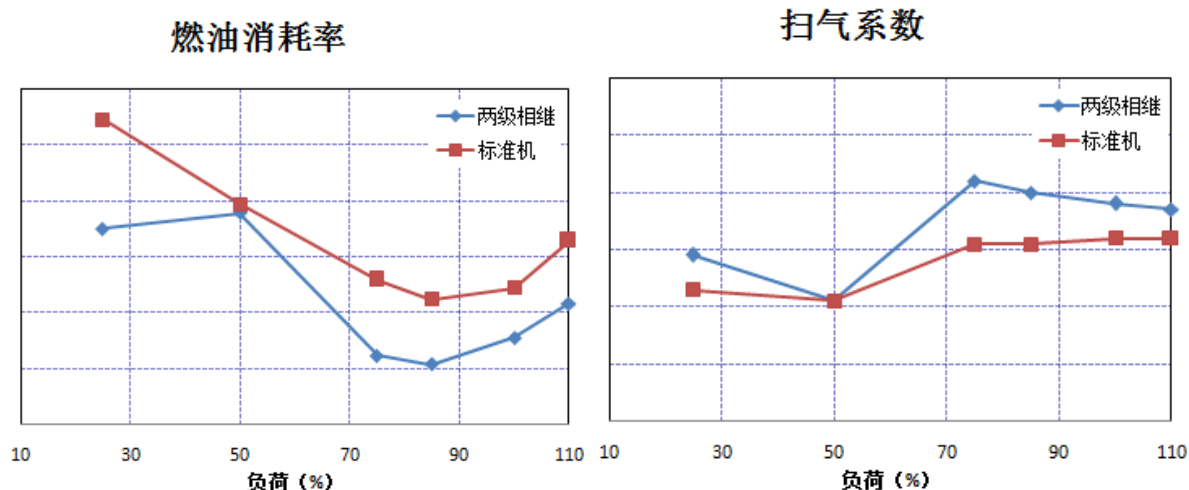


图 5 1GTC 和 2GTC 条件，两级相继增压柴油机性能计算结果比较

5 两级相继增压与原机性能比较

柴油机两级相继增压与原机推进特性全工况性能计算结果如图 6 所示。从图中可以看出，采用两级相继增压，压比提高了 30%后，油耗明显下降，100%负荷比油耗降低 2%，中低负荷油耗下降更加明显，降幅超过 3%，油耗指标满足设计要求。从扫气系数的比较可知，两级相继增压系统的扫气量较标准机有明显的提升，这有利于降低零部件的热负荷。采用两级相继增压系统后，由于柴油机的功率较标准机提高了 10%，在 85%以上负荷，两级相继增压的涡轮前排气温度较标准机提高约 15℃，但对于涡轮前温度限值还有很大的余量，能满足环境适应性要求。综合分析，某船用柴油机采用两级相继增压系统后，动力性、燃油经济性指标有很大的提高。



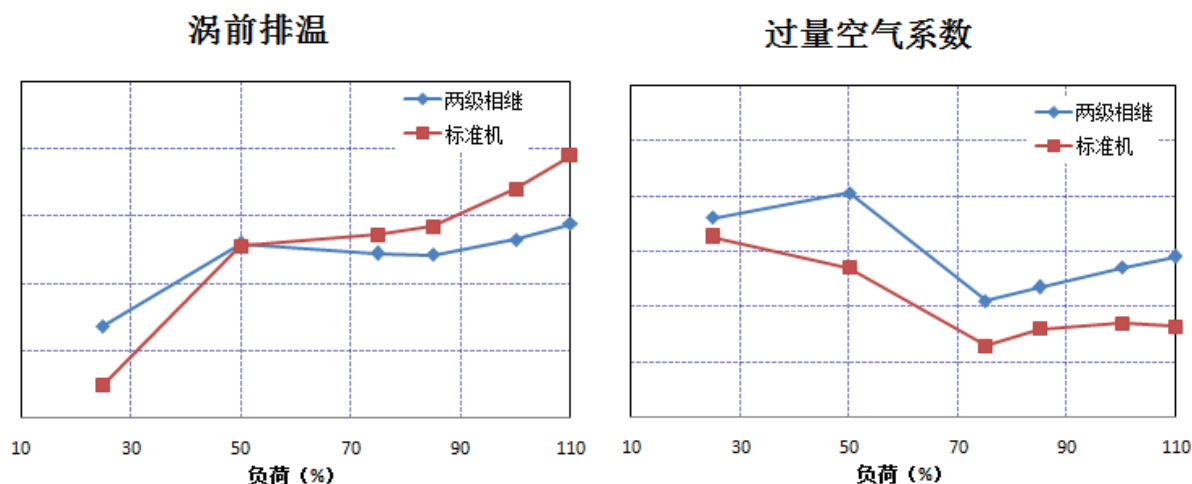


图 6 两级相继增压与原机全工况性能比较

6 结论

(1) 基于建立的两级相继增压仿真计算模型,进行了两级相继增压配气正时和压比分配的影响分析。计算结果表明:随着 IVC 正时增加,油耗逐渐增大,涡前排温逐渐降低,IVC 正时降低到 515°CA ;油耗和扫气系数随着 EVC 正时的推迟而增加, 涡前排温随着 EVC 正时的推迟而减小,, 功率有较大幅度的提升,热负荷会有所上升,应采用较大的扫气系数方案, EVC 正时初步确定为 415°CA ,同原型机;高、低压级压比分配比为 4:6 的总体性能较优。

(2) 基于建立的两级相继增压仿真计算模型,以油耗最优确定切换边界,确定 50%负荷作为两级相继增压系统切换工况。

(3) 某船用柴油机采用两级相继增压后,整机功率比原型机提升了 10%,综合油耗较原型机降低 2%-3%,综合分析,动力性、燃油经济性指标均有很大的提高。

7 参考文献

- [1] Jakob Bucher . Comparison of several methods of improving the part-load performance of a medium-speed engine with a two-stage turbocharging system[C]. CIMAC2010, Paper NO. 99.
- [2] 孙万臣, 王晓丹等. 二级增压对重型高压共轨柴油机燃烧及微粒排放特性的影响[J]. 内燃机工程. 2014. 3.
- [3] Marcello Canova, Fabio Chiara, et al. Design and Validation of a Control-Oriented Model of a Diesel Engine with Two-Stage Turbocharger[J]. SAE Paper 2009-24-0122.
- [4] Ugur Kesgin ,Efficiency improvement and NOx emission reduction potentials of two-stage turbocharged Miller cycle for stationary natural gas engines[J]. International Journal of Energy Research. 2005. 29
- [5] 袁锋, 郑尊清等. 二级增压重型柴油机排放和燃烧特性试验研究[J]. 内燃机工程. 2012. 4.