

重型柴油发动机两级增压研究

Two Stage Turbocharge Investigated in Heavy Duty Diesel Engine

董大陆 史艳彬 王磊

中国第一汽车集团股份有限公司技术中心、发动机部、吉林省长春市、130011

摘要:以一台 8.6L 电控重型柴油机为基础,通过发动机热力学仿真和发动机台架试验,研究了两级增压对于发动机性能的影响,结果表明:两级增压可以提升动力性,经济性最高可以提高 4%。

关键词:热力学仿真、两级增压、排气能量

ABSTRACT:Based on a 8.6L heavy duty electrical control diesel engine , through the thermodynamic simulation and engine bench test, studied the effect two stage turbocharging for engine performance, the results show that: Experimental result showed 4% improvement in fuel economy by two stage turbocharging system.

KEYWORDS :Thermodynamics Simulation, Two Stage Turbocharge, Exhaust Energy

1 前言

重型柴油发动机经济性及其动力性是决定其市场竞争力的关键因素,而商用车整车对发动机使用要求更多的偏向中低转速,基于整车对重型柴油机的中低转速要求达到低速大扭矩及良好的燃油经济性,重型柴油机提升低速动力性及经济性成为必然的趋势。

考虑到整机成本和排放法规要求,重型柴油机现阶段依然以采用普通放气阀式增压器为增压主要技术方案,然而普通放气阀式增压器在低速段受其本身性能限制,低速段扭矩提升受限,难以达到低速大扭矩及良好经济性的要求,因此两级增压技术及可变涡轮增压技术(VGT)成为研究的主要技术措施。两级增压技术及 VGT 在发动机开发过程中会带来大量的匹配设计及开发试验标定工作,研发周期和成本大幅提升。为了降低匹配设计和开发试验标定工作,采用软件的数值模拟计算匹配成为降低工作量和开发成本的主要技术手段。

本文研究基于一款排量为 8.6L 的重型柴油机上,采用 Gamma 公司的热力学计算仿真软件 GT-power 进行匹配模拟计算,采用串联式两级增压系统,进行两级增压匹配研究。通过建立发动机热力学计算模型,进行增压系统的匹配选择,并进行发动机台架试验验证方案的合理性,达到大幅提升发动机的低速扭矩和燃油经济性的目的,同时控制达到了国IV排放。

2 两级增压发动机匹配模拟计算及试验研究

2.1 发动机的基本参数及试验设备

发动机主要参数及试验设备见表 1，发动机是直列 6 缸，排量为 8.6L 的重型柴油发动机。涡轮增压的最大增压压力约为 2.9bar，增压器是普通固定截面放气阀式增压器，应用 SCR 后处理系统达到国IV排放。通过发动机台架进行了发动机数据测量，发动机速度范围从 800 r/min 到 2100r/min。同时对于每个发动机工作点，详细记录了缸内数据和燃油喷射压力等试验数据。

表 1 发动机主要参数及试验设备

发动机型式	6缸4冲程柴油机	设备名称	设备型号
排量(L)	8.6	测功机	AFA-T500
压缩比(-)	17.5	油耗仪	AVL753 S
最大扭矩(N·m)	1600	排放仪	AMA4000
最大功率(kW)	258 (2100r/min)	全流稀释系统	CVS4000
燃油系统	共轨	燃烧分析仪	AVL INDICOM
气门	4气门/缸	烟度计	AVL415

2.2 发动机的基础模型建立与校核

模拟计算采用热力学计算仿真软件 GT-power 进行计算。发动机基础模型的建立基于详细的进排气系统管系尺寸，设置合理的传热和摩擦损失等系数，并且通过准确的发动机台架数据校正模型。通过对外特性范围内进行进气、有用功以及发动机缸内爆发压力模拟结果与试验结果校核。有用功以及缸内爆发压力对比如图 1-4 所示。

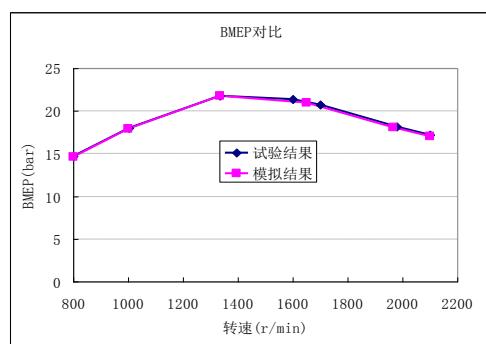


图 1 试验数据与模拟结果外特性 BMEP 对比

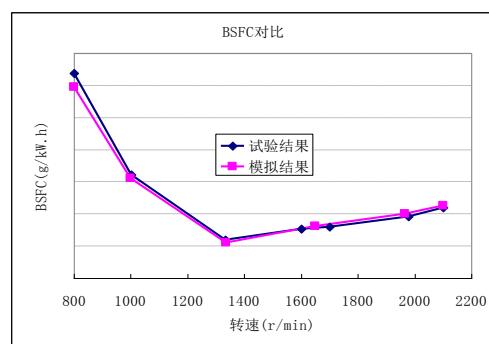


图 2 试验数据与模拟结果外特性 BSFC 对比

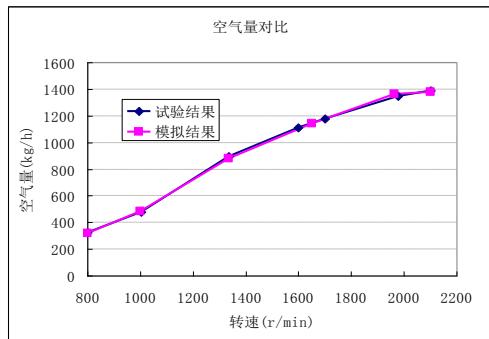


图 3 试验数据与模拟结果外特性空气量对比

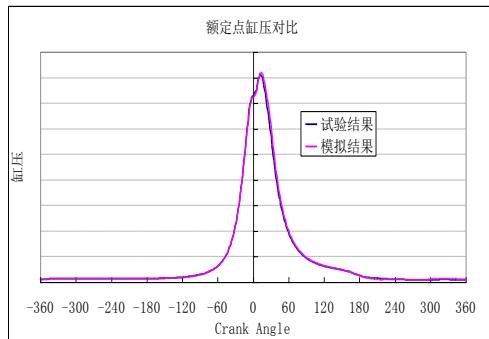


图 4 试验数据与模拟结果额定点缸压对比

从图中可以看出在整个外特性范围内模拟结果与试验结果吻合较好，误差低于 2%。缸内爆发压力，计算与实测符合程度也比较好。由此可以看出基础模型的准确度较高，可以为两级增压模拟研究作为基础模型，为下一步工作奠定基础。

2.3 发动机两级增压模型建立与模拟匹配

基于基础模型建立了串联式发动机两级增压模型，如图 5 所示，新鲜空气经过低压级压气机进入增压中冷器，再进入高压级压气机，经过发动机进气冷却器进入进气管。经过燃烧的废气则通过高压级涡轮机后再进入低压级涡轮机两次膨胀做工驱动压气机后，排出到大气，高压级涡轮机和低压级涡轮机分别有废气放气阀控制通过涡轮机废气流量。

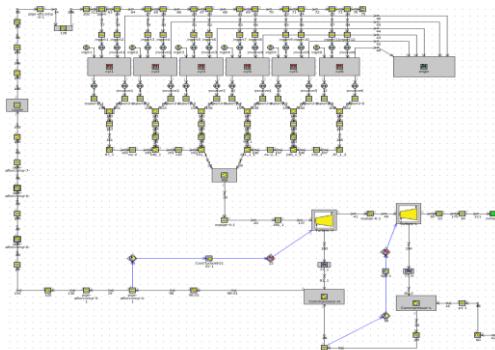


图 5 两级增压模型

在本文中选择多个增压器匹配方案进行模拟计算，高压级涡轮增压器匹配选择考虑到增压器的流量、压比及考虑废气放气阀旁通能力通过合理组合形成增压方案。不同两级增压器匹配计算的基础是控制油量相同，对比经济性，进气量等来比较方案的合理性，对比结果如图 6-9 所示。

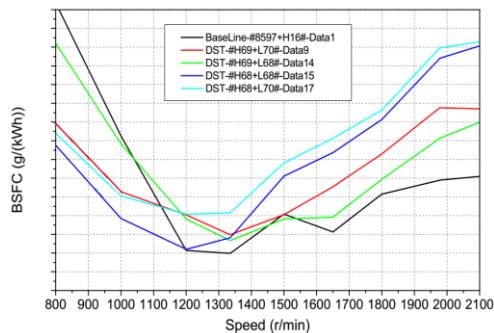


图 6 比油耗仿真计算结果对比

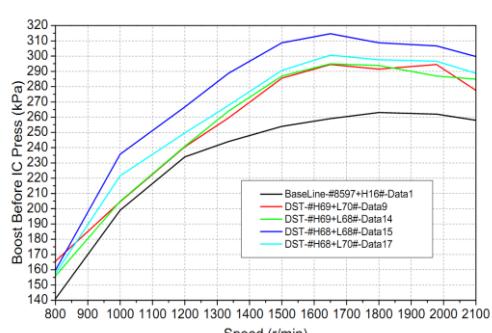


图 7 进气压力仿真计算结果对比

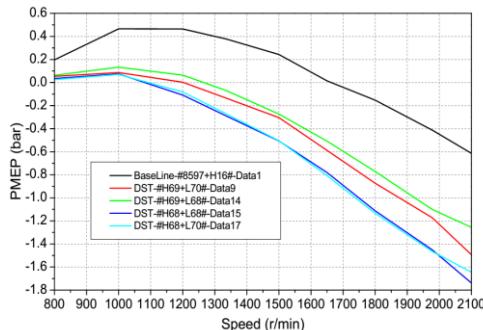


图 8 PMEP 仿真计算结果对比

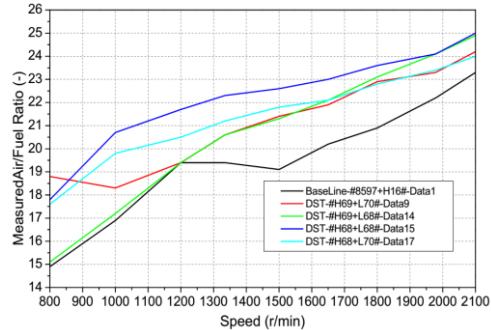


图 9 空燃比仿真计算结果对比

相对于原机，四种两级增压方案的均能在低速段改善比油耗，低速段空燃比改善 3~4 单位，对提升燃烧效率及经济性有较大帮助，但高速段经济性较差，主要因高速段四种两级增压方案的泵气损失（PMEP）增加较大，而原机空燃比合理，进一步提升空燃比对发动机经济性改善作用微小，但 PMEP 的增加使得经济性大幅下降，图 8 所示，PMEP 增加的主要原因是两级增压增加了高压级增压器涡后阻力，提高了发动机的排气背压。从提升发动机低速段性能角度考虑，综合分析选择“H68+L68”方案，但对高速段需进一步优化，降低 PMEP 提升发动机经济性。

3 发动机台架试验结果与分析

在发动机台架上应用 GT-Power 模拟计算推荐的“H68+L68”方案，发动机燃烧系统与原机相同，后处理应用 SCR 系统。试验用主要设备如表 1 所示，进行了两级增压试验，首先在相同 ECU 控制数据下做对比分析，结果如图所示 10~13 所示。

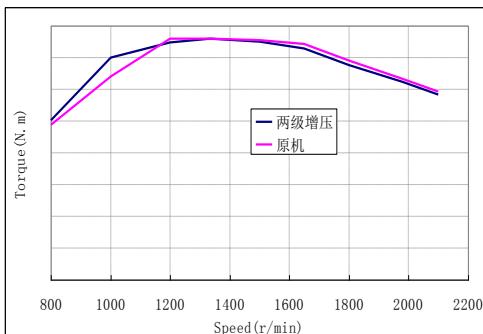


图 10 外特性扭矩试验结果对比

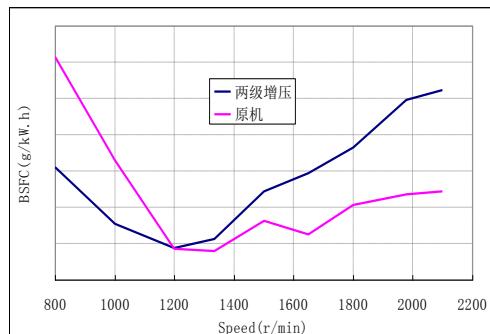


图 11 外特性比油耗试验结果对比

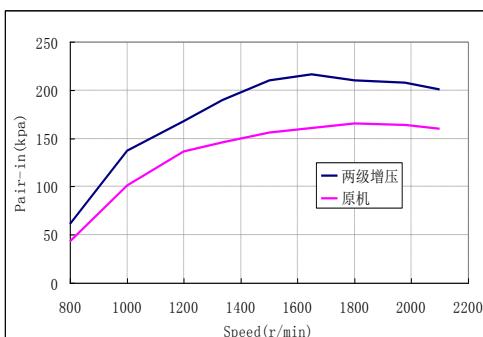


图 12 外特性进气压力试验结果对比

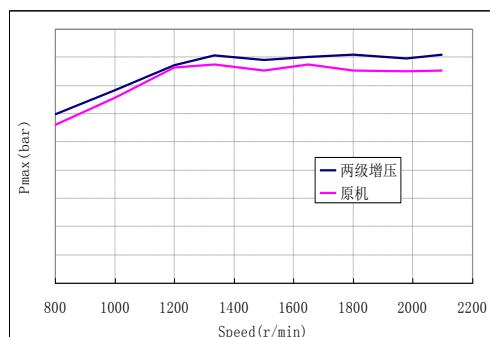


图 13 外特性最大爆压试验结果对比

在相同喷油控制条件下，两级增压可以有效改善低速段经济性，低速段油耗降低 2~3%，主要是

因为低速段空燃比提升较大，改善机内的燃烧，高速段因泵气损失经济性会降低，结果与前面模拟计算相符，同时由于进气量的增加，发动机的缸内最大爆发压力相对原机会有较大的提升，因此针对两级增压系统需适当放开爆压限制，同时需要优化高、低压级增压器放气阀开启策略，降低高速段泵气损失。

4 模拟仿真与发动机台架试验联合优化

为了优化两级增压的废气旁通能力，提升高速段经济性，需要对高低压级增压器废气放气阀开启策略进行优化，如果直接采用试验优化方法则工作量大成本高，因此首先在两级增压计算模型中通过 DOE 计算优化放气阀开启策略，额定工况点、C100 工况优化如图 14-15 所示。

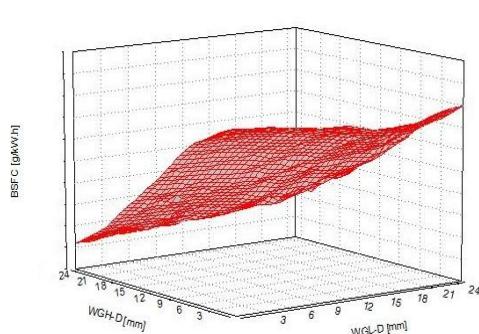


图 14 额定工况放气阀 DOE 模拟优化结果

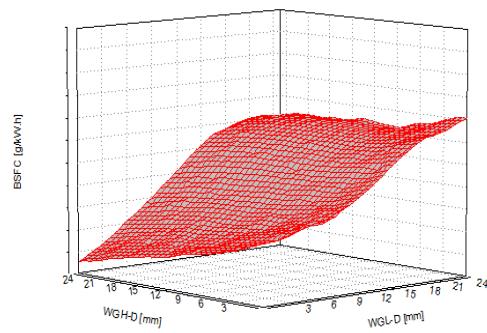


图 15 C100 工况放气阀 DOE 模拟优化结果

然后试验验证优化结果，试验结果显示通过废气放气阀开启策略优化能起到降低燃油消耗的效果，模拟计算和标定工作结合通过 DOE 优化计算能降低标定试验工作量，如图 16-17 所示。

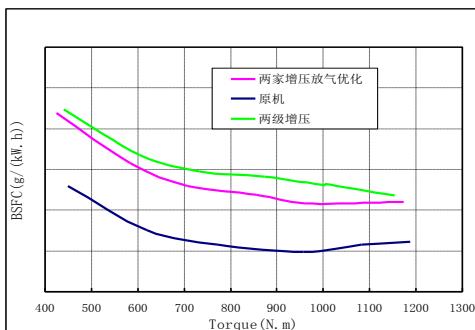


图 16 额定工况放气阀优化试验结果对比

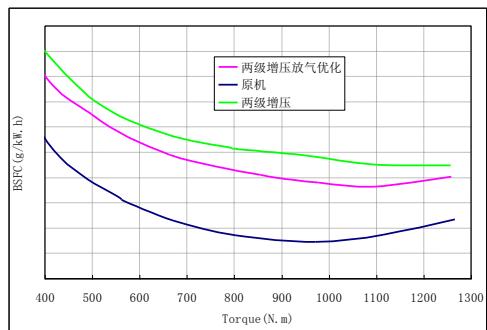


图 17 C100 工况放气阀优化试验结果对比

在发动机试验后对两级增压模型再次校准，发动机匹配两级增压高低压级联合运行线如图 18-19 所示，增压器匹配较为合理。重型柴油机采用两级增压后发动机进气量增加，空燃比改善低速扭矩可以较大幅度提升，同时可以进一步提升发动机升功率，如图 20 所示。重型柴油机采用两级增压后，在发动机万有特性中低速段对发动机油耗改善较大，高速段受泵气损失影响会有经济性恶化如图 21 所示。

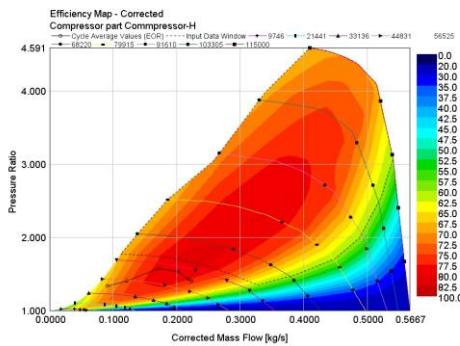


图 18 高压级增压器联合运行模拟结果

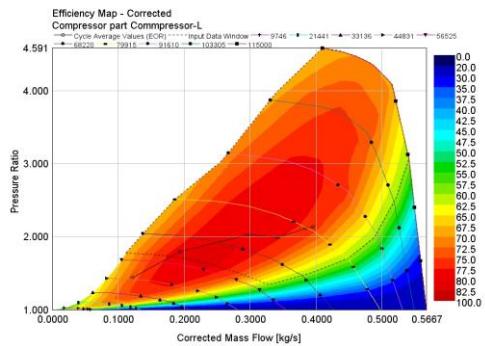


图 19 低压级增压器联合运行模拟结果

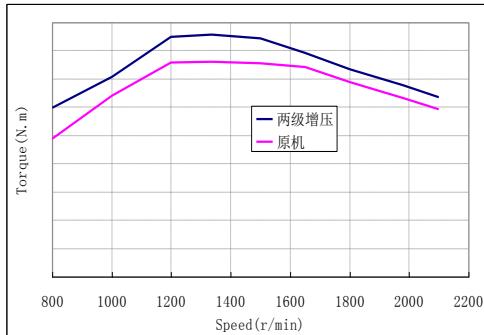


图 20 两级增压与原机动力性对比

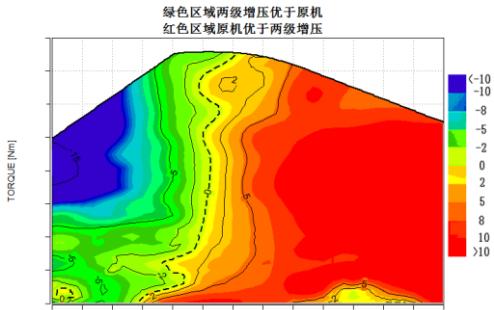


图 21 两级增压与原机比油耗差值

5 结论

采用 GT-Power 模拟计算和发动机开发同步进行，通过匹配计算及 DOE 优化计算可以降低两级增压系统开发工作量，模拟计算对方案的选择和优化有重要作用。

重型柴油机采用两级增压后对低速段动力性可以大幅提升，低速段经济性可以提升 2-4%，进气压力与空燃比得到改善；高速段发动机动力性可以提升，但由于泵气损失的增加高速段经济性会恶化。

重型柴油机采用两级增压后，提升高速段发动机经济性，需对高压级涡轮增压器废气放气能力进一步提高和优化，要改善废气旁通能力。

6 参考文献

- [1] 林建生. 燃气轮机与涡轮增压内燃机原理与应用. 天津大学出版社, 2005.
- [2] John B. Heywood. Internal Combustion Engine Fundamentals. 1988.
- [3] F. Millo. The Potential of Dual Stage Turbocharging and Miller Cycle for HD Diesel Engines [C]. SAE Paper, 2005, 01-0221.
- [4] 李骏. 汽车发动机节能减排先进技术. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.