

动力涡轮在重型柴油机上应用的仿真

史艳彬, 王磊, 赵海峰,

(中国第一汽车集团股份有限公司技术中心, 吉林省 长春市 130011)

摘要: 通过建立 11L 电控重型柴油发动机与动力涡轮联合仿真热力学模型, 研究了动力涡轮增压器匹配过程, 应用动力涡轮进行发动机排气能量回收的研究以及对于发动机性能的影响, 为试验开发确定了增压系统方案。进行了发动机台架试验, 结果表明: 应用动力涡轮最高可以提高 3% 的经济性, ESC 结果表明可以达到国 IV 排放。

关键词: 热力学仿真; 排气能量; 动力涡轮;

Abstract: Turbocompound system was investigated in 11 liters heavy duty electrical control diesel engine with development coupled thermodynamics simulation model. The effect of turbocompound on diesel performance, and exhaust energy recovery with turbocompound system also were investigated in this paper. With thermodynamics simulation a suitable exhaust gas turbocharger was confirmed for test bench from various turbochargers. Experimental result showed 3% improvement in fuel economy with turbocompound system was achieved, and Country IV emission regulation was met on the ESC Test.

Key Words : thermodynamics simulation, exhaust energy, turbocompound

1 前言

商用车的经济性是决定其市场竞争力的关键因素之一, 而发动机的性能是决定整车经济性的关键。在现代的中重型柴油机中, 燃油能量的 25%~50% 转化为有用功, 其他的转化为热能被冷却水与排气带走。在这里燃油能量的 20%~25% 被排气带走。如果能够回收一部分废气能量, 将有助于提高发动机燃油经济性。本文在一款 11L 排量的重型柴油机上, 在普通废气涡轮增压器后增加一个动力涡轮增压器, 通过变速器建立复合增压系统, 进行废气能量回收的研究。建立了发动机热力学计算模型, 进行增压系统的匹配选择。进行了发动机台架试验, 通过试验表明通过动力涡轮可以实现废气能量的回收, 实现了在部分转速区域达到 3% 的节油, 同时达到了国 IV 排放。

2 动力涡轮增压发动机仿真计算

2.1 发动机基本参数

发动机主要参数在表 1 中显示, 发动机是直列 6 缸, 排量为 11.05L 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, 后处理应用 SCR 系统达到国 IV 排放。通过发动机台架进行了发动机稳态外特性数据测量, 发动机速度范围从 800 r/min 到 1900r/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

Type	Diesel\6 cylinders in line\4stroke,
Displacement(L)	11.05
Compression Ratio(-)	18
Maximum Torque(N.m)	2100
Maximum Power(kW)	309(1900r/min)
Fuel injection system	Common Rail Direct Injection
Valves	4 valves/cylinder

2.2 发动机模型建立与校核

应用 IDAJ 公司的热力学计算仿真软件 GT-power 进行计算。下面简要介绍发动机模型建立过程。基础模型建立需要详细的进排气的管系以及详细准确的发动机台架数据。正确设置传热和摩擦损失等系数，同时输入台架测量的燃烧放热率与发动机摩擦数据。在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。换气与有用功以及缸内爆发压力对比如图 1-4 所示。在整个速度范围内计算结果与试测结果对比符合程度比较好，误差低于 2%。缸内爆发压力，计算与实测符合程度也比较好。最大压力以及最大压力的曲轴转角位置，试验与计算有良好的吻合。例如在 A100 得到的结果如图 5 所示。在整个转速范围内计算结果都能比较好的吻合试验数据。

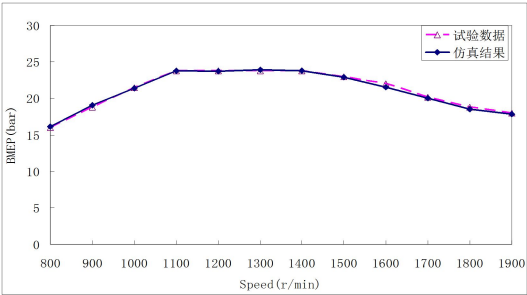


图 1 试验数据与仿真计算外特性 BMEP 对比

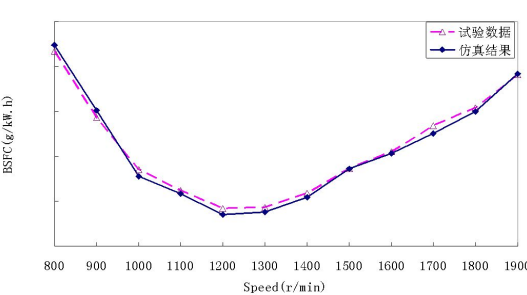


图 2 试验数据与仿真计算外特性 BSFC 对比

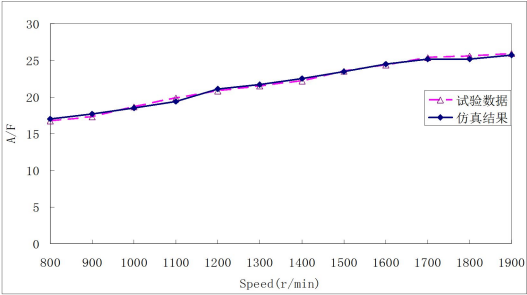


图 3 试验数据与仿真计算外特性 A/F

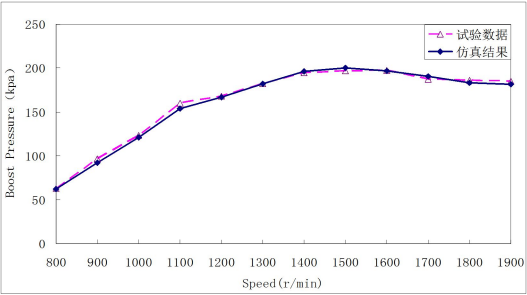


图 4 试验数据与仿真计算外特性进气压力对比

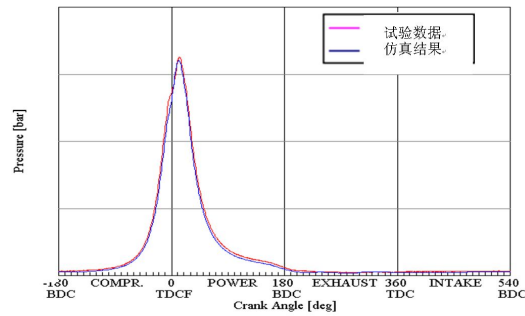


图 5 试验数据与仿真计算 A100 爆发压力对比

2.3 动力涡轮发动机模型建立与高压级普通增压器选型

动力涡轮增压系统又称复合增压系统，这种装置在大功率柴油机上有所采用。动力涡轮从进气方式来分主要有两种，轴流式与径流式。轴流式具有效率高的特点，但径流式可以改善部分负荷的性能，同时具有更加紧凑的空间布置。综合两种方式的特点，在本文中选用康明斯径流式动力涡轮。

图 6 是动力涡轮增压系统的热力学仿真模型。新鲜空气经过压气机、中冷器后进入发动机，经过燃烧后排出的废气首先驱动高压级涡轮，驱动高压级涡轮的能量带动压气机工作，经过高压级涡轮的废气再进入动力涡轮，动力涡轮通过液力耦合器等装置将能量回馈发动机输出轴。涡轮的输出轴通过一个齿轮减速系统与发动机的曲轴连接。一般情况下，最大的涡轮输出轴转速为 70000 r/min，而发动机曲轴的最大转速才为 1900 r/min，除了减速，还需要一套隔离装置用来防止速度差带来的冲击。根据动力涡轮转速与发动机额定转速关系，本文中选择 27 减速比。

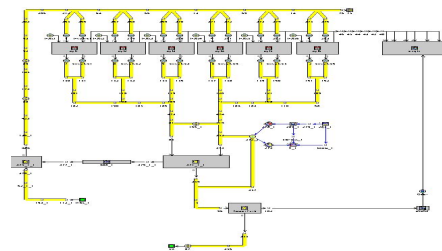


图 6 动力涡轮发动机热力学仿真模型

增加动力涡轮后，将增加高压级增压器的涡轮后压力，影响到高压级涡轮的膨胀比，影响高压级增压器的效率。在本文中选择两种高压级增压器进行匹配计算，一种是原机增压器，另外一种，考虑到发动机高原动力性需求，压气机端选择与原机增压器相同，通过降低涡轮端的流量，提高动力涡轮入口的废气能量。涡轮端相比原机降低 20% 的流量。

两种方案与原机对比结果如图 7-13 所示。不同方案的仿真计算的基础是动力性相同。

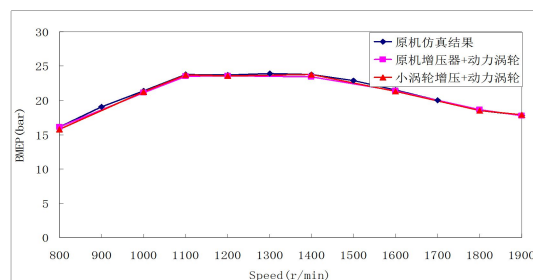


图 7 BMEP 仿真计算结果对比

相对于原机,两种方案的 PMEP 都有所增加,图 8 所示,主要原因是动力涡轮增加了高压级增压器涡轮后阻力,提高了高压级的排气背压。通过动力涡轮实现了图 10 所示的排气能量的回收,有用功增加。通过计算 PMEP 与动力涡轮回收功可得,利用小涡轮的高压级增压器方案可以实现在高转速经济性提高 3%,同时保证了低速油耗与原机相同。“原机增压器+动力涡轮”方案虽然可以降低额定转速的比油耗,但是由于增压器效率降低,增压压力在高转速下降较多,无法实现与原机相同的空燃比,无法达到排放要求。综合分析选择“小涡轮增压器+动力涡轮”方案。同时该方案满足高原动力性需求。

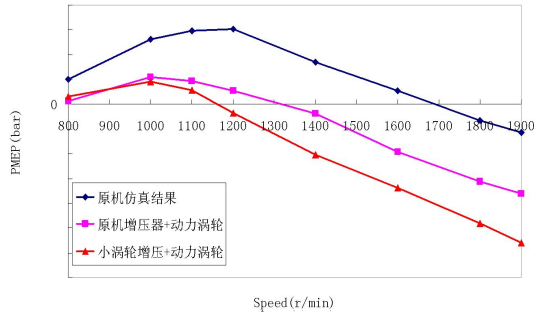


图 8 PMEP 仿真计算结果对比

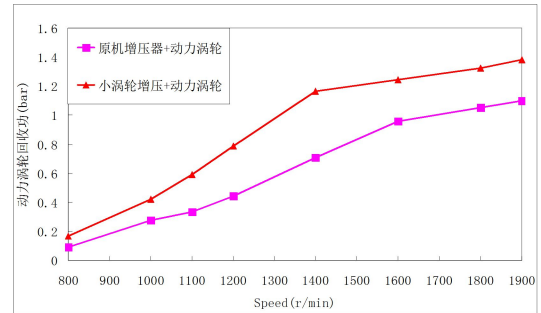


图 9 动力涡轮回收功仿真计算结果对比

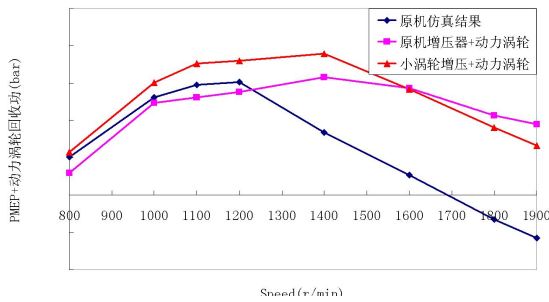


图 10 (动力涡轮回收功+PMEP) 仿真计算结果对比

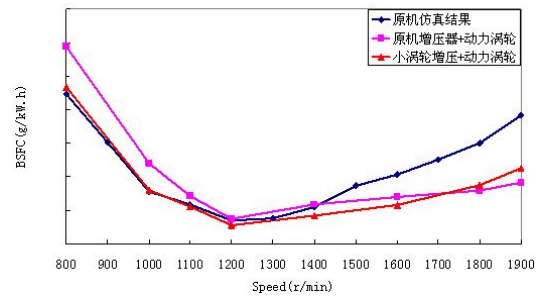


图 11 比油耗仿真计算结果对比

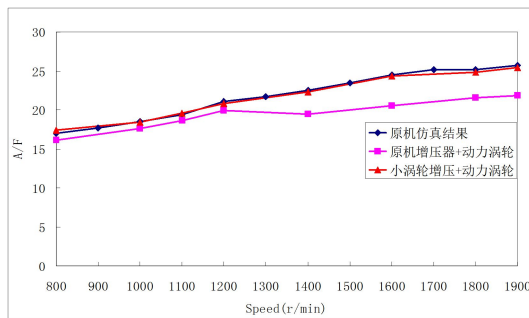


图 12 空燃比仿真计算结果对比

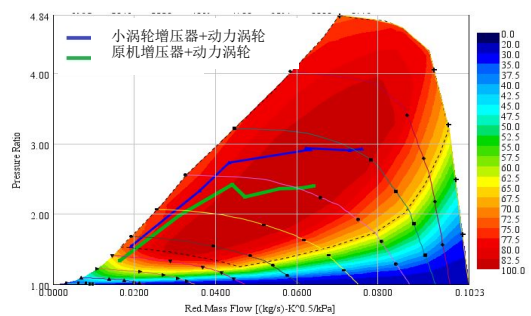


图 13 联合运行线仿真计算结果对比

3 发动机台架试验结果与分析

在发动机台架上应用热力学仿真推荐的高压级与动力涡轮增压系统,发动机燃烧室、喷油器、气道等与原机相同,后处理应用 SCR 系统。试验用主要设备如表 3 所示。进行了喷油定时与喷油压力的优化。表 2 是柴油机 ESC 循环十三工况加权测试结果。从表中可以看出,发动机达到国 IV 排放,同时加权比油耗下降了 2.5%。

表 2 ESC 循环十三工况的加权测试结果对比

	氮 氧 化 物 (g/kW.h)	碳 氢 化 合 物 (g/kW.h)	一 氧 化 碳 (g/kW.h)	颗粒物 (g/kW.h)	13 工况加权比油耗 (相对百分比)
原机	3.1	0.1	0.188	0.016	100
动力涡轮	3.06	0.1	0.185	0.015	97.5

同时进行了发动机万有特性的对比，相对于原机应用动力涡轮后在大负荷以及高转速区域，节油效果比较明显，最高节油可以达到 3%。但在低速区域，油耗较差，这与高压级增压器匹配有关。在低负荷区域油耗较差，这是因为低负荷，排气能量较差，动力涡轮已经成为耗功器件，无法使动力涡轮脱开从而导致该区域油耗较高。

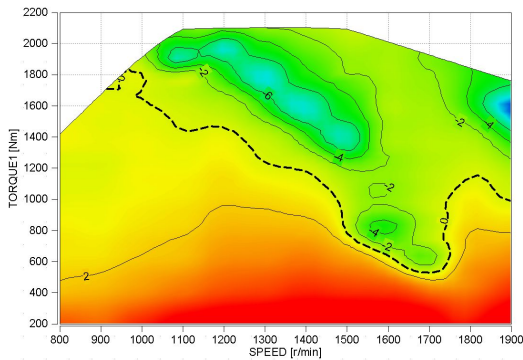


图 14 动力涡轮发动机与原机比油耗差值(动力涡轮比油耗-原机比油耗)

表 3 发动机主要参数试验用主要设备

名称	型号
测功机	AFA-T500
油耗仪	AVL735S
燃油恒温装置	AVL753
排放仪	AMA4000
全流稀释系统	CVS4000
燃烧分析仪	AVL INDICOM
烟度计	AVL415

4 结论

本文利用动力涡轮这种复合增压方式，有效地进行排气能量回收，发动机经济性最高可提高 3%，同时可以应用 SCR 后处理系统达到国 IV 排放。但在低负荷区域，油耗增加。

动力涡轮增压系统的高压级涡轮由于采用较小尺寸匹配，因此可以获得良好的瞬态响应性。

动力涡轮增压系统增加了涡前与进气之间的压差，泵气损失增加，对 EGR 回流有很大帮助，在将来可以在应用 EGR 发动机上扩展应用

动力涡轮增压系统的结构复杂，在发动机上难于布置，同时液力耦合减速系统成本较高，维修保养困难。

5 参考文献

- [1] 李俊. 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.
- [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] 杨东. 车用废气能量回收系统的探讨: [硕士学位论文]. 吉林: 吉林大学汽车工程学院, 2012.