

性能与排放

基于某型柴油机的天然气发动机性能优化仿真研究

乔英志¹, 夏 倩¹, 吴 杰², 刘 博¹, 朱 骏¹

(1. 中船动力研究院有限公司, 上海 200129; 2. 宁波中策机电集团有限公司, 浙江 宁波 315032)

摘 要: 针对基于某型柴油机改造的天然气发动机进行了性能仿真计算研究。通过建立天然气发动机仿真模型, 对其结构参数进行了优化计算, 并进行了增压器匹配计算。仿真计算得到了优化后的天然气发动机的性能参数, 验证了该型柴油机改造为天然气发动机的可行性, 并为基于柴油机改造的天然气发动机的性能提升与试验提供了理论依据。

关键词: 天然气发动机; 性能; 仿真; 增压器; 匹配

中图分类号: TK432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)03-0017-05

Simulation Study on Performance Optimization of Natural Gas Engine Based on Certain Diesel Engine

Qiao Yingzhi¹, Xia Qian¹, Wu Jie², Liu Bo¹, Zhu Jun¹

(1. China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200129;
2. Ningbo C. S. I. Power & Machinery Group Co., Ltd., Zhejiang Ningbo 315032)

Abstract: The performance of the natural gas engine which was reformed from the diesel engine was studied through simulation. The structure parameters of natural gas engine were optimized by simulation model. The turbocharger matching was also studied. The optimized performance data of the natural gas engine were achieved. The feasibility of transformation was verified and the theoretical guidance for performance improvement and test was also provided.

Key words: natural gas engine; performance; simulation; turbocharger; matching

0 引 言

随着能源危机和环境污染问题日益突出, 人们在不断改进发动机性能和排放的基础上, 积极致力于寻求新型清洁能源^[1]。天然气作为新型的替代燃料除了具有资源丰富、价格低廉等优势外, 由于其主要成分为 CH₄, 所以还具有辛烷值高, 抗爆性好, 燃烧排放污染小等优点^{[2][3]}。目前, 国内部分车用发动机已采用天然气作为燃料, 此类发动机主要由柴油机或汽油机改装得到, 由于改装成本较低而得到了广泛应用^[4]。

柴油机改造为天然气发动机, 由于燃料特性的变化, 其动力性将下降^{[5][6]}。为满足改造后天然

气发动机保持原柴油机功率要求, 采取提高转速的措施。提高发动机转速可以增加单位时间气缸做功的次数, 因而可提高发动机的功率输出。本文研究的天然气发动机改造后转速由原柴油机的 600 (r · min⁻¹) 提高到 750 (r · min⁻¹)。改造后的天然气发动机采用预燃室火花点火技术, 以满足缸内稀薄燃烧的点火能量要求。稀薄燃烧可以提高缸内空气量, 降低排温并减弱爆震趋势, 提高平均有效压力, 使发动机动力性得到进一步提高。

本文应用 GT-POWER 软件对某型柴油机改造为天然气发动机进行仿真计算, 对改造后天然气发动机的结构参数进行优化, 并对优化后的天然气发动机进行增压器匹配计算, 最终得到天然气发动机

的结构参数和性能参数，为该型柴油机改造为天然气发动机提供理论依据和指导。

1 柴油机建模与仿真计算

根据柴油机结构参数和进排气系统管路尺寸，利用 GT-POWER 软件建立原柴油机的仿真计算模型。利用柴油机试验数据对模型进行标定。仿真计算值与试验值对比如图 1，由图可知，除涡轮前进口温度和各缸平均温度误差偏大外，其他性能参数的计算值与试验值误差都在 2% 以内，故可在柴油机计算模型的基础上建立天然气发动机仿真计算模型。

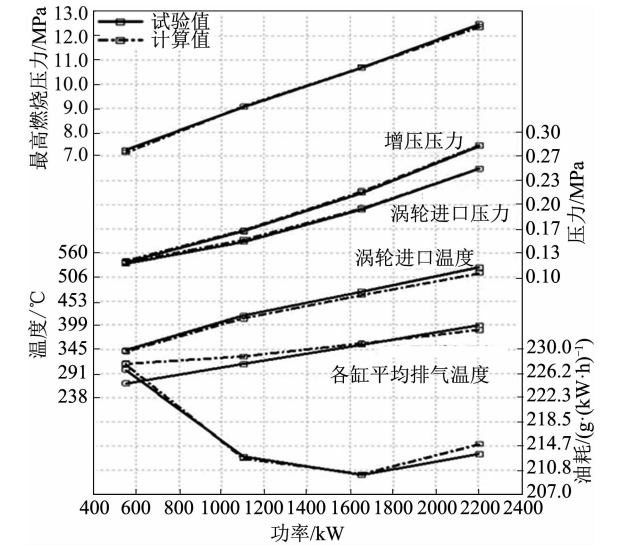


图 1 柴油机计算值与仿真值比较

2 天然气发动机仿真计算模型

柴油机改造为天然气发动机主要是对原柴油机的燃料供给系统和进气系统进行改造，同时增加预燃室点火系统和电控系统^[5]。天然气发动机增加的主要系统有：（1）点火系统：采用预燃室火花点火系统，取消柴油机的喷油器，加装预燃室。（2）天然气进气系统：取消柴油机的燃油喷射系统，增加两路天然气管路，一路为预燃室进天然气，另一路为进气歧管进天然气。进气歧管进气采用电控多点顺序喷气技术，通过电磁阀精确控制各缸燃料喷入的时刻及持续期。（3）空燃比控制系统：采用进气旁通和节气门对空燃比进行联合控制，低负荷时采用节气门控制，高负荷采用进气旁通控制。（4）电控系统：主要包括点火控制模块、天然气喷射控制模块、空燃比控制模块、转速控制模块、爆震监测模块和安保模块等。根据天然气发动机新增系统，结合柴油机模型，建立天然气发动

机仿真计算模型。

3 天然气发动机性能优化

通过对天然气发动机压缩比、天然气喷入正时和进排气阀正时等参数的优化计算，得到优化的结构参数，并在此基础上对天然气发动机进行增压器匹配计算，最终得到天然气发动机的结构参数和性能参数，为改造后天然气发动机的性能优化提供理论指导。

3.1 压缩比优化计算

随着压缩比的增大，发动机的经济性、燃烧和起动性能都有所改善，因此在机械负荷允许的条件下应尽量选择较大的压缩比。由于天然气发动机存在爆震的可能，因此，压缩比通常选为 10.5 ~ 12^[7]。

由于改造后天然气发动机采用预燃烧室火花点火方式，预燃室替代原柴油机喷油器，其伸出缸盖的距离对压缩比的选取有直接影响，预燃室与活塞最小距离应满足原柴油机的要求。根据预燃室的设计，预燃室伸出缸盖的高度约为 10 mm。天然气发动机不同压缩比对应的余隙高度和预燃室与活塞最小距离如表 1。由表 1 可知：随压缩比的增大，余隙高度逐渐减小，预燃烧室与活塞最小距离减小。参考柴油机喷油器与活塞的最小距离，预燃室与活塞最小距离应大于 5.0 mm，故天然气发动机压缩比实际最大取值为 12。

表 1 天然气发动机不同压缩比下的余隙高度

压缩比	11	11.5	12	12.5	13
余隙高度/mm	16.6	14.8	13.2	11.7	10.3
预燃室与活塞最小距离/mm	8.6	6.8	5.2	3.7	2.3

利用仿真计算模型设置不同压缩比和不同燃烧起始角进行 DOE 计算，结果如图 2 和图 3。由图 2 可得出：最高燃烧压力随压缩比增大而增大，随燃烧起始角增大而减小。由图 3 可得出：天然气发动机效率随压缩比增大而增大，随燃烧起始角的增大先增大后减小。天然气发动机结构允许的最大燃烧压力为 16.5 MPa，根据参考文献 [7]，天然气发动机正常运行时，实际最高燃烧压力波动为 ±10% 左右。考虑最高燃烧压力限制和爆震因素，改造后的天然气发动机压缩比取为 12，燃烧起始角为 -7.5 °CA。

3.2 天然气喷入正时优化

由于天然气发动机采用进气歧管喷射方式，天然气喷入过早或过晚都会导致气阀重叠期天然气的

泄漏，进而影响天然气发动机的效率。基于上述考虑，需要对天然气喷入正时进行优化计算。初步选取天然气喷入正时为 320 ~ 410 °CA 之间的十种案例进行仿真计算，得到 CH₄ 泄漏量和天然气发动机热效率随天然气喷入正时的变化曲线，分别如图 4 和图 5。

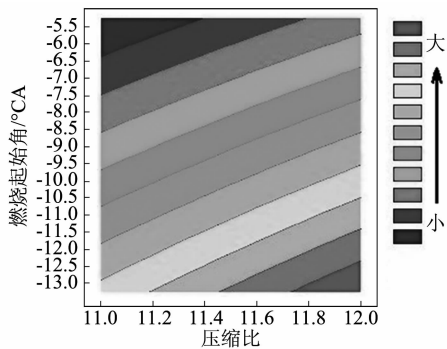


图2 最高燃烧压力随压缩比和燃烧起始角变化曲线

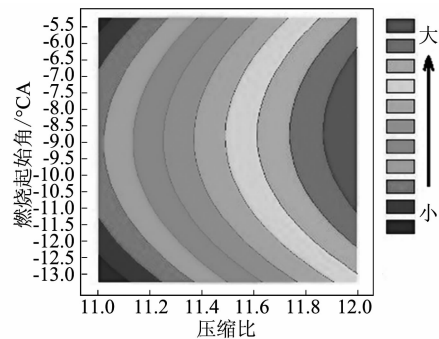


图3 效率随压缩比和燃烧起始角变化曲线

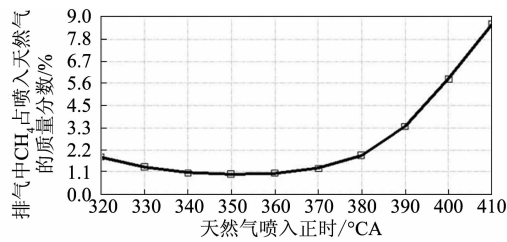


图4 排气中甲烷占喷入天然气的质量分数变化

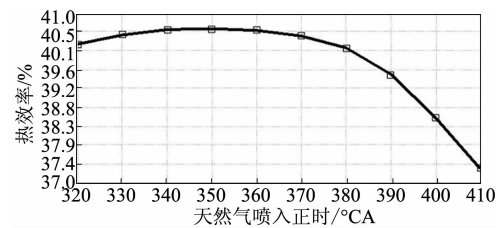


图5 热效率变化曲线

由图 4 可看出：排气中 CH₄ 占喷入天然气的质量分数随天然气喷入正时的增大先减小后增大，呈抛物线式变化；由图 5 可看出：天然气发动机热效率随天然气喷入正时的增大先增大后减小。综合

图 4 和图 5 可得出：天然气喷入正时为 350 °CA 时，天然气发动机排气中 CH₄ 泄漏量最小，热效率最高。在实机试验中可以根据该规律对天然气喷入正时进行优化调整。

图 6 为天然气喷入正时为 350 °CA 时，进排气阀口和电磁阀口 CH₄ 含量随曲轴转角的变化曲线。由进气阀口 CH₄ 质量分数和质量流量随曲轴转角的变化曲线可得出：进气阀关闭阶段，空气和 CH₄ 混合气存在倒流，进气道内 CH₄ 含量增加；由排气阀口 CH₄ 质量分数曲线可得出：气阀重叠期间，进气道内的 CH₄ 与空气的混合气进入排气道内，导致排气中 CH₄ 含量升高。基于上述分析，须对进排气阀正时进行优化计算，以减少排气中 CH₄ 的泄漏量。

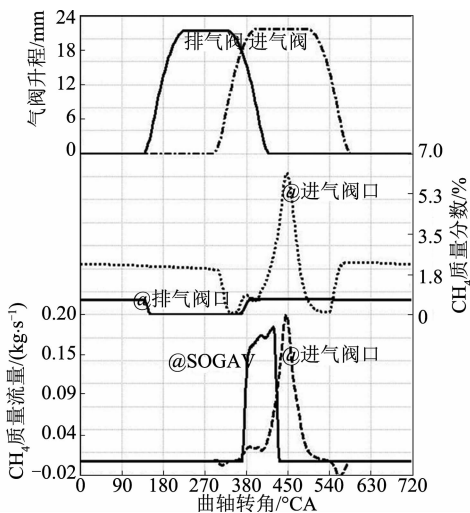


图6 CH₄ 含量随曲轴转角的变化规律

3.3 进排气阀正时优化计算

天然气发动机采用原柴油机进排气阀正时，进气阀关闭阶段缸内 CH₄ 与空气混合气存在倒流，导致气阀重叠期 CH₄ 泄漏到排气中，故对进排气阀正时进行优化计算，减小进气阀提前关闭角度和气阀重叠期。进排气阀正时的优化结合原机的进排气阀升程曲线进行，利用原柴油机进排气凸轮的缓冲、上升和下降段，通过改变等速段对进排气阀正时进行调整。通过提前关闭进气阀实现米勒循环，以降低气缸内温度。

图 7 为进排气阀正时变化示意图。进气阀延迟开启变化角度区间为 0 ~ 50 °CA，进气阀提前关闭变化角度区间为 0 ~ 50 °CA，排气阀提前关闭变化角度区间为 0 ~ 30 °CA，间隔为 10 °CA。利用 GT-POWER 中 DOE 功能对参数进行组合仿真计算，得到不同组合下的天然气发动机热效率变化规律，如图 8 ~ 图 11 所示。

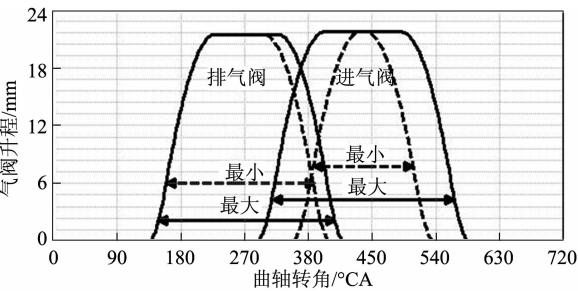


图 7 进排气阀正时变化示意图

和进气阀延迟开启变化角度为 $40 \sim 50^{\circ}\text{CA}$ 所围成的区域范围内。

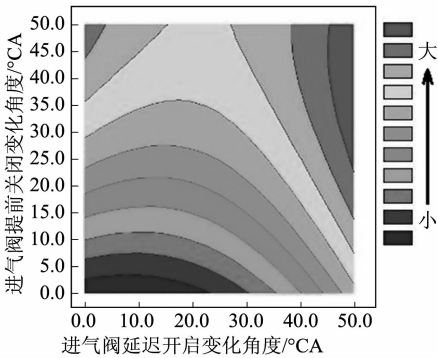


图 11 排气阀提前关闭变化角度为 30°CA

图 12 ~ 图 14 为排气阀提前关闭角度为 0°CA 时，最高燃烧压力、每循环排气中 CH_4 质量和涡轮前排气温度随进气阀正时的变化规律。

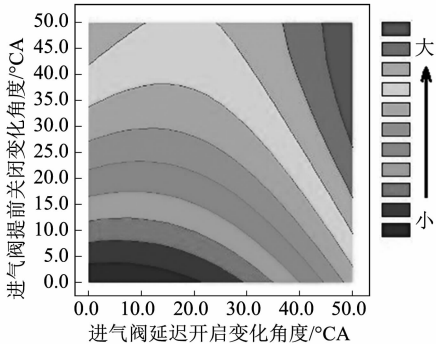


图 8 排气阀提前关闭变化角度为 0°CA

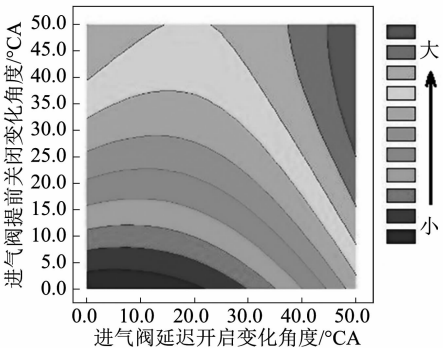


图 9 排气阀提前关闭变化角度为 10°CA

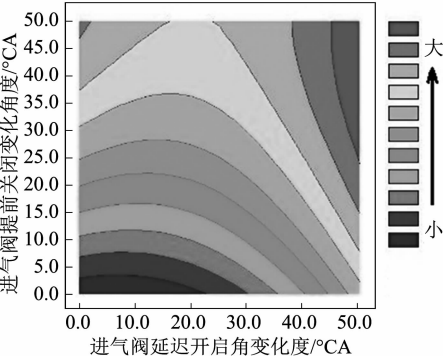


图 10 排气阀提前关闭变化角度为 20°CA

由图 8 ~ 图 11 可得出：排气阀提前关闭角度对天然气发动机热效率影响较小。热效率主要受进气阀提前关闭变化角度的影响，热效率较高的区域主要集中在进气阀提前关闭变化角度为 $25 \sim 50^{\circ}\text{CA}$ ，

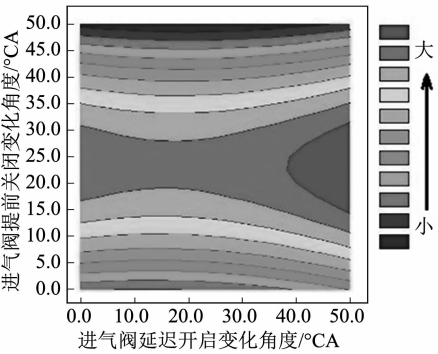


图 12 最高燃烧压力变化规律

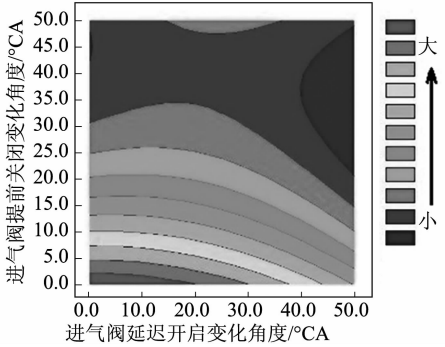


图 13 排气中 CH_4 质量变化规律

由图 12、13 可得出：在排气阀正时不变的前提下，最高燃烧压力和 CH_4 泄漏量主要受进气阀提前关闭角度的影响，最高燃烧压力随进气阀提前关闭角度的增大先增大后减小，甲烷泄漏量随进气阀提前关闭角度的增大先减小后增大。由图 14 可得出：排气温度主要受进气阀延迟开启角度的影响，排气温度随进气阀延迟开启角度的增大而增大。

综上所述，在满足天然气发动机最高燃烧压力

和排气温度限制的前提下，甲烷泄漏量最少，热效率最高的进排气阀正时为：进气阀延迟开启和提前关闭变化角度均为 50 °CA，排气阀正时不变。

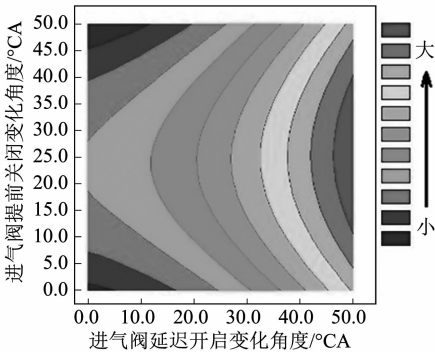


图 14 排气温度变化规律

3.4 天然气发动机与增压器匹配

天然气发动机优化后其结构参数发生了变化，须重新对增压器进行匹配计算。利用原柴油机涡轮增压器进行匹配计算，得到额定工况下压气机联合运行点如图 15。由图可得出：天然气发动机额定工况下增压器压气机的喘振裕度为 7%，喘振裕度偏小，原柴油机增压器的压气机偏大。选择新型增压器进行重新配机计算，得到天然气发动机负荷特性下的压气机联合运行曲线，如图 16 所示。由图可知，压气机联合运行曲线平行于压气机喘振线，且穿过压气机高效率区域。由表 2 中不同负荷下的喘振裕度可得出：天然气发动机与新型增压器匹配，其喘振裕度 > 15%，满足匹配要求。

表 2 不同负荷下的压气机喘振裕度

负荷/%	100	75	50	25
喘振裕度/%	16.3	23.0	50.3	84.9

综上可得到优化后的天然气发动机额定工况下的性能数据，如表 3。由表 3 可得出：柴油机改造成天然气发动机后，其功率与原柴油机相当（额定工况：转速 600 (r · min⁻¹)，功率 2 206 kW），效率可达 43% 左右。

表 3 额定工况下天然气发动机性能数据

转速/(r · min ⁻¹)	750
功率/kW	2 206.0
热效率/%	43.26
涡轮增压器效率/%	63.43
涡轮前排气温度/°C	473.4
缸内过量空气系数	2.00
总过量空气系数	2.13

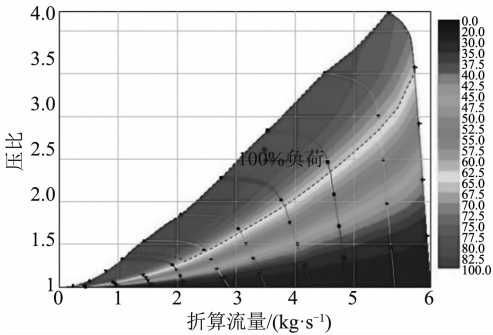


图 15 原柴油机增压器压气机联合运行点

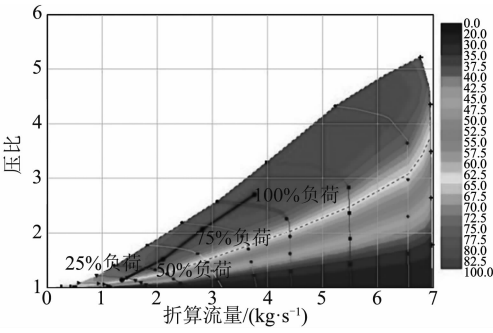


图 16 新型增压器压气机联合运行线

4 总 结

本文对基于柴油机改造的天然气发动机进行了仿真计算，并对天然气发动机的结构参数进行了优化。在此基础上对天然气发动机进行了增压器匹配计算，最终得到了优化后的天然气发动机的结构参数。为柴油机改造成天然气发动机的性能优化、实机开发与试验提供了理论依据。

参考文献

[1] 于华, 马相明, 许自顺, 等. 增压中冷稀燃天然气发动机燃烧特性实验研究 [J]. 内燃机, 2014 (5): 4-8.

[2] T Fujisawa, K Yokota. A new look at the utilization of alternative fuels for diesel engine-IDIS [C]. SAE 810998.

[3] 马叶红, 徐国华, 齐洪元, 等. YC4102Q1 柴油机燃用天然气的排放特性研究 [J]. 内燃机工程, 2002 (4): 57-59.

[4] 邵晓杰. 基于 6135 柴油机的 CNG 单燃料发动机性能模拟研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

[5] 张晓东, 刘兴华, 张幽彤. 柴油机改为火花点火式天然气发动机技术研究 [J]. 内燃机, 2002 (6): 6-9.

[6] 周冬. 柴油机改装天然气发动机的意义及技术措施 [J]. 山东内燃机, 2005 (1): 10-13.

[7] B Johansson, K Olsson. Combustion chambers for natural gas SI engine part 1 [C]. SAE Paper 950469.