

船用低速机高低压 EGR 系统仿真研究

Numerical consequence of high and low pressure EGR system on a
marine low speed engine

唐洪威 李澍冉 石磊 邓康耀

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市, 200240)

摘 要: 本文基于 GT-Suite 软件, 针对 6EX340 机型, 采用 DIPulse 燃烧模块, 建立整机模型并仿真高低压 EGR 系统。结果表明, 高、低压 EGR 系统均有效地降低 NO_x 排放。高压 EGR 系统, 在 100% 负荷、37% EGR 率工况, 可将 NO_x 排放降至 2.993 g kW⁻¹ h⁻¹; 在其他负荷 42% EGR 率工况, 可将 NO_x 排放降至 Tier III 标准。低压 EGR 系统, 在 100% 负荷、35% EGR 率工况, 可将 NO_x 排放降至 2.442 g kW⁻¹ h⁻¹; 在其他负荷 40% EGR 率工况, 可将 NO_x 排放降至 Tier III 标准。相同排放标准下, 低压 EGR 方案的油耗更低。但由于重油杂质较多, 压气机的可靠性会受到影响。

关键词: 高低压 EGR 方案; 预测模型; Tier III 排放; 油耗; 船用低速机

Doi: 10.11990/jheu

中图分类号: TK421.5

文献标识码: A

文章编号: 1006-7043 (2015) xx-xxxx-x

Abstract: A model of a marine low speed engine was established and calibrated based on the GT-Suite software using DIPulse combustion model to simulate high and low pressure EGR (Exhaust Gas recirculation, EGR) system. Results showed that both of High and low pressure EGR system could reduce NO_x emission significantly. For high pressure EGR system, on 100% load with 21% EGR rate, the NO_x emission could be decreased to 2.993 g kW⁻¹ h⁻¹; on other load with 21% EGR rate, the NO_x emission could satisfy the Tier III stand. For low pressure EGR system, on 100% load with 20% EGR rate, the NO_x emission could be decreased to 1.442 g kW⁻¹ h⁻¹; on other load with 20% EGR rate, the NO_x emission could satisfy the Tier III stand. The BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) of Low pressure EGR system is less. However, considering the impurities of heavy diesel fuel, it is a critical challenge for the reliability of the compressor.

Keywords: High and low pressure EGR system; Predictive model; Tier III emission; BSFC; Marine low speed engine

随着环境问题的日益严峻, 针对船舶柴油机 NO_x 排放的 Tier III 标准于 2016 年 1 月开始执行^[1-2]。废气再循环(EGR, Exhaust Gas Recirculation)因其能够有效地降低 NO_x 排放, 在车用柴油机上已得到了广泛的应用, 并成为满足 Tier III 标准的主要技术之一。EGR 的原理是将发动机排除的废气重新导入燃烧室。这有效地降低了空燃比并对热负荷影响不大。EGR 主要从三方面减少 NO_x 的生成: 1. 废气中由于含有 CO₂、H₂O 等三原子分子, 因此其比热容大于空气。与纯空气相比, 导入废气后, 相同质量的气体, 可吸收更多缸内的热量, 降低缸内温度, 减少 NO_x 的生成; 2. 废气的 O 含量小于空气。与纯空气相比, 导入废气后, 相同质量的气体, O 含量下降, 减少 NO_x 的生成; 3. 导入废气后, 其中的 CO、HC 等在高温下吸收热量、发生裂解, 降低缸内温度^[3-5]。和高压 EGR 系统相比, 低压 EGR 系统具有结构简单、能耗较低等优势。而相关高校和科研院所的研究主要集中在高压 EGR 对船用低速机 NO_x 排放的影响上^[6-9]。低压 EGR 系统的研究相对缺乏。因此, 本文基于 6EX340 船用低速柴油机, 建立 GT-Suite 模型, 并模拟高、低压 EGR 系统对 NO_x、比油耗(BSFC, Brake Specific Fuel Consumption)、进气压力、流量、爆发压力等的影响。

1. 模型的建立与校核

为分析不同 EGR 系统对整机和增压系统的影响,以某低速二冲程柴油机为研究对象,基于 GT-Suite 软件建立仿真模型。该机型主要技术参数如表 1 所示,其原机 NO_x 排放满足 Tier II 法规标准(13.75 g kW⁻¹ h⁻¹)。

表 1 船用低速机主要技术参数
Table1 Main paratemers of engine

参数	数值
缸径/mm	340
冲程/mm	1600
连杆长度/mm	1600
压缩比	19.8
额定功率/kW	4896
额定转速/rpm	157
发火次序	1-6-2-4-3-5

整机模型示意图如 1 所示,主要包括进气系统、气缸、排气系统、涡轮增压系统、中冷器、辅助风机及曲轴箱等。

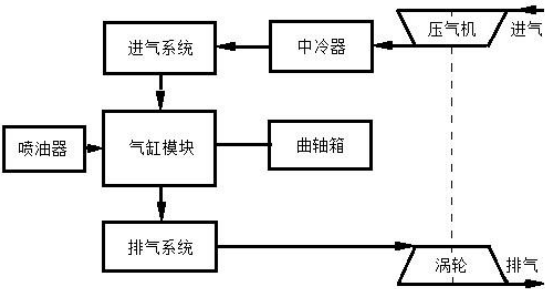


图 1 整机模型示意图
Fig. 1 Schematic of engine

其中传热模型采用 WoschniGT 模型,该模型与经典 Woschni 模型接近但不考虑旋流影响,适用于旋流参数未知的情况。摩擦模型采用 EngFrictionCF 模块,其中 CF 代表 Chen-Flynn 模型,该模型包括了曲轴箱、活塞、配气机构等全部摩擦。燃烧模型采用预测型准维三区燃烧模型 DIPulse,其中燃烧放热率的预测基于压力和温度曲线、进气门关时的成分和喷油速率曲线,平均计算时间比非预测模型多 5%。该燃烧模型通过将气缸容积分成三个离散的热力学区域来实现,每个热力学区域具有其自身的温度和浓度。被称为主未燃区的第一区主要是进气门关闭(IVC)时的留在气缸内的气体,被称为喷射未燃区的第二区域由在喷射过程中卷吸的燃料和气体的混合物组成,被称为喷射已燃区的第三区域由已燃烧的燃烧产物组成^[10-12]。

分别对推进特性为 25%、50%、75%、100%负荷的模型与实验数据进行标定,主要关注功率、BSFC、扫气压力、扫气温度、涡轮排温、爆发压力、压缩压力、NO_x 排放等数据,经过校核,不同负荷下各性能参数仿真结果与实验结果的对比如表 2 所示,误差均符合要求,表明仿真模型能够准确地反映发动机的各项性能。

仿真模型校核后分别引入高压 EGR 和低压 EGR 系统。图 2 为高压回路 EGR 方案示意图。废气从涡轮前的排气集管引出,进入 EGR 回路,经过清洗、过滤、中冷与增压后与进气混合。其中,EGR 切断阀控制 EGR 回路的开关,EGR 控制阀和风机控制 EGR 率。由于二冲程柴油机进排气压力差的存在,废气需要通过一个 EGR 风机增压后才能进入扫气腔。气缸旁通用于防止较大 EGR 率时压气机喘振。

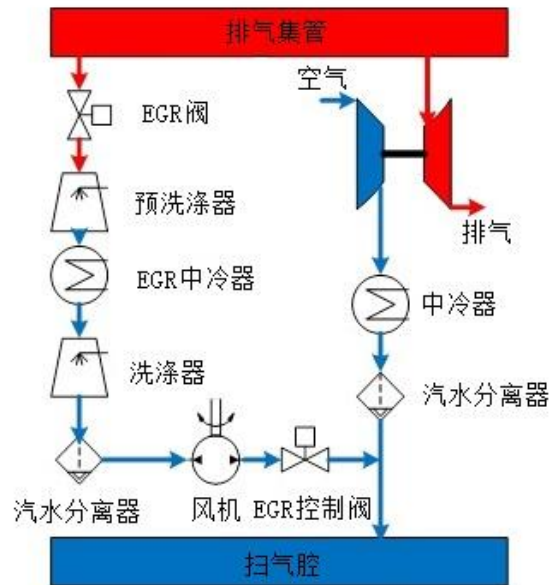


图 2 高压回路 EGR 系统示意图

Fig.2 Schematic of high pressure EGR system

图 3 是低压回路 EGR 系统示意图。低压 EGR 系统废气在涡轮后引出，进入 EGR 通路，经过清洗、过滤、中冷后与进气在增压器前混合，共同增压进入气缸完成废气再循环。由于柴油机废气中有大量颗粒物及其它对压气机工作稳定性严重影响的物质，在 EGR 通路中必须对废气进行严格的过滤、清洗，使其达到能够保证增压器稳定工作的标准才能与进气混合。

表 2 整机校核结果

Table 2 Calibration of engine

负荷	功率 kW	BSFC g kW ⁻¹ h ⁻¹	扫气压力 bar	扫气温度 °C	涡轮排温 °C	爆发压力 bar	压缩压力 bar	NOx 排放 ppm
100%	仿真	4938	180.96	4.28	37.41	413.55	184.24	165.29
	实验	4859	183.91	4.28	37.80	414.00	183.12	165.09
75%	仿真	3711	178.14	3.40	30.69	358.53	173.09	140.81
	实验	3633	181.98	3.42	31.12	360.00	168.59	141.61
50%	仿真	2464	181.64	2.46	27.96	323.89	135.62	101.18
	实验	2450	182.74	2.41	28.02	323.00	135.38	99.09
25%	仿真	1246	192.57	1.49	37.29	305.47	99.24	63.81
	实验	1231	194.95	1.47	37.24	305.00	99.39	63.14

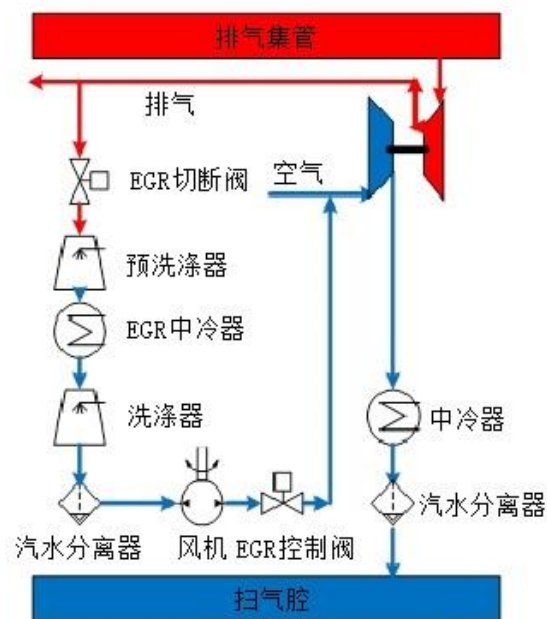


图 3 低压 EGR 系统回路示意图

Fig.3 Schematic of low pressure EGR system

2. 计算结果分析

2.1 EGR 系统对整机性能的影响

以 100%负荷为例，高压 EGR 对 NO_x 排放和燃油消耗率的影响如图 4 所示，当 EGR 率为 10%时，能够将 NO_x 排放降低至 7.421 g kW⁻¹ h⁻¹，燃油消耗率比原机仅上升了 0.07 g kW⁻¹ h⁻¹，影响非常小；当 EGR 率为 20%时，能够将 NO_x 排放降低至 3.451 g kW⁻¹ h⁻¹，仍没有达到 Tier III 标准规定的 NO_x 排放限值(3.274 g kW⁻¹ h⁻¹)，但是已经非常接近，此时燃油消耗率增加至 190.55 g kW⁻¹ h⁻¹，涨幅为 3.57%；当 EGR 率达到 37%时，能将 NO_x 排放降低至 2.993 g kW⁻¹ h⁻¹，满足 Tier III 标准，并且其余负荷也满足该标准；继续增大 EGR 率至 40%时，虽然 NO_x 排放降低至 0.248g kW⁻¹ h⁻¹，但是燃油消耗率也大幅增加至 205.09 g kW⁻¹ h⁻¹。当 EGR 率达到最大限值 45%时，二冲程柴油机的 NO_x 排放从原机的 10.48 g kW⁻¹ h⁻¹ 降低至 0.016 g kW⁻¹ h⁻¹，降低幅度为 99.85%，但是在该 EGR 率下，燃油消耗率由原机的 183.91 g kW⁻¹ h⁻¹ 增加至 250.37 g kW⁻¹ h⁻¹，增加幅度为 36.14%。

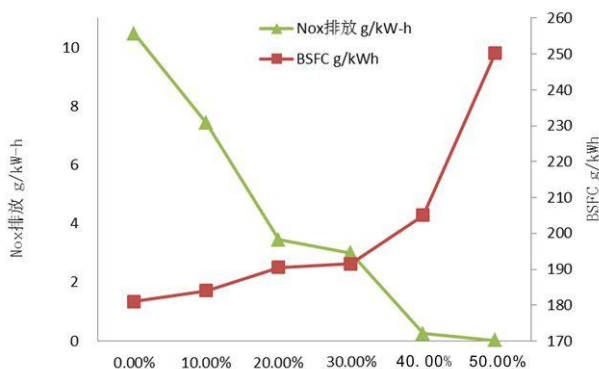


图 4 NO_x 和 BSFC 随高压 EGR 率的变化(100%负荷)

Fig.4 The effect of EGR rate on NO_x and BSFC for high pressure EGR system

以 100%负荷为例，低压 EGR 对 NO_x 排放和燃油消耗率的影响如图 5 所示，当 EGR 率为 10%时，能够将 NO_x 排放降低至 6.556 g kW⁻¹ h⁻¹，燃油消耗率比原机上升了 2.73 g kW⁻¹ h⁻¹；当 EGR 率为 18%时，能够将 NO_x 排放降低至 2.365 g kW⁻¹ h⁻¹，已经达到 Tier III 标准规定的 NO_x 排放限值(3.274 g kW⁻¹ h⁻¹)，此时燃油消耗率增加至 187.92g kW⁻¹ h⁻¹，涨幅为 3.85%；当 EGR 率为 37%时，能够将 NO_x 排放降低至 1.442 g

$\text{kW}^{-1} \text{h}^{-1}$, 此时燃油消耗率增加至 $189.77 \text{g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$, 涨幅为 4.87%, 其余负荷都能在 EGR 率为 20% 时满足排放标准; 继续增大 EGR 率至最大 24.03% 时, 虽然 NO_x 排放降低至 $0.121 \text{g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$, 但是燃油消耗率也大幅增加至 $199.13 \text{g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$, 增加幅度为 10.04%。相比高压 EGR 系统, 在同时满足排放标准时, 低压 EGR 系统的燃油消耗率涨幅非常小, 是因为低压 EGR 系统中所有废气都通过涡轮膨胀做功, 因此效率更高, 油耗更低。

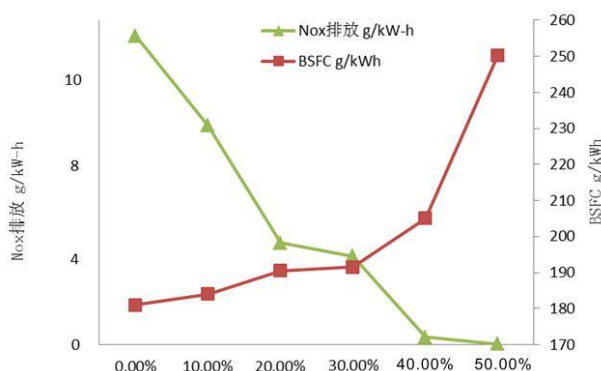


图 5 NO_x 和 BSFC 随低压 EGR 率的变化

Fig.5 The effect of EGR rate on NO_x and BSFC for high pressure EGR system

2.2 EGR 系统对压气机的影响

引入 EGR 系统可以有效降低 NO_x 排放, 达到 Tier III 标准。但是将部分涡轮前废气送至压气机后使得涡轮前流量的减小, 进而会造成压气机流量和压比下降, 柴油机性能出现恶化。

EGR 系统的引入使得涡轮前流量降低进一步对压气机流量和增压压力产生影响。图 6 给出了高压 EGR 系统不同 EGR 率对增压压力和压气机流量的影响, 其中 4 个工况点分别为 25%、50%、75%、100% 负荷。随着 EGR 率的逐渐增加, 即从 0 增加至可以达到的最大 EGR 率时, 不同负荷的压气机压比和流量都有下降。这是因为 EGR 率的增加使得涡轮前流量减少, 因而压气机端流量减少, 增压压力下降。针对该机型, 要达到 Tier III 排放标准, EGR 率应控制在 20%-30% 之间, 各负荷相比于原机, 相应压气机流量下降 10%-20%, 压比下降 3%。

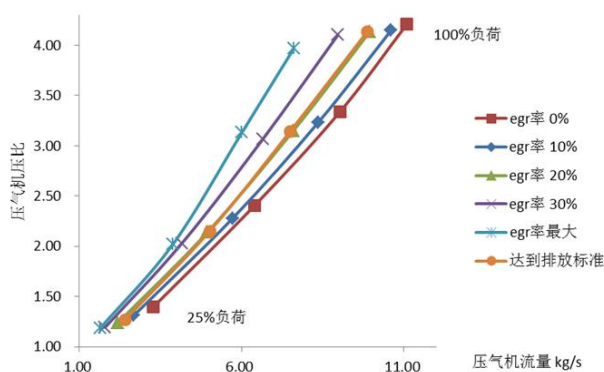


图 6 高压 EGR 对进气压力和流量的影响

Fig.6 The effect of EGR rate on intake pressure and mass flow rate for high pressure EGR system

图 7 为低压 EGR 系统对压气机流量和压比的影响, 低压 EGR 系统将部分涡轮后废气送至压气机前, 要达到 Tier III 排放标准, EGR 率应控制在 10%-20% 之间, 压气机流量和压比稍有下降, 但是影响不明显, 是因为废气的引出端和引入段对于涡轮、压气机的流量影响较小。各负荷相比于原机, 相应压气机流量下降 7%-20%, 压比下降 3%-7%。

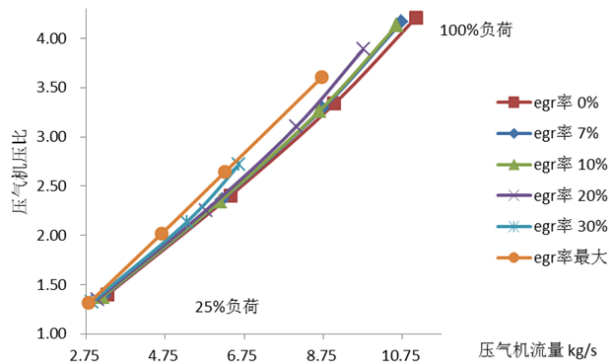


图 7 低压 EGR 对进气压力和流量的影响

Fig.7 The effect of EGR rate on intake pressure and mass flow rate for low pressure EGR system

2.3 EGR 系统对扫气压力及爆发压力的影响

高压 EGR 系统不同负荷扫气压力及爆发压力随 EGR 率的变化分别如图 8、9 所示。可以看到在随着 EGR 率的逐渐增加到最大 EGR 率时，不同负荷的扫气压力相比原机下降 5%，达到 Tier III 排放标准时，下降 3%。主要是受压气机压比、流量下降影响，而爆发压力随着 EGR 率的上升受到较大影响，扫气压力减小造成过量空气系数下降明显，因为 EGR 率的增加，使得涡轮前流量减少，因而压气机端流量减少，增压压力下降。而过量空气系数主要由缸内气量和缸内气体成分所决定，增压压力的减少使得缸内气量下降，过量空气系数相应下降。同时 EGR 率的增加使得缸内气体中废气量比例升高，过量空气系数也会下降，最终造成爆发压力大幅度下降。

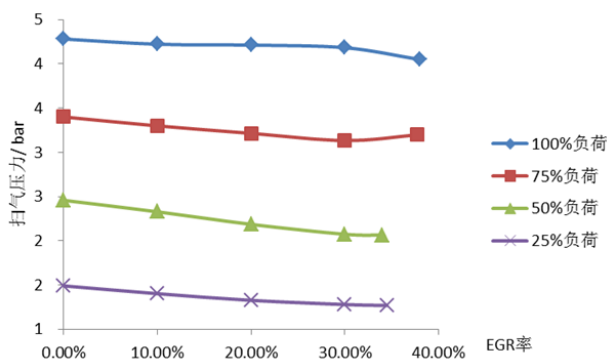


图 8 高压 EGR 率对扫气压力的影响

Fig.8 The effect of EGR rate on scavenge pressure for high pressure EGR system

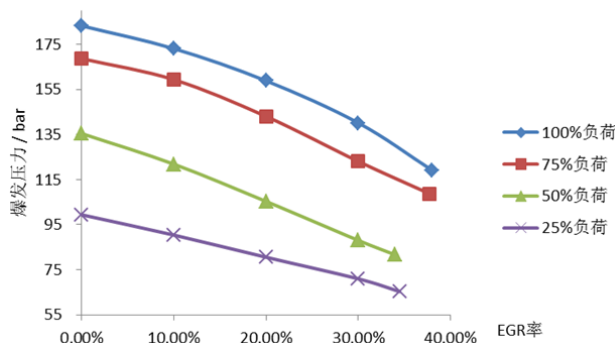


图 9 高压 EGR 率对爆发压力的影响

Fig.9 The effect of EGR rate on brake pressure for high pressure EGR system

低压 EGR 系统不同负荷扫气压力及爆发压力随 EGR 率的变化分别如图 10、11 所示，可以看到在随着 EGR 率的逐渐增加到最大 EGR 率时，不同负荷的扫气压力相比原机下降 5%-20%，达到 Tier III 排放标准时，下降 3%-8%。主要是因为 EGR 率为 20% 以下时，压气机压比、流量下降不明显。而爆发压力随着 EGR 率的上升受到较大影响，扫气压力减小造成过量空气系数下降明显。因为 EGR 率的增加，使缸内废

气比例上升, 新鲜空气减少, 过量空气系数主要由缸内气量和缸内气体成分所决定, 最终造成爆发压力大幅度下降。

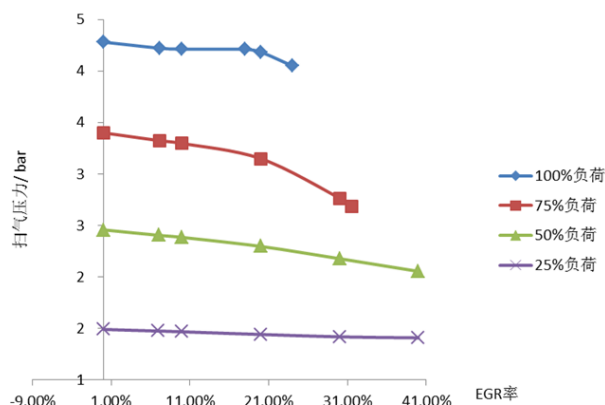


图 10 EGR 率对扫气压力的影响

Fig.10 The effect of EGR rate on scavenge pressure for high pressure EGR system

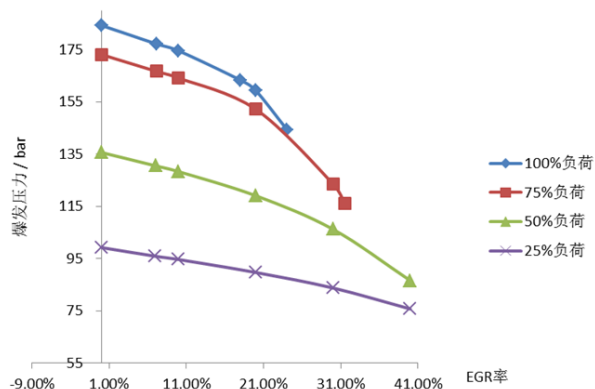


图 11 EGR 率对爆发压力的影响

Fig.11 The effect of EGR rate on brake pressure for high pressure EGR system

3. 结论

本文基于 6EX340 船用低速柴油机, 建立 GT-Suite 模型, 并模拟高、低压 EGR 系统对 NO_x、比油耗 (BSFC, Brake Specific Fuel Consumption)、进气压力、流量、爆发压力等的影响。

该模型在功率、BSFC、扫气压力、扫气温度、涡前排温、爆发压力、压缩压力、NO_x 排放等方面误差均小于 5%。

模拟结果表明, 高、低压 EGR 系统均能有效地降低 NO_x 排放。压 EGR 系统, 在 100%负荷、37%EGR 率工况, 可将 NO_x 排放降至 2.993 g kW⁻¹ h⁻¹; 在其他负荷 42%EGR 率工况, 可将 NO_x 排放降至 Tier III 标准。低压 EGR 系统, 在 100%负荷、35% EGR 率工况, 可将 NO_x 排放降至 1.442 g kW⁻¹ h⁻¹; 在其他负荷 40% EGR 率工况, 可将 NO_x 排放降至 Tier III 标准。

在满足 Tier III 标准的工况, 低压 EGR 系统采用的 EGR 率均小于高压 EGR 系统; 相同 EGR 率的工况, 低压 EGR 系统所需的风机功率和油耗低于高压 EGR 系统。在进气压力、流量、爆发压力等方面, 低压 EGR 系统对发动机性能的影响更小。

但是, 考虑到船用低速柴油机用重柴油, 其杂质高。采用低压 EGR 系统, 废气中的杂质对压气机的可靠性构成较大的挑战。

4. 参考文献

- [1] International Maritime Organization, Annex VI of MARPOL 73/78 an NO_x technical code[S]. London: Conference of parties to the international convention for the prevention of pollution from ships, 2008.
- [2] Christer W. Tier III technology development and influence on ship installation and operation[C].CIMAC, 2013, Paper NO.159.
- [3] C. Wik, K. Lundin, J. Ristimäki. “EGR system for a 2-stage turbocharged medium-speed diesel engine and its influence on engine performance”. 17th Supercharging Conference, September 2012, P. 93-108.
- [4] Weisser G, Wik C, Delneri. “IMO Tier III – Challenging Task for the Developers of Large Diesel Engines”. 13. Tagung “DER ARBEITS – PROZESS DES VERBRENNUNGSMOTORS”, Graz, September 2011.
- [5] C. Wik, K. Hoyer, T. Matt, P. Schuermann, P. Kyrtatos. “2-stage turbo charging on medium speed engines – results from the LERF – test facility”. 16th Supercharging Conference, September 2011, P. 9 -24.
- [6] 陶一凯, 邓康耀, 王真, 等. 采用 EGR 技术降低低速机排放的三维仿真研究[J].柴油机, 2015,37(3): 9-13.
- [7] 魏宇坤, 安士杰, 张志友.EGR 率对船用柴油机中低负荷燃烧排放性能影响的仿真及试验研究[J].柴油机, 2016,38(2): 11-15.
- [8] 刘宏杰, 邓康耀, 王真,等. EGR 技术降低低速二冲程柴油机 NO_x 排放的计算研究[J]. 柴油机, 2016, 38(3):11-16.
- [9] 胡必柱, 王峰, 张充睿, 等.船用柴油机 EGR 技术仿真研究[J]. 柴油机,2013,35(2):13-17.
- [10]Vijayak V. Predictive Diesel Combustion Using DI-Pulse in GT-Power[D].Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2015.
- [11]Sara S L, Gas Exchange Modeling of a Single-cylinder Engine [D].Gothenburg:Chalmers University of Technology, 2015.
- [12]Gallone A, Pizza S, Rimondi M. Study and Application of Predictive Di-PulseModel for Diesel Combustion in GT-Power [R]. GT-SUITE Conference Italiana,2015.