

船用中速柴油机废气再循环技术仿真研究

The Simulation Research of EGR on Medium Speed Marine Diesel Engine

胡必柱, 张东明, 平涛

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 本文以船用中速单缸柴油机为研究对象, 开展了废气再循环 (EGR) 对船用中速柴油机性能及排放影响的仿真研究, 并探讨了喷油正时、喷油压力、进气压力和 Miller 正时对 EGR 柴油机性能及排放的优化。结果表明: 75% 负荷工况, 柴油机应至少使用 19% 的 EGR 率; 综合考虑 NO_x 排放和燃油消耗率影响, 柴油机单一参数最佳的优化措施是调整进气压力, 其次为喷油压力, Miller 正时和喷油正时; 根据优化仿真结果分析得出了单缸机采用 EGR 技术满足 IMO Tier III 排放标准的首轮技术路径。

关键词: 船用中速柴油机, 废气再循环, 排放, 仿真

Abstract: The simulation research of EGR effects on performance and emission characteristics were investigated on a medium speed marine single cylinder diesel engine in this paper, and the optimization of EGR diesel based on start of injection, injection pressure, intake pressure and Miller timing had been discussed. The simulation results show that the 75% load must use 19% EGR rate at least. The first-rankly regulative steps to optimize the EGR diesel engine are intake pressure, injection pressure, Miller timing, injection timing when considering NOX and BSFC at the same time. Based on the simulation results, the first-run technical path of the single cylinder diesel engine using EGR to meet IMO Tier III legislation was confirmed at last.

Key words: medium speed marine diesel engine, EGR, emission, simulation

1 前沿

随着航运行业的迅猛发展, 船用柴油机 NO_x 排放问题已引起人类高度重视, 世界各国和国际组织纷纷相继提出控制 NO_x 排放的法规。2008 年 10 月, 国际海事组织 (IMO) 制定《73/78 国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL73/78) 附则 VI《防止船舶造成污染规则》及其附件《船用柴油机氮氧化物排放控制技术规则》, 定义了三个级别的船用柴油机 NO_x 排放标准, 如图 1 所示^[1]。在不久的将来, IMO 将在排放控制区域 (ECAs) 内实行更加严格的 Tier III 标准, 此时 NO_x 排放量将相对 Tier II 标准下降 75% 以上, 因此, 世界各著名船用柴油机生产商及研究机构早已开始研究降低 NO_x 排放的各种技术措施, 而废气再循环被认为是较有效的方法之一^{[2][3]}。

废气再循环 (Exhaust Gas Recirculation, EGR) 技术的原理是将发动机部分排气引入

气缸，增大气缸内混合气比热容，降低混合气中氧浓度及燃烧速率，从而降低缸内压缩终点温度和最高燃烧温度，破坏 NO_x 高温、富氧生成条件，抑制 NO_x 的生成^[4]。

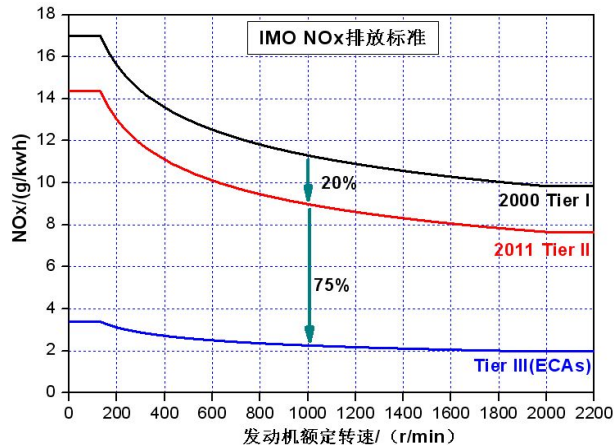


图1 IMO NO_x 排放标准限值

虽然EGR技术的应用可以大幅降低柴油机 NO_x 排放，但由于再循环废气引入气缸，降低了缸内过量空气系数，从而使柴油机燃烧恶化，燃油消耗量排放大幅上升。但通过调整喷油正时、喷油压力、进气压力和Miller正时，可提高EGR柴油机的过量空气系数和循环热效率，从而有效改善柴油机燃油经济性。本文基于上述技术背景，搭建了某型船用中速单缸柴油机GT-power模型，研究了EGR技术对船用中速柴油机性能及排放的影响，并探讨了喷油正时、喷油压力、进气压力和Miller正时对EGR柴油机性能及排放的优化，确定了单缸机采用EGR技术满足IMO Tier III排放标准的首轮技术路线。

2. 仿真计算模型的建立及标定

图2为船用中速单缸柴油机EGR系统仿真计算模型，图中方框部分为新增的EGR系统。为克服进排气逆差，采用电动机驱动的EGR泵对再循环废气增压，从而实现废气的再循环。模型样机为某船用中速单缸柴油机，在原机运行状态参数下， NO_x 排放满足IMO Tier II标准，其主要技术参数见表1。模型中通过PID闭环控制器控制柴油机每循环喷油量、喷油率曲线放大系数以达到柴油机所需的有效功率和喷油压力。选用GT-power软件中的DIJet燃烧模型对缸内燃烧过程和排放进行仿真计算，该模型是预测型燃烧模型，能有效预测 NO_x 的排放。DIJet燃烧模型中参数的设置是利用实测的进排气压力波曲线、缸压曲线以及喷油率曲线标定生成^[5]。

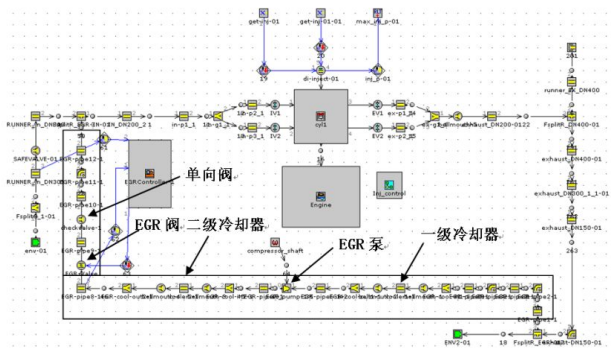


图 2 单缸柴油机 EGR 系统仿真计算模型

表 1 船用中速单缸柴油机主要技术参数

机型	四冲程、单缸、高压共轨
额定功率/(kW)	220
额定转速/(r/min)	1000
缸径×冲程/(mm×mm)	210×320
压缩比	17

根据已有的试验数据，对仿真计算模型进行标定，其部分标定结果如表 2 所示。从表中可知，50%负荷工况柴油机功率、最高燃烧压力（PFP）、燃油消耗率（BSFC）及 EGR 率的试验值与计算值吻合度较好；但 NO_x排放试验值与预测值有较大差异，其主要原因是 NO_x反应系数设定不合适，但随 EGR 率的改变 NO_x减排规律与试验结果比较一致。通过对比表明，该仿真模型能够反映不同 EGR 率对单缸机性能及排放特性产生的影响，可用于柴油机 EGR 系统工作过程参数、性能及排放特性的规律性预测分析。

表 2 50%负荷部分标定结果

参数		功率/(kW)	EGR 率/(%)	PFP/(bar)	BSFC/(g/kwh)	NO _x /(g/kwh)
50%负荷	试验值	94.2	0	146	250	13.3
	仿真值	94	0.2	146.1	253	10.8
	试验值	94.3	8.7	143	251.3	8
	仿真值	94	8.6	142	255.9	5.8
	试验值	94.2	17.1	141	253.3	4
	仿真值	93.9	17	138	259	2.6

3. 仿真计算结果分析

3.1 EGR 对柴油机性能及排放的影响

在原机运行状态参数下，根据已标定好的仿真计算模型，对船用中速单缸柴油机进行 EGR 仿真研究。

图 3 为 75%负荷工况，柴油机 NO_x 和 BSFC 的 Trade-off 关系图。从图中可以得知，EGR 率每增大 4%， NO_x 降低在 2g/kWh 左右，但当 EGR 率超过 10%以后， NO_x 减排趋势有所放缓，且当 20%EGR 率时， NO_x 达到 2.26g/kWh，这主要是因为废气被引入气缸内，废气中三原子分子增大了混合气比热容，降低了缸内氧浓度，使燃烧滞燃延长，最高燃烧温度下降，从而抵制了柴油机 NO_x 的生成。随着 EGR 率的增大，过量空气系数（Lambda）明显降低，EGR 率每增大 4%，Lambda 降低在 0.06~0.08 之间。当 EGR 小于率 10%时，EGR 率每增大 4%，燃油消耗率增加 1g/kWh 左右，EGR 率高于 10%后，燃油消耗率增加 1.5g/kWh 左右，在 20%EGR 率时，燃油消耗率约增加 6g/kWh，这是由于废气进入气缸后，Lambda 下降，后燃增多，燃烧室内局部区域燃烧恶化，柴油机燃油消耗率上升。

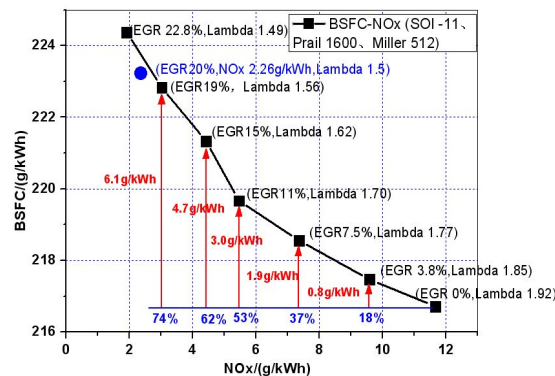


图 3 75%负荷 NO_x 和 BSFC Trade-off 关系图

表 3 为 75%负荷工况，不同 EGR 率对柴油机性能及排放的影响，以及 5%左右 EGR 率对缸内最高燃烧压力、燃油消耗率、过量空气系数、排气温度以及 NO_x 排放的量化影响。从表中可知，由于船用中速柴油机在应用 EGR 技术后， NO_x 排放量应下降 75%以上才能达到 IMO Tier III 排放标准，因此，75%负荷工况，柴油机应至少使用 19%的 EGR 率。

表 3 75%负荷 EGR 对柴油机性能及排放影响

EGR 率 /(%)	PFP /(bar)	BSFC /(g/kWh)	ΔNO_x /(%)	Lambda	排气温度 /(°C)
0	164	216.7	100	1.92	469
3.8(+3.8)	162(-2)	217.5(+0.8)	82(-18)	1.85(-0.06)	472(+3)
7.5(+3.7)	160(-2)	218.6(+1.1)	63(-19)	1.77(-0.08)	478(+5)
11.3(+3.8)	157(-3)	219.7(+1.1)	47(-16)	1.70(0.07)	486(+8)
15.1(+3.8)	154(-3)	221.3(+1.6)	38(-9)	1.63(0.07)	495(+9)
19(+3.9)	151(-3)	222.8(+1.5)	26(-12)	1.56(0.07)	504(+9)

3. 2EGR 柴油机性能优化

在原机运行参数基础上应用 EGR 虽然可以大幅度降低柴油机 NO_x 排放，但同时也降低了缸内过量空气系数，使燃油消耗率大幅上升。为改善因应用 EGR 带来的柴油机负面影响，本节将主要探讨喷油正时、喷油压力、进气压力和 Miller 正时对 EGR 柴油机性能及排放的优

化。

图 4 是 75%负荷, 19%EGR 率, 喷油正时对柴油机 NO_x 排放和 BSFC 的影响。从图中可知, 喷油时刻提前可显著改善柴油机燃油消耗率, 但 NO_x 排放却有所上升。这是由于提前喷油后, 燃烧相位整体前移, 柴油机循环热率效有所上升, 燃油经济性得到改善; 但柴油机预混燃烧速率增快, 最高燃烧温度增大, 使得 NO_x 排放有所上升。从计算结果可以得知, 喷油时刻每提前 1°CA , 燃油消耗降低 $1.5 \sim 2 \text{g/kWh}$, 但 NO_x 会相应增加 0.5g/kWh 左右。

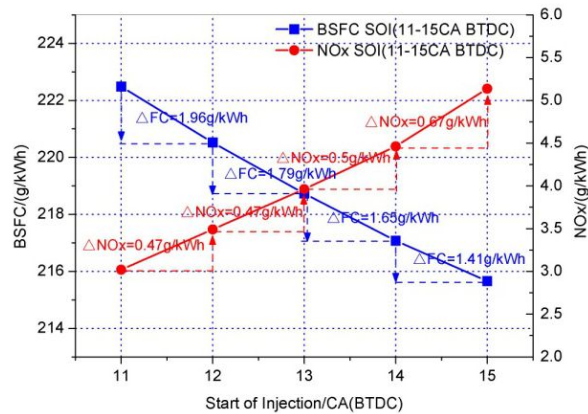


图 4 喷油时刻调整对柴油机 NO_x 和 BSFC 的影响

图 5 是 75%负荷, 19%EGR 率, 喷油正时对柴油机 PFP 和排气温度的影响。随着喷油时刻的提前, 柴油机最高燃烧压力有所上升, 但排气温度却会明显下降。这是由于喷油时刻提前使得燃油在达到着火条件前有更多的时间和空气混合, 所以燃烧过程得以改善, 最高燃烧压力相应升高, 燃烧过程也会提前完成, 后燃减少, 排气温度相应降低。从计算结果可以得知, 喷油时刻每提前 1°CA , 缸内最高爆发压力增加 6.5bar 左右, 排气温度降低 7°C 左右。

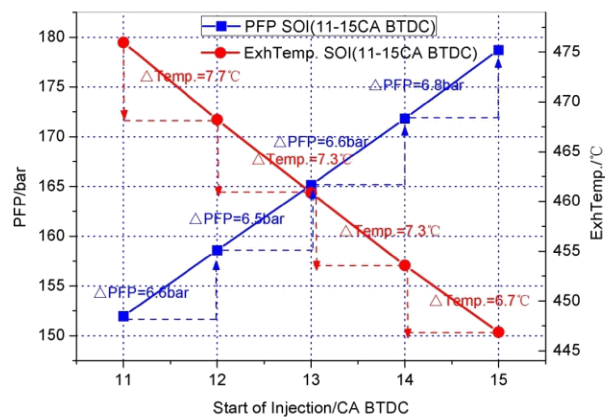


图 5 喷油时刻调整对柴油机 PFP 和排气温度的影响

表 4 是根据仿真计算结果主观统计出的 75%负荷优化参数单一因素对单缸柴油机燃油消耗率和 NO_x 排放等结果的影响规律。从表中可知, 喷油正时 (SOI) 可显著改善柴油机燃油消耗率, 但 NO_x 排放将显著恶化, 同时也对最高燃烧压力影响较大; 喷油压力 (Prail) 对排气温度影响较大, 对 BSFC、最高燃烧压力、过量空气系数影响相对较小; Miller 正时对柴油机 NO_x 排放和过量空气系数影响较大; 进气压力对柴油机 NO_x 排放影响较小, 但对 BSFC、最高燃烧压力、排气温度以及过量空气系数影响相对较大。综合考虑 NO_x 排放和燃油消耗率

影响, 柴油机单一参数最佳的优化措施是调整进气压力, 其次为喷油压力, Miller 正时和喷油正时, 但考虑试验过程中参数调整的灵活性, 因此, 本文在优化 EGR 柴油机时, 主要考虑调整喷油压力和喷油正时。

表 4 75%负荷优化参数单一因素的影响规律

Load 75%, EGR 19%优化参数的影响					
参数	NO _x	BSFC	PFP	排气温度	Lambda
SOI(1° CA)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★	★★★★
Prail(50bar)	★★★★	★★	★★	★★★★★	★★
Miller(4° CA)	★★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★★
Pcharge(4%)	★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★

根据优化仿真结果分析得出了单缸机采用 EGR 技术满足 IMO Tier III 排放标准的首轮技术路径, 如图 5 所示。在原机运行参数的基础上采用 EGR, 使 NO_x 排放首先达到 IMO Tier III 要求。针对 EGR 造成的柴油机燃油消耗率增加, 碳烟排放恶化等负面影响, 首先采取推迟喷油结合提高喷油压力的技术措施来降低燃油消耗率, 同时控制碳烟的排放; 在喷油参数优化基础上, 进一步增大缸内过量空气系数, 改善燃烧过程, 使得油耗和碳烟排放的恶化得到进一步的改善。

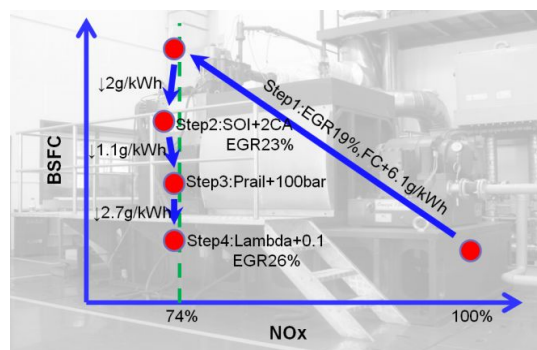


图 5 75%负荷 NO_x满足 IMO Tier III 排放标准首轮技术路径

4 结论

通过对船用中速单缸柴油机机高压 EGR 一维仿真分析, 初步得出以下结论:

(1) 由于船用中速柴油机在应用 EGR 技术后, NO_x 排放量应下降 75%以上才能达到 IMO Tier III 排放标准, 因此, 75%负荷工况, 柴油机应至少使用 19%的 EGR 率。

(2) 综合考虑 NO_x 排放和燃油消耗率影响, 柴油机单一参数调整顺序为进气压力, 其次为喷油压力, Miller 正时和喷油正时。

(3) 根据优化仿真结果分析得出了单缸机采用 EGR 技术满足 IMO Tier III 排放标准的首轮技术路径。

5 参考文献

- [1]Marine Environment Protection Committee. Report of The Marine Environment Protection Committee On Its Fifty-seven Session[R], IMO, 2008.
- [2]Ulrich Dohle. MTU solutions for meeting future exhaust emissions regulations [C]. CIMAC, 2010, Paper NO. 284
- [3]Georg Tinschmann. Sailing towards IMO Tier III – Exhaust Aftertreatment versus Engine-Internal Technologies for Medium Speed Diesel Engines [C]. CIMAC, 2010, Paper NO. 274.
- [4]胡必柱. 船用柴油机 EGR 技术仿真研究 [J]. 柴油机, 2013 (2): 13-17.
- [5]Gamma Technologies. GT-power V7. 0. 0-Engine Performance Application Manual, 2009.