

## 压比分配和 EGR 率对船用柴油机性能的影响研究

### Research on the influence of Marine diesel Engine's Pressure Ratio Assignment and EGR Rate

李新瑞, 王先锋, 王锡卿, 彭春梅, 李先南  
(中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 上海 201108)

**摘要:** 本文搭建了某中速船用柴油机的 GT-Power 一维仿真模型, 基于该仿真模型分析研究了压比分配和 EGR 率对柴油机性能的影响, 并根据不同因素的影响规律, 给出了目标柴油机性能参数的最佳配置。仿真结果表明: 当涡轮流量系数的变化范围为 -20%~20% 时, 柴油机的油耗和 NOx 排放变化较为平缓; 当低压级压比分配比例为 0.46 时, 可以同时使高、低压级增压器均处在高效区, 当柴油机的 EGR 率为 17.5%~22% 时, 目标柴油机的具备油耗不超过原机、达标 Tier III 阶段排放水平的能力。

**关键词:** 中速柴油机; 压比分配; EGR 率; Tier III

**Abstract:** In this paper, it was constructed that the working process simulation model of a middle-speed marine diesel engine, based on which the pressure ratio assignment and EGR rate that would influence the performance of the diesel engine were studied. According to the influence law of different factors, the optimized turning range of the factors were put forward in this paper. The simulation result shows when the coefficient of the turbines ranges from -20% to 20%, the target engine could have gentle performance. What's more, when the lower turbo-charger's pressure ratio takes 46 per cent of the total ratio, as well as the EGR rate is in the range 17.5%~22%, the target engine could meet IMO Tier III standards with no any higher fuel consumption.

**Key words:** Middle-speed Diesel Engine, Pressure Ratio Assignment, EGR rate, Tier III

## 1. 概述

为了满足船舶柴油机高功率密度、低油耗和低 NOx 排放的应用需求, 两级增压系统应运而生<sup>[1-2]</sup>。两级增压系统具有高压比、宽运行范围、结构可靠等优点<sup>[3-4]</sup>, 匹配两级增压技术后, 柴油机的升功率、低速大扭矩也大幅提高<sup>[5]</sup>; 另外, 在船用柴油机匹配两级增压技术后, 能够实现较大的空燃比, 从而允许柴油机采用更大的残余废气量、实现更大的 EGR 率, 进而更加有效的降低机内的 NOx 排放<sup>[6-7]</sup>。本文以某船用柴油机为研究对象, 通过仿真分析增压器在匹配时的压比分配比例以及 EGR 率变化对船用柴油机性能的影响, 评估目标柴油机在油耗不超过原机、实现 Tier III 阶段排放的能力, 从而实现柴油机总体性能的优化。

## 2. 仿真模型的建立

### 2.1 仿真研究对象

本文研究的目标柴油机, 其基本性能参数如表 1 所示, 该柴油机采用高、低压级两个增压器, 并在两级增压器之前装置冷却器; 而废气在从缸内排出时, 则主要通过调节 EGR 旁通阀的开度来实现 EGR 率的变化。

表 1 某中速柴油机的主要技术参数

参数名称	单位	参数值
缸径	mm	210
行程	mm	320

参数名称	单位	参数值
缸数	-	6
压缩比		17
标定转速	r/min	1000
标定功率	kW	1032
进气方式		增压中冷

## 2.2 柴油机边界参数

本文仿真计算的目的已在前文进行描述,本部分的主要内容为明确目标柴油机在达标 Tier III 排放水平时,柴油机的性能边界参数,如表 2 所示。

表 2 6CS21 柴油机性能参数

性能参数	参数值	备注
缸径×冲程/(mm×mm)	210×320	
额定转速/(r/min)	1000	
最高爆压/(MPa)	23	
轨压	≤1800bar	
增压器转速	L≤50000r/min; H≤60000r/min	高低压级
压力升高率	≤8bar/deg	
NOx 排放/(g/kWh)	≅2/≅4.96 g/kWh	
BSFC/(g/kWh)	≅245.7/≅240.8 g/kWh	
烟度/(FSN)	≅0.8	
HPT 涡前排温 (°C)	L≤650°C; H≤570°C	高低压级
压气机端 Map	L:JTH210_C; H: JTH180_C	高低压级
涡轮端 Map	L:JTH210_T;H: JTH180_T_new	高低压级

## 2.3 仿真计算模型

图 1 给出了本文在仿真计算时的一维模型。相较于原机模型,本模型新增了两级增压系统和 EGR 系统,同时为了保证柴油机的总压比不变,添加了总压比控制模块,即在进气压力一定时,对高压级增压器出口压力进行控制,具体的模块及参数设置如图 2 和图 3 所示。

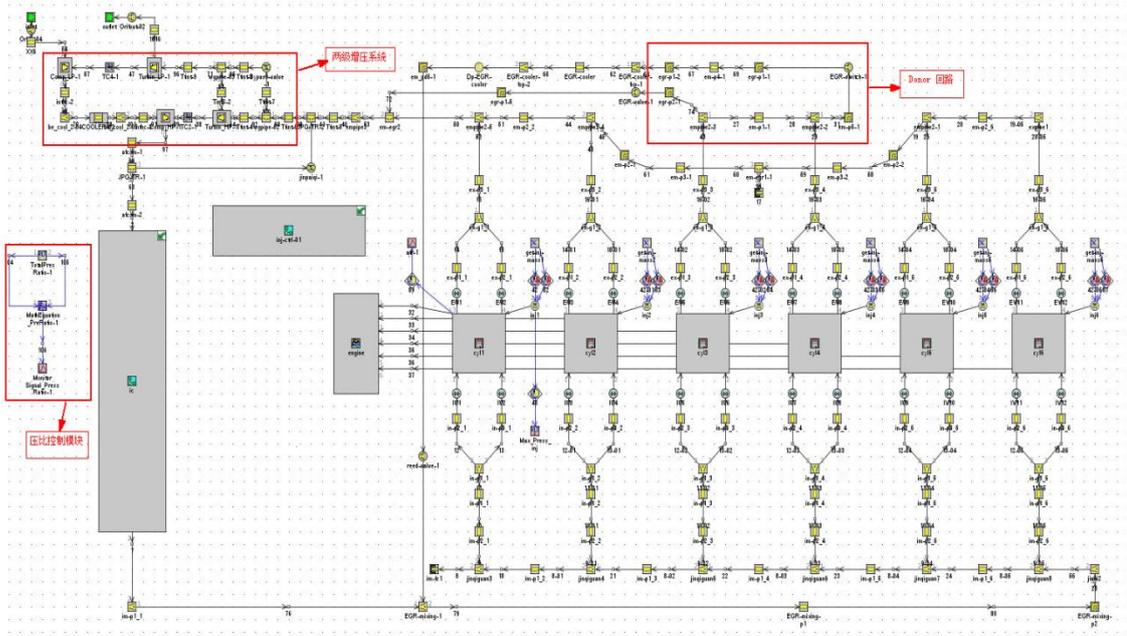


图 1 一维仿真计算模型

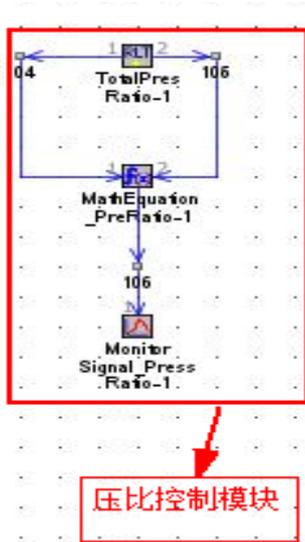


图 2 压比控制模块

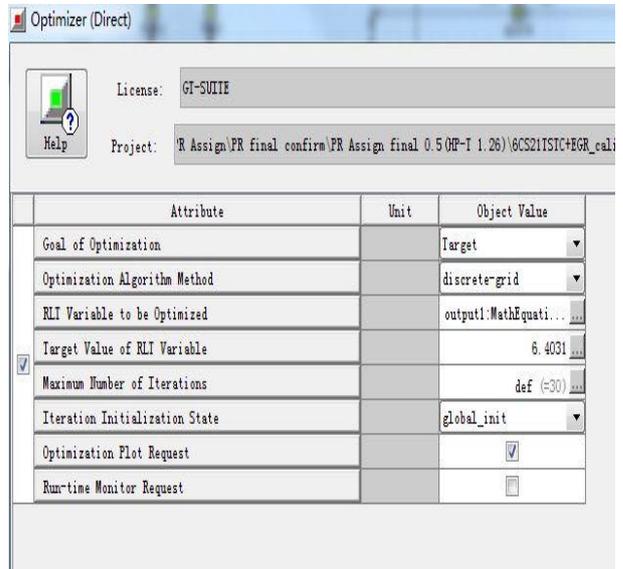


图 3 Optimizer 参数设置

### 3. 仿真结果分析

#### 3.1 压比分配对柴油机缸内性能的影响

由于两级增压对柴油机的空燃比、燃油经济性及排放特性影响较大，在实现高压比、宽运行范围的同时，合适的压比分配比例直接影响着进气压力和增压器效率，为了使柴油机的油耗及排放指标满足要求，本文计算了高低压级增压器的压比分配对柴油机性能的影响。在仿真计算时，以原模型的标定参数为基础，分别对高/低压级压气机和涡轮的流量系数进行调整，调整范围为-40%~40%。

图4和图5分别给出了柴油机的油耗和 NOx 排放随流量系数调整的变化趋势。由图可知：（1）相比于压气机的流量系数，增压器的涡轮流量系数对柴油机油耗和 NOx 排放的影响相对平缓；（2）低压级压气机流量系数（即 LPC 系数）对柴油机性能的影响最大，

尤其当 LPC 从 -40% 增加至 -20% 时, 柴油机的油耗减少了 15g/kW h, 相应地, 柴油机的 NO<sub>x</sub> 排放也增加了约 2 g/kW h; (3) 高压级涡轮流量系数 (即 HPT 系数) 对柴油机性能的影响最小, 在整个变化区间内, 柴油机的油耗变化不超过 2.5g/kW h, 柴油机的 NO<sub>x</sub> 变化不超过 1.5g/kW h; (4) 压气机和涡轮的流量系数在 -20% 到 +20% 的调整区间时, 柴油机的油耗和 NO<sub>x</sub> 变化相对平缓, 超出这个区间, 柴油机的性能参数随流量系数调整的变化则较为敏感。根据仿真分析结果, 后续在进行高、低压级增压器的压比分配时, 主要调整涡轮的流量系数, 且调整区间为 -20%~20%。

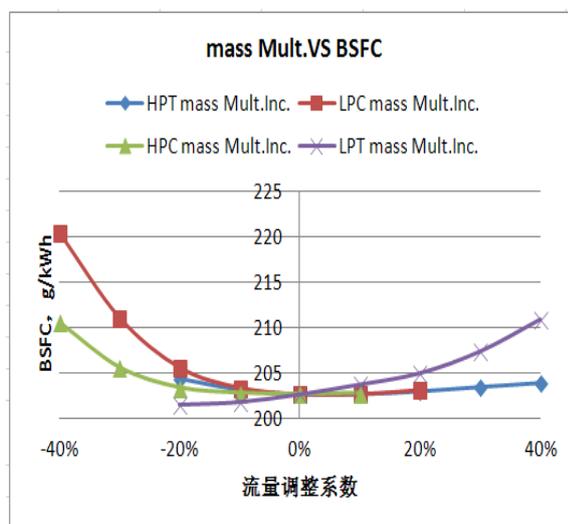


图 4 油耗随流量系数的变化

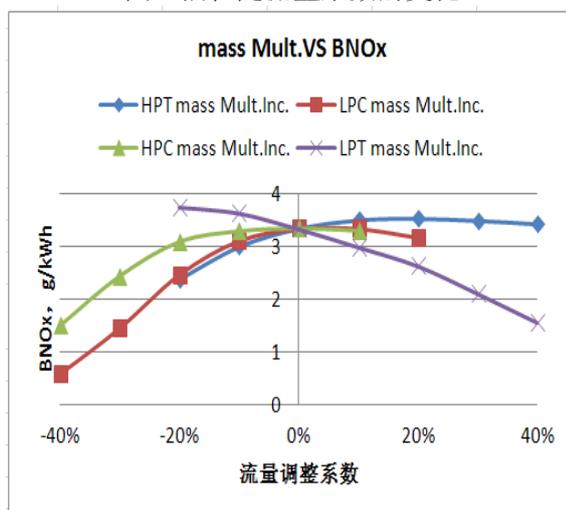
图 5 NO<sub>x</sub> 排放随流量系数的变化

图 6 和图 7 分别给出了低压级压比分配比例变化时的增压器总效率  $\eta$ 、油耗和 NO<sub>x</sub> 的变化曲线。由计算结果可知: (1) 随着低压级压比的增加, 两级增压系统的总效率先缓慢增加后迅速降低, 柴油机的油耗则随增压系统的效率增加而降低, 且油耗与 NO<sub>x</sub> 排放满足 trade-off 关系; (2) 在低压级压比约为 0.56 时, 两级增压系统的总效率最高, 此时柴油机的油耗约为 204 g/kW·h, NO<sub>x</sub> 排放约为 3.89 g/kW·h; (3) 相较于增大低压级压比, 略微调小低压级压比时, 增压系统的效率、油耗及 NO<sub>x</sub> 排放的变化均相对缓

和，且根据调研结果[8]，随着低压级压比的增加，增压器的尺寸增加、气体流通性变差，所以暂定低压级压比为 0.46 与 0.56 两种方案，并对比两种方案的高、低压级增压器效率。

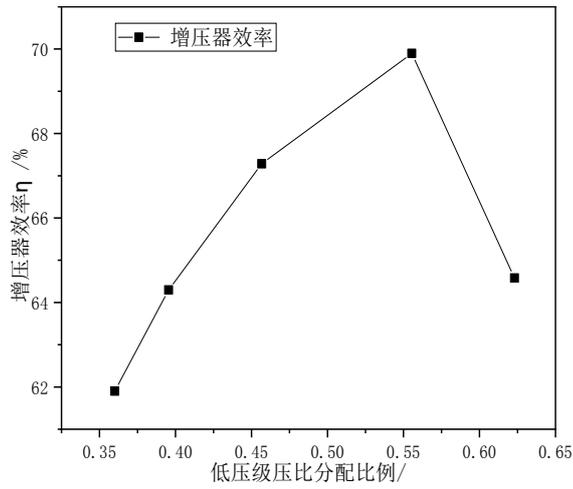


图 6 增压器效率  $\eta$  随低压级压比分配的变化

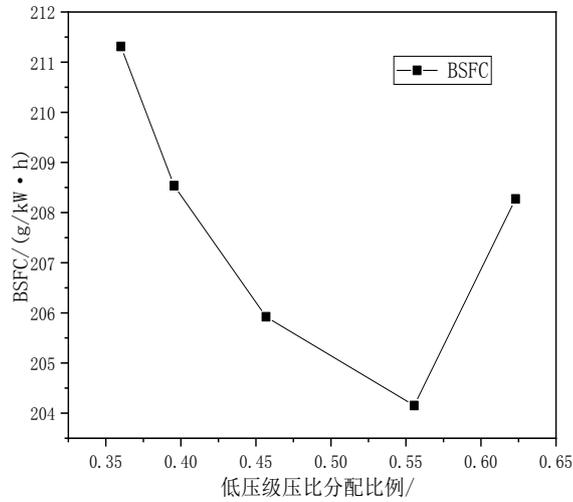


图 7 BSFC 随低压比分配的变化

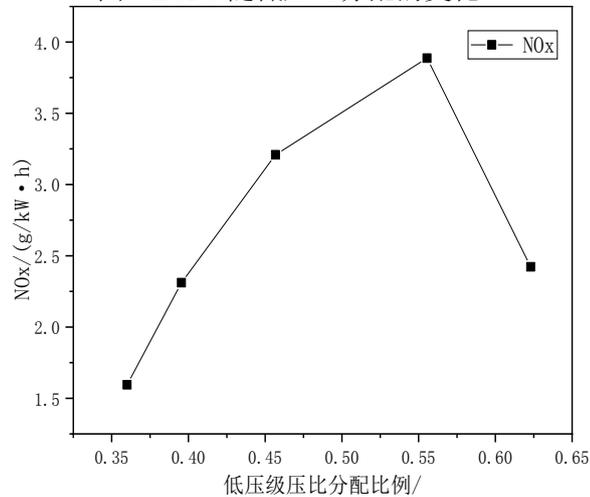


图 8 NOx 随低压比分配的变化

图 9~图 12 分别给出了低压级压比为 0.46 和 0.56 两种方案的高、低压级增压的效率分布，从图中可以看出，在低压级压比占总压比的分配比例为 0.46 时，柴油机的高、低压级增压器均在高效区，且有一定的喘振裕度，但低压级在 0.56 时，其低压级增压器的效率点在喘振线上，所以应采用低压级压比为 0.46 时作为最优方案。

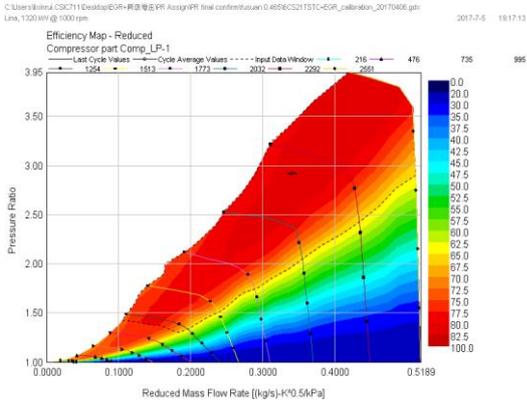


图 9 低压级占比 0.46 时低压级增压器效率

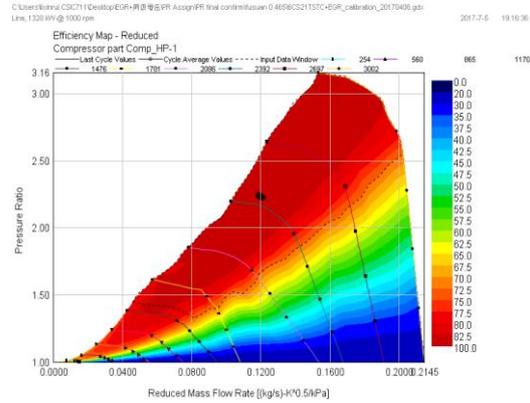


图 10 低压级占比 0.46 时高压级增压器效率

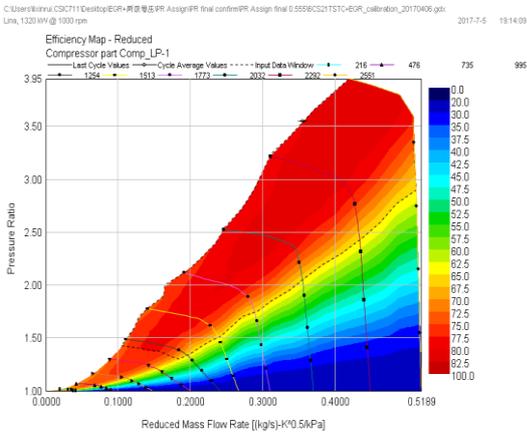


图 11 低压级占比 0.56 时低压级增压器效率

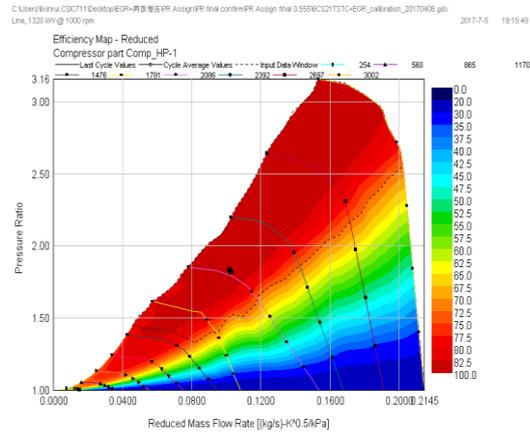


图 12 低压级占比 0.56 时高压级增压器效率

### 3.2 EGR 率对达标 Tier III 排放能力分析

本文在仿真计算时，主要通过调节 EGR 旁通阀的开度来改变废气流量，从而实现缸内 EGR 率的变化，EGR 率变化的计算结果如图 13 所示。由图可以看出，当 EGR 旁通阀完全关闭时，柴油机的 EGR 率最大，即最大 EGR 率为 30%；随着 EGR 旁通阀开度的逐渐降低，缸内的 EGR 率逐步下降，在 EGR 旁通阀直径约为 55mm 时，缸内 EGR 率为零。

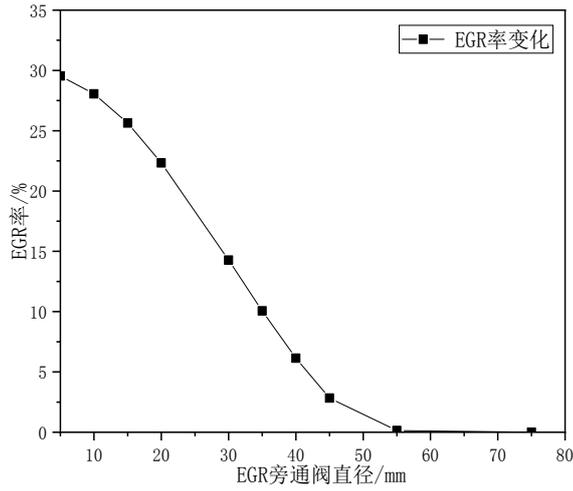


图 13 EGR 率随 EGR 阀门直径的变化关系

图 14~图 16给出了柴油机的经济和排放特性随 EGR 率的变化。由图可以看出：

(1) 随着 EGR 率的变化，柴油机的有效燃油消耗率与 NO<sub>x</sub> 排放呈 trade-off 关系，在 NO<sub>x</sub> 排放满足目标要求时（即在 2~4.96 g/kW h 之间），柴油机的有效燃油消耗率在 202.5~203.3 g/kW h；

(2) 在 EGR 率为 14.5%~22%时，柴油机的 NO<sub>x</sub> 排放 在 2~4.96 g/kW h 之间，可以满足柴油机的排放要求；在 EGR 率约为 30%时，缸内 NO<sub>x</sub> 排放很小，接近于零，但缸内的燃油消耗率急剧增加，不满足要求；

(3) 随着 EGR 率的增加，柴油机的 Soot 排放先迅速增加，在 EGR 率约为 22%左右时 Soot 排放略微减小。

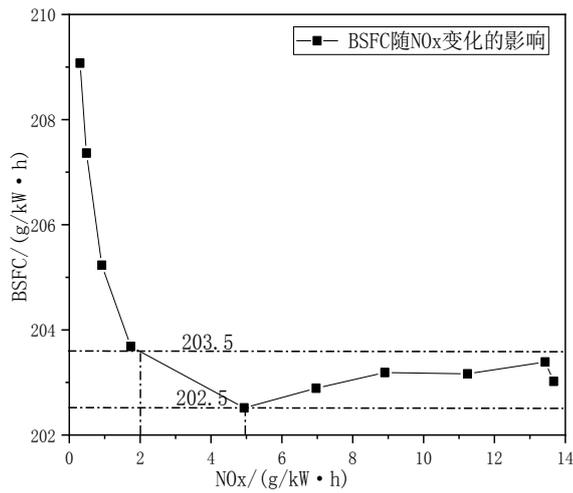


图 14 油耗随 NO<sub>x</sub> 排放的变化

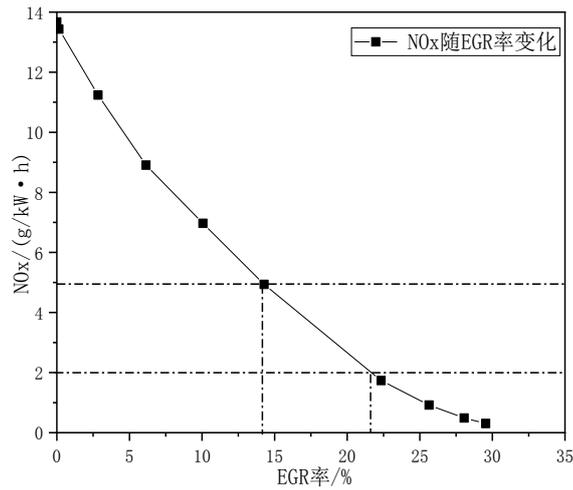
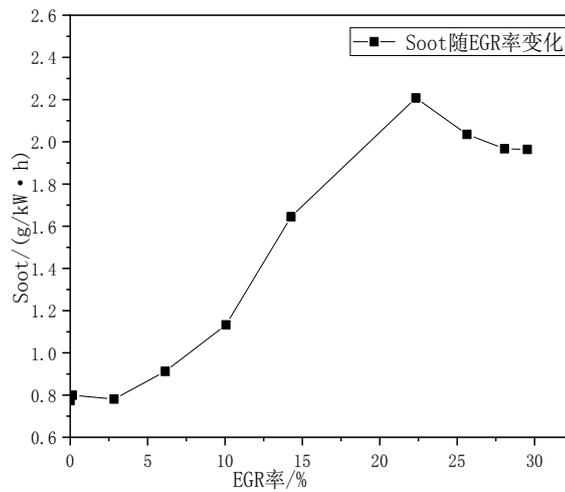
图 15 NO<sub>x</sub> 排放随 EGR 率的变化

图 16 Soot 排放随 EGR 率的变化

图 17和图 18分别给出了柴油机的增压压力及缸内爆压随 EGR 率变化的计算结果。由图可以看出：随着柴油机 EGR 率的增加，新鲜进气量降低而未经增压的残余废气量增加，进而导致缸内的增压压力和缸内爆压的降低；当柴油机的缸内爆压达到限值时，柴油机的 EGR 率约为 17.5%。结合上述仿真分析结果，当低压级压比分配比例为 0.46、EGR 率变化区间为 17.5%~22%时，柴油机具备油耗不超过原机，同时达标 Tier III 阶段排放水平的潜力。

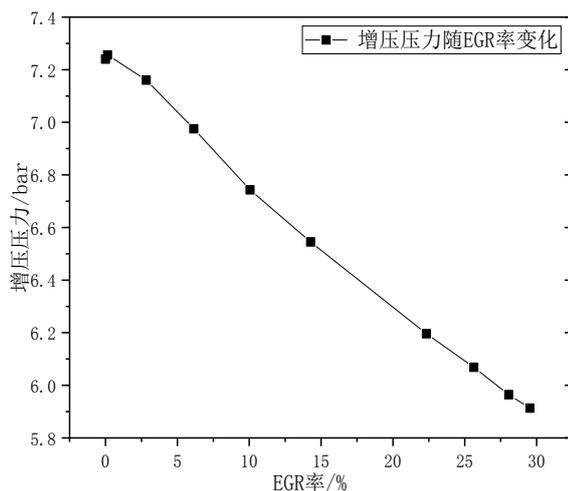


图 17 增压压力随 EGR 率的变化

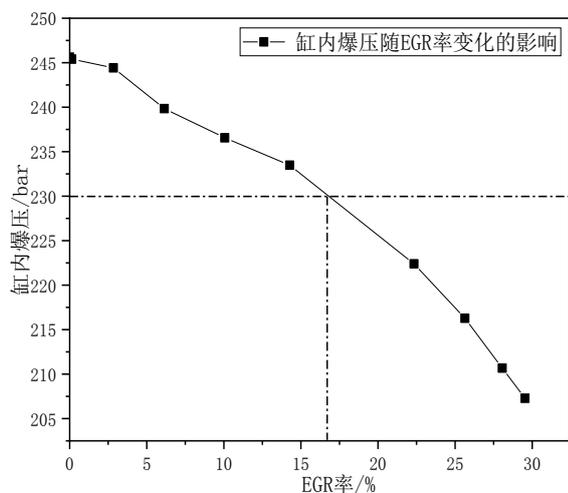


图 18 缸内爆压随 EGR 率的变化

图 19和图 20分别给出了柴油机的高压级、低压级压气机 Map 随 EGR 率的变化。由图可以看出：

(1) EGR 率的增大，对高、低压级增压器的影响不同。随着 EGR 率的增加，高压级压比基本不变，但流量逐渐降低、趋近喘振线；低压级压比和流量则随着 EGR 率的增加同时减小，但低压级增压效率有所增加；

(2) 在 EGR 率的整个变化区间内，柴油机的增压器匹配未出现超速和喘振现象，且当 EGR 率为 17.5%~22%时，柴油机的高、低压级增压器均处在高效区。

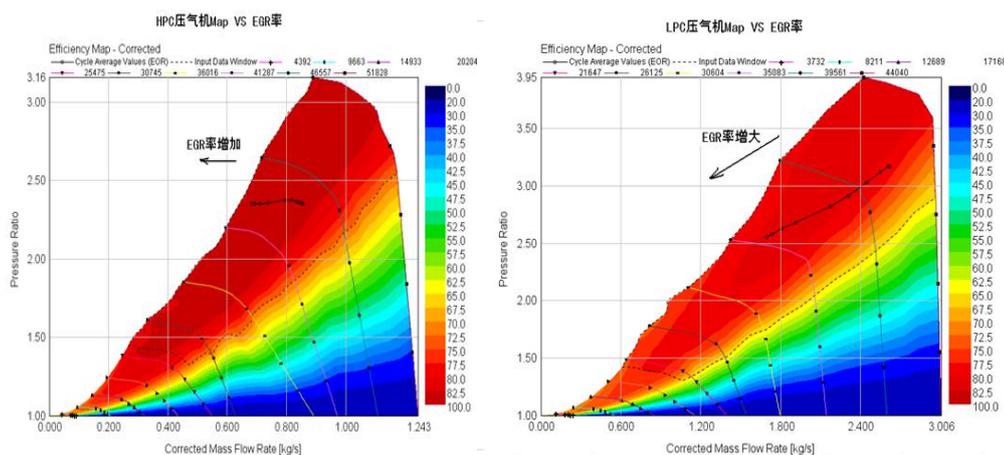


图 19 低压级压气机 Map 随 EGR 率变化 图 20 高压级压气机 Map 随 EGR 率变化

## 4. 总结

本文以某船用柴油机为研究对象，分析了目标柴油机在采用两级增压结合 EGR 技术后，柴油机的性能参数随压比分配和 EGR 率的变化，总结如下：

(1) 当目标柴油机涡轮流量系数的变化区间为-20%~20% 时，柴油机的油耗和 NO<sub>x</sub> 排放变化较为平缓，且相对于调节压气机流量系数，通过调节涡轮流量系数来改变柴油机的压比分配更佳；

(2) 随着低压级压比分配比例的增加，增压器的总效率先逐渐降低后迅速增加；当目标柴油机的低压级压比分配比例为 0.46 时，增压器的高、低压级增压器均处在高效区，且同时具备较低的油耗和 NO<sub>x</sub> 排放；

(3) 对于目标柴油机，能够实现最大 30% 的 EGR 率，且随着 EGR 率的增加，柴油机的缸内爆压和 NO<sub>x</sub> 排放均逐渐降低，而缸内 Soot 排放则随着 EGR 率的变化存在最佳值；

(4) 随着 EGR 率的变化，柴油机的油耗和 NO<sub>x</sub> 排放存在 trade-off 关系，且当低压级压比分配比例为 0.46、EGR 率为 17.5%~22% 时，柴油机的油耗不超过原机且 NO<sub>x</sub> 排放具备达标 Tier III 阶段排放水平的能力。

## 5. 参考文献

- [1] 张晋东, 李洪武. 车用柴油机涡轮增压技术的新发展[J]. 车用发动机, 2002 (1): 1~4.
- [2] Michel R. Honeywell Turbo Technologies. Future Diesel PV Technical Trends[R]. The Beijing 2006 Forum on Sustainable Development of Internal Combustion Engines, April, 2006, Beijing.
- [3] 袁锋, 郑尊清, 尧命发, 等. 二级增压重型柴油机排放和燃烧特性的试验研究[J]. 内燃机工程, 2012, 33(4): 9-16, 21.
- [4] Unemasa Hashimoto. BSFC Improvement and NO<sub>x</sub> Reduction by Sequential Turbo System in a Heavy Duty Diesel Engine[C]. SAE paper 2012-01-0712.
- [5] Pflüger F, Regulated Two-Stage Turbocharging-3K-Warner's New Charging System for Commercial Diesel Engines, ImechE: The Sixth International Conference on Turbocharging and Air Management System, London, UK: 1998.
- [6] Lü L, Wang L. Model-based optimization of parameters for a diesel engine SCR system[J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, (14): 13-18.
- [7] 李胜达, 石磊, 邓康耀. 两级增压柴油机增压器匹配方法及压比分配研究[J]. 铁道机车车辆, 2011 年 10 月.
- [8] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.