

# 船用柴油机应对 IMO Tier III 排放法规的技术措施

张东明, 平涛, 闫萍, 张文正, 孙强

(七一一研究所, 上海 201108)

**摘要:** 介绍了国外知名船用柴油机生产商及技术咨询公司应对 IMO Tier III 排放法规将要采取的技术措施。针对废气再循环结合中等强度 Miller 循环技术进行了仿真分析, 分析结果表明: 该技术是满足 Tier III 排放的有效途径。

**关键词:** 船用柴油机; IMO Tier III; 技术措施; 仿真分析

**中图分类号:** TK421.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4357(2011)04-0029-05

## Marine Diesel Engine Technologies for IMO Tier III Emission Legislations

Zhang Dongming, Ping Tao, Yan Ping, Zhang Wenzheng, Sun Qiang

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

**Abstract:** Technical solutions from famous marine diesel engine manufactures and consultancy companies to comply with IMO Tier III are summarized. Simulation analysis was carried out on the technology of EGR combined with moderate Miller cycle. Analysis results proves that it is an effective solution for marine diesel engines to satisfy Tier III.

**Keywords:** marine diesel engine; IMO Tier III; technical solution; simulation analysis

## 0 引言

船用柴油机凭借其经济性和可靠性优势, 几乎占据了船舶动力系统市场 95% 的份额。船用柴油机强化程度较高, 其 CO<sub>2</sub>、CO 和 HC 的排放相对低于车用柴油机, 但是 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 排放严重。据统计 2002 年全球船舶排放的污染气体大约导致了 64 000 人死亡<sup>[1]</sup>, 2008 年全球海运船舶排放的 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub> 分别占世界 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub> 排放总量的 18% ~ 30% 和 9%<sup>[2]</sup>, 所以无论是着眼于当代还是放眼于未来, 船用柴油机有害污染物的排放所造成的大气污染已经到了不容忽视的程度。

2008 年 10 月, 隶属于国际海事组织( IMO) 的海上环境保护委员会( MEPC) 第 58 次会议讨论通过了一项国际性防止船舶造成空气污染法律法规——船舶防污公约附则 VI-修订版。法规对船用柴油机尾气排放中的 NO<sub>x</sub> 排放量做出了明确的

规定, 详见表 1。自 2011 年 1 月起, IMO Tier II 排放控制法规在 IMO 所有缔约国海域内强制实施, Tier II 阶段 NO<sub>x</sub> 排放量比 Tier I 阶段降低 16% ~ 20%, 这一标准完全可以通过柴油机缸内净化技术来实现。目前, 世界各大船用柴油机生产商已经有大量 Tier II 机型投入市场。2016 年 1 月 1 日将要强制实施的 Tier III 阶段法规, 要求 NO<sub>x</sub> 排放量相比 Tier I 阶段降低 80%, 需要借助尾气后处理装置或者采用废气再循环等技术才能满足法规的要求。

当前, 高效和环保的理念已经成为发动机领域产品创新和新技术研发的主动动力。MEPC 制定的防止船舶造成空气污染法律法规, 无疑是对目前可靠性和经济性都很成熟的船用柴油机领域提出了更高更严格的要求。

收稿日期: 2010-12-24; 修回日期: 2011-04-01

作者简介: 张东明(1984-), 男, 研发工程师, 主要研究方向为柴油机燃烧与排放, E-mail: csic711\_zdm@163.com。

表 1 IMO NO<sub>x</sub> 排放限制

额定转速 $n/(r/min)$	$n < 130$	$130 \leq n \leq 2\,000$	$n > 2\,000$
Tier I (2000) /g/(kW·h)	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.84
Tier II (2011) /g/(kW·h)	14.36	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.66
Tier III(2016) /g/(kW·h) 非 ECA	14.36	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.66
Tier III(2016) /g/(kW·h) ECA	3.40	$9 \cdot n^{-0.2}$	1.97

## 1 国外应对 Tier III 排放标准采取的技术措施

随着 Tier III 排放法规的日益临近, MAN、Caterpillar、Ricardo 和 AVL 等世界知名船用柴油机生产商和技术咨询公司都在积极地研究船用柴油机

可能应用的技术措施, 从而满足 Tier III 阶段需求, 提前占领市场。

### 1.1 MAN B&W 公司 Tier III 阶段技术措施<sup>[3]</sup>

MAN B&W 公司针对 Tier III 排放法规, 在 Tier II 标准的机型 6L32/44CR 上提出了三项技术方案, 具体参见表 2。

表 2 中的三种措施都能满足 Tier III 阶段排放法规要求, 但是其投资和运行成本有所差异。MAN B&W 公司对以上三种措施的运行成本进行了评估, 结果如图 1、2 所示。从图 1 可以看到, 同时采用两级增压技术和 SCR 后处理装置的方案 2 与采用单级增压技术的方案 1 在 10 年寿命周期内的成本相比, 大约低 4%。这主要是由于两级增压技术的应用, 使该机油耗改善了 3% ~ 5%; 其设备安装成本能在 2.5 年内收回。

表 2 MAN B&W 公司 IMO Tier III 技术措施(四冲程柴油机)

技术方案	原机排放水平	机内措施	机外措施	排放水平	燃油	
					排放控制区	非排放控制区
方案 1	IMO Tier II	高压共轨 单级增压	SCR	IMO Tier III	MGO	HFO
方案 2	IMO Tier II	高压共轨 两级可变增压	SCR	IMO Tier III	MGO	HFO
方案 3	IMO Tier II	高压共轨 两级可变增压 多次喷射 EGR	-	IMO Tier III	MGO	HFO

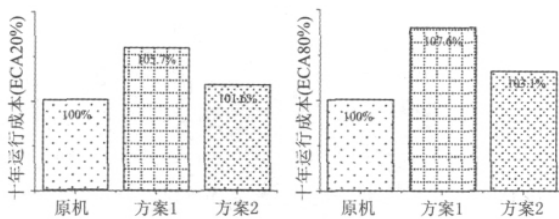


图 1 Tier II(SCR)和 Tier II 两级增压(SCR)成本对比

采用 SCR 后处理装置的方案, 成本的增加主要是由于其运行过程中尿素的消耗, 在排放控制区 (ECA) 运行时间越久, 其尿素的消耗量就越大。与 SCR 系统相比, 采用 EGR 系统的技术方案 3 就不需要额外的消耗。经过试验验证, EGR 系统运行在排放控制区以外的海域时, 与技术方案 2 的成本相当; 在排放控制区 EGR 系统的运行, 会使柴油机油耗恶化 2% ~ 4%, 油耗升高的成本完全可以与 SCR 系统中 NH<sub>3</sub> 消耗的成本抵消。由此可见技术方案 2 与 3 的成本差异主要是由于两套系统的初次安装成本造成的。相比较而言, 如果该样机在排放控制区运行时间不足 50% 时, SCR 系统相对

成本较低, 当超过 50% 时, EGR 系统运行成本较低, 但是成本差异较小, 即使其寿命周期内全部在排放控制区运行, 成本也只相差 100, 如图 2 所示。

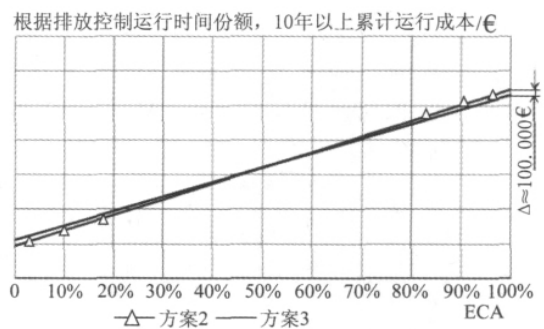


图 2 Tier II 两级增压(SCR)和 Tier III (EGR)成本对比

### 1.2 Caterpillar 公司 Tier III 技术措施<sup>[4]</sup>

Caterpillar 公司的 MaK 机通过采用提高压缩比、可变凸轮正时 (FCT) 及高压共轨 (CCR) 等低排放发动机技术 (LEE), 已经满足了 Tier II 排放标准。针对要求更严格的 Tier III 排放标准, Caterpil-

lar 通过对设备初次投资成本和运行成本估算, 发现 EGR 结合两级增压技术的成本更加低廉, 其成本估算如图 3 所示。Caterpillar 拟在非排放控制区采用两级增压技术, 燃油依然为 HFO, 而在排放控制区内采取 EGR 技术, 其原理如图 4 所示, 这样就避免了 SCR 后处理系统所带来的安装和运行所产生的高额成本。

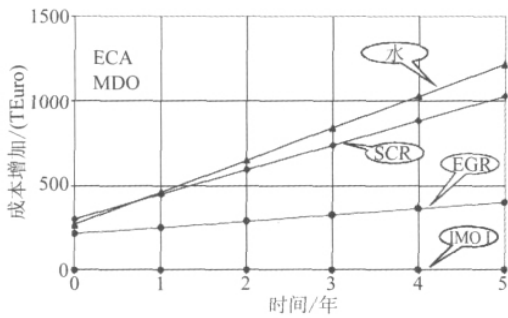


图 3 满足 Tier III 排放标准技术措施成本比较

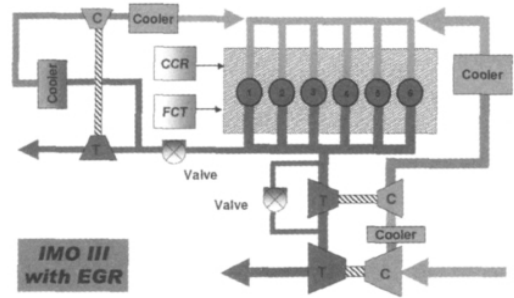


图 4 CAT 公司 Tier III EGR 机型原理图

### 1.3 Ricardo 公司 Tier III 阶段技术措施<sup>[5]</sup>

Ricardo 公司提出的船用柴油机满足 Tier III 阶段排放法规的技术措施如图 5 所示, 有两级增压结合缸内喷水技术、强米勒结合高压共轨技术、两级增压结合 EGR、SCR 技术以及气体机。各项 Tier III 阶段技术措施的取舍, 要综合考虑排放控制区运行时间、运行成本、设备安装空间, 以及其对柴油机可靠性的影响等因素。

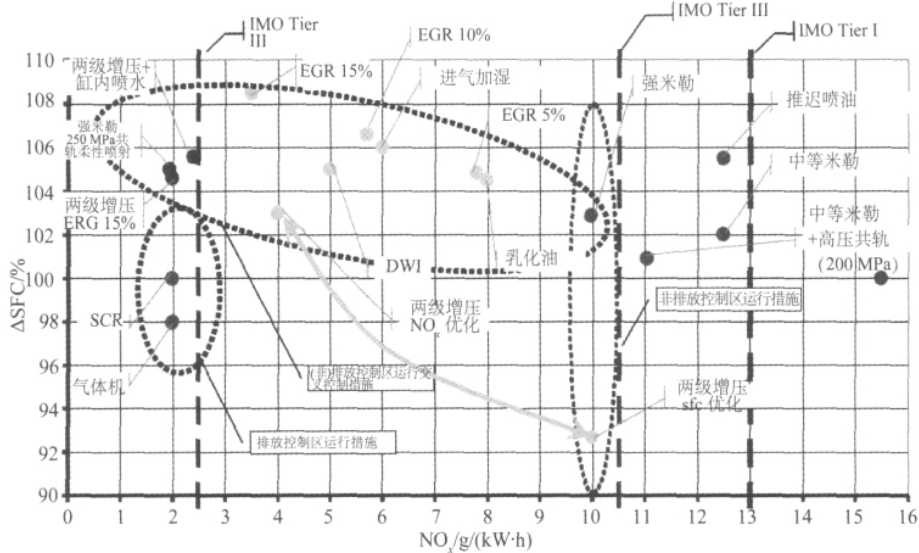


图 5 目前以及未来具有潜力达到 Tier III 排放法规的技术措施及其对油耗的影响

经过对各项新技术的综合评估, Ricardo 希望清洁的缸内净化技术能满足 Tier III 阶段的排放标准, 例如两级增压结合 EGR 系统的低碳烟排放措施。

### 1.4 AVL 公司 Tier III 阶段技术措施<sup>[6]</sup>

AVL 公司针对 2016 年开始实施的 Tier III 排放法规同样提出了相应的技术措施: EGR 结合 Miller 循环技术和 SCR 结合 Miller 循环技术, 如图 6 所示。第一种技术措施的实现需要结合先进的燃烧系统、两级增压、中等强度 Miller 循环、25% EGR 率以及高压共轨技术; 第二种技术措施的实现同样需要先进的燃烧系统、两级增压(可选)、中等强度 Miller

循环、可变气门正时以及高压共轨技术。AVL 公司认为两种技术措施的取舍需要结合船用柴油机的具体设计指标及其实际运行情况等因素综合考虑。

## 2 仿真模型的建立

通过以上分析可以发现, Tier III 阶段船用柴油机最有可能采取的技术措施主要是 EGR 和 SCR 技术, 而 EGR 技术凭借其安装空间和初次设备成本上的优势更受到世界各大船用柴油机生产商的青睐。鉴于此, 本文通过搭建一维仿真模型对此项技术措施降低 NO<sub>x</sub> 的能力进行预测。

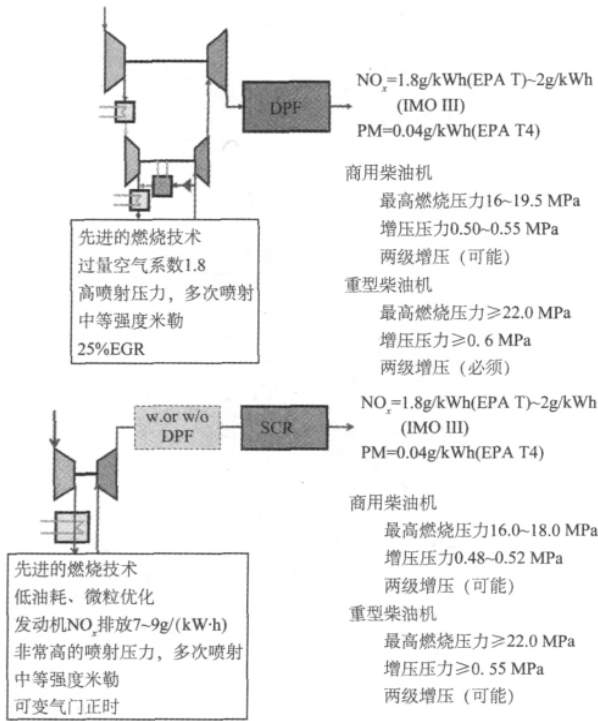


图 6 AVL 公司 Tier III 柴油机技术措施

其技术参数如表 4 所示。

表 4 主要技术参数

缸径 /mm	190
冲程/mm	230
压缩比	15
额定转速/( r/min)	1 500
单缸最大功率/kW	163
平均有效压力/MPa	2.0

一维 GT-power 计算模型搭建过程中的柴油机摩擦损失通过 Chen-Flynn Engine Friction Model 进行修正。循环喷油量通过 Engine Cranktrain 模型反馈给 PID 模块的有效功率信号进行驱动，以达到所需的平均有效压力水平。原机计算模型根据额定工况点试验数据进行标定，如表 5 所示。

表 5 额定工况点稳态试验数据

转速/( r/min)	1 500
功率/kW	163
平均有效压力/MPa	20
比油耗/g/( kW·h)	230
空燃比	33.81
最高燃烧压力/MPa	19.0
NO <sub>x</sub> 排放量/g/( kW·h)	6.7

预测模型与原机模型相比，增加了两级增压、

Miller 循环、高压共轨( CR) 和 EGR 技术。Miller 循环技术通过将进气门在下止点前 30 °CA 和 60 °CA 将进气门关闭来实现，米勒循环气门型线如图 7 所示。

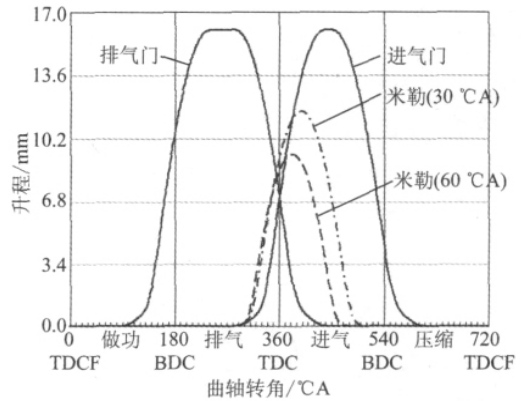


图 7 原机与 Miller 循环进排型线

### 3 计算结果及讨论

预测模型计算过程中，由于 EGR 技术和 Miller 循环技术的应用，使缸内氧浓度急剧下降，为保证柴油机工作过程性能，预测模型中适当提高了进气压力。为达到同样的有效功率目标值，模型中通过 PID 闭环控制器控制单缸柴油机循环喷油量。计算结果如图 8 ~ 11 所示。

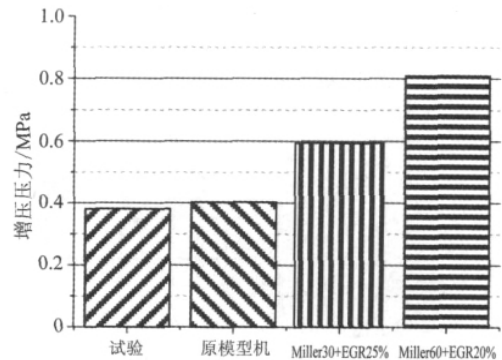


图 8 增压压力预测

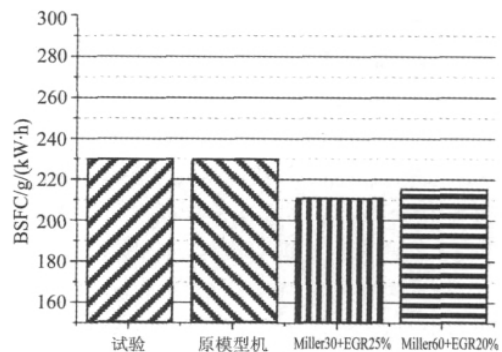


图 9 比油耗预测

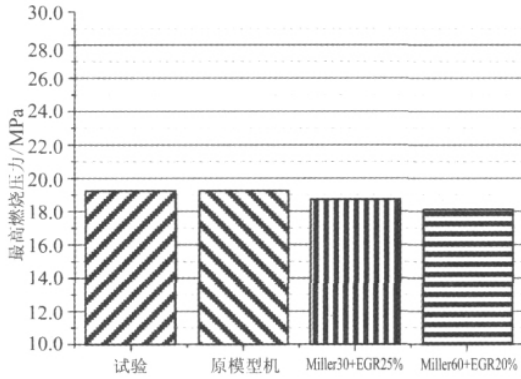


图 10 缸内最高燃烧压力预测

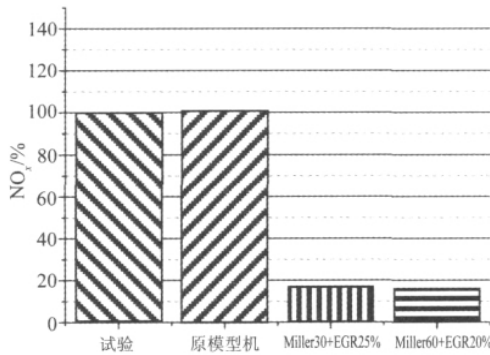


图 11 NO<sub>x</sub> 排放量预测

从图中可以明显看到, 由于米勒循环技术的应用, 预测模型的缸内最高燃烧压力降低了 5% 左右, 为维持原机的性能指标, 增压压力必须相应提高。预测模型中, 进气门于下止点前 30 °CA 关闭并采用 25% 的 EGR 率和进气门于下止点前 60 °CA 关闭并采用 20% 的 EGR 率的两种工况下, 都能将 NO<sub>x</sub> 降低 80% 以上; 同时由于高压共轨和两级增压技术的应用, 使原机模型额定工况点油耗有效降低了约 6%。

从预测的结果可以得出, 在 IMO Tier II 船用柴油机的基础上, 应用中等强度的米勒循环再结合 20% 左右 EGR 率, 很有潜力满足 IMO Tier III 排放

标准; 同时由于高压共轨和两级增压技术的应用, 原机比油耗会得到相应的降低。船用柴油机整个寿命周期中油耗量降低所节约的运行成本完全可以弥补两级增压和 EGR 系统的初次设备投资, 使得 Tier III 机型的改造成本不会很高。

### 4 结 论

(1) 随着大气环境的日益恶化和船用柴油机排放法规的日趋严格, 确定 Tier III 阶段船用柴油机最佳技术措施已刻不容缓。世界知名船用柴油机生产商和技术咨询公司都在积极地研究 Tier III 阶段船用柴油机可能应用的最佳技术措施。

(2) 分析表明, IMO Tier III 阶段船用柴油机最有潜力的技术途径为: ①两级增压结合 SCR 尾气后处理装置; ②两级增压、中等强度 Miller 循环同时采用废气再循环技术。

(3) 利用一维仿真软件对 Miller 循环结合 EGR 的技术措施进行预测, 结果表明: 此项技术措施是船用柴油机满足 Tier III 排放法规的一项行之有效技术途径。

### 参考文献

- [1] <http://www.acidrain.org>.
- [2] <http://www.ssb.no>.
- [3] Georg Tinschmann, Dirk Thum. Sailing towards IMO Tier III Exhaust aftertreatment versus engine-internal technologies for medium speed diesel engines [C]. CIMAC 2010, Paper No. 274.
- [4] Klaus Wirth. Emissions reduction opportunities on MaK engines [C]. CIMAC 2010, Paper No. 286.
- [5] Paolo Tremuli, Andy Skipton Carter. Emissions-the way ahead [C]. CIMAC 2010, Paper No. 132.
- [6] Andrei Ludu. Large high speed diesels, quo vadis? superior system integration the answer to the challenge of the 2012 - 2020 emission limits [C]. CIMAC 2010, Paper No. 313.