

性能与排放

船用中速柴油机 SCR 系统匹配与试验研究

张 慧¹, 金玉山², 张东明², 刘 瑞², 平 涛², 王 锋²

(1. 上海港复兴船务公司, 上海 200080; 2. 七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 通过一台船用中速柴油机与 SCR 系统的匹配与标定试验, 设计了合理有效的性能优化调整方案; 提出了降低综合运行成本的优化技术措施, 并进行了配机试验。试验结果表明: 柴油机排放水平由原机的 Tier II 标准提升至 Tier III 标准; 在保证柴油机动力性不变的前提下, 燃油经济性得到了改善, 燃油消耗量下降 3% ~ 5%, 考虑到还原剂尿素的消耗, 综合运行成本下降 2% ~ 3%。研究结果表明: SCR 具有有效降低 NO_x 排放, 且成本相对较低的优点, 在船舶柴油机领域有广阔的应用前景。

关键词: 船用柴油机; SCR; 匹配; 性能; 成本

中图分类号: TK421⁺.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2016)04-0015-05

SCR System Matching and Experimental Study for Medium Speed Marine Diesel Engine

Zhang Hui¹, Jin Yushan², Zhang Dongming², Liu Rui², Ping Tao², Wang Feng²

(1. Shanghai Harbor Fuxing Shipping Co., Ltd., Shanghai 200080;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: In accordance with the SCR system matching and calibration experiment for a marine medium speed diesel engine, reasonable and effective performance optimization and adjustment scheme was designed, the optimization technical measures for reducing the comprehensive operation cost were introduced and the matching test had been done. The results of the test indicated that the diesel engine met the Tier III Standards instead of Tier II Standards. Under the premise of ensuring the power output of the diesel engine remain the same, fuel economy had been improved, and the fuel consumption was decreased by 3% to 5%. Taking into account the consumption of urea, the comprehensive operation cost was decreased by 2% to 3%. The results indicated that SCR could reduce the NO_x emission effectively and the cost was relatively low, the application prospect of SCR is quite broad in the field of marine diesel engine.

Key words: marine diesel engine; SCR; matching; performance; cost

0 引 言

国际海事组织 2008 年 10 月批准了 MARPOL 附则 VI 修正案。Tier III 标准是迄今为止最为严格的 NO_x 减排标准, 其与 Tier II 标准相比, NO_x 排放量

减少 75% 左右, 与 Tier I 标准相比, NO_x 排放量减少 80%。由于 SCR 技术相比其它 Tier III 排放控制措施具有灵活可控、技术相对成熟的优势, 所以世界各大船用柴油机生产商纷纷选择了 SCR 技术, 以应对 2016 年即将实施的 Tier III 排放法规。欧美

收稿日期: 2015-12-02

基金项目: 上海市科技人才计划项目 (14XD1423300)。

作者简介: 张慧(1965-), 男, 工程师, 主要研究方向为拖轮建造及运营, E-mail: zhangh@fxcw.com。

在 SCR 技术研发和产品设计方面起步较早,近年来日韩也在迅速跟进。

2013 年 4 月,日本川崎汽船公司、日本海洋联合公司和大发柴油机厂,在一艘 8 600 TEU 集装箱船的发电柴油机上安装 SCR 系统,检测其运行情况,并验证该船 NO_x 排放是否符合 Tier III 标准。该项目持续了 18 个月^[1]。我国对船用 SCR 系统的研究还处于起步阶段,随着国家相关法规政策的出台和市场竞争压力的不断增大,各柴油机制造企业和科研单位都加快了相关技术的研究。

当前,高效和环保的理念已经成为船用柴油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的法律法规,对当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。SCR 技术降低 NO_x 的能力早已得到证实,但是在运行成本方面,由于相关数据并不全面,还不能完全定论。SCR 技术成本构成主要包括:初始设备投资成本和运行成本(燃油及尿素消耗)。MAN 公司根据欧洲市场价格分析认为:将满足 Tier II 标准的原机提升至 Tier III 排放水平,40%浓度的尿素溶液需要量大约为 $18 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$,相当于运行成本增加 $4.9 \sim 13.5 (\text{欧元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1})$,而根据重油测算的燃油成本约为 $95 (\text{欧元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1})$ (低速二冲程柴油机的 BSFC 约为 $175 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$)^[2]。因此,成本方面是制约 SCR 技术在船舶领域推广应用的主要因素之一。但是美国环保部 EPA 在分析各排放控制措施时指出:采用 SCR 后处理系统的船舶运行在 Tier III 排放控制区,不会引起燃油消耗量增加,因为可通过增大喷油提前角来改善燃油经济性^[3]。总之,在船舶柴油机与 SCR 系统的匹配与标定过程中,须考虑综合运行成本。

本文针对一台四冲程高压共轨船用中速柴油机,结合机内优化措施,进行了 SCR 配机试验。基于尿素晶体的供货价格及当前国际燃油标价,试验研究了 SCR 技术对综合运行成本的影响。试验结果表明:在柴油机动力性保持不变前提下,柴油机的排放性能由原机 Tier II 提升至 Tier III 水平,燃油消耗量和综合运行成本均低于原机。

1 原机参数

试验柴油机为直列六缸电控高压共轨中速船用柴油机 6CS21/32,排放满足 Tier II 标准,用途为发电辅机。该机的主要技术参数如表 1 所示。

根据法规,6CS21/32 柴油机 Tier III 阶段 NO_x

排放加权限值为 $2.26 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 。采用 SCR 排放控制措施能有效降低 NO_x 排放,但增加了还原剂尿素的运行成本。根据市场调研,工业用高纯尿素晶体的价格为 $3\,500 (\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$,近期国际柴油标价为 $6\,000 (\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$,本文在上述价格基础上进行运行成本的对比分析。

表 1 试验原机主要技术参数

缸径×冲程/(mm×mm)	210×320
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
额定功率/kW	1 320
最大燃烧压力/MPa	19.3
额定油耗/(g·(kW·h) ⁻¹)	198.1
综合油耗*/(g·(kW·h) ⁻¹)	222.9
NO_x 排放/(g·(kW·h) ⁻¹)	8.69 (Tier II)

*注:综合油耗是根据排放法规中的加权权重对各工况下的燃油消耗率加权计算得出。

2 SCR 试验装置及测试条件

试验选用 SZ013A 型 SCR 装置,选用 40%浓度的尿素溶液及空气辅助型喷嘴,通常需要 $0.4 \sim 0.6 \text{ MPa}$ 的压缩空气用于尿素溶液的雾化,并在尿素溶液停喷阶段进行清洗。反应器为卧式,安装有 3 层涂覆式钒钨钛系催化剂。控制系统包括信号采集处理单元、主控单元和执行单元等,能够对尿素喷射量、反应器入口(出口) NO_x 、废气温度等进行实时监测;进行 MAP 标定后,能够根据柴油机负荷信号自动调节尿素溶液喷射量。试验测试设备如表 2。

表 2 配机试验测试设备

燃烧分析仪	DEWE-5000
油耗仪	AVL-740
烟度计	AVL-439
NH_3 分析仪	LDS-6
排放分析仪	Horiba 1600EGR
尿素溶液流量计	10H02

3 试验方案及性能调整

试验选用含硫量 $\leq 0.1\%$ 的 0#柴油。测试 D2 循环工况下柴油机原机和带 SCR 装置两种不同状况下的排放,并分析运行成本(燃油消耗率、尿素消耗量)。柴油机燃油消耗与 NO_x 排放存在折中(trade-off)关系,而 NO_x 的去除程度取决于氨的加入量(即 NH_3/NO_x 的比值,每 mol 的尿素生成 1 mol 的 NH_3),在氨的加入量相对多时(即 NH_3/NO_x 的比值较高时), NO_x 的去除率较高^[4]。所以

燃油与尿素消耗成本间有一个相对优化的区间。

以目前燃油及尿素的价格分析, 提高柴油机 NO_x 排放水平, 改善燃油经济性, 虽然会带来一些尿素消耗量的增加, 但可带来更高的整体经济性。

为满足试验目标要求, 结合仿真计算结果, 对试验方案中柴油机配气系统、燃油系统进行了性能参数调整; 试验过程中, 通过调整氨氮比设定不同的尿素喷射量, 综合评价其对燃油消耗率、 NO_x 排放及运行成本的影响。

3.1 柴油机性能参数调整

配气系统主要通过调整进气门关闭时刻 (由原机的 522°CA 提前至 516°CA) 来优化柴油机的性能和排放, 在基本不影响燃油经济性前提下, 降低 NO_x 排放。

喷油正时对柴油机燃油消耗率及 NO_x 排放有重要影响。燃油系统参数调整主要通过测试柴油机在不同喷油正时下的燃油消耗量及 NO_x 排放量, 根据经验公式计算出理论的尿素溶液消耗量, 进而进行运行成本分析, 找到满足试验目标要求的合理配置。

图 1 所示为 75%、50% 负荷工况, 柴油机油耗及 NO_x 随喷油正时变化的测试结果。75% 工况喷油提前角为 -15°CA 时, 油耗及 NO_x 排放分别是 $195.4 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 和 $14.03 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 。继续增大喷油提前角至 -17°CA 时, 油耗降至 $194.4 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ (减少 $1 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$), NO_x 排放却增加至 $16.14 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 。根据经验公式计算: 须增加消耗 $1.38 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 尿素晶体。按照价格折合成油耗约为 $0.8 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$, 而实际的尿素溶液使用量有可能还会高一些。因此综合考虑 NO_x 排放及运行经济性, 75% 负荷工况下继续增大喷油提前角是不利的。如果减小喷油提前角至 -13°CA 时, 油耗增加至 $197.1 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ (增加 $1.7 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$), NO_x 排放减少至 $12.26 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$, 尿素消耗量的减少 (折合为 $0.67 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 油耗) 不足以弥补油耗的增加。同样不符合试验的目的。

对 D2 排放测试循环工况, 进行喷油正时调整并进行排放及成本计算, 可以得到满足试验预期的喷油参数 MAP。

3.2 SCR 尿素喷射量标定

SCR 实际的减排效果受到很多因素的影响, 如排气温度、燃油品质、催化剂活性等, 给尿素溶液消耗量增加了不确定性。尿素喷射量过少, 不能保

证 NO_x 排放达到 IMO Tier III 阶段法规要求; 尿素喷射量过多, 则可能会引起氨气泄漏的二次污染, 运行成本也会增加。

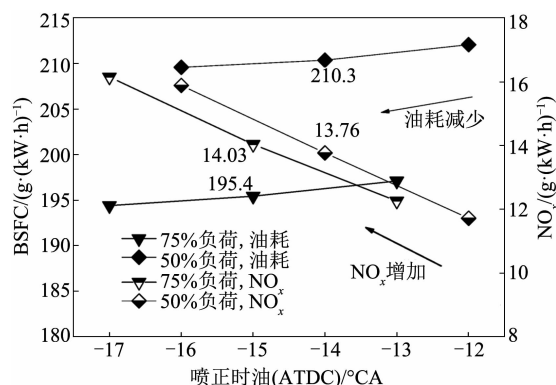


图 1 喷油正时对油耗及 NO_x 排放影响

在稳定工况下, 根据上述柴油机性能调整后 NO_x 的测试结果, 设定氨氮比在 $0.8 \sim 1.1$ 范围内, 调节尿素溶液喷射量, 测试实际的减排效果, 并对运行成本进行分析。结果如图 2 所示。

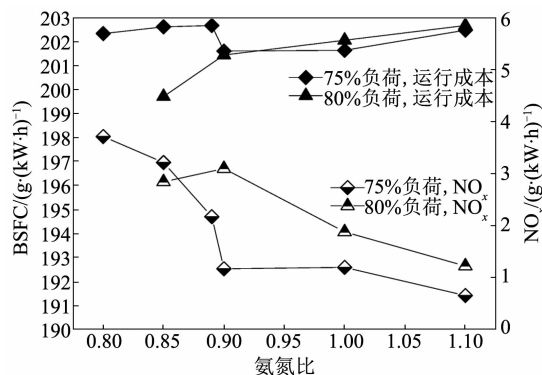


图 2 氨氮比对油耗及 NO_x 排放影响

从试验结果分析, 75% 负荷稳定工况下, SCR 尿素喷射量设定氨氮比小于 0.9 时, 随氨氮比的增加, 还原效率迅速增加, 反应器出口 NO_x 排放急剧减少; 在氨氮比大于 0.9 以后, 反应趋于饱和, 转化效率基本不变。氨氮比增加后, 运行成本随尿素喷射量增加略有提高, 但非常有限, 在氨氮比为 0.9 的位置出现小的转折, 主要原因是油耗的波动。为满足试验目的, 单工况下尿素喷射量的选择原则设置如下:

- (1) 氨气泄漏量不超过 20×10^{-6} ;
- (2) 满足法规要求, 即不超过 1.5 倍加权限值, 考虑一定安全裕度, 试验设定为 $3 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$;
- (3) 尿素喷射量选择最小化。

综上所述, 75% 负荷工况下的氨氮比选定为 0.85 。

试验中发现个别工况, 如图 2 中 80% 工况,

在氨氮比大于1后,反应器出口 NO_x 仍在迅速下降,反映出该工况的转化效率偏低。分析其原因可能与喷嘴部分堵塞引起雾化效果不良有关。该工况下的氨氮比设定为1。试验对10%到100%多个工况的尿素喷射量进行标定,形成较为全面的MAP图谱。

标定结果同样显示:通过调节氨氮比减少尿素喷射量,对成本进行优化的空间较小;运行成本的降低主要依靠机内优化,降低燃油消耗率。以100%工况为例,氨氮比从0.8提高到1.0,尿素喷射量从 $18.4 (\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$ 增加到 $23 (\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$,折算到油耗,约增加 $0.9 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 。

4 试验结果分析

试验柴油机调整及SCR系统标定满足预期目标后,参数固化,并进行排放测试。

4.1 运行成本分析

SCR配机后,柴油机主要运行性能参数如表3所示。

表3 SCR配机后主要性能参数

最大燃烧压力/MPa	20.28
额定工况油耗/ $(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	193.1
综合油耗/ $(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	211.04
NO_x 排放/ $(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	1.58
CO_2 排放/ $(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	650.2
CO排放/ $(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	0.97
HC排放/ $(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	0.07

试验结果验证了SCR降低 NO_x 排放的能力。最大转化效率达到95%以上,加权排放从 $11.70 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 降至 $1.58 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$,满足第三阶段排放法规要求。各排放工况点的转化效率及氨气泄漏情况如图3所示。

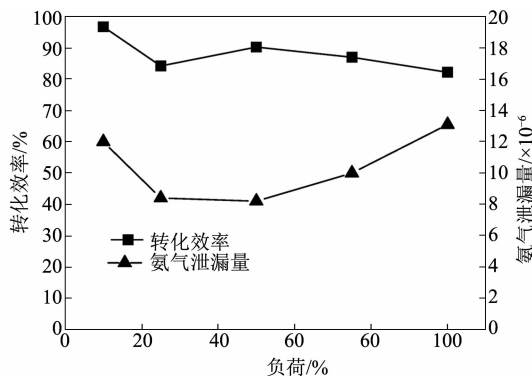


图3 SCR试验结果

通过机内优化,额定工况下燃油消耗率下降 $5 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$,加权燃油消耗率下降5.3%。

从测试结果还可以看出: CO_x 的排放相比原机得到大幅下降。加权尿素溶液消耗量为 $22.57 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$,即降低1 kg NO_x ,需要2.04 L的尿素溶液(40%)。综合考虑燃油及尿素消耗,运行成本下降了3%,见图4所示。

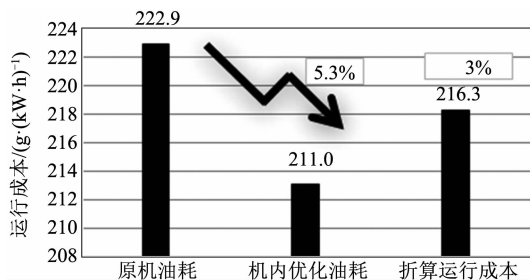


图4 运行成本对比分析

对SCR配机试验进行多次复测发现:试验柴油机燃油消耗率及 NO_x 排放(SCR还原反应前)受到试验环境温度、大气压力、湿度的影响,略有波动,但整体上比对一致性较好。

图5所示为第二、第三次测试结果,相比第一次测试数据,试验油耗增加量在2%范围内波动,但是 NO_x 波动较大,10%工况的最大差异量为17%。有文献指出,相同型号和功率的发动机在使用过程中,可能会出现最大超过30%以上的原机排放波动^[5]。

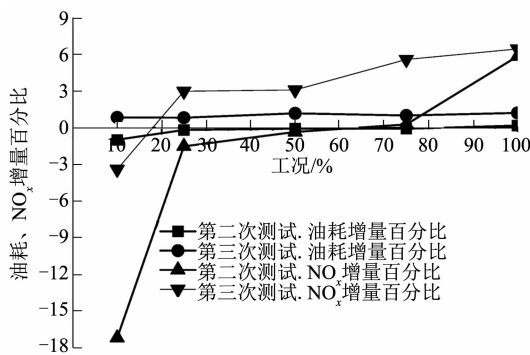


图5 油耗及 NO_x 波动测试结果

成本分析的结果同样受到SCR系统稳定性的影响,其中尿素结晶引起的喷嘴部分堵塞是最常见的问题之一,其会引起雾化效果差异,进而影响尿素喷射量。根据三次试验的结果,每减少1 kg NO_x ,分别需要2.02、2.04、1.74 L的尿素溶液(40%)。

4.2 经济效益分析

SCR排放控制措施可有效降低 NO_x 排放。以额定功率1320 kW的试验柴油机为例,采用SCR技术后, NO_x 排放由 $12.26 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 降至 $1.58 (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 。假定年运行6000 h计算,运行工况为85%负荷,可减少 NO_x 排放约70 t。

采用 SCR 技术,结合机内优化,可实现运行成本的降低。以试验柴油机 6CS21 为例,SCR 系统初期投资成本约 100 万,按照综合运行成本下降 2%,即节省 $4.7 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 油耗,SCR 系统运行约 3 年,基本可实现设备成本的回收。

5 结 论

本文结合船用中速柴油机 SCR 的配机试验,对柴油机与 SCR 的匹配方法进行了研究。提出了通过 SCR 技术实现低排放、低成本的目标。试验结果表明:

(1) SCR 技术作为一种后处理技术,可以结合柴油机性能优化设计,在满足排放法规要求的前提下进一步降低油耗。加权燃油消耗率可降低 3%~5%,综合运行成本下降 2%~3%。

(2) 在控制 NO_x 排放技术中,SCR 技术相对较为成熟、有效,最高可使 NO_x 排放降低 96% 以上(氨泄漏量接近 20×10^{-6})。每减少 1 kg NO_x ,大约需要 2 L 的尿素溶液(40%),尿素溶液的消耗大约是燃油消耗(体积)的 7%,这主要取决于 NO_x 的减排量和氨泄漏水平的控制。

(3) 为了满足 Tier III 排放法规的要求,采用高压共轨、电控单体泵等电控高压燃油喷射系统与 SCR 技术相结合,将是 NO_x 排放控制的发展趋势之一。

(4) SCR 系统运行稳定性受多方面因素影响,如 NO_x 排放的波动,尿素喷射雾化效果等。开环控制并不能达到对系统的精确控制,而闭环控制则能进一步降低 SCR 技术的综合运行成本。

参考文献

- [1] 张运秋,丁立勋,李博洋.船舶柴油机尾气后处理 SCR 技术分析和应用[J].船舶与海洋工程,2015,31(1):36-40.
- [2] Henrik Christensen, Michael Finch Pedersen. Continuous development of Tier III SCR for large 2-stroke diesel engines [C]. CIMAC Congress 2013, PAPER NO: 178.
- [3] EPA-420-R-09-019. Regulatory Impact Analysis: Control of emissions of air pollution from category 3 marine diesel engines [R]. December 2009, page: 5-42, 43.
- [4] 袁庭全.船用柴油机的排放控制[J].船舶,2005(1):35-38.
- [5] 杨建军、刘双喜.柴油机 SCR 后处理系统的应用研究[A].2013 中国汽车工程学会年会论文集[C].2013.

(上接第 14 页)

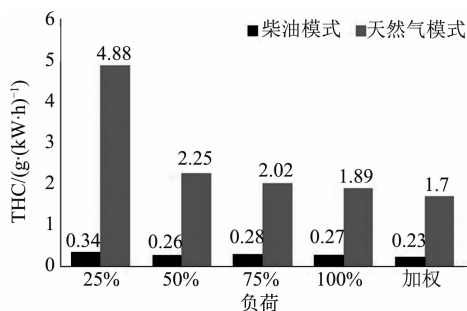


图 8 5RT-flex50DF 燃气模式与燃油模式 THC 的排放值

4 结 论

(1) 随着世界能源结构的调整,以天然气为燃料的双燃料发动机将逐步成为未来发动机技术发展的一个主流。我国在该领域由于起步晚,目前无论是天然气动力船舶,还是双燃料低速发动机的发展均已落后欧美等发达国家。但伴随着中国 ECA 区域的实行和绿色船舶的推广,双燃料发动机在中国将会迎来一个较快的发展机遇期。

(2) 瓦锡兰 5RT-flex50DF 双燃料低速发动机通过采用 Otto 循环与可调开度废气旁通阀技术,降低缸内最高燃烧温度及调节燃气模式下的空燃

比,达到了抑制 NO_x 生成的目的。

(3) 瓦锡兰 5RT-flex50DF 双燃料低速发动机在燃气模式下,可大幅降低 NO_x 的排放,实现无需任何废气后处理设备即可满足 IMO Tier III 排放的要求。

(4) 燃气模式下,双燃料发动机 THC 排放大幅提升,在一定程度上恶化了发动机的经济性。后续优化重点应关注如何降低 THC 的排放。

参考文献

- [1] 谭月静,黄学武.内河柴油/LNG 双燃料动力船舶发展现状及建议[J].水运管理,2013,35(2):39-42.
- [2] Wärtsilä 2 stroke gas engine technical meeting [C]. Shanghai, April, 2013.
- [3] 宋雅丽,吴朝晖.船用低速双燃料发动机燃烧循环及应用现状分析[J].柴油机,2015,37(3):38-42.
- [4] 任建兴,陈群华,吴志忠,等.氮氧化物的生成与控制[J].上海电力学院学报,2014(3).
- [5] Rudolf Wettstein. Low-speed dual-fuel engine [R]. Wintertur; WinGD, April, 2015.
- [6] 钱良智.柴油-LNG 双燃料船用发动机排放特性试验研究[J].航海工程,2015,44(3):142-145.