

船用柴油机 SCR 系统控制策略试验研究

李文昕¹, 谢宗序², 郑添¹

1. 中船重工第七〇三研究所无锡分部, 江苏 无锡 214000; 2. 中国核电工程有限公司华东分公司, 浙江 嘉兴 314300

摘要:为降低船用柴油机 NO_x 排放, 分析柴油机选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)后处理系统的开环、闭环控制策略, 对不同策略及工况下 NO_x 转化率及 NH₃ 泄露进行试验对比。结果表明:采用开环策略, 柴油机功率与额定功率的比为 75%以上时, NO_x 转化效率可达到 83%, 但不同工况下 NO_x 转化率波动超过 20%;采用闭环控制策略, 不同工况下 NO_x 转化率稳定在 85%左右, 尾气中 NH₃ 的体积分数低于 20×10⁻⁶;闭环控制策略下 NO_x 转化率具有自调整、高稳定性、响应速度快等优势, 可降低 NO_x 排放且尾气中 NH₃ 的体积分数在规定范围内。

关键词:SCR 系统;开环控制;闭环控制;NO_x 排放

中图分类号:TK421+.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)01-0075-06

引用格式:李文昕, 谢宗序, 郑添. 船用柴油机 SCR 系统控制策略试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(1):75-80.

LI Wenting, XIE Zongxu, ZHENG Tian. Experimental study on SCR control strategy for a marine diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(1):75-80.

0 引言

随着全球航运业不断发展, 船用柴油机 NO_x 排放带来的环境问题得到了广泛关注, 如何满足相关的排放标准成为研究重点。国际海事组织(international maritime organization, IMO)要求, 2016年1月1日后建造的船舶用柴油机在排放控制区(emission control area, ECA)航行时, 产生的 NO_x 排放应符合船舶 Tier 3 标准。Tier 3 标准规定的 NO_x 排放限值比 Tier 1 标准减少了 80%^[1]。

选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)技术是指向主机废气中喷入适量的尿素溶液, 在催化剂作用下, 尿素溶液水解后生成 NH₃ 和 CO₂, NH₃ 和尾气中 NO_x 反应生成 N₂ 排出, 降低 NO_x 排放。船用 SCR 系统运行过程中, 柴油机负荷变化导致反应器排气温度、废气质量流量及 NO_x 排放密度不同, 对尿素溶液喷射量的要求发生变化, 若喷射过多, 造成 NH₃ 泄露;若喷射过少, 增大 NO_x 排放, 因此精确控制尿素溶液喷射量是一项非常重要的研究内容^[2]。

目前, 国内船用 SCR 系统主要采用开环控制方式, 通过柴油机试验标定各参数 map 图, 并结合排气温度、发动机工况等进行修正, 实现对尿素溶液喷射量的控制。但开环控制存在瞬态工况响应滞后、动态修正差、不能根据主机负荷变化实时快速调节等问题, 导致瞬态排放超标, 需与闭环控制相结合。国外闭环策略通常采用在 SCR 系统前、后分别安装 NO_x 及 NH₃ 传感器, 通过传感器数据实时调节尿素溶液喷射量, 但国内船用排放标准中未明确规定 NH₃ 泄露限值, 主要采用 SCR 系统前、后安装 NO_x 传感器的方式。对于大型船用柴油机, SCR 系统响应时间过长, 控制明显滞后, 将前馈控制和闭环控制结合, 可提高大型船用柴油机系统响应速度^[3]。

本文中以某船用柴油机 SCR 系统为研究对象, 对比开、闭环控制策略下尾气中 NO_x 的体积分数及

收稿日期:2023-11-21

第一作者简介:李文昕(1989—), 男, 河南洛阳人, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为柴油发电机组控制, E-mail: ting2008910@163.com。

NH_3 的体积分数,提出有效控制策略,降低 NO_x 排放。

1 试验系统

某 KM493G-1 型直列柴油机,四冲程、增压中冷、直喷,主要技术参数如表 1 所示。

表 1 柴油机主要技术参数

缸径/mm	行程/mm	缸数	额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	额定功率/kW	燃油消耗率/[$\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$]	总排量/L	冷却方式
93	102	4	3 000	30	≤ 300	2.771	风冷、水冷

基于该发动机搭建 SCR 系统试验台架,试验系统包括柴油机、加热器、反应器、SG1600 氨分析仪、DME 48 型计量泵、PT100 热电阻温度传感器、威力巴排气质量流量计、西门子可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 等,其中,温度传感器用于测量反应器出、入口的排气温度,加热器用于加热柴油机排出的尾气温度,反应器出、入口分别安装 NB1500 型 NO_x 传感器,测量反应器出、入口 NO_x 体积分数,以便计算实际 NO_x 转化率;采用 SG1600 氨分析仪内的传感器测量反应器出、入口 NH_3 的体积分数,确保尿素溶液计量的准确和稳定;DME 48 型计量泵输出尿素溶液体积流量;PLC 实时采集 SCR 系统运行参数,以控制尿素溶液喷射量。SCR 系统试验台架结构组成示意如图 1 所示。

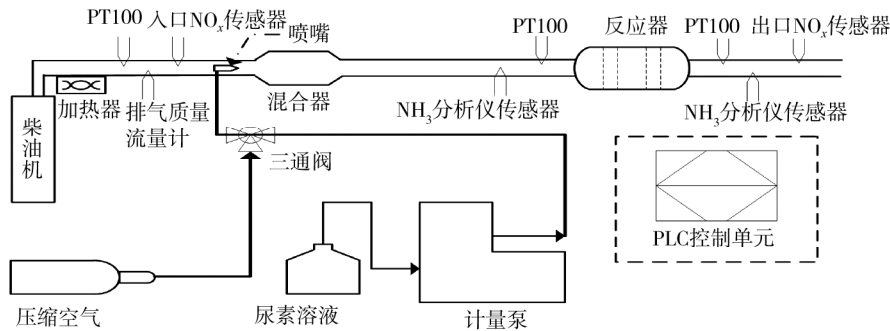


图 1 SCR 系统试验台架结构组成示意图

2 控制策略

2.1 尿素溶液理论量

假设排气中 NO 、 NO_2 的质量比为 9 : 1, NO_x 平均摩尔质量 $M(\text{NO}_x) = 31.6 \text{ g/mol}$, 忽略湿度对 NO_x 体积浓度的影响,即湿度修正因数 $k_{\text{hd}} = 1$ 。理论上 1 mol NO_x 反应需要 1 mol NH_3 , 尿素溶液理论喷射质量流量^[4]

$$q_{m,N} = q_{m,1} c M(\text{NH}_3) / [2M(\text{NO}_x) w(\text{NH}_3)] \quad (1)$$

式中: $q_{m,1}$ 为 NO_x 排气质量流量, kg/h ; c 为氨氮的质量比; $M(\text{NH}_3)$ 为尿素溶液中氨的摩尔质量, $M(\text{NH}_3) = 60.07 \text{ g/mol}$; $w(\text{NH}_3)$ 为尿素溶液中氨的质量分数, $w(\text{NH}_3) = 32.5\%$ 。

尿素溶液体积流量

$$q_{V,N} = q_{m,N} / \rho_N \quad (2)$$

式中: ρ_N 为尿素溶液密度, g/L 。

2.2 c 修正

由于 SCR 反应器体积确定,可将排气质量流量换算为反应器空速,结合反应器温度,在满足最佳 NO_x 转化率和最少 NH_3 泄漏的条件下,通过试验标定 c 与反应器温度 t 、反应器空速 v_s 变化的 map 图。

2.3 尿素溶液温度修正

环境温度变化,尿素溶液密度发生波动,导致尿素体积流量变化^[5-6]。环境温度与质量分数为

32.5%的尿素溶液密度的关系如图2所示,由图2可知:尿素溶液密度随环境温度升高而降低。

SCR系统通过温度传感器确定实际环境温度,并根据环境温度与尿素溶液密度的关系曲线,修正理论尿素喷射量。

2.4 开环控制

基于尿素溶液理论喷射量,结合尿素溶液温度的变化,得到尿素溶液实际喷射量,开环控制框图如图3所示。

由图3可知:开环控制策略根据柴油机负荷、NO_x体积分数计算尿素溶液理论喷射量;根据 t 、 v_s 进行最佳 c 修正;结合环境温度修正尿素溶液密度;通过尿素溶液理论喷射量、修正后 c 及尿素溶液密度得到尿素溶液修正量,由计量泵根据上述参数完成实际尿素喷射量喷射。

2.5 闭环控制

由于反应器控制NO_x排放有较大的滞后效应,但流量泵能及时迅速地控制尿素溶液流量。SCR闭环控制策略采用闭环前馈控制,主控制器为反应器,通过反应器出、入口NO_x传感器,实现对目标NO_x转化率的主动控制;副控制器为计量泵,响应快,实现稳定、准确地控制尿素溶液流量^[7-8]。

为保持系统稳定且减小柴油机负荷造成的NO_x体积分数和排气质量流量的干扰,采用比例积分(proportion integral, PI)控制器进行前馈控制,提前调节尿素喷射量,提高SCR对负荷干扰响应的快速性。闭环前馈控制框图如图4所示。

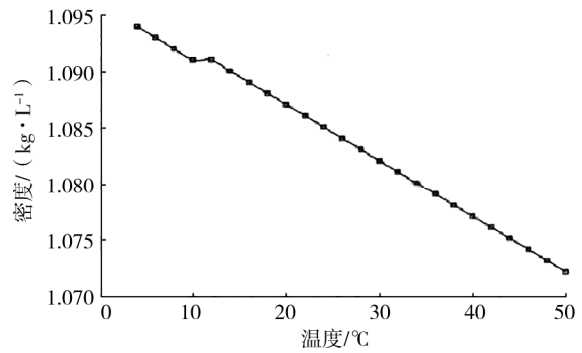


图2 环境温度与尿素溶液密度的关系

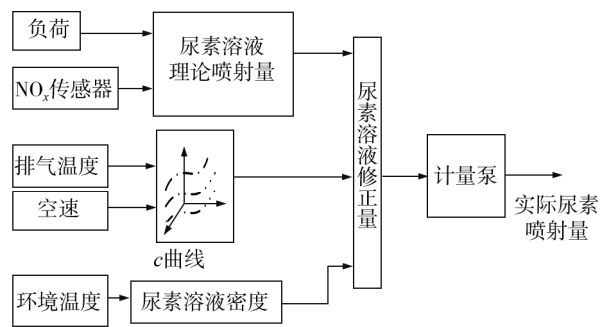


图3 开环控制框图

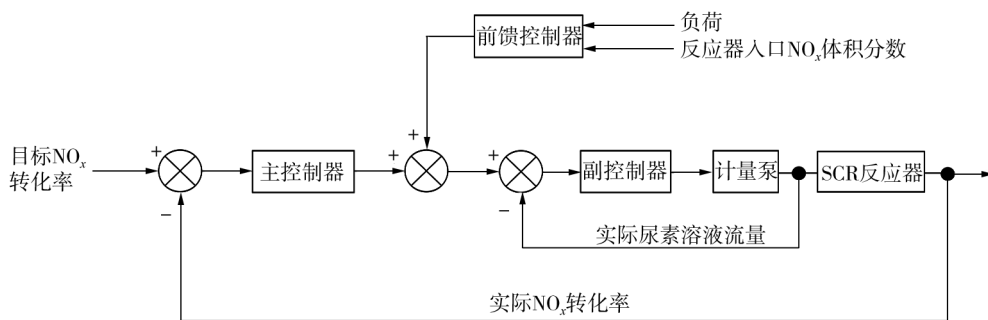


图4 闭环前馈控制框图

相关研究表明:SCR反应器采用闭环控制实际尿素溶液喷射量,在一定条件下,NO_x转化率随尿素溶液喷射量的增加而升高,NO_x转化率达80%以上;不同负荷条件下,目标NO_x转化率不同,当实际NO_x转化率低于设定目标,需增大尿素溶液喷射;若转化率高于设定目标,为防止尿素溶液喷射过量导致NH₃泄露,应减少尿素溶液喷射量^[9-10]。

3 试验研究

3.1 开环控制试验

选取负荷比(发动机功率与额定功率的比)25%、50%、75%、85% 4个工况,通过排气加热器模拟不同的负荷比对应的排气温度分别为270、300、350、370℃,进行开环控制试验。试验中 $c=1$,通过NO_x传感器

采集反应器入口、出口 NO_x 体积分数等,计算理论尿素喷射量,在压缩空气的雾化作用下喷入排气管道。开环控制下,不同负荷比及温度时 NO_x 转化率及尾气中 NH_3 的体积分数随时间的变化曲线如图 5 所示。

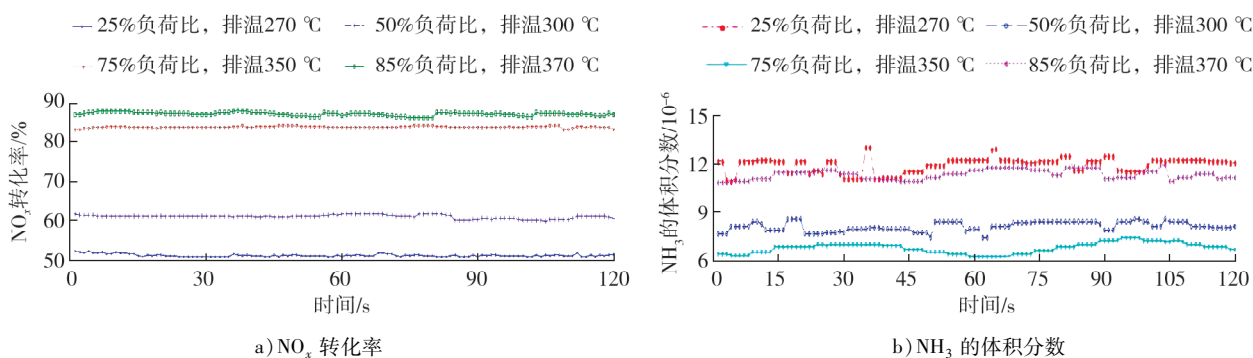


图 5 开环控制下,不同负荷比及温度时 NO_x 转化率及尾气中 NH_3 的体积分数随时间的变化曲线

由图 5 可知:柴油机工况为负荷比 25%、排温为 270 °C 时,未达到催化剂正常工作温度(280 °C 以上),尿素溶液分解后的 NH_3 未与排气中的 NO_x 发生反应, NO_x 转化率基本在 50%,同时尾气中 NH_3 的体积分数较高,为 13×10^{-6} 左右;工况为负荷比 50%、排温为 300 °C 时,未达到催化剂最佳工作温度(350 °C 以上), NO_x 转化率升高,为 60.7%,尾气中 NH_3 的体积分数减少;工况为负荷比 75%、排温为 350 °C 时,达到催化剂最佳工作温度, NO_x 转化率为 83.8%,大部分 NH_3 与 NO_x 发生反应,尾气中 NH_3 的体积分数最少;工况为负荷比 85%、排温为 370 °C 时,由于催化剂活性温度升高, NO_x 转化率升高幅度较小,尿素喷射量升高导致尾气中 NH_3 的体积分数增大。开环控制下,在满足催化剂工作温度的条件下,不同工况下 NO_x 转化率波动超过 20%;温度过低, NO_x 转化率低,造成尾气中 NH_3 的体积分数较高;温度过高,尿素喷射量升高,造成尾气中 NH_3 的体积分数较高。

3.2 闭环控制试验

为满足船用柴油机 Tier 3 排放标准, NO_x 转化率必须达到 80% 以上,尾气中 NH_3 的体积分数一般不超过 20×10^{-6} 。 NO_x 目标转化率设定为 85%,可满足排放要求,同时降低尾气中 NH_3 的体积分数。

在负荷比 75%、排温为 350 °C 时进行闭环控制策略研究,由于 SCR 系统为大惯性,响应慢,在闭环比例微分积分(proportion integral differential,PID)计算中加入提前计算的前馈量,以适应 SCR 系统运行条件的变化,使实际 NO_x 转化率在目标转化率附近,设置死区宽度为 2.5% 以降低闭环控制的灵敏度。闭环前馈 PID 控制下, NO_x 转化率、 NO_x 体积分数及 NH_3 的体积分数随时间的变化曲线如图 6 所示。

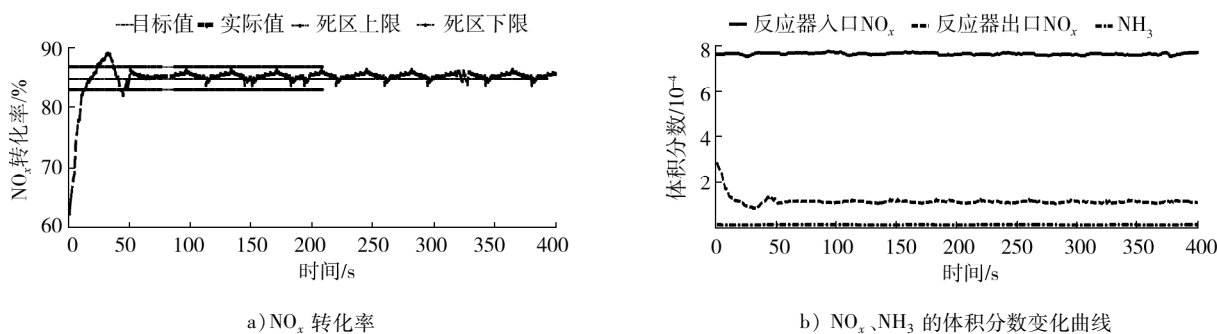


图 6 闭环控制下, NO_x 转化率、 NO_x 体积分数及 NH_3 的体积分数随时间的变化曲线

由图 6a) 可知:由于此控制系统为大惯性系统,尿素溶液喷入反应器后需要一定的反应时间,因此开始反应时 NO_x 转化率较低,大约经 50 s 稳定后,在目标转化率 85% 死区上、下限内波动,基本符合设定的控制目标。由图 6b) 可知:反应器出、入口 NO_x 体积分数变化较为稳定,尾气中 NH_3 的体积分数一直稳定在 15×10^{-6} 以下,不超过该机型尾气中 NH_3 的最大体积分数为 20×10^{-6} 的规定。

对柴油机瞬态工况进行闭环控制策略研究,柴油机工况为第0~580秒负荷比为75%,第580~900秒负荷比为50%,第900~1260秒负荷比为25%,第1260~2000秒负荷比为85%,第2000~2260秒为空载,第2260~2600秒负荷比为70%,各工况排温与3.1相同。不同负荷比下,反应器出、入口 NO_x 体积分数, NO_x 转化率及尾气中 NH_3 的体积分数曲线如图7所示。

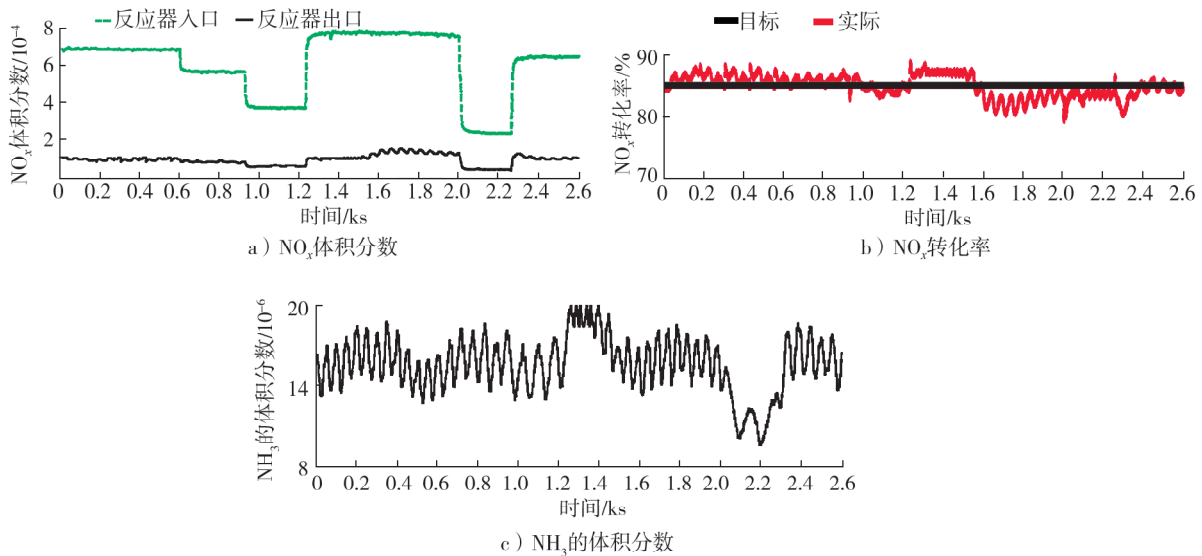


图7 不同负荷比 NO_x 体积分数、 NO_x 转化率及尾气中 NH_3 的体积分数曲线

由图7可知:随着柴油机负荷比变化, NO_x 转化率基本稳定在目标转化率85%附近,具有较好的鲁棒性;负荷比85%下,由于排温升高,尿素溶液喷射量增加,尾气中 NH_3 中体积分数最大,接近 20×10^{-6} ,仍然满足SCR控制系统要求。

4 结论

1) 开环控制试验中在满足催化剂工作温度的条件下,不同柴油机工况下 NO_x 转化率上下波动超过20%,易造成尿素溶液喷射量过多或喷射量不够等异常情况,无法实现对 NO_x 转化率的主动控制。

2) 相比开环控制,闭环控制在控制 NO_x 转化率方面更稳定、高效,能够克服负荷扰动对转化率的干扰, NO_x 转化率基本稳定在85%附近,同时尾气中 NH_3 的体积分数在正常范围 20×10^{-6} 内,满足船舶柴油机Tier 3排放标准的要求。

参考文献:

- [1] WILLEMS F, CLOUDT R, EIJNDEN E, et al. Is closed-loop SCR control required to meet future emission targets? [C]// Proceedings of SAE 2007 World Congress. Detroit, USA; SAE International, 2007.
- [2] 佟德辉, 李国祥. 利用SCR技术降低车用柴油机 NO_x 排放的控制策略研究[J]. 车用发动机. 2009(5):39-43.
- [3] WANG D Y, YAO S, SHOST M, et al. Ammonia sensor for closed-loop SCR control [C]// Proceedings of SAE 2008 World Congress. Detroit, USA; SAE International, 2008.
- [4] CHARLTON S J. Developing diesel engines to meet ultra-low emission standards [C]// Proceedings of Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition. Chicago, USA; SAE International, 2005.
- [5] KOICHI H, YOICHI N, MASAKUNI K, et al. Development of marine SCR system and field test on ship [C]// Proceedings of International Symposium on Marine Engineering. Busan, Korea; ISME, 2009.
- [6] 杨建军, 马杰, 刘双喜, 等. 柴油机SCR后处理控制策略开发与研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(10):869-874.
- [7] 胡静, 赵彦光. 重型柴油机尿素SCR后处理系统的控制策略研究[J]. 内燃机工程. 2011, 32(2):1-5.
- [8] SONG Q W, ZHU G. Model-based closed-loop control of urea SCR exhaust aftertreatment system for diesel engine [C]//

Proceedings of SAE 2002 World Congress. Detroit, USA; SAE International, 2002.

- [9] LIU C Z, HU G D, ZHU Q. Model-based urea injection control strategy and ammonia storage estimation for diesel engine SCR system[C]//Proceedings of 27th Chinese Control and Decision Conference. Qingdao, China; CCDC, 2015.
- [10] HSIEH M F, WANG J M. Development and experimental studies of a control-oriented SCR model for a two-catalyst urea-SCR system[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(4): 409-422.

Experimental study on SCR control strategy for a marine diesel engine

LI Wenting¹, XIE Zongxu², ZHENG Tian¹

1. Wuxi Division, NO. 703 Research Institute of CSSC, Wuxi 214000, China;

2. East China Branch, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Jiaying 314300, China

Abstract: In order to reduce marine diesel engines NO_x emission, the open-loop and closed-loop control strategies of the diesel selective catalytic reduction aftertreatment system are analyzed, the NO_x conversion and NH₃ leakage under different strategies and operating conditions are compared. The results show that with the open-loop control, when the load ratio of diesel engine is above 75%, the NO_x conversion efficiency can reach 83%, but the fluctuation of NO_x conversion is more than 20%. With the closed-loop control strategy, the conversion of NO_x is stable at about 85%, and the volume fraction of NH₃ leakage is less than 20×10⁻⁶ under different operating conditions. The closed-loop control strategy has the advantages of self-adjustment of NO_x conversion, high stability and fast response speed, which can reduce NO_x emission and NH₃ leakage volume fraction within the specified range.

Keywords: SCR system; open-loop control; closed-loop control; NO_x emission

(责任编辑:胡晓燕)

(上接第 74 页)

Performance optimization of a marine auxiliary generator

LIU Jinrong¹, FAN Xicong¹, HE Xiaofeng¹, WANG Jialun¹,
ZHANG Zhiyong¹, BAI Shuzhan²

1. Technology Center, Chongqing Weichai Engine Co., Ltd., Chongqing 402262, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

Abstract: In order to reduce the fuel consumption of an marine auxiliary engine, the optimal valve timing, compression ratio and plunger speed are determined by simulation analysis. Through the load characteristic test and the orthogonal test, the best injector scheme is determined, and the suitable oil pump and sea water pump are selected through the hot idle test. The fuel consumption before and after optimization is compared by bench load test. The results show that after optimization, the crankshaft angle corresponding to the intake closing is 565°, the crankshaft angle corresponding to the exhaust opening is 135°, the compression ratio is 15.5, and the maximum plunger speed is increased to 2.54 m/s, the injector with a hole diameter of 0.32 mm and a hole cone angle of 158° is selected, the volume flow rate of oil pump and sea water pump is reduced by 10 and 15 m³/h respectively. The fuel consumption rate is decreased by 4-5 g/(kW·h) compared with the original one in the common working condition, which achieve the goal of reducing fuel consumption.

Keywords: marine auxiliary generator; fuel consumption rate; valve timing optimization; fuel injector selection

(责任编辑:胡晓燕)