

性能与排放

电控排气阀开启/关闭角度对
智能化低速柴油机性能的影响舒 畅¹, 王勤鹏¹, 杨建国^{1,2}

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063;

2. 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 以 RT-Flex60C 大型智能化低速柴油机为研究对象, 建立了智能化柴油机工作过程仿真模型, 用自主开发的大型智能化柴油机电控排气阀系统硬件在环(HIL)仿真试验平台和柴油机台架试验数据验证仿真模型的正确性; 在此基础上, 对电控排气阀开启/关闭角度对柴油机性能与排放特性的影响进行了仿真计算分析。根据分析结果提出了 RT-Flex60C 机排气门开启/关闭角度的优化方案。

关键词: 低速柴油机; 电控排气阀; 性能

中图分类号: TK421⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2012)03-0008-06

Effect on Performance of Marine Intelligent Low-speed Diesel Engine by
Different Opening and Closing Angles of Electrically Controlled Exhaust ValvesShu Chang¹, Wang Qinpeng¹, Yang Jianguo^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063;

2. Key Laboratory of Marine Power Engineering & Technology under Ministry of Communications,
Hubei Wuhan 430063)

Abstract: A simulation model was built based on RT-Flex60C marine intelligent low-speed marine diesel engine, and was validated by data from hardware in loop (HIL) simulation test bench developed independently for large intelligent diesel engine's electrically controlled exhaust valves, as well as data from diesel engine bench test. Based on these research, simulation analysis was carried out on the effect on performance of marine intelligent low-speed diesel engine by different opening and closing angles of electrically controlled exhaust valves. The optimized opening and closing angles of exhaust valves on RT-Flex60C was given according to the analysis results.

Keywords: low-speed diesel engine; electrically controlled exhaust valves; performance

0 引 言

智能化是船用柴油机的发展趋势, 使用高压共轨燃油电控喷射和电控排气阀技术可以降低有害排放并提高柴油机经济性, 满足日益严格的排放法规要求。船用智能化柴油机取消了凸轮传动机构, 由电控单元(Electrical Control Unit, ECU)发出指令, 通过电控执行元件, 根据柴油机工况柔性控制排气阀的开启/关

闭角度, 其升程曲线与传统凸轮控制的柴油机有区别, 能在各种工况下达到柴油机性能的优化^{[1][2]}。MAN 和 Wärtsilä 等公司推出的新型智能化柴油机采用伺服油驱动排气阀, 实现了排气阀开启/关闭的柔性控制, 提高了柴油机的经济性并降低有害排放。目前国内船用低速柴油机电控排气阀系统的研究尚处于初级阶段, 只有部分高校和研究所开展了中、小型柴油机电控配气机构的基础研究^[3-5]。

收稿日期: 2011-12-06; 修回日期: 2012-02-20

基金项目: 国防科工委民用专项资助项目([2005]568)

作者简介: 舒畅(1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为柴油机监测与电子控制, E-mail: jgyang@whut.edu.cn。

本文以 Wärtsilä RT-Flex60C 大型智能化低速柴油机为研究对象,用 AVL-boost 仿真软件建立智能化柴油机工作过程仿真模型,用自主开发的大型智能化柴油机电控排气阀系统硬件在环(HIL)仿真试验平台和柴油机台架试验数据验证仿真模型的正确性;在此基础上,分析电控排气阀开启(VEO)和关闭(VEC)角度对柴油机性能与排放特性的影响,为电控排气阀开启/关闭角度的制定提供了依据。

1 柴油机工作过程计算原理与建模

1.1 柴油机工作过程计算原理

柴油机工作过程计算是一个复杂的系统过程,主要包括对气体交换过程、压缩过程、喷射雾化过程、燃烧过程、膨胀过程和排放物生成过程的模拟。由于试验条件的限制,难以完全确定各点的不稳定边界条件,需要建立物理化学模型简化方程。

燃烧模型对柴油机工作过程的计算结果影响显著,燃烧模型分为零维模型、准维模型和三维模型。零维模型不能预测排放,三维模型计算量大;在有试验数据验证的条件下,采用准维模型可获得较高的仿真精度和较短的计算时间。准维模型将燃烧空间划分成若干区域,能描述相关参数随空间的分布,对于特定机型可较准确地预测燃烧过程主要性能参数,并在一定程度上预测柴油机的排放特性^[6]。

1.2 柴油机工作过程建模

Boost 是 AVL 公司开发的对柴油机结构和性能进行整机或零部件模拟计算的柴油机仿真软件,能比较准确地模拟柴油机的工作过程。根据 RT-Flex 60C 型柴油机的系统结构特征,使用 AVL-boost 仿真软件建立了柴油机工作过程仿真模型。RT-Flex 60C 型柴油机主要技术参数如表 1 所示。AVL-boost 模型如图 1 所示。燃烧室部分选用准维模型中的双区表模型;传热模型选用 Woschni1978 模型^[7]。

表 1 RT-Flex 60C 柴油机主要技术参数	
缸数	7
冲程	2
行程/mm	2 250
缸径/mm	600
MCR 功率/MW	11.8
MCR 转速/(r·min ⁻¹)	114

图 1 中 SB1~SB4 是系统边界;MP1~MP8 是测点;C1~C7 是气缸;1~31 是管道连接;PL1、PL2 是进气管道;CO1、CO2 是空冷器;TC1、TC2

为涡轮增压器。

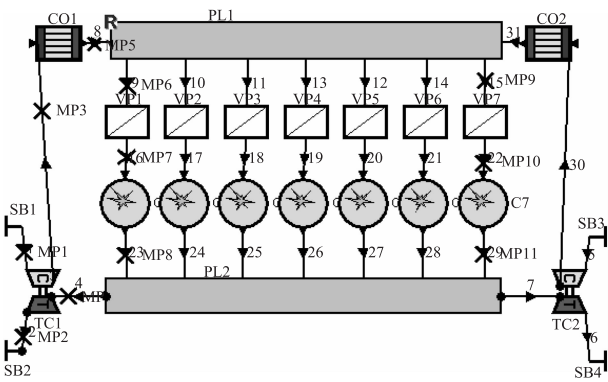


图 1 AVL-boost 模型

1.3 模型的边界条件

仿真模型建立后需要选择边界条件。模型的边界条件可分为:热力学参数(环境温度、压力、流量系数、燃气热值、空燃比等);结构参数(包括缸径、行程、连杆长度、点火顺序、进排气门(道)参数);燃烧和放热模型等以及试验参数(排气阀升程曲线、排气歧管压力、温度,空冷器流量等)。

1.4 硬件在环仿真平台

自主开发的大型智能化柴油机电控排气阀系统 HIL 仿真试验平台获取电控排气阀升程曲线以及排气阀开启(VEO)和关闭(VEC)角度值,如表 2 所示。限于篇幅,大型智能化柴油机电控排气阀系统 HIL 仿真试验平台详见参考文献[8~10]。

表 2 各工况排气阀开启关闭角度				
负荷	25%	50%	75%	100%
VEO (°CA)	123.2	121.4	121.2	119.6
VEC (°CA)	229.6	248.4	259.5	259.3

2 柴油机工作过程计算模型试验验证

AVL-boost 仿真模型输入初值后经过计算得到仿真结果,包括输出功率、燃油消耗率、平均有效压力、最高燃烧压力、管道内气体压力和温度等数据,与试验数据对比可以验证仿真模型精度。

柴油机出厂前在测试台架上进行测试,测试台架安装有水力测功器、气缸压力传感器、温度计等测量设备,可获取柴油机输出功率、气缸压力、管道中气体温度、压力等数据。从该机型生产厂家的试车报告可获取模型验证所需的试验数据。表 3 是该型柴油机试车报告数据和 AVL-boost 模型仿真结果对比。仿真数据和试车报告数据相对误差小于 4.5%。

表 3 仿真结果与试验对比

主要性能参数	试验值	仿真值	相对误差/%
输出功率/kW	16 520.00	16 461.70	-0.35
燃油消耗率/(g·(kW·h) ⁻¹)	173.91	174.53	0.36
平均有效压力/MPa	1.95	1.95	0.00
爆发压力/MPa	15.30	15.32	0.13
压缩压力/MPa	14.14	14.32	1.27
涡轮前排气温度/K	653.00	639.20	-2.11
涡轮后排气温度/K	503.00	480.50	-4.47
中冷前气体温度/K	463.00	462.00	-0.22
中冷后气体温度/K	306.00	305.70	-0.10
进气歧管压力/MPa	0.375	0.380	1.33
排气歧管压力/MPa	1.284	1.282	-0.16

NO_x 排放仿真结果如表 4 所示,模型仿真数据和试验数据吻合,相对误差小于 1%,加权平均值均小于 14.4 (g·(kW·h)⁻¹),满足 IMO Tier II 类法规要求^[10]。

表 4 各工况 NO_x 排放仿真结果与试验对比

负荷	25%	50%	75%	100%	加权平均值/ (g·(kW·h) ⁻¹)
权重	0.15	0.15	0.50	0.20	
试验值/ (g·(kW·h) ⁻¹)	21.51	15.11	13.01	11.90	14.38
仿真值/ (g·(kW·h) ⁻¹)	21.52	15.11	12.96	11.87	14.35
误差	0.05%	0	0.38%	0.25%	0.21%

综上所述,模型仿真数据与试验数据误差较小,模型经验证其精度满足计算精度要求,可用于智能化柴油机进行仿真试验研究。

3 仿真试验和结果分析

Wärtsilä RT-Flex60C 柴机电控排气阀系统采用柔性控制策略,在柴油机不同工况下排气阀开启/关闭角度不同,对柴油机性能有一定影响。为分析智能化柴机电控排气阀开启/关闭角度对其性能的影响,利用经验证的柴油机工作过程仿真模型分析不同排气阀升程曲线以及不同的开启/关闭角度对柴油机燃油消耗率(g_e)、NO_x 排放特性以及最高燃烧压力(p_z)等性能参数的影响。

3.1 不同排气阀升程曲线对柴油机性能的影响

智能化柴油机在不同工况其排气阀开启/关闭角度不同,排气阀的升程曲线也不同;而传统凸轮驱动排气阀在各个工况下的升程曲线是一致的。设计以下仿真试验,研究不同排气阀升程曲线下柴油机性能的区别。

(1) 可变排气正时排气阀升程曲线下仿真:将 HIL 仿真平台上获取的各个工况下排气阀升程曲线输入 AVL-boost 模型进行仿真计算。

(2) 固定排气正时排气阀升程曲线下仿真:保持其它参数不变,HIL 仿真平台上获取的 100% 负荷工况排气阀升程曲线输入 AVL-boost 模型,即排气阀开启角度设为定值 119.6 °CA,排气阀关闭角度设为定值 259.3 °CA,在各工况下进行仿真。

(3) 保持其它参数不变,把凸轮驱动排气阀的升程曲线直接输入 AVL-boost 模型,在各个工况下进行仿真。

不同升程曲线下燃油消耗率和 NO_x 排放仿真结果如图 2 所示,在低负荷工况下,可变排气正时的仿真计算得到的燃油消耗率(g_e)和 NO_x 排放值较低。

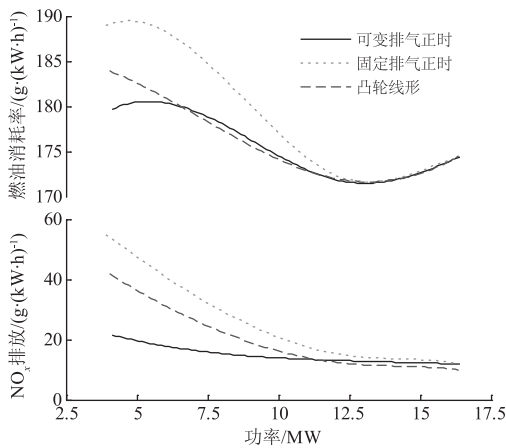


图 2 不同升程曲线下燃油消耗率和 NO_x 排放仿真结果

按照 IMO TierII类排放法规要求计算 NO_x 排放的加权平均值,结果如表 5。固定排气正时角度下排气阀升程曲线仿真结果: NO_x 排放加权平均值为 21.26 (g·(kW·h)⁻¹);凸轮驱动排气阀升程曲线仿真结果: NO_x 排放加权平均值为 18.27 (g·(kW·h)⁻¹);均超过了 14.4 (g·(kW·h)⁻¹)的标准,不满足 IMO TierII类法规要求。

表 5 NO_x 排放的加权平均值

负荷	25%	50%	75%	100%	加权平均值 /(g·(kW·h) ⁻¹)
权重	0.15	0.15	0.50	0.20	
可变排气正时/ (g·(kW·h) ⁻¹)	21.52	15.11	12.96	11.87	14.35
固定排气正时/ (g·(kW·h) ⁻¹)	50.76	26.23	14.66	11.90	21.26
凸轮线形/ (g·(kW·h) ⁻¹)	40.28	22.15	13.07	11.87	18.27

综上所述，相对于凸轮驱动排气阀和采用固定正时控制策略的排气阀，可变排气正时的电控排气阀可降低柴油机油耗，并使得 NO_x 排放达到 IMO TierII 类法规要求，在经济性和排放指标上占有优势。

3.2 排气阀开启/关闭角度对柴油机性能的影响

用 AVL-boost 模型可以仿真不同排气阀开启/关闭角度下的柴油机性能；分析排气阀开启关闭角度对柴油机性能的影响；结合试验结果对排气阀开启关闭角度进行优化。

分析柴油机在不同排气阀开启/关闭角度下机械负荷、经济性和排放性能的变化趋势，选取最高燃烧压力(p_z)、燃油消耗率(g_e)和 NO_x 排放这三个指标作为主要评价指标。以柴油机 100% 负荷工况为例，设计三组仿真试验，研究不同排气阀开启/关闭角度对柴油机性能的影响。仿真试验方案分别见表 6 ~ 8；最高燃烧压力、燃油消耗率 NO_x 排放等性能指标的仿真结果分组对比分别见图 3、图 4 和图 5。

表 6 排气阀开启角度变化

单位: °CA		
试验号	排气阀开启角度	排气阀关闭角度
1	117.6	259.3
2	118.6	259.3
3	119.6	259.3
4	120.6	259.3
5	121.6	259.3

表 7 排气阀关闭角度变化

单位: °CA		
试验号	排气阀开启角度	排气阀关闭角度
6	119.6	257.3
7	119.6	258.3
8	119.6	259.3
9	119.6	260.3
10	119.6	261.3

表 8 排气阀开启/关闭角度等值变化

单位: °CA		
试验号	排气阀开启角度	排气阀关闭角度
11	115.6	256.3
12	116.6	257.3
13	117.6	258.3
14	118.6	259.3
15	119.6	260.3
16	120.6	261.3
17	121.6	262.3
18	122.6	263.3
19	123.6	264.3

(1) 排气阀开启角度变化的仿真结果分析。以 100% 负荷 ECU 设定的排气阀开启角度为准，按前后间隔 1 °CA 模拟计算 5 种方案，实验仿真计算结果如图 3 所示。

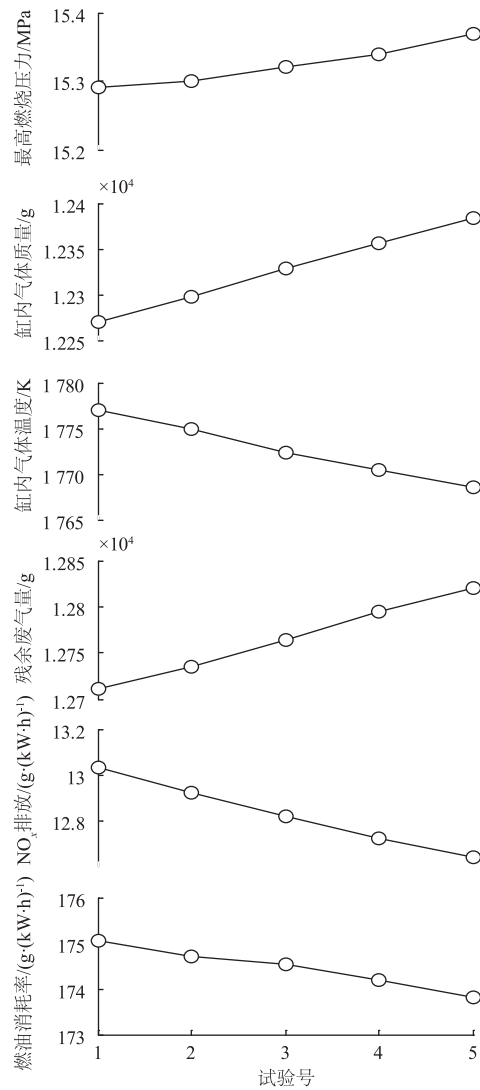


图 3 排气阀开启角度变化仿真结果对比

随着排气阀开启角度的延迟，最高燃烧压力增加，燃油消耗率和 NO_x 排放降低。当进气压力和燃油系统相关参数如喷油量、喷油始角、喷油持续期等条件保持不变，而排气阀开启角度延迟，气缸内气体膨胀做功增加，燃油消耗率减少；同时排气持续期减少，导致排出的缸内气体减少，缸内气体总量(含废气量)增加，缸内气体温度下降，使得 NO_x 排放减少；气缸内气体质量增加，缸内气体压缩终点压力增加，导致缸内最高燃烧压力增加。1 号、2 号试验仿真结果中燃油消耗率和 NO_x 排放指标较高；4 号、5 号试验中最高燃烧压力较大。3 号试验采用的是 ECU 设定排气阀开启关闭角度，最高燃烧压力、燃油消耗率和 NO_x 排放仿真结果适中。

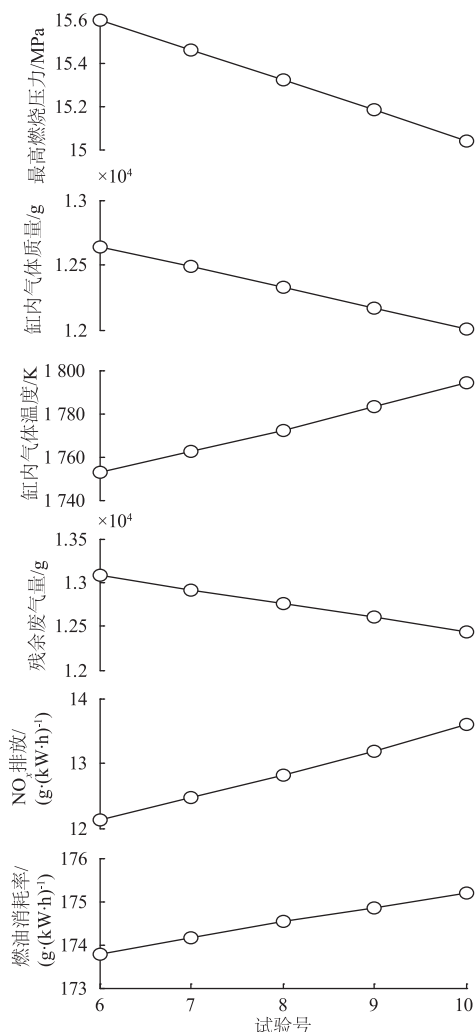


图 4 排气阀关闭角度变化仿真结果对比

(2) 排气阀关闭角度变化的仿真结果分析。以 100% 负荷 ECU 设定的排气阀关闭角度为准, 按前后间隔 1°CA 模拟计算 5 种方案, 仿真计算结果如图 4 所示。气阀关闭角度延迟, 排气时间增加, 缸内气体总量(含残余废气量)减少, 缸内气体压缩终点的压力降低, 导致缸内最高燃烧压力降低; 缸内气量总量减少, 缸内燃烧温度增加, 使得 NO_x 排放增加; 由于缸内压力降低, 气缸内气体所做有效功减少, 喷油量一定的条件下, 燃油消耗率增加。8 号试验采用的是 ECU 设定排气阀开启关闭角度, 最高燃烧压力、燃油消耗率和 NO_x 排放仿真结果适中。

(3) 排气阀开启/关闭角度等值变化的仿真结果分析。以 100% 负荷 ECU 设定的排气阀开启/关闭角度为准, 等值移动排气阀开启关闭角度, 按前后间隔 1°CA 模拟计算 9 种方案, 仿真计算结果如图 5 所示。随着排气阀升程曲线相位的增加, 最高燃烧压力减少, NO_x 排放指标增加, 燃油消耗率变化呈现先减少后上升趋势。15 号试验采用的是 ECU 设定排气阀开启关闭角度; 14 号试验仿真结

果中燃油消耗率最低, 相对于 15 号试验仿真结果其 NO_x 排放较低, 但最高燃烧压力较大。

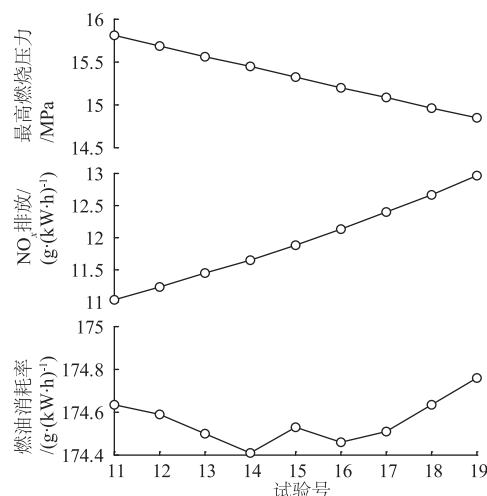


图 5 排气阀开关闭角度等值变化对性能的影响

3.3 排气阀开启/关闭角度的优化

优化柴油机排气阀开启/关闭角度, 需要比较不同排气阀开启/关闭角度下柴油机燃油经济性、排放性能和机械负荷。以 100% 负荷工况为例, 以 2°CA 为步长改变排气阀开启关闭角度仿真柴油机各性能参数, 不同排气阀开启/关闭角度的燃油消耗率、最高燃烧压力和 NO_x 排放分别如图 6、图 7 和图 8 所示。

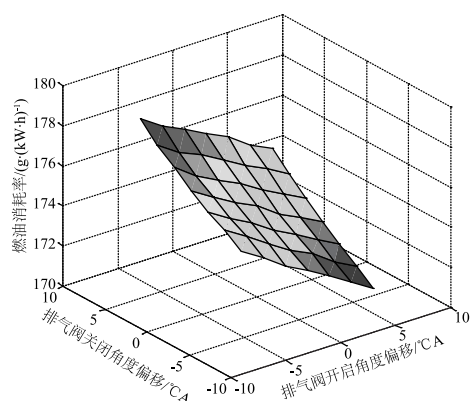


图 6 不同排气阀开启/关闭角度燃油消耗

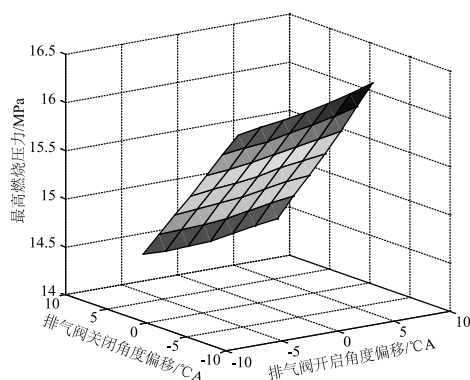


图 7 不同排气阀开启/关闭角度爆发压力

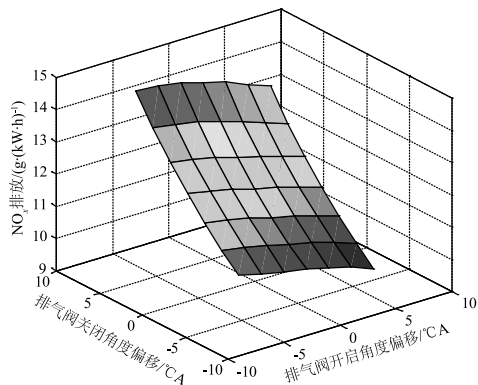


图 8 不同排气阀开启/关闭角度 NO_x 排放

以 ECU 设定排气阀开启/关闭角度下柴油机燃油消耗率、最高燃烧压力和 NO_x 排放数据为参考值，其他排气阀开启、关闭角度下的仿真结果中没有发现上述三个性能指标均低于参考值的样本，即在不提高柴油机机械负荷的条件下，ECU 在 100% 负荷工况设定的排气阀开启关闭角度值是最优值。

其他工况下改变排气阀开启/关闭角度仿真结果类似，即 ECU 设定的排气阀开启关闭角度在满足 NO_x 排放的条件下获得较高的经济性，由于篇幅所限，仅给出优化后各工况排气阀开启/关闭角度，如表 9；优化前后的柴油机性能对比如图 9 所示，NO_x 排放对比如表 10 所示，优化后 NO_x 排放加权平均值降低了 3.62%。

表 9 优化的排气阀开启/关闭角度

负荷	25%	50%	75%	100%
原机 VEO/°CA	123.2	121.4	121.2	119.6
优化 VEO/°CA	127.2	123.4	123.2	119.6
原机 VEC/°CA	229.6	248.4	259.5	259.3
优化 VEC/°CA	227.6	248.4	257.5	259.3

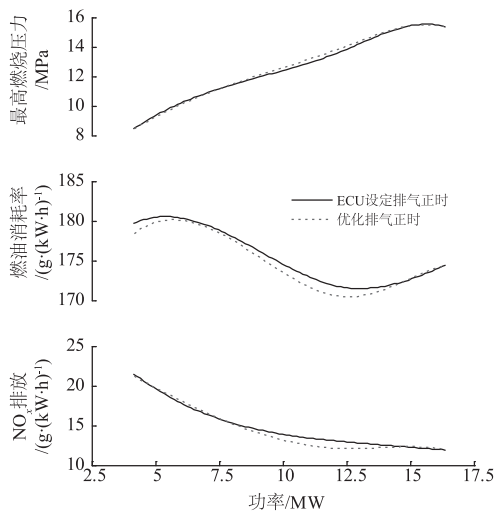


图 9 排气阀开启/关闭角度优化前后的性能对比

表 10 排气阀开启/关闭角度优化前后的 NO_x 排放对比

负荷	25%	50%	75%	100%	加权平均值 (g·(kW·h) ⁻¹)
原机值/ (g·(kW·h) ⁻¹)	21.52	15.11	12.96	11.87	14.35
优化值/ (g·(kW·h) ⁻¹)	21.20	14.95	12.07	11.87	13.83

综上所述，优化排气阀开启/关闭角度后，柴油机燃油消耗率和 NO_x 排放均有所降低，且最高燃烧压力在气缸能承受的压力范围内。

4 结 论

- (1) 建立了 AVL-boost 工作过程模型，经试验验证可较准确仿真智能化柴油机主要性能参数；
- (2) 智能化柴油机通过 ECU 对排气阀开启/关闭进行柔性控制，优化了柴油机在不同工况下的排气阀开启/关闭角度值；
- (3) 智能化柴油机工作过程仿真计算结果表明：首先应满足柴油机机械负荷和排放法规要求，然后以燃油消耗率为优化目标。

参考文献

[1] Kytölä. Success of Wartsila and Sulzer common rail engine [J]. Marine News, 2004 (2):27.

[2] MAN Diesel & Turbo. ME engines—the new generation of diesel engines [OL]. <http://www.mandiesel.com/files/news/files0f2810/p412-0503.pdf>. 2006-9-2.

[3] 王希珍,李莉,严兆大,等. 基于仿真基础上的电磁控制全可变气门系统优越性的分析[J]. 内燃机工程, 2004,25(1):31-34.

[4] 张纪鹏,姜慧,张洪信,等. 发动机排气门电液驱动可变配气相位机构的设计[J]. 内燃机工程, 2008,29(2):34-47.

[5] 李莉,王希珍,严兆大,等. 电磁驱动气门机构系统模型[J]. 内燃机工程, 2004, 25(4):11-14.

[6] 刘永长. 内燃机工作过程模拟[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1996.

[7] AVL. BOOST USER GUIDE[R] 2008. 1:2-19.

[8] Shu Chang, Jianguo Yang. HIL simulation system of intelligent marine diesel engine based on hybrid software development model[C]. OEMT 2009, 12:648-652.

[9] 王勤鹏,汤旭晶,王征,等. 基于 cRIO 控制器的高压共轨柴油机 ECU 硬件在环仿真系统设计[J]. 船舶工程, 2009,31(5):13-16.

[10] 杨建国,舒畅,王勤鹏. 船用智能化柴油机排气阀硬件在环仿真试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2012, 33(2):174-179.

[11] International maritime organization. Marine environment protection committee 57th session Agenda item 4 [S]. 2008-4-3,4:19.