

智能化与控制

船用单体泵柴油机控制系统 HiL 测试与试验验证

吴庆林, 张 鹏, 李鹏豪, 王文成

(重庆红江机械有限责任公司, 重庆 永川 402162)

摘 要: 以某型电控单体泵柴油机控制系统为例, 采用船用柴油机专用的 HiL(硬件在环)系统测试同步信号、转速闭环、排温修正策略及极限工况。测试结果显示: 冷起动时间 2.4 s; 额定工况稳态转速波动率 0.31%; 突加突减负荷时瞬时调速率小于 5%, 稳定时间小于 4 s; 各缸排温不平均率维持在 5% 左右。HiL 系统优化后的控制策略在实际配机试验时的应用效果良好, 冷起动时间 3.6 s; 额定工况稳态转速波动率 0.67%; 负荷突变时瞬时调速率为 2.67%, 稳定时间为 4.9 s, 各缸排温不平均率为 7.9%。验证结果表明: 主要评价指标均满足柴油机整机性能对控制的需求; HiL 测试有效提高了控制策略的稳定性和实际配机效率。

关键词: 船用柴油机; 电控单体泵; 闭环测试; HiL 系统

中图分类号: TK424.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)06-0006-05

HiL Test and Experimental Validation of the Control System of a Marine Diesel Engine with Electronic Unit Pump

Wu Qinglin, Zhang Peng, Li Penghao, Wang Wencheng

(Chongqing Hongjiang Machinery Co., Ltd., Chongqing Yongchuan 402162)

Abstract: The control system for a certain type of diesel engine with electronic unit pump is taken as an example to test synchronizing signals, engine speed feedback, exhaust temperature modified strategy and limiting working condition by marine diesel engine appropriate HiL (Hardware-in-the-Loop) system. The test results show that the cold start of the diesel engine need 2.4 s; under the rating working condition, the speed fluctuation of steady state is as low as 0.31%; the speed governing rate is less than 5% with sudden load increasing or reduction, and the the time needed for getting back to stable condition is less than 4s; the exhaust temperature difference ratio of each cylinders is around 5%. The engine matching test of the control strategy with HiL system boasts good application results; the cold start of the diesel engine need 3.6 s; under the rating working condition, the speed fluctuation of steady state is 0.67%; the speed governing rate is 2.67% with sudden load increasing or reduction, and the the time needed for getting back to stable condition is 4.9 s; the exhaust temperature difference ratio of each cylinders is 7.9%. The verification results show that the main evaluation indexes could meet with the requirement of the whole engine performance, and the HiL system could effectively improve the stability of control strategy and efficiency of engine matching.

Key words: marine diesel engine; electronic unit pump; closed-loop test; HiL system

收稿日期: 2017-09-18; 修回日期: 2018-04-19

基金项目: 工信部“高技术船舶科研计划-船用低速机工程(一期)”研制经费资助。

作者简介: 吴庆林(1985-), 女, 工程师, 主要研究方向为柴油机控制系统集成测试, wutsingrin570@126.com。

0 引言

2018 年 7 月中国内河航运排放标准正式实施^[1]，各船舶主机厂将迎来一次技术革新，采用清洁燃料，如天然气；以及动力系统升级换代，如由传统机械式升级为电控单体泵和电控共轨系统是未来内河主机发展的两大主要方向。目前，电控系统 HiL，即硬件在环测试系统在集成测试过程中得到广泛应用^[2]。本文利用船机专用 HiL 系统对电控单体泵柴油机控制系统进行闭环测试，以提高控制系统可靠性，减少故障率；通过极限工况的模拟测试提高台架试验的安全性，减少实际配机试验的周期和成本。

HiL 测试包括：转速信号同步、起动控制、稳态转速控制、排温修正控制、超速及负荷突变等极限工况测试。在测试中不断改进优化控制算法，获得良好的控制性能，满足柴油机评价标准要求。然后在配机试验中充分验证该机型控制系统的起动、稳态特性、负荷突变、排温一致性等控制策略的可靠性、稳定性和可执行性。

1 测试环境

本文根据船用柴油机控制系统设计和配机的需求，主要完成控制系统测试的中间环节：系统集成闭环测试。测试环境包括：机型参数、目标机型 HiL 模型和测试软硬件平台。

1.1 目标机型

船用柴油机主要用于船舶推进、发电和并机。本文以某型电控单体泵柴油机为目标机型，其主要参数如表 1 所示。该机型由机械调速器式改进设计而来，用于船舶推进。通过电控系统的精确控制，在保证原动力输出不变的同时，降低油耗和排放。

表 1 目标机型主要参数

发动机型式	直列六缸、四冲程、水冷、增压、空对空中冷
(缸径×行程)/(mm×mm)	210×250
排量/L	86.72
压缩比	14.5:1
着火顺序	1-3-5-6-4-2
供油方式	电控单体泵
怠速(额定转速)/(r·min ⁻¹)	400(1 000)
额定功率/kW	1 000
额定扭矩/(N·m)	9 549

1.2 HiL 模型

HiL 柴油机模型的建立是一个复杂的过程^[3]，

与车用机相比，船机控制系统功能较单一：动力输出和安保。因此，本文根据能量守恒及实时处理器时间步长的限制，采用实时计算常用的经过处理后的平均值模型^[4-5]，利用大量标定试验数据 MAP 增加模型的精度。目标机型的模型结构如图 1 所示。

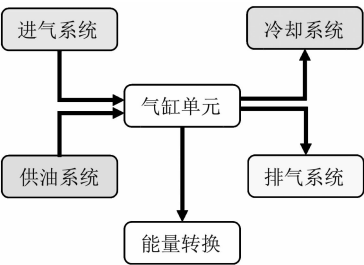


图 1 实时模型结构

1.3 基于 Veristand 的硬件在环系统

硬件在环测试技术在汽车行业相当成熟，如 dSpace、LabCar 及 ADRTS 等应用非常广泛^[6]。船机因其型号多变，批量小的特点，不能像车用机一样一个型号对应一套 HiL。本文以 NI 开放的软硬件平台为支撑，搭载高速实时处理器和数据采集板卡，使用 NI VeriStand 软件设计人机交互界面，实现该船用柴油机闭环测试系统。图 2 为 HiL 测试系统组成。



图 2 HiL 测试系统

1.4 曲轴凸轮信号同步

发动机控制的前提是信号同步，只有发动机运行的物理信号与喷油计算的电信号相互统一才能实现 ECU 控制的执行。完成信号同步工作的介质是曲轴和凸轮轴传感器。因此模拟发动机运行的首要任务就是模拟出正确的曲轴和凸轮轴信号。本文基于 NI LabView 设计了波表生成器软件，可以模拟任何类型的曲轴和凸轮轴信号，可满足船机曲轴和凸轮轴信号多变、特殊及异形的需求。

目前，曲轴和凸轮轴信号采集用传感器有两种类型：磁电式和霍尔式，采集的信号形式分别为正弦波和方波。目标机型的曲轴和凸轮轴信号分别为霍尔式 206 齿无缺齿和霍尔式 48 齿 2 缺齿。用自

行设计的波表生成器得到的曲轴和凸轮轴信号如图3所示。

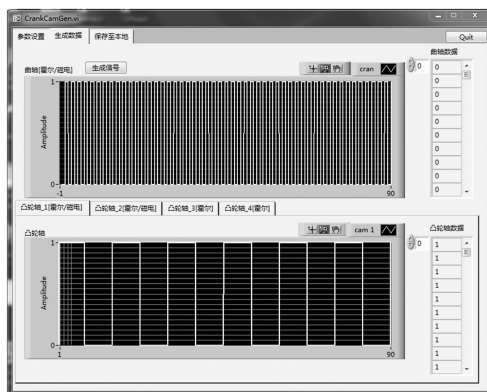


图3 目标机型波表信号

2 HiL 测试

闭环测试主要完成控制策略的验证、调试和优化,在控制与反馈共同作用下使系统达到性能最优。根据 GB/T 3475-2008 船用柴油机调速系统技术要求和试验方法规定的评价标准(如表2),在测试中根据控制效果修改转速分段 PID 参数,不断优化控制策略,直到各项指标达到要求。各缸排气温度要求:从起动到额定工况,其不均匀率应小于8%。

表2 发动机控制主要评价指标

指标内容	评价特性	评价标准
稳态转速波动率 α	稳态特性	动力: $\leq 1.5\%$
突变负荷, 瞬态调速率 δ_d	动态特性	动力: $\leq 15\%$
突变负荷, 转速稳定时间 γ	动态特性	动力: $\leq 8\text{ s}$
排温不均匀率 ε	稳态特性	动力: $\leq \pm 8\%$

稳态转速波动率:

$$\alpha = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{2n_T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $n_{\max}$ 为测得的最高转速, ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); $n_{\min}$ 为测得的最低转速, ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); n_T 为当前目标转速, ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。

突加负荷:

$$\delta_d = \frac{n_r - n_{\min}}{n_r} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $n_{\min}$ 为突加负荷最低瞬时转速, ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); n_r 为额定转速, ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。

突减负荷:

$$\delta_d = \frac{n_{\max} - n_r}{n_r} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $n_{\max}$ 为突卸负荷最高瞬时转速, ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。

排气温度不均匀率:

$$\varepsilon = (T_i - T_m) / T_m \times 100\% \quad (4)$$

式中: T_i 为当前各缸最高排温 $T_{\max}$ 或当前最低排温 $T_{\min}$, 为便于对比, 本文统一用最高排温 $T_{\max}$ 计算不均匀率; T_m 为当前平均排温。

2.1 起动过程

船机在起动、倒拖过程中会消耗大量能量,在保证起动成功率的情况下,如何快速稳定的起动是柴油机起动控制须要解决的主要问题^[7]。起动过程控制采用经典的开闭环相结合的方式:开环提速-闭环稳定。HiL 测试用模拟起动电机倒拖发动机至怠速转速后立即进入闭环调节模式。目标转速 $400 (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$, 最大超调转速 $421 (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$, 启动时间 2.4 s 。起动过程转速变化如图4所示。

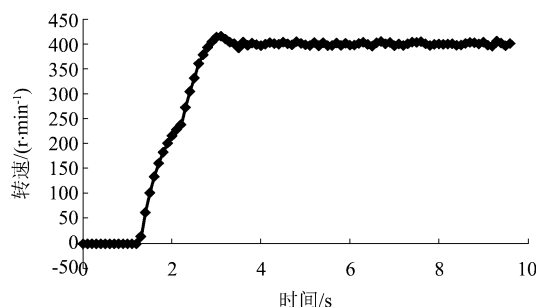


图4 起动过程转速变化

2.2 额定稳态

船用柴油机动力推进系统多数时间运行在额定工况,因此额定工况的稳态特性是评价柴油机整体性能的重要指标。首次测试稳态调速率高达6.45%,调整 HiL 模型及控制算法参数使稳态调速率达到4.43%,继续优化后稳态调速率可达0.31%,转速稳定性明显提高,如图5所示。

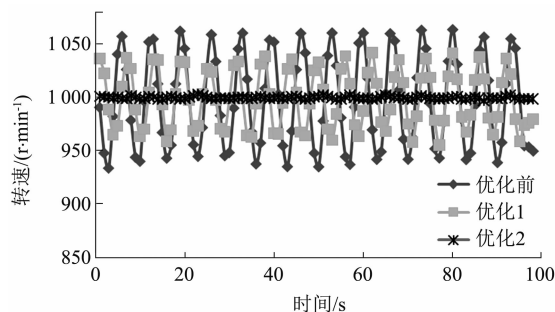


图5 稳态转速优化对比

2.3 排温修正

各缸排气温度作为反应柴油机缸内做功的重要性征参数,用来衡量柴油机运行状态是否良好。本文采用排温分步进阶修正策略^[8]来调节排温一致性,算法如图6所示。各缸温度同一时刻最大值与

最小值之差在 15 ℃ 以上的开启微调模式。算法中获取柴油机一些基本参数如喷油提前角、进气压力、外部负载，以判定排温差异的主要影响因素，并作为排温微调的补偿；差值在 40 ℃ 以上时进入粗调模式。排温粗调的主要作用是在气缸排温太高或者太低情况下，快速调节喷油量，使排温回到微调范围。

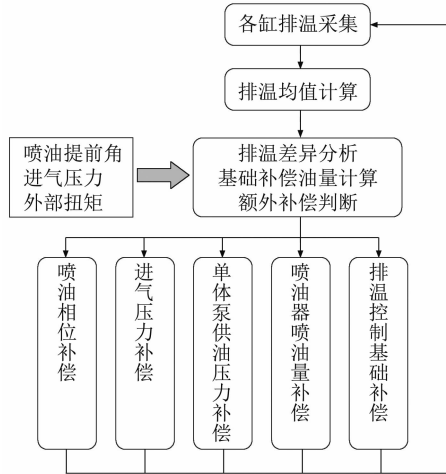


图 6 排温修正算法框图

图 7 所示为在排温控制算法作用下，目标柴油机 6 个缸的排气温度从冷机起动到额定工况稳定运行的变化趋势。在 Veristand 上修改排温控制参数，通过观测窗口可以看到整个控制算法的计算过程及调节量的输出。通过 HiL 测试使排温算法控制精度和效率得到提高。额定工况下各缸排温最高 371.2 ℃，最低 341.7 ℃，最大温差 29.5 ℃，不均匀率 4.4%。

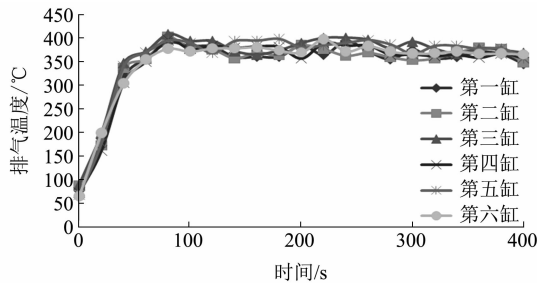


图 7 优化算法后各缸排温

2.4 极限工况

2.4.1 超速

柴油机飞车是非常危险的，与调速器式柴油机相比，电控柴油机飞车控制难度更大，超速保护功能必须可靠，反应迅速。如在额定工况超过限定转速时必须立即将转速降到安全范围内，以保护柴油机；又如在起动后柴油机转速不可控地升到限定转

速必须立即断油停机，以保证操作人员的安全。在 HiL 调试时将柴油机转速从额定转速标定为停机转速 1 200 ($r \cdot \min^{-1}$)，转速从 1 208 ($r \cdot \min^{-1}$) 降为 0 的时间为 2.9 s，如图 8 所示。

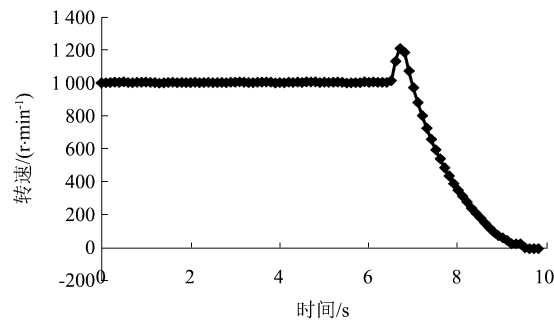


图 8 超速停机转速变化

2.4.2 负荷突变

风浪模式下船机推进系统螺旋桨有时会浮出水面，造成负载忽大忽小，因此船机要求负载突加突减时转速要能稳定住，稳定时间在 5 s 以内。图 9 所示为额定转速、突变负荷时转速的变化。表 3 示出 0% ~ 50%、50% ~ 75%、75% ~ 100%、100% ~ 0% 负荷变化对应的发动机转速变化。突加负荷时最低转速降至 952.5 ($r \cdot \min^{-1}$)，瞬时速率为 4.75%，稳定时间 3.08 s。代表突减负荷情况的是负荷抛甩，即在额定转速下将额定负荷从 100% 减为 0%。负荷抛甩时最高转速升至 1 040.3 ($r \cdot \min^{-1}$)，瞬时速率为 4.03%，稳定时间 3.15 s。

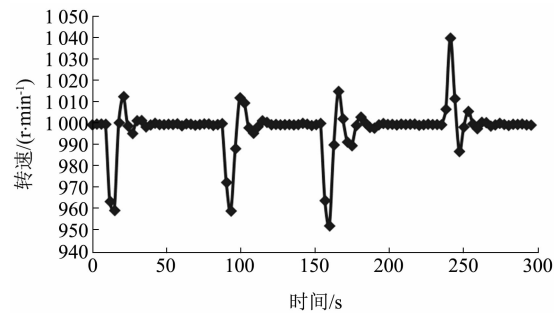


图 9 负荷突变对应的转速变化

表 3 负荷变化对转速的影响

负荷	瞬态调速率	稳定时间/s
0% ~ 50%	5%	4.04
50% ~ 75%	4.4%	4.78
75% ~ 100%	4.8%	4.89
100% ~ 0%	4.03%	3.15

3 试验验证

3.1 起动

为了保证柴油机一次起动成功并减少起动机倒拖时间,试验中采用大油量的起动方法。转速到达怠速转速后立即进入怠速闭环控制,小油量稳定在怠速。试验中起动最高转速 $452\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$,起动时间 3.6 s ,起动转速变化如图10所示。

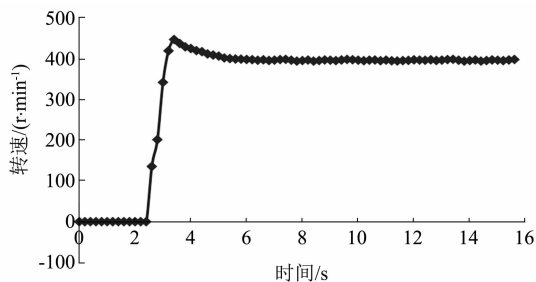


图10 起动试验

3.2 稳态调速

瞬态调速率的评价要求一个测试循环不低于 1 min 。在额定工况下做了10个测试循环,在没有外部干扰的情况下,测得最高转速 $1\,005.6\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$,最低转速 $992.2\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$,见图11。稳态调速率为 0.67% ,满足船用动力柴油机瞬态评价指标要求。

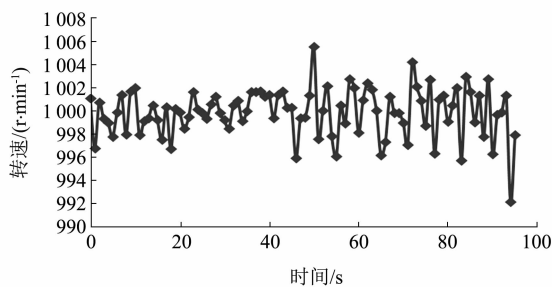


图11 稳态试验

3.3 排温修正

排温修正算法在柴油机试验中执行效果一般,经过多次调整修正MAP,基本达到评价指标的要求,最高不均匀度为 7.9% ,6个缸的排温如图12所示。额定稳态运行时,第三缸排温高于其余各缸,一段时间后各缸排温才趋于一致,说明温差较大时排温调节有一定延迟;第三缸单体泵供油量相比其他缸的供油量相对较大,排温算法持续反馈才将温度调节至正常。该排温控制算法在此次试验之后还须做进一步调整和测试,优化响应时间;对于机械部件本身特性不均匀性的识别与处理将是后续算法改进的方向。

3.4 负荷突卸

配机试验的试验台架为水力测功机,无法做到

快速、精确地加载扭矩,因此在试验过程中仅验证了额定工况下突卸 100% 负荷转速的变化。图13反映负荷抛甩过程转速变化情况。试验过程中由于测功机的负载比模型模拟的负载稳定,转动惯量的非线性变化在负荷突变时抑制转速变化的作用明显,因此实际试验中负荷抛甩的瞬时调速效果比HiL测试效果要好。最高转速升至 $1\,026.7\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$,瞬时调速率为 2.67% ,稳定时间 4.9 s 。

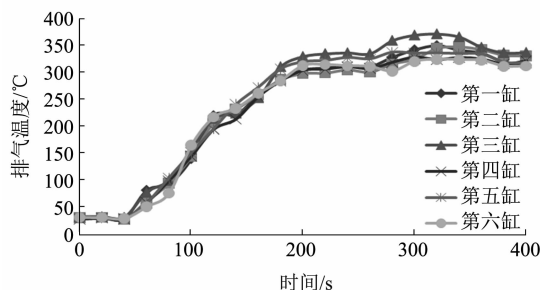


图12 试验排温曲线

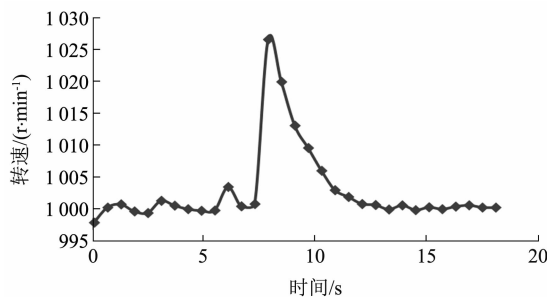


图13 100%负荷抛甩试验

4 结 论

在船用HiL上完成了单体泵柴油机控制系统测试并进行了实机配机试验,结论如下:

(1) 控制系统HiL测试是电控系统开发必不可少的环节,船机的HiL系统应向配置灵活、自主设计的发展方向。

(2) HiL测试优化了该控制系统的稳态特性,最优稳态转速波动率为 0.31% ,试验测得稳态转速波动率为 0.67% 。排温修正算法可将额定工况下各缸排温不平均率控制在 8% ,但是控制效果没有达到预期。

(3) HiL测试优化了该控制系统的瞬时特性,利用稳定的转速控制算法,负荷突变瞬时调速率和转速稳定时间分别可达 4.03% 和 3.15 s ;试验中则获得了更好的控制效果,其值分别为 2.67% 和 4.9 s 。

(下转第22页)

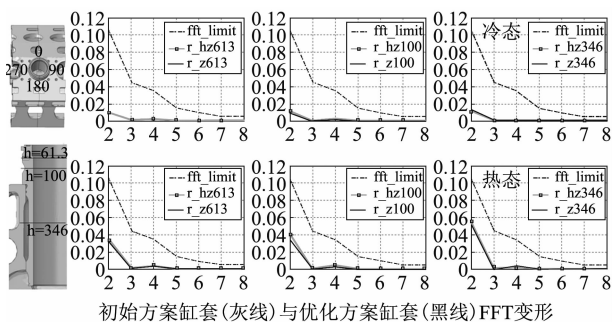


图 8 变形情况对比

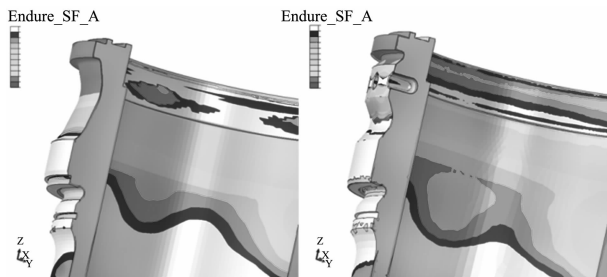


图 9 疲劳安全系数

4.3 气缸套温度场优化效果

通过油气室匹配,并经冷却优化后,气缸套第一道活塞环上止点处温度比初始方案下降了 11.5%;优化方案与初始方案气缸套内孔变形趋势相似,且变形满足活塞环顺应性要求;优化方案气缸套疲劳安全系数满足设计要求。

5 试验验证

对优化方案开展了性能和温度场试验验证。试验结果表明:柴油机油耗、排放等性能指标满足设计要求,同时气缸套温度场有了明显改善。优化后气缸套温度场测试结果显示:第一道活塞环上止点处平均温度下降了 13%,大大降低了因润滑油结焦导致拉缸的风险。

6 结 论

(1) 油气室匹配与气缸套钻孔冷却优化设计方案对降低气缸套第一道活塞环上止点处温度,提高其可靠性作用明显。

(2) 小喷孔夹角方案有利于降低气缸套壁面散热量,但是活塞壁面的散热量会略有增加。

(3) 冷却优化后的气缸套温度场分布有明显改善,有利于提高气缸套-活塞环摩擦副的可靠性。

参考文献

- [1] 王希珍,严兆大,周军. 柴油机缸套热负荷评估的分析及实验研究方法 [J]. 内燃机工程, 2001 (4): 62-65.
- [2] 骆清国,冯建涛,刘红彬,等. 大功率柴油机缸内传热与热负荷分析研究 [J]. 内燃机工程, 2010 (12): 32-37.
- [3] 曹海波,杨世春,张良. 柴油机喷雾夹角对缸内三维流动的影响 [J]. 内燃机与动力装置, 2012 (1): 22-25.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法 (中国第一、二阶段): GB 15097-2016 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [5] 曹云鹏. 双燃料发动机 ECU 硬件在环仿真系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [6] 于世涛,周兴利,杨晓峰,等. 基于扭矩控制的电控单体泵柴油机仿真模型的研究 [J]. 内燃机工程, 2006, 27 (2): 29-32.
- [7] MALKHEDE D N, SETH B, DHARIWAL H C. Mean value model and control of a marine turbocharged diesel engine [C]. SAE, 2005-01-3889.
- [8] WURZENBERGER J C, HEINZLE R, DEREGNAU COURT M V, et al. A comprehensive study on different system level engine simulation models [C]. SAE, 2013-01-1116.
- [9] 郭凯. 基于 Veristand 的发动机硬件在环测试系统研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [10] 韩晓梅,林学东,李德刚,等. 基于目标起动转速变化规律的起动过程瞬态喷油量控制策略研究 [J]. 内燃机工程, 2015-09-09 (网络版).
- [11] 王文成,杜兵,张鹏,等. 柴油机排温自动修正算法的研究 [J]. 柴油机, 2017, 39 (2): 28-32.

(上接第 10 页)