

上海市船舶与海洋工程学会 2018 年学术年会轮机专场论文专栏

船用机械燃油系统升级为电控系统的 喷射特性及可行性研究

王昌庆, 黄立, 浦卫华, 郭立君, 李晓声, 刘广才

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 针对旧机改造的潜在市场应用需求, 开展船用机械单体泵燃油系统电控化升级的可行性研究。在已标定的机械式燃油系统仿真模型基础上, 搭建电控单体泵系统仿真模型并确定电磁阀结构参数, 分析电控单体泵系统的喷射稳定性、喷油持续期、喷油率等喷射性能参数及工作范围。分析表明: 在满足燃油系统配机需求的情况下, 升级后的电控单体泵系统供油正时可覆盖原机械单体泵系统的供油正时; 在运行区域内的 23 个工况点中, 电控单体泵系统在 15 个工况点中的循环油量比原机械系统更稳定。在测试的 12 个电磁阀中筛选出 8 套电磁阀, 测试得到: 其各工况点的控制脉宽最大差异在 3 000 μs 内, 均在 ECU 控制参数修正范围内。表明: 该方法具有将原机机械式燃油系统升级为电控燃油系统的可行性。

关键词: 船用柴油机; 燃油系统; 电控单体泵; 电磁阀

中图分类号: TK423.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)02-0020-06

Study on Injection Characteristics and Feasibility of Upgrading Marine Mechanical Fuel System to Electrical Control System

Wang Changqing, Huang Li, Pu Weihua, Guo Lijun, Li Xiaosheng, Liu Guangcai

(Shanghai Marine Diesel Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: In view of the potential market of retrofitting of old marine diesel engines, the feasibility study of upgrading marine mechanical unit pump fuel systems to electrical control systems was carried out. Based on the calibrated mechanical fuel system simulation model, an electronic-controlled unit pump (EUP) system simulation model was established and the solenoid valve parameters were determined. The injection performance characters, such as injection stability, injection duration, and injection rate, as well as the operating range were analyzed. It shows that with the premise of meeting the matching demand of fuel system, the operating area of EUP systems can cover that of mechanical unit pumps. Among the 23 operating points in the operating area, the fuel injection of the EUP system in the 15 operating points is more stable than the original mechanical system. The 12 solenoid valves were tested and 8 sets of solenoid valves were selected. The maximum difference of control pulse width of each valve at each operating point in the test was within 3 000 μs , which was within the correction range of ECU control parameters. It means this method has the feasibility of upgrading the original mechanical fuel system to the electric control fuel system.

Key words: marine diesel engine; fuel system; EUP; solenoid valve

收稿日期: 2018-10-08

作者简介: 王昌庆(1991-), 男, 在读硕士, 主要研究方向为柴油机燃料供给与调节, wgchgq@126.com。

0 引言

大功率柴油机具有热效率高、功率范围宽、使用寿命长等优点,被广泛用作船舶动力装置。目前,全球对船用柴油机的排放要求越来越严格,国际海事组织(IMO)排放法规对船用柴油机 NO_x 排放要求^[1]如图1所示。如此,一些早年生产的旧型船用柴油机可能会因排放不达标而无法继续使用。

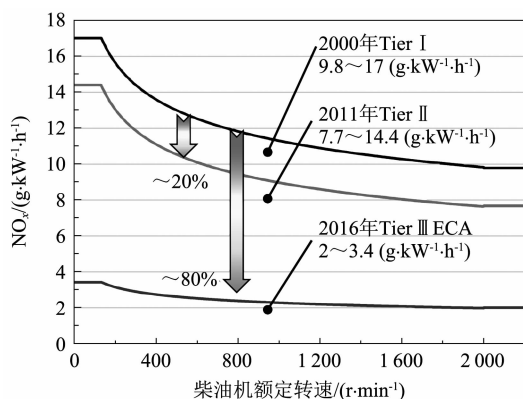


图1 IMO对 NO_x 排放的规定

为使船用柴油机满足日益严苛的排放要求,同时降低油耗,高压共轨燃油喷射系统在船舶柴油机上得到应用^[2,3]。但由于高压共轨燃油喷射系统的使用及维护成本比较高,船东更希望选择工作可靠、成本较低、具有人机交互功能的柴油机燃油系统。而电控单体泵燃油喷射系统也可以实现喷油量及喷油定时的控制^[4],因此逐渐替代机械式供油系统。

针对旧机改造的潜在市场应用需求,进行了某型船用机械式泵管嘴燃油系统升级为电控燃油系统的可行性研究。本文主要工作是针对某柴油机机械式燃油系统开展电控系统升级的仿真研究;并测试升级后电控燃油系统的运行区域及喷射特性;对升级使用的电磁阀进行了一致性测试。

1 机械单体泵电控化升级方案

1.1 系统改造

对机械式燃油系统的改造如图2所示。在原有机械系统基础上,在高压油泵出口安装两位三通电磁阀,两位三通电磁阀高压油出口接高压油管;通过外部ECU来驱动和控制电磁阀。该系统的改造技术具有易用性、通用性的特点。

1.2 电控单体泵系统工作特性

由机械式泵管嘴燃油系统升级后的电控单体泵燃油系统具有供油量及供油正时柔性可调的能力。

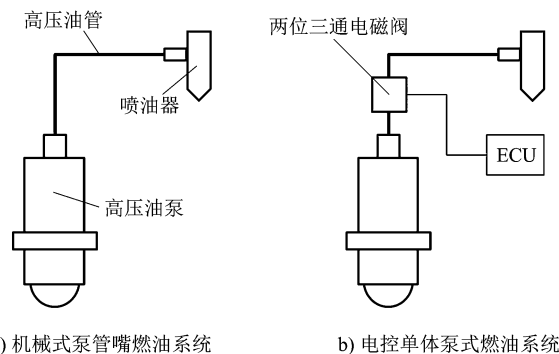


图2 系统改造示意图

1.2.1 供油量控制

原机械式燃油系统添加两位三通电磁阀后其供油量控制原理如图3所示。高压油泵齿条固定于最大供油位置,柱塞仅保留加压功能;电控系统根据油量需求,由外部驱动器控制电磁阀通断电时间间隔,从而对单次循环供油量进行控制。

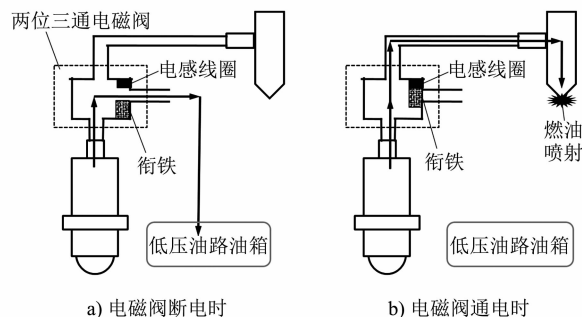


图3 电控单体泵系统供油量控制原理

1.2.2 供油正时控制

电控单体泵系统供油正时控制原理如图4所示。外部驱动器根据飞轮传感器信号确定凸轮 0° 位置,根据凸轮转速及不同凸轮正时要求确定电磁阀加电正时,从而对单次循环供油正时进行控制。图4中预先固定转角 Φ_0 。为飞轮位置信号触发点与凸轮上升段间人为设定的转角。

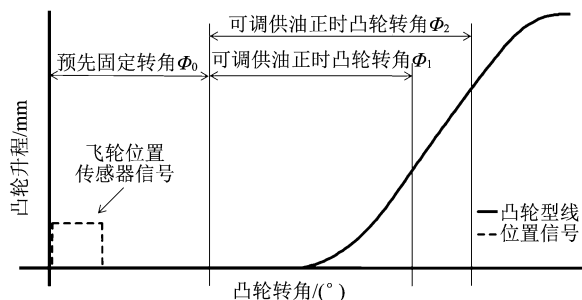


图4 电控单体泵供油正时控制原理

2 仿真分析

2.1 机械式燃油系统模型标定

AMESim 软件被广泛应用于柴油机燃油系统的建模及仿真计算^[5-6]。建立原机械式燃油系统 AMESim 模型如图 5 所示。模型标定点为某型柴油机额定工况点, 凸轮转速 $500 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$, 循环油量 $1\,537 \text{ mg}$, 燃油密度 $830 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 。

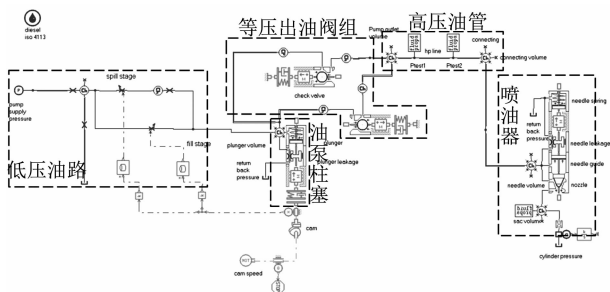


图5 机械式燃油系统的 AMESim 模型

循环油量和喷油持续期模型计算值与试验测试值的偏差如表 1 所示。可认为该系统模型可用于电控单体泵系统电磁阀的仿真计算。

表 1 模型计算值与试验测试值的偏差

参数名	模型计算值	试验测试值	偏差率 (计算相对于试验)
循环油量/mg	1 532. 62	1 540. 4	-0. 50%
喷油持续期/ms	5. 51	5. 48	0. 55%

2.2 电控单体泵系统模型

建立电控单体泵的模型如图 6 所示。在已标定的机械式燃油系统模型基础上, 取消等压出油阀组, 并将这部分高压容积合并至柱塞腔容积; 电磁阀开关信号以凸轮角度触发。

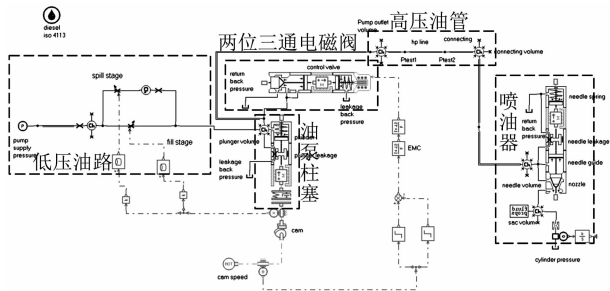


图6 电控单体泵燃油系统的 AMESim 模型

通过对电磁阀结构参数优化, 得到符合电磁阀响应时间的电磁阀关键结构参数。两位三通阀结构示意图如图 7 所示。

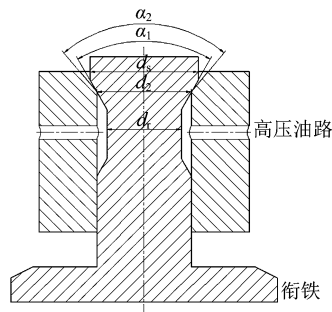


图7 两位三通阀结构示意图

3 平台性能试验

3.1 测试条件

本文采用优化结构参数后的两位三通电磁阀将某型柴油机的机械式燃油系统升级为电控燃油系统; 同时对试验台进行相应调整。改造后的电控燃油系统试验台如图 8 所示。试验台及测试设备如表 2 所示。

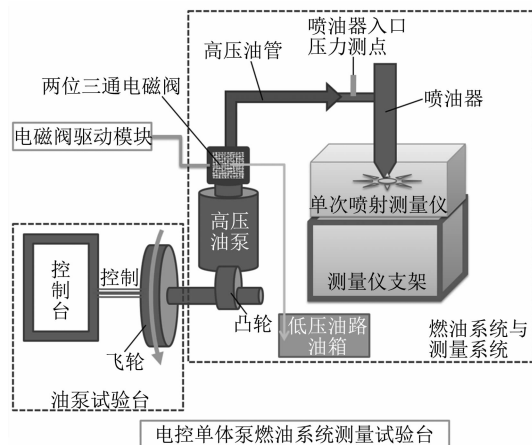


图8 试验台简图

表 2 试验台及测试设备

设备与名称	作用	生产单位
油泵试验台	提供动力、转速	无锡威孚
单次喷射测量仪	测量喷油量、 喷油规律	法国 EFS IFR6000
电磁阀驱动模块	驱动电磁阀	法国 EFS 8246
示波器	采集压力、 电流信号	台湾泰克
压力传感器	测量喷油器 入口压力	Kistler

3.2 测试方案与结果

在试验台上对两种燃油系统按柴油机推进特性 0%、25%、50%、75%、85%、100%、110% 负荷进行测试。并根据燃油系统配机需求, 通过平台

试验设定电控单体泵系统试验时的预先固定转角 $\Phi_0 = 43^\circ$ ，得到可调的供油正时凸轮转角为 16° 、 18° 、 20° 、 22° ；可调的凸轮转角范围为 6° ，转化为以曲轴转角计工作正时范围是 12° 。试验时测试 100 次燃油喷射的参数，测试结果如表 3 所示。表 3 中不可实现的工况有两种：（1）喷射油量不稳定，100 次循环内的最大喷油量与最小喷油量差值较大，如 0% 负荷下凸轮正时 16° 、 18° ；（2）喷射的油量达不到需求，如 100% 负荷下凸轮正时 22° ，110% 负荷下凸轮正时 20° 、 22° 。

表 3 试验结果

负荷	机械单体泵系统	电控单体泵系统			
		正时 16°	正时 18°	正时 20°	正时 22°
0%	✓	×	×	✓	✓
25%	✓	✓	✓	✓	✓
50%	✓	✓	✓	✓	✓
75%	✓	✓	✓	✓	✓
85%	✓	✓	✓	✓	✓
100%	✓	✓	✓	✓	×
110%	✓	✓	✓	×	×

注：✓——表示可以实现的工况；×——表示不可实现的工况

基于表 3 试验结果，为实现某型 8 缸船用柴油机燃油系统升级的目标，共测试了 12 套电磁阀。以凸轮转角 18° 、 20° 为基准，在满足工况要求条件下，测试得到了不同电磁阀的控制参数如图 9 所示。

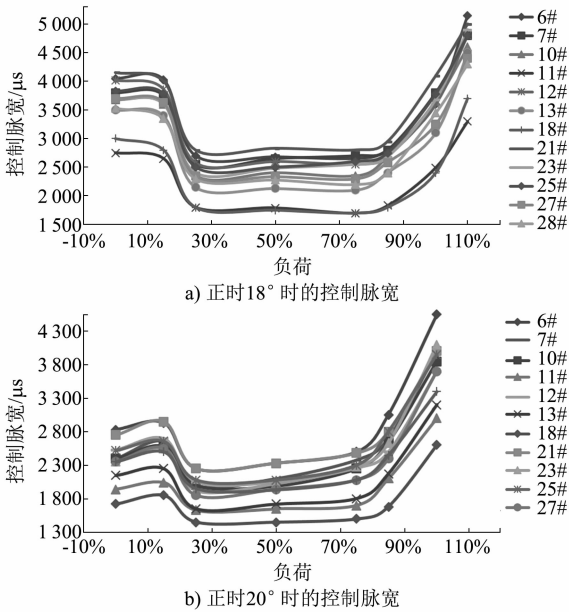


图 9 电磁阀控制参数

3.3 试验数据分析与处理

3.3.1 电控单体泵系统工作范围

将试验结果转化为电控燃油系统工作范围，如图 10 所示。在满足燃油系统配机需求的条件下，升级后的电控单体泵燃油系统在宽广的负荷范围内具有可调的供油正时区域，并可以覆盖原机械单体泵系统的供油正时线。

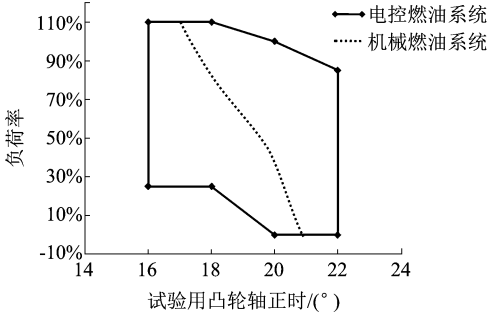


图 10 燃油系统工作范围

3.3.2 燃油喷射量的稳定性

单套泵管嘴系统的循环油量稳定性与整机的各缸均匀性正相关。此次试验中定义循环油量稳定性为：燃油系统连续 100 次喷油量的标准差。标准差越大，喷油量稳定性越差。标准差可表达为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (1)$$

式中： x_i 为样本值； μ 为样本均值，平均数； n 为样本个数。

单套机械供油系统与电控单体泵系统的循环油量稳定性对比如图 11 所示。在电控单体泵系统运行区域内，循环油量稳定性的综合分析如图 12 所示。图中电控单体泵系统循环油量的标准差比机械系统的小的工况点为电控系统占优工况点，反之为不占优工况点。可测的电控单体泵系统 23 个工况点中，13 个工况点比原机械系统更稳定。也即，电控单体泵系统在燃油系统运行区域内，部分工况测试点比原机械系统稳定。

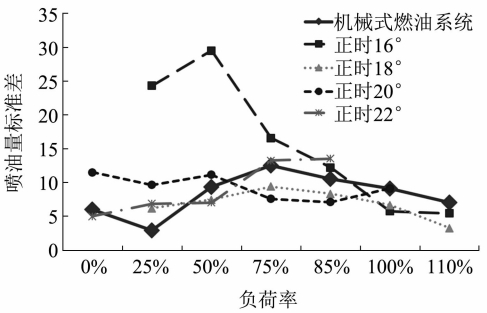


图 11 循环油量稳定性

3.3.3 喷油器入口压力峰值对比

图 13 为不同柴油机负荷下不同燃油系统的喷

油器入口压力峰值对比。从图13可以看出：电控单体泵系统在不同凸轮正时时，喷油器入口压力峰值均低于原机械系统的压力峰值。100%负荷时，改型电控单体泵系统喷油器入口峰值均值比原机械系统低9.2%。在机械泵系统中添加两位三通电磁阀后会增大管路内压力损失，使电控单体泵系统的喷油器入口峰值压力低于原机械泵系统。

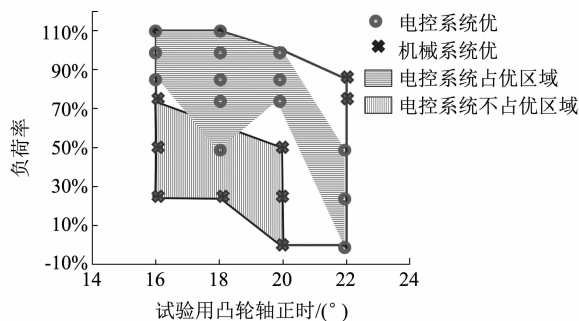


图12 电控系统的油量稳定性分布

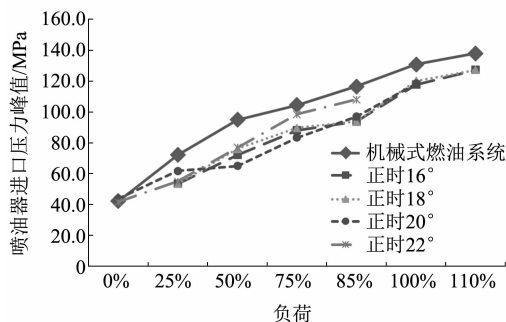


图13 不同柴油机负荷下不同燃油系统的喷油器入口峰值压力

3.3.4 喷油率曲线对比

喷油率是燃油系统的重要参数，理想的喷油率曲线应“先缓后急、断油干脆”^[8]。图14为测试得到的100%负荷下，机械式燃油系统与电控单体泵在凸轮正时16°、18°、20°时的喷油率对比。可以看出：在0~1 ms喷油率上升段的初始喷射区间，机械系统与电控系统的喷油率曲线相近，但机械系统喷油率上升的持续时间比电控系统稍长。在1~4 ms稳定喷射区间，机械系统与电控系统的喷油率均呈缓慢增长趋势，机械系统在此段的喷油率波动比电控系统大。在4~6 ms喷油率下降区间，电控系统比机械系统断油更迅速。从图14还可以得出：100%负荷时电控系统比机械系统的喷油持续期短0.3~0.5 ms。可见：100%负荷时电控单体泵系统的喷油率更接近理想喷油率形状。

3.3.5 配机电磁阀筛选

针对改造的8缸机型，根据图9试验结果，在

12套电磁阀中排除控制参数偏离较大的电磁阀7#、11#、18#、21#，选取剩余8套用于分析。剩余的电磁阀的控制脉宽分布区间如图15所示。从图15c)可以看出：在正时18°和正时20°时，最大脉宽减最小脉宽的值控制在3 000 μs 以下，在ECU允许的控制修正偏差之内。因此，所选取的8套电磁阀可以应用于该型船用柴油机8个机械单体泵的控制，从而将原机械式燃油系统升级为电控燃油系统。

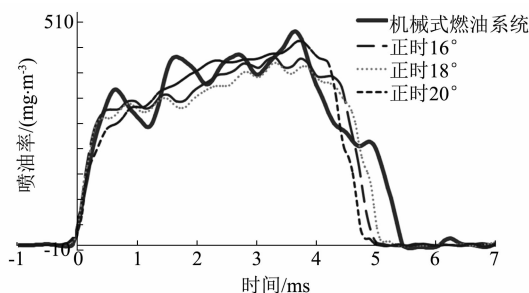
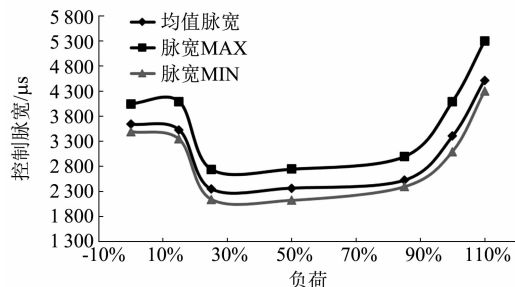
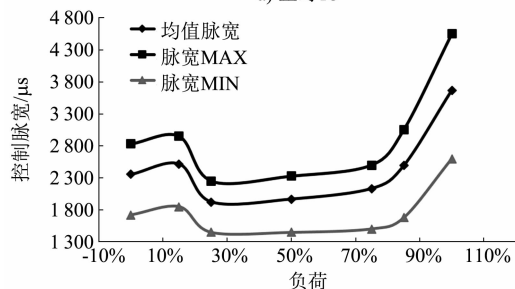


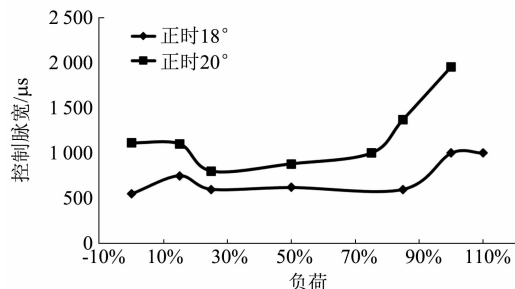
图14 喷油速率对比



a) 正时18°



b) 正时20°



c) 不同正时下脉宽的最大值减最小值

图15 电磁阀控制脉宽的分布区间

4 结论

(1) 电控单体泵系统平台性能试验结果表明：

凸轮正时可调范围是 6° , 即 12° 曲轴转角。升级后的电控单体泵系统运行区域可以覆盖原机械泵管嘴系统运行线。

(2) 电控单体泵系统在运行区域内的 23 个工况点中, 有 15 个工况点的循环油量比原机械系统更稳定。其喷油器入口压力峰值均低于原机械系统的压力峰值。100% 负荷时, 电控单体泵系统的喷油率更接近理想喷油率形状。

(3) 在满足工况要求的条件下, 选取配机用的电磁阀的控制脉宽最大差异在 $3\ 000\ \mu\text{s}$ 内, 均在 ECU 控制参数修正范围内。具有将原机械式燃油系统升级为电控燃油系统的可行性。

升级后的电控单体泵系统须进一步开展配机试验验证, 以分析其对实机燃油消耗率、 NO_x 排放指标的改善程度。下一步可开展凸轮型线的优化设计, 以进一步挖掘升级后电控单体泵系统的潜力, 提高喷射稳定性、缩短喷油持续期、优化喷油率曲线形状。

参考文献

- [1] IMO. Revised MARPOL Annex VI: regulations for the prevention of air pollution from ships and NO_x technical code 2008 [R]. 2009.
- [2] 金江善, 杨林, 陈自强, 等. 船用柴油机电控系统 [J]. 舰船科学技术, 2010, 32 (8): 70-74.
- [3] JAY D, DELNERI D, CAVRESSI F, et al. Development of CR technology in the last decade-4 stroke Wartsila engines [C]. CIMAC CONGRESS, HELSINKI, JUE6-10, 2016.
- [4] 杨时威, 吴长水, 冒晓建, 等. 电控单体泵燃油喷射系统控制方法研究 [J]. 内燃机工程, 2008 (3): 6-11.
- [5] LINO P, MAIONE B, RIZZO A. Nonlinear modelling and control of a common rail injection system for diesel engines [J]. Applied Mathematical Modelling, 2007 (31): 1770-1784.
- [6] 仇滔, 刘兴华. 电控单体泵供油系统仿真研究 [J]. 车用发动机, 2005 (2): 23-25.
- [7] 范立云, 文李明, 姚崇, 等. 柴油机电控单体泵燃油系统的稳定性研究 [J]. 内燃机工程, 2012, 33 (6): 58-65.
- [8] 高宗英, 朱剑明. 柴油机燃料供给与调节 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

MAN Energy Solutions 将高负荷 MAN L23/30H 发动机升级为 MAN L23/30H Mk 3 EcoGen 发动机

MAN Energy Solutions 将高负荷 MAN L23/30H 发动机升级为 MAN L23/30H Mk 3 EcoGen 发动机, 升级后的发动机是 2018 年末推出的, 而且 MAN Energy Solutions 已经接获了几个新版本发动机订单。较之 Mark 2 变型机, 新推出的发动机功率输出提高了 15%。由于新推出的 9 缸机, 在转速为 $900\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 时功率高达 1 800 kW, L23/30H 发动机目前覆盖的功率已从 500 kW 扩大到了 1 800 kW, 因此提升了其对远洋船舶的吸引力。

MAN Energy Solutions 船用发动机组推广及用户支持主管 Paw Houmann – Poulse 告诉媒体: “新推出的 EcoGen 发动机能满足绝大多数商船的要求, 因此, 对船队船型多样化的船东和运营商来说是理想的选择。”

功率输出的提高将给船东提供减少发动机缸数、减轻重量和降低燃油耗的选择, 或选择增加发动机缸数以便将发动机的转速从 $900\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 降至 $720\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$, 这样一来可延长大修间隔高达一年。

该四冲程机设计已经更新, 可满足投资废气清洁系统 (洗涤器) 的船东对能源的要求, 一些较大型散货船的闭环洗涤器功率需求可高达 250 kW。当然, 该机也能烧低硫燃油。

该发动机的设计大量吸收了可靠的 MAN L23/30H 发动机的优点, 后者最早是 1965 年推出的, 服务记录良好。不过, MAN 还是对老机进行了许多设计改进, 以方便维护、简化安装。

大修间隔时间仍然是同类之最。此外新推出的 MAN L23/30H Mk 3 EcoGen 发动机还可兼容使用 MAN Energy Solutions 的在线服务。

(李积轩 编译)