

船用低速二冲程柴油机燃油喷射系统发展概述

文李明, 张志勇, 吴朝晖

(中船动力研究院有限公司, 上海 200129)

摘要: 针对日趋严格的排放法规, 指出: 电控燃油喷射技术是实现船用大功率柴油机缸内清洁、高效燃烧的关键技术。介绍了船用低速二冲程柴油机电控燃油喷射系统的发展现状, 就目前应用在大功率低速柴油机上的主要电喷系统, 增压式电控燃油喷射系统和共轨式电控燃油喷射系统做了详细的介绍和分析。

关键词: 船用低速柴油机; 燃油喷射系统; 共轨

中图分类号: TK423.8⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)01-0024-05

The Overview of Low Speed Two Stroke Marine Diesel Engine Fuel Injection System Development

Wen Liming, Zhang Zhiyong, Wu Zhaohui

(China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200129)

Abstract: To meet with the more and more stringent emission regulations, it is pointed out that the electronically controlled fuel injection is the main technology to achieve in-cylinder clean and high efficient combustion. The status of marine diesel engine fuel injection system development is introduced, and the two major electronically controlled fuel injection systems used on low speed marine diesel engines are expounded and studied in detail, which are fuel boost injection system and common rail injection system.

Key words: low speed marine diesel engine; fuel injection system; common rail

0 引言

船舶低速二冲程柴油机由于其性能优良、可靠性好、使用维护方便、能燃用劣质燃油等, 已成为大型油船、大型干散货船、大型集装箱船的主要动力^[1]。近年来, 随着环境污染、能源危机的加剧, 为了提高柴油机的动力性、经济性和排放性, 多项新技术被研发出来。其中电控燃油喷射技术的应用使柴油机发展发生了历史性的飞跃^{[2][3]}。

目前世界上船用低速二冲程柴油机市场被 MAN、Wärtsilä 两家公司所垄断, 相应的船用低速柴油机电控燃油喷射系统也出现了两种不同的技术路线: 以 MAN ME 系列柴油机为代表的增压式电控燃油喷射系统及 Wärtsilä RT-flex 系列共轨式电控

燃油喷射系统。两种类型的燃油喷射系统都得到了广泛的应用, 且随着技术的发展, 燃油系统的控制精度不断提高, 控制自由度也更大。

1 燃油系统发展概述

1.1 增压式电控燃油喷射系统

1.1.1 MAN ME 系列增压式电控燃油喷射系统

MAN 柴油机由传统的机械式电控 MC 系列柴油机发展到目前的 ME 系列柴油机, 在保持其一贯注重可靠性、成本控制的基础上, 大幅减少了凸轮轴、燃油泵等传统燃油及排气驱动用机械部件, 并实现了燃油喷射、排气驱动及气缸注油等的电子控制。其燃油喷射系统是基于高压伺服油增压低压燃油的增压式电控燃油喷射原理。系统结构组成如图

收稿日期: 2015-06-12; 修改日期: 2015-07-02

作者简介: 文李明(1986-), 男, 工程师, 主要研究方向为船用柴油机燃油喷射系统设计, E-mail: wlm@cspi.nt.cn。

1 所示, 主要由电控单元 (ECU)、液压气缸单元 (HCU)、液压供给单元 (HPS) 组成。伺服油驱动压力根据主机转速及负荷变化, 通过 HPS 中伺服油泵进行调整; HCU 集成了燃油增压泵、排气阀正时控制、注油器控制三大功能。ME-C 系列燃油喷射系统部分结构原理如图 2 所示; 图 3 则展示了燃油的增压及吸油过程。

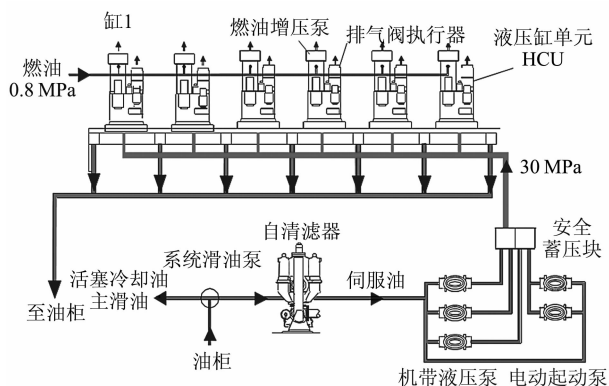


图1 ME-C 系列燃油喷射、排气驱动系统组成

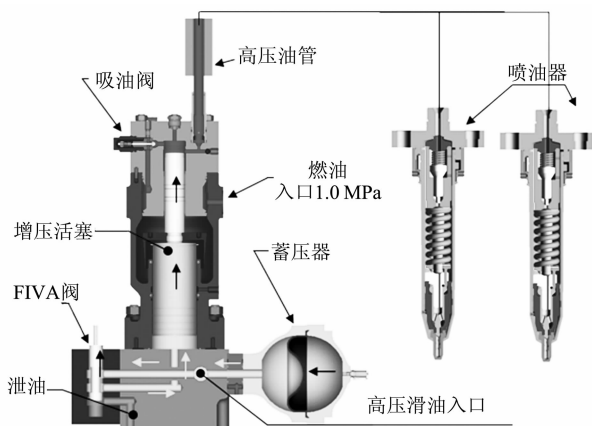


图2 ME-C 系列燃油喷射系统原理图

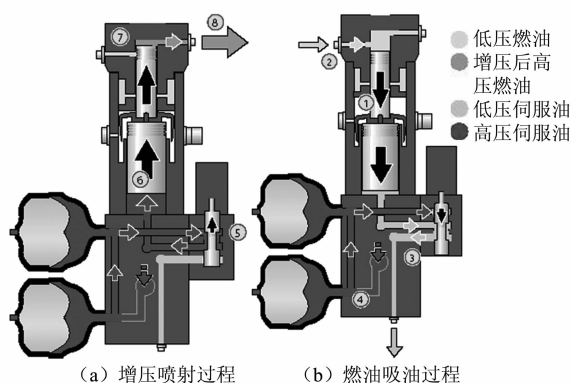


图3 ME-C 系列燃油增压原理图

ME 增压式电控燃油喷射系统主要由 FIVA 阀、蓄压器、液压增压活塞、高压燃油管和机械式喷油器组成。其中 FIVA 阀的上电动作时刻和动作持续

期直接决定了喷油定时和喷油量。液压增压活塞是燃油增压的执行结构, 负责在高压伺服油驱动下将低压燃油 (0.7 ~ 1.0 MPa) 按一定增压比 (由增压大小活塞面积比决定) 增压至高压, 当增压后的燃油压力大于喷油器的开启压力时 (一般为 37.5 MPa) 喷油器针阀开启, 开始喷油。因此, 喷油器是燃油喷射的最终执行部件, 喷油器的结构参数对喷油特性有至关重要的影响。额定工况下, 伺服油驱动压力为 30.0 MPa, 增压后喷油峰值压力可达 90.0 MPa。部分工况下, 伺服油驱动压力可根据主机负荷与转速灵活设定。因此, 在全工况范围内, 喷油压力可与主机运行工况需求实现优化匹配。蓄压器具有稳定高压伺服油驱动压力的作用, 用于稳定由 FIVA 阀、针阀动作引起的系统内压力波动, 从而削减单个气缸燃油喷射过程对整个液压供油系统压力的波动影响, 进而削减单个气缸多次喷射过程之间的耦合影响, 避免燃油喷射压力不稳定; 并且还可以减少多缸之间的喷油过程对喷射特性的耦合影响, 有助于气缸单元之间燃油喷射一致性的控制, 从而简化系统燃油喷射控制策略的复杂性。

在 ME 增压式电控燃油喷射系统中, FIVA 阀是系统的电子控制部件, 同时也是决定系统喷射特性 (喷油定时、喷油持续期、喷油率) 的关键部件, 其可以完成对燃油喷射压力的控制, 进而实现喷油率的柔性控制。图 4 所示为系统几种典型燃油喷射压力对比。通过控制 FIVA 阀阀杆运动速度和动作模式, 可以实现传统蓄压喷射的三角喷射形状; 当 FIVA 阀的动作速度比较快, 燃油加压过程近似等压喷射, 这有助于柴油机的燃油经济性; 当 FIVA 阀连续动作两次, 第一次阀动作时间比较短, 第二次动作时间长即可实现两次喷油, 这有助于降低 NO_x 的生成。可见该系统具有对喷油压力、喷油定时、喷油量、喷油率灵活控制的功能。

根据最新资料, MAN 正在试验其新型的 FBIV (Fuel Booster Injection Valve) 燃油喷射系统, 如图 5 所示。新的 FBIV 是基于将燃油增压功能与喷油器功能整合在一起的一种新型喷油器。其设计理念与传统的泵喷嘴系统基本一致, 区别在于过去的泵喷嘴系统中的燃油加压主要是通过凸轮驱动, 而这里是通过电子控制的伺服油控制, 由电磁阀驱动一两三位三通阀, 用伺服油直接驱动喷油器内的液压活塞, 使低压燃油增压; 当压力达到针阀的开启压力时, 针阀打开, 实现喷油; 当控制电磁阀将伺服油切换到低压时, 液压活塞上升回位, 并完成吸油动

作, 为下一次喷油做准备。

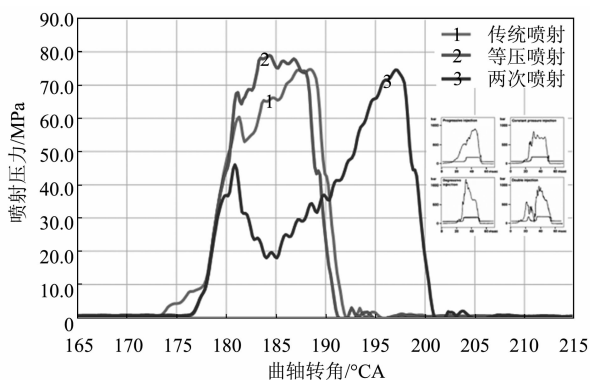


图 4 ME-C 柴油机不同喷射模式下的喷射压力曲线

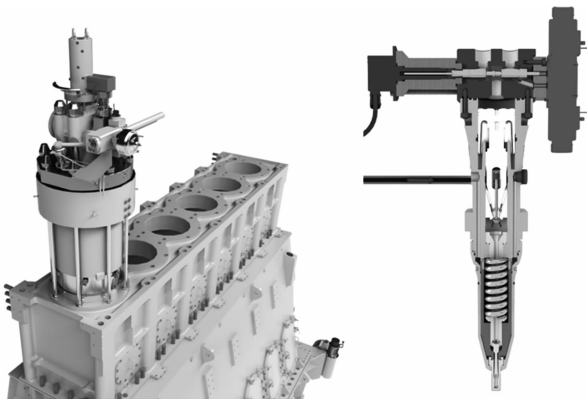


图 5 MAN 最新 FBIV 喷射系统

MAN 的新设计将产生高压的元件与喷油器做成一体, 大幅度简化系统并降低成本的同时, 最大程度地减小了目前燃油喷射系统中对喷油控制影响最大的压力波动的传播与反射现象, 并且使控制及系统的液力延迟大大减小; 而且在循环工作中, 温度较低的进油还起到不断冷却喷油器的作用, 设计非常巧妙。图 6 所示为新的 FBIV 喷射系统在三井 4 缸试验机上的测试情况。由图 6 (b) 可见, 经过 534 h 的连续运行后, 喷油器针阀等关键部件状态良好, 未发现严重磨损及穴蚀等现象。图 6 (c)、(d) 分别为多循环喷油压力及针阀升程测试曲线, 由图中可看出, 喷油器具有良好的循环间喷油一致性。

1.1.2 MHI 的 UEC-ECO 增压式电控燃油系统

UEC-ECO 柴油机的电控系统基本原理与目前的 MAN ME 柴油机的相同, 同样采用增压式燃油喷射原理。图 7 是 MHI UEC-ECO 主机燃油喷射系统的结构示意图, 可以看出燃油系统与 MAN ME 目前设计的主要区别在于:

(1) 取消了膜式蓄压器, 取而代之的是蓄压块;

(2) 在蓄压块中装配有主阀, 用以开启伺服油驱动燃油柱塞回路;

(3) 对主阀的控制由主、辅电磁阀配合使用, 以提高主阀控制精度;

(4) 燃油增压活塞部分与 MAN ME 目前的设计差别较大, 其是传统的燃油泵结构设计, 即有柱塞、套筒 (设置有回油孔)、止回阀 (出油阀), 顶部安装有卸压机构 (用于吸收喷油器关闭时返回的压力波)。

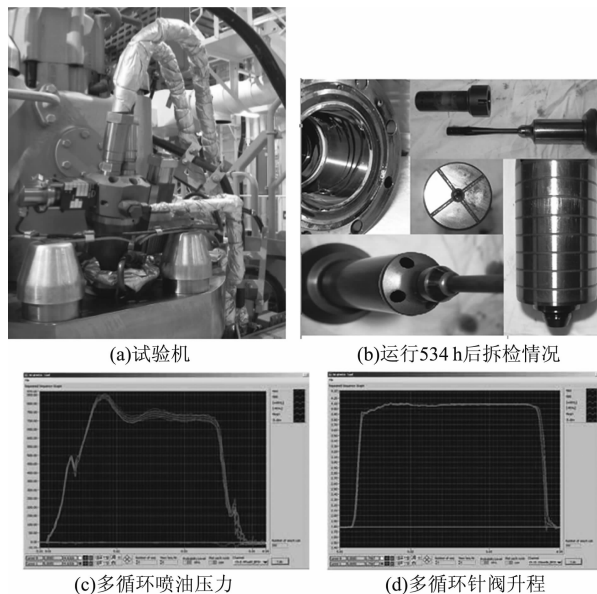


图 6 FBIV 增压式喷油器在三井试验机上的测试情况

从其结构上分析可以认为, UEC-ECO 的燃油喷射系统在 MAN ME 的基础上有所改进, 控制更精细, 系统功能更完善, 但制造难度也相应加大, 尤其是蓄压块及增压油泵部分。

1.2 高压共轨燃油喷射系统

1.2.1 Wärtsilä RT-flex 系列高压共轨燃油喷射系统

高压共轨燃油喷射系统是一种全新概念的燃油喷射系统, 其不再采用传统喷油系统的柱塞泵分缸脉动供油原理, 而是用一个置于燃油泵和喷油器之间的具有较大容积的共轨管, 把高压油泵输出的燃油蓄积起来并平抑压力波动, 然后再通过各高压燃油管输送到每个喷油器, 由各喷油器上的电磁阀动作控制喷射过程。高压共轨燃油喷射技术在中高速机上已有广泛应用, 产品更新换代非常快, 诸如 Bosch、Delphi、电装、康明斯等厂家都有好几代的共轨系统产品。Wärtsilä 公司在将其 RTA 机械式柴油机向智能、电控化发展的过程中, 选择了应用高压共轨喷射技术作为新一代 RT-flex 电控智能化柴油机的燃油喷射系统。

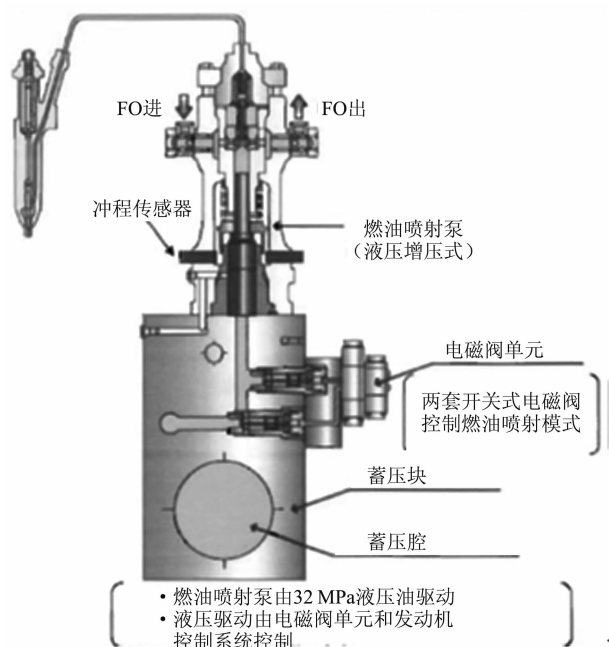


图7 MHI UEC-ECO 主机燃油系统原理图

图8所示，Wärtsilä经过近20年的努力，终于研制成功了商业化运营的RT-flex系列电控共轨柴油机。其共轨喷射原理如图9所示，图9(a)为第一代共轨系统的喷射原理图，由于在该系统中，喷油器仍然采用机械式喷油器，因此在共轨与喷油器之间有ICU控制单元。ICU控制单元接收来自主机电控单元WECS-9520的信号，控制高压燃油与喷油器之间的通断。ICU控制单元中每个喷射控制电磁阀控制一个喷油器，同时ICU自带的计量活塞可以精确测量每循环的燃油喷射量，因此该系统称为容积式喷射控制。图9(b)为Wärtsilä新一代X系列共轨柴油机的喷射原理图。可见新一代X系列共轨系统与第一代系统相比，零部件减少，系统更加紧凑，模块化更高，控制更简单。如图10所示，新一代X系列共轨系统最大的更新在于采用电控喷油器替代原系统的ICU控制单元和机械式喷油器，同时采用更加灵活、节能的电控燃油泵取代原系统的位置控制式柱塞泵。更新后的共轨系统在控制灵活性、控制精度上都取得了显著的进步。

1.2.2 MAN 高压共轨燃油喷射系统

由于共轨系统是将高压燃油直接蓄积在共轨管内等待喷射，且燃油喷射过程完全受控于电控喷油器的高速控制电磁阀，因此其可以实现几乎独立与柴油机转速及负荷的喷射压力；且与增压式电控燃油喷射系统相比，由于其取消了燃油增压过程，故可以实现理想的多次喷射过程，因此共轨系统优于增压式系统的最大一点就在于其具备更加灵活的喷

油率控制能力。而柔性的喷油率控制对柴油机经济性、排放性有着至关重要的影响，所以共轨系统是船用低速柴油机燃油系统发展的一个重要方向^[4]。

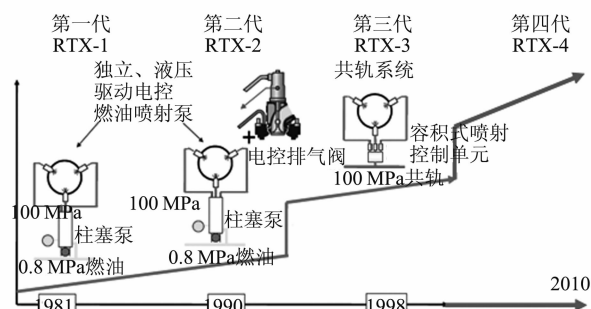


图8 Wärtsilä 燃油系统发展历程

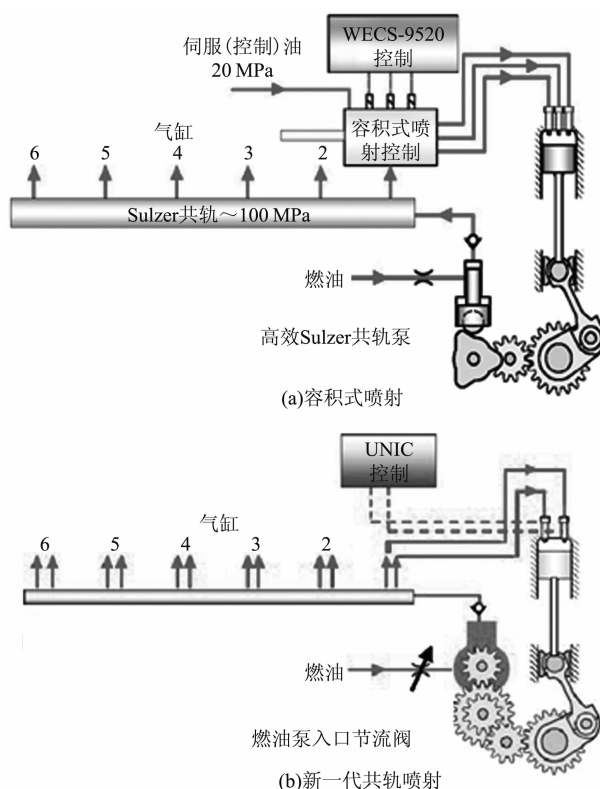


图9 共轨喷射原理

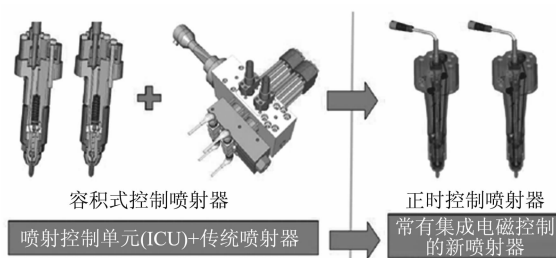


图10 Wärtsilä RT-flex 与新一代X系列共轨系统区别

图11所示为MAN开发中的高压共轨系统架构图。由图中可见，MAN采用分布式共轨系统（每缸一个相对较小的蓄压腔取代总的共轨管），使得

燃油系统的结构更加紧凑, 同样采用带有高速电磁阀的电控喷油器控制燃油的喷射过程。电控喷油器结构示意图如图 12 所示, 主要由燃油循环阀、蓄压腔、限流阀、电磁阀及滑阀式针阀组成。图 13 所示为共轨系统测试台架, 图 14、15 为相应的测试及仿真结果。由图 15 可见, 该共轨系统具有柔性控制的多次喷射能力。

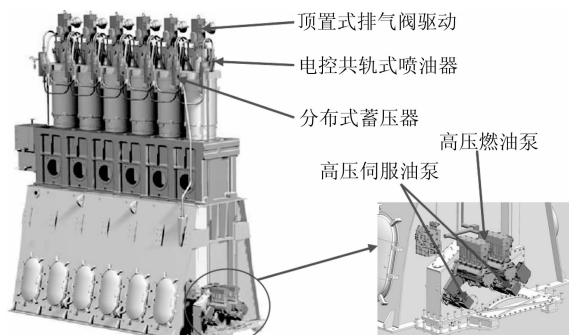


图 11 MAN 开发中的共轨系统示意图

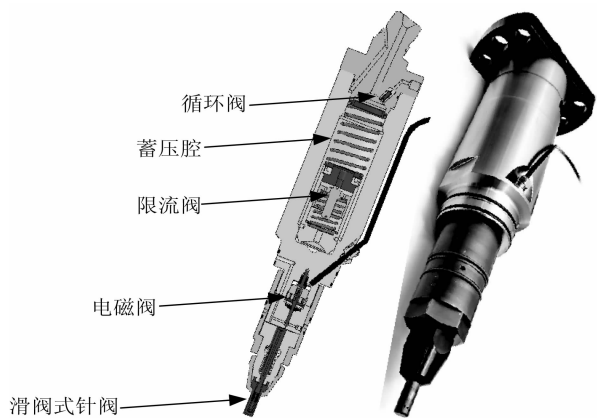


图 12 MAN 开发中的共轨系统电控喷油器

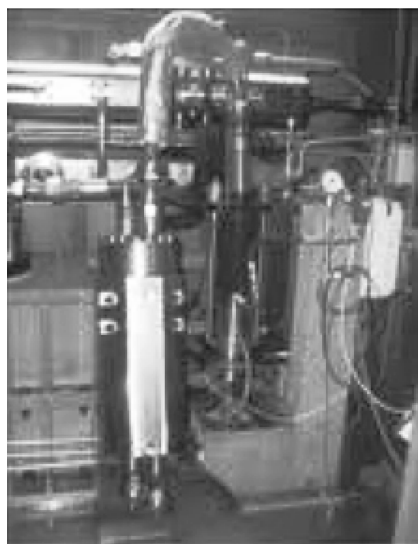


图 13 MAN 共轨系统测试台架

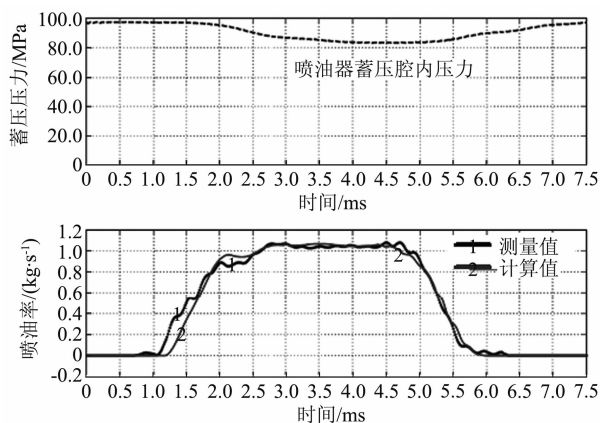


图 14 MAN 共轨系统喷油压力、喷油率测试结果

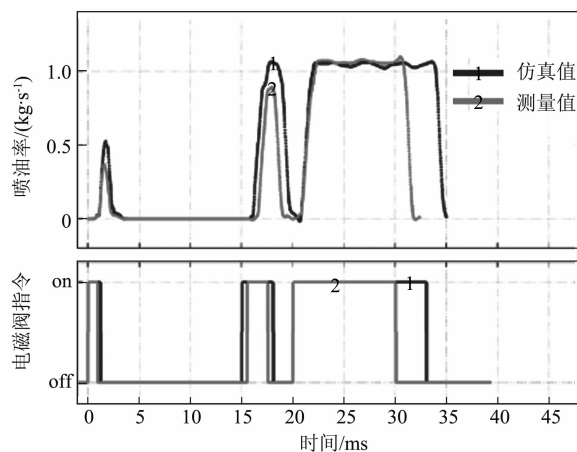


图 15 MAN 共轨系统多次喷射能力

2 结 语

船用低速柴油机燃油喷射系统与中高速机有很大区别, 目前世界上真正成熟的只有 Wärtsilä 与 MAN 公司的产品, 国外其他成熟的中高速柴油机电喷系统供应商都尚未真正进入低速机领域, 原因一方面在于市场定位的不同, 但另外更加重要的方面是, 低速机与中高速机完全不同的运行特点及性能要求, 是不可忽视的技术难点。因此, 目前我国想要实现船用低速机的自主化设计, 电控燃油喷射系统成为首先需要重点突破的关键、瓶颈技术。

参考文献

- [1] 冯明志. 船舶柴油机减排新形势与技术发展 [J]. 船舶轮机, 2009 (4): 34-37.
- [2] 崔容健. 柴油机技术现状及发展展望 [J]. 船电技术, 2009, 29 (12): 43-47.

(下转第 47 页)

孔口粗糙度极差的惯性质量问题;并使曲轴的加工周期缩短。采用无主油道、连杆颈单侧油孔结构后,可减少斜油孔压套、斜油孔螺堵、主油道油封、拉杆螺栓等附件的生产、组装,节省了设备、刀具及人力资源。

4 结束语

2013 年,首根 16V280ZC/ZD 船用柴油机曲轴

试制成功后,安装在国内某船用柴油机上运行考核,公司售后服务部进行了为期一年多质量跟踪,反馈使用情况良好。2014 年 3 月后进行了扩大化试装十根。至今,总体运用状况良好,未发生曲轴疲劳断裂的事件,达到了预期目标,实现了 280 机车柴油机曲轴在船舶领域的可靠运用。

(上接第 28 页)

[3] 朱剑明, 彭代勇. 世界能源现状与内燃机的发展机遇 [J]. 内燃机工程, 2011, 32 (2): 81-84.

[4] Rainer W. Jorach, Hartmut Schneider, Anton J. Kerchhoff, et al. From high speed diesel to medium speed HFO engines-L'Orange platform based common rail pumps fulfill future demands [C]. CIMAC Congress 2004, Kyoto. Paper No: 80.

[5] Senghaas Clements, Olav Altmann, Matthias Schwalbe, et al. Advanced technology for HFO injection systems developed for medium speed engines [C]. CIMAC Congress 2007, Vienna. Paper No: 137.

[6] Clemens Senghass, Marius Ligensa, Klaus Reischmann. New platform based common rail injector for MTU series 1163 [C]. CIMAC Congress 2013, Shanghai Paper No: 101

[7] Marc-Tran Heller, Tobias Stelzer, Mike Riegert, et al. L'Orange fuel injection system in China & Asia-past experience, today's expertise and examples for tomorrow's excellence. [C]. CIMAC Congress 2013, Shanghai Pa-

per No: 121.

[8] Elias Boletis, Andreas Kyrtatos, Turhan Yildirim, et al. A new fuel injection and exhaust valve actuation system for a two stroke engine family in the 30 to 50cm bore segment [C]. CIMAC Congress 2010, Bergen. Paper No: 101.

[9] Clemens Senghass, Hartmut Scheneider, Steffen Reinhard, et al. Second generation of HFO injection system for medium speed engines to fulfill future requirements [C]. CIMAC Congress 2010, Bergen. Paper No: 119.

[10] Marco Coppo, Claudio Negri, Klaus Heim, et al. Advanced HFO common rail injector for maximising the performance of medium speed engines [C]. CIMAC Congress 2013, Shanghai Paper No: 223.

[11] Christoph Kendlbacher, Thomas Lengenfelder, Dieter Blatterer, et al. The 2200 bar modular common rail injection system for large diesel and HFO engines [C]. CIMAC Congress 2013, Shanghai Paper No: 427.

《柴油机》杂志广告价目表

版位	尺寸/mm	颜色	定价
封面	205 × 226 (去刊头)	彩色	8000 元/版
封二	210 × 297	彩色	6000 元/版
封三	210 × 297	彩色	4000 元/版
封底	210 × 270 (去条形码)	彩色	5000 元/版
首插页	210 × 297	彩色	5000 元/版
插页	210 × 297	彩色	4000 元/版

注:《柴油机》杂志为双月刊,单月月底出版,全年 6 期。
联系人: 高荃, 夏斐 电话: 021-31310201, 021-31310204