

船舶主机选型的发展和展望

梅 春

(中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

摘 要: 从船用主机的不断强化、电喷技术的广泛应用、由 Tier II 法规引领的低速主机技术的革新等几方面介绍了船用主机的发展。分析了目前主要船型的主机选型特点。面向未来讨论了 EE-DI 下船型的开发、主机排气余热回收装置、节能船型的主机选型以及 Tier III 法规下低速主机的技术革新等问题。

关键词: 船用低速主机; 电喷技术; 选型; 低油耗

中图分类号: U664.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)06-0007-06

Development and Prospect of Marine Main Engine Type-choosing

Mei Chun

(Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011)

Abstract: The development of marine main engines are introduced from the aspects of improvement of marine main engine, the wide application of electronic injection, and the technical innovation of low-speed main engine to meet with Tier II legislations. The characteristics of main engine type-choosing for the present main ship types are analyzed. For the future development, some other issues are discussed, such as ship-type development under EEDI, heat recovery equipment for main engine exhaust gas, main engine type-choosing of energy-saving ships, as well as the technical innovation under Tier II legislations.

Keywords: marine main engine; electronic injection; type-choosing; low-fuel consumption

0 引 言

船用低速主机的发展走了一条不断强化提升功率和降低油耗的道路。运输船在 2008 年经济危机前呈现不断快速化的发展特征,而近期在高油价低运费的挤压下,呈现:在维持船舶一定航速要求的前提下,追求船舶日油耗最低化的趋势。

1 低速主机自身的发展

1.1 主机的强化

低速主机的缸内平均燃烧压力在不断提高,如 MAN 公司的 MK6 机的缸内平均燃烧压力为 1.8 MPa,到 Mk9 机平均燃烧压力增大到 2.0 MPa,以至 2.1 MPa (50 机以下),而新的 G80ME-C9.2 更是在大缸径低

速机上也实现了 2.1 MPa 的缸内平均燃烧压力。

于是,同缸径的低速主机的单缸输出功率不断上升,如 80 机的单缸功率就从 Mk6 的 3 640 kW 提高到 Mk9 的 4 510 kW,提高了近 24%。

与此同时,低速主机的油耗从 Mk6 机型过去的最低 $166 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$, 上升到 2008 年的 $174 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ (Tier II 的 MC/MC-C 主机), 2011 年又下降到 $168 \text{ (g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ 。这个变化是由于排放规范的提高和低速主机新技术(如电喷技术等)的应用和发展。

1.2 电喷主机的广泛应用

替代凸轮轴技术的燃油电子喷射技术被引入低速二冲程柴油机,被视作是内燃机技术领域中的一个里程碑。

收稿日期: 2011-08-28

作者简介: 梅春(1974-),男,研究员,主要研究方向为民用运输船和海洋工程轮机研发机设计, E-mail: mcb@maric.com.cn。

(1) Wartsila Sulzer 的电喷机型 RT-flex

应用电控共轨燃油喷射技术的 Sulzer RT-flex 柴油机自 1993 年开始开发,到 1998 年开始全范围的研究。首台电喷柴油机 Sulzer 6RT-flex58T-B 于 2001 年 9 月投入使用,功率为 11 275 kW。Sulzer RT-flex 电喷柴油机的优点是:在柴油机所有转速范围内燃料喷射压力被调整为最佳;在柴油机低速工况下气缸内部分供油被切断、排气阀定时优化。柴油机 NO_x 排放可达到 MARPOL73/78 附则 VI 中有关 NO_x 排放规定。图 1 为首台 RT-flex 机和传统的低速柴油机无可视烟运行比较。

电控燃油喷射阀控制每缸的燃油喷射定时、喷射量和喷射模式。在各个气缸上三个燃料喷射阀是可以独立控制的,因此它们可以被安排为分别动作、或者一起动作。所以 Sulzer RT-flex 电喷柴油机运行时各缸之间、各冲程之间更趋平衡,低负荷时的燃油消耗少。燃油喷射的准确控制,柴油机低速时也能喷射高压燃油,加上气缸内部分供油切断措施使 Rt-flex 柴油机可以以最大转速的 10% ~ 12% 平稳运行。图 2 为 RT-flex 系统的核心——快速响应共轨阀。

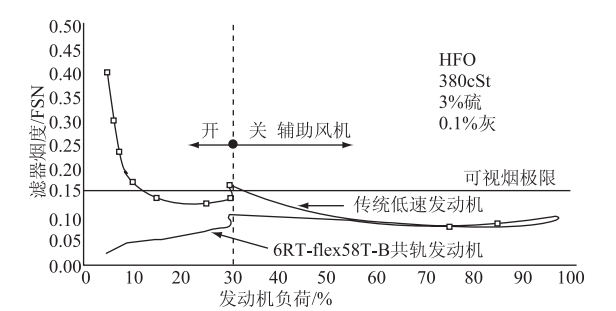


图 1 首台 RT-flex 机无可视烟运行比较

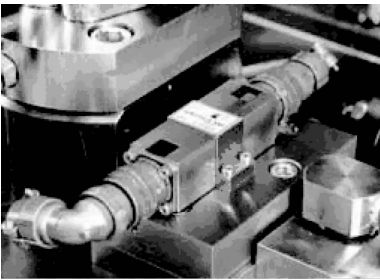


图 2 Rt-flex 系统核心·快速响应共轨阀

(2) MAN B&W 的电喷机型 ME

凸轮轴控制的柴油机已经发展和精炼到相当高的水平,但是,一旦制作完成,一个机械凸轮就是固定的,尽管可以应用种种机械和液压装置,如 VIT、正时控制装置等,但柴油机在整个负荷范围内的燃料消耗和排放性能还是受到机械凸轮控制燃

料喷射压力的局限,做不到最少和最优化。因此,电子控制燃油喷射的主要目的是要保证燃油准确地定时定量喷射,以及排气阀和气缸油喷射的类似定时动作。尤其是,电子控制可以在柴油机低负荷时也保持足够高的燃油喷射压力。因此,MAN B&W 的电喷机型 ME 柴油机和传统低速柴油机相比在以下方向有所改进:低负荷运行工况性能,低负荷燃油消耗率,柴油机调速能力,NO_x、灰炱和烟的排放,大修间隔期延长,更利于配置工况诊断工具等。图 3 为 MAN B&W 的首台电喷低速二冲程柴油机 7S50ME-C,图 4 为 ME 柴油机的燃油喷射曲线。

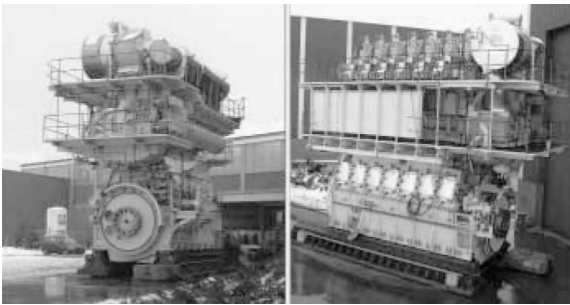


图 3 MAN B&W 首台电喷柴油机 7S50ME-C

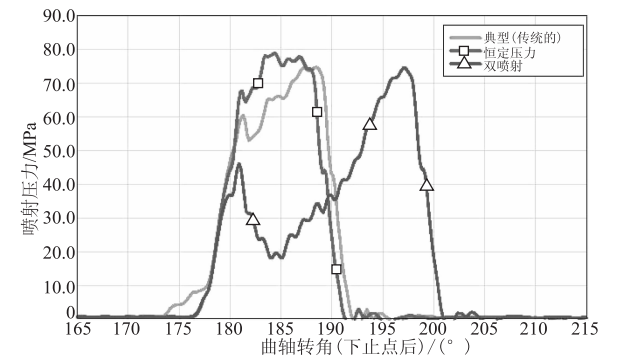


图 4 7S50ME-C 发动机燃油喷射曲线(75% 负荷)

1.3 NO_x Tie II 引起的技术革新

Tie II 的 NO_x 排放限值是 Tie I 的 80% (见图 5)。排放限值的提高,首先带来的变化是主机油耗的增高,油耗从 Mk6 主机的 166 ~ 167 (g·(kW·h)⁻¹),一度上升到 2008 年的 173 ~ 174 (g·(kW·h)⁻¹) (Tie II 的 MC/MC-C 主机,而 ME 主机在此基础上减 2 (g·(kW·h)⁻¹),在 2011 年度下降到 168 (g·(kW·h)⁻¹),这主要得益于电喷主机的应用及技术更新。

具体的技术改进有:

(1) 低速主机的性能参数变化

- ① 最高燃烧压力提高 0.5 ~ 1.0 MPa (单位油耗下降, NO_x 升高);
- ② 扫气压力提高 0.025 MPa (单位油耗和 NO_x 都下降);

③ 压缩容积减小(NO_x 下降)。

结果是新主机的单位油耗下降, 而 NO_x 排放不变, 仍然满足 Tier II 的要求。

(2) 根据客户对船舶营运需求优化

主机的 NO_x 排放值是由 25%、50%、75%、100% 负荷下的 NO_x 排放值以不同权重计及所得的综合值。即, 主机的 NO_x 排放值 = $5\% \times \text{NO}_x(25\%) + 11\% \times \text{NO}_x(50\%) + 55\% \times \text{NO}_x(75\%) + 29\% \times \text{NO}_x(100\%)$ 。可见: 低负荷区的 NO_x 排放值所占权重较小, 这样就可以利用以上关系来改善不同负荷下的油耗, 即, 可以减少部分负荷的油耗, 适当增加高负荷区的油耗, 但整机的 NO_x 排放值保持不变。

(3) 米勒循环

米勒循环通过提前关闭进气阀, 利用缸内气体的膨胀作用, 减小压缩终点温度, 进而降低燃烧温度, 从而降低 NO_x 排放。

(4) SFOC 优化负荷范围

高负荷 85% ~ 100% SMCR (standard tuned engine)、部分负荷 50% ~ 85% SMCR、低负荷 25% ~ 70% SMCR。

优化的方法有 VT(可变喷嘴环)(图 6)、ECT(性能参数调整)、EGB(废气旁通)。

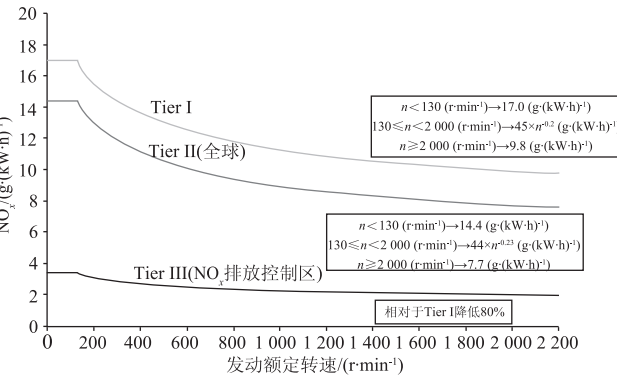


图 5

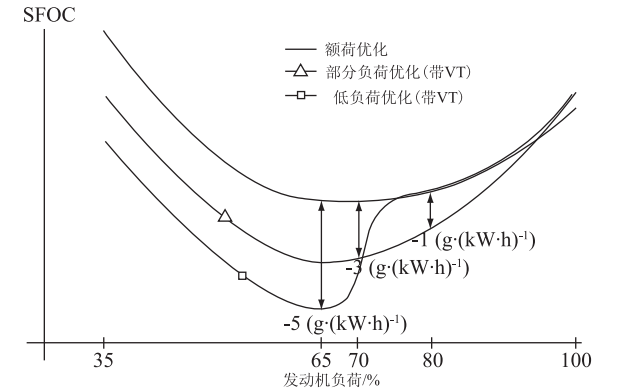


图 6 ME/ME-C(带可变喷嘴环增压器) SFOC 优化负荷范围

2 近来主要船型的主机选型

2.1 集装箱船系列

8 000 ~ 10 000TEU 的航速要求由原来的 25kn 以上降到 22kn 左右, 主机由 68 520kW 的 12K98MC-C 改为 52 000 kW 左右的 9S90ME-C, 而 4250TEU 的航速要求由原来 24kn 以上降到 4800TEU 的 21kn 左右, 主机由 36 560 kW 的 8K90MC-C 改为 27 000 kW 左右的 6S80ME-C, 这样船舶日油耗下降了约 25% ~ 30%。

2.2 油船系列

大型的 MR 型油船在航速基本不变的情况下, 主机降功率设定 CSR 点, 船舶日油耗油由 35 t/d 下降至约 30 t/d 左右; 而 VLCC 的航速由原来的 16kn 以上略降到 16kn 以下, 主机降功率设定 CSR 点, 船舶日油耗由约 100 t/d 左右降至约 85 t/d 左右。

2.3 散货船系列

散货船的主机配置和同级别的油船相近, 航速和船舶日油耗的变化也基本相近。

3 面向未来

3.1 EEDI 下的船型开发

国际海事组织海洋环境保护委员会 (MEPC) 第 62 次会议于 2011 年 7 月 11 日至 15 日在伦敦的 IMO 总部召开。会议重点关注减少船舶温室气体的排放, 并致使“能源效率规范”作为 MARPOL 附则 V I 的新的第四章被采纳, 其内容包括了能源效率设计指数 (EEDI) 和船舶能效管理计划 (SEEMP)。

EEDI 反应了每吨/英里 (货物载重容量) 排放的二氧化碳量。该指数包含了在设计阶段和新船建造阶段计算船舶能源效率的统一方法, 并将通过鼓励提升船舶设计水平来控制未来新造船的二氧化碳排放。

SEEMP 为船舶营运者建立了机制, 通过各效率措施的管理来提升船舶能源效率。

上述规范生效日期为 2013 年 1 月 1 日。SEEMP 将被应用于 400 总吨以上的所有船舶, 而 EEDI 只应用于新造船, 但不包括那些柴油机-电力、蒸汽涡轮或混合能源推进系统船舶。见表 1。

上文提到的集装箱船降速和换装小功率主机及油船、散货船主机降功率的情况, 其实就是在 EEDI 影响下船舶界的应对之道, 船舶适当降速和降低选型主机的比功率油耗将是今后发展的主流。

表 1 相比 EEDI 参考线，要求的 EEDI 下降率

单位：%

船型	船舶大小	阶段 0 2013 年 1 月 1 日	阶段 1 2015 年 1 月 1 日	阶段 2 2020 年 1 月 1 日	阶段 3 2025 年 1 月 1 日
散货船	20000 DWT 及以上	0	10	20	30
	10000 – 20000 DWT	n/a	0 – 10 *	0 – 20 *	0 – 30 *
液化气船	10000 DWT 及以上	0	10	20	30
	20000 – 10000 DWT	n/a	0 – 10 *	0 – 20 *	0 – 30 *
油船/化学品船	20000 DWT 及以上	0	10	20	30
	40000 – 20000 DWT	n/a	0 – 10 *	0 – 20 *	0 – 30 *
集装箱船	15000 DWT 及以上	0	10	20	30
	10000 – 15000 DWT	n/a	0 – 10 *	0 – 20 *	0 – 30 *
杂货船	15000 DWT 及以上	0	10	15	30
	3000 – 5000 DWT	n/a	0 – 10 *	0 – 15 *	0 – 30 *
冷藏货船	5000 DWT 及以上	0	10	15	30
	3000 – 5000 DWT	n/a	0 – 10 *	0 – 15 *	0 – 30 *
混合货船	20000 DWT 及以上	0	10	20	30
	4000 – 20000 DWT	n/a	0 – 10 *	0 – 20 *	0 – 30 *

注 1：表中 n/a 表示不生效（not available）；

注 2：* 指减排率的下限值对应于最小的船舶载重吨，减排率由船舶载重吨决定，取上下限数值之间的线性插值。

3.2 主机排气余热回收装置

大型二冲程柴油机的效率已经显著提高，这得益于高效增压器和增压系统以及电控高压燃油喷射系统的发展，典型产品的效率已达到 50% 左右。发动机效率欲进一步提高，受到热力学理论的限制。但是新一代的余热回收（WHR）系统（图 7）可以推动推进装置和电站效率的提升。余热回收系统已经有一定使用历史，目前已成功地在船舶上运行。

为了充分回收余热的能量，带动力涡轮和汽轮机的余热系统在涡轮增压器后再加一台废气锅炉，

由其产生的蒸汽驱动汽轮机。采用这种布置可使输出增大约 10%（意味着使用了相应数量的“免费燃料”），并减少了排放。节省耗油率和排放量 4%，意味着主发动机的总效率提高到约 52%；而节省 9%，则效率可升高到约 55%。

在船型研发和船舶设计上，集装箱船的主机功率很大，同时冷藏集装箱的电力需求也很大，应用主机排气余热回收装置拥有很大的前景。油船和散货船的主机相对较小，降功率选用主机的话，主机排气余热回收的能量更加少了，需要根据具体情况对主机排气的余热回收利用进行综合平衡考虑。

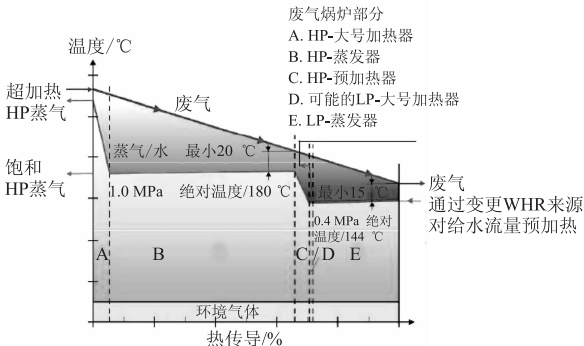
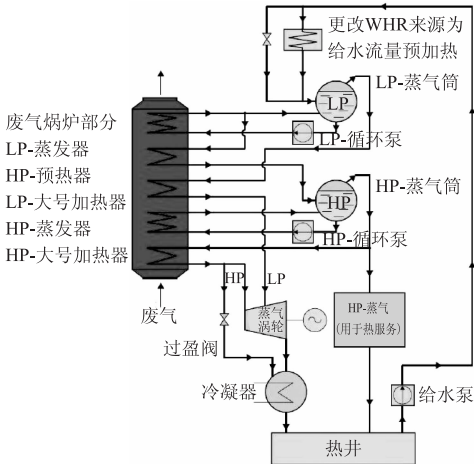


图 7

3.3 G 型机和节能船型的主机选型

G 型机(图 8)是新一代的低速柴油机,拥有超超长的冲程缸径比和更低转速的功率输出范围,有利于船舶匹配更大的螺旋桨来提高推进效率,使同吨位船舶在保持一定航速条件下,消耗更小的功率,从而使船舶拥有更经济的日油耗,达到节能减排的目的。虽然,它的首型主机 G80 还没有完全设计定型,但是已经广受瞩目。表 2 为 G80ME-C9.2 型机的主要技术参数。

G80 机主要用作新一代 VLCC 的船用低速主机,也可以匹配相应的 VLCC 或者是万箱级集装箱船。

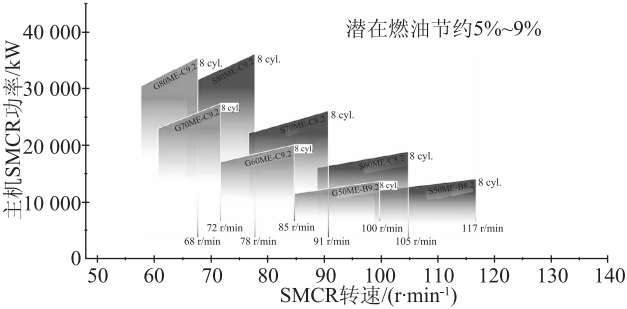


图 8 绿色系列 G-ME 和已有的超长冲程 S-ME 发动机型谱比较

表 2 G80 ME-C9.2 型机主要技术参数

V_{pist} =最大 8.5 (m·s⁻¹) (低速) S =最大 3 720 mm→ S/B =4.65 mep_{L1} =2.1 MPa

已有机型	V_{pist} /(m·s ⁻¹)	S /mm	B /mm	S/B	mep_{L1} /MPa	$P_{cyl_{L1}}$ /kW	rpm_{L1} /(r·min ⁻¹)
S80ME-C9.2	8.97	3 450	800	4.31	2.0	4 510	78
S90ME-C8.2	8.29	3 188	900	3.54	2.0	5 270	78
S80ME-C8.2	8.32	3 200	800	4.00	2.0	4 180	78
Alt. 新机型							
1 G80ME-C9.2	8.43	3 720	800	4.65	2.1	4 450	68

$SFOC_{L1 Tier II}$ =167 (g·(kW·h)⁻¹), 最新设计使其比S80/S90 ME-C8/9.2型机低1 (g·(kW·h)⁻¹)

3.4 满足 Tie III 排放法规的低速主机技术

Tie III 的排放法规将于 2016 年生效,NO_x排放相对于 Tie I 要降低 80%,而目前低速柴油机上已经使用的技术措施不足以达到要求。目前看来,未来业界倾向采用柴油机自身的 EGR(图 9)或者是排气后处理的 SCR(图 10)等技术或几种技术相结合来满足 NO_x Tie III 的排放要求。

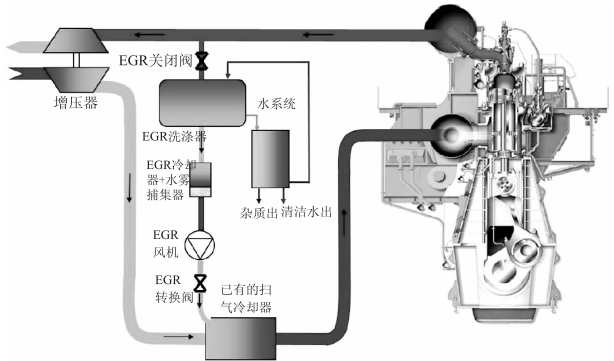


图 9 MAN EGR 系统

MAN 在 EGR 领域的研究成果已经接近于在技术上达到排放要求,更进一步的工作集中在控制装置尺寸和成本方面。

SCR 的工作原理是将尿素溶液在 290 ~ 450 ℃ 下注入排气中,尿素分解为无害的氮和水。遇到的问题之一是现有低速柴油机部分负荷下排气温度较低,会降低 SCR 的处理能力。目前也有多方面的

报道称:能够在低速柴油机部分负荷下低温运行的 SCR 系统已经装船试验成功。WARTSILA 在这方面的应用较为领先。

SCR 属于机外处理技术,装置的体积相当大,对于船舶机舱布置尤其是机舱棚布置设计是一种挑战。而 EGR 基本属于机内处理技术,对于船舶机舱布置的直接影响要小一些,但是对于一些机舱段线型包着主机设计的船来说,线型也会需要做出改变。

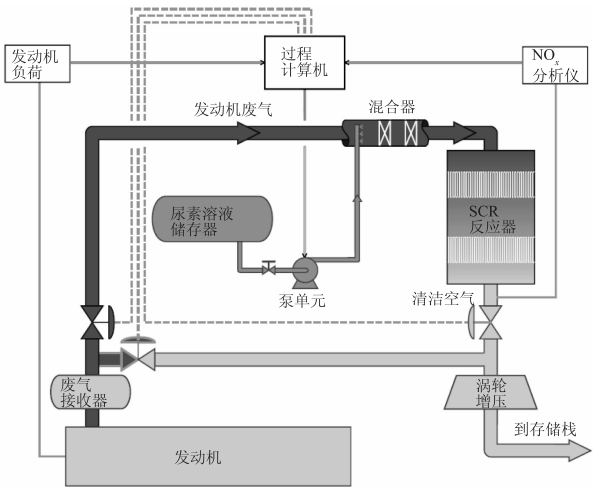


图 10 SCR 系统

SCR 技术主要是要求主机有一定的排温,对于主机的 NO_x排放限制少,甚至允许主机提高 NO_x排

放来降油耗，但是也有额外的运行成本。综合评价 EGR 还是 SCR 目前还难有定论，尚需时日。

4 小 结

在环保要求的促进下，船用低速主机的发展走过了一条从主机自身工况强化，到电喷技术应用、米勒循环改进、增压器可变喷嘴环应用等新技术应用之路，通过不断的发展不断地追求效率。同样，在面向未来的一系列新法规如 EEDI、NO_x Tie III 和余热回收要求，有利于提高船舶航行效率的 G 型机也已经出现。未来的船舶业将继续在高效率，低排放、低油耗、低成本的道路上迎风前行。

参考文献

[1] 梅春. 超大功率主机、大容量电站及相关动力系统设计技术研究报告/大型设备系统设计关键技术[R]. 国防科技工业民用专项科研技术研究项目《8000 ~

10000TEU 超大型集装箱船开发关键技术研究》,2008.
[2] Diesel Technology Seminar 2011 [R]. MAN Diesel & Turbo.
[3] Green Ship Technology Seminar 2010 [R]. Aalborg + MAN Diesel & Turbo.
[4] Thermo efficiency system (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission[R]. MAN B&W Diesel A/S.
[5] Waste heat recovery system for saving fuel and protecting the environment [R]. November 2005, Wärtsilä Switzerland.
[6] Marine engine technologies for reduced emissions waste heat recovery[R]. 2006, Wärtsilä Switzerland.
[7] ABB 动力涡轮领导新一代余热回收[J]. 船舶推进与辅助机械,2006(8/9).
[8] Assessment of IMO mandated energy efficiency measures for internationall shipping, Zabi Bazari 英国 LR 船级社, Tore Longva 挪威 Oslo DNV 船级社, 2011.
[9] Classification news No. 15/2011 ,英国 LR 船级社.

(上接第 3 页)

未来大功率柴油机仍然是船舶最主要动力来源,国内在设计、生产环节通过近几年的持续投入,将在未来的五年体现出强劲的技术开发水平和生产制造能力。

环境要求和能耗新政对我国船舶柴油机带来的不只是冲击,还带来了机遇。政府、业界和专业人士从政策、资金、技术和与国外合作等各个方面已采取

措施,积极面对。可以确信,我国船舶柴油机制造业一定会同世界同行一起,共同承担起节能减排的重任,为人类作出应有的贡献。

参考文献

[1] 2010 - 2014 年中国船用柴油机市场调查及投资发展前景战略研究报告[R]. 北京中研纵横经济信息中心.

(上接第 6 页)

同时针对内河船舶的法规建设也正在步入快车道,2006 年原国家环保总局已正式下达了编制内河/沿海《船舶柴油机大气污染物排放限值及测量方法》,由济南汽车检测中心承担编制,至 2009 年底,完成了开题论证报告,2011 年已通过了专家评审,正在征求各方意见和建议,不久即将发布。该法规的总体编制思路是参照国际海事组织 IMO 的排放限值,要求船舶柴油机按照两个时间段达到逐步严厉的排放限制指标。以 NO_x 排放为例,第一阶段等效 IMO Tier I,第二阶段比 IMO Tier II 略低。这些法规建设和技术进步必将促进我国内河船舶柴油机从低层次扩张向更高技术水平发展,大幅度提升我国内河船舶设计、制造的整体水平和能力。

5 结 论

我国内河船舶柴油机年需求量和保有量巨大,但总体技术水平、燃油消耗率、排放水平、自动化程度等与海洋船舶相比仍有不小的差距。随着国家在内河航运中的节能减排政策的推进以及相关技术的发展,内河船舶柴油机必将面临技术升级和产品更新换代的考验。

参考文献

[1] 济南汽车检测中心,《船舶柴油机大气污染物排放限值及测量方法》。