

第二十届全国大功率柴油机会论文专栏

余热利用发电对降低能效指数 EEDI 贡献研究

王学敏¹, 陈小雷²

(1. 中船动力研究院有限公司, 上海 200129; 2. 沪东重机有限公司, 上海 200129)

摘要: 对比分析了 6 种典型船舶安装余热系统后新船能效设计指数 (EEDI) 的降低情况。通过国内外船舶柴油机余热利用发电技术的研究, 证明: 船舶采用柴油主机余热回收发电系统可有效降低柴油机综合油耗, 是降低 EEDI 的有效手段之一。

关键词: 船舶; 能效设计指数 (EEDI); 余热利用系统

中图分类号: TK421⁺.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)02-0010-04

The Contribution Analysis of Decreasing EEDI by Waste Heat Utilization Power Generation

Wang Xuemin¹, Chen Xiaolei²

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

2. Hudong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129)

Abstract: The contributions of waste heat recovery system to decrease the new ship energy efficiency design index (EEDI) for six kinds of typical marine ships were compared and analyzed. The domestic and overseas marine diesel engine waste heat recovery power generation technology was studied, and proved that the comprehensive diesel fuel consumption could be reduced by waste heat recovery system (WHR), and WHR is one of the effective measures to decrease EEDI.

Key words: ship; energy efficiency design index (EEDI); waste heat recovery system (WHR)

0 引言

随着能源危机及全球环境问题的日益严峻, 温室气体 CO₂ 排放已成为国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 近年来讨论的热点问题之一。根据 IMO (2009) 发布的第二次温室气体研究报告: 2007 年整个海运行业排放的 CO₂ 占全球 CO₂ 排放总量的 3.3%, 约 10.5 亿吨, 其中, 国际海运 CO₂ 排放量占全球 CO₂ 总排放量的 2.7%, 约为 8.7 亿吨^[1]。IMO 的另一份报告预测: 随着海运贸易的增长, 如果不采取任何措施, 到 2020 年海运行业的温室气体排放量占比将达到 5%^[2]。在此背景下, IMO 从 1997 年开始启动国际

海运温室气体 CO₂ 排放的谈判工作, 2011 年 7 月在环境保护委员会 (MEPC) 62 届会议上通过了《国际防止船舶造成环境污染公约 (MARPOL)》附则 VI, 包括关于“新造船能效设计指数” (EEDI) 和“船舶能效管理计划” (SEEMP) 的修正案, 并于 2013 年 1 月 1 日起强制实施。MARPOL 附则 VI 生效后, 凡适用于船舶能效条款要求 (包括 EEDI 和 SEEMP) 的船舶, 都将接受港口国检验, 港口国有权不让尚未取得船级社颁发的 IEEC 证书的船舶进入其港口^[3]。

能效指数 EEDI 强制施行是 IMO 关于控制国际海运温室气体 CO₂ 排放的第一步; 2017 年 7 月, 环境保护委员会 (MEPC) 71 届会议开始讨论国际

收稿日期: 2017-07-26; 修回日期: 2018-02-13

基金项目: “十三五” 工信部高技术船舶-余热利用装置 (WHR) 应用研究 (K16023)。

作者简介: 王学敏 (1983-), 男, 高级工程师, 主要研究方向节能减排技术研究, wangxuemin2008@163.com。

船舶温室气体 CO₂ 减排战略草案^[4]，可预期未来国际船舶温室气体 CO₂ 减排要求会日趋严格。

1 MARPOL 附则 VI 框架下的 EEDI

1.1 适用范围

能效指数 EEDI 适用于 400 GT 及以上国际航行的所有船舶和重大改建的新船以及部分重大改建

$$\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{NME} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME(i)} \right) + \left(P_{AE} C_{FAE} SFC_{AE} \right) + \left(\left(\prod_{j=1}^M \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} \right) - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} SFC_{AE} - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME} SFC_{ME} \right)$$

$f_i Capacity V_{ref} f_w$

(1)

式中： C_F 为燃料消耗量转化为 CO₂ 排放量的无量纲转换系数； $P_{ME(i)}$ 为每台主机 75% 负荷时的功率； P_{AE} 为正常最大海况下所需的辅机功率； $P_{PTI(i)}$ 为每台轴带发电机额定功率除效率后的 75% 功率值； $P_{AEff(i)}$ 为采用能效创新使主机功率减少的效能功率的 75%； $P_{eff(i)}$ 为采用能效创新使辅机功率减少的效能功率的 75%； SFC 为单位油耗值； $Capacity$ 为装载量； V_{ref} 为航速，kn；下标 ME (i)、AE 表示主机、辅机； $f_{eff(i)}$ 为创新能效技术因子，对于余热回收系统为 1.0； f_j 、 f_w 、 f_i 为考虑不同海况下的修正系数，本文取值均为 1.0。

本文严格按“新造船能效设计指数计算方法导则”中规定的计算方法对 EEDI 进行计算，基线值采用丹麦提案 GHG-WG2/2/7 结果^[5-6]。

1.3 余热发电对降低 EEDI 的分析

文献 [6] 按照 MARPOL 附则 VI 中 EEDI 计

的现有船舶，目前适用包括：散货船、气体运输船、液货船、集装箱船、杂货船、冷藏船、兼用船、LNG 运输船、滚装货船（车辆运输船）、滚装货船、滚装客船及具有非常规推进动力的豪华邮轮。

1.2 EEDI 计算方法

EEDI 是用船舶 CO₂ 排放量与载货能力的比值来表征船舶的能效，计算公式如下：

算公式提供了 3 种典型散货船和 3 种典型油船的 EEDI 计算结果，可见：6 种典型船舶中辅助发电机功率占主机功率（MCR）的比例为 3.35% ~ 5.33%。从 EEDI 的计算公式可知：采用新的节能技术回收发电功率 P_{AEff} 可减少辅机燃油消耗，是降低 EEDI 的有效措施之一。根据 MAN B&W 余热利用设计报告^[6]：柴油机采用余热系统最大可回收主机功率 12% 的发电量。因此，选择合适的余热系统方案所回收的发电量可满足 6 种典型船舶全部用电需求。

表 1 为 6 种典型船舶采用和不采用余热利用系统情况下 EEDI 计算结果。分析可知：船舶采用余热利用系统后，EEDI 值可降低 5.2% ~ 7.55%，其中有两型船舶的 EEDI 计算值虽仍大于 EEDI 要求值，但偏差明显减小。

表 1 6 种典型船舶 EEDI 计算结果

船型	BC76K	BC115K	BC180K	OT115K	OT165K	OT318K
	散货船			油船		
船舶最大载重量 $Capacity/t$	75 800	115 280	180 000	115 000	165 000	318 000
船舶最大吃水时 $\sum P_{ME}$ 功率下航速 V_{ref}/kn	13.55	14.13	14.8	14.5	15	15.4
主机台数 n_{ME}	1	1	1	1	1	1
每台主机最大功率的 75% P_{ME}/kW	6 624.8	9 810	13 995	10 710	13 995	22 005
主机功率 P_{ME} 下单位油耗 $SFC_{ME}/(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1})$	167	169	171.1	171.1	171.1	168
主机 CO ₂ 无量纲转换系数 C_{FME}	3.114 4	3.114 4	3.114 4	3.114 4	3.114 4	3.114 4
正常航速工况下辅机功率 P_{AE}/kW	441.7	577	716.5	607	716.5	983.5
辅机单位油耗值 $SFC_{AE}/(g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1})$	205	205	205	205	205	205
辅机 CO ₂ 无量纲转换系数	3.114 4	3.114 4	3.114 4	3.114 4	3.114 4	3.114 4
EEDI 计算值（未采用余热系统）	3.629	3.4	2.971	3.655	3.198	2.479
EEDI 要求值（文献值）	4.312	3.48	2.77	3.884	3.203	2.257
EEDI 计算值（采用余热系统）	3.355	3.169	2.799	3.423	3.013	2.35
EEDI 降比	7.55%	6.79%	5.79%	6.35%	5.78%	5.20%

2 国内外船舶柴油机余热利用发电技术

国内对船舶柴油机余热综合利用发电技术研究

起步较晚，2017 年底，由中船集团联合哈尔滨工程大学完成的国内首台套船舶柴油机余热利用装置通过工信部验收。三菱重工、MAN B&W 和 Wartsila 等世界著名的柴油机及动力设备成套公司 20 世

纪70年代已开始余热利用技术研发,可根据主机特性提供不同的技术解决方案。

2.1 三菱重工余热利用方案^[7]

某7450TEU集装箱运货船采用日本三菱重工的余热利用装置,其流程如图1所示。主机最大持续功率为45 740 kW,转速78 ($r \cdot \min^{-1}$)。旁通13%主机排气用以驱动动力涡轮,然后与增压器的排气混合后进入双压余热锅炉。锅炉的给水先经缸套水换热器加热至75℃,再由两段式空冷器加热至135℃后分别进入锅炉的高、低压锅筒中。低压蒸发器、高压蒸发器经强制循环与烟气换热,分别产生0.35 MPa(a)的饱和蒸汽和0.65 MPa(a)/265℃的过热蒸汽,驱动汽轮机发电机组。为了防止动力涡轮掉电后超速,动力涡轮与汽轮机发电机组通过减速齿轮箱和高速离合器直连整装在一个平台上。

当主机工况大于35%时,汽轮机启动;当主机工况大于45%时,动力涡轮介入;当主机工况小于30%时,由于排气温度过低,为防止烟气中冷凝水产生酸露点腐蚀,烟气通过余热锅炉的旁通阀直接排空。系统可回收的额定发电量约为4 000 kW,占柴油主机功率的8.7%。

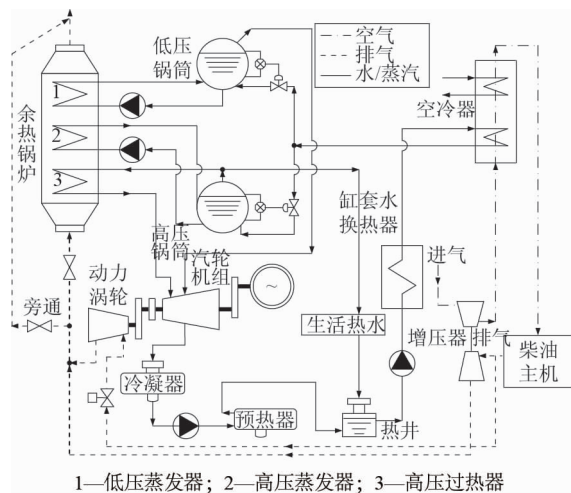


图1 三菱重工船舶柴油机余热综合利用流程图

2.2 MAN B&W 余热利用方案^[8]

图2为MAN B&W公司的柴油机余热综合利用流程图。10S90ME-C9.2柴油主机功率为48 510 kW,转速为84 ($r \cdot \min^{-1}$)。11.6%旁通废气驱动动力涡轮联合发电机组,系统采用了五段式强化换热强制循环余热锅炉。

循环水经缸套水换热器和两段式空冷器预热至144℃进入余热锅炉低压锅筒,低压蒸发器循环水分成两路,一路经低压预热器进一步加热后进入余热锅炉高压锅筒;另一路再回至低压锅筒。高压过

热器和低压过热器换热分别产生1.0 MPa(a)/259℃过热蒸汽和0.45 MPa(a)/148℃饱和蒸汽,驱动汽轮机由减速齿轮箱带动发电机发电。系统装置可回收的额定发电量为4 313 kW,约占柴油主机功率的8.9%。

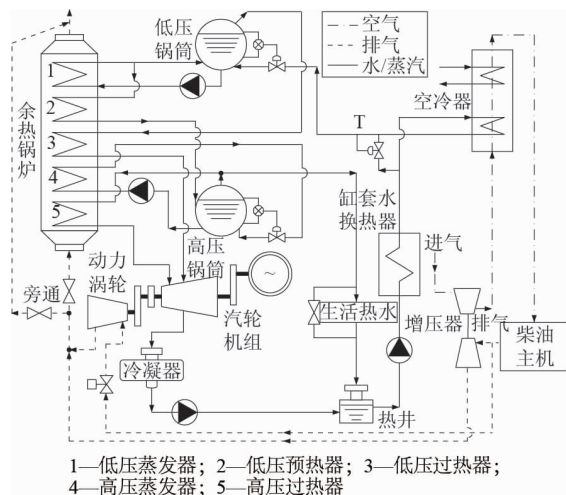


图2 MAN B&W 船舶柴油机余热综合利用流程图

2.3 瓦锡兰公司余热利用方案^[9]

瓦锡兰(Wartsila)公司12RTA96C船舶柴油主机的余热综合利用发电流程如图3所示。柴油主机功率为68 640 kW,主机约10%的排气驱动涡轮增压发电机组。系统总循环水经缸套水换热器预热至85℃,一路直接进入余热锅炉的低压锅筒,另一路再经过两段式空冷器加热至150~160℃进入余热锅炉高压锅筒。循环水流经强制循环余热锅炉的高压蒸发器和低压蒸发器,被柴油机排气加热,产生0.9 MPa(a)/260℃的高压过热蒸汽和0.35 MPa(a)/190℃的低压过热蒸汽,驱动汽轮机发电机组发电。该系统可回收的额定发电量约为7 000 kW,占柴油主机功率的10.2%。

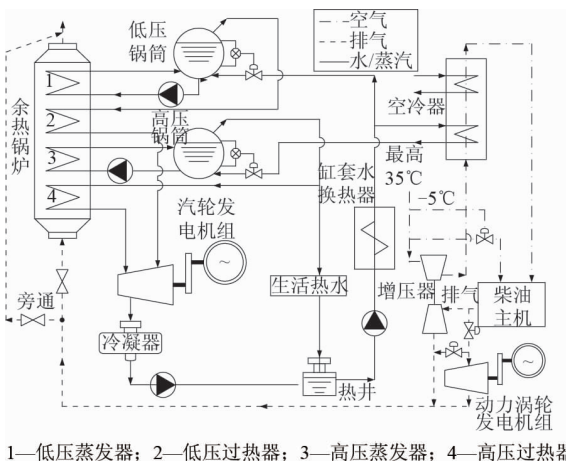


图3 瓦锡兰(Wartsila)船舶柴油机余热综合利用流程图

2.4 国内首台套船舶柴油机余热利用装置

基于调制后的 MAN B&W 6S50ME-C8.2 柴油机 (9 960 kW@127 (r·min⁻¹)) 研发的, 国内首台套自主余热利用试验装置 (WHR) 如图 4 所示。系统流程如图 5。该系统利用了柴油机缸套水和增压空气预热进入余热锅炉高、低压汽包的给水。立式蛇形管余热锅炉由高压过热器、高压蒸发器、低压蒸发器和热水器四段组成, 分别产生 0.65 MPa(a)/270 °C 过热蒸汽、0.4 MPa(a)/135 °C 饱和蒸汽和 0.5 MPa(a)/140 °C 热水, 阶梯利用柴油机排气能量, 产生过热蒸汽、饱和蒸汽和低压热水。该系统区别于国外先进的余热综合利用技术之处是: 验证了烟气换热的 0.5 MPa(a)/140 °C 热水能作为 ORC (有机朗肯循环) 发电系统的热源; 可采用螺杆膨胀机发电机组回收低温余热。



图 4 6S50ME-C8.2 柴油机余热利用装置

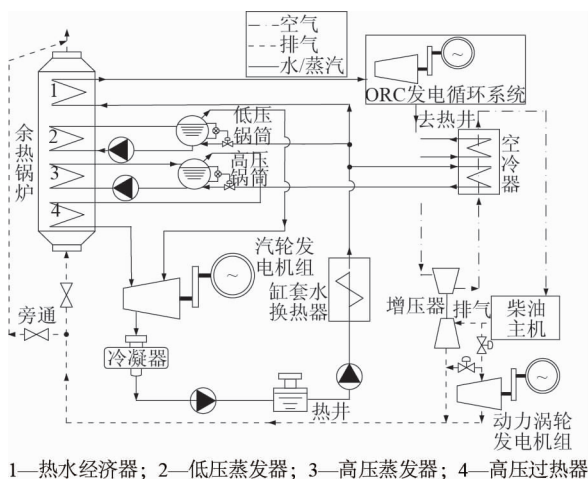


图 5 CSSC 船舶柴油机余热综合利用流程图

该装置于 2016 年 11 月在上海中船三井完成台架考核功能性试验。台架试验实测: 85% 柴油机工

况下, 装置总发电量 635 kW, 占柴油主机功率的 7.5%; 预测船舶柴油机等效油耗可降低 10.1 (g·kW⁻¹·h⁻¹)。

3 总 结

本文对比分析了 6 种典型船舶采用余热利用系统后的 EEDI 降低情况, 表明: 柴油机余热回收系统可以有效降低 EEDI, 按回收的发电量可满足船舶用电需求计算, 6 种典型船舶能效指数 EEDI 可降低 5.2% ~ 7.55%。通过对国内外船舶柴油机余热利用发电技术的调研及试验验证, 表明: 船舶采用合适的主机余热回收发电系统可有效降低等效油耗, 从而实现降低船舶能效设计指数的目的。

本文从 EEDI 公式出发, 验证了采用余热利用发电技术可最大程度减少辅机油耗, 从而实现降低 EEDI 的目的。但对于余热发电技术的实际装船应用, 船东会综合考虑初期投资成本、船舶经济性航速等因素, 因此, 余热利用技术对降低 EEDI 的贡献比还与实际的系统方案有关。

参考文献

- [1] 代磊, 郑卫刚. EEDI 发展及应对船舶温室气体介质排放对策 [J]. 节能, 2011 (2): 9-11.
- [2] 杨子龙. 船舶柴油机节能减排技术发展趋势 [J]. 柴油机, 2013, 35 (3): 21-24.
- [3] 中国船级社、中国船舶工业协会. 国际造船新公约、新规范、新标准技术. 培训教材 [R]. 2014.
- [4] 中国船级社. MEPC 71, 会议要点快报 [R]. 2017.
- [5] GHG-WG 2/2/7. Recalculation of energy efficiency design index baselines for cargo ship [R]. 2009.
- [6] 柳卫东, 陈兵. 新造船能效设计指数及其对船舶设计的影响 [J]. 船舶工程, 2010, 32 (2): 17-21.
- [7] ICHIKI Y, SHIRAISHI K, KANABOSHI T, et al. Development of super waste-heat recovery system for marine diesel engines [J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2011, 48 (1): 17-21.
- [8] MAN Diesel & Turbo. Waste heat recovery system (WHRS) for reduction of fuel consumption, emissions and EEDI [R]. 2012.
- [9] SCHMID H, POWER S. Less emissions through waste heat recovery [C]. The Green Ship Technology Conference, London, 2004.