

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

210 000 DWT 散货船主推进动力装置 EGR 及 SCR 技术应用对比研究

于 瑶, 张道志, 蒋雄健

(江南造船(集团)有限责任公司, 上海 201913)

摘 要: 针对 Tier III NO_x 排放法规, 基于 210 000 DWT 散货船主机, 对 EGR 及 SCR NO_x 减排技术的应用进行了对比研究。分析了二种技术的特点、成本差异, 并结合该船特点及系统布置认为: 在该项目中 SCR 系统更具有优势。该研究可为 NO_x 减排技术的选择提供借鉴。

关键词: 排放控制区; 主机; NO_x ; EGR; SCR

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)02-0014-06

The Comparison Research of EGR and SCR Technology Used on the Main Propulsion of a 210 000 DWT Bulk-Cargo Ship

Yu Yao, Zhang Daozhi, Jiang Xiongjian

(Jiangnan Shipyard Group Co., Ltd., Shanghai 201913)

Abstract: To comply with the Tier III NO_x legislations, based on the main engine of a 210 000 DWT bulk-cargo ship, the two NO_x reduction technologies which are EGR and SCR are compared and studied. The technical characteristics, cost difference are analyzed, and based on the characteristics and system layout of this ship, it is believed that SCR has more advantages. The research offers reference for the selection of NO_x reduction technologies.

Key words: emission control area; main engine; NO_x ; EGR; SCR

0 引 言

MARPOL 附则 VI Tier III 排放标准已实施, 其规定 2016 年 1 月 1 日及之后的新造船舶在 NO_x 排放控制区 (NO_x Emission Control Area, NECA) 内航行时, 应满足第三阶段标准。不同阶段对 NO_x 排放的限值要求见图 1。目前 NECA 区域主要为北美水域 (美国和加拿大附近水域), 而北欧 (波罗的海及北海等水域) NECA 也将于 2021 年 1 月 1 日正式生效^[1], 这对航行于这些海域的船舶来说影响深远, NECA 的日益扩大对船用柴油机的减排技术提出了更高的要求。

目前比较主流的减排技术主要有废气再循环

(EGR) 和选择性催化还原 (SCR)。本文主要针对这两种技术在 210 000 DWT 散货船主机上的应用进行对比研究, 分析其技术特点及成本差异, 为 NO_x 减排技术的选择提供借鉴和参考。

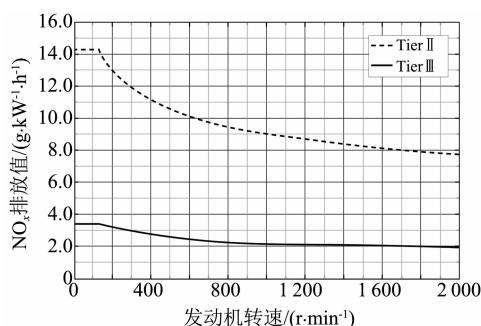
1 技术背景

1.1 废气再循环技术

废气再循环 (Exhaust gas recirculation, EGR) 是将部分 (30% ~ 40%) 废气重新循环进入燃烧室内参与燃烧的过程^[2]。如此, 参与燃烧的气体中部分氧气被二氧化碳替代, 使得空气的比热容变大, 从而降低了燃烧的峰值温度, 减少了 NO_x 的生成。

收稿日期: 2018-06-26

作者简介: 于瑶 (1986-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为民船轮机研发设计, yuyao110@163.com。

图1 不同阶段 NO_x 排放限值标准

EGR 系统主要由 EGR 单元、收集柜单元 (Receiving Tank Unit, RTU)、水处理系统 (Water Treatment System, WTS)、供给单元 (Supply Unit, SU) 以及相关控制系统组成。EGR 单元主要由洗涤器、EGR 中冷器、水雾分离器 (Water Mist Catcher, WMC) 等组成, 通常在其出口管路上会设置 EGR 风机用于控制 EGR 率; RTU 包括一个压力柜、循环泵及相关控制阀, 主要用于接收、循环冲洗、冷却 EGR 单元的洗涤水; WTS 包含一个 BTU (Buffer Tank Unit)、WTU (Water Treatment Unit) 和相关泵组及水质监控系统等; SU 主要由供给泵和 NaOH 泵组成, 一般做成单元形式。EGR 系统具体运行原理及流程见图 2。该系统中 WTS 主要用于处理和净化洗涤水, 因此须要消耗 NaOH^[3]。

NaOH 溶液具有腐蚀性和危险性, 低温下容易结晶, 因此针对船上储存该溶液须进行专门设计。NaOH 溶液耗量主要从四方面进行考虑: (1) NECA 航行时间及航行模式; (2) 燃油含硫量; (3) NaOH 溶液浓度; (4) 计划加注周期。

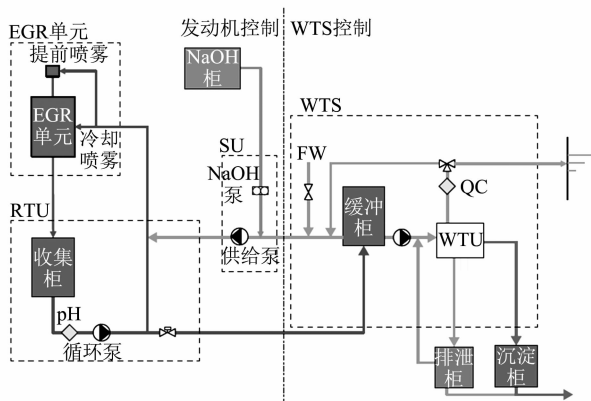


图2 EGR 系统组成及相关流程图

1.2 选择性催化还原技术

选择性催化还原 (Selective Catalytic Reduction, SCR) 是在催化剂的作用下利用还原剂 (常

用 40% 尿素水溶液) 与 NO_x 反应生成氮气和水等无害物质的过程, 是现阶段应用较为广泛的后处理技术^[2]。

SCR 系统对温度比较敏感, 所以须将反应温度控制在一定范围内。结合温度特性, 对于低速二冲程柴油机, 高压 SCR 系统 (HP-SCR) 可适用于高硫 (HS) 或低硫 (LS) 燃油; 而低压 SCR 系统 (LP-SCR), 则须增加加热系统或采用低温催化剂, 同时仅适用于低硫 (LS) 燃油^[4]。

由于 SCR 系统须要供给还原剂 (如 40% 浓度的尿素水溶液), 所以对船上如何储存尿素溶液提出了相关要求。SCR 系统流程原理如图 3 所示。研发阶段须对尿素舱容进行计算。而尿素耗量主要取决于尿素单位耗量、NECA 航行时间及航行模式、计划加注周期等几个方面。

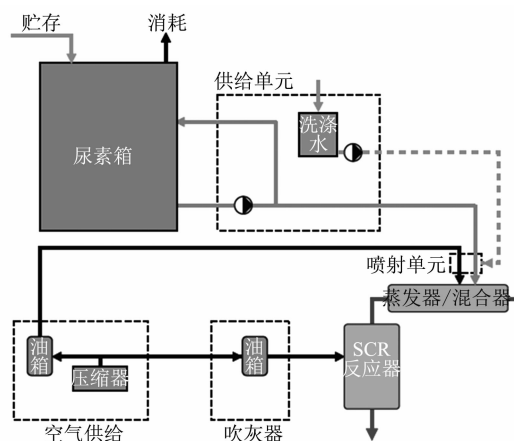


图3 SCR 系统尿素溶液供给系统流程图

2 技术对比

2.1 设计条件

下文主要从运行投入方面对 EGR 和 SCR 系统各自的特点进行分析。分析过程中的相关性能参数或耗量参数均基于 ISO 工况条件, 即基于空气温度 25 °C, 冷却水 25 °C 的条件。

210 000 DWT 散货船项目中, 主机相关技术参数及设定航行工况如表 1 所示, 本文各系统耗量结果也依据于此。

2.2 废气再循环

2.2.1 EGR 系统形式

EGR 系统有两种匹配形式, 分别为带 By-pass 和带 TC cut-out 形式。本项目主机缸径为 70 cm, 并且只配一个涡轮增压器, 因而采用 By-pass 匹配形式^[5] (图 4)。

由于 EGR 单元通常集成到主机上, 相比于标准机型, 加装 EGR 系统的主机尺寸会更大, 因此,

该方案对船体的艏部线型设计有一定要求。

表 1 主机技术参数及航行工况

主机型号	MAN B&W 6G70ME - C10.5
选定最大功率点 (100% SMCR) /kW@ (r · min ⁻¹)	14 760@ 74.5
服务功率点 (NCR, 85% SMCR) /kW@ (r · min ⁻¹)	12 546@ 70.6
50% SMCR/kW@ (r · min ⁻¹)	7 380@ 59.1
25% SMCR/kW@ (r · min ⁻¹)	3 690@ 46.9
燃油含硫量 (质量分数)	0.1% (TierⅢ标准)
NECA 单次航行总时间 T/h	100
主机 100% SMCR 负荷航行时间 T ₁ /h	10 (占 10% NECA 航行总时间)
主机 85% SMCR 负荷航行时间 T ₂ /h	60 (占 60% NECA 航行总时间)
主机 50% SMCR 负荷航行时间 T ₃ /h	20 (占 20% NECA 航行总时间)
主机 25% SMCR 负荷航行时间 T ₄ /h	10 (占 10% NECA 航行总时间)
NECA 航行频率/ (天/次)	50

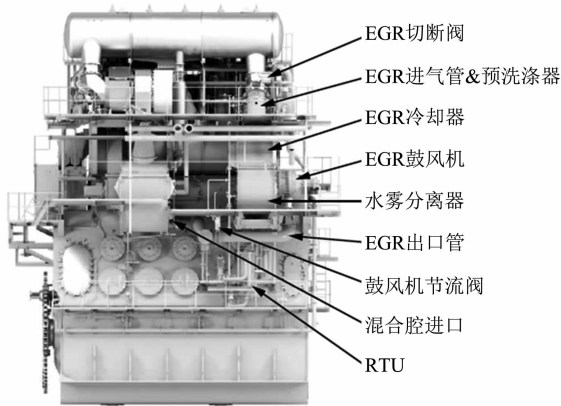


图 4 主机 EGR 带 By-pass 布置形式

2.2.2 EGR 系统耗量计算

(1) 燃油消耗量

由于 EGR 系统部分废气再循环, 燃烧状态发

生变化, 主机燃油消耗率 (Specific Fuel Oil Consumption, SFOC) 会有所增加。

ISO 条件下, 对比 TierⅡ 件标准机型, 加装 EGR 系统的主机油耗情况见表 2。

表 2 EGR 系统主机油耗

主机负荷	100% SMCR	85% SMCR (NCR)	50% SMCR	25% SMCR
SFOC (TierⅡ) / (g · kW ⁻¹ · h ⁻¹)	161.8	155.6	154.3	161.8
SFOC (TierⅢ) / (g · kW ⁻¹ · h ⁻¹)	163.8	160.4	161.3	165.8
各负荷航行时间/h	10	60	20	10
TierⅢ各工况油耗/t	24.2	120.7	23.8	6.1
总油耗/t	174.8			

(2) 设备电功耗

EGR 系统耗电设备主要有 EGR 风机以及 WTS 系统中的各种电动泵, 具体耗电如表 3 所示。

(3) NaOH 溶液消耗量

考虑到船上 NaOH 溶液储存及维护的便捷性, 可选用 30% 质量分数的 NaOH 溶液, 以减少辅助加热设备。NaOH 柜可做成独立箱柜 (采用特殊材料, 如不锈钢等) 或结构箱柜 (表面经过特殊处理)。NaOH 溶液消耗量见表 4。

(4) 污水产生量

EGR 系统中的洗涤水通过 WTS 做净化处理, 产生的污水被排放到污水舱。基于含水量 93%、含固体杂质 7% 的污水产生量如表 5 所示。

(5) 泄放水产生量

WTS 系统中经过处理后产生的过量洗涤水, 满足相应排放条件可以排出舷外, 如果由于当地排放法规的限制不能排放, 则需要考虑暂时储存在泄放舱内。泄放舱舱容可结合排水量和排放次数计算得到。

表 3 EGR 系统设备电功耗

燃油含硫量		0.1%		3.5%	
WTS 单位功耗 (SMCR) / (kW · MW ⁻¹)		1.8		3.3	
主机负荷		100% SMCR	85% SMCR (NCR)	50% SMCR	25% SMCR
EGR 风机功耗/kW		58	57	50	58
WTS 功耗/kW	0.1%	27.3	27.3	27.3	27.3
	3.5%	48.7	48.7	48.7	48.7
总功耗/kW	0.1%	85.3	84.3	77.3	85.3
	3.5%	106.7	105.7	98.7	106.7
各负荷航行时间/h		10	60	20	10
设备总耗能/ (kW · h)	0.1%	8 310			
	3.5%	10 450			

表 4 EGR 系统 NaOH 溶液消耗量

主机负荷		100% SMCR	85% SMCR (NCR)	50% SMCR	25% SMCR
NaOH 溶液耗量 (SMCR) / (L · h ⁻¹ · MW ⁻¹)	0.1%	0.28	0.26	0.18	0.11
	3.5%	10.0	9.3	6.5	4.1
NaOH 溶液单位耗量/ (L · h ⁻¹)	0.1%	4.1	3.8	2.7	1.6
	3.5%	147.6	137.3	95.9	60.5
各负荷航行时间/h		10	60	20	10
各工况 NaOH 溶液耗量/m ³	0.1%	0.04	0.23	0.05	0.02
	3.5%	1.5	8.2	1.9	0.6
NaOH 溶液总耗量/m ³	0.1%	0.34			
	3.5%	12.2			

表 5 EGR 系统污水产生量

主机负荷		100% SMCR	85% SMCR (NCR)	50% SMCR	25% SMCR
污水产生量 (SMCR) / (L · h ⁻¹ · MW ⁻¹)	0.1%	0.21	0.18	0.12	0.09
	3.5%	2.5	2.3	1.3	0.7
污水产生量/(L · h ⁻¹)	0.1%	3.1	2.7	1.8	1.3
	3.5%	36.9	33.9	19.2	10.3
各负荷航行时间/h		10	60	20	10
各工况污水产生量/m ³	0.1%	0.03	0.16	0.04	0.01
	3.5%	0.4	2.0	0.4	0.1
污水总产生量/m ³	0.1%	0.24			
	3.5%	2.9			

表 6 EGR 系统泄放水产生量

主机负荷		100% SMCR	85% SMCR (NCR)	50% SMCR	25% SMCR
泄放水产生量 (SMCR) / (L · h ⁻¹ · MW ⁻¹)	0.1%	40	35	21	10
	3.5%	52	47	31	21
泄放水产生量/ (m ³ · h ⁻¹)	0.1%	0.59	0.52	0.31	0.15
	3.5%	0.78	0.69	0.46	0.31
各负荷航行时间/h		10	60	20	10
各工况泄放水产生量/m ³	0.1%	5.9	31.2	6.2	1.5
	3.5%	7.8	41.4	9.2	3.1
泄放水总产生量/m ³	0.1%	44.8			
	3.5%	61.5			

2.3 选择性催化还原

2.3.1 SCR 系统形式

本项目主机采用低速二冲程柴油机，结合燃油灵活性、机舱区域布置，以及厂家推荐的系统形式等因素，主机 SCR 系统采用 HP-SCR 形式。

2.3.2 SCR 系统耗量计算

(1) 燃油消耗量

加装 SCR 系统会影响主机的性能，对比 Tier II 的标准机型，加装 SCR 系统后，主机单位油耗会有所增加，具体情况见表 7。

(2) 设备电功耗

SCR 系统耗电设备主要有电动泵、小型风机及辅助加热设备等，总电功耗可粗略按 5 (kW · MW⁻¹) (SMCR) 来计算。本项目主机 (SMCR) 功率为 14 760 kW，则设备总电功耗约为 73.8 kW，设备总耗能如表 8 所示。

(3) 尿素溶液消耗量

系统采用 40% 质量分数的尿素水溶液，尿素柜可做成独立箱柜 (采用特殊材料，如不锈钢等) 或结构箱柜 (表面经过特殊处理)，表 9 为尿素水溶液耗量计算。

表 7 加装 SCR 系统主机油耗

主机负荷	100% SMCR	85% SMCR (NCR)	50% SMCR	25% SMCR
SFOC (Tier II) / ($\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	161.3	155.6	154.3	161.8
SFOC (Tier III) / ($\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	161.8	156.4	156.3	165.5
各负荷航行时间/h	10	60	20	10
Tier III 各工况油耗/t	23.9	117.7	23.1	6.1
总油耗/t	170.8			

表 8 SCR 系统设备总耗能

主机负荷	100% SMCR	85% SMCR (NCR)	50% SMCR	25% SMCR
各负荷航行时间/h	10	60	20	10
各工况总功耗/kW	73.8	73.8	73.8	73.8
设备总耗能/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)	7 380			

表 9 SCR 系统尿素水溶液耗量

主机负荷	100% SMCR	85% SMCR (NCR)	50% SMCR	25% SMCR
尿素水溶液单位耗量/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	210	210	170	110
各负荷航行时间/h	10	60	20	10
各工况尿素水溶液耗量/ m^3	2.1	12.6	3.4	1.1
尿素水溶液总耗量/ m^3	19.2			

NECA 停港工况, 主机处于停机状态, HP-SCR 系统未开启, 无尿素消耗。

此外, 如果主发电柴油机也加装 SCR 系统 (通常为 LP-SCR 形式), 则还须额外计算发电柴油机的尿素消耗量。本文主要研究主机 SCR 系统的相关特性, 故在此不做具体描述。

(4) 其他消耗量

SCR 反应须要在催化剂的作用下才能进行。随着使用时间的增长, 催化剂也存在一定的寿命, 为

了保证反应的有效性, 须要定期更换催化剂, 因此催化剂耗量也属于 HP-SCR 系统运行成本中的一部分。根据沪东重机推荐: 一般采用三层催化剂; 更换策略为每四年整体更换一次; 四年内逐年更换一层, 即 24 年共使用 14 层催化剂, 平均 0.58 层/年。

3 成本对比分析

本项目的 EGR 系统和 SCR 系统的成本分析见表 10。

表 10 EGR 系统和 SCR 系统成本分析

系统	废气再循环 (EGR)		选择性催化还原 (SCR)	
初期成本 * ¹	报价 154.5 万美元		报价 87.4 万美元	
运营成本 * ²	主机总油耗 * ³ /t	174.8	主机总油耗 (吨) * ³ /t	170.8
	燃油含硫量	0.1%	燃油含硫量	0.1%
	燃油单价/ ($\text{\$} \cdot \text{t}^{-1}$)	600	燃油单价/ ($\text{\$} \cdot \text{t}^{-1}$)	600
	燃油总价/ \$\text{\\$}	104 880	燃油总价/ \$\text{\\$}	102 480
	设备总耗能/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)	8 310	设备总耗能/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)	7 380
	折算成发电机油耗 * ⁴ /t	1.7	折算成发电机油耗 * ⁴ /t	1.5
	折算燃油价格/ \$\text{\\$}	1 020	折算燃油价格/ \$\text{\\$}	900
	NaOH 溶液总耗量 * ⁵ / m^3	0.34	尿素溶液总耗量 * ⁶ / m^3	19.2
	NaOH 溶液单价/ ($\text{\$} \cdot \text{t}^{-1}$)	200	尿素溶液单价/ ($\text{\$} \cdot \text{t}^{-1}$)	350
	NaOH 溶液总价/ \$\text{\\$}	90	尿素溶液总价/ \$\text{\\$}	7 459
	单次航行运行总成本 * ⁷ / \$\text{\\$}	105 990	单次航行运行总成本 * ⁷ / \$\text{\\$}	110 839
维护成本 * ²	1 年运行总成本 * ⁸ / \$\text{\\$}	741 930	1 年运行总成本 * ⁸ / \$\text{\\$}	775 873
	-	-	1 年催化剂维护成本/ \$\text{\\$}	11 800
	其他/ ($\text{\$} \cdot \text{y}^{-1}$)	3 542	其他/ ($\text{\$} \cdot \text{y}^{-1}$)	1 771
总投入成本	1 年维护总成本/ ($\text{\$} \cdot \text{y}^{-1}$)	3 542	1 年维护总成本/ ($\text{\$} \cdot \text{y}^{-1}$)	13 571
	初期 + 运营 + 维护成本/万 \$\text{\\$}	229.0	初期 + 运营 + 维护成本/万 \$\text{\\$}	166.3

备注:

- *¹ 初期成本中各系统报价由沪东重机提供;
- *² 运营及维护成本中相关价格参数由 MAN 公司提供;
- *³ Tier III 模式下主机总油耗量;
- *⁴ 发电柴油机单位油耗按 $195 \text{ (g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ 来估算, 发电机效率为 95%;
- *⁵ 30% NaOH 溶液密度为 $1.33 \text{ (kg} \cdot \text{L}^{-1})$;
- *⁶ 40% 尿素水溶液密度为 $1.11 \text{ (kg} \cdot \text{L}^{-1})$;
- *⁷ 采用 EGR 或 SCR 技术单次航行所须投入的运行成本;
- *⁸ NECA 航行频率为 50 天/次, 一年 NECA 航行次数为约为 7 次。

4 结束语

通过对主机 EGR 和 SCR 两种系统经济性特点的分析, 可以得出如下结论:

(1) 采用两种系统均会增加主机燃油消耗。就本机型计算结果而言, SCR 系统对 SFOC 的影响较小, 这主要与 SCR 系统不直接参与燃烧进程, 对燃烧状况影响较小有关。

(2) 两种系统均会增加电功率损耗, 主要是部分辅助系统的供电需求, 但相差不大。

(3) EGR 系统须消耗 NaOH 溶液, 中和洗涤水中过量的酸性物质, NaOH 溶液的浓度和耗量与燃油含硫量密切相关; 其次由于洗涤循环废气中的杂质等, 也会产生一定量的污水。而 SCR 系统则需要足量的还原剂 (如 40% 尿素水溶液), 由于尿素耗量较大, 船上安装相关系统时须考虑合理布置尿素柜。

(4) 两种系统均还需要其他的一些辅助系统或设备, 在初期设计中都须考虑一定的成本。

结合本项目自身特点、EGR 与 SCR 两种系统的成本对比以及系统布置等因素, 对于 MAN B&W 6G70ME - C10.5 柴油机而言, SCR 系统更具有优势。同时在处理低速机 NO_x 排放上, SCR 系统相

比较 EGR 系统, 有更多的设备厂家可供选择, 且目前应用群体相对较多, 因此本船初步选定 SCR 系统作为主机降低 NO_x 排放的方式。

实际应用中, 船舶主机 NO_x 处理系统的选用是船厂、制造商、船东以及市场具体情况等多方因素综合考量的结果。本船在现阶段初步选用 SCR 系统作为主机 NO_x 处理方式较为合适, 但随着时间的推移, 还可根据市场动态、船东需求、以及主流 NO_x 处理系统配置等情况再进行综合分析考虑。

参考文献

- [1] IMO. MARPOL 公约附则 VI 修正案 [R]. 2008.
- [2] MAN Energy Solutions. Emission Project Guide for MAN B&W Two - stroke Marine Engines [R]. 2017.
- [3] 魏宇坤, 安士杰, 张志友. EGR 率对船用柴油机中低负荷燃烧排放性能影响的仿真及试验研究 [J]. 柴油机, 2016, 38 (2): 11-15.
- [4] 王磊, 李一旻, 陈小雷. 大型船用柴油机高压 SCR 系统研究 [A]. 上海市船舶与海洋工程学会 2017 年学术年会轮机专场论文集 [C]. 2017.
- [5] MAN Energy Solutions. MAN Diesel & Turbo Main Engine Comparison [R]. 2017.

Norsepower 公司旋筒风帆动力装置通过型式认证

为船舶提供辅助风力推进的 Norsepower 公司称, 其旋筒风帆动力装置 (Rotor Sails) 已经获得了首个型式认证设计证书, 该辅助风力推进系统安装在 Maersk Pelican LR2 号油船上。

DNV · GL 船级社的型式认证证书是在对 Norsepower 公司的两个高 30 m, 直径 5 m 的旋筒风帆动力装置的设计评审后于 2019 年 2 月颁发的。获得该证书意味着安装了 Norsepower 的旋筒风帆动力装置的船舶从技术层面来说能够在所有的运行和环境条件下安全地航行。

Norsepower 的旋筒风帆动力装置已经装在 3 艘船上, 而且已经运行了 35 000 h 多, 据报道已经减少了至少 4 500 t CO_2 排放。据 Norsepower 公司介绍, 通过独立验证, 旋筒风帆动力装置具有节省燃料高达 20% 的潜力。

(李积轩 编译)