

基于 EEDI 的 8 000 吨级近海油轮节能减排因素分析

石 峰¹, 吴 杰²

(1. 南京理工大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210000; 2. 长江引航中心 南通引航站, 江苏 南通 226000)

摘 要:在介绍 EEDI(船舶能效设计指数)背景以及影响的基础上,突出船舶节能减排理念。以 8 000 吨级近海油轮为研究对象,提出油船的 EEDI 计算公式,计算该船的 EEDI 结果。从影响 EEDI 变化的三个主要因素——载重量、主机功率、航速出发,研究油轮的节能减排,进而为该类船型控制 CO₂ 排放和提高船舶自身性能提供依据。

关键词:船舶能效设计指数;油轮主机;节能减排

中图分类号:U676.3

文献标志码:A

文章编号:1671-9891(2019)03-0031-08

0 引言

EEDI 全名船舶能效设计指数(Energy Efficiency Design Index),是船舶消耗的能量换算成 CO₂ 排量和船舶有效能量换算成 CO₂ 排量的比例指数。EEDI 的设立是为船舶建立一个最低能源效率的标准,一般而言,EEDI 指数越高,能源效率越低。^[1]鉴于能源效率与二氧化碳联系的紧密性,IMO 设立 EEDI 标准后,通过设定最大允许 EEDI 指数,然后规定在未来几年内逐步减小(2020 年 30%,2025 年 20%,一直到 2025 年后达到 10%)。EEDI 的形成主要经历了以下过程:1997 年,在 MARPOL 公约缔约国大会上,IMO 通过一项研究船舶 CO₂ 排放问题的决议。2007 年,IMO 环保委员会(MEPC)第 56 次会议确定在新造船的设计上可采取技术性措施进行节能减排。2008 年,MEPC 第 57 次会议制定“强制性新造船 CO₂ 设计指数”,委员会同意会议按照“新造船 CO₂ 设计指数”“营运船 CO₂ 排放指数”以及“市场机制”三个模块进行审议。MEPC 第 58 次会议形成了“新造船 EEDI 计算方法临时导则草案”,MEPC 第 59 次会议对 EEDI 导则草案做了进一步修订,强制要求该指数适用于 400 总吨以上的船舶,于 2013 年 1 月 1 日生效。中国船级社(CCS)关于 EEDI 的验证评估主要推出以下内容:2012 年 7 月《内河船舶能效设计指数(EEDI)评估指南》以及在 2012 年 12 月《船舶能效设计指数(EEDI)验证指南》^[2]。EEDI 公式综合考量了传统设计技术、使用技术、耐波性以及高科技新技术。传统设计技术主要考虑阻力优化,采用优秀型线,实用技术取 75%MCR 为节能指标,耐波性角度主要考虑船舶失速系数 FW,采用节能措施和装备改变新技术,具体体现为:(1)水动力性能设计——复杂流动现象以及预报和控制船舶强非线性/动态载荷与响应的基础性研究,主要包括建模、精细测量和 CFD 技术研究^[3]。(2)结构轻量化设计——结构优化设计技术。(3)动力适配技术——船舶推进集成技术与系统性能仿真研究,推进系统各部件匹配技术研究,船舶推进系统综合优化控制技术。(4)先进设计技术——船型优化设计、绿色船舶性能优化设计、船舶总体构型技术、船舶多学科优化技术。

1 8 000 吨级近海油轮参数介绍

本文主要以 8 000 吨级近海油轮为研究对象,提出油船的 EEDI 计算公式,计算该船的 EEDI 结果,结合衡准要求,满足能效指标。最后从影响 EEDI 变化的三个主要因素——载重量、主机功率、航速入手,研究三因素与油轮节能减排上的关系,进而为该类船型控制 CO₂ 排放和提高船舶自身性能提供依据。

8 000 吨级近海油轮为钢质船体,单甲板,首尾及机舱、泵舱设平台甲板,货油舱区域设双壳、双层底,球鼻首,方型艉,单桨单舵单柴油机近海 I 级油船,设有 12 个货油舱、艏艉楼和四层甲板室。8 000 吨级近海油

收稿日期:2019-02-02

作者简介:石峰(1989—),男,江苏南通人,南京理工大学材料科学与工程学院硕士生。

轮航行于国内近海航区(冰区除外)各港口之间,也可进入长江中下游地区航行,可载运闪点 $<60^{\circ}\text{C}$ 的成品油。该船的主要尺度和参数:总长 $L_{OA}=123.90\text{ m}$,设计水线长 $L_{WL}=117.88\text{ m}$,垂线间长 $L_{PP}=115.00\text{ m}$,型宽 $B=18.00\text{ m}$,型深 $D=9.20\text{ m}$,设计吃水 $d=6.80\text{ m}$,满载排水量 $\Delta=11\,743.0\text{ t}$,载重量 $W=8\,973.66\text{ t}$ 。主机采用 G16V300ZCB 型船用柴油机 1 台,额定功率 $2\,940\text{ kW}$,额定转速 500 r/min 。离合器为 GWC60.66 型船用齿轮箱 1 台,减速比 $2.85:1$ 。发电机组由 4135ZCaf 型船用柴油机 2 台构成,功率 132.5 kW ,转速 $1\,500\text{ r/min}$,TFH-H-120 型三相交流发电机 2 台,功率 120 kW ,转速 $1\,500\text{ r/min}$ 。螺旋桨为 MAU 型,直径 3.70 m ,螺距 2.886 m ,螺距比 0.78 ,盘面比 0.65 ,5 叶。航速要求本船在设计吃水 $d=6.80\text{ m}$,主机功率 $P=2\,940\text{ kW}$,转速 $N=500\text{ r/min}$,且风力不大于蒲氏风标三级时,其满载试航速率不低于 12.0 kn 。

2 8 000 吨级近海油轮 EEDI 计算公式

8 000 吨级近海油轮的 EEDI 首先考虑以下两个方面:(1)由于 8 000 吨级近海油轮采用主机推进系统,EEDI 计算以主机部分为准;(2)载重量的计算按照实际船的载重量为准。按照该船稳性计算书中数据,参考下列资料:总布置图、型线图、静水力曲线表、稳性横截曲线表。首尾楼计入稳性曲线,其上层建筑结构必须符合规范要求,门窗应符合载重线的要求,在恶劣天气中门窗应能保持关闭,各排水管道出口处应设置符合规范要求的止回阀。在空载时,应按计算书要求在各压载水舱内注满压载水,压载水舱不得存在自由液面。同时只允许一对货油舱存在自由液面,其它货油舱应为空舱或满舱(98%)^[4]。为了方便计算,以满载出港工况下的节能减排作为依据,该油船的 EEDI 公式为:

$$EEDI = \frac{P \times C_F \times SFC}{f_i \times Capacity \times v_{ref} \times f_j \times f_{eff}} \quad (1)$$

其中分子部分表示油船在实际工况下所耗燃油所转换成 CO_2 的排放量,分母部分体现了油船最大工况下的载重量($Capacity$)和航速(v)的乘积,并考虑了载重量修正系数以及航行过程中受到地质和水域风浪(比如结冰因素等)的修正系数^[5]。EEDI 的数值单位是 $\text{g}(\text{CO}_2)/(\text{t}\cdot\text{nm})$ 。公式中的相关参数罗列如下:

C_F ——燃油的碳转换系数,针对柴油机无量纲 CO_2 转化因子 $C_F=3.114$;

P ——G16V300ZCB 型船用柴油机 1 台,额定功率 $2\,940\text{ kW}$,额定转速 500 r/min 。 P_{ME} 取为该船柴油机的总功率的 75%,所以 $P_{ME}=0.75 \times 2\,940 = 2\,205\text{ kW}$;

$Capacity$ ——8 000 吨级近海油轮满载出港工况下的载重量 $8\,400\text{ t}$;

SFC ——柴油机燃油消耗量, 178 g/kWh ;

f_i ——载重量的修正系数,修正系数为 1;

f_j ——冰区加强修正系数,修正系数为 0.95;

v_{ref} ——最大航速;

f_{eff} ——能效创新系数,修正系数为 1。

结合以上参数,可得到 8 000 吨级近海油轮的 EEDI 为:

$$EEDI = \frac{2\,205 \times 3.114 \times 178}{1 \times 8\,400 \times 12 \times 0.95} = 12.76\text{g}(\text{CO}_2)/(\text{t}\cdot\text{nm})$$

3 影响油轮 EEDI 变化的三个主要因素分析

MEPC 对 EEDI 公式做了明确推广,包括一些工作船、多用途船等。丹麦提案做了一系列的数值回归,得到一指数函数 $EEDI = a \times Capacity^c$,式中 a 、 c 为常数,如表 1 所示,该公式计算得到 EEDI 值作为衡准值。中国提案为了验证这个公式的准确性也进行一系列船型的计算回归,如图 1 所示。

本文研究对象为油船,结合以上的回归公式计算得出 8 000 吨级近海油轮的参考值。计算公式:衡准值 $EEDI = 1\,905.7 \times Capacity^{-0.5337}$ 。因此本船的 EEDI 值为 $EEDI = 1\,905.7 \times 8\,400^{-0.5337} = 15.33\text{g}(\text{CO}_2)/(\text{t}\cdot\text{nm})$ 。综上分析可得,8 000 吨级近海油轮的 EEDI 计算值为衡准值为 $12.76\text{g}(\text{CO}_2)/(\text{t}\cdot\text{nm})$,前者小于后者,满足船舶能效指标满足。

8 000 吨级近海油轮主要通过主机进行推进,该船 EEDI 公式可以简化成:

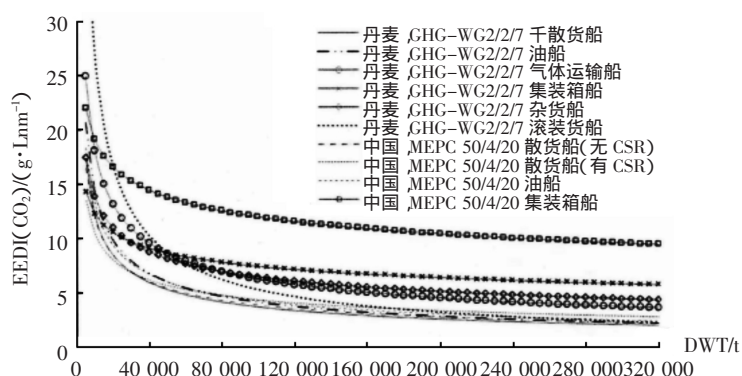


图1 参考线公式比较(丹麦—中国)

表1 新参考线公式

类型	a	Capacity	c	船数
散货船	1 354	DWT	0.51	2 365
油船	1 950		0.53	3 100
LNG	1 253		0.46	410
集装箱船	139		0.22	2 188
杂货船	290		0.33	1 820
滚装船	19 700		0.71	400

$$EEDI = \frac{P \times SFC \times C_F}{Capacity \times v_{ref}} \quad (2)$$

公式(2)中 C_F 代表燃油的碳转换系数, P 由 P_{ME} 代替, 代表船柴油机推进功率; $Capacity$ 为特定工况下的 DWT; SFC 为该船的柴油机燃油消耗; v_{ref} 表示最大航速。

可见要想提高 8 000 吨级近海油轮的 EEDI, 可以通过载重量、主机功率、航速以及推进器的型号等因素进行考虑。本文主要从载重量、航速和主机功率三个因素研究该船的 EEDI。

(1) 载重量因素分析。为了分析 8 000 吨级近海油轮的 DWT (载重量为 8 400 t) 与 EEDI 之间的关系, 需要对内部的几个量值进行说明: 主机为 G16V300ZCB 型船用柴油机 1 台, 额定功率 2 940 kW, 额定转速 500 r/min, 载重量按照线性递减进行处理, 排水量与航速之间关系运用海军系数法进行分析。具体调整如下:

$$v_1 = \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_1} \right)^{\frac{9}{2}} \times v_0 = \left(\frac{LW_0 + DW_0}{LW_1 + DW_1} \right)^{\frac{9}{2}} \times v_0 \quad (3)$$

为了详细计算不同船舶载重量与 EEDI 关系, 对油船的货物重量进行每 200 t 均匀递减, 如表 2 所示, 计算结果对比如图 2 所示。

表2 载重量(DWT)与 EEDI 的关系

载重量/t	航速/kn	计算值	衡准值	计算值/衡准值
8 400	12.00	12.76	15.33	0.83
8 200	12.05	13.02	15.53	0.84
8 000	12.10	13.29	15.74	0.84
7 800	12.15	13.58	15.95	0.85
7 600	12.20	13.88	16.18	0.86
7 400	12.25	14.19	16.41	0.86
7 200	12.31	14.52	16.65	0.87

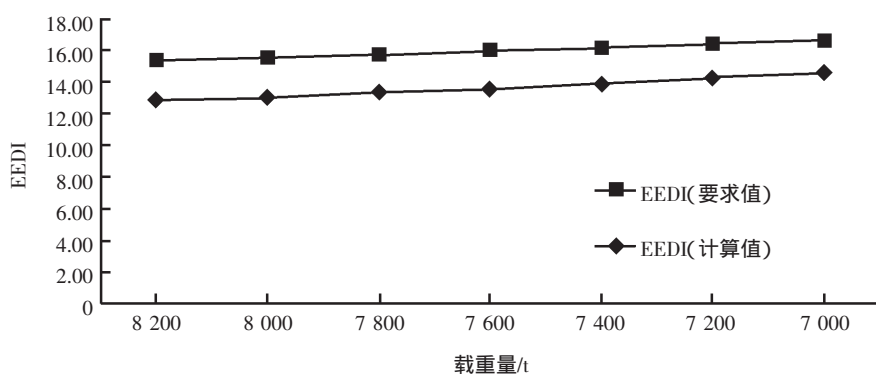


图2 载重量变化对 EEDI 影响

从表2和图2的结果对照分析中可以得出结论:载重量减小,航速增加,EEDI计算值呈现递增趋势,可见该油船改变载重量对于节能减排是不利的。载重量减小,衡准值(EEDI)随之递增,计算值离衡准值越来越近。可见半载和空载情况下单减小载重量对于EEDI也是不利的。由载重量-EEDI曲线可知,EEDI的衡准指标要求,计算值<衡准值,满足船舶能效设计指数的要求,但是依然不能满足IMO的第二阶段减排20%的目标,所以一味改变装载量不能解决问题。

(2)主机功率因素分析。要研究8000吨级近海油轮的主机功率与EEDI之间的关系,必须考虑以下几个参数:8000吨级近海油轮载重量8400t保持不变,主机功率从2205kW开始,每隔50kW进行递减,航速通过以下无量纲因子计算。

$$v_1 = \sqrt[3]{\frac{\Delta_0^{\frac{2}{3}} \times v_0^3 \times P_1}{\Delta_1^{\frac{2}{3}} \times P_0}} = \sqrt[3]{\frac{v_0^3 \times P_1}{P_0}} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}} \times v_0 = \left(\frac{MCR_1}{MCR_0}\right)^{\frac{1}{3}} \times v \quad (4)$$

计算不同主机功率与EEDI之间关系,对主机功率进行每50kW递减,如表3所示,计算结果对比如图3所示。

表3 主机功率与 EEDI 的关系

载重量/t	主机功率/kW	航速/kn	计算值	计算值/衡准值
8 400	2 205	12.00	12.76	0.83
	2 155	11.91	12.57	0.82
	2 105	11.82	12.37	0.81
	2 055	11.72	12.18	0.79
	2 005	11.63	11.98	0.78
	1 955	11.53	11.78	0.77
	1 905	11.43	11.58	0.76
	1 855	11.33	11.37	0.74
	1 805	11.23	11.17	0.73
	1 755	11.12	10.96	0.72

从表3和图3对照分析可知,航速随着主机功率减小而减小,EEDI的计算值也随着主机功率降低而减小。由于衡准值跟主机功率没有直接关系,所以衡准值保持不变。计算所得EEDI值小于衡准值,满足满载船舶能效指标要求。由主机功率对EEDI的影响曲线可知,当8000吨油轮的主机功率达到2205kW时,满足IMO的第二阶段减排20%的目标。随着主机功率减小,计算值与衡准值之间的差值就越大。由此可得主机功率对8000吨级近海油轮的节能减排效果是明显的。

(3)航速因素分析。最后研究8000吨级近海油轮的航速因素与EEDI之间的关系。同样需要对载重量和主机功率参数进行说明:油轮载重量8400t保持不变,该船的航速以0.2kn均匀降低,主机功率与航速

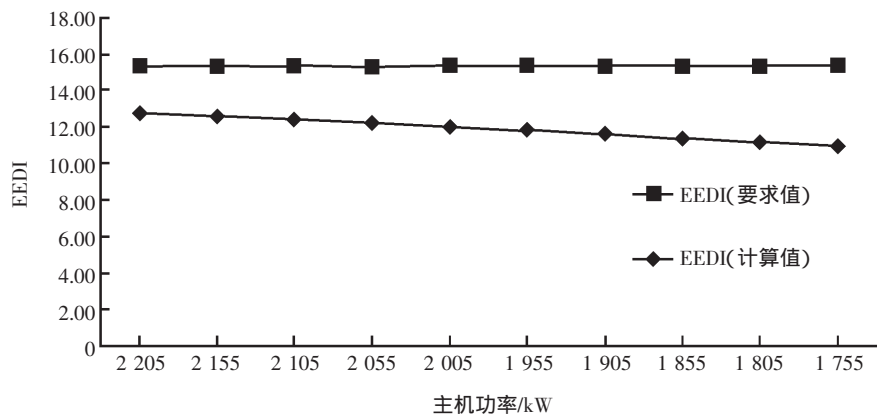


图 3 主机功率变化对 EEDI 影响

之间的关系还是用海军系数法来表示。

$$P_1 = \left(\frac{v_1}{v_0}\right)^3 \tag{5}$$

计算不同航速与 EEDI 之间关系,如表 4 所示,计算结果对照如图 4 所示。

表 4 航速与 EEDI 的关系

航速/kn	主机功率/kW	计算值	计算值/衡准值
12.0	2 205	12.76	0.83
11.8	2 097	12.34	0.81
11.6	1 992	11.93	0.78
11.4	1 891	11.52	0.75
11.2	1 793	11.12	0.73
11.0	1 698	10.72	0.70
10.8	1 607	10.34	0.67
10.6	1 520	9.96	0.65
10.4	1 435	9.59	0.63
10.2	1 354	9.22	0.60

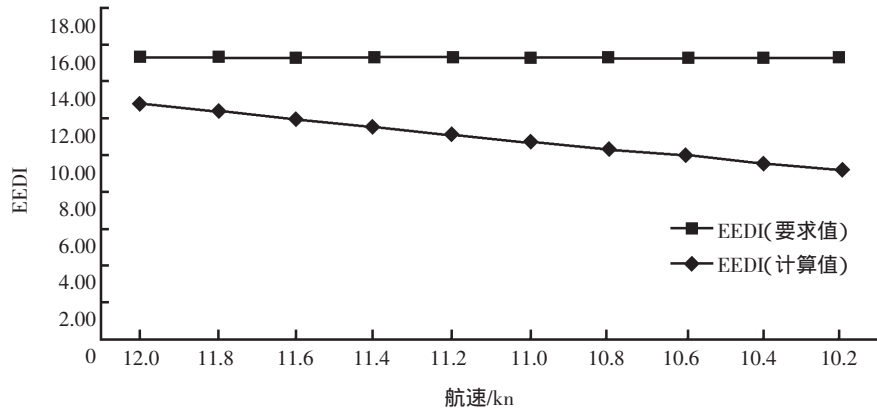


图 4 航速对 EEDI 影响

从表 4 和图 4 的结果对照中发现:主机功率随着航速减小而减小,计算得到该船的节能指标随之下降。由于衡准值跟航速没有直接关系,该值在曲线上保持不变。同时节能指标的计算值小于衡准值,满足船舶能效指标。由航速对 EEDI 的影响曲线可知,通过改变航速达到 12 kn 时满足 IMO 的第二阶段减排 10% 的目标。航速越小,计算值与衡准值之间的差值越来越大,由此可得船舶航速因素对 8 000 吨级近海油轮的节能

减排效果是明显的。

(4)载重量和主机功率联合因素分析。由因素分析(1)(2)(3)可知,载重量的变化对 EEDI 的影响不利,而航速和主机功率对 EEDI 有利。然而单单改变一种因素对 EEDI 影响片面,所以联合载重量和主机功率两种因素研究他们对 EEDI 的影响。

为了更好地分析他们之间的关系,首先需对主机功率、载重量和航速参数进行说明:主机功率还是以 50 kW 均匀降低,载重量按照线性减小 200 t 进行处理,通过海军系数法对航速进行计算。

$$v_1 = \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_1}\right)^{\frac{9}{2}} \times \left(\frac{MCR_1}{MCR_0}\right)^{\frac{1}{3}} \times v_0 = \left(\frac{LW_0 + DW_0}{LW_1 + DW_1}\right)^{\frac{9}{2}} \times \left(\frac{MCR_1}{MCR_0}\right)^{\frac{1}{3}} \times v_0 \quad (6)$$

表 5 载重量和功率对 EEDI 影响

载重量/t	Δ/t	主机功率/kW	航速/kn	计算值	衡准值	计算值/衡准值
7 200	9 969	2 205	12.31	14.52	16.65	0.87
7 400	10 169	2 205	12.25	14.19	16.41	0.86
7 600	10 369	2 205	12.20	13.88	16.18	0.86
7 800	10 569	2 205	12.15	13.58	15.95	0.85
8 000	10 769	2 205	12.10	13.29	15.74	0.84
8 200	10 969	2 205	12.05	13.02	15.53	0.84
8 400	11 169	2 205	12.00	12.76	15.33	0.83
7 200	9 969	2 155	12.21	14.30	16.65	0.86
7 400	10 169	2 155	12.16	13.97	16.41	0.85
7 600	10 369	2 155	12.11	13.67	16.18	0.84
7 800	10 569	2 155	12.06	13.37	15.95	0.84
8 000	10 769	2 155	12.01	13.09	15.74	0.83
8 200	10 969	2 155	11.96	12.82	15.53	0.83
8 400	11 169	2 155	11.91	12.57	15.33	0.82
7 200	9 969	2 105	12.12	14.08	16.65	0.85
7 400	10 169	2 105	12.06	13.76	16.41	0.84
7 600	10 369	2 105	12.01	13.45	16.18	0.83
7 800	10 569	2 105	11.96	13.16	15.95	0.83
8 000	10 769	2 105	11.91	12.89	15.74	0.82
8 200	10 969	2 105	11.86	12.63	15.53	0.81
8 400	11 169	2 105	11.82	12.37	15.33	0.81
7 200	9 969	2 055	12.02	13.85	16.65	0.83
7 400	10 169	2 055	11.97	13.54	16.41	0.83
7 600	10 369	2 055	11.92	13.24	16.18	0.82
7 800	10 569	2 055	11.87	12.95	15.95	0.81
8 000	10 769	2 055	11.82	12.68	15.74	0.81
8 200	10 969	2 055	11.77	12.42	15.53	0.80
8 400	11 169	2 055	11.72	12.18	15.33	0.79
7 200	9 969	2 005	11.92	13.63	16.65	0.82
7 400	10 169	2 005	11.87	13.32	16.41	0.81
7 600	10 369	2 005	11.82	13.02	16.18	0.81
7 800	10 569	2 005	11.77	12.74	15.95	0.80

续表 5 载重量和功率对 EEDI 影响

载重量/t	Δ/t	主机功率/kW	航速/kn	计算值	衡准值	计算值/衡准值
8 000	10 769	2 005	11.72	12.48	15.74	0.79
8 200	10 969	2 005	11.67	12.22	15.53	0.79
8 400	11 169	2 005	11.63	11.98	15.33	0.78
7 200	9 969	1 955	11.82	13.40	16.65	0.80
7 400	10 169	1 955	11.77	13.10	16.41	0.80
7 600	10 369	1 955	11.72	12.81	16.18	0.79
7 800	10 569	1 955	11.67	12.53	15.95	0.79
8 000	10 769	1 955	11.62	12.27	15.74	0.78
8 200	10 969	1 955	11.57	12.02	15.53	0.77
8 400	11 169	1 955	11.53	11.78	15.33	0.77
7 200	9 969	1 905	11.72	13.17	16.65	0.79
7 400	10 169	1 905	11.67	12.87	16.41	0.78
7 600	10 369	1 905	11.62	12.59	16.18	0.78
7 800	10 569	1 905	11.57	12.32	15.95	0.77
8 000	10 769	1 905	11.52	12.06	15.74	0.77
8 200	10 969	1 905	11.48	11.81	15.53	0.76
8 400	11 169	1 905	11.43	11.58	15.33	0.76

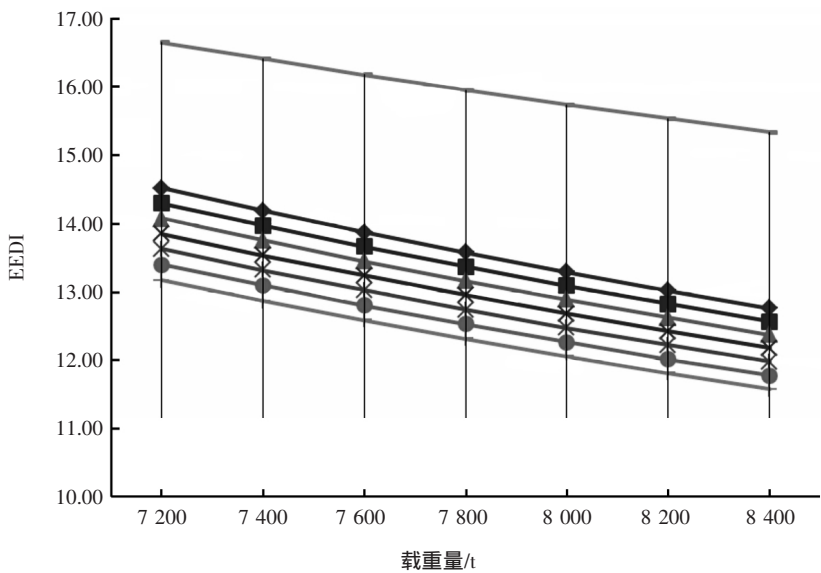


图 5 载重量与主机功率变化对 EEDI 影响

图 5 和表 5 表示载重量和主机功率同时改变与 EEDI 之间关系 ,主要结论如下 :随着载重量减小 ,排水量降低 ,船舶能效指标的计算值也增加 ;主机功率降低 ,航速下降 ,能效指标值随之减小。所以 ,载重量的增加同时主机功率降低可以大大降低该计算值。结合 EEDI 的衡准 ,得出计算值小于衡准值 ,满足要求。载重量越大 ,航速越小 ,EEDI 的计算值与衡准值之间差值也越大 ,说明更加有利该船的节能减排效果。

4 结束语

本研究首先对 EEDI 背景以及影响进行介绍 ,突出一些相关的节能减排理念 ,接着主要以 8 000 吨级近海油轮为研究对象 ,提出油船的 EEDI 计算公式 ,计算该船的 EEDI 结果 ,结合衡准要求 ,满足能效指标。最后从影响 EEDI 变化的三个主要因素——载重量、主机功率、航速等方面入手 ,研究他们与 EEDI 之间关系。最终得出如下结论 :

(1)载重量因素。载重量减小,航速增加,EEDI 呈现递增趋势。在半载和空载情况下,仅减小载重量对于节能减排是不利的。

(2)主机功率因素。能效指标随着主机功率降低而减小。由于衡准值(EEDI)跟主机工况没有直接关系,因此该衡准值可以保持不变。EEDI 值小于衡准值就能满足船舶能效指标要求。调控主机功率因素对 8 000 吨级近海油轮的节能减排效果明显。

(3)航速因素。主机功率随着航速减小而减小,计算得到该船的节能指标随之下降。航速越小,计算值与衡准值之间的差值越来越大,由此可见,调控船舶航速因素对 8 000 吨级近海油轮的节能减排效果明显。

(4)载重量与航速联合因素。随着载重量减小,排水量降低,船舶能效指标的计算值也增加,主机功率降低,航速下降,能效指标值随之减小。所以,增加载重量的同时降低主机功率,可以大大降低该计算值。

参考文献:

- [1]王明雨.船舶柴油机非常规排放检测技术的研究[D].大连:大连海事大学,2014.
- [2]陆瑶.船用柴油机燃烧与排放三维数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [3]赵海鸥,陈智君,魏柳新,等.船舶柴油机排放在线监测系统设计[J].航海工程,2016(3):73-75.
- [4]王占广.废气再循环对船舶低速柴油机性能及排放影响的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
- [5]方平,陈雄波,唐子君,等.船舶柴油机大气污染物排放特性及控制技术研究现状[J].化工进展,2017(3):1067-1076.

(责任编辑 顾力豪)

Analysis of Energy Saving and Emission Reduction Factors of an 8,000-ton Offshore Oil Tanker Based on EEDI

SHI Feng¹, WU Jie²

(School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China;
Nantong Pilot Station, the Yangtze River Pilotage Center, Nantong 226000, China)

Abstract: On the basis of introducing the background and influence of EEDI (Ship's Energy Efficiency Design Index), the concept of ship's energy saving and emission reduction is highlighted. Taking an 8,000-ton offshore oil tanker as the research object, the EEDI calculation formula of the tanker is proposed and the EEDI result of the ship is calculated. Based on the three main factors affecting the EEDI - deadweight capacity, main engine power, sailing speed, it studies oil tanker energy saving and emission reduction, and then provides reference for this type of ship controlling CO₂ emission and improving ship's own performance.

Key words: ship's EEDI; oil tanker's main engine; energy saving and emission reduction