

文章编号:1671-1637(2015)04-0069-08

船舶主机能效模型

范爱龙^{1,2,3}, 严新平^{1,2,3}, 尹奇志^{1,3}, 孙星², 陈前昆², 张永波³

(1. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063; 3. 武汉理工大学 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘要:根据船、机、桨关系,以船舶动力装置的能量传递为基础,基于 MATLAB/Simulink 仿真平台建立了主机能效模型。以某内河旅游船舶为研究对象,根据船体与主机参数,利用回归多项式法得到螺旋桨敞水特性曲线。在船舶上安装了油耗仪等传感器,采集了主机瞬时油耗、船舶对地航速、对水航速等数据,并计算了主机的实际能效。针对实船采集数据,分析了航道水流速度的分布特征。基于仿真模型,计算了船舶在不同航道水流速度与对水航速下的主机能效,比较分析了实测数据与仿真结果,并对模型进行了验证。验证结果表明:航道水流速度偏度为-0.033,总体服从正态分布;船舶实际主机能效与对水航速之间不是一一对应关系,而是相关系数为0.824的散点分布;船舶主机能效模型能够精确地表征船舶在航行过程中的主机能效水平及其变化规律,误差不大于10.5%。

关键词:轮机工程;主机能效;船、机、桨关系;油耗;水流速度

中图分类号:U664.1 **文献标志码:**A

Energy efficiency model of marine main engine

FAN Ai-long^{1,2,3}, YAN Xin-ping^{1,2,3}, YIN Qi-zhi^{1,3}, SUN Xing², CHEN Qian-kun², ZHANG Yong-bo³

(1. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 3. Key Laboratory of Marine Power Engineering and Technology of Ministry of Communications, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: According to the hull-engine-propeller relationship, the energy efficiency model of marine main engine was established based on the energy transfer within marine power plant and MATLAB/Simulink simulation platform. An inland river cruise ship was chosen as a research object, and the open-water characteristic curves of propeller were obtained by using the regression polynomial method according to the parameters of hull and main engine. Several sensors (such as fuel consumption instruments) were mounted on the target ship, the instantaneous fuel oil consumption of main engine, the marine speed relative to ground, and the marine speed relative to water were collected, and the real main engine energy efficiencies were calculated. The distribution characteristic of water speed was analyzed according to actual collected data. The energy efficiencies of main engine under different water speeds and marine speeds relative to water were calculated based on the simulation model. The actual data and

收稿日期:2015-02-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51279149);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120143130002);船舶动力工程技术交通行业重点实验室开放基金项目(444-20310142)

作者简介:范爱龙(1990-),男,安徽巢湖人,武汉理工大学工学博士研究生,从事船舶能效提升技术研究。

导师简介:严新平(1959-),男,江西莲花人,武汉理工大学教授,工学博士。

simulation results were compared and analyzed, and the model was verified. Verification result indicates that water speeds are almost normal distribution with skewness of -0.032 , the one-to-one correspondence between real energy efficiency and marine speed relative to water is not observed, but their relationship is a scattered distribution with correlation coefficient of 0.824 . The established energy efficiency model can accurately evaluate the energy efficiency level and changing rule of main engine in navigation process, and the error is less than 10.5% . 3 tabs, 11 figs, 26 refs.

Key words: marine engineering; energy efficiency of main engine; hull-engine-propeller relationship; fuel consumption; water speed

Author resumes: FAN Ai-long(1990-), male, doctoral student, +86-27-86582280, fanailong@sina.com; YAN Xin-ping(1959-), male, professor, PhD, xpyan@whut.edu.cn.

0 引 言

近年来,随着全球气候逐渐变暖,国际社会对于温室气体排放问题越来越重视。根据国际海事组织(IMO)2014年的温室气体研究报告,全球航运业在2012年排放 CO_2 约为9.38亿吨,占当年全球 CO_2 排放总量的 2.6% 。随着航运业的迅速发展,如果不加限制,国际航运业在2050年的 CO_2 排放量将会在2007年基础上增加 $150\% \sim 250\%$,届时占全球范围内 CO_2 排放量的比例也将大幅提高,为 $12\% \sim 18\%$ ^[1-2]。作为温室气体的排放大户,航运业正承受着越来越大的压力。

为了控制航运业温室气体的排放,IMO于2011年7月在海洋环境保护委员会(MEPC)第62次会议上通过了MARPOL附则6修正案,新加入的第4章要求所有400 t以上的新船强制执行新造船舶能效设计指数(EEDI),所有船舶强制执行船舶能效管理计划(SEEMP),并于2013年1月1日起生效。船舶能效管理计划为航运企业提供了船舶营运能效指数(Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI)作为监测工具,用以评估营运船舶的 CO_2 排放水平,并为今后制定营运船舶的 CO_2 排放基线作准备。IMO将通过建立严格的 CO_2 排放基线来对船舶 CO_2 排放实施控制。近些年,随着燃油价格的上涨,航运企业也在不断探索降低燃油单耗^[3]与提升船舶能效的方法^[4-5]。针对营运船舶而言,航速优化^[6]与航线规划^[7]等措施是能效提升的有效措施,也是当前航运业节能减排研究的热点^[8-9]。

船舶营运能效指数与船舶油耗有直接的关系,因此,船舶油耗数学模型的研究是船舶营运能效评价和提升研究的基础。Leifsson等利用前馈神经网络,建立了串联与并联的2种灰箱模型,仿真结果证

明方法可以有效预测油耗^[10];Shi等建立了挖泥船的油耗预测模型^[11];杨国豪等采用模糊评判的数学建模方法对船舶能耗进行评估,结果表明模糊评判适用于船舶能耗的综合评价^[12];Yan等通过对BP神经网络模型的学习训练,建立了适用于内河船舶营运能效的BP神经网络模型,并利用实船数据验证了模型的精确性与可靠性^[13]。

随着信息技术、传感技术的发展,船舶油耗实时远程监控成为可能,对船舶主机油耗进行直接监测,进而评估船舶的营运能效水平,也是当前国内外营运能效研究的热点。Sala等在渔船上建立了油耗监测系统,分析了渔船在不同操作工况下的营运能效水平^[14];Barro等针对一艘营运中的集装箱船,搭建了营运能效监控系统,能够在船舶航行过程中实时监测主机运行数据与温室气体排放情况^[15];Sun等针对实船监测的能耗数据分析了通航环境因素对船舶营运能效的影响,并建立了船舶营运能效分析模型^[16-17];Coraddu等针对大量实船营运数据,将船舶的排水量、航行速度与风浪等环境参数视为随机因素,运用蒙特卡洛模拟方法估计船舶的营运能效指数^[18-19];颜林等利用《船舶EEOI自愿使用指南》中定义的EEOI计算公式对国内船舶 CO_2 排放情况进行统计,通过对EEOI与其他指数(如BSR指数和INTERTANKO指数)的比较,阐明了EEOI指数的科学性和优越性^[20-21]。

综上所述,当前针对船舶营运能效的研究,主要包括2部分,基于船舶油耗预测的营运能效建模研究与基于实船监测数据的统计分析研究。本文综合上述内容,开展船舶主机营运能效建模仿真与实船数据验证研究。船舶主要耗油设备包括主机、副机与锅炉,其中副机与锅炉的营运能效水平主要由船舶用电用汽负荷决定,而船舶主机的营运能效水平

受航道通航环境、船舶装载等因素影响较大^[22]。本文依据船舶营运能效指数的定义公式,基于船、机、桨相互作用关系,从机理分析角度建立船舶主机的营运能效模型,并且通过实船数据对模型可靠性进行验证;研究主机营运能效的计算方法,建立机理分析模型,可用于指导船舶管理人员科学地评估主机的营运能效水平,确定船舶装载质量并依据实时的通航环境特征选择合适的操船方法。

1 船舶营运能效指数

船舶营运能效指数是国际海事组织推出的衡量船舶营运能效的标准,反映的是船舶实际航行运输过程中船舶单位运输工作量所产生的 CO₂ 排放。

在 2009 年 7 月举行的 IMO 海洋环境保护委员会第 59 次会议上,《船舶 EEOI 自愿使用指南》^[23] 获得通过,根据该指南,单一航程船舶营运能效指数 f 表示为

$$f = \frac{\sum_j F_j C_{bj}}{mS} \quad (1)$$

式中: F_j 为船舶在航行中消耗燃油 j 的质量; C_{bj} 为燃油 j 的 CO₂ 排放因子; m 为船舶载货质量; S 为船舶航行里程。

EEOI 适用于所有承担运输工作的船舶,包括干散货船、液货船、气体运输船、集装箱船、滚装船、普通货船与客船(客滚船)等。本文研究对象为内河某旅游船舶,使用柴油作为燃料,船上主要耗油设备为 2 台主推进发动机,2 台锅炉与 2 台发电柴油机,旅游船舶主机、锅炉、发电柴油机的油耗比例分别为 45%、30%、25%,船舶主机为船舶最大的耗油设备。本文以主机的营运能效指数为研究目标,结合式(1),得到主机营运能效指数 E 为

$$E = \frac{C_{b0}}{m} \int \frac{Q}{V_1 t} dt = \frac{C_{b0}}{m} \int \frac{q}{V_1} dt \quad (2)$$

式中: Q 为船舶在航行中主机消耗的柴油质量; q 为主机单位时间油耗; C_{b0} 为柴油的 CO₂ 排放因子; V_1 为船舶对地航速; t 为航行时间。

2 船、机、桨关系模型

船舶在航行时,船体受到水和空气的阻力为 R ,为了克服这种阻力,要求船舶主机发出一定的功率转动螺旋桨,使之产生推动船舶前进的推力 T 。假设螺旋桨的个数为 k ,当船舶以对水航速 V_2 匀速航行时,螺旋桨总的有效推力等于船体受到的阻力,表示为

$$R = kT_0 = kT(1 - \omega_1) \quad (3)$$

式中: T_0 为螺旋桨的有效推力; ω_1 为推力减额分数。

船舶主机发出的功率 P_2 先后经过减速齿轮箱、轴系等装置传送到螺旋桨,由于中间受到各种摩擦损失,螺旋桨收到的功率 P_1 小于船舶主机发出的功率。螺旋桨收到功率后,经过螺旋桨与船体之间水流的相互作用,最终转化为克服阻力的有效功率 P_0 。 P_1 与 P_2 、 P_1 与 P_0 的关系分别为

$$P_2 = P_1 / \eta_1 \eta_2 \quad (4)$$

$$P_1 = P_0 / \eta_0 \eta_3 \eta_4 \quad (5)$$

$$P_0 = RV_2 / k \quad (6)$$

$$\eta_0 = \frac{1 - \omega_1}{1 - \omega_2}$$

式中: η_0 为船身效率; η_1 为轴系传递效率; η_2 为齿轮箱效率; η_3 为螺旋桨敞水效率; η_4 为相对旋转效率; ω_2 为伴流分数。

船舶推进系统从本质上就是一个由船、机、桨构成的能量转换系统,船、机、桨相互作用关系见图 1。

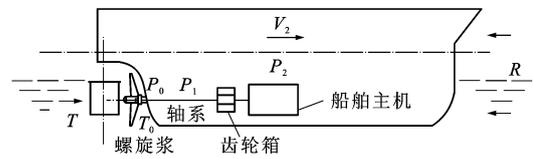


图1 船、机、桨关系

Fig. 1 Hull-engine-propeller relationship

螺旋桨推力 T 为

$$T = K_T \rho n^2 D^4 \quad (7)$$

式中: K_T 为推力系数; ρ 为水的密度; n 为螺旋桨转速; D 为螺旋桨直径。

螺旋桨进速系数 J 和敞水效率 η_3 分别为

$$J = \frac{V_0}{nD} = \frac{(1 - \omega_2)V_2}{nD} \quad (8)$$

$$\eta_3 = \frac{K_T J}{2\pi K_Q} \quad (9)$$

式中: V_0 为螺旋桨进速; K_Q 为转矩系数。

联立式(3)、(7)、(8)可得

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{R}{\rho(1 - \omega_1)(1 - \omega_2)^2 V_2^2 D^2} \quad (10)$$

联立式(3)~(9)得到主机发出功率 P_2 为

$$P_2 = \frac{2\pi k \rho n^3 D^5 K_Q}{\eta_1 \eta_2 \eta_4} \quad (11)$$

根据柴油机特性曲线,插值得到主机油耗率 g_1 ,则主机的单位时间油耗 q 为

$$q = \frac{2\pi k \rho n^3 D^5 K_Q g_1}{\eta_1 \eta_2 \eta_4} \quad (12)$$

为了在船舶航行过程中动态地掌握主机能效水平,对式(2)进行求微分处理。结合式(12)得到主机

营运能效指数的机理模型,并以此衡量主机在船舶航行过程中的能效水平,其表达式为

$$e = dE = \frac{2\pi C_{b0} k \rho D^5 n^3 K_Q g_1}{m \eta_1 \eta_2 \eta_4 V_1} \quad (13)$$

式中: e 为主机营运动态能效指数(下文简称主机能效)。

3 算例分析

以某内河旅游船舶(图 2)为例,利用基于船、机、桨相互作用关系建立的主机能效模型,仿真计算船舶在不同对水航速下的主机能效;利用船舶在某航次上水航行过程中实船采集的主机实时油耗与船舶对水航速数据,得到实际的主机能效,对主机能效模型进行验证。



图 2 旅游船舶
Fig. 2 Cruise ship

3.1 船舶参数

3.1.1 船舶参数

旅游船舶船体与主机参数见表 1。

表 1 旅游船舶参数

Tab. 1 Parameters of cruise ship

船舶长度/m	80	船舶宽度/m	14.8
设计对水航速/kn	15.12	船舶总载重吨位/t	4 587
方形系数	0.55	纵向菱形系数	0.73
主机额定功率/kW	960×2	主机额定转速/(r·min ⁻¹)	750
螺旋桨叶片数	4	螺旋桨直径/m	1.74
螺距比	0.793	盘面比	0.7

3.1.2 效率估算

(1)对于双桨且方形系数为 0.54~0.84 的船舶,利用汉克歇儿公式计算推力减额分数与伴流分数,分别为

$$\omega_1 = 0.5C_2 - 0.18 \quad (14)$$

$$\omega_2 = 0.7C_2 - 0.3 \quad (15)$$

式中: C_2 为纵向菱形系数。

将表 1 中纵向菱形系数代入式(14)、(15),得到 ω_2 为 0.211, ω_1 为 0.185,同时可以得到船身效率为 1.03。

(2)对象船舶为尾机型船舶时,轴系传递效率为

0.98。由于使用了减速齿轮箱,实际轴系传递效率需要乘以齿轮箱效率,一般取 0.96。在缺少资料时,螺旋桨相对旋转效率一般近似取 1。

3.1.3 船舶阻力与主机特性曲线

利用 Holtrop 方法^[24]得到船舶的阻力曲线,见图 3,根据该曲线可以由船舶对水航速推算出船舶所受的阻力。

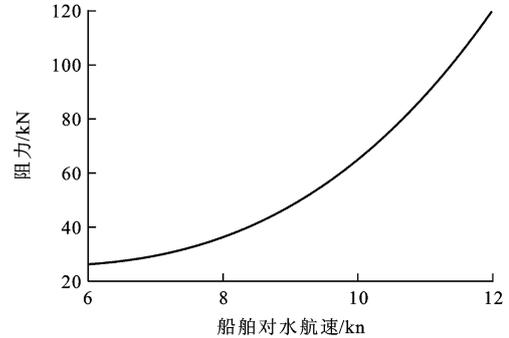


图 3 阻力曲线

Fig. 3 Resistance curve

根据船舶主机出厂前台架试验数据得到主机特性曲线,见图 4,主机特性曲线表征了主机在不同运行负荷下的油耗率 g_0 。

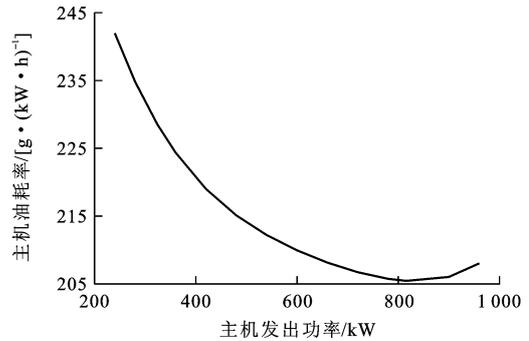


图 4 主机特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of main engine

3.1.4 螺旋桨敞水特性

计算船舶主机能效,需要利用螺旋桨的敞水特性,即螺旋桨在特定进速系数 J 下的推力系数、转矩系数与敞水效率。本文以荷兰楚思德水池提供的 B 型螺旋桨系列回归多项式为基础,结合旅游船舶螺旋桨的具体参数,通过编制 MATLAB 程序,绘制螺旋桨的敞水特性曲线。B 型螺旋桨回归多项式为

$$K_T = \sum_{i=1}^{39} C_{0i} J^s \left(\frac{B}{D}\right)^a \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^u Z^v \quad (16)$$

$$K_Q = \sum_{i=1}^{47} C_{0i} J^s \left(\frac{B}{D}\right)^a \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^u Z^v \quad (17)$$

式中: C_{0i} 为第 i 个回归多项式系数; s, a, u, v 分别为对应变量的指数,可查船舶设计实用手册得知; B

为螺旋桨螺距; A_1 为螺旋桨各个叶片近似展平后的面积之和; A_0 为螺旋桨直径圆面积; Z 为螺旋桨叶片数。

螺旋桨敞水特性曲线与辅助曲线, 见图 5。

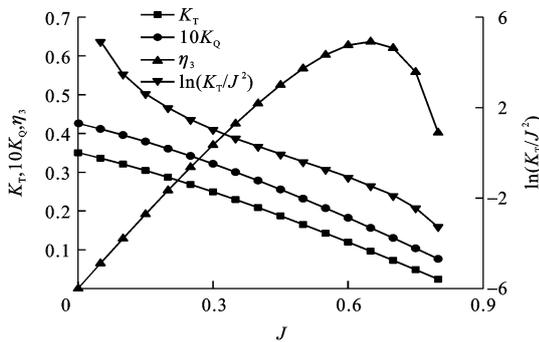


图 5 螺旋桨敞水特性曲线与辅助曲线

Fig. 5 Open-water characteristic curves and auxiliary curve of propeller

3.2 基于 Simulink 的主机能效模型

基于机理分析模型, 计算船舶在一定静水航速 (船舶对水航速) V_2 下的主机能效, 其仿真计算步骤如下。

Step 1: 选取一组船舶常用静水航速, 对船舶阻力曲线进行插值, 得到该组静水航速下船体受到的阻力 R 。

Step 2: 利用式(10)计算 $\ln(K_T/J^2)$, 对螺旋桨辅助曲线 $J-\ln(K_T/J^2)$ 进行插值, 得到该组静水航速下螺旋桨进速系数 J 。同理, 利用进速系数 J 对螺旋桨敞水曲线 $J-10K_Q$ 进行插值, 得到相应的转矩系数 K_Q 。

Step 3: 利用式(8)计算对应的螺旋桨转速。

Step 4: 利用式(11)计算得到船舶主机发出功率 P_2 , 对主机特性曲线进行插值, 得到相应的主机油耗率 g_0 。考虑到主机运行满 20 年, 柴油机的性能相比台架试验时差, 根据实船测试结果可知, 主机的实际油耗率 g_1 比台架试验值 g_0 高约 20%。

Step 5: 利用式(12)、(13)计算主机单位时间油耗与主机能效。

主机能效计算流程见图 6。根据该流程, 基于 MATLAB/Simulink 仿真平台, 建立主机能效模型, 见图 7。

3.3 模型仿真与验证

3.3.1 实船数据采集

为了验证模型的准确性, 利用实船采集的数据计算主机能效, 并与模型计算结果进行比较。由式(12)、(13)可知

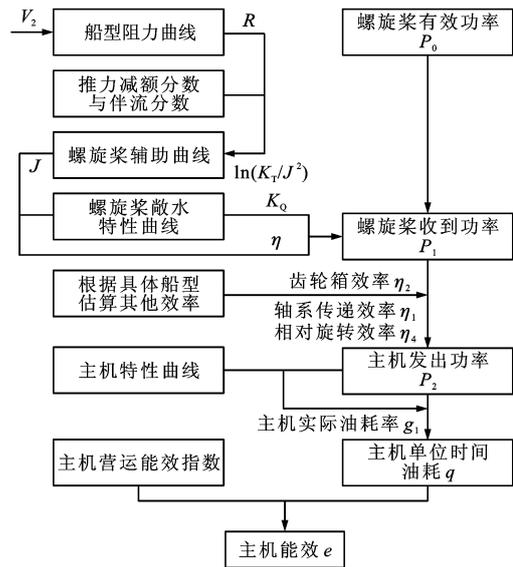


图 6 计算流程

Fig. 6 Calculation flow

$$e = \frac{kC_{bo}q}{mV_1} \quad (18)$$

根据《船舶 EEOI 自愿使用指南》, 柴油的 CO_2 排放因子为 3.206, 船舶载质量选择船舶总吨位, 为 4 587 t。实船试验需要采集船舶对岸、对水航速, 以及左右 2 台主机的单位时间油耗。通过在船上安装相应的信息采集传感器, 在该旅游船舶某航次上水航行时进行了数据采集。实船安装的传感器见图 8, 采集数据信息见表 2。

表 2 数据信息

Tab. 2 Data informations

传感器	采集参数
GPS 接收仪	对地航速
多普勒流速仪	对水航速
油耗仪	瞬时油耗

3.3.2 实船数据分析

由于船舶是逆水航行, 航道水流速度 V_3 与船舶对地航速 V_1 、对水航速 V_2 的关系为

$$V_3 = V_2 - V_1 \quad (19)$$

根据式(19)计算实船试验期间航道的水流速度, 得到水流速度样本的分布频率, 见图 9。根据图 9, 利用 MATLAB 计算水流速度样本的偏度为 -0.033, 说明航道水流速度在总体上服从正态分布。实船试验期间, 航道水流速度的变化范围为 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 均值为 $0.87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

将采集的实船数据预处理后代入式(18), 得到实际的主机能效。利用 MATLAB 得到船舶对水航速对应的主机能效, 见图 10。由图 10 中散点的分

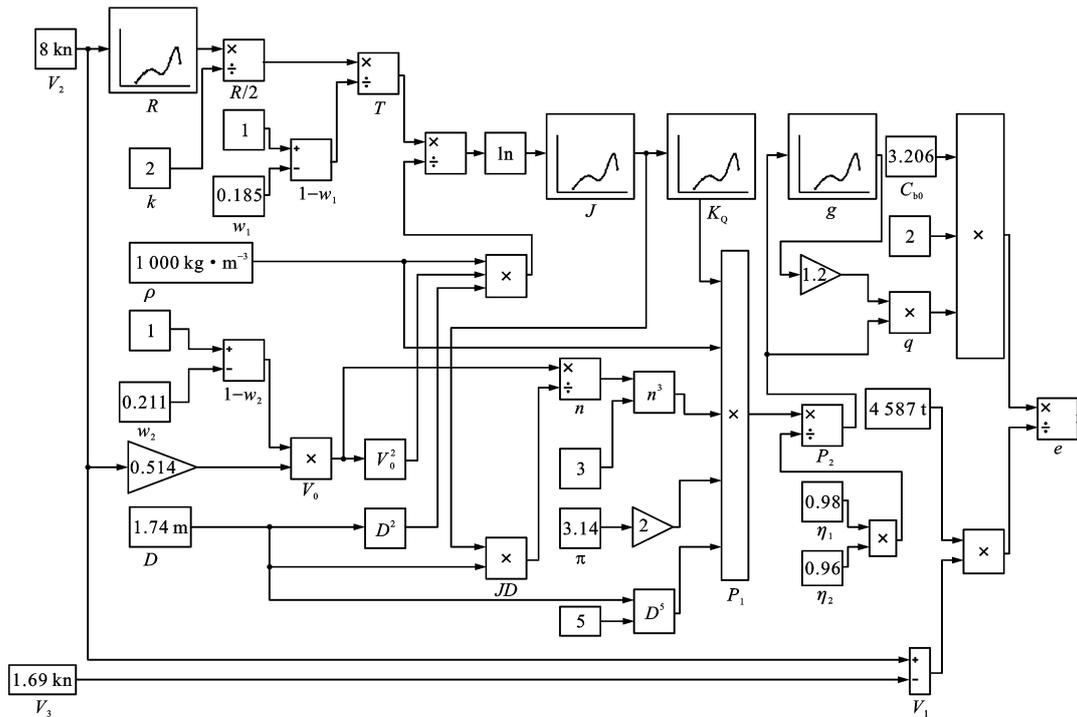


图7 主机能效模型

Fig.7 Energy efficiency model of main engine

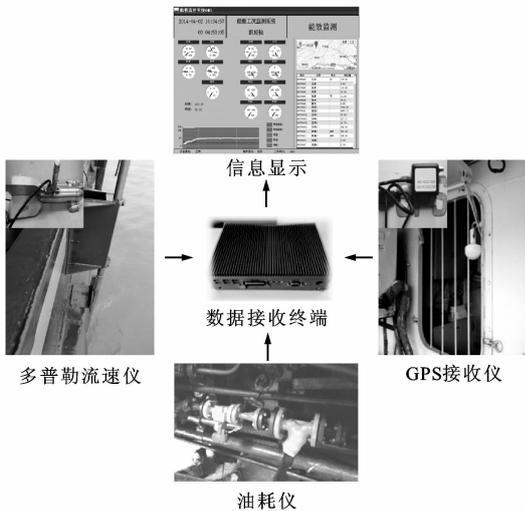


图8 传感器

Fig.8 Sensors

布可以看出,船舶在航行中主要以约7、10、11 kn的对水航速行驶,这种航速特征也符合船舶定速航行节省燃油的规律^[25]。图10中实测主机能效与船舶对水航速之间不呈现一一对应关系,主要因为水流速度在时域内是一个随机变化的量。

3.3.3 仿真与验证

考虑到水流的变化特征,取水流速度的均值 $0.87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及上、下极值 $0, 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 三种速度进行模拟计算。取一组船舶的常用对水航速为 7.0、7.5、...、11.5、12.0 kn,利用图7中的主机能效

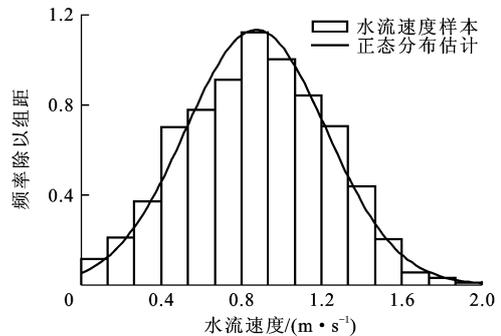


图9 水流速度分布

Fig.9 Distribution of water speeds

模型,计算3种水流速度在不同对水航速下的主机能效,计算结果见图10。

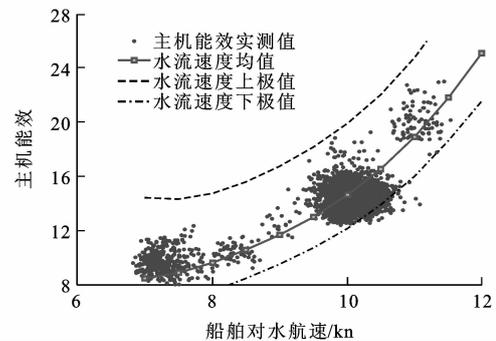


图10 主机能效仿真结果

Fig.10 Simulation result of EEOI for main engine

由图10可以看出,实测数据点基本位于水流速度上、下极值仿真曲线之间。针对实测数据,利用

SPSS 软件对主机能效与船舶对水航速进行相关性分析^[26]。得出在 0.01 水平上 2 个变量的 Pearson 相关系数为 0.824,说明两变量高度正相关,即从整体上看主机能效随着船舶对水航速的增大而增大,并且,该增长特征与水流速度取均值时主机能效仿真曲线吻合良好。以水流速度取均值时模型仿真计算的主机能效为模型仿真参照值,在散点的上、下边界附近选取若干点进行拟合,得到实测数据的上、下边界线,在对水航速为 7~12 kn 范围内,取主机能效实测数据上、下边界的平均值作为实测数据参照值,见图 11。

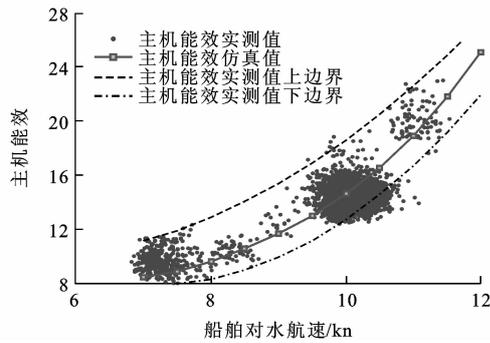


图 11 主机能效验证结果

Fig. 11 Verification result of EEOI for main engine

将图 11 中模型仿真参照值与实测数据参照值进行比较,进一步验证模型的精度,见表 3。由表 3 可以看出,基于船、机、桨相互作用关系建立的主机能效与船舶对水航速的动态响应关系模型具有较高的精确度,能够有效评估并预测船舶在航行过程中主机能效水平,且相对误差范围不大于 10.5%。

表 3 模型精度

Tab. 3 Model accuracy

对水航速/kn	主机能效仿真值	主机能效实测值	相对误差/%
7.0	8.5	9.5	10.5
7.5	8.9	9.9	10.1
8.0	9.6	10.6	9.4
8.5	10.5	11.5	8.7
9.0	11.7	12.6	7.1
9.5	13.0	14.0	7.1
10.0	14.6	15.7	7.0
10.5	16.3	17.5	6.9
11.0	18.9	19.6	3.6
11.5	21.8	22.0	0.9
12.0	25.1	24.6	2.0

4 结 语

(1)船舶主机能效随着船舶对水航速的增大而

增大(以船舶逆水航行为例),对水航速越大,主机能效的增大幅度越大。由于受到水流速度变化的影响,在特定的对水航速下,主机能效的取值存在一定的变化区间。

(2)基于船、机、桨相互关系建立了船舶主机能效模型,实船数据的验证结果表明模型能够精确地评价与计算船舶在航行过程中的主机能效水平。

(3)利用回归多项式法绘制螺旋桨敞水特性曲线,有利于使用 MATLAB 软件进行插值计算螺旋桨敞水效率。相对于传统的人工查图谱法,回归多项式法可以有效提高建模精度。

(4)在长江等内河上,影响主机能效的通航环境因素较多,本文仅考虑了航道水流的影响,后续需要进一步研究风、浅水与弯曲航道等多种影响因素综合作用下的船舶主机能效建模方法。

(5)对于数量众多的营运船舶,可以结合船舶的运行周期与航道通航环境特征,通过优化船舶载货质量、在航时间、主机运行转速等参数,提升船舶的营运能效指数。

参 考 文 献 :

References :

[1] Marine Environment Protection Committee. Prevention of air pollution from ships (Second IMO GHG Study 2009) [R]. London: International Maritime Organization, 2009.

[2] Marine Environment Protection Committee. Prevention of air pollution from ships (Third IMO GHG Study 2014) [R]. London: International Maritime Organization, 2014.

[3] BJILSMA S J. Minimal time route computation for ships with pre-specified voyage fuel consumption [J]. The Journal of Navigation, 2008, 61(4): 723-733.

[4] LO K. A critical review of China's rapidly developing renewable energy and energy efficiency policies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 508-516.

[5] BALLOU P J. Ship energy efficiency management requires a total solution approach [J]. Marine Technology Society Journal, 2013, 47(1): 83-95.

[6] PSARAFTIS H N, KONTOVAS C A. Ship speed optimization: concepts, models and combined speed-routing scenarios [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 44: 52-69.

[7] SHAO Wei, ZHOU Pei-lin, THONG S K. Development of a novel forward dynamic programming method for weather routing [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2012, 17(2): 239-251.

[8] LINDSTAD H, ASBJØRNSLETT B E, STRØMMAN A H. Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds [J]. Energy Policy, 2011, 39(6): 3456-3464.

[9] NORSTAD I, FAGERHOLT K, LAPORTE G. Tramp ship

- routing and scheduling with speed optimization[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(5): 853-865.
- [10] LEIFSSON L P, SAEVARSDOTTIR H, SIGUROSSON S P, et al. Grey-box modeling of an ocean vessel for operational optimization[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2008, 16(8): 923-932.
- [11] SHI Wei, GRIMMELIUS H. Comparison of modeling techniques for simulation of fuel consumption of dredgers[C]//BERTRAM V. *The 9th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*. Gubbio: TUHH-Technologie GmbH, 2010: 382-395.
- [12] 杨国豪,徐轶群,林荣模. 基于模糊评判的船舶能耗评估[J]. *中国航海*, 2011, 34(4): 22-25, 50.
YANG Guo-hao, XU Yi-qun, LIN Rong-mo. Fuzzy evaluation of ship energy consumption[J]. *Navigation of China*, 2011, 34(4): 22-25, 50. (in Chinese)
- [13] YAN Xin-ping, SUN Xing, YIN Qi-zhi. Multiparameter sensitivity analysis of operational energy efficiency for inland river ships based on backpropagation neural network method[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2015, 49(1): 148-153.
- [14] SALA A, CARLO F D, BUGLIONI G, et al. Energy performance evaluation of fishing vessels by fuel mass flow measuring system[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(5/6): 804-809.
- [15] BARRO R D C, KIM J S, LEE D C. Real time monitoring of energy efficiency operation indicator on merchant ships[J]. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 2011, 35(3): 301-308.
- [16] SUN Xing, YAN Xin-ping, WU Bing, et al. Analysis of the operational energy efficiency for inland river ships[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2013, 22: 34-39.
- [17] 陈前昆,严新平,尹奇志,等. 基于 EEOI 的内河船舶航速优化研究[J]. *交通信息与安全*, 2014, 32(4): 87-91.
CHEN Qian-kun, YAN Xin-ping, YIN Qi-zhi, et al. Speed optimization for inland river ships based on EEOI[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2014, 32(4): 87-91. (in Chinese)
- [18] CORADDU A, FIGARI M, SAVIO S. Numerical investigation on ship energy efficiency by Monte Carlo simulation[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2014, 228(3): 220-234.
- [19] 李可顺,刘伊凡,孙培廷. 船舶能效营运指数仿真建模[J]. *中国航海*, 2014, 37(2): 105-108, 121.
LI Ke-shun, LIU Yi-fan, SUN Pei-ting. Modeling and simulation of ship energy efficiency operation indicator[J]. *Navigation of China*, 2014, 37(2): 105-108, 121. (in Chinese)
- [20] 颜 林. 国内船舶能效指数与 CO₂ 排放基线实船研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
YAN Lin. Research on energy efficiency index and CO₂ emission from ships in China[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [21] 倪骏恺. 船舶能效营运指数研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
NI Jun-kai. Research on ship energy efficiency operational indicator[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [22] FAN Ai-long, YAN Xin-ping, YIN Qi-zhi, et al. Study of Yangtze River waterway partition based on cluster analysis[C]// TRB. 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2015: 1-15.
- [23] Marine Environment Protection Committee. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI)[R]. London: International Maritime Organization, 2009.
- [24] HOLTROP J, MENNEN G G. An approximate power prediction method[J]. *International Shipbuilding Progress*, 1982, 29: 166-170.
- [25] 张绍阳,葛丽娟,安毅生,等. 交通运输数据标准研究现状与发展[J]. *交通运输工程学报*, 2014, 14(2): 112-126.
ZHANG Shao-yang, GE Li-juan, AN Yi-sheng, et al. Research status and development of transportation data standards[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, 14(2): 112-126. (in Chinese)
- [26] 张 笛,万程鹏,严新平. 基于事故特征分析的长江碍航风险研究[J]. *中国航海*, 2013, 36(2): 94-99.
ZHANG Di, WAN Cheng-peng, YAN Xin-ping. Navigation hindering risk assessment of the Yangtze River based on analysis of accident characteristics[J]. *Navigation of China*, 2013, 36(2): 94-99. (in Chinese)