

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.01.011

双速比拖网渔船机桨网匹配动态特性研究^{*}

黄文超^{1,2}, 黄温赞^{1,2}, 赵新颖^{1,2}

(1. 农业部 远洋渔船与装备重点实验室, 上海 200092; 2. 中国水产科学研究院
渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

摘要:针对拖网渔船在拖网工况下主机和螺旋桨匹配工作点发生显著变化, 渔船变工况动态特性影响渔船运行可靠性和经济性的问题, 对双速比渔船在正常航行工况和拖网工况下的航速、扭矩、功率等动态特性进行了研究。基于船机桨网匹配理论模型, 通过对螺旋桨特性曲线进行数值拟合, 构建了适合数字仿真研究的 Chebyshev 多项式解析形式, 建立了基于 AMESim 的双速比拖网渔船机桨网匹配数学模型, 对双速比渔船在多工况下的运行特性进行了仿真研究。研究结果表明: 双速比推进方式能够使主机在拖网工况时维持额定转速的状态下降低主机扭矩和功率, 有效地提高动力系统的可靠性和经济性, 基于 AMESim 的船机桨网匹配建模仿真研究结果与实船运行情况十分接近。

关键词: AMESim; 双速比; 船机桨网匹配

中图分类号: TH39; U664.33

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)01-0057-05

Dynamic characteristics of hull-propeller-engine-net matching of double speed ratio fishing vessel

HUANG Wen-chao^{1,2}, HUANG Wen-yun^{1,2}, ZHAO Xin-ying^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ocean Fishing Vessel and Equipment, Ministry of Agriculture, Shanghai 200092, China; 2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Shanghai 200092, China)

Abstract: Aiming at the problem of the fishing vessel's dynamic characteristics influencing the vessel's reliability and economy when the engine and propeller's working point changes under trawling condition, research was done on the vessel's speed, torque, power and other dynamic characteristics under normal and trawling condition. Based on hull-propeller-engine-net matching theory, through the numerical fitting of propeller characteristic curve, Chebyshev polynomial analytical form was built up which is suitable for digital simulation research, and the double speed ratio trawler's hull-propeller-engine-net models based on AMESim were set up, simulation research was done on double ratio fishing vessel's operation characteristics under multi condition. The results indicate that double speed ratio propulsion mode can reduce main engine's torque and power while it keeps its rated speed in trawling condition, which improves the reliability and economy effectively, and that the hull-propeller-engine-net matching modeling simulation research results are very close to the actual vessel's operation condition.

Key words: AMESim; double speed ratio; hull-propeller-engine-net matching

收稿日期: 2017-02-28

基金项目: 农业部远洋渔船与装备研发创新团队项目(2016RS001); 工信部高技术船舶科研项目(作者未提供)

作者简介: 黄文超(1987-), 男, 江西抚州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事渔船动力装置优化与节能技术方面的研究. E-mail: huangwenchao@

0 引 言

拖网渔船在拖网工况下由于阻力系数增大,渔船螺旋桨的进速比会降低,渔船主机和螺旋桨匹配的工作点发生变化,此时传统推进方式渔船会采取降低主机转速的方式降低主机功率,使主机保持在额定工作范围内。主机在低转速大扭矩的工况下不仅油耗率升高,而且可靠性会降低。配备双速比齿轮箱的渔船具备两档速比,一档为正常航行速比,一档为拖网作业速比^[1]。当齿轮箱切换进入拖网速比时,渔船可以在保持主机转速不变的情况下降低螺旋桨转速,既可以使主机在相对高转速的情况下承受较低的扭矩提高渔船运行的可靠性,又可以保障渔船运营的经济性。双速比推进方式十分适用于拖网渔船^[2]。

本文将双甲板冷冻艇滑道拖网渔船为研究对象,在传统单速比推进方式的基础上进行动力系统优化,使用更适合拖网作业的双速比齿轮箱,并对双速比推进方式进行仿真分析,再结合实船运行及捕捞作业情况进行验证。

1 船机桨网匹配理论模型及摩洛哥渔船主要参数

根据船体阻力特性、主机功率特性、船舶螺旋桨特性和网具阻力特性,建立渔船的船机桨网匹配理论模型^[3],如图 1 所示。

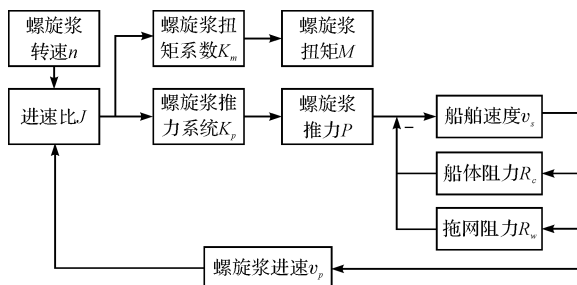


图 1 船机桨网匹配理论模型

在该模型中进速比如下所示:

$$J = \frac{v_p}{nD} \quad (1)$$

在该模型中螺旋桨扭矩如下所示:

$$M = K_m \rho n^2 D^4 \quad (2)$$

在该模型中螺旋桨推力如下所示:

$$P = K_p \rho n^2 D^4 \quad (3)$$

式中: n —螺旋桨转速; v_p —螺旋桨进速; D —螺旋桨直径; K_m —螺旋桨扭矩系数; K_p —螺旋桨推力系数; ρ —海水的密度。

扭矩系数 K_m 和推力系数 K_p 随螺旋桨的进速比 J 变化,变化规律根据 K_m-J 和 K_p-J 特性曲线。

摩洛哥双速比渔船、齿轮箱、螺旋桨及网具主要参数如表 1 所示。

表 1 渔船、齿轮箱、螺旋桨及网具主要参数

数 值	参数 / 单位
渔船总长 /m	34.5
排水量 /t	678.96
功率 /kW	735
螺旋桨直径 /m	2.6
螺距比	1.12
盘面比	0.45
设计转速 /(r · min ⁻¹)	166
齿轮箱减速比	5.0:1/5.6:1
网具型式	六片式单拖网
总长 /m	49.2
网口周长 /m	47.42

2 螺旋桨特性曲线拟合

船舶稳定航行时,进速比 J 在一个较小的范围内变动,可是在动态情况下, V_p 和 n 都会有大幅度的变化。当 n 趋近于 0 时, J 趋近于无穷大。在理论上当然是可行的,但对于仿真分析来讲,一个自变量变化很大的函数无论对于数字仿真还是模拟仿真都是需要消耗计算系统很大的空间和很多时间的^[4]。

因此,为满足螺旋桨动态仿真要求,需要对螺旋桨敞水特性进行改进,本研究采用四象限螺旋桨特性的形式来表达。根据螺旋桨转速 n 和进速 v_p 的不同,可把螺旋桨的工况分为 4 个象限,即第一象限($n > 0, v_p > 0$),第二象限($n < 0, v_p > 0$),第三象限($n < 0, v_p < 0$),第四象限($n > 0, v_p < 0$)。

在 n 和 V_p 不同时为零时^[5],进速比如下式所示:

$$J' = \frac{v_p}{\sqrt{v_s^2 + n^2 D^2}} = \frac{v_s(1 - \omega)}{\sqrt{v_s^2(1 - \omega)^2 + n^2 D^2}} \quad J' \in [-1, 1] \quad (4)$$

式中: ω —伴流系数。

推力系数如下所示:

$$K_p' = \frac{P}{\rho D^2 (v_p^2 \delta + n^2 D^2)} \quad (5)$$

扭矩系数如下所示:

$$K_m' = \frac{M}{\rho D^2 (v_p^2 \delta + n^2 D^2)} \quad (6)$$

从而得到 J' 和 J 的函数转化关系:

$$J' = \begin{cases} 1 & n = 0, v_p > 0 \\ \frac{J}{\sqrt{1+J^2}} & n > 0 \\ -\frac{J}{\sqrt{1+J^2}} & n < 0 \\ -1 & n = 0, v_p < 0 \end{cases} \quad (7)$$

K_p' 、 K_m' 与 J' 的函数关系式为:

$$K_p' = K_p \frac{n^2 D^2}{v_p^2 + n^2 D^2} = K_p (1 - J'^2) \quad (8)$$

$$K_m' = K_m \frac{n^2 D^2}{v_p^2 + n^2 D^2} = K_m (1 - J'^2) \quad (9)$$

由此可知,改进后的螺旋桨推力系数和扭矩系数可以表示为:

$$K_p' = K_p(J'), K_m' = K_m(J').$$

诺尔特斯特洛姆系列试验图谱是哥德堡水池进行的盘面比 0.45, 桨叶数 4, 螺距比 0.0 ~ 1.6 的全程试验图谱^[6-7]。由于它生动地反映了螺旋桨从进到退和从退到进的不等现象, 而且螺距比变化范围大, 在推进仿真上, 尤其有用。从纯粹数值拟合角度来看, 由于其具有变化比例特点, 处理上具有一定的代表性, 本研究选用该图谱。

3 基于 Chebyshev 多项式的螺旋桨特性曲线解析形式

曲线形式虽然直观, 但不便于进行数学分析和建立模型, 从设计和仿真需要出发, 最好采用解析形式。本研究采用 Chebyshev 多项式将螺旋桨特性曲线表现为解析形式。一般地说, 在 $[-1, 1]$ 上有连续导数的函数可近似用 n 阶 Chebyshev 多项式来表示, 即:

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 T_0(x) + a_1 T_1(x) + \cdots + a_n T_n(x) \quad (10)$$

式中: $T_0(x) = 1, T_1(x) = x, T_2(x) = 2x^2 - 1, T_3(x) = 4x^3 - 3x, \dots, T_k(x)$ 是以 x 为自变量的多项式, 它是无量纲的, 其一般递推形式是 $T_{k+1}(x) = 2xT_k(x) - T_{k-1}(x), k = 1, 2, \dots, n$ 。

对该特性曲线做 Chebyshev 多项式分析:

$$K_p'(J') = \frac{1}{2}a_{0p} T_0(J') + a_{1p} T_1(J') + \cdots + a_{np} T_n(J') \quad (11)$$

$$K_m'(J') = \frac{1}{2}a_{0m} T_0(J') + a_{1m} T_1(J') + \cdots + a_{nm} T_n(J') \quad (12)$$

从精度和时间效率两方面考虑, 本研究决定采用 8 阶的 Chebyshev 多项式。本研究采用螺距比 1.1 时的系

数 $a_0 \sim a_8$ 组成多项式。具体系数如表 2、表 3 所示^[8]。

表 2 螺旋桨推力特性多项式系数 $a_0 - a_8$

系数	n	
	$n > 0$	$n < 0$
a_0	0.426 5	-0.298 1
a_1	-0.225 1	-0.219 1
a_2	-0.180 5	0.137 4
a_3	-0.019 61	-0.026 84
a_4	-0.002 028	0.000 926 1
a_5	0.052 20	0.047 40
a_6	-0.030 01	0.029 14
a_7	0.017 06	0.019 08
a_8	0.015 66	-0.003 896

表 3 螺旋桨扭矩特性多项式系数 $a_0 - a_8$

系数	n	
	$n > 0$	$n < 0$
a_0	0.064 73	-0.054 05
a_1	-0.033 01	-0.035 74
a_2	-0.027 10	0.029 33
a_3	-0.004 307	-0.005 709
a_4	0.000 173 6	-0.000 935 9
a_5	0.006 520	0.007 651
a_6	-0.002 861	0.005 019
a_7	0.003 960	0.004 703
a_8	0.002 059	-0.001 367

4 船机桨网匹配数学模型

由上述分析可知, 螺旋桨扭矩为:

$$M = K_m' \rho D^3 (v_p^2 + n^2 D^2) = \frac{K_m' \rho D^3 v_p^2}{J'^2} \quad (13)$$

由上述分析可知, 螺旋桨推力为:

$$P = K_p' \rho D^2 (v_p^2 + n^2 D^2) = \frac{K_p' \rho D^2 v_p^2}{J'^2} \quad (14)$$

由上述分析可知, 螺旋桨实际推力为:

$$P_e = (1 - t)P = \frac{(1 - t)K_p' \rho D^2 v_p^2}{J'^2} \quad (15)$$

式中: t — 推力减额系数。

本研究只讨论正车的情况, 根据经验 t 取 0.13。

船体阻力由裸船体阻力和附加阻力两部分组成, 均随航速的增加而增加, 根据实船数据和船模试验的结果表明, 船舶正常航行时船体阻力可简化为:

$$R_e = r_e v_s^2 \quad (16)$$

式中: r_e — 船舶阻力系数, 与船体型线、载重、航道及海情等因素有关。

随着船舶航行工况的变化, r_e 也在不断变化。为了缩短仿真时间, 本文对船舶阻力系数 r_e 进行简化, 根据经验对 r_e 取一般航行过程均值 3 000。

当渔船进入拖网工况时, 渔具及鱼获在水中的阻

力特性近似于船体阻力特性^[9-10]:

$$R_w = r_w v_s^2 \quad (17)$$

式中: r_w —拖网阻力系数,与鱼货体积、网具形状及海情等因素有关。

本研究中该值依据摩洛哥方实船作业测量提供的数据,仿真中使用最大鱼获量时的拖网阻力系数38 000。

船机桨网匹配数学模型如图2所示。

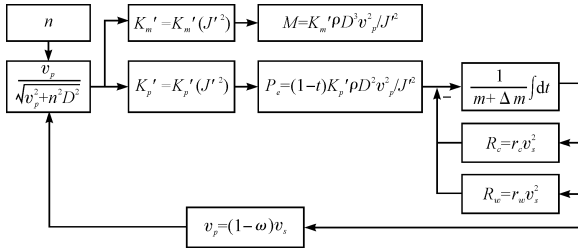


图2 船机桨网匹配数学模型

Δm —船体在航行过程中因为粘附上水和海生物等产生的附加重量,一般为船体质量 m 的 5% ~ 15%,本研究取 15%; ω —伴流系数,本研究取 0.15

表4 AMESim 数字模型初始化参数

转速输入 $n/(r \cdot s^{-1})$	附件重量 $\Delta m/kg$	伴流系数 ω	螺旋桨直径 D/m	船速 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	推力减额系数 t	海水密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$
2.77/2.47(拖网)	101.84	0.15	2.6	0.000 001	0.13	1 030

该渔船主机额定功率 735 kW,额定转速为 830 r/min,当渔船在正常航行工况时,齿轮箱减速比为 5:1,螺旋桨转速为 166 r/min。此时得到的渔船航速和扭矩参数动态响应特性如图4、图5所示。

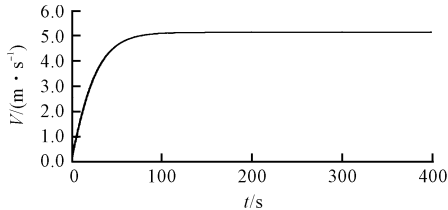


图4 航行工况航速响应曲线

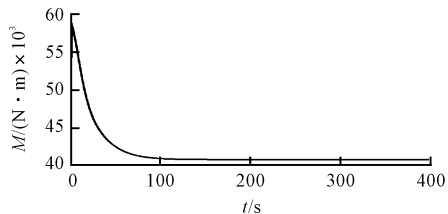


图5 航行工况扭矩响应曲线

仿真结果显示:当渔船动力系统达到稳态后,渔船航速 5.1 m/s,即 10.2 kn,螺旋桨扭矩 40.9 kN·m。航行工况时主机功率为 $40\ 900 \cdot 166/9\ 550 = 711$ kW,主机发出扭矩 $40.9/5 = 8.18$ kN·m。

当渔船进入拖网工况时,齿轮箱切换至拖网速比 5.6:1,此时螺旋桨转速为 148 r/min,再对系统施加拖网阻力负载,渔船航速和扭矩参数动态响应特性如

5 基于 AMESim 的船机桨网匹配数字模型

笔者根据船机桨网匹配数学模型,建立基于 AMESim 的数字模型^[11],如图3所示。

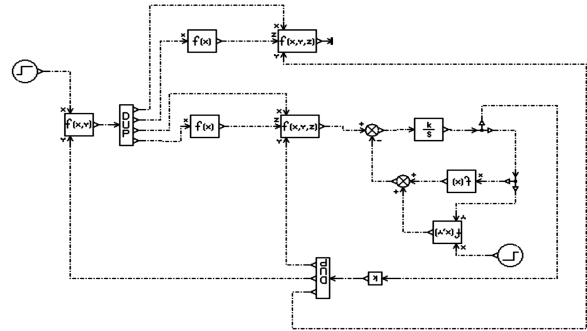


图3 基于 AMESim 的船机桨网匹配数字模型

系统参数初始量设置如表4所示。

图6、图7所示。

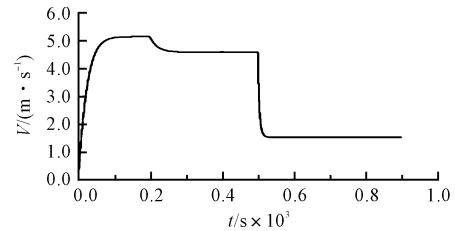


图6 拖网工况航速响应曲线

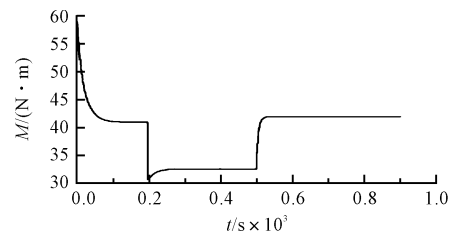


图7 拖网工况扭矩响应曲线

在该仿真过程中, $t = 200$ s 时齿轮箱切换速比至 5.6:1,航速由 5.1 m/s 下降至 4.6 m/s,航速稳定后在 $t = 500$ s 时进行拖网作业,加入拖网负载,速度最终下降至 1.6 m/s,即 3.2 kn,螺旋桨扭矩 42.0 kN·m。拖网工况时主机功率为 $42\ 000 \cdot 148/9\ 550 = 651$ kW,主机发出扭矩 $42/5.6 = 7.50$ kN·m。

6 AMESim 仿真结果分析

从以上仿真结果中可以看出,当渔船在正常航行

工况时,齿轮箱速比为5:1,主机功率711 kW;当渔船在拖网工况时,将齿轮箱速比切换至5.6:1,主机功率651 kW,双速比齿轮箱可以在保持主机转速在830 r/min的情况下,有效地降低主机功率,提高了动

力系统的经济性和可靠性。

将 AMESim 数字建模仿真计算结果与摩方实船作业测得渔船性能相关数据进行比较,如表5所示。

表5 AMESim 仿真结果与实船数据对比

	船速/ kn(航行)	主机功率/ kW(航行)	主机扭矩/ kN·m(航行)	船速/ kn(拖网)	主机功率/ kW(拖网)	主机扭矩/ kN·m(拖网)
仿真	10.2	711	8.18	3.2	651	7.50
实船	10.0	718	8.26	3.6	660	7.59

从表5可以看出:在正常航行工况和拖网工况时,仿真结果与实船测得数据十分接近,该研究方法具有实用性。

7 结束语

本研究对螺旋桨特性曲线进行了基于 Chebyshev 多项式的离散化处理,并通过 AMESim 平台建立了船机桨网匹配数学模型,对渔船在正常航行工况和拖网作业工况中的船速、扭矩、功率等影响渔船运行效率和经济性的重要指标进行仿真分析,分析结果表明:双速比推进方式能够使主机在拖网工况时维持额定转速的状态下有效地降低主机扭矩和功率,这样不仅使渔船动力系统的可靠性得到提高,还可以降低渔船主机油耗率,减少渔船运营成本。

基于 AMESim 的数字建模仿真结果与实船运行情况十分接近,AMESim 数字仿真技术能够为渔船设计理论提供验证,也能与船模试验有机地结合,丰富了渔船设计方法,对传统设计方法进行了有效地补充。该研究方法还可以应用于拖轮、海洋工程结构物、海洋测量浮标等相关领域工程设备的动态特性分析和校核,进而完善设备的水动力性能。

参考文献(References):

- [1] 吴洪飞,张吉萍.双速比齿轮箱在渔船中的推广作用[J].中国水运,2011,11(5):97-100.
- [2] 周瑞平,孙先华.双速比齿轮箱匹配性能分析[J].船海工

程,1999(4):16-19.

- [3] 刘波.船舶电力推进及船机桨工况配合[D].武汉:武汉理工大学机电工程学院,2005.
- [4] GUOY, ZHENGHY, WANGBL, et al. Design of ship electric propulsion simulation system[J]. **International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, 2005, 2(1):1059-1063.
- [5] DIAO L J, LIU Z G, SHEN M S, et al. A novel simulation system of marine propeller load characteristics[J]. **International Power Engineering Conference**, 2005(2):1147-1152.
- [6] YUH J. Underwater robotic vehicles: design and control[M]. Albuquerque: TSI Press, 1996.
- [7] 鲁谦,李连有,李来成.船舶原理手册[M].北京:国防工业出版社,1988.
- [8] LI Dian-pu, WANG Zone-yi, CHI Hai-hong. Chebyshev fitting way and error analysis for propeller atlas across four quadrants[J]. **Journal of Marine Science and Application**, 2002, 1(1):52-59.
- [9] 陆奇巍,张敏,邹晓荣.竹荚鱼中层拖网阻力计算的初步研究[J].海洋渔业,2014,36(2):155-162.
- [10] 孙兆群,万荣,朱玉贵.海州湾单拖网渔船技术效率及其影响因素分析[J].中国渔业经济,2016,34(1):71-80.
- [11] 胡安平.基于 AMESim-Simulink 联合仿真的再生制动系统研究[D].长春:吉林大学机械科学与工程学院,2008.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

黄文超,黄温赞,赵新颖.双速比拖网渔船机桨网匹配动态特性研究[J].机电工程,2017,35(1):57-61.

HUANG Wen-chao, HUANG Wen-yun, ZHAO Xin-ying. Dynamic characteristics of hull-propeller-engine-net matching of double speed ratio fishing vessel[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 35(1):57-61.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>