

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2019.11.011

本文引用格式:袁善坤,储江伟,李洪亮,等.气力推进艇螺旋桨静态推力计算及检测试验[J].重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(11):75-80.

Citation format:YUAN Shankun, CHU Jiangwei, LI Hongliang, et al. Calculation and Experiment for Static Thrust of Airboat Propeller[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(11): 75-80.

# 气力推进艇螺旋桨静态推力计算及检测试验

袁善坤, 储江伟, 李洪亮, 詹长书, 张民安

(东北林业大学 交通学院, 哈尔滨 150040)

**摘 要:**基于叶元体理论和动量守恒理论推导,利用迭代法提出了气力推进艇螺旋桨推力与转矩的 Matlab 程序,对不同转速、螺距角和桨叶数时的推力进行计算;设计构建了气力推进艇螺旋桨静态推力测试系统,并进行不同参数条件下的推力检测试验,对比分析了推力计算和检测试验结果的差异及其主要原因。结果表明:在螺距角和桨叶数不同时,螺旋桨推力计算结果与测试数据随旋桨转速的变化都呈抛物线形,即推力的计算结果与测试数据的变化规律相同,因此计算结果具有参考意义;螺旋桨推力的计算结果大于试验数据,最大平均误差为 87 N,相对误差为 10%~20%。

**关 键 词:**螺旋桨;迭代法;静态推力

中图分类号:U662.2

文献标识码:A

文章编号:1674-8425(2019)11-0075-06

## Calculation and Experiment for Static Thrust of Airboat Propeller

YUAN Shankun, CHU Jiangwei, LI Hongliang, ZHAN Changshu, ZHANG Min'an

(School of Traffic and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Based on the theory of blade element theory and the momentum conservation theory, the Matlab program of propeller thrust and torque was written by iteration method. The thrust of different speed, pitch angle and blade number was calculated. A static thrust test system for propellers was designed and constructed, and the thrust test under different parameters was carried out. The difference between thrust calculation and test results was compared and the main reasons were compared. The results show that when the pitch angle and blade number were different, the calculation results of propeller thrust and test data were parabolic with the change of propeller speed. The calculation results of thrust and test data were the same, so the calculation results were of reference significance. The calculation results of propeller thrust were larger than the test data, the maximum average error was 87 N, and the relative error was from 10% to 20%.

**Key words:** propeller; iterative method; static thrust

收稿日期:2018-10-21

基金项目:国家林业局“948”项目(2015-04-33)

作者简介:袁善坤,男,硕士研究生,主要从事载运工具技术状态检测与性能仿真研究;通讯作者 储江伟,男,教授,博士生导师,主要从事载运工具运用工程研究。

气力推进艇是由发动机驱动后置螺旋桨旋转产生向后的推力,使其依靠空气动力在水中行驶<sup>[1]</sup>,主要应用于水面、雪地、冰面、沼泽等一般船舶无法行驶的特殊地段,供人们进行旅游观光、生态勘察、救灾救援以及运输作业等<sup>[2-3]</sup>。国外对于气力推进艇的研究开展较早,形成了较完整的理论设计、工业制造及实际应用体系。

气力推进艇螺旋桨的静态推力是在气力推进艇不动的条件下,测试的螺旋桨产生的推力<sup>[3]</sup>。螺旋桨静态推力是气力推进艇动力系统匹配和螺旋桨应用选型的主要技术参数,对螺旋桨的实际应用具有指导意义。通过编程计算和试验检测气力推进艇螺旋桨的静态推力,可为进一步优化螺旋桨的翼型设计和提高使用性能提供参考<sup>[4]</sup>。

## 1 螺旋桨推力计算方法

### 1.1 基于叶元体理论的推力计算

将螺旋桨叶片沿径向细分为多个离散的截面称为叶元体,如图1所示。对于每个叶元体只分析其轴向速度和角速度分量,忽略其他截面的诱导流,且对每部分进行独立地分析,求出任意半径 $r$ 上的叶元体的作用力。

在图1中的AA截面处,取 $dr$ 段的叶元体进行分析。令几何螺旋角为 $\theta$ ,攻角为 $\alpha_k$ 。当流体以速度 $V_1$ 流向此叶元体时,流体轴向速度矢量 $V_0$ 和流体角速度矢量 $V_2$ ,并产生了升力 $L$ 和阻力 $D$ ,如图2所示。图2中, $Q$ 为驱动转矩, $T$ 为推力<sup>[4]</sup>。

推力和升力方向之间的角度差定义为 $\phi$ :

$$\phi = \theta - \alpha_k \quad (1)$$

将升力 $dL$ 分解为沿螺旋桨轴向的分力 $dL_\alpha$ 和旋转方向的分力 $dL_t$ ;将阻力 $dD$ 分解为沿螺旋桨轴向的分力 $dD_\alpha$ 和旋转方向的分力 $dD_t$ 。叶元体的推力 $dT$ 和转矩 $dQ$ 可以表达为<sup>[5]</sup>:

$$dT = dL_\alpha - dD_\alpha = dL \cdot \cos\phi - dD \cdot \sin\phi \quad (2)$$

$$\frac{dQ}{r} = dL_t + dD_t = dL \cdot \sin\phi + dD \cdot \cos\phi \quad (3)$$

叶元体产生力区域面积是 $c \cdot dr$ , $c$ 为叶片弦

长,则叶元体所受的升力与阻力表达式为<sup>[6]</sup>:

$$dL = \frac{1}{2} C_L \rho V_1^2 c dr \quad (4)$$

$$dD = \frac{1}{2} C_D \rho V_1^2 c dr \quad (5)$$

式中: $C_L$ 为升力系数; $C_D$ 为阻力系数; $\rho$ 为空气密度, $1.225 \text{ kg/m}^3$ 。

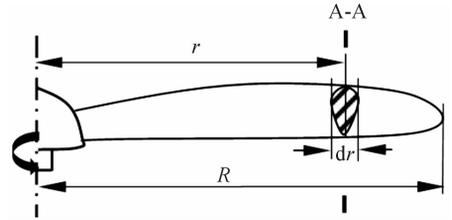


图1 叶元体截取位置

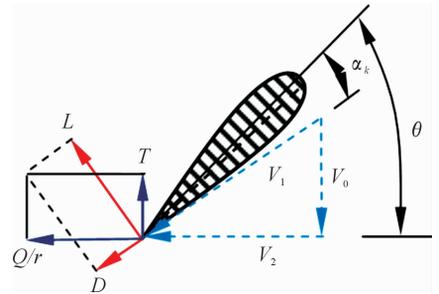


图2 叶元体截面速度与作用力分析

当螺旋桨叶片的数量为 $B$ 时,则

$$dT = \frac{1}{2} \rho V_1^2 c (C_L \cos\phi - C_D \sin\phi) B dr \quad (6)$$

$$\frac{dQ}{r} = \frac{1}{2} \rho V_1^2 c (C_L \sin\phi + C_D \cos\phi) B dr \quad (7)$$

根据图2所示,流体的合速度 $V_1$ 和攻角 $\alpha_k$ 可以表达为:

$$V_1 = \sqrt{(V_0^2 + V_2^2)} \quad (8)$$

$$\alpha_k = \theta - \tan^{-1}(V_0/V_2) \quad (9)$$

式中: $V_0$ 等于气力推进艇的前进速度 $V_{inf}$ , $V_2$ 等于叶元体旋转的线速度 $\omega r$ 。

引入轴向诱导因子 $a$ 和周向诱导因子 $b$ ,则 $V_0$ 和 $V_2$ 可以表达为<sup>[7]</sup>

$$V_0 = V_{inf} + a \cdot V_{inf} \quad (10)$$

$$V_2 = \omega r - b \cdot \omega r \quad (11)$$

## 1.2 基于动量守恒理论的推力计算

假设螺旋桨在无限的静止流体中以速度  $V_{inf}$  前进,应用运动转换原理,即认为螺旋桨是固定的且被包在空气流管里,空气自无穷远前方以速度  $V_{inf}$  流向螺旋桨。

根据动量守恒定理,作用在流体上的力等于单位时间内流体的动量的变化量<sup>[8-9]</sup>,则在叶元体上产生推力的表达式为:

$$dT = \Delta P = dm \cdot \Delta V = \rho 2\pi r dr V_0 (V_{slip} - V_{inf}) \quad (12)$$

式中:  $\Delta P$  为动量的变化量;  $dm$  为叶元体质量;  $\Delta V$  为速度的变化量;  $V_{slip}$  为滑流速度 (m/s)。

由伯努利方程和动量守恒,可知螺旋桨盘面的轴向速度  $V_0$  是空气自由流速  $V_{inf}$  和气流速度的平均值  $V_{slip}$ <sup>[10]</sup>:

$$V_0 = (V_{inf} + V_{slip})/2 \quad (13)$$

则

$$V_{slip} = V_{inf}(1 + 2a) \quad (14)$$

因此,由动量守恒理论得到的螺旋桨推力为:

$$dT = \rho 4\pi r^2 V_{inf}^2 (1 + a) \cdot a \cdot dr \quad (15)$$

根据角动量守恒,考虑其与轴向速度的变化相结合可以证明滑流角速度是螺旋桨盘  $r$  处值的 2 倍,即

$$V_\theta = 2b\omega r \quad (16)$$

即

$$dQ = \rho 4\pi r^3 V_{inf}^2 (1 + a) b\omega r \cdot dr \quad (17)$$

螺旋桨总体推力  $T$  及所需的驱动转矩  $Q$  等于其径向叶元体推力  $dT$  和转矩  $dQ$  的总和,即

$$T = \sum dT \quad (18)$$

$$Q = \sum dQ \quad (19)$$

## 2 螺旋桨推力及推力系数计算

### 2.1 迭代算法及编程

上述式(6)~(9)(15)和(17)中是含有 4 个未知变量的  $dT$ 、 $dQ$ 、 $a$  和  $b$  的方程,可以利用迭代的方法求出未知数。采用 Matlab 编写计算程序的

流程,如图 3 所示。计算过程如下:

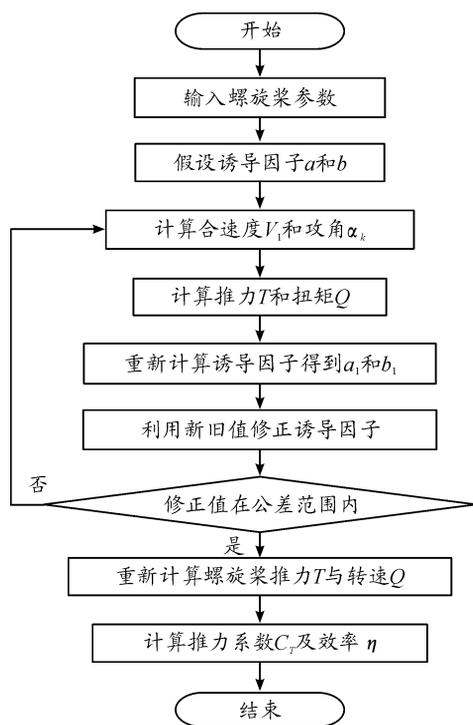


图 3 计算流程

1) 假设诱导因子  $a$  和  $b$  值并赋予初始值,利用式(8)和式(9)计算出流体的合速度  $V_1$  和攻角  $\alpha_k$ ;

2) 根据叶元体原理得出的式(6)和(7),估计叶元体推力和转矩;

3) 根据得出的推力与转矩的近似值,利用动量守恒定理得出的式(15)和(17),修正诱导因子  $a$  和  $b$ ;

4) 重复 1) 至 3) 计算过程,使  $a$  和  $b$  的值在指定的收敛范围内;

5) 赋予诱导因子  $a$  和  $b$  的收敛值,利用式(8)和(9)计算得到叶元体推力和转矩的预测计算值。

### 2.2 相关计算参数

以某型号气力推进艇螺旋桨叶片为研究对象,如图 4 所示。螺旋桨叶片半径为 90 cm,其各半径位置的弦长  $c$  和厚度  $h$  的数值如表 1 所示。

在计算中假定螺旋桨截面为相对简单的标准线性化翼型设计及叶片具有恒定的螺距  $p$ 。螺距  $p$

由标准螺距方程计算得到。

升力系数和阻力系数与桨叶的材料、形状等因素有关,精确计算比较复杂,根据该螺旋桨的基本叶形,由 Fluent 软件计算得到叶形在不同雷诺数和不同迎角下相对应的升力系数和阻力系数。经拟合数据得,升力系数  $C_L$  和攻角  $\alpha_k$  略成线性关系,模型可取比例系数为 6.2。

$$C_L = 6.2\alpha_k \quad (20)$$

阻力系数与升力系数的函数关系为:

$$C_D = 0.008 - 0.003C_L + 0.01C_L^2 \quad (21)$$

$$P = 2\pi r \tan\theta \quad (22)$$



图4 桨叶实物

表1 螺旋桨结构数据

位置	弦长 $c/\text{mm}$	厚度 $h/\text{mm}$
$R$	80	9
$0.9R$	130	14
$0.8R$	163	17
$0.7R$	190	23
$0.6R$	213	27
$0.5R$	230	33
$0.4R$	234	36
$0.3R$	232	35
$0.2R$	210	35
$0.1R$	80	34

### 2.3 螺旋桨推力计算结果

在气力推进艇螺旋桨为 2 桨叶或 3 桨叶时,计算得到不同螺距角时的推力,如图 5 所示。

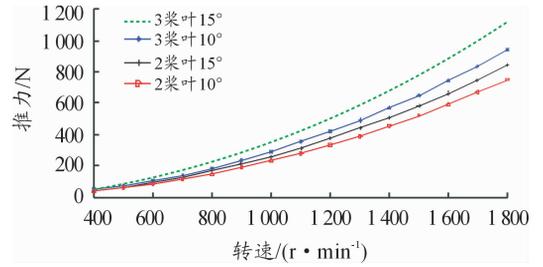


图5 螺旋桨推力计算结果

## 3 螺旋桨推力测试试验及结果分析

### 3.1 静态推力测试方法

由气力推进艇样机、电子拉力计、联接钢丝绳、滚杠及固定桩等构成静态推力测试系统,如图 6 所示。气力推进艇样机选用 4G63S4T 增压汽油发动机。发动机的最大功率是 130 kW/5 000 r/min,最大扭矩是 253 N·m/2 500 r/min。测试时将滚杠放置在平整、光滑的水磨石地面上,并将气力推进艇安放在滚杠上,以尽可能地减小摩擦阻力。

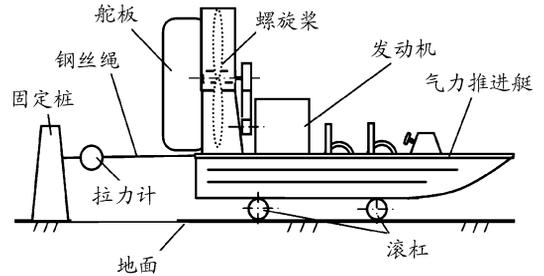


图6 静态推力测试系统

### 3.2 静态推力测试结果

在螺距角不同时,3 桨叶螺旋桨静态推力测试结果,如表 2、表 3 所示。

表2 螺距角 10° 时 3 桨叶静态推力测试结果

螺旋桨转速/ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	推力/ N	风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	推力 系数
686	52	5	0.031
808	82	6	0.035
1 005	136	5	0.038
1 142	181	8	0.039
1 311	265	10	0.043
1 609	476	12	0.052

表3 螺距角 15°时 3 桨叶静态推力测试结果

螺旋桨转速/ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	推力/ N	风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	推力 系数
616	65	6	0.041
799	121	9	0.053
998	225	10	0.063
1256	402	14	0.071
1428	540	17	0.074

在螺距角不同时,2 桨叶螺旋桨静态推力测试结果,如表 4、表 5 所示。

表4 螺距角 10°时 2 桨叶静态推力测试结果

螺旋桨转速/ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	推力/ N	风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	推力 系数
655	28	4	0.018
791	45	7	0.020
1 006	98	8	0.027
1 206	184	9	0.035
1 414	292	12	0.041
1 699	528	14	0.051

表5 螺距角 15°时 2 桨叶静态推力测试结果

螺旋桨转速/ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	推力/ N	风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	推力 系数
612	50	6	0.038
774	116	7	0.054
1 023	226	10	0.061
1 209	318	12	0.061
1 415	496	14	0.069
1 600	682	16	0.075

### 3.3 螺距角不同时推力计算结果与检测数据对比

螺距角不同时,3 桨叶螺旋桨推力计算结果与测试数据的对比如图 7 所示。可以看出,推力计算结果与测试数据都随螺旋桨转速的变化呈抛物线形。

相同螺旋桨转速下,推力计算结果与测试数据的平均误差见表 6。螺距角相同时,3 桨叶的推力计算结果与测试数据的平均误差小于 2 桨叶;

螺距角为 15°时的推力计算结果与测试数据的平均误差大于螺距角为 10°时的误差。

推力计算结果大于试验检测数据的原因主要是:在计算中采用的叶元体理论和动量守恒理论主要研究对象是理想螺旋桨,即假设空气可以自由通过螺旋桨盘面,空气速度和压力在螺旋桨盘面上均匀分布,空气为不可压缩的理想流体以及螺旋桨截面为相对简单的标准线性化翼型的影响。

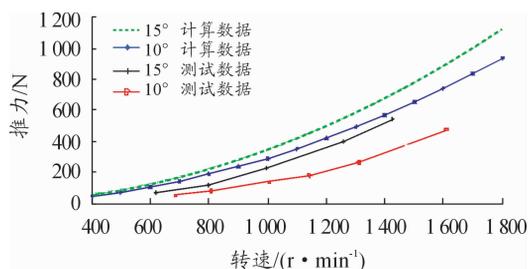


图7 螺距角不同时推力计算与测试

表6 推力计算与测试结果的误差统计

螺旋桨结构	螺距角 $\theta$	绝对误差 N	相对误差/%
2 桨叶	10°	50	9.6
	15°	82	11.6
2 桨叶	10°	-22	7.5
	15°	77	13.8

### 3.4 桨叶数不同时推力计算结果与检测数据对比

螺旋桨的桨叶数增多时,单位时间内流过螺旋桨盘面的流体质量增加,所以空气单位时间内获得的动量增加,即桨叶数多时推力也增加。在相同转速下,3 桨叶产生推力的计算结果比 2 桨叶的推力大,如图 8 所示。但是,检测获得的不同桨叶数推力的增加幅度小于计算结果的增加幅度。这是因为螺旋桨数目增多后,桨叶之间的相互扰动变大,前一个螺旋桨桨叶的绕流会影响下一个螺旋桨桨叶周围的流场分布,所以检测获得的不同桨叶数推力的增加幅度减小。

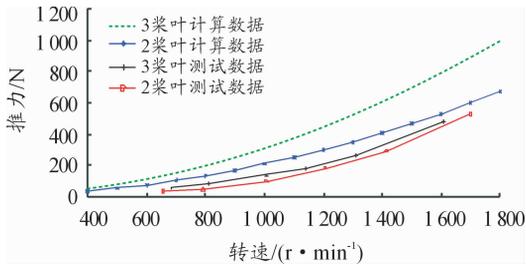


图8 桨叶数不同时推力计算与测试结果

## 4 结论

1) 在螺旋角和桨叶数不同时,螺旋桨推力计算结果与测试数据随螺旋桨转速的变化都呈抛物线形,即推力的计算结果与测试数据的变化规律相同,因此计算结果具有参考意义。

2) 在螺旋桨转速、螺旋角和桨叶数不同时,其平均绝对误差有差异,最大平均误差为 87 N,相对误差为 10% ~ 20%。

3) 螺旋桨推力计算结果与测试数据有差异的主要原因是计算公式的假设条件理想化及检测试验中存在着摩擦阻力等因素的影响。

## 参考文献:

[1] HAMDAN S, JUNAIDI E, KUEK P. An Airboat for Dument R. The Use of Airboat in Ice and Water Rescue

Emergencies [J]. Fire Engineering, 2004, 157 (3): 113 - 126.

- [2] YUTAKA KAIZU, MUNETAKA IIO, HIROYUKI YAMADA, et al. Development of unmanned airboat for water-quality mapping [J]. Biosystems Engineering, 2011, 109 (4): 338 - 347.
- [3] 高峰, 徐大平, 吕跃刚. 基于叶素理论的风力发电机组风轮建模 [J]. 现代电力, 2007 (6): 52 - 57.
- [4] 段宏. 基于动量叶素理论的风力机风轮建模仿真 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [5] 张晓磊. 基于动量叶素理论的风力机叶轮建模 [J]. 云南电力技术, 2016, 44 (2): 130 - 133.
- [6] 窦真兰, 王晗, 凌志斌, 等. 基于叶素理论的风力机模拟系统研究 [J]. 电工电能新技术, 2011, 30 (3): 1 - 5.
- [7] 张悦, 冯杰. 浅谈动量守恒定律的导出方式 [J]. 物理通报, 2016 (10): 20 - 24.
- [8] 柳青. 叶素动量理论 (BEM) 实现方法讨论 [J]. 中国科技信息, 2016 (18): 82 - 84.
- [9] 刘颖, 严军. 基于叶素动量理论的水平轴风力机叶片设计方法 [J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40 (6): 59 - 64.
- [10] 张萧, 孙石, 李瑞涛, 等. 基于叶素动量理论的潮流能发电机组叶片设计方法 [J]. 中国新技术新产品, 2017 (12): 10 - 11.

(责任编辑 林芳)

## (上接第 51 页)

- [2] 王军雷, 李百川, 应世杰, 等. 车道变换碰撞预警分析及最小纵向安全距离模型的研究 [J]. 人类工效学, 2004, 10 (4): 16 - 19.
- [3] HIDAS P. Modeling Vehicle Interactions in Microscopic Simulation of Merging and Weaving [J]. Transportation Research Part C13, 2005: 37 - 62.
- [4] KITA H. Effects of Merging Lane Length on the Merging Behavior at Expressway On-Ramps [C] // Proc 12th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, 1993: 37 - 51.
- [5] KITA H. A Merging-Giveway Interaction Model of Cars in A Merging Section: A Game Theoretic Analysis [J]. Transportation Research Part 33 A, 1999: 305 - 312.
- [6] 陈斌. 基于多智能主体系统的车道变换模型 [J]. 中国公路学报, 2005, 18 (3): 104 - 108.
- [7] YE P, ZHONG C W, LI B Q. Two-lane cellular automata Traffic Model Based on the Characteristic of Initiative lane changing of Fast and Slow Vehicles [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2007, 25 (1): 86 - 89.
- [8] 王飞雄, 刘伟铭. 基于模糊推理的换车道模型 [J]. 交通信息与安全, 2010, 28 (2): 84 - 87.
- [9] 冯心欣, 柳泽烽, 谢志鹏. 考虑道路形状约束的车辆轨迹聚类方法 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2019, 31 (4): 556 - 562.
- [10] Federal Highway Administration. Next Generation Simulation Fact Sheet [EB/OL]. [2018 - 08 - 15]. ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysisstools/ngsim.htm.

(责任编辑 杨黎丽)