

有关船舶拖航总阻力的计算

刘积甫

(丹东港引航站, 辽宁 丹东 118300)

摘要: 随着海上运输业的快速发展, 越来越多的大型工程船舶, 海上移动平台, 海上浮式生产储油船(FPSO)等被广泛的应用于海上作业, 为了保证大型工程船舶在拖航和工作过程中的安全性, 对其工作时的拖航阻力进行研究。通过分析大型工程船舶的总阻力构成成分进一步说明各个相关阻力的计算方法, 最终与多个经验公式对比分析, 证明经验公式的计算结果存在较大误差。

关键词: 船舶; 拖航; 总阻力; 经验公式

中图分类号: U661.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2023) 03—0061—03

随着我国海洋事业的逐步深入, 各类各样的大型工程船舶, 平台等数量在不断增长。这些平台很多都是非自航的, 当从一个工作区到达另一工作区时, 则需要拖航船舶进行辅助移动。因此选择合适的拖航船舶至关重要, 即拖航总阻力需预先进行计算从而选项合适的拖曳设备。

1 阻力计算方法

波浪阻力、海流阻力、风阻力和静水阻力构成了拖航的总阻力。总阻力可通过船级社给出的经验公式计算得出, 也可通过模拟实验(如水池或风洞模型)以及数值模拟等方法得到^[1]。即使模型试验精度相比较于其他方法精度较高, 计算结果较为精准, 但由于其投入的成本较高并未广泛应用, 因而大多数采用经验公式或者对拖航阻力进行数值计算从而进行估算。

2 拖航阻力计算

2.1 静水阻力模型

拖航阻力中占主导地位的是静水阻力, 模型试验实现对静水阻力的早期预报。通过运用弗劳德数 Fr 相似原理实现船舶模型相关拖曳水池试验, 从而计算出船舶模型的静水阻力, 进一步预报出实船的阻力性能。当船模总阻力 R_{tm} 被测量时, 船舶模型的总阻力系数 C_{tm} 与剩余阻力系数 C_{rm} 表示为^[2]:

$$C_{tm} = R_{tm} / (0.5\rho_f S_m V_m^2) \quad (1)$$

$$C_{rm} = C_{tm} - C_{fm} \quad (2)$$

其中: ρ_f 表示为静水密度, S_m 表示为船舶模型湿表面积, V_m 表示为拖曳速度, 定义 C_{fm} 船舶模型的摩擦阻力系数。船舶总阻力 R_{ts} 和总阻力系数 C_{ts} 定义为

$$C_{ts} = [(S + S_{bk}) / S] \times (C_{fs} + \Delta C_f) + C_r \quad (3)$$

$$R_{ts} = C_{ts} \times (0.5\rho_s S V_s^2) \quad (4)$$

其中: S_{bk} 表示为舭龙骨的湿表面积, S 表示实船

的湿表面积, V_s 表示为实船的航速, ρ 表示为海水的密度, C_r 表示为剩余阻力系数, $C_r = C_{rm}$, ΔC_f 表示为摩擦阻力修正系数, C_{fs} 表示为实船的摩擦阻力系数。

如果船舶低速行驶, 船只周边的流体呈层流或过渡流形式, 此时雷诺数相对较小, 在总阻力中摩擦阻力相对较大; 如果船舶保持高速行驶, 由于船舶航速较大船舶周边的流体呈现为湍流状, 此时雷诺数值相对很大, 从而导致残余压力在总压力中占相对较大。而关于摩擦阻力系数 C_f , 如果船只保持低速行驶, 通过国际船舶模型拖曳水池研讨会 (International Towing Tank Conference, ITTC)^[3] 中提供的计算模型, 通过给定的公式计算出的数据显然高于通过其他计算公式所获得的数据, 从而直接导致残余压力为负, 所以应采用更能满足转换流态的摩擦阻力计算公式。经过对比多种不同的摩擦阻力计算方法, 最后选定了柏兰特—许立汀方法的最大摩擦阻力系数 C_f , 即

$$C_f = \frac{0.455}{(\lg Re)^{2.58}} \quad (5)$$

其中: 雷诺数用 Re 表示。在雷诺数为较小数值时, 可通过公式(5)对过渡流的摩擦阻力系数和水体层流根据经验值进行修正, 通过对比发现在湍流状态下得到的结果与 ITTC 的计算结果相当。

2.2 风阻力模型

风阻力计算模型为^[4]:

$$F_{wi} = 0.5 C_s C_H \rho (V_w + V_i)^2 A \quad (6)$$

其中: C_H 表示为受风构件的高度系数, C_s 表示为受风构件的形状系数, F_{wi} 表示为风阻力, V_i 表示为航速, V_w 表示为海区真风速, A 表示为倾斜状态下所有暴露面的正投影面积, ρ 表示为空气密度 1.222kg/m^3 。

对该结构物某一受风面进行分析, 计算其在不同风速, 相应航速情况下对应的风阻力见下图。(因研究物体是同一受风面, 所以其受风构件的形状系数和高度系

数及投影面积均为固定值，因此影响其风阻力的影响可定量为航速和风速，随着风速和航速而变化）

通过实验及公式可知，当风速一定时，风阻力的变化如下图：

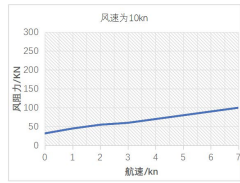


图1 风速为10kn时风阻力和航速的关系

当航速一定时，风阻力的变化如下图：

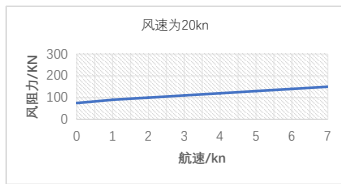


图2 风速为20kn时风阻力和航速的关系

由图1和图2的实验数据和公式对比可知，当风速一定时，航速增加的同时风阻力也相应增加。通过图1和图2比较，当航速维持到一定值时，风阻力曲线接近平行，可知风速的增加与风阻力的变化呈一定规律。

2.3 流阻力模型

流阻力计算模型为^[5]：

$$F_c = 0.5C_D\rho(V_c + V_t)^2 A \quad (7)$$

其中： F_c 表示流力， A 表示被拖物浸水部分中的横剖面面积， ρ 表示海水密度， 1025kg/m^3 ， C_D 表示拖曳力系数， $C_D=0.5 \times (0.046\text{Re}-0.134+0.011)$ ， V_c 表示流速。

$$A = B \times d \times \delta \quad (8)$$

其中： δ 为船舶的纵剖面系数， d 表示为拖航的吃水， B 表示为船舶宽度。

由于 C_D 系数的选取直接影响流阻力计算的准确度，该公式为经验公式，公式与实验对象表面的粗糙程度、雷诺数 Re 和实验对象的横截面形状等有关。当确定实际项目参数时，用模型试验进行确定的可行性最高。鉴于试验资源的限制，也可以参考相关船级社的经验模型来计算。

我们取试验对象为一浮式结构物，其 $\delta=0.8978$ ， $A=370.12\text{m}^2$ ，多种船速条件下的流阻力计算如下表（试验数据均取至百分位）：

| 航速/kn | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 流阻力/KN | 46.98 | 194.89 | 443.04 | 790.86 | 1239.12 | 1787.87 | 2436.27 | 3187.05 |

2.4 波浪阻力模型

考虑到拖航过程海浪载荷所产生的航行阻力构造物在波浪中所产生的二阶均值偏移力定义。基于水动力分析软件并根据作业水域的实际海况要求，通过光谱分析方法计算在不规则波中的短期反应值作出预测，然后

计算得到最大的平均漂移力值。

首先选取拖航海域对应的波浪图及其相应的PM谱，从而得到平均跨零周期 T_z 和谱峰值周期 T_p ，其中 $T_z=T_p/1.41$ ， T_p 表示为^[6]。

$$\frac{\sqrt{13H_s}}{1+(V_1 \cos \theta / 1.56 \sqrt{13H_s})} \leq T_p \leq \frac{\sqrt{30H_s}}{1+(V_1 \cos \theta / 1.56 \sqrt{30H_s})} \quad (9)$$

其中： θ 表示船拖航方向， H_s 表示有义波高， V_1 表示航速，不同航速下波浪阻力计算结果如下表：

| 航速 | $H_s=5\text{m}$ | | $H_s=3\text{m}$ | | $H_s=2\text{m}$ | |
|----|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| | T_p 范围/s | 波浪阻力/KN | T_p 范围/s | 波浪阻力/KN | T_p 范围/s | 波浪阻力/KN |
| 0 | 8.0~12.1 | 260 | 6.1~9.49 | 91.6 | 5.2~7.68 | 41.49 |
| 1 | 7.6~11.8 | 260 | 5.8~9.18 | 85.6 | 4.6~7.45 | 41.49 |
| 2 | 7.3~11.6 | 260 | 5.5~8.92 | 85.7 | 4.4~7.21 | 41.49 |
| 3 | 7.2~11.2 | 260 | 5.2~8.61 | 85.8 | 4.1~6.86 | 40.69 |
| 4 | 6.8~11.2 | 260 | 5.0~8.34 | 75.2 | 3.9~6.59 | 40.69 |

3 拖航总阻力

3.1 总阻力

被拖物体的拖航总阻力等于上述分阻力的叠加即：

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (10)$$

其中静水阻力、风阻力，流阻力和波浪阻力分别用 F_1 ， F_2 ， F_3 ， F_4 表示。

由上述试验结果得知，四种阻力都不可被忽略，在计算拖航总阻力时，必须都要考虑进去，为了明显直观的得到结论，我们需要用实际计算数据与部分船级社给出的经验公式进行对比。

3.2 与经验公式结果对比

在参考部分船级社给出的经验下可以得到，影响拖航阻力的因素只有剩余阻力、风阻力和摩擦阻力，公式为^[7]：

$$\sum R = 0.7 \times (R_f + R_B) + R_a \quad (11)$$

其中： R_B 表示被拖平船舶的剩余阻力， R_f 表示被拖船舶的摩擦阻力， R_a 表示空气阻力， $R_f=1.67 \times A_1 V_1^{1.83} \times 10^{-3}$ ， $R_B=0.147 C_B A_2 V_1^{1.74+0.15V}$ ， $R_a=0.5 \rho (V_w+V_t)^2 \sum C_s A_j \times 10^{-3}$ 。（为了方便对比，此经验公式与本文上述提到的计算公式区别在于没有考虑被拖物体高度系数对阻力的影响）。

| 航速/kn | 经验公式 | | | | 本文计算公式 | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|
| | 摩擦力 | 剩余阻力 | 风阻力 | 拖航阻力 | 静水阻力 | 流阻力 | 波浪阻力 | 拖航阻力 | |
| 0 | 0 | 0 | 123.19 | 123.19 | 0 | 136.95 | 43.37 | 264.01 | 444.33 |
| 1 | 8.44 | 14.67 | 135.82 | 152.00 | 24.1 | 150.99 | 195.00 | 260.01 | 630.1 |
| 2 | 30.01 | 51.82 | 149.06 | 206.34 | 44.2 | 165.71 | 442.92 | 260.01 | 912.84 |
| 3 | 63.03 | 115.50 | 162.92 | 287.89 | 99.5 | 181.12 | 791.13 | 260.00 | 1331.75 |
| 4 | 106.71 | 215.32 | 177.40 | 402.82 | 190.4 | 197.21 | 1239.63 | 260.00 | 1887.24 |
| 5 | 160.53 | 365.83 | 192.49 | 560.94 | 395.6 | 213.99 | 1788.41 | 260.00 | 2658.00 |
| 6 | 224.11 | 587.99 | 208.20 | 776.67 | 590.3 | 231.45 | 2437.49 | 260.00 | 3518.76 |

半浸桨推进装置的产品特点与应用情况

史宗鹰¹, 张金涛², 姚明珠¹

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2. 武警部队装备部军事代表局五室, 北京 100161)

摘要: 半浸桨推进装置因具有推进效率高、无空泡剥蚀和浅水适应强等显著优点而在超高航速船舶中得到广泛应用。本文通过对半浸桨推进装置的桨叶和结构特征进行介绍, 提出了半浸桨推进与普通螺旋桨推进的差别所在。目前国内用户对半浸桨产品的应用需求较大, 尤其公务艇市场对半浸桨产品的国产化需求更为迫切, 国内半浸桨生产单位针对半浸桨推进装置的产品特点, 不断在其可靠性和耐久性方面进行工程突破, 已取得一定的市场应用, 未来可打破国外产品的行业垄断。

关键词: 半浸桨; 结构特征; 国产化; 市场应用

中图分类号: U664.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2023) 03—0063—03

半浸式螺旋桨 (Surface Piercing Propeller, SPP, 简称半浸桨, 又称表面桨), 是一种在高速运转时只有一半桨叶浸入水中而能正常工作的螺旋桨。半浸桨推进装置是一种集半浸式螺旋桨、驱动装置本体、操纵油缸及液控系统为一体的高速船用推进装置, 该装置在高速航行时具有无空泡剥蚀、低阻力、高效率 and 操控灵活等显著优点^[2,3], 在当今世界的超高速船艇上得到了广泛的应用。半浸桨推进与常规螺旋桨推进具有显著的不同, 主要表现在半浸桨叶和装置的结构特征两方面, 这也造成了半浸桨产品在适配船艇上具有典型的应用特点。

1 半浸桨推进装置的优点

与传统螺旋桨推进相比, 半浸桨推进装置的显著优点具体特征如下:

从上述可知, 摩擦阻力与剩余摩擦力的和大大小于流阻数值, 所以在考虑拖航摩擦力时, 需要充分考虑流阻的作用。不能忽略船速较快条件时静水阻力的影响。按照最新拖航阻力模型选择适当的拖船, 在最不利的海况环境下仍用适当的拖力以防止被拖物顶风滞航。

4 结论

基于船级社提供的模型求取拖航阻力, 虽然快捷方便, 但与实际阻力存在较大的偏差, 特别是在航速较快及海况恶劣的情况下。如果计算风阻力必须涉及受风构件的高度系数的影响, 同时若计算拖航阻力, 也应考虑静水阻力。因此不能完全依赖经验公式的算法去计算拖航阻力来选取拖轮。为了增加拖航系统的安全性, 提高拖轮选取的合理性, 在计算拖航阻力时要谨慎核算, 不能忽略任一阻力。

1.1 推进效率高

螺旋桨设计时, 螺旋桨的直径往往和其他影响螺旋桨水动力性能的参数相互制约, 动量理论表明相同的螺旋桨推力, 桨叶直径越大, 效率越高; 但实际桨叶设计时, 其直径往往受船艇吃水、桨轴位置和动力设备条件等诸多因素限制。半浸桨工作于船艇尾部水面附近, 可自由选择较大速比降低桨叶转速, 增大直径, 提高半浸桨推进效率。与此同时, 半浸桨工作时只有部分桨叶露出水面, 桨叶水下附体尺寸较小, 阻力降低, 流经半浸桨水流状态比全浸桨好, 半浸桨的推进效率也得以提高。不同类型螺旋桨的推进效率对比图 1 如下:

参考文献:

- [1] 张新未, 勾莹, 徐文彪. 双层流体中浮箱拖航阻力的实验研究 [J]. 船舶力学, 2020, 24(08): 981-988.
- [2] 曾骥, 尹艳, 王超. 浮式结构物拖航阻力计算方法探讨 [J]. 船海工程, 2016, 1(45): 168-173.
- [3] 曹树杰, 李红涛. 海上移动平台的拖航阻力 [J]. 中国船检, 2013, (6): 84-86.
- [4] 张海燕. 海上移动平台和 FPSO 拖航阻力分析 [J]. 中国海洋平台, 2015, 30(05): 74-79+83.
- [5] 徐田甜. 超大型 FPSO 远洋拖航安全关键技术研究 [J]. 中国海上油气, 2021, 33(06): 138-146.
- [6] 徐嘉雯, 于雁云, 林焰. 浮体带漂角拖航阻力数值预报 [J]. 船舶工程, 2020, 42(04): 32-37+85.
- [7] 李伟峰, 史国友. 钻井平台拖航阻力计算 [J]. 船海工程, 2017, 46(02): 121-123+134.