



文章编号: 1000-8608(2009)06-0872-04

基于 Rankine 源法的兴波阻力数值计算研究

张宝吉, 马 坤*, 纪卓尚

(大连理工大学 船舶 CAD 工程中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以边界元法为基础, 以 Rankine 源函数作为基本解, 编制了兴波阻力数值计算程序, 分别计算了数学船型 Wigley、S60 船型和实船 26 000 t 成品油船的兴波阻力, 并将所得的计算结果与船模阻力试验值及 Michell 积分法相比较, 结果表明 Rankine 源法和试验值比较接近, 本方法可靠实用。

关键词: 边界元法; Rankine 源; 数值计算; 兴波阻力

中图分类号: U661.1 **文献标志码:** A

0 引 言

当前在势流框架下计算船舶兴波问题大多采用边界元方法. 以均匀流动为基本流动的线性兴波阻力理论使用的格林函数是 Kelvin 源(或 Havelock 源), 它是拉普拉斯方程的一个基本解, 形式和计算都相当的复杂^[1], 在考虑非线性自由面条件时, 难于推导; 而采用 Rankine 源作为基本解, 形式简单, 易于求解, 通过这个方法还可以获得更多的关于流场的信息, 更重要的是 Rankine 源法可以扩展到求解非线性自由面条件的船舶绕流问题, 因此受到了许多学者的青睐^[2].

本文编制基于 Rankine 源法的兴波阻力数值计算程序, 用该程序分别计算几种船型兴波阻力, 并对计算结果进行分析比较. 同时编制后处理程序和绘图程序, 以便能迅速准确地绘制船体型线图、自由面波形图和兴波阻力系数曲线.

1 Rankine 源法概述

Rankine 源法是一种兴波阻力数值计算方法, 它以叠模绕流代替薄船理论中的均匀流动. 取固定在船体上的直角坐标系, X 轴、 Y 轴取在未扰动的静水面上, X 轴沿着均匀来流指向船尾, Z 轴垂直向上^[3,4].

船体周围的速度势 ϕ 由叠模绕流的速度势 ϕ_0 和考虑自由面影响的波动速度势 ϕ_1 两部分组成,

即

$$\phi = \phi_0 + \phi_1 \quad (1)$$

其中

$$\phi_0(x, y, z) = Ux - \iint_{S_0} \sigma_0(x', y', z') \frac{1}{r_0} dS \quad (2)$$

$$\phi_1(x, y, z) = - \iint_{S_1} \sigma_1(x', y') \frac{1}{r_1} dx' dy' - \iint_{S_0} \Delta\sigma_0(x', y', z') \frac{1}{r_0} dS \quad (3)$$

$$r_0 = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$$
$$r_1 = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}$$

r_0, r_1 分别表示场点 (x, y, z) 与源点 (x', y', z') 和 $(x', y', 0)$ 之间的距离; S_0 表示船体表面, S_1 表示静止水面.

边界条件:

$$\frac{\partial\phi_0}{\partial n} = 0, \text{ 在 } S_0 \text{ 上}; \quad \frac{\partial\phi_1}{\partial n} = 0, \text{ 在 } S_1 \text{ 上} \quad (4)$$

线性化后的自由面条件:

$$\phi_{0z}^2 \phi_{1zz} + 2\phi_{0z} \phi_{0zz} \phi_{1z} + g\phi_{1z} = -\phi_{0z}^2 \phi_{0zz}; \text{ 在 } z=0 \text{ 上} \quad (5)$$

将式(2)代入边界条件式(4)中, 离散化后解出叠模表面源强 σ_0 ; 将式(3)代入边界条件式(4)和线性化后的自由面条件式(5)中, 离散化后解出自由面源强 σ_1 和船体表面源强 $\Delta\sigma_0$, 进一步求出兴波阻力系数及自由面波高.

2 船体网格和自由水面网格划分

Rankine 源法的数值离散不仅要在船体与流体界面 S_b 上进行,还要在整个自由面 S_f 进行,但自由面通常被认为是无穷区域,数值离散只在船舶引起干扰的自由面附近进行.自由面区域大小的选择应根据具体情况而定.对于较细长的船型,自由面区域可以小些;对于较粗大的船型,因为波动影响区域较大,自由面离散区域相应也大些^[5].

船体表面划分成四边形面元,通过 Hess-Smith 方法计算叠模解.对于自由面,先给出自由面上组成网格的流线根数,每根流线上的点数;第一根流线上各点的坐标值,以及每根流线的起始位置,其他流线上未知各点的坐标由叠模解计算而得.算出所有流线上的点后,由相邻的点按顺序组成自由面网格^[6].本文根据 Dawson 的网格划分经验^[1],自由面网格的区域半宽取为约 $3L/8$,上游伸展 $L/4$,下游向后延伸 0.25 个波长,整个水面网格顺流倾斜 45° ,船首和船尾附近网格均加密,Rankine 源法的初始计算网格如图 1 所示.

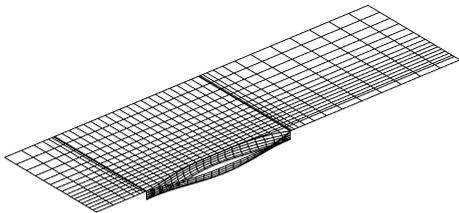


图 1 船体和自由面网格划分

Fig. 1 Dividing grids for hull and free surface

3 计算程序系统简介

首先输入船型数据,该数据需提供船体型值和少量的输入参数,这些参数包括船长、流体质量密度、航速、自由面计算区域;然后,自动生成船体网格;Hess-Smith 程序模块采用边界单元法计算势流场,为 Rankine 源程序模块提供船体周围在无波、无粘性假定下的速度场和自由面上的流线分布;通过龙格-库塔法获得自由表面流线,采用流线跟踪法生成自由面网格;Rankine 程序模块采用边界单元和有限差分相结合的方法,提供船舶周围在无粘性、有波假定下的速度场、压力场、兴波阻力和波形;最后将计算结果(船体周围流场的速度、压力、波阻、波形和流线等)以数据文件格式输出.

为了验证程序的可靠性,本文分别计算 Wigley 数学船型、S60 船型、实船 26 000 t 成品油船的兴波阻力,并描绘出自由面波形图.

4 数值计算实例与结果分析

4.1 Wigley 船型

Wigley 船型是试验和数值计算常用到的船型,其船体表面可以用数学方程式来表达.主要参数取 $L = 2.0, B/L = 0.1, T/L = 0.0625$,船体表面定义为 $y = 0.1 \times (1 - x^2) \times (1 - 64z^2)$.船体表面共划分 160 个面元,自由面划分 690 个面元.船体横剖面如图 2 所示;自由面波形如图 3 所示;兴波阻力系数曲线如图 4 所示.

从兴波阻力系数曲线图中可以看出,对于 Wigley 船型,Michell 积分法曲线出现很大的波动;而 Rankine 源法的曲线光滑平稳,其计算结果更接近试验值,但和试验值还有一定的差距,主要是由于计算时没有考虑粘性和非线性因素的影响.

从自由面波形图上可以看出,在高傅氏数时能够再现开尔文波系形状.

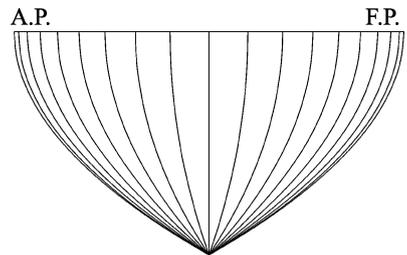


图 2 Wigley 船型船体横剖面

Fig. 2 Body plans for the Wigley hull form

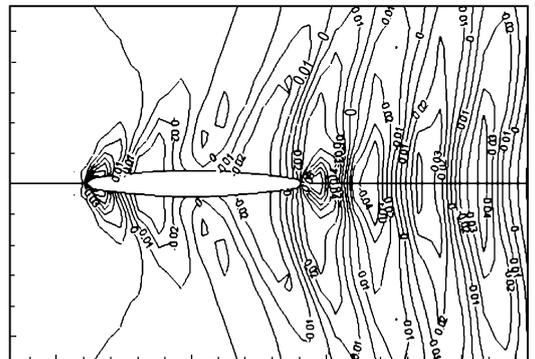


图 3 Wigley 船型自由面波形 ($2g\zeta/U^2$) 图 ($Fr = 0.35$)

Fig. 3 Wave patterns ($2g\zeta/U^2$) of free surface of Wigley hull form at $Fr = 0.35$

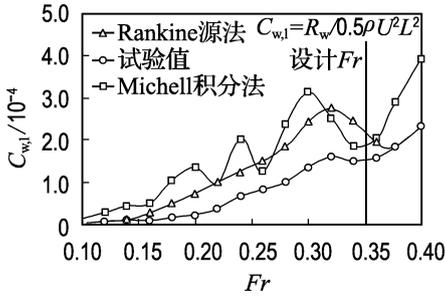


图 4 Wigley 船型兴波阻力系数曲线图
Fig. 4 Comparison of wave-making resistance coefficient curves of Wigley hull form

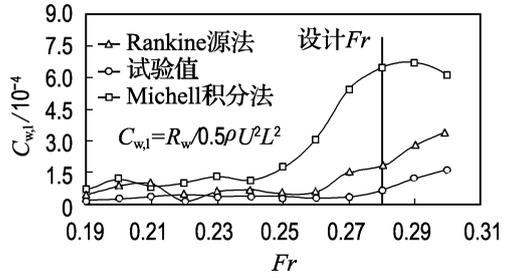


图 7 S60 船型兴波阻力系数曲线图
Fig. 7 Comparison of wave-making resistance coefficient curves of S60 hull form

4.2 S60 船型

S60 船型船体表面共划分 120 个面元,自由面划分 752 个面元,船体横剖面如图 5 所示;自由面波形如图 6 所示;兴波阻力系数曲线如图 7 所示。

从兴波阻力系数曲线图中可以看出 S60 船型,3 条曲线的变化趋势基本一致,在傅氏数大于 0.24 以后,Michell 积分法计算的曲线出现了很大的波动.其原因是 Michell 积分是一种薄船理论,实际船舶都有一定的厚度,所以结果会出现很大的偏差;而 Rankine 源法和试验值比较接近,但和试验值还有差距,主要是由于没有考虑非线性因素的影响。

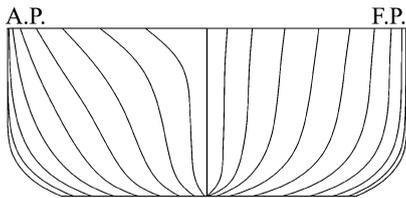


图 5 S60 船型船体横剖面
Fig. 5 Body plans for the S60 hull form

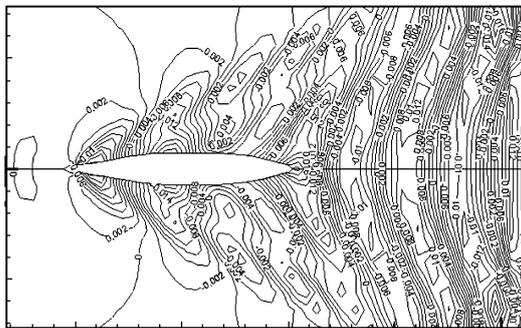


图 6 S60 船型自由水面波形 ($2g\zeta/U^2$) 图 ($Fr=0.30$)
Fig. 6 Wave patterns ($2g\zeta/U^2$) of free surface of S60 hull form at $Fr=0.30$

从船行波的自由面波形图中可以看到,有明显的开尔文波系形状,出现了横波和散波,以及限制在 $\pm 19^\circ 28'$ 范围内波系的状态。

4.3 26 000 t 成品油船

以实船 26 000 t 成品油船为例,运用 Rankine 源法计算兴波阻力,并将所得的计算结果与船模阻力试验值及 Michell 积分法相比较.船体纵向划分 570 个面元,自由面划分 1 056 个面单元.船体横剖面如图 8 所示;自由面波形如图 9 所示;兴波阻力系数曲线如图 10 所示。

从兴波阻力系数曲线图中可以看出,傅氏数在 0.10~0.14, Rankine 源法的计算值和阻力试

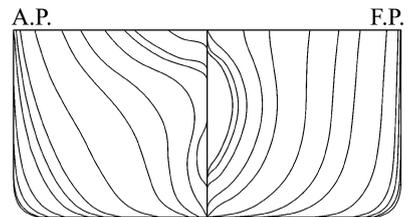


图 8 26 000 t 成品油船船体横剖面
Fig. 8 Body plans for the 26 000 DWT

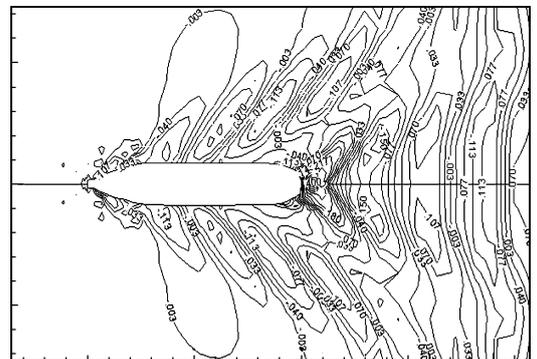


图 9 26 000 t 成品油船自由面波形 ($2g\zeta/U^2$) 图 ($Fr=0.175$)
Fig. 9 Wave patterns ($2g\zeta/U^2$) of free surface of 26 000 DWT at $Fr=0.175$

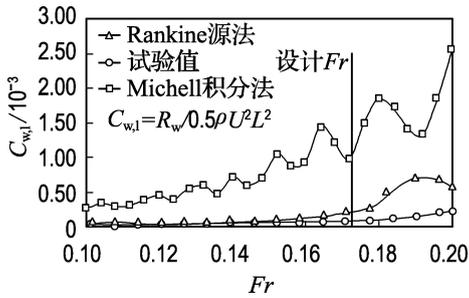


图 10 26 000 t 成品油船兴波阻力系数曲线

Fig. 10 Comparison of wave-making resistance coefficient curves of 26 000 DWT

验值基本相同；而傅氏数大于 0.16 时，Rankine 源法的兴波阻力值逐渐增加，和试验值相差较大，但和 Michell 积分法的计算结果比要更接近于试验值。对于这种肥大船型用 Michell 积分法计算显得更加不适用了。

自由面波形图可以清楚、直观再现开尔文波系，这和试验时观察的波形比较接近。

5 结 语

从本文的兴波阻力系数曲线图上可以看出，对于较细长船型 Wigley，用 Michell 积分法和 Rankine 源法计算的兴波阻力曲线和试验结果相差不大。随着船型变得肥大（S60 船型，实船 26 000 t 成品油船），Michell 积分法越来越不适

用，而 Rankine 源法虽然在高速域偏差大了些，但比 Michell 积分法要更接近试验值，因此，该方法对于研究船型的阻力性能和船型优化将会有很好的使用价值。

参 考 文 献：

- [1] 刘应中. 船舶兴波阻力理论[M]. 北京：国防工业出版社，2003
- [2] 嵇 醒，藏跃龙，程玉民. 边界元法进展及通用程序[M]. 上海：同济大学出版社，1997
- [3] SUZUKI K, IOKAMORI N. Studies on minimization of wave making resistance based on Rankine source method [J]. *Kansai Society of Naval Architecture in Japan*, 1999, **185**:9-19
- [4] SUZUKI Kazuo, KAI Hisashi, KASHIWABARA Shigetoshi, *et al.* Studies on the optimization of stern hull form based on a potential flow solver [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2005, **10**(2):61-69
- [5] 陈京普，朱德祥，刘晓东. 兴波阻力数值预报方法研究及其在集装箱船船型优化中的应用[J]. *水动力学研究与进展*, 2006, **21**(1):113-121
- [6] 高 斌. 兴波阻力计算及船型优化[D]. 上海：上海交通大学，2002

Numerical calculation research on wave-making resistance based on Rankine source method

ZHANG Bao-ji, MA Kun*, JI Zhuo-shang

(Ship CAD Engineering Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the boundary element method, and using Rankine source function as a basic solution, calculation program for the wave-making resistance value was worked out to calculate wave-making resistance of 26 000 DWT product oil tanker, mathematical ship form of Wigley and S60. At the same time, the calculation results of each ship form are compared with those of the Michell integral and the ship model resistance test value. The results indicate that the value of Rankine source method and the trial value are in good agreement so as to prove the reliability of the method used.

Key words: boundary element method; Rankine source; numerical value calculation; wave-making resistance