

# 船舶兴波阻力的一种计算方法

郝志超, 张 伟

(山东交通学院 工程机械系, 山东 济南 250023)

摘 要: 简述了采用面元法计算船舶兴波阻力的原理, 给出了 Rankine 源和 Kelvin 源两种格林函数的具体形式, 并比较了两者的优缺点。最后以 Wigley 数学船型为例, 总结出了一套完整的兴波阻力计算步骤。

关键词: 面元法; 兴波阻力; Rankine 源; Kelvin 源

中图分类号: U661.21<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973(2009)010-0036-02

## 一、引言

船舶阻力作为船舶工程中一项重要的研究内容, 长期以来都为国内外船舶专家学者所重视。最早对船舶阻力的研究, 可以追溯到 19 世纪。经过几代学者不断的探索, 对船舶阻力的计算准确度已大大提高, 但由于船舶本身是复杂的三维曲面, 加之船体首尾部剧烈的曲率变化, 想要完全精确地给出船舶在某海况下运行过程中所受的阻力, 目前还无法做到。当前比较普遍的计算船舶阻力的做法是, 根据船舶受到的各部分阻力产生的原因, 将总阻力  $R_t$  分成摩擦阻力  $R_f$ , 粘压阻力  $R_{pv}$  和兴波阻力  $R_w$  三部分:

$$R_t = R_f + R_{pv} + R_w$$

其中  $R_f$  采用相当平板进行计算,  $R_{pv}$  和  $R_w$  合称剩余阻力, 采用相似比较率进行换算<sup>[1]</sup>。

对于低速船, 摩擦阻力约占总阻力的 70%~80%, 粘压阻力占 10%以上, 兴波阻力成分很小, 单独研究兴波的意义不大。但对中高速船, 兴波阻力将急剧增加, 达到总阻力的 40%~50%。随着船舶制造业以及相关产业的不断发展, 船舶高速化趋势日益明显, 因此对于兴波阻力的研究开始越来越凸显出实际应用价值。与摩擦阻力所不同, 兴波阻力对船体型线比较敏感, 尤其在首尾部, 适当的型线变化可以明显的降低兴波阻力。传统的计算兴波阻力的方法依赖于船模实验, 在船舶设计的初始阶段, 由于缺少足够的船型参数, 难以把握兴波阻力随型线变化的规律, 因此越来越多的学者开始使用数值方法, 通过计算获得兴波阻力。本文将简述数值计算兴波阻力所采用的一种方法。

## 二、数学原理

船舶的兴波问题仅是由于重力的作用, 与液体的粘性无关, 因而在考虑兴波问题时, 可认为船舶航行于理想流体中。假定船在静水中做稳定的匀速直线运动, 来流速度为  $U$ 。取固定于船体上的右手直角坐标系, 如图 1 所示。取  $Z=0$  平面为自由表面。假定流体无旋且不可压缩, 则存在速度势  $\phi$ , 可记  $\phi = \phi - U_0 x$ , 即总速度势分解为船舶产生的扰动势与恒定的来流势。

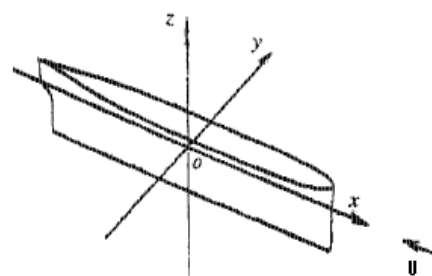


图 1 坐标系

扰动速度势  $\phi$  满足 Laplace 方程:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

定解条件包括物面边界条件(物面不可穿透), 自由面边界条件, 远前方无波条件等<sup>[2]</sup>。

采用格林函数法求解方程(1), 常用的格林函数有两种, 一种称为 Kelvin 源, 其具体表达式为:

$$G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) = -\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} + G' \quad (2)$$

$$\text{其中 } \frac{1}{r} = \frac{1}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2]^{1/2}}$$

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2]^{1/2}}$$

$$G' = \frac{k_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} \frac{\exp\{k[(z+\zeta) + i\omega]\}}{k \cos^2 \theta - k_0 + i\mu \cos \theta} dk$$

另一种格林函数称为 Rankine 源, 其表达式为:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2]^{1/2}} \quad (3)$$

上述表达式中,  $(\xi, \eta, \zeta)$  表示原点的位置, 即格林函数本身所在的位置, 而  $(x, y, z)$  表示场点的位置, 即待求点的位置。两种格林函数各有优点。Kelvin 源本身满足线性自由面边界条件和远前方无波条件, 因此使用该函数, 仅需在船体表面进行格林函数布置, 无需考虑自由面问题, 可以减少未知数的个数。但 Kelvin 源的缺点也非常明显, 即其自身的表达相

收稿日期: 2009-08-10

作者简介: 郝志超(1987-), 男, 山东交通学院工程机械系。

当复杂, 数值处理上较 Rankine 源复杂得多。Rankine 源自身的表达式非常简单, 但它的缺点在于不满足任何的边界条件, 因此为了准确描述船体周围流场的情况, 需要在船体表面和自由面都布置格林函数, 致使未知数的个数大大增加。另外, 为满足船体远前方无波, 还需要引入一些其它约束条件<sup>[2][3]</sup>。

使用合适的格林函数并配备相应的边界条件后, 变可以解出兴波速度势  $\phi$ , 进一步的可以得到流体的扰动速度  $\vec{V} = \nabla\phi = (\phi_x, \phi_y, \phi_z)$ 。因为船体远前方无波, 自由面相对压力为 0, 速度为来流速度  $U$ , 因此由流体力学伯努利方程<sup>[4]</sup>, 可以得出船体表面的压力分布:

$$p = \rho \left( -\frac{\nabla\phi \cdot \nabla\phi}{2} - gz + U_0\phi_x \right) \quad (4)$$

将船体表面各点压力沿船体表面积分:

$$\vec{F} = (F_x, F_y, F_z) = -\int_S p \vec{n} ds \quad (5)$$

得到的  $x$  方向上的合力分量, 即船舶的兴波阻力。

### 三、应用实例

现考虑一 wigley 数学船型, 其船型参数  $L$ 、 $B$ 、 $T$  满足表达式:

$$y = \pm \frac{B}{2} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{L} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{z}{T} \right)^2 \right] \quad (6)$$

假定取船长为 10 米, 船宽、吃水均为 5 米, 当以匀速  $U$  航行时, 该船的兴波阻力计算步骤如下:

(1) 对船体表面进行离散, 划分网格。假定在  $x$  方向取网格密度为 100, 在  $z$  方向取网格密度为 50, 沿船长, 吃水方向进行等间距划分, 总共分成  $N=5000$  片网格, 网格交点的半宽由 (4) 式确定。将相邻的四个网格点拟合合成一块小平面, 即所谓的面元。因为网格密度较大, 采用大量的平面面

元代替船体曲面, 不至引起太大的误差。

(2) 采用 Kelvin 源格林函数法求解方程。在离散后船体表面的每一片面元上布置强度为  $\sigma(\vec{q})$  的源, 则流场中任意一点的速度势可由各个点源对该点引起的诱导速度势表达, 对坐标为  $\vec{p} = (x, y, z)$  的点, 扰动速度势写为:

$$\phi(\vec{p}) = \iint_S \sigma(\vec{q}) G(\vec{p}, \vec{q}) dS = \sum_{i=0}^N \iint_{S_i} \sigma(\vec{q}) G(\vec{p}, \vec{q}) dS_i$$

式中  $S$  代表船体表面,  $S_i$  代表第  $i$  片面元,  $\vec{q}$  代表面元上的点。

(3) 将扰动势函数的表达势带入物面边界条件  $\nabla\phi \cdot \vec{n} = \vec{U} \cdot \vec{n}$  中, 通过求解离散的线性代数方程组, 就可确定源强  $\sigma(\vec{q})$ , 得到速度势  $\phi$ 。

(4) 将得到的速度势依次代入方程 (4) 和方程 (5), 便可以解得兴波阻力。

### 四、结束语

本文简述了使用面元法求解船舶兴波阻力的一般做法。计算过程可以总结为: 首先通过格林函数法求解 Laplace 方程, 获得兴波速度势  $\phi$ , 进而求得速度  $v$ , 再根据伯努利方程, 解出船体表面的压力, 最后对压力进行积分, 获得兴波阻力。本文采用数学船型, 在划分网格时可以方便的获取各点的坐标。对实船而言, 船体表面离散可借助三维软件辅助进行。

### 参考文献

- [1] 邵世明等. 船舶阻力. 国防工业出版社, 1992.
- [2] 李世谟. 兴波阻力理论基础. 人民交通出版社, 1986.
- [3] 王献孚, 周树信等. 计算船舶流体力学. 上海交通大学出版社, 1992.
- [4] 王家楣, 张志宏, 马乾初. 流体力学. 大连海事大学出版社, 2002.

(上接 35 页)

### 4. 加强 VTS 服务水平

VTS 人员既是船舶交通的指挥者, 也是交通的协调者, 做好以下五方面才能进一步保障海轮的安全靠泊。

- (1) 熟知辖区 VTS 环境;
- (2) 熟知过境船舶数量、主要船舶种类及基本特性, 掌握不同季节不同流速、潮水情况下, 各种类型船舶操纵性能;
- (3) 熟知日常交通组织要点, 指挥要得当, 应用要自如;
- (4) 熟练掌握 VTS 设备的日常操作和信息收集、评估, 做好全程跟踪, 应船舶请求, 提供水位气象、他船动态、码头泊位以及实施交通组织和助航等服务;
- (5) 熟知辖区水域水上交通安全管理相关法律、法规和规章, 掌握船舶定线制规定和各种预防预控的管理要求。

### 六、结束语

长江镇江段错综复杂的通航环境是影响海轮就近横越安全靠泊的主要风险, 为了规避由此带来的风险, 我们应该牢固树立安全发展理念, 进一步从观念上、制度上和管理上下功夫, 努力提高通航安全保障水平, 才能有效降低长江镇江段海轮横越通航分道就近进行靠泊时所带来的安全风险。

### 参考文献

- [1] 《中华人民共和国内河交通安全管理条例》(2002 年 6 月 19 日国务院第 60 次常务会议通过、2002 年 6 月 28 日国务院令 355 号公布)
- [2] 《中华人民共和国内河避碰规则 (1991)》(1991 年 4 月 28 日交通部令 30 号发布)
- [3] 《长江江苏段船舶定线制规定》(2005)