

冰阻力试验预报方法研究

周秀红¹ 黄宇翔¹

(1. 中国船舶科学研究中心, 无锡 214082)

摘 要

本文提出了一种船模冰阻力的试验预报方法。将复杂的冰阻力分解成三个阻力分量: 破冰阻力、碎冰阻力及水的阻力单独进行预报。详细分析了各阻力分量在预报过程中需满足的相似规律及预报原理。该方法已在某些破冰船及冰区航行船的模型试验中得到验证。

关 键 词: 船模试验; 冰阻力; 预报

中图分类号: U661.43 **文献标识码:** A

0 引言

近年来, 北极地区原油天然气开采活动的增加使破冰船的设计变得十分重要和迫切。世界上很多国家都拥有破冰船, 如俄罗斯不仅有多艘核动力破冰船, 甚至拥有专门的北极破冰船; 美国、北欧、日本等国也都装备了自己的破冰船队。我国目前仅拥有一艘能够承担极地航行任务的破冰船“雪龙号”, 破冰船的研究、设计和建造能力与世界先进国家相比, 还存在相当大的差距, 一些关键问题的研究还处于探索阶段。

破冰船的设计、建造需要综合考虑其冰区航行性能、船体结构强度等诸多因素, 破冰船应具有冰区航行时阻力小、操纵性好等特点。设计者必须在充分认识冰载荷的基础上才能决定破冰船的结构设计原则, 而破冰船冰阻力的估算是破冰船设计的一个重要基础, 也是必须解决的关键问题。本文在对国外一些冰阻力预报方法进行研究的基础上, 提出了一种改进的冰阻力试验预报方法, 分析了冰阻力的组成并对其分量进行分别预报。

1 冰阻力

用物理和数学方法精确描述船舶与冰相互作用的过程, 必须首先已知冰的物理力学特性以及试验船的设计数据, 而获取这些数据本身是相当复杂的。用试验方法来研究船舶与冰的相互作用过程简单且数据可靠, 因此备受青睐。除一些特殊情况(如模拟碎冰试验)外, 模型冰阻力预报试验应在专门的冰水池中进行。

船舶在冰区航行的总阻力通常可表示为:

$$R = R_p + R_{\text{碎冰}} + R_{\text{水}}, \quad (1)$$

式中, R - 船舶在冰区航行的总阻力, kN;

R_p - 破冰阻力及船体与未被破坏的冰层表面之间的摩擦力, kN;

$R_{\text{碎冰}}$ - 碎冰阻力, kN;

$R_{\text{水}}$ - 水的阻力, kN;

冰区航行船舶的典型阻力曲线如图 1 所示。

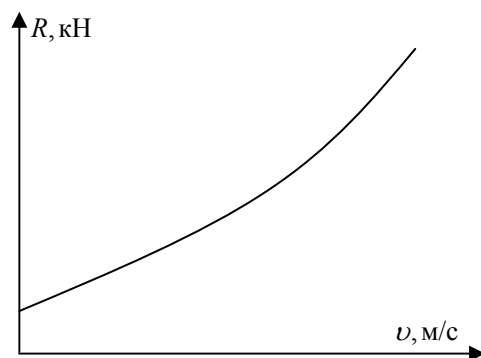


图 1 冰区航行船舶的阻力曲线

2 俄罗斯南北极设计院冰阻力试验预报方法

1955 年，俄罗斯南北极设计院建成了世界上第一个冰水池并在其他单位冰水池建成之前取得了大量破冰船和各种冰区航行船舶的模型及实船试验数据，这些数据对其研究船舶与冰相互作用的意义是不可估量的。经过大量理论研究和试验积累，南北极设计院 Л.М. Ногидом, Ю.А. Шиманским, В.И. Каштеляном 建立了一套冰水池船模试验的基础理论，该理论采用如下相似规律：

$$\left\{ \begin{array}{l} Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} = idem \\ Re = \frac{vL}{\nu} = idem \\ \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{в}}} = idem \\ Ch = \frac{1}{E} = idem \\ f_H = f_M = idem \\ \frac{\sigma}{E} = idem \\ \frac{\sigma_H}{\sigma_M} = \frac{h_H}{h_M} = \frac{L_H}{L_M} = \lambda \\ \mu_H = \mu_M \end{array} \right. \quad (2)$$

式中： Fr - 傅汝德相似准则；

Re - 雷诺数相似准则；

Ch - 柯西数；

v - 航行速度， m/s；

g - 重力加速度， m/s^2 ；

L - 特征长度， m；

ν - 运动粘度系数， m^2/s ；

$\rho_{\text{л}}$ ， $\rho_{\text{в}}$ - 冰和水的密度， t/m^3 ；

E ， μ - 冰的杨氏模量和泊松比 (kPa, -)；

f - 船体与冰之间的摩擦系数；

h - 冰的厚度， m；

σ - 冰的弯曲强度极限， kPa；

λ - 缩尺比。

当进行船舶在碎冰中航行的模型试验时，对冰的强度和弹性不作要求，但需附加另外一个条件： $s = idem$ ，这里， s 是指碎冰密集度（碎冰密集度 s 由密集度函数 $\bar{s}$ 确定，它等于碎冰所占面积和航道面积的比值。密集度函数的变化范围为 1（碎冰覆盖整个水面）到 0（没有碎冰）。密集度函数的 1、0.9、0.8、... 0 与密集度等级 10、9、8 ... 0 相对应。）。

当实冰与模型冰均为弹性体时，它们的厚度、强度极限以及弹性模量满足以下关系：

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_m} = \frac{h_n}{h_m} = \frac{E_n}{E_m} = \lambda, \quad (3)$$

这里，下标 «H» 和 «M» 分别对应实冰和模型冰的相应参数。对于具有相同量纲的参数(如 E 和 σ)，应满足条件： $E/\sigma = idem$ 。

上述所列表式均是在一定假设的基础上得到的，即假设破冰船所经区域密实冰盖的破坏主要是由弯曲变形引起的。但实际上，在很多情况下,尤其是当缩尺比 λ 很大时，上述条件 (2) 和条件 (3) 是不成立的。

特别需要指出的是，对于实冰 $E_n/\sigma_n = 3000 \sim 5000$ 的情况，按以上相似准则得到的模型冰的 $E/\sigma_n = 300 \sim 500$ ，在这样的模型冰下进行试验时，冰层在很大程度上表现为塑性，但众所周知，破冰船实际破冰航行过程中，冰层在与船体发生相互作用时表现为弹性。实冰与模型冰弹性模量不满足上述比例关系使得几何相似得不到满足，从而动力相似也被破坏。例如，Vance G.P 曾通过试验发现, 由实冰与模型冰弹性模量不满足几何相似关系所引起的冰阻力的试验值约超过实际冰阻力的 35%^[1,2]。

3 改进的冰阻力试验预报方法

俄罗斯南北极研究院建立的上述方法被广泛应用于前苏联破冰船和破冰舰队的设计建造过程，虽然该方法在当时得到了全面验证，但在之后的研究应用过程中证明，由于该方法得到的试验冰具有很高的塑性，使得破冰阻力无法模拟（实际破冰过程中，冰层为弹性破坏），因此它仅能解决非常有限的一些问题（如冲击破冰模式无法模拟）。为了建立更加合理且通用的冰水池试验方法，全世界针对此问题进行了广泛研究，在改进试验方法和试验工艺的基础上，也在不断探索新的制冰技术（在水中添加不同成分和比例的物质），意图寻找物理力学特性更接近实冰试验模拟冰。

用自然冰作为试验冰是研究者们最初的设想，然而经过大量尝试及试验发现，当试验冰与实冰满足几何相似($h_n = h_m/\lambda$)时，由于试验冰的强度太高，无法满足 $\sigma_m = \sigma_n/\lambda$ 的要求。但由于这种制冰技术简单易操作，尽管其存在以上弊端，仍吸引着学者们对其继续研究，尝试用其他办法来弥补试验冰的强度太高带来的弊端。如著名的德国汉堡水池早前就采用该方法制冰^[1]，他们按 $\lambda^{3/2}$ 选用多种冰厚作为试验冰强度的补偿，而实冰阻力由试验冰阻力乘以缩尺比的三次方得到。

3.1 破冰阻力的试验预报方法

遵循以上思路，本文也采用该方法进行试验冰的模拟，选取自然冰作为试验冰进行破冰阻力试验。当气温低于零度时，在专门的露天冰水池中，水自然冻结成冰。通过分析破冰船低速航行时冰层的应力-应变状态得到几何相似关系，而试验冰与实冰厚度及破冰阻力的转换符合该相似关系。

冰层在力的作用下发生弯曲变形时，有如下弯曲方程：

$$D\nabla^4 w + \rho g w + \rho_a h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

式中， $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ - 冰层的柱面刚度。

w - 冰层变形的挠度；

t —时间。

不考虑低速航行时的惯性分量，将弯曲方程（4）进行无量纲转换，我们得到薄板弯曲的无量纲方程，对于试验冰和实冰，该方程是相同的：

$$\frac{D}{\rho_B g L^4} = idem, \frac{E}{\sigma} = idem, \frac{\rho_s}{\rho_s} = idem, f = idem, \mu = idem$$

这样，试验冰的冰厚可按式由实冰冰厚转换而得：

$$\frac{h_M}{h_n} = \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3} \quad (5)$$

这里， $\lambda_E = \frac{E_n}{E_M}$ - 冰的弹性相似比（实冰与试验冰弹性模量之比），其值可在试验过程中测量也可

取经验值。

破冰阻力和航速按下式进行换算：

$$\frac{R_n^p}{R_M^p} = \lambda^3; \frac{V_n}{V_M} = \sqrt{\lambda}$$

由文献[3]可知，冰层所受应力达到极限值时，冰层中将出现裂纹，当冰层被交错的裂纹覆盖后，相邻裂纹边缘间的相互作用仍可承受很大的外部载荷，因此，裂纹的产生并不意味着冰层失去了承载能力。实际上，冰层失去承载能力与冰层的完全断裂是等效的。因此，在估算破冰阻力时，不应仅考虑载荷的相互作用，还需要考虑破冰所做的功。图 2 为典型的冰层在外部载荷作用下发生弯曲破坏的载荷与挠度关系曲线。

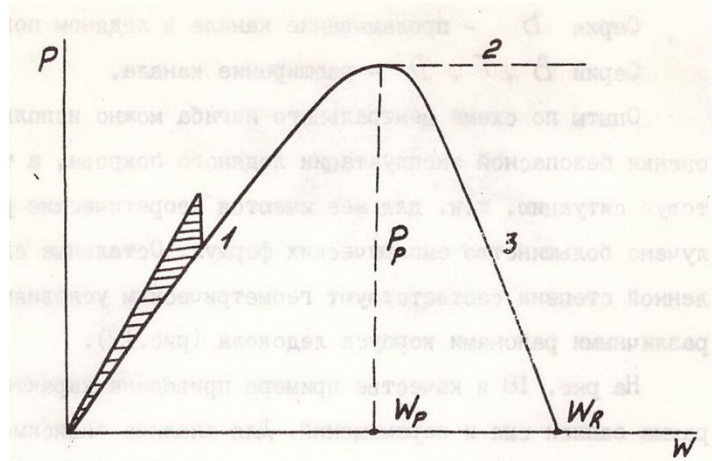


图 2 冰层加载过程曲线

1-2 – 力的加载过程；1-3 – 冰层变形过程

由图 2 可知，破冰所做的功可用曲线与坐标轴所围成的图形面积来计算：

$$A_p = \int_0^{W_p} P(w) dw$$

在模拟破冰过程时，必须保证实际冰层破坏曲线与试验冰层破坏曲线与坐标轴所围成的面积（即破冰所做的功）满足以下相似关系：

$$\frac{A_{pH}}{A_{pM}} = \frac{P_{pH} W_{RH}}{P_{pM} W_{RM}} = \lambda^4$$

3.2 碎冰阻力的试验预报方法

以上通过冰层破坏曲线所得到的阻力仅为模型航行过程中的破冰阻力。由式（1）可知，破冰船冰区航行所受的冰阻力除破冰阻力外，还包括碎冰阻力以及水的阻力。由于碎冰阻力试验与破冰阻力试验过程中需满足不同的相似规律，因此，碎冰阻力试验需单独进行。碎冰阻力试验需满足以下条件：

$$Fr = idem, \rho_a / \rho_s = idem, f = idem, s = idem \quad (6)$$

同破冰阻力一样，碎冰阻力试验面临的最大问题亦是试验冰材料的选择问题，选取的试验冰必须满足式（6）的全部要求。对于自然冰，因其摩擦系数较小，仅为 0.03~0.05，而实际要求的摩擦系数在 0.15~0.18^[3]之间，因此，碎冰阻力试验中，自然冰很少被采用。

本文研究的冰阻力试验预报方法采用高强度聚乙烯作为试验碎冰材料，其密度为 0.92t/m³、与带涂层木质船模表面间的摩擦系数为 0.15。聚乙烯具有的这些物理力学特性比其他材料（如石蜡，纯蜡等）更接近于实冰。

试验准备阶段，将高强度聚乙烯板切割成三角形和四边形的试验碎冰，选取与实际冰层遭到弯曲破坏后产生的碎冰块相对应的 5 到 7 个冰厚。对大量试验数据的统计分析表明，个别冰块形状并不影响碎冰阻力。碎冰密集度按试验要求选取，将切割好的试验碎冰按密集度要求均匀放置在试验水池或航道中。

碎冰试验中的得到的物理量按以下方法向实船转换：

$$\begin{aligned} h_H &= \lambda h_M \\ R_{HH}^{обл} &= \lambda^3 R_M^{обл} \\ h_H &= h_M \sqrt{\lambda} \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 冰域中水阻力的试验预报方法

严格来讲，冰域中水的阻力和纯水中水的阻力是不同的。但当船舶以很低速度航行时（破冰船在破冰航行时，航速通常不超过 5kn），两者的差别并不大，因此可以用纯水中水阻力的计算方法来确定冰域中水的阻力。

4 结语

- 1、船模冰阻力试验中，模型受到的冰阻力可分解成破冰阻力、碎冰阻力和水的阻力，而各阻力分量由于满足的相似规律不同，因此，在试验过程中它们是被单独预报的。
- 2、这种船模冰阻力的预报方法是在一定假设的基础上进行的，即假设船体与冰在相互作用的过程中，各阻力分量都是独立的、相互之间不存在耦合。
- 3、该方法已在某些破冰船及冰区航行船的模型试验中得到验证，但其准确度和适用范围需要在更多的试验中进行继续探索。

参 考 文 献

- [1] Edwards R.Y. Modelling the interaction between ice and ship. Physics and mechanics of ice. Symposium, Copenhagen, august 6-10,1979.
- [2] Vance G.P. Modelling testing in ice – Naval Engineering Journal, 1968, IV, vol.80.
- [3] Вяхирев Р.М., Никитин Б.А., Мирзоев Д.А. Обустройство и освоение морских нефтегазовых месторождений. - М.: Издательство академии горных наук, 1999. — 373 с.Chan
- [4] Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем. - СПб.: МОРИНТЕХ, 2001. - 432 с.
- [5] Гусейнов Т.И., Алекперов Р.Э. Охрана природы при освоении морских нефтегазодобывающих месторождений. - М.: Недра, 1989. - 230 с.
- [6] Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. Л.: Судостроение, 1986, 288 с.
- [7] Ибрагимов А.М. Нефтегазопромысловые гидротехнические сооружения для освоения шельфа.- М.: Недра, 1992. - 263 с..
- [8] Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов. – СПб.: Судостроение, 2013. - 512 с.

作 者 简 介

周秀红 女，1984 年生，高级工程师。主要从事高性能船舶设计工作。

黄宇翔 男，1989 年生，助理工程师。主要从事高性能船舶设计工作。