第47卷第6期 大连理工大学学报 Vol. 47, No. 6
2007年11月 Journal of Dalian University of Technology Nov. 2007

文章编号：1000-8608(2007)06-0885-05

基于试验数据优化辨识孤立冰块的流拖曳系数

白乙拉*[1]， 李志军[2]， 卢 鹏[2]， 张丽敏[2]， 冯恩民[1]

（1. 大连理工大学 应用数学系，辽宁 大连 116024；
2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘要：流拖曳系数是海冰动力学模型中的重要参数，实际海冰运动时受到水流的底面剪切作用和侧面正压力作用，对应的拖曳系数分别为摩拖曳系数和形拖曳系数. 利用实验室波流水槽设备，对长方体平底、长方体粗糙底和圆饼形淡水冰试样进行拖曳运动试验，获得26组冰样运动数据. 根据这些试验数据，利用动量法原理和优化方法构造了识别摩拖曳系数和形拖曳系数的参数辨识模型，并计算出相应的拖曳系数. 在此基础上，引入描述表面粗糙度的两个指标——轮廓支承长度率和轮廓均方根偏差，统计分析了粗糙度指标对拖曳系数的影响. 此外还得到摩拖曳系数同冰样长度和吃水深度之比的关系，该关系可用于计算冰山和浮冰的摩拖曳系数.

关键词：海冰；拖曳；粗糙度测量；参数辨识
中图分类号：P731.15 **文献标识码**：A

0 引 言

极地海冰是全球最重要的冷源，它的分布变化与全球大气环流、大洋环流和气候变异都有密切关系，因而它成为全球气候系统的重要组成部分之一. 近年来全球气候变化的加剧推动了人们对极地海冰问题的研究. 极地海冰数值模拟的研究主要包括：海冰动力学和热力学过程及其与大气、海洋相互作用. 其中海冰的动力学模式主要描述的是海冰与大气、海洋间的动力相互作用，模式中涉及到众多的海冰形态参数，而这些参数的准确性直接影响到动力学模式的精度. 拖曳系数是动力学模式中的重要参数，包括风拖曳系数和流拖曳系数，它们直接影响风、流对冰的拖曳力. 前人已经在这方面进行了大量研究，目前常用的拖曳系数确定方法可分为3类：涡动法、廓线法和动量法. 涡动法是综合考虑大气、海水和海冰的温度、速度等物理要素来计算风和流的拖曳系数[1]；廓线法是通过冰上风速和冰下流速廓线来计算冰面粗糙长度，进而得到拖曳系数[2]；动量法则是根据海冰漂移的动力学方程来确定拖曳系数[3]. 利用上述方法，已经获得一些海域海冰拖曳系数的经验值，并应用到了动力学模拟[4~8]. 这些经验值同冰粗糙度的关系不是很明确，所以目前仍然有学者致力于寻求气-冰和流-冰界面粗糙度同拖曳系数的关系[9,10].

另外，冰山作为海冰的特殊形态，其拖曳系数差异很大，主要是由于水平和垂直尺度的比值范围较大而引起的. 如果冰山的拖曳系数也像大面积浮冰那样，用一个综合考虑了摩阻力和形阻力影响的拖曳系数来表达就有缺陷. 本文就是以实验室流对冰的拖曳试验数据为基础，再利用数学中的参数辨识方法，从中分离出摩拖曳系数和形拖曳系数，从而探讨尺寸效应和冰层底面粗糙度效应. 文中重点介绍试验和辨识方法，简单讨论所得拖曳系数同尺寸和粗糙度之间的关系.

1 水槽试验

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的波流水槽中进行，水槽长22 m、宽0.45 m、深0.6 m，通过造流系统可以得到沿深度

收稿日期：2005-12-12； 修回日期：2006-06-16.
基金项目：国家自然科学基金资助项目（重点项目40233032；40376006）；科技部科技基础性工作和社会公益研究专项资助项目（2003DEB5J057）.
作者简介：白乙拉*（1961-），男，博士，副教授.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

流速基本均匀的流场. 试验之前对造流系统进行标定,在 40 cm 水深条件下,水面以下 5 cm 和 15 cm 处的流速基本相同,本试验在水面以下 15 cm 之内的流速为 6.75 cm/s.

试验选用不同厚度和形状的淡水冰块,用 CCD 采集它们在波流水槽中被水流拖曳运动过程,以此计算其速度和加速度,试验装置如图 1 所示.

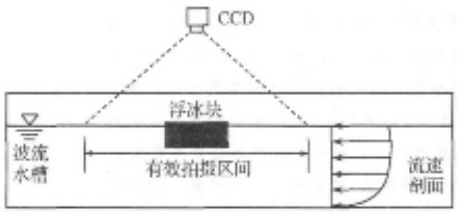


图 1 试验装置

Fig. 1 Test's equipment

试验时 CCD 距离水面 70 cm,有效拍摄宽度范围大约 25 cm,冰块最大入水深度 13 cm;CCD 采集频率 25 Hz,帧间隔 0.04 s;每次可采集 219 帧,持续大约 8.8 s. 每个冰块试验 3 次,均在有效拍摄区间内从静止开始采集图像. 分析时为了凸现每帧之间的差距,每隔 4 帧取一次图像,即分析用的时间间隔为 0.2 s. 为了标定和图像处理方便,在冰块上表面都贴有边长已知的正三角形标志物,有 2、5、8 和 10 cm 四种. 图像中每个像素代表0.685 87 mm × 0.685 87 mm. 图 2 是CCD 采集的某一时刻的冰块图像.

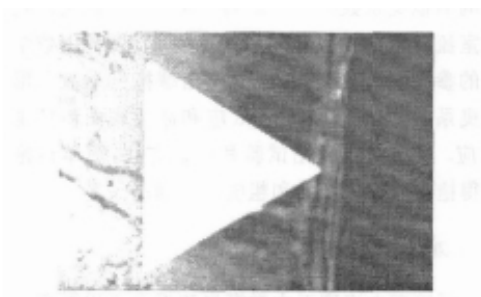


图 2 CCD 采集冰在水槽中某一时刻状态

Fig. 2 The state at a certain moment of ice by CCD

试验中冰块在水槽内不发生旋转,从图像中直接获取冰块上标志三角形最前面顶点的像素坐标位置,用来代表该时刻冰块的位置,所以在计算位移时仅考虑沿水流方向的位移. 由冰块标志点的位移除以时间间隔即得冰块在该加速时段的平均速度 v_i.

由于冰块基本作匀加速直线运动,其位移随时间的变化关系为

$$s = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t \tag{1}$$

根据冰块的位移 - 时间关系拟合出一个二次曲线,其二次项系数就是加速度的一半,这样求出的加速度能较好地代表整个加速时段的加速度平均值,如图 3 所示. 拟合得到的二次曲线的一次项系数是初速度,这表现了在释放冰块时其他因素的干扰,并不能使冰块达到理想的"静止"状态,但它对于提取加速度不会造成影响.

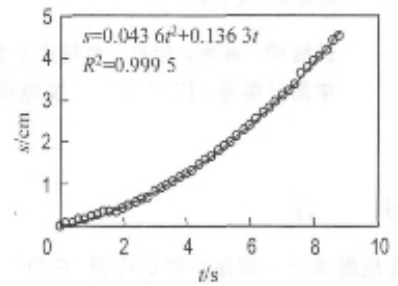


图 3 某次试验加速阶段位移 - 时间拟合曲线

Fig. 3 Acceleration fitting curve based on displacement-time

2 摩拖曳系数和形拖曳系数的优化辨识方法

水流对冰块的拖曳力分为摩阻力和形阻力两项,可表示为

$$F = F_1 + F_2 = Ma = \rho_w C_1 S_1 (v_w - v_i)^2 + \frac{1}{2}\rho_w C_2 S_2 (v_w - v_i)^2 \tag{2}$$

式中:F 为水流拖曳力;M 为冰块质量;a 为冰块运动加速度;F_1、F_2 为拖曳力中的摩阻力项和形阻力项;ρ_w 为水的密度;S_1 为冰块下底面面积;S_2 为冰块水下部分在垂直水流方向上的投影面积(侧向面积);v_w 为水流速度;v_i 为冰块运动速度. 式(2)中的 M、v_w、ρ_w、S_1、S_2 是在试验中已知的测试数据,a 及 v_i 由试验数据提取,C_1 与 C_2 是待辨识的摩拖曳系数和形拖曳系数.

设每个冰块重复试验 N 次,根据每次试验采

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

集的数据，利用前述方法计算出本次试验中冰块运动的平均速度 v_i 和加速度 a_i，$i \in I := \{1,2,\cdots,N\}$. 对于每个试验组次的 N 个样本，理论上每个样本中的摩拖曳系数 C_1 和形拖曳系数 C_2 是不变的，目的是要确定这两个参数. 为此，对每个试验组次的 N 个样本，要在 C_1 及 C_2 的允许范围内，使式(2)左端项和右端项之差的平方和达到最小，这是一个带约束条件的非线性函数求极值问题. 将上述思想用数学语言描述如下：

考虑摩拖曳系数 C_1 和形拖曳系数 C_2 的实际物理意义，参数 C_1 和 C_2 必有上下界，令 $W := \{(C_1, C_2) \mid C_{1l} \leqslant C_1 \leqslant C_{1u},\ C_{2l} \leqslant C_2 \leqslant C_{2u},$ 其中 C_{1l}、C_{1u}、C_{2l}、C_{2u} 为确定的实数$\} \subset \mathbf{R}^2$ 为有界闭集，定义 $U_{ad} := \{(C_1, C_2) \mid (C_1, C_2) \in W \subset \mathbf{R}^2\}$ 为辨识参数 (C_1, C_2) 的允许集. 对任意 $(C_1, C_2) \in U_{ad}$，定义目标函数为

$$J(C_1,C_2) = \sum_{i=1}^{N}\left[Ma_i - \left(C_1S_1 + \frac{1}{2}C_2S_2\right) \times (v_w - v_i)^2\rho_w\right]^2 \tag{3}$$

这样以 $J(C_1, C_2)$ 为性能指标，辨识参数 $(C_1, C_2) \in U_{ad}$ 的优化辨识模型记为

$$\text{OPT}: \min J(C_1, C_2)$$
$$\text{s.t. } (C_1, C_2) \in U_{ad}$$

由于对任意 $(C_1, C_2) \in U_{ad}$，$J(C_1, C_2)$ 是 U_{ad} 上的连续可微函数，而且 U_{ad} 是 $\mathbf{R}^2$ 中的有界闭集，因此优化辨识模型 OPT 的最优解 $(C_1^*, C_2^*) \in U_{ad}$ 存在且惟一. 对此辨识参数 (C_1, C_2) 的非线性优化问题，本文采用了遗传算法进行求解.

每个冰块做 3 次试验，可以得到 3 组加速度 a_i 和速度 v_i 值，也就是每个冰块有 3 个样本(即 $N = 3$). 对于每个冰块的 3 个样本，为使式(2)左右两端项之差的平方和最小，在允许集 U_{ad} 内，按遗传算法的规则依次调整 C_1 和 C_2，能使式(3)达到最小值的 C_1、C_2 即为所求. 实际计算时，根据前人的结果[5~8]，可以给出参数 C_1 和 C_2 的大致取值范围为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 99.0 \times 10^{-3}$.

本试验累积 30 组次，通过质量控制得到 26 组有效数据，其中平底长方体冰块 13 个、带底纹长方体冰块 9 个、平底圆饼形冰块 4 个. 经过参数辨识计算，得到上述 26 组有效数据所对应的摩拖曳系数和形拖曳系数值.

3　结果初步分析

为了寻求拖曳系数同冰样尺寸和粗糙度的关系，试验使用不同形状、不同厚度和不同底纹的冰样进行. 为此，选择了能够描述表面形态，又能方便地从现场观测中得到，并同拖曳力有直接关系的 2 个粗糙度指标. 第一个指标为冰样底面轮廓支承长度率 (t_p)，其物理意义是在给定轮廓最大高度的条件下轮廓的实际长度与取样长度之比. 该指标用于评定冰层底面的摩阻力. 平底冰试样的 t_p 为 1，粗糙底面冰试样的 t_p 均大于 1；第二个指标为冰样粗糙底面轮廓均方根偏差 R_q，该指标用于评定冰层侧面的形阻力.

3.1　冰样底面轮廓支承长度率的效应

轮廓支承长度率越大，表面起伏越大，其相应的摩拖曳系数越大. 将辨识的摩拖曳系数 (C_1) 和冰样底面轮廓支承长度率 (t_p) 联系起来，得到图 4. 从图 4 可以发现摩拖曳系数随冰样底面轮廓支承长度率的增加而增加. 但由于冰样长度和吃水深度比值的效应，数据存在一定的分散性.

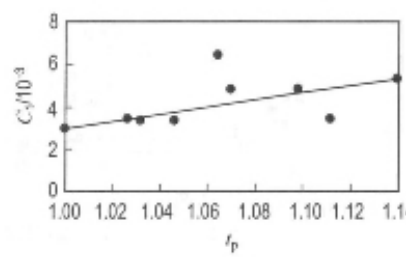


图 4　摩拖曳系数与评价指标 t_p 的关系

Fig. 4　Skin drag coefficient vs. index t_p

3.2　冰样吃水深度效应

形拖曳系数体现冰侧面受水流的作用力，所以形拖曳力直接与冰样吃水深度有关，冰底面起伏在其侧面上的投影也引起水下厚度的变化，所以为了评价形拖曳系数，选择冰样平均吃水深度和底面轮廓均方根偏差之和 (R_h) 作为评价指标. 该指标也容易从现场实测冰厚剖面资料中获得. 对于实验室试验，$R_h = 0.917H + R_q$，H 为平均冰厚，R_q 为冰样底面轮廓均方根偏差，属于粗糙度指标之一. 形拖曳系数同该指标的试验关系见图 5，它反映形拖曳系数同 R_h 之间存在非线性关系. 由于 R_h 属于有量纲参数，特别提醒在应用到原型冰条件时注意实验室物理模拟的比尺关系.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

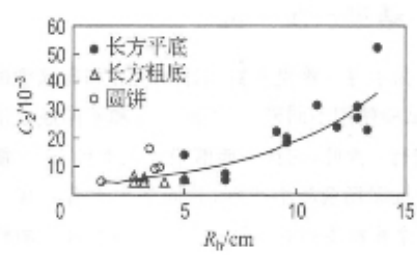


图5 形拖曳系数与评价指标 R_h 的关系

Fig. 5 Form drag coefficient vs. index R_h

3.3 冰样长度和总吃水深度之比的效应

对于海上存在的大面积浮冰，由于其长度远远大于厚度，即使其形拖曳系数很大，但形拖曳力相对摩拖曳力也会小许多个量级. 对于冰山，情况就不完全相同，其长度同总吃水深度的比值比浮冰小得多. 为此，本文定义一个新指标，即冰样长度与总吃水深度的比值(L/R_h)，用它来寻求平滑底面条件下摩拖曳系数的分布规律，所得结果见图6.

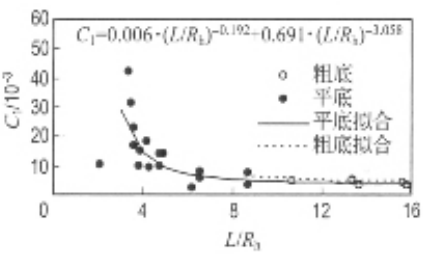


图6 摩拖曳系数与评价指标 L/R_h 的关系

Fig. 6 Skin drag coefficient vs. index L/R_h

由图可见，摩拖曳系数随着冰样长度与总吃水深度比值的增大而减小，这条曲线能够统一冰山和浮冰摩拖曳系数的取值问题. 对于海冰，从浮冰块到冰原对应的 L/R_h 可以在 $3 \sim 10\,000$ 变化，根据图6曲线的拟合函数 $C_1 = 0.006 \cdot (L/R_h)^{-0.192} + 0.691 \cdot (L/R_h)^{-3.058}$ 关系，对应海上浮冰的摩拖曳系数处于 $28.87 \times 10^{-3} \sim 1.02 \times 10^{-3}$. 目前在国内外海冰动力漂移和堆积模拟中，流拖曳系数的取值有 20×10^{-3}、5.8×10^{-3}、5.5×10^{-3}、4.5×10^{-3}、3.2×10^{-3}、2.6×10^{-3}、2.5×10^{-3}、1.02×10^{-3} [5~8,11~13]，它们均在上述范围之内. 从图中还可看出，粗糙底面冰样的摩拖曳系数比平底面略高一些，具体可以通过图6解决. 对冰山而言，其长度同总吃水深度的比值可以在 $1.5 \sim 100$ 范围变化，对应的摩拖曳系数在 $2.06 \times 10^{-1} \sim 2.48 \times 10^{-3}$ 范围变化. 根据文献[14]，20世纪80年代的冰山动力学模拟将冰山的摩拖曳系数设为 2.0×10^{-3}，然后根据实测资料拟合形拖曳系数. 实践发现冰山的摩阻力相对形阻力较小，所以在20世纪90年代的工作中将摩阻力项忽略[15]. 这对较大的冰山是可行的，但对南极60°S附近观测到的较小冰山[16]会产生错误.

4 结 论

(1) 利用动量法原理和优化方法构造了识别摩拖曳系数和形拖曳系数的参数辨识模型，并对实验室不同尺寸、形状的淡水冰拖曳试验结果进行优化辨识，获得了冰样的摩拖曳系数和形拖曳系数.

(2) 根据材料表面粗糙度的概念，引入描述表面粗糙度的两个指标 —— 轮廓支承长度率和轮廓均方根偏差，实现对流拖曳系数同冰底面粗糙度指标关系的定量分析. 得到摩拖曳系数同冰样底面轮廓支承长度率成线性正比的关系；形拖曳系数同平均吃水深度与底面轮廓均方根偏差之和成非线性递增关系.

(3) 利用新的评价指标 —— 冰样长度和总吃水深度之比，能应用于从冰山尺度到小浮冰块、大浮冰原尺度的摩拖曳系数的计算问题.

参考文献：

[1] GUEST P S, DAVIDSON K L. The aerodynamic roughness of different types of sea ice[J]. **J Geophys Res**, 1991, **96**(C3): 4709-4721

[2] ANDREAS E L. Roughness of Weddle sea ice and estimate of air-ice drag coefficient [J]. **J Geophys Res**, 1993, **98**(C7): 12439-12452

[3] MARTINSON D G. Ice drift and momentum exchange in winter Antarctic pack ice [J]. **J Geophys Res**, 1990, **95**(C5): 1741-1755

[4] WU Hui-ding, BAI Shan, ZHANG Zhan-hai, *et al*. Numerical simulation for dynamical process of sea ice [J]. **Acta Oceanologica Sinica**, 1997, **16**(2): 303-325

[5] HIBLER W D. Ice dynamics [M] // **The Geophysics of Sea Ice**. New York: Plenum Press, 1986:577-640

[6] 岳前进，张 希，季顺迎. 辽东湾海冰漂移的动力要素分析[J]. 海洋环境科学，2001，**20**(4)：34-39

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[7] 苏　洁，吴辉碇，MARGARET A K，等. 渤海海冰和海洋的动力相互作用模拟试验[J]. 冰川冻土，2003，25(增刊 2)：292-298

[8] 季顺迎，王瑞学，毕祥军，等. 海冰拖曳系数的确定方法研究[J]. 冰川冻土，2003，25(增刊 2)：299-303

[9] PRINSENBERG S，PETERSON I K. Variations in air-ice drag coefficient due to ice surface roughness [J]. **Int J Offshore and Polar Eng**，2002，**12**(2)：1-5

[10] STEINER N，HARDER M，LEMKE P. Sea-ice roughness and drag coefficients in a dynamic-thermodynamic sea-ice model for the Arctic [J]. **Tellus**，1999，**51A**：964-978

[11] 季顺迎，沈洪道，王志联，等. 基于 Mohr-Coulomb 准则的黏弹-塑性海冰动力学本构模型[J]. 海洋学报，2005，**27**(4)：19-30

[12] 刘钦政，黄嘉佑，白　珊，等. 全球冰-海洋耦合模式的海冰模拟[J]. 地学前缘，2000，**7**(增刊)：219-230

[13] RHEEM C K，YAMAGUCHI H，MATSUZAWA T. Application of a new sea ice dynamic model，DMDF model，for the prediction of pack ice motion in the whole Okhotsk sea [C] // **The 16th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice**. Hokkaido：Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association，2001：293-300

[14] SMITH S D，BANKE E G. The influence of winds，currents and towing forces on the drift of icebergs [J]. **Cold Regions Sci and Technol**，1983，**6**：241-255

[15] SMITH S D. Hindcasting iceberg drift using current profiles and winds[J]. **Cold Regions Sci and Technol**，1993，**22**：33-45

[16] LI Zhi-jun，LU Peng. Measurement of iceberg draft with marine radar[C] // **6th International Symposium on Test and Measurement**. Dalian：Dalian University of Technology，2005：2972-2975

Optimization and identification on current drag coefficients of isolated ice floe based on experimental data

BAI Yi-la*[1]，LI Zhi-jun[2]，LU Peng[2]，ZHANG Li-min[2]，FENG En-min[1]

(1. Dept. of Appl. Math.，Dalian Univ. of Technol.，Dalian 116024，China；
2. State Key Lab. of Coastal and Offshore Eng.，Dalian Univ. of Technol.，Dalian 116024，China)

Abstract：Current drag coefficients are most important parameters in sea ice dynamics model. Both shear stress on ice bottom and pressure on ice draft section contributed to ice floe movement，and in the numerical simulations ice corresponding coefficients for their contributions are skin drag coefficient and form drag coefficient respectively. By using a wave-current flume，current-ice drag experiments were performed by freshwater ice blocks with different shapes，including cuboids with smooth bottom surface and rough surface and disk with smooth bottom surface，and 26 data sets were obtained. Using these data，the parameter identification model is established to distinguish skin drag coefficient from form drag coefficient by applying momentum method theory and optimization method，and the corresponding drag coefficients are obained. Based on the two roughness index—profile bearing length rate and root-mean-square deviation of the profile，relationships of the coefficients and the index are analyzed. In addition，the relationship between skin drag coefficient and the ratio of ice block length to draft is obtained，which can be used to compute the skin drag coefficients of the iceberg and ice floe.

Key words：sea ice；drag；roughness measurement；parameter estimation

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net