

船舶流体力学中若干逆问题的研究*

缪国平 刘应中 刘滋源

上海交通大学船舶流体力学研究室, 上海 200030

摘要 在船舶流体力学中, 给定物体(船、桨、附体或其组合体), 要求确定其在不同的运行状态和环境条件下的某种性能(如阻力、运动等等)或周围的流场, 这种问题称为正问题。与此相反, 若给定物体的性能要求或场的信息, 寻求满足要求的物体, 就是逆问题。

本文通过船舶流体力学中若干逆问题(如给定表面速度分布时螺旋桨桨叶剖面设计、轴对称物体设计等等)的介绍和讨论, 对逆问题研究的特殊性、实用性及可能的发展方向作简要的评述。

关键词 逆问题; 船舶流体力学; 物形探测

1 前言

佛经云:“因则能生, 果则所生, 缘则助生。”由因生果, 是正问题。知果探因, 是逆问题。缘就是条件, 果赖以生。在船舶流体力学中, 给定物体(船、桨、附体或其组合体), 要求确定其在不同的运行状态和环境条件下的某种性能, 如压力分布、前进阻力、一定主机功率时的航速、某种海况下的运动性能、周围流场的性态等等, 是正问题。与此相反, 若给定物体的性能要求, 在若干限制条件下寻求满足要求的物体, 就是逆问题。更工程化一些, 也称为设计问题。在有些情况下, 我们要从已知的或测得的流场的信息来确定物体形状或介质特征, 这也是一种逆问题, 或称为探测问题。

对于设计人员或工程师来说, 逆问题也许是更为直接和更令人感兴趣的。因为当他们接手某项设计任务时, 面对的往往是这类逆问题。遗憾的是, 与正问题相比, 逆问题的研究不够透彻和系统。其困难不仅在于逆问题研究对象的多样性, 还在于对逆问题的适定性(可解性、唯一性、稳定性等等)缺乏系统和一般的提法。

本文将通过船舶流体力学中若干典型的逆问题(如给定表面速度分布时螺旋桨桨叶剖面设计、轴对称物体设计等等)的介绍和讨论, 对逆问题研究的特殊性、实用性及可能的发展方向作简要的评述。

* 国家自然科学基金资助项目。

2 螺旋桨桨叶剖面的设计问题

设计理想的螺旋桨桨叶剖面,使桨叶表面上的速度分布满足设计者的意图,是个古典的流体力学问题。给定桨叶表面速度分布与给定压力分布是等价的。合适的速度分布除了可提高桨叶的升阻比外,还可以避免螺旋桨桨叶上空泡的产生。在常规船舶螺旋桨设计中,空泡性能是个重要的性能指标。现代高速水翼艇的设计也极大地依赖于高性能水翼的开发。螺旋桨桨叶剖面和水翼的设计与空气动力学中的机翼设计有很多共通之处。

在翼型的正问题(即给定翼型,确定性能)的研究中,保角变换法有其独特的优点。引进合适的保角变换关系,可以把物理平面上给定的翼型变换成辅助平面上的单位圆,在该平面上,有环量圆柱绕流的复势是已经求得的,从而确定翼面上的速度分布及有关性能^[1]。

逆问题的做法则是从辅助平面上有环量圆柱绕流的复势出发,寻求合适的保角变换关系,使得变换得到的翼表面上有预定的速度分布。在辅助平面 ζ 上,有环量圆柱绕流的复势 $F(\zeta)$ 可表达为

$$F(\zeta) = e^{-i\alpha\zeta} + e^{i\alpha\zeta^{-1}} - \frac{\Gamma}{2\pi i} \ln \zeta \quad (1)$$

其中, α 为均流的攻角, $\Gamma = 4\pi \sin\alpha$ 为环量。物理平面(平面 z)上复速度为

$$\bar{w} = ve^{-i\theta} = \frac{dF}{dz} = \frac{dF/d\zeta}{dz/d\zeta} \quad (2)$$

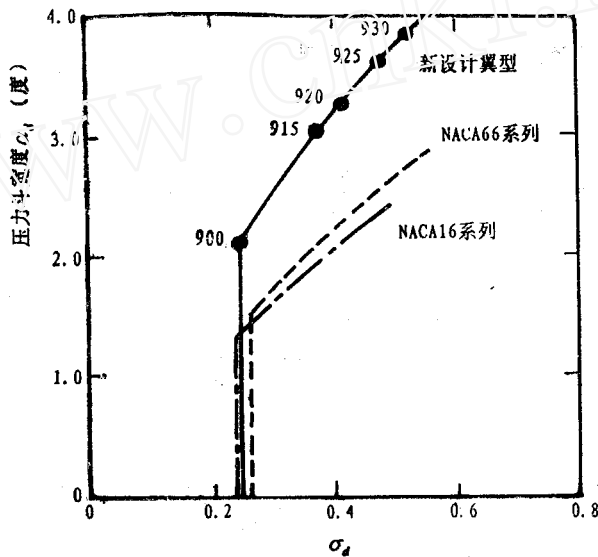


图1 不同翼型压力斗宽度与压力参数 σ_a' 的关系(翼厚比 $t/c=0.09$)

式中 v 和 θ 分别为复速度的模和幅角。在辅助平面的单位半径圆柱表面 $\zeta = e^{i\phi}$ (ϕ 为幅角)上, $dF/d\zeta$ 已知, $v(\phi)$ 给定,理论上可通过积分上式中 $dz/d\zeta$ 求得圆柱与翼型的变换关系 $z(\zeta)$ 以确定翼型。Eppler等人^[2,3]按上述思路发展了一套计算程序。该方法中速度分布函数的选择有一定的自由度(尽管不是完全任意的),有助于新翼型的开发。计算中还可用边界层理论把粘性影响考虑进去。图1中显示了按上述方法设计的新翼型与NACA系列关于空泡

压力斗宽度的比较,可见方法的实际意义.源汇分布法也可用于机翼的设计,这在空气动力学中已经得到了充分的发展^[4].

3 低阻轴对称物体

低阻轴对称物体的研究对潜艇和鱼雷等物形的设计和发展有着十分重要的指导意义. Bristow 应用 Douglas 表面源汇分布法程序,辅以迭代过程,每步迭代产生一个修正了的物形,直至计算速度分布与预定速度分布的均方差最小^[5],从而得到符合要求的物形.这是一种直接法,可以相当精确,适用范围也比较广,但计算费时,不利于众多方案的比较. Zedan 和 Dalton 利用物体轴对称的特点提出了对称轴上分布源汇的方法^[6].设对称轴上源汇分布的强度为 σ_ξ ,那么,在均流 U_∞ 中,流场中任意一点 (x, r) 处的流函数可表示为

$$\phi(x, r) = -\frac{1}{4\pi} \int_{x_n}^{x_i} \frac{\sigma_\xi (x - \xi) d\xi}{\sqrt{(x - \xi)^2 + r^2}} + \frac{U_\infty r^2}{2} \quad (3)$$

其中 x_n, x_i 分别为物体对称轴上源汇分布的起迄位置.点 (x, r) 上轴向和径向扰动速度分别可由流函数的坐标偏导得到.将这些关于源强的积分方程离散化.容易得到矩阵方程

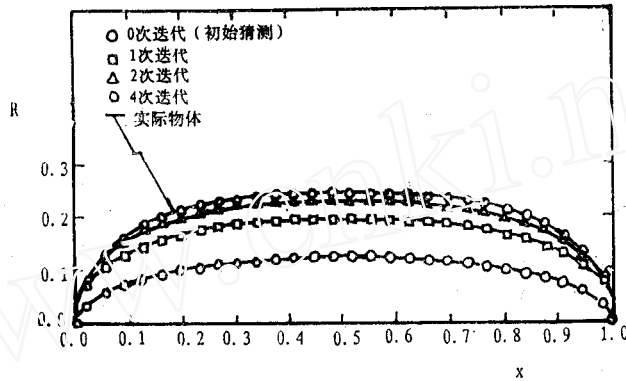


图2 Rankine 物形 (细长度 $FR=2$) 迭代结果

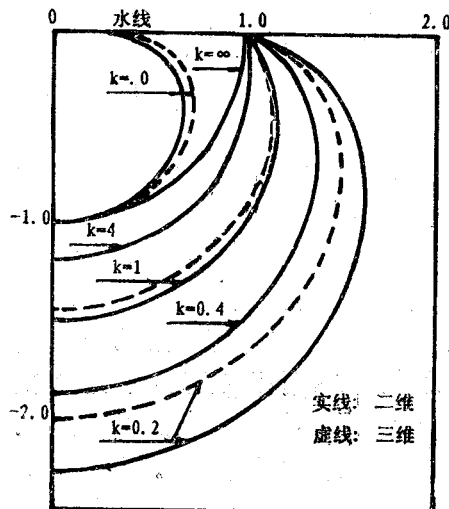


图3 $m = \frac{i}{x + iz}$ 时的物形

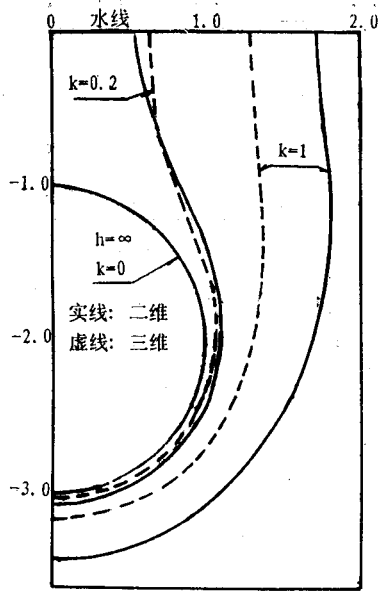


图4 $m = \log\left(\frac{t+ih}{t-ih}\right)$
 $t = x+iz$, h 为奇点位置时的物形

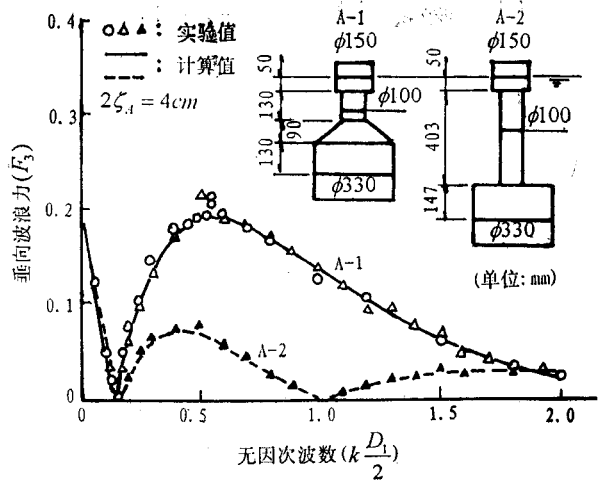


图5 双频无波物形上的垂向波浪力

$$\phi_i = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^M \bar{\phi}_{ij} C_j + \frac{U_\infty r_i^2}{2} \quad \text{和} \quad u_i = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^M \bar{U}_{ij} C_j + U_\infty \quad (4)$$

由初始估计物形及给定的表面速度分布，可确定表面各控制点 i 上的轴向速度 u_i ，从而由上式后一个方程确定系数 C_j ，复由前一方程取 $\phi_i = 0$ 得到新的物体半径分布。依次迭代，直至得到有给定表面速度分布的物形。图 2 为 Rankine 物形迭代计算之一例。辅以边界层理论，可依此方法设计出满足使用要求的低阻轴对称物体。

4 不受波浪力的浮体形状确定

在浮式海洋工程结构物的设计环境载荷中，论重要性或首推波浪载荷。能否设计一种物形，使其在某一频率的波浪中的受力为零（至少是某一方向上的波浪力分量），无论在理论上和实践中都是令人感兴趣的。别所正利^[7]通过引进无波势，用流线追踪法以求出某一方向上的波浪力分量为零的物形。

对二维问题，取一个关于静水面 $z=0$ 反对称、且在无限远方正则调和的辅助函数 $m(x, z)$ ，使得速度势 $\phi(x, z) = (k + \partial/\partial z)m(x, z)$ ，这样， $\phi(x, z)$ 的自由面条件 $(k - \partial/\partial z) \cdot \phi(x, z) = 0$ ($z=0$ 上) 自动得以满足，即在自由面 $z=0$ 上 $m(x, z)$ 满足 $(k^2 - \partial^2/\partial z^2)m(x, z) = 0$ ， $m(x, z)$ 即可称为无波势。选用不同的无波势和不同的波数 k 可以得到不同的物体形状。图 3 和图 4 分别为两种无波势用流线追踪法求出的垂向波浪力为零的物形。可以证明，对某一波浪频率，当一个浮体不受波浪力时，其辐射阻尼也为零。这意味着该浮体一旦产生振荡运动，该运动将维持下去。这时，运动的粘性阻尼将起主要的作用。

设计在多个频率上波浪力为零的物体也是可能的。图 5 所示物形即是一例。其意义在于可压低一段频带上的波浪力，如果该频带恰好落在不规则海浪能量集中分布的频带之中，那么该结构物的运动性能可以有一定程度的改善。原则上，我们可引进无波势 $m(x, z)$ ，使

$$\phi(x, z) = (k_1 + \partial/\partial z)(k_2 + \partial/\partial z)m(x, z) \quad (5)$$

得到的浮体在波数 k_1 和 k_2 上垂向波浪力均为零。其中的困难在于如何得到有实用价值的物体形状。

从图 3 和图 4 还可发现, 选取不同的无波势可求出不同的物形, 即这时的解不是唯一的。事实上, 目前的问题提法与给定物面上压力或速度分布的情况不一样, 它强调的是总体效果, 或者说是整体的积分效果。这样的提法显然在解的求取上提供了过多的自由度。要得到唯一的解, 或许还需要对物形给出几何上的限制和实用要求上的限制。在船舶工程中, 这类问题相当多, 例如无波船型的研究^[10,11]、船舶阻力性能优化^[12,13]等等。

5 物形探测

战争中, 敌暗我明乃兵家之大忌。如何有效地发现敌方目标和隐蔽自己是克敌致胜的先决条件之一。粗糙地说, 隐形技术无非是尽量降低己方目标的“能见度”(电磁的或水声的, 舰艇或飞行器的尾迹等等), 减少敌方从发现目标到作出反应的时间, 增加己方对敌方攻击的成功率。反过来, 我们也必须有有效的手段及时发现敌方来袭物体, 并准确地判定敌方目标的类型及战术能力, 增加己方的防御或反击的有效性。这一反隐形技术或可称为显形技术。

事实上, 隐形和显形是一件事物的两个方面。从理论角度而言, 前者注重的是从给定物体(即边界扰动)确定场的信息, 包括场的分布形态和强度。通常我们把这类问题称为正问题。若从辐射场的强度或分布形态要求出发来确定或优化物体形状(或表面阻抗), 则属于一种逆问题^[9]。显形也是逆问题之一; 在一定意义上说, 它远较隐形技术中优化物形的逆问题复杂和困难。显形要求从测得的场信息(包括水声辐射或舰艇航行中在自由面上生成的尾迹)反过来再现物体的形状。

河边宽等人提出了从远场散射的水声信息确定二维刚性物体形状的一种方法^[9]。其基本做法是, 如果实际物形为 c' , 预估物形为 c , c 与 c' 相去不远, 按 Green 公式, 我们可以建立下面的矩阵方程:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\phi_d \\ \delta n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \delta F \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{式中} \quad A = \int_c \frac{\partial S(P, Q)}{\partial n_p} dS_p, \quad B = \int_c \frac{\partial^2 \phi_0(P)}{\partial n_p^2} S(P, Q) dS_p + \frac{\partial \phi_0(Q)}{\partial n_Q}$$

$$C = \int_c \frac{\partial}{\partial n_p} \exp(\tilde{\theta}) dS_p, \quad D = \int_c \frac{\partial \phi_0(P)}{\partial n_p} \frac{\partial}{\partial n_p} \exp(\tilde{\theta}) dS_p$$

其中 ϕ_0 是波数为 k 的平面入射声波速度势; $S(P, Q)$ 为满足 Helmholtz 方程的点源 Green 函数, 其中 $Q(x_Q, y_Q)$ 为场点, $P(x_P, y_P)$ 为源点; $\tilde{\theta} = i_k(x_p \cos \theta_Q + y_p \sin \theta_Q)$; $\Delta\phi_d = \phi'(P) - \phi_d(P)$ 为实际物形与预估物形绕射势在 c 上点 P 处的差值; $\delta F = F'(k, \theta_Q) - F(k, \theta_Q)$, F' 与 F 分别为远场某点 $Q(r_Q, \theta_Q)$ 上实际物形与预估物形产生的绕射势(Kochin 函数), F' 可由测量得到, F 则可由预估物形计算得到; δn 为物面上某点沿法线的变形量。

给定初始估计的物形, 按求得的 δn 修正物形, 再重复上述计算, 经过迭代, 逐步逼近于真实的物形。从方程组成来讲, 一个入射波即可。文[9]在实际计算中, 用了两个入射

波，以最小二乘法求解矩阵方程（6）。图6为其计算结果的一个例子。这一方法原则上可用来探测一般形状的三维物体，当然，处理上将更加繁复。

另外，上述方法是建筑在整个场的信息均可测得的基础上的。当我们在实践中不可能得到整个场的信息，可能测得的仅是场中某一点（充其量是若干离散点）上的信息时，如何从有限的信息中重建物形就有相当的难度。诸如能否从探测到的若干场点上的信息反演出物体形状，对信息有何要求，物形是否是唯一的等等一系列的问题，都需要进一步的探讨。

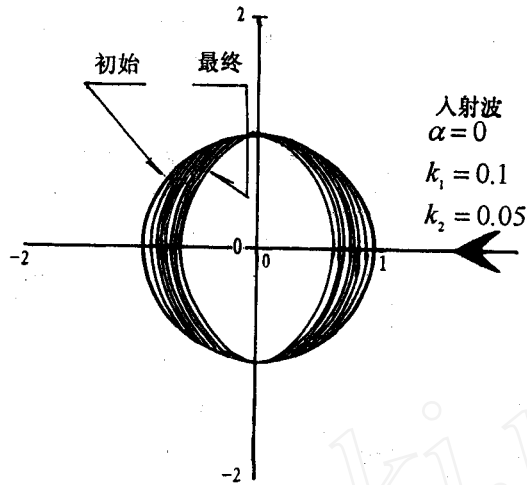


图6 由流场信息探测物形的迭代结果

6 结束语

事实上，除船舶流体力学外，其他许多自然科学领域和工程领域中同样有各种各样的逆问题，如卫星遥感和遥测，医学上的核磁共振等等。有些成果已经在实践中得到有效的应用。概括起来，逆问题的做法大致有三种，一是立足于正问题，以优化方法搜索得到；另一种是建立逆问题的变分原理；三是对特殊问题建立直接解法。这些方法各有其优点和适用范围。近年来，关于逆问题的研究已经引起学术界和工程界的极大的重视。本文中介绍和讨论的一些逆问题仅是船舶流体力学中较为典型的和有代表性的例子，我们希望通过这些例子能使读者对逆问题研究的特殊性、实用性及可能的发展方向有一概要的了解。

参 考 文 献

- 1 刘应中，缪国平. 海洋工程水动力学基础. 海洋出版社，北京（1991）
- 2 Eppler R, Somers D M. A computer program for the design and analysis of low-speed airfoils. NASA Technical Memorandum 80210 (1980)
- 3 Shen Y, Eppler R. Wing sections for Hydrofoils—Part 2: Nonsymmetrical profiles. *J. of Ship Res.*, 25, 3 (1981): 191—200
- 4 Labrujere Th E, Sloff J W. Computational methods for the aerodynamic design of aircraft components. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 25 (1993): 183—214
- 5 Bristow D R. A solution to the inverse problem for incompressible axisymmetric potential flow. AIAA Fluid Dynamics Conf., Calif. (1974)
- 6 Dalton C, Zedan M F. Design of low-drag axisymmetric shapes by the inverse method. *J. Hydrodynamics*, 15, 1 (1981): 48—54

- 7 别所正利, 动摇问题における波なし分布について. 日本造船协会论文集, No. 117 (1965): 127—138
- 8 Chen G, et al. Minimizing the reflection of waves by surface impedance using boundary elements and global optimization. *Wave Motion*, **10** (1988): 239—255
- 9 河边宽, 森口悦次. 水中物体の形状推定の基础研究(续). 日本造船协会论文集, No. 175 (1994): 193—204
- 10 Tuck E O. A submerged body with zero wave resistance. *J. of Ship Res.*, **33**, 2 (1989): 81—83
- 11 谷川和男, 姬野洋司. ナビエ・ストークス方程式の数値解を用いた非線形計画法による物体形状の最適化(第3報)——抵抗に対する感度系数の直接解法. 关西造船协会志, No. 218 (1992): 15—24
- 12 铃木和夫. 低速近似微小造波抵抗船型の研究. 关西造船协会志, No. 211 (1989): 19—24
- 13 别所正利. 船舶流体力学における最適化问题(数学物理学のすすめ). 关西造船协会志, No. 219 (1993): 185—211

SOME INVERSE PROBLEMS IN SHIP HYDRODYNAMICS

Miao Guoping Liu Yingzhong Liu Ziyuan

Ship Hydrodynamics Laboratory, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030

Abstract In ship hydrodynamics, the determination of performances (such as resistance, motion characteristics etc.) of a given object or the flow field around the object under various running conditions and environmental conditions is known as the direct problem. On the contrary, in some case, we will have to find a suitable object having given performances or given flow field characteristics, which is the so called the inverse problem.

The aim of the present paper is to make some comments on the special features and the practical use of the inverse problems as well as the possible development through the discussion on some typical inverse problem in ship hydrodynamics, such as the design of 2-D wing sections and axisymmetrical bodies under the given surface velocity or pressure distribution etc.

Keywords *Inverse problem; ship hydrodynamics; shape identification*