

## 船舶螺旋桨叶片环量的数值优化

苏玉民, 黄 胜

(哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:**螺旋桨叶片环量分布的优化问题是船舶螺旋桨理论设计中的重要课题, 以往的求螺旋桨叶片最佳环量分布的方法多基于 Betz 条件, 因而只对均匀来流的情况是正确的。利用螺旋的升力线模型和变分法原理对螺旋桨叶片环量分布进行了数值优化。优化可分别在给定推力负荷系数和给定功率负荷系数的情况下进行。数值优化计算中计入了粘性影响和来流的径向非均匀性, 并以采用镜像涡的方式考虑了桨毂的影响。在文中计算的各种情况下都得到了合理的优化结果。

**关 键 词:**螺旋桨; 数值计算; 优化方法; 叶片环量

**中图分类号:**U661.313 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7043(2002)01-0001-04

# Numerical Optimization of Circulation Distribution on Marine Propellers

SU Yu-min, HUANG Sheng

(1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Different methods were developed to determine the optimum distribution of circulation on marine propeller blades. Most of these methods are based on the Betz condition which is true for uniform flow only. The optimum distribution of circulation on a marine propeller blade is numerically determined by using the lift-line vortex model and variational calculus. The circumferentially averaged axial wake, viscous effect, and the effect of hub can be included and in the case that the load factor or power factor of a propeller is prescribed, the optimum distribution of circulation calculated keeps the efficiency of a propeller the highest. The results obtained under different conditions prove the effectiveness of method proposed.

**Key words:** propeller; optimization method; numerical calculation; circulation distribution

船舶螺旋桨的效率直接取决于其叶片的环量分布, 因此, 螺旋桨叶片环量分布的优化问题是船舶螺旋桨理论设计中的重要课题。Betz<sup>[1]</sup>早在 1919 年就以升力线理论为基础导出了均匀流中螺旋桨最佳环量分布的条件。Goldstein<sup>[1]</sup>提出了一种势流场中计算最佳环量分布的方法。Lerbs<sup>[2]</sup>也提出了一种计算最佳环量分布的方法, 并将其应用于非均匀流中的螺旋桨。他们都用了 Betz 条件, 应该说其方法只对于均匀流的情况是完全正确的。

本文应用螺旋桨的升力线涡模型, 先将涡系离散化, 再应用变分法原理建立满足所给定的推力负荷系数或功率负荷系数的确定螺旋桨最佳环量分布的基本方程, 并用数值计算的方法解该方程, 求得螺旋桨的最佳环量分布。方程中考虑了流动的径向非均匀性、粘性影响和桨毂的影响<sup>[3,4]</sup>。

## 1 优化方程

对于在均匀来流  $V_a$  中以角速度  $\omega$  转动的螺旋桨, 考虑其升力线涡模型并取如图 1 所示固定于桨上的坐标系。假设螺旋桨的尾涡片是螺旋面, 其螺距由附着涡线上流动的方向决定。根据中载荷螺旋桨升力线理论, 附着涡线上的流速和力可表示为如图 2 所示的速度多角形, 局部进流速度  $V_1^*(r_1)$  和水动力螺距角  $\beta_1(r_1)$  为

$$V_1^*(r_1) = \sqrt{[V_a + u_{a1}^*(r_1)]^2 + [\omega r_1 - u_{t1}^*(r_1)]^2}, \quad (1)$$

$$\beta_1(r_1) = \tan^{-1} \frac{V_a + u_{a1}^*(r_1)}{\omega r_1 - u_{t1}^*(r_1)}, \quad (2)$$

而螺旋桨的推力  $T$  和转矩  $Q$  可以写为

收稿日期: 2001-04-05; 修订日期: 2001-11-16

作者简介: 苏玉民 (1960-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为船舶流体力学

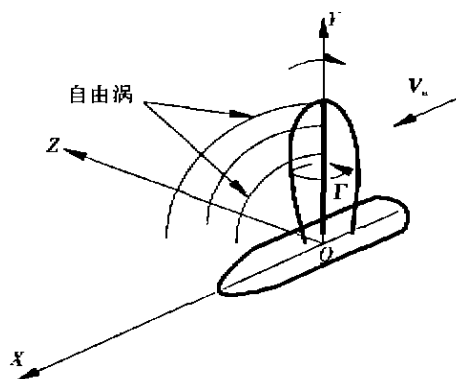


图1 螺旋桨的坐标系和涡模型

Fig.1 Coordinate system and vortex model of propeller

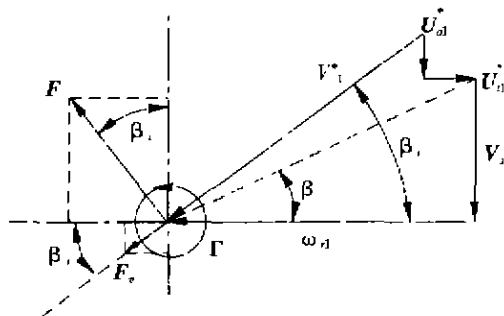


图2 附着涡的速度三角形和水动力

Fig.2 Inflow velocity and forces on bound vortex

$$\begin{aligned} T &= \rho Z \int_{R_h}^R \Gamma(r_1) [\omega r_1 - u_{a1}^*(r_1)] dr_1, \\ Q &= \rho Z \int_{R_h}^R \Gamma(r_1) [V_u + u_{a1}^*(r_1)] r_1 dr_1. \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $r_1$  为径向位置,  $u_{a1}^*$ ,  $u_{r1}^*$  为诱导速度的分量,  $R$  为螺旋桨半径,  $R_h$  为毂径,  $\Gamma(r_1)$  为桨叶环量,  $\rho$  为水密度,  $Z$  为桨叶数. 考虑到粘性影响及伴流, 并按下列参数定义做无因次化处理:

$$r = \frac{r_1}{R}, V^*(r) = \frac{V_{u1}^*(r)}{V_a}, \lambda_s = \frac{V_u}{\pi n D},$$

$$u_{a1}^*(r) = \frac{u_{a1}^*(r)}{V_a}, u_{r1}^*(r) = \frac{u_{r1}^*(r)}{V_a},$$

$$G(r) = \frac{\Gamma(r)}{\pi D V_u},$$

$$C_T = \frac{T}{0.5 \rho V_a^2 A_0}, C_P = \frac{Q \omega}{0.5 \rho V_a^3 A_0}.$$

则式(1)~(3)可被改写为

$$V^*(r) = \sqrt{[1 - w(r) + u_a^*(r)]^2 + \left[\frac{r}{\lambda_s} - u_r^*(r)\right]^2}, \quad (4)$$

$$\beta_i(r) = \tan^{-1} \left[ \frac{1 - w(r) + u_a^*(r)}{\frac{r}{\lambda_s} - u_r^*(r)} \right], \quad (5)$$

$$\begin{cases} C_T = 4Z \int_{R_h}^R G(r) \left[ \frac{r}{\lambda_s} - u_r^*(r) \right] [1 - \epsilon \tan \beta_i(r)] dr, \\ C_P = \frac{4Z}{\lambda_s} \int_{R_h}^R G(r) [1 - w(r) + u_a^*(r)] \left[ 1 + \frac{\epsilon}{\tan \beta_i(r)} \right] r dr. \end{cases} \quad (6)$$

螺旋桨的效率是

$$\eta = \frac{C_T}{C_P}. \quad (7)$$

式中:  $\lambda_s$  为速度比,  $A_0$  为螺旋桨盘面积,  $w$  为伴流分数,  $\epsilon$  为叶剖面阻升比,  $C_T$ ,  $C_P$  分别为推力负荷系数和功率负荷系数.

将连续的附着涡线离散化, 即将其分成  $M$  段等强度的涡元, 取其中点为控制点并以控制点的涡强为涡元的强度, 这样自由涡面被离散化成一系列螺旋涡线, 由涡元和从它两端泄出的自由涡组成一个马蹄涡系, 根据 Lerbs 和 Wrench<sup>[1]</sup> 发展的诱导因子法, 控制点的诱导速度可由下式计算:

$$\begin{cases} u_a^*(r(i)) = \sum_{j=1}^M G(j) u_a(i, j), \\ u_r^*(r(i)) = \sum_{j=1}^M G(j) u_r(i, j). \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $u_a$ ,  $u_r$  是一个马蹄涡的诱导速度. 离散化后, 推力负荷系数和功率负荷系数为

$$\begin{cases} C_T = 4Z \sum_{j=1}^M G(j) \left[ \frac{r(j)}{\lambda_s} - u_r^*(j) \right] [1 - \epsilon \tan \beta_i(j)] \Delta r(j), \\ C_P = \frac{4Z}{\lambda_s} \sum_{j=1}^M G(j) [1 - w(j) + u_a^*(j)] \left[ 1 + \frac{\epsilon}{\tan \beta_i(j)} \right] r(j) \Delta r(j). \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\Delta r(j)$  表示附着涡元的长度.

在船舶螺旋桨的设计问题中, 一般是指定推力负荷系数  $C_T$  或功率负荷系数  $C_P$ , 这样环量分布的优化问题是寻求使推力负荷系数  $C_T$  等于指定值  $C_{T0}$  而功率负荷系数  $C_P$  达到最小的环量分布, 或使功率负荷系数  $C_P$  等于指定值  $C_{P0}$  而推力负荷系数  $C_T$  达到最大的环量分布. 对前一种情况, 利用变分法原理, 构筑辅助函数:

$$H = C_P + \lambda [C_T(1 - t) - C_{T0}], \quad (10)$$

则满足如下方程的环量分布  $G(i)$  将使  $C_T(1-t) = C_{T0}$  而  $C_P$  最小:

$$\frac{\partial H}{\partial G(i)} = 0, i = 1, \dots, M; \quad (11)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda} = 0. \quad (12)$$

这里考虑了推力减额的影响,  $t$  表示推力减额分数,  $\lambda$  为 Lagrange 乘数. 将式(8)、(9)代入式(10)并求导, 以上两式可展成:

$$\begin{aligned} & \frac{r(i)}{\lambda_i} \Delta r(i) [1 - \epsilon \tan \beta_i(i)] \left[ 1 + \frac{\epsilon}{\tan \beta_i(i)} \right] + \\ & \frac{1}{\lambda_r} \sum_{j=1}^M G(j) \{ u_a(i, j) r(i) \Delta r(i) \left[ 1 + \frac{\epsilon}{\tan \beta_i(i)} \right] + \\ & u_a(i, j) r(j) \Delta r(j) \left[ 1 + \frac{\epsilon}{\tan \beta_j(j)} \right] + \\ & \lambda(1-t) \frac{r(i)}{\lambda_i} \Delta r(i) [1 - \epsilon \tan \beta_i(i)] - \\ & \lambda(1-t) \sum_{j=1}^M G(j) \{ u_t(i, j) \Delta r(i) \cdot \\ & [1 - \epsilon \tan \beta_i(i)] + u_t(j, i) \Delta r(j) [1 - \epsilon \tan \beta_j(j)] \} \\ & = 0; \quad i = 1, \dots, M, \quad (13) \end{aligned}$$

$$4Z(1-t) \sum_{j=1}^M G(j) \left[ \frac{r(j)}{\lambda_j} - u_t^+(j) \right] \cdot$$

$$[1 - \epsilon \tan \beta_j(j)] \Delta r(j) = C_{T0}. \quad (14)$$

求导时水动力螺距角  $\beta_i$  被处理为相对于量  $G(j)$  的常量. 上两式是包含  $M$  个未知的  $G(j)$  和未知的  $\lambda$  的非线性方程组. 其中诱导速度依赖于环量, 而  $\beta_i(j)$  又由诱导速度确定. 假设式(13)左边最后一项中的  $\lambda$  及诱导速度  $u_t^+(j)$ ,  $u_t^-(j)$  是已知的, 为  $\lambda_0$  和  $u_{a0}^+(j)$ ,  $u_{a0}^-(j)$ . 那么该方程组可转化为如下线性方程组:

$$\begin{aligned} & \frac{r(i)}{\lambda_i} \Delta r(i) [1 - \epsilon \tan \beta_i(i)] \left[ 1 + \frac{\epsilon}{\tan \beta_i(i)} \right] + \\ & \frac{1}{\lambda_r} \sum_{j=1}^M G(j) \{ u_a(i, j) r(i) \Delta r(i) \left[ 1 + \frac{\epsilon}{\tan \beta_i(i)} \right] + \\ & u_a(i, j) r(j) \Delta r(j) \left[ 1 + \frac{\epsilon}{\tan \beta_j(j)} \right] + \\ & \lambda(1-t) \frac{r(i)}{\lambda_i} \Delta r(i) [1 - \epsilon \tan \beta_i(i)] - \\ & \lambda_0(1-t) \sum_{j=1}^M G(j) \{ u_t(i, j) r(i) \Delta r(i) \cdot \\ & [1 - \epsilon \tan \beta_i(i)] + u_t(j, i) \Delta r(j) [1 - \epsilon \tan \beta_j(j)] \} \\ & = 0 \quad i = 1, \dots, M, \quad (15) \end{aligned}$$

$$4Z(1-t) \sum_{j=1}^M G(j) \left[ \frac{r(j)}{\lambda_j} - u_{a0}^+(j) \right] \cdot$$

$$[1 - \epsilon \tan \beta_j(j)] \Delta r(j) = C_{T0}, \quad (16)$$

其中

$$\beta_i(j) = \tan^{-1} \frac{1 - \omega(i) + u_{a0}^+(j)}{\frac{r(j)}{\lambda_j} - u_{a0}^+(j)}. \quad (17)$$

这样就可以用数值迭代法求得方程的数值解.

对于指定功率负荷系数  $C_P$  的情况, 由同样的过程可得到相似的方程.

计算中采用加入如图3所示的镜像涡系的方式计入桨毂的影响, 此时, 应由下式代替式(8)计算诱导速度:

$$\begin{cases} u_a^+(r(j)) = \sum_{j=1}^M G(j) [u_a(i, j) + u_{avn}(i, j)], \\ u_t^-(r(j)) = \sum_{j=1}^M G(j) [u_t(i, j) + u_{tvm}(i, j)]. \end{cases} \quad (18)$$

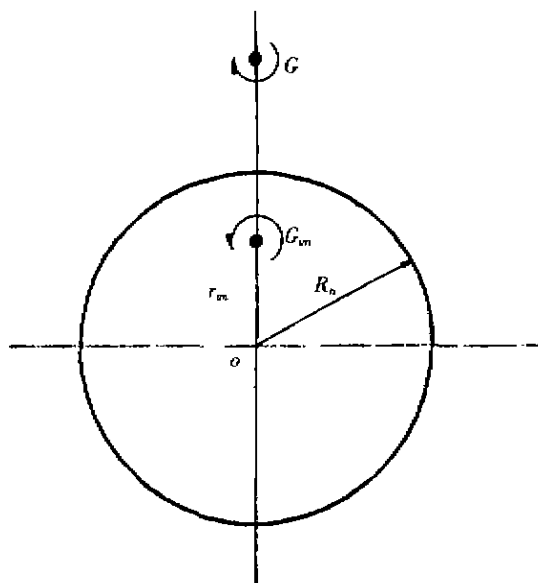


图3 关于桨毂的镜像涡

Fig. 3 Image vortex with respect to hub

## 2 数值结果及分析

图4是数值计算结果与 Coney<sup>[5]</sup> 的计算结果的比较. 计算桨是在均匀流中的五叶桨, 其给定的推力负荷系数  $C_{T0} = 0.512$ . 由图可见两计算结果吻合良好. 随着进速系数的降低, 环量分布趋于平均分布, 更接近动量定理的结果.

图5所示的是同一螺旋桨的最佳效率随进速系数的变化. 未计入粘性影响时, 最佳效率随进速系数的减少而递增, 最终趋近于理想推进器理论的理想效率值. 计入粘性影响后, 最佳效率相应某一进速系数有最大值.

桨毂对最佳环量分布的影响是使靠近桨毂处的环量增大,如图6所示,而远离桨毂处的环量有所降低.在图7中可以看到,均匀流中螺旋桨的最佳环量有所熟悉分布形式,最大环量偏向叶根部.

部.但在周向均匀的伴流中,最佳环量分布发生了很大的变化,其分布形式取决于伴流分布,该算例的最大环量偏向叶根部.

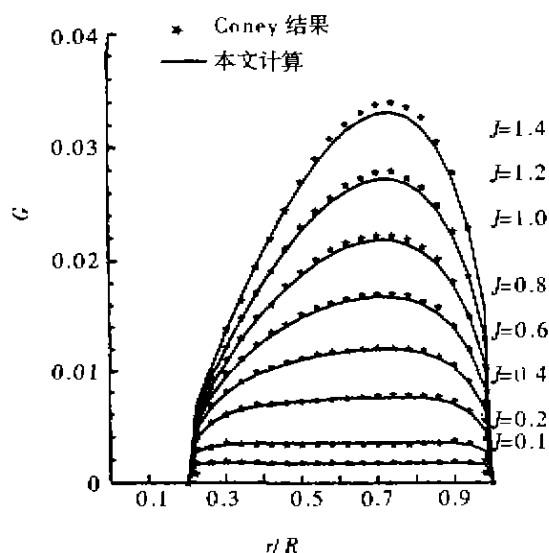


图4 均匀流中优化环量分布

Fig. 4 Optimum circulation distribution in uniform flow

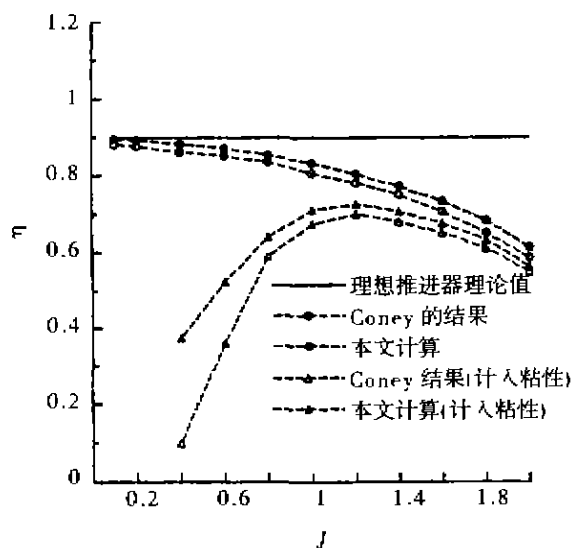


图5 均匀流中的最佳效率

Fig. 5 Optimum efficiency in uniform flow

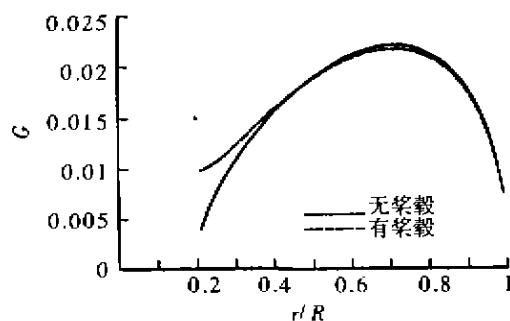


图6 桨毂对最佳环量的影响

Fig. 6 Effect of hub on optimum circulation

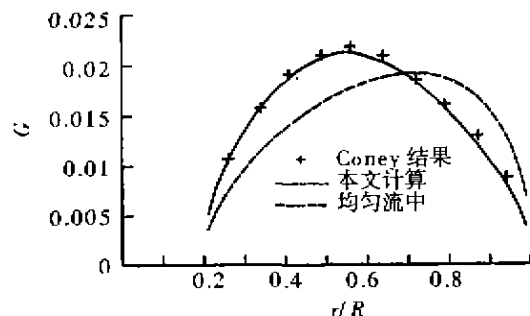


图7 伴流对最佳环量的影响

Fig. 7 Effect of wake on optimum circulation

### 3 结束语

文中利用螺旋桨的升力线涡模型和变分法原理对船舶螺旋桨叶片环量进行优化.算例结果表明无论对均匀流中的桨还是对周向均匀的伴流中的桨,及计入粘性影响和桨毂的影响的情况,该方法都得到了合理的优化计算结果.

### 参考文献:

- [1]董世汤.船舶螺旋桨理论[M].上海:上海交通大学出版社,1985.

- [2] LERBS H. Moderately loaded propellers with finite number of blades and an arbitrary distribution of circulation[J]. Trans of SNAME, 1952.
- [3] SU Y. A study on design of marine propellers by lifting-body theory[D]. Yokohama: Yokohama National University, 1999.
- [4] 苏玉民,黄胜.用面元法预报船舶螺旋桨的水动力性能[J].哈尔滨工程大学学报,2001,22(2):1~5.
- [5] CONEY W. A method for the design of a class of marine propulsors[D]. Boston: MIT, 1989.

[责任编辑:刘玉明]