

# 参数化定义螺旋桨侧斜及其优化设计研究

周斌<sup>1</sup>, 李亮<sup>1</sup>, 薛强<sup>2</sup>

1. 中国船舶科学研究中心船舶振动噪声重点实验室, 无锡, 214082, Email:htrmax@163.com

2. 渤海船舶重工有限责任公司, 葫芦岛市, 125004

**摘要:** 螺旋桨工作于船后非均匀伴流场中会引起螺旋桨桨叶载荷非定常变化, 进而引发螺旋桨、轴系及船体的震动和噪声问题。螺旋桨设计时引入侧斜可以使桨叶不同半径的剖面在不同时刻进入流场的峰值, 有助于减小桨叶的非定常力。本研究在分析螺旋桨侧斜分布特征的基础上, 采用最大侧斜角、侧斜分配形式等 5 个参数对螺旋桨侧斜进行了参数化定义, 结合 CSSRC 非定常升力面涡格法和粒子群优化算法, 以最小轴向非定常力为优化目标, 开展了螺旋桨侧斜优化设计研究。研究表明采用目前的侧斜参数化定义方法可以很好的反映螺旋桨侧斜分布特征, 非定常升力面涡格法和粒子群优化算法的结合也有助于较快速和便捷的找到非定常力大幅减小的侧斜分布形式, 可以为螺旋桨的侧斜优化提供参考和借鉴。

**关键词:** 侧斜参数优化; 非定常力; 升力面;

## 1 引言

螺旋桨工作于船后非均匀伴流场中, 在螺旋桨旋转一周内, 桨叶各半径剖面的来流攻角随着当地伴流的不同而时刻变化, 导致桨叶上承受周期性变化的力, 这种螺旋桨叶上的非定常载荷会使螺旋桨产生激振力会引起螺旋桨桨叶载荷非定常变化, 进而引发螺旋桨、轴系及船体的震动和噪声问题。螺旋桨设计时引入侧斜可以使桨叶不同半径的剖面在不同时刻进入流场的峰值, 有助于减小桨叶的非定常力。如何选取、优化合理的螺旋桨侧斜分布, 使得螺旋桨的非定常力能够得到有效控制是螺旋桨设计者一直关注的问题。

在螺旋桨水动力性能优化方面, 国内相关学者开展了大量的研究工作, 赵威<sup>[1-2]</sup>利用优化软件ISIGHT, 以改善螺旋桨表面的压力分布, 提升空化性能为目标, 对螺旋桨的螺距和拱度分布进行了优化设计, 所采用的计算工具为面元法和RANS方法。周斌、黄树权等<sup>[3-4]</sup>分别采用粒子群优化算法PSO和遗传算法, 从桨叶剖面优化着手, 对螺旋桨的水动力效率进行优化。在螺旋桨侧斜等参数优化方面, 任万龙等<sup>[5]</sup>对螺旋桨的侧斜和纵倾采用贝塞尔曲线来表达, 然后采用面元法对螺旋桨进行水动力预报, 以改善螺旋桨敞水效率为优化目

标,采用粒子群PSO方法对螺旋桨的侧斜和纵倾进行了优化;蔡昊鹏等<sup>[6]</sup>,采用B曲线对侧斜进行多个控制点的重新表达研究,然后采用非定常面元法对螺旋桨进行非定常水动力预报,以减小螺旋桨轴承力为优化目标,采用粒子群PSO方法对螺旋桨的侧斜进行了优化研究。从上述螺旋桨的水动力性能以及侧斜的优化设计的相关研究工作可以看出。目前在螺旋桨设计及性能设计方面,采用优化方法已成为螺旋桨性能提升的重要手段,其次对于螺旋桨侧斜的表达方面,目前多采用B样条或者贝塞尔曲线,设置一系列控制点来对侧斜进行重新表达,然后通过调整控制点的方式来优化侧斜。上述方法可以获得较为光顺的侧斜分布,但是在侧斜的表达上忽略了侧斜的物理意义特征量,因而容易引起寻优范围与优化效率之间成反比的矛盾。

本研究在分析螺旋桨侧斜分布特征基础上,采用最大侧斜角、侧斜分配形式等5个参数对螺旋桨侧斜进行了参数化定义,结合CSSRC非定常升力面涡格法和粒子群优化算法,以最小轴向非定常力为优化目标,开展了螺旋桨侧斜优化设计研究。

## 2 螺旋桨侧斜参数化定义方法

螺旋桨的侧斜主要目的是让螺旋桨叶片各剖面交错的出现伴流峰值区域。从而减小螺旋桨由于伴流引起的攻角变化产生的轴承力。因此从物理角度,我们一般会以侧斜的某些分布特征来描述一种具体的侧斜分布形式。如反映侧斜最小值和最大值之间的角度差定义为最大侧斜角;侧斜一般有负角度和正角度,此时将侧斜分布与 0°角的交点定义为侧斜平衡点;此外在实际侧斜分布当中,侧斜极小与极大值的比例、侧斜极小值的位置等都是与流场的分布密切联系的量。据此,为了能更直观的定义侧斜分布,我们在引入了以下参数: S1, 最大侧斜角; S2, 平衡点位置; S3, 侧斜在负轴和正轴的分配比例; S4, 最小侧斜位置,平衡位置乘以系数; S5, 外半径处的侧斜回调比例。

据上述 S1~S5 的参数定义可以换算 P1~P5 点。然后通过 P1~P5 点作为控制点拟合得到整个侧斜分布曲线,侧斜分布的控制点及拟合曲线见图 1。

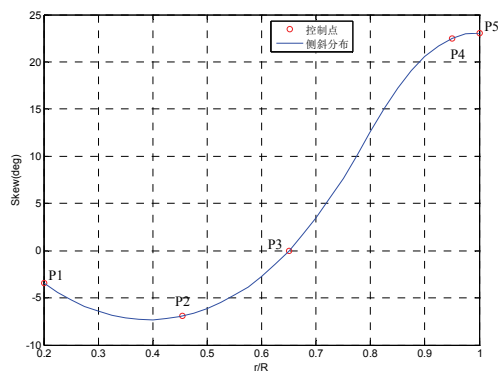


图 1 侧斜分布的控制点及拟合曲线

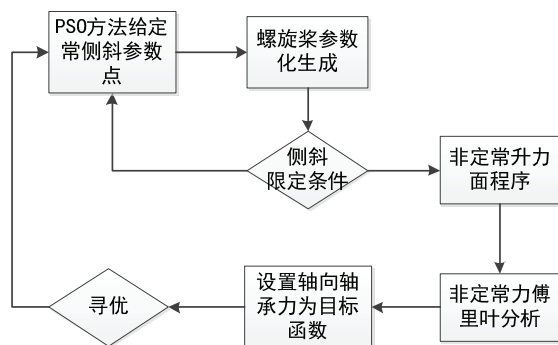


图 2 螺旋桨侧斜优化设计流程

### 3 螺旋桨侧斜优化设计方法

#### 3.1 优化设计流程

根据上节中的螺旋桨侧斜参数化定义方法，结合非定常升力面涡格法程序，采用粒子群优化算法（以下简称 PSO）方法为优化框架，我们构建了螺旋桨侧斜优化设计自动化工作流程。首先采用 PSO 方法随机产生一系列 S1~S5 的设置参数，其中 S1~S5 可以设置限制范围，然后对侧斜进行初步的光顺性判断，合格的侧斜分布带入升力面程序计算非定常轴承力，然后设置某一方向、阶数的轴承力为目标函数，进行 S1~S5 参数的寻优设计工作。整个优化设计流程见图 2。

#### 3.2 非定常升力面方法

由于螺旋桨的非定常力计算，需要提取螺旋桨在几个周期范围内稳定运行的轴承力，因此计算耗时较长，选择合适的求解工具对于优化算法的效率极为关键。考虑的计算量、计算资源，目前普遍采用求解器仍是势流求解器。本文选择了非定常升力面涡格法程序来预报螺旋桨非定常轴承力，参考其对于 DTRC4119 桨在 3 周期伴流中的计算结果<sup>[1]</sup>（见图 3 和图 4），可见目前采用非定常升力面涡格法预报一阶叶频的轴向非定常力在预报速度和预报精度方面能够达到较好的效果。

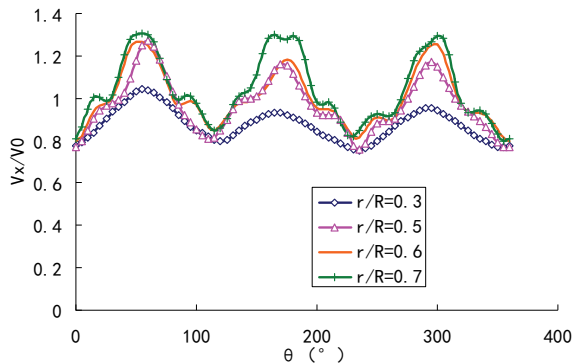


图 3 DTRC 3 周期伴流分布

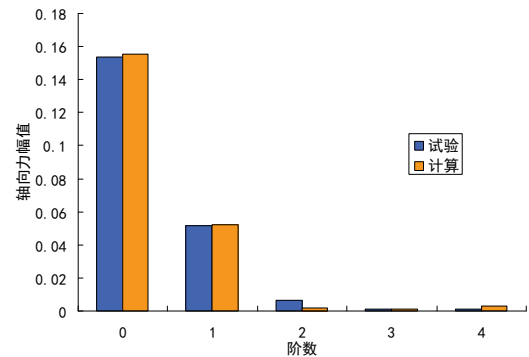


图 44119 桨在 3 周期伴流中非定常力计算结果

非定常升力面方法是基于如下假设：螺旋桨运动在一个无黏无旋不可压的无限流场中，则流场中螺旋桨引起的扰动速度势满足：

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

同时满足桨叶表面不可穿透条件、外边界辐射条件、Kutta 条件等。在上述条件下通过数值离散、格林公式等方法可求得桨叶面上的扰动速度势，然后利用运动坐标系下的柯西-拉格朗日积分公式，可获得桨叶上的涡强分布，根据求解的桨叶表面涡强，可以进一步求出桨叶面上的压力分布，再对整个桨叶表面作压力积分，即可求得作用在桨叶上的力和一周期内整个螺旋桨的轴承力。

轴承力的计算结果可以采用下式进行了无量纲化：

$$K_{Fx} = \frac{F}{\rho n^2 D^4} \quad (2)$$

其中  $\rho, n, D$  分别为介质密度、螺旋桨转速和直径。

### 3.2 粒子群优化设计方法 (PSO 方法)

粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO)，又称微粒群算法，是由 J. Kennedy 和 R. C. Eberhart 等于 1995 年开发的一种演化计算技术<sup>[7]</sup>，来源于对一个简化社会模型的模拟。其中“群 (swarm)”来源于微粒群，PSO 算法简单，编程容易，收敛相对较快的特点。

粒子群优化算法数学描述为：设搜索空间为 D 维，总粒子数为  $n$ ，第  $i$  个粒子位置表示为向量  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ，第  $i$  个粒子迄今为止搜索到的最优位置为  $p_{best} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ ，整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置为  $g_{best} = (g_1, g_2, \dots, g_D)$ ，第  $i$  个粒子的位置变化率 (速度) 为向量  $v = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。进化过程中粒子的每维速度和位置按如下公式进行变化。

$$\begin{aligned} V_{id}(t+1) &= w \cdot V_{id}(t) + c1 \cdot r1(p_{id}[i] + x_{id}(t)) + c2 \cdot r2 \cdot (p_{gd}(t) - x_{id}(t)) \\ x_{id}(t+1) &= x_{id}(t) + k \cdot v_{id}(t+1) \\ 1 \leq i \leq n, 1 \leq d \leq n \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $w$  为惯性权值，反映了算法在全局搜索和局部搜索之间的选择； $c1, c2$  为非负常数，称为认知和社会参数； $r1, r2$  为 [0,1] 之间的随机数； $k$  为压缩因子对粒子的飞行速度进行约束；通常还需要对粒子中每维的位置和速度变化设置一个范围，如超过这个范围则将其设置为边界值。粒子群的初始位置和速度由随机产生。

在螺旋桨侧斜优化过程中，根据定义的螺旋桨参数  $n$ ，设置随机变量数组  $C$ ，根据种群的规模  $n$ ，便可以在初始侧斜的基础上得到  $n$  组的参数化侧斜分布。然后对每个侧斜分布进行非定常升力面的计算获取这一组  $n$  条侧斜分布的局部最小轴向非定常力时，侧斜参数化时的位置  $p$ ，并将  $p$  幅值给全局最佳位置数组  $pgd(t)$ ，上述过程即为完成了一次进化 (迭代)。重复上述过程就可以渐进式的获取每次进化过程中侧斜分布的最佳位置，并对参数进行调整，获取非定常力逐渐减小的侧斜分布方案。

## 4 螺旋桨侧斜优化设计应用

### 4.1 研究对象

为了验证整个优化设计流程的优化效果，我们选取了一高速集装箱船螺旋桨作为优化设计对象，原型螺旋桨的主要参数如表 1 所示。其三向流场分布见图 5。

表 1 螺旋桨主要参数

直径 D(m)	8.0
叶数 Z	6
毂径比 d/D	0.194
盘面比 Ae/Ao	0.9530

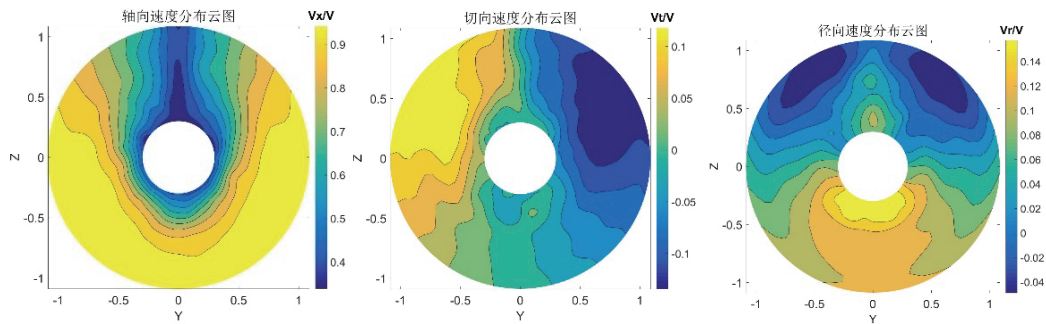


图 5 高速集装箱船的三向流场分布

对螺旋桨的轴向来流进行傅里叶分析结果见图 6，可以看出流场中 1~3 阶量较高，5~7 阶量幅值相当，量级均在 2% 左右。原型螺旋桨的侧斜分布见图 7。原桨在设计状态的非定常力计算结果见表 2。

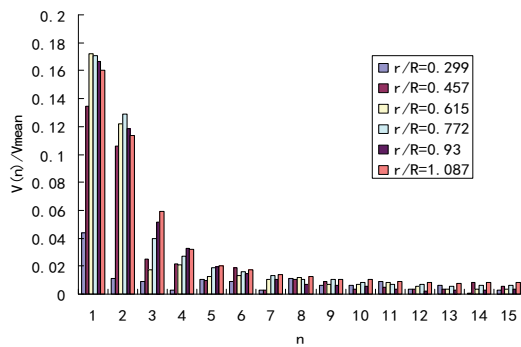


图 6 螺旋桨轴向来流傅里叶分析结果

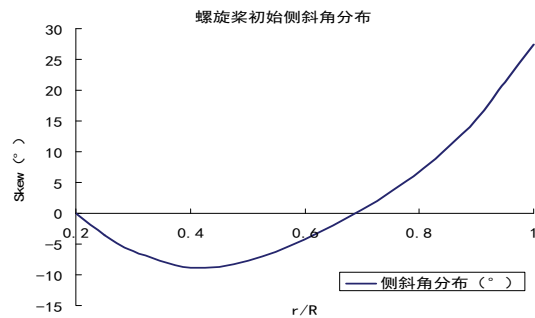


图 7 原桨初始侧斜角分布

表 2 原型桨在设计工况下各阶轴向非定常轴承力

阶数 (叶频)	0	1	2	3
$(K_{Fx})_n$	0.21822	0.00243	0.00028	0.00021

#### 4.2 优化结果

采用 3.1 中的优化设计流程，对集装箱船螺旋桨侧斜进行了优化设计，PSO 算法中每次种群数设置为 20，侧斜最大角度限制在  $40^\circ$  以内，迭代了 9 次，计算时间约 15 h。完成 9 次迭代 180 次计算后，得到的优化侧斜方案最终的轴承力计算结果见表 3。从中可以看出，优化螺旋桨的平均力与原螺旋桨的平均力差别为 0.8%。其水动力的差别可以忽略，其各阶叶频的轴向轴承力均有显著减小。侧斜优化后，螺旋桨轴向 1 阶非定常轴承力较原方案下降了 32% 左右。优化过程、优化侧斜与原侧斜的比较见图 8 和图 9。螺旋桨侧斜优化前后三维造型比较见图 10。

表 3 侧斜优化前后螺旋桨的各阶轴承力及侧斜参数

阶数(n)	0	1	2	3	侧斜参数	S1	S2	S3	S4
原桨 $(K_{Fx})_n$	0.21822	0.00243	0.00028	0.00021	原桨	36.29	0.66	0.29	0.40
优化桨 $(K_{Fx})_n$	0.21656	0.00164	0.00006	0.00004	优化桨	39.86	0.75	0.30	0.50
$\Delta$	-	-0.76%	-32.51%	-78.57%	-	-	-	-	-

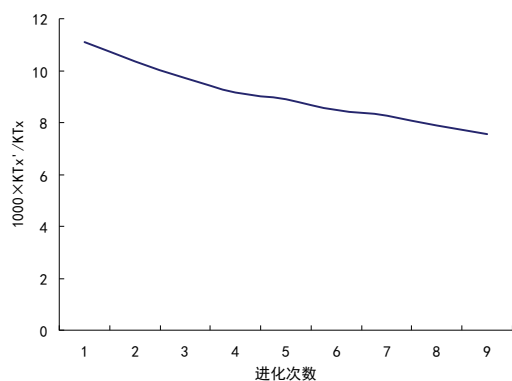


图 8 螺旋桨轴承力随迭代次数的变化

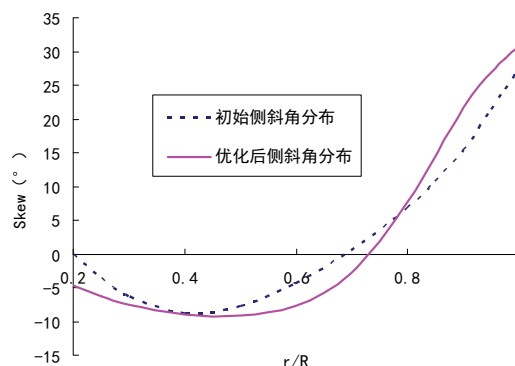


图 9 侧斜优化前后分布比较

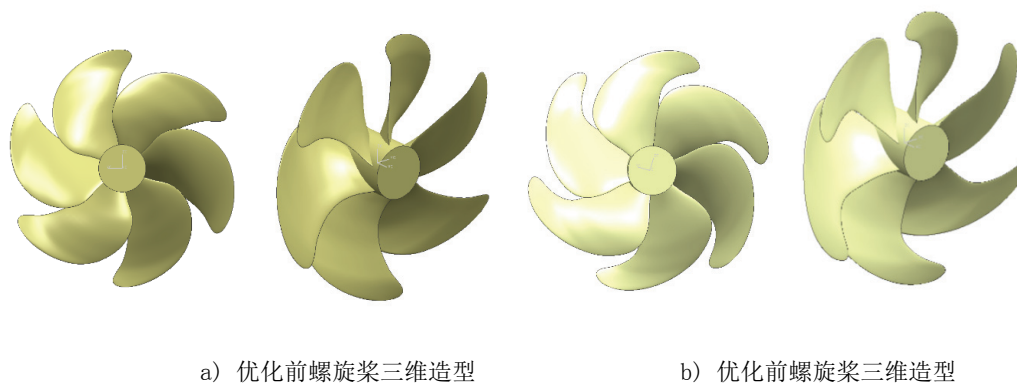


图 10 螺旋桨侧斜优化前后三维造型比较

## 5 结论展望

本研究通过对螺旋桨侧斜的定义及构成进行了分析，构建了以螺旋桨最大侧斜角、侧斜分配形式等 5 个参数的螺旋桨侧斜参数化构成方式，结合粒子群优化算法、非定常涡格升力面方法，以最小轴向 1 阶轴承力为优化目标，以高速集装箱船螺旋桨为应用对象开展了螺旋桨侧斜的优化设计研究工作。通过优化设计计算得到如下结论。

(1) 采用文中的螺旋桨参数定义方式能够较好的实现侧斜定义及控制点之间的转化，便于扩大侧斜寻优的范围。

(2) 构建了侧斜参数化+粒子群+非定常涡格升力面方法的螺旋桨侧斜优化流程，计算表明该优化设计方法可以在同一计算工具内较为快速的寻找到大幅减小螺旋桨非定常轴承力的侧斜优化方案。

减小高速船舶轴承力是螺旋桨及船体尾部设计的重要议题，本文所述方法构建了螺旋桨侧斜的优化设计流程，理论上适用于更高阶轴承力的优化设计问题，现阶段由于高精度求解器、来流条件的限制，更高阶轴承力的求解及优化仍缺乏有效的验证。后续随着高精度求解器的不断涌现，有望针对高阶轴承力为优化目标，开展螺旋桨侧斜更细致的优化设计工作。

## 参考文献

- 1 赵威, 杨晨俊. 船舶螺旋桨螺距及拱度的优化设计研究. 中国造船, 2010, 51(1): 1-8;

- 2 程成, 须文波, 冷文浩. 基于ISIGHT平台DOE方法的螺旋桨敞水性能优化设计. 计算机工程与设计, 2007, 28(6): 1455-1459.
- 3 周斌. 四桨两舵大型船舶螺旋桨的面元法设计研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010: 68-69.
- 4 黄树权. 基于遗传算法的螺旋桨性能优化研究. 大连: 大连理工大学, 2009: 55-56.
- 5 任万龙, 耗宗睿. 基于纵倾与侧斜的螺旋桨优化设计. 山东科学, 2016, (4):8-11;
- 6 蔡昊鹏, 马骋. 确定螺旋桨侧斜分布的一种数值优化方法. 船舶力学, 2014, 18: 771-777;
- 7 KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimizadon IEEE International Conference on Neural Networks. Perth Australla: IEEE ServiceCenter, 1995: 1942-1948.

## Parameterization and optimization of propeller skew

ZHOU Bin, LI Liang, XUE Qiang

(China Ship Scientific Research Center national key laboratory on ship vibration & noise, Wuxi 214082,  
Email:htrmax@163.com)

**Abstract:** Apropeller operating in the non-uniform wake field which result in spatial and temporal fluctuations of blade angle of attack. These angle of attack fluctuations result in unsteady blade loadings and the generation of propeller noise. The purpose of introducing skew is to make propeller sections enter wake peak at different time, so as to reduce the unsteady force of propeller. The present work introduce a parameterized definition method of skew combining lift surface method and PSO optimization method, the propeller skew optimization process can be carry out. Calculation result shows the current optimization process is very efficient, which can provide a reference for the optimization of propeller skew.

**Key words:** Propeller; Propeller skew optimization; Unsteady force; Lift surface method;