

引用格式: 王睿, 熊鹰. 基于伴随方法的舰船推进器优化设计 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1): 36-41.

WANG R, XIONG Y. Propeller optimization design based on the adjoint method[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(1): 36-41.

# 基于伴随方法的舰船推进器 优化设计



王睿<sup>1</sup>, 熊鹰<sup>2</sup>

1 中国人民解放军 91404 部队, 河北 秦皇岛 066001

2 海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033

**摘要:** [目的] 为探索高效的螺旋桨优化设计方法, 基于面元法开展伴随优化方法的研究。[方法] 通过桨叶表面法向速度为零条件和等压库塔条件建立伴随方程, 得到敏感导数求解式。以 DTMB 4381 螺旋桨为对象, 分别运用伴随方法和传统的求解控制方程方法计算螺旋桨性能与参数之间的敏感导数; 基于伴随方法对某螺旋桨进行敏感导数分析, 再根据敏感导数分析结果进行几何参数优化, 并将结果与 ISIGHT 优化平台中的粒子群算法(PSO)得到的结果进行对比。[结果] 结果表明, 采用伴随方法与传统的求解控制方程方法计算得到的结果具有较好的一致性, 但伴随方法的计算效率更高, 优化结果也优于 PSO 算法, 且优化所用时间也少。[结论] 研究表明, 伴随方法在多参数螺旋桨优化设计中的计算效率优于智能算法。

**关键词:** 船舶螺旋桨; 优化设计; 伴随方法; 面元法

中图分类号: U661.3

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02131

## Propeller optimization design based on the adjoint method

WANG Rui<sup>1</sup>, XIONG Ying<sup>2</sup>

1 The 91404 Unit of PLA, Qinhuangdao 066001, China

2 College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering,  
Wuhan 430033, China

**Abstract:** [Objectives] In order to develop a highly efficient method for propeller design optimization, the adjoint method is studied based on surface panel method. [Methods] An adjoint equation is established under the conditions of zero normal velocity of blade and equal-pressure Kutta to obtain a formulae for solving sensitive derivative problem. A DTMB 4381 propeller is used as the research objective to calculate the sensitive derivatives of propeller performance to design parameters using the adjoint method and traditional method respectively for solving governing equation. Next, an analysis of sensitive derivatives on a ship propeller design is carried out based on the adjoint method. The sensitive derivatives are then obtained and applied to optimize the geometric parameters of the propeller, achieving the optimal solutions which are compared with that by particle swarm optimization (PSO) algorithm of ISIGHT. [Results] The results indicate that the sensitive derivatives calculated via the adjoint method are not only in good agreement with that by traditional method, but also offers much higher computation efficiency, generating optimal solutions of the propeller design superior to that by PSO algorithm with less time-consumption. [Conclusions] The research shows that the computation efficiency of the adjoint method is superior to traditional intelligent algorithms in multi-parameters optimization design of ship propellers.

**Key words:** ship propeller; optimization design; adjoint method; surface panel method

## 0 引言

目前, 船舶螺旋桨的优化设计大多基于智能优化算法<sup>[1-4]</sup>, 但其优化效率与设计变量的数目息

息相关。对于多目标、多参数的优化设计问题, 智能优化算法的效率往往比较低。因此, 智能优化算法应用于螺旋桨的优化设计需要耗费大量的计算时间<sup>[5-8]</sup>。为了解解决好此矛盾, 将空气动力学

收稿日期: 2020-10-01

修回日期: 2021-03-14

网络首发时间: 2022-02-22 15:27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479207)

作者简介: 王睿, 男, 1990年生, 博士, 工程师。

熊鹰, 男, 1958年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 舰船水动力性能。E-mail: xiongying0920@126.com

\*通信作者: 王睿

中迅速发展起来的伴随方法引入到螺旋桨的优化设计中<sup>[9]</sup>。伴随方法通过伴随方程实现敏感导数的计算,得到目标函数与设计变量的敏感导数关系,具有极高的优化设计效率<sup>[10-11]</sup>。伴随方法最早于1974年应用于流体力学问题<sup>[12]</sup>,随后在机翼、飞行器及涡轮机械的优化设计方面得到广泛应用<sup>[13-15]</sup>。尽管伴随方法的研究已逐渐深入,但在船舶螺旋桨的优化设计中还未涉及。

为了探究伴随方法在螺旋桨优化设计的实际效果,本文将开展基于面元法的伴随方法研究,详细探讨伴随方法应用于螺旋桨优化设计中的求解方程和数值处理,以为螺旋桨的优化设计建立高效可行的数值方法。

## 1 基于面元法建立伴随方程

势流方法和黏性流方法均可应用于分析船舶螺旋桨水动力问题。其中,基于势流的面元法未对几何模型作任何假设,计算结果比较精确;而黏性流方法大多基于商用软件,难以进行数值程序的修改和扩充,故而选择基于面元法建立伴随方程。面元法通过在物面上布置奇点来模拟流场流经桨叶的运动状态。通过拉普拉斯方程和格林函数得到螺旋桨表面任一场点  $p$  的速度势为<sup>[16-17]</sup>

$$\phi_p = \frac{1}{2\pi} \iint_{S_B} \left[ \phi_q \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_q} \left( \frac{1}{R_{pq}} \right) - \frac{\partial \phi_q}{\partial \mathbf{n}_q} \frac{1}{R_{pq}} \right] dS_q + \frac{1}{2\pi} \iint_{S_w} \left[ \Delta \phi_q \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_q} \left( \frac{1}{R_{pq}} \right) \right] dS_w \quad (1)$$

式中:  $q$  为控制点;  $S_B$  为螺旋桨的边界;  $S_w$  为螺旋桨尾涡面的边界;  $\mathbf{n}_q$  为控制点外法向;  $R_{pq}$  为场点与控制点之间的距离;  $\phi_p$  与  $\phi_q$  分别为场点与控制点的速度势;  $\Delta \phi_q$  为螺旋桨尾涡面偶极子强度。

针对螺旋桨水动力性能的优化,目标函数  $I$  可以表示为流动特征量  $\mathbf{U}$  和设计变量  $\mathbf{x}$  之间的函数。由于面元法计算中,通过等压库塔条件,尾涡面速度势与桨叶面速度势可以相互求解,因此,选择尾涡面速度势或者桨叶面速度势作为流动特征量是可以等效的,在这里流动特征量选为尾涡面速度势  $\Delta \phi$ , 设计变量  $\mathbf{x}$  即为螺旋桨的几何参数,故目标函数可以写为

$$I = I(\Delta \phi, \mathbf{x}) \quad (2)$$

目标函数可以是螺旋桨的推力、扭矩、最大负压系数和噪声等;设计变量  $\mathbf{x}$  可以是弦长、螺距和侧斜角度等。通过等压库塔条件,可建立速度势与几何变量间的关系:

$$N(\Delta \phi, \mathbf{x}) = \Delta p(\Delta \phi, \mathbf{x}) = p_U - p_L = 0 \quad (3)$$

式中:  $p_U$  为随边叶背压力;  $p_L$  为随边叶面压力; 压差  $\Delta p$  可通过雅克比矩阵建立与  $\Delta \phi$  间的关系。引入伴随变量  $\lambda$ , 则敏感导数的求解式可写为:

$$\frac{dI}{d\mathbf{x}} = \frac{\partial I}{\partial \mathbf{x}} - \lambda^T \frac{\partial N}{\partial \mathbf{x}} \quad (4)$$

其中,  $\lambda^T$  满足式(5):

$$\frac{\partial N^T}{\partial (\Delta \phi)} \lambda = \frac{\partial I^T}{\partial (\Delta \phi)} \quad (5)$$

式(5)即为伴随方程。求解完成控制方程式(1)后,基于式(3),微小改变  $\mathbf{x}$  和  $\Delta \phi$ , 即得到  $N$  与  $\mathbf{x}$ ,  $\Delta \phi$  间的偏导数。基于式(1),微小改变  $\mathbf{x}$  和  $\Delta \phi$ , 即得到  $I$  与  $\mathbf{x}$ ,  $\Delta \phi$  之间的偏导数。于是,求解一次伴随方程式(5),得到伴随变量  $\lambda$  的值,代入敏感导数求解式(4)即得到了敏感导数结果。可以看出,建立伴随方程后,敏感导数的求解不再需要重复求解控制方程,只需要求解一次控制方程式(1)和一次伴随方程式(5),即可完成敏感导数的求解,这对于设计变量较多的优化问题,具有极大优势。

## 2 敏感导数计算结果对比

为检验伴随方法的敏感导数计算精度,以DTMB4381螺旋桨为对象,运用伴随方法和传统方法分别计算推力、扭矩、效率与螺距分布、拱弧分布之间的敏感导数,并对比计算结果。传统的敏感导数计算是每改变一次设计变量  $\mathbf{x}$ , 求解一次控制方程式(1),得到  $\Delta I$  与  $\Delta \mathbf{x}$  的比值,即为敏感导数。若采用中心差分的方法,则每改变一次设计变量  $\mathbf{x}$ , 需要求解2次控制方程。在本次计算中,采用的面元法计算结果与实验值对比具有较好的一致性<sup>[18]</sup>, 伴随方法及传统方法计算敏感导数均采用中心差分的数值处理,计算对比结果如图1所示。图1中:  $K_T$  为推力系数;  $K_Q$  为扭矩系数;  $\eta_0$  为敞水效率;  $P/D$  为螺距比;  $f_{\max}/C$  为拱弧比弦长;  $r/R$  为螺旋桨径向位置。以  $dK_T/d(P/D)$  表示推力系数与螺距比之间的敏感导数关系,其他敏感导数的意义与此式类似。

图1给出了敏感导数沿螺旋桨径向分布,对比结果可知,伴随方法及传统方法的敏感导数计算结果具有较好的一致性,但在叶梢位置处的一定差别。分析认为,面元法的计算模型在叶梢位置处的精度有限,微小改变螺旋桨几何时,敏感导数计算结果存在一定的差值,但变化曲线的突变点并不影响径向参数对螺旋桨性能影响的变化方向,若要消除叶梢处的曲线突变点,可通过调整叶梢处网格疏密及径向参数的变化值大小来

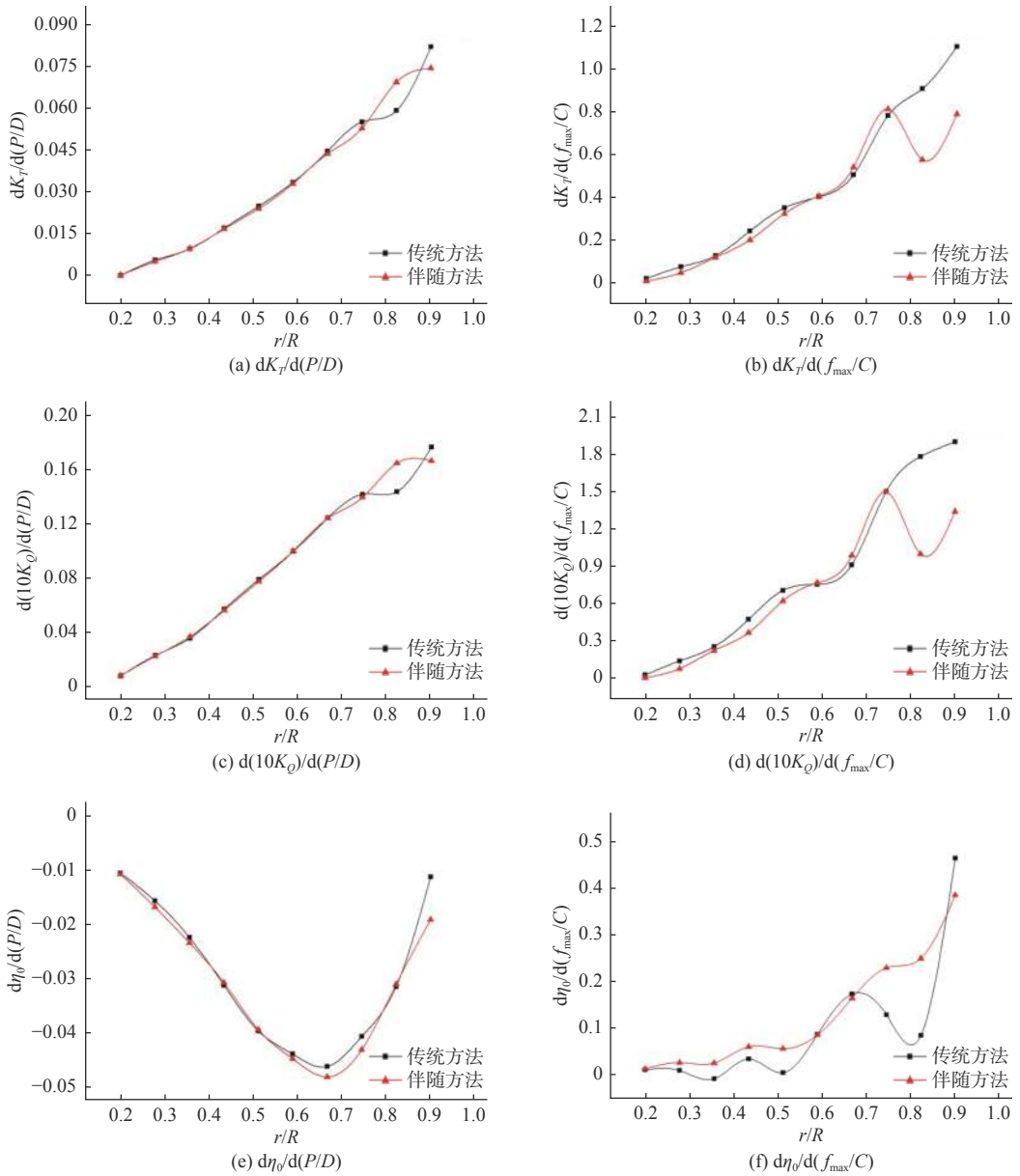


图 1 DTMB 4381 桨螺距及拱弧敏感导数对比

Fig. 1 Sensitive derivative comparison of pitch ratio and camber ratio of DTMB 4381 propeller

处理, 限于本文研究的主题, 在此不再详细探讨。进一步分析可知, 伴随方法在敏感导数计算中, 需同时对  $\Delta\phi$  与  $\mathbf{x}$  的数值进行微小扰动, 可在一定范围内平衡数值误差, 从而使计算结果更加稳定, 对几何参数的改变更加敏感。而传统方法只改变几何变量  $\mathbf{x}$ , 敏感导数计算结果对几何参数的敏感性较差。对比两者敏感导数的计算时间, 就本文计算中选取的 10 个径向位置而言, 伴随方法的敏感导数计算时间约为传统求解方法的 1/10。因此, 伴随方法的效率优势明显, 尤其对于设计变量较多的状况, 计算时间会大大减少。

### 3 螺旋桨优化设计

伴随方法求解敏感导数的最终目的是指导螺

旋桨的设计, 根据敏感导数结果迅速找到几何参数与螺旋桨性能之间的定量关系。选择文献 [18] 的螺旋桨 HG01 作为研究对象, 文献 [18] 基于 ISIGHT 平台, 结合实验设计方法和粒子群算法对螺旋桨进行了优化设计, 设计过程中保持推力不变, 提高螺旋桨的效率和最大负压系数。研究中首先对此螺旋桨进行敏感导数的分析, 因文献 [18] 只改变螺距比及拱弧比, 为了对比研究, 本文也只对螺距比及拱弧比进行优化。敏感导数计算结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 螺距由叶根到叶梢, 对螺旋桨的推力、扭矩的影响效果逐渐变大, 而对效率的影响效果是先增大后减小。由叶根到叶梢, 拱弧对于螺旋桨的推力、扭矩及效率的影响效果均逐渐增大。但螺距对效率的影响是负相关的, 拱

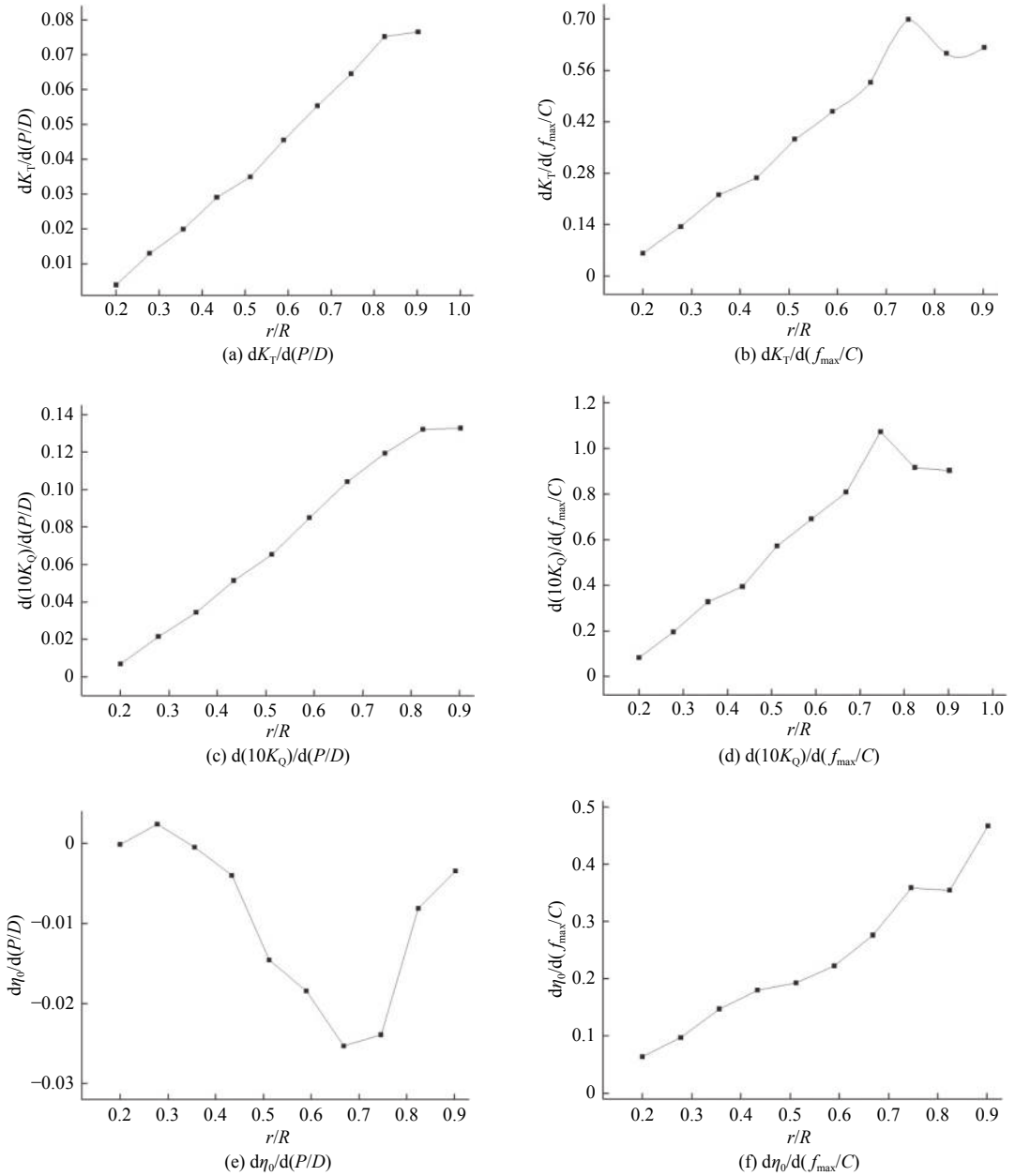


图 2 HG01 桨径向参数敏感导数对比结果

Fig. 2 Comparison of sensitive derivative of HG01 propeller's radial parameters

弧对效率的影响呈正相关。根据螺距和拱弧对推力、扭矩以及效率的影响, 选择适当的变化方式, 改变螺旋桨螺距及拱弧的径向分布。由于螺距在  $0.7R$  处, 对效率的影响最大, 靠近叶根与叶梢对效率的影响逐渐变小, 且呈负相关。为了维持推力不变, 同时提高效率和改善空泡性能。选择减小螺距, 增大拱弧。螺距在  $0.7R$  处减小幅度最大, 靠近叶根及叶梢端的减小幅度逐渐减小。拱弧由叶根到叶梢均增大, 从叶根到叶梢增大的幅度逐渐变大。

根据优化过程中以敏感导数的定量结果作为参考, 按照各个几何参数的 1% 进行逐步迭代修正。先调整螺旋桨的径向几何参数, 再调整螺旋桨叶剖面几何, 来达到改善螺旋桨空泡性能的目的,

同时需要满足螺旋桨的敞水性能保持不变。如式(6)所示, 下标加 0 表示优化前数值。

$$\begin{cases} \min(-C_P) \\ K_T = K_{T0} \\ K_Q = K_{Q0} \end{cases} \quad (6)$$

式中, 自变量为螺旋桨径向参数和尾涡面速度势径向值。

最终优化得到的螺旋桨螺距及拱弧的对比如图 3 所示。另外, 基于 ISIGHT 优化平台的粒子群方法 (PSO) 得到的螺距及拱弧对比如图 4 所示。

由图 3 和图 4 可以看出, 伴随方法与粒子群优化方法对于螺旋桨螺距及拱弧的改变方式是完全不同的, 但根据敏感导数分析结果可知, 粒子

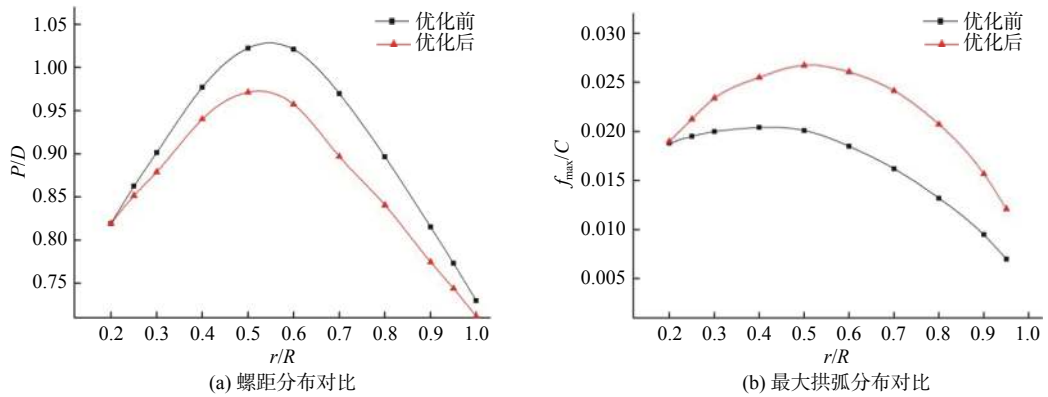


图 3 伴随方法优化前后几何参数对比结果

Fig. 3 Comparison of parameters before and after optimization with the adjoint method

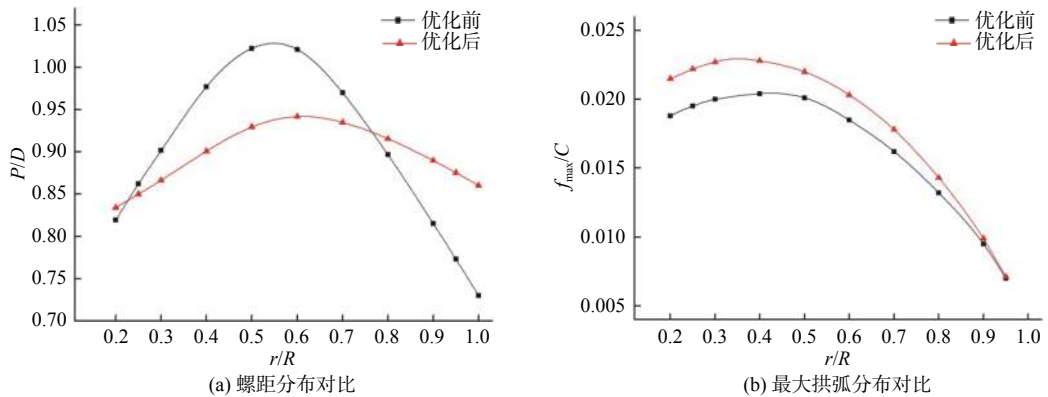


图 4 ISIGHT 优化平台的粒子群算法优化前后几何参数对比结果

Fig. 4 Comparison of parameters before and after optimization with the PSO algorithm of ISIGHT

群优化方法对螺旋桨螺距和拱弧的改变方式也是可行的途径之一,但不是提高效率、优化空泡性能及同时保持推力不变的最佳途径。为了对比伴随方法及粒子群方法的优化效果,对伴随方法及粒子群算法优化得到的推力、扭矩系数和敞水效率以及最大负压系数进行了对比,对比结果如表 1 所示。表中“+”表示增加,“-”表示降低。计算用的是同一台计算机,CPU 为 4 核 Intel Core 2 Quad CPU Q6600 @ 2.4 GHz。

表 1 优化结果对比

Table 1 The comparison of optimization results

项目	$K_T$	$10K_Q$	$\eta_0$	$-C_{Pmax}$	计算时间/min
初始桨	0.166	0.2764	0.6404	-0.846	-
伴随方法优化结果	0	-1.52%	+1.59%	-13.5%	28
粒子群方法优化结果	0	-1.45%	+1.55%	-2.95%	438

由表 1 可以看出,比较伴随方法与粒子群方法的优化结果,在优化效率上伴随方法的增大幅度略高,在最大负压系数的减小幅度上,伴随方法的减小幅度较大。另外在计算时间上,粒子群方法所需要的时间比伴随方法的时间消耗多一个数量级。因此,伴随方法在螺旋桨的优化设计中

具有巨大优势。

## 4 结论

本文主要基于面元法开展伴随方法的研究,运用伴随方法分析敏感导数,并应用于螺旋桨的优化设计。根据数值对比结果和设计结果得到以下结论:

1) 伴随方法敏感导数计算比传统方法稳定,且计算效率要高。就本文选取的 10 个径向位置,伴随方法的敏感导数计算时间约是传统方法的 1/10。

2) 伴随方法计算得到的敏感导数结果为螺旋桨优化设计提供方向。由于伴随方法高效的敏感导数计算,得到了螺旋桨性能与几何参数之间的定量关系,使得优化设计时对各个位置处的几何参数改变更具针对性,从而大大提高了螺旋桨的优化设计效率。

3) 伴随优化方法与粒子群方法的对比表明,伴随方法优化得到的结果更好,优化效率更高。

### 参考文献:

- [1] GAGGERO S, TANI G, VILLA D, et al. Efficient and multi-objective cavitating propeller optimization: An ap-

- plication to a high-speed craft[J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 64: 31–57.
- [2] 邬伟, 熊鹰. 一种抗空化翼型修形设计方法 [J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(6): 878–883, 888.  
WU W, XIONG Y. A reshaping method for anti-cavitating hydrofoil design[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2013, 47(6): 878–883, 888 (in Chinese).
- [3] KOYAMA K. Relation between the lifting surface theory and the lifting line theory in the design of an optimum screw propeller[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2013, 18: 145–165.
- [4] 黄斌, 熊鹰, 王波. 基于粒子群算法的螺旋桨侧斜分布优化 [J]. *中国舰船研究*, 2016, 11(6): 83–89.  
HUANG B, XIONG Y, WANG B. Application of particle swarm optimization theory in skew distribution of propeller[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(6): 83–89 (in Chinese).
- [5] 王超, 韩康, 汪春辉, 等. 冰区航行船舶推进器特殊性分析 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(2): 1–7.  
WANG C, HAN K, WANG C H, et al. Analysis on the particularity of propulsor of ice-going ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(2): 1–7 (in Chinese).
- [6] LEE K J, HOSHINO T, LEE J H. A lifting surface optimization method for the design of marine propeller blades[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 88: 472–479.
- [7] WANG C, YE L Y, CHANG X, et al. The study on optimization design of propeller pitch[J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 73(Supp1): 466–470.
- [8] 宋召运, 刘波, 程昊, 等. 基于改进粒子群算法的串列叶型优化设计 [J]. *推进技术*, 2016, 37(8): 1469–1476.  
SONG Z Y, LIU B, CHENG H, et al. Optimization of tandem blade based on modified particle swarm algorithm [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(8): 1469–1476 (in Chinese).
- [9] SIKARWAR N, MORRIS P J. The use of an adjoint method for optimization of blowing in a convergent-divergent nozzle[J]. *International Journal of Aeroacoustics*, 2015, 14(1/2): 327–351.
- [10] BIAVA M, WOODGATE M, BARAKOS G N. Fully implicit discrete-adjoint methods for rotorcraft applications[J]. *AIAA Journal*, 2016, 54(2): 735–749.
- [11] 季路成, 李伟伟, 伊卫林. 伴随方法用于叶轮机优化设计的回顾与展望 [J]. *航空发动机*, 2011, 37(5): 53–57, 62.  
JI L C, LI W W, YI W L. Retrospect and prospect for adjoint method applying to turbomachinery optimization design[J]. *Aeroengine*, 2011, 37(5): 53–57, 62 (in Chinese).
- [12] PIRONNEAU O. On optimum design in fluid mechanics[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1974, 64(1): 97–110.
- [13] JAMESON A. Aerodynamic design via control theory[J]. *Journal of Scientific Computing*, 1988, 3(3): 233–260.
- [14] CHOI S, LEE K, POTSDAM M M, et al. Helicopter rotor design using a time-spectral and adjoint-based method [J]. *Journal of Aircraft*, 2014, 51(2): 412–423.
- [15] 李伟伟, 季路成, 伊卫林. 基于伴随方法的多级叶轮机三维叶片优化设计 [J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(11): 2164–2167.  
LI W W, JI L C, YI W L. Blade shape optimization of multistage turbomachinery by adjoint method[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(11): 2164–2167 (in Chinese).
- [16] 王睿, 熊鹰, 王展智. 适用于整体求解吊舱推进器的定常面元法 [J]. *推进技术*, 2016, 37(5): 992–1000.  
WANG R, XIONG Y, WANG Z Z. A steady surface panel method suitable for calculation of podded propulsor as a whole[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(5): 992–1000 (in Chinese).
- [17] WANG R, XIONG Y, WANG Z Z. A surface panel method for the analysis of hybrid contra-rotating shaft pod propulsor[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 140: 97–104.
- [18] 王波. 船用螺旋桨参数化分析及优化设计研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2013.  
WANG B. Research on optimization design and parameters analysis of marine propeller[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2013 (in Chinese).