

潮流能水轮机翼型升阻比与空化性能优化研究

孙召成, 李增亮, 徐朝政, 董祥伟, 张琦, 冯 龙

(中国石油大学(华东)机电工程学院, 青岛 266580)

摘 要: 以NACA63-018翼型为研究对象,分别采用贝塞尔曲线和NURBS曲线对翼型进行参数化构造,通过对比选用拟合精度更高的NURBS曲线。以水轮机空化系数 σ' 为优化目标,同时兼顾升阻比,采用多目标遗传算法和数值模拟手段进行多目标优化设计。对优化后的翼型与原始翼型在多攻角工况范围内进行水动力学特性分析,通过XFOIL验证优化后翼型升阻比性能;利用CFD软件对优化前后翼型空化流场进行瞬态模拟,对比两者空化性能。分析结果表明,优化后翼型相比较,原始翼型空化性能和升阻比均得到进一步提高。

关键词: 水轮机; 曲线拟合; 升阻比; 空化系数; 多目标遗传算法

中图分类号: TK73

文献标识码: A

0 引 言

潮流能发电水轮机是将水流能转换为旋转机械能进而转化为电能的装置,其能量转换依靠转轮叶片与水流相互作用来实现。叶片是影响水轮机效率高低的关键部件,其好坏由翼型性能高低来决定。关于翼型的优化设计历来是国内外学者研究的重点,尤其是在如何提高翼型升阻比和抗空化措施方面已有大量研究^[1,2]。翼型的表示都是通过一组离散的数据点来实现的,目前尚无专门的函数表达式,翼型优化设计一般是通过调整翼型坐标点来控制翼型形状,进而达到提高性能的目的。陈进等^[3]提出一种翼型集成理论与B样条结合的风力机翼型线优化设计方法,该方法构建的翼型具有很好的结构兼容性。琚亚平等^[4]利用贝塞尔曲线对翼型进行参数化设计,并利用神经网络和遗传算法进行优化,优化后的翼型升阻比性能得到明显提升。此外,Laurens等^[5]采用基于机翼截面的叶片动量理论设计获得逼近贝茨极限的叶片。水轮机在水下运行时,往往会因为局部压力低于水的饱和蒸汽压而发生空化现象。空化造成的空蚀会对水轮机造成极大的损害,造成水轮机叶片物理损伤和效率下降。王树杰等^[6]利用数值模拟方法对水轮机空化展开研究,结果表明空化现象存在于水轮机运行

状态中,在叶片尖端最先发生空化并向中部扩展,空化会造成水轮机功率系数和扭矩系数下降。张博等^[7]采用试验方法,研究翼型空化流动特性。刘艳等^[8]采用2种空化模型对翼型空化流动展开研究,经过合理的选择经验系数,得到具有信服力的结果。

本文在上述研究的基础上,通过NURBS曲线拟合方法对NACA63-018进行参数化设计,以升阻比和水轮机空化系数 σ' 作为优化目标进行多目标优化,获得翼型优化曲线参数。运用XFOIL和CFD软件对优化后翼型曲线进行升阻比和空化性能验证,证明优化后的翼型相比原始翼型具有高升阻比和空化性能优良的特点,可为以后水轮机翼型优化设计提供理论设计方法和依据。

1 水轮机叶片翼型参数化设计

翼型的轮廓曲线一般是由足够密集的离散点构成,单纯地将离散数据点作为优化设计变量时会带来计算量过大的问题^[9]。目前常用的曲线参数化方法有贝塞尔曲线、B样条曲线和NURBS曲线。本文通过NURBS曲线和贝塞尔曲线分别来构造翼型曲线,通过比对两者的拟合精度优选拟合方法。基本思路是:首先根据现有翼型NACA63-018为基础,获取该翼型一组有序的数据坐标点,插值出这

收稿日期: 2017-06-21

基金项目: 工业和信息化部“高技术船舶科研”(2014020024); 中央高校基本科研业务费专项(10CX05009A)

通信作者: 李增亮(1962—), 男, 博士、教授, 主要从事流体机械方面的研究。lizl@upc.edu.cn

组数据点的控制顶点和权因子,然后通过改变控制顶点坐标来修改所构造的 NURBS 曲线,最终拟合出逼近原始翼型的曲线。

NURBS 曲线是一种既能描述自由型曲面的 B 样条曲线,又能精确表示二次曲线弧与二次曲面的数学方法,其表示式^[10]为:

$$p(u) = \sum_{i=0}^n d_i R_{i,k}(u) \quad (1)$$

$$R_{i,k}(u) = \frac{\omega_i N_{i,k}(u)}{\sum_{j=0}^n \omega_j N_{j,k}(u)} \quad (2)$$

式中, $R_{i,k}(u)$ —— k 次有理基函数; ω_i —— 权或权因子,分别与控制顶点 d_i 相关联,首末权因子 ω_0 、 $\omega_n > 0$,其他 $\omega_i > 0$,以防止分母为零; $N_{i,k}(u)$ —— 德布尔-考克斯递推公式; $i=0,1,\dots,n$ 。

贝塞尔曲线是参数多项式曲线,其表达形式为:

$$p(t) = \sum_{j=0}^n b_j B_{j,n}(t), \quad t \in [0,1] \quad (3)$$

$$B_{j,n}(t) = C_n^j t^j (1-t)^{n-j} \quad (4)$$

式中, b_j —— 控制点, $j=0,1,3,\dots,n$; $B_{j,n}(t)$ —— 伯恩斯坦基函数; t —— 参数; C —— 组合数。

然后通过给定的 NACA63-018 翼型数据坐标点,反算插值曲线的控制顶点,给定相应的权因子,对翼型线进行拟合,图 1 给出 2 种拟合方法拟合后的翼型曲线和原始翼型曲线比较。从图 1 可看出,拟合后 NURBS 曲线和贝塞尔曲线都已非常逼近原始型线,但 NURBS 曲线拟合精度更高、更接近原始翼型。

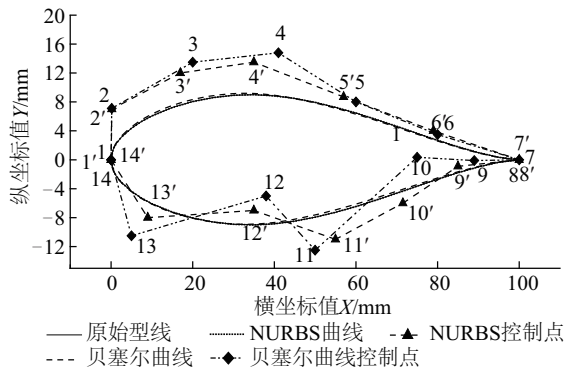


图 1 NURBS 曲线拟合翼型

Fig. 1 NURBS fitting curve of foil

图 2 为 2 种拟合方法迭代收敛曲线。从图 2

可看出, NURBS 曲线收敛速度明显优于贝塞尔曲线,因此本文采用 NURBS 曲线对翼型进行拟合。

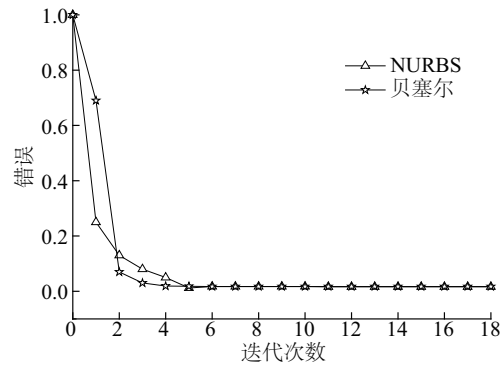
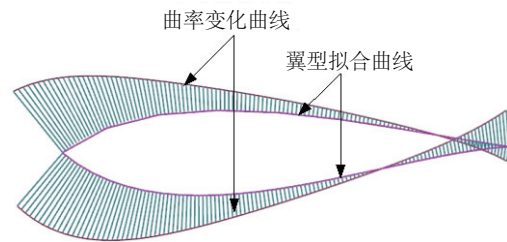


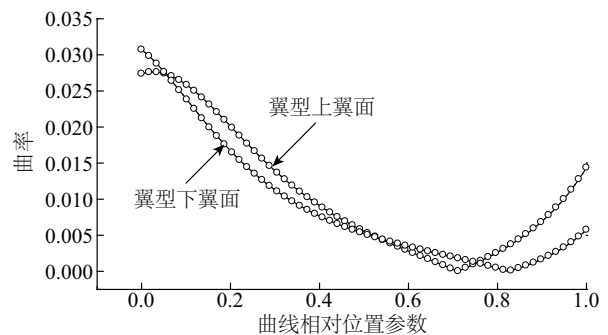
图 2 收敛曲线

Fig. 2 Residual curves

对拟合后的 NURBS 翼型曲线利用曲率梳工具进行曲率检查,图 3 显示,拟合后的翼型曲线曲率变化从前缘到尾缘处呈先减小后增大的趋势,无明显波动,较光滑连续,表明拟合翼型表面光滑连续性好,曲线拟合质量较高,从而可保证翼型性能与原始翼型性能的一致性。



a. 曲率变化示意图



b. 曲率随相对位置参数变化

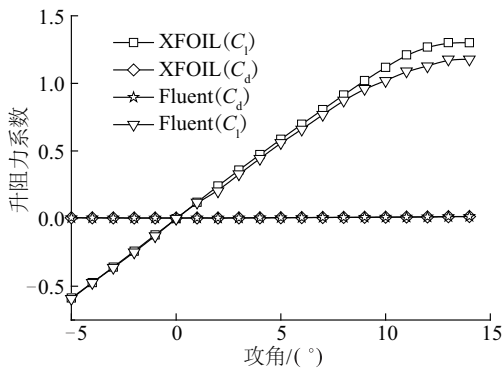
图 3 NURBS 曲线拟合翼型曲率分析图

Fig. 3 Curvature analysis of blade parameter model lines by NURBS curve

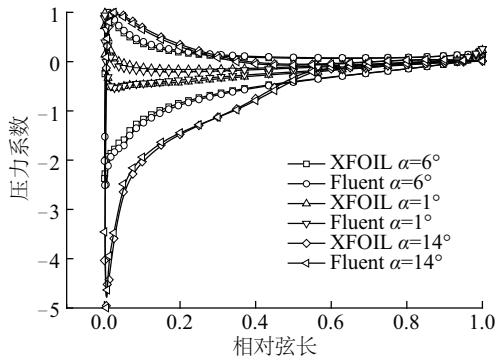
2 翼型水动力学性能计算

在获取翼型升阻力系数方面,目前较为流行的

方法有 CFD 流体仿真和 XFOIL^[11], XFOIL 软件在计算速度方面优于 CFD。图 4 为 XFOIL 与 Fluent 模拟 NACA63-018 翼型在攻角 α 为 $-5^\circ \sim 14^\circ$ 区间内的升、阻力系数变化对比情况。从图 4 可看出,在 $\alpha = 14^\circ$ 时升力系数达到最大值,当攻角 α 超过 14° 时翼型升力系数会下降,进入失速点。在上述 3 种工况下,使用 2 种软件对翼型升阻比性能和表面压力系数分布进行模拟仿真,文献[12]采用绕翼型的 C 型结构化网格离散计算域,近壁区域的网格如图 5 所示,计算域总网格数量为 58410,设定流动雷诺数为 0.85×10^6 ,远场来流速度为 $V = 2.5 \text{ m/s}$ 。从图 5 可看出,2 种模拟计算方法在 3 种不同攻角下所得计算结果吻合良好。



a. 翼型升阻力系数与攻角关系



b. 不同方法计算所得翼型表面压力系数分布

图 4 2 种计算方法结果对比

Fig. 4 Comparison of two calculation methods

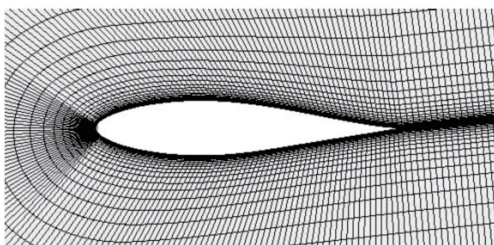


图 5 翼型壁面网格

Fig. 5 Local grids around hydrofoil

3 遗传算法

遗传算法是根据达尔文遗传进化论发展而来的一种模拟自然中优胜劣汰的生物进化过程的计算模型,是一种在进化过程中不断寻找最优解的方法^[13-15]。本文采用多目标遗传算法可解决所优化目标之间存在冲突的矛盾,使多个目标可在指定的区域上存在最优解。

多目标优化问题的数学模型为:

$$\begin{cases} V - \min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T \\ \text{s.t.} & x \in X \\ & X \subseteq R^m \end{cases} \quad (5)$$

式中, $f(x)$ ——优化目标函数; x ——优化设计变量; R ——基本空间; X —— R 的一个子集即约束集; m ——维数。

寻找最优解的过程,通过模仿生物进化运用选择算子、交叉算子和变异算子进行进化操作,多次寻优后得到最佳个体,其值接近最优解。

4 水轮机翼型优化模型

4.1 优化目标

4.1.1 升阻比

本文以 NACA63-018 翼型为初始翼型,为使其在较大攻角范围内拥有较好的升阻性能,需在优化时对其展开多攻角工况下优化设计从而提高水轮机的出力和效率。在给定相应的雷诺数和速度情况下,翼型在设计攻角 α 下的升阻比计算公式为:

$$f(x) = C_l / C_d \quad (6)$$

式中, C_l 、 C_d ——翼型的升力系数和阻力系数; x ——优化设计变量。

4.1.2 水轮机空化系数 σ'

衡量水轮机性能有 2 个重要参数,一个是效率,表示能量性能;另一个是水轮机空化系数 σ' ,表示空化性能。在设计水轮机翼型时除满足高的升阻比外,还应具有良好的空化性能,因此本文引入水轮机空化系数 σ' ,将其作为优化目标之一。水轮机空化系数 σ' 所代表的意义是水轮机相对动力真空值,与水轮机叶片翼型、叶片表面流体流速相关与翼型升力系数 C_l 以及翼型厚度 s 关系估算公式

为^[16]:

$$\sigma' = \eta_{\omega} \frac{V_2^2}{2gH} + \left(\frac{1}{4k} C_1 + \zeta \right) \frac{V_2^2}{2gH} \quad (7)$$

$$\zeta = 0.01k \left(\frac{100s}{l} - 3 \right) \quad (8)$$

式中, H ——水深, m; k ——叶栅稠密度; ζ ——翼型厚度系数; η_{ω} ——尾水管恢复系数; V ——叶片表面流速, m/s; σ' ——无因次量, 其值越小代表水轮机翼型抗空化性能越好; s ——翼型厚度, mm; l ——弦长。

4.2 约束条件

为控制优化设计变量范围, 选取翼型 NURBS 拟合曲线作为优化目标, 选取翼型拟合曲线上控制顶点 2~6 和 9~13 除去首尾控制顶点共 10 个控制顶点 $d(\Delta x, \Delta y)$ 的纵坐标 Δy 作为优化设计变量, 保持其横坐标 Δx 不变, 通过调整控制点纵坐标 Δy 位置来改变翼型的外形参数, 对 Δy 变化范围控制在 $[-15, 15]$ 之间。此外, 兼顾水轮机叶片强度设计要求等, 对翼型面积 S 进行约束, 优化翼型与原始翼型面积关系约束为:

$$|S - S'|/S' \leq 5\% \quad (9)$$

水轮机空化系数 σ' 越小, 空化性能越好, 但过小不能保证翼型升阻比, 因此给予约束关系为:

$$\sigma'_{\min} \leq \sigma' \leq \sigma'_{\max} \quad (10)$$

式中, σ'_{\min} 、 σ'_{\max} ——指定的最小和最大水轮机空化数。

4.3 水轮机翼型优化命题

本文选择无穷远处来流速度 $v=2.5$ m/s, 雷诺数 $Re=0.85 \times 10^6$, 对攻角为 1° (阻力系数小)、 6° (升阻比最大) 和 14° (失速区) 3 种攻角工况下优化翼型升阻比和水轮机空化系数 σ' 。具体优化流程如图 6 所示。以升阻比和水轮机空化系数 σ' 作为水轮机翼型优化目标, 约束函数为外形面积约束, 其优化命题可表述为:

$$\begin{cases} \min [-(F_1(X), -F_6(X), -F_{14}(X)), \sigma'] \\ \text{s.t. } |S - S'|/S' \leq 5\% \\ \sigma'_{\min} \leq \sigma' \leq \sigma'_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $F_1(X)$ 、 $F_6(X)$ 、 $F_{14}(X)$ ——3 种工况下的升阻比; X ——控制顶点的纵坐标值; S' 、 S ——初始翼型和优化后翼型截面积。

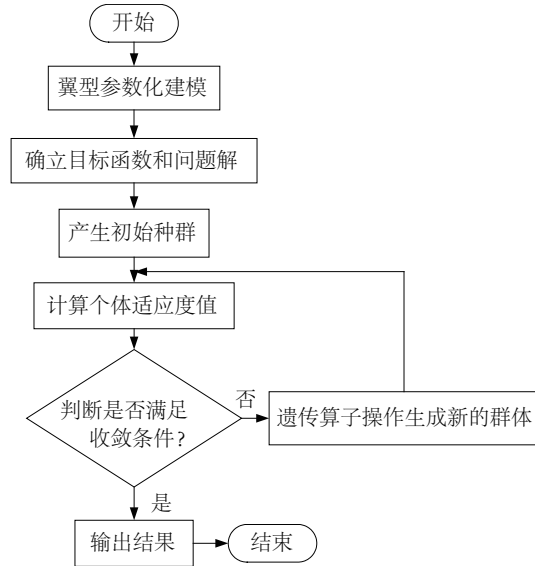


图 6 翼型优化设计方案流程

Fig. 6 Flowchart of optimal design of turbine foil

适应度函数为:

$$\begin{cases} F(X) = f(C_1/C_d) \\ \sigma' = \eta_{\omega} \frac{V_2^2}{2gH} + \left(\frac{lC_1 + 4k^2s - 0.12k^2l}{4kl} \right) \frac{V_2^2}{2gH} \end{cases} \quad (12)$$

为便于计算水轮机空化系数 σ' , 简化设计变量, 这里将水轮机空化系数 σ' 所需部分计算参数赋予固定值, 例如水轮机恢复系数 η_{ω} 、叶轮实度 k 等, 具体工况参数如表 1 所示。

表 1 水轮机基本参数

Table 1 Basic parameters of hydraulic turbine

参数	数值	参数	数值
恢复系数 η_{ω}	0.85	水流速度 $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.5
叶轮实度 k	0.20	水深 H/m	10
弦长 l/mm	70	—	—

根据翼型初始输入参数, 计算得到个体的翼型性能数据 (如升阻力系数计算得到翼型升阻比), 根据所需计算参数计算得到水轮机空化系数 σ' , 遗传算法种群数设置为 80, 进化代数为 100, 选择随机抽样, 交叉概率设为 0.8, 变异概率设为 0.1。结果显示在迭代到 86 代求得最佳样本个体。

5 结果与分析

图 7 为优化后的翼型与原始翼型形状对比效果图。可看出拟合型线能较好地表达翼型线, 相比较原始翼型, 优化后的翼型前缘上翼面略突出, 最

大相对厚度弦向位置也向前缘靠拢,这有利于提高翼型升力系数;优化后的尾缘处上下翼型线相比原始翼型略有收缩,导致产生一定弯度,进一步提高翼型升阻比。

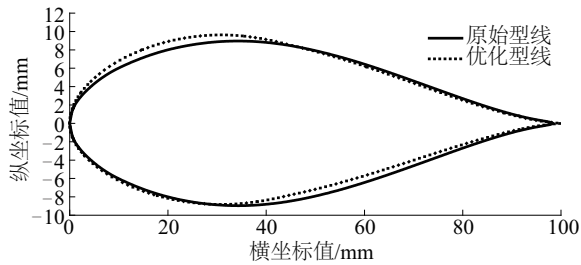


图7 优化前后翼型形状对比

Fig. 7 Contrast of airfoils before and after optimization

表2为优化后的翼型与原始翼型性能对比。数据显示,在相同工况条件下,优化后的翼型升阻比在3种工况下都得到一定提高。攻角为 14° 时升阻比增幅最大为4.4%,从式(7)可看出,由于升力系数的增大会导致水轮机空化系数 σ' 的增大,所以优化过程中限制了升力系数的增幅;水轮机空化系数 σ' 在3种工况条件下均有所减小,攻角为 6° 时,水轮机空化系数 σ' 减幅最大(为7.56%),对应为其空化性能的提高,由此可见优化后的翼型性能指标均有所提升,因此具有更好的水动性能和空化性能,符合设计目标要求。

表2 初始翼型和优化翼型性能对比

Table 2 Comparison of hydrofoil's performance between initial and optimal

翼型	α	C_l	C_d	C_l/C_d	s'
初始翼型	1	0.1181	0.0070	16.871	0.088
	6	0.6973	0.0087	80.149	0.119
	14	1.0963	0.0350	31.323	0.220
优化翼型	1	0.1205	0.0071	16.972	0.082
	6	0.7109	0.0087	81.713	0.110
	14	1.1148	0.0341	32.692	0.216

针对优化后翼型的空化性能利用 Fluent 软件进行空化数值模拟计算,以进一步验证优化翼型的空化性能,数值模拟计算方法具有经济性好、计算时间短,不受试验装置模型设备限制,因此成为研究者的必用手段。

数值模拟采用二维翼型 NACA63-018,模型弦

长为 70 mm,网格如图 5 采用绕翼型的 C 型结构化网格离散计算域,网格数量为 58410,计算翼型攻角为 8° ,水蒸气密度为 0.02558 kg/m^3 ,饱和蒸气压 p_{vapor} 为 3540 Pa,粘度为 $0.001 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

出流边界条件:设置速度入口 $V=5.3 \text{ m/s}$,静压出口,对整个出口取压力的面积平均,通过改变出口压力来调整空化系数 σ 的大小^[17]。

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{0.5\rho V^2} \quad (13)$$

式中, p_0 ——出口平均压力,Pa; p_v ——水蒸气压; V ——无穷远处来流速度,m/s。

设置多相流模型为 Mixture,空化模型选用 Zwart-Gerber-Belamri 模型,选择压力-速度耦合求解算法为 Coupled,同时选择 Realizable 模型和增强壁面函数模型。

图 8 为当不同空化系数 σ 时,同一时刻原始翼型与优化翼型的气体体积分数分布云图。从图 8 可看出,2 种翼型都在前缘上翼面附近出现空化区,优化翼型的空化区域长度面积明显小于原始翼型,尤其是当空化系数 σ 较低时,空化抑制效果较明显。此外,从图 8 还可看出,优化翼型空化发生区域位置相较原始翼型靠后即更远离于前缘,这样可使空化产生的气泡溃灭时发生在尾缘之后,避免对叶片造成破坏,减轻空化的不利影响。

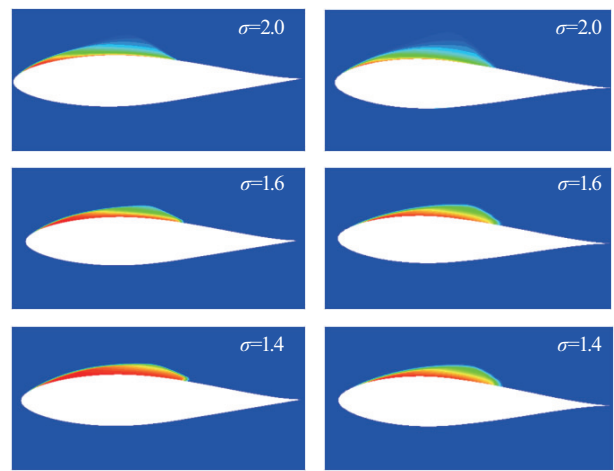


图8 不同空化数下2种翼型空化气体体积分数云图

Fig. 8 Air volume fraction contours for two airfoils at different cavitation numbers

图 9 为同一时刻不同空化系数 σ 下优化翼型与原始翼型附近空化流线分布。从图 9 可看出,当

$\sigma=1.4$ 时,优化与原始翼型空化较为稳定,流场影响较小; $\sigma=0.8$ 时,2 种翼型尾部都出现流动混乱现象,优化翼型混乱程度小于原始翼型,在同样攻角工况下,空化系数 σ 越小翼型的空化程度越剧烈。

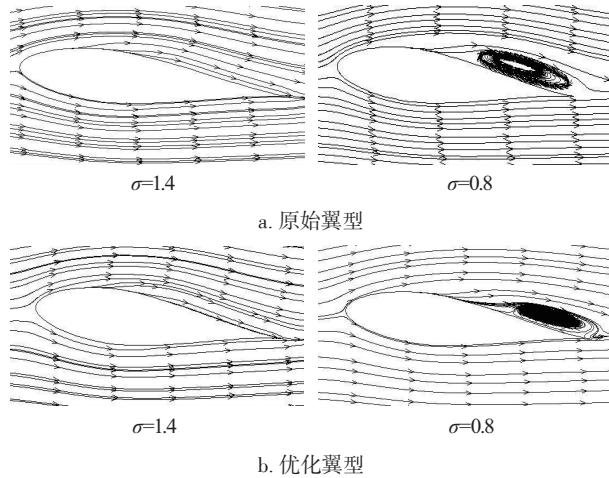


图9 不同空化数下2种翼型空化流线图

Fig. 9 Streamlines for 2 airfoils at different cavitation numbers

空化初生判据定义为当局部压力低于该温度下的汽化压力时,就会发生空化现象。压力系数定义为:

$$C_p = \frac{p_L - p_0}{0.5\rho V^2} \quad (14)$$

式中, p_L ——翼型表面静压强。

由式(13)和式(14)可知,当满足 $-C_p \geq \sigma$,即可发生空化。空化系数 σ 可由改变出口压力来调节,空化系数 σ 由 2.5 开始逐步减小,对攻角为 6° 、 $V = 5.3 \text{ m/s}$ 时的原始翼型和优化翼型,通过数值模拟计算不同空化系数 σ 下对应翼型剖面压力系数沿弦长的分布如图 10 所示。由图 10 可知,在设定模拟工况下,翼型下表面受空化影响较小,故优化前后翼型下表面压力系数 C_p 变化不大;当空化系数 $\sigma = 2$ 时,原始翼型上表面压力系数最小峰值 $C_p = -2.11$,优化翼型压力系数最小峰值 $C_p = -2.02$,由空化发生条件,翼型前缘导边处发生空化,原始翼型空化发生起始位置为 $x/c = 0.0011$ 处,优化翼型空化起始位置为 $x/c = 0.0043$ 。优化后翼型出现空化的位置相比原始翼型延后,空化程度也小于原始翼型,这与前文图 8 所示云图相呼应。当空化系数 $\sigma = 1.5$ 时,优化后翼型压力系数最小峰值 $C_p = -1.68$,原始翼型最小峰值 $C_p = -1.81$,同样在前

缘处发生空化,由数据可知,优化翼型空化程度小于原始翼型。空化起始位置优化前为 $x/c = 0.001$,优化后为 $x/c = 0.0075$,对比可得优化后翼型空化性能得到提高。

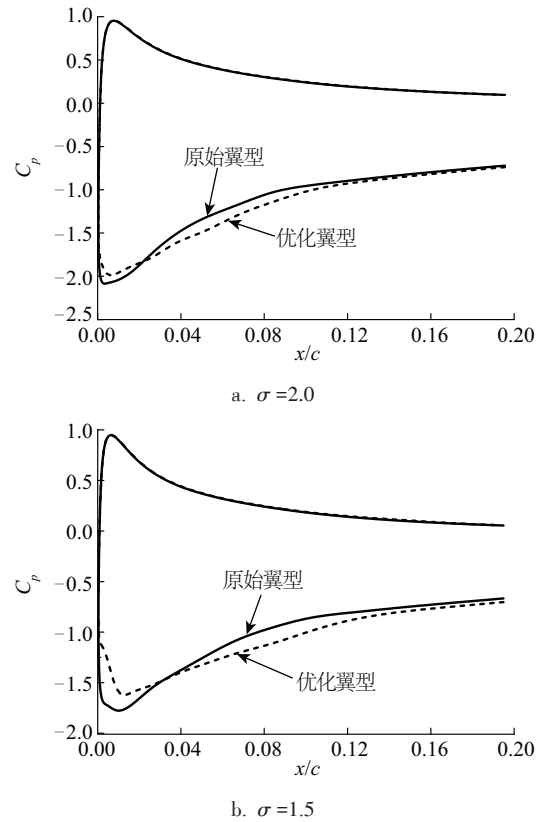


图10 翼型表面压力系数分布

Fig. 10 Contrast of pressure coefficient of airfoil surface

6 结 论

1)采用 NURBS 曲线与贝塞尔曲线对翼型曲线进行参数化设计,通过对比发现 NURBS 曲线相比于贝塞尔曲线拟合精度更高,可根据调整控制点来修改任意段曲线。优化过程采用 XFOIL 软件同样可快速准确得到翼型性能参数,节约了时间,效率得到提高。

2)将水轮机空化系数 σ' 作为优化目标,进行参数优化同时兼具翼型升阻比进行多目标优化设计。优化结果表明,优化后的翼型升阻比增加,水轮机空化系数 σ' 在优化工况下均有所减小。采用 CFD 对优化翼型二维剖面进行空化性能数值模拟以进一步验证优化翼型空化性能,模拟结果表明优

化翼型空化性能要优于原始翼型,证明了本文优化方法的合理性与可行性。

[参考文献]

- [1] Kaufmann N, Carolus T H, Starzmann R, et al. An enhanced and validated performance and cavitation prediction model for horizontal axis tidal turbines [J]. International Journal of Marine Energy, 2017, 19: 145—163.
- [2] Kumar P, Saini R P. Study of cavitation in hydro turbines—A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 374—383.
- [3] 陈进,汪泉,李松林,等.翼型集成理论与B样条结合的风力机翼型优化设计方法研究[J].太阳能学报, 2014, 35(10): 1930—1935.
- [3] Chen Jin, Wang Quan, Li Songlin, et al. Study of optimization design method for wind turbine airfoil combining airfoil integrated theory B-spline [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2014, 35(10): 1930—1935.
- [4] 据亚平,张楚华.基于人工神经网络与遗传算法的风力机翼型优化设计[J].中国电机工程学报, 2009, 29(20): 106—111.
- [4] Ju Yaping, Zhang Chuhua. Optimal design method for wind turbine airfoil based on artificial neural network model and genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(20): 106—111.
- [5] Laurens J M, Ait-Mohammed M, Tarfaoui M. Design of bare and ducted axial marine current turbines [J]. Renewable Energy, 2016, 89(2): 181—187.
- [6] 王树杰,盛传明,袁鹏,等.潮流能水平轴水轮机空化数值模拟[J].太阳能学报, 2015, 36(2): 522—528.
- [6] Wang Shujie, Sheng Chuanming, Yuan Peng, et al. Numerical simulation of cavitation on horizontal axis tidal current turbine [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2015, 36(2): 522—528.
- [7] 张博,王国玉,黄彪,等.绕水翼空化非定常的动力特性[J].机械工程学报, 2013, 46(6): 165—169.
- [7] Zhang Bo, Wang Guoyu, Huang Biao, et al. Unsteady dynamics of cavitation flows around a hydrofoil [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 46(6): 165—169.
- [8] 刘艳,赵鹏飞,王晓放,等.2种空化模型计算二维水翼空化流动研究[J].大连理工大学学报, 2012, 52(2): 176—182.
- [8] Liu Yan, Zhao Pengfei, Wang Xiaofang, et al. Study of cavitation flows around two-dimensional hydrofoil using two cavitation models [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(2): 176—182.
- [9] 陈进.风力机翼型及叶片优化设计理论[M].北京:科学出版社, 2013.
- [9] Chen Jin. Wind turbine airfoil and blade optimum design theory [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [10] 施法中.计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M].北京:高等教育出版社, 2001.
- [10] Shi Fazhong. Computer aided geometric design and non-uniform rational B splines [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [11] 杨阳,李春,缪维跑,等.水平轴风力机叶片优化设计方法[J].太阳能学报, 2016, 37(5): 1107—1113.
- [11] Yang Yang, Li Chun, Miu Weipao, et al. Optimization design method of horizontal axis wind turbine blade [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2016, 37(5): 1107—1113.
- [12] 朱国俊,冯建军,郭鹏程,等.基于径向基神经网络-遗传算法的海流能水轮机叶片翼型优化[J].农业工程学报, 2014, 30(8): 65—73.
- [12] Zhu Guojun, Feng Jianjun, Guo Pengcheng, et al. Optimization of hydrofoil for marine current turbine based on radial basis function neural network and genetic algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 65—73.
- [13] Goldberg D E. Genetic algorithms in search optimization and machine learning [M]. Jacob Way, Reading, MA 01867: Addison-Wesley publishing Company Inc., 1989: 122—124.
- [14] 刘楠楠.基于进化算法的多目标优化算法及应用研究[D].南京:南京航空航天大学, 2010.
- [14] Liu Nannan. Multi-objective optimization algorithm based on evolutionary algorithm and its application [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010.
- [15] 张帅帅,李伟华,胡远.基于遗传算法的翼型性能优化[J].流体机械, 2009, 37(1): 15—19.
- [15] Zhang Shuaihui, Li Weihua, Hu Yuan. Optimization of airfoil performance based on genetic algorithm [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(1): 15—19.
- [16] 刘大恺.水轮机[M].北京:中国水利水电出版社, 2011.
- [16] Liu Dakai. Water turbine [M]. Beijing: China Water

Conservancy and Hydropower Publishing House, 2011.
[17] Da Silva P A S F, Shinomiya L D, De Oliveira T F, et

al. Design of hydrokinetic turbine blades considering cavitation[J]. Energy Procedia, 2015, 75: 277—282.

OPTIMIZATION OF LIFT-DRAG RATIO AND CAVITATION PERFORMANCE FOR MARINE CURRENT TURBINE

Sun Zhaocheng, Li Zengliang, Xu Chaozheng, Dong Xiangwei, Zhang Qi, Feng Long
(College of Mechanical Electronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Taking the NACA63-018 airfoil as the research object, the paper uses the Bezier curve and NURBS curve to parameterize the airfoil and, after comparison, selects the NURBS curve with higher fitting precision. With the turbine cavitation coefficient σ' as one of the optimization goal, the multi-objective genetic algorithm and the numerical simulation method are used to conduct the multi-objective optimization design with the consideration of the lift-drag ratio. The hydrodynamic characteristics of the optimized airfoil and the original airfoil within the range of the multiple attack angles and working conditions are then analyzed so as to verify the lift-drag ratio performance of the optimized airfoil through XFOIL; the CFD software is also used to conduct the transient simulations of the cavitation flow fields of airfoils before and after the optimization so as to compare their cavitation performances. The results show that the cavitation performance and the lift-drag ratio of the optimized airfoil have been further improved compared with the original airfoil.

Keywords: marine current turbines; curve fitting; lift-drag ratio; cavitation coefficient; multi-objective genetic algorithm