

双调和方程在航空离心泵叶型 优化设计的应用

刘显为, 李华聪, 史新兴, 符江锋
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为了减少构建代理模型的计算量,提高优化效率,基于双调和方程模型和混合人工鱼群算法对航空离心泵叶型进行优化改型设计。在 Matlab 平台下分别采用 5 点 4 次 Bezier 曲线和线性函数控制叶型圆周角分布和积叠变化规律,通过软件 UG 和 Fluent 的联合批处理方法对 15 组设计结果进行内流场数值仿真。在曲面插值获得计算空间边界条件的基础上,采用中心差分格式对双调和偏微分方程进行数值求解,建立超曲面性能代理模型。以效率最高为目标函数基于人工鱼群算法对设计变量进行全局寻优。结果表明:基于双调和方程的超曲面代理模型能够保证试验值与预测值完全一致,而优化后的离心叶轮流动中的尾迹效应被明显减弱,水力效率比原型泵提高 5.4%。

关 键 词: 航空离心泵; 优化设计; 叶型参数化; 双调和方程; 人工鱼群算法

中图分类号: V233.91 **文献标志码:** A

Application of biharmonic equation in optimization design of aero centrifugal pump blade profile

LIU Xianwei, LI Huacong, SHI Xinxing, FU Jiangfeng
(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to reduce the amount of computation and improve the efficiency of optimization process, the optimization design of aero centrifugal pump blade profile based on the biharmonic equation agent model and hybrid artificial fish-swarm algorithm was studied. Five-point fourth-order Bezier curves and linear function were used to control the distribution of the circumference angles and the stacking of the blade profile under the Matlab platform. The numerical simulation of the 15 design results was carried out by the joint batch processing of softwares UG and Fluent. Then based on surface interpolation, the calculation of spatial boundary conditions was obtained, and biharmonic partial differential equation on central difference scheme was solved to establish the hypersurface agent model. The objective function of maximum efficiency was used to optimize the design variables based on the artificial fish swarm algorithm. Results showed that the artificial fish-swarm optimization method based on biharmonic equation agent model can ensure the test value and the predicted value were exactly the same. Compared with prototype the wake effect in the optimized impeller was weakened, and the hydraulic efficiency increased by 5.4%.

收稿日期:2018-08-25

基金项目:航空基金(20150653006)

作者简介:刘显为(1992—),男,博士生,主要从事航空离心泵设计与内流仿真研究。E-mail:lxw@mail.nwpu.edu.cn

引用格式:刘显为,李华聪,史新兴,等.双调和方程在航空离心泵叶型优化设计的应用[J].航空动力学报,2019,34(4):950-960.
LIU Xianwei,LI Huacong,SHI Xinxing,et al. Application of biharmonic equation in optimization design of aero centrifugal pump blade profile[J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(4):950-960.

Key words: aero centrifugal pump; optimization design;
blade profile parameterization; biharmonic equation;
artificial fish-swarm algorithm

燃油离心泵是航空发动机燃油系统中重要的动力部件,对叶轮型线的优化设计,能够在不变动主要尺寸的基础上提高离心泵的整体性能,具有非常重要的工程实用意义,国内外学者对此展开过大量研究。

在型线参数化领域,蔡江畔等^[1]采用 3 次 B 样条曲线来设计离心泵叶轮前、后盖板轴面流线和流线展开线。殷明霞等^[2]基于 Bezier 理论,利用 OpenGL 软件作为图形图像的开发工具,开发出叶轮机二维叶型参数化设计软件。在优化代理模型的研究方面,赵伟国等^[3]利用人工神经网络的学习功能,建立效率目标函数与优化变量之间的映射关系,采用遗传算法对设计变量进行全局寻优。张人会等^[4-6]采用自由曲面变形方法实现叶型的参数化设计,采用共轭梯度方法对离心泵叶轮载荷进行优化改型研究。张宇等^[7]基于拉丁超立方抽样,构建 Kriging 代理模型对船用双吸离心泵叶轮进行优化设计。Shi 等^[8]采用正交试验方法对深井泵叶轮进行优化设计研究。Kim 等^[9-11]将因子分析方法应用于叶轮设计,基于数据回归分析探讨优化参数对性能的影响,并耦合曲面响应方法和正交试验方法对混流泵进行优化研究。李嘉等^[12-14]采用多项式空间曲线拟合一体式叶轮型线,并通过优化型线控制方程系数,实现离心叶轮的性能优化。

综上所述以往的研究中大多采用正交试验法、曲面响应法、神经网络方法和 Kriging 法等数据挖掘方法构建性能代理模型。由于多项式方程形式的限制,曲面响应法和正交试验方法的精度不高,当优化变量增多时,代理模型的灵敏度和准确性会变差^[15-17]。而神经网络和 Kriging 方法需要进行大量的样本学习,否则会在模型预测值与实际试验值之间产生较大的误差,降低模型的精度^[18-20]。如果对每一样本都进行流场计算,由于优化过程中 CFD 的计算量巨大,优化设计变量较多,会导致维数灾难降低优化效率。近年来基于偏微分方程的代理模型方法逐渐得到应用,其中偏微分双调和方程代理模型将样本学习结果作为边界控制条件,通过求解 4 阶双调和方程来构建变量空间上的超曲面,在较少的样本学习条件下,实现模型预测值与实际试验值的完全一致,保证

了代理模型的精度^[21-22]。

此外,由于离心泵叶轮流道形状的几何边界与流动性能之间关系复杂,以往的研究多采用的经典梯度方法和遗传算法对参数进行优化。然而,梯度算法通过获取目标函数的最速下降方向,能够实现较快的收敛,然而其最大弊病在于寻优结果依赖初值,不具有全局搜索能力。对于曲面响应法或正交试验法而言,优化变量有限且性能模型以多项式方程表达,梯度算法尚能满足需求。而对神经网络和 Kriging 模型等深度数据挖掘模型而言,则需要具备良好的全局优化能力。遗传算法通过将设计参数编码,子代交叉遗传、变异等方式,以种群进化手段,实现空间内的全局寻优。但是遗传算法在求解时编码复杂,迭代周期长,且全局搜索能力仅依赖变异概率,这限制了遗传算法在离心泵叶轮优化中的应用。因此,构建高效优化算法,提高优化过程中状态的转移能力,避免陷入局部最优解,是目前优化设计研究面临的另一个问题^[23-24]。与传统经典算法和其他启发式智能算法相比,人工鱼群算法通过模仿鱼群的运动,将状态的行为分为觅食、聚群、追尾和随机变化,多行为方式的组合能够有效避免陷入局部最优解,提高了算法的计算速度和全局收敛性,此外,人工鱼群算法不需要进行复杂的编码和转换过程,使程序编制得到简化^[25-27]。

本文在叶片型线几何参数化的基础上,采用双调和方程性能代理模型与人工鱼群算法相结合的方式,以提高效率为目标函数对航空离心泵叶轮进行优化改型设计,研究结果表明,经过优化后整泵的水力效率提高 5.4%。

1 叶型参数化设计与数值模拟

1.1 几何模型及型线参数化过程

优化设计的对象是比转速为 63.13 的航空燃油离心泵,其主要过流部件包括诱导轮、离心叶轮和蜗壳,设计转速为 7 600 r/min,如图 1 所示为该燃油泵的三维模型及实物图。

离心叶轮叶片中心面可以看作轴面流线的空间展开,研究采用 5 点 4 次 Bezier 曲线通过控制轮毂和轮缘流线的圆周角度,实现叶型的参数化建模。如图 2 所示横坐标 θ 为弧度单位,表示流

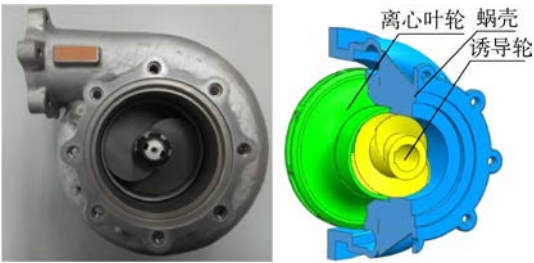


图 1 航空离心泵三维模型及实物图

Fig. 1 Three-dimensional model and physical picture of aero centrifugal pump

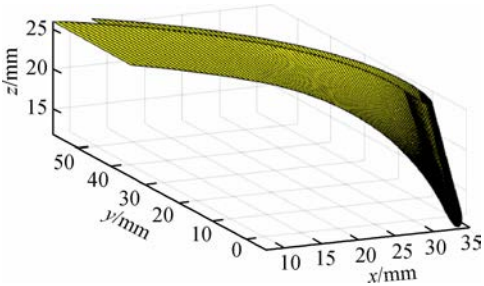


图 3 离心叶轮叶片型线参数化设计结果

Fig. 3 Parameterized design result of blade profile in centrifugal impeller

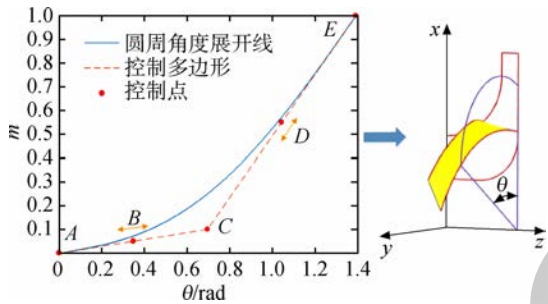


图 2 Bezier 曲线控制的轴面流线圆周角分布

Fig. 2 Circular angle distribution of axial streamline based on Bezier curve

线展开的圆周角度,纵坐标 m 表示流线的相对长度。A、B、C、D、E 展开流线的控制点,红色虚线表示 Bezier 曲线的控制多边形,蓝色曲线表示建立的圆周角分布关系。通过控制 B 点和 D 点分别在直线 AC 段和直线 CE 段上运动,从而获得不同的圆周角分布关系。

叶片中心面的积叠效应采用线性控制函数

$$\varphi_s = \varphi_h + \Delta\alpha t \tag{1}$$

其中 φ_s 表示轮缘流线起始圆周角度, φ_h 表示轮毂流线起始圆周角度, $\Delta\alpha$ 表示最大扭曲积叠角度, t 表示积叠控制参数。

考虑到实际加工制造等因素,设计叶片采用等厚度叶型,叶型流面厚度为 3 mm,并采用长短轴比为 8 的椭圆型线拟合叶片进口边。研究基于 Matlab 平台实现离心叶轮的参数化设计,设计结果如图 3 所示,其中 x 、 y 、 z 分别表示笛卡尔坐标系下的 3 个坐标分量。

1.2 网格划分和数值模拟

在优化设计中,网格的划分既要保证计算结果的准确性,同时还需要为后续的数值仿真提供良好的网格模板。在离心泵内流仿真计算中,通常采用 Blasius 公式近似预估第 1 层网格点与壁面之间的距离

$$y_{wall} = 6 \left(\frac{V_{ref}}{\nu} \right)^{-\frac{7}{8}} \left(\frac{L_{ref}}{2} \right)^{\frac{1}{8}} y^+ \tag{2}$$

式中 y_{wall} 表示第 1 层网格点与壁面之间的距离; V_{ref} 为参考速度; ν 为流体的运动黏度; L_{ref} 为参考长度; y^+ 表征近壁区黏性底层的无量纲量,对于 $k-\epsilon$ 模型而言,一般以接近 30 为最佳。

研究采用 ICEM CFD(integrated computer engineering and manufacturing code for computational fluid dynamics) 网格划分软件对过流部件进行网格划分,考虑到叶轮叶片的包角为 80° 扭曲程度有限,为了方便后续优化计算的网格生成,研究采用 O 型网格对叶轮流道进行网格划分。如图 4 所示,分别控制叶轮径向、周向和轴向的网格节点数量,就能够很好地构建出不同尺度的叶轮流体域网格。

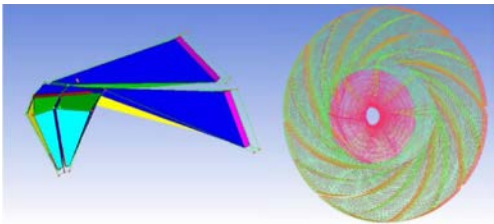


图 4 离心叶轮模板网格生成策略

Fig. 4 Grid generation strategy of centrifugal impeller template

对包含诱导轮和蜗壳流体域在内的原始叶轮在设计点情况下,分别对径向、周向和轴向 3 种不同的网格分布情况采用压力校正 SIMPLEC (semi-implicit method for pressure-linked equation consistent) 算法,基于 Fluent 软件进行数值仿真,湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型,转速为 7 600 r/min,设定进口速度条件和出口静压条件。在诱导轮出口与叶轮进口、叶轮出口和蜗壳进口处应用 interface 交互面。网格无关性验证结果如图 5

所示。图中数字分别表示径向网格节点数、周向网格节点数和轴向网格节点数。

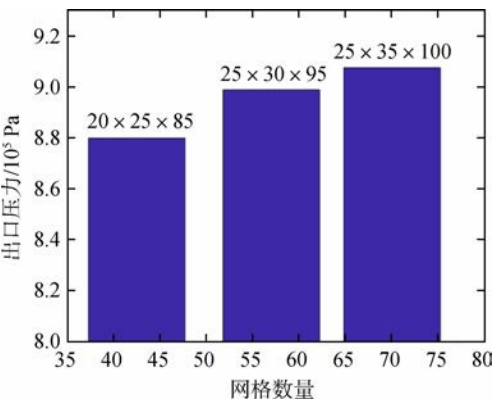


图 5 不同网格尺度下叶轮出口压力分布

Fig. 5 Outlet pressure distribution of impeller at different grid scales

从图 5 中可以看到,当选择径向网格节点数为 25,周向节点数为 30,轴向节点数为 95 时,叶轮网格节点总数为 57 万,计算出来的结果与 70 万网格节点数的计算结果压力的相对误差仅为 0.96%,为了提高计算效率,缩短优化时间,故而选择该种节点分布作为优化过程中网格生成模板。

为了体现优化前后叶轮性能的对比,同时进行验证计算结果的可靠性,对原始叶轮结构在非设计工况下进行数值计算。得到的流量 Q 与扬程 H 曲线与试验数据的对比如图 6 所示。

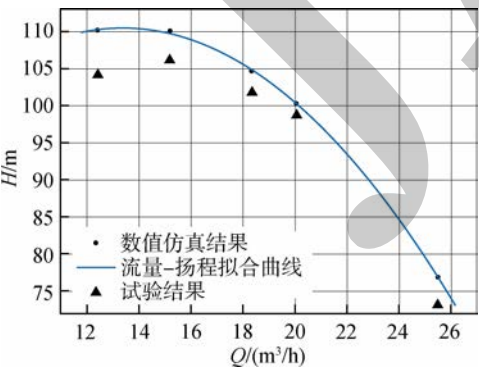


图 6 流量-扬程特性试验对比

Fig. 6 Comparison of volume flow-head characteristics test

从对比结果分析可以看到,由于实际试验中必然存在前后泵腔的泄漏流动,因而即使是在设计点数值仿真结果也不可能与试验结果完全一致。然而设计工况条件下,泄漏量所占的比重较小,主流体域内的数值模拟可以准确反映离心泵内部流动,因而外特性显示出的误差较小,约为

1.8%。而在小流量工况和大流量工况,离心泵在流体激振力的作用下,出现不稳定流动现象,振动和噪声明显加剧,此时包括泄漏流动、二次流所占比重增大,因而外特性上的误差也比较明显,小流量时扬程相对误差约为 5.4%,而大流量时扬程相对误差约为 4.8%。从总体情况而言,数值仿真能够在一定程度上真实反映离心泵内部流动特性,可以作为优化设计评判的依据。

2 离心叶轮型线优化设计

2.1 双调和方程代理模型

双调和偏微分方程代理模型的实质是将曲面数据回归的造型问题转换为对双调和方程的边值求解。该方法可以避免响应曲面或 Kriging 等数据挖掘方法产生的误差,保证试验值与模型预测值完全一致。

基于文中第 2.1 节所述,选择轮毂流线和轮缘流线上的 B 、 D 在直线段 AC 、 CE 处的相对位置 t_B 、 t_D 和积叠线控制参数 t 为优化设计变量。为了进一步减少优化设计参数,对轮毂、轮缘流线优化参数进行编码,可以将 4 个优化控制变量转换为 2 个优化变量。表 1 给出设计参数的编码转化关系。

表 1 设计参数编码优化	
Table 1 Optimization of design parameter coding	
设计参数 x_i	对照编码(t_B, t_D)
1	(1,1)
0	(0.5,0.5)
-1	(0,0)

使用 x_1 表示轮毂流线的优化控制参数, x_2 表示轮缘流线的优化控制参数, x_3 表示积叠函数控制参数 t 。如此优化设计变量就由 5 个减少到 3 个。选择泵整体水力效率为优化设计目标,构建的双调和方程为

$$\left(\frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + \frac{\partial^4}{\partial x_2^4} + \frac{\partial^4}{\partial x_3^4} + \frac{\partial^4}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + \frac{\partial^4}{\partial x_1^2 \partial x_3^2} + \frac{\partial^4}{\partial x_2^2 \partial x_3^2}\right) \eta(x_1, x_2, x_3) = 0 \tag{3}$$

其中 η 表示离心泵的水力效率。一般情况下选择在空间立方体内对上式进行数值求解,因此有第一类边界条件为

$$\eta(x_1, x_2, x_3) \big|_{\partial \Omega} = g_i(x_1, x_2, x_3) \tag{4}$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$

第二类边界条件为

$$\frac{\partial \eta(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_j} \Big|_{\partial \Omega} = h_i(x_1, x_2, x_3)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6; \quad j = 1, 2, 3 \quad (5)$

研究以 Matlab 为主控制平台,通过联合批处理方式首先将所设计叶轮以文件点的形式导出,然后调用自主开发的软件 UG 后台二次开发程序 3dmodel. exe,建立流体域模型并以 parasolid 文件格式输出到 ICEM(integrated computer engineering and manufacturing)中,最后通过划分执行 mesh. rpl 脚本语句实现叶轮网格的自动生成。将叶轮网格与之前生成的诱导轮及蜗壳网格导入 fluent 中进行数值仿真计算,获得不同设计参数下的效率特性。如图 7 所示为双调和方程模型网格的计算域空间,对计算区域边界点进行整泵流体域水力效率 η 数值计算。

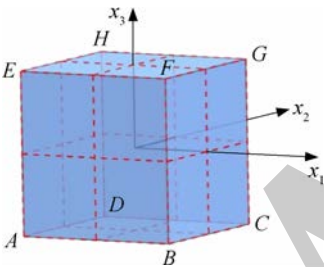


图 7 超曲面代理模型的计算域空间

Fig. 7 Computational domain space of hypersurface agent model

为了较准确地反映各设计参数与效率之间的关系,同时尽可能的减少计算量,提高优化效率,研究对 15 组设计模型进行数值仿真,计算结果如表 2 所示。

表 2 整泵模型水力效率仿真结果

Table 2 Simulation results of hydraulic efficiency of the whole pump model

x_1	x_2	x_3	$\eta/\%$
0	0	0	54.40
0	0	1	56.22
0	-1	0	54.29
1	-1	1	55.77
0	1	0	55.67
-1	-1	1	55.72
0	0	-1	56.28
1	-1	-1	59.45

续表

x_1	x_2	x_3	$\eta/\%$
-1	-1	-1	55.46
1	1	-1	57.21
-1	1	-1	55.89
1	0	0	56.11
1	1	1	55.62
-1	1	1	56.93
-1	0	0	54.25

采用非均匀 B 样条曲面对各个边界面进行插值,得到的结果如图 8 所示。

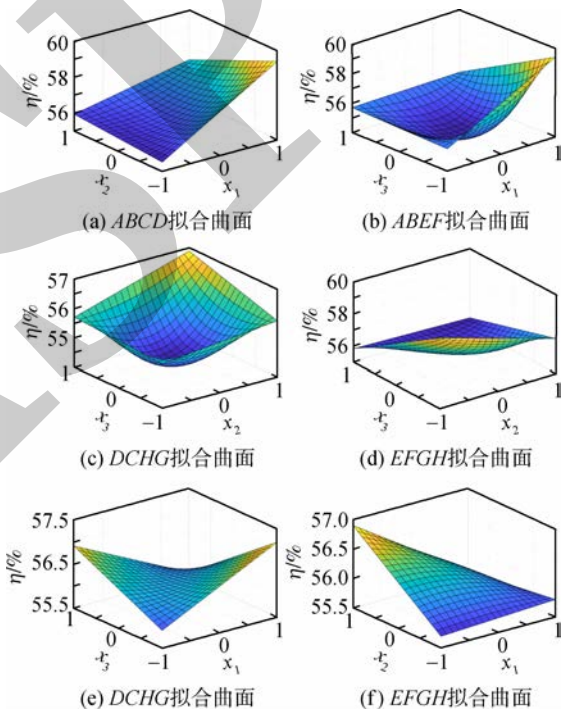


图 8 计算域边界曲面 B 样条插值

Fig. 8 B spline interpolation surface of computational domain boundary

对于式(3)在计算域中采用中心差分离散方式,建立 25 节点差分格式,利用逐点超松弛方法对该高维度方程进行求解,迭代表达式为

$$\eta_{i,j,k}^{n+1} = - \left[\eta_{i+2,j,k} + \eta_{i-2,j,k} + \eta_{i,j+2,k} + \eta_{i,j-2,k} + \eta_{i,j,k+2} + \eta_{i,j,k-2} - 12(\eta_{i+1,j,k} + \eta_{i-1,j,k} + \eta_{i,j+1,k} + \eta_{i,j-1,k} + \eta_{i,j,k+1} + \eta_{i,j,k-1}) + 2(\eta_{i+1,j+1,k} + \eta_{i-1,j+1,k} + \eta_{i+1,j-1,k} + \eta_{i-1,j-1,k}) + 2(\eta_{i,j+1,k+1} + \eta_{i,j+1,k-1} + \eta_{i,j-1,k+1} + \eta_{i,j-1,k-1}) + 2(\eta_{i+1,j,k+1} + \eta_{i-1,j,k+1} + \eta_{i+1,j,k-1} + \eta_{i-1,j,k-1}) \right] / 42 \quad (6)$$

式中 n 表示迭代次数, i, j, k 分别表示网格节点编

号,由于式(3)属于 4 阶偏微分方程的边值问题,因而计算内部节点 $i, j, k \in [3, N_{\max} - 2], N_{\max}$ 表示单方向上最大网格节点数,本研究选择为 100。而对于边界节点的值则有第二类边界条件求得

$$\begin{cases} \eta(i+1, j, k) = \eta(i, j, k) + \Delta x_1 \eta_{x_1}(i, j, k) \\ \eta(i, j+1, k) = \eta(i, j, k) + \Delta x_2 \eta_{x_2}(i, j, k) \\ \eta(i, j, k+1) = \eta(i, j, k) + \Delta x_3 \eta_{x_3}(i, j, k) \end{cases} \quad (7)$$

如图 9 所示为偏微分方程超曲面代理模型的计算流程示意图。



图 9 超曲面代理模型的计算流程

Fig. 9 Computing process of hypersurface agent model

如图 10 所示为超曲面代理模型在等 x_3 设计参数条件下的效率结果。图中色谱表示不同设计空间点位置对应的水力效率 η 。

研究通过对比 20 组任意设计空间点处,代理模型预测结果和 CFD 仿真结果的误差,进一步验证代理模型的精度。模型效率预测对比如图 11 所示,图中横坐标 N 表示设计空间点的编号。

通过分析这 20 组结果可以发现,最大相对误差仅为 0.85%,代理模型的预测结果能够满足工程需要。

2.2 人工鱼群算法

在建立超曲面代理模型的基础上,研究采用人工鱼群算法对三参数进行优化。人工鱼群算法模仿鱼群的觅食、聚群、追尾等行为,实现全局寻优。

觅食行为就是趋向食物的活动,假设人工鱼 i 当前的优化参数状态为 $\mathbf{X}_i$,在其感知范围内随机选择一个状态 $\mathbf{X}_j$

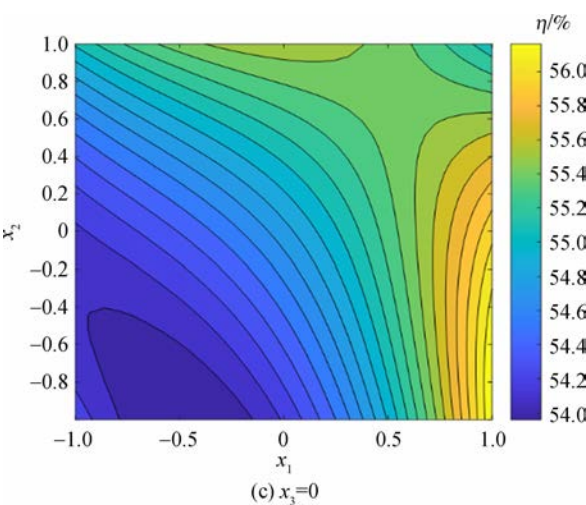
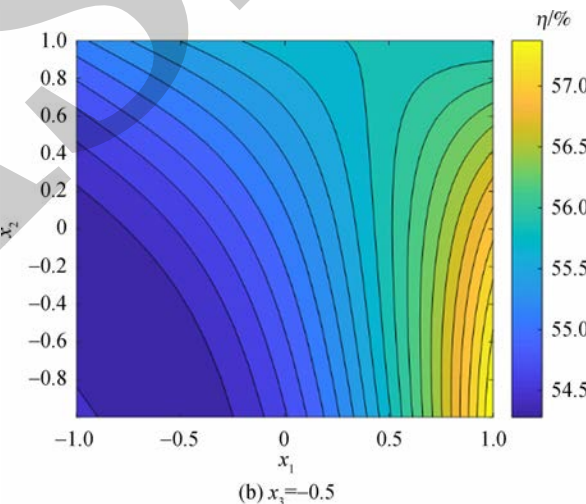
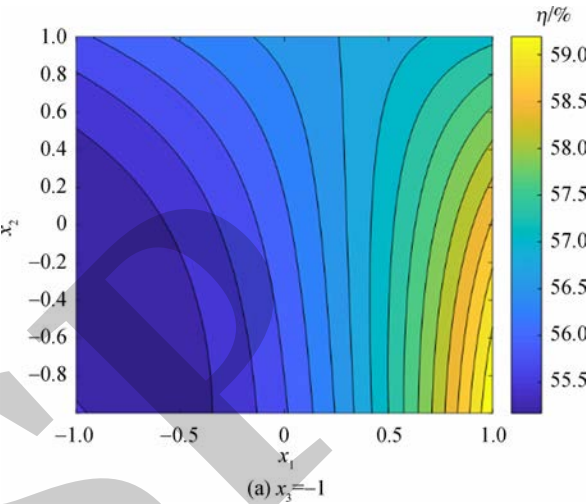
$$\mathbf{X}_j = \mathbf{X}_i + v\mathbf{R} \quad (8)$$

式中 v 为感知范围值, $\mathbf{R}$ 为介于 0 和 1 之间的随机数向量。 $\mathbf{X}_i$ 和 $\mathbf{X}_j$ 在本问题中为三维列向量,分别表示 x_1, x_2, x_3 三个优化设计参数。将 $\mathbf{X}_j$ 代

入代理模型中,如果计算的参数 η_j 大于 η_i ,则人工鱼向该方向前进一步

$$\mathbf{X}_i^{n+1} = \mathbf{X}_i^n + \frac{\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i^n}{\|\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i^n\|} s\mathbf{R} \quad (9)$$

式中 s 表示迭代步长。反之,再重新计算随机选择 $\mathbf{X}_j$,判断是否满足前进条件,反复尝试 t_{try} 次,



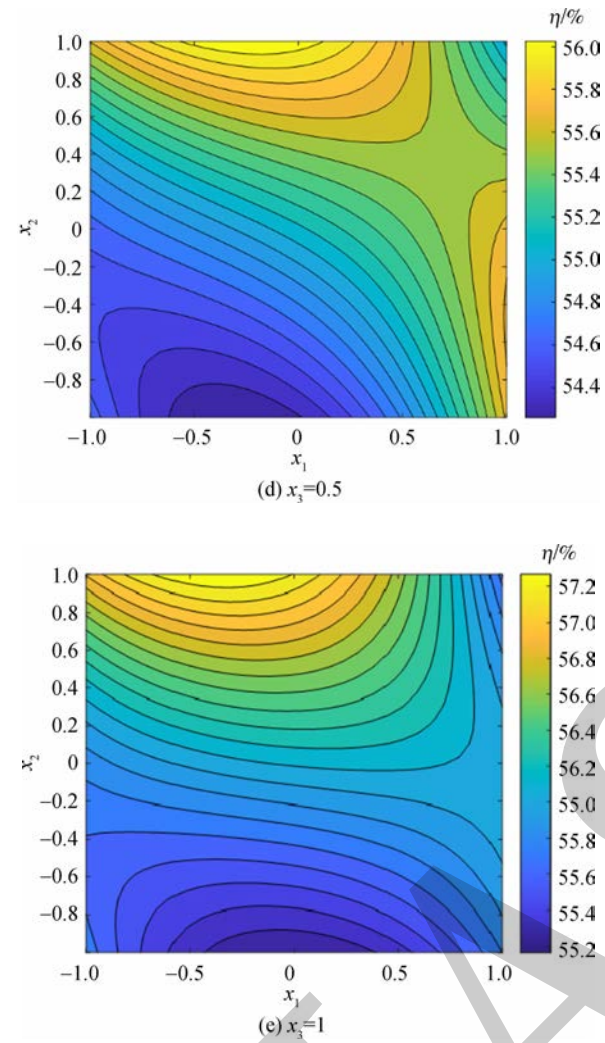


图 10 等 x_3 条件下超曲面模型效率结果
Fig. 10 Efficiency results of hypersurface model at different constant x_3

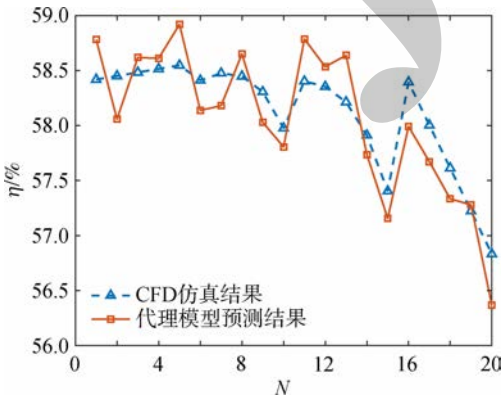


图 11 代理模型效率预测对比结果
Fig. 11 Comparison of efficiency prediction results for agent models

仍不满足条件则随机移动一步

$$\mathbf{X}_i^{n+1} = \mathbf{X}_i^n + v\mathbf{R} \quad (10)$$

聚群行为是指人工鱼为了保证群体的生存,会自然而然的聚集成群。设人工鱼探索当前邻域内的伙伴数量 n_i , 中心位置 $\mathbf{X}_c$ 及对应的目标函数值 η_c , 给定的拥挤系数 δ 。如果 $\eta_c/n_i > \delta\eta_i$, 表明伙伴中心有较多的食物且不太拥挤, 则朝伙伴的中心位置方向前进一步, 反之则执行觅食行为

$$\mathbf{X}_i^{n+1} = \mathbf{X}_i^n + \frac{\mathbf{X}_c - \mathbf{X}_i^n}{\|\mathbf{X}_c - \mathbf{X}_i^n\|} s\mathbf{R} \quad (11)$$

追尾行为是指人工鱼向邻近最高适应度的伙伴追逐的行为, 设人工鱼探索当前邻域内的伙伴中最高适应度 η_j 为最大值的伙伴 $\mathbf{X}_j$, 如果 $\eta_j/n_i > \delta\eta_i$, 表明 $\mathbf{X}_j$ 的状态具有较多的食物并且其周围不太拥挤, 则朝着 $\mathbf{X}_j$ 的方向前进一步, 否则执行觅食行为

$$\mathbf{X}_i^{n+1} = \mathbf{X}_i^n + \frac{\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i^n}{\|\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i^n\|} s\mathbf{R} \quad (12)$$

在人工鱼群算法中距离函数是数据挖掘衡量接近程度的关键度量, 目前主要有 Minkowski 距离函数、Camberra 距离函数、Mahalanobis 距离函数、Bhattacharyya 距离函数。在本研究中采用的距离函数为 Minkowski 距离函数

$$D = \left[\sum_{i=1}^3 |x_i - y_i|^p \right]^{1/p} \quad (13)$$

式中 D 表示距离度量, x_i, y_i 分别表示两个不同的优化设计变量状态点。 p 为 Minkowski 距离函数类型定义, 本研究选取 $p=2$ 。人工鱼群算法的基本流程如图 12 所示。

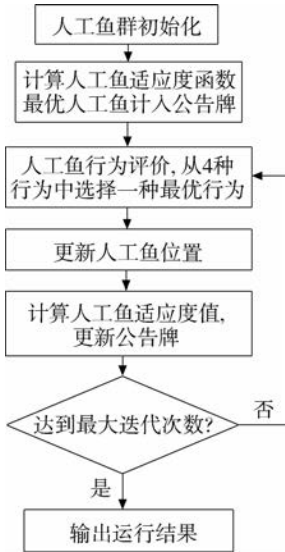


图 12 人工鱼群算法计算流程
Fig. 12 Computing process of artificial fish-swarm algorithm

考虑到寻优空间为边长为 2 的立方体,在本文研究过程中选择人工鱼总数为 100,感知范围值 v 为 0.3,步长 s 为 0.1,尝试次数 t_{try} 为 5,拥挤度因子为 0.3,迭代次数为 100。由此得到的初始人工鱼群分布如图 13 所示。

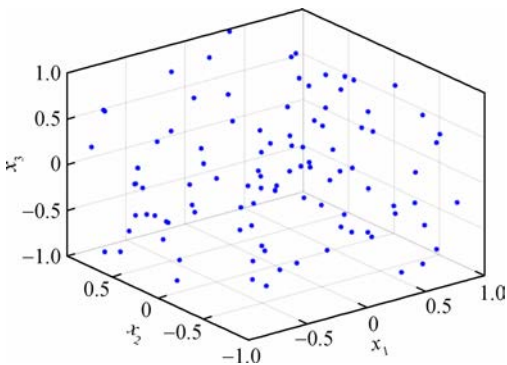


图 13 人工鱼初始种群分布

Fig. 13 Initial population distribution of artificial fish

从图 13 中可以看到,最初的人工鱼按照随机生成的函数均匀分布在整個寻优空间中,经过 100 步寻优后,人工鱼群的分布如图 14 所示。

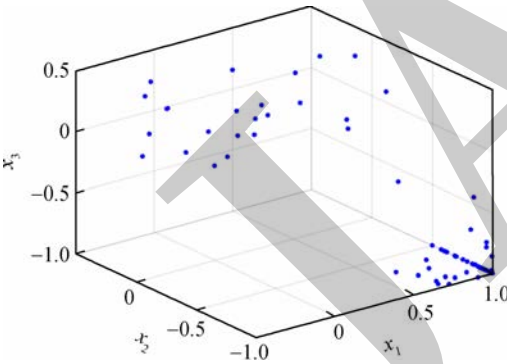


图 14 人工鱼最终种群分布

Fig. 14 Final population distribution of artificial fish

从结果分析来看,经过 100 步迭代寻优之后,人工鱼群的分布呈现出明显的方向性。虽然仍有少数人工鱼均匀分布在空间当中,但是在空间点 $(1,-1,-1)$ 处,出现明显的鱼群聚集现象。而从公告牌的记录来看,最优点即为寻优空间边界的鱼群聚集点。

如图 15 所示为人工鱼群算法的收敛曲线,从图中可以看出,当迭代步数为 20 以后,曲线基本收敛到 59.45% 的最高效率值处。

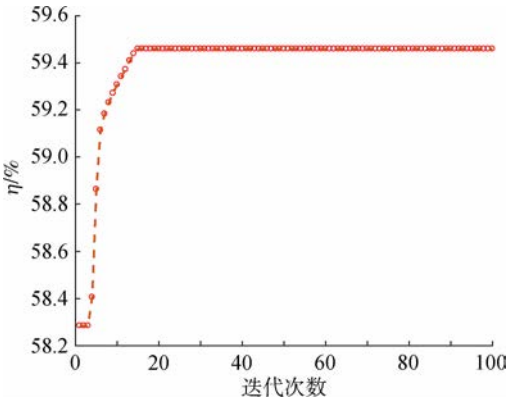
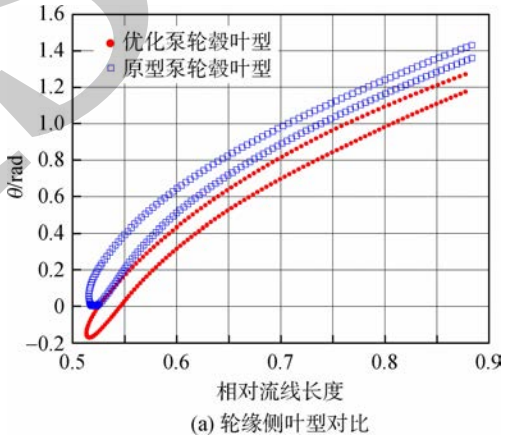


图 15 人工鱼群算法收敛曲线

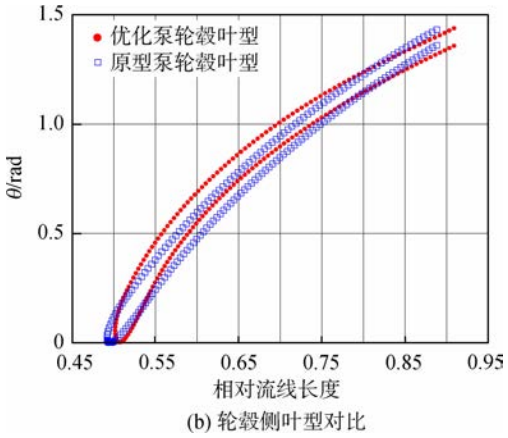
Fig. 15 Convergence curve of artificial fish swarm algorithm

3 优化设计结果分析

为了更加清楚地对比优化后叶型的变化,研究在轴面流线长度坐标下将原型泵与优化泵轮毂和轮毂侧型线进行共性映射投影,得到的结果如图 16 所示。



(a) 轮毂侧叶型对比



(b) 轮毂侧叶型对比

图 16 优化泵与原型泵型线对比

Fig. 16 Blade profile comparison between optimized impeller and prototype impeller

图 16 中横坐标表示叶轮型线轴面流线的相对长度,纵坐标表示型线空间点对应的圆周分布角度 θ ,单位为 rad。圆点表示优化后的叶型分布,方块表示原型叶轮的叶型分布。从图中可以看到,经过优化后,轮毂侧型线扭曲程度变大,能够更加符合流体的运动规律,尽可能减少分离流动。而在轮缘侧,叶型曲率变化不大,但是由于叶型积叠关系的变化,使优化泵的叶型在圆周角度上发生平移,这在一定程度上能够消除轴面流道由轴向转向径向的曲率变化而带来的脱流现象。对优化后的燃油离心泵在设计工况和非设计工况下进行整泵数值模拟仿真,得到的内流场压力及相对速度矢量分布如图 17 所示。

图 17 中分别给出了优化泵和原型泵在 3 种流量状态(18.34、20、25.51 m³/h)下,内流场的分

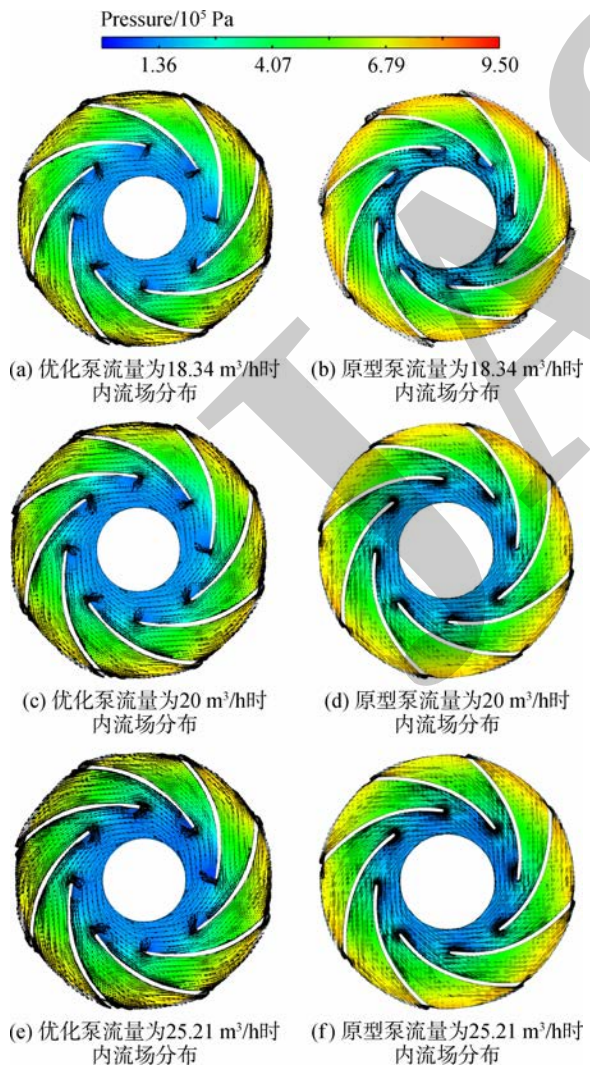
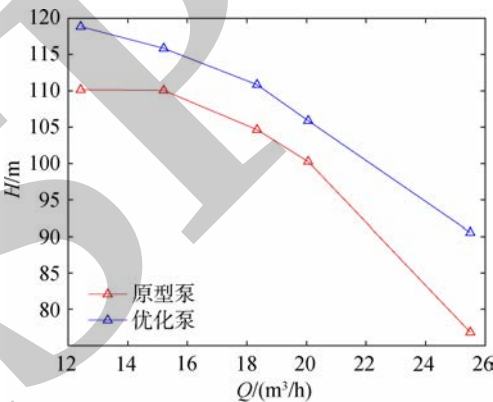


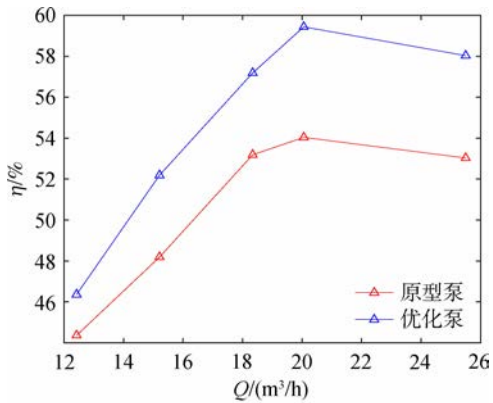
图 17 优化泵内流仿真结果

Fig. 17 Internal flow simulation results of optimized pump

布情况,其中 20 m³/h 为设计点流量条件。在设计流量条件下,离心叶轮流道内压力分布均匀,相对速度矢量呈现出明显的射流特征。而经过优化后的叶轮进口冲击明显减小,出口相对速度有所增加。随着流量的减小,流道出口叶片压力面的压力显著增高,表现出压力分布的不对称性原型泵叶轮进口吸力面侧出现低压区域,而经过优化后,叶轮进口的低压区消失,内流速度分布更加均匀。在大流量条件下,由于流体轴向速度的增大,优化泵和原型泵在叶片进口处速度矢量均出现混杂现象,因为存在高能流体团的碰撞作用,从而离心泵效率都有所降低。优化泵与原型泵的扬程和效率对比曲线如图 18 所示。



(a) 扬程对比曲线



(b) 效率对比曲线

图 18 外特性对比结果

Fig. 18 Comparison results of external characteristics

从外特性结果对比可以看出,优化泵的扬程曲线消除原有的驼峰现象,提高了小流量工况下的稳定性,此外,优化泵的效率无论是在设计工况还是在非设计工况下,都高于原型泵,这主要是因为经过型线优化后,叶轮内部的尾迹效应得到有效抑制,如图 19 所示为设计工况条件下叶轮流道

出口处相对速度变化关系。图中纵坐标为对应的流体相对速度 w 分布,单位为 m/s 。图中可以明显看出,原型泵出现明显的低能流体区域,而优化泵的相对速度变化则较均匀。此外,优化泵的出口相对速度高于原型泵,这也解释了优化后扬程提高的原因。

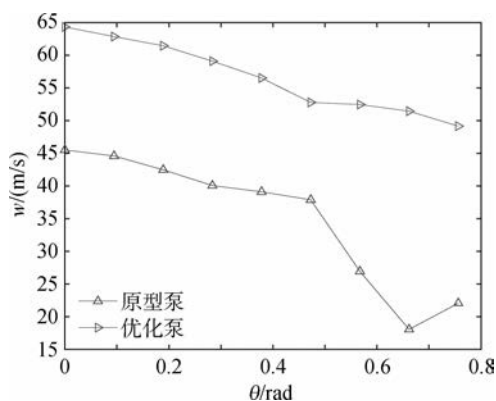


图 19 叶轮出口相对速度变化

Fig. 19 Relative velocity variation of impeller outlet

4 结 论

研究通过在 Matlab 平台下,使用软件 UG 和 Fluent 的联合批处理方法对 15 组设计结果进行内流场数值仿真,得到数据挖掘样本,对双调和方程求解建立偏微分超曲面性能代理模型,在此基础上采用混合人工鱼群算法对航空离心泵叶型进行优化改型设计,所得结论如下:

1) 航空燃油离心泵多为低比转速泵,径向尺寸大而叶片宽度小,采用 5 点 4 次 Bezier 曲线控制轮毂和轮缘型线的空间展开,能够获得较好的叶型设计结果;

2) 调和方程性能代理模型将曲面数据回归的造型问题转换为对双调和方程的边值求解,能够实现在较少样本计算的条件下,使模型预测值和试验值完全一致,能够有效提高优化效率;

3) 人工鱼群算法通过觅食、聚集、追尾和随机 4 种行为方式的组合策略,能够避免优化结果陷入局部最优解,鱼群算法的计算结果表明,当种群数量为 100 时,迭代计算 20 步后已经基本收敛到 59.45% 的最高效率点,型线优化的最优点出现在计算域边界 $(1, -1, -1)$ 处;

4) 经过混合优化后的航空离心泵设计点条件下叶轮出口尾迹效应被明显减弱,出口相对速度增加且呈现出均匀分布,整体水力效率提高 5.4%。

参考文献:

- [1] 蔡江畔,李春,李沈坚. 参数曲线在水泵叶轮设计中的应用[J]. 上海理工大学学报,2008,30(4):311-314.
CAI Jiangpan, LI Chun, LI Shenjian. Application of parameterized curves in pump impeller design[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2008, 30(4):311-314. (in Chinese)
- [2] 殷明霞,刘群辉,桂幸民. 利用 Bezier 样条曲线进行叶轮机可视化设计[J]. 航空动力学报,2006,21(1):156-160.
YIN Mingxia, LIU Qunhui, GUI Xingmin. Visualized design of turbomachinery using Bezier spline[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1):156-160. (in Chinese)
- [3] 赵伟国,盛建萍,杨军虎,等. 基于 CFD 的离心泵优化设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):125-131.
ZHAO Weiguo, SHENG Jianping, YANG Junhu, et al. Optimization design and experiment of centrifugal pump based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21):125-131. (in Chinese)
- [4] 张人会,杨军虎,李仁年. 离心叶轮的参数化设计[J]. 排灌机械,2009,27(5):310-313.
ZHANG Renhui, YANG Junhu, LI Rennian. Parametric design of centrifugal pump impellers[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2009, 27(5):310-313. (in Chinese)
- [5] 张人会,樊家成,杨军虎. 基于自由曲面变形方法的离心泵叶片载荷优化研究[J]. 农业机械学报,2015,46(10):38-43.
ZHANG Renhui, FAN Jiacheng, YANG Junhu. Optimization of centrifugal pump blade load based on free form deformation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):38-43. (in Chinese)
- [6] 张人会,郭苗,杨军虎. 基于自由曲面变形方法的离心泵叶片反问题方法研究[J]. 农业机械学报,2014,45(1):84-88.
ZHANG Renhui, GUO Miao, YANG Junhu. New inverse method of centrifugal pump blade based on free-form deformation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):84-88. (in Chinese)
- [7] 张宇,覃刚,张云清,等. 基于克里金元模型的离心泵水力性能多目标优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(4):54-57.
ZHANG Yu, QIN Gang, ZHANG Yunqing, et al. Kriging based multi-objective optimization for hydraulic performance of centrifugal pump[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2015, 43(4):54-57. (in Chinese)
- [8] SHI W D, LING Z, LU W G, et al. Numerical prediction and performance experiment in a deep-well centrifugal pump with different impeller outlet width[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(1):46-52.
- [9] KIM J H, LEE H C, KIM J H, et al. Improvement of hydrodynamic performance of a multiphase pump using design of experiment techniques[J]. Journal of Fluids Engi-

- neering, 2015, 137(8):081301. 1-081301. 15.
- [10] KIM J H, LEE H C, KIM J H, et al. Design techniques to improve the performance of a centrifugal pump using CFD [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(1):215-225.
- [11] KIM S, LEE K Y, KIM J H, et al. A numerical study on the improvement of suction performance and hydraulic efficiency for a mixed-flow pump impeller [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(1):1-17.
- [12] 李嘉, 李华聪, 王淑红, 等. 多级导流诱导轮与叶轮一体型线优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(5):953-960.
- LI Jia, LI Huacong, WANG Shuhong, et al. Profile optimization of multi-diversion combination inducer and impeller [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(5):953-960. (in Chinese)
- [13] 李嘉, 李华聪, 王淑红, 等. 诱导轮与叶轮组合式航空燃油离心泵轴向力间隙补偿 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(11):2765-2772.
- LI Jia, LI Huacong, WANG Shuhong, et al. Outlet clearance optimization on axial-force of inducer and impeller combination aero fuel centrifugal pump [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(11):2765-2772. (in Chinese)
- [14] 李嘉, 李华聪, 符江锋, 等. 带引射器的多级导流叶轮航空燃油离心泵数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2015, 30(8):1909-1917.
- LI Jia, LI Huacong, FU Jiangfeng, et al. Numerical simulation of multi-diversion aero fuel centrifugal pump with ejector [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(8):1909-1917. (in Chinese)
- [15] XIAO Y, GUO S U. Structural reliability analysis by gaussian process response surface method [J]. Yangtze River, 2016, 56(4):549-567.
- [16] GOSWAMI S, GHOSH S, CHAKRABORTY S. Reliability analysis of structures by iterative improved response surface method [J]. Structural Safety, 2016, 60:56-66.
- [17] 吴科亮, 丁春林. 基于正交试验法的边坡稳定因素敏感性分析 [J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(2):114-120.
- WU Keliang, DING Chunlin. Sensitivity analysis on slope stability factor based on orthogonal test [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(2):114-120. (in Chinese)
- [18] 彭磊, 刘莉, 龙腾. 基于动态径向基函数代理模型的优化策略 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(7):164-170.
- PENG Lei, LIU Li, LONG Teng. Optimization strategy using dynamic radial basis function metamodel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7):164-170. (in Chinese)
- [19] 高月华, 王希诚. 基于 Kriging 代理模型的稳健优化设计 [J]. 化工学报, 2010, 61(3):676-681.
- GAO Yuehua, WANG Xicheng. Robust optimization based on Kriging surrogate model [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2010, 61(3):676-681. (in Chinese)
- [20] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展 [J]. 航空学报, 2016, 37(11):3197-3225.
- HAN Zhonghua. Kriging surrogate model and its application to design optimization: a review of recent progress [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11):3197-3225. (in Chinese)
- [21] BEZERRA M A, SANTELLI R E, OLIVEIRA E P, et al. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry [J]. Talanta, 2008, 76(5):965-977.
- [22] BASHIR M J K, AZIZ H A, YUSOFF M S, et al. Application of response surface methodology (RSM) for optimization of ammoniacal nitrogen removal from semi-aerobic landfill leachate using ion exchange resin [J]. Desalination, 2010, 254(1):154-161.
- [23] 王清, 招启军. 基于遗传算法的旋翼翼型综合气动优化设计 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(6):1486-1495.
- WANG Qing, ZHAO Qijun. Synthetical optimization design of rotor airfoil by genetic algorithm [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(6):1486-1495. (in Chinese)
- [24] XIN Zhe, ZOU Zixiang. A method for flow pattern design of axial flow turbine stage [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 16(1):61-70.
- [25] WANG L G, HONG Y, ZHAO F Q, et al. Improved artificial fish swarm algorithm [J]. Computer Engineering, 2008, 34(19):281-285.
- [26] CHEN G Z, WANG J Q, CHUAN L I, et al. An improved artificial fish swarm algorithm and its applications [J]. Systems Engineering, 2009, 27(12):105-110.
- [27] ZHANG B, BAI Z Q, LI J H, et al. Artificial fish swarm algorithm based pilot allocation in massive mimo system [R]. Qingdao, Shandong; International Symposium on Communications and Information Technologies, 2016.

(编辑:王碧珺)