

采用变弦长叶片设计的多翼离心风机叶轮改进与优化

雷健, 秦国良, 崔琴, 贾诚

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对多翼离心风机蜗壳宽度大、叶片短引起的轴向进气流量分布不均匀和叶道回流现象, 提出变弦长叶片的设计方法, 以多翼离心风机叶轮为研究对象, 开展了叶轮前缘的参数化优化。使用有5个控制点的贝塞尔曲线构建叶轮前缘, 建立了支持向量回归代理模型, 设置了效率与静压的优化目标, 通过遗传优化算法对选取的控制点参数进行了优化。设计结果表明: 变弦长叶片设计提升了多翼离心风机的通流能力, 体积流量最大提升至 $35.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 。流场分析发现, 变弦长叶片设计的叶轮沿叶高方向的流量分布更均匀, 特别是在靠近轮盖侧速度小于0的区域, 流量几乎消除, 轮盘截面的通流占比提升29.8%, 叶道回流现象得到明显改善, 变弦长叶片叶轮的做功能力更强。优化后, 变弦长叶片多翼离心风机的气动性能得到显著提高, 大流量方向的工况范围得以拓宽, 小流量工况下的效率提升了4.9%, 风机的静压能力最大提高了91.1 Pa。研究为多翼离心风机内部流动控制、多翼离心风机变弦长叶片优化设计提供了理论基础和工程实践。

关键词: 变弦长叶片; 多翼离心风机; 支持向量回归; 数值分析

中图分类号: TH432; TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202308002 **文章编号:** 0253-987X(2023)08-0011-11

Improvement and Optimization of Multi-Blade Centrifugal Fan Impeller Based on Variable Chord Length Blade Design

LEI Jian, QIN Guoliang, CUI Qin, JIA Cheng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In view of the uneven distribution of axial inlet flow and the backflow of the blade passage caused by the large volute width and short blades of the multi-blade centrifugal fan, this paper proposes a design method of variable chord length blades. With the multi-blade centrifugal fan impeller as the research object, the parametric optimization of the impeller leading edge is carried out. The leading edge is constructed using the Bezier curve with five control points, the support vector regression proxy model is established, the optimization objectives for efficiency and static pressure are set, and the parameters of the selected control points are optimized by genetic optimization algorithm. The variable chord long blade design improves the flow capacity of the multi-blade centrifugal fan, resulting in a maximum volume flow increase to $35.7 \text{ m}^3/\text{h}$. The analysis of the flow field reveals that the impeller designed with variable chord length blades has a more uniform flow distribution along the blade height direction, especially in the area near the

shroud side where the velocity is less than 0, and the flow ratio of the disk section increases by 29.8%. The channel backflow phenomenon is significantly improved, and the working ability of the impeller with variable chord length blades is relatively stronger. Based on the variable chord length blade design, the aerodynamic performance of the multi-blade centrifugal fan is greatly improved, the operating range in the large flow direction is widened, the efficiency increases by 4.9% under the small flow condition, and the static pressure capacity of the fan increases by up to 91.1 Pa. This research provides the theoretical basis and engineering practice value for the internal flow control and the variable chord length blade design of multi-blade centrifugal fans.

Keywords: variable chord length blade; multi-blade centrifugal fan; support vector regression; numerical analysis

现代社会中,绿色、节能、低噪等观念已深入人心,人们更加追求高质量的生活,对建筑设备和生活中使用的电器具有更高的要求。空调、吸油烟机电器作为现代人们生活中必不可少的设备,对其能效、噪声的要求也日趋严格。多翼离心风机作为这类设备中的关键做功部件,对于整机性能的提升和噪声源的控制至关重要。

国内外学者针对多翼离心风机的相关研究已发表了不少成果。Velarde-Suárez 等^[1]通过试验方法研究了前向多翼离心风机的气动噪声来源。Velarde-Suárez 等^[2]通过非定常计算探究了前向式多翼离心风机的内部流动特征。Younsi 等^[3]和 Lin 等^[4]通过试验和数值方法研究了多翼风机的非定常流动。Sasaki 等^[5]探讨了涡流对前向多翼离心风机内部产生的宽带噪声的影响。为了提高多翼离心风机的能效,Benchikh Le Hocine 等^[6]使用代理模型和开源数据库自动优化多翼离心风机的部分结构参数,最终提高了多翼离心风机的性能。刘文武等^[7]针对高压比小流量多翼离心风机进口集流器的偏心安装进行了数值研究,通过改变集流器的位置以匹配多翼离心风机内部的非对称性流动。杨伟刚等^[8]通过将集流器偏心安装改善了多翼风机噪声。刘小民团队^[9]对椭圆型进口集流器对多翼离心风机气动性能的影响进行了数值模拟,并给出了椭圆长轴和短轴的合适的布置区间。蔡涛等^[10]对 XBF 多翼离心风机结构进行了试验研究与结构改进。吴灵辉等^[11]结合多目标优化方法对叶轮进行了优化改进。Ballesteros-Tajadura 等^[12]对多翼离心风机蜗舌处的压力波动进行了数值计算,认为蜗舌的压力波动是引起多翼离心风机气动噪声的重要因素,并通过改进蜗舌构型达到了提升多翼离心风机性能的目的。Xu 等^[13]采用不同湍流模型计算了蜗舌形状对性能的影响。方挺等^[14]针对尺寸限制下的多翼离

心风机蜗壳进行了重新设计,研究了蜗壳切割部位对多翼离心风机的影响,并给出了蜗壳切割建议。王珂等^[15]基于分组模型对多翼离心风机不同部件进行了分组优化,达到了良好的效果,并通过仿生蜗舌的设计提高了多翼离心风机气动性能。

学者们针对多翼离心风机的内部流动也开展了许多研究。Maeda 等^[16]使用粒子图像测速方法 (particle image velocimetry, PIV) 对多翼风机内三维流场进行了详细研究。蒋博彦等^[17]通过 PIV 方法对小流量工况下的风机内部流动特性进行了研究。李亮等^[18]使用非线性湍流模型对多翼离心风机内部流动进行了数值模拟。顾昭阳等^[19]研究了多翼风机内部涡的产生,并提出了整流破涡方法。Heo 等^[20]考虑风机气动噪声和性能,优化设计了多翼离心风机。多翼离心风机部件中,蜗舌作为多翼离心风机内部流动最复杂的地点,Cau 等^[21]通过试验研究了风机内部二次流与主流的相互作用,发现轮毂区域的回流以及涡流结构和尾流的位置随流量变化的变化。宫武旗等^[22]使用 PIV 方法对蜗舌处的流场进行了详细测量。研究表明,蜗舌与叶轮等的结构匹配对多翼离心风机的性能有重大影响。Neise 等^[23]总结了离心风机降噪方法。刘小民等^[24]研究了不同凹形蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声的影响。刘小民等^[25]使用仿生蜗舌设计方法提高了多翼风机性能并降低了气动噪声。熊仲营等^[26]研究了不同蜗舌构型对多翼离心风机气动性能的影响。

由于多翼离心叶轮的叶片较短、数量较多,使得气流在蜗舌处的流动形成了流向蜗壳出口的主要气流、蜗舌回流与小部分的叶道回流,后两者造成了多翼离心风机的气动效率较低。其次,为了增大多翼离心风机的通流流量,常常增加多翼离心风机的叶轮宽度。较宽的叶轮会使进口气流沿叶轮的轴向存在较大的不均匀性,而蜗舌一般设计为等直蜗舌。

种种因素叠加,加剧了蜗舌处的复杂流动。

本文在轮盖和轮盘之间以不同弦长堆叠进行叶片设计(如图 1 所示),以满足不同叶高处的叶轮通流流量要求,达到降低蜗舌回流与叶道回流的目的。建立贝塞尔曲线以拟合叶片进口前缘曲线,结合贝塞尔曲线控制点的待优化变量构建支持向量回归代理模型,采用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II,NSGA-II)对变弦长叶片进行参数优化,以达到最大的全压和效率提升。通过对比分析变弦长叶片设计和原始叶轮的内部流场,验证了变弦长叶片设计对多翼离心风机性能提升的有效性。

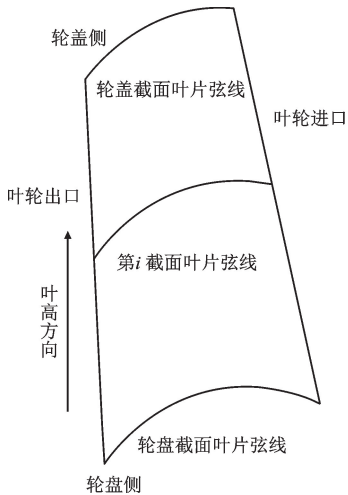


图 1 变弦长叶片示意
Fig. 1 Diagram of variable chord length blades

1 变弦长叶片设计

1.1 原始多翼离心风机

本文所研究的基础多翼离心风机结构如图 2 所示。该多翼离心风机为单吸气式风机,叶轮采用单圆弧叶片,风机的设计转速为 1 500 r/min,多翼离心风机的结构参数详见表 1。

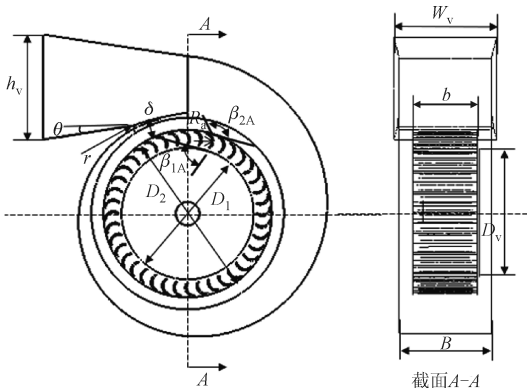


图 2 多翼离心风机结构示意图
Fig. 2 Diagram of multi-blade centrifugal fan structure

表 1 多翼离心风机结构参数

Table 1 The structural parameters of the multi-blade centrifugal fan	
参数	数值
叶片进口直径 D_1 /mm	109.8
叶片出口直径 D_2 /mm	131.0
叶片数 Z	40
叶轮宽度 b /mm	52.4
蜗壳宽度 B /mm	75
叶片进口安装角 β_{1A} /($^{\circ}$)	50.8
叶片出口安装角 β_{2A} /($^{\circ}$)	163.9
叶片厚度 t /mm	1
蜗舌半径 r /mm	13.3
扩散角 θ /($^{\circ}$)	6.5
对数螺旋线终止长度 L /mm	12.4

在针对原型风机的数值模拟结果中发现,沿叶高的方向存在流动不均匀的情况,使得靠近轮盖侧的叶轮出口存在负径向速度区域面积较大。因此,提出采用变弦长叶片的设计来匹配这种不均匀的流量分布。

1.2 变弦长叶片设计

采用 5 个控制点的贝塞尔曲线对叶轮叶片前缘进行设计定型,控制点如图 3 所示。其中, P_0 点按照叶片进口半径固定,其他控制点到转轴距离的变化范围如表 2 所示。

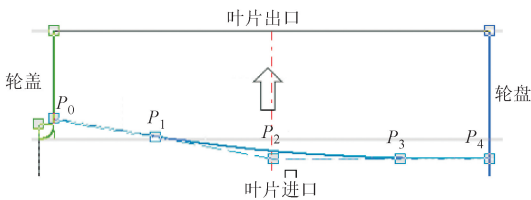


图 3 叶片进口前缘控制点分布
Fig. 3 Control point of the blade inlet leading edge

通过给定控制点顶点,贝塞尔曲线可通过伯恩斯坦多项式表示

$$\begin{cases} P(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_i^n(t) \\ B_i^n(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i} \\ C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!} \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为控制点数量; t 在 0 ~ 1 之间取值; C 为组合数。

表 2 叶片前缘控制点到转轴距离的变化范围
Table 2 Distance variation of the control points of the blade leading edge to rotation shaft

控制点	控制点到转轴距离的变化范围/mm
P_0	54.89
P_1	45.00~54.89
P_2	45.00~54.89
P_3	45.00~54.89
P_4	45.00~54.89

为了更快地分析变弦长叶片对多翼离心风机气动性能的影响,得到最优的变弦长叶片设计参数,使用代理模型结合 NAGA-II 优化算法对叶轮前缘贝塞尔曲线的 5 个控制点进行参数寻优,探究变弦长叶片对内部流动的控制机理。

1.3 数值模型与验证

为了对比分析不同弦长叶片对多翼离心风机气动性能的影响,本文采用 ANSYS-FLUENT 对设计方案模型进行数值模拟,计算模型如图 4 所示,包括叶轮、蜗壳以及进出口延伸段。不同弦长叶片设计仅改变叶轮部件,因此对不同设计方案的叶轮部件做相应改变,表 3 给出了部分设计方案的叶片前缘控制点参数。

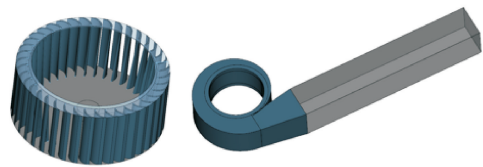


图 4 风机计算域模型
Fig. 4 Computational domain model of the fan

表 3 前缘控制点参数取值
Table 3 Parameter values of blade leading edge control points

设计方案	P_1 到 转轴的 距离/mm	P_2 到 转轴的 距离/mm	P_3 到 转轴的 距离/mm	P_4 到 转轴的 距离/mm
1	52.29	51.30	49.08	46.61
2	53.53	52.29	50.56	50.07
3	50.81	49.33	48.83	45.37
4	52.05	52.05	47.60	45.12
5	53.28	50.81	49.82	49.33
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

求解的流动控制方程为 Navier-Stokes 方程。湍流模型选用了 realizable $k-\epsilon$ 模型,相关的研究认为该模型的计算结果更接近实际结果。近壁方程采用标准的近壁面控制方程,压力速度耦合方程的求解采用 SIMPLEC 算法,对流项的离散格式采用二阶迎风格式,压力插值修正使用 PRESTO! 算法,扩散项的离散格式采用二阶迎风格式。进出口边界均采用压力边界条件。

针对多翼离心风机模型进行了网格无关性验证和数值模拟结果验证,结果如图 5 所示。计算模型最终选取的网格数为 500 万。为了验证数值模拟的可靠性,对比了数值模拟结果与试验测试值,如图 5(b)所示。可以看出,数值模拟结果相较于试验测试值普遍偏高,出口总压和效率最大误差分别为 2.76% 和 3.15%,在容许的误差范围内。

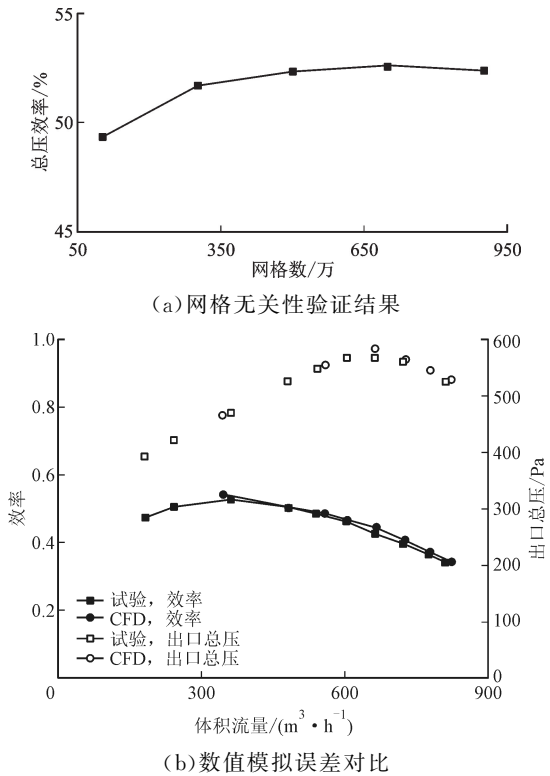


图 5 风机数值模型结果验证
Fig. 5 Validation of numerical model results for the fan

2 优化设计方法

2.1 代理模型构建

随着优化变量数目的增加,为了更高效地提升多翼离心风机的性能,探究叶轮结构参数对风机性能的影响,代理模型与优化算法被更多地引入到流体机械的优化设计过程中。代理模型具有替代部分数值计算的优点,通过数值模拟与代理模型的结合,

可以在已知的误差区间内对多翼离心风机的气动性能进行更好的预测。

支持向量机由 Vapnik 等^[27]提出,是一种基于统计学习的智能算法。支持向量回归机则用来处理回归问题,其基本思想是通过在特征空间构建超平面划分数据,使得各个点到该超平面的距离最短。

图 6 展示了支持向量回归机在一维线性回归问题的示例,寻找一条回归直线,使得落在 2Ψ (Ψ 为允许的最大回归误差)范围外的点到边界的距离之和最小。

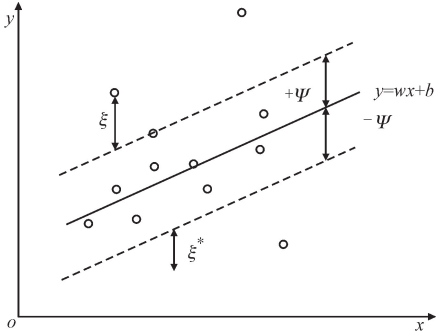


图 6 一维支持向量回归机

Fig. 6 One-dimensional support vector regression

标准支持向量回归算法的基本表达式为

$$\min \frac{1}{2} \| \mathbf{W} \|^2 + C \sum_{i=1}^P (\xi_i + \xi_i^*) \tag{2}$$

$$\text{s. t. } ((\mathbf{W} \cdot \mathbf{X}_i) + b) - y_i \leq \psi + \xi_i, \tag{3}$$
$$i = 1, 2, \dots, P$$

$$y_i - ((\mathbf{W} \cdot \mathbf{X}_i) + b) \leq \psi + \xi_i^*, i = 1, 2, \dots, P \tag{4}$$

$$\xi^{(*)} = (\xi_1^*, \xi_1^*, \dots, \xi_i^*, \xi_i^*) \geq 0 \tag{5}$$

式中: P 为样本总数; $\mathbf{X}_i$ 和 y_i 对应输入和输出; $\mathbf{W}$ 和 b 为待求解参数; $\xi^{(*)}$ 和 C 为松弛因子和惩罚函数。通过对偶理论将上述问题转化为对偶问题进行求解。引入核函数将非线性问题映射到线性空间,常用的高斯核函数为

$$K(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{6}$$

采用最小序列最优化方法求解该对偶问题,最终求得支持向量回归的最优超平面方程

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_i^*) K(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j) + \bar{b} \tag{7}$$

$$\bar{b} = y_j - \sum_{i=1}^P (\bar{\alpha}_i^* - \bar{\alpha}_i) K(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j) + \psi \tag{8}$$

式中 α_i^* 为待求拉格朗日乘子向量分量。

图 7 展示了支持向量回归模型流程,样本生成过程采用拉丁超立方采样,该方法具有良好的样本

空间代表性。随机生成了 40 组样本,其中 25 组作为训练样本,剩余 15 组作为验证样本。当模型精度不达标时,通过增加额外样本的方法提升模型精度。

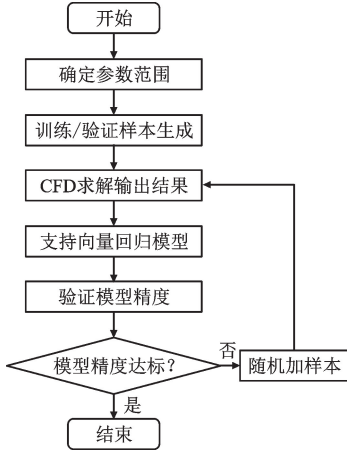
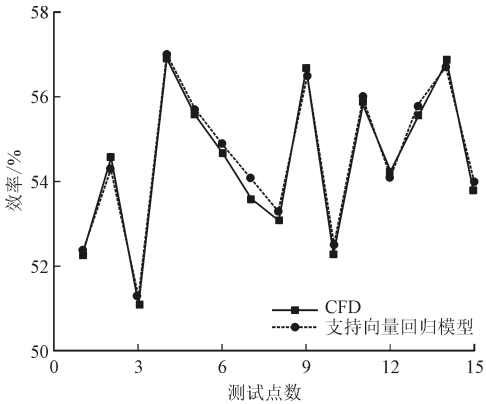


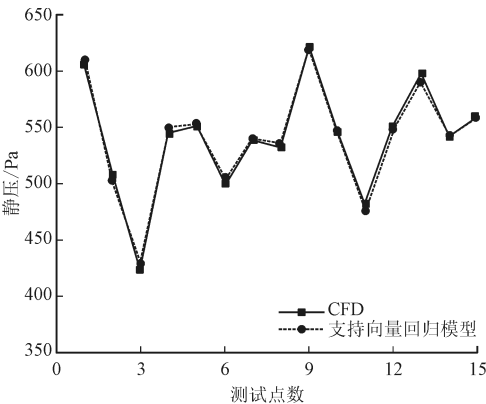
图 7 支持向量回归模型流程

Fig. 7 The workflow of support vector regression model

图 8 展示了支持向量回归模型的预测精度。可以看出,支持向量回归模型与 CFD 的效率的最大误差为 2.47%,可以用于预测多翼离心风机气动性能。



(a)效率



(b)静压

图 8 支持向量回归模型预测准确度验证

Fig. 8 Validation of prediction accuracy for support vector regression models

2.2 多目标优化方法

遗传算法的使用已日臻成熟,具体流程包括种群生成、选择、交叉、变异、新种群生成等,通过适应度淘汰部分个体,以此反复迭代,直至寻找到最优解。图 9 展示了结合遗传算法的变弦长叶片设计优化流程,具体如下:

- (1)将叶片前缘的 5 个控制点作为控制叶轮前缘的参数,其参数变化范围如表 2 所示;
- (2)通过拉丁超立方取样方法随机抽取了 40 组样本,其中 25 组作为训练样本,另外 15 组作为验证样本;
- (3)通过数值模拟方法计算各个样本对应的效率和静压,并导入支持向量回归模型,完成代理模型的构建;
- (4)应用遗传算法 NSGA-II 作为多目标优化算法,设置效率与静压为优化目标;
- (5)针对优化得到的模型进行数值模拟验证,完成变弦长叶片的优化设计。

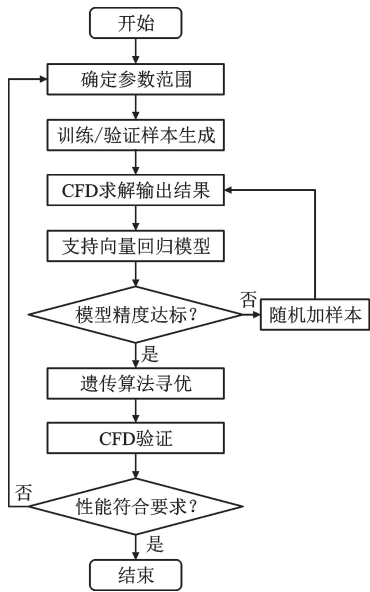


图 9 多目标遗传优化算法流程

Fig. 9 Process of multi-objective genetic optimization algorithm

多目标优化由于待优化的目标数目大于 1,实际使用中往往不能同时使各个目标均达到最优,因此通过寻找 Pareto 前沿并从中挑选适应实际要求的最优解。

2.3 多目标优化命题

本文主要研究变弦长叶片对多翼离心风机气动性能的影响,因此以提升风机运行效率与静压能力

为主要目的,控制参数的变化范围如表 2 所示,设定的优化命题为

$$\text{目标 1: } \max f_1 = \eta \tag{9}$$

$$\text{目标 2: } \max f_2 = p_s \tag{10}$$

3 结果分析与讨论

3.1 气动性能分析

优化后的风机效率最大值与静压最大值不能同时达到,综合考虑效率与静压提升,选取Pareto前沿解中的一个(图 10 中红色点)进行分析。优化后的叶片进口前缘曲线控制点位置参数如表 4 所示,优化前后叶片对比如图 10 所示。优化后的叶片在轮盘侧的弦长更长,轮盘与轮盖之间的叶轮进口前缘曲线整体呈外凸形式,不同叶高截面的叶片弦长持续增大。

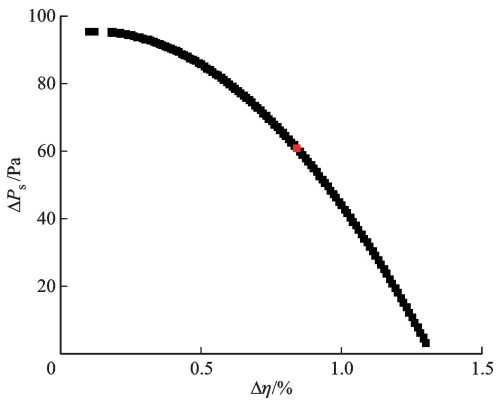


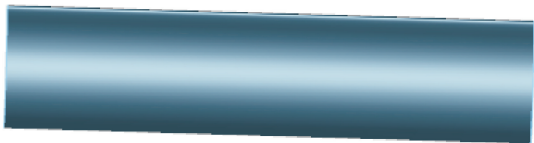
图 10 多目标优化 Pareto 前沿解

Fig. 10 Pareto frontier solutions of multi-objective optimization

表 4 优化后的叶片前缘控制点位置参数

Table 4 Parameter values of the control point positions on the blade leading edge after optimization

控制点	控制点到转轴的距离/mm
P_0	54.89
P_1	54.01
P_2	50.80
P_3	50.21
P_4	50.00



(a)原型叶片



(b) 优化后变弦长叶片

图 11 优化前后叶片型线对比

Fig. 11 Comparison of blade profile before and after optimization

优化后的多翼离心风机气动性能有较大的提升,如图 12 所示。大流量方向的工况范围更宽,且大流量下的风机静压更高,静压最大提升值相较原始多翼离心风机提高了 91.1 Pa。整个工况范围内,优化后的多翼离心风机效率均有明显提升,特别是在小流量工况处,效率提升显著,提升幅度为 4.9 %。

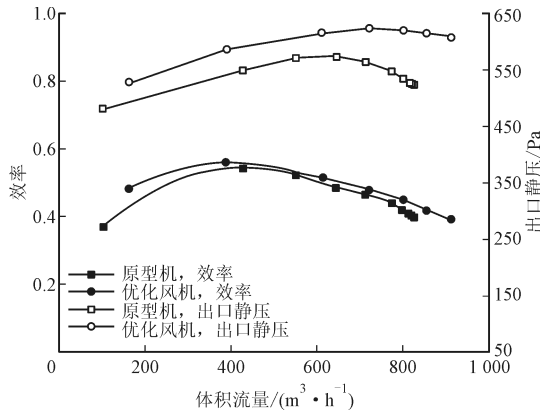
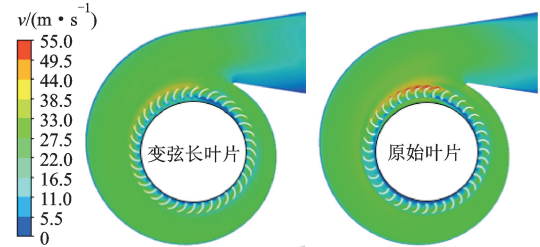


图 12 原型机与优化风机性能曲线

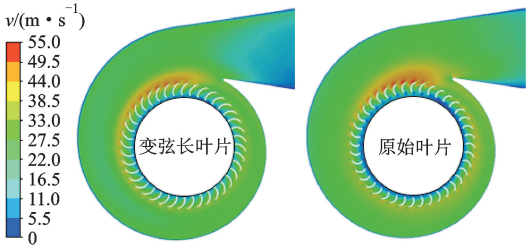
Fig. 12 Performance curve of prototype and optimized fan

3.2 流场分析

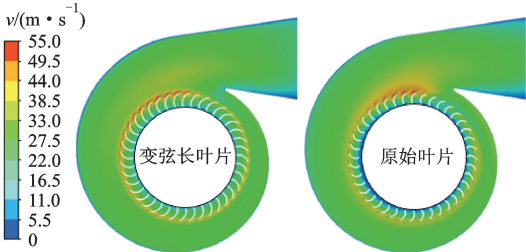
选取体积流量为 400 m³/h 时的工况分析变弦长叶片设计的优化效果。通过不同截面的速度云图分析变弦长叶片对多翼离心风机气动性能的影响,如图 13 所示。可以看出,在不同叶高截面上,变弦长叶片的叶轮出口速度相较于原始叶片更均匀。原始叶片在不同叶高处的速度梯度变化较大,0.5 叶



(a) 0.2 叶高



(b) 0.5 叶高



(c) 0.8 叶高

图 13 风机内部速度云图

Fig. 13 The velocity map inside the fan

高处的通流流量大于 0.2 和 0.8 叶高处的;变弦长叶片在不同叶高处的速度梯度变化更缓和,更好地匹配了不同叶高处的通流需求。

图 14 展示了变弦长叶片与原始叶片叶轮出口速度展开图,图像上方为轮盘侧。优化后的变弦长叶片由于在靠近轮盘侧增大了叶片弦长,因此轮盘侧的叶轮出口速度相较于原始叶片叶轮有所增大。与此同时,靠近轮盖侧的叶轮出口速度也随之增大,低速区域减少,轮盖侧的流动得到改善,与蜗舌的相互作用减弱。

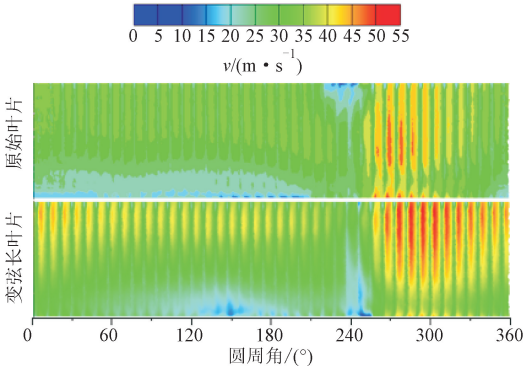


图 14 叶轮出口速度分布

Fig. 14 Velocity distribution diagram at the impeller outlet

图 15 展示了叶轮出口径向速度云图,蓝色区域为速度为负的区域。可以发现,变弦长叶片的负径向速度区域显著减少,叶轮流道的通流能力得到了

改善,特别是在靠近轮盖一侧。负速度区域的减少表示叶轮的叶道回流现象得到了改善。

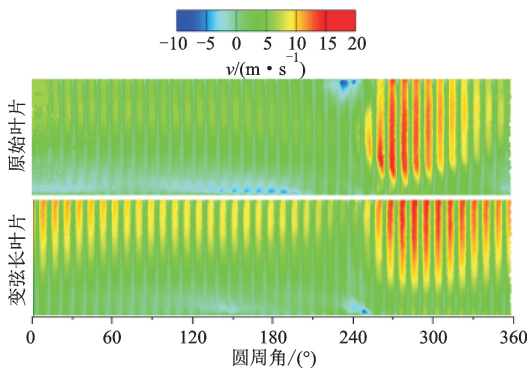


图 15 叶轮出口径向速度分布

Fig. 15 Impeller outlet radial velocity distribution chart

通过不同叶高截面的速度矢量图观察变弦长叶片和原始叶片与蜗舌的相互作用,如图 16 所示。

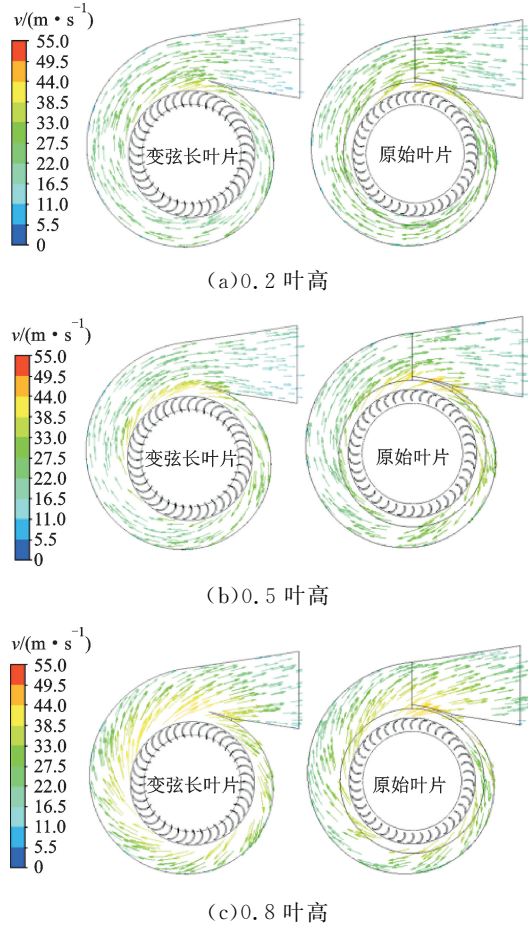


图 16 风机内部速度矢量分布

Fig. 16 Internal velocity vector distribution of the fan

从图 16 可以看出,变弦长叶片更好地适应了不同截面的通流流量需求,对蜗舌的冲击相较于原始

叶片范围更小。特别在 0.8 叶高处,原始叶片由于在蜗舌处的速度更快,对蜗舌的冲击影响了通流能力,结合图 15 可知,该叶高处的叶轮出口存在回流现象。变弦长叶片则由于通流流量被分配给叶片弦长更长的截面,因此在 0.8 叶高的叶轮出口速度更小,对蜗舌的冲击也更小,改善了叶轮出口的回流。

图 17 展示了不同叶高的多翼离心风机叶轮叶道的流线图。可以看出,0.2 叶高处由于变弦长叶片的叶道更长,叶轮的出口速度更大,叶道内的旋涡明显少于原始叶轮。在 0.5 叶高和 0.8 叶高截面,变弦长叶片和原始叶片叶道内均有旋涡,但原始叶片的低速旋涡区会影响靠近蜗舌区域的整个叶道,导致某些叶道出现回流现象。

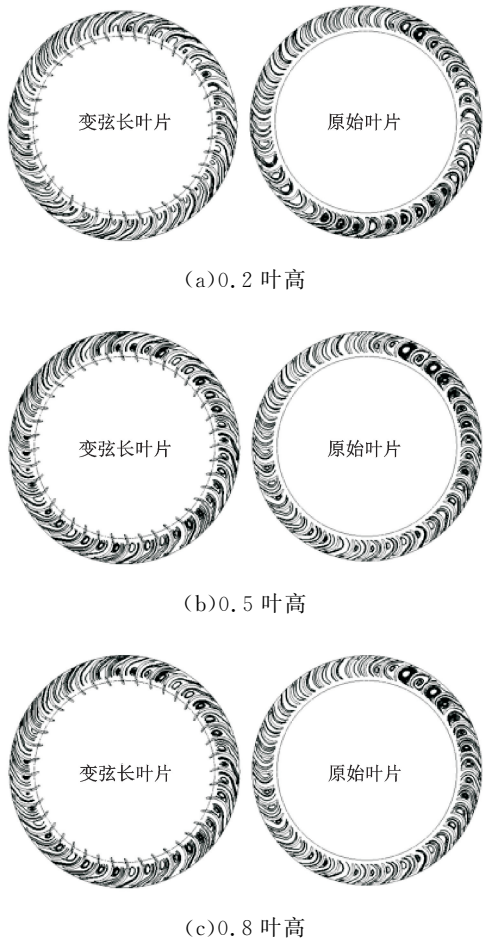


图 17 叶轮流道内速度流线图

Fig. 17 Velocity streamline diagram inside the impeller flow channel

图 18 展示了不同截面的总压分布情况。可以看出,变弦长叶片相较于原始叶片的叶轮做功能力提高,叶轮进出口的总压升有所增加,变弦长叶片改善了叶轮流道的流动。

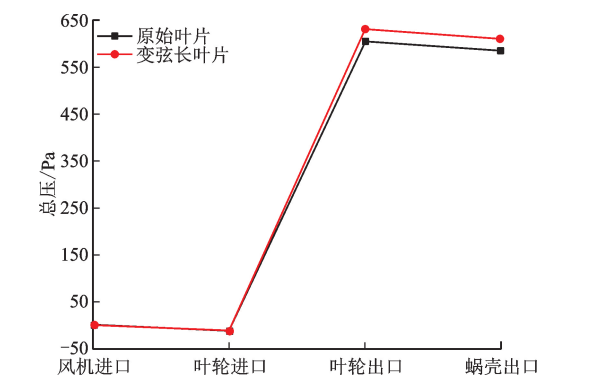


图 18 风机内部不同截面总压分布

Fig. 18 Distribution of total pressure at different cross sections inside the fan

湍流动能可以用来表征湍流强度和能量耗散速度,图 19 给出了 0.5 叶高和 0.2 叶高处的湍流动能。在 0.2 叶高处,变弦长叶片随着流动的改善,靠近蜗舌叶道的湍流动能远小于原始叶片相应叶道的。变弦长叶片由于不同叶高的叶片弦长不同,位于轮盘侧的弦长更长,相应的通流能力更强,改善了叶轮出口流动,减小了与蜗舌的相互作用,使得该区域的能量损失更小。

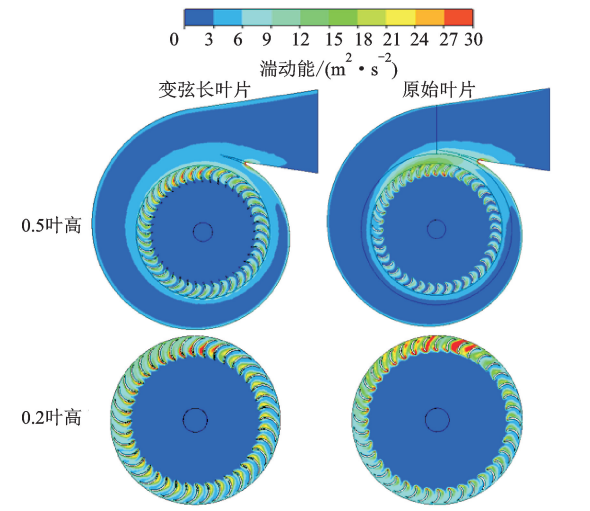


图 19 风机内部湍动能分布

Fig. 19 Turbulent kinetic energy distribution inside the fan

通过 Q 准则比较原始叶片和变弦长叶片不同截面的涡量分布,如图 20 所示。可以看出,原始叶片在 0.2 叶高和 0.5 叶高截面的涡量集中在叶轮进口处,且在靠近蜗舌处的相关叶道内几乎布满整个区域。变弦长叶片的设计改善了叶轮的流动分离情况,涡量集中在叶轮进口。随着通流能力的改善,变弦长叶片靠近蜗舌的叶道与蜗舌的相互作用减弱,

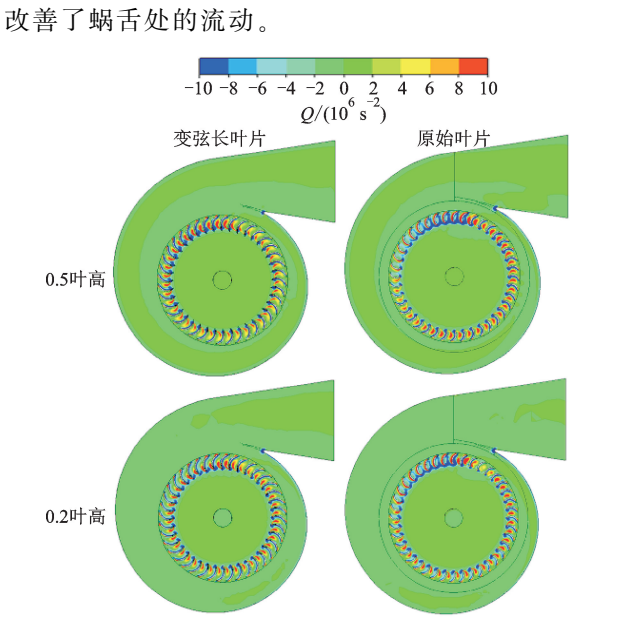


图 20 叶轮内部涡量云图

Fig. 20 Vortex cloud diagram in the impeller

4 结 论

本文针对多翼离心风机叶轮进行设计优化,提出了变弦长叶片以满足不同叶高的风机通流流量要求,并借助理模型和遗传算法对叶片前缘线进行优化,得到的主要结论如下。

- (1) 基于原型多翼离心风机叶轮不同叶高处的通流流量分布不均匀,提出变弦长叶片的设计方法,使得叶轮不同截面的通流改善。
- (2) 对控制变弦长叶片的控制点进行多目标优化后,多翼离心风机性能得到显著提高,小流量工况下效率提升 4.9%,风机静压最大提高 91.1 Pa。
- (3) 优化后的多翼离心风机大流量侧的工况范围拓宽,轮盖侧的叶道回流现象得到明显改善,蜗舌处的冲击损失减小,叶轮的做功能力提高。

参考文献:

[1] VELARDE-SUÁREZ S, SANTOLARIA-MORROS C, BALLESTEROS-TAJADURA R. Experimental study on the aeroacoustic behavior of a forward-curved blades centrifugal fan [J]. Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(2): 276-281.

[2] VELARDE-SUÁREZ S, BALLESTEROS-TAJADURA R, SANTOLARIA-MORROS C, et al. Unsteady flow pattern characteristics downstream of a forward-curved blades centrifugal fan [J]. Journal of Fluids

- Engineering, 2001, 123(2): 265-270.
- [3] YOUNSI M, BAKIR F, KOUIDRI S, et al. Numerical and experimental study of unsteady flow in a centrifugal fan [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2007, 221(7): 1025-1036.
 - [4] LIN S C, HUANG C L. An integrated experimental and numerical study of forward-curved centrifugal fan [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(5): 421-434.
 - [5] SASAKI S, KODAMA Y, HATAKEYAMA M. Influence of Karman vortex street on broadband frequency noise generated from a multiblade fan [J]. JSME International Journal Series: B Fluids and Thermal Engineering, 2006, 49(3): 678-685.
 - [6] BENCHIKH LE HOCINE A E, PONCET S, FELLOUAH H. CFD modeling and optimization by meta-models of a squirrel cage fan using OpenFoam and Dakota: ventilation applications [J]. Building and Environment, 2021, 205: 108145.
 - [7] 刘文武. 高压比小流量多翼离心风机集流器结构及偏心安装对其气动特性影响研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
 - [8] 杨伟刚, 蒋博彦, 王军, 等. 集流器偏心对多翼离心风机性能及噪声的影响研究 [J]. 工程热物理学报, 2018, 39(7): 1476-1480.
YANG Weigang, JIANG Boyan, WANG Jun, et al. Study on the effect of inlet nozzle eccentric installation on performance and noise of multi-blade centrifugal fan [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(7): 1476-1480.
 - [9] 曲昊, 刘小民. 椭圆型集流器对多翼离心风机气动性能影响的数值研究 [J]. 工程热物理学报, 2019, 40(8): 1793-1798.
QU Hao, LIU Xiaomin. Numerical study on the effect of elliptical inlet nozzle on the aerodynamic performance of multi-blade centrifugal fan [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(8): 1793-1798.
 - [10] 蔡涛, 王渴, 王军, 等. XBF 多翼离心风机的结构改进与试验研究 [J]. 风机技术, 2014, 56(2): 25-28, 46.
CAI Tao, WANG Ke, WANG Jun, et al. Structure improvement and experimental research on XBF multi-blade centrifugal fan [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2014, 56(2): 25-28, 46.
 - [11] 吴灵辉, 许滔, 王发银, 等. 多翼离心风机叶轮的多目标优化试验研究 [J]. 风机技术, 2019, 61(6): 29-33.
WU Linghui, XU Tao, WANG Fayin, et al. Multi-goal experiment research on multi-blade centrifugal fan impeller based on orthogonal design [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2019, 61(6): 29-33.
 - [12] BALLESTEROS-TAJADURA R, VELARDE-SUÁREZ S, HURTADO-CRUZ J P, et al. Numerical calculation of pressure fluctuations in the volute of a centrifugal fan [J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(2): 359-369.
 - [13] XU Cheng, AMANO R S. Computational analysis of scroll tongue shapes to compressor performance by using different turbulence models [C]//ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2007: 1487-1502.
 - [14] 方挺, 漆石球, 王宇贤, 等. 尺寸限制条件下离心风机蜗壳型线的设计研究 [J]. 风机技术, 2020, 62(1): 22-28.
FANG Ting, QI Shiqiu, WANG Yuxian, et al. Volute profile design of centrifugal fan with space limitation [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2020, 62(1): 22-28.
 - [15] 王珂, 琚亚平, 张楚华. 基于分组模型及仿生蜗舌的多翼离心风机设计 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(8): 1671-1675.
WANG Ke, JU Yaping, ZHANG Chuhua. Design of multi-blade centrifugal fan based on grouping model and bionic volute tongue [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(8): 1671-1675.
 - [16] MAEDA M, HIRAHARA H, NAKAMURA M. 0313 Experimental analysis of internal 3D flow field of multi-blade centrifugal fan with PIV measurement [J]. The Proceedings of the Fluids Engineering Conference, 2012, 2012: 151-152.
 - [17] 蒋博彦, 刘辉, 王军, 等. 多翼离心风机小流量工况流动特性 PIV 研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 98-103.
JIANG Boyan, LIU Hui, WANG Jun, et al. PIV investigation of flow characteristics in multi-blade centrifugal fan under low flow-rate condition [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(5): 98-103.
 - [18] 李亮, 王瑞, 金晗辉. 基于非线性湍流模型的多翼离心风机内部流场三维数值模拟及性能预测 [J]. 流体机械, 2012, 40(10): 41-45.
LI Liang, WANG Rui, JIN Hanhui. Three dimensional numerical simulation of internal flow field in multi-blade centrifugal fan based on the non-linear turbulent model [J]. Fluid Machinery, 2012, 40(10): 41-45.

- [19] 顾昭阳, 李念平, 卢继龙, 等. 多翼离心风机蜗壳内整流破涡的研究 [J]. 建筑科学, 2016, 32(2): 111-117.
GU Zhaoyang, LI Nianping, LU Jilong, et al. Flow deflection and vortex-broken inside volute of multi-blade centrifugal fan [J]. Building Science, 2016, 32(2): 111-117.
- [20] HEO M W, KIM J H, SEO T W, et al. Aerodynamic and aeroacoustic optimization for design of a forward-curved blades centrifugal fan [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2016, 230(2): 154-174.
- [21] CAU G, MANDAS N, MANFRIDA G, et al. Measurements of primary and secondary flows in an industrial forward-curved centrifugal fan [J]. Journal of Fluids Engineering, 1987, 109(4): 353-358.
- [22] 宫武旗, 吕伟领, 席光, 等. 前向多翼式离心风机蜗舌附近流场的 PIV 试验研究 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 166-171.
GONG Wuqi, LV Weiling, XI Guang, et al. Experiment study on the velocity field near the tongue of a forward curved multi-blades centrifugal fan [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 166-171.
- [23] NEISE W. Noise reduction in centrifugal fans: a literature survey [J]. Journal of Sound and Vibration, 1976, 45(3): 375-403.
- [24] 刘小民, 魏铭, 杨罗娜, 等. 内凹式蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12): 128-135.
LIU Xiaomin, WEI Ming, YANG Luona, et al. Study on the effects of concave volute tongues on aerodynamic performance and noise of a multi-blade centrifugal fan [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(12): 128-135.
- [25] 刘小民, 李烁. 仿鸮翼前缘蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(1): 14-20, 33.
LIU Xiaomin, LI Shuo. Effects of bionic volute tongue bioinspired by leading edge of owl wing on aerodynamic performance and noise of multi-blade centrifugal fan [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(1): 14-20, 33.
- [26] 熊仲营, 邓稼琦, 王梦豪, 等. 蜗舌改型设计对多翼离心风机气动性能的影响 [J]. 风机技术, 2018, 60(6): 31-37.
XIONG Zhongying, DENG Jiaqi, WANG Menghao, et al. Study on effects of modified volute tongue on the performance of a multi-blade centrifugal fan [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2018, 60(6): 31-37.
- [27] VAPNIK V N. Statistical learning theory [M]. New York, NY, USA: Wiley, 1998.

(编辑 陶晴)