doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.01.013

最优预测元模型在小型离心式鼓风机性能优化中的应用

李科钦,周忠宁,李意民,纪子宁,周志恒,包昊森
(中国矿业大学 低碳能源与动力工程学院,江苏徐州 221116)

摘　要:针对传统的叶片气动设计方法存在依赖于设计者的经验、研发周期长、设计精度难以保证等问题,将最优预测元模型优化方法应用到离心鼓风机叶轮优化中。通过将某小型离心式鼓风机进行参数化造型,使用高级拉丁超立方(ALHS)方法对叶片子午面、进、出口安放角、叶片流面扭转角 3 个部分的 36 个参数采样并进行数值模拟计算,构建了 200 组鼓风机性能数据;在此基础上,采用最优预测元模型(MOP)筛选出了对鼓风机性能影响最大的 9 个参数,并以最大等熵效率为目标,进、出口压差为约束条件,运用进化算法(EA)对 9 个参数进行迭代计算,得到了性能最优的鼓风机参数,对优化前、后的鼓风机流场进行了对比分析。结果表明,优化后的鼓风机抑制了叶顶泄漏流,叶顶泄漏流量相较于原模型减少了 10%;在叶轮中段(55% 子午流线位置处)流体沿叶高优化前、后的最大速度由 101.66 m/s 减少到 82.06 m/s,速度变化 ΔV 由 53.52 m/s 减少到 40.74 m/s,流动损失降低;叶轮出口的最大压力也从 115.37 kPa 增加到 116.19 kPa;最优预测元模型能够过滤掉优化过程中不重要的输入参数,从而减少优化成本与时间,研究结果可为离心式鼓风机的优化设计提供参考。

关键词:小型离心式鼓风机;参数优化;最优预测元模型;数值模拟
中图分类号:TH43　　**文献标志码:**A

Application of metamodel of optimal prognosis in performance optimization of small centrifugal blowers

LI Keqin, ZHOU Zhongning, LI Yimin, JI Zining, ZHOU Zhiheng, BAO Haosen
(School of Low-Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Addressing the issues inherent in traditional aerodynamic design methods for blades—such as reliance on designer experience, long development cycles, and difficulty in ensuring design precision—this study applies an optimal surrogate model optimization method to the impeller optimization of a centrifugal blower. By parameterizing the design of a small centrifugal blower and using the Advanced Latin Hypercube Sampling (ALHS) method to sample 36 parameters from the meridional profile, inlet and outlet blade angles, and blade surface twist angle, 200 sets of blower performance data were constructed through numerical simulations. Based on this data, the optimal surrogate model (MOP) was employed to identify the 9 parameters that most significantly impact blower performance. Subsequently, an evolutionary algorithm (EA) was utilized to iteratively compute the optimal values of these 9 parameters, with the objective of maximizing isentropic efficiency and constraining the inlet-outlet pressure difference. A comparative analysis of the flow fields before and after optimization was conducted. The results demonstrate that the optimized blower suppressed tip leakage flow, reducing the tip leakage flow rate by 10% compared to the original model. At the mid-span of the impeller (at 55% of the meridional streamline), the maximum fluid velocity along the blade height decreased from 101.66 m/s to 82.06 m/s after optimization, and the velocity variation ΔV reduced from 53.52 m/s to 40.74 m/s, indicating reduced flow losses. Additionally, the maximum pressure at the impeller outlet increased from 115.37 kPa to 116.19 kPa. The optimal surrogate model effectively filters out non-critical input parameters during the optimization process, thereby reducing optimization costs and time. The findings of this research provide a reference for the optimal design of centrifugal blowers.

Key words: small centrifugal blower; parameter optimization; metamodel of optimal prognosis; numerical simulation

收稿日期: 2024－01－26　**修回日期:** 2024－07－16
基金项目: 国家自然科学基金项目(51776217)

0 引言

小型离心式鼓风机因具有尺寸小、质量轻、运动部件少、结构简单可靠等优点，得到了广泛的应用。通过对离心鼓风机转子叶片优化设计，不仅可以提高鼓风机的综合性能，还能够降低运行成本，从而拓展更多的应用场景。李轩等[1]针对Y7-43离心通风机优化设计了一种高比转速叶轮，结合试验和数值模拟分析了三种不同叶型对风机性能的影响，使得风机更加适合大流量工况。然而，传统的叶片气动设计方法依赖于设计者的经验，导致了研发周期长、效率低、设计精度难以保证，尤其在应对先进几何构型的设计需求方面表现不足。

随着离心叶轮设计技术和全三维方程求解方法的发展，以及对高负荷离心叶轮设计经验的不断积累，设计优化方法已成为叶片构型设计的主要方法之一。这种方法通过参数化设计、优化算法和寻优策略对设计空间进行自动评估，并利用优化理论求解最佳值。与传统方法不同的是，设计优化方法通过数学过程指导叶片设计的修改方向，以达到预定的优化目标，通常是效率最大化。

吴恩启等[2]以静压、风量和效率为主要参数，采取分组优化的方式，分别对离心风机叶片的叶型和进、出口安装角进行设计，以降低流动损失为目标，通过粒子群寻优法可知，进、出口角的适当改变对风量、效率的提升效果最明显，并通过数值计算对各方案风机的气动性能及其流场进行分析。优化后风机的静压提高12.9%，风量提高8.1%，效率提高7.2%，大于分组设计中各方案单一优化的结果，符合实际生产需求。李星峰等[3]为了研究叶片出口安装角和叶片数对叶轮气动性能优化的影响，对某离心压缩机叶轮建立理论数值模型，利用多目标遗传算法对模型寻优。对优化的结果进行圆整处理后，进行参数化建模，并通过CFD叶轮在设计工况点压缩比提高3.57%，等熵效率提高0.79%，叶轮整体情况得到改善。基于元模型的优化方法具有计算量小、与经验无关等优点。一方面，能够避免错误地优化非影响参数而导致的性能改进；另一方面，避免了较高的计算负荷，提高了优化的计算效率。BAMBERGER等[4]训练了基于局部模型网络（LMN）和多层感知器（MLP）相互组合的元模型，用来对风机性能进行预测，相比于经典的优化设计方法，该模型节省了优化设计时间与成本。丛小青等[5]基于响应面优化法对高速离心泵的叶轮、导叶和压水室进行优化设计，叶轮叶片出口角、叶轮叶片包角、导叶叶片出口角和导叶叶片包角为设计变量，以高速泵的扬程、效率和湍流动能为优化指标，较原始模型，扬程提升13.33%，满足设计要求同时，水力效率提升15.048%和最大湍动能降低22.298%。

本文选择WILL等[6-8]开发的一种从可用元模型和变量过滤工具的库中自动选择元模型类型并进行变量约简的方式，提出了最优预测元模型（MOP）这种优化方法。通过对小型离心式鼓风机子午面型线、进出口安放角以及叶片流面扭转角，进行参数化造型并结合数值模拟和试验设计方法（DOE），以最大效率为目标，进、出口压差为约束条件进行样本采样，分析了各个参数对离心鼓风机性能的影响，通过最优预测元模型（MOP）筛选出重要输入参数以及为接下来的响应值预测建立近似模型。最后通过EA算法进行迭代计算，搜索出在该设计空间下的最优解并用数值模拟进行验证及比较分析。验证了该优化方法在离心鼓风机叶轮气动性能优化中的可行性。为小型离心式鼓风机的性能提升提供新的思路和方法，并为相关领域的研究和应用提供有价值的参考。

1 研究模型及数值方法

1.1 研究模型建立

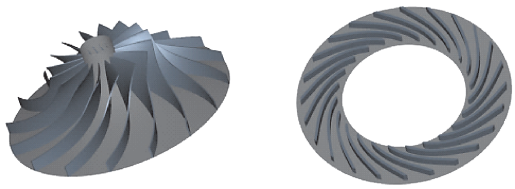
本文以某一吸尘器用离心式鼓风机为优化对象，该鼓风机由离心叶轮和带径向导叶的扩压器组成。其中，离心叶轮有16个叶片，设计转速为100 000 r/min，在15 ℃空气下设计流量为0.01 m^3/s；径向导叶的扩压器有24个。叶轮与扩压器的主要尺寸参数见表1。

表1 叶轮与扩压器主要几何参数

Tab.1 Main parameters of impeller and diffuser

叶轮参数	数值	扩压器参数	数值
轮毂直径 D_h/mm	5	出口直径 D_4/mm	52
进口直径 D_s/mm	17	导叶进口角/(°)	40
出口直径 D_2/mm	35	导叶包角/(°)	30
出口宽度 b_2/mm	2		
叶顶间隙 Δ/mm	0.17		
出口角 β_{b2}/(°)	50.5		

图1分别示出离心鼓风机叶轮和扩压器的三维模型。



（a）叶轮 （b）扩压器

图 1 叶轮及扩压器三维模型

Fig.1 3D model of impeller and diffuser

1.2 数值模拟方法及模型验证

本文通过 Ansys CFX 软件对鼓风机进行数值计算，从节省计算时间和成本的角度出发，进行单通道数值模拟，计算区域主要包括叶轮及扩压器，湍流模型采用 SST k-ω 模型。介质采用 15 ℃理想空气，进口采用压力进口，出口采用质量流量出口，设定参考压力为 0，转速为 100 000 r/min。

网格数量是影响数值计算精度的重要因素，本次网格划分采用相同的拓扑方式，共划分 112 392，132 404，148 660，176 088 和 199 508 共 5 组网格方案进行无关性验证，使用相同的数值方法进行计算，得到不同网格数量下的网格无关性验证曲线，如图 2 所示。当网格数量达到 176 088 后，效率基本不变。本文最终选择叶轮加导叶共 176 088 左右网格作为最终的网格数量。图 3 示出叶轮和导叶的网格分布。

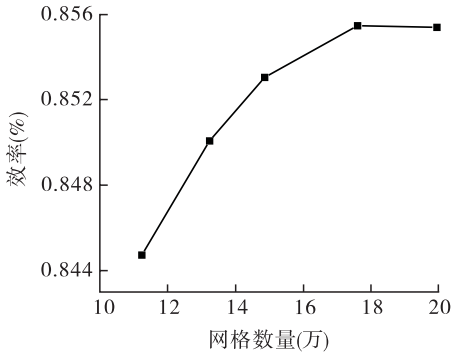


图 2 网格无关性验证

Fig.2 Grid-dependency test

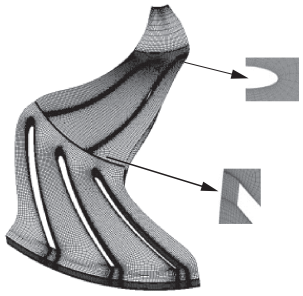


图 3 网格分布

Fig.3 Grid distribution

本文使用该离心式鼓风机实物的外特性试验测试数据对所建立模型的准确性进行验证。其试验结果与数值模拟结果如图 4 所示。

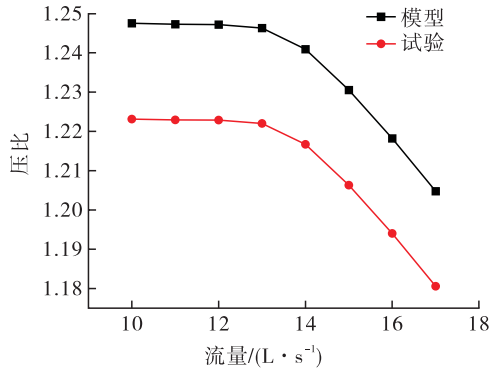


图 4 数值模拟结果与试验结果对比

Fig.4 Comparison of experimental results and numerical results

由图可以看出，各工况下数值模拟与试验测试的压比最大差值没有超过 1.96%，表明本文所建立的模型以及数值计算方法，能够有效预测离心鼓风机的气动性能，可以用于后续优化研究。

2 叶片优化几何参数的选取

对现有实体模型的叶片参数化拟合是优化设计的基础，研究对象的具体几何模型参数选择对优化设计的过程和结果有重要影响。NEVEROV 等[9]对离心叶轮几何参数的选择做出研究，发现叶片子午面型线和叶片扭转角两个方面的参数化设计有较好的效果。舒信伟等[10]对鼓风机叶型进行了优化设计，减少了叶型的前弯程度和厚度，有利于改善流道中的流动情况和减小尾迹损失。王俊杰等[11]研究发现轮毂型线对进入叶片流道内的气流起重要的导向作用。邓敬亮等[12]将原始叶片的叶型中弧线通过 3 种不同方法进行优化，采用单一变量法对不同优化方式的优化效果进行了比较分析。优化后，绝热效率都有不同程度的提高，有效地削弱了流动分离，减小了流动损失，流况得到不同程度的改善，表明以数值气动优化来提高叶片气动性能的方法是有效的。

本文对于控制叶片生成的两个关键方面进行了参数化设计研究。

2.1 叶片子午面型线参数化

陈宏冀[13]使用 Bézier 曲线对子午面进行拟

合使得流道型线曲率变化更加平滑。图 5 为本文原模型子午面型线使用 Bézier 曲线参数化拟合的几何示意，其中 r 为径向方向，z 为轴向方向。在不改变叶轮进、出口直径和出口宽度的基础上对子午面进行改型优化，通过改变点的坐标来改变子午面的形状。子午面前盖板型线控制点 A_i（i=1,2,3），后盖板型线控制点 B_i（i=1,2,3），进口边控制点 C_i（i=1,2,3,4,5）。

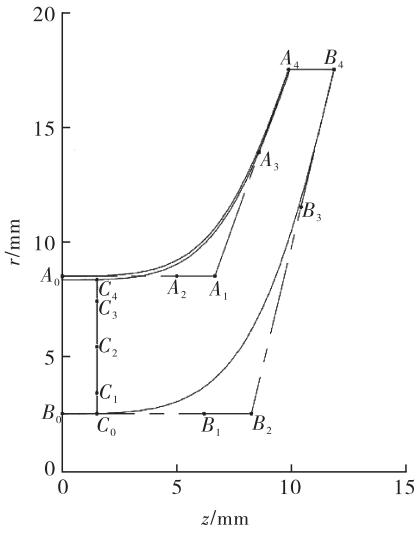
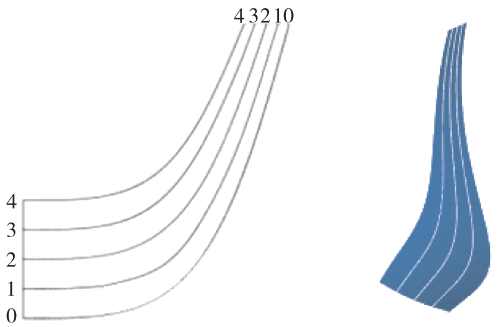


图 5 Bézier 曲线几何示意

Fig.5 Geometric diagram of Bézier curve

2.2 叶片流面参数化

叶片流面由 5 个叶高截面的几何参数确定。先将叶片前盖板到后盖板等距划分为 5 段，如图 6 所示；再将子午面映射到平面上，其中横坐标为子午线相对长度，纵坐标为叶片不同跨度所对应的扭转角，如图 7 所示。通过改变不同叶高截面的扭转角和前后缘堆叠角（Stacking Angle）来控制整体叶片流面的形状。



（a）子午面 （b）三维叶片

图 6 叶片跨度分布

Fig.6 Blade span distribution

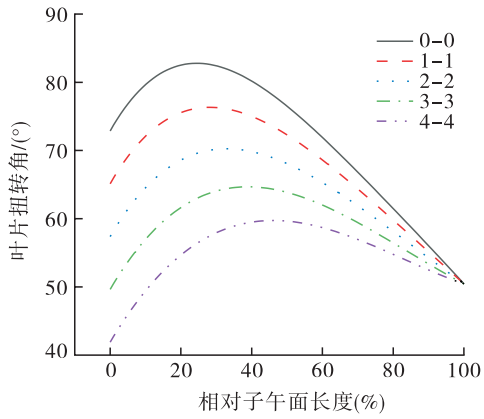


图 7 叶片扭转角分布

Fig.7 Distribution of blade twist angle

3 优化方案

为了减少优化时间与成本，首先应用 DOE 方法在设计空间中均匀采样，然后建立 MOP 对输入参数进行敏感性分析，再通过进化算法（EA）用该模型对离心鼓风机离心叶轮的叶片结构进行优化并最终进行数值模拟验证。图 8 示出离心鼓风机叶轮叶型结构的优化流程。优化目标以进、出口全压差为约束条件，提高离心鼓风机在转速为 100 000 r/min 时的效率。考虑到气体在鼓风机内进行高转速运动时温度会发生变化，因此选择等熵效率（η）为本次优化的目标。

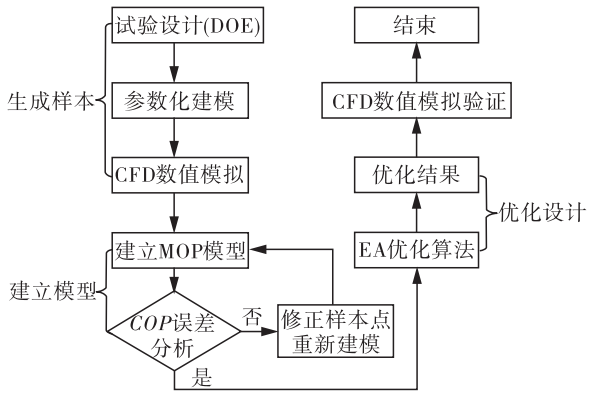


图 8 叶轮优化流程

Fig.8 Blade optimization flowchart

（1）基于 DOE 方法建立数据库。

本文采用一种高级拉丁超立方（ALHS）采样方法[14]，对子午面型线、叶片流面扭转角以及叶片进、出口角共 36 个优化参数进行采样，最终形成由 200 个不同结构参数的叶轮，通过数值模拟计算构成的数据库。部分优化参数变化范围见表 2。

表 2　36 个参数中部分优化参数变化范围

Tab.2　Partial optimization parameter variation range among 36 parameters

优化参数	初始值	优化范围
β_{B1}.0	72.858	(65.57,80.14)
β_{B2}.4	50.440 4	(45.4,55.49)
*B*2.*x*	8.228 43	(7.41,9.05)
*B*2.*y*	2.5	(2.25,2.75)
0–0.Stacking angle	50	(45,55)
*A*1.*x*	4.955 36	(4.46,5.45)
*A*1.*y*	8.5	(7.65,9.35)

注：β_{B1} 和 β_{B2} 分别表示叶片进、出口安放角。

(2) 优化方法。

本文以等熵效率(η)作为目标函数，进、出口全压差为约束条件，把η最大化作为单目标优化问题使用 EA 算法进行优化。

4　结果与讨论

4.1　基于 MOP 的优化与预测结果

(1) 敏感性分析。

最优预测元模型(MOP)的建立是一个自动选择的过程，对于具有许多输入变量的更为复杂的系统或模型，就需要测试大量的近似模型。多项式回归方法、移动最小二乘法(MLS)或者 Kriging 模型，它们可以非常快速和可靠地构建近似模型。为了进一步减少这种工作量，MOP 中使用到的过滤方法减少了必要的模型测试次数，并将其定义为全模型与约简模型调整后的决定系数($adj.R^2$)之差。输入变量所需 $CoI_{\min}$ 的最小阈值在 1%~5% 之间，如果 *CoI* 不小于 $CoI_{\min}$，则在最终近似模型的建立中考虑使用该输入参数。因此，在交叉验证的基础上提出了一种新的预测系数(Coefficient of Prognosis，CoP)来衡量 MOP 的近似质量。

定义式如下：

$$CoI_{x_i} = adj.R^2_{(x_1,\ldots,x_N)} - adj.R^2_{(x_1,\ldots,x_{i-1},x_{i+1},\ldots,x_N)}$$

$$CoI_{x_i} \geqslant CoI_{\min}$$

$$CoP = 1 - \left(SS_E^{\text{Prediction}} / SS_T\right)$$

式中，*CoI* 为基于一个多项式模型所对应的重要系数；x_i 为输入参数；$adj.R^2$ 为经过调整的相关系数[15]；$SS_E^{\text{Prediction}}$ 为预测误差的平方和；SS_T 为总的方差。

图 9 示出了 *CoP* 系数矩阵，包括输入变量的单个 *CoP* 和全模型的 *CoP*。单个 *CoP* 表示每个输入变量的总效果，其中，可以看出 MOP 对前面的 36 个输入参数进行筛选检测，根据单个参数 *CoP* 值不小于 1% ~ 5% 的标准检测出了影响等熵效率的 9 个重要参数。全模型的 *CoP* 有助于评估 MOP 的预测质量，从而决定是使用该模型进行优化还是通过附加设计点来提高质量。根据 *CoP* 的定义，预测模型的质量在于 *CoP* 的值是否接近 1，一般 *CoP* 的值大于 0.8 就可以认为近似模型的质量是可靠的。从图中可以发现，全模型 *CoP* 分别为η=87.2%，*PD*=95.4%。

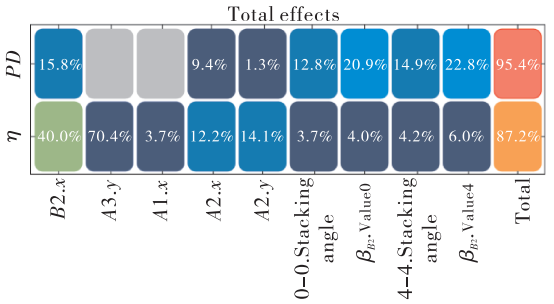


图 9　*CoP* 系数矩阵

Fig.9　*CoP* coefficient matrix

根据 MOP 检测出的 9 个重要影响参数，大致可以分为 3 个方面对于等熵效率的影响。首先 *A*3.*y*，*A*1.*x*，*A*2.*x*，*A*2.*y*，*B*2.*x* 这 5 个参数主要控制的是子午面型线的变化。其次是 β_{B2}.Value0 和β_{B2}.Value4，这 2 个参数控制的是叶片后缘出口安放角的变化。最后 0–0.Stacking angle 和 4–4.Stacking angle 主要反映叶片堆叠角所控制的叶片流面的变化。

图 10 示出了从设计点计算得到的η与从元模型预测的η。其中最大误差为 0.009 36，平均误差为 0.001 97，均方根误差为 0.002 5。由此说明用于等熵效率的各向同性 Kriging 模型的拟合效果较好。

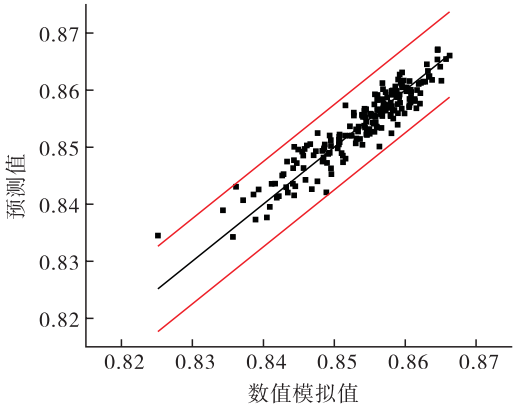


图 10　等熵效率 η 的拟合度

Fig.10　Goodness of fit for η

（2）优化结果。

最终 EA 算法经过 2 010 次迭代在第 2 000 次得到了最佳的输入参数所得到的对最大等熵效率为 87.03%。对应的最优参数组合为：β_{B2}.Value0（72.86°），β_{B2}.Value4（50.44°），$B2.x$（9.05），$A1.x$（4.46），$A2.x,y$（6.7，9.3），$A3.y$（14.3），0–0.Stacking angle（48.78°），4–4.Stacking angle（48.54°）。

4.2 鼓风机优化前、后性能及数值模拟结果对比分析

（1）子午面形状对比。

图 11 示出优化前、后子午面形状对比。可以看出，通过控制点坐标的改变，使得优化后的前、后盖板型线向外偏移，子午面前、后盖板型线的曲率变小，影响了流体在流道内的流动。

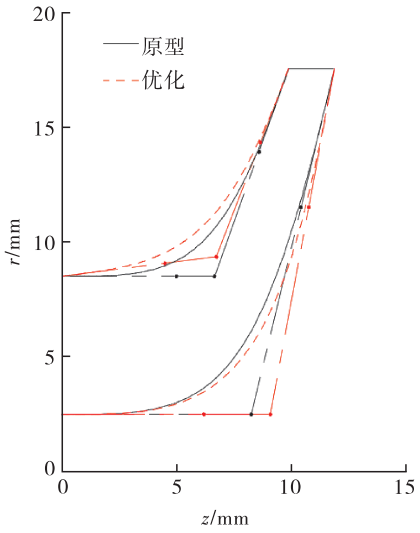


图 11 优化前、后子午面形状对比

Fig.11 Comparison of meridian surface shapes before and after optimization

（2）整机性能对比。

图 12 示出了在转速为 100 000 r/min 下优化前、后离心鼓风机的特性曲线。

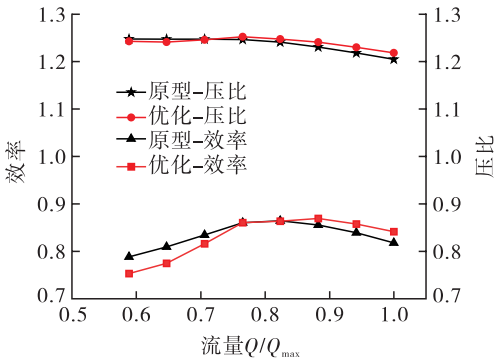


图 12 全工况特性曲线

Fig.12 Full working condition characteristic curve

可以看到优化后的模型随着流量的增加，压比和等熵效率均大于原模型。在设计流量下等熵效率由 85.55% 提高至 86.93%（与最优预测元模型预测的结果误差为 0.1%），提升了 1.38%。

（3）叶片优化前、后的流场分析。

图 13 示出了优化前、后子午面静熵分布。由于叶轮进口气流由轴向转为径向的流动损失较为严重，优化前靠近叶顶部分的中段存在流动损失较大区域（如方框区域所示），优化后该区域的面积减小，流动损失降低，流场性能改善。可以推测出优化后的叶片对于叶顶处的改善最为明显。

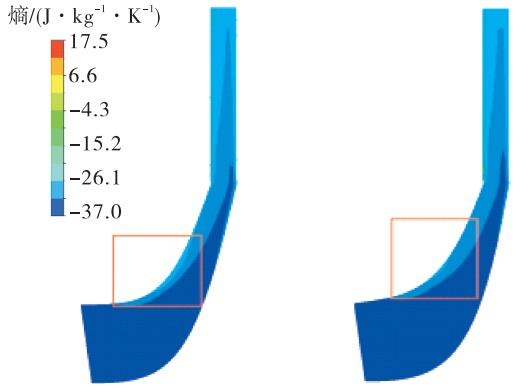


图 13 子午面熵分布

Fig.13 Meridian static entropy distribution

图 14 示出了优化前、后流体沿叶高的湍动能对比。原型与优化后的模型的湍动能在叶根附近以及叶顶附近存在显著差异，湍动能的最大值从 92.35 m^2/s^2（原型）减少到 76.73 m^2/s^2（优化）。改进后的流场具有更小的湍动能，且湍动能最值之间的差值更低。

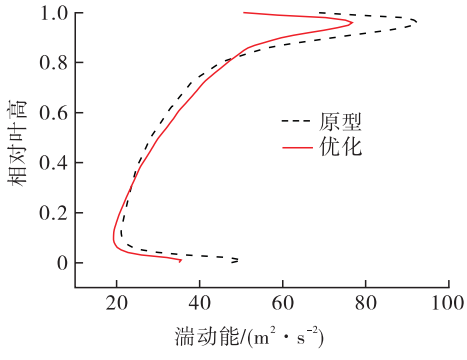
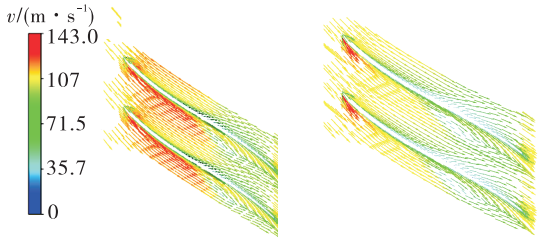


图 14 湍动能沿叶高分布

Fig.14 Turbulent kinetic energy distribution

从整体上来看，改进后的叶轮中的能量损耗减小，能量利用率得到了提高。

图 15 示出了优化前、后的叶片在 0.9 倍叶高处的速度矢量图。优化后的叶片由于叶片流面扭转角以及盖板型线曲率的改变使得流体速度有一定的下降，流道内的流速的变化更加平缓。



（a）优化前　　（b）优化后

图 15　0.9 倍叶高截面处速度矢量图

Fig.15　Velocity vector at 0.9 span

图 16 示出了原型与优化后的速度分布沿叶高的分布趋势大致相同。在 0.7 倍叶高附近，原模型与优化后模型的流体速度均达到最大值，分别为 101.66，82.06 m/s；从整体来看，流体沿着整个叶片高度的速度变化 Δv 不同，优化前 Δv=53.52 m/s、优化后 Δv=40.74 m/s，所以可以得出优化后流体速度沿叶高的变化更加平缓，流动的损失减少。

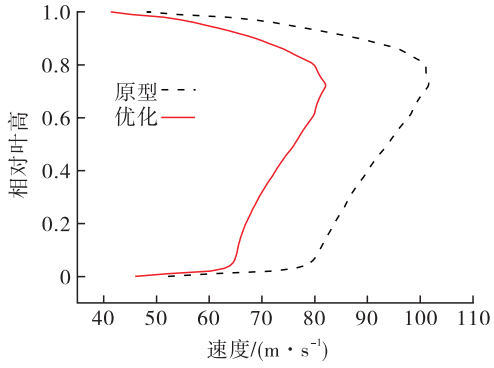
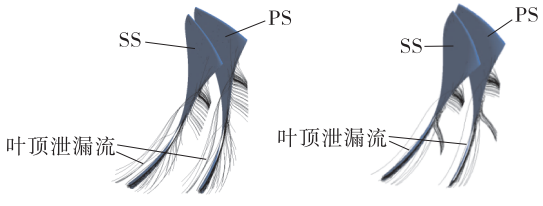


图 16　55% 子午流线位置速度分布

Fig.16　55% Meridian position and velocity distribution

图 17 示出了优化前、后叶片的叶顶泄漏流的流线图。



（a）优化前　　（b）优化后

图 17　叶顶泄漏二次流流线图

Fig.17　Secondary flow streamline diagram of blade tip leakage

可以看出，优化后的叶顶泄漏流明显减少，根据统计计算得出，优化后模型的叶顶泄漏流量相较于原模型减少 10%。

图 18 示出优化前、后在 0.9 倍叶高截面处的静压分布情况。从图中可以看出，优化前的叶片前缘出现压力侧静压低于吸力侧的现象，这是由于进口气流在叶片前缘形成负冲角，冲击吸力侧而在压力侧加速流动，使得叶片前缘压力侧静压下降。优化后的叶片由于进口安装角的调整避免了这一现象的发生。同时优化后的流道面积增加使得叶片前缘的加速现象减弱。在尾缘处最大压力也从 115.37 kPa 增加到 116.19 kPa。整体来看，优化后的整体压差有一定的减小，有利于抑制泄漏流的发生；沿流向的静压提升更加平稳，也有利于叶轮对气体稳定做功。

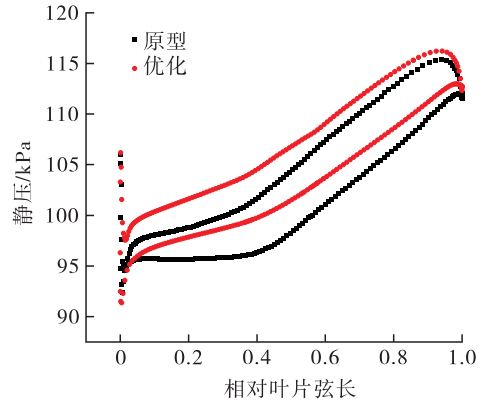


图 18　0.9 倍叶高静压曲线

Fig.18　Static pressure curve at 0.9 span

5　结论

（1）优化前、后的叶片对于流场的影响主要有：优化后叶片在叶顶处的高静熵区域减小；湍动能较原模型的最大值从 92.35 m^2/s^2 减少到 76.73 m^2/s^2，且湍动能最值之间的差值更低。优化后的流道内流体速度分布更加均匀，在 55% 子午流线位置处的流体沿叶高的速度差为优化前 Δv=53.52 m/s、优化后 Δv=40.74 m/s，速度沿叶高变化更加平缓；在出口处的高压区域增加并且最大压力也从 115.37 kPa 增加到 116.19 kPa；优化后的叶片，由于进口安装角的改变，使得靠近叶顶区域进口处的低压区域减少，并且抑制了前缘泄漏流的产生，叶顶泄漏流量减少 10%。

（2）将 MOP 与 EA 优化算法进行结合的方式，使得离心鼓风机的等熵效率由 85.55% 提升到 87.03%。将预测结果与数值模拟结果进行验

证对比误差得到为0.1%，说明利用MOP优化预测的结果是可靠的。

（3）通过将叶片参数化、试验设计、MOP（最优预测元模型）以及EA优化算法与数值模拟计算相结合，提供了一种离心鼓风机叶片的优化方法，这个方法可以更好地筛选出叶片优化中的重要参数，对小型离心鼓风机设计及优化有很好的理论指导意义。

参考文献：

[1] 李轩，王维，卢金玲，等.Y4-73离心通风机叶轮的高比转速优化设计研究[J].流体机械，2020，48(1)：7－13.
LI X，WANG W，LU J L，et al.Research on high specific speed optimization design of Y4-73 centrifugal fan impeller[J].Fluid Machinery，2020，48(1)：7－13.

[2] 吴恩启，梅寅，张士恒，等.离心式清洁风机的优化设计[J].流体机械，2023，51(4)：66－72.
WU E Q，MEI Y，ZHANG S H，et al.Optimization design of centrifugal cleaning fans[J].Fluid Machinery，2023，51(4)：66－72.

[3] 李星峰，尹湘云，殷国富.基于CFD和多目标算法的离心叶轮参数优化[J].流体机械，2019，47(3)：31－36.
LI X F，YIN X Y，YIN G F.Optimization of centrifugal impeller parameters based on CFD and multi-objective algorithm[J].Fluid Machinery，2019，47(3)：31－36.

[4] BAMBERGER K，CAROLUS T，BELZ J，et al.Development，validation，and application of an optimization scheme for impellers of centrifugal fans using computational fluid dynamics-trained metamodels[J].Journal of Turbomachinery，2020，142(11)：1－15.

[5] 丛小青，肖建荣，李辉，等.高速离心泵水动性能多目标优化设计[J].流体机械，2022，50(12)：27－34.
CONG X Q，XIAO J R，LI H，et al.Multi objective optimization design of hydrodynamic performance of high-speed centrifugal pumps[J].Fluid Machinery，2022，50(12)：27－34.

[6] WILL J，MOST T.Metamodell of optimized prognosis (MoP) an automatic approach for user friendly parameter optimization[C]//Ansys Conference & Cadfem Users Meeting，2010.

[7] MOST T，WILL J.Recent advances in meta-model of optimal prognosis[C]//Weimar Optimization & Stochastic Days，2010.

[8] MOST T，WILL J.Metamodel of optimal prognosis-an automatic approach for variable reduction and optimal meta-model selection[C]//Weimar Optimization and Stochastic Days，2008.

[9] NEVEROV V，KOZHUKHOV Y，KARTASHOV S，et al.The choice of key geometric parameters in the numerical optimization of centrifugal compressor impellers[J].MATEC Web of Conferences，2018(245)：09008.

[10] 舒信伟，谷传纲，王彤，等.小流量高压头离心鼓风机叶型优化设计[J].中国电机工程学报，2008(8)：77－81.
SHU X W，GU C G，WANG T，et al.Optimization design of blade shape for small flow high-pressure centrifugal blower[J].Chinese Journal of Electrical Engineering，2008(8)：77－81.

[11] 王俊杰，黄燕，张凡，等.新能源汽车空调鼓风机气动噪声特性分析及优化[J].噪声与振动控制，2022，42(2)：134－142.
WANG J J，HUANG Y，ZHANG F，et al.Analysis and optimization of aerodynamic noise characteristics of air conditioning blowers for new energy vehicles[J].Noise and Vibration Control，2022，42(2)：134－142.

[12] 邓敬亮，楚武利.离心风机叶轮叶片气动优化研究[J].流体机械，2013，41(7)：23－27.
DENG J L，CHU W L.Aerodynamic optimization research on centrifugal fan impeller blades[J].Fluid Machinery，2013，41(7)：23－27.

[13] 陈宏冀.子午流道Bézier曲线造型中的几何问题[J].工程热物理学报，1997(4)：445－449.
CHEN H J.The geometry problem of meridian channel Bézier curve modeling[J].Journal of Engineering Thermophysics，1997(4)：445－449.

[14] HUNTINGTON D E.LYRINTZIS C S.Improvements to and limitations of Latin hypercube sampling[J].Probabilistic Engineering Mechanics，1998，13(4)：245－253.

[15] RUNGER D C.Applied Statistics and Probability for Engineers[J].Third edition，2003.

作者简介：李科钦（1999），男，硕士研究生，研究方向为流体机械，E－mail：TS22130045P31@cumt.edu.cn。

通信作者：周忠宁（1979），男，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为流体机械，通信地址：221116 江苏省徐州市大学路1号中国矿业大学低碳能源与动力工程学院，E－mail：zznwt@163.com。

本文引用格式：
李科钦，周忠宁，李意民，等.最优预测元模型在小型离心式鼓风机性能优化中的应用[J].流体机械，2025，53(1)：105－112.
LI K Q，ZHOU Z N，LI Y M，et al.Application of metamodel of optimal prognosis in performance optimization of small centrifugal blowers[J].Fluid Machinery，2025，53(1)：105－112.