

燃料电池离心压缩机叶轮构型的 参数优化及性能分析

王艺达¹, 刘小民¹, 周逸伦¹, 樊宏周¹, 陈玉辉², 张治平²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 珠海格力电器股份有限公司, 519070, 广东珠海)

摘要: 为提升离心压缩机气动性能以满足燃料电池系统的需求,以某燃料电池离心压缩机叶轮为研究对象,选取叶轮进口倾角、叶片数、子午流道等型线控制点和叶片安装角分布控制点等关键构型参数作为优化变量,采用数值计算方法对离心压缩机叶轮气动性能进行模拟和优化。结合拉丁超立方抽样与 BP 神经网络拟合叶轮构型参数与气动性能的映射关系,以叶轮等熵效率最大为优化目标、总压比和功率等参数为约束,运用遗传算法对上述叶轮关键构型参数进行多参数寻优,并对优化前后叶轮的气动性能及其内部流动特性进行了对比分析。结果表明:在设计工况下,优化后叶轮等熵效率提高了 3.90%,总压比为 1.742,功率为 8.53 kW,满足设计要求;叶轮的稳定运行工况范围变宽,并且在整个工况范围内叶轮的等熵效率也均得到提升;从流场分析可以发现,优化后叶轮轮盖侧高熵值区域缩小,叶片压力面及出口截面速度分布更均匀,低速气体团面积在不同流动方向上减小,叶道内流动分离得到抑制,验证了所提离心叶轮多参数优化设计方法的有效性。

关键词: 离心压缩机;叶轮;燃料电池;气动性能;多参数优化

中图分类号: O354.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202206019 **文章编号:** 0253-987X(2022)06-0164-11



OSID 码

Performance Analysis and Multi-Parameter Optimization of Centrifugal Impeller Configuration for the Centrifugal Compressor Used in Fuel Cells

WANG Yida¹, LIU Xiaomin¹, ZHOU Yilun¹, FAN Hongzhou¹,
CHEN Yuhui², ZHANG Zhiping²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Gree Electric Appliances Inc. of Zhuhai, Zhuhai, Guangdong 519070, China)

Abstract: In order to improve the aerodynamic performance of the centrifugal compressor to meet the demand of the fuel cell system, this paper takes a fuel cell centrifugal compressor impeller as the study object, selects the key configuration parameters such as the impeller inlet inclination angle, number of blades, radial flow path and other profile control points and blade mounting angle distribution control points as optimization variables, then uses the numerical calculation method to simulate and optimize the aerodynamic performance of the centrifugal impeller. Based on the Latin hypercube sampling and the BP neural network, this paper mapped the relationship between the impeller configuration parameters and the aerodynamic performance, then uses the maximum isentropic efficiency of the impeller as the optimization target, and takes the total pressure ratio and power as constraints. The genetic algorithm was used to optimize the key configuration pa-

rameters of the impeller, and the aerodynamic performance and internal flow characteristics of the impeller before and after optimization were compared and analyzed. The results show that the isentropic efficiency of the optimized impeller increases by 3.90%, its total pressure ratio is 1.742, and its power is 8.53 kW under the design conditions, which satisfies the design requirements. At the same time, the range of stable operating conditions of the impeller becomes wider, and the isentropic efficiency of the impeller is also improved in the whole range of operating conditions. The flow field analysis shows that the high entropy area on the cover side of the impeller is reduced after optimization, the velocity distribution in the pressure surface and outlet section of the blade is more uniform, the area of the low-speed gas mass is reduced in multiple directions, and the flow separation in the impeller channel is suppressed. The above verifies the effectiveness of the multi-parameter optimization design method of the centrifugal impeller in this paper.

Keywords: centrifugal compressor; impeller; fuel cell; aerodynamic performance; multi-parameter optimization

离心压缩机气动性能在很大程度上影响着燃料电池系统的整体性能,高速高效高压比小型化离心压缩机的研制也是当前制约燃料电池发展的技术瓶颈之一^[1]。这主要是由于离心压缩机叶轮控制参数较多,但是这些控制参数还没有统一的数学描述所造成的。因此,研究叶轮多参数控制与综合优化方法对于提高离心压缩机气动性能和满足燃料电池系统要求具有重要的理论意义和应用价值。

在离心压缩机叶轮气动性能优化方面,已有较为丰富的研究文献可供参考。这些研究中,优化设计参数主要包括叶轮叶片数^[2]、叶片进口角、叶片出口角^[3]、出口直径、尾缘倾角^[4]、叶片厚度^[5-7]、叶顶间隙^[8-9]等叶轮结构参数以及叶片型线等复杂曲线控制参数。这些研究多集中于单一参数对离心压缩机性能的影响,较少涉及到多参数的协同作用及耦合优化设计。另一方面,离心压缩机叶轮构型的控制参数耦合性较强,不同参数匹配对离心压缩机性能影响的机制也较复杂,因此应同时选取多构型参数进行叶轮设计,进而实现叶轮的全局优化。

离心压缩机数值计算成本相对较高,在寻优工作中通常采用代理模型方法,通过训练拟合变量与叶轮气动性能的映射关系,降低优化过程的计算成本。代理模型种类较多,离心压缩机优化过程常用模型包括响应面模型、Kriging模型、支持向量机、神经网络等。万玉等以65 kW燃料电池动力系统的离心空压机为优化对象,选取叶型控制点并采用Kriging近似模型进行多工况优化,叶轮常用工况点和额定工况点等熵效率及压比均得到提高^[10];李星峰等选取叶片出口安装角和叶片数,利用多目标遗传算法对数值模型寻优,叶轮在设计工况点整体情

况得到改善^[11];陈培江等以110 kW燃料电池离心空压机为研究对象,结合Kriging近似模型与灰狼优化算法,优化后的离心空压机压比有一定提升,功耗仍有所降低^[12];程鸿亮等采用支持向量机与遗传算法进行叶型全局寻优,叶轮峰值效率提高^[13]。上述研究有十分重要的指导意义,但离心压缩机多参数协同优化问题具有较多的变量与复杂的映射关系,响应面模型与Kriging模型在拟合高维强非线性数据时精度相对较差^[14],支持向量机对参数与核函数选择较为敏感^[15],BP神经网络具有极强的非线性映射能力与自适应能力,适用于复杂的多参数映射拟合问题^[16]。

本文以某燃料电池离心压缩机叶轮为研究对象,综合考虑叶轮进口倾角、叶片数、子午流道型线、叶片安装角分布等叶轮关键控制参数,在满足离心压缩机运行工况的约束条件下,以等熵效率最大为优化目标进行叶轮参数寻优,获得高性能离心压缩机叶轮设计。通过对比分析优化前后离心叶轮内流场分布特性,揭示控制参数对叶轮性能的影响机制,以发展高效离心压缩机叶轮多参数优化设计方法,满足燃料电池离心压缩机的性能和结构要求。

1 数值方法

1.1 研究对象

本文研究对象为某燃料电池离心压缩机叶轮,设计转速 n 为90 000 r/min,额定质量流量 q_m 为0.135 kg/s,总压比 ϵ 为1.70。为满足高转速带来的叶轮强度需求,避免轮盖侧应力过大,叶轮形式选取半开式叶轮;叶片采取等长后弯形式,后弯角为30°。无叶扩压器结构简单,适用工况范围较宽,效

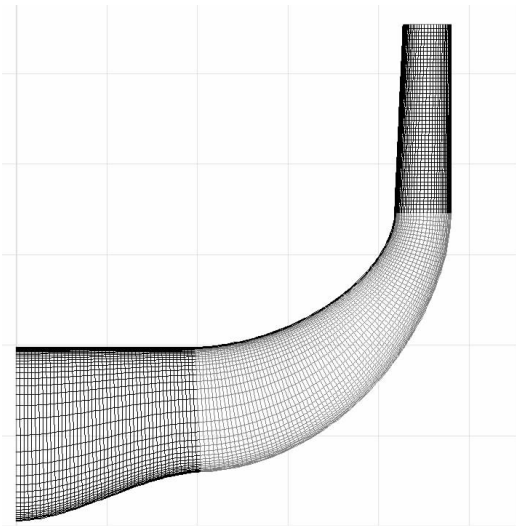
率曲线相较于叶片扩压器更为平坦^[17],因此扩压器形式选取无叶扩压器。经过初始设计得到叶轮主要参数如表 1 所示。

表 1 离心压缩机叶轮主要几何参数
Table 1 Centrifugal compressor impeller main geometric parameters

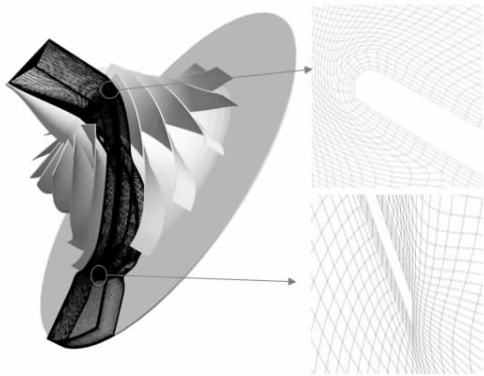
参数	数值
叶片数 Z	11
叶顶间隙 s/mm	0.2
叶片厚度 t/mm	0.5
叶轮进口倾角 $\gamma/(\text{^\circ})$	90
叶轮进口叶根直径 D_{1h}/mm	12
叶轮进口叶顶直径 D_{1s}/mm	37.1
叶轮出口直径 D_2/mm	70.7
叶片出口安装角 $\beta_{2A}/(\text{^\circ})$	30

1.2 数值计算方法

本文采用计算流体力学商业软件 ANSYS Fluent 数值求解三维雷诺时均纳维埃-斯托克斯(RANS)控制方程,进行离心压缩机叶轮气动性能及其流场特性的模拟,主要计算部件包括叶轮进口延伸段、叶轮单通道以及扩压器段。流动控制方程中对流项的离散采用二阶迎风格式,扩散项的离散采用二阶中心格式,时间项的离散采用 4 阶 Runge-Kutta 方法。由于 Spalart-Allmaras(S-A)湍流模型具有收敛速度快、计算精度高等优点,本文湍流计算采用 S-A 湍流模型。离心压缩机计算域流道内网格采取非结构化网格,在壁面附近进行网格加密处理,计算区域网格划分如图 1 所示。为了保证数值计算的有效性,以叶轮等熵效率和总压比作为判定



(a)子午流道网格分布



(b)三维网格分布

图 1 计算域网格分布

Fig. 1 Grid distributions in the computational domain

参数,进行了网格无关性验证,经过数值计算结果比较,总网格数最终确定为 1 214 180。

计算进口边界条件设定为总压力、总温度,其中进口总压设定为 101 325 Pa,总温度为 293.15 K,轴向进气。出口边界条件取质量流量出口,叶片两侧取周期性边界条件进行单通道计算,所有固体壁面取绝热无滑移边界条件。当计算残差降至 10^{-5} 以下且离心压缩机进出口质量流量相对误差小于 0.5%时,认为计算收敛。

1.3 数值模型验证

为验证本文数值计算方法的有效性,本文采用实验方法对设计的燃料电池用离心压缩机进行气动性能测试,实验测试台布置如图 2 所示。



图 2 实验测试台布置

Fig. 2 Experimental test setup

实验测试按照《GB/T 25630—2010 透平压缩机性能试验规程》进行,采用标准规定的实验程序和测试方法,测量离心压缩机的转速、流量、进排气压力、功率等参数。实验装置主要由离心压缩机、数据采集系统、电源及控制系统、电机及控制系统等主要

系统组成。

2 叶轮多参数优化方法

2.1 优化变量选择

离心压缩机叶轮流道扭曲,构型参数较多,本文主要选取3组变量进行叶轮控制参数的寻优工作。

第1组变量为部分单一变量控制的叶轮结构参数,选取叶轮进口倾角 γ 、叶轮出口角余角 β_2 、叶片数 Z 这3个简单参数作为第一组优化变量,记为 $\mathbf{x}$ 。这类参数相对简单,选取角度参数的具体定义如图3所示。

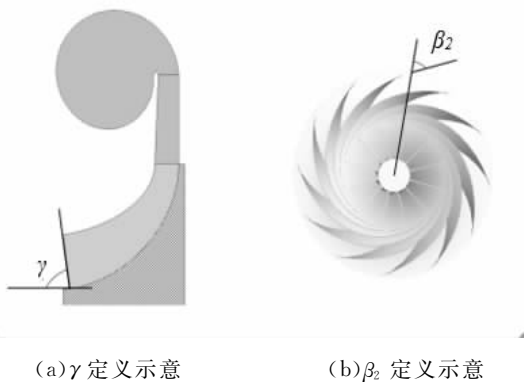


图3 选取角度变量定义

Fig. 3 Diagram of the selected angle definition

离心压缩机叶轮中,无法用单一变量控制的参数较多,如叶轮子午流道型线等复杂曲线。对于复杂曲线,传统的离散数据点坐标描述方法较为复杂,过多的坐标变量使得优化成本过大,优化效率也较低。因此,本文采用Bézier曲线对叶轮进行参数化拟合,利用较少的控制变量实现对离心压缩机叶轮复杂曲线的描述。Bézier曲线易于控制且具有良好的几何特性,如几何不变性、凸包性、变差缩减性等^[18-19],能够较好地适用于复杂三维曲线的几何描述。一条 n 次Bézier曲线的表达式为

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i A_{i,n}(t) \quad (1)$$

式中: $B(t)$ 为原曲线上一点坐标; P_i 为Bézier曲线控制点的坐标; $A_{i,n}(t)$ 为Bernstein基函数多项式,定义为 $A_{i,n}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i}$, $t \in [0, 1]$ 。

第2组变量选取离心压缩机叶轮的子午流道型线控制点,记为 $\mathbf{y}$ 。为保证流道轮廓曲线始终光滑,对子午流道两侧轮廓曲线均采用5个控制点的Bézier曲线进行参数化描述。分别选取轮廓曲线中间3个控制点的纵坐标作为优化变量,优化过程保

持叶轮进出口截面积不变,通过改变子午流道轮廓曲率改变叶轮的气动性能,由此进行子午流道轮廓曲率的优化研究,子午流道型线沿叶轮径向及轴向控制点分布如图4(a)所示。

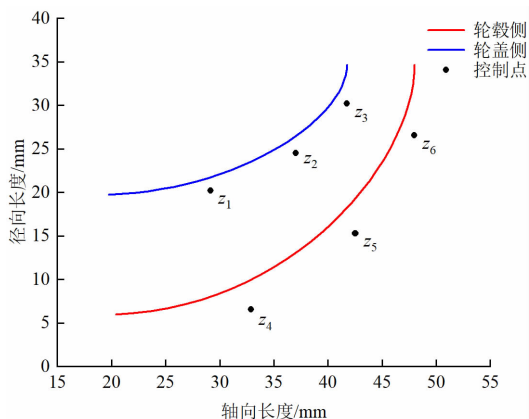
第3组变量为离心压缩机叶轮叶片安装角 β 分布曲线控制点,轮盘及轮盖侧 β 角分布曲线均采用5个控制点的Bézier曲线进行参数化描述。选取轮盘侧曲线中间3个控制点 b_1 、 b_2 、 b_3 的纵坐标作为优化变量,记为 $\mathbf{z}$ 。 β 角分布曲线及轮盘侧控制点分布如图4(b)所示。

本文选取12个共计3组变量 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$ 、 $\mathbf{z}$ 进行离心压缩机叶轮的数值计算与寻优工作,以叶轮等熵效率 η 最大为优化目标,保证优化过程的总压比 ϵ 始终在1.7以上。为控制燃料电池系统的整体寄生功率,限制叶轮功率 P 小于9.20 kW,则优化问题可表述为

$$\begin{cases} \max[\eta(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})] \\ \mathbf{x} = (\gamma, \beta_2, Z) \\ \mathbf{y} = (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6) \\ \mathbf{z} = (b_1, b_2, b_3) \\ \text{s. t. } \gamma \in [70, 90]; \beta_2 \in [40, 70]; \\ Z \in [10, 18]; z_1 \in [18, 21.5]; \\ z_2 \in [22.5, 26]; z_3 \in [27, 33]; \\ z_4 \in [5, 10]; z_5 \in [11, 19]; \\ z_6 \in [22, 30]; b_1 \in [44, 64]; \\ b_2 \in [54, 74]; b_3 \in [29, 49]; \\ \epsilon \geq 1.7; P \leq 9.20 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 多参数优化方法

本文主要结合神经网络代理模型与遗传算法实现离心压缩机叶轮控制变量的寻优工作,采用拉丁超立方抽样方法选取不同变量组合进行数值计算,将变量与计算结果作为样本库训练神经网络代理模



(a) 子午流道控制点分布

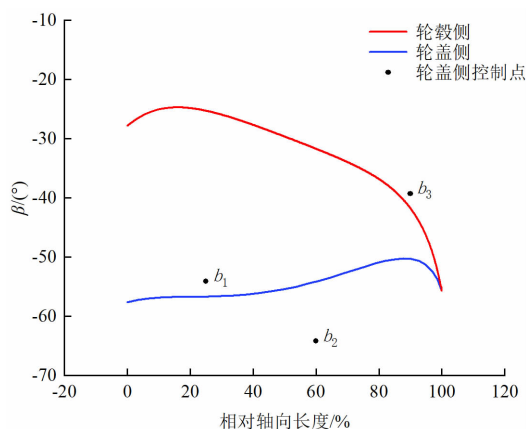
(b) β 角控制点分布

图4 复杂曲线控制点分布情况

Fig. 4 Control points distribution in the impeller design

型,得到二者之间的映射关系并采用遗传算法进行寻优,并将寻优结果进行数值计算验证,最终实现离心压缩机叶轮的优化设计。离心压缩机叶轮多参数优化设计的流程如图5所示。

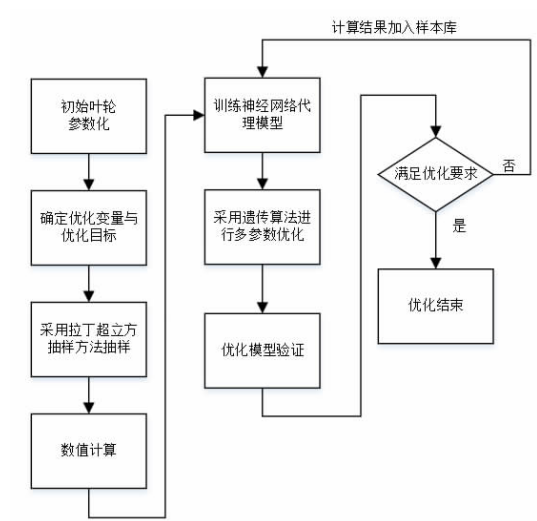


图5 叶轮多参数优化流程

Fig. 5 Flowchart of the impeller multi-parameter optimization design

采用拉丁超立方抽样方式抽取50组参数组合进行数值计算并用于训练神经网络。相比于传统抽样方法,拉丁超立方抽样具有高效的空間填充能力,可以有效降低代理模型对样本库数据点的需求^[20-21]。以叶轮进口倾角 γ 、出口安装角余角 β_2 、子午流道控制点 $z_1 \sim z_2$ 这两组变量为例,通过拉丁超立方抽样方法得到参数组合分布情况,如图6所示。可以看出,抽样结果较均匀地散布于整个样本空间内,有利于提升代理模型对整个样本空间的拟合精度。

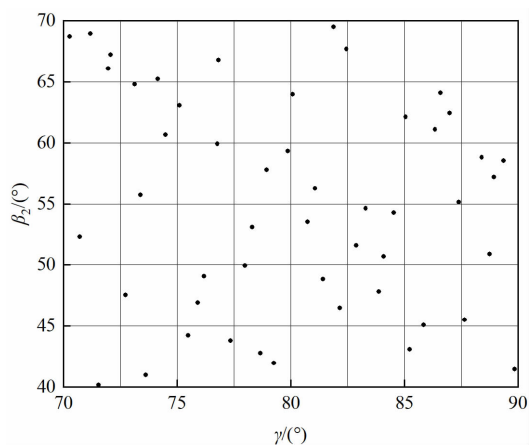
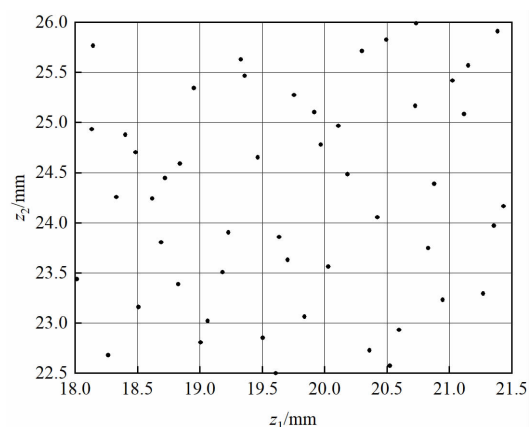
(a) γ - β_2 样本分布(b) $z_1 \sim z_2$ 样本分布

图6 取样点分布情况

Fig. 6 Distribution of sampling points

为提升寻优结果的可靠性并且降低数值计算工作量,本文采用BP神经网络代理模型对叶轮控制参数与气动性能之间的映射关系进行拟合,训练样本库由抽样选取的50组变量与对应数值计算结果构成,设定训练集与测试集的比例为80%、20%。BP神经网络是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络,拥有较好的非线性映射性、自学习与自适应性、泛化性。BP神经网络主要结构包括输入层、隐藏层以及输出层^[22],本文选用含有一层隐含层的BP神经网络,其拓扑结构如图7所示。

本文BP神经网络采用的激励函数为Sigmoid函数,定义为

$$g(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3)$$

BP神经网络隐含层的输出为

$$H_j = g\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + a_j\right) \quad (4)$$

式中: w_{ij} 为输入层到隐含层的权重; x_i 为输入变量, a_j 为输入层到隐含层的偏置值。

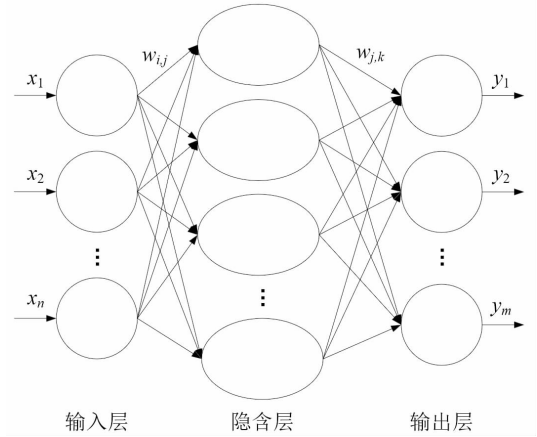


图 7 单隐含层 BP 神经网络的拓扑结构

Fig. 7 Topology of BP neural network with single hidden layer

BP 神经网络输出层的输出为

$$y_m = \sum_{j=1}^l H_j w_{jk} + b_k \tag{5}$$

式中: w_{jk} 为隐含层到输出层的权重; b_k 为隐含层到输出层的偏置值。

通过式(3)~(5)可以得到输入参数 x_n 与输出参数 y_m 的拟合关系,记为

$$y_m = F_{\text{net}}(x_n) \tag{6}$$

本文采用回归值 R 对代理模型的预测精度进行评估^[23], R 的取值范围为 $[0,1]$, 越接近 1 代表越高的拟合精度。训练后等熵效率、总压比的 R 分别为 0.987 2、0.977 3, 表明训练得到的神经网络可以满足精度要求。

针对训练好的神经网络, 本文采用遗传算法实现进一步寻优工作, 该算法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法, 可以同时处理群体中的多个个体, 有效避免陷入局部最优解, 具有自组织性、自适应性和自学习性等优良性质^[24], 具体流程如图 8 所示。

本文编码方式为实数编码, 初始种群类型为自适应种群。本文优化目标函数始终取正值, 且以叶轮等熵效率 η 最大为目标, 并且同时使得总压比 ϵ 、功率 P 满足各自需求。因此, 直接选择目标函数值作为个体的适应度, 适应度函数为 BP 神经网络拟合的输入变量与输出变量的映射关系

$$J = F_{\text{net}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \tag{7}$$

选择方法为锦标赛方法, 交叉方法为中间重组方法, 变异选用高斯分布选取。本文设定优化过程初始种群规模为 150, 进化代数为 200, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.1。

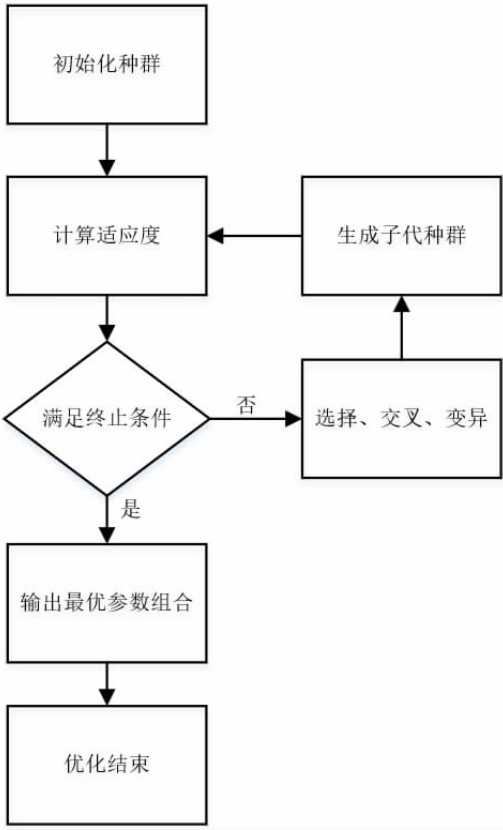


图 8 基于遗传算法的优化设计流程

Fig. 8 Flowchart of the impeller optimization design based on genetic algorithm

3 优化结果分析

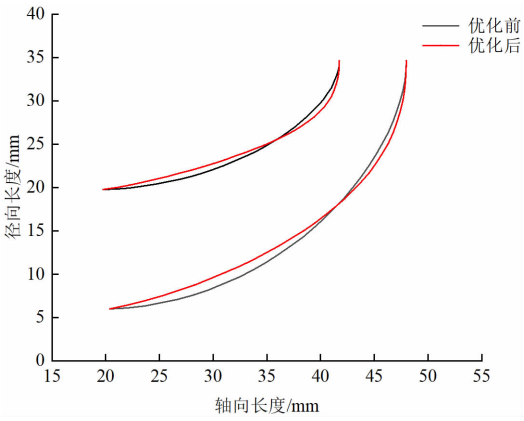
采用上述优化方法可以得到离心压缩机叶轮优化的 Pareto 最优解集前沿, 选取其中等熵效率较高的参数组合, 变量组 $\mathbf{x}$ 优化前后的对比如表 2 所示, 叶轮子午流道型线以及 β 角的分布情况如图 9 所示。

表 2 变量组 $\mathbf{x}$ 优化前后的对比

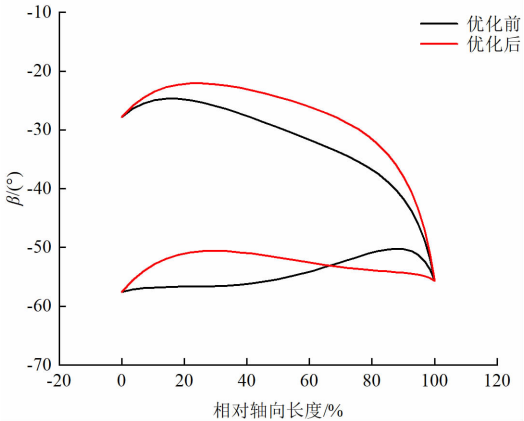
Table 2 Comparison of variable group $\mathbf{x}$ before and after optimization design

参数	数值	
	优化前	优化后
叶轮进口倾角 $\gamma/(^{\circ})$	90	86.13
叶片出口角余角 $\beta_2/(^{\circ})$	60	56.15
叶片数 Z	11	13

相比于初始叶轮, 优化后叶轮进口倾角 γ 减小, 叶片出口角余角 β_2 减小, 叶片出口后弯程度增大。叶片数 Z 增大, 可以有效抑制流道内边界层的发展。 $\mathbf{y}$ 组中每个变量的变化趋势不同, 整体来看, 子



(a) 子午流道优化前后对比



(b) β 角分布优化前后对比

图 9 参数优化前后叶片构型的对比

Fig. 9 Comparison of blade configuration before and after optimization design

午流道轮盖侧型线出口处向内收缩,入口侧流道更为平缓,转向区域向出口侧移动。相比于变量组 y , 变量组 z 变化较明显,说明效率对该组变量敏感性更低,轮盘侧 β 角整体变大,出口侧变化更平缓。

针对优化后的叶轮,采用实验方法测试了该离心压缩机在 90 000 r/min 转速下设计点工况的气动性能,实验测试结果与数值计算结果如表 3 所示。

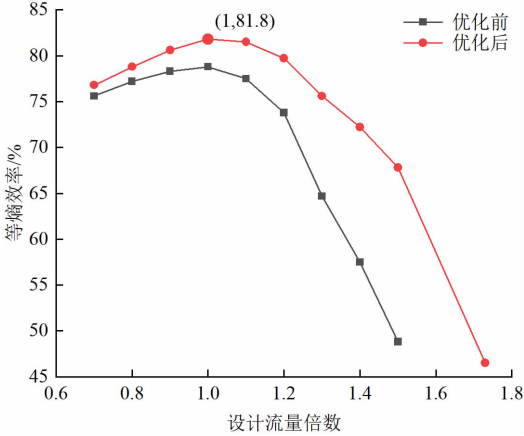
表 3 优化叶轮的实验测试与数值计算结果
Table 3 Experimental and numerical results of the optimized impeller

数值类型	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	总压比	等熵效率/%
实验值	90 000	1.702	79.6
计算值	90 000	1.742	81.8
相对误差/%	0.00	2.23	2.68

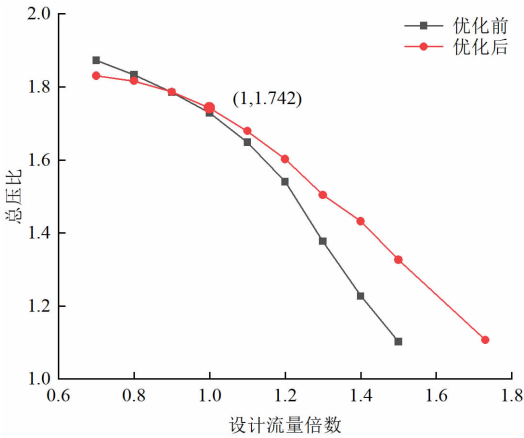
从表 3 可以看出,优化后叶轮的实验测试与数值计算结果较为接近,总压比与等熵效率误差在可

接受范围内。数值计算结果高于实验结果,这是由于数值计算过程中未考虑实际部件的表面粗糙度、计算模型简化误差、实验测量误差等因素的影响。

在同一转速下,对优化前后叶轮在不同流量工况下的气动性能进行了数值计算。优化后设计点处叶轮等熵效率为 81.8%,相比于初始设计有一定提升,总压比为 1.742,功率为 8.53 kW,能够满足设计要求。为便于比较,将叶轮性能曲线横坐标替换为某工况下质量流量与设计流量的比值,定义为设计流量倍数。优化前后离心压缩机叶轮性能曲线如图 10 所示。



(a) 等熵效率性能曲线



(b) 总压比性能曲线

图 10 叶轮性能曲线优化前后的对比

Fig. 10 Comparison of impeller performance map before and after optimization design

从图 10 可以看出,相对于初始设计,优化后叶轮等熵效率在设计点处提高了 3.90%,在全工况范围内均得到一定提升。等熵效率在大流量区域提升较为明显,1.3 倍设计流量处等熵效率提升了 17.06%,叶轮的稳定工况范围变宽。优化后叶轮总压比在设计点为 1.742,可以满足燃料电池离心压

缩机设计需求,大流量区域压比提高,小流量区域有所降低,0.8 倍额定流量处压比降低了 3.47%,但仍可满足总压比大于 1.7 的需求。

设计工况下,选取叶轮流道内部分差异明显的参数分布进行对比,优化前后叶轮子午流道内平均熵分布情况如图 11 所示。可以看出,优化前叶轮轮盖侧及出口处存在较为明显的高熵值区域,这是气体由轴向流动转为径向流动导致的流动分离现象,分离区产生较为明显的涡结构,导致当地熵值较高,造成较大流动损失。向内调整轮盖侧子午流道的型线有效地抑制了流动分离现象,叶轮叶顶侧及出口高熵值区域缩小,叶顶侧能量损失降低。

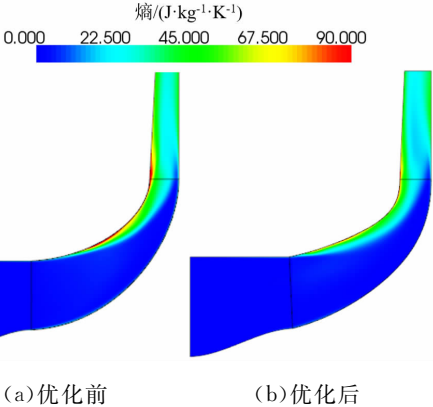


图 11 子午流道平均熵分布优化前后的对比
Fig. 11 Comparison of average entropy distribution along meridional flow path before and after optimization design

图 12 为优化前后离心压缩机叶轮 90% 叶高处相对马赫数的分布情况。可以看出,优化前由于叶轮安装角分布与流动情况匹配度不高,流道内流动分离现象较剧烈,叶片压力面侧存在较明显的低速气体团,导致靠近叶轮出口附近气体不易流出叶轮,造成一定堵塞与损失。优化后叶轮内部低速气体团面积减小,出口侧的流动情况得到改善,优化过程有效抑制了低能流体团沿流道方向的蔓延。通过调整叶轮叶片安装角分布有效降低了叶片尾部负荷,同时增加叶片数较好地减小了叶道内速度梯度,缩小了低能流体区域面积,从而有效提升了叶轮效率。

图 13 为优化前后叶轮出口截面上相对马赫数的分布情况。由于叶顶间隙的存在,叶道内存在由压力面向吸力面流动的二次流现象。优化前叶道内二次流与主流的掺混现象较明显,该现象会干扰流道中的正常流动,带来能量损失,降低叶轮的效率与压比。经过优化,叶轮内部流动情况得到改善,叶片吸力面侧的低速区域明显减小,叶道内的速度分布

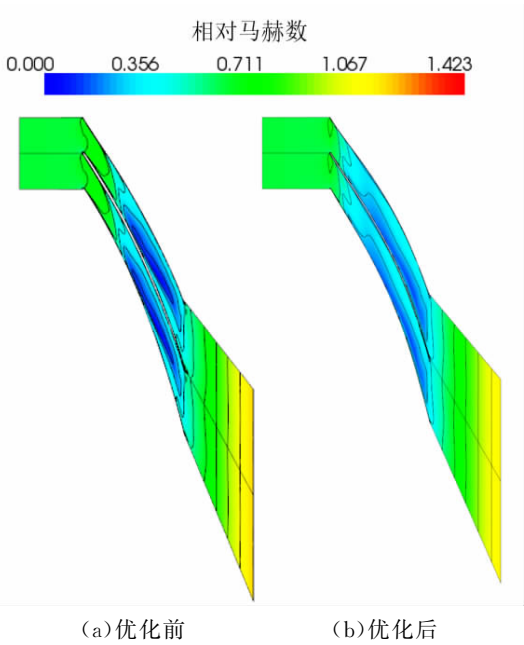


图 12 90% 叶高处优化前后叶轮通道内相对马赫数分布的对比
Fig. 12 Comparison of relative Mach number distribution in the impeller channel before and after optimization at 90% span

更加均匀。减小速度梯度在一定程度上削弱了附面层的横向运动,二次流对主流的掺混作用减弱,降低了内泄露带来的流动损失。

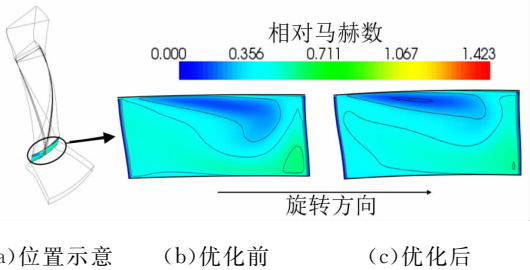


图 13 叶轮出口处相对马赫数分布优化前后的对比
Fig. 13 Comparison of relative Mach number distribution at the impeller outlet before and after optimization design

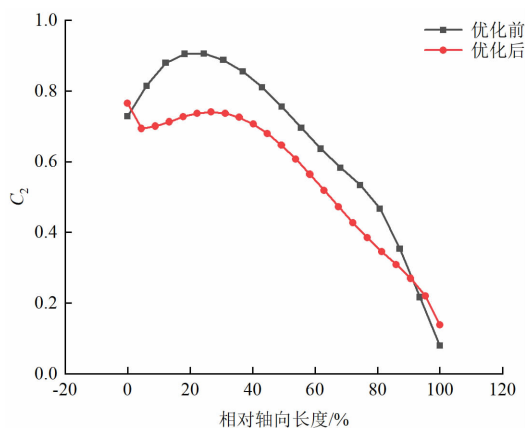
为了衡量流道中流动分离的剧烈程度,引入两个无量纲系数 C_2 及 C_3 , 定义为

$$C_2 = \frac{W_{\text{shroud}} - W_{\text{hub}}}{W} \quad (8)$$

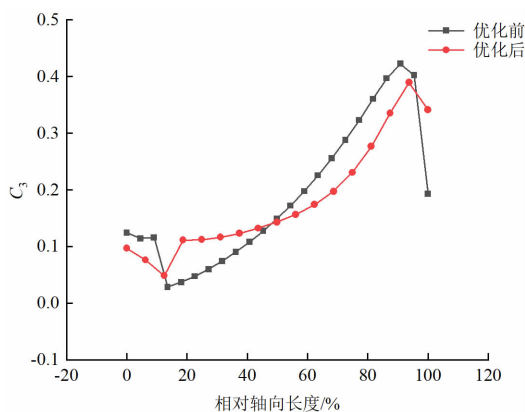
$$C_3 = \frac{W_{\text{suction}} - W_{\text{pressure}}}{W} \quad (9)$$

式中: W_{shroud} 为轮盘侧相对速度; W_{hub} 为轮盖侧相对速度; W_{suction} 为吸力面侧相对速度; W_{pressure} 为压力面侧相对速度; W 为平均相对速度。

根据定义, C_2 为叶轮轮盖-轮盘侧相对速度的相对波动值, C_3 为叶轮叶片压力面-吸力面方向上相对速度的相对波动值。这两个系数可以简单反映对应方向上发生流动分离的剧烈程度, 一般情况下 C_3 不应超过 0.7^[25-26]。图 14 为 C_2 及 C_3 优化前后沿子午方向的分布情况。可以看出, 优化后 C_2 及 C_3 最大值均降低, 流道内的整体流动情况得到改善。相比于初始叶轮, 优化后叶轮在 40% 叶轮子午长度至 90% 叶轮子午长度上的 C_2 及 C_3 均降低, 叶轮中后部流动分离现象得到较明显抑制, 与流场分布情况相符。



(a) 优化前



(b) 优化后

图 14 C_2 及 C_3 分布优化前后的对比

Fig. 14 Comparison of C_2 and C_3 distribution along the meridional flow path before and after optimization design

4 结 论

本文结合神经网络代理模型与遗传算法, 以离心压缩机叶轮等熵效率最大为优化目标, 对离心叶轮关键构型参数进行寻优, 实现了叶轮的多参数优

化设计。通过数值分析优化前后叶轮的气动性能及其内部流动特性, 得到的主要结论如下。

(1) Bézier 曲线可以有效实现离心压缩机叶轮复杂曲线的参数化描述, 减少优化参数数量, 提升优化效率。拉丁超立方抽样方法建立的训练样本库可以有效覆盖样本空间, 减少样本点需求, 结合 BP 神经网络与遗传算法可以实现离心叶轮高效多参数优化设计。

(2) 设计工况下, 优化后叶轮等熵效率提高了 3.90%, 总压比为 1.742, 功率为 8.53 kW, 能够满足设计需求。叶轮稳定运行工况范围变宽, 叶轮等熵效率在多工况范围内均得到一定提升。

(3) 减小叶轮进口倾角 γ 并增大叶片数 Z 可以降低叶片负荷, 有效抑制流道内边界层发展; 叶轮子午流道转向区域向出口侧移动利于减小叶顶侧的高熵值区域, 该区域面积对轮盖侧型线控制参数较为敏感; 优化后叶轮叶片压力面及出口截面速度分布更均匀, 低速气体团面积在多方向上减小, 叶道内流动分离受到抑制。

(4) 本文采用的离心叶轮多参数优化方法可以有效提升离心叶轮整体气动性能并改善叶轮内部流动状态, 可为燃料电池离心压缩机多参数优化设计提供有益的参考。

参考文献:

- [1] 陈培江. 燃料电池车用空气增压系统设计与优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [2] 左曙光, 韦开君, 吴旭东, 等. 采用 Kriging 模型的离心压缩机叶轮多目标参数优化 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 77-83.
ZUO Shuguang, WEI Kaijun, WU Xudong, et al. Multi-objective parameter optimization of centrifugal compressor impeller with Kriging model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 77-83.
- [3] 倪成龙. 小流量离心压缩机流场分析及结构改进研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [4] 孙晔晨, 田玉宝, 席光, 等. 三元叶片型面造型对离心压缩机叶轮气动性能影响的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(11): 135-141.
SUN Yechen, TIAN Yubao, XI Guang, et al. Numerical research on effect of 3-D blade surface profiles on aerodynamic performance of centrifugal compressor impellers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(11): 135-141.
- [5] 席光, 唐永洪, 田玉宝, 等. 任意空间曲面三元叶轮

- 叶片厚度对气动性能的影响 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41(2): 354-360.
- XI Guang, TANG Yonghong, TIAN Yubao, et al. Effect of blade thickness on aerodynamic performance of three-dimensional impeller with arbitrary spatial surface [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(2): 354-360.
- [6] 冀春俊, 李春阳, 房俊翌, 等. 叶片厚度分布对流道式叶片性能的影响分析 [J]. 热科学与技术, 2019, 18(4): 321-326.
- JI Chunjun, LI Chunyang, FANG Junyi, et al. Influence of blade thickness distribution on performance of runner blade [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2019, 18(4): 321-326.
- [7] JI Chunjun, LI Chunyang, FANG Junyi, et al. Loss mechanism of static interstage components of multi-stage centrifugal compressors for integrated blade design [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018(4): 9025650.
- [8] 贺晓希, 宫武旗, 邓俊杰, 等. 叶轮叶顶间隙对离心制冷压缩机性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 30-37.
- HE Xiaoxi, GONG Wuqi, DENG Junjie, et al. Influence of impeller tip clearance on the performance of centrifugal refrigeration compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(7): 30-37.
- [9] LI Tao, WU Yadong, OUYANG Hua. Numerical investigation of tip clearance effects on rotating instability of a low-speed compressor [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 111: 106540.
- [10] 万玉, 许思传, 张良. 燃料电池车用离心叶轮型线参数化及多工况优化 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 98-108.
- WAN Yu, XU Sichuan, ZHANG Liang. Multi-operating condition optimal design of centrifugal impeller for fuel cell vehicle application based on parameterization of impeller profile [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(1): 98-108.
- [11] 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 Xingfeng, YIN Xiangyun, YIN Guofu. Parameter optimization of centrifugal compressor impeller based on CFD and multi-objective algorithm [J]. Fluid Machinery, 2019, 47(3): 31-36.
- [12] 陈培江, 洪伟荣, 陈德鑫. 燃料电池用空压机性能设计与参数优化 [J]. 流体机械, 2020, 48(10): 22-29.
- CHEN Peijiang, HONG Weirong, CHEN Dexin. Performance design and parameter optimization of air compressor for fuel cell [J]. Fluid Machinery, 2020, 48(10): 22-29.
- [13] 程鸿亮, 伊卫林, 季路成. 机器学习在高压比离心叶轮优化设计中的应用研究 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41(11): 2734-2741.
- CHENG Hongliang, YI Weilin, JI Lucheng. Application research of machine learning in optimal design of high pressure-ratio centrifugal impeller [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(11): 2734-2741.
- [14] 李琛玺, 王静, 宋立明, 等. 高压比离心叶轮气动强度多学科优化与知识挖掘 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(5): 102-111.
- LI Chenxi, WANG Jing, SONG Liming, et al. Aero-mechanical multidisciplinary optimization and knowledge discovery of high pressure ratio centrifugal impeller [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(5): 102-111.
- [15] 张西宁, 郭清林, 刘书语. 深度学习技术及其故障诊断应用分析与展望 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 1-13.
- ZHANG Xining, GUO Qinglin, LIU Shuyu. Analysis and prospect of deep learning technology and its fault diagnosis application [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(12): 1-13.
- [16] 罗明, 左志涛, 李弘扬, 等. 基于 BP 人工神经网络的离心压气机叶轮多目标优化设计方法 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(10): 2424-2431.
- LUO Ming, ZUO Zhitao, LI Hongyang, et al. Multi-objective optimization design of centrifugal compressor impeller based on BP artificial neural network [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(10): 2424-2431.
- [17] 徐忠. 离心式压缩机原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [18] 左盼, 李孝检, 刘正先. 离心叶轮叶型参数化设计研究 [J]. 流体机械, 2019, 47(3): 42-47, 36.
- ZUO Pan, LI Xiaojian, LIU Zhengxian. Parametric design research of the centrifugal impeller [J]. Fluid Machinery, 2019, 47(3): 42-47, 36.
- [19] 赵峰. 叶轮机械部件三维参数化优化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [20] WAN Yu, GUAN Jinping, XU Sichuan. Improved empirical parameters design method for centrifugal compressor in PEM fuel cell vehicle application [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(8): 5590-5605.

- [21] ROSLI S J, RAHIM H A, ABDUL RANI K N, et al. A hybrid modified method of the sine cosine algorithm using Latin hypercube sampling with the cuckoo search algorithm for optimization problems [J]. *Electronics*, 2020, 9(11): 1786.
- [22] 杨从新, 凌祖光, 王岩, 等. 改进深度学习算法的对称翼型流场再现 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(3): 20-28.
YANG Congxin, LING Zuguang, WANG Yan, et al. Improved deep learning algorithm for reproduction of airfoil flow field [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(3): 20-28.
- [23] TANG Tianquan, LIU Bo. The genetic algorithm-radial basis function neural network to quickly predict aerodynamic performance of compressors [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; part G Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 235(5): 537-552.
- [24] 刘小民, 张文斌. 采用遗传算法的离心叶轮多目标自动优化设计 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(1): 31-35.
LIU Xiaomin, ZHANG Wenbin. Multi-objective automatic optimization design of centrifugal impeller based on genetic algorithm [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(1): 31-35.
- [25] HOWARD J H G, OSBORNE C. A centrifugal compressor flow analysis employing a jet-wake passage flow model [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1977, 99(1): 141-147.
- [26] HOWARD J H G, ABRAMIAN M, HERMANN P. Experimental investigation of impeller and volute flow fields for a low specific speed pump with single and double volutes [C] // *Proceedings of ASME-JSME Thermal Engineering Conference*. New York, USA: ASME, 1987: 51-61.

(编辑 陶晴 杜秀杰)