

仿生圆弧微槽对离心叶轮气动性能影响的数值研究

樊宏周¹, 雷伟鹏¹, 岳宝², 张伟江², 郭红涛¹, 席光¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 广东美的暖通设备有限公司, 528000, 广东佛山)

摘要: 为提升离心叶轮的气动性能及降低流动损失,以鲨鱼表皮微沟槽为仿生原型,结合数控加工工艺开展了仿生圆弧微槽对离心叶轮气动性能影响的数值研究。针对叶片压力面和吸力面,首先在50%叶高处分别布置不同尺寸的仿生圆弧微槽,探求能使离心叶轮性能得到提升的最佳微槽尺寸;然后,分别按一定叶高间隔布置最佳尺寸的仿生圆弧微槽,研究微槽数量对离心叶轮流场和性能的影响;最后,按不同叶高间隔同时布置不同数量的仿生圆弧微槽,进一步探究其对气动性能的影响规律。数值结果表明:相对宽度为2%、深度为5%的微槽是提升离心叶轮性能的最佳微槽尺寸;在压力面和吸力面分别以7%、6%叶高间隔布置13、16条微槽,能够显著改善叶轮出口截面的流场分布,从而降低流动损失;在压力面和吸力面同时布置最佳尺寸及数量的微槽,能够进一步提升离心叶轮的气动性能,设计工况下等熵效率提升了0.63%,压比提升了0.40%。研究工作可为离心叶轮的设计优化及数控加工提供参考。

关键词: 离心叶轮;仿生圆弧微槽;数控加工;气动性能;等熵效率

中图分类号: TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202410008 **文章编号:** 0253-987X(2024)10-0083-12

Numerical Study on the Influence of Bionic Arc-Shaped Micro-Grooves on the Aerodynamic Performance of Centrifugal Impellers

FAN Hongzhou¹, LEI Weipeng¹, YUE Bao², ZHANG Weijiang², GUO Hongtao¹, XI Guang¹

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

2. Guangdong Midea HVAC Equipment Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: To enhance the aerodynamic performance and reduce flow losses of centrifugal impellers, a numerical study is conducted to explore the effects of biomimetic arc-shaped micro-grooves, inspired by shark skin micro-grooves and implemented through computer numerical control machining technology. The study focuses on the pressure and suction surfaces of the impeller blades. Different sizes of biomimetic arc-shaped micro-grooves are strategically placed at 50% of the blade height to determine the optimal groove size for improving the performance of the centrifugal impeller. Subsequently, the optimal-sized micro-grooves are arranged at regular intervals along the blade height to assess the influence of the number of micro-grooves on the flow field and overall performance of the impeller. Furthermore, varying quantities of biomimetic arc-shaped micro-grooves are

收稿日期: 2023-12-06。 作者简介: 樊宏周(1976—),男,高级工程师;席光(通信作者),男,教授,博士生导师。

基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(52130603)。

网络出版时间: 2024-03-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240306.1119.002>

simultaneously positioned at different blade height intervals to further examine their impact on the aerodynamic performance. The numerical results reveal that micro-grooves with a relative width of 2% and a depth of 5% are identified as the optimal dimensions for enhancing the performance of the centrifugal impeller. Arranging 13 and 16 micro-grooves with intervals of 7% and 6% of the blade height on the pressure and suction surfaces, respectively, yield significant improvements in the flow distribution at the impeller's exit section and result in reduced flow losses. By concurrently incorporating the optimal-sized micro-grooves in optimal quantities on both the pressure and suction surfaces, the aerodynamic performance of the centrifugal impeller is further enhanced. Under the design conditions, the isentropic efficiency improves by 0.63%, and the pressure ratio increases by 0.40%. This study provides valuable insights for the design optimization and computer numerical control machining of centrifugal impellers.

Keywords: centrifugal impeller; bionic arc micro-groove; computer numerical control machining; aerodynamic performance; isentropic efficiency

离心叶轮作为离心压缩机的关键能量转化部件,其性能的优劣直接影响整个机组的稳定运行及工作效率。在设计制造过程中,通过对离心叶轮叶片形状进行改型优化设计,以实现被动流动控制并提高工作效率^[1-2]。此外,直接在叶片表面添加小翼^[3]、微型凸起^[4-5]、微槽^[6-7]等结构也可达到改善流场、提升叶轮性能的目的。

仿生流动表面技术的发展为离心叶轮叶片的优化设计提供了新思路^[8-9]。国外对仿生表面技术的研究始于20世纪30年代,最初是以减小表面粗糙度为目标,认为表面越光滑流动阻力越小。但随着实验和仿真技术的发展,研究发现微尺度非光滑表面结构能够有效减小摩阻^[10-12]。Choi^[13]详细分析了光滑表面和纹状表面边界层近壁的湍流结构,发现通过波纹控制湍流边界层,不仅可以减小湍流表面摩擦,还能降低流动噪声。Sareen等^[14]在涡轮机中布置微槽,发现能量耗散率最高可降低5%。Domel等^[15]在机翼吸力侧添加齿状突起结构,发现该结构能有效减小阻力,从而改变机翼的升阻比。国内对仿生流动减阻技术的研究起步较晚,早期主要通过实验手段研究仿生微结构的减阻效果,而后期数值模拟方法的快速发展为研究表面微结构减阻效果和机理提供了便利。王志恒等^[16]研究了离心压缩机直纹面化叶片压力面侧流向微槽对叶轮性能和流场分布的影响,研究表明:在叶片布置流向微槽能有效降低二次流损失,提升离心叶轮的气动性能。杨雪峰等^[17]研究了不同U型微沟槽表面的减阻特性,发现U型微沟槽在满足一定条件时,减阻效果明显。代翠等^[18]采用数值模拟方法研究了离心叶片仿生非光滑凹坑对泵效率和内部流场的影响,发现该凹

坑结构对泵效率的影响有限,但相较于光滑叶片,壁面剪切力仍降低了12.7%。Liu等^[19]通过数值模拟和试验方法研究了表面添加横向微槽管道的减阻性能,发现横向微槽能减少输送过程中的压力损失。由此可见,在流动表面布置不同形式的微槽结构所带来的性能优化在工程上有很大的应用前景^[20]。

离心叶轮数控加工过程中,刀具会不可避免地会在叶轮叶片上形成加工残留,加工残留的分布位置、高度等均与刀轨路径规划算法密切相关。国内对加工残留的研究大多以优化刀轨降低表面加工误差为目的,聚焦于自由曲面零部件的加工制造^[21-23]。进一步研究发现,数控加工过程中材料的残留形状与鲨鱼表皮连续分布的圆弧形脊状结构^[24](见图1)在形状上具有高度的相似性。因此,结合鲨鱼皮仿生原理及数控加工工艺,探究离心叶轮叶片新型表面形状对其气动性能的影响具有重要的理论及工程应用价值。

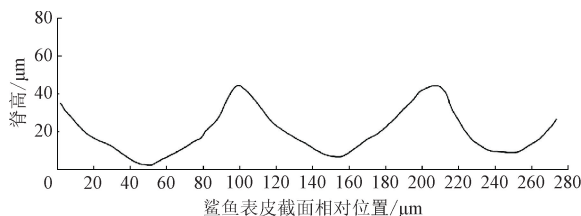


图1 鲨鱼表皮截面轮廓曲线^[24]

Fig. 1 Shark skin cross-sectional contour curve^[24]

本文以某离心叶轮为研究对象,结合鲨鱼皮仿生原理及数控加工工艺,数值分析了布置在叶片压力面和吸力面上不同尺寸、数量的仿生圆弧微槽对离心叶轮气动性能及流场的影响。研究结果表明:通过在叶片表面布置仿生圆弧微槽,可提升离心叶轮的气动性能及降低流动损失,进而为离心叶轮叶

片设计优化与数控加工工艺改进等方面的融合研究提供有益的理论支撑。

1 研究对象及数值计算方案

本文研究对象为某带有分流叶片的半开式离心叶轮^[25],设计压比为 4.2,质量流量为 5.7 kg/s,转速为 19 200 r/min,叶片为变厚度分布,叶根厚度为 6 mm,叶顶厚度为 3 mm,其他几何参数见表 1。

表 1 叶轮主要几何参数

Table 1 Main geometric parameters of impeller	
参数	数值
主叶片数 Z_1	12
分流叶片数 Z_2	12
叶轮进口直径 D_1/mm	104
叶轮出口直径 D_2/mm	460
叶片进、出口安装角 $\beta_1, \beta_2/(\text{^\circ})$	38,58
叶顶间隙 δ/mm	0.5
叶片出口叶高 h_b/mm	18
50%叶高处叶片出口厚度 l_{out}/mm	4.5

采用等熵效率及总压比分析离心叶轮的气动性能,表达式如下

$$\eta_{\text{is}} = \frac{(p_2/p_1)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1}{(T_2/T_1) - 1}$$
 (1)

$$\epsilon = p_2/p_1$$
 (2)

式中: η_{is} 、 ϵ 分别为等熵效率和总压比; p_1 、 p_2 、 T_1 、 T_2 分别为进、出口的总压、总温; κ 为等熵指数。

综合考虑鲨鱼表皮结构及数控加工刀轨形状,对本文所研究的仿生圆弧微槽进行几何参数化,如图 2 所示,其中红色圆弧为微槽结构。定义宽度 b 为仿生圆弧微槽沿叶片方向的距离,深度 t 为沿叶片厚度方向的距离, R 为仿生圆弧微槽半径。同时,对仿生圆弧微槽尺寸进行百分比相对量化:宽度 b 以叶片出口叶高 h_b 为基准,深度 t 以 50% 叶高处叶片出口厚度 l_{out} 为基准。

通过 CFX BladeGen 软件提取整体叶轮流体域的单流道开展数值计算,单流道计算域包括进口段、叶轮和出口无叶扩压器 3 个区域,如图 3 所示。利用 ANSYS Meshing 软件对计算域划分混合结构网格,其中进口段及出口扩压段采用结构化网格,叶轮转子域采用以四面体为主导的非结构化网格,仿生圆弧微槽处采用局部控制的方法划分网格。图 4 给出了单流道计算域网格及仿生圆弧微槽处局部网格的示意图。

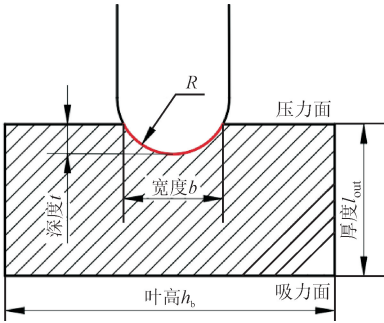


图 2 叶片表面仿生圆弧微槽结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of bionic arc micro-groove structure on blade surface

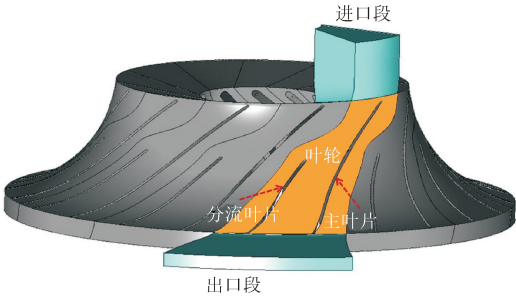


图 3 单流道计算域划分示意图
Fig. 3 Schematic diagram of domain division for single-channel calculation

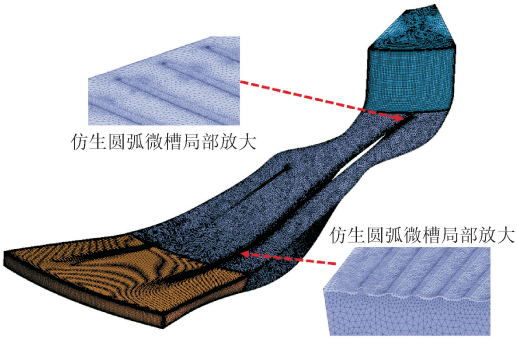


图 4 单流道网格及仿生圆弧微槽局部示意图
Fig. 4 Partial schematic diagram of single channel grid and bionic arc micro-grooves

采用 ANSYS CFX 软件进行数值计算,在叶轮单流道计算域内采用 SST $k-\omega$ 湍流模型求解三维定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程,在近壁面区域采用 Automatic Wall Treatment 函数求解流动边界层。计算工质为理想空气,进口边界给定总温为 308 K,总压为 1.013×10^5 Pa,出口边界给定质量流量,叶轮转速为设计转速,固体壁面采用绝热、无滑移的边界条件,转静交界面采用冻结转子法,单流道流体域

设置为周期性界面。

本文对布置在叶片上不同尺寸及数量的仿生圆弧微槽均进行了网格无关性验证。首先,对原型叶轮进行验证,发现当单流道的网格节点数为 75 万时,等熵效率及总压比的相对误差较小,仅为 0.05%。接着,控制原型叶轮流体域其他位置的网格节点数不变,采用局部加密方式改变仿生圆弧微槽处的网格数,选取 5 种网格数量方案对布置有 3、9、13、16、19 条仿生圆弧微槽的叶片压力面开展网格无关性验证,得到的结果如图 5 所示。由图可见,离心叶轮的等熵效率和总压比随着网格节点数的增大逐渐趋于平稳。总体来看,后 3 种网格方案的计算结果相对误差较小,均可满足无关性要求,考虑到计算效率,选取第 3 种网格方案开展后续数值计算。

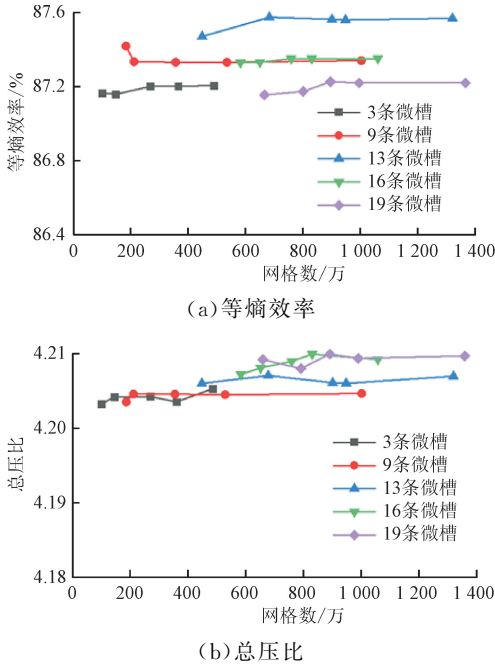


图 5 网格无关性验证

Fig. 5 Grid independence verification

为验证数值模拟方法的准确性,本文采用已公开实验数据的 Krain 离心叶轮^[26]进行实验验证。图 6 给出了文献[26]公开的实验数据与本文数值计算得到的总压比及等熵效率的对比。由图可见,设计点处实验测量到的等熵效率为 82.97%,总压比为 4.03;数值计算得到的等熵效率为 82.34%,总压比为 4.21。误差可能是湍流模型预测误差及数值计算设定的计算域与实验之间的差异所引起的。总体而言,实验测量与数值模拟结果变化趋势基本一致,且二者偏差遵循相同的变化规律,表明该数值方法具有较高的模拟精度。

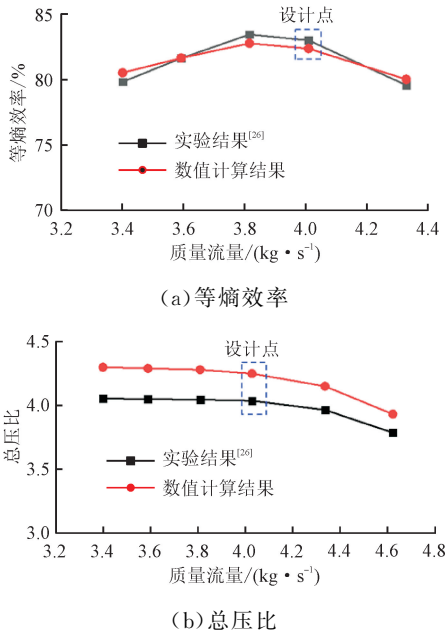


图 6 数值模拟与实验结果^[26]的对比

Fig. 6 Comparison of numerical simulation and experimental results^[26]

2 仿生圆弧微槽尺寸对叶轮性能的影响研究

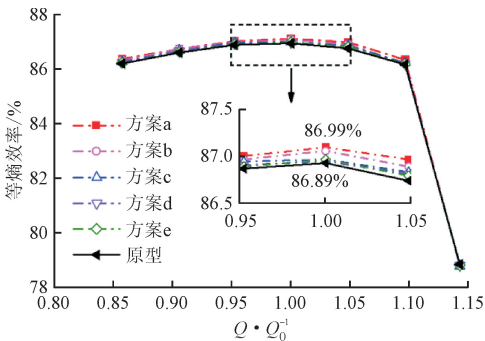
文献[16]研究表明:在 50%叶高处布置流向微槽对离心叶轮的性能提升最大。参考该流向微槽的布置位置,本文首先在叶片压力面和吸力面 50%叶高处分别布置不同尺寸的仿生圆弧微槽,对比分析微槽尺寸对离心叶轮气动性能及流场分布的影响,以探求对性能提升最佳的微槽尺寸。选取的微槽尺寸及具体方案编号如表 2 所示,其中小写字母对应压力面,大写字母对应吸力面。

表 2 仿生圆弧微槽尺寸方案		
Table 2 Bionic arc micro-groove dimensioned scheme		
方案	相对宽度($b \cdot h_b^{-1}$)/%	相对深度($t \cdot l_{out}^{-1}$)/%
a,A	2	5
b,B	2	10
c,C	5	5
d,D	5	10
e,E	10	10

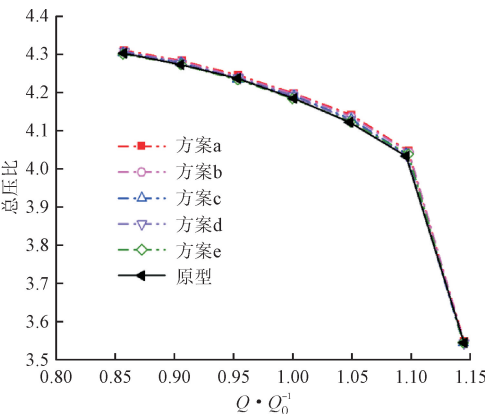
2.1 压力面 50%叶高处仿生圆弧微槽尺寸影响研究

根据表 2 的尺寸方案,在叶片压力面 50%叶高处布置不同尺寸的仿生圆弧微槽。以无因次流量 $Q \cdot Q_0^{-1}$ 为横轴,等熵效率和总压比为纵轴,绘制离心叶轮的性能曲线,如图 7 所示。由图 7(a)可见,

在压力面 50% 叶高处布置不同尺寸的仿生圆弧微槽,均可提升离心叶轮的等熵效率。设计工况下,相对宽度为 2%、深度为 5% 的微槽对离心叶轮的等熵效率提升最大,约为 0.10%。从图 7(b)中的无因次流量-总压比曲线发现,方案 a~e 的仿生圆弧微槽对总压比的影响均较小。



(a) 无因次流量-等熵效率



(b) 无因次流量-总压比

图 7 叶片压力面 50% 叶高处布置不同尺寸微槽时叶轮的性能曲线

Fig.7 Performance curves of the impeller with different dimensions of micro-groove arranged at 50% blade height on the pressure surface

由上可知,在叶片压力面 50% 叶高处采用方案 a 布置仿生圆弧微槽,对离心叶轮的等熵效率提升相对最大。进一步对比分析方案 a 与原型叶轮的内流场分布特性,图 8 给出了离心叶轮叶片压力面的极限流线分布。从图中可以看出,原型叶片压力面存在明显由轮盘侧向轮盖侧的二次流(红色箭头所示),导致叶顶处出现流动分离现象。当在压力面 50% 叶高处布置仿生圆弧微槽后,叶片附面层的流动状态发生改变,微槽处的低速流体被有效限制在了底部,因此当流体由轮盘侧向轮盖侧移动时,由于微槽底部低速流体的屏障作用,极限流线出现明显偏折(红色矩形框所示),从而有效降低了二次流,有助于提升离心叶轮的气动性能。

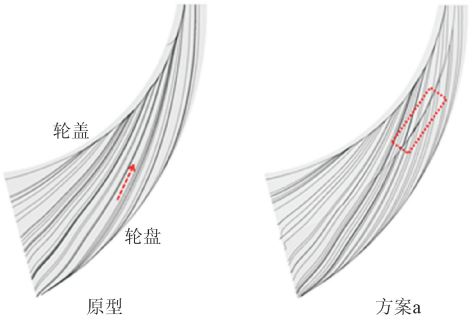
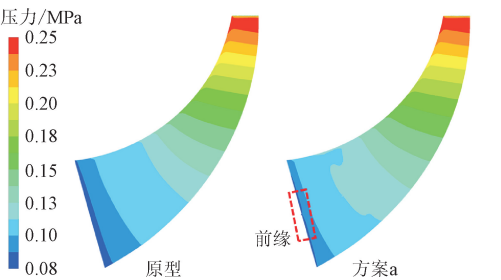


图 8 叶片压力面的极限流线

Fig.8 Ultimate streamline of blade pressure surface

图 9 对比了原型叶片和以方案 a 布置仿生圆弧微槽时,叶片压力面的压力分布及叶轮出口截面的相对马赫数分布云图。



(a) 压力面压力分布



(b) 出口截面相对马赫数

图 9 原型叶片与压力面 50% 叶高处布置微槽时叶轮的流场分布对比

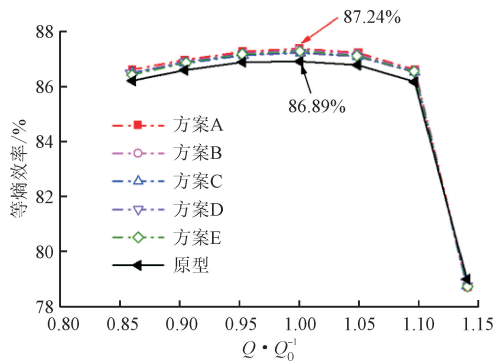
Fig.9 Comparison of the flow field on the impeller between the prototype blade and micro-grooves arranged at 50% blade height on the pressure side

由图 9(a)可知,原型叶片和布置微槽时叶片的压力分布存在差异,当布置微槽时,叶片压力面前缘低压区面积显著减小(红色矩形框所示),压力等值线发生变化,前缘处的低压区通常由于叶片几何形状的曲率变化,导致气流通经该区域时发生流动分离,从而形成局部低压区。由此可见,在叶片压力面布置微槽结构,能有效改善叶片表

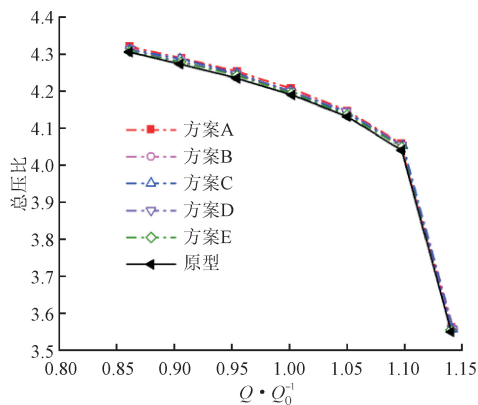
面的流动状态,从而抑制流动分离,降低流动损失。从图 9(b)可以看出,布置仿生圆弧微槽影响了主叶片压力面侧和相邻分流叶片吸力面流道处的相对马赫数分布,使得压力面侧局部高马赫数区域面积减小,低马赫数区域面积增大,最终导致离心叶轮出口截面流场分布较好,流动损失降低,等熵效率提升。

2.2 吸力面 50% 叶高处仿生圆弧微槽尺寸影响研究

采用方案 A~E(见表 2),对在叶片吸力面 50% 叶高处布置有不同尺寸仿生圆弧微槽的叶轮性能开展研究,结果如图 10 所示。由图可见,在叶片吸力面布置不同尺寸的仿生圆弧微槽,均能提升离心叶轮的等熵效率,设计工况下等熵效率最高提升了 0.35%(采用方案 A),总压比变化不大。



(a) 无因次流量-等熵效率



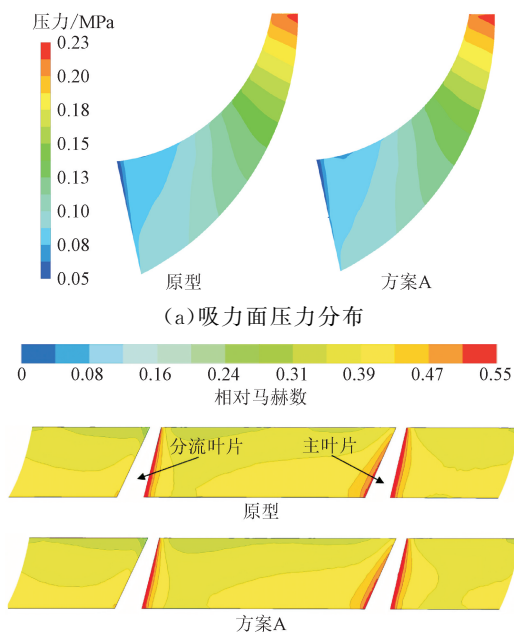
(b) 无因次流量-总压比

图 10 叶片吸力面 50% 叶高处布置不同尺寸微槽时叶轮的性能曲线

Fig. 10 Performance curves of the impeller with different dimensions of micro-groove arranged at 50% blade height on the suction surface

图 11 对比了原型叶片和在叶片吸力面采用方案 A 布置仿生圆弧微槽时,叶片吸力面的压力分布

及叶轮出口截面的相对马赫数分布云图。由图 11(a)可见,在叶片吸力面 50% 叶高处布置仿生圆弧微槽,对压力分布的影响并不明显,二者差异仅出现在叶片靠近进、出口处。由图 11(b)可见,在叶片吸力面 50% 叶高处采用方案 A 布置仿生圆弧微槽,改变了主叶片压力面侧的相对马赫数分布,与图 9(b)的变化趋势一致,表明仿生圆弧微槽的存在使得局部位置的高马赫数区域面积减少,流动损失降低,等熵效率提升。



(b) 出口截面相对马赫数

图 11 原型叶片与吸力面 50% 叶高处布置微槽时叶轮的流场分布对比

Fig. 11 Comparison of the flow field on the impeller between the prototype blade and micro-grooves arranged at 50% blade height on the suction side

3 仿生圆弧微槽数量对叶轮性能的影响研究

上节分析了在叶片压力面和吸力面 50% 叶高处布置不同尺寸仿生圆弧微槽对离心叶轮气动性能的影响,并得出相对宽度为 2%、相对深度为 5% 的仿生圆弧微槽是提升离心叶轮性能最佳的微槽尺寸,设计工况下等熵效率分别提升了 0.10% 和 0.35%。与鲨鱼表皮连续分布的脊状表面不同,本节旨在探究不同数量的仿生圆弧微槽对叶片性能的影响,从而为后续工作提供理论指导。现按照一定叶高间隔,分别在叶片压力面和吸力面布置最佳尺寸的仿生圆弧微槽,探究微槽数量对离心叶轮气动性能及流场的影响,具体方案如表 3 所示,其中仿生圆

弧微槽的最大数量以连续覆盖最短叶高为标准。

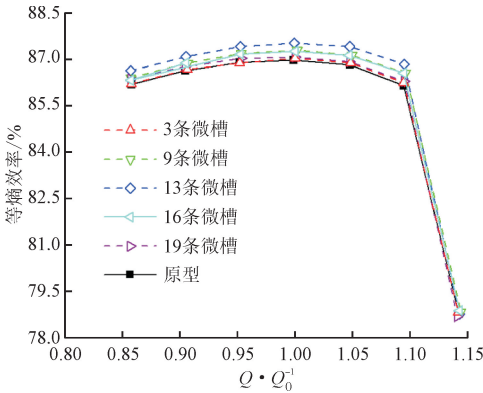
表 3 仿生圆弧微槽数量方案

Table 3 Bionic arc micro-groove quantity scheme

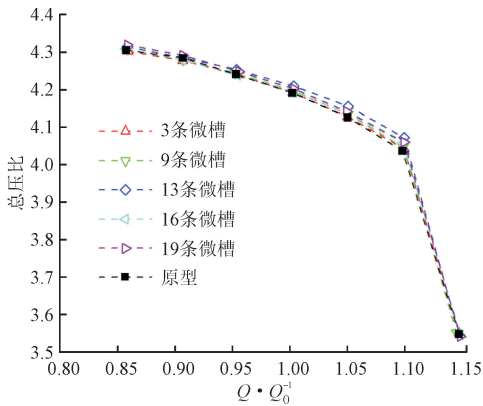
仿生圆弧微槽数	布置规律
3	25%叶高间隔
9	10%叶高间隔
13	7%叶高间隔
16	6%叶高间隔
19	5%叶高间隔

3.1 压力面仿生圆弧微槽数量影响研究

图 12 给出了布置不同数量仿生圆弧微槽时离心叶轮的性能曲线。由图 12(a)可见,非阻塞工况($Q \cdot Q_0^{-1}$ 的取值范围为 0.85~1.10)下,在叶片压力面布置不同数量的仿生圆弧微槽,均能提升离心叶轮的等熵效率,按 7%叶高间隔布置 13 条仿生圆弧微槽对离心叶轮的等熵效率提升最为明显,设计工况下等熵效率提升了约 0.50%。不同数量的仿生圆弧微槽对离心叶轮总压比的影响均较小,其中按 7%叶高间隔布置 13 条微槽的影响相对较大。



(a) 无因次流量-等熵效率



(b) 无因次流量-总压比

图 12 叶片压力面布置不同数量微槽时叶轮的性能曲线
Fig. 12 Performance curves of impeller with different numbers of micro-grooves arranged on blade pressure surface

为探究上述仿生圆弧微槽对离心叶轮性能产生影响的原因,图 13 给出了设计工况下,原型叶片与叶片压力面以 7%叶高间隔布置 13 条仿生圆弧微槽时叶轮出口截面的流场分布对比。由图可见,整体流场变化趋势一致,但在局部区域存在一定差异。如图 13(a)所示,在原型叶片的主叶片吸力面侧存在局部低压区,布置仿生圆弧微槽能够有效减小该位置的局部低压区面积,同时增加主叶片压力面和相邻分流叶片吸力面流道处的高压区面积。由图 13(b)可见,当在叶片压力面布置仿生圆弧微槽时,叶轮出口截面高熵产区域面积明显减少,特别是在靠近轮盖侧的位置。由图 13(c)可见,在叶片压力面布置 13 条仿生圆弧微槽时,靠近主叶片压力面侧的高马赫数区域面积减少,从而减少了气体在流道内的流动损失,提升了气动性能。综上,离心叶轮叶顶间隙的存在使得靠近叶顶位置出现由压力面向吸力面流动的气体,当在叶片压力面布置一定数量的仿生圆弧微槽时,靠近叶顶位置的微槽减弱了壁面处低速流体与外界流体之间的动量传递,使得间隙流出的气体产生压力波动,从而改变了叶轮出口截面的流场分布。

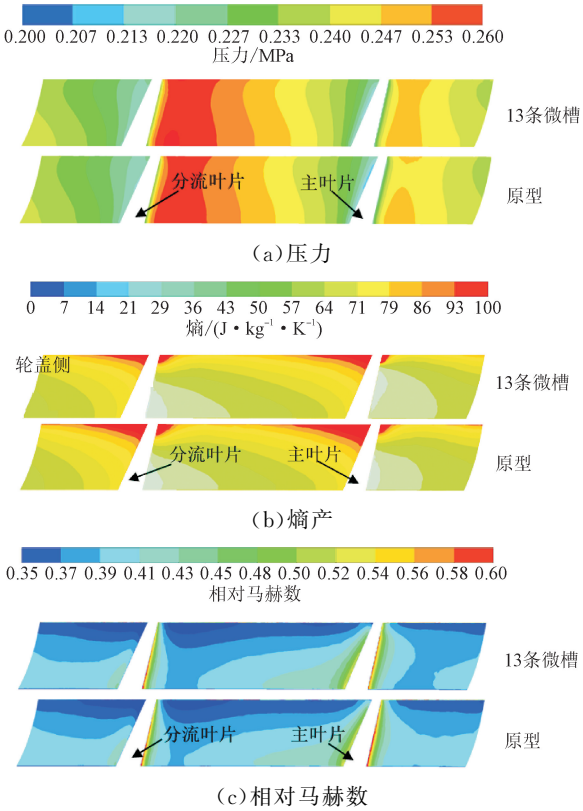
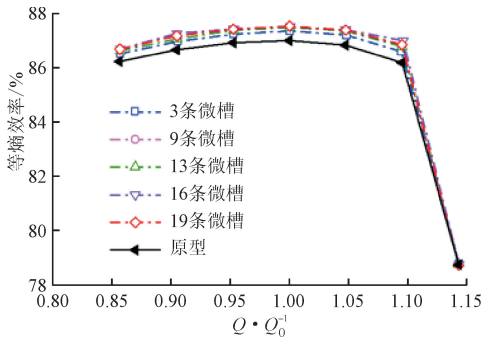


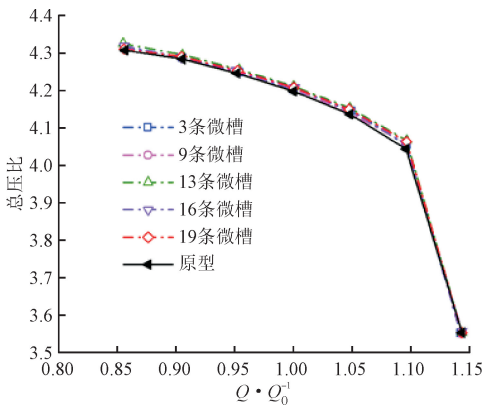
图 13 原型叶片与压力面布置 13 条微槽时叶轮出口截面的流场分布对比
Fig. 13 Comparison of the flow field at the impeller outlet between 13 micro-grooves arranged on the blade pressure surface and the prototype blade

3.2 吸力面仿生圆弧微槽数量影响研究

下面探究在叶片吸力面布置不同数量的仿生圆弧微槽对离心叶轮性能及流场分布的影响。图 14 为在叶片吸力面布置不同数量微槽时叶轮的性能曲线。由图可见,非阻塞工况下,在叶片吸力面布置不同数量的仿生圆弧微槽,均能提高离心叶轮的等熵效率和总压比,其中按 6% 叶高间隔布置 16 条微槽对离心叶轮等熵效率的提升最大,幅度约为 0.53%。



(a) 无因次流量-等熵效率



(b) 无因次流量-总压比

图 14 叶片吸力面布置不同数量微槽时叶轮的性能曲线

Fig. 14 Performance curves of impeller with different numbers of micro-grooves arranged on blade suction surface

为进一步分析叶片吸力面布置不同数量的仿生圆弧微槽对离心叶轮性能产生影响的原因,图 15 给出了设计工况下叶片吸力面布置不同数量微槽时,叶轮出口截面附近的局部压力分布。由图可见,在叶片吸力面布置仿生圆弧微槽,能够减少甚至消除叶片壁面附近的低压区,增大流道处的高压区面积,从而使叶轮获得良好的流场分布,提升了等熵效率。

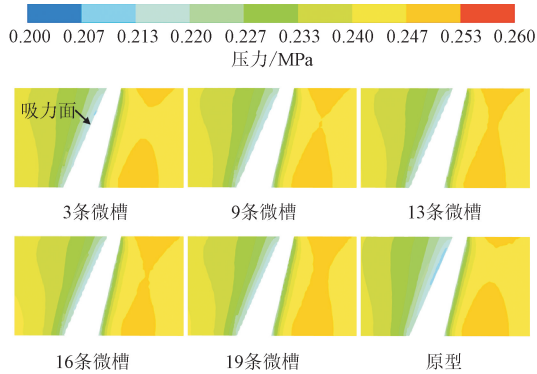


图 15 叶片吸力面布置不同数量微槽时叶轮出口截面的局部压力分布

Fig. 15 Local pressure distribution at the impeller outlet with different numbers of micro-grooves arranged on the suction surface of the blade

4 压力面和吸力面同时布置微槽研究

在离心叶轮叶片压力面和吸力面分别布置仿生圆弧微槽,一定程度上均可以改善流场并提升叶轮性能,以相对宽度为 2%、相对深度为 5% 分别在压力面以 7% 叶高间隔布置 13 条仿生圆弧微槽和在吸力面以 6% 叶高间隔布置 16 条仿生圆弧微槽对叶轮性能的提升最大。本节通过在叶片压力面和吸力面同时布置上述形式的仿生圆弧微槽,进一步研究其对离心叶轮气动性能、流场及叶片结构强度的影响。图 16 为在叶片压力面及吸力面同时布置仿生圆弧微槽时的模型示意图。

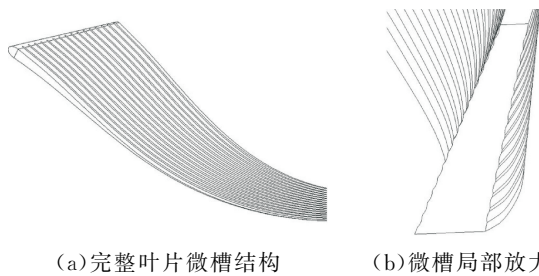


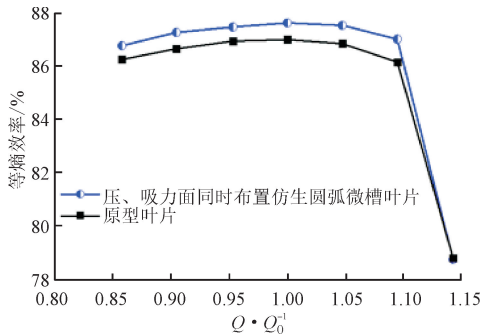
图 16 压力面和吸力面同时布置微槽时的模型示意图

Fig. 16 Model schematic diagram of micro-grooves arranged both on pressure and suction surfaces

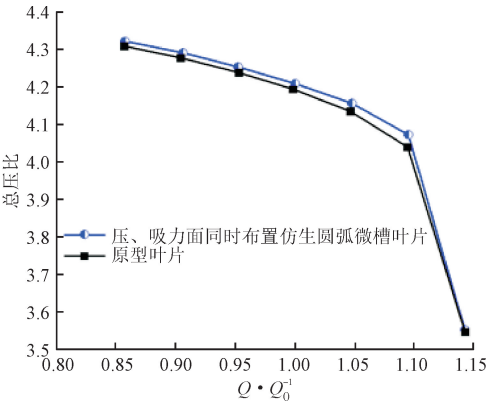
4.1 离心叶轮性能及流场研究

图 17 为离心叶轮叶片压力面和吸力面同时布置仿生圆弧微槽时的性能曲线。由图可见,全工况范围内,相比原型叶片,以相对宽度为 2%、相对深度为 5%,同时在叶片压力面以 7% 叶高间隔布置 13 条、吸力面以 6% 叶高间隔布置 16 条仿生圆弧微

槽,可显著提升离心叶轮的等熵效率及总压比。



(a)无因次流量-等熵效率



(b)无因次流量-总压比

图 17 原型叶片与压力面和吸力面同时布置微槽时叶轮的性能曲线对比
Fig. 17 Comparison of performance curves of the impeller between micro-grooves arranged simultaneously on the pressure and suction sides and the prototype blade

接着,对比分析原型叶片与同时在压力面和吸力面布置仿生圆弧微槽的流场分布特点,并深入探究影响出口截面流场分布的原因。图 18 为原型叶片与同时在压力面和吸力面布置仿生圆弧微槽叶片的出口截面流场分布对比。由图可见,同时在叶片压力面和吸力面布置仿生圆弧微槽,叶轮出口截面的流场分布会发生较大变化。由图 18(a)可见,相较于原型叶片,在压力面和吸力面同时布置微槽,主叶片吸力面侧局部低压区消失,主叶片和分流叶片之间的流道高压区面积增大。由图 18(b)可见,在压力面和吸力面同时布置微槽,主叶片吸力面和分流叶片压力面之间的流道高熵产区域面积明显减少,从而降低了气体流动过程中因扰动而产生的能量损失。如图 18(c)所示,从整个流道分析,当在压力面和吸力面同时布置微槽,主叶片压力面和分流叶片吸力面之间的流道高马赫数区域面积明显减小;从局部区域分析,在压力面和吸力面同时布置微槽,主叶片吸力面侧高马赫数区域的面积增大。

由上可知,同时在叶片压力面和吸力面布置仿生圆弧微槽,对叶轮流场分布的影响并不等同于分别在压力面或吸力面布置仿生圆弧微槽影响效果的叠加。

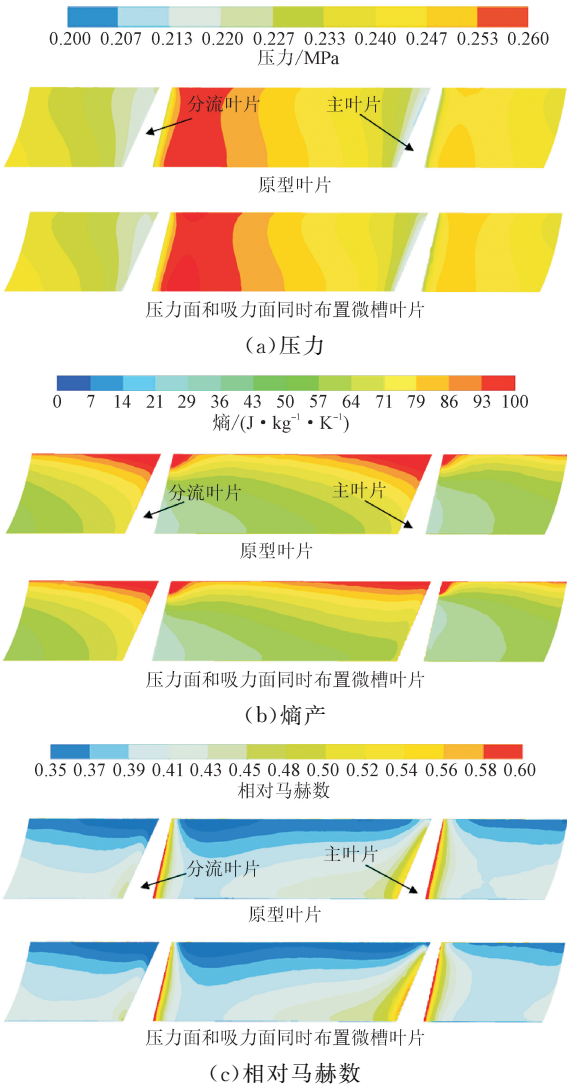


图 18 原型叶片与压力面和吸力面同时布置微槽时叶轮出口截面的流场分布对比
Fig. 18 Comparison of the flow field at the impeller outlet between micro-grooves arranged simultaneously on the pressure and suction sides and the prototype blade

综上所述,在叶片压力面和吸力面同时布置仿生圆弧微槽,能够进一步提升离心叶轮的性能,改善叶轮出口截面的流场分布。相比原型叶片,离心叶轮的等熵效率和总压比显著提升,设计工况下等熵效率提升了 0.63%,总压比提升了 0.40%。

4.2 离心叶轮叶片结构强度研究

在离心叶轮叶片表面布置仿生圆弧微槽,一方面改变了叶轮内部的流场分布和气动性能,另一方

面对叶轮本身的结构强度也会产生影响。因此,本文对压力面和吸力面同时布置仿生圆弧微槽的离心叶轮进行了叶片结构强度评估。采用 Static Structural 模块进行有限元计算,在叶片上施加离心载荷和气动载荷,并在叶片与轮盘结合面设置固定约束,计算得到离心叶轮叶片的等效应力及总变形分布,如图 19 所示。离心叶轮叶片材料选取马氏体沉淀硬化不锈钢(FV520B),基本物理参数如表 4 所示。

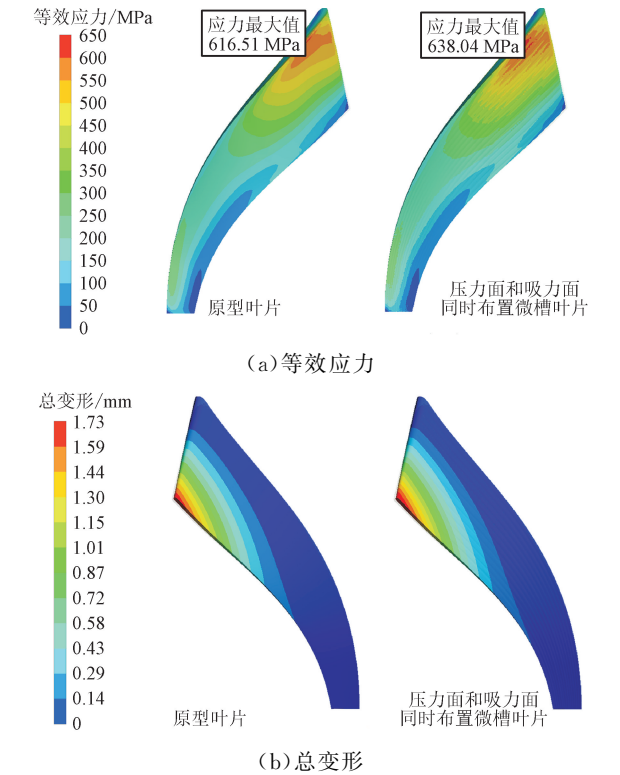


图 19 原型叶片与压力面和吸力面同时布置微槽时叶片的强度分布对比

Fig. 19 Comparison of strength parameters distribution between micro-grooves arranged simultaneously on the pressure and suction sides and the prototype blade

表 4 不锈钢物理参数

Table 4 Physical parameters of stainless steel			
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服极限/MPa
7.8×10^3	2×10^5	0.3	1.029×10^5

由图 19(a)可见,原型叶片与在压力面和吸力面同时布置仿生圆弧微槽叶片的等效应力分布类似,最大应力均位于叶片吸力面靠近前缘位置的叶根附近,最小应力位于叶顶附近。原型叶片的最小应力为 0.71 MPa,最大应力为 616.51 MPa,平均应力为 194.18 MPa。压力面和吸力面同时布置微槽时,叶片

的最小应力为 0.35 MPa,最大应力为 638.04 MPa,平均应力为 191.17 MPa,相较于原型叶片,最大应力增大了 3.5%,最小应力减小了 50.7%,平均应力减小了 1.5%。虽然此时最大等效应力增大,但仍远小于材料的屈服极限,能够满足结构强度要求。图 19(b)展示了原型叶片与压力面和吸力面同时布置仿生圆弧微槽时叶片的总变形分布。由图可知,二者的叶片总变形分布特点相同,最大变形位于叶片前缘叶顶附近,最小变形位于叶根附近。原型叶片的最大变形为 1.71 mm,叶片压力面和吸力面同时布置仿生圆弧微槽时的最大变形为 1.72 mm,总变形量基本相同。因此,从变形的角度分析,与原型叶片相比,同时在叶片压力面和吸力面布置仿生圆弧微槽,叶片的变形位置和变形量无明显变化。

5 结 论

本文以某离心叶轮为研究对象,结合鲨鱼皮仿生原理及数控加工工艺,通过对在叶片压力面和吸力面布置不同尺寸、数量的仿生圆弧微槽进行数值模拟分析,探讨并总结了仿生圆弧微槽对离心叶轮气动性能及流场分布的影响,得到以下结论。

(1)在叶片压力面和吸力面 50%叶高处分别布置不同尺寸的仿生圆弧微槽,可提升离心叶轮的等熵效率,但对总压比影响较小,相对宽度为 2%、相对深度为 5%的微槽对等熵效率的提升最大,可视为最佳微槽尺寸。

(2)相较于原型叶片,同时在叶片压力面以 7%叶高间隔布置 13 条、吸力面以 6%叶高间隔布置 16 条最佳尺寸的仿生圆弧微槽,可进一步提升离心叶轮的气动性能,改善叶轮出口截面的流场分布,降低流动损失,设计工况下的等熵效率提升了 0.63%,压比提升了 0.40%。此外,在叶片压力面和吸力面同时布置仿生圆弧微槽,对离心叶轮的结构强度及变形基本无影响。

综上所述,考虑叶片厚度和宽度,在离心叶轮叶片表面布置一定尺寸及数量的仿生圆弧微槽,可有效提升离心叶轮的气动性能,降低流动损失,进而为离心叶轮叶片的结构设计及数控加工工艺的改进提供参考。

参考文献:

[1] 周逸伦,孙永瑞,胡付佳,等. 仿鸮翼离心压缩机叶轮的参数优化及性能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(7): 151-159.

- ZHOU Yilun, SUN Yongrui, HU Fujia, et al. Parametric optimization and performance investigation of centrifugal compressor with bionic impeller inspired by owl's wing [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(7): 151-159.
- [2] 郭红涛,樊宏周,席光. 离心叶片进出口几何形状对气动性能影响研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(6): 181-190.
- GUO Hongtao, FAN Hongzhou, XI Guang. Impact of inlet and outlet geometry of centrifugal blade on aerodynamic performance [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(6): 181-190.
- [3] 陈亚莉,孙中国,唐永洪,等. 叶端加不同小翼对 Krain 离心叶轮气动性能影响的数值研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(11): 49-55.
- CHEN Yali, SUN Zhongguo, TANG Yonghong, et al. Numerical investigation on the effect of blade tip winglets on the aerodynamic performance of Krain centrifugal impeller [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(11): 49-55.
- [4] 成水燕,聂智军,李立. 微型凸起流动控制用于翼型的减阻特性研究 [J]. *航空计算技术*, 2017, 47(3): 40-44.
- CHENG Shuiyan, NIE Zhijun, LI Li. Drag reduction characteristic research of mini-protuberance flow control on airfoil [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2017, 47(3): 40-44.
- [5] 许耀宇,李鑫,谭慧俊,等. 基于局部粒子投放的压缩拐角激波/边界层干扰流动控制研究 [J]. *推进技术*, 2023, 44(2): 105-114.
- XU Yaoyu, LI Xin, TAN Huijun, et al. Compression corner shock wave/boundary layer interaction flow control based on local particles injection [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(2): 105-114.
- [6] WU Zhengren, LI Shuguang, LIU Mei, et al. Numerical research on the turbulent drag reduction mechanism of a transverse groove structure on an airfoil blade [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2019, 13(1): 1024-1035.
- [7] MA Rong, MA Hongwei, ZHANG Zhenyang, et al. Effects of a kind of surface groove on flow loss in both rectangular and circular ducts at different Reynolds numbers [J]. *Journal of Thermal Science*, 2016, 25(5): 389-393.
- [8] WU Zhengren, CHENG Xianghui, YANG Yufei, et al. Numerical study on flow characteristics of airfoil with bionic micro-grooves [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, 44(11): 505.
- [9] SHARMA V, DUTTA S. Experimental and numerical investigation of bio-inspired riblet for drag reduction [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2023, 145(2): 021207.
- [10] WALSH M J. Riblets as a viscous drag reduction technique [J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(4): 485-486.
- [11] CHU D C, KARNIADAKIS G E. A direct numerical simulation of laminar and turbulent flow over riblet-mounted surfaces [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 250: 1-42.
- [12] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, 338: 59-87.
- [13] CHOI K S. Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 208: 417-458.
- [14] SAREEN A, DETERS R W, HENRY S P, et al. Drag reduction using riblet film applied to airfoils for wind turbines [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2014, 136(2): 021007.
- [15] DOMEL A G, SAADAT M, WEAVER J C, et al. Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2018, 15(139): 20170828.
- [16] 王志恒,孙晔晨,樊宏周,等. 流向微槽对直纹面化离心叶轮气动性能影响的数值研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(5): 999-1004.
- WANG Zhiheng, SUN Yechen, FAN Hongzhou, et al. Numerical investigations on effect of streamwise micro-groove on aerodynamic performance of ruled surface impeller [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(5): 999-1004.
- [17] 杨雪峰,赵丹阳. 仿生鲨鱼皮滚压成型表面减阻数值模拟研究 [J]. *建模与仿真*, 2018, 7(2): 63-75.
- YANG Xuefeng, ZHAO Danyang. Study on numerical simulation of drag reduction on the bionic surface of shark skin fabricated by roller embossing [J]. *Modeling and Simulation*, 2018, 7(2): 63-75.
- [18] 代翠,陈怡平,董亮,等. 离心泵叶片仿生非光滑结构的布置位置 [J]. *排灌机械工程学报*, 2020, 38(3): 241-247.
- DAI Cui, CHEN Yiping, DONG Liang, et al. Layout position of bionic non-smooth structure on blades of centrifugal pump [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020, 38(3): 241-247.
- [19] LIU Weili, NI Hongjian, WANG Peng, et al. An inves-

- tigation on the drag reduction performance of bioinspired pipeline surfaces with transverse microgrooves [J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2020, 11: 24-40.
- [20] 申正精, 楚武利. 压水室布置凹槽对离心泵内部流动特性的影响 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 37-42.
- SHEN Zhengjing, CHU Wuli. Influence of grooves arrangement in volute casing on internal flow characteristics of centrifugal pump [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2019, 47(12): 37-42.
- [21] 王晶, 罗明, 张定华, 等. 自由曲面侧铣刀具轮廓与轨迹同步优化方法 [J]. 航空学报, 2020, 41(11): 389-402.
- WANG Jing, LUO Ming, ZHANG Dinghua, et al. Simultaneous optimization method for tool contour design and path planning of freeform surface flank milling [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(11): 389-402.
- [22] 李洲龙, 朱利民. 薄壁曲面零件五轴侧铣加工过程几何-力学仿真及变形误差刀路补偿 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(6): 168.
- LI Zhoulong, ZHU Limin. Geometric mechanical simulation and deformation error tool path compensation in the five-axis side milling process of thin-walled curved parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(6): 168.
- [23] 蔡永林, 高超峰. 叶片曲面微结构加工刀位轨迹规划 [J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(6): 111-117.
- CAI Yonglin, GAO Chaofeng. Tool-path planning for machining of riblets on blade surfaces [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(6): 111-117.
- [24] 赵丹阳, 田倩倩, 王敏杰, 等. 仿鲨鱼皮微沟槽结构疏水机理实验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(4): 503-507.
- ZHAO Danyang, TIAN Qianqian, WANG Minjie, et al. Experimental study of hydrophobic mechanism of micro-riblets on imitative shark skin [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(4): 503-507.
- [25] 郭红涛. 离心叶轮叶片几何形状对气动性能影响的数值研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2023.
- [26] KRAIN H. Swirling impeller flow [J]. Journal of Turbomachinery, 1988, 110(1): 122-128.

(编辑 李慧敏)