

叶型轮廓度偏差对离心叶轮性能影响的数值研究

樊宏周, 雷伟鹏, 王志恒, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为研究叶型轮廓度偏差对离心叶轮性能的影响,以 Krain 叶轮为研究对象,通过构建实际加工中的叶型偏差模型,研究了叶型局部及全局偏差对叶轮性能的影响。针对叶型局部偏差,分析了不同弦长位置等厚轮廓度偏差对叶轮性能的影响;在对性能影响最显著的弦长位置,研究了不同偏差对叶轮性能的影响规律。针对叶型全局偏差,分别探讨了轮廓度及扭转偏差对叶轮性能的影响。数值结果表明:靠近前缘的局部偏差对叶轮性能影响最大,且吸力面偏差与叶轮性能变化存在对应关系,吸力面先过切后欠切恶化了叶轮性能,吸力面先欠切后过切优化了靠近前缘叶片的曲率变化,增大了流道易产生阻塞的通流面积,进而提升了叶轮性能,特别在大流量工况,等熵效率提升 1.5%,阻塞流量增大 0.6%。叶片全局轮廓度及扭转偏差分别通过改变整个流道的通流面积及叶片进出口安装角影响了叶轮性能,设计工况下,全局负轮廓度、正扭转偏差总压比最大提升了 1.2%、1.4%。该研究工作为离心叶轮的加工制造及叶型优化提供了有益参考。

关键词: 离心叶轮;轮廓度偏差;阻塞流量;叶型优化

中图分类号: TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202509019 **文章编号:** 0253-987X(2025)09-0197-12

Numerical Investigation on the Influence of Blade Profile Deviation on the Performance of Centrifugal Impellers

FAN Hongzhou, LEI Weipeng, WANG Zhiheng, XI Guang

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

Abstract: To investigate the influence of blade profile deviation on the performance of centrifugal impellers, the Krain impeller is selected as the research object. A blade deviation model based on actual manufacturing processes is developed to examine the effects of both local and global blade deviations on impeller performance. For local blade deviations, the impact of uniform-thickness profile deviations at different chordwise positions on impeller performance is analyzed. At the chordwise position with the most significant influence on performance, the relationship between different deviations and impeller performance is examined. For global blade deviations, the effects of both profile and twist deviations on impeller performance are explored. Numerical results indicate that local deviations near the leading edge have the greatest impact on impeller performance. A corresponding relationship exists between suction-side deviations and performance changes; deviations where the suction side is first undercut and then overcut degrade impeller performance, whereas deviations where the suction side is first overcut and then undercut optimize the curvature

收稿日期: 2025-01-20。 作者简介: 樊宏周(1976—),男,高级工程师;王志恒(通信作者),男,副教授,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: 2025-06-13

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250613.1053.002>

variation near the leading edge, increasing the flow passage area prone to blockage and thereby improving impeller performance. Specifically, under large-flow conditions, the isentropic efficiency increases by 1.5%, and the blockage flow rate rises by 0.6%. Global blade profile and twist deviations influence impeller performance by altering the entire flow passage area and the blade inlet/outlet installation angles, respectively. At the design condition, the total pressure ratio improves by up to 1.2% and 1.4% for global negative profile deviation and positive twist deviation, respectively. This study provides valuable insights for the manufacturing and blade profile optimization of centrifugal impellers.

Keywords: centrifugal impeller; blade profile deviation; blockage flow rate; profile optimization

离心叶轮作为离心压缩机及离心泵等的核心部件在工业领域中发挥重要作用。离心叶轮叶片的几何形状、进出口安装角等设计参数直接影响设备性能及可靠性^[1-2]。叶轮叶片在实际加工中,往往会由于加工轨迹规划不合理、刀具磨损及材料弹性变形等原因^[3-4],使得实际加工叶型出现偏差,特别是形状相对复杂、空间扭曲度较大的叶轮叶片上。

国内外学者对大量实际加工叶型进行了检测^[5-6]。欧洲研究报告指出,实际叶型易发生叶片前缘偏差、叶型整体扭转偏差以及高低起伏的局部轮廓度偏差^[7];Lejon 等^[8]发现最大偏差位于叶片尾缘及轮毂前缘、尾缘区域;刘佳鑫等^[9]发现叶型轮廓度容易出现正偏差,导致前尾缘局部位置偏差偏离正态分布。实际叶型偏差会直接影响叶轮机械的性能及运行可靠性^[10-11]。Lange 等^[12]研究发现叶片前缘厚度增加会导致驻点附近低动量区气流加速,从而增加损失。Lebele-Alawa 等^[13]研究发现叶型扭转偏差使气流转折角增大,导致损耗增加。王浩浩等^[14]采用非嵌入多项式混沌方法(NIPC)研究了钝头前缘不确定性对压气机气动性能的影响,在全工况范围内,钝头前缘加工误差均恶化了压气机的性能。孟德君等^[15]发现位于叶片前缘的偏差通过影响前缘分离强度进而影响叶轮的性能。高丽敏等^[16]对叶片前缘的加工缺陷建立了参数化模型,表明叶片前缘过切角度是影响叶片性能合格性的重要因素。翟益琛等^[17]采用非嵌入混沌多项式方法,研究了全局叶型扭转角偏差对压气机性能的影响,结果表明扭转误差影响了激波位置及泄漏强度,最终对效率产生影响。叶型偏差不可避免地改变叶片的几何轮廓度特征,进而改变叶轮的性能表现,但也有不少学者通过主动调整叶片的形状参数来实现叶轮内部的流动控制,从而提升叶轮机械的气动性能^[18-20]。

基于此,本文以 Krain 离心叶轮为研究对象,通

过构建局部及全局叶型轮廓度偏差模型,数值分析了叶型轮廓度偏差对离心叶轮性能及流场的影响。轮廓度偏差定义为基于叶型表面法线方向实际叶型与设计叶型之间的距离差值,正偏差指刀具未完全加工至设计叶型,即产生欠切误差,负偏差指刀具加工超过设计叶型,即产生过切误差^[21]。

1 研究对象及数值计算方法

1.1 研究对象

研究对象选择德国宇航研究院设计的半开后弯式 Krain 离心叶轮^[22],设计压比为 4.7,设计转速为 22 363 r/min,设计流量为 4 kg/s,叶片数为 24,具体形状参数如表 1 所示。叶片厚度为变厚度分布,叶片前缘最大厚度为 4 mm,尾缘最大厚度为 2 mm,详见文献^[23]。

表 1 Krain 离心叶轮形状参数

Table 1 Shape parameters of Krain centrifugal impeller

参数	数值
叶轮进、出口宽度 b_0, b_2 /mm	67.75, 14.7
叶轮进、出口直径 D_0, D_2 /mm	225.5, 400
进、出口叶顶间隙 δ_1, δ_2 /mm	0.5, 0.3
叶片进、出口安装角 β_{1A}, β_{2A} /($^\circ$)	60, 30

1.2 数值计算模型

为了对不同叶型偏差下的叶轮性能及流动特性进行评估,本文采用 CFX 软件对叶轮单流道计算域进行数值模拟,同时在叶轮进口及出口增加延伸区域 S_1, S_2 。数值计算采用多参考系求解,延伸区域 S_1, S_2 采用静止坐标系、转子区域 R_1 采用旋转坐标系, S_1, S_2 与 R_1 之间的交界面设置为冻结转子法;湍流模型选择 SST $k-\omega$ 。计算工质选择为理想空气,边界条件:进口总温为 288.15 K、总压为 1.013×10^5 Pa,速度垂直进口气流角为 0° ;出口质量流量;叶轮转速为设计转速;固体壁面设置为绝热、无滑移的边界

条件;单流道两侧设置为周期性边界条件。图 1 为离心叶轮计算域及叶轮子午截面示意图,其中图 1(a)蓝色部分即为单流道计算域。

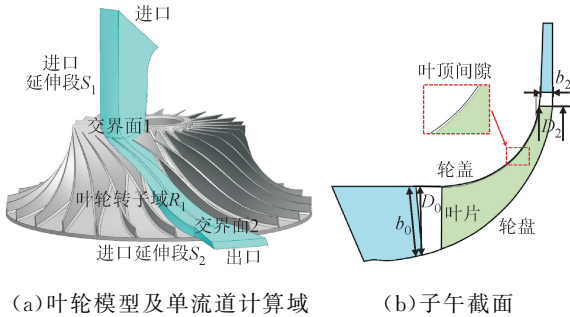


图 1 离心叶轮计算域及其子午截面示意图
Fig.1 Schematic diagram of the calculation domain and meridional section of centrifugal impeller

采用 Ansys Meshing 软件对叶轮单流道计算域划分网格,延伸区域 S_1 、 S_2 采用结构化网格划分,转子域 R_1 采用以四面体为主导的非结构化网格划分。同时,为保证近壁面精准捕捉叶片表面形貌发生变化所产生的性能及流场变化,对叶片壁面处的网格进行了边界层细化,第 1 层网格尺寸为 5×10^{-4} mm,网格层数为 16,增长因子为 1.6。针对所划分的网格,采用 Skewness 偏斜度进行质量检查。图 2 为单流道计算域网格划分结果及局部区域网格放大示意图。

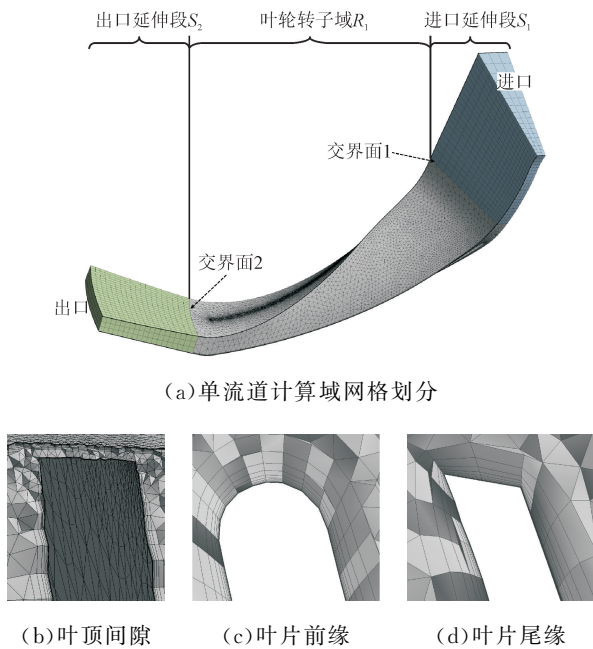


图 2 单流道计算域网格划分及局部放大示意图
Fig. 2 Schematic diagram of grid division and local enlargement for single channel calculation domain

为减小网格数对计算结果的影响,对原型叶轮进行了网格无关性验证。通过调节全局网格尺寸、曲率法向角等划分了 5 套不同数量的网格,网格节点数分别为 80 万、100 万、140 万、170 万及 200 万。图 3 显示了不同网格数下叶轮单流道的数值计算结果。可以看出,原型叶轮网格数在 140 万及以上时,等熵效率及总压比基本不变,偏差在 0.03% 内。因此,本文在后续采用该网格设定方案进行数值计算,等熵效率及总压比计算表达式如下

$$\eta_{is} = \frac{(p_{t,out}/p_{t,in})^{(\kappa-1)/\kappa} - 1}{T_{t,out}/T_{t,in} - 1} \tag{1}$$

$$\epsilon = p_{t,out}/p_{t,in} \tag{2}$$

式中: η_{is} 、 ϵ 分别为等熵效率和总压比; $p_{t,in}$ 、 $p_{t,out}$ 、 $T_{t,in}$ 、 $T_{t,out}$ 分别为进出口的总压、总温; κ 为等熵指数。

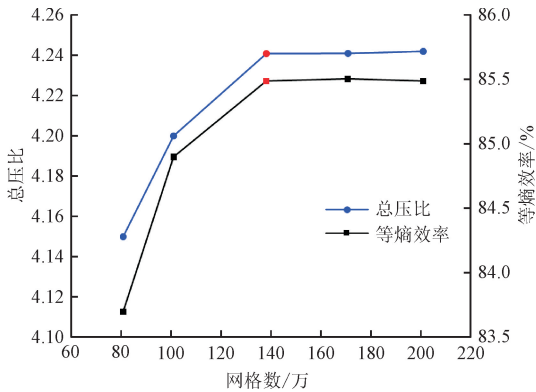
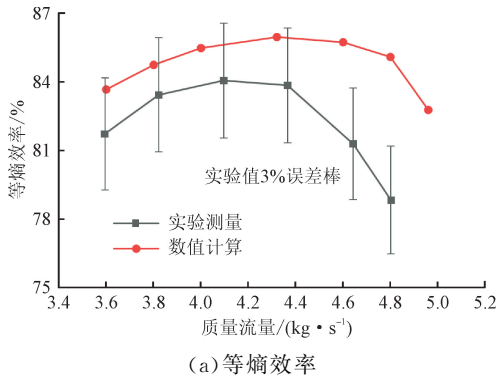


图 3 网格无关性验证
Fig. 3 Grid independence verification

1.3 实验验证

图 4 为 Krain 叶轮实验测量及数值计算在不同质量流量下的性能对比曲线。实验与数值计算的性能曲线变化趋势基本一致但存在误差,除大流量外,实验与数值计算相对偏差在 3% 内。误差的主要原因为:Krain 叶轮实验数据为整机的性能曲线,并未给出出口扩压段的几何数据;而大流量工况误差主要与叶轮内部的复杂流动特性相关,



(a) 等熵效率

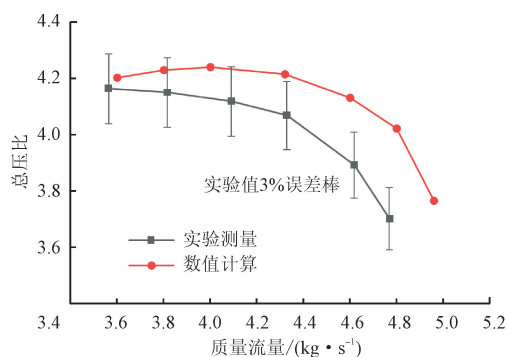


图4 Krain 叶轮实验验证

Fig. 4 Krain impeller experimental verification

如二次流、流动分离等现象。虽然数值计算与实验存在具体数值上的偏差,但从整体变化趋势而言,本文所采用的数值方法及湍流模型在一定误差范围内可以准确预测 Krain 叶轮的性能^[24-25]。

2 叶型局部及全局偏差模型

2.1 叶型局部轮廓度偏差模型

实际叶型局部轮廓度偏差位置及其形式具有不确定性,图 5(a)为叶片靠近前缘实际叶型正、负交替的偏差形式,其中本文研究对象的前缘形式为标准圆弧形。

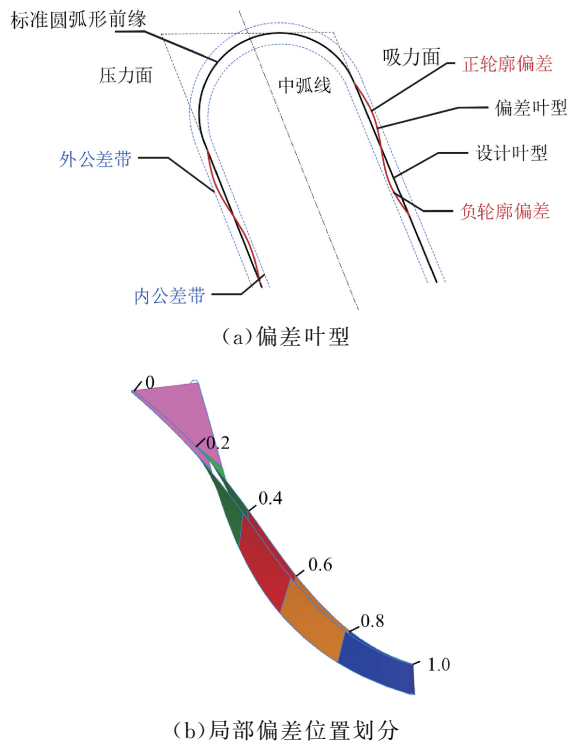


图5 叶片局部轮廓度偏差及位置划分

Fig. 5 Local blade profile deviations and positional zones

结合实际叶型的偏差形式,本文对局部轮廓度偏差模型的构建方式如下:①将局部轮廓度正负交替的

偏差模型简化为正弦函数,函数峰值根据叶型公差要求设定为 0.05 mm ^[26],偏差为相对原型叶片的实际偏差量;②在叶片某一局部位置布置偏差时,其余位置保持与原型叶片一致;③根据局部轮廓度偏差变化范围^[27],在叶片弦长 0.2 范围内布置一个完整周期正弦形式的局部偏差,设定叶片前缘为弦长 0 处,尾缘为弦长 1 处,图 5(b)为叶片以弦长 0.2 所划分的局部区域。

根据对叶片厚度的影响,局部轮廓度偏差可分为等厚及变厚偏差。等厚偏差指的是叶片压力面及吸力面在同一位置的偏差大小、方向均一致,如图 6(a)所示。变厚偏差指的是叶片压力面及吸力面同一位置的偏差大小、方向不一致,如图 6(b)~6(d)所示。

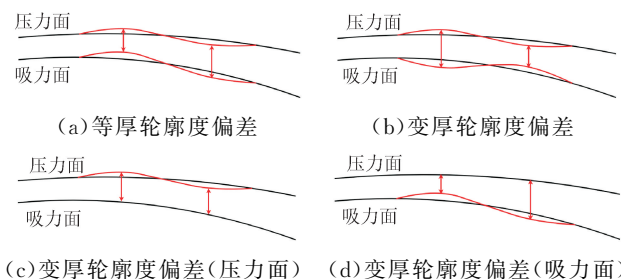


图6 等厚及变厚偏差示意图

Fig. 6 Schematic diagram of profile deviation

采用上述偏差模型的构建方法,本文首先研究了叶片弦长不同位置等厚偏差对叶轮性能的影响;然后在对性能影响最显著的位置构建不同形式的偏差,深入研究各偏差对叶轮性能及流场的影响差异。不同偏差方案的模型示意如图 7 所示,偏差形式均为压力面先欠切后过切,吸力面先过切后欠切,图中浅蓝色实体为原型叶片,其余颜色为偏差叶型。

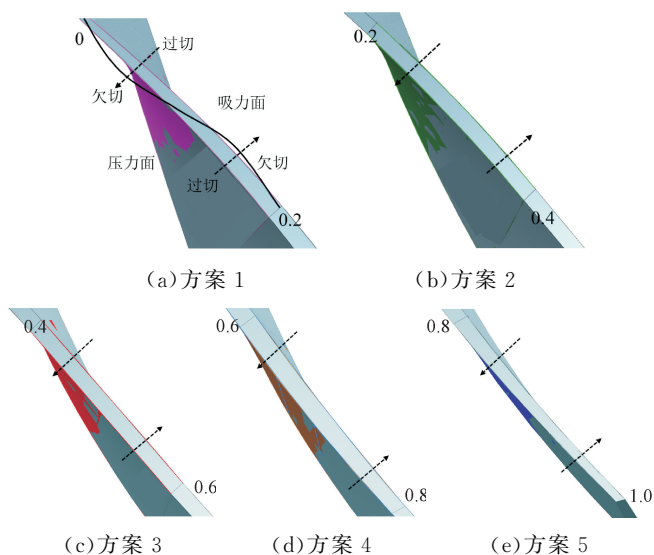


图7 叶片不同弦长位置等厚偏差模型示意图

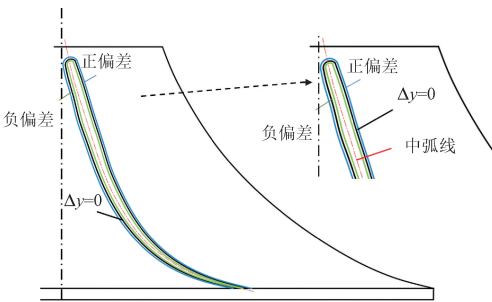
Fig. 7 Schematic diagram of equal thickness profile deviation models for different chord length positions

2.2 叶型全局轮廓度及扭转偏差模型

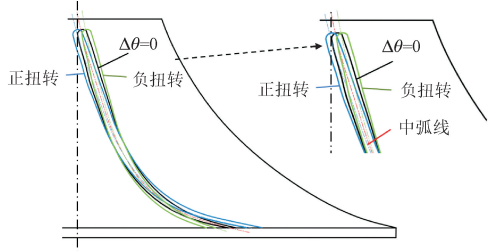
全局偏差指的是整体加工叶型与设计叶型在全局范围内存在一致性偏差。本文除对叶型全局轮廓度偏差进行研究外,还对全局叶型易出现的扭转偏差进行研究。叶型全局轮廓度及扭转偏差建模方式为:①获取原型叶片不同叶高位置的截面控制线,并计算各叶高控制线的法线方向及其截面重心;②将截面控制线曲面法向内、外偏置,基于偏置后的截面控制线进行曲面重构;③将截面控制线以各截面叶型重心进行扭转,基于扭转后的截面控制线进行曲面重构。全局轮廓度偏差 Δy 及扭转偏差 $\Delta \theta$ 依据叶型公差要求^[26],轮廓度偏差为全局均匀偏差,扭转偏差正方向为前缘与叶轮旋转方向相同,各参数设置方案及示意图见表 2、图 8,其中 Big、Small 代表正、负轮廓偏差;FW、BW 代表正、负扭转偏差。

表 2 叶型全局偏差模型参数设置
Table 2 Parameter setting of global profile deviation models

偏差类型	偏差方案	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta \theta/(\text{^\circ})$
轮廓度偏差	Big 0.02	0.02	
	Big 0.05	0.05	
	Big 0.10	0.10	
	Small 0.02	-0.02	
	Small 0.05	-0.05	
	Small 0.10	-0.10	
扭转偏差	FW0.5		0.5
	FW1		1.0
	BW0.5		-0.5
	BW1		-1.0



(a)全局轮廓度偏差及前缘局部放大



(b)全局扭转偏差及前缘局部放大

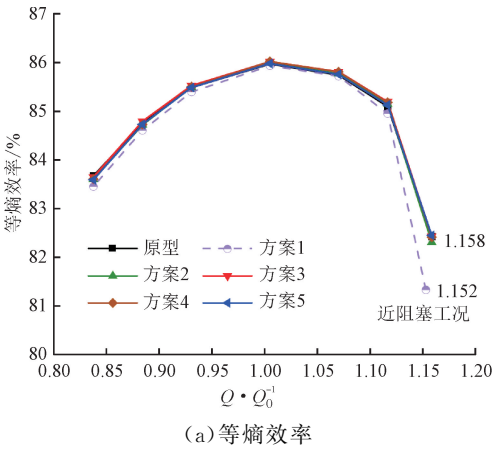
图 8 叶型全局偏差模型

Fig. 8 Global profile deviation model

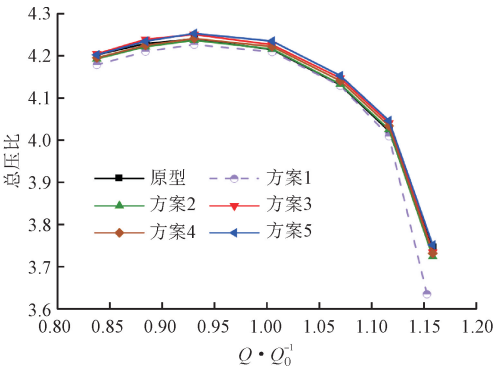
3 叶型局部轮廓度偏差对离心叶轮性能及流场的影响

3.1 不同弦长位置等厚轮廓度偏差

采用与原型叶轮相同的数值方法对叶型局部轮廓度偏差下的叶轮进行流动数值分析。图 9 为原型叶轮与不同弦长等厚轮廓度偏差的性能曲线,横坐标为归一化流量 $Q \cdot Q_0^{-1}$ 。由性能曲线可得,原型叶轮与各方案等熵效率及总压比变化趋势相同,方案 1 对叶轮性能影响最大,特别在近阻塞工况,等熵效率及总压比明显下降。相比原型叶轮,方案 1 的阻塞流量下降约 0.5%,其余方案阻塞流量基本不变。



(a)等熵效率



(b)总压比

图 9 不同弦长等厚轮廓度偏差性能曲线

Fig. 9 Performance curve of profile deviation with different chord lengths and equal thickness

3.2 靠近叶片前缘等厚及变厚轮廓度偏差

3.2.1 对叶轮性能曲线的影响

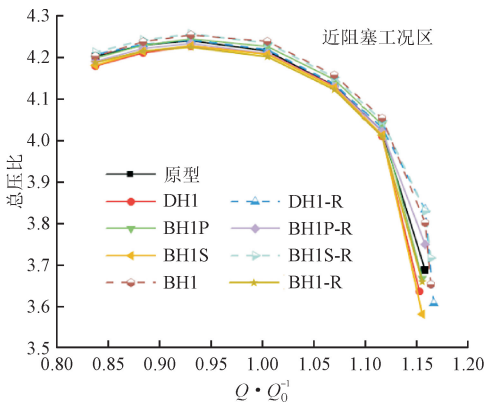
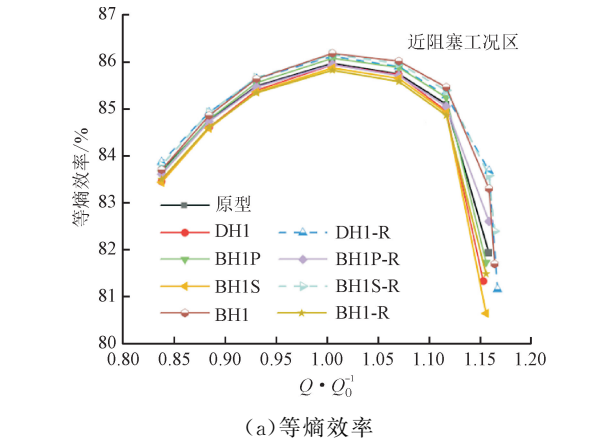
由图 9 可得,方案 1 的局部偏差对叶轮性能影响最大。以下通过在弦长 0~0.2 处布置不同形式的局部偏差,研究其对叶轮性能的影响,具体方案见表 3。其中,偏差方案中 DH、BH 表示等厚、变厚偏

差,数字 1 代表靠近前缘偏差,R 代表相反变化,P、S 代表仅压力面、吸力面偏差。

表 3 叶型靠近前缘不同轮廓度偏差模型设置
Table 3 Construction scheme of different profile deviation models near the blade leading edge

偏差方案	0~0.1 弦长位置		0.1~0.2 弦长位置	
	压力面	吸力面	压力面	吸力面
DH1	欠切	过切	过切	欠切
DH1-R	过切	欠切	欠切	过切
BH1P	欠切		过切	
BH1P-R	过切		欠切	
BH1S		过切		欠切
BH1S-R		欠切		过切
BH1	欠切	欠切	过切	过切
BH1-R	过切	过切	欠切	欠切

图 10 为原型叶轮和靠近前缘各偏差叶轮的性能曲线,图 11 为靠近前缘各偏差阻塞流量的变化。由性能曲线可得,靠近前缘不同轮廓度偏差对叶轮性能影响不同,特别在近阻塞工况。由阻塞流量变化曲线可得,DH1-R、BH1S-R、BH1 为增大阻塞流量的方案,阻塞流量最大增加 0.6%;DH1、BH1S、BH1-R 为减小阻塞流量的方案,阻塞流量最大减小 0.5%;BH1P、BH1P-R 为对阻塞流量基本无影响的方案。同时,阻塞流量相对增大的偏差方案在其余运行工况下,其等熵效率及总压比也较大,设计工况下等熵效率最大提升 0.2%,大流量工况下等熵效率最大提升 1.5%。总结阻塞流量与各叶片靠近前缘轮廓度偏差形式的变化规律可得,仅压力面偏差对叶轮的阻塞流量基本无影响,阻塞流量增大的偏差方案对应吸力面偏差形式为先欠切后过切;阻塞流量减小的偏差方案对应吸力面偏差形式为先过切后欠切。



(b)总压比
图 10 叶片靠近前缘不同轮廓度偏差性能曲线

Fig. 10 Performance curve of different profile deviations near the blade leading edge

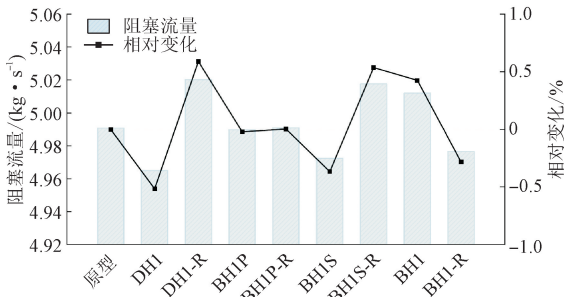
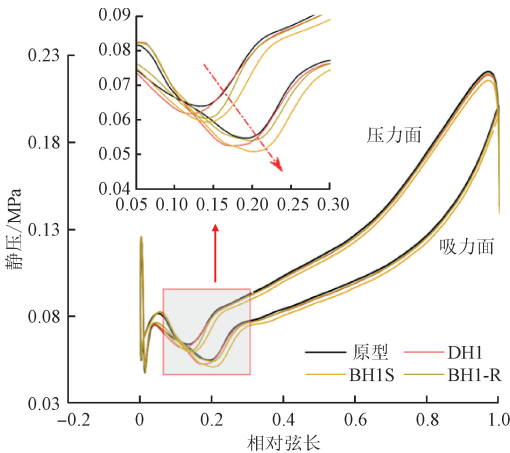


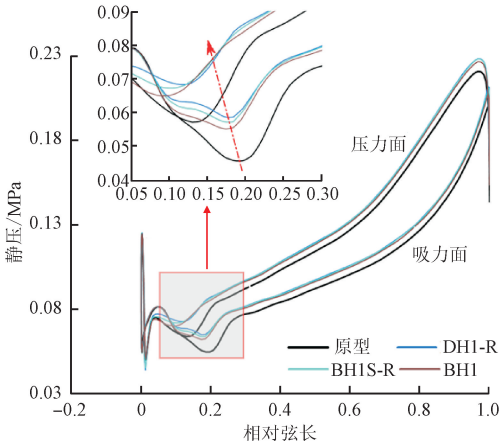
图 11 叶片靠近前缘不同轮廓度偏差阻塞流量
Fig. 11 Flow blockage near blade leading edge

3.2.2 对叶轮流场的影响及其机理分析

由靠近叶片前缘不同局部偏差叶轮的性能曲线及阻塞流量变化曲线可得,相比原型叶轮,不同轮廓度偏差对叶轮性能的影响不同,特别是近阻塞区。因此,以下将进一步对比原型叶轮与各偏差叶轮内部流场的分布,探究影响性能及流场的机理。由于仅压力面偏差对叶轮的性能影响较小,因此以下仅对比原型叶轮与吸力面存在偏差时叶轮内部的流场分布。图 12 为近阻塞工况($Q \cdot Q_0^{-1} = 1.158$)下,靠近前缘吸力面存在偏差时 50%叶高截面处静压随弦长的变化曲线。由图可得,各方案静压随弦长的变化趋势与原型叶轮基本一致,均在弦长 0.2 处出现局部凹陷(如曲线放大部分)。相比原型叶轮,阻塞流量减小方案的静压曲线略微下移,在弦长 0.2 处的局部凹陷程度加深、范围增大;阻塞流量增大方案的静压曲线则整体上移,在弦长 0.2 处的局部凹陷程度减弱、范围减小。



(a)阻塞流量减小方案

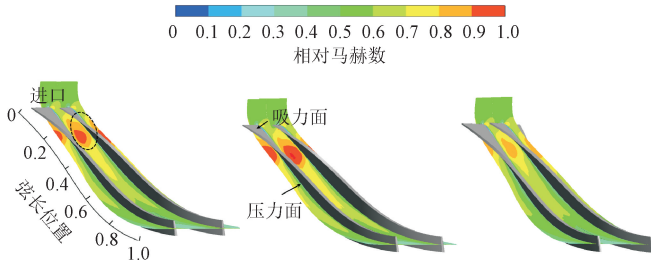


(b)阻塞流量增大方案

图 12 靠近前缘偏差 50% 叶高截面线静压随弦长变化曲线
Fig. 12 Curve of static pressure variation with chord length near the leading edge deviation of 50% blade height section line

进一步探究靠近前缘偏差形式与叶轮流场、性能变化之间的对应关系,以下仅对比吸力面偏差叶轮的流场分布。吸力面偏差 BH1S、BH1S-R 为叶片变厚偏差方案,因此改变了流道靠近前缘位置的通流面积。其中,叶片过切为通流面积增大;叶片欠切为通流面积减小。图 13 为近阻塞工况下 50% 叶

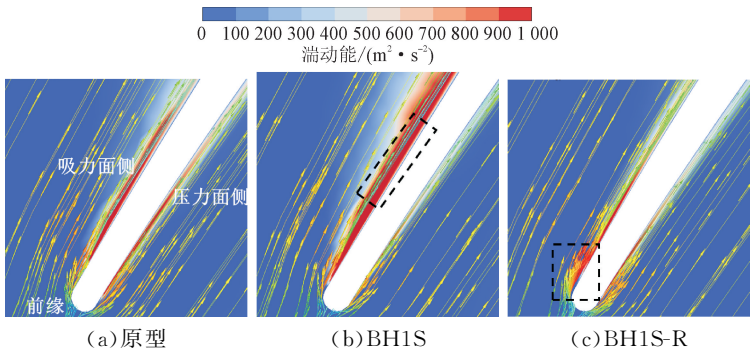
高截面原型叶轮及 BH1S、BH1S-R 方案的相对马赫数分布。相对马赫数分布显示,原型叶轮在弦长 0.2 处的叶轮通道内出现局部高马赫数区域,方案 BH1S 增大了该位置的局部高马赫数区域面积,而 BH1S-R 则减小了该位置的局部高马赫数区域面积。



(a)原型 (b)BH1S (c)BH1S-R

图 13 靠近前缘偏差 50% 叶高相对马赫数分布
Fig. 13 Relative Mach number distribution near the leading edge deviation of 50% blade height

靠近叶片前缘局部轮廓度偏差除对叶片厚度产生影响外,还对靠近前缘叶片的曲率变化产生影响。吸力面先过切后欠切曲率变化为先凹后凸,先欠切后过切曲率变化为先凸后凹。图 14 为设计工况下原型叶轮与方案 BH1S 与 BH1S-R 在 90% 叶高靠近前缘的湍动能及流线分布。由湍动能及流线分布可得,相比原型叶轮,方案 BH1S 在吸力面侧的高湍动能区域明显增大,高湍动能位置的流动分离现象更为明显;方案 BH1S-R 的高湍动能区域面积减小,且前缘吸力面侧的流体加速效果显著。由此可得,靠近前缘吸力面不同形式的偏差方案通过改变靠近前缘叶片的曲率变化,进而影响流体在叶片表面边界层的流动状态。吸力面先凹后凸恶化了前缘至叶片的曲率变化,增大了其在靠近前缘吸力面侧的高湍动能区域及流动分离现象;吸力面先凸后凹缓解了叶片前缘至叶片的曲率变化,减小了在靠近前缘叶片吸力面侧的高湍动能区域,从而减小了流动损失,提升了叶轮性能。



(a)原型 (b)BH1S (c)BH1S-R

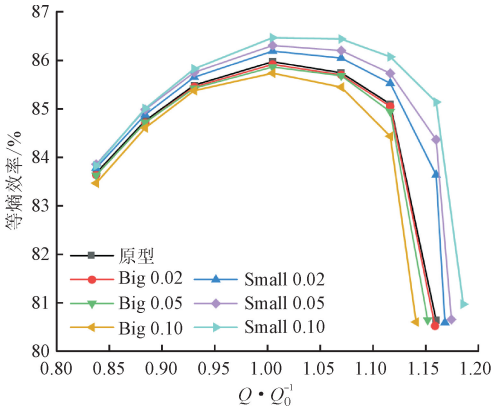
图 14 靠近前缘偏差 90% 叶高端动能及流线分布
Fig. 14 Turbulent kinetic energy and streamline distribution near the leading edge deviation of 90% blade height

4 叶型全局轮廓度及扭转偏差对离心叶轮性能及流场的影响

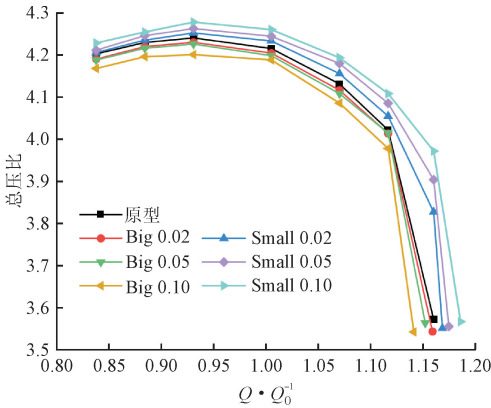
4.1 叶型全局轮廓度偏差

4.1.1 对叶轮性能曲线的影响

图 15 为原型叶轮与全局轮廓度偏差的性能对比,图 16 为全局轮廓度偏差与原型叶轮的阻塞流量对比。由性能曲线可得,全局轮廓度正偏差在各工况下的性能曲线均略低于原型叶轮;全局轮廓度负偏差在各工况下的性能曲线均高于原型叶轮。设计工况下,全局负偏差等熵效率及总压比最大增大 0.6%、1.2%。此外,阻塞流量与叶片厚度呈负相关,阻塞流量最大降低 1.6%、叶片厚度最大增大 2.2%。



(a) 等熵效率



(b) 总压比

图 15 各全局轮廓度偏差性能曲线

Fig. 15 Global profile deviation performance curve

4.1.2 对叶轮流场的影响及其机理分析

相比叶型局部轮廓度偏差仅改变了叶片局部位置的厚度,全局轮廓度偏差对整个叶片的厚度均产生影响。正轮廓度偏差减小了叶轮在不同流道位置的通流面积;负轮廓度偏差增大了叶轮在不同流道位置的通流面积。

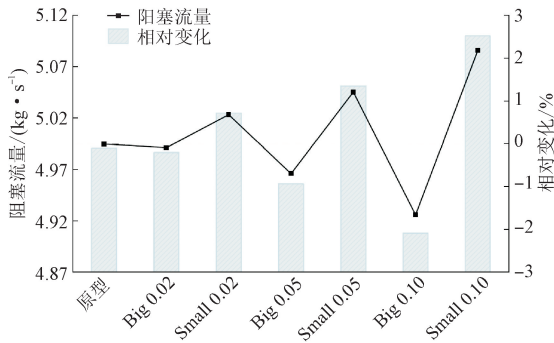


图 16 各全局轮廓度偏差阻塞流量

Fig. 16 Flow blockage from global profile deviations

由图 15、图 16 可得,正、负轮廓度偏差对叶轮性能及阻塞流量的影响不同,正偏差性能曲线相对下移,阻塞流量减小;负偏差性能曲线上移,阻塞流量增大。因此,以下对比原型叶轮与对性能及阻塞流量影响最大的正、负轮廓度偏差在近阻塞工况($Q \cdot Q_0^{-1} = 1.152$)下,50%叶高截面的相对马赫数及静压分布,结果如图 17、图 18 所示。

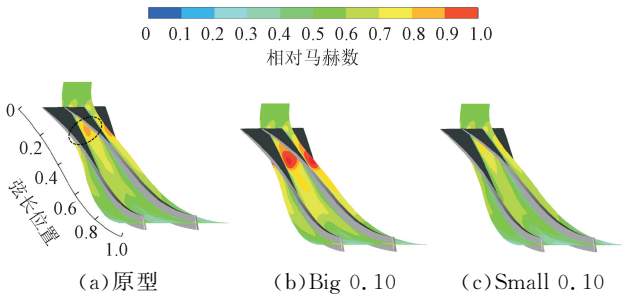


图 17 全局轮廓度偏差 50% 叶高相对马赫数分布

Fig. 17 Global deviation of 50% blade height relative Mach number distribution

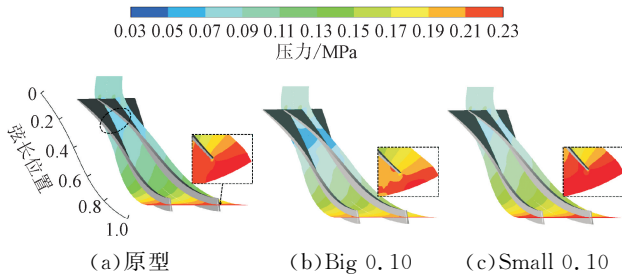


图 18 全局轮廓度偏差 50% 叶高静压分布

Fig. 18 Global deviation of 50% blade height static pressure distribution

由图 17 可得,原型叶轮在弦长 0.2 处出现局部高马赫数区域,而正轮廓度偏差增大了该区域的高马赫数区域面积,负轮廓度偏差减小了该区域的高马赫数区域面积。由图 18 可得,全局轮廓度偏差对静压分布的影响除集中在弦长 0.2 处,还分布在叶

轮靠近出口即整个流道的发展趋势上(如局部放大部分)。正轮廓度偏差增大了弦长 0.2 处的低压区面积;负轮廓度偏差减小了弦长 0.2 处的低压区面积,增大了叶轮靠近出口处的压力。

4.2 叶型全局扭转偏差

4.2.1 对叶轮性能曲线的影响

图 19 为原型叶轮与全局扭转偏差的性能对比曲线。由图可得,相比原型叶轮,正扭转偏差等熵效率

率及总压比均相对增大,设计工况下等熵效率、总压比分别相对最大增加 0.2%、1.4%;负扭转偏差等熵效率及总压比均相对减小,设计工况下等熵效率、总压比分别相对最大减小 0.15%、0.5%。扭转偏差对叶轮的阻塞流量影响较小,与原型叶轮的相对差值均在 0.01%内。可见,扭转偏差对叶轮的运行工况范围基本无影响,正扭转偏差即叶片前缘向叶轮旋转方向扭转更有利于提升离心叶轮的性能。

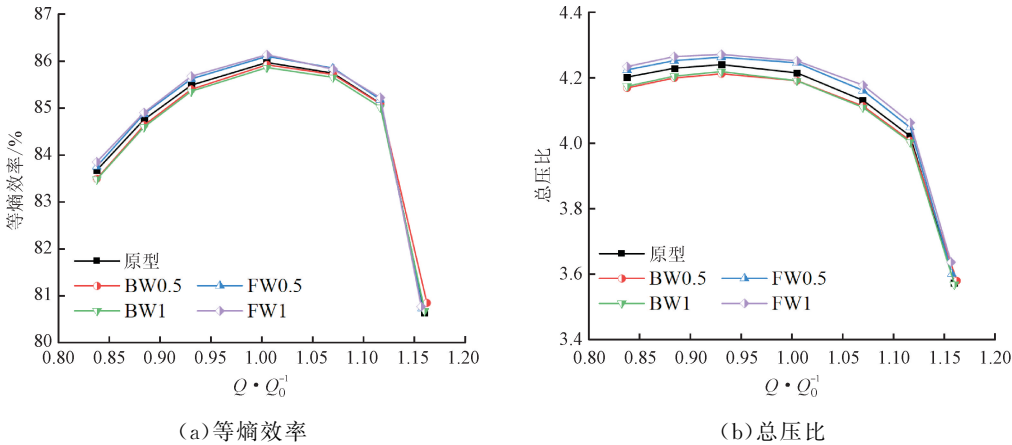


图 19 全局扭转偏差性能曲线
Fig. 19 Global torsional profile deviation performance curve

4.2.2 对叶轮流场的影响及其机理分析

叶型扭转偏差直接改变了叶片进、出口安装角,正扭转减小了叶片进、出口安装角,负扭转偏差增大了叶片进、出口安装角。同时,全局扭转偏差对叶片前缘的进口安装角影响更大,原因是叶轮进口直径相对较小,曲率较大,微小的扭转变化会引起较大的角度变化。图 20、图 21 分别为设计工况下原型叶轮与正、负扭转偏差在 90% 叶高截面的相对马赫

数、湍动能及流线分布。由图 20 可得,从叶轮进口至出口,原型叶轮与扭转偏差相对马赫数的变化趋势一致,且均在叶片前缘出现局部高马赫数区域,流道中后段出现低马赫数区域。原型叶轮与扭转偏差相对马赫数分布不同的位置位于叶片前缘(见图 20(a)局部放大部分),正扭转偏差降低了叶片前缘高马赫数区域的峰值及面积,负扭转偏差增大了叶片前缘高马赫数区域的峰值及面积。

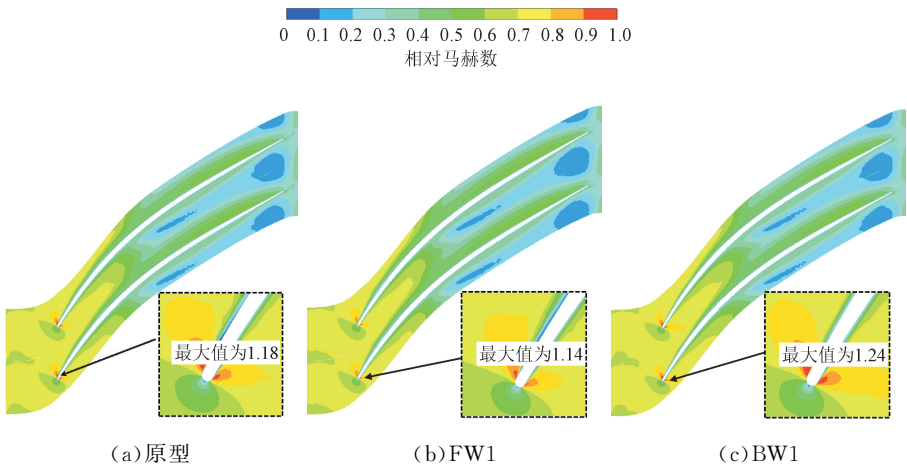


图 20 全局扭转偏差 90% 叶高相对马赫数分布

Fig. 20 Global torsional deviation of 90% blade height relative Mach number distribution

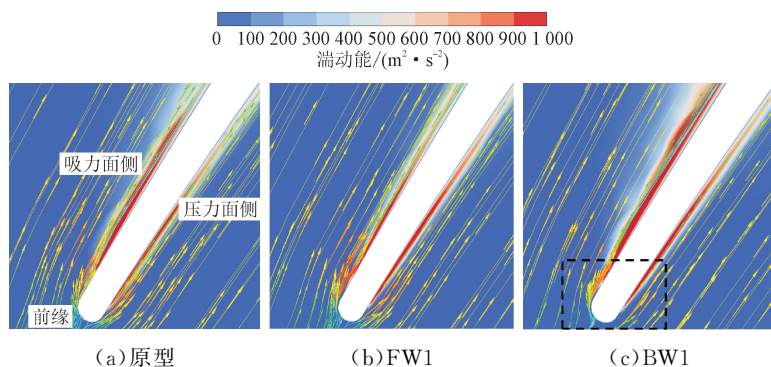


图 21 全局扭转偏差 90% 叶高端动能及流线分布

Fig. 21 Global torsional deviation of 90% blade height turbulent kinetic energy and streamline distribution

由图 21 可得,正扭转偏差减小了叶片前缘附近的湍动能耗散及流动分离,负扭转偏差增大了叶片前缘附近的湍动能耗散,特别是吸力面侧。可见,正扭转偏差通过减小叶片进口安装角,从而减小了冲角;负扭转偏差通过增大叶片进口安装角,从而增大了冲角,使流体进入叶轮时的相对速度方向偏离叶片表面,导致进口区域流动分离现象加剧,进一步恶化了叶轮的整体性能。

5 结 论

为研究实际加工过程中叶型轮廓度偏差对离心叶轮性能的影响,本文以 Krain 离心叶轮为研究对象,构建了叶型局部和全局偏差模型,数值分析了叶型偏差对叶轮性能及流场的影响,并探讨了其影响叶轮性能的机理原因,主要结论如下。

(1)在局部轮廓度偏差中,叶片靠近前缘吸力面侧偏差对叶轮性能影响最大。吸力面先欠切后过切,即先凸后凹的曲面形式为对叶轮性能相对有益的偏差叶型,其等熵效率最大提升 1.5%,阻塞流量最大增大 0.6%;吸力面先过切后欠切,即先凹后凸的曲面形式为对叶轮性能产生负面影响的偏差叶型。

(2)靠近前缘吸力面侧偏差通过改变靠近前缘叶片的曲率变化及叶轮局部位置的通流面积,进而影响靠近前缘叶片近壁面及流道内的流场分布。吸力面先欠切减小了靠近前缘吸力面侧的流动分离现象,后过切减小了流道内易产生阻塞的高马赫数区域面积。

(3)全局负轮廓度及正扭转偏差提升了叶轮的性能;全局正轮廓度及负扭转偏差恶化了叶轮的性能。相比原型叶轮,全局负轮廓度偏差设计工况下等熵效率、总压比最大增加 0.6%、1.2%,阻塞流量

最大增加 2.2%;全局正扭转偏差设计工况下等熵效率、总压比最大增加 0.2%、1.4%。

(4)全局轮廓度偏差通过改变整个流道的通流面积进而影响了离心叶轮的流场分布,特别是在流道易出现阻塞的位置。全局扭转偏差通过改变叶片进、出口安装角,特别是前缘位置的进口冲角,影响了叶片靠近前缘处的流场分布。

本文所构建的偏差模型基于叶轮叶片在实际加工中的常见形式,其对性能有益的偏差形式可为叶轮叶型设计及制造的协同研究提供理论参考。在叶片设计、制造过程中,应特别关注流道易产生高马赫数的区域、前缘与叶片过渡的曲率变化,以及叶片进口安装角等。此外,通过叶型优化设计,也可有效减少偏差带来的不利影响,改善流场分布,从而提升叶轮的整体性能。

参考文献:

- [1] 张梅,席光,唐永洪.离心压气机楔形扩压器设计及改进方法研究[J].工程热物理学报,2020,41(3):601-608.
ZHANG Mei, XI Guang, TANG Yonghong. Study on design and improvement of wedge vane diffuser for centrifugal compressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(3): 601-608.
- [2] 胡晨星,耿开贺,张成,等.叶片安装角对离心压气机扩压器气动性能及失速机理影响研究[J].热能动力工程,2021,36(10):77-84.
HU Chenxing, GENG Kaihe, ZHANG Cheng, et al. Research on the influence of the vane stagger angle on the aerodynamic performance and stall mechanism of centrifugal compressor diffuser [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10): 77-84.
- [3] 李洲龙,朱利民,ALTINTAS Y.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]. 金属加工(冷加工), 2020(11): 87.
- LI Zhoulong, ZHU Limin, ALTINTASY Y. Geometric-mechanical simulation and tool path compensation for deformation errors in five-axis side milling of thin-walled curved surface parts [J]. *Metal Working(Metal Cutting)*, 2020(11): 87.
- [4] 王辉, 吴宝海, 李小强. 新一代商用航空发动机叶片的先进加工技术 [J]. 航空制造技术, 2014(20): 26-31.
- WANG Hui, WU Baohai, LI Xiaoqiang. Advanced machining technology of new generation commercial aeroengine blade [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(20): 26-31.
- [5] GREINER D, GALVÁN B, PÉRIAUX J, et al. Advances in evolutionary and deterministic methods for design, optimization and control in engineering and sciences [M]. Cham, Belin: Springer International Publishing, 2015.
- [6] 陈慧瀛, 陆永华. 三坐标测量在叶轮叶片型面误差检测中的应用 [J]. 中国机械, 2024(10): 45-48.
- CHEN Huiying, LU Yonghua. Application of three-dimensional measurement in rotor blade profile error detection [J]. *Machine China*, 2024(10): 45-48.
- [7] GARZON V E. Probabilistic aerothermal design of compressor airfoils [D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [8] LEJON M, ANDERSSON N, ELLBRANT L, et al. The impact of manufacturing variations on performance of a transonic axial compressor rotor [C]//ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2018: V02AT39A028.
- [9] 刘佳鑫, 于贤君, 孟德君, 等. 高压压气机出口级叶型加工偏差特征及其影响 [J]. 航空学报, 2021, 42(2): 342-358.
- LIU Jiaxin, YU Xianjun, MENG Dejun, et al. State and effect of manufacture deviations of compressor blade in high-pressure compressor outlet stage [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(2): 342-358.
- [10] 张伟昊, 邹正平, 李维, 等. 叶型偏差对涡轮性能影响的非定常数值模拟研究 [J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2130-2138.
- ZHANG Weihao, ZOU Zhengping, LI Wei, et al. Unsteady numerical simulation investigation of effect of blade profile deviation on turbine performance [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(11): 2130-2138.
- [11] 李玉, 楚武利, 姬田园. 叶片安装角偏差对动叶性能影响的不确定性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 49-59.
- LI Yu, CHU Wuli, JI Tianyuan. Uncertainty research of effects of blade stagger angle deviation on the performance of rotor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(4): 49-59.
- [12] LANGE A, VOIGT M, VOGELER K, et al. Probabilistic CFD simulation of a high-pressure compressor stage taking manufacturing variability into account [C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2010: 617-628.
- [13] LEBELE-ALAWA B T, HART H I, OGAJI S O T, et al. Rotor-blades' profile influence on a gas-turbine's compressor effectiveness [J]. *Applied Energy*, 2008, 85(6): 494-505.
- [14] 王浩浩, 高丽敏, 杨光, 等. 钝头前缘加工不确定性对亚声速压气机叶型气动性能的影响 [J]. 航空动力学报, 2024, 39(2): 171-181.
- WANG Haohao, GAO Limin, YANG Guang, et al. Influence of manufacturing uncertainty of blunt leading edge on aerodynamic performance of compressor blade [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(2): 171-181.
- [15] 孟德君, 史文斌, 刘佳鑫, 等. 几何偏差对可控扩散叶型性能影响规律及机理 [J]. 航空学报, 2024, 45(19): 23-33.
- MENG Dejun, SHI Wenbin, LIU Jiaxin, et al. Influence of geometric variation on aerodynamic performance of controlled diffusion airfoil [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(19): 23-33.
- [16] 高丽敏, 王浩浩, 杨光, 等. 关于叶片前缘加工缺陷及气动合格性的探讨 [J]. 推进技术, 2023, 44(1): 76-85.
- GAO Limin, WANG Haohao, YANG Guang, et al. Discussion on machining defects of blade leading edge and aerodynamic qualification [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(1): 76-85.
- [17] 翟益琛, 楚武利, 刘铠烨, 等. 全局叶型扭转角误差对轴流压气机性能影响的不确定性量化分析方法 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(3): 110-123.
- ZHAI Yichen, CHU Wuli, LIU Kaiye, et al. Uncertainty quantification method on the influence of global blade twist angle errors on axial compressor performance [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025, 59(3): 110-123.
- [18] 姜戴宇, 王宏光, 韩铁鹰. 基于 Krain 离心压气机叶轮的叶型优化 [J]. 节能技术, 2019, 37(2): 161-165.

- JIANG Daiyu, WANG Hongguang, HAN Tieying. Blade profile optimization based on Krain centrifugal compressor impeller [J]. *Energy Conservation Technology*, 2019, 37(2): 161-165.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 雷伟鹏, 樊宏周, 雍建华, 等. 叶片加工误差对压气机性能影响研究综述 [J]. *风机技术*, 2024, 66(2): 87-92.
- LEI Weipeng, FAN Hongzhou, YONG Jianhua, et al. Summary of research on the influence of blade machining errors on compressor performance [J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2024, 66(2): 87-92.
- [22] KRAIN H. Swirling impeller flow [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1988, 110(1): 122-128.
- [23] 席光. 关于 Krain 实验叶轮几何型线及其流道二次流旋涡结构的讨论 [J]. *工程热物理学报*, 2000, 21(4): 440-442.
- XI Guang. Discussion on the geometry and the secondary flow vortex structure of Krain's experimental compressor impeller [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2000, 21(4): 440-442.
- [24] 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.
- [25] XIANG Hang, CHEN Jiang, CHENG Jinxin, et al. Blade number selection for a splitted mixed-flow compressor impeller using improved loss model [J]. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2022, 39(4): 549-564.
- [26] 中国航空工业总公司. 叶片叶型的标注、公差与叶身表面粗糙度: HB 5647-98 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [27] 高丽敏, 杨光, 王浩浩, 等. 波纹对高亚音叶型气动敏感位置和宽度研究 [J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(1): 78-85.
- GAO Limin, YANG Guang, WANG Haohao, et al. Research on the aerodynamic sensitive position and width of waviness on the high subsonic profile [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(1): 78-85.

(编辑 杜秀杰)