

离心压气机进口径向总压畸变不确定性分析

徐永祥¹, 琚亚平¹, 秦瑞鸿², 李震¹, 刘艳³, 张楚华¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 沈阳航空航天大学航空发动机学院, 110136, 沈阳; 3. 大连理工大学能源与动力学院, 116024, 辽宁大连)

摘要: 针对离心压气机实际运行过程中的进口畸变不确定性问题,提出了一种离心压气机进口径向总压畸变不确定性参数化表征模型。以跨声速 Radiver 离心压气机为研究对象,采用非嵌入式多项式混沌法和 Sobol 敏感性分析方法,研究了压气机气动性能受叶尖畸变、轮毂畸变两类进口径向总压畸变不确定性的影响,获得了对压气机气动性能影响最为显著的不确定性因素,并分析了不确定性因素影响压气机气动性能的相关流动机理。结果表明:相比于均匀来流,叶尖畸变、轮毂畸变均使压气机级多变效率下降近 1.0%;轮毂畸变、叶尖畸变分别对级总压比、扩压器总压损失系数带来的影响较为显著,级多变效率受轮毂畸变影响下降 1.4%,叶尖畸变使损失系数增大 11.0%;相较于轮毂侧和叶尖侧畸变峰之间的相对位置,压气机气动性能对畸变峰的数值大小更敏感;受进口径向总压畸变影响下的压气机的性能恶化与扩压器叶片进口冲角不均匀分布导致的流动分离现象密切相关。研究工作表明了进口畸变不确定性在离心压气机不确定性分析中的重要性,对未来发展离心压气机鲁棒优化设计具有一定的学术意义和工程应用价值。

关键词: 离心压气机;进口畸变;不确定性;敏感性分析;流动机理

中图分类号: TK14 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202408008 **文章编号:** 0253-987X(2024)08-0069-11

Uncertainty Quantification of a Centrifugal Compressor Considering Uncertain Inlet Total Pressure Distortion

XU Yongxiang¹, JU Yaping¹, QIN Ruihong², LI Zhen¹, LIU Yan³, ZHANG Chuhua¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Aero-Engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: As for the effect of uncertain upstream distortion on the aerodynamic performance of in-service centrifugal compressors, this paper proposes a parametrization model of uncertain inlet radial total pressure distortion in the centrifugal compressor. Based on this model, the study adopts non-intrusive polynomial chaos and Sobol sensitivity analysis methods to perform the uncertainty quantification of Radiver, a transonic centrifugal compressor. The influence of two types of inlet total pressure distortion, i. e., tip distortion and hub distortion uncertainties on the aerodynamic performance of the compressor is investigated, the most influential uncertain factor is obtained, and the flow mechanism under influence of uncertainties on the aerodynamic

performance is analyzed. The results show that, compared with the uniform inflow, the considered two types of inlet total pressure distortion decrease the stage polytropic efficiency by nearly 1.0%, and the hub distortion and tip distortion have a significant impact on the stage total pressure ratio and the diffuser total pressure loss coefficient, respectively. The stage polytropic efficiency declines by 1.4% due to hub distortion and the loss coefficient increases by 11.0% due to tip distortion. The aerodynamic performance of the compressor is more sensitive to the magnitude of distortion peaks than to the relative position between distortion peaks in two sides (hub side and tip side). The performance degradation of the compressor induced by the two types of distortion is closely related to the flow separation caused by the non-uniform incidence distribution at the leading edge of the diffuser vane. The study highlights the importance of inlet distortion uncertainty in the uncertainty analysis of centrifugal compressors, and is of important academic and engineering application significance to the future robust optimization design of centrifugal compressors.

Keywords: centrifugal compressor; inlet distortion; uncertainty; sensitivity analysis; flow mechanism

离心压气机作为中小型航空发动机、微型燃气轮机、涡轮增压器等领域的关键装备,在我国国防工业和经济发展中长期占据核心地位。离心压气机新产品通常是在假定进口流场是稳定和均匀的条件下设计的。然而,由于工作环境、系统因素等影响,压气机的实际运行工况不可避免地具有一定的随机可变性,引发上游来流参数的不确定性微小扰动^[1-2]。同时,上游来流气体在经过进口管道时,受到管道弯扭等因素影响后,难免在压气机进口处产生不同程度的径向、周向畸变,在上游来流参数不确定性的影响下,这些畸变也具有随机可变性。进口来流的不确定性畸变使得压气机实际运行性能偏离设计期望,面临效率降低、喘振裕度减小等问题,对整机安全稳定运行带来严重威胁。因此,研究进口畸变不确定性对离心压气机气动性能的影响,对提升压气机性能鲁棒性、发展高性能离心压气机产品具有重要的学术意义和工程应用价值。

针对离心压气机进口畸变的研究,国内外众多学者开展了相应工作。Ariga等^[3]对叶尖畸变、轮毂畸变、周向畸变这3类进口畸变进行了实验研究,探究总压畸变对压气机性能的影响;周颂东等^[4]在上述3类进口畸变的基础上,实验研究了进口总压径向组合畸变对压气机性能的影响;Jahani等^[5]研究了周向进口畸变条件下采用叶顶射流对压气机流场结构的影响;Grimaldi等^[6]针对压气机的进气气流角畸变展开了一系列实验研究,通过改变进气导叶布局生成多种畸变形式;王鹏^[7]关注离心压气机

非对称进气,数值分析其对离心压气机流场结构和失速先兆特性的影响。陈冠言^[8]对90°弯管引起的旋涡畸变展开研究,实验对比弯管进气和直管进气对压气机性能的影响;李聪^[9]关注二级涡轮增压系统,数值研究了9种进气管道产生的进口畸变对二级增压器的影响;佟鼎等^[10]针对进口畸变带来的影响,优化了弯管结构;王铭毅等^[11]关注进口总压畸变在离心压气机中传播的非定常性,数值分析了进口畸变的时空演化过程;王震飞等^[12]数值研究了进口总压畸变条件下离心压气机近失速工况的流动特征。这些工作对于认识进口畸变对离心压气机气动性能和内部流动影响具有一定的指导意义,但是在这些工作均基于确定性的假设,未考虑环境、运行等不确定性条件的波动下的畸变流场。

在离心压气机不确定性研究方面,目前国内外大多数相关研究主要集中在压气机几何不确定性的影响方面^[13-22],对于来流不确定性影响的研究相对较少。Zhu等^[2]对压气机进口总压、总温和叶轮叶顶间隙等的不确定性进行研究,采用基于随机收集方法的非嵌入式稀疏网格;唐新姿等^[23]结合转速和加工误差的不确定性,采用蒙特卡罗法进行研究。

以上研究均假定进口流场是均匀分布的,未能揭示进口畸变不确定性的影响。目前尚未有研究涉及离心压气机进口畸变不确定性,关于进口畸变及其不确定性对压气机气动性能的影响尚不明晰。本文在对离心压气机进口畸变及其不确定性进行参数化表征的基础上,以Radiver离心压气机为例,研究受进口径向总压畸变不确定性影响下的压气机气动

性能统计特征,辨析对压气机气动性能影响最为显著的畸变不确定性参数。

1 径向畸变不确定性参数化表征模型

1.1 研究对象

本文研究对象为 Radiver 离心压气机,该压气机包括离心叶轮及叶片扩压器,其几何及实验数据详见文献[24-25]。考虑到压气机在 80% 转速下的气动性能测试数据较 100% 转速更全,所以选取 Radiver 离心压气机在 80% 转速下进行研究。压气机在该工况下的运行参数及压气机主要几何参数如表 1、2 所示。

表 1 Radiver 压气机运行参数

Table 1 Operating parameters of Radiver compressor

参数	数值
质量流量/(kg·s ⁻¹)	1.061 8
进口总压/Pa	60 000
进口总温/K	296
径向流量系数	0.401
叶轮转速/(r·min ⁻¹)	28 160

表 2 Radiver 压气机主要几何参数

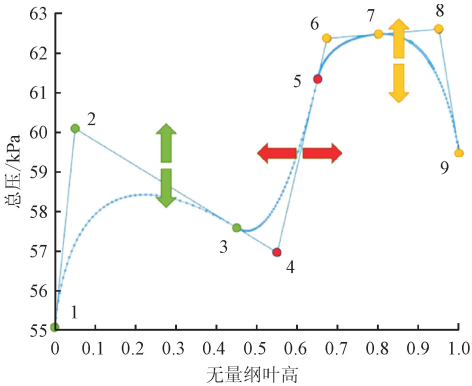
Table 2 Geometrical parameters of Radiver compressor

参数	数值
叶轮外径/mm	135
叶轮叶片数	15
叶轮叶片前缘叶顶间隙/mm	0.7
叶轮叶片尾缘叶顶间隙/mm	0.48
扩压器进口宽度/mm	11.1
扩压器叶片数	23
扩压器进口安装角/(°)	16.5
扩压器进口半径与叶轮出口半径之比	1.04
扩压器叶片楔角/(°)	6.615
扩压器当量扩张角/(°)	9.037

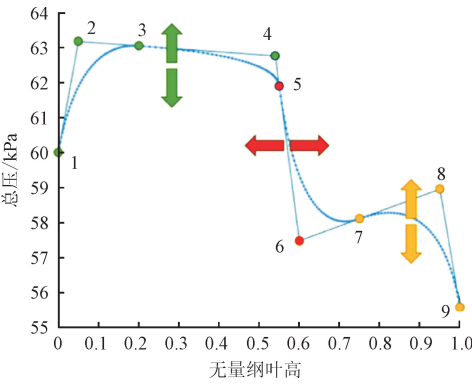
1.2 径向总压畸变确定性表征模型

本文主要研究轮毂畸变、叶尖畸变这两类进口径向总压畸变对离心压气机气动性能的影响,基于如下假设:①不考虑周向畸变,假定进口参数在周向分布均匀;②仅考虑叶轮进口总压畸变,假定静压、总温沿径向均匀分布且进口进气方向为轴向;③总压畸变发生位置距离叶片前缘上游方向 50 mm,覆盖整个进气道。

在 Ariga 等^[3]的实验研究中,叶尖畸变、轮毂畸变分别通过在离心压气机进口上游叶尖侧和轮毂侧区域安装畸变网所生成,畸变网后出现的低速区使得压气机进口相应位置的总压亏欠更为显著,从而形成总压畸变。在本文研究中,为避免压气机进口平均总压对性能造成影响,设定该值与均匀进口条件下的进口总压 60 kPa 一致。采用 4 段 2 阶 Bezier 曲线构建两类离心压气机进口径向总压畸变的确定性参数化表征模型,如图 1 所示。图中蓝色光滑曲线为轮毂畸变和叶尖畸变的分布形式,两者均存在两个明显的畸变峰,其中较高畸变峰对应着进气道畅通的区域,较低畸变峰对应着进气道堵塞的区域;各 Bezier 控制点的物理意义明确,轮毂畸变第 1 组控制点 1、2、3 和叶尖畸变第 1 组控制点 1、2、3、4 的纵坐标反映轮毂侧畸变峰的数值大小,轮毂畸变第 2 组控制点 4、5 和叶尖畸变第 2 组控制点 5、6 的横坐标反映两侧畸变峰之间的相对位置,轮毂畸变第 3 组控制点 6、7、8、9 和叶尖畸变第 3 组控制点 7、8、9 的纵坐标反映叶尖侧畸变峰的数值大小。



(a) 轮毂畸变



(b) 叶尖畸变

图 1 径向总压畸变参数化表征模型

Fig. 1 Parametric models for radial total pressure distortion

1.3 径向总压畸变不确定性表征模型

基于上述进口径向总压畸变确定性参数化表征模型,建立进口径向总压畸变不确定性表征模型。假定两类畸变峰的数值大小和畸变峰相对位置具有不确定性,设置三维随机变量。图 1 中两类畸变的 3 组贝塞尔控制点以不同颜色进行区分,对应随机变量的 3 个维度,同组的控制点一起变动,不同颜色的箭头对应着随机变量相应维度的数值变化方向。假定不确定性总压畸变随机变量各维度服从正态分布,随机变量各维度均值为确定性基准分布下对应控制点组内控制点数值平均值;标准差的设置则遵循 3σ 原则,以随机变量各维度均值的 3% 作为变化范围,以 $\pm 3\sigma$ 作为随机变量波动的上下界。表 3 列出了两类不确定性随机变量各维度的均值和标准差,其中 $\xi_{hub,i}$ 、 $\xi_{tip,i}$ 分别为轮毂畸变和叶尖畸变的随机变量的第 i 维度(被第 i 组 Bezier 控制点控制)。

表 3 两类畸变不确定性随机变量的统计规律
Table 3 Statistical law of uncertainty random variables for two types of distortion

畸变类型	随机变量	均值	标准差
轮毂畸变	$\xi_{hub,1}/\text{Pa}$	57 424.60	287.12
	$\xi_{hub,2}/\text{Pa}$	0.661 7	0.003 308 5
	$\xi_{hub,3}/\text{Pa}$	61 503.26	307.52
叶尖畸变	$\xi_{tip,1}/\text{Pa}$	62 228.76	311.14
	$\xi_{tip,2}/\text{Pa}$	0.575	0.002 875
	$\xi_{tip,3}/\text{Pa}$	57 539.38	287.70

2 不确定性流动分析方法

2.1 计算流体力学模型

借助商业软件 Ansys CFX 数值求解三维定常雷诺时均 N-S 方程 (Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS),流动方程离散格式为有限体积法,对流项采用采用二阶迎风格式离散,扩散项使用二阶中心格式离散,湍流模型采用剪切应力传输 (shear stress transfer, SST) $k-\omega$ 模型。进口边界条件为总温、总压及进气方向,其中随机样本总压分布通过 XLS 表格文件导入,出口边界条件为质量流量,固壁设置无滑移绝热边界条件,周期性界面给定旋转周期性边界条件。

对计算区域生成结构化计算网格,如图 2 所示。第一层网格距离壁面的法向高度为 0.008 mm,以保证无量纲距离 y^+ 在 1 左右,满足 SST $k-\omega$ 湍流模型的使用要求。为进行网格无关性验证,网格数依次增加 20%,生成 3 套网格,并在设计转速下最高效

率点处进行数值计算,结果如表 4 所示。发现第 1、2 套网格的计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 预测结果差异较大,而第 2 套和第 3 套网格的 CFD 预测结果一致,因此选取第 2 套网格(118 万)开展后续研究。

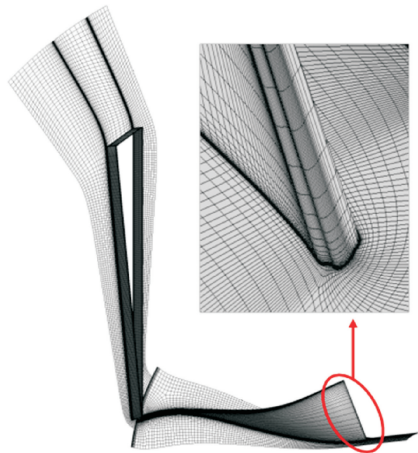


图 2 计算域网格展示
Fig. 2 Computational grids

表 4 网格无关性验证数值模拟结果
Table 4 Results of grid independence examination

网格	网格数/万	叶轮总多变效率/%	叶轮总压比
第 1 套	98	91.63	4.43
第 2 套	118	91.36	4.31
第 3 套	139	91.36	4.31

为验证数值模拟结果的准确性和可靠性,针对 80% 转速下的总压比进行验证,对比结果如图 3 所示,图中质量流量已在标准进口条件下进行修正,发现计算结果与实验数据吻合较好。图中 P_1 点代表 80% 转速下的最高效率点,为本文研究对象的运行工况。

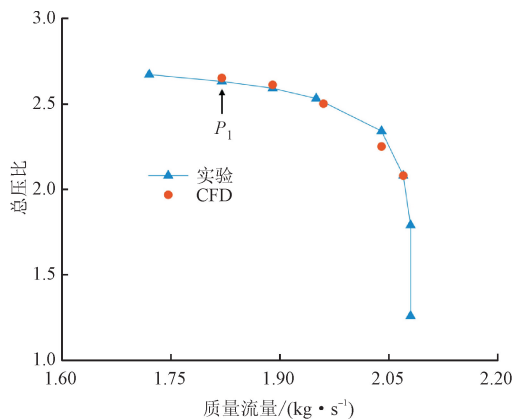


图 3 总压比 CFD 模拟与实验数据对比
Fig. 3 Comparison of total pressure ratio between CFD simulation and experimental data

2.2 非嵌入多项式混沌法

作为一种不确定性分析方法,非嵌入式多项式混沌法(non-intrusive polynomial chaos, NIPC)的本质是将系统响应输出在输入的随机空间内进行多项式展开,即

$$U = \sum_{k=0}^Q u_k \psi_k(\xi) \tag{1}$$

$$Q = \frac{(n+o)!}{n!o!} - 1 \tag{2}$$

式中: U 为系统响应输出; $\psi_k(\xi)$ 为随机变量对应的正交多项式; u_k 为多项式系数; Q 为截断项数,由随机变量的维度和多项式阶数限制; n 为随机变量的维度; o 为选用多项式的最高阶数,本文采用 3 维 3 阶多项式。

对于式(1)中系数 u_k 的求解,采用最小二乘近似法(least square approximation, LSA)。最小二乘近似法的思想是使拟合结果和实际结果的欧式距离最小化,从而获得精确度较高的系数解。式(1)可表达为矩阵形式

$$\Phi_{N \times M} u = U \tag{3}$$

式中: $\Phi_{N \times M}$ 为多项式 $\psi_k(\xi)$ 构成的矩阵, N 为抽取样本数量, M 为多项式展开截断项数,求解过程中 $\Phi_{N \times M}$ 需保持满秩 $N=40$; u 为待求解的系数向量; U 为系统响应向量,对应所关注的压气机气动性能指标。采用最小二乘法求解系数 u

$$u = (\Phi^T \Phi^{-1}) \Phi^T U \tag{4}$$

3 不确定性分析结果与讨论

为对离心压气机气动性能开展不确定性分析,

采用拉丁超立方采样法(latin hypercube sampling, LHS)生成 40 个样本,对每个样本进行 CFD 数值模拟,并结合 3 维 3 阶 NIPC 展式,建立压气机气动性能与不确定性变量间的快速映射关系。本节重点关注的气动性能为叶轮多变效率 η_{pi}^* 、级多变效率 η_{ps}^* 、叶轮总压比 ϵ_i^* 、级总压比 ϵ_s^* 和扩压器总压损失系数 λ ,扩压器总压损失系数 λ 的定义为

$$\lambda = \frac{p_3^* - p_4^*}{p_3^* - p_3} \tag{5}$$

式中: p_3^* 为扩压器进口总压; p_4^* 为扩压器出口总压; p_3 为扩压器进口静压。针对叶尖畸变和轮毂畸变各气动性能建立的 NIPC 展式的预测均方根误差 RMSE 均值分别为 0.003 1、0.000 5,说明所建 NIPC 展式具有较高的预测精度。

3.1 气动性能统计分析结果

基于 NIPC 展式和蒙特卡罗模拟(Monte Carlo simulation, MCS)方法,获得 η_{ps}^* 、 ϵ_s^* 、 λ 在叶尖畸变和轮毂畸变条件下的概率统计分布,如图 4、5 所示,其中 MCS 样本数为 10 000。

由图 4、5 可知,无论受叶尖畸变还是轮毂畸变的影响,两者的级多变效率 η_{ps}^* 和级总压比 ϵ_s^* 均比均匀来流条件下低。其中级多变效率受叶尖畸变影响下降 1.3%,受轮毂畸变影响下降 1.1%;级总压比受叶尖畸变影响下降幅度较小(小于 0.1%),受轮毂畸变影响下降 1.4%;对于扩压器总压损失系数,叶尖畸变使损失系数大幅度增高(11.0%),而轮毂畸变使损失系数减小(2.9%),两者表现截然相反。

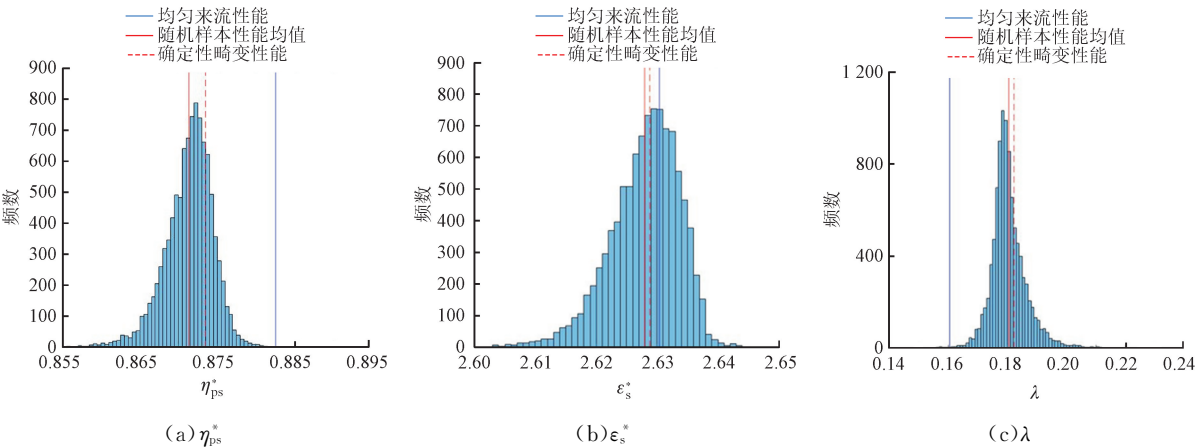


图 4 叶尖畸变影响下压气机气动性能 MCS 统计结果

Fig. 4 MCS statistical results of compressor aerodynamics performance under the influence of tip distortion

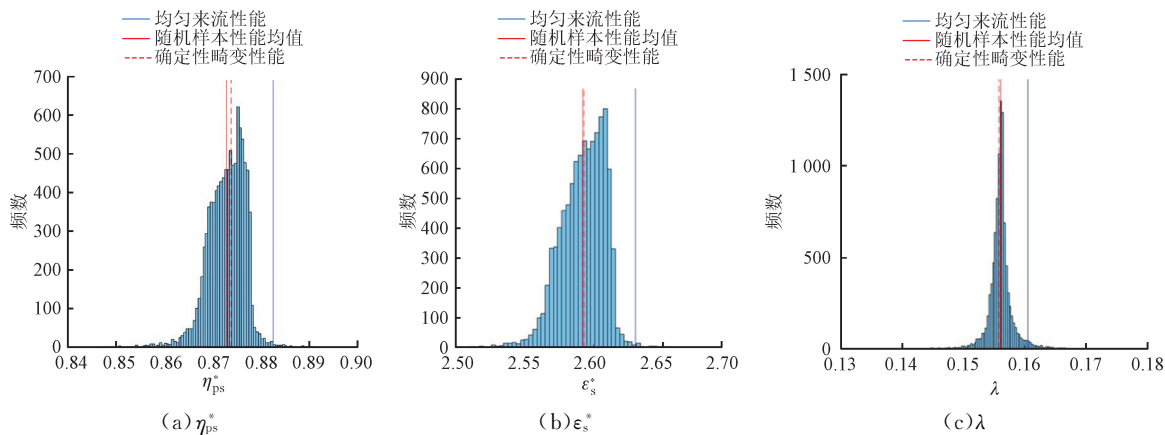


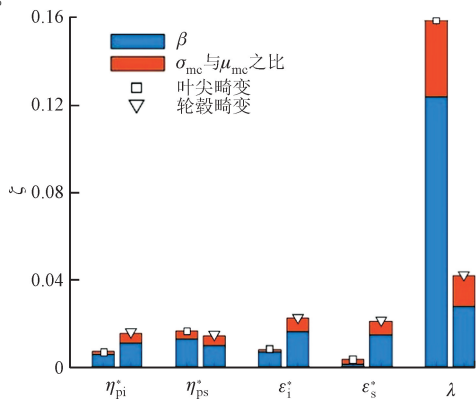
图 5 轮毂畸变影响下压气机气动性能 MCS 统计结果

Fig. 5 MCS statistical results of compressor aerodynamics performance under the influence of hub distortion

为进一步比较压气机气动性能受畸变不确定性的影响,提出如下无量纲影响因子

$$\zeta = \frac{\sigma_{mc}}{\mu_{mc}} + \beta \quad (6)$$

式中: σ_{mc} 为 MCS 样本的标准差; μ_{mc} 为 MCS 样本的均值,二者比值越大,表明受畸变不确定性影响下的气动性能的分散度越大,即畸变条件下的性能鲁棒性越差; β 为 MCS 样本的性能均值与均匀来流条件下的性能值之间的偏差。采用相对偏差形式 $\beta = |\mu_{mc} - \mu_u| / \mu_u$, μ_u 为均匀来流条件下的性能,其数值越大,表明受畸变形式的影响越大。对 MCS 统计结果的影响因子 ζ 进行计算,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,扩压器总压损失系数 λ 在所有性能指标中的受影响程度最大,且叶尖畸变的总压损失系数受影响程度显著大于轮毂畸变。因此,在后续的内流场分析中将重点关注扩压器受进口畸变的影响。

图 6 压气机各性能的影响因子 ζ 计算结果Fig. 6 Calculation results for influence factor ζ of each performance quantity

3.2 基于 Sobol 指数的敏感性分析

为进一步探究畸变各维度对压气机气动性能的影响,本文使用 Sobol 指数对压气机性能开展敏感性分析^[26]。

对于一个随机过程 $f(\xi) \in L^2(\Omega^d, p(\xi))$, 存在 Sobol 形式的函数分解,其分解形式如下

$$f(\xi) = \sum_{s \subseteq \{1, 2, \dots, d\}} f_s(\xi_s) \quad (7)$$

式中: s 为一系列整数的集合,其内元素对应多维随机变量 ξ_s 的维度, $\xi_s = (\xi_{s_1}, \xi_{s_2}, \dots, \xi_{s_n})$, 其中 $n = |s|$ 且 $f_\emptyset = f_0$; $f_s(\xi_s)$ 为随机变量 ξ_s 对应的多项式。对于一个随机过程对应的函数 $y = f(\xi)$ 而言,用条件方差在方差中所占的比例来衡量敏感程度, Sobol 指数的定义为

$$S_s = \frac{\int_{\Omega^{|s|}} f_s^2(\xi_s) p(\xi_s) d\xi_s}{\int_{\Omega^d} f^2(\xi) p(\xi) d\xi - f_0^2} \quad (8)$$

Sobol 指数的计算通常采用 MCS 法,对于具有显示表达式的 NIPC 展式,其解析表达式为

$$S_s \approx \hat{S}_s = \frac{\sum_{k \in K_s} u_k^2 \langle \psi_k, \psi_k \rangle}{\sum_{k=0}^Q u_k^2 \langle \psi_k, \psi_k \rangle} \quad (9)$$

式中: K_s 为指标集,是所选取多项式对应的指标 k 构成的集合。不同样本数量下 MCS 法和 NIPC 解析法对 Sobol 指数的计算结果如图 7 所示,可知二者计算结果基本吻合,进一步验证了 3.1 节基于 MCS 结果的可靠性。

基于前述已构建完成的 NIPC 展式,由式(9)对离心压气机各气动性能的 Sobol 指数进行计算,结

果如图 8 所示。图中 Sobol 指数 S 的下标 1、2、3 分别表示靠近轮毂侧畸变峰值大小、轮毂侧与叶尖侧畸变峰之间的相对位置、靠近叶尖侧畸变峰值大小这 3 类不确定性因素。结果表明:针对叶尖畸变,在一阶 Sobol 指数中(S_1, S_2, S_3), S_1 、 S_3 均大于 S_2 ,说明叶尖畸变条件下,压气机气动性能主要受畸变峰数值大小的影响,而对两侧畸变峰之间的相对位置不敏感;针对轮毂畸变,在离心压气机的所有气动性能中, S_1 均最大,说明性能受靠近轮毂侧畸变峰数值大小影响显著。因此,对于轮毂畸变,靠近轮毂侧的畸变峰数值大小是决定压气机气动性能的主要因素。

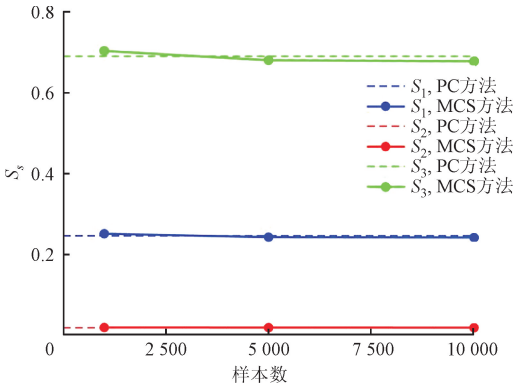


图 7 NIPC 解析法和 MCS 法的预测结果比较
Fig. 7 Comparison of prediction results between NIPC analytic method and MCS method

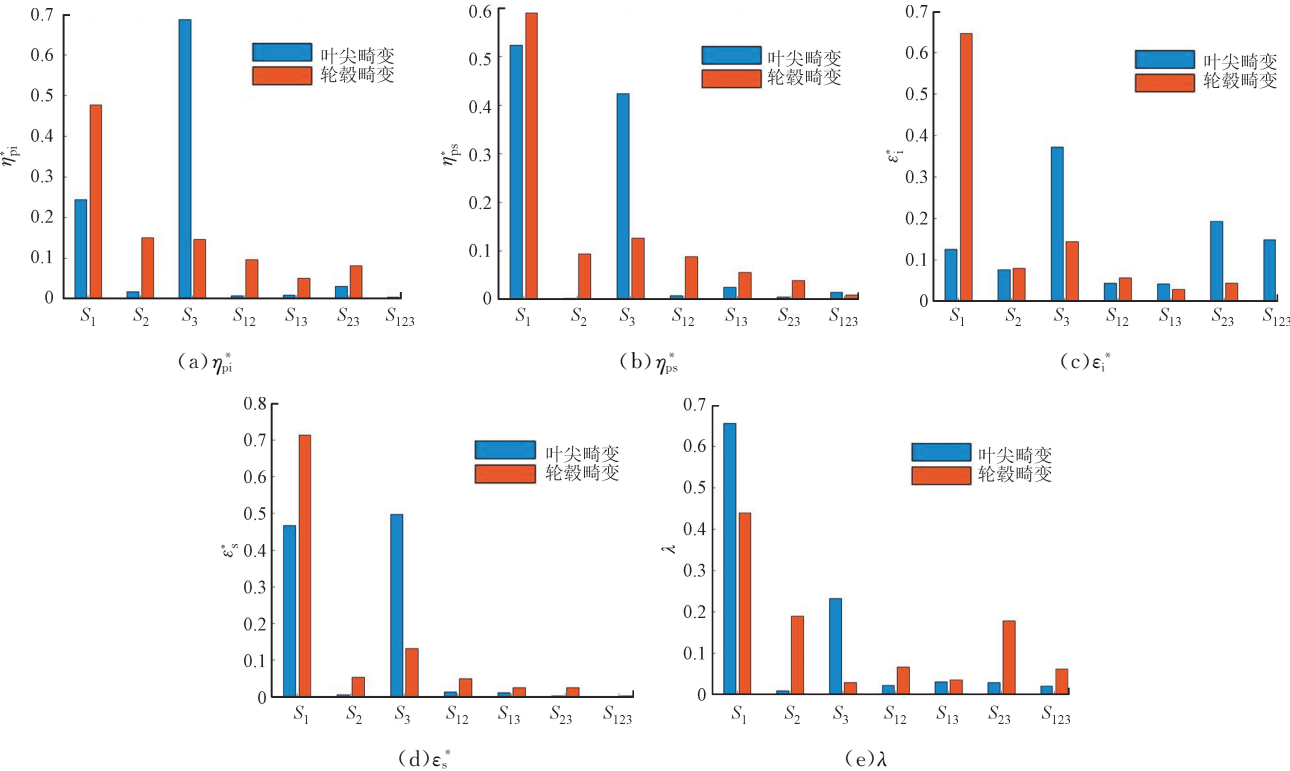


图 8 压气机各性能在两类畸变情况下的 Sobol 指数
Fig. 8 Sobol indexes of compressor performance under two types of distortion

基于上述统计特征分析和敏感性分析结果,后续流场分析将重点关注进口畸变轮毂侧畸变峰对扩压器内流场的影响,分析叶尖畸变和轮毂畸变带来影响的异同以及扩压器内流场的变化。

3.3 内流场分析

针对扩压器受影响程度较大的现象,讨论上游流场变化对下游扩压器性能的影响。由于叶尖畸变和轮毂畸变均使压气机级多变效率和级总压比降低,为使分析效果更加明显,选取性能最差的算例进

行分析,与均匀来流条件下进行对比。
关注扩压器进口流动参数的分布情况,扩压器进口子午方向速度和冲角在 3 类进口条件下沿周向(沿叶高方向取均值)和沿叶高方向(沿周向取均值)的分布如图 9、10 所示。从图 9、10 可以看出,相较沿周向分布,叶尖畸变和轮毂畸变对流动参数沿叶高方向的分布的影响更为显著。由图 9(b)、10(b)可知,相较均匀来流,叶尖畸变和轮毂畸变均对扩压器进口流场沿叶高方向的分布造

成了较为显著的影响,其中叶尖畸变产生的不均匀性更强(两侧分布较高,中间分布较低),而轮毂畸变带来的影响较弱,仅造成在靠近轮毂侧的流动参数分布较高。

畸变带来的影响较弱,仅造成在靠近轮毂侧的流动参数分布较高。

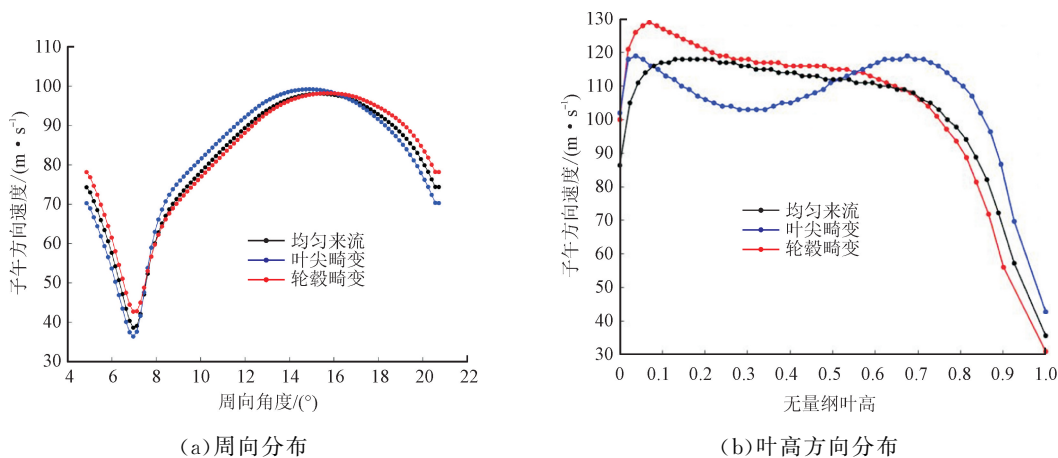


图 9 扩压器进口子午方向速度的分布

Fig. 9 Meridional velocity distributions at the diffuser inlet

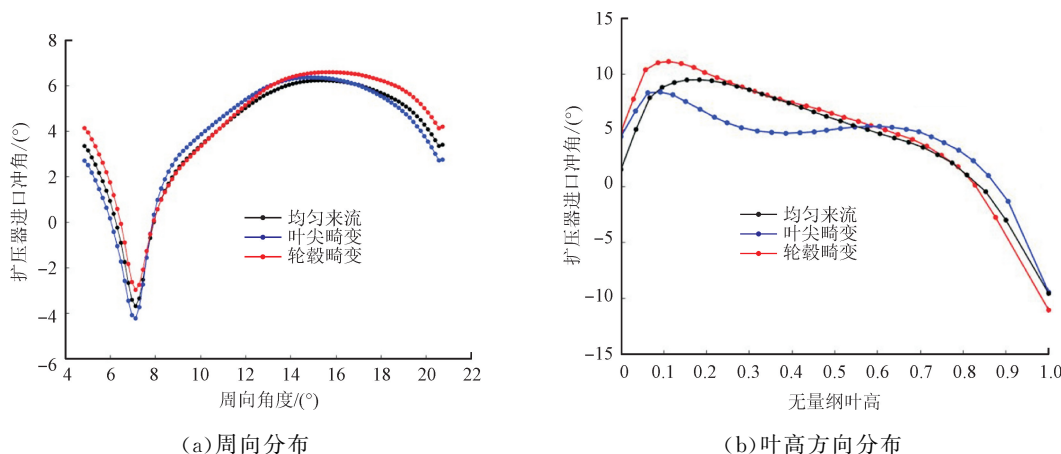
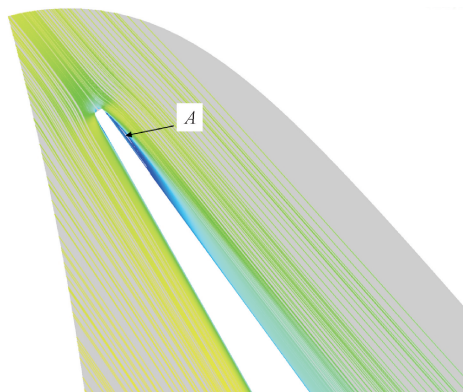


图 10 扩压器进口冲角的分布

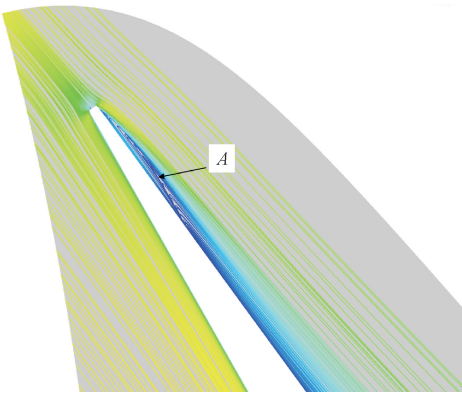
Fig. 10 Incidence distributions at the diffuser inlet

两类畸变条件下的冲角沿叶高方向的分布将显著影响扩压器的流动分离现象。在均匀来流和轮毂畸变条件下扩压器 10 % 叶高位置处叶片前缘的流线图如图 11 所示,用 A 标记存在流动分离的区域。发现相较于均匀来流,轮毂畸变轮毂侧(10 % 叶高)的较大冲角在叶片吸力侧产生了更为剧烈的流动分离,该现象沿着流动方向传递,在扩压器出口产生较大涡旋,对扩压器气动性能带来不利影响。均匀来流和叶尖畸变条件下 30 % 叶高处扩压器中段的流线图如图 12 所示,可知相较于均匀来流,叶尖畸变中间低(30 % 叶高)的冲角分布显著加剧了在扩压器中段轮毂侧叶片压力侧的流动分离现象(B 标记),该现象随着气体流动方向剧烈扩张,最终在扩

压器末端位置产生较大规模涡旋,造成扩压器气动性能显著下降。



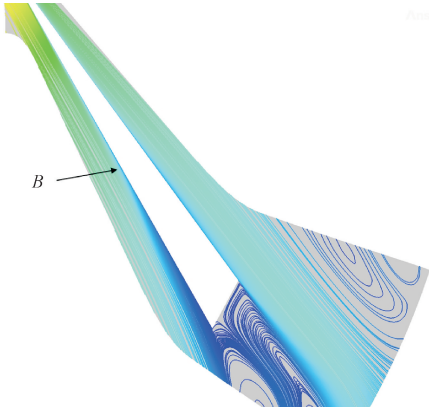
(a) 均匀来流



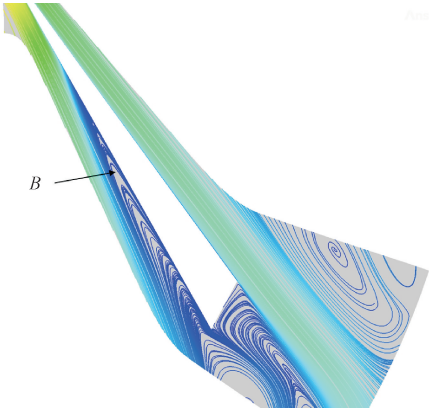
(b)轮毂畸变

图 11 10%叶高位置扩压器叶片前缘流线图

Fig. 11 Streamlines around diffuser leading edge at 10% span



(a)均匀来流

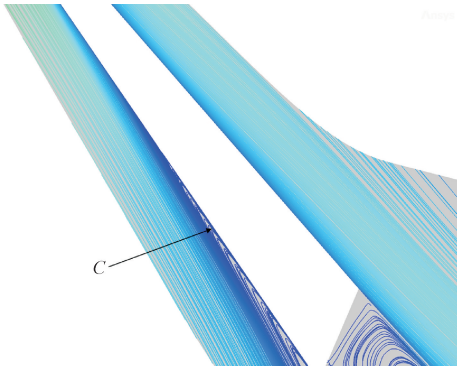


(b)叶尖畸变

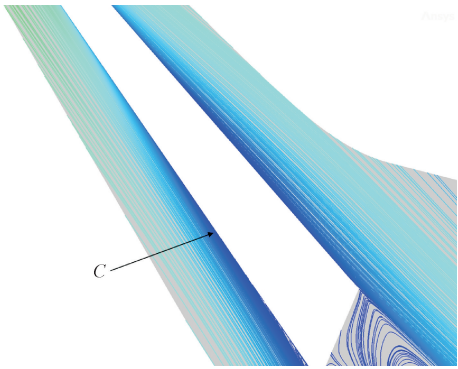
图 12 30%叶高位置扩压器中段流线图

Fig. 12 Streamlines in middle section at 30% span of diffuser

为解释轮毂畸变条件下扩压器总压损失系数的降低,针对其总压损失最小的算例进行简要分析,该算例和均匀来流条件下 10%叶高处扩压器中段的流线如图 13 所示。通过对比,发现轮毂畸变条件下的扩压器相应位置处(C 标记)几乎不存在流动分离,分离损失较小,扩压器的总压损失系数较低。



(a)均匀来流



(b)轮毂畸变

图 13 10%叶高位置扩压器中段流线图

Fig. 13 Streamlines in middle section at 10% span of diffuser

4 结 论

(1)Radiver 离心压气机在轮毂、叶尖畸变的影响下,相比均匀来流,其级多变效率显著下降(略大于 1%);轮毂畸变影响下的级总压比下降 1.4%,叶尖畸变影响下的扩压器损失系数增高 11.0%;扩压器气动性能受到的影响程度最大,且叶尖畸变的影响程度远大于轮毂畸变。

(2)叶尖总压畸变和轮毂总压畸变条件下,畸变峰数值大小的不确定性均为影响 Radiver 离心压气机气动性能的主要因素,而压气机气动性能对畸变峰的相对位置普遍不敏感。

(3)进口径向总压畸变对 Radiver 离心压气机带来的影响主要体现在扩压器进口流场沿叶高方向的分布,其中扩压器进口冲角的不均匀分布造成扩压器内部的流动分离现象,对扩压器性能产生了较大影响,是引起压气机级气动性能下降的主要原因。

参考文献:

[1] TANG Xinzi, WANG Zhe, XIAO Peng, et al. Uncertainty quantification based optimization of centrifugal

- compressor impeller for aerodynamic robustness under stochastic operational conditions [J]. *Energy*, 2020, 195: 116930.
- [2] ZHU Rui, JU Yaping, ZHANG Chuhua. Effects of geometric and operational uncertainties on aerodynamic performance of centrifugal compressor stage [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy*, 2022, 236(3): 490-505.
- [3] ARIGA I, KASAI N, MASUDA S, et al. The effect of inlet distortion on the performance characteristics of a centrifugal compressor [J]. *Journal of Engineering for Power*, 1983, 105(2): 223-230.
- [4] 周颂东, 温泉. 进口总压径向畸变对离心压气机性能的影响 [J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2005, 18(3): 10-14.
- ZHOU Songdong, WEN Quan. The effects of inlet total pressure radial distortions on the performance characteristics of a centrifugal compressor [J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2005, 18(3): 10-14.
- [5] JAHANI Z, KHALEGHI H, TABEJAMAAT S. Using tip injection to stability enhancement of a transonic centrifugal impeller with inlet distortion [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2022, 15(6): 1815-1824.
- [6] GRIMALDI A, MICHELASSI V. The impact of inlet distortion and reduced frequency on the performance of centrifugal compressors [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Powers*, 2019, 141(2): 021012.
- [7] 王鹏. 非对称边界下离心压气机失速先兆特性及其调控研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
- [8] 陈冠言. 弯管进气对离心压气机性能及进口流场影响的实验研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [9] 李聪. 进气管道对二级压气机效率影响的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [10] 佟鼎, 田红艳, 刘欣源, 等. 进气弯管对离心压气机特性影响及弯管结构优化 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(4): 706-714.
- TONG Ding, TIAN Hongyan, LIU Xinyuan, et al. Effect of inlet bend pipe on the centrifugal compressor performance and its optimization design [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(4): 706-714.
- [11] 王铭毅, 王志恒, 武耀族, 等. 进口总压畸变在离心压气机中传播的非定常特性与时空演化过程 [J]. *风机技术*, 2023, 65(5): 28-33.
- WANG Mingyi, WANG Zhiheng, WU Yaozu, et al. Unsteady characteristics and spatial-temporal evolution of inlet total pressure distortion in a centrifugal compressor [J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2023, 65(5): 28-33.
- [12] 王震飞, 王铭毅, 王志恒, 等. 进口总压畸变条件下离心压气机流动失稳特性的数值研究 [J]. *风机技术*, 2023, 65(1): 1-8.
- WANG Zhenfei, WANG Mingyi, WANG Zhiheng, et al. Numerical study on flow instability characteristics of centrifugal compressor with inlet total pressure distortion [J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2023, 65(1): 1-8.
- [13] HAN Mei, LIU Xuejun, HUANG Min, et al. Integrated parameter and tolerance optimization of a centrifugal compressor based on a complex simulator [J]. *Journal of Quality Technology*, 2020, 52(4): 404-421.
- [14] JAVED A, PECNIK R, VAN BUIJTENEN J P. Optimization of a centrifugal compressor impeller for robustness to manufacturing uncertainties [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(11): 112101.
- [15] PANIZZA A, VALENTE R, RUBINO D, et al. Impact of manufacturing variability on the aerodynamic performance of a centrifugal compressor stage with curvilinear blades [C]//ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2016: V02CT45A027.
- [16] PANIZZA A, RUBINO D T, TAPINASSI L. Efficient uncertainty quantification of centrifugal compressor performance using polynomial chaos [C]//ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2014: V02BT45A001.
- [17] PANIZZA A, IURISCI G, SASSANELLI G, et al. Performance uncertainty quantification for centrifugal compressors: part 1 stage performance variation [C]//ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2012: 1863-1872.
- [18] BICCHI M, MARCONCINI M, BELLOBUONO E F, et al. Multi-point surrogate-based approach for assessing impacts of geometric variations on centrifugal compressor performance [J]. *Energies*, 2023, 16(4): 1584.
- [19] LIU Yiming, JU Yaping, QIN Ruihong, et al. Collaborative robust design optimization of blade geometry and manufacturing tolerance for a transonic centrifugal impeller [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2023, 145(7): 071001.

[20] 柳一鸣. 考虑真实加工误差的离心叶轮气动外形和公差约束协同优化设计 [D]. 西安: 西安交通大学, 2020.

[21] 蒋伟. 离心压气机叶轮加工误差的不确定性流动分析及设计优化 [D]. 西安: 西安交通大学, 2019.

[22] JU Yaping, LIU Yiming, JIANG Wei, et al. Aerodynamic analysis and design optimization of a centrifugal compressor impeller considering realistic manufacturing uncertainties [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 115: 106787.

[23] 唐新姿, 王喆, 王效禹, 等. 多源不确定耦合下离心压气机叶轮气动稳健性 [J]. *航空动力学报*, 2020, 35(1): 196-204.
TANG Xinzi, WANG Zhe, WANG Xiaoyu, et al. Aerodynamic robustness of centrifugal compressor impeller under multi-source uncertainty coupling [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(1): 196-204.

[24] ZIEGLER K U, GALLUS H E, NIEHUIS R. A study on impeller-diffuser interaction; part I influence on the performance [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2003, 125(1): 173-182.

[25] ZIEGLER K U, GALLUS H E, NIEHUIS R. A study on impeller-diffuser interaction; part II detailed flow analysis [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2003, 125(1): 183-192.

[26] CRESTAUX T, LE MAÎTRE O, MARTINEZ J M. Polynomial chaos expansion for sensitivity analysis [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(7): 1161-1172.

(编辑 赵炜)