

整机环境下离心压气机叶轮流固耦合 不确定性量化分析

徐永祥¹, 宋嘉涛², 张本瑞¹, 李震¹, 琚亚平¹, 张楚华¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 比亚迪汽车工业有限公司, 518118, 广东深圳)

摘要: 针对流固耦合不确定性量化计算中精度和成本难以有效平衡的问题, 从某涡轮增压器离心压气机双向流固耦合计算出发, 提出了考虑叶片热态变形和蜗壳非对称影响的离心压气机内流场计算简化模型, 并结合集成代理模型和蒙特卡罗方法, 开展了整机环境下离心压气机叶轮流固耦合的不确定性量化分析。数值结果表明: 在保证计算精度的前提下, 相较于整机流固耦合模型, 提出的简化模型将计算时间缩短了 83%~98%; 材料属性不确定性对叶轮效率的影响大于转速不确定性, 密度、泊松比和弹性模量 3 种不确定性因素对叶轮效率的影响程度相当, 转速对叶片热态变形不确定性的影响程度在转速不确定性中最为显著; 叶片热态变形不确定性对叶轮效率的影响主要体现在效率均值的变化, 而与热态变形无关的转速自身、叶轮出口非对称流场等不确定性因素对叶轮效率的影响主要体现在分散度的变化。研究工作突显了流固耦合分析在离心压气机不确定性量化分析中的必要性, 为今后开展鲁棒优化设计提供了理论基础。

关键词: 离心压气机; 叶轮; 流固耦合; 不确定性量化; 效率

中图分类号: TK14 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202410011 **文章编号:** 0253-987X(2024)10-0121-13

Uncertainty Quantification of Fluid-Solid Interaction of Centrifugal Compressor Impeller in Whole Machine Environment

XU Yongxiang¹, SONG Jiatao², ZHANG Benrui¹, LI Zhen¹, JU Yaping¹, ZHANG Chuhua¹

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

2. BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518118, China)

Abstract: To balance the computational accuracy and cost in uncertainty quantification of fluid-solid interaction, a simplified numerical model for the internal flow field of centrifugal compressors is proposed based on two-way fluid-solid interaction of a turbocharger centrifugal compressor and with the hot deformation of blades and the asymmetric effect of volute taken into account. Combined with integrated surrogate models and Monte Carlo method, uncertainty quantification of fluid-solid interaction of centrifugal compressor impeller is carried out in whole machine environment. The results show the simplified model proposed can reduce the computational time by 83% to 98% compared with the fluid-solid interaction model of whole machine while the computational accuracy remains. The impact of material property uncertainty on impeller efficiency is greater than that of rotational speed uncertainty. Three uncertainty factors of density, Poisson's ratio and elastic

收稿日期: 2024-01-04。 作者简介: 徐永祥(1999—), 男, 硕士生; 李震(通信作者), 男, 助理教授, 硕士生导师。 基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(52376030, 52206051)。

网络出版时间: 2024-04-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240403.1659.006>

modulus yielded equivalent impacts on impeller efficiency. Among the rotational speed uncertainties, the induced hot deformation of blades had the most significant impact. The impact of hot deformation of blades on impeller efficiency is mainly reflected in terms of mean value, while uncertainty factors unrelated to hot deformation, such as rotational speed itself and asymmetric flow field at the impeller outlet, mainly affected impeller efficiency in terms of scatter, with the former being the main factor affecting impeller efficiency variation. This study highlights the necessity of fluid-solid interaction in uncertainty quantification of centrifugal compressors and lays a theoretical foundation for robust design optimization of centrifugal compressors.

Keywords: centrifugal compressor; impeller; fluid-solid interaction; uncertainty quantification; efficiency

离心压气机是涡轮增压器、微型燃气轮机、中小型航空发动机、大型空分等装置中的核心部件。离心叶轮作为离心压气机的唯一旋转做功部件,其气动性能直接影响着装置整体性能。一方面,离心叶轮叶片多为复杂薄壁曲面,在高速旋转过程中,受离心力和气动力的共同作用,叶轮叶片易发生变形(即热态变形)^[1-2],而叶片变形反过来作用于流场边界,压气机内流场及气动性能又随之改变^[3],随着离心压气机转速和负荷的提升,上述流固耦合作用愈发显著;另一方面,在实际工作中,叶轮转速和叶片材料属性如密度、弹性模量和泊松比存在固有不确定性,使得叶片热态变形呈现出一定的随机可变性,进而对整机高效稳定和安全可靠运行构成严重威胁^[4]。因此,开展离心压气机流固耦合不确定性量化研究,对深刻认知压气机内部不确定性流动现象、开发高性能强鲁棒离心压气机具有重要的理论意义及工程应用价值。

在压气机流固耦合研究方面,国内外众多学者开展了大量工作。针对离心叶轮强度,罗庆怡等^[5]采用单向流固耦合方法,分析了不同叶片几何尺寸下的离心叶轮应力和应变状态。文献[6-7]考虑温度载荷的影响,采用单向流固耦合方法对离心压气机进行应力分析。Aissa等^[8]以最大应力和最大惯性矩为约束条件对离心压气机进行优化。针对离心叶轮变形,Hazby等^[9]采用双向流固耦合方法对大流量系数混流叶轮叶片变形进行研究。杨长灵等^[10]采用双向流固耦合方法对离心叶轮叶片叶顶间隙和周向扭转变化进行研究。王宏亮等^[11]采用单向流固耦合方法对某微型燃气轮机用高速离心叶轮的叶顶间隙变化进行研究。刘向阳等^[12]采用单向流固耦合方法对某离心压气机首级闭式叶轮的轮盖间隙变化进行研究。以上这些工作在揭示压气机内流场与叶轮叶片相互作用机理上具有一定的指导意义,但这些工作均基于确定性的假设,未考虑几

何、运行环境等不确定性带来的影响。

在压气机不确定性研究方面,唐新姿等^[13]采用蒙特卡罗法研究了叶轮制造误差与转速不确定性对离心压气机气动性能的影响。Gopinathrao等^[14]采用非浸入多项式混沌法研究了入口总压不确定性对跨声速压气机气动性能的影响。傅珏等^[15]采用非浸入多项式混沌法研究了叶顶间隙几何不确定性对离心叶轮气动性能的影响。李磊等^[16]采用组合算法开展了几何尺寸、材料属性和运行工况等随机因素条件下的离心叶轮优化设计。Zhu等^[17]采用稀疏网格随机配点法研究了几何和运行工况不确定性对离心压气机气动性能的耦合作用。Panizza等^[18]采用多项式混沌展开等方法研究了叶片角度和厚度不确定性对离心压气机气动性能的影响。Bicchi等^[19]采用人工神经网络和蒙特卡罗方法研究了几何参数不确定性对离心压气机气动性能的影响。文献[20-21]分别采用非浸入多项式混沌法和稀疏网格随机配点法研究了叶片表面加工误差对离心叶轮气动性能的影响。从以上研究工作可以看出,压气机几何和运行不确定性带来的气动性能变化不容忽视。

流固耦合不确定性量化是解决上述问题的根本途径,但从公开文献来看,目前尚鲜有研究工作涉及离心压气机流固耦合不确定性量化,无法揭示热态运行状态压气机气动性能的随机可变性,这主要是因为流固耦合不确定性量化的计算成本较流动不确定性量化显著增大,尤其是当考虑蜗壳非对称影响时,基于全通道计算的不确定性量化成本过于高昂。因此,本文在对离心压气机进行双向流固耦合计算的基础上,提出了考虑叶片热态变形和非对称蜗壳影响的离心压气机内流场简化计算模型,开展了离心压气机整机环境下叶轮流固耦合不确定性量化研究,分析了材料属性及转速不确定性影响下的离心叶轮气动性能变化,为离心压气机热态不确定性分

析及鲁棒优化设计提供参考。

1 离心压气机双向流固耦合计算模型

1.1 几何模型

本文研究对象是某车用涡轮增压器离心压气机,主要由叶轮、无叶扩压器和蜗壳 3 部分组成,其中离心叶轮设计转速为 150 000 r/min,叶轮外径为 56 mm,包括 6 个主叶片和 6 个分流叶片,叶片叶顶厚度为 0.5 mm,叶顶间隙为 0.5 mm,叶轮材料为铝合金 ZL201,无叶扩压器宽度为 3.3 mm。基于研究对象的几何参数,重构出离心压气机三维计算机辅助设计(CAD)模型,如图 1 所示。

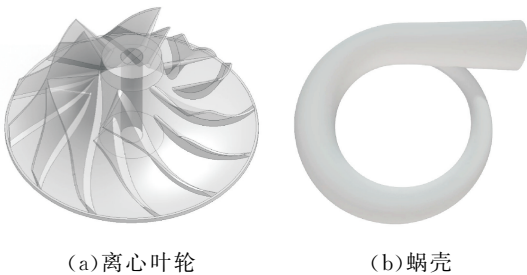


图 1 离心压气机 CAD 模型
Fig. 1 CAD models of centrifugal compressor

1.2 流体域、固体域数值计算模型

采用双向流固耦合方法^[22]计算上述离心压气机气动性能,计算流程如图 2 所示。双向流固耦合计算包含流体域计算、固体域计算和流固交界面数据传递 3 部分。在求解过程中,求解流体域获得叶轮表面压力分布传递给固体域,然后求解固体域获得在离心载荷和气动载荷作用下的叶轮变形,并将变形再次返回流体域进行下一轮迭代求解,最终获得收敛结果。

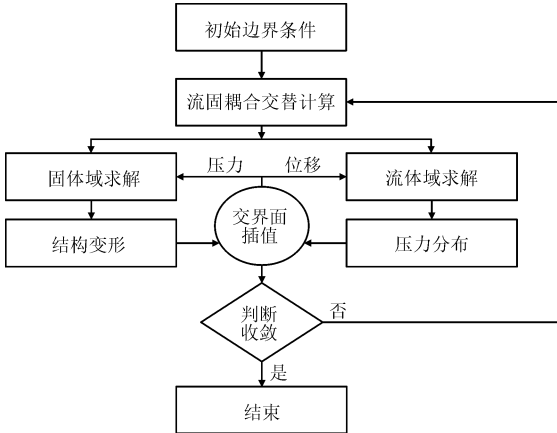


图 2 双向流固耦合方法流程图
Fig. 2 Flowchart of two-way fluid-solid interaction method

利用商业软件 ANSYS 的流体仿真模块 CFX 数值求解三维定常雷诺时均纳维-斯托克斯(RANS)方程获得流体域流场参数,湍流模型采用 $k-\epsilon$ 模型,采用有限体积法进行方程离散,其中对流项采用二阶迎风格式,扩散项采用二阶中心格式。进口给定总温为 293.15 K、总压为 101 325 Pa,进口气流方向为轴向,壁面满足绝热无滑移边界条件,出口给定压力。对于每个计算工况,通过调整出口压力值,使压气机进口流量等于设定值。为考虑蜗壳导致的流场参数周向非对称分布,叶轮与扩压器的动静交界面采用冻结转子法进行处理^[23]。

利用商业软件 ANSYS 的结构仿真模块 Transient Structural 数值求解弹性力学控制方程,获得固体域的结构场参数,采用有限元法进行方程离散,忽略轴的振动和径向变形,在叶轮与轴的接触面施加完全固定约束,在叶轮轮盘底部施加轴向零位移约束。叶轮旋转时承受的离心力通过在控制方程中引入体积力源项来施加。

流体域和固体域计算模型均为全通道,计算网格如图 3 所示。对于流体域,采用结构化网格, y^+ 取 40,以满足壁面函数的使用要求;对于固体域,采用非结构化网格对叶轮进行网格划分。经网格无关性验证,流体域网格总数为 677 万(其中叶轮和无叶扩压器部分为 470 万,蜗壳部分为 207 万),叶轮固体域网格总数为 97 万。

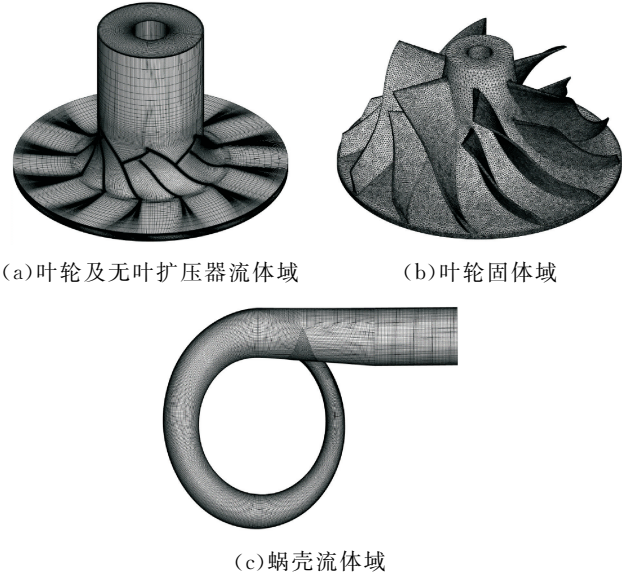


图 3 离心压气机数值计算网格
Fig. 3 Computational grids of the centrifugal compressor

采用有公开实验数据的 Radiver 离心压气机^[24-25],验证流体域流场数值计算模型的精度,由

于80%转速下的实验数据比100%转速下更全面,故选取80%转速进行验证。计算采用的湍流模型和数值方法与本文研究对象一致,验证结果如图4所示。计算所得多流量点下的压气机总压比和效率与实验数据吻合较好,设计工况下效率和压比的预测相对误差分别为2.4%、1.1%,验证了流场数值计算模型的有效性。

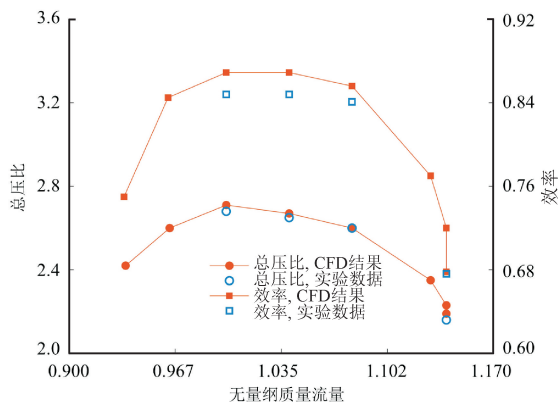


图4 Radiver 压气机计算流体力学数值预测结果与实验数据对比

Fig. 4 Comparison of computational fluid dynamics result and experimental data of Radiver compressor

1.3 流固交界面数据传递方法

流体域和固体域之间进行数据传递时,固体域计算需要流体域提供交界面应力,流体域计算需要固体域提供交界面位移,表达式如下

$$\begin{cases} \sigma_s n_s = \sigma_f n_f \\ d_f = d_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_f 、 σ_s 分别为流体侧和固体侧界面应力张量; n_f 、 n_s 分别为流体界面和固体界面的单位法向量; d_f 、 d_s 分别为流体界面和固体界面位移向量。流体侧界面应力仅考虑流体压力的影响,即式(1)中的项 $\sigma_f n_f$ 蜕化为 $p \mathbf{I} n_f$,其中 p 为流体压力, $\mathbf{I}$ 为单位张量。

在每一步流固耦合迭代计算中,流体域将计算的流固界面压力场数据集 $\{x, p\}$ 传递给固体域,以形成界面边界条件,此处 x 表示当地坐标向量;固体域将计算的流固界面位移场数据集 $\{x, d_f\}$ 传递给流体域,以更新流体域计算网格。由于流体域与固体域界面采用非匹配计算网格,因此利用距离倒数加权平均法^[22,26]对位移和应力进行插值计算。

在叶轮主叶片前缘叶顶处设置监测点,当监测点叶片变形变化小于 7×10^{-5} mm 且流动参数基本

不再发生变化时视为流固耦合迭代收敛。在 Intel Core i7-8700K 处理器 10 核上,对上述离心压气机进行设计工况下双向流固耦合迭代计算,所需计算时间约为 336 h。

为验证流固耦合交界面数据传递方法的精度,提取本文研究对象在设计转速、最高效率工况下主叶片叶顶位置处压力面在流体侧和固体侧界面位移大小的流向分布,结果如图5所示。流体侧固体侧界面变形的分布吻合良好,位移量最大误差小于 0.001 mm。上述分析表明,交界面固体侧界面压力导致的位移能较精确地传递到流体界面上,说明了交界面数据传递方法的可靠性。

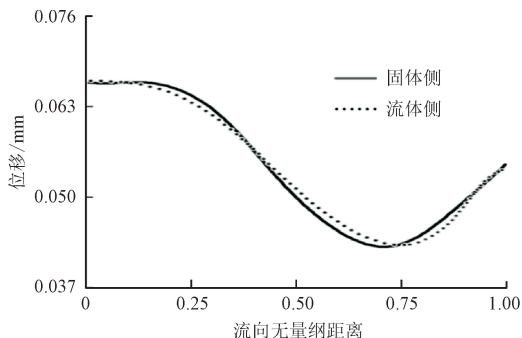


图5 主叶片叶顶位置处压力面变形的流向分布

Fig. 5 Distribution of pressure side deformation along the streamwise direction at the top of a main blade

2 离心压气机流固耦合简化模型

本文旨在研究离心叶轮材料属性和转速的不确定性对压气机气动性能的影响,而不确定量化作为一种统计分析方法,需开展大量数值计算,以提供足够数目的统计样本。对于单样本计算,为考虑蜗壳周向非对称结构对模拟结果的影响,通常需要在计算域中引入蜗壳,并结合冻结转子法开展整圈计算;同时,流固耦合计算需要分别在流体域与固体域交替进行多次迭代。以上两方面因素显著增加了单样本的计算量,进而使不确定量化分析的多样本计算成本难以承受。为此,本文提出能够考虑叶片热态变形和蜗壳非对称影响的压气机数值模拟简化模型。

2.1 考虑蜗壳非对称影响的简化模型

在不确定量化分析的多样本计算中,为节约计算成本,首先探讨蜗壳非对称性对离心叶轮气动性能和热态变形的影响,并对上述离心压气机流固耦合模型(以下简称原模型)进行简化。

表1对比了设计转速下原模型和不考虑蜗壳条

件(扩压器出口压力均匀分布)下定常计算所得离心叶轮等熵效率、总压比和叶片最大变形,可知在近喘振、最高效率和近堵塞工况条件下,不考虑蜗壳条件的叶轮效率和压比均高于考虑蜗壳的计算结果,而叶片最大变形均小于考虑蜗壳的计算结果。相较原模型,在最高效率点处,不考虑蜗壳条件的叶轮效率上升 0.38%,压比上升 2.26%,叶片最大变形下降 3.03%;在近喘振点处,叶轮效率上升 1.93%,压比上升 3.27%,叶片最大变形下降 3.12%;在近堵塞点处,叶轮效率上升 2.99%,压比上升 1.30%,叶片最大变形下降 4.41%。因此,蜗壳导致的无叶扩压器出口非对称流场对叶轮气动性能和热态变形影响较大,不可忽略。

表 1 考虑蜗壳和不考虑蜗壳流固耦合模型所得离心叶轮的气动性能及热态变形

Table 1 The predicted impeller aerodynamics performance and hot blade deformation by models with and without volute

工况点	考虑蜗壳			不考虑蜗壳		
	效率/ %	压比	变形/ mm	效率/ %	压比	变形/ mm
近喘点	72.60	2.448	0.064	74.00	2.528	0.062
最高效率点	79.62	2.476	0.066	79.92	2.532	0.064
近堵点	66.80	1.852	0.068	68.80	1.876	0.065

为计及蜗壳造成的流场周向非对称分布对离心叶轮气动性能和热态变形的影响并节约计算成本,将由双向流固耦合模型计算所得蜗壳进口压力的非周向非对称二维分布数据集 $\{x, p\}$ 作为压力出口边界条件施加在无叶扩压器出口,将原模型简化为叶轮和无叶扩压器流固耦合计算模型(以下称简化模型 1)。

表 2 展示了设计转速下原模型和简化模型 1 所得离心叶轮效率、压比和叶片最大变形,可知两种模型对效率的预测结果在最高效率点、近喘振点及近堵塞点处仅相差 0.03%、0.14%、0.04%,对压比的预测结果仅相差 0.04%、0.08%、0.05%,对叶片最大变形的预测结果仅相差 1.51%、1.56%、1.47%,均远小于不考虑蜗壳带来的误差,说明简化模型 1 具有较高精度,能够预测压气机整机环境下的离心叶轮气动性能和热态变形。因此,下文所建的全周简化模型均通过在无叶扩压器出口边界施加双向流固耦合计算所得的非对称压力分布,以此来考虑下游蜗壳非对称性的影响。

表 2 简化模型 1 与原模型所得离心叶轮的气动性能和热态变形对比

Table 2 Comparison of the predicted impeller aerodynamics performance and hot blade deformation by Model 1 and the original model

工况点	简化模型 1			原模型		
	效率/ %	压比	变形/ mm	效率/ %	压比	变形/ mm
近喘点	72.70	2.450	0.063	72.60	2.448	0.064
最高效率点	79.60	2.475	0.065	79.62	2.476	0.066
近堵点	66.83	1.853	0.067	66.80	1.852	0.068

2.2 考虑材料属性变化的简化模型

为研究叶片材料属性扰动对离心叶轮气动性能的影响,首先对叶轮叶片变形和无叶扩压器出口非对称流场的耦合关系进行分析。

基于叶轮和无叶扩压器整圈计算流体动力学模型和上述简化模型 1,对比设计转速下最高效率点处有无叶片变形条件下无叶扩压器出口压力,结果表明压力的变化小于 0.01%;基于叶轮和无叶扩压器整圈流固耦合均匀压力出口模型及简化模型 1,对比设计转速下最高效率点处均匀出口边界和非对称压力出口边界条件下的叶轮叶片变形,结果表明叶片变形的变化小于 0.005%。综合上述结果,叶片变形和出口非对称压力边界的相互影响可忽略,故考虑将二者解耦,从而分别确定叶片变形和出口非对称流场对离心叶轮气动性能的影响,即

$$\Delta \xi_{\text{def}, P_{\text{vol}}} = \Delta \xi_{\text{def}} + \Delta \xi_{P_{\text{vol}}} \tag{2}$$

$$\Delta \xi_{\text{def}, P_{\text{vol}}} = \xi_{\text{def}, P_{\text{vol}}} - \xi \tag{3}$$

$$\Delta \xi_{\text{def}} = \xi_{\text{def}} - \xi \tag{4}$$

$$\Delta \xi_{P_{\text{vol}}} = \xi_{P_{\text{vol}}} - \xi \tag{5}$$

式中: $\Delta \xi_{\text{def}, P_{\text{vol}}}$ 为叶片变形与出口非对称流场共同作用时离心叶轮气动性能的变化量; $\Delta \xi_{\text{def}}$ 为叶片变形单独作用时的性能变化量; $\Delta \xi_{P_{\text{vol}}}$ 为出口非对称流场单独作用时的性能变化量; ξ 为不考虑叶片变形和出口非对称流场作用条件下的离心叶轮气动性能,可采用单通道均匀压力出口流动计算模型(以下称简化模型 2)进行计算; $\xi_{\text{def}, P_{\text{vol}}}$ 为同时考虑两者作用时的气动性能,采用前述简化模型 1 计算; ξ_{def} 为仅考虑叶片变形作用时的气动性能,可采用单通道均匀压力出口流固耦合计算模型(以下称简化模型 3)进行计算; $\xi_{P_{\text{vol}}}$ 为仅考虑出口非对称流场作用时的气动性能,可采用全通道非对称压力出口流动计算模型(以下称简化模型 4)进行计算。

表 3 给出了 3 种转速下,基于上述简化模型计算叶轮最高效率点的等熵效率变化,表中 $\Delta\eta_{\text{def},P_{\text{vol}}}$ 为叶片变形与出口非对称流场共同作用时的效率变化量, $\Delta\eta_{\text{def}}$ 为叶片变形单独作用时的效率变化量, $\Delta\eta_{P_{\text{vol}}}$ 为出口非对称流场单独作用时的效率变化量,计算结果与上述分析一致且进一步证实了式(2)的合理性。因此,本文在进行材料属性不确定性量化时,不考虑出口非对称流场影响,采用简化模型 3,在相同计算硬件配置下,单工况计算时间由原模型的 336 h 降至约 56 h,节约了 83%。

表 3 最高效率工况下考虑叶片变形及出口非对称压力分布的等熵效率变化

Table 3 The isentropic efficiency variations under blade deformation and outlet asymmetric pressure distribution at the peak efficiency point

转速/(r · min ⁻¹)	($\Delta\eta_{\text{def}} + \Delta\eta_{P_{\text{vol}}}$)/%	$\Delta\eta_{\text{def},P_{\text{vol}}}$ /%
110 000	-0.07	-0.07
130 000	0.04	0.05
150 000	0.28	0.30

2.3 考虑转速变化的简化模型

从流固耦合角度来看,转速不确定性对离心叶轮气动性能的影响可写为如下关系式

$$\Delta\xi_{\text{N}} = \Delta\xi_{\text{N}}^0 + \Delta\bar{\xi} = \Delta\xi_{\text{N}}^0 + \Delta\xi_{\text{N}}^{\text{def}} + \Delta\xi_{\text{N}}^{\text{Pvol}} \tag{6}$$

式中: $\Delta\xi_{\text{N}}$ 为转速不确定性导致的离心叶轮气动性能变化量; $\Delta\xi_{\text{N}}^0$ 为转速自身直接影响的性能变化量; $\Delta\bar{\xi}$ 为转速间接影响的性能变化量。基于叶片变形和出口非对称流场的解耦关系, $\Delta\bar{\xi}$ 可进一步分解成 $\Delta\xi_{\text{N}}^{\text{def}}$ 、 $\Delta\xi_{\text{N}}^{\text{Pvol}}$,其中 $\Delta\xi_{\text{N}}^{\text{def}}$ 为转速变化带来叶片热态变形变化所导致的性能变化量, $\Delta\xi_{\text{N}}^{\text{Pvol}}$ 为转速变化引起出口非对称流场变化导致的性能变化量。

基于式(6)的 3 个部分变化量,分别采用 3 个简化模型研究转速不确定性对离心叶轮气动性能的影响。由于 $\Delta\xi_{\text{N}}^{\text{def}}$ 仅考虑叶片变形作用,故采用简化模型 3 进行计算; $\Delta\xi_{\text{N}}^0$ 仅考虑转速自身作用,采用简化模型 2 进行计算; $\Delta\xi_{\text{N}}^{\text{Pvol}}$ 仅考虑出口非对称流场作用,可采用简化模型 4 进行计算,其中后两者对单工况的计算时间由原模型的 336 h 降至 4.8、19.2 h,分别节约了 98%、94%。对于简化模型 4,转速变化亦导致出口非对称压力分布发生变化,为保证简化计算模型的精度,基于原模型对不同转速下无叶扩压器出口压力分布规律进行探究。

对 150 000、130 000 和 110 000 r/min 这 3 个转速下最高效率点处无叶扩压器出口压力的周向分布形

式进行归一化处理,如图 6 所示,可知不同转速下最高效率点处经过归一化处理的无叶扩压器出口压力分布形式均在 -20°位置处跌至波谷,在 60°位置升至波峰。对归一化结果进行一致性验证,其两两相关性系数均大于 0.98,因此转速变化时无叶扩压器出口压力分布的归一化形式保持不变。

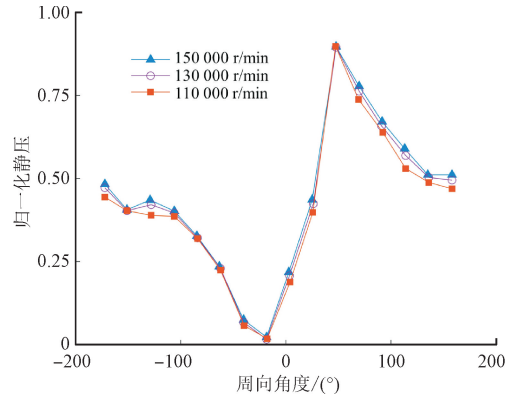


图 6 归一化后无叶扩压器出口压力分布

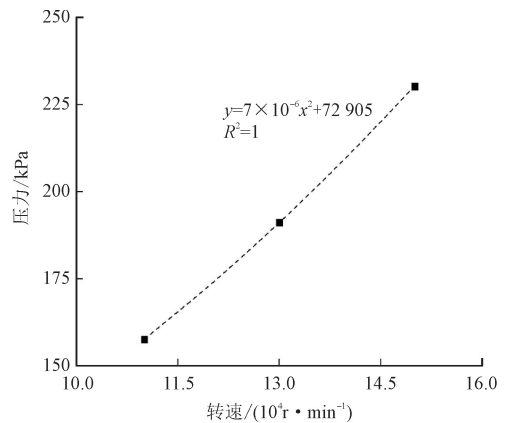
Fig. 6 Normalized pressure distributions at vaneless diffuser outlet

基于上述分析,无叶扩压器出口各周向位置压力 $P(\theta,n)$ 随转速的变化规律可表示为

$$P(\theta,n) = P'(\theta,n)A(n) + \left(\bar{P}(n) - \frac{A(n)}{2}\right) \tag{7}$$

式中: θ 为周向角度; $P'(\theta,n)$ 为压力分布的归一化形式; $\bar{P}(n)$ 、 $A(n)$ 分别为压力分布均值和波动幅值。

在 $P'(\theta,n)$ 基础上,对 $\bar{P}(n)$ 、 $A(n)$ 与转速的关系进行拟合,结果如图 7 所示,可知最高效率工况下转速与出口平均压力呈二次关系,与压力波动幅值呈线性关系,二者相关性系数 R^2 均大于 0.99。根据已确定的 $P'(n)$ 、 $\bar{P}(n)$ 和 $A(n)$,通过式(7)即可确定无叶扩压器出口压力随转速的变化规律 $P(n)$,从而将 $P(n)$ 作为简化模型 4 的出口边界条件。离心叶轮内流场计算模型如表 4 所示。



(a) $\bar{P}(n)$

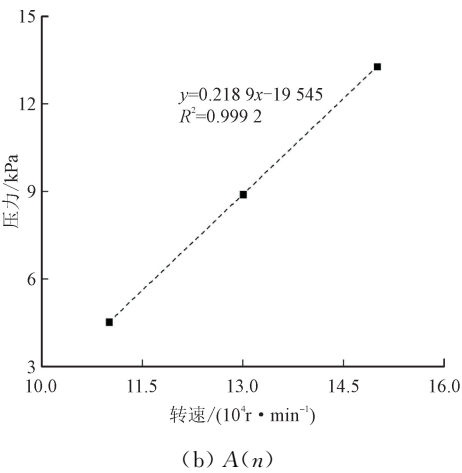


图 7 出口平均压力和压力波动幅值随转速的变化
Fig. 7 The variations of average pressure and pressure fluctuation amplitude at diffuser outlet with rotational speed

表 4 离心叶轮内流场计算模型

Table 4 Numerical models for the internal flow of centrifugal impeller

不确定性变量	计算模型	模型说明	计算时间/h
材料属性	原模型	全通道整级, 流固耦合	336
	简化模型 3	单通道均匀压力出口, 流固耦合	56
	简化模型 2	单通道均匀压力出口, 流动	4.8
转速	简化模型 3	单通道均匀压力出口, 流固耦合	56
	简化模型 4	全通道非对称压力出口, 流动	19.2

3 离心叶轮不确定性量化及结果分析

3.1 不确定性量化方法

针对前述离心叶轮在整机环境下开展材料属性和转速不确定性量化。已知叶轮材料为铝合金 ZL201,弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.33,密度为 2 780 kg/m³,强度极限为 360 MPa。选取密度、泊松比、弹性模量 3 个材料属性作为不确定性变量,并假定其与转速不确定性变量均满足正态分布^[13, 18, 20-21]。表 5 列出了材料及转速不确定性参数^[27],其中变异系数为标准差与均值之比,可用来衡量不同不确定性因素的分散度。

表 5 材料属性及转速不确定性参数统计特征

Table 5 Statistics of uncertain material properties and rotational speed

不确定性变量	均值	变异系数
密度	2 780 kg · m ⁻³	0.01
泊松比	0.33	0.05
弹性模量	70 000 MPa	0.05
转速	150 000 r · min ⁻¹	0.01

为确保流固耦合不确定性量化的精度和效率,采用集成代理模型与蒙特卡洛相结合的方法进行不确定性量化,基于表 4 中的简化模型和拉丁超立方采样(Latin hypercube sampling, LHS)方法生成集成代理模型的训练样本。本文所建立的集成代理模型包含线性回归(LR)、回归树(RT)、支持向量机回归(SVR)、高斯过程回归(GPR)、径向基函数神经网络(RBFNN)5 种模型,从中选择前 3 个预测精度最高的代理模型构建集成代理模型^[28],即

$$f_{ens}(\bullet) = w_1 f_1(\bullet) + w_2 f_2(\bullet) + w_3 f_3(\bullet) \tag{8}$$

$$w_i = 0.5 - \frac{e_i}{2(e_1 + e_2 + e_3)} \tag{9}$$

式中: $f_{ens}(\bullet)$ 为集成代理模型函数; $f_i(\bullet)$ 为前 i 个精度最高的代理模型; e_i 为 $f_i(\bullet)$ 通过十折交叉验证获得的预测误差。

在研究材料属性、转速不确定性对整机环境下离心叶轮气动性能的影响时,采用表 4 中对应的简化模型生成集成代理模型的训练样本。不同不确定性量化问题所涉及的具体集成代理模型、样本数及模型预测精度如表 6 所示,表中 R_m^2 为该研究问题下不同简化模型的代理模型相关系数平均值,用来衡量集成代理模型的预测精度。

表 6 集成代理模型

Table 6 Integrated surrogate models

问题	集成代理模型	LHS 样本数	R_m^2
材料属性不确定性量化	GPR+SVR+RBFNN	20	1
转速不确定性量化	GPR+SVR+LR	8	0.99

3.2 材料属性不确定性量化

图 8 给出了密度、泊松比和弹性模量不确定性(即材料属性整体)共同作用下离心叶轮等熵效率相对变化量的统计分布。图中横坐标表示离心叶轮效

率相对于不考虑热态变形和蜗壳非对称影响确定性计算结果的差值,蓝色实线为考虑材料属性不确定性后相对效率变化量的均值。结果表明,相较冷态叶轮,材料属性导致的叶片变形使叶顶间隙减小,叶轮效率有所提升,受材料属性整体不确定性影响,效率变化量为 0.27%~0.52%。

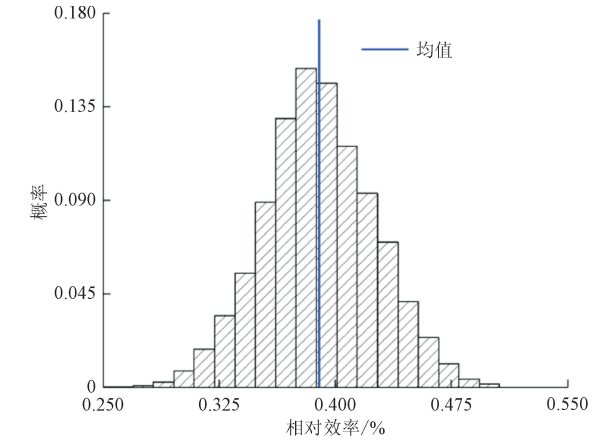
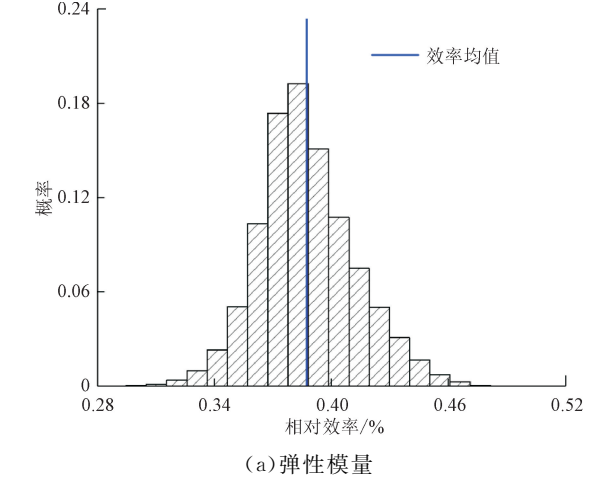
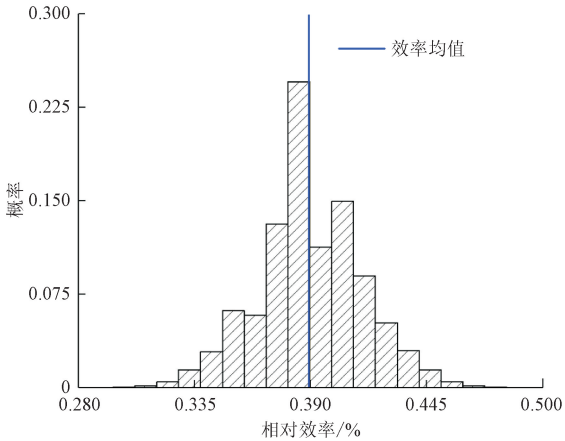


图 8 材料属性整体不确定性对离心叶轮效率的影响
Fig. 8 The overall influence of the material property uncertainty on the efficiency of centrifugal impeller

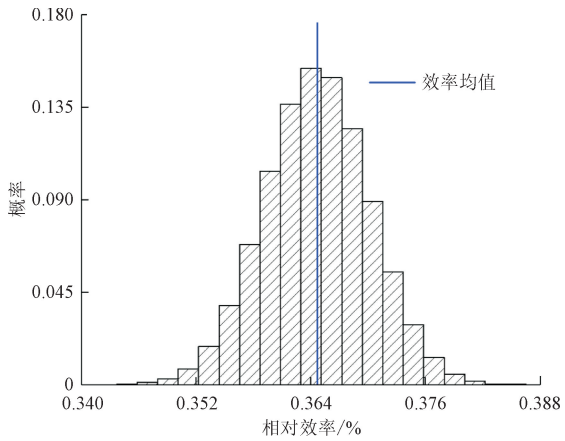
为进一步探究密度、泊松比和弹性模量不确定性单独作用对叶轮效率变化的贡献,分别针对上述 3 种材料属性开展不确定性量化研究,结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,受 3 种材料属性不确定性的单独影响,离心叶轮效率均在提升的基础上有所变化,弹性模量不确定性影响下离心叶轮效率变化量为 0.3%~0.5%,泊松比不确定性影响下离心叶轮效率变化量为 0.29%~0.47%,密度不确定性影响下离心叶轮效率变化范围最小,其变化量为 0.34%~0.38%。



(a)弹性模量



(b)泊松比



(c)密度

图 9 材料属性独立不确定性对离心叶轮效率的影响
Fig. 9 The individual influence of material property uncertainties on the efficiency of centrifugal impeller

针对叶片变形导致离心叶轮效率提升的机理进行分析,图 10 展示了材料属性取均值时离心叶轮沿流向方向叶顶间隙的变化。

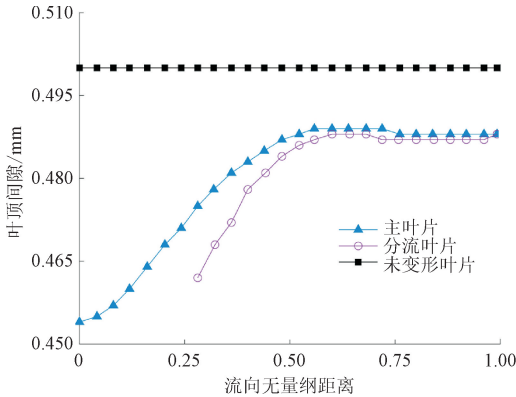


图 10 离心叶轮流向方向叶顶间隙变化(简化模型 3)
Fig. 10 Tip clearance of centrifugal impeller along streamwise direction (Model 3)

由图 10 可知,叶顶间隙减小 0.044 mm 最为明显,约占原叶顶间隙的 8.8%,分流叶片前缘的叶顶间隙变化略大于主叶片前缘。叶顶间隙的减小将导致叶顶泄漏流的减小,从而减小与主流的掺混损失,提升离心叶轮效率。

3.3 转速不确定性量化

探究转速自身、转速引起叶片变形和转速引起出口非对称流场耦合不确定性(即转速整体)对离心叶轮等熵效率的影响,结果如图 11 所示,可知除少量结果低于基准点效率,离心叶轮效率提升为主要趋势,变化量为-0.15%~0.37%。

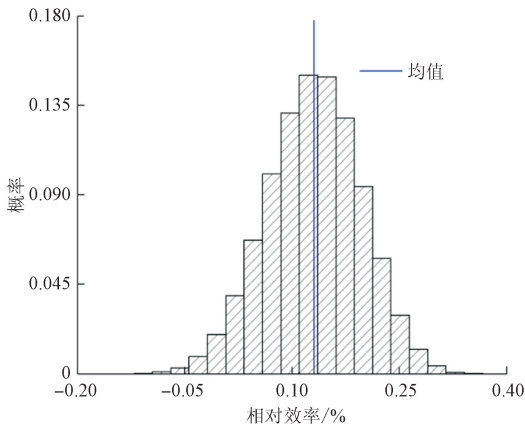
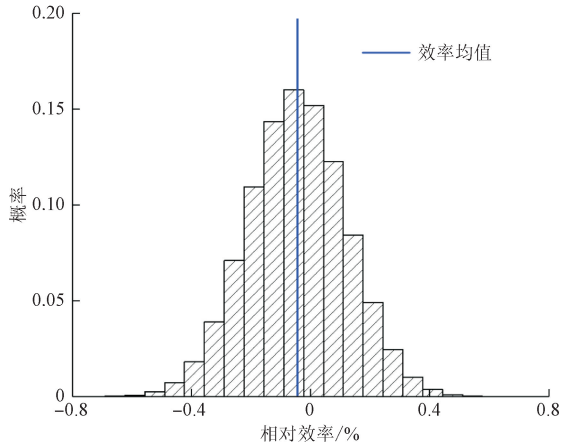


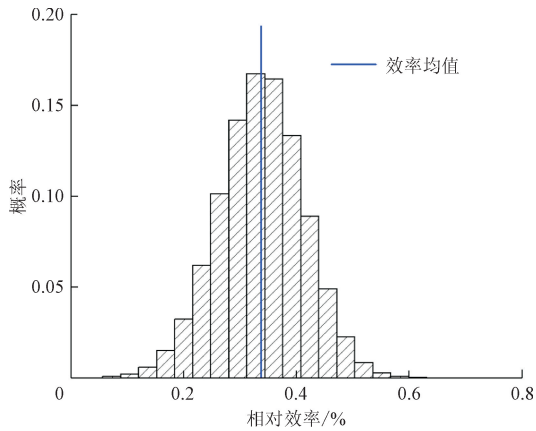
图 11 转速整体不确定性对离心叶轮效率的影响
Fig. 11 The overall influence of rotational speed uncertainty on the efficiency of centrifugal impeller

转速自身、转速引起叶片变形和转速引起出口非对称流场单独作用下的不确定性量化结果如图 12 所示。由图 12 可以看出:转速自身不确定性对离心叶轮效率带来的优劣基本相当,转速引起叶片变形不确定性使效率有所提升,而转速引起出口非对称流场不确定性使效率有所下降;在转速自身不确定性影响下,离心叶轮效率变化量为-0.7%~0.5%。通过数值计算,148 000 r/min 转速下的离心叶轮效率为 80.53%,152 000 r/min 转速下的离心叶轮效率为 80.07%,两者效率相差约 0.45%。图 13 给出了 148 000、152 000 r/min 转速下,不考虑叶片变形以及在均匀出口条件下 90%叶高处叶片前缘相对马赫数分布。由图 13 可见,152 000 r/min 转速对应的叶轮主叶片前缘的激波强度较 148 000 r/min 更大,因此造成的激波损失更大,叶轮效率更低。转速引起叶片变形不确定性影响下,效率变化量为 0.05%~0.6%,其影响机理与材料属性类似。图 14展示了设计转速下离心叶轮全周 90%叶高处相对马赫数分布,黑色虚线指示下游蜗舌所在位置,

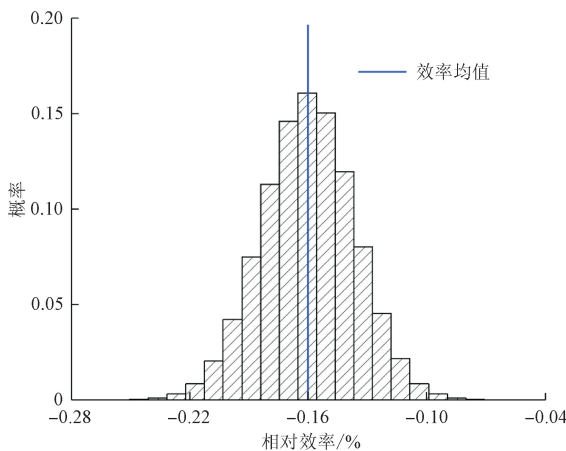
可知下游蜗壳导致的出口流场非对称性影响上游,使得叶片前部的超音速区域(以黑色长方形标识)覆盖范围增大,造成更大的激波损失,进而降低叶轮效率,在转速引起出口非对称流场不确定性影响下,效率变化量为-0.25%~-0.05%。



(a) 转速自身



(b) 转速引起叶片变形



(c) 转速引起出口非对称流场

图 12 转速独立不确定性对离心叶轮效率的影响
Fig. 12 The individual influence of rotational speed uncertainties on the efficiency of centrifugal impeller

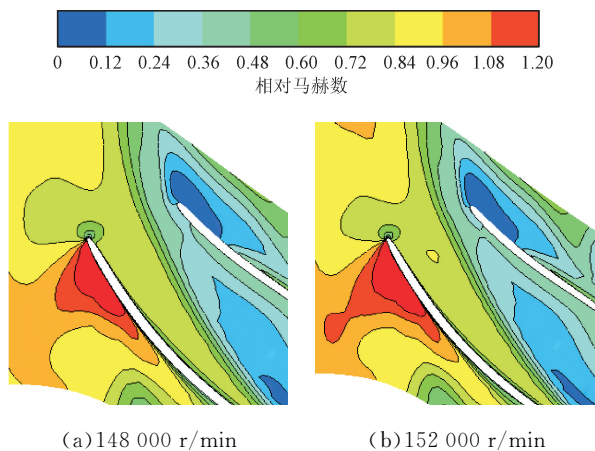


图 13 离心叶轮 90% 叶高处叶片前缘相对马赫数分布 (简化模型 2)

Fig. 13 Distributions of relative Mach number at the leading edge of 90% span of centrifugal impeller (model 2)

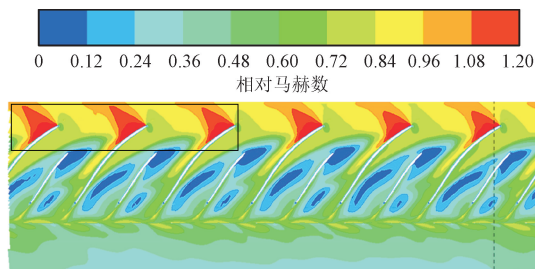


图 14 离心叶轮全周 90% 叶高处相对马赫数分布 (简化模型 4)

Fig. 14 Distributions of relative Mach number at 90% span of centrifugal impeller (model 4)

3.4 影响因子分析

由前述分析可知,不确定性因素对叶轮效率的影响主要体现在效率均值和分散度两方面,其中效率均值可通过量化效率均值较基准点的相对位置来衡量,分散度可由效率分布的标准差来确定。为此,定义影响因子 ζ_{tot} 来定量表征不确定性因素的影响效果,即

$$\zeta_{\text{tot}} = \zeta_{\text{dev}} + \zeta_{\text{sca}} = \left| \frac{\mu - \mu_{\text{base}}}{\mu_{\text{base}}} \right| + \left(\frac{\sigma}{\mu_{\text{base}}} \right) \quad (10)$$

式中: ζ_{dev} 、 ζ_{sca} 分别为不确定性响应的均值偏移程度和分散度; μ 为性能均值; μ_{base} 为基准点性能; σ 为性能标准差。

根据式(10),可得到各不确定性因素计算影响因子的计算结果,如图 15 所示,可知对于本文所研究的离心压气机,材料属性整体不确定性对叶轮效率的影响大于转速整体不确定性。

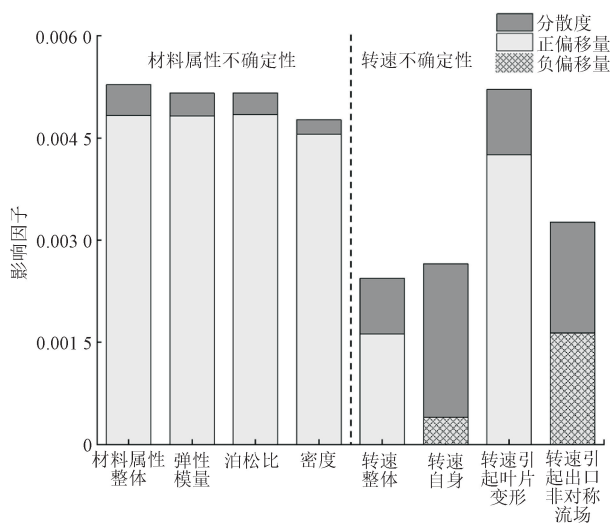


图 15 影响因子分析结果

Fig. 15 Analysis result of impact factors

对材料属性不确定性带来的影响进行分析,结果表明弹性模量、泊松比和密度不确定性因素的影响相当,正偏移量较分散度占比更大,说明材料属性不确定性带来的影响主要体现在叶轮效率均值有所提升。对转速不确定性带来的影响进行分析,发现转速引起叶片热态变形不确定性带来的影响最大且正偏移量占据主导,而其余不确定性变量带来的影响较小且分散度占据主导,其中转速自身和转速引起非对称流场带来的负偏移量表明叶轮效率均值有所下降,进而一定程度削弱转速整体不确定性带来的影响。

从叶片热态变形角度进行分析,与叶片热态变形相关的不确定性因素(材料属性、转速引起叶片变形)对叶轮效率的影响较与叶片热态变形无关的不确定性因素(转速自身、转速引起出口非对称流场)的影响更为显著,说明开展离心叶轮流固耦合不确定性分析的必要性。

4 结 论

以某涡轮增压器离心压气机为研究对象,提出了能够考虑叶片热态变形和蜗壳非对称性影响的离心压气机简化计算模型,并基于此开展了整机环境下离心叶轮的流固耦合不确定性量化研究,得到主要结论如下。

(1)为降低整机环境下离心叶轮流固耦合的计算时间,在离心压气机全通道双向流固耦合分析的基础上,提出了 3 个简化计算模型,即叶轮单通道流固耦合和均匀压力出口、单通道流动和均匀压力出

口、全通道流动和非对称压力出口模型,在保证离心叶轮设计点预测精度的前提下,3 种简化模型的计算时间分别缩短了 83%、98%和 94%。

(2)对于所研究的离心叶轮,材料属性不确定性对气动性能的影响大于转速不确定性;材料属性不确定性通过叶片热态变形对叶轮气动性能产生影响,且密度、泊松比和弹性模量三者的影响程度相当;转速不确定性影响由转速自身、转速引起叶片热态变形及转速引起叶轮出口非对称流场的不确定性影响构成,其中转速引起叶片热态变形的影响较另外两者更为显著。

(3)叶片热态变形不确定性对叶轮效率的影响主要体现在叶轮效率均值的变化;与叶片热态变形无关的不确定性因素,如转速自身和叶轮出口非对称流场,对叶轮效率的影响主要体现在分散度的变化,而前者为叶轮效率变化的主要因素,表明开展离心叶轮流固耦合不确定性量化的研究十分必要。

参考文献:

- [1] 位景山,郑群,闫巍,等. 基于气动激励特征的压气机叶片高周疲劳分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(9): 1579-1589.
WEI Jingshan, ZHENG Qun, YAN Wei, et al. High cycle fatigue analysis of compressor blade based on aerodynamic excitation characteristics [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(9): 1579-1589.
- [2] LEJON M, ANDERSSON N, ELLBRANT L, et al. The impact of manufacturing variations on performance of a transonic axial compressor rotor [J]. Journal of Turbomachinery, 2020, 142(8): 081009.
- [3] 唐新姿,肖鹏,王喆,等. 多载荷变形工况下离心压气机叶轮气动优化设计[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(8): 1741-1750.
TANG Xinzi, XIAO Peng, WANG Zhe, et al. Aerodynamic optimal design of centrifugal compressor impeller under multi-load deformation condition [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(8): 1741-1750.
- [4] OBERKAMPF W L, DELAND S M, RUTHERFORD B M, et al. Error and uncertainty in modeling and simulation [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002, 75(3): 333-357.
- [5] 罗庆怡,梅琦,胡晓兵,等. 基于流固耦合的压气机叶片拓扑优化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(2): 6-9.

- LUO Qingyi, MEI Qi, HU Xiaobing, et al. Research on topology optimization of compressor blade based on fluid-structure coupling [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(2): 6-9.
- [6] 王定标,韩落乐,王光辉,等. 基于流固耦合的离心式压气机叶轮叶片仿真研究[J]. 热科学与技术, 2020, 19(1): 64-71.
WANG Dingbiao, HAN Luole, WANG Guanghui, et al. Simulation research on impeller blade of centrifugal compressor based on fluid-structure coupling [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2020, 19(1): 64-71.
- [7] DANILISHIN A, PETROV A, KOZHUKHOV Y, et al. Fluid-structure interaction analyze for the centrifugal compressor 3d impellers [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2020: 012010.
- [8] AISSA M H, VERSTRAETE T. Metamodel-assisted multidisciplinary design optimization of a radial compressor [J]. International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power, 2019, 4(4): 35.
- [9] HAZBY H, WOODS I, CASEY M, et al. Effects of blade deformation on the performance of a high flow coefficient mixed flow impeller [J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 137(12): 121005.
- [10] 杨长灵,李雨润,姬成,等. 离心叶轮叶片变形对性能的影响及预变形设计[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(8): 2098-2105.
YANG Changling, LI Yurun, JI Cheng, et al. Effects of blade deformation on the performance and pre-deformation design of a centrifugal impeller [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(8): 2098-2105.
- [11] 王宏亮,席光. 离心叶轮几何形变对气动性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(5): 46-50.
WANG Hongliang, XI Guang. Influence of centrifugal blade deformation on impeller aerodynamic performance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(5): 46-50.
- [12] 刘向阳,辛建池,吴化银,等. 闭式叶轮变形对离心压缩机性能及气动载荷的影响[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(2): 82-90.
LIU Xiangyang, XIN Jianchi, WU Huayin, et al. Influence of closed impeller deformation on the performance and the aerodynamic load of centrifugal compressor [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2022, 48(2): 82-90.
- [13] 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.
- [14] GOPINATHRAO N P, BAGSHAW D, MABILAT C, et al. Non-deterministic CFD simulation of a transonic compressor rotor [C]//ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2009: 1125-1134.
- [15] 傅珏, 蒋伟, 柳一鸣, 等. 叶顶间隙几何不确定性对离心叶轮气动性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 51-57.
- FU Jue, JIANG Wei, LIU Yiming, et al. Influence of tip clearance geometrical uncertainties on the aerodynamic performance of centrifugal impellers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 51-57.
- [16] 李磊, 李缘, 杨子龙, 等. 基于寿命与可靠性的离心叶轮多学科设计优化 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(4): 530-534.
- LI Lei, LI Yuan, YANG Zilong, et al. Optimization of life-reliability-based multidisciplinary design of centrifugal impeller [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(4): 530-534.
- [17] 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.
- [18] 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, USA: ASME, 2014: V02BT45A001.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 宋嘉涛. 涡轮增压器离心压缩机流固耦合不确定性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2023.
- [23] 赵红亮, 邱佳慧, 张敏, 等. 跨音压气机总温畸变下数值模拟研究 [J]. 工程热物理学报, 2024, 45(1): 67-76.
- ZHAO Hongliang, QIU Jiahui, ZHANG Min, et al. Numerical simulation for a transonic compressor with total temperature distortion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(1): 67-76.
- [24] ZIEGLER K U, GALLUS H E, NIEHUIS R. A study on impeller-diffuser interaction: 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: detailed flow analysis [J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(1): 183-192.
- [26] 杨永强, 马云鹏, 武哲. 基于流固耦合的充气翼内压对翼面变形影响分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 188-192.
- YANG Yongqiang, MA Yunpeng, WU Zhe. Analysis of effect of interior pressure to deformation of inflatable wing with fluid-structure interaction analysis method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(2): 188-192.
- [27] LI Lei, WAN Huan, GAO Wenjing, et al. Reliability based multidisciplinary design optimization of cooling turbine blade considering uncertainty data statistics [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 59(2): 659-673.
- [28] HU Kaibin, JU Yaping, FENG Yi, et al. A dimension reduction-based multidisciplinary design optimization method for high pressure turbine blades [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2022, 144(9): 091011.

(编辑 赵炜 李慧敏)