

DOI: 10.7652/xjtuxb201811008

叶顶间隙几何不确定性对离心 叶轮气动性能的影响

傅珏, 蒋伟, 柳一鸣, 琚亚平, 张楚华
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了揭示受叶顶间隙几何不确定性影响的离心叶轮气动性能和内部流场变化规律,采用非嵌入式多项式混沌(NIPC)法并结合计算流体力学方法,以 Krain 离心叶轮为例,研究了叶顶间隙服从高斯分布时的叶轮效率、压比性能统计变化规律,并从叶轮出口流动不均匀性、相对马赫数分布、载荷分布等角度探究其物理机制。结果表明:不同流量工况下,Krain 叶轮效率和压比的不确定带大小相当;小流量工况下,叶轮出口流动对叶顶间隙几何不确定性的敏感程度较强;大流量工况下,叶轮进口及吸力面附近流动对叶顶间隙几何不确定性的敏感程度较强。研究结果有利于深刻认识叶顶间隙几何不确定性对离心叶轮气动性能和内部流场的影响,同时为深入开展流体机械不确定性流动分析研究提供了一定的理论指导。

关键词: 离心叶轮;叶顶间隙;不确定性分析;多项式混沌法;气动性能
中图分类号: TH452 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)11-0051-07

Influence of Tip Clearance Geometrical Uncertainties on the Aerodynamic Performance of Centrifugal Impellers

FU Jue, JIANG Wei, LIU Yiming, JU Yaping, ZHANG Chuhua
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to reveal the variations of aerodynamic performance and the flow field of centrifugal impeller due to tip clearance geometrical uncertainties, this paper combines the non-intrusive polynomial chaos (NIPC) method and the fluid computational dynamics method to conduct the flow uncertainty analysis on the Krain impeller. The statistical variation rules of the impeller efficiency and pressure ratio are investigated under the assumption that the tip clearance is subject to a Gaussian distribution. The physical mechanisms are explored relating to the non-uniformity of the impeller discharge flow, the relative Mach number distribution and load distribution. The results show that the uncertainty intervals of impeller efficiency and pressure ratio are almost the same under different flow conditions. At low flow rates, the impeller discharge flow is more sensitive to the tip clearance geometrical uncertainties, while the flow near the impeller inlet and suction surface is more sensitive at high flow rates. The present work is beneficial to the in-depth understanding of the influence of tip clearance geometrical uncertainties on the aerodynamic performance and internal flow field of centrifugal impellers, providing a theoretical foundation for the research on the flow uncertainty analysis of fluid machinery.

Keywords: centrifugal impeller; tip clearance; uncertainty quantification; non-intrusive polynomial chaos; aerodynamic performance

受加工误差、服役环境等影响,离心叶轮叶顶间隙的几何尺寸呈现出一定的随机可变性,致使叶轮叶片上的载荷分布、边界层流态、分离流等与理想状态存在差异,导致叶轮实际运行性能偏离理想期望值,甚至急剧下降,对整机高效稳定和安全可靠运行构成严重威胁^[1]。因此,精确量化叶顶间隙几何不确定性对离心叶轮气动性能和内部流场的影响具有重要的现实意义。

在叶顶间隙对离心叶轮气动性能的影响方面,芬兰拉普兰塔理工大学的 Saaresti 等对离心压缩机的叶顶间隙展开了数值模拟,结果表明,叶顶间隙对离心叶轮气动性能的影响呈线性关系^[2]。赵会晶等以 Krain 叶轮为研究对象,研究了离心叶轮叶顶间隙泄漏涡的结构^[3]。张楚华等通过研究叶顶间隙对离心叶轮气动性能的影响,发现随着叶顶间隙增大,离心叶轮气动效率、压比及转矩均降低,但变化曲线与线性函数相距甚远,呈现出典型的双平台变化关系^[4]。刘正先等分析了典型叶轮相对叶顶间隙值在 0~10% 之间的叶轮气动性能、叶片载荷分布、间隙泄漏量的变化规律^[5]。由以上研究可知,叶顶间隙对离心叶轮气动性能及内部流场的影响不容忽视,但这些工作主要集中于确定性流动分析,鲜有涉及离心叶轮叶顶间隙几何不确定性及其对叶轮气动性能的影响。

在离心叶轮气动性能不确定性分析方面,Javed 等针对涡轮增压器用离心叶轮,采用蒙特卡洛(MC)取样方法^[6],研究了叶片进出口叶顶间隙等一维设计参数几何不确定性对叶轮效率和压比的影响。Panizza 等针对不同形式闭式离心叶轮,先后采用蒙特卡洛法、多项式混沌(PC)法研究了叶轮一维设计参数几何不确定性对叶轮乃至整级效率和做功能力的影响^[7-9]。有必要对离心叶轮气动性能进行不确定性分析,研究对了解离心叶轮气动性能受几何不确定性因素影响下的统计变化规律具有指导意义,但缺乏对叶轮内部不确定性流动现象的研究,不利于深入认识几何不确定性因素对叶轮气动性能的影响机制。

因此,本文结合流体机械不确定性流动分析的学术前沿,针对考虑叶顶间隙几何不确定性的离心叶轮气动性能和内部流动展开了研究,从叶轮效率和压比性能曲线、叶轮出口流场、相对马赫数分布等

方面进行探讨,为深入认识实际运行离心叶轮内部流场特征、提高叶轮性能对叶顶间隙几何不确定性的抗干扰能力、保证离心叶轮高效安全稳定运行提供了一定的理论参考。

1 非嵌入式多项式混沌法

1.1 方法概述

多项式混沌法作为一种不确定性量化方法,相较于基于蒙特卡洛取样的不确定性量化方法,能够在确保高精度的同时大幅度降低不确定性分析的计算成本^[10]。按照与确定性求解器的耦合方式,PC法可分为嵌入式多项式混沌(IPC)法和非嵌入式多项式混沌(NIPC)法。其中,IPC法需要对求解器程序代码进行大量修改,存在一定风险和困难;NIPC法与之相反,仅将求解器视为一个“黑匣子”,在不确定性分析研究中的应用更为广泛。本文采用 NIPC 方法进行离心叶轮气动性能的不确定性分析,其基本原理概述如下。

假设 $U(\theta)$ 是概率空间 (Θ, Σ, P) 上关于随机事件 θ 的随机过程,则 $U(\theta)$ 可表示成多项式混沌展式

$$U(\theta) = u_0 \phi_0 + \sum_{i_1=1}^n u_{i_1} \phi_1(\xi_{i_1}(\theta)) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} u_{i_1 i_2} \phi_2(\xi_{i_1}(\theta), \xi_{i_2}(\theta)) + \cdots + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \cdots \sum_{i_p=1}^{i_{p-1}} u_{i_1 i_2 \cdots i_p} \phi_p(\xi_{i_1}(\theta), \xi_{i_2}(\theta) \cdots \xi_{i_p}(\theta)) \quad (1)$$

式中: n 为随机空间维数; p 为多项式混沌展开式阶数; $\phi_n(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \cdots, \xi_{i_n})$ 为关于随机变量 $\xi = (\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \cdots, \xi_{i_n})$ 的正交多项式,其与概率密度函数 $\rho(\xi)$ 相关。式(1)的简化形式为

$$U = \sum_{k=0}^P u_k \phi_k(\xi), P+1 = \frac{(n+p)!}{n!p!} \quad (2)$$

利用 NIPC 方法求解不确定性分析问题的核心在于对多项式系数 u_k 的求解。根据正交多项式的性质,可得

$$u_k = \frac{\langle U, \phi_k \rangle}{\langle \phi_k, \phi_k \rangle} \quad (3)$$

根据数值积分公式,有

$$\langle U, \phi_k \rangle = \int U(\xi) \phi_k(\xi) p_1(\xi) d\xi \approx \sum_{i=1}^m U(\xi_i) \phi_k(\xi_i) \omega_i \quad (4)$$

式中: ξ_i 、 ω_i 分别为正交多项式 ψ_k 的零点以及相应的权重; m 为积分点个数。

最后,计算 U 的均值和方差,即

$$E(U) = \langle U(\xi) \rangle = \langle \psi_0 U(\xi) \rangle = \sum_{k=0}^P u_k \langle \psi_0, \psi_k \rangle = u_0 \tag{5}$$

$$\sigma_U^2 = E[(U - E(U))^2] = E[(\sum_{k=1}^P u_k \psi_k)^2] = \sum_{k,l=1}^P u_k u_l \langle \psi_k, \psi_l \rangle = \sum_{k=1}^P u_k^2 \langle \psi_k^2 \rangle \tag{6}$$

1.2 方法验证

为验证 NIPC 方法在不确定性分析方面的有效性,分别以二维 Sum Squares 函数与三维 Rosenbrock 函数为例,将不同概率空间下预测所得输出响应的统计特征与基于 MC 方法所得统计结果(MC 采样数为 10^5)进行对比。二维 Sum Squares 函数与三维 Rosenbrock 函数的数学表达式为

$$f_1(\xi) = \xi_1^2 + 2\xi_2^2 \tag{7}$$

$$f_2(\xi) = 100(\xi_1^2 - \xi_2)^2 + (\xi_1 - 1)^2 + 100(\xi_2^2 - \xi_3)^2 + (\xi_2 - 1)^2 \tag{8}$$

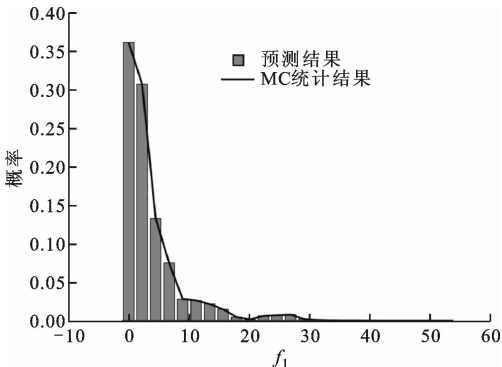
假定 ξ 分别服从指数分布、高斯分布和均匀分布,对应的变化区间分别为 $[0, +\infty)$ 、 $(-\infty, +\infty)$ 和 $[-1, +1]$ 。采用 NIPC 方法生成关于 ξ 的 4 阶 5 点多项式混沌展式。在指数分布、高斯分布和均匀分布情况下,构造多项式混沌展式所需的正交多项式分别为 Laguerre 多项式、Hermite 多项式和 Legendre 多项式。表 1、表 2 分别给出了上述测试函数预测所得输出响应的均值和标准差数值与基于 MC 方法所得统计结果的比较,相应的概率密度分布如图 1、图 2 所示。由对比结果可知,预测结果与 MC 采样分析的统计结果相当吻合,说明 NIPC 方法在不确定性分析方面具有较高的精度。

表 1 二维 Sum Square 函数预测值与 MC 统计结果的比较

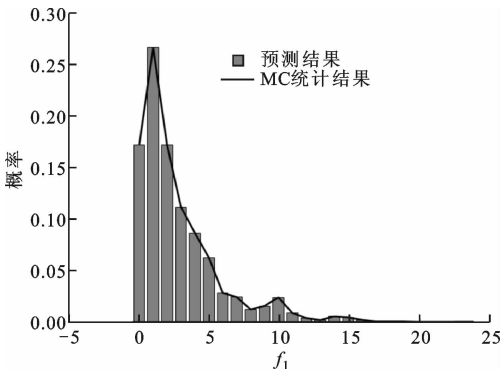
分布类型	结果类型	均值	标准差
指数分布	预测结果	3.79	7.65
	MC 统计结果	3.79	7.65
高斯分布	预测结果	2.97	3.09
	MC 统计结果	2.97	3.09
均匀分布	预测结果	4.01	2.67
	MC 统计结果	4.01	2.67

表 2 三维 Rosenbrock 函数预测值与 MC 统计结果的比较

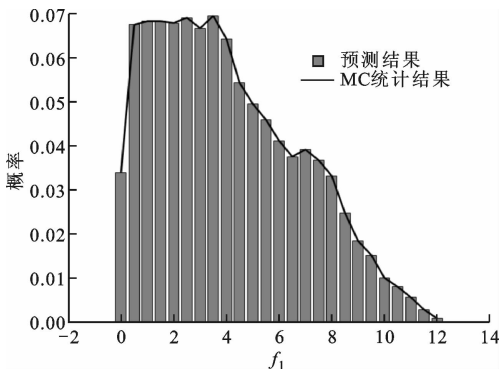
分布类型	结果类型	均值	标准差
指数分布	预测结果	2 097.09	4 579.65
	MC 统计结果	2 351.87	5 297.75
高斯分布	预测结果	4.53	2.25
	MC 统计结果	4.52	2.24
均匀分布	预测结果	111.85	102.95
	MC 统计结果	112.32	103.97



(a) 指数分布

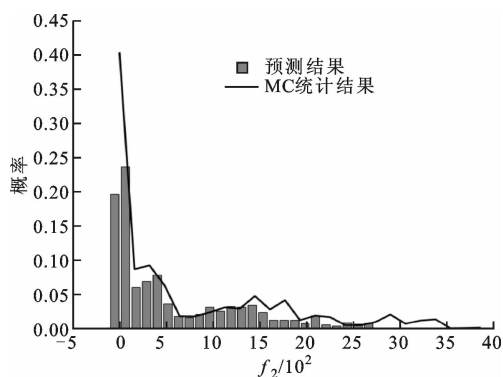


(b) 高斯分布

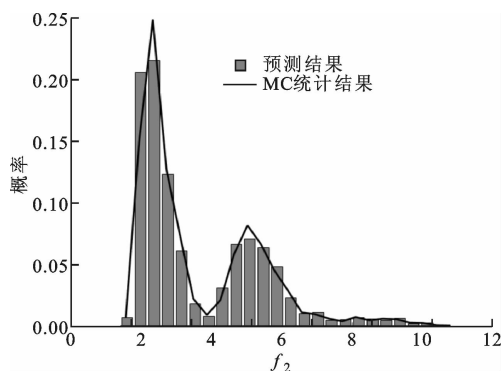


(c) 均匀分布

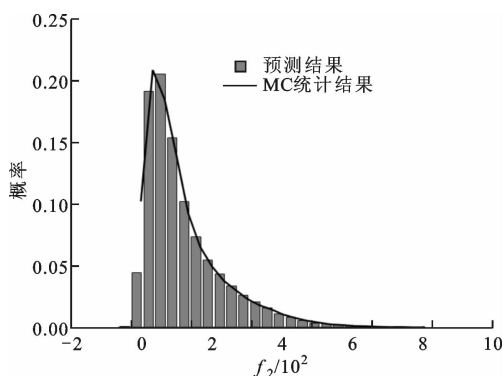
图 1 二维 Sum Squares 函数预测值与统计结果对比图



(a) 指数分布



(b) 高斯分布



(c) 均匀分布

图2 三维 Rosenbrock 函数预测值与统计结果对比图

2 离心叶轮内流场数值计算方法

借助 NUMECA Fine/Turbo 软件,求解三维定常雷诺时均 N-S 方程,获得离心叶轮气动性能和内部流场。采用 4 阶 Runge-Kutta 法进行时间项离散,采用 2 阶中心格式并添加人工黏性的方法进行对流项离散,湍流模型采用 S-A 模型,并采用多重网格、当地时间步长和隐式残差光滑技术进行加速收敛。采用单通道计算模型,计算区域进口给定总温总压分布曲线和轴向进气,出口给定质量流量 m ,在周期性边界设定周期性边界条件,固壁为无滑移

绝热边界条件。

本文研究对象为具有公开几何和实验数据的 Krain 离心叶轮^[11],其前后缘叶顶间隙分别为 0.5、0.3 mm,在 Autogrid 模块中生成叶轮单通道计算网格,如图 3 所示。为捕捉叶轮气动性能和内部流场受叶顶间隙几何不确定性影响下的变化情况,在叶顶间隙处沿叶高方向布置 17 个节点。通过网格无关性验证,当单通道网格总数约为 630 000 时,计算达到网格无关性要求,数值计算方法的精度验证可参考文献[12]。

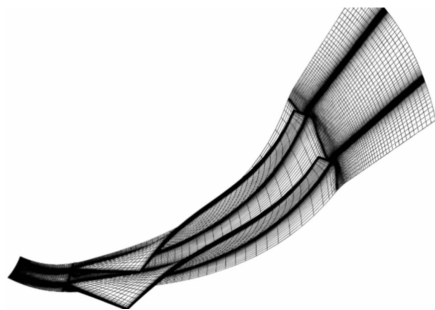


图3 叶轮计算网格

图 4、图 5 分别给出了计算所得叶轮子午面速度矢量图和叶轮出口 1.05 倍叶轮外径处周向平均速度沿叶高方向的分布图。由图 4 可知,在叶轮出口靠近轮盖侧存在明显流动分离,这与图 5 所示的局部速度波动相对应,故可采用速度波动峰值 V_p 的大小来定量反映叶轮出口流动的非均匀程度^[12]。

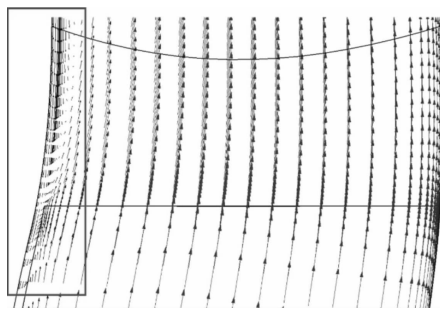


图4 叶轮子午面速度矢量

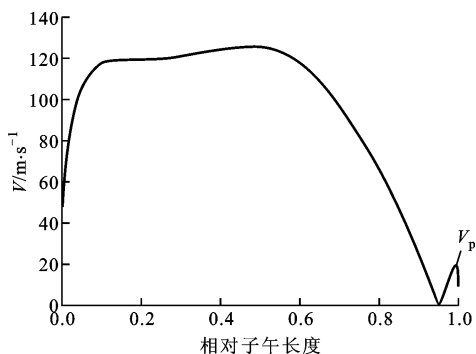


图5 叶轮出口附近周向平均速度沿叶高方向分布

3 离心叶轮不确定性流动分析

本节基于 NIPC 和 CFD 方法,研究了 Krain 离心叶轮叶顶间隙几何不确定性对叶轮气动性能和内部流场的影响。为简化分析,选取叶轮叶片进出口位置处的叶顶间隙为两个独立的几何不确定量,沿流动方向的叶顶间隙由进出口的叶顶间隙线性插值得到,由于流场计算为单通道计算,暂不考虑叶顶间隙沿圆周方向的不均匀性。考虑到叶轮叶顶间隙的真实分布规律难以准确测量,故选取自然界中普遍存在的高斯分布对叶轮叶片进出口位置处的叶顶间隙统计特征进行描述;同时,为保证叶顶间隙在合理的范围内波动,假定叶轮叶片进出口叶顶间隙大小均服从标准差为 10% 均值的高斯分布,即进口的叶顶间隙均值为 0.5 mm、标准差为 0.05 mm,出口的叶顶间隙均值为 0.3 mm、标准差为 0.03 mm。采用 NIPC 方法生成关于叶片进出口叶顶间隙的 4 阶 5 点多项式混沌展式,并针对 7 个流量工况点进行不确定性分析,共开展 175 次确定性 CFD 流场计算。

3.1 叶轮气动性能统计特征

图 6 给出了预测所得叶轮多变效率和压比性能曲线的统计均值和不确定带,不确定带表示叶顶间隙在运行中的波动而导致的叶轮效率和总压比的变化范围。

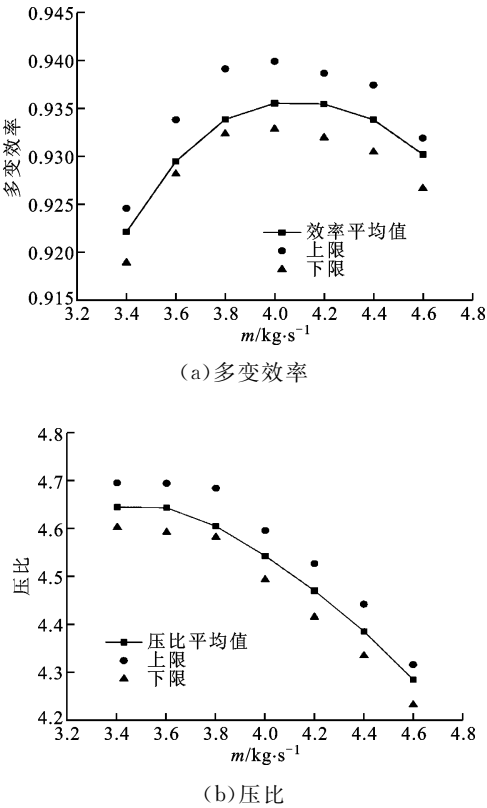


图 6 叶轮气动性能统计均值与不确定带分布

化范围。由图 6 可知,不同流量工况下,叶轮多变效率和总压比在叶顶间隙几何不确定性影响下的变化范围基本相当。

3.2 叶轮出口流动非均匀性统计特征

为探究叶顶间隙几何不确定性对叶轮出口流动均匀性的影响,给出了预测所得叶轮出口轮盖侧周向平均速度局部波动峰值 V_p 在不同流量工况下的统计特性,如图 7 所示。由图 7 可知,从近喘振工况到近堵塞工况,叶轮出口 V_p 均值及不确定带均随流量的增大逐渐减小,这说明随着流量的增加叶轮出口靠近轮盖侧的流动分离逐渐减小,分离流对叶顶间隙几何不确定性的敏感程度也逐渐降低。在近喘工况下,叶轮出口靠近轮盖侧的分离流最为明显,流动非均匀性最差,对叶顶间隙几何不确定性的敏感程度也最大。

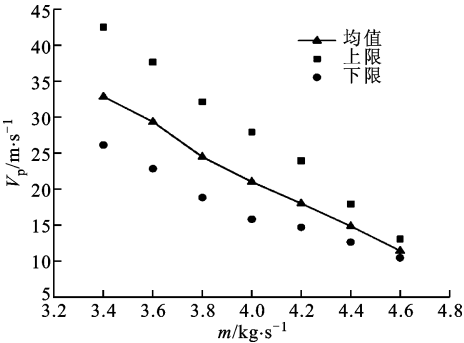
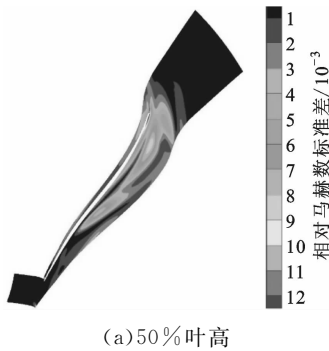


图 7 不同工况下叶轮出口 V_p 均值与不确定带分布

3.3 相对马赫数分布统计特征

图 8 给出了预测所得设计工况下不同叶高截面处相对马赫数的标准差分布。由图 8 可知,在不同叶高截面,相对马赫数标准差较大的位置主要集中于流道后部且靠近压力面的地方,如图 9 所示。这主要是因为该区域相对流速较低,逆压梯度较大,流动较为不稳定,易受叶顶间隙几何不确定性的干扰。标准差极大值集中于叶轮叶片出口 90% 叶高截面区域附近,说明该处流动对叶顶间隙几何不确定性的敏感度最强,结合图 4 可知,该区域毗邻叶轮出口轮盖侧的流动分离区,流动稳定性较弱。此外,由图 8c 可知,尽管 98% 叶高截面更加靠近叶顶间隙区,且叶片出口位于轮盖侧的流动分离区内,但该处流场对叶顶间隙不确定性的敏感程度较 90% 叶高截面反而有所降低。这主要是因为 98% 叶高较 90% 叶高的气动载荷有所降低,流道内逆压梯度减小,未存在明显的低速区。

考虑到 90% 叶高截面的流场最为敏感,图 10 进一步比较了另外两种典型工况下 90% 叶高截面



(a)50%叶高



(b)90%叶高



(c)98%叶高

图 8 设计工况下不同叶高相对马赫数标准差分布

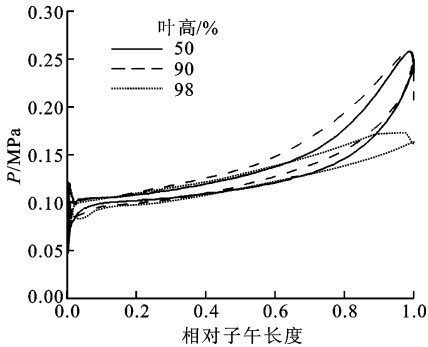
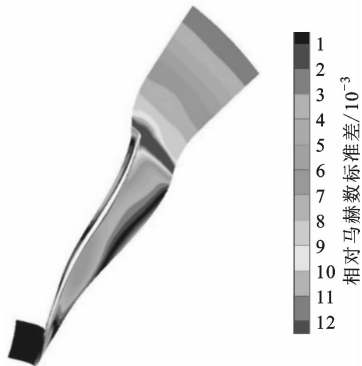


图 9 设计工况下不同叶高处叶片载荷分布

的相对马赫数标准差分布。对照图 8b 可知,随着流量的增大,叶轮出口的标准差逐渐减小,说明叶轮出口流动对叶顶间隙几何不确定性的敏感程度逐渐降低,这和图 7 所示 V_p 的变化趋势相对应。然而,随着流量的增大,相对马赫数标准差极大值由叶轮叶

片出口逐渐转移至叶轮前缘和靠近吸力面的区域。由此可知,叶轮进口及吸力面附近的流动对叶顶间隙几何不确定性的敏感程度随流量的增大而增大。对照图 9、图 11 所示叶片表面载荷分布图可知,随着流量的增大,叶轮进口及吸力面附近逆压梯度变大,流动不稳定,易受叶顶间隙变化的影响。综上所述,随着流量的增大,叶轮出口流动对叶顶间隙的敏感性逐渐减小,而叶轮叶片进口及吸力面附近的流动对叶顶间隙的敏感性逐渐增大,二者相互抵消,这在一定程度上解释了图 6 所示叶轮效率和压比的不确定带变化范围在不同流量工况下基本不变的原因。



(a)近喘振工况 $m=3.4\text{ kg/s}$



(b)近堵塞工况 $m=4.6\text{ kg/s}$

图 10 近喘振与近堵塞工况下 90%叶高处相对马赫数标准差分布

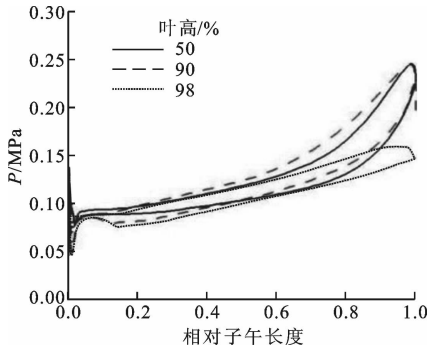


图 11 近堵塞工况下不同叶高处叶片载荷分布

4 结 论

(1)非嵌入式多项式混沌法在随机变量服从不同概率分布的情况下,均具有良好的拟合精度,且相较于蒙特卡洛取样方法,计算效率显著提升;

(2)对于 Krain 离心叶轮,随着流量的增大,叶轮多变效率和总压比受叶顶间隙几何不确定性影响下的不确定带范围基本相当,而叶轮出口流动非均匀程度得到明显改善,且叶轮出口流动的非均匀性对叶顶间隙几何不确定性的敏感度也逐渐减小;

(3)Krain 叶轮 90%叶高截面区域对叶顶间隙几何不确定性的敏感度最强,且随着流量的增大,叶轮出口流动对叶顶间隙几何不确定性的敏感程度逐渐降低,但叶轮进口及吸力面附近流动对叶顶间隙几何不确定性的敏感程度反而逐渐增大。

参考文献:

- [1] 刘智益,王晓东,康顺. 叶顶间隙尺度的不确定性对压气机性能影响的 CFD 模拟 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(4): 628-631.
LIU Zhiyi, WANG Xiaodong, KANG Shun. CFD simulations of uncertainty tip clearance effect on compressor performance [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(4): 628-631.
- [2] VÄRRI A J, SAARESTI T T, GRÖNMAN A, et al. Numerical investigation of centrifugal compressor tip clearance [C] // ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2016; V02CT42A028.
- [3] ZHAO H, WANG Z, YU H, et al. Numerical investigation of shock effects on performance and flow field in a transonic centrifugal impeller [C] // ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2016; V02DT 42A012.
- [4] 张楚华,王宝潼,栾辉宝,等. 叶顶间隙对离心叶轮气动性能影响研究 [J]. 流体机械, 2006, 34(12): 13-16.
ZHANG Chuhua, WANG Baotong, LUAN Huibao, et al. Study on influence of tip clearance on aerodynamic performance of centrifugal impeller [J]. Fluid

Machinery, 2006, 34(12): 13-16.

- [5] 刘正先,鲁寅,陈丽英. 叶顶间隙对离心叶轮气动性能的影响规律 [J]. 工程热物理学报, 2014, 35(4): 673-677.
LIU Zhengxian, LU Yin, CHEN Liying. Analysis of aerodynamic performance affected by blade tip clearance in unshroud centrifugal impellers [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(4): 673-677.
- [6] JAVED A, PECNIK R, VAN BUIJTENEN J P. Optimization of a centrifugal compressor impeller design for robustness to manufacturing uncertainties [C] // ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2016; 306-324.
- [7] PANIZZA A, IURISCI G, SASSANELLI G, et al. Performance uncertainty quantification for centrifugal compressors; 1 Stage performance variation [C] // ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2012; 1863-1872.
- [8] 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; V02BT 45A001.
- [9] PANIZZA A, VALENTE R, RUBINO D T, 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, USA: ASME, 2016; V02CT45A027.
- [10] LE MAÎTRE O P, KNIO O M. Spectral methods for uncertainty quantification [M]. Berlin, Germany: Springer, 2010; 1-72.
- [11] KRAIN H. Swirling impeller flow [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1988, 110(1): 122-128.
- [12] JU Y P, ZHANG C H, CHI X L. Optimization of centrifugal compressor impeller for uniform discharge flow and wide operating range [J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(5): 888-899.

(编辑 赵炜)