

二维无叶扩压器旋转失速的正交模态分析

赵博,吴蔚,竺晓程,杜朝辉

(上海交通大学机械与动力工程学院,上海200240)

摘要:为了直观地揭示扩压器内部非稳定流动的周向传播和发展过程,采用本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)对数值模拟得到的非稳定流场进行分解,辨识出不同阶的扰动模态,对成对和孤立模态在空间分布和时间变化上进行了分析,成对模态在周向空间分布上存在相位差,在时间变化上具有相近的振动幅度和周期,在时域上表现出周向传播的特性。孤立模态为“过渡态”,代表对平均流动的修正,表示平均流动从一个状态过渡到另一个状态。重构了各阶模态在不同时刻的幅值信息,并对各阶模态幅值变化进行了傅里叶变换,得到对应的频率信息,并与线性稳定性方法预测结果进行了对比。

关键词:无叶扩压器;旋转失速;本征正交分解;傅里叶变换

中图分类号:TK474.8 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.03.018

[引用本文格式]赵博,吴蔚,竺晓程,等.二维无叶扩压器旋转失速的正交模态分析[J].热能动力工程,2020,35(3):122-128. ZHAO Bo, WU Wei, ZHU Xiao-cheng, et al. Orthogonal modal analysis for rotating stall of two-dimensional vaneless diffuser[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3):122-128.

Orthogonal Modal Analysis for Rotating Stall of Two-Dimensional Vaneless Diffuser

ZHAO Bo, WU Wei, ZHU Xiao-cheng, DU Zhao-hui

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: In order to reveal the circumferential propagation and development process of unsteady flow in the diffuser visually, the unsteady flow field obtained by numerical simulation is decomposed by Proper Orthogonal Decomposition (POD), and the disturbance modes of different orders are identified. The spatial distribution and time variation of the paired and isolated modes are analyzed. The paired modes have a phase difference in the circumferential spatial distribution, similar vibration amplitudes and periods in time variation, and exhibit the characteristics of circumferential propagation in time domain. The isolated mode is a "shift mode", which represents a correction to the average flow, indicating that the average flow transitions from one state to another. The amplitude information of each mode at different times is reconstructed, and the Fourier transform is performed on the amplitude changes of each mode to obtain the corresponding frequency information, which is then compared with the predicted results with the linear stability method.

Key words: vaneless diffuser, rotating stall, proper orthogonal decomposition, Fourier transform

收稿日期:2018-07-28; 修订日期:2018-10-25

基金项目:国防基础科研计划资助(B1420110136)

Fund-supported Project: Defense Industrial Technology Development Program(B1420110136)

作者简介:赵博(1995-),男,安徽萧县人,上海交通大学硕士研究生。

通讯作者:竺晓程(1975-),男,浙江宁波人,上海交通大学副教授, E-mail:zhxc@sjtu.edu.cn.

引言

带无叶扩压器的离心压气机广泛应用于涡轮增压器中,无叶扩压器失速是一种非稳定流动现象,它常发生在离心压气机的小流量工况下,将限制其工作范围^[1-2]。针对无叶扩压器中旋转失速特性的观点大致可以分为两类,第一种观点认为三维壁面边界层的作用导致无叶扩压器中发生旋转失速。Jansen^[3]通过线性稳定性分析和实验发现,三维流动分离的存在会产生非定常流动,并且分离的位置取决于流动角,入口雷诺数和扩压器的几何形状等,认为扩压器的旋转失速是由于扩压器内部的局部回流引起的。Abidogun^[4]通过实验研究发现,在尚无失速发生的工况下,扩压器的轮盖侧存在小范围的回流,从实验的角度证明了局部回流并非等价于失速。Frigne^[5]在实验结果的基础上提出了一种非线性模型,认为无叶扩压器内的旋转失速是由边界层与无粘主流之间的相互作用产生的,其模型的预测结果与实验结果一致。第二种观点假设扩压器流动是无粘的,这说明扩压器旋转失速的动态特性并非取决于边界层理论中的粘性影响,而是由无粘核心流产生的。Abdelhamid^[6]忽略壁面边界层的影响,采用线性化的动量方程分析了扩压器内的非稳定流动,认为在旋转失速开始时存在二维流动不稳定性,并通过实验^[7]发现失速不仅限于轮盖或轮毂侧的边界层内,而是可能出现在从入口到出口的整个扩压器内。Shin^[8]通过实验发现无叶扩压器在不同流量下会产生两种不同的失速,一种是扩压器出口逆流引起的,另一种是由于流动分离扩展而产生的。Moore^[9]提出了一种二维无叶扩压器稳定性模型,获得了无叶扩压器的失速关键角以及失速团转速。Hu^[10]采用全局稳定性分析的方法,建立了适用于预测无叶扩压器稳定性的二维无粘稳定性模型,用以预测扩压器内失速的关键流动角和转速,预测结果与实验结果基本一致。

在数值研究上,Ljevar^[11-12]等人提出了一种二维CFD计算方法来研究无叶扩压器的失速问题,在CFD模型的入口设置了Jet-Wake型的速度分布,出口设置了周向一致的静压。Gao等人^[13]采用类似的方法对二维无叶扩压器的流动进行研究,分析了无叶扩压器尺寸对其内部失速的影响。Everitt^[14]对

于孤立扩压器的数值研究揭示了蜗壳对于扩压器失速的抑制作用。Megerle^[15]分别选用层流模型、SST湍流模型和SAS-SST湍流模型模拟了均匀进口下二维无叶扩压器内的流动,均捕捉到旋转失速团。

本文基于Megerle的数值计算处理方法,数值模拟得到二维无叶扩压器的非稳定流场,采用POD方法对计算结果进行分析,得到二维无叶扩压器的压力和速度模态,直观地揭示了扩压器内部非稳定流动的周向传播和发展过程,并将结果与文献[10]中的结论进行对比。

1 数值模拟

图1给出了无叶扩压器的几何结构参数和入口速度分布情况。将长度以内径为单位进行无量纲化,建立半径比为1.8的无叶扩压器计算模型,并假设入口速度沿周向分布是均匀的。定义进口径向速度分量为 V_r ,周向速度分量为 V_θ ,绝对速度与周向速度分量的夹角为入口流动角 α 。

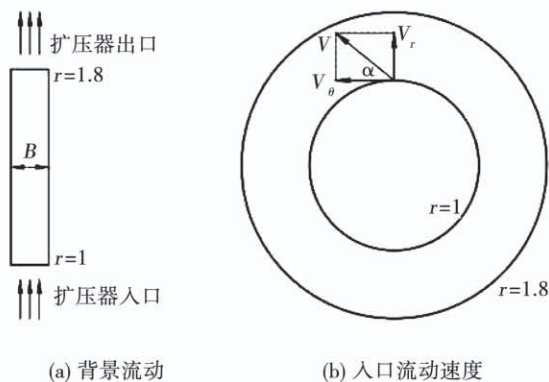


图1 无叶扩压器模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of vaneless diffuser model

在数值计算方面,定常计算选择SST湍流模型,工质为水。参考压力为0.1 MPa,进口边界条件设置为指定速度的大小和方向,具体数值为轴向速度0 m/s,径向速度4 m/s,周向速度15.22 m/s。出口边界条件设置为静压,0 Pa。收敛标准为最大残差小于 10^{-4} 。非定常计算中的湍流模型,工质、边界条件设置与定常计算相同,每个时间步的迭代步数设为5步,收敛标准同样为最大残差小于 10^{-4} 。非定常计算通过布置监控点以观察计算的收敛情况。通过调整入口流动角分别获得二维无叶扩压器流动的稳定工况和非稳定工况。

图 2 给出了非定常计算下的监控曲线,当入口流动角为 14.7° 时,监控曲线呈收敛状,当入口流动角为 13.4° 时,监控曲线呈发散状,可以认为入口临界流动角为 14.7° 。

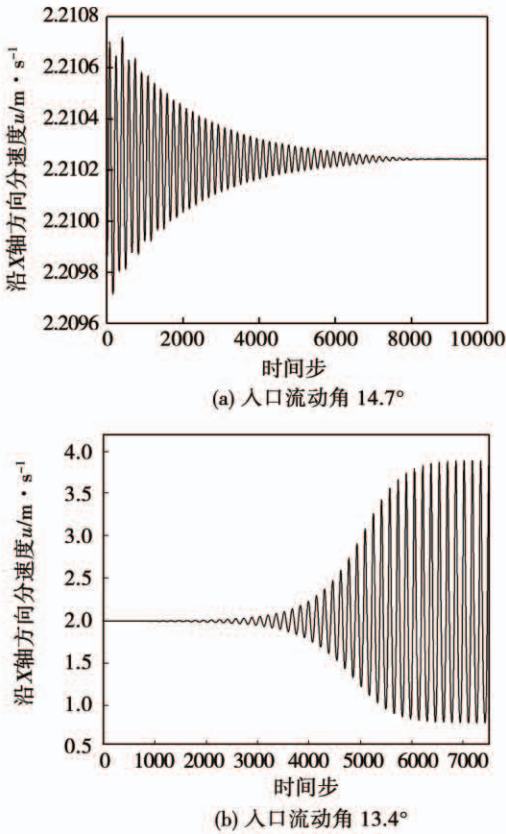


图 2 非定常计算监控曲线图

Fig. 2 Monitoring curves of unsteady computation

图 3 给出了稳定工况下计算到 10 000 步二维无叶扩压器的压力云图和流线图,压力云图呈现出一系列同心圆,沿周向均匀分布。流线则呈现出对数螺线的形式,较好地还原了无叶扩压器中无粘流动的基本特征。

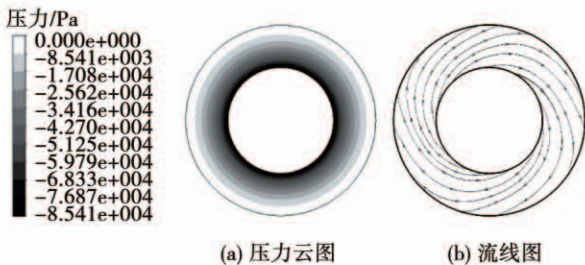


图 3 无叶扩压器稳定工况流场

Fig. 3 Steady flow field of vaneless diffuser

2 本征正交分解

POD 方法是近年来较为常用的一种模态分解方法,适用于从复杂流场中分解出大尺度的流动结构,其在 1967 年首次在流场分析中被采用^[16]。Buchmann 等人^[17]使用 POD 的方法分析了 NA-CA0015 翼型上的非定常流场。丁杰^[18]使用 POD 方法对离心压气机无叶扩压器的非定常流动进行分析,认为 POD 方法可以获得原始复杂流场中占有绝大部分能量比的大尺度结构,相比于 CFD 数值模拟的结果更加清晰直观地展现了无叶扩压器内的流动情况。

分析非定常流动采用“快照 POD”的方法,首先假定有一组随时间变化的数据矩阵:

$$X(\varepsilon) = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \cdots \quad \varepsilon_N] \quad (1)$$

式中: N —时间步总数; ε_i —第 i 时间步的数据组成的向量,维度为 M 。

POD 方法首先是求这组参数在时间上的平均值,并将这一组平均值定义为 POD 的第 0 阶模态,针对原始参数各时刻在第 0 阶模态上的脉动值进行处理。计算流场物理量的脉动值:

$$U = X - \bar{X} \quad (2)$$

将 N 个时刻的参数脉动部分均写入一个矩阵,得到:

$$U = \begin{bmatrix} u_1^1 & u_1^2 & \cdots & u_1^N \\ u_2^1 & u_2^2 & \cdots & u_2^N \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ u_M^1 & u_M^2 & \cdots & u_M^N \end{bmatrix} \quad (3)$$

该矩阵的自协方差矩阵可以表示为:

$$C = U^T U \quad (4)$$

上式的特征值问题可以表示为:

$$CA = \lambda A \quad (5)$$

其中特征向量单位正交,此时每个特征向量为一个模态,按照对应特征值大小排列,利用排列好顺序的特征向量就可以得到 POD 的各阶模态:

$$\phi^i = \frac{\sum_{n=1}^N A_n^i u^n}{\left\| \sum_{n=1}^N A_n^i u^n \right\|}, i = 1, \cdots, N \quad (6)$$

其中分母的范数定义为:

$$\|y\| = \sqrt{y_1^2 + y_2^2 + \cdots + y_M^2} \quad (7)$$

每一个快照的参数可以由各阶模态的线性组合来表示,各个快照的 POD 系数可以由下式得到:

$$a^n = \Psi^T u^n \tag{8}$$

其中, $\Psi = [\varnothing^1 \ \varnothing^2 \ \cdots \ \varnothing^N]$ 。

每个快照参数又可以采用 POD 模态重构得到:

$$u^n = \sum_{i=1}^N a_i^n \varnothing^i = \Psi a^n \tag{9}$$

3 结果分析

基于非稳定工况的非定常计算结果,截取了 1500 ~ 7000 步的计算数据,每 5 个时间步输出一个“快照”,得到 1100 个流动“快照”进行 POD 分析。图 4 给出了压力前 25 阶模态的特征值分布,横轴为模态阶数,纵轴为各阶模态特征值的对数坐标,POD 模态的特征值对应 POD 相应模态的能量。从图 4 可以看出,随着模态阶数的上升,模态的能量衰减十分迅速,说明前几阶模态在能量上占据很大比例,对流动起到了主要影响。因此,分析前几阶模态所包含的流动信息可以认识流场的主要特征。

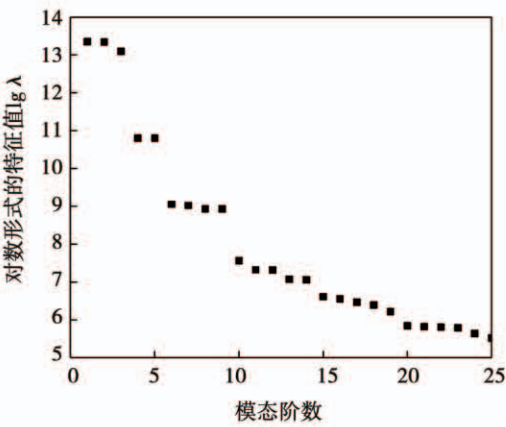


图4 压力模态特征值分布

Fig.4 Distribution of eigenvalues of pressure modes

图 5 给出了前 10 阶压力模态云图,所有模态分解得到的流场分布云图均经过无量纲化处理。对照图 4 中特征值的分布,可以发现除了第 3 阶和第 10 阶模态之外,其他阶模态均成对出现,成对模态的能量接近,且流场拓扑结构比较相近,但在空间分布上存在相位差。第 1 阶和第 2 阶、第 4 阶和第 5 阶、第 6 阶和第 7 阶以及第 8 阶和第 9 阶模态在周向分别存在不同波数的扰动。第 3 阶和第 10 阶模态拥有与原始流场相似的分布结构,称为“过渡态”^[19],Noack^[20-21]认为“过渡态”表示稳定解和时间平均周期解之间基本流动的变化,对应于以稳定解作为基本模态的扩展。能量占比最高的第 1 阶和第 2 阶模态所观察到空间的扰动数为 4,文献[10]中的线

性稳定性方法也预测到了在半径比为 1.8 的无叶扩压器中,周向扰动波为 4 个时最不稳定,与本文结果一致。

图 5 中可以看出,压力模态云图中扰动较大的区域出现在扩压器进口处,这与线性稳定性分析中出口给定的压力无扰动条件一致。

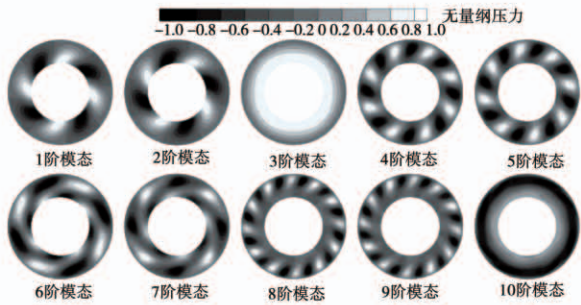
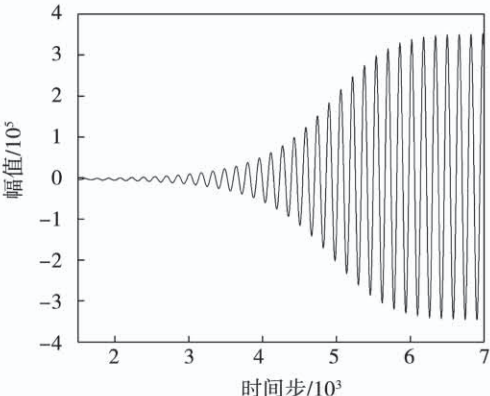


图5 压力模态云图

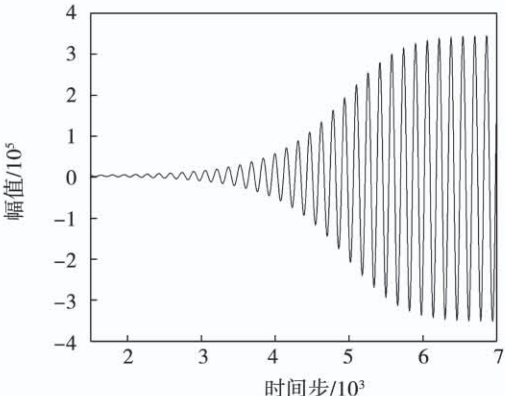
Fig.5 Contour of pressure modes

图 6 给出了压力各阶模态的幅值随时间(1500 ~ 7000 步)的变化情况,按照模态阶数从小到大进行排列。3 组成对模态(第 1 阶和第 2 阶、第 4 阶和第 5 阶和第 8 阶和第 9 阶)的幅值呈现出相似的变化趋势,均为先发散后保持不变,表明这 3 组扰动的能量初期随时间推进不断放大,待流动充分发展后保持不变。第 6 阶和第 7 阶模态的幅值显示出两个波包的形态,说明在流动发展过程中存在扰动放大和抑制过程。成对模态在周向空间分布上存在相位差,在时间变化上具有相近的振动幅度和周期,在时域上表现出周向传播的特性。第 3 阶和第 10 阶模态则表现出不同的特征,不具有明显的周期性,初期呈现出较为平缓的趋势,后续呈“指数形式”的变化,然后趋于平缓,代表对平均流动的修正,表示平均流动从一个状态过渡到另一个状态。

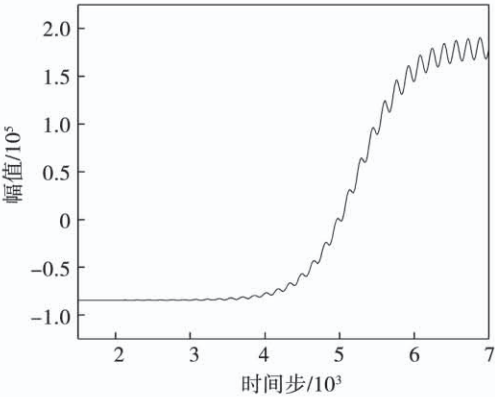
对各阶模态幅值的时域信号进行傅里叶变换,得到对应的频率信息。图 7 给出了前 2 阶压力模态的频谱图。第 1 阶和第 2 阶模态的频谱图呈现出单峰的形式,对应频率为 25.45 Hz。为了方便与文献[10]的二维无粘线性稳定性模型的预测结果作比较,把两种方法下得出的失速团转速相对于叶轮转速的比值进行对比,其中第 1 阶和第 2 阶模态的失速团相对叶轮转速为 0.262 9,文献[10]中的线性稳定性模型的预测结果为 0.265 8,二者仅相差 1%。其余模态的频率信息如表 1 所示。其中,前 5 阶模态的频谱均为单峰形式,第 6 阶和第 7 阶及第 8 阶和第 9 阶模态存在混频现象。



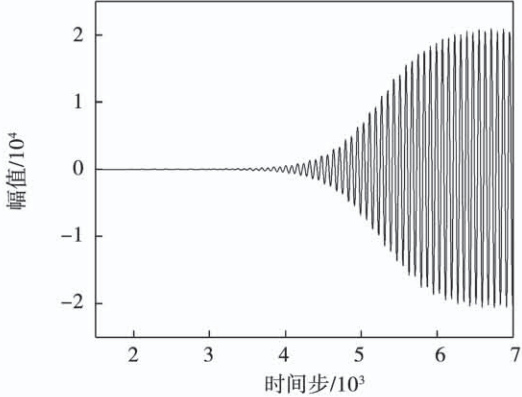
(a) 第1阶模态



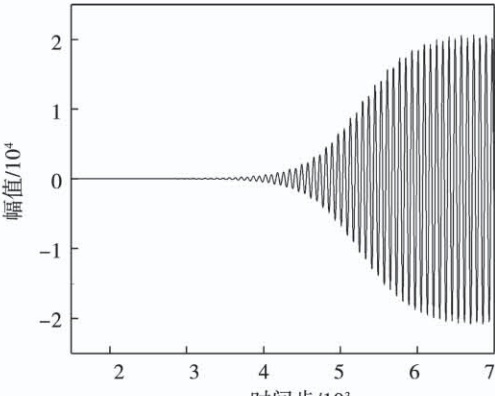
(b) 第2阶模态



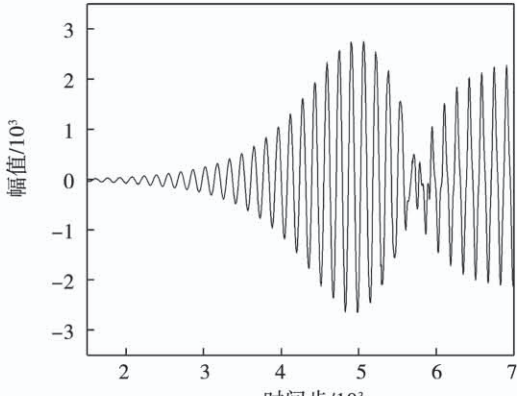
(c) 第3阶模态



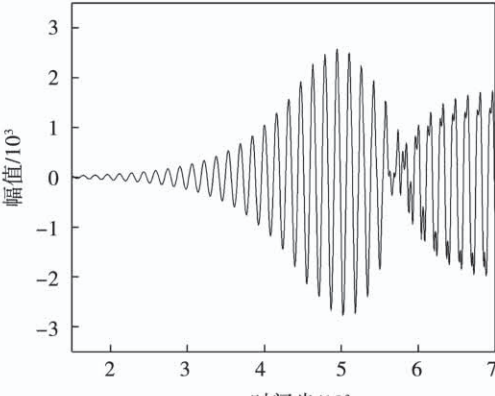
(d) 第4阶模态



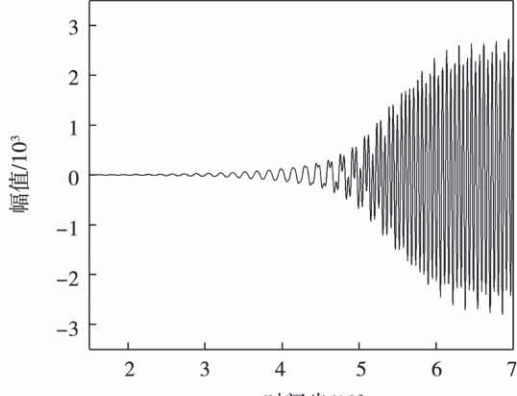
(e) 第5阶模态



(f) 第6阶模态



(g) 第7阶模态



(h) 第8阶模态

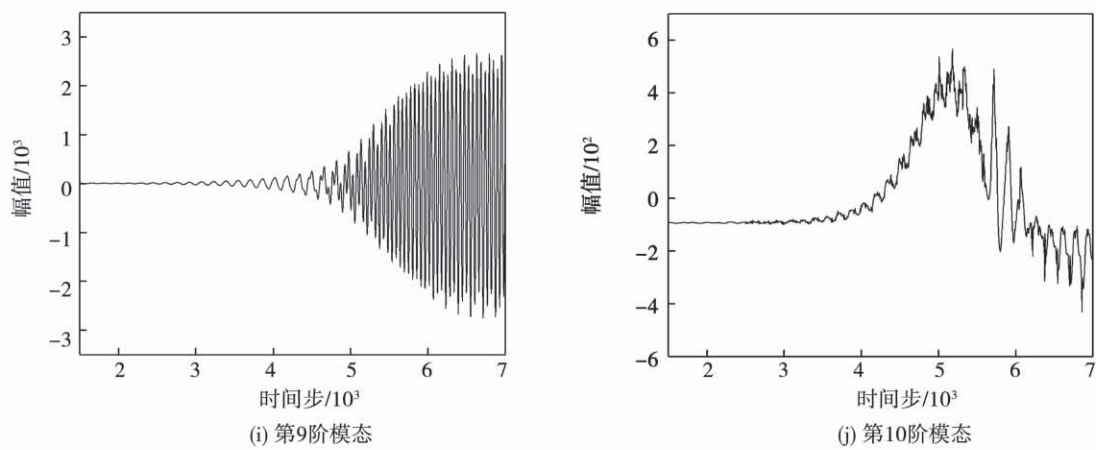


图6 压力模态的幅值变化曲线

Fig.6 Amplitude curves of pressure modes

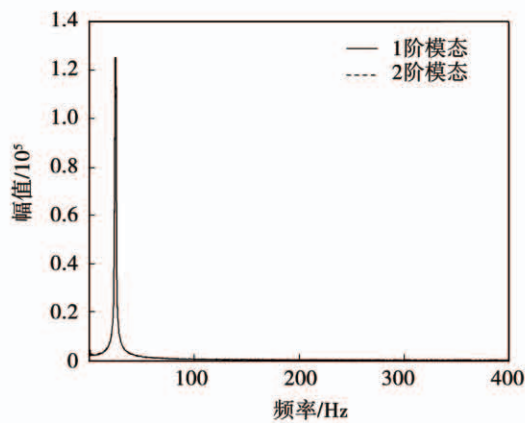


图7 前2阶压力模态频谱图

Fig.7 Spectrum of the first two pressure modes

表1 各阶模态频率信息

Tab.1 Frequency information of each mode

模态阶数	主频率/Hz	副频率/Hz
4	50.18	—
5	50.18	—
6	26.18	74.91
7	26.18	74.91
8	74.91	26.18
9	74.91	26.18

图8给出了径向速度和周向速度的前两阶模态云图,可以看出,速度扰动和压力扰动在径向上的分布位置是不同的,速度扰动较大的区域靠近扩压器出口处。

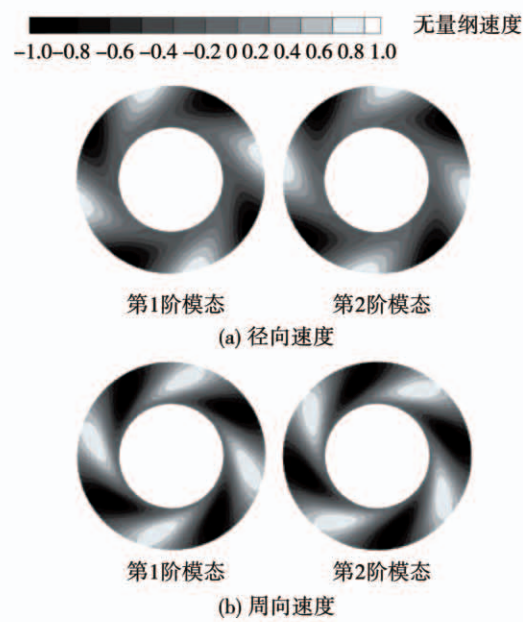


图8 速度模态云图

Fig.8 Contour of velocity modes

4 结 论

- (1) 采用数值模拟的方法对二维无叶扩压器的非稳定流动进行了研究,计算得到了入口临界流动角,入口流动角小于临界流动角时扩压器将发生旋转失速。
- (2) 通过 POD 方法分解二维无叶扩压器内的失速流场,获得不同阶的流动模态,能量占比最大的模态所含扰动波数与线性化稳定性模型预测结果一致。

(3) 成对模态在周向空间分布上存在相位差,在时间变化上具有相近的振动幅度和周期,在时域上表现出周向传播的特性。而孤立模态为“过渡态”,代表对平均流动的修正,表示平均流动从一个状态过渡到另一个状态。

参考文献:

- [1] EMMONS H, PEARSON C, GRANT H. Compressor surge and stall propagation[J]. ASME Transactions, 1955, 77: 455 – 469.
- [2] GREITZER E M. Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors[J]. ASME Transactions, 1976, 98(2): 190 – 211.
- [3] JANSSEN W. Rotating stall in a radial vaneless diffuser[J]. Journal of Fluids Engineering, 1964, 86(4): 750 – 758.
- [4] ABIDOĞUN K B. Effects of vaneless diffuser geometries on rotating stall[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 22(3): 542 – 549.
- [5] FRIGNE P, BRAEMBUSSCHE R V D. A theoretical model for rotating stall in the vaneless diffuser of a centrifugal compressor[J]. Journal of Engineer for Gas Turbines & Power, 1985, 107(2): 507 – 513.
- [6] ABDELHAMID A N. Analysis of rotating stall in vaneless diffuser of centrifugal compressors[J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 1980(26): 118 – 128.
- [7] ABDELHAMID A N. Effects of vaneless diffuser geometry on flow instability in centrifugal compression systems[J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 1983(29): 259 – 266.
- [8] SHIN Y H, KIM K H, SON B J. An experimental study on the development of a reverse flow zone in a vaneless diffuser[J]. JSME International Journal Series B, 1998(141): 546 – 555.
- [9] MOORE F K. Weak rotating flow disturbances in a centrifugal compressor with a vaneless diffuser[J]. Journal of Turbomachinery, 1989(4): 442 – 449.
- [10] HU Chen-xing, LIU Hao, ZHU Xiao-cheng. Dynamics of global instabilities in the vaneless diffuser: A numerical approach and its applications[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2018(6): 1159 – 1170.
- [11] LJEVAR S, DE LANGE H C, van Steenhoven A A. Rotating stall characteristics in a wide vaneless diffuser[J]. ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea & Air, 2005, 1335 – 1342.
- [12] LJEVAR S, DE LANGE H C, van Steenhoven A A. Two-dimensional rotating stall analysis in a wide vaneless diffuser[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2006(15): 3109 – 3126.
- [13] GAO Chuang, GU Chuan-gang, WANG Tong, DAI Zheng-yuan. Numerical analysis of rotating stall characteristics in vaneless diffuser with large width-radius ratio[J]. Front. Energy Power Eng, 2008, 2(4): 457 – 460.
- [14] EVERITT J N. Investigation of stall inception in centrifugal compressors using isolated diffuser simulations[D]. Cambridge, MA: MIT, 2010.
- [15] MEGERLE B. Unsteady aerodynamics of low-pressure steam turbines operating under low volume flow conditions[D]. Switzerland: Swiss federal Institute of Technology in Lausanne, 2014.
- [16] LUMLEY J L. The structure of inhomogeneous turbulent flows// Atmospheric turbulence and radio wave propagation[C]. Moscow: Nauka, 1967: 166 – 178.
- [17] BUCHMANN N A, KITSIOS V, ATKINSON C, et al. Investigation of coherent structures and dynamics using POD and DMD of a separated airfoil subjected to ZNMF jet forcing[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015.
- [18] 丁 杰. 离心压气机内不稳定流动的数值模拟与模态分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [19] DING Jie. Numerical simulation and modal analysis of unsteady flow in centrifugal compressors[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [20] NOACK B R, AFANASIEV K, MORZYNSKI M, et al. A hierarchy of low-dimensional models for the transient and post-transient cylinder wake[J]. Fluid Mech, 2003(497): 335 – 363.
- [21] NOACK B R, WITOLD S, MAREK M, et al. Recursive dynamic mode decomposition of transient and post-transient wake flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016(809): 843 – 872.
- [22] LEHMANN O, LUCHTENBURG M, NOACK B R, KING R. Wake stabilization using POD Galerkin models with interpolated modes[C]. European Control Conference CDC-ECC 05 IEEE Conference on Decision & Control, 2005.

(丛 敏 编辑)