



流量骤减工况下离心压缩机瞬态特性的数值分析

杜 昱¹, 窦华书¹, 卢傅安², 李 云², 孙 洋², 曾 鸣²

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 沈阳鼓风机集团股份有限公司, 沈阳 110869)

摘 要: 为研究离心压缩机在流量骤减过程中的瞬态特性, 在设计转速下对离心压缩机模型级进行全流道非定常数值模拟, 对该过程中流场结构的时空演变情况进行了捕捉, 同时对级内流动稳定性以及叶轮气动载荷进行了分析。结果表明: 在离心压缩机流量骤减过程中, 扩压器中失速微团沿叶轮旋转反方向加速运动, 在空间上呈现出由扩压器向叶轮、由轮盖向轮盘延伸的趋势; 各通流部件中气体流动稳定性随流量降低逐渐变差, 叶轮受到气流的轴向力与转矩变化均呈现低频大幅值脉动趋势, 当该离心压缩机模型级流量降低至 3.9 kg/s 时, 叶轮受到气体的径向力分量出现短暂的异常波动, 随后径向力合力骤增近一个数量级, 这对于预防离心压缩机失效等事故的发生具有重要的指导意义。

关键词: 离心压缩机; 变流量工况; 数值模拟; 旋转失速; 转子气动载荷

中图分类号: TH452

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2020)05-0341-08

Numerical study on transient characteristics of centrifugal compressor under sudden-dropped flow condition

DU Yu¹, DOU Huashu¹, LU Fuan², LI Yun², SUN Yang², ZENG Ming²

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Shenyang Blower Group Corporation, Shenyang 110869, China)

Abstract: To study the transient characteristics of the centrifugal compressor during sudden-dropped flow process, unsteady numerical simulation was carried out for the full stage of centrifugal compressor model under the design rotation speed. The spatial-temporal evolution of the flow field structure during this process was captured. The flow stability in the stage and the aerodynamic load of the impeller were also analyzed. The results show that in the process of sudden flow reduction, the stall cells in the diffuser accelerate along the reverse direction of impeller rotation. Spatially, the stall cells show the trend of extending from the diffuser to the impeller and from the shroud to the hub. The stability of air flow in each component becomes worse with the decrease of flow. The changes of the impeller axial force and torque caused by the air flow present the trend of lower frequency and larger amplitude. When the flow is reduced to a flow rate of 3.9 kg/s, the radial force component of the impeller caused by the air flow shows the transient abnormal fluctuation, and then the resultant force of radial force increases sharply by nearly one order of magnitudes, which has important guiding significance for preventing operation failure and other accidents of centrifugal compressors.

Key words: centrifugal compressor; variable flow condition; numerical simulation; rotating stall; rotor aerodynamic load

收稿日期: 2019-10-08 网络出版日期: 2020-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51536008, 51579224); 浙江省重点研发计划(2018C03046)

作者简介: 杜 昱(1994-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事离心压缩机方面的研究。

通信作者: 窦华书, E-mail: huashudou@yahoo.com

0 引言

离心压缩机因其体积小、单级压比高的特点,被广泛应用于石化、冶金、电力、交通等工业领域。为适应我国可持续发展的经济战略和节能减排的政策要求,近些年来关于离心压缩机的研究逐渐向大流量工况范围、高压比、高效率和高可靠性的方向发展^[1]。与此同时,随着计算机性能的不断提升和算法的不断优化,基于计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)的方法在解决工程问题中的作用越来越被重视^[2]。相比于理论和实验方法,CFD方法在动力机械的应用中,尤其在分析具有破坏性的瞬态工况时,优势愈发明显。

通常离心压缩机在大流量工况下运行相对稳定,而在小流量工况下,由于压比高,同时伴随着分离、失速等复杂流动现象,离心压缩机将处于不稳定的危险工作状态^[3]。Shum等^[4]指出,叶轮与叶片扩压器之间的动静干涉作用是导致离心压缩机发生旋转失速现象的重要原因之一。刘立军等^[5]发现,扩压器叶片前缘存在的低速滞止区域使叶轮叶片前部的流动更加不均匀,叶轮中的尾迹损失会因此增大。席光等^[6]通过研究发现,扩压器的势反冲效应与叶轮叶片尾迹的非定常影响处于相同数量级。郝苜婷等^[7]利用CFD方法研究了叶轮上下游固定叶排的时序效应对离心压缩机叶轮叶片气动负荷的影响。Vagani等^[8-9]利用CFD方法对离心压缩机失速工况下的流场进行研究,将数值模拟数据与实验数据进行了比较,指出通过对计算模型交接面的流量进行FFT分析,可以实现对旋转失速现象的捕捉,并提出了一种确定失速起始工况点的通用方法,为离心压缩机设计阶段失速点预测工作提供了一种CFD解决方案。Fujisawa等^[10]利用实验与数值方法研究了离心压缩机叶片扩压器失速到喘振的转变过程,指出扩压器中的失速现象是由多种涡系结构引起的。邢鹏等^[11]在多种工况下对某三级离心压缩机进行了流固耦合研究。Zamp等^[12]利用数值和实验方法研究了由叶片扩压器引起的上游叶轮受迫振动。

上述针对离心压缩机小流量工况的数值研究大多采用部分流道定常方法^[5-6],忽略了小流量工况下离心压缩机内部流动固有的非定常与空间非对称特性。目前,利用全流道非定常计算模型的研究仍然较少,并且其中大多数是在固定工况下开展离心压缩机非定常数值计算研究,关于瞬态变工况的研究仍然较少。考虑到离心压缩机在实际运转过程中极

易受管网环境扰动影响,流量在短时间内会出现波动,其中流量骤减过程对于离心压缩机运行稳定性与可靠性的负面影响最大,因此,本文利用CFD方法对某离心压缩机模型级进行全流道非定常计算,从叶轮与扩压器中失速微团发展与内部流动稳定性的角度,分析了在流量发生骤减过程中的级内流动特性,同时对转子的气动载荷变化进行了分析,指出径向力分力的异常波动特征在离心压缩机实际运转过程中具有重要意义。

1 计算模型

1.1 几何模型

本文研究对象为沈阳鼓风机集团股份有限公司生产的LB56150 KY108型离心压缩机模型级,其几何模型如图1所示。离心压缩机模型级的通流元件主要包括闭式叶轮、叶片扩压器和回流器,设计转速为14230 r/min,设计流量为6.61 kg/s。离心压缩机模型级主要参数见表1,其中叶轮出口直径400 mm,包含13个三维扭曲叶片,扩压器和回流器均采用直叶片,叶片数目分别为14和22。

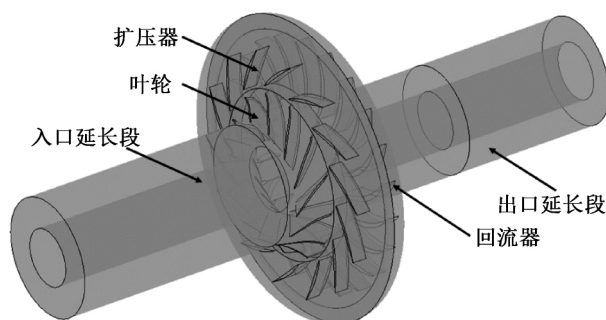


图1 离心压缩机模型级内流道几何建模示意图

表1 离心压缩机模型级主要参数

参数名称	叶轮	扩压器	回流器
进口直径/mm	236	435	631
出口直径/mm	400	622	320
出口宽度/mm	38.4	36.6	54.7
叶片进口角/(°)	39	33	45
叶片出口角/(°)	60	47	101
叶片数/个	13	14	22

1.2 网格划分

利用TurboGrid软件对离心压缩机模型级进行全流道结构网格划分,其中叶轮叶片前缘处采用C型拓扑结构,尾缘处采用H型拓扑结构,扩压器与回流器叶片前缘尾缘均采用H型拓扑结构。离心压缩机模型级全流道网格划分如图2所示。对壁面边界层附近网格进行局部加密,所有流域中所划

分网格的最小网格正交角、最大扩展因子以及最大纵横比分别控制在 20° 、15 和 900, 网格质量符合 CFX-Solver 求解器的计算要求^[13]。

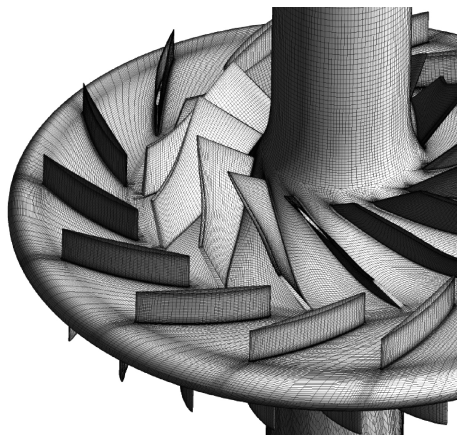


图2 离心压缩机模型级全流道网格划分示意图

1.3 数值方法及网格无关性验证

由于动静部件之间的相互作用, 叶轮机械内部流动具有固有的非定常性质, 在非设计工况和瞬变工况下表现更为突出, 因此传统的定常模拟计算已经无法适应这些特殊工况的分析要求^[14-15]。本文利用 ANSYS CFX 商业软件对离心压缩机模型级求解三维非定常可压缩雷诺时均 Navier Stokes 方程, 采用 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型, 将空气视为理想气体并作为工质, 壁面采用无滑移绝热边界条件, 入口设定总温和总压, 出口给定质量流量边界条件, 计算数据采用双精度模式; 定常计算中动静域交接面采用混合平面方法, 非定常计算中采用基于相变换的 Transient Rotor Stator 方法。时间域采用二阶向后欧拉差分格式进行离散化处理, 叶轮转动一圈布置 390 个时间步, 根据压缩机转速计算出时间步长约为 1.08×10^{-5} s, 除此之外, 内迭代步数设定为 7, 目标残差值设置为 1×10^{-6} 。

图3展示了在设计工况下模型级外特性参数的定常计算结果随网格数量的变化情况。考虑到全流道非定常计算需要耗费大量的计算资源, 因此应在保证计算精度的前提下尽可能减少网格数量。与设计工况下外特性参数实验结果相比, 采用不同网格数模型的计算结果相对误差在表2中列出, 其中负值表示计算结果低于实验结果, 正值表示计算结果高于实验结果。与网格数为 1030 万的计算模型相比, 采用 568 万网格数计算得到的总压比相对差值低于 0.6%, 多变效率相对差值低于 0.8%。综合考虑计算过程的高效性和计算结果的精确性, 最终选择 568 万网格数量模型进行后续计算。

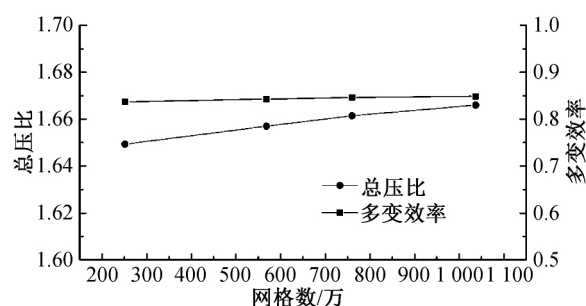


图3 基于设计工况定常计算结果的网格无关性验证

表2 设计工况下不同网格数模型计算与实验外特性参数结果相对误差 %

误差	网格数/万			
	251	568	760	1030
总压比相对误差	-0.7859	-0.3269	-0.0580	0.2163
多变效率相对误差	-1.1961	-0.5032	-0.0740	0.2332

2 计算结果与分析

2.1 计算结果可靠性验证

图4展示了设计工况下叶轮叶片与轮盘壁面 y^+ 值分布情况的定常计算结果, 从图中可以看出, 壁面 y^+ 值整体控制在 200 以下, 符合 $k-\epsilon$ 湍流模型对壁面 y^+ 值的计算要求。

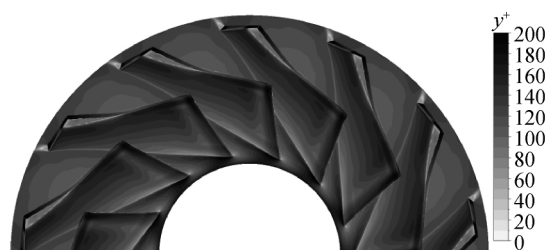


图4 叶轮域叶片与轮盘壁面 y^+ 值分布情况

在模型级设计转速下分别对 4.5、5.5、6.0 kg/s 和 6.6 kg/s 四个小流量工况进行非定常计算, 并将计算得到的外特性参数结果对时间平均后与实验数据进行对比, 如图5所示。从图中可以看出, 数值计算与实验结果拟合良好, 总压比、总温比以及多变效率的相对误差均小于 3.5%。

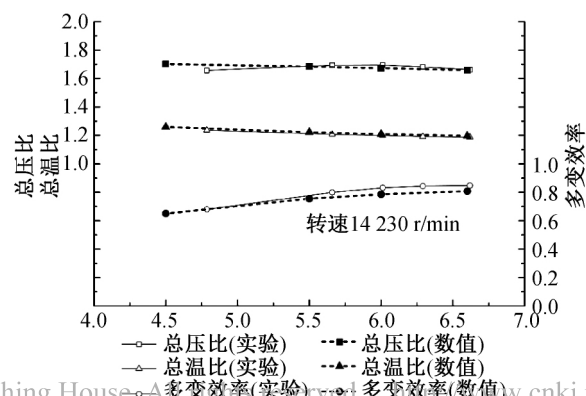


图5 小流量工况下数值计算与实验结果^[16]外特性曲线

2.2 流量骤减计算条件设置及结果

为模拟离心压缩机模型级流量骤减的瞬态过程,在设计转速下小流量工况范围内,通过阶梯减小流量的方式对模型级进行非定常数值计算。计算中出口边界条件采取叶轮每转过两圈,质量流量降低 0.1 kg/s 的阶梯型下降方式,最终获得从设计工况 6.6 kg/s 逐渐

降低至 3.0 kg/s 过程中各计算域交接面质量流量随时间的波动情况,如图6所示。从图6中可以看出,随着质量流量骤减,通过各交接面的流量波动相位基本保持一致,当流量降低至 4.5 kg/s 附近时流量开始出现明显的低频大幅值波动,随着流量继续减小,脉动幅值不断增大,内部流动稳定性变差。

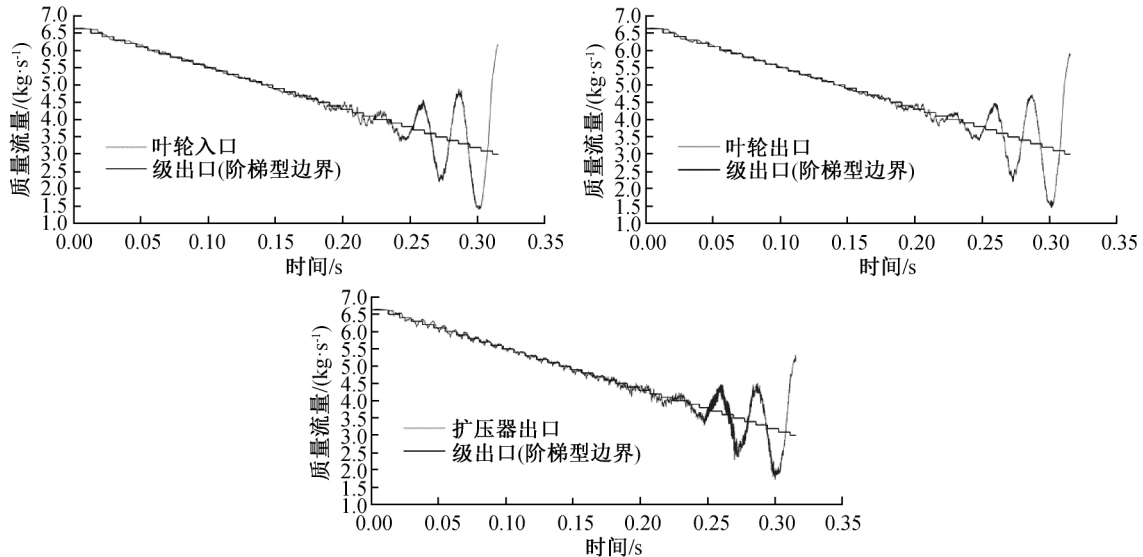


图6 流量骤减过程计算条件设置及各交接面流量随时间变化情况

2.3 失速微团时空发展过程分析

图7展示了流量骤减瞬态过程中50%叶高面流场的变化情况,用虚线圆圈标记 0.0134 s 时刻扩压器中某个失速微团的位置,并在流量骤减过程中对其进行追踪,从而得到失速微团沿周向传播的运动轨迹,图中相邻两时刻间失速微团周向传播距离均不多于一周。从对失速微团的追踪结果可以看出,随着流量

不断降低,离心压缩机发生旋转失速现象,失速微团在叶片扩压器中逆时针旋转,且传播速度呈现出加速趋势。此外,失速微团所占据的空间不断扩大,在流量骤减的过程中,逆压梯度增大,失速微团向叶轮流道内延伸,与此同时,失速微团沿周向分布的对称性逐渐减弱,当流量降低至 3.0 kg/s 时相邻位置的失速微团彼此融合,所标记的失速微团已经无法追踪。

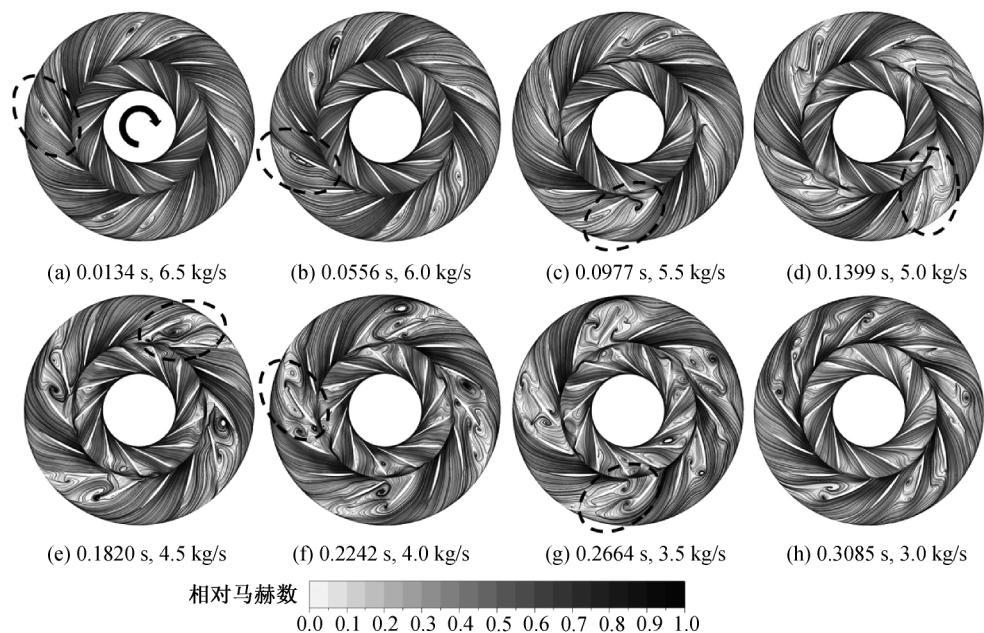


图7 流量骤减过程50%叶高面流场变化情况

图8展示了流量骤减瞬态工况下失速微团的空间发展过程,从图中可以看出,在0.0387 s时刻,40%以下叶高位置没有观察到失速微团,失速微团主要聚集在60%以上叶高位置。随着流量减小至5.5 kg/s,在0.1005 s时刻失速微团已经扩散至50%叶高位置,但30%叶高位置的流动仍然保持稳定。同理在0.1596 s时刻失速微团延伸至

40%叶高位置,而在0.1792 s时刻,10%叶高位置出现微弱的分离现象,当流量降低至4.4 kg/s时(0.1905 s时刻),可以在10%叶高位置观察到明显的失速微团,失速微团占据整个叶高范围。当流量降低至3.4 kg/s时(0.2804 s时刻)10%叶高位置的失速微团在空间上表现出明显的周向不均匀性。

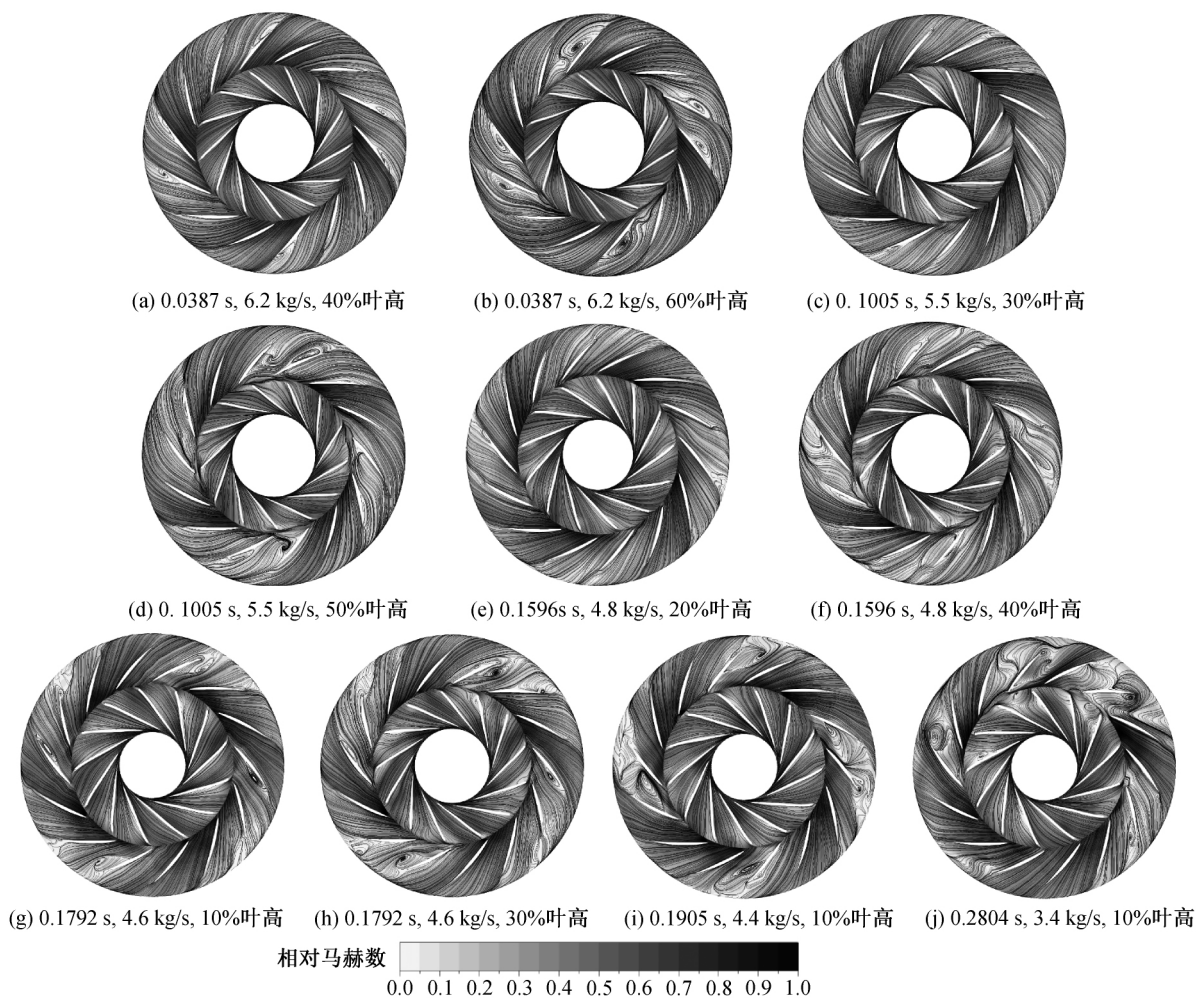


图8 流量骤减过程不同叶高面失速微团空间发展情况

2.4 内部流动稳定性分析

为便于分析离心压缩机在流量骤减过程中关键通流部件内部气体流动的稳定性,将各通流部件间交接面的质量流量利用式(1)进行无量纲化处理:

$$\dot{m}^* = \frac{\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}{\dot{m}_d} \quad (1)$$

其中: \dot{m}^* 为无量纲质量流量; \dot{m}_{in} 为流经计算域入口的质量流量, kg/s; \dot{m}_{out} 为流经计算域出口的质量流量, kg/s; \dot{m}_d 为设计工况下的质量流量, kg/s。

无量纲化处理后分别得到叶轮域和扩压器域的无量纲质量流量 \dot{m}^* 随时间的变化情况。由连续性

方程可以推知,无量纲质量流量具有所研究控制体内气体密度随时间变化率的物理意义,可以用于描述控制体内工质的压缩与震荡强度。

图9中(a)和(b)分别给出了流量骤减过程中叶轮与扩压器计算域内无量纲质量流量在时域上的变化情况,并利用FFT方法得到其中四个时间段的频域分布情况。为便于分析,利用式(2)将计算得到的频率做无量纲化处理:

$$f^* = \frac{f}{f_r} \quad (2)$$

其中: f^* 为无量纲频率; f 为计算频率, Hz; f_r 为叶轮旋转频率, Hz。

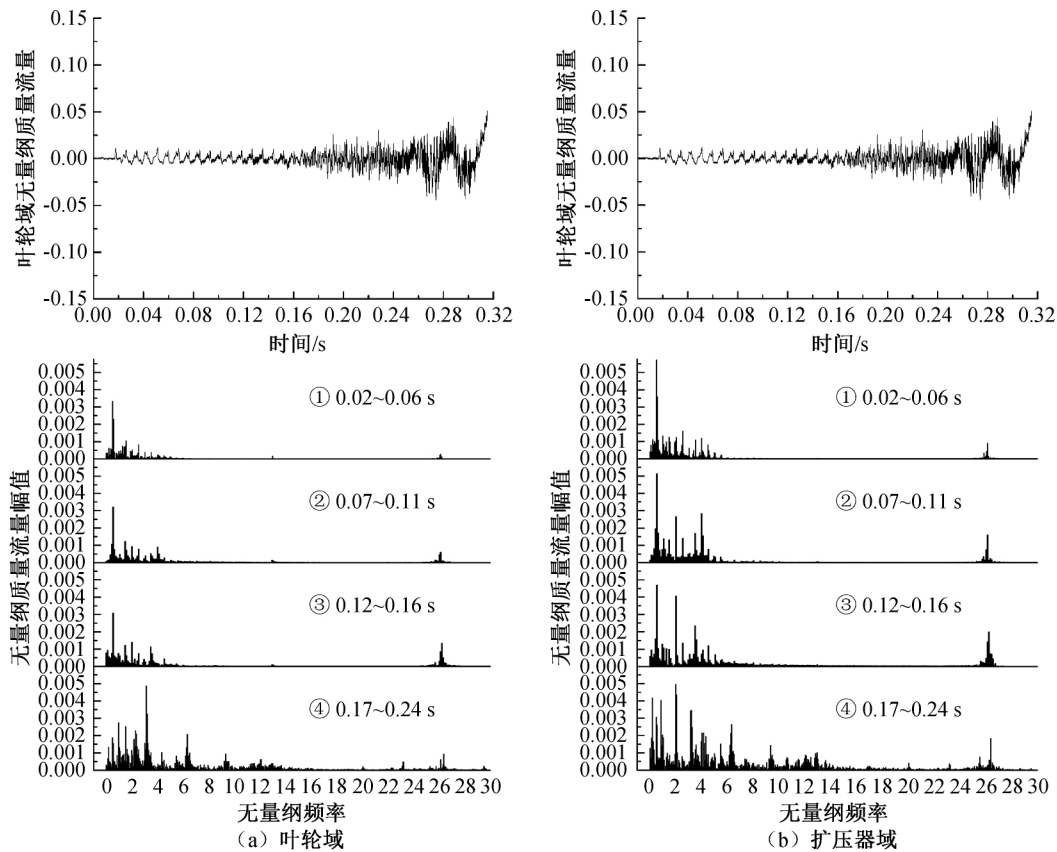


图9 叶轮与扩压器内部气体震荡情况

从图9中可以看出,相比叶轮中的气体,扩压器中气流流动更加不稳定,随着流量降低,两通流部件中的气流震荡幅值都显著增大,且叶轮域中的增幅更加明显,这与图7中失速微团在流量骤减初始阶段主要集中于扩压器中,随后在逆压梯度的作用下向叶轮域延伸的现象一致。从0.17~0.24 s内的频谱分布情况可以看出,频率分布变得复杂,离心压缩机内部流动无序性增强,与此同时,低频分量增多且幅值增大,即气体震荡中低于叶轮转频的部分凸显出来,预示着喘振现象即将发生。

2.5 转子气动作用力与力矩分析

图10展示了在流量骤减过程中叶轮受到的气体作用力随时间的变化情况。从图10中可以看出,随着流量降低,气体与叶轮之间的动量交换减少,因此叶轮受到气体的轴向力作用整体呈现减弱趋势。考虑到小流量工况下离心压缩机内部气体流动将受到较强的逆压梯度作用,极易发生分离与回流现象,受气流轴向震荡的影响,在0.17 s流量降低至4.7 kg/s时,轴向力开始出现明显的高频波动,离心压缩机进入不稳定工况范围。随着流量继续减小至3.9 kg/s,轴向力出现大幅低频分量。由于在小流量工况下在叶片吸力面会出现

严重的流动分离并伴随着涡脱落现象,且流量越小,涡脱落的无序性越强,叶轮在旋转过程中各个叶片所受到的气体作用力差异性增大,因此气体对叶轮施加的转矩也将随着叶轮内部气体流动的失稳产生相应变化。

在流量从设计工况逐渐降低的初始阶段,叶轮流道内气体对叶轮施加的径向力分量随时间的波动情况相对稳定,从0.08 s时刻开始径向力分量幅值逐渐增大,合力整体呈现缓慢上升趋势。在0.24 s时刻流量降低至3.9 kg/s,径向力分量出现明显的异常波动现象,其幅值突然降低,开始出现低频脉动成分,与此同时,径向力合力减小,叶轮在气动力的作用下进入短暂的悬浮状态。但随着流量继续减小,叶轮所受到的径向力合力急剧增大,增幅接近一个数量级,离心压缩机进入危险工作状态。图10中0.24~0.26 s时间段内径向力分量的异常波动以及径向力合力骤减的现象对于离心压缩机的安全可靠运行具有重要意义,径向力突变现象间接反映了叶轮内部流动结构沿圆周分布正在经历由对称向不对称过渡,即旋转失速向喘振现象的转变,因此,在离心压缩机实际运转过程中对相关参数进行实时动态监测,可以预防失效等事故发生。

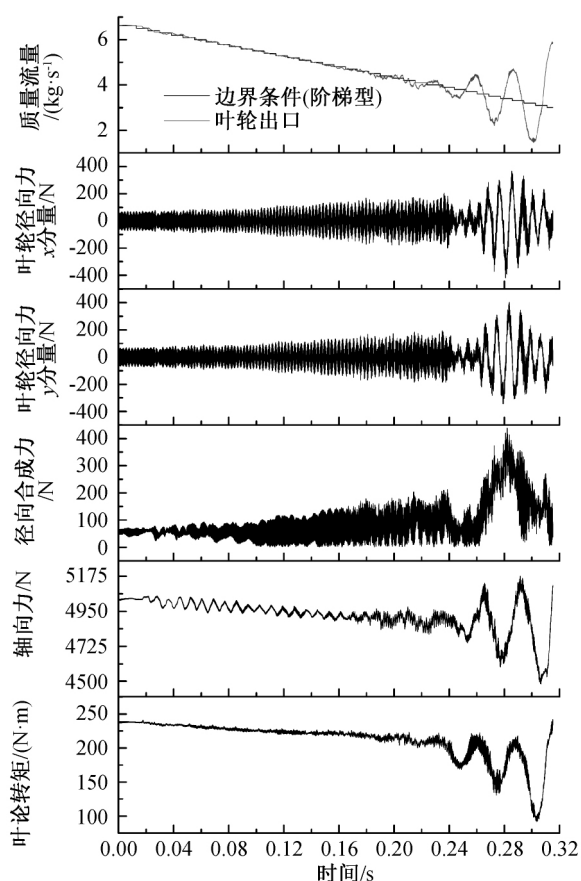


图10 流量骤减过程中气体对叶轮作用力变化情况

3 结 论

本文通过在设计转速下对 LB56150 KY108 型离心压缩机流量骤减瞬态过程进行全流道非定常数值模拟,重点从失速微团时空演变、通流部件内部流动稳定性以及气动载荷变化特征三个方面进行分析,得出以下结论:

a) 随着流量急剧减小,失速微团沿叶轮旋转反方向移动,且周向传播速度呈现出加速趋势;空间上,失速微团逐渐由扩压器向叶轮流道内部延伸,在叶片叶高方向上由轮盖向轮盘延伸并在流量降低至 4.4 kg/s 时占据整个叶高范围。

b) 在流量骤减初始阶段由于失速微团的存在,与叶轮相比扩压器中的流动更加不稳定,随着流量继续降低,失速微团向叶轮流道延伸,叶轮中流动稳定性出现更明显的恶化。

c) 随着流量骤减,逆压梯度增大,离心压缩机内部回流严重,轴向力出现低频大幅值波动;叶轮叶片吸力面出现严重的分离现象,旋涡脱落无序性增大,叶轮转矩亦出现低频大幅值波动。

d) 当流量降低至 3.9 kg/s 时,径向力分量在经

历了短暂的异常波动现象之后,径向力合力骤增近一个数量级,径向力分力的异常波动特征对于预防离心压缩机失效等事故的发生具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 王学军, 葛丽玲, 谭佳健. 我国离心压缩机的发展历程及未来技术发展方向[J]. 风机技术, 2015, 57(3): 65-77.
- [2] 易林, 侯树强, 王灿星. 离心式叶轮内部流动数值模拟方法的研究综述[J]. 风机技术, 2006, 48(2): 45-50.
- [3] 王跃方, 刘艳, 郭婷. 离心式压缩机叶轮非定常流动特性及动力响应研究进展[J]. 风机技术, 2016, 58(5): 81-87.
- [4] Shum Y K P, Tan C S, Cumpsty N A. Impeller-diffuser interaction in a centrifugal compressor[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(4): 777-786.
- [5] 刘立军, 徐忠, 张玮. 离心式压气机模型级内非定常流动的数值试验[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 58-64.
- [6] 席光, 党政, 王尚锦. 离心式动/静相干叶排内部非定常流动的数值计算[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(1): 12-15.
- [7] 郝苜婷, 谢蓉, 关亮. 时序效应对离心压缩机叶片非定常气动负荷影响[J]. 风机技术, 2016, 58(1): 15-21, 40.
- [8] Vagani M, Engeda A, Cave M J. Prediction of impeller rotating stall onset using numerical simulations of a centrifugal compressor. Part 1: Detection of rotating stall using fixed-flow transient simulations [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2013, 227(4): 403-414.
- [9] Vagani M, Engeda A, Cave M J. Prediction of impeller rotating stall onset using numerical simulations of a centrifugal compressor. Part 2: Evaluation of mass-flow fluctuations at rotor-stator interfaces[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2013, 227(4): 415-425.
- [10] Fujisawa N, Inui T, Ohta Y. Evolution process of diffuser stall in a centrifugal compressor with vaned diffuser[J]. Journal of Turbomachinery, 2019, 141(4): 041009.
- [11] 邢鹏, 李涛, 刘会, 等. 三级离心压缩机非定常流动与交变应力的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(4): 760-765.
- [12] Zemp A, Abhari R S. Vaned diffuser induced impeller blade vibrations in a high-speed centrifugal compressor [J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(2): 021015.

- [13] Ansys Inc.. Ansys CFX Solver Theory Guide[EB/OL]. (2014-11-14) [2019-11-19]. <http://support.ansys.com/documentation>.
- [14] 饶昆, 聂小林, 涂必成, 等. 多级离心泵内部流动分析及性能预测[J]. 浙江理工大学学报, 2016, 35(3): 385-391.
- [15] 周汉涛, 崔宝玲, 方晨, 等. 不同分流叶片起始直径对离心泵压力脉动的影响[J]. 浙江理工大学学报, 2014, 31(3): 235-240.
- [16] 窦华书, 陈兴, 张滨炜, 等. 基于能量梯度理论的离心压缩机回流器子午面改型研究[J]. 动力工程学报, 2017, 37(3): 229-236.

(责任编辑:康 锋)