

文章编号: 1000-8055(2023)08-2042-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210301

转轴偏心对离心压气机喘振边界的影响

陈颖秀¹, 郑新前^{1,2}, 侯安平³

(1. 清华大学 车辆与运载学院, 北京 100084;

2. 清华大学 航空发动机研究院, 北京 100084;

3. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 采用试验方法研究了转轴偏心对某离心压气机喘振特性的影响, 分析了轻度喘振和深度喘振的脉动特征, 对比了不同转速、不同转轴偏心方向下离心压气机喘振边界的变化。试验结果表明: 由于蜗壳非对称性的影响, 离心压气机轻度喘振脉动幅值在周向上存在较大差异, 且差异的幅值和相位均随转速的变化而变化; 但蜗壳非对称性对深度喘振脉动幅值周向差异性的影响很小。与无偏心情况相比, 转轴偏心最大使轻度喘振稳定工作范围相对增加 4.24%。不同转轴偏心相位下, 轻度喘振边界相对差异可达 6.12%。当转轴偏心引起的最小叶尖间隙位于轻度喘振幅值较大的周向位置时, 能有效抑制轻度喘振的周向差异性, 拓宽轻度喘振边界, 反之, 轻度喘振稳定工作范围将会减小。蜗壳和转轴偏心的非对称耦合作用对深度喘振边界的影响很小, 与无偏心情况相比, 不同转轴偏心相位下深度喘振边界的变化均在 1% 以内。

关 键 词: 离心压气机; 转轴偏心; 轻度喘振; 深度喘振; 非对称性

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effects of rotor eccentricity on the surge boundary of a centrifugal compressor

CHEN Yingxiu¹, ZHENG Xinqian^{1,2}, HOU Anping³

(1. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute for Aero Engine, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The effects of rotor eccentricity on the centrifugal compressor surge were experimentally studied. Pulsation characteristics of the mild and deep surge were analyzed. And features of the surge boundaries were studied for different rotational speeds and rotor eccentricity cases. The results showed that due to the asymmetric volute, the pulsation amplitude of the mild surge had distinct circumferential difference, and both the magnitude and the phase of the difference varied with the rotational speed. However, the volute asymmetry had little effect on the circumferential difference of the pulsation amplitude of the deep surge. Compared with the non-eccentric case, the rotor eccentricity can increase the stable operating range of the mild surge by 4.24%. And the relative difference of the stable operating range for different eccentricity cases was up to 6.12%. When the minimum clearance caused by the rotor eccentricity was located at the circumferential position with large pulsation amplitude of mild surge, the

收稿日期: 2021-06-15

基金项目: 国家科技重大专项(2017-II-0004-0016)

作者简介: 陈颖秀(1991—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事叶轮机械气动热力学研究。

通信作者: 郑新前(1976—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事先进航空涡轮发动机与叶轮机械技术等领域研究。

E-mail: zhengxq@tsinghua.edu.cn

引用格式: 陈颖秀, 郑新前, 侯安平. 转轴偏心对离心压气机喘振边界的影响[J]. 航空动力学报, 2023, 38(8): 2042-2048. CHEN Yingxiu, ZHENG Xinqian, HOU Anping. Effects of rotor eccentricity on the surge boundary of a centrifugal compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(8): 2042-2048.

mild surge can be suppressed and delayed, then the stable operating range was increased. Because there was almost no circumferential difference for the deep surge pulsation, the asymmetric coupling between the volute and the rotor eccentricity had little effect on the deep surge boundary. Compared with the non-eccentric case, the variation of the deep surge boundary was less than 1% under different rotor eccentricities.

Keywords: centrifugal compressor; rotor eccentricity; mild surge; deep surge; asymmetry

离心压气机广泛应用于鼓风机、航空发动机、涡轮增压器、燃料电池系统等领域^[1-3]。由于制造、安装误差以及空气轴承、油膜轴承等特殊轴承的使用^[4], 离心压气机中通常会存在转轴偏心的现象, 进而造成进口周向非均匀叶尖间隙, 对压气机性能及稳定性产生影响。

针对转轴偏心引起周向非均匀叶尖间隙的影响, 研究者在轴流压气机中进行了相关研究。Graf 等人^[5]采用理论模型和试验方法研究了非均匀叶尖间隙对某低速压气机性能和稳定性的影响, 结果显示周向非均匀叶尖间隙会引起明显的非轴对称流场, 对压气机稳定边界及峰值升压均具有明显的恶化作用, 而对效率的影响较小。Cameron 等人^[6-7]采用试验方法分析了轴流压气机转轴偏心与涡动对失速先兆的影响, 发现旋转坐标系下失速先兆扰动会周期性地产生并消失。Young 等人^[8]的试验研究表明, 失速先兆扰动与间隙尺寸和偏心率密切相关, 随着流量减小, 失速扰动在大间隙区域迅速增强, 而小间隙区域基本不发生变化。

喘振是压气机典型的流动失稳形式, 其引起的剧烈振动严重威胁压气机的安全运行。与轴流压气机相比, 离心压气机中会出现诸如两区喘振等更复杂的喘振特征^[9-11]。此外, 蜗壳引起的非对称流场与离心压气机喘振失稳关系密切。Zheng、Yang 等人^[12-16]深入分析了流场及喘振特征的非对称性, 采用“非对称流动控制”方法分别设计了非对称有叶扩压器、非对称无叶扩压器以及非对称处理机匣等结构, 使周向流动分布更加均匀, 有效抑制了压气机喘振的发生。Yang 等人^[17-18]研究了弯管与蜗壳之间的安装相位对离心压气机喘振特性的影响, 结果表明弯管引起的进口畸变流动具有优化压气机喘振边界的潜力。

目前针对离心压气机转轴偏心影响的研究相对较少, 本文首先分析轻度喘振和深度喘振的流动特征, 随后采用试验方法定量研究不同转速下转轴偏心对某离心压气机喘振边界的影响, 着重

分析蜗壳引起的非对称喘振脉动与转子偏心相位之间的关联特征, 总结在蜗壳引起的非对称流场中转轴偏心对压气机喘振边界的影响机理。

1 试验设置

1.1 研究对象

研究对象为某型高速鼓风机中使用的离心压气机, 叶轮由 8 个主叶片和 8 个分流叶片构成, 采用无叶扩压器形式, 并带有集气蜗壳。由于离心叶轮的几何特征, 转轴径向偏心主要使进口叶尖间隙呈现周向非均匀现象, 而对叶轮出口叶尖间隙基本无影响。该离心压气机主要设计参数如表 1 所示。

表 1 压气机主要设计参数

Table 1 Main design parameters of the compressor

参数名称	数值
主叶片数	8
分流叶片数	8
前缘轮毂直径/mm	36
前缘叶尖直径/mm	107.6
尾缘叶轮直径/mm	198
间隙尺寸/mm	0.7
扩压器形式	无叶
扩压器宽度/mm	15
扩压器出口直径/mm	316
转速/(r/min)	32 000
总压比	1.85
质量流量/(kg/s)	1.1

离心压气机非对称蜗壳的周向角度定义如图 1 所示, 本文研究了转轴向 0°、90°、180°以及 270°方向偏心的 4 种情况, 分别命名为 E_a 、 E_b 、 E_c 、 E_d , 无偏心情况命名为 E_0 。转轴偏移量为 0.3 mm, 即 43% 设计间隙。

1.2 试验台布置

试验驱动电动机采用了动压空气轴承支撑的高速永磁电动机方案, 图 2 为偏置轮盖机匣与蜗壳的装配图, 试验中通过径向偏置轮盖机匣, 使

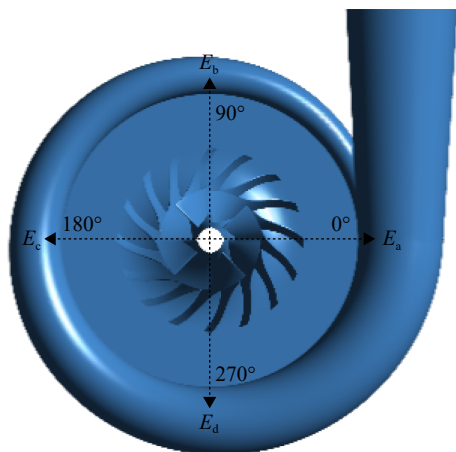


图 1 离心压气机示意图

Fig. 1 Schematic of centrifugal compressor

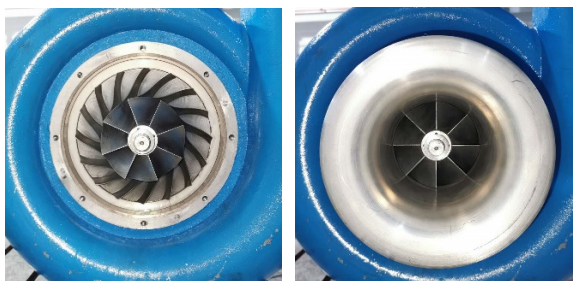
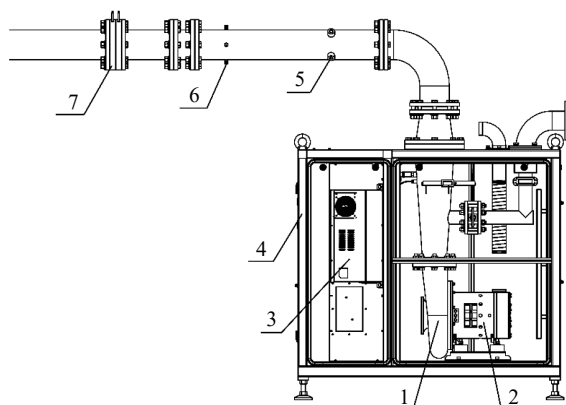


图 2 偏置机匣与蜗壳装配图

Fig. 2 Assembly of eccentric casing and volute

其轴线偏离离心叶轮轴线,实现叶轮转轴偏心的模拟。此外,试验采用塞尺测量并调整叶轮进口的周向间隙分布,实现转轴偏心量的定量控制。

试验台结构如图 3 所示,分为箱体外的试验段和箱体外的测试段两部分。本文对不同转轴偏心情况下压气机的稳态性能进行了对比研究,各组试验均在相近的大气环境下进行,以减小环境



1 离心压气机; 2 高速驱动电动机; 3 变频驱动器; 4 防护箱体;
5 测温孔; 6 测压孔; 7 流量测试段。

图 3 试验台示意图

Fig. 3 Schematic of the experimental rig

及测试仪器对测量结果的影响,并对各组进行了重复性测试,以避免随机性误差。根据压气机性能测试要求,试验采用温度、压力及压差传感器对进口总温、进口总压、出气温度、出气静压、流量测试段压差 5 个参数进行了稳态测试,其精度分别为 0.19 K、0.16 kPa、0.35 K、0.2 kPa、0.02 kPa。通过不确定度分析,流量、总压比和效率的相对误差分别为 0.972%、0.42% 以及 1.15%。

此外,在距离叶片前缘 1% 叶高的机匣壁面均布 4 个 Kulite 动态压力传感器,分别监测叶片前缘 0°、90°、180°和 270°四个周向位置的非定常压力脉动。动态压力传感器型号为 XCQ-107S-062,采样频率设置为 50 kHz,约 90 倍转动频率。图 4(a)为动态压力传感器布置示意图,图 4(b)为动态压力传感器安装后的内部实物图。

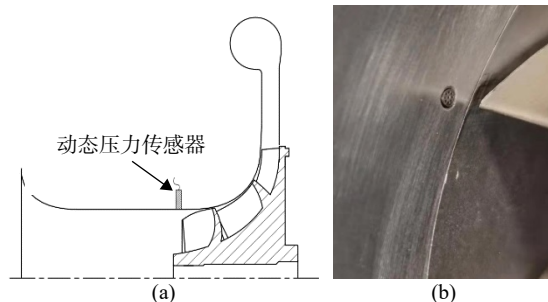


图 4 动态压力传感器布置

Fig. 4 Layout of dynamic pressure sensors

2 试验结果与分析

首先对无偏心情况下压升曲线的轻度喘振和深度喘振脉动特征进行研究;进一步,定量分析并探究不同转速下转轴偏心对离心压气机喘振边界的影响机理。

2.1 离心压气机喘振脉动特征分析

离心压气机流向叶片通道长,子午流道存在明显的曲率,叶顶端壁区域的压力梯度受到离心力、流道曲率的多重影响,流动更为复杂,失稳模式在不同转速下往往具有不同的表现形式^[9]。

图 5 为无偏心情况下离心压气机在 100%、80% 以及 60% 转速下的压比特性曲线。为了便于研究转轴偏心对离心压气机喘振的影响,本文定义某转速下深度喘振最大进口压力脉动幅值为 p_r ,当离心压气机进口喘振脉动幅值大于 $80\%p_r$ 时,即认为离心压气机进入深度喘振,并定义离心压气机进入深度喘振前的最后一个工况点为深度喘振边界,如图中红色虚线所示,深度喘振边

界的左侧,离心压气机均处于深度喘振工况。同时,本文定义离心压气机进口喘振脉动周向平均幅值大于 $1\%p_t$ 的工况为轻度喘振工况,并定义试验中离心压气机产生连续轻度喘振前的最后一个工况点为轻度喘振边界,如图中绿色虚线所示,从压比特性曲线看出,轻度喘振边界位置正好对应峰值压比工况。在不同转速下,随着流量减小,离心压气机依次经历稳定工况、轻度喘振以及深度喘振。图中工况点 H_9 、 M_9 、 L_9 位于轻度喘振边界,且对应峰值压比工况,工况点 H_{11} 、 M_{11} 、 L_{11} 位于深度喘振边界。

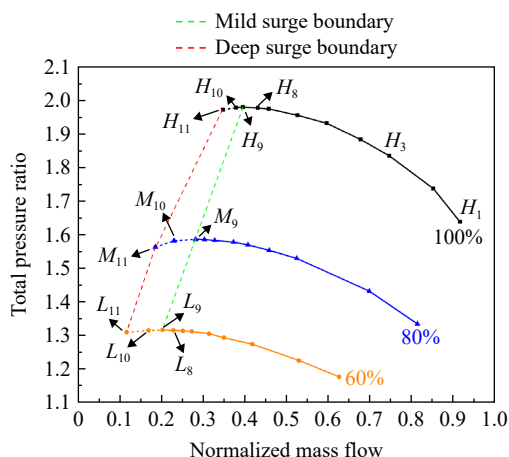


图5 无转轴偏心情况总压比特性图

Fig. 5 Total pressure ratio map without rotor eccentricity

图6为满转速下 H_{11} 工况点(轻度喘振)与深度喘振边界左侧工况(深度喘振)的时域压力信号,其中图中粗实线为采用4%的叶片通道通过频率进行低通滤波的处理结果。可以发现各周向位置轻度喘振与深度喘振的脉动相位和周期基本一致。其中 H_{11} 工况点轻度喘振时,6个周期对应217.5 r,计算可得其频率约为14.7 Hz。而5个深度喘振周期对应223 r,计算可得其频率约为12 Hz,小于轻度喘振的脉动频率。这是因为深度喘振工况下离心压气机流量波动剧烈,压缩系统容腔的充气和放气时间会影响系统中压力脉动的频率。

对于各周向位置的脉动幅值,轻度喘振与深度喘振具有较大的区别。离心压气机发生轻度喘振时,180°和270°位置的脉动幅值明显大于0°和90°位置,而进入深度喘振工况后,各周向位置的脉动幅值趋于一致。非设计工况下,离心压气机中的非对称流场特征主要由蜗壳引起,由图6定性可知,蜗壳的非对称性会使轻度喘振脉动幅值产生明显的周向差异,而对深度喘振幅值的周向

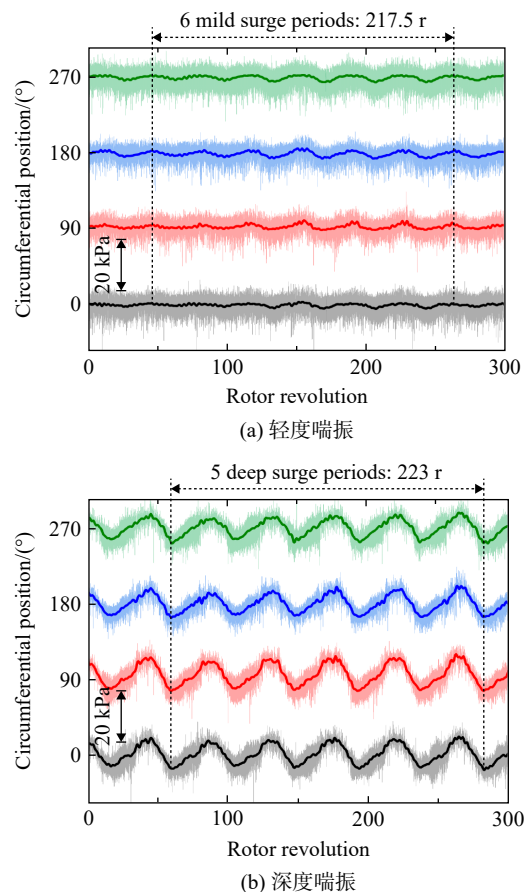


图6 100%转速轻度喘振(H_{11} 工况点)与深度喘振压力脉动
Fig. 6 Pressure pulsation of the mild surge (H_{11} point) and the deep surge at 100% speed

差异性影响较小。

本文采用快速傅里叶变换对压力信号进行处理,提取喘振频率对应的脉动幅值,并以平均幅值为基准,定义喘振脉动幅值的周向相对差异为周向最大脉动幅值与平均幅值之差除以平均幅值。图7给出了不同转速下轻度喘振脉动幅值的周向分布情况。100%、80%、60%转速下轻度喘振幅值的周向相对差异分别为41.4%、35.6%以及30.7%,随着转速降低,轻度喘振的周向差异性有所减弱。平均幅值则呈现了不同规律,80%转速下轻度喘振的平均幅值最高,平均幅值要大于100%和60%情况。此外,轻度喘振幅值周向差异的相位特性与转速相关,100%转速下180°与270°位置幅值最大,0°位置幅值最小,而60%转速下,90°位置幅值最大,270°位置对应最小幅值。这说明,轻度喘振脉动幅值的周向差异、平均值以及分布相位均与转速关系密切,转速的影响不容忽视。

图8为不同转速下深度喘振脉动幅值的周向分布情况。各转速的幅值周向分布呈现了一致的

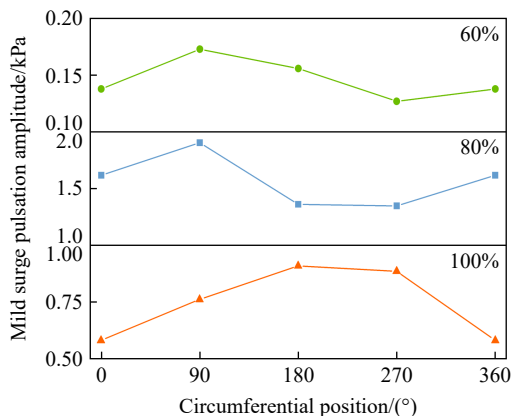


图7 100%、80%、60%转速轻度喘振压力脉动幅值

Fig. 7 Pressure pulsation amplitudes of the mild surge at 100%, 80% and 60% rotational speed

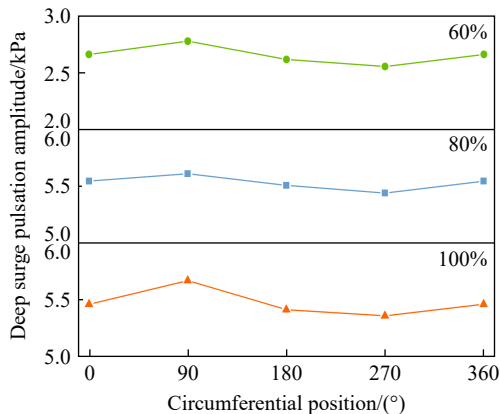


图8 100%、80%、60%转速深度喘振压力脉动幅值

Fig. 8 Pressure pulsation amplitudes of the deep surge at 100%, 80% and 60% rotational speed

相位特性, 脉动幅值的最大和最小值分别位于 90° 和 270° 位置。然而, 定量而言深度喘振受蜗壳非对称性的影响远小于轻度喘振情况, 100%、80%、60%转速深度喘振幅值的周向相对差异分别为5.5%、4.8%以及8.3%。与轻度喘振平均幅值相比, 深度喘振平均脉动幅值急剧增大, 100%、80%、60%转速下深度喘振平均幅值分别为轻度喘振的7倍、3.5倍和18倍。在不同转速下, 深度喘振均呈现相对较小的周向差异以及一致的相位特性, 这说明由整体压缩系统失稳引起的深度喘振, 其压力波动剧烈, 脉动幅值大, 蜗壳非对称性的影响难以凸显。

上文轻度喘振和深度喘振脉动特征的分析, 补充并完善了离心压气机喘振现象的研究。轻度喘振的发生会降低离心压气机的增压能力, 在非对称蜗壳的作用下, 离心压气机轻度喘振脉动特性呈现明显的周向差异, 且差异的幅值和相位与转速密切相关。因此, 对于离心压气机轻度喘振

的研究, 采用周向多测点的布置方法有利于更全面地辨识动态失稳的演化特征, 探究非对称流动对喘振失稳的影响机理。而离心压气机蜗壳非对称性对深度喘振脉动幅值周向差异性的影响很小, 可以认为仍然满足传统观点的轴对称假设。

2.2 转轴偏心对离心压气机喘振边界的影响

离心压气机轻度喘振边界与压气机峰值压比工况密切相关, 而深度喘振边界关系到压气机能否稳定运行, 探究转轴偏心对两种喘振边界的影响具有重要的意义。

本文引入表征稳定工作范围的参数 R ^[19], 以堵塞流量为基准, 定义 R 为堵塞流量与喘振流量之差除以堵塞流量, R 越大说明喘振边界越远离堵塞流量点, 压气机稳定工作范围越大, 反之意味着压气机稳定工作范围较小, 其表达式如下式所示:

$$R = \left(\frac{m_c - m_s}{m_c} \right) \times 100\%$$

式中 m_c 为某转速堵塞点的流量, m_s 为相同转速下轻度喘振边界或深度喘振边界工况点对应的流量。

图9为100%转速不同转轴偏心方向下离心压气机的压比特性曲线。由图可知, 在各流量工况下, 转轴偏心对压比和深度喘振边界的影响很小, 但对轻度喘振边界有较大的影响。

表2给出了100%转速下各偏心情况轻度和深度喘振边界对应的 R 参数。可以发现, 不同方向的转轴偏心对深度喘振边界影响较小, 其对应的 R 相对差异小于0.75%。而转轴偏心对轻度喘振边界的影响呈现出不同的规律, 与无偏心情况相比, E_b 偏心情况对轻度喘振边界对应的 R 影响不大, E_c 和 E_d 偏心情况拓宽了轻度喘振边界, 最

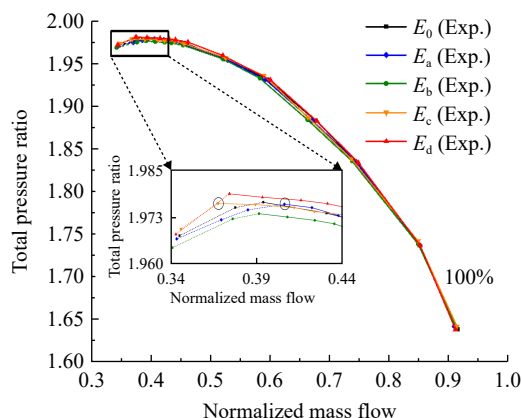


图9 100%转速不同转轴偏心情况的总压比曲线

Fig. 9 Total pressure ratio performance curves with different rotor eccentricity at 100% rotational speed

表 2 100% 转速下不同转轴偏心情况 R 参数
Table 2 R of different rotor eccentricity at 100% speed

偏心情况	$R/\%$	
	轻度喘振	深度喘振
E_0	60.57	65.34
E_a	59.40	65.51
E_b	60.83	65.75
E_c	63.16	65.27
E_d	62.52	65.56

大使其对应的稳定工作范围相对增加 4.24%, 而 E_a 偏心情况正好相反, 使轻度喘振边界对应的稳定工作范围相对减小了 1.98%。如图 9 中圆圈标识所示, 最佳偏心情况(E_c)和最差偏心情况(E_a)轻度喘振边界的 R 相对差异达 6.12%。

图 10 为 60% 转速不同转轴偏心方向下离心压气机的压比特性曲线, 表 3 为各曲线轻度和深度喘振边界对应的 R 参数。同样发现转轴偏心对压比以及深度喘振边界的影响较小。而对于轻度喘振边界, E_b 和 E_c 偏心情况产生了优化作用, 而 E_a 和 E_d 偏心情况则减小了其对应的稳定工作范围。最佳偏心情况(E_b)和最差偏心情况(E_a)轻度喘振边界对应的稳定工作范围相对差异为 3.43%。

不同方向的转轴偏心会拓宽或缩窄离心压气机轻度喘振边界, 体现了转轴偏心与蜗壳不同的非对称耦合作用。图 11 给出了 100% 转速下最佳偏心情况(E_c)、最差偏心情况(E_a)以及无偏心情况(E_0)下轻度喘振及深度喘振脉动幅值的周向分布。 E_c 、 E_a 以及 E_0 情况轻度喘振幅值的周向相对差异分别为 38%、43.5% 以及 41.4%, 如图 11(a) 所示。结合 3 种情况轻度喘振边界对应的稳定工

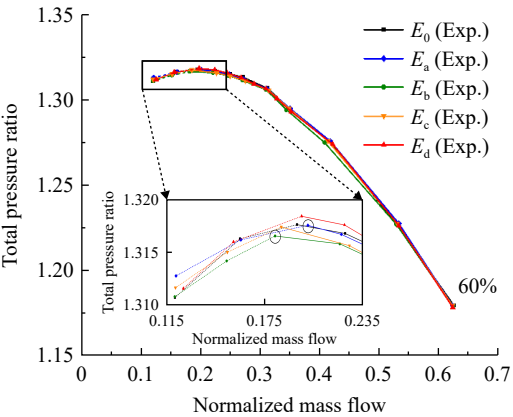


图 10 60% 转速不同转轴偏心情况的总压比曲线
Fig. 10 Total pressure ratio performance curves with different rotor eccentricity at 60% rotational speed

表 3 60% 转速下不同转轴偏心情况 R
Table 3 R of different rotor eccentricity at 60% speed

偏心情况	$R/\%$	
	轻度喘振	深度喘振
E_0	74.96	84.52
E_a	74.12	84.44
E_b	76.69	85.54
E_c	76.20	84.48
E_d	74.61	83.87

作范围以及图 7 可知, 当转轴偏心引起的最小间隙位置正好位于轻度喘振幅值较大的周向位置时, 转轴偏心与蜗壳的非对称耦合作用能降低轻度喘振周向差异性, 进而拓宽了轻度喘振边界, 反之, 轻度喘振边界对应的稳定工作范围将会减小。结合图 7 和图 10 可知, 60% 转速下, 转轴偏心的影响呈现了相同的规律。

而对于 E_c 、 E_a 以及 E_0 情况的深度喘振, 周向相对差异分别为 6%、5.5% 以及 5.9%, 如图 11(b)

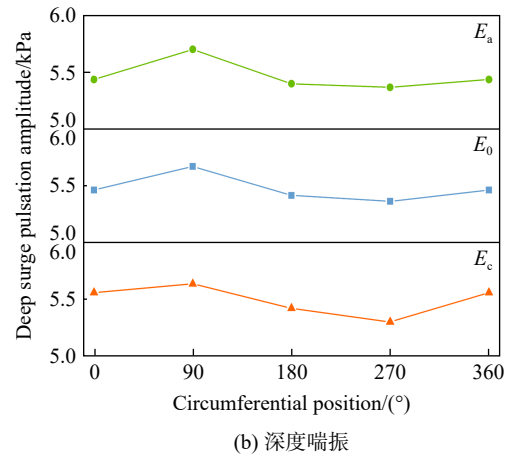
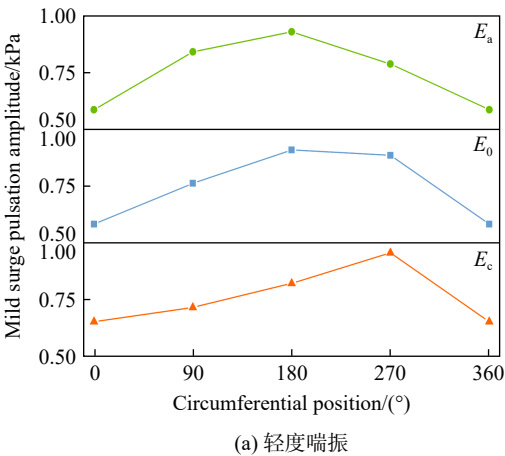


图 11 100% 转速 E_c 、 E_a 以及 E_0 情况轻度喘振与深度喘振压力脉动幅值分布
Fig. 11 Pressure pulsation amplitudes of the mild and deep surge of E_c , E_a and E_0 cases at 100% rotational speed

所示。这说明转轴偏心与蜗壳的非对称耦合作用对深度喘振脉动影响很小,进而解释了上述不同转轴偏心情况下深度喘振边界基本无变化的现象。

在轴流压气机中,转轴偏心通常带来压气机稳定性能的下降,而在离心压气机中,由于非对称蜗壳的存在,转轴偏心引起的进口非均匀间隙与蜗壳的耦合作用具有改善离心压气机稳定性的潜力。本文提出的“转轴偏心”流动控制方法及优化准则,能有效拓宽轻度喘振边界,提高离心压气机流动稳定性,为非对称流动控制提供了新的方法。

3 结 论

本文采用试验方法分析了不同转速下离心压气机轻度喘振与深度喘振的脉动特征,并研究了转轴偏心对离心压气机喘振边界的影响机理。结论如下:

1) 由于蜗壳非对称性的影响,离心压气机轻度喘振脉动幅值在周向上存在明显差异,且差异的幅值和相位均随转速的变化而变化。但是,离心压气机蜗壳非对称性对深度喘振脉动幅值周向差异性的影响很小。

2) 转轴偏心具有改善离心压气机轻度喘振边界的潜力,与无偏心情况相比,最大使其稳定工作范围相对增加4.24%。不同转轴偏心相位下,轻度喘振边界相对差异可达6.12%。当转轴偏心引起的最小叶尖间隙位于轻度喘振幅值较大的周向位置时,能有效抑制轻度喘振的周向差异性,拓宽轻度喘振边界,反之,轻度喘振稳定工作范围将会减小。

3) 由于离心压气机深度喘振各周向位置的脉动幅值基本一致,蜗壳和转轴偏心的非对称耦合作用对深度喘振边界的影响很小,与无偏心情况相比,不同转轴偏心相位下深度喘振边界的变化均在1%以内。

参考文献:

- [1] ZHENG Xinqian, ZHANG Yangjun, HE Hong, et al. Design of a centrifugal compressor with low specific speed for automotive fuel cell[R]. ASME Paper GT2008-50468, 2008.
- [2] FENELEY A J, PESIRIDIS A, ANDWARI A M. Variable geometry turbocharger technologies for exhaust energy recovery and boosting a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 71: 959-975.
- [3] KRAIN H. Review of centrifugal compressor's application and development[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2005, 127(1): 25-34.
- [4] KIM K S, LEE I. Vibration characteristics of a 75kW turbo machine with air foil bearings[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, 129(3): 843-849.
- [5] GRAF M B, WONG T S, GREITZER E M, et al. Effects of non-axisymmetric tip clearance on axial compressor performance and stability[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(4): 648-661.
- [6] CAMERON J D, BENNINGTON M A, ROSS M H, et al. Effects of steady tip clearance asymmetry and rotor whirl on stall inception in an axial compressor[R]. ASME Paper GT2007-28278, 2007.
- [7] CAMERON J D, BENNINGTON M A, ROSS M H, et al. The influence of tip clearance momentum flux on stall inception in a high-speed axial compressor[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2013, 135(5): 051005.1-051005.11.
- [8] YOUNG A, DAY I, PULLAN G. Stall warning by blade pressure signature analysis[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 135(1): 1589-1599.
- [9] ZHENG Xinqian, LIU Anxiong. Experimental investigation of surge and stall in a high-speed centrifugal compressor[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(3): 815-825.
- [10] ZHENG Xinqian, LIU Anxiong. Phenomenon and mechanism of two-regime-surge in a centrifugal compressor[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(8): 081007.1-081007.7.
- [11] BUFFAZ N, TREBINJAC I. Impact of tip clearance size and rotation speed on the surge onset in a high pressure centrifugal compressor[R]. ASME Paper GT2012-68427, 2012.
- [12] ZHENG Xinqian, SUN Zhenzhong, KAWAKUBO T, et al. Stability improvement of a turbocharger centrifugal compressor by a non-axisymmetric vaned diffuser[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(4): 041007.1-041007.13.
- [13] ZHENG Xinqian, YUN L, TOMOKI K, et al. Extension of operating range of a centrifugal compressor by use of a non-axisymmetric diffuser[J]. *Ishikawajima-Harima Heavy Industries Engineering Review*, 2018, 51(1): 43-56.
- [14] YANG Mingyang, ZHENG Xinqian, ZHANG Yangjun, et al. Stability improvement of high-pressure-ratio turbocharger centrifugal compressor by asymmetric flow control: Part I non-axisymmetrical flow in centrifugal compressor[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2013, 135(2): 021006.1-021006.9.
- [15] YANG Mingyang, ZHENG Xinqian, ZHANG Yangjun, et al. Stability improvement of high-pressure-ratio turbocharger centrifugal compressor by asymmetric flow control: Part II non-axisymmetrical self-recirculation casing treatment[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2013, 135(2): 021007.1-021007.8.
- [16] ZHENG Xinqian, SUN Zhenzhong, KAWAKUBO T, et al. Experimental investigation of surge and stall in a turbocharger centrifugal compressor with a vaned diffuser[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 82: 493-506.
- [17] YANG Ce, ZHANG Hanzhi, YANG Dengfeng, et al. Casing wall static pressure distribution behavior in a centrifugal compressor with asymmetric inlet/outlet structures[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy*, 2019, 233(1): 37-51.
- [18] YANG Ce, LIU Yixiong, WANG Leilei, et al. Investigation on the performance and flow structure of centrifugal compressor: understand the inlet bent duct configurations[R]. ASME Paper GT2016-56169, 2016.
- [19] SUN Zhenzhong, ZOU Wangzhi, ZHENG Xinqian. Instability detection of centrifugal compressors by means of acoustic measurements[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 82: 628-635.

(编辑:张 雪)