

文章编号:1000-8055(2013)02-0426-06

单级轴流压气机的旋转失速特性实验

罗志煌¹, 李 军¹, 杨 朴², 吴 云¹, 刘东健¹, 李凡玉¹

- (1. 空军工程大学 航空航天工程学院 等离子体动力学重点实验室, 西安 710038;
2. 陆军航空兵学院 飞行理论系, 北京 101123)

摘 要: 以一台单级低速轴流压气机为研究对象, 采用在压气机周向、轴向不同位置处布置多个动态压力传感器的方法, 获取了压气机失速过程中不同位置动态压力信号的变化情况, 通过对各测点的压力信号分别进行了时域、频域分析. 结果表明: 压气机在失速前出现尖脉冲型扰动; 失速后的失速团有分裂和合并的现象, 个数在 1 和 2 之间相互转换, 但退出失速时总是由两个合并成为一个, 并且在几个转子周期内迅速退出; 对失速时的压力信号频谱分析证明了对失速团个数判断的准确性.

关键词: 压气机; 旋转失速; 失速团; 动态压力; 频谱分析

中图分类号: V231

文献标志码: A

Experiment on single axial compressor of characteristic of rotating stall

LUO Zhi-huang¹, LI Jun¹, YANG Pu², WU Yun¹,
LIU Dong-jian¹, LI Fan-yu¹

(1. Science and Technology Plasma Dynamics Laboratory,
Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University,
Xi'an 710038, China;

2. Flight Theory Department, The Army Institute, Beijing 101123, China)

Abstract: The stall inception of a single low speed compressor was investigated with uniform inlet flow. By installing high response dynamic pressure transducers in the circumferential and axial directions, the dynamic pressure data at different positions were collected and analyzed using time analysis and frequency analysis, respectively. The results indicate that the spike-type inception will appear before stall; the stall cells are splited and incorporated, but two cells are always incorporated to one when exiting from stalling quickly; and frequency analysis of the dynamic pressure validate the veracity of the number of stall cell.

Key words: compressor; rotating stall; stall cells; dynamic pressure;
frequency analysis

旋转失速一般发生在转子和静子叶排内的轴流和离心压气机中, 表现为旋转的流动堵塞, 属于三维非定常流动的范畴, 其最早于 1945 年在离心

式压气机中观察到^[1], 是严重的局部流动不稳定现象. 它最初由某一叶片排中一个或少数几个叶片通道的流动分离形成通道堵塞, 然后通过堵塞

收稿日期: 2012-07-14

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130131.0829.201302.426_025.html

基金项目: 国家自然科学基金(50906100)

作者简介: 罗志煌(1985—), 男, 湖南湘潭人, 博士生, 主要从事轴流压气机流动控制的研究.

的通道引起紧邻叶片通道流动攻角增大来进行传播,使压气机叶片通道周期性地进入堵塞和正常状态^[2]. 旋转失速一般在压气机工作点达到或接近特性线的最高点时出现,并且需要满足一定的条件:即压气机下游的高压容腔相对较小和储存的能量较低的情况下才可能发生. 旋转失速的具体表现形式为绕周向旋转的失速团,失速团内有总压损失,几乎没有流量通过,失速团沿周向传播的速率比转子旋转的速度要低^[2]. 总之,旋转失速的产生,会减小压气机环面平均压比和质量流量,造成压气机增压能力下降,并带来性能损失.

尖脉冲扰动^[3-5]和模态波扰动^[6-8]是旋转失速的两种先兆扰动形式,大量的实验表明两者均可在同一台压气机中观察到,有时甚至会同时出现^[3]. 李军等^[4]对一台单级轴流压气机的旋转失速发展过程进行了大量实验研究,应用谐波 Fourier 系数法(SFC)识别出失速的初始扰动有尖脉冲扰动和模态波扰动两种形式,并且发现压气机结构形式对失速的初始扰动形式有很大的影响,单级压气机与孤立转子相比,其失速初始扰动形式更为明显地表现为旋转波扰动,进口导叶作负预旋调节时可使旋转波加强,并且明显增长了失速预报时间等. 长尺度的模态波扰动与整个压缩系统的二维不稳定相关,而短尺度的尖脉冲扰动表明流场中存在与高的转子攻角相联系的三维流场中断^[3].

对失速先兆现象分析的方法主要有时域分析^[9]、频域分析^[10]、小波分析^[11]、极坐标图^[12-13]等,这些方法都能有效地判别出失速先兆形式以及失速团的流动特征,但是都只是对失速先兆形式进行了研究,而失速发生之后的流动现象却都没有涉及. 为了进一步加深对轴流压气机失速现象的深刻认识,本文针对单级低速轴流压气机在不同的质量流量状态下的旋转失速特性以及失速恢复特性做了详细的研究,以期揭示轴流压气机的失稳机制,用以对压气机的设计以及主动控制提供必要的指导和借鉴.

1 实验设备及方案介绍

研究对象为空军工程大学的单级低速轴流压气机,该压气机不带进口导流叶片,采用轴向进气、径向排气的结构布局. 转子叶片数为 45,静子叶片数为 60,其外壁和内壁的直径在进口和出口处均相等,轮毂直径为 400 mm,机匣直径为 600 mm,设计条件下该单级压气机的主要性能参数

为:质量流量为 6.5 kg/s,全压升为 2500 Pa(总压比为 1.025);最大转速为 3000 r/min.

动态数据采集采用了中泰研创科技有限公司的 USB-7646B 采集卡,该采集卡共有 16 个通道,量程为 ± 10 V,16 路并行采集时最高采样频率为 200 kHz,数模转换精度为 16 bit,并配有专用数据采集以及分析软件.

在距离转子叶尖前缘 1/4 轴向弦长位置处的 1-1 截面沿周向均匀布置 4 个 Kulite 动态压力传感器,用以观察失速团沿周向发展及旋转情况;沿轴线方向的机匣壁面布置了 7 个 Kulite 动态压力传感器,用以观察失速团沿轴向的发展以及分布情况,如图 1 所示(图中 1~7 为沿轴向 7 个传感器的相对位置).

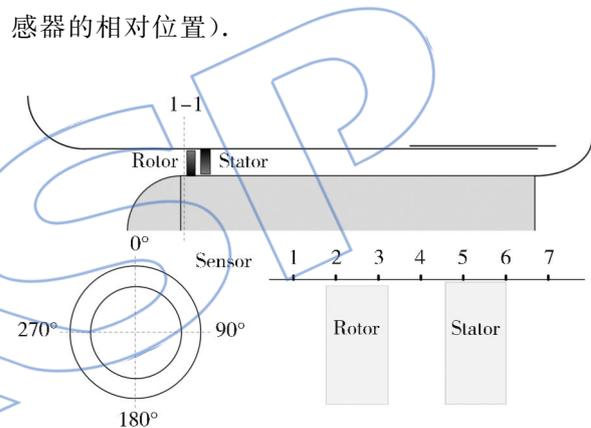


图 1 压气机结构及动态压力测点布局

Fig. 1 Configuration of compressor construction and dynamic pressure transducers

2 实验结果及分析

采用时域和频域分析相结合的方法,通过分析失速过程中的壁面静压信号,利用时域分析的方法确定失速先兆的类型、失速团的个数及其旋转频率;然后对原始信号进行滤波处理,采用时频分析的方法证明时域分析的准确性.

2.1 失速先兆类型的确定

尖脉冲扰动由压气机某一特定叶片排的局部失速产生,在原本平稳的压力(或速度)信号中表现为突然出现的刺状尖脉冲,出现后迅速发展为旋转失速^[3]. 当这种尖脉冲第一次出现时,它所占据的周向范围很小,一般仅限于 1~2 个叶片通道,因此绕周向传播得很快,传播速度介于 60%~80% 转子转速之间. 尖脉冲扰动的这种窄带结构和高旋转速度的状态持续时间很短,当这种尖刺开始传播后,它的尺寸迅速增大,因此旋转速度也相应减小,在 2~3 转的时间内发展成为二维失速团.

图 2 为压气机节流全过程(最大状态—不断节流—失速—退出失速—最大状态)的叶顶前缘周向均布 4 个测点的压力信号值,压气机稳定工作时压力信号非常平稳,当进入失速状态时压力值会出现大幅度的脉动,退出失速后压力值会恢复平稳状态.图 3 为刚进入失速的压力信号局部放大图,可以看出:失速先兆起始于 3 号传感器附近,当扰动出现之后,其周向尺寸迅速增大,几乎在 2.5 个转子周期内发展成为失速团,最后稳定沿周向传播(如图 4),所以失速初始扰动形式为尖脉冲扰动.

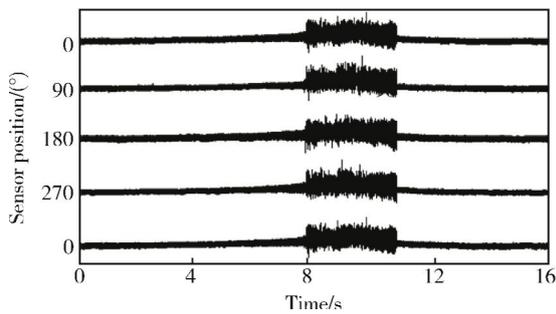


图 2 压气机节流全过程的压力信号

Fig. 2 Pressure variations of the compressor throttle

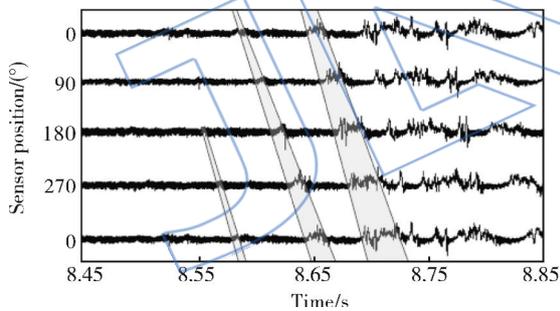


图 3 失速先兆发展过程

Fig. 3 Development of stall inception

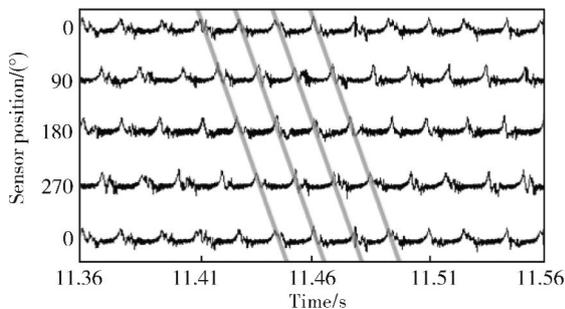


图 4 失速团沿周向稳定传播

Fig. 4 Propagation of stall cells in the circumferential direction

2.2 失速团的个数以及旋转速度

在稳态失速的过程中,所有的压力波动都有其

自己的频率成分,在脉动压力信号中,把压力减小较大的区域定义为失速团^[12-13],之所以把压力波动中的低压部分定义为失速,是因为失速总是伴随着压力的减少.这样,能够把压气机在失速压力场中压力值很低部分的区域(低压区)叫做旋转失速团.

根据文献[12]对失速团个数判别方法有: $n = T_{cr} / T_{osc}$ (其中 T_{cr} 为 4 个传感器对压力信号测得的失速团旋转周期, T_{osc} 为单个传感器测得的失速团旋转周期),当 $T_{cr} = T_{osc}$ 时(如图 5),失速团的个数 $n=1$.图 6 为压气机进入失速后沿周向均布的 4 个传感器的压力信号图,可以看出压气机刚进入失速后只有 1 个失速团.如果压气机的进一步节流,流动状态进一步恶化,将会发生全周向范围内失速,失速团也将不复存在.若此时将节流阀开大,使其逐渐退出失速,在退出失速的过程中,可以观察到失速团会重新出现,在经历一段

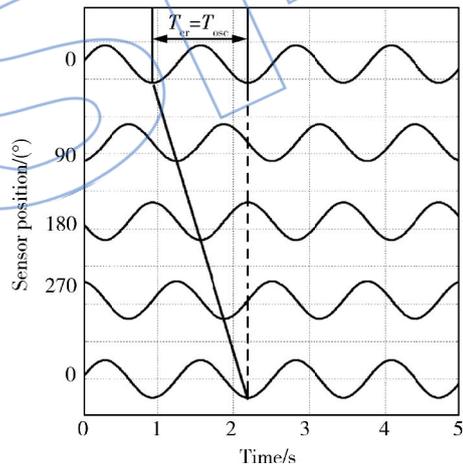


图 5 随时间变化的理想压力

Fig. 5 Characteristic of idealized pressure variations versus time

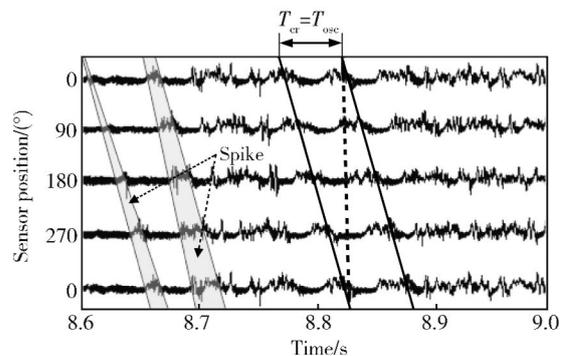


图 6 失速团沿周向传播

Fig. 6 Propagation of stall cells in the circumferential direction

较为紊乱的压力区域后,个数会在较短时间内由 1 个逐渐分裂成 2 个(如图 7),同时其旋转速度增大,由 40% 转子转速增加到 64% 转子转速(如图 7 下放大部分:分裂之前失速团需要经过 2.5 个转子周期,分裂后经过 1.56 个转子周期).在退出失速的临界点附近,失速团会由 2 个迅速合并成为 1 个(如图 8,其中一个较小的失速团会突然消失),最终经过大约 4 个转子周期完全退出失速,此时的失速团旋转速度不会发生变化,基本维持在 64% 转子转速左右(1.56 个转子周期).

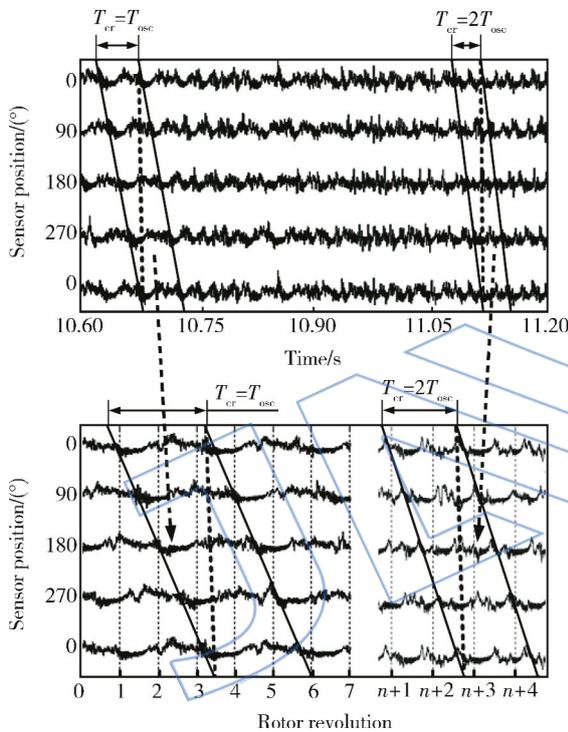


图 7 失速团分裂现象

Fig. 7 Phenomenon of stall cells splitting

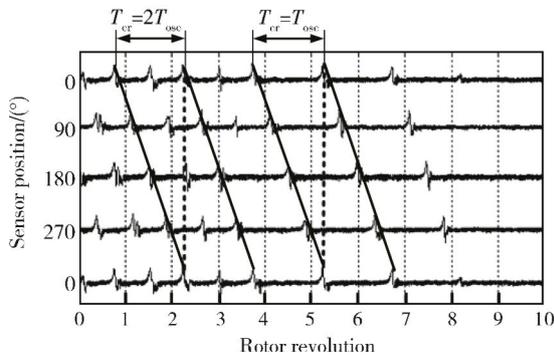


图 8 退出失速时的失速团合并现象

Fig. 8 Phenomenon of stall cells incorporation when exiting

2.3 失速团的起始位置和范围探讨

图 9 为压气机节流全过程的沿轴向 7 个位置

的传感器压力信号值,压气机稳定工作时压力信号非常平稳,波动幅度很小,当进入失速状态时压力值会出现大幅度的明显脉动,退出失速后压力值会恢复平稳状态.2 号传感器(位置在转子叶尖前缘稍靠后)压力波动最大,这与泄漏流经过之处有很大的关系.随着不断的节流,2 号传感器处的压力波动逐渐增大,说明泄漏流随着反压的增大不断前移,直至失速发生,此时泄漏流与前缘平齐^[14-15].1 号传感器位于距离叶片前缘一个轴向弦长的位置,受不断节流、反压增大的影响很小,但是处于失速团的影响范围之内;3 号、4 号传感器分别位于转子尾缘和静子通道内部,随着不断节流、反压增大,但是其波动很小,几乎保持平稳状态,直至失速的发生;5 号、6 号、7 号传感器位于静子通道内及出口处,其压力受静子尾迹的影响波动范围较大,失速团信号对比不是很明显.

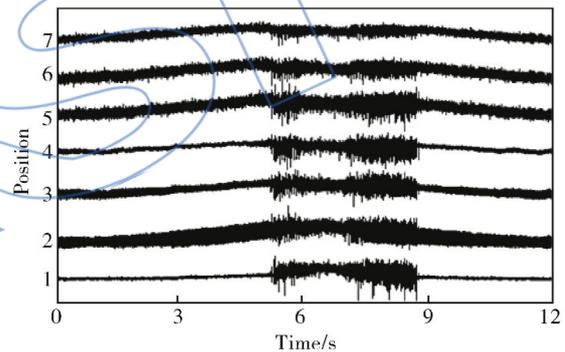


图 9 压气机节流全过程的压力信号

Fig. 9 Pressure variations of the compressor throttle

图 10 为失速发生时的压力信号局部放大图,从图中可以看出在 5.48 s 时出现了明显的失速团,失速团在产生后会沿周向运动,在轴向方向并没有流动速度,因此会在其所在的区域造成流动堵塞,气流遇到堵塞气团会减速增压,在失速团离开传感器所在位置时,气流需要加速补充过来,此时总压不变,静压降低,所以传感器所记录压力信号表现为先增后减,随后迅速回复正常.1 号压力先增后减,受到明显的失速团扰动,2 号也受到失速团扰动的影响,从影响的时间范围来看 2 号的时间最长,周向范围最大.3 号~6 号压力先减后增,说明其处于失速团之后并受其影响,气流先是加速减压,失速团离开之后恢复正常,而 7 号附近受失速团影响已经很小了.2 号锯齿波压力遭到破坏与 1 号压力升高几乎同时发生,失速团轴向起始位置应该是在 1 号、2 号之间,具体位置还需要做进一步详细实验分析和判断.

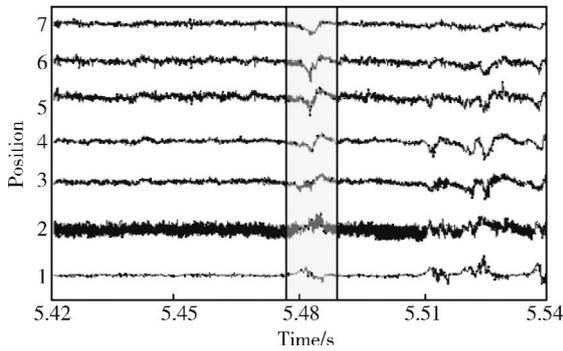


图 10 失速发生时的压力信号

Fig. 10 Pressure variations in occurrence of stalling

2.4 失速时的信号频率特性分析

压气机在工作时,流过转子气流可能的干扰源有:叶片对气流的扰动,为叶片通过频率及其倍频;转子进入失速后,失速团的扰动为失速频率及其倍频;转子进入喘振,气流局部回流造成低频脉动;由气流局部分离和堵塞造成平均速度脉动;转子前整流支板、导向叶片、探针等干扰.而对测量所得到的动态压力信号做频谱分析就可以得到各种干扰源的频率及其强度.

从频谱分析图上可以看出:各种状态的频率结构有很大差异.在最大工作状态时,压气机的气流流动状态最好,当气流流过转子时,叶片是其不可避免的扰动源,图 11 为最大工作状态时转子叶尖处传感器压力信号时域及频域分析.图上半部分为一个转子周期内的压力信号,压气机每转一圈有 45 个叶片扫过传感器,由于叶片压力面和吸力面的压力不等,在正常无失速先兆的情况下,所得到的是有规律的锯齿波波形图,图下半部分为该工作状态下的频谱分析,对应的 2250 Hz 的频率幅值最大,该频率即为转子叶片通过频率: $45 \times 3000 / 60 = 2250 \text{ Hz}$ (转子叶片数 45、转速 3000 r/min).

进入失速后,失速频率和气流脉动频率幅值会显著上升.图 12 为压气机进入失速后稳定为一个失速团时的叶尖前缘压力信号时域以及频域分析图,该工作状态下失速团的旋转速度也为 64% 转子转速,其特征频率为: $50 \times 64\% = 32 \text{ Hz}$ 及其倍频.图 13 为压气机进入失速后稳定为 2 个失速团时的叶尖前缘压力信号时域以及频域分析图,该工作状态下失速团的旋转速度为 64% 转子转速,其特征频率为: $50 \times 64\% \times 2 = 64 \text{ Hz}$ 及其倍频;通过对该失速信号的频谱分析发现频率幅值的分布与 2.2 节中用文献[12]方法计算失速团个

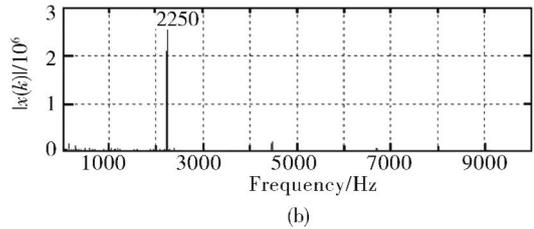
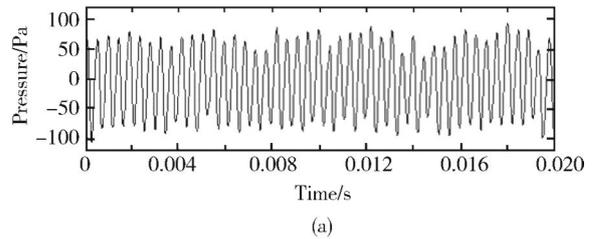


图 11 最大工作状态时信号的时域及频域分析

Fig. 11 Time and frequency analysis at large flow

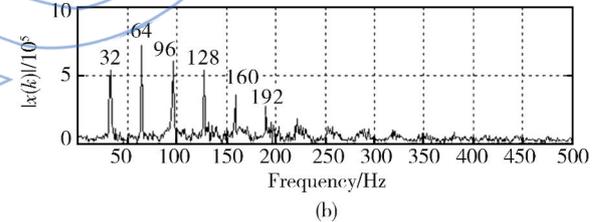
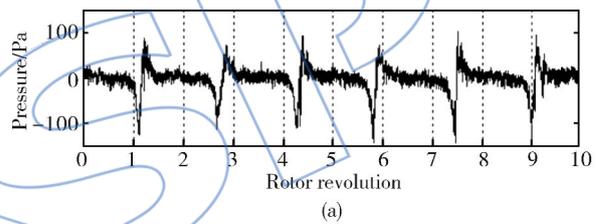


图 12 1 个失速团稳定传播时的时域及频域分析

Fig. 12 Time and frequency analysis with 1 stall cell

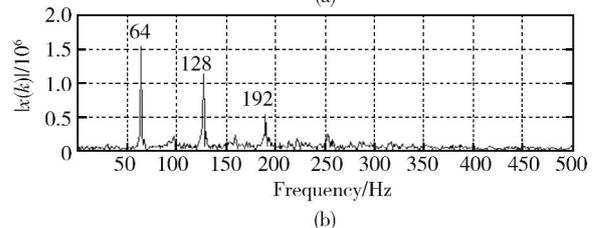
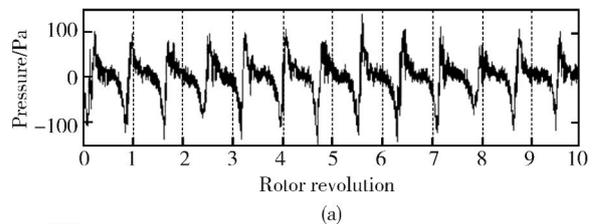


图 13 2 个失速团稳定传播时的时域及频域分析

Fig. 13 Time and frequency analysis with 2 stall cells

数得到的特征频率吻合得很好,这也说明了文献[12]计算失速团个数方法的准确性。

3 结 论

1) 本文通过对动态压力信号进行时域、频域分析,发现压气机的失速先兆类型是尖脉冲型,尖脉冲型失速先兆一旦出现,在几个转子周期内迅速发展成为大失速团,因此很难判断其失速的起始位置。

2) 刚进入失速时失速团的个数为1个,但是不能稳定存在,随后失速团会分裂成为2个,在退出失速的过程中失速团有分裂和合并的现象,个数在1和2之间相互转换,但退出失速时总是由2个合并成为1个,并且在几个转子周期内迅速退出;对失速时的压力信号频谱分析证明了对失速团个数判断的准确性。

3) 由于尖脉冲型失速一般起始于转子叶尖区域,所以本文没有进一步做关于失速团沿径向传播的研究。鉴于失速团内的总压降低,几乎没有气流流动,或者甚至根本没有气流流动,所以下一步工作拟通过开展二维粒子图像测速技术PIV (particle image velocimetry) 实验研究来捕捉和验证失速团的存在以及传播。

参 考 文 献:

- [1] 陆亚钧. 叶轮机非定常流动理论[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1991.
- [2] Hellmich B, Seume J R. Acoustic resonance in a 4-stage high-speed axial compressor[R]. ISROMAC10-2004-004, 2004.
- [3] Camp T R, Day I J. A study of spike and modal stall phenomena in a low-speed axial compressor[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(3):393-401.
- [4] 李军, 徐纲, 朱俊强, 等. 轴流压气机失速初始扰动形式的实验研究[J]. 航空动力学报, 1997, 12(1):17-20.
LI Jun, XU Gang, ZHU Junqiang, et al. Initial disturbance forms of rotating stall in axial flow compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(1):17-20. (in Chinese)
- [5] Day I J, Breuer T, Escuret J F, et al. Stall inception and the prospects for active control in four high speed compressors [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1999, 121(1):18-27.
- [6] McDougall N M, Cumpsty N A, Hynes T P. Stall inception in axial compressors[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112(1):116-125.
- [7] Moore F K, Greitzer E M. A theory of post-stall transients in axial compression systems: Part I development of equations[R]. ASME Paper 85-GT-171, 1985.
- [8] Greitzer E M, Moore F K. A theory of post-stall transients in axial compression systems: Part II application [R]. ASME Paper 85-GT-172, 1985.
- [9] 聂超群, 陈静宜, 蒋浩康, 等. 低速轴流压气机旋转失速先兆特征的分析[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(3):293-298.
NIE Chaoqun, CHEN Jingyi, JIANG Haokang, et al. Experimental investigation on inception of rotating stall in low-speed axial compressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1998, 19(3):293-298. (in Chinese)
- [10] 屠宝锋, 胡骏, 王志强, 等. 低速轴流压气机旋转失速特性试验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(1):143-149.
TU Baofeng, HU Jun, WANG Zhiqiang, et al. Experimental investigation on characteristic of rotating stall in a low-speed axial compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1):143-149. (in Chinese)
- [11] LIN Feng, LI Meilin, CHEN Jingyi. Long-to-short length-scale transition a stall inception phenomenon in an axial compressor with inlet distortion[R]. ASME Paper GT-2005-68656, 2005.
- [12] Levy Y, Pismenny J. The number and speed of stall cells during rotating stall[J]. ASME Paper GT-2003-38221, 2003.
- [13] 王春瑞, 岳林. 轴流压气机失速特征识别[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8):1887-1892.
WANG Chunrui, YUE Lin. Identification of stall characteristics of axial flow compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8):1887-1892. (in Chinese)
- [14] Tan C S, Day I, Morris S. Spike-type compressor stall inception, detection, and control[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42(8):275-300.
- [15] DU Juan, LIN Feng, CHEN Jingyi. An experimental and computational investigation of tip clearance flow and its impact on stall inception[J]. ASME Paper GT-2010-23516, 2010.