

文章编号: 1000-8055(2010)01-0067-05

叶顶微喷气提高旋转畸变条件下低速轴流压气机失稳裕度的机理分析

张靖焯¹, 罗 玛², 聂超群³, 林 峰³, 陈静宜³

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 株洲 412002;

3. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190)

摘 要: 对旋转畸变条件下轴流压气机的失稳特性进行了实验研究, 结果表明, 畸变影响区内叶顶泄漏流的前缘溢出造成了旋转失速的提前发生, 缩减了压气机的失稳裕度. 叶顶微喷气方法有效地提高了旋转畸变条件下轴流压气机的失稳裕度, 其原因在于, 实施叶顶微喷气后, 临近失速时, 压气机顶部畸变区诱发的分离团受到抑制, 减少了其诱发旋转失速的可能性, 从而实现扩稳目的.

关 键 词: 旋转畸变; 旋转失速; 微喷气

中图分类号: V231. 3

文献标识码: A

Experimental study of the mechanism of improving stall margin of low speed axial-flow compressor with micro-injection under rotating inlet distortion

ZHANG Jing-xuan¹, LUO Ma², NIE Chao-qun³, LIN Feng³, CHEN Jing-yi³

(1. School of Jet and Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou 412002, China;

3. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: An experimental investigation was carried out in the paper to clarify the flow mechanism of how micro-injection improves the stall margin of a low speed axial-flow compressor under rotating inlet distortion. The results show that, in distorted sectors, the tip leakage flow is pushed forward to the leading edge; as the mass flow rate is decreased, tip leakage flow would spill out of the blade passage and trigger the rotating stall. Micro-injection can inhibit the formation of distortion disturbances and then delay the occurrence of rotating stall.

Key words: rotating inlet distortion; rotating stall; micro-injection

进口畸变是诱发航空压气机内部流动失稳的关键因素^[1-3], 表现为在压气机进口产生一个非均匀流场, 使得压气机在严重偏离设计工况下工作,

极大地限制了其性能及稳定运行范围. 航空发动机的发展要求不断推出高性能的压气机部件, 部件的高性能使之与高参数(高增压比、高效率)联

收稿日期: 2008-12-13; **修订日期:** 2009-03-13

基金项目: 中国博士后基金(20080430306); 国家自然科学基金(50736007)

作者简介: 张靖焯(1978-), 男, 辽宁康平人, 博士, 主要从事专业叶轮机械内部非定常流动机理及控制研究.

系在一起,致使压气机的工作不稳定性问题更加严重,从而亦导致进口畸变诱发流动失稳的问题日益突出.1999年“跨世纪航空发动机发展科学对策”学术会议上,中国航空工业总公司顾诵芬院士明确提出“提高发动机的抗畸变能力”应作为提高下一代歼击机性能的工作要点^[4].就压气机扩稳方式而言,以往的研究结果表明^[5-6],叶顶微喷气能够大幅度地提高压气机的失稳裕度,但在进口畸变条件下,其是否依然有效,仍然有待进一步工作的开展.另外,如果可行,如何设计喷气方案使之更好地达到扩稳效果,需以明确其扩稳机理为前提.鉴于此,本文以旋转畸变为例,从实验角度研究叶顶微喷气对进口畸变的效果,并分析其作用机理.

1 实验方案

本文的实验对象为单转子压气机,并于压气机进口安置了旋转畸变发生装置,整个实验台的参数及畸变发生装置的结构详见文献^[7].本文中所采用的微喷气系统与文献^[7]中完全一样,主要

由空压机、储气罐、阀门、流量计、喷嘴等部件组成.其中,喷嘴在设计上为了力求其出口与压气机内壁贴平,造成喷气孔与机匣壁面形成一定的角度(投影到 $R-Z$ 平面上,称之为径向喷气角),本文所采用喷嘴的径向喷气角为 15° ,从而保证叶顶喷射气流能有效作用于动叶顶部区域.另外,本文采用的喷嘴个数为4个,且均布在机匣四周,每个喷嘴的喷射量为压气机设计流量的 0.023% ,因此总喷气量为压气机设计流量的 0.092% 左右.整个实验程序如下:首先将压气机节流阀开至最大,启动压气机到设计转速;然后,启动旋转畸变转置,使畸变片以固定转速旋转.本文共选取了两种旋转畸变工况:一为 30° 圆心角的扇形畸变片以 0.2 倍转子转速与压气机同向旋转,记为 $P02_1 \times 30$;另一畸变工况为 30° 圆心角的扇形畸变片以 0.2 倍转子转速与压气机反向旋转,记为 $N02_1 \times 30$.畸变片旋转稳定后,打开微喷气系统,通过节流阀调节到预定流量;逐步关小压气机节流阀,直至进入旋转失速.喷嘴结构及整个实验的方案如图1所示.

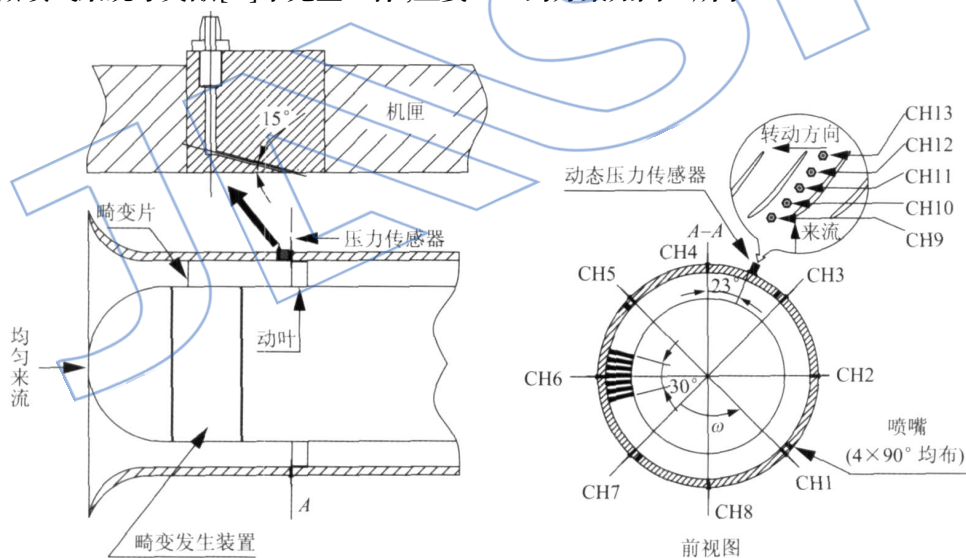


图1 喷嘴结构及实验测量方案

Fig.1 Injector design and injection system

2 实验结果及分析

2.1 旋转畸变条件下压气机失稳过程的流场特征

图2给出了旋转畸变工况下压气机的失稳过程.其中,条纹所代表的是因畸变片旋转而造成的扰动,因其与转子转动方向相反,且其绝对转速为转子转速的 20% ,故其转速标识为 -20% ;图中箭头标注的为畸变影响区诱发的类尖脉冲扰动,该扰动传播速度为 50% ,并最终触发旋转失速.

关于类尖脉冲扰动的产生及传播机理,详见文献^[8],这里不再赘述.图2表明,旋转畸变条件下,畸变诱发的类尖脉冲扰动是流动失稳产生的直接原因.

2.2 有无喷气时压气机节流特性比较

为了说明旋转畸变下叶顶微喷气的扩稳效果,图3给出了 $N02_1 \times 30$ 及 $P02_1 \times 30$ 工况喷气前后节流特性线的比较.从图上不难看出,实施叶顶微喷气后,两种工况下其节流特性线的失稳

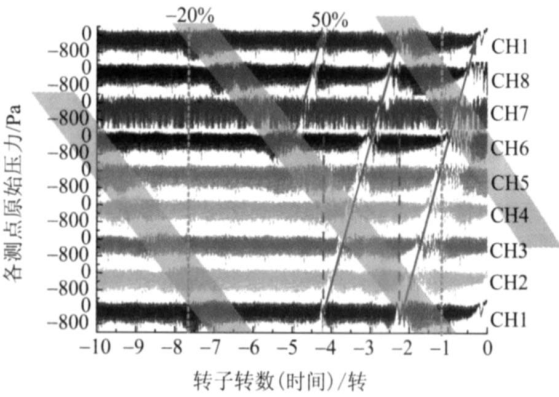
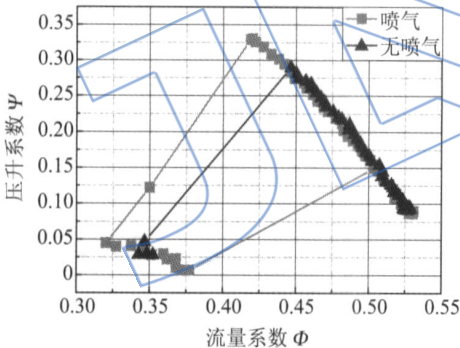
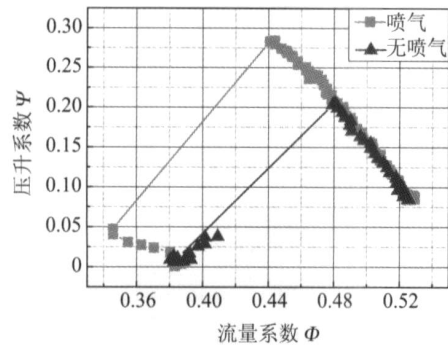


图 2 旋转畸变条件下流动失稳的触发过程
Fig. 2 Process of the rotating stall

点均大大向左推进,并且保持了特性线在大流量工况时的形状,也就是说在大流量时叶顶微喷气并没有影响压气机的工作状态,而是单纯地拓宽压气机的稳定工作范围,获得了比原来工况更大的压升系数及更小的流量系数.两种工况实施微喷气前后失稳点的流量系数及压升系数的变化如表 1 所示.就扩稳效果来看,P02_1 ×30 畸变工况的效果要大于 N02_1 ×30 畸变工况,这主要是因为正向畸变对压气机稳定性影响较大的缘故.



(a) N02_1 ×30 畸变工况



(b) P02_1 ×30 畸变工况

图 3 有无喷气旋转畸变工况下压气机节流特性线对比

Fig. 3 Comparison the characteristic line between with and without micro-injection

表 1 微喷气对旋转畸变的扩稳效果

Table 1 Improvement of stall margin with micro-injection

旋转畸变工况	与无喷气下旋转畸变工况失稳点相比	
	流量系数减小 百分比/ %	压升系数提高 百分比/ %
N02_1 ×30	6. 2	14. 2
P02_1 ×30	8. 7	37. 8

2. 3 微喷气对畸变影响区叶顶压力流场的影响

既然实施叶顶微喷气后,压气机在旋转畸变条件下较无叶顶微喷气时的失稳裕度有很大提高,这说明,叶顶微喷气方法能有效推迟压气机旋转失速的发生.但其扩稳机理是什么?下面结合叶顶数据对此进行分析.

图 4 给出了有无喷气条件下畸变影响区叶顶压力流场的比较(此时工况为失速前节流过程).从图中可以看出,在未实施叶顶微喷气时,畸变影响区内除了相应叶片通道负载增加(压力面吸力面压差增大),部分叶片通道还出现了锯齿波遭破坏的现象,而该现象则是流场扰动形成的根源,会逐渐发展成失速.反观实施叶顶微喷气后,虽然畸变影响区内的叶片负载仍大于非畸变影响区域,但锯齿波遭破坏的现象基本消失,这说明微喷气能够改善畸变区域内的流场.图中还给出了部分叶片通道的等压云图,从中亦可看出实施微喷气后叶顶叶片通道内的流场明显好于无喷气情况.图 5 亦给出了 N02_1 ×30 畸变工况畸变区域有无喷气时的流场比较,其结果与 P02_1 ×30 畸变工况基本一致,不再赘述.

2. 4 微喷气对诱发类尖脉冲扰动的抑制作用

为了说明微喷气对诱发类尖脉冲扰动的抑制作用,本文采用小波分析的方法对类尖脉冲扰动进行了分析.图 6 给出了 N02_1 ×30 畸变工况有无喷气下 GWS(global wavelet spectrum)对比,从中不难看出,与未实施叶顶微喷气工况相比,实施叶顶微喷气后,类尖脉冲扰动产生的几率明显减少(图中标注的浅色图斑减少),依照文献[8]的结论,类尖脉冲扰动产生的几率小,旋转失速的发生就会延迟,相应工况下压气机的稳定性就会提高,这也和本文前面所得到的节流特性线相吻合.图 7 亦给出了 P02_1 ×30 畸变工况有无喷气下 GWS 对比,其结论也与 N02_1 ×30 类似.由此,我们可以认为,微喷气后能拓宽旋转畸变下压气机失稳裕度的原因在于其能改善畸变区域流场,抑制类尖脉冲扰动的产生.

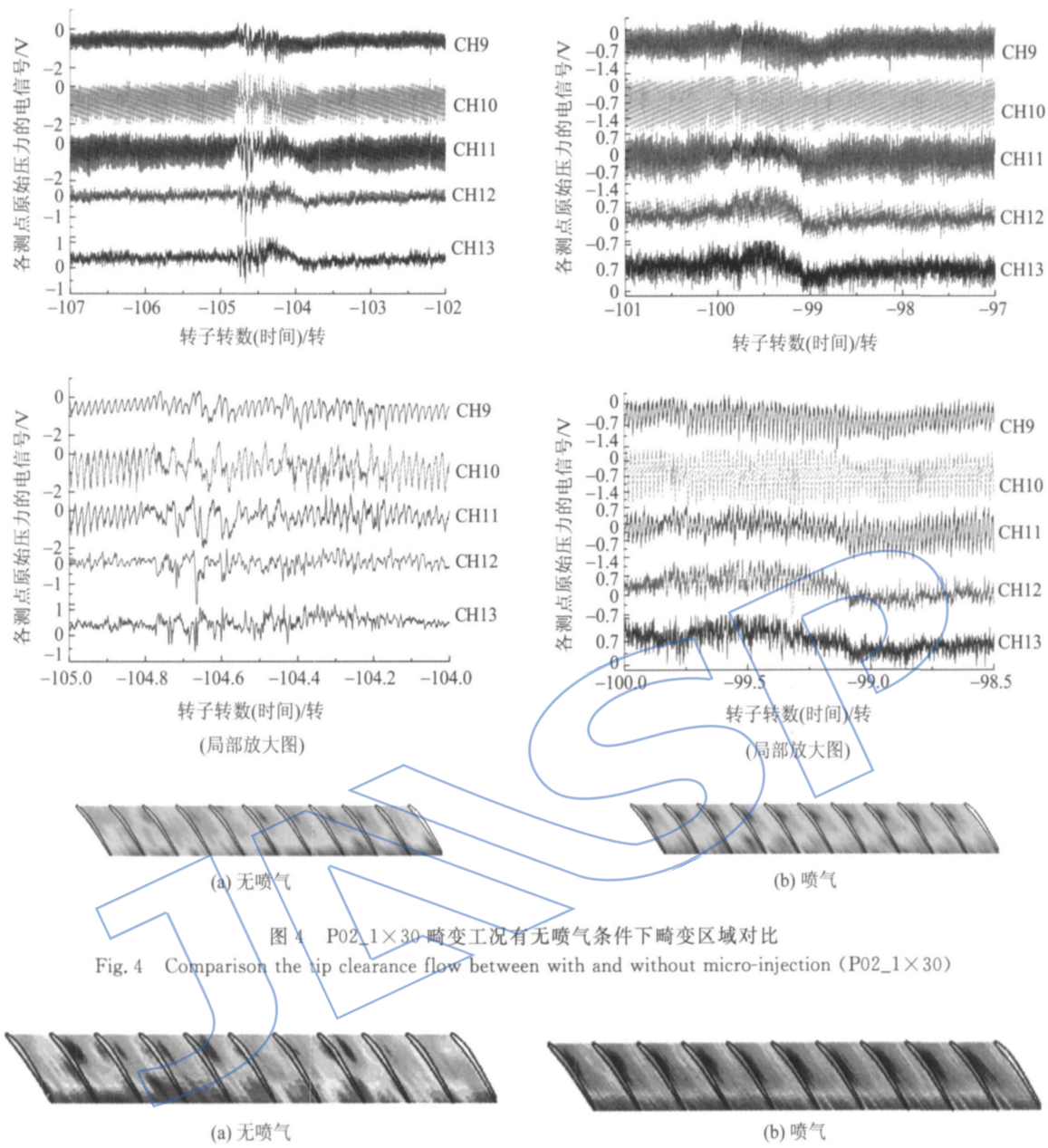


图 4 P02_1×30 畸变工况有无喷气条件下畸变区域对比
Fig. 4 Comparison the tip clearance flow between with and without micro-injection (P02_1×30)

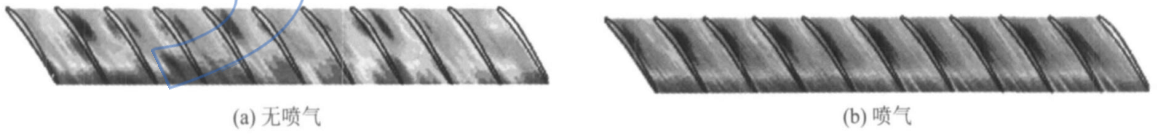


图 5 N02_1×30 畸变工况有无喷气下叶顶压力云图比较
Fig. 5 Comparison the tip pressure between with and without micro-injection (N02_1×30)

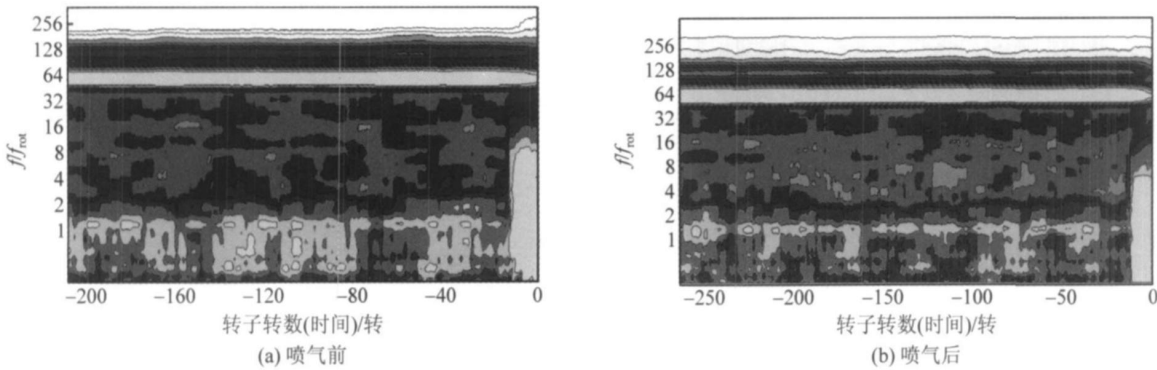


图 6 有无喷气工况下 N02_1×30 畸变工况 GWS 比较
Fig. 6 Comparison of GWS between with and without injection (N02_1×30)

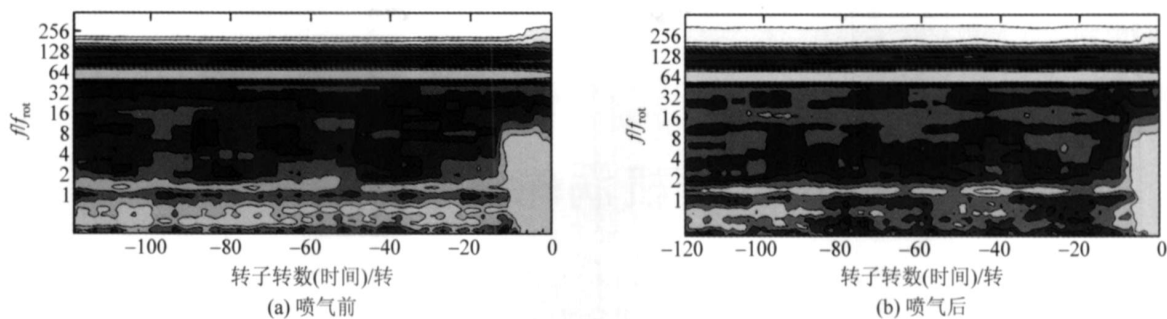


图 7 有无喷气工况下 P02_1 X30 畸变工况 GWS 比较

Fig. 7 Comparison of GWS between with and without injection (P02_1 X30)

3 结 论

本文通过实施叶顶微喷气,拓宽了旋转畸变条件下压气机的失稳裕度,并利用叶顶压力流场及微喷气能够扩稳的原因,得到主要结论如下:

1) 旋转畸变条件下,压气机失稳提前的原因在于畸变区域诱发叶顶泄漏流前缘溢出,形成初始扰动;

2) 实施叶顶微喷气能够拓宽进口畸变条件下压气机的失稳裕度;

3) 叶顶微喷气能够改善畸变影响区的流场,表现为抑制泄漏流前移及溢出。

本文实验结果说明叶顶微喷气不失为提高压气机抗畸变能力的有效方案之一。

参考文献:

- [1] Reid C. The response of axial compressors to intake flow distortion[J]. ASME Paper 69-GT-29, 1969.
- [2] Longley J P, Shin H W, Plumley R E, et al. Effects of rotating inlet distortion on multistage compressor stability[J]. ASME J. Turbomachinery, 1996, 118: 181-188.
- [3] Peters T, Fottner L. Effects of co- and counter-rotating inlet distortions on a 5-stage HP-compressor[R]. ASME Paper 2002-30395.
- [4] 顾诵芬. 新一代歼击机的发展及其对动力的要求[R]. 北京: 香山科学会议第 119 次学术讨论会, 1999.
- GU Songfen. The development of new generation fighter

plane and its requirement for power[R]. Beijing: Xiangshan Science Conference, 119th Session, 1999. (in Chinese)

- [5] NIE Chaoqun, XU Gang, CHENG Xiaobin, et al. Micro air injection and its unsteady response in a low-speed axial compressor[J]. ASME J. Turbomachinery, 2002, 124 (4): 572-579.
- [6] 徐纲, 聂超群, 黄伟光, 等. 低速压气机顶部微量喷气控制失速机理的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2004, 25 (1): 37-40.
- XU Gang, NIE Chaoqun, HUANG Weiguang, et al. Numerical simulation of micro injection in a low-speed axial compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25 (1): 37-40. (in Chinese)
- [7] 童志庭. 轴流压气机中叶尖泄漏涡、失速先兆、叶尖微喷气非定常关联性的实验研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2006.
- TONG Zhiting. The interactive of unsteady mechanism between tip leakage vortex, stall inception and micro tip injection in low-speed axial compressor[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, 2006. (in Chinese)
- [8] 张靖焯, 林峰, 陈静宜, 等. 旋转畸变条件下轴流压气机叶顶间隙流非定常流场特征及与旋转失速的关联[J]. 工程热物理学报, 2008, 29 (3): 390-394.
- ZHANG Jingxuan, LIN Feng, CHEN Jingyi, et al. The unsteady features and role of tip clearance flow in distortion induced instability in an axial compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29 (3): 390-394. (in Chinese)