

文章编号:1000-8055(2012)11-2577-08

低速单级轴流压气机自引气扩稳实验

李继超^{1,2}, 刘 乐^{1,2}, 张宏伟^{1,2}, 童志庭², 林 峰², 聂超群²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100190;

2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190)

摘 要: 在一台低速单级轴流压气机上采用自引气-喷气方式进行了实验研究, 实验中分析比较了不同的引气方式对压气机失速裕度改善(SMI)以及对压气机效率的影响, 同时对不同自引气方式的扩稳机理进行了探讨. 实验结果表明: 自引气方式能够有效的改善压气机失速裕度, 并且能够略微提高压气机效率. 与传统的外部引气相比, 节省了外部引气所需要的外部空气压缩系统; 为自引气在实际压气机稳定性控制中的应用提供参考.

关 键 词: 轴流压气机; 自引气; 叶顶喷气; 功率谱密度; 均方根

中图分类号: V235; TK474

文献标志码: A

Experiment of self-recirculation tip injection in low speed single-stage compressor

LI Ji-chao^{1,2}, LIU Le^{1,2}, ZHANG Hong-wei^{1,2}, TONG Zhi-ting²,
LIN Feng², NIE Chao-qun²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Experiment of self-recirculation tip injection was performed. The effect of different air-entraining ways on the stall margin improvement (SMI) and efficiency were analyzed. The mechanism of stability range extension was also discussed. It is demonstrated that the self-recirculation tip injection can enhance the stall margin effectively, and can also increase the peak efficiency appreciably. Compared with the tip injection with external air source, the proposed method can save the auxiliary equipment which supplies the external air. The self-recirculation tip injection is simple and practical, and is of great value in many applications.

Key words: axial compressor; self-recirculation; tip injection;
power spectrum density (PSD); root mean square (RMS)

在压气机运行时, 稳定性是其一个重要的指标. 因此在压气机设计时, 必须留有一定的稳定裕度以确保其能安全稳定的运行, 这样压气机就不能运行在高压比, 低流量的工况点. 因此, 有必要

采取合理的主动和被动控制措施来拓宽其失稳裕度. 叶顶喷气作为一种常见的扩稳措施在国际上被广泛研究和运用. 1993 年剑桥大学的 Day^[1] 使用主动喷气的控制方法成功地延迟了多级轴流压

收稿日期: 2011-11-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121115.1028.026.html>

基金项目: 国家青年自然科学基金(51006099); 国家自然科学基金(51010007)

作者简介: 李继超(1984—), 男, 湖北仙桃人, 博士生, 主要研究方向为轴流压气机内部流动失稳控制.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

气机中旋转失速和喘振的发生,所用喷气量小于压气机总流量的 1%,但却使压气机的失稳裕度增加 4%。随后 1997 年麻省理工学院(MIT)的 Weigl^[2]和 Spakovszky 等^[3-4]同样采用主动喷气控制方法在跨声轴流压气机上进行了实验研究,实验中通过高频响动态传感器检测到长尺度扰动作为反馈信号,控制策略分别采用定常和非定常喷气手段。2006 年 Kefalakis 等^[5]通过改变脉动喷气的频率进行了主动控制实验研究,也取得了一定的扩稳效果。叶顶喷气在航空发动机上也有相关研究, Freeman 等^[6]在 VIPER 发动机上采用定常和可控自循环引气的方式实现了扩稳,实验结果表明:可控制自循环引气比定常放气的扩稳效果更好。Leinhos 等^[7]从外部高压压气机上引气到低压压气机上进行叶顶喷气,实验采用 5%的设计点流量时,实现了双重扩稳的目的。由于主动喷气对控制器和信号检测要求太高,在实际的燃气轮机中很难被采用,因此研究的重点又回归到被动喷气扩稳研究上。Suder 等^[8]研究了喷气速度和喷嘴周向布置对失速裕度提高的影响,研究结果表明:失速推迟的流动机制是增加了叶顶主流平均轴向速度,而且,定常喷气扩稳的原因是减小叶顶负载,从而减小堵塞。Nie 等^[9]在国内最早采用微喷气的方法在低速轴流压气机上实现扩稳研究。童志庭^[10]进行了叶尖泄漏涡,失速先兆,叶顶微喷气之间的关联性研究,从叶顶泄漏涡非定常性的角度解释了叶顶微喷气的扩稳机理。

上述学者均是采用外部喷气方式进行的扩稳实验研究,在进行叶顶喷气时需要提供外部喷气的高压气源,以及提供气源所需要的辅助设备,在实际的应用中也受到了各种限制。能否结合放气和引气的双重效果进行流动失稳控制?2004 年美国国家航空航天局(NASA)的 Strazisar 等^[11]在 Stage35 上进行了初步自引气数值计算和实验研究,采用 0.7%~1.3%的喷气量实现了 4%~6%的失速裕度改善。2011 年剑桥大学的 Weichert^[12]等在一台 2 级低速轴流压气机上进行了自引气实验研究,分析了在动叶顶部壁面不同引气位置以及不同喷气结构对失速裕度提高的影响,对动叶顶部引气位置进行了优化,并取得了 2%~4%的扩稳效果。

基于上述启发,本文在一台低速单级轴流压气机的静叶后周向布置不同的自引气-喷气机构进行了实验研究。首先,分析比较了不同自引气方式对失速裕度改善和压气机效率的影响,以及在

压气机节流过程中引气动量的变化和稳定性裕度提升之间的关系。然后,通过安装在壁面动态传感器进行壁面动态压力信号测量,并通过壁面压力谱,功率谱密度(PSD),以及均方根(RMS)对其扩稳机制进行了进一步探讨。

1 实验台介绍

1.1 实验台

实验是在 1 台低速单级轴流压气机上完成,压气机相关气动结构参数如表 1 所示。

表 1 实验台气动结构参数
Table 1 Structure parameters of the rig

参数	数值
设计转速/(r/min)	2 400
设计点流量/(kg/s)	3.5
动叶数	58
静叶数	60
轮毂比	0.75
顶部间隙(%顶部弦长)/%	1.9
通道外径/mm	500
动叶顶部弦长/mm	36.3

1.2 自引气机构布置

实验中考虑到实际的应用,将引气和喷气装置均安装在机匣壁面上,引气口和喷气口均与机匣壁面相平,不会对转子进口流场产生干扰,在周向布置 8 套自引气装置。如图 1 所示,引气口顺着来流方向,并与来流成一定的角度,在本文中为第一种自引气方式。其中安装在引气管道的质量流量计和压力变送器分别用来测量引气的流量和引气的压力。

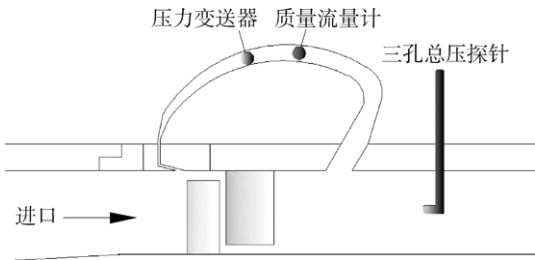


图 1 实验中自引气结构及安装位置
Fig. 1 Structure of the first self-recirculation

喷气口位于动叶叶尖前缘 2 mm 处,并与来流成 15°,根据文献[6],本文采用的喷嘴结构及

安装位置为抑制叶顶泄漏涡非定常性最佳位置。如图 2 所示,将引气道逆着来流方向,并在周向布置 8 套自引气机构,在本文中为第二种自引气方式。而同样将引气道逆着来流方向,在周向布置 4 套自引气机构,在本文中为第三种自引气方式。接下来将对这三种自引气方式和光壁的稳态和动态结果进行分析。

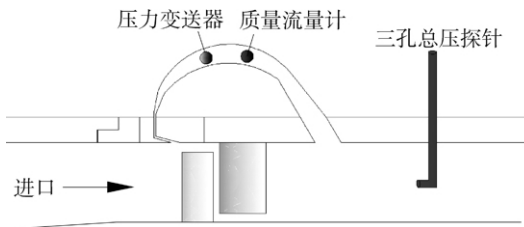


图 2 实验中第二种引气安装结构

Fig. 2 Structure of the second self-recirculation

实验中沿弦向布置了 8 个高频动态传感器,如图 3 所示,用来测量壁面动态压力。稳态测量进行了重复性实验,而且稳态测量的误差均小于 0.5%。

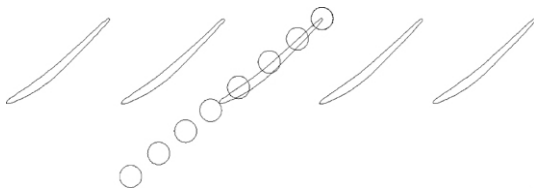


图 3 动态压力传感器布置

Fig. 3 Arrangement of dynamic pressure transducer

2 实验结果分析

2.1 不同自引气方式扩稳效果比较

由图 4 的实验结果可以看出,对于第一种自引气方式、第二种自引气方式以及第三种自引气方式同光壁相比,均可以取得一定的扩稳效果,而几种状态下特性线相互重合,说明这几种结构并未改变压气机的特性曲线而仅仅推迟了失速的发生。在实验中测得了各失速点的流量系数和压力系数来计算失速裕度,由于该压气机总压比比较低,在整个流量范围内均接近于 1,因此忽略总压比的影响,将失速裕度的改善(SMI,量符号记为 S_{mi})定义为

$$S_{mi} = \left(\frac{\varphi_s^{sw}}{\varphi_s^*} - 1 \right) \times 100\% \tag{1}$$

其中 φ_s^{sw} 为光壁失速点流量系数(sw 指光壁, s 是指失速), φ_s^* 为不同处理条件下的失速点流量系数。由此得到的失速裕度改善如表 2 所示。

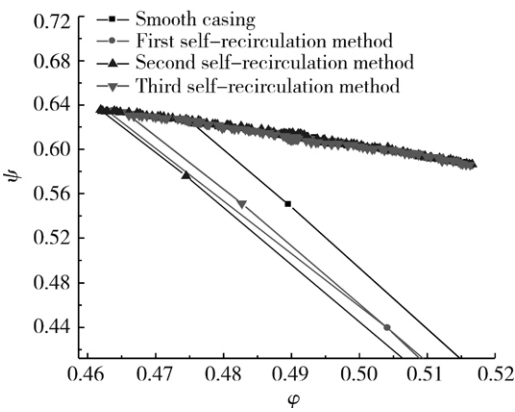


图 4 实验中自引气前后压升系数-流量系数特性线

Fig. 4 Characteristic line of different self-recirculation methods

表 2 各实验条件下的 SMI

Table 2 SMI of different self-recirculation methods

实验条件	光壁	第一种自引气方式	第二种自引气方式	第三种自引气方式
$S_{mi}/\%$	0	2.66	2.88	1.99

从表 2 中可以看出,第二种自引气方式的扩稳效果最好,相对于第一种自引气方式,唯一改变的是引气道的方向,扩稳效果好,说明喷气量要比第一种自引气方式要大,从引气结构上可以分析,采用第一种自引气方式时,进入引气管的气体会在引气管的左侧壁面区域回流,会形成阻塞区。图 5 为第一种引气方式引气管的数值模拟结果,图

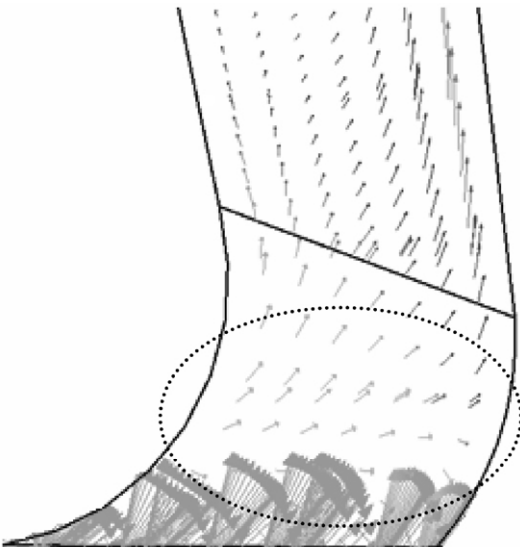


图 5 第一种引气方式引气管速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector of the first self-recirculation

中圆圈内部的速度方向可以看出,出现了回流现象.因此结合所得出的扩稳裕度可以看出其扩稳效果会不如第二种自引气方式.

图 6 为实验所测得的效率-流量系数的特性线,从图中可以看出,采用自引气机构之后,压气机的效率不但没有下降,反而得到了微弱的提升,峰值效率大约提高了 1%.

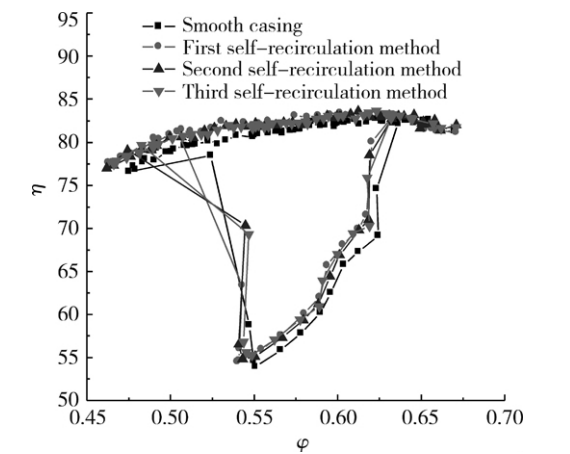


图 6 自引气前后压气机效率-流量系数特性线

Fig. 6 Characteristic line of efficiency-flow coefficient

从图 7 中可以看出,3 种不同自引气方式的喷气流量随着压气机流量系数的变化规律.在压气机节流过程中,喷气的流量会缓慢增加,和定常喷气相比,自引气相当于非定常喷气.从图中可以看出,第二种自引气方式的喷气量在节流过程略高于第一种自引气方式,在近失速点时,喷气量约为压气机设计点流量的 0.16%.而第三种自引气

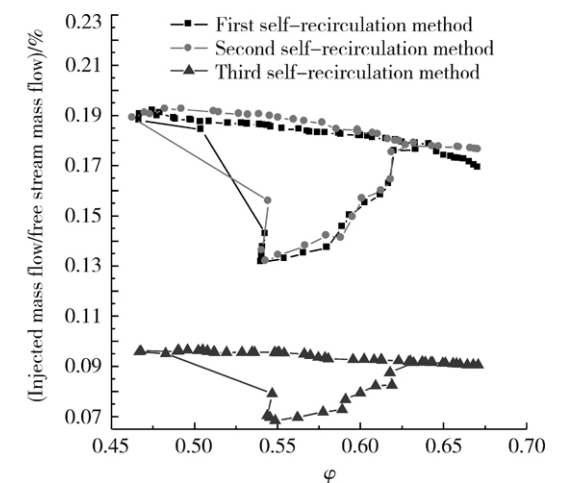


图 7 不同引气方式喷气流量随流量系数的变化

Fig. 7 Changing of injected mass flow ratio

方式,在近失速点时的喷气量约为压气机设计点流量的 0.08%.三种情况的喷气量均相当于文献[6]中微喷气效果.

从图 8 中可以看出,喷气动量/主流动量比在节流过程中,随着流量系数的减小,上升的趋势更加明显,第二种自引气方式的喷气动量比增大的趋势明显要高于第一种,也说明喷气动量比可以作为扩稳能力的衡量指标.

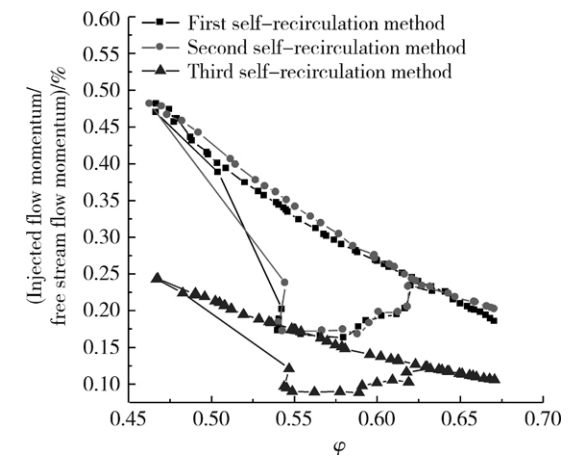


图 8 不同引气方式喷气/主流动量比随流量系数的变化

Fig. 8 Changing of injected flow momentum/free stream momentum with different self-recirculation methods

2.2 壁面动态压力信号分析

根据文献[10],叶顶喷气主要作用于叶尖泄漏涡,并通过抑制泄漏流非定常性进一步实现扩稳的目的.因此,本文同样在机匣壁面布置了动态传感器进行壁面压力测量,并分别采用功率谱密度、均方根(RMS)进行分析.从图 9 的结果可以看出,采用 3 种自引气方式之后,均在一定程度上抑制了特征频带的幅值.图中 BFP 代表带通滤波器.根据文献[10],图中的特征频带即为泄漏流非定常性对应的频率.而且从图中可以看出,第二种自引气方式对特征频带幅值的抑制效果最好,即减弱了泄漏流的非定常性.

图 10 为光壁近失速点时采用通道锁相之后获得的一部分通道的壁面动态压力谱,从图中可以看出,在某些通道,泄漏流出现了横跨通道到达下一个叶片的压力面,更加垂直于主流,即泄漏流与主流的交界面向前移,最终会导致失速先兆的产生.

图 11~图 13 为光壁近失速点时 3 种不同自

引气方式的壁面动态压力谱,从图中可以看出,相比光壁近失速点时的壁面动态压力谱,3 种自引气方式均能够有效的改变泄漏流的轨迹,将泄漏流与主流的交界面向通道末端推进.其中第二种自引气方式的壁面动态压力谱的结果中,对泄漏流轨迹改变最为明显,基本没有出现横跨通道的现象.这也说明了第二种自引气方式扩稳效果最好,原因在于其对泄漏流轨迹的改变最为明显,从而推迟失速的发生.为了能更加清晰的反映对泄漏

流的抑制效果,接下来采用 RMS(均方根)的方法对 3 种情况和光壁的动态压力信号进行了研究.

图 14 为壁面动态压力信号的 RMS 分析结果,从图中可以看出,光壁近失速点时,叶片压力面处的压力脉动急剧增加,这说明此时叶顶泄漏涡非定常性增强,最终会诱发失速.而采用自引气方式之后,可以看出,在一定程度上能够抑制泄漏流的非定常性,其中第二种自引气方式的效果最好.

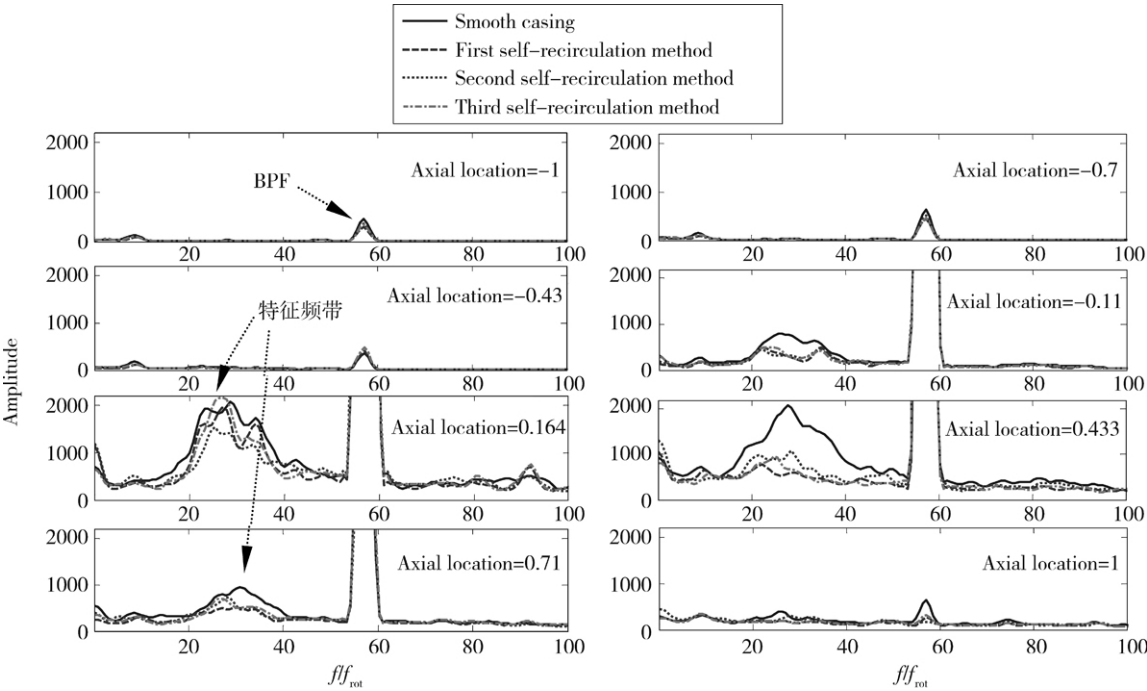


图 9 不同引气方式和光壁机匣时壁面动态压力的功率谱密度

Fig. 9 Power spectrum density(PSD) with different self-recirculation methods

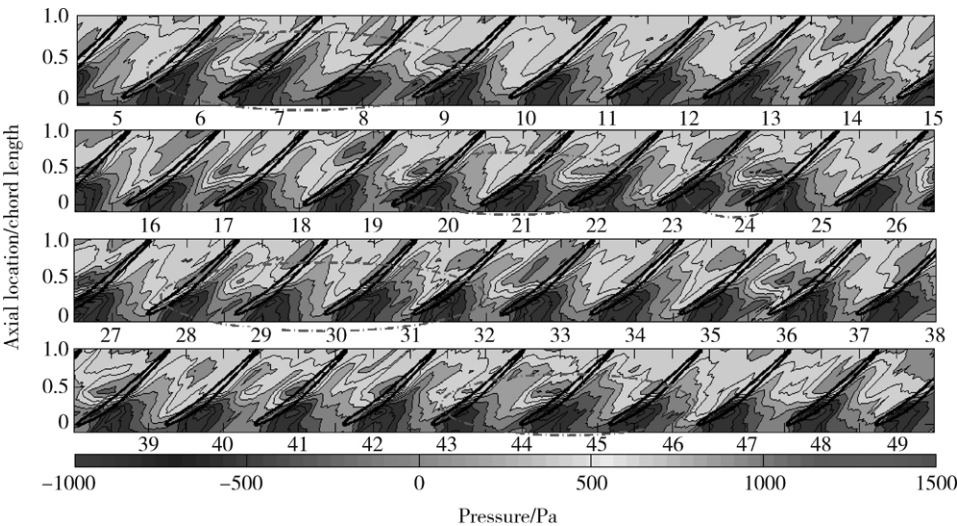


图 10 光壁条件下壁面动态压力谱

Fig. 10 Pressure contours of smooth casing

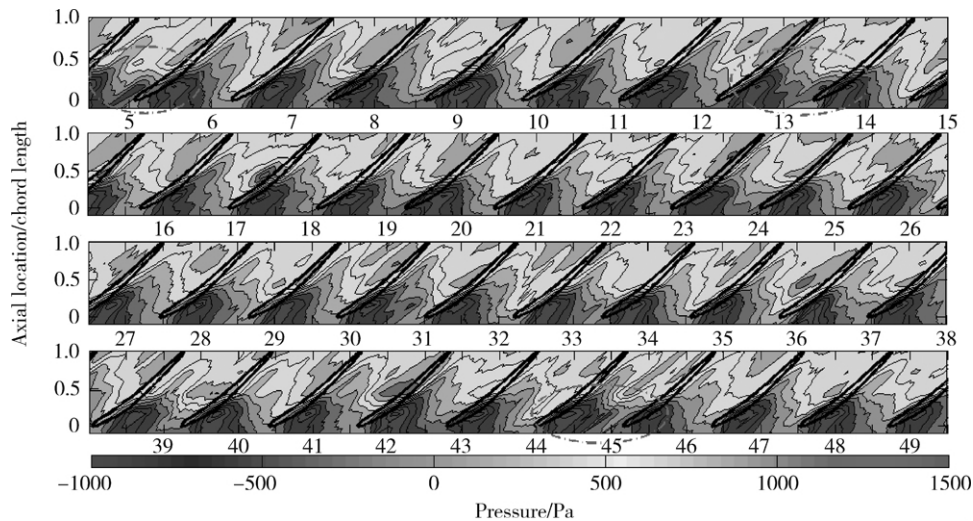


图 11 第一种自引气方式条件下壁面动态压力谱

Fig. 11 Pressure contours with the first self-recirculation method

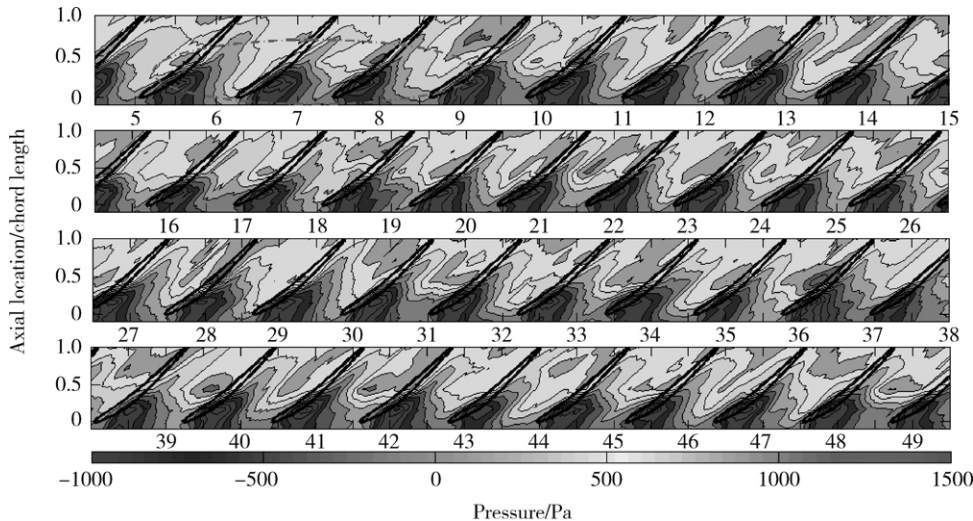


图 12 第二种自引气方式条件下壁面动态压力谱

Fig. 12 Pressure contours with the second self-recirculation method

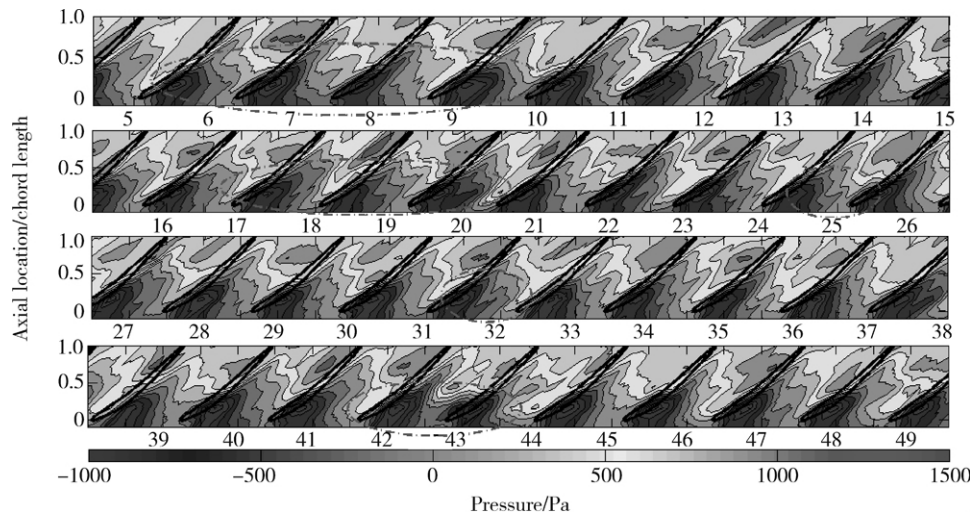


图 13 第三种自引气方式条件下壁面动态压力谱

Fig. 13 Pressure contours with the third self-recirculation method

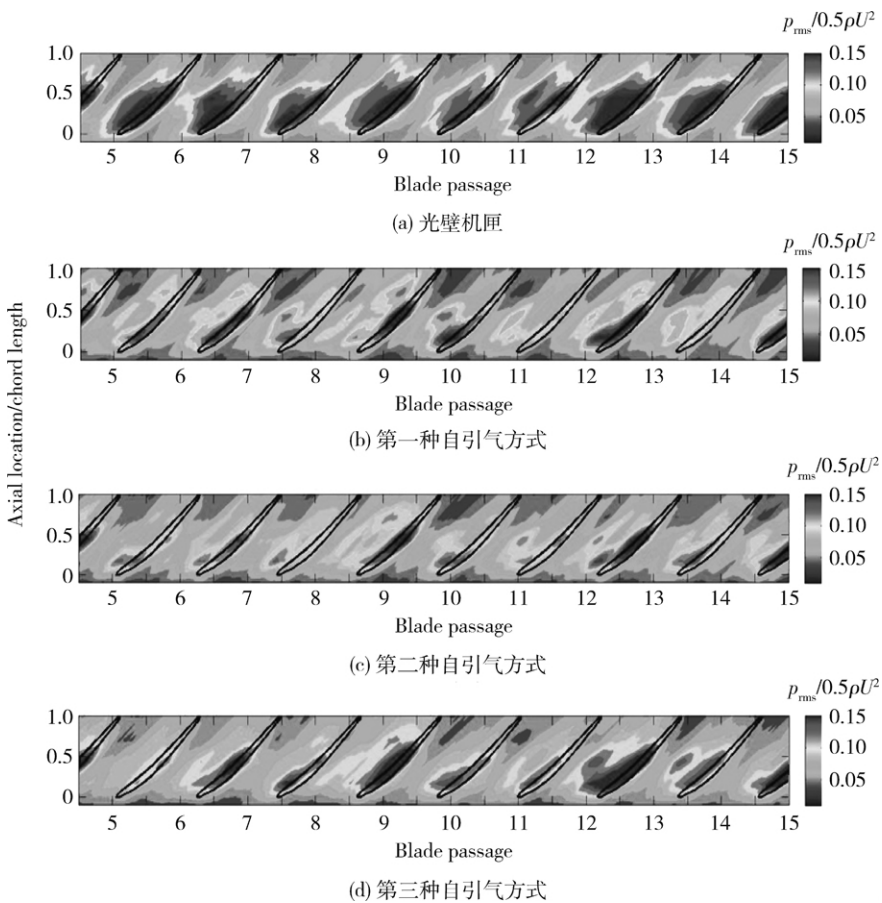


图 14 光壁机匣和不同自引气方式的 RMS
Fig. 14 Root mean square with different self-recirculation method

3 结 论

本文在一台低速单级轴流压气机上进行了自引气扩稳实验研究,实验中分析比较了 3 种不同自引气方式扩稳效果及对效率的影响,并对其扩稳机理进行了探讨.得出了以下几点结论:

- 1) 自引气相当于非定常喷气,引气机构简单可靠,节省了提供外部气源的附加设备及能量.能够扩稳的同时,对效率的影响也很小,甚至能够略微提高效率.因为实验中很难测得能够合理解释效率不受影响甚至略提高的相关参数.也需要进行数值计算进行进一步的解释.
- 2) 采用 3 种自引气方式,第二种自引气方式的扩稳效果最好.对自引气喷气扩稳机构在实际压气机中的应用起到了一定的设计依据.
- 3) 三种引气方式均能在一定程度上减弱泄漏涡非定常性的强度,自引气扩稳的机理仍然是改变泄漏流的轨迹.

参考文献:

[1] Day I J. Active suppression of rotating stall and surge in axial compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115(1):40-47.
[2] Weigl H J, Paduano J D, Frechette L G, et al. Active stabilization of rotating stall in a transonic single stage axial compressor[R]. ASME Paper 1997-GT-411, 1997.
[3] Spakovszky Z S, Weigl H J, Paduano J D, et al. Rotating stall control in a high-speed stage with inlet distortion: Part I radial distortion[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(3):510-516.
[4] Spakovszky Z S, Van Schalkwyk C M, Weigl H J, et al. Rotating stall control in a high speed stage with inlet distortion; Part II circumferential distortion[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(3):517-524.
[5] Kefalakis M, Papailiou K D. Detailed measurements on an axial compressor stage with application of discrete tip injection for increasing the surge margin[R]. ECT Paper 2001-044, 2001.
[6] Freeman C, Wilson A G, Day I J, et al. Experiments in active control of stall on an aeroengine gas turbine[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4):637-647.
[7] Leinhos D C, Scheidler S G, Fottner L, et al. Experiments in active control of a twin-spool turbofan engine [R]. ASME Paper 2002-GT-30002, 2002.
[8] Suder K L, Hathaway M D, Thorp S A, et al. Compressor stability enhancement using discrete tip injection[J]. Jour-

nal of Turbomachinery,2001,123(1):14-23.

[9] Nie C,Xu G,Cheng X,et al. Micro air injection and its unsteady response in a low-speed axial compressor[J]. Journal of Turbomachinery,2002,124(4):572-579.

[10] 童志庭. 轴流压气机中叶尖泄漏涡、失速先兆、叶间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 unsteady mechanism between tip leakage vortex, stall inception and micro tip injection in low-speed axial compressor[D]. Beijing: Institute of Thermophysics, Chinese Academy of Science, 2006. (in Chinese)

[11] Strazisar A J, Bright M M, Thorp S, et al. Compressor stall control through endwall recirculation[R]. ASME Paper 2004-GT-54295, 2004.

[12] Weichert S, Day I, Chris F. Self-regulation casing treatment for axial compressor stability enhancement [R]. ASME Paper 2011-GT-46042, 2011.