

轴流压气机叶顶喷气控制实验研究

李继超^{1, 2, *}, 林峰^{1, 2}, 童志庭^{1, 2}, 聂超群^{1, 2}

1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190
2. 中国科学院先进能源动力重点实验室, 北京 100190

摘要: 叶顶喷气已被证实能够有效拓宽轴流压气机的稳定工作范围。基于此, 针对轴流压气机流动失稳控制, 以叶顶喷气作为控制手段, 采用比例电磁阀实现喷气量的实时可调, 充分利用从微喷气到大喷气的扩稳能力。通过设计相应的 DSP(Digital Signal Processing) 控制器, 实现信号采集、算法分析、控制信号输出的功能。并结合提出的互相关分析检测前失速先兆信号的方法, 成功地实现了从动态信号检测到叶顶喷气的反馈控制。实验结果表明: 基于比例电磁阀和 DSP 控制器的叶顶喷气控制, 不仅在扩稳效果上和传统的定常喷气相当, 而且能够节省大量的喷气能量, 具有良好的应用前景。

关键词: 压气机; 叶顶喷气; 比例电磁阀; DSP 控制器; 互相关分析

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6893(2013)11-2464-08

轴流风扇/压气机内部流动失稳主动控制技术的实现并走向应用一直是专家们所追求的目标, 也是工业界和航空领域关注和迫切需要解决的难题。因此, 国际上不少学者对其开展了相应的研究工作。1989年, Epstein等^[1]提出的基于M-G模型的主动控制概念, 使得学者们开始对提高压气机稳定性的主动控制技术进行探索。Paduano等^[2]在M-G模型的基础上提出了基于系统辨识的可调导叶主动控制技术, 并进行了实验研究。但由于早期在检测手段与控制手段上受到限制, 使得主动控制技术很难实施。1993年, 英国剑桥大学的Day^[3]认为叶顶喷气能够抑制失速先兆的起始, 在此基础上设计了相应的主动控制实验, 并取得了4%的扩稳裕度。1997年, 美国麻省理工学院的Weigl等^[4]提出了基于反馈抑制波的主动控制技术, 并采用叶顶喷气产生与失速先兆

波相位相反的控制波来抑制先兆的发展。随后, Spakovszky等^[5-6]采用主动喷气控制方法在跨声速轴流压气机上进行了深入的实验研究, 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。由于早期对叶顶喷气的扩稳机理不是很明确, 仅仅是从抑制扰动的角度施加叶顶喷气控制手段, 这就会使其控制效果受到限制。而且传统的失速先兆^[7-8]具有渐进性和突发性耦合的特点, 很难准确/及时地检测。另外需要能够产生高频控制波的电磁阀, 这些因素一直阻碍着主动控制技术的发展。

2001年以来, Tahara等^[9]、Dhingra等^[10]、Christensen等^[11]以及李琳和聂超群^[12]对压气机的壁面动态压力扰动信号进行了检测分析, 分别避开对失速先兆的直接检测, 而通过检测失速

收稿日期: 2013-01-04; 退修日期: 2013-01-27; 录用日期: 2013-02-26; 网络出版时间: 2013-03-06 16:58

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130306.1658.001.html

基金项目: 国家自然科学基金(51010007, 51176188, 51006099)

* 通讯作者. Tel.: 010-82543072 E-mail: lijichao@iet.cn

引用格式: Li J C, Lin F, Tong Z T, et al. Experimental investigation of control with tip air injection in axial flow compressor. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(11): 2464-2471. 李继超, 林峰, 童志庭, 等. 轴流压气机叶顶喷气控制实验研究. 航空学报, 2013, 34(11): 2464-2471.

先兆产生之前的壁面压力锯齿波周期性的破坏程度,作为反馈信号的判断依据。并在此基础上提出了通过检测“前失速先兆”的控制策略,这也使得对流动失稳控制中反馈信号的检测时间在一定程度上有所提前,为作动机构控制方案的实施预留了更长的动态响应时间。而且 Tahara 和 Tong 对基于前失速先兆检测的主动控制技术也开展了相应的工作:Tahara 通过控制安装在轮毂上蝶阀的开关来推迟失速的产生。Tong 等^[13]则采用微喷气作为控制手段,通过 DSP (Digital Signal Processing) 控制器将数据现代处理和步骤进行固化,进而控制电磁阀的开关,成功地推迟了失速的发生,提高了低速轴流压气机的失速裕度。尽管目前提出的通过检测前失速先兆取代失速先兆的方法在反馈信号检测上取得了很大的进步,信号检测也能够给控制器及作动机构留有足够的响应时间,但是目前基于前失速先兆检测的主动控制技术也存在不足:首先,执行机构均为开关阀,即通过检测到自相关系数的变化,来判断阀门的开关,从而推迟压气机失速的发生。这样对阀门开关的频率要求很高,而且阀门频繁的开关也会影响其寿命。另外,Tong 等前期采用的微喷气控制手段,虽然取得了一定的扩稳效果,但是根据 Suder 等^[14]的研究结果,微量喷气在跨声速压气机上的扩稳效果并不理想,而且单纯地控制喷气阀的开关来拓宽流动失稳裕度具有一定的局限性。

另外,文献[15]于 2012 年提出了采用互相关分析对前失速先兆信号进行检测以及对互相关系数变化与叶顶喷气之间的关系进行了相应的实验研究。文献[15]和文献[16]分别对前失速先兆信号检测与叶顶间隙泄漏流非正常性之间的关联性进行了详细分析,即叶顶间隙泄漏流非正常性出现时,自相关系数/互相关系数则会呈现明显下降的趋势,这就说明了前失速先兆信号检测与压气机叶顶端区流动特性之间存在关系。而且杜娟^[17]在多台跨声速压气机上通过数值计算结合实验研究验证了叶顶间隙泄漏流非正常性存在的普遍性。这也进一步说明目前对前失速先兆检测的方法将有可能适用于高速压气机稳定性控制中反馈信号的检测,且具有一定的应用前景。

因此,本文以比例电磁阀作为执行机构,并通过设计相应的 DSP 控制器,实现根据实际需要实

时调节喷气量的大小,从兼顾效率和扩稳裕度的角度充分利用从微喷气到大喷气的不同扩稳机制^[18]。在信号检测方面,采用互相关分析对前失速先兆检测,并以此作为控制器的反馈输入信号。随着流量系数的减小,通过判断互相关系数的变化趋势,自适应控制比例电磁阀的开度,调节喷气量的大小,实现低速轴流压气机稳定裕度的拓宽。

1 实验台参数及测量手段

实验在一台低速单转子轴流压气机上完成,压气机的气动结构参数如表 1 所示。在压气机机匣壁面对称安装径向喷气角度为 15° 的喷嘴,如图 1 所示,同时在机匣周向对称布置 4 个高频响 Kulite 动态压力传感器,用以检测机匣壁面非定常压力波动。

表 1 压气机的气动结构参数

Table 1 Aerodynamic and structural parameters of compressor

Parameter	Value
Design speed/($r \cdot \min^{-1}$)	2 400
Rotor blade number	58
Outer diameter/mm	500
Design mass flow rate/($kg \cdot s^{-1}$)	2.9
Rotor tip chord/mm	36.3
Rotor tip stagger angle/($^\circ$)	39.2
Hub-tip ratio	0.75

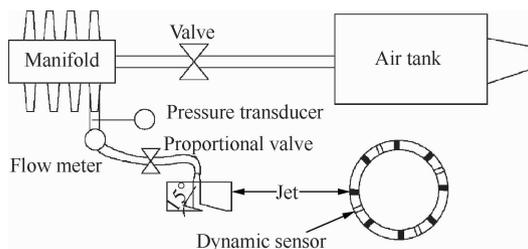


图 1 喷气系统及传感器布置图

Fig. 1 Schematic diagram of jet and sensor arrangement

2 控制器的设计及功能介绍

整个叶顶喷气控制系统的方框图如图 2 所示,主要包括控制对象——轴流压气机,DSP 控制器,执行机构——比例电磁阀。其具体的工作

流程包括:首先采集压气机进出口气动参数以及壁面动态压力信号,通过控制器的 A/D 采集端口输入到 DSP;然后,在 CPU 中进行算法分析,通过 D/A 端口输出控制信号;最后,比例电磁阀的驱动器根据接收的控制信号来作动比例电磁阀的开度,进而调节喷气量的大小,实现扩稳的目的。控制系统的方框图如图 3 所示。

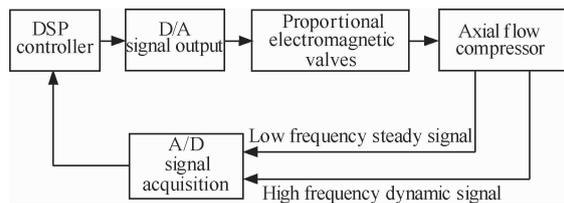


图 2 控制系统的方框图

Fig. 2 Block-diagram of control system

在控制器设计过程中,需要同时考虑以下 3 个因素:①稳态数据采集,压气机进出口气动参数为稳态采集,对采集的频响要求比较低,仅需要保证采集数据的准确性和精度;②动态数据采集,压气机机匣壁面动态数据采集需要尽可能地捕捉叶片扫略时叶片通道的详细流场,并需要保证足够的采样频率;③算法执行及控制信号输出。因此,在设计时单独采用一块 DSP 芯片对动态数据进行采集,单通道采样频率为 80 kHz;而另外一块 DSP 芯片则需完成稳态数据采集和控制信号的处理。如图 3 所示,进行动态数据采集的 DSP 完成高速采集和算法分析之后,首先将信号传输到主 DSP 芯片中。然后主 DSP 芯片会发出控制信号指令,最后通过驱动器调节比例电磁阀的开度。

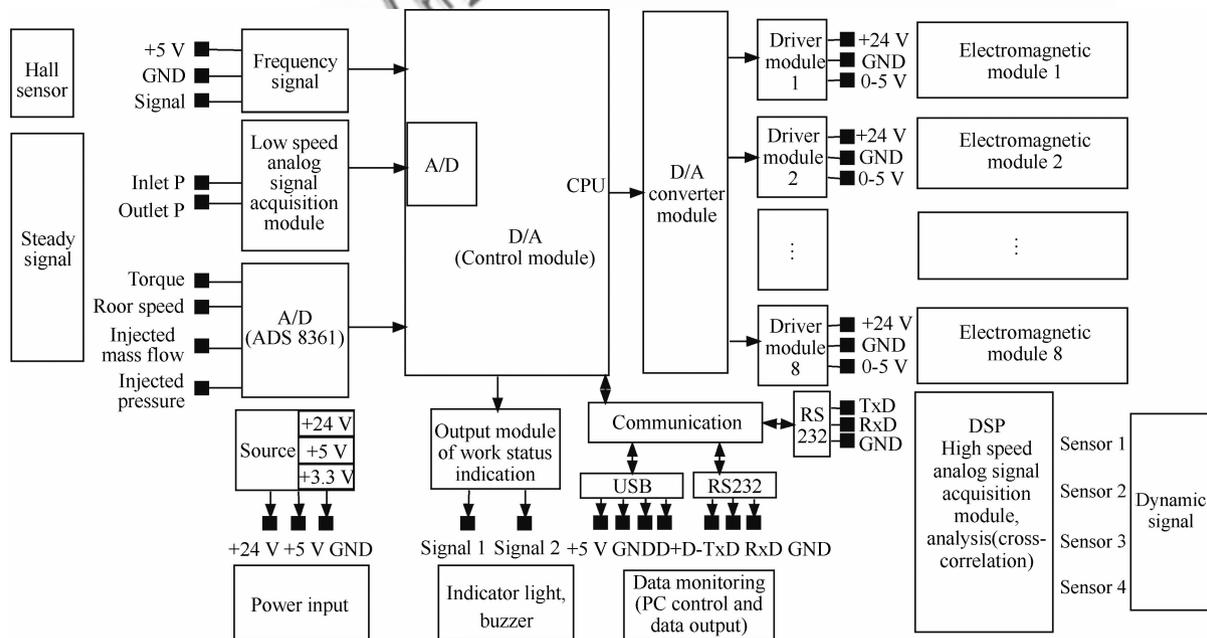


图 3 控制器的结构图

Fig. 3 Structural chart of controller

根据采用的比例电磁阀及相应的 DSP 控制器形成了如图 4 所示的整个叶顶喷气控制系统。实验中,为了方便程序的实时修改和调试,以及数据的离线分析,采用上位机对 DSP 控制器进行控制和调试,以及对动态数据和稳态数据进行采集

和存储。

3 互相关分析检测方法

控制措施能取得扩稳效果的关键,除了 DSP 控制器的设计,还需要采取合理有效的方法对反

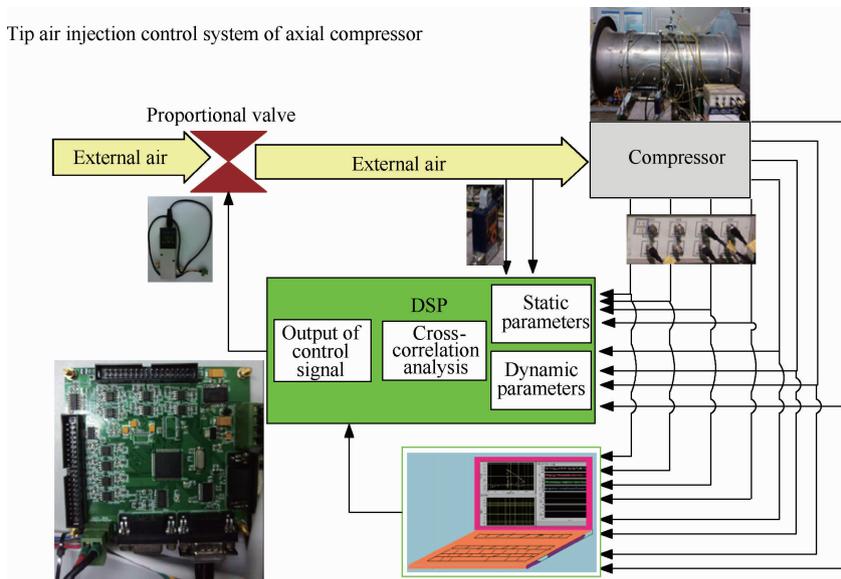


图4 控制系统的流程图

Fig. 4 Flow chart of control system

馈信号进行检测和控制方式的选择。为了能够尽早检测到前失速先兆——叶顶间隙泄漏流非正常性,采用互相关分析方法对前失速先兆进行检测分析。2011年,文献[19]提出了采用互相关分析对失速信号进行检测,并提出了基于互相关检测方法的控制策略。遗憾的是笔者对反馈信号的检测仍然是基于失速先兆的信号分析。虽然比传统的通过检测失速先兆频率和幅值的方法,在扰动信号的捕捉时间上提前了大约3 s,但是仍然无法应用于实际压气机流动失稳控制中。而对于前失速先兆信号的检测,早期主要是Tahara, Dhingra, Chritensen和Tong等^[9-11,13]提出的自相关分析方法。2012年,文献[15]对互相关分析检测前失速先兆的可行性进行了探讨和验证,并得出互相关分析能够及时地检测到前失速先兆信号的产生。相比自相关分析,其具有以下优点:①能够同时捕捉多点扰动的存在,这样避免了扰动产生的随机性;②数据在线处理上能够实时处理,避免了锁相和延时处理。当然由于算法简单及扰动信号检测远离失速点,因此明显好于传统失速先兆检测方法——时域分析和小波分析等。其具体的公式为

$$R_{p(X)p(Y)}(n) = \frac{\sum_{i=n-m}^n p(X)_i p(Y)_i}{\sqrt{\sum_{i=n-m}^n p(X)_i^2} \sqrt{\sum_{i=n-m}^n p(Y)_i^2}} \quad (1)$$

式中: R 为互相关系数; p 为压力离散形式; n 为采样点个数; m 为互相关分析数据点的个数。

图5给出了不同流量系数 ϕ 工况下,周向对称布置动态传感器测得的壁面动态压力信号的互相关系数的变化。从图中虽然能够看出,随着流

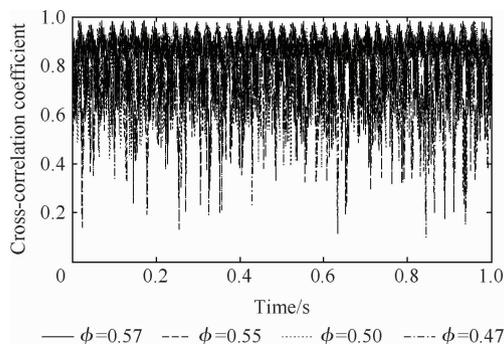


图5 不同流量系数下互相关系数的变化

Fig. 5 Variation of cross-correlation coefficient under different flow coefficients

量系数的减小互相关系数整体的变化趋势,但是由于互相关系数的随机跳动性,无法明确区分随流量系数的变化,互相关系数值的变化。因此,接下来将采用概率统计分布的方式,对 1 s 内的互相关系数进行统计分布,从而就能够明确区分随着流量系数的变化,概率统计分布线的变化,并以此作为互相关系数变化的判断依据。

图 6 为图 5 中互相关系数值的概率统计分布,概率统计分布公式如下:

$$F(X) = P(X < x) \quad (2)$$

式中: X 为随机变量; x 为任意指定权值; F 为概率分布值。

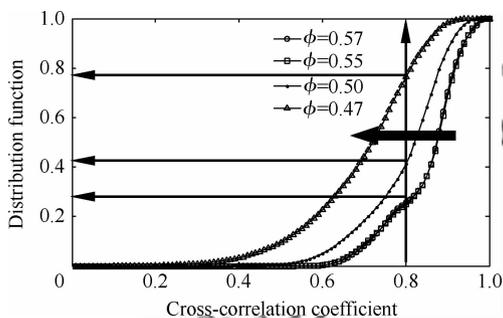


图 6 互相关系数的概率统计分布

Fig. 6 Probability statistical distribution of cross-correlation coefficient

从图 6 中可以清晰地看出,随着流量系数的减小,概率统计分布线是逐渐向左移的,这说明互相关系数低于某一指定值的概率随着流量系数的减小而逐渐增加,也进一步说明互相关系数在逐渐减小。如图 6 中箭头所示,选取了 $x=0.8$ 进行概率分析,可以看出:在大流量工况时,互相关系数低于 0.8 的概率约为 0.26;而在小流量工况时,互相关系数低于 0.8 的概率则增大到 0.42。随着流量系数进一步减小到近失速点时,互相关系数低于 0.8 的概率进一步增大到 0.76。这充分说明了随着流量系数的减小,互相关系数是逐渐减小的,特别是靠近失速点时,互相关系数会发生很明显的变化。因此互相关系数可以作为反馈信号检测手段来对前失速先兆进行检测。接下来将采用互相关系数对壁面动态压力扰动信号进行检测,并通过比较互相关系数的变化作为控制器作为判断依据。

4 实验结果分析

Tong 等^[13]采用基于自相关分析检测和开关阀的叶顶喷气控制技术应用在一台低速轴流压气机上,并取得了一定的扩稳效果。为了比较分析,在实验中分别选取了定常喷气,开关阀(检测到互相关系数小于某一设定值(0.8)之后,阀门会开启进行喷气;当互相关系数大于等于某一设定值之后,阀门会关闭)和比例阀(根据对互相关系数变化的判断,阀门会逐渐开启,直到最大开度状态)控制进行实验研究,并测得了压气机特性线和喷气量的变化。图 7 为不同喷气方式下,压气机特性线的变化。图中: φ 为压气机的流量系数; ψ 为压气机的压升系数。根据文献[18]对叶顶喷气扩稳机理实验研究的结果,当喷气量大于一定值之后,压气机的扩稳裕度会出现下降的趋势,因此实验中选取的定常喷气、开关阀、比例阀的最大喷气量大小为主流进口流量的 1.18%。由于所采用的喷气量相对于主流而言非常小,在流量系数计算时通过测量压气机进出口静压、总压得到。从图 7 中可以看出:开关阀虽然也能够扩稳,但是扩稳能力极其有限。定常喷气具有很好的扩稳能力,其扩稳裕度能够达到 44.2%。而采用比例电磁阀进行控制时,可以发现比例电磁阀的扩稳效果和定常喷气的扩稳相当。但是由于在实际应用中采用定常喷气时,要么从大流量工况开始喷气阀门就一直处于开启状态,要么在小流量或者近失速工况时喷气阀门就得处于开启状态。相比定常喷气,采用

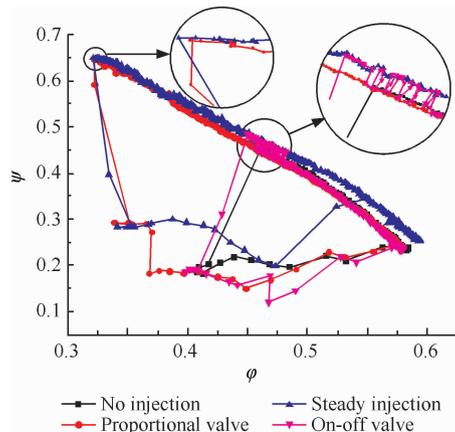
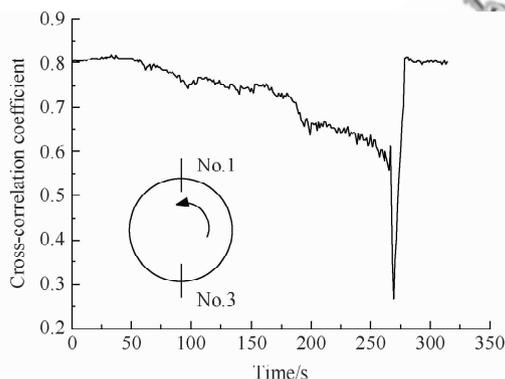


图 7 不同喷气方式下压气机的特性线

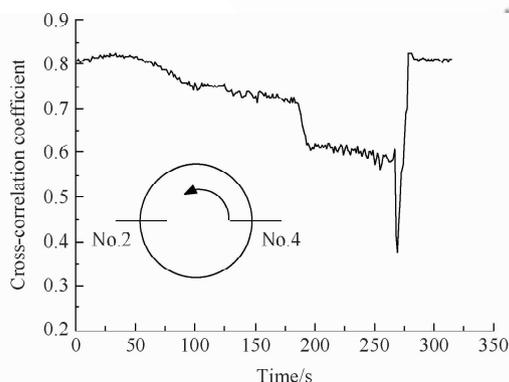
Fig. 7 Characteristic curve of compressor under different injection ways

比例阀进行调节之后,随着节流阀的关闭,喷气阀会根据控制器对检测信号的判断而逐渐开启,这样会节省大量的喷气能力。

在机匣壁面对称布置两组动态压力传感器之后,所测得的壁面动态压力信号互相关系数的变化如图 8 所示。实验中选取的互相关系数的阈值为 0.8,即当检测到互相关系数小于等于 0.8 时,DSP 控制器开始启动程序。通过比较判断互相关系数的变化趋势,调节比例阀的开度。文献 [15]对互相关分析检测前失速先兆及叶顶喷气对互相关系数的影响进行了详细地分析,得出了叶顶喷气能够提高机匣壁面动态压力信号的互相关系数。从图 8 中可以看出,在叶顶喷气控制过程中,互相关系数呈缓慢下降的趋势,直到失速发生之后,互相关系数会急剧下降。



(a) Variation of cross-correlation coefficient between No.1 and No.3



(b) Variation of cross-correlation coefficient between No.2 and No.4

图 8 对称布置传感器互相关系数的变化

Fig. 8 Variation of cross-correlation coefficient between the symmetrically arranged sensors

图 9 为不同喷气方式下所需喷气量的变化。从图中可以看出,开关阀的扩稳能力有限,使得其

对喷气量的需求无法与比例电磁阀控制和定常喷气进行比较。而图中网格区域所示为采用比例阀之后,在节流过程中所需的喷气量,和定常喷气相比,其所需喷气量明显不足定常喷气的 1/3。因此可以得出,基于比例阀结合 DSP 控制器的叶顶喷气控制方法不仅具有很强的扩稳能力,还能节省大量的喷气能量,具有良好的经济效益和实用价值。

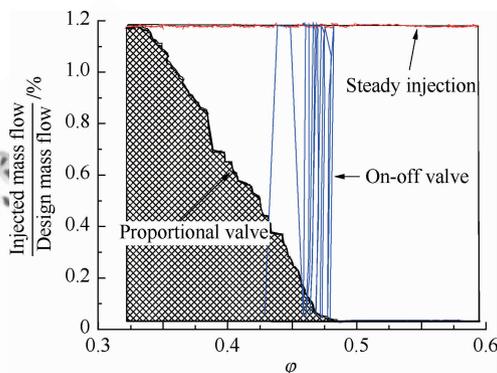


图 9 不同喷气控制方式下喷气量的变化

Fig. 9 Variation of injected mass flow under different injection ways

5 结论

本文选取了比例电磁阀作为调控机构,结合互相关分析反馈信号检测方法,并设计了相应的 DSP 控制器,在一台低速轴流压气机上进行了叶顶喷气控制实验研究。实验中比较了不同喷气方式时的扩稳效果和喷气量的需求,得出了以下几点结论:

1) 设计的 DSP 控制器能够有效地采集高频动态数据,准确检测到对称布置传感器的互相关系数的变化,以及及时调节比例电磁阀的开度。

2) 比例电磁阀结合 DSP 控制能够有效拓宽压气机的流动失稳裕度,提高大约 44.2% 的稳定裕度,和定常喷气的扩稳效果相当,具有广阔的应用前景。

3) 和定常喷气相比,比例电磁阀结合 DSP 控制能够节省大量的喷气量。在相同的扩稳裕度条件下,所需要的喷气量不足定常喷气的 1/3,具有良好的经济性。

由于本文主要关注的是低速轴流压气机稳定
© 航空学报编辑部 http://hkxb.buaa.edu.cn

性提高方面的研究:信号检测、控制器设计及调控手段的实现。虽然稳定性和效率是压气机性能不可或缺的指标,但因本文所采用的喷气量比较小,并未关注压气机效率变化,特别是采用比例阀控制之后,压气机的性能基本没有变化。根据扭矩效率公式可知,在其他参数基本不变的前提下,效率仅取决于压气机进口质量流量,而进口质量流量变化非常小,因此对效率的影响也很小。另外从低速走向高速也是目前的发展趋势之一。这些将在后续的工作中展开研究。

参 考 文 献

- [1] Epstein A H, Ffowcs Williams J E, Greitzer E M. Active suppression of aerodynamic instabilities in turbomachines. *Journal of Propulsion and Power*, 1989, 5(2): 204-211.
- [2] Paduano J D, Epstein A H, Valavani L, et al. Active control of rotating stall in a low-speed axial compressor. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1993, 115(1): 48-56.
- [3] Day I J. Active suppression of rotating stall and surge in axial compressors. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1993, 115(1): 40-47.
- [4] Weigl H J, Paduano J D, Frechette L G, et al. Active stabilization of rotating stall and surge in a transonic single stage axial compressor. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(4): 625-636.
- [5] Spakovszky Z S, Weigl H J, Suder K L, et al. Rotating stall control in a high-speed stage with inlet distortion: Part I-Radial distortion. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1999, 121(3): 510-516.
- [6] 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. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1999, 121(3): 517-524.
- [7] McDougall N M, Cumpsty N A, Hynes T P. Stall inception in axial compressors. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1990, 112(1): 116-125.
- [8] Day I J. Stall inception in axial flow compressors. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1993, 115(1): 1-9.
- [9] Tahara N, Nakajima T, Kurosaki M, et al. Active stall control with practicable stall prediction system using auto-correlation. *AIAA-2001-3623*, 2001.
- [10] Dhingra M, Neumeier Y, Prasad J V R, et al. A stochastic model for a compressor stability measure. *ASME Paper, GT-2006-91182*, 2006.
- [11] Christensen D, Cantin P, Gutz D, et al. Development and demonstration of a stability management system for gas turbine engines. *ASME Paper, GT-2006-90324*, 2006.
- [12] Li L, Nie C Q. On-line measurement and stall control by DSP in single-stage axial compressor. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(5): 787-793. (in Chinese) 李琳, 聂超群. 轴流压气机旋转失速 DSP 在线控制方法. *航空学报*, 2009, 30(5): 787-793.
- [13] Tong Z T, Li L, Nie C Q, et al. Online stall control with the digital signal processing method in an axial compressor. *ASME Paper, GT-2009-59509*, 2009.
- [14] Suder K L, Hathaway M D, Thorp S A, et al. Compressor stability enhancement using discrete tip injection. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2001, 123(1): 14-23.
- [15] Li J C, Tong Z T, Nie C Q, et al. Detection and analysis of early stall warning base on cross-correlation. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(1): 28-36. (in Chinese) 李继超, 童志庭, 聂超群, 等. 基于互相关分析的前失速先兆检测分析. *航空学报*, 2013, 34(1): 28-36.
- [16] Li J C, Tong Z T, Lin F, et al. Experimental investigation of tip air injection base on detection mechanism of early stall warning. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(4): 573-577. (in Chinese) 李继超, 童志庭, 林峰, 等. 基于前失速先兆检测机理的叶顶喷气扩稳实验研究. *工程热物理学报*, 2012, 33(4): 573-577.
- [17] Du J. Investigation on the unsteady mechanism of tip leakage flow in transonic compressor/fan rotors. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, 2010. 杜娟. 跨音压气机/风扇转子叶顶泄漏流动的非定常机制研究, 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2010.
- [18] Li J C, Liu L, Tong Z T, et al. Experimental investigation of stability range extension mechanism with tip air injection in a low-speed axial compressor. *Asian Congress on Gas Turbines, ACGT-2012-1097*, 2012.
- [19] Pramod B S, John J, Pradeep A M. Active feedback control of stall in an axial flow fan under dynamic inflow distortion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, 35(6): 1135-1142.

作者简介:

李继超 男, 博士, 助理研究员。主要研究方向: 轴流风扇/压气机内部流动失稳控制, 信号分析测量研究。

Tel: 010-82543072

E-mail: lijichao@iet.cn

林峰 男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 非线性转子动力学, 压气机内部流动失稳机理研究, 压气机系统辨识与建模。

Tel: 010-82543089

E-mail: linfeng@iet.cn

童志庭 男, 博士, 副研究员。主要研究方向: 轴流压缩系统内部流动失稳机理及控制方法研究。

Tel: 010-82543147

E-mail: tongzhiting@iet.cn

聂超群 男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 压气机内部流动失稳机理, 非正常动态测试, 流动失稳控制技术研究。

Tel: 010-82543076

E-mail: ncq@iet.cn

Experimental Investigation of Control with Tip Air Injection in Axial Flow Compressor

LI Jichao^{1,2,*}, LIN Feng^{1,2}, TONG Zhiting^{1,2}, NIE Chaoqun^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Advanced Energy and Power, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Tip air injection is proven to be able to enhance effectively the stall margin in axial flow compressors. It is here selected as a control method, and a proportional electromagnetic valve is adopted to realize the real-time adjustment of injected mass flow, which can take full advantage of the stability enhancement ability from micro injection to macro injection. A corresponding DSP (Digital Signal Processing) controller is designed to realize signal acquisition, algorithm analysis and output of the control signal. In the DSP controller, a cross-correlation analysis is performed to detect the pre-stall inception signal. Experiments are performed in a single-rotor axial flow compressor. The experimental results demonstrate that the control with tip air injection based on the proportional electromagnetic valve and DSP controller not only achieves the same stability enhancement as the steady tip air injection, but also saves a considerable quantity of injected energy. This method has a good application prospect.

Key words: compressor; tip air injection; proportional electromagnetic valve; DSP controller; cross-correlation analysis

Received: 2013-01-04; Revised: 2013-01-27; Accepted: 2013-02-26; Published online: 2013-03-06 16:58

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130306.1658.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51010007, 51176188, 51006099)

* Corresponding author. Tel.: 010-82543072 E-mail: lijichao@iet.cn