

文章编号: 1000-8055(2005)02-0278-04

轴流式压气机近失速状态端壁 流动时频分析

张 朴, 李应红, 尉询楷, 吴 云, 张百灵
(空军工程大学工程学院 推进系统实验室, 陕西 西安 710038)

摘要: 为准确辨识某型单轴涡喷发动机压气机近失速点的流动特征, 对其端壁静压信号进行了时频分析。时频分析结果表明, 近失速点的工况下, 与其它各级相比, 压气机第一级静子机匣壁面流动变化最为显著; 随着发动机工作点沿共同工作线趋近喘振边界, 压气机第一级静子机匣壁面静压信号中以550 Hz为中心的宽带信号开始出现并逐步增强。所发现的压气机端壁流态特征可用于发动机节流过程中工作点接近失速边界的程度的判定, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 航空、航天推进系统; 端壁流动; 时频分析; 压气机; 发动机; 喘振; 失速; 流动分离

中图分类号: V 231. 3

文献标识码: A

Time-Frequency Analysis of the Axial Flow Compressor Endwall Flow at Near Stall Conditions

ZHANG Pu, LI Ying-hong, WEI Xun-kai,
WU Yun, ZHANG Bai-ling

(Propulsion System Laboratory, Engineering Institute,
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To identify the flow pattern of a single-spool turbojet axial flow compressor at near stall conditions, the compressor end wall static pressure signals were analyzed using time-frequency analysis technology. The results show that at near stall conditions, the endwall flow of the first compressor stator varies dramatically compared to other stators. As the operating point runs close to the surge line along the operating line, a broad band signal centered on 550 Hz occurs and gradually builds up. The observed end wall flow patterns can be used to assess the stall margins during engine throttling, and thus, it has certain value in engineering application.

Key words: aerospace propulsion system; endwall flow; time-frequency analysis; compressor; engine; surge; stall; flow separation

失速和喘振是限制燃气涡轮发动机性能的两个主要方面。发动机在设计时, 均预留了较大的稳定工作裕度, 使共同工作线远离喘振边界, 以保证

发动机在全包线范围内所有可能的工况下均能稳定工作。而为了提高发动机性能, 往往需要发动机工作在距喘振边界较近的工作点上。失速和喘振主动

收稿日期: 2004- 05- 24; **修订日期:** 2004- 09- 06

作者简介: 张朴(1973-), 男, 四川汉源人, 空军工程大学工程学院博士生, 工程师, 主要从事航空发动机稳定性与监控诊断研究

控制技术的目的之一,就是要使发动机能够在靠近喘振边界的工作点上也能稳定工作,且满足必要的稳定要求,即能够抵抗外界扰动的影响^[1]。恰当的压气机不稳定工作征兆检测方法则是成功实现失速和喘振主动控制的一个前提。

检测压气机不稳定工作征兆涉及多个方面的问题,如传感器的选取及安装位置、采用的算法等。这方面的研究一直是失速和喘振研究的一个重点。就检测算法而言,目前应用较多的方法包括行波能量法^[2~4]、功率谱密度分析^[3,4]、小波分析^[3,5]和快速傅里叶变换^[4]等。至于传感器的选取和安装,一般选用高响应的动态压力传感器,测点包括压气机转子动叶尖部前缘附近、动叶转子顶部机匣壁面、静子机匣壁面及静叶通道不同叶高等^[2~6]。

本文采用时频分析方法,对某型涡喷发动机喘振试验中压气机机匣壁面近失速点流动进行分析,成功地捕捉到了发动机失稳前的流动特征。

1 实验装置及压气机特性

某型现役高速多级轴流式涡喷发动机在节流过程中多次出现气动不稳定现象。为解决该问题,选择一台该型发动机作为试验机进行了相关的试验研究。试验在专用试车台架上进行。试验发动机为单轴涡喷发动机,压气机为七级轴流式。防喘装置为置于压气机三、四级之间的放气带。试验中,在压气机上、下机匣的安装面上钻孔,安装高响应动态压力传感器或测压探针,测量压气机各级静子机匣壁面静压及同一静叶通道不同径向位置的总压。

图1是试验发动机的压气机特性示意图。该型发动机在中低转速范围确定穿越喘振区域,与

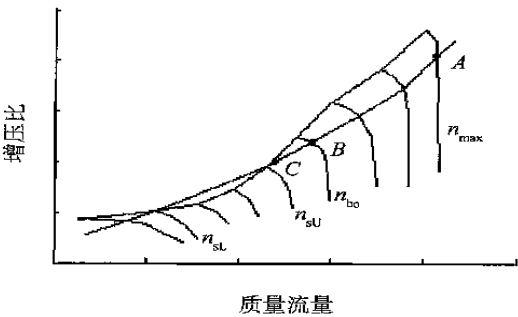


图1 试验发动机压气机特性示意图(未按比例)
Fig 1 Schematic compressor characteristics of the research engine (not to scale)

喘振边界有2个交点,分别为喘振上边界转速 n_{su} 和喘振下边界转速 n_{sl} 。因此,从 n_{su} 以上转速手动关闭放气带、缓收油门节流时,发动机将沿共同工作线进入不稳定工作区域。图1中,工作点A是设计点,对应发动机最大转速,工作点B对应放气带开关转速 n_{bo} ,工作点C对应的转速比 n_{sl} 高20 r/min左右。

对发动机在接近失速边界的工作点B,C附近工作时压气机各级静子机匣壁面静压进行了测量。测量中使用了10 000 Hz和1 000 Hz的两种数据采集速率。

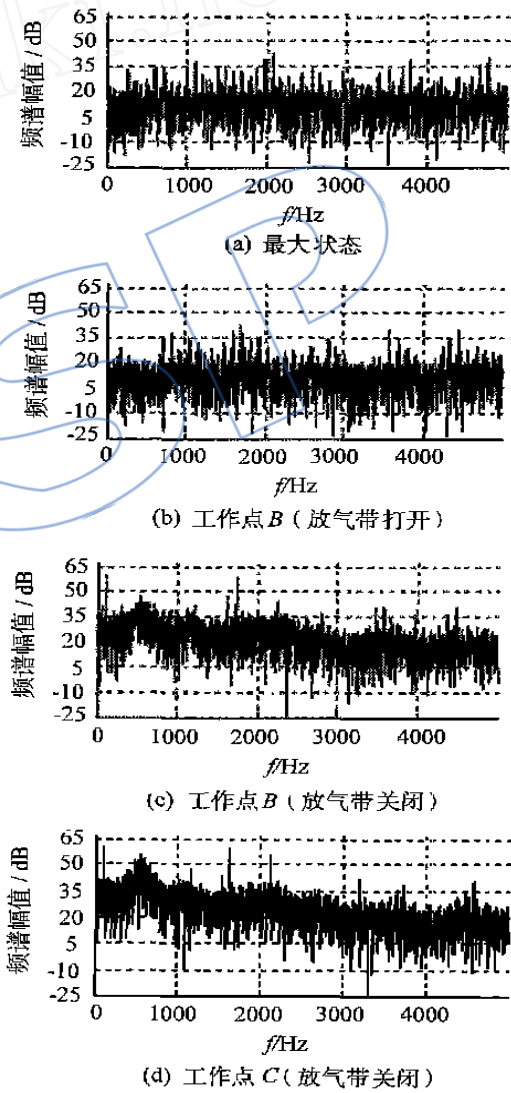


图2 压气机第一级静子机匣壁面静压信号的幅频特性
Fig 2 Amplitude-frequency characteristics of casing wall static pressure signal of the first compressor stator

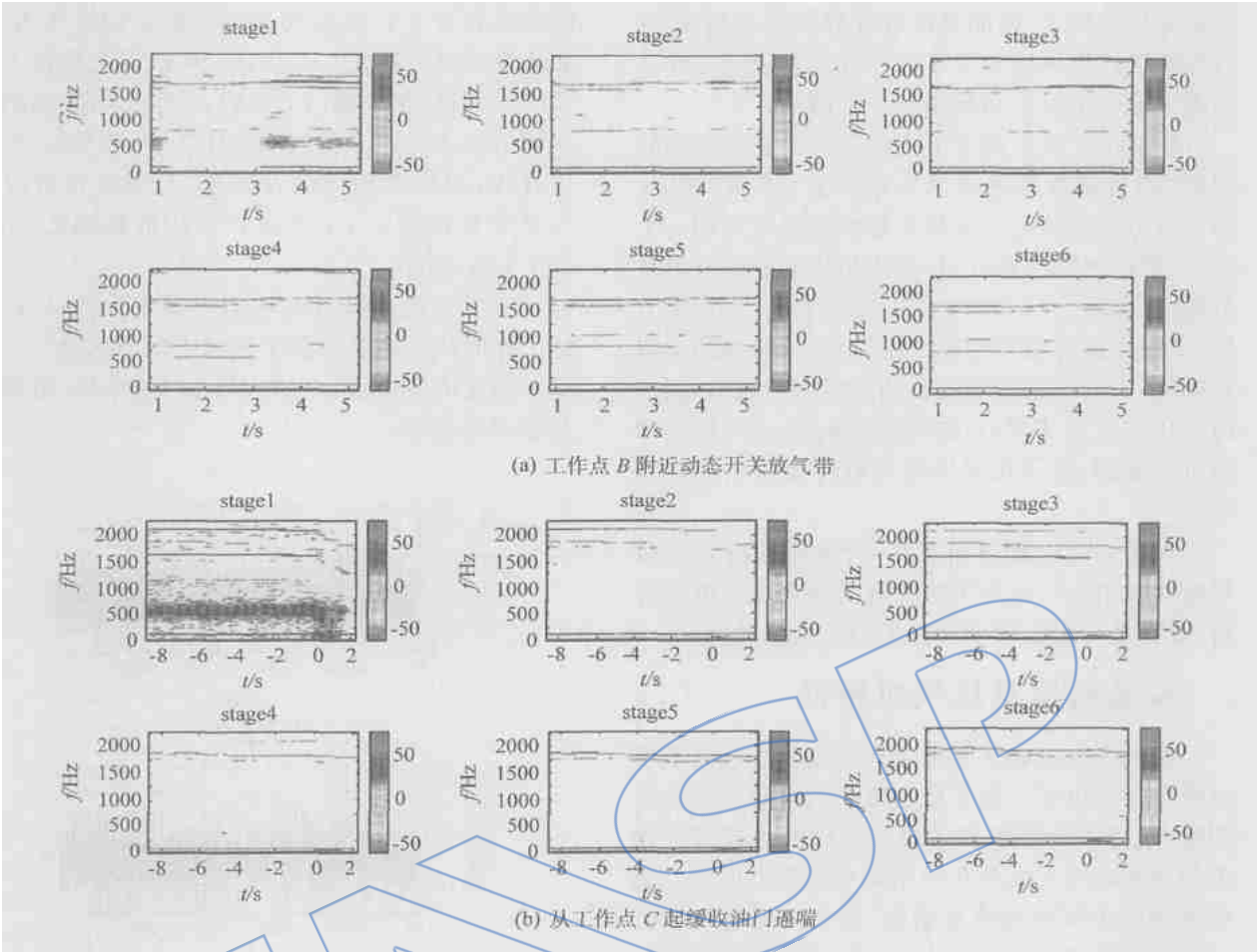


图3 压气机1~6级静子机匣壁面静压信号时频图

Fig 3 Spectrogram of casing wall static pressure signal of compressor stages 1~6

2 压气机端壁流动的时频分析

2.1 近失速点压气机第一级静子机匣壁面静压信号的幅频特性

频谱分析表明, 发动机工作在设计点A 时, 压气机第一级静子机匣壁面静压信号与近失速点(工作点B、C)有较大差异。图2 的幅频特性反映了这种差异。

图2(a)是发动机在设计点A 稳定工作时, 压气机第一级静子机匣壁面静压信号的幅频特性; 图2(b)的幅频特性对应的是工作点B、放气带打开的工况; 而图2(c)和图2(d)则分别是放气带关闭的情况下, 工作点B 和C 对应的压气机第一级静子机匣壁面静压的幅频特性。对比以上各图可以看出, 在喘振裕度较大的两种工况下[图2(a)、图2(b)], 压气机第一级静子机匣壁面静压信号的幅频特性较为相似, 没有能量集中的频带。而在发动机喘振裕度较小的两种工况下, 2 500 Hz 以下频带信号分量的幅度有较明显的增长, 且以550 Hz 为中心的一

个较宽频带的频率分量幅度增长尤其显著[图2(c)、图2(d)]。从图2(c)和图2(d)幅频特性的对比可以判断, 在放气带关闭的情况下, 由工作点B 沿工作线趋近喘振边界的过种中, 以550 Hz 为中心的一个较宽频带的频率分量幅度的持续增长是该型发动机近失速点工况的一个显著特点。

2.2 近失速点压气机第一级静子机匣壁面静压信号的时频特性

图3 是发动机在近失速点的工况B 和C 附近工作时, 压气机1~6级静子机匣壁面静压信号的时频图。图3(a)对应工作点B、放气带关闭- 打开- 关闭的动态过程, 放气带在 $t=0.80\sim 2.80\text{ s}$ 的时段内处于打开状态。图3(b)对应发动机从工作点C 起, 慢收油门逼喘的动态过程, $t=0$ 对应压气机整机深度失速的起始时刻。时频图中, 将35 dB 以下的信号分量均置零, 以突出显示35 dB 以上的较高能量的频率成分随时间的演化情况。

对比图3(a)和3(b), 可以观察到两种不同工况下, 最为明显的差异表现在压气机第一级静子机匣

壁面静压的时频图上。对于工作点B、放气带动态开关的过程[图3(a)],在放气带关闭时,以550 Hz为中心的频带上较为集中的能量(中心频率分量幅度为45 dB左右),而在放气带打开期间,则不存在类似的能量集中现象。从工作点C 缓收油门的过程中[图3(b)],在整机失速前($t = -8.5 \sim 0$ s),以频率550 Hz为中心的频带进一步展宽,幅度进一步增强(中心频率分量幅度增大到55 dB左右)。在发动机的最大状态时,没有观察到类似的现象。这与图2的幅频特性所反映的情况一致。

由以上分析可知,以550 Hz为中心的宽带信号随工作点沿共同工作线趋近喘振边界开始出现并逐步增强。这表明以550 Hz为中心的高能频带的出现,是与压气机第一级端部流动在近失速点与压气机几何尺寸不相匹配联系在一起。在工作转速远小于设计转速的近失速点B和C,压气机前面级,尤其是第一级转子叶尖气流攻角增大较多,流动分离最先出现。第一级转子叶尖的流动分离、动叶后缘增强的尾迹脱落、近失速点增强的叶尖间隙流动、泄漏流动和各种复杂涡系的相互作用,是造成以上现象的主要原因。

此外,在工作点B、放气带打开的时间段内($t = 0.80 \sim 2.80$ s),由于压气机各级流动匹配情况改善,第一级动叶叶尖流动也得到改善,流动分离被较好地抑制,反映在紧邻的下游静子机匣壁面静压信号中,则是以550 Hz为中心的高能频带在此期间不复存在[图3(a)]。

3 结 论

在放气带关闭的情况下,当试验发动机工作点

沿共同工作线逐步趋近喘振边界时,压气机第一级静子机匣壁面静压信号中以550 Hz为中心的一个较宽的能量集中频带开始出现,并且逐步展宽和增强。这是该型发动机节流过程中近失速点的端壁流动特征,可用以判断该型发动机节流过程中工作点接近不稳定工作边界的程度,对于该型发动机不稳定工作征兆的检测具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] Paduano J D, Epstein A H. Compressor Stability and Control: Review and Practical Implications[A]. RTO MP - 051, RTO AVT Symposium on "Active Control Technology for Enhanced Performance Operational Capabilities of Military Aircraft, Land Vehicles and Sea Vehicles[C]. Brunsvick, Germany: 2000.
- [2] Tryfonidis M, Etchevers O, Paduano J D, et al. Pre-Stall Behavior of Several High-Speed Compressors[J]. *ASME J. Turbomachinery*, 1995, 117(1): 62~80.
- [3] Leinhos D, Schmid N R, Fottner L. The Influence of Transient Inlet Distortions on the Instability Inception of a Low-Pressure Compressor in a Turbofan Engine[J]. *ASME J. Turbomachinery*, 2001, 123(1): 1~8.
- [4] Hoss B, Leinhos D, Fottner L. Stall Inception in the Compressor System of a Turbofan Engine[J]. *ASME J. Turbomachinery*, 2000, 122(1): 32~44.
- [5] Inoue M, Kurosumaru M, Yshida S, et al. Short and Long Lengthscale Disturbances Leading to Rotating Stall in an Axial Compressor Stage with Different Stator/Rotor Gaps[J]. *ASME J. Turbomachinery*, 2002, 124(3): 376~384.
- [6] 张朴, 祝雪平, 李应红. 失速起始检测的平均数值差分方法[J]. *航空动力学报*, 2003, 18(4): 546~548.
ZHANG Pu, ZHU Xue-ping, LI Ying-hong. An Averaged Numerical Difference Method for Detection of Stall Inception[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(4): 546~548.