

文章编号: 1000-8055(2007)11-1935-04

航空发动机压气机静子通道压力信号时频特征

魏沅亭, 李应红, 张 朴

(空军工程大学 工程学院推进系统实验室, 西安 710038)

摘 要: 进行发动机整机试验, 获取了压气机第一级静子通道内的压力信号. 通过时频分析, 从压力信号中辨识出了以 550 Hz 和 2200 Hz 为中心的时频结构; 辨识出了压气机前 3 级转子叶片通过频率信号及它们的一些和频、差频信号. 同时, 还观察到在试验发动机减速过程中, 放气带打开前, 压气机前 3 级转子的叶片通过频率信号及它们的一些和频、差频信号幅度显著增强, 这表明减速过程中压气机第一级转子尖区的流动分离逐渐趋于严重. 因此, 监控压气机静子通道压力信号时频特征的变化, 可以获得特定的压气机转子的流场信息, 从而为压气机稳定性控制提供重要依据.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 压气机; 稳定性; 时频分析; 叶片通过频率

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Time-frequency characteristics of stator passage pressure signal of aeroengine compressor

WEI Feng-ting, LI Ying-hong, ZHANG Pu

(Laboratory of Propulsion System, The Engineering Institute,
Airforce Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Tests on aeroengine were conducted to obtain stator passage pressure signal of the first compressor stage of a test aeroengine. By means of time-frequency analysis, the time-frequency structures centered on 550 Hz and 2 200 Hz were identified; the blade passing frequency of the first 3 compressor rotors, and some of their sum-frequency and difference frequency signals, were identified too. It's also observed that for the first 3 compressor rotors, in the process of engine throttling, the blade passing frequencies, their sum-frequency and difference frequency signals would gradually increase their magnitudes before the opening of discharge valve, which indicated that the first compressor tip region flow separation became server following the decrease of engine speed. Thus compressor rotor flow field information might be obtained through monitoring the time-frequency characteristics of pressure signal of specific compressor stator passage, which was helpful for the control of compressor stability.

Key words: aerospace propulsion system; aeroengine; compressor; stability; time-frequency analysis; blade passing frequency

对于固定几何的多轴轴流式压气机, 在偏离设计工作状态时, 其流量和压气机通道几何之间的匹配情况会发生改变. 比如, 在偏离设计转速的

中小转速工况下, 压气机前面级, 尤其是第一级转子叶片尖区的进气攻角增加得较多, 容易引起流动在叶片尖区背部发生流动分离. 流动分离是引

收稿日期: 2007-04-06; 修订日期: 2007-07-02

作者简介: 魏沅亭(1974), 男, 陕西西安人, 博士生, 主要从事发动机稳定性方面的研究.

起压气机发生旋转失速和喘振的主要原因.

为有效防止在多级轴流式压气机中发生旋转失速和喘振这两种危害性极大的流动现象, 必须采用相应的调节措施.

对压气机进行主动控制, 到目前为止, 相当一部分的研究是针对旋转失速前的模态扰动波进行控制, 如 Weigl^[1] 等、Spakovszky^[2] 等所开展的试验就是如此. 这种方法的困难在于, 旋转失速前的模态扰动波并不总是出现. 如 Freeman^[3] 的研究表明, 对于 Rolls-Royce 公司生产的一台 Viper 发动机, 仅在设计转速的 85% ~ 87% 范围内, 才存在明显的周向模态扰动信号. Day^[4] 等在 MTU 三级轴流式压气机试验中也观察到, 模态扰动也仅在压气机的中等转速范围才出现. 因此, 有必要研究其它的流动特征, 以方便对压气机气动稳定性进行主动控制.

文献[5-6]中, 研究了某型实验发动机的多级轴流式压气机在几个特定工作条件下, 压气机第一级转子机匣壁面静压信号的时-频特征, 提出可以考虑根据频率特征进行发动机稳定性控制. 然而, 其所考虑的转速范围相对有限.

为考察在更宽广转速范围内, 发动机压气机在偏离设计状态的工作条件下, 通道流动信号的频率特征, 进行了发动机整机台架试车试验, 获取了发动机从起动到 0.8 额定转速时, 压气机第一级静子通道流动压力信号, 分析其偏离设计工作条件下压力信号的频率特征, 进一步研究频率特征与发动机稳定工作状态的关系.

1 试验装置和步骤

试验发动机为 7 级轴流式涡喷发动机, 防喘装置为安装在压气机第 3, 4 级之间的放气带. 图 1 为实验发动机的压气机特性图, 横坐标为质量流量 W_a , 纵坐标为总-静压增压比 p_c . 图中 n_d 为设计转速, n_{bo} 为放气带开关转速, n_{sl} 为喘振下边界转速, n_{su} 为喘振上边界转速. 与大多数高增压比的多级轴流式压气机的特性图相似, 试验发动机压气机的共同工作线在中小转速下要穿越不稳定工作范围. 因此, 在放气带开关转速以下, 需要打开放气带保证发动机稳定工作.

对于试验发动机, 压气机前 3 级转子叶片数 ($Z_i, i = 1, 2, 3$) 依次为 27, 35, 53, 在发动机转速为 N 时, 对应的转子叶片通过频率 (Blade Passing Frequency, BPF) 为

$$f_{BPFi} = N Z_i / 60, \tag{1}$$

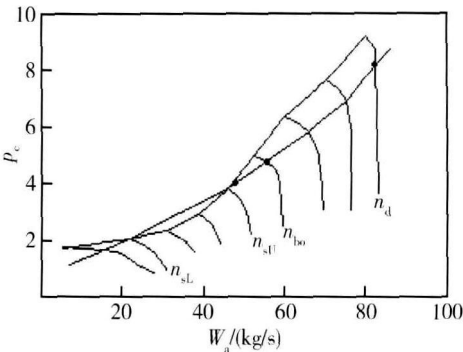


图 1 试验发动机压气机特性图

Fig. 1 Compressor characteristics for the test engine

前 3 级转子叶片通过频率的和频频率为

$$f_{sum, ij} = N (Z_i + Z_j) / 60, \tag{2}$$

$i, j = 1, 2, 3, i \neq j,$

差频频率为

$$f_{diff, ij} = N (Z_j - Z_i) / 60, \tag{3}$$

$j = 2, 3, i = 1, 2, j > i.$

偏离设计条件时, 压气机转子叶片流动随进气攻角的增大, 附面层不断增厚直至发生流动分离和旋涡脱落, 相应会引起叶片尾迹流动的变化. 因此, 在压气机第 1 级转子叶片下游安装传感器, 对叶片尾迹流场进行测量. 同时, 考虑到中小转速条件下, 压气机第 1 级转子叶片尖部的流动最容易发生分离, 因此, 重点测量转子叶片尖部的尾迹流场. 基于以上考虑, 在压气机第 1 级静子机匣壁面上钻孔, 安装动态压力传感器. 传感器头部直径为 5.0 mm, 量程为 200 kPa, 响应频率超过 150 kHz. 传感器位于两相邻静子叶片前缘弦线 1/2 处, 竖直伸入静子叶片通道中, 伸入深度为 15.0 mm, 伸入深度占静子叶片叶高的 5%. 数据采集时, 分别使用了 10 kHz 和 5 kHz 的数据采集速率.

为防止吸入异物打伤发动机, 试车时, 在压气机进口安装了专用防尘罩. 实验中同时测量了环境大气压力. 试验在试验发动机的专用试车台架上进行, 分两天进行, 共采集了 43 组数据. 试验数据涵盖了发动机从启动到额定转速之间的转速范围. 重点采集了发动机加、减速工作中, 转速通过放气带开关转速附近时给定测点处的脉动压力信号.

2 实验结果及分析

此次试验获取了试验发动机宽广的转速范围 (0 转速到 80% 转速) 内, 压气机第一级静子通道的压力信号. 对发动机加、减速的动态过程中, 通

道压力信号的频率特征进行了分析, 研究压力信号频率特征与压气机通道流动状态的关联.

图 2 是发动机从慢车转速加速至额定转速, 在额定状态稳定一段时间后, 收油门减速至慢车转速的动态过程中, 压气机第 1 级静子通道压力信号的时频图. 对应压力信号的采样频率为 10 kHz. 时频分析每个时间窗口的长度为 4 096 点, 步长为 0.1 s.

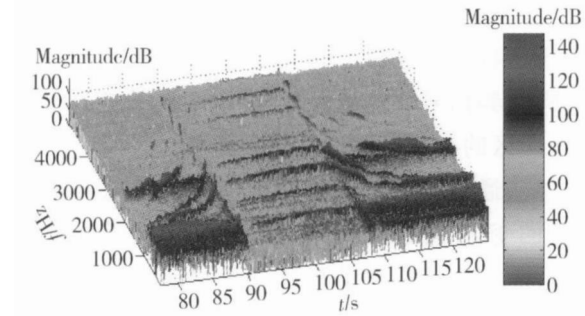


Fig. 2 压气机第一级静子通道压力信号时频图(3D)
Fig. 2 Spectrogram for the static pressure signal of the first compressor stator passage(3D)

图 2 对应的状态为: 发动机从 77.0 s 对应的慢车转速(1 770 r/min)开始加速, 到 89.0 s 对应的放气带开关转速时, 放气带关闭, 然后发动机继续加速, 并将转速稳定在额定转速(93.0~106.7 s), 最后, 发动机收油门减速, 在 107.7 s 时, 放气带打开. 随后, 发动机减速到慢车转速.

由图 2 可见, 随着试车过程中发动机状态的变化, 压力信号的频率成分也相应变化, 形成多条带状的时频结构. 这些主要时频带的幅值随发动机状态的改变, 也相应地发生变化.

在与图 2 对应的 2D 时频图中(图 3), 可更清晰地观察压气机第一级静子通道内压力信号的时频结构随发动机工作状态变化而发生变化的情况.

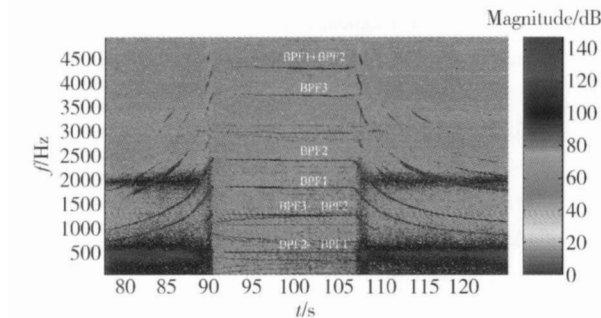


Fig. 3 压气机第一级静子通道压力信号时频图(2D)
Fig. 3 Spectrogram for the static pressure signal of the first compressor stator passage (2D)

由图 3, 有两条分别以 550 Hz 和 2 200 Hz 为中心的时频带. 可以观察到这两条时频带在发动机转速超出放气带开关转速较多的额定转速附近(90.5~105.5 s)附近并不存在; 在放气带开关转速附近时, 若放气带处于打开状态, 则其幅度比较弱, 反之, 若放气带处于关闭状态, 则其幅度非常强; 在低于放气带开关转速的条件下, 其幅度非常强. 这两条时频带仅在放气带开关转速附近及以下的小转速范围内出现, 且频率中心基本不随发动机转速变化而变化. 因此, 我们判断它们的出现与压气机第一级转子尖区流动在中小转速下的流动分离相关. 其产生的物理机制, 需要进一步系统研究.

图 3 中, 频带的频率中心随转速变化而变化的时频带, 主要有 3 条, 分别是与压气机第 1~3 级转子叶片通过频率 BPF1~BPF3 对应的时频带. 亚声速条件下, 压气机转子出口流场撞击下游静子叶片激发的叶片通过频率信号^[7]是弱扰动信号, 可以在压气机内流场中逆流向上游传播, 因此, 在压气机第一级静子通道压力信号中检测到 BPF2、BPF3 信号, 是下游转子叶片通过频率信号形成的扰动向上游传播的结果.

除 BPF1~BPF3 之外, 还有它们的一些差频信号及和频信号. 由于压气机转子的叶片通过频率与发动机转速成正比, 因此, BPF1~BPF3 时频带是随转速变化而变化的频率结构. 经测算, 确定了图 3 中几条主要的时频带, 由下至上依次对应压气机第 1、2 级转子 BPF 的差频信号 BPF2-BPF1, 第 2、3 级转子 BPF 的差频信号 BPF3-BPF2, 第 1~3 级转子的叶片通过频率信号 BPF1、BPF2 和 BPF3, 以及第 1、2 级转子的和频信号 BPF1+BPF2. 由图 3, 可以观察到以上论及的时频带在发动机的不同工作状态, 其幅度强度变化是不同的.

从试验发动机压气机中小转速下流动稳定性监控的角度而言, 应该重点关注从放气带开关转速以上收油门减速的过程中, 压力信号时频图上时频结构的变化. 图 4 中, 从更微观的时间尺度上观察发动机从 106.7 s 起收油门至放气带打开期间, 压气机第一级静子通道压力信号的时频结构. 如图 4 所见, 减速过程中, 随着发动机转速接近放气带开关转速(放气带在 107.7 s 打开), 以 2 200 Hz、550 Hz 为中心的时频带开始出现; BPF1、BPF2、BPF3、BPF2-BPF1、BPF3-BPF2 及 BPF1+BPF2 时频带变宽、强度增强. 由于节流过

程中, 发动机转速越接近放气带开关转速, 压气机第一级尖区的分离越严重, 所以, 以上论及时的频结构的变化, 正是压气机第一级流动分离状态变化的反映.

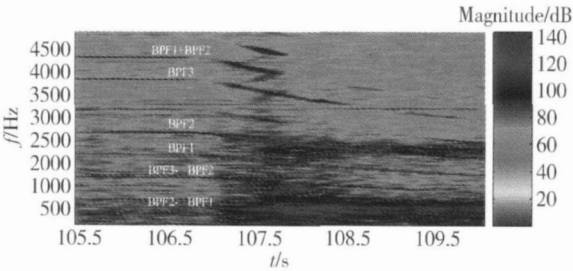


Fig. 4 节流过程中压气机第 1 级静子通道压力信号的时频图

Fig. 4 Stator passage pressure signal spectrogram of the first compressor stage during throttling process

3 讨 论

从发生的物理条件来看, 旋转失速或喘振发生前, 压气机内部流动中必然已经存在相当程度的流动分离. 对于失速前的流动扰动信号, 无论是模态扰动还是尖脉冲扰动, 它们的发生也是压气机转子叶片绕流发生流动分离, 且流动分离已经严重到一定程度后的结果.

值得注意的是, 在压气机转子叶片绕流从零攻角至大攻角, 最终发生流动分离、引起通道流动堵塞的过程中, 压气机转子叶片的绕流要经历流动附体→附面层增厚→附面层分离→附面层严重分离、旋涡脱落的过程. 在这个过程中, 转子叶片尾迹的流动形态将发生显著变化. 而发生显著变化的尾迹向下游流动冲击静子叶片, 其相互作用也将发生变化, 从而引起叶片通过频率等相关频率成分的变化.

对压气机级间流动压力信号时频结构分析的意义, 在于由其可以明确, 发动机在不同的工况下, 压气机通道压力信号中频率成分的构成及变化特征. 准确识别这种特征, 并将其与压气机内部的空气动力学行为相联系, 将有利于压气机通道流动状态的判断, 并用于压气机气动稳定性控制. 同时, 也可以作为发动机调节是否有效和调节机构工作是否正常的判断.

4 结 论

- (1) 获得了试验发动机在较宽广的转速范围内, 压气机第 1 级静子通道内的压力信号.
- (2) 压气机第 1 级静子通道压力信号的时频

图中, 分别以 550 Hz、2200 Hz 为中心的时频带在发动机状态变化过程中, 频带的频率中心基本不随发动机状态变化而变化.

(3) 从时频图中, 辨识出了压气机第 1~3 级转子的叶片通过频率信号 BPF1、BPF2 和 BPF3, 第 1、2 级转子 BPF 的差频信号 BPF2-BPF1, 第 2、3 级转子 BPF 的差频信号 BPF3-BPF2, 以及第 1、2 级转子的和频信号 BPF1+BPF2.

(4) 试验发动机减速过程中, 在放气带打开前, 压气机前 3 级转子的 BPF 信号及它们的一些和频、差频信号幅度显著增强, 表明压气机第 1 级转子尖区的流动分离逐渐趋于严重.

(5) 通过监控压气机静子通道压力信号时频特征的变化, 可以获得特定的压气机转子的流场信息, 从而为试验发动机压气机稳定性控制提供重要依据.

致谢 作者谨对陈东林教授、张百灵副教授、李军教授在试验中所做的工作表示由衷感谢.

参考文献:

- [1] Weigl H J, Paduano J D, Frechette L G, et al. Active stall bilization of rotating stall and surge in a transonic single stage axial compressor [J]. ASME J. Turbomachinery, 1998, 120(4): 625-636.
- [2] 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]. ASME J. Turbomachinery, 1999, 121(4): 510-516.
- [3] Freeman C, Wilson A G, Day I J, et al. Experiments in active control of stall on an aeroengine gas turbine[J]. ASME J. Turbomachinery, 1998, 120(4): 637-647.
- [4] Day I J, Breuer T, Escuret J, et al. Stall inception and the prospects for active control in four high speed compressors [J]. ASME J. Turbomachinery, 1999, 121(1):19-27.
- [5] 张朴, 李应红, 尉询楷, 等. 轴流式压气机近失速状态端壁流动时频分析[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 278-281. ZHANG Pu, LI Yinghong, WEI Xunkai, et al. Time frequency analysis of the axial flow compressor endwall flow at near stall conditions [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2): 278-281.
- [6] 张朴, 李应红, 王卓健, 等. 轴流压气机近失速状态叶片通过频率特性研究[J]. 推进技术, 2005, 26(3): 229-233. ZHANG Pu, LI Yinghong, WANG Zhuojian, et al. Investigation on the characteristics of blade passing frequency of axial flow compressor at near stall conditions[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 229-233.
- [7] 唐狄毅, 李文兰, 乔渭阳. 飞机噪声基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.