

轴流式压气机机匣壁面静压脉动特征研究*

张 朴¹, 秦启书², 魏泮亭¹, 吴 云¹, 宋慧敏¹, 张百灵¹

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038 2. 河南工业职业技术学院, 河南 南阳 473009)

摘 要:运用小波包分析和概率密度函数分析的方法,对某型发动机节流过程中,压气机第一级静子机匣壁面静压信号的脉动特征及概率密度函数特性进行了研究。研究发现,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几个特定频带内信号分量的脉动幅度增强、概率密度函数分布展宽,可以作为试验发动机节流过程中气动失稳的信号特征。

关键词:航空、航天推进系统;机匣壁面静压;小波包分析;压气机;气动不稳定

中图分类号: V23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2005)01-0004-03

研究航空涡轮发动机近失速点的流动特征是进行发动机气动不稳定征兆检测的基础。目前在压气机试验中应用得较多的失速征兆信号分析方法,主要包括行波能量法^[1~3]、功率谱^[2]和频谱分析方法^[3]、小波分析方法^[4~5]和一些非线性时间序列分析方法,如相关积分法^[6]等。这些方法分别从时域、频域、时-频、空-频和非线性动力系统的观点,来研究压气机近失速工况的流动特征。

对于气流通道几何尺寸不可调节的轴流式涡轮发动机,当工作点接近喘振边界时,其多级压气机的前后各级流动与压气机的几何参数之间的匹配失调。在工作转速小于设计转速的情况下,压气机前面级,尤其是第一级端部负荷增大,分离流动增强。在某型发动机气动稳定性试验中,就观察到了在工作转速小于设计转速的近失速点,压气机第一级静子机匣壁面静压信号概率密度函数偏离设计状况时的密度函数^[7]的现象。本文利用小波包分析和概率密度函数分析方法,对此现象进行了进一步分析,以研究试验发动机近失速点的流动特征。

1 实验装置及压气机特性

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。

图 1 是试验发动机的压气机特性示意图。该型发动机的共同工作线在中低转速范围确定地穿越喘振区域,与喘振边界有两个交点,分别为喘振上边界转速 n_{sl} 和喘振下边界转速 n_{sl} 。工作点 A 是设计点,对应发动机最大转速 n_{max} ,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。关于发动机改装和数据采集方案,文献 [8] 中有较为详细的介绍。

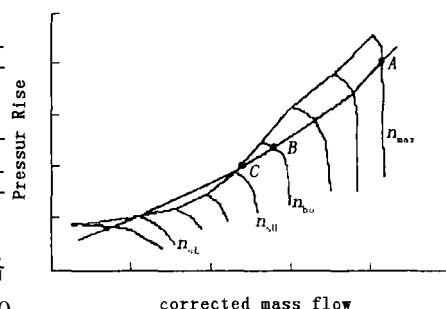


图 1 试验发动机压气机特性示意图

* 收稿日期: 2004-06-02

基金项目: 军队科研基金资助项目(04-253-2004)

作者简介: 张 朴(1973-),男,四川汉源人,工程师,博士生,主要从事发动机稳定性与监控诊断研究。

2 压气机第一级静子机匣壁面静压脉动信号的小波包和概率密度函数分析

一层小波分解是将原信号 s 分解成近似信号 a_1 和细节信号 d_1 两部分。分解过程中, 近似信号 a_1 中失去的信息由细节信号 d_1 捕获。在下一层的分解中, 又进一步对 a_1 作类似于 s 的分解。而小波包分解是一种比小波分解更为精细的方法^[9]。下文中, 对试验发动机在不同工况下压气机第一级静子机匣壁面静压脉动信号进行小波包三层分解, 然后对第三层分解对应的 8 个节点的重构信号进行概率密度函数分析。

2.1 静压信号的小波包分解

取试验发动机在设计点 A 、工作点 B (放气带关闭) 及工作点 C 稳定工作时, 压气机第一级静子机匣壁面静压测量信号进行三层小波包分解, 结果见图 2。图 2 显示了利用 db5 小波构造的小波包, 对三种不同工况下压气机第一级静子机匣壁面静压信号进行三层分解后, [3 0], ..., [3 7] 等 8 个分解节点对应的重构信号。图中标号为 [0 0] 的节点对应的信号依次为 A 、 B 、 C 三种不同工况下, 压气机第一级静子机匣壁面的静压原始测量信号。各分解节点中, 节点 [3 0] 的重构信号对应原始信号的低频部分, 是原信号的近似。而原信号的细节信号则保存在其它 7 个分解节点的重构信号中。

由图 2 可以看出, 三种不同工况下, 静压测量信号的脉动幅度有较大的差别: 在设计状态 A 静压脉动幅度较小, 见图 2(a)。而在近失速点 B 和 C , 静压脉动幅度明显增大, 见图 2(b)、2(c)。且最接近喘振边界的工作点 C 静压脉动幅度最大, 见图 2(c)。从各小波包分解节点的重构信号可以进一步看出, 发动机工作点趋向喘振边界时, 不同的节点对机匣壁面静压信号脉动幅度增大做出贡献是不同的。如图 2 所示, 除节点 [3 4] 和 [3 5] 以外, 在各个节点上重构信号的脉动幅度均有明显的增长, 且增长最为显著的几个节点是 [3 0]、[3 1] 和 [3 3]。利用文献 [9] 提供的方法, 可以方便地计算出各个节点对应的频段, 从而确定在发动机工作点接近喘振边界的过程中, 哪些频段能量的增长对原始测量信号脉动幅度的增大做出了贡献。

2.2 小波包分解信号的概率密度函数分析

压气机第一级静子机匣壁面静压信号是随机信号, 而静压 P 则是对应的随机变量。随机变量最基本的可预测特性是其概率和概率密度。在对三种不同工况下压气机第一级静子机匣壁面静压信号进行三层小波包分解的基础上, 本节对第三层小波包分解对应的 8 个节点重构信号脉动分量分别进行概率密度函数分析。

图 3 是对应的概率密度函数分析结果, 顶部的 3 个图依次为 A 、 B 和 C 三种工况下压气机机匣壁面的静压测量信号。在压力信号图下, 依次是 [3 0] ~ [3 7] 等三层小波包分解的 8 个节点重构信号脉动量的概率密度函数。由于是对零均值脉动分量分析, 所以图中各个概率密度函数的图像均分布在零均值周围。

图 3 中, 在设计状态 A 压气机第一级静子机匣壁面静压信号进行三层小波包分解后, 第三层的所有 8 个分解节点重构信号的零均概率密度函数均非常紧凑、对称, 形状也极为相似, 见图 3(a)。而在近失速点 B 、 C , 节点 [3 0]、[3 1] 和 [3 3] 的重构信号的概率密度函数分布展宽图, 见图 3(b)、图 3(c)。且越接近喘振边界, 概率密度函数图像越为扁平, 见图 3(c)。这与图 2 中各节点重构信号脉动幅度的变化情况相一致。此外, 随着发动机工作点逐渐靠近喘振边界, 节点 [3 2]、[3 6] 和 [3 7] 重构信号的概率密度函数也有展宽的趋势, 只是程度要小一些。

3 结论

通过小波包分析和概率密度函数分析, 准确地捕捉到了试验发动机在不同工况下, 压气机第一级静子机匣壁面静压信号的变化特征: 在发动机喘振裕度较高的设计工作状态, 压气机第一级静子机匣壁面静压信号脉动幅度较小, 各频段上的信号分量概率密度函数分布相似, 均很紧凑、对称。发动机节流过程中, 随着发动机工作点沿共同工作线逐渐靠近喘振边界线, 压气机第一级静子机匣壁面静压信号脉动幅度也逐渐增强, 但不同频段内静压信号脉动幅度增强、概率密度函数分布展宽的程度不同。相比而言, 压气机其它各级机匣壁面的静压信号在工作状态转换时, 脉动幅度的变化并不如第一级那样显著。因此, 可以确定该型发动机压气机第一级是对节流操作最为敏感的压气机级。

本文揭示的发动机节流过程中, 压气机第一级静子机匣壁面静压在不同工况下的信号特征, 可用以分析试验发动机节流过程中工作点接近喘振边界的程度, 具有一定的工程应用价值。

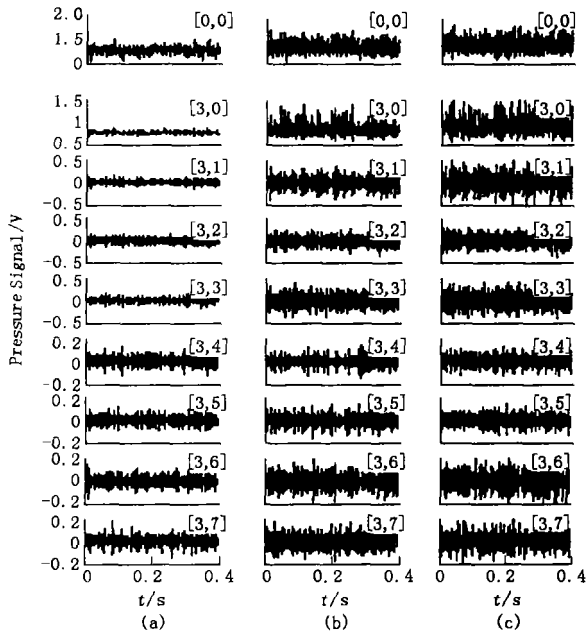


图2 第一级静子机匣壁面静压信号及三层小波包分解

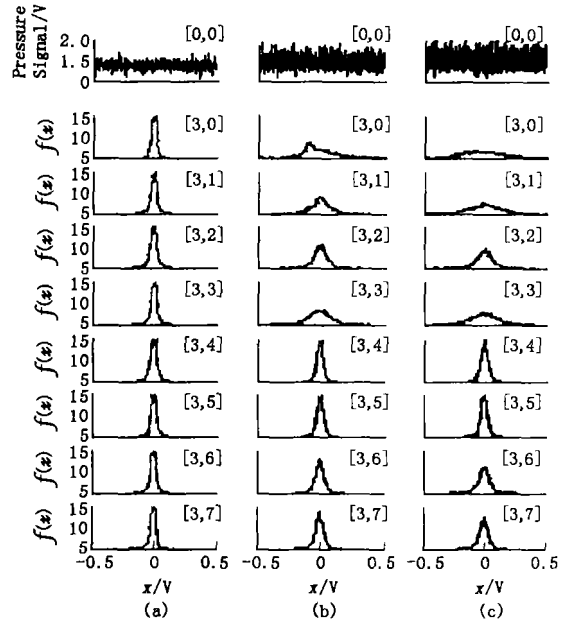


图3 第三层小波包分解的零均概率密度函数

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Leinhos D, Schmidt 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.
- [3] 张朴, 魏津亭, 李应红. 某型发动机旋转失速压力信号的频谱分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(4): 5-7.
- [4] Inoue M, Kuroumanu M, Yshida S, et al. Short and Long Length-Scale Disturbances Leading to Rotating Stall in An Axial Compressor Stage with Different Stator/rotor Gaps[J]. ASME J Turbomachinery, 2002, 124(3): 376-384.
- [5] Höss B, Leinhos D, Fottner L. Stall inception in the Compressor System of a Turbofan Engine[J]. ASME J Turbomachinery, 2000, 122(1): 32-44.
- [6] Bright M M. Chaotic Time Series Analysis Tools for Identification and Stabilization of Rotating Stall Precursor Events in High Speed Compressors[D]. Akron: Akron Univ, 2000.
- [7] 李应红, 张朴, 尉询楷, 等. 一种失速-喘振征兆信号检测方法[P]. 中国, 200410028956.9, 2004-3-23.
- [8] 姜涛. 发动机喘振-失速预估模型和故障检测研究[D]. 西安: 空军工程大学工程学院, 2002.
- [9] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计-小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.

(编辑: 姚树峰)

Investigation on the Characteristics of Axial Flow Compressor Casing Wall Static Pressure Fluctuations

ZHANG Pu¹, QN Qi-shu², WEI Feng-ting¹, WU Yun¹, SONG Hui-min¹, ZHANG Bai-ling¹

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China; 2. Henan Polytechnic Institute, Nanyang, Henan 473009, China)

Abstract Based on wavelet packet analysis and probability density function analysis, the characteristics of signal fluctuation and probability density function distribution of the first compressor stator casing wall static pressure, which was measured during the throttling process of a certain engine, are investigated. It is observed that along with the gradual approaching of engine working point to the surge line, the fluctuation magnitude of the first compressor stator casing wall static pressure contents at several specific frequency bands will increase, and corresponding probability density function distribution will become wider. The observed signal characteristics can serve as an aerodynamic instability indication of the test engine during the throttling process.

Key Words aerospace propulsion system; casing wall static pressure; wavelet packet analysis; compressor aerodynamic instability