

文章编号: 1000-8055 (2004) 02-0224-05

基于小波消噪的进气道动压信号的分析

李文峰¹, 章 进², 王永生¹

(1. 西北工业大学 电子工程系, 陕西 西安 710072;

2. 华阳电工厂 军代表室, 贵州 贵阳 550009)

摘要: 结合进气道隐身装置与某涡扇发动机地面联合试验所采集到的数据, 研究了在小波消噪基础上对发动机进气道动态压力信号进行定量处理和分析的方法和步骤。结果表明, 信号的频谱分量主要集中在 100 Hz 以下。低发动机转速时, 进气道气流形成的涡旋较大。随着转速的提高, 压力升高, 紊流度增大。证明了在高速紊流的脉动压力系统中存在奇怪吸引子, 关联维数为 5~6。

关键词: 航空、航天推进系统; 进气流场; 动态压力; 小波; 数据处理

中图分类号: TP274⁺. 2; V217⁺. 1

文献标识码: A

Dynamic Pressure Signal's Processing and Analyzing in Flow Field Based on Wavelet Theory

LI Wen-feng¹, ZHANG Jin², WANG Yong-sheng¹

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Huayang electrical engineering factory, Guiyang 550009, China)

Abstract: Combined with the acquisition data from experiments of stealthy device in air duct and some turbofan engine, the paper studies the methods and steps of processing and analyzing dynamic pressure signals based on the wavelet theory. The results show that the power spectrum magnitude of signals is mainly fastened within 100 Hz, both range and turbulence of signals are augmented while rotating speed of engine is raised. The lower is the rotating speed, the more intensive are the vortices. It is confirmed that there is a strange attractor in turbulent fluctuation pressure system of flow field, and the correlation dimension D tends from 5 to 6.

Key words: aerospace propulsion system; flow field; dynamic pressure; wavelet; data processing

进气道中气流的压力脉动是气流不规则紊流运动产生的, 紊流的特征在于它具有随机性质的涡旋结构。由于随机脉动压力对压气机工作会产生复杂的非定常气动力影响, 因而使发动机对动态压力畸变更为敏感^[1]。在某涡扇发动机与进气道隐身装置地面联合试验中, 为了研究隐身装置对进气道气动性能的影响, 在径向 0.9R 处沿周

向均匀分布了 6 支动态压力传感器, 形成一个“水”字型进气道流场测量截面 (AIP), 数据采集系统以每通道 1 kHz 并行采样率得到若干组安装隐身装置前后发动机不同状态下进气流场压力信号, 数据的处理分析采用了小波分析等理论。吸波导流体与发动机联合地面试验系统组成以及发动机进口流场测量截面测点布局请参考文献[2]。

收稿日期: 2003-05-17; 修订日期: 2003-09-16

作者简介: 李文峰 (1970-), 男, 河南襄城人, 西北工业大学电子工程系讲师, 博士, 主要从事航空测试技术研究。

1 试验数据的处理

1. 1 数据的滤波

压力脉动信号频率与低压压气机最大设计旋转频率有关, 气流脉动频率约为发动机转子频率的 40%~60%^[3]。某涡扇发动机最大转速为 10200 r/min, 约 170 Hz^[4], 则压力信号上限频率约为 102 Hz。对原始信号做的频谱估计也证明了这一点。图 1 为 $N_1=97\%$ 、未装隐身装置时, 测点 1 信号的功率谱密度曲线。用 SymletsA 小波系的 sym8 小波分解信号到第 20 层, 脉动压力的随机过程仍不含明显的周期性分量, 且信号的频谱是连续的, 分量主要集中在 100 Hz 以下, 甚至更低。

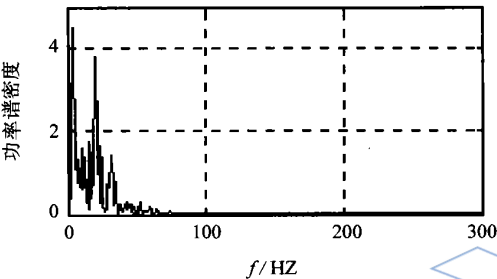


图 1 $N_1=97\%$ 时, 测点 1 的功率谱密度曲线
Fig. 1 The power spectrum magnitude of 1th test point while N_1 is 97%

为保证数据的质量, 对原始动态压力脉动数据进行了 300 kHz 低通滤波。同时动态信号处理前进行了高通滤波^[5], 截止频率不同, 对以后研究的相关函数曲线差别很大。本次试验选取的高通截止频率为 2.5 Hz。滤波器设计为二阶 Butterworth 数字 IIR 滤波器。

1. 2 基于小波理论的动压信号的消噪

在实际中, 信号谱和噪声谱是任意重叠的, 用传统傅立叶分析进行滤波, 只能用于信号和噪声频带重叠部分非常小或两者完全分开的情况下, 然后通过滤波的方法将信号与噪声分开。小波分析由于能同时在时域和频域对信号进行分析, 利用有用信号和噪声在小波变换下的模极大值不同传播特性^[6], 利用小波理论对信号进行了有效消噪处理。实际应用中选择 Daubechies 小波系中的 db3 小波, 小波分解层数定为 3, 对两种消噪方法进行了比较。一种为默认阈值消噪处理; 另一种为强制消噪, 即把小波分解结构中的高频系数全部变为 0, 把高频部分全部滤除掉, 再对信号进行

重构处理^[7]。图 2 为 $N_1=65\%$ 、未装隐身装置时, 测点 1 的原始波形, 默认阈值消噪信号波形和强制消噪信号波形。从分解图形看, 噪声主要包含

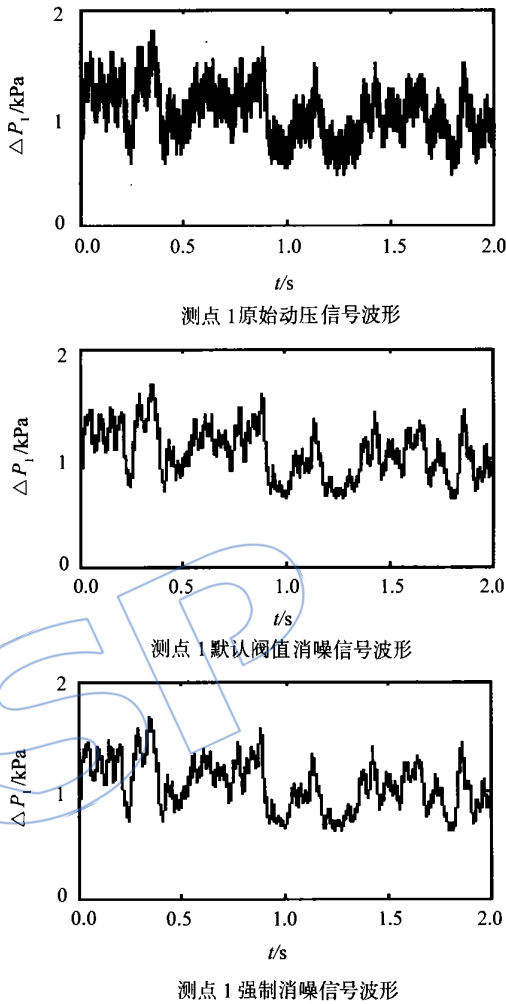


图 2 $N_1=65\%$ 时, 测点 1 的原始波形和消噪波形
Fig. 2 The original signal and de-noising signal of 1th test point while N_1 is 65%

在小波分解的高频第一、第二、第三层中; 动压信号虽然也是随机信号, 但比较平稳, 没有大幅度的突变, 因而本文采用强制消噪处理信号。

2 压力脉动信号的分析

2. 1 压力脉动信号的幅值域分析

由文献 [8] 可知, 动态压力的最大瞬时值在进气道跨音速工作时约为稳态值的 1.3~1.5 倍; 当进气道在超临界状态工作时, 最大瞬时压力值甚至可达稳态值的 2.0 倍。实际结果是: 在装隐身装置前, 最大瞬时动压为平均动压的 1.58~1.95 倍。研究表明: 随着发动机转速的增大, 动压信号的幅值在升高, 并且这种变化趋势与发动

机加速性动压信号变化趋势一致。同时, 压力脉动的频谱集中区间相对高移, 紊流度增大。图 3 为未装隐身装置时, 测点 6 的动压信号随转速的变化以及在加速性(慢车→最大)中的变化。

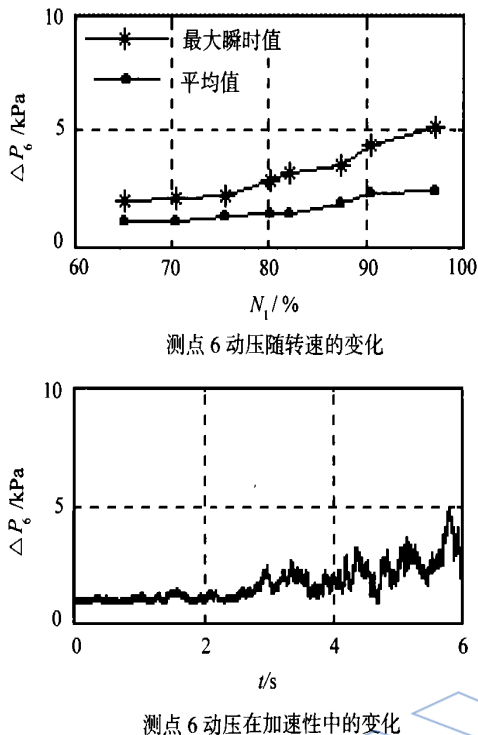


图 3 测点 6 的变化曲线

Fig. 3 The curves of 6th test point

2. 2 压力脉动的相关分析

紊流内部充满着许多大小不同的涡旋, 如果两点之间处于同一涡旋之内, 则两点的流动必然相关, 否则就不相关; 当涡旋以一定速度流过某一测点时, 在涡旋所经过的时间内, 所测的压力脉动也必然呈现某种相关程度^[9]。动压信号包含有稳态成分, 高通滤波频率的确定是进行相关性分析的一个十分关键的因素。物理转速 $N_1=90\%$ 、 $N_1=70\%$, 测点 1 和测点 6 的自相关函数曲线以及两个测点之间的互相关函数曲线, 如图 4 所示。从图中可以得出如下规律:

在任一测点, 发动机转速越低, 其自相关函数曲线下降低得越慢。这说明转速低时, 进气道气流形成的涡旋较大。

在任意两测点间, 发动机转速越低, 其互相关函数曲线衰减得越慢。这同样说明转速低时, 进气道气流形成的涡旋较大。

2. 3 关联维数的分析

关联维数体现了动力系统相空间中图形结构

的维数。根据文献 [10] 的计算方法, 对进气道紊流脉动压力信号时间序列的分维进行了计算。 $\ln C(r)$ 和 $\ln r$ 的对应关系曲线见图 5。图中的曲线斜率将渐趋于一定值, 该值即为关联维数 D 。这一特性证明了在进气道高速紊流的脉动压力系统中存在奇怪吸引子。关联维数 $D(5 < D < 6)$ 值即为该吸引子的维数, 该值也表示描述该紊流系统所需要独立变量的最小数目。

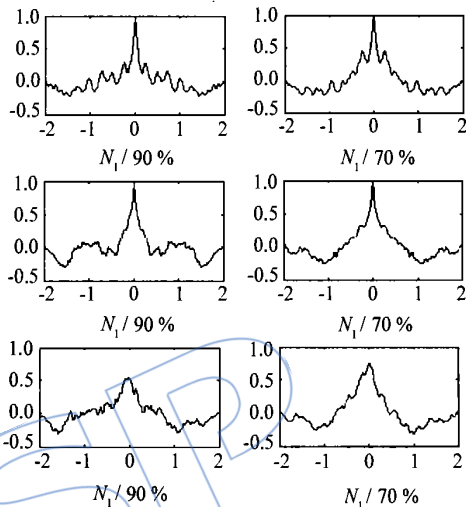


图 4 $N_1=70\%$ 、 $N_1=90\%$ 时, 测点 1 和测点 6 归一化处理后的自、互相关函数曲线

Fig. 4 The coherence function estimate between 1th test point and 6th point, while N_1 is 70% and N_1 is 90%

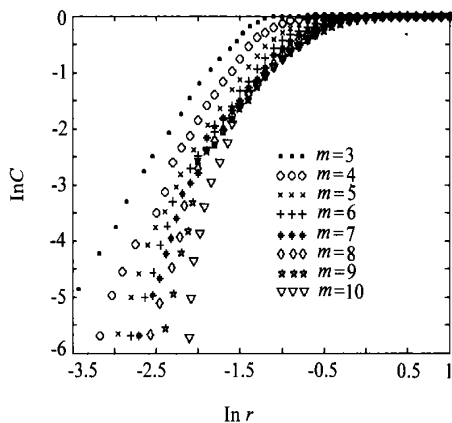


图 5 $N_1=90\%$ 时, 测点 1 $\ln C$ 与 $\ln r$ 的对应关系

Fig. 5 The corresponding relation of 1th test point between $\ln C$ and $\ln r$ while N_1 is 90%

通过上述对压力脉动信号的分析, 无论是幅值域、时域、频域, 都得到了相当一致的结果。

3 动压信号安装隐身装置前后的变化

气动分析表明: 安放隐身装置将会影响进气道气动性能。由于隐身装置的影响, 气流发生分离, 安装隐身装置后气流的脉动应该加剧, 紊流度将加大。

3. 1 幅值域的变化

动压信号在安装隐身装置后幅值增加, 最大瞬时动压为平均动压的 1.62~2.01 倍, 表明气流速度较前加快; 方差值增大表明紊流度也较前加大, 因为紊流度的定义为均方根与总压平均值的比值。图 6 为测点 1 压力值在安装隐身装置前后随转速的变化。这一现象同样在运用小波理论识别加速性信号的发展趋势中得到验证。图 7 为安装隐身装置之后压力信号在加减速性过程中的小波分解图形。本例用 SymletsA 小波系的 sym8 小波分解信号到第 20 层, 在低频的第 15 层, 压力变化的趋势清晰地分离出来, 加速性历经时间大约 5 s。与安装隐身装置之前压力信号在加速性过程中的小波分解图形作比较 (参考图 3), 可以明显看出, 动压的幅值在安装隐身装置后增加。

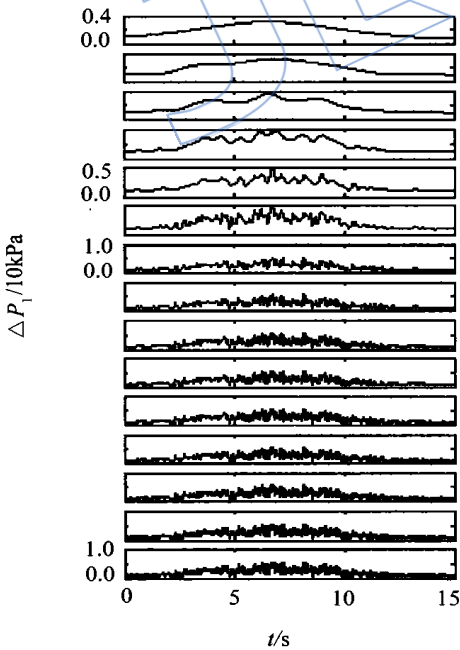


图 7 安装隐身装置后, 压力信号 1 在加速性过程中的各层低频和高频部分小波分解图形

Fig. 7 The wavelet decomposed figures of 1th test point in the course of engine accelerated motion after fixed stealthy device

3. 2 压力相关性的变化

压力相关性变化的具体情况是: 在中、低转速, 自/互相关函数降低不大; 在高转速, 相关性降低, 意味着进气道气流形成的涡旋破碎变小。

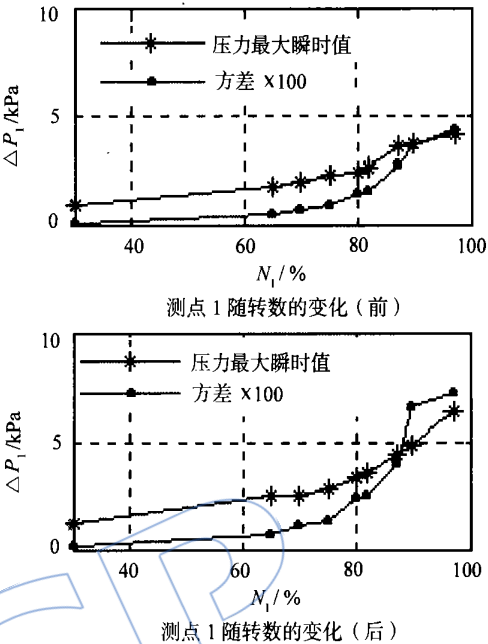
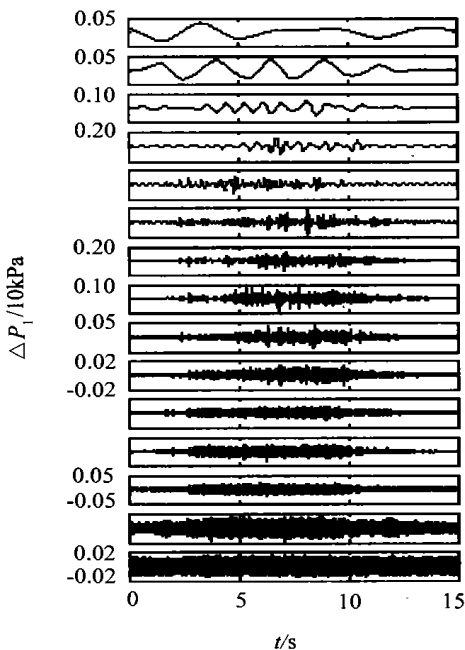


图 6 测点 1 压力值随转速的变化

Fig. 6 The pressure magnitude's change of 1th test point while rotate speed of engine raised



4 结 论

小波理论可用于进气道动压信号的消噪。

压力脉动信号的频率与低压压气机最大设计旋转频率有关，频谱分量主要集中在 100 Hz 以下。

随着发动机转速的提高，动压信号的幅值、频率均在升高，并且这种变化趋势与发动机加速性动压信号变化趋势相一致。

发动机低转速时，进气道气流形成的涡旋较大、紊流度较低；反之亦然。

进气道高速紊流的脉动压力系统中存在奇怪吸引子，其关联维数 $5 < D < 6$ 。

参考文献:

[1] Amin N F, Hollweger D J. F/A - 18A Inlet-Engine Compatibility Flight Test Results [J]. AIAA- 91- 1393.

[2] 李文峰, 马利东, 王永生, 等. 某涡扇发动机压力畸变评

定技术 [J]. 西北工业大学学报, 2003, 21 (5): 540-543.

[3] Carfinkel A, Spano M L, Ditto W L, et al. Controlling cardiac chaos [J]. SCIENCE, 1992, 257: 1230.

[4] 谢寿生. 某型飞机某加力涡扇发动机 [M]. 西安: 空军工程学院出版社, 1998.

[5] 郑克扬, 李懿, 伍耐明, 等. 发动机动态压力畸变数据采集处理系统方案研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 1997, (10): 29- 35.

[6] 李文峰. 航空发动机 V XI 总线测试系统及其数据处理技术 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.

[7] 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: 217- 225.

[8] Moore M E, Lueke J E. A Similarity Parameter for Scaling Dynamic Inlet Distortion [J]. Transaction of ASME, 1994, 96B (4): 735- 742.

[9] 程邦勤. 涡喷、涡扇发动机进气总压畸变试验研究 [D]. 西安: 空军工程大学, 2000.

[10] 王玲玲, 黄细彬, 金忠青. 用奇怪吸引子理论研究紊流脉动压力特性 [J]. 河海大学学报, 2001, 29 (3): 8- 11.