

文章编号: 1000-8055(2006)06-1092-06

基于相关积分法的离心压气机 喘振过程的非线性监测

孙 涛¹, 徐光华², 张春梅³

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

3. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 相关积分算式中参考距离的取值显著影响计算结果, 本文以相关积分值的物理意义和两点距离序列的分布规律为依据引出了参考距离的取值原则。为了定量分析离心压气机失稳和喘振的程度, 分别定义了基于参考距离的相对非平稳度和基于相关积分值的喘振强度。以实验分析论证了相关积分值等三个监测参数在离心压气机运行工况监测、喘振强度辨识和压力信号非平稳性度量中的有效性。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 离心压气机; 相关积分法; 喘振; 工况监测

中图分类号: TP206.3

文献标识码: A

Nonlinear monitoring of the centrifugal compressor surge process based on the correlation integral method

SUN Tao¹, XU Guang-hua², ZHANG Chun-mei³

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of manufacturing System Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;)

Abstract: The reference distance in the correlation integral formula affects the computational value of correlation integral dramatically. In this paper, the method of setting values for the reference distance was presented on the basis of the physical meaning of the correlation integral value and the distribution of all inter-points distances at different operating conditions. Relative degree of unsteadiness based on the reference distance and intensity of surge based on the correlation integral value were defined to analyze the degree of instability and surge in centrifugal compressors quantitatively. By means of applying these measuring parameters to a case of our experiment, it demonstrates that the correlation integral value, etc. are effective for the nonlinear monitoring of operating condition, identification of surge intensity and measuring of pressure unsteadiness in centrifugal compressors.

Key words: aerospace propulsion system; centrifugal compressor; correlation integral

收稿日期: 2005-11-15; 修订日期: 2006-04-23

基金项目: 国家重大产业化专项项目——大型透平压缩机组集散监控系统高技术产业化示范工程

作者简介: 孙 涛(1977-), 男, 陕西西安人, 西安交通大学仪器科学与技术系博士生, 主要从事监测诊断理论和方法的研究。徐光华(联系人), 男, 教授, 博士生导师。

method; surge; condition monitoring

喘振是一种典型的失稳现象,它造成的后果是很严重的,不仅使压气机的性能恶化,压力和效率显著降低,机器出现异常的噪声、吼叫和爆音,而且使机器出现强烈的振动,致使压气机的轴承、密封遭到损坏,甚至发生转子和固定部件的碰撞,造成机器的严重破坏。失稳征兆检测方法旨在通过分析压气机内部流动特征,正确地预测压气机的运行状态,对于保障压气机的安全有效运行是非常有益的。目前常用的失稳征兆检测方法可分为时域分析^[1]、频域分析、时频域联合分析,如相关分析^[2]、功率谱密度分析^[3]和小波分析^[4]等。本质而言,相关分析和功率谱密度分析属于平稳信号处理技术,是以信号的平稳性为前提的,仅从时域或频域分别给出统计平均结果,不能同时兼顾信号在时域和频域的局部化和全貌。小波变换通过可以伸缩和平移的小波对信号作变换而达到时频局部化分析的目的,但是小波本质上是一种窗口可调的 Fourier 变换,其小波窗内的信号必须是平稳的,因而没有摆脱 Fourier 分析的局限,小波基的有限长会造成信号能量的泄漏,使得信号的能量-时间-频率分布很难定量给出。这些方法大多基于捕获失稳过程中的时域指标或频率的变化,不能很好地反映喘振过程中压气机作为一个非线性系统状态演化信息。近些年来,许多学者以非线性理论为指导,将分叉、混沌和奇异性等理论应用于压气机气动不稳定的监测诊断。文献[5]将分形动力学思想引入航空发动机转子振动系统的信号分析中,用关联维数分析、辨识不同的故障。文献[6]采用混沌理论的 SVD 方法构造了流动的空间相位图,分析了离心压气机流动的失速的成长过程。而相关积分值在当今的非线性研究领域用于计算分形维数,在监测诊断工程领域,已有学者尝试将其用于航空发动机压气机失速时气动不稳定监测和失速先兆辨识。美国 NASA 的 M. B. Michelle 通过在高速压气机上的实验发现旋转失速发生前较长时间工作介质压力信号的相关积分值就明显下降^[7,8];吴云等对某涡喷发动机节流试验的研究表明在不同的发动机稳定裕度下,压气机第一级静叶通道机匣壁面静压的相关积分值有规律的变化^[9]。以上工作充分表明非线性方法是压气机稳定性分析的重要手段。

作为非线性分析的主要方法之一的相关积分

法,是基于 Takens 提出的相空间重构原理来定量描述非线性系统的动力学特性,相关积分算式中主要参数嵌入维数 m 、时间延迟 τ 和参考距离 r 的取值十分关键,直接影响相关积分计算结果。在前期的研究工作中,对 m 和 τ 的选取方法研究较多, τ 的选择可采用自相关法、互信息法、高阶相关法、平均位移法等, m 的选择也有奇异谱分析、伪邻近点法等多种方法,而对 r 取值的研究则很少。本文以相关积分值的物理意义和两点距离序列的分布规律为依据引出了参考距离 r 的取值方法。在此基础上,针对压气机的运行工况稳定性和典型非平稳工况喘振的剧烈变化程度的定量描述要求,定义了两个相对应的度量参数,并将其应用于气动不稳定监测、出口压力非平稳性度量和喘振强度辨识中,取得良好效果。

1 实验装置和过程

本实验在西安交通大学赛尔机泵成套工程研究中心离心压气机实验台上进行的。实验台设计成一个开放式系统,由功率为 250 kW 的直流电机、增速齿轮箱、单级离心压气机、进气管道、出气管等部分组成。其中离心压气机的实验转速为 13 570 r/min,叶轮外径为 290 mm,叶轮进口宽度 4.5 mm,叶轮出口宽度 3.4 mm。本次实验设计压比为 1.34,喘振的一阶谐波频率约为 2.67 Hz,采样频率为 150 Hz。

实验过程中测量了流量、压力和温度。流量的测量是在空气吸入段附近的进气管道处装有标准孔板流量计,孔板前后管道上开有静压孔,外接精度为 0.25% 的压力变送器。离心压气机级进口和出口管道上开有总压孔和静压孔,用来测量级的总压和静压。其中,总压测量采用套管式总压探针,外接精度为 0.1% 压力变送器。此外级进出口处还装有电阻式温度传感器用来测量级的进口和出口温度。

对实验所用的压力传感器动态标定结束后,开始调节节流阀,测量不同转速下的离心压气机性能及流量、压力信号。首先,测量两组离心压气机大流量下的性能数据。其次,缓慢关小压气机下游出口处的节流阀,调节压气机流量至设计工况,测量一组稳态时流量和压力信号。再次,以较快的速度继续关小节流阀使压气机发生喘振,记录整个过程的动态数据。最后,迅速开大节流阀,

待压气机恢复设计工况附近的流量后,以较慢的速度关小节流阀使压气机再次发生喘振,记录整个过程动态数据。对不同转速重复上述过程,实验结束。离心压气机的特性曲线及实验细节参见文献[10]。

2 相关积分法

1983 年,Grassberger 和 Procaccia 根据延时嵌入重构的思想,提出了从时间序列直接计算关联维数的算法,即 G-P 算法^[11]。在该算法中,相关积分值仅仅充当计算关联维数的中间量,而非独立的动态过程度量指标,此后大量的研究表明相关积分值可以充当度量非线性系统动力学特性变化的指标。为了检测动力学特性的改变,相关积分法被提出并被广泛应用于非线性系统的研究。在相关积分法中,相关积分值作为时间的函数,其变化被所谓的相关积分曲线(r 取固定值时,由各滑动时间窗的相关积分值对时间的曲线)追踪。

2.1 相关积分算式

Takens 重构原理通过将时间序列 $\{x_t\}$ 映射到 m 维的欧氏空间 R^m 中,并使 R^m 空间中的点保持原有未知吸引子的拓扑特性,从而解决了依据实际测得的单变量的标量时间序列建立和描述有限维的吸引子及重构系统动力学的问题。以嵌入维数 m 和延迟时间 τ 对时间序列 $\{x_t, t=1, 2, \dots, n\}$ 进行延时嵌入重构,重构出一个由 $N=n-(m-1)t$ 个向量 $Y_i=\{x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}\}$ 构成的相空间。定义 $\|Y_i-Y_j\|\leq r$ 的点 (Y_i, Y_j) 为相关点对,则重构向量序列的相关积分值 CI 可表示为:

$$CI = C(r) = \frac{N_d}{N_c} \tag{1}$$

式中 $N_c = \frac{N(N-1)}{2}$, 相空间中任意两个相点所构成的点对的总数。

$N_d = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N H(r - \|Y_i - Y_j\|)$, 为相空间中相关点对的总数, r 为参考距离。

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \text{ 为 Heaviside 函数}$$

分析相关积分算式可得出如下结论: ① $0 \leq CI \leq 1$; ② 相关积分值反映在重构相空间中距离小于 r 的相关点对在所有点对中所占的比例。

2.2 参考距离取值原则

由重构向量序列 $\{Y_i, i=1, 2, \dots, N\}$ 中任意

两点之间的距离 $\|Y_i - Y_j\|$ 构成一新的时间序列 $\{D_s, s=1, 2, \dots, N(N-1)/2\}$ (两点距离序列, 也称 interpoint distance)。显然, 相关积分值也等于两点距离序列中值小于参考距离的点数和两点距离序列中总点数之比。利用 G-P 算法计算关联维数时, 公式(1)中参考距离必须在某个适当范围内取值以保证吸引子的维数 d 与累积分布函数 $C(r)$ 满足对数线性关系, BDS(Brock, Dechert and Scheinkman) 数学统计结果表明 $\frac{\sigma}{2} \leq r \leq 2\sigma$

较为合适, 这里 σ 指时间序列的均方差。而在监测诊断领域, 相关积分值作为一个定量指标区分设备的不同状态, 比如在压气机的气动不稳定监测中用于反映压气机内部流场的流动状况, 此时式(1)中的 r 相当于给了 D_s 一个变化的门限值, 一般取为固定值, 这种情况下 r 的取值原则很少有人研究, 基本上还是参照 BDS 数学统计结果, 采用试凑法进行估计。文献[12]在假设平稳过程服从正态分布的前提下, 得出两点间距离序列中元素落在 $(-\infty, \mu + 2\sigma)$ 之内的概率大于 97.72%, 取参考距离为 $R = \mu + 2\sigma$ 。虽然假设平稳过程服从正态分布可以满足工程的需要, 但与实际的概率分布仍有较大的出入, 以此参考距离计算非平稳过程的相关积分值误差更大。

Bright 利用统计直方图分析了压气机稳态工况和失速工况压力信号两点距离序列的分布规律: 机组处于平稳运行工况时两点距离序列的样本点比较集中, 相关积分值较大; 机组处于非平稳运行工况时两点距离序列的样本点分布范围较广, 相关积分值较小^[8]。由此可见, 两点距离序列的分布可以作为确定参考距离的依据。本文根据两点距离序列的分布规律和相关积分值的物理意义, 提出了一种新的确定参考距离的方法。该方法包括以下 4 个步骤: ① 确定稳态时间窗的两点距离序列, 并将两点间距离序列的元素从小到大排列构成新的序列 X' ; ② 设定稳态时间窗所对应的相关积分值, 一般大于 0.9; ③ 将两点距离序列的总点数 N_c 和预先设定的相关积分值代入公式(1)即可求得两点距离小于参考距离 r 的点对的个数 n_l ; ④ 以 X' 中的第 n_l 点为参考距离。本参考距离取值算法无需计算两点间距离序列的数学期望和均方差, 计算量小, 并且避免了假设所产生的计算误差和试凑法的繁琐, 在压气机气动不稳定监测中的应用表明该算法是合理而有效的, 优于文献[12]所提出的参考距离取值原则。

3 信号非平稳性的度量

诊断方法的多样性在扩大诊断范围、提高确诊率的同时也为分析时诊断方法的选用带来了困难。根据信号的性质可将数字信号处理方法分为两大类, 平稳信号分析方法和非平稳信号分析方法, 因此研究信号的非平稳性和非平稳程度对选择信号处理方法很有必要。为了定量分析离心压气机的失稳和喘振的程度, 分别定义了基于参考距离的相对非平稳度和基于相关积分值的喘振强度。根据相对非平稳度判断信号的性质后选择诊断方法, 可降低现场设备操作人员的工作难度, 提高诊断的客观性。由于防喘控制并不能控制运行点移动速率, 只能对引起运行点加快移动的因素进行预测补偿, 根据喘振强度判断喘振的强弱后决定补偿量, 预期可改善补偿效果。

由前面的分析可知, 压气机的运行工况和两点距离序列的概率分布有良好的对应关系, 其概率分布和参考距离共同决定了相关积分值的计算结果。根据本文提出的参考距离取值原则计算平稳样本的参考距离, 令其为基准参考距离。定义相对非平稳度为:

$$ND_r = |R_1 - R| / R \tag{2}$$

式中 R 为平稳样本的参考距离, R_1 为被度量样本的参考距离。公式(4)中 R 是固定值, 显然, ND_r 越大, R_1 和 R 间的距离越大, 两点距离的分布范围越大, 信号非平稳程度越大, 压气机运行越不平稳。

稳态向喘振过渡阶段的相关积分曲线表明喘振前 1~ 2 s, 相关积分值快速下降, 然而进入喘振后, 下降趋势将终止(见图 2 和图 3)。相关积分曲线下降段的散点(CI_i, t_i)大致靠近一直线, 对这些散点进行最小二乘线性拟合, 定义拟合直线斜率倒数的绝对值为喘振强度。

$$SI = |1/k| \tag{3}$$

式中 k 为拟合直线的斜率。

4 实验数据分析

本文所分析的信号为出口总压, 所作预处理是去除直流分量、趋势项和高频噪声, 将经过预处理的信号分别进行 PSD(power spectrum density) 分析和相关积分分析。延迟时间和嵌入维数的选择分别采用自相关法和伪邻近点法, 取值分别为 3 和 10。根据本文所提出的参考距离取值原则, 选取 $r = 12.176$ 。窗口大小为 1 s, 滑动时

间间隔为 0.1 s。

4.1 压气机气动不稳定监测

分别对离心式压气机远离喘振(数据段 1)、接近喘振到进入微弱喘振(数据段 2)、接近喘振到进入较大喘振(数据段 3)和完全进入喘振(数据段 4)三种工况下的 4 组数据进行 PSD 分析和相关积分分析, 分析结果如图 1~ 图 4 所示(图 1~ 图 4 中压力为去除均值后的压力, 非实际压力)。可以看出, 随着离心压气机逐渐进入喘振工况, 出口压力有规律的发生变化。远离喘振时, 出口压力比较稳定, 压力幅值脉动较小, 功率谱图上只有约 46Hz 的工频噪声, 相关积分值在一个较高水平上(大于 0.95); 稳态向喘振过渡阶段, 功率谱图上除了 46Hz 的工频噪声, 低频部分还出现了约为 2.3Hz 的喘振先兆频率, 相关积分曲线由高到低变化, 喘振前 1~ 2 s 相关积分值突然快速下降, 进入喘振后下降趋势终止, 相关积分值保持在较低水平(0.72 左右); 完全进入喘振后, 整个系统发生周期性轴向低频大幅度气流振荡现象, 出口压力脉动很大, 低频部分出现约为 2.6Hz 的喘振频率, 幅值也明显大于喘振先兆频率的幅值, 相关积分值在一个更低的水平上(0.65 左右)。因此相关积分值的变化反映了不同工况下离心压气机内部流场的流动状况, 可以将离心压气机出口压力的相关积分值作为度量其内部流动的一个指标。

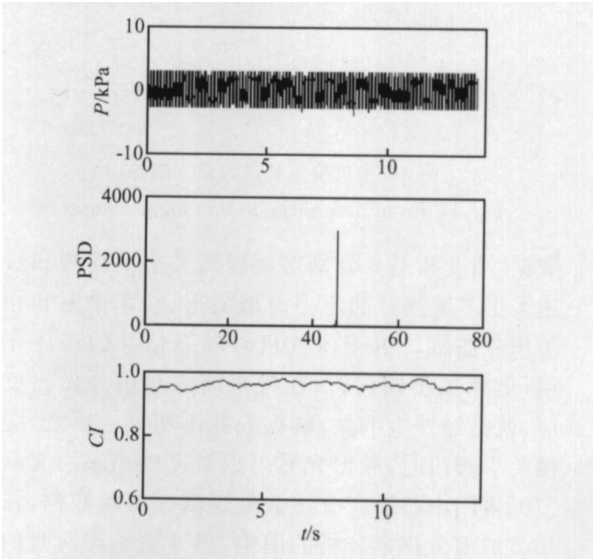


图 1 远离喘振

Fig. 1 Far from surge

4.2 喘振强度辨识和非平稳性度量

在喘振实验中记录了两组稳态向喘振过渡的

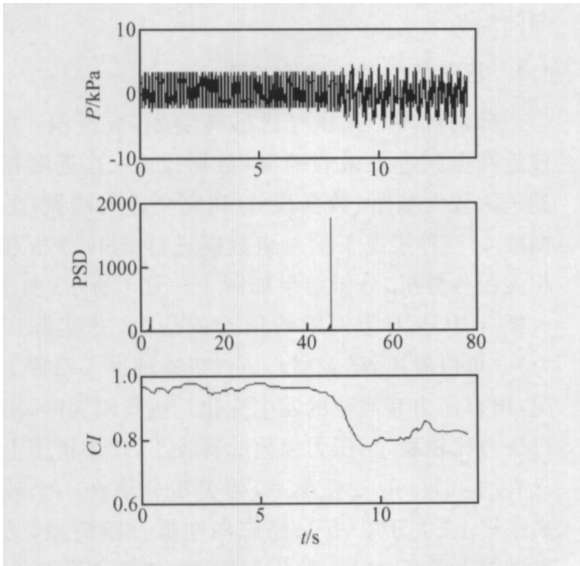


图 2 接近喘振到进入微弱喘振

Fig. 2 From near surge to into mild surge

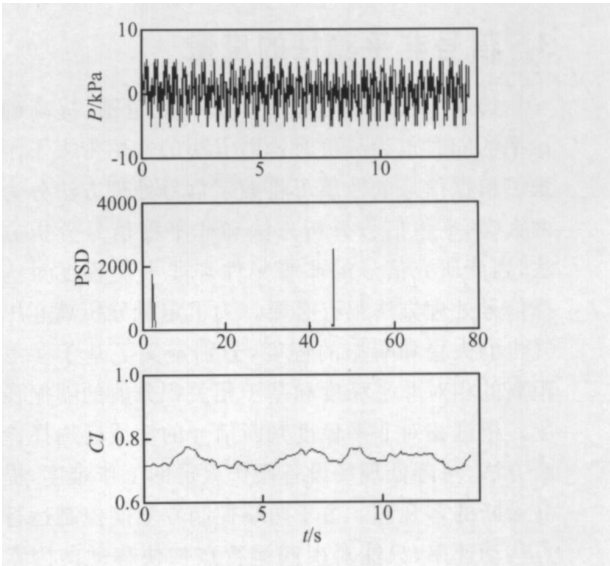


图 4 完全进入喘振

Fig. 4 Complete entrance into surge

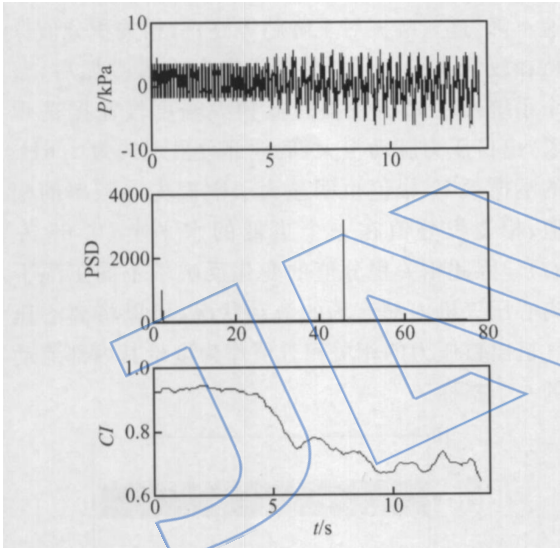


图 3 接近喘振到进入较大喘振

Fig. 3 From near surge to into biggish surge

段 2 和数据段 3 的喘振强度分别为 7.05 和 9.36。迅速关小阀门时入口流量迅速减小,喘振剧烈,喘振强度大,反之则小,证明了喘振强度的有效性。

喘振强度和时域波形均表明数据段 3 压力信号的非平稳性比数据段 2 强。叠取数据段 1 前 4 s 压力为平稳样本,被度量样本分别选择数据段 2 的 8~12 s 的压力和数据段 4 的 7~11 s 的压力,采用本文提出的相对非平稳度公式计算微弱喘振段和较大喘振段压力的相对非平稳度,其值分别为 0.317 5 和 0.532 4,显然较大喘振时的相对非平稳度比微弱喘振时大,证明了相对非平稳度的有效性。

5 结论

相关积分法具有对参数变化的可靠性和对噪声不敏感的优点,预期可为失稳征兆的检测提供较长的预警时间。实验数据的分析表明本文所提出的参考距离的取值原则及所定义的相对非平稳度和喘振强度是有效的,它们提高了诊断方法选择和喘振强度辨识的客观性。对相关积分曲线的分析可得到如下结论:

- (1) 随着压气机从稳态向喘振过渡,相关积分值渐次减少,喘振前和喘振中相比较,存在相关积分值的突降,相关积分法用于离心压气机运行工况的监测是有效的。
- (2) 相关积分法可在进入喘振前较长时间辨识出喘振先兆,监测压气机出口压力信号的相关积分值的变化预期可以提高喘振检测的时效性。

数据,图 2 和图 3 分别对应缓慢关小节流阀和快速关小节流阀时的压力时域波形、功率谱图和相关积分曲线。由于压气机对动态信号的滞后作用,迅速关小阀门时,压气机尚未对信号做出反应,就已经发生喘振,喘振先兆不明显。反之,缓慢关小阀门时,喘振先兆可以被反映出来。文献 [10] 采用小波结合分维数处理喘振实验数据,在小波的多分辨率分析的图中,迅速关小阀门时的喘振先兆不明显,图 2 和图 3 的功率谱图差别也不大,但它们的相关积分曲线差别却很大,相关积分值下降的时刻比从时域上可明显看到喘振先兆分别提前了约 1.5 s 和 1.2 s。为了度量喘振的剧烈程度,根据本文所定义的喘振强度,计算数据

参考文献:

- [1] 张靖焯. 一种捕捉预示压气机失稳预警信号的新方法的研究. 航空动力学报, 2004, 19(2): 270-277.
Zhang Jing xuan. Study of a new method for giving warning signals of instability [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(2): 270-277.
- [2] 宋慧敏, 李应红, 吴云, 等. 基于自相关函数的压气机气动不稳定监测方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 16(3): 7-9.
Song Hui min, Li Ying hong, Wu Yun, et al. Sensing the aerodynamic instability of compressor using autocorrelation function [J]. Journal of air force engineering university (Natural Science Edition), 2005, 16(3): 7-9.
- [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] 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.
- [5] 陈超, 程礼. 基于关联维数的发动机转子振动故障模式判别[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(3): 17-22.
Chen Chao, Cheng Li. Vibration fault mode determination for engine rotor based on correlation dimension [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(3): 17-22.
- [6] 顾春伟, 晋宏师, 长岛利夫, 等. 叶轮机械内部不稳定流动现象的研究[A]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议论文集[C]. 北京: 2005, 505-510.
- [7] Bright M M, Qammar H K, Weigl H J, et al. Stall precursor identification in high speed compressor stages using chaotic time series analysis methods [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119: 491-499.
- [8] Bright M M, Helen K Q, Wang L. Investigation of pre stall mode and pip inception in high speed compression through the use of correlation integral [J]. AEME Journal of Turbomachinery, 1999, 121: 743-750.
- [9] 吴云, 张朴, 李应红, 等. 基于相关积分方法的压气机气动不稳定监测[A]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议论文集[C]. 西安: 2004: 434-439.
- [10] 李美林. 基于小波分析的离心压气机喘振实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2001.
- [11] Grassberger D A, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors [J]. Physica D, 1983(9): 189-208.
- [12] 关惠玲, 阎献国, 张优云. 动态过程非平稳性度量及其在设备诊断工程中的应用[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 141-145.
Guan Huiling, Yan Xian guo, Zhang Youyun. Unsteadiness measurement of dynamic process and its application to equipment diagnosing engineering [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8): 141-145.