

文章编号: 1000 8055(2008)11-2133-04

基于系统混沌指数的航空发动机状态监测

李天亮¹, 何立明¹, 程邦勤¹, 邹仕军²

(1. 空军工程大学 工程学院, 西安 710038;

2. 驻沈阳飞机制造公司军事代表室, 沈阳 110034)

摘 要: 从混沌理论、分形学的角度研究了航空发动机失稳工作, 计算了发动机失稳过程系统混沌特征量的变化. 采用小波降噪对压气机压力数据作预处理, 重构了系统相空间, 改进了关联积分的计算方法, 在此基础上采用滑动窗口方法计算了发动机失稳过程中系统李雅普诺夫指数、关联维数的变化. 计算结果显示, 发动机失稳过程中系统的混沌指数有显著的改变, 系统进入失稳状态李雅普诺夫指数增大 0.19, 而关联维数则减小 0.45, 表明混沌指数可用于发动机系统的状态监控, 亦为发动机失稳运动的特性研究提供了新思路.

关 键 词: 状态监测; 李雅普诺夫指数; 分形维数

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Condition monitoring for aero engine based on chaos exponents of dynamic system

LI Tianliang¹, HE Liming², CHENG Bangqin², ZOU Shirun²

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Representative office in Shenyang Aeroplane (group) Ltd, Shenyang 110034, China)

Abstract: The instability condition of aeroengine was studied in light of chaos and fractal theories, the chaotic character exponents of aeroengine in the process of entering instability condition were calculated. First, the pressure signal was denoised with wavelet method, and then the phase space of the engine was reconstructed. The method to calculate correlation integral was improved, then, the Lyapunov exponents and correlation dimension were calculated with the method of sliding window. The results show that the chaos exponents changed markedly as the condition of aeroengine varies, as a consequence, the chaos exponents can be used to identify the aero engine condition and as a new method to study the dynamic characteristics.

Key words: condition monitoring; Lyapunov exponent; fractal dimension

航空发动机是飞行器的“心脏”, 对其进行状态监控对飞行的安全尤为重要. 但由于其是多变量、强耦合的复杂非线性系统, 研究起来困难较多. NASA 利用卡尔曼滤波方法估计发动机的性能退化, 但该方法对系统的模型依赖度较高、收敛性较差^[1-2], 文献[3]对发动机的多个参数进行综

合加权, 得到一个反映系统性能的综合指数, 在此基础上文献[4-5]采用遗传算法进一步优化综合指数权值, 并采用支持向量机、神经网络等方法对该指数进行预测, 从而监控发动机的状态. 但该方法中的权系数对专家的经验较为依赖, 而且需要进行一定数量的故障试验.

收稿日期: 2007 10 09; 修订日期: 2007 12 14

作者简介: 李天亮(1981-), 男, 湖北枣阳人, 博士生, 研究方向为推进系统特性及动力系统稳定性.

Email: tianliang_flying@yahoo.com.cn

传统的状态监测方法,例如 FFT 谱、伪相图等,只能做出初步的、定性的结果,另一方面,发动机的不同状态对应着不同的非线性特征,比如发动机喘振可视为由于系统参数的变化导致分岔,形成极限环^[6]. 非线性动力学的发展,特别是混沌、分形的进步,为诸如航空发动机等复杂机械系统的研究提供了新的观点和方法. 混沌与分形通过研究系统吸引子的结构及其变化来研究系统的稳定性. 系统正常工作时其吸引子结构是稳定的,当系统偏离正常工作状态时其吸引子结构就发生变化. 系统的最大李雅普诺夫指数、分形维数等混沌指数是混沌系统的重要参数,它们定量刻画了混沌吸引子的混沌水平,反映了系统的复杂程度. 基于此,本文采用混沌指数作为发动机状态的特征参数,研究发动机工作状态变化过程中对应系统混沌指数的变化,从而对发动机的状态进行监控.

1 混沌指数算法及分析

1.1 相空间重构

重构相空间相当于将一维时间序列 x_i 映射到 M 维的欧氏空间 R^M 中,并希望 R^M 空间中的点能保持原动力系统的拓扑特性. 本文采用 Takens 时间延迟法重构动力系统的相空间^[7]. 对时间序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 重构后的相空间可表示为 $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]^T$, 式中 X_i 是相空间中的一个矢量点, $X_i = [x_i, x_{i+J}, \dots, x_{i+(m-1)J}]$, 其中 m 是嵌入维数, J 是时间延迟. 显然, $M = N - (m - 1)J$.

1.2 计算李雅普诺夫指数

通常计算李雅普诺夫指数采用 GP 算法 (Grassberger-Procaccia), 但该方法计算量较大, 对参数较为敏感, 对数据的信噪比要求也较高. 鉴于此, 本文采用 Rosenstrin 提出的可适用于小数据量的稳健算法^[8,9].

在相空间 X 中搜索每个矢量点 X_i 的最近邻域点, 即

$$d_j(0) = \min \|X_j - X_i\|$$
$$\text{s. t. } |j - i| > p$$

其中 p 为时间序列的平均周期, 可以通过时间序列的 FFT 估计得到^[8,9].

由最大李雅普诺夫指数的几何意义可知, 该指数量化了初始邻近轨道的指数分散率, 即

$$d_j(k) = d_j(0)e^{\lambda(k\Delta)}$$

式中 $j = 1, 2, \dots, M$; k 是演化步长, Δ 是采样时间间隔, 对上式两边取对数

$$\ln d_j(k) = \ln d_j(0) + \lambda(k\Delta t)$$

上式表示一簇近似平行线, 采用最小二乘法拟合这簇直线的平均斜率即为所求李雅普诺夫指数, 即

$$y(k) = \frac{1}{\Delta} [\ln d_j(k)]$$

式中 $[\cdot]$ 表示对所有 j 求平均.

1.3 计算分形维数

关联维数、盒维数、李雅普诺夫维数等维数能在一定意义上代替分形维数, 其中关联维数数学物理意义清晰且计算较为方便, 本文计算系统的关联维数代替分形维数.

对相空间 X , 任取其中一个参考点 X_i , 计算其余点到它的距离: $r_{ij} = \|X_i - X_j\|$, 其中 $\|\cdot\|$ 表示二次范数. 求出所有点对 (Pair) 间的距离, 凡是距离小于给定参数 r 的矢量, 称为关联矢量, r 是相空间中超球半径. 在相空间 X 中, 关联矢量对占有所有矢量对的比例称为关联积分^[8]

$$C(r) = \frac{1}{M^2} \sum_{i,j=1}^M H(r - r_{ij})$$

式中 $H(\theta)$ 为阶跃 (Heaviside) 函数

$$H(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta \leq 0 \end{cases}$$

$$\text{关联维数 } D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C(r)}{\ln r}$$

考虑到在式 (5) 计算中, 数据点选取有重复性, 本文对关联积分进行改进, 如下:

$$C(r) = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M H(r - r_{ij})$$

1.4 参数分析

时间延迟 J 和嵌入维数 m 是重构相空间的两个重要参数, 其选择的优劣将直接影响到混沌指数计算结果的精确性.

Takens 指出嵌入维数应满足: $m \geq 2 \times (d + 1)$, d 是系统分形维数^[7], 但系统的分形维数一般是未知的, 所以通常采用逐步增大 m 直到关联积分收敛的算法计算量较大. 本文采用虚假邻域法 (False Neighbors) 计算嵌入维数, 定义相空间中虚假邻域所占的百分比为

$$\Lambda(k, m, J) = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i=1}^{M-J} \sum_{j=i}^{M-J} \ln \frac{\|x_{i+k} - x_{j+k}\|}{\|x_i - x_j\|}$$

式中 k 是设定的常数, 取 Λ 最小时对应的维数为

最佳嵌入维数.

若时间延迟 J 过小, 则重构点在相空间距离非常小, 不能作为独立的坐标; J 过大, 状态点又将失去相关性, 使得简单的图像看起来也极为复杂. 本文采用互信息函数法计算时间延迟^[7], 互信息定义如下:

$$I(J) = \sum_{i=1}^{M-J} p(x_i, x_{i+J}) \log_2 \left[\frac{p(x_i, x_{i+J})}{p(x_i)p(x_{i+J})} \right] \quad (9)$$

式中 $p(x)$, $p(x, y)$ 分别是概率密度和联合概率密度. 取 $I(J)$ 的第一个局部最小值为最佳时间延迟 J .

2 诊断例子及分析

针对某型发动机在使用过程中出现失速、喘振等不稳定工作现象已进行了多次试验研究. 本文以某次地面试车过程中采集的压气机压力数据为基础, 研究发动机由稳定工作状态过渡到失稳工作状态系统所对应的混沌指数的变化.

试验中在发动机前 8 级压气机安装压力传感器, 数据采样频率为 10 000 Hz. 试验采集了从压气机稳定工作到失速结束过程共持续 12 s 的压力数据, 压力数据单位是标准大气压 (101. 325 kPa). 试验发现第三级压气机最先出现失速扰动气流, 所以本文采用第三级压气机动叶后压力数据为研究对象.

为消除测量噪声的影响, 首先采用小波降噪对数据进行预处理, 采用 sym8 小波, 分解层次为 6, 如图 1 所示. 为突出重点, 本文只研究压气机失速过程前后系统混沌指数变化情况, 即从第 8 s 开始到过程结束的这 4 s 内的系统混沌指数的变化.

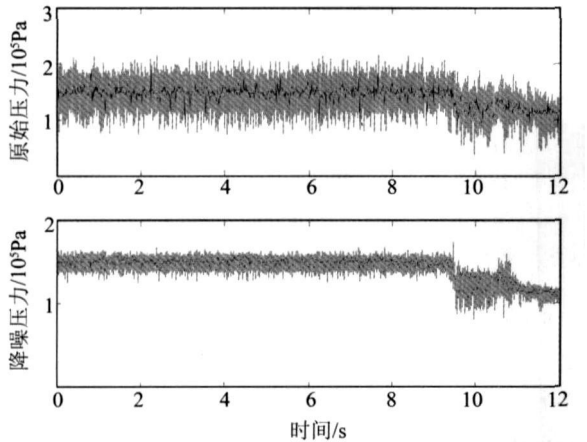


图 1 失稳过程压力变化与降噪处理

Fig. 1 Original and denoised pressure data of the complete process

口每前进一步计算一次. 经计算对比发现, 窗口宽度、滑动步长都取 1000 时, 系统失稳过程中混沌指数变化较明显, 检测效果好. 由滑动步长及数据采样频率可知, 此时每 0. 1 s 计算一次系统的混沌指数.

根据 2. 4 节介绍的算法, 时间延迟 J 、嵌入维数 m 的计算结果分别为 7, 8, 如图 2, 图 3 所示.

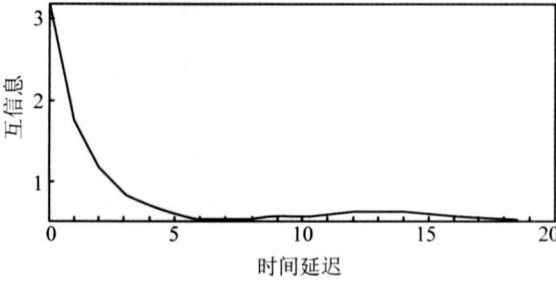


图 2 时间延迟

Fig. 2 Figure of the time lag

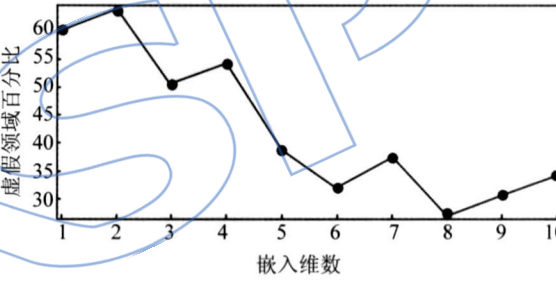


图 3 嵌入维数

Fig. 3 Figure of the embedding dimension

发动机失稳过程中系统最大李雅普诺夫指数的变化如图 4 所示, 系统关联维数的变化如图 5 所示. 两图中均用虚线标出了失稳前、后对应混沌指数的平均值.

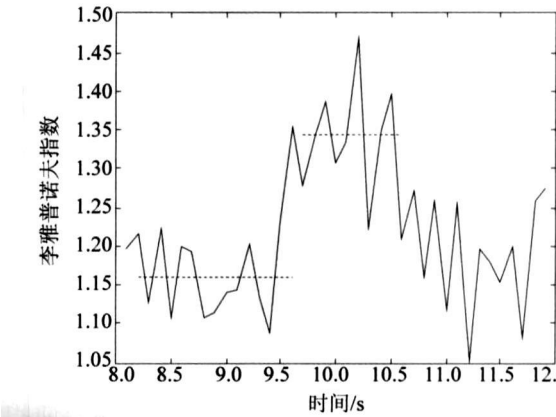


图 4 最大李雅普诺夫指数变化

Fig. 4 Variation of the max Lyapunov exponents

采用滑动窗口方法计算混沌指数的变化, 窗

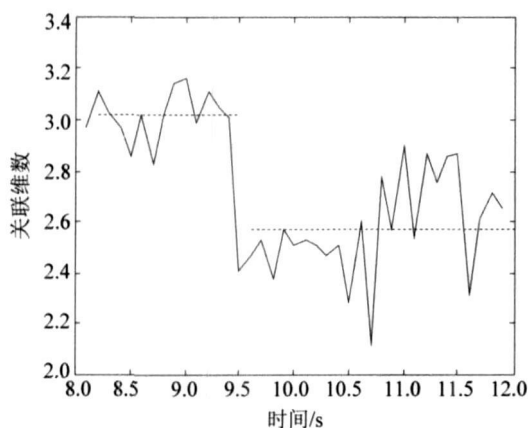


图5 关联维数变化

Fig. 5 Variation of the correlation dimension

系统最大李雅普诺夫指数实质上反映了系统的混沌水平. 由图4可见, 发动机系统在稳定工作时混沌水平较低, 其最大李雅普诺夫指数在1.16左右, 而当系统进入不稳定工作时, 最大李雅普诺夫指数有较大的提高, 在1.35左右, 其均值增大0.19, 说明发动机系统进入不稳定工作状态时混沌运动水平显著加强.

与最大李雅普诺夫指数的变化趋势不同, 发动机在稳定工作时, 其关联维数保持在3.02上下, 而进入不稳定工作状态后, 系统关联维数减小, 数值小于2.57, 其均值减小0.45. 关联维数的变化说明, 发动机进入失稳状态后压气机的工作形式(失速或喘振)存在某种一致和有序.

由此可见, 发动机在失稳过程中系统的最大李雅普诺夫指数、关联维数都有显著的变化, 对应着发动机失稳工作前后状态的变化, 所以, 可以用系统的混沌指数对发动机进行状态监测.

3 结 论

本文从非线性动力学的观点研究了发动机不稳定工作前、后的状态变化, 计算了系统状态变化过程中最大李雅普诺夫指数、关联维数等混沌指数的变化. 通过某型发动机实测试车压力数据的计算表明, 发动机失稳前后系统的混沌指数有较大变化, 可以采用混沌指数对发动机状态进行状态监测, 这也为研究发动机失稳工作提供了新思路. 若能进一步研究系统混沌指数的变化与发动机工作参数的关系, 比如压气机几何尺寸、转速、喷口面积对混沌指数的影响, 则可以采用混沌指数量化发动机的稳定性能, 这也是本文进一步的研究方向.

此外, 系统的最大李雅普诺夫指数、关联维数在发动机失稳前后的变化趋势相反, 说明系统运动的混沌水平和系统的维数没有必然联系, 在低维数空间中(关联维数较小)也可以产生较复杂的运动(李雅普诺夫指数较大). 这对研究发动机的不稳定工作亦有所启示.

参考文献:

- [1] Borguet S, Dewalle P. ON-line transient engine diagnostics in a kalman filtering framework [R]. ASME TURBO EXPO: GT2005-68013.
- [2] 方前. 航空发动机系统建模与故障诊断研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
FANG Qian. Modeling and model based fault diagnosis for aero engine [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)
- [3] 谢寿生. 某型飞机发动机故障诊断与性能趋势监测研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 1998.
XIE Shousheng. Fault diagnosis and performance monitor for a certain aero engine [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1998. (in Chinese)
- [4] 胡金海, 谢寿生. 基于支持向量机方法的发动机性能趋势预测 [J]. 推进技术, 2005, 26(3): 260-264.
HU Jinhai, XIE Shousheng. Study of support vector machines for aero engine performance trend forecasting [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 260-264. (in Chinese)
- [5] 胡金海, 谢寿生. 基于遗传算法的发动机性能监控与故障诊断 [J]. 推进技术, 2003, 24(3): 198-200.
HU Jinhai, XIE Shousheng. Performance monitoring and fault diagnosis of engines based genetic algorithm [J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(3): 198-200. (in Chinese)
- [6] 陈策, 李军. 基于B参数的轴流压气机过速稳定性分析 [J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 678-683.
CHEN Ce, LI Jun. Stability analysis of axial flow compressor post-stall transients based on parameter B [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 678-683. (in Chinese)
- [7] Takens F. Dynamical systems and turbulence [R]. Lecture Notes in Mathematics, Berlin: Springer, 1981: 366-381.
- [8] Rosenstein M T, Collins J J, Deluca C J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets [J]. Physica D, 1993, 65: 117-134.
- [9] 谢勇, 徐健学. 皮层脑电时间序列的相空间重构及非线性特征量的提取 [J]. 物理学报, 2002, 51(2): 205-214.
XIE Yong, XU Jianxue. Phase space reconstruction of ECoG time sequence and extraction of nonlinear characteristic quantities [J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(2): 205-214. (in Chinese)