

基于相关维数的发动机失速特征

张百灵, 丁康乐, 李应红, 姜涛

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:压气机内的压力变化数据,蕴涵着丰富的发动机状态信息,进行分析对于诊断发动机故障有重要意义。运用分形理论,对压气机失速前后的压力变化数据进行分析,分别计算压气机失速前后压力信号相关维数的变化,结果表明相关维数对发动机失速信号是敏感的,可以作为判断压气机失速的特征信号。

关键词:压气机;失速;分形;相关维数

中图分类号: V231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2003)03-0023-04

自20世纪70年代 Benoit B. Mandelbrot 提出分形几何理论以来,经过30年的发展,分形理论已成为一门重要的学科,在许多领域中得到广泛研究,并成为前沿研究领域之一。把分形理论和混沌理论应用于机械故障诊断领域,是近年来国际学术界的新动向。分形理论和混沌理论是当今非线性科学的一个重要而且也是非常活跃的方面,它特别适合研究各种“复杂现象”。目前对分形和混沌虽然还不能给出一个完满的定义,但它所蕴涵的意义已被逐步认识,而且在不断扩大。利用分形理论和混沌理论,不仅可以定性地分析系统的运动状态,还可以对其进行量化,从而实现复杂机械系统的故障诊断。

航空发动机作为飞机的“心脏”,是复杂的非线性系统,对其状态进行监控和故障诊断是一个迫切而困难的问题。压气机内的压力变化数据,蕴涵着丰富的发动机状态信息,对其进行分析对于诊断发动机故障将有重要意义。本文采用相关维数的方法,对测量到的压气机静叶内的压力变化数据进行分析,计算发动机在正常和失速时压力数据的相关维数,结果表明相关维数对失速信号是敏感的,可以用做压气机失速的特征量^[1]。

1 分形理论

1.1 定义相空间

动力系统在某一时刻的状态称为相。通常用质点的位置 x 及速度 \dot{x} 来刻画,平面 (x, \dot{x}) 称为相平面;系统所有可能的状态的集合称为相空间。

1.2 定义吸引子

对于耗散系统,相空间的体积在运动过程中会不断收缩,我们把经过足够长时间后系统在相空间中所趋向(收缩)的有限区域,称为吸引子。根据动力系统运行状态不同,其吸引子分为四种:定常吸引子、周期吸引子、准周期吸引子和奇异吸引子。

1.3 吸引子的分数维

维数是空间和客体的重要几何参数,状态空间中的维数反映了描述该空间运动所需的变量个数,而吸引子的维数则说明了刻画该吸引子所必须的信息量。Hausdorff 1919 年用这种方法定义了以他的名字命名的测度和维数,以此为基础,数学家又发展了十几种不同的维数,如拓扑维、盒子维、信息维、相关维等。这里主

收稿日期:2002-09-06

作者简介:张百灵(1966-),男,陕西乾县人,讲师,硕士,主要从事航空宇航推进理论与工程研究;

李应红(1963-),男,重庆奉节人,教授,博士生导师,主要从事推进系统控制与可靠性研究。

要介绍相关维。

1.4 定义相关维数

若考察 m 维相空间中的一队相点:

$$x_m(t_i): (x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau))$$

$$x_m(t_j): (x(t_j), x(t_j + \tau), \dots, x(t_j + (m-1)\tau))$$

设它们之间的欧氏距离为 $\varepsilon_{ij}(m)$, 它是相空间维数 m 的函数, 满足: $\varepsilon_{ij}(m) = \|x_m(t_i) - x_m(t_j)\|$ 。给定一个临近距离 ε , 也是 m 维相空间的超球体半径, 检查有多少点对 (x_i, x_j) 之间的距离小于超球体半径 ε , 并把距离小于 ε 的点在所有点对中所占比例记为: $C(\varepsilon, m) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \theta(\varepsilon - \|x_i - x_j\|)$ 。式中: $N = n -$

$(m-1)$, τ 为相点数, θ 是 (Heaviside) 函数, 满足 $\theta(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$ 适当选取超球体半径 ε , 在无标度区存在

如下关系: $C(\varepsilon, m) = \varepsilon^{D_c(m)}$ 和 $D_c(m) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln C(\varepsilon, m)}{\ln \varepsilon}$; 其中, $D_c(m)$ 即为相关维数。

在众多的分形维数中, 相关维数对吸引子的不均匀性反应敏感, 更能反映吸引子的动态结构。而且求相关维数的 G-P 算法较别的方法简单可靠, 仅凭系统的一个解序列就可以得到, 所以成为描述时间序列分形特征的常用方法。

2 基于时间序列的相空间重构

在实际工程应用中, 由于条件所限, 一般我们只能得到系统的一个状态变量的输出, 通常以离散时间序列 $\{x_i\}, i=1, 2, \dots, N$ 的形式出现。原则上讲, 它是系统中各要素相互作用的结果, 因此, 它应该包含该动力系统的信息。为了研究系统的动力学特征, 就要从这个时间序列中抽取动力系统, 重构相空间。帕卡拉 (Packara) 在 1980 年提出了用时间序列重构吸引子的相空间图象。

设观测到的时间序列为 $\{x_i\}, (i=1, 2, \dots, N)$ 其采样时间间隔为 Δt , 为了从 $\{x_i\}$ 重建吸引子, 要建立一个 m 维嵌入空间, 将 $\{x_i\}$ 映射到该嵌入空间中, 这时可对 $\{x_i\}$ 进行延时采样, 延时时间为 τ, τ 为 Δt 的整数倍, 即 $\tau = J\Delta t (J$ 为整数), 将得到若干新的时间序列 $V_i = (x_i, x_{i+J}, x_{i+2J}, \dots, x_{i+(m-1)J})$, $(i=1, 2, \dots, N - (m-1)J)$ V_i 对应于 m 维相空间的一个点, $N - (m-1)J$ 个点形成了相空间中一条动力学轨道。

从单变量的时间序列重构相空间, 为了保证该相空间容纳原有状态空间吸引子的拓扑结构, 嵌入维数必须满足一定的条件, Whitney 在 1934 年提出了嵌入维数大小的嵌入定理。Takens 在 1980 年证明了该定理。

嵌入定理^[2]: 如果原吸引子的维数为 d , 则嵌入空间的维数 $m \geq 2d + 1$ 。即嵌入空间的维数一般至少是吸引子维数的两倍, 这样伪相空间和系统的状态空间微分同胚, 即拓扑等价, 它们的动力学特性在定性意义上完全相同。

3 相关维数的确定

在实际测取的信号中, 往往混杂着许多无用的干扰信息, 而这些噪声信号对相关维数的计算影响很大^[3], 有可能造成相关维数不能收敛到一个稳定的值。因此, 在计算相关维数之前必须对测量信号进行降噪处理。由于小波分析对非平稳信号消噪有着傅立叶分析不可比拟的优点^[4], 本文采用软阈值小波消噪的方法, 对测量信号进行消噪处理。

由相关维数的定义可知, 相关维数的计算涉及到嵌入维数的选择, ε 值的选取^[5], 虽然嵌入定理提供了选择嵌入维数的方法, 但实际工程应用中, 一般情况下; 缺乏对系统动力维数的先验知识, 因此, 对实际动力系统, 嵌入维数 m 的选择比较困难。本文利用试凑的方法来选择嵌入维数 m 和 ε 的值, 以确定相关维数, 计算过程如下:

首先对原始数据进行小波降噪, 试给 m 值重构相空间, 试给 ε 值计算 $C(\varepsilon, m)$, 再计算 $D_c(m)$, 然后判断关系式 $D_c(m+1) - D_c(m) < \delta$ 是否成立, 如果不成立继续试给 m 值重构相空间, 如果成立则可得到相关维数 D_c 。

ϵ 的取值不能太大, 否则一切点对 (x_i, x_j) 的距离都不会超过它, 因而 $C(\epsilon, m) = 1$, 这不能反映系统内部的动力特性; ϵ 的取值也能太小, 否则系统中的一切偶然噪声都会表现出来, 本文 ϵ 的取值在 0.001 ~ 0.45 之间。

4 结果分析

4.1 信号的获取

在某高速轴流式发动机的机匣上打孔^[6], 将高频测压探针深入压气机的静子导流叶片之间, 通过逼喘的试验方式, 将发动机由正常状态转入失速状态, 利用高频测压探针测量发动机由正常状态到失速状态过程中, 压气机静子叶片间的压力变化。其中, 高频测压探针的精度等级为 0.2, 非线性: $\pm 0.08\%$, 重复性: 0.03%, 迟滞: 0.04%, 使用范围: 40 °C ~ 80 °C; 探针为三孔式探针, 可以测量叶根、叶中部和叶尖处的压力变化。

试验数据的采集分为计算机自动采集和人工记录两种方式。当发动机处于额定状态时, 关闭放气带缓收油门, 在喘振边界转速以上 20 r/min 左右, 启动计算机数据采集系统, 利用计算机记录发动机收油门至喘振过程中各级的压力变化, 并将所测到各级压力数据以 .dat 文件保存, 以供试车后数据的离线处理。发动机性能数据由常规人工方式记录。

计算机数据采集流程如下: 利用动态压力传感器分别测量压气机静子间的压力变化, 经变送器对信号进行调理之后, 送到高速数据采集板, 由数据采集板将测试到的数据送到计算机并存储。

4.2 结果分析

为有效区分发动机正常状态与失速状态相关维数, 本文分别对正常状态与失速状态的数据进行了分析 (见图 1 ~ 图 4)。

首先求取失速前静子叶片间压力信号的相关维数, 图 1 为嵌入维数 m 从 26 变化到 30 时, 超球体半径自然对数和积分自然对数关系曲线。利用图 1 中不同嵌入维数下的曲线, 求取相关维数, 再将相关维数与嵌入维数画在同一个坐标系下, 得到图 2 所示关系曲线。由图 2 可以看出, 发动机在正常工作情况下, 随着嵌入维数的增大, 压气机压力信号的相关维数逐渐趋向于一个固定值 2.62, 这就是压气机失速前压力信号的相关维数。

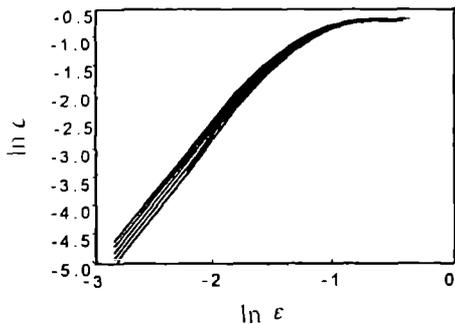


图 1 失速前 $\ln C \sim \ln \epsilon$ 曲线

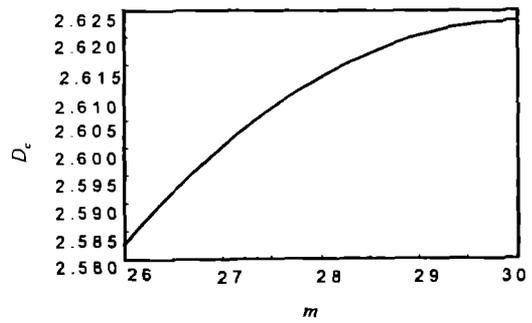


图 2 失速前相关维数与嵌入维数关系

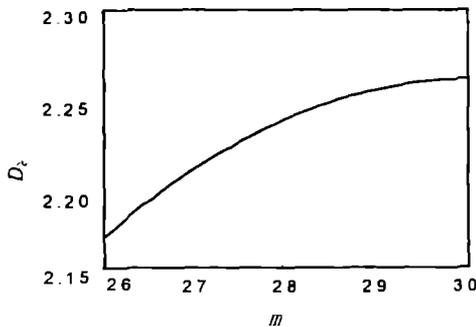


图 3 失速前相关维数与嵌入维数关系

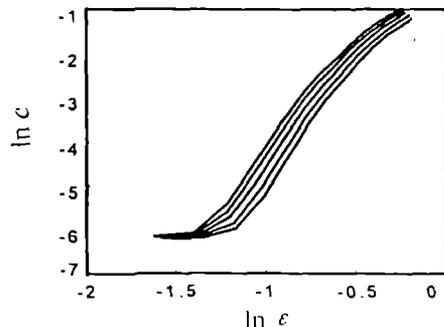


图 4 噪声干扰下 $\ln C \sim \ln \epsilon$ 曲线

利用相同的方法可计算出失速后压气机压力信号的相关维数,结果为 2.27,如图 3 所示。由图 2 和图 3 可以看出,失速前和失速后压气机压力信号的相关维数有明显差别,由失速前 2.62 下降到失速后的 2.27。这就说明相关维数对发动机失速信号是敏感的,可以作为判断压气机失速的特征信号。失速前和失速后相关维数的这种变化正好反映了失速前后压力的相对变化,利用失速前后相关维数的变化诊断发动机故障有着重要意义^[5],该方法在对某型发动机压气机最先失速级的判定研究上已取得了很好的成效。

为了观察测量噪声对相关维数的影响,本文在进行小波降噪前求取了压力信号的相关维数,结果如图 4 所示。由图可以看出,在噪声信号的影响下,相关维数不再收敛到一个固定值,无法求出压气机压力信号的相关维数。因此在计算信号的相关维数之前,进行降噪是必要的。

5 结论

通过对某涡喷发动机失速前后压力信号的分析,表明分形理论是对复杂信号进行分析的有力工具;相关维数对压气机的失速信号是敏感的,可以作为发动机失速探测的特征信号来对待;由于相关维数对噪声影响较为敏感,在求取信号的相关维数之前对其进行降噪处理是必要的;同时该理论还不很完备,嵌入维数的确定和超球体半径的选取等方面还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王 军,林 华. 基于特征分析的滚动轴承诊断系统[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,3(2):48-50.
- [2] 刘式达,刘式适. 分形和分维引论[M]. 北京:气象出版社,1993.
- [3] 徐章遂,房立清. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,20002.
- [4] 胡昌华,张军波. 基于 MATLAB 的系统分析与设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2000.
- [5] 姜建东,屈梁生. 相关维数在大机组故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报. 1998,32(4):27-31.
- [6] 姜 涛,李应红,李 军. 某型发动机压气机最先失速级判定的试验研究(简报)[J]. 航空动力学报. 2002,17(1):80-82.

(编辑:姚树峰)

The Engine Stall Characteristic Based on Correlation Dimension

ZHANG Bai - ling, DING Kang - le, LI Ying - hong, JIANG Tao

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: Pressure signal in compressor consists of rich state information of the engine, which is valuable for fault diagnosis. Applying fractal theories to the analysis of the pressure data of a compressor before and after surge, this paper calculates its correlation dimension. The correlation dimension is sensitive to the stall signal of engine and can be used as an important characteristic for stall detection.

Key words: compressor; stall; fractal; correlation dimension