

文章编号: 1000-8055(2002) 04-0437-05

转子碰摩振动响应的非线性时间序列分析

任 辉, 裴承鸣, 贺尔铭, 刘启洲, 张志禹
(西北工业大学 航空动力与热能工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对碰摩转子系统的非线性特性, 采用动力学非线性时间序列分析的方法对其振动响应进行了分析研究。基于动力学重构的基本理论, 对碰摩转子响应进行了状态空间重构。在此基础上, 进一步对碰摩转子系统振动响应进行了相关维数的估计, 不同的相关维数值表明了系统是处于周期或拟周期运动, 还是处于含有拟周期的混沌运动, 或者是明显的混沌运动。系统碰摩严重时的相关维数值会比碰摩较轻时的相关维数值大, 进一步对实验数据的计算结果也证实了这一点。

关 键 词: 转子碰摩; 非线性时间序列分析; 混沌; 相空间
中图分类号: V 231. 96 文献标识码: A

Nonlinear Time Series Analysis of the Rub-Impacting Rotor Vibration Response

REN Hui, PEI Cheng-ming, HE Er-min, LIU Qi-zhou, ZHANG Zhi-yu
(Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Rub-impact of rotor system is a typical failure for an engine. The vibration response of a rub-impacting rotor system exhibits some nonlinear characteristics. How to diagnose the fault of the rub-impact rotor with the new theories of the modern signal analysis has become a noticeable research project. In this paper, the researches of the fault diagnosis of rub-impact rotor are carried out by the theory of nonlinear time series analysis considering the nonlinear dynamical characteristics of the rub-impacting rotor. Based on the theory of phase space reconstruction, the estimations of the embedding delay and dimension are deduced, and the reconstruction of the time series of the rub-impacting rotor system is completed. Then the correlation dimensions of the different time series are estimated. The performances of the diagnosing methods are studied and evaluated by means of the simulation data and the testing data of the rub-impacting rotor. It is found that the correlation dimension values can describe the extent that the behavior of the system approaches to chaos. The different correlation dimension values show the system to be in quasi-periodic vibration, chaotic vibration with quasi-periodic or obvious chaotic vibration. When rub-impact of the rotor system is serious, the correlation dimension increases. The computation of the testing data also prove this.

Key words: rub-impacting rotor system; nonlinear time serious analysis; chaotic; phase space

1 前言

转子碰摩是一种能导致旋转机械破坏的故障形式,也是航空发动机中最常见的故障之一。对碰摩转子系统的研究一直受到国内外学者的高度重视,近年来,其非线性特性开始引起注意。例如,文献[1]通过对不对中、轴裂纹、动静件碰摩、基础部件松动故障的运动微分方程及三维谱图的分析,表明这几类带有故障的转子系统都是非线性振动系统。文献[2]建立了转子系统的碰摩模型,分析表明系统具有丰富的混沌运动与分叉现象。文献[3]以转静碰摩为例,数值模拟显示该动力学模型系统在很大的工作参数范围内呈现混沌状态,文献[4]的研究表明,在稳定状态下,碰摩转子系统典型的振动方式为周期振动、拟周期振动和混沌振动,有时系统的振动响应有明显的混沌振动迹象,接近混沌振动,但还包含一些拟周期或周期成分。混沌振动的频谱是连续谱且随时间变化而变化。系统的振动在完全混沌状态下谱是连续的,在不完全混沌时,系统振动响应的谱既有连续谱又有线谱。对这种含有混沌特征的振动信号,需要根据碰摩故障的非线性动力学特性,引入混沌与分形动力学理论中的新方法,研究基于非线性信号处理的特征提取方法。

非线性信号的时域分析方法^[5~7],基于相空间重构,研究如何将响应信号变换到重构的相空间中,并从中抽取动力学特征信息。混沌运动的极限集称为“奇异吸引子”^[8],奇异吸引子的统计特征之一是分维数,可以从混沌时间序列估计它的分维数,从而确定它的混沌特征。本文在动力学时间序列状态空间重构理论上,进行了碰摩转子不同形态的一维振动响应时间序列的相应状态空间重构,以及在此基础上对相关维数的估计,并探讨了碰摩转子系统复杂振动的混沌度量问题。分别应用仿真数据及发动机实验数据,分析了非线性时间序列分析方法的性能和特点。

2 相空间重构

非线性时间序列分析,是将非线性动力学所发展起来的分析方法用于时间序列数据分析,以便从中尽可能多的得到系统的性质和特征,其前提是能否根据所得到的系统一维响应观测数据,完成吸引子的多维几何体的动力学重构。通常对于所感兴趣的信号,需要建立一个合适的空间来观察和研究该信号。由于引起非线性混沌的过程

基本上是多变量的,因此需要重构系统的相空间。通过动力学重构,在无须已知动力学系统的数学模型的情况下,可以获得系统的多变量状态表示,使非线性动力学分析方法能用于实验数据的分析和处理。

动力学重构所依据的基本理论,即称为延迟嵌入定理的几何定理^[9],依照嵌入定理,如果系统轨道是在位于维数为 d_A 的几何体的空间里产生的,那么,这个几何体能够清楚地呈现在另一个整数维数 $d > 2d_A$ 的空间中,其空间坐标是原系统状态空间坐标的非线性变换。采用系统的观测量 $s(i)$ 和它的延迟分量,系统的坐标序列则可以通过下面新的矢量形成:

$$x(i) = [s(i), s(i + \tau), s(i + 2\tau), \dots, s(i + (d_E - 1)\tau)] \quad (1)$$

上式矢量 $x(i)$ 中的每个分量在时间上以 $\tau\Delta t$ 为间隔, τ 是一个正的整数,称作规一化嵌入延迟, d_E 是嵌入维数。当我们用(1)式重构系统状态空间时,希望矢量中的每个分量都能提供有关信号的新的信息。所以选择合适的 τ ,使得坐标之间既不线性相关又非完全独立,将对建于该空间的数据模型的性能好坏有着至关重要的影响。采用信息论中Shannon的相互信息^[10],可以给出两个坐标之间的(广义)非线性相关度。对于观测序列:

$$\{a_1, a_2, \dots, a_j\}, \quad \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$$

其平均相互信息可以表示如下^[10]:

$$I(\tau) = \sum_{a_j, b_k} P_{ab}(a_j, b_k) \cdot \log_2 \left[\frac{P_{ab}(a_j, b_k)}{P_a(a_j) P_b(b_k)} \right] \quad (2)$$

其中: $P_a(a)$ 是获得 a 的概率; $P_b(b)$ 是获得 b 的概率; P_{ab} 是获得 a 和 b 的联合概率。对于所讨论的问题, a_j 是 $s(n)$, b_k 就是 $s(n + \tau)$ 。对所有的 τ , $I(\tau) \geq 0$,取 $I(\tau)$ 首次达到极小值时的 τ 作为嵌入延迟,使得两个坐标之间在某种程度上既相互独立又非统计不相关。

对嵌入维数的选择,依照嵌入定理的一般意义可以这样选择坐标数目,对于吸引子中任一点 $x(n)$,考察当维数从 d 增加到 $d + 1$ 时,轨道 $x(n)$ 上的点那些是真正的邻居,那些点是错误的邻居。所谓错误邻居是指数据序列中这样的点,当在一个太小的嵌入空间($d < d_E$)中观察轨道时,它是某些点的邻居;而当在一个足够大的嵌入空间中观察时,它就不是这些点的邻居。这种确定最小嵌入维数的方法称作伪邻法^[11]。设在 d 维空间定义

$s(n)$ 的第 r 个最近邻居为 $x_r(n)$, 从(1)式得到点 $x(n)$ 与这个邻居的距离是:

$$R_d^2(n, r) = \sum_{k=0}^{d-1} [s(n+k\tau) - s^{(r)}(n+k\tau)]^2 \quad (3)$$

从维数 d 到维数 $d+1$, 给矢量 $x(n)$ 的每个分量都加上第 $(d+1)$ 个坐标, 这个新的坐标就是 $x(n+\tau d)$ 。在 $(d+1)$ 维空间, 点 $x(n)$ 与这同一个邻居的距离是:

$$R_{d+1}^2(n, r) = R_d^2(n, r) + [s(n+d\tau) - s^{(r)}(n+d\tau)]^2 \quad (4)$$

若 $R_{d+1}(n, r)$ 相对于 $R_d(n, r)$ 很大, 那么就可以认为在维空间中确定的“最近”邻点实际上是一个伪邻点。于是, 下式便可以作为伪邻点的一个判据:

$$\left[\frac{R_{d+1}^2(n, r) - R_d^2(n, r)}{R_d^2(n, r)} \right]^{1/2} = \frac{|s(n+d\tau) - s^{(r)}(n+d\tau)|}{R_d(n, r)} > R_{tol} \quad (5)$$

R_{tol} 是设定的门限值, 根据这一判据, 统计吸引子轨道上具有伪邻点的 $x(n)$ 的数目, 然后依次增加嵌入维数 d 。如果伪邻点数目降至零附近或充分小时, 就可以认为轨道已经得到完全的析展, 此时的维数便是所求的嵌入维数。

3 从一维时间序列估计分维数

相关维数^[12]作为分维的一种度量, 被许多实验科学家成功采用。在相空间(或在重构相空间)中取 N 个点 $\{x_i\}$, 计算各点间的距离:

$$S_{ij} = |x_i - x_j| \quad (6)$$

选定一个距离 l , 相关函数定义为:

$$C(l) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} (S_{ij} < l \text{ 的一对点的数目}) \quad (7)$$

对许多吸引子发现有指数率成立:

$$\lim_{l \rightarrow 0} C(l) = l^d \quad (8)$$

因此可以定义相关维 d_c :

$$d_c = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\log C(l)}{\log l} \quad (9)$$

在许多情况下, 特别是许多实验中, 无法确切知道系统方程和相空间维数, 而只能从实验中获取有限变量的数据, 更普遍的情况是: 所能观测到的数据仅是一维的时间序列。而为了从几何和数量上发现并认识系统的混沌特征, 必须通过对一维时间序列进行相空间重构, 获得描述系统(吸引子)的重构(伪逆)相空间。在此基础上, 再进行分

维数估计。这里用 m 代替(1)式中的 d_E , 因而 τ 和 m 分别是嵌入延迟和嵌入维数, 完成重构后再采用(9)式来估计相关维数。实际计算时, 通常是求得在某一给定的嵌入维数下的 $\log(c(l))$ 与 $\log l$ 的函数曲线的斜率, 就是相关维数 d_c , 更多的是用 $D_2(m)$ 表示, 即:

$$D_2(m) = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\log C(l)}{\log l} \quad (10)$$

当 $D_2(m)$ 随着嵌入维数 m 的增加收敛到一常数时, 收敛值即是系统的相关维数估计值 D_2 。

4 仿真信号处理与分析

采用上面分析方法, 对碰摩转子仿真模型^[4]所计算的不同状态下的碰摩转子响应信号确定嵌入延迟和嵌入维数, 进行状态空间重构。图1是对其中三种状态重构的结果, 分别为(a)~(c)所示, 图中左边是响应信号的 Poincare 图, 中间是相空间轨迹, 右边就是重构的相空间轨迹。吸引子的重构相空间图反映了原吸引子的运动形态, 这意味着在重构的相空间中可以得到原系统的动力学不变量(例如相关维数、李雅普诺夫指数等)的估计值。

图1中(a)~(c)所示信号的相关维数估计值分别是1.1131, 2.2033和3.1443。对另外12个状态的信号也进行了相关维数的估计, 这里不一列出估计结果, 从对这些不同状态的信号估计的结果可以总结出: 当转子运动是周期或拟周期时, 相关维数大于1, 在1附近; 相关维数大于2, 在2附近的转子运动状态, 既有明显的拟周期成份又有混沌运动的迹象; 当相关维数在3附近时, 转子运动具有明显混沌运动。

5 实测信号处理与分析

实验是在某单级轴流压气机实验台上进行, 实验台转子是悬臂式结构, 为了能实施直接测试转子的振动响应, 在其端部固接了一个带圆柱面的外伸段, 并安置了三个电涡流位移传感器(CD-21型和 CWY-DO-81084型), 分别用其测试转子端部外伸段铅直方向、水平方向和轴向方向的振动位移。测试系统框图如图2所示, 光电传感器一方面用来测试转速, 还用它获取多通道同步整周期数据采集所需的转子同步脉冲信号。实验时, 用 CAMD-6100型旋转机械状态监测与故障诊断系统采集数据, 可进行数据的多通道并行采集和实时分析。

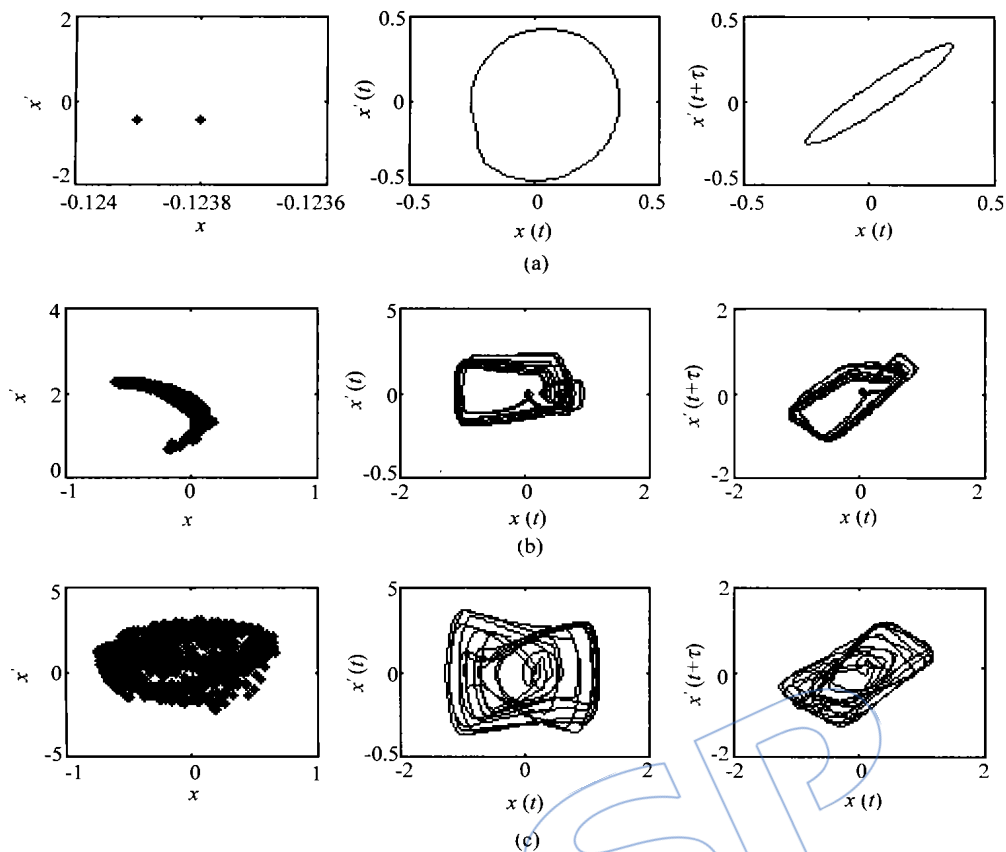


图1 碰摩响应信号的 Poincare 图、相空间轨迹、重构相空间轨迹

Fig. 1 Rub-impacting response signals: poincare maps, phase space trace, reconstructed phase space trace

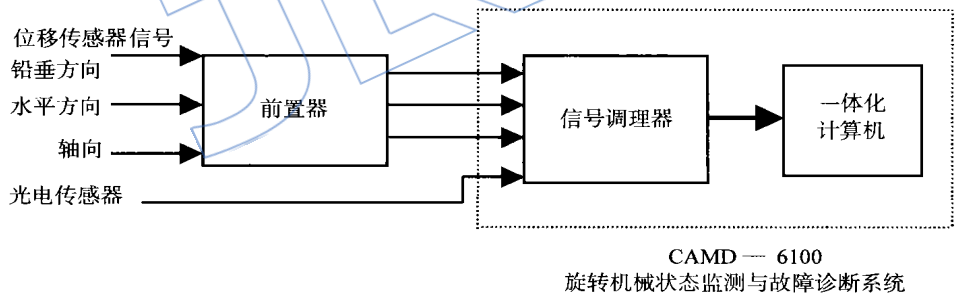


图2 实验测试系统框图

Fig. 2 Block diagram of testing system for the experiment

实验中发生了转子叶片端部与静子机匣的碰摩(应用轴心轨迹、进动分析原理监测以及对机匣内壁的直观检测判定),通过上述实验测试系统记录了两组转速状态下的信号,并进行了相应的时间序列信号分析。图3(a)和(b)给出了两组测得的时域信号及相应的相关维数估计结果,其中(a)中左图是有碰摩,转速为8838 r/min 时的信号,此时已有旋转失速发生;(b)中左图是有碰摩,转速为11274 r/min 时的信号,并且这时已有喘振发生。(b)中信号的反进动量大于(a)中信号的反进动

量,碰摩更严重。(a)中信号的嵌入延迟因子和嵌入维数 m 的估计结果分别是 $\tau=1$ 和 $m=10$; (b)中信号的嵌入延迟因子和嵌入维数 m 的估计结果分别是 $\tau=1$ 和 $m=7$ 。对这两组信号估计相关维数,分别如(a)和(b)中的右图所示,相关维数估计值分别为2.5066和3.0672,表明转子运动含有混沌运动,并且碰摩越严重,相关维数越大。

当信号含噪声时,对相关维数的估计有影响^[13],这里着重研究用相关维数描述碰摩转子碰摩的程度,此外李雅普诺夫指数也可以作为识别

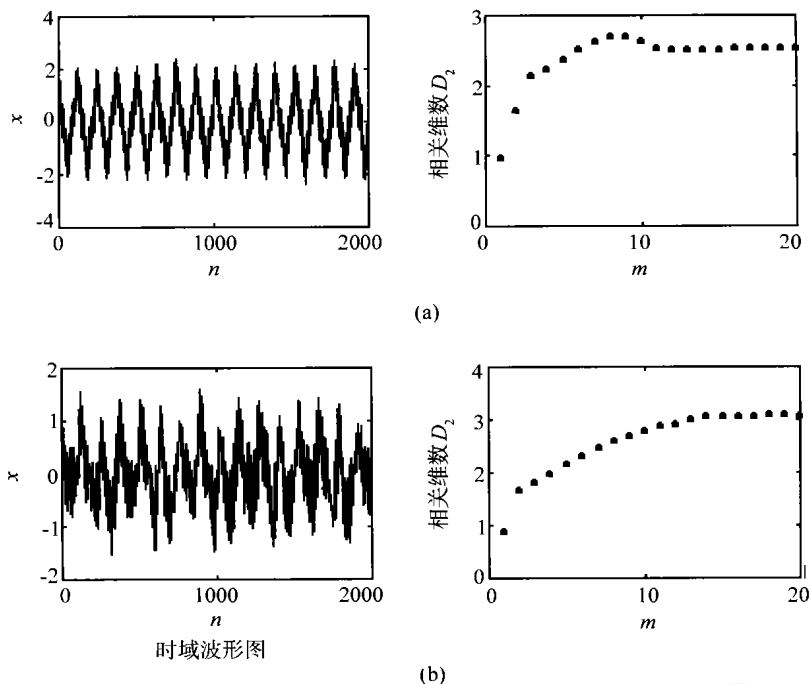


图3 实验数据及其相关维数估计结果

Fig. 3 Experimental data and estimation results of the correlation dimension

混沌的标志, 这里不再详述。

6 结 论

在非线性时间序列状态空间重构的基础上对转子碰摩系统仿真数据信号的相关维数估计结果表明, 当转子运动是周期或拟周期时, 相关维数大于1, 在1附近; 当转子运动是含有概周期的混沌运动时, 相关维数大于2; 当相关维数在3附近时, 转子运动具有明显混沌运动, 用同样方法对实验信号处理结果表明所分析的系统运动含混沌运动, 碰摩严重时相关维数变大。

参考文献:

[1] 褚福磊, 李贵三, 张正松. 旋转机械常见故障的振动三维谱特征及其识别[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(7): 86-91.

[2] 刘献栋, 李其汉. 转静件碰摩模型及不对中转子局部碰摩的混沌特性[J]. 航空动力学报, 1998, 13(4): 361-365.

[3] Adams M L, Abu-Mahfouz L A. Expiratory Research on Chaos Concepts as Diagnosis Tools for Assessing Rotating Machinery Vibration Signatures [A]. Proceedings of the Fourth International Conference on Rotor Dynamics [C]. Chicago, 1994: 29-39.

[4] 张志禹. 碰摩转子系统的分叉与混沌特性[D]. 西安: 西北工业大学, 1999.

[5] Tong H. Dimension estimation and models, (Nonlinear Time

Series and Chaos Vol. 1) [M]. Singapore: World Scientific, 1993.

[6] Abarbanel H D L, Ted W Frison, Lev S Tsirring. Obtaining Order in a World of Chaos: Time-Domain Analysis of Nonlinear and Chaotic Signals[J]. IEEE Signal Processing Magazine, May, 1998, 15(3): 49-65.

[7] Kantz H, Schreiber T. Nonlinear Time Series Analysis[M]. Cambridge University Press, 1997.

[8] Garnett P Williams. Chaos Theory Tamed[M]. Joseph Henry Press, 1997, Reprinted 1999.

[9] Takens F. Detecting Strange Attractors in Turbulence[A]. in Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980, Lecture Notes in Mathematics[C]. 898, ed. D. Rand and Young L S, Berlin: Springer-Verlag, 1981.

[10] Andrew M Fraser, Harry L Swinney. Independent Coordinates for Strange Attractors from Mutual Information[J]. Physical Review A, Number, 1986, 33(2).

[11] Matthew B Kennel, Reggie Brown, Henry D I Abarbanel. Determining Embedding Dimension for Phase-Space Reconstruction Using a Geometrical Construction[J]. Physical Review A, Number, 1992, 45(6).

[12] Grassberger P, Procaccia I. Measurement the Strangeness of Strange Attractor[J]. Physica, 9D, 1983.

[13] Mingzhou Ding, Celso Grebogi, Edward Ott, Tim Sauer, James A Yorke. Estimating Correlation Dimension from a Chaotic Time Series: When Does Plateau Onset Occur?[J]. Physica D 69, 1993.