文章编号: 1672-6413(2006) 06-0055-03

分形网格维数在齿轮故障诊断中的应用

任丽娟, 姚竹亭

(中北大学 机械工程与自动化学院, 山西 太原 030051)

摘要: 在介绍分形和网格维数定义的基础上, 着重概述了网格维数的计算方法和诊断原理, 计算了齿轮在常见故障状态下的网格维数, 并利用网格维数距离函数对齿轮的常见故障进行了识别。

关键词: 网格维数; 齿轮; 故障诊断

中图分类号: TH132.41∶TH165+.3　　文献标识码: A

0 引言

分形理论是非线性学科中的一个很活跃的数学分支, 其研究的对象是由非线性系统产生的不光滑和不可微的几何形体, 对应的参数是分维。在工程实际当中, 通过对齿轮的振动信号波形进行研究得出齿轮的时域波形在一定的时域长度下存在自相似性。例如在不同的采样频率下采集齿轮的振动信号(时域波形序列), 采样频率较高的振动信号时间序列变化趋势类似于频率较低的波形信号, 说明齿轮的时域信号具有自相似性(当然不是数学意义上严格的自相似), 因此可以用分形理论来描述其时间序列的不规则度[1]。

在许多常见的大型齿轮旋转机械中, 有许多故障如松动、碰摩等, 由于其强烈的非线性特点, 使得其振动信号中通常具有丰富的频率成份, 有时甚至呈连续的谱分布, 这类故障有时难以从时域中提取有用的诊断信息, 而用分形理论则可以进行比较精确的诊断。本文将网格维数用于齿轮故障信号的分析, 详细讨论网格维数的计算及其应用中的若干问题。

1 分形网格维数的定义与计算[2~4]

1.1 分形的定义

到目前为止, 分形还没有严格的数学定义, 只能给出一般描述性的定义。其定义主要有以下几种:

定义1: 设集合$F\subset R^n$的Hausdorff维数是D。如果F的Hausdorff维数D严格大于它的拓扑维数$D_T=n$, 即$D>D_T$, 我们称集合F为分形集, 简称分形。其数学表达式可记为: $F=\{D:D>D_T\}$。

定义2: 局部与整体以某种方式相似的形叫分形。

定义3: F是分形, F具有如下典型性质: ①F具有精细的结构, 即有任意小比例的细节; ②F是如此的不规则, 以至它的局部和整体都不能用传统的语言来描述; ③F通常有某种自相似的形式, 可能是近似的或是统计的; ④一般地, F的分形维数大于它的拓扑维数; ⑤在大多数情况下, F可以以非常简单的方法定义, 可以由迭代产生。

定义4: 分形集就是比在经典集合考虑的集合更不规则的集合, 这个集合无论被放大多少倍, 越来越小的细节仍能看到。

1.2 振动信号网格维数的定义

设实际采样时间T为有限量, 采样间隔为Δt, 采集振动信号为x_1, x_2, …, x_n; n为样本序列点数, $n=T/\Delta t$, 以不同的Δt采样, 则定义信号的网格维数为:

$$d_j=\frac{\ln\left(\sum_{i=1}^{n}(x_{i+1}-x_i)/\Delta t\right)}{\ln\Delta t}。\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

其中, d_j反映信号特征, 对于机械设备的正常信号和各种异常信号应该有不同的d_j值。

1.3 振动信号的网格维数计算方法

将欧氏空间R_n分为尽可能细的Δ网格, 当正规等测度分割时, 即分割成n维以Δ为边长的正方体时, 将集合X离散为数字点集, 用N_Δ表示离散空间(间距为Δ)上的集合X的计点数。这样, 将Δ网格放大为$m\Delta$网格, 此时用$N_{m\Delta}$表示离散空间(间距为$m\Delta$)上的集合X的计点数, 得到K个不同网格宽度上的计点数$N_{k\Delta}$, $K=1, 2, \cdots$。网格分形示意图见图1。设$x_k=$

收稿日期: 2006-04-14; 修回日期: 2006-06-24

作者简介: 任丽娟(1982-), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事机械设计及理论研究。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$\log_b(k)$, $y_k = \log_b(N_{k\Delta})$, 这里 $b = 2, e, 10$, 以下对数省略底数。则由 $M_k(x_k, y_k)$ 构成的直线的斜率为网格维数。网络维数有以下几种计算方法。

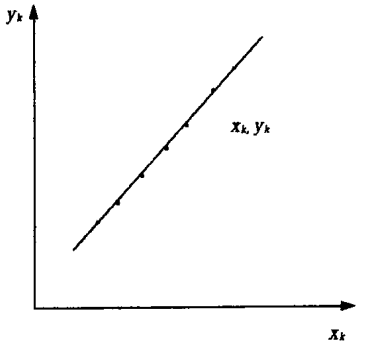


图 1 网格分形示意图

(1) 用平均法计算网格维数:

$$d_N(X) = \frac{1}{C}\sum_{k}^{k'} \frac{\log(N_{k\Delta}/N_{k\Delta})}{\log(k/k')} \text{。} \quad \cdots\cdots (2)$$

其中, $1 < k < k' \leq K$, C 为 $\sum$ 求和式的次数。

(2) 用最小二乘法计算网格维数: $y_k = -dx_k + b$ $(k = 1, 2, \cdots, K)$, 其中, d、b 为直线的斜率和截距, 而且 d 为分形维数。当我们计算了 K 或测定了 (x_k, y_k), 可以建立函数:

$$f(d, b) = \sum_{k=1}^{K} (y_k + dx_k - b)^2 \text{。}$$

使这个函数获得最小值的条件为:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial f}{\partial d} = 2\sum_{k=1}^{K} (y_k + dx_k - b)(x_k) = 0 \\ \dfrac{\partial f}{\partial b} = 2\sum_{k=1}^{K} (y_k + dx_k - b)(-1) = 0 \end{cases} \text{。} \quad \cdots\cdots (3)$$

得到的网格维数为:

$$d_N(X) = \frac{\sum_{k=1}^{N} x_k y_k - \sum_{k=1}^{N} x_k \sum_{k=1}^{N} y_k}{\sum x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^{N} x_k\right)^2} =$$

$$\frac{\sum_{k=1}^{N} \log k \log N_{k\Delta} - \sum_{k=1}^{N} \log k \sum_{k=1}^{N} \log N_{k\Delta}}{\sum_{k=1}^{N} \log^2 k - \left(\sum_{k=1}^{N} \log k\right)^2} \text{。} \quad \cdots\cdots (4)$$

(3) 用简单计算法计算网格维数: 当 Δ 确定, $\log N_{k\Delta}$ 是 $\log k$ 的单调下降凸函数时, 常用的维数估算公式近似为:

$$d_N(X) = \frac{\log N_\Delta}{\log k} \text{。} \quad \cdots\cdots (5)$$

1.4 振动信号分形维数相关性判断法

故障诊断过程实际上是系统的识别和分类过程, 这一过程有两个步骤, 第一步以适当的特征描述被诊断的对象, 第二步根据被识别事物的特征进行分类。机械设备系统的每一种故障状态就是一个样本, 同一类故障, 出现的情况可能千差万别, 但在特征上表现出共性, 根据这些特征可以将其区别于其它类型的故障。当采用振动信号对机械系统状态进行故障诊断时, 同样对系统不同状态的信号建立特征模式。

由模式特征组可以建立模式空间, 每种特征相当于模式空间的点:

$$M(X_i) = [x_1, x_2, \cdots, x_J]^T \quad i = 1, 2, \cdots \text{。} \quad \cdots\cdots (6)$$

其中, $M(X_i)$ 表示模式空间, $[x_1, x_2, \cdots, x_J]^T$ 表示模式特征。

特征相近的状态在模式空间上的距离相近, 所以可以用已建立的模式空间点样本对待检模式建立距离函数, 通过距离的数学关系判定待检模式属于哪种状态, 从而实现对分形维数特征量的模式识别。将分形维数作为机械设备振动信号诊断识别的特征量, 其正常状态和几种故障状态按相同的采样时间间隔 Δt_i $(i = 1, 2, \cdots n)$ 采样, 通过式(1)得到信号的网格维数 $d_{\Delta t_i}^{(j)}$ $(i = 1, 2, \cdots)$ 作为第 j 种状态以 Δt_i 采样时的特征分形维数。

对于待检振动信号 X 按 Δt_i 进行采样, 通过式(1)得到待检信号的网格维数 $D_{\Delta t_i}^{(k)}$ $(i = 1, 2, \cdots n)$, 定义维数距离函数为:

$$R_{j,k} = \frac{1}{\frac{1}{n}\sum (d_{\Delta t_i}^{(j)} - D_{\Delta t_i}^{(k)})^2} \text{。} \quad \cdots\cdots (7)$$

式(7)这个函数反映了第 k 个待检信号与第 j 种模式的相关程度, 进而可以实现时域的诊断。$R_{j,k}$ 越小, 则第 k 个待检信号与第 j 种模式的相关程度越强; 反之, $R_{j,k}$ 越大, 则第 k 个待检信号与第 j 种模式就越相离。特征分形维数与采样时间有关, 采样时间越长, 特征分形维数值越大。若要良好反映信号特征, 实际中应选一个合适的采样时间范围。

2 故障实例分析

现代机械设备虽然多种多样, 但齿轮传动仍是目前广泛采用的主要传动形式之一。由于齿轮传动具有结构紧凑、效率高、寿命长、工作可靠和维修方便等特点, 所以在运动和动力传递以及变更速度等各个方面得到了普遍应用。但是齿轮传动也有明显的缺点, 由于其特有的啮合传力方式造成两个突出问题: 一是振动、噪声较其它传动方式大; 二是当其制造工艺、材质、热处理、装配等因素未达到理想的状态时, 常成为诱发机器故障的重要因素。齿轮产生的故障主要有齿面磨损和齿根裂纹, 本文采用上面所讨论的网格维数诊断方法来对齿轮进行故障诊断。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图2～图5 是某一齿轮在正常状态、齿面磨损、齿根裂纹和待测信号四种状态的时域信号图。

根据所测数据，在采样总时间为T = 0.256s，采样周期分别为Δt= 0.125ms，0.25ms，0.5ms，1ms，2ms 的条件下，确定对应的网格维数，见表1。表2 为待测信号与各状态信号之间的维数距离。图6 为齿轮不同采样周期对应的网格维数图。

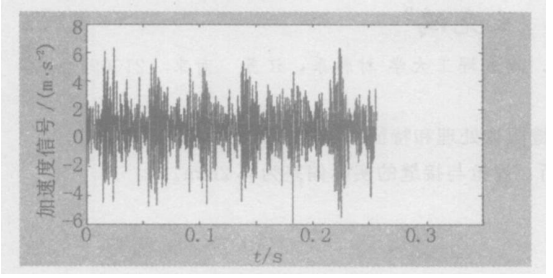


图2　正常状态时域波形

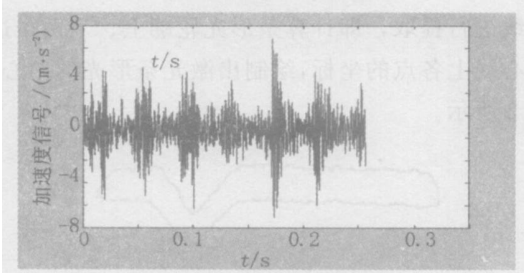


图3　齿面磨损时域波形

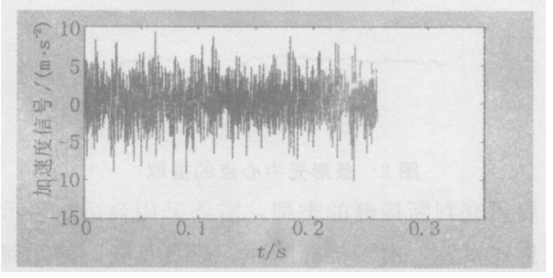


图4　齿根裂纹时域波形

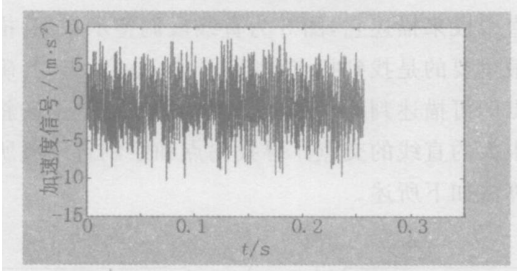
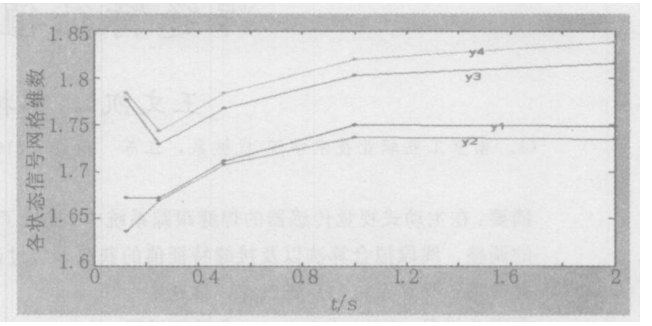


图5　待测信号时域波形

表 1　齿轮不同采样周期的网格维数特征值

采样总时间	T = 0.256s				
采样周期(ms)	0.125	0.25	0.5	1	2
正常状态网格维数特征值	1.671 9	1.671 8	1.711 7	1.750 3	1.748 6
齿面磨损网格维数特征值	1.636 2	1.669 3	1.708 1	1.737 2	1.734 7
齿根裂纹网格维数特征值	1.776 9	1.729 5	1.767 5	1.802 7	1.815 4
待测信号网格维数特征值	1.783 7	1.743 9	1.783 9	1.819 4	1.838 3

由图6 可以看出待测信号y_4 与齿根裂纹故障y_3 最接近，同时由表2 也可以看出待测信号y_4 与齿根裂纹故障y_3 的维数距离最小，即这两组信号最接近，故可判断此待测信号最有可能为齿轮齿根裂纹故障，该结果与实际结果相符。



y_1—— 正常状态；　y_2—— 齿面磨损；

y_3—— 齿根裂纹；　y_4—— 待测信号

图 6　齿轮不同采样周期对应的网格维数图

表2　待测信号与各状态信号之间的维数距离

待测信号与各状态信号比较	维数距离$R_{j,k}$
正常状态	0.084 5
齿面磨损	0.100 6
齿根裂纹	0.016 3

3　结束语

对于齿轮的故障诊断有各种各样不同的诊断方法，传统的时频域分析方法虽然简单，但由于其本身的局限性，只能作为故障诊断中的简易诊断。而基于网格维数的分形诊断方法作为非线性系统故障诊断中的一种，原理简单易懂，所要求的外界条件少，只要在时域内诊断即可达到诊断目的，是在时域上完成的诊断。但分形诊断方法在旋转机械故障诊断中的应用研究还只是刚刚开始，人们对分形维数与机械故障机理的内在关系研究的还不够。尽管如此，分形诊断方法已经给出了一个直接从测量的特征信号推测其本身特征的一种方法，我们有理由相信，分形作为继小波之后的又一个数学分支，必将在更多的场合中得到应用，解决更多的实际问题。

参考文献：

[1] 石博强，申焱华. 机械故障诊断的分形方法：理论与实践[M]. 北京：冶金工业出版社，2001.

[2] 侯祥林，王泳嘉，虞和济. 非线性系统故障的分形和神经网络智能诊断方法研究[D]. 沈阳：东北大学，2000：31–53.

[3] 钟建军，徐玉秀. 基于分形理论的旋转机械故障诊断的应用研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2002：26–28.

[4] 飞思科技产品研发中心. MATLAB7 基础与提高[M]. 北京：电子工业出版社，2005.

(C)1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(英文摘要转第60页)

觉焊缝跟踪系统的精度和效率。从理论上讲这种视觉焊缝跟踪系统分析软件的判断误差是一个像素，即约 0.2mm，但是在实际视觉焊缝跟踪中，加上实验平台、各种设备以及控制系统的各种原因造成的各种误差，最后的总误差将比这个误差稍大。

图7 与图8 是两组焊缝偏差实验的图线，这两组实验图像就是上述的接缝偏差影响图像的处理分析结果。实际偏差值的单位是mm，而软件计算得到的偏差值的单位是像素，实际测量的偏差值精度为 0.1mm，这是由测量工具和工作平台以及人的因素所造成的，两组实验的像素值大约与实际尺寸的折算是每个像素 0.2mm。从这两个图线可以看出，接缝信息视觉检测系统的精度很高，与实际测量值的曲线十分吻合，进一步证明了本系统的合理性、正确性。

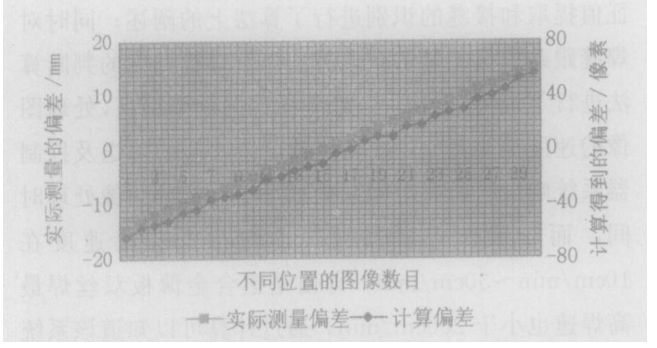


图7 焊缝偏差实验一

2 结论

在主动式视觉传感器的焊缝跟踪系统中，提出的接缝图像处理和特征值提取的算法是正确和合理的。经过分析，焊枪与接缝的实际偏差能够很好地满足焊缝跟踪的精度要求，图像处理的速度也能满足焊缝实时跟踪、高效率的要求。

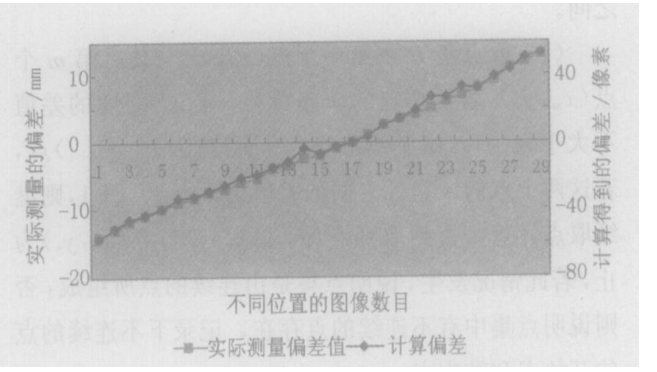


图8 焊缝偏差实验二

参考文献:

[1] 吴林, 陈善本. 智能化焊接技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[2] 王克鸿, 刘永. 弧焊机器人典型工件几何建模研究[J]. 机械制造与自动化, 2002(4): 15-18.

[3] 王克鸿, 周毅仁. 基于知识的弧焊机器人焊接参数二次优化[J]. 焊接学报, 2001(2): 17-21.

[4] 肖强. 焊接机器人视觉系统[J]. 焊接, 1992(4): 7-10.

Image Process and Characters Recognition of Welding Seam

WANG Wen-kai[1], PENG Huan-xin[1], WANG Ke-hong[2]

(1. Nanjing Institute of Industry Technology, Nanjing 210016, China; 2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This paper put forward a new algorithm of image process and seam identification in the vision system of the welding seam tracking. The line adjustment, fit arithmetic and character recognition of seam are described in detail. The precision of the check-up system is as high as 0.2mm.

Key words: vision system; seam check-up; welding seam

(上接第 57 页)

Application of Gridding Dimension in Fault Diagnosis of Gear

REN Li-juan, YAO Zhu-ting

(College of Mechanical Engineering and Automation, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In this paper, the author presented the definition of fractal and gridding dimension, especially the method of its calculations and the theory of its diagnosis, calculated gridding dimension of the gear in general malfunction. And using the distance function of gridding dimension diagnosed the general failure of gear.

Key words: gridding dimension; gear; fault diagnosis

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net