

高阶累积量在红外热像损伤检测信号分析中的应用

马说那¹, 刘欣博², 马齐爽²

(1. 龙源电力集团股份有限公司, 北京 100034;

2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对常规红外检测信号的脉冲相位法没有考虑测量噪音, 简单的 Fourier 变换对数据信息的挖掘不足、利用率不高的问题, 提出在处理中引入非高斯特性分析, 应用三阶累积量和双谱估计对信号进行分析, 提取发生损伤时信号的特性信息, 得到分辨完好区域与损伤区域的特征判据。给出信号分析中三阶累积量和双谱的定义, 分析其幅值和相位的对角切片谱在提取损伤特征方面的优势, 最后对比分析两者在实际检测中的效果。结果表明: 利用该方法具有良好的抗高斯和非高斯对称分布型噪音的优点, 且运算量小、计算速度快。同时, 弥补了传统脉冲相位法中幅值谱不宜使用的缺点。

关键词: 红外检测; 高阶累积量; 双谱分析; 切片谱幅值

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1350-05

Application of higher order spectral analysis in infrared thermography damage signal processing

Ma Shuohan¹, Liu Xinbo², Ma Qishuang²

(1. China Longyuan Power Group Corporation Limited, Beijing 100034, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In the routine infrared inspection signal processing, pulse phase thermography doesn't take into account the measure noise, the experimental data isn't made good use of by the simple Fourier transform, where more information needs to be dig. The non-Gaussianity analysis was introduced to the routine signal processing, the third-order cumulant and bispectrum estimation were used for extracting the characteristic information from the detection signal when damage occurred, therefore the criterion of distinguishing sound area from defective area was obtained. The definitions of third-order cumulants and bispectrum were achieved for the acquired signal, in addition, the advantage using magnitude and phase of slice spectrum was analyzed and the effects were compared in actual detection. The proposed method has the advantages of suppressing Gaussian and symmetry distribution non-Gaussian noise efficiently, small calculation amount, fast computation speed. Moreover, it compensates the demerit which magnitude of spectrum is hard to use in the traditional pulsed phase thermography.

Key words: thermography inspection; higher order cumulant; bispectrum analysis; slice bispectrum magnitude

收稿日期: 2012-09-13; 修订日期: 2012-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(60576181; 60879014)

作者简介: 马说那(1982-), 男, 博士, 主要从事红外热像检测及信号处理方面的研究。Email: mashuohan@gmail.com

0 引言

红外热像检测作为一种新型的无损检测技术,已经逐渐应用于现代工业的质量保障和后期维修之中^[1-2]。由于被检结构和环境的限制,单侧法较双侧法在实际中应用得更广泛;而快速检测的要求使得脉冲法比调制法更普遍^[3-4]。脉冲相位法(Pulsed phase thermography, PPT)结合脉冲和调制两种方法的优势,应用傅里叶变换(Fourier Transform, FT)在频率域分析信号的幅值和相位信息,其中相位分析优于幅值分析,在检测数据处理中获得了很好的效果^[5]。但 PPT 的分析是在假设信号和噪音为高斯性、平稳性的前提下进行的,而在实际情况下测得的信号可能是非高斯、非线性和非平稳的,此时传统的简单谱分析就难以胜任了。高阶累积量分析近年来发展非常迅速,高阶谱分析从更高阶统计结构表征随机信号,不仅保留了系统的非线性特征,抑制加性高斯噪音,并且还可以抑制各类非高斯对称分布型的噪音,在反映信号能量的同时还含有丰富的相位信息,在信号检测中有很好的应用效果^[6]。

实践经验表明,当待检部件是完好状态时,其红外信号接近高斯分布;发生损伤时,信号往往偏离高斯分布。所以,利用高阶谱可以很好地从噪音信号中提取出损伤特征信息。最常用的高阶谱是双谱,在齿轮各类故障、机械轴承失效和中医脉象的诊断中得到了广泛地应用。文中运用双谱和双谱切片方法对模拟损伤的试件进行分析^[7-8]。结果表明,该方法可以成功地分辨出损伤区和完好区,切片幅值谱的效果要好于 PPT 方法,并且具有良好的抗噪性。

1 高阶统计量的基本定义和原理

1.1 高阶统计量

高阶统计量包括高阶矩、高阶累积量和高阶矩谱、高阶累积量谱,由于高阶累积量在分析中比高阶矩更具优越性,所以,高阶谱一般就指高阶累积量谱。设 $f(x)$ 是零均值随机变量 x 的概率密度函数,则第一特征函数(亦称“矩生成函数”) $\Phi(\omega)$ 定义为:

$$\Phi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{j\omega x} dx = E[e^{j\omega x}] \quad (1)$$

其第二特征函数(亦称“累积量生成函数”)定义为:

$$\psi(\omega) = \ln[\Phi(\omega)] \quad (2)$$

分别对 $\Phi(\omega)$ 和 $\psi(\omega)$ 求 k 阶导数,并令 $\omega=0$,即可得到 x 的 k 阶矩 m_{kx} 和 k 阶累积量 c_{kx} 为:

$$m_{kx} = (-j)^k \Phi^{(k)} \quad (3)$$

$$c_{kx} = (-j)^k \psi^{(k)} \quad (4)$$

由此可以推广到多个随机变量的情况,设 n 个随机变量的集合为 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中 $r=k_1+k_2+\dots+k_n$ 阶联合累积量定义为:

$$C_{k_1, k_2, \dots, k_n} = (-j)^r \frac{\partial^r \Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)}{\partial \omega_1^{k_1} \partial \omega_2^{k_2} \dots \partial \omega_n^{k_n}} \Big|_{\omega_1=\omega_2=\dots=\omega_n=0} \quad (5)$$

式中: $\Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = E[e^{j(\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n)}]$ 为联合特征函数。

如果高阶累积量 $C_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$ 是绝对可和的,即:

$$\sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} |C_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})| < \infty \quad (6)$$

则 k 阶累积量谱定义为 k 阶累积量的 $k-1$ 为傅里叶变换,即:

$$S_{kx}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{k-1}) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} C_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2 + \dots + \omega_{k-1} \tau_{k-1})} \quad (7)$$

一般,最常用的高阶谱是三阶谱,也称双谱,定义为三阶累积量的二维傅里叶变换。由于双谱阶次最低,却包括高阶谱的所有特性,计算量较小,成为高阶谱分析中的热点。根据公式(5)和(7),零均值的随机过程 $\{x(n)\}$ 的三阶累积量和双谱为:

$$C_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E[x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)] \quad (8)$$

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} C_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)} \quad (9)$$

一个实序列的三阶累积量有六个对称区域,双谱有十二个对称扇形区域,只要知道主三角区 $\{\omega_2 \geq 0, \omega_1 \geq \omega_2, \omega_1 + \omega_2 \leq \pi\}$ 内的双谱,就能完全描述所有的双谱。另外,零均值高斯过程的三阶累积量等于零,所以双谱也为零。在试件完好区域,检测信号接近高斯分布,而在损伤区,信号就会偏离高斯分布,所以,可以利用双谱对待检试件的损伤境况进行诊断^[6]。

1.2 双谱切片

由于高阶累积量是多维函数,因此计算量较大,在某些情况下不太适宜。Nagata 提出了利用累积量的一维切片概念,以及相应的一维傅里叶变换作为分析信号特性的手段^[9]。双谱切片的定义为三阶累积量切片的一维傅里叶变换。常用的双谱切片为双谱

对角切片 (亦称 $\frac{1}{2}$ 维谱)^[10], 其定义为三阶累积量 $C_{3x}(\tau_1, \tau_2)$ ($\tau_1 = \tau_2 = \tau$) 的傅里叶变换 $C(\omega)$:

$$C(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t)x^2(t+\tau)dt \right] e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (10)$$

双谱的物理意义并不非常明确, 但双谱切片在形式上类似于功率谱, 功率谱反映了信号能量在频谱上的分布, 而双谱可以认为是信号歪度在频谱上的表征, 因此可以描述信号的非对称性、非高斯性和非线性特征。计算 $\frac{1}{2}$ 维谱的算法如下:

- (1) 将原始信号序列分为 K 段, 每段的长度是 M ;
- (2) 对每段的数据进行去均值处理;
- (3) 分别计算每段数据的三阶累积量 $C^{(i)}(\tau)$;

$$C^{(i)}(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{s_1}^{s_2} x^{(i)}(n)x^{(i)}(n+\tau)x^{(i)}(n+\tau) \quad (11)$$

式中: $i=1, 2, \dots, K$; $s_1 = \max(0, \tau)$; $s_2 = \min(M-1, M-1-\tau)$

- (4) 对每段数据的 $C^{(i)}(\tau)$ 取平均, 得到三阶累积量切片估计 $\hat{C}(\tau) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K C^{(i)}(\tau)$;
- (5) 对 $\hat{C}(\tau)$ 做一维傅里叶变换, 得到该信号的 $\frac{1}{2}$ 维谱。

2 红外热像检测信号的双谱分析

红外热像检测实验采用脉冲单侧型方式, 试件为 4 mm 厚 150 mm×150 mm 规格的 Plexiglas[®] 材质平板状材料, 在其下底面用机加工的方式铣出 6 个平底孔(直径都是 10 mm, 深度分别 3.5、3、2.5、2、1.5 和 1 mm, 见图 1), 用于模拟不同的损伤情况。红外热

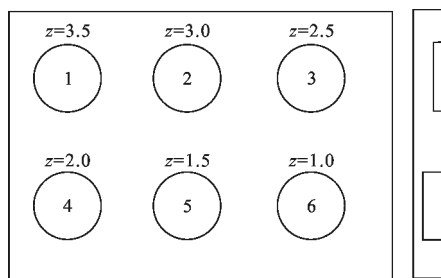


图 1 试件的设计参数示意图
Fig.1 Design diagram and geometry of the sample

像仪型号为 Barbara Focalplane SBF 125, 工作波段 3~5 μm , 像素分辨率 320×256。加热源为 2 个功率的闪光灯(Balcar FX 60), 可以产生 6.4 kJ 持续试件约为 15 ms 的热量。实验时, 采样频率为 10 Hz, 共采集 100 帧图像。文中所用实验数据由加拿大 Laval 大学

的 MIVIM 实验室提供。

在试件的模拟损伤中取各孔的中心点分别记为 P1-P6, 并以孔 3 的中心点为分析参考点, 表示缺陷区域; 在完好区域任取一参考点, 表示完好区域, 记为 P7。从 100 帧图像中抽取对应坐标的温度序列可以得到七个点的温升-时间图线, 如图 2 所示。

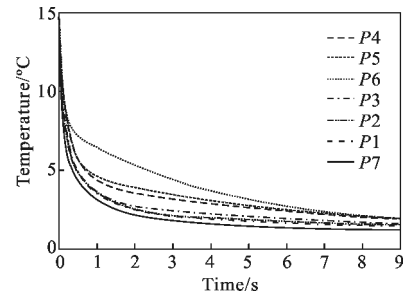


图 2 试件上表面七个对应点的温升随时间变化关系图
Fig.2 Surface temperature difference curves of defect vs time at 7 different position

从图 2 可以看出完好点的温度最低, 平底孔距离上表面越近温升越高, 即损伤深度越浅温度变化越明显。这是容易理解的, 因为热向试件内部扩散越深, 过程中损失的热就越多, 可以建立的热梯度也就越小。现在, 用高阶累积量的方法来分析损伤点 P3 和完好点 P7 两个参考点的特性, 它们的双谱幅值投影图和立体图分别如图 3(a)-(d) 所示。

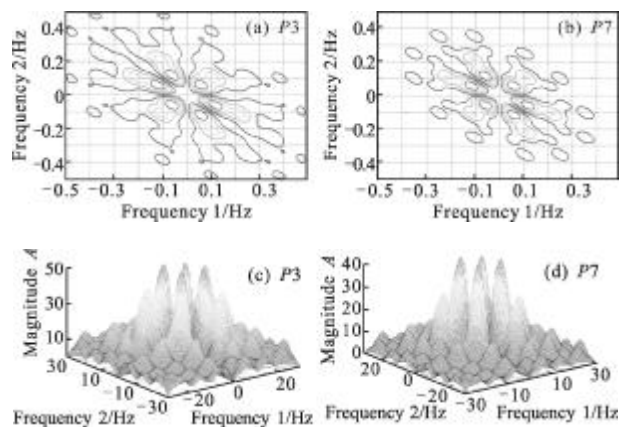


图 3 双谱幅值投影图和双谱幅值立体图
Fig.3 Diagram of bispectrum magnitude projection and bispectrum magnitude solid

从图 3 可以看出, 损伤区点的双谱投影分布区域比完好区点的更分散, 形状也更不规则, 局部小峰值较多; 而完好区点谱的峰值更多地集中在低频区域中, 即能量比较集中。从三维图中也可以发现, 损

伤区点的谱分布虽然很宽,但峰值幅度仍然比完好区点的要大很多,说明其信号能量更大,这和以前的原理分析相吻合。损伤点 P3 和完好点 P7 的双谱相位投影图和立体图情况,如图 4(a)~(d)所示。

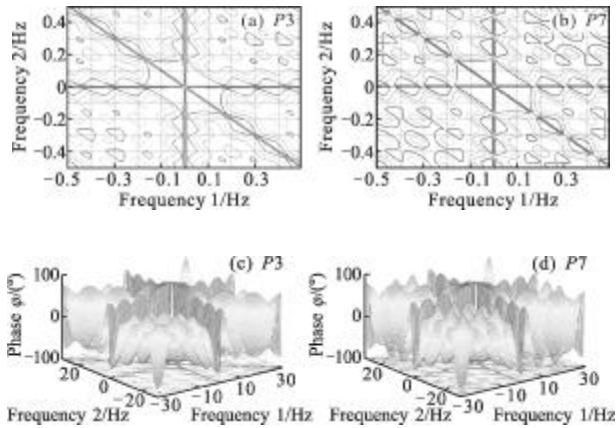


图 4 双谱相位投影图和双谱相位立体图

Fig.4 Diagram of bispectrum phase projection and bispectrum phase solid

从图 4 可以发现,损伤区点和完好区点在双谱相位上的区别主要在高频段,尤其是对角线方向上(I - III 象限或 II - IV 象限)的形态差别比较大。例如,在左侧表示损伤情况的图中,相位峰值以均匀分散的“孤岛”形态出现在对角 I, III 两个象限之中;而在右侧图中,相位是以明显的中心式“环岛”形态分布的。

为了突出比较双谱幅值和相位的差异,仍然效仿 PPT 分析中的对比度的概念,即损伤区 P3 点的幅值(或相位)减去完好区 P7 点的幅值(或相位)后的量值。同时对同样的信号进行 $1\frac{1}{2}$ 维谱分析,其双谱幅值、相位对比图, $1\frac{1}{2}$ 维谱幅值、相位对比值如图 5(a)~(d)所示。

从图 5 可以看到,两个参考点的双谱幅值对比度图变换较大,从各自的在低频区较为集中的“准椭圆”形态变化为全区域的“准矩形”的发射状分布;相位方面,中心的峰值区域全部消失,主要区别仍在主对角线和次对角线区域中。而在 $1\frac{1}{2}$ 维谱中也得到了很好的印证,其中,幅值谱表现的峰值对比度出现在低频区,相位发生在高频区,并且之间相差不大。相对于 PPT 方法中,幅值谱对比度特征出现不明显的问题,在 $1\frac{1}{2}$ 维谱幅值谱中却很突出。同时,维谱

的计算量较双谱小很多,所以在长采样信号处理中优势更大。

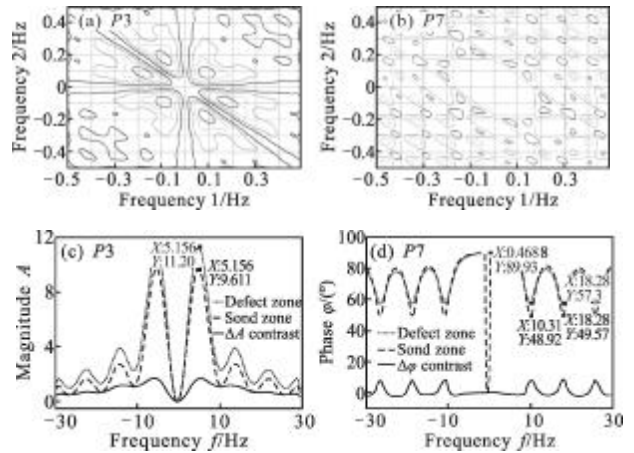


图 5 损伤点 P3 和完好点 P7 的双谱幅值、相位对比度图及 $1\frac{1}{2}$ 维谱的幅值、相位对比图

Fig.5 Diagram of bispectrum magnitude and bispectrum phase, bispectrum magnitude slice spectra, bispectrum phase slice spectra contrast for point 3 and point 7

3 结 论

文中提出将高阶累积量用于对红外热像检测信号进行分析,考虑引入非高斯非线性测量噪音的影响,通过高阶谱和切片谱可以提取出信号中用 PPT 方法所无法得到的大量特征信息,弥补了 PPT 法不能充分利用幅值谱的重要缺点,并能更好地抑制高斯和各类对称型噪音。为进一步研究损伤信号提供了新的方法,有助于实现红外信号的定性和定量分析,为红外热像检测的损伤情况评估提供了更多有益的辅助判断信息。

参 考 文 献:

[1] Liu Hui, Liu Junyan, Wang Yang. Processing thermal image sequences for defect detection based on ultrasound lock-in thermography [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 944-948. (in Chinese)
刘慧,刘俊岩,王扬.基于超声锁相热像技术检测缺陷的热图序列处理[J].红外与激光工程,2011,40(5):944-948.

[2] Yang Zhengwei, Zhang Wei, Tian Gan, et al. Infrared thermography applied to detect debond defect in shell structure [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 186-191. (in Chinese)
杨正伟,张炜,田干,等.红外热波方法检测壳状结构脱粘

- 缺陷[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 186-191.
- [3] Tao Ning, Zeng Zhi, Feng Lichun, et al. Thermal effusivity measurement of subsurface heterogeneous materials using pulsed thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2098-2103. (in Chinese)
陶宁, 曾智, 冯立春, 等. 采用脉冲红外成像法的表面下暗藏物蓄热系数的测量 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2098-2103.
- [4] Li Lichao, Yang Lu, Zhang Yanhua. Defect test of material using infrared image processing methods [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 372-376. (in Chinese)
李立超, 杨录, 张艳花. 利用红外图像处理方法检测材料缺陷[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 372-376.
- [5] Maldague X, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography [J]. *J Appl Phy*, 1996, 79(5): 2694-2698.
- [6] Collis W B, White P R, Hammond J K. Higher-order spectra: the bispectrum and trispectrum [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1998, 12(3): 375-394.
- [7] Duan Xiangyang, Wang Yongsheng, Su Yongsheng. Application of slice bispectrum analysis to fault diagnosis of centrifugal pump [J]. *Journal of Vibration Measurement & Diagnosis*, 2010, 10(5): 581-584. (in Chinese)
段向阳, 王永生, 苏永生. 切片双谱分析在离心泵故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 10(5): 581-584.
- [8] Li Yuhua, Cai Kunbao, Zhang Jihong. Application of bispectrum estimation to analyzing pulse signals [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2006, 29(5): 44-47. (in Chinese)
李玉韩, 蔡坤宝, 张继红. 双谱估计在中医脉象信号分析中的应用[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 5(29): 44-47.
- [9] Nagata Y. Bispectra of spike-army type time series and their applications to the analysis of oceanic microstructures [J]. *Oceanographical Society*, 1978, 34: 734-740.
- [10] Zhang Yan, Wang Shunxun. Slice spectra approach to nonlinear phase coupling estimation [J]. *Electronics letters*, 1998, 34(4): 340-341.

下期预览

低损耗太赫兹镀膜金属波导研究

何雅兰, 何金龙, 刘平安

(中国计量学院 机电学院 太赫兹技术与应用研究所, 浙江 杭州 310000)

摘要: 理论研究太赫兹波在镀膜二维平板金属波导传输时, 损耗减小的机制和条件, 发现只有 TM 模式在大间隙的金属镀膜波导传播时, 其损耗小于不镀膜的金属波导。利用射线光学方法分析波导尺寸、膜厚度以及膜折射率等参数对 TM 模式损耗的影响, 获得其损耗最低的优化结构参数。并利用转移矩阵理论对镀介质膜前后平板金属波导的损耗进行理论计算和分析, 当介质为聚乙烯且厚度为 0.06mm 时, 波导的损耗最小。所获结论对于太赫兹波导器件及太赫兹波低损耗波导研制具有较大的意义。