脉冲红外相位线性调频 Z 变换

马说邯 马齐爽

(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: 为了解决脉冲相位法(PPT,Pulse Phase Thermography)在处理红外检测数据时频率分辨率不够的问题,提出了一种新型的频域变换方法. 利用快速傅里叶变换(FFT,Fast Fourier Transform)选择出包含特征频率的窄频带,对其进行线性调频 Z 变换(CZT,Chirp Z Transform),得到细化的频率结构. 并将逐点像素分析后的结果重构出清晰的幅值和相位图像序列. 在不增加采样时间的前提下获得了比 PPT 更高的频率分辨率. 通过对铝制材料试件检测信号的对比分析,结果表明该算法可以对选频带进行有效细化,得到更精确的特征频率,有效降低了频谱泄露造成的误差.

关 键 词: 热像; 无损检测; 图像处理; 频谱分析

中图分类号: TN 21

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1435-05

Pulse phase thermography chirp Z transform

Ma Shuohan Ma Qishuang

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient frequency resolution, occurring at the infrared detection data processing by the pulse phase thermography (PPT), a new frequency domain transform method was proposed. The fast Fourier transform (FFT) was utilized to choose the narrow frequency band included within the characteristic frequency, this band was processed by the chirp Z transform (CZT), the refined frequency structure was obtained. The clear amplitude and phase image sequences were reconstructed from the pixel-by-point analysis results. Without increasing the sampling time, a higher frequency resolution was achieve than the one of the PPT. Through the comparison of the detection signal from an aluminum material specimen, the results show that the algorithm can effectively refine the selected frequency band, get more precise characteristic frequency and effectively reduce the spectral leakage errors.

Key words: thermography; nondestructive examination; image processing; spectrum analysis

红外热成像检测作为一种无损检测技术,已经广泛应用于电力、建筑、机械和航空航天工业等领域. 与其他无损检测方法相比,具有非接触、速度快、一次可检面积大等优点. 但是,红外热像法易受加热不均、被测试件表面辐射度变化等因素的影响,从而限制了检测能力. 脉冲相位法(PPT,Pulse Phase Thermography)结合了脉冲红外检测(PT,Pulse Thermography)能快速获取实验数据,调制红外检测(MT,Modulated Thermography)对光照不均不敏感这两者的技术优势,成为红外无损检测的一种重要数据分析方法[1-2]. 然而受设备本身采样率限制,以及快速傅里叶变换(FFT,Fast Fourier Transform)固有的频率分辨率特性,使得 PPT 频率分辨率较低[3],可获得的有效特征频率较少,其检测效果不能令人满意.

PPT 基于离散傅里叶变换(DFT, Discrete

收稿日期: 2010-11-05; **网络出版时间**: 2011-11-14 17:19; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111114.1719.002

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111114.1719.002.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60879014)

作者简介: 马说邯(1982 -),男,河北邯郸人,博士生,mashuohan@asee.buaa.edu.cn.

Fourier Transform),其实现是由 FFT 计算完成,由时域截断所引起的频谱泄露是不可避免的. 另外,栅栏效应导致的分辨率不够,会使某些关键的特征谱线无法识别. 针对这一问题,将 chirp Z 变换(CZT,Chirp Z Transform)用于检测信号的分析中,利用该方法的局部频谱细化能力,实现了热图序列的局部频谱分析,提高了数据的利用率.

1 PPT 原理

在 PT 检测时,如果将热源假设为单位脉冲函数 $\delta(t)$,由傅里叶变换(FT,Fourier Transform)可知,其频域表达为 1,即包含所有的频率分量,且幅值相同. 这样等效于在 MT 中一次检测只使用一种频率值的过程,在 PT 中一次就可以完成 MT 的多次、多种频率的检测[4]. 在 MT 中相位的分析非常有效,将这两种技术联合起来,即通过 FT 对脉冲激励不同频率下的相位频响进行分析,称为 PPT 算法[5]. 在实验时,热激励有大约 10 ms 的持续时间,并不是理想的脉冲函数,故在频域为 sinc 函数形状的谱,但是其频谱在主瓣范围里已经远远涵盖了要分析的频带范围,所以可以认为是满足要求的[6].

PPT 算法的原理是将热图像序列中的每一个像素(i,j)的时间变化过程$f(x)$抽取出来,将其进行 DFT 计算,过程为

$$F(u)=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}f(x)\exp\left(\frac{-\mathrm{j}2\pi ux}{N}\right)=R(u)+\mathrm{j}I(u) \tag{1}$$

式中,$R(u)$和$I(u)$分别为频域表达式$F(u)$的实部与虚部;N 为采样点数. 幅值 $A(u)$ 和相位 $\Phi(u)$的计算为

$$\left.\begin{aligned}A(u)&=\sqrt{R^2(u)+I^2(u)}\\ \Phi(u)&=\arctan\frac{I(u)}{R(u)}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

分析得到的频谱范围是 $0\sim 1/\Delta x$(即采样频率 F_S,这里 Δx 是采样时间间隔). 在实际计算时,DFT 由 FFT 实现. 将图像中的每一个像素经过上述处理,之后在特定的频率下可以重构相应的幅值和相位图像序列. 一般在分析中使用相位图像,因为它不易受热源照射不均的影响,效果较好[7]. 在本文的实验中,F_S 为 60 Hz,N 为 108. 所以,频率分辨率 $\Delta u=1/N\Delta x=0.55$ Hz. 经 PPT 分析后,重构出的图像序列中有效可见的幅值和相位图分别如图 1、图 2 所示.

从图 1 和图 2 可以看出 PPT 方法重构出的相位图比幅值图效果要好很多,而且有效的帧数也

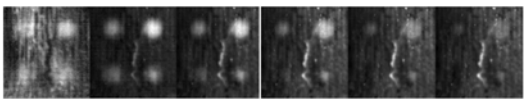


图 1 PPT 方法重构出的幅值图

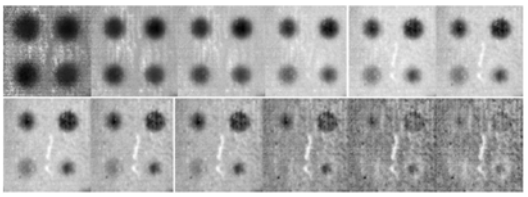


图 2 PPT 方法重构出的相位图

多. 在图 1 中可以清晰看出存在圆形缺陷的帧数为 6 帧,而在图 2 的相位图中其数量是远大于 6 的. 实验中 $\Delta u=1/N\Delta x=0.55$ Hz,所以幅值的有效可见频率范围是 0 ~ 3.3 Hz;相位的有效可见频率范围扩展为 0 ~ 6 Hz. 另一方面,由 MT 的原理可知,热扩散长度 μ 的表达式为:$\mu=\sqrt{2\alpha/\omega}$,$\alpha$ 为热扩散系数;ω 为热波频率. 相位表达式为:$\Phi=z/\mu$,z 为缺陷的深度. 可知检测深度直接和 μ 相关,也即与频率 ω 有关,当 z 较大时,ω 必然很低. 从以上的分析可知:FFT 的分辨率是受到限制的,某些关键的特征谱线可能因为栅栏效应而无法获得,所以,需要对经典 PPT 方法进行改进.

2 CZT 原理

对信号做 N 点 DFT 计算的结果,等效于在 Z 平面单位圆上的 N 点等间隔取样,分辨率为 F_S/N,而小于该值的频率是无法识别的,否则就要降低 F_S或者增加 N 以提高分辨率. 前者会因为可能不满足香农采样定理而发生频率混叠现象;后者会增加计算工作量,或因为硬件的条件限制不易实现. 另外,并非整个单位圆上的频谱对于分析都有意义,例如,对于窄带信号,往往只需要对信号所在的一段频带进行分析即可,希望在这段频带内分辨率尽可能高一些,而频带以外的部分不必考虑[8-9].

CZT 的原理是在 Z 平面螺旋周线上 Z 变换的等间隔取样,这些取样点在螺旋线的某一部分上按等角度分布,如图 3 所示.

Z 变换是将一个离散的数字信号从时间域模式变换到频率域模式,定义式为

$$X(z)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)z^{-n}\quad n=0,1,\cdots,N-1 \tag{3}$$

式中,$X(z)$为 N 点信号序列 $x(n)$的 Z 变换.

在 Z 平面单位圆内的一段螺旋线做等分角,设取样点为 Z_k,其定义式为

$$Z_k=AW^{-k}\quad k=0,1,\cdots,M-1 \tag{4}$$

式中,M 为复频谱的取样点数,M 不一定等于 N;A 和 W 可以取任意复数,具体表示为

$$\left.\begin{aligned} A &= A_0 e^{j\theta_0} \\ W &= W_0 e^{-j\Phi_0} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中,A 为起始取样点的位置;A_0 为径向长度,当 $A_0>1$ 时,螺旋线起点在单位圆内,否则在单位圆外;θ_0 为起点的相角;W 为采样路径;W_0 为路径沿螺旋线的伸展率,$W_0>1$ 时,螺旋线内旋,反之外伸;Φ_0 为抽样间隔,$\Phi_0>0$ 时,路径逆时针旋转,相反则顺时针旋转.

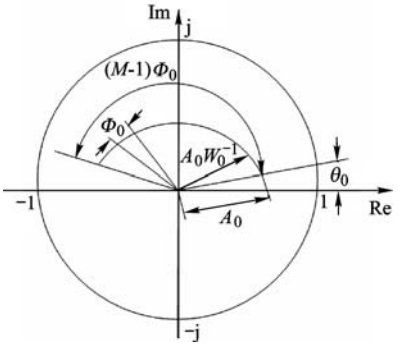


图 3　CZT 原理示意图

当 $M=N$,$A=1$(即 $A_0=1$,$\theta_0=0°$),$W=1$(即 $W_0=1$,$\Phi_0=2\pi/M=2\pi/N$)时,Z_k 均匀等角度分布在单位圆上,此时 CZT 即为 DFT[10]. 将式(4)代入式(3)中,可得

$$\mathrm{CZT}[x(n)] = X(Z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) Z_k^{-n} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) A^{-n} W^{nk} \quad 0 \leqslant k \leqslant M-1 \tag{6}$$

根据 Bluestein 等式:$nk=[n^2+k^2-(k-n)^2]/2$,式(6)可化简为

$$X(Z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) A^{-n} W^{\frac{1}{2}[n^2+k^2-(k-n)^2]} = W^{\frac{k^2}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) A^{-n} W^{\frac{n^2}{2}} W^{-\frac{(k-n)^2}{2}} \quad 0 \leqslant k \leqslant M-1 \tag{7}$$

令

$$\left.\begin{aligned} g(n) &= x(n) A^{-n} W^{\frac{n^2}{2}} \\ h(n) &= W^{-\frac{n^2}{2}} \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

则

$$X(Z_k) = W^{\frac{k^2}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} g(n) h(k-n) = W^{\frac{k^2}{2}} [g(k) * h(k)] = W^{\frac{k^2}{2}} y(k) \tag{9}$$

式中,$y(k) = g(k) * h(k) = \sum_{n=0}^{N-1} g(n) W^{-\frac{(k-n)^2}{2}}$,$0 \leqslant k \leqslant M-1$.

从式(8)和式(9)可知,可以先对 $x(n)$ 做一次加权运算,系数为 $A^{-n}W^{\frac{n^2}{2}}$,则得到 $g(k)$;再通过单位脉冲响应为 $h(n)$ 的线性系统得到 $y(k)$;对 $y(k)$ 再做一次加权运算,其系数为 $W^{\frac{k^2}{2}}$,即可完成 CZT 计算,算法的实现过程如图 4 所示.

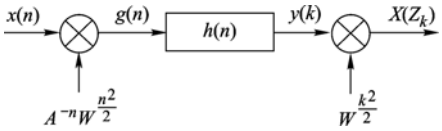


图 4　CZT 计算实现的过程框图

3　CZT 的计算步骤

计算 $X(Z_k)$ 的关键是实现 $g(n)$ 和 $h(n)$ 的线性卷积,可利用 FT 的时、频域卷积与乘法对应的性质,以及循环卷积与线性卷积的关系,用 FFT 来完成,这就是 CZT 快速算法的基本原理. 选择一个最小整数 L,使其满足 $L=2^M$,且 $L>(N+M-1)$,以实现基-2 的 FFT 算法,整个计算过程如图 5 所示,IFFT 为逆 FFT.

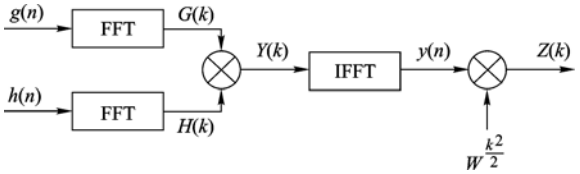


图 5　用 FFT 计算 CZT 的原理框图

1) 对信号 $x(n)$ 进行加权、补零计算:

$$g(n) = \begin{cases} A^{-n}W^{\frac{n^2}{2}}x(n) & 0 \leqslant n \leqslant N-1 \\ 0 & N \leqslant n \leqslant L-1 \end{cases} \tag{10}$$

2) 将 $h(n)$ 转换成 L 点序列:

$$h(n) = \begin{cases} W^{\frac{n^2}{2}} & 0 \leqslant n \leqslant M-1 \\ 0 & M \leqslant n \leqslant L-N \\ W^{-\frac{(L-n)^2}{2}} & L-N+1 \leqslant n \leqslant L \end{cases} \tag{11}$$

3) 求出 $g(n)$ 和 $h(n)$ 的 FT 结果,用 FFT 完成,即:$G(k)=\mathrm{FFT}[g(n)]$,$H(k)=\mathrm{FFT}[h(n)]$;

4) 计算 $Y(k)=G(k)\times H(k)$,求出 $Y(k)$ 的傅里叶反变换 $y(n)$,即 $y(n)=\mathrm{IFFT}[Y(k)]$;

5) 加权计算,完成 CZT 变换:

$$X(Z_k) = W^{\frac{k^2}{2}} y(n) \quad 0 \leqslant k \leqslant M-1 \tag{12}$$

4　CZT 运算量估计

对于长度为 N 的数据,当采用时域抽取 FFT 算法时,N 点 FFT 的复数乘法次数为 $N/2\log_2 N$,复数加法次数为 $N\log_2 N$. 在 CZT 算法中,有 3 次 L 点的 FFT 运算;形成 $g(n)$ 序列时需要 $3N$ 次复数

乘法;形成序列 $h(n)$ 时需要 $L-N'$ 次复数乘法,这里 $N'=\max(M,N)$;加权计算还需要 M 次复数乘法,总计运算量为

$$O_{CZT}=\frac{3L}{2}\log_2 L+3N+L-N'+M \quad (13)$$

5 CZT 应用与 PPT 对比实验

将 CZT 用于红外热像检测,变换参数 $A_0=1$, $W_0=1$,即螺旋线在单位圆上. 此时,CZT 成为一种特殊的傅里叶变换,通过调整系数 Φ_0 和 θ_0 可以实现对选择频带的局部处理. 若采样频率是 F_S,变换点数是 M,选择频带的起始位置是 F_1,截止位置是 F_2,则 Φ_0 和 θ_0 可以用下式确定:

$$\theta_0=\frac{2\pi F_1}{F_S} \quad (14)$$

$$\Phi_0=\frac{2\pi}{M}\frac{F_2-F_1}{F_S} \quad (15)$$

实验时采用反射方式进行检测,热激励设备为 2 只闪光灯,总能量为 6.4 kJ,加热脉冲持续时间约为 10 ms. 热像仪空间分辨率为 320×240,最大采样频率为 60 Hz. 实验样件 1 是一块铝材板状件,其设计参数如图 6 所示. 试件 2 为民航提供的 B767 上的真实飞机部件,在其背面发生了较大面积的腐蚀,照片如图 7 所示.

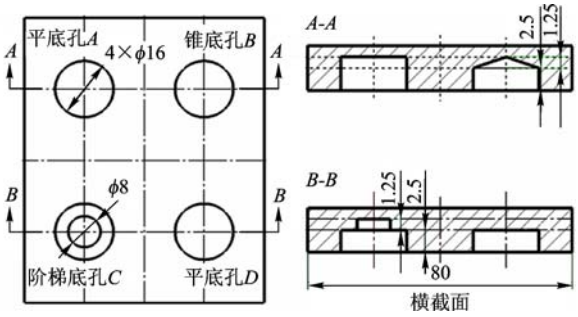
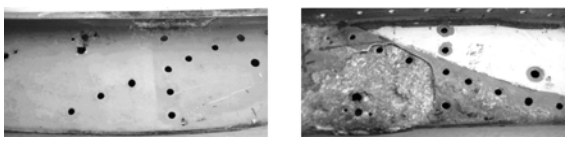


图 6 铝制试件 1 的设计图



a 试件 2 的正面 b 试件 2 的背面

图 7 B767 客机部件(试件 2)的正、背面照片

5.1 试件 1 的检测结果

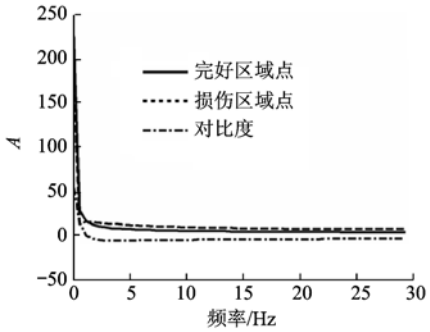
由于铝质试件的热扩散系数较大,数量级为 10^{-5} m^2/s,所以热暂态过程很快结束. 在 60 Hz 的采样频率下,实验采集序列长度为 108 帧(约为 1.8 s),但有效帧并不多. 经过 PPT 处理后频率分辨率为 0.55 Hz,效果见本文中的图 1 和图 2,栅栏效应使得小于该分辨率的谱线无法识别出来.

在用 PPT 和 CZT 处理时,可以选择图像中一个缺陷点和一个完好点用来定义相位对比度,见式(16),同理,亦可定义幅值对比度.

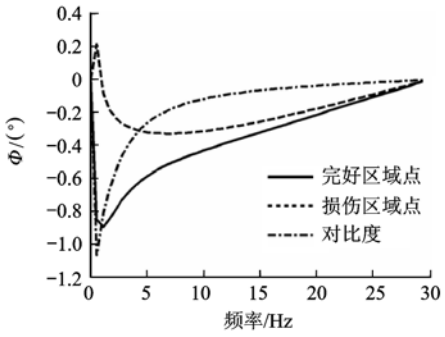
$$\Phi_c=\Phi_d-\Phi_s \quad (16)$$

式中,下标 c,d 和 s 分别表示相位对比度(contrast)、缺陷区域(defect)的相位和完好区域(sound)的相位.

在 PPT 处理序列中取单个像素数据如图 8 所示,若在相位图中设一个相位对比度阈值 h,则可用 h 来选择欲细化分析的频带,如选择 0 ~ 15 Hz的频带范围进行局部分析,其 CZT 细化的效果如图 9 所示. 在图 9b 的相位谱中发现有几处明显的峰值,但在 PPT 处理的谱图中却没有反映出来,另外谱线的波动状态也没有体现出来.



a PPT 算法分析单点像素的幅值图

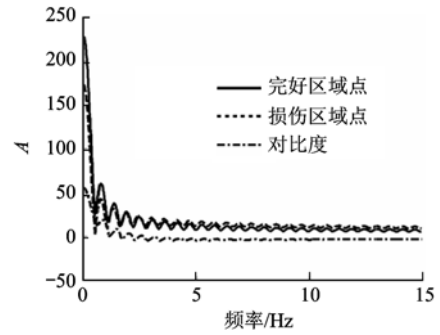


b PPT 算法分析单点像素的相位图

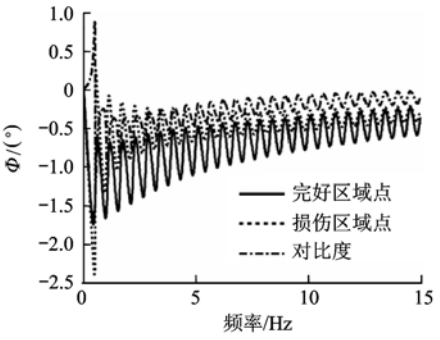
图 8 PPT 方法分析单点数据的频谱图

用 CZT 分析时参数为:$F_1=0$ Hz, $F_2=15$ Hz, $A_0=1$, $W_0=1$, $M=200$. 经 CZT 细化后的频率分辨率可达 0.05 Hz,比 PPT 提高了 10 倍. 从图 9 可以看出,细化后幅值、相位的变化是震荡延伸的,而非图 8 中所示的平滑曲线. 用 CZT 重构出的整帧幅值、相位序列如图 10 和图 11 所示(图 10 和 11 中只是截取了部分图像序列).

分别对比图 10 和图 1,图 11 和图 2 可以看出,在不增加 N 的前提下,CZT 处理后重构的幅值和相位中有效特征频率图像比 PPT 法要多出很多,背景更加均匀,同时频率分辨率也大幅提高,这就等效于提高了信号数据的利用率.



a　CZT 算法分析单点像素的幅值图



b　CZT 算法分析单点像素的相位图

图 9　CZT 方法分析单点数据的细化频谱图

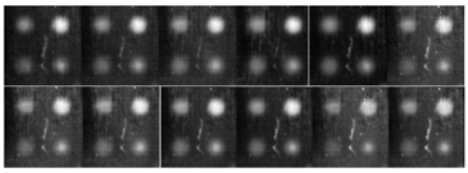


图 10　CZT 幅值重构图,0 ~ 15 Hz 频带图像序列

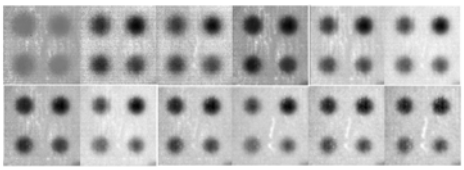


图 11　CZT 相位重构图,0 ~ 15 Hz 频带图像序列

5.2　B767 部件(试件 2)的检测结果

在对真实飞机部件进行检测时,F_S 为 60 Hz,序列长为 30 帧. 此时的 Δu 为 2 Hz. 经过 PPT 方法处理出的效果分别如图 12、图 13.

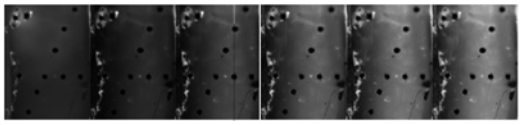


图 12　PPT 处理后重构的幅值合成图

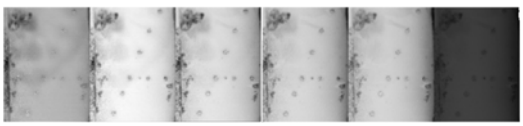


图 13　PPT 处理后重构的相位合成图

从图 12 和图 13 中可以发现 PPT 重构的幅值图受加热不均的影响很明显,左上角处的腐蚀区在幅值图中表现的不清晰,并且呈现出的腐蚀面积较小,这与实际情况相差较大. 在相位图中可以发现腐蚀区的面积较为贴近真实的大小,边界也清楚. 但是,能够获得的有效图像数目并不多,而用 CZT 方法处理后的结果如图 14、图 15 所示.

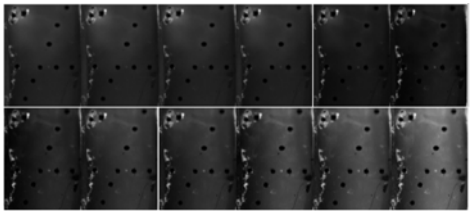


图 14　CZT 处理后重构的幅值合成图

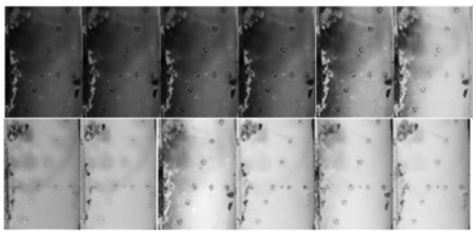


图 15　CZT 处理后重构的相位合成图

在用 CZT 分析时,使用的参数和试件 1 的参数相同,Δu 提高 10 倍,可以得到 200 幅图像,图 14 和图 15 仅为部分图像序列. 从中可以发现图像变化的过渡均匀细腻,CZT 重构的相位图效果比 PPT 的改进很多,可以进行判读的有效图像数目增加了 6 倍多. 所以,用 CZT 算法处理真实飞机部件损伤红外检测数据的效果比使用 PPT 方法要好很多.

6　结　论

本文首次提出将频谱分析中的频带细化分析技术应用于红外热像检测的数据分析中去. 应用 CZT 替代 PPT 分析中的 FFT,在改进了经典 PPT 方法的基础上得到结论:①在不增加信号采样点数的条件下,显著改善了 PPT 方法中分辨率较低的问题,并且新算法还可以满足对运算量的要求. ②减小了分析中 FFT 栅栏效应问题的产生,从而可以得到更多特征频率处的重构图像,同时也抑制了因频谱泄露而发生的误差. ③可以进一步消除实验时光照不均效应的不良影响,CZT 处理后的图像质量较 PPT 处理的图像有了很大程度的改善. 通过和 PPT 法处理的结果对比可以发现,用 CZT 算法处理检测数据获取的高分辨率效果,在理论上是高效的,在工程应用中是切实可行的,增强了红外热像检测数据谱分析的灵活性.

(下转第 1445 页)

75-58,1975

[2] Baysal O,Eleshaky M,Burgreen G. Aerodynamic shape optimization using sensitivity analysis on third-order Euler equations[J]. Journal of Aircraft,1993,30(6):953 – 961

[3] 罗世彬. 高超声速飞行器机体发动机一体化及总体多学科设计优化方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学航天与材料工程学院,2004
Luo Shibin. Research on airframe/engine integration issues and multidisciplinary design optimization methods for air-breathing hypersonic vehicle[D]. Changsha:College of Aerospace & Materials Engineering, National University of Defense Technology, 2004(in Chinese)

[4] 陈兵. 空间推进算法及超燃冲压发动机部件优化设计研究[D]. 北京:北京航空航天大学宇航学院,2006
Chen Bing. A space-marching algorithm with application to scramjet components optimization design[D]. Beijing:School of Astronautics,Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006 (in Chinese)

[5] 贺旭照,张勇,汪广元,等. 高超声速飞行器单壁膨胀喷管的自动优化设计[J]. 推进技术,2007,28(2):148 – 151
He Xuzhao,Zhang Yong,Wang Guangyuan,et al. Automated design optimization of single expansion ramp nozzle for hypersonic vehicle[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28 (2): 148 – 151(in Chinese)

[6] 贺旭照,倪鸿礼,周正,等. 吸气式高超声速飞行器三维后体/尾喷管优化设计[J]. 推进技术,2009,30(6):687 – 690
He Xuzhao, Ni Hongli, Zhou Zheng, et al. 3D afterbody nozzle optimization of air-breathing hypersonic vehicle[J]. Journal of Propulsion Technology,2009,30(6):687 – 690(in Chinese)

[7] 周正,倪鸿礼,贺旭照,等. 基于 Rao 方法的二维单壁膨胀喷管优化设计[J]. 推进技术,2009,30(4):451 – 456
Zhou Zheng,Ni Hongli,He Xuzhao,et al. Optimization design of single expansion ramp nozzle based on Rao's method[J]. Journal of Propulsion Technology,2009,30(4):451 – 456(in Chinese)

[8] 曹德一,李椿萱. 高超声速飞行器尾喷管的优化设计[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(10):1162 – 1165
Cao Deyi,Lee Chunhian. Optimal design of nozzle for hypersonic Vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007,33(10):1162 – 1165(in Chinese)

[9] 车竞. 高超声速飞行器乘波布局优化设计研究[D]. 西安:西北工业大学航天学院,2006
Cheng Jing. Optimization design of waverider-hypersonic cruise vehiele[D]. Xi'an:College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University,2006(in Chinese)

[10] Giunta A A. Use of data sampling,surrogate models,and numerical simulation optimization in engineering design[R]. AIAA 2002-0538,2002

[11] Queipo N V,Haftka R T,Shyy W,et al. Surrogate-based analysis and optimization[J]. Progress in Aerospace Sciences,2005, 41(1):1 – 28

[12] Forrester A I J,Keane A J. Recent advances in surrogate-based optimization[J]. Progress in Aerospace Sciences,2009,45(3): 50 – 79

[13] Dyer J D,Hartfiekd R J. Aerospace design optimization using a steady state real coded genetic algorithm[R]. AIAA 2008-5921,2008

[14] Ahuja V,Hartfield R J Jr. Optimization of air-breathing hypersonic aircraft design for maximum cruise speeds using genetic algorithms[R]. AIAA 2009-7323,2009

(编　辑:李　晶)

(上接第 1439 页)

参考文献(References)

[1] Omar M A,Zhou Y. A quantitative review of three flash thermography processing routines[J]. Infrared Phys Techn, 2008, 51(4):300 – 306

[2] Hung M Y Y,Chen Y S,Siu P N,et al. Review and comparison of shearography and pulsed thermography for adhesive bond evaluation[J]. Opt Eng,2007,46(5):51007 – 51016

[3] Galmiche F,Leclerc M,Maldague X. Time aliasing problem in pulsed phased thermography[C]//Rozlosnik A,Dinwiddie R. Thermosense XXⅢ. Orlando,FL:SPIE,2001:550 – 553

[4] Maldague X,Marinetti S. Pulse phase infrared thermography[J]. Journal of Applied Physics,1996,79(5):2694 – 2698

[5] Ibarra-Castanedo C,Galmiche F,Darabi A,et al. Thermographic nondestructive evaluation:overview of recent progress[C]//Crametk,Maldague X. Proc SPIE Thermosense XXV. Florida:SPIE, 2003:450 – 459

[6] 奥本海姆 A V,谢弗 R W. 离散时间信号处理[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001
Oppenheim A V,Schafer R W. Discrete-time signal processing [M]. Xi'an:Xi'an JiaoTong University Press,2001(in Chinese)

[7] Wu D,Salerno A,Schonbach B,et al. Phabe sensitive modulation thermography and its applications for NDE[C]//Wurzbach R, Burleigh D. Proc SPIE Thermosense XIX. Bellingham: SPIE, 1997:176 – 182

[8] 陈祝明,丁义元,向敬成. 采用 Chirp-Z 变换提高 LFMCW 雷达的测距精度[J]. 信号处理,2002,18(2):110 – 112
Chen Zhuming, Ding Yiyuan, Xiang Jingcheng. Improving range precision of LFMCW radar by chirp-Z transform [J]. Signal Processing,2002,18(2):110 – 112 (in Chinese)

[9] 郭惠勇,李正良. 基于模态应变能与频率信息修正的结构多损伤识别研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2008,16(5): 719 – 725
Guo Huiyong, Li Zhengliang. An improved information method based on modal strain energy and frequency for structural multiple damage identification [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2008,16(5):719 – 725(in Chinese)

[10] Babiner L,Schafer R,Rader C. The chirp Z-transform algorithm [J]. Audio and Electmacoustics,IEEE Tmnsactions on,1969, 17(2):86 – 92

(编　辑:刘登敏)