文章编号:1673-5005(2007)06-0092-05

傅里叶变换轮廓术中预处理滤波方法的研究

任旭虎^{1,2}, 綦耀光¹, 宋珊珊²

(1. 中国石油大学 机电工程学院,山东 东营 257061; 2. 中国石油大学 信息与控制工程学院,山东 东营 257061)

摘要:用傅里叶变换轮廓术测量复杂物体形状时,频谱能量分布弥散,出现频率混叠现象,滤波时难以确定截止频 率。选用了3种频域滤波窗以及小波滤波4种滤波方法对傅里叶变换轮廓术中的变形光栅图进行处理,计算机模拟 并比较了在有噪声和无噪声的情况下不同滤波方法的误差分布。数据分析表明,选用合适的小波基对信号进行滤 波处理比其余3种滤波器的测量精度要高。

关键词:傅里叶变换轮廓术;滤波;小波变换;测量精度 中图分类号:0438 文献标识码:A

Study on pre-filtering in Fourier transform profilometry

REN Xu-hu^{1,2}, QI Yao-guang¹, SONG Shan-shan²

College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;
 College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: In Fourier transform profilometry, the frequency is dispersed and confused when detecting complex objects. It is difficult to filter out the inutility information and determine the cut-off frequency. The wavelet filtration method and three frequency domain filtering windows were chosen to analyze the raster pattern of FTP when noise exists and does not exist. The error distributions without noise and with noise were given. The results show that the measuring accuracy is higher using wavelet transform than that obtained by the frequency domain filtering window.

Key words: Fourier transform profilometry; filtering; wavelet transform; measuring accuracy

用光栅投影的方法测量三维物体的表面轮廓在 工业、医学等各个领域中具有重要意义。特别是由 Takeda^[1]等人提出的傅里叶变换轮廓术(Fourier transform profilometry,FTP),由于其只需获取一幅图 像就可恢复出物体形面信息,易于动态处理,具有非 接触、速度快、精度较高等特点而得到广泛的应用。 目前傅里叶变换轮廓术研究的重点是如何提高其测 量精度和范围,并提出了许多提高精度和增加测量 范围的新方法^[27]。由于物体对测量光栅条纹的调 制作用,使携带有用信息的基频分量频谱扩展,如果 被测物体形状复杂,在频谱中将出现能量分布弥散 现象,此时选择合适的滤波窗对信号进行处理,准确 地提取基频信息,对提高傅里叶变换轮廓术的测量 精度起着重要作用。因此,笔者对几种常用的滤波 窗以及小波滤波进行分析,为实际测量中如何选择 合适的滤波方法提供参考。

1 傅里叶变换轮廓术的基本原理

傅里叶变换轮廓术^[1,8]的测量光路原理如图1 所示。



图 1 FTP 测量原理光路图 图 1 中 d 是投影仪出瞳和摄像机人瞳间的距

收稿日期:2007-02-18

作者简介:任旭虎(1973 ~),男(汉族),山西闻喜人,副教授,博士研究生,主要从事信号处理、机电一体化应用研究。

离,1 为摄像机入瞳与参考平面的距离,H 是测量物 体上的一点,C,D 是参考平面上的点,O 是投影仪与 摄像机光轴交点,S 是 C 点在摄像机上的成像。投 影仪将罗奇(正弦)光栅投影到物体上,物体上 H 点 也在摄像机 S 点处成像,而此时投影仪在 H 点处的 投影光栅的相位与没有放置物体时参考平面上 D 点的相位相同,因而 CD 间的相位差与物体上 H 点 的高度有一定的对应关系,求得 CD 间的相位差就 可以得出物体 H 点的高度值。设 x 轴与光栅条纹 方向正交,y 轴与光栅条纹方向平行,则投影仪在物 体上得到的变形光栅图可以表示为

$$g(x, y) = r(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp \left\{ j \left[2\pi n f_0 x + n \varphi \left(x, y \right) \right] \right\}$$
(1)

式中 f_0 为光栅像的基频;r(x,y)为物体表面反射率 分布的函数; $\varphi(x,y)$ 为由物体表面高度变化引起的 位相调制。

没有放置物体时,投影到参考平面上的参考光 栅图可以表示为

 $g_0(x,y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp\{j[2\pi n f_0 x + n \varphi_0(x,y)]\}.$ (2) 其中 $\varphi_0(x,y)$ 代表初始相位调制。固定 y 轴,对式 (1),(2)沿 x 轴进行一维傅里叶变换,得到的频谱 分别表示为 G(f,y)和 $G_0(f,y), G(f,y)$ 的频谱图如 图 2 所示。图中零频分量 Q_0 反映背景光强的分布, 基频分量 Q_1 包含了所要求的位相信息。设计合适 的滤波器,将其中的基频分量滤出来,然后进行逆傅 里叶变换,最终得到的分布可以表示为

$$\tilde{g}(x,y) = A_1 r(x,y) \exp\{j[2\pi f_0 x + \varphi(x,y)]\},$$
 (3)

$$\tilde{g}_0(x,y) = A_0 \exp\{j[2\pi f_0 x + \varphi_0(x,y)]\}.$$
 (4)



图 2 傅里叶变换频谱图

单纯由高度引起的相位调制为 $\Delta \varphi(x,y) = \varphi$ $(x,y) - \varphi_0(x,y) = 2\pi f_0 \overline{CD}$,对应着物体的高度分 $\pi h(x,y)$,由式(3)和式(4)可得

 $\Delta \varphi(x,y) = \operatorname{Im} \left\{ \lg [\tilde{g}(x,y)\tilde{g}_0(x,y)] \right\},$

Im 表示取复数的虚部。由于 $\Delta \varphi(x,y)$ 被截断在(π,π)之间,故应对其进行相位展开,将截断的位相 恢复为连续的位相,再利用三角形相似性得到所测 物体的高度分布,即

$$h(x,y) = \frac{L\Delta\varphi(x,y)}{\Delta\varphi(x,y) - 2\pi f_0 d}.$$

从傅里叶变换轮廓术的原理可以看出,准确地 得到基频信息对最终测量结果的精度有着至关重要 的作用,因此选择合适的滤波方法是傅里叶变换轮 廓术中的一个关键问题。

2 不同滤波方法和参数的选取

2.1 滤波方法的优选

2.1.1 Butterworth 滤波器法

IIR 是无限长脉冲响应滤波器,选用其中的巴特沃斯(Butterworth)滤波器。该滤波器在通带中有最大平坦的振幅特性,而且随着频率升高呈单调减小,因此又称为最平的幅度响应滤波器。它的特征函数表示为

$$A^{2}(\Omega) = |H_{a}(j\Omega)|^{2} = 1 / \left[1 + \left(\frac{\Omega}{\Omega_{c}}\right)^{2N}\right]$$

式中,N为滤波器的阶数; Ω 为信号的频率; Ω 。为截 至频率。N越大,滤波器的振幅特性越接近于理想 的矩形。本文中N取6。

2.1.2 矩形窗(Rect)法

矩形窗的函数可以表示为

$$\omega(n) = \begin{cases} 1, 0 \leq n \leq N-1; \\ 0, \ \pm \&n \end{cases}$$

说明是一理想低通滤波器,N为矩形窗窗口的宽度。 只要窗口大小合适,就可以将有用的基频分量信息 提取出来。但是,滤波窗在频域的突然截止会在时 域引起振铃效应。

2.1.3 汉宁窗(Hanning)法

观察傅里叶变换频谱(图2)可以看出,在基频附 近的频谱,对应着时域中变换比较缓慢、幅度系数比 较大的条纹,离基频较远的部分,对应着时域中变化 比较迅速、幅度系数比较小的条纹,这样就可以通过 窗函数加权的方法,对基频附近的分量加较大的权 重,离基频越远的部分,赋予越小的权重,可以对高频 噪声起到很好的抑制作用^[9]。一般采用汉宁窗对其 进行数字加权^[9-10],汉宁窗的函数表现形式为

$$\omega(n) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{2n\pi}{N}\right), \ n = -\frac{N}{2}, \cdots, \frac{N}{2}$$

2.1.4 小波滤波法

小波滤波的机理是基于信号与噪声的小波系数 在尺度上的不同性质,采用相应规则,对含噪信号的 小波系数进行取舍、抽取或切削等非线性处理,以达 到去除噪声的目的。

小波变换有一种"集中"的能力,有用信号经小. 波变换后,信号产生的小波系数幅值较大,数目较 少,而噪声对应的小波系数幅值较小,通过在不同尺 度上选一合适的阈值,并将小于该阈值的小波系数 置零,而保留大于该阈值的小波系数,从而使信号中 的噪声得到有效抑制,最后进行小波逆变换,得到滤 波后的重构信号^[11]。这样,就可以将傅里叶变换轮 廓术测量光栅图像中的噪声消除。对信号进行多层 小波分解,可以将信号的低频及高频分量依次分离



开。图3为模拟的各种光栅条纹与待测物体三维 图,图4为取图3(a)中一行(128行)进行的小波分 解图。

从图中可以看到,噪声信号基本都分布在分解 细节层的高频部分 dl 上,原始信号主要是低频分量 al 部分,选择合适的小波对信号进行分解,去除高 频及噪声信号,重构后即可得到反应物面高度的基 频分量。选用 haar, db, sym, coif, bior, meyr 等多种 小波对信号进行分解后发现,采用 coif5 小波对信号 处理效果最好,本文中对其中信号进行5 层分解。



图3 计算机模拟图

肉香

(c) 待测物体三维图

2.2 滤波器参数的选取

30

由于系统模拟的光栅条纹周期 $p_{=8}$ 像素/条 纹,测量范围长度量化为 N = 256 个像素点,则一幅 图像共 256/8 = 32 个条纹,根据离散傅里叶变换可 知信号的基频出现在 32 点附近,这样就可以确定滤 波窗口的中心位置,然后根据变形物体傅里叶变换 结果设计滤波窗的宽度和形状,实际分析表明,滤波 窗的归一化截止频率选在 $f_c = 0.3$ 即可将基频分量 全部滤出。图 5(a)是没有放置物体时参考条纹一 行(第 128 行)的傅里叶变换频谱图(此时已经去除 零频分量),可以看到基频的位置在 32 点附近;图 5

银素

(b)是放置物体后的傅里叶变换频谱图(去除零频 分量后),基频已经在物体的调制作用下扩展了,此 时滤波窗如果选用同信号没有调制时相同的截止频 率,将得不到完整的基频分量信息,最终不能准确地 恢复物体高度,所以截止频率就应该选择大一些。 从图5(b)中可以看到,基频分量的高端部分已经扩 展到50点以外,此时已经有可能与二次谐波分量发 生混叠,滤波窗的归一化截止频率可以选择在f。= 0.4。最终滤波窗的截止频率按照调制信号基频的 宽度来设计。对矩形窗和汉宁窗来说,窗口的中心 位置选在32点附近,窗口的宽度 N 就应该取 64,此 时如果被测物体梯度变化较慢,没有出现频谱混叠 现象,滤波窗会完全将基频分量提取出来,但是如果 被测物体复杂,基频分量与二次谐波分量混叠,滤波

窗就无法完整地提取基频分量,这时会有一部分信 息丢失。



图5 傅里叶变换频谱图

3 计算机模拟仿真

为了验证设计的各种滤波窗的滤波效果,用计 算机对各种滤波方法进行了模拟仿真,并作了误差 比较。首先选择合适的系统参数,模拟出参考光栅 和待测物体,本文模拟物体选用的是一球冠。根据 物体的曲面方程以及高度和相位的关系,模拟出变 形光栅图像。物面方程为

 $h(x,y) = \sqrt{R^2 - (x - N/2)^2 - (y - N/2)^2} - H.$ 式中,R 为待测球冠的半径;N 为投影光栅在测量平 面上的采样点数。 模拟系统的参数是:参考平面光栅周期 p = 8 像 素/条纹,测量范围长度量化为 N = 256 个像素点,R = 150 像素,H = 128 像素,模拟图像如图 3 所示。

3.1 无噪声

表1中给出了没有添加噪声时,采用几种不同 的滤波方法对变形光栅滤波的测量误差。采用 π 相移技术消除零频分量的影响后,3种滤波器的频 率响应见图 6(a)。

通过误差比较,可以看出没有噪声时经 Butterworth 窗滤波测量误差最大,采用小波和矩形窗处理 后的信号测量误差最小。



图6 几种滤波器频滤响应

3.2 有噪声

模拟的噪声是均值为0、均方差为0.03的高斯



噪声,加入高斯噪声后的变形条纹如图3(d)所示。 表2给出了有噪声时几种滤波方法的测量误差,加 入噪声后3种滤波器的频率响应见图6(b)。

表 2 有噪声时的测量误差

	滤波方法	最大高度误差	均方差
	矩形窗	0. 382 15	0.083612
•	Butterworth	0. 563 32	0. 106 337
	Hanning 🗃	0. 352 57	0. 082 039
•	小波	0. 264	0.061771

从表 2 可以看出,此时误差最小的是采用小波 分析处理后的信号,矩形窗和 Hanning 窗测量误差 相当,误差最大的是经 Butterworth 处理后的信号,但 是与没有噪声时比较,汉宁窗抑制噪声的效果明显 好于矩形窗。图 7 显示了有噪声时各种滤波器的测 量误差分布情况。无论是从表格的数据还是从误差 分布图上都可以看出经小波滤波后的测量误差最 小。



图 7 各种滤波方法的测量误差分布

4 结束语

采用了4种滤波方法对变形光栅图进行处理, 计算机模拟了在有噪声和无噪声情况下的各种滤波 方法的测量结果,并对测量误差进行了比较。通过 各种情况下的误差数据比较,可知在傅里叶变换轮 廓术的预处理滤波过程中,采用小波分析的方法对 信号进行处理比用传统的滤波方法有更小的误差, 可以提高系统的测量精度。

参考文献:

 TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes [J]. Appl Opt, 1983, 22(24): 3977-3982.

- [2] 陈文静,苏显渝,曹益平,等. 傅里叶变换轮廓术中抑 制零频的新方法[J]. 中国激光,2004,31(6):740-744.
 CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, CAO Yi-ping, et al. New method to eliminate extension of zero component in FTP [J]. Chinese Journal of Lasers,2004,31(6):740-744.
- [3] SU Xian-yu, CHEN Wen-jing. Fourier transform profilometry: a review [J]. Optics & Lasers Engineering, 2001,35(5):263-284.
- [4] LI Jian, SU Xian-yu, GUO Lu-rong. Improved Fourier transform profilometry of the automatic measurement of three-dimensional object shapes [J]. Opt Eng, 1990, 29 (12):1439-1444.
- [5] 陈文静,苏显渝,谭松新. Fourier 变换轮廓术中对测量 系统的基本要求[J]. 光电子 · 激光, 1999, 10(6): 535-539.
 CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, TAN Song-xin. Basic requirement for measurement system in FTP[J]. Journal of Optociectronics · Laser, 1999, 10(6):535-539.
- [6] 陈文静,苏显渝,苏礼坤,等.利用灰度图提高 Fourier 变换轮廓术的测量精度[J].光电工程,2000,27(3): 55-59.

CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, SU Li-kun, et al. Improvement for measuring accuracy of Fourier transform profilometry with gray image [J]. Opto-electronic Engineering, 2000, 27(3):55-59.

(上接第91页)

- [10] American National Standards Institute. ASHRAE 52. 2. Method of testing general ventilation air cleaning devices for removal efficiency by particle size [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc, 1996.
- [11] 戴天翼. 我国过滤材料的标准亟待起草与颁发[J]. 产业用纺织品, 2003,21(9):25-26.
 DAI Tian-yi. Domestic standard of filter media awaiting drafting and issue [J]. Technical Textiles, 21(9):25-26.
- [12] 梁政,杨志,邓雄,等.在役天然气分离除尘设备性

÷

[7] 黄尚廉,江毅.提高傅里叶变换轮廓法测量三维物体 轮廓陡峭度的方法[J].仪器仪表学报,1995,16(2): 113-118.

HUANG Shang-lian, JIANG Yi. The method to improve the measurable steepness of Fourier transform profilometry for the 3D measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1995, 16(2):113-118.

- [8] 苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 北京:科学出版社, 1999:321-335.
- [9] 苏显渝,谭松新,向利群,等. 基于傅里叶变换轮廓术 方法的复杂物体三维面形测量[J].光学学报,1998, 18(9):1228-1233.
 SU Xian-yu, TAN Song-xin, XIANG Li-qun, et al. Com-

plex object shape measurement using FTP method [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(9): 1228-1233.

[10] 步鹏,陈文静,苏显渝.滤波窗的选择对傅里叶变换 轮廓术测量精度的影响[J].激光杂志,2003,24 (4):43-45.

> BU Peng, CHEN Wen-jing, SU Xian-yu. Analysts on measuring accuracy of Fourier transform profilometry due to different filtering window [J]. Laser Journal, 2003, 24 (4):43-45.

[11] 潘泉,张磊,孟晋丽,等.小波滤波方法及应用[M].
 北京:清华大学出版社,2005:2-16.

(编辑 沈玉英)

能评价[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 144-147.

LIANG Zheng, YANG Zhi, DENG Xiong, et al. Performance evaluation of natural gas separation and dedusting facility in service [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(11):144-147.

- [13] CHOI J H, HA S J, JANG H J. Compression properties of dust cake of fine fly ashes from a fluidized bed coal combustor on a ceramic filter [J]. Powder Technology, 2004,140:106-115.
- [14] 岑可法, 倪明江, 严建华, 等. 气固分离理论及技术[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1999.

(编辑 沈玉英)