

傅立叶变换轮廓法用于测量大型三维曲面

江毅 黄尚廉

(重庆大学光电精密机械研究所, 630044)

摘要 叙述了一种用傅立叶变换轮廓法(FTP)来实现的大型三维曲面形状测量系统,并讨论了FTP所能达到的最大测量范围及其在大型三维测量中的优势。

关键词: 傅立叶变换轮廓法(FTP); 大型三维曲面; 测量

1 引言

现代工业中急需较精确地测量大型三维曲面的形状轮廓。如飞机机翼、汽车外壳、水轮机叶片、导弹壳体、船体等,在其生产加工过程中,都急需对其表面轮廓进行测量。以水轮机叶片为例,其本身曲面形状和加工精度将直接影响到水轮机的出力效率。但在国内,其检测至今仍采用传统的靠模检验这种旧的生产工艺,不仅生产效率低,劳动强度大,而且产品质量难以保证。

用光学的方法测量三维曲面不需要庞大的机械移动及定位装置,获取数据量大,速度快,并且与被测物非接触,因此倍受青睐。一般说来,用光学的方法测量大型三维曲面,必须解决以下几个问题:

- 1、在大面积、大视场测量中,如何克服图像采样点少的限制,达到较高的分辨率。
- 2、如何克服大型测量中光源和图像采集系统抖动的影响,达到较高的重复性精度。
- 3、如何克服大视场光学系统畸变引入的误差、达到较高的测量精度。

我们将傅立叶变换轮廓(FTP)用于大型三维曲面的测量,较好地解决了上述几个问题。本文在首先分析了FTP的测量原理及其用于大型曲面测量中的优势后,讨论了FTP能够达到的最大测量范围,并给出了我们的测量结果。

2 测量原理

为了减小大视场测量中投影光栅像的变形,我们采用了图1所示的平行光轴结构,摄像机光轴与摄影机光轴平行且垂直于参考平面R。投影光栅为矩形光栅,且栅线放置方向垂直于两光轴所成的平面。坐标如图1所示,摄像机光轴与平面R交点O为坐标原点,摄像机CCD

扫描方向为 x 方向。参考平面 R 为一实际大型基准平台(基面)。当被测物置于基面上后,投影光栅像的位相就受到物体表面高度轮廓的调制产生变形,成为变形光栅像。分别拍摄两幅光栅像:未放置被测物时基面上的原始光栅像 $g_0(x,y)$ 和放置被测物后基面上的变形光栅像 $g_1(x,y)$ 。则 $g_0(x,y)$ 和 $g_1(x,y)$ 可分别表示为:

$$g_0(x,y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \cdot \exp\{i[2\pi n f_0 x + n \varphi_0(x,y)]\} \quad (1)$$

$$g_1(x,y) = r(x,y) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \cdot \exp\{i[2\pi n f_0 x + n \varphi_1(x,y)]\} \quad (2)$$

其中, $f_0 = 1/d_0$, d_0 是基面上光栅像的周期, 则 f_0 是光栅像的空间频率。 $r(x,y)$ 是物体表面的非均匀反射率。 $\varphi_0(x,y)$ 是原始光栅像的初相, 在理想平行光轴下, 原始光栅像未产生变形, $\varphi_0(x,y) = 0$ 。然而在实际大视场、大面积测量中, 光学系统畸变较厉害, 使得原始光栅像产生了变形, 即 $\varphi_0(x,y) \neq 0$ 。 $\varphi_1(x,y)$ 基面上放置被测曲面后, 变形光栅像的初相, 它包含有曲面的高度轮廓信息和 $\varphi_0(x,y)$ 两个部分。

下面的处理是沿 x 方向进行的, 只需改变行号 (y 值), 便可处理完整幅图像。分别对 (1), (2) 两式的一行沿 x 方向求傅立叶变换, 得其频谱, 分别为 $G_0(f,y)$ 和 $G_1(f,y)$, 如图 2 所示, 其中低频直流成分是由于投影光场非均匀造成的。在大视场测量中, 投影光场的非均匀性尤为显著。高次谐波是由于投影光栅为矩形光栅的原故。

用一开口适合的滤波器滤出一级谱(图 2 中的阴影部分)后, 再求傅立叶反变换, 可得:

$$\hat{g}_0(x,y) = A_1 \cdot \exp\{i[2\pi f_0 x + \varphi_0(x,y)]\} \quad (3)$$

$$\hat{g}_1(x,y) = r(x,y) \cdot A_1 \cdot \exp\{i[2\pi f_0 x + \varphi_1(x,y)]\} \quad (4)$$

由于投影光场的非均匀, 光强抖动以及图像采集系统的抖动主要影响零级谱和高次谐波, 所以此时的 $\hat{g}_0(x,y)$ 和 $\hat{g}_1(x,y)$ 受外界影响较小。

(3) 式与 (4) 式共轭相乘:

$$\begin{aligned} & \hat{g}_0^*(x,y) \cdot \hat{g}_1(x,y) \\ &= r(x,y) \cdot A_1^2 \cdot \exp\{i[\varphi_1(x,y) - \varphi_0(x,y)]\} \\ &= r(x,y) \cdot A_1^2 \cdot \exp[i \cdot \Delta\varphi(x,y)] \end{aligned} \quad (5)$$

再对 (5) 式求自然对数:

$$\begin{aligned} & \ln[\hat{g}_0^*(x,y) \cdot \hat{g}_1(x,y)] \\ &= \ln r(x,y) \cdot A_1^2 + i \cdot \Delta\varphi(x,y) \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 式的虚部 $\Delta\varphi(x,y)$ 就反映了纯粹由于曲面高度轮廓引起的相移, 它不受原始光栅像

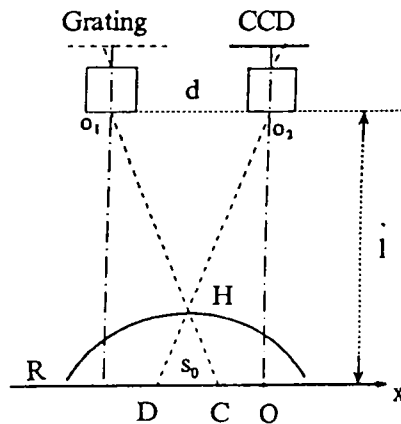


图 1 平行光轴结构

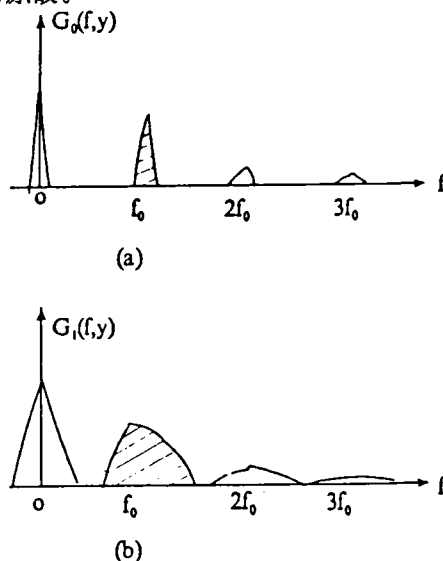


图 2 光栅函数谱

变形的影响,即消除了光学系统畸变的影响。 $\Delta\varphi(x,y)$ 的意义可见图1中的D点,原始光栅像和变形光栅像在D点的相位差值就是C点到D点的相移:

$$\Delta\varphi(x,y) = \varphi_1(x,y) - \varphi_0(x,y) = 2\pi f_0 \cdot S_0(x,y) = 2\lambda f_0 \cdot \overline{DC} \quad (7)$$

由(7)式可求出曲面上的点在基面上引起的相移 $S_0(x,y)$ (在H点即为 \overline{DC})。再由相似三角形 $\triangle DHC \sim \triangle O_2HO_1$,有:

$$h(x,y) = \frac{S_0(x,y) \cdot l}{d + S_0(x,y)} = \frac{\delta\varphi(x,y) \cdot l}{2\pi f_0 d + \Delta\varphi(x,y)} \quad (8)$$

由(8)式即可求出曲面到基面的高度轮廓。

3 FTP 法的测量范围

FTP法用于大型三维曲面测量时,其最大测量范围受图像的空间采样频率的限制。即图像的空间采样频率必须满足采样定理。设拍摄一幅光栅像在 x 方向的空间采样频率为 F_s ,在基面上摄像机沿 x 方向的测量范围为 L ,每一行采样 N 个点,则摄像机在基面上的空间采样频率 f_s 为:

$$f_s = \frac{N}{L} \quad (9)$$

在FTP中,只有一级谱成分携带有用信息,而对于矩形光栅像中的高频成分,则是需要滤除的。因此在采集一幅光栅像时必须保证完整地采集到一级谱成分,而不必考虑能否完整地采集高次谐波成分。由采样定理可知,必须满足^[2]:

$$f_s > 2(f_1)_{max} \quad (10)$$

$(f_1)_{max}$ 的含义如图3所示。

由于

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \omega_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\partial \varphi_n(x,y)}{\partial x} \quad (11)$$

$$\varphi_n(x,y) = 2\pi n f_0 x + n\varphi(x,y) \quad (12)$$

$$\therefore f_n = n f_0 + \frac{n}{2\pi} \cdot \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial x} \quad (13)$$

对于基频成分(一级谱):

$$f_1 = f_0 + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial x} \quad (14)$$

$$\text{则 } (f_1)_{max} = f_0 + \frac{1}{2\pi} \left| \frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial x} \right|_{max} \quad (15)$$

由于 $\Delta\varphi(x,y) \gg \varphi_0(x,y)$,则 $\varphi(x,y) \approx \Delta\varphi(x,y)$,又由(8)式,可得:

$$\varphi(x,y) \approx \Delta\varphi(x,y) \approx \frac{2\pi f_0 d}{l} \cdot h(x,y) (l \gg h(x,y))$$

$$\therefore \left| \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{max} \approx \frac{2\pi f_0 d}{l} \cdot \left| \frac{\partial h(x,y)}{\partial x} \right|_{max} \quad (16)$$

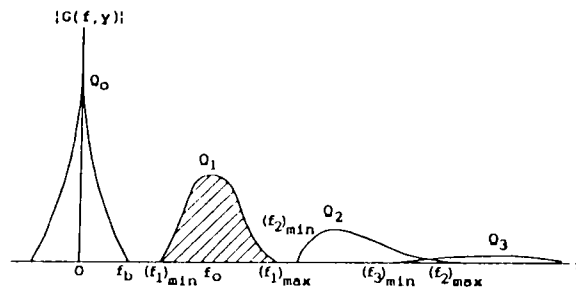


图3

其中, $|\frac{\partial h(x,y)}{\partial x}|_{\max}$ 是被测面的最大陡峭度。设被测曲面上任一点沿 x 方向的切线与基面所成角度都必须小于 θ , 即系统的最大测量陡峭度为 θ , 则

$$|\frac{\partial h(x,y)}{\partial x}|_{\max} < \text{tg}\theta \quad (17)$$

将 (17)、(16) 式代入 (15) 式:

$$(f_1)_{\max} < f_0 + \frac{f_0 d}{l} \cdot \text{tg}\theta = f_T \quad (18)$$

f_T 为最大测量陡峭度时光栅信号一级谱的最高频率。满足 $f_s > f_T$ 的采样频率一定满足 (10) 式, 此时系统的最大测量范围 L_{\max} 为:

$$L_{\max} = \frac{Nl}{2f_0(l + d\text{tg}\theta)} \quad (19)$$

其中, l 和 d 为测量系统的几何结构参数, N 是采样点个数, f_0 是基面上原始光栅像的空间采样频率, $\text{tg}\theta$ 是系统最大测量陡峭度。

4 测量结果

图4是我们的测量系统框图, 计算机输出控制信号, 控制投影系统将光栅投影到基面上, 摄像机拍摄后, 经图像卡 (CA5300) 转换成 512×512 位的 8bit 图像矩阵在入计算机, 经计算后显示并打印输出。为了实现大视场、大面积测量, 我们设计了独特的光学系统, 如图5示。其中 $d=500\text{mm}$, $l=2400\text{mm}$ 。投影光源为 300ω 的氙金, 投影系统采用柯勒照明方式, 光栅为 10 线/mm。此时测量出基面上光栅像的栅距为 27.3mm。

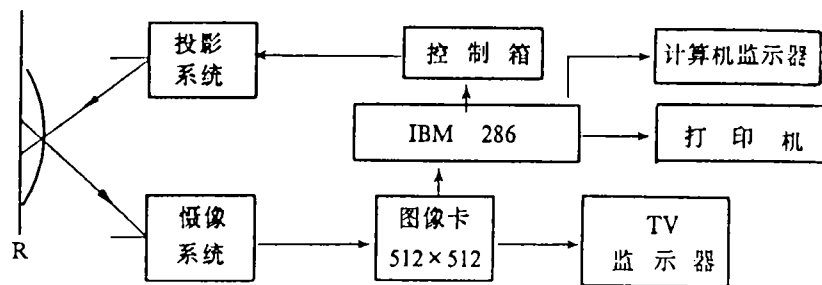


图4 测量系统框图

系统最大测量陡峭角度 θ 不大于 60° , 由 (19) 式可求得系统能达到最大测量范围:

$$L_{\max} = 5135\text{mm} \approx 5.1\text{m}$$

由此分析可见, 理论上讲, 在本系统中仅用每行 512 个采样点, 即可实现沿 x 方向 (即扫描方向) 5.1m 范围的三维测量。可见由于 FTP 法利用了相位的调制与解调的观点, 能够在图像采样点较少的条件下达到较高的分辨率。

图6 (a) 所示为平板倾斜一角度 (45°), 作为标准被测曲面用于检验系统时测量出的三维重建图。图6 (b) 是旋转 90° 后的三维重建图。测量数据与实际平板数据比较, 其引用误差^[3]小于 3%。同一幅图像连续测量 8 次求出的均方误差^[3] $\sigma < 2\text{mm}$ 。图6 (c) 为一水轮机叶片的三维重

建图。

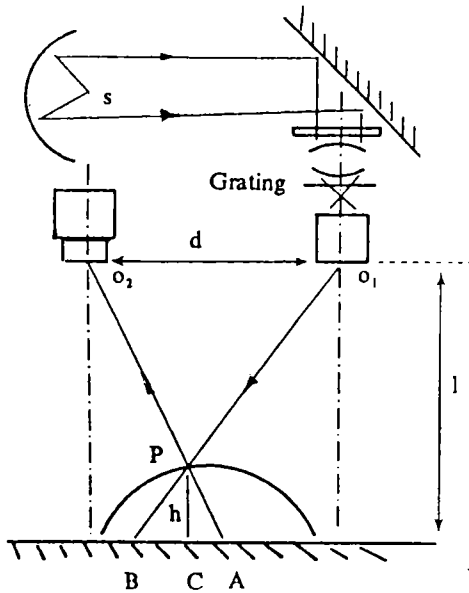


图5 光路图

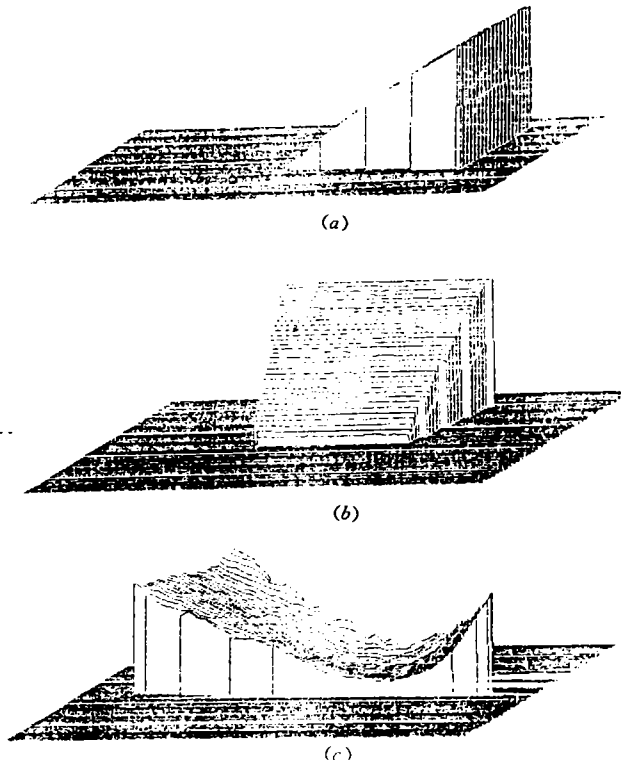


图6 三维重建图

5 讨 论

在三维曲面形状测量中，接触测量（如三坐标机）的测量范围窄，获取数据速度慢，对工作环境要求高。在非接触光学方法中，用激光测距的方法一次只能测量一个点或一行数据，若要测量整个曲面，须有精密的机械步进装置，且光学系统调整复杂。用投影光栅的方法能有效地克服以上不足。而傅立叶变换轮廓法尤其适合于大型三维曲面形状测量，它具有以下优点：

- 1 用较少的采样点来采集一幅光栅像能获得较高的测量精度与分辨率。因为 FTP 是测量光栅的相位值，只要采样频率满足采样定理就可以完整地提取出 3-D 信息，并能求出每个采样点所对应的高度轮廓值。
- 2 它能克服由于大视场引起的光学畸变，因为这样畸变可以归结为初始相位 $\varphi_0(x, y)$ ，而 FTP 能有效地消掉初相 $\varphi_0(x, y)$ 的影响。
- 3 在大视场、大面积测量中，必须采用大功率的投影光源（如氙灯），因此投影光强波动较大，投影光场分布不均匀，并且图像采集系统有轻微的抖动。这些影响主要都集中在光栅图像的低频及高次谐波部分。但 FTP 需提取出基频成分，而滤除低频分量高次谐波。因而 FTP 法受光源及图像采集系统影响小，重复性精度较好。

参 考 文 献

- [1] M. Takeda and K. Mutoh, Fourier Transform Profilometry for the Automatic measurement of 3-D Object shapes, *Appl. Opt.*, 1983, 22: 3977-3982
- [2] 邹理和, 数字信号处理. 国防工业出版社, 1985
- [3] 费业泰, 误差理论与数据处理. 机械工业出版社, 1990

Large 3-D Measuring Technigue Based on Fourier Transform Profilometry

Jiang Yi, Huang Shanglian

(*Institute of Opto-electronic precision Instrumexts in Chongging Univ.*, 630044)

Abstract

A new measuring method of large 3-D shapes is described in this paper which is based on Fourier transform profilometry (FTP). The maximum measuring range of FTP and its merits in large scope measurement are also discussed.

Key Words: Fourier transform profilometry (FTP), Large 3-D shapes, Measurement