

降维测量微小位移的方法

贺庚贤

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 论述了降维测量微小位移的原理,基于该原理,建立了微小位移降维测量系统,实现了用一线阵 CCD 接收器同时测量二维位移量这一测量方法,介绍了降维测量系统的组成、实现方法和检测结果。

关键词 降维测量 微小位移 电荷耦合器件

1 引言

所谓降维测量,是指用较少的接收器测量较多维坐标的变量,例如用一维接收器测量二维变量。本文将论述如何用一线阵 CCD 接收器降维测量二维微小位移量,介绍了降维测量系统的组成、实现方法和检测结果。

建立在降维测量原理基础之上的降维测量系统与传统的测量系统相比具有诸多优点:从观念上看,它打破了用一维接收器只能测量一维变量这一传统观念;从经济上看,由于降维测量方法节省了一维接收器及其与之相配套的测量系统,因而降低了成本,提高了经济效益;从系统的稳定性上看,所用元器件越少,系统越稳定。因此,降维测量系统的稳定性也增强了。

2 测量原理

如图1所示,ABC 为一不透光等腰直角三角形平面物体,它被成像在 CCD 的接收像面, MN 为一线阵 CCD 接收器,三角形的底边平行于 CCD 光敏面的排列方向,并定义该方向为 X 方向,其垂直方向为 Y 方向。假定物体只存在平面位移运动,位移前的位置为 ABC,位移后的位置为 A'B'C',相对于 CCD 上的接收位置分别为 (X_1, X_2) 和 (X_1', X_2') 。

首先分析 X 向运动,由图1可知, X 向位移量可以通过计算两三角形中垂线的偏移量而得出:

$$\Delta X = \frac{1}{2}[(X_2 + X_1) - (X_2 + X_1)] \quad (1)$$

现在讨论 Y 向位移量, 由图1可知:

$$\Delta Y = L$$

$$\Delta X = X_1 - X_1 + L$$

$$\Delta X = X_2 - X_2 - L$$

将以上三式整理得出:

$$\Delta Y = \frac{1}{2}[(X_2 - X_1) - (X_2 - X_1)] \quad (2)$$

公式(1)和(2)就是降维测量微小位移的方程式, 由公式可以看出, 未知量为二维(ΔX 和 ΔY), 而已知量却只有一维, 从而实现了用一维接收器同时测量二维位移量的降维测量。

由上述推导过程可以得出: 降维测量得以实现取决于特殊三角形这一被测参考物的选取。如果将该参考物固定于一待测物体上, 使之随着被测物体的运动而运动, 那么, 对被测物体的测量问题就转化为对被测三角形物体测量问题, 这时, 只要用一维接收器, 应用以上降维测量原理, 通过软件计算, 就可以实现对 ΔX 和 ΔY 二维位移量的同时测量。

3 测量系统

建立在降维测量原理基础之上的降维测量系统是一种非接触式光电测量系统, 接收器采用高速、高灵敏度的光电传感器件 CCD, 被测对象是固定于被测物体之上的三角形参考物体, 整个测量系统具有灵敏度高、响应速度快、结构简单、易于实现的特点。

测量系统主要由两大部分组成, 光学成像部分和电子学测量部分。光学成像部分的功能是将被测参考物清晰而准确成像在 CCD 的接收像面, 如图1所示, 使之满足测量要求。电子学测量部分的功能是将 CCD 的输出信号进行处理, 通过公式(1)和(2)得出二维位移量, 显示测量结果。

3.1 光学成像部分组成及工作原理

图2为光学成像部分示意图。

1为光源, 2为毛玻璃, 它们将被测参考物均匀照明。3为等腰直角三角形平面物体, 被固定在被测物体上。4为成像物镜, 它将被测参考物以一定的放大倍率成像在

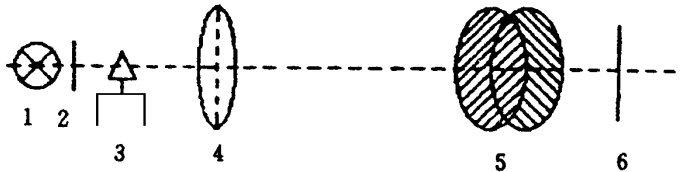


Fig. 2 Optical part struction

CCD 的接收像面。5为光强调节器, 它由两片偏振片组成, 通过调节二个偏振片之间的相对位置, 而使得 CCD 接收到的光强连续可调, 以满足测量要求。6为 CCD 接收器。

对物体成像的要求是: 被测三角形的底边平行于 CCD 光敏面的排列方向, 以确保降维测量公式的相对成立, 减少测量误差; 三角形所在平面物体的运动平面和 CCD 的接收像面应互相平行, 以保证三角形的像不失真, 使得三角形象能完全反映被测物体的运动情况。

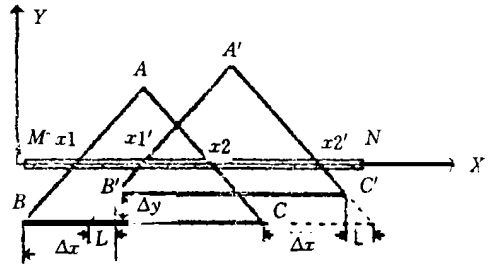


Fig. 1 Opaque triangle image focused on CCD

成像倍率可根据不同的测量要求和条件而定。成像倍率是与系统测量分辨率的高低成正比的,放大倍率越大,相对系统测量的分辨率就越高(系统测量分辨率等于 CCD 的固有分辨率除以光学放大倍率),从这一点上看,希望光学系统的放大倍率相对大一些,但是,放大倍率的增加是以牺牲测量空间和图像质量为代价的,因此,放大倍率的选取应根据具体的测量条件和要求而定。本实验系统的放大倍率选定为13,相对系统分辨率 $1\mu\text{m}$ 。

3.2 电子测量部分工作原理

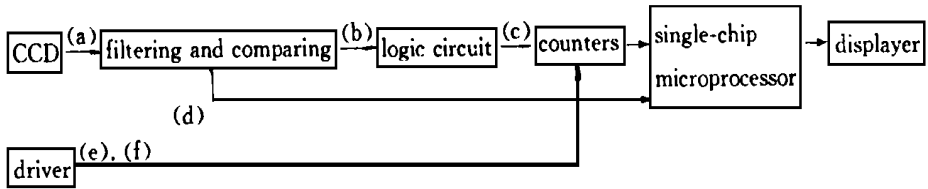


图3为电子测量部分硬件原理框图及对应之波形图。CCD 将被测物体的象转化为电信号(a), T 为一个完整的 CCD 周期,其输出信号电平的高低代表了所接收图像的明暗程度。输出信号(a)经滤波整形电路被二值化处理,成为具有“0,1”特征的数字信号(b)。处理电路主要由触发器构成,产生控制计数器计数的控制信号(c)和中断采集信号(d)。计数器在控制信号(c)有效期间(高电平)对计数脉冲(f)进行计数,低电平时停止计数并保持,在每次计数开始前,由清零脉冲(e)清零。单片机的数据采集受外部中断信号(d)的控制,在其下降沿到来后,响应中断,采集已存储的计数值 k_1 ,在计数控制信号(c)的下降沿到来之后,采集计数值 k_2 ,被测物体的空间位置 X 可由计数值计数脉冲当量计算得出,即 $X = E \cdot k / \beta$,其中 k 为计数值, β 为光学放大倍率, E 为计数脉冲当量。将 X 代入上述降维测量公式,便可计算出 X 和 Y 两维位移量。

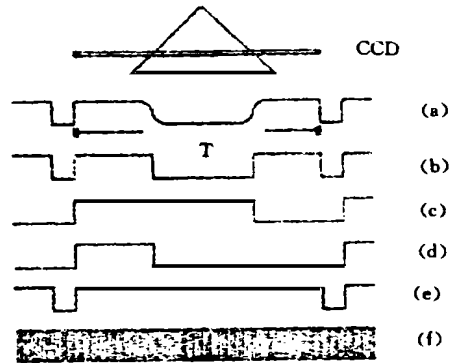


Fig. 3 Electric measurement block diagram and signal wave

$$\Delta X = \frac{E}{2\beta} [(k_2 + k_1) - (k_2 + k_1)] \quad (3)$$

$$\Delta Y = \frac{E}{2\beta} [(k_2 - k_1) - (k_2 - k_1)] \quad (4)$$

在实际测量过程中,为提高测量的准确性,通常采取多次采样平均的方法,现以 n 次采样为例说明数据处理过程。

设 (k_{1i}, k_{2i}) 为第 i 次采样的计数值($i = 0, 1, \dots, n$), 分别取其平均值:

$$\overline{k_{1i}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{1i}, \overline{k_{2i}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{2i}$$

则 $(\overline{k_{1i}}, \overline{k_{2i}})$ 就表示位移前三角形的中心位置,同样,以 $(\overline{k_{1i}}, \overline{k_{2i}})$ 表示位移后三角形的中心位置:

$$k_{1i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{1i}, k_{2i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{2i}$$

将位移前后的两个中心位置代入公式(3)和(4):

$$\Delta X = \frac{E}{2\beta}[(\overline{k2i} + \overline{k1i}) - (\overline{k2i} + \overline{k1i})] \quad (5)$$

$$\Delta Y = \frac{E}{2\beta}[(\overline{k2i} - \overline{k1i}) - (\overline{k2i} - \overline{k1i})] \quad (6)$$

则由公式(5)和(6)即可计算出多次采样后的平均位移量。

4 误差分析

该测量系统主要存在以下4种误差, 设放大倍率 $\beta = 13$, CCD 固有分辨率 $E = 13\mu\text{m}$ 。

(1) 量化误差

计数器计数误差为 ± 1 个脉冲, 它对应一个 CCD 像元, 则量化误差:

$$\delta_1 = \frac{E}{3\beta} = 0.58(\mu\text{m})$$

(2) 调焦误差

由人眼的视觉误差而使得三角形的象没有聚焦在 CCD 的接收像面, 设它偏离量 $\Delta L = 1\text{mm}$, 物镜焦距 $f = 50\text{mm}$, 则

$$\frac{\beta}{\Delta\beta} = \frac{L}{\Delta L} \quad f^2 = 2500(\text{mm})$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta X}{3} \left(1 - \frac{1}{1 + \Delta\beta/\beta}\right) = \frac{1}{3(1 + \beta/\Delta\beta)} \Delta X = 2.3 \times 10^{-4} \Delta X$$

(3) 比较误差

在对 CCD 输出信号进行数字化处理时, 由此带来比较器的比较误差, 若比较边缘占 1 像元, 则误差:

$$\delta_3 = \frac{2E}{3\beta} = 1.16(\mu\text{m})$$

(4) 三角形与 CCD 的相对位置误差

若三角形底边与 CCD 的像元排列方向不平行, 存在夹角 $\alpha = 0.5^\circ$; 则可推导出:

$$\delta_{4x} = \frac{1}{3} [1 - 2\cos^2(45^\circ + \alpha)] \Delta Y = 1 \times 10^{-2} \Delta Y$$

$$\delta_{4y} = \frac{1}{3} \sin^2 \alpha \Delta X = 4.4 \times 10^{-5} \Delta X$$

设测量范围 ΔX_{\max} 和 ΔY_{\max} 均小于 $100\mu\text{m}$, 则 δ_2 和 δ_{4y} 可忽略, 根据误差合成理论, 单次测量的误为:

$$\delta_x = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_3^2 + \delta_{4x}^2} = 1.6(\mu\text{m})$$

$$\delta_y = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_3^2} = 1.3(\mu\text{m})$$

5 测量结果

应用上述降维测量系统对降维测量原理进行了试验验证, 在实验中, 放大倍率 $\beta = 13$,

CCD 固有分辨率 $E = 13\mu\text{m}$, 对应系统分辨率 $1\mu\text{m}$, 测量精度实测为 $\pm 2\mu\text{m}$, 测量数据如下:

Table 1 Test result

	x axis: (μm)										y : axis(μm)							
truth data	0	6	10	20	31	44	60	73	84	0	5	11	20	32	43	58	70	90
test data	0	6	10	20	30	43	59	71	82	0	5	11	19	31	42	57	68	88
error	0	0	0	0	-1	-1	-1	-2	-2	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-2	-2

6 结论及应用

从以上实验结果可以得出: 上述降维测量原理是正确的, 只要使被测三角形物体的运动同步于被测对象的运动, 应用上述降维测量系统就可实现用一个线接收器对二维位移量的降维测量。

上述降维测量方法还可以应用到其它非接触式测量中, 如将传统的一维目视自准直仪改造为二维数显式的自准直仪, 目前此项工作正在进行中。

参 考 文 献

- 1 何立民. 单片机应用系统设计. 北京: 航空航天大学出版社, 1990
- 2 毛英泰. 误差理论与精度分析. 北京: 国防工业出版社, 1986
- 3 赵 力, 刘 岩, 熊经武. 应用线阵 CCD 降维测量放映机画面抖动. 光学机械, 1989(6): 44 ~ 48

The Method of Micro-tiny Displacement Measurement by Dimension Reduction

HE Geng-Xian

(Changchun Institute of Optical and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes the principle of micro-tiny displacement measurement by dimension reduction. Based the principle, micro-tiny displacement test system has been established. The method of testing two-dimentional displacement using a linear CCD is relized. Test system struction, realized method and test result are mentioned.

Key words: Measurement by dimension reduction, Micro-tiny displacement, CCD

贺庚贤 女, 1987年毕业于天津大学电子工程系, 电子仪器及测量技术专业。多年来一直从事电子技术及微计算机方面的研究和检测工作。