

光电 CT 垂线自动监测的图像处理

华 炯 胡铁力

徐友仁

(东南大学 南京 210018) (河海大学 南京 210098)

摘要 根据光电 CT 理论和 CCD 传感技术研制的垂线自动观测仪的工作原理, 研究由投影重建图像的方法。在数字信号处理中, 结合垂线的特点, 讨论镜射、延拓、相关处理信息提取技术。研究阵列光源精确标定的原理和方法, 利用样机进行测试及对测值精度的评价。

关键词 CT 技术 自动监测 光电图像处理 数字信号

利用垂线监测建筑物的位移, 是一种重要的方法并得到广泛应用。近年来, 自动化监测仪器研制发展迅速, 使垂线自动监测技术产生“质”的飞跃, 为建筑物的动、静态安全监测和深入揭示变形规律创造了条件。

大坝及一些建筑物安全监测中, 由于湿度大、环境条件差, 因此对垂线自动监测仪有特殊的要求。除了必须满足精度、量程、直线性和重复性好, 有较高分辨率及灵敏度外, 还必须满足防潮、长期稳定性、易于率定及修复、能在干扰环境中正常工作和易于计算机控制及数据处理。

利用 CCD 技术和阵列光源构成一种无外部透镜的数字成像系统, 结合近代计算机断层分析 (CT) 信息处理技术而成的垂线自动监测仪, 是一种能在潮湿等恶劣环境下长期可靠运行、品质优越的新型自动化监测仪器。

1 图像传感技术

1.1 光电图像处理

光电图像技术是把光电成像、光电转换和计算机图像处理技术相结合, 以成像目标物及其空间位置关系为研究对象, 通过多维图像分析从中提取有关的信息。

在光电 CT 垂线自动监测仪中, 采用阵列光源, 这不仅是二维图像处理所需, 而且对提高测值的精度和可靠性有显著作用。光电转换是用 2048 像元的 CCD 图像传感器, 由计算机及垂线图像处理软件分析后, 输出垂线空间位置的信息, 使整个仪器对垂线中心位置的判别性能起了决定作用。

1.2 CCD 视频信号的处理

CCD 输出的视频信号是离散的时序模拟信号, 包含着光强和物体二维位置的信息。垂线自动化监

测中, 是求取垂线中心的坐标, 图像灰度的处理并不重要。把图像和背景作为分离的二值化处理, 将使信息数字化工作变得简单并能极大提高处理速度。图 1 为采用比较法使电路实现二值化的原理图。

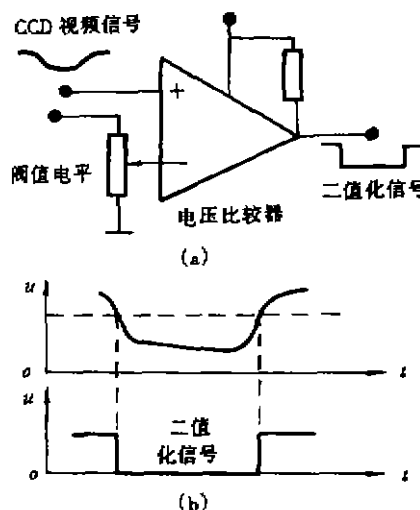


图 1 电路比较法二值处理图

CCD 传感器在测量光强信息时, 需要把对应的光敏元感受的光强转换成输出电压幅值, 再转换成数字编码送入计算机, 完成视频信号量化处理。

2 光电 CT 技术的图像重建

CT 理论的基础是由投影重建图像, 二维图像可由多方向的一维投影重建。CCD 垂线自动监测仪内, 布置有经过分析而确定的 8 个光源组成的阵列光源。每个光源的射线经过重建区域时, 透射率取 1, 而经过垂线断面区域时透射率取 0。利用此阵列光源可获得垂线断面多个方向的一维投影像, 如图 2 所示。

第一作者简介: 华炯, 男, 东南大学电子工程系学生, 曾发表《埋入式仪器可靠性的评价》论文。

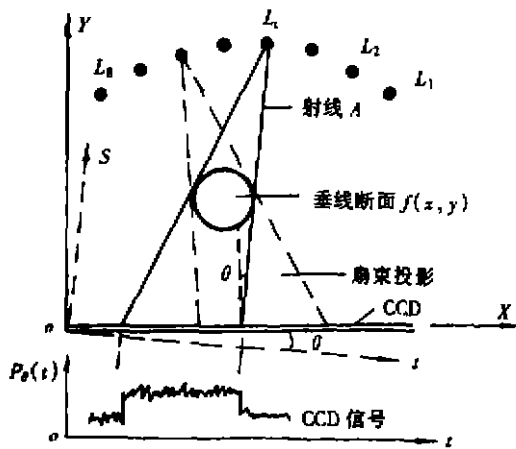


图2 垂线在 CCD 上的投影

投影中,若 $f(x, y)$ 表示图形函数,则射向 $f(x, y)$ 的一条射线 A ,其射线积分可写为

$$P_\theta(t) = \int f(x, y) ds \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} t \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (2)$$

若把垂线断面套选在一个分得很细的 $n \times n$ 方形格网中,令 f_j 代表按电视扫描顺序排列的第 j 个小方格上 $f(x, y)$ 值,则由 i 条射线扫描累加值 g_i 为

$$g_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} f_j \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (3)$$

式中 a_{ij} 为权系数,展开上式得

$$\left. \begin{aligned} a_{11}f_1 + a_{12}f_2 + \dots + a_{1N}f_N &= g_1 \\ a_{21}f_1 + a_{22}f_2 + \dots + a_{2N}f_N &= g_2 \\ &\dots\dots\dots \\ a_{M1}f_1 + a_{M2}f_2 + \dots + a_{MN}f_N &= g_M \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

按最小二乘原理,求解上述方程组,写成矩阵形式为

$$[f] = [A]^{-1}[g] \quad (5)$$

由选定的象元 N 和射线数 M ,经计算机分析,求出 $f_1, f_2, \dots, f_N$ 之值,然后重建出垂线断面图像 $f(x, y)$ 。

3 数字信号处理

由 N 像元组成的线阵 CCD,接收垂线断面投影电信号时,不仅有确定性信号,而且有随机白噪声。计算机获得的采样序列信号 $f_{(n)}$ 可表达为有用信号 $A_{(n)}$ 和白噪声 $\eta_{(n)}$

$$f_{(n)} = A_{(n)} + \eta_{(n)} \quad (0 \leq n \leq 2047) \quad (6)$$

对 $f_{(n)}$ 作镜像变换成 $f_{(-n)}$,再把 $f_{(n)}$ 和 $f_{(-n)}$ 延拓变换得

$$F_{(n)} = \begin{cases} 0 & -N+1 \leq n \leq 0 \\ f_{(n)} & 0 \leq n < N-1 \end{cases} \quad (7)$$

$$F_{(-n)} = \begin{cases} 0 & -2N+1 \leq n \leq -N+1 \\ f_{(-n)} & -N+1 \leq n \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

令 $F_{(-n)} = G_{(n)}$; $g_{(n)} = f_{(-n)}$; $A_{(-n)} = A'_{(n)}$; $\eta_{(-n)} =$

$\eta'_{(n)}$ 。作相关运算并整理后可得

$$F_{(n)} * F_{(-n)} = A_{(n)} * A'_{(n)} + \eta_{(n)} * \eta'_{(n)} + \eta_{(n)} * A'_{(n)} + A_{(n)} * \eta'_{(n)} \quad (9)$$

由于 $A_{(n)}$ 与 $\eta'_{(n)}$, $A'_{(n)}$ 与 $\eta_{(n)}$ 互不相关。而 $\eta_{(n)} * \eta'_{(n)}$ 根据白噪声的平稳随机过程特性,由施瓦茨不等式可推得采样信号的真正平稳随机过程发生在 $-N+1 \leq n \leq N-1$ 区域,所以

$$|\eta_{(n)} * \eta'_{(n)}| = \begin{cases} C & (m = N-1) \\ 0 & (m \neq N-1) \end{cases} \quad (10)$$

即采样信号经镜像转换、延拓、相关处理后是个确定的信号,白噪声的高频部分得到极大削弱。除 $N-1$ 点外,经相关处理后的值构成了一条光滑曲线,数字信号处理中,为垂线断面中心坐标的判定创造了良好的条件。

4 垂线断面中心坐标的判定

如图2所示,建立以 CCD 左端为原点,线阵方向为 X 轴的 XOY 统一坐标系。阵列光源 $L_i (X_i, Y_i)$ 的坐标值可预先标定出。垂线中心坐标为 $P(X, Y)$,阵列光源依次发光,由 CCD 接收视频信号,经上述处理,获得垂线中心在 CCD 上投影的对应坐标为 $(X^{(i)}, 0)$, i 为对应的光源号。列出观测值的误差方程

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= Y - k_1 X + b_1 \\ V_2 &= Y - k_2 X + b_2 \\ &\dots\dots\dots \\ V_n &= Y - k_n X + b_n \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中

$$k_i = Y_i / (X_i - X^{(i)})$$

$$b_i = (Y_i X^{(i)}) / (X_i - X^{(i)})$$

由测量平差,解算得垂线中心坐标 X, Y 之值

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & -[k] \\ -[k] & [kk] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [b] \\ -[kb] \end{bmatrix} \quad (12)$$

5 阵列光源标定及实测分析

5.1 光源的标定

在室内标定时,垂线悬点由两个位于同一水平且正交的测微千分尺牢固相连,其中一根千分尺的方向与 CCD 线阵面平行。标定时,先开一个光源,设为 L_1 ,测得千分尺读数 x_{d0}, y_{d0} 和 CCD 判定的垂线中心 X_{∞} 。转动千分尺移垂线到另一位置,应保持 CCD 输出的位置值为 X_{∞} ,读出千分尺数值 x_{d1} 和 y_{d1} 。重复转动千分尺,测定 8~10 组。

令 L_1 的坐标为 $X^{(1)}, Y^{(1)}$,垂线中心坐标 X_1, Y_1 ,由首次观测和第一次移动观测,可列出数学表达式

$$Y_0 X^{(1)} + (X_{\infty} - X_0) Y^{(1)} = Y_0 X_{\infty} \quad (13)$$

$$Y_1 X^{(1)} + (X_{\infty} - X_1) Y^{(1)} = Y_1 X_{\infty} \quad (14)$$

两式相减,并设 $Y_0 - Y_1 = \Delta Y_1$; $X_0 - X_1 = \Delta X_1$,可得

$$\Delta Y_1 X^{(1)} - \Delta X_1 Y^{(1)} = \Delta Y_1 X_{\infty} \quad (15)$$

对于 8~10 次移动观测,均可列出如式(15)的方程,

组成方程组,根据测量平差原理解算,求出 L_1 光源精确坐标

$$\begin{bmatrix} X^{(1)} \\ Y^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\Delta Y^2] & -[\Delta Y \Delta X] \\ -[\Delta Y \Delta X] & [\Delta X^2] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [\Delta Y^2] X_{\infty} \\ [\Delta X \Delta Y] X_{\infty} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中 $\Delta Y_i = y_{d0} - y_{di}$; $\Delta X_i = x_{d0} - x_{di}$, 可由千分尺读数求出。

上述方法通过多个位移相对变化量测定光源坐标,对提高标定精度和可靠性有利,标定工作也容易实施。

5.2 实测结果及分析

为研究和评价本系统的实测精度,对样机进行了大量试验。首先按上述方法严格标定各光源坐标,并由式(12)计算垂线中心各次移动的坐标,进而求定千分尺坐标系 xoy 与统一坐标系 XOY 的关系, $\Delta X_0 = X - x$; $\Delta Y_0 = Y - y$ 之值。

试验时,固定垂线于 A 点,读千分尺值 x_A 和 y_A ,

以各个光源 $L_1, \dots, L_8$ 逐个测量,求出各个对应的垂线中心坐标。转动千分尺移垂线于 B 点、 C 点,重复上述测量。实测结果列于表 1 和表 2,通过对实测值的分析,可得出以下几点结论。

a. 光电 CT 垂线仪是一种测量精度高,性能优越的仪器,通常一次测定的精度可达 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 左右。

b. 该仪器布置 8 个阵列光源加大了测量的量程,对提高测值的精度起积极作用,而且通过不同光源组合对同一垂线测量,可达到相互检核、克服粗差和系统误差,提高测值的可靠性,这是本仪器的显著特点。

c. 光电 CT 垂线仪的数字信号处理系统是确保仪器正常工作和高精度的关键。本系统根据垂线观测的特点,采用二值化处理,镜像转换,延拓和相关分析等技术,不仅确保处理结果的精度,而且大大提高了分析的速度。

d. 阵列光源坐标的率定精度直接影响垂线定位的精度,本文研究的率定方法简便易行,是一种能被普遍采用的精确方法。

表 1 千分尺测定垂线坐标计算

单位: mm

垂线位置	千分尺读数		两坐标系差值		统一坐标	
	x	y	ΔX	ΔY	X	Y
A	5.77	5.70	5.8742	13.7174	11.6442	19.4174
B	13.33	9.33	5.8742	13.7174	19.2042	23.0474
C	11.34	15.72	5.8742	13.7174	17.2142	29.4374

表 2 CT 垂线仪测定值

单位: mm

光源对	A 点位置		B 点位置		C 点位置	
	X_A	Y_A	X_B	Y_B	X_C	Y_C
4,3	11.6512	19.4016	19.2219	23.0368	17.2441	29.3938
5,1	11.6437	19.4498	19.2151	23.0262	17.2285	29.3678
5,2	11.6643	19.4147	19.2182	23.0303	17.2318	29.4087
5,3	11.6446	19.4269	19.2084	23.0452	17.2024	29.4418
5,4	11.6474	19.4412	19.2404	23.0307	17.2186	29.4094
6,1	11.6531	19.4207	19.2068	23.0154	17.2467	29.3992
6,2	11.6443	19.4247	19.2176	23.0294	17.2125	29.4132
6,3	11.6748	19.4263	19.2161	23.0234	17.2272	29.4403
6,4	11.6684	19.4280	19.2180	23.0315	17.2354	29.4556
6,5	11.6443	19.4248	19.2047	23.0370	17.2247	29.3787
7,1	11.6472	19.4654	19.2627	23.0600	17.2318	29.4087
7,2	11.6381	19.4171	19.2075	23.0492	17.2114	29.4422
7,3	11.6475	19.4459	19.2057	23.0689	17.2549	29.4241
7,4	11.6498	19.4202	19.2054	23.0128	17.2294	29.4252
7,5	11.6320	19.4058	19.2430	23.0549	17.2337	29.4333
7,6	11.6478	19.4144	19.2114	23.0651	17.2038	29.3880
8,3			19.2051	23.0349		
8,4			19.2626	23.0648		
平均值标准差	11.6499	19.4267	19.2206	23.0398	17.2273	29.4143
	0.018		0.021		0.020	