

光学三角法在大面积体积测量中的应用

邓任远

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 作者的研究目标是一种用于测量大面积物体体积的新系统。该测量系统是以获得距离信息的光三角原理为基础, 它的位置传感器是线性 CCD, 它的显示和控制中心是微机。这种仪器可作实时显示、并能输出计算结果。文中详细讨论了光学系统的成像特性, 给出了用于控制系统的软硬件设计。测量结果表明, 系统的操作正常, 测量精度在 2% 之内。最后给出测量误差的数学分析结果。

关键词: 光三角成像; 操作控制; CCD; 驱动器

1 前言

如何测量大面积体积, 是实际中面临的一个困难问题。国内各大热电厂的燃煤一般堆放在一个长数百米, 宽数十米的场地内, 而且煤堆的表面形状也无规则, 如果用人工对煤场存煤进行盘点, 将耗费大量的工时和人力, 而且计量也不准确, 这已成为国内热电厂早待解决的一个问题。

若将整个煤场的煤堆, 按确定的步长割成若干个小体积 V_i , 各小体积的底面积均固定为 $\Delta S = \Delta x \cdot \Delta y$, 当已知每个小体积的高度 h_i 时, 便由数值积分求出整个体积

$$V = \sum V_i = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \sum h_i \quad (1)$$

本论文便是从这一基本思想出发, 以光学三角原理为基础, 利用线阵 CCD 探测器测量出煤堆的高度, 然后间接地计算出煤场的存煤体积, 从另一角度出发解决了问题。为光学测量又开辟了一个新的应用领域。

2 光学三角测量原理

2.1 检测仪探头结构及其光学三角关系

图 1 给出了用于煤堆体积检测的三角结构组成。激光束垂直向下照射, 用 CCD 摄像机探测像点位置。地面 A 点 $h = 0$, 摄像机物镜主平面距地面距离 $h_0 = 16\text{m}$, 待测煤堆的最大高度

为 $h_B = 10\text{m}$, 激光束与物镜水平距离为 l , 摄像机物镜焦距为 f 。

由图中的简单几何关系可知:

1) 摄像物镜的视场角 $\omega = \omega_1 - \omega_2$

其中 $\omega_1 = [\text{tg}^{-1}/(h_0 - h_B)]$

$$\omega_2 = \text{tg}^{-1}(1/h_0)$$

光轴与激光束的夹角 $\theta = \omega_2 + \omega/2$

2) 光轴与激光束交点高度

$$h_p = h_0 - (l/\text{tg}\theta)$$

光轴与激光束交点 P 物距 $U_p = PO =$

$$l/\sin\theta$$

3) 最低点 A 的物距 $U_A = \cos(\omega/2) \cdot$

$$(l/\sin\omega_2)$$

最高点 B 的物距 $U_B = \cos(\omega/2) \cdot$

$$(l/\sin\omega_1)$$

4) A、B、P 三点像距

$$V_A = \frac{f \cdot U_A}{U_A - f}$$

$$V_B = \frac{f \cdot U_B}{U_B - f}$$

$$V_P = \frac{f \cdot U_P}{U_P - f}$$

5) 像面与光轴夹角

$$\text{tg}\theta = T \cdot \text{tg}\varphi$$

其中

$$T = V_P/U_P$$

$$\therefore \text{tg}\varphi = \text{tg}\theta / (\frac{f}{U_P - f})$$

6) 当以地面 A 点 ($h = 0$) 为高度基准时, 则 A 点在 CCD 上的像 A' 的位置就为计算像点 S 的基准点。设处于某高度的物点在 CCD 上成像于第 n 个像元位置, 那么该像点相对于基准点 A' 的位移。

$$S = (n - n_A) \cdot 14 \times 10^{-6}(\text{m})$$

该点对应的像距、物距分别为

$$v = V_A + S \cdot \cos\varphi$$

$$U = \frac{v \cdot f}{v - f}$$

该点的高度

$$h = \frac{U_A - U}{\cos\theta}$$

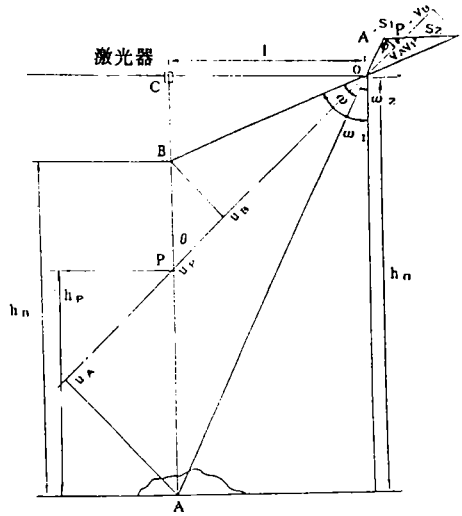


图 1 检测仪光学三角结构

2. 2 光学三角成像特性与检测仪三角结构参数的确定

2. 2. 1 像点在 CCD 上位置与高度的关系

图 2 示出了以 A 点为基准时, 像点在 CCD 上的位移 S 与物点高度 h 的关系, 即 $h = F(s)$ 。从图中可以看出 $h = F(s)$ 是非线性函数, 曲线的变化率随高度的增大而变小, 这说明随高度的增加, 对应于同样的像面上的位移变化 Δs 可以细分出更小的高度变化 Δh 。

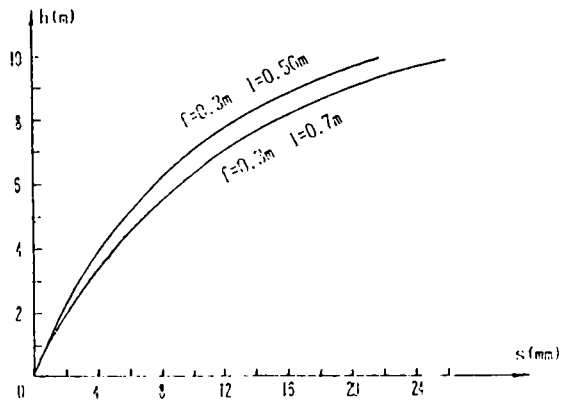


图 2 像点在 CCD 上位置与高度关系

2. 2. 2 CCD 工作长度与 l, f 的关系

图 3 给出了不同三角结构下像点在 CCD 上的移动范围, 也即 CCD 的有效长度 S_0 的值, 它是 l 与 f 的函数 $S_0 = F(l, f)$ 。从图中可以看出, 当像点在 CCD 上移动的有效长度 S_0 给定后, l 与 f 关系是唯一确定。

我们应恰当地选择 S, l, f 三者的数值, 使 S_0 略小于总工作长度 S , 这样 CCD 才能被充分利用, 同时又能保证在全高度范围内的正常检测。

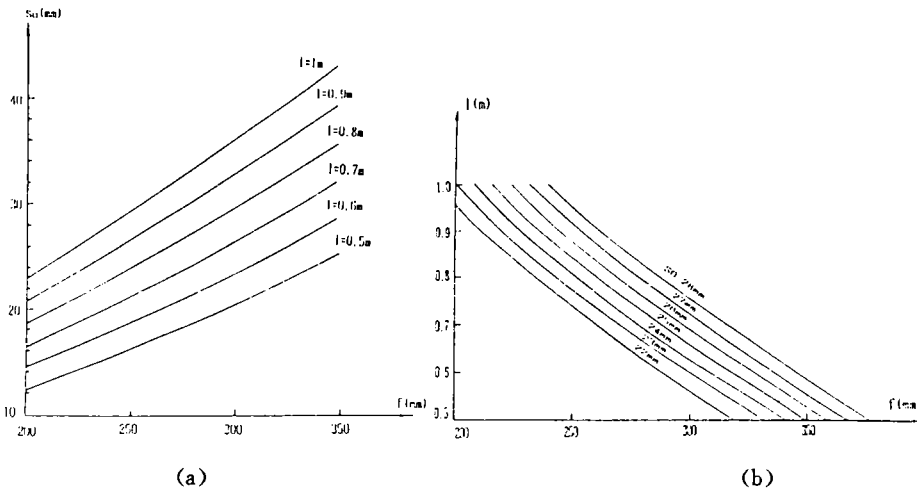


图 3 S_0, l, f 三者之间的关系

2. 2. 3 三角装置的分辨力

图 4 给出了不同三角结构参数 l, f 下分辨率随高度 h 的变化曲线。从曲线中我们可以看出, ①分辨率 Δh 是高度 h 的函数, 且随高度的增加系统的分辨率提高; ②分辨率 Δh 随 f 的增大而减小, 即分辨率提高; ③ Δh 随 l 的增加而减小, 即增加 l 亦有利于分辨率的提高。

2. 2. 4 CCD 上像点的直径

图 5 给出了激光光斑直径 D 和像点直径 D_c 随高度 h 的变化曲线。从图中我们可以看出, 像点直径 D_c 也是 l 与 f 的函数。对于相同的 f , 随 l 的增加, 像点在 CCD 的直径减少; 而对于相同的 l , 随 f 的增大像点直径 D_c 也增大。显然, 较小的像点在 CCD 上所占的像素数较少将有利像点 CCD 上位置的判别, 故而有利于提高检测精度。

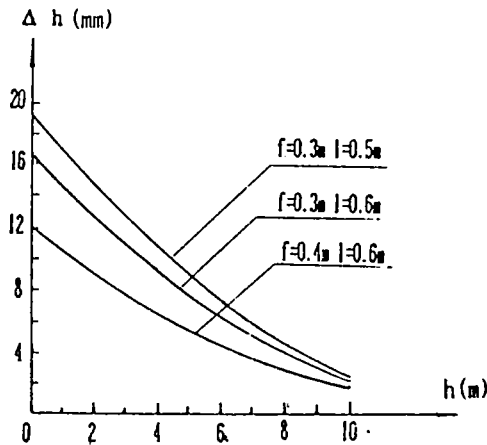
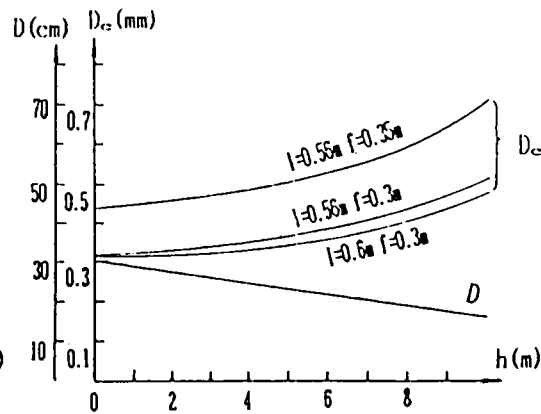


图4 分辨率随 h 变化曲线

图5 像点直径 D_c 与 h 的关系

对于图 1 所示煤堆检测仪结构, 我们选用的是 2048 位的线阵 CCD, 它的总工作长度 $S = 14 \times 10^{-6} \times 2048 = 28.7$ (mm)

物镜焦距 $f = 0.3$ m

光源与物镜间距 $l = 0.6$ m

视场角 $\omega = 3.563^\circ$

物镜光轴与光束夹角 $\theta = 3.929^\circ$

CCD 像面光轴夹角 $\varphi = 62.68^\circ$

按照以上结构, 像点将在 CCD 上 $S_0 = 23.2$ mm 范围内移动, 而最大像点在 CCD 上的直径 $D_c = 0.48$ mm, 约占 36 个像素; 最小像点在 CCD 上的直径 $D_c = 0.3$ mm, 约占 22 个像素。

3 实存煤体积检测系统组成

3.1 系统的组成

整个系统的组成结构框图如图 6。

系统的工作过程如下, 利用现场的一台门式堆取料机 (大车) 沿纵长方向 (Y 方向) 的运动完成一维扫描; 在大车的横梁上架沿钢轨, 将激光探头和仪器箱固定在一小车上, 小车沿钢轨作往复运动, 这样激光探头便可完成另一维 (x 方向) 扫描。

在小车运行期间, 8253 定时器每隔 275ms 产生一触发脉冲。单片机 1 查询到该触发脉冲即对 CCD 视频信号和 CCD 时钟进行采样计数; 单片机 2 查询到该触发脉冲便产生 CCD 的驱动时钟, 将 CCD 中存储的电荷信号串行输出送到单片机 1 中。单片机 1 通过软件计算出像点中心所处的 CCD 的像素位置 N, 同时将此 N 值通过串行线送到控制台主机, 主机根据此 N 值计算出采样点的高度 h_{ij} , 当各扫描行上的 h_{ij} 已知时, 使可由主机计算出整个煤场的体积。

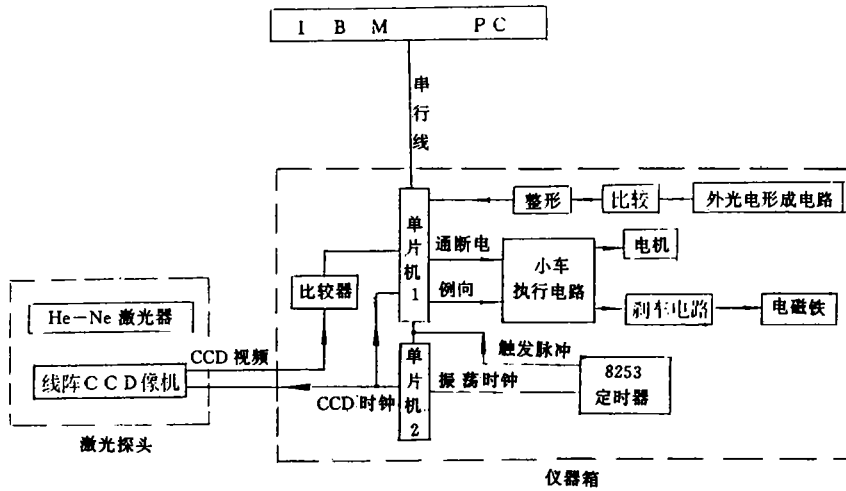


图 6 检测仪系统结构框图

3.2 硬件结构的实现

(1) 单片机 1 功能及其外围扩展电路

单片机 1 主要完成以下功能：

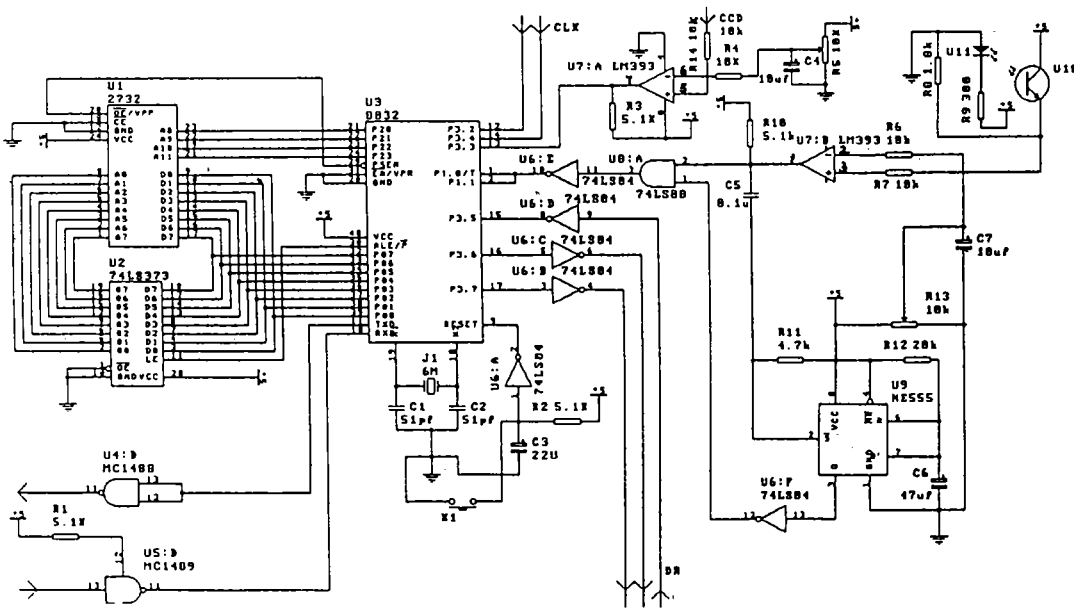


图 7 单片机 1 系统电原理图

a 控制小车运行执行机构

- b 完成对 CCD 视频信号的采集
- c 完成与 PC 机的串行通讯

根据以上功能考虑, 设计了以下单片机及其外围扩展电路, 如图 7 所示。

(2) 单片机 2 功能及其外围扩展电路

单片机 2 主要完成以下功能:

- a 完成对定时器 8253 的初始化。
- b 产生 CCD 工作所需的各种驱动脉冲。

根据以上功能考虑, 设计了以下单片机及外围扩展电路, 如图 8。

经过长时间的实用证明, 系统的工作是稳定可靠的, 能够保证载有激光探头的小车可靠地运行并进行数据的正常采集、传输。

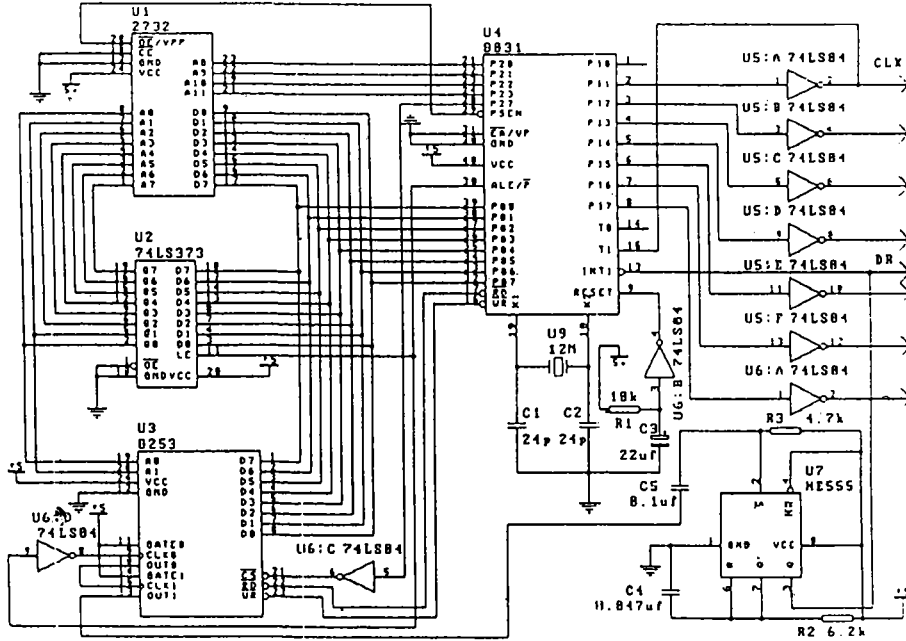


图 8 单片机 2 系统电原理图

4 系统软件设计

整个系统软件主要包括主机 PC 机的程序和两片 51 单片机的程序, 它们与系统硬件配合, 使得我们能够通过主机键盘控制小车的运行和在主机屏幕上实时显示测量结果并最后在打印机上自动完成打印输出。

PC 机的软件我们采用 BASIC 和 8088 汇编程序混合编程。控制台 PC 机软件主要包括:

- (1) 控制台主程序
- (2) INS 8250 初始化子程序
- (3) 向片发送命令子程序

- (4) 接收单片机传送的数据子程序
- (5) 向单片机发送数据子程序
- (6) 延时子程序
- (7) 屏幕打印输出子程序

其中 2~7 是采用 8088 汇编程序完成。

单片机 1 的软件主要包括

- (1) 单片机系统主程序
- (2) 串行发送子程序
- (3) 串行接收子程序
- (4) 采集计算 CCD 视频信号子程序
- (5) 发送 CCD 信号子程序
- (6) 延时子程序
- (7) 定时/计数器 2 中断子程序

单片机 2 的软件主要包括

- (1) 对 8253 的初始化子程序
- (2) CCD 驱动脉冲形成子程序

经过使用证明, 整个系统软件设计逻辑关系合理, 结构清晰, 功能完善, 与硬件配合正确, 完全能够达到实用要求。

5 测试结果及分析

5.1 现场测量结果

5.1.1 高度的标定

当载有激光探头的小车在固定位置时, 用该系统测得的高度与实际的高度进行比较便可得到系统的高度测量精度。这里的实际高度是用精确到 1CM 的米尺在标杆上标出的, 认为是准确高度。表 1 为测量结果。其中测量高度为对同一高度进行 50 次测量得出的平均值。

表 1 高度测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
标杆高度 (m)	0	1.00	1.80	3.42	5.48	6.41	7.52	8.95	9.58
测量高度 (m)	0.008	1.035	1.767	3.446	5.497	6.402	7.526	8.953	9.583
绝对误差 (m)	0.008	0.035	0.033	0.026	0.017	0.008	0.006	0.003	0.003
相对误差 (%)		3.500	1.833	0.760	0.310	0.125	0.0798	0.0335	0.0313

从测量结果中可以看出, 系统测量精度一般都在毫米至厘米量级, 这对于测量煤层高度是较为合适的。

5.1.2 煤场总体积的测定

测量方法是: 先对煤场现存煤量进行检测, 然后在煤场内堆放已知数量的煤, 再进行检测, 将两次检测所得体积的差值与堆放进的已知煤量进行比较, 便可确定该装置的测量误差。

以下为两次测量的结果：

a 堆放进煤之前对煤场进行六次扫描测量，测得的数据如表 2

表 2

序号	1	2	3	4	5	6
体积 (m ³)	20993.6	20893.4	20932.4	21051.6	21001.6	21028.4

∴此时煤场内存煤的平均体积 $V = 20983.1 \text{ m}^3$

b 堆放进煤后对煤场再进行四次扫描测量，测得的数据如表 3

表 3

序号	1	2	3	4
体积 (m ³)	21995.1	22079.3	22053.4	22077.2

∴此时煤场内存煤的平均体积

$$V = 22051.3 \text{ m}^3$$

从以上两次测量结果可得堆放进的煤量 $V = 1068.1 \text{ m}^3$ 。堆进的煤在放入煤场前经轨衡检斤得出的重量为 1063.39 吨 t，比重按 1.006 t/m^3 计算，可得体积 $V = 1057.0 \text{ m}^3$ ，认为该值为真值。

所以，测量结果与真值的差 $\Delta V = 11.1 \text{ m}^3$ ，相对误差 $\Delta V / 1057.0 = 1.05\%$ 。

图9给出了测量的最终打印输出结果。

5.2 系统的误差估算

从前面的分析可知，系统对体积进行测量时的误差将由两部分产生，一是系统测量高度时，由于线阵 CCD 象元的有限尺寸限制产生的高度鉴别误差造成的体积误差；二是由于采样步距有限使体积数值积分时存在截断误差。

5.2.1 高度鉴别误差

如前所述，在给定的三角结构：

$h_0 = 16 \text{ m}$, $h_B = 10 \text{ m}$, $l = 0.6 \text{ m}$, $f = 0.3 \text{ m}$ 的条件下，对不同的高度，系统的分辨率是不同的，表4给出了各高度 h 的分辨率，也即系统对各高度的最大可鉴别误差。

正由于以上原因，在实际测量中，高度测量精度因实际高度不同而异，在 $0 \sim 10 \text{ m}$ 的测量

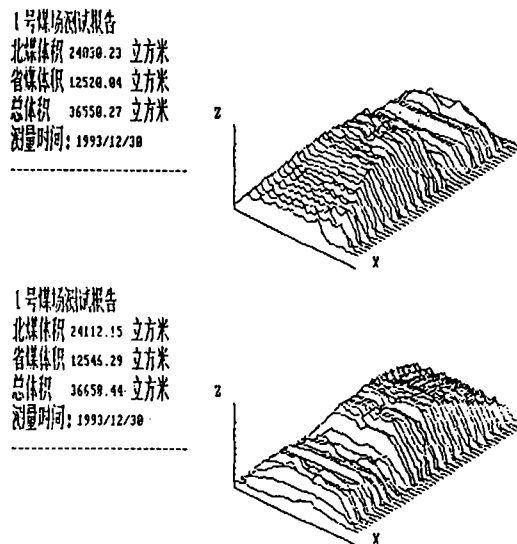


图 9 煤场测量结果

范围内进行的是一种非等精度测量, 对不同高度测量的可信度也是不同的。

这样, 对于长200m×宽50m的煤场, 经计算, 由于测量高度时分辨率限制造成的最大体积误差不会超过176m³。

表4 不同 h 处的分辨率

h (m)	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
dh (cm)	1.76	1.64	1.53	1.43	1.37	1.24	1.14	1.05	0.97	0.89	0.81

h (m)	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
dh (cm)	0.74	0.67	0.60	0.54	0.48	0.42	0.37	0.32	0.28	0.23

5.2.2 采样步距带来的误差

对于不规则形状的煤堆体积计算利用的是离散化的数值积分, 本文采用的是重积分梯形公式:

$$V = \iint h(x, y) dx dy = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m V_{ij} (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$$

式中 i 和 j 分别为 x, y 方向上的等分节点, 总体积为 $m \times n$ 个小体积 V_{ij} 之和。

其中 $V_{ij} = V_p + R$

$$V_p = \frac{\Delta x \Delta y}{4} (h_{ij} + h_{ij-1} + h_{i-1, j} + h_{i-1, j-1})$$

$$(i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$$

$$R = -\frac{\Delta x \Delta y}{12} \left[\Delta x^2 \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} (\xi_1, \eta_1) + \Delta y^2 \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} (\xi_2, \eta_2) \right]$$

式中 V_p 为数值积分体积, $\Delta x, \Delta y$ 为 x, y 方向上的步长, $h_{ij}(i, j)$ 点的高度, R 为梯形公式计算产生的截断误差。对于我们实际所取的值有

$$\Delta x = 0.5 \text{m}; \quad \Delta y = 4 \text{m}$$

由于 $\Delta y^2 \gg \Delta x^2$, 故 (3) 式中第一项可忽略不计, 即截断误差主要由 y 方向上的参量决定。

所以在某份小体积 V_{ij} 中由截断误差造成的体积误差

$$\Delta V_k = R \approx \frac{\Delta x \Delta y^3}{12} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$$

整个煤场被分为5000个底面积为 $4 \times 0.5 \text{m}^2$ 的小体积。

表5给出了在 y 方向上的采样点步距长 $\Delta y = 4 \text{m}$ 情况下

$$\Delta V = \sum_{k=1}^{5000} \Delta_k \text{ 的不同误差限的概率。}$$

表5 误差限概率

y_n 区间	$ y_n =0$	$ y_n <0.32\sigma$	$ y_n <0.67\sigma$	$ y_n <1.51\sigma$	$ y_n <2\sigma$	$ y_n <3\sigma$
误差限 ΔV (m^3)	$ \Delta V =0$	$ \Delta V <30.2$	$ \Delta V <63.2$	$ \Delta V <142.5$	$ \Delta V <188.7$	$ \Delta V <283.0$
概率	0	25%	50%	75%	95%	99.7%

从上表可看出,截断误差造成的总体误差一般均在 $283m^3$ 以内。若将 y 方向上的步距减小一倍,即为 $2m$,则数值积分误差将为目前的八分之一,即一般情况下将均在 $35m^3$ 以内。

Application of Optical Triangulation Imaging to Measure the Volume from a Large Area Object

Deng Renyuan

(Changchun Institute of Optics and Fien Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

Abstract

In this dissertation, our object of study is a novel system for measuring the volume of a large area object. This measuring system is based on the principle of optical triangulation to obtain distance information. Its position sensor is linear CCD, its display and control centre is microcomputer. This instrument can measure the object rapidly with real time displaying and out putting the results. The imaging characteristics of optic system is discussed in detial and the design of hardware and software for the control system is given. The measuring results show that operation of the system is normal, and the accuracy of measurement is within 2%. The measuring error is also analyzed mathemaically at the end of the paper.

Key workds: Optical triangulation imaging, Operation control, CCD driver.