

一种大面积煤堆体积自动检测系统

李集田 贾欣志 檀慧明*

摘要: 本文详细介绍一种用于大面积煤堆体积自动检测系统。由扫描车、激光器和线阵CCD 摄像机组成的扫描探测系统,把煤堆分成若干小面积,并测出每个小面积的高度,再进行积分求出煤堆总体积。采用单片机系统实现扫描控制、数据采集和数据处理。该系统具有打印输出、数字显示和绘图功能,测量误差约为1%。

一、引 言

光学测量技术是光学应用技术一个重要领域,因而出现了各种各样的光学测量仪器。光学测高技术广泛地用于建筑、测绘工程中。然而,传统的光学技术和电子技术的结合,特别是和电子计算机的结合才能满足复杂的测量技术要求,也是光学测量技术发展方向。

要测出一个长250m,宽50m场地上堆放的形状不规则的煤堆体积,是一个困难的问题。传统的测量方法是先用推土机进行整形,人为地推成近似梯形,再进行人工丈量。不言而喻,这种方法不仅耗费大量工时和人力,而且计量也不准确,成了国内各热电厂长期困扰的问题。

这里介绍的检测系统的基本设计思想,是把整个场地的煤堆按确定的步长分割成若干个小体积 V_i ,用光学成像方法测出每个小面积($\Delta S = \Delta x \cdot \Delta y$)的高度 h_i ,进行积分求出总体积,于是

$$V = \sum_{i=1}^{m \cdot n} V_i = \Delta x \cdot \Delta y \sum_{i=1}^{m \cdot n} h_i \quad (1)$$

式中 Δx 、 Δy 分别为 x 、 y 方向上分割步长; m 、 n 分别为 x 、 y 方向上分割的份数。由(1)看出,对长(y)、宽(x)确定的场地而言,当分割步长 Δx 、 Δy 确定之后, m 、 n 也是确定的,那么求总体积的问题就归结为求每个小面积(共 $m \cdot n$ 个)高度的问题。

为了测出整个煤堆各小面积的高度 h ,要有一套能在被测煤堆上方对整个场地进行两维扫描的探测系统。我们采用He—Ne激光器作为光源,垂直照射煤表面形成光点,并用摄像机逐点对激光点摄像。在扫描过程中,随着煤表面高度的变化,光点就像在摄像机像面不同位置上,采用电子学方法,确定像点的不同位置,再经过简单的光学计算就可求出高度,进而求出总体积。为使激光束在煤堆表面形成有效光点,使之能被摄像机有效探测,要求激光束垂直向下照射,为使在煤堆高度变化范围

(0~10m)内光点都能有效地摄入摄像机内,要求摄像物镜光轴与激光束有一个不大的夹角,并确保光轴与激光束在同一平面内。如上所述,随着煤堆高度的变化,激光点(物)沿着激光束上下移动,于是由激光束和摄像机就

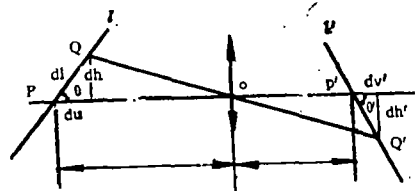


图 1

注:参加此项工作的还有侯庭辉、牛惠辉、刘绍武。

组成一个物面与光轴不垂直的成像系统。如图 1 所示，当物面不与光轴垂直时，与之共轭的像面也不与光轴垂直。

如图 1 所示，当物点 P 沿物面 l 移 dl 于 Q 点时，与之共轭的像点 P' 沿像面 l' 移动 dl' 至 Q' 点，令 Q 点物高 dh ，像高 dh' ，物移和像移分别为 du 、 dv 。设物面 l 与光轴倾角为 θ ，像面 l' 与光轴倾角为 θ' ，则有

$$\frac{\tan\theta}{\tan\theta'} = \frac{\frac{dh}{du}}{\frac{dh'}{dv}} = \frac{dh}{dh'} \cdot \frac{dv}{du} \quad (2)$$

其中 $\frac{dh}{dh'} = \frac{1}{M_0}$ 为 Q 点的放大率的倒数，又由薄透镜公式(1)

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (3)$$

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

$$\therefore \frac{dv}{du} = \left(\frac{f}{u - f} \right)^2 = \left(\frac{v}{u} \right)^2 = m^2 \quad (4)$$

当 $dl \rightarrow 0$ 时， $m_s \approx m_0 = m$ 于是

$$\tan\theta' = \frac{\tan\theta}{m} \quad (5)$$

可见，当物面不与光轴垂直时，像面与光轴也不垂直，当 θ 角确定之后，对特定光学系统， θ' 也是确定的。

二、系统的组成

该检测系统是集，光学、机械和电子学于一身的自动检测设备，它由机械扫描、光电探测和由单片机组成的运行控制与数据采集和数据处理各部分组成。

1. 机械扫描

如图 2 所示，它是由场地上的门式堆取料机（以下简称大车）、架在大车横梁上的单轨和悬挂在单轨上，并在其上运行的扫描小车（以下简称小车）组成。当大车沿场地两侧铺设的

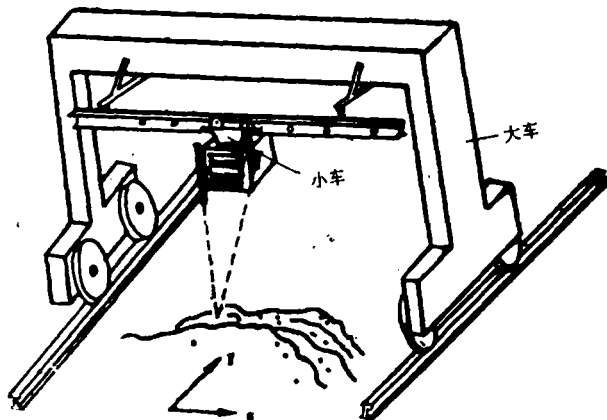


图 2 机械扫描系统

铁轨作纵向(y)运行时, 小车沿单轨作横向(x)往复运动。于是当大车从场地一端行驶到另一端时, 装在小车上的光电探测系统, 就对整个场地进行一遍二维扫描。即实现对整场地煤堆表面各点高度进行探测。

2. 光电探测系统

它由作为探测光源的He—Ne激光器和线阵CCD摄像机组成。使用时把激光器和摄像机都装在小车上, 并随同小车运行, 以实现对整个场地的探测。选用He—Ne激光器, 是因为其输出波长为 6328 \AA , 恰好靠近 CCD 光谱响应峰值; CCD 摄像机, 由 2048 像元的线阵 CCD、焦距 $f = 0.3\text{m}$ 的物镜及驱动电路组成。CCD 摄像机结构紧凑、工作可靠, 是它与普通摄像机相比的固有优点; 物镜焦距的选择是这样考虑的, 一方面不能太小, 否则影响被测高度的分辨率; 另一方面不能太大, 否则光点像占 CCD 像元数太多, 将会给后面数据处理和存贮带来困难。选择 $f = 0.3\text{m}$ 时, 可分辨高度为 1.8cm , 最大像点 (对确定的激光斑点 $\phi = 3\text{cm}$) 占 80 个象素。

按装时, 激光器垂直向下, 照射煤堆表面, 为确保激光器和摄像机组成一个完整的光学成像系统, 按装时要保证摄像机的光轴与激光束在同一平面内, 其交角 w_0 也是确定的。图 3 给出光电探测系统光学原理图。

如图 3 所示, 激光器与摄像机物镜的水平距离 $L = 0.56\text{m}$, 距地面 A 点高度 $H_0 = 15.7\text{m}$, 煤表面最大高度 B 点距地面 $H_b = 10\text{m}$, 该值确定了物镜有效视场角 w ; 光轴与激光束相交于 P, 交角为 w_0 ; A、B 和 P 各点在线阵 CCD 上分别成像于 A' 、 B' 和 P' 。根据光学共轭原理, 在 AB 上任意一点 Q, 都可以在像面线阵 CCD 上找到一点 Q' 与之共轭。于是当光电探测系统随同大车、小车运行时, 随着

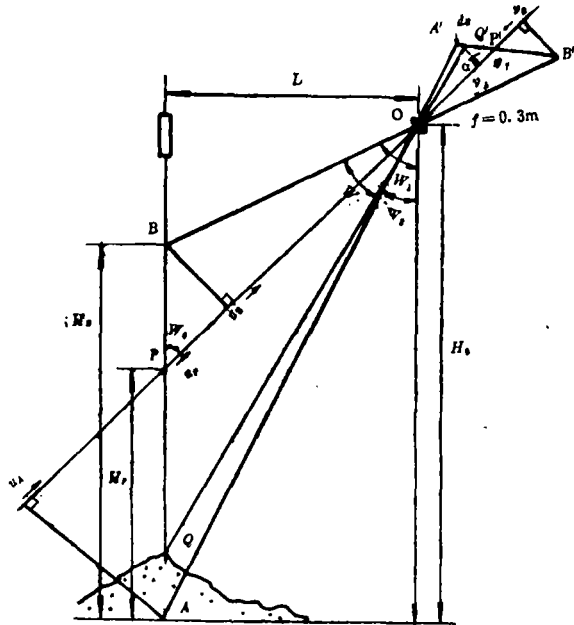


图 3 光电探测系统原理

煤堆表面高度在 $0 \sim 10\text{m}$ 范围内变化, 照射在煤表面的激光点就在 AB 之间上下移动, 与激光点共轭的像点就在像面线阵 CCD 上 $A'B'$ 之间移动。当我们用电子学方法判断出像点在 CCD 上的位置时 (即在某个像元上), 就可计算出与之对应的高度 H 。根据图 3 中的几何关系

$$w_1 = \tan^{-1} \frac{L}{H_0 - H_b}, \quad w_2 = \tan^{-1} \frac{L}{H_0}, \quad w = w_1 - w_2 \quad w_0 = w_2 + \frac{w}{2} \quad \text{于是}$$

$$P \text{ 点高度 } H_p = H_0 - \frac{L}{\tan w_0} \quad (6)$$

$$P \text{ 点物距、像距分别为: } u_p = \overline{PO} = \frac{L}{\sin w_0}, \quad v_p = \frac{f \cdot u_p}{u_p - f} \quad (7)$$

$$A \text{ 点物距、像距分别为: } u_A = \cos \frac{\omega}{2} \cdot \frac{L}{\sin w_2} \quad (8)$$

$$v_A = \frac{f u_A}{u_A - f} \quad (9)$$

像面与光轴夹角

$$\tan \alpha = \frac{\tan w_0}{m_s} = \frac{\tan w_0}{v_s / u_s} \quad (10)$$

设像点在CCD上的位置距A'距离为dS, 则该点像距

$$u = u_A + \cos \alpha \cdot dS \quad (11)$$

$$\text{对应的物距 } u = \frac{f \cdot v}{v - f} \quad (12)$$

于是与之共轭的物点, 即煤堆表面高度

$$H = H_s + \frac{u_s - u}{\cos w_0} \quad (13)$$

随着机械扫描的运行, 可测得一系列的高度H值, 将H代入(1)式, 就可求得整煤场煤堆的体积。

3. 运行控制、数据采集和数据处理

小车运行控制、光电信号的采集和数据处理及打印输出, 是由分别装在控制台和小车上的两个单片机系统和有关软件完成的。其组成框图于图4。

(1) 运行控制

为实现二维机械扫描, 大车的纵(y)向运行和小车的横(x)向运行必须同步, 为此分别在大车和小车上装有光电开关, 用以记录大车小车行驶距离。大车行驶后就有光电脉冲通过电缆传给控制台单片机, 并进行累加计数, 同时通过串行线发出指令启动小车单片机运行小车程序。小车程序发出通电信号, 并通过装在小车上的执行电路, 给电机通电, 使小车开始运行。小车运行后, 装在小车上的光电开关发出光电脉冲, 送给小车单片机进行累加计数, 当计数到相当煤场横向宽度(50m)时, 就发出断电信号, 使小车断电、刹车停止运行。通过延迟电路, 当小车停稳后, 刹车机构自动松开, 准备返程运行。接着程序发出倒向、通电信号, 使小车再次起动车返程运行, 单片机依然累加计数光电脉冲, 当记录到相同数目之后, 再发断电、刹车信号, 使小车停在初始位置上, 于是小车完成了一次往返运行。这时小车单片机处在等待大车同步信号状态。当大车脉冲计数达到特定值时(该值标示大车行驶特定距离, 称作纵向步长), 再由控制台单片机发出启动小车运行指令, 于是小车就开始第二次往返运行。如此进行下去, 小车每往返一次, 都和大车同步一次, 当大车沿纵向走完全程后, 就实现了对整个场地进行二维扫描。

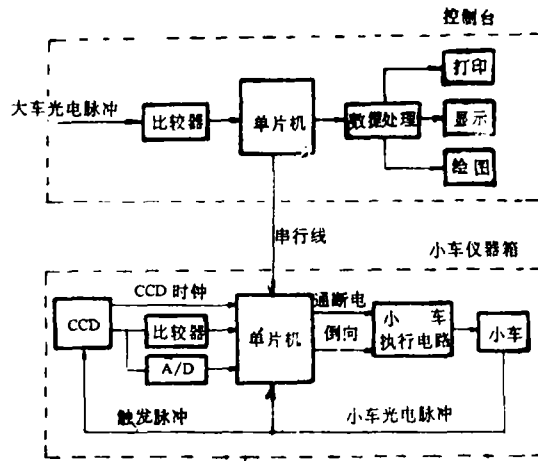


图4 运行控制、数据采集及数据处理电路框图

通过延迟电路, 当小车停稳后, 刹车机构自动松开, 准备返程运行。接着程序发出倒向、通电信号, 使小车再次起动车返程运行, 单片机依然累加计数光电脉冲, 当记录到相同数目之后, 再发断电、刹车信号, 使小车停在初始位置上, 于是小车完成了一次往返运行。这时小车单片机处在等待大车同步信号状态。当大车脉冲计数达到特定值时(该值标示大车行驶特定距离, 称作纵向步长), 再由控制台单片机发出启动小车运行指令, 于是小车就开始第二次往返运行。如此进行下去, 小车每往返一次, 都和大车同步一次, 当大车沿纵向走完全程后, 就实现了对整个场地进行二维扫描。

(2) 数据采集和数据处理

数据采集和数据处理是和机械扫描控制同时进行的。当小车运行后，产生的光电脉冲，除送给单片机作行程计数外，同时送到CCD摄像机中，作为CCD触发脉冲。CCD接到该触发脉冲后，便开始一个周期的信号传输操作。当CCD某像元上有激光光像时(即有光照时)，

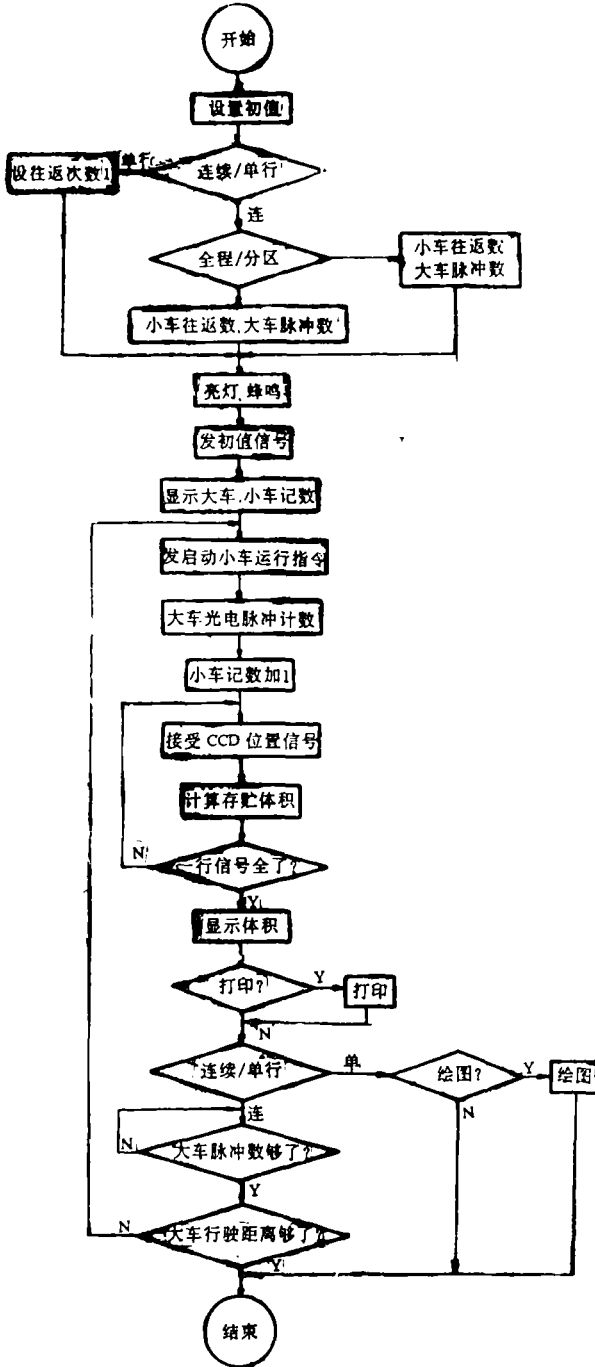


图 5 控制台程序流程

- 初值:
- 1. 运行方式: 连续/单行 2. 运行初始方向
- 3. 测量方式: 全程/分区

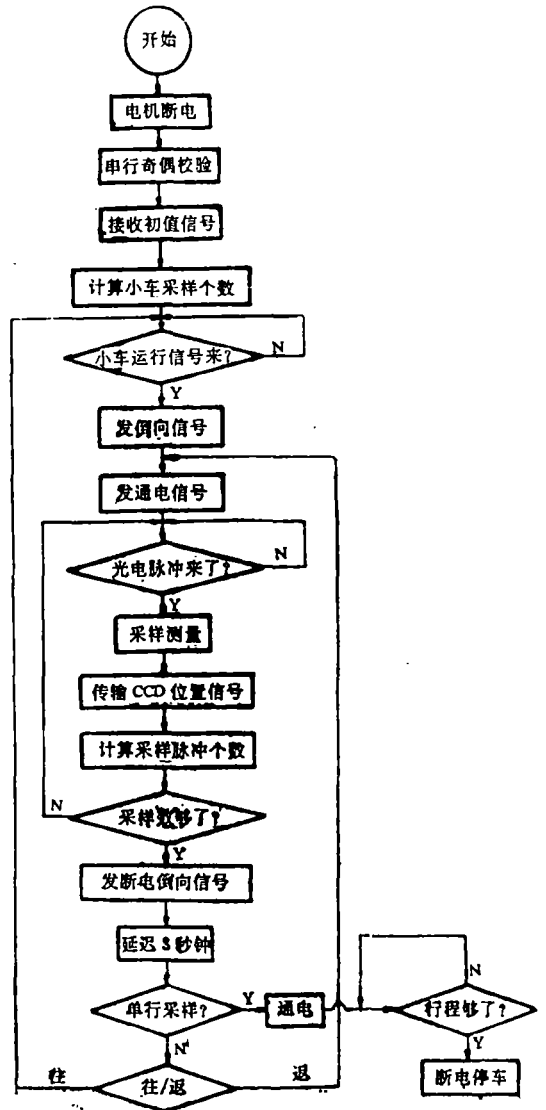


图 6 小车程序流程

该像元上就形成一个电荷包，通过 CCD 时钟连续作用就有光电流传输出来，该信号二值化后送给单片机，与此同时，CCD 时钟信号送给单片机，并进行计数，每个时钟脉冲对应 CCD 上的一个像元。当单片机收到 CCD 信号为高电平时（有光照），脉冲计数停止，如计数为 N ，则表明激光点在 CCD 线阵上第 N 个象素上成像，当像点覆盖多个像元时，则通过软件找到光电信号峰值对应的像元数 N 。于是把这 N 值通过串行线传输给控制台单片机中存贮。随着机械扫描的不断进行，煤表面高度发生变化，像点在 CCD 上位置改变，就可通过数据采得到一系列的处于高电平的 CCD 像元值，并送给控制台单片机进行累计。

数据处理（包括软件），就是根据采集的 CCD 出现高电平时所对应的时钟脉冲数，算出该像元所处 CCD 上的位置，计算出煤堆体积。如上所述，如果时钟是从线阵 CCD 一端扫描算起，第 N 个像元为高电平，每个像元尺寸为 $14\mu\text{m}$ ，那么， $dS = N \cdot 14 \times 10^{-6}\text{m}$ ，把 dS 代入 (11)、(12) 和 (13) 式就算出该像元对应的煤表面高度 H 。当扫过整个煤场后，就能求得一系列的高度值 H_i ，再由 (1) 式，就能求出整个煤场煤堆体积。这些计算主要是由软件完成的。图 5 和图 6 分别给出控制台单片机程序和小车单片机程序的流程图。此外，数据处理还包括结果打印输出、数字显示和绘图等。

三、该系统的精度与存在问题

对于不规则形状的煤堆体积可用下式表示

$$V = \iint h(x, y) dx dy \quad (14)$$

式中 $h(x, y)$ 为煤堆表面高度，它是 x, y 的函数。与 (1) 式比较，当我们取 $\Delta x, \Delta y$ 为有限值时，用 (1) 式测得的体积是一个近似值。即用 $\Delta x \cdot \Delta y$ 面积上某一点的高度 H ，代替该体积的真实高度，将引起误差。显然，当 $\Delta x, \Delta y$ 取值越小， m, n 取值越大，(1) 式求得的体积就越接近 (14) 式的理论值。现在我们用近似积分法来分析由 (1) 式求出的体积带来的误差。

由数值积分梯形公式 (2)

$$\int_a^b h(y) \cdot dx \approx \Delta x \left(\frac{h_0 + h_n}{2} + h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1} \right) \quad (15)$$

$$\text{误差为: } \frac{(b-a)^3}{12 \cdot n^2} h''(x) \quad (16)$$

在 x 方向（横向）上，场地宽度 $b - a = 50\text{m}$ ， 0.5m 采样一次，即 $\Delta x = 0.5\text{m}$ ，则 $m = 50/0.5 = 100$ 。 $h''(x)$ 为 $[a, b]$ 区间二阶导数最大值，根据煤堆表面实际情况，设在 $\Delta x = 1\text{m}$ 的线度内取表面最大坡度为 45° ，即 $h'(x) = 1$ ，最小坡度 0° ，故 $h''(x) = 1$ ，代入 (16) 式可算出 (1) 式在 x 方向上的面积误差 $\Delta S_x = 1.04\text{m}^2$

由于面积误差引起的煤场长度 (y) 为 250m 时的体积误差 $\Delta V_x = \Delta S_x \cdot y = 260\text{m}^3$

在纵向 (y)，采样步长 Δy ，与大车往返次数有关，当大车往返两次时 $\Delta y = 1\text{m}$ ， $b - a = 50\text{m}$ ，则 $n = 250$ 。代入 (16) 式可求得 y 方向上的面积误差

$$\Delta S_y = 20.8\text{m}^2$$

由此所产生的体积误差 $\Delta V_y = 20.8x = 1041\text{m}^3$

x, y 两个方向上的体积误差

$$\Delta V = \Delta V_x + \Delta V_y = 1301\text{m}^3$$

这对于整个场地长250m, 宽50m, 煤堆取大高度10m的体积而言, 相对误差为

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1301}{10 \times 50 \times 250} = 1\%$$

该检测系统目前尚存在的主要问题是太阳光对测试的影响比较严重。尽管我们在摄像机物镜中已装有对6328 Å通过的窄带滤光片, 但在强烈阳光照射煤堆表面的条件下, 探测信号背景变大, S/N 下降。严重时, 甚至可能淹没有用信号, 达到以假乱真, 使该系统不能正常测量。因此, 使用该系统测量时, 最佳时间选在早晚时分为宜。今后如选用功率更大的激光器光源, 通带更窄的滤光片, 对上述问题会有所克服。此外, 由小车运行时的机械振动, 也会带来一些测量误差。

参 考 文 献

- [1] [美]无线电公司,《电光学手册》国防工业出版社, 1978, 177~178
 [2] 四川矿业学院数学教研组,《数学手册》科学出版社1978.330

An Automatic System Used to Measure Volumes of Large Heaps of Coal

Li Jitian Jia Xinzhi Tan Huiming

Abstract

An automatic system used to measure volumes of large heaps of coal is described in detail in this paper. The scanning detection system composed of scanning vehicle, laser and camera divides large heaps of coal into a number of small areas and measures the heights of each small area and then computes the integrating volume. using scanning control, data sampling and processing, and single chip microprocessor. The measuring error of the system is approximately 1%.