

河床模型地形的无接触快速测量技术

马志敏, 范北林¹⁾, 许明¹⁾, 王敏
(武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)

摘要:针对河床模型地形测量的需要,介绍了两种无接触快速地形测量技术,即利用超声波实现水下地形无接触快速扫描测量和利用激光与 CCD 光学成像原理实现水上地形的无接触快速测量,并介绍了测量系统的组成、工作原理及有关主要技术问题的解决方法。

关键词:地形测量;河床模型;超声检测;激光;无接触测量

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)04-0185-04

Non-Contact Quick Measurement Technology for River-Bed Topography

MA Zhi-min, FAN Bei-lin¹⁾, XU Ming¹⁾, WANG Min

(School of Electric Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Two methods of non-contact quick scan measuring river-bed topography were introduced. The topography under water was measured by the theory of ultrasonic echo wave and the topography upon water was measured by the theory of laser and CCD imaging. The testing system, the main problems in the test and the ways of solving them were presented.

Keywords: Topography measurement; River-bed mode; Ultrasonic testing; Laser; Non-contact measurement

河床模型地形测量,尤其是动床地形测量对于水流泥沙的相互作用机理、河床的淤积演变规律以及洪水的演进过程的物理模型的试验研究具有十分重要的意义。而河床模型地形测量又是一项复杂而艰巨的任务,一直是河工模型试验测量中的一个难点,在一定程度上制约了河工模型试验的研究。

河工模型一般长达数十至数百米,宽达数米至数十米。一次地形测量点数可达数千点至数万点,测量任务繁重。而且,模型试验是用一个较短的时间来模拟天然情况下一个较长的时间过程,为保证测量数据的同时性,同一批次的测量应在较短时间内完成,因此要求系统应具有很高的测量速度。同时,河床模型都是由原型经过大比例尺缩小而成的,模型上的 1 mm 可能相当于原型 100 mm,甚至更大。为了保证足够的试验精度,模型地形测量精度和水平定位精度都要求较高。另一方面,由于水流流动作用,且模型沙的比重很轻,床面流动性很强,

采用接触测量极易对河床产生扰动,带来误差。

目前,国内外使用的主要是电阻式地形仪,属于接触式测量。主要存在的问题是①对河床地形有扰动,无论是对水下淤面或水上洲滩、边滩都有一定的扰动和接触误差。②测量速度慢,每点测量需要的时间为 2~4 s,无法满足动床和大模型测量的需要。针对上述情况,笔者提出了两种无接触式快速扫描测量方法。

1 超声水下地形快速扫描测量

1.1 测量原理

该方法基于回声测量原理。超声换能器位于水面,垂直向下发射一束脉冲超声波(图 1),设水中的声速为 c ,声波来回传输的时间为 t_0 ,则

$$H = h_0 + \frac{ct_0}{2} \quad (1)$$

式中 H ——河床的深度

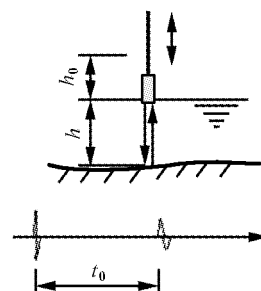


图 1 回声测量原理

收稿日期: 2005-02-23

1) 长江科学院, 武汉 430009

h ——水深

h_0 ——水面至参考点的距离

由电路测量出回波的声时 t_0 , 声速为已知值(可通过校正测量获得), 根据式(1)即可计算出河床深度 H 。配合三维机械扫描机构, 使超声探头沿水面作横向和纵向扫描, 就可实现二维断面和三维河床地形扫描测量与成像。

由于超声传播的速度很快, 约为 $1\,500\text{ m/s}^{[1]}$, 以 300 mm 水深为例, 单次测量需要的时间仅为 0.5 ms , 当水平扫描速度为 100 mm/s 时, 在每次测量时间内探头移动的水平距离仅为 0.05 mm , 完全可认为探头的水平行走不影响测量的精度, 因此可实现不停顿地快速扫描测量。

适当的选择超声换能器的结构参数, 同时采用合适的声速校正措施, 地形垂直分辨率可达 0.25 mm , 在 300 mm 水深范围内, 地形测量精度优于 1 mm , 符合模型地形测量的要求。

1.2 超声测量单元设计

包括超声传感器、发射接收电路、时间增益放大器(TGC)、信号调理电路、声时测量电路、单片机、测杆垂直驱动与定位机构等部分(图2)。

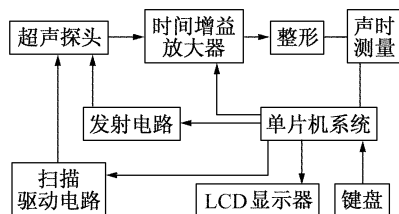


图2 超声测量单元组成

超声水下地形测量主要应解决问题是, ① 合理的传感器结构与参数的设计及声速校正, 保证测量的精度。② 消除粒子的反射干扰。③ 减小测量的盲区。

1.2.1 传感器结构与参数的设计及声速校正

为保证有较高的测量分辨率和指向性, 同时保证在最大测量水深和含沙量的情况下有足够强的回波信号幅度, 超声的频率不宜过高或过低。综合考虑, 超声频率 f 可取 3 MHz , 换能器直径 D 可取 20 mm , 地形测量的垂直分辨率可达 0.25 mm 。水深在 300 mm 范围内, 测量精度优于 1 mm 。在含沙量 $>5\text{ kg/m}^3$ 时, 测量范围达 $600\sim1\,000\text{ mm}$ 。

换能器内增加适当的阻尼, 可有效减小超声测量的盲区, 但阻尼不宜过重, 过重会显著减小传感器的灵敏度。

由于水的声速随水温和成分而变, 其中水温对声速影响最为显著, 水温每变化 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 声速的变化达 3% , 不进行修正势必带来较大的测量误差。通常, 可采用测温校正和定距离校正来修正声速变化的误差。定距离校正实际上是直接进行声速的测量, 可以校正各种因素对声速的影响, 比测温校正更准确, 因此采用了该校正法。

定距离校正法是在校正探头的前部安装一个校正挡板, 挡板与探头的距离是固定的。测量时, 校正探头置入水中, 通过测量声波在探头和挡板之间的来回传输时间即可计算出对应的声速。

1.2.2 消除粒子的反射干扰方法

消除粒子的反射干扰有多种途径, 首先, 可以适当控制增益, 避免信号的过放大, 从而达到抑制粒子干扰的目的。因为, 一般来说, 相同位置的底波(床面回波)信号比粒子干扰信号要强得多, 所以可选择适当的增益, 使底波信号放大到足够的幅度, 而使粒子干扰信号处在相对较低的水平, 就可不造成粒子的反射干扰。同时, 由于底波信号的强度随距离呈指数规律衰减^[1], 粒子反射干扰信号也随距离呈指数规律衰减。为了保证不同距离的底波信号能均衡放大, 而粒子反射信号又不被过度放大, 放大器的增益应随距离指数增长, 即应随时间指数增加。这可通过时间增益放大器实现。

另一种途径是采用信号叠加增强的方法^[2]。由于粒子干扰信号具有流动性和随机性, 而底波信号相对稳定, 同一位置多次测量的回波信号叠加后, 底波信号可得到增强, 而粒子干扰信号则相对被抑制。所以, 当粒径较大, 粒子反射干扰较重, 采用时间增益控制难以消除粒子反射干扰时, 可采用叠加滤波的方法。此时需通过高速 A/D 采集, 将模拟回波信号转换成数字序列信号, 再由数字信号处理器(DSP)单元进行数字滤波处理和底波识别。该方法可有效抑制粒子反射干扰, 提高测量的可靠性。

1.2.3 减小测量盲区的方法

减小测量盲区也有两种途径, 一是从放大电路入手, 采用时间增益放大器, 避免发射波拖尾信号的过放大。二是从传感器结构入手, 可采用拖尾信号较小的材料作为敏感元件或增加传感器的阻尼。

由上可见, 采用时间增益放大器对于减小测量盲区和抑制粒子的反射干扰都有显著效果。

1.2.4 时间增益放大器的设计

时间增益放大器由三级压控放大器 AD603 和

D/A 转换器 AD0832 组成(图 3)。来自单片机的数字信号 D 经 D/A 转换器转换成模拟电压 V , 加到第二级和第三级 AD603 的增益控制端, 控制放大器增益的大小。通过程序控制 D 随时间按指数规律增加, 则放大器的增益也将随时间增长。该放大器增益的控制范围可达 $0 \sim 40$ dB, 这样既保证了对盲区 and 杂散粒子反射干扰的抑制, 又保证了对床面回波的充分放大。指数增益控制的时间常数可根据试验结果确定。

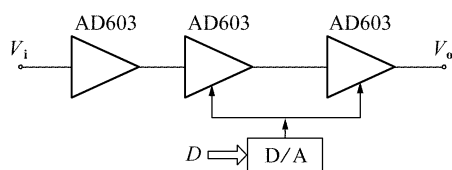


图 3 时间增益放大器

2 激光 CCD 水上床面快速扫描测量

通常, 河床模型制作完后需要测量干床地形, 在试验过程中也常常需要测量一些滩地的地形, 如黄河模型试验中, 由于有水河槽很窄, 大部分都是无水河滩, 所以水上滩地测量的任务也很大。现有的测量方法有两种, 对于湿滩的测量采用阻抗法, 对于硬床的测量则采用接触限位的方法。测量过程与阻抗淤面测量基本相同, 都是由步进电机带动测针逐步向下探测, 测量速度慢, 测针与床面有一定接触, 给测量结果带来一定误差。此外, 这些方法还不能测量干软的沙滩地形。

基于激光与电荷耦合器件存储器 (CCD) 的光学成像测量方法可实现任何情况下 (包括硬床面、湿软床面和干软床面) 的无水河床的快速无接触测量。

2.1 测量原理

激光 CCD 光学成像测量方法的原理是, 由激光器经聚焦准直后发射出一束极细的光束, 垂直照射到床面, 形成一个高亮度的细小光斑(图 4)。高分辨率线阵式 CCD 沿垂线方向, 通过

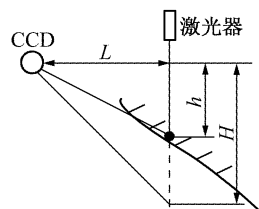


图 4 CCD 地形测量原理

光学镜头以固定的视场角瞄准测量区域, 床面的光斑将成像到对应的 CCD 单元, 通过测量 CCD 传感器的投影长度即可计算出对应的河床深度。设 CCD 视场的上边缘已调整到水平位置, CCD 中心距光束中心的距离为 L , 视场沿激光束的最大深度为

H , 光斑距视场上边缘的距离为 h (河床的深度), 物像之间的对应投影关系见图 5。

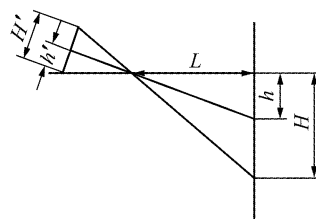


图 5 物与像之间的几何关系

其中 H' 为 CCD 阵列的长度 (为已知的定值), 与最大深度 H 相对应。 h' 为 h 的投影长度, 根据几何光学关系可以推出以下关系 (推导略)

$$h = \frac{h' L H}{H' \sqrt{L^2 + H^2} - h' (\sqrt{L^2 + H^2} - L)} \quad (2)$$

式中 L, H 和 H' 均为已知量, h' 由 CCD 测出。由上式即可计算出河床的深度 h 。

CCD 测量速度很快, 测量一个点仅需 $2 \sim 3$ ms, 所以通过机械扫描的方式可以实现快速断面地形测量。

另外, 线阵式的 CCD 分辨率很高, 现在可以达到 5 000 线, 甚至 7 000 线。即可将 H 细分成 5 000 $\sim$ 7 000 份, 对应 500 mm 的河床深度范围, 最高分辨率可达 0.1 mm。

2.2 测量系统组成

激光 CCD 测量单元由激光器、1501D 型高分辨率线阵式 CCD、差分放大器、信号比较器、计数器、帧行转移脉冲发生器、扫描驱动机构和单片机等部分组成(图 6)。

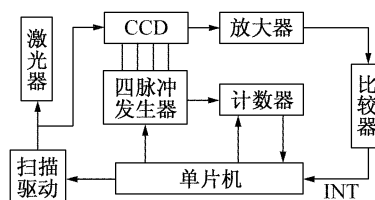


图 6 CCD 测量单元的组成

激光器采用的是 50mW 半导体激光器, 具有体积小、功耗低和寿命长的特点。CCD 采用的是高分辨率两相式线阵 CCD, 型号为 1501D, 分辨率可达 5 000 线, 具有较好的光学灵敏度。四脉冲发生器由 CPLD 器件 MAX3000 实现, 按规定时序输出四个移位脉冲控制信号, 其中一路为场转移脉冲 Φ_{SH} , 两路为行转移脉冲 Φ_A 和 Φ_B , 另一路为复位脉冲 Φ_R , 用以控制 CCD 单元电荷的转移输出。计数器的作用是记录移位脉冲数, 从而确定光斑的位置。单片

机负责控制和协调整个系统的工作,并完成信号的处理和结果显示。

其工作过程是,在单片机的控制下,扫描驱动机构将测量单元定位到指定的测点,激光束照射在床面上形成高亮度的光斑,通过光学镜头将光斑成像到 CCD 对应单元,单片机控制 CCD 在给定的时间内对光束方向进行光积分采样。与光斑对应的 CCD 单元将获得足够强的信号电荷,而其它暗场单元电荷很小。随后,在脉冲信号发生器产生的帧转移和行转移脉冲信号的协调控制下,将 CCD 阵列各单元电荷逐一串行移出,经放大器放大。每移出一个 CCD 单元的电荷包,计数器加 1,以记录光斑的位置。对应非光斑信号照射的 CCD 单元,输出为暗电荷,放大器输出亦为低电平。而对于被光斑照射的 CCD 单元,则输出较强的信号电荷^[3](图 7),放大器对应输出较强的脉冲电压。该电压信号和预定设置好的参考电压相比较,当输出脉冲电压大于参比电压时,比较器输出一个脉冲信号,加到单片机的 INT 引脚,产生一个中断,通知单片机读出对应的计数值,即光斑的像位置 N ,则河床深度的投影长度为

$$h' = pN$$

式中 p 为相邻两 CCD 单元的中心距离。将 h' 代入式(2)即可计算出对应的河床深度。

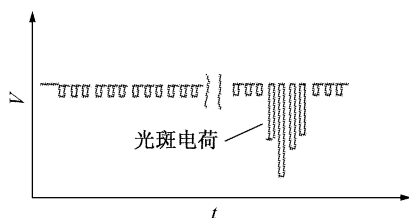


图 7 CCD 信号输出

为保证足够的测量精度,光斑点应足够小,所以由激光器发出的光束应进行聚焦和准直,使光束的直径不超过 2 mm。由于光斑附近会出现光晕,使得光斑点扩大且边界变模糊,亮度起伏,造成干扰。解决的办法是可对光脉冲信号进行滤波,再经比较器整形成单个脉冲信号,由单片机的两个中断输入端 INT1 和 INT2 捕捉脉冲信号的前沿和后沿,从而计算出光斑的中心位置。利用光斑中心再计算河床的深度。该方法可提高测量精度和抗干扰性。

激光器和 CCD 一同固定安装在测试车上,随测试车一起水平运动,即可实现水上地形的扫描测量。

该方法还可用于水质透明性较好的水下地形测量,但需要根据水的折射性进行修正。对于水流比较浑浊的情况,激光衰减很快,照射不到床面,因此无法测量水下地形。

3 组合测量

由于模型地形的实际情况较复杂,有水下淤面、洲滩、边滩浅滩、硬床和干软的床面,单独一种测量方法很难面面俱到。因此只能根据模型试验的需要和实际情况将几种测量方法组合起来,构成一个联合测量系统,实现水上和水下地形的同步测量。考虑到系统的复杂性,组合的方法一般最好不要超过两种。以下是几种组合方案:

(1) 对于水流透明性较好的试验模型,如采用塑料沙试验的情况,可采用超声与 CCD 组合方式。其中超声波完成水下地形测量,而激光 CCD 可完成水上和浅滩(水深小于超声测量盲区)地形的测量。

(2) 对于水流透明性较差,且河槽相对较宽的模型(如长江模型),可采用超声和阻抗法的组合方式。即采用超声波法测量水下地形,采用阻抗法测量水上和浅滩(水深小于超声测量盲区)地形。

(3) 对于水流透明性较差,且滩地相对较宽的模型(如黄河模型),可采用激光 CCD 与阻抗法的组合方式,即采用阻抗法测量水下地形,采用 CCD 测量水上洲滩和边滩的地形。

4 结束语

由于超声和激光 CCD 河床模型地形测量技术具有无接触、无扰动和测量速度快的特点,有利于提高河床模型地形测量的精度和速度,特别是对于动床地形测量具有重要的实用意义。武汉大学在超声模型水下地形测量方面作了较为深入的研究,最近,武汉大学电子信息学院与长江科学院合作已研制出超声阻抗一体化的动床模型三维地形测量系统。与此同时,对于激光 CCD 地形测量技术也进行了试验研究,正着手样机的研制。希望上述研究对于促进河床模型试验测量技术的进步有所帮助。

参考文献:

- [1] 冯 若. 超声手册[M]. 南京:南京大学出版社,1999. 17—27.
- [2] 吕俊芳. 传感器接口与检测仪器电路[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1995. 132—142.