

基于二线能坡法的自动测流系统设计与应用研究

王德维, 胡必要, 周 云, 冉四清

(江苏省水文水资源勘测局连云港分局, 江苏 连云港 222004)

摘要: 主要研究了基于二线能坡法的自动测流系统的设计, 并在小许庄水文站进行应用。该方法通过 2 台 ADCP 分别获取 2 条实测垂线流速, 再通过实测垂线流速获取能坡参数, 以流速~面积法计算断面流量。系统可以实现自动采集、储存、传输、实时在线查询和误差分析等功能, 为实现“少人看管, 无人值守”水文测站管理模式提供了条件。

关键词: 二线能坡法; 自动测流; 系统设计; ADCP; 水文测站

中图分类号: [TV123] **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2016) 05-0033-06

Research on design and application of automatic flow measurement system based on two-lines energy slope method

WANG Dewei, HU Biyao, ZHOU Yun, RAN Siqing

(Lianyungang Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Lianyungang 222004, Jiangsu)

Abstract: Design of automatic flow measurement system based on two-lines energy slope method is mainly studied, which has been applied in Xiaoxu Village hydrological station. The method obtains two measured vertical velocity by two ADCP, then gets the slope parameters, and lastly calculates the section discharge by the velocity-area method. The System can achieve automatically collecting, storing, transmitting, real-time querying, error analyzing and other functions, which provides a condition for hydrological station management model of “few people care, no people on duty”.

Key words: two-lines energy slope method; automatic flow measurement; system design; ADCP; hydrological station

0 引言

传统的流量测验是沿河道宽在过水断面上用流速仪测量多条垂线流速, 然后用部分流速面积法求出流量。这种方法被广泛应用于天然河道的流量测量中, 其作业过程称为测流。

天然河道遇到大洪水的时候, 流速大、漂浮物多, 流速仪测流法无法实施, 此时常用浮标法代替, 但由于浮标在河道中不仅经常移动, 还会出现多个浮标被挤到中泓区的现象。而且, 浮标法所

测到的是上下比降断面之间的河段平均流速, 不是测流断面的实际流速, 所以精度不高。当遇到特大洪水的时候, 还可以采用比降面积法作为备用方案, 但由于比降不容易测量准确, 所以精度比浮标法更差。

近年来, 国外声纳测流技术发展很快, 电磁式、雷达式测速仪也在我国有所应用, 与传统流速仪比较, 技术先进、测流时间短, 但价格要比传统的机械式流速仪昂贵许多。采用传统相关关系建立流量在线实时监测系统也存在一定困难, 且建设

收稿日期: 2016-01-22

作者简介: 王德维 (1987-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事水文测验、水情预报等工作。

周期长和高水外延的缺点也不易克服。

能坡法是颜开等同志研制的垂线流速计算模型, 1995年获水利部科技成果进步三等奖, 1997年被列入《水文巡测规范》(SL195-97)。近期发展成为二线能坡法, 通过2条实测垂线流速求出能坡参数后, 即可把原来在断面中实测 n 条垂线流速变为计算 n 条垂线流速的方法。

1 二线能坡法测流原理

1.1 基本思路

二线能坡法测流以曼宁公式为基础, 借助水力学实验方法, 从矩形、三角形断面入手, 寻求垂线流速与断面平均流速的关系, 建立与曼宁公式具有相同结构形式的垂线流速公式。改天然河道中综合糙率为分解糙率, 并以2条实测垂线流速为已知条件反求能坡(水流能量坡度)参数, 代替曼宁公式中比降与糙率的比值关系, 从而使成果精度显著提高, 并借助等效流量原理, 解决多种非恒定、非均匀流条件下流量测量问题。

1.2 垂线流速公式

天然河道断面一般都是不规则的, 断面内垂线流速沿断面宽分布图与倒置的过水断面具有相似的特点^[1-2]。按照三角形断面内垂线流速公式的建立方法, 根据每条垂线的水深、水面宽和起点距, 在若干个水面宽相同、水深不等的矩形水槽中, 用矩形断面内垂线流速公式算出各垂线的“流速”, 并得到1条沿断面宽分布曲线。但由于断面形状不规则, 无法用相同的改正系数对上述的“垂线流速”作改正。

设不规则断面如图1, 求图中垂 i 的流速。已知垂 i 水深为 h , 水面宽为 B 和实测垂线流速沿断面宽分布图。在糙率 n 、比降 S 及流态相同的条件下, 假定: 在水深为 h 、水面宽为 B 的矩形断面中, 垂线流速沿断面宽分布如图2。在水深 h 、水面宽为 B 的三角形断面中, 垂线流速沿断面宽分布如图3。

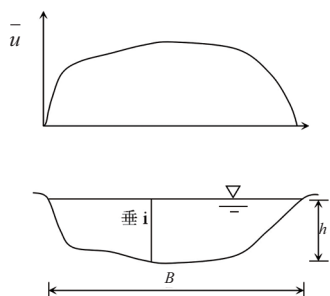


图1 不规则断面垂线流速分布图

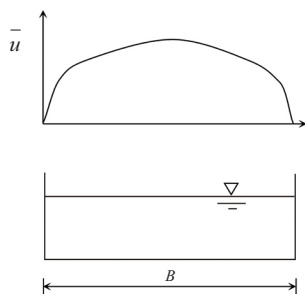


图2 矩形断面垂线流速分布图

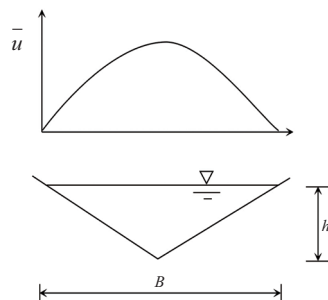


图3 三角形断面垂线流速分布图

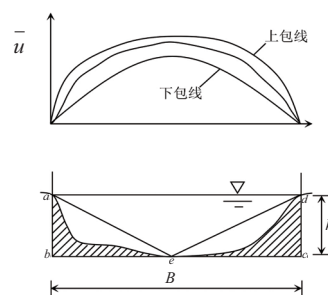


图4 三种断面垂线流速分布重叠图

把以上三个断面和流速分布图重叠在同一坐标图上, 如图4, 图中垂线流速沿断面宽的分布规律中上包线为矩形断面的, 下包线为三角形断面的, 中间为不规则断面的。分析图中不规则断面垂线流速沿断面宽变化的原因, 可以发现, 主要是由于三角形与矩形断面之间所夹的不过水面积的变化(图4中 abe 、 ecd 阴影部分)造成的。因此, 可根据矩形断面内与三角形断面内的流速差和两种断面中所夹不过水断面面积两要素, 用比例分成的方法内插垂 i 的流速。流速公式为:

$$V_{\text{垂}} = \frac{V_{\text{垂}(l)} + V_{\text{垂}(r)}}{2} \quad (1)$$

$$V_{\text{垂}(l)} = V_{\text{矩}(l)} - (V_{\text{矩}(l)} - V_{\text{三角}(l)}) \frac{f_{(l)}}{F_{(l)}} \quad (2)$$

$$V_{\text{垂}(r)} = V_{\text{矩}(r)} - (V_{\text{矩}(r)} - V_{\text{三角}(r)}) \frac{f_{(r)}}{F_{(r)}} \quad (3)$$

$$V_{\text{矩}(l)} = \frac{\alpha}{n} R_{\text{矩}(l)}^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$V_{\text{矩}(r)} = \frac{\alpha}{n} R_{\text{矩}(r)}^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$V_{\text{三角形}(l)} = \frac{\beta}{n} R_{\text{三角形}(l)}^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$V_{\text{三角形}(r)} = \frac{\beta}{n} R_{\text{三角形}(r)}^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中:

f_{al} 、 f_{ar} — 垂线 i 之左、右夹在矩形与三角形断面之间的不过水面积;

F_{al} 、 F_{ar} — 垂线 i 之左、右的矩形与三角形的面积差;

$V_{\text{矩}}$ — 矩形断面内垂线之左(右)断面平均流速;

$V_{\text{三角形}}$ — 三角形断面内垂线之左(右)垂线流速;

S — 比降;

N — 糙率;

R — 水力半径;

α 、 β — 与矩形、三角形断面的垂线流速改正系数。

1.3 能坡参数计算方法

根据河段和断面资料划分出断面的分块糙率, 用上述方法计算出第 i 条垂线流速 V'_i 。用第 i 条实测流速 V_i 作为已知的条件, 则能坡参数计算可用垂线流速逆运算法求得。如图 5, 当断面设有 2 条实测流速垂线时, 可求得 2 个能坡参数值, 左边垂线至左岸各垂线流速计算采用左垂线的能坡参数值计算, 中间部分垂线采用左、右两垂线能坡参数的差值按线性内插法计算各垂线流速, 右垂线至右岸之间垂线采用右垂线能坡参数计算各垂线流速。

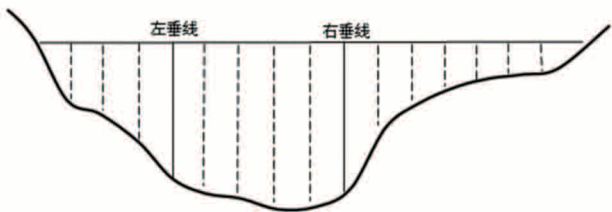


图5 垂线分布示意图

1.4 声学多普勒测速原理

水中存在着浮游生物、悬沙等声波散射体。声学多普勒流速测量^[3-4]是建立在平稳随机过程基础之上的, 即首先认为在水中漂浮的微小浮游生物、悬沙是和水流融为一体的, 它们的速度大小即代表了水流的速度大小, 它们前进的方向就是水

流的方向。在此前提下, 主动超声波发射器首先向水体中发射超声波, 当声波在水中传播时, 遇到散射体后将有部分能量透射过去, 继续沿着声波传播方向传播; 同时也有另外一部分能量将向四周散射, 其中的一部分将返回到接收器中。当散射体和换能器存在相对运动时, 换能器接收到的回波信号的频率和发射时的声波频率是不同的, 这个差别就是多普勒频偏, 根据这个频偏就可以计算出散射体的速度。

当声源和接收器静止, 反射体以速度 v_r 运动时:

$$\Delta f = \pm \frac{2v_r}{c} f_s \quad (8)$$

式中:

Δf — 声源处发出的和返回的声波频率差, 也就是多普勒频偏;

f_s — 声源信号的频率;

c — 超声波在水中的传播速度, 当反射体远离声源处时, 取“+”号, 反之取“-”号。

当反射体的运动方向和声波传播的方向互相垂直时, 接收到的回波不存在多普勒频偏。 f_s 、 c 均是已知量, 只要测量出频偏 Δf 即可反算出水体的速度 v_r 。

1.5 ADCP 安装及测流方法

2 台声学多普勒流速流量剖面仪 (ADCP) 分别安装在距离两岸 20% ~ 30% 的位置。数据线和电源线要沿着河堤, 向两岸方向铺设, 不可直接拉向一边, 以免影响船只通行。放置 ADCP 的地方要设置浮标, 提醒过往船只尽量沿中央河道行走, 避免损坏 ADCP 或电缆。上位机和数据库放在河岸边的站房内, 其中一台 ADCP 的数据可以直接传到上位机并存入数据库中, 另一台的数据通过无线收发机传输。ADCP 放置在河底, 超声探头要有一定倾斜度, 推荐与垂线成 20° ~ 45°; 逆流、顺流均可以, 但不能竖直放置, 否则因超声传播方向与水流方向垂直, 测不出多普勒效应。测量时, 由上位机通过串口给 ADCP 发送命令, ADCP 在 3 ~ 5 s 内可将探头方向各测量点 (每 20 ~ 25 cm 设置 1 个点) 的流速返回给上位机, 并存入数据库中。这些点的流速很容易转换为垂线方向各点的流速。在测量了左右 ADCP 所在位置垂线上的流速后, 用能坡法反推其余垂线上流速, 进而可算出断面的流速、流量。

2 小许庄水文站概况

小许庄水文站位于淮河流域沐河水系临洪河上游干流黄泥河上,站址位于江苏省东海县房山镇尚仁村。1956年7月1日,由治淮委员会设立为汛期水文站。该站为临洪河上游干流黄泥河径流控制站、省级重要水文站,也是地方防汛调度的重要报讯站。由于该站位于江水北调入连云港市的枢纽工程下游,因此又是外引水进入市区的上游控制站。

小许庄测验河段顺直段长度约1000 m,总宽176 m,主槽宽60 m。河底为砂礓及粘土河床,河岸为粘土,河道没有严重冲淤变化,河床基本稳定(如图6)。断面为复式河床,左右岸有陡坎,水位超过2.72 m左右开始漫滩,两岸滩地宽共90 m,滩地为杂草。测验河段为航运河道,有船只通过。

根据水文站上下游河段条件分析,水文缆道测流断面至下游45 m范围内河段基本满足自动流量监测要求。

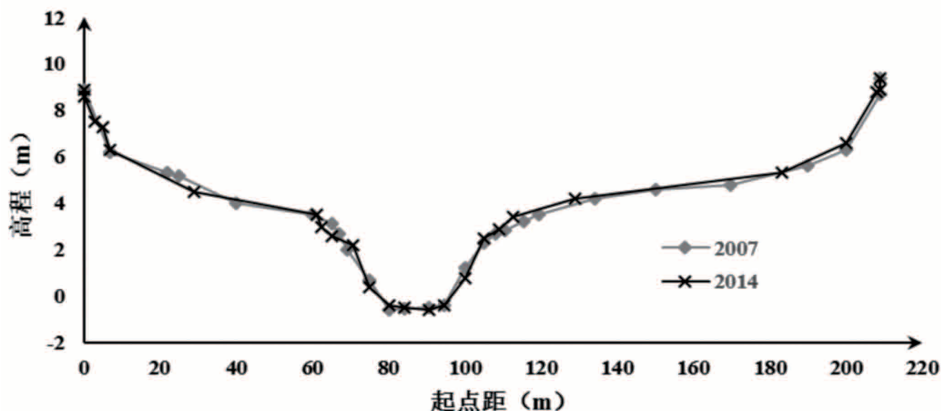


图6 2007年与2014年实测大断面对比图

3 自动测流系统设计

3.1 水位信息采集系统

采用成熟的信号分隔技术,与小许庄水文站现有的遥测水位集成,保证自动流量水位与遥测水位一致。

3.2 流速信息采集系统

系统包括水下设备安装、水下布线、岸上布线、岸上仪表安装调试、太阳能设备安装、沉浮控制装置、GPRS模块安装配置等。水下传感器将水下监测的流速信息通过信号电缆实时传输至岸上仪表。仪表将采集到的水位与流速数据通过GPRS模块上传至服务器。

3.3 接收数据与流量数据计算软件

此系统安装在信息中心服务器上。接收程序负责接收监测端仪表通过GPRS模块传来的数据信息,同时将上传的数据解码成水位与点流速并入库。流量数据计算软件根据上传的水位、点流速等数据结合大断面信息计算出垂线流速,再用二线能坡模型计算出断面流量,并存入数据库。系统每5分钟完成1次数据采集与流量计算。

3.4 网页查询系统

开发基于WEB技术的网页查询系统,可以查询水位、流量数据,可以查询系统运行状态,包括水深、电压等,可以计算任意时间段的水量,拥有用户权限管理功能。数据以表格、过程线等多种方式展示,并提供数据下载功能。

3.5 后台管理系统

开发基于WEB技术的后台管理系统,可以对数据进行管理,可录入人工实测流量,并将自动流量数据与人工实测数据进行对比分析,进行误差统计,还可查看水深、电压、角度、垂线流速、点流

速等多种系统状态信息。

4 应用成果与分析

4.1 实时查询

示例1:系统可以查询实时水位、流量数据、系统运行状态(包括水深、电压等)等,数据以表格、过程线等多种方式展示,并提供数据下载功能,见图7。

从流量过程线可以看出,自动流量测量结果不是很平缓,存在比较大的跳变现象。原因在于:(1)水流脉动和水中漂浮物的影响。根据ADCP的测量原理,它在测量时将水流在垂直方向上分成很多的深度单元,1台ADCP相当于多台的单点流速仪,

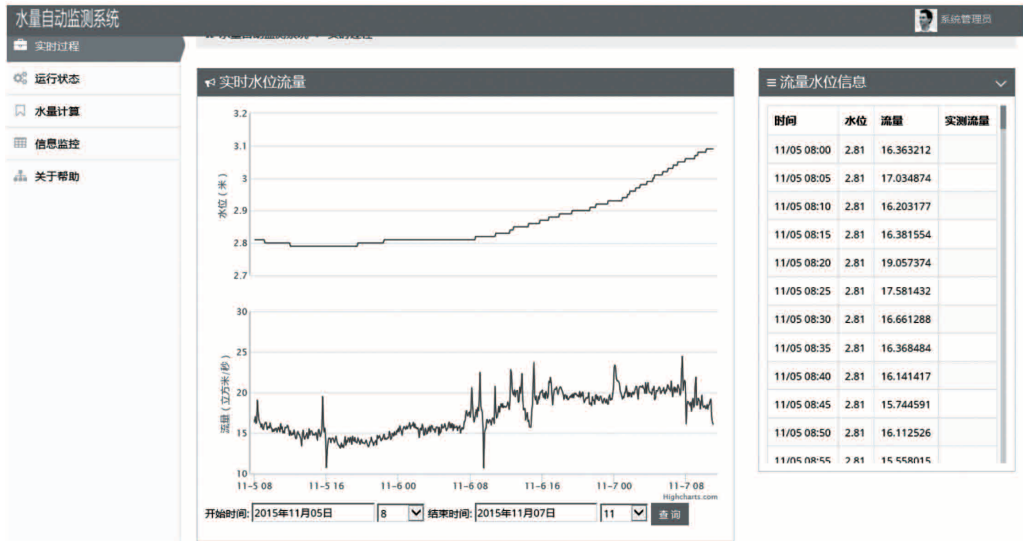


图 7 网页实时在线查询页面

灵敏度也比传统流速仪高, 因此水流的脉动 (如湍流、漩涡) 或漂浮物对 ADCP 的影响较流速仪大。(2) 测量时长的影响。传统旋杯式流速仪测量整个断面流量需要几分钟的时间, 所得流速实际是这个较长时间段内的平均值; 而基于能坡法的自动测流系统, 测量 1 次只需 2 ~ 3 s 时间, 是流速的瞬时值, 水流的瞬时状态对测量结果影响较大。

示例 2: 系统还可以根据选择时间段, 自动计算出水量, 见图 8。在 2015 年 11 月 07 日 08 时至 2015 年 11 月 12 日 08 时时段内, 通过选择 2015 年 11 月 00 日 11:06:11 至 2015 年 11 月 12 日 10 时 12:52:14 时段, 自动计算出水量为 291 万 m³。

4.2 后台管理

后台管理软件可以进行自动流量数据的维护管理、人工实测流量的录入、误差分析统计, 可以查看水深、电压、角度、垂线流速、点流速等多种系统状态信息。

示例: 选择“误差统计”项, 见图 9, 再选择 2015 年 10 月 28 日 06 时至 2015 年 11 月 30 日 16 时时段, 系统就可以将自动流量数据与人工实测的 37 组数据进行对比并分析误差。页面左侧为自动流量数据与人工实测数据误差数值统计表, 页面右侧为自动流量 ~ 流速人工实测流量相关图, 若自动测流系统所得数据大于人工测量的流量数, 则点落在 45° 斜线上方; 反之, 若自动流量测量系统所得数据小于人工测量的流量数, 则点落在 45° 斜线下方; 若两者相等, 示意点正好落在斜线上, 表示结果很理想。由图 9 可知, 该流量系列相关性较好。

从表 1 的统计结果可以看出, 以传统螺旋桨式流速仪测得流速为标准值, ADCP 测速误差在 5% 以内的合格率分别为 62.4%, 在 10% 以内的合格率分别为 91.4%。故认为, 比测成果比较合理可靠, 但还需要进一步改善。

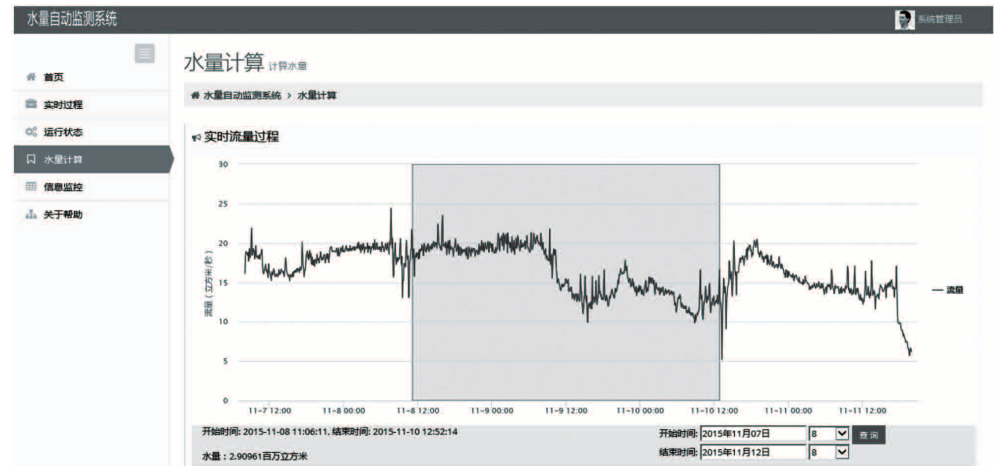


图 8 水量自动计算页面

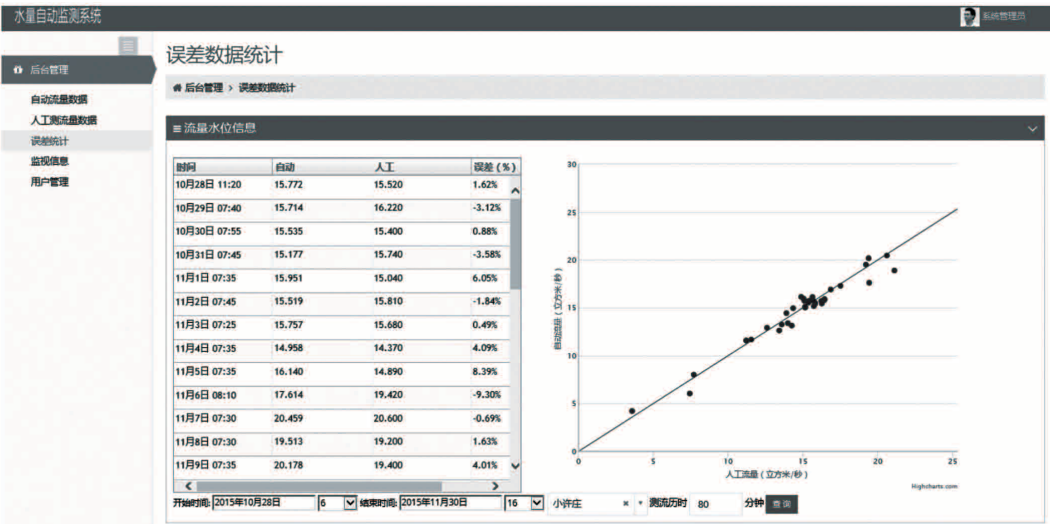


图 9 误差数据统计页面

表 1 误差级别统计表

级别	≤3%	≤5%	≤8%	≤10%	> 10%
百分比	33.2	62.4	83.9	91.4	8.6

5 结语

二线能坡法测流在现有的流量测验方法中,是比较先进的流量测验方法。通过在小许庄水文站应用,该方法具有速度快、实时在线、无人值守、误差较小的优点,但有时测量结果波动性较大,有待进一步研究和改善。在需要快速、自动测量流量或河底形状复杂的地方,可考虑使用此系统,为防汛抗旱、区域调水和水资源管理提供决策依据。

参考文献:

[1] 刘晓凤,丛丽君.能坡法流量计算在水文在线测流系统的应用研究[J].气象水文海洋仪器,2010(2):7-11.

[2] 梁厚军,刘小虎,蔡国成,等.二垂线式 ADCP 流量测量系统[J].水利信息化,2013(4):26-29.

[3] 韩继伟,符伟杰,唐跃平,等.ADCP 流量生成模型及相应计算方法研究[J].水文,2014,34(6):9-13.

[4] 黄勇强.ADCP 流速仪在三水水文站的比测试验[J].广东水利水电,2011(2):43-45. (责任编辑:徐丽娜)