

能坡法流量计算在水文在线测流系统的应用研究

刘晓凤, 丛丽君

(黑龙江省水文局, 哈尔滨 150001)

摘要: 通过石头水文站使用能坡法流量计算在水文在线测流系统的应用研究, 总结、寻找出一种实时性强、测验精度又高的在线测流方法, 从而为受人类活动影响较大的测站提供一种高效、快速的水文测验新方法。

关键词: 能坡法流量计算; 在线测验; 受人类活动影响

中图分类号: P33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-009X(2010)02-0007-05

Application and research of flow calculation with energy gradient in the system of hydrological on-line flow measurement

Liu Xiaofeng, Cong Lijun

(Heilongjiang Hydrological Bureau, Harbin 150001)

Abstract: Based on the application and research of flow calculation with energy gradient in the system of hydrological on-line flow measurement at Shitou hydrological station, this paper summarizes and finds out the method of on-line flow measurement, which processes the features of strong real time and high precision. The effective, rapid and new hydrological test method is provided for the stations that easily impacted by human activity.

Key words: flow calculation with energy gradient; on-line test; impacted by human activity

0 引言

水文测验主要是采集天然状态下的水文要素变化, 测站一旦受到人类活动的影响, 就需要迁移断面, 或设立辅助断面, 或采用加密测次等办法进行补救。但是, 随着人类社会的进步和发展, 受到工程影响的水文测站点也越来越多, 为了寻求一种既简单又能保证测验精度的方法, 我们从 2007 年开始在黑龙江省内, 对受人类活动影响很大的石头水文站开展了在线测流实验研究。

石头水文站建于 1955 年 7 月, 位于黑龙江省宁安市石岩镇, 集水面积 13 771 km²。石头水文站以上流域内有大型水库 1 座(镜泊湖), 中型水库 1 座(小石河), 小型水库 4 座。在基上 500 m

处有一座水电站即石岩电站, 对该站正常水文测验影响非常严重。

本断面的来水主要受上游电站发电、泄洪的控制。通过本断面的流量与电站的机组出力和泄洪闸的运行情况基本一致, 具有日际变化频繁的特点。

1 系统的研究

为了提高石头水文站水文信息采集的时效性和资料收集的精度, 有关技术人员在测验整偏上作了大量的工作, 均因影响水流变化因素的复杂多变, 未取得令人满意的结果。

为此, 我们摆脱了传统水文测验的束缚, 采用目前国内最前沿的两线能坡法水文测验技术, 在

收稿日期: 2010-02-26.

作者简介: 刘晓凤(1970-), 女, 大学, 高级工程师. 现从事水文测报工作.

最基础的水文测报领域中取得了突破,建设了石头站在线测流系统。本系统从建设到运行历经可行性研究、比测验证、在线试验、系统试运行4个阶段。试验采用了我省牡丹江电子仪器厂生产的电磁流速仪,经过一个半汛期的野外测试,共取得了155 d, 2 184测次实测资料,获取了成功的结果和试验经验,将两线能坡法流量计算模型应用到实际工作中。

1.1 系统组成及主要功能

1.1.1 系统组成

在测流断面上架设一条渡河索,将两条浮船固定在渡河索选定的垂线处(即起距点76 m和123 m处,与原固定垂线重合),电磁流速仪安装在船体上,入水深度为20 cm,数据通讯机、蓄电池等放置在船体内,组成垂线流速信息采集、传输系统;岸上部分为信息接收、计算机监视和两线能坡法流量计算软件系统组成。

主要硬件设备有2台电磁流速仪和船体、数据通讯机、系统监控计算机、电源(太阳能、蓄电池)等。

1.1.2 工作流程

根据设定,每小时测1次或召测指令自动监测仪在规定的时间内或实时召测指令通过电台,向架设在浮船上的控制箱发出测速指令,控制箱根据指令利用2台电磁流速仪,分别采集断面上固定两条垂线上的测点实时流速,把流速数据发回到监测仪上保存起来。数据保存后监测仪根据用户的设定和操作,可将数据存储并通过通讯机转发到测站的监控计算机中保存,流量实时在线系统软件自动读取流速数据,进行流量计算(两线能坡法流量计算模型),并形成资料整编成果和流量过程线,利用计算机进行打印或显示。

1.1.3 系统功能

系统主要功能有以下几个方面:

(1) 实时流速采集、存贮。系统将2台电磁流速仪检测到的两条垂线水面流速和一体化设备中的水位信息保存到监测仪的存贮器中,作为原始资料保存,以方便用户今后下载。

(2) 根据水位流速信息自动计算实时流量,并显示流量过程线。两线能坡法流量实时在线监测系统软件,根据本系统自动检测到的流速信息,测报一体化设备采集到的水位信息,测站实测的大断面资料,利用两线能坡法流量模型计算出流量,并生成流量成果及过程线。

(3) 支持测站现场下载和中心站远程下载。保存在监测仪的存贮器中流速、水位数据可在测站和中心站通过有线方式实现现场和远程下载。

(4) 具有测站现场实时召测功能。在定时自报的基础上,为了便于用户随时掌握流量信息,可利用系统提供的召测功能,在测站随时召测实时流量。从指令的发出到获得流量信息只需3~5 min。

(5) 还可根据人工输入的水位、流速信息,计算出相应流量。本系统也可使没有实现流速、水位采集自动化的测站使用,可以直接用人工观测(自记)水位和流速仪采集的流速信息,利用两线能坡法流量模型计算出流量,拓展了本系统的功能。

(6) 测站可在现场完成对系统的维护、监视、修改、设置等工作。

1.2 系统运用价值

本系统通过实际运用2台电磁流速仪工作正常,获取流速数据基本准确;数据传输稳定可靠,满足实际工作需要;系统软件功能比较完善,达到了原设计要求。通过实时在线流量与68次实测(流速仪多垂线“流速~面积”法)流量比较,满足现行规范的要求。整个系统达到了技术先进、成果准确、运行稳定、方便实用的目的。

本系统的投入运行将在以下几方面体现它在实际工作中的运用价值:

(1) 可以大幅度提高水文站监测能力。

(2) 可以缩短测流历时,提高水情信息的时效性。做到流量实时在线。

(3) 为水文站实现自动化和半自动化测流提供了可以借鉴的经验。

(4) 可以及时地提供准确的流量数据,为水情预报、防洪调度、科学决策提供可靠的依据和迅捷的信息。

(5) 无须专人值守,可以节约人力、物力、财力,降低测流的运行成本,提高工作效率。

(6) 可极大地提高行业信息化水平,解决长期困扰水文流量测次严重不足,流量变化过程控制不好,资料收集质量不高的问题。探讨解决受水利工程影响河流流量规律的研究。

2 电磁流速仪

2.1 电磁流速仪的结构组成

电磁流速仪可根据使用环境的不同选用不同类型产品,它包含水上仪器及水下仪器两部分,同时具有测深功能和水下数据传输功能。

2.2 电磁流速仪的基本原理

其原理基于法拉第电磁感应定律: 一定导电性待测液体以速度 V 流动, 切割磁场 B 的磁力线而产生感应电动势 E , 此电动势经电极输出, 其值为: $E = KBLV$ 。

其中: E 为感应电动势; L 为电极间距; B 为磁感应强; V 为液体流速; K 为与传感器相关的系数。可见流速 V 与感应电动势 E 的大小成正比。

2.2.1 数据采集部分

由单片机产生的方波信号经电路变换形成三角波信号, 此信号作为激磁控制信号为测速传感器提供激磁; 由电极产生的速度电势经放大送至采样保持电路, 采样保持电路在单片机采样脉冲控制下适时采样、求和、放大后送至单片机进行 A/D 变换及流体力学修正, 最后与采集的水深数据及用于铅鱼控制的水面、河底信号进行数据整编后, 经调制放大由悬吊铅鱼的钢索传送到接收装置。

2.2.2 数据传输部分

采用起吊铅鱼的钢丝绳(不用电缆)在水中信号传送是目前水下数据传输的重大突破。经过长期的研究与实践, 其在信号传送机制、编码方式、波特率选择、跳频模式、多阶滤波技术和识别判断等方面均取得了最佳传输模式和方案。

信号传输部分的工作原理是采用电流制拾取信号。这种电流制的信号传输系统, 其显著优点是灵敏度极高, 一般不必设置水面极板。与传统电压制信号传输系统相比较, 对缆道接地电阻值也没有额外的不合理要求, 因此不降低缆道的防雷性能。

2.3 电磁流速仪的性能特点

该仪器在两个方面有重大创新: 一是电磁感应传感探头采用了磁路高密分布与四电极配置以及电极与走线工艺的优化设计, 提高了灵敏度, 增强了抗干扰性, 实现了水下微伏弱信号提取技术上的重大突破, 解决了流态多变的江河测速的首要难题; 二是实现单根钢丝绳(无电缆)的水下信号传输, 在水下信号传输技术上获得了重大创新, 为时实传送数据和自动连续监测提供了技术支撑。而且测速范围比国外同类仪器提高 1 倍多。

2.3.1 仪器主要技术指标

测速范围: 0.05~ 10.00 m/s;

测速误差: [(测量值的 ±1%) ±1] cm/s;

平均测流历时: (积点法) 0~ 2 000 s 范围内任选。

2.3.2 现场应用

电磁流速仪在牡丹江水文站共施测流量 90 多次, 最高水位 227.65 m, 流量 2 230 m³/s, 最大流速 2.23 m/s, 最大水深 6 m。流量比测系统误差为 -0.46%, 小于 1%; 累计频率 75% 的误差为 3.5%, 小于 5%。

2.3.3 国内外情况对比

电磁测速技术主要应用于传统流速仪不便测量的场合, 如: 严重污染或泥沼严重的地方和河岸的边缘区域。主要指标如下:

测速范围: 0.000~ 2.5 m/s;

准确度: 1%;

零漂: ±2 cm/s;

输出: RS-232C 接口;

信号电缆最大长度: 100 m。

ALE 公司的 Acn-8 MS 电磁流速仪和 Yokogawa Weathe 公司的电磁流速仪, 主要应用于海洋测速, 测速范围: 0~ 250 cm/s; 准确度: ±2%; 分辨力: 0.1 cm/s。目前国外电磁流速仪仍然是便携式单一功能的, 只测速度一项指标, 水下信号传输还是采用信号电缆, 只能应用于江河岸边, 浅水河及流速低的场合, 对于大江、大河的监测却很难派上用场。近几年我国有少量进口, 但由于使用范围的限制, 很少有使用场合。

在国内, 目前电磁流速仪在水文界尚无正式产品应用, 对电磁测速技术的成功研究也未见详细报道。

在美国等国家推出的声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 虽然技术比较先进, 但是使用时要求含沙量比较低, 且河床比较规整的河道, 不能完全适应我国水文观测的需要。我们依托专业公司研制开发的电磁测速技术, 是在借鉴国外电磁测速技术的基础上, 为了适应我国的各种复杂水系, 而开辟的一个新的技术领域, 从根本上解决测速、数据传输 2 大难题。

2.4 电磁流速仪的比测检定

为了开展好试验工作, 我们首先对电磁流速仪进行了在站试验前的比测检验工作, 系统误差均小于 2%, 满足规范要求, 详见表 1。

表 1 流速比测

测点 数	流速范围 m/s	偏差 ≤ ±3% 测点数	偏差 ≤ ±5% 测点数	平均偏 差%	系统偏 差%
40	0.28~ 0.71	36	37	1.69	1.69

试验日期: 2008-08-26

3 “能坡法”流量模型

3.1 基本思路和方法

能坡法是利用断面上实测垂线流速,反算河流量能量坡度,找出能坡参数的比降与糙率关系,建立模型公式,实现河流流量计算。

3.1.1 基本思路

本方法以曼宁公式为基础,以推理加实验的方法,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;并以二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,并能解决非恒定、非均匀流条件下流量计算问题。

3.1.2 方法

(1) 断面分解方法

在理想的矩形断面中任意垂线将断面一分为二,垂线左、右两部分断面平均流速的均值乘以改正系数 α ,得该垂线流速。对垂线流速沿断面宽积分,即得流量。此即断面分解,一分为二,先分后合的3个步骤。

先把三角形分解出若干条垂线,并置各垂线于水面宽等于实际水面宽,水深等于各垂线水深,流态、比降、糙率与三角形水槽相同的若干个矩形水槽中。按照断面分解,一分为二,先分后合的方法通过关系转换的手段,得到三角形断面内垂线流速公式。

(2) 不规则断面的处理—计算垂线流速

即在计算垂线流速的过程中,不规则断面可得到相应的处理。将需要计算流速的垂线置于水深等于该垂线水深、水面宽等于相应水位下水面宽的虚拟矩形、三角形断面中,分别求出垂线在两种虚拟断面中的流速,根据两虚拟断面中平均流速之差与夹在两虚拟断面中的不过水部分的面积占两种虚拟断面面积差的比重,用“比例分法”求出垂线的实际流速,然后以所求得各垂线流速,用“流速—面积法”计算流量方法求出全断面流量。

(3) 糙率分解

糙率分解:先分解、后综合。

天然河道中河床及边壁大都是非均质的,是由多种河床质组成的,影响糙率的因素大体上可

分为3种:第一种是河床及边壁的性质和粗糙程度,第二种是与断面形状有关的因素,第三种是与河道沿程变化有关的因素。其中第二种因素可通过计算垂线流速的方法加以考虑,第三种因素,用反求能坡的方法解决。所谓糙率分解,即将断面中不同河床质根据实际分布宽度划分开,分别根据其性质确实糙率。再以他们各自对应的过水面积为权重,加权平均求出平均糙率,根据垂线所在位置糙率,加上其左、右两边高、低糙率之间通过水流梯度力产生的影响,最后用推理加实验的方法得出糙率公式。

(4) 实测2线流速反求能坡参数

天然河道中,严格讲来,水流性质大都属非均匀流。因此,用实测2线垂线流速反求能坡参数的比降、糙率关系。

3.2 能坡法流量模型验证

3.2.1 验证资料

验证资料均选用流速仪实测资料,验证过程中未进行任何改正、内插和整理。资料年份大多是60、80和90年代的,垂线流速为2、3点法和0.6h1点法。水面1点法较少。除乌江鸭池河站1965年的流量资料均是精测法外,其它各站精测法资料极少。大断面为借用断面资料,总体上资料质量较好。

3.2.2 验证站况

在验证中,共选取34个水文测站,流域面积自316~1488036 km²不等,流量总测次1471次,测速垂线总数14751条,测流水位变幅1.04~21.1 m,最大流量307~46300 m³/s,最小流量8.3~7110 m³/s,流量变幅220~4200 m³/s,最大垂线流速1.58~4.93 m/s,最小垂线流速0.04~1.36 m/s,垂线平均变幅0.66~4.39 m/s。验证选用站不仅包括各种河段水流类型,而且既有大河控制站,又有区域代表站,因此资料具有较好的代表性。

3.2.3 验证方法

从测流断面中选一条垂线,用该垂线实测的平均流速作已知条件反求能坡,使得能坡计算的该垂线流速和对应实测垂线流速相等,以此能坡作为断面上的能坡计算其它垂线流速,最后用流速—面积法求出断面流速。验证的具体步骤如下:

3.2.3.1 确定分块糙率

采用第1、2测的实测资料通过计算机按一定步长在预设的横断面上各分块糙率,直到参加率

定各测次中垂线流速计算值与实测拟合最佳。

(1) 根据河床质沿横断面的实际分布, 按糙率表初拟其值。在河床质不确定时, 可依照糙率两岸边大、中间小的原则拟值。糙率分块数可参考断面变化和垂线分布初定。

(2) 确定分块糙率: 采用第 1, 2 测次的实测资料使其计算垂线流速与实测垂线流速误差控制在岸边 ±10%, 中泓部分为 ±5% 左右, 相对误差的正负偏差沿横断面分布基本均匀; 断面平均流速计算值与实测值误差控制在 ±5% 之内; 系统误差 ±1.0%。

3.2.3.2 确定反求能坡的垂线

根据以上参加率定 1~2 个流量测次垂线流速计算值与实测值拟合精度, 从中泓附近选择 2 条稳定性好的垂线。所选垂线计算流速与实测流速误差和断面平均流速误差的正、负偏差一致, 且两误差数值在 ±5% 以内。

3.2.3.3 验证计算

(1) 反求能坡, 参数输入率定好的糙率, 所需验证的全部测次及相应的实测比降或假定比降 S' , 计算出第 i 条垂线流速 V'_i 。用第 i 条实测流速 V_i 作为已知条件, 代入反求能坡公式 $S = (\frac{V_i}{V'_i})^2 \cdot S'^{1/2}$, 求得各测次的两条垂线能坡参数。

(2) 输入各测次反求的能坡参数, 计算得出断面流量以及各项误差统计值。上述各项计算全部由计算机完成。

3.2.3.4 验证结果

验证总测次 1 471 次, 计算的 35 站中, 标准差在 1.8%~8.0% 之间, 不确定度在 3.6%~16.0% 之间, 系统误差在 0.0%~2.1% 之间, 最大相对误差在 -27.7%~21.2% 之间, 详见表 2。

验证结果表明: 中泓基本稳定, 断面冲淤变化不大, 垂线流速沿横断面分布规律较好的测站, 其

模型精度较高。但断面有冲淤, 尤其是水流变化对垂线流速横向分布影响显著的站, 其模型精度不够理想, 如鲁台子、白河等站。

表 2 各站能坡法模型验证误差统计表

站名	总测次	系统误差 (%)	标准差 (%)	最大相对误差 (%)
长潭河	27	-0.9	4.6	-10.2

原始资料带有偶然性误差或错误, 对验证精度有不利影响。另外, 不同质量的资料, 其验证精度也有差别。其所选择的 2 条垂线流速资料测验精度高的测次, 计算的精度高, 反之, 其他垂线精度高而选用的垂线精度不高, 则直接影响模型精度, 一般通过流速横向分布均可看出。

3.3 模型计算流量与实测流量误差分析

为了检验“能坡法”流量模型在石头水文站的适用性, 选用了 2002—2009 年 8 a 汛期的共 68 次实测流量资料和 2008-09-25—2008-10-18, 2009-06-05—2009-10-18 共计 155 d, 2 184 次实测资料中同水位级模型计算流量进行对比分析, 取得了令人满意的效果。通过与“能坡法”模型计算流量比较, 模型计算流量标准差为 0.178%, 系统误差为 -2.55%, 规范允许值为 ±2%; 标准差为 0.22, 规范允许值为 12.0%~16.0%。由于本站水流规律复杂, 经批准本站流量一般按三类精度控制定线, 也就是综合不确定度不超过 16.0%。因此“能坡法”流量计算模型完全适用于石头水文站, 检验后的各项误差指标均在规范允许范围之内。

为了进一步检验能坡法流量实时在线监测系统所收集资料的精度, 又提取了 7 次同步比测资料分析计, 这段时间内, 水位变幅范围从 91.11~92.49 m, 流量变化范围由 239~22.1 m³/s, 如表 3 所示。

表 3 2 线能坡法与常规流速仪法对照表

2 线能坡法模型				常规流速仪法			绝对误差	相对误差	P ²
日期	时间	水位	流量	时间	水位	流量			
2009-06-25	09:00	92.18	186	09:42-10:24	92.19	165	21	12.73	0.0162
2009-07-14	12:00	92.28	206	09:12-10:18	92.29	193	13	6.74	0.0045
2009-08-05	09:00	92.30	182	09:06-10:12	92.28	184	-2	-1.09	0.0001
2009-08-20	07:00	92.49	267	05:48-07:00	92.48	244	23	9.43	0.0089
2009-09-24	09:00	91.64	57	09:24-10:18	91.64	58.9	-1.9	-3.23	0.0010
2009-10-15	11:00	91.62	22.5	10:00-11:00	91.63	55.5	-33	-59.46	0.3535
2009-09-27	11:00	91.59	45.4	10:42-11:36	91.58	52.0	-6.6	-12.69	0.0161
平均误差							1.93	-6.80	0.0572
标准差	0.2830								

(下转第 14 页)

前题下, 检定点温度区间的端点温度。编写检定证书时, 按以上(1) —(8) 式的步骤进行, 计算方向由低温到高温, 计算精度取小数点一位, 检定证书可打印输出。

(2) 模块 6 针对气象用水银气压表检定数据处理及检定证书打印等。

水银气压表检定分动槽和定槽两个子块, 检定技术要求有所不同, 模块中分别给出, 以便检定人员查寻和进行外观检查。示值检定栏目中, 给出定槽水银气压表刻度检定, 比较检定及其记录整理, 动槽水银气压表的比较检定及其记录整理, 最后是检定证书打印。

(3) 模块 7 空盒气压计检定数据处理及检定证书打印。该模块共有 4 个子块, 即技术要求、温度系数测定, 示值检定及处理和检定证书打印。示值检定的检定点分两种, 通常为 1 050, 1 030, 1 010, 990, 960 hPa 5 点, 对使用中或修理后的气压计, 只进行 1 050, 1 010, 960 hPa 3 点检定。检定方向先由高到低, 再由低升高。其检定的数据处理与温度表有些类似, 这里不再详述。

(4) 模块 8 为通风干湿表, 毛发湿度计, 轻便风速表等仪表的检定处理和检定证书的打印, 输入相参数, 由计算机判断是否合格, 然后显示打印。

3 结束语

河南省气象计量检定业务管理系统投入计量检定主要有以下 3 个主要特点:

(1) 本系统结合本省实际情况, 把省级气象计量检定所进行的主要的仪器管理和常规的检定业务纳入计算机处理, 是功能比较齐全的一项应用软件系统。

(2) 系统的菜单设计和提示清晰醒目, 操作说明简练、清楚, 一般业务人员根据简要说明即可顺利操作。

(3) 系统运行过程主要采用屏幕提示、选项操作, 以保证我所检测数据的准确可靠。通过对河南省气象计量检定业务管理系统的应用不但能提高工作效率和工作质量, 对检定所质量活动持续改进具有深远影响。

(上接第 11 页)

从表中可以看出该系统收集资料精度较为可靠, 相对而言流速仪法在这种复杂水流条件下的流量测验受到了很大的局限, 有时精度难以得到保证。而 2 线能坡法各项技术指标完全符合规范规定的精度, 对石头站流量整体精度产生显著性提高。“在线监测系统”采样周期最小可达 5 min, 因此可以较好控制流量过程的变化规律。

4 结束语

能坡法流量实时在线系统突破了传统的思维模式, 是流量测验领域的一次革新。实现了流速信息的自动测报、远程下载和实时召测; 首次将能坡法流量模型运用在实际工作中, 使测速垂线减少, 测流历时缩短, 运行成本降低, 取得了良好的

效果。它的投入使用是水文信息化建设中取得的一项重要成果, 必将为水文现代化建设起到积极的推动作用。

本系统功能齐全、设计科学、方法合理、成果可靠, 满足规范及有关技术标准的要求。界面友好、操作简单、使用方便、运行快捷, 便于在基层测站推广使用, 有效地解决了受水利工程影响的河流流量测验问题。

实现流量在线, 在国内尚处于起步阶段, 本系统建成的时间很短, 在今后的运行过程中还会遇到一些问题, 我们将在系统的适应性、设备的稳定性及应对河流漂浮物等方面继续努力, 对系统进行不断的优化和扩展, 使系统功能更完善, 适用性更强, 运行更可靠。