

望亭枢纽浮漂安装 ADCP 在线流量比测分析

孔令启¹, 陆建伟², 任晓东²

(1. 江苏省水土保持生态环境监测总站, 江苏 南京 210012; 2. 江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 江苏 苏州 215000)

摘要:河道 ADCP 垂线法在线流量测验性能稳定, 流量数据精度高, 得到广泛使用。采用座底安装 ADCP 方式, 水下安装强调安装稳固, 严格朝向河道主流方向, 深水时需要专业的潜水人员, 施工成本高。改进为浮漂体安装, ADCP 流速传感器、无线传输设备及电源都安置在航标灯式浮漂体上, 安装、维修时拆装可快速完成, 适应地处复杂的感潮、河口、航运、船闸、分水及大型抽水站的在线测流。望亭枢纽的排洪期及引水期在线测量比测成功表明, 双垂线法浮漂 ADCP 在线测流系统简单实用。

关键词:流量测验; 双向测流; 比测分析; 望亭枢纽

中图分类号: TV131.66

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)05-0052-0005

Online flow comparative analysis of ADCP for floating installation in Wangting Hub

KONG Lingqi¹, LU Jianwei², REN Xiaodong²

(1. Jiangsu Soil and Water Conservation Eco-environmental Monitoring Station, Nanjing 210012, China;
2. Suzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Suzhou 215000, China)

Abstract: Online flow measurement by ADCP vertical line method is widely used for its stable performance and high accuracy of flow data. At first, ADCP is installed at the bottom of the seat, and the underwater installation emphasized stable installation, strictly facing the mainstream of the river, and the construction cost is high when professional divers are needed in deep water. The installation of floating body is improved. ADCP velocity sensor, wireless transmission equipment and power supply are all placed on the beacon light floating body, and disassembly and assembly can be done quickly during installation and maintenance. It is suitable for the online flow measurement in complex tidal, estuary, shipping, ship lock, water diversion and large pumping stations. The success of online measurement and comparison in flood discharge period and diversion period of Wangting Hub shows that the online flow measurement system of floating ADCP with double vertical lines is simple and useful.

Key words: flow measurement; double vertical flow measurement; comparative analysis; Wangting junction

双垂线法浮漂 ADCP 在线测流系统, 由 ADCP 施测断面中泓两侧的 2 条垂线流速, 根据垂线流速计算模型, 计算出若干条垂线流速, 用部分流速面积法计算流量。这种推流方法不是代表垂线法, 其

核心是二线能坡法流量计算模型。搭建在线测流系统, 是在河道流量测验断面的浮漂体安装在线自动流量监测设备, 分别安装自动测报水位计、ADCP (多普勒流速仪)、供电、信号传输设备等, 有效实现

收稿日期: 2023-03-31

作者简介: 孔令启 (1986—), 男, 工程师, 本科, 主要从事水文自动测报方面的工作。E-mail: 1437581110@qq.com

了比较精准的水量在线监测。流量数据可直接传输到后台数据服务器,用户从信息平台的应用服务器查取在线测流系统的流量数据^[1-2]。

双垂线法(基于二线能坡原理)在线流量监测开始于2000年前后,开始采用座底安装 ADCP 方式,强调安装稳固,测流方向严格与河道主流方向一致,深水施工难度比较大,安装、运行、维护及修理需要专业的潜水人员,极不方便且费用高。此后研发浮体安装 ADCP 在水面上,流速传感器、无线传输设备及电源都安置在浮漂体上,ADCP 安装维修时拆装只需10 min 完成,极大方便了水文站的管理维护。浮漂体在水面上随水流摆动,模拟了流速仪和走航 ADCP 追随主流方向,使得流量测验更精准^[3-4]。

为了验证双垂线法浮体安装 ADCP 在线测流在不同类型测站的适用性,2019年在苏州望亭立交枢纽水文站进行比测,比测由水文站提供走航 ADCP 实测流量数据,与平台摘录的在线测验流量数据进行比较分析。

1 测站概况

望虞河南起太湖边沙墩口,流向东北,经锡山、吴县、常熟等城镇,在耿泾口入长江,总长60.8 km,具有防洪、除涝、引水、航运等综合功能。望虞河沿线地形平坦,西部为澄锡虞高地,地面高程多为4.5~5.5 m,局部沿河的湖荡地区地面高程为3.5~4.5 m,东部为阳澄区,地面高程在3.5 m左右,大部分为圩区。

望亭水利枢纽位于苏州市相城区望亭镇以西,望虞河与京杭大运河相交处,距望虞河入太湖口2.2 km,是太湖流域防洪和供水的主要控制工程之一。望亭水利枢纽为2级建筑物,采用“上槽下洞”立交布置形式。上部为钢筋混凝土矩形槽,槽宽60 m,底高程-1.7 m;下部为矩形涵洞,共9孔,每孔7 m×6.5 m(宽×高),洞底高程-9.6 m;在上游洞首处设9孔平面钢闸门,采用9台卷扬式启闭机。总过水面积400 m²,设计流量400 m³/s,其中2孔为发电厂常年供水。

望亭(立交)水文站位于望亭水利枢纽(立交闸)上游400 m,水文站上游200 m处建有月城河船闸,下游800 m大运河左岸处建有蠡河控制工程,其基本测流断面为规则的梯形断面,断面宽127 m左右,两岸均为浆砌驳岸。望亭(立交)水文站承担着引江济太和引水排涝的重要水文监测工作,为太湖

流域防汛抗旱调度提供水文数据,为水资源管理、地下水开发利用、生态环境保护、工程管理等提供数据信息。

2 双垂线法测流原理

双垂线法 ADCP 在线测流系统,由 ADCP 施测断面中泓两侧的2条垂线流速,根据垂线流速计算模型,计算出符合规范要求的若干条垂线流速,用部分流速面积法计算流量。这种推流方法不是代表垂线法,其核心是二线能坡法流量计算模型^[5-6]。

2.1 双垂线法流量计算模型主要参数

(1)曼宁公式

常用于明渠流量或速度经验公式,适用于均匀流,计算式为

$$V = \frac{k}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

式中: V 为流速; k 为转换常数; n 为糙率; R_h 为水力半径; S 为明渠比降。

(2)圣维南动力方程

描述水道和其他具有自由表面的浅水体中渐变不恒定水流运动规律的偏微分方程组,由反映质量守恒定律的连续方程和反映动量守恒定律的运动方程组成。

(3)比降

亦称坡降、坡度,指任意两端点间的高程差与两点间的水平距离之比,河流的比降分为床面比降和水面比降。床面比降表示河床纵断面地形的变化,水面比降即河流中任意两端点间的瞬时水面高程差与其相应水平距离之比,表明河流全程或分段的水面坡度,故又称水力坡度。

(4)水力学半径

水力学半径是水力学中的专有名词,指某输水断面的过流面积与水体接触的输水管道边长(即湿周)之比,与断面形状有关,常用于计算渠道、隧道的输水能力。

(5)糙率

边界表面越粗糙,糙率越大;边界表面越光滑,则糙率越小。在假定河槽中沿断面宽不同部位由不同河床质组成,且顺水流方向呈带状平行分布条件下,再根据有关糙率表,分别确定某种介质糙率值,称为糙率分解。

2.2 双垂线法流量计算模型说明

借助水力学模型建立流速与比降关系,代入经

典的曼宁公式,求解出比降和垂线流速,最后根据部分流速面积法推导出断面流量,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、非均匀流条件下的流量计量问题。

建立比降与流速关系,在非均匀流条件下,由于超出了曼宁公式适用范围,即使水面比降观测得再准确,也不能用曼宁公式求得准确结果,为此,改用2条实测垂线流速反求比降的方法。

求解比降参数,当断面设有2条实测流速垂线时,可求得2个比降参数。左边垂线至左岸各垂线流速计算采用左垂线的比降数值计算,中间部分垂线采用左、右垂线比降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比降参数计算各垂线流速。最后,根据垂线流速和断面数据计算流量。

3 双垂线测流系统主要设备

双垂线浮漂法 ADCP 在线测流系统由6个主要部分组成(图1)。

(1)垂线 ADCP:2 台 ADCP,安装在浮漂载体里,ADCP 俯视水底,施测垂线平均流速和水深(水位)。

(2)测流控制器:1 个测流控制器记录 ADCP 数据,并发送到远程服务器。测流控制器具有流量计算功能,远程传输中断时,可现场启动测流,得到流量成果。

(3)无线传输设备:1 对无线短传电台和 1 个无线公网远程传输设备,短传电台把 2 个 ADCP 数据发送给岸边(测站)的测流控制器,然后通过无线公网或宽带网发送到远程服务器。也可增加 1 个短传电台,把数据同步发送到水文站,作为无线公网链路故障时的备用传输手段。

(4)太阳能供电设备:给现场设备供电。

(5)浮体:2 个浮体分布在主河槽两岸,安装 ADCP、短传电台、太阳能电源等设备,浮体可采用立柱、锚系、悬索拖带方式。

(6)服务器软件:1 套系统管理软件,使用双垂线法流量计算功能,根据现场发来的 2 条垂线流速计算流量。

系统可增加单独的水位计和 4G 远程视频监控设备。水位计实现高密度采集,在 ADCP 休眠时监测水位变化,可对 ADCP 实测水位进行校验。视频监控可实时查看 ADCP 浮体状态。

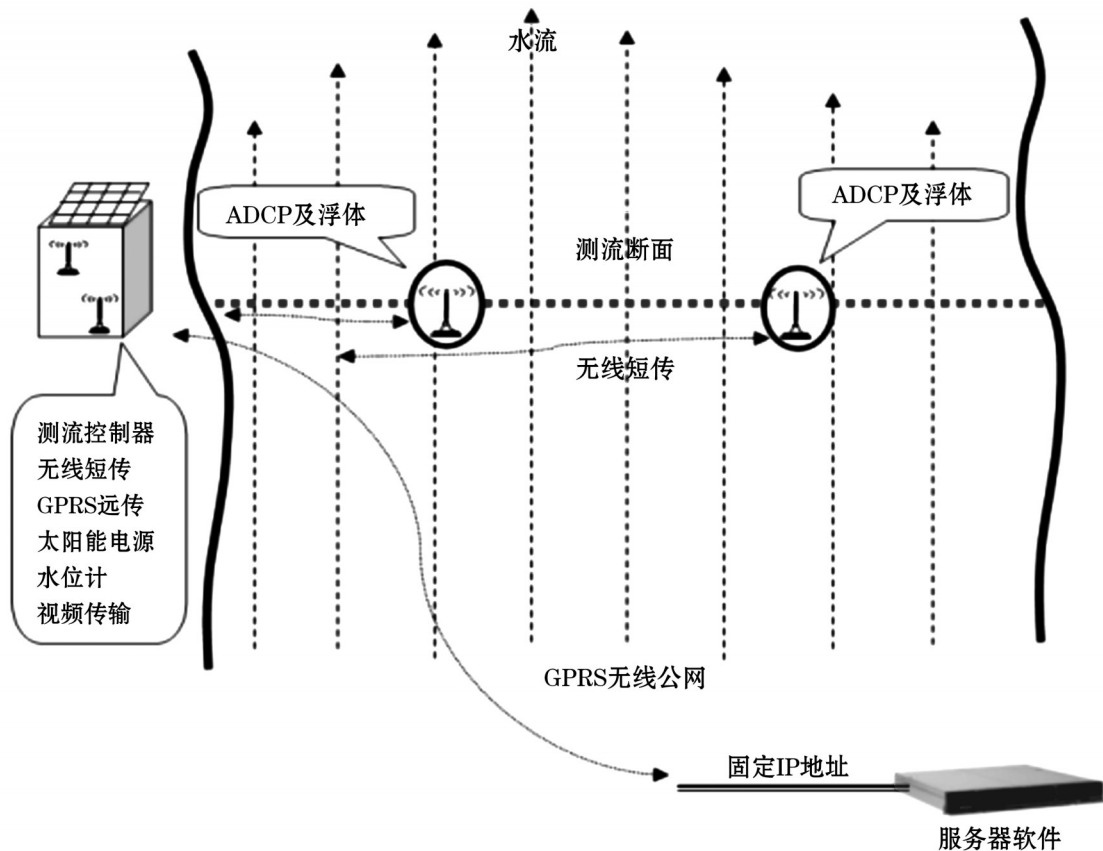


图1 双垂线流量在线测流系统结构

4 流量比测成果对比

4.1 排水期对比分析

汛期太湖水位较高,需要排放洪水。排水期流量比测工作从2019年7月12日至9月14日,陆续监测共获得26组比测数据,流量变化范围为43.5~289 m³/s。26次比测流量相对误差都小于10%,占比100%,最大相对误差7.89%,其中有16次相对误差小于5%,占比61.5%。浮漂 ADCP 监测流量多数偏大,为19次,占比为73.1%。

4.2 引水期对比分析

4.2.1 引水期流量比测统计

汛期太湖水位较低,或者非汛期入湖来水量较少时,为了改善太湖水环境,需要从长江引水补充太湖水量。2019年引水期流量比测工作从10月30日至12月26日,陆续监测共获得36组比测数据,流量变化范围为73.7~114 m³/s。36次比测流量相对误差小于10%的有20次,合格率55.6%。最大相对误差24.83%,其中有7次相对误差小于5%,占比19.4%。浮漂 ADCP 监测流量全部偏大,存在系统偏差。

4.2.2 引水期流量误差分析

引水期流量比测统计发现自动监测流量系统偏大,分析其原因,可能是由于工程位置处水文站的设置没有规范要求的顺直河段。如望亭枢纽水文站处于河道弯曲处,并且望亭枢纽的水下涵道出流方向与河道中泓方向不一致。

(1) 流态分析

2019年12月11日走航 ADCP 实测流量-117 m³/s,双垂线浮漂 ADCP 在线流量-139 m³/s,偏差22 m³/s。根据走航 ADCP 航迹和流速矢量图,主流严重偏向左岸,1号 ADCP 位于主流段之中,违背了双垂线法测流2条垂线必须布置在水流中泓两侧的规定,导致流量变大。在布置浮漂位置时主要考虑了河底形态及正常的河流泄洪正流量方向的洪水水流形态,遵循2条垂线必须布置在水流中泓两侧的规定,确定浮漂的位置。

在望亭立交枢纽开启地下涵道向太湖补水时,由于枢纽工程的地涵流道方向与河道方向不一致,并且从地下涵管出来流向是对向左岸,而河道又是向右弯曲走向,导致水流流经测流断面时水流流速分布的最大流速与河道地形中泓不一致,严重偏向左岸的1号 ADCP 安置的浮漂,造成垂线处于水流中泓段的状态,导致双垂线浮漂安装 ADCP 在线流量测验系统的计算流量偏大。

(2) 位置改正系数设置

解决上述位置受限的情况有2种方法。一是移动浮漂 ADCP 的位置,找到向太湖补水时水流形态的中泓和河道地形中泓的耦合点,打破顺直河道中泓安装的常规位置,提高测流成果的准确性。但是这种方法比较麻烦,如果经常交替进行排洪和补水,位置变动会带来很大不便。二是通过位置系数的调整来改变平均流速计算的大小,在参数设置中设置小于1的流量计算系数,其物理意义是减小1号安置浮漂 ADCP 的流速到“理想的中泓”两侧的流速,使得断面平均流速精准度得到提高。这个参数不同于代表流速的系数,因为一般代表流速的系数在水位变化也会需要调整,双垂线流量计算模型采用曼宁公式已经通过湿周变化反映了河道形状的影响,所以一般情况下位置系数应该不受水位变化的影响。实践证明不需要大量比测,通过几组数据就能得到稳定的位置系数。

为了解决类似非顺直河段水文站的在线测流,设置位置改正系数 K ,来调整改变 ADCP 到虚拟中泓两侧位置,在计算流量时模拟 ADCP 到虚拟中泓两侧位置的流速,使断面流量精准度得到提高。由于断面某位置垂线流速与平均流速关系比较稳定,位置改正系数 K 很容易得到。

(3) 位置改正系数分析

对于测流原始数据中自动监测数据,分别设定0.89、0.90、0.9125、0.925的位置改正系数来进行系统流速偏差值的改正计算。通过试算,位置改正系数0.90效果最好。考虑到合格次数及正负号分布,位置改正系数为0.90时,综合效果比较好,此时的相对误差小于10%的数据32组,合格率为88.9%。

设置位置改正系数的应用和分析表明,可以修正双垂线在线流量测验在弯曲河段存在的流量测验系统偏差。

5 结 语

双垂线法浮体安装 ADCP 在线测流系统在望亭枢纽的比测分析,表明其适用性很强,在引入位置改正系数后,即使望亭枢纽这样测流条件不好的测站也能取得很好的效果。改进的浮体安装方法克服了坐底安装深水施工难度比较大,安装、运行、维护及修理需要专业的潜水人员,极不方便且费用高等缺点。浮体安装法 ADCP 安装维修时拆装只需10 min 完成,极大方便了水文站的管理维护。

采用航标灯浮体安装可以适应通航河道及不

通航的闸坝、抽水站等各类测站的流量测验。即使设站条件差(河道不够顺直的)或测验条件不好(河道水流干扰多水流不平稳)的测站,通过设置位置改正系数也能取得很好的测流效果。浮体ADCP安装在水面上,只有探头部位入水,没有水压、水质对设备的性能及状态的不良影响,非监测时期也方便将ADCP取出清洁保养后存放仓库,有利于延长设备使用寿命。整个试验从2018年到2022年,没有因为设备及技术问题中断工作,系统运行稳定可靠,避免了水下座底安装ADCP设备始终在较深水下,水压、水质对设备的性能及状态都有不良影响。

双垂线法在线测流系统运用能坡模型计算流量,计算流量不需要比测率定,精度较高,适应性强,在弯曲河段通过设置位置改正系数,可以得到

比较精准的流量,较好解决了当前水文部门亟需的实时在线流量测量问题。

参考文献:

- [1] 张建云,唐镇松,姚永熙,等.水文自动化测报系统应用技术[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [2] 章树安,张留柱,马湛.中美水文测验技术比较研究[J].水文,2007,27(6):70-87.
- [3] 韩新庆.能坡法流量实时在线自动监测系统在沈丘水文站的应用[J].水文,2017,37(1):79-82.
- [4] 韦立新,蒋建平,曹贯中.南京水文实验站ADCP流量测验方法改进研究[J].水利水电快报,2017,38(6):11-14.
- [5] 梁后军,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.
- [6] 封一波,武宜壮,胡菲菲,等.小许庄水文站二线能坡法自动测流系统应用与分析[J].治淮,2019(9):14-16.

(上接第51页)

洪水预报演算,理论依据充分,方法简单实用,为实现洪水预报、水文数字孪生探讨提供了新型的预报方法,具有较高的实用价值。

(2)预测流量与实测流量过程相似度较好,洪水预报精度较高。运用雨洪规律计算的预测流量与实测流量过程变化相似度较好,基本同步一致,峰值流量预报精度较高。鲢鱼桥站有3个洪峰流量过程,而且还受多级滚水坝的水流调节影响,洪水预测难度大,但计算的各洪峰流量与实测值基本吻合,相对误差均在20%以内,峰现时间完全一致,说明在有大面积的调蓄水影响下,流域的降雨洪水也能应用雨洪规律进行洪水预报。鹤州、白沙两站的洪水是独立单峰流量过程,预测洪水的效果精度更高。

(3)受人类活动影响下的洪水预报有待探讨。

受人类活动影响下的洪水,未改变水流原来规律的,根据工况适当调整有关汇流参数后进行洪水预报,但对受人类活动干预影响下改变水流原本规律的洪水预报有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 颜开,陈树娥,陈信华.消退曲线超渗产流模型[J].水科学进展,1997,8(1):90-93.
- [2] 包为民.水文预报[M].5版.北京:中国水利水电出版社,2017.
- [3] 颜开.一种退水曲线公式的初步探讨[J].水文,1984(1):13-18.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.水文情报预报规范:GB/T 22482—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.