

河流极枯流量条件下提高水文测验精度的方法

罗昌军, 聂 霁

长江水利委员会长江上游水文水资源勘测局, 重庆

收稿日期: 2023年5月18日; 录用日期: 2023年6月14日; 发布日期: 2023年6月30日

摘 要

由于渠江富流滩电站检修需要关闭电站闸门, 导致渠江河流流量急剧减小, 常规流速仪测量方法已无法满足流量测验精度要求, 为了搜集准确可靠的极枯流量测验成果, 我们采用缆道加走航式ADCP配合GNSS的方法施测极枯流量, 用水文站大断面成果进行ADCP施测面积的改算, 测验效果很好, 精度可靠, 有效解决了常规流速仪无法施测极枯流量的问题, 满足了获取最小下泄流量的河流生态需求。

关键词

ADCP, GNSS, 极枯流量, 流量测验

The Method of Improving Accuracy of Hydrological Test under Extremely Low Flow Condition of the River

Changjun Luo, Ji Nie

Hydrology and Water Resources Survey Branch for Upper Reaches, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Chongqing

Received: May 18th, 2023; accepted: Jun. 14th, 2023; published: Jun. 30th, 2023

Abstract

Due to the need to close the gate of the Qujiang Fuliutian Power Station for maintenance, the flow rate of the Qujiang River has sharply reduced. Conventional hydrometric propeller is unable to meet the accuracy requirements of flow testing. In order to collect accurate and reliable results of extremely low flow testing, we measure the extremely low flow with cable and navigation ADCP combined with GNSS, and we calculate the measurement area of ADCP with the hydrological station's large cross-section results, which has good effect and reliable accuracy, and effectively solves the problem that conventional hy-

作者简介: 罗昌军, 出生于 1985 年 5 月 13 日, 四川宜宾人, 注册测绘师、工程师, 研究方向为测绘、水文、水利, Email: 395098231@qq.com

文章引用: 罗昌军, 聂霁. 河流极枯流量条件下提高水文测验精度的方法[J]. 水资源研究, 2023, 12(3): 267-272.

DOI: 10.12677/jwrr.2023.123030

drometric propeller flow cannot measure extremely low flow rates, and meets the ecological demand of rivers to obtain the minimum discharge flow rate.

Keywords

ADCP, GNSS, Extremely Low Flow, Flow Test

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

罗渡溪水文站设立于 1953 年 6 月,是为控制渠江下游水情,认识河流水文规律,以供流域规划,水资源开发、水文分析、水情预报而建立的流量一类精度水文站,二类精度泥沙站,属国家基本水文站。测验项目包含水位、流量、单位含沙量、悬移质输沙率、降水、颗分、水质监测等测验项目。断面上游 1.5 km 处,有富流滩水电站,对本站中低水位流量有显著控制作用,断面下游约 85 km 为嘉陵江汇合口,河道平坦落差小,嘉陵江汇合口下游约 32.8 km 处为草街电站,水位流量关系受该电站顶托影响。当富流滩水电站进行安全检修的时候需要关闭所有闸门,导致电站下游流量急剧减小,常规的低流速测速仪的测速范围为 0.018~0.5 m/s,无法满足极枯流量的测验要求,而现状条件下又有获取最小下泄流量的河流生态需求。本文结合水文站测验的实际情况出发,采用缆道加走航式 ADCP 配合 GNSS 的方法进行极枯流量的水文测验,取得了良好的测验效果,搜集到了精度可靠的极枯水文流量资料。

2. 走航式 ADCP 与传统流速仪测流的区别

2.1. 走航式 ADCP 测流原理

ADCP 安装在遥控船上,每个 ADCP 配有 4 个换能器,换能器与 ADCP 轴线成一定夹角,每个换能器既是发射器又是接收器。换能器发射的声波能集中于较窄的范围内,也称为声束。换能器发射固定频率的声波,然后聆听被水体中颗粒物散射回来的声波。假定颗粒物的运动速度和水体流速相同,当颗粒物的运动方向接近换能器时,换能器聆听到的回波频率比发射波的频率高;当颗粒物的运动方向背离换能器时,换能器聆听到的回波频率比发射波的频率低。声学多普勒频移,即发射声波频率与回波频率之差由下式确定:

$$F_D = 2F_s \frac{V}{C} \quad (1)$$

式中: F_D 为声学多普勒频移, F_s 为发射声波频率, V 为颗粒物沿声束方向的移动速度, C 为声波在水中的传播速度。ADCP 既能发射声波又能接受回波,因此多普勒频移加倍[1]。

ADCP 基于如下公式计算流量:

$$Q = \int_0^T \int_0^H (U \times V_b) \cdot k dz dt \quad (2)$$

式中: Q 为对应于测验起点与终点之间的流量,不包括岸边非实测区的流量, U 为河流断面某点处流速矢量, V_b 为船速矢量, dz 为垂向微元长度, z 自河底起算, dt 为时间微元。

ADCP 每个换能器轴线即为 1 个声束坐标,每个换能器测量的流速是水流沿其声束坐标方向的速度,任意 3

个换能器轴线即组成一组相互独立的空间声束坐标。此外, ADCP 自身定义有直角坐标系: X-Y-Z。Z 方向与 ADCP 轴线方向一致。ADCP 首先测出沿每一声束坐标的流速分量, 然后利用声束坐标与直角坐标系 X-Y-Z 坐标之间的转换关系, 将声束坐标系下的流速转换为 X-Y-Z 坐标系下的三维流速, 再利用罗盘和倾斜仪提供的方向、倾斜数据将 X-Y-Z 坐标系下的流速转换为地球坐标系下的流速[2]。而利用四个波束测量, 增加了测量信息量, 使流速测量的短期精度比采用三波束提高了 25%, 其对称性, 能够有效地消除由于船只横摇和纵摆引起的流速测量误差。

2.2. 传统流速仪测流原理

基本原理: 将断面面积划分成若干个部分面积(相当于单元面积), 每一块部分面积为标准梯形(岸边为三角形), 垂线水深为梯形的底, 相邻两垂线之间的间距为梯形(岸边为三角形)的高。将相邻两垂线的垂线平均流速的平均值(称之为部分平均流速)作为该面积上水体的高。底面积与高之积即为通过该部分面积的流量。各部分流量的累加值即为全断面流量, 断面流量计算公式如下:

$$Q = \int dQ = \int_0^F V dF \quad (3)$$

式中: Q 为对应于测验起点与终点之间的流量, V 为河流断面某点处流速, F 单元面积。

2.3. 走航式 ADCP 相比传统流速仪测流的优点

- 1) 测量速度快, 可以进行断面准同步测量。
- 2) 可以体现三维流速流向情况。
- 3) 能自动消除各种外界因素的影响, 还具有对数据资料进行评判的能力。对测量数据质量进行鉴别, 避免不合理数据参与数据处理, 而影响测量数据精度的现象出现[3]。
- 4) ADCP 利用声波作为传感器, 不但操作方便快捷, 而且测量时不干扰水流, 可以直接测量流速断面, 适合各种环境测量。该仪器的投入、使用可减轻人工测流强度, 增加测流人员的安全性, 具有测量精度高、快速、高效、省时、省力等优点。
- 5) ADCP 能够在测量流速剖面的同时测量悬浮物浓度剖面, 是研究泥沙迁移规律, 是计算输沙率十分有效的工具。
- 6) ADCP 可以施测出卵石(且主河槽卵石较大)河床中卵石间的过隙流量, 这是用流速仪等传统测流仪器无法达到的, 因而也使其测验成果更加精确[4]。
- 7) ADCP 测流理论上不要求测流断面垂直于河岸。

3. 极枯流量的水文测验方法

对于极枯流量的测验方法, 我们采用缆道加走航式 ADCP 配合 GNSS 的方法进行施测。由于受下游草街电站的顶托, 导致测流断面水位较高, 河面较宽, 但是流速很小, 常规的低流速测速仪的测速范围为 0.018~0.5 m/s, 无法满足极枯流量的测验要求, 采用缆道能很好的控制 ADCP 遥控船的行进速度且能保证在水文测验断面上, 结合 GNSS 能准确的算出 ADCP 开始和结束时离岸边的距离。图 1 为 ADCP 现场测验成果图, 从测流软件中可以直接读出流速、断面面积、流量等信息, 再结合水文断面的大断面测量数据, 通过大断面计算软件计算出同一水位下的河道断面面积。图 2 为罗渡溪水文测验断面图, 通过再对 ADCP 的断面面积进行改算, 能有效的消除左右岸边和 ADCP 顶部的盲区面积, 得出高精度的流量测量结果。

3.1. ADCP 测验成果

本次测验成果总共施测了 8 次 ADCP 测流, 通过成果表 1 可知, 平均流速在 0.006~0.009 m/s 之间, 低于常规流速仪的施测范围, 流量在 13.43~20.16 m³/s 之间, 属于极枯流量。

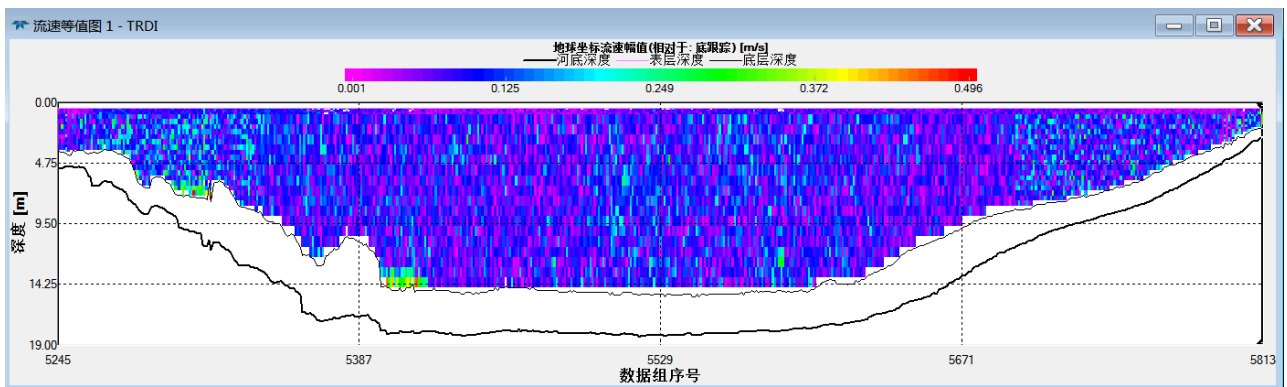


Figure 1. The diagram of ADCP field test results
图 1. ADCP 现场测验成果图

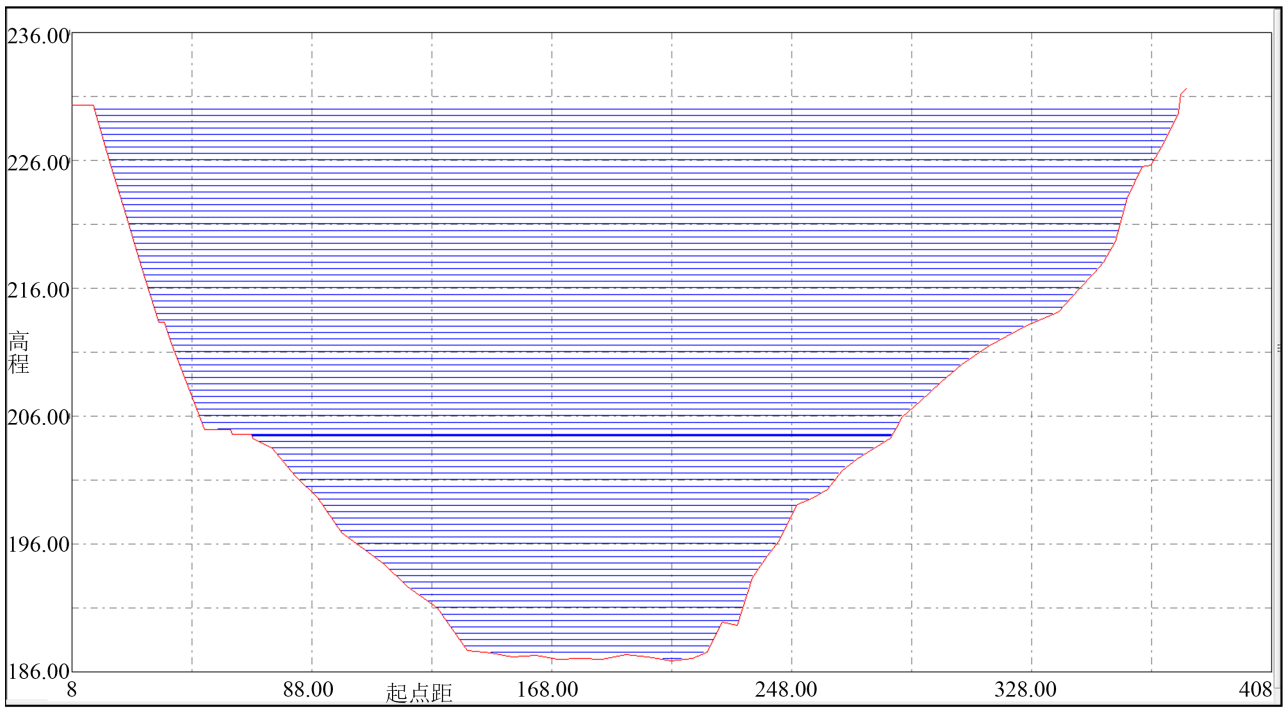


Figure 2. Cross section of Luoduxi hydrology test
图 2. 罗渡溪水文测验断面图

Table 1. The results of ADCP test
表 1. ADCP 测验成果表

测次	流量(m ³ /s)	最大流速(m/s)	平均流速(m/s)	最大水深(m)	河道断面面积(m ²)	水位(m)
1	15.65	0.142	0.007	17.85	2236	204.53
2	20.15	0.147	0.009	17.85	2239	204.53
3	17.84	0.095	0.008	17.85	2230	204.53
4	13.45	0.140	0.006	17.79	2242	204.49
5	13.43	0.110	0.006	17.76	2238	204.48
6	20.16	0.129	0.009	17.76	2240	204.48
7	19.17	0.116	0.009	17.71	2130	204.45
8	14.86	0.085	0.007	17.71	2123	204.45

3.2. 通过水文大断面数据结合 ADCP 流速计算流量成果

通过水文大断面计算的流量成果表 2 可知,平均流速在 0.006~0.009 m/s 之间,低于常规流速仪的施测范围,流量在 14.39~21.68 m³/s 之间,河道面积比 ADCP 测的面积偏大。

Table 2. Calculated flow results of large hydrological section
表 2. 水文大断面计算流量成果表

测次	流量(m ³ /s)	平均流速(m/s)	最大水深(m)	河道断面面积(m ²)	水位(m)
1	16.86	0.007	17.62	2408.80	204.53
2	21.68	0.009	17.62	2408.80	204.53
3	19.27	0.008	17.62	2408.80	204.53
4	14.40	0.006	17.58	2400.23	204.49
5	14.39	0.006	17.57	2398.10	204.48
6	21.58	0.009	17.57	2398.10	204.48
7	21.53	0.009	17.55	2391.70	204.45
8	16.74	0.007	17.55	2391.70	204.45

3.3. 两成果对比分析

通过前面两次计算成果对比可知(见表 3),用水文大断面计算的面积和 ADCP 施测的河道面积存在不同程度的差值,差值范围为 158.1~268.7 m²,流量结果相差百分比范围为-6.59~-11.23,水位越低,差值越明显。

Table 3. Comparison of the two flow results
表 3. 两次流量成果对比表

测次	ADCP 实测流量(m ³ /s)	通过大断面计算流量(m ³ /s)	两者流量相差百分比
1	15.65	16.86	-7.17
2	20.15	21.68	-7.05
3	17.84	19.27	-7.42
4	13.45	14.40	-6.59
5	13.43	14.39	-6.68
6	20.16	21.58	-6.59
7	19.17	21.53	-10.94
8	14.86	16.74	-11.23

4. 结论和建议

通过分析计算,总结了一些枯水条件下流量测验相关的经验,对河流极枯流量的测验方式和计算方法提出以下建议:

- 1) 在河流极枯流量且受下游电站顶托下,常规流速仪无法进行流量测验,只能选用高精度的 ADCP 进行测验。
- 2) 在低流速情况下,通过缆道能准确均匀的控制 ADCP 测验船的行进速度,且能保证不偏离测验断面。
- 3) 水文站大断面有几十年的观测数据,且用不同的仪器进行了验证,用水文站大断面进行断面面积计算精

度更高更可靠。

4) 用 ADCP 施测的断面平均流速结合水文站大断面计算的河道断面面积计算的流量成果精度更高更可靠。

5) 通过缆道控制 ADCP 测验船, 再通过用水文站大断面进行面积换算的方式, 能有效地减少 ADCP 测验的盲区误差以及船速不均匀产生的流速采集误差。

参考文献

- [1] 田淳, 刘少华. 声学多普勒测流原理及其应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
TIAN Chun, LIU Shaohua. Principle and application of acoustic Doppler current profilers. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 谢波, 田岳明, 叶建红, 吴建荣. ADCP 河流流量测验及其误差分析[J]. 水资源研究, 2007, 28(4): 69-73.
XIE Bo, TIAN Yueming, YE Jianhong and WU Jianrong. ADCP river flow test and its error analysis. Journal of Water Resources Research, 2007, 28(4): 69-73. (in Chinese)
- [3] 陈琳, 陆欣华. ADCP 测量技术在长江口深水航道治理工程中的应用[J]. 水运工程, 2000, 24(12): 62-66.
CHEN Lin, LU Xinhua. Application of ADCP measurement technology in deep-water waterway treatment project at the mouth of the Yangtze River. Port & Waterway Engineering, 2000, 24(12): 62-66. (in Chinese)
- [4] 王丁坤, 席占平, 刘月. ADCP 在小浪底水文站流量测验中的可行性研究[J]. 人民黄河, 2005, 27(8): 22-23.
WANG Dingkun, XI Zhanping and LIU Yue. Feasibility study of ADCP in flow test of Xiaolangdi hydrological station. Yellow River, 2005, 27(8): 22-23. (in Chinese)
- [5] 王俊, 刘东生, 陈松生, 魏进春. 河流流量测验误差的理论与实践[M]. 武汉: 长江出版社, 2017: 310-317.
WANG Jun, LIU Dongsheng, CHEN Songsheng and WEI Jinchun. Theory and practice of river flow test error. Wuhan: Changjiang Press, 2017: 310-317. (in Chinese)