

Application of H-ADCP Flow Measurement in Wusongkou Station of Huangpu River

Bingsen Wang

Shanghai Hydrological Station, Shanghai, 200232, China

Abstract

As a critical flow monitoring section at the Huangpu River estuary, the Wusongkou Station's large cross-section plays a vital role in analyzing the river's flow, regional water balance, and saltwater intrusion. However, the station faces significant challenges due to its complex river terrain, unique flow characteristics, and human activities, compounded by frequent regulatory restrictions during flow measurements. This paper examines the applicability and limitations of a single H-ADCP (Hydrodynamic Array Current Profiler) for flow monitoring in restricted river sections, covering equipment selection, installation procedures, parameter configuration, data calibration, and error analysis. By integrating real-world data from Wusongkou Station—including cross-sectional measurements, water levels, and flow rates—the study evaluates the device's performance and provides a practical framework for optimizing flow monitoring equipment placement, installation, and evaluation under similar conditions.

Keywords

H-ADCP; ratio measurement; flow measurement

H-ADCP 流量测验在黄浦江吴淞口站的应用研究

王丙森

上海市水文总站, 中国·上海 200232

摘要

吴淞口站测流大断面作为黄浦江河口处的重要流量监测断面, 对黄浦江流量分析、区域水量平衡、咸潮入侵等方面研究具有重要意义。但本站受河道地形、水流特性及人类活动影响较大, 且流量测验过程中受到管制较多, 测验难度较大。本文通过设备选址、安装介绍、参数设置、数据定线、误差分析等方面, 并结合吴淞口站实测断面、水位、流量等数据讨论了单一H-ADCP在受限河段进行流量监测的适用性和局限性, 分析评价了该设备在吴淞口测验断面的应用效果。为类似条件下流量设备的选址、安装和评价等提供了一种思路。

关键词

H-ADCP; 比测; 流量测验

1 引言

吴淞口站位于黄浦江出口段, 在蕹藻浜口和黄浦江口中间, 坐落于吴淞码头。吴淞口站是黄浦江下游重要的流量监测站, 承担着防汛调度、水资源管理及水生态保护等关键数据支撑任务。受河道弯曲、河床淤积、航运影响、跨河设施(如外环隧道)及潮汐影响, 断面水流紊乱, 涨落潮逆流现象显著, 且吴淞口来往船只频繁, 受限于码头影响, H-ADCP 布设空间不足。本文结合吴淞口站工作情况, 结合实测数据, 进行分析 [1]。

2 断面概况

2.1 地理位置与河道特征

吴淞口站测验河段处在黄浦江河口处的弯道上, 河道不顺直, 测验河段不规整, 外环隧道以沉箱方式穿越测验河段, 往来船舶频繁(见图1)。测流断面在基本水尺断面上游250米处, 测流断面宽度约650米, 潮平均水位相应水面宽约450米, 主槽靠近左岸, 右岸有浅滩, 整个大断面呈偏态形状(见图2)。

2.2 水文特征

2021-2024年水位监测数据显示, 水位变幅0.18-5.55m, 3.0m以下出现频率达25%, 此时河床裸露面积增大, 浅滩滞留区形成, 水流垂向分层明显 [2]。

3 流量监测现状与受限条件分析

3.1 现有监测技术与局限

吴淞口断面自采用H-ADCP进行监测试验, H-ADCP

【作者简介】王丙森(1985-), 男, 中国江苏连云港人, 本科, 工程师, 从事水文勘测研究

安装在左岸专用井筒中并固定支架上，安装高程-7米，距离左岸66米。因断面较宽，选择300kHz的H-ADCP设备，设备波束角左右各20度，波束开角2.2度。因受左岸码头

设施及蕹藻浜流量测验需求影响，测验断面选择在蕹藻浜支流下游较平缓位置。该处极易受潮汐影响影响，在潮流期的局部时段，会表现出类似受水库回水变动影响的现象 [3]。



图1 吴淞口断面所在河道水系图

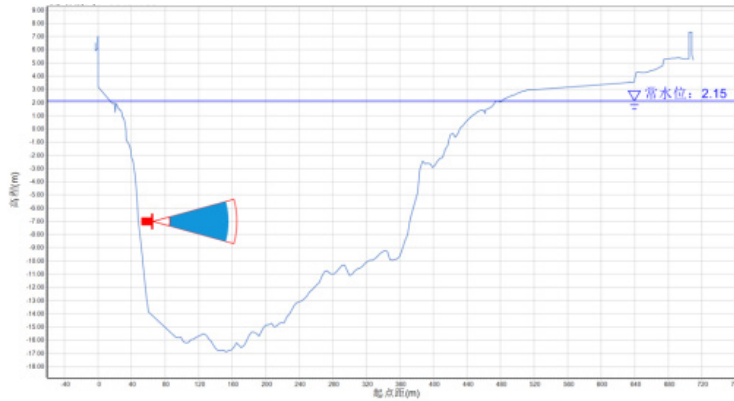


图2 吴淞口测验大断面图

3.2 受限条件分类

结合现场勘察，吴淞口断面受限条件可归纳为三类：

(1) 地形限制：河道天然呈漏勺状，主槽不对称，右岸防汛墙与左岸滩地高差达4.0m，形成不对称河床，落潮时主流靠左岸，涨潮时，主流会偏向右岸，涨落潮形成主流来回摆动；

(2) 水文限制：潮汐周期（约12小时25分钟）与上游来水叠加，导致测验断面水流方向不一致，单次测流过程中可能出现2-3次横断面流向不一致；

(3) 设施限制：H-ADCP探头布置在高程-7m处，约水深0.5倍，但仍受重船停靠影响，甚至直接遮挡探头。

4 研究内容与成果

以2022年16次连续走航式ADCP测验为基础，对测流数据进行分析总计。来研究H-ADCP在该位置的可行性。

4.1 代表流速关系构建

目前，H-ADCP代表流速关系采用单要素相关法，即

通过代表流速 V_i 与全断面平均流速 V_C 建立映射关系。具体定线操作步骤如下：

(1) 数据组排列与区间划分

以代表流速 V_i 为参照，按涨潮最大→落潮最大顺序排列数据组；

在涨潮、落潮数据段内，从最大流速至零流速划分 ≥ 10 个区间；

每个区间需包含6~12个点据，且避免同区间数据来自同一潮流期。

(2) 数据点选取原则

每一区间内按均匀间隔选取3~6个数据点；禁止主观挑选，确保数据分布客观性。

(3) 关系线构建方法

将选定的 (V_i, V_C) 数据组点绘于坐标系；

采用一次单项式关系（线性模型）；

按最小二乘法确定关系线： $V_C = k \cdot V_i + b$

计算相关系数 r 评估拟合优度。

(4) 关系线合理性检验

截距 b 的绝对值 $|b| \leq 0.05$ m/s (硬性阈值)；
若超出限值需重新校核数据。

(5) 定线精度量化评估

以系统误差 (偏差均值) 与随机不确定度 (95% 置信区间) 为指标。

(6) 三项统计检验: a、符号检验, 目的是验证残差序列随机性; b、适线检验, 目的是判断关系线形态合理性; c、偏离数检验, 目的是识别异常点对拟合的影响。(7) 涨落潮过渡线建立依据

严格遵循《DB31/T 763-2013》上海地方标准执行。

本次采用“涨落潮分开定线”建立代表流速 (V_i) 与断面平均流速 (V_c) 关系。按涨潮 (流向下流, 即黄浦江方向)、落潮 (流向下流, 即长江方向)。定线结果见图 4。

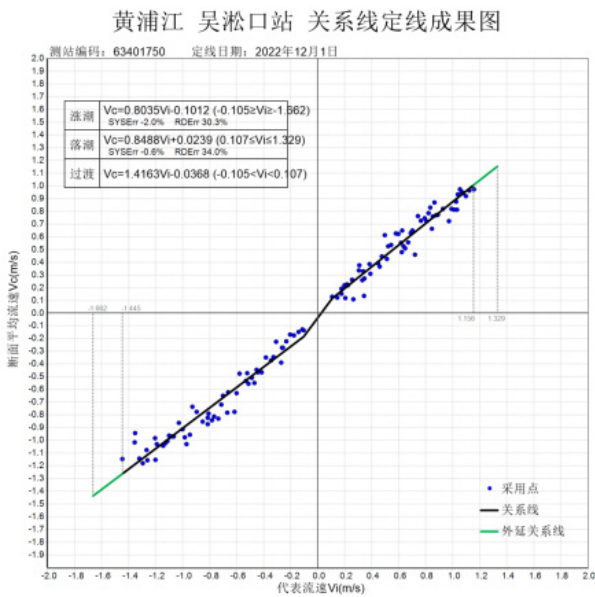


图 4 吴淞口 H-ADCP 与走航 ADCP 成果图

落潮期: V_i - V_c 关系线系统误差 -2.0%, 关系线斜率 0.80, 不确定度 30.3%;

涨潮期: V_i - V_c 关系线系统误差 -2.0%, 关系线斜率 0.80, 不确定度 34.6%;

本次定线结果三项检验通过, 但随机不确定度不满足相关规范要求。

4.2 H-ADCP 流量测验误差分析

4.2.1 流速单元情况

H-ADCP 工作原理是将两个声速探头分角度向对岸进行声波测量 (图 5), 并得到直线上的测量单元, 根据有效测量单元格流速数据 (图 5), 进行平均得到代表流速 V_i , 吴淞口 H-ADCP 在 2022 年测验时段内, 将流速分为 1-50 个单元, 每个单元宽度 2 米, 根据, 实际断面数据实际情况, 选取了 9~43 单元进行平均得到代表流速 V_i , 现将 H-ADCP 有关联的 9~43 单元拆分为 35 组单个单元的 V_i 单与 V 断面

据并进行相关行分析, 进而对整个代表流速 V_i 与断面平均流速 V_c 之间的关系进行分析 [4]。

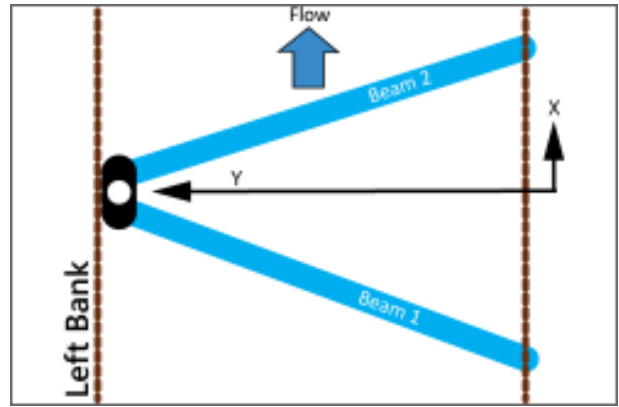


图 5 H-ADCP 测量示意图

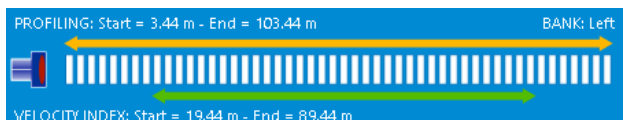


图 6 H-ADCP 测验单元图

4.2.2 流速单元选取

在 H-ADCP 实测流速过程线上, 一共有 1-50 个单元数据, 选取其中 9-43 单元数据 $V_{i单}$, (部分数据见图 7) 与断面平均流速 V_c 之间的关系。选取

| Cell | Vc [m/s] | Vy [m/s] | Cell | Vc [m/s] | Vy [m/s] | Cell | Vc [m/s] | Vy [m/s] | Amp_x | Amp_y | Std_x [cm] | Std_y [cm] | Corr_x | Corr_y |
|------|----------|----------|------|----------|----------|------|----------|----------|-------|-------|------------|------------|--------|--------|
| 1 | -0.09 | 0.01 | 1 | 0.12 | -0.03 | 1 | 0.25 | -0.00 | 174 | 176 | 0.00 | 0.00 | 123 | 123 |
| 2 | -0.09 | 0.01 | 2 | 0.29 | -0.03 | 2 | 0.41 | -0.03 | 195 | 199 | 0.00 | 0.00 | 123 | 122 |
| 3 | -0.07 | 0.02 | 3 | 0.54 | -0.04 | 3 | 0.52 | -0.01 | 160 | 167 | 0.00 | 0.00 | 123 | 125 |
| 4 | -0.10 | 0.01 | 4 | 0.57 | -0.03 | 4 | 0.57 | -0.03 | 161 | 164 | 0.00 | 0.00 | 121 | 120 |
| 5 | -0.09 | 0.00 | 5 | 0.57 | -0.03 | 5 | 0.59 | -0.06 | 165 | 164 | 0.00 | 0.00 | 126 | 124 |
| 6 | -0.10 | 0.00 | 6 | 0.63 | -0.02 | 6 | 0.57 | -0.10 | 163 | 164 | 0.00 | 0.00 | 127 | 122 |
| 7 | -0.09 | 0.00 | 7 | 0.60 | -0.02 | 7 | 0.63 | -0.09 | 154 | 163 | 0.00 | 0.00 | 119 | 125 |
| 8 | -0.07 | 0.00 | 8 | 0.67 | -0.02 | 8 | 0.77 | -0.06 | 142 | 157 | 0.00 | 0.00 | 122 | 119 |
| 9 | -0.07 | -0.00 | 9 | 0.67 | -0.03 | 9 | 0.62 | -0.05 | 136 | 147 | 0.00 | 0.00 | 124 | 121 |
| 10 | -0.07 | -0.01 | 10 | 0.71 | -0.03 | 10 | 0.85 | -0.04 | 132 | 138 | 0.00 | 0.00 | 126 | 121 |
| 11 | -0.07 | -0.01 | 11 | 0.73 | -0.01 | 11 | 0.83 | -0.04 | 127 | 132 | 0.00 | 0.00 | 122 | 121 |
| 12 | -0.08 | -0.01 | 12 | 0.79 | 0.00 | 12 | 0.87 | -0.05 | 124 | 128 | 0.00 | 0.00 | 126 | 121 |
| 13 | -0.07 | -0.01 | 13 | 0.81 | 0.01 | 13 | 0.84 | -0.05 | 118 | 126 | 0.00 | 0.00 | 124 | 125 |
| 14 | -0.06 | -0.01 | 14 | 0.82 | 0.02 | 14 | 0.81 | -0.05 | 115 | 122 | 0.00 | 0.00 | 126 | 123 |
| 15 | -0.06 | -0.01 | 15 | 0.82 | 0.02 | 15 | 0.80 | -0.05 | 112 | 120 | 0.00 | 0.00 | 126 | 123 |
| 16 | -0.06 | -0.00 | 16 | 0.81 | 0.03 | 16 | 0.80 | -0.04 | 110 | 114 | 0.00 | 0.00 | 123 | 122 |
| 17 | -0.06 | -0.00 | 17 | 0.81 | 0.03 | 17 | 0.79 | -0.03 | 110 | 111 | 0.00 | 0.00 | 127 | 124 |
| 18 | -0.04 | -0.01 | 18 | 0.81 | 0.02 | 18 | 0.80 | -0.01 | 109 | 111 | 0.00 | 0.00 | 122 | 125 |
| 19 | -0.02 | -0.01 | 19 | 0.80 | 0.02 | 19 | 0.82 | 0.01 | 107 | 106 | 0.00 | 0.00 | 127 | 123 |
| 20 | -0.01 | -0.01 | 20 | 0.83 | 0.02 | 20 | 0.78 | 0.00 | 103 | 102 | 0.00 | 0.00 | 126 | 123 |
| 21 | -0.01 | -0.00 | 21 | 0.83 | 0.02 | 21 | 0.74 | -0.02 | 95 | 99 | 0.00 | 0.00 | 122 | 123 |
| 22 | -0.02 | -0.00 | 22 | 0.85 | 0.01 | 22 | 0.74 | -0.04 | 92 | 96 | 0.00 | 0.00 | 126 | 124 |
| 23 | -0.02 | -0.01 | 23 | 0.85 | 0.01 | 23 | 0.75 | -0.03 | 94 | 98 | 0.00 | 0.00 | 123 | 125 |
| 24 | -0.00 | -0.01 | 24 | 0.85 | 0.00 | 24 | 0.71 | -0.02 | 92 | 95 | 0.00 | 0.00 | 126 | 124 |
| 25 | -0.01 | -0.01 | 25 | 0.83 | 0.01 | 25 | 0.64 | -0.01 | 90 | 92 | 0.00 | 0.00 | 122 | 124 |
| 26 | -0.01 | -0.00 | 26 | 0.86 | 0.01 | 26 | 0.64 | -0.01 | 88 | 88 | 0.00 | 0.00 | 125 | 122 |
| 27 | -0.06 | -0.00 | 27 | 0.87 | 0.01 | 27 | 0.65 | -0.02 | 85 | 87 | 0.00 | 0.00 | 121 | 123 |
| 28 | -0.03 | -0.00 | 28 | 0.83 | 0.01 | 28 | 0.65 | -0.02 | 83 | 86 | 0.00 | 0.00 | 122 | 123 |
| 29 | -0.03 | -0.01 | 29 | 0.83 | 0.00 | 29 | 0.63 | -0.03 | 83 | 86 | 0.00 | 0.00 | 123 | 124 |
| 30 | -0.01 | -0.00 | 30 | 0.81 | -0.01 | 30 | 0.63 | -0.04 | 80 | 83 | 0.00 | 0.00 | 120 | 122 |
| 31 | -0.00 | 0.00 | 31 | 0.81 | 0.00 | 31 | 0.61 | -0.03 | 81 | 81 | 0.00 | 0.00 | 120 | 121 |
| 32 | -0.01 | -0.00 | 32 | 0.81 | 0.01 | 32 | 0.60 | -0.03 | 83 | 89 | 0.00 | 0.00 | 122 | 120 |
| 33 | -0.00 | -0.00 | 33 | 0.81 | 0.00 | 33 | 0.62 | -0.04 | 82 | 78 | 0.00 | 0.00 | 119 | 120 |
| 34 | -0.02 | -0.00 | 34 | 0.79 | 0.00 | 34 | 0.62 | -0.03 | 80 | 77 | 0.00 | 0.00 | 118 | 119 |
| 35 | 0.03 | -0.00 | 35 | 0.81 | -0.00 | 35 | 0.68 | -0.02 | 77 | 76 | 0.00 | 0.00 | 118 | 118 |
| 36 | 0.03 | -0.00 | 36 | 0.83 | -0.00 | 36 | 0.70 | -0.01 | 76 | 75 | 0.00 | 0.00 | 115 | 121 |
| 37 | 0.02 | -0.00 | 37 | 0.81 | 0.00 | 37 | 0.69 | -0.05 | 86 | 73 | 0.00 | 0.00 | 105 | 115 |
| 38 | 0.03 | -0.01 | 38 | 0.80 | -0.00 | 38 | 0.51 | -0.10 | 99 | 73 | 0.00 | 0.00 | 127 | 118 |
| 39 | 0.04 | -0.01 | 39 | 0.78 | 0.01 | 39 | 0.68 | -0.01 | 93 | 71 | 0.00 | 0.00 | 115 | 116 |
| 40 | 0.02 | -0.02 | 40 | 0.84 | 0.04 | 40 | 0.73 | -0.02 | 92 | 69 | 0.00 | 0.00 | 126 | 115 |
| 41 | 0.04 | -0.02 | 41 | 0.85 | 0.05 | 41 | 0.77 | -0.02 | 83 | 67 | 0.00 | 0.00 | 116 | 113 |
| 42 | 0.02 | -0.03 | 42 | 0.80 | 0.05 | 42 | 0.75 | -0.00 | 74 | 65 | 0.00 | 0.00 | 115 | 111 |
| 43 | 0.02 | -0.02 | 43 | 0.74 | 0.06 | 43 | 0.75 | -0.02 | 69 | 64 | 0.00 | 0.00 | 106 | 110 |
| 44 | 0.02 | -0.03 | 44 | 0.72 | 0.05 | 44 | 0.63 | 0.01 | 66 | 63 | 0.00 | 0.00 | 107 | 109 |
| 45 | 0.02 | -0.03 | 45 | 0.69 | 0.02 | 45 | 0.61 | 0.01 | 65 | 62 | 0.00 | 0.00 | 104 | 109 |
| 46 | 0.05 | -0.01 | 46 | 0.67 | 0.02 | 46 | 0.64 | 0.03 | 67 | 60 | 0.00 | 0.00 | 109 | 105 |
| 47 | 0.03 | -0.02 | 47 | 0.64 | 0.03 | 47 | 0.60 | 0.05 | 68 | 59 | 0.00 | 0.00 | 100 | 103 |
| 48 | -0.01 | -0.01 | 48 | 0.69 | 0.02 | 48 | 0.77 | 0.04 | 66 | 58 | 0.00 | 0.00 | 107 | 99 |
| 49 | -0.01 | -0.02 | 49 | 0.70 | 0.00 | 49 | 0.62 | 0.03 | 65 | 56 | 0.00 | 0.00 | 109 | 95 |
| 50 | -0.03 | -0.01 | 50 | 0.69 | -0.03 | 50 | 0.63 | 0.03 | 65 | 55 | 0.00 | 0.00 | 105 | 92 |

图 7 部分测验断面流速数据 $V_{i单}$ 示意图

分析 2022 年 9 月 28 日至 2022 年 10 月 4 日后共收集实测走航数据 365 组, 寻找对应 H-ADCP 数据 365 组, 在 0.1m/s 流速区间内选取 5 组数据, 共得到实测数据 55 组, 见表 1。

4.2.3 数据合理性检验方法

不确定度计算: 稳定的 V_i - V_c 关系曲线的单一性, 都要计算实测点对关系线的标准差、随机不确定度和。

(1) 实测点标准差按照

式中 σ 一实测点标准差, %;

$V_{i单}$ —H-ADCP 第 i 单元实测点的流速 m3/s;

式中—置信水平为 95% 的随机不确定度。

$V_{Ci单}$ —第 i 单元流速在关系线上对应的流速 m3/s;

根据上述方法，计算得到 9-43 共 35 组随机不确定度

(2) 随机不确定度按照下式计算

分图 (图 8)

表 1 9~43 流速单元数 $V_{i单}$ 与 V_c 数据

Table with 43 columns (9-43) and multiple rows of data. The table contains numerical values for velocity units and their corresponding Vc values, organized in a grid format.

随机不确定度分布

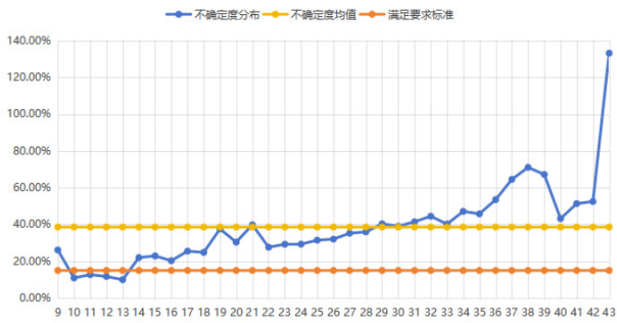


图 8 随机不确定度分布图

根据上图可得到，只有 4 组不确定度在表准范围内，平均不确定度接近 40%，H-ADCP 单元流速 $V_{i单}$ 代表性较差。

5 总结与思考

5.1 主要结论

- (1) H-ADCP 在吴淞口区域内适用性不满足要求，还需继续进行研究；
- (2) H-ADCP 单元流速 $V_{i单}$ 结果不理想会直接导致代表流速 V_i 不满足要求；
- (3) 受限河段 H-ADCP 应用需突破“单一设备适化”

思维，针对地形、水流、设施三类限制条件，需要进一步开拓思路；

5.2 应用建议

- (1) 新建受限河段断面时，优先选择河床顺直、两岸无障碍物的位置并且尽量远离口门处，不受大水体顶托影响；
- (2) 测验断面，要选择在走航测验不易受往来船只影响的位置，能够连续覆盖完整潮流期，测次间隔均匀。
- (3) 在吴淞口地区，水下、岸边地形情况复杂，来往船只频繁，要对增加设备进行全断面控制，可以选择一站多断面的方式，或者探索新型测验装备来进一步优化精度。

参考文献

[1] SL337-2006, 声学多普勒流量测验规范[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2006.

[2] 丁昌言, 徐明, 司存友. 泾河水站H-ADCP流量关系率定校正及应用[C]// 全国水文学测验学术研讨会论文集. 西安: 中国水利学会, 2019: 88-92.

[3] 陈金浩, 丁昌言, 徐明. H-ADCP在线监测系统的优化与验证分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(8): 45-50.

[4] 牛占, 李志敏, 吕耀光, 等. H-ADCP在非接触式流量监测中的误差控制方法研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 12-17.