



# 右江航道整治工程河段比降观测方法探讨

王 柱, 江木春

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

**摘要:** 针对右江航道整治工程比降观测要求, 对比降观测的方法进行探讨。采用纵比降与河心比降相结合的实施方案, 重点对河心比降水准测量方法进行论证。通过在竹筏上设置可调节管状水准尺的水面比降器, 采用水准测量的方法测量河心水面高程, 结合全球卫星导航系统-载波相位差分技术 (GNSS-RTK) 测得的坐标等信息, 提高河心比降观测精度。结果表明, 水准观测的方法可实现毫米级观测精度, 比 GNSS-RTK 观测河心比降的精度更高。

**关键词:** 河心比降; 纵比降; 航道整治; 水准观测

中图分类号: U612.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0144-05

## Observation method of river section gradient in the Youjiang River waterway regulation project

WANG Zhu, JIANG Muchun

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

**Abstract:** In response to the requirements for gradient observation of the Youjiang River waterway regulation project, the methods of gradient observation are discussed. An implementation plan combining longitudinal gradient and river center gradient is adopted, with a focus on demonstrating the leveling measurement method of river center gradient. By setting an adjustable tubular level on a bamboo raft, a leveling observation method is used to measure the elevation of the river center water surface. Combined with the coordinates and other information measured by GNSS-RTK, the accuracy of river center leveling observation is improved. The results show that the leveling observation method can achieve millimeter level observation accuracy for measuring the river center gradient, which has higher accuracy than using GNSS-RTK.

**Keywords:** river center gradient; longitudinal slope; channel regulation; leveling observation

比降观测是航道整治工程在勘察设计阶段水文测量的要素之一, 主要包括纵比降、横比降和河心比降, 反映了江河水力特征, 是推算流量及研究水位流量关系的重要资料, 也是重载标准船舶适航性能研究、河床泥沙冲刷或淤积分析的重要依据。纵比降是水面的纵向坡度, 是河流上、下游断面水位差与断面间距离的比值, 通过在河流上沿水流方向隔一定距离设置水尺进行水位观测, 经计算后求得纵比降。相邻水尺河段须顺直, 河岸和河床稳定, 断面均匀一致, 避免有支流的

汇入或临河建筑物对水流造成明显的干扰<sup>[1]</sup>。当上、下游比降断面间的水流有明显的转折, 支流汇入, 或河流较长, 纵比降在不同的河段比值不同时, 须增加比降水尺进行分段观测。一般山区河段比降较大, 平原河段比降较小, 受潮汐影响的河段还应考虑潮汐的影响。常以左岸或右岸的水尺水位代表断面水位, 在没有横比降的情况下, 任何一岸的比降都能替代纵比降<sup>[2]</sup>。

由于河流蜿蜒曲折, 普遍存在横比降, 河床冲淤变化宜采用两岸的平均水位, 在关键河段断

收稿日期: 2023-04-18

作者简介: 王柱 (1979—), 男, 高级工程师, 从事公路、桥梁、港口和航道等工程测量。

面上左右两岸设立监测点观测横比降。横比降是垂直于河流纵断面水位差与其相应距离之比。在河流弯道处,水流受惯性和离心力共同作用而形成垂直于纵向水流的横比降。当水流由直段进入弯道后,水面的平衡状态遭到破坏,进入弯段出现横比降,最大横比降一般在弯顶附近,然后逐渐减小,至弯段出口处仍有一定横比降,出弯段后很快消失<sup>[3]</sup>。

## 1 河心比降

水位比降对河床冲淤变化有影响,因此不宜将凹岸和凸岸的水位比降作为研究河床演变的重要建模参数,此时应该用两岸的平均水位比降作为河心比降。当河流较窄,在没有横比降或横比降较小的情况下,观测任何一岸的水位比降都能满足要求。山区河流比降不易准确测量,山区河流有的两岸高山峻岭、地势陡峭,河床多为岩石和卵石构成,水面比降大,特别是在滩险河段水面纵、横比降更大。河流弯段水流是形成横比降的前提条件,河中有礁石、浅滩等水流障碍物,影响河中水面降落,也形成横比降;不同水位变化时期,河中水流与岸边有明显高低不同,加密岸边水尺或沿岸测定水面均不能准确反映主流真实水面比降结果。JTS 132—2015《水运工程水文观测规范》<sup>[4]</sup>规定:岸边与河心水位有明显差异时,宜加测河心水位,并分别计算相应的比降。河心比降是指河心水流流路上任意两点的水面高程与相应距离之比,河心是指河道中泓线处。目前国内河心比降观测多集中在对观测设备的研究,对河心比降观测方法研究相对较少。河心比降多采用全球卫星导航系统-载波相位差分技术(GNSS-RTK)观测方法,该方法平面观测精度高、高程观测偏低,在比降较小的河段会出现倒比降的异常情况。

本文以右江航道整治工程比降观测为例,对纵比降和河心比降特征进行分析,重点对河心比降的观测技术设备、观测方法、观测数据进行处理和分析,旨在为类似航道整治工程比降观测提供良好的技术范例。

## 2 比降观测方法

水位观测是纵横比降观测最主要的技术手段,观测精度高。虽然 GNSS-RTK 水位观测方法效率较高,但精度偏低,水尺观测方法精度相对较高。水尺包括直立式、倾斜式、矮桩式与悬锤式等多种结构形式,水位等于水面在水尺上的读数加上水尺零点的高程<sup>[5]</sup>。随着科技的发展,自记水位计能将水位变化的连续过程自动记录下来,已成为水位观测的主要方式,还可通过网络将观测的数据或图像远程传输<sup>[6]</sup>。

航道整治工程中航道水深一般大于 5 m,而且受来往船只的影响,设立水尺或自记水位计的方法不可行。目前国内航道整治工程河心比降的观测方法多采用一些实用新型专利<sup>[7-8]</sup>,将 GNSS-RTK 固定在专用设施上,精准量取 GNSS-RTK 天线到水面距离,设置 GNSS-RTK 按等距离或相同时间间隔记录,将设备沿河流中心顺水流淌,获取河流中心水面的三维坐标,可测得河流河心比降。这种方法在河道平直的河段测量成果比较理想,但在弯曲的河段,观测装置受水流和惯性运动的综合影响,往往不是沿河流中心流淌,而是逐步飘向岸边,故现场试验结果并不理想,在水流较急的河段甚至无法实行。

冯玉全等<sup>[9]</sup>在测量船上利用 GNSS-RTK 观测河心比降,船只逆水下行,顺流自上而下匀速行驶,通过 GNSS-RTK 采集三维数据,在不考虑 GNSS-RTK 测量误差和船只摇摆误差的影响,计算出河心比降。该方法具有测量时间短、区域和全段比降准确无改正的优点,但受水面波浪影响较大,导致该方法测量精度偏低,在水流流态复杂、流速大、落差大、河心比降较大的河流,局部比降反映不科学,同时须与岸边纵比降进行校核。在实际的航道整治工程中,受多种因素综合影响,水流复杂多变,经现场观察、分析、比对和实践,综合采用纵比降与河心比降相结合的实施方案,特别是采用水准测量的方法观测河心比降可以提高测量精度,满足测量精度要求。

3 工程应用

3.1 工程概况

右江航道整治工程(百色枢纽坝下一澄碧河口段)按内河Ⅲ级双线航道标准进行整治,通航1 000吨级船舶,设计航道尺度为3.0 m×60 m×330 m(水深×宽度×最小弯曲半径),主要内容为水下炸礁、疏浚、护岸、助导航及配套设施(含助导航工程、站房及附属设施、信息系统工程)、交叉和环境保护工程等。测区范围为106°30'E—106°38'E、23°52'N—23°54'N,属右江上游河段,位于广西百色市境内,全长15 km,其中航道前7 km相对顺直,后8 km蜿蜒曲折,贵百高速公路大桥—百林大桥间河道出现S形弯曲,河道水面宽80~330 m,水流平缓,实测流速0.11~1.11 m/s。

3.2 纵比降观测

纵比降观测水尺数量根据现场实际情况确定,全河段共布置20把临时水尺,水尺均匀分布在河道左岸,平均间距约750 m,弯曲段加密,水尺零点高程均按四等水准精度进行测量,包括三角高程联测和水准联测两种方式,多次测量取平均值,确保水位接测的精度,纵比降水尺分布见图1。

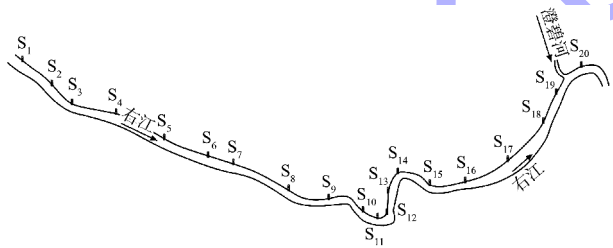


图1 纵比降水尺分布

水位观测采用人工观测和潮位仪相结合的方法。观测计时采用北京时间,观测前后精准对时,其误差不大于1 min,每小时观测1次,同步连续观测12个时段。人工观测精确到厘米,多次读数取平均值进行记录。潮位仪自动观测并记录,通过软件对潮位仪进行设置,每小时观测1次,每次取5次数据的平均值,投放到选定的比降观测点后,获取连续稳定的水位数据,共获取12组数据。

水尺读数经水尺零点换算为水位后,进行比

降计算,并对结果进行合理性分析,可疑的数据进行核查或复测,纵比降观测结果制成表格,包括水尺间距、水位、水位差和纵比降等,以某天13时的1组观测结果为例,见表1。

表1 纵比降观测结果

水尺	间距/m	水位/m	水位差/m	比降/ $10^{-4}$
S <sub>1</sub>		115.788		
S <sub>2</sub>	795	115.718	0.070	0.881
S <sub>3</sub>	584	115.644	0.074	1.267
S <sub>4</sub>	975	115.507	0.137	1.405
S <sub>5</sub>	1 163	115.430	0.077	0.662
S <sub>6</sub>	1 034	115.355	0.075	0.725
S <sub>7</sub>	560	115.300	0.055	0.982
S <sub>8</sub>	1 314	115.227	0.073	0.556
S <sub>9</sub>	920	115.182	0.045	0.489
S <sub>10</sub>	840	115.150	0.032	0.381
S <sub>11</sub>	372	115.133	0.017	0.457
S <sub>12</sub>	330	115.124	0.009	0.273
S <sub>13</sub>	422	115.118	0.006	0.142
S <sub>14</sub>	450	115.112	0.006	0.133
S <sub>15</sub>	780	115.104	0.008	0.103
S <sub>16</sub>	795	115.090	0.014	0.176
S <sub>17</sub>	1 093	115.077	0.013	0.119
S <sub>18</sub>	1 150	115.065	0.012	0.104
S <sub>19</sub>	712	115.056	0.009	0.126
S <sub>20</sub>	784	115.047	0.009	0.115

3.3 河心比降观测

河心比降水准测量是将水面比降器放在测船上,测船发动机关闭状态时在河道主流处于自然漂流状态,为避免动吃水对高程测量带来误差,通过在岸上水准仪同一时间或距离间隔测定水准尺读数。水准测量观测河心比降时,水准仪距水面的高差宜大于1.5 m,前视最大距离宜小于1 km。观测前对沿岸水文和地形环境进行详细踏勘,在右江左岸选择布测水准仪架设点和相应的临时水准基点,水准基点按四等水准测量精度进行接测,做好相应的标记,测站之间不能有观测盲区。采用可调节管状水准尺<sup>[10]</sup>,它是与水准尺相同的三面标记为基础构造设计和制作而成,见图2。可调节的管状水准尺可实现360°方位观测,通过增加尺长提高观测高差范围,观测精度达到毫米级,满足河心比降观测的要求。



图2 可调节管状水准尺

水面比降器是测量河中水面高程和比降的工具,由可调节的管状水准尺、平衡环、支架和竹筏4部分组成,水准尺安装在平衡环上,尺下吊

以重物,平衡环是由直径0.20与0.35 m的大小铁环各1个组成。铁环边上通过轴将小铁环穿在大铁环上,环轴可左右摆动,大铁环安装在支架调整杆上,可前后摆动,二轴平面方向互相垂直,当水面波动不稳时,二环可自由旋转,使水准尺随着重物保持垂直。水面比降器在竹筏上安装好后,在岸边平静水区域测定水面比降器的标尺零点与水面高程的差值 $k$ ,河心比降观测前、后均须精确测定,各次测定值差不超过3 mm,归算各观测河心水位观测数据。竹筏具有颠簸小、稳定、不易翻沉和拖带方便的优点,GNSS-RTK流动站固定在水准尺附近。水准仪以岸边提前设置好的临时水准点 $B$ 作为后视,以水面比降水准尺 $A$ 作为前视,水准点 $B$ 的高程为 $H_b$ ,后视尺读数为 $b$ ,管状水准尺读数为 $a$ ,见图3。河心水面高程 $H_a$ 公式为:

$$H_a = H_b + b - a - k \quad (1)$$

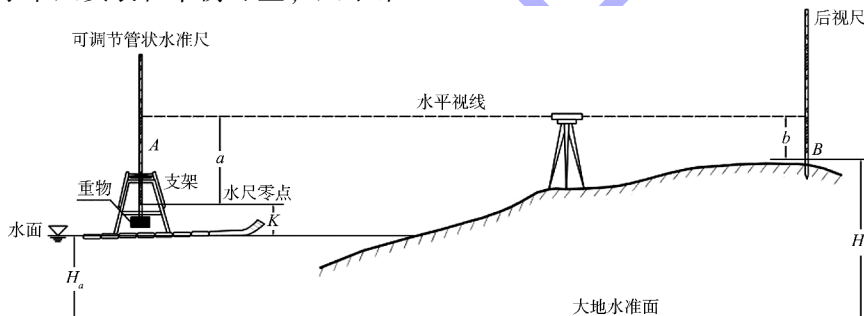


图3 河心水面高程水准观测布置

河心比降观测前应了解枢纽发电下泄水量情况,选择下泄水量稳定日期、天气晴好有利于观测的时段进行河心比降观测。将竹筏用绳索系在小船后,顺水流淌,通过划桨的方法控制竹筏沿河道中心流淌,减少波浪对竹筏的影响。GNSS-RTK流动站与水准仪同步观测,GNSS-RTK流动站测定水准尺的三维坐标。调整水准仪保证旋转任何一方向时水准泡都能居中,以便观测时不再动微倾螺旋、读数准确。水准仪同步观测水准尺读数,沿岸以多台水准仪交替进行水准观测的方式观测标尺,观测计时采用北京时间,观测前后精准对时,其误差不大于1 min,专人负责比降观测点定位和记录工作,RTK定位和水准观测优先采用按时刻自动观测和记录,测点间距可结合比降观测器移

动速度分析后设定,由定位人员通知水准观测人员同步观测,并做好观测记录,比降观测器抵达设计观测位置时应及时进行平面定位并同步进行水面高程观测,观测和定位记录以实际同步观测时的位置为准。观测充分反映测区水位变化,观测数据、对时等情况应及时记录。

### 3.4 内业数据处理

导出平面记录数据,包括点名、坐标、时间、解状态、解精度等信息,根据平面定位数据整理出每个比降点的测时平面坐标结果,包括比降点名、平面坐标和观测时间(精确到秒);将观测水准尺读数通过岸边后视点水准高程换算为水位,全线共观测101个点,并根据同步定位的江心观测点的位置坐标进行比降计算。河心比降观测成果



包括河心比降观测成果表和成果图(对应的水位比降线)见图 4 和表 2。

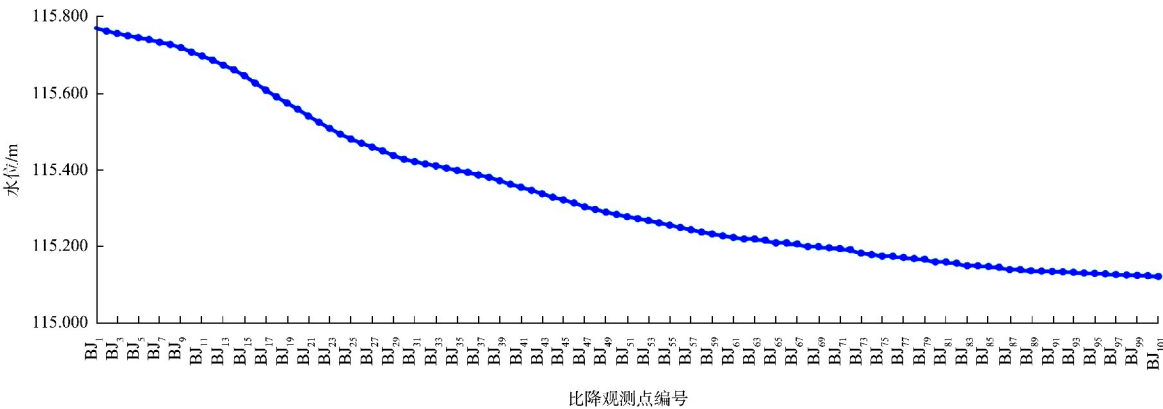


图 4 河心水位线

表 2 河心比降成果

点号	坐标/km		水位/ m	距离/ m	水位差/ m	比降/ 10 <sup>-4</sup>
	y 向	x 向				
BJ <sub>1</sub>	2 644. 925	450. 086	115. 769	—	—	—
BJ <sub>2</sub>	2 644. 876	450. 182	115. 761	108	0. 008	0. 741
BJ <sub>3</sub>	2 644. 840	450. 259	115. 755	85	0. 006	0. 706
BJ <sub>4</sub>	2 644. 803	450. 364	115. 749	111	0. 006	0. 540
BJ <sub>5</sub>	2 644. 737	450. 428	115. 744	92	0. 005	0. 542
BJ <sub>6</sub>	2 644. 669	450. 506	115. 739	103	0. 005	0. 483
BJ <sub>7</sub>	2 644. 605	450. 578	115. 732	96	0. 007	0. 729
BJ <sub>8</sub>	2 644. 537	450. 652	115. 726	100	0. 006	0. 599
BJ <sub>9</sub>	2 644. 457	450. 709	115. 718	98	0. 008	0. 813
BJ <sub>10</sub>	2 644. 390	450. 771	115. 706	92	0. 012	1. 308
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
BJ <sub>90</sub>	2 641. 637	458. 038	115. 133	102	0. 001	0. 098
BJ <sub>91</sub>	2 641. 707	458. 091	115. 132	88	0. 001	0. 114
BJ <sub>92</sub>	2 641. 819	458. 080	115. 131	113	0. 001	0. 089
BJ <sub>93</sub>	2 641. 908	458. 107	115. 129	93	0. 002	0. 216
BJ <sub>94</sub>	2 642. 011	458. 103	115. 128	103	0. 001	0. 097
BJ <sub>95</sub>	2 642. 110	458. 124	115. 127	102	0. 001	0. 098
BJ <sub>96</sub>	2 642. 203	458. 145	115. 125	95	0. 002	0. 211
BJ <sub>97</sub>	2 642. 304	458. 144	115. 124	101	0. 001	0. 099
BJ <sub>98</sub>	2 642. 400	458. 175	115. 123	101	0. 001	0. 099
BJ <sub>99</sub>	2 642. 493	458. 221	115. 122	104	0. 001	0. 097
BJ <sub>100</sub>	2 642. 557	458. 287	115. 120	93	0. 002	0. 216

4 结语

1) 航道整治工程由于水文条件复杂, 须因地制宜地采用多种水文观测方法。本文综合采用纵比降与河心比降相结合的实施方案, 有效解决了航道整治工程比降观测问题, 为工程设计施工提供完整的水文基础资料。

2) 水准测量结合水面比降器进行河心比降观测, 提高河心比降观测精度, 但用水准测量的方

法进行河心比降观测需多人多组协同配合, 对测量人员水准观测的熟练程度和精准度均要求较高。随着 GNSS 定位技术、千寻定位技术和我国北斗导航定位精度, 特别是高程测量精度的提高, 新技术必将优于传统测量方法。

参考文献:

[1] 王俊锋, 吕平毓, 王晓青. 三峡库区断面平均流速 3 种估算方法的讨论[J]. 人民长江, 2006(11): 8-9.

[2] 赵新生, 付光锋, 罗战伟. 河床演变研究中水位横比降观测的意义及措施[C]// 黄河水利科学研究院. 第六届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 1686-1689.

[3] 张耀先, 焦爱萍. 弯曲型河道挟沙水流运动规律研究进展[J]. 泥沙研究, 2002(2): 53-58.

[4] 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津水运工程勘察设计院, 中交天津港航勘察设计院有限公司. 水运工程水文观测规范: JTS 132—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[5] 李东明, 李辉. 关于水文信息的采集与处理[J]. 建筑工程技术与设计, 2014(25): 542-542.

[6] 钟杰, 孙红月, 沈水进. 山区沿河公路水毁要素监测研究[J]. 华东公路, 2011(4): 10-13.

[7] 胡其武, 王学文, 孙再刚, 等. 一种河心比降观测装置: 201920347997. 6[P]. 2019-03-19.

[8] 余忠孝, 陶平, 刘国伟, 等. 具有 GPS 观测姿态平衡稳定结构的河心比降器: 201822179428. 3[P]. 2018-12-25.

[9] 冯玉全, 高俊. 内河航道水深及比降测量实践[J]. 中国新技术新产品, 2018(22): 120-121.

[10] 洪剑, 朱春春, 卢中, 等. 可调节管状水准尺: 20222101 2574. 7[P]. 2022-04-25. (本文编辑 王璁)