

曼拉撒水文站固定式多探头雷达波测流系统比测分析

王蓓

云南省水文水资源局西双版纳分局, 中国·云南 景洪 666100

摘要:曼拉撒水文站为流量二类精度站, 位于云南省勐腊县, 澜沧江一级支流, 地处东经 $101^{\circ} 33' 06.0''$, 北纬 $21^{\circ} 25' 50.9''$, 在水资源管理、防洪减灾、航运等方面发挥重要作用。本文旨在分析雷达波在线测流系统流量计算模型方法, 依据人工实测与数据资料, 率定分析流量计算模型参数, 对成果进行精度评定。采用指标流速法率定流量模型, 并进行精度检验。结果表明: 指标流速与人工实测平均流速相关系数 $R^2=0.9852$, 系统误差 0.022% , 随机不确定度 9.243% , 各项测试指标均严格符合二类精度水文站的业务运行标准。

关键词: 雷达波在线测流系统; 流量计算模型; 精度评定; 指标流速法

Comparative analysis of fixed multi probe radar wave current measurement system at Manlasa hydrological station

Wang Bei

Xishuangbanna Branch of Yunnan Provincial Hydrology and Water Resources Bureau, China Yunnan Jinghong 666100

Abstract: Manlasa Hydrological Station is located in Mengla County, Yunnan Province, a first-class tributary of the Lancang River, located at $101^{\circ}33'06.0''$ east longitude and $21^{\circ}25'50.9''$ north latitude, which plays an important role in water resources management, flood prevention and mitigation, and shipping. This paper aims to analyze the flow calculation model method of the radar wave online flow measurement system. Based on manual measurements and data, the parameters of the flow calculation model are calibrated and analyzed, with the results evaluated for accuracy. The indicator velocity method is employed to calibrate the flow model, followed by precision verification. The results show that the correlation coefficient between the indicator velocity and the average manual measurement velocity is $R^2=0.9852$, with a systematic error of 0.022% and a random uncertainty of 9.243% , all test indicators strictly comply with the operational standards of Class II precision hydrological stations.

Keywords: Radar wave online flow measurement system; Traffic calculation model; Accuracy evaluation; Indicator flow rate method

0 引言

曼拉撒水文站位于澜沧江一级支流, 在水资源管理、防洪减灾、航运等方面具有重要作用。为了提高水文监测精度和效率, 近年来该站引入了固定式多探头雷达波测流系统, 以实现河道水流的实时监测和分析。

固定式多探头雷达波测流系统可以提供高精度的水流数据, 帮助水文站更准确地掌握河道的水文动态。该系统能够实现实时数据采集和传输, 确保在关键时刻能够获得水流信息, 有助于迅速做出决策。自动化测流系统减少了人工测量的工作量, 降低了运行成本, 同时减少了人工测量过程中的人为误差。高精度的水流数据对于水资源管理、防洪预警、河道生态保护等方面都具有重要意义^[1]。

本文的目的在于分析确定雷达波在线测流系统流量计算模型方法, 根据人工实测流量数据资料和雷达波在线测

流系统数据资料, 率定分析流量计算模型参数, 对率定分析成果进行精度评定, 为曼拉撒水文站流量在线监测提供科学依据, 更好地服务于流域水文水资源监测工作。

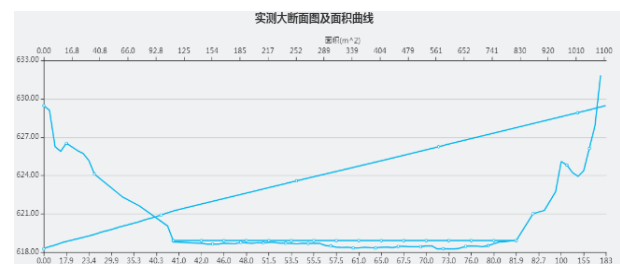


图1 曼拉撒水文站大断面图

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

曼拉撒水文站隶属于国家基本水文站网, 兼具重要水文站、省级报讯节点、国家水质监测断面及大河控制站

等多重职能, 定级为二类精度站, 位于云南省勐腊县东经 101° 33′ 06.0″、北纬 21° 25′ 50.9″ 的勐腊~勐捧县公路右旁南腊河右岸, 距河口(湄公河) 84.0km, 交通便捷, 控制南腊河干流 1311km² 集水面积(南腊河干流集水面积 4550km², 其中中国境内径流面积 3937km²), 旨在收集澜沧江一级支流南腊河区域基本水文资料, 掌握水量、泥沙、水质等水文要素, 为勐腊县县城和下游乡镇防汛、抗旱和水生态文明建设服务。

1.1.1 雷达流速传感器流速测量原理

雷达流速传感器采用多普勒效应原理测量流体表面流速, 如图 2 所示。通过计算多普勒频移与水体相对速度的关系, 得到流体表面流速^[2-4]。

多普勒效应原理测量流体表面流速的公式如公式 (1.1) 所示

$$v = \frac{f_d c}{2f_0 \cos\theta} \tag{1.1}$$

- 式中: v 是流体表面流速;
- f_d 是多普勒频移, 即接收频率与发射频率之差;
- c 是电磁波在介质中的传播速度;
- f_0 是发射波的频率;

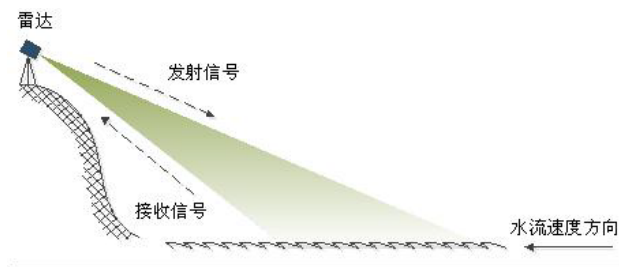


图2 雷达阵列流速传感器测量示意图

1.1.2 雷达流速传感器水位测量原理

雷达水位计通过测量电磁波的发射和接收时间差来计算雷达水位计与液面之间的距离即空高, 如式 (1.2) 所示, 换算出水深 = 安装高度 - 空高, 如图 3 所示。

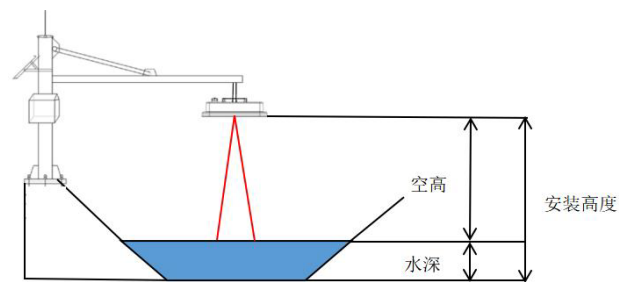


图3 雷达水位传感器工作原理示意图

$$d = \frac{c * t}{2} \tag{1.2}$$

式中:

- d 是雷达水位计与液面之间的距离;
- c 是电磁波波速(通常设定为 299792458m/s);
- t 代表电磁波自发射至回波接收的时间间隔。

1.2 数据及来源

研究所用的数据分为两类: 其一是自动监测数据, 使用曼拉撒水文站雷达波在线测流系统在 2023 年 7 月至 2024 年 9 月期间连续采集的成果, 涵盖 3 个雷达波探头的每 5 分钟间隔流速数据及系统每 5 分钟间隔流量数据; 其二是人工比测数据, 使用曼拉撒水文站 2023 年 7 月至 2024 年 9 月流速仪测流数据, 数据汇总成表格, 表格包含各测次的开始结束时间、水位、实际测量流量、过水面积等核心参量, 还在历次流速采集过程中叠加了同步水深探测环节, 以此作为动态反演河道过水断面面积的依据。站上日常人工观测记录水位, 可用于校核自动水位监测。转子流速仪流量成果由云南省水文水资源局西双版纳分局提供。

2 研究方法

2.1 流量计算模型

采用指标流速法^[5], 流量计算模型如下式:

$$V_m = f(V_1) \tag{2.1}$$

$$Q_{虚} = V_m A \tag{2.2}$$

式中:

- V_m —断面的实际平均流速, m/s;
- V_1 —系统的指标流速, m/s, 该值是对雷达探头的实测表面流速数据进行特定数学计算后得到的;
- f — V_m 和 V_1 所建立的数学转换函数关系;
- $Q_{虚}$ —表示依托拟合模型反演推算出的河道断面流量, m³/s;
- A —当前水位条件下的有效过水断面面积, m²。

2.2 技术路线与精度检验

2.2.1 率定分析技术路线

围绕公式 (2.1) 开展率定分析, 核心任务包含两个方面。一是指标流速 V_1 的计算方法; 二是推出断面的实际平均流速 V_m 和 V_1 之间的函数关系 f 。

V_1 通过对各个雷达波探头的流速数据进行计算分析来得到, 所确定的 V_1 应能充分反映断面流速分布特征, 并与 V_m 之间可以呈现最优的相关性。

在探究具体的函数关系 f 时, 研究中多引入一元线性、二元线性及多项式等多种数学结构进行尝试验证, 最终凭借相关系数的大小来确定合适的函数关系。

具体率定分析技术路线如图 4:

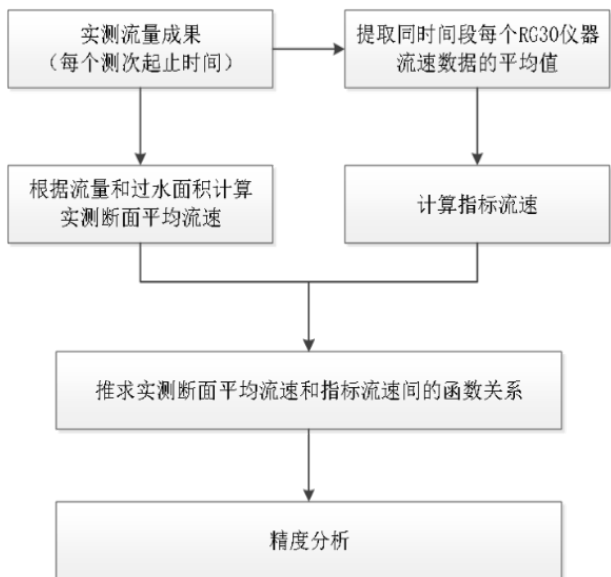


图4 率定分析技术路线图

2.2.2 精度检验方法

参照《水文资料整编规范》(SL/T 247-2020)^[6],对率定分析出的关系曲线,实测点不少于10个的均应计算实测点对关系线的标准差、随机不确定度和系统误差,并进行关系曲线检验,包括符号检验、适线检验和偏离检验。

实测点标准差、随机不确定度和系统误差:

(1) 实测点标准差可按下式计算:

$$S_e = \left[\frac{1}{n-2} \sum \left(\frac{Q_i - Q_{ci}}{Q_{ci}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

上式中: S_e 表示实测样本分布的标准差,以百分比(%)计; Q_i 表示第 i 个实际测量点的流量数值,单位为 m^3/s ; Q_{ci} 表示 Q_i 相对应的关系曲线上的流量,单位为 m^3/s ; n 表示参与统计的实际测量点总数。

(2) 随机不确定度与的关系如下:

$$X'_Q = 2s_e \quad (2.4)$$

式中: X'_Q 表示随机不确定度,置信水平为 95%。

(3) 当判定实测散点同拟合关系曲线之间未发生明显的单向系统偏倚时,可直接计算全体有效测点相对偏差的算术均值,以此作为该定线模型的综合系统误差。

关系曲线检验:

(1) 符号检验: 首先分类各实际测量点相对拟合曲线呈现正向偏离与负向偏离的具体个数(针对无偏离的零值测点,则正负各分配 0.5 个测点),再按照公式(2.5)计算符号检验统计量 u 值,然后将 u 值和表 1 中的 $u_{1-\alpha/2}$ 值进行比较,如果结果满足 $u < u_{1-\alpha/2}$,则接受假设;不满足则拒绝原假设。

$$u = \frac{|k-np|-0.5*}{\sqrt{npq}} = \frac{|k-0.5n|-0.5}{0.5\sqrt{n}} \quad (2.5)$$

式中: u 表示符号检验统计量; n 为有效实测点总数; k 表示正、负号出现的个数; p 、 q 都取值 0.5,表示正号与负号出现的概率; * 表示连续性修正系数,可以将离散型转换为连续型。

(2) 适线检验: 首先以实测水位值为基准,将所有样本点按从小到大的顺序重新编排。随后,自序列的第二项起,逐点比对相邻测点相对拟合曲线的误差符号(正向或负向)变换情况。若当前点的偏离符号与前一点相异,则赋值为 1;若符号保持一致,则赋值为 0。最终累计全序列中符号发生变换的总频次,记为 k 。再按公式(2.6)计算适线检验 u 值,将 u 值和表 1 中的 $u_{1-\alpha}$ 值进行比较,如果结果满足 $u < u_{1-\alpha}$,则接受假设;不满足则拒绝原假设。

$$u = \frac{(n-1)p-k-0.5}{\sqrt{(n-1)pq}} = \frac{0.5(n-1)-k-0.5}{0.5\sqrt{n-1}} \quad (2.6)$$

式中: u 为适线检验统计量; n 为有效实测点总数; k 为正负符号变换的次数,当满足条件 $k < 0.5(n-1)$ 时,应用公式(2.6)作适线检验,不满足则不作此检验; p 、 q 都取值 0.5,分别表示正负符号变换,不变换的概率。

(3) 偏离数值检验: 首先按下列给出的公式分别计算 t 与 S_p ,再将 t 与表 2 中的 $t_{1-\alpha/2}$ 值比较,如果结果满足 $|t| < t_{1-\alpha/2}$ 则接受假设;不满足则拒绝原假设。

$$t = \frac{\bar{p}}{S_p} \quad (2.7)$$

$$S_p = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\sum (p_i - \bar{p})^2 / (n(n-1))} \quad (2.8)$$

式中: t 表示偏离数值检验统计量; \bar{p} 表示全体有效测点相对偏差的算术均值; S_p 表示该平均相对偏离度(\bar{p})所对应的标准误差; S 表示 p 的标准差; n 表示参与定线精度核验的实测样本总容量; p_i 表示具体到第 i 个数据点时,其实测值偏离标定曲线的相对误差值。

(4) 只有当符号检验、适线检验、偏离数值检验三种检验结果均接受原假设时,方可判定定线成果成立;如果其中任何一项或多项检验未能通过,则需要分析未通过原因,对原定线方案作针对性调整后,再重新进行验证,直至三种检验完全通过。

(5) 显著性水平 α 值的选用与临界值的确定要求:

① 符号检验: 其显著性水平 α 统一标定为 0.25,相应的判别临界值 $u_{1-\alpha/2}$ 需通过查阅表 1 来最终获取。

② 适线检验: 该项检验的 α 值允许在 0.05 至 0.10 的区间内进行灵活选定,其判别临界值 $u_{1-\alpha}$ 同样对照

表1进行检索。

③偏离数值检验：要求将 α 取值界限控制在0.10至0.20的范畴内，最终的检验临界值 $t_{1-\alpha/2}$ 则通过检索表2来确定。

表1 临界值 $u_{1-\alpha/2}$ 与 $u_{1-\alpha}$

显著性水平 α	0.05	0.10	0.25
置信水平 $1-\alpha$	0.95	0.90	0.75
$u_{1-\alpha/2}$	1.96	1.64	1.15
$u_{1-\alpha}$	1.64	1.28	-

表2 临界值 $t_{1-\alpha/2}$

$k \backslash \alpha$	6	8	10	15	20	30	60	∞
0.05	2.45	2.31	2.23	2.13	2.09	2.04	2.00	1.96
0.10	1.94	1.86	1.81	1.75	1.73	1.70	1.67	1.65
0.20	1.44	1.40	1.37	1.34	1.33	1.31	1.30	1.28
0.30	1.13	1.11	1.09	1.07	1.06	1.06	1.05	1.04

注：表中的 k 代表检验模型的自由度，在偏离数值检验中，按照 $k=n-1$ 计算（ n 为参与核算的有效实测样本总数）；在学生氏 t 检验中，按照 $k=n_1+n_2-2$ 计算（ n_1 、 n_2 分别为各自代表第一组和第二组对比序列的有效测点容量）。

3 结果与讨论

3.1 指标流速稳定性分析

本研究将雷达波测流系统所搭载的3个探测单元获取的瞬时流速加以算术平均，以此得到指标流速。图5为指标流速和缆道流速仪平均流速的变化趋势对比图。

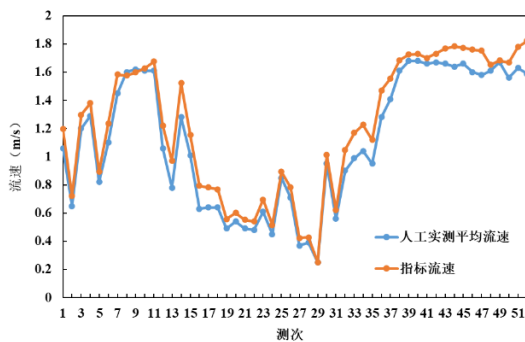


图5 平均流速趋势对比图

观察图5可以发现，指标流速和人工实测平均流速的趋势变化基本一致。

3.2 相关关系率定

本节以雷达波在线系统输出的指标流速作为自变量，以流速仪人工测量的均速为因变量，深度构建了两者的数学回归模型，并系统开展了定线精度评估。两者相关分析图如下。

分析图6可知，两者具有很强的相关性，相关系数 $R^2=0.9852$ 。采用的相关关系模型为一元二次方程 $V_A=0.1292V_1^2+0.6808V_1+0.0683$ ，其中， V_A 表示依据雷达系

统拟合推演得出的断面平均流速测算值， V_1 表示系统提取的指标流速。

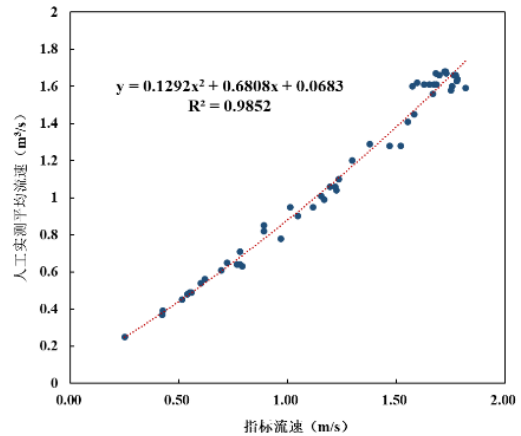


图6 雷达波测流系统指标流速和人工实测平均流速相关分析图

3.3 检验分析

将各测次的指标流速代入所构建的一元二次回归模型（ $=0.12922+0.6808+0.0683$ ）求解得出雷达系统的断面平均流速推算值。再以人工现场实测的断面均速为校核基准，对该回归模型实施了系统性的精度评估，结果如表3所示。

表3 指标流速和断面平均流速关系曲线检验表

序号	测次	相应水位 (m)	人工实测平均流速 (m/s)	线上流速 (m/s)	偏差P (%)
1	19	618.94	0.49	0.489	-0.28
2	29	618.96	0.25	0.248	-0.95
3	16	618.97	0.63	0.689	9.43
4	20	618.97	0.54	0.525	-2.74
5	24	618.97	0.45	0.454	0.86
6	22	618.98	0.48	0.473	-1.38
7	13	618.99	0.78	0.851	9.08
8	21	618.99	0.49	0.483	-1.48
9	18	619.02	0.64	0.667	4.26
10	17	619.03	0.64	0.680	6.23
11	27	619.03	0.37	0.380	2.63
12	23	619.06	0.61	0.604	-1.02
13	28	619.06	0.39	0.383	-1.86
14	15	619.09	1.01	1.027	1.67
15	31	619.11	0.56	0.541	-3.35
16	26	619.13	0.71	0.680	-4.29
17	12	619.15	1.06	1.093	3.09
18	2	619.16	0.65	0.627	-3.61
19	35	619.23	0.95	0.992	4.47
20	25	619.26	0.85	0.779	-8.38
21	34	619.3	1.04	1.098	5.56
22	5	619.31	0.82	0.779	-4.98
23	14	619.32	1.28	1.404	9.68
24	30	619.33	0.95	0.890	-6.33
25	32	619.36	0.90	0.925	2.73

续表3

序号	测次	相应水位 (m)	人工实测平均 流速 (m/s)	线上流速 (m/s)	偏差P (%)
26	33	619.39	0.99	1.041	5.12
27	1	619.47	1.06	1.067	0.65
28	36	619.54	1.28	1.348	5.30
29	6	619.56	1.10	1.107	0.60
30	3	619.78	1.20	1.170	-2.54
31	37	619.86	1.41	1.439	2.03
32	4	619.89	1.29	1.254	-2.82
33	46	620.27	1.60	1.667	4.18
34	7	620.58	1.45	1.470	1.35
35	52	620.63	1.59	1.736	9.20
36	45	620.71	1.66	1.682	1.35
37	8	620.76	1.60	1.462	-8.61
38	43	620.88	1.66	1.675	0.89
39	41	620.91	1.66	1.600	-3.64
40	51	620.97	1.63	1.689	3.59
41	11	621.05	1.61	1.572	-2.39
42	38	621.09	1.61	1.583	-1.68
43	9	621.33	1.62	1.487	-8.22
44	47	621.39	1.58	1.658	4.93
45	42	621.41	1.67	1.635	-2.12
46	10	621.43	1.61	1.520	-5.60
47	44	621.68	1.64	1.693	3.23
48	40	621.75	1.68	1.632	-2.87
49	39	621.94	1.68	1.627	-3.16
50	50	623.16	1.56	1.564	0.28
51	49	624.14	1.67	1.581	-5.33
52	48	624.3	1.61	1.546	-3.95
样本容量: N=52 正号个数: 26 符号交换次数: 34					
符号检验: $u=-0.139$ 允许: 1.15 (显著性水平 $\alpha=0.25$) 合格					
适线检验: u 允许: 1.64 (显著性水平 $\alpha=0.05$)					
不需检验 $K=26>0.5 (n-1)$					
偏离数值检验: $ t =0.035$ 允许: 1.7 (显著性水平 $\alpha=0.10$) 合格					
标准差: $Se=4.621\%$ 随机不确定度: 9.243% 系统误差: 0.022%					

3.4 精度评价

曼拉撒水文站属于流量二类精度站,按照《水文资料整编规范》(SL247-2012) 3.3.2-1对采用单一曲线法定线的二类精度水文站规定,定线精度指标为:系统误差 $\pm 1\%$,不确定度10%;考虑到雷达波测流属于表面流速法,与水面浮标法原理相近,规范允许其随机不确定度在基础限值上放宽2%~4个百分点^[7];所以,最后确定曼拉撒水文站测流定线随机不确定度范围为12%~14%。

分析表3数据可以知道,反演所得的断面平均流速,在同人工实测均速进行系统的定线精度比时展现了极高的契合度。关系曲线检验结果表明:三种检验结果均通过,系统误差为0.022%,远小于规范规定的1%,随机不确定度为9.243%,满足规定的小于12%~14%。因此,曼拉撒水

文站定线精度指标满足规范规定。

4 结论及建议

4.1 结论

对曼拉撒水文站固定式三探头雷达波测流系统进行比测分析,对雷达波测流系统所搭载的3个探测单元获取的瞬时流速加以算术平均,以此得到指标流速。以雷达波在线系统输出的指标流速作为自变量,以流速仪人工测量的均速为因变量,深度构建了两者的数学回归模型,最优模型为:一元二次多项式 $V_A=0.1292V_1^2+0.6808V_1+0.0683$,相关系数 $R^2=0.9852$ 。三种检验结果均通过,系统误差为0.022%,远小于规范规定的1%,随机不确定度为9.243%,小于规定的12%~14%,曼拉撒水文站定线精度指标满足规范规定。

4.2 建议

(1) 分水位级深化比测:后续测验应合理控制高、中、低各类水位数据的均衡分布,根据不同水位级别分别标定流速转换系数,并开展相应的数据验证。此外,水文站应持续丰富比测数据库,以便为云南地区普及侧扫雷达测流技术提供坚实、可靠的技术保障。

(2) 数据质量控制优化:建议加强异常流速数据的智能识别与剔除算法研究,有效剔除无效测值,提升流量推求结果的稳健性与可靠性。

参考文献:

- [1] 聂岳正,冯凯.固定式双探头雷达测流系统在长坪水文站中的应用[J].广西水利水电,2025(01):119-122.DOI:10.16014/j.cnki.1003-1510.2025.01.026.
- [2] 周水利.固定式多探头雷达波测流系统在缸瓦窑水文站的应用研究[J].陕西水利,2023(05):44-46+50.DOI:10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2023.05.019.
- [3] 张琦.雷达波流速仪在中小河流流量测验中的应用分析[J].黑龙江科学,2017,8(02):47-48.
- [4] 李永华.大藤峡水文站五探头固定式雷达测流系统比测分析[J].广西水利水电,2023(01):30-32+36.DOI:10.16014/j.cnki.1003-1510.2023.01.008.
- [5] 指标流速法[J].中国水利,2007(11):69.
- [6] 水利部水文司.水文资料整编规范:SL/T 247-2020[S].北京:中国水利水电出版社,2021.
- [7] 水文资料整编规范:SL 247-2012[S].2012.

作者简介:王蓓(1981.01-),女,拉祜族,云南省西双版纳傣族自治州勐海县,工程师,本科,研究方向:水文监测、水文预报,规范水文工作,为开发、利用、节约、保护水资源和防灾减灾服务。