

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180415

北京市三角形剖面堰水位推流应用研究

臧 敏, 季明锋, 温子希, 张 欣, 王 阳

(北京市水文总站, 北京 100089)

摘 要:为解决河道小水等生态流量的监测难题,实现水资源的精细化管理,北京市在部分河道断面采用三角形剖面堰使水位流量单值化,并开展堰上水头连续监测,通过典型断面不同水位流量的现场精测,与三角形剖面堰水位流量关系理论线进行比对分析,发现堰上水头在低水区间流量实测值与理论值偏差在误差范围内,因此可在小水时利用理论线进行水位推流、中高水利用率定线进行水位推流。三角形剖面堰可推广应用于北方典型河道,满足防洪、景观、水资源、水质考核等要求,更有助于生态流量、海绵城市项目典型断面等水量监测。

关键词:水文测验;三角形剖面堰;理论线;比对分析

中图分类号:TV11

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)05-0055-06

1 引言

为实现水资源的精细化管理,北京市在部分河段开展了标准断面建设,设置了不同式样的测流堰,解决了基流和小水精测问题,大大降低了驻测和巡测工作强度,提高了测验效率,实现了水位流量的自动报讯。目前北京市共建成31座测流堰,根据堰壁缺口形状有V形堰、三角形剖面堰等,其中以三角形剖面堰应用最为广泛,全市已有17个,最早一批三角形剖面堰从2004年开始运行,至今堰体保持完好。

通过分析三角形剖面堰理论线和实测定线之间的误差,来确定三角形剖面堰理论线在一定量程区间的可靠性,既解决已建三角形剖面堰断面维持长期低水时的巡测问题,为理论线的启用奠定基础,又可为三角形剖面堰在生态流量监测、海绵城市流量监测等应用提供支撑。

2 资料及方法

由于北京市天然河道断面常年维持基流或断流,汛期受上游降水影响偶尔产生径流,但水位涨幅不大,保持在低水区间运行,在这种情况下,无法采用常规的水文监测方法,只能采取对水流约束控制,从而形成水

面明显的局部降落,产生一定的水头差。因此利用理论线和实测定线进行比对分析时,主要侧重于低水区域。据统计,受降水和下垫面影响,大部分河道低水区间时段占全年的99%以上,因此验证低水区间理论线的可靠性对于北京市日常驻测和巡测工作具有十分重要的意义。部分三角形剖面堰自建成后先后出现了多次小洪水过程,为低水区流量误差分析研究积累了资料。

结合实际过流和实测定线工作,从已建成的三角形剖面堰中选择雁翅(永定河)、英城(洵河)、张家坟(白河)、下会(潮河)、青白口(清水河)、陇驾庄(永定河)、窑上闸(小清河)、长阳(哑叭河)、延庆东大桥(妫水河)9个断面(见表1)。其中:雁翅、英城、张家坟、下会站是国家重要水文站,另外5个断面为巡测断面。雁翅、英城站资料质量较好,有10年以上资料,实测到了最大、最小水位变幅区间的水位及流量。张家坟、下会站是在矩形槽中设置的流线型三角形剖面堰,人工实测了堰上槽内全部水位及流量的变幅过程,两站资料质量均较好,有10年以上资料。窑上闸、青白口、陇驾庄站、长阳站、延庆东大桥等站为近年来新建断面,也已经历了多次过水,监测到了低水区间部分流量。

本次分析以实测资料连续且较好的雁翅、英城、张家坟、下会等4个断面为基础,开展水位流量关系

收稿日期:2018-12-01

作者简介:臧敏(1979-),男,江苏宜兴人,教授级高级工程师,主要从事水文水资源研究和管理工。E-mail:whzm79@163.com

定线并通过三性检验，以此作为基准值来比对理论线在一定量程区间内的可靠度。通过其他 5 个断面实测数据进一步验证理论线的可靠性，从而解决三角形剖面堰断面在低水时启用理论线水位推流的问题。

表1 三角形剖面堰基本情况表

Table1 The characteristics of the triangular cross-section weir

序号	名称	堰高 /m	断面 形式	堰上水头 /m	实测区间 /m
1	雁翅	1.00	梯形	0~2.38	0~0.88
2	英城	1.00	梯形	0~1.00	0~1.00
3	长阳	0.60	梯形	0~2.25	0~0.81
4	院驾庄	0.60	梯形	0~0.89	0~0.60
5	窑上闸	0.60	梯形	0~0.88	0~0.58
6	张家坟	0.55	矩形	0~0.45	0~0.45
7	下会	0.50	矩形	0~0.60	0~0.60
8	延庆东大桥	0.50	矩形	0~1.87	0~1.66
9	青白口	0.30	梯形	0~0.45	0~0.45

3 误差分析

3.1 低水误差分析

雁翅、英城、张家坟、下会站三角形剖面堰建成运行以来,经历了多次断面过水过程,经人工实测定线,低水区间水位流量呈单一稳定关系。

3.1.1 堰形介绍

三角形剖面堰(见图 1)设置在顺直河段,河槽设置成梯形或矩形,河道硬化 100m 以上,中间为混凝土,往上下游分别以浆砌石、铅丝石笼过渡,堰的上下游坡分别为 1:2 和 1:5,水位监测位置设置在堰上 2 $h_{\max}$ 处($h_{\max}$ 为堰上最大水头)^[1]。

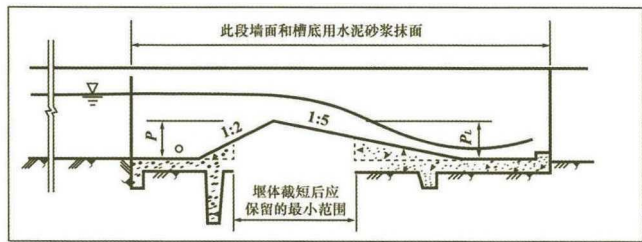


图1 三角形剖面堰剖面图
Fig.1 The profile of the triangular cross-section weir

3.1.2 实测与理论公式对比

(1)雁翅站。雁翅站为梯形槽中设置的三角形剖面堰,堰高 1.0m,边坡系数为 1.8,槽内堰上水头最大可达 2.38m。2004 年三角形剖面堰运行使用后,监测到堰

上水头范围为 0~0.88m,对应水位 233.60~234.48m,最大流量发生在 2016 年 7 月 20 日,为 107m³/s,在槽内行洪。

通过对实测流量数据进行分析,发现水位流量关系成单一线,根据《水文资料整编规范》对其定线^[2],并进行关系线检验,系统误差 0.78%,随机不确定度为 5.59%,本次定线符合规范要求,以此作为该断面的标准线。

按照《水工建筑物与堰槽测流规范》中梯形河槽中三角形剖面堰的流量公式计算,得到不同水位的流量值。通过点绘对比分析,低水区间理论线与人工标准线吻合较好,低水部分比测随机不确定度 4.7%,系统误差-0.2%,符合《河流流量测验规范》要求^[3](见表 2 和图 2)。从目前资料来看,雁翅站水位在 234.4m(流量小于 100m³/s)以下时,可以用理论线进行水位推流。

表2 雁翅站测流堰理论公式与人工实测流量相对误差表
Table2 The relative errors of the flow calculated with theoretical weir formula and the observed values at the Yanchi station

堰上水位 /m	堰理论公式 /m ³ ·s ⁻¹	人工实测 /m ³ ·s ⁻¹	相对误差 /%
233.57	0	0	0
233.70	4.04	3.91	-3.32
233.80	11.5	11.0	-4.35
233.90	21.8	22.0	0.92
234.00	34.5	35.3	2.33
234.10	49.5	47.9	-3.23
234.20	61.6	64.2	4.22
234.30	77.6	76.0	-2.06
234.40	94.9	98.5	3.79

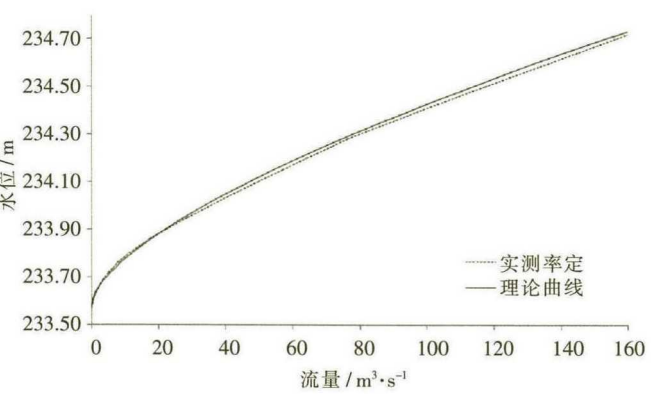


图2 雁翅站水位流量关系图
Fig.2 The relationship between the water stage and discharge at the Yanchi station

(2)英城站。英城站为梯形槽中设置的三角形剖面堰,堰高 1.0m,边坡系数为 1.8,槽内堰上水头最大为 1.00m。2006 年三角形剖面堰运行使用后,实测到了槽内全水头范围 0~1.00m,对应水位 13.00~14.00m。最大流量发生在 2012 年 7 月 22 日,为 216m³/s,超出堰槽 2.75m。

根据《水文资料整编规范》对槽内人工实测定线,并进行关系线检验,系统误差为 0.56%,随机不确定度为 4.91%,本次定线符合规范要求。

通过对比分析,槽内部分(70m³/s)理论线与人工实测定线吻合较好,低水部分比测随机不确定度 5.2%,系统误差 0.3%,符合《河流流量测验规范》要求(见表 3、图 3)。因此英城站水位 14.00m(小于 70m³/s)以下时,可以用理论线来推求流量。

表3 英城站测流堰理论公式与人工实测相对误差表
Table3 The relative errors of the flow calculated with theoretical weir formula and the observed values at the Yingcheng station

堰上水位 / m	堰理论公式 / m³·s ⁻¹	人工实测 / m³·s ⁻¹	相对误差 / %
13.00	0	0	0
13.10	2.11	2.04	-3.32
13.20	5.65	5.48	-3.00
13.30	11.1	11.6	4.50
13.40	17.6	17.0	-3.41
13.50	24.5	24.9	1.63
13.60	32.1	33.6	4.67
13.70	41.3	40.6	-1.69
13.80	49.6	51.3	3.43

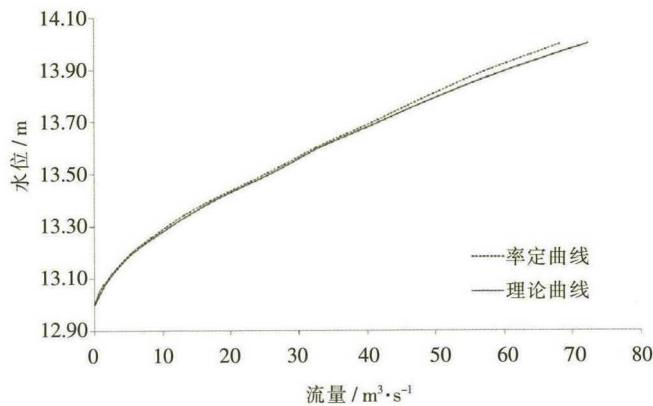


图3 英城站水位流量关系图
Fig.3 The relationship between the water stage and discharge at the Yingcheng station

(3)张家坟站和下会站。这两站为流线型三角形剖面堰,在两个坡面之间的锐缘棱用一个与两个坡面相切的圆弧所代替,形成流线型的堰顶。相对于三角形剖面堰,该类堰形过流能力更大,并能减少淤积。张家坟和下会两站均将流线型三角形剖面堰设置在复式断面矩形槽中,槽深分别为 1m、1.1m,堰高分别是 0.55m、0.5m,适用的水头范围分别是 0~0.45m、0~0.6m。利用全区间水头实测资料,人工实测定线和理论线基本吻合(见图 4 和图 5)。

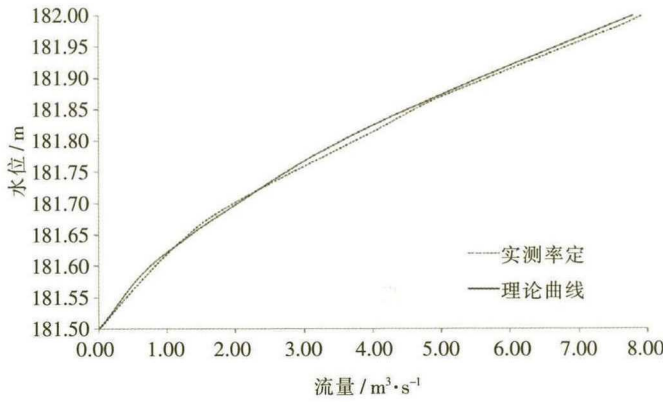


图4 张家坟站水位流量关系图
Fig.4 The relationship between the water stage and discharge at the Zhangjiafen station

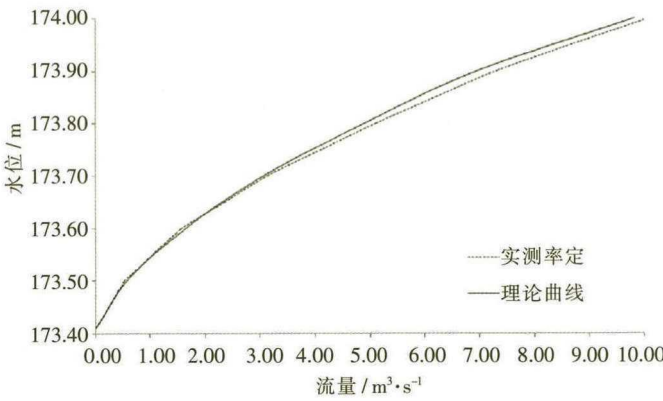


图5 下会站水位流量关系图
Fig.5 The relationship between the water stage and discharge at the Xiahui station

3.2 中高水误差分析

在中高水时,堰流形式从自由流变为淹没出流,随着 $h_{\text{堰下}}/h_{\text{堰上}}$ (堰下游水头/堰上游总水头)变化,淹没系数从 1 趋于 0.5。由于目前三角形剖面堰下未设置水头观测设施,理论公式中未考虑淹没系数,造成中高水区域时同等水位下理论线较实测定线流量偏

大,且水位越高偏值越大。

因此,中高水部分的水位流量关系曲线只能依靠对洪水过程的连续监测,开展定线后进行生产应用。

3.3 自由流-淹没出流过渡分析

低水到中高水过渡时,三角形剖面堰流态随之变化,理论计算参数也随之发生变化。矩形河段三角形剖面堰,当 $h_{\text{堰下}}/h_{\text{堰上}}$ (堰下游水头/堰上游总水头) >0.24 时为淹没出流;梯形河段三角形剖面堰,当 $h_{\text{堰下}}/h_{\text{堰上}}$ (堰下游水头/堰上游总水头) >0.2 时为淹没出流。

以梯形河槽三角形剖面堰为例:

$$Q=C_D C_V C_s C_f \sqrt{g} b h^{3/2} \tag{1}$$

式中: C_D 为流量系数; C_V 为行近流速系数; C_s 为形状系数; C_f 为淹没系数; $C_s=1+\frac{4m_a h}{5b}$, m_a 为梯形断面边坡系数。当边坡系数 m_a 分别为1.732(边坡角为 30°)和0.577(边坡角为 60°)时,流量系数 C_D 可分别采用0.605和0.615。自由流时的 C_V 、淹没流时的 $C_V C_f$ 均可通过查算图获得。

当梯形断面边坡按标准确定后,流量系数 C_D 为常值。随着堰下水头的升高,行进流态从自由流向淹没流过渡。 $C_V C_s$ 的乘积从1逐渐变大,一般小于1.5。淹没系数 C_f 从自由流时的1逐渐减小,最终趋向于0.5。

从槽内理论线与人工实测的线型分布看,符合相关逻辑关系,即:未考虑淹没系数的高水区间理论线流量要比同等水位量级的人工实测定线流量偏大。

4 验证及应用

4.1 验证

通过以上4个站理论线和人工实测定线进行比对,低水区间线型基本吻合,误差在标准规范以内,水位流量关系曲线呈单一关系,结合现有实测资料,确认低水区间堰上水头在一定量程内,可将该区间理论线作为日常低水位推流应用。

窑上闸、长阳、陇驾庄、青白口、延庆东大桥等站先后出现断面过流,将实测资料点绘到低水区间理论线图中,发现实测点偏离理论曲线相对误差均在15%以内(见图6~图10),进一步验证了可将理论线作为低水时生产应用的结论。

4.2 理论线应用

在降雨产流时,断面巡测工作任务重,无法兼顾所有三角形剖面堰断面。利用低水区间理论线推流,可以解决部分断面人工巡测问题。

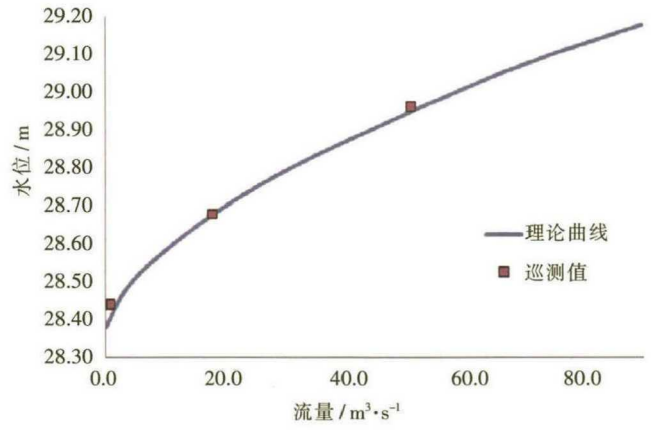


图6 窑上闸站水位流量关系图

Fig.6 The relationship between the water stage and discharge at the Yaoshangzha station

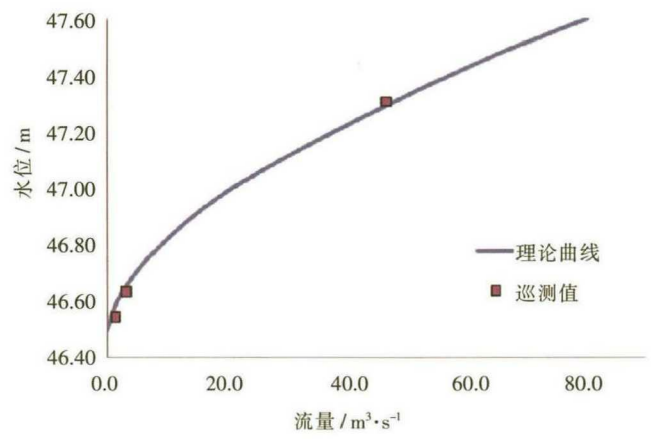


图7 长阳站水位流量关系图

Fig.7 The relationship between the water stage and discharge at the Changyang station

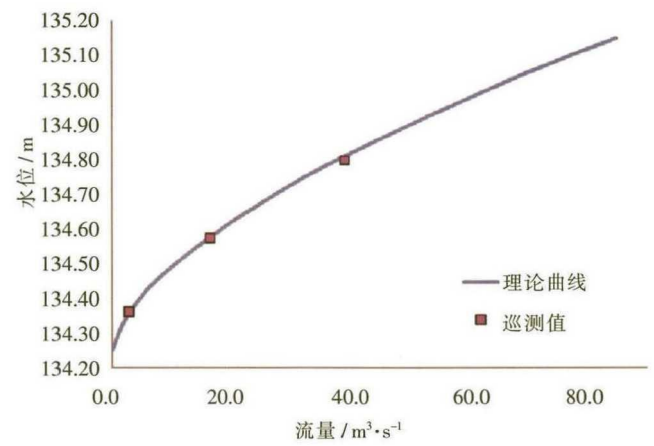


图8 陇驾庄站水位流量关系图

Fig.8 The relationship between the water stage and discharge at the Longjiazhuang station

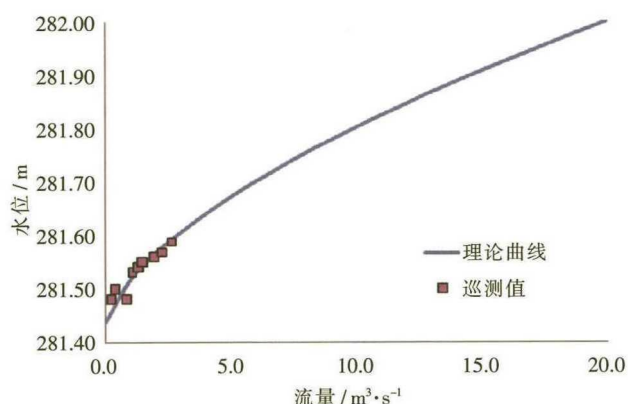


图9 青白口水位流量关系图

Fig.9 The relationship between the water stage and discharge at the Qingbaikou station

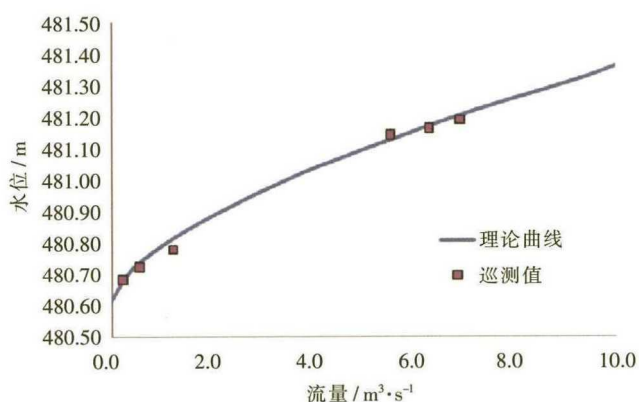


图10 东大桥站水位流量关系图

Fig.10 The relationship between the water stage and discharge at the Dongdaqiao station

平谷区杨家台站(杨家台水库入库站)为山洪实验站,地处偏远,流域面积 10.9 km^2 ,断面为矩形三角形剖面堰,堰高 0.5 m 。2017年8月2~3日杨家台站累计日雨量 115.5 mm ,自动水位计监测到了水位涨幅,利用理论线进行推流,得到该断面最大流量 $3.52\text{ m}^3/\text{s}$ 。

昌平区七孔桥站(十三陵水库入库站)流域面积 69 km^2 ,断面为梯形三角形剖面堰,堰高 0.6 m 。2018年8月8日,上游德胜口站最大 60 min 降雨量为 78.5 mm ,断面受强降雨影响出现产流,利用理论线进行推流,得到该断面建站后最大流量 $11.4\text{ m}^3/\text{s}$,与洪水调查 $11.7\text{ m}^3/\text{s}$ 基本一致。

通过三角形剖面堰理论线的应用,减轻了全年水文巡测的压力。对于未经过人工实测定线的标准断面,在遇到降雨产流时要注重比测率定工作,验证理论线的可靠性,提交该站单值化成果。

5 影响因素

按照三角形剖面堰设计图施工后,小水时可直接用理论线推流,水位流量关系呈现单值化,可以实现有人看护、无人值守的水文巡测模式。从系统误差角度分析,沉降、堰顶不平、冲淤、堰下顶托等因素会影响理论线和实测定线的吻合度,特别是堰下顶托、淤积对堰的使用影响较大,堰下顶托会造成理论线和实测定线吻合的水位量程缩短,对应流量量级缩小;堰上严重淤积则造成水位抬高而实际流量变小。

(1)沉降影响水深。三角形剖面堰结构经过建设后,会产生整体沉降,如未对零点高程进行校准,会造成理论曲线推流偏小。

(2)堰顶不平影响水资源量。三角形剖面堰建设完成后,堰顶不平高差在 1 cm 以内,一般以堰顶最高点作为堰上水头的零点,由于水位的误差为 2 cm ,因此水位监测无法纠正堰顶水平。建议在施工时应注意测量精度,改进施工工艺,尽量避免堰顶水平出现大的偏差。从当前施工工艺和测量精度来看,堰顶水平高差可控制在 2 mm 内,并以此作为验收标准。

(3)设置堰上水头监测合理位置。以水资源量监测任务权重较大的站点为例,常年维持基流,堰上水头监测布设在 $2h_{\text{max}}$ 处。从实测数据来看,在自由流时, 3‰ 的河道比降堰上水面比降接近零,堰上水头监测位置影响不大。

(4)堰上淤积影响理论线。从实测数据来看,堰上一般淤积对堰流影响较小,但当堰上严重淤积,甚至部分区域与堰顶淤平时,同级水位时理论线流量较实测定线偏大。

(5)堰下顶托影响理论线。当堰下河道行洪不畅,到一定量级流量时,理论线流量较实测定线偏大。

6 结论与建议

(1)通过典型断面低水区间实测定线与理论线进行比对,比测随机不确定度不超过 7% ,系统误差不超过 2% ,满足相关标准规范要求。在北方地区维持基流或干涸河道,三角形剖面堰建成后,在低水时可依照理论曲线进行推流应用。为获得理论线的最大水头区间,避免小水时出现淹没出流,在设计时应尽量增加堰高,堰高在 1 m 以上,从而获得最大低水区间。

(2)由于当前三角形剖面堰未设置堰下水头监测

设施,制订理论线时,在淹没出流状态未考虑淹没系数 C_f ,中高水理论线推算流量数据较实测偏大。因此要按照水文巡测规范要求,做好洪水过程的连续监测,开展水位流量关系的定线工作,确定断面报汛曲线。

(3)影响三角形剖面堰流量精度的物理因子主要涉及施工精度、沉降、淤积、堰下顶托及堰上水头监测位置等,特别是堰下顶托会造成理论线和实测定线吻合的水位量级缩短,对应流量量级缩小,而堰上严重淤积则造成水位抬高而实际流量变小。因此在考虑该类型堰时,应选择顺直且行洪通畅处河段,堰形断面按照矩形或梯形对称进行设计,并细化施工工艺,加强清淤运维,开展人工巡测定线比对等工作,发挥小水时三角形剖面堰的水位流量单值化功能。

(4)通过三角形剖面堰建设,改变了河道断面的水流形态,使水位流量呈现单一关系,在低水监测时可靠性高,可为北京地区及北方干旱地区河道提供小水的精测方法,也可在海绵城市项目中合适断面进行推广应用,特别适用于生态流量的水量计量。

参考文献:

- [1] SL537-2011, 水工建筑物与堰槽测流规范[S]. (SL537-2011, Code for Measurement of Discharge by Hydraulics Structures, Weirs and Flumes [S]. (in Chinese))
- [2] SL247-2012, 水文资料整编规范 [S]. (SL247-2012, Code for Hydrologic Data Processing [S]. (in Chinese))
- [3] GB50179-2015, 河流流量测验规范[S]. (GB50179-2015, Code for Liquid Flow Measurement in Open Channels [S]. (in Chinese))

Research on Discharge Calculating for Water Stage at Triangular Cross-section Weirs in Beijing

ZANG Min, JI Mingfeng, WEN Zixi, ZHANG Xin, WANG Yang

(Beijing Hydrology Center, Beijing 100089, China)

Abstract: In order to solve the problem of monitoring low ecological flow and realize the fine management of water resource, this paper studied the relationship between the water stage and discharge by triangular weirs at some stream cross-sections in Beijing. The water stage at the weirs were measured continuously. The comparison between the measured results and theoretical relationship of the water stage and discharge at triangular weir cross-sections shows that the flow head of the weir in the low water interval deviated from the theoretical value within the reasonable range. Therefore, the small flow could be calculated with this theoretical relationship curve and the medium or large flow could be calculated with the calibrated relationship curve. These weirs with triangular cross-sections could be widely applied to some typical streams that meet the requirements of flood control, water resources and water quality evaluation, which also contribute to monitor the ecological discharge at some typical cross-sections of sponge-city project.

Key words: hydrometry; weir with triangular cross-section; theoretical curve; comparative analysis

(上接第 44 页)

Analysis of Ecological Water Demand in Zishui River Channel

HOU Tingjuan¹, GAO Ye^{2,3}

(1. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Chenzhou City, Chenzhou 423000, China;

2. College of Life Science, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China;

3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hunan Province, Changsha 410007, China)

Abstract: River water intake, reservoir storage and inter-basin water transfer have changed the natural hydrological regime of rivers around the world. Retaining sufficient ecological water demand is the key to maintain river ecosystem integrality. According to Qp method, Tennant method, monthly frequency calculation method etc., monthly ecological water demand in the Zishui River Channel were calculated respectively, and the calculation results by different calculation methods were compared and analyzed. The minimum annual ecological water demand of $112.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ was recommended.

Key words: in-stream ecological water demand; Zishui River; monthly frequency calculation method