

矩形渠道分水口分流规律及影响因素

刘海强 王文娥* 胡笑涛 薛城

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要 目前渠道分水口分流规律的研究侧重于分水口两侧渠底高程一致的情况,但在实际工程中多为侧渠道渠底高程高于主渠道渠底,针对这一实际问题,对矩形渠道直口渠分水口进行分流规律试验,测量分水口处的水深,获得分水口处的水面线,分析不同分流比下,水面变化和分流比与相对堰上水头、主渠上下游傅汝德数的关系及流向角与分流比的关系。结果表明:不同来流量下,分水口附近的水面线变化规律基本一致,都为壅水曲线;同一流量下,分流比随相对堰上水头的增大而增大,随主渠道分水口上下游傅汝德数的增大而减小;同一流量下,流向角随分流比的增大而增大,增加趋势逐渐变缓,最大流向角均趋近于 60° 。

关键词 直口渠; 分水口; 分流比; 流向角

中图分类号 S274.4

文章编号 1007-4333(2018)09-0117-06

文献标志码 A

Water-division rules and the influencing factors of rectangular channel

LIU Haiqiang, WANG Wen'e*, HU Xiaotao, XUE Cheng

(College of Water Resources and Agricultural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract At present, the research of diversion is focused on the height consistency of the two sides of the diversion. Actually, most of the side canal bottom elevation is higher than the main canal bottom. Aiming to solve this problem, experiments are conducted. The water depth near the diversion is measured, the diversion's water line is obtained, the different split ratio under the changing of water surface, the relation between the diversion and the Frouder number of the main channel's upstream and downstream the weir head are analyzed. The results show that: Under different discharges, the variation of the water line on the diversion is basically the same for backwater curve; Under the same flow, the split ratio increases with the increasing of the relative weir head, and decreases with increasing the of Frouder number of the main canal's upstream and downstream; Under the same flow, the flow angle increases with the split ratio increases, the increasing trend gradually slows down. The biggest flow angle is close to 60 degree.

Keywords direct export channel; dividing opening; flow ratio; flow angle

分水口是输水渠道常见的过水建筑物^[1],灌区通过渠系分水口闸门及下游渠道的节制闸调节分水流量实现按需输水,灌区渠系布置除了按照干支斗农毛逐级设置外,也存在大量在干渠或支渠上设置分水口与斗渠或农渠衔接,如河套灌区的干渠及分干渠设置大量直口渠,其渠底高程高于来流渠道,即直口渠进水口处为堰坎。通过调节节制闸及分水闸开度控制主流渠道及分水渠道内的水位,使来流按

要求的流量经分水口进入直口渠,若通过测量分水口前后渠道内水位进行流量量测,就可以达到渠道水量的测控一体化,也可避免因修建特设量水设施而产生的水头损失。目前关于渠道分水口附近水流流动的研究多集中在分水口无堰坎的领域。Taylor^[2]根据试验结果及动量方程,得出了主渠上游、侧渠下游水深与分流比之间的关系式。Law等^[3]分析了主渠上游傅汝德数、侧渠下游傅汝德数

收稿日期: 2017-11-28

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0400200);公益性行业(农业)科研专项(201503125)

第一作者: 刘海强,硕士研究生,E-mail:2684675859@qq.com

通讯作者: 王文娥,教授,博士生导师,主要从事流体机械及灌排设备研究,E-mail:wangwene@nwsuaf.edu.cn

及分流比对侧渠道的收缩系数的影响,并给出了收缩系数的计算式。Ramamurthy等^[4]的研究结果表明在侧渠自由出流的条件下,当主渠道与侧渠道的宽度比值一定时,主渠下游傅汝德数是影响分流比的主要因素。郑国华等^[5]探讨了梯形明渠侧面分水的水力学问题,给出了利用主渠上游傅汝德数计算侧渠道的流量系数的计算公式,但在实际中主渠傅汝德数计算复杂,应用性较低。罗福安等^[6-7]对直角分水口处的水流形态及分水宽度进行了研究,发现分水宽度与分流比和主渠上游傅汝德数有关,并给出了分水宽度的计算式。Hsu等^[8]对无堰坎分水口处的能量损失系数与分流比的关系进行了试验研究。近年来,关于分水口处的流速分布及局部水头损失研究较多,如利用三维流速测量仪(ADV)对分水口附近水域进行三维流速测量^[9-11],分析了侧渠回流特性、口门断面流速分布;运用数值模拟软件对分水口进行数值模拟^[12-14],并将模拟结果与试验结果进行对比。已有研究主要对无堰坎的分水口水力性能进行试验研究,但对有堰坎的渠道分水口(侧渠道渠底高程高于来流渠道)分流规律及影响因素研究较少。

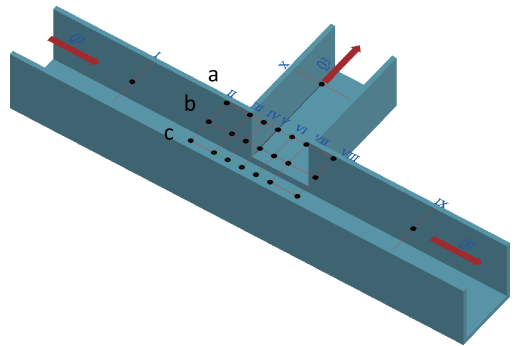
本研究拟对矩形直口渠分水口分流规律进行试验研究,测定主渠道、直口渠(侧渠道)及分水口附近的水面线,分析研究分流比与相对堰上水头、主渠上下游傅汝德数、流向角变化规律及相互关系,以期为分水口处流量测量及泥沙淤积影响因素的研究提供参考依据。

1 试验设计

试验在西北农林科技大学水工厅进行。试验系统由水循环系统、流量调节系统、量测系统及辅助设备组成。本试验来流渠道(主渠道)长为12 m,宽0.47 m;侧渠道长3 m,宽0.47 m;底部高程高于主渠道0.06 m,即侧渠道堰坎高 $P=6$ cm。主渠道上游来流经过分水口后,一部分流向侧渠道,一部分流向主渠道下游。主渠总来流量 Q_1 与主渠末端流出流量 Q_2 由主三角堰进行量测,总流量 Q_1 与分水口下游主渠道流量 Q_2 ,两者之差即为侧渠道流量 Q_3 。

由于侧渠道与主渠道夹角为 90° ,水流流线在分水口处急剧弯曲,水流内侧水面低于外侧,为了研究分水口附近水流水面形态等水力特性,沿分水口上游端每隔12 cm设置1个断面,共5个断面,距分水口上下游端20 cm处各设置1个断面,即II和VIII(图

1)。受分流影响,主渠道靠近分水口侧附近水面低于远离分水口侧的水面,因此分水口处每个断面设置3个测点,分别在主渠道靠近分水口一侧(a)、主渠道中心线(b)和主渠道远离分水口一侧(c)。水深用SCM60型水位测针测量,精度为 ± 0.1 mm。在主渠上、下游端距分水口分别为1 m处设置断面I和IX,在侧渠道下游端距取水口1 m处设置断面X,断面I和IX处水深比较稳定,故只在主渠道中心线设1个测点,测得的水深作为主渠上下游水深。共10个测量断面21个测点。图1示出渠道模型及测点布置。试验中共设置了6个流量工况,分别为17.82、23.45、28.98、32.66、39.8和45.32 L/s,每个流量工况下通过调节主渠下游水位,获得了6个分流比 R_0 (侧渠流量 Q_3 与主渠总流量 Q_1 之比,即: $R_0 = Q_3/Q_1$),共进行36组试验,测得了各断面水深。



Q_1 、 Q_2 和 Q_3 分别为主渠道来流量、主渠道末端流量和侧渠道流量,L/s。

a、b和c分别为主渠道靠近分水口一侧、主渠道中心线和主渠道远离分水口一侧;I~X为测点所在的断面。图2同。

Q_1 、 Q_2 and Q_3 are the flow of main channel and end of main channel, side channel.

a, b and c are the side of main channel close to diversion, the center line of main channel and the side of main channel apart from diversion; I~X are sections of measuring point location. The same as in Fig. 2.

图1 渠道模型及测点布置示意图

Fig. 1 The model of channel and arrangement of measuring points

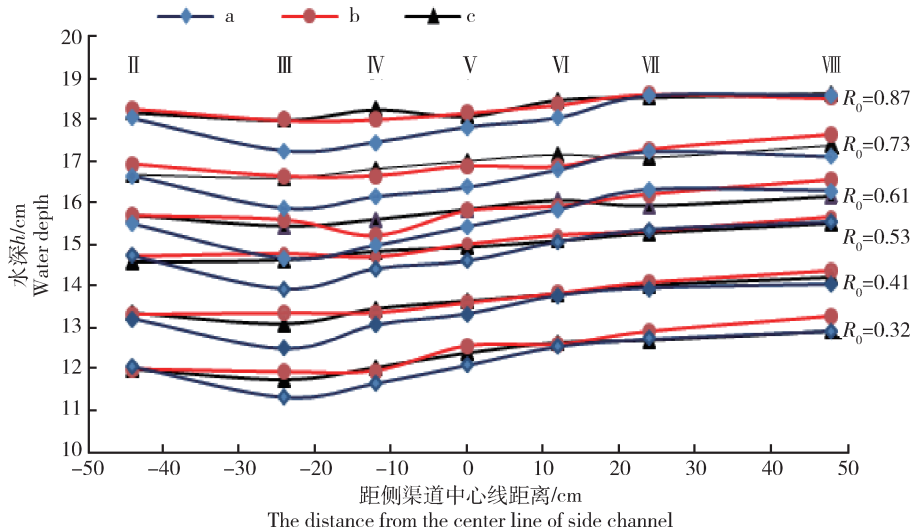
2 结果与分析

2.1 水面线

水面线的定性分析可以了解渠道的水流流态^[15],主渠道在分水口处的水流流态复杂,为研究分水口附近水流特性,获取了各流量下不同分流比 R_0 下各个断面的水深,绘制成水面线。图2为主渠道来流量 Q_1 为28.98 L/s时,各分流比下的水面线。

可以看出,主渠道在靠近分水口上游端(断面 III)时,主渠道在 a、b 和 c 处水面线为降水曲线, a 和 b 处的水面下降幅度较小,而 c 处的水面因靠近分水口减小幅度比 a 和 b 处大;分水口处主渠道 a、b 和 c 处的水面线为壅水曲线,水面在分水口上游端(断面 III)降至最低,而在分水口沿主渠下游方向水面线逐渐上升,到分水口下游端达到最大值;随着分流比的增加,主渠道在分水口上游端和下游端的水深差值减小,水面线接近于直线,说明随着分流比的增大,分水口对远离分水口处的水深变化影响减

小。其他 5 种流量工况下水面线变化规律类似,这与 Ramamurthy^[16] 和 Omari^[17] 对等宽明渠无堰坎分水口的水面线的研究结果基本一致。对于本试验中有堰坎分水口处的水流,可以看做堰坎高为 6 cm 的侧堰流出,已有研究提出对于一般的棱柱形缓流渠道,侧堰段渠道主流水面线可近似地认为是直线形的壅水线^[18]。从本试验可以观测到,分水口处的渠道主流水面线凹凸程度都不显著,所以分水口处渠道主流的壅水曲线可近似地认为是直线形的壅水线。



横轴,坐标 0 点为侧渠道中心线位置,沿主渠下游为正方向。

Horizontal axis, the 0 point of the coordinate is the center line of the side channel, and it is the positive direction along the main channel.

图 2 主渠道来流量 Q 为 28.98 L/s 时各分流比 R_0 下的主渠道水面线

Fig. 2 Main channel's profile at each diversion ratio when the main channel's flow Q is 28.98 L/s

2.2 分流比

渠道在运行过程中,通过输水主渠道的节制闸和分水口处的分水闸配合,控制渠道中的水位,实现按照需求量分水,即主渠道与侧渠道水位直接影响分水流量。另外侧渠道的底部高程也会影响分水流量,当主渠道中的水位低于侧渠道底部高程时,水流不会进入侧渠道;主渠道水位高于侧渠道,但侧渠道进水口堰上水头 H (主渠断面 I 处的水深与侧渠道入口处堰坎高 P 的差值)与堰高 P 的比值相对堰上水头 H/P 不同时,侧渠道的流量也不同,根据堰流的特点,相对堰上水头 H/P 也是分流比的影响因素。图 3 示出不同来流量下分流比 R_0 与相对堰上水头 H/P 的关系。

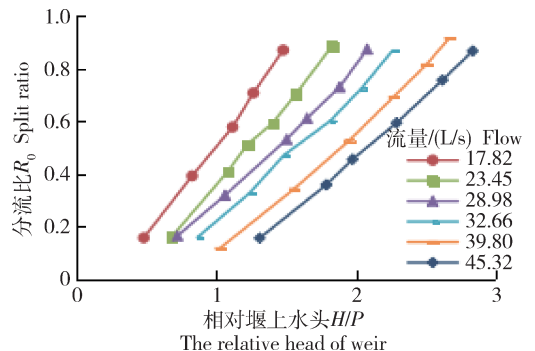


图 3 不同来流量下分流比 R_0 与相对堰上水头 H/P 的关系
Fig. 3 The variation of diversion ratio R_0 with the relative water head of wire H/P at different flows

可以看出,同一来流流量下,分流比的变化随相对堰上水头的增大而增加,且增加的趋势线大致为直线,即分流比与相对堰上水头存在线性关系;同一分流比下,相对堰上水头随着流量的增加而逐渐增加,即主渠道水深逐渐增大,当分流比为 0.16 时,随着主渠来流流量的增加,堰上水头由 0.029 m 增加到了 0.079 m;当分流比为 0.87 时,堰上水头由 0.089 m 增加到 0.170 m。

傅汝德数 Fr 反映水流的流动形态,是一个包含水深、流速等信息的量纲为 1 的数,由于分水影响分流比, Fr 与分流比存在一定的关系。本研究通过控制主渠道和侧渠道下游水深,得到了各流量下分流比 R_0 与主渠分水口上下游傅汝德数 Fr 的关系曲线见图 4。

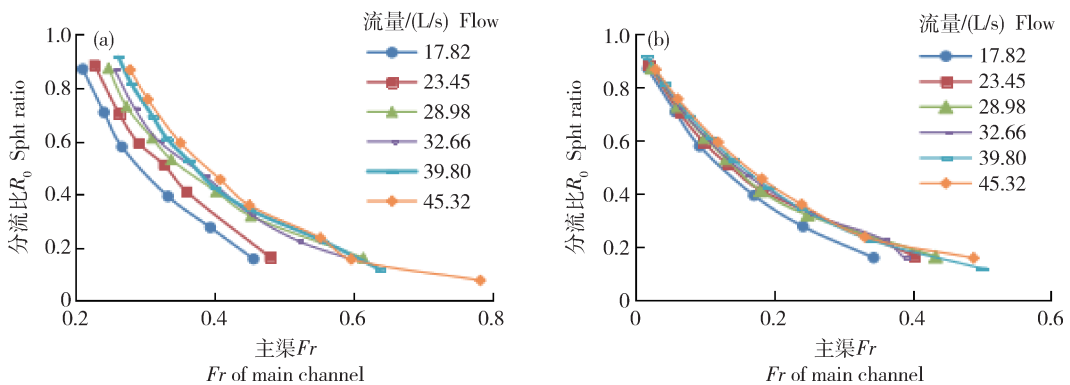


图 4 不同来流量下分流比 R_0 与主渠上游(a)和下游(b)傅汝德数 Fr 的关系

Fig. 4 The relation of diversion ratio R_0 with the main canal's upstream (a) and downstream (b) Fr at different flows

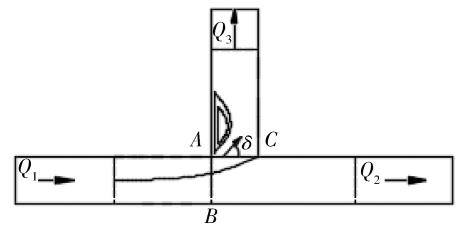
2.3 流向角

当主渠道内水流流经分水口后,部分水流发生偏转进入侧渠道,即侧渠道进口处的水流流线对于主渠道轴线具有偏转角,并且会在侧渠道一侧形成回流区,由于回流区的存在,侧渠道进水口的实际宽度要小于侧渠道宽度,回流区在主渠方向的宽度越大,对侧渠道的束缩宽度越大。为了了解回流区的变化规律及形状参数,已有研究提出了流向角 δ 的概念,即分水交界面的断面平均速度向量与主渠水流流向的夹角(图 5),受分水角(主渠与侧渠道主轴夹角)、分流比和渠宽比的影响^[19-20]。定义为:

$$\delta = \arctan \frac{U_t}{V_t} \quad (1)$$

式中: V_t 为断面 AB 平均流速, m/s; U_t 为断面 AC 平均流速, m/s。本试验中分水角为 90° , 渠宽比为 1, 所以流向角仅受分流比的影响。

主渠来流流量一定时,分流比随主渠道傅汝德数的增大而减小,傅汝德数越大,水流的惯性力越大,分流能力越弱,即进入侧渠道的水流流量越小;分流比随傅汝德数的变化趋势随傅汝德数的增加而减小,即主渠道傅汝德数对小分流比的影响减小;不同来流量下,随着流量的增加,主渠上游傅汝德数与分流比的关系曲线逐渐重合,即当流量 > 23.45 L/s 时,主渠来流量对主渠上游傅汝德数与分流比的关系的影响减小。由图 4(b)可以看出,分流比与主渠下游傅汝德数存在着一定的关系,除流量为 17.82 L/s 时,其他流量下的分流比与主渠下游傅汝德数的关系曲线大致重合,即分流比与主渠下游傅汝德数的关系不受主渠来流量的影响,主渠下游傅汝德数随分流比的增加而减小。



Q_1 、 Q_2 和 Q_3 分别为主渠道来流量、主渠道末端流量和侧渠道流量, L/s; AB、AC 为渠道断面; δ 为流向角。

Q_1 、 Q_2 and Q_3 are the flows of main channel and end of main channel, side channel; AB and AC are the sections of channel; δ is flow angle.

图 5 流向角示意图

Fig. 5 The schematic diagram of flow angel

图 6 给出了不同来流量下分流比与流向角的关系,当主渠道来流量一定时,流向角随分流比的增加而增加,且增加趋势逐渐减缓,呈指数函数关系;分

流比增加,即进入侧渠道的流量增加,说明主渠道越来越多的水流在分水口处偏离主渠方向进入侧渠道,如主渠道流量为 17.82 L/s,分流比为 0.16、0.4、0.58、0.71、0.87 时,流向角分别为 32°、44°、50°、54°、58°,当侧渠道宽度、分水角一定时,分水口处的水流流线随分流比的增加偏离主渠渠底中心线的夹角逐渐增大,与侧渠道渠底中心线的夹角逐渐减小,即流向角增加,回流区的最大束缩宽度减小;在其他来流量下,流向角随分流比的变化曲线大致一样,且随着来流量的增加,变化曲线更加接近。

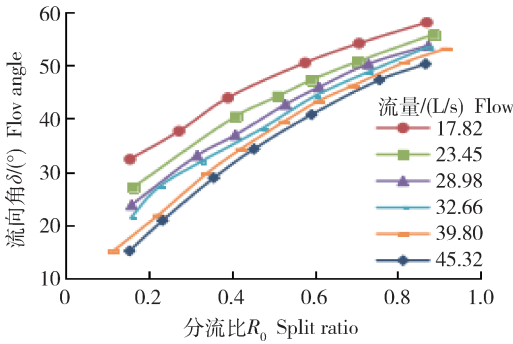


图 6 不同流量下流向角 δ 与分流比 R_0 的关系

Fig. 6 The variation of flow angle δ with diversion ratio R_0 at different flows

采用 SPSS 数据分析软件,对不同流量下的分流比与流向角的关系进行拟合,结果见表 1:相关系数均 >0.99 ,相对误差均 $<5\%$ 。当分流比为 1 时,各流量下的流向角依次是 60.8°、58.9°、57.9°、57.4°、57.8°、57.8°,来流量为 28.98、32.66、39.8 和 45.32 L/s 时的最大流向角趋近于 60°,即最大流量角随主渠来流量的增加,逐渐减小后趋于一定值;从表 1 可以看出,各流量下流向角与分流比的公式中,分流比的次幂随来流量的增加而增加,为了得到其他来流量下的流向角,对表 1 中的公式进行了归纳,得到了任意流量下流向角的计算公式:

$$\delta = 60R_0^{12.7Q_1+0.12} \quad (2)$$

采用式(2),已知分流比 R_0 及来流量 Q_1 ,可求得流向角,且相关误差均 $<10\%$ 。分流比为 1 时,主渠来流量即为侧渠道流量,水流全部进入侧渠道,回流区对侧渠道的束缩宽度达到最小,但流向角没有达到 90°,即回流区对侧渠道的束缩宽度随着分流比的增加而增加,但不会减少到零,因为侧渠道水流方向与主渠道方向存在夹角,流经分水口的水流具有速度,在分水口必然发生偏转而脱离边壁,或拐角处水深较浅,侧渠道的有效过水宽度要小于实际宽度。

表 1 不同来流量下流向角 δ 与分流比 R_0 之间的关系

Table 1 The formula of flow angel δ with diversion ratio R_0 at different flow

主渠来流量 $Q_1/(L/s)$ The flow of main channel	公式 Formula	相关系数 R^2 Correlation coefficient	平均相对误差/ $\%$ The average relative error	最大相对误差/ $\%$ The maximum relative error
17.82	$\delta = 60.8R_0^{0.3504}$	0.996	0.09	2.85
23.45	$\delta = 58.9R_0^{0.4305}$	0.999	0.45	0.29
28.98	$\delta = 57.9R_0^{0.4897}$	0.999	0.04	1.51
32.66	$\delta = 57.4R_0^{0.5276}$	0.997	0.14	3.18
39.80	$\delta = 57.8R_0^{0.6276}$	0.998	0.19	3.02
45.32	$\delta = 57.8R_0^{0.7063}$	0.996	0.34	4.19

3 结 论

本研究对矩形渠道直口渠分水口在不同来流量下进行了试验研究,分析了分水口处的水面线、分流比与相对堰上水头、主渠上下游傅汝德数的关系及流向角与分流比的关系,得到了以下主要结论:

1) 主渠道水面线在靠近分水口时逐渐降低,到

分水口上游端达到最低,而在分水口沿主渠方向水面线逐渐上升至最大值;主渠道在分水口处的水面线为接近于直线形的壅水曲线;随着分流比的增加,主渠在分水口上游端和下游端的水深差值逐渐减小。

2) 同一流量下,分流比随相对堰上水头的增加而增加,且增加曲线大致为直线,即分流比与相对堰

上水头存在线性关系;不同来流量下,分流比随相对堰上水头的增加而增加,随主渠上下游傅汝德数的增加而减小;除主渠来流量 17.82 L/s,分流比随主渠下游傅汝德数的变化,不受主渠来流量的影响。

3)同一来流流量下,流向角随分流比的增加而增加,且增加趋势逐渐变缓,回流区的最大束缩宽度随分流比的增加逐渐减小;不同来流量下,流向角与分流比关系曲线的趋势基本大致,且呈指数函数关系,各流量下的最大流向角随主渠来流量的增加,逐渐减小后趋近于一定值,该值接近 60° 。

参考文献 References

- [1] 张成, 郑立松, 黄成涛, 刘林. 大型输水渠道分水口水影响及调控原则研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(6): 975-986
Zhang C, Zheng L S, Huang C T, Liu L. Influence and principle of water division operation of flow diversion gate in large water transfer channel[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(6): 975-986(in Chinese)
- [2] Taylor E H. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions[J]. *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, 1944, 109: 893-912
- [3] Law S W, Reynolds A J. Dividing flow in an open channel[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1965, 92(2): 207-231
- [4] Ramamurthy A S, Satish M G. Division of flow in short open channel branches [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988, 114(4): 428-438
- [5] 郑国华, 杨文兴. 梯形槽中急流分水的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 1990, 9(4): 1-6
Zheng G H, Yang W X. Experimental research on diversion from trapezoidal flume in super critical flow[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1990, 9(4): 1-6(in Chinese)
- [6] 罗福安, 梁志勇. 直角分水口水流形态的实验研究[J]. 水科学进展, 1995, 6(1): 71-75
Luo F A, Liang Z Y. Experimental studies on division of flow [J]. *Advances in Water Science*, 1995, 6(1): 71-75 (in Chinese)
- [7] 罗福安, 梁志勇, 张德茹, 徐永年. 直角分水口水宽度的实验研究[J]. 泥沙研究, 1994, 12(4): 28-38
Luo F A, Liang Z Y, Zhang D R, Xu Y N. Experimental study on diversion of flow[J]. *Journal of Sediment Research*, 1994, 12(4): 28-38(in Chinese)
- [8] Hsu C C, Tang C J, Lee W J. Subcritical 90° equal-width open-channel dividing flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 128(7): 716-720
- [9] 曹继文, 陈惠泉, 贺益英. 明渠岸边横向取水口水力特性的试验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(10): 32-37
Cao J W, Chen H Q, He Y Y. Experimental study on hydraulic characteristics of lateral intake in open channel[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(10): 32-37(in Chinese)
- [10] 杨帆, 陈惠泉, 郭军. 明渠岸边侧向 45° 取水口水力特性试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(4): 264-270
Yang F, Cen H Q, Guo J. Experimental study on hydraulic characteristics of 45° lateral intake flow in open channel[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2006, 4(4): 264-270(in Chinese)
- [11] 杨帆. 明渠岸边侧向取水的“取水角效应”研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2007
Yang F. Study on “diversion angle effect” of lateral intake flow[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007(in Chinese)
- [12] 孟文, 孙宏伟, 蒋俊峰, 张玲, 杨兆君. 分流对弯道分流口门分布的影响[J]. 农业科技与装备, 2014(7): 59-63
Men W, Sun H W, Jiang J F, Zhang L, Yang Z J. Effect of the surface velocity distribution at the entrance of the bend shunt [J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2014(7): 59-63(in Chinese)
- [13] 张鹤, 赵青, 张黎. 弯道凹岸横向取水口水力特性的试验研究[J]. 东北水利水电, 2011, 29(5): 60-63
Zang H, Zao Q, Zhang L. Experimental study of hydraulic characteristics of transversal intake in river bend concave bank[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2011, 29(5): 60-63(in Chinese)
- [14] 李涛, 邹健, 曲少军. 基于不同断面形态的直角分流口处局部损失研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(6): 30-37
Li T, Zou J, Qu S J. Local head loss of 90° lateral diversion from open channels of different cross-sectional shapes[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(6): 30-37(in Chinese)
- [15] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 214-220
Lv H X, Pei G X, Yang L X. *Hydraulic*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 214-220(in Chinese)
- [16] Ramamurthy A S, Qu J, Vo D. Numerical and experimental study of dividing open-channel Flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(10): 1135-1144
- [17] Al Omari N K, Khaleel M S. Laboratory study of the effect of the branching angle and the branching channel slope on flow[J]. *Al-Rafadain Engineering Journal*, 2012, 20(5): 33-41
- [18] 陈祺模, 谢佩珍, 陈日齐. 侧堰水力特性试验研究[J]. 福州大学学报, 1979, 19(0): 26-29
Chen Q M, Xie P Z, Chen R Q. Experimental study on hydraulic characteristics of the side weir [J]. *Journal of Fuzhou University*, 1979, 19(0): 26-29(in Chinese)
- [19] Ramamurthy A S, Satish M G. Division of flow in short open channel branches[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988, 114(4): 428-438
- [20] Kesserwani G, Vazquez J, Rivière N. New approach for predicting flow bifurcation at right-angled open-channel Junction[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136(9): 662-668