

超声波流量计测流在扬黄渠道的应用研究

王绪存, 吴 荣*, 马佳东

(宁夏回族自治区固海扬水管理处, 宁夏 中宁 755100)

摘 要:【目的】提高超声波流量计在扬黄灌区多泥沙渠道的测流精度。【方法】基于多声道超声波流量计的测流原理, 分析超声波流量计在渠道测流上的影响因素, 对测控一体化闸门进行改造, 闸门控制过闸流量, 斗渠上设置多声道超声波测流槽测量过流量; 并对测流槽上超声波换能器角度进行调整, 使超声波声强的有效距离变短, 增加声强的识别能力; 利用超声波液位计和超声波换能器的联动对渠道流量进行测量。【结果】采用闸门和测流分体设置, 不会影响闸门的自动控制、测流数据监测和计算分析, 还能使斗渠内的水流平稳; 在高泥沙水流中, 渠道超声波声强有效距离变短后声强的衰减量减小, 超声波声强的识别能力增强, 提高流量的测量精度。【结论】经过改造后的 303 斗口在不同含沙量和水深条件下的比测精度对比, 测量误差均在 5% 以内, 满足自动化流量测控要求。该成果可为灌区测量水自动化改造提供技术支撑, 对多泥沙渠道的信息化建设进行有益的探索。

关 键 词: 超声波流量计; 测流; 扬黄渠道; 高泥沙水流; 计量

中图分类号: S27; TV671

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022465

OSID:



王绪存, 吴荣, 马佳东. 超声波流量计测流在扬黄渠道的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 90-97.

WANG Xucun, WU Rong, MA Jiadong. Application of Ultrasonic Flowmeter in Yellow-river Irrigation Channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 90-97.

0 引 言

宁夏固海扬黄灌区是宁夏境内最大的扬水灌区, 肩负着 3 市 6 县(区) 16 个乡镇的农业灌溉及人畜饮水任务。现有灌溉面积及设施农业补灌面积 11.376 万 hm^2 , 运行泵站 29 座, 干支输水渠道 464 km, 渠道共有直开口 396 座。【研究意义】在 2019 年安装测控一体化闸门以前, 渠道直开口全部采用人工调配水和计量, 各干渠水情测控不能及时掌握; 不能满足和适应节水灌溉与计划用水的需求, 为了更好地提高对水资源的高效利用, 优化灌区水资源配置, 推动扬水灌区的高质量发展, 对渠道直开口进行自动化改造。

【研究进展】我国自 20 世纪 50 年代开始, 对渠道的流速、流量进行测流和计量, 从最初的巴歇尔量水槽、量水堰测流^[1-2]、渠道测流^[3]以及利用已有的水工建筑物等量测水^[4-5], 发展到现在的超声波流量计测流、电磁流量计测流、转子流量计测流、压差式流量计测流等^[6]多种自动化测流方式进行测流, 流体的测流计量技术发生了质的飞跃。从 20 世纪 90 年代开

始, 我国灌区的自动化测配水逐步应用到生产、生活中, 超声波流量计等多种新型流量计量装置逐渐被人们认识^[7]。超声波自动化渠道测流与渠道量水堰及水工建筑物测流^[1-5]相比较, 具有节约人力、物力, 测流的自动化程度高和优化资源配置等特点。到 21 世纪初我国将大型灌区信息化改造正式纳入灌区续建配套与节水改造的总体规划中^[8], 灌区信息自动化改造得到飞速发展。

超声波流量计是利用超声波换能器将电能(电压信号)转换成机械能(超声波信号), 同时也能将机械能转换成电能的一种转换装置^[9]。其是一种非接触式测量仪器, 换能器布置在建筑物或管道的侧壁上, 与被测液体不直接接触, 因此不会影响液体的流态^[10]; 超声波流量计具有结构简单, 对流体的测量精度高, 安装的非接触性和集成化程度高等特点^[11], 在很多领域得到广泛应用。超声波流量计按照信号传输测量原理可分为传播速度法、多普勒法、波束偏移法和相关法等^[12-14]多种计量方法。近年来许多学者对超声波明渠测流研究较多, 陶德志等^[15]提出利用超声波液位测量结合巴歇尔量水槽进行明渠测流; 李忠虎等^[16]应用脉冲发生器和计时模块进行双声道超声波明渠测流; 吕常智等^[17]利用多对超声波换能器测量实现多声道明渠测流, 许苗苗等^[18]利用压力式流量传感器测量渠道流量。随着高性能集成化元器件和电子芯片的应用, 超声波流量计的测流精度和性能的稳定性越来越

收稿日期: 2022-08-23 修回日期: 2023-07-04 网络出版日期: 2023-11-14

基金项目: 固海扬水工程“6+1”增流改造工程关键技术研究与应用(宁水科信发(2019)5号)

作者简介: 王绪存(1972-), 男, 宁夏中宁人。高级工程师, 学士, 主要从事水利工程管理和水工设计等研究。E-mail: ghyglcwxc@163.com

通信简介: 吴荣(1972-), 男, 宁夏彭阳人。高级工程师, 学士, 主要从事水利工程管理等研究。E-mail: ghgck@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

越好^[19]，超声波流量计测流技术日趋完善^[20]，并向着高度智能化方向发展。

【切入点】2019 年固海扬水在自动化灌区改造中，对渠道直开口进行测控一体化集中改造，共改造渠道直开口 124 台套；这些测控一体化闸门在使用过程中，发现安装的部分闸门测流监测数据与闸门直开口实际过流量存在一定的偏差，有些直开口流量的测量误差在 20% 以上。【拟解决的关键问题】为了更好地对测流数据进行监测，使直开口测流数据与实际流量一致，在前人对测流自动化研究的基础上对测控一体化闸门进行测流改造，以达到渠道测流自动化控制的精度要求。

1 多声道超声波流量计测量原理

1.1 超声波流量计的定义

超声波流量计是利用超声波在水中顺流与逆流传播速度的时间差，来确定液体流动的速度，进一步计算液体流量的一种方法。超声波的传播速度法又可以分为时差法、相位差法和频差法等方法；多普勒法是利用超声波在液体中的频移来计算液体流量的方法；波束偏移法是通过测量流体流动所引起超声波信号波的偏移角来确定流体流速的测量方法。

1.2 时差法超声波流量计的测量原理

在渠道两岸上下游一定水深的 A、B 点，相对位置布设一对电声可逆的超声波换能器，相向交替收发超声波，A 换能器位于渠道上游一侧，B 换能器位于下游另一侧，AB 二点之间的距离为 L ，水流方向与 AB 点之间的夹角为 θ ，水流的平均流速为 v ，水流在 AB 方向上的流速为 v_1 ，超声波在静水中的速度 c ，A 换能器和 B 换能器相向交替发送和接收超声波脉冲信号。

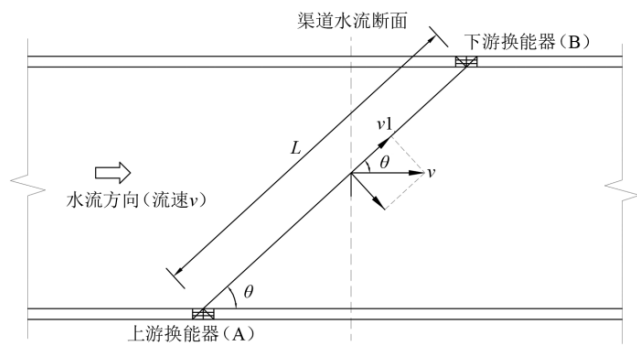


图 1 时差法超声波布置

Fig.1 Ultrasonic arrangement of time difference method

上游 A 换能器发射超声波信号，信号沿水流方向向下游 B 换能器传递，信号经过时间 t_{AB} 到达信号接收端 B 换能器，这时超声波的传播速度为 $c+v_1$ ，传播距离为 L ，则超声波的传播时间 t_{AB} 式 (1) 所示：

$$t_{AB} = \frac{L}{c+v_1} = \frac{L}{c+v\cos\theta}, \quad (1)$$

下游 B 换能器发射信号，经过时间 t_{BA} 到达信号接收端 A 换能器，这时超声波的传播速度为 $c-v_1$ ，传播距离为 L ，则超声波的传播时间 t_{BA} 式 (2) 所示：

$$t_{BA} = \frac{L}{c-v_1} = \frac{L}{c-v\cos\theta}, \quad (2)$$

利用式 (1) 和式 (2) 可以计算出超声波信号在逆流和顺流的时间差 Δt 为式 (3)：

$$\Delta t = t_{BA} - t_{AB} = \frac{L}{c-v\cos\theta} - \frac{L}{c+v\cos\theta} = \frac{2vL\cos\theta}{c^2 - v^2\cos^2\theta}, \quad (3)$$

由于超声波在不同水温中的传播速度不相同，一般情况下超声波在水中的传播速度 c 在 1 400~1 530 m/s 之间，远远大于水流的流速，所以 $c^2 \gg v^2\cos^2\theta$ ，对于 c^2 来说， $v^2\cos^2\theta$ 可以近似的等于 0，所以式 (3) 可以简化为式 (4)：

$$\Delta t \approx \frac{2vL\cos\theta}{c^2}, \quad (4)$$

由式 (4) 可以推导出该水流层的平均流速式 (5)：

$$v \approx \frac{c^2\Delta t}{2L\cos\theta}, \quad (5)$$

由此可知，水流流速与超声波在水中顺流和逆流的时间差成正比，与超声波传播的距离成反比。

渠道的过水断面为 S ，在该断面下的过流流量式 (6)。

$$Q = vS = \frac{c^2\Delta t}{2L\cos\theta} S. \quad (6)$$

根据水流流过该断面的流速和该流速下的面积就能计算出该断面的过水流量。

1.3 渠道水流的特点及测流方法

由于水流具有黏滞性，水流在流动过程中存在着相对运动，渠道内壁对水流具有一定的阻力，导致水流在靠近内壁时流速明显降低。根据水流的管束理论，水流在渠道中、上部的中间部位流速最快，越靠近渠道底部和侧壁流速越慢，流速梯度越大；水层间的流速会随着水位的升高而增大，流速梯度逐渐减小。

对于单对超声波换能器只能测量其所在水层的平均流速，进一步可以测得该水层上下一定距离的平均流速，无法正确测得整个断面的流速；当渠道流速梯度较大时，一对超声波换能器的测量结果无法代表整个断面内的流速；为了更准确地测量通过渠道断面的流量，在不同的水深处安装多对超声波换能器测量不同深度的平均流速，将各个断面的平均流速分别计算所在断面的流量，最后得到多个断面的总流量，就是超声波多声道时差法流量计的测量方法。

2 多声道超声波流量计在固海渠道的应用

2019 年固海扬水渠道闸门自动化改造中, 采用多家国内知名企业生产的测控一体化闸门, 渠道共安装测控一体化闸门 124 台套, 安装的测控一体化闸门全部采用超声波多声道测量水计量装置。实现了直开口闸门开启度与过闸流量的自动控制、测流数据的自动监测和数据分析计算等信息成果, 并将测量数据不间断传输到管理处调度中心和各斗口所辖的泵站调度室, 实现对直开口闸门现场操作和远程操作两种控制方式的任意切换。测控一体化闸门安装后有效缓解渠道测量水和直开口调配水人员不足的问题, 同时也为管理处调度中心积极应用大数据和云计算等现代信息技术提供可靠的数据支撑。

2.1 固海渠道直开口的特点

固海干、支渠直开口既是灌区农作物灌溉斗口, 又是干支渠水位调节建筑物; 对于扬水渠道的直开口,

必须保证下一级泵站机组正常运行的前提下, 对渠道辖区内的农作物进行灌溉, 当渠道水位降低时, 调节直开口的配水量来保证下一级泵站水泵机组的正常运行; 渠道水位过高时, 增加直开口配水量调节渠道水位。因此渠道直开口应及时对渠道水位进行调节, 优化各干渠的水资源配置, 提高干支渠调配水自动化改造的精准度, 是扬水灌区提高渠道水利用系数, 更好服务灌区的最佳答案。

2.2 固海渠道测控一体化闸门存在的问题

渠道测控一体化闸门在运行过程中, 发现部分闸门自动计量数值与闸门实际过流量测量数值存在一定的偏差。在 2020—2021 年宁夏水利科学研究院与固海扬水管理处联合对固海干渠 53 套不同厂家的测控一体化闸门的测流精度进行现场跟踪比测, 测量仪器主要采用流速仪和无喉道量水堰进行比对分析, 比测精度结果见表 1。

表 1 固海扬水渠道测控一体化闸门比测精度统计表

Table 1 Statistical table of measuring accuracy of integrated gate for Guhai Water Channe

指标	数据偏差				合计
	$\pm (0\sim 5\%)$ (绝对值在 $0.02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 内)	$\pm (5\%\sim 10\%)$	$\pm (10\%\sim 20\%)$	$> \pm 20\%$	
设备数量/套	14	3	13	23	53
占比/%	26.4	5.7	24.5	43.4	100

同时, 在比测精度时发现, 在冬季和春季灌溉渠道水质比较好 (实测渠道水含沙量介于 $1.15\sim 3.23 \text{ kg/m}^3$), 测控一体化闸门的比测精度比 5—8 月渠道水流泥沙量较大时 (实测渠道水含沙量介于 $5.63\sim 28.86 \text{ kg/m}^3$, 5—8 月渠道水正常含沙量为 5.63 kg/m^3 , 在清水河发洪水后的 2~3 d 内实测渠道水含沙量的最大值为 28.86 kg/m^3) 的比测精度高。

由表 2 可知, 渠道水含沙量不同, 测量偏差不同。渠道水含沙量增加时, 测控一体化闸门超声波测量系统误差明显增加, 部分测控一体化闸门在清水期 (渠道水含沙量 $< 3.23 \text{ kg/m}^3$) 测量精度能满足设计要求, 但到汛期 (渠道水含沙量 $> 5.63 \text{ kg/m}^3$) 测量误差明显

增加。

另外在比测中发现对于相同的厂家, 闸后涵洞产生噪音大的闸门与闸后涵洞产生噪声小的闸门相比较, 噪音大的涵洞影响测量数据的精度; 进口测流箱内杂物和泥沙淤积对测流精度有影响。

由表 3 可以看出, 随着闸门开启高度的增加, 闸门流量加大, 测流箱内的流态发生改变, 测流箱底部为急流, 接近闸门板上部形成漩涡, 水流强烈紊动造成测流误差增大; 流量增大输水涵洞内产生水流噪音也影响超声波的测流; 测流箱内的杂物和淤积对超声波测流产生不利影响。

表 2 渠道水不同含沙量比测精度对比

Table 2 Comparison of measurement accuracy of different sediment content in channel water

斗口名称	测流箱尺寸/ cm^3	实测流量/ $(\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	渠道含沙量/ (kg m^{-3})	计算流量/ $(\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	流量绝对差值/ $(\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$	测量偏差/%
D303	95×45×45	0.25	1.82	0.251	0.001	-0.40
			18.61	0.226	0.024	-9.60
G201	110×60×60	0.23	2.44	0.233	0.003	1.30
			16.72	0.252	0.022	9.56
G506	86×40×40	0.161	2.16	0.155	0.006	3.73
			12.63	0.142	0.019	-11.80
D103	86×40×40	0.120	1.97	0.126	0.006	5.00
			24.64	0.135	0.015	12.50

表 3 闸门开启高度与测控一体化闸门比测精度的对比

Table 3 Comparison of gate opening degree and measurement accuracy of integrated gate

斗口名称	测流箱尺寸/cm ³	闸前水深/cm	闸门开启高度/cm	闸门开启度/%	测控计算流量/(m ³ s ⁻¹)	流速仪测量流量/(m ³ s ⁻¹)	测量偏差/%
G204	95×45×45	165.8	9.0	20.0	0.079	0.086	-8.14
		164.1	17.0	37.8	0.113	0.127	-11.02
G703	110×60×60	161.0	8.5	14.2	0.150	0.180	-16.67
		156.7	22.2	37.0	0.350	0.380	-7.89
G603	86×40×40	95.4	7.5	18.8	0.082	0.094	-12.77
		94.8	12.7	31.8	0.146	0.182	-19.78
G502	95×45×45	139.6	4.1	9.1	0.193	0.216	-10.65
		139.4	7.9	17.6	0.202	0.240	-15.83

注 校核流量用的流速仪采用 LS68 型旋杯式流速仪, 由于斗渠的流量都比较小, 在斗渠上测流采用三点法进行测流。

2.3 产生数据偏差的成因分析

测控一体化闸门产生误差原因有以下几个方面:

1) 渠道水流中含沙量的大小对测流精度有一定的影响, 因超声波在均匀介质中沿直线传播, 具有很好的方向性, 可以将超声波震动能量从 A 换能器传播到 B 换能器; 同时由于超声波的频率高, 声波携带的能量大, 但在传播过程中水流携带的泥沙、气泡和悬浮的杂质等对超声波能量的吸收、散射的副作用同样大, 对超声波产生阻力引起声强降低, 导致超声波接收换能器接收到的声强减弱, 对声波的识别力降低产生测量误差。渠道中的泥沙量和杂质越多对超声波的测流影响就越大。

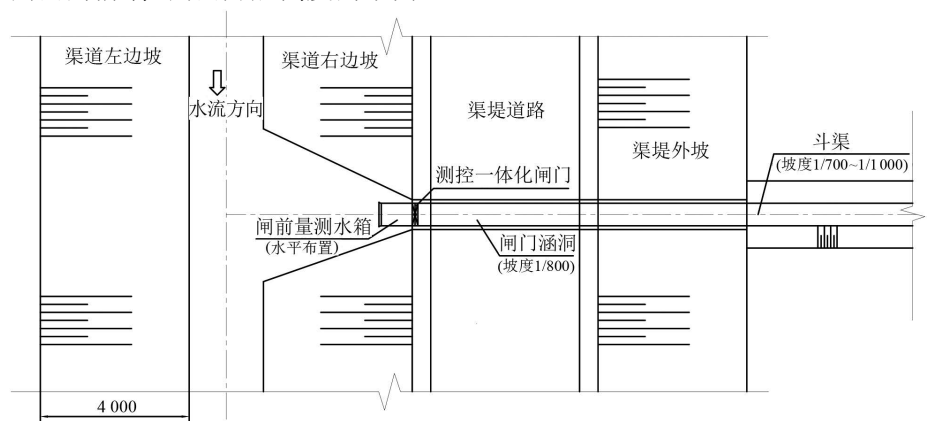
2) 涵洞及周围的噪声也影响超声波的测流精度, 由于渠道水位较高, 直开口闸门的开启度低, 高速水流在涵洞内形成湍流, 产生水流噪声影响超声波信号的识别和接收。

3) 测流箱在闸门的前端, 闸门开启高度的不同,

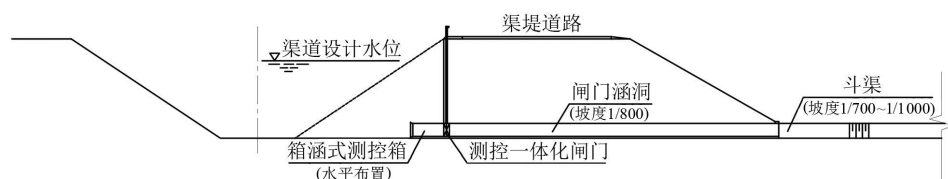
会造成测流箱内水流紊乱, 闸门开启度低时, 测流箱底部水流的流速快, 测流箱上部水流的流态不稳定, 对超声波测流产生影响。

4) 干渠直开口的测流箱截面为正方形, 尺寸均较小(测流箱截面与直开口闸门板的尺寸对应, 一般为 40 cm×40 cm 到 60 cm×60 cm), 闸门的开启度一般在半开启状态甚至更低, 渠道沿途经过村庄和山坡, 渠道中的杂物、杂草等垃圾进入或淤堵到测流箱的进口或闸门处, 在渠道运行过程中无法将测流箱中的垃圾及杂草清理出去, 直接影响测流箱超声波的测流。

5) 对于扬水干渠渠道比降在 1/5 000~1/8 000 之间, 而末梢干渠由于渠道的流量小, 流速较低, 在渠道运行中末梢渠道淤积严重, 在斗渠配水量小的情况下, 造成前置式测流箱底部淤积, 影响超声波的测流。固海干渠测控一体化闸门布置见图 2。



(a) 测控一体化闸门平面布置



(b) 测控一体化闸门剖面布置

图 2 测控一体化闸门平、立面布置

Fig.2 Flat and elevation layout of the integrated gate

3 多声道超声波流量计的改进措施

3.1 多声道超声波流量计的改进

为了减小闸门前置式测流箱对超声波测流的影响,采用闸门和测流箱分离,闸门用来控制直开口的过流量;测流箱对过流量进行测流,并通过测流对直开口的配水量及闸门的开启度进行实时调整、数据收集和分析计算。

在这样的前提下对同心三干渠 303 斗口测控一体化闸门的测量装置进行改造,原斗口闸门为 40 cm×40 cm,将测流箱设置在斗渠下游 30 m 的平直段内,将测流箱改为测流槽,测流槽前后的斗渠比降均为 1/1 000,这样既能减小闸门对测流箱的影响,又能实现闸门与测流装置的联动,同时还保证了测流槽的水流稳定。主要进行以下几方面的改进:

1) 渠道闸门的水量控制与计量装置分开设置。

闸门仍采用轻量化闸门结构设计,只对闸门及启闭装置进行改造,闸后涵洞及闸室部分不变;在闸后斗渠 30 m 的位置安装金属不锈钢测流槽,测流槽的宽度与闸门宽度相同均为 40 cm,斗渠最大配水量的水深为 50 cm;量水槽高度确定为 60 cm。为了减少渠道不稳定流态对测流的影响,本设计仍采用多对超声波换能器分层测量不同深度水流的流速,在斗渠的左右两岸分别安装 4 对超声波换能器,采用交叉传输的阵列式布局。在测流槽的上部安装一台非接触式超声波液位计用来测量测流槽的水位。闸门及测量水装置的电源采用光伏板加蓄能电池进行运行控制。超声波换能器布置见图 3。

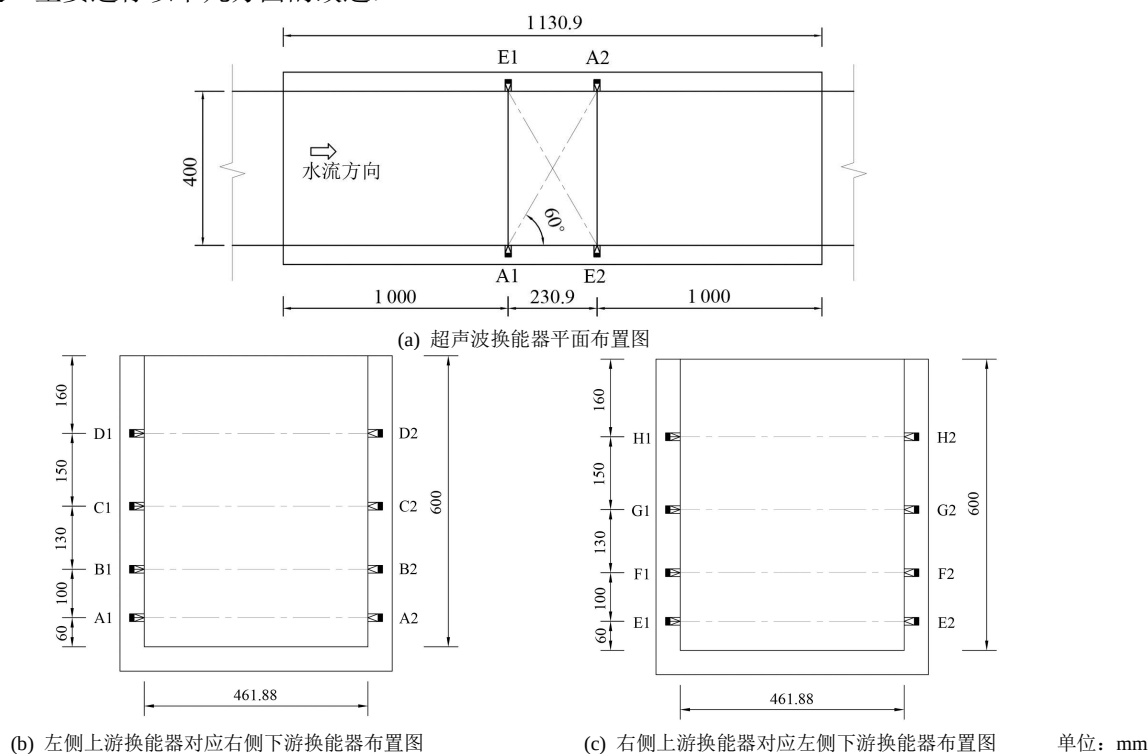


图 3 超声波换能器布置

Fig.3 Layout of ultrasonic transducer

2) 为了减小超声波声强在水中被吸收和散射的衰减,同时兼顾传播信号的稳定性,将每一对超声波换能器的角度调整到一条线上,并最大限度地相互对应(由专业厂家制作),测流槽超声波换能器与侧壁间的夹角由原来的 45°调整为 60°,减少超声波发送与接收的距离(表 4)。

表 4 超声波换能器角度调整后发送与接收距离对比

Table 4 Comparison of transmitting and receiving distance after angle adjustment of ultrasonic transducer

测量槽 宽度/cm	换能器 角度/(°)	A—B 之间的 距离/mm	距离 差值/mm	备注
40	45	565.69	0	角度调整后 A—B 间的
40	60	461.88	-103.81	距离减少 103.8 mm

3) 在斗渠中设置测流槽时由于不受长度的限制,适当对测流槽的长度向上下游进行延长,测流槽进口距超声波换能器 A1 的长度由原来的 160 mm 增加到 1 000 mm,下游换能器 A2 距闸门板的距离由 180 mm 增加到 1 000 mm,使测流槽内的水流平顺。

3.2 改进后超声波流量计的测流

1) 测量原理,由于测流槽中配水量大小的不同,槽内的形态经常为两相流(液相和气相),超声波换能器采用 1.0 MHz 压电陶瓷片换能器,虽然超声波信号在空气中的衰减很快,但由于每对超声波的距离相对较短,超声波信号有可能抵达对岸对应的接收换能器,因此在测量时通过非接触式超声波液位计测量槽

内的水位高度，只有超声波换能器全部被水淹没后，该对超声波换能器才开始对过流进行测量，并计算该水层下的流速和对应的流量。

2) 流量测量计算，由于测流槽的宽度相同，各个断面的流量与该断面的平均流速成正比关系，每一层流速采用左右两对超声波换能器分别测量，同时相向传播和接收声强信号，计算两对超声波的平均流速，作为每一层的平均流速进行计算，以增加测量精度。

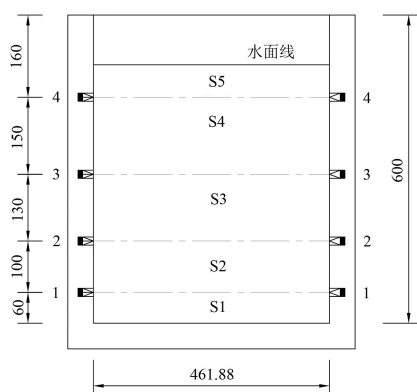


图4 斗渠测量槽流量测流计算 单位：mm

Fig.4 Flow measurement calculation diagram of measuring channel

底层流量的计算，对于底层的过流流量采用经验公式计算，计算式为：

$$Q_1 = K v_1 S_1, \quad (7)$$

式中： K 为光滑面底层流速系数，通过查阅相关资料， $K=0.6$ 。

中层流量的计算，为上下2层超声波换能器测得的流速进行计算，计算式为：

$$Q_i = \frac{(v_i + v_{i+1})}{2} S_{i+1}, \quad (8)$$

式中： $i=1, 2, 3$ 水平层间的数值。

上层流量的计算，由于上表面的流速和上层超声波换能器的流速相等或接近，在此取上层换能器测得的流速计算上部的流量。

$$Q_{\text{上}} = \frac{(v_{\text{上}} + v_{\text{上}})}{2} S_{\text{上}}, \quad (9)$$

上部流量计算式同样适用于1—2, 2—3, 3—4水面线之间流量的计算。

根据实际水层的流量计算通过测流槽整个断面的流量 $Q_{\text{总}}$ ，计算式为：

$$Q_{\text{总}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_{\text{上}}. \quad (10)$$

3.3 改进后侧水槽超声波流量计的应用

在斗渠中安装测流槽后，继续采用比测方法进行流量的测量，结果如下：

表5 同心三千渠303斗口不同水位比测精度的对比

Table 5 Comparison of measuring accuracy of different water levels at 303 bucket mouths of Tongxin Sangan Canal

量水槽 水深/ mm	流速仪 实测流量/ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	渠道水 含沙量/ (kg m^{-3})	测控 计算流量/ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	流量 绝对差值/ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	测量 偏差/ %
14	0.036 1	2.64	0.037 1	0.001 0	2.77
		21.18	0.034 8	-0.001 3	-3.60
25	0.096 0	2.64	0.097 2	0.001 2	1.25
		21.18	0.093 6	-0.002 4	-2.50
38	0.197 0	2.64	0.203 0	0.006 0	3.05
		21.18	0.188 6	-0.008 4	-4.26
48	0.295 0	2.64	0.303 0	0.010 0	2.71
		21.18	0.307 0	0.015 0	4.06

由于超声波换能器与侧壁间的夹度由 45° 调整为 60° ，超声波的传播距离由原来的566 mm减少到462 mm，距离减少了104 mm；在渠道水流含沙量高时，由于超声波传播距离变短，在相同高含沙量（渠道水含沙量大于 5.63 kg/m^3 ）的情况下，水流中携带的泥沙等杂质对超声波能量的吸收、散射的作用减小，水流中泥沙对超声波声强产生的阻力降低，换能器接收到的声强增大，提高超声波的辨别度，从而提高超声波的测量精度。原测流箱由于进口条件的限制，超声波换能器的进出口距离均较短，再加上闸门的开启高度没有在全开启状态，导致测流箱内的水流紊乱，测流箱内的雷诺系数较高；采用斗渠设置测流槽进行测量，由于渠道的比降一定，测流槽进出口较长，槽内的水流平稳，测流槽内的雷诺系数较低，有利于超声波换能器的测流；斗渠中的测流槽距离闸门位置较远，闸门产生的噪声不会影响测流槽的运行；测流槽上部为开放式，同时和斗渠平顺连接，杂物随水流直接通过测流槽不会产生淤堵；斗渠渠道比降介于 $1/800 \sim 1/1000$ ，斗渠流速相对较快，水流中的泥沙不会对测流槽产生淤积。

经过一段时间的比测，测流槽内的流量与流速仪比测结果相符，测流槽内水深变化时比测流量的相对误差均在5%以内，达到试验改造设计的预期目的。

4 结 论

1) 超声波换能器与侧壁间的夹角由原来的 45° 变为 60° ，能有效提高声强的质量，降低水中泥沙含量高对声强造成的衰减和散射影响。

2) 将测流槽与闸门过流量控制分离，可以使通过测流槽的水流稳定平顺。

3) 采用闸门和测流设施分开设置，有效降低闸门开启造成的噪音对超声波设施的影响，并且不会出现淤堵和杂物堵塞。

4) 闸门控制和超声波测量水设备分开设置可以

有效减小测量水的误差,提高测量水精度,达到试验的预期目的。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 李伟, 张新燕, 刘朝阳. 仿舵型量水槽体形模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 118-123.
LI Wei, ZHANG Xinyan, LIU Zhaoyang. The impact of geometry of rudder-like flume on its performance and accuracy[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 118-123.
- [2] 刘鸿涛, 屈忠义, 向丹丹. 矩形渠道翼形量水槽仿生优化试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 140-146.
LIU Hongtao, QU Zhongyi, XIANG Dandan. Bionic optimization of wing-shaped flume for rectangular channel based on experimental study[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 140-146.
- [3] 廖伟, 张维乐, 王文娥, 等. 底坡对U形渠道量水平板测流影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 138-143.
LIAO Wei, ZHANG Weile, WANG Wen'e, et al. Impact of bed slope on accuracy of the horizontal plate for measuring water flow in U-shaped channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 138-143.
- [4] 崔巍, 吴鑫, 陈文学, 等. 大型渠道弧形闸门过流公式测试比较[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 141-146.
CUI Wei, WU Xin, CHEN Wenxue, et al. Comparison of different discharge calculation equations for large canal radial gates[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 141-146.
- [5] 贾飞, 陈小攀, 秦连乐, 等. 矩形明渠跌水测流研究现状与进展[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S1): 15-20.
JIA Fei, CHEN Xiaopan, QIN Lianle, et al. A research review on flow measurement in rectangular open channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(S1): 15-20.
- [6] 张羽. 浅谈流量计的选型及其应用[J]. 自动化与仪表, 2007, 22(1): 24-27.
ZHANG Yu. Discussion on the type selection and application of a flow meter[J]. Automation & Instrumentation, 2007, 22(1): 24-27.
- [7] 邓卫疆. 电磁流量计和超声波流量计基本性能的比较[J]. 科协论坛(下半月), 2012(7): 16-17.
- [8] 马乐平, 易善桢, 严冬, 等. 基于 WebGIS 的灌区水资源管理信息化方法与实现[J]. 水电能源科学, 2010, 28(8): 137-139.
MA Leping, YI Shanzhen, YAN Dong, et al. WebGIS-based water resources management information system and its implementation in irrigation area[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(8): 137-139.
- [9] 代伟, 李骏, 陈太红, 等. 压电陶瓷极化特性研究[J]. 计量与测试技术, 2010, 37(3): 39-40, 44.
DAI Wei, LI Jun, CHEN Taihong, et al. Piezoelectric ceramics polarization characteristic property studies[J]. Metrology & Measurement Technique, 2010, 37(3): 39-40, 44.
- [10] 方宜兵. 基于高频超声的液体流量测量机理及方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
FANG Yibing. Study on the mechanism and method of liquid flow measurement based on high frequency ultrasound[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [11] 任增强, 李跃忠, 钱永安. 超声污水流量测量的数学建模及影响因素分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2017, 33(2): 21-24, 47.
REN Zengqiang, LI Yuezhong, QIAN Yongan. Analysis of mathematical modeling and influence factors of ultrasonic sewage flow measurement[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2017, 33(2): 21-24, 47.
- [12] 韩莎. 超声波流量计的测量原理和应用[J]. 工业计量, 2012, 22(S2): 64-66.
- [13] 史中兴, 张师玮, 张彦蕊, 等. 大型引黄灌区超声波流量计的改进与应用[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(12): 1 276-1 281.
SHI Zhongxing, ZHANG Shiwei, ZHANG Yanrui, et al. Improvement of ultrasonic flowmeter and its application in large Yellow River Irrigated District[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(12): 1 276-1 281.
- [14] 罗凤琼. 超声波流量计测量准确度的影响因素分析[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2018(3): 43-45.
LUO Fengqiong. Analysis of the influence factors of ultrasonic flowmeter measurement accuracy[J]. Instrument Standardization & Metrology, 2018(3): 43-45.
- [15] 陶德志, 王莉. 超声波明渠流量计的设计[J]. 声学与电子工程, 2011(1): 46-48.
- [16] 李忠虎, 岳兰娇. 双声道超声波明渠流量计设计[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(6): 149-151.
LI Zhonghu, YUE Lanjiao. Design of double track ultrasonic open channel flow meter[J]. Industrial Control Computer, 2017, 30(6): 149-151.
- [17] 吕常智, 王亚琪, 桑涛. 多声道超声波明渠流量计的设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(12): 13-16, 21.
LYU Changzhi, WANG Yaqi, SANG Tao. Design of multichannel high precision ultrasonic open channel flowmeter[J]. Automation & Instrumentation, 2019(12): 13-16, 21.
- [18] 许苗苗, 周义仁, 李浩. 便携式矩形渠道自动测流装置的研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(1): 114-116, 121.
XU Miaomiao, ZHOU Yiren, LI Hao. Research on the portable rectangular channel automatic flow measurement device[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(1): 114-116, 121.
- [19] 史中兴, 张师玮, 张彦蕊, 等. 大型灌区渠道闸门一体化测控系统[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(2): 145-151.
SHI Zhongxing, ZHANG Shiwei, ZHANG Yanrui, et al. Integrated measurement and control system for irrigation canal gates in large-scale irrigation districts[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(2): 145-151.
- [20] 李志勇, 张英敏, 张鹏. 基于 FPGA 的科氏流量计驱动技术实现[J]. 测控技术, 2010, 29(3): 4-7.
LI Zhiyong, ZHANG Yingmin, ZHANG Peng. Realization of driving technology for Coriolis mass flowmeter based on FPGA[J]. Measurement & Control Technology, 2010, 29(3): 4-7.

Application of Ultrasonic Flowmeter in Yellow-river Irrigation Channels

WANG Xucun, WU Rong*, MA Jiadong

(Ningxia Hui Autonomous Region Ocean And Water Management Office, Zhongning 755100, China)

Abstract: **【Objective】** As the allocation of Yellow River water for irrigation diminishes, there is a pressing need to improve irrigation management. A fundamental requirement for achieving this objective is a comprehensive understanding of water flow in each irrigation channel. The aim of this paper is to propose a method to improve the precision of ultrasonic flowmeters for measuring flow rates in these sediment-laden channels. **【Method】** The proposed method is based on the principles of multi-channel ultrasonic flow measurement. It entails a comprehensive redesign of the integrated measurement and control gate. An automatic gate is installed to regulate flow through the gate, while a multi-channel ultrasonic measuring tank and an ultrasonic level meter are placed downstream of the canal gate to measure canal flow. The angle of the ultrasonic transducer on the measuring tank is adjusted by shifting from the original 45 ° to 60 °. This adjustment shortens the effective distance of ultrasonic sound intensity, reducing the attenuation of sound intensity caused by factors like sediment, bubbles, and suspended impurities in the water. An additional ultrasonic level gauge is integrated into the upper section of the measuring tank, and channel flow is measured through the coordinated operation of the ultrasonic level gauge and ultrasonic transducer. **【Result】** The separate installation of the control gate and the flow measuring tank has no adverse impact on gate automatic control or the monitoring and analytical calculation of flow measurement data. Furthermore, it stabilizes water flow within the canal and decreases the Reynolds coefficient of the channel flow, reducing interference from culverts and water flow noise on sound intensity. In cases of high sediment concentration, the shortened effective distance of the channel ultrasonic sound intensity leads to reduced sound intensity attenuation. This enhances the ultrasonic transducer's ability to recognize sound intensity and substantially improves flow measurement accuracy, especially in conditions characterized by high sediment content and impurities. The separate reconstruction of the gate and measuring flume at the 303 bucket mouth of the three trunk lines was compared under varying water depths and sediment concentrations. The measurement error in several scenarios remained within 5%. **【Conclusion】** The automatic water measurement facilities developed in this paper meet the rigorous requirements for automatic flow measurement and control in irrigation areas. The results have potential for application in modernization of sediment-laden channel water measurement in high sediment concentration areas, thus contributing to the information technology advancements in such channels.

Key words: ultrasonic flowmeter; flow measurement; Yellow River Channel; high sediment flow; measurement

责任编辑：赵宇龙