

宁夏引黄灌区斗渠量测水设备比测试验研究

王怀博¹, 徐利岗¹, 刘学军¹, 苏笑曦²

(1. 宁夏水利科学研究所, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏唐徕渠管理处, 宁夏 银川 750001)

摘要: 考虑稳定性、准确性、泥沙含量和气温变化等因素综合作用对量测水设备可靠性的影响, 建立量测水设备比测综合评价指标体系。在宁夏引黄灌区唐徕渠斗渠建立试验点, 分别在夏秋灌和冬灌两个行水期对5类设备进行比测评价。结果表明: 灌溉期泥沙对新安装量测水设备的精度影响不大, 气温变化不足以影响设备精度; 单纯基于超声波原理的设备不适宜在泥沙含量较大的渠道应用; 基于电磁法和超声波原理的智能化明渠流量测量系统测流的准确性较高, 但稳定性不足; 非接触式明渠雷达流量计可靠性最优, 其低水位时流量误差综合不确定度为8.87% (受极端水位影响), 中水位时为2.87%, 高水位时为4.68%。研究可为引黄灌区不同流量级别渠道上量测水设备比测和选用提供借鉴。

关键词: 量测水设备; 斗渠; 比测试验; 可靠性分析; 综合评价指标体系; 引黄灌区

中图分类号: TV213.4; TB937 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)06-0250-06

Study on comparing measurement of volume of water equipment in lateral canal of the Yellow River irrigation district in Ningxia

WANG Huaibo¹, XU Ligang¹, LIU Xuejun¹, SU Xiaoxi²

(1. The Scientific Research Institute of the Water Conservancy of Ningxia, Yinchuan 750021, China;

2. Ningxia Hydrology Department Tang Laiqu Management Branch, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Considering the influence of stability, accuracy, sediment concentration and temperature variation on the reliability of water measuring equipment, a comprehensive evaluation index system was established. A field test was performed in Tang Laiqu channel of the Yellow River irrigation district of Ningxia, which would be used to evaluate the five types of equipment in summer autumn irrigation and winter irrigation water period. The results showed that: the sediment of the irrigation period had little influence on the precision of the newly installed water measuring equipment, and the temperature change was not big enough to affect the precision of the equipment; the equipment based on ultrasonic principle was not suitable for the channel application with large sediment content; the accuracy of intelligent measurement system in open channel flow measurement system with electromagnetic method and ultrasonic principle was high, but the stability was insufficient; the non-contact open channel radar flow gauge had the best reliability, and the comprehensive uncertainty of the low water level reached 8.87% (affected by the extreme water level), the middle water level reached 2.87%, and the high water level reached 4.68%. The study can provide reference for the equipment comparison and selection in different flow level channels in the yellow irrigation area.

Key words: water measure equipment; lateral canal; comparison measurement experiment; reliability analysis; comprehensive evaluation index system; Yellow River irrigation district

收稿日期: 2018-04-19; 修回日期: 2018-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC04002); 宁夏回族自治区水利厅水利科技项目“宁夏引黄灌区测量水设备比测遴选及测控一体化系统研究”

作者简介: 王怀博(1988-), 男, 宁夏海原人, 硕士, 工程师, 主要从事农田水利工程与水资源规划利用研究。

1 研究背景

根据国内外灌区建设的经验和发展趋势,建设现代化灌区是适应新形势、解决新问题的必然选择,灌区现代化的一个主要标志就是量水技术的提高。准确计量对保护和节约水资源、提高经济效益、保障水资源可持续利用具有重要意义^[1-3]。国内灌区多以明渠灌溉为主,灌溉用水以斗农渠口水量按方收费^[4],因此明渠测流是灌区管理的重要任务之一,也直接关系着灌区经济效益。

宁夏引黄灌区地处中温带干旱区,昼夜温差较大,年均气温8~9℃,4-9月大于等于10℃的积温为3 200~3 400℃,衬砌良好的斗农渠中引用的黄河水泥沙含量在1.5~2.2kg/m³之间。灌区测流主要存在量测水设备多样,精度不一,对不同流量级别、不同工况条件下适宜的量测水设备缺乏系统研究及选用依据^[5-7]。随着水费制度的改革,对斗农渠的量水精度要求将会越来越高。按照测流原理分类,近些年现场应用的流量计可分为电磁流量计^[8]、质量流量计^[9]、涡街流量计、超声波流量计(时差式超声波流量计、多普勒超声波流量计、气体超声波流量计)^[10-12]。受环境、流场、传输信号、硬件电路和软件算法等多方面因素的影响和制约^[13],各类流量计在不同情况下测流精度不一致。多数相关设备的研究针对单一原理研究的较多,技术也得到很大改进,目前大多明渠测流系统注重集成多种流量计技术以提高测流精度^[14-16],澳大利亚的全渠道控制系统实现了测控一体,灌溉水有效利用系数提高至84%~90%,电磁流量计对明渠测流上摩擦和黏附效应较敏感,质量流量计和涡街流量计主要用于管道测流,超声波流量计主要用时差法和多普勒法测流,多以测流速和水位得出流量,在高含沙的黄河水测流中表现出劣势。本研究引进不同测流原理的量测水设备,构建量测水设备比测综合评价指标体系,评价各类设备的可靠性,旨在为宁夏引黄灌区不同流量级别渠道推荐适宜的量测水设备,为灌溉管理部门提高量测水管理水平,以及灌区信息化、现代化建设提供理论依据和技术支撑。

2 资料和方法

2.1 研究区概况

在宁夏引黄灌区唐徕渠支干渠第二农场渠的斗渠上选择合适位置建设标准化测流断面,确定流量级别为1~3 m³/s。在该渠道上将各类设备按照灌溉渠道系统量水规范(GB/T 21303-2007)的要求

进行安装布设,各类设备在同一时段(流量指标相对稳定)或时间相隔不大的时限内同时进行观测,以保证各类设备监测时的工况及基本条件近似,具有数据的可比性。测流时的水位、流量范围尽可能调控到被检测设备最不利工况(即从最小水位到最大水位)。

2.2 比测试验方案

按照断面流量设置级别及唐徕渠不同流量斗口分布情况,选取团结斗典型渠道进行设备比测试验。该斗渠位于第二农场渠进口以下4+020右岸,灌溉面积340 hm²,渠道长8 km。斗口为0.8 m×0.8 m双孔方涵,断面最大流量3.3 m³/s,测水断面设置于出口以下200 m,断面型式为梯形浆砌石砌护。典型断面安装了直开口手动闸门量控水系统、超声波测流系统、智能化明渠流量测量系统、恒流量电动闸门监控系统和非接触式明渠雷达流量计^[17]共5台设备(表1),各类设备每5 min返回1次数据。

表1 设备编号及名称

设备编号	设备名称
设备1	直开口手动闸门量控水系统
设备2	超声波测流系统
设备3	智能化明渠流量测量系统
设备4	恒流量电动闸门监控系统
设备5	非接触式明渠雷达流量计

试验采取人工测流与设备自动测流两种方式,通过获得数据及其他参数分析,综合评价各类设备。测流期间水量以调解水位的方式进行控制,人工及设备监测不同水位条件下典型断面的水位、水面宽度、断面面积、断面平均流速、断面瞬时流量。根据典型断面实际情况,团结斗断面测线布置采用3垂线两点法(图1),每个水位需获得5个测次的有效数据,同一水位重复测量3次。由于灌溉期应注意每日的调度水位,可人工调节正常调度水位的±10 cm,并及时进行短时水位的测定,对运行的最低至最高水位均进行监测。

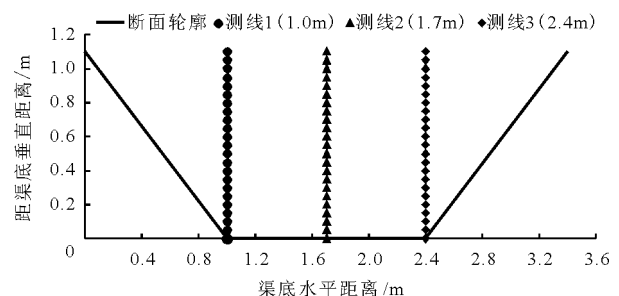


图1 团结斗典型比测断面测线布置图

2.3 数据处理方法

2.3.1 误差与准确度计算方法 误差是测定值 X_i (各类必测设备的监测值) 与真值 P_i (LS25 - 3D 监测值) 之差, 可分为绝对误差 E 和相对误差 E_r , 其计算公式分别为公式(1)、(2)。

$$E = X_i - P_i \tag{1}$$

$$E_r = (X_i - P_i) / P_i \tag{2}$$

绝对误差和相对误差有正负之分, 正误差表示分析结果偏高, 负误差表示分析结果偏低。

2.3.2 测量不确定度计算方法 误差不宜用来定量表明测量结果的可靠程度, 测量不确定度^[18]合理地赋予了被测量值的分散性, 是与测量结果相联系的参数, 有合理性、分散性、联系性3个特点, 不确定度和测量结果相结合用来表示在给定条件下对测量进行测量时测量结果所可能出现的区间, 可用来描述测量结果的可靠性。

按照《水位观测标准》(GB/T50138 - 2010), 比测试验对于监测数据不确定度的计算采用如下算法:

(1) 系统不确定度的计算公式

$$X''_y = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{yi} - P_i)}{N} \tag{3}$$

式中: P_{yi} 为各类比测设备监测的数值或误差(水位、断面平均流速、断面平均流量); P_i 为 LS25 - 3D 监测的数据或误差; N 为观测次数。

(2) 随机不确定度的计算公式

$$X'_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{yi} - P_i - X''_y)^2}{N - 1}} \tag{4}$$

(3) 综合不确定度的计算公式

$$X_z = \sqrt{X'^2_y + X''^2_y} \tag{5}$$

2.3.3 可靠性评价标准 可靠性评价标准按照比测试验实际情况制定, 评价指标的权重采用德尔菲法和层次分析法相结合的方法确定。通过征求宁夏引黄灌区管理部门人员、长期从事监测工作的技术人员、水利专家、水文气象专家、农业专家、工程设计人员、设备厂家等对评价指标重要性的比较意见, 计算各层次指标的权重值(表2)。

表2 评价指标权重

目标层	准则层	评判值	权重	指标层	评判值	权重
适宜宁夏引黄灌区的量测水设备	技术性指标 (S_1)	100	1.0	数据稳定性(S_{11})	40	0.40
				数据准确性(S_{12})	40	0.40
				泥沙阻抗性(S_{13})	10	0.10
				气温阻抗性(S_{14})	10	0.10

总体评价以流量指标为主, 参照水位和流速指标, 总评判值100分, 其中数据稳定性占40分, 数据准确性占40分, 设备对泥沙阻抗性占10分, 对气温变化(夏秋灌高温、冬灌低温)的阻抗性占10分。各指标评分标准计算方法如下:

(1) 稳定性指标评分标准。依据整个比测期流量的误差统计表(范围1: $-5\% < X < 5\%$; 范围2: $-10\% < X \leq -5\%$ 且 $5\% \leq X < 10\%$; 范围3: $X \geq 10\%$ 且 $X \leq -10\%$), 计算出每个误差范围内数据占比 A 、 B 、 C , 每个范围系数为1.0, 0.5, 0, 范围3的数据得分为0, 各类设备分别得分 $S = 40 \times A + 20 \times B$ 。

(2) 准确性指标评分标准。依据整个比测期流量值的综合不确定度、趋势线斜率和 R^2 值, 不确定度赋分20, 斜率赋分10, R^2 值赋分10。据综合不确定度(误差) X_z , 按照范围(范围1: $-5\% < X_z < 5\%$; 范围2: $-10\% < X_z \leq -5\%$ 且 $5\% \leq X_z < 10\%$; 范围3: $X_z \geq 10\%$ 且 $X_z \leq -10\%$) 计算出每个范围内数据占比 A_1 、 B_1 、 C_1 , 每个范围系数为1.0, 0.5, 0, 综

合不确定度得分 $S_1 = 20 \times A_1 + 10 \times B_1$; 斜率按照范围(范围1: $0.8 < a < 1.2$; 范围2: $0.5 < a \leq 0.8$ 且 $1.2 \leq a < 1.5$; 范围3: $a \geq 1.5$ 且 $a \leq 0.5$) 计算出每个范围内数据占比 A_2 、 B_2 、 C_2 , 每个范围系数为1.0, 0.5, 0, 斜率得分 $S_2 = 10 \times A_2 + 5 \times B_2$; R^2 值按照范围(范围1: $0.8 < R^2 < 1.2$; 范围2: $0.5 < R^2 \leq 0.8$ 且 $1.2 \leq R^2 < 1.5$; 范围3: $X \geq 1.5$ 且 $X \leq 0.5$) 计算出每个范围内数据占比 A_3 、 B_3 、 C_3 , 每个范围系数为1.0, 0.5, 0, R^2 值得分 $S_3 = 10 \times A_3 + 5 \times B_3$ 。最终各类设备准确性指标得分 $S = S_1 + S_2 + S_3$ 。

(3) 设备对泥沙阻抗性评分标准。依据整个比测期不同断面监测的泥沙含量, 对泥沙含量从小到大进行排序, 以断面泥沙含量最小时的流量测量误差为基准值, 计算出不同泥沙含量下流量测量误差的变幅, 按照范围(范围1: $-5\% < X < 5\%$; 范围2: $-10\% < X \leq -5\%$ 且 $5\% \leq X < 10\%$; 范围3: $X \geq 10\%$ 且 $X \leq -10\%$) 计算出每个范围流量误差内变幅占比 A 、 B 、 C , 每个范围系数为1.0, 0.5, 0, 最终

设备对泥沙阻抗性 $S = 10 \times A + 2.5 \times B$ 。

(4)设备对气温变化阻抗性评分标准。依据冬灌和夏秋灌两个时期气温变化时段各类设备的流量误差进行计算。由于比测期试验点在冬灌期间气温为 $-3 \sim 8^{\circ}\text{C}$,该温度区间均在现有电子元件适用范围内,比测期连续多天气温超过 35°C ,因此低温赋分 4,高温赋分 6,冬灌以时段最高温(夏秋灌以时段最低温)时流量误差为基准值,计算出气温显著变化情况下流量误差的变幅,按照范围(范围 1: $-5\% < X < 5\%$;范围 2: $-10\% < X \leq -5\%$ 且 $5\% \leq X < 10\%$;范围 3: $X \geq 10\%$ 且 $X \leq -10\%$)计算出每个流量误差范围内变幅占比 $A_1(A_2)$ 、 $B_1(B_2)$ 、 $C_1(C_2)$,每个范围系数为 1.0, 0.5,0,最终设备对气温变化阻抗性得分 $S = 4 \times A_1 + 2 \times B_1 + 6 \times A_2 + 3 \times B_2$ 。

3 结果与分析

3.1 比测资料的选取

比测时间分为 2016 年冬灌和 2017 年夏秋灌两个时期,冬季比测时间始于 11 月 3 日,11 月 7 日终止,夏秋季比测时间始于 2017 年 5 月 20 日,7 月 25 日终止,获得 0.35、0.43、0.54、0.60、0.66、0.71、0.74、0.80、0.88、0.93、0.96、1.03 m 共 12 个水位不同时段的数据。特定渠道水位不同水流态也会发生变化^[19-20],研究中将获取的数据相应水位分为低、中、高 3 类,即 0.35 ~ 0.60 m、0.66 ~ 0.74 m、0.80 ~ 1.03 m。对行水期内人工及各类设备监测得到数据进行可靠性分析,包括稳定性、准确度及其他因素干扰分析。其中,稳定性评价是对各比测设备值相对人工监测值的变幅和误差范围(范围 1: $-5\% < X < 5\%$;范围 2: $-10\% < X \leq -5\%$ 且 $5\% \leq X < 10\%$;范围 3: $X \geq 10\%$ 且 $X \leq -10\%$)进行统计分析;数据准确性评价对不同监测时段比测设备返回的各测次数据不确定度和误差进行综合分析;黄河宁夏段含沙量较高,研究对典型渠道泥沙含量^[21]与比测设备各参数量测精度之间的关系进行分析;还对高寒与高温气候条件下各类设备监测数据误差变化状态进行监测。

3.2 数据对比分析

3.2.1 稳定性分析 通过 LS25-3D 型流速仪监测获得标尺数据,对该数据监测时段内各比测设备返回数据进行提取并统计个数,并计算该数据误差,对每个数据的误差在各误差范围(范围 1: $-5\% < X < 5\%$;范围 2: $-10\% < X \leq -5\%$ 且 $5\% \leq X < 10\%$;范围 3: $X \geq 10\%$ 且 $X \leq -10\%$)内的个数

进行统计,并计算其占比,各比测设备误差统计如表 3 所示。从表 3 可以看出,整个监测时段流量误差在 5% 以内占比排序为:设备 5 > 设备 1 > 设备 3 > 设备 2 > 设备 4。

表 3 团结斗斗口各类设备误差统计表

设备名称	有效数	$-5\% < X < 5\%$		$-10\% < X \leq -5\%$		$5\% \leq X < 10\%$	
		个数	占比	个数	占比	个数	占比
设备 1	158	56	35.44	40	25.32	62	39.24
设备 2	122	5	4.10	5	4.10	112	91.80
设备 3	118	10	8.47	39	33.06	69	58.47
设备 4	56	0	0	11	19.64	45	80.36
设备 5	128	65	50.78	33	25.78	30	23.44

比较不同水位下比测时段各类设备流量并得出其变幅(器测数据与人工数据的误差变幅)。低水位如水位为 0.43 m 时(LS25-3D 断面平均流量:0.644 m^3/s)设备 5 变幅最小,波动区间在 0.004 ~ 0.018 m^3/s (对应误差 0 ~ 2.80%)之间;中水位如水位为 0.71 m 时(LS25-3D 断面平均流量:1.503 m^3/s)设备 1 变幅最小,波动区间在 0.034 ~ 0.075 m^3/s (对应误差 2.26% ~ 4.99%)之间;高水位如水位为 0.96 m 时(LS25-3D 断面平均流量:2.821 m^3/s),设备 5 变幅最小,波动区间 0.0125 ~ 0.0191 m^3/s (对应误差趋于 0)。

3.2.2 准确性分析 绘制不同水位下比测设备数据与 LS25-3D 型流速仪拟合直线,截距设置为 0,统计分析各类设备流量拟合直线斜率和 R^2 值并计算误差综合不确定度 X_c 值。图 2 为全测期的水位-流量关系曲线和不同设备与流速仪获得的流量数据的拟合线,表 4 统计了各类设备与流速仪流量值拟合直线。

表 4 流速仪与各设备拟合线指标

设备名称	指标	全水位	低水位	中水位	高水位
设备 1	斜率	1.0935	1.0529	0.9865	0.8887
	R^2 值	0.9757	0.9597	0.9016	0.9329
设备 2	斜率	0.3311	0.8434	0.9972	0.9769
	R^2 值	0.6073	--	0.9255	0.0934
设备 3	斜率	0.8638	0.9246	0.8987	0.9530
	R^2 值	0.9793	0.9737	0.9469	0.8804
设备 4	斜率	0.7926	0.9434	0.8555	0.7538
	R^2 值	0.8818	0.8328	0.9634	0.5272
设备 5	斜率	0.9620	1.0874	1.0107	0.9356
	R^2 值	0.9749	0.9409	0.9480	0.9222

注:--表示不存在相关关系。

由图 2 和表 4 可见,全水位条件下,比测数据和流速仪监测数据的吻合程度由高到低为:设备 5 > 设备 1 > 设备 3 > 设备 4 > 设备 2;低水位时除设备 2 外其他

设备拟合均较好,设备1最优($y = 1.0529x, R^2 = 0.9597$),其次是设备3,中、高水位时各类设备拟合均较好,中水位时设备5拟合最优($y = 1.0107x, R^2 = 0.9480$),其次是设备2,高水位时设备5拟合最优($y = 0.9356x, R^2 = 0.9222$),其次是设备3。

图3为各类设备流量综合不确定度在不同水位条件下的堆积面积图,某水位下堆积值越低,则各类设备不确定度越低,表明在该种水位下适宜性越好,同一水位,对堆积值贡献越小的设备,表明其测流越可靠。整

体来看,各个水位条件下堆积贡献率最大的是设备2,最小的是设备5,其次是设备1,如0.54 m时,贡献率从小到大依次为:设备5 > 设备3 > 设备1 > 设备4 > 设备2。从综合不确定的大小比较,设备5综合不确定度除0.35 m和1.03 m两个极端水位外均符合测流规范(小于5%)其次是设备3和设备1基本符合测流规范,其中设备1不确定在极端水位下明显大于设备3,其他水位反之。设备5在低水位时综合不确定度为8.87%,中水位时为2.87%,高水位时为4.68%。

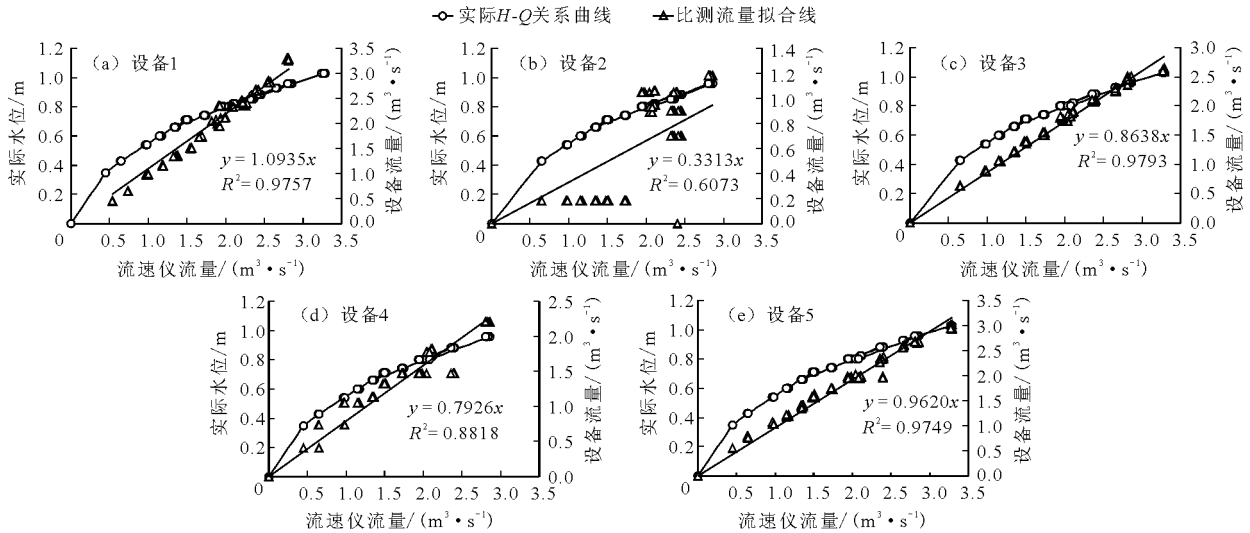


图2 全水位下各比测设备水位流量关系曲线和流量数据拟合线

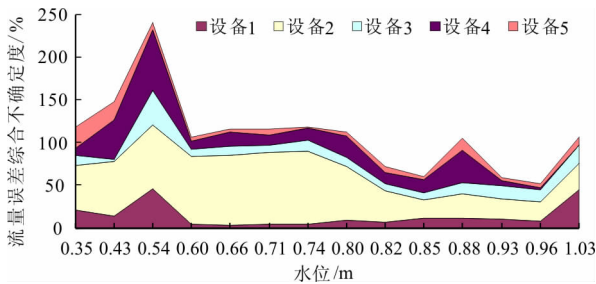


图3 各类设备在不同水位条件下流量综合不确定度的变化

3.2.3 设备对泥沙和气温变化的阻抗性分析 渠道行水期,在比测断面采取水样检测当日泥沙含量和泥沙颗粒级配^[22-23]。结果表明行水期泥沙含量最小为0.320 kg/m³,最大为0.840 kg/m³,泥沙含量小于0.433 kg/m³时,泥沙含量对误差影响不大,泥沙含量大于0.433 kg/m³时,各类设备的误差随着泥沙含量的增大而增大,泥沙量为0.433 kg/m³时,粒径区间

16.70 ~ 21.28 μm 的颗粒占总含量比例最高,为8.45%,粒径小于20 μm 的颗粒占总含量的68%以上。为了确定测流误差来源,结合宁夏气候条件,于2016年11月试验点最低气温-10℃和2017年7月12日至7月21日试验点最高气温达39℃,且温度超过35℃持续极端高温日数突破历史极值的条件下,分析温度突变前后的测流误差,误差变化稳定,表明温度变化对设备测量误差无明显影响。

3.3 综合评价

从可靠性指标方面分析得出最后评分(表5)可见,设备5得分74.09分,排名第一;设备1,得分61.35分,排名第二;设备3得分44.45分,排名第三;设备4得分27.95分,排名第四;设备2得分21.18分,排名第五。在唐徕渠斗渠(流量级别为1 ~ 3 m³/s)推荐采用设备5,其次是设备1。

表5 团结斗斗口量测水设备比测综合评价得分表

一级指标	二级指标	赋分	设备1	设备2	设备3	设备4	设备5
技术性指标	数据稳定性	40	19.24	2.46	10.00	3.92	25.46
	数据准确性	40	28.57	10.00	25.45	16.67	30.71
	泥沙阻抗性	10	6.26	4.00	5.00	5.00	8.76
	气温阻抗性	10	7.28	4.72	4.00	2.36	9.16
合计		100	61.35	21.18	44.45	27.95	74.09

通过试验发现,现有量测水设备测流原理多样化,精度均在不断提高,本研究是基于全面数据的分析,发现单纯基于超声波原理的设备不适宜在泥沙含量较大的渠道上应用,通过闸门控制水量计算流量的设备1和设备4对测流断面的标准要求较高,结合电磁法和超声波原理的设备3准确性较高,但是稳定性不足,设备5将声学 and 雷达多普勒效应结合明显提高了设备的可靠性。

4 结论与讨论

本研究建立量测水设备比测综合评价指标体系,对不同测流原理设备进行比测,并对各类设备进行量化评价,得到如下结论:

(1)推荐在唐徕渠斗渠(流量级别为 $1 \sim 3 \text{ m}^3/\text{s}$)采用非接触式明渠雷达流量计,其次是直开口手动闸门量控水系统。除 0.35 m 和 1.03 m 两个极端水位外,非接触式明渠雷达流量计的流量值均符合测流规范(小于5%),其低水位时综合不确定度为8.87%,中水位时为2.87%,高水位时为4.68%。

(2)单纯基于超声波原理的设备不适宜在泥沙含量较大的渠道上应用,通过闸门控制水量计算流量的设备对测流断面的标准要求较高,结合电磁法和超声波原理的设备准确性较高,但是稳定性不足,将声学 and 雷达多普勒效应结合能明显提高设备的可靠性。

(3)灌溉期气温变化不足以影响设备精度,泥沙对新安装量测水设备的精度影响不大。

所建立的量测水设备比测综合评价指标体系可用于比测引黄灌区不同流量级别渠道上的设备,通过对不同原理量测水设备全面数据稳定性、准确性和其他指标影响的定量评价方法,为渠道引选各类设备提供理论依据和技术支撑。本研究结果是对全面数据的分析,由于在野外渠道上进行测量,受时间的影响,对于校准各类设备测流模型的参数缺乏探索,下一步研究工作主要对各类设备多年长系列数据进行分析,提出校准量测水设备的关键参数,进一步改善量测水设备的可靠性。

参考文献:

[4] 沈昱明. 流量测量中若干问题的计量学基本原则[J]. 计

量学报,2008(5):472-474.

- [5] 杨志. 宁夏引黄灌区现代化建设的认识与实践[J]. 中国水利,2017(16):61-62.
- [6] 张军明. 水库灌区量水设施应用技术比较研究[J]. 节水灌溉,2012(10):69-71+74.
- [7] 郝树荣,任瑞英,郝树刚. 灌区量水技术的发展与展望[J]. 人民黄河,2003,25(11):41-43.
- [8] 赵保生,吴蓉,刘志森,等. 电磁流量计发展及趋势[J]. 自动化仪表,2017,38(5):67-71.
- [9] 王利军. 基于振动管测量系统建模的科里奥利质量流量计零点补偿方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [10] 张华,陈凤,黄勇,等. 基于动量守恒原理的量水设施-动量式流量计的研制[J]. 节水灌溉,2012(2):5-8.
- [11] 阮芬,马树升,白清俊,等. 超声波流量计的测流原理及其应用研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2006,37(1):99-104.
- [12] 高科,赵伟国. 超声水表流量标准装置系统设计[J]. 中国计量学院学报,2015,26(3):258-262+290.
- [13] 臧克江,陈鹰. AutoCAD环境下的齿轮泵理论流量计算与验证[J]. 农业机械学报,2003,34(5):76-79.
- [14] 王成福,景少波,吴旭. 新疆灌区明渠量测水现状与对策初探[J]. 水利水电技术,2011,42(12):81-83.
- [15] 王林,周义仁. 基于毫米级数字水位计的明渠测流系统的研究[J]. 中国农村水利水电,2015(2):105-107+111.
- [16] 张从鹏,罗学科,李功一,等. 面向灌区调水工程的远程自动计量闸门研究[J]. 农业机械学报,2014,45(8):172-177+275.
- [17] 杜亚南,张良平,游目林. 钢铁材质浮标对ADCP水文监测系统流量测验精度的影响[J]. 水利水电科技进展,2017,37(1):55-59.
- [18] 张海滨,王中宇,刘智敏. 测量不确定度评定的验证研究[J]. 计量学报,2007,28(3):193-197.
- [19] MEDAGODA L, WILLIAMS S B, PIZARRO O, et al. Mid-water current aided localization for autonomous underwater vehicles[J]. Autonomous Robots, 2016, 40(7):1207-1227.
- [20] HUANG Hening. Statistical quality control of streamflow measurements with moving-boat acoustic Doppler current profilers[J]. Journal of Hydraulic Research, 2015, 53(6):820-827.
- [21] 胡浩,程和琴,韦桃源,等. 基于ADCP测量的长江口推移质运动速度研究[J]. 泥沙研究,2015,40(5):1-6.
- [22] HAWKINS A J, FOX D B, BECKER M W, et al. Measurement and simulation of heat exchange in fractured bedrock using inert and thermally degrading tracers[J]. Water Resources Research, 2017,53(2):1210-1230.
- [23] 舒安平,费祥俊. 粘性泥石流运动流速与流量计算[J]. 泥沙研究,2003(3):7-11.