

# 大中型灌区高效用水全程量测控技术模式构建

谢崇宝

(中国灌溉排水发展中心,100054,北京)

**摘要:**在总结现有灌区用水量测控技术和设备的基础上,提出了灌区用水全程量测控设施的布局原则,分析了基于孔流或堰流特征的测控一体化技术研发与设备创制进展情况,经过实践提炼了在大中型灌区续建配套与现代化改造中经济实用的5种量测控技术模式,并根据发展需求提出了相关意见与建议,以期实现灌区供水服务的安全性、公平性、可靠性和灵活性,提高水资源的利用效率和效益。

**关键词:**大中型灌区;高效用水;全程量测控

**Technical modes creation of the whole-process water measurement and control for high efficiency of water use in large and medium irrigation districts//Xie Chongbao**

**Abstract:** Base on the summary of current technology and equipment on irrigation water measurement and control in irrigation districts, geographical layout principles of whole-process water measurement and control equipment have been raised. The article analyses the progress of technical research and equipment innovation on integrated functions of measurement and control basing on weir and orifice flow characteristics. Five economical and practical modes on both water measurement and control have been summarized in infrastructural improvement and irrigation modernization projects in large and medium irrigation districts. In order to achieve water supply services safely, equity, reliability and flexibility to further increase water use efficiency and profit in irrigation districts, some comments and suggestions have been made.

**Keywords:** large and medium irrigation districts; high efficiency of water use; whole-process of water measurement and control

中图分类号:S277.9

文献标识码:B

文章编号:1000-1123(2021)17-0018-06

## 一、灌区用水全程量测控规划布局与选型原则

大中型灌区作为一个重要的生产系统和生态系统,也是服务农业农村现代化发展的重要基础支撑平台,因此,研究灌区用水管理需要有系统治理的思维,需要以全局的视角,通过适宜的技术,实现灌区供水服务高效化。灌区用水全程量测控是灌区实施精准化管理的重要手段,其根本目标是提高水资源的利用效率和效益,从水源取水、渠系配水、田间用水到农田排水等全过程对水流实施监测与控制,其主要过程包括蓄水、引水、提水、输水、配水、用水和排水等灌区重

要节点。在灌区用水全程量测控技术中,最为核心的是量水设施的布局和选型。总体而言,量测水设施应选择布设在渠道顺直、断面规则、渠床稳固和水流平顺处,以满足必要的水力学条件;控制设施位置选择应避免进口出现横向流和旋涡,出口应避免出现淹没流和回流;灌区量测水设施规划布局和设施选型应综合考虑,按照经济实用原则合理确定。大中型灌区用水全程量测控技术框架示意见图1。

### 1.设施规划布局

设施规划布局应从水源开始,提水灌区应包括泵站流量的监测与控制。从输配水渠道来看,应在引水渠、输水渠、配水渠渠首等引水口门下游

适当位置且水流平稳处布设;从渠系建筑物来看,应在闸门、渡槽、倒虹吸、涵洞、跌水等重要建筑物处布设;从机构职责来看,应在管理单元的分水点或行政单元的分界点处来布设;从布置顺序来看,应从源头开始,先上游后下游,先干支后斗农,逐级向下延伸,优先保证用水单元分界点的计量和满足特定目的计量需求;从服务单元来看,当条件不具备时,宜适当扩大用水计量单元,在单元内部按面积或其他认可的方式分摊,当条件成熟后,应逐步缩小计量单元,以提高灌区用水精细化管理水平。

### 2.量测设施选型

量测设施选型应以经济实用为

收稿日期:2021-06-18

作者简介:谢崇宝,教授级高级工程师。

目标。量水设施选择应优先利用现有建筑物量水,既不增加新的水头损失也不增加新的基建投资,这对平原型灌区具有特殊重要的意义,同时视实际需求与可能,在配水渠和分水点等小型渠道宜采用量水堰或量水槽量水。总体而言,流速仪量水适用于要求水头损失小、易受下游水位影响的渠道量水;标准断面法量水适用于渠段顺直、断面规则、水流均匀、测流断面不受建筑物泄流影响的渠道;流量计适用于输水管道量水。具体而言,设施选型:①应满足一定的量水精度要求,过高或过低都会对灌区用水管理造成不利影响,实践中应以满足实际需求为原则,具有准确性;②量水设施应与渠道过流能力相适应,水头损失要小,测流范围要大,具有适应性;③量水设施应造价低廉,施工简易,观测简便,养护灵活,具有便捷性;④量测水设施应能及时准确感知水情变化,具有灵敏性;⑤由于量水设施的野外使用环境,水质、水温、泥沙、气候、电磁波等不可避免会对测控设施造成影响,要求设备应具有抗干扰性。

## 二、渠系输配水量测控技术创新与设备创制

### 1.渠系输配水量测控设施高效布局模式

闸门和溢流堰是渠系建筑物中重要的水量调控设施,也是蓄水、引水、输水、配水建筑物中必不可少的重要组成部分。对大中型灌区渠系分水口或配水口而言,总是期望向下游配水流量尽量稳定,同时期望上游来水尽量稳定或者通过适当调节能快速实现新的稳定。分析堰流和孔流特性可知,当上游来流量增加1倍时,堰前水位只增加1.6倍,而闸前水位却增加4倍,表明堰流具有很好的水位稳定功能,而孔流具有很好的流量稳定功能。理想的输配水节点应是节制闸采用堰流而配水闸采用孔流,如

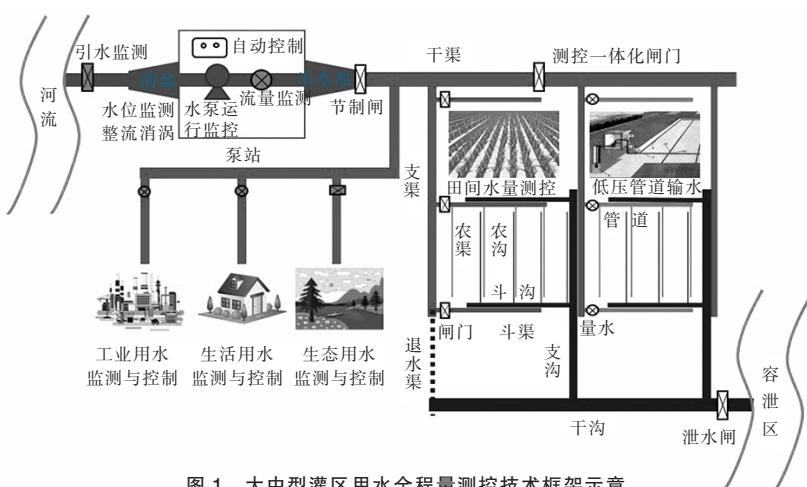


图1 大中型灌区用水全程量测控技术框架示意

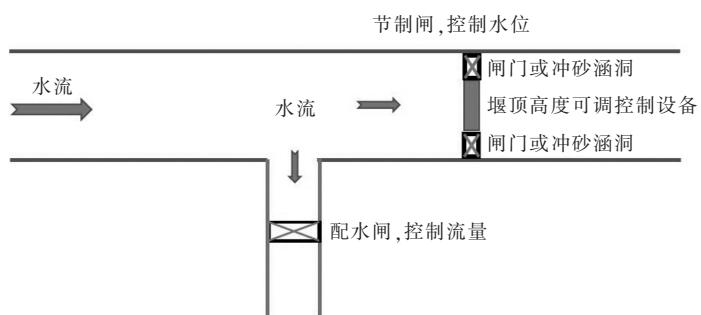


图2 堰闸优化组合高效输配水布局模式示意

图2所示,但由于传统堰流堰顶高度固定,限制了这种配置的实现,因此,开发堰顶高度可调的水流控制设备是实现这种理想配置的重要前提。

### 2.基于水位流量关系或流速面积法的水量监测技术与设备

渠系水量监测是灌区高效用水的前提条件,更是落实最严格水资源管理制度的重要手段。水量监测的基本要素为水位和流速,目前灌区广泛使用的监测设备主要包括水位传感设备和流速传感设备,并依据水位流量关系或流速面积原理计算流量。现有量测水措施主要包括流速仪量水、标准断面量水、建筑物量水、堰槽量水和仪表量水等五大类。其中:

①建筑物量水,主要包括涵闸量水、渡槽量水、跌水量水和倒虹吸量水等。

②堰槽量水,主要包括巴歇尔量水槽、无喉道量水槽、长喉道量水槽、直壁式量水槽、机翼型量水槽、量水槛、三角形薄壁堰、矩形薄壁堰、梯形

薄壁堰等。

③仪表量水,主要包括水位、流速和流量三大类;就水位而言,主要包括压力式水位计、浮子式水位计、超声波水位计、雷达水位计、磁致伸缩水位计、激光水位计、霍尔水位计、磁浮子水位计和电子水尺等;就流速而言,主要包括旋转式流速仪、雷达表面流速仪、超声波时差法流速仪和多普勒频差法流速仪等,随着自动控制技术的进步和设备造价的降低,对较大渠道断面基于传统缆道式测流方法,研制开发了轨道式测流车、桁架式测流车和缆道式测流车,可依靠设定的程序自动完成断面测流;就流量而言,主要包括机械式水表、阀控超声波式水表、电磁流量计和超声波流量计等。

这些仪表依据不同的原理完成相应的设备制造,配合特定的量水建筑物或量水堰槽共同完成水量的监测,适用于不同的测流环境和测流

要求。

### 3. 基于超声波特性的水量监测技术与设备创制

超声波测流具有较长的发展历史,目前主要依据时差法原理和频差法原理来实施(如图3)。

①时差法主要利用声波在流体中因流体流动方向不同而传播速度不同的特点,测量它的顺流传播时间和逆流传播时间的差值,从而计算流体的流速和流量,显然单声道测流系统只适应于水位和流速变化不大的小型渠道;而大型渠道,由于其水面宽、水流深,流速纵横剖面变化大,则需要采用多声道测流布局才能获得较为准确的流量值,而且为减少不稳定流态引起的不均匀流速影响,大多采用交叉传输的阵列式布局。

②频差法主要依据声波的多普勒效应,检测多普勒频率差。实践中,频差法监测设备往往集成水位传感器,同步完成流速和水位的监测,进而可以计算得到流量,根据现场环境,可以选择渠底安装或渠壁安装,但具体位置则应综合考虑断面的流速分布特征及泥沙杂草等环境影响,否则会严重影响测流效果。

近年,依据上述原理创制的箱涵式时差法超声波流量计、管涵式时差法超声波流量计和渠底式超声波频差法流量计(多普勒流量计)发展迅速,并在大中型灌区现代化改造工作中得到应用(如图4)。实践中,也有把箱涵直接用渠壁代替,成为明渠镶嵌式安装的流量监测设备。为快速监测小型渠道的过流能力,也有依据超声波原理开发完成的便携式超声波流速仪;为节省传感器设备投资和适应水位变化的影响,对较大的渠道,也可在渠道两侧安装移动式换能器实现不同水深断面的平均流速监测。

### 4. 基于堰流特性的堰高可调测控一体化技术与设备创制

传统上,堰顶溢流是作为防汛保安的水位高度限制器,其明显特征为

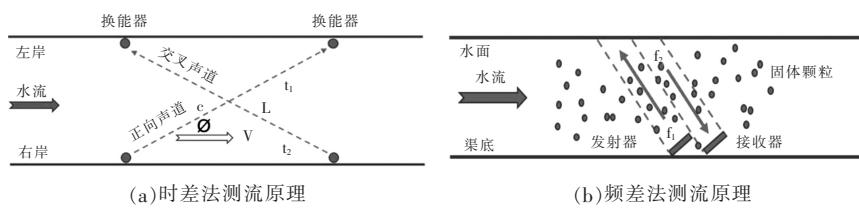


图3 超声波测流原理示意



图4 超声波流量监测设备

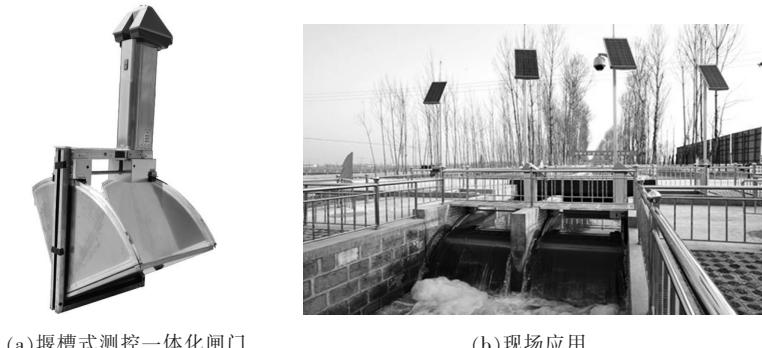


图5 堰槽式测控一体化闸门

堰顶高度固定不变。但若作为渠道输配水的节制闸,则难以保证当上游来水发生变化时及时发挥上下调节作用。鉴于堰流具有很好的水位稳定性,实践中亟须提供一种可调节堰顶高度的水流控制设备。近年,基于堰流特性而开发的测控一体化设备在大中型灌区现代化改造中得到初步应用。从结构形式来分,设备主要包括堰槽式、底升式、弧底式、活页式和卷帘式等五大类型测控一体化闸门。从水力学特性来看,这些闸门均为堰顶高度可以调节的薄壁堰,其过流能力的计算遵循一般的堰流规律,但目前只有堰槽式测控一体化闸门进入规模化应用阶段(如图5),其他四类仍在逐步完善或刚开始应用,具体特征和应用环境各有不同。

①底升式测控一体化闸门,为垂直上下运动的平面闸型堰,当闸板上升至最高点时,闸板底部与水渠渠底持平,

持平,闸板下降至最低点时,闸板顶部与水渠渠底持平。

②弧底式测控一体化闸门,为中轴支轴式的弧面闸型堰,当驱动机构带动弧底型闸板转动至竖直状态时,部分弧面形成挡水高度,当无须挡水时,弧形闸板可平铺于渠底的闸板箱内,闸板平面与渠底持平。

③活页式测控一体化闸门,为底轴旋转式的平面闸型堰,当闸板转动至竖直状态时,闸板与门型闸框的底部、左侧壁和右侧壁密封接触,当闸板转动至水平状态时,闸板平放于渠底。

④卷帘式测控一体化闸门,为滚轴式的单向柔性平面闸型堰,在无须挡水时可平铺于水渠渠底沿渠道水流方向放置的闸板箱内,无须深度开挖水渠,当需要挡水时,单向柔性闸板从水平放置的闸板箱内转置90°垂直升起,实现水流调节功能。

各类闸门结构示意见图6。

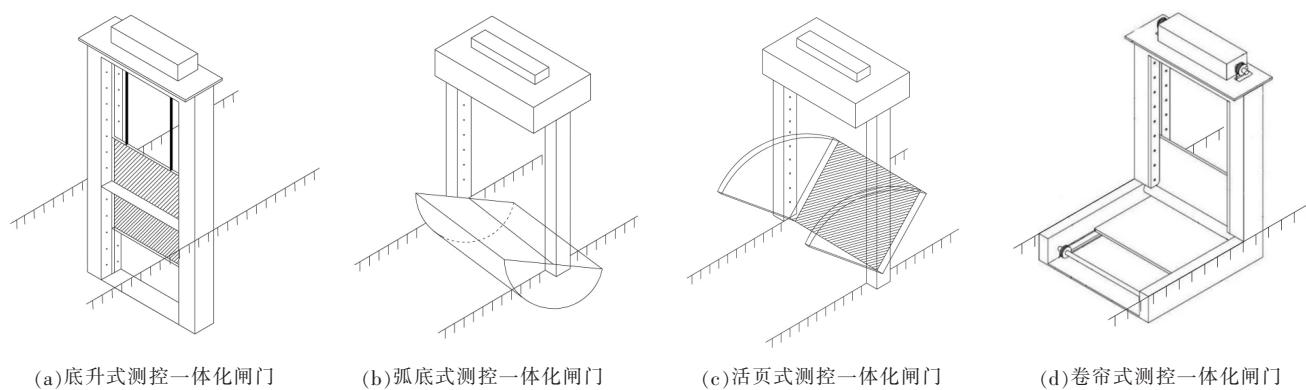


图 6 堤顶高度可调的测控一体化闸门结构示意

## 5. 基于孔流特性的测控一体化技术与设备创制

传统上,闸孔出流是大中型灌区节制水流和配置流量的重要措施。大中型灌区续建配套和现代化改造中涉及大量闸门的新建、改建或功能提升。由于闸门的频繁启闭会造成水流不稳,在特定环境或条件下有时仅仅依靠上下游水位监测和开度监测计算流量往往无法达到满意效果。究其原因可能由于无法满足必要的水力学条件,导致这种单纯依靠水位流量关系改造方式实现计量实际并不可行,但采用流速面积法的测控一体化闸门有可能成功解决这些矛盾。

近年,在大中型灌区续建配套和节水改造中,广泛采用了箱涵式测控一体化闸门和管涵式测控一体化闸门(如图 7 所示)。所谓测控一体化闸门是集流量计量、闸门控制、能源供给和无线通信等功能于一体的高度集成式轻型闸门,其中箱涵式为前后贯通的长方体测流设备与孔口式闸板高度融合而成的测控一体化闸门,管涵式为前后贯通的圆柱体测流设备与孔口式闸板高度融合而成的测控一体化闸门。这两种测控一体化闸门实质上为超声波时差法测量设备和平面闸门的组合体,测量箱完成计量功能,平面闸门完成控制功能,测控信息在控制器中实现融合。很显然,这种模式即可分拆也可融合,分拆时测控分置,合体时测控一体。

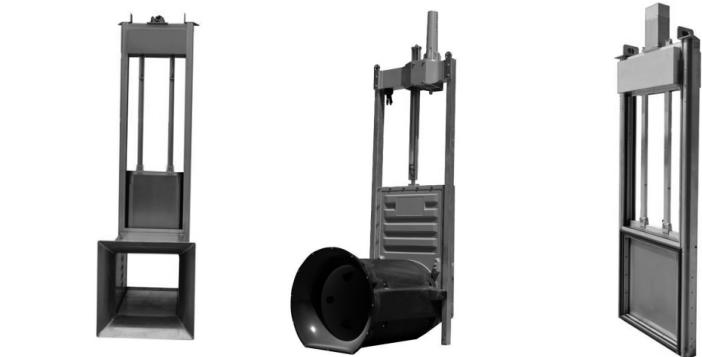


图 7 孔口出流的测控一体化闸门

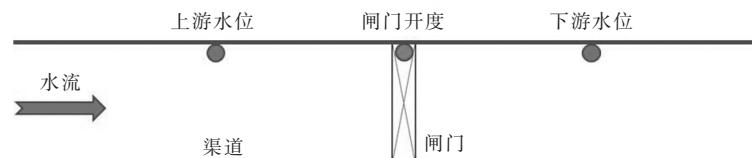


图 8 闸门新增流量监测功能模式示意

## 三、灌区输配水关键节点量测控技术模式构建

堰流和孔流具有不同的流量特征,堰流具有很好的水位稳定性,孔流具有很好的流量稳定性,为高效完成渠系输配水,应因地制宜选择构建不同的量测控技术模式。

### 1. 闸门新增流量监测功能模式

本模式中,闸门及相关基础设施已完成更新改造,现有结构功能完善,进出水流条件满足测流水力学要求。在此环境下,只需在闸门前后的适当位置加装上下游水位传感器和

开度传感器,并根据具体的水工建筑物结构形式,选择相应的闸门流量计算公式,即可计算通过闸门的流量。当需要对通过闸门流量进行控制时,可以通过调节闸门开度来实现过闸流量的测控(如图 8)。

### 2. 前闸后槽集中改造模式

本模式中,无论闸门更新与否,闸门事实上不能满足流量计算水力学条件,可考虑就近在闸门下游水流平稳处增设或改建量水槽并配置水量自动监测设备,与上游闸门通过有线或无线方式组建成地水量测控系统。具体操作程序为通过下游水量监

测结果调整上游闸门开度,完成过闸流量的测控。根据下游水量监测方式的不同,可进一步细分为前闸后槽、前闸后堰、前闸后箱或前闸后管等多种模式。与此同时,也可根据需要对原有闸门进行不同程度的改造,既可更新闸门控制结构,也可更新闸门体及控制系统,实现测控功能的整体提升(如图9)。

### 3.后置测控一体化闸门模式

本模式中,当上游闸门具有一定历史文化价值或者其他原因不宜拆除或更新时,可就地保护原有闸门,并在下游渠道适当位置安装测控一体化闸门。对配水闸门下游,可安装底孔出流测控一体化设备;在节制闸门下游可安装堰高可调测控一体化设备(如图10)。测控一体化闸门的选择需进行技术经济比较并结合现场的安装条件和水质条件等综合考虑确定。现场改造完成后,原有闸门可提至最大开度处就地保护,依靠新安装的闸门完成水量的测控与调度。

### 4.原位拆除重建测控一体化闸门模式

本模式中,当现有闸门位置具有较好的水力学条件也即闸门前后的水力条件能够满足渠道水流顺直的要求,但闸门本身破烂不堪,则可选择原位整体拆除重建控制设施,在现有闸门附近适当位置安装测控一体化闸门。但设计中应充分考虑新型闸门的安装是否会造成原有水力条件的重大改变,进而导致泥沙淤积情况的发生或其他不利的情况出现。选择何种测控一体化闸门应综合比选,一般而言,当更新位置的闸门为配水闸时,可选择底孔出流测控一体化设备,当更新位置的闸门为节制闸时,可选择堰顶高度可调测控一体化设备(如图11)。

### 5.测控一体化闸门优化组合模式

本模式中,在大中型灌区进行续建配套和现代化改造的过程中,可选择适当位置安装测控一体化闸门优化组合模式,该模式中节制闸选择堰



图9 前闸后槽集成改造模式示意

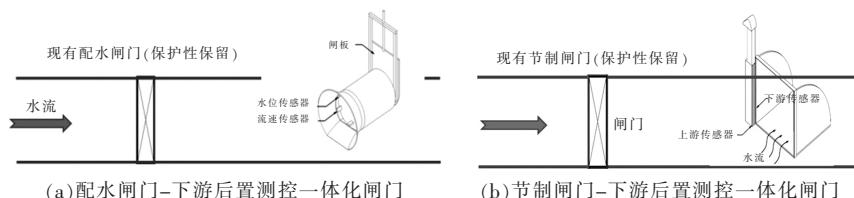


图10 后置测控一体化闸门模式示意

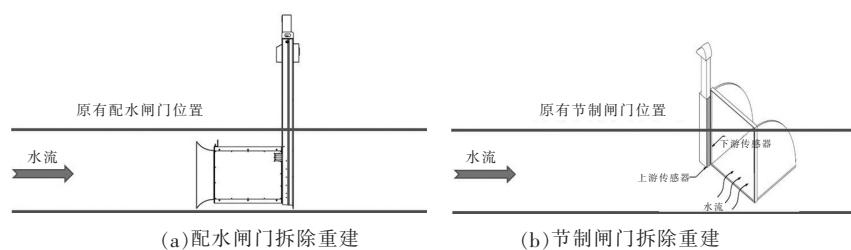


图11 原位拆除重建测控一体化闸门模式示意

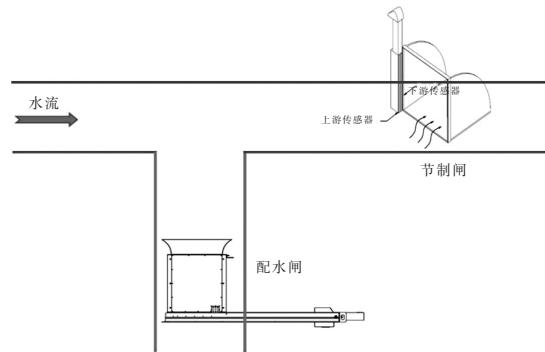


图12 测控一体化闸门优化组合模式示意

顶高度可调的测控一体化闸门,其上游的配水闸可选择底孔出流的测控一体化闸门,依靠堰闸的空间合理布局,共同完成水量的高效调节与控制。但设计中应充分考虑闸门前后的过闸水力条件,避免泥沙淤积和可能的不利影响发生,必要时应考虑冲砂设施,以保证测流精度和闸门正常启闭及长久稳定运行(如图12)。

## 四、意见与建议

### 1.合理确定水量计量误差与不确定度

测量误差与测量不确定度是两

个不同的概念。对于测量而言,只有当某量被完善地确定并能排除所有测量上的缺陷时,通过测量所得到的量值才是量的真值,一般而言,真值不可能确切获知。而不确定度是由于测量误差的存在,对被测量值的不能肯定的程度,它是测量结果质量的指标,它表征合理地赋予被测量之值的分散性。国家标准《灌溉渠道系统量水规范》提出了不确定为5%的要求,《取水计量技术导则》根据不同引水情况提出了3%~10%不同的误差控制要求。2020年发布的团体标准《提水灌区用水全程量测控技术指南》同时

提出了测量误差和测量不确定度要求，并明确提出干渠、支渠、斗渠测流，可根据实际需求和应用环境等采用不同的误差要求；新建或改建测流设施应进行必要的水力学复核，避免严重改变原有流态导致测量误差增大或者其他负面影响的发生。

## 2.准确把握渠系建筑物量水的适宜性

渠系建筑物发展趋向定型化、装配化、轻型化及施工机械化，利用已经存在的渠系建筑物量水是相关标准推荐优先采用的方法。用于量水的渠系建筑物主要包括闸门、渡槽、倒虹吸、跌水、涵洞、标准化渠道等，但这些建筑物设计之初主要功能是为完成相应的流量输送，特别是闸门，其主要功能为节制和调节水量。为不增加新的水头损失和建设投资，利用建筑物量水是经济实用的办法，但这些建筑物除本身需要完整无损外，还必须满足相应的测流边界条件和水力条件，即水工建筑物应对水流产生平面或垂直的约束控制作用，形成明显的局部降落，产生必要的水头差，上下游进出口和底部均不应有明显的冲淤变化，进出水段均应保持必要的顺直稳定渠段长度。但由于建筑物实际工程条件和水力条件与理论公式要求的使用条件不尽相同，因此应用理论公式计算流量由于条件的差异往往造成流量严重偏差。实际测流中应多方比较选择相应的测流方法，建筑物可以用来测流但并不意味着所有建筑物都适宜用来测流。

## 3.有序制定灌区测流设施检定与校准规范

计量检定的对象是计量法明确规定强制检定的测量装置，而仪器校准的对象是属于强制性检定之外的测量装置，检定和校准都是量值溯源的有效合理方法和手段。随着农业水价综合改革的推进，灌区水量监测不仅是水资源管理的需要，也是水费

计收的依据。在实验室环境下，对计量设备的检定或校准是创造设备安装调试的合格条件，通过标准化计量设施对待检定设备进行测试，并对出厂设备计量性能进行评价。计量法规定，制造计量器具的单位生产计量器具新产品，必须经省级以上人民政府计量行政部门对其样品的计量性能考核合格，方可投入生产。根据计量法及其实施细则要求，用于贸易结算等方面列入强制检定目录的工作计量器具，实行强制检定，目前纳入《实施强制检定的工作计量器具目录》中的涉水计量设施仅有水表(DN15~DN50)和流量计(口径范围DN300及以下)，大量的其他量测控设施并未纳入该目录中。实践中急需有序制定灌区流量设施检定与校准规范，科学布局检测场站设施，并获得计量检定或校准授权，以期积极促进灌区水量计量设施制造和应用的标准化和规范化。

## 4.积极探索灌区计量设施现场比测有效途径与方法

大中型灌区中存在着大量的量测控设施，这些水工建筑物、测流堰槽或测控一体化闸门等测流的结果是评价灌区用水管理水平和用水效率高低的重要依据。根据相关量水规范，流速仪测流结果可用于分析水工建筑物流量系数、确定断面水位流量关系曲线和评价渠道水利用系数等，因此现场环境下可采用流速面积法或移动堰槽法式结构参数误差等方法进行量值溯源。为有效使用量测水设施，堰槽闸等建筑物施工时应严格按照图纸进行并定期进行维修和养护，现场设施的安装环境应尽可能满足设备的额定条件，以免差异造成计量精度的衰减。同时，现场测试技术人员的操作规范性也会对测流精度有重大影响。因此，应积极探索制定灌区计量设施现场测试规范。对较大断面可采用流速面积法进行比测，对较小断面可采用堰槽设施进行比测。

为减少测量误差，测量段应避免淤积，用于现场测试的主要仪器等测具或设备应进行定期检定和校准，加强维修与养护，选择有相关资质的单位开展流量现场测定以满足量值溯源要求。

## 5.创新构建智慧灌区高效用水管理系统

基于北斗系统实现灌区计算机识别，基于物联网技术实现量测控设施数字赋能，基于水利专业模型实现灌区水资源优化配置，基于自主创新实现灌区设施提档升级，坚持科技引领，完成灌区数字孪生，通过新原理、新材料、新结构、新设计、新功能的研发和融合，突破核心技术，实现设备创制，确保数据安全，强化精准预报和科学预警并形成预案。充分认识测控一体化设备减少基建投资、降低水头损失和减轻水损风险等特点，着力研发缓坡渠道与多泥沙水流多种工况渠道水量监测技术与设备，不断充实完善灌区量测控设施，快速提升灌区水情信息捕捉和感知能力，动态掌握灌区全域水量需求、水量供给和用水过程等信息，通过智慧化模拟进行灌区全域的水资源调度与管理，以灌区用水全程量测控为推进灌区水资源安全集约利用提供智慧化的决策支持，有效促进灌区续建配套和现代化改造，实现灌区输配水服务的安全性、公平性、可靠性和灵活性，全面提升灌区高质量发展的新动能，提升灌区水旱灾害防御及现代化调度指挥能力，确保供水安全和粮食安全。 ■

### 参考文献：

- [1] 谢崇宝,等.堰顶高度可调的控水设备研发[J].中国农村水利水电,2017(6).
- [2] 谢崇宝,等.灌溉现代化水管理关键技术及设备研发[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
- [3] 谢崇宝,等.灌区用水管理信息化结构体系[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

责任编辑 韦凤年