

取水输水建筑物丛书

主编 陈德亮

Water Measurement
Technique and Measure

量水技术 与设施

王长德 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

取水输水建筑物丛书

主编 陈德亮

Water Measurement Technique
and Measure

量水技术 与设施

王长德 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共分 11 章,全面系统地介绍了国内外在渠系量水方面比较成功的有应用推广价值的量水技术和设备。第 1~3 章为基本理论 and 应用要求;第 4 章是本书介绍的重点,介绍了目前国外正在大力推广的长喉槽的设计理论及应用技术资料,希望能对其在国内的推广起推动作用;第 5~9 章是国内目前常用的技术方法,除对其作一般介绍外,重点介绍了它们的应用条件和应用问题,希望能引起读者在应用时予以注意;第 10 章介绍了压力管道测流的方法和设备;第 11 章介绍了误差估计理论、方法及资料整编的要求。

本书可供水利工程技术人员在设计和管理工作中参考,也可用作水利院校师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

量水技术与设施/王长德主编. —北京:中国水利水电出版社, 2005

(取水输水建筑物丛书/陈德亮主编)

ISBN 7-5084-3365-3

I. 量... II. 王... III. ①渠道流动—水流量—测量
②渠道流动—水流量—测量仪器 IV. TV133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 126059 号

书 作 者	取水输水建筑物丛书 量水技术与设施 王长德 主编
出版 发 行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 10 印张 269 千字
版 次	2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—4100 册
定 价	30.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

我国是一个人均水资源紧缺的国家，加之水资源在时间和空间上分布不均，导致水资源供需矛盾更加尖锐。缺水已成为我国经济和社会进步的重要制约因素。努力实现水资源的优化配置，满足经济社会对水资源的需求，以水资源的可持续利用来支撑经济社会的可持续发展，这是建设水利事业的根本目标和基本任务。

1949年新中国成立以来，我国的用水状况发生了很大变化。新中国成立初期，当时水利建设的主要任务是发展农业，解决粮食问题。1949年全国总供用水量仅1000余亿立方米，而当时农业用水就占全部用水量的90%以上，城镇工业用水比重很低。随着经济及社会的发展，特别是改革开放20年来，由于城市化进程的加快，这种用水状况有了很大变化。到1997年，全国总用水量已达5566亿 m^3 ，其中农业用水占70.4%，而城市生活和工业用水已占到总用水量的30%。这一趋势是改革开放以来经济社会发展的必然结果。从今后的发展看，农业虽是用水大户，但农业用水的重点是解决节水灌溉，提高用水效率的问题。据专家分析，如果将农业用水的平均有效利用系数从目前的0.43提高到0.55~0.60，则在不增加农业用水的情况下，完全能保证2030年人口达16亿时的粮食安全。如果再加上农业结构的调整等其他因素，农业用水总量将基本不会有大的改变。中国未来的供水矛盾将集中在城市，供水将主要用于发展城市、发展工业及保护生态与环境。例如，南水北调工程的供水原则就是以城市供水为主，兼顾生态及农业。

实现水资源的优化配置有各种手段，而工程手段就是其中之一。无论是资源性缺水还是工程性（经济性）缺水，其最主要的工程手段都是在水源处修建取水工程，然后通过输水工程送到用水处。有时，为了把丰水地区的水资源调到缺水地区，还需要实施跨流域的远距离调水，对水资源进行地域上的再配置。在 21 世纪，跨流域调水将是中国水利建设的一大特点。国内外实践经验表明，采用调水工程这一工程手段来改善水资源的不利状况，是促进缺水地区经济发展的重要举措。大的调水工程往往还成为国家发展战略的重要组成部分。我国南水北调工程就是改善国家资源配置、支持经济社会发展的基础性战略工程。此外，为了提高用水效率，实施节约用水，合理计价收费，还需采取量水技术设施这一工程手段。针对上述形势发展的需要，我们特组织有关专家编写了这套《取水输水建筑物丛书》，以更好地为水资源的优化配置服务。

《取水输水建筑物丛书》（以下简称《丛书》）共十一个分册，分别为：介绍从天然水源或人工水源取水的《取水工程》、《泵站》（含输水渠道上的多级提水泵站）、《水闸》（含输水渠道上的节制闸、分水闸、退水闸等）及与之配套的《闸门与启闭设备》；为节约用水、科学用水、计价收费而设置的《量水技术与设施》；以及在输水渠道跨越天然或人工障碍时，在渠道上修建的一系列建筑物《渡槽》、《倒虹吸管》、《隧洞》、《涵洞》、《桥梁与基础》及《跌水与陡坡》等。以南水北调中线工程为例，该工程总干渠全长 1200 多公里，途经三省两市，横跨长江、黄河、淮河、海河四大流域，穿越大小河流 219 条，需修建各类取水及输水建筑物 960 多座，仅大型倒虹吸管就有 95 座，渡槽有 49 座；还有大量的涵洞、节制闸、分水闸、退水闸及与之配套的闸门和启闭设备；还有大批桥梁工程；总干渠上的排水建筑物即达 400 多座。如果加上输水分干渠、支渠上的建筑物，其数量十分可观。此外，在各级输水渠道上还有大量的量水技术设施。以上这些，均是我们这套《丛书》的服务范围。

本《丛书》的服务宗旨是：为水资源优化配置，为提高用水效率，为实现水资源的可持续利用服务。

本《丛书》的编写遵循以下基本原则：

1. 《丛书》的服务对象以大学本科毕业的水利工程技术人员为主；讨论的工程规模以中型为主，兼顾大型（个别分册例外，如《跌水与陡坡》主要以中小型为主）；写法以“实用”为主。在扼要阐明基本原理的基础上，着重介绍工程的布置、结构形式、构造、计算公式的应用，并介绍一些工程实例，便于广大读者在设计中应用和参考。

2. 《丛书》在重点介绍目前常用的理论方法的同时，注意反映国内外的先进技术，用前瞻眼光预计未来经济社会可持续发展的重大决策走向；注意总结经过实践证明，技术上先进、经济上合理、运用安全可靠的先进经验。使《丛书》既具有现实指导性，又有前瞻性。

3. 为了反映计算机应用技术的发展，《丛书》在有关部分介绍计算机辅助设计或计算的有关内容，但不附源程序。

4. 《丛书》不介绍一般性的施工技术内容，但某些与设计关系密切的施工问题，有特色的施工内容或特殊的施工问题，对读者确有参考价值的，要适当编入。

5. 《丛书》面向全国，尽可能注意照顾地区特点。特别是寒冷地区的冻害及多沙地区的泥沙问题，在建筑物的布置、形式、构造及计算方面加以兼顾。

这套《丛书》在编写过程中得到了各方面的大力支持和真诚帮助，在此一并表示衷心感谢。对书中的缺点、疏漏和不妥，恳请读者批评指正。

陈德亮

2002年8月

前 言

一、我国灌排渠系量水技术的应用问题

我国地域辽阔，灌溉面积居世界之首，但灌区量水工作却很落后。如果在量水设备的选型上，不注意我国灌区的特点，不作比较，随意选用量水设备，甚至盲目推广一些国外已淘汰或不适用的设备，势必带来很大的浪费。因此，对量水设备的性能加以研究比较，优选出一些经济适用的技术和设备加以推广，是当前灌区量水工作应注意的问题。

一般来说，在满足量水精度、灵敏度、测流幅度、抗泥沙沉积、漂浮物堵塞、水头损失小等要求的前提下，要尽可能选用那些造价低、易施工、管理运行简单的结构。

量水精度高，水头损失小（即淹没度高），是衡量明渠量水建筑物优劣的主要技术指标。目前所常用的明渠量水建筑物很难达到既量水精度高又水头损失小的要求。

1. 巴歇尔量水槽的技术问题

巴歇尔槽由于喉道较短，节省了工程量，在自由流条件下，量水精度较高，测流比率大，尤其适宜在流量变幅大的渠道上使用。水中夹有杂物、泥沙时也能正常量水。

巴歇尔槽的缺点比较突出。它结构复杂、造价高、施工困难。过去选择具有95%淹没度的巴歇尔槽槽前壅水 $0.1\sim 0.16\text{m}$ 是很普遍的做法。虽然有校正淹没流的方法，但它作为淹没流量测设施却不实用，因为它牺牲了精度。如水头量测不精确，可增加4%~20%流量误差，比自由流多3%~5%。此外，Peck

(1988) 最近的研究表明,淹没出流校正方程依水面上升或下降而有12%的不连续性。因此,它不宜在经常发生严重壅水的渠道上使用,仅适宜在可提供足够水头的干支渠上使用。

巴歇尔槽近年来在欧美不再被大力推荐,除了其本身的缺陷,更多是因为更先进的长喉槽的推广使用。美国近来也在研究如何把已建的巴歇尔槽改建成长喉槽的技术措施。

2. 无喉道量水槽的应用问题

无喉道量水槽是将巴歇尔槽喉段切去而得的改进槽,在我国引沁、引渭等灌区中应用较广。

它的结构简单、经济、便于修建,抗杂物、泥沙能力强,自由出流时量水精度较好。但淹没度过大时,精度同样会降低。宜在大中渠道、壅水不严重的条件下使用。但有必要对各种型号进行测试,确定精确的参数,以便推广使用。

无喉槽由于它的上、下游水位测点均位于流线可能与边界脱离区域,水力特性复杂,故目前国外资料大多不推荐使用此类结构,国内在应用时也应重视这一问题,慎重对待。

3. 应用和研究中存在的其他问题

(1) 利用明渠标准断面测流有两种方法:

1) 在渠道上平直段兴建一标准断面渠段,量测水位利用谢才公式计算流量。

2) 该标准断面采用流速仪等测流仪表率定水位流量关系测流。

前一种方法不宜用于灌区量水,这是由于谢才公式计算的是均匀流条件下的渠道流量,而一般河渠中大量的是渐变流,很难判断何处为均匀流。另外渠道的糙率很难率定,且在使用过程中随渠床表面情况变化而变化,对混凝土衬砌渠床而言,糙率由0.014变为0.015,流量计算误差可达7%,精度难以保证。后一种方法在应用时应保证下游回水不会影响到测流断面。

(2) 新研制的量水堰槽。20世纪70年代以来,国内研制了一些新的量水堰槽,成果较多,但应用较少。目前应用比较多的

有用于 U 形渠槽的量水堰槽，主要又分为无喉和长喉两种形式。

据资料称，国内某单位研究的无喉 U 形量水槽淹没度可达 0.9，这同国外介绍的无喉槽淹没度为 0.7 左右相差甚大。在理论上也难以解释为何可达如此高的淹没度，值得存疑。

对于 U 形长喉道槽，国外在 20 世纪 70 年代即已作为长喉槽的一种形式有了成熟的研究成果，国内的研究者不了解国外的研究情况，他们的研究成果不如国外的严密完备，在应用上难以计算得出在各种工况的水力参数，使应用受到限制。

(3) 量水堰槽前的泥沙淤积问题。我国北方有很多多沙河流，从此类河流取水，渠道淤积是运行中的难题。从表面看，一般量水堰槽前水流由缓流变为临界流，呈加速状，似乎此处淤积应比上游渠段小一些。实际上，由于巴歇尔槽或无喉槽的淹没度低，水头损失大，虽然在通过渠道设计流量时抗泥沙干扰能力比较强，但在中小流量时，由于槽前壅水、泥沙淤积可能比原来渠道还要严重。经过一段时间，由于泥沙淤积，导致量水精度降低或无法运行。因此，真正能抗泥沙干扰的量水堰槽不仅在大流量时上游水位壅高不大，而且在中小流量时槽前水位亦应和原渠道运行水位相差不大。一般的量水堰槽由于几何形状标准化，难以随不同的渠道断面及水力条件变化而变化，并不能很好解决泥沙淤积问题。长喉道槽，由于其断面形状可以随渠道断面及水力条件不同灵活变化，可以做到在高水和中水流量下上游水位变动不大，加之水流流动的加速，抗泥沙干扰能力优于其他形式的量水堰槽。

(4) 关于长喉道量水槽。长喉量水槽实际上是一种改进型的宽顶堰。目前在结构和设计理论、计算方法上都已完整成熟。它结构简单，施工容易，造价低廉（为其他类型量水槽的 10%~20%），水头损失小，淹没出流的临界点高（临界淹没界限可达 0.95，从而可以按自由出流的水力条件来量测和计算过堰流量），量测精度高。

长喉道槽有各种各样的断面形状，可以做到和现行渠道采用

同样的横断面尺寸和形状，仅只需要底部做一升高的底坎，因而造价很低（为巴歇尔槽和无喉槽的10%~20%）。它不但形式简单，对施工工艺要求也不高，仅要求堰面保持较好的水平，而对其他尺寸引起的误差不太敏感，从而施工也很方便。

1984年 M. G. BOS, J. A. Replogle 和 A. J. Clemmens 根据自己多年研究成果出版了《渠系测流槽》一书，该书中应用边界层理论，不但能计算流量系数 C_d ，而且能比较精确计算长喉槽的水头损失和淹没界限等，首次实现了测流堰槽各项设施参数的理论计算，完善了长喉槽的设计计算方法，在该书中推荐的结构型淹没度可达0.90。上述成果，无疑使长喉槽的研究和应用进入了一个新的阶段，被称为20世纪70年代灌溉排水领域的技术进步之一，近年来，在美国得到了大力的推广应用。美国垦务局编写的最新版的《量水手册》已根据上述成果在量水槽中以介绍长喉槽为主。对巴歇尔槽也指出了它的缺点和不足，不主张大量应用。对无喉槽则限制应用，不予以具体介绍。但在国内，目前对量水堰槽，仍以介绍巴歇尔槽为主，对长喉槽则仍停留在20世纪70年代以前的技术水平，对其新的发展和优点无所了解，一些文章，将其简单地称为“量水槛”，管窥不及全豹，极大地影响了它在我国的应用和推广。国内制定的SL24-91《堰槽测流规范》对长喉槽的介绍内容也已陈旧，亟待订正。

二、关于本书的编写

自20世纪80年代以来，本书编者长期从事灌排工程量水技术的研究工作，90年代后期，又承担了国家“九五”攻关课题中“灌区量水新技术研究”项目，多年的研究，深感我国虽然介绍量水技术的书籍较多，但能够明确说清上述存在问题，介绍有关最新技术进展，在技术上分清先进与落后，指导发展方向的则不多见，甚至一些已编或在编的规范也存在一些介绍内容过时陈旧的问题。故想针对上述问题编写一本理论上有一定深度、选材和编写上针对上述问题予以取舍，具体介绍时，根据应用前景，详略有所不同，明确指出优点、缺点、应用限制与推广前景，内

容比较新颖的新书，希冀能对我国灌排工程量水工作的发展有所贡献。由于量水技术内容广泛，有待进一步研究的内容很多，新技术和设备研究发展迅速，尽管作者有良好的愿望，但限于水平，疏漏和错误在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

本书共分11章：第1、2、3章由王长德、管光华编写；第4、5、6章由王长德、崔巍编写；第7、8、9章由王长德、范杰编写；第10章由童刚编写；第11章由田兴参编写；王长德制定本书的编写大纲并对全书进行统编。

本书编写中，陈德亮教授对全书进行了细致审阅，提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

王长德

2005年12月

目 录

序

前言

第一章 概述	1
第一节 灌区量水的任务与要求	1
第二节 灌区量水设施的应用条件	5
第三节 灌区量水设备的类型与分类	7
第四节 量水设备的选型	9
第二章 与渠道量水有关的水力学理论及概念	24
第一节 简介	24
第二节 水流的分类	24
第三节 量水的基本原理	25
第四节 流量—面积—流速关系	26
第五节 流量归总	27
第六节 其他类型的测速型量水设备	27
第七节 水头的概念	28
第八节 孔口出流关系	28
第九节 薄壁堰水头流量关系	29
第十节 水流中的能量平衡	29
第十一节 平均水深及水力半径	32
第十二节 佛汝德数以及临界流关系	33
第十三节 矩形宽顶堰的出流公式	35
第十四节 管流型流量计的能量方程	36
第十五节 方程中的参数	39
第十六节 行近流条件	40

第三章 量水堰的设计和安装	41
第一节 量水堰(槽)的设计	41
第二节 量水设备的安装和维护	43
第三节 灌区量水站网的设置	46
第四章 长喉道量水槽	48
第一节 量水堰(槽)的发展历史	48
第二节 宽顶堰与长喉槽的优点	54
第三节 长喉槽的基本结构	56
第四节 量水原理	58
第五节 长喉道槽的水头损失计算	76
第六节 长喉道槽的优化与自动设计	96
第七节 土渠上的长喉槽的设计	101
第八节 简易量水槛	106
第五章 短喉道量水槽	129
第一节 巴歇尔槽	129
第二节 无喉道量水槽	135
第六章 量水堰	139
第一节 薄壁堰	139
第二节 宽顶堰	152
第三节 平坦 V 形堰	159
第七章 其他量水设备	171
第一节 量水喷嘴	171
第二节 量水套管	176
第三节 分流计	181
第四节 配水器	188
第八章 断面流速法测流	192
第一节 断面流速分布	192

第二节	流速仪·····	194
第三节	测量方法·····	198
第四节	流量的计算·····	200
第五节	流速仪测流的误差分析·····	204
第九章	水工建筑物量水·····	208
第一节	量水的要求与步骤·····	208
第二节	启闭式闸、涵量水·····	212
第三节	跌水量水·····	217
第四节	渡槽量水·····	220
第五节	倒虹吸管量水·····	221
第六节	水工建筑物自动量水·····	222
第十章	有压管道流量测量及流量计·····	225
第一节	流量计·····	225
第二节	旋桨式流速仪测流·····	229
第三节	超声波流量计·····	244
第四节	差压测流装置·····	252
第五节	食盐浓度法测流·····	266
第六节	电磁流量计·····	272
第十一章	量水误差分析及资料整理·····	278
第一节	量水误差基本概念·····	278
第二节	量水误差的不确定度·····	284
第三节	误差因素分析及处理措施·····	287
第四节	资料整理的内容和方法·····	294
	参考文献及参考资料·····	303

第一章 概 述

第一节 灌区量水的任务与要求

一、灌区量水的发展过程

在中国，灌溉伴随着农业历史早已出现。然而对灌溉用水的量度，则始于 20 世纪 50 年代。促使灌溉量水技术发展的首先是水利工程的水费征收问题。我国的水资源分布不均，且总量不足，农业节水是促进水资源合理使用的关键环节，只有简单易行并且能够满足精度要求的量水，才能保证水资源的合理利用。

1985 年 7 月，国务院发布了《水利工程水费核订、计收和管理办法》后，发展灌区量水技术的工作日益得到重视。不久，水利电力部农水司委托江苏省水利厅筹备和举办了全国灌区量水技术交流会。会上对 1949 年建国以来的灌区量水工作做了总结，并且对当时国内外比较先进的 33 件量水设备进行了讨论，提出了今后一段时期的工作重点及在我国当前条件下，应该如何发展量水技术的方针。

“九五”期间，国家将“灌区量水新技术研究”作为一项重要的攻关课题。这促进了量水技术的进展，涌现了不少的新型技术及设备。与此同时，我们不断地向国外学习，也引进了一批先进的设备、技术。近几年来，随着计算机技术的发展，形成了计算机辅助的自动化量水技术。GIS（地理信息系统）在工程中的深入、广泛的应用，将会导致灌溉用水遥测、遥控及其进一步自动化、智能化的发展。

到目前为止，国内投入使用的灌区量水设备已超过 100 种，其中最为常用的就是各种量水槽及量水堰。同时，对江、河及大型渠道，流速仪量水仍得到广泛的使用。从量水方法上分，有水

工建筑物量水、特设量水设备量水；从设备原理上分，有力学、电学、声学、热学、光学等；从设备结构上分，有容积式、叶轮式、压差式、变面积式、动量式、冲量式、电磁式及超声波式。

二、灌区量水新形势

灌区量水作为节水灌溉和灌区科学管理的基本手段正日益受到人们的重视。随着工业的发展，对有限水资源的要求与日俱增，而水的开发成本又日渐加大。在此情况下，对用水进行有效的控制与量测的要求已越来越迫切，精度要求也越来越高。我国人均水资源量为 2220m^3 ，预测到 2030 年我国人口增至 16 亿时，人均水资源量将降到 1760m^3 。按国际上一般承认的标准，人均水资源量少于 1700m^3 为用水紧张的国家，因此我国未来水资源形势是严峻的。与此同时，用水效率不高、用水严重浪费的现象普遍存在。全国农业灌溉用水的利用系数平均为 0.45，而先进国家为 0.7，甚至 0.8。我国每千克粮食的耗水率为发达国家的 2~3 倍。

1977 年 5 月，国际灌排组织在德黑兰举行的关于灌溉效率的会议指出，要确定任何一项用水的效率，其根本在于精确的掌握在用水系统内流动的水量，而流量的量测与调节是有效用水管理的最重要基础。

伴随着现代水利科学技术的发展，量水技术和设备也在不断的发展，形形色色的技术设施及设备，正在国民经济的各个领域发挥着作用。就灌溉系统而言，目前世界上使用和研制出的取水口上的量测和控制建筑物的种类和形式非常多，但其中还很少能满足结构简单、坚固耐用、精度合理、水头损失小、基建和维护费用低、操作简单等要求。特别在田间进水口小型建筑物方面，由于小支渠和田间进水口数量很大，不能采用昂贵复杂的量水设备，必须使用简单、经济、具有合理精度，既能量水又能调节的建筑物，这就给我们提出了两方面的任务：一是发展新型量水结构去满足以上要求；二是在使用时进行优化选型，尽可能地做到经济合理。

我国地域辽阔，灌溉面积居世界之首，但灌区量水工作却很落后。随着节水灌溉和灌区科学管理工作的深入，兴建各类量水设施的任务非常巨大，如果在量水设备的选型上，不注意我国灌区的特点，不作比较，随意选用量水设备，甚至盲目推广一些国外业已淘汰或不适用的设备，势必带来很大的浪费。因此，对量水设备的性能加以研究比较，优选出一些适用的技术和设备加以推广，是当前灌区量水工作迫切需要注意的问题。

三、灌区量水的任务

灌区量水作为用水控制的主要手段，不仅为水量控制、水费征收提供了主要依据，而且对促进节约用水，改进灌水方案等也很重要。因此，量水工作尤为重要。灌区量水的主要任务可以归纳为以下几点：

(1) 按照水资源调配的综合方案以及各地的需水量，准确地从水源引水，将水在各级渠道合理分配以保证按照计划定额向田间供水。

(2) 根据量水的记录计算出输送水量，并且根据水的成本计算出相应的水费，促进其合理使用。

(3) 根据量水的结构分析、计算以检验配水方案的合理性，检查灌水质量及灌溉效率，对不合理处进行修正，完善用水工作。

(4) 提供实时测量结果，并以一定的形式转化成信息传输出去，由此构成渠道系统的自动控制。精确的量度结果将成为控制闸门等过水构件开度变化的主要依据。

(5) 由测量结果验证渠道和建筑物的输水能力，并且可以计算出渠道上的量水损失，以此作为灌区改建、扩建及新建的基本资料。主要资料项目包括：

1) 每一年度，灌溉季节和每次灌溉引水的总水量，田间用水量，排泄和退废水量。

2) 渠道及建筑物的输水能力，渠道、田间水和灌溉水有效利用系数。