

灌区量水实用技术指南

蔡 勇 周明耀 主编

中国水利水电出版社

第一章 绪 论

第一节 灌区量水的发展历程

我国自 20 世纪 50 年代就开始了灌区量水技术的研究和应用,其间走过了曲折的道路。1985 年 7 月国务院发布《水利工程水费核订、计收和管理办法》后,灌区量水引起了广泛重视。同年 9 月水利电力部农田水利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,总结了 1949 年以来灌区量水工作的经验教训,对当时国内外比较先进的 33 件量水设备进行考察和评议,提出了今后研制、推广灌区量水设备和技术的指导思想、原则要求,推动了灌区量水工作的深入发展。

全国灌区量水技术交流会后,江苏连续 6 年进行了量水试验推广,首先在 8 个大中型灌区开展量水试点,选择既有自流又有提水,既有大型又有中型,既有工程基础好又有工程基础差的不同类型灌区,采取不同的量水方法,进行了系统探索,取得了显著效果,6 年累计推广 1248 万亩,布设量水网点 1558 处,节水 18.3 亿 m^3 。但由于当时上上下下对节水的意识不强,对量水的认识不足,成功的试点经验在全省没有得到更进一步推广。

“九五”期间,国家将“灌区量水新技术研究”作为攻关内容之一。经过几年的研究,在灌区量水技术方面已取得了一些新进展,研制了一批实用的仪器设备。特别是随着计算机技术的迅速发展,自动化计量成为灌区量水新的发展趋势。

到目前为止,国内已投入使用的灌区量水设备达 100 多种,如各种量水堰、量水槽、量水槛、量水计、流量计以及喷嘴、套管、配水器等。从量水方法上分,有土工建筑物量水、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、原子能等;从设备结构上分,有容积式、叶轮式、差压式、变面积

式、动量式、冲量式、电磁式、超声波式。

第二节 灌区量水的新形势

1. 水资源紧缺成为严峻的形势,水是关系到我国经济安全和长远发展的三大战略资源之一

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的形势是严峻的。与此同时, 用水效率不高、用水严重浪费的现象普遍存在。全国农业灌溉水的利用系数平均约为 0.45, 而先进国家为 0.7, 甚至 0.8。我国每千克粮食的耗水量是发达国家的 2~3 倍。

江苏人均水资源拥有量仅占全国的 1/4, 水量型缺水与水质型缺水并存。遇中等干旱年份, 缺水 24.69亿 m^3 ; 遇特殊干旱年份, 缺水 102.7亿 m^3 。丘陵山区和沿海地区由于缺少灌溉水资源, 经济发展相对迟缓, 部分地区干旱年份人畜饮水十分困难。

2. 水资源可持续利用成为我国经济社会发展的需要

党的十四届五中全会指出“要大力普及节水灌溉技术”。时隔两年, 党的十五届三中全会提出“将推广节水灌溉作为一项革命性措施来抓”。1998 年 5 月 24 日江泽民总书记对我国水资源问题作出重要批示: 在开源的同时要注重节流, 认真做好工业、农业、日常生活的节水工作。不久, 江总书记进一步指出“我国的水资源大为短缺, 我们过去的认识很不够, 必须引起全党的十分重视”。十五届五中全会指出: “水资源可持续利用是我国经济社会发展的战略问题, 核心是提高用水效率”。在 2001 年召开的中央人口资源环境工作座谈会上, 江总书记强调指出: 水是人类生存的生命线, 是经济发展和社会进步的生命线, 是实现可持续发展的重要物质基础。没有水, 就没有生命, 就没有经济的发展, 就没有社会的进步和稳定。

朱镕基总理对南水北调提出了“三先三后”指导原则，即“先节水后调水，先治污后通水，先环保后用水”。江苏省在 20 世纪 90 年代后期也逐渐认识到节水的迫切性，1999 年 5 月，省办公厅转发省水利厅《关于加强节水灌溉工作的意见》，明确了节水灌溉的指导思想、目标任务、工作重点、投入措施。

3. 量水是灌溉用水管理的基本条件

量水是灌溉用水管理的基本条件，是促进节约用水的有效手段，是实行计量灌溉的前提和基础，是征收水资源费、水费的重要依据，是提高水费实收率和减轻农民不合理负担的重要措施。20 世纪 90 年代后期，随着对节水认识的提高，量水工作逐步引起重视，并作为节约用水的重要环节列入议事日程。水利部在 1999 年 5 月下发的《关于全面加强节约用水工作的通知》明确提出：农业灌溉用水要逐步完善计量措施，安装计量设备。2000 年 12 月国家计委印发的改革水价促进节约用水的指导意见，明确要求逐步完善计量设施，实行按用水量计量收费。财政部、国家计委、农业部 2000 年下发的《关于取消农村税费改革试点地区有关涉及农民负担的收费项目的通知》要求：按实际供水量和规定的水费标准收取，严禁按田亩或人头强行向农民摊派等不规范的收费行为，以减轻农民负担。根据这些要求，大力配置量水设施已十分迫切。

4. 农业灌溉量水成为用水计量的“瓶颈”

农业灌溉计量是当前计量工作的薄弱环节。“九五”期间，江苏城镇工业和生活用水共安装取水计量设施 16844 座，其中地下水 12928 座，大部分地下水计量安装率达到 90% 以上。2001 年内江苏非农业取水计量设施安装率将达到 95% 以上。而农业灌溉计量的发展十分缓慢，在节水工作普遍引起重视的形势下，农业灌溉计量将是今后节约用水的发展重点。

第三节 灌区量水的任务

灌区量水，是合理调度灌溉水资源，正确执行用水计划，加

强经济管理的必要措施；是各用水户根据用水量合理负担水费的依据。同时，也是衡量灌溉管理水平和灌区灌溉水利用率高低的重要技术指标之一。

灌区量水的任务可归纳为：促进节约用水；为征收水费、水资源费提供依据；提高水费实收率、减轻农民不合理负担；为灌溉工程的规划、设计和管理提供第一手资料。具体任务如下：

1) 测算历年、月、日时段渠道水位、流量变化情况以及输水能力，为编制渠系用水计划提供依据。

2) 根据用水计划和水量调配方案，及时准确地从水源引水，并配水到各级渠道的用水单元和灌溉地段。

3) 为灌区定额供水、按方征收水费和水资源费提供可靠依据。

4) 利用量水观测资料和灌溉面积资料，分析、检查灌水质量和灌溉效率，修正、调整供配水方案，指导和改进用水工作。

5) 利用量水资料验证渠道和建筑物的输水能力、渠道输水损失率，为灌区改建、扩建、新建提供规划、设计和科研的基本资料。

第四节 量水网点的规划布局

一、量水网点的分类和作用

量水网点分为基本网点和辅助网点两大类。

(一) 基本网点

1. 引水渠渠首

观测从水源引入流量及水位，分析引水口水位与引水流量变化关系和引水渠水位~流量关系，指导配水工作。量水点布设在引水渠渠首以下约 50~100m 范围内的水流平稳渠段处。亦可利用引水建筑物量水。

2. 配水渠渠首

观测从上一级渠道配得的水量及渠道的输水损失。量水点布

设在配水渠渠首以下 30~80m 范围内的水流平稳渠段处。亦可利用配水建筑物量水。

3. 分水渠渠首

观测从配水渠分得的水量及渠道的输水损失。量水点布设在分水渠渠首以下 30~50m 范围内的水流平稳渠段处。亦可利用分水建筑物量水。

(二) 辅助网点

1. 平衡点

观测渠道及灌区的退泄和排出水量，为灌区水量平衡的分析计算提供数据。平衡量水点应分别布设在各级灌溉渠道的末端及排水渠上。

2. 专用点

为观测、收集专门的资料（如渠道输水损失、糙率系数、流速、流量与冲淤关系等）而设。专用量水点布设位置视实际需要选定。

二、量水网点布设程序

1) 根据量水要求，在灌区、渠系平面图上，全面规划，统一布设，分步实施。

2) 实地勘察，确定量水点的具体位置。

3) 设立标志，建立施测断面，鉴别建筑物类型，或安设特设量水设备。

4) 布设完毕后，应将量水网点类型、位置、使用量水方法等，编表列册，并分别标示在渠系平面图上，以备查考。

三、量水网点布设要求

1) 充分利用现有水工建筑物量水，并视经济条件，逐步安装特设量水设备。

2) 量水网点布设应自上而下进行，优先保证灌区渠首、乡与乡或村与村等用水单元分界点的计量。

3) 量水网点布设应因地制宜，由粗到细，分步实施。在经济欠发达地区，先计量出大的用水单元用水量，单元内部再进行合

理分摊。

4) 量水网点布设应和供水方式协调,如支渠续灌,斗农渠分组轮灌,在支渠首计量。下游轮灌组实际用水量,如小于计量水量,在条件许可时,可增设网点。

第五节 灌区量水的原则要求

灌区量水一般应遵循以下一些原则要求:

1) 灌区量水应从源头开始,即从灌区引水渠首开始,从上到下,从头到尾,逐级延伸,先干、支后斗、农。

2) 灌区水源及引水渠(如总干、干渠、支渠)宜采用水工建筑物量水;配水渠渠首(如支、斗渠)、分水点(如斗、农渠)宜采用特设量水设备量水。

3) 鉴于当前经济条件和灌溉用水管理的水平,目前没有必要计量到最小的用水单元,即每个田块、每家每户,可采用“适当放大用水单元,大的用水单元计量、单元内部分摊”的过渡方法。开始时放大计量单元,条件成熟后,缩小计量单元。

4) 灌区量水设备的选用,应当侧重于具有施工方便、造价低廉、测算简捷、损失水头小、抗干扰能力强(既让杂物和泥沙顺利通过,又不影响自身的安全和精度)。

5) 对于计量的精确度不一定要过高,一般仪表类量水设施量水误差不超过正负百分之五,特设量水设备量水误差不超过正负百分之八,利用水工建筑物量水误差不超过百分之十。推广的初始阶段,精度可低些,以后再逐步提高。

6) 对于任何新设备的引进和采用,必须经过认真的检验和试点,确认其适用,才可推广。决不可一哄而起,盲目推广,造成损失和浪费。

7) 在今后灌区更新改造时,量水设施的配套应作为一项主要内容,统一规划,统一实施。

第六节 灌区量水方法的选择

一、灌区量水的特点

灌区量水，与大江大河的水文测验不尽相同。灌区量水施测流量一般较小，但观测次数频繁，时间要求严格，亦要有一定的精度。

二、常用的灌区量水方法

- 1) 利用水工建筑物量水；
- 2) 利用特设的量水设备量水；
- 3) 利用流速仪量水；
- 4) 利用浮标量水；
- 5) 利用水尺量水。

利用水工建筑物量水是较为经济、简便的量水方法，在有可能用水工建筑物量水的地方，应优先考虑使用。特设量水设备量水的成果比较精确，但设备费用较高，一般在没有水工建筑物或现有水工建筑物不能用以量水时，或是要求的量水精度超过水工建筑物量水所能达到的精度时，可采用特设量水设备。流速仪测流，成果精确，但费时较多，设备费用高，施测和计算繁杂，多在水工建筑物及特设量水设备可资利用的情况下使用。浮标测流，经济简单，但精度低。

在断面稳定均直(可人工加以衬砌)、没有回水影响的渠段内，设置水位尺，利用测绘好的水位流量关系图表测水，经济方便。或安设经过测量换算制成的流量尺，直接测读流量，但精度稍差。

第二章 量水基础知识

第一节 量水水力学

一、常用水力学基本知识

(一) 液体流动的基本要素

描述液体流动状况的物理量,包括:动水压强、过水断面、流速、流量等。亦叫水力要素。

1. 动水压强

流动的液体中,任意点上的压强叫动水压强,用符号 p 表示。

2. 过水断面

过水断面是指与水流流动方向相垂直的横断面。基本要素有断面几何形状、过水断面面积、湿周与水力半径。

过水断面面积,常用符号 ω 表示,如圆管: $\omega = \frac{\pi}{4} d^2$,湿周指流动液体与固壁相接触的湿线长度,用符号 χ 表示, $\chi = \pi d$; 水力半径 R 指过水断面 ω 与湿周 χ 之比,即 $R = \frac{\omega}{\chi}$ 。

3. 液体流速与流量

在水利工程中,为方便计算,都采用断面平均流速,即过水断面各点实际流速的平均值,用符号 v 表示。

流量即在单位时间内通过过水断面 ω 的液体体积,用符号 Q 表示,即 $Q = \omega v$ 。

(二) 液体流动的分类

1. 恒定流与非恒定流

根据流速与动水压强是否随时间而变,可将液体流动分为恒定流与非恒定流。凡通过断面上各点的流速与动水压强都不随时间变化的液体流动叫恒定流,又叫稳定流;凡通过断面上各点的流速与动水压强都随时间变化的液体流动叫非恒定流,又叫非稳

定流。

2. 等速流和变速流

按流动要素是否随流动方向变化，可将恒定流分为等速流与变速流。当液体质点的流动速度在所经过的路程上保持不变，这种流动叫等速流，又叫均匀流；否则，叫变速流，又叫非均匀流。

在变速流中，当水流质点的流速大小与方向沿程的变化十分缓慢时，流动近似于等速流，这种流动叫渐变流；反之，为急变流。

3. 有压流与无压流

根据促成液体流动的主要力量，可将液体分为有压流与无压流。有压流是指液体主要受压力作用而发生流动。其特征是流动液体充满整个管道，即不存在自由面。无压流是指液体主要受重力作用而发生的流动，其特征是具有自由面，作用在自由面上的压强为大气压。

(三) 流体流动的基本方程

1. 恒定流连续性方程

当管道或渠道中流动是恒定流，而且水在流动中是连续不断，又不易压缩，根据质量守恒定律，在同一时间内流经两个不同断面的水体体积相等（无分叉），即

$$Q_1 = Q_2 \quad (2-1)$$

当两断面间有流量引入或分出时，恒定流连续性方程为：

$$Q_2 = Q_1 \pm Q_3 \quad (2-2)$$

上式表明在恒定流条件下，通过恒定总流任意过水断面的流量均相等。在流量给定时，恒定总流的平均流速与过水断面面积成反比。

2. 恒定流能量方程式

通常流动液体具有的能量包括有三种形式：

(1) 位能：如果流动的单位重量液体所在的位置相对于基准面的位置高度为 Z ，那么液体相对于这一基准面就具有能量，叫位置势能，其大小由液体所处的位置高度决定，即：位能 = 位置高度 = Z 。又叫位置水头。

(2) 压能：这是流动液体中动水压强具有的作功本领，又叫压能。单位重量的液体所具有的压能大小计算如下：

$$\text{压能} = \frac{p}{\gamma}$$

水力学中，位能与压能统称为势能 $\left(Z + \frac{p}{\gamma}\right)$ ，又称为测压管水头。

(3) 动能：液体流动所具有的能量。若液体流动的平均速度为 v ，则单位重量液体具有的动能大小计算如下：

$$\text{动能} = \frac{\alpha v^2}{2g}$$

水力学上又把动能 $\frac{\alpha v^2}{2g}$ 叫流速水头，其中 α 叫动能修正系数，一般取用 $\alpha=1.0\sim 1.10$ 。流动的单位重量液体所具有的总能量（总水头）为：

$$\text{总能量}(E) = \text{动能} + \text{位能} + \text{压能} = Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (2-3)$$

在图 2-1 所示的恒定水流中，取水平面 0—0 为基准面，取过水断面 1—1 与 2—2 分析：

断面 1—1 上水流的总能量为：

$$E_1 = Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \quad (2-3a)$$

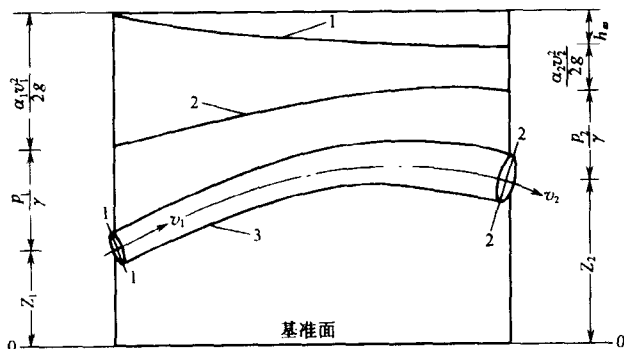


图 2-1 管道水流能量示意图

1—总水头线；2—测压管水头线；3—总流流线

断面 2—2 上:

$$E_2 = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \quad (2-3b)$$

水流从断面 1—1 到断面 2—2 的过程中, 由于水流存在粘滞性, 必然消耗一部分能量, 用于克服摩擦阻力, 这部分能量将转化为热能消失, 称能量损失, 也叫水头损失, 用符号 h_w 表示。

因水流为恒定流, 据能量守恒定律, 单位重量的液体经断面 1—1 时的总能量, 应等于流经断面 2—2 时的总能量, 加上水流在两断面的能量损失, 即

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w \quad (2-4)$$

上式即恒定流的能量方程, 又叫伯努利方程。

(四) 流体流动的水头损失

1. 水头损失的分类

水头损失 h_w 可分为沿程水头损失与局部水头损失, 液流克服沿程阻力 (液流各层之间的磨擦阻力) 而引起的单位重量液体的水头损失称沿程水头损失, 用符号 h_f 表示。单位重量液体克服局部阻力 (由于液流局部边界的急剧改变所引起的阻力) 做功而引起的水头损失称为局部水头损失, 用符号 h_j 表示, 则总水头损失为:

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j \quad (2-5)$$

2. 沿程水头损失的计算

(1) 达西公式:

$$\text{对管流:} \quad h_f = \frac{\lambda L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (2-6)$$

$$\text{对明渠流:} \quad h_f = \frac{\lambda L}{4R} \frac{v^2}{2g} \quad (2-7)$$

以上两式中 λ ——沿程损失系数, 是一个无量纲的数值, 由实验测定;

L ——长度;

d ——直径;

R ——水力半径。

(2) 谢才公式：

$$h_f = \frac{v^2}{C^2} \frac{L}{R} \quad (2-8)$$

或
$$v = C \sqrt{RJ} = C \sqrt{R \frac{h_f}{L}} \quad (2-9)$$

式中 J ——水力坡度， $J = \frac{h_f}{L}$ ；

C ——谢才系数；

v ——流速；

R ——水力半径。

3. 局部水头损失的计算

其大小通常用流速水头的倍数表示：

$$h_f = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (2-10)$$

式中 ζ ——称局部阻力系数，一般由实验确定。读者可查有关的水力学计算表。

(五) 液体流动的两型态

实际液体流动存在两种型态即层流与紊流。当流速较小时，各流层的液体质点有条不紊的运动，互不混杂，这种流态叫层流。当流速较大时，各流层的液体质点在流动中互相混杂，这种流态叫紊流。

上述液流型态可用一个无量纲的数来判断：

$$Re = \frac{vR}{\nu} \quad (2-11)$$

式中 Re ——雷诺数，液流型态转变时的雷诺数叫临界雷诺数；

ν ——液体的运动粘滞系数；

R ——水力半径。

层流时可求得沿程阻力系数 $\lambda = \frac{64}{Re}$ 。

紊流时，通过一系列实验，确定了管道中在不同流速与不同

相对粗糙度 $\frac{r_0}{\Delta}$ ($\frac{r_0}{\Delta}$ 是管道半径 r_0 与砂粒直径 Δ 之比) 下的沿程阻力系数的变化规律:

(1) 层流区: 即 $\lambda = \frac{64}{Re}$, 说明沿程阻力系数 λ 只与 Re 有关, 且两者是线性关系, 而与过流管道的壁面粗糙度无关。

(2) 紊流过渡区: 沿程阻力系数 λ 也只与 Re 有关, 而与过流管道的壁面粗糙度无关。但两者不是线性关系。

(3) 紊流区: 即沿程阻力系数 λ 不仅与 Re 有关, 且与过流管道的壁面粗糙度有关。该区又可分为三个区: 水力光滑管区、光滑管到粗糙管的过渡区、粗糙管区。① 水力光滑管区: 该区贴近管道壁面附近的慢速层流状水流淹没了砂粒直径 Δ , 管道中的紊态水流近似在光滑管道中流动。该区 λ 仍然仅与 Re 有关, 与 $\frac{r_0}{\Delta}$ 无关。② 光滑管到粗糙管的过渡区: 贴近管道壁面附近的慢速层流状水流开始被破坏, 该区 λ 不仅与 Re 有关, 且与 $\frac{r_0}{\Delta}$ 有关。③ 粗糙管区: 该区贴近管道壁面附近的慢速层流状水流被破坏。只有 $\frac{r_0}{\Delta}$ 对沿程阻力系数 λ 起作用, 而与 Re 无关。由达西公式可知, 此时 $h_f \propto v^2$, 即沿程水头损失是与平均流速的平方成比例的, 故又称阻力平方区。

在明渠中试验可得到与上述相类似的结果。

(六) 明渠流

人工渠道、天然渠道及未充满水的管道统称为明渠。明渠水流系无压流。明渠水流可以是恒定流, 也可以是非恒定流。可以是均匀流, 也可以是非均匀流。通常如果它的断面形状、尺寸、渠底坡度与渠内表面的粗糙度都沿水流的方向不改变, 而且渠道有一定的长度, 那么在渠道中各断面的水深 h_0 , 断面平均流速 v 和流速分布都沿流向不变, 我们称这种水流为明渠均匀流。否则, 称为明渠非均匀流。

1. 明渠类型

常见的人工渠道的断面形状有: 梯形、矩形、圆形、U 形等。

天然河道一般是不规则断面，可按浅矩形断面计算。凡是断面形状、大小及底坡沿水流的方向不改变的顺直渠道称为棱柱形渠道。否则，称为非棱柱形渠道。

在渠道中，只有当渠道的底面相对于水平面成一倾角时才能产生均匀流。如果倾角为 θ ，则将任意两断面的渠底高差 Δh 与此两断面的渠底段长度 Δl 的比值称渠道底坡，记为 i ，即

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \sin \theta \quad (2-12)$$

由于 θ 在一般渠道中很小，故实际上用 $i = \sin \theta \approx \tan \theta$ 。

当渠底高程沿水流方向降低时， $i < 0$ ，称为正坡渠道；当渠底高程沿水流方向降低时， $i < 0$ ，称为正坡渠道；当渠底高程沿水流方向降低时， $i < 0$ ，称为正坡渠道。

2. 明渠中的水流现象

(1) 明渠均匀流：在正坡棱柱形长渠中，出现明渠均匀流时，由于流速和水深沿流动方向不变，所以在明渠等速流条件下，渠中的水面线、渠底线和总水头线为互相平行的三根直线。即，水面坡度 = 渠底坡度 = 水力坡度。

(2) 明渠非均匀流：明渠非均匀流分为加速流动与减速流动。由于流速的变化，使明渠变速流的水面出现以下的两种情况：
① 壅水现象：即水深沿流动方向逐渐增加。其水面线又称壅水曲线。
② 降水现象：即水深沿流动方向逐渐减小。其水面线又称降水曲线。

3. 明渠均匀流计算

由前述谢才公式 (2-9) 可得：

$$v = C \sqrt{Ri} \quad (2-13)$$

式中 i ——渠道底坡；

R ——水力半径， $R = \omega / \chi$ ，即过水断面面积 ω 与湿周 χ 之比值；

C ——谢才系数。 C 的确定常用曼宁公式：

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (2-14)$$

式中 n ——渠道的糙率，常见人工糙率，见表 2-1。

表 2-1 各种壁面的糙率 n 值表

顺序	渠 床 表 面 特 征	n	$\frac{1}{n}$
1	抹光的水泥护面	0.0120~0.0130	83.3
2	光滑的混凝土护面	0.0120~0.0140	66.7
3	粗糙的混凝土护面	0.0150~0.0170	58.8
4	紧密黄土或细砾土渠，有薄淤泥层	0.0180~0.0200	55.6
5	紧密黏土、黄土、壤土的渠道，养护条件在中等以上的土渠	0.0200~0.0225	50.0
6	紧密砾石铺面、紧密壤土渠，有薄淤泥层，开凿得很好的岩石渠道	0.0225~0.0250	44.4
7	良好的干砌石渠道，养护条件中等的土渠	0.0250~0.0325	40.0
8	养护条件低于一般标准的土渠	0.0250~0.0275	36.4
9	条件较差的土渠（如有的地方有水草，渠底有卵、砾石，局部坡岸崩塌）	0.0300~0.0350	33.3
10	条件很恶劣的渠道（如断面不规则等）	0.0350~0.0400	28.6
11	条件异常恶劣的渠道（如有崩岸石块等）	0.0400~0.0450	25.0
12	铸铁管	0.013	76.9
13	钢管	0.012	83.39

再依据流量公式：

$$Q = \omega C \sqrt{Ri} \quad (2-15)$$

若令 $K = \omega C \sqrt{R}$ (2-16)

则 $Q = K \sqrt{i}$ (2-17)

式中 K ——流量模数， m^3/s ，它综合反映了明渠断面形状、大小和粗糙程度对过水能力的影响。在底坡 i 保持不变时，流量与流量模数成正比。

4. 急流、缓流

(1) 基本特征：对于明渠中任意形状的断面，水深采用断面平

均水深 $\bar{h} = \frac{\omega}{B}$ ，其中 B 是水面宽度，则水中的水波速度 c 可表示为：

$$c = \sqrt{g\bar{h}} = \sqrt{g \frac{\omega}{B}} \quad (2-18)$$

将波速 c 与明渠中原水流断面平均流速 v 相比较：

$$v > c = \sqrt{g \frac{\omega}{B}}, \text{ 水流为急流；}$$

$$v < c, \text{ 水流为缓流；}$$

$$v = c, \text{ 水流为临界流。}$$

(2) 佛汝德数：将水流断面平均流速 v 与波速 c 相比可得一个无量纲的数，称佛汝德数 Fr ，对于任意断面：

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \frac{\omega}{B}}} \quad (2-19)$$

结合式 (2-18) 可得佛汝德数的判别式：

$$v > c \quad \text{则 } Fr > 1, \text{ 水流为急流；}$$

$$v < c \quad \text{则 } Fr < 1, \text{ 水流为缓流；}$$

$$v = c \quad \text{则 } Fr = 1, \text{ 水流为临界流。}$$

(3) 临界水深与断面比能。

1) 临界水深：当 $v = \sqrt{g \frac{\omega}{B}}$ 时，水流为临界流，相对应的断面流速叫临界流速，用 v_k 表示；相应的断面水深叫临界水深，用 h_k 表示；相对应的断面面积和水面宽度用 ω_k 、 B_k 表示。那么，上式可改为：

$$v_k = \sqrt{g \frac{\omega_k}{B_k}} \quad (2-20)$$

由 $Q = \omega_k v_k$ ，可得：

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{\omega_k^3}{B_k} \quad (2-21)$$

上式即是临界水深的计算公式。