

# 明渠测流的理论和方法

张志昌 肖宏武 毛兆民 编著



## 内 容 提 要

本书是在作者多年从事明渠测流研究的基础上,总结了近年来国内外明渠测流技术的最新发展而撰写的较为全面、系统的专著。书中介绍了明渠测流的基本理论、方法和应用条件。全书共 15 章,前 11 章主要介绍了明渠测流的理论和方法,其中涉及流速面积法、水工建筑物法、坡降 - 水力半径 - 面积法和末端水深法;后 4 章简要地介绍了明渠测流设施的设计方法、误差分析、仪器设备和计算程序等。

本书可作为水利类大专院校学生和教师的参考书,也可供水利设计工程师、管理工程师和有关工程技术人员参考使用。

# 前 言

水是人类宝贵的资源,合理开发和利用水资源是实现我国水资源可持续发展的重要措施。科学用水、计划用水、节约用水已为人们所共识。我国水资源的 60% 以上用于明渠灌溉、排洪或向工厂供水。因此,有必要对河槽的流量进行测量。

随着水资源的开发利用和水费制度的改革,水的计量不仅涉及工农业用水,而且涉及千家万户。依法用水、准确计量、按量收费是我国水资源管理的一项基本制度。因此,解决好水量的测量问题是关系到国计民生的大事。而掌握流量测量的理论和方法对于设计工程师、管理工程师和用户都是必要的。

全书共 15 章,第 1 章介绍明渠测流的基本方法和理论;第 2 章介绍流速面积法测流;第 3 章至第 8 章介绍堰槽测流;第 9 章介绍闸孔流量计算;第 10 章介绍坡降—水力半径—面积法测流;第 11 章介绍用末端水深法估算流量;第 12 章介绍测流设施的设计方法;第 13 章介绍测流的误差分析;第 14 章介绍明渠测流的仪器设备;第 15 章介绍明渠测流的计算程序。

本书在编写过程中,力求做到机理阐述清楚,理论分析和推导严谨,实际资料验证充分。对近年来在明渠测流堰槽中应用的边界层理论作了详细的介绍,为测流堰槽的设计提供了全新的方法。

本书由西安理工大学张志昌主编,并编写了第 1 章至第 11

章。第 12 章和第 14 章由陕西省水利厅肖宏武同志编写,第 13 章和第 15 章由陕西省水利厅毛兆民同志编写。

本书得到了陕西省水利厅科学基金资助,在此表示感谢。

由于我们水平有限,书中错误在所难免,衷心欢迎读者指正。

作者

2004.2.25

# 目 录

## 第 1 章 明渠测流的基本方法及理论

|                        |      |
|------------------------|------|
| 1.1 明渠测流的方法 .....      | (1)  |
| 1.2 明渠测流的研究和发展 .....   | (4)  |
| 1.3 明渠测流的理论 .....      | (6)  |
| 1.4 明渠测流的行近渠槽水力条件..... | (12) |
| 1.5 下游水流条件.....        | (16) |
| 参考文献 .....             | (18) |

## 第 2 章 流速仪测流

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 2.1 流速仪测流方法简介.....         | (20) |
| 2.2 垂线上流速分布的规律.....        | (21) |
| 2.3 断面测流垂线的选择.....         | (25) |
| 2.4 垂线流速测点的布置方法.....       | (27) |
| 2.5 各种测点分布的垂线平均流速误差分析..... | (30) |
| 2.6 断面流量的计算.....           | (31) |
| 2.7 曲面两垂线之间面积的计算.....      | (33) |
| 参考文献 .....                 | (39) |

### 第3章 薄壁堰

|                     |      |
|---------------------|------|
| 3.1 薄壁堰的类型及作用·····  | (40) |
| 3.2 三角形缺口堰·····     | (41) |
| 3.3 矩形薄壁堰·····      | (63) |
| 3.4 特殊薄壁堰的流量计算····· | (76) |
| 3.5 有关薄壁堰的几个问题····· | (82) |
| 参考文献·····           | (84) |

### 第4章 宽顶堰

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 4.1 宽顶堰的类型及作用·····          | (86)  |
| 4.2 矩形宽顶堰的水流流态和理论分析·····    | (86)  |
| 4.3 矩形宽顶堰的流量计算·····         | (92)  |
| 4.4 矩形宽顶堰的淹没出流·····         | (96)  |
| 4.5 具有侧收缩的宽顶堰·····          | (102) |
| 4.6 无坎宽顶堰·····              | (104) |
| 4.7 英国水力试验站对矩形宽顶堰的研究成果····· | (104) |
| 4.8 国际标准和我国水利行业标准的计算方法····· | (110) |
| 4.9 圆头(流线型)宽顶堰的理论研究成果·····  | (111) |
| 4.10 V形宽顶堰流量的计算·····        | (119) |
| 参考文献·····                   | (126) |

### 第5章 测流槽

|                      |       |
|----------------------|-------|
| 5.1 测流槽的类型和作用·····   | (128) |
| 5.2 长喉道测流槽的理论分析····· | (130) |

|     |                         |       |
|-----|-------------------------|-------|
| 5.3 | 长喉道测流槽不同断面形状的流量公式 ..... | (132) |
| 5.4 | 长喉道测流槽的设计方法 .....       | (161) |
| 5.5 | 短喉道测流槽 .....            | (163) |
| 5.6 | 孙奈利槽 .....              | (184) |
| 5.7 | 帕尔默·玻鲁斯水槽(P-B槽) .....   | (185) |
|     | 参考文献 .....              | (187) |

## 第6章 三角剖面堰

|     |                        |       |
|-----|------------------------|-------|
| 6.1 | 三角剖面堰的发展 .....         | (190) |
| 6.2 | 三角剖面堰的设计 .....         | (192) |
| 6.3 | 三角剖面堰的流量计算 .....       | (194) |
| 6.4 | 三角剖面堰在 U 形渠道中的应用 ..... | (202) |
| 6.5 | 三角剖面堰的运行特性及条件限制 .....  | (204) |
|     | 参考文献 .....             | (205) |

## 第7章 V形三角剖面堰

|     |                             |       |
|-----|-----------------------------|-------|
| 7.1 | V形三角剖面堰的发展 .....            | (207) |
| 7.2 | V形三角剖面堰的设计 .....            | (207) |
| 7.3 | V形三角剖面堰的流量公式 .....          | (208) |
| 7.4 | 自由出流时的流量系数 .....            | (210) |
| 7.5 | V形三角剖面堰非淹没点水流条件 .....       | (212) |
| 7.6 | 淹没系数 $\sigma_v$ 的试验研究 ..... | (214) |
| 7.7 | 流量计算 .....                  | (217) |
| 7.8 | 梯形渠道上的 V 形三角剖面堰 .....       | (234) |
|     | 参考文献 .....                  | (236) |

## 第 8 章 实用剖面堰

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 8.1 实用剖面堰的发展和形状 .....   | (237) |
| 8.2 实用堰的堰顶曲线和流量公式 ..... | (239) |
| 8.3 克 - 奥实用剖面堰 .....    | (242) |
| 8.4 WES 实用剖面堰 .....     | (247) |
| 8.5 长研 I 型实用剖面堰 .....   | (252) |
| 8.6 低实用剖面堰 .....        | (254) |
| 8.7 驼峰堰 .....           | (260) |
| 参考文献 .....              | (261) |

## 第 9 章 闸孔出流流量的计算

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 9.1 闸孔出流的类型 .....                   | (263) |
| 9.2 平底平板闸门下的出流 .....                | (263) |
| 9.3 平底弧形闸门下的出流 .....                | (267) |
| 9.4 平底闸孔出流垂向收缩系数、流速系数和流量系数<br>..... | (268) |
| 9.5 平底闸孔淹没出流的水力计算 .....             | (274) |
| 9.6 用边界层理论计算平底闸孔出流的流量 .....         | (279) |
| 9.7 实用堰上的闸孔出流 .....                 | (283) |
| 参考文献 .....                          | (287) |

## 第 10 章 坡降 - 水力半径 - 面积法测流

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 10.1 明渠恒定均匀流的基本方程 .....   | (289) |
| 10.2 标准断面明渠均匀流的水力计算 ..... | (292) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 10.3 明渠均匀流水力设计的几个问题····· | (304) |
| 参考文献·····                | (322) |

## 第 11 章 用末端水深法估算流量

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 11.1 末端水深法的流量计算公式·····    | (325) |
| 11.2 应用末端水深法应注意的几个问题····· | (328) |
| 参考文献·····                 | (329) |

## 第 12 章 明渠测流设施的设计要求和方法

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 12.1 明渠测流设施设计的准备工作····· | (330) |
| 12.2 明渠测流设施的选型·····     | (334) |
| 12.3 明渠测流设施的设计任务·····   | (340) |
| 12.4 设计举例·····          | (343) |
| 参考文献·····               | (349) |

## 第 13 章 明渠测流的误差分析

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 13.1 误差的基本概念·····     | (351) |
| 13.2 误差的来源和分类·····    | (352) |
| 13.3 随机误差的估计·····     | (354) |
| 13.4 系统误差及其消除·····    | (364) |
| 13.5 粗差的判别及剔除·····    | (365) |
| 13.6 间接测量误差的估计·····   | (366) |
| 13.7 明渠水流测量误差的估算····· | (372) |
| 参考文献·····             | (376) |

## 第 14 章 明渠测流仪器简介

|             |       |
|-------------|-------|
| 14.1 水位测量仪器 | (379) |
| 14.2 流速测量仪器 | (383) |
| 14.3 流量测量仪器 | (387) |
| 参考文献        | (388) |

## 第 15 章 计算机在明渠测流中的应用

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 15.1 Visual Basic 6.0 的基本情况、功能和运行环境 | (390) |
| 15.2 编程范围                           | (391) |
| 15.3 程序设计                           | (392) |
| 15.4 程序的使用方法                        | (402) |
| 参考文献                                | (403) |

# 第1章 明渠测流的基本方法及理论

## 1.1 明渠测流的方法

水文测验学一般定义为测流的科学和实践。测流可分为封闭管道的测流和明渠测流两大类。前者所测量的是有压管道的流量,这种流量的测量方法已比较成熟,如文丘里流量计、孔板流量计、涡轮流量计、电磁流量计、超声波流量计等。明渠测流比较复杂,因为明渠有自由表面,其过水断面面积和流速都会随流量而变化。因此,100多年来,水利工作者对明渠测流的方法进行了大量的研究,取得了丰硕的成果。明渠测流的方法概括起来有以下几种:

- (1)流速面积法;
- (2)水工建筑物方法;
- (3)坡降-水力半径-面积法;
- (4)稀释法。

流速面积法测流是通过量测河渠某过水断面的流速和面积来测流的。其依据是流量等于某一过水横断面上的流速的积分,这种方法可用于特定时间和地点的临时测流。

水工建筑物测流是利用特设的量水堰、测流槽或闸门、跌水等建筑物测流。其原理是预先建立流量与实测水位的关系,这种流量水位关系可以根据基本物理定律建立,也可根据实验求得水位流量关系的经验公式。水工建筑物测流的主要类型有:

- 1)量水堰

量水堰有三种形式:

(1)薄壁堰。如三角堰、矩形堰、梯形堰、抛物线形堰、圆形堰等。薄壁堰的量水精度高,因而常用于实验室率定流量。

(2)宽顶堰。这种堰也叫长底堰,是明渠上常用堰形之一。宽顶堰有矩形宽顶堰、圆头形宽顶堰和无底坎宽顶堰。

(3)实用堰。实用堰有曲线形实用堰和折线形实用堰。曲线形实用堰常用于大坝泄洪等大中型水利工程;折线形实用堰常用于中小型水利工程。

上述三种堰形的判定条件是堰的厚度  $L$  和堰上的水头  $H$  的比值,即

|                    |     |
|--------------------|-----|
| $L/H < 0.67$       | 薄壁堰 |
| $0.67 < L/H < 2.5$ | 实用堰 |
| $2.5 < L/H < 10$   | 宽顶堰 |

## 2)测流槽

测流槽也叫临界水深槽,是灌溉渠道常用的测流建筑物。测流槽的测流原理与量水堰相同。测流槽分为长喉道测流槽和短喉道测流槽。长喉道测流槽只要测流槽的几何尺寸确定以后,即可以用边界层理论求出水位与流量的关系;短喉道测流槽由于喉道短,过槽水流流线弯曲大,无法用理论公式计算,只能通过试验率定,且不能将率定结果按几何尺寸放大或缩小。

常用的长喉道测流槽有:矩形断面长喉道测流槽、梯形断面长喉道测流槽、三角形断面长喉道测流槽、U形断面长喉道测流槽、抛物线形断面长喉道测流槽。常用的短喉道测流槽有:巴歇尔测流槽、矩形短喉道测流槽和抛物线形短喉道测流槽。

除上述量水堰槽外,还有已不能按上述堰、槽情况分类的其他量水形式,如三角形剖面堰、平坦V形剖面堰等。

量水堰槽均可通过理论分析和量纲分析得出流量与水位的关式。堰槽运行特性分析的关键在于确定流量公式中的各种系

数,这些系数取决于流体的性质,并与建筑物上的作用水头和决定建筑物几何特性的主要尺寸有关。

### 3) 闸孔出流测流

闸孔出流是利用闸门开度和闸门的上下游水位差来确定闸孔通过的流量。闸孔出流分为宽顶堰上的闸孔出流和曲线形堰上的闸孔出流,还分为平板闸门下的出流和弧形闸门下的出流,闸门形式不同,其流量系数也不一样。

### 4) 跌水测流

跌水测流是利用河渠断面的突然不连续,在河渠上形成自由溢流的形式,在跌水末端由于渠底阻力突然消失和重力的作用,使得水流突然跌落,水深小于临界水深。渠道水流从正常水深变为小于临界水深,则在跌水上游某一断面必然出现临界水深断面,通过试验找出跌水末端水深与临界水深的关系,即可用临界水深公式计算流量。

坡降—水力半径—面积法测流是根据明渠均匀流的理论,只要测出渠道的正常水深、渠道某一渠段的水面坡降、平均过水断面面积和湿周,代入曼宁公式或流速对数律或指数律公式即可计算流量。

稀释法测流是采用适当比例的盐溶液,等量注入所测量河渠的入口断面处,并在下游某一断面测量化学盐的浓度。渠道中注入溶液中化学盐的浓度与下游断面化学盐的浓度之比乘以化学盐溶液注入量即得渠道中水流的流量。稀释法要求渠道中水流的紊动程度高,以便使注入溶液与全部水流充分溶合,并且贯穿于整个流程。这种测流方法常用于山区河流和洪水中。由于此种方法和常用的测流方法差异较大,所以本书不做介绍,如需用这种方法测流,可参见文献[1]。

## 1.2 明渠测流的研究和发展

明渠测流是一个古老而又实际的课题,古代劳动人民就已认识到测流的重要性,并为此进行过研究。我国秦代在公元前256—210年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程。特别是都江堰,延续两千多年,至今仍在发挥着效益,成为驰名中外的灌溉系统。18世纪至19世纪期间,为了适应当时工程技术的发展,使用实验手段解决实际工程问题的水力学得以蓬勃发展。在水力学上有卓越成效的工程师如谢才和曼宁提出了谢才(Antoine Chezy)公式和曼宁(Robert Manning)公式,谢才公式和曼宁公式是坡降—水力半径—面积法测流的基础。在对堰流的研究中,巴赞(Henri Emile Batin)、雷伯克(Rehbock)、弗朗西斯(Francis)、汤姆森(Thomson)、巴辛(Bazin)、美国陆军工程兵团,英国的克鲁普、阿克尔斯,美国的巴歇尔以及苏联学者 H.H. 巴甫洛夫斯基、A.P. 别列斯基、A.C. 奥菲采罗夫等进行了大量的研究,提出了各种堰形的剖面和计算方法。20世纪以后,现代工业的突飞猛进和新技术的不断涌现,推动着水力学和古典流体力学进入了一个新的发展时期。1904年法国工程师普朗特(Ludwig prandtl)提出了边界层理论,使纯理论的古典流体力学开始与工程实际相结合,奠定了现代流体力学的基础。边界层理论是长喉道测流槽流量计算的基础。

近几十年来,明渠测流在以下几个方面得到了发展:

(1)提出用边界层理论计算测流堰槽流量的新方法,这种方法不需要进行室内试验和现场率定。边界层理论除计算堰槽流量外,文献[2]还首次把边界层理论应用于平底闸的闸下出流,计算结果表明,用边界层理论计算平底闸下出流的流量是完全可行的。

(2)在量水堰槽的研究方面,提出了许多新堰形。如美国陆军

工程兵团提出的 WES 实用剖面堰。近几十年来,我国在大力推广 U 形渠道,为了适应 U 形渠道的发展,文献[3]和文献[4]提出了适合于 U 形渠道测流的 U 形渠道直壁式测流槽和 U 形渠道平底抛物线形测流槽。

(3)研究出通过改进量水堰的淹没出流控制技术来尽量减小上下游水位差的办法。如英国的克鲁普提出的三角剖面堰<sup>[5]</sup>,采用堰顶和上游双水位测流法,就是在堰顶线附近的下游堰面设测压孔量测水位而不是在下游用传统的水尺量测水位。这种在当时具有彻底变革的新方法,能够克服下游水位量测中水面波动所遇到水位测量的困难<sup>[6]</sup>。

(4)利用统计学理论,更加合理地估算测流的误差和精度。

(5)研究了行近流速对测流的影响,包括渠槽上游弯道的影响。

(6)考虑了模型比尺效应的修正方法。

(7)明确了有泥沙运动时,河槽形态与测流建筑物之间的影响关系。

(8)运用计算机进行数值模拟求得流量。

(9)加强了测流仪器的研究,如超声波流量计、水位流量计、水位流量远距离传输系统,用计算机进行数据采集和处理。

(10)在明渠测流的标准化方面有了很大的进展,各国的和international的许多有关组织已为各种特定的测流方法和特定形式的量水堰槽制定了规范化标准。如英国 BS3680 标准《明渠水流测流方法》<sup>[7]</sup>和国际 ISO 标准《明渠水流测量》<sup>[1]</sup>,我国也制定了堰槽测流规范<sup>[8]</sup>和水工建筑物测流规范<sup>[9]</sup>。陕西省在 U 形渠道测流研究方面提出了 U 形渠道量水槽的陕西省地方标准<sup>[10]</sup>。这些标准的制定和运用,为明渠测流的标准化打下了基础。需要说明的是,采用标准化的水工建筑物测流并不意味着不发展新的测流设施,也不意味着不能采用非标准的测流设施,这是因为新的测流设施不可能很快地实现标准化。

### 1.3 明渠测流的理论

上面已经提到,明渠测流的方法有流速面积法、坡降-水力半径-面积法和水工建筑物测流的方法。

流速面积法测流是将河槽横断面分成若干条垂线,假定垂线上的流速分布符合某一数学方程,通过对方程的积分求出垂线平均流速的位置。测流时只要测出该点的流速即可认为是垂线平均流速,两相邻垂线平均流速之和的  $1/2$  倍乘以相邻两垂线之间的面积即为该分块的流量,对所取横断面的所有垂线之间流量求和即为通过该断面的总流量。

坡降-水力半径-面积法测流是指对明渠恒定均匀流求流量的方法。该方法用在渠道底坡不变的长直棱柱体渠道中,渠道必须为顺坡,且渠道当中不应有任何改变水流阻力的因素。其计算公式为谢才公式和曼宁公式,或者依赖于明渠流速分布的某个数学公式,如流速分布的对数律或指数律公式等。

水工建筑物测流是指在设计测流建筑物时,一般都使其成为渠道上的一个“控制”,在控制断面存在单值水位-流量关系并形成临界水流状态。可以应用能量方程、边界层理论或量纲分析的方法得出流量计算公式。

现以图 1-1 所示的圆头平顶宽顶堰为例,来分析测流堰槽的流量计算方法。

#### 1) 用能量方程和连续方程推导堰流公式

以通过堰顶的水平面为基准面,对堰前断面 0-0 及堰顶断面 1-1 列能量方程,得

$$H + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = h + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + \zeta \frac{V_1^2}{2g} \quad (1-1)$$

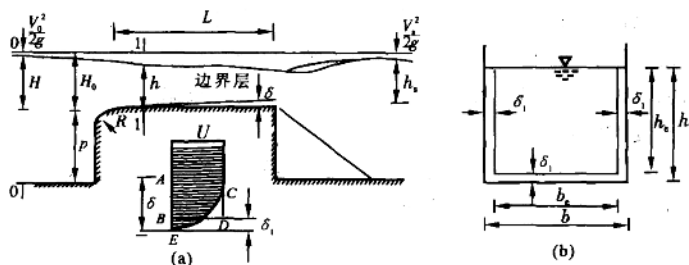


图 1-1 理论分析简图

$$\text{令 } H + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = H_0, \quad \frac{1}{\sqrt{\alpha_1 + \zeta}} = \varphi, \text{ 整理上式得}$$

$$V_1 = \varphi \sqrt{2g(H_0 - h)} \quad (1-2)$$

则

$$Q = A_1 V_1 = bh\varphi \sqrt{2g(H_0 - h)} \quad (1-3)$$

在实际测流中,一般不测量堰顶水深,只测量堰上水头,可以令  $h = \xi H_0$ ,代入式(1-3)得

$$Q = \varphi \xi \sqrt{1 - \xi} b \sqrt{2gH_0} H_0 = mb \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (1-4)$$

式中  $\varphi$  为流速系数;  $\xi$  为考虑水头垂直收缩的系数;  $b$  为堰宽;  $m$  为流量系数;  $H_0$  为堰上总水头。式(1-4)就是测流堰槽流量的一般表达式,适合于薄壁堰、宽顶堰、实用堰和各种形式的测流槽。

## 2) 用边界层位移厚度表示的流量公式

边界层理论适合于水流边界不分离的情况。边界层理论的出发点是:在实际液流中,固体边界上的液体质点必然粘附在固体边界上,与边界没有相对运动,即在固体边界上的流速等于零。在固体边界的外法线方向上液流的流速从零迅速增大。这样,在边界附近的流区存在着相当大的流速梯度。在这个流区里粘滞性的作用不能忽视,边界附近的这个流区即称为边界层。