JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-202X

输水梯形明渠现场流量溯源方法技术规范

Technical specification for on-site flowrate calibration method of trapezoidal open channel

（征求意见稿）

XXXX－XX－XX 发布　　XXXX－XX－XX 实施

国家市场监督管理总局发布

输水梯形明渠现场流量溯源方法技术规范

Technical specification for on-site flowrate calibration method of trapezoidal open channel

---

归 口 单 位：全国能源资源计量技术委员会水资源计量分技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院
水利部水文仪器及岩土工程仪器质量监督检验测试中心
中国水科水电科学研究院

参加起草单位：

本规范委托全国能源资源计量技术委员会水资源计量分技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

胡鹤鸣（中国计量科学研究院）
史占红（水利部水文仪器及岩土工程仪器质量监督检验测试中心）
王志刚（中国水利水电科学研究院）

参加起草人：

目　录

引言.....II
1 范围.....1
2 引用文件.....1
3 术语与计量单位.....1
3.1 术语.....1
3.2 计量单位.....2
4 概述.....3
4.1 工作原理.....3
4.2 基本组成.....3
4.3 用途.....4
5 装置技术要求.....4
5.1 测流装置要求.....4
5.2 测量位置的选择.....5
5.3 声道设计.....5
6 装置安装调试.....6
6.1 换能器定位安装.....6
6.2 水位计定位安装.....6
6.3 几何参数测量.....7
6.4 参数配置与调试.....7
6.5 ADCP 比测与数据分析.....8
7 测流数据评价报告.....8
7.1 校准报告.....8
7.2 首次测流数据报告.....9
7.3 周期性测流数据报告.....9
附录 A 基本测量原理.....10
A.1 流速测量原理.....10
A.2 流量计算模型.....10
附录 B 超声传播时间测量能力测试.....12
附录 C 纯水中的声速.....14

引言

本规范参照国际标准 ISO6416-2017《水文测验—用超声传播时间法测量流量》（hydrometry — Measurement of discharge by the ultrasonic transit time method），给出了明渠超声时差法测流装置的测量原理、技术要求、安装调试、测流数据报告等。本规范结合国内明渠超声时差法测流装置的生产、使用现状进行制订，主要技术指标与国际标准、国家标准相一致。

JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1004《流量计量名词术语及定义》和 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制订的基础性系列规范。

本规范为首次制订。

输水梯形明渠现场流量溯源方法技术规程

1 范围

本规范适用于现场安装换能器的梯形明渠（含矩形明渠）超声时差法测流装置的现场流量量值溯源。本规范不适用于箱式超声明渠流量计、无线超声时差法明渠流量计。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 28714 取水计量技术导则

JJG 1030 超声流量计

SL 482 灌溉与排水渠系建筑物设计规范

ISO6416 水文测验—用超声传播时间法测量流量（hydrometry — measurement of discharge by the ultrasonic transit-time method）

ISO 24578 水文测验—超声多普勒流速仪—用走航法测量明渠流量的方法及应用（hydrometry — acoustic Doppler profiler — method and application for measurement of flow in open channels from a moving boat）

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语与计量单位

本规范除引用 JJF 1001、JJF 1004 规定的术语和定义之外，还使用下列术语及定义。

3.1 术语

3.1.1 超声时差法 ultrasonic transit-time method

利用超声在流体中逆流传播时间与顺流传播时间之差求出声道轴向流速，通过积分算法计算面平均流速、并与面积相乘得到流量的方法，亦称超声传播时间法。

3.1.2 超声换能器 ultrasonic transducer

超声测流装置中利用压电陶瓷来实现电输出和机械振动输出相互转换的部件，亦称超声探头。

3.1.3 明渠超声时差法测流装置 open channel discharge measurement device of ultrasonic transit-time method

超声换能器直接固定到现有明渠边壁上、具备排空条件实施几何参数精测、采用超声传播时间法进行流速测量，并结合水位计数据进行流量测量的装置。以下简称测流装置或装置。

3.1.4 声道 ultrasonic path

超声在成对的超声换能器间传播的实际路径，亦称声路。

3.1.5 声道长度 ultrasonic path length

成对换能器之间超声在水介质中传播的实际距离。

3.1.6 声道角 ultrasonic path angle

声道与流道轴线之间的夹角。

3.1.7 声道高度 ultrasonic path height

声道相对于渠道底部的垂向高度。

3.1.8 凸出比 protrusion ratio

换能器凸出高度与声道层宽度之比。

3.1.9 声道轴向流速 ultrasonic path axial velocity

声道投影流速除以声道角的余弦值得到的流速，直接用于积分计算流量。

3.1.10 面平均流速 cross-sectional average velocity

过流流量除以截面面积得到的流速。

3.1.11 传播时间 transit time

超声波从一个换能器出发开始计时、到达另一个换能器结束计时所测到的时间。

3.1.12 时间差 time difference

一对换能器互为收发测量超声传播时间时，逆流传播时间和顺流传播时间的差值。

3.2 计量单位

主要量的计量单位和符号见表 1。

表 1 主要量的计量单位和符号

序号	量的名称	计量单位	计量单位符号
1	流速	米每秒；毫米每秒	m/s；mm/s
2	长度	米；毫米	m；mm
3	时间	时；分；秒；毫秒；微秒	h；min；s；ms；μs
4	温度	摄氏度	℃

4 概述

4.1 工作原理

测流装置采用速度面积法进行流量测量，其中流速测量采用超声时差法，利用声波顺流和逆流传播的时间差来测量声道上的线平均流速，采用多个声道分层测量多个线平均流速，进而计算面平均流速和流量。具体的测量原理见附录 A。

超声时差法由于具有换能器现场安装方便、多声道可适应复杂流场等优势，在明渠流量测量中得到了大量应用。本规范中的测流装置与常规明渠超声流量计有所不同，旨在利用超声时差法可直接溯源到时间量和几何量的绝对测量法优势，实现现场条件下的流量量值溯源和测流数据质量评价。具体要求如下：

- 时间测量：时间差应基于超声波形和相关法计算，并可显示诊断用的超声波形，且时间差测量能力经过实验室验证；
- 几何测量：明渠排空时进行换能器精确定位安装，并利用三维坐标法精测截面尺寸和声道几何参数；
- 流量积分：声道高度分布合理，最低水深条件下淹没的声道不少于 3 个；流量积分算法可核查，涉及的参数有实验数据支撑。

测流装置基于几何量、时间量的测量和流量积分算法来实现流量测量，是一种绝对测量方法，其流量测量结果的不确定度仅与超声传播时间测量、换能器几何参数标定和流量积分算法有关，可不必逐台在实验室标定，直接在现场实现量值溯源。

4.2 基本组成

测流装置基本组成示意图如图 1 所示，一般包括下列主要组成部分：

1）多对换能器（含信号线缆）及换能器安装座；

2）至少两种不同原理的水位计及安装支架；

3）超声测流主机及配件（电源、远传模块等）。

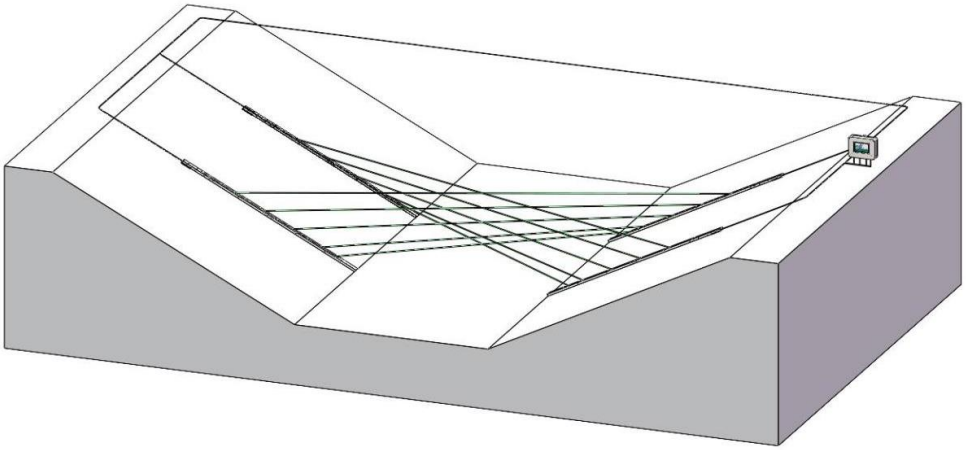


图 1 测流装置示意图

4.3 用途

梯形明渠输水广泛用于引水调水、灌区输水等场景，其流量测量是用水调度、贸易结算等的基础。

测流装置用于根据 GB/T 28714 要求进行的已安装流量计的现场校准/比测，也可用于梯形明渠流量的长期在线监测。

5 装置技术要求

5.1 测流装置要求

测流装置主机是用于激励换能器、测量传播时间、计算流速和流量、显示和记录测量结果的电子设备，其应保证换能器正常发射和接收超声脉冲信号并通过有效性检查，确保超声脉冲信号在上、下游方向都能被检测到，且具有适用的信号质量。测流装置应满足以下要求：

- 单台主机应具有至少 5 声道流速测量能力，超声传播时间差的测量精度不劣于 1 ns；
- 主机应具有两种及以上不同原理水位计的接入能力，水位计的分辨力应不劣于 1mm；
- 主机中流量计算模型应可核查，可根据实测声道高度进行配置，应具有合理的声道缺失补偿算法；
- 应具备流速分布廓形显示能力；
- 应具备超声波形显示和定期存储功能，具有信号质量指标体系；
- 应具备原始数据的长期存储能力，包括各声道的流速、声速、传播时间、信号强度及质量等。

测流装置换能器宜采用球型换能器，方便不同坡度明渠安装时换能器发射面对正。换能器宜配备专门的换能器安装座，同时宜采用换能器凸出比小的结构设计。在保证信号强度的前提下，应优先选择尺寸较小的换能器及其安装座。

换能器凸出会影响测流装置的准确度，凸出比越大，引起的测量偏差越大。换能器凸出比宜不大于 2%，否则应对换能器凸出影响进行评估或修正。

测流装置应具备一定的抗干扰能力，在信号质量恶化甚至信号丢失时有良好的应对措施。测流装置在换能器和主机配置时应具有足够的信号增益余量，以保证测流装置在全寿命周期内所有声道信号均有效。

5.2 测量位置的选择

测量位置宜首先在监控站房附近选择，便于供电接入和网络接入。附近无监控站房时，可考虑太阳能供电和无线网络接入。

测流装置换能器的安装位置，应尽可能选择水流平顺的明渠顺直段，上游远离弯道、闸门、泵站等干扰源，确保水流均匀稳定且无明显掺气现象。安装位置的前后直段长度宜满足前 5 倍水面宽度、后 2 倍水面宽度（前后直段长度计算时，以所有换能器的中心断面为参照），无法满足该条件时，超声测流装置仍可应用，但测量不确定度应附加额外的复杂流场影响项。

测流装置换能器的安装位置，应选择渠底平整且无淤积之处，或冲淤平衡后淤积不再有显著变化之处。如未来可能存在较大的冲淤变化，则应定期实测淤积量，并修正到流量计算中。

测流装置换能器的安装位置，应选择渠道坡面平整且坚固处，衬砌无松动，坡面无杂草，便于换能器安装座的长期可靠固定。

测流装置换能器安装位置，宜选择附近有测桥处，便于雷达波水位计的安装和换能器跨河线缆布设。

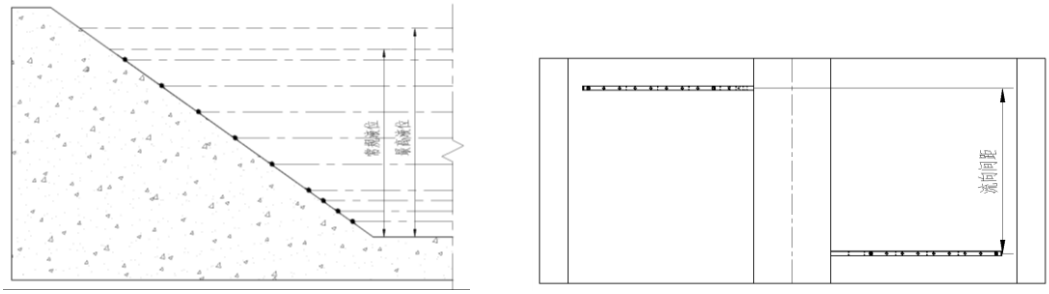
5.3 声道设计

声道设计包括声道数、声道高度、声道角的设计。

测流装置应不少于 5 层声道，合理布置即可实现复杂流场条件下较好的面平均流速准确度；10 层以上声道必要性不大，在硬件成本相同的情况下，过多声道数反而会降低换能器单价和整体可靠性，导致容易出现异常声道进而造成测流偏差。

梯形明渠流道换能器的典型布置如图 2 所示。声道高度设计时，渠底附近声道高度宜加密，保证在最低运行水位下淹没至少 3 个声道，且最底部声道高度十分重要，在保证信号不受淤积和底面反射影响的前提下越低越好。

声道层应在水平方向布置，确保上下游换能器在同一高程上并使其对正。上游换能器连线和下游换能器连线宜分别垂直于流动方向，如图 2(b)所示，便于换能器现场安装固定。声道角宜在 45°~75° 的范围内进行设计，明渠较宽时可采用较大的声道角。



（a）侧视图　　（b）俯视图

图 2 梯形明渠道布置示意图

6 装置安装调试

6.1 换能器定位安装

换能器的精确定位安装是测流装置施工的关键环节，施工控制水平直接影响测量准确度。换能器定位安装应在明渠排空后，由专业人员在流道内认真施工，宜采用全站仪等三维测量设备进行辅助定位。换能器应安装到预期位置附近，声道角偏差应保证声道角余弦值的变化小于 5%，声道高度偏差应小于最大水深的 5%。

换能器座及穿线管宜采用一体化设计，同一侧的所有换能器按设计间距安装到同一个长条型换能器座上，然后在渠道壁面开槽并将换能器座嵌入，使得凸出明渠壁面的部分尽量少，降低对流场的干扰。

换能器及其信号线缆的固定应足够牢固，确保长期监测过程中不损坏。信号线缆跨渠可采用渠底走线或附近测桥走线。同一声道的一对换能器应采用相等长度的线缆，不等长线缆会造成明显的时间差零点偏移，进而造成低流速时的流量测量偏差。

6.2 水位计定位安装

测流装置应采用至少两种不同原理的水位计，可为雷达水位计、压力式水位计、超声水位计等，便于进行明渠水深数据的互相校核，保证水深测量的准确度。

雷达式水位计可固定到附近的测桥底部，或立杆伸出的悬臂上。压力式水位计可固定在明渠坡面底部附近，选择合适安装高度确保不会被淤积。超声式水位计可采用与换能器同样方式固定，选择合适安装高度确保不会被淤积。

6.3 几何参数测量

几何参数是测流装置流量计算模型的基础参数，包括流道截面尺寸（底部宽度、开口宽度及对应高度），声道参数（声道长度、声道角、声道高度），水位计安装高度等。

几何参数测量应在换能器安装完成后在明渠内实施，应采用全站仪等三维测量设备进行测量，采集流道壁面点和换能器中心点的三维坐标，建立空间位置关系，基于壁面拟合获得明渠的截面尺寸及方向，进而计算测流装置的几何参数。

采用全站仪测量的具体步骤如下：

a) 选择合适位置在明渠底部架设全站仪并调水平，使其能无遮挡的测到所有换能器；

b) 利用全站仪扫描明渠壁面点，测点数量至少 50 个，并尽量均匀覆盖换能器安装的流道范围；利用最小二乘法由壁面测点拟合流道柱面，并计算截面尺寸及方向；

c) 利用全站仪目镜对准换能器中心，逐个测量换能器发射面中心的坐标，所有换能器测量完成后至少复测 2 遍，得到不少于 3 组换能器坐标数据；

d) 利用换能器坐标和流道方向，按照各自定义分别计算声道长度、声道角、声道高度，并计算多次测量的算术平均值作为最终结果；

e) 利用全站仪逐个测量水位计的参考位置坐标，并推算水位计的安装高度。

6.4 参数配置与调试

换能器及水位计安装完成后应根据现场安装情况，整理确定流量计算模型的参数，包括：

- 几何参数：流道截面尺寸（底部宽度、开口宽度及对应高度），声道参数（声道长度、声道角、声道高度），水位计安装高度等；
- 非水介质延时：包含电缆延时、换能器延时、主机延时等；
- 换能器凸出效应修正：根据换能器及其安装座的凸出比确定；
- 平均流速算法参数：顶层折算系数 K_S 和底层折算系数 K_B 等。

参数计算完成后，应完成以下装置调试工作：

- 根据主机的操作要求，输入配置参数；
- 有水条件下检查各声道的超声波形是否正常，并记录各声道信号强度和质量指标；
- 有水条件下检查各声道声速的合理性和一致性，参考附录 C 中公式由温度换算声速，核查实测声速的合理性，流动条件下各声道声速应具有一致性；
- 流动条件下检查声道流速分布的合理性，包括流动分布是否符合明渠特征、双声道面流速分布的一致性等；
- 流动条件下检查两种水位计的示数一致性；
- 如有明确的静水条件，可在静水条件下进行零点流速修正。

6.5 ADCP 比测与数据分析

走航式 ADCP 虽然无法实时测流，且水平方向和竖直方向都有盲区，但是在水深方向测点密度较好，另外还具备渠底地形的扫描能力。利用 ADCP 获得的垂向流速分布和渠底地形来完善测流装置的配置参数，可进一步降低测流装置的系统偏差。

参照 ISO 24578 中的方法，利用走航式 ADCP 还可直接获得流量，用于和测流装置数据进行比测。该比测仅可在水面宽大于 5m、水深大于 1m 的明渠进行，如两者偏差超过 5%，应核查各自的参数配置和算法。

7 测流数据评价报告

测流装置在安装调试完毕并经过一段时间的试运行后，应由检测技术机构出具测流装置的校准报告和首次测流数据报告。

用于长期在线监测的测流装置，应在首次测流数据报告的基础上，后续根据需求进行定期跟踪评价，出具周期性测流数据报告。

7.1 校准报告

校准报告应包括：装置参数设置、不确定度评价。

装置参数设置包括几何参数、平均流速算法参数、非水介质延时信息、换能器凸出效应修正信息、零点修正信息等。

不确定度评价应根据测流装置基本原理，利用分项分析的方式进行。不确定度来源应包括截面面积（含底部不平影响、水位计偏差等）、声道几何参数、传播时间及时间差测量、流量积分算法（含底部和顶部盲区折算）等。各分项分别评估后，按照方和根方法计算测流装置的总不确定度。

按照本规范设计和施工的测流装置，最大水位条件下正常工作时流量测量的扩展不确定度通常在 2%~5%之间。随着水位下降，流量不确定度会增大。应根据不同运行工况分别给出不确定度评价结果。

7.2 首次测流数据报告

首次测流数据报告具体包括：

- 各声道超声波形的图形表达，以及信号强度和质量指标等；
- 记录一段时间内瞬时流量和水位的波动过程，统计流量均值和标准差，以及超声测量次数和各声道数据有效率；
- 各声道声速分布，统计一段时间内的均值和标准差；
- 各声道流速分布，统计一段时间内的均值和标准差；
- 各水位计的测量结果，统计一段时间内的均值和标准差；
- 走航式 ADCP 比测分析数据（如有）。

7.3 周期性测流数据报告

周期性测流数据报告应导出主机存储的历史数据进行分析，必要时还可新增高频次诊断数据进行分析。如具备条件可在远程平台上导出，实现测流装置的远程计量评价。

周期性测流数据报告应包括首次测流数据报告中除参数设置之外的所有部分，并重点关注各声道信号强度与质量与上次相比是否有变化，水位计的一致性、各声道声速的一致性，流速分布规律是否变化、是否出现声道缺失等。

根据周期性测流数据报告，对测流数据的不确定度进行确认或更新，同时对测流装置提出运行维护意见。

附录 A 基本测量原理

A.1 流速测量原理

超声传播时间法通过测量超声在流体中传播的时间来计算流体的流速和流量。如图 A.1 所示，一对探头以声道长度 L、声道角 φ 安装在流道两侧，流体中超声传播速度 C 会与声道投影流速 $V_{\text{proj}}=V\cos\varphi$ 叠加，造成超声从下游到上游探头的传播时间 t_{u} 大于从上游到下游探头的传播时间 t_{d}，

$$\left.\begin{aligned} t_{\text{u}} &= L\big/\left(C-V_{\text{proj}}\right) \\ t_{\text{d}} &= L\big/\left(C+V_{\text{proj}}\right) \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{cases} V_{\text{proj}} = \left(1/t_{\text{d}} - 1/t_{\text{u}}\right)\cdot L/2 \\ C = \left(1/t_{\text{d}} + 1/t_{\text{u}}\right)\cdot L/2 \end{cases} \tag{A.1}$$

由上式可同时得到声道投影速度 v_{proj} 和声速 C，进而可以得到声道轴向流速：

$$V = \frac{V_{\text{proj}}}{\cos\varphi} = \frac{L}{2\cos\varphi}\left(\frac{1}{t_{\text{d}}} - \frac{1}{t_{\text{u}}}\right) = \frac{L}{2\cos\varphi}\cdot\frac{\Delta t}{t_{\text{d}}t_{\text{u}}} \tag{A.2}$$

式中，超声传播时间差 $\Delta t = t_{\text{u}} - t_{\text{d}}$，是超声传播时间法的关键测量参数。

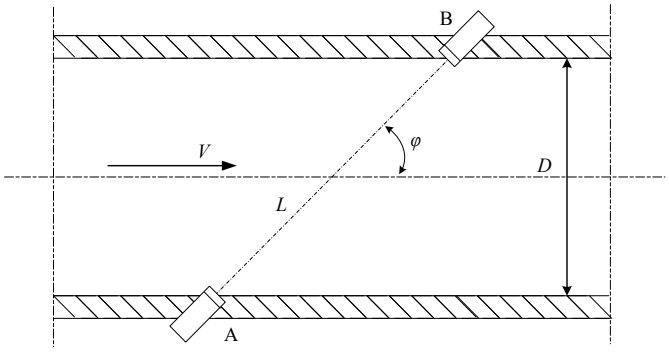


图 A.1 超声传播时间法原理示意图

声道轴向流速的计算不依赖于声速，温度和泥沙含量变化造成的声速变化不会直接影响流速的测量结果。

A.2 流量计算模型

为了得到准确的流道平均流速，需要在不同的声道高度 z_{i} 上平行布置若干声道，每条声道的声道轴向流速 V_{i} 代表其上下的一定面积内的平均流速，利用多个声道轴向速度 V_{i} 更好的估计流道的面平均流速 $\bar{V}$，结合流道面积计算得到流量，

$$Q = A\bar{V} = A\cdot f\left(V_1, V_2, \cdots, V_N\right) \tag{A.3}$$

常用的梯形明渠流量计算模型可参考 ISO 6416，根据声道高度进行分层，各层的平均流速与相应层的面积相乘得到各层流量，各层流量全部相加得到流道流量，如图 A.2 所示。其中，中间层以上下相邻两声道的流速均值为该层的平均流速，顶层和底层采用折算方法计算平均流速，顶层折算系数 K_S 和底层折算系数 K_B 的设置可参考工程经验，或利用其他方法实测流速分布廓形进行计算后得到。

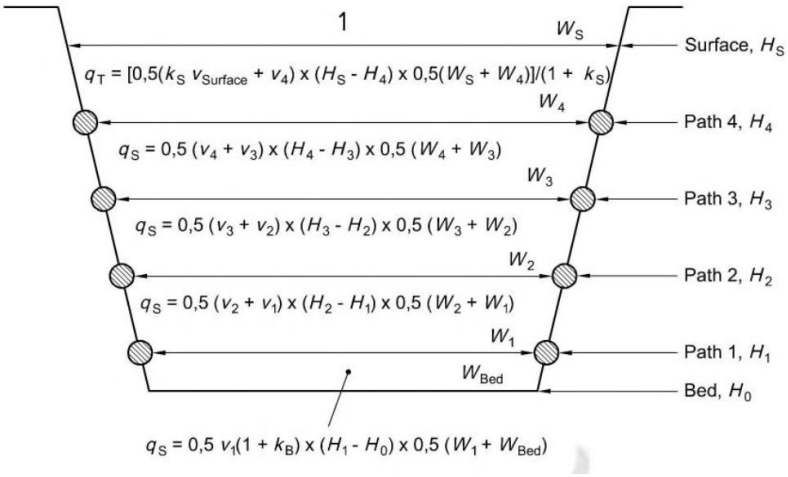


图 A.2 明渠流量计算模型（ISO 6416）

附录 B 超声传播时间测量能力测试

超声传播时间和时间差是测流装置测量的量值，传播时间的测量能力是测流装置的基础。同型号的测流装置主机和换能器具有相同的测量能力，可通过实验室测试方法评估其测量能力。

B.1 静水拖曳法测试时间差

当测流装置的主机和换能器能够送检时，对测流装置的单一声道开展静水拖曳法测试，将车速换算为标准时间差，可对测流装置的时间差测量能力进行测试。具体实施方法如下：

1) 按照测流装置现场应用条件，以尽量接近的声道长度和声道角来设计换能器固定方案；

2) 按照设计方案将一对换能器固定在拖车下方，并对实际声道长度和声道角进行精确测量，可采用激光线进行辅助定位；

3) 将实测的声道长度 L、声道角 ϕ 等参数输入装置主机，并在静水条件下进行零点修正；

4) 开展静水拖曳法拖曳实验，记录测流装置的时间差，并以车速换算的时间差为标准值进行误差分析，其中车速可按下式换算为时间差

$$\Delta t_{si} = \frac{2\cos\phi \cdot v_i \cdot t_{ui} \cdot t_{di}}{L} \tag{B.1}$$

5) 参考测流装置实际工况选择至少 5 个流速点，每点测试至少 3 遍，统计时间差测量的线性和重复性作为测流装置不确定度分析的依据。

B.2 相对位移法测试传播时间

将一对超声换能器浸没在水中，其中一支换能器可用精密导轨系统进行相对位移，其相对位移结合实测声速可换算为传播时间，从而对测流装置的传播时间测量能力进行测试。具体实施方法如下：

1) 按照测流装置现场应用条件，以尽量接近的声道长度设计换能器固定方案；

2) 按照设计方案，将一支超声换能器固定，另一支换能器安装在精密导轨系统上，导轨系统可测量精确的相对位移，相对位移范围内实测精确的声速；

3) 将实测的声道长度等参数输入装置主机，调试到可记录超声传播时间；

4) 开展相对位移法实验，记录初始状态的传播时间，计算相对位移后的传播时间增量，并以相对位移换算的传播时间增量为标准值进行误差分析；

5) 参考测流装置工况选择至少 5 个相对位移，每点测试至少 3 遍，统计传播时间增量的线性和重复性作为测流装置不确定度分析的依据。

附录 C 纯水中的声速

纯水的声速可按下式计算：

$$V=\frac{A+Bt_{\mathrm{n}}}{1+Ct_{\mathrm{n}}+Dt_{\mathrm{n}}^{2}+Et_{\mathrm{n}}^{3}+Ft_{\mathrm{n}}^{4}}\left(\mathrm{m/s}\right) \tag{C.1}$$

式中：

$t_{\mathrm{n}}=t/100$，其中 t 为温度，单位为摄氏度（℃）；

A=1402.39；

B=1478.5625；

C=0.69494542；

D=0.16618854；

E=-0.0160586；

F=0.02192692。

该式适用范围为：温度 0℃~90 ℃，标准大气压（101325 Pa）。水的声速随压强升高而增大，增幅约为 1.5×10^{-6} (m/s)/Pa，相当于每增加 1 m 水深，声速增加 1.5 cm/s。