

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 35717—2024

代替GB/Z 35717—2017

## 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机流量的测量 超声传播时间法

Discharge measurement for hydraulic turbines, storage pumps and  
pump-turbines—Ultrasonic transit-time method

2024-05-28发布

2024-12-01实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会

目 次

前言 ..... III

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 符号 ..... 3

5 测量原理 ..... 3

    5.1 基本原理 ..... 3

    5.2 超声传播时间的测量 ..... 4

    5.3 声道层平均流速的计算 ..... 4

    5.4 流量的计算 ..... 5

6 装置技术要求 ..... 6

    6.1 测量管段选择 ..... 6

    6.2 声道配置 ..... 6

    6.3 测流装置 ..... 7

7 装置安装与调试 ..... 8

    7.1 换能器定位安装 ..... 8

    7.2 几何参数测量 ..... 8

    7.3 参数配置与调试 ..... 9

8 测流数据质量评价 ..... 9

    8.1 测量不确定度 ..... 9

    8.2 定期跟踪评价 ..... 10

附录A（规范性）声道高度与权重系数 ..... 11

附录 B（规范性）流速代表性参考数据 ..... 13

附录C（规范性）圆形流道测流装置的几何参数测量 ..... 15

附录D（资料性）纯水中的声速 ..... 18

附录E（规范性）不确定度评定方法 ..... 19

附录F（资料性）超声传播时间测量能力测试 ..... 21

参考文献 ..... 22



# 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替GB/Z 35717—2017《水轮机、蓄能泵和水泵水轮机流量的测量 超声传播时间法》，与GB/Z 35717—2017相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 增加了装置参数配置与调试(见7.3)；
- 增加了测流数据定期跟踪评价(见8.2)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国水轮机标准化技术委员会(SAC/TC 175)归口。

本文件起草单位：中国计量科学研究院、国网甘肃省电力公司电力科学研究院、中国水利水电科学研究院、北京市水资源调度管理事务中心、哈尔滨大电机研究所有限公司、河海大学、中国长江电力股份有限公司、水利部农村电气化研究所、国电南瑞科技股份有限公司、水利部机电研究所、青岛清万水技术有限公司、雅砻江流域水电开发有限公司、清华大学、北京华声量测科技有限公司、西安理工大学、南京申瑞电气系统控制有限公司、东方电气集团东方电机有限公司、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、大唐水电科学技术研究院有限公司、北京唯恩传感技术有限公司、中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司、国能大渡河流域水电开发有限公司、汇中仪表股份有限公司、西华大学。

本文件主要起草人：胡鹤鸣、董开松、周叶、杨卓、孟涛、覃大清、陈红、刘源、李友平、徐伟、夏洲、潘罗平、刘秀良、冷吉强、张梁、赵越、朱德军、路鹏、郭鹏程、徐春荣、甄文喜、胡江艺、黄靖乾、朴奇焕、张海库、赵霖、段宏江、马越、陈辉、赵伟、李正贵。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 2017年首次发布为GB/Z 35717—2017；
- 本次为第一次修订。

# 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机流量的测量

## 超声传播时间法

### 1 范围

本文件描述了水轮机、蓄能泵和水泵水轮机流量测量的超声传播时间法，包括测量原理、测试方法、装置选址与选型、装置安装与调试要求、测试数据质量评价等。

本文件适用于水轮机、蓄能泵和水泵水轮机的现场流量测量，断面为圆形或矩形的有压管道，直径或等效直径不小于0.8 m。

本文件适用于采用内贴式或外插式换能器的超声传播时间法测流装置的流量测量，不适用于采用外贴式换能器的测流装置的流量测量。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 35138 封闭管道中流体流量的测量 渡越时间法液体超声流量计  
JJF 1358 非实流法校准DN1000~DN15000 液体超声流量计校准规范

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**超声传播时间法** 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。

#### 3.2

**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。

注：亦称超声探头。

#### 3.3

**内贴式换能器** built-in transducer

固定在流道内壁上的超声换能器。

#### 3.4

**外插式换能器** plug-in transducer

从流道外壁插入安装固定的超声换能器。

#### 3.5

**超声传播时间法测流装置** discharge measurement device of ultrasonic transit-time method

超声换能器直接安装在现有流道上，采用超声传播时间法进行流量测量的装置。

注：以下简称测流装置

3.6

**声道 ultrasonic path**

超声在成对的超声换能器间传播的实际路径。

注：亦称声路。

3.7

**声道长度 ultrasonic pathlength**

成对换能器之间超声在水介质中传播的实际距离。

3.8

**声道角 ultrasonic path angle**

声道与流道轴线之间的夹角。

3.9

**声道高度 ultrasonic path height**

声道相对于流道中心的高度。

注：声道高度的绝对值为声道与流道轴线之间的最短距离。以流道中心以上为正值，以下为负值，正好过流道中心的为零。相对声道高度为声道高度与半径的比值。

3.10

**声道高度角 ultrasonic path height angle**

对于圆形流道，声道高度与半径比值的正弦值对应的角度，亦即利用经纬仪进行换能器安装时的俯仰角投影到断面上的角度。

注：声道高度角的范围为 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

3.11

**换能器凸出高度 transducer protrusion height**

换能器外形最高点到内壁的垂直距离。

3.12

**凸出比 protrusion ratio**

换能器凸出高度与圆形流道断面直径(或矩形流道断面宽度)之比。

3.13

**声道层 ultrasonic layer**

声道高度相同的两个声道所在的层面。

3.14

**声道面 ultrasonic plane**

声道角相同的一组声道所在的流道斜截面。

3.15

**声道投影流速 ultrasonic path projected velocity**

测流装置利用传播时间直接测到的流速分量。

注：亦即声道上的实际流速的线平均值投影到声道方向上的分量。

3.16

**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。

注：声道轴向流速直接用于积分计算流量。

3.17

**矩形断面等效直径 equivalent diameter**

与矩形断面面积相等的圆的直径。

## 3.18

面平均流速 cross-sectional average velocity  
过流量除以过流断面面积得到的流速。

## 3.19

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。

## 3.20

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。

## 4 符号

下列符号适用于本文件。

A: 流道断面面积，单位为平方米(m<sup>2</sup>)。

B: 矩形流道断面宽度，单位为米(m)。

C: 介质声速，单位为米每秒(m/s)。

D: 圆形断面直径或矩形断面等效直径，单位为米(m)。

d<sub>i</sub>: 声道i 的声道高度，单位为米(m)。

H: 矩形流道断面高度，单位为米(m)。

L: 声道i 的声道长度，单位为米(m)。

L<sub>w,i</sub>: 声道i 的自管壁起算的声道长度，单位为米(m)。

N: 声道数。

Q: 流道断面流量，单位为立方米每秒(m<sup>3</sup>/s)。

R: 圆形流道半径，单位为米(m)。

t<sub>a</sub>: 声道i 的顺流传播时间，单位为秒(s)。

t<sub>i</sub>: 声道i 的相对声道高度。

t<sub>u</sub>: 声道i 的逆流传播时间，单位为秒(s)。

U<sub>proj,i</sub>: 声道i 的声道投影流速，单位为米每秒(m/s)。

v<sub>1</sub>: 声道i 的声道轴向流速，单位为米每秒(m/s)。

φ: 声道i 的声道角，单位为度(°)。

α: 声道i 的声道高度角，单位为度(°)。

Δt: 超声传播时间差，单位为秒(s)。

w<sub>i</sub>: 声道i 的权重系数。

## 5 测量原理

## 5.1 基本原理

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1 a) 所示，一对换能器以声道长度L、声道角 φ 安装在流道两侧，流体中声速C 会与声道投影流速v<sub>pra</sub> = vcosφ叠加，造成超声逆流传播时间t<sub>u</sub>大于顺流传播时间t<sub>a</sub>。

$$\left. \begin{aligned} t_a &= L / (C - v_{\text{proj}}) \\ t_u &= L / (C + v_{\text{proj}}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} v_{\text{proj}} = (1/t_a - 1/t_u) \cdot L/2 \\ C = (1/t_a + 1/t_u) \cdot L/2 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

由公式(1)可以得到声道轴向流速 $v$ , 见公式(2):

$$v = \frac{v_{\text{proj}}}{\cos\varphi} = \frac{L}{2\cos\varphi} \left( \frac{1}{t_c} - \frac{1}{t_u} \right) = \frac{L}{2\cos\varphi} \cdot \frac{\Delta t}{t_c t_u} \dots\dots\dots (2)$$

式中, 超声传播时间差 $\Delta t=t_u-t_c$ , 是超声传播时间法的关键测量参数。

声道轴向流速的计算不依赖于声速, 介质声速变化不会直接影响流速的测量结果。

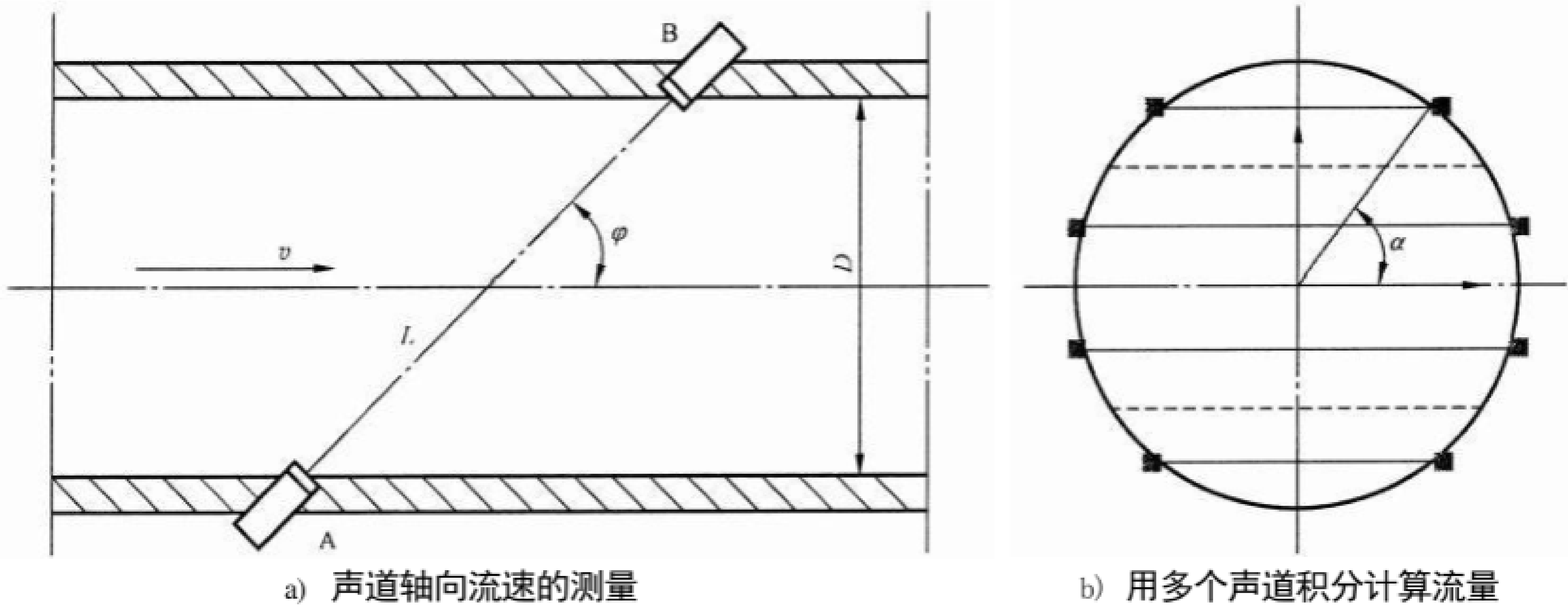


图 1 超声传播时间法原理示意图

在实际应用中, 经常在流道中不同声道高度 $z$ ; 上平行布置若干声道。如图1 b) 所示, 每条声道的声道轴向流速 $v$ ;代表其上下一定面积内的平均流速, 利用多个声道轴向流速 $v$ ;更好地估计流道的面平均流速 $v$ , 进而得到流道的流量 $Q$ , 见公式(3):

$$Q=Av=Af \cdot (v_1 ,v_2 ,..., Un) \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- A ——流道断面面积;
- N——声道数。

5.2 超声传播时间的测量

测流装置声道长度通常在米量级, 超声传播时间通常在毫秒量级, 时间差通常在微秒量级, 时间差的测量准确度要求要远高于传播时间。测流装置采用过零检测、波形相关分析等方法测量传播时间和时间差, 应提高单位时间内的采样次数进行多次平均处理。

测流装置需要测量换能器之间水介质中的超声传播时间来计算声道轴向流速, 主机应消除信号电缆中的信号传播时间、换能器匹配层中的传播时间、电子设备中的信号处理时间等造成的时间延迟。

5.3 声道层平均流速的计算

测流装置所处流道可能具有较强的横向流动, 交叉声道面配置可有效削弱横向流动的干扰。

声道投影流速与垂直于声道面的流速分量无关, 假设声道层内两声道上的线平均流速分量相等, 其流速矢量记为 $v_a$ , 与流道轴向的夹角记为 $\theta$ , 如图2所示。  $T_{sc}$  可分解为轴向流速 $v_a$  和横向流速 $v_h$ , 其中  $v$  是测流装置希望测到的声道轴向流速。当存在横向流速  $v_h$  时, 测到的声道投影流速分别为  $0p_s.A=v_s\cos(\theta+0)$  和  $v_{pa,B}=V\log\cos(\theta p-0)$ , 进一步换算到A、B两声道面的声道轴向流速见公式(4)和公式(5):

$$VA=V_{\text{layer}} \cos(\theta A+0)/\cos\theta A \dots\dots\dots (4)$$



$$UB=Vlayercos(\varphi s-\theta)/cos\varphi B \dots\dots\dots (5)$$

利用几何计算可得到待测声道轴向流速见公式(6)：

$$vax=Vlayercos\theta=(vAtangs+vptangA)/(tan\varphi A+tan\varphi s) \dots\dots\dots (6)$$

当声道角  $\varphi A=\varphi B$ 时，可以简化为公式(7)：

$$Vax=(vA+vB)/2 \dots\dots\dots (7)$$

如果采用单声道面配置，将存在较大的流速测量误差，利用交叉声道面可以有效提高测流装置的准确度。

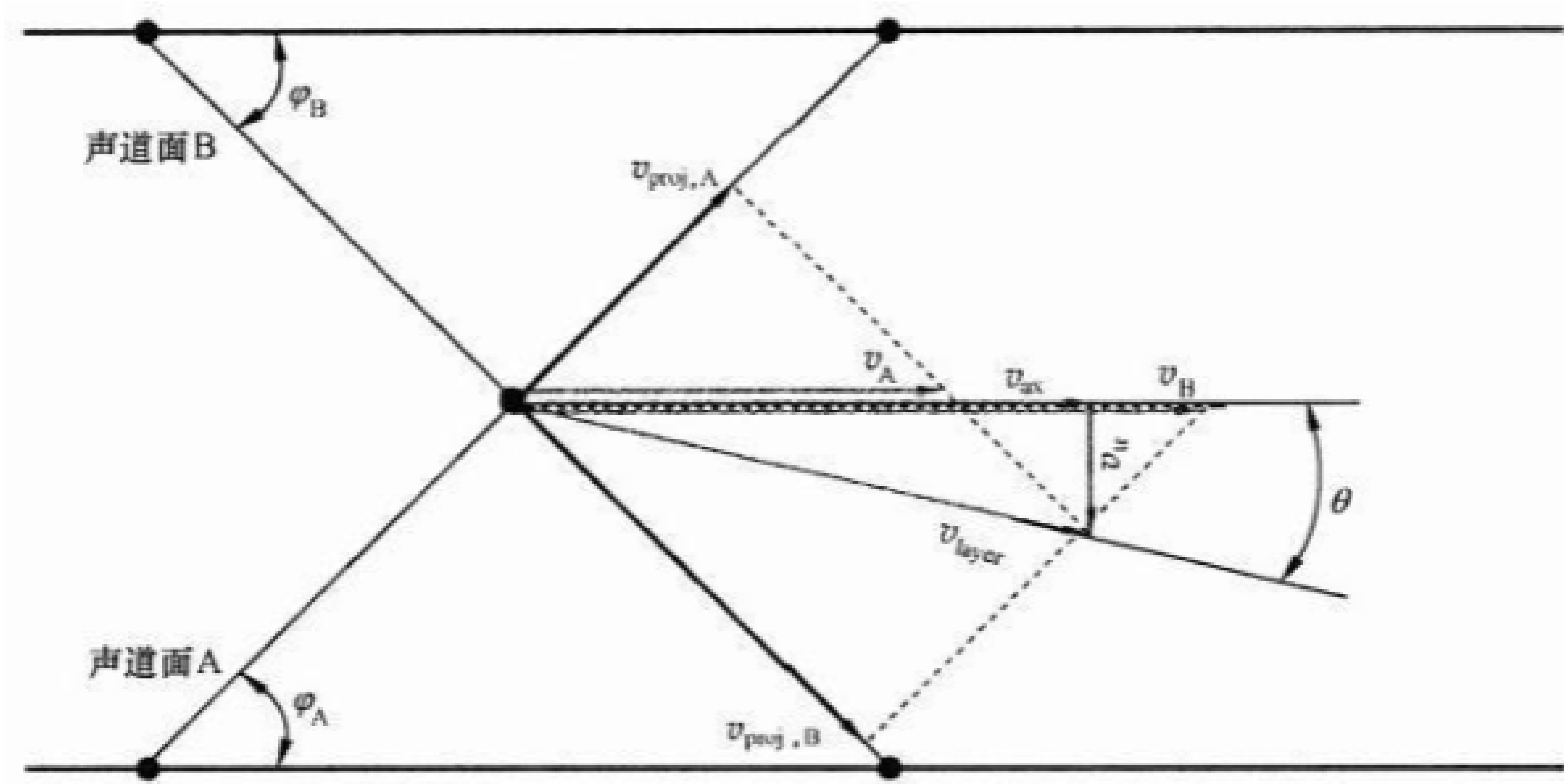


图 2 存在横向流动时声道轴向流速示意图

换能器安装时通常会凸出于流道边壁，如图3所示。换能器凸出将造成：

- a) 换能器附近流动存在旋涡，局部声道投影流速与无换能器时相比存在明显差异；
  - b) 声道轴向流速实际采样范围L 与预期采样范围L<sub>w</sub>(边壁到边壁的距离)不同。
- 两者均直接影响声道轴向流速的测量，导致流量测量的系统偏差。

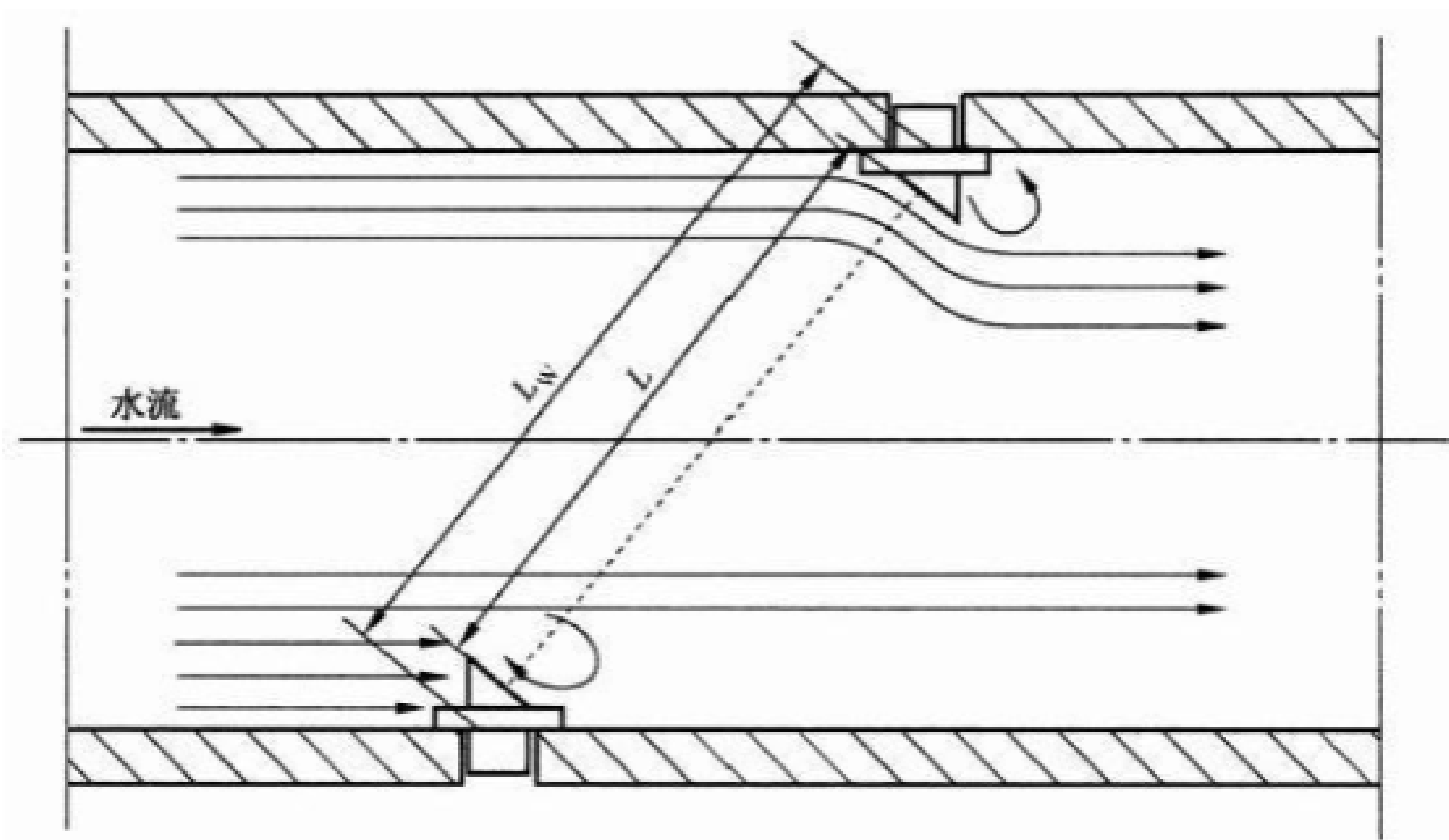


图 3 换能器凸出影响示意图

5.4 流量的计算

测流装置在不同声道高度z;上平行布置若干声道，来测量声道轴向流速并计算流量，如图1 b) 所示。通常用相对声道高度 $t_i=d/R$  (圆形流道，R 为其半径)、 $t_i=d/(H/2)$  (矩形流道，H 为其高度) 来表征声道的安装位置，其中圆形流道还可使用声道高度角  $\alpha_i=\arcsin t_i$  来描述相对声道高度。相对声道高度应符合附录A 的要求，换能器应严格按照表A. 1安装。

圆形流道通常采用高斯-雅克比积分法(Gauss-Jacobi) 和圆形优化积分法(OWICS) 计算流量, 后者考虑了边壁附近的零流速, 系统偏差略小, 对于充分发展的流动具有一定优势。表 A.1 给出了两种方法在相同的声道高度布置条件下的权重系数w, 流量Q 采用加权平均的方式按公式(8) 计算。

$$Q = R \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot v_i \cdot L_{w,i} \sin \varphi_i = 2R^2 \sum_{i=1}^N \omega_i \cos \alpha_i \cdot v_i \quad \dots\dots\dots (8)$$

若令 $W_i = w_i \cos \alpha_i$ , 流量计算还可简化为公式(9)。

$$Q = 2R^2 \sum_{i=1}^N W_i \cdot v_i \quad \dots\dots\dots (9)$$

高斯-雅克比积分法的相对声道高度和权重系数还可以表达为公式(10)。

$$t_i = \cos \frac{i \pi}{N + 1}, \quad i=1,2,\dots,N \quad \dots\dots\dots (10)$$
$$W_i = \frac{\pi}{N + 1} \sin^2 \frac{i \pi}{N + 1}$$

矩形流道采用高斯-勒让德法积分法(Gauss-Legendre) 和矩形优化积分法(OWIRS) 计算流量。

$$Q = \frac{BH}{2} \cdot \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot v_i \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中:

B——矩形流道宽度。

对于交叉声道面配置的测流装置, 宜先按公式(6)或公式(7)对同一层的两个声道轴向流速  $v_{A,i}$ 和  $v_{B,i}$ 进行平均, 计算声道层平均流速, 再按公式(9)和公式(11)进行加权求和计算流量Q。

6 装置技术要求

6.1 测量管段选择

测流装置换能器安装位置的选择, 尽可能远离扰流区(如产生速度分布不对称、旋涡或大范围紊流的弯曲段), 尽可能减少或消除干扰测流装置信号质量的气泡、沉淀物和噪声等。

测流装置换能器安装优先选择暴露式钢管部位, 以便采用外插式换能器。在可选圆形流道和矩形流道的情况下, 应优先选择圆形流道安装, 典型情况如下。

- 对于中高水头混流式水轮机, 测流装置宜选择安装在蜗壳前的压力钢管水平直管段上
- 对于蓄能泵, 测流装置宜安装在直管段最长的圆形压力钢管上; 若无圆形流道, 也可安装在上游渐变矩形流道内, 但其测量不确定度会有较大增加。
- 对于水泵水轮机, 测流装置可安装在蜗壳前的压力钢管水平直管段上, 或尾水管进出口流道内。

超声测流装置的前后直管段长度宜满足前10D 后 3D(前后直管段长度计算时, 以所有换能器的中心断面为参照), 对于水泵水轮机宜满足前10D 后 1 0D。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, 可按照附录B 中的方法进行评价。

6.2 声道配置

本文件最低配置要求为双面交叉4声道(8声道)。无法满足6.1中的直管段条件时, 宜采用更多的声道以提高复杂流场条件下的面平均流速准确度, 并宜对流道内的流速分布进行流体仿真分析或模型试验测试, 以确定最适合的声道高度和权重系数。

圆形流道和矩形流道换能器的典型布置分别如图4和图5所示。声道层宜在水平方向布置。声道角宜在36°~75° 范围内进行设计, 直管段长度较短时可采用较大的声道角。

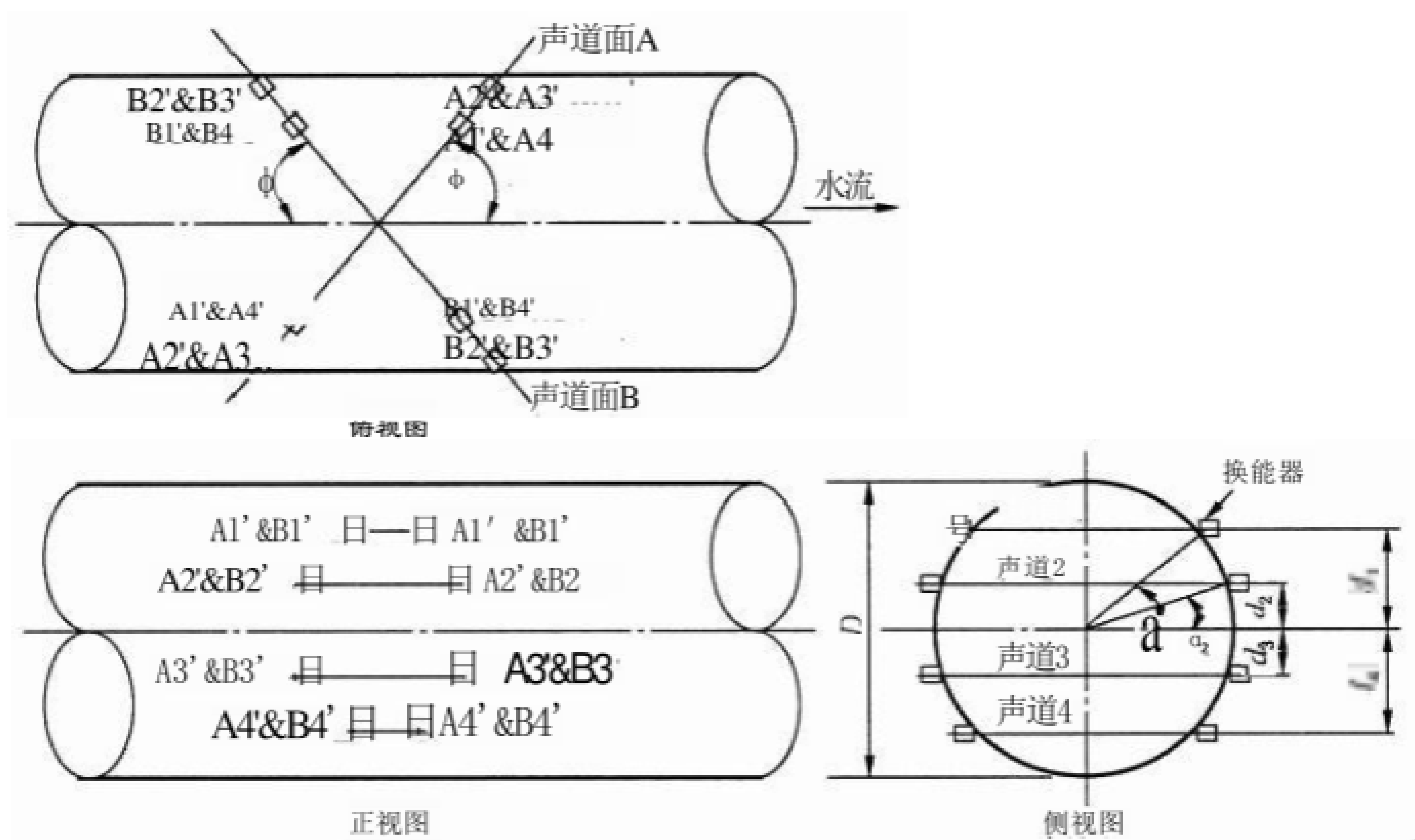


图 4 圆形流道双面交叉4声道布置

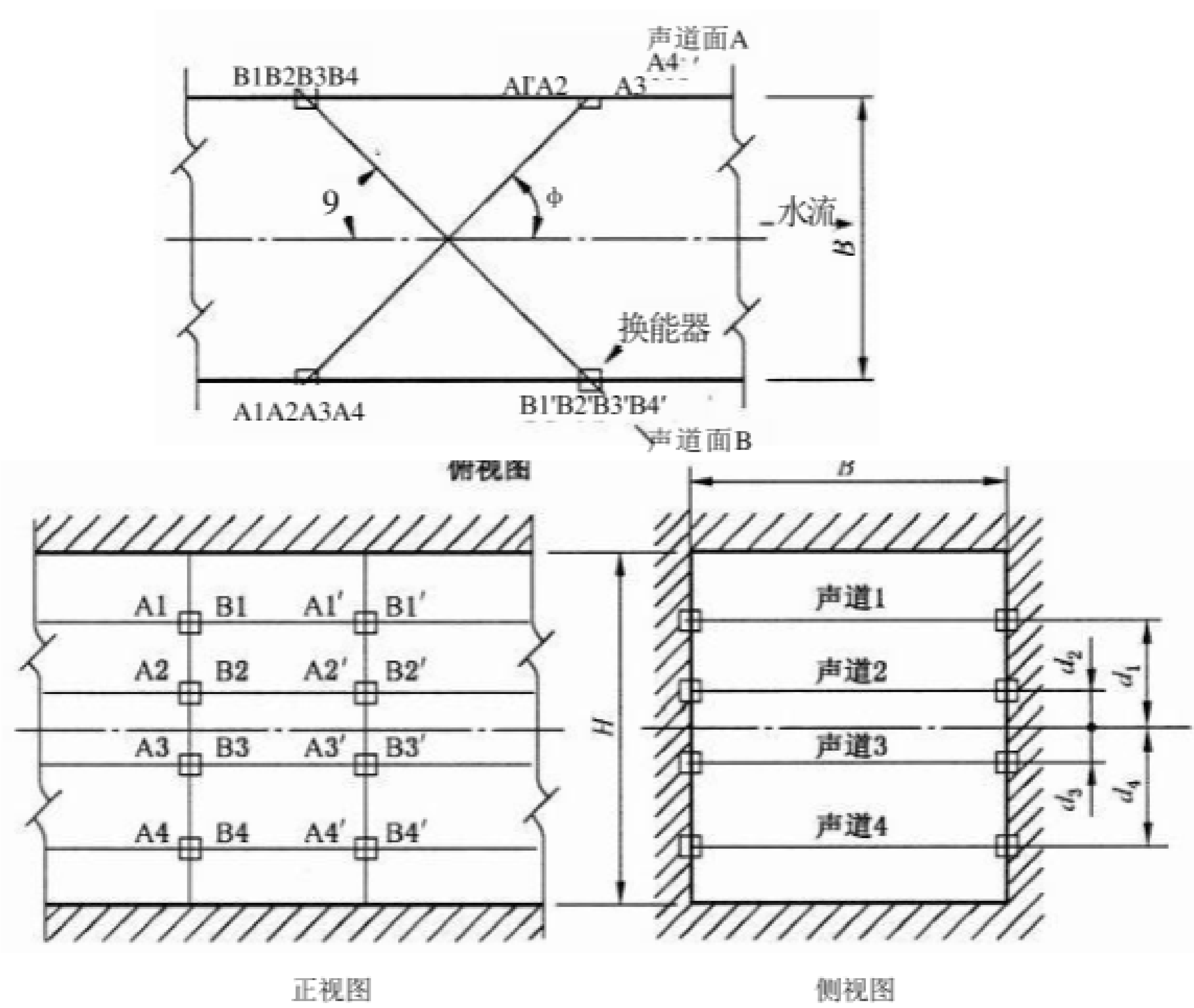


图 5 矩形流道双面交叉4声道布置

6.3 测流装置

测流装置应在测量管段选择和声道配置确定的情况下进行选型。

测流装置换能器有外插式和内贴式两种安装形式，应优先选择外插式换能器。外插式换能器安装到管道外壁，配有专门的换能器安装座，换能器凸出壁面较少，产生的扰流效应也较小，且可在带水条件下更换换能器；内贴式换能器安装到管道内壁，信号电缆经穿缆器引出，换能器及穿线管都会存在扰流效应。

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。应按照附录B 对换能器凸出影响进行评估或修正。

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。测流装置主机选型应满足以下要求：

- 单台主机具有至少8声道测量能力；
- 超声传播时间差的测量精度优于1 ns；
- 主机中流量积算模型的权重系数可见，且可根据实测声道高度进行配置，流量积算模型具有合理的声道缺失补偿算法；
- 具备超声波形显示和诊断功能，具有信号质量指标体系；
- 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。水中的气泡、泥沙、杂质、环境噪声等可能引起超声信号大幅衰减和失真，造成部分数据错误或缺失，在换能器和主机选择时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的信号有效。

## 7 装置安装与调试

### 7.1 换能器定位安装

外插式换能器定位参照管道外部特征进行，分为斜插式和直插式两种，前者精度较高，且不需要手动旋转对正，宜优先采用。内贴式换能器定位参照管道内部轴线进行。

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。换能器定位安装应由专业人员进行，宜采用全站仪等三维测量设备进行辅助定位。内贴式换能器，也可采用经纬仪与钢卷尺相结合的方式。换能器应安装到预期位置，声道角偏差应不大于 $2^{\circ}$ ，相对声道高度偏差应不大于0.05。

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。外插式换能器线缆不在流道内，可避免对流场的扰动。对于内贴式换能器，信号电缆护管直径与流道直径(或等效直径)之比宜不大于1:50，沿周长方向的信号电缆护管应布置在测量断面下游侧，且到最近的换能器的距离应大于1D。

同一声道的一对换能器宜采用相等长度的线缆。线缆长度存在明显差异时，应能提供静水条件进行零点修正。

### 7.2 几何参数测量

几何参数是测流装置流量积算模型的基础数据，包括管道半径(矩形流道则为宽度和高度)、声道长度、声道角、声道高度等。

几何参数测量方法分为流道内部测量法和流道外部测量法，应按照附录C 中的方法，由专业人员实施测量，并优先选择流道内部测量法。几何参数宜采用全站仪等三维测量设备进行测量，通过扫描流道形状建立虚拟管道轴线，无需实物靶板。内部测量法可采用经纬仪进行测量，需要搭建实物靶板。

流道直径应在测量断面内确定，测量范围应包围所有换能器。采用三维坐标测量时，壁面采样点不少于50个；采用经纬仪测量时，至少等间距测量5个截面，每个截面测量不少于6次等分直径，如图6所示。

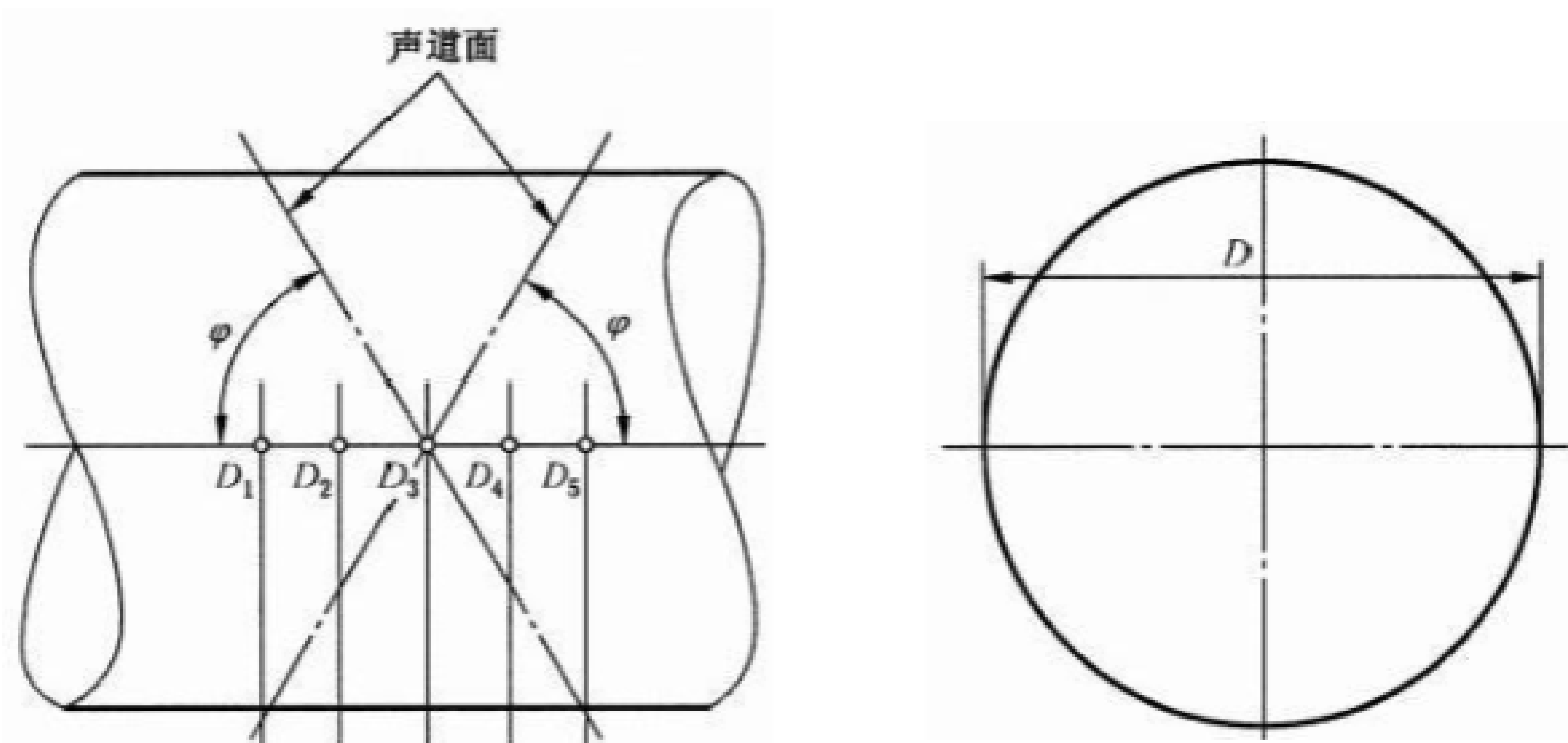


图6圆形流道直径测量位置示意图

7.3 参数配置与调试

- 换能器安装完成后应根据现场安装情况整理确定流量积算模型的参数，包括：
- 几何参数：圆形流道半径(或矩形流道宽度、高度)、声道长度、声道角；
  - 权重系数：根据实测声道高度计算的权重系数；
  - 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。
- 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，由温度换算声速见附录D 中公式(D. 1)，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，包括流动分布的对称性、双声道面流速分布的一致性等；
  - 如有明确的静水条件，应在静水条件下进行零点流速修正。
- 首次调试完成后，应出具测流装置的安装调试报告，包括：
- 装置参数配置，包括几何参数、权重系数、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；
  - 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的波动过程，统计其均值和标准差；
  - 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。

8 测流数据质量评价

8.1 测量不确定度

测流装置在安装调试完毕并经过一段时间的试运行后，应在安装调试报告基础上，进行测流装置不确定度评价工作。

根据测流装置基本原理，其不确定度来源主要包括传播时间及时间差测量、几何参数测量、流速代表性等三项，见表2。不确定度评价方法应符合JJF 1358,各分项分别评估后，按照方和根方法可以计算测流装置的总不确定度，具体评估方法应符合附录E。测流装置未达到规定安装条件时，流速代表性

引入的不确定度难以准确评估，宜采用模型试验、数值仿真等方法进行评价。

表 2 测流装置不确定度评价项目

项 目		评价方式	具体方法描述
传播时间及时间差测量引入的不确定度	超声波形质量检查	现场静水条件下检查与测试	
	非水介质延时检查		
	零点流速检查		
	声速及其一致性检查		
	传播时间差测量能力测试	将同型号的主机和换能器送实验室检测	附录F
	传播时间测量能力测试		
几何参数测量引入的不确定度	流道面积	针对已安装的换能器，现场复测其几何参数	附录C
	声道长度		
	声道角度		
	声道高度		
	水压及温度变化影响		
流速代表性引入的不确定度	直管段长度影响评价	根据现场安装信息进行评估，或开展模型试验/数值仿真分析评估	附录B
	换能器凸出效应评价		
	流速分布合理性检查		
	流量计算模型检查		

测流装置采用交叉4声道配置，其流量测量的扩展不确定度估计在1.0%~2.0%之间，见GB/T 20043—2005。按照本文件设计和施工的超声测流装置，正常工作状态下流量测量的扩展不确定度通常为2%左右，具体数值应以严谨的不确定度评价结果为准。

8.2 定期跟踪评价

测流装置应在首次全面评价的基础上，进行定期的原始数据跟踪评价，以确定测流装置是否处于正常工作状态。跟踪评价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。

跟踪评价主要包括超声波形质量检查、声速分布的一致性、流速分布规律是否变化、是否出现声道缺失、零点是否变化等。根据跟踪评价结果，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。

如流道上安装了其他在线测流装置，如水轮机工况蜗壳压差、水泵工况进水肘管压差等，宜用超声测流装置对其定期比对，以校核两者数据的有效性。

附录 A  
(规范性)  
声道高度与权重系数

A.1 典型声道配置

除图4和图5的圆形流道和矩形流道交叉4声道配置(8声道)外，典型的声道配置还包括交叉5声道(10声道)、交叉9声道(18声道)。

A.2 相对声道高度及权重系数

换能器应精确安装在设计的相对声道高度位置上，可按照表A.1 中的权重系数加权求和计算流量。对于圆形流道，表A.1按照高斯-雅克比积分法给出相对声道高度和声道高度角，并分别给出两种不同积分法在该声道高度下的权重系数；对于矩形流道，表 A.1 按照高斯-勒让德积分法给出相对声道高度，并分别给出两种不同积分法在该声道高度下的权重系数。在此基础上，可以按照公式(8)和公式(11)分别计算圆形流道和矩形流道的流量。

表 A.1 相对声道高度与权重系数

声道数 N	序号 i	圆形流道				矩形流道		
		相对声道高度 t <sub>i</sub>	声道高度角 a	权重系数w		相对声道高度 t	权重系数w	
				高斯-雅克比积分法	圆形优化积分法		高斯-勒让德积分法	矩形优化积分法
4	1	0.809017	54.00	0.369316	0.365222	0.861136	0.347855	0.336984
	2	0.309017	18.00	0.597566	0.598640	0.339981	0.652145	0.655527
5	1	0.866025	60.00	0.261799	0.258135	0.906180	0.236927	0.228094
	2	0.500000	30.00	0.453450	0.455836	0.538469	0.478629	0.485402
	3	0.000000	0.00	0.523599	0.521504	0.000000	0.568889	0.562705
6	1	0.900969	64.29	0.194727	0.192460	0.932470	0.171324	0.165695
	2	0.623490	38.57	0.350885	0.351849	0.661209	0.360762	0.363690
	3	0.222521	12.86	0.437547	0.437269	0.238619	0.467914	0.467005
7		0.923880	67.50	0.150279	0.148296	0.949108	0.129485	0.124840
	2	0.707107	45.00	0.277680	0.278885	0.741531	0.279705	0.283085
	3	0.382683	22.50	0.362807	0.361873	0.405845	0.381830	0.379019
	4	0.000000	0.00	0.392699	0.393562	0.000000	0.417959	0.420611
8		0.939693	70.00	0.119388	0.117966	0.960290	0.101229	0.097845
	2	0.766044	50.00	0.224375	0.225064	0.796666	0.222381	0.224377
	3	0.500000	30.00	0.302300	0.301961	0.525532	0.313707	0.312642
	4	0.173648	10.00	0.343763	0.343866	0.183435	0.362684	0.363020
9	1	0.951057	72.00	0.097081	0.095849	0.968160	0.081274	0.078403
	2	0.809017	54.00	0.184658	0.185362	0.836031	0.180648	0.182700
	3	0.587785	36.00	0.254160	0.253670	0.613371	0.260611	0.258953
	4	0.309017	18.00	0.298783	0.299176	0.324253	0.312347	0.313833
		0.000000	0.00	0.313159	0.313796	0.000000	0.330239	0.328802
注：表中只给出声道高度非负的一半声道，另一半声道与之呈镜面对称，声道高度和高度角变为负号，权重系数不变。								

A.3 实测声道高度下的权重系数

换能器安装后复测时，声道高度通常会与设计值存在一定差异，宜根据实测的声道高度修正相应的权重系数。对于交叉声道面测流装置，如同一声道层的两声道存在差异，可采用先平均声道轴向流速后积分计算流量的方式，此时需要将声道高度也做平均处理，即 $t_1=(t_A, +t_P, i)/2$ 。

本文件中的积分法可共用一套权重系数修正的解析表达式，参数 $k$  对不同的积分法具有不同的值。

$$\omega_i = \sum_{j=1}^{[(N+1)/2]} g_j(\kappa) \cdot f_j(\{t_{k=1,...,N \text{ and } k \neq i}\}) / \left[ (1-t_i^2)^* \prod_{j=1, j \neq i}^N (t_i - t_j) \right] \dots\dots\dots(A.1)$$

式中，参数  $g_j(\kappa) = \int_{-1}^1 (1-x^2)^* x^{2(j-1)} d\tau$  ,其数值可查表A.2;f;({ta}) 为  $\prod_{m=1}^{N-1} (t - t_m)$  展开后的  $N+1-2j$  次方项。

注： f;({ta}) 在MATLAB中表达为f;({tA})=sum(prod(nchoosek({ta},j),2))。

表 A.2 权重系数修正公式(A.1) 中的系数

积分方法	圆形流道		矩形流道	
	高斯-雅克比积分法 r=0.5	圆形优化积分法 r=0.6	高斯-勒让德积分法 k=0	矩形优化积分法 k=0.15
gi(c)	1.570796	1.513365	2	1.837286
g2(x)	0.392699	0.360325	2/3	0.556753
g2(e)	0.196350	0.174351	2/5	0.315143
g4(c)	0.122718	0.106311	2/7	0.215852
gs()	0.085903	0.072959	2/9	0.162469

特别地，对于典型的交叉4声道和9声道配置，其权重系数修正公式分别见公式(A.2) 和公式(A.3)。

$$\omega_i = \left[ -g_2(\kappa) \sum_{k=1, k \neq i}^4 t_k - g_1(\kappa) \prod_{k=1, k \neq i}^4 t_k \right] / \left[ (1-t_i^2)^* \prod_{k=1, k \neq i}^4 (t_i - t_k) \right] \dots\dots\dots(A.2)$$

$$\omega_i = \left[ g_5(\kappa) + g_4(\kappa) \sum_{\substack{k,j=1 \\ k < j \\ k,j \neq i}}^5 t_k t_j + g_3(\kappa) \sum_{\substack{k,j,l,m=1 \\ k < j < l < m \\ k,j,l,m \neq i}}^5 t_k t_j t_l t_m + g_2(\kappa) \sum_{\substack{k,j,l,m,n,o=1 \\ k < j < l < m < n < o \\ k,j,l,m,n,o \neq i}}^5 t_k t_j t_l t_m t_n t_o + g_1(\kappa) \prod_{k=1, k \neq i}^5 t_k \right] / \left[ (1-t_i^2)^* \prod_{k=1, k \neq i}^5 (t_i - t_k) \right] \dots\dots\dots(A.3)$$

对于圆形流道，若测流装置采用公式(8)计算流量，权重系数应设置为w;；若采用公式(9)计算流量，权重系数应设置为Wi=w;cOsa;。



附录 B  
(规范性)  
流速代表性参考数据

B.1 概述

测流装置所在流场对其流量测量结果的影响可用流速代表性来描述。其一是面流速代表性，描述的是声道高度方向上有限个声道层流速采样加权平均结果与面平均流速的差异；其二是线流速代表性，描述的是声道轴向流速和待测声道层实际轴向流速的差异。前者源自数值积分误差，流场越复杂该项影响越大，直接与上、下游直管段长度有关；后者源自换能器凸出影响以及横向流动的干扰，其中横向流动干扰也与上、下游直管段长度有关。

B.2 数值积分误差

图 B.1 给出了不同单面声道数条件下的积分误差参考范围，其中竖线代表的是统计标准差。测流装置积分误差的平均值和标准差都随着声道数的增加呈现逐渐减小的趋势。整体来看，圆形优化积分法具有一定的优势，尤其在声道数较少时优势明显。

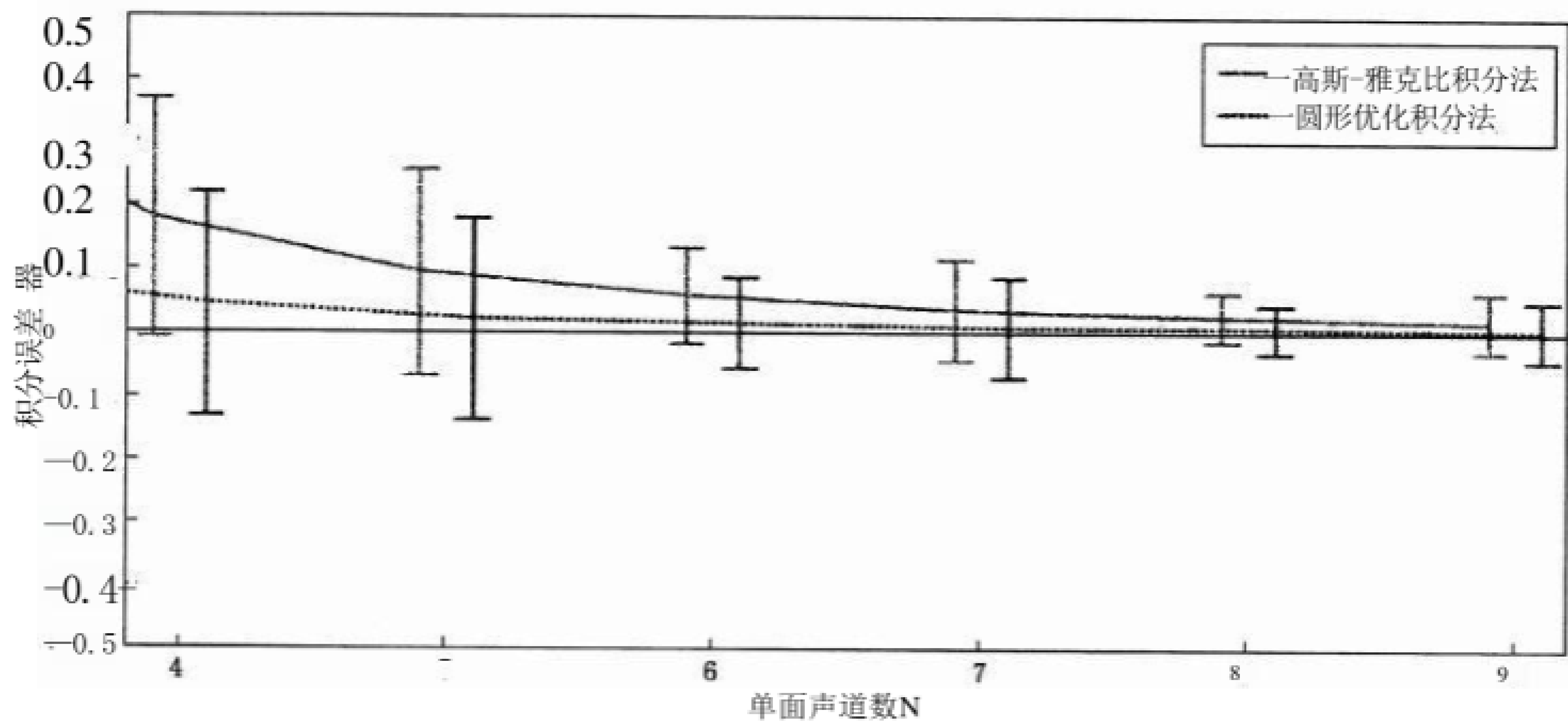


图 B.1 数值积分误差范围的参考值

B.3 直管段长度影响

扰流件影响表现为积分误差和横向流动干扰，如采用交叉声道面配置，横向流动干扰可基本抵消。测流装置典型的安装环境为水轮机蜗壳上游处；通常情况下前后直管段非常短，应采用交叉声道面配置。当直管段长度不足时应采用交叉声道面配置，且评估较大的不确定度。弯管引入的扩展不确定度可参考表B.1 中的数据

表 B.1 弯管引入的扩展不确定度参考值

直管段长度	单面声道数	扩展不确定度
上游小于2D且下游小于1D	4~5	1.50%
	8~9	1.00%
上游大于10D且下游大于3D	4~5	0.30%
	8~9	0.10%

利用流场仿真法或模型试验法可以对测流装置的扰流件影响进行修正，降低其测量不确定度。如某混流式机组中12.4 m 口径的测流装置，采用交叉9声道(18声道)配置，利用流场仿真和模型试验两种方法共同得到：扰流件影响将引起0.3%的系统偏差，修正后扩展不确定度为0.6%。

B.4 换能器凸出效应

换能器凸出会影响测流装置的系统偏差，换能器凸出比越大，引起的测量偏差越大。当换能器凸出比大于0.4%时，宜进行有效的模型试验或流体仿真来修正换能器凸出造成的系统偏差。

表B.2 给出了圆形流道和矩形流道在不同换能器凸出比时引起的系统偏差，可作为不确定度评估时的参考。

表 B.2 换能器凸出导致的系统偏差参考值

流道类型	圆形流道		矩形流道	
直径或宽度/mm	500	1000	2000	2000
换能器凸出高度/mm	7.6	7.6	7.5	43
凸出比	1.5%	0.8%	0.4%	2.2%
相对系统偏差	2.50%	1.00%	0.35%	2.80%
对于圆形流道，凸出比为各换能器凸出比的算术平均值。				

附录 C  
(规范性)  
圆形流道测流装置的几何参数测量

C.1 概述

几何参数是测流装置流量计算模型的基础数据。换能器安装完成后，应对流道直径、声道长度、声道角及声道高度等几何参数进行精确测量。当条件允许时，宜进入管道内部进行几何参数测量，可采用三维坐标测量法或经纬仪法；管道外部测量只能用三维坐标测量法。

C.2 管道内部测量法

C.2.1 三维坐标测量法

该方法利用三维坐标测量仪器采集管道壁面点和换能器中心点的三维坐标，建立空间位置关系，基于柱面拟合计算测流装置的几何参数。

对于较大流道，可用全站仪进行测量；对于全站仪无法进入的较小流道，可使用关节臂式坐标测量机等其他仪器进行测量。以全站仪为例，见图C.1，测量步骤如下：

- a) 选择合适位置在流道底部架设全站仪，使其能无遮挡的测到所有换能器中心点；
- b) 利用全站仪扫描流道内部壁面点，测点数量至少为50个，并尽量均匀覆盖换能器安装的管段范围，利用最小二乘法由内壁测点拟合流道柱面，并计算流道半径和虚拟轴线；
- c) 利用全站仪目镜对准换能器中心，逐个测量换能器坐标，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虚拟轴线，按照各自定义分别计算声道长度、声道角、声道高度；
- e) 计算多次测量的算术平均值，并结合其重复性分析不确定度。

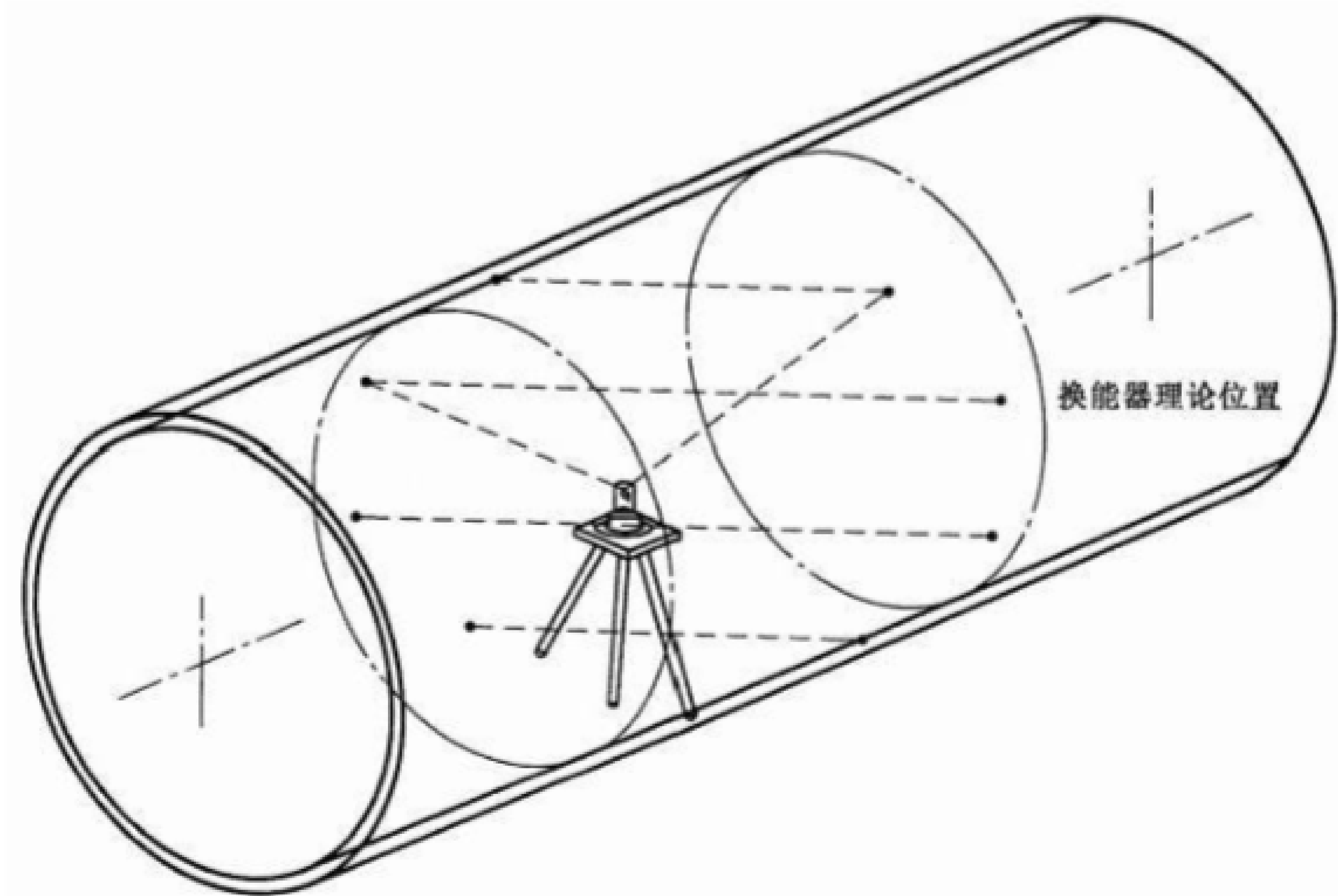


图 C.1 三维坐标测量仪器管内测量方法示意

C.2.2 经纬仪法

该方法利用经纬仪进行换能器定位安装和几何参数测量，见图C.2，具体步骤如下：

- 在换能器安装段上、下游两端固定安装靶板；
- 分别在两端靶板上绘制流道轴心，确定流道等效轴线并测量流道直径；
- 将经纬仪架固定在安装段中点，调整经纬仪使经纬仪物镜轴线与流道轴线重合；
- 利用经纬仪确定换能器的理论位置，然后对换能器凸出引起的偏移进行修正，并在设计位置安装换能器；
- 安装完毕后，利用经纬仪和钢卷尺测量声道长度、声道角、声道高度。

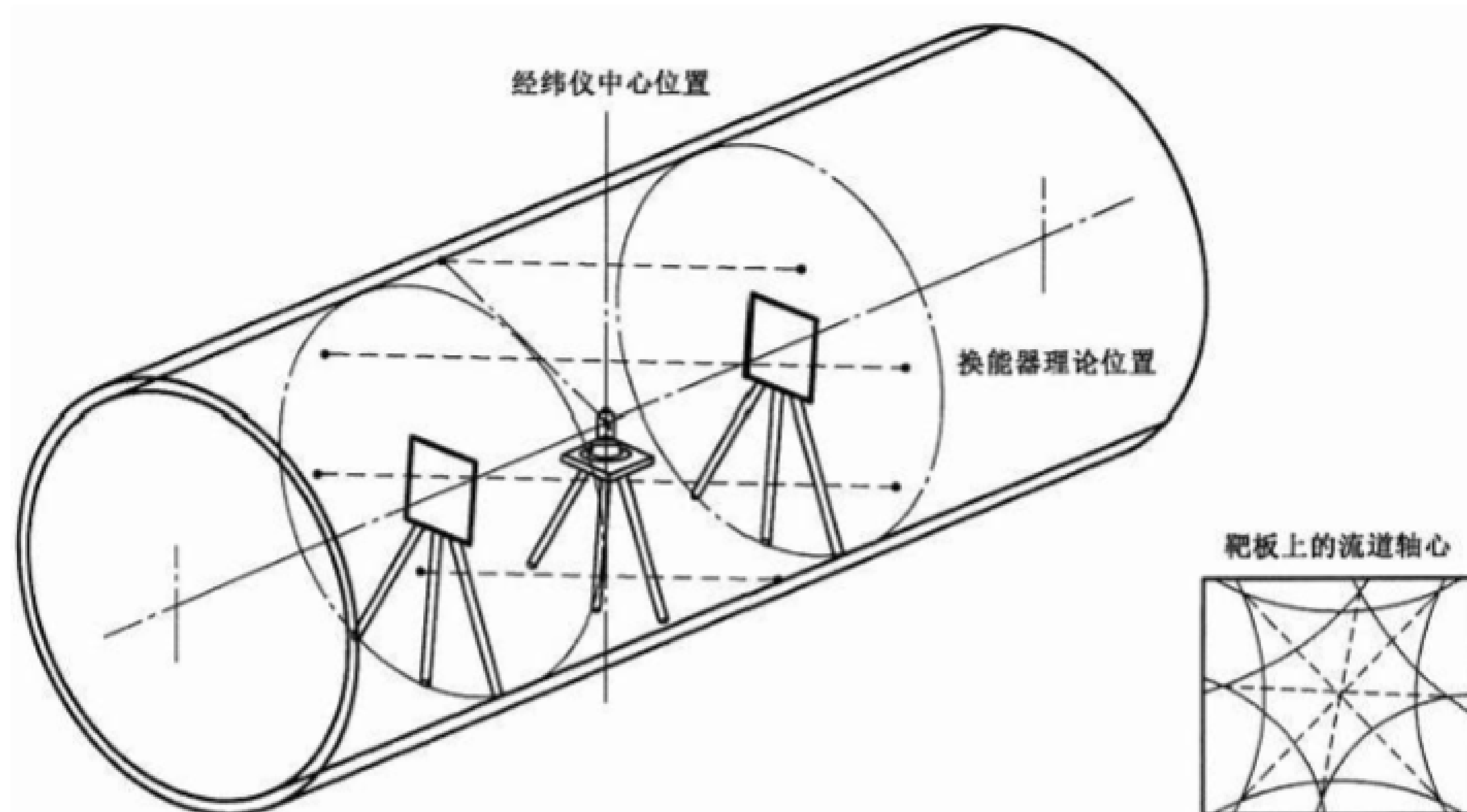


图 C.2 经纬仪测量方法示意

### C.3 管道外部测量法

该方法利用三维坐标测量仪器从管道外部采集管道壁面点的三维坐标，结合壁厚进行柱面拟合获得虚拟轴线；采集外插式换能器外部特征点的三维坐标，并向内推导换能器中心点的坐标，进而计算测流装置的几何参数，如图 C.3 所示。该方法只适用于外插式换能器。

三维坐标测量仪器宜采用激光跟踪仪(具有较好的精度)，也可采用全站仪。具体步骤如下：

- 在待测管道附近不同位置布置多个转站标记点(一般不少于8个)，为多站测量提供定位功能；
- 利用三维坐标测量仪器采集管道壁面点坐标，并拟合出现场管道，测点尽量覆盖整个管道，根据现场管道实际情况选择转站次数；
- 选择合理的外插式换能器外部特征点，以内推换能器中心点准确可靠为原则，分别在合适的测站采样换能器特征点；
- 利用三维建模软件进行管道内径、声道长度、声道角、声道高度等几何参数的计算分析。

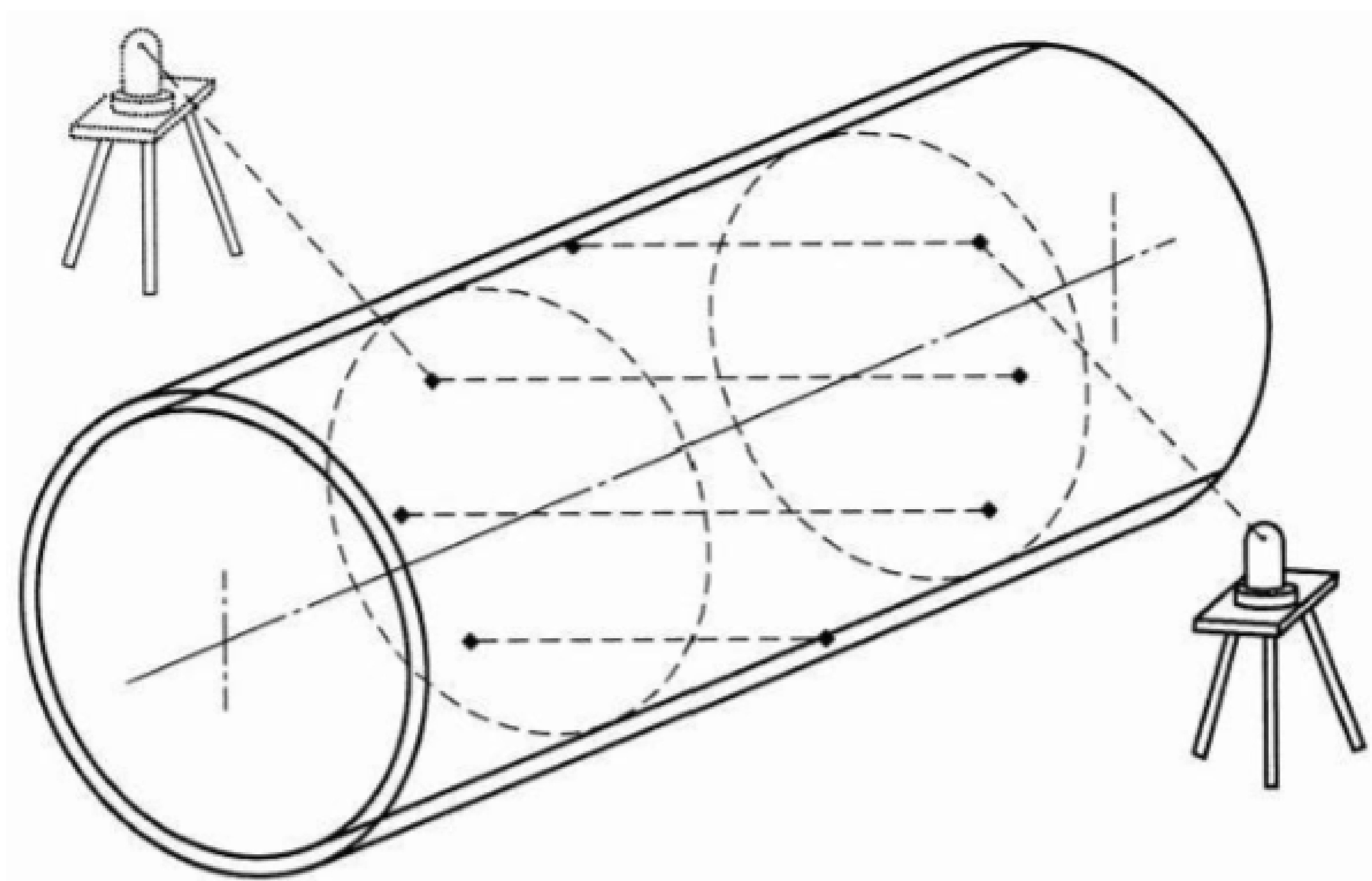


图 C.3 三维坐标测量仪器管外测量方法示意

C.4 水压和水温变化的修正

在流道内部开展几何参数测量只能在水状态下进行，测流装置实际运行时由于水压的增加将导致流道膨胀，除了直接引起直径增加外，对声道长度和声道角也有影响，对于高水头电站水压可能引起0.2%的系统偏差，应进行修正和评估。另外，测流装置在不同时间运行时的水温和水压也可能发生变化，水压变化和水温变化导致的几何参数不确定度也应进行评估。具体修正方法应符合GB/T 35138的要求。

附录 D  
(资料性)  
纯水中的声速

纯水中的声速*v* 可按公式(D.1) 计算。

$$v = \frac{A + Bt_n}{1 + Ct_n + Dt_n^2 + Et_n^3 + Ft_n^4}$$

.....(D.1)

式中：

*t<sub>n</sub>*=*t*/100, 其 中*t* 为纯水的温度，单位为摄氏度(℃)；

A=1402.39;

B=1478.5625;

C=0.69494542;

D=0.16618854;

E=—0.0160586;

F=0.02192692。

公式(D.1) 的适用条件为：温度0℃~90℃, 标准大气压(101325 Pa)。纯水中的声速随压强升高而增大，增幅约为1.5×10<sup>-6</sup>(m/s)/Pa， 相当于每增加1 m 水深，声速增加0.015 m/s。

附录 E  
(规范性)  
不确定度评定方法

E.1 数学模型

测流装置通过在测流截面上布设多对换能器，得到若干条声道线上的声道轴向速度，然后根据各声道权重不同用加权积分的方法按公式(E.1) 计算流量。

$$Q=2R^2\sum_{i=1}^Nw_i\cdot\frac{L_i}{2\cos\varphi_i}\frac{\Delta t}{t_{u,i}t_{d,i}}\dots\dots\dots(E.1)$$

测流装置的流量由几何参数、时间参数、面平均流速模型等三部分计算得到，测流装置的不确定度主要源于几何参数测量、传播时间及时间差测量、流速代表性。分别评估各分项后，按照方和根方法可以评估测流装置的总不确定度。

E.2 几何参数测量引入的不确定度

结合附录C 中的测量方法，先由测量仪器自身的不确定度和测量数据的重复性计算流道等效直径R、各声道长度L、各声道角φi的不确定度u(R)/R、u(L)/Li、u(φ;),再按公式(E.2) 进行合成。

$$\left[\frac{u_c(Q)}{Q}\right]^2=\left[2\frac{u(R)}{R}\right]^2+\left\{\left[\sum_{i=1}^Nw_iv_i\frac{u(L_i)}{L_i}\right]^2+\left[\sum_{i=1}^Nw_iv_i\tan\varphi_iu(\varphi_i)\right]^2\right\}/\left(\sum_{i=1}^Nw_iv_i\right)^2\dots\dots\dots(E.2)$$

通常，利用经纬仪测量方法进行几何参数测量引入的扩展不确定度在0.5%左右，利用全站仪测量方法进行几何参数测量引入的扩展不确定度在0.2%左右。管道外部测量法应根据实际测量情况附加一项不确定度。

E.3 传播时间及时间差测量引入的不确定度

分析现场采样数据，根据超声波形质量检查、非水介质延时检查、声速及其一致性检查等数据，进行传播时间及时间差测量引入的不确定度的评估。表E.1给出了不同声道长度和声道投影流速下的传播时间和时间差，可供评估相对不确定度时参考。

表 E.1 不同声道长度和声道投影流速下的传播时间和时间差

L/m	Uproj/(m/s)	tu/μs	ta/μs	Δt/μs
1.00	0.2	675.8	675.6	0.1826
	1.0	676.1	675.2	0.9131
5.00	0.2	3379	3378	0.9131
	1.0	3381	3376	4.565
10.00	0.2	6757	6756	1.826
	1.0	6761	6752	9.131

E.4 流速代表性引入的不确定度

E.4.1 概述

流速代表性引入的不确定度可参考附录B 中的数据。在测流装置无法满足直管段长度要求或换能器凸出比较大的情况下，建议双方协商或选择以下两种方法进行流量积算模型的修正和流速代表性引入不确定度的评估。

E.4.2 流场仿真法

根据测流装置现场流道尺寸、上下游扰流件几何形状、换能器及其安装座等，对测流装置所处流道系统内部流动进行仿真，得到测流装置处流速分布情况，可评估测流装置在该流场条件下的流速代表性。

E.4.3 模型试验法

利用相似性原理，在流量校准装置上进行测流装置的模型试验，来评估测流装置的流速代表性。



附录 F  
(资料性)  
超声传播时间测量能力测试

F.1 概述

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。

F.2 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：

- a) 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设计换能器固定方案；
- b) 按照设计方案将一对超声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；
- c) 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；
- d) 开展静水拖曳法拖曳试验，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v：可按公式(F.1) 换算为超声传播时间差Δtsi。

$$\Delta t_{si} = \frac{2\cos\phi \cdot v \cdot t_{si} \cdot t_{si}}{L} \dots\dots\dots(F.1)$$

- e) 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。

F.3 相对位移法测试传播时间

将一对超声换能器浸没在水中，其中一支超声换能器可用精密导轨系统进行相对位移，其相对位移除以实测声速可换算为标准的超声传播时间，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：

- a) 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；
- b) 按照设计方案，将一支超声换能器固定，另一支超声换能器安装在精密导轨系统上；
- c) 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；
- d) 开展相对位移法试验，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；
- e) 参考测流装置实际工况选择至少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。

## 参 考 文 献

- [1]GB/T 20043—2005 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机水力性能现场验收试验规程
- [2]GB/T 30500—2014 气体超声流量计使用中检验声速检验法
- [3]JF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示
- [4]JJG 1030—2007 超声流量计
- [5]ISO 5168:2005 Measurement of fluid flow—Procedures for the evaluation of uncertainties
- [6]ISO 6416:2017 Hydrometry—Measurement of discharge by the ultrasonic transit time (time of flight)method
- [7]ASME PTC18 Hydraulic Turbines and Pump-Turbines Performance Test Codes
- [8]E Batistal,et al.The selection of water property formulae for volume and flow calibration.Metrologia,44(2007):453-463.
- [9]H Hu,et al.Experimental study on velocity representation of ultrasonic transit-time discharge measurement in open channel.Proceeding of FLOMEKO,2016,Sydney
- [10]C Wang,et al.Accuracy of the ultrasonic flow meter used in the hydroturbine intake penstock of the Three Gorges Power Station.Flow Measurement and Instrumentation.25(2012):32-39.
- [11]胡鹤鸣, 孟涛, 王池. 扰流流场对超声流量计积分误差的影响分析. 计量学报, 32(2011): 198-202.

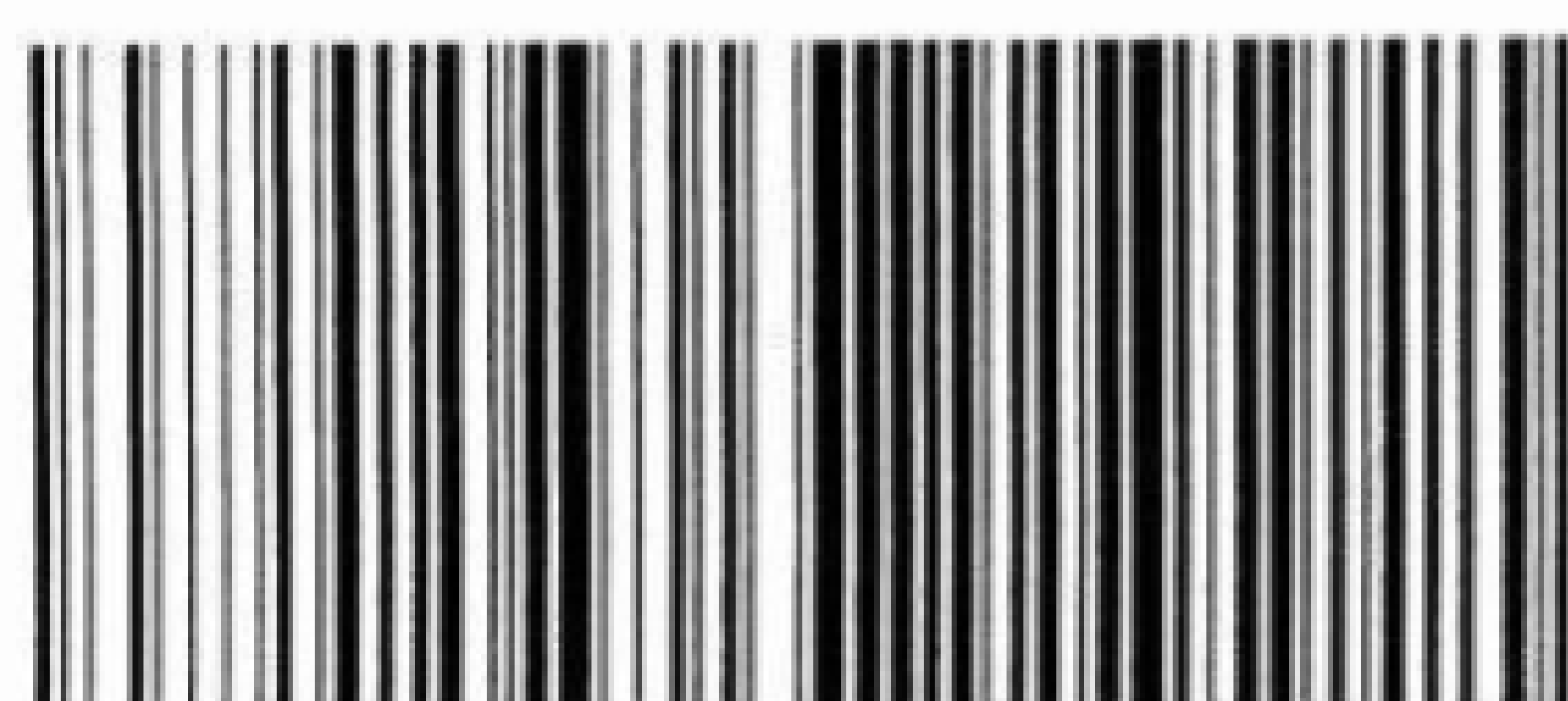
中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
水轮机、蓄能泵和水泵水轮机流量的测量  
超声传播时间法  
GB/T 35717—2024

中国标准出版社出版发行  
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)  
北京市西城区三里河北街16号(100045)  
网址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)  
总编室：(010)68533533 发行中心：(010)51780238  
读者服务部：(010)68523946  
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷  
各地新华书店经销

开本880×1230 1/16 印 张 2 字 数 4 2 千 字  
2024年5月第 一 版2024年5月第 一 次印刷

书号：155066 · 1-76058 定 价 5 4 . 0 0 元

如有印装差错由本社发行中心调换  
版权专有 侵权必究  
举报电话：(010)68510107



GB/T 35717-2024



[www.bzxz.net](http://www.bzxz.net)

免费标准下载网