

ICS

CCS 点击此处添加 CCS 号

DB 11

北京市地方标准

DB11/T XXXX—XXXX

大口径输水管涵流量监测规程—超声传播 时间法

Code for fluid flow monitoring of large diameter water transmission
pipe culvert—Ultrasonic transit-time method

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

北京市市场监督管理局 发布

目 次

前言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 符号	5
5 测量原理	5
6 监测方案设计	7
7 现场安装调试	8
8 测量不确定度评价	9
9 原始数据诊断分析	9
附录 A（规范性） 权重系数	11
附录 B（资料性） 三维坐标法几何参数测量	13

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。

本文件由北京市水务局提出并归口。

本文件由北京市水务局组织实施。

本文件起草单位：北京市河湖流域管理事务中心、北京市水资源调度管理事务中心

本文件主要起草人：

大口径输水管涵流量监测规程——超声传播时间法

1 范围

本文件规定了大口径输水管涵流量监测的测量原理、监测方案设计、现场安装调试、测量不确定度评价以及原始数据诊断分析等内容及要求。

本文件适用于大口径输水管涵流量监测，断面为封闭的圆形、矩形或异型的有压流道，直径或等效直径不小于 DN800。采用接触式超声传播时间法测流装置（以下简称测流装置）的流量监测。

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
- GB/Z 35717 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 28714 取水计量技术导则
- JJF 1001 通用计量术语及定义
- JJF 1358 非实流法校准DN1000~DN15000液体超声流量计校准规范
- JJF(京) 80 北京市水资源大口径流量计在线检测技术规范

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

利用超声波在水体中逆流传播时间与顺流传播时间之差求出声道流速，利用声道与流道轴线的投影关系求出声道轴向流速，通过积分算法计算面平均流速，进而由面平均流速与面积的乘积得到流量的方法。

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，亦称**超声探头**。

3.3

内贴式超声换能器 built-in transducer

安装固定在流道内壁上的超声换能器。

3.4

超声传播时间法测流装置 discharge measurement device of ultrasonic transit-time method
采用超声传播时间法进行流量测量的装置。

3.5

声道 ultrasonic path

超声在成对的超声换能器间传播的实际路径。

3.6

声道长度 ultrasonic path length

超声在成对的超声换能器之间传播的实际距离。

3.7

声道角 ultrasonic path angle

声道与流道轴线之间的夹角。

3.8

声道高度 ultrasonic path height

声道相对于流道中心的高度,其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,正好过流道中心为零。相对声道高度为声道高度与半径(圆形流道)或半高(矩形流道)的比值。

3.9

超声换能器凸出高度 transducer protrusion height

超声换能器外形最高点到流道内壁的垂直距离。

3.10

凸出比 protrusion ratio

超声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。

3.11

声道层 ultrasonic layer

声道高度相同的两个声道所在的层面。

3.12

声道面 ultrasonic plane

声道角相同的一组声道所在的流道斜截面。

3.13

等效直径 equivalent diameter

矩形或异形断面流道按相同面积的圆形流道换算得到的直径。

4 符号

下列符号适用于本文件。

A: 流道断面面积, 单位为 m^2 。

B: 矩形流道断面宽度, 单位为 m 。

C: 水介质声速, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

D: 圆形断面直径或其它断面等效直径, 单位为 m 。

H: 矩形流道断面高度, 单位为 m 。

L_i : 声道 i 的声道长度, 单位为 m 。

$L_{w,i}$: 声道 i 的自管壁起算的声道长度, 单位为 m 。

N: 声道数。

Q: 断面流量, 单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

R: 圆形流道半径, 单位为 m 。

t_u : 声道 i 的逆流传播时间, 单位为 s 。

t_d : 声道 i 的顺流传播时间, 单位为 s 。

$V_{\text{proj},i}$: 声道 i 的声道投影流速, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

V_i : 声道 i 的声道轴向流速, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

d_i : 声道 i 的声道高度, 单位为 m 。

t_i : 声道 i 的相对声道高度。

φ_i : 声道 i 的声道角, 单位为 $^\circ$ 。

α_i : 声道 i 的声道高度角, 单位为 $^\circ$ 。

Δt : 超声传播时间差, 单位为 s 。

ω_i : 声道 i 的权重系数。

5 测量原理

5.1 声道流速的测量

5.1.1 测流装置通过测量超声在水中传播的时间来计算流速和流量。如图 1 a) 所示, 一对超声换能器以声道长度 L 、声道角 φ 安装在流道两侧, 超声逆流传播时间 t_u 大于顺流传播时间 t_d ,

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

5.1.2 由式 (1) 可以得到声道轴向流速:

$$V = \frac{V_{\text{proj}}}{\cos \varphi} = \frac{L}{2 \cos \varphi} \left(\frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_u} \right) = \frac{L}{2 \cos \varphi} \cdot \frac{\Delta t}{t_d t_u} \quad (2)$$

式中：

超声传播时间差 $\Delta t = t_u - t_d$ 。

5.1.3 超声传播时间法能够适应不同的水体条件。

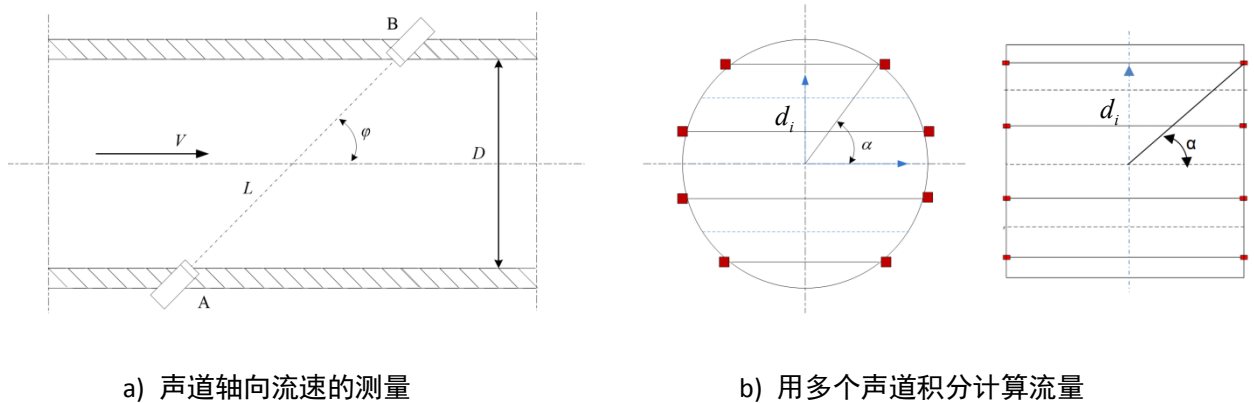


图 1 超声传播时间法原理示意图

5.1.4 超声换能器安装时通常会凸出于流道边壁，如图 1a) 所示。超声换能器凸出有两方面影响：其一，超声换能器附近流动存在旋涡，局部声道投影流速与无超声换能器时存在明显差异；其二，声道轴向流速实际采样范围（超声换能器端面之间的距离）与预期采样范围（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。对于超声换能器凸出比小于 0.2% 的情况，凸出效应可以忽略，否则需在流速计算时予以修正。

5.2 管涵流量的计算

5.2.1 测流装置在不同的声道高度平行布置若干声道，来测量声道轴向流速并计算流量，如图 1b) 所示，通常用相对声道高度 $t_i = d_i/R$ （圆形流道， R 为其半径）、 $t_i = d_i/(H/2)$ （矩形流道， H 为其高度）来表征声道的安装位置，其中圆形流道还可用声道高度角 $\alpha_i = \arcsin t_i$ 来描述相对声道高度，见附录 A 的表 A.1，超声换能器应严格按照表 A.1 安装。

5.2.2 圆形流道通常采用高斯-雅可比积分法 (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。对于异形流道，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 ω_i ，流量采用加权平均的方式计算如下：

$$Q = R \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot V_i \cdot L_{w,i} \sin \varphi_i = 2R^2 \sum_{i=1}^N \omega_i \cos \alpha_i \cdot V_i \quad (3)$$

若令 $W_i = \omega_i \cos \alpha_i$ ，流量计算还可简化为：

$$Q = 2R^2 \sum_{i=1}^N W_i \cdot V_i \quad (4)$$

$$t_i = \cos \frac{i\pi}{N+1}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$W_i = \frac{\pi}{N+1} \sin^2 \frac{i\pi}{N+1}$$
(5)

5.2.3 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:

$$Q = \frac{BH}{2} \cdot \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot V_i$$
(6)

5.2.4 相同声道高度布置下, 两种方法的权重系数 ω_i 见表 A.1。

5.2.5 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。对于交叉声道面配置的测流装置, 宜先对各声道轴向流速进行平均计算声道层平均流速, 再进行加权求和计算流量。

6 监测方案

6.1 监测位置

测流装置超声换能器安装位置应选择不易淤积的位置, 宜远离扰动区, 包括可能产生速度分布不对称、旋涡或大范围紊流的弯曲段, 收缩或者扩散段, 蝶阀、调流阀等扰流设备。还应尽可能消除或减少干扰声学法流量测量的气泡、沉淀物和噪声等。

- a) 应优先选择规则的流道位置。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; 如现场无法找到可用的圆形或矩形流道, 也可在非规则形状流道 (如渐变方涵、优弧弓形涵洞等) 安装, 但应针对现场流道定制流速代表性模型。
- b) 应考虑直管段长度尽量长 (即上下游没有阀门、弯头等扰流部件)。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, 以所有超声换能器的中心断面为参照)。无法满足以上条件时, 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, 可通过数值仿真或模型实验确定。
- c) 应考虑现场布线和超声换能器维护方便, 宜选择具有暴露式管段的流道。新建工程应设计合理的布线路径, 已有工程安装应优化布线路径。

6.2 测流模型

6.2.1 测流装置最低配置要求为双面交叉四声道 (8 声道), 声道层宜采用水平方向。

6.2.2 非渐变管涵声道角设计宜在 36°~75° 范围内, 直管段长度较短时宜采用较大的声道角。渐变管涵宜采用 75° 以上声道角。采用大声道角时, 应对超声测流主机的时间差测量能力进行评估。

6.2.3 高斯-雅克比积分法和高斯-勒让德积分法分别给出了圆形和矩形流道的最佳的声道相对高度。超声换能器应精确安装在设计的相对声道高度位置上, 应按照附录表 A.1 中的权重系数, 加权求和计算流量。对于圆形流道, 宜采用圆形优化法权重系数; 对于矩形流道, 宜采用矩形优化法权重系数。

6.2.4 对于异型流道或直管段长度无法满足 6.1 节中的直管段条件时, 应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, 并应对流道内的流速分布进行仿真分析或试验测试, 以确定最适合的声道高度和权重系数。应根据现场流道尺寸、上下游扰流件几何形状、超声换能器及底座安装结构等, 对测流装置所处流道系统内部流场进行仿真, 得到测流装置处流速分布情况, 并据此定制测流装置在该流场条件下的流速代表性算法。应利用相似性原理, 在流量校准装置上进行测流装置的模型试验, 定制流速代表性算法; 考虑探头局部扰流, 应定制采用相同缩尺比的超声换能器及其底座。

6.2.5 测流模型应具有合理的声道缺失补偿算法。

6.3 测流装置

6.3.1 测流装置应在测量管段和声道配置确定的情况下选择超声换能器安装形式。

6.3.2 超声换能器有外插式和内贴式两种安装形式，应优先选择外插式超声换能器。外插式超声换能器安装到流道外壁，配有专用安装座，可在带水条件下更换；内贴式超声换能器安装到流道内壁，安装和维护时须停水作业，信号电缆经穿缆器引出，超声换能器及穿线管存在扰流效应。

6.3.3 在保证信号强度的前提下，应优先选择尺寸较小的超声换能器及安装座。超声换能器应采用凸出式安装，避免杂质沉积堵塞造成信号大幅衰减。超声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。对于 DN3000 及以下流道，应对超声换能器凸出影响进行评估和修正。对于确定的换能器及其安装座，应具有不同管径下的修正实验数据，模型实验可采用声道速度比对或流量比对两种方式进行。

6.3.4 测流装置主机应保证超声换能器正常发射和接收超声脉冲信号并通过有效性检查，应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 1ns；
- 主机中流量计算模型的权重系数应开放，且可根据实测声道高度进行配置；
- 具备超声波形显示和诊断功能，具有信号质量评价指标体系；
- 具备原始数据的存储和传输能力，包括各声道的流速、声速、传播时间、信号强度及质量等。

6.3.5 测流装置应具备一定的抗干扰能力，能够应对信号质量恶化甚至信号丢失。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，超声换能器和主机应具有足够的信号增益余量。

6.4 数据远传

6.4.1 应采用数字信号进行数据传输，如采用网络协议或串口协议等。

6.4.2 应传输流量、累计水量、各声道流速、各声道信号质量。

6.4.3 应采用信息多次采集、滑动平均的方式。

6.4.4 应采用自报和应答的双向通信机制。

7 现场安装调试

7.1 超声换能器定位安装

7.1.1 外插式超声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。内贴式超声换能器定位参照管道内部轴线进行。

7.1.2 超声换能器定位安装宜采用全站仪等高精度三维测量设备辅助定位。

7.1.3 安装条件受限的内贴式超声换能器，可采用经纬仪与钢卷尺相结合的方式，具体操作方法见附录 B。超声换能器应安装到预期位置，声道角偏差应不大于 2° ，相对声道高度偏差应不大于 0.05。

7.1.4 同一声道的一对超声换能器宜采用相等长度的线缆。线缆长度存在明显差异时，应进行静水条件下的零点修正。

7.1.5 对于内贴式超声换能器，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，且到最近的超声换能器的距离应大于 1D。

7.1.6 超声换能器及其信号线缆应牢固固定。管道内部安装内贴式超声换能器时，宜采用植筋胶和专

用锚栓固定，提升长期可靠性；管道外部安装外插式超声换能器时，应在开孔前进行打压试漏。

7.2 几何参数测量

7.2.1 几何参数是测流装置流量计算模型的基础数据，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。

7.2.2 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。内部测量法可采用经纬仪进行测量，需要搭建实物靶板。具体测量方法见附录 B。

7.3 参数配置与调试

7.3.1 超声换能器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（见 7.2）；
- 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、超声换能器延时、主机延时等；
- 超声换能器凸出效应修正：根据超声换能器及其安装座的凸出比确定。

7.3.2 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，由温度换算声速核查实测声速的合理性，流动条件下各声道声速应具有 consistency；
- 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；
- 如有明确的静水条件，应在静水条件下进行零点流速修正。

7.3.3 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、超声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 测量不确定度评价

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几何参数测量、传播时间及时间差测量、流速代表性三项，不确定度评价方法应符合 GB/Z 35717 和 JJF 1358 的相关要求。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。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。

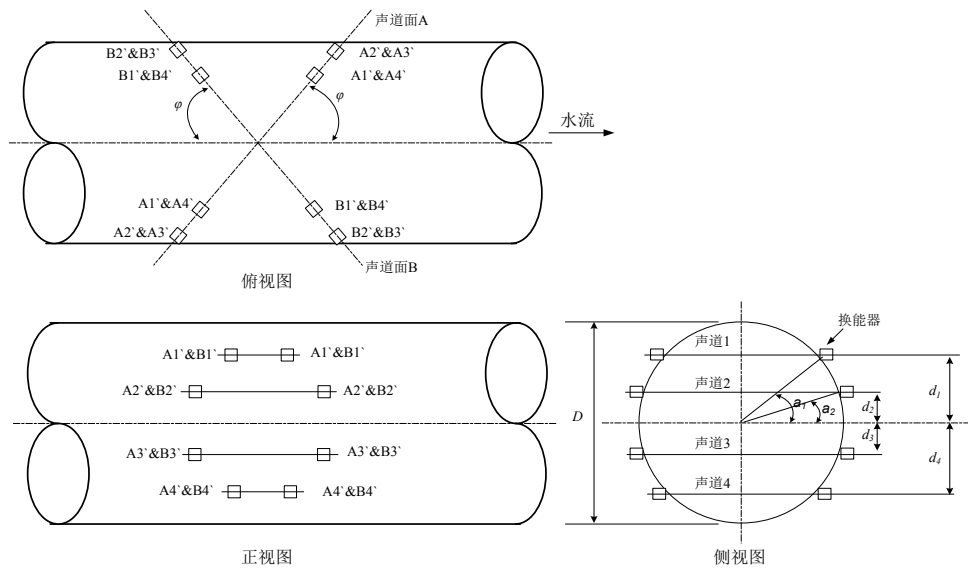
9 原始数据诊断分析

- 9.1 测流装置投入使用之后，中心站软件应具备数据远程诊断功能，可通过现场的各声道波形数据、流速数据等参数之间的逻辑关系判定超声换能器健康状态、安装位置漂移程度等信息。
- 9.2 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。当发现异常情况时，应及时进行系统维护。
- 9.3 原始数据诊断和跟踪评价主要包括：
- 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。

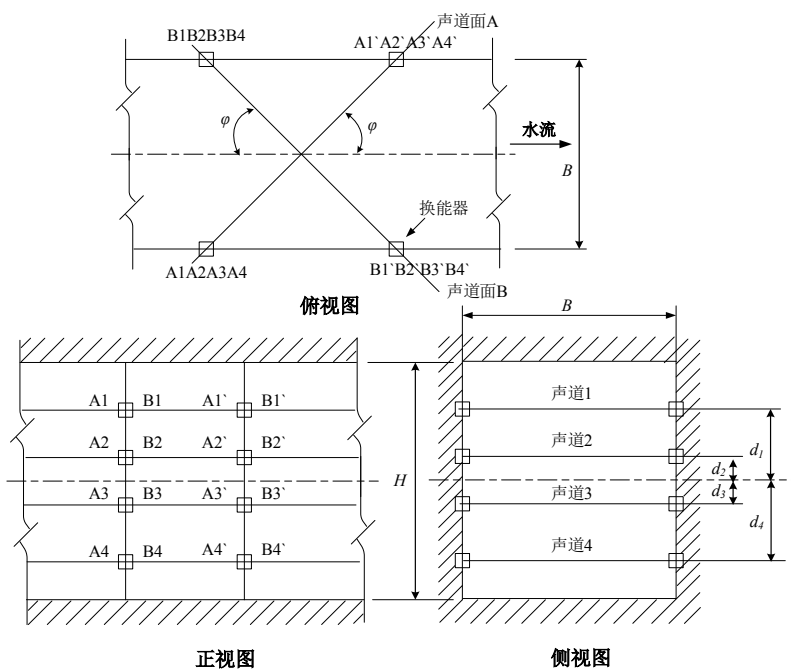
附录 A
(规范性)
权重系数

A.1 典型声道布置

圆形流道和矩形流道超声换能器的典型布置分别如图 A.1 和图 A.2 所示。



图A.1 圆形流道双面交叉四声道布置



图A.2 矩形流道双面交叉四声道布置

A.2 相对声道高度及权重系数

超声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 中的权重计算加权求和计算流量。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，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，可以按照式（3）和式（6）分别计算圆形流道和矩形流道的流量。对于圆形流道，若测流装置采用式（3）计算流量，权重系数应设置为 ω_i ；若采用式（4）计算流量，权重系数应设置为 $W_i = \omega_i \cos \alpha_i$ 。

表A.1 相对声道高度与权重系数

声道数 <i>N</i>	序号 <i>i</i>	圆形流道				矩形流道			
		相对声道高度 t_i	声道高度角 α_i	权重系数 ω_i		相对声道高度 t_i	权重系数 ω_i		
				高斯-雅克比	圆形优化法		高斯-勒让德	矩形优化法	
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	1	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	1	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	
	5	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，另外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。

附录 B (资料性) 三维坐标法几何参数测量

B.1 概述

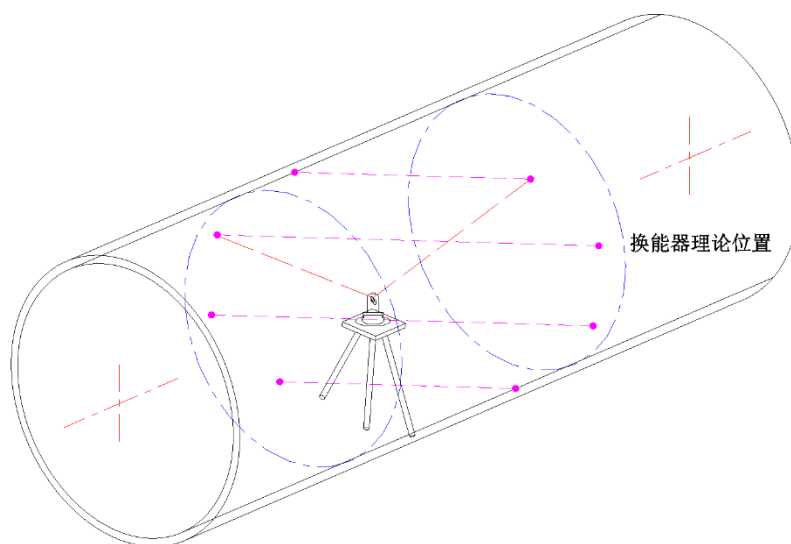
几何参数是测流装置流量计算模型的基础数据。超声换能器安装完成后,应对流道直径、声道长度、声道角及声道高度等几何参数进行精确测量。当条件允许时宜进入管道内部进行几何参数测量。

B.2 管道内部测量法

B.2.1 该方法利用三维坐标测量仪器采集管道壁面点和超声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。

B.2.2 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及其它仪器进行测量。以全站仪为例,见图B.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超声换能器;
- b) 利用全站仪扫描流道内壁点,测点数量至少 50 个,并尽量均匀覆盖超声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超声换能器中心,逐个测量超声换能器的坐标,所有超声换能器测量完成后至少复测 2 遍,得到不少于 3 组超声换能器坐标数据;
- d) 利用超声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。



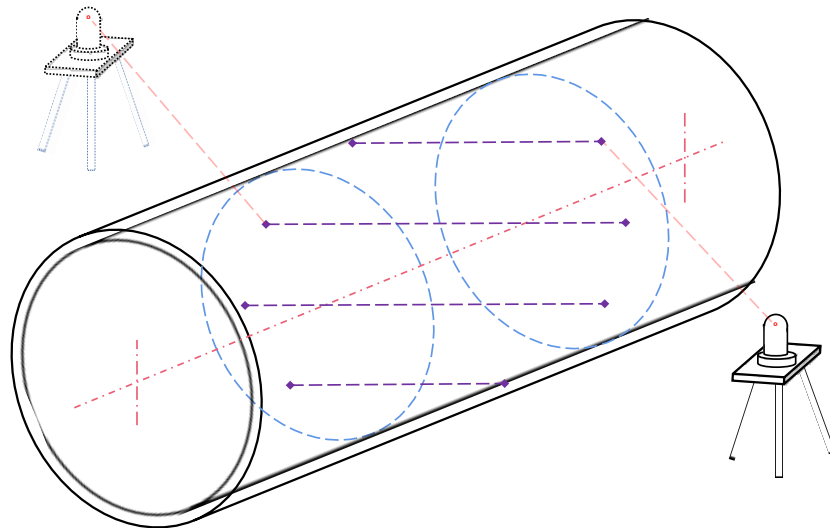
图B.1 三维坐标测量仪器管内测量方法示意

B.3 管道外部测量法

B.3.1 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；采集外插式超声换能器外部特征点的三维坐标，并向内推导超声换能器中心点的坐标，进而计算测流装置的几何参数。该方法只适用于外插式超声换能器。

B.3.2 三维坐标测量仪器宜采用激光跟踪仪，也可采用全站仪。具体步骤如下：

- a) 在待测管道附近不同位置布置多个转站标记点（一般转站标点不少于8个），为多站测量提供定位功能；
- b) 利用三维坐标测量仪采集管道壁面坐标点，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来选择转站次数；
- c) 选择合理的外插式超声换能器特征点，以内推超声换能器中心点准确可靠为原则；分别在合适的测站采样超声换能器特征点；
- d) 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B.2 三维坐标测量仪器管外测量方法示意