

中国计量测试学会

量学函〔2025〕1号

中国计量测试学会关于《高温流体外夹式超声测流系统不确定度评定技术要求》团体标准征求意见的函

各有关单位：

根据国家标准化管理委员会、民政部印发的《团体标准管理规定》及《中国计量测试学会团体标准管理办法》有关规定，经中国计量测试学会批准立项，由核电运行研究（上海）有限公司、中国计量科学研究院、中核运维技术有限公司、三门核电有限公司、江苏核电有限公司、福建福清核电有限公司、海南核电有限公司、中国核电工程有限公司、汇中科技唐山有限公司、辽宁省计量科学研究院、江西省计量科学研究院、中广核研究院有限公司、中国计量测试学会等单位牵头起草的《高温流体外夹式超声测流系统不确定度评定技术要求》团体标准现已完成征求意见稿的编制，为保证标准的科学性、严谨性和适用性，现面向社会广泛公开征求意见。

请各有关单位及专家对上述标准提出宝贵意见和建议，于2025年2月22日前将《征求意见反馈表》反馈至以下联系方式。

联系人：刘源

电 话：16619877964

电子邮箱：lyuan@nim.ac.cn

- 附件：1. 《高温流体外夹式超声测流系统不确定度评定技术要求》征求意见稿
2. 《高温流体外夹式超声测流系统不确定度评定技术要求》编制说明
- 3.征求意见反馈表



ICS 17.120.10

CCS N12

T

团 体 标 准

T/CSMT-00*—20xx

高温流体外夹式超声测流系统
不确定度评定技术要求

Uncertainty Evaluation Technical Requirements for Clamp-on

Ultrasonic Measurement System for High-Temperature Liquid Medium

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国计量测试学会 发布

目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 测量原理	2
5 测量不确定度来源完整性要求	5
5.1 总则	5
5.2 不确定度的分项及基本分析方法	5
6 不确定度评定方法要求	6
6.1 基本测试项目	6
6.2 基本性能	7
6.3 密度测量	8
6.4 几何参数影响	9
6.5 超声传播时间量测量	9
6.6 高温介质条件流速代表性外推	9
6.7 流场适应性	10
6.8 长期性能漂移影响	10
6.9 性能核查	10
附录 A（规范性）介质条件参量外推的评定方法	12
附录 B（规范性）流场适应性的评定方法	13
附录 C（规范性）密度测量结果的评定方法	14
附录 D（规范性）长期使用性能改变的评定方法	15
参 考 文 献	16

前 言

本文件是依据 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》和 T/CAS 1.1—2017 《团体标准的结构和编写指南》的有关要求编写。

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。

本文件由中国计量测试学会归口。

本文件起草单位：核电运行研究（上海）有限公司、中国计量科学研究院、中核运维技术有限公司、三门核电有限公司、江苏核电有限公司、福建福清核电有限公司、海南核电有限公司、中国核电工程有限公司、汇中科技唐山有限公司、辽宁省计量科学研究院、江西省计量科学研究院、中广核研究院有限公司、中国计量测试学会。

本文件主要起草人：林宇、黄元媛、张福海、昌正科、张明晖、王路遥、刘源、孟涛、李德银、刘玉杰、居法立、魏建军、王五妹、何绍群、郭林、郭晨阳、王震、裘雪玲、陈满、张佳楠。

本文件为首次发布。

引 言

本团体标准旨在根据我国高温流体流量计量的实际需求,结合当前外夹式超声流量测量技术的最新发展及溯源技术手段,提出一套针对高温流体外夹式超声测流系统的不确定度评定技术要求。

本团体标准依据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》和T/CAS 1.1—2017《团体标准的结构和编写指南》的相关要求,系统地给出了外夹式超声测流系统在高温流体条件下测量的不确定度来源,并给出了相应评定方法要求。通过理论分析、实验室校准及现场测试等手段,本规范旨在为规范和引导未来出现的流量计量需求,特别是针对高温、高压流体介质的准确测量,提供一套科学、合理、可操作的技术依据。

本标准适用于外夹式超声测流系统安装于高温现场前和安装后的性能核查。

本标准为首次发布。

高温流体外夹式超声测流系统不确定度评定技术要求

1 范围

本规范适用的口径范围为 DN150~DN1000 的高温流体条件封闭式管道, 基于外夹式超声测流系统的不确定度评定。

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。

JJG 1030 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

GB/T 35138 封闭管道中流体流量的测量—液体超声传播时间法

3 术语和定义

以下术语和定义适用于本文件。

3.1

外夹式超声换能器 clamp-on ultrasonic transducer

利用夹具固定在被测管道外表面的超声换能器。

3.2

夹具 fixtures

将一对或多对外夹式超声换能器固定在管道外壁的机械结构。

3.3

外夹式超声测流系统 clamp-on ultrasonic measurement system

由一对或多对外夹式超声换能器、测温装置、测压装置、信号线缆及主机构成的系统。

注: 主机是用于激励超声换能器、测量传播时间、采集温度与压力信号、计算流速和流量、显示和记录测量结果的电子设备。

3.4

声道 sound path

超声波信号在成对超声波换能器间传播的实际路径。

[来源: JJG 1030-2007,3.6]

3.5

声道角 path angle

声道与管道轴线之间的夹角。

[来源: JJG 1030-2007,3.7]

3.6

声道长度 path length

成对换能器之间超声在流体介质中传播的实际距离。

3.7

超声波传播时间 transit time

超声波在流体介质部分传播的时间。

[来源: JJG 1030-2007,3.5]

3.8

线性度 linearity

超声测流系统实流测试误差随流量变化的分布情况, 可根据需要分段表示。

3.9

仪表系数 flow-meter coefficient

与流量测量有关, 为修正仪器测量误差而设定的参数。

注: 1. 由于各厂家生产流量计的工艺、算法和名称不同, 该参数可能被称为传感器系数、修正系数或其他参数;

注: 2. 该参数通常由一个或一组参数构成。

3.10

管道雷诺数 pipe Reynolds number

表示管道内惯性力和黏性力之比的无量纲数, Re_D 。

$$Re_D = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

其中:

ρ —— 介质密度, kg/m^3 ;

V —— 管道平均流速, m/s ;

D —— 管道内径, m ;

μ —— 动力黏度, $mPa \cdot s$;

ν —— 运动黏度, m^2/s 。

4 测量原理

超声传播时间法通过测量超声波在流体介质中传播的时间来计算流体的流速和流量。外夹式超声测流原理如图 1 所示, 常见的换能器安装方式有“Z”型和“V”型, 当管道内直径较小时, 为了提高传

播时间测量的准确度，还可以采用“N”型、“W”型等安装方式。通常认为声波在流体中的实际传播速度是由超声波在静止状态下流体中传播的速度（ C_l ）与流体轴向平均流速（ v ）在声波传播方向上的分量组成。顺流方向传播时间 t_u 与逆流方向传播时间 t_d 为

$$\begin{cases} t_u = \frac{D}{(C_l - v \cdot \sin \varphi) \cos \varphi} \\ t_d = \frac{D}{(C_l + v \cdot \sin \varphi) \cos \varphi} \end{cases} \quad (1)$$

式中：

D ——管道内径，mm；

φ ——超声波在液体中折射的角度，°；

C_l ——超声波在静止状态下流体中传播的速度，mm/μs；

v ——流体轴向平均流速，mm/s。

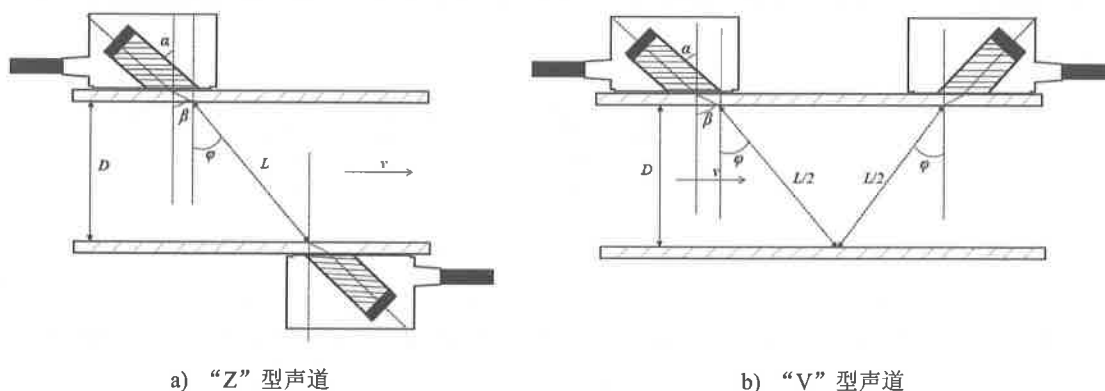


图 1 外夹式超声测流系统轴向流速测量原理

流体的流速计算方法如下：

$$v = \frac{D(n+1)}{\sin 2\varphi} \left(\frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_u} \right) \quad (2)$$

式中：

n ——超声波在管道内的反射次数（如，采用 Z 法安装时 $n=1$ ，采用 V 法安装时 $n=2$ ，以此类推）。

流体的声速计算方法如下：

$$C_l = \frac{D \cdot (n+1)}{4 \cos \varphi} \left(\frac{1}{t_d} + \frac{1}{t_u} \right) \quad (3)$$

对于外夹超声流量计而言，超声波在传播过程中经过传感器的声楔、管壁与流体介质后被与之对应的传感器接收，声波的传播角度满足 snell 定律

$$\frac{\sin(\alpha)}{C_w} = \frac{\sin(\beta)}{C_p} = \frac{\sin(\varphi)}{C_l} \quad (4)$$

式中：

α ——超声传感器的安装角度，°；

β ——超声波在管壁中的折射角，°；

C_w ——超声波在传感器声楔中传播的声速，mm/μs；

C_p ——超声波在管壁中传播的声速，mm/μs；

在实际应用中，为了进一步提流量测量的准确性，可以通过布置多个通过圆心的声路，每条声路上的轴向流速 v_i 代表该直径上安装超声传感器测量的平均流速，利用多个声道上的平均流速可以更好的估计流道截面上的平均流速，进而得到截面上的体积流量。常温常压状态下的体积流量计算公式可以表示为

$$Q_v = \frac{4\pi \cdot k \cdot K \cdot \bar{v}}{D^2} = \frac{4\pi \cdot k \cdot K \cdot f(v_1, v_2 \cdots v_N)}{D^2} \quad (5)$$

式中：

k ——用于将线流速测量值转换为通过管道截面平均流速的仪表系数，可以是超声测流系统的仪表系数；

K ——超声测流系统的仪表系数，通常由实流标定获得；

N ——声道数；

f ——多个线平均流速的合成结果；

Q_v ——体积流量，m³/h。

质量流量是由体积流量和密度合成计算的，除此以外，还需要考虑温度、压力对体积流量测量中几何参数和时间量测量的影响，以及高温、高压介质条件下流速剖面形状改变所需的仪表系数修正，得质量流量

$$Q_m = \rho \cdot K_p \cdot K_T \cdot K_{Re} \cdot Q_v \quad (6)$$

式中：

ρ ——流体介质的密度；

K_p ——压力修正系数；

K_T ——温度修正系数；

K_{Re} ——流速剖面形状修正系数；

Q_m ——质量流量，t/h。

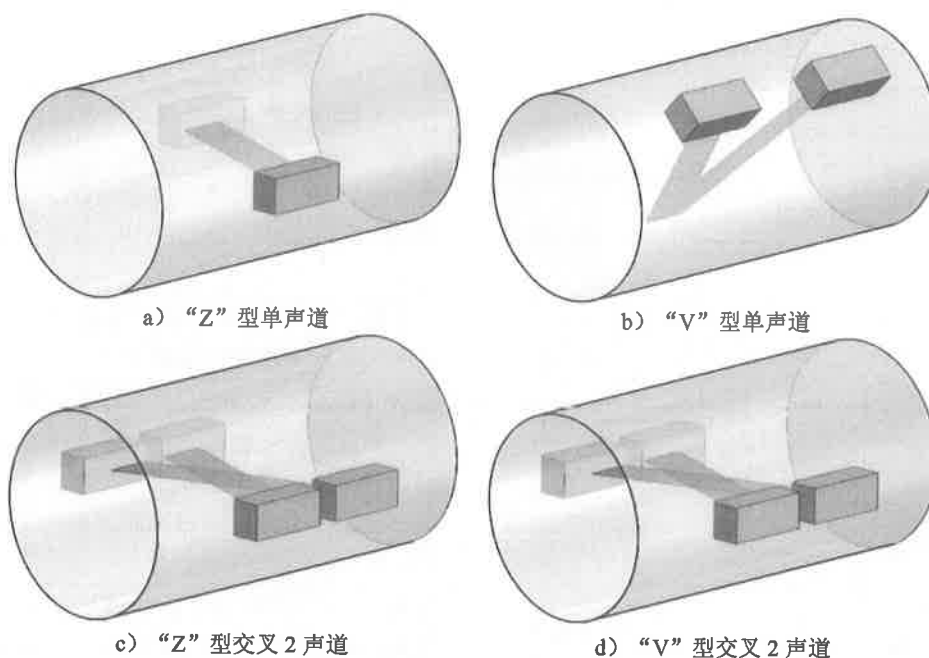


图2 外夹式超声测流系统传感器安装示意图

5 测量不确定度来源完整性要求

5.1 总则

鉴于受流体介质高温可能导致的管道结构膨胀、声学性能改变及流速代表性改变，高温流体外夹式超声测流系统对校准方法和不确定度评定的要求有别于一般外夹式超声流量计。

根据 JJG 1030，一般外夹超声测流系统可以采用实流法校准，但受限于当前流量标准装置所能提供的介质条件远远达不到现场的工作温度、压力范围，所以必须合理估计由介质条件外推引入的不确定度。根据 JJF 1358，其介质条件外推主要包括几何参数、超声传播时间量和流速代表性，对于高温流体介质流量测量设备，需要有针对性的建立校准或测试方法，特别是对不同的积分模型和适应算法，需要进行有效评估。

5.2 不确定度的分项及基本分析方法

根据表 1 所述的校准、测试及核验项目，结合第三方校准报告、由厂家提供可追溯的测试数据，以及现场工作中获取的数据，可以对外夹式超声测流系统的测量结果的不确定度进行分析。

根据测试的方法及测流系统的基本原理，其不确定度来源可以分为基本性能、密度测量、介质条件外推、流场适应性和长期性能漂移 5 类。

表 1 高温流体介质外夹式超声测流系统不确定度评估项目表

项目		评估方式	
基本性能	标准装置	第三方检定、校准报告或社会公用标准证书	
	线性度	测流系统安装前，根据测试要求，选择测试点和重复次数进行实流验证实验，并依据实验数据进行评定	
	重复性		
	复现性	根据线性度实验工况，进行实流复测，可根据流量计后期维护方法选择是否计入不确定度	
密度测量	温度测量	整个测温系统的第三方校准报告，以及长期漂移的实验或分析，现场使用中需要进行周期性复校	
	压力测量	整个测压系统的第三方校准报告，以及长期漂移的实验或分析，现场使用中需要进行周期性复校	
	密度计算公式	由主机中系统分辨力和密度模型引入的不确定度分析，实施方法见附录 C	
	分辨力		
介质条件影响	几何参数	半径	实验室标定、现场安装后均需要进行几何测量，测量重复安装后的几何参数变化量，测量或保守估计现场工作条件几何参数的变化量
		声道长度	
		声道角度	
	超声传播时间量	传播时间测量	测流系统安装前，通过高温、高压实验测量传播时间量受介质条件的影响
		时间差测量	
	流速代表性	高温高压外推模型	通过对外推模型的分析或通过实流实验对外推模型进行保守估计，其准确性可通过现场实验进行验证
流场适应性		测流系统安装前，通过对扰流场中不确定性因素进行充分模拟，并进行实流验证实验	
长期性能漂移	零点漂移	在高温、高压条件下，长期反复测量，得出零点的稳定性	
	仪表系数漂移	通过理论分析或实流实验进行分析，实施方法见附录 D	
	安装影响	测流系统安装前，通过充分的实验验证，实施方法见附录 B	

6 不确定度评定方法要求

6.1 基本测试项目

由于目前的实验室无法模拟现场高温介质条件，为了保证表 1 所述的不确定度分析结果的完整性，对其分析可以分为 3 个阶段。

现场安装前必须对系统的测量能力进行校准，安装于现场后需要对系统开展现场测试。此外，使用一段时间后通过开展期间核查保证长期使用后不确定度不发生显著改变，具体的实施内容如表 2 所示。

对于现场可以对流量进行分段使用的情况，称流量计的使用范围分为“高区”和“低区”，应分别对表 2 中仪表系数、密度测量、几何参数、超声传播时间量、流速代表性外推、流场适应性、长期性能的分量进行分析。

表 2 校准、测试项目表

项目		实验室校准	现场测试	
基本特征	线性度	+	-	
	重复性	+	-	
	复现性	+	-	
密度测量	温度测量	+	+	
	压力测量	+	+	
介质条件影响	几何参数	半径	+	+
		声道长度	+	+
		声道角度	+	+
	超声传播时间量	传播时间测量	+	-
		时间差测量	+	-
	流速代表性	高温高压外推模型	+	+
流场适应性		+	-	
长期性能改变	零点漂移	+	-	
	仪表系数漂移	+	-	
	安装影响	+	-	
主机核查	波形及信噪比	+	+	
	声速及其一致性核查	+	+	

6.2 基本性能

6.2.1 标准装置

标准装置的不确定度来自于国家计量标准考核证书或社会公用计量标准证书。

6.2.2 线性度

外夹式超声测流系统的线性度表征的是经系统修正后的流量测量系统偏差和线性偏离度，是在使用相同参数（系数）条件下，流量计各流量点误差的差异引入的不确定度。该项不确定度评定需依据实流实验，在明确了实验方法和计算方法后其评定结果是确定的、且可以作为验收指标被检验。

线性度实流的流量点选取应不少于 7 个，应包含下列流量点： q_{\min} 、 $0.4q_{\max}$ 、 q_{\max} ，其他流量点应均匀选取；对于需要流量进行分段使用的情况，“低区”应至少包含 3 个流量点，“高区”应至少包含 4 个流量点。

对于常温介质条件下流量测量扩展不确定度要求大于或等于 0.5% ($k=2$) 的, 每个流量点的重复次数为 3 次; 对于常温介质条件下流量测量扩展不确定度要求小于 0.5% ($k=2$) 的, 每个流量点的重复次数为 6 次。

一般情况下, 线性度测试宜在理想直管段条件下进行。

6.2.3 重复性

重复性指的是在相同的测量条件下, 对同一被测量进行连续多次测量的输出结果之间的一致程度。

重复性应至少测量 3 个流量点, 一般应选取 q_{\min} 、 $0.4q_{\max}$ 、 q_{\max} 。对于需要流量进行分段使用的情况, 应增加分界流量点。

每个流量点重复次数为 10 次。

6.2.4 复现性

复现性指的是再现性测量条件下测量结果的准确度, 用于核查外夹式超声测流系统在一段时间内修正系数的稳定性。

复现性测试的时间至 6.2.2 节线性度实验结束后一周以上。在条件允许的情况下, 外夹式超声测流系统应尽量保持不动, 以减小重复安装的影响。若期间外夹式超声测流系统从测试管道上取下, 应重新测量并向主机置入几何参数。

流量点与重复次数应与 6.2.2 节线性度实验保持一致。

6.3 密度测量

6.3.1 温度测量

外夹式超声测流系统的温度测量的能力。

首次安装使用前, 温度传感器、温度变送器及主机应获得国家法定计量机构出具的校准证书或检定证书。

温度测量的主要不确定度来源如下:

- 1) 温度传感器、温度变送器及主机的首次检定/校准结果;
- 2) 复校期内温度测量结果可能的漂移量;
- 3) 温度传感器安装位置与外夹式超声测流系统之间的温差;

建议通过期间核查手段对温度测量能力进行定期核验。

6.3.2 压力测量

外夹式超声测流系统的压力测量的能力。

首次安装使用前, 压力变送器应获得国家法定计量机构出具的校准证书或检定证书。

压力测量的主要不确定度来源如下:

- 1) 压力传感器和压力变送器的首次检定/校准结果;
- 2) 复校期内温度测量结果可能的漂移量。

建议通过期间核查手段对压力测量能力进行定期核验。

6.3.3 密度计算公式

密度计算公式在现场工作范围内的误差。

6.3.4 设备分辨力

外夹式超声测流系统的设备分辨力引入的误差。

6.4 几何参数影响

6.4.1 管道半径

半径的膨胀可以在 ISO 12242 的自由膨胀模型基础上, 根据现场管段可能存在的不均匀膨胀进行保守估计; 也可以采用高温几何测量手段对膨胀后管道外径进行测量。

6.4.2 声道路径及声道长度

高温、高压条件下的声道长度, 是与管道的膨胀与超声换能器夹具有关的综合量。

条件允许的情况下, 建议采用高温几何测量手段测量换能器沿轴向的改变量, 结合半径在高温条件下的测量值, 分析由声道路径与声道长度对流量测量引入的误差。

当不具备高温测量手段时, 应对传感器夹具与传感器形状受高温影响后, 声道路径与声道长度的改变量进行充分的保守估计。

6.4.3 声道角度

声道角度的校准结果可以通过半径和声道长度计算分析得出, 保守估计由入射角度引入的误差。

6.5 超声传播时间量测量

6.5.1 传播时间

超声传播时间的误差主要来自 2 个方面:

- 1) 超声传感器在高温状态下, 测量波形改变对传播时间测量结果的影响;
- 2) 在高温状态下路径变化对传播时间的影响。

在本节只考虑超声传感器在高温状态下, 波形改变对传播时间测量的影响。应模拟常温到高温的介质条件, 对超声传感器进行测试, 记录超声波的中心频率。

超声传感器测试的温度点不少于 5 个, 至少包含现场使用的最低温度与最高温度, 并均匀选取温度测试点依次进行测试。

每个温度测试点应保持测量 15 分钟, 温度的稳定性优于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

每个温度测试点重复测试 3 次。

6.5.2 时间差

时间差的误差来源主要来自测量的稳定性与高温条件下的漂移量 2 个方面。

应模拟常温到高温的介质条件, 对超声传感器进行测试, 记录静态条件下的时间差零点。

6.6 高温介质条件流速代表性外推

流体介质在高温高压条件与常温条件的流速分布是不同的,应确定外夹式超声测流系统是否内置对雷诺数的修正,并根据所使用的修正模型进行分析。

在具备高温高压液体实流校准或测试平台的情况下,应通过实流实验对流速代表性外推模型的有效性进行验证,并通过厂家宣称修正模型与验证结果的偏差给定不确定度的分析结果。

在不具备高温高压液体实流校准或测试平台的情况下,应通过充分的保守估计,并验证其能够包络现场的不确定度情况。

6.7 流场适应性

流场的形态与现场管线布置有关,并对流量测量结果产生系统影响。评定这种系统影响,宜在 6.2.2 节线性度实验的基础上,通过充分且足够包络现场流量偏差的模拟扰流条件,开展测试实验。

测试的流量点应与线性度实验一一对应。

每个流量点应重复测试 3 次。

需要说明的是,除了系统误差测量结果的不确定性以外,测量结果的稳定性也应计入不确定度中。

6.8 长期性能漂移影响

6.8.1 长期性能的分项

外夹式超声测流系统的使用年限较长,所以其长期使用后性能的漂移,以及零部件维护带来的影响是必须考虑的因素。其中,温度和压力测量的影响已经在 6.2 节中讨论,本节重点考虑零点漂移、仪表系数漂移和安装影响的影响。

6.8.2 零点漂移

零点的漂移不仅是在静态条件下的标定,还包括换能器使用一段时间后,零点的变化情况。

零点测试应在常温和模拟现场高温条件下分别测试,每次测试的间隔时间不短于 24h。

零点测试不少于 3 次。

6.8.3 仪表系数漂移

结合不同厂家提供的维护服务之间可能存在差异,仪表系数的漂移可以根据几何参数、超声传播时间量和流场适应性条件的改变进行分析;也可以整体拆卸后在标定工况下进行校准,这种期间的校准需要覆盖系统生命周期。

6.8.4 安装影响

综合考虑安装影响对流量测量结果带来的影响。由于外夹式超声测流系统替换时需要更换换能器进行重新拆装和定位,由传感器位置改变引入的不确定性是较难通过理论评估的。建议通过充分的拆装,并分别进行实流验证实验,对安装影响的影响进行综合评定。

具体的测试方法见附录 D.3。

6.9 性能核查

6.9.1 核查时间

首次核查应在外夹式超声测流系统安装后进行，此后周期性开展核查工作，建议核查的周期不超过24个月。

6.9.1 波形及信噪比

核查波形及信噪比是否达到使用需求，确认系统的工作状态是否正常。

6.9.2 声速及其一致性和核查

通过实验室和现场测量得各个声路上的声速，对传播时间的测量能力进行核查，判断是否发生粗大误差。

附录 A （规范性）介质条件参量外推的评定方法

A.1 外推参数

介质参数外推包括几何参数、超声传播时间量和流速代表性等综合的影响，根据实验的条件及模型的来源，可以有针对性的选用校准方法。

A.2 几何参数

A.2.1 理论分析方法

针对温度、压力测量，以及可能的误差来源（如管道的非均匀膨胀、换能器及夹具可能产生的轴向位移、换能器及夹具可能产生的周向滑动），建议通过数值计算、数值仿真等手段对半径、声道长度和声道角度变化量的上限进行估计，或在理论模型的基础上对在几何膨胀过程中可能产生的偏差进行分析，实现对几何参数外推模型不确定度的保守估计。

A.2.2 直接测量法

采用可以在高温环境下使用或能够承受现场环境温度的非接触式测量手段，对管道和超声传感器的几何形状进行直接测量。

A.3 超声传播时间测量

需要尽量模拟现场温度及压力介质条件，并采用测流系统直接记录传播时间和时间差。

至少需要使介质或传感器的温度达到现场使用条件，重复多次测量传播时间的偏移量及零点数据。

A.4 流速代表性

需要确定外推模型的合理性，考虑到外推模型无法在实验室得到很好的验证，所以要模型自身的有效性进行保守分析。外推模型需要有充分的依据，或者足够证明模型合理性的实验数据。

除模型自身之外，还需要充分考虑实验室标定流场与现场情况存在差别，使得外推模型与预期之间的偏离。

附录 B（规范性） 流场适应性的评定方法

尽管高温流体外夹式超声测流系统应尽量安装在直管段，但对于现场可能存在不理想的上游管线条件，必须进行充分保守的估计。

一方面，在验证CFD数值仿真流场分布准确性的前提下，可以采用CFD数值仿真模拟上游管线，并计算由流场分布可能引入的流量偏差。

另一方面，当上游管线条件较为复杂或不便于模拟时，可以采用一种或多种扰流模拟件开展实流测试，分析上游扰流场可能引入的流量偏差范围。

附录 C（规范性） 密度测量结果的评定方法

实际密度取值过程中，主要不确定度来源包括：密度测量公式、介质温度和介质压力，密度的相对标准不确定度如下

$$u_{\delta,\rho} = \sqrt{c_F^2 u(F)^2 + c_T^2 u(T)^2 + c_p^2 u(p)^2} \quad (\text{C.1})$$

其中， $u(F)$ 、 $u(T)$ 、 $u(p)$ 分别为密度测量公式、介质温度、介质压力引入的标准不确定度。 c_F 、 c_T 、 c_p 分别为密度测量公式、介质温度、介质压力的灵敏系数。

附录 D（规范性） 长期使用性能改变的评定方法

D.1 长期使用

外夹式超声测流系统长期使用后仪表系数的变化量，是包含安装位置滑动、超声传播时间量漂移、设备老化、管道磨损等因素的综合结果。

当具有条件时可以根据厂家长期使用的实践经验，对仪表系数的变化量进行估计；对于新研制的型号或实践经验不够充分的条件，可以依据表 2 所示核查项目进行逐一检测。

D.2 仪表系数漂移

为确定仪表在长期使用中仪表系数的变化，并分析其对外夹式超声测流系统的影响，需要开展实验室校准和长期维护工作。

首先，管道磨损等不确定度来源可根据管道材料及介质条件进行分析。

其次，通过实验室复现性实验，对短期内仪表系数的变化范围进行校准。测量复现性时，至少应间隔 1 周时间，在完全相同的装置条件下对同一台流量计进行试验，根据至少 2 次校准结果差异的最大值评定其不确定度情况。复现性引入的不确定度可作为仪表系数漂移的参考之一，当 2 次校准结果的偏差过大，则需要进一步增加复现性实验次数，以确定仪表系数漂移的原因。

再次，如厂家能够定期将系统进行拆卸并送回实验室进行校准，则可以有以下 2 种分析方案：

(1) 每隔一段时间将外夹式超声测流整体取下，并送回实验室开展校准实验，分析其仪表系数的最大变化；

(2) 将超声传感器送回实验室后，只对超声传播时间量的测量能力进行复测，其重复安装引入的不确定度不再单独分析，其长期使用中可能发生的位移可根据现场实测等方式进行分析。

D.3 安装影响

外夹超声测流系统的安装影响，应通过直接替换超声换能器后，进行实流校准实验，统计安装影响引入的不确定度。

为了尽可能的降低实验的复杂程度，可以采用轮换传感器的方式，即每做一个工况后即更改一次传感器排列顺序，每拆装一次即开展一次实流实验，建议重复拆装次数 10 次。流量点至少选取 3 个，包括 q_{\min} 和 q_{\max} ，每个流量点重复测试 3 次。

参 考 文 献

- [1] ISO 12242 封闭管道中流体流量的测量—液体超声传播时间法 (Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic transit-time meters for liquid)
- [2] IAPWS IF-97 IAPWS 水和水蒸汽热力性质 1997 工业用公式 (Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam)
- [3] IAPWS R6-95 IAPWS 普通水体物质热力学性质 1995 一般和科学用途公式 (Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use)
- [4] ASME PTC 19.1 测试不确定度 (Test Uncertainty)
- [5] ASME PTC 19.5 流体测量 (Flow Measurement)
- [6] JJF 1358 非实流法校准 DN1000~DN15000 液体超声流量计校准规范
- [7] JJG 1030 超声流量计
-

中国计量测试学会团体标准
高温流体外夹式超声测流系统
不确定度评定技术要求
(送审稿)
编制说明

标准起草组

2025年1月

一、工作简况

（一）任务来源

随着核电产业的快速发展，核电站的安全、高效运行对主给水流量测量的准确性提出了更高要求。核电站主给水管路的水流量测量不仅是发电效率的技术核心，也是确保核电站安全稳定运行的关键环节。然而，核电站主给水管路的使用条件具有高温、高压、长使用年限等特点，这些特殊条件超出了现有超声测流系统相关国内外标准、规范的有效范围，导致无法直接对核电站主给水流量测量能力进行评价。因此，建立完善、合理、可行的不确定度评价技术体系，对于提升核电站主给水流量测量的准确性和可靠性具有重要意义。

目前，尽管国内外在超声测流系统领域已经取得了一定的研究成果，针对核电站主给水管道这种极端应用环境，尚未有专门的标准或技术规范。现有的液体实流校准装置无法覆盖核电站主给水管路的使用条件，使得对核电站主给水流量测量能力的评价存在困难。此外，外夹式超声测流装置作为高温、高压、大口径等特殊管道流量测量与计量的重要手段之一，也亟待形成有效的计量手段。

本团体标准旨在填补国内外在核电站主给水管道超声测流系统不确定度评价方面的空白，为核电站主给水流量测量的准确性和可靠性提供技术支撑。

（二）主要工作过程

2024年3月29日，中国计量测试学会以线下会议形式召开《核电站主给水外夹式超声测流系统不确定度评价》（团体标准）立项会议。《核电站主给水外夹式超声测流系统不确定度评价》（团体标准）由中国计量测试学会标准工作部组织，中国计量科学研究院牵头，核电运行研究（上海）有限公司、三门核电有限公司共同发起。

2024年11月12日，由中国计量科学研究院牵头有关单位对《核电站主给水外夹式超声测流系统不确定度评价》进行了线上研讨，并对团体标准题目和正文进行修订。

2025年1月21日，由中国计量科学研究院有关单位共同发起的《高温流体外夹式超声测流系统不确定度评定技术要求（团体标准）》已完成征求意见稿。

（三）标准起草单位

本标准主要起草单位：核电运行研究（上海）有限公司，中国计量科学研究院，中核运维技术有限公司，三门核电有限公司，江苏核电有限公司，福建福清核电有限公司，海南核电有限公司，中国核电工程有限公司，汇中科技唐山有限公司，辽宁省计量科学研究院，江西省计量科学研究院，中广核研究院有限公司。

（四）标准主要起草人及其所做的工作

本文件主要起草人：林宇、黄元媛、张福海、刘源、李德银、刘玉杰、居法立、魏建军、王五妹、何绍群、郭林、郭晨阳、王震、裘雪玲、陈满。上述同志承担的主要工作如下：

表 1 标准主要起草人及具体承担的工作

序号	姓名	单位	具体承担工作
1	林宇	核电运行研究（上海）有限公司	标准起草工作主要负责人，统筹协调、协调标准起草工作；负责章节 1 范围的起草工作。
2	刘源	中国计量科学研究院	负责组织、协调并参与标准调研工作，归纳总结实际操作中的经验，负责整体结构的梳理。
3	黄元媛	核电运行研究（上海）有限公司	负责标准章节 3 术语和定义的编写工作。
4	张福海	核电运行研究（上海）有限公司	负责标准章节 4 测量原理的编写工作。
5	李德银	中核运维技术有限公司	负责标准章节 5 测量不确定度的完整性要求的总则等。
6	刘玉杰	中核核电运行管理有限公司	负责标准章节 5 不确定度的分项方法和基本分析方法表格等。
7	居法立	三门核电有限公司	负责标准章节 6 不确定度评定方法要求中的基本测试项目部分等。
8	魏建军	江苏核电有限公司	负责标准章节 6 不确定度评定方法要求中的基本性能部分，包括标准装置、线性度、重复性和复现性等。

序号	姓名	单位	具体承担工作
9	王五妹	福建福清核电有限公司	负责标准章节 6 不确定度评定方法要求中的密度测量方法，包括温度测量、压力侧测量、密度计算公式、设备分辨力，以及附录 C 等。
10	何绍群	海南核电有限公司	负责标准章节 6 不确定度评定方法要求中的几何参数影响部分，包括管道半径声道路径及声道长度、声道角度等。
11	郭林	中国核电工程有限公司	负责标准章节 6 不确定度评定方法要求中的超声传播时间量和高温介质条件流速代表性外推等编写。
12	郭晨阳	汇中科技唐山有限公司	负责标准章节 6 不确定度评定方法要求中的流场适应性部分及附录 B 等编写。
13	王震	辽宁省计量科学研究院	负责标准章节 6 不确定度评定方法要求中的长期性能漂移影响部分及附录 D 等的编写。
14	裘雪玲	江西省计量科学研究院	负责标准章节 6 不确定度评定方法要求中的性能核查部分的编写，包括核查时间、波形及信噪比、声速及其一致性核查等。
15	陈满	中广核研究院有限公司	负责附录 A 介质条件参量外推方法等编写。

二、标准编制原则和确定标准主要内容的依据

（一）标准编制原则

标准的编写格式遵循 GB/T1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》的规定。

（二）确定标准主要内容的依据。

说明：依据 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》和 T/CAS 1.1—2017《团体标准的结构和编写指南》的相关要求编写，为了确保标准内容制定的准确性、实用性，且充分反映实际情况，能够补充

我国核电站等高温管道流体介质的流量计量能力的空白，保证标准内容科学、合理，本《规程》分为前言和六章的主体内容。

1. 范围

明确了标准的适用范围。本标准适用于 DN150~DN1000 口径范围的高温流体条件封闭式管道，基于外夹式超声测流系统的不确定度评定，包括安装于高温现场前和安装后的性能核查。

2. 规范性引用文件

列出了标准编制过程中引用的规范性文件，包括 JJG 1030《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》和 GB/T 35138《封闭管道中流体流量的测量—液体超声传播时间法》等，确保标准的编制符合现有国家和行业标准。

3. 术语与定义

本章详细定义了与高温流体外夹式超声测流系统不确定度评定相关的关键术语，旨在为标准的后续内容提供清晰、统一的语言基础。具体定义的术语包括外夹式超声换能器（利用夹具固定在被测管道外表面的超声换能器）、夹具（将一对或多对外夹式超声换能器固定在管道外壁的机械结构）、外夹式超声测流系统（由超声换能器、测温装置、测压装置、信号线缆及主机构成的测量系统）、声道（超声波信号在成对超声波换能器间传播的实际路径）、声道角（声道与管道轴线之间的夹角）、声道长度（成对换能器之间超声在流体介质中传播的实际距离）、超声波传播时间（超声波在流体介质部分传播的时间）、线性度（超声测流系统实流测试误差随流量变化的分布情况）、仪表系数（与流量测量有关，为修正仪器测量误差而设定的参数）、以及管道雷诺数（表示管道内惯性力和黏性力之比的无量纲数）。这些术语的定义不仅明确了各自的概念，还确保了标准内容的准确性和一致性。

4. 基本原理

本章深入阐述了外夹式超声测流系统的工作原理和测量过程，详细解释了超声波传播时间法在外夹式超声测流中的应用。该方法通过测量超声波在流体介质中顺流和逆流传播的时间差来计算流体的流速，进而求得流量。本章介绍了外夹

式超声换能器的不同安装方式（如“Z”型、“V”型等），并分析了这些安装方式对测量精度的影响。同时，还详细推导了流速和流量的计算公式，考虑了超声波在流体中的传播特性、声道角度、声道长度以及超声波在管壁和流体中的折射等因素。此外，本章还讨论了如何通过布置多个声道来提高流量测量的准确性和代表性，以及如何通过温度、压力修正和质量流量计算来完善流量测量体系。这些内容共同构成了外夹式超声测流系统测量原理的完整框架，为后续不确定度评定提供了理论基础。

5. 测量不确定度来源完整性要求

全面而系统地分析了高温流体外夹式超声测流系统测量过程中不确定度的各种可能来源，并提出了相应的完整性要求。这些不确定度来源被细致地划分为五大类：基本性能、密度测量、介质条件外推、流场适应性和长期性能漂移。对于基本性能，考虑了线性度、重复性和复现性等因素对测量结果的影响；密度测量方面，则关注温度测量、压力测量以及密度计算公式和设备分辨力引入的不确定度；介质条件外推部分，重点分析了由于高温高压环境导致的管道几何参数变化、超声传播时间量变化以及流速代表性变化对测量结果的影响；流场适应性方面，探讨了不同流场形态对流量测量结果的系统性影响；最后，长期性能漂移部分则关注了零点漂移、仪表系数漂移以及安装影响等长期因素导致的测量不确定度变化。针对每一类不确定度来源，本章都提出了具体的分析方法和评估要求，以确保对高温流体外夹式超声测流系统测量不确定度的全面、准确评估，为提高测量结果的可靠性和溯源性提供有力支持。

6. 不确定度评定方法要求

详细阐述高温流体外夹式超声测流系统测量不确定度的评定方法，为准确评估测流系统在不同条件下的测量性能提供了全面、具体的指导。

首先，明确了不确定度评定的基本测试项目，包括实验室校准和现场测试两大环节。实验室校准主要在测流系统安装前进行，旨在验证其基本性能，如线性度、重复性和复现性等，以确保测流系统在常温常压条件下的准确性和稳定性。现场测试则在测流系统安装后进行，重点评估其在高温高压实际工作环境下的测量能力和不确定度表现。

其次，详细规定了针对不确定度分项的评定方法。对于基本性能不确定度，通过实流验证实验，依据实验数据对线性度、重复性和复现性进行定量评估。密度测量不确定度则考虑温度测量、压力测量以及密度计算公式和设备分辨力等因素引入的误差。介质条件外推不确定度评估，特别关注了高温高压环境对管道几何参数、超声传播时间量和流速代表性的影响，提出了基于实验数据和理论分析的评估方法。流场适应性不确定度评定，通过模拟不同流场形态下的测量条件，评估流场对测量结果的系统性影响。

再次，在长期性能漂移不确定度方面，强调了零点漂移、仪表系数漂移以及安装影响等因素的长期监测和评估。提出了通过实验室复现性实验、现场周期性核查以及长期跟踪测试等手段，持续监测测流系统性能的稳定性，并据此调整和优化维护策略。

最后，还详细说明了不确定度评定的具体实施步骤，包括测试方法的选择、测试数据的记录和处理、不确定度分量的量化和合成等。同时，强调了不确定度评定过程中应遵循的原则，如方法的合理性、数据的充分性和结果的可靠性等，以确保评定结果的准确性和有效性。

7. 附录

附录 A： 介质条件参量外推的评定方法。针对介质条件参量（如温度、压力等）外推过程中可能引入的不确定度，提供了具体的评定方法。首先，介绍了外推参数的概念，包括几何参数、超声传播时间量和流速代表性等。接着，详细阐述了理论分析方法和直接测量法两种外推评定手段。理论分析方法建议通过数值计算、数值仿真等手段对管道几何参数变化进行估计，或在理论模型基础上分析几何膨胀过程中可能产生的偏差。直接测量法则采用高温环境下适用的非接触式测量手段，对管道和超声传感器的几何形状进行直接测量。此外，还讨论了超声传播时间测量和流速代表性的外推评定方法，强调了外推模型合理性和实验室标定流场与现场情况差异的分析。

附录 B： 流场适应性的评定方法。针对流场形态对流量测量结果可能产生的系统性影响，提供了流场适应性的评定方法。一方面，建议在验证 CFD 数值仿真流场分布准确性的前提下，采用 CFD 数值仿真模拟上游管线，计算由流场分布可能引入的流量偏差。另一方面，当上游管线条件较为复杂或不便于模拟时，可采

用扰流模拟件开展实流测试，分析上游扰流场可能引入的流量偏差范围。这两种方法共同构成了流场适应性评定的完整框架。

附录 C：密度测量结果的评定方法。详细说明了密度测量结果不确定度的评定方法。首先，列出了密度测量过程中可能引入不确定度的主要来源，包括密度测量公式、介质温度和介质压力等。接着，给出了密度相对标准不确定度的计算公式，并解释了公式中各符号的含义和计算方法。此外，还讨论了如何根据现场工作条件确定密度测量公式的适用性和准确性，以及如何通过实验验证和校准手段提高密度测量的精度和可靠性。

附录 D：长期使用性能改变的评定方法。针对外夹式超声测流系统长期使用过程中可能发生的性能变化，提供了具体的评定方法。首先，强调了长期使用后仪表系数变化量的监测和评估的重要性，并提出了基于实践经验、实验室复现性实验和长期跟踪测试等手段的评估方法。接着，详细讨论了仪表系数漂移的原因和影响因素，并提出了相应的校正和维护策略。此外，还考虑了安装影响对流量测量结果的不确定性，建议通过直接替换超声换能器后进行实流校准实验来评估安装影响的大小。最后，给出了长期使用性能改变评定过程中应遵循的原则和注意事项，以确保评定结果的准确性和有效性。

三、主要试验的分析综述报告、技术经济论证或预期的经济效果

通过系统的试验研究，全面评估了高温流体外夹式超声测流系统的不确定度来源及其影响，涵盖了基本性能测试、密度测量、介质条件外推、流场适应性和长期使用性能等多个方面，提出了相应的评定方法和补偿措施，为测流系统的实际应用提供了科学依据。

研究成果在提高测量准确性和可靠性方面具有显著技术经济效益，可降低生产损失和能源消耗，为相关行业带来巨大经济效益；同时，提出的评定方法和补偿措施为测流系统的校准和维护提供了科学依据，有助于降低维护成本，提高使用寿命和可靠性，具有广泛的社会效益，对推动行业技术进步和可持续发展具有重要意义。

四、采用国际标准和国外先进标准的程度

本标准高温流体介质外夹式超声测流系统首个标准，标准的撰写参照了相关国内和国际的最新研究成果，对后续进一步开展液体流量、核电、火电、热量

计量等相关领域标准撰写奠定了良好的基础。

五、与有关的现行法律和强制性国家标准的关系

无

六、重大分歧意见的处理经过和依据

无

七、标准过渡期的建议

无。

八、废止现行有关标准的建议

无

九、其它应予说明的事项

无

附件 3

中国计量测试学会团体标准（征求意见稿）

征求意见稿反馈表

建议人姓名	职称/职务	专业	
单位		联系电话	
地址		邮 编	
章、条序号	修改意见或建议		理由/背景材料

衷心感谢您对本项工作的大力支持和辛勤指点！