

T/JLA

福建省计量测试学会团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

蒸汽流量计在线检测方法

OnLine Testing Method for Steam Flowmeters

(征求意见稿)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

福建省计量测试学会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 概述 2

 4.1 组成 2

 4.2 工作原理 2

5 技术要求 4

 5.1 示值误差 4

 5.2 重复性 4

6 检测要求 4

 6.1 环境条件 4

 6.2 被测流量计 5

 6.3 标准表 5

 6.4 其他配套设备 5

7 检测项目 5

8 检测方法 5

 8.1 测量点选取 5

 8.2 检测流量点 5

 8.3 管道降噪处理 5

 8.4 检测准备 5

 8.5 检测操作步骤 6

 8.6 示值误差检测 6

 8.7 其他要求 6

9 检测结果处理 6

 9.1 示值误差 6

 9.2 重复性 7

 9.3 不确定度 7

10 检测结果表达 7

附录 A（资料性） 在线检测记录参考格式 8

附录 B（规范性） 检测证书（内页） 参考格式 9

附录 C（资料性） 流量计检测结果不确定度的评定方法与示例 10

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。

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。

本文件由福建省计量科学研究院提出。

本文件由福建省计量测试学会归口。

本文件起草单位：福建省计量科学研究院、广州能源检测研究院、广州钛尔锐科技有限公司、厦门联风自动化科技有限公司、厦门厦钨新能源材料股份有限公司。

本文件主要起草人：*****。

蒸汽流量计在线检测方法

1 范围

本文件规定了蒸汽流量计在线检测技术要求、检测要求、检测项目和方法等。

本文件适用于采用外夹式超声流量计做标准表,开展以蒸汽为介质的使用中流量计(包括差压流量计、涡街流量计、超声流量计等)的在线检测,其他蒸汽管道流量在线检测可参照执行。

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。

JJF1001-2011 通用计量术语及定义

JJF1004-2004 流量计量名词术语及定义

GB 17167 用能单位能源计量器具配备和管理通则

IAPWS R7-97(2012) Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam

GB/T34060 蒸汽热量计算方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超声流量计 ultrasonic flowmeter

利用超声波在流体中的传播特性来测量流量的流量计。

3.2

超声换能器 ultrasonic transducer

在电信号作用下可产生声波输出,并可将声波信号转换为电信号的器件。

3.3

外夹式超声流量计 clamp-on ultrasonic flowmeter

将超声换能器固定在流体管道外,声波传播的路径透过流体管道壁的流量计。

3.4

声道 ultrasonic path

超声在成对的超声探头间传播的实际路径。

注:声道有时也称为声路。

3.5

声道面 ultrasonic plane

声道角相同的一组声道所在的流道斜截面。

3.6

声道长度 ultrasonic 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

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,通常以流道中心以上为正,以下为负,正好过流道中心的为零。

3.9

饱和蒸汽 saturated steam

密闭空间内气、液两相处于动态平衡状态即饱和状态的蒸汽。

3.10

过热蒸汽 hyperthermia steam

在一定压力下对干饱和蒸汽再加热使其温度超过该压力下的饱和蒸汽温度的蒸汽。

4 概述

4.1 组成

本方法通过现场安装蒸汽流量在线检测装置，以外夹式超声流量计作为标准表，基于超声传播时间法，结合几何量、时间量和流量算法模型来测得到流速，并计算出蒸汽流量，通过与现场蒸汽流量计的数据比较，确定流量计的计量性能。也适用于未安装流量计的蒸汽管道流量的现场流量检测。

蒸汽流量在线检测装置主要包括：外夹式超声流量计主机、换能器和线缆、换能器固定装置、几何参数测量设备等。

4.2 工作原理

4.2.1 时差法原理

超声传播时差法通过测量超声在流体中传播的时间差来计算流体的流速和流量。如图 1a 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，流体中超声传播速度 C 会与声道投影流速叠加，造成超声从下游到上游超声换能器的传播时间 t_u 大于从上游到下游超声换能器的传播时间 t_d ，各量之间的关系是：

$$t_u = \frac{L}{C - V \cos \varphi}, \quad t_d = \frac{L}{C + V \cos \varphi} \dots\dots\dots(1)$$

式中：

- t_u —— 超声波从下游到上游的传播时间；
- t_d —— 超声波从上游到下游的传播时间；
- L —— 声道长度；
- φ —— 声道角；
- C —— 超声波在流体中的传播速度；
- V —— 流体的轴向平均流速。

由式错误!未找到引用源。可以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：

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

式中，超声传播时间差 $\Delta t = t_u - t_d$ ，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，介质成分及温度、压力的变化不会直接影响流速的测量结果。

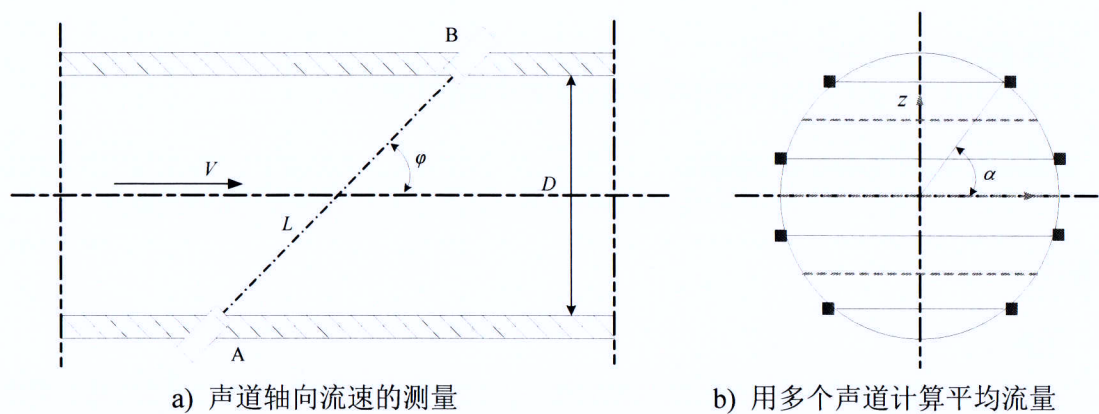


图1 传播时差法原理示意图

为了得到准确的管道平均流速，可以在不同的声道高度 z_i 上平行布置若干声道，如图1b 所示，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 $\bar{V}$ ，进而得到流量。

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

式中：

- A ——流道断面面积；
- N ——声道数。

4.2.2 互相关法原理

通过互相关法确定流体流速，将相互间距为 Δx 的两组同型号超声波传感器依次安装在完全充满流体的管道上，两组传感器构成测量栅A和B，交替从发射器A1和B1发出超声波信号，由相应的接收器A2和B2接收。超声信号的振幅和相位由湍流流动的涡流调制，由于涡流随流体流动，它们会以时间偏移量 Δt 通过测量栅A和B，因此，测量栅A和B的超声波信号的调制模式也会有 Δt 的延时。此时间偏移 Δt 是通过调制信号的互相关来测量的，平均流速可以用流场修正系数计算。

$$V = \frac{k_{Re} \cdot \Delta x}{\Delta t} \cdots \cdots (4)$$

式中：

- k_{Re} ——流场修正系数；
- Δx ——测量栅间距；
- Δt ——调制模式的时间偏移量。

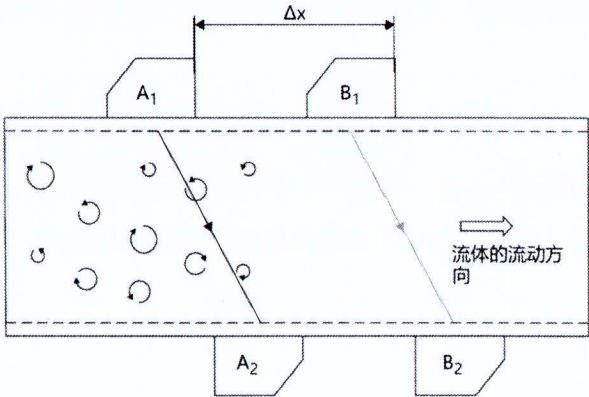


图2 互相关法原理示意图

A1 - 测量栅A发射器，A2 - 测量栅A接收器，B1 - 测量栅B发射器，B2 - 测量栅B接收器

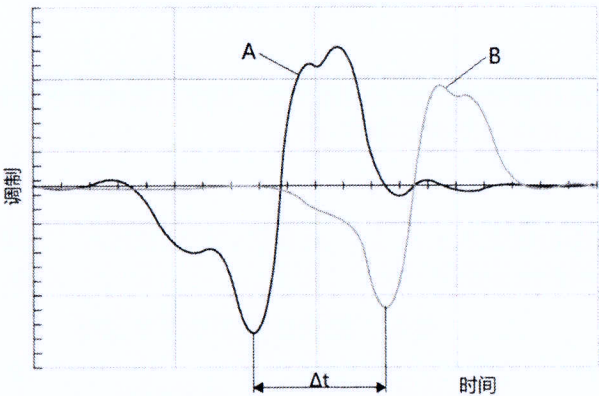


图3 调制信号的时间偏移量 Δt

A - 测量栅A的调制信号，B - 测量栅B的调制信号

5 技术要求

5.1 示值误差

蒸汽流量计示值误差通常用相对误差表示，示值最大允许误差见表1。

表1 流量计最大允许误差

准确度等级	1.5	2.0	2.5
最大允许误差/%	±1.5	±2.0	±2.5

5.2 重复性

流量计重复性不得超过相应准确度等级规定的最大允许误差绝对值的 1/3。

6 检测要求

6.1 环境条件

6.1.1 环境条件一般应满足：

- 环境温度：（-10～40）℃；
- 相对湿度：（10～95）%RH；
- 大气压力：（86～106）kPa。

6.1.2 工作介质应是过热蒸汽或饱和蒸汽，本方法不适用于不饱和蒸汽。

6.1.3 在防爆区域开展在线检测工作时，所有设备设施及工具应符合相关安全防爆要求。

6.1.4 场地满足安全操作要求。

6.1.5 在工作压力下在线装置各部件连接处应无泄漏。

6.1.6 外界磁场对在线装置和被测流量计的影响可忽略。

6.1.7 振动和噪声对在线装置和被测流量计的影响可忽略。

6.1.8 被测流量计出口处应保持足够的背压，避免使介质出现空化的工况测量条件。

6.2 被测流量计

流量计的安装与使用应满足此类型流量计及厂家要求。

6.3 标准表

标准表应在蒸汽实流标准装置上做定流速溯源，流速应覆盖被测对象的流速范围，其扩展不确定度应不大于被测流量计最大允许误差绝对值的 1/2 。

6.4 其他配套设备

其他配套设备的技术指标要求见表 2 ，其中用于测量管道尺寸与壁厚的计量器具应有有效的检定或校准证书。管道外径测量推荐使用不低于 I 级卷尺，亦可采用卡尺或 π 尺，壁厚测量推荐使用测厚仪。

表2 配套计量器具技术指标

序号	标准器名称	测量范围	技术指标	用途
1	测厚仪	(0~50) mm	分辨率: 0.1mm	测量管道壁厚
2	钢卷尺	>2m	I 级	测量管道外径, 亦可采用卡尺或 π 尺
3	秒表	大于 999s	分辨率:0.1s	计时

7 检测项目

示值误差和重复性。

8 检测方法

8.1 测量点选取

现场选取流场充分发展稳定蒸汽管段，安装蒸汽流量在线检测装置，测量点满足超声流量计对前后直管段的安装要求, 上游不得少于20倍管道直径，下游不得小于10倍管道直径。

8.2 检测流量点

根据现场实际情况与流量计用户协商确定检测流量点，流量点一般选择1~3个，每个流量点一般检测3次。现场无法调节流量时可采用在一天不同时段的方法进行不同流量点的检测。

8.3 管道降噪处理

测量点应做好降噪处理，减少外部噪声对测量的干扰影响，具体做法如下。

首先拆除测量点位置蒸汽管道上的保温层，具体长度根据测量管径大小适当调整，并清理管道表面，尽量保证管道表面洁净光滑；之后将专用降噪漆均匀涂抹在管道表面，涂抹长度不小于1米，可根据管径大小适当调整，通常情况涂抹的长度越长，信号质量越好。待漆干燥后，接着进行第二次涂抹，如此重复涂抹5到7遍，漆层厚度一般要达到在3mm到5mm，等到漆层干燥即可。注意此过程要做好个人防护，防止高温烫伤。

8.4 检测准备

8.4.1 现场检查蒸汽流量计内置的影响计量准确度的关键参数输入的是否正确。

8.4.2 现场检查流量计的安装与使用是否满足流量计说明书的要求。

8.4.3 现场检查流量计配套的温度、压力传感器（变送器）是否正常工作。

8.4.4 检查并记录流量计的当前蒸汽工作温度、压力和流速及蒸汽状态是否满足检测要求。

8.4.5 将与被检蒸汽流量计的口径、流速相同（或接近）的标准表仪表系数设置于标准表内。

8.5 检测操作步骤

检测操作步骤如下：

- a) 测量被测管道周长，测量次数不小于三次，测量前应清理管道表面锈迹和其他干扰测量的附着物，取三次测量的平均值作为管道直径。
- b) 测量蒸汽管道壁厚，应在管道圆周不同位置测量不小于五次，取平均值作为管道壁厚。
- c) 将管道直径、壁厚、材质等参数输入到蒸汽在线检测装置内，计算出超声换能器探头之间的安装距离，选择正确的安装方式，安装方式如图 4 所示，蒸汽测量一般选择 Z 法安装。

注：对无法测量的参数，如管道材质、衬里材料、厚度等，应根据技术资料现场查明确认。

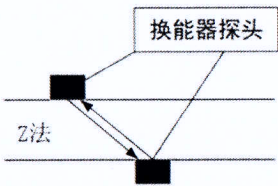


图4 传感器安装示意图

- d) 将温度、压力信号接入到装置上，如果被测蒸汽管道温度、压力稳定的情况下，也可以直接将温度、压力值输入到装置内。
- e) 根据装置计算的探头安装距离，在涂抹降噪漆的管段中间位置根据探头大小刮除降噪漆，安装传感器探头，安装位置应避开顶部和底部，在管道中部选择合适位置，并固定牢固，安装过程注意要做好个人防护，防止高温。
- f) 完成安装，检查信噪比、信号质量、声速等是否在满足要求，是否合理范围内，如果不满足要求，应分析原因，排除故障，满足要求则可以开始测量。
- g) 核查被检管道内蒸汽流速是否在标准表的溯源范围内，如超出溯源范围则不能检测。
- h) 示值误差检测，按 8.6 节操作。

8.6 示值误差检测

标准表和被测流量计示值保留四位有效数字，现场流量波动较大或被测流量计流量示值分辨力低时一般采用累积流量法，流量波动小于3%时，可采用瞬时流量法。可采用同步拍照系统代替人工读数。

8.6.1 累积流量法

若采用累积流量法，则应读取至少30分钟的流量累积值作为该次测量的标准表和流量计示值。

8.6.2 瞬时流量法

每次检测时，由两名检测人员同时读取并记录流量计和标准表的流量示值。若采用瞬时流量法，则至少读取30个瞬时流量数值，读数时间间隔应相同，之后在做平均值计算时允许按规则剔除读数粗大误差。以计算出的平均值作为该次测量的标准表和流量计示值。

8.7 其他要求

管道上有溯源过的温压变送器，且准确度等级满足需求的情况下，可以使用已有的温压变送器的测量数据，否则另外安装经溯源过的高精度温度、压力变送器。

9 检测结果处理

9.1 示值误差

累积流量法各流量点每次测量的示值误差 E_{ij} 按式（5）计算：

$$E_{ij} = \frac{Q_{ij} - (Q_s)_{ij}}{(Q_s)_{ij}} \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

式中：
 Q_{ij} ——被检流量计第*i*流量点第*j*次检测的累积流量示值；
 $(Q_s)_{ij}$ ——标准表第*i*流量点第*j*次检测的累积流量示值。

瞬时流量法各流量点每次测量的示值误差 E_{ij} 按式（6）计算：

$$E_{ij} = \frac{q_{ij} - (q_s)_{ij}}{(q_s)_{ij}} \times 100\% \dots\dots\dots(6)$$

式中：
 q_{ij} ——被检流量计第*i*流量点第*j*次检测的瞬时流量示值；
 $(q_s)_{ij}$ ——标准表第*i*流量点第*j*次检测的的瞬时流量示值。

取三次测量的在线示值误差平均值作为该流量点的在线示值误差 E_i 。

9.2 重复性

流量计每个流量点的重复性 $(E_r)_i$ 按式（7）计算：

$$(E_r)_i = \frac{(E_{ij})_{\max} - (E_{ij})_{\min}}{C_n} \dots\dots\dots(7)$$

式中：
 $(E_r)_i$ ——第 *i* 流量点的重复性。
 C_n ——极差法系数，*n* = 3时， C_n =1.69。

取流量计所有流量点的重复性最大值作为该台流量计的重复性 E_r 。
重复性超出 5.2节 要求时，在检测证书上应给出相关提示。

9.3 不确定度

各流量点的不确定度参照附录C进行评定，取各流量点的扩展不确定度最大值作为被检测流量计的扩展不确定度。

10 检测结果表达

检测记录和检测证书格式可参考附录 A 和附录 B。

附录 A
(资料性)
在线检测记录参考格式

委托单位			地 址			
流量计	名 称		型 号		编 号	
	制造单位		准确度等级	级	规格	
	流量范围		仪表系数			
标准表	证书号		不 确 定 度			
	名 称		型 号		编 号	
	换能器型号		编 号		安装方式	法
标准管段	管道内径	mm	管道壁厚	mm	管道材质	
	衬里材质		衬里厚度	mm	/	/
环境条件	环境温度	℃	相对湿度	%RH	大气压力	kPa
	蒸汽温度	℃	蒸汽压力	MPa	蒸汽状态	
检测依据						
标准表状态	使用前:		使用后:			
流量点 序号	标准表示值 (t/h 或 t)	流量计示值 (t/h 或 t)	示值误差 (%)	示值误差 平均值 (%)	重复性 (%)	扩展不确定 度 (k=2)
1						
2						
3						
备注						

检测： 核验： 检测日期： 年 月 日

附 录 B
(规范性)
检测证书(内页) 参考格式

1. 本单位出具的数据均可溯源至国家计量基准。

2. 本次检测依据的技术文件:

3. 本次检测所使用的计量器具

名称: 编号: 不确定度: 证书号:

4. 检测的环境条件

温度: (°C); 相对湿度: (%RH) ; 大气压力: (kPa); 介质:

5. 检测结果

序号	标准表示值 (t/h 或 t)	流量计示值 (t/h 或 t)	示值误差 (%)	重复性 (%)	扩展 不确定度 ($k=2$)
1					
2					
3					

6. 流量计的测量不确定度: $U_r =$ ($k=2$)

7. 附注

标准管段内径: 壁厚:

附录 C

(资料性)

流量计检测结果不确定度的评定方法与示例

C.1 数学模型

流量计在线检测的示值误差 E 按公式 (C.1) 计算 (以累积流量法为例)。

$$E = \frac{Q_m - Q_s}{Q_s} \times 100\% \quad \text{.....(C.1)}$$

$$Q_s = 3.6 \frac{\rho v_s}{K} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{.....(C.2)}$$

$$d = \frac{L}{\pi} - 2\delta \quad \text{.....(C.3)}$$

式中:

E ——流量计示值相对误差;

Q_m ——流量计示值 (累积值或瞬时值), t 或 t/h;

Q_s ——标准表示值 (累积值或瞬时值), t 或 t/h;

ρ ——蒸汽密度, kg/m³

v_s ——声道上线平均流速, m/s;

K ——流速分布修正系数;

d ——管道内径, m;

L ——管道外周长, m;

δ ——管道壁厚, m。

各输入量的不确定度彼此不相关时, 合成的标准不确定度按式 (C.4) 计算。

$$u_c(E) = \sqrt{[c_{Q_m} u(Q_m)]^2 + [c_{Q_s} u(Q_s)]^2} \quad \text{.....(C.4)}$$

$$\text{式中: } c_{Q_m} = \frac{\partial E}{\partial Q_m} = \frac{1}{Q_s}, \quad c_{Q_s} = \frac{\partial E}{\partial Q_s} = \frac{-Q_m}{Q_s^2}$$

$$\begin{aligned} \text{代入化简得到: } u_c(E) &= \sqrt{\left[\frac{1}{Q_s} u(Q_m) \right]^2 + \left[\frac{-Q_m}{Q_s^2} u(Q_s) \right]^2} \\ &= \sqrt{\left[\frac{Q_m}{Q_s} \frac{u(Q_m)}{Q_m} \right]^2 + \left[\frac{-Q_m}{Q_s} \frac{u(Q_s)}{Q_s} \right]^2} \\ &= \sqrt{\left[(E+1) \frac{u(Q_m)}{Q_m} \right]^2 + \left[-(E+1) \frac{u(Q_s)}{Q_s} \right]^2} \\ &= |E+1| \sqrt{u_r^2(Q_m) + u_r^2(Q_s)} \quad \text{.....(C.5)} \end{aligned}$$

式中 $u_r^2(Q_s)$ 根据 (C.2) 的计算模型, 计算如下:

$$u_r^2(Q_s) = u_r^2(v_s) + u_r^2(\rho) + 4u_r^2(d) \quad \text{.....(C.6)}$$

式中 $u_r^2(d)$ 根据 (C.3) 的模型, 考虑钢卷尺和测厚仪一般给出的是绝对误差, 采用管道外周长和壁厚的标准不确定参与 $u_r^2(d)$ 的合成计算, 计算如下:

$$u_r^2(d) = \frac{\left[\frac{\partial d}{\partial L} u_c(L)\right]^2 + \left[\frac{\partial d}{\partial \delta} u_c(\delta)\right]^2}{d^2} = \left[\frac{1}{\pi d} u_c(L)\right]^2 + \left[\frac{2}{d} u_c(\delta)\right]^2 \dots\dots\dots (C.7)$$

所以得到示值误差的合成不确定 $u_c(E)$ 的计算式如下：

$$u_c(E) = |E + 1| \sqrt{u_r^2(Q_m) + u_r^2(v_s) + u_r^2(\rho) + \left[\frac{2}{\pi d} u_c(L)\right]^2 + \left[\frac{4}{d} u_c(\delta)\right]^2} \dots\dots\dots (C.8)$$

C.2 不确定度分量及灵敏系数

C.2.1 被测流量计示值引入的不确定度 $u_r(Q_m)$

被测流量计示值引入的不确定度分量应根据不同测量方法分别计算，当采用瞬时流量法时，受现场蒸汽负荷的变化，一般都存在流量波动，且该波动往往大于流量示值读数引起的误差，不宜采用示值读数重复性引入的不确定度，应采用流量示值分辨力 δ_x 引入的不确定度，按(C.9)计算。

$$u_r(q_m) = \frac{\frac{\delta_x}{2}}{q_m} \times 100\% = \frac{\delta_x}{2\sqrt{3}q_m} \times 100\% \dots\dots\dots (C.9)$$

当采用累积流量法时，计算累积流量起止示值的差值作为被测量示值，起止时刻只有单次读数机会，无法多次读数，同样应考虑流量示值分辨力 δ_x 引入的不确定度，同时考虑读数时间延迟引入的不确定度分量(按矩形分布)，按(C.10)计算。

$$u_r(Q_m) = \sqrt{\left(\frac{\delta_x}{2\sqrt{3}Q_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{\sqrt{3}t}\right)^2} \times 100\% \dots\dots\dots (C.10)$$

式中：

Δt ——流量计示值读数的延时，考虑起始两次读数，一般取 2s；

t ——累积流量单次测量时间，如单次测量 30 分钟，取 1800s；

对应灵敏系数 $c_{Q_m} = 1$ 。

C.2.2 平均流速测量引入的不确定度 $u_r(v_s)$

标准表蒸汽实流溯源证书给出扩展不确定度为 U ($k=2$)，则平均流速引入的不确定分量为：

$$u_r(v_s) = \frac{U}{k} = \frac{U}{2} \dots\dots\dots (C.11)$$

对应灵敏系数 $c_{v_s} = 1$

C.2.3 密度引入的不确定度 $u_r(\rho)$

蒸汽密度通过获取蒸汽的温度和压力数据，利用IAPWS R7-97(2012)的公式计算得到，由此引入的不确定主要有两个部分组成，第一部分是密度计算公式本身引入，第二部分是温度和压力传感器引入。

$$u_r(\rho) = \sqrt{[u_1(\rho)]^2 + [u_2(\rho)]^2} \dots\dots\dots (C.12)$$

(1) 密度计算公式引入的不确定度，根据IAPWS R7-97(2012)文件给出计算相对误差 ε ，低于300℃的过热蒸汽取0.05%，大于300℃，且低于500℃的，取0.1%，已基本覆盖工业常用蒸汽温度范围，按矩形分布考虑，则：

$$u_1(\rho) = \frac{\varepsilon}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (C.13)$$

(2) 温度和压力传感器引入的不确定度

通过IAPWS R7-97(2012)计算密度需要已知温度 T 和压力 p , 考虑两者不相关, 引入的相对不确定:

$$u_2(\rho) = \frac{\sqrt{[c_T u(T)]^2 + [c_p u(p)]^2}}{\rho} \times 100\% \quad \text{.....(C.14)}$$

低于800℃的过热蒸汽密度(即IAPWS R7-97(2012)划分的2区)计算公式如下:

$$\rho(\pi, \tau) = \frac{1000 p^* \pi \tau}{RT^* [1 + \sum_{i=1}^{43} n_i I_i \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i}]} \quad \text{.....(C.15)}$$

式中: $\pi = p/p^*$, $\tau = T^*/T$, $p^* = 1\text{MPa}$, $T^* = 540\text{K}$, $R = 0.461526\text{kg/(kg} \cdot \text{K)}$

p : 压力, MPa, T : 绝对温度, K

n_i , I_i , J_i 等系数详见 IAPWS R7-97(2012)表10、表11。

根据密度的计算公式, 求得灵敏度系数 c_T 和 c_p 计算公式如下:

$$c_T = \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial T}, \quad c_p = \frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{\partial \rho}{\partial \pi} \cdot \frac{\partial \pi}{\partial p} \quad \text{.....(C.16)}$$

式中: $\frac{\partial \tau}{\partial T} = \frac{-T^*}{T^2}$, $\frac{\partial \pi}{\partial p} = \frac{1}{p^*} = 1$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 1000 p^* \pi \frac{1 + \Psi + \tau \sum_{i=1}^{43} n_i I_i J_i \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i - 1}}{RT^* (1 + \Psi)^2}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \pi} = 1000 p^* \tau \frac{1 + \Psi + \sum_{i=1}^{43} n_i I_i^2 \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i}}{RT^* (1 + \Psi)^2}$$

$$\Psi = \sum_{i=1}^{43} n_i I_i \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i}$$

对应灵敏系数 $c_p = 1$ 。

C.2.4 测量管道外周长 L 的标准不确定度 $u_c(L)$

测量管道外周长引入不确定度分量应考虑测量重复性和钢卷尺测量不确定度两个因素。

$$u_c(L) = \sqrt{[u_1(L)]^2 + [u_2(L)]^2} \quad \text{.....(C.17)}$$

管道外周长测量重复性引入不确定分量按(C.18)计算, 采用极差法, 当测量3次, 极差系数 C 取1.69:

$$u_1(L) = \frac{(L_{\max} - L_{\min})/C}{\sqrt{n}} \quad \text{.....(C.18)}$$

钢卷尺最大允许误差为 Δ , 引入不确定分量按(C.19)计算, 按矩形分布考虑:

$$u_2(L) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad \text{.....(C.19)}$$

对应灵敏系数 $c_L = \frac{2}{\pi d}$

C.2.5 测量管道壁厚 δ 的标准不确定度 $u_c(\delta)$

测量管道壁厚引入不确定度分量应考虑测量重复性和测厚仪测量不确定度两个因素。

$$u_c(\delta) = \sqrt{[u_1(\delta)]^2 + [u_2(\delta)]^2} \quad \text{.....(C.20)}$$

壁厚测量重复性引入不确定分量按(C.21)计算:

$$u_1(\delta) = \frac{s(\bar{\delta})}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2} \dots\dots\dots(C.21)$$

若测量管道壁厚的测厚仪溯源证书给出扩展不确定度为U（k=2），则：

$$u_2(\delta) = \frac{U}{2} \dots\dots\dots(C.22)$$

对应灵敏系数 $c_\delta = \frac{4}{d}$

C.2.6 不确定度分量一览表

不确定度分量汇总见表C1：

表C1 不确定度分量一览表

序号	符号	来 源	不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$c_i \cdot u(x_i)$
1	$u_r(Q_m)$	测量重复性		1	
2	$u_r(v_s)$	标准表		1	
3	$u_r(\rho)$	蒸汽密度计算		1	
4	$u_c(L)$	管道外周长测量		$\frac{2}{\pi d}$	
5	$u_c(\delta)$	管道壁厚测量		$\frac{4}{d}$	

C.3 合成标准不确定度及扩展不确定度

C.3.1 合成标准不确定度 $u_c(E)$

按式（C·8）计算，如下：

$$u_c(E) = |E+1| \cdot \sqrt{[u_r(Q_s)]^2 + [u_r(v_s)]^2 + [u_r(\rho)]^2 + \left[\frac{2}{\pi d} \cdot u_c(L)\right]^2 + \left[\frac{4}{d} u_c(\delta)\right]^2} \dots\dots\dots(C.23)$$

C.3.2 扩展不确定度U

$$U = k \cdot u_c(E), k = 2 \dots\dots\dots(C.24)$$

C.4 测量结果不确定度评定实例

C.4.1 检测条件

被检测流量计为涡街流量计，蒸汽管道口径DN80，蒸汽温度161.5℃，压力0.5348MPa，在280m³/h的稳定流量点以累积流量法测量，标准表（外夹式超声流量计）在蒸汽实流溯源证书给出扩展不确定度为U=0.5%（k=2）。

C.4.2 被测流量计示值引入的不确定度 $u_r(Q_m)$

被测蒸汽流量计在280m³/h流量下，重复测试三次的累积流量分别为0.656t、0.650t、0.643t，平均值为0.650t，测试时间30分钟，累积流量的最小分辨力为0.001t，示值引入不确定度分量：

$$u_r(Q_m) = \sqrt{\left(\frac{0.001}{2\sqrt{3} \times 0.650}\right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{3} \times 1800}\right)^2} \times 100\% = 0.07\%$$

对应灵敏系数 $c_{Q_m} = 1$ 。

C.4.3 平均流速测量引入的不确定度 $u_r(v_s)$

标准表蒸汽实流溯源证书给出扩展不确定度为 $U = 1.0\%$ ($k = 2$)，则平均流速引入的不确定分量为：

$$u_r(v_s) = \frac{U}{k} = \frac{1.0\%}{2} = 0.5\%$$

对应灵敏系数 $c_{v_s} = 1$

C.4.4 密度引入的不确定度 $u_r(\rho)$

管道温度为 161.5°C ，压力 0.5348MPa ，通过 IAPWS R7-97(2012) 公式计算蒸汽密度为 2.7852kg/m^3 ，

(1) 密度计算公式引入的不确定度 $u_1(\rho)$ ，计算相对误差取 0.05% ，按矩形分布考虑，则：

$$u_1(\rho) = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.029\%$$

(2) 温度和压力传感器引入的不确定度 $u_2(\rho)$ ，其中温度传感器的最大允许误差为 0.2°C ，压力传感器量程为 $(0 \sim 2.5)\text{MPa}$ ，准确度等级为 0.1 级，按最大量程的误差计算不确定度，均按矩形分布，则：

$$u(T) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.115\text{K}$$

$$u(p) = \frac{2.5 \times 0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.00144\text{MPa}$$

根据 (C.16) 计算对应灵敏度系数 $c_T = -4.97 \times 10^{-3}$ ， $c_p = 4.9494$ ，得到：

$$u_2(\rho) = \frac{\sqrt{[-0.00497 \times 0.115]^2 + [4.9494 \times 0.00144]^2}}{2.7852} \times 100\% = 0.26\%$$

合成得到： $u_r(\rho) = \sqrt{[u_1(\rho)]^2 + [u_2(\rho)]^2} = \sqrt{[0.029\%]^2 + [0.26\%]^2} = 0.26\%$

对应灵敏系数 $c_\rho = 1$ 。

C.4.5 测量管道外周长 L 的标准不确定度 $u_c(L)$

测量管道外周长三次数据为 278.5mm 、 280.0mm 、 279.5mm ，平均值为 279.3mm ，根据壁厚计算管道内径 d 为 79.9mm ，测量所用钢卷尺为 I 级，最大允许误差为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，则：

$$u_c(L) = \sqrt{\left(\left[\frac{280.0 - 278.5}{1.69 \times \sqrt{3}}\right]\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0.52\text{mm} = 5.2 \times 10^{-4}\text{m}$$

对应灵敏系数 $c_L = \frac{2}{\pi d} = 7.97$

C.4.6 测量管道壁厚 δ 的标准不确定度 $u_c(\delta)$

测量管道壁厚五次数据为 4.52mm 、 4.50mm 、 4.51mm 、 4.49mm 、 4.47mm ，平均值为 4.50mm ，所用测厚仪在 $(3.3 \sim 10)\text{mm}$ 范围内， $U = 0.02\text{mm}$ ($k=2$)，则：

$$u_c(\delta) = \sqrt{[u_1(\delta)]^2 + [u_2(\delta)]^2} = \sqrt{\left[\frac{0.019}{\sqrt{5}}\right]^2 + \left[\frac{0.02}{2}\right]^2} = 0.015\text{mm} = 1.5 \times 10^{-5}\text{m}$$

对应灵敏系数 $c_{\delta}=\frac{4}{d}=50$

序号	符号	来 源	不确定度分量 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$c_i \cdot u(x_i)$
1	$u_r(Q_m)$	测量重复性	0.07%	1	0.07%
2	$u_r(v_s)$	标准表	0.5%	1	0.5%
3	$u_r(\rho)$	蒸汽密度计算	0.26%	1	0.26%
4	$u_c(L)$	管道周长测量	$5.2\times10^{-4}\text{m}$	7.97m^{-1}	0.414%
5	$u_c(\delta)$	管道壁厚测量	$1.5\times10^{-5}\text{m}$	50m^{-1}	0.075%

C. 4. 7 合成标准不确定度 $u_c(E)$

按式 (C.8) 计算，式中 $|E+1|\approx 1$ ，简化计算如下：

$$u_c(E)=\sqrt{(0.07\%)^2+(0.5\%)^2+(0.26\%)^2+(0.414\%)^2+(0.075\%)^2}=0.707\%$$

C. 4. 8 扩展不确定度 U

$$U=0.707\%\times 2\approx 1.4\%(k=2)$$
