

天津市地方计量技术规范

JJF(津)92-2023

DN50 以上大口径热量表 在线校准规范

Online Calibration Specification of heat meters

with diameters bigger than DN50

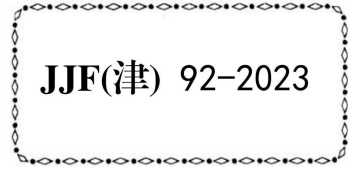
2023-06-30 发布

2023-09-30 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

DN50 以上大口径热量表在线
校准规范

Online Calibration Specification of heat
meters with diameters bigger than DN50



归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院

本规范委托天津市计量监督检测科学研究院负责解释

本规范主要起草人：

李 坡（天津市计量监督检测科学研究院）

施 鑫（天津市计量监督检测科学研究院）

路 遥（天津市计量监督检测科学研究院）

参加起草人：

李毅堂（天津市计量监督检测科学研究院）

于劲竹（天津市计量监督检测科学研究院）

王锡钢（天津市计量监督检测科学研究院）

刘 明（天津市计量监督检测科学研究院）

赵 轶（天津市计量监督检测科学研究院）

目 录

引 言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和定义	(1)
3.1 在线校准 online calibration	(1)
3.2 比焓值 enthalpy value	(1)
3.3 超声换能器 ultrasonic transducer	(1)
3.4 便携式超声波流量计 portable ultrasonic meter	(1)
3.5 标准直管段 standard straight pipeline	(1)
4 概述	(2)
5 计量性能要求	(2)
5.1 准确度等级	(2)
5.2 最大允许误差	(3)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 主要标准器及配套设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 校准项目	(4)
7.2 校准方法	(4)
7.3 数据处理	(6)
8 校准结果的表达	(9)
9 复校时间间隔	(10)
附录 A 校准记录参考格式	(11)
附录 B 校准证书参考格式	(13)
附录 C 热量测量系统校准结果的不确定度评定实例	(14)

引言

为满足供热、用热企业对热量表的现场计量要求，结合天津市热量表行业现状，特编制本规范。

本规范适用于以液体为媒介的口径 DN50 以上的热量表、以及相似原理的热量计量系统或冷量计量系统的在线校准。在规范中制定了热量（冷量）、流量、温度、温差参数的在线校准方法和使用的校准装置，为在线校准热量表提供了工作依据。

GB/T 32224-2020《热量表》、GB/T 30121-2013《工业铂热电阻及铂感温元件》、JJG 225-2001《热能表》、JJG 160-2007《标准铂电阻温度计》、JJF(津) 54-2021《液体流量计在线校准规范》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次制定。

DN50 以上大口径热量表在线校准规范

1 范围

本规范适用于以液体为媒介的热交换管网中，DN50 以上大口径热量表的流量、温度、温差、热量（或冷量）现场在线校准，相似原理的热量（冷量）计量系统参考本规范执行校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 160 标准铂电阻温度计

JJG 225 热能表

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF(津)54 液体流量计在线校准规范

GB/T 30121 工业铂热电阻及铂感温元件

GB/T 32224 热量表

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 术语和定义

3.1 在线校准 online calibration

在热量表工作现场，确定热量表所指示的流量值、温度值、温差值、热量值与标准表所复现的上述值之间关系的一组操作。

3.2 比焓值 enthalpy value

在某一温度下每千克介质中含有的能量，单位是 kJ/kg。

3.3 超声换能器 ultrasonic transducer

在电信号作用下可产生声波输出，并可将其转换为电信号的器件。

3.4 便携式超声波流量计 portable ultrasonic flowmeter

可将换能器直接固定在流体管道外，超声波传播的路径透过流体管道壁的流量计。

3.5 标准直管段 standard straight pipeline

用耐腐蚀性较强的材质制作的、适合标准流量计安装的、可以准确测量的一段管道。

4 概述

介质流经热交换系统中的热量表时,根据流量传感器测出的流量和温度传感器测出的进、出口温度,及介质流经的时间,通过计算器计算热交换系统释放或吸收的热量。热交换系统释放或吸收的热量按式(1)和式(2)计算:

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} q_m \times \Delta h \times dt \quad (1)$$

$$q_m = \rho \times q_v \quad (2)$$

式中:

Q ——热交换系统释放或吸收的热量,单位为千焦(kJ);

q_m ——流经热量表的介质质量流量,单位为千克每小时(kg/h);

Δh ——热交换系统进、出口温度下对应介质的质量比焓值的差,单位为千焦每千克(kJ/kg);

t ——工作时间,单位为小时(h);

ρ ——流经热量表介质的密度,单位为千克每立方米(kg/m³);

q_v ——流经热量表介质的体积流量,单位为立方米每小时(m³/h)。

5 计量性能要求

5.1 准确度等级

热量表的计量准确度等级按最大允许误差分为1级表、2级表、3级表,误差采用相对误差表示,并按式(3)计算:

$$E = \frac{V_d - V_c}{V_c} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

E ——误差;

V_d ——测量值;

V_c ——约定量值。

5.2 最大允许误差

对于不同等级的热量表的流量、温度、温差、热量的最大允许误差，如表 1 所示：

表 1 热量表的最大允许误差

等级	流量示值误差限 E_q	温度示值误差限 E_θ	热量示值误差限 E_h
1 级表	$\pm(1+0.01\frac{q_p}{q})\%$ 且 $\leq\pm 5\%$	配对温度传感器的温差 误差应满足 $\pm(0.5+3\frac{\Delta\theta_{\min}}{\Delta\theta})\%$; 单支温度传感器温度误差 应满足 $\pm(0.30+0.005 \theta)^\circ\text{C}$	$\pm(2+4\frac{\Delta\theta_{\min}}{\Delta\theta}+0.01\frac{q_p}{q})\%$
2 级表	$\pm(2+0.02\frac{q_p}{q})\%$ 且 $\leq\pm 5\%$		$\pm(3+4\frac{\Delta\theta_{\min}}{\Delta\theta}+0.02\frac{q_p}{q})\%$
3 级表	$\pm(3+0.03\frac{q_p}{q})\%$ 且 $\leq\pm 5\%$		$\pm(4+4\frac{\Delta\theta_{\min}}{\Delta\theta}+0.05\frac{q_p}{q})\%$

注：以上指标不是用于合格判据，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：(-20~45) °C；

相对湿度：(35~95) %；

大气压力：(86~106) kPa；

测量管道内应压力充足，保证工作介质充满管道且流态稳定。热量表管道上游或者下游合适位置具有可供测量标准器附着的已去除保温材质后裸露的、无衬里的碳钢或不锈钢管段，表面需进行打磨处理且长度需满足校准要求，且管壁厚度可知。

6.2 主要标准器及配套设备

6.2.1 主要标准器

主要标准器包括便携式超声波流量计和配对二等标准铂电阻温度计，其技术指标如表 2 所示。

表 2 主要设备

序号	设备名称	技术要求	用途
1	便携式超声波流量计	检定证书，准确度等级不低于 0.5 级，能力范围应覆盖被测表口径和流量	在线校准流量
2	配对二等标准铂电阻温度计	检定证书，满足二等标准铂电阻温度计等级要求，温度范围应覆盖 (-50~150) °C	在线校准温度、温差

6.2.2 配套设备

配套设备见表 3 所示。

表 3 配套设备

序号	设备名称	技术要求	用途
1	恒温槽	至少 2 个槽, 工作区域最大温差不大于 0.02°C , 水平温场均匀性不大于 0.01°C 。	模拟进水、出水端温场
2	钢卷尺	II 级及以上, 即在示值刻度不高于 1cm 时, 允许误差为 $\pm 0.2\text{mm}$, 高于 1cm 但低于 10cm, 误差为 $\pm 0.4\text{mm}$ 。	测量试验管道外直径以及换能器安装距离
3	测厚仪	最大允许误差: $\pm 0.01\text{mm}$	测量试验管道壁厚

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准的项目包括流量、温度及温差、热量。校准前, 应先对被测表的铭牌、显示及工作状态进行检查。

7.2 校准方法

7.2.1 流量校准

A) 选取与被校流量计应直接串联的标准管段, 前后直管段长度能够保证便携式超声波流量计准确计量的要求, 去除标准管段管壁上的油漆、污垢、铁锈等, 露出管道材质。

B) 测量标准管段的外径、壁厚, 查询内在介质的温度等参数, 并将参数输入到便携式超声波流量计的主机, 得出换能器安装距离 L , 并在管段上标记位置, 对换能器均匀涂抹耦合剂后, 根据介质流动方向, 将换能器按上下游标识正确安装。

C) 等待便携式超声波流量计正常工作后, 流量波动的范围应在该校准点的 $\pm 5\%$ 以内, 再进行流量校准。

D) 校准可选取流量值或累计流量值, 但宜优先选取累计流量值校准方式。采用累计值校准时, 可采用同步拍照法记录被测表和标准表的初始和终止值, 如果条件允许, 亦可采用脉冲、电流等同步输出方式采集上述值, 且测量时间应足够长, 使得被测表采集频率等因素对测量结果造成的影响应可忽略。

E) 校准前应与客户协商校准点的选取。在条件允许的情况下, 宜在流量范围内均匀选取 3 个流量点 (或根据用户需求确定流量点)。在条件不允许的情况下, 将当前流

量点作为校准点。每个流量点重复校准 6 次。

7.2.2 温度和温差校准

A) 范围的选择:

温度校准（即单支温度传感器校准）：

选择如下 3 个温度范围内选择温度点 θ ：

- ① $\theta_{\min} \sim (\theta_{\min} + 10^{\circ}\text{C})$ （当 $\theta_{\min} < 20^{\circ}\text{C}$ 时）或 $(35 \sim 45)^{\circ}\text{C}$ （当 $\theta_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$ 时）；
- ② $(45 \sim 55)^{\circ}\text{C}$ （常温型）或 $(75 \sim 85)^{\circ}\text{C}$ （高温型）；
- ③ $(\theta_{\max} - 5^{\circ}\text{C}) \sim \theta_{\max}$ 。

温差校准（配对温度传感器校准）：

选择如下 3 个温差点 $\Delta \theta$ ：

- ① 被测表实际管路中的温差：测量入口和出口温度传感器的恒温设备温度调节为与被测量系统的介质温度一致；
- ② 被测表实际管路中的最小测量温差；
- ③ 被测表实际管路中中的最大测量温差。

B) 校准时将被测表的 2 个温度传感器分别放入恒温设备中（如校准时条件允许，最好在一个恒温槽中分别测试配对温度传感器），浸没深度一致，等待温度稳定，校准前后温度变化不应超过 0.1°C 。

C) 对单只温度传感器的校准是在同一个恒温设备内进行，将恒温设备的温度控制在校准温度点，每个点至少读 2 个过程，每个读数过程为：标准铂电阻温度计 → 温度传感器（入口或出口） → 标准铂电阻温度计；配对温度传感器的校准是在 2 台恒温设备中进行，按温差点控制温度，每个温差点至少读 2 个过程，每个过程为：标准铂电阻温度计 1 → 入口温度传感器 → 标准铂电阻温度计 2 → 出口温度传感器（如校准时条件允许，最好在一个恒温槽中分别测试配对温度传感器，先后设定出口和入口温度，读数过程为：标准铂电阻温度计 → 温度传感器（出口或入口） → 标准铂电阻温度计）。

D) 误差计算方法：对单只温度传感器（入口或出口）校准，取被校传感器显示温度的算术平均值与标准器对应温度值的算术平均值之差作为传感器的误差；配对温度传感器温差的校准，取被校配对温度传感器温差的算术平均值与标准温差的算术平均值之差的相对误差。

E) 单支温度传感器和配对温度传感器的校准结果可参考条款 5 中的要求。

7.2.3 热量校准

热量的计算方法采用焓差法（计算按照公式（1））：将便携式超声波流量计安装在标准管段处并平稳运行，将被测表的配对温度传感器分别放入恒温设备中， $\Delta \theta$ = 实际被测系统的温差；并且入口和出口温度传感器温度设定要与被测系统介质实际温度相近或尽量一致并且稳定；

校准开始后，同时开始记录被测表的热量初值和标准流量测量器具的累计流量初值，待流量计累计流量累计一段时间后校准结束，同时记录被测表的热量末值和标准流量测量器具的累计流量末值，进出口温度查水密度表，得到热交换入口的水的密度值，与体积累计量相乘得到水的质量值，同时查询进出口温度分别对应的质量焓值得到焓差值，计算出标准热量值，完成 1 次校准过程。重复测量 6 次，计算每次的相对误差。

7.3 数据处理

7.3.1 流量示值误差

A) 选取瞬时流量值校准时，瞬时流量值误差计算公式：

$$E_V = \frac{V - V_S}{V_S} \times 100\% \quad (4)$$

重复性计算公式为：

$$E_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_{Vi} - \overline{E_V})^2} \quad (5)$$

式中：

E_V —— 瞬时流量示值相对误差，%；

V —— 被测表的瞬时流量值， m^3/h ；

V_S —— 标准瞬时流量值， m^3/h ；

E_{Vi} —— 第 i 次瞬时流量值误差，%；

$\overline{E_V}$ —— 瞬时流量值误差平均值，%。

B) 选取累计流量值校准时，累计流量误差计算公式：

$$E_q = \frac{q - q_S}{q_S} \times 100\% \quad (6)$$

被测表累计流量计算公式：

$$q = q_{末} - q_{初} \quad (7)$$

标准累计流量计算公式:

$$q_s = q_{s末} - q_{s初} \quad (8)$$

重复性计算公式为:

$$E_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_{qi} - \overline{E_q})^2} \quad (9)$$

式中:

E_q ——累计流量示值相对误差, %;

$q_{末}$ ——被测系统流量累计末值, m^3 ;

$q_{初}$ ——被测系统流量累计初值, m^3 ;

q ——被测系统流量累计值, m^3 ;

q_s ——标准流量装置累计值, m^3 ;

E_{qi} ——第 i 次累计流量示值误差, %;

$\overline{E_q}$ ——累计流量误差平均值, %。

7.3.2 温度和温差示值误差

A) 单支温度传感器

单支(入口或出口)温度传感器误差公式:

$$E_\theta = \overline{\theta} - \overline{\theta}_s \quad (10)$$

温度传感器误差平均值计算公式:

$$\overline{\theta} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \theta_i \quad (11)$$

标准温度平均值计算公式:

$$\overline{\theta}_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \theta_{si} \quad (12)$$

式中:

E_θ ——某一温度点的误差, $^\circ C$;

$\overline{\theta}$ ——某一温度下被测温度传感器温度(入口或出口)测量平均值, $^\circ C$;

$\overline{\theta}_s$ ——某一温度下标准温度传感器温度测量平均值, $^\circ C$;

θ_i ——某一温度下被测温度传感器温度（入口或出口）第 i 次测量值， $^{\circ}\text{C}$ ；

θ_{si} ——某一温度下标准温度传感器温度第 i 次测量值， $^{\circ}\text{C}$ ；

m ——校准次数。

B) 配对温度传感器

配对温度传感器误差计算公式：

$$E_{\Delta} = \frac{\overline{\Delta\theta} - \overline{\Delta\theta}_s}{\overline{\Delta\theta}_s} \times 100\% \quad (13)$$

标准温差计算公式：

$$\Delta\theta_s = \theta_{s\lambda} - \theta_{s\text{出}} \quad (14)$$

标准温差平均值计算公式：

$$\overline{\Delta\theta}_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta\theta_{si} \quad (15)$$

被测配对温度传感器温差平均值计算公式：

$$\overline{\Delta\theta} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta\theta_i \quad (16)$$

被测配对温度传感器计算公式：

$$\Delta\theta = \theta_{\lambda} - \theta_{\text{出}} \quad (17)$$

式中：

E_{Δ} ——某一温差点相对误差，%；

θ_{λ} ——被测配对温度传感器入口温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\theta_{\text{出}}$ ——被测配对温度传感器出口温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\overline{\Delta\theta}_s$ ——某一温差点标准温差的平均值， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\overline{\Delta\theta}$ ——某一温差点被测配对温度传感器温差的平均值， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\Delta\theta_i$ ——某一温度下被测配对温度传感器温度第 i 次温差测量值， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\Delta\theta_{si}$ ——某一温度下标准温度传感器温度第 i 次温差测量值， $^{\circ}\text{C}$ 。

7.3.3 热量示值误差

热量相对误差公式：

$$E_Q = \frac{Q - Q_s}{Q_s} \times 100\% \quad (18)$$

焓差法标准热量的计算公式为：

$$Q_s = (V_{s末} - V_{s初}) \times \rho \times (h_{\lambda} - h_{出}) \quad (19)$$

重复性计算公式为：

$$E_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_{Qi} - \overline{E_Q})^2} \quad (20)$$

式中：

E_Q ——热量相对示值误差，%；

Q_s ——校准装置测量的热量值，kW·h；

Q ——被测系统显示热量值，kW·h；

ρ ——热交换回路中，流量校准装置所在测量位置的介质密度值，kg/m³；

$h_{出}$ ——热交换回路中出口温度对应的载热液体的比焓值，kJ/kg；

h_{λ} ——热交换回路中入口温度对应的载热液体的比焓值，kJ/kg；

E_{Qi} ——第 i 次累计热量示值误差，%；

$\overline{E_Q}$ ——累计热量误差平均值，%。

8 校准结果的表达

经校准的测量系统应出具校准证书，校准结果应在校准证书上反映（校准结果参考格式见附录 B）。校准证书应包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 校准地点名称；
- c) 证书的唯一性标识（如编号），页码及总页数的标识；
- d) 客户的名称和地址；
- e) 被校对象的描述和明确标识；
- f) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- g) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；

- h) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- i) 校准环境的描述;
- j) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- k) 校准证书批准人、校准员、核验员的签名或等效标识;
- l) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- m) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

校准结果应给出校准装置的热量值和被测测量系统的热量值(总量法)及相对误差, 或者校准装置和被测测量系统的流量值及相对误差、温度值及误差, 温差值及相对误差(分量法), 还应给出热量、流量、温度及温差校准结果的扩展不确定度($k=2$)。

校准结果的扩展不确定度:

不确定度通常包括以下几项: 标准装置带来的不确定度, 重复性带来的不确定度, 读数分辨力带来的不确定度。

9 复校时间间隔

复校时间间隔可根据具体情况由用户确定, 建议复校时间最长不超过 1 年。

附录 A

校准记录参考格式

委托单位: _____ 计量器具名称: _____
 规格型号: _____ 编号: _____
 温度范围: _____ 温差范围: _____ 流量范围: _____
 校准介质: _____ 环境温度: _____ 环境湿度: _____
 校准时间: _____ 校准地点: _____

校准装置信息:

主要标准器名称	型号	编号	准确度等级	检定证书号	有效期

校准结果:

序号	管道壁厚	周长
1		
2		
3		
平均		
外径		
管道材质		

1、流量分量校准 ()

累积流量值校准

校准量 测量次数	标准器体积 累计量(m ³)	被测量系统体积累计量(m ³)			误差%	重复 性%
		初值	末值	累计值		
1						
2						
3						
4						
5						
6						

2、温度校准（单支温度传感器校准）

测量次数	温度点 (°C)	被测入口温度传感器 温度示值(°C)	标准温度 示值(°C)	误差 (°C)
1				
2				
平均值				
测量次数	温度点 (°C)	被测出口温度传感器 温度示值(°C)	标准温度 示值(°C)	误差 (°C)
1				
2				
平均值				

3、温差校准（配对温度传感器校准）

检测 次数	进水温度(°C)		出水温度(°C)		温差(°C)		
	标准值	显示值	标准值	显示值	标准值	显示值	误差 (%)
1							
2							

4、热量校准

校准量 测量次数	标准器体 积累计量 (m ³)	入口 温度 (°C)	出口 温度 (°C)	被测量系统 热累计量(kWh)			误差 (%)	重复性 (%)
				初值	末值	累计值		
1								
2								
3								
4								
5								
6								

校准员：

核验员：

第

页共

页

附录 B

校准证书参考格式

1.介质:

2.介质入口温度:

介质出口温度:

3.校准参数: 被测表安装位置: 进水回水 计量方式: 热量冷量

4.校准结果:

标准热量值 (kW·h)	测量系统热量示值 (kW·h)	重复性 (%)

标准累积流量值 (m ³)	测量系统累积流量值 (m ³)	重复性 (%)

流量值 (m ³ /h)	测量系统流量示值 (m ³ /h)	重复性 (%)

(入口) 标准温度值 (°C)	(入口) 测量系统温度示值 (°C)

(出口) 标准温度值 (°C)	(出口) 测量系统温度示值 (°C)

标准温差值 (°C)	测量系统温差示值 (°C)

5、校准结果的不确定度; 流量: $U_{rel} =$, $k=2$ 温度: $U =$, $k=2$
 温差: $U =$, $k=2$ 热量: $U_{rel} =$, $k=2$ 。

附录 C

热量测量系统校准结果的不确定度评定实例

测量方法

本方法采用便携式超声波流量计（准确度等级为 0.5 级）为流量测量标准器，一对二等铂电阻温度计和便携式水槽（不确定度 $U=0.004^{\circ}\text{C}$ ）为温度测量标准器，对一台 DN400 的热量测量系统进行校准，比较其热量测量的相对示值误差。热量测量方法为焓差法，采用分量法分别校准流量、温度和温差、热量并计算其不确定度。

该系统管道外径为 420mm，壁厚 10mm，无衬里，流量传感器为 SIEMENS 电磁流量计，流量点为 $1100\text{m}^3/\text{h}$ ，流速为 2.43m/s ，进水管温度为 70°C ，出口温度为 40°C 。累计流量单位为 m^3 ，分辨力为 0.01m^3 ，温度和温差的分辨力为 0.01°C 。

以下分别分析不确定度：流量校准，温度和温差校准，热量校准。

C1 流量校准法

流量传感器不确定度评定

C1.1 数学模型

$$E_Q = \frac{Q - Q_s}{Q_s} \times 100\%$$

不确定度传播率： $u^2(E) = C_1^2 u^2(Q) + C_2^2 u^2(Q_s) + C_3^2 u^2(\bar{E})$

灵敏系数： $C_1 = \frac{1}{Q_s}$ $C_2 = -\frac{Q}{Q_s^2}$ $C_3 = 1$

C1.2 不确定度分量

C1.2.1 被测热量表流量累积量 Q 引入的不确定度 $\mu(Q)$

被检对象的分辨力带来的不确定度。

被检表的累计流量分辨力为 0.01m^3 ，按均匀分布：

$$u(Q) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} = 0.0029\text{m}^3$$

C1.2.2 标准流量累积量 Q_s 引入的不确定度 $\mu(Q_s)$

数学模型： $Q_s = q_s \cdot t = \frac{\pi}{4} D^2 v_s t$

$$\text{传播率: } u(Q_S) = \sqrt{C_{s1}^2 u^2(D) + C_{s2}^2 u^2(v_S) + C_{s3}^2 u^2(t)}$$

$$\text{灵敏系数: } C_{s1} = \frac{\pi}{2} D v_S t = 152.604 \text{ m}^2$$

$$C_{s2} = \frac{\pi}{4} D^2 t = 12.56 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$$

$$C_{s3} = \frac{\pi}{4} D^2 v_S = 0.305 \text{ m}^3 / \text{s}$$

C1.2.2.1 管道外周长测量引入的标准不确定度为 $\mu(D)$

$$\text{由 } D = \frac{L}{\pi} - 2\delta, \text{ 得 } u(D) = \sqrt{\frac{1}{\pi} u^2(L) + 4u^2(\delta)}。$$

C1.2.2.1.1 管道外周长 L 测量引入的标准不确定度 $u(L)$

管道为周长采用分度值为 1mm 的钢卷尺测量, 测量次数为 2 次, 测得值为: 420mm, 422mm 平均值为 421mm。采用极差法, 平均值的标准不确定度为:

$$u_1(L) = \frac{2}{1.13\sqrt{2}} = 1.252 \text{ mm}$$

钢卷尺分辨力引入的标准不确定度为:

$$u_2(L) = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.29 \text{ mm}$$

$$\text{则标准不确定度: } u(L) = \sqrt{\mu_1^2(L) + \mu_2^2(L)} = 1.29 \text{ mm}。$$

C1.2.2.1.2 管道壁厚 δ 测量引入的标准不确定度 $u(\delta)$

管道壁厚采用分辨力为 0.1mm 的超声波测厚仪测量, 测量次数为 3 次, 测得值为: 10.1mm, 10.3mm, 10.0mm, 平均值为 10.13mm, 采用极差法, 平均值的标准不确定度为:

$$u_1(\delta) = \frac{0.3}{1.69\sqrt{3}} = 0.11 \text{ mm}$$

$$\text{测厚仪分辨力引入的标准不确定度为: } u_2(\delta) = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} = 0.029 \text{ mm}。$$

C1.2.2.1.3 管道油漆厚度等因素引入的标准不确定度 $u_3(\delta)$

$$\text{按最大不超过 0.5mm 估计, 则: } u_3(\delta) = \frac{0.5}{2\sqrt{3}} = 0.145 \text{ mm}。$$

$$\text{则标准不确定度: } u(\delta) = \sqrt{\mu_1^2(\delta) + \mu_2^2(\delta) + \mu_3^2(\delta)} = 0.185 \text{ mm}。$$

C1.2.2.2 所以管道内径测量引入的标准不确定度 $u(D)$

$$u(D) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \mu^2(L) + 4\mu^2(\delta)} = 0.56\text{mm}$$

C1.2.2.3 标准器引入的不确定度 $u(v_s)$

标准器的准确度等级为 0.5 级，按正态分布考虑，所以标准器带来的不确定度为：

$$u(v_s) = \frac{0.005 \times 2.43}{3} = 0.00405\text{m/s}$$

C1.2.2.4 测量时间引入的不确定度 $u(t)$

上级溯源机构给出秒表的不确定度为： $u(t)=0.01\text{s}$ 。

不确定度来源	灵敏系数 C_i	不确定度分量 $u(x_i)$	$ C_i u(x_i)$
管道外周长测量引入的标准不确定度为 $u(D)$	152.604m ²	0.00056m	0.0854 m ³
标准器带来的不确定度 $u(v_s)$	12.56m ² s	0.00405m/s	0.0508m ³
测量时间带来的不确定度 $u(t)$	0.305m ³ /s	0.01s	0.0032 m ³

C1.2.2.5 标准器带来的不确定度 $\mu(Q_s)$ ：

$$u(Q_s) = \sqrt{C_{s1}^2 u^2(D) + C_{s2}^2 u^2(v_s) + C_{s3}^2 u^2(t)} = 0.105\text{m}^3$$

C1.2.3 被测热量系统的测量重复性带来的不确定度：

校准量 测量次数	标准器体积 累计量 (m ³)	被测量系统体积累计量 (m ³)			误差%	重复 性%
		初值	末值	累计值		
1	31.41	1566.64	1597.6	30.96	1.46	0.10
2	31.27	1625.11	1655.95	30.84	1.41	
3	31.38	1701.63	1732.63	31.00	1.22	
4	30.96	1766.64	1797.20	30.56	1.31	
5	31.23	1825.11	1855.95	30.84	1.25	
6	31.38	1901.63	1932.63	31.00	1.24	

$$\mu(\bar{E}) = \frac{0.1\%}{\sqrt{6}} = 0.041\%$$

C1.2.4 合成标准不确定度 U

$$U = \sqrt{C_1^2 u^2(Q) + C_2^2 u^2(Q_S) + C_3^2 u^2(\bar{E})} = 0.355\%$$

C1.2.5 扩展不确定度 U_{rel}

$$U_{\text{rel}} = 0.355 \times 2 = 0.71\%, k=2。$$

C2 温度校准法

单支温度传感器准确度的不确定度评定

C2.1 数学模型

1) 温度传感器的准确度由下式表示： $E = \theta_{\text{示}} - \theta_{\text{标}}$

式中：

E ——单支温度传感器的准确度；

$\theta_{\text{示}}$ ——温度传感器的显示值；

$\theta_{\text{标}}$ ——标准装置的温度值。

2) 不确定度来源及灵敏系数

一般测量系统单支温度传感器检测每个点至少读两个循环，在检测过程中多次测量的重复性引入的标准不确定度往往大于被检表分辨力引入的不确定度，所以只取多次测量重复性引入的不确定度。

$\theta_{\text{示}}$ 引入的标准不确定度 $\mu_{\text{示}}$ ：灵敏系数 $c_{\text{示}}=1$ 。

$\theta_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $\mu_{\text{标}}$ ：灵敏系数 $c_{\text{标}}=1$ 。

3) 不确定度传播率公式： $u_E = \sqrt{c_{\text{示}}^2 u_{\text{示}}^2 + c_{\text{表}}^2 u_{\text{表}}^2}$

C2.2 标准不确定度的来源及评定

C2.2.1 $\theta_{\text{示}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{示}}$

一般测量系统两次测量温度变化不超过 0.2°C ，按均匀分布 $u_{\text{示}} = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.116^\circ\text{C}$ 。

C2.2.2 $\theta_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度

C2.2.2.1 标准铂电阻温度计准确度引入的不确定度分量 u_1

根据上级计量机构溯源给出的结果 $U=0.004^\circ\text{C}$ ， $k=3$ ，则 $\mu_1=0.0014^\circ\text{C}$ 。

C2.2.2.2 标准铂电阻温度计周期稳定性引入的不确定度 u_2

根据铂电阻温度计的特性，检定周期内变化最大为 0.01°C ，按均匀分布，则：

$$u_2 = 0.01^\circ\text{C} / 1.732 = 0.0058^\circ\text{C}。$$

C2.2.2.3 电测设备引入的不确定度分量 u_3

按标准要求，电测设备在实际使用时，要引入修正值。所以要考虑电测设备检测结果的不确定度。根据上级计量机构溯源证书给出的结果 $U=3\times 10^{-6}$ ， $k=2$ ，在最高温度 90°C 时，估算 $u_3=0.0005^\circ\text{C}$ 。

C2.2.2.4 提供温场设备引入的标准不确定度分量 u_4

提供温场的设备为恒温槽，参考温度计和标准温度计在同一深度测温时，垂直方向上不必考虑温场的波动性引入的不确定度，只考虑水平方向上温场均匀性引入的不确定度。恒温槽的波动度要求 $0.005^\circ\text{C}/15\text{min}$ ，根据上级计量机构溯源证书给出的结果，水平温场均匀性小于 0.01°C ，按均匀分布，则 $u_4=0.01^\circ\text{C}/1.732=0.0058^\circ\text{C}$ 。

C2.2.2.5 合成 $\theta_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{标}}$

$$u_{\text{表}} = \sqrt{u^1 + u^2 + u^3 + u^4} = 0.0084^\circ\text{C}$$

C2.3 不确定度分量汇总

$\theta_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{标}}$ 由多个分量组成，近似为正态分布，所以：

不确定度分量来源	估计值 x_i	概率分布	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数	不确定度分量 $u_i(E)$
$\theta_{\text{示}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{示}}$	0.2°C	均匀	0.116	1	0.116
$\theta_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{标}}$	/	正态	0.0084	1	0.0084

C2.4 单支温度传感器准确度引入的标准不确定度评定

$$u_c = \sqrt{0.116^2 + 0.0084^2} = 0.117^\circ\text{C}$$

单支温度传感器准确度的扩展不确定度评定

不确定度的主要分量为正态分布，所以按正态分布估计， $U=0.24^\circ\text{C}$ ， $k=2$ 。

配对温度传感器准确度引入的不确定度评定

C2.5 数学模型

(1) 配对温度传感器的准确度由下式表示

$$E = \frac{\Delta\theta_{\text{示}} - \Delta\theta_{\text{表}}}{\Delta\theta_{\text{表}}} \times 100\%$$

式中:

E —— 配对温度传感器的准确度 (°C);

$\Delta\theta_{\text{示}}$ —— 温度传感器的显示温差 (°C);

$\Delta\theta_{\text{表}}$ —— 标准装置的温差 (°C)。

(2) 不确定度来源级灵敏系数

一般测量系统配对温度传感器的温差由于多次测量的重复性引入的标准不确定度往往大于被检表分辨力引入的不确定度, 所以只取多次测量重复性引入的不确定度 $u_{\text{示}}$

引入的标准不确定度 $u_{\text{示}}$, 灵敏系数 $c_{\text{示}} = \frac{1}{\Delta\theta_{\text{示}}}$ 。

$\Delta\theta_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{标}}$, 灵敏系数 $c_{\text{标}} = -\frac{\Delta\theta_{\text{示}}}{\Delta\theta_{\text{表}}^2}$ 。

校准点/°C	$c_{\text{示}}$	$c_{\text{标}}$
30	0.033 (1/°C)	0.033 (1/°C)

其中, 标准测量不确定度主要有四个分量:

标准铂电阻温度计准确度引入的不确定度分量 u_1 ;

标准铂电阻温度计波动度引入的不确定度分量 u_2 ;

电测设备引入的不确定度分量 u_3 ;

提供温场设备引入的不确定度分量 u_4 。

(3) 不确定度传播率公式: $u_E = \sqrt{C_{\text{示}}^2 u_{\text{示}}^2 + C_{\text{表}}^2 u_{\text{表}}^2}$

C2.6 标准不确定度的来源及评定

C2.6.1 $\Delta\theta_{\text{示}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{示}}$

主要来源于重复性, 两次重复测量温差一般变化在 0.2°C 以内, 按均匀分布:

$$u_{\text{示}} = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.116 \text{ °C}$$

C2.6.2 $\Delta\theta_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{标}}$ C2.6.2.1 标准铂电阻温度计准确度引入的不确定度分量 u_1

根据上级计量机构溯源证书给出的结果 $U=0.004^{\circ}\text{C}$, $k=3$, 由于配对温度传感器是两只铂电阻温度计, 故其值是单支值的 $\sqrt{2}$ 倍, 则 $u_1 = \sqrt{2} \times 0.004 \div 3 = 0.0019^{\circ}\text{C}$ 。

C2.6.2.2 标准铂电阻温度计周期稳定性引入的不确定度分量 u_2

根据铂电阻温度计的特性, 检定周期内变化最大为 0.01°C , 按均匀分布, 由于配对温度传感器是两只铂电阻, 故其值是单支的 $\sqrt{2}$ 倍, 则 $u_2 = \sqrt{2} \times 0.01 \div \sqrt{3} = 0.0082^{\circ}\text{C}$ 。

C2.6.2.3 电测设备引入的不确定度 u_3

按标准要求, 电测设备在实际使用时, 要引入修正值。所以要考虑电测设备检测结果的不确定度。根据上级计量机构溯源证书中给出的结果 $U=3 \times 10^{-6}$, $k=2$, 配对后为 $\sqrt{2}$ 倍, 估算 $u_3 = \sqrt{2} \times 0.0005 = 0.00071^{\circ}\text{C}$ 。

C2.6.2.4 提供温场设备引入的不确定度分量 u_4

提供温场的设备为恒温槽, 参考温度计和标准温度计在同一深度测温时, 垂直方向上不必考虑温场的波动性引入的不确定度, 只考虑水平方向上温场均匀性引入的不确定度。根据上级计量机构溯源证书给出的结果, 水平温场均匀性小于 0.01°C , 按均匀分布, 选用的是两台恒温槽, 故其值是单个恒温槽的 $\sqrt{2}$ 倍, 则 $u_4 = \sqrt{2} \times 0.01 \div \sqrt{3} = 0.0082^{\circ}\text{C}$ 。

C2.6.2.5 合成 $\Delta\theta_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{标}}$

$$u_{\text{标}} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.012^{\circ}\text{C}。$$

C2.6.3 不确定度分量汇总

$\Delta\theta_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $\mu_{\text{标}}$ 由多个分量组成, 近似为正态分布, 所以:

不确定度分量来源	估计值 x_i	概率分布	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 C_i	不确定度分量 $u_i(E)$
$\Delta\theta_{\text{示}}$ 引入的标准不确定度 $\mu_{\text{示}}$	0.2°C	均匀	0.116°C	$0.033(1/^{\circ}\text{C})$	0.387%
$\Delta\theta_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $\mu_{\text{标}}$	/	正态	0.012°C	$0.033(1/^{\circ}\text{C})$	0.04%

C2.6.4 配对温度传感器准确度引入的标准不确定度评定

$$u_c = \sqrt{0.387\%^2 + 0.04\%^2} = 0.389\%$$

C2.6.5 配对温度传感器准确度的扩展不确定度评定

不确定度的主要分量为正态分布，所以按正态分布估计，取 $k=2$ ，则 $U_{rel}=0.78\%$ 。

C3 热量校准法

热量准确度（总量）不确定度评定

C3.1 数学模型

(1) 热量准确度由下式表示

$$E = \frac{Q_{示} - Q_{标}}{Q_{标}} \times 100\%$$

(2) 不确定度来源及灵敏系数

热量准确度重复性引入的标准不确定度 $c_1=1$ 。

$Q_{示}$ 引入的标准不确定度 $c_2 = \frac{1}{Q_{标}}$ 。

$Q_{标}$ 引入的标准不确定度 $c_3 = -\frac{Q_{示}}{Q_{标}^2}$ 。

温差点	c_1	c_2	c_3
30	1	0.001 (1/kWh)	0.001 (1/kWh)

③ 不确定度传播率

$$u_E = \sqrt{c_1^2 u_{\text{E}}^2 + c_2^2 u_{\text{示}}^2 + c_3^2 u_{\text{表}}^2}$$

C3.2 热量的标准不确定度的评定

C3.2.1 测量重复性引入的不确定度 u_{E}

在设定的温度、温差和流量下使被测系统正常工作，比较显示值与标准值，从而得到误差。选一台 DN400 的热量表，流量点为 $1100\text{m}^3/\text{h}$ ，测量时间 100s ，累计流量为 30.20m^3 ，热量表显示热量平均值为 1045.938 kWh ，热量标准平均值为 1048.157 kWh 。测量结果如下：

检测温差点℃	进口温度℃		出口温度℃		流量 m ³	热量 kWh		热量示值误差	重复性
	标准值	显示值	标准值	显示值		显示值	标准值	%	
30	70	70.23	40	40.11	30.21	1043.898	1064.36	-0.50	0.76
30	70	70.21	40	40.09	30.15	1040.882	1039.63	-0.59	
30	70	70.26	40	40.16	30.18	1049.710	1049.71	0.22	
30	70	70.17	40	40.11	30.35	1048.645	1048.65	-0.31	
30	70	70.22	40	40.09	30.21	1049.702	1049.70	0.02	
30	70	70.25	40	40.16	30.09	1042.787	1049.99	-0.11	

$$u_{\bar{E}} = \frac{0.76\%}{\sqrt{6}} = 0.32\%$$

C3.2.2 $Q_{\text{示}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{示}}$

主要来源为被检表的分辨力，被检表的分辨力为 0.001 kWh，按均匀分布，则：

$$u_{\text{示}} = \frac{0.001}{2 \times \sqrt{3}} = 0.00289 \text{ kWh}$$

C3.2.3 $Q_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{标}}$

(1) 数学模型为 $Q_{\text{标}} = \rho \times \Delta h \times V$

(2) 不确定度来源及灵敏系数

密度 ρ 引入的不确定度 $\mu_{\text{标}1}$ ，灵敏系数 $c_4 = \Delta h \times V$ 。

焓差 Δh 引入的不确定度 $\mu_{\text{标}2}$ ，灵敏系数 $c_5 = \rho \times V$ 。

标准体积 V 引入的不确定度 $\mu_{\text{标}3}$ ，灵敏系数 $C_6 = \rho \times \Delta h$ 。

温差点	c_4	c_5	C_6
30℃	3762.3 (kJ/kg·m ³)	29310 (kg)	122125 (kJ/m ³)

(3) 不确定度传播率

$$u_{\text{标}} = \sqrt{c_4^2 u_{\text{标}1}^2 + c_5^2 u_{\text{标}2}^2 + c_6^2 u_{\text{标}3}^2}$$

C3.2.3.1 密度引入的不确定度 $u_{\text{标}1}$

按绝对值估计，温度相差 2℃。密度最大误差为 0.1%，按均匀分布：

$$u_{\text{标}1} = \frac{0.1\%}{2 \times \sqrt{3}} \times 977.98 = 0.28 \text{ kJ/kg} \cdot \text{m}^3$$

C3.2.3.2 焓差引入的不确定度 $u_{\text{标}2}$

温度相差 2℃. 焓差最大误差为 0.64%, 按均匀分布:

$$u_{\text{标}2} = \frac{0.64\%}{2 \times \sqrt{3}} \times 125.41 = 0.23 \text{ kJ/kg}$$

C3.2.3.3 标准体积引入的不确定度 $u_{\text{标}3}$

同上文流量传感器的评定, 得 $u_{\text{标}3} = 0.355\%$ 。

C3.2.3.4 $Q_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度 $u_{\text{标}}$

$$u_{\text{标}} = \sqrt{(3762.3 * 0.28)^2 + (29310 * 0.23)^2 + (0.00355 * 122125)^2} = 1.9 \text{ kWh}$$

C3.3 不确定度分量汇总

由于 $Q_{\text{示}}$ 引入的标准不确定度主要来源于分辨力, 与重复性引入的不确定度相比较小, 只取重复性引入的不确定度, $Q_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度由多个分量组成, 近似为正态分布, 所以:

不确定度来源	标准不确定度 u_{x_i}	灵敏系数 c_i	不确定度分量 $u_i(E)$
测量重复性引入的不确定度	0.312%	1	0.312%
$Q_{\text{标}}$ 引入的标准不确定度	1.9kWh	0.001 (1/kWh)	0.19%

C3.4 合成标准不确定度

$$U_C = \sqrt{0.312^2 + 0.19^2} = 0.36\%$$

C3.5 扩展不确定度

按正态分布估计, 取 $k=2$, 则 $U_{\text{rel}} = 0.36\% * 2 = 0.72\%$, $k=2$ 。

