



海南省地方计量技术规范

JJF (琼) 004-2025

标准表法超声波液体流量计 在线校准规范

Master Meter Method Ultrasonic Liquid Flowmeter Online

Calibration Specification

2025-05-13发布

2025-07-01实施

海南省市场监督管理局 发布

标准表法超声波液体流量计 在线校准规范

Master Meter Method Ultrasonic Liquid Flowmeter
Online Calibration Specification

JJF (琼) 004—2025

归口单位：海南省计量技术委员会

主要起草单位：海南省检验检测研究院

广电计量检测(海南)有限公司

海南科瑞计量技术服务有限公司

参加起草单位：海南省供水排水协会

海南毕托巴科技研究院有限公司

海口开源水务有限公司

海南永准质检技术服务有限公司

本规范委托海南省计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

蒙启晓（海南省检验检测研究院）
叶秀松（海南省检验检测研究院）
施怡行（海南省检验检测研究院）
许德永（海南省检验检测研究院）
高欢迪（广电计量检测（海南）有限公司）
林明进（海南科瑞计量技术服务有限公司）

参加起草人：

胡向军（海南省供水排水协会）
刘 祺（海南省检验检测研究院）
王忠辉（海南毕托巴科技研究院有限公司）
朱文儒（广电计量检测（海南）有限公司）
蓝善贵（广电计量检测（海南）有限公司）
李光远（海口开源水务有限公司）
覃逸秋（海南永准质检技术服务有限公司）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
3.1 术语	(1)
3.2 计量单位	(2)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 示值误差	(2)
5.2 重复性	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 测量标准及其他设备	(2)
7 校准项目与校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准前准备工作	(3)
7.3 校准过程	(5)
8 校准结果的表达	(8)
9 复校时间间隔	(8)
附录 A	(9)
附录 B	(11)

引 言

本规范是针对大口径超声波液体流量计在线校准的计量技术规范。本规范依据JJF 1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》为基础而制定。

本校准规范为首次制定。

标准表法超声波液体流量计在线校准规范

1 范围

本规范适用于对安装在圆形封闭管道上,用于测量满管流状态下单相液体介质体积流量的超声波流量计进行的在线校准,被校准超声波液体流量计口径应大于或等于DN300,其他口径的超声液体波流量计应用本规程校准时应被用于非贸易结算用途。

2 引用文件

本规范引用了下列文件:

JJF 1004 流量计量名词术语及定义

JJG 1030 超声流量计检定规程

JJF 1126 超声波测厚仪校准规范

CJ/T 364-2011 管道式电磁流量计在线校准要求。

凡是注日期的引用文件,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。

3 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1 在线校准 online calibration

在被校仪表实际工作环境下,对被校仪表进行校准的一组操作。

3.1.2 标准表装置 master meter device

基于渡越时间法,用于校准在线超声波流量计的外夹式超声波流量计。

3.1.3 标准表法 master meter method

流体在相同时间间隔内连续通过标准表和被校流量计,比较两者输出的流量值,从而确定被校流量计准确度的校准方法。

3.1.4 声道数 number of acoustic path

超声波信号在成对的超声换能器之间传输时,穿过管道轴心的次数。

3.1.5 直管段 straight length

安装在流量计上游和下游的用于使流场达到某种要求的管段。其轴线是笔直的，且内部横截面的面积与形状不变，横截面通常为圆形或矩形，也可为环形或任何其他有规则的形状。

3.1.6 流量计系数 meter factor

可通过修改其数值而改变流量计计量性能的一个或一组参数。

3.2 计量单位

累积流量计量单位： m^3 （立方米）、L（升）等；

瞬时流量计量单位： m^3/h （立方米每小时）、L/min（升每分钟）等。

4 概述

超声波液体流量计一般由显示装置、信号处理单元和超声换能器组成，利用超声波在流动液体（如：水、油等）介质中的传播特性为原理，测量流经超声波液体流量计的液体介质的瞬时流量或累积流量，所测得的流量一般以体积流量的形式体现。

5 计量特性

5.1 示值误差

在线使用的超声波液体流量计的示值误差应满足用户的使用要求，示值的最大允许误差为 $\pm 5\%$ 。

5.2 重复性

在线使用的超声波液体流量计的重复性不得超过客户要求最大允许误差的一半，不得大于 2.5% 。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：（ $5\sim 45$ ） $^{\circ}\text{C}$ ；

环境湿度：（ $30\sim 95$ ）%RH。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 标准表装置

标准表装置应该具备有效的溯源证书，溯源的流量范围与流速范围应覆盖被校流量

计现场的流量与流速,标准表的相对扩展不确定度不大于用户要求的最大允许误差的三分之一。

6.2.2 其他辅助设备

所有辅助设备的测量范围应覆盖被校量的范围,应具备有效的溯源证书。辅助设备包括:

表1 辅助设备及其技术要求

序号	设备名称	技术要求	用途
1	几何量具	满足1级要求的纤维卷尺或不低于此精度的钢卷尺、 π 尺、卡尺。	测量直管段外周长或外直径
2	超声波测厚仪	分辨力不大于0.1 mm, 满足JJF 1126 《超声波测厚仪校准规范》的技术要求	测量直管段管壁厚度
3	秒表	分辨力不大于0.1 s, 日差不超过 ± 0.5 s, 或其他满足要求的时间同步系统	同步测量
4	温度测量仪器	溯源范围大于介质温度, $MPE \leq 1^\circ\text{C}$	测量介质温度

7 校准项目与校准方法

7.1 校准项目

大口径液体流量计在线校准的项目为流量计的示值误差与重复性。

7.2 校准前准备工作

7.2.1 现场检查

7.2.1.1 流量计安装情况

观察被校流量计与周围管件的距离,在被校流量计上游方向10倍管径的距离、下游方向5倍管径的距离范围内不应有水泵、阀门、弯头等影响标准表计量性能的管道组件。

7.2.1.2 流量计稳定性

应确定流经流量计的流体流速相对稳定,在单次测量过程中任意时刻被校流量计的瞬时流量应稳定在校准开始时瞬时流量的 $\pm 10\%$ 以内。

7.2.1.3 校准用直管段

根据现场管件安装情况选择直管段,直管段尽量与被校流量计距离较近,对管件的要求参照7.2.1.1,且便于对直管段表面进行清洁和打磨处理。

7.2.2 直管段外直径或外周长的测量与计算

使用几何量具在选定的直管段上同一截面等角分布测量至少3次外周长 d_i ,利用公式(1)计算算术平均值作为管道外周长,并利用外周长计算直管段的外直径 R ,计算时取圆周率 $\Omega=3.14159$:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n\pi} \dots\dots\dots (1)$$

式中: n 为管道外周长测量次数;

d_i 为第 i 次测得的直管段外周长值。

如使用 π 尺直接测量管道外直径,则在选定的直管段上同一截面等角分布测量至少3次外直径 R_i ,利用公式(2)计算平均值作为管道外直径:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \dots\dots\dots (2)$$

式中: n 为管道外直径测量次数;

r_i 为第 i 次测得的管道外直径值。

7.2.3 直管段管壁厚的测量

使用测厚仪在直管段上选定的超声换能器安装点重复测量至少3次管壁厚 h_i ,利用公式(3)计算算术平均值 H 作为直管段管壁厚:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \dots\dots\dots (3)$$

式中: n 为管壁厚测量次数;

h_i 为第 i 次测得的管壁厚值。

7.2.4 标准表的安装

将管道参数与测量声道数等信息输入标准表,按标准表给出距离将超声换能器安装在直管段上。超声换能器的安装应满足如下要求:

- a) 如声道数为奇数,则超声换能器安装在管道两侧,应使其连线穿过管道轴心;
- b) 如声道数为偶数,则超声换能器安装在管道同侧,应使其连线与管道轴线平行。

超声换能器安装完毕后,根据标准表装置测得声速值查表得到对应的介质温度,当其与实测介质温度相差不超过 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时视作已正确安装,否则应重复执行7.2.1至7.2.3,直至满足要求。

7.3 校准过程

7.3.1 示值误差的校准

7.3.1.1 校准点的选择

一般选择被校流量计当前工作的流量点作为校准点进行校准;当流量可调节时,可选择2至3个常用的流量点作为校准点进行校准。

7.3.1.2 数据测量

7.3.1.2.1 测量方法

当被校流量计可显示累积流量时,优先选用累积流量作为测量数据,仅当存在下列情况时可以选用瞬时流量作为测量数据。

- a) 被校准流量计仅显示瞬时流量;
- a) 被校准流量计在校准过程中能够保持流量均匀平稳,在单次测量过程中任意时刻被校流量计的瞬时流量稳定在校准开始时瞬时流量的 $\pm 3\%$ 以内时。

流量测量应至少重复三次。

7.3.1.2.2 累积法测量

利用同步测量工具在采集开始和采集结束时同时读取标准表和被校流量计的累积流量值,读取时间如不能同步,误差时间不得超过0.5秒。下列条件满足其中之一时,当前轮次测量可终止:

- a) 单次测量时间持续超过 15 分钟;
- b) 累积数据测量量值大于 500 倍累积流量分辨力。

利用公式(4)计算单次校准的标准表流量示值 Q_{si} :

$$Q_{si} = Q_{si2} - Q_{si1} \cdots \cdots (4)$$

式中:

Q_{si1} 为第 i 次标准表累积流量起始值;

Q_{si2} 为第 i 次标准表累积流量终止值。

利用公式 (5) 计算单次校准的被校流量计流量示值 Q_{ti} :

$$Q_{ti} = Q_{ti2} - Q_{ti1} \cdots \cdots \cdots (5)$$

式中:

Q_{ti1} 为第 i 次被校流量计累积流量起始值;

Q_{ti2} 为第 i 次被校流量计累积流量终止值。

7.3.1.2.3 瞬时法测量

在规定的一段时间内, 按一定时间间隔读取标准表和被校流量计的瞬时流量值, 一次读取30组流量值。

利用公式 (6) 计算单次校准的标准表流量示值 Q_{si} :

$$Q_{si} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{si}}{n} \cdots \cdots \cdots (6)$$

式中:

q_{si} 为第 i 组采得的标准表瞬时流量值;

n 为单次测量过程中对瞬时流量的测量组数。

利用公式 (7) 计算单次校准的被校流量计流量示值 Q_{ti} :

$$Q_{ti} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{ti}}{n} \cdots \cdots \cdots (7)$$

式中:

q_{ti} 为第 i 组采得的被校流量计瞬时流量值;

n 为单次测量过程中对瞬时流量的测量组数。

7.3.1.3 示值误差的计算

单次测量的示值误差以相对误差的形式表示, 利用公式 (8) 计算:

$$E_i = \frac{Q_{ti} - Q_{si}}{Q_{si}} \times 100\% \cdots \cdots \cdots (8)$$

式中:

E_i 为第 i 次测量得到的示值误差结果;

Q_{ti} 为第 i 次测量得到的被校流量计流量示值;

Q_{si} 为第 i 次测量得到的标准表流量示值。

利用公式 (9) 计算示值误差 E :

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m E_i}{m} \dots\dots\dots (9)$$

式中: m 为测量次数。

7.3.2 重复性的校准

7.3.2.1 累积法校准的重复性

重复性 σ 可以利用示值误差校准过程中采集的数据利用公式 (10) 计算。

$$\sigma = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{c} \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

式中:

c 为极差系数, 可通过表1查询。

$E_{\max}$ 为 n 次测量得到的示值误差中的极大值。

$E_{\min}$ 为 n 次测量得到的示值误差中的极小值。

表2 极差系数与测量次数的关系

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9
极差系数 c	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97

7.3.2.2 瞬时法校准的重复性

对瞬时流量单次测量的示值误差以相对误差的形式表示, 利用公式 (11) 计算:

$$e_i = \frac{q_{ti} - q_{si}}{q_{si}} \times 100\% \dots\dots\dots (11)$$

式中:

e_i 为第 i 次测量得到的示值误差结果;

q_{ti} 为第 i 次测量得到的被校流量计瞬时流量示值;

q_{si} 为第 i 次测量得到的标准表瞬时流量示值。

重复性 σ 可以利用测量瞬时流量值过程中采集的 n 次数据利用贝塞尔公式 (12) 计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{(e_i - \bar{e})^2}{n-1}} \times 100\% \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$\bar{e}$ 为次全部测得的示值误差平均值;

n 为对瞬时流量的测量次数。

8 校准结果的表达

经校准的流量计出具校准证书, 校准证书应符合JJF1071-2010的要求。校准原始记录格式见附录A。

9 复校时间间隔

超声波液体流量计的复校时间间隔由使用单位根据实际使用情况确定, 建议复校时间间隔不超过2年。

附 录 A

(资料性附录)

校准原始记录内页建议格式

A.1 累积法测量原始记录内页

记录编号 (同证书编号):

委托单位				设备名称				
规格型号			出厂编号			管理编号		
校准依据				制造厂				
标准器名称	编号	证书号/有效期		溯源单位		技术特征		
校准地点			环境温度	℃		环境湿度	%RH	

校准结果:

一、流量计安装运行与直管段情况: _____

二、直管段管道参数测量 (单位: mm):

测量次数	1	2	3	4	平均结果
管壁厚 H					
外周长 D /外直径 R					

三、流量数据 (单位: _____)

流量计系数: _____

测量轮次	1			2			3		
	时间	标准表	被校表	时间	标准表	被校表	时间	标准表	被校表
起始瞬时流量									
开始时间									
结束时间									
累积流量									
示值误差									
结果/%	参数名称			校准结果			扩展不确定度 ($k=2$)		
	示值误差 E								
	重复性 σ								

校准员:

核验员:

校准日期: _____年____月____日

A.2 瞬时法测量原始记录内页

记录编号（同证书编号）：

委托单位				设备名称		
规格型号			出厂编号			管理编号
校准依据				制造厂		
标准器名称	编号	证书号/有效期		溯源单位		技术特征
校准地点			环境温度	℃	环境湿度	%RH

校准结果：

一、流量计安装运行与直管段情况：_____

二、直管段管道参数测量（单位：mm）：

测量次数	1	2	3	4	平均结果
管壁厚 H					
外周长 D /外直径 R					

三、流量数据（单位：_____）

流量计系数：_____

测量轮次	1		2		3	
	标准表	被校流量计	标准表	被校流量计	标准表	被校流量计
1						
2						
3						
.....						
29						
30						
平均值						
示值误差						
结果/ %	参数名称		校准结果		扩展不确定度（ $k=2$ ）	
	示值误差 E					
	重复性 σ					

校准员：

核验员：

校准日期：

年 月 日

附录 B

(资料性附录) 校准结果不确定度评定方法及示例

B.1 大口径液体超声波流量计校准概述

B.1.1 测量标准：外夹式超声波流量计、纤维卷尺、超声波测厚仪等。

B.1.2 校准依据：JJF(琼)004-2025 标准表法超声波液体流量计在线校准规程。

B.1.3 环境条件

温度：32.4 °C；

湿度：49 %RH。

B.1.4 测量对象：口径 DN1000 的超声波液体流量计

B.1.5 测量过程：以标准表装置为标准器，使液体介质在相同时间间隔内连续通过标准表装置和被校管道式液体流量计，重复采集并比较六次标准表装置与测量对象的累积流量值，根据相对示值误差计算公式计算相对示值误差。

B.2 测量模型与灵敏系数

B.2.1 测量模型

管道式液体流量计的示值误差按式 (B.1)

$$E = \frac{Q_t - Q_s}{Q_s} \times 100\% \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

Q_t 为被校流量计流量示值；

Q_s 为标准表流量示值；

B.2.2 不确定度来源分析

- a) 标准表引入的标准不确定度 u_1 ；
- b) 示值误差测量结果引入的标准不确定度 u_2 。

B.2.3 灵敏系数

$$c_1 = \frac{1}{Q_s} \quad c_2 = -\frac{Q_t}{Q_s^2}$$

则测量不确定度由公式 (B.2) 计算得出：

$$u_c^2 = u_1^2 c_1^2 + u_2^2 c_2^2 \dots\dots\dots (B.2)$$

B.3 标准不确定度的评定

B.3.1 测量数据

使用钢卷尺测量管道外周长 D ，使用超声波测厚仪测量管壁厚度 H ，之后使用外夹式超声波流量计对被校超声波液体流量计进行测量，按照测量数据超过被校流量计最小分度数的 500 倍计算，采集得到的数据如下表（表 B.1）：

表 B.1 标准表与被校测量数据

测量次数	1	2	3	平均值
周长D	3207	3209	3207	3207.7
壁厚H	10.3	10.0	10.1	10.13
测量次数	标准表累积流量 Q_s (m ³)		被校流量计累积流量 Q_t (m ³)	相对示值误差 E (%)
1	584.2		592	1.34
2	623.7		632	1.33
3	580.1		587	1.19
4	596.8		607	1.71
5	591.6		601	1.59
6	586.3		594	1.31
平均值	593.78		602.2	1.41
注: 测量时管道保持流速为 1.0 m/s, 平均测试时间为 188.7 s。				

B.3.2 标准表装置引入的不确定度 u_1

根据标准表装置工作原理，有：

$$Q_s = q \times \frac{(R - 2H)^2}{4} \times \pi \times t \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

q 为标准器装置测得得流速值；

R 为使用几何量具测得得管道直径值；

H 为使用超声波测厚仪测得的管壁厚度值；

t 为测试持续时间。

各分量的灵敏系数为：

$$c_q = \frac{(R - 2H)^2}{4} \times \pi \times t = 593.75 ; \quad c_r = q \times \frac{(R - 2H)}{2} \times \pi \times t = 593.29 ;$$

$$c_h = -q \times (R - 2H) \times \pi \times t = -1186.57; \quad c_t = \frac{(R - 2H)^2}{4} \times \pi \times q = 3.147;$$

B.3.2.1 标准表装置引入的不确定度分量 u_{11}

根据标准表装置溯源证书, 标准超声波流量计对流速的测量不确定度为 $U=0.5\%$ ($k=2$), 在测量流速为 1.0 m/s 的液体介质时, 其引入的标准不确定度 u_{11} 为:

$$u_{11} = 1.0 \times \frac{0.5\%}{2} = 0.0025 \text{ m/s}$$

B.3.2.2 外直径测量引入的不确定度分量 u_{12}

B.3.2.2.1 几何量具不确定性引入的不确定度分量 u_{121}

分度值为 1mm , 等级为 I 级的纤维卷尺最大允许误差为: $\pm 0.2\text{mm}$, 服从正态分布。

$$u_{121} = \frac{0.2}{\sqrt{3}\pi} = 0.037 \text{ mm}$$

B.3.2.2.2 几何量具分辨力引入的不确定度分量 u_{122}

分度值为 1mm 的纤维卷尺分辨力为: 0.5mm , 服从正态分布。

$$u_{122} = \frac{0.5}{\sqrt{3}\pi} = 0.092 \text{ mm}$$

B.3.2.2.3 测量重复性引入的不确定度分量 u_{123}

根据外周长测量结果, 使用极差法可得:

$$u_{123} = \frac{2}{1.69 \times \pi} = 0.377 \text{ mm}$$

B.3.2.2.4 管道附着物及管道椭圆度引入的不确定度分量 u_{124}

根据经验, 管道附着物和管道椭圆度对管道外直径测量的影响一般不超过 0.1% , 服从矩形分布。

$$u_{124} = \frac{3207.7 \times 0.1\%}{\sqrt{3}} = 1.849 \text{ mm}$$

B.3.2.2.5 不确定度分量 u_{12} 的计算

由于 u_{122} 与 u_{123} 相关, 故取其大者, 则 u_{12} 为:

$$u_{12} = \sqrt{0.037^2 + 0.377^2 + 1.849^2} \approx 0.0019 \text{ m}$$

B.3.2.3 管壁厚度测量引入的不确定度分量 u_{13}

B.3.2.3.1 测厚仪不确定性引入的不确定度分量 u_{131}

分度值为0.1mm的测厚仪在测试不超过30 mm试块时，最大允许误差为： $\pm 0.4\text{mm}$ ，服从正态分布。

$$u_{131} = \frac{0.4}{\sqrt{3}} = 0.233 \text{ mm}$$

B. 3. 2. 3. 2 测厚仪分辨力引入的不确定度分量 u_{132}

分度值为0.1mm的测厚仪分辨力为：0.1mm，服从正态分布。

$$u_{132} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.058 \text{ mm}$$

B. 3. 2. 3. 3 测量重复性引入的不确定度分量 u_{133}

根据管壁厚度测量结果，使用极差法可得：

$$u_{133} = \frac{0.3}{1.69} = 0.178 \text{ mm}$$

B. 3. 2. 3. 4 不确定度分量 u_{13} 的计算

由于 u_{132} 与 u_{133} 相关，故取其大者，则 u_{13} 为：

$$u_{13} = \sqrt{0.233^2 + 0.178^2} \approx 0.294 \text{ mm} \approx 0.0003 \text{ m}$$

B. 3. 2. 4 测量时间引入的不确定度分量 u_{14}

测量时间的影响主要体现在标准器装置与被检表采样不同步，根据经验，采样时间不同步的影响不超过0.5 s，服从正态分布。

$$u_{14} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{ s}$$

B. 3. 2. 5 不确定度分量 u_1 的合成

$$u_1 = \sqrt{u_{11}^2 c_q^2 + u_{12}^2 c_r^2 + u_{13}^2 c_h^2 + u_{14}^2 c_t^2}$$

$$u_1 = \sqrt{0.0025^2 \times (593.75)^2 + 0.0019^2 \times (593.29)^2 + 0.0003^2 \times (-1186.57)^2 + 0.289^2 \times (3.147)^2} \\ \approx 2.11 \text{ m}^3$$

B. 3. 3 测量结果引入的不确定度 u_2

B. 3. 3. 1 被校仪表分辨力引入的不确定度分量 u_{21}

被校流量计分辨力为 1 m^3 ，设读数变化区间的半宽度为分辨力的一半，且为均匀分布，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则被校仪表分辨力引入的不确定度分量 u_{21} ：

$$u_{21} = \frac{1}{2 \times \sqrt{3}} = 0.29 \text{ m}^3$$

B. 3. 3. 2 测量重复性引入的不确定度分量 u_{22}

测量次数为6次，故使用极差法计算测量重复性引入的不确定度分量

$$u_{22} = 593.78 \times \frac{1.71\% - 1.19\%}{2.53} = 1.22 \text{ m}^3$$

B.3.3.3 由于 u_{21} 与 u_{22} 相关，故仅取其大值作为测量结果引入的不确定度分量：

$$u_2 = u_{22} = 1.22 \text{ m}^3$$

B.4 合成标准不确定度

B.4.1 标准不确定度汇总

综上所述，各标准不确定度分量及其灵敏系数为：

表 B.2 标准不确定度分量及灵敏系数汇总表

标准不确定度分量		不确定度来源	不确定度	灵敏系数
u_1		标准器测量不确定度	2.11 m^3	$\frac{1}{Q_s}$
u_2	u_{21}	测量结果重复性	0.29 m^3	$-\frac{Q_t}{Q_s^2}$
	u_{22}	被校仪器的分辨力	1.22 m^3	$-\frac{Q_t}{Q_s^2}$

B.4.2 合成标准不确定度的计算

$$u_c = \sqrt{u_1^2 c_1^2 + u_2^2 c_2^2}$$

$$u_c = \sqrt{2.11^2 \times \left(\frac{1}{593.78}\right)^2 + 1.22^2 \times \left(\frac{602.2}{593.78^2}\right)^2} \approx 0.5\%$$

B.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为

$$U = 2 \times 0.5\% \approx 1.0\% \quad (k=2)$$