

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—202X

原子干涉重力仪不确定度评定方法

The Evaluation Method of Measurement Uncertainty for
Atomic Interference Gravimeter

(送审稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

原子干涉重力仪不确定度评定方法

The Evaluation Method of Measurement Uncertainty for Atomic Interference
Gravimeter

归口单位：全国力值硬度重力计量技术委员会

主要起草单位：浙江工业大学

参加起草单位：中国计量科学研究院

本规范委托全国力值硬度重力计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

吴 彬 (浙江工业大学)
王启宇 (中国计量科学研究院)

参加起草人：

冯金扬 (中国计量科学研究院)
庄 伟 (中国计量科学研究院)
王 宇 (北京长城计量测试技术研究所)
汤 彪 (中国科学院精密测量科学与技术创新研究院)

目 录

引 言	4
1 范围	5
2 引用文件	5
3 术语和定义	5
3.1 重力 gravity	5
3.2 重力加速度 gravitational acceleration	5
3.3 原子干涉重力仪 atomic interference gravimeter	5
3.4 测量不确定度 measurement uncertainty	6
4 概述	6
5 计量特性	6
6 标定条件	6
6.1 环境条件	6
6.2 通用技术要求	7
7 评定项目和评定方法	7
7.1 评定项目	7
7.2 评定装置	7
7.3 评定过程	7
8 结果表达	9
8.1 A类不确定度评估结果	9
8.2 B类不确定度评估结果	9
8.3 不确定度评定示例	9
9 复校时间间隔	9
附录 A	10
附录 B	11
附录 C	17

引 言

在国际单位制(SI)中,重力加速度的单位是基本长度单位“米”和基本时间单位“秒”的导出单位: m/s^2 。常用的重力加速度单位是 Gal(伽): $1 \text{ Gal}=1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$, $1 \text{ mGal}=1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, $1 \text{ } \mu\text{Gal}=1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

本规范根据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2010《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》规定的规则编写。

本规范在制定过程中充分参考了《重力加速度量值溯源与传递框图》、GB/T 20256-2019《国家重力控制测量规范》中的术语、符号与定义,以及相关的技术要求、技术指标和测试方法。本规范给出了原子干涉重力仪不确定度评定方法。

本方法为首次发布。

原子干涉重力仪不确定度评定方法

1 范围

本方法适用于原子干涉重力仪的不确定度评估，它规定了原子干涉重力仪不确定度评定的计量特性、标定条件、标定项目、标定方法、标定结果的处理。

2 引用文件

本方法引用下列文件：

JJF 1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》

JJF 1001-2010 《通用计量术语及定义》

JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》

JJF 1001-2011 《通用计量术语及定义》

GB/T 20256-2019 《国家重力控制测量规范》

GB/T 43740-2024 《原子重力仪性能要求和测试方法》

《重力加速度量值溯源与传递框图》

凡是标注日期的引用文件，仅标注日期的版本适用于本方法；凡是不标注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改版）均适用于本方法。

3 术语和定义

JJF 1071-2010、JJF 1001-20108、JJF 1001-2011、GB/T 43740-2024 和 GB/T 20256-2019 界定的及以下术语和定义适用于本方法。

3.1 重力 gravity

重力是受地球（包括太阳、月亮等其他天体物质）的引力和地球自转所产生的惯性离心力的合力，重力是随时间和空间变化的一个重要物理量。

3.2 重力加速度 gravitational acceleration

当地球表面上的物体只受到重力场的作用而不受其他力场作用时，该物体自由下落时产生的加速度称为重力加速度。

3.3 原子干涉重力仪 atomic interference gravimeter

基于原子物质波干涉原理的直接测量地球表面某一点的绝对重力加速度的计量仪器。

3.4 测量不确定度 measurement uncertainty

表征原子重力仪测量重力加速度准确性的非负参数。

注：单位为米每二次方秒（ m/s^2 ）。

4 概述

重力所产生的自由落体加速度“ g ”是一种随空间和时间的变化而变化的物理量，精确和准确地测量 g 值，对于基础物理、计量学、地球物理、惯性导航等领域都有着极其重要的意义。

原子干涉重力仪是最近 30 年发展起来的一种新型绝对重力仪，与光学干涉式绝对重力仪的区别是其利用拉曼受激跃迁来操纵冷原子团，目前大多是基于三脉冲拉曼跃迁型原子干涉仪，利用受激拉曼脉冲（ $\pi/2-\pi-\pi/2$ ）实现原子物质波包的分束、偏转、合束，最终实现一个马赫-曾德尔型原子干涉仪，通过提取原子干涉条纹的相位信息以获得绝对重力值。目前，其测量不确定度基本上达到了光学干涉式重力仪的水平，而它使用的原子干涉测量法是当前高精度绝对重力测量的两种主要技术手段之一。原子干涉重力仪的实现方式有多种，包括使用不同的原子铷 87、铷 85、钠原子等实现原子干涉仪，包括使用自由下落或直接上抛原子两种方式实现原子干涉仪，包括使用不同方案的超高真空单元、激光光路单元、电子控制单元等实现重力测量，这些实现方式的不同导致原子干涉重力仪的不确定度评估项和评估方式也不同。因此有必要对原子干涉重力仪的不确定度进行系统评估。

5 计量特性

原子干涉重力仪的计量特性主要包括：测量不确定度。

6 标定条件

6.1 环境条件

环境温度： $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ；

相对湿度：40%~70%；

电源：额定电压 200 V ~240V；

振动：优于 VC-C；

地理信息：实验地点应具有明确的经纬度、海拔高度、垂直梯度和固体潮汐参数信息；

其他条件：检测应在周围的污染、电磁干扰对检测结果无影响的环境下进行。

6.2 通用技术要求

6.2.1 设备外观应完好无损，所需附件应配套齐全。铭牌上的型号、编号等标记应清晰可辨。

6.2.2 设备能够以文件形式输出数据，数据至少应包含各个数据点对应的测量时间、重力测量值以及大气压和固体潮等修正参数。

7 评定项目和评定方法

7.1 评定项目

原子干涉重力仪的不确定度。

7.2 评定装置

评定装置为原子干涉重力仪，如图 1 所示，它是由超高真空物理单元、激光光路单元和电子控制单元等组成，其中超高真空物理单元为实验提供一个真空环境，实现激光冷却原子和原子干涉等过程。

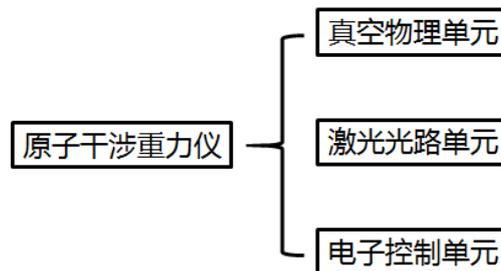


图 1 原子干涉重力仪的组成

7.3 评定过程

7.3.1 原子干涉重力仪的安放

将原子干涉重力仪安放在测试点位正上方，连接各部件的连线，接通各部件的电源，微调支撑腿的高度，确保原子干涉重力仪基本处于倾斜零点。

7.3.2 原子干涉重力仪的检查

检查原子干涉重力仪主要部件：激光器及其锁频系统、原子钟、大气压计、离子泵、计算机等处于正常工作状态。

7.3.3 原子干涉重力仪的测试准备

预热激光器使其达到稳定状态，依次检查光功率。无误后将光纤接入真空物理单元，锁定激光器频率，依次检查原子数、TOF 信号、微波拉比、拉曼拉比、拉曼谱及原子干涉条纹，完成测试前的准备工作。

7.3.4 原子干涉重力仪的倾斜测量

将真空物理单元大致处于倾斜零点处，并以其内部的高精度倾斜计的电压输出为标准。调节支撑角，在 X 轴方向，依次改变 0 、 ± 2.5 、 ± 5 mrad，并在该倾斜值下运行时序运行原子绝对重力仪，扫描 50 条条纹，获得重力值。以 5 次测量的倾斜值为横坐标、重力值为纵坐标做抛物线拟合，读取抛物线顶点对应的横坐标 X_0 。 Y 轴方向重复该流程，获得 Y_0 。调节支撑角，将倾斜计输出值调到 X_0 和 Y_0 ，此时原子干涉重力仪真空物理单元处于垂线状态，后续测量连续实时记录倾斜值随时间变化，并通过公式实时进行修正，从而减小仪器倾斜对测量的影响。

7.3.5 原子干涉重力仪的科里奥利力测量

将真空物理单元转动 0° 及 180° 方向，2 个方向各测量 3 次，每次扫描 50 条条纹，拟合获取重力值。以角度为横坐标，重力值做纵坐标，做正弦拟合获得修正值。测量完成后将探头放置在 0° 或 180° 均可。

7.3.6 原子干涉重力仪的绝对重力测量

运行时序，扫描 12 h（通常建议选取早 8:00-晚 20:00），获取重力加速度原值记录值，见附录 A。

7.3.7 原子干涉重力仪的不确定度评定

测量不确定度评定分为 A 类评定和 B 类评定，总不确定度是 A 类不确定度和 B 类不确定度的合成。A 类评定表示用统计分析的方法进行的不确定分量的评定，基于通用方法评定，可以参考国标 GB/T 43740-2024，其值主要取决于原子干涉重力仪的噪声；B 类评定涉及原子干涉重力仪的系统固定偏差，主要分仪器本身由物理效应引起的重力测量值偏置量（系统误差）和由外界环境参数引起的重力测量值偏移。对原子干涉重力仪测量结果需要进行各项不确定度修正，常见的修正项及修正方法见附录 B。

8 结果表达

8.1 A类不确定度评估结果

数据应先计算后修约，出具的测量数据多保留一位有效数字，不确定度保留两位有效数字，基于附录 A 原始数据评估重力测量的平均值和 A 类不确定度。

8.2 B类不确定度评估结果

主要基于原子干涉重力仪 B 类不确定度评定方法，参考附录 B，进行评估并给出相应的结果。

8.3 不确定度评定示例

示例不确定度评定按 JJF1059-1999，总不确定度是 A 类不确定度和 B 类不确定度的合成，见附录 C。

9 复校时间间隔

原子干涉重力仪的仪器状态参数会随时间变化，因此，可根据实际使用需求自主决定复校的时间间隔，建议每年标定一次。

附录 A

重力加速度原始记录

附录 B

常见修正项及修正方法

B.1 固体潮修正

根据万有引力定律，所有天体对地球每个质点都有引力作用，因而对地球表面形成引潮力，引潮力的垂直分量与重力方向一致，引起地面上每一点的重力加速度值因地球与天体位置的变化而随时变化。因此，在精确测定地面点的重力加速度值时，必须做固体潮修正，以消除其影响。

固体潮修正采用零潮汐系统，其数学模型为：

$$\Delta g = k \times G(t) - \bar{f}_c$$

$$G(t) = -165.17 \times F(\varphi) \times \left(\frac{C}{r}\right)^3 \times \left(\cos^2 Z - \frac{1}{3}\right) - 1.37 \times F^2(\varphi) \times \left(\frac{C}{r}\right)^4 \times \cos Z \times (5\cos^2 Z - 3) \\ - 76.08 \times F(\varphi) \times \left(\frac{C_s}{r_s}\right)^3 \times \left(\cos^2 Z_s - \frac{1}{3}\right)$$

$$F(\varphi) = 0.998327 + 0.00167 \times \cos 2\varphi$$

$$\bar{f}_c = -4.83 + 15.73 \times \sin^2 \phi - 1.59 \times \sin^4 \phi$$

式中：

Δg ：固体潮修正值，单位为 μGal ；

k ：重力潮汐因子；

$\frac{C_s}{r_s}$ ：地球轨道参数，为不同时刻日心至地心距离，为时间 t 的函数；

$\frac{C}{r}$ ：月亮轨道参数，为不同时刻月心至地心距离，为时间 t 的函数；

φ ：被测点大地纬度；

ϕ ：被测点地心纬度。

B.2 极移修正

极移修正是由于地球自转与被检测点之间距离随时间变化而导致的离心力变化。因此，需要根据最接近观测时间的极移位置进行重力修正。

极移修正公式为：

$$\Delta g = -1.164 \times 10^8 \times \omega^2 \times a \times 2 \sin(2\phi) \times (x \cos \lambda - y \sin \lambda)$$

式中：

Δg ：极移修正值，单位为 μGal ；

ω ：地球自转角速度，为 $7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ；

A ：地球长半轴，为 6378136 m ；

ϕ ：被校准点大地纬度；

λ ：被校准点大地经度；

x, y ：地球极坐标，单位为 rad/s 。

B.3 大气压修正

测量的重力加速度值均需归算到被检测点的正常大气压时的值。

大气压修正公式为：

$$\Delta g = 0.3 \times (P - P_n)$$

$$P_n = 101325 \times \left(1 - 0.0065 \times \frac{H}{288.15}\right)^{5.2559}$$

式中：

Δg ：大气压修正值，单位为 μGal ；

P ：被测点观测到的大气压值，单位为 hPa ；

H ：被测点的海拔高度，单位为 m 。

B.4 归算高度修正

需要将原子干涉重力仪在有效高度处的观测值引至被测点位需归算高度处的检测值。

$$\Delta g = G_z \times \Delta h$$

式中：

Δg ：仪器高修正值，单位为 μGal ；

G_z ：被测点位的重力垂直梯度，单位为 $\mu\text{Gal/m}$ ；

Δh ：被测点位归算高度与绝对重力仪有效高度之差，单位为 m ；

地球表面通常情况下，随着垂直高度升高，重力加速度值也越小。

B.5 激光频率修正

激光频率的精度将直接影响拉曼光有效波矢的准确性，通过激光频率可以计算相应的修正值。

激光频率引起的重力值修正为：

$$\Delta g = -\frac{\delta(1/k_{eff})}{1/k_{eff}} g_0 = \frac{\delta f_L}{f_L} g_0$$

式中：

Δg ：激光频率偏差引起的重力修正值，单位为 μGal ；

k_{eff} ：拉曼光有效波矢，单位为 rad/m ；

$\delta(1/k_{eff})$ ：由于激光频率的微小偏差引起的拉曼光有效波矢倒数的微小偏差；

f_L ：激光器的频率，单位为 MHz ；

δf_L ：激光器的频率与标准激光器标准频率之差，一般通过光频梳测量所得，单位为 MHz ；

g_0 ：测量点位的绝对重力加速度，一般精确到 10^{-3}m/s^2 量级即可，单位为 μGal 。

B.6 原子钟频率修正

原子钟产生的参考时钟频率不准确时，拉曼激光扫描频率的啁啾率 α 将产生一定的偏差，需要修正其引起的绝对重力值偏差。

原子钟频率引起的重力值修正为：

$$\Delta g = -\frac{\delta\alpha_{ref}}{\alpha_0} g_0 = 2\frac{\delta f_{ref}}{f_{ref}} g_0$$

式中：

Δg ：原子钟频率偏差引起的重力修正值，单位为 μGal ；

k_{eff} ：拉曼光有效波矢，单位为 rad/m ；

δf_{ref} ：原子钟输出频率与标准频率之差，单位为 Hz ；

f_{ref} ：与原子钟输出频率相对应的标准频率，单位为 Hz ；

g_0 ：测量点位的绝对重力加速度，一般精确到 10^{-3}m/s^2 量级即可，单位为 μGal 。

B.7 测量高度修正

原子从磁光阱中心下落到探测区存在一定的高度差,重力场在竖直方向存在梯度,实际测量的重力值包含梯度的影响,需要进行相应的修正,并归算至磁光阱中心。

测量高度修正公式表示为:

$$\Delta g = -G_z \times g_0 \times \left(\frac{7}{12} T^2 + t_0 T \right)$$

式中:

Δg : 由测量高度效应引起的修正值,单位为 μGal ;

G_z : 测点的垂直重力梯度,单位为 $\mu\text{Gal/m}$;

T : 拉曼脉冲之间的时间间隔,单位为 s ;

t_0 : 原子团开始下落到作用第一束拉曼脉冲的时间,单位为 s ;

g_0 : 测点的绝对重力值,单位为 m/s^2 。

B.9 仪器倾斜修正

为了得到当地精确的重力加速度值,拉曼光有效波矢的方向需要与重力加速度方向严格平行,否则将测量重力加速度的竖直分量。

倾斜修正公式可以表示为:

$$\Delta g = g_0 ((\theta_x - \theta_{x0})^2 + (\theta_y - \theta_{y0})^2)$$

式中:

Δg : 由倾斜引起的修正值,单位为 μGal ;

θ_x 、 θ_y : X 和 Y 方向仪器实时测量的倾斜值,单位 rad ;

θ_{x0} 、 θ_{y0} : 由倾斜调制实验测得的 X 和 Y 方向倾斜零点值,单位为 rad ;

g_0 : 测点的绝对重力值,单位为 m/s^2 。

B.10 科里奥利力修正

重力是万有引力和地球向心力的合力。因为地球自转,地面表面物体都处在一个旋转的坐标系,会受到科里奥利力效应的影响。

科里奥利力修正公式可以表示为:

$$\Delta g = 2\Omega_{Earth} \cos(\varphi_{Lat}) v \cos(\theta)$$

式中：

Δg ：由科里奥利力效应引起的修正值，单位为 μGal ；

Ω_{Earth} ：地球的自转角速度，单位 rad/s ，一般约为 $7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ；

φ_{Lat} ：地理纬度；

v ：原子团的平均水平速度；

θ ：原子团与东向的方位夹角。

按 6.2.7 节《原子干涉绝对重力仪的科里奥利力测量》中的方法可以测得由科里奥利力效应引起的修正值，修正到拟合曲线 90° 对应的重力值。

B.11 双光子光移修正

拉曼激光由一对向下传输的光和一对向上传输的光组成。干涉过程中，这两对光会同时和原子相互作用。这时，不只发生共振的双光子跃迁，非共振的双光子跃迁也会发生。非共振的双光子跃迁会产生光移，从而影响共振的双光子跃迁，并最终导致一个重力值修正（双光子光移修正）。

双光子光移修正公式表示为：

$$\Delta g = \left(\frac{\Omega_{eff}}{4k_{eff} v(t_0)} - \frac{\Omega_{eff}}{4k_{eff} v(t_0 + 2T)} \right) / (k_{eff} \cdot T^2)$$

式中：

Δg ：由测量高度效应引起的修正值，单位为 μGal ；

G_z ：测点的垂直重力梯度，单位为 $\mu\text{Gal/m}$ ；

T ：拉曼脉冲之间的时间间隔，单位为 s ；

t_0 ：原子团开始下落到作用第一束拉曼脉冲的时间，单位为 s ；

g_0 ：测点的绝对重力值，单位为 m/s^2 。

双光子光移效应跟拉曼光功率成正相关，可以通过全功率和半功率的测量配置进行评估。

B.12 拉曼光波前畸变效应修正

原子团自由下落过程中会膨胀，原子以不同路径下落，在不同水平位置感受到的拉曼光波前会有差别，这将引起附加的效应，即拉曼光波前畸变效应。

拉曼光波前畸变效应的修正一直是一个难题,需要选择光学平整度较高的拉曼光窗片,尽量降低原子团温度。通过原子团膨胀感知波前和通过精确测量拉曼光波前等方式可以评估其影响大小,但目前尚未有成熟的修正方案。

B.13 自引力效应修正

原子在真空腔体中自由下落,会受到真空物理单元的组件质量的吸引作用,由万有引力定律可知原子周边的质量体会引起一个修正项,即自引力效应修正。自引力效应评估是通过有限元分析法计算出真空物理单元内沿原子团下落路径上的自引力大小,通过积分得出自引力修正项。因不同研制单位的真空物理单元的构造不尽相同,需要进行评估,但该项一般不随外界参数变化。

B.14 与拉曼光波矢无关的修正项

原子干涉重力仪的系统效应一般分两类:一类是与波矢相关的效应,包括双光子光移、科里奥利力相移、拉曼光波前畸变相移,这些修正项会直接耦合进最终的测量结果。另外一类是与拉曼光波矢无关的相移,包括射频相移、单光子光移、二阶塞曼频移等,这类修正项通过修改测量配置来反转拉曼光波矢,通过调制实验可以提取出来,因此不会影响 B 类不确定评定。

B.15 其它修正项

原子干涉重力仪还有其它修正项需要考虑,包括由光速有限性效应引起的光速有限性修正、由冷原子之间相互碰撞效应引起的冷原子碰撞频移修正等,这些修正相对比较小,可以参考现有文献介绍的方法进行修正。此外,在调制拉曼激光方案中,由拉曼边带效应引起的拉曼光边带效应修正通常比较大,需要进行考虑。另外,在基于铷 85 原子的原子干涉重力仪中,需要考虑由拉曼光方案不同引入的系统修正项。

附录 C

原子干涉重力仪测量结果不确定度评定方法及示例

C.1 概述

本附录主要介绍原子干涉重力仪测量不确定度的评定方法，为原子干涉重力仪的不确定度评估提供参考。

C.2 重力加速度值计算

基于原子干涉重力仪测量重力加速度的基本公式如下：

$$P = A + C \cos(2\pi(\alpha - \alpha_0)T^2)$$

$$g = \frac{2\pi\alpha_0}{k_{eff}}$$

式中：

P ：原子布居数；

A ：原子干涉条纹的直流偏置；

C ：原子干涉条纹的对比度；

T ：拉曼脉冲之间的时间间隔；

g ：绝对重力加速度， m/s^2 ；

α ：拉曼光扫频的频率啁啾率，单位 Hz/s ；

α_0 ：与绝对重力加速相对应的拉曼光频率啁啾率，单位 Hz/s ；

k_{eff} ：拉曼激光的有效波矢，单位 rad/m 。

C.3 不确定度的分析与评定

(1) B类不确定度的评定

测量其它来源引入的不确定度是原子干涉重力仪的 B 类不确定度。系统误差评估会引入 B 类的不确定度 u_B ，主要的来源有：固体潮修正、极移修正、大气压修正、归算高度修正、激光频率修正、原子钟频率修正、测量高度修正、

仪器倾斜修正、科里奥利力修正、双光子光移修正、拉曼光波前畸变效应修正、自引力效应修正、与拉曼光波矢无关的修正和其它修正等。

表 C.1 原子干涉重力仪的 B 类不确定度来源汇总表（单位：μGal，k=1）

序号	B 类不确定度来源	不确定度评定
1	激光频率修正	u_1
2	原子钟频率修正	u_2
3	科里奥利力效应修正	u_3
4	测量高度修正	u_4
5	双光子光移修正	u_5
6	拉曼光波前畸变效应修正	u_6
7	自引力效应修正	u_7
8	归算高度修正	u_8
9	仪器倾斜修正	u_9
10	固体潮修正	u_{10}
11	极移修正	u_{11}
12	大气压修正	u_{12}
13	与拉曼光波矢无关的修正	u_{13}
14	其它修正	u_{14}

通过表 C.1 中给出的 B 类不确定度来源可以计算绝对重力测量值总的 B 类不确定度，相应公式如下：

$$u_B = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots + u_{14}^2}$$

(2) A 类不确定度的评定

原子干涉重力仪中的探测噪声、拉曼光光强噪声、振动噪声、拉曼光相位噪声等随机噪声是主要的噪声来源，影响绝对重力仪的 A 类不确定度。在重复性条件或复现性条件下，进行 n 次绝对重力加速度的观测，相应结果为 $g_m (m=1,2,\dots,n)$ ，则观测结果的标准不确定度可用测量平均值 \bar{g} 的标准偏差来计算，其表达式如下：

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{m=1}^n (g_m - \bar{g})^2}$$

其中， $\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n g_m$ 。

(3) 合成标准不确定度的评定

原子干涉重力仪的不确定度使用 A 类和 B 类不确定度的合成标准不确定度表示其不确定性，其表达式如下：

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

合成标准不确定度的扩展因子 k 是 1，为了增加最终结果的置信水平，取扩展因子 $k=2$ ，其置信概率为 95.45%，对应的扩展不确定度为： $U=2u_c$ 。