

《医用准分子激光源校准规范》

实验报告

《医用准分子激光源校准规范》起草小组

2024年11月

实验报告（一）

一、 实验目的

通过实验，验证《医用准分子激光源校准规范》中各参数校准方法的可行性，核查指标是否能够完全覆盖校准规范中的规定，并对测量不确定度评定的合理性和准确性进行分析。

二、 实验地点及时间

实验地点：上海市黄浦区瞿溪路500号；

实验时间：2024年09月19日。

三、 环境条件

实验室环境条件	测量开始时	测量结束时
温度/°C:	22	22
相对湿度(%):	53	53
其它特殊条件:	无	无
样品状况:	正常	正常

四、 校准用设备

名称/型号	编号	证书编号/ 有效期限	测量范围/准确度等级或 最大允许误差或不确定度
激光能量计/ PE50-SH-V2	237262	GXjg2024-04784 / 2025-08-19	25μJ~10J / $U_{rel}=3\%$ ($k=2$)
数字示波器/ DSO-X 3102A	MY542302 18	2023F32-10-4902278001 / 2024-10-29	频率: (DC~1000MHz); 电 平: (0~100)V / 时间: ±1.0%
数字示波器/ DSO91204A	MY544101 03	2024F32-10-5367737001 / 2025-07-14	频率: DC~12GHz, 时间: 5ps~20s, 幅度: 5mV~5V / 时间: ±1.0%

五、 校准人员

高建强、于磊

六、 被校样品信息

名称	型号	编号	生产厂商
准分子激光角膜屈光治疗机	EX500	眼科-1	爱尔康

七、 校准方法及结果

(一) 校准方法

1 输出能量

1.1 调整工作光束和激光能量计，使工作光束垂直入射到激光能量计的探测器接收面中央。重复测量3次取平均值，按公式（1）计算示值相对误差 δ_Q ：

$$\delta_Q = \frac{\bar{Q}_{DUT} - \bar{Q}_S}{\bar{Q}_S} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

\bar{Q}_{DUT} ——被校准分子源示值，J；

\bar{Q}_S ——激光能量计 3 次测量值的算术平均值，J。

1.2 输出能量不稳定度

将准分子源工作光束输出能量调至额定工作状态，以治疗过程中可能出现的最长时间为测试时间，在测试时间内等间隔选取 10 点，测量 10 次脉冲能量，按式（2）求出功率不稳定度 S_t 。

$$S_t = \pm \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n Q_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

Q_i ——第*i*次能量测量值，J；

Q_{\max} ——10次能量测量值的最大值，J；

Q_{\min} ——10次能量测量值的最小值，J；

n ——测量次数。

1.3 输出能量复现性

将准分子源工作光束输出能量调至额定工作状态，用激光能量计进行测量；断开准分子源电源，再接通电源并调至额定工作状态，用激光能量计进行测量。如此重复5次，得5次测量值，按照式（3）计算工作光束输出激光能量复现性 R_p 。

$$R_p = \pm \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n Q_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

Q_i ——第 i 次能量测量值，J；

Q_{\max} —— n 次能量测量值的最大值，J；

Q_{\min} —— n 次能量测量值的最小值，J；

n ——测量次数。

1.4 激光脉冲持续时间

选取满足准分子源脉冲持续时间校准需要的光电探测器和数字存储示波器，按照GB/T 41572—2022第6.2.1条测量激光脉冲持续时间。重复测量3次取平均值，按公式

（4）计算示值相对误差 δ_τ ：

$$\delta_\tau = \frac{\bar{\tau}_{\text{DUT}} - \bar{\tau}_s}{\bar{\tau}_s} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

$\bar{\tau}_{\text{DUT}}$ ——被校准分子源示值，s；

$\bar{\tau}_s$ ——激光脉冲持续时间3次测量值的算术平均值，s。

1.5 激光脉冲重复频率

选取满足准分子源脉冲重复频率校准需要的光电探测器和数字存储示波器，按照

GB/T 41572—2022第6.3条测量激光脉冲重复频率。重复测量3次取平均值，按公式

(5) 计算示值相对误差 δ_f ：

$$\delta_f = \frac{\bar{f}_{\text{DUT}} - \bar{f}_s}{\bar{f}_s} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

\bar{f}_{DUT} ——被校准分子源示值，Hz；

\bar{f}_s ——激光重复频率 3 次测量值的算术平均值，Hz。

(二) 校准结果：

1、输出能量

示值 (mJ)	实际值 (mJ)	示值相对误差	不确定度
2.5	2.36	5.9%	$U=4.0\% (k=2)$

2、输出能量不稳定性：±1.3%。

3、输出能量复现性：±1.5%。

4、脉冲持续时间

示值 (ns)	实际值 (ns)	示值相对误差	不确定度
7	7.1	-1.4%	$U=6.0\% (k=2)$

5、重复频率

示值 (kHz)	实际值 (kHz)	示值相对误差	不确定度
500	501.26	-0.3%	$U=2.0\% (k=2)$

八、校准结果的不确定度评定

8.1 测量模型

8.1.1 激光能量示值相对误差 δ_Q ：

$$\delta_Q = \frac{\bar{Q}_{\text{DUT}} - \bar{Q}_S}{\bar{Q}_S} \times 100\%$$

8.1.2 激光脉冲持续时间示值相对误差 δ_τ :

$$\delta_\tau = \frac{\bar{\tau}_{\text{DUT}} - \bar{\tau}_S}{\bar{\tau}_S} \times 100\%$$

8.1.3 激光重复频率示值相对误差 δ_f :

$$\delta_f = \frac{\bar{f}_{\text{DUT}} - \bar{f}_S}{\bar{f}_S} \times 100\%$$

8.2 激光能量示值相对误差 δ_Q 的不确定度评定

医用准分子激光源激光能量示值相对误差 δ_Q 测量结果的不确定度主要包括以下方面:

8.2.1 激光能量测量重复性所引入的标准不确定度分量 u_1 。

对一台医用准分子激光源, 对设置值2.5 mJ连续重复测量10次, 得到测量列: 2.35、2.36、2.38、2.39、2.35、2.36、2.37、2.40、2.41、2.36, 单位为mJ, 采用A类评定方法。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = 2.373 \text{ mJ}$$

单次相对实验标准差为:

$$s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{10} (E_i - \bar{E})^2}}{\bar{E}} = 0.89\%$$

实际测量时, 在重复性条件下连续测量3次, 以3次测量算术平均值为测量结果, 则可得到:

$$u_1 = s / \sqrt{3} = 0.51\%$$

8.2.2 标准激光能量计上级量传所引入的标准不确定度分量 u_2 。

标准激光能量计上级量传的不确定度为 $U_{\text{rel}}=3\%$ ($k=2$), 采用B类评定方法进行评

定。

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{3\%}{2} = 1.5\%$$

8.2.3 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度汇总于表8.1。

表8.1 标准不确定度汇总表

标准不确定度 u_i	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	激光能量测量重复性	0.51%
u_2	标准激光能量计上级量传	1.5%

8.2.4 相对合成标准不确定度的计算

上述各标准不确定度分量彼此独立不相关，所以相对合成标准不确定度可按下式得到：

$$u(\delta) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 1.60\%$$

8.2.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(\delta) = 2 \times u(\delta) = 2 \times 1.60\% = 3.2\% \approx 4.0\%$$

8.3 激光脉冲持续时间示值相对误差 δ_τ 的不确定度评定

医用准分子激光源激光脉冲持续时间示值相对误差 δ_τ 测量结果的不确定度主要包括以下方面：

8.3.1 激光脉冲持续时间测量重复性所引入的标准不确定度分量 u_1 。

对一台医用准分子激光源，在7 ns设置值附近连续重复测量10次，得到测量列：7.1、7.0、7.1、7.2、7.1、7.1、7.2、7.2、7.1、6.9，单位为ns，采用A类评定方法。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = 7.10 \text{ ns}$$

单次相对实验标准差为：

$$s = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (E_i - \bar{E})^2}{n-1}}}{\bar{E}} = 1.33\%$$

实际测量时，在重复性条件下连续测量3次，以3次测量算术平均值为测量结果，则可得到：

$$u_1 = s / \sqrt{3} = 0.77\%$$

8.3.2 数字存储示波器测量准确度所引入的标准不确定度分量 u_2 。

数字存储示波器时间测量最大允许误差为±1.0%，按照均匀分布，采用B类评定方法进行评定。

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.58\%$$

8.3.3 光电探测器上升时间引入的标准不确定度 u_3 。

光电探测器上升时间为0.3ns，测量结果为7.10 ns时， $a_3=4.23\%$ ，按照均匀分布，采用B类评定方法进行评定。

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{4.23\%}{\sqrt{3}} = 2.44\%$$

8.3.4 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度汇总于表8.2。

表8.2 标准不确定度汇总表

标准不确定度 u_i	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	激光脉冲持续时间测量重复性	0.77%
u_2	数字存储示波器测量准确度	0.58%
u_3	光电探测器响应时间	2.44%

8.3.5 相对合成标准不确定度的计算

上述各标准不确定度分量彼此独立不相关，所以相对合成标准不确定度可按下式得到：

$$u(\delta_r) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 2.62\%$$

8.3.6 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(\delta_r) = 2 \times u(\delta_r) = 2 \times 2.62\% = 5.24\% \approx 6.0\%$$

8.4 激光重复频率示值相对误差 δ_f 的不确定度评定

医用准分子激光源激光重复频率示值相对误差 δ_f 测量结果的不确定度主要包括以下方面：

8.4.1 激光重复频率测量重复性所引入的标准不确定度分量 u_1 。

对一台医用准分子激光源，在500 Hz设置值附近连续重复测量10次，得到测量列：501.13、501.24、501.45、501.25、501.46、501.23、501.54、500.98、500.87、501.46，单位为Hz，采用A类评定方法。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = 501.261 \text{ Hz}$$

单次相对实验标准差为：

$$s = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (E_i - \bar{E})^2}{n-1}}}{\bar{E}} = 0.044\%$$

实际测量时，在重复性条件下连续测量3次，以3次测量算术平均值为测量结果，则可得到：

$$u_1 = s / \sqrt{3} = 0.026\%$$

8.4.2 数字存储示波器测量准确度所引入的标准不确定度分量 u_2 。

数字存储示波器时间测量最大允许误差为±1.0%，按照均匀分布，采用B类评定方法进行评定。

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.58\%$$

8.4.3 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度汇总于表8.3。

表8.3 标准不确定度汇总表

标准不确定度 u_i	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	激光脉冲持续时间测量重复性	0.026%
u_2	数字存储示波器测量准确度	0.58%

8.4.4 相对合成标准不确定度的计算

上述各标准不确定度分量彼此独立不相关，所以相对合成标准不确定度可按下式得到：

$$u(\delta_f) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.59\%$$

8.4.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(\delta_f) = 2 \times u(\delta_f) = 2 \times 0.59\% = 1.18\% \approx 2.0\%$$

九、 实验结论

本实验严格按照校准规范中的校准方法执行，未出现有分歧性或模糊性的操作，具有可操作性；实验数据可靠。因此，本实验很好的验证了校准规范的可操作性和参数指标的合理性。

实验报告（二）

一、 实验目的

通过实验，验证《医用准分子激光源校准规范》中各参数校准方法的可行性，核查指标是否能够完全覆盖校准规范中的规定，并对测量不确定度评定的合理性和准确性进行分析。

二、 实验地点及时间

实验地点：上海市徐汇区宝庆路19号；

实验时间：2024年10月23日。

三、 环境条件

实验室环境条件	测量开始时	测量结束时
温度/°C:	21	21
相对湿度(%):	55	55
其它特殊条件:	无	无
样品状况:	正常	正常

四、 校准用设备

名称/型号	编号	证书编号/ 有效期限	测量范围/准确度等级或 最大允许误差或不确定度
激光能量计/ PE50-SH-V2	237262	GXjg2024-04784 / 2025-08-19	25μJ~10J / $U_{rel}=3\%$ ($k=2$)
数字示波器/ DSO-X 3102A	MY542302 18	2023F32-10-4902278001 / 2024-10-29	频率: (DC~1000MHz); 电 平: (0~100) V / 时间: ±1.0%
数字示波器/ DSO91204A	MY544101 03	2024F32-10-5367737001 / 2025-07-14	频率: DC~12GHz, 时间: 5ps~20s, 幅度: 5mV~5V / 时间: ±1.0%

五、 校准人员

高建强、于磊

六、 被校样品信息

名称	型号	编号	生产厂商
准分子激光系统	MEL90	1230265	Carl Zeiss

七、 校准方法及结果

(一) 校准方法

1 输出能量

1.1 调整工作光束和激光能量计，使工作光束垂直入射到激光能量计的探测器接收面中央。重复测量3次取平均值，按公式（1）计算示值相对误差 δ_Q ：

$$\delta_Q = \frac{\bar{Q}_{\text{DUT}} - \bar{Q}_s}{\bar{Q}_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

\bar{Q}_{DUT} ——被校准分子源示值，J；

\bar{Q}_s ——激光能量计3次测量值的算术平均值，J。

1.2 输出能量不稳定度

将准分子源工作光束输出能量调至额定工作状态，以治疗过程中可能出现的最长时间为测试时间，在测试时间内等间隔选取10点，测量10次脉冲能量，按式（2）求出功率不稳定度 S_t 。

$$S_t = \pm \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n Q_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

Q_i ——第*i*次能量测量值，J；

Q_{\max} ——10次能量测量值的最大值，J；

Q_{\min} ——10次能量测量值的最小值，J；

n ——测量次数。

1.3 输出能量复现性

将准分子源工作光束输出能量调至额定工作状态，用激光能量计进行测量；断开准分子源电源，再接通电源并调至额定工作状态，用激光能量计进行测量。如此重复5次，得5次测量值，按照式（3）计算工作光束输出激光能量复现性 R_p 。

$$R_p = \pm \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n Q_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

Q_i ——第*i*次能量测量值，J；

Q_{\max} ——5次能量测量值的最大值，J；

Q_{\min} ——5次能量测量值的最小值，J；

n ——测量次数。

1.4 激光脉冲持续时间

选取满足准分子源脉冲持续时间校准需要的光电探测器和数字存储示波器，按照GB/T 41572—2022第6.2.1条测量激光脉冲持续时间。重复测量3次取平均值，按公式

（4）计算示值相对误差 δ_τ ：

$$\delta_\tau = \frac{\bar{\tau}_{\text{DUT}} - \bar{\tau}_s}{\bar{\tau}_s} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

$\bar{\tau}_{\text{DUT}}$ ——被校准分子源示值，s；

$\bar{\tau}_s$ ——激光脉冲持续时间3次测量值的算术平均值，s。

1.5 激光脉冲重复频率

选取满足准分子源脉冲重复频率校准需要的光电探测器和数字存储示波器，按照

GB/T 41572—2022第6.3条测量激光脉冲重复频率。重复测量3次取平均值，按公式

(5) 计算示值相对误差 δ_f ：

$$\delta_f = \frac{\bar{f}_{\text{DUT}} - \bar{f}_s}{\bar{f}_s} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

\bar{f}_{DUT} ——被校准分子源示值，Hz；

\bar{f}_s ——激光重复频率3次测量值的算术平均值，Hz。

(二) 校准结果：

1、输出能量

示值 (mJ)	实际值 (mJ)	示值相对误差	不确定度
1.2	1.101	9.0%	$U=4.0\% (k=2)$

2、输出能量不稳定性：±2.5%。

3、输出能量复现性：±1.0%。

4、脉冲持续时间

示值 (ns)	实际值 (ns)	示值相对误差	不确定度
4	4.1	-2.4%	$U=3.0\% (k=2)$

5、重复频率

示值 (kHz)	实际值 (kHz)	示值相对误差	不确定度
250	250.52	-0.2%	$U=2.0\% (k=2)$
500	497.43	0.5%	$U=2.0\% (k=2)$

八、校准结果的不确定度评定

8.1 测量模型

8.1.1 激光能量示值相对误差 δ_Q :

$$\delta_Q = \frac{\bar{Q}_{\text{DUT}} - \bar{Q}_S}{\bar{Q}_S} \times 100\%$$

8.1.2 激光脉冲持续时间示值相对误差 δ_τ :

$$\delta_\tau = \frac{\bar{\tau}_{\text{DUT}} - \bar{\tau}_S}{\bar{\tau}_S} \times 100\%$$

8.1.3 激光重复频率示值相对误差 δ_f :

$$\delta_f = \frac{\bar{f}_{\text{DUT}} - \bar{f}_S}{\bar{f}_S} \times 100\%$$

8.2 激光能量示值相对误差 δ_Q 的不确定度评定

医用准分子激光源激光能量示值相对误差 δ_Q 测量结果的不确定度主要包括以下方面:

8.2.1 激光能量测量重复性所引入的标准不确定度分量 u_1 。

对一台医用准分子激光源, 对设置值1.2 mJ连续重复测量10次, 得到测量列: 1.083、1.125、1.095、1.076、1.117、1.102、1.124、1.096、1.092、1.132, 单位为mJ, 采用A类评定方法。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = 1.104 \text{ mJ}$$

单次相对实验标准差为:

$$s = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (E_i - \bar{E})^2}{n-1}}}{\bar{E}} = 1.74\%$$

实际测量时, 在重复性条件下连续测量3次, 以3次测量算术平均值为测量结果, 则可得到:

$$u_1 = s / \sqrt{3} = 1.00\%$$

8.2.2 标准激光能量计上级量传所引入的标准不确定度分量 u_2 。

标准激光能量计上级量传的不确定度为 $U_{rel}=3\%$ ($k=2$)，采用B类评定方法进行评定。

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{3\%}{2} = 1.5\%$$

8.2.3 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度汇总于表8.1。

表8.1 标准不确定度汇总表

标准不确定度 u_i	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	激光能量测量重复性	1.00%
u_2	标准激光能量计上级量传	1.5%

8.2.4 相对合成标准不确定度的计算

上述各标准不确定度分量彼此独立不相关，所以相对合成标准不确定度可按下式得到：

$$u(\delta_Q) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 1.80\%$$

8.2.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(\delta_Q) = 2 \times u(\delta_Q) = 2 \times 1.80\% = 3.6\% \approx 4.0\%$$

8.3 激光脉冲持续时间示值相对误差 δ_r 的不确定度评定

医用准分子激光源激光脉冲持续时间示值相对误差 δ_r 测量结果的不确定度主要包括以下方面：

8.3.1 激光脉冲持续时间测量重复性所引入的标准不确定度分量 u_1 。

对一台医用准分子激光源，在4 ns设置值附近连续重复测量10次，得到测量列：

4.1、4.1、4.0、4.0、4.0、4.1、4.1、4.0、4.1、4.0，单位为ns，采用A类评定方法。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = 4.05 \text{ ns}$$

单次相对实验标准差为：

$$s = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (E_i - \bar{E})^2}{n-1}}}{\bar{E}} = 1.30\%$$

实际测量时，在重复性条件下连续测量3次，以3次测量算术平均值为测量结果，则可得到：

$$u_1 = s / \sqrt{3} = 0.75\%$$

8.3.2 数字存储示波器测量准确度所引入的标准不确定度分量 u_2 。

数字存储示波器时间测量最大允许误差为 $\pm 1.0\%$ ，按照均匀分布，采用B类评定方法进行评定。

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.58\%$$

8.3.3 光电探测器上升时间引入的标准不确定度 u_3 。

光电探测器上升时间为 0.05ns ，测量结果为 4.05 ns 时， $a_3=1.23\%$ ，按照均匀分布，采用B类评定方法进行评定。

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{1.23\%}{\sqrt{3}} = 0.71\%$$

8.3.4 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度汇总于表8.2。

表8.2 标准不确定度汇总表

标准不确定度 u_i	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	激光脉冲持续时间测量重复性	0.75%
u_2	数字存储示波器测量准确度	0.58%

u_3	光电探测器响应时间	0.71%
-------	-----------	-------

8.3.5 相对合成标准不确定度的计算

上述各标准不确定度分量彼此独立不相关，所以相对合成标准不确定度可按下式得到：

$$u(\delta_\tau) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 1.19\%$$

8.3.6 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(\delta_\tau) = 2 \times u(\delta_\tau) = 2 \times 1.19\% = 2.38\% \approx 3.0\%$$

8.4 激光重复频率示值相对误差 δ_f 的不确定度评定

医用准分子激光源激光重复频率示值相对误差 δ_f 测量结果的不确定度主要包括以下方面：

8.4.1 激光重复频率测量重复性所引入的标准不确定度分量 u_1 。

对一台医用准分子激光源，在500 Hz设置值附近连续重复测量10次，得到测量列：497.13、497.65、497.35、497.26、497.49、497.86、497.51、497.28、467.46、497.34，单位为Hz，采用A类评定方法。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = 497.433 \text{ Hz}$$

单次相对实验标准差为：

$$s = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (E_i - \bar{E})^2}{n-1}}}{\bar{E}} = 0.042\%$$

实际测量时，在重复性条件下连续测量3次，以3次测量算术平均值为测量结果，则可得到：

$$u_1 = s / \sqrt{3} = 0.024\%$$

8.4.2 数字存储示波器测量准确度所引入的标准不确定度分量 u_2 。

数字存储示波器时间测量最大允许误差为 $\pm 1.0\%$ ，按照均匀分布，采用B类评定方法进行评定。

$$u_2 = \frac{a}{k} = \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.58\%$$

8.4.3 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度汇总于表8.3。

表8.3 标准不确定度汇总表

标准不确定度 u_i	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	激光脉冲持续时间测量重复性	0.024%
u_2	数字存储示波器测量准确度	0.58%

8.4.4 相对合成标准不确定度的计算

上述各标准不确定度分量彼此独立不相关，所以相对合成标准不确定度可按下式得到：

$$u(\delta_f) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.59\%$$

8.4.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(\delta_f) = 2 \times u(\delta_f) = 2 \times 0.59\% = 1.18\% \approx 2.0\%$$

九、 实验结论

本实验严格按照校准规范中的校准方法执行，未出现有分歧性或模糊性的操作，具有可操作性；实验数据可靠。因此，本实验很好的验证了校准规范的可操作性和参数指标的合理性。