



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—202X

## 标准光波长计校准规范

Calibration Specification of Standard Wavelength Meter

(征求意见稿)

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

# 标准光波长计校准规范

Calibration Specification of Standard Wavelength meter

JJF ××××—202X

**归口单位：**全国几何量长度计量技术委员会

**主要起草单位：**中国计量科学研究院

中国测试技术研究院

天津市计量监督检测科学研究院

**参加起草单位：**上海市计量测试技术研究院

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所

本规范委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

本规范起草人：

殷 聪（中国计量科学研究院）

王建波（中国计量科学研究院）

冉莉萍（中国测试技术研究院）

刘红光（天津市计量监督检测科学研究院）

参加起草人：

雷李华（上海市计量测试技术研究院）

谢春玉（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术  
研究所）

毕文文（中国计量科学研究院）

# 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 标准光波长计 standard wavelength meter .....	1
4 概述.....	1
5 计量特性.....	1
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 校准项目和校准方法.....	3
7.1 原理 .....	3
7.2 波长示值误差 .....	3
7.3 波长分辨力 .....	4
7.4 功率示值误差 .....	4
8 校准结果表达.....	5
9 复校时间间隔.....	5
附录 A 常见可用作标准器的稳频激光器量值与相对标准不确定度 .....	6
附录 B 校准记录内容 .....	7
附录 C 校准证书内页主要内容 .....	8
附录 D 测量不确定度评定示例 .....	9

## 引 言

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》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范修订工作的基础性系列规范。

# 标准光波长计校准规范

## 1 范围

本规范适用于（237~2350）nm 测量范围的标准光波长计的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

IEC 62129-2:2011 波长/光频率测量仪器校准 - 第 2 部分：迈克尔逊干涉式单波长计（Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments - Part 2: Michelson interferometer single wavelength meters）

JJG 963—2022 通信用光波长计

JJG 813—2013 光纤光功率计检定规程

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 术语和计量单位

### 3.1 标准光波长计 standard wavelength meter

用于校准光波长计波长示值误差的，具有最高准确度等级的参考光波长计。一般情况下，标准光波长计的相对扩展不确定度优于  $2 \times 10^{-6}$  ( $k=2$ )。标准光波长计也可以直接用于测量激光器输出的真空波长或频率。

## 4 概述

光波长计可分为测量单个光波长的单波长计和同时测量多个光波长（波分复用信号）的多波长计。光波长计一般采用迈克尔逊或斐索干涉技术，内置作为参考光源的 633 nm 稳频 He-Ne 激光器，以及空气折射率修正系统，可以准确测量被测光的真空波长值或频率值。

标准光波长计的输入方式包括光纤输入和空间光输入。

## 5 计量特性

### 5.1 波长示值误差

### 5.2 波长分辨力

### 5.3 功率示值误差

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

实验室环境温度：(23±5) °C，校准过程中的温度波动不超过±2 °C；

相对湿度：≤ 75%；

准备时间：被校准的标准光波长计在校准实验室内平衡温度的时间不得少于 2 小时，校准时需先根据标准光波长计的要求进行预热；

其他要求：周围无影响校准正常工作的电磁干扰和机械振动。

### 6.2 测量标准及其他设备

根据标准光波长计测量准确度、测量范围和校准需求，选择适当的标准器，见表 1。

**表 1 标准器具及技术要求**

标准器具		技术要求
标准器	稳频激光器	真空波长值位于被校准光波长计测量范围内。 真空波长相对标准不确定度：不大于被校准光波长计相对标准不确定度的 1/3，一般为 $10^{-8}$ ~ $10^{-12}$ 量级。如，国际计量委员会（CIPM）推荐的用于复现 SI 基本单位米的稳频激光波长，或锁定于光频梳的稳频激光器。 常见的稳频激光器的量值和相对标准不确定度范围见附录 A。
	波长分辨力测量系统	最小波长分辨力：不大于被校准波长计标称分辨力的 1/3，一般为小于 0.03 pm，即 4 MHz@1530 nm，75 MHz@633 nm。 波长扫描范围：大于等于被校准波长计标称分辨力的 3 倍，一般为大于 0.3 pm，即 36 MHz@1530 nm，225 MHz@633 nm。
	标准光功率计	工作波长：满足不确定度要求的波长范围或特定波长 功率测量范围：(-60~+10) dB 分辨力：≤0.01 dB

		扩展不确定度： $U \leq 0.1 \text{ dB} (k=2)$
--	--	---------------------------------------

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 原理

标准光波长计是准确度等级最高的光波长计。本规范采用稳频激光器作为波长参考，校准标准光波长计，将光波长计的波长示值直接溯源至国家波长基准。稳频激光器是一种通过反馈控制技术使输出光真空波长精确且稳定的激光器，其真空波长和频率的相对标准不确定度一般为  $10^{-8} \sim 10^{-12}$  量级。

校准实验室应根据标准光波长计的具体校准需求选择稳频激光器作为波长参考源。参考源真空波长值的标准不确定度应不大于标准光波长计标准不确定度的  $1/3$ 。

### 7.2 波长示值误差

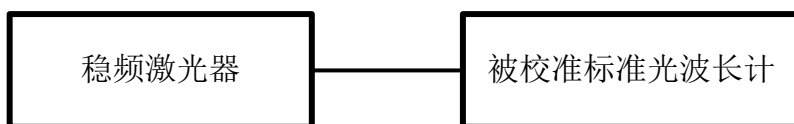


图 1 波长示值误差校准装置示意图

根据标准光波长计的测量范围和校准需求选择对应波长的稳频激光器。参照图 1 搭建测量装置。必要时需衰减稳频激光器的输出功率，使之处于标准光波长计可正常工作的接收功率范围。以稳频激光器的真空波长值为参考值  $\lambda_{\text{ref}}$ 。

每个被校准波长点测量  $m$  组 ( $m \geq 5$ )，每组读取  $n$  次数据 ( $n \geq 10$ )。每组测量间隔时间不少于 10 min。以测得波长值  $\lambda_{ij}$  的算术平均值为标准光波长计的示值  $\lambda_x$ ，表示为：

$$\lambda_x = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \quad (1)$$

被校准波长点的示值误差表示为：

$$\Delta \lambda_x = \lambda_x - \lambda_{\text{ref}} \quad (2)$$



### 7.3 波长分辨力

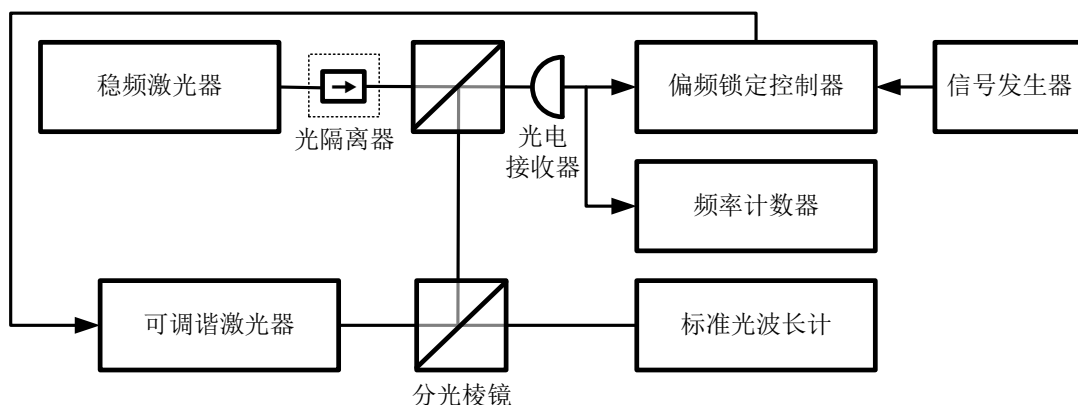


图 2 波长分辨力校准原理

根据标准光波长计校准的波长点选取对应的波长分辨力测量系统，如图 2 所示。设置信号发生器输出频率为(20~100) MHz 之间的正弦波。控制可调谐激光器锁定于参考激光器。可调谐激光器与参考激光器之间的频差等于信号发生器的输出频率，通过频率计数器记录该频差。

将标准光波长计的测量分辨力设置为最高。调节信号发生器的输出频率，当标准光波长计读数最低位变化一个数字时，记录频率计数器的频率变化量 $\Delta f_i$ 。重复上述步骤  $n$  次 ( $n \geq 3$ )，取算术平均值为标准光波长计的频率分辨力  $R_f$ ：

$$R_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta f_i \quad (3)$$

则，标准光波长计的波长分辨力 $\Delta\lambda$ 表示为：

$$R_\lambda = \frac{R_f}{f_x} \cdot \lambda_x = \frac{R_f}{f_x^2} \cdot c \cdot 10^3 = \frac{R_f}{c} \cdot \lambda_x^2 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

式中：

$R_\lambda$ ——标准光波长计的波长分辨力，nm；

$R_f$ ——标准光波长计的频率分辨力，MHz；

$f_x$ ——偏频锁定激光系统调节频率前输出的频率值，MHz；

$\lambda_x$ ——偏频锁定激光系统调节频率前输出的波长值，nm；

$c$ ——真空中的光速，299 792 458 m/s

### 7.4 功率示值误差

功率示值误差方法参照 JJG963—2022 《通信用光波长计》。

## 8 校准结果表达

校准结果在校准证书上反映。校准证书至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 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；
- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次校准所用测量标准的溯源性和有效性说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 对校准规范的偏离的说明；
- m) 校准证书或校准报告签发人的签名或等效标识；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明；

## 9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

建议复校时间间隔不超过一年。

## 附录A 常见可用作标准器的稳频激光器量值与相对标准不确定度

## 常见可用作标准器的稳频激光器量值与相对标准不确定度

稳频激光器	量值范围	相对标准不确定度
633 nm 碘分子饱和吸收稳频激光器	波长值: 633 nm 频率值: 474 THz	$2.5 \times 10^{-10} \sim 2.0 \times 10^{-11}$
633 nm 双纵模稳频激光器	波长值: 633 nm 频率值: 474 THz	$2.0 \times 10^{-8} \sim 5.0 \times 10^{-9}$
543 nm 碘分子饱和吸收稳频激光器	波长值: 543 nm 频率值: 552 THz	$2.5 \times 10^{-10} \sim 4.5 \times 10^{-11}$
543 nm 双纵模稳频激光器	波长值: 543 nm 频率值: 552 THz	$2.0 \times 10^{-8} \sim 5.0 \times 10^{-9}$
532 nm 碘分子饱和吸收稳频激光器	波长值: 532 nm 频率值: 563 THz	$2.5 \times 10^{-10} \sim 8.9 \times 10^{-12}$
1.5 $\mu\text{m}$ 乙炔分子饱和吸收稳频激光器	波长值: 1.5 $\mu\text{m}$ 频率值: 194 THz	$2.5 \times 10^{-10} \sim 2.6 \times 10^{-11}$
1.5 $\mu\text{m}$ 乙炔分子线性吸收稳频激光器	波长值: 1.5 $\mu\text{m}$ 频率值: 194 THz	$2.0 \times 10^{-8} \sim 5.0 \times 10^{-9}$
1.3 $\mu\text{m}$ 甲烷线性吸收稳频激光器	波长值: 1.3 $\mu\text{m}$ 频率值: 229 THz	$5.0 \times 10^{-8} \sim 5.0 \times 10^{-9}$
612 nm 碘分子饱和吸收稳频激光器	波长值: 612 nm 频率值: 490 THz	$2.5 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-10}$
780 nm 铷原子饱和吸收稳频激光器	波长值: 780 nm 频率值: 384 THz	$5.0 \times 10^{-9} \sim 5.0 \times 10^{-10}$
778 nm 铷原子双光子吸收稳频激光器	波长值: 778 nm 频率值: 385 THz	$1.3 \times 10^{-10} \sim 1.3 \times 10^{-11}$

## 附录B 校准记录内容

## 标准光波长计校准原始记录

参考激光频率值:  $f_{ref,i} =$  \_\_\_\_\_ MHz

参考激光真空波长值:  $\lambda_{ref,i} =$  \_\_\_\_\_ nm

1. 被校准光波长计的平均真空波长值:

平均真空波长值:  $\lambda_{x,i} =$  \_\_\_\_\_ nm

2. 波长分辨力:

波长分辨力:  $R =$  \_\_\_\_\_ nm

3. 被校准光波长计的示值误差:

$\Delta\lambda_i =$  \_\_\_\_\_

4. 被校准光波长计的测量不确定度:

$U(\lambda)_{rel} =$  \_\_\_\_\_ ( $k=2$ )

5. 被校准光波长计的功率测量不确定度:

$U(P)_{rel} =$  \_\_\_\_\_ ( $k=2$ )

## 附录C 校准证书内页主要内容

## 校 准 结 果

参考激光频率值:  $f_{ref,i} =$  \_\_\_\_\_ MHz

参考激光真空波长值:  $\lambda_{ref,i} =$  \_\_\_\_\_ nm

1. 被校准光波长计的平均真空波长值:

平均真空波长值:  $\lambda_{x,i} =$  \_\_\_\_\_ nm

2. 波长分辨力:

波长分辨力:  $R =$  \_\_\_\_\_ nm

3. 被校准光波长计的示值误差:

$\Delta\lambda_i =$  \_\_\_\_\_

4. 被校准光波长计的波长测量不确定度:

$U(\lambda)_{rel} =$  \_\_\_\_\_ ( $k=2$ )

5. 被校准光波长计的功率测量不确定度:

$U(P)_{rel} =$  \_\_\_\_\_ ( $k=2$ )

-----以下空白-----

## 附录D 测量不确定度评定示例

## 测量不确定度评定示例

## D.1 校准任务

校准标准光波长计的波长示值误差，并评估标准光波长计的测量不确定度。

## D.2 校准条件

实验室环境温度：23 °C，校准过程中温度波动小于 2 °C；

相对湿度：50%；

准备时间：被校准仪器在校准实验室内平衡温度的时间达到 2 小时。

采用 633 nm 碘稳频 He-Ne 激光器为参考激光器，真空波长值为  $\lambda_{\text{ref}}=632.99121258 \text{ nm}$ ，相对标准不确定度为  $u_{\text{rel}}=2 \times 10^{-10}$ 。

## D.3 校准方法

启动标准光波长计，预热使之达到稳定状态。将预热好的稳频激光器输出光束耦合进标准光波长计。

共测量  $m$  组 ( $m=5$ )，每组读数  $n$  个数 ( $n=10$ )。

## D.4 不确定度评定方法

## D.4.1 波长示值误差测量模型

波长示值误差测量模型可表示为：

$$\Delta\lambda_x = \lambda_x - \lambda_{\text{ref}} \quad (\text{D.1})$$

式中：

$\lambda_x$ ——标准光波长计的示值，nm；

$\lambda_{\text{ref}}$ ——稳频激光器的真空波长值，nm；

## D.4.2 各输入量的灵敏系数

$$|c_1| = |c_2| = 1 \quad (\text{D.2})$$

## D.4.3 各输入量的标准测量不确定度

各输入量的标准测量不确定度分别为标准光波长计示值的不确定度  $u(\lambda_x)$  和稳频激光器波长的不确定度  $u(\lambda_{\text{ref}})$ 。

标准光波长计示值的不确定度来源包括单波长测量重复性引入的不确定度分量  $u_{\text{swr}}$ 、多波长测量重复性引入的不确定度分量  $u_{\text{mwr}}$  和分辨力引入的不确定度分量  $u_R$ 。各分量互不相关，且灵敏系数均为 1，则被测标准光波长计示值的不确定度表示为

$$u(\lambda_x) = \sqrt{(u_{\text{swr}})^2 + (u_{\text{mwr}})^2 + (u_R)^2} \quad (\text{D. 3})$$

#### D. 4. 4 各输入量引入的不确定度分量

$$u_{\lambda_x} = |c_1| \cdot u(\lambda_x) = u(\lambda_x) \quad (\text{D. 4})$$

$$u_{\text{ref}} = |c_2| \cdot u(\lambda_{\text{ref}}) = u(\lambda_{\text{ref}}) \quad (\text{D. 5})$$

#### D. 4. 5 合成标准不确定度

各输入量互不相关，所以合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{(u_{\lambda_x})^2 + (u_{\text{ref}})^2} = \sqrt{(u_{\text{swr}})^2 + (u_{\text{mwr}})^2 + (u_R)^2 + (u_{\text{ref}})^2} \quad (\text{D. 6})$$

#### D. 5 不确定度评定示例

以碘稳频 He-Ne 激光器为波长参考源，真空波长值为  $\lambda_{\text{ref}}=632.99121258 \text{ nm}$ ，相对标准不确定度为  $u_{\text{rel}}=2 \times 10^{-10}$ ，则参考光的真空波长不确定度为  $u(\lambda_{\text{ref}})=632.99121258 \text{ nm} \times 2 \times 10^{-10}=0.00012 \text{ pm}$ 。代入式(D.5)得到参考波长引入的不确定度分量为  $u_{\text{ref}} = |c_2| \cdot u(\lambda_{\text{ref}})=0.00012 \text{ pm}$ 。

单波长重复性引入的不确定度分量  $u_{\text{swr}}$  采用 A 类不确定度评定方法评定。对标准光波长计进行  $m=5$  组测量，每组测量  $n=10$  次，测量结果列于表 D. 1 中。

**表 D. 1 单波长重复性测量结果**

单位：nm

	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
1	632.9911	632.9911	632.9912	632.9913	632.9913
2	632.9912	632.9912	632.9912	632.9913	632.9912
3	632.9911	632.9911	632.9913	632.9913	632.9912
4	632.9912	632.9910	632.9912	632.9912	632.9912
5	632.9912	632.9912	632.9913	632.9913	632.9913

6	632.9912	632.9911	632.9913	632.9912	632.9912
7	632.9911	632.9911	632.9912	632.9913	632.9913
8	632.9911	632.9911	632.9913	632.9912	632.9912
9	632.9912	632.9910	632.9912	632.9913	632.9912
10	632.9911	632.9912	632.9912	632.9913	632.9913
平均值 $\bar{\lambda}_i$	632.9912	632.9911	632.9912	632.9913	632.9912
平均值的标准 差 $u(\bar{\lambda}_i)$	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002
示值平均值 $\lambda_x$				632.9912	
单波长测量重复性引入的不确定度分量 $u_{swr}$				0.068 pm	

表 D. 1 中标准光波长计的真空波长值示值的平均值为

$$\lambda_x = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} = 632.9912 \text{ nm}, \text{ 对应的频率值示值为: } f_x = 473612363 \text{ MHz}。$$

表 D.1 中第 i 组测量得到的平均值表示为:

$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \quad (\text{D. 7})$$

第 i 组测量算术平均值的标准差表示为:

$$u(\bar{\lambda}_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (\lambda_{ij} - \bar{\lambda}_i)^2} \quad (\text{D. 8})$$

单波长测量重复性引入的不确定度分量表示为:

$$u_{swr} = \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \sum_{i=1}^m (\bar{\lambda}_i - \lambda_x)^2 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m u(\bar{\lambda}_i)^2} \quad (\text{D. 9})$$

式(D.9)中的第二项非常小, 相对于第一项可以忽略。因此, (D.9)变为

$$u_{swr} = \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \sum_{i=1}^m (\bar{\lambda}_i - \lambda_x)^2} \quad (\text{D. 10})$$

多波长测量重复性引入的不确定度分量为  $u_{mwr}$ 。根据标准光波长计测量范围选取 N 个典型波长点进行测量 ( $N \geq 2$ )。每个波长点测量 n 次 ( $n \geq 10$ )。

第 i 个波长点 ( $i=1 \cdots N$ ) 示值平均值表示为



$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \quad (\text{D. 11})$$

第  $i$  个波长点示值平均值的标准差表示为

$$u(\bar{\lambda}_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (\lambda_{ij} - \bar{\lambda}_i)^2}$$

第  $i$  个波长点示值误差表示为

$$\Delta\lambda_i = \bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_{ref,i} \quad (\text{D. 12})$$

$N$  个波长点测量得到示值误差的平均值为

$$\overline{\Delta\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\lambda_i \quad (\text{D. 13})$$

$N$  个波长测量重复性引入的不确定度分量表示为

$$u_{mwr} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (\Delta\lambda_i - \overline{\Delta\lambda})^2 + \frac{1}{N} \sum_i^N u(\bar{\lambda}_i)^2} \quad (\text{D. 14})$$

式(D.14)中的第二项非常小，相对于第一项可以忽略。因此，(D.14)变为

$$u_{mwr} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (\Delta\lambda_i - \overline{\Delta\lambda})^2} \quad (\text{D. 15})$$

分析多波长测量引入的重复性时，参考激光器分别为 633 nm 碘稳频 He-Ne 激光器，波长值为 632.99121258 nm；1.3  $\mu\text{m}$  甲烷稳频激光器，波长值为 1312.5910 nm；1.5  $\mu\text{m}$  乙炔稳频激光器，波长值为 1541.7530 nm。各波长点示值列于表 D. 2 中。

**表 D. 2 多波长测量重复性测量结果**

单位：nm

	波长点 1	波长点 2	波长点 3
1	632.9911	1312.5911	1541.7531
2	632.9912	1312.5909	1541.7531
3	632.9911	1312.5910	1541.7531
4	632.9912	1312.5909	1541.7531
5	632.9912	1312.5910	1541.7531

6	632.9912	1312.5909	1541.7532
7	632.9911	1312.5911	1541.7531
8	632.9911	1312.5909	1541.7530
9	632.9912	1312.5911	1541.7531
10	632.9911	1312.5909	1541.7532
平均值 $\lambda_{x,i}$	632.9912	1312.5910	1541.7531
平均值的标准差 $u(\lambda_{x,i})$	0.00002	0.00003	0.00002
波长点示值误差 $\Delta\lambda_i$	0.0000	0.0000	0.0001
示值误差的平均值 $\overline{\Delta\lambda}$		0.00003	
多波长重复性引入的不确定度分量 $u_{mwr}$		0.058 pm	

被测标准光波长计的波长分辨力为 $R_\lambda=0.1$  pm，概率分布为均匀分布，则分辨力引入的不确定度分量为

$$u_R = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} = 0.029 \text{ pm} \quad (\text{D. 16})$$

综上，影响激光波长测量的各不确定度分量列于表 D. 2 中。

**表 D. 2 标准光波长计测量不确定度一览表**

序号	影响量	影响量的标准 不确定度(pm)	灵敏系数	引入的 不确定度分量(pm)	
1	参考波长	0.00012	1	$u_{ws}$	0.00012
2	单波长重复性	0.068	1	$u_{swr}$	0.068
3	多波长重复性	0.058	1	$u_{mwr}$	0.058
4	分辨力	0.029	1	$u_R$	0.029

各输入量互不相关，所以合成标准不确定度为：

$$u_c(\lambda_x) = \sqrt{u_{ws}^2 + u_{swr}^2 + u_{mwr}^2 + u_R^2} = 0.1 \text{ pm}$$

$$U(\lambda_x) = 0.2 \text{ pm}, \quad k=2$$

$$U_{\text{rel}} = \frac{0.2 \text{ pm}}{632.9912 \text{ nm}} = 3.2 \times 10^{-7}, \quad k=2$$

中华人民共和国  
国家计量技术规范  
XXXXXXXXXX 校准规范  
**JJFXXXX—XXXX**  
国家市场监督管理总局发布