



天津市地方计量技术规范

JJF(津)124—2024

海上风电多参数监测仪校准规范

Calibration specification for multi parameter monitoring instruments for
offshore wind power

2024-06-01 发布

2024-09-01 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

海上风电多参数监测仪 校准规范

JJF(津) 124-2024

Calibration specification for multi parameter
monitoring instruments for offshore wind
power

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津水运工程勘察设计院有限公司

交通运输部天津水运工程科学研究所

中交二航局建筑科技有限公司

本规范主要起草人：

张二林（天津水运工程勘察设计院有限公司）

周振杰（交通运输部天津水运工程科学研究所）

李绍辉（交通运输部天津水运工程科学研究所）

顾龙声（天津水运工程勘察设计院有限公司）

税 毅（中交二航局建筑科技有限公司）

参加起草人：

吴昊旭（天津水运工程勘察设计院有限公司）

黄 磊（中交二航局建筑科技有限公司）

目 录

引言	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 计量特性.....	(1)
4 校准条件.....	(1)
4.1 环境条件.....	(1)
4.2 校准用标准物质及配套设备.....	(2)
5 校准项目和校准方法.....	(2)
5.1 校准项目.....	(2)
5.2 校准方法.....	(2)
6 校准结果表达.....	(5)
7 复校时间间隔.....	(6)
附录 A 海上风电多参数监测仪校准原始记录格式(推荐)	(7)
附录 B 海上风电多参数监测仪校准证书内页格式(推荐).....	(8)
附录 C 示值校准结果的测不确定度评定示例.....	(10)

引 言

本规范依据 JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

海上风电多参数监测仪校准规范

1 范围

本规范适用于海上风电多参数监测仪的校准。

2 概述

海上风电多参数监测仪是基于物联网技术和云平台技术，用于监测风电机组塔筒及其基础运行状态的模块化系统，主要监测振动、倾斜、腐蚀和应力等参数，在风电工程中被广泛应用。

海上风电多参数监测仪一般由数据采集、通信系统以及分析软件组成。

3 计量特性

海上风电多参数监测仪计量特性应符合表1的要求。

表 1 计量特性

计量参数	量值	技术要求
示值误差	电压	$\pm 2\%$
	频率	$\pm 0.01\%$
	应变	$\pm (0.2\% \text{red} + 2\mu\epsilon)$
	波长	$\pm 30 \text{ pm}$
通道一致性误差	电压	延时: $\pm 0.3 \text{ ms}$ 幅值: $\pm 0.2 \text{ dB}$
	频率	幅值: $\pm 0.2 \text{ dB}$
	应变	
	波长	

注：以上技术指标不用于合格性判定，仅供参考。

4 校准条件

4.1 环境条件

4.1.1 温度: $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$;

4.1.2 湿度: 不大于 85%RH。

4.2 校准用标准物质及配套设备

4.2.1 正弦信号发生器：电压范围1 mV~10 V，分辨力不大于1 μ V，电压幅值稳定度优于1% (8h)，失真度优于0.03%；频率范围 (1~6000) Hz，频率稳定度优于0.05%，频率最大允许误差 $\pm 1 \times 10^{-5}$ ；

4.2.2 数字万用表：6位半；

4.2.3 模拟应变量校准器：校准测量范围0 ~99999 $\mu\epsilon$ ，准确度等级为0.02级；

4.2.4 波长计：光谱范围 (1510~1590) nm，最大允许误差 ± 0.3 ppm；

4.2.5 参考光纤光栅：反射率不小于75%，反射谱边模抑制比不小于10 dB，反射谱半高度宽带不大于0.5 nm；

4.2.6 环形器：插入损耗不大于4.5 dB；

4.2.7 宽带光源：光谱范围 (1510~1590) nm，光谱宽度不小于80 nm，输出稳定度不小于0.03dB/15 min。

5 校准项目和校准方法

5.1 校准项目

海上风电多参数监测仪校准项目见表2。

表 2 校准项目

序号	项目名称
1	电压示值误差
2	频率示值误差
3	应变示值误差
4	波长示值误差
5	通道一致性误差

5.2 校准方法

5.2.1 外观及功能性检查

海上风电多参数监测仪应有下列标识：仪器名称、规格型号、测量范围以及生产单位等内容，应结构牢固，装配件无松动，线缆外表面无损伤，控制器面板功能正常，数字显示清晰、完整。确定没有影响校准计量特性的因素后再进行校准。

5.2.2 电压示值误差

电压示值误差试验步骤如下：

a) 连接信号发生器，数字万用表和海上风电多参数监测仪电压测量通道，分别输入10%、20%、50%、80%、100%满量程电压的交流电压，记录数字万用表的电压示值；

b) 每间隔10 s读取一次海上风电多参数监测仪电压示值，共记录5次，计算电压示值平均值，按照公式（1）计算电压示值误差。

$$\Delta V = \frac{\bar{V} - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

ΔV ——电压示值误差；

\bar{V} ——测得的电压示值算术平均值，mV；

V_0 ——数字万用表电压示值，mV。

5.2.3 频率示值误差

频率示值误差试验步骤如下：

a) 连接信号发生器，数字万用表和海上风电多参数监测仪频率测量通道，输入某一电压和10%、20%、50%、80%、100%满量程频率的交流电压，记录频率计的频率示值；

b) 每间隔10 s读取一次海上风电多参数监测仪频率示值，共记录5次，计算频率示值平均值，按照公式（2）计算频率示值误差。

$$\Delta F = \frac{\bar{f} - f_0}{f_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

Δf ——频率示值误差；

\bar{f} ——测得的频率示值算术平均值，Hz；

f_0 ——数字万用表频率示值，Hz。

5.2.4 应变示值误差

应变示值误差试验步骤如下：

a) 连接模拟量应变校准器和海上风电多参数监测仪应变测量通道，10%、20%、50%、80%、100%满量程应变，记录模拟量应变校准器的应变示值；

b) 每间隔10 s读取一次海上风电多参数监测仪应变示值，共记录5次，计算应变示值平均值，按照公式（3）计算应变示值误差。

$$\Delta\varepsilon = \frac{\bar{\varepsilon} - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

$\Delta\varepsilon$ ——应变示值误差；

$\bar{\varepsilon}$ ——测得的应变示值算术平均值， $\mu\varepsilon$ ；

ε_0 ——模拟量应变校准器应变示值， $\mu\varepsilon$ 。

5.2.5 波长示值误差

波长示值误差试验步骤如下：

a) 连接波长计、宽带光源、环形器和参考光纤光栅，读取波长计波长测量值为参考光纤光栅的波长值；

b) 参考光纤光栅连接海上风电多参数监测仪波长测量通道，每间隔10 s读取一次海上风电多参数监测仪波长示值，共记录5次，计算波长示值平均值，按照公式（4）计算波长示值误差。

$$\Delta\lambda = \frac{\bar{\lambda} - \lambda_0}{\lambda_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

$\Delta\lambda$ ——波长示值误差；

$\bar{\lambda}$ ——测得的波长示值算术平均值， μm ；

λ_0 ——标准波长值， μm 。

5.2.6 电压通道一致性误差

使用信号发生器分别给海上风电多参数监测仪各电压采集通道输入参考频率 10 Hz 和幅值 500 mV 的参考电压，采集各通道信号波形，分别读取这两个波形同一周期过零点的时间 T_1 和 T_2 。按照公式（5）计算海上风电多参数监测仪通道一致性延时误差。

$$\Delta_\varphi = T_1 - T_2 \quad (5)$$

式中：

Δ_φ ——通道一致性延时误差，ms；

T_1 ——第一通道过零点的时间, ms;

T_2 ——其他通道过零点的时间, ms。

分别读取这两个通道的波形幅值 x_1 和 x_2 , 以第一通道为参考点, 按照公式 (6) 计算海上风电多参数监测仪电压通道一致性幅值误差。

$$\delta_x = 20 \lg \frac{x_1}{x_i} \quad (6)$$

式中:

δ_x ——通道一致性幅值误差, dB;

x_1 ——第一通道过波形幅值, mV;

x_i ——其他通道波形幅值, mV。

5.2.7 频率通道一致性误差

使用信号发生器分别给海上风电多参数监测仪各弦式频率采集通道输入参考频率 1000 Hz 和幅值 500 mV 的参考电压, 采集各通道信号频率示值, 分别读取这两个通道的频率 x_1 和 x_2 , 以第一通道为参考点, 按照公式 (6) 计算海上风电多参数监测仪频率通道一致性误差。

5.2.8 应变通道一致性误差

使用模拟应变量校准器分别给海上风电多参数监测仪各应变采集通道输入 10000 $\mu\epsilon$ 模拟信号, 采集各通道信号应变示值, 分别读取这两个通道的应变 x_1 和 x_2 , 以第一通道为参考点, 按照公式 (6) 计算海上风电多参数监测仪应变通道一致性误差。

5.2.9 波长通道一致性误差

连接波长计、宽带光源、环形器和参考光纤光栅, 海上风电多参数监测仪波长通道分别连接 1560 nm 参考光纤光栅, 分别读取这两个通道的频率 x_1 和 x_2 , 以第一通道为参考点, 按照公式 (6) 计算海上风电多参数监测仪波长通道一致性误差。

6 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映, 校准证书应包括以下信息:

- a) 标题: “校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点;

- d) 校准证书编号, 页码及总页数的标识;
- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校仪器的制造单位、名称、型号及编号;
- g) 校准单位校准专用章;
- h) 校准日期;
- i) 校准所依据的技术规范名称及代号;
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- k) 校准时的环境温度、相对湿度;
- l) 校准结果及其测量不确定度;
- m) 对校准规范的偏离的说明(若有);
- n) “校准证书”的校准人、核验人、批准人签名及签发日期;
- o) 校准结果仅对被校仪器本次测量有效的声明;
- p) 未经实验室书面批准, 部分复制证书或报告无效的声明。

7 复校时间间隔

仪器的复校时间间隔由用户自定, 建议不超过 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等因素所决定, 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。如果对仪器的性能有怀疑或仪器更换重要部件及修理后应对仪器重新校准。

附录 A

海上风电多参数监测仪校准记录推荐格式(推荐)

证书编号:

仪器名称		校准地点			
送检单位		生产单位			
规格型号		仪器编号			
温度		相对湿度			
计量标准名称	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	计量(基)标准证书编号	有效期至	
校准使用的标准器:					
名称	编号	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号及溯源机构	有效期至
校准项目					
一、外观					
二、电压示值误差			三、频率示值误差		
电压标准值	测量值		频率标准值	测量值	
四、应变示值误差			五、波长示值误差		
六、电压通道一致性误差			七、频率通道一致性误差		
通道 1 示值 x_1	通道 2 示值 x_2	通道一致性	通道 1 示值 x_1	通道 2 示值 x_2	通道一致性
八、应变通道一致性误差			九、频率通道一致性误差		
通道 1 示值 x_1	通道 2 示值 x_2	通道一致性	通道 1 示值 x_1	通道 2 示值 x_2	通道一致性

校准员:

核验员:

校准日期:

年 月 日

附录 B

海上风电多参数监测仪校准证书内页格式 (推荐)

证书编号××××—××××				
校准机构授权说明				
校准所依据的技术文件 (代号、名称)				
校准环境条件及地点:				
温度	℃	地点		
相对湿度	%	其他		
校准使用的主要标准器				
名称	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	检定/校准证书编号	有效期至
第×页共×页				

证书编号××××—××××

校准结果

序号	校准项目		校准结果	测量不确定度
1	示值误差	电压		
2		频率		
3		应变		
4		波长		
5	通道一致性 误差	电压		
6		频率		
7		应变		
8		波长		

以下空白

第×页 共×页

附录 C

示值校准结果不确定度评定示例

C.1 电压示值校准结果不确定度评定

C.1.1 概述

C.1.1.1 环境条件：环境温度为 25.8℃，环境相对湿度 15%RH。

C.1.1.2 测量对象：海上风电多参数监测仪。

C.1.1.3 测量标准：正弦信号发生器：电压范围不小于 1 mV~10 V，分辨力不大于 1 μV，电压幅值稳定度优于 1% (8h)，失真度优于 0.03%；频率范围不小于 (1~6000) Hz，频率稳定度优于 0.05%；六位半数字万用表。

C.1.1.4 测量方法：从正弦信号发生器给出标准电压量值 V_N ，然后从被测海上风电多参数监测仪读取相应的变量值 V_X ，两者之差即为海上风电多参数监测仪的电压示值误差。

C.1.2 数学模型

数学模型为：

$$\delta = V_X - V_N \quad (\text{C.1})$$

式中：

δ ——电压测量误差，mV；

V_X ——信号发生器输出的标准频率值，mV；

V_N ——频率测量误差，Hz。

根据数学模型，分析仪的频谱幅值示值误差测量结果的不确定度将取决于输入量 V_N, V_X 的不确定度。其中输入量 V_N 的标准不确定度来源主要由数字万用表测量不准引入的不确定度分量 $u_1(V_N)$ ，输入量 V_X 的标准不确定度来源主要由分析仪测量重复性引入的不确定度分量 $u(V_X)$ ，考虑到分析仪的分辨力所引入的不确定度已包含在重复性条件下所得的测量列的分散性中，故在此可不另作分析。

C.1.3 标准不确定度评定

C.1.3.1 输入量 V_N 引入的不确定度分量 $u(V_N)$

1) 数字万用表不准引入的不确定度分量 $u_1(V_N)$ ，采用 B 类方法进行评定。根据溯源证书显示，在 10 mV~5 V 范围内，最大允许误差为 $\Delta = \pm 0.05\%$ ，在区间内可认为服从均

匀分布, 包含因子 $\sqrt{3}$, 半区间 a 为 0.05%, 标准不确定度 $u(V_N)$ 为:

$$u_1(V_N) = \frac{a}{k} = 0.03\% \quad (\text{C.2})$$

2) 数字万用表分辨率引入的不确定度 $u_2(V_N)$, 采用 B 类方法评定。分辨力为 0.001mV, 在 10 mV~5 V 范围内, 认为服从均匀分布, 包含因子 $\sqrt{3}$, 标准不确定度 $u_2(V_N)$ 为

$$u_2(V_N) = \frac{0.001}{10} \times 100\% = 0.01\% \quad (\text{C.3})$$

数字万用表不准引入的不确定度和分辨力引入的不确定度二者取最大值, 则 $u(V_N) = 0.01\%$ 。

C.1.3.2 输入量 V_X 引人的不确定度分量 $u(V_X)$

分析仪的测量重复性引入的不确定度分量 $u(V_X)$, 可以通过连续测量得到测量列, 采用 A 类方法进行评定。选取某型号动态信号分析仪, 选择信号发生器输出电压为 1V(1kHz)点, 在重复性条件下连续独立测量 10 次, 获得的动态信号分析仪测量值分别为: 1.0007 V, 1.0008 V, 1.0007 V, 1.0006 V, 1.0007 V, 1.0008 V, 1.0007 V, 1.0006 V, 1.0007 V, 1.0008 V。

测量次数: $n=10$

平均值:

$$\bar{V}_X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i = 1.00074 \text{ V} \quad (\text{C.4})$$

单次测量标准差:

$$s_m(V_X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V}_X)^2}{n-1}} = 7.38 \times 10^{-5} \text{ V} \quad (\text{C.5})$$

实际开展工作测量 5 次为校准结果, 则标准不确定度分量:

$$u(V_X) = \frac{s_m(V_X)}{\sqrt{5\bar{V}_X}} \times 100\% = 3.3 \times 10^{-4} \text{ V} \quad (\text{C.6})$$

C.1.4 标准不确定度一览表

各不确定度分量汇总见表 C.1。

表 C.1 标准不确定度一览表

标准不确定度分量 $u(x_1)$	标准不确定度来源	标准不确定度 (Hz)	灵敏度系数 c_i	$ c_i \cdot u(x_1)$
u_1	标准器示值误差	0.03%	1	0.03%
u_2	测量重复性	0.0033%	1	0.033%

C.1.5 合成标准不确定度

由数学模型 (C.1) 得灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial \delta}{\partial V_X} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \delta}{\partial V_N} = -1 \quad (\text{C.7})$$

因输入量 V_N , V_X 彼此独立不相关, 则由不确定度的传递律, 合成方差为:

$$u_c^2 = \left[\frac{\partial \delta}{\partial V_X} u(V_X) \right]^2 + \left[\frac{\partial \delta}{\partial V_N} u(V_N) \right]^2 = [c_1 u(V_X)]^2 + [c_2 u(V_N)]^2 \quad (\text{C.8})$$

合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u^2(V_X) + u^2(V_N)} = 0.031\% \quad (\text{C.9})$$

C.1.6 合成标准不确定度

取 $k=2$, 扩展不确定度为: $U_{rel} = k u_c = 0.07\%$

C.2 频率示值校准结果不确定度评定

C.2.1 概述

C.2.1.1 环境条件: 环境温度为 25.8°C , 环境相对湿度 15%RH。

C.2.1.2 测量对象: 海上风电多参数监测仪。

C.2.1.3 测量标准: 正弦信号发生器: 电压范围不小于 $1\text{ mV} \sim 10\text{ V}$, 分辨力不大于 $1\text{ }\mu\text{V}$, 电压幅值稳定度优于 1% (8h), 失真度优于 0.03%; 频率范围不小于 (1~6000) Hz, 频率稳定度优于 0.05%; 六位半数字万用表。

C.2.1.4 测量方法: 从正弦信号发生器给出标准频率量值 f_0 , 然后从被测海上风电多参数监测仪读取相应的变量值 f , 两者之差即为海上风电多参数监测仪的频率示值误差。

C.2.2 数学模型

$$f_x = f_0 + \Delta = \frac{n}{\tau} \quad (\text{C.10})$$

式中:

f_x ——海上风电多参数监测仪所测得的频率值, Hz

f_0 ——信号发生器输出的标准频率值, Hz

Δ ——频率测量误差, Hz

n ——海上风电多参数监测仪内部计数器所计的脉冲数

τ ——海上风电多参数监测仪内部计数器所用的闸门时间

C.2.3 标准不确定度评定

按照不确定度合成法由式 (C.10) 得测量不确定度传播率:

$$u_c^2(f_x) = \left[f_x \times \frac{u(\tau)}{\tau} \right]^2 + \left[\frac{u(n)}{\tau} \right]^2 \approx \left[f_0 \times \frac{u(\tau)}{\tau} \right]^2 + \left[\frac{u(n)}{\tau} \right]^2 \quad (\text{C.11})$$

由式 (C.10) 可知影响频率 f_x 测量结果的不确定度来源主要为两项:

- a. 闸门时间 τ 引入的不确定度, 它反映了仪器晶振的不准和不稳;
- b. 脉冲数 n 计数引入的不确定度, 它反应了计数分辨力及随机误差。

由于信号发生器内部晶振准确度高于振弦仪内部晶振一个量级, 其引入的误差可忽略, 因此海上风电多参数监测仪晶振产生的闸门时间 (或时基) 的不准和不稳引入的不确定度 u_1 、计数分辨力和随机误差以及其它不稳定因素引入的不确定度 u_2 是测量误差的主要来源。

计数分辨力和随机误差以及其他不稳定因素引入的不确定度为 u_2 。

合成标准不确定度:

$$u_c(f_x) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (\text{C.12})$$

C.2.3.1 闸门时间 (或时基) 不准引入的不确定度分量 u_1

u_1 由晶振频率准确度 (即时基准确度) 来估算, 海上风电多参数监测仪的时基准确率为 2.75×10^{-5} , 即区间半宽值为 $a = 2.75 \times 10^{-5}$, 按均匀分布取包含因子为 $\sqrt{3}$, 当频率测试点为 f_0 时, 测量结果 f_x 标准不确定度: $u_1 = f_x \times \frac{a}{\sqrt{3}} \approx f_0 \times \frac{a}{\sqrt{3}}$, 取 $f_0 = 3000$ Hz, 则 $u_1 = 0.0476$ Hz。

C.2.3.2 计数分辨力和随机误差及其他不稳定因素引入的不确定度分量 u_2

u_2 采用N次测量来估算, $f_0=3000$ Hz, 取N=10, 得频率测量列 f_i 及单次测量标准差s, 如表C.2。

表 C.2 计数分辨力和随机误差及其他不稳定因素引入的不确定度分量 u_2

测量次数 <i>i</i>	频率 f_i (Hz)	单次测量标准差s
1	3000.04	$S = \sqrt{\frac{\sum (f_i - f)^2}{N-1}} = 0.1738\text{Hz}$
2	2999.74	
3	3000.04	
4	3000.04	
5	3000.04	
6	3000.04	
7	3000.35	$U_2 = s = 0.1738\text{Hz}$
8	3000.04	
9	3000.04	
10	3000.35	
平均值	3000.072	

C.2.4 标准不确定度一览表

各不确定度分量汇总见表 C.3。

表 C.3 标准不确定度一览表

标准不确定度分量 $u(x_1)$	标准不确定度来源	标准不确定度 (Hz)	灵敏度系数 c_i	$ c_i \cdot u(x_1)$
u_1	标准器示值误差	0.0476	1	0.0476
u_2	测量重复性	0.1738	1	0.1738

C.2.5 合成标准不确定度

参照不确定度分量汇总表, 各分量不相关, 合成标准不确定度如下:

$$u_c(f_x) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.18 \text{ Hz} \quad (\text{C.13})$$

C.2.6 扩展标准不确定度

取 $k=2$, 扩展不确定度为: $U = 2 \times u_c(f_x) = 0.4 \text{ Hz}$

C.3 应变示值校准结果不确定度评定

C.3.1 概述

C.3.1.1 环境条件：环境温度为 25.8 °C，环境相对湿度 15% RH。

C.3.1.2 测量对象：海上风电多参数监测仪。

C.3.1.3 测量标准：标准模拟应变量校准器，测量范围（1~100000） $\mu\epsilon$ ，0.02 级。

C.3.1.4 测量方法：从标准模拟应变量校准器给出标准应变量值 ϵ_0 ，然后从被测海上风电多参数监测仪读取相应的变量值 ϵ ，两者之差即为海上风电多参数监测仪的应变示值误差。

C.3.2 数学模型

示值误差计算公式：

$$\epsilon_{\text{示}} = \epsilon_{\text{标}} + \delta_1 + \delta_2 \quad (\text{C.14})$$

式中：

$\epsilon_{\text{示}}$ ——被检电阻应变仪的示值；

$\epsilon_{\text{标}}$ ——标准模拟应变量校准器给出的标准值；

δ_1 ——重复性引入的误差

δ_2 ——环境温度变化引起的误差。

C.3.3 标准不确定度评定

C3.3.1 输入量 $\epsilon_{\text{标}}$ 的标准不确定度分量 u_1

标准模拟应变量校准器的检定等级为 0.02 级，则在 10000 $\mu\epsilon$ 点时，最大允许误差为：

$$\pm (0.02\% \times 10000 \mu\epsilon) = \pm 2 \mu\epsilon$$

按照均匀分布，取分布因子为 $\sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{2 \mu\epsilon}{\sqrt{3}} = 1.155 \mu\epsilon \quad (\text{C.15})$$

C3.3.2 重复性测量引入的不确定度分量 u_2

取一台静态电阻应变仪，根据检定规程中示值误差检定所示，对其测量点 1 的 10000 $\mu\epsilon$ 的正方向连续测量 10 次，得到测量值如表 C.4 所示。

表 C.4 测量数据

标准器示值 $\mu\epsilon$	10000									
被检仪器示值 $\mu\epsilon$	10005	10004	10006	10006	10004	10005	10004	10004	10005	10006
平均值 $\mu\epsilon$	10004.9									
试验标准偏差 $\mu\epsilon$	0.88									

则 $u_2=0.88\mu\epsilon$ 。

C3.3.3 测环境温度变化引起的不确定度分量 u_3

检定工作是在恒温实验室进行测量工作，温度完全符合检定规程的要求，因此认为环境温度的变化引起的误差忽略不计，则 $u_3=0\mu\epsilon$ 。

C.3.4 标准不确定度一览表

各不确定度分量汇总见表 C.5。

表 C.5 标准不确定度一览表

标准不确定度分量 $u(x_1)$	标准不确定度来源	标准不确定度 ($\mu\epsilon$)	灵敏度系数 c_i	$ c_i \cdot u(x_1)$
u_1	标准器示值误差	1.55	1	1.55
u_2	测量重复性	0.88	1	0.88
u_3	温度变化	0	1	0

C.3.5 合成标准不确定度

参照不确定度分量汇总表，各分量不相关，合成标准不确定度如下：

$$u_c = \sqrt{\sum c_i^2 u_i^2} = \sqrt{1.55^2 + 0.88^2} = 1.8 \mu\epsilon \quad (\text{C.16})$$

C.3.6 扩展标准不确定度

取 $k=2$ ，扩展不确定度为： $U = ku_c = 2 \times 1.8 = 3.6 \mu\epsilon$

C.4 波长示值校准结果不确定度评定

C.4.1 概述

C.4.1.1 环境条件：环境温度为 25.8°C ，环境相对湿度 $15\%RH$ 。

C.4.1.2 测量对象：海上风电多参数监测仪。

C.4.1.3 测量标准：波长计：光谱范围不小于(1510~1590) nm，最大允许误差 ± 0.3 ppm。

C.4.1.4 测量方法：给海上风电多参数监测仪一个波长，波长计测量出标准波长量值 R_s ，然后从被测海上风电多参数监测仪读取相应的波长值 R_u ，两者之差即为海上风电多参数监测仪的频率示值误差。

C.4.2 数学模型

考虑到影响测量不确定度的因素，其测量模型为：

$$\Delta = \overline{R_u} - \overline{R_s} \quad (\text{C.17})$$

式中：

$\overline{R_u}$ ——被校光纤光栅传感网络分析仪示值的平均值，nm；

$\overline{R_s}$ ——标准波长计示值的平均值，nm。

测量模型中各物理量互不相关，故合成方差为：

$$u_c^2(\Delta) = c^2(R_u)u^2(R_u) + c^2(R_s)u^2(R_s) \quad (\text{C.18})$$

式中，灵敏系数为：

$$c(R_u) = \frac{\partial(\Delta)}{\partial(\Delta R_u)} = 1 \quad (\text{C.19})$$

$$c(R_s) = \frac{\partial(\Delta)}{\partial(\Delta R_s)} = -1 \quad (\text{C.20})$$

C.4.3 标准不确定度评定

C.4.3.1 校准点上的仪器显示特性引入的不确定度分量 $u_1(R)$

a. 被校光纤光栅传感网络分析仪测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_{11}(R)$

利用被校光纤光栅传感网络分析仪对参考光纤光栅进行 10 次测量，结果见表 C.6。

表 C.6 中心波长示值测量数据

测量次数	中心波长/nm			
	1	1530.052	1542.017	1550.007
2	1530.054	1542.012	1550.005	1563.015
3	1530.048	1542.015	1550.007	1563.016
4	1530.052	1542.013	1550.008	1563.014
5	1530.055	1542.014	1550.007	1563.015
6	1530.054	1542.016	1550.009	1563.015
7	1530.052	1542.015	1550.007	1563.016
8	1530.054	1542.016	1550.006	1563.014
9	1530.052	1542.015	1550.008	1563.015
10	1530.053	1542.014	1550.007	1563.015
平均值/nm	1530.0526	1542.0147	1550.0071	1563.0151
实验标准偏差/pm	2.0	1.5	1.1	0.7

由表 C.1 可知，测量重复性最大 2.0 pm，实际校准试验重复性测量 6 次作为校准结果，则该项引入的不确定度分量：

$$u_{11}(R) = \frac{2.0}{\sqrt{3}} = 1.2 \text{ pm} \quad (\text{C.21})$$

b. 被校光纤光栅传感网络分析仪波长分辨力引入的标准不确定度分量 $u_{22}(R)$ ；

工程中常用的光纤光栅传感网络分析仪波长分辨力一般在 pm 量级，为简便运算取值 1 pm，半宽度为 0.5 pm。按均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，该项引入的不确定分量 u_{22} ：

$$u_{22}(R) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ pm} \quad (\text{C.22})$$

则合成不确定度为：

$$u_1(R) = \sqrt{u_{11}^2(R) + u_{12}^2(R)} = 0.8 \text{ pm} \quad (\text{C.23})$$

C.4.3.2 参考光纤光栅引入的标准不确定度 $u_2(R)$

参考光纤光栅引入的标准不确定度分量由其稳定性决定。参考光纤光栅稳定性为 ± 2

pm, 按均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则该项引入的不确定分量为:

$$u_2(R) = \frac{2 \text{ pm}}{\sqrt{3}} = 1.2 \text{ pm} \quad (\text{C.24})$$

C.4.3.3 波长计引入的标准不确定度 $u_3(R)$

可溯源的波长计测量不确定度为 $U=0.0008 \text{ nm}$ ($k=2$), 则该项引入的不确定度分量为:

$$u_3(R) = \frac{0.8 \text{ pm}}{2} \approx 0.4 \text{ pm} \quad (\text{C.25})$$

C.4.3.4 其他影响因素引入的标准不确定度分量 $u_4(R)$

其他影响因素包括光纤中应力双折射引起的波长漂移、温度波动引入的波长漂移、光纤光栅参数校准装置和被校光纤光栅传感网络分析仪波长幅值算法差异等, 估计影响量为:

$$u_4(R) = 1.0 \text{ pm} \quad (\text{C.26})$$

C.4.4 标准不确定度一览表

各不确定度分量汇总见表 C.7。

表 C.7 各不确定度分量汇总

符号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数	概率分布	包含因子
$u_1(R)$	校准点上的仪器显示特性引入的不确定度分量	A	1.2pm	1	均匀分布	$\sqrt{3}$
$u_2(R)$	参考光纤光栅引入的不确定度分量	B	1.2pm	1	均匀分布	$\sqrt{3}$
$u_3(R)$	波长计引入的不确定度分量	B	0.4pm	1	均匀分布	$\sqrt{3}$
$u_4(R)$	其他因素引入的不确定度分量	B	1.0pm	1	均匀分布	$\sqrt{3}$

C.4.5 合成标准不确定度

参照不确定度分量汇总表, 各分量不相关, 则合成标准不确定度如下:

$$u(R) = \sqrt{u_1(R)^2 + u_1(R)^2 + u_1(R)^2 + u_1(R)^2} = 2.0 \text{ pm} \quad (\text{C.27})$$

C.4.6 扩展标准不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度： $U = ku(R) = 4.0 \text{ pm}$
