



北京市地方计量技术规范

JJF (京) XXXX-XXXX

光纤光栅温度、压力传感器校准规范

Calibration Specification for Fiber Bragg grating
temperature and pressure sensor
(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

北京市市场监督管理局 发布

JJF(京) XXXX-XXXX

光纤光栅温度、压力传感器 校准规范

Calibration Specification for Fiber Bragg
grating temperature and pressure sensor

JJF(京) XXXX-XXXX

归口单位：北京市市场监督管理局

主要起草单位：北京市计量检测科学研究院

参加起草单位：北京市计量检测科学研究院

本规范委托北京市计量检测科学研究院负责解释

本规范主要起草人：

李 颖（北京市计量检测科学研究院）

杨志刚（内蒙古蒙牛乳业（集团）股份有限公司）

王媛媛（北京市计量检测科学研究院）

赵 霞（北京市计量检测科学研究院）

参加起草人：

杨 光（北京通为科技有限公司）

张占庭（内蒙古蒙牛乳业（集团）股份有限公司）

田永丰（内蒙古蒙牛乳业（集团）股份有限公司）

目 次

引 言	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 名词术语.....	(1)
3.1 光纤光栅温度、压力传感器.....	(1)
3.2 温度重复性.....	(1)
4 概述.....	(1)
5 计量特性.....	(2)
5.1 外观.....	(2)
5.2 技术指标.....	(2)
6 校准条件.....	(3)
6.1 环境条件.....	(3)
6.2 测量标准.....	(3)
7 校准项目和校准方法.....	(3)
7.1 校准项目.....	(3)
7.2 解调器要求.....	(4)
7.3 校准方法.....	(4)
7.4 数据处理.....	(5)
8 校准结果表达.....	(6)
9 复校时间间隔.....	(6)
附 录 A 光纤光栅温度、压力传感器校准原始记录格式.....	(7)
附 录 B 校准证书内页格式.....	(9)
附 录 C 光纤光栅温度、压力传感器温度示值误差校准不确定度评定实例....	(10)
附 录 D 光纤光栅温度、压力传感器压力示值误差校准不确定度评定实例....	(16)

引 言

光纤光栅传感器因其具有精度高、响应速度快、抗电磁干扰能力强、抗腐蚀等特点，在地球动力学、航天器、电力工业和化学传感中有广泛的应用。在充分考虑了技术和经济的合理性前提下，制定了本规范。

本规范参照了国家计量技术规范 JJF1001—2011《通用计量术语及定义》，JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》以及 JJF1071—2010《国家计量校准规范编写规则》中规定的相关术语定义和编写规则。

本规范采用了 JG/T 421-2013《土木工程用光纤光栅温度传感器》中规定的相关术语定义和技术内容。

光纤光栅温度、压力传感器校准规范

1 范围

本规范适用于光纤光栅传感器温度及压力计量性能的校准，其他光纤传感器的校准也可参照本规范。

2 引用文件

GB/T 39347-2020 空间用光纤光栅传感系统通用规范

JG/T 421-2013 土木工程用光纤光栅温度传感器

JJF 1630-2017 分布式光纤温度计校准规范

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 名词术语

3.1 光纤光栅温度、压力传感器 Fiber Bragg grating temperature and pressure sensor

利用光纤光栅的敏感性来测量物体或环境冷热程度、压力变化的传感器。

3.2 温度重复性 Temperature repeatability

同一观测者在同一温度下多次重复进行测量结果之间的符合程度。

3.3 分辨力 Resolution

传感器在规定测量范围内可检测出的被测量的最小变化量。

4 概述

光纤光栅传感器是监测各种动态或静态信号如温度、压力、应变、机械波等物理参数的重要传感器。光纤光栅是利用光纤中的光敏性制成的。所谓光纤中的光敏性是指激光通过掺杂光纤时，光纤的折射率将随光强的空间分布发生相应变化的特性。而在纤芯内形成的空间相位光栅，其作用的实质就是在纤芯内形成一个窄带的（透射或反射）滤波器或反射镜。光纤光栅的种类很多，其中均匀光纤光栅折射率变化的周期一般为0.1 μ m量级。它可将入射光中某一确定波长的光反射，反射带宽窄。在传感器领域，均匀光纤光栅可用于制

作温度传感器、应变传感器等传感器。光纤光栅传感器工作原理见图1，宽带光进入光纤，经过光栅反射回特定波长的光，通过测量光栅反射波长，换算被测体温度/应变等物理量。

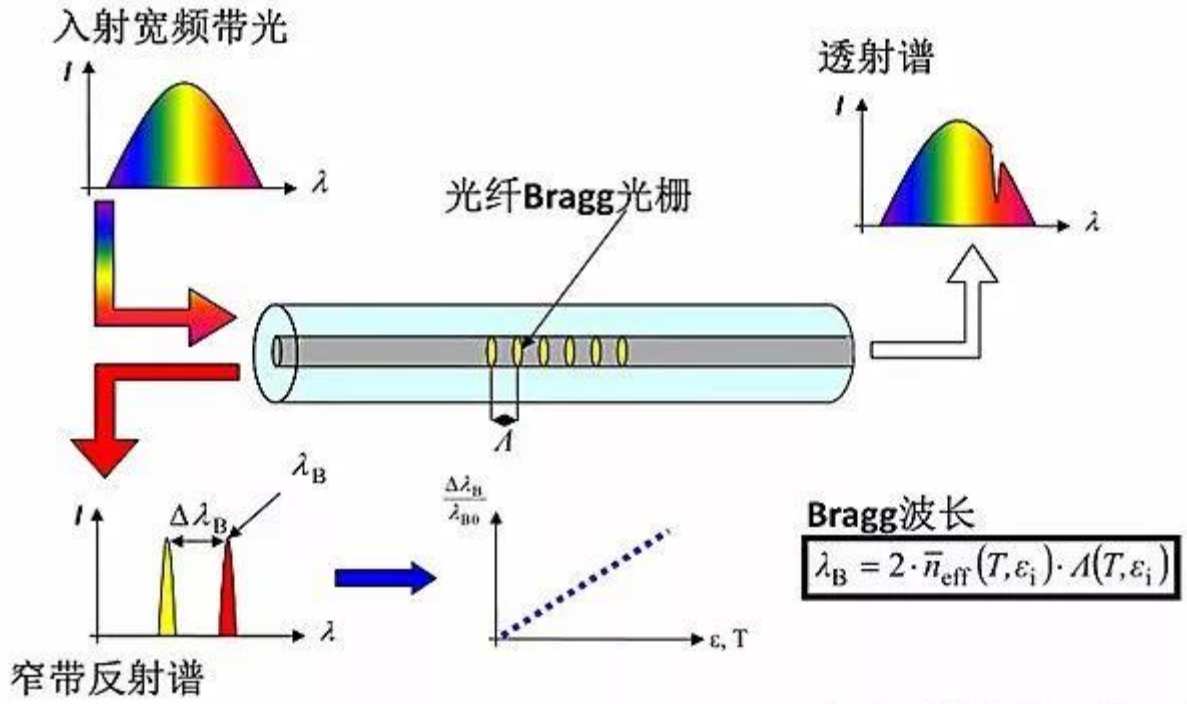


图1 光纤光栅传感器工作原理

5 计量特性

5.1 外观

传感器外观应光洁、无锈斑及裂痕各部分应连接牢固光纤引线应无损，标示应清晰。

5.2 技术指标

5.2.1 温度测量范围

传感器温度测量范围应满足 $-40^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 。

5.2.2 温度示值误差

光纤光栅温度压力传感器温度示值误差不应大于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

5.2.3 温度重复性

温度重复性应小于0.5。

5.2.4 温度分辨力

温度分辨力应大于 0.1°C 。

5.2.5 压力测量范围

传感器压力测量范围应满足 (0~5) MPa

以上技术指标均不作为合格判定。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(15~35)℃；环境湿度：(25~75)%RH；大气压 86kPa~106kPa

[电工电子产品环境试验 概述和指南 (GB/T 2421.1-2008)]

6.1.2 电测仪器设备的环境条件应满足其相应要求。

6.2 测量标准

6.2.1 温度测量标准器及配套设备

标准器及配套设备见表1。

序号	设备名称	技术要求		用途
1	铂电阻温度计	二等标准，测量范围-20℃~100℃		温度标准器
2	电测设备	0.05级，电测设备配接标准器后，最小分辨率相当于0.01℃		配套电测设备
3	恒温槽	测温范围	-40℃~100℃	恒温装置
		温度均匀性	0.02℃	
		温度波动度	0.04℃/10min	
		恒温区域	深x直径：25cmx15cm，或者容积是被校传感器体积的5倍以上	

6.2.2 压力测量标准

压力测量标准器可选用补偿式微压计、数字压力计、标准压力发生器或其他符合要求的压力标准器对光纤光栅传感器进行校准。标准器的准确度等级应优于 0.5 级。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目包括温度示值误差、温度重复性、压力示值误差。

7.2 解调器要求

可完成光纤光栅传感器的信号采集并进行输出的设备。

7.3 校准方法

7.3.1 外观检查

目测检查纤光栅传感器的外观是否符合 5.1 的要求。

7.3.2 温度示值误差、温度重复性的校准

7.3.2.1 校准前的准备

- a) 开启电测设备进行预热，预热时间至少 20min 或满足其使用说明书的要求。
- b) 按恒温槽使用说明书的要求使其处于正常工作状态，并保证工作区域的液面处于规定的位置。
- c) 调制解调器开机预热。

7.3.2.2 温度示值误差的校准过程

- a) 测量温度点一般选择传感器的下限值、中间值和上限值，也可根据用户需要选择实际常用的温度点。在校准温度的同时校准传感器温度响应时间。为保证示值有效，所选温度点偏离环境温度至少 10℃。
- b) 将传感器与调制解调器相连，使其处于正常工作状态。将传感器与标准铂电阻温度计一同放入恒温槽，浸没深度不小于 15cm。
- c) 将恒温槽设定在下限温度，待恒温槽温度稳定，实际温度最大偏差不超过 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 时（以标准器为准），稳定 10min，分别读取标准器的温度示值 t_s 和调制解调器显示的温度示值 t ，每 2min 读取一次，连续测量 5 次。在测量过程中，恒温槽温度变化不超过 0.05℃。
- d) 根据上述测量要求，依次测量中间温度和上线温度时标准器和调制解调器的温度示值，也可根据用户需要测量选择的温度点。

7.3.2.3 温度重复性的校准

将传感器放入恒温槽内，设置恒温槽温度至 60℃，待温度稳定 20min 后记录传感器示值，然后将传感器取出在室温环境下回复 10min 后再次放入恒温槽内读数。重复试验 6 次，在此期间要求标准器读数波动不得超过 0.05℃。

7.3.3 压力校准

7.3.3.1 压力校准点的选择

压力传感器校准点的数量一般不少于 5 个点（包括零点、压力传感器测量上限），均匀分布在量程范围内，也可以根据客户要求选取。

7.3.3.2 校准过程

校准时，通过压力发生器产生压力，由零点开始校准，逐渐平稳加压到各个校准点，直至测量上限；然后由测量上限开始，逐渐平稳降压到各校准点，直至零点，每个校准点压力稳定后，分别读取并记录标准器示值和压力传感器示值，此为一个循环。压力校准应进行正反行程的三个循环校准。

7.4 数据处理

7.4.1 温度示值误差

$$\Delta t = \bar{t} - \bar{t}_s \quad (1)$$

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5} \quad (2)$$

$$\bar{t}_s = \frac{t_{s1} + t_{s2} + t_{s3} + t_{s4} + t_{s5}}{5} \quad (3)$$

式中：

- Δt — 温度示值误差，℃；
- \bar{t} — 传感器读数平均值，℃；
- \bar{t}_s — 标准器读数平均值，℃；

7.4.2 温度重复性

$$S = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum x_i (x_i - \bar{x})^2}}{A_m} \times 100\%$$

式中：

- S — 温度重复性
- x_i — 第*i*次传感器温度示值，℃；
- \bar{x} — 传感器温度示值的平均值，℃；
- n — 测量次数；
- A_m — 传感器的量程，℃。

7.4.3 压力示值误差

压力传感器各校准点示值误差按公式（1）计算：

$$\Delta p_i = p_i - p_{0i} \quad (1)$$

式中： Δp_i —第*i*个校准点的压力示值误差，Pa；

P_i —第*i*个校准点的压力示值，Pa；

P_{0i} —第*i*个校准点的标准器示值，Pa。

压力传感器示值误差按公式（2）计算：

$$\Delta p = (\Delta p_i)_{\max} \quad (2)$$

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（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) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 各校准项目检查结果的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 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

复校时间的间隔是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，用户可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

建议复校时间间隔最长不超过一年，使用特别频繁时应适当缩短。

附录 A

光纤光栅温度、压力传感器校准原始记录格式

记录编号:

委托单位:	样品名称:
制造厂:	型号规格:
环境 温度 ℃ 湿度 %RH 大气压 kPa	出厂编号:
校准地点:	外观检查:

主要计量标准器

名称	型号规格	最大允许误差/ 准确度等级/不 确定度	仪器编号	证书编号及溯 源单位	有效期

1. 温度示值误差:

校准温度(℃)		传感器示值(℃)	校准温度(℃)		传感器示值(℃)
次数	标准器示值(℃)		次数	标准器示值(℃)	
1			1		
2			2		
3			3		
4			4		
5			5		
平均值			平均值		
示值误差(℃)			示值误差(℃)		

2. 温度重复性:

次数	传感器示值 (°C)	平均值 (°C)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
温度重复性: %		

3. 压力示值误差:

计量单位 ()

标准值	第一次		第二次		第三次		示值 误差	示值误差扩 展不确定度 $U, k=2$
	正行 程	反行 程	正行 程	反行 程	正行 程	反行 程		

附录 B

校准证书内页格式

1. 温度示值误差（单位：℃）

校准温度	示值误差	不确定度

2. 温度重复性：____%

3. 压力示值误差（单位：）

压力标准值	示值误差	不确定度

复校时间间隔建议： 年

----（以下空白）----

附录 C

光纤光栅温度、压力传感器温度示值误差校准不确定度评定实例

C.1 概述

C.1.1 测量方法：

用二等标准铂电阻温度计和配套数字多用表作为标准器，采用比较法校准光纤光栅温度压力传感器。操作本规范7.3.2的要求，选择60℃作为校准点。

C.1.2 主要标准器：二等标准铂电阻温度计、0.05级数字多用表和恒温槽。

C.1.3 被校对象：光纤光栅温度压力传感器，解调器显示分辨率为0.1℃。

C.2 数学模型

$$\Delta t = \bar{t} - \bar{t}_s \quad (\text{F.1})$$

式中：

Δt — 温度示值误差，℃；

\bar{t} — 传感器读数平均值，℃；

\bar{t}_s — 标准器读数平均值，℃。

C.3 不确定度来源和传播公式

C.3.1 不确定度来源

C.3.1.1 被校传感器引入的标准不确定度

被校光纤光栅传感器测量重复性导致相应的标准不确定度。

C.3.1.2 标准装置引入的标准不确定度

标准铂电阻温度计量值溯源、配套电测仪器本身误差、标准铂电阻温度计稳定性及恒温槽温场的不均匀也会导致相应的标准不确定度。

C.3.2 传播公式

传播公式中的各分量可认为彼此独立，所以被校光纤光栅传感器温度示值误差的测量不确定度传播率为：

$$u_c^2(\Delta t) = u^2(t) + u^2(t_s)$$

C.4 标准不确定度评定

C.4.1 t 引入的标准不确定度

被校光纤光栅传感器温度测量重复性引入的不确定度 u_1

采用 A 类评定方法，以 60℃为例，在恒温槽稳定后，对传感器进行 6 次独立重复测量，从其显示仪表上读取6次显示值，记为 t_1 、 t_2 、…… t_6 ，平均值记为 \bar{t} 。测量结果见表 C1。

表C. 1

i (次数)	t_i (°C)	i (次数)	t_i (°C)	i (次数)	t_i (°C)
1	60.0	3	60.0	5	60.3
2	60.1	4	60.2	6	60.2

由公式：

$$S(\bar{t}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n(n-1)}}$$

计算得算术平均值 t 的实验标准差 $s(t)=0.05^\circ\text{C}$ 。则由 6 次独立重复测量引人的标准不确定度分量 $u_1 = S(\bar{t})=0.05^\circ\text{C}$

C. 4. 2 t_s 引入的标准不确定度

C. 4. 2. 1 标准铂电阻温度计量值溯源引入的标准不确定度 $u_{2,1}$

二等标准铂电阻温度计在60℃时的扩展不确定度 $U=3\text{mK}$ ， $k=2$ 。

则标准不确定度 $u_{2,1}=3\text{mK}/2=1.5\text{mK}$

C. 4. 2. 2 配套电测设备引入的标准标准不确定度 $u_{2,2}$

配套电测设备的准确度等级为0.05级，60℃时的标准铂电阻温度计的电阻比变化率

$$dW_{60}/dt = 3.91600 \times 10^{-3}, \text{带来的温度误差为} \frac{0.0005}{(dW/dt)} = 0.0005/0.0039=0.13(^\circ\text{C})$$

按均匀分布，则标准不确定度为

$$u_{2,2}=0.13/\sqrt{3}=0.08(^\circ\text{C})$$

C. 4. 2. 3 标准铂电阻温度计稳定性引入的标准不确定度 $u_{2,3}$

直接使用检定证书中的水三相点值，带来的最大变化8mK，为均匀分布，则标准不确定度为 $u_{2,3}=0.008/\sqrt{3}=0.005(^\circ\text{C})$

C. 4. 2. 4 恒温槽不均匀引入的不确定度 $u_{2,4}$

在60℃时，恒温槽温场均匀性不超过0.02℃，为均匀分布，则标准不确定度为

$$u_{2,4}=0.02/\sqrt{3}=0.012^\circ\text{C}$$

C. 5 合成不确定度计算

标准不确定度分量汇总见表C.2

表C.2 标准不确定度分量汇总一览表

序号	不确定度来源	分布	标准不确定度/°C
1	被校光纤光栅传感器温度测量重复性引入的不确定度 u_1	统计	0.05
2	标准铂电阻温度计量值溯源引入的标准不确定度 $u_{2.1}$	正态	0.002
3	配套电测设备引入的标准标准不确定度 $u_{2.2}$	均匀	0.08
4	标准铂电阻温度计稳定性引入的标准不确定度 $u_{2.3}$	均匀	0.005
5	恒温槽不均匀引入的不确定度 $u_{2.4}$	均匀	0.012
合成标准不确定度 $u_c(\Delta t_d)$			0.1

C.6 扩展不确定度的评定

取 $k=2$ ，则 $U = ku_c = 2 \times 0.1 \approx 0.2^\circ\text{C}$

附录 D

光纤光栅温度、压力传感器压力示值误差校准不确定度评定实例

D.1 概述

D.1.1 被校计量器具

名称：光纤光栅温度压力传感器（压力参数）

测量范围：（200~4000）kPa。

D.1.2 标准器

标准器信息见表 D.1

表 D.1 标准器

名称	现场全自动压力校验仪
准确度等级	0.02 级
测量范围	（0~4）MPa

D.1.3 校准环境条件

校准时环境温度：21.0℃，相对湿度：54%，大气压：100.730kPa。

D.2 测量结果

光纤光栅温度压力传感器压力示值误差校准结果见表 D.2。

表 D.2 压力计校准结果

计量单位（kPa）

标准值	第一次		第二次		第三次		示值误差	示值误差扩展不确定度 $U, k=2$
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程		
200	202.1	203.5	203.9	202.6	202.5	201.0	+3.9	2.5
1000	1001.7	1001.0	1000.4	1002.6	1000.7	1003.0	+3.0	2.5
2000	2001.9	2002.5	2000.2	2001.7	2001.9	2002.4	+2.5	2.5
3000	2999.8	3001.8	3001.3	3003.4	3001.7	3003.8	+3.8	2.5
4000	4001.8	4003.6	4001.6	4003.1	4001.3	4001.5	+3.6	2.5

D.3 不确定度分析

D.3.1 数学模型

依据本规范，光纤光栅温度压力传感器压力示值误差是在所要求的校准条件下，用现场全自动压力校验仪作标准器，以测量被校光纤光栅温度压力传感器压力示值误差为例，进行不确定度评定。（如式（D.1））

$$\Delta p_i = p_i - p_{0i} \quad (D.1)$$

式中： Δp_i —第 i 个校准点的压力示值误差，kPa；

p_i —第 i 个校准点的压力示值，kPa；

p_{0i} —第 i 个校准点的标准器示值，kPa。

D.3.2 不确定度来源

- a) 被校传感器的示值 p_i 引入的不确定度分量 $u(p_i)$
- b) 标准器的压力值 p_{0i} 引入的不确定度分量 $u(p_{0i})$

D.3.3 不确定度分量的评定

D.3.3.1 输入量 p_i 的标准不确定度分量 $u(p_i)$ 的评定

- a) 被校传感器重复性引入的不确定度分量 $u(p_{i1})$

对被校光纤光栅温度压力传感器在 2000kPa 处重复测量 10 次，其测得值如表 D.3 所示。

表 D.3

测量次数	10 次测量									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
示值 (kPa)	2002.8	2004.2	2003.4	2000.8	2002.7	2003.9	2003.2	2001.6	2001.1	2002.0

$$u(p_{i1}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{(n-1)}} = 1.16 \text{kPa}$$

- b) 被校传感器分辨力引入的不确定度分量 $u(p_{i2})$

仪表分辨力引入的误差区间的半宽为分辨力的 1/2，取均匀分布（分辨力为 0.1kPa）

$$u(p_{i2}) = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} = 0.0289 \text{kPa}$$

c) 标准不确定度 $u(p_i)$ 的确定

$$u(p_i) = \sqrt{u^2(p_{i1}) + u^2(p_{i2})} = 1.16\text{kPa}$$

对公式 (式 C.1) 求偏导, 得到 $u(p_i)$ 的灵敏度系数 $c(p_i) = 1$

D. 3. 3. 2 输入量 p_{0i} 的标准不确定度分量 $u(p_{0i})$ 的评定

根据检定证书, 现场全自动压力校验仪的测量范围为 (0~4) MPa, 准确度等级为 0.02 级, 其最大允许误差 $\Delta = \pm 4000 \times 0.02\% = \pm 0.8\text{kPa}$, 则置信区间半宽度 $a = 0.8\text{kPa}$, 服从均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 其标准不确定度为

$$u(p_{0i}) = \frac{a}{k} = \frac{0.8}{\sqrt{3}} = 0.462\text{kPa}$$

对公式 (式 D.1) 求偏导, 得到 $u(p_{0i})$ 的灵敏度系数 $c(p_{0i}) = -1$

D. 3. 4 合成标准不确定度 u_c

由于被校设备的示值 p_i 与标准器的压力值 p_{0i} 之间彼此独立, 互不相关, 根据不确定度传播定律, 合成其标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{c^2(p_i)u^2(p_i) + c^2(p_{0i})u^2(p_{0i})} = 1.25\text{kPa}$$

D. 3. 5 标准不确定度一览表

表 D. 4

序号	符号	不确定度分量来源	灵敏系数 $ c_i $	标准不确定度
1	$u(p_{i1})$	重复性引入的不确定度分量	/	1.16kPa
2	$u(p_{i2})$	分辨力引入不确定度分量	/	0.0289kPa
3	$u(p_i)$	被校压力计示值引入的不确定度分量	1	1.16kPa
4	$u(p_{0i})$	标准器压力值引入的不确定度分量	-1	0.462kPa
合成标准不确定度 u_c				1.25kPa

D. 3. 6 计算扩展不确定度 U

取包含因子 $k=2$, 其测量结果的扩展不确定度为

$$U = k \times u_c = 2 \times 1.25 = 2.5 \text{kPa}$$

由于被校光纤光栅温度压力传感器的分度值为 100Pa，扩展不确定度位数与测量结果的位数一致，因此被校光纤光栅温度压力传感器的扩展不确定度 U 为 2.5kPa。

