



# 中华人民共和国工业和信息化部 军工民品计量技术规范

JJF(军工民品) 0042—2024

## 光纤光栅温度传感器校准规范

Calibration Specification of Fiber Grating Temperature Sensor

(报批稿)

××××—××—××发布

××××—××—××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

# 光纤光栅温度传感器 校准规范

Calibration Specification of Fiber  
Grating Temperature Sensor

JJF（兵工民品） 0042—2024

归口单位：中国兵器工业标准化研究所

主要起草单位：国营第六一八厂

参加起草单位：北京航空航天大学

北京北方信恒计量检测技术有限公司

本规范技术条文委托起草单位负责解释

**本规范主要起草人：**

毕京红（国营第六一八厂）

杜 勤（国营第六一八厂）

魏 鹏（北京航空航天大学）

**参加起草人：**

李克雷（北京北方信恒计量检测技术有限公司）

武 盼（北京北方信恒计量检测技术有限公司）

吴建海（国营第六一八厂）

祁金秋（北京北方信恒计量检测技术有限公司）

# 目 录

引言.....（Ⅱ）

1 范围.....（1）

2 引用文件.....（1）

3 术语和计量单位.....（1）

4 概述.....（1）

5 计量特性.....（3）

6 校准条件.....（4）

6.1 环境条件.....（4）

6.2 测量标准及其他设备.....（4）

7 校准项目和校准方法.....（5）

7.1 校准项目.....（5）

7.2 校准方法.....（5）

8 校准结果表达.....（6）

9 复校时间间隔.....（7）

附录 A 原始记录格式.....（8）

附录 B 校准证书内页格式.....（9）

附录 C 测量不确定度评定示例.....（10）

# 引 言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

# 光纤光栅温度传感器校准规范

## 1 范围

本规范适用于温度范围（-100~1000）℃光纤光栅温度传感器（以下简称传感器）的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1007-2007 温度计量名词术语及定义

JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

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

JJF 1007-2011界定的及以下术语和定义适用于本规范。

### 3.1

光纤光栅温度传感器 fiber grating temperature sensor

利用光纤光栅的光敏性来测量温度参数的传感器。

## 4 概述

### 4.1 结构

传感器是由光纤纤芯、包层、涂覆层和传感器封装材料等组成。传感器采用一种和光纤折射率相匹配的高分子温敏材料涂覆在两根熔接在一起的光纤外面，使光能由一根光纤输入该反射面从另一根光纤输出，受温度影响，引起折射率变化，进而实现对温度的测量，如图1所示。

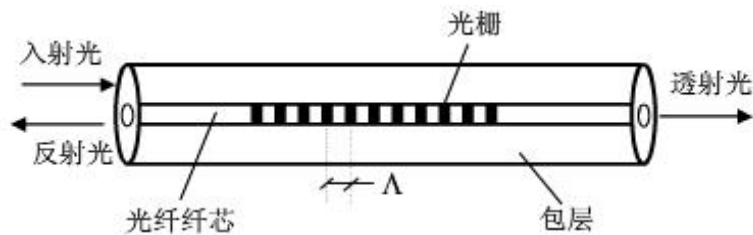


图1 光纤光栅结构图

## 4.2 原理

传感器受温度变化的影响,光栅会发生热膨胀效应和热光效应,引起光栅的有效折射率和光栅周期发生变化,导致传感器中心波长发生变化,通过光纤光栅解调仪测量传感器的中心波长,实现温度的测量。公式(1)的微分式为公式(2)。

$$t = \frac{\Delta\lambda_B}{K_T} + t_0 \quad (1)$$

式中:

$t$  ——光纤光栅温度传感器所在区域的环境温度;

$\Delta\lambda_B$  ——光纤光栅温度传感器中心波长变化量;

$K_T$  ——光纤光栅温度传感器的温度灵敏度系数;

$t_0$  ——光纤光栅温度传感器所在区域的初始环境温度。

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{eff}\Lambda + 2n_{eff}\Delta\Lambda \quad (2)$$

式中:

$\Delta n_{eff}$  ——纤芯有效折射率的变化量;

$\Delta\Lambda$  ——光栅周期的变化量。式中右侧第一项代表光弹效应引起的波长变化,第二项代表应变效应(光栅长度改变,即光栅周期改变)引起的波长变化。

当外界环境的温度发生变化时,光纤 Bragg 光栅的中心波长也会发生变化。当温度发生变化时,将式(2)展开,可以得到 FBG 中心波长变化量  $\Delta\lambda_B$  的表达式公式(3)。

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[ \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \Delta T + (\Delta n_{eff})_{ep} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial a} \Delta a \right] \Lambda + 2n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Delta T \quad (3)$$

式中:

$\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$  ——光纤的热光系数,用  $\xi$  表示;

$(\Delta n_{eff})_{ep}$  ——热膨胀导致的光弹效应;

$\frac{\partial n_{eff}}{\partial a}$  ——热膨胀引起纤芯直径发生变化而产生的波导效应;

$\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$  ——光纤的热膨胀系数,用  $\alpha$  表示。

则公式(4)可表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \Delta T} = \frac{1}{n_{eff}} \left[ n_{eff} \xi + \frac{(\Delta n_{eff})_{ep}}{\Delta T} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial a} \cdot \frac{\Delta a}{\Delta T} \right] + \alpha \quad (4)$$

式中:

$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B\Delta T}$  ——FBG 的温度灵敏度系数。

以温度灵敏度来表示温度引起的各向应变：

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{rr} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \\ \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \end{bmatrix} \quad (5)$$

相同地，可以将式 (3) 进一步写成下式：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B\Delta T} = \frac{1}{n_{eff}} \left[ n_{eff}^3 \xi - \frac{n_{eff}^3}{2} (P_{11} + 2P_{12}) \alpha + k_{wg} \cdot \frac{\Delta a}{\Delta T} \right] + \alpha \quad (6)$$

式中：

$k_{wg}$  ——波导效应引起的波长变化系数。

室温条件下石英光纤的热膨胀系数为  $\alpha \approx 5.0 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，热光系数为  $\xi \approx 7.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。由于热膨胀系数  $\alpha$  比热光系数  $\xi$  小一个数量级，热膨胀效应对 FBG 的影响小于热光效应对 FBG 波长的影响。由于波导效应的影响非常小，所以在实际温度测量中可以忽略。因此，公式 (6) 可以简化为公式 (7)。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\xi + \alpha) \cdot \Delta T = k_T \cdot \Delta T \quad (7)$$

式中：

$k_T$  ——FBG 的温度灵敏度系数。

将热膨胀系数  $\alpha$  和热光系数  $\xi$  的值代入公式 (7)，可以计算出常温下 FBG 的灵敏度系数  $K_T = 7.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。对式 (7) 进行一项，可得温度引起的 FBG 中心波长变化量  $\Delta\lambda_B$ 。

$$\Delta\lambda_B = (\xi + \alpha) \cdot \lambda_B \cdot \Delta T = K_T \cdot \Delta T \quad (8)$$

室温范围内中心波长 1550 nm 的 FBG 的温度灵敏度  $K_T = 11.625 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。由于制作方法及工艺等方面的影响，光纤光栅的温度灵敏度可能会与理论值存在误差，需要对其进行灵敏度标定后再应用于实际测量。

#### 4.3 用途

由于传感器具有灵敏度高、体积小、耐腐蚀、抗电磁辐射、光路可弯曲等诸多优点，可用于多领域、多介质的温度控制、测量。

#### 5 计量特性

传感器最大允许误差见表 1。

表 1 传感器最大允许误差

温度传感器名称	测量范围	最大允许误差
光纤光栅温度传感器	(-100~300) °C	±0.5 °C
	(300~1000) °C	±2 °C

注：上述计量特性，不作为合格判定的依据。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(15~35) °C。

6.1.2 相对湿度：≤80%。

### 6.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备见表 2。

表 2 测量标准及其他设备

序号	设备名称	技术要求	用途	备注
1	标准铂电阻温度计	二等	标准器	(-100~300) °C
2	标准铂铑 10-铂热电偶	一等	标准器	(300~1000) °C
3	电测设备	准确度等级不低于 0.01 级，分辨力不低于 0.1 μV	与标准器配套使用	—
4	恒温设备	(-100~300) °C 在有效工作区域内任意两点温差 不大于 0.1 °C (300~1000) °C a) 恒温设备为管式炉时，应配置 均温块； b) 有效工作区域轴向 30 mm 内， 任意两点温差绝对值不大于 0.5 °C；径向半径不小于 14 mm 范围内，同一截面任意两点的温 差绝对值不大 0.25 °C。	提供恒定 均匀温场	也可使用满足校准 要求的其他恒温设 备
5	参考端恒温器	恒温器深度应不小 200mm，工作 区域温度变化为 (0±0.1) °C	为标准器参考端 提供 0 °C 的温场	可用满足要求的其 他设备
6	光纤光栅解调仪	中心波长分辨率所对应的温度 分辨力为 0.1 °C	与被校传感器配 套使用	—

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目

传感器校准项目为外观检查、温度示值误差。

### 7.2 校准方法

#### 7.2.1 外观

目测检查传感器及光纤光栅解调仪的外观。被校传感器及光纤光栅解调仪不应有严重的污染、破损等缺陷。

#### 7.2.2 温度示值误差

7.2.2.1 在被校传感器温度范围内，至少校准三个温度点。测量温度点一般选择传感器的下限值、中间值和上限值，可按使用温度范围均匀分布，也可根据客户需求选择其他校准温度点。

##### 7.2.2.2 (−100~300)℃温度范围传感器的校准

采用比较法，被校传感器与标准器二等标准铂电阻温度计进行比较，校准方法如下：

a) 将传感器与光纤光栅解调仪相连，使其处于正常工作状态。将标准器测量端与被校传感器测量端置于恒温设备有效工作区域的同一水平位置，插入深度应不小于200mm；

b) 将恒温设备设定在下限温度，待恒温设备温度稳定，当测量标准温度偏离校准温度点±1℃以内，温度变化每分钟不超过0.1℃时开始读数，分别读取标准器的温度示值和光纤光栅解调仪显示的温度示值，每2 min读取一次，连续测量4次，记录在原始记录中，原始记录格式见附录A。在每一校准温度点的整个读数过程，恒温设备温度的变化不大于0.2℃，读数顺序为：

标准（第1次）→ 被校（第1次）→ 标准（第2次）→ 被校（第2次）



被校（第4次）← 标准（第4次）← 被校（第3次）← 标准（第3次）

c) 示值误差按公式（9）计算。

$$\Delta t = \bar{t}_{\text{校}} - \bar{t}_{\text{标}} \quad (9)$$

式中：

$\bar{t}_{\text{校}}$  ——被校传感器四次读数平均值，℃；

$\bar{t}_{\text{标}}$  ——标准器四次读数平均值，℃。

d) 按a)～c)依次测量中间温度和上限温度时标准器和光纤光栅解调仪的温度示值。

##### 7.2.2.3 (300~1000)℃温度范围传感器的校准

采用比较法，将被校传感器与标准器一等标准铂铑10-铂热电偶进行比较，校准方

法如下:

a) 将传感器与光纤光栅解调仪相连, 使其处于正常工作状态。将标准器套上保护管, 与被校传感器捆扎成一束。然后将这一束置于恒温设备的均温块, 推至恒温设备的有效加热区域, 使被校测量端与标准器的测量端处于同一个径向界面上。标准器处于恒温设备轴线位置上, 测量端处于炉内最高均匀温区, 炉口用耐火材料封堵;

b) 校准应由低温向高温逐点升温进行, 将恒温设备设定在下限温度, 待恒温设备温度稳定, 当测量标准温度偏离校准温度点 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内, 温度变化每分钟不超过 $0.2^{\circ}\text{C}$ 时开始读数, 分别读取标准器的温度示值和光纤光栅解调仪显示的温度示值, 每2 min读取一次, 连续测量4次。在每一校准温度点的整个读数过程, 恒温设备温度的变化不大于 $0.5^{\circ}\text{C}$ , 读数顺序按7.2.2.2进行;

c) 示值误差按公式(1)计算。

## 8 校准结果表达

校准结束后应出具校准证书, 推荐校准证书内页格式见附录B。校准证书应准确、客观的报告校准结果。校准结果用校准数据的形式给出, 并给出测量不确定度, 不确定度评定示例见附录C。校准证书至少包含以下信息:

经校准的被校光纤光栅出具校准证书。校准证书至少应包含以下信息:

- 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) 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 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) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- 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说明;
- 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

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，建议不超过 12 个月。

附录 A

光纤光栅温度传感器原始记录格式

样品信息					
委托单位			名称		
出厂编号			型号/规格		
外观检查			制造单位		
校准地点			校准依据		
标准器信息					
名称	型号/规格	仪器编号	准确度等级/ 最大允许误差	证书编号	有效期

测量单位：℃

校准温度	读数顺序	标准器示值	被校光纤光栅温度传感器示值
	1		
	2		
	3		
	4		
	平均值		
	示值误差		
	1		
	2		
	3		
	4		
	平均值		
	示值误差		
	1		
	2		
	3		
	4		
	平均值		
	示值误差		

校准员：

核验员：

校准日期：

附录 B

校准证书内页格式

校准结果

样品信息					
委托单位			名称		
出厂编号			型号/规格		
外观检查			制造单位		
校准地点			校准依据		
标准器信息					
名称	型号/规格	仪器编号	准确度等级/ 最大允许误差	证书编号	有效期

校准温度点 ℃	温度示值误差 ℃	扩展不确定度 $U(k=2)$ /℃

以下空白

## 附录 C

## 测量不确定度评定示例

## C.1 400℃校准结果测量不确定度的评定

## C.1.1 测量模型

测量模型见公式 (C.1)。

$$\Delta t = \bar{t}_{\text{校}} - \bar{t}_{\text{标}} \quad (\text{C.1})$$

式中:

$\bar{t}_{\text{校}}$ ——被校传感器四次读数平均值, °C;

$\bar{t}_{\text{标}}$ ——标准器四次读数平均值, °C。

## C.1.2 不确定度来源

不确定度来源包含:

- a) 电测仪器测量标准热电偶热电势引入的标准不确定度  $u_{B1}$ ;
- b) 恒温设备波动引入的标准不确定度  $u_{B2}$ ;
- c) 标准热电偶参考端 (0℃) 不确定引入的标准不确定度  $u_{B3}$ ;
- d) 光纤光栅解调仪分辨力引入的标准不确定度  $u_{B4}$ ;
- e) 光纤光栅温度传感器重复性引入的标准不确定度  $u_A$ 。

## C.1.3 不确定度分量的评定

## C.1.3.1 电测仪器测量标准热电偶热电势引入的标准不确定度

电测仪器使用的数字表允许误差按一年内的准确度  $\pm(37 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 6 \times 10^{-6} \times \text{量程})$  计算, 标准热电偶在 400℃ 的电势为 3.259mV, 电势率为 0.00961mV/℃, 服从均匀分布,

$$u_{B1} = (37 \times 10^{-6} \times 3.259 + 6 \times 10^{-6} \times 200) / (0.00961 \times \sqrt{3}) = 0.021^\circ\text{C}$$

## C.1.3.2 恒温设备波动引入的标准不确定度

检定点恒温设备波动的影响取  $0.5^\circ\text{C}/2 = 0.25^\circ\text{C}$ , 服从均匀分布,

$$u_{B2} = 0.25 / \sqrt{3} = 0.141^\circ\text{C}$$

## C.1.3.3 标准热电偶参考端 (0℃) 不确定引入的标准不确定度

标准热电偶参考端 (0℃) 不确定带来的影响, 允许误差  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , 服从均匀分布,

$$u_{B3} = 0.1 / \sqrt{3} = 0.058^\circ\text{C}$$

## C.1.3.4 光纤光栅解调仪分辨力引入的标准不确定度

光纤光栅解调仪的分辨力为  $0.1^\circ\text{C}$ , 区间半宽度均匀分布,

$$u_{B4} = 0.1 / 2 \sqrt{3} = 0.0288^\circ\text{C}$$

C.1.3.5 光纤光栅温度传感器重复性引入的标准不确定度 $u_A$ 

用标准热电偶对被校光纤光栅温度传感器在校准温度点 400℃进行 10 组独立重复测量，测量值是每一组校准记录 4 次数据的平均值，用 A 类方法进行评定见表 C.1。

表 C.1 测量值及计算结果

组数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	400.8	400.7	400.7	400.8	400.8	400.7	400.9	400.9	400.8	400.7
$S_n(x)$	$S_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$									

$$u_A = S_n(x) / \sqrt{10} = 0.025^\circ\text{C}$$

## C.1.4 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_A^2} = 0.26^\circ\text{C}$$

## C.1.5 扩展不确定度

$$U = k \cdot u_c = 0.5^\circ\text{C} (k=2)$$

## C.2 0℃校准结果测量不确定度的评定

## C.2.1 测量模型

测量模型见公式 (C.1)。

## C.2.2 不确定度来源

不确定度来源包含：

- 电测仪器测量标准热电偶热电势引入的标准不确定度 $u_{B1}$ ；
- 恒温设备波动引入的标准不确定度 $u_{B2}$ ；
- 标准铂电阻不稳定性引入的标准不确定度 $u_{B3}$ ；
- 光纤光栅解调仪分辨力引入的标准不确定度 $u_{B4}$ ；
- 光纤光栅温度传感器重复性引入的标准不确定度 $u_A$ 。

## C.2.3 不确定度分量的评定

## C.2.3.1 电测仪器测量标准铂电阻电阻值引入的标准不确定度

电测仪器使用的数字表允许误差按一年内的准确度 $\pm(56 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 7 \times 10^{-6} \times \text{量程})$ 计算，标准铂电阻在 0℃的电阻为 25 Ω (0.1014 Ω/℃)，服从均匀分布，

$$u_{B1} = (56 \times 10^{-6} \times 25 + 7 \times 10^{-6} \times 200) / (0.1014 \times \sqrt{3}) = 0.016^\circ\text{C}$$

## C.2.3.2 恒温设备波动引入的标准不确定度

检定点恒温设备波动的影响取 0.1℃/2=0.05℃，服从均匀分布，

$$u_{B2} = 0.05 / \sqrt{3} = 0.028^\circ\text{C}$$

## C.2.3.3 标准铂电阻不稳定性引入的标准不确定度

标准铂电阻不稳定性引入的影响, 允许误差 $\pm 0.006^{\circ}\text{C}$ , 服从均匀分布,

$$u_{B3} = 0.006 / \sqrt{3} = 0.003^{\circ}\text{C}$$

#### C.2.3.4 光纤光栅解调仪分辨力引入的标准不确定度

光纤光栅解调仪的分辨力为  $0.1^{\circ}\text{C}$ , 区间半宽度均匀分布,

$$u_{B4} = 0.1 / 2\sqrt{3} = 0.029^{\circ}\text{C}$$

#### C.2.3.5 光纤光栅温度传感器重复性引入的标准不确定度 $u_A$

用标准铂电阻对被校光纤光栅温度传感器在校准温度点  $0^{\circ}\text{C}$  进行 10 组独立重复测量, 测量值是每一组校准记录 4 次数据的平均值, 用 A 类方法进行评定见表 C.2。

表 C.2 测量值及计算结果

组数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
$S_n(x)$	$S_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$									

$$u_A = S_n(x) / \sqrt{10} = 0.020^{\circ}\text{C}$$

#### C.2.4 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_A^2} = 0.048^{\circ}\text{C}$$

#### C.2.5 扩展不确定度

$$U = k \cdot u_c = 0.1^{\circ}\text{C} (k=2)$$

中华人民共和国工业和信息化部

兵工民品计量技术规范

光纤光栅温度传感器校准规范

JJF(兵工民品) 0042—2024

版权所有 不得翻印