

JJF

中华人民共和国计量技术规范

JJF×××—××××

桥梁结构健康监测用  
光纤光栅式静态应变测量系统

Fiber Grating Static Strain Measurement System for  
Bridge Structural Health Monitoring

(征求意见稿)

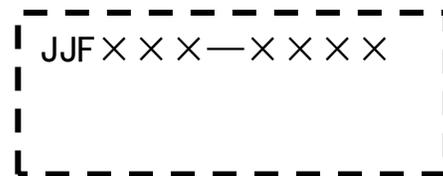
××××—××—××发布

××××—××—××实施

国家市场监督管理总局 发布

# 桥梁结构健康监测用光纤光栅式 静态应变测量系统校准规范

Fiber Grating Static Strain  
Measurement System for Bridge  
Structural Health Monitoring



**归口单位：**全国公路专用计量器具计量技术委员会

**起草单位：**

本规程委托全国公路专用计量器具计量技术委员会负责解释。



**本规程主要起草人：**

**参加起草人：**



# 目录

引 言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 概述	1
4 计量特性	3
4.1 应变测量示值误差	3
4.2 应变测量重复性	3
4.3 温度测量示值误差	3
5 校准条件	3
5.1 环境条件	3
5.2 校准设备	3
6. 校准项目和校准方法	3
6.1 应变测量示值误差	3
6.2 示值测量重复性	4
6.3 温度测量示值误差	5
7 校准结果	5
7.1 校准记录	5
7.2 校准证书	5
7.3 校准结果不确定度评定	5
8 复校时间间隔	6
附录 A	7
附录 B	8
附录 C	9
附录 D	11

# 引 言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1059.1-2010《测量不确定度评定与表示》进行制定。

本规范为首次制定。

# 桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统校准规范

## 1 范围

本规程适用于桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统的校准。

## 2 引用文件

本规程引用了下列文件：

JT/T 1037 公路桥梁结构安全监测系统技术规程

GB 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范

GB/T 18459-2001 传感器主要静态性能指标计算方法

JJF 1059.1 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程；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规程。

## 3 概述

桥梁结构健康监测用光纤光栅静态应变测量系统是用于结构物应变测量的设备，是 JT/T 1037 和 GB 50982 中应变监测要求的主要监测系统

光纤光栅技术是利用紫外曝光等技术在光纤芯中引起折射率的周期性变化而形成的。光纤光栅中折射率分布的周期性结构，导致某一特定波长光的反射，从而形成光纤光栅的反射谱。光纤光栅式应变计是由连接器、光纤光栅、应变或裂缝转换装置、保护组件构成。装置的目的是将应变或微裂等外部参数转换为光纤光栅波长的变化，通过解调仪测出其当前波长，再经过计算求出其应变值。

桥梁结构健康监测用光纤光栅静态应变测量系统主要由应变传感器、解调仪、安装座、弹性元件、光源信号发射及采集端口、光缆、外壳等部分组成，其主要结构如图 1 所示。

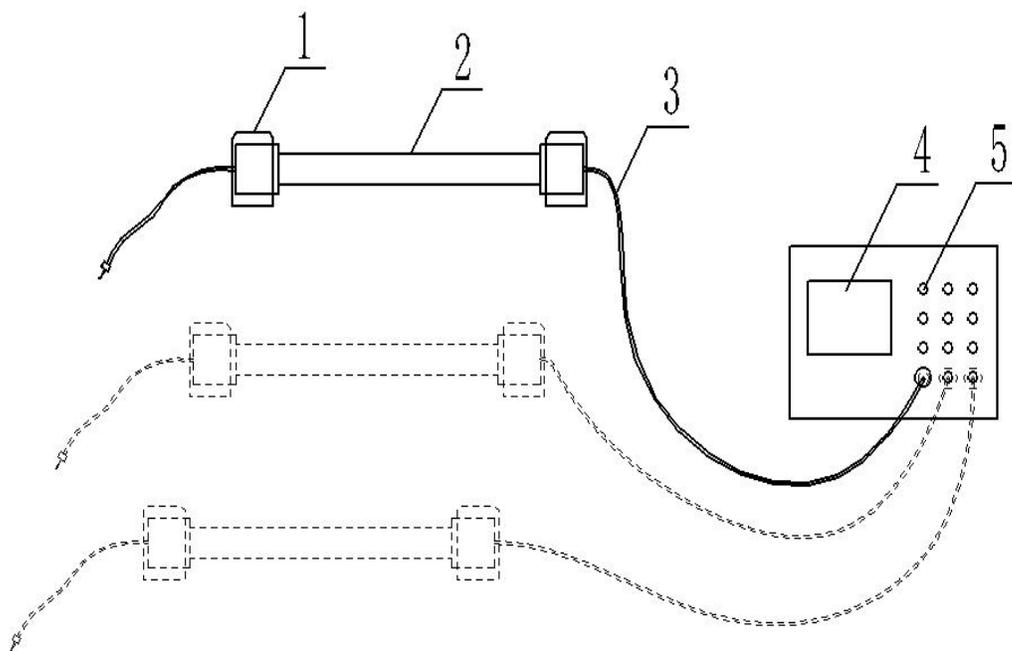


图 1. 桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统结构示意图

1——安装座； 2. 外壳； 3. 光纤线缆； 4. 显示屏； 5. 光源信号发射及采集端口。

## 4 计量特性

### 4.1 应变测量示值误差

桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统的测量示值误差建议应不大于 $\pm 1\%$ ;

### 4.2 应变测量重复性

桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统的重复性建议应不大于 $0.5\%$ ;

### 4.3 温度测量示值误差

桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统的测量温度示值误差建议应不大于 $0.5^{\circ}\text{C}$ 。

## 5 校准条件

### 5.1 环境条件

5.1.1 环境温度： $-15^{\circ}\text{C}\sim+35^{\circ}\text{C}$ （在每项试验期间，允许的温度变化不大于 $1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ）；

5.1.2 环境湿度：不大于 $85\%RH$ ；

5.1.3 校准时工作台应保持水平，无振动冲击。

### 5.2 校准设备

#### 5.2.1 光纤光栅式应变测量系统校准装置

位移范围应包含 $0\text{mm}\sim 10\text{mm}$ ，示值重复性不大于 $1\mu\text{m}$ ；

#### 5.2.2 恒温槽

温度范围应包含 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，温度均匀性不大于 $0.05^{\circ}\text{C}$ ，温度波动性不大于 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{min}$ ；

#### 5.2.3 温度计

温度测量范围应包含 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，分度值不大于 $0.1^{\circ}\text{C}$ 。

## 6 校准项目和校准方法

### 6.1 应变测量示值误差

a) 将桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统固定在校准装置上，开启测量

系统；

b) 将光纤光栅式应变测量系统满量程应变值按 20%分档，从满量程的下限开始，逐级进给应变至满量程上限，读取并记录每个档位的校准装置的位移值记为 $L_{Ri}$ ；记录光纤光栅式应变测量系统波长示值并换算为应变值记为 $\varepsilon_{Si}$ ；

c) 按式 (1) 分别计算专用校准装置产生的微应变 $\varepsilon_{Ri}$

$$\varepsilon_{Ri} = \frac{L_{Ri}}{L} \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中：

$\varepsilon_{Ri}$ —校准装置激励的第  $i$  个标准微应变值；

$L_{Ri}$ —专用校准装置输出的位移值，mm；

$L$ —应变传感器标距，mm。

按照公式 (2) 计算光纤光栅式应变测量系统的微应变示值误差 $\Delta\varepsilon_i$ ；

$$\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_{Si} - \varepsilon_{Ri} \quad (2)$$

式中：

$\Delta\varepsilon_i$ —光纤光栅式应变测量系统的示值误差；

$\varepsilon_{Si}$ —光纤光栅式应变测量系统测量应变值；

$\varepsilon_{Ri}$ —校准装置输出的应变值。

## 6.2 示值测量重复性

a) 将桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统固定在校准装置上，开启测量系统；

b) 将光纤光栅式应变测量系统满量程应变值按 50%分档，从满量程的下限开始，逐级进给应变至满量程上限，在每个档位停留 10min，将标定装置输出的应变值记为 $\varepsilon_{Ri}$ ，将光纤光栅式应变测量系统输出的值记为 $\varepsilon_{Si}$ ，按式 (3) 和 (4) 分别计算每个档位的变异系数。计算结果均应符合要求。

$$c_{V\varepsilon} = \frac{S_\varepsilon}{\varepsilon_{Ri}} \times 100\% \quad (3)$$

$$S_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{Si} - \bar{\varepsilon}_{Ri})^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中：

$c_{V\varepsilon}$ —应变偏差系数；

$S_\varepsilon$ —标准偏差；

$\overline{\varepsilon_{Ri}}$ —n 次测量的平均值；

n—测量次数；

$\varepsilon_{Ri}$ —第 i 次测量的光纤光栅式应变测量系统的应变值。

### 6.3 温度测量示值误差

a) 启动恒温槽，将其温度分别设定为-20℃、0℃、20℃、40℃、60℃。等恒温槽恒定后，用标准温度计分别测量恒温槽的温度记为 $T_{Ri}$ ；

b) 将光纤光栅式应变计放入恒温槽中，静置 5min 后读取光纤光栅式应变测量系统的温度波长示值，并计算为对应温度记为 $T_i$ ；每个设定温度重复测量 3 次，取算术平均值作为测量结果 $\overline{T}_i$ ；

c) 按式（5）计算温度示值误差

$$\Delta T_i = \overline{T}_i - T_{Ri} \quad (5)$$

式中：

$\Delta T_i$ —温度示值误差，℃；

$\overline{T}_i$ —光纤光栅式应变测量系统温度示值平均值，℃；

$T_{Ri}$ —标准温度，℃。

## 7 校准结果

### 7.1 校准记录

桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统的校准记录应信息齐全、内容完整，校准记录式样见附录 A。

### 7.2 校准证书

桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统的校准结果以校准证书的形式表达，校准证书包含的信息及内页式样见附录 B。

### 7.3 校准结果不确定度评定

桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统校准结果的不确定度评定按照 JJF 1059.1 进行，不确定度评定示例见附录 C。

## 8 复校时间间隔

桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统的复校时间间隔建议为 6 个月。由于复校时间间隔的长短是由桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统的使用情况、使用者等诸因素所决定的，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。

## 附录 A

## 校准记录表格式

记录编号：

第 X 页共 X 页

送检单位		校准日期	
型号规格		出厂编号	
生产厂家		出厂日期	
环境温度		环境湿度	
其 他			
序号	校准项目	校准结果	
1	应变测量示值误差		
2	应变测量重复性		
3	温度示值误差		

## 附录 B

### 桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统

#### 校准证书信息及内页式样

##### B.1 校准证书信息

桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 校准实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点；
- d) 证书编号、页码及总页数；
- e) 委托单位的名称和地址；
- f) 样品接收日期，报告批准日期；
- g) 被校准仪器的信息；
- h) 进行校准的日期；
- i) 校准所依据的技术规范名称和代号；
- j) 所用测量标准或主要设备的名称、编号、主要技术参数及溯源证书有效期；
- k) 校准时的环境条件；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 校准报告批准人的签名或识别；
- n) 校准结果仅对校准对象有效的声明；
- o) 未经校准实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。
- p) 如可获得，任何调整或修理前后的结果；
- q) 相关时，与要求或规范的符合性声明；
- r) 已与客户达成协议时，给出复校时间间隔的建议。

## 附录 C

## 桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统 测量不确定度评估示例

### 1 单次测量的不确定度评定

#### 测量模型

单次测量的示值误差:

$$\Delta\mu\varepsilon_i = \mu\varepsilon_i - \mu\varepsilon_0$$

$\Delta\mu\varepsilon_i$ : 单次测量示值误差

$\mu\varepsilon_i$ : 单次测量值

$\mu\varepsilon_0$ : 单次测量标准值

#### 不确定度分析

由测量模型可知, 桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统的单次测量示值误差 $\Delta d_{S,i}$ 的不确定度 $u_s$ 主要有三个来源:

#### (1) 由标准器引入的不确定度 $u_1$

采用 B 类评定, 由校准测量系统的校准证书可知符合 JJF 1305-2011 的要求, 按照矩形分布, 半宽 $a=0.5\mu\text{m}$ ,  $k=\sqrt{3}$ , 则由标准器引入的不确定度按下式计算:

$$u_1 = \frac{a}{k} = \frac{0.5\mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0.2889\mu\text{m}$$

#### (2) 由重复性引入的不确定度 $u_2$

在评定上, 不确定度参照 A 类, 可以通过下列公式进行计算, 仪器的不确定度确定为 10 次重复性标准差, 其标准不确定度:

$$u_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}}$$

其中:

$x_i$ —第  $i$  次测得的应变值,  $\mu\text{m}$ ;

$\bar{x}_i$ —应变测量平均值,  $\mu\text{m}$ 。

表 6-1 重复性试验数据

	1	2	3	4	5
应变值/ $\mu\text{m}$	3.37568	3.37758	3.36554	3.36554	3.37377
	6	7	8	9	10
	3.35857	3.36744	3.37441	3.36997	3.39849

根据计算结果可知, 标准差的值为:  $0.010749\mu\text{m}$ , 则重复性引入的不确定度分量 $u_2 = 0.010749\mu\text{m}$ 。

### (3) 温度及环境引入的不确定度 $u_3$

通过调研和高低温试验验证等手段发现对测量结果造成主要影响的环境因素就是温度，除此之外的环境因素造成的影响都可以忽略不计。校准装置的主标准器位移测量系统，由温度-应变可靠性试验可知，温度标准偏差的典型值为  $0.0782 \mu\text{m} / 10^\circ\text{C}$ ，最大值为  $0.3 \mu\text{m} / 10^\circ\text{C}$ ，应变校准系统校准环境条件温度为  $(-20-60)^\circ\text{C}$ ，一般情况下一次试验温度变化不大于  $20^\circ\text{C}$ 。按温度标准偏差最大值，温度变化最大量  $20^\circ\text{C}$  计算，则  $\Delta_2 = \pm 0.3 \mu\text{m} / 10^\circ\text{C} \times 20^\circ\text{C} = \pm 0.6 \mu\text{m}$ 。按照均匀分布，半宽  $a_2 = |\Delta_2|$ ， $k_2 = \sqrt{3}$ 。那么可以通过下列公式对温度影响的不确定度分量进行准确的计算：

$$u_3 = \frac{\Delta_2}{k_2} = \frac{0.6}{\sqrt{3}} = 0.035$$

即  $u_3 = 0.035 \mu\text{m}$ 。

### (4) 合成标准不确定度的计算

校准结果的不确定度分量汇总见表 6-2。

表 C-1 校准结果的不确定度分量汇总表

序号	不确定度来源	不确定度分量	类别	分布
1	标准器	$u_1$	B	平均分布, $k_1 = \sqrt{3}$
2	重复性	$u_2$	A	正态分布
3	温度	$u_3$	B	平均分布, $k_1 = \sqrt{3}$

因此校准结果的标准不确定度  $u_c$  按照下式计算：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

经计算，标准不确定度  $u_c = 0.29121 \mu\text{m}$ 。

### (5) 扩展不确定度的计算

将置信概率设置为  $P=95\%$ ， $k=2$ ，可以计算出校准结果的扩散不确定度如下所示：

$$U_r = k \cdot u_c$$

综上，根据计算可知，桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统校准结果的扩展不确定度为  $U_r = 0.58242 \mu\text{m}$ ， $k=2$ 。

### (6) 不确定度报告

桥梁结构健康监测用光纤光栅式静态应变测量系统校准结果的不确定度： $U_r = 0.58 \mu\text{m}$ ， $k = 2$ 。

其他计量性能指标校准的不确定度可参照以上方法评定。

## 附录 D

## 光纤光栅式应变测量系统校准装置结构示意图

校准装置由位移测量单元、拉伸压缩驱动单元、控制单元等组成，校准时，控制单元使拉伸压缩驱动单元产生微小的直线运动，待校准应变传感器将发生形变，同时位移测量单元测量等量位移，应变传感器通过位移测量单元，并与光纤光栅式波长解调系统测量的波长变化量进行比对，位移范围应包含 0mm~10mm，实现对待校准传感器的应变示值和重复性的校准。例如其结构示意图（如下图）由光纤光栅式应变传感器固定装置、位移传感器、电机、底座组成。

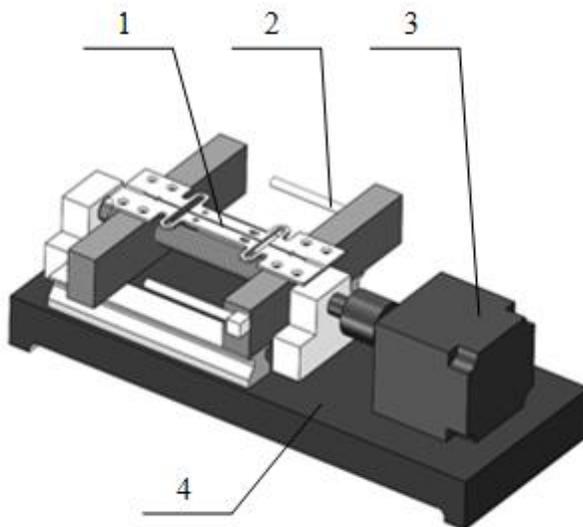


图 D-1. 光纤光栅式应变测量系统校准装置

1—光纤光栅式应变传感器固定装置；2—位移传感器；3—电机；4—底座