



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××—××××

粘贴式应变计校准规范

Calibration Specification for Bonded Strain Gauges

(征求意见稿)

2022-×-×发布

2022-×-×实施

国家市场监督管理总局 发布

粘贴式应变计 校准规范

Calibration Specification for
Bonded Strain Gauges



归口单位：全国力值硬度重力计量技术委员会

主要起草单位：中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所

参加起草单位：中航电测仪器股份有限公司
中国飞机强度研究所

本规范委托全国力值硬度重力计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

秦海峰（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所）

隋广惠（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所）

尹 肖（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所）

参加起草人：

余 康（中航电测仪器股份有限公司）

王义强（中国飞机强度研究所）

黎永前（西北工业大学）

目 录

引 言	IV
1 范围	5
2 引用文件	5
3 术语和定义	5
4 概述	6
5 计量特性	6
6 校准条件	7
7 校准项目和校准方法	7
8 校准结果表达	12
9 复校时间间隔	12
附录 A	14
附录 B	17
附录 C	19

引 言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》规定的规则编写。

本规范替代 JJG1046-1994《金属电阻应变计的工作特性技术规范》。

本规范在制定过程中充分考虑了国家标准 GB/T13965-2008《仪表元器件术语》、JJF1001《通用计量术语及定义》、JJF 1011-2006《力值与硬度计量术语及定义》；国家标准 GB/T 13992-2010《金属粘贴式电阻应变计》、JJG391-2009《力传感器》、JJG623-2005《电阻应变仪》中相关的校准项目、方法及计量性能。

与 JJG1046-1994 相比本规范除编辑性修改外，主要内容变化如下：

- 增加了引言；
- 增加了引用文件；
- 增加了术语和定义；
- 增加了概述；
- 增加了校准用设备计量特性；
- 增加了直线度、重复性、机械滞后、蠕变等的计量性能要求；
- 修改了规范中环境条件要求；
- 修改了规范中灵敏系数、灵敏系数随温度的变化、热输出等的计量性能要求；
- 删除了电阻测量、横向效应系数测量相关内容；
- 删除了试验结果处理；
- 删除了附录中的附录 1 应变计结构、附录 2 出厂报告值与试验值比较举例、附录 3 向用户推荐一种评价应变计性能试验的方法。
- 增加了附录 A 灵敏系数校准结果的不确定度评估、附录 A 粘贴式应变计校准原始记录、附录 B 粘贴式应变计校准证书内页格式。

粘贴式应变计校准规范

1 范围

本规范适用于粘贴式应变计（以下简称应变计）的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF1001-2011	通用计量术语及定义
JJF1011-2006	力值与硬度计量术语及定义
JJF1059.1—2012	测量不确定度评定与表示
JJG391-2009	力传感器
JJG623-2005	电阻应变仪
GB/T13965-2008	仪表元器件术语
GB/T13992-2010	金属粘贴式电阻应变计

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡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 术语和定义

3.1 金属粘贴式电阻应变计 **metallic bonded resistance strain gauge**

用金属电阻体作为敏感栅，用粘接剂固定在试件上的电阻应变计。

3.2 光纤光栅应变计 **bonded fiber bragg grating strain gauge**

用光纤光栅作为敏感元件，用粘接剂固定在试件上的光纤应变计。

3.3 真实应变 **real strain**

由于温度变化及施加机械载荷而在试件上产生应力所引起的单位变形。以 (ε_z) 表示。

3.4 机械应变 **mechanical strain**

仅由于施加机械载荷而在试件上产生应力所引起的单位变形。以 (ε_j) 表示。

3.5 指示应变 **indicated strain**

指由应变计测得的应变值，它是由指示器的读数经过对测量系统的影响进行修正得出的。以 (ε_1) 表示。

3.6 试件 **specimen**

用于安装应变计并测试其工作特性的标定梁或其他规定的检测件（简称为试件）。

3.7 灵敏系数 **gages factor**

将被校应变计粘贴在试件上，对试件施加机械载荷，被校应变计的指示输出幅值与机械应变量之比为灵敏系数。对于光纤光栅应变计，灵敏系数的单位用皮米每微应变 ($\text{pm}/(\mu\text{m}/\text{m})$) 表示；对于金属粘贴式电阻应变计，灵敏系数的单位无量纲。

4 概述

粘贴式应变计主要由敏感层、基底、密封层、引出线等组成。常见的粘贴式应变计有金属粘贴式电阻应变计和光纤光栅应变计，应变计的输出变化分别基于敏感栅的电阻值变化（ $\Delta R/R_0$ ）和光栅反射中心波长的变化（ $\Delta\lambda$ ）。

金属粘贴式电阻应变计敏感层主要由金属箔蚀刻或金属丝绕制而成；基底一般由高分子材料或陶瓷材料组成，用于应力应变传递和绝缘；密封层与基底材料相同，主要对敏感层进行保护封装；引线材用裸线或绝缘金属导线。其工作原理是基于金属导体的应变效应，金属导体在外力作用下发生机械变形时，其长度、截面尺寸发生变化，电阻值随之变化，即金属导体的电阻随机械变化的变化而发生变化，用电阻相对变化表征机械变形产生的应变。

光纤光栅应变计敏感层采用在光纤中制作光栅形成；基底一般由高分子材料或金属组成，用于应力应变传递；密封层根据需要进行设置；引出线一般采用光纤进行连接。其工作原理是基于光纤光栅的反射中心波长的应变效应，光纤在外力作用下发生机械变形，光纤长度、截面尺寸发生变化，光纤光栅的反射中心波长随之变化，反射中心波长随机械变化的变化而发生变化，用光纤光栅反射中心波长的变化表征机械变形产生的应变。

5 计量特性

5.1 外观及附件

被校应变计应配有连接线缆及必要的附件，还应具有安装尺寸及安装要求、应用环境条件等信息的说明书或其他技术资料。在标准照明条件下进行外观检查，不应出现下列现象：

- a) 丝栅表面或焊接端上有明显褶皱等损伤痕迹；
- b) 基底上有气泡或裂纹；
- c) 基底缺角；
- d) 基底变形、翘曲大于 0.5mm；
- e) 裁剪后标记不完全，缺一个以上。

5.2 抽样方案

本规范校准结论仅对送检样件有效，对于抽样方案和样本大小不做规定要求。

5.3 技术指标

应变计的准确度分级及对应的技术指标见表 1。

表 1 准确度分级及技术指标一览表

级别	A	B	C
灵敏系数	*		
直线度（%FS）	±0.3	±0.5	±0.8
重复性（%FS）	0.3	0.5	0.8

机械滞后 (%FS)	0.3	0.5	0.8
蠕变 (%FS)	0.3	0.5	1.0
灵敏系数的温度系数 (%/100℃)	±1	±2	±3
热输出系数 (%FS/℃)	0.15	0.2	0.4
注：1、标“*”的项目可按出厂指标或用户要求来校准，并给出实际校准结果；			

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：(20±5)℃；

相对湿度：≤70%；

大气压强：(86~106) kPa；

供电电源：电压：(220±22) V，频率：(50±1) Hz

其他条件：装置及其周围环境应无明显影响校准结果的振动和冲击源，无强电场、强磁场、强声场的干扰。

6.2 校准用仪器设备

6.2.1 校准所用的仪器设备应经过计量技术机构检定或校准，满足使用要求，并在有效期内。校准用仪器设备见表 2。

表 2 校准用仪器设备

序号	仪器设备名称	用途及说明
1	静态应变标准装置	标准机械应变的发生装置，提供标准应变的加载
2	高低温试验箱	提供校准所需的高低温试验环境
3	指示仪表	用于对应变计信号进行测量、调理及显示

6.2.2 校准用设备计量特性：

6.2.2.1 静态应变标准装置

标准装置的测量不确定度应优于 0.15%。

6.2.2.2 高低温试验箱

高低温试验箱的温度调节范围应不小于应变计的温度试验范围。有效恒温区的温度偏差不应超过±2℃，温度波动度不应超过±1℃，温度均匀度不应大于 2℃。

6.2.2.3 指示仪表

应变计校准中使用的指示仪表（包括可向应变计提供激励电压的指示仪表）的相关技术指标，原则上应不超过被校应变计相应技术指标的三分之一。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 3。

表 3 校准项目

序号	项目
1	外观及附件
2	灵敏系数
3	机械滞后
4	蠕变
5	直线度
6	重复性
7	灵敏系数的温度系数
8	热输出系数

7.2 校准方法

7.2.1 外观及附件检查

目力观测，应符合 5.1 的要求。

在检查过程中，严禁用力拉扯应变计引出线，电阻应变计绝缘电阻、标定电阻值应符合规定的要求。

7.2.2 校准前准备

7.2.2.1 应变计安装

将被校的应变计按照规定的程序安装在试件上详细记录以下各项：

- a) 试件材料的种类和被测表面的清理步骤；
- b) 粘接剂的种类；
- c) 固化处理和稳定化处理过程；
- d) 应变计安装前后的电阻值；
- e) 用于热输出等技术指标测量的试件，必须标明并记录其材料的线膨胀系数。

7.2.2.2 导线连接

测量导线应选用电阻率和电阻温度系数都比较小的材料，并在规定的工作温度范围内保证电性能的温度和足够的绝缘电阻。必要时可采用屏蔽导线，以减少环境的电磁干扰。应保证连线处的接触电阻稳定并将导线妥善地固定。应变测量方法采用三线制连接。

7.2.3 灵敏系数

7.2.3.1 应变计应严格按照规定工艺进行粘贴，应变计轴线与标定梁表面的轴向应力方向平行。用于灵敏系数测定并已粘贴了应变计的试样，应在同一环境中放置不少于 12h。

7.2.3.2 按照正确的接线方式将应变计与指示仪表连接，通电预热，预热时间按说明书的规定，或预热至各部分稳定。

7.2.3.3 对应变计进行 3 次预加载，每次加到 110% 的额定应变值，然后退回到零值。每次施加应变前，对指示仪表进行复位或清零处理。

7.2.3.4 按照双向等幅应变循环方法，额定应变值取为 $1000\mu\text{m}/\text{m}$ ，对预加载后的应变计实施正式应变循环加载： $0, +1000\mu\text{m}/\text{m}, 0, -1000\mu\text{m}/\text{m}$ ，每一级应变加载完成后，保持一定时间再读取示值；应变保持时间可取 5s, 10s, 20s, 30s。额定应变可根据校准装置的应变量程范围和用户的实际使用要求确定。

7.2.3.5 连续进行 7.2.3.4 步骤至少 3 次。用+1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 和-1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 两个测量点之间直线的斜率来确定应变计灵敏系数。

对于电阻应变计，使用应变仪作为指示仪表，记录应变读数，则应变计的灵敏系数可按公式（1）计算：

$$K_d = 2.00 \times (\bar{\varepsilon}_i / \bar{\varepsilon}_j) \quad (1)$$

式中：

K_d ——电阻应变计灵敏系数，无量纲；

$\bar{\varepsilon}_i$ ——同一应变计受拉和受压各三次时，指示仪表读数与初始读数（或零点）之差的平均值， $\mu\text{m}/\text{m}$ ；

$\bar{\varepsilon}_j$ ——试样表面受拉和受压时轴向机械应变绝对值的平均值， $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

对于光纤光栅应变计，采用相应指示仪表记录反射中心波长的增量，则应变计的灵敏系数可按公式（2）计算：

$$K_g = \frac{\Delta \bar{\lambda}}{\bar{\varepsilon}_j} \quad (2)$$

式中：

K_g ——光纤光栅应变计灵敏系数， $\text{pm}/(\mu\text{m}/\text{m})$ ；

$\Delta \bar{\lambda}$ ——同一应变计受拉和受压各三次时，指示仪表读数与初始读数之差的平均值， pm 。

7.2.4 直线度及重复性

7.2.4.1 在应变计量程范围内选择不少于 5 个测量点（不包括零应变点），尽量均匀分布。

7.2.4.2 逐级加应变，直到额定应变，每一级应变加载完成后，保持一定时间再读取示值。应变保持时间可取 5s，10s，20s，30s。额定应变可根据校准装置的应变量程范围和用户的实际使用要求确定。

7.2.4.3 连续进行 7.2.4.2 步骤 3 次。对于选择的每个测量点，分别记录校准装置复现的机械应变值和指示仪表读数。按照公式（3）和公式（4）计算应变计的直线度和重复性标指。

直线度：

$$L = \frac{\Delta \theta_L}{\theta_\varepsilon} \times 100\% \quad (3)$$

重复性：

$$R = \frac{\Delta \theta_R}{\theta_\varepsilon} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

θ_ε ——应变计的额定输出测量值， $\mu\text{m}/\text{m}$ 或 pm ；

L ——直线度，%FS；

$\Delta \theta_L$ ——各测量点对应的读数与平均端点直线对应标称值偏差的最大值， $\mu\text{m}/\text{m}$ 或

pm;

R ——重复性, %FS;

$\Delta\theta_R$ ——进程重复校准时各级测量点对应读数的极差的最大值, $\mu\text{m}/\text{m}$ 或 pm。

7.2.5 机械滞后

7.2.5.1 测量仪器和操作步骤与 7.2.3 相同。加载方法: 0→额定应变值→0, 每次加载达额定应变值时停留时间不得超过 1min。

7.2.5.2 记录数据前预先加卸载三次。

7.2.5.3 正式加载前, 记录每个应变计的初始读数(或零点), 然后加卸载三次, 记录每个应变计每次卸载时的读数, 计算每个应变计相邻两次卸载时的应变读数之差, 取绝对值较大者 $\Delta\theta_Z$, 按公式(5)和公式(6)计算应变计的机械滞后。

电阻应变计的机械滞后:

$$Z_d = \frac{2.00}{\bar{K}} \frac{\Delta\theta_Z}{\theta_\varepsilon} \times 100\% \quad (5)$$

光纤光栅应变计的机械滞后:

$$Z_g = \frac{\Delta\theta_Z}{\theta_\varepsilon} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

Z_d ——电阻应变计的机械滞后, %FS;

Z_g ——光纤光栅应变计的机械滞后, %FS;

$\Delta\theta_Z$ ——相邻两次卸载时应变读数之差的绝对值较大者, $\mu\text{m}/\text{m}$ 或 pm;

\bar{K} ——电阻应变计在室温下的平均灵敏系数, 无量纲;

7.2.6 蠕变

7.2.6.1 测量仪器和操作步骤与 7.2.3 相同。加载时为了使标定梁保持恒定的机械应变, 可采用固定位移的加载方式, 加载后加载梁不得有振颤产生。试验前各被测应变计应保持 4h 以上未承受机械载荷, 测定蠕变时只允许加载一次。

7.2.6.2 将标定梁在 15s 内加载至额定应变值, 并保持恒定, 加载后 1min 内记录完被测应变计的第一次读数, 然后前 30min 每隔 5min 记录一次, 后 30min 每隔 10min 记录一次, 共进行 1h。

7.2.6.3 计算应变计各次读数与第一次读数之差, 取其中最大差值用 $\Delta\theta_\theta$ 表示。取绝对值较大者, 按公式(7)和公式(8)计算应变计的蠕变。

电阻应变计的蠕变:

$$\theta_d = \frac{2.00}{\bar{K}} \frac{\Delta\theta_\theta}{\theta_\varepsilon} \times 100\% \quad (7)$$

光纤光栅应变计的蠕变:

$$\theta_g = \frac{\Delta\theta_\theta}{\theta_\varepsilon} \times 100\% \quad (8)$$

式中：

θ_d ——电阻应变计的蠕变，%FS；

θ_g ——光纤光栅应变计的蠕变，%FS；

$\Delta\theta_\theta$ ——应变计各次读数与第一次读数之差的最大差值， $\mu\text{m}/\text{m}$ 或 pm ；

$\bar{\theta}_\varepsilon$ ——应变计各次读数的平均值， $\mu\text{m}/\text{m}$ 或 pm 。

7.2.7 灵敏系数的温度系数

7.2.7.1 按测试灵敏系数的操作步骤安装应变计，将安装有被校应变计的试样放置于高低温试验箱中，连接导线，调好指示仪表的量程和零位，通电预热，预热时间按说明书的规定，或预热至各部分稳定。

7.2.7.2 对应变计预加载 3 次，每次加到额定应变，然后退回到零值。每次加应变前，对指示仪表进行复位或清零处理。

7.2.7.3 通过高低温试验箱调节试验温度，每级温度应在 15min 内达到平衡。

7.2.7.4 温度平衡后，对应变计施加额定应变，待应变值达到后保持一定时间再读取示值。然后退回到零值，保持一定时间再读取示值。应变保持时间可取 5s, 10s, 20s, 30s。

7.2.7.5 连续加卸载 3 次。以室温作标准，按公式 (9) 计算工作温度范围内每 100℃ 灵敏系数的变化 d_{Kt} ：

$$d_{Kt} = \frac{100(K_m - K_0)}{K_0(t_m - t_0)} \times 100\% \quad (9)$$

式中：

d_{Kt} ——工作温度范围内每 100℃ 灵敏系数的变化，%/℃；

K_0 ——室温下应变计的平均灵敏系数，无量纲或 $\text{pm}/(\mu\text{m}/\text{m})$ ；

K_m ——极限工作温度的平均灵敏系数，无量纲或 $\text{pm}/(\mu\text{m}/\text{m})$ ；

t_0 ——室温，℃；

t_m ——极限工作温度，℃。

7.2.8 热输出系数

7.2.8.1 按测试灵敏系数的操作步骤安装应变计，将安装有被校应变计的试样放置于高低温试验箱中，连接导线，调好指示仪表的量程和零位，通电预热，预热时间按说明书的规定，或预热至各部分稳定。

7.2.8.2 对于常温应变计的热输出测试，以室温 20℃~23℃ 为零点，进行指示仪表调零，逐级升温，至高温极限温度后，直接降到低温极限温度，再逐级升温，直至起始零点。

7.2.8.3 在 0~100℃ 范围内，大以 20℃ 温度间隔（最大不超过 30℃ 温度间隔）测试为宜，超过 100℃ 或低于 0℃ 时，大约以 25℃ 温度间隔（最大不超过 40℃ 温度间隔）为宜，进行升温或降温，测试点一般不少于 5 点，待最终达到充分热平衡后，方可进行测试。

7.2.8.4 在每一温度测试点，测试并记录被校应变计的指示应变 θ_{it} ，按公式 (10) 和公式 (11) 计算被校应变计的平均热输出系数 C_t ：

电阻应变计的热输出系数：

$$C_{dt} = \frac{2.00}{\bar{K}} g \frac{\theta_{t_{\max}} - \theta_{t_{\min}}}{\theta_{\varepsilon}(t_{\max} - t_{\min})} \quad (10)$$

光纤光栅应变计的热输出系数：

$$C_{gt} = \frac{\theta_{t_{\max}} - \theta_{t_{\min}}}{\theta_{\varepsilon}(t_{\max} - t_{\min})} \quad (11)$$

式中：

C_{dt} ——电阻应变计的热输出系数，%FS/°C；

C_{gt} ——光纤光栅应变计的热输出系数，%FS/°C；

$\theta_{t_{\max}}$ ——在 $(t_{\min} \sim t_{\max})$ 温度范围内，被测应变计热输出的最大值， $\mu\text{m/m}$ 或 pm ；

$\theta_{t_{\min}}$ ——在 $(t_{\min} \sim t_{\max})$ 温度范围内，被测应变计热输出的最小值， $\mu\text{m/m}$ 或 pm ；

t_{\max} ——应变计最高极限工作温度，°C；

t_{\min} ——应变计最低极限工作温度，°C。

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声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

推荐的校准结果原始记录的内容格式见附录 A，校准证书的内容格式见附录 B。

9 复校时间间隔

粘贴式应变计的复校时间间隔可根据实际使用情况，由用户自主决定，建议复校时间为 1 年。（仅对可重复使用的粘贴式应变计）。

附录 A

灵敏系数校准结果的不确定度评估

粘贴式应变计的灵敏系数是静态校准的主要校准结果，需对其相应的测量不确定度进行评价。电阻应变计和光纤光栅应变计的灵敏系数的校准方法和测量结果不确定度的评价方法都是相似的，以下针对电阻应变计灵敏系数的测量不确定度评价过程进行举例说明。

A.1 测量模型

针对电阻应变计，使用应变仪记录应变读数，则应变计的灵敏系数按公式 (A.1) 计算。

$$K_d = 2.00 \times (\bar{\varepsilon}_i / \bar{\varepsilon}_j) \quad (\text{A.1})$$

式中：

K_d ——电阻应变计灵敏系数，无量纲；

$\bar{\varepsilon}_i$ ——同一应变计受拉和受压各三次时，指示仪表读数与初始读数（或零点）之差的平均值， $\mu\text{m}/\text{m}$ ；

$\bar{\varepsilon}_j$ ——试样表面受拉和受压时轴向机械应变绝对值的平均值， $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

由上式可知，灵敏系数的校准不确定度由应变计的示值读数、试件的机械应变两部分分量引起。因此，用于相对不确定度评定的数学模型如下：

$$u_{c,rel}(K_d) = \sqrt{c_1^2(\bar{\varepsilon}_i)u_r^2(\bar{\varepsilon}_i) + c_2^2(\bar{\varepsilon}_j)u_r^2(\bar{\varepsilon}_j)} \quad (\text{A.2})$$

式中灵敏系数为： $c_1=c_2=2$

A.2 不确定度来源

2.1 静态应变标准装置施加的机械应变引入的相对标准不确定度 $u_r(\bar{\varepsilon}_j)$

根据静态应变标准装置的应变值测量不确定度不超过 U_{1r} ， $k=2$ ，则引入的相对标准不确定度 $u_r(\bar{\varepsilon}_j)$ 按照下式计算：

$$u_r(\bar{\varepsilon}_j) = \frac{U_{1r}}{2} \quad (\text{A.3})$$

2.2 应变计的示值读数引入的相对标准不确定度 $u_r(\bar{\varepsilon}_i)$

应变计的示值读数引入的不确定度分量来源包括：

- a) 应变计的重复性引入的测量不确定度分量 u_1 ；
- b) 应变计的直线度引入的测量不确定度分量 u_2 ；
- c) 应变计的机械滞后引入的测量不确定度分量 u_3 ；
- d) 应变计配套指示仪表引入的不确定度分量 u_4 ；

2.2.1 应变计的重复性引入的相对标准不确定度 u_{1rel}

$$u_{1rel} = \frac{\Delta\theta_R}{d_{n1} \times \sqrt{n_1} \times \theta_\varepsilon} \quad (\text{A. 4})$$

式中:

$\Delta\theta_R$ ——应变计在额定负荷下示值多次校准数据的极差, $\mu\text{m}/\text{m}$;

d_{n1} ——极差系数, 测量次数为 3 次时, 则取 $d_{n1} = 1.69$;

n_1 ——测量次数;

θ_ε ——力传感器的额定输出值, $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

该不确定度分量用 A 类方法进行评定。使用极差法进行计算, 当测量次数为 3 次时, 则取 $d_{n1} = 1.69$ 。

2.2.2 应变计的直线度引入的相对标准不确定度 u_{2rel}

由测量结果得到应变计的直线度为 L , 服从均匀分布, 其标准测量不确定度为:

$$u_{2rel} = \frac{L}{\sqrt{3}} \quad (\text{A. 5})$$

2.2.3 应变计的机械滞后引入的相对测量不确定度 u_{3rel}

由测量结果得到应变计的机械滞后为 Z_d , 服从均匀分布, 其标准测量不确定度为:

$$u_{3rel} = \frac{Z_d}{\sqrt{3}} \quad (\text{A. 6})$$

2.2.4 应变计配套指示仪表引入的相对测量不确定度 u_{4rel}

根据应变计配套指示仪表证书, 其测量不确定度为 U_{2r} , 则引入的相对标准不确定度为:

$$u_{4rel} = \frac{U_{2r}}{2} \quad (\text{A. 7})$$

$$u_r(\bar{\varepsilon}_i) = \sqrt{u_{1rel}^2 + u_{2rel}^2 + u_{3rel}^2 + u_{4rel}^2} \quad (\text{A. 8})$$

A. 3 合成不确定度

灵敏系数校准的相对合成标准不确定度, 按照下式计算:

$$u_{c,rel}(K_d) = \sqrt{2^2 \times u_r^2(\bar{\varepsilon}_i) + 2^2 \times u_r^2(\bar{\varepsilon}_j)} \quad (\text{A. 9})$$

A. 4 扩展不确定度

灵敏系数校准的扩展标准不确定度, 按照下式计算:

$$U_r = 2 \times u_{c,rel}(K_d) \quad (\text{A. 10})$$

A. 5 扩展不确定度计算实例

灵敏系数扩展不确定度计算实例如表 A-1 所示:

表 A-1 不确定度实例计算表

序号	标准不确定	不确定度来源	标准不确定
----	-------	--------	-------

	度分量 $u(x_i)$		度分量%
1	$u_r(\bar{\varepsilon}_J)$	静态应变标准装置的不确定度	0.075
2	u_{1rel}	应变计的重复性引入的误差	0.018
3	u_{2rel}	应变计的直线度引入的误差	0.064
4	u_{3rel}	应变计的机械滞后引入的误差	0.116
5	u_{4rel}	应变计配套指示仪表的不确定度	0.1
$u_{crel}(K_d)$			0.37
$U_r (k=2)$			0.74

附录 B

粘贴式应变计校准原始记录

第 页共 页

委托单位 _____ 地址 _____
 计量器具名称 _____ 型号规格 _____
 出厂编号 _____ 制造厂 _____
 准确度 _____ 校准前状态 _____ 校准后状态 _____
 校准地点 _____ 温度 _____ °C 相对湿度 _____ %
 校准日期 _____ 有效期限 _____ 证书编号 _____

一、校准依据文件

二、校准用的计量标准设备

名称	设备编号	规格型号/ 测量范围	准确度等级/最大允 许误差/不确定度	证书编号	有效日期

三、校准数据

1 校准前检查：

序号	项目	记录
1	静置 12 小时以上	起始时间： 结束时间：
2	被测表面清理	
3	粘接剂的种类	
4	安装前	初始电阻： 初始中心波长：
5	安装后	初始电阻： 初始中心波长：
6	外观及附件检查	

2 静态应变校准

2.1 灵敏系数、直线度、重复性、机械滞后

加载应变 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	测量仪器读数 ($\mu\text{m}/\text{m}$ 或 pm)					灵敏系 数	重复性 (%)	直线度 (%)
	1	2	3	平均值	差值			

平均灵敏系数: _____ 直线度: _____ 重复性: _____ 机械滞后: _____ 灵敏系数测量不确定度: _____								

2.2 蠕变、灵敏系数的温度系数、热输出系数

加载应变 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	读数时间间隔	工作温度	测量仪器读数 ($\mu\text{m}/\text{m}$ 或 pm)				
			1	2	3	平均值	差值
蠕变: _____ 灵敏系数的温度系数: _____ 热输出系数: _____							

校准人员: _____ 核验人员: _____

附录 C

粘贴式应变计校准证书内页格式

序号	校准项目	校准结果
1	灵敏系数	
2	灵敏系数校准结果的不确定度 ($k=2$)	
3	直线度	
4	重复性	
5	机械滞后	
6	蠕变	
7	灵敏系数的温度系数	
8	热输出系数	
备注		