

中华人民共和国工业和信息化部
JJF
电子计量技术规范

JJF(电子)XXXX-20XX

飞机结构静态强度
测试系统校准规范

Calibration Specification for Aircraft Structure Static Strength Testing System

(报批稿)

2026-06-00发布

0000-00-00实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

飞机结构静态强度测试系统校准规范

Calibration Specification for Aircraft Structure
Static Strength Testing System

JJF (电子) XXXX—20XX

归口单位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：中国飞机强度研究所

中国电子科技集团公司第二十研究所

本规范委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

- 尧建平（中国飞机强度研究所）
- 刘 洋（中国电子科技集团公司第二十研究所）
- 郑亚田（中国飞机强度研究所）
- 赵 昭（中国电子技术标准化研究院）
- 汤宇佳（中国飞机强度研究所）

参加起草人：

- 张佳乐（中国飞机强度研究所）
- 陆 强（中国电子科技集团公司第二十研究所）
- 黄晓龙（中国飞机强度研究所）

目录

引 言II

1 范围 1

2 引用文件 1

3 术语 1

4 概述 1

5 计量特性 2

6 校准条件 2

6.1 环境条件2

6.2 校准通道的选取原则2

6.3 测量标准及其他设备2

7 校准项目和校准方法 3

7.1 外观及工作正常性检查3

7.2 采集速率3

7.3 应变量5

7.4 位移量7

7.5 通道间串扰8

7.6 零点漂移9

8 校准结果表达 9

9 复校时间间隔 10

附录 A11

附录 B15

附录 C18

引 言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

飞机结构静态强度测试系统校准规范

1 范围

本规范适用于飞机结构静态强度测试系统中应变量、位移量静态计量特性的现场校准。其他类似测试系统静态性能校准也可参照进行。

2 引用文件

无

3 术语

无

4 概述

飞机结构静态强度测试系统主要由应变传感器、位移传感器和多通道数据采集系统组成。用户可以根据需要灵活配置系统的规模，一般可以配置组成多个中小型测试系统，也可以形成上万通道的大型测试系统。

在飞机结构强度试验中，飞机结构静态强度测试系统主要用于试验件在受载情况下对其结构变形量的测量，即应变或位移等物理量的测量。传感器与数据采集系统组成飞机结构静态强度测试系统，传感器测量或感知试验件变形，输出模拟电信号，通过数据采集系统的信号调理和多路装换开关后，再经过A/D转化为数字信号，最终通过计算机采集、记录、显示、处理并存储，完成相关的测量过程。其工作原理如图1所示。

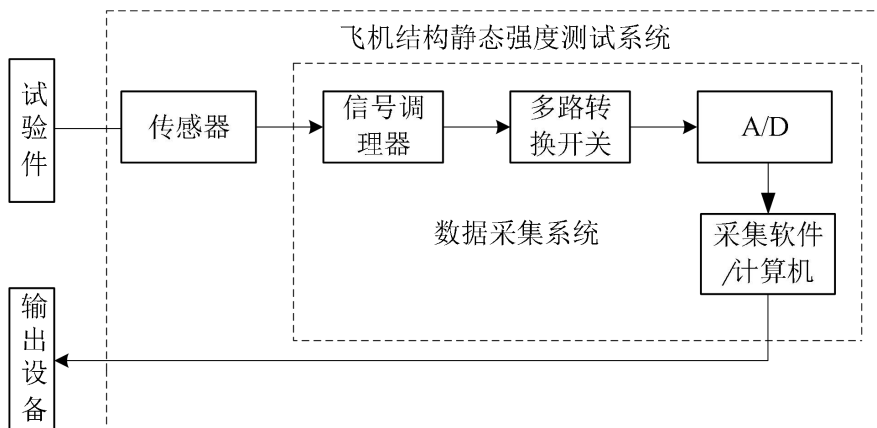


图1 飞机结构静态强度测试系统工作原理图

5 计量特性

5.1 通道采集速率

范围：(10~200) k Sa/s, 最大允许误差：±0.05%。

5.2 应变量

应变量测量范围（数据采集系统）：±(0.1~20000) $\mu\epsilon$, 最大允许误差：±1.0% , 线性度：≤0.5%。

应变量测量范围（应变传感器+数据采集系统）：±(0.1~4000) $\mu\epsilon$, 最大允许误差：±10.0%，线性度：≤0.5%。

5.3 位移量

位移量测量范围：(0~1000) mm, 最大允许误差：±1.0%，线性度：≤0.5%。

5.4 通道间串扰

隔离度：≥50 dB。

5.5 系统零漂误差

系统零漂误差：≤0.3% FS。

注：以上技术指标仅供参考，不作为合格性判断依据。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：20°C±10°C；

6.1.2 相对湿度：20%~80%；

6.1.3 电源要求：(220±22)V、(50±1)Hz；

6.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 标准应变量校准装置

应变量范围：±(0.1~4000) $\mu\epsilon$, 最大允许误差：±1.0%；

6.2.2 标准模拟应变量校准器

应变量范围：±(0.1~100000) $\mu\epsilon$, 最大允许误差：±0.05%；

6.2.3 标准位移量校准装置

应变量范围： $\pm (0\sim 1000)$ mm，最大允许误差： $\pm 0.1\%$ ；

6.2.4 多功能校准源

交流电压范围： $(0\sim 1000)$ V，最大允许误差： $\pm 0.005\%$ ；

6.2.5 标准精密电阻

电阻值：120 Ω ，350 Ω ，最大允许误差： $\pm 0.05\%$ 。

7 校准项目和校准方法

校准项目见表 2。

表 2 校准项目一览表

序号	校准项目	校准方法条款
1	外观及工作正常性检查	7.1
2	采集速率	7.2
3	应变量	7.3
4	位移量	7.4
5	通道间串扰	7.5
6	零点漂移	7.6

7.1 外观及工作正常性检查

7.1.1 检查测试系统铭牌或外壳，应标明系统名称、生产厂家、型号、编号和出厂日期，系统送校时应附有使用说明书及全部配套附件。

7.1.2 系统外观应完好，开关、按键、旋钮等可正常操作，标志清晰明确，插件不应有松动或损坏。

7.1.3 按要求连接所有设备，并对接入设备和系统通电预热半小时，系统应正常工作。将检查结果记录于附录A表A.1中。

7.2 采集速率

7.2.1 采集速率校准接线方式如图 2 所示，选择一个测量通道接到多功能校准源上。

7.2.2 根据校准要求，设置系统为单通道最高采集速率状态，选择通道采集数据个数 n (≥ 1000)，设置系统通道量程。

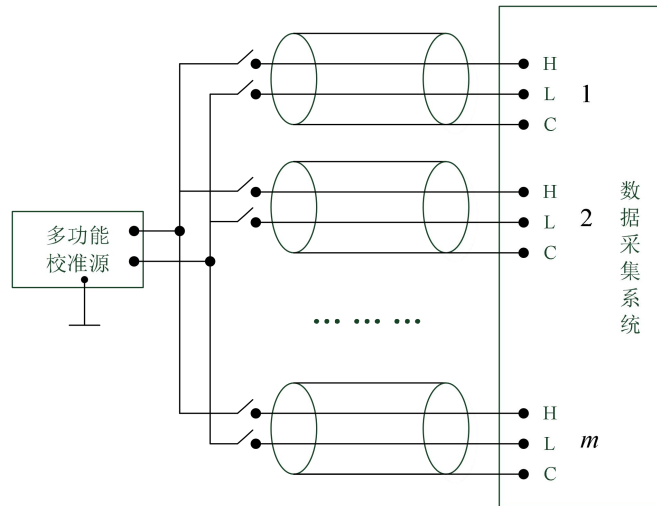


图2 采集速率接线图

7.2.3 按公式(1)计算标准信号频率 f 的输入范围，在频率范围内选择合适的频率值，按要求设置多功能校准源信号峰峰值，一般为量程的50%~100%（通常量程为10V）；

$$(\nu_{id} / 3) \geq f \geq (2\nu_{id} / n) \quad (1)$$

式中：

ν_{id} ——单通道最高采集速率的标称值，Sa/s；

n ——被测系统每通道采集数据个数。

7.2.4 加载信号，启动采集，记录采集数据并按最小二乘法找出最佳拟合正弦信号：

$$\begin{aligned} a(i) &= E \times \sin(\omega \times i + \theta) + D \\ \omega &= 2\pi f_s \\ \omega' &= \omega \times \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

式中：

$a(i)$ ——拟合信号的瞬时值，V；

E ——拟合正弦信号的幅度，V；

θ ——拟合正弦信号的初相位，rad；

D ——拟合信号的直流分量值(直流偏移实测值)，V；

ω ——拟合正弦信号的离散角频率，rad；

ω' ——拟合正弦信号的离散角频率，rad；

f_s ——拟合正弦信号的频率，Hz；

Δt ——采样时间间隔，s。

7.2.5 按公式 (3) 计算出单通道最高采集速率 v_d , 将计算结果记录于附录 A 表 A.2 中。

$$v_d = 2\pi f_l / \omega' \quad (3)$$

式中:

f_l ——输入信号频率, Hz;

7.2.6 对于具有不同最高采集速率的测试系统, 应分别进行校准, 并记录表格。

7.3 应变量

7.3.1 应变量的校准方式包括两种, 分为“应变传感器+数据采集系统”和“数据采集系统”应变量校准, 根据选择的校准方式按照图 3 或图 4 连接设备。

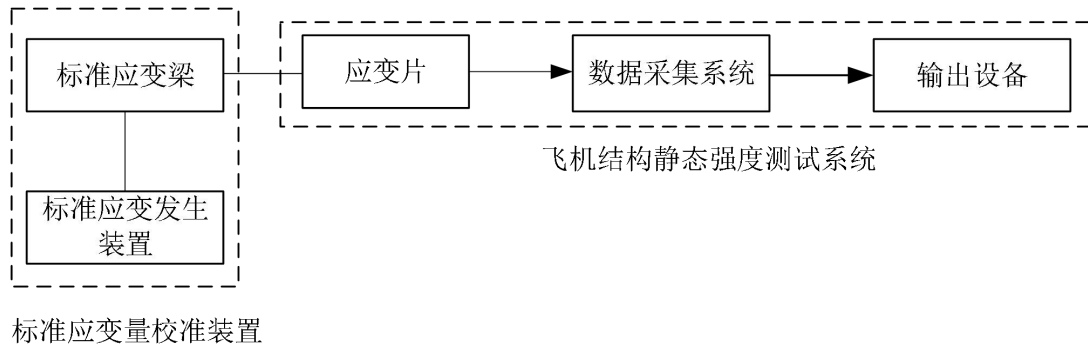


图 3 应变量（应变传感器+数据采集系统）校准连接图

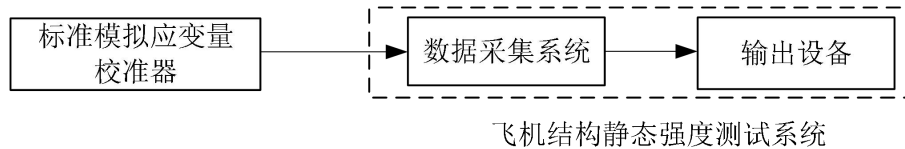


图 4 应变量（数据采集系统）校准连接图

7.3.2 按照校准要求, 设置好通道参数 (桥路方式、量程、灵敏度系数)。

7.3.3 给系统输入标准信号 E_i ($i=1, \dots, 11$), 其选取原则为: 按公式 (4) ~ (7) 在测量范围 (E_L 、 E_H) 内选择 11 个标准信号 E_i ($i=1, 2, \dots, 11$), E_i 在量程内需均匀分布, 且宜取整数。如量程为 $\pm 1000\mu\epsilon$ 时, 依次调整标准应变至 $\pm 0\mu\epsilon$ 、 $\pm 200\mu\epsilon$ 、 $\pm 400\mu\epsilon$ 、 $\pm 600\mu\epsilon$ 、 $\pm 800\mu\epsilon$ 、 $\pm 975\mu\epsilon$ 。手动采集, 每个校准点分别采集 4 次输出值 x_{ij} ($j=1, \dots, 4$)。将采集值记录在附录 A 表 A.3 中。

$$E_1 = E_L + E_r \times 1.25\% \quad (4)$$

$$E_i = E_L + E_r \times (i-1) \times 10\% \quad (i=2, 3, \dots, 10) \quad (5)$$

$$E_{11} = E_L + E_r \times 98.75\% \quad (6)$$

$$E_r = E_H - E_L \quad (7)$$

式中：

E_L ——通道测量范围下限；

E_H ——通道测量范围上限；

E_r ——通道的量程。

7.3.4 更换通道，重复执行 7.3.2~7.3.3，直到所有通道校准完毕。

7.3.5 按公式 (8) ~ (12)，计算出系统通道的线性度 L 。

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, 11; j=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

$$k = \frac{\bar{x}_{11} - \bar{x}_1}{E_{11} - E_1} \quad (9)$$

$$b = \frac{E_{11} \cdot \bar{x}_1 - E_1 \cdot \bar{x}_{11}}{E_{11} - E_1} \quad (10)$$

$$\Delta \bar{x}_i = \bar{x}_i - (k \cdot E_i + b) \quad (11)$$

$$L = \frac{\max(|\Delta \bar{x}_i|, i=2, \dots, 10)}{E_r} \times 100\% \quad (12)$$

式中：

x_{ij} ——第 i 个信号点 E_i 的第 j 个测量数据($i=1, \dots, 11$; $j=1, \dots, 4$);

n ——每一通道在第 i 个信号点 E_i 上的采集数据个数($n=4$);

k ——端基直线的斜率；

b ——端基直线的截矩；

$\bar{x}_i$ ——第 i 个信号点 E_i 上测量 n 次的平均值

$\Delta \bar{x}_i$ ——第 i 个信号点 E_i 上测量 n 次的平均值与端基直线回归值的偏差

7.3.6 按公式 (13) 计算出 E 值处的测量误差 A ，从计算出的 11 个 A 值中选取最大值作为通道测量误差的校准结果，将结果记录于附录 A 表 A.3 中。

$$A = \pm \frac{|\bar{x} - E| + 2\sigma}{E_r} \times 100\% \quad (13)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (14)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (15)$$

式中：

x_i ——系统采集数据值

$\bar{x}$ ——采集数据平均值

n ——每个校准点采集数个数

E ——系统输入标准信号的幅度

E_r ——通道的量程

σ ——采集数据的标准差

7.4 位移量

7.4.1 按图 5 所示连接设备，将通道位移传感器安装在标准位移量校准装置上。

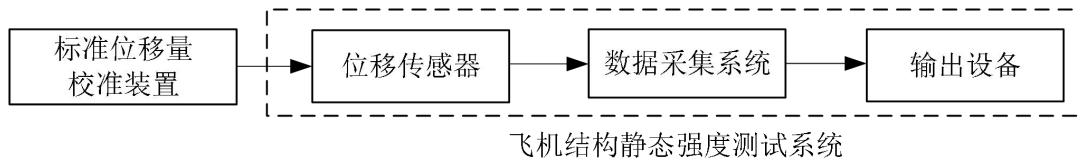


图 5 位移量校准连接图

7.4.2 按照校准要求，设置好通道参数（采集速率、采集数据个数及通道量程）。

7.4.3 调节好校准装置和位移传感器零位，校准装置数显清零，启动系统采集，记录采集数据，并逐级加载，逐级采集。信号点的选取原则为：在有效量程范围选择不少于 6 个校准点（含零点），需均匀分布，且取整数。如量程为 1000mm 时，依次调整标准位移至 0 mm、200 mm、400 mm、600 mm、800 mm、1000 mm。

7.4.4 重复步骤 7.4.3，每个通道进行三次正行程校准。其平均值作为位移实测值，并记录在附录 A 表 A.4 中。

7.4.5 更换通道，重复执行 7.4.2~7.4.4，直到所有通道校准完毕。

7.4.6 按公式（8）~（12），计算出系统通道的线性度 L ；按公式（13）计算出 E 值处

的测量误差 A 。从计算出的 L 值和 A 值中选取最大值作为通道线性度和测量误差的校准结果，将结果记录于附录 A 表 A.4 中。

7.5 通道间串扰

7.5.1 按图6所示连接装置，选择采集顺序上连续的2个以上通道 ω , $\omega+1$, $\dots$, $\omega+k$, 作为测量通道。通道 ω 经过传感器连接到标准应变变量校准装置上, $\omega+1$, $\dots$, $\omega+k$, 等通道接入电阻 R_0 , R_0 一般取 $1k\Omega$, 有特殊规定的系统按规定执行。

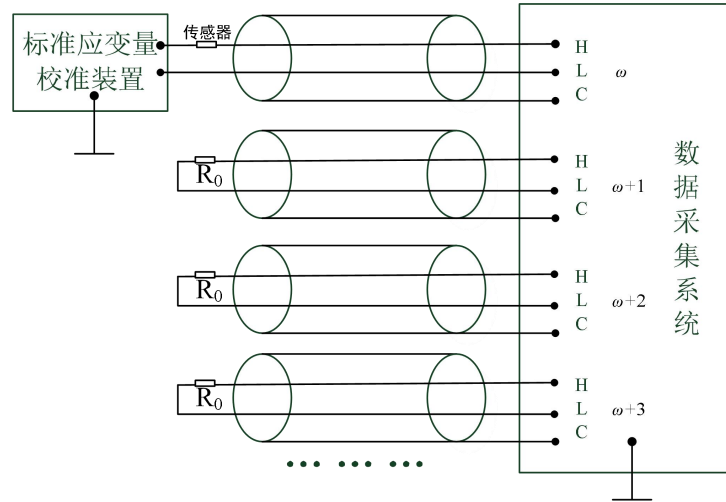


图6 校准通道间串扰的接线图

7.5.2 通道 ω 选取最大量程，通道 $\omega+1$, $\dots$, $\omega+k$, 等均选最小量程。

7.5.3 按照校准要求，设置好通道参数（桥路方式、量程、灵敏度系数），设置系统为最高采集速率状态。

7.5.4 关闭标准应变变量校准装置输出（ $E=0$ ），启动采集，得到通道 $j(j=\omega+1, \dots, \omega+k)$ 的采集数据 $X_{ji0}(i=1, \dots, n)$, $n(\geq 100)$ 。按下式计算出通道 j 的平均零点：

$$\bar{x}_{j0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_{ji0} \quad (j = \omega+1, \dots, \omega+k) \quad (16)$$

7.5.5 调节标准应变变量校准装置输出，使输出 E 为通道 ω 的测量范围上限或下线（ $E=E_H/E_L$ ）。启动采集，得到通道 $j(j=\omega+1, \dots, \omega+k)$ 的采集数据 $x_{jim}(i=1, \dots, n)$, $n(\geq 100)$ 。按下式计算出通道 j 对通道 ω 的串扰抑制比：

$$SCRR_j = 20 \times \lg \left| \frac{E}{x_{jm} - x_{j0}} \right| \quad (j = \omega+1, \dots, \omega+k) \quad (17)$$

$$\bar{x}_{jm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_{jim} \quad (j = \omega+1, \dots, \omega+k) \quad (18)$$

7.5.6 系统的通道间串扰抑制比由 $SCRR_{\omega+1}$ 给出。

7.6 零点漂移

7.6.1 应变测量

7.6.1.1 根据桥路要求将标准精密电阻 (120Ω 或 350Ω) 接入被校通道, 系统清零, 启动采集并记录测量数据, 在 4 小时内每半小时采集数据, 共采集 8 次($Y_i, i=1\dots$), 并记录测量结果在附录 A 表 A.6 中。

7.6.1.2 计算每个通道后续测量值与首次测量值之差, 取绝对值的最大值为最大零漂误差, 按照公式 (19), 计算每个通道的最大零漂误差。

$$\text{通道零漂误差} = \frac{|\text{最大零漂误差}|}{\text{测量范围的上限}} \times 100\% \quad (19)$$

7.6.1.3 取所有通道最大零漂误差的最大值作为系统应变零漂误差。

7.6.2 位移测量

7.6.2.1 按照校准要求, 选取合格有效位移传感器接入校准通道, 每个位移传感器给定初始位移并固定保持位移不变化, 系统清零后启动采集, 30 分钟采集 1 次, 共 4 个小时 8 次, 记录测量数据 $X_i(i=1,\dots,n)$ 在附录 A 表 A.7 中。

7.6.2.2 重复步骤 7.6.1.2~7.6.1.3 得到系统位移零漂误差。

8 校准结果表达

校准后, 出具校准证书。校准证书应至少包含以下信息:

- 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) 证书或报告的唯一性标识 (如编号), 每页及总页数的标识;
- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校准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) 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

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定, 建议不超过 1 年。

附录 A

原始记录格式

A.1 外观及工作正常性检查

表 A.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	
工作正常性检查	

A.2 采集速率

表 A.2 采集速率校准记录表

通道号:

量程 (V)	数据个数 ($n \geq 1000$)	通道最高速率 (Sa/s)	信号幅度 (V)	信号频率 (Hz)	速率测值 (Sa/s)	速率 误差	测量不确定度 ($k=2$)

A.3 应变变量

表 A.3 测量误差、线性度校准记录表

通道号: 标准器: 量程:

标准值 ($\mu\epsilon$)	测量值 $X_i(\mu\epsilon)$				平均值 $\bar{X}_i(\mu\epsilon)$	回归差 $\Delta X_i(\mu\epsilon)$	线性度 (%)	测量误差 (%)	测量不确定度 ($k=2$)
	X_{i1}	X_{i2}	X_{i3}	X_{i4}					

线性度 = % 测量误差=± %									

A.4 位移量

表 A.4 位移量测量误差、线性度校准记录表

通道号: 1 量程:

标准值 (mm)	测量值(mm)			平均值 X_i (mm)	回归差 ΔX_i (mm)	线性度 (%)	测量误差 A(%)	测量不确定度 ($k=2$)
	1	2	3					
线性度 = % 测量误差=± %								

A.5 串扰抑制比

表 A.5 通道间串扰校准记录表

通道号	数据个数 ($n \geq 100$)	平均值 $X_i/\mu\epsilon$		通道 j 对通道 ω 的 串扰	系统通道间串扰/dB	测量不确定度 ($k=2$)
		零点	上限或下限			
ω						
$j=\omega+1$						
$j=\omega+2$						

A.6 零点漂移（应变）

表 A. 6 应变量零点时间漂移校准记录表

时间/h	零漂数据平均值 $X_i/\mu\epsilon$				测量不确定度 ($k=2$)
	1ch	2ch	3ch	4ch	
0:00					
0:30					
1:00					
1:30					
2:00					
2:30					
3:00					
3:30					
4:00					
通道最大零漂 误差%					
系统零漂误差= %					

A.7 零点漂移（位移）

表 A. 7 位移量零点时间漂移校准记录表

时间/h	零漂数据平均值 X_i/mm				测量不确定度 ($k=2$)
	1ch	2ch	3ch	4ch	
0:00					
0:30					
1:00					
1:30					
2:00					
2:30					
3:00					

3:30					
4:00					
通道最大零漂 误差%					
系统零漂误差=	%				

附录 B

校准证书内页格式

B.1 外观及工作正常性检查

表 B.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	
工作正常性检查	

B.2 采集速率

表 B.2 采集速率校准记录表

通道号:

量程 (V)	通道最高速率 (Sa/s)	信号幅度 (V)	信号频率 (Hz)	速率测值 (Sa/s)	速率 误差	测量不确定度 ($k=2$)

B.3 应变量

表 B.3 测量误差、线性度校准记录表

通道号:

标准器:

量程:

标准值 ($\mu\epsilon$)	实测值 $X_i(\mu\epsilon)$	回归差 $\Delta X_i(\mu\epsilon)$	线性度 (%)	测量误差 (%)	测量不确定度 ($k=2$)

线性度 = % 测量误差=± %					

B.4 位移量

表 B.4 位移量测量误差、线性度校准记录表

通道号: 1 量程:

标准值 (mm)	实测值 $X_i(\text{mm})$	回归差 $\Delta X_i(\text{mm})$	线性度 (%)	测量误差 $A(\%)$	测量不确定度 ($k=2$)
线性度 = % 测量误差=± %					

B.5 串扰抑制比

表 B.5 通道间串扰校准记录表

通道号	平均值 $X_i/\mu\text{e}$		通道 j 对通道 ω 的串扰	系统通道间串扰 /dB	测量不确定度 ($k=2$)
	零点	上限或下限			
ω					
$j=\omega+1$					
$j=\omega+2$					

B.6 应变零点漂移

表 B. 6 应变量零点时间漂移校准记录表

	1ch	2ch	3ch	4ch	测量不确定度 ($k=2$)
通道最大零漂 误差%					
系统零漂误差=	%				

B.7 位移零点漂移

表 B. 7 位移量零点时间漂移校准记录表

	1ch	2ch	3ch	4ch	测量不确定度 ($k=2$)
通道最大零漂 误差%					
系统零漂误差=	%				

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 采集速率不确定评定

以多功能校准源为标准装置，VTI 数据采集系统为被校系统，评定示例如下：

C.1.1 测量模型

用直接测量法。各种影响测量不确定度的其他因数可忽略不计，则数学模型式为 $y = 2\pi f_l / \omega'$ 。

f_l 为输入信号频率， ω' 为拟合正弦信号的离散角频率

$$f_l \text{ 的灵敏度系数 } c_f = \frac{\partial y}{\partial f_l} = \frac{2\pi}{\omega'}$$

$$\omega' \text{ 的灵敏度系数: } c_{\omega'} = \frac{\partial y}{\partial \omega'} = -\frac{2\pi x}{(\omega')^2} = -\frac{y^2}{2\pi f_l}$$

C.1.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：

- a) 测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- b) 多功能校准源频率 f_l 的输出不准引入的不确定度分量 u_2 。

输入信号幅值为 6V，信号频率为 300Hz，通道最高采集速率为 20000 Sa/s。

C.1.3 标准不确定度分量

C.1.3.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

按 A 类评定方法。对同一信号进行 10 次独立重复拟合，得到 ω' 为：

0.942	0.942	0.943	0.942	0.940
0.941	0.942	0.941	0.943	0.944

$$\text{则: } \overline{\omega'} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega'_i}{n} = 0.942 \text{ rad/s}$$

$$\text{测量重复性: } s(\omega') = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega'_i - \overline{\omega'})^2}{(n-1)}} = 0.000548 \text{ rad/s}$$

在实际测量中, 取 1500 次的测量平均值作为测量结果, 则重复性引入的不确定度分量: $u_3 = s(x) / \sqrt{1500} / 6.2832 = 2.2 \times 10^{-6} \text{Hz}$ 。

C.1.3.2 多功能校准源频率 f_i 的输出不准引入的不确定度分量 u_2

按 B 类评定方法。多功能校准源输出频率的最大允许误差为 $\pm 0.005\%$, 取均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

则引入的标准不确定度分量为:

$$u_2 = 300 \times 0.005\% / \sqrt{3} = 0.009 \text{Hz}$$

C.1.4 合成标准不确定度

测量结果的标准不确定度分量见表 C.1。

表 C.1 标准不确定度分量一览表

输入量	标准不确定度来源	概率分布	标准不确定度分量	灵敏度系数	$c \times u$
u_1	测量重复性引入	正态分布	$2.2 \times 10^{-6} \text{Hz}$	-20000	0.045Hz
u_2	多功能校准源频率 f 的输出不准引入	均匀分布	0.017Hz	5.92	0.009Hz

以上各标准不确定度分量独立不相关, 则合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.046 \text{Hz}$$

C.1.5 扩展不确定度的计算

取 $k=2$, 则扩展不确定度

$$U = 2 \times u_c = 0.09 \text{Hz}$$

相对扩展不确定度 $U_{rel} = U/300 = 3 \times 10^{-4}$

C.2 应变变量 (应变传感器+数据采集系统) 测量不确定评定

以标准应变变量校准装置 (应变传感器+数据采集系统) 为标准装置, VTI 数据采集系统为被校系统。在 $2000 \mu\epsilon$ 评定示例如下:

C.2.1 测量模型

用直接测量法。各种影响测量不确定度的其他因数可忽略不计, 则数学模型式为 $y = x$ 。

C.2.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：

- a) 测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- b) 数据采集系统分辨率引入的不确定度分量 u_2 ；
- c) 标准应变发生装置引入的不确定度分量 u_3 ；
- d) 标准应变梁引入的不确定度分量 u_4 ；
- e) 应变片引入的不确定度分量 u_5 ；
- f) 应变片粘贴引入的不确定度分量 u_6 ；

C.2.3 标准不确定度的评定

C.2.3.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

按 A 类评定方法。在相同条件下，重复 10 次测量应变值，测得数据如下：

2005	2003	2005	2002	2004
2004	2004	2003	2004	2004

$$\text{则： } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 2003.8 \mu\epsilon$$

$$\text{测量重复性： } s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.87 \mu\epsilon$$

在实际测量中，取 4 次的测量平均值作为测量结果，则重复性引入的不确定度分量： $u_1 = s(x) / \sqrt{4} = 0.44 \mu\epsilon$ 。

C.2.3.2 数据采集系统分辨率引入的不确定度分量 u_2

按 B 类评定方法。数据采集系统在应变测量时有效分辨力为 $1 \mu\epsilon$ ，取均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则其分辨率引入的不确定度分量为：

$$u_2 = 1 / 2\sqrt{3} = 0.29 \mu\epsilon$$

C.2.3.3 标准应变发生装置引入的不确定度分量 u_3

按 B 类评定方法。标准应变发生装置（应变传感器+数据采集系统）应变输出的最大允许误差为 $\pm 0.03\%$ ，取均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

输出值为 $2000 \mu\epsilon$ ，则引入的不确定度分量：

$$u_3 = 2000 \mu\epsilon \times 0.03\% / \sqrt{3} = 0.35 \mu\epsilon$$

C.2.3.4 标准应变梁引入的不确定度分量 u_4

按 B 类评定方法。标准应变梁应变输出的最大允许误差为 $\pm 0.1\%$ ，取均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

则引入的不确定度分量：

$$u_4 = 2000 \mu\epsilon \times 0.1\% / \sqrt{3} = 1.15 \mu\epsilon$$

C.2.3.5 应变片引入的不确定度分量 u_5

按 B 类评定方法。应变片输出的最大允许误差为 $\pm 0.5\%$ ，取均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

则引入的不确定度分量：

$$u_5 = 2000 \mu\epsilon \times 0.5\% / \sqrt{3} = 5.77 \mu\epsilon$$

C.2.3.6 应变片粘贴引入的不确定度分量 u_6

按 B 类评定方法。应变片粘贴致使应变输出的最大允许误差为 $\pm 2\%$ ，取均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

则引入的不确定度分量：

$$u_6 = 2000 \mu\epsilon \times 2\% / \sqrt{3} = 23.1 \mu\epsilon$$

C.2.4 合成标准不确定度

测量结果的标准不确定度分量见表 C.2。

表 C.2 标准不确定度分量一览表

输入量	标准不确定度来源	概率分布	灵敏度系数	标准不确定度分量
u_1	测量重复性引入	正态分布	1	$0.44 \mu\epsilon$
u_2	数据采集系统分辨力引入	均匀分布	1	$0.17 \mu\epsilon$
u_3	标准应变发生装置引入	均匀分布	-1	$0.29 \mu\epsilon$
u_4	标准应变梁引入	均匀分布	-1	$1.15 \mu\epsilon$
u_5	应变片引入	均匀分布	-1	$5.77 \mu\epsilon$
u_6	应变片粘贴引入	均匀分布	-1	$23.1 \mu\epsilon$

以上各标准不确定度分量独立不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} = 23.8\mu\epsilon$$

C.2.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度

$$U = 2 \times u_c = 47.69\mu\epsilon$$

相对扩展不确定度 $U_{rel} = U/2000 = 0.024$

C.3 应变量（数据采集系统）测量不确定度评定

以标准模拟应变量校准器 DR-6 为标准设备，VTI 数据采集系统为被校系统，在 $10000\mu\epsilon$ 评定示例如下：

C.3.1 测量模型

用直接测量法。各种影响测量不确定度的其他因数可忽略不计，则数学模型式为 $y = x$ 。

C.3.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：

- a) 测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- b) 标准器引入的不确定度分量 u_2 ；
- c) 数据采集系统分辨力引入的不确定度分量 u_3 。

C.3.3 标准不确定度的评定

C.3.3.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

按 A 类评定方法。在相同条件下，重复 10 次测量应变值，测得数据如下：

10003	10004	10005	10005	10005
10004	10004	10003	10004	10004

$$\text{则： } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 10004.1\mu\epsilon$$

$$\text{测量重复性： } s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.73\mu\epsilon$$

在实际测量中，取 4 次的测量平均值作为测量结果，则重复性引入的不确定度

分量: $u_1 = s(x) / \sqrt{4} = 0.365 \mu\epsilon$ 。

C.3.3.2 标准器引入的不确定度分量 u_2

按 B 类评定方法。DR-6 型的标准模拟应变变量校准器 (生产商: 中国计量科学研究院), 应变输出的最大允许误差为 $\pm 0.05\%$, 取均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

则引入的不确定度分量:

$$u_2 = 10000 \times 0.05\% / \sqrt{3} = 2.89 \mu\epsilon$$

C.3.3.3 数据采集系统分辨率引入的不确定度分量 u_3

按 B 类评定方法。数据采集系统在应变测量时有效分辨力为 $1 \mu\epsilon$, 取均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则分辨率引入的不确定度分量为:

$$u_3 = 1 / 2\sqrt{3} = 0.29 \mu\epsilon$$

C.3.4 合成标准不确定度

测量结果的标准不确定度分量见表 C.3。

表 C.3 标准不确定度分量一览表

输入量	标准不确定度来源	概率分布	灵敏度系数	标准不确定度分量
u_1	测量重复性引入	正态分布	1	$0.365 \mu\epsilon$
u_2	标准器的误差引入	均匀分布	-1	$2.89 \mu\epsilon$
u_3	数据采集系统分辨力引入	均匀分布	1	$0.29 \mu\epsilon$

以上各标准不确定度分量独立不相关, 则合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 3.0 \mu\epsilon$$

C.3.5 扩展不确定度的计算

取 $k=2$, 则扩展不确定度

$$U = 2 \times u_c = 6.0 \mu\epsilon$$

相对扩展不确定度 $U_{rel} = U/10000 = 6.0 \times 10^{-4}$

C.4 位移量测量不确定度评定

以 WCX-3000 型位移传感器校准装置为标准设备, WDL100-3852 位移传感器与 VTI 数据采集系统为被较设备。在 400mm 评定示例如下:

C.4.1 测量模型

用直接测量法。各种影响测量不确定度的其他因数可忽略不计，则数学模型式为 $y = x$ 。

C.4.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：

- a) 测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- b) 标准装置示值和回程不准引入的不确定度分量 u_2 ；
- c) 装夹倾斜引入的不确定度分量 u_3 ；
- d) 数字多用表引入的不确定度分量 u_4 ；
- e) 直流稳压电源输出稳定性引入的不确定度分量 u_5 。

C.4.3 标准不确定度的评定

C.4.3.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

按 A 类评定方法。在相同条件下，重复测量位移，测得数据如下：

序号	1	2	3	4	5	6
测量值/mA	9.270	9.270	9.270	9.273	9.272	9.268

$$\text{测量重复性: } s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.002\text{mA}$$

由校准结果知：该传感器在此次校准中零点输出平均值为 4.063mA，在 1000mm 处即满量程输出平均值为 20.045mA，因此重复性测量相对误差为：

$$s(x)_{rel} = \frac{s(x)}{Y_{FS}} = \frac{0.002}{(20.045 - 4.063)} = 0.01\%$$

在实际测量中，取 3 次的测量平均值作为测量结果，则重复性引入的不确定度分量： $u_1 = s(x) / \sqrt{3} = 0.007\%$ 。

C.4.3.2 由标准装置示值和回程不准引入的不确定度分量 u_2

按 B 类评定方法对于 WCX-3000 型位移传感器校准装置，参考其出厂指标及历年校准结果该装置的最大允许误差为 $\pm 0.02\%$ ，按均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则引入的不确定度分量为：

$$u_{2a} = \frac{0.002\%}{\sqrt{3}} = 0.012\%$$

该装置的回程最大允许误差为 $\pm 0.005\%$ FS，按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，则有：

$$u_{2b} = \frac{0.005\%}{\sqrt{3}} = 0.003\%$$

因此，由标准装置示值和回程不准引入的不确定度分量 u_2 ：

$$u_2 = \sqrt{0.012\%^2 + 0.003\%^2} = 0.012\%$$

C.4.3.3 装夹倾斜引入的不确定度分量 u_3

装夹几何图如下图所示：

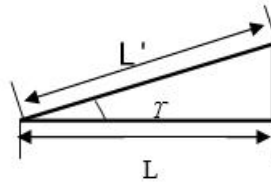


图1 传感器装夹拉线倾斜图

其中： $\Delta L = L' - L$ 。

r 是装夹倾斜角，在校准人员目测安装正确后，用激光打点法多次试验发现，在其 3000mm 处，光点左右上下偏移大致在 20mm 范围内。由此可得：

$$L_1 = \left(\sqrt{20^2 + 3000^2} - 3000 \right) \text{mm} = 0.067 \text{mm}$$

$$(0.067 \div 3000) = 0.003\%$$

按 B 类评定方法。考虑到上下及左右都可能有装夹倾斜，按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = \frac{0.003\%}{\sqrt{3}} = 0.003\%$$

C.4.3.4 数字多用表引入的不确定度分量 u_4

按 B 类评定方法。在位移传感器的校准过程中，使用 Agilent34401A 的数字多用表，其直流电流和直流电压测量误差均不超过 $\pm 0.005\%$ ，按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ 则：

$$u_4 = \frac{0.005\%}{\sqrt{3}} = 0.003\%$$

C.4.3.5 直流稳压电源输出稳定性引入的不确定度分量 u_5

按 B 类评定方法。在位移传感器的校准过程中, 使用 PQS4323 的直流稳压电源, 其输出稳定性为 $\pm 0.01\%$, 按均匀分布, 取 $k=\sqrt{3}$, 则:

$$u_5 = \frac{0.01\%}{\sqrt{3}} = 0.006\%$$

C.4.4 合成标准不确定度

测量结果的标准不确定度分量见表 C.4。

表 C.4 标准不确定度分量一览表

输入量	标准不确定度来源	概率分布	灵敏度系数	标准不确定度分量
u_1	测量重复性引入	正态分布	1	0.007%
u_2	标准装置示值和回程不准引入	均匀分布	-1	0.012%
u_3	装夹倾斜引入	均匀分布	1	0.003%
u_4	数字多用表引入	均匀分布	1	0.003%
u_5	直流稳压电源输出稳定性引入	均匀分布	1	0.006%

以上各标准不确定度分量独立不相关, 则合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 0.016\%$$

C.4.5 扩展不确定度的计算

取 $k=2$, 则扩展不确定度

$$U = 2 \times u_c = 0.032\%$$

C.5 通道间串扰不确定度评定

以标准应变校准装置为标准设备, VTI 数据采集系统为被校系统, 评定示例如下:

C.5.1 测量模型

用直接测量法。各种影响测量不确定度的其他因数可忽略不计, 则数学模型式

$$\text{为 } y = 20 \times \lg \left| \frac{E}{x - x_0} \right|。$$

$$\text{串扰通道信号的灵敏度系数: } \frac{\partial y}{\partial x} = -20 \frac{1}{(x - x_0) \ln 10} \approx -\frac{8.686}{x - x_0}$$

C.5.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：

- a) 测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- b) 数据采集系统分辨率引入的不确定度分量 u_2 。

C.5.3 标准不确定度的评定

C.5.3.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

按 A 类评定方法。串扰实验的测量值为 dB 是一个比值，在进行不确定度计算时，首先将其转化为线性值（某通道输入信号为 0 与上下限时的应变值之差）。在相同条件下，重复 10 次测量应变值，测得数据如下：

26	22	21	26	23
19	23	22	24	22

$$\text{则： } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 22.44 \mu\epsilon$$

$$\text{测量重复性： } s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 1.94 \mu\epsilon$$

在实际测量中，取 4 次的测量平均值作为测量结果，则重复性引入的不确定度分量： $u_1 = s(x) / \sqrt{4} = 0.486 \mu\epsilon$ 。

C.5.3.2 数据采集系统分辨率引入的不确定度分量 u_2

按 B 类评定方法。数据采集系统在应变测量时有效分辨力为 $1 \mu\epsilon$ ，取均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则分辨率引入的不确定度分量为：

$$u_2 = 1 / 2\sqrt{3} = 0.29 \mu\epsilon$$

C.5.4 合成标准不确定度

测量结果的标准不确定度分量见表 C.5。

表 C.5 标准不确定度分量一览表

输入量	标准不确定度来源	概率分布	标准不确定度分量	灵敏度系数	$c \times u$
u_1	测量重复性引入	正态分布	$0.486 \mu\epsilon$	-0.39	0.19 dB
u_2	数据采集系统分辨率引入	均匀分布	$0.29 \mu\epsilon$	-0.39	0.11 dB

以上各标准不确定度分量独立不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.22\text{dB}$$

C.5.5 扩展不确定度的计算

取 $k=2$ ，则扩展不确定度

$$U = 2 \times u_c = 0.44\text{dB}$$

C.6 应变零点漂移不确定度评定

以标准精密电阻为标准设备，VTI 数据采集系统为被校系统，评定示例如下：

C.6.1 测量模型

用直接测量法。各种影响测量不确定度的其他因数可忽略不计，输入量为初始零点输出 O_0 、时刻 t 零点输出 O_t ，则数学模型式为 $y = O_t - O_0$ 。

C.6.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：

- a) 测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- b) 数据采集系统分辨率引入的不确定度分量 u_2 。

C.6.3 标准不确定度的评定

C.6.3.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

按 A 类评定方法。在相同条件下，重复 10 次测量某时刻 t 应变值与 0 时刻的应变值之差，测得数据如下：

0.074	0.179	0.089	0.255	0.158
0.186	0.096	0.235	0.241	0.157

$$\text{则： } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 1.77\mu\epsilon$$

$$\text{测量重复性： } s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.03\mu\epsilon$$

在实际测量中，取 4 次的测量平均值作为测量结果，则重复性引入的不确定度分量： $u_1 = s(x) / \sqrt{4} = 0.015\mu\epsilon$ 。

C.6.3.2 数据采集系统分辨率引入的不确定度分量 u_2

按 B 类评定方法。数据采集系统在应变测量时有效分辨力为 $1\mu\epsilon$ ，取均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则分辨率引入的不确定度分量为：

$$u_2 = 1 / 2\sqrt{3} = 0.29\mu\epsilon$$

C.6.4 合成标准不确定度

测量结果的标准不确定度分量见表 C.6。

表 C.6 标准不确定度分量一览表

输入量	标准不确定度来源	概率分布	灵敏度系数	标准不确定度分量
u_1	测量重复性引入	正态分布	1	$0.015\mu\epsilon$
u_2	数据采集系统分辨力引入	均匀分布	-1	$0.29\mu\epsilon$

以上各标准不确定度分量独立不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.29\mu\epsilon$$

C.6.5 扩展不确定度的计算

取 $k=2$ ，则扩展不确定度

$$U = 2 \times u_c = 0.58\mu\epsilon$$

C.7 位移零点漂移不确定度评定

以标准精密电阻为标准设备，VTI 数据采集系统为被校系统，评定示例如下：

C.7.1 测量模型

用直接测量法。各种影响测量不确定度的其他因数可忽略不计，输入量为初始零点输出 O_0 、时刻 t 零点输出 O_t ，则数学模型式为 $y = O_t - O_0$ 。

C.7.2 不确定度来源

不确定度来源主要有：

- 测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- 数据采集系统分辨力引入的不确定度分量 u_2 。

C.7.3 标准不确定度的评定

C.7.3.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

按 A 类评定方法。在相同条件下，重复 10 次测量某时刻 t 应变值与 0 时刻的应变值之差，测得数据如下：

0.03	0.00	0.03	0.03	0.06
-0.04	0.00	0.00	-0.01	-0.01

$$\text{则: } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 0.023\text{mm}$$

$$\text{测量重复性: } s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.028\text{mm}$$

在实际测量中, 取 4 次的测量平均值作为测量结果, 则重复性引入的不确定度分量: $u_1 = s(x) / \sqrt{4} = 0.012\text{mm}$ 。

C.7.3.2 数据采集系统分辨率引入的不确定度分量 u_2

按 B 类评定方法。数据采集系统在位移测量时有效分辨力为 0.01mm, 取均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则分辨率引入的不确定度分量为:

$$u_2 = 0.01 / 2\sqrt{3} = 0.003\text{mm}$$

C.7.4 合成标准不确定度

测量结果的标准不确定度分量见表 C.7。

表 C.7 标准不确定度分量一览表

输入量	标准不确定度来源	概率分布	灵敏度系数	标准不确定度分量
u_1	测量重复性引入	正态分布	1	0.012mm
u_2	数据采集系统分辨力引入	均匀分布	-1	0.003mm

以上各标准不确定度分量独立不相关, 则合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.012\text{mm}$$

C.7.5 扩展不确定度的计算

取 $k=2$, 则扩展不确定度

$$U = 2 \times u_c = 0.024\text{mm}$$