



中华人民共和国纺织行业计量技术规范

JJF(纺织) 020—2024

织物厚度仪校准规范

Calibration Specification for Fabric Thickness Testers

(报批稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

织物厚度仪校准规范

Calibration Specification for

Fabric Thickness Testers

JJF (纺织) 020—2024
代替 JJF (纺织) 020—2010

归口单位：中国纺织工业联合会

起草单位：广州纤维产品检测研究院

广州检验检测认证集团有限公司

广州高铁计量检测股份有限公司

温州市大荣纺织仪器有限公司

泉州市美邦仪器有限公司

温州际高检测仪器有限公司

莱州元茂仪器有限公司

济宁市质量计量检验检测研究院

纺织工业科学技术发展中心

本规范委托全国纺织计量技术委员会负责解释

本规范起草人：

谭伟新（广州纤维产品检测研究院）

白 莹（纺织工业科学技术发展中心）

黎智曦（广州检验检测认证集团有限公司）

胡剑灿（广州纤维产品检测研究院）

孔 健（济宁市质量计量检验检测研究院）

马远武（广州高铁计量检测股份有限公司）

杨红斌（温州市大荣纺织仪器有限公司）

王 疆（温州际高检测仪器有限公司）

赵艳山（泉州市美邦仪器有限公司）

李春钢（莱州元茂仪器有限公司）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 概述	(1)
4 计量特性	(1)
5 校准条件	(2)
6 校准项目和校准方法	(3)
6.1 校准前准备	(3)
6.2 校准项目	(4)
6.3 校准方法	(5)
7 校准结果表达	(6)
8 复校时间间隔	(7)
附录 A 织物厚度仪校准记录参考格式	(8)
附录 B 织物厚度仪校准证书内页参考格式	(10)
附录 C 织物厚度仪测量不确定度评定示例	(11)

引 言

本规范是以 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修订工作的基础性系列规范。

本规范参考了 GB/T 3820—1997《纺织品和纺织制品厚度的测定》、JJF 1255—2010《厚度表校准规范》等标准的相关技术内容。

本规范是对 JJF (纺织) 020—2010《织物厚度仪校准规范》的修订，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 增加了“引言”；
- 范围中明确“本规范适用于测量厚度（0.1~20）mm 的织物厚度仪的校准”，删除了范围中“新制造、使用中和修理后”的表述（见第 1 章）；
- 删除了 JJF 1001—1998、JJF 1059—1999 和 GB/T 3820—1997 等引用文件，增加了 JJF 1071—2010 引用文件（见第 2 章）；
- 删除了术语章；
- 更改了概述的表述，增加厚度仪示意图（见第 3 章）；
- 将原 2010 年版计量特性中可通过目测外观检查的项目，调整为校准前准备项目（见 6.1）；
- 将原 2010 年版计量特性厚度仪放置环境要求调整到环境条件（见 5.1）；
- 将压脚工作面直径要求标称直径 ± 0.1 mm 更改为压脚面积最大允许误差 ± 1 %（见 4.1）；
- 将压重时间要求标称值 ± 1 s 更改为压重时间误差 (10 ± 2) s、 (30 ± 5) s（见 4.3）；
- 将厚度仪整机示值不大于 0.015 mm 更改为厚度示值最大允许误差为 $\pm (0.009 \sim 0.04)$ mm，增加厚度示值变动性（见 4.5）；
- 更改了厚度示值误差校准方法（见 6.3.6），增加厚度示值变动性校准方法（见 6.3.5）；
- 更改了附录织物厚度仪校准记录格式和测量不确定度评定示例，增加了校准证书内页格式（见附录 A、附录 B 和附录 C）。

本规范历次版本发布情况：

JJG 028—1989；

JJF（纺织）020—2006；

JJF（纺织）020—2010。

织物厚度仪校准规范

1 范围

本规范适用于厚度测量为（0.1~20）mm 的织物厚度仪（以下简称厚度仪）的校准。其他工作原理相同、结构类似的检测仪器校准可参照本规范执行。不适用土工布合成材料厚度仪、常规类非织造布厚度仪和蓬松类非织造布厚度仪的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1071—2010 国家计量校准规范编写规则

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，其最新现行有效版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 概述

厚度仪用于测量在一定压力下的织物厚度。厚度仪主要由基准板、压脚、加压力值砝码、压重时间控制装置和厚度测量装置等组成（见图 1）。工作原理：试样放置于基准板上，平行基准板的一定面积和被施加一定压力的压脚作用于试样上一定时间后，测定压脚与基准板之间的垂直距离（即试样厚度值）。

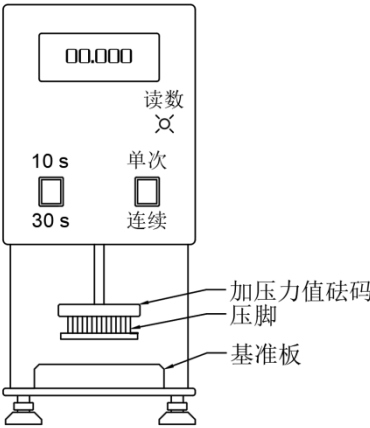


图 1 厚度仪示意图

4 计量特性

4.1 压脚面积最大允许误差：±1 %。

4.2 加压力值砝码最大允许误差：±1 %。

4.3 压重时间：(10±2) s、(30±5) s。

4.4 厚度示值变动性和厚度示值最大允许误差见表 1。

表 1 厚度示值变动性和厚度示值最大允许误差 单位：mm

厚度仪类型	分度值/分辨力	示值变动性	测量范围上限 S	示值最大允许误差
指针式	0.01	≤0.005	1<S≤10	±0.020
			10<S≤20	±0.030
数显式	0.01	≤0.01	1<S≤10	±0.03
			10<S≤20	±0.04
	0.001	≤0.002	1<S≤10	±0.009
			10<S≤20	±0.015

5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 环境温度：(20±10)℃。

5.1.2 环境湿度：≤80 %RH。

5.1.3 校准前，厚度仪和测量标准及其他设备等温平衡时间不少于 2 h。

5.1.4 其他条件：厚度仪应水平放置在稳固工作台上，校准环境应清洁，周围无腐蚀性介质，无明显强烈振动，无强烈气流。

5.2 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	名称	测量范围、分度值或分辨力	不确定度或准确度等级或最大允许误差	数量
1	量块	测量范围：(1~20) mm	3 级	1
2	外径千分尺	测量范围：(0~25) mm 分度值：0.01 mm	±4 μm	1
3	外径千分尺	测量范围：(25~50) mm 分度值：0.01 mm	±4 μm	1
4	游标卡尺	测量范围：(1~150) mm， 分度值：0.02 mm	±0.03 mm	1
5	秒表	测量范围：0.1 s~1 h，	±0.10 s	1

		分度值: 0.01 s		
6	电子天平	测量范围: (5~600) g, 分度值: 0.01 g	Ⓓ	1
7	砝码	测量范围: 10 g	M ₁	1
<p>注: 校准用测量标准可选用本表所列, 也可以选用测量范围覆盖被校准量的测量范围, 其测量结果扩展不确定度 $U(k=2)$ 不大于校准量最大允许误差绝对值的 1/3 的测量标准。</p>				

6 校准项目和校准方法

6.1 校准前准备

校准前须用目测方法对厚度仪进行外观检查, 确定没有影响计量特性因素后再进行校准。

6.1.1 厚度仪应在适当部位装有铭牌。铭牌上须标明仪器名称、型号、制造厂、出厂编号和出厂日期等。

6.1.2 厚度仪配置的压脚面积标称值有 100 mm²、500 mm²、2000 mm²、2500 mm²、10000 mm² 等, 配置的加压力值砝码标称值有 10 cN、25 cN、50 cN、100 cN、200 cN、500 cN 等。压脚工作面应平整光滑, 不应有影响使用的碰伤、缺损、锈蚀或其他缺陷。

6.1.3 厚度仪工作时压脚上下应运动自如, 应无异常噪声、振动产生, 按钮和拨动开关等电器装置应安全、灵敏、可靠。

6.1.4 压脚灵敏度: 厚度仪安装压脚后, 启动厚度仪, 当厚度仪压脚接触基准板时, 关闭厚度仪电源, 压脚处于自由状态。当压脚不施加加压力值砝码时, 使压脚与基准板分离, 压脚应呈现随遇平衡状态; 当压脚施加 10 g 砝码或 10 cN 加压力值砝码时, 压脚应与基准板保持接触。用电子天平称量压脚质量, 各压脚之间质量差异应 ≤ 1 g。

6.1.5 在“单次”工作方式时, 压脚完成一次测试就停止运行; 在“连续”工作方式时, 压脚应连续平稳上下运动, 直至按“停止”键, 使压脚停止运行。压脚运行停止后, 压脚处于最高位置。

6.1.6 压脚与基准板平行度检查: 选用厚度仪配置标称值为 2000 mm² 的压脚, 在压脚上施加 25 cN 加压力值砝码, 选用“连续”工作方式, 设置压重时间为“10 s”。用厚度仪测量范围内任意厚度量块置于压脚与基准板之间, 按图 2 规定的 4 个位置分别测量量块示值, 读取 4 次厚度仪指示器读数。4 个读数的最大值与最小值之差为压脚与基

准板平行度，其应 ≤ 0.025 mm。

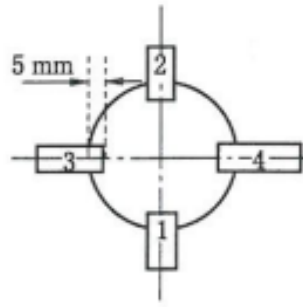


图2 压脚与基准板平行度测量示意图

6.1.7 机械式厚度指示器

6.1.7.1 表盘刻度应清晰平直、不应有目测可见的断线和粗细不均匀。

6.1.7.2 表圈转动应灵活、平稳、静止要可靠，表圈和表体的配合应无明显松动。

6.1.7.3 指针末端与刻线方向一致，无目测可见的偏斜；指针末端应盖住最短刻度线的30 %~80 %。

6.1.8 数显式厚度指示器

6.1.8.1 显示数字不应有缺划和小数点缺失现象。

6.1.8.2 显示有效位数的数值不能有跳动和漂移现象，清零按钮功能有效。用量块置于厚度仪压脚与基准板之间，在压脚上施加25 cN加压力值砝码，观察厚度显示值在15 min内的漂移不大于其分辨力。

6.2 校准项目

厚度仪校准项目对应本规范计量特性条款和校准方法条款见表3。

表3 厚度仪校准项目

序号	校准项目	计量特性条款	校准方法条款
1	压脚面积误差	4.1	6.3.1
2	加压力值砝码误差	4.2	6.3.2
3	压重时间	4.3	6.3.3
4	厚度示值变动性	4.4	6.3.4
5	厚度示值误差	4.4	6.3.5

6.3 校准方法

6.3.1 压脚面积误差

厚度仪每个压脚工作面相互垂直直径方向取 2 个校准点。工作面面积标称值不大于 500 mm² 压脚，用外径千分尺分别测量压脚工作面 2 个校准点压脚直径；工作面面积标称值大于 500 mm² 压脚，用游标卡尺分别测量压脚工作面 2 个校准点压脚直径；用公式 (1) 计算压脚工作面面积误差。

$$\delta_s = \frac{S_s - \pi \cdot \left(\frac{\overline{D_0}}{2} \right)^2}{\pi \cdot \left(\frac{\overline{D_0}}{2} \right)^2} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

δ_s —— 压脚工作面面积误差，%；

S_s —— 压脚工作面面积标称值，mm²；

$\overline{D_0}$ —— 外径千分尺或游标卡尺 2 个校准点测量结果算术平均值，mm。

6.3.2 加压力值砝码误差

将每个加压力值砝码分别在电子天平上称量其质量，重复测量 2 次，用公式 (2) 计算加压力值砝码误差。

$$\delta_F = \frac{F_s - \overline{M_0} \cdot g / 10}{\overline{M_0} \cdot g / 10} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

δ_F —— 加压力值砝码误差，%；

F_s —— 加压力值砝码标称值，cN；

$\overline{M_0}$ —— 电子天平 2 次测量结果算术平均值，g；

g —— 当地重力加速度，m/s²。

6.3.3 压重时间

厚度仪设置压重时间为“10 s”，选用“单次”工作方式，在压脚与基准板之间放置一块 1 mm 量块，在压脚上施加 25 cN 加压力值砝码。启动厚度仪，当压脚再次与量块刚接触，机械式厚度指示器指针不连续变动或数显式厚度指示数字不跳动时，启动秒表。当厚度仪读数指示灯亮时，按停秒表，记录秒表读数，重复测量 2 次，2 次测量

结果算术平均值为压脚与基准板距离 1 mm 时压重时间。

用上述方法分别测量压脚与基准板距离分别为 6 mm、9 mm 时压重时间，取压脚与基准板距离 1 mm、6 mm、9 mm 时压重时间与压重时间设定值偏离最大值为压重时间。

设置压重时间为“30 s”，用上述方法测量压脚与基准板距离分别为 1 mm、6 mm、9 mm 时压重时间，取压脚与基准板距离 1 mm、6 mm、9 mm 时压重时间与压重时间设定值偏离最大值为厚度仪压重时间。

6.3.4 厚度示值变动性

厚度仪压脚选用厚度仪配置直径最小压脚。在压脚上施加 25 cN 加压力值砝码，选用“连续”工作方式，设置压重时间为“10 s”。在厚度仪测量范围内任一位置，将量块置于压脚与基准板之间，对同一量块重复测量 5 次，其测量结果最大值与最小值之差为示值变动性。

6.3.5 厚度示值误差

压脚与基准板平行度满足 6.1.6 要求后，方可用量块测量厚度示值误差。

厚度仪压脚选用厚度仪配置压脚面积最小压脚，在压脚上施加 25 cN 加压力值砝码，选用“连续”工作方式，设置压重时间为“10 s”。

在 (1~10) mm 范围内，以每间隔 2 mm 为一校准点；在 (10~20) mm 范围内，以每间隔 5 mm 为一校准点。将一组量块按校准点依次置于压脚与基准板之间，对同一量块重复测量 2 次，按公式 (3) 计算厚度示值误差。

$$\Delta L = \overline{L_0} - L_s \quad (3)$$

式中：

ΔL —— 厚度示值误差，mm；

$\overline{L_0}$ —— 厚度仪 2 次测量示值平均值，mm；

L_s —— 量块标称值，mm。

7 校准结果表达

7.1 校准记录

校准记录应详尽记录测量数据和计算结果。推荐的校准记录格式见附录 A。

7.2 校准证书

经校准的厚度仪应出具校准证书，校准结果应在校准证书上反映。校准证书包括的信息应符合 JJF 1071—2010 中 5.12 的要求，推荐的校准证书内页格式见附录 B。

7.3 不确定度

校准证书应给出各校准项目测量结果的测量不确定度，测量不确定度评定示例见附录 C。

8 复校时间间隔

在定期进行期间核查的条件下，建议复校时间间隔一般不超过 1 年。

注：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

织物厚度仪校准记录参考格式

委托方：设备编号：原始记录号：

型号规格：产品编号：出厂日期：校准证书编号：

制造厂：环境温度：℃环境湿度：%RH

校准日期：年 月 日校准地点：

校准员：核验员：

校准依据:JJF（纺织）020—2024 织物厚度仪校准规范

使用主要计量标准器具

标准器名称	型号	编号	证书号	有效期	技术特征	状态

一、校准前准备：☐工作正常 ☐工作不正常，不正常情况：

二、计量特性校准：

序号	校准项目	技术要求		实测值						
1	压脚面积 误差	±1 %	标称 mm ² (直径 mm)	直径 1 (mm)	直径 2 (mm)	平均 (mm)	面积 (mm ²)	误差 (%)	U(k=2)	
			100 mm ² (11.28 mm)							
			500 mm ² (25.24 mm)							
			2000 mm ² (50.48 mm)							
			2500 mm ² (56.43 mm)							
			10000 mm ² (112.87 mm)							
2	加压力值 砝码误差	±1 %	标称值 (cN)	质量 1 (g)	质量 2 (g)	平均 $\overline{M_0}$ (g)	误差 δ_F (%)	U(k=2) (%)		
			10							
			25							

			50										
			100										
			200										
			200										
			500										
3	压重时间	间隔		1 mm		6 mm		9 mm		U(k=2)（s）			
		(10±2) s	1（s）										
			2（s）										
			平均(s)										
		(30±5) s	1（s）										
			2（s）										
			平均(s)										
		4	厚度示值 变动性 （mm）	≤0.01 mm 或 ≤ 0.002 mm	位置	1	2		3		4		5
					示值								
变动性													
5	厚度示值 误差 （mm） 测量范围： mm	分度值： 0.01 1<S≤10： ±0.020 10<S≤20： ±0.030 分辨力： 0.001 1<S≤10： ±0.009 10<S≤20： ±0.015	校准点	1	2		平均		误差		U(k=2)		
			2										
			4										
			6										
			8										
			10										
			15										
			20										

附录 B

织物厚度仪校准证书内页参考格式

校 准 结 果

校准项目	技术要求	校准结果	测量结果扩展不确定度 $U(k=2)$
压脚面积误差	$\pm 1\%$	100 mm ² : 500 mm ² : 2000 mm ² : 2500 mm ² : 1000 mm ² :	
加压力值砝码误差	$\pm 1\%$	10 cN: 25 cN: 50 cN: 100 cN: 200 cN: 500 cN:	
压重时间	(10±2) s, (30±5) s	10 s: 30 s:	
厚度示值变动性	≤0.01 mm 或 ≤0.002 mm		
厚度示值误差	测量范围 (1~10) mm 分度值 0.01 mm 允差: ±0.020 mm 分辨力 0.001 mm 允差: ±0.009 mm; 测量范围 (10~20) mm 分度值 0.01 mm 允差: ±0.030 mm 分辨力 0.001 mm 允差: ±0.015 mm	厚度示值测量范围: mm 厚度示值分度值/分辨力: mm 1 mm<S≤10 mm: mm 10 mm<S≤20 mm: mm	

以下空白

附录 C

织物厚度仪测量不确定度评定示例

C.1 压脚面积（面积不大于 500 mm²）误差测量不确定度的评定

C.1.1 概述

用测量范围为（0~25）mm，分度值为 0.01 mm，最大允许误差±4 μm 外径千分尺测量面积标称值为 100 mm²，最大允许误差±1 %的压脚面积误差。校准的试验操作：用外径千分尺分别测量压脚工作面相互垂直直径方向的 2 个校准点压脚直径，用公式（C.1）计算压脚工作面面积误差。

C.1.2 测量模型

$$\delta_s = \frac{S_s - \pi \cdot \left(\frac{\overline{D}_0}{2}\right)^2}{\pi \cdot \left(\frac{\overline{D}_0}{2}\right)^2} \times 100\% = \left(\frac{4S_s}{\pi \cdot \overline{D}_0^2} - 1\right) \times 100\% \quad (\text{C.1})$$

式中：

δ_s —— 压脚工作面面积误差，%；

S_s —— 压脚工作面面积标称值，mm²；

\overline{D}_0 —— 外径千分尺 2 次测量结果算术平均值，mm。

由于外径千分尺与压脚彼此独立，互不相关，压脚面积误差合成标准不确定度可由式（C.2）计算：

$$u_c^2(\delta_s) = c^2(S_s)u^2(S_s) + c^2(\overline{D}_0)u^2(\overline{D}_0) \quad (\text{C.2})$$

$$\text{灵敏系数：} c(S_s) = \frac{\partial \delta_s}{\partial S_s} = \frac{4}{\pi \cdot \overline{D}_0^2} \times 100\%,$$

$$c(\overline{D}_0) = \frac{\partial \delta_s}{\partial \overline{D}_0} = -\frac{8S_s}{\pi \cdot \overline{D}_0^3} \times 100\%$$

因 S_s 为压脚工作面面积标称值，压脚面积标准不确定度 $u(S_s) = 0$ ，则

$$u_c^2(\delta_s) = c^2(\overline{D}_0)u^2(\overline{D}_0) \quad (\text{C.3})$$

C.1.3 标准不确定度来源分析和评定

压脚工作面面积误差的标准不确定度 $u(\delta_s)$ 来源主要是测量重复性引起的标准不确定度分项 $u_1(\delta_s)$ 或外径千分尺分度值引起的标准不确定度 $u_2(\overline{D_0})$ 和外径千分尺示值误差引起的标准不确定度分项 $u_3(\overline{D_0})$ 。

C.1.3.1 测量重复性标准不确定度 $u_1(\delta_s)$ 的评定

测量重复性标准不确定度可采用连续重复多次测量直接求出标准不确定度，采用 A 类方法进行评定。

参照 JJF 1059.1-2012 中 4.3.2.9 例 3，A 类评定时，通过直径的测量计算圆的面积时，在直径的重复测量中，应随机地选取不同的方向测量。在重复性条件下用外径千分尺随机地选取不同方向测量压脚工作面压脚直径，公式（C.1）计算压脚工作面面积误差。

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
面积标称值 (mm ²)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
直径实测值 (mm)	11.318	11.322	11.328	11.312	11.334	11.322	11.316	11.324	11.314	11.326
面积 (mm ²)	100.556	100.627	100.734	100.450	100.841	100.627	100.521	100.663	100.485	100.698
面积误差 (%)	-0.553	-0.623	-0.729	-0.448	-0.834	-0.623	-0.518	-0.659	-0.483	-0.694

直径平均值 $\overline{D_0} = \frac{\sum_{i=1}^{10} D_{0i}}{10} = 11.3216 \text{ mm}$

面积平均值 $S = \frac{\sum_{i=1}^{10} S_i}{10} = 100.62 \text{ mm}^2$

面积误差平均值 $\delta_s = \frac{\sum_{i=1}^{10} \delta_{si}}{10} = -0.616 \%$

直径标准差 $S_{pD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (D_{0i} - \overline{D_0})^2}{10-1}} = 0.0068 \text{ mm}$

面积误差标准差 $S_{p\delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\delta_{si} - \overline{\delta_s})^2}{10-1}} = 0.119 \%$

实际测量情况：压脚工作面压脚直径在重复性条件下连续测量压脚工作面相

互垂直直径方向 2 次 ($m=2$), 以 2 次测量结果算术平均值为测量结果, 则可得到:

压脚工作面压脚直径测量重复性引起的标准不确定度 $u_1(\overline{D_0})$:

$$u_1(\overline{D_0}) = \frac{S_{pD}}{\sqrt{m}} = \frac{0.0068}{\sqrt{2}} = 0.0048 \text{ mm} \quad (\text{C. 4})$$

压脚工作面面积误差测量重复性引起的标准不确定度 $u_1(\delta_s)$:

$$u_1(\delta_s) = \frac{S_{p\delta}}{\sqrt{m}} = \frac{0.119\%}{\sqrt{2}} = 0.084 \% \quad (\text{C. 5})$$

C. 1. 3. 2 外径千分尺分度值引起的标准不确定度 $u_2(\overline{D_0})$ 的评定

外径千分尺分度值为 0.01 mm, 按分度值 2/10 进行估读, 其量化误差以等概率分布在半宽为 $a_1 = 0.01 \times \frac{2}{10} \times \frac{1}{2} = 0.001 \text{ mm}$ 的区间内, 属均匀分布, 即包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故外径千分尺分度值引入的标准不确定度 $u_1(\overline{D_0})$ 为:

$$u_2(\overline{D_0}) = \frac{a_1}{k} = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0.0006 \text{ mm} \quad (\text{C. 6})$$

因 $u_2(\overline{D_0}) = 0.0006 \text{ mm} < u_1(\overline{D_0}) = 0.0048 \text{ mm}$, 取最大值 $u_1(\overline{D_0}) = 0.0048 \text{ mm}$, 即取压脚面积误差测量重复性标准不确定度 $u_1(\delta_s) = 0.084 \%$, 重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(\overline{D_0})$ 已包含分度值的影响, 不考虑外径千分尺分度值的影响。

C. 1. 3. 3 外径千分尺示值误差引起的标准不确定度分项 $u_3(\overline{D_0})$ 的评定

外径千分尺示值误差引起的标准不确定度可根据检定证书或校准证书给出的该外径千分尺的最大允许误差来评定, 属均匀分布, 可采用 B 类方法评定。

外径千分尺测量范围 (0~25) mm, 分度值 0.01 mm, 最大允许误差为 $\pm 4 \mu\text{m}$, 即 $a_2 = 4 \mu\text{m} = 0.004 \text{ mm}$, 通常认为在区间内服从均匀分布, 即包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则外径千分尺示值误差引起的标准不确定度 $u_3(\overline{D_0})$:

$$u_3(\overline{D_0}) = \frac{a_2}{k} = \frac{0.004}{\sqrt{3}} = 0.0023 \text{ mm} \quad (\text{C. 7})$$

C. 1. 4 标准不确定度分量汇总

各分量的标准不确定度汇总如表 C. 1 所示。

表 C. 1 标准不确定度分量汇总一览表

序号	不确定度来源	符号	类别	分布	灵敏系数	标准不确定度	备注
1	测量重复性	$u_1(\delta_s)$	A	正态	1	0.084 %	
2	外径千分尺分度值	$u_2(\overline{D_0})$	B	均匀	$c(\overline{D_0})$	0.0006 mm	不考虑
3	外径千分尺示值误差	$u_3(\overline{D_0})$	B	均匀	$c(\overline{D_0})$	0.0023 mm	

C. 1.5 合成标准不确定度计算

由公式（C. 3）压脚面积 100 mm² 误差标准不确定度得：

$$\begin{aligned} u_{c100}(\delta_s) &= \sqrt{c^2(\overline{D_0})u^2(\overline{D_0})} = \sqrt{u_1^2(\delta_s) + \left(-\frac{8S_s}{\pi \cdot \overline{D}^3}\right)^2 \times u_3^2(\overline{D_0})} \\ &= \sqrt{0.084\%^2 + \left(-\frac{8 \times 100 \times 100\%}{\pi \times 11.3216^3}\right)^2 \times 0.0023^2} \\ &= 0.0932 \% \end{aligned}$$

C. 1.6 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度为：

$$U_{rel100} = k \times u_{c100}(\delta_s) = 2 \times 0.0932\% = 0.186\% \approx 0.2 \% \tag{C. 8}$$

C. 1.7 测量结果不确定度的报告与表示

厚度仪压脚面积标称值 100 mm² 工作面面积误差测量结果扩展不确定度为：

$$U_{rel100} = 0.2 \% \quad k = 2。$$

C. 2 加压力值砝码误差测量不确定度的评定

C. 2.1 概述

用测量范围为（2~620）g，最小读数 $d=0.01$ g，准确度级别为Ⅱ级电子天平直接称量测量范围（10~500）cN，最大允许误差±1 %加压力值砝码质量，每个加压力值砝码质量重复测量 2 次，用公式（C. 9）计算加压力值砝码误差。

以 25 cN 加压力值砝码误差为例进行测量结果不确定度评定。

C. 2. 2 测量模型

$$\delta_F = \frac{F_s - \overline{M}_0 \cdot g / 10}{\overline{M}_0 \cdot g / 10} \times 100\% = \left(\frac{10F_s}{\overline{M}_0 \cdot g} - 1 \right) \times 100\% \quad (\text{C. 9})$$

式中：

δ_F —— 加压力值砝码误差，%；

F_s —— 加压力值砝码标称值，cN， $F_s = 25$ cN；

\overline{M}_0 —— 电子天平 2 次测量结果算术平均值，g；

g —— 当地重力加速度，广州地区 $g = 9.7833$ m/s²。

由于电子天平与加压力值砝码彼此独立，互不相关，因此，加压力值砝码质量的标准不确定度可由式 (C. 10) 计算：

$$u_{\text{crel}}^2(\delta_F) = c^2(F_s)u_{\text{rel}}^2(F_s) + c^2(\overline{M}_0)u_{\text{rel}}^2(\overline{M}_0) \quad (\text{C. 10})$$

$$\text{灵敏系数：} C(F_s) = \frac{\partial \delta_F}{\partial F_s} = 1, \quad C(\overline{M}_0) = \frac{\partial \delta_F}{\partial \overline{M}_0} = -1$$

加压力值砝码质量的标准不确定度：

$$u_{\text{crel}}^2(\delta_F) = u_{\text{rel}}^2(F_s) + u_{\text{rel}}^2(\overline{M}_0) \quad (\text{C. 11})$$

因 F_s 为压脚工作面面积标称值，加压力值砝码标准不确定度 $u(F_s) = 0$ ，

$u_{\text{rel}}(F_s) = 0$ ，则

$$u_{\text{crel}}(\delta_F) = u_{\text{rel}}(\overline{M}_0) \quad (\text{C. 12})$$

C. 2. 3 输入量 \overline{M}_0 的标准不确定度 $u(\overline{M}_0)$ 来源分析和评定

加压力值砝码质量 \overline{M}_0 的标准不确定度 $u(\overline{M}_0)$ 来源主要是测量重复性引起的标准不确定度分项 $u_1(\overline{M}_0)$ 或电子天平分度值引起的标准不确定度 $u_2(\overline{M}_0)$ 和电子天平最大允许误差引起的标准不确定度分项 $u_3(\overline{M}_0)$ 。

C. 2. 3. 1 测量重复性标准不确定度 $u_1(\overline{M}_0)$ 的评定

测量重复性标准不确定度可采用连续重复多次测量直接求出标准不确定度, 采用 A 类方法进行评定。

在重复性条件下用电子天平直接称量 25 cN 加压力值砝码质量, 连续 10 次测量, 得到一测量列 (单位: g): 25.57、25.58、25.58、25.57、25.58、25.58、25.58、25.58、25.57、25.58。

则测量结果的实验标准偏差 s_p 为:

$$\text{平均值} \quad \overline{M_0} = \frac{\sum_{i=1}^{10} M_{0i}}{10} = 25.577 \text{ g} \quad (\text{C. 13})$$

$$\text{标准差} \quad S_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (M_{0i} - \overline{M_0})^2}{10-1}} = 0.0048 \text{ g} \quad (\text{C. 14})$$

实际测量情况: 加压力值砝码质量在重复性条件下连续测量 2 次 ($m=2$), 以 2 次测量结果算术平均值为测量结果, 则可得到:

加压力值砝码质量测量重复性引起的标准不确定度:

$$u_1(\overline{M_0}) = \frac{S_p}{\sqrt{m}} = \frac{0.0048}{\sqrt{2}} = 0.0034 \text{ g} \quad (\text{C. 15})$$

C. 2. 3. 2 电子天平分度值引起的标准不确定度 $u_2(\overline{M_0})$ 的评定

电子天平最小读数 $d=0.01 \text{ g}$, 以等概率分布在半宽为 $a_3 = \frac{d}{2} = \frac{0.01}{2} = 0.005 \text{ g}$

的区间内, 服从均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则由电子天平分度值引入的不确定度 $u_2(\overline{M_0})$ 为:

$$u_2(\overline{M_0}) = \frac{a_3}{k} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029 \text{ g} \quad (\text{C. 16})$$

因 $u_2(\overline{M_0})=0.0029\text{g}<u_1(\overline{M_0})=0.0034\text{g}$, 取最大值 $u_1(\overline{M_0})=0.0034 \text{ g}$, 重复性引入的不确定度分量已包含分辨力的影响, 不再考虑电子天平分度值引起的标准不确定度 $u_2(\overline{M_0})$ 。

C. 2. 3. 3 电子天平最大允许误差引起的标准不确定度分项 $u_3(\overline{M_0})$ 的评定

电子天平最大允许误差引起的标准不确定度可根据检定规程或校准证书给出的该电子天平的最大允许误差来评定, 属均匀分布, 可采用 B 类方法评定。

依据 JJG 1036—2022《电子天平》检定规程, 最大称量 $Max=620\text{ g}$, $d=0.01\text{ g}$, $e=0.1\text{ g}$, 检定分度数 $n=\frac{Max}{e}=\frac{620\text{ g}}{0.1\text{ g}}=6.2\times 10^3$, 该电子天平对应准确度级别为 Ⅱ 级。在 25 cN 加压力值砝码质量 25.577 g 范围内电子天平最大允许误差 $MPE=\pm 0.5e=\pm 0.05\text{ g}$, 即 $a_4=0.05\text{ g}$, 通常认为在区间内服从均匀分布, 即包含因子 $k=\sqrt{3}$, 则电子天平在 25 cN 加压力值砝码质量最大允许误差引起的标准不确定度 $u_3(\overline{M}_0)$:

$$u_3(\overline{M}_0)=\frac{a_4}{k}=\frac{0.05}{\sqrt{3}}=0.0289\text{ g} \quad (\text{C. 17})$$

C. 2. 3. 4 加压力值砝码质量 \overline{M}_0 合成标准不确定度 $u(\overline{M}_0)$ 计算

由于电子天平与加压力值砝码彼此独立, 互不相关, 标准不确定度 $u_1(\overline{M}_0)$ 、 $u_2(\overline{M}_0)$ 和 $u_3(\overline{M}_0)$ 也相互独立, 则加压力值砝码质量 \overline{M}_0 合成标准不确定度 $u(\overline{M}_0)$:

$$u(\overline{M}_0)=\sqrt{u_1^2(\overline{M}_0)+u_3^2(\overline{M}_0)}=\sqrt{0.0034^2+0.0289^2}=0.0291\text{ g} \quad (\text{C. 18})$$

C. 2. 4 标准不确定度分量汇总

各分量的标准不确定度汇总如表 C. 2 所示。

表 C. 2 标准不确定度分量汇总一览表

序号	不确定度来源	符号	类别	分布	灵敏系数	标准不确定度 (g)	备注
1	测量重复性	$u_1(\overline{M}_0)$	A	正态	-1	0.0034	
2	电子天平分度值	$u_2(\overline{M}_0)$	B	均匀	-1	0.0029	不考虑
3	电子天平最大允许误差	$u_3(\overline{M}_0)$	B	均匀	-1	0.0289	

C. 2. 5 合成标准不确定度计算

$$u_{rel}(\overline{M_0}) = \frac{u(\overline{M_0})}{\overline{M_0}} \times 100\% = \frac{0.0291}{25.577} \times 100\% = 0.114\% \quad (\text{C. 19})$$

由公式 (C. 12) 25 cN 加压力值砝码误差相对标准不确定度:

$$u_{crel25}(\delta_F) = u_{rel}(\overline{M_0}) = 0.114\%$$

C. 2. 6 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k = 2$ ，加压力值砝码 25 cN 误差扩展不确定度为:

$$U_{rel25} = k \times u_{crel25}(\delta) = 2 \times 0.114\% = 0.228\% \approx 0.3\% \quad (\text{C. 20})$$

C. 2. 7 测量结果不确定度的报告与表示

25 cN 加压力值砝码误差测量扩展不确定度为: $U_{rel25} = 0.3\%$ $k = 2$ 。

C. 3 压重时间测量不确定度的评定

C. 3. 1 概述

采用比较法,用测量范围 0.1 s~10 h,分辨力 0.01 s,最大允许误差为 ± 0.10 s 的电子秒表测量厚度仪压重时间 (10 ± 2) s。试验操作:厚度仪设置压重时间为“10 s”,选用“单次”工作方式,在压脚与基准板之间放置一块 1 mm 量块,在压脚上施加 25 cN 加压力值砝码。启动厚度仪,当压脚再次与量块刚接触,机械式厚度指示器指针不连续变动或数显式厚度指示数字不跳动时,启动电子秒表。当厚度仪读数指示灯亮时,按停电子秒表,记录电子秒表读数,重复测量 2 次,2 次测量结果算术平均值为压脚与基准板距离 1 mm 时压重时间。

C. 3. 2 测量模型

$$t = \overline{t_0} \quad (\text{C. 21})$$

式中:

t ——压重时间, s;

$\overline{t_0}$ ——电子秒表 2 次测量结果算术平均值, s。

由于电子秒表与厚度仪时间控制器彼此独立,互不相关,因此,压重时间测量结果的标准不确定度 $u_c(t)$ 可由式 (C. 22) 计算:

$$u_c^2(t) = c^2(\bar{t}_0)u^2(\bar{t}_0) \quad (\text{C. 22})$$

灵敏系数: $c(\bar{t}_0) = 1$

$$\text{则: } u_c^2(t) = u^2(\bar{t}_0) \quad (\text{C. 23})$$

C. 3. 3 输入量 \bar{t}_0 的标准不确定度来源分析和评定

压重时间实测值 \bar{t}_0 的标准不确定度 $u(\bar{t}_0)$ 来源主要是测量重复性引起的标准不确定度分项 $u_1(\bar{t}_0)$ 或电子秒表分辨力误差引起的标准不确定度 $u_2(\bar{t}_0)$ 和电子秒表示值误差引起的标准不确定度分项 $u_3(\bar{t}_0)$ 。

C. 3. 3. 1 测量重复性引起的标准不确定度分项 $u_1(\bar{t}_0)$ 的评定

测量重复性引起的标准不确定度可采用连续重复多次测量直接求出标准不确定度, 采用 A 类方法进行评定。

厚度仪压重时间设定 10 s, 在重复性条件下用电子秒表直接厚度仪压重时间, 连续 10 次测量, 得到一测量列 (单位: s): 10.12、10.01、10.06、9.98、10.14、10.08、10.10、10.06、10.04、10.08。

则测量结果的实验标准偏差 s_t 为:

$$\text{平均值} \quad \bar{t}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{10} t_{0i}}{10} = 10.067 \text{ s} \quad (\text{C. 24})$$

$$\text{标准差} \quad S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (t_{0i} - \bar{t}_0)^2}{10-1}} = 0.049 \text{ s} \quad (\text{C. 25})$$

实际测量情况: 压重时间在重复性条件下连续测量 2 次 ($m=2$), 以 2 次测量算术平均值为测量结果, 则可得到:

压重时间测量重复性引起的标准不确定度:

$$u_1(t_0) = \frac{S_t}{\sqrt{m}} = \frac{0.049}{\sqrt{2}} = 0.035 \text{ s} \quad (\text{C. 26})$$

C. 3. 3. 2 电子秒表分辨力误差引起的标准不确定度 $u_2(\bar{t}_0)$ 的评定

电子秒表分辨力为 0.01 s, 其量化误差以等概率分布在半宽为 $a_5=0.005 \text{ s}$

的区间内, 属均匀分布, 即包含因子 $k = \sqrt{3}$, 故引入的不确定度 $u_2(\bar{t}_0)$ 为:

$$u_3(\bar{t}_0) = \frac{a_5}{k} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003 \text{ s} \quad (\text{C. 27})$$

因 $u_2(\bar{t}_0) = 0.003 \text{ s} < u_1(\bar{t}_0) = 0.035 \text{ s}$, 取最大值 $u_1(\bar{t}_0) = 0.035 \text{ s}$, 重复性引入的不确定度分量 $u_1(\bar{t}_0)$ 已包含电子秒表分辨力的影响, 不再考虑电子秒表分辨力引起的标准不确定度 $u_2(\bar{t}_0)$ 。

C. 3. 3. 3 电子秒表示值误差引起的标准不确定度分项 $u_3(\bar{t}_0)$ 的评定

电子秒表示值误差引起的标准不确定度可根据检定证书或校准证书给出的该电子秒表的最大允许误差来评定, 属均匀分布, 可采用 B 类方法评定。

电子秒表在 10 s 测量间隔的最大允许误差为 $\pm 0.10 \text{ s}$, 即 $a_6 = 0.10 \text{ s}$, 通常认为在区间内服从均匀分布, 即包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则电子秒表在 10 s 测量间隔内示值误差引起的标准不确定度 $u_3(\bar{t}_0)$:

$$u_3(\bar{t}_0) = \frac{a_6}{k} = \frac{0.10}{\sqrt{3}} = 0.058 \text{ s} \quad (\text{C. 28})$$

C. 3. 3. 4 压重时间实测值 \bar{t}_0 合成标准不确定度 $u(\bar{t}_0)$ 计算

由于电子秒表与厚度仪压重时间控制器彼此独立, 互不相关, 标准不确定度 $u_1(\bar{t}_0)$ 、 $u_2(\bar{t}_0)$ 和 $u_3(\bar{t}_0)$ 也相互独立, 则压重时间实测值 \bar{t}_0 合成标准不确定度 $u(\bar{t}_0)$:

$$u(\bar{t}_0) = \sqrt{u_1^2(\bar{t}_0) + u_3^2(\bar{t}_0)} = \sqrt{0.035^2 + 0.058^2} = 0.068 \text{ s} \quad (\text{C. 29})$$

C. 3. 4 标准不确定度分量汇总

各分量的标准不确定度汇总如表 C. 3 所示。

表 C. 3 标准不确定度分量汇总一览表

序号	不确定度来源	符号	类别	分布	灵敏系数	标准不确定度(s)	备注
1	测量重复性	$u_1(\bar{t}_0)$	A	正态	1	0.035	
2	电子秒表分辨力	$u_2(\bar{t}_0)$	B	均匀	1	0.003	不考虑

3	电子秒表示值误差	$u_3(\overline{t_0})$	B	均匀	1	0.058	
---	----------	-----------------------	---	----	---	-------	--

C.3.5 合成标准不确定度计算

由式 (C.23) 得压重时间标准不确定度:

$$u_c(t) = u(\overline{t_0}) = 0.068 \text{ s}$$

C.3.6 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度为:

$$U = k \times u_c(t) = 2 \times 0.068 = 0.136 \approx 0.2 \text{ s} \quad (\text{C.30})$$

C.3.7 测量结果不确定度的报告与表示

压重时间 10 s 测量结果扩展不确定度为: $U = 0.2 \text{ s} \quad k=2$ 。

C.4 厚度示值误差测量不确定度的评定

C.4.1 概述

用测量范围 (1~10) mm, 准确度为 3 级量块测量测量范围 (0~10) mm, 分度值 0.001 mm, 最大允许示值误差 $\pm 0.009 \text{ mm}$ 厚度仪厚度示值误差。校准试验操作: 厚度仪压脚选用厚度仪配置压脚面积最小压脚 50 mm², 在压脚上施加 25 cN 加压力值砝码, 选用“连续”工作方式, 设置压重时间为“10 s”。以每间隔 1 mm 为一校准点, 直至全量程。将一组量块按校准点依次置于压脚与基准板之间, 对同一量块重复测量 2 次, 2 次测量结果算术平均值与量块标称值之差为厚度示值误差。以 3 mm 校准点为例评定厚度示值误差测量不确定度。

C.4.2 测量模型

$$e = \overline{L_0} - L_s \quad (\text{C.31})$$

式中:

e —— 厚度示值误差, mm;

$\overline{L_0}$ —— 厚度仪 2 次测量示值平均值, mm;

L_s —— 量块标称值, mm。

由于量块与厚度仪彼此独立, 互不相关, 因此, 厚度示值误差测量结果合成标准不确定度 $u_c(e)$ 可由式 (C.37) 计算:

$$u_c^2(e) = c^2(\overline{L_0})u^2(\overline{L_0}) + c^2(L_s)u^2(L_s) \quad (\text{C.32})$$

灵敏系数: $c(\overline{L_0}) = 1$, $c(L_s) = -1$

$$u_c^2(e) = u^2(\overline{L_0}) + u^2(L_s) \quad (\text{C.33})$$

C.4.3 输入量 $\overline{L_0}$ 的标准不确定度来源分析和评定

厚度仪示值 $\overline{L_0}$ 的标准不确定度 $u(\overline{L_0})$ 来源主要是测量重复性引起的标准不确定度分项 $u_1(\overline{L_0})$ 或厚度仪示值分辨力引起的标准不确定度 $u_2(\overline{L_0})$ 。

C.4.3.1 测量重复性引起的标准不确定度分项 $u_1(\overline{L_0})$ 的评定

测量重复性引起的标准不确定度分项 $u_1(\overline{L_0})$ 可采用连续重复多次测量直接求出标准不确定度, 采用 A 类方法进行评定。

将标称值为 3 mm 的量块放置在厚度仪压脚与基准板之间, 用厚度仪测量量块, 连续 10 次测量, 得到数据列 (单位: mm): 3.004、3.003、3.004、3.004、3.004、3.004、3.003、3.004、3.004、3.003。按式 (C.34) 和 (C.35) 分别计算平均值和标准差。

$$\overline{L_0} = \frac{\sum_{i=1}^{10} L_{0i}}{10} = 3.0037 \text{ mm} \quad (\text{C.34})$$

$$S_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (L_{0i} - \overline{L_0})^2}{10-1}} = 0.00048 \text{ mm} \quad (\text{C.35})$$

实际测量情况: 该校准点的实测值在重复性条件下连续测量 2 次 ($m=2$), 以 2 次测量算术平均值为测量结果, 则可得到:

3 mm 校准点测量重复性引起的标准不确定度:

$$u_1(\overline{L_0}) = \frac{S_p}{\sqrt{m}} = \frac{0.00048}{\sqrt{2}} = 0.000339 \text{ mm} \quad (\text{C.36})$$

C.4.3.2 厚度示值分辨力引起的标准不确定度 $u_2(\overline{L_0})$ 的评定

厚度仪厚度示值分辨力为 0.001 mm，其量化误差以等概率分布在半宽为 a_7 = 0.0005 mm 的区间内，属均匀分布，即包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故厚度仪示值分辨力引入的标准不确定度 $u_2(\overline{L}_0)$ 为：

$$u_2(\overline{L}_0) = \frac{a_7}{k} = \frac{0.0005}{\sqrt{3}} = 0.000289 \text{ mm} \quad (\text{C. 37})$$

因 $u_2(\overline{L}_0) = 0.000289 \text{ mm} < u_1(\overline{L}_0) = 0.000339 \text{ mm}$ ，取最大者 $u_1(\overline{L}_0) = 0.000339 \text{ mm}$ ，测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(\overline{L}_0)$ 已包含分辨力的影响，不再考虑厚度仪示值分辨力引起的标准不确定度 $u_2(\overline{L}_0)$ 的影响。

厚度仪示值 \overline{L}_0 合成标准不确定度 $u(\overline{L}_0) = u_1(\overline{L}_0) = 0.000339 \text{ mm}$

C. 4. 4 输入量 L_s 的标准不确定度来源分析和评定

量块标称值 L_s 的标准不确定度 $u(L_s)$ 来源主要是量块长度偏差引入的标准不确定度 $u_1(L_s)$ 。

量块长度偏差引起的标准不确定度可根据检定证书或校准证书给出的该量块的最大允许偏差来评定，属均匀分布，可采用 B 类方法评定。

标称值 3 mm，准确度为 3 级量块最大允许偏差为 $\pm 1.0 \text{ } \mu\text{m}$ ，即 $a_8 = 0.001 \text{ mm}$ ，通常认为在区间内服从均匀分布，即包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则量块长度偏差引起的标准不确定度 $u_1(L_s)$ ：

$$u_1(L_s) = \frac{a_2}{k} = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0.000577 \text{ mm} \quad (\text{C. 38})$$

C. 4. 5 标准不确定度分量汇总

各分量的标准不确定度汇总如表 C. 4 所示。

表 C. 4 标准不确定度分量汇总一览表

序号	不确定度来源	符号	类别	分布	灵敏系数	标准不确定度 (mm)	备注
1	测量重复性	$u_1(\overline{L}_0)$	A	正态	1	0.000339	

2	厚度示值分辨力	$u_2(\overline{L_0})$	B	均匀	1	0.000289	不考虑
3	量块长度偏差	$u_1(L_s)$	B	均匀	1	0.000577	

C.4.6 合成标准不确定度计算

由公式 (C.33) 3 mm 厚度示值误差测量结果的标准不确定度 $u_c(e)$:

$$u_c(e) = \sqrt{u^2(\overline{L_0}) + u^2(L_s)} = \sqrt{0.000339^2 + 0.000577^2} = 0.000669 \text{ mm} \quad (\text{C.39})$$

C.4.7 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度为:

$$U = k \times u_c(e) = 2 \times 0.000669 = 0.001338 \approx 0.002 \text{ mm} \quad (\text{C.40})$$

C.4.8 测量结果不确定度的报告与表示

厚度仪厚度示值 3 mm 处示值误差测量结果的扩展不确定度为:

$$U_{3\text{mm}} = 0.002 \text{ mm} \quad k=2。$$