



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1411—2013

测量内尺寸千分尺校准规范

Calibration Specification for Micrometers
of Measuring Inside Dimension



2013-05-13 发布

2013-11-13 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

测量内尺寸千分尺校准规范

Calibration Specification for
Micrometers of Measuring
Inside Dimension

JJF 1411—2013
代替 JJF 1091—2002

归口单位：全国几何量工程参量计量技术委员会

主要起草单位：黑龙江省计量检定测试院

吉林省计量科学研究院

参加起草单位：青海量具刃具有限责任公司

福建省计量科学研究院

本规范委托全国几何量工程参量计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

梁玉红（黑龙江省计量检定测试院）

窦艳红（吉林省计量科学研究院）

张黎平（黑龙江省计量检定测试院）

陈洪侠（黑龙江省计量检定测试院）

参加起草人：

黄晓宾（青海量具刃具有限责任公司）

王朝阳（福建省计量科学研究院）



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 测力	(3)
4.2 刻线宽度及宽度差	(3)
4.3 微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离	(3)
4.4 微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置	(4)
4.5 测量面的表面粗糙度	(4)
4.6 量爪测量面的圆弧半径及素线平行度	(4)
4.7 示值误差	(4)
4.8 校对环规直径尺寸	(5)
4.9 细分误差	(5)
4.10 数值漂移	(5)
5 校准条件	(5)
5.1 环境条件	(5)
5.2 校准项目和标准器	(5)
6 校准方法	(6)
6.1 测力	(6)
6.2 刻线宽度及宽度差	(6)
6.3 微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离	(6)
6.4 微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置	(7)
6.5 测量面的表面粗糙度	(7)
6.6 量爪测量面的圆弧半径及素线平行度	(7)
6.7 示值误差	(7)
6.8 校对环规直径尺寸	(8)
6.9 细分误差	(8)
6.10 数值漂移	(8)
7 校准结果表达	(8)
8 复校时间间隔	(8)
附录 A 三点内径千分尺示值误差测量结果不确定度评定	(9)
附录 B 内测千分尺示值误差测量结果不确定度评定	(13)
附录 C 数显三点内径千分尺示值误差测量结果不确定度评定	(17)
附录 D 数显内测千分尺示值误差测量结果不确定度评定	(21)
附录 E 校准证书内容及内页格式	(25)

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》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑校准规范修订工作的基础性系列规范。

JJF 1411—2013《测量内尺寸千分尺校准规范》(以下简称“本规范”)等同采用GB/T 6314—2004《三爪内径千分尺》、JB/T 10006—1999《内测千分尺》、修改采用GB/T 22093—2008《电子数显内径千分尺》,本规范替代JJF 1091—2002《测量内尺寸千分尺校准规范》。

与JJF 1091—2002相比,除编辑性修改外,本规范主要技术变化如下:

——三点内径千分尺测量范围增加到300 mm,电子数显内测千分尺测量范围增加到200 mm。

——对内尺寸千分尺外形结构图进行了较大的改动,与现在新型的结构基本一致。

——“示值误差”等技术指标按GB/T 22093—2008《电子数显内径千分尺》、JB/T 10006—1999《内测千分尺》的要求等同采用。

——“校对环规直径尺寸”尺寸要求及技术指标进行了较大改动,等同采用GB/T 22093—2008《电子数显内径千分尺》国家标准的要求。

——增加电子数显内尺寸千分尺“细分误差”和“数值漂移”二项技术要求。

——在示值误差检定方法中增加国际建议推荐的10点量块尺寸要求。

——增加电子数显三点内径千分尺和电子数显内测千分尺的示值误差不确定度评定。

——原规范测量三点内径千分尺所用环规尺寸的可操作性差,在新版中已经去掉。

JJF 1091—2002的历次版本发布情况:

JJG 23—1988 内测千分尺;

JJG 378—1985 孔径千分尺。

测量内尺寸千分尺校准规范

1 范围

本规范适用于分度值为 0.01 mm 测量范围上限至 150 mm 的内测千分尺，分度值为 0.001 mm、0.002 mm、0.005 mm 测量范围上限至 300 mm 的三点内径千分尺，分辨力为 0.001 mm 测量范围上限至 200 mm 的电子数显内测千分尺以及分辨力为 0.001 mm 测量范围上限至 300 mm 的电子数显三点内径千分尺的校准。

分辨力为 0.001 mm~0.01 mm 测量范围上限至 200 mm 的计数器内测千分尺和分辨力为 0.001 mm~0.01 mm 测量范围上限至 300 mm 的计数器三点内径千分尺，可以参考本规范进行校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJG 894—1995 标准环规

GB/T 6314—2004 三爪内径千分尺

GB/T 22093—2008 电子数显内径千分尺

JB/T 10006—1999 内测千分尺

DIN863-1 千分尺 (DIN863-1 micrometer)

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）适用本规范。

3 概述

内测千分尺是通过螺旋副将旋转运动转变为两个弧形测量面沿与旋转轴线平行的直线运动，并对两测量面分割的距离读数的内尺寸测量器具。它的外形结构见图 1。

电子数显内测千分尺是通过螺旋副将旋转运动转变为两个弧形测量面沿与旋转轴线平行的直线运动，利用角度传感器、电子和数字显示技术，计算并显示两测量面分割的距离的内尺寸测量器具。它的外形结构见图 2。

三点内径千分尺是通过螺旋副和转向机构将旋转运动转变为三个弧形测量面沿与旋转轴线垂直的直线运动，并对三个弧形测量面构成的圆柱直径读数的内尺寸测量器具。它的外形结构见图 3。

电子数显三点内径千分尺是通过螺旋副和转向机构将旋转运动转变为三个弧形测量面沿与旋转轴线垂直的直线运动，利用角度传感器、电子和数字显示技术，计算并显示三个弧形测量面构成的圆柱直径的内尺寸测量器具。它的外形结构见图 4。

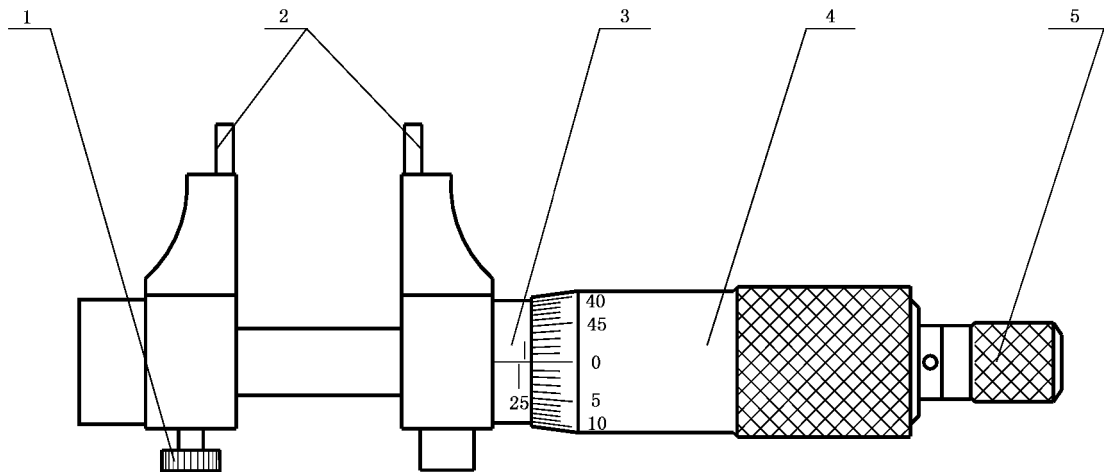


图 1 内测千分尺外形结构

1—锁紧装置；2—测量面；3—固定套管；4—微分筒；5—测力装置

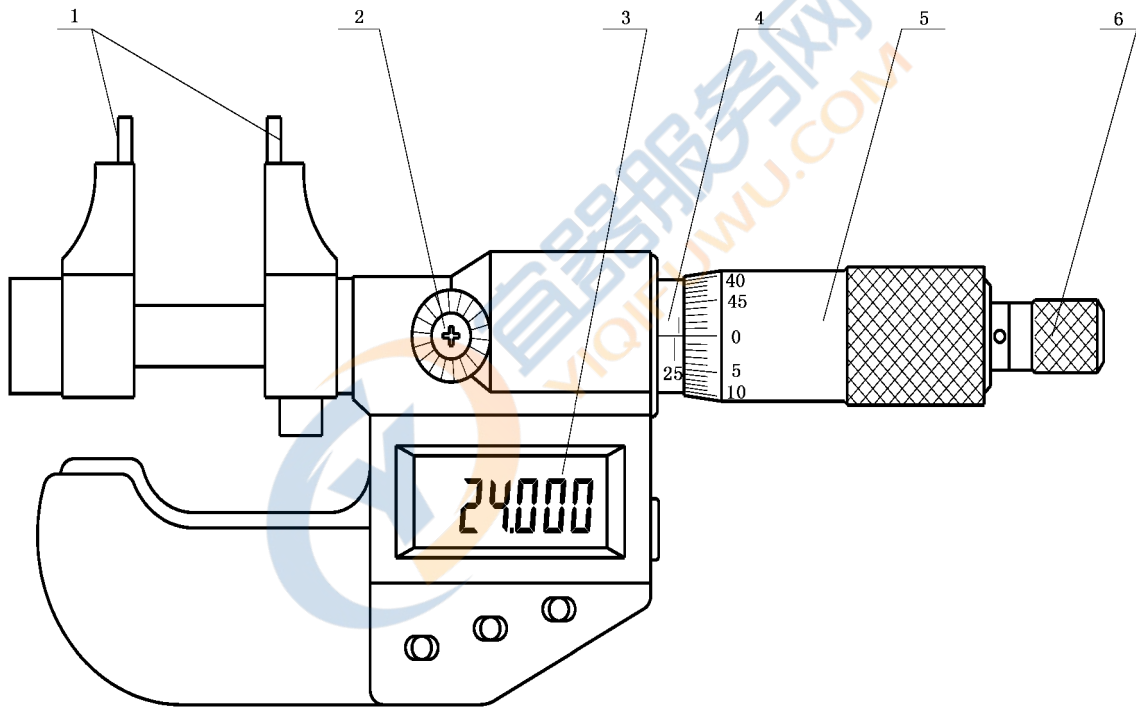


图 2 电子数显内测千分尺外形结构

1—测量面；2—锁紧装置；3—电子数显装置；4—固定套管；5—微分筒；6—测力装置

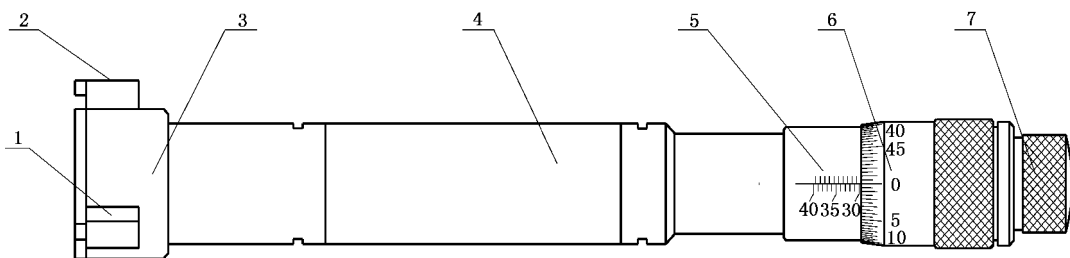


图 3 三点内径千分尺外形结构

1—量爪；2—测量面；3—主体或底座；4—深度接长杆；5—固定套管；6—微分筒；7—测力装置

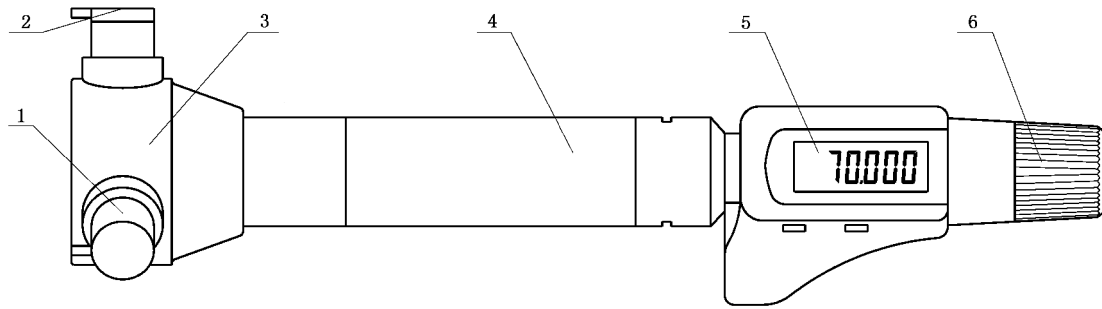


图4 电子数显三点内径千分尺外形结构

1—量爪；2—测量面；3—主体或底座；4—深度接长杆；5—电子数显装置；6—测力装置

4 计量特性

4.1 测力

4.1.1 内测千分尺及电子数显内测千分尺的测力及测力变化见表1。

表1 内测千分尺及电子数显内测千分尺的测力及测力变化

测量范围/mm	测力/N	测力变化/N
$\geq 5 \sim 50$	3~7	2
$> 50 \sim 200$	5~10	2

4.1.2 三点内径千分尺及电子数显三点内径千分尺的测力及测力变化见表2。

表2 三点内径千分尺及电子数显三点内径千分尺的测力及测力变化

测量范围/mm	测力/N	测力变化/N
$\geq 6 \sim 12$	6~15	5
$> 12 \sim 100$	10~30	10
$> 100 \sim 300$	15~45	15

4.2 刻线宽度及宽度差

固定套管纵刻线和微分筒上的刻线宽度为 $(0.08 \sim 0.20)$ mm，刻线宽度差一般不大于 0.03 mm。

4.3 微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离

微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离一般不大于 0.4 mm，见图5中 a 。

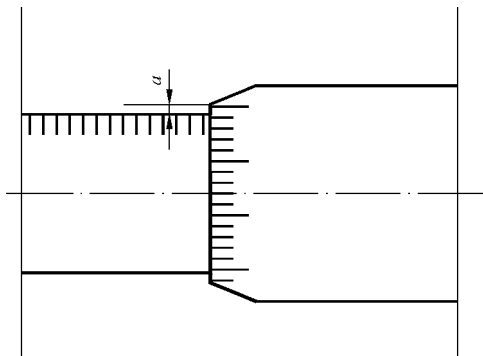


图5 内尺寸千分尺微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离

4.4 微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置

当微分筒零刻线与固定套管纵刻线对准后，微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的右边缘应相切，若不相切，压线一般不大于 0.05 mm，离线一般不大于 0.1 mm。

4.5 测量面的表面粗糙度

测量面的表面粗糙度一般不大于 $Ra\ 0.20\ \mu\text{m}$ 。

4.6 量爪测量面的圆弧半径及素线平行度

测量内尺寸千分尺量爪测量面的圆弧半径一般不超过测量下限尺寸的一半。

内测千分尺及电子数显内测千分尺测量面素线的平行度，见表 3。

表 3 内测千分尺素线平行度

测量范围/mm	测量面素线的平行度/ μm
$\geq 5\sim 30$	2
$> 25\sim 50$	2
$> 50\sim 75$	3
$> 75\sim 100$	3
$> 100\sim 125$	4
$> 125\sim 150$	4
$> 150\sim 200$	4

4.7 示值误差

测量内尺寸千分尺的示值最大允许误差应符合表 4 规定。

表 4 测量内尺寸千分尺的示值误差

mm

被校尺的名称	测量范围	示值最大允许误差
内测千分尺	$\geq 5\sim 30$	± 0.007
	$> 25\sim 50$	± 0.008
	$> 50\sim 75$	± 0.009
	$> 75\sim 100$	± 0.010
	$> 100\sim 125$	± 0.011
	$> 125\sim 150$	± 0.012
电子数显内测千分尺	$\geq 5\sim 50$	± 0.005
	$> 50\sim 100$	± 0.006
	$> 100\sim 150$	± 0.007
	$> 150\sim 200$	± 0.008
三点内径千分尺及电子数显三点内径千分尺	$\geq 6\sim 50$	± 0.004
	$> 50\sim 100$	± 0.005
	$> 100\sim 150$	± 0.006
	$> 150\sim 200$	± 0.007
	$> 200\sim 250$	± 0.008
	$> 250\sim 300$	± 0.009

4.8 校对环规直径尺寸

测量内尺寸千分尺零位校对环规的直径尺寸一般为其测量范围下限值，其测量不确定度应符合表 5 规定。

表 5 测量内尺寸千分尺校对环规直径尺寸 mm

标称尺寸	直径尺寸的测量不确定度 $U (k=2)$
$\geq 5 \sim 10$	0.001 3
$\geq 10 \sim 100$	0.001 5
$\geq 100 \sim 200$	0.002 0
$\geq 200 \sim 300$	0.002 5

4.9 细分误差

电子数显内测千分尺及电子数显三点内径千分尺的电子数显装置的细分误差一般不大于 0.002 mm。

4.10 数值漂移

电子数显内测千分尺及电子数显三点内径千分尺的电子数显装置的数值漂移一般不大于其分辨力。

注：以上指标不用于合格性判别，仅供参考。

5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 被校测量内尺寸千分尺及校准器具在温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的室内平衡温度时间不少于 4 h。

5.1.2 校对环规参照 JJG 894—1995 标准环规的校准条件。

5.2 校准项目和标准器

校准项目和标准器见表 6。

表 6 校准项目和标准器

序号	校准项目	主要校准器具
1	测力	量仪测力仪：2.0 级
2	刻线宽度及宽度差	工具显微镜 MPEV：3 μm 或读数显微镜 MPE： $\pm 0.010 \text{ mm}$
3	微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离	塞尺 MPE： $\pm 0.012 \text{ mm}$ 或工具显微镜 MPEV：3 μm
4	微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置	—
5	测量面的表面粗糙度	表面粗糙度比较样块 R_a 值 MPE： $-17\% \sim +12\%$
6	量爪测量面的圆弧半径及素线平行度	半径样板 MPE： $\pm 0.042 \text{ mm}$ 杠杆千分尺 MPE： $\pm 1 \mu\text{m}$

表 6 (续)

序号	校准项目	主要校准器具
7	示值误差	标准环规：3 等 或 5 等量块及量块附件
8	校对环规直径尺寸	—
9	细分误差	—
10	数值漂移	—

6 校准方法

首先检查外观，确定没有影响校准特性的因素后再进行校准。

6.1 测力

用准确度为 2.0 级的量仪测力仪测量。

6.1.1 使内测千分尺和电子数显内测千分尺的圆柱形测量面与测力仪平面测头接触，在测量上限、测量下限两极限位置上进行测量，在测力计上分别读取两个数值，均应满足表 1 规定，两数值之差为测力变化。

6.1.2 分别在三点内径千分尺和电子数显三点内径千分尺的测量上限、测量下限进行测量。测量时，借助 V 形块进行，三点内径千分尺的 3 个量爪应同时受力，然后在测力计上分别读取两个数值，均应满足表 2 规定，两数值之差为测力变化，见图 6。

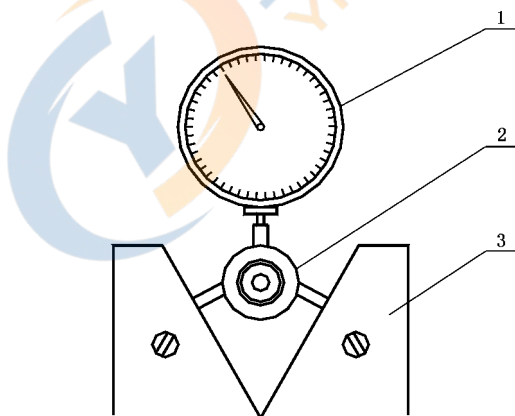


图 6 三点内径千分尺的测力方法

1—测力仪；2—三点内径千分尺；3—V 形块

6.2 刻线宽度及宽度差

在工具显微镜或读数显微镜上测量。微分筒和固定套管至少各抽测均匀分布的 3 条刻线。刻线宽度差以最大值和最小值之差确定。

注：建议此项仅在首次校准时测量。

6.3 微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离

在工具显微镜上测量。也可用厚度为 0.4 mm 的塞尺进行比较测量。在微分筒 1 圈内每转动 90°测量 1 次。

6.4 微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置

当测量下限调整正确后，转动微分筒使其零刻线与固定套管的纵刻线对准，观察微分筒锥面的端面是否与固定套管毫米刻线右边缘相切，若不相切时，转动微分筒使其相切，在微分筒上读出其零刻线对固定套管纵刻线的偏移量，该偏移量即为离线或压线的数值，见图 7。

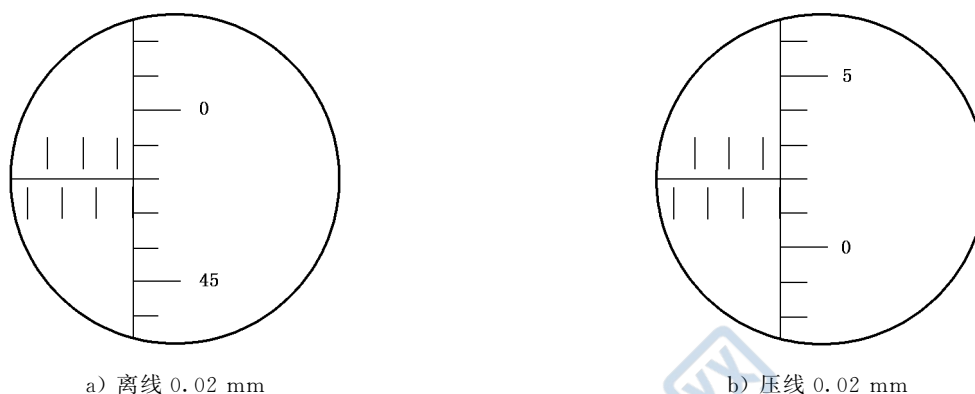


图 7 微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置

6.5 测量面的表面粗糙度

用表面粗糙度比较样块以比较法进行测量。在进行比较时，所用的表面粗糙度样块和被校测量面的加工方法应该相同，表面粗糙度样块的材料、形状、表面色泽等也应尽可能与被校测量面一致。判断的准则是根据被校测量面加工痕迹的深浅来决定表面粗糙度是否符合要求，当被校测量面的加工痕迹深浅不超过表面粗糙度样块工作面加工痕迹深度时，则被校测量面的表面粗糙度一般不超过表面粗糙度样块的标称值。

6.6 量爪测量面的圆弧半径及素线平行度

测量内尺寸千分尺量爪测量面的圆弧半径用半径样板以光隙法测量。只允许样板两侧有光隙。

内测千分尺及数显内测千分尺量爪测量面素线平行度用杠杆千分尺测量。当分别在量爪圆弧测量面的两端进行测量时，所得尺寸的差值即为素线平行度。

6.7 示值误差

测量内尺寸千分尺示值误差用 3 等标准环规在测量行程范围内均匀分布的不少于 4 个测量点数进行校准。内测千分尺及电子数显内测千分尺也可用 5 等量块和量块附件组成的内尺寸校准。

校准时应先以标准环规校好零位，然后在标准环规工作面的中间截面上进行，把测量结果代入公式 (1)，求得该点示值误差。取各受校点中绝对值最大的示值误差为该尺的示值误差。

各点示值误差按公式 (1) 求得：

$$e_i = L_i - L_s \quad (1)$$

式中：

e_i ——示值误差，mm；

L_i ——测量内尺寸千分尺的读数值，mm；

L_s ——标准环规或量块的实际尺寸，mm。

使用量块校准内测千分尺及电子数显内测千分尺的测量点为： A ， $A+5.12$ ， $A+10.24$ ， $A+15.36$ ， $A+21.50$ ， $A+25$ （或德国标准推荐值： A ， $A+2.5$ mm， $A+5.1$ mm， $A+7.7$ mm， $A+10.3$ mm， $A+12.9$ mm， $A+15$ mm， $A+17.6$ mm， $A+20.2$ mm， $A+22.8$ mm， $A+25$ mm）。 A 为测量范围的下限。

6.8 校对环规直径尺寸

校对环规直径尺寸测量方法参照 JJG 894—1995 标准环规检定规程。

6.9 细分误差

对于带有微分筒的数显内尺寸千分尺测量细分误差时，在测量范围任意位置上，以微分筒刻度为基准，数字显示装置清零，每隔 0.04 mm 为测量点，共测量 12 个点。读取各校准点数字显示值与刻度显示值之差为测量结果，取各测量结果中最大值与最小值之差即为细分误差。

注：建议此项仅在首次校准时测量。

6.10 数值漂移

在任意位置下使测微螺杆固定，并保持 1 h。观察电子数显装置显示数值的变化。

带自动关机功能的测量内尺寸千分尺可不校准此项。

7 校准结果表达

经校准的测量内尺寸千分尺发给校准证书。

校准证书及内页格式见附录 E。

8 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

三点内径千分尺示值误差测量结果不确定度评定

A.1 测量方法

以标准环规对三点内径千分尺的示值误差进行校准。以分度值为 0.005 mm 三点内径千分尺为例。

A.2 测量模型

$$e_i = L_i - L_s + L_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_i - L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_s \quad (\text{A.1})$$

式中：

e_i ——三点内径千分尺的示值误差；

L_i ——三点内径千分尺的示值（20℃条件下）；

L_s ——标准环规的实际尺寸（20℃条件下）；

α_i 和 α_s ——分别是三点内径千分尺和标准环规的线膨胀系数；

Δt_i 和 Δt_s ——分别是三点内径千分尺和标准环规偏离参考温度 20℃ 的值。

A.3 方差和灵敏系数

因为 Δt_i 和 Δt_s 来源于同一只温度计而相关，数学处理过程非常复杂，因此我们采用下述方法将相关转化为不相关，以简化数学处理过程。

$$\text{令 } \delta_\alpha = \alpha_i - \alpha_s \quad \delta_t = \Delta t_i - \Delta t_s$$

$$\text{取 } L \approx L_i \approx L_s \quad \alpha = \alpha_i = \alpha_s \quad \Delta t = \Delta t_i = \Delta t_s$$

$$\begin{aligned} \text{则 } e_i &= L_i - L_s + L_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_i - L_i \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_i + L_i \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_i - L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_s \\ &= L_i - L_s + L \cdot \Delta t \cdot \delta_\alpha + L \cdot \alpha \cdot \delta_t \end{aligned}$$

$$\text{又 } c_1 = \partial e_i / \partial L_i = 1; c_2 = \partial e_i / \partial L_s = -1; c_3 = \partial e_i / \partial \delta_\alpha = L \cdot \Delta t; c_4 = \partial e_i / \partial \delta_t = L \cdot \alpha$$

令 u_1, u_2, u_3, u_4 分别表示 $L_i, L_s, \delta_\alpha, \delta_t$ 的不确定度，则

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u^2(e_i) = u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 u_4^2 \\ &= u_i^2 + u_s^2 + u_\alpha^2 + u_t^2 \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

A.4 标准不确定度一览表

表 A.1 不确定度概算汇总表

L=6 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	0.32 μm	1	0.32
u_s	标准环规的不确定度	0.25 μm	-1	0.25
u_α	三点内径千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 2 \times 10^3 \times 5 \text{ } \mu\text{m } ^\circ\text{C}$	0.006
u_t	三点内径千分尺与标准环规的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 2 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$	0.004
$u_c = 0.41 \text{ } \mu\text{m}$		$U = 0.9 \text{ } \mu\text{m} \quad (k=2)$		

表 A.2 不确定度概算汇总表

L=100 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	0.42 μm	1	0.42
u_s	标准环规的不确定度	0.58 μm	-1	0.58
u_a	三点内径千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 25 \times 10^3 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{C}$	0.073
u_t	三点内径千分尺与标准环规的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$	0.050
$u_c = 0.72 \text{ } \mu\text{m}$ $U = 1.5 \text{ } \mu\text{m}$ ($k=2$)				

表 A.3 不确定度概算汇总表

L=300 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	0.48 μm	1	0.48
u_s	标准环规的不确定度	1.14 μm	-1	1.14
u_a	三点内径千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 25 \times 10^3 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{C}$	0.073
u_t	三点内径千分尺与标准环规的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$	0.050
$u_c = 1.24 \text{ } \mu\text{m}$ $U = 2.5 \text{ } \mu\text{m}$ ($k=2$)				

A.5 计算标准不确定度分量

A.5.1 测量重复性估算的不确定度分量 u_i

L=6 mm 时, 以三点内径千分尺测量 6 mm 标准环规, 重复测量 10 次, 数据为 5.999 mm, 5.999 mm, 5.998 mm, 5.999 mm, 5.998 mm, 5.999 mm, 5.999 mm, 5.999 mm, 5.999 mm, 5.999 mm。由贝塞尔公式得实验室标准差

$$u_i = u_1 = s = 0.32 \text{ } \mu\text{m}$$

L=100 mm 时, 以三点内径千分尺测量 100 mm 标准环规, 重复测量 10 次, 数据为 99.997 mm, 99.998 mm, 99.998 mm, 99.998 mm, 99.997 mm, 99.998 mm, 99.998 mm, 99.998 mm, 99.998 mm, 99.998 mm。由贝塞尔公式得实验室标准差

$$u_i = u_1 = s = 0.42 \text{ } \mu\text{m}$$

L=300 mm 时, 以三点内径千分尺测量 300 mm 标准环规, 重复测量 10 次, 数据为 300.003 mm, 300.003 mm, 300.003 mm, 300.004 mm, 300.003 mm, 300.004 mm, 300.004 mm, 300.003 mm, 300.003 mm, 300.003 mm。由贝塞尔公式得实验室标准差

$$u_i = u_1 = 0.48 \mu\text{m}$$

A. 5.2 由标准环规给出的不确定度分量 u_s

标准环规的不确定度由溯源证书得到, $U = (0.7 + 6L) \mu\text{m}$ ($k=3$)。

当 $L=6 \text{ mm}$ 时, 只以下限环规对零位

$$u_s = u_2 = (0.7 + 6 \times 0.006) / 3 = 0.25 \mu\text{m}$$

当 $L=100 \text{ mm}$ 时, $u_{2\pm} = (0.7 + 6 \times 0.1) / 3 = 0.433 \mu\text{m}$

测量下限 $L=75 \text{ mm}$, $u_{2\text{F}} = (0.7 + 6 \times 0.075) / 3 = 0.383 \mu\text{m}$

$$u_s = u_2 = \sqrt{0.433^2 + 0.383^2} = 0.58 \mu\text{m}$$

当 $L=300 \text{ mm}$ 时, $u_{2\pm} = (0.7 + 6 \times 0.3) / 3 = 0.833 \mu\text{m}$

测量下限 $L=275 \text{ mm}$, $u_{2\text{F}} = (0.7 + 6 \times 0.275) / 3 = 0.783 \mu\text{m}$

$$u_s = u_2 = \sqrt{0.833^2 + 0.783^2} = 1.14 \mu\text{m}$$

A. 5.3 三点内径千分尺与标准环规的膨胀系数差给出的不确定度分量 u_a

δ_a 在 $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 范围内按均匀分布, 则 $u_3 = 1/\sqrt{3} = 0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$L=6 \text{ mm}$ 时, 三点内径千分尺读数装置的测量范围为 (6~8) mm, 即 $L=2 \text{ mm}$

则 $u_a = L \cdot \Delta t \cdot u_3 = 2 \times 10^3 \mu\text{m} \times 5 \text{ } ^\circ\text{C} \times 0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 0.006 \mu\text{m}$

$L=100 \text{ mm}$ 及 $L=300 \text{ mm}$ 时, 三点内径千分尺读数装置的测量范围为 25 mm, 即 $L=25 \text{ mm}$

则 $u_a = L \cdot \Delta t \cdot u_3 = 25 \times 10^3 \mu\text{m} \times 5 \text{ } ^\circ\text{C} \times 0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 0.073 \mu\text{m}$

A. 5.4 三点内径千分尺与标准环规的温度差给出的不确定度分量 u_t

三点内径千分尺与标准环规有一定的温差存在, 并以等概率落于区间 $[-0.3, +0.3] \text{ } ^\circ\text{C}$ 内

$$u_4 = 0.3 / \sqrt{3} = 0.173 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$L=6 \text{ mm}$ 时, 三点内径千分尺读数装置的测量范围为 (6~8) mm, 即 $L=2 \text{ mm}$

$$u_t = L \cdot \alpha \cdot u_4 = 2 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \mu\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.173 \text{ } ^\circ\text{C} = 0.004 \mu\text{m}$$

$L=100 \text{ mm}$ 及 $L=300 \text{ mm}$ 时, 三点内径千分尺读数装置的测量范围为 25 mm, 即 $L=25 \text{ mm}$

则 $u_t = L \cdot \alpha \cdot u_4 = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \mu\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.173 \text{ } ^\circ\text{C} = 0.050 \mu\text{m}$

A. 6 合成标准不确定度 u_c

由式 (A.2) $u_c^2 = u^2(e_i) = u_i^2 + u_s^2 + u_a^2 + u_t^2$

当 $L=6 \text{ mm}$ 时:

$$u_c^2 = 0.32^2 + 0.25^2 + 0.006^2 + 0.004^2 = 0.165 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 0.41 \mu\text{m}$$

当 $L=100 \text{ mm}$ 时:

$$u_c^2 = 0.42^2 + 0.58^2 + 0.073^2 + 0.050^2 = 0.52 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 0.72 \mu\text{m}$$

当 $L=300 \text{ mm}$ 时:

$$u_c^2 = 0.48^2 + 1.14^2 + 0.073^2 + 0.050^2 = 1.55 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 1.24 \mu\text{m}$$

A.7 扩展不确定度

取 $k=2$,

当 $L=6 \text{ mm}$ 时: $U=2 \times 0.41 \approx 0.9 \mu\text{m}$

当 $L=100 \text{ mm}$ 时: $U=2 \times 0.72 \approx 1.5 \mu\text{m}$

当 $L=300 \text{ mm}$ 时: $U=2 \times 1.24 \approx 2.5 \mu\text{m}$

表 A.4 不确定度概算汇总表

测量值 L mm	不确定度分量 μm				u_c μm	$U, (k=2)$ μm	允许值 μm
	u_1	u_2	$c_3 u_3$	$c_4 u_4$			
6	0.32	0.25	0.006	0.004	0.41	0.9	4
10	0.32	0.35	0.012	0.008	0.48	1.0	4
25	0.42	0.38	0.044	0.030	0.57	1.2	4
50	0.42	0.44	0.073	0.050	0.61	1.3	4
100	0.42	0.58	0.073	0.050	0.72	1.5	5
125	0.48	0.65	0.073	0.050	0.81	1.7	6
150	0.42	0.72	0.073	0.050	0.84	1.7	6
200	0.48	0.86	0.073	0.050	0.99	2.0	7
250	0.48	1.00	0.073	0.050	1.08	2.2	8
275	0.48	1.07	0.073	0.050	1.18	2.4	9
300	0.48	1.14	0.073	0.050	1.24	2.5	9

附录 B

内测千分尺示值误差测量结果不确定度评定

B.1 测量方法

以标准环规对内测千分尺的示值误差进行校准。以分度值为 0.01 mm 内测千分尺为例。

B.2 测量模型

$$e_i = L_i - L_s + L_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_i - L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_s \quad (\text{B.1})$$

式中：

e_i ——内测千分尺的示值误差；

L_i ——三点内径千分尺的示值（20 °C 条件下）；

L_s ——标准环规的实际尺寸（20 °C 条件下）；

α_i 和 α_s ——分别是三点内径千分尺和标准环规的线膨胀系数；

Δt_i 和 Δt_s ——分别是三点内径千分尺和标准环规偏离参考温度 20 °C 的值。

B.3 方差和灵敏系数

因为 Δt_i 和 Δt_s 来源于同一只温度计而相关，数学处理过程非常复杂，因此我们采用下述方法将相关转化为不相关，以简化数学处理过程。

$$\text{令 } \delta_\alpha = \alpha_i - \alpha_s \quad \delta_t = \Delta t_i - \Delta t_s$$

$$\text{取 } L \approx L_i \approx L_s \quad \alpha = \alpha_i = \alpha_s \quad \Delta t = \Delta t_i = \Delta t_s$$

$$\begin{aligned} \text{则 } e_i &= L_i - L_s + L_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_i - L_i \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_i + L_i \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_i - L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_s \\ &= L_i - L_s + L \cdot \Delta t \cdot \delta_\alpha + L \cdot \alpha \cdot \delta_t \end{aligned}$$

$$\text{又 } c_1 = \partial e_i / \partial L_i = 1; \quad c_2 = \partial e_i / \partial L_s = -1; \quad c_3 = \partial e_i / \partial \delta_\alpha = L \cdot \Delta t; \quad c_4 = \partial e_i / \partial \delta_t = L \cdot \alpha$$

令 u_1, u_2, u_3, u_4 分别表示 $L_i, L_s, \delta_\alpha, \delta_t$ 的不确定度，则

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u^2(e_i) = u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 u_4^2 \\ &= u_i^2 + u_s^2 + u_\alpha^2 + u_t^2 \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

B.4 标准不确定度一览表

表 B.1 不确定度概算汇总表

L=5 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	0.42 μm	1	0.42
u_s	标准环规的不确定度	0.24 μm	-1	0.24
u_α	内测千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 25 \times 10^3 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{C}$	0.073
u_t	内测千分尺与标准环规的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$	0.050
$u_c = 0.49 \text{ } \mu\text{m}$		$U = 1.0 \text{ } \mu\text{m}$	$(k=2)$	

表 B.2 不确定度概算汇总表

L=100 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	0.42 μm	1	0.42
u_s	标准环规的不确定度	0.58 μm	-1	0.58
u_a	内测千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 25 \times 10^3 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{C}$	0.073
u_t	内测千分尺与标准环规的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$	0.050
$u_c = 0.72 \text{ } \mu\text{m}$ $U = 1.5 \text{ } \mu\text{m}$ ($k=2$)				

表 B.3 不确定度概算汇总表

L=150 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	0.48 μm	1	0.48
u_s	标准环规的不确定度	0.72 μm	-1	0.72
u_a	内测千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 25 \times 10^3 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{C}$	0.073
u_t	内测千分尺与标准环规的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$	0.050
$u_c = 0.87 \text{ } \mu\text{m}$ $U = 1.8 \text{ } \mu\text{m}$ ($k=2$)				

B.5 计算标准不确定度分量

B.5.1 测量重复性估算的不确定度分量 u_i

L=5 mm 时, 以内测千分尺测量 5 mm 标准环规, 重复测量 10 次, 由贝塞尔公式得实验室标准差

$$u_i = u_1 = s = 0.42 \text{ } \mu\text{m}$$

L=100 mm 时, 以内测千分尺测量 100 mm 标准环规, 重复测量 10 次。由贝塞尔公式得实验室标准差

$$u_i = u_1 = s = 0.42 \text{ } \mu\text{m}$$

L=150 mm 时, 以内测千分尺测量 200 mm 标准环规, 重复测量 10 次。由贝塞尔公式得实验室标准差

$$u_i = u_1 = 0.48 \text{ } \mu\text{m}$$

B.5.2 由标准环规给出的不确定度分量 u_s

标准环规的不确定度由溯源证书得到, $U = (0.7 + 6L) \text{ } \mu\text{m}$ ($k=3$)。
当 L=5 mm 时, 只以下限环规对零位,

$$u_s = u_2 = (0.7 + 6 \times 0.005) / 3 = 0.24 \mu\text{m}$$

当 $L=100 \text{ mm}$ 时, $u_{2\pm} = (0.7 + 6 \times 0.1) / 3 = 0.433 \mu\text{m}$

测量下限 $L=75 \text{ mm}$, $u_{2\text{F}} = (0.7 + 6 \times 0.075) / 3 = 0.383 \mu\text{m}$

$$u_s = u_2 = \sqrt{0.433^2 + 0.383^2} = 0.58 \mu\text{m}$$

当 $L=150 \text{ mm}$ 时, $u_{2\pm} = (0.7 + 6 \times 0.150) / 3 = 0.533 \mu\text{m}$

测量下限 $L=125 \text{ mm}$, $u_{2\text{F}} = (0.7 + 6 \times 0.125) / 3 = 0.483 \mu\text{m}$

$$u_s = u_2 = \sqrt{0.533^2 + 0.483^2} = 0.72 \mu\text{m}$$

B. 5.3 内测千分尺与标准环规的膨胀系数差给出的不确定度分量 u_3

δ_α 在 $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 范围内按均匀分布, 则 $u_3 = 1/\sqrt{3} = 0.58 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

内测千分尺读数装置的测量范围为 25 mm , 即 $L=25 \text{ mm}$

则 $u_\alpha = L \cdot \Delta t \cdot u_3 = 25 \times 10^3 \mu\text{m} \times 5 \text{ }^\circ\text{C} \times 0.58 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} = 0.073 \mu\text{m}$

B. 5.4 内测千分尺与标准环规的温度差给出的不确定度分量 u_4

内测千分尺与标准环规有一定的温差存在, 并以等概率落于区间 $[-0.3, +0.3] \text{ }^\circ\text{C}$ 内

$$u_4 = 0.3 / \sqrt{3} = 0.173 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 11.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

内测千分尺读数装置的测量范围为 25 mm , 即 $L=25 \text{ mm}$

$$u_t = L \cdot \alpha \cdot u_4 = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \mu\text{m} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 0.173 \text{ }^\circ\text{C} = 0.050 \mu\text{m}$$

B. 6 合成标准不确定度 u_c

由式 (B.2) $u_c^2 = u^2(e_i) = u_i^2 + u_s^2 + u_\alpha^2 + u_t^2$

当 $L=5 \text{ mm}$ 时:

$$u_c^2 = 0.42^2 + 0.24^2 + 0.073^2 + 0.050^2 = 0.24 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 0.49 \mu\text{m}$$

当 $L=100 \text{ mm}$ 时:

$$u_c^2 = 0.42^2 + 0.58^2 + 0.073^2 + 0.050^2 = 0.52 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 0.72 \mu\text{m}$$

当 $L=150 \text{ mm}$ 时:

$$u_c^2 = 0.48^2 + 0.72^2 + 0.073^2 + 0.050^2 = 0.76 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 0.87 \mu\text{m}$$

B. 7 扩展不确定度

取 $k=2$,

当 $L=5 \text{ mm}$ 时: $U=2 \times 0.49 \approx 1.0 \mu\text{m}$

当 $L=100 \text{ mm}$ 时: $U=2 \times 0.72 \approx 1.5 \mu\text{m}$

当 $L=150 \text{ mm}$ 时: $U=2 \times 0.87 \approx 1.8 \mu\text{m}$

表 B.4 不确定度概算汇总表

测量值 L mm	不确定度分量				u_c μm	$U, (k=2)$ μm	允许值 μm
	u_1	u_2	$c_3 u_3$	$c_4 u_4$			
5	0.42	0.24	0.073	0.050	0.49	1.0	7
30	0.48	0.38	0.073	0.050	0.62	1.3	7
50	0.42	0.44	0.073	0.050	0.61	1.3	8
75	0.42	0.51	0.073	0.050	0.66	1.4	9
100	0.42	0.58	0.073	0.050	0.72	1.5	10
125	0.48	0.65	0.073	0.050	0.81	1.7	11
150	0.48	0.72	0.073	0.050	0.87	1.8	12



附录 C

数显三点内径千分尺示值误差测量结果不确定度评定

C.1 测量方法

以标准环规对数显三点内径千分尺的示值误差进行校准。以分辨力为 0.001 mm 数显三点内径千分尺为例进行分析。

C.2 测量模型

$$e_i = L_i - L_s + L_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_i - L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_s \quad (\text{C.1})$$

式中：

e_i ——三点内径千分尺的示值误差；

L_i ——三点内径千分尺的示值（20 °C 条件下）；

L_s ——标准环规的实际尺寸（20 °C 条件下）；

α_i 和 α_s ——分别是三点内径千分尺和标准环规的线膨胀系数；

Δt_i 和 Δt_s ——分别是三点内径千分尺和标准环规偏离参考温度 20 °C 的值。

C.3 方差和灵敏系数

因为 Δt_i 和 Δt_s 来源于同一只温度计而相关，数学处理过程非常复杂，因此我们采用下述方法将相关转化为不相关，以简化数学处理过程。

令 $\delta_\alpha = \alpha_i - \alpha_s$

$\delta_t = \Delta t_i - \Delta t_s$

取 $L \approx L_i \approx L_s$

$\alpha = \alpha_i = \alpha_s$

$\Delta t = \Delta t_i = \Delta t_s$

则 $e = L_i - L_s + L_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_i - L_i \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_i + L_i \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_i - L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_s$

$= L_i - L_s + L \cdot \Delta t \cdot \delta_\alpha + L \cdot \alpha \cdot \delta_t$

又 $c_1 = \partial e / \partial L_i = 1$ ； $c_2 = \partial e / \partial L_s = -1$ ； $c_3 = \partial e / \partial \delta_\alpha = L \cdot \Delta t$ ； $c_4 = \partial e / \partial \delta_t = L \cdot \alpha$

令 u_1, u_2, u_3, u_4 分别表示 $L_i, L_s, \delta_\alpha, \delta_t$ 的不确定度，则

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u^2(e_i) = u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 u_4^2 \\ &= u_i^2 + u_s^2 + u_\alpha^2 + u_t^2 \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

C.4 标准不确定度一览表

表 C.1 不确定度概算汇总表

L=6 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	0.32 μm	1	0.32
u_s	标准环规的不确定度	0.25 μm	-1	0.25
u_α	数显三点内径千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 2 \times 10^3 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{C}$	0.006
u_t	数显三点内径千分尺与标准环规的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 2 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$	0.004
$u_c = 0.41 \text{ } \mu\text{m}$		$U = 0.9 \text{ } \mu\text{m} \quad (k=2)$		

表 C.2 不确定度概算汇总表

L=50 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	$0.42 \mu\text{m}$	1	0.42
u_s	标准环规的不确定度	$0.44 \mu\text{m}$	-1	0.44
u_a	数显三点内径千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 25 \times 10^3 \times 5 \mu\text{m } ^\circ\text{C}$	0.073
u_t	数显三点内径千分尺与标准环规的温度差	$0.173 \text{ } ^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \mu\text{m}$	0.050
$u_c = 0.61 \mu\text{m}$ $U = 1.3 \mu\text{m}$ ($k=2$)				

表 C.3 不确定度概算汇总表

L=300 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	$0.48 \mu\text{m}$	1	0.48
u_s	标准环规的不确定度	$1.14 \mu\text{m}$	-1	1.14
u_a	数显三点内径千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 25 \times 10^3 \times 5 \mu\text{m } ^\circ\text{C}$	0.073
u_t	数显三点内径千分尺与标准环规的温度差	$0.173 \text{ } ^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \mu\text{m}$	0.050
$u_c = 1.24 \mu\text{m}$ $U = 2.5 \mu\text{m}$ ($k=2$)				

C.5 计算标准不确定度分量

C.5.1 测量重复性估算的不确定度分量 u_i

数显三点内径千分尺分辨力为 0.001 mm ，等概率分布在区间半宽 $\pm 5 \mu\text{m}$ 内，则由分辨力引入的不确定度分量为 $0.5/\sqrt{3} = 0.29 \mu\text{m}$ ；

$L=6 \text{ mm}$ 时，以电子数显三点内径千分尺测量 6 mm 标准环规，重复测量 10 次，由贝塞尔公式得

$$\text{实验标准差 } s = 0.32 \mu\text{m}, \text{ 则 } u_1 = s = 0.32 \mu\text{m}$$

$L=50 \text{ mm}$ 时，以电子数显三点内径千分尺测量 50 mm 标准环规，重复测量 10 次，由贝塞尔公式得实验室标准差

$$u_1 = s = 0.42 \mu\text{m}$$

$L=300 \text{ mm}$ 时，以电子数显三点内径千分尺测量 300 mm 标准环规，重复测量 10 次，由贝塞尔公式得实验室标准差

$$u_1 = s = 0.48 \mu\text{m}$$

由此可见，分辨力引入的不确定度分量远小于测量重复性引入的不确定度分量，因此以测量重复性引入的不确定度分量作为分析结果。

C.5.2 由标准环规给出的不确定度分量 u_s

标准环规的不确定度由溯源证书得到， $U = (0.7 + 6L) \mu\text{m}$ ($k=3$)。

当 $L=6 \text{ mm}$ 时，只以下限环规对零位，

$$u_s = u_2 = (0.7 + 6 \times 0.006) / 3 = 0.25 \mu\text{m}$$

当 $L=50 \text{ mm}$ 时， $u_{2\pm} = (0.7 + 6 \times 0.05) / 3 = 0.333 \mu\text{m}$

测量下限 $L=25 \text{ mm}$ ， $u_{2\text{F}} = (0.7 + 6 \times 0.025) / 3 = 0.283 \mu\text{m}$

$$u_s = u_2 = \sqrt{0.333^2 + 0.283^2} = 0.44 \mu\text{m}$$

当 $L=300 \text{ mm}$ 时， $u_{2\pm} = (0.7 + 6 \times 0.3) / 3 = 0.833 \mu\text{m}$

测量下限 $L=275 \text{ mm}$ ， $u_{2\text{F}} = (0.7 + 6 \times 0.275) / 3 = 0.783 \mu\text{m}$

$$u_s = u_2 = \sqrt{0.833^2 + 0.783^2} = 1.14 \mu\text{m}$$

C.5.3 数显三点内径千分尺与标准环规的膨胀系数差给出的不确定度分量 u_a

δ_a 在 $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 范围内按均匀分布，则 $u_3 = 1/\sqrt{3} = 0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$L=6 \text{ mm}$ 时，三点内径千分尺读数装置的测量范围为 (6~8) mm 即： $L=2 \text{ mm}$

则 $u_a = L \cdot \Delta t \cdot u_3 = 2 \times 10^3 \mu\text{m} \times 5 \text{ } ^\circ\text{C} \times 0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 0.006 \mu\text{m}$

$L=50 \text{ mm}$ 及 $L=300 \text{ mm}$ 时，三点内径千分尺读数装置的测量范围为 25 mm 即： $L=25 \text{ mm}$

则 $u_a = L \cdot \Delta t \cdot u_3 = 25 \times 10^3 \mu\text{m} \times 5 \text{ } ^\circ\text{C} \times 0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 0.073 \mu\text{m}$

C.5.4 数显三点内径千分尺与标准环规的温度差给出的不确定度分量 u_t

数显三点内径千分尺与标准环规有一定的温差存在，并以等概率落于区间 $[-0.3, +0.3] \text{ } ^\circ\text{C}$ 内，

$$u_4 = 0.3 / \sqrt{3} = 0.173 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$L=6 \text{ mm}$ 时，三点内径千分尺读数装置的测量范围为 (6~8) mm，即 $L=2 \text{ mm}$

$$u_t = L \cdot \alpha \cdot u_4 = 2 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \mu\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.173 \text{ } ^\circ\text{C} = 0.004 \mu\text{m}$$

$L=50 \text{ mm}$ 及 $L=300 \text{ mm}$ 时，三点内径千分尺读数装置的测量范围为 25 mm，即 $L=25 \text{ mm}$

则 $u_t = L \cdot \alpha \cdot u_4 = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \mu\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.173 \text{ } ^\circ\text{C} = 0.050 \mu\text{m}$

C.6 合成标准不确定度 u_c

由式 (C.2) $u_c^2 = u^2(e_i) = u_i^2 + u_s^2 + u_a^2 + u_t^2$

当 $L=6 \text{ mm}$ 时：

$$u_c^2 = 0.32^2 + 0.25^2 + 0.006^2 + 0.004^2 = 0.165 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 0.41 \mu\text{m}$$

当 $L=50 \text{ mm}$ 时：

$$u_c^2 = 0.42^2 + 0.44^2 + 0.073^2 + 0.050^2 = 0.38 \mu\text{m}^2 \quad u_c = 0.61 \mu\text{m}$$

当 $L=300$ mm 时:

$$u_c^2 = 0.48^2 + 1.14^2 + 0.073^2 + 0.050^2 = 1.55 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 1.24 \mu\text{m}$$

C.7 扩展不确定度

取 $k=2$,

当 $L=6$ mm 时: $U=2 \times 0.41 \approx 0.9 \mu\text{m}$

当 $L=50$ mm 时: $U=2 \times 0.61 \approx 1.3 \mu\text{m}$

当 $L=300$ mm 时: $U=2 \times 1.24 \approx 2.5 \mu\text{m}$

表 C.4 不确定度概算汇总表

测量点 L mm	不确定度分量				u_c μm	$U, (k=2)$ μm	允许值 μm
	u_1	u_2	$c_3 u_3$	$c_4 u_4$			
6	0.32	0.25	0.006	0.004	0.41	0.9	4
25	0.32	0.38	0.044	0.030	0.50	1.0	4
50	0.42	0.44	0.073	0.050	0.61	1.3	4
75	0.42	0.51	0.073	0.050	0.66	1.4	5
100	0.42	0.58	0.073	0.050	0.72	1.5	5
125	0.48	0.65	0.073	0.050	0.81	1.7	6
150	0.42	0.72	0.073	0.050	0.84	1.7	6
175	0.48	0.79	0.073	0.050	0.93	1.9	7
200	0.48	0.86	0.073	0.050	0.99	2.0	7
250	0.48	0.97	0.073	0.050	1.08	2.2	8
300	0.48	1.14	0.073	0.050	1.24	2.5	9

附录 D

数显内测千分尺示值误差测量结果不确定度评定

D.1 测量方法

以标准环规对数显内测千分尺的示值误差进行校准。以分辨力为 0.001 mm 数显内测千分尺为例进行分析。

D.2 测量模型

$$e_i = L_i - L_s + L_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_i - L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_s \quad (\text{D.1})$$

式中：

e_i ——数显内测千分尺的示值误差；

L_i ——数显内测千分尺的示值（20℃条件下）；

L_s ——标准环规的实际尺寸（20℃条件下）；

α_i 和 α_s ——分别是数显内测千分尺和标准环规的线膨胀系数；

Δt_i 和 Δt_s ——分别是数显内测千分尺和标准环规偏离参考温度 20℃ 的值。

D.3 方差和灵敏系数

因为 Δt_i 和 Δt_s 来源于同一只温度计而相关，数学处理过程非常复杂，因此我们采用下述方法将相关转化为不相关，以简化数学处理过程。

$$\text{令 } \delta_\alpha = \alpha_i - \alpha_s \quad \delta_t = \Delta t_i - \Delta t_s$$

$$\text{取 } L \approx L_i \approx L_s \quad \alpha = \alpha_i = \alpha_s \quad \Delta t = \Delta t_i = \Delta t_s$$

$$\begin{aligned} \text{则 } e_i &= L_i - L_s + L_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta t_i - L_i \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_i + L_i \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_i - L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t_s \\ &= L_i - L_s + L \cdot \Delta t \cdot \delta_\alpha + L \cdot \alpha \cdot \delta_t \end{aligned}$$

$$\text{又 } c_1 = \partial e_i / \partial L_i = 1; \quad c_2 = \partial e_i / \partial L_s = -1; \quad c_3 = \partial e_i / \partial \delta_\alpha = L \cdot \Delta t; \quad c_4 = \partial e_i / \partial \delta_t = L \cdot \alpha$$

令 u_1, u_2, u_3, u_4 分别表示 $L_i, L_s, \delta_\alpha, \delta_t$ 的不确定度，则

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u^2(e_i) = u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 u_4^2 \\ &= u_i^2 + u_s^2 + u_\alpha^2 + u_t^2 \end{aligned} \quad (\text{D.2})$$

D.4 标准不确定度一览表

表 D.1 不确定度概算汇总表

L=5 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	0.32 μm	1	0.32
u_s	标准环规的不确定度	0.24 μm	-1	0.24
u_α	数显内测千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 25 \times 10^3 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{C}$	0.073
u_t	数显内测千分尺与标准环规的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$	0.050
$u_c = 0.41 \text{ } \mu\text{m}$		$U = 0.9 \text{ } \mu\text{m}$	$(k=2)$	

表 D.2 不确定度概算汇总表

L=50 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	0.42 μm	1	0.42
u_s	标准环规的不确定度	0.44 μm	-1	0.44
u_a	数显内测千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 25 \times 10^3 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{C}$	0.073
u_t	数显内测千分尺与标准环规的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$	0.050
$u_c = 0.61 \text{ } \mu\text{m}$		$U = 1.3 \text{ } \mu\text{m} \quad (k=2)$		

表 D.3 不确定度概算汇总表

L=200 mm

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	c_i	$ c_i u(x_i)$ μm
u_i	测量重复性	0.48 μm	1	0.48
u_s	标准环规的不确定度	0.86 μm	-1	0.86
u_a	数显内测千分尺与标准环规的线膨胀系数差	$0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t = 25 \times 10^3 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{C}$	0.073
u_t	数显内测千分尺与标准环规的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}$	0.050
$u_c = 0.99 \text{ } \mu\text{m}$		$U = 2.0 \text{ } \mu\text{m} \quad (k=2)$		

D.5 计算标准不确定度分量

D.5.1 测量重复性估算的不确定度分量 u_i

数显内测千分尺分辨力为 0.001 mm，等概优率分布在区间半宽 $\pm 5 \text{ } \mu\text{m}$ 内，则由分辨力引入的不确定度分量为 $0.5/\sqrt{3} = 0.29 \text{ } \mu\text{m}$ ；

当 $L=5 \text{ mm}$ 时，数显内测千分尺测量 5 mm 标准环规，重复测量 10 次，由贝塞尔公式得

$$\text{实验标准差 } s = 0.32 \text{ } \mu\text{m}, \text{ 则 } u_1 = s = 0.32 \text{ } \mu\text{m}$$

当 $L=50 \text{ mm}$ 时，数显内测千分尺测量 50 mm 标准环规，重复测量 10 次，由贝塞尔公式得实验室标准差

$$u_1 = s = 0.42 \text{ } \mu\text{m}$$

当 $L=200 \text{ mm}$ 时，数显内测千分尺测量 200 mm 标准环规，重复测量 10 次，由贝塞尔公式得实验室标准差

$$u_1 = s = 0.48 \text{ } \mu\text{m}$$

由此可见，分辨力引入的不确定度分量远小于测量重复性引入的不确定度分量，且测量重复性数据中已包含了分辨力引入的量化误差，因此以测量重复性引入的不确定度分量作为分析结果。

D.5.2 由标准环规给出的不确定度分量 u_s

标准环规的不确定度由溯源证书得到， $U = (0.7 + 6L) \mu\text{m}$ ($k=3$)。

当 $L=5 \text{ mm}$ 时，只以下限环规对零位，

$$u_s = u_2 = (0.7 + 6 \times 0.005) / 3 = 0.24 \mu\text{m}$$

当 $L=50 \text{ mm}$ 时， $u_{2\pm} = (0.7 + 6 \times 0.05) / 3 = 0.333 \mu\text{m}$

测量下限 $L=25 \text{ mm}$ ， $u_{2\text{F}} = (0.7 + 6 \times 0.025) / 3 = 0.283 \mu\text{m}$

$$u_s = u_2 = \sqrt{0.333^2 + 0.283^2} = 0.44 \mu\text{m}$$

当 $L=200 \text{ mm}$ 时， $u_{2\pm} = (0.7 + 6 \times 0.200) / 3 = 0.633 \mu\text{m}$

测量下限 $L=175 \text{ mm}$ ， $u_{2\text{F}} = (0.7 + 6 \times 0.175) / 3 = 0.583 \mu\text{m}$

$$u_s = u_2 = \sqrt{0.633^2 + 0.583^2} = 0.86 \mu\text{m}$$

D.5.3 数显内测千分尺与标准环规的膨胀系数差给出的不确定度分量 u_a

δ_a 在 $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 范围内按均匀分布，则 $u_3 = 1/\sqrt{3} = 0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

数显内测千分尺读数装置的测量范围为 25 mm ，即 $L=25 \text{ mm}$

则 $u_a = L \cdot \Delta t \cdot u_3 = 25 \times 10^3 \mu\text{m} \times 5 \text{ } ^\circ\text{C} \times 0.58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 0.073 \mu\text{m}$

D.5.4 数显内测千分尺与标准环规的温度差给出的不确定度分量 u_t

数显内测千分尺与标准环规有一定的温差存在，并以等概率落于区间 $[-0.3, +0.3] \text{ } ^\circ\text{C}$ 内，

$$u_4 = 0.3 / \sqrt{3} = 0.173 \text{ } (^\circ\text{C})$$

$$\alpha = 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

数显内测千分尺读数装置的测量范围为 25 mm ，即 $L=25 \text{ mm}$

$$u_t = L \cdot \alpha \cdot u_4 = 25 \times 10^3 \times 11.5 \times 10^{-6} \mu\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.173 \text{ } ^\circ\text{C} = 0.050 \mu\text{m}$$

D.6 合成标准不确定度 u_c

由式 (D.2) $u_c^2 = u^2(e_i) = u_i^2 + u_s^2 + u_a^2 + u_t^2$

当 $L=5 \text{ mm}$ 时：

$$u_c^2 = 0.32^2 + 0.24^2 + 0.073^2 + 0.050^2 = 0.17 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 0.41 \mu\text{m}$$

当 $L=50 \text{ mm}$ 时：

$$u_c^2 = 0.42^2 + 0.44^2 + 0.073^2 + 0.050^2 = 0.38 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 0.61 \mu\text{m}$$

当 $L=200 \text{ mm}$ 时：

$$u_c^2 = 0.48^2 + 0.86^2 + 0.073^2 + 0.050^2 = 0.98 \mu\text{m}^2$$

$$u_c = 0.99 \mu\text{m}$$

D.7 扩展不确定度

取 $k=2$ ，

当 $L=5$ mm 时: $U=2\times 0.41\approx 0.9\ \mu\text{m}$

当 $L=50$ mm 时: $U=2\times 0.61\approx 1.3\ \mu\text{m}$

当 $L=200$ mm 时: $U=2\times 0.99\approx 2.0\ \mu\text{m}$

表 D.4 不确定度概算汇总表

测量点 L mm	不确定度分量				u_c μm	$U, (k=2)$ μm	允许值 μm
	u_1	u_2	$c_3 u_3$	$c_4 u_4$			
5	0.32	0.24	0.073	0.050	0.41	0.9	5
25	0.32	0.37	0.073	0.050	0.50	1.0	5
50	0.42	0.44	0.073	0.050	0.61	1.3	5
75	0.42	0.51	0.073	0.050	0.66	1.4	6
100	0.42	0.58	0.073	0.050	0.72	1.5	6
125	0.48	0.65	0.073	0.050	0.81	1.7	7
150	0.42	0.72	0.073	0.050	0.84	1.7	7
175	0.42	0.79	0.073	0.050	0.93	1.9	8
200	0.48	0.86	0.073	0.050	0.99	2.0	8

附录 E

校准证书内容及内页格式

E.1 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) 校准证书或校准报告签发人的签名、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。

E.2 校准证书内页格式

校准证书内页格式见表 E.1。

表 E.1 校准证书内页格式

温度： $^{\circ}\text{C}$ 相对湿度： $\%$

序号	校准项目	校准结果
1	测力	
2	刻线宽度及宽度差	
3	微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离	
4	微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置	
5	测量面的表面粗糙度	
6	量爪测量面的圆弧半径及素线平行度	
7	示值误差	

表 E.1 (续)

序号	校准项目	校准结果
8	校对环规直径尺寸	
9	细分误差	
10	数值漂移	

注：仅电子数显内测千分尺以及电子数显三点内径千分尺校准第 9、10 两项。

