

天津市地方计量校准规范

JJF (津) XXX—2023

齿轮千分尺校准规范

Calibration Specification for Gear Micrometers

(报批稿)

20XX—XX—XX 发布

20XX—XX—XX 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

齿轮千分尺校准规范

Calibration Specification

for Gear Micrometers

JJF(津) XXX—2023

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所

本规范委托天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所负责解释

本规范主要起草人：

吴 娟 （天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所）

刘 婷 （天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所）

韩大勇 （天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所）

参加起草人：

李 斌 （天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所）

周卯君 （天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所）

目 录

引言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 概述.....	(1)
4 计量特性.....	(2)
4.1 测力和测力变化.....	(2)
4.2 刻线宽度和宽度差.....	(2)
4.3 微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离.....	(2)
4.4 微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置.....	(2)
4.5 可换球测头的表面粗糙度.....	(2)
4.6 可换球测头的直径差值.....	(2)
4.7 可换球测头对示值的影响.....	(2)
4.8 数显齿轮千分尺的示值变动性.....	(2)
4.9 数显齿轮千分尺的数值漂移.....	(2)
4.10 示值误差.....	(3)
4.11 数显齿轮千分尺的细分误差.....	(3)
4.12 校对用量杆.....	(3)
5 校准条件.....	(3)
5.1 环境条件.....	(3)
5.2 校准项目和校准设备.....	(4)
6 校准项目和校准方法.....	(4)
6.1 测力和测力变化.....	(4)
6.2 刻线宽度和宽度差.....	(4)
6.3 微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离.....	(4)
6.4 微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置.....	(5)
6.5 可换球测头的表面粗糙度.....	(5)
6.6 可换球测头的直径差值.....	(5)
6.7 可换球测头对示值的影响.....	(5)
6.8 数显齿轮千分尺的示值变动性.....	(6)
6.9 数显齿轮千分尺的数值漂移.....	(6)
6.10 示值误差.....	(6)
6.11 数显齿轮千分尺的细分误差.....	(6)
6.12 校对用量杆.....	(6)
7 校准结果的表达.....	(7)
8 复校时间间隔.....	(7)
附录 A 齿轮千分尺示值误差测量结果的不确定度评定.....	(8)
附录 B 数显齿轮千分尺示值误差测量结果的不确定度评定.....	(13)
附录 C 校准证书内页格式.....	(18)

引言

JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF1059.1-2012《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，本规范在制定中参考了 GB/T1216-2018《外径千分尺》、GB/T36175-2018《特殊结构的电子数显外径千分尺》。

本规范为首次制定。

齿轮千分尺校准规范

1 范围

本规范适用于分度值为 0.01mm、分辨力为 0.001mm、测量范围上限至 300mm 的齿轮千分尺的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T1216-2018 外径千分尺

GB/T36175-2018 特殊结构的电子数显外径千分尺

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于该规程；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 概述

齿轮千分尺是应用螺旋副传动原理，把测微螺杆的旋转运动转变成测微螺杆的直线运动，对尺架上两球测头间分隔距离进行读数的一种计量器具，主要用于测量各种齿轮节圆直径。齿轮千分尺是由尺架、可换球测头、测微螺杆、测力装置和读数装置等组成。其外形结构如图 1、图 2 所示。

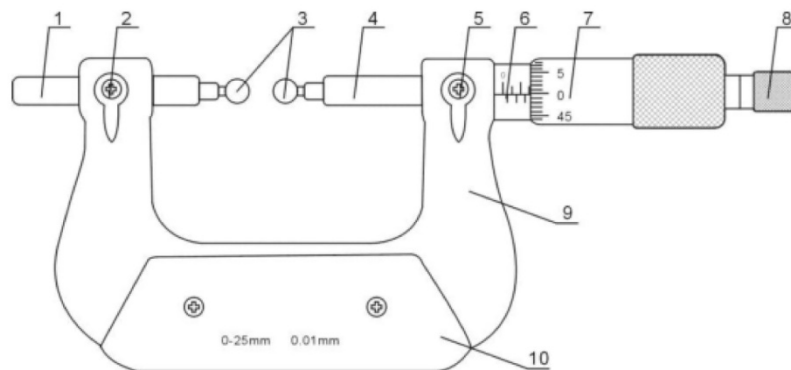


图 1 齿轮千分尺

- 1—测砧套 2—测砧套锁紧装置 3—可换球测头 4—测微螺杆 5—测微螺杆锁紧装置
6—固定套管 7—微分筒 8—测力装置 9—尺架 10—隔热装置

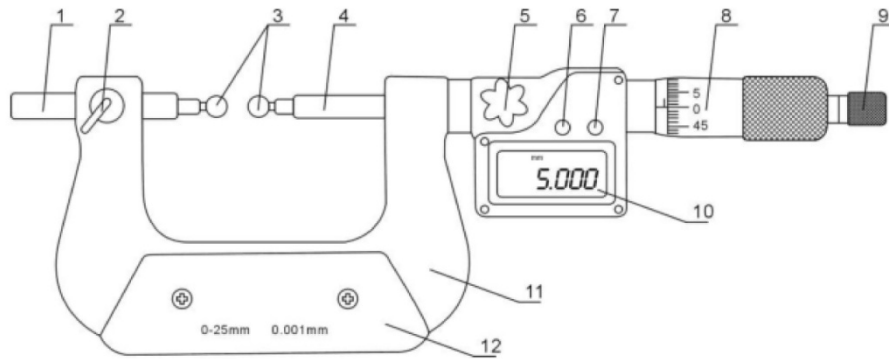


图2 数显齿轮千分尺

1—测砧套 2—测砧套锁紧装置 3—可换球测头 4—测微螺杆 5—测微螺杆锁紧装置
6—功能键 7—功能键 8—微分筒 9—测力装置 10—显示屏 11—尺架 12—隔热装置

4 计量特性

4.1 测力

测力应为(5~10) N。

4.2 刻线宽度和宽度差

刻线宽度应为(0.08~0.20) mm, 固定套管上的刻线与微分筒上的刻线的宽度差均应不大于0.03mm。

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应不大于0.4mm。

4.4 微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置

微分筒上的零刻线与固定套管纵刻线对准时, 微分筒的端面与固定套管毫米刻线右边缘应相切, 若不相切, 压线应不大于0.05mm, 离线应不大于0.10mm。

4.5 可换球测头的表面粗糙度

可换球测头工作面的表面粗糙度应不超过 $R_a 0.40\mu\text{m}$ 。

4.6 可换球测头的直径差值

一对可换球测头之间的直径差值应不大于 $2\mu\text{m}$ 。

4.7 可换球测头对示值的影响

齿轮千分尺可换球测头对示值的影响应不超过表1中的规定。

表 1 可换球测头对示值的影响

可换球测头直径 / mm	可换球测头对示值的影响 / μm
$d \leq 5$	2
$d > 5$	1

4.8 数显齿轮千分尺的示值变动性

数显齿轮千分尺的示值变动性应不大于 $1\mu\text{m}$ 。

4.9 数显齿轮千分尺的数值漂移

数显齿轮千分尺在任意位置时的数值漂移 1h 不超过 1 个分辨力。

4.10 示值误差

齿轮千分尺示值最大允许误差应不超过表 2 中的规定。

表 2 示值最大允许误差

测量范围 / mm	最大允许误差 / μm
0~25, 25~50	± 4
50~75, 75~100	± 5
100~125, 125~150	± 6
150~175, 175~200	± 7
200~225, 225~250	± 8
250~275, 275~300	± 9

4.11 数显齿轮千分尺的细分误差

数显齿轮千分尺数显装置的细分误差应不大于 $\pm 2\mu\text{m}$ 。

4.12 校对用量杆

齿轮千分尺校对用量杆的尺寸偏差和变动量应不超过表 3 的要求。

表 3 校对用量杆的尺寸偏差和变动量

测量范围 / mm	尺寸偏差 / μm	变动量 / μm
0~25, 25~50	± 2	1
50~75, 75~100	± 3	1.5
100~125, 125~150	± 4	2
150~175, 175~200	± 5	2.5
200~225, 225~250	± 6	3
250~275, 275~300	± 7	3.5

注：校准工作不判断合格与否，上述计量特性要求仅供参考。

5 校准条件

5.1 环境条件

校准齿轮千分尺的室内温度和被校齿轮千分尺在室内平衡温度的时间均应符合表 4 中的规定。室内相对湿度不大于 70%RH。

表 4 室内温度和被校齿轮千分尺在室内平衡温度的时间

名称	测量范围 / mm	室内温度对 20℃ 的允许偏差 / °C	平衡温度的时间 / h
齿轮千分尺	0~100	±5	2
	>100~300	±4	3
数显齿轮千分尺	0~100	±3	3
	>100~175	±2	4
	>175~300	±1	5

5.2 校准项目和校准设备

主要校准项目和校准设备见表 5。

表 5 校准项目和校准设备

序号	校准项目	主要校准设备
1	测力	2 级量仪测力计
2	刻线宽度和宽度差	工具显微镜 MPE: ±3μm 或读数显微镜 MPE: ±0.010mm
3	微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离	工具显微镜 MPE: ±3μm 或塞尺 MPE: ±0.012mm
4	微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置	——
5	可换球测头的表面粗糙度	表面粗糙度比较样块 MPE: -17%~+12%
6	可换球测头的直径误差	测长仪器 MPE: ±(0.6+L/1000) μm
7	可换球测头对示值的影响	——
8	数显齿轮千分尺的示值变动性	5 等量块
9	数显齿轮千分尺的数值漂移	——
10	示值误差	5 等量块
11	数显齿轮千分尺的细分误差	微分筒或 5 等量块
12	校对用量杆	测长仪器 MPE: ±(0.6+L/1000) μm 4 等量块

注：允许采用满足测量不确定度要求的其他测量设备。

6 校准项目和校准方法

首先检查外观及各部分相互作用，确定没有影响计量特性的因素后再进行校准。

6.1 测力

用分度值不大于 0.2N 的量仪测力计进行测量。测量时，确保齿轮千分尺的球面测量面与量仪测力计的平面测量面有效接触后进行。

6.2 刻线宽度和宽度差

在工具显微镜或读数显微镜上进行测量。微分筒和固定套管至少各任意抽测 3 条刻线。刻线宽度差以最大值和最小值之差确定。

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。也可以用 0.4mm 塞尺置于固定套管刻线表面上用比较法测量，测量应在微分筒转动一周内不小于 3 个位置上进行。见图 3。

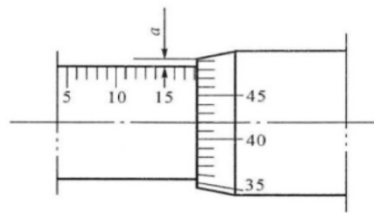
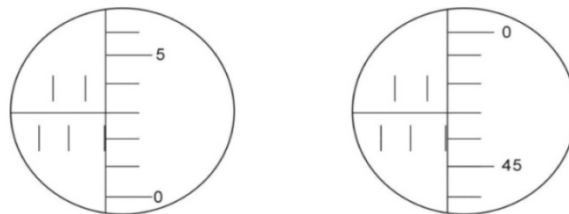


图 3 微分筒锥面的端面棱边至固定套管刻线面的距离

6.4 微分筒锥面的端面与固定套管毫米刻线的相对位置

当安装好可换球测头后，将微分筒调整至正确的零值位置，转动微分筒锥面的端面与固定套管任意毫米刻线的右边缘相切，读取微分筒上零刻线与固定套管纵向刻线的偏移量，该偏移量即为离线或压线的数值的校准值，见图 4。



(a) 压线 0.03mm

(b) 离线 0.03mm

图 4 微分筒锥面的端面与固定套管毫米标尺标记的相对位置

6.5 可换球测头的表面粗糙度

用表面粗糙度比较样块进行比较测量。在进行比较时，所用的表面粗糙度比较样块

和被校测量面的加工方法应该相同，表面粗糙度比较样块的材料、形状、表面色泽等也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度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度不超过表面粗糙度比较样块工作面的加工痕迹深度时，则被校测量面的表面粗糙度一般不超过表面粗糙度比较样块的标称值。

6.6 可换球测头的直径差值

在球测头的上下测量方向和左右测量方向 2 个相互垂直的截面用测长仪器测量，测量位置如图 5 所示，得到 2 个位置的测量值，取其平均值作为球测头的直径尺寸。两个球测头的直径尺寸之差的绝对值即为可换球测头的直径差值。

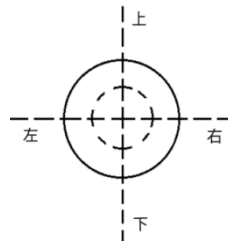


图 5 测量位置示意图

6.7 可换球测头对示值的影响

在齿轮千分尺对好零位后，固定测砧套上的可换球测头不动，将测微螺杆上的可换球测头沿顺时针方向依次旋转 90° ，分别得到 4 个测量值；将固定测砧套上的可换球测头沿顺时针方向旋转 90° 后保持不动，再分别将测微螺杆上的可换球测头沿顺时针方向依次旋转 90° ，再次得到 4 个测量值；然后将固定测砧套上的可换球测头沿顺时针方向继续旋转 90° 两次，并按照上述的校准方法进行校准，可得到 8 个测量值，最后以 16 个测量值中最大值与最小值之差作为可换球测头对示值的影响。

测量范围大于 25mm 的齿轮千分尺，使用对零量块按照上述方法进行测量。

6.8 数显齿轮千分尺的示值变动性

在相同测量条件下重复测量 5 次分别读数，示值变动性以读数最大值与最小值的差值确定。

6.9 数显齿轮千分尺的数值漂移

在测量范围内的任意位置锁紧测微螺杆，观察 1h 内显示值的变化，每 15min 观察记录一次，取最大示值与最小示值的差值为校准值。带自动关机功能的不做此项校准。

6.10 示值误差

齿轮千分尺示值误差用量块进行测量。测量前调整齿轮千分尺零位至正确位置，各种齿轮千分尺校准点应均匀分布于测量范围的 5 点上，如表 6 中所示。读取齿轮千分尺示值与各相应量块尺寸的差值，取各校准点中绝对值最大的示值误差为该尺的示值误差。

齿轮千分尺示值误差 e 可由下式计算：

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

式中：

e ——示值误差，mm；

L_i ——齿轮千分尺的读数值，mm；

L_s ——量块的实际值（参考温度 20℃），mm。

表 6 校准点尺寸

测量范围 / mm	校准点尺寸 / mm
0~25	5.12 10.24 15.36 20.50 25 或 5.12 10.25 15.37 20.50 25
>25	A+5.12 A+10.24 A+15.36 A+20.50 A+25 或 A+5.12 A+10.25 A+15.37 A+20.50 A+25
注：表中 A 为齿轮千分尺的测量下限。	

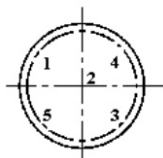
6.11 数显齿轮千分尺的细分误差

在测量范围任意位置上，沿测量方向转动微分筒，每间隔 0.04mm 测量 1 次，共测量 12 点，分别读出各校准点数显装置上的显示值与微分筒读数值之差，其最大差值为校准值。

对于没有微分筒的数显齿轮千分尺，可用量块测量。

6.12 校对用量杆

校对用量杆的尺寸和变动量在测长仪器上采用 4 等量块以比较法进行测量。校对用量杆应采用球面测帽在图 6 所示的 5 点上测量，取其中心点的测量偏差值为校对用量杆的尺寸偏差，取 5 点中最大尺寸与



为校对用量杆的变动量。

图 6 校对用量杆测量点示意图

7 校准结果的表达

经校准的齿轮千分尺发给校准证书。

校准证书及内页格式见附录 C。

8 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。也可根据实际使用情况，由使用者自主决定复校时间间隔。

附录 A

齿轮千分尺示值误差测量结果的不确定度评定

A.1 测量方法

依据规范, 测量范围在 (0~100) mm 以内, 测量温度为 (20±5)℃, 测量范围大于 100mm, 测量温度为 (20±4)℃, 分度值为 0.01mm 的齿轮千分尺示值误差是在规定条件下使用 5 等量块进行的。下面仅对 (0~25) mm, (150~175) mm 和 (275~300) mm 齿轮千分尺的测量上限点示值误差进行测量结果不确定度分析。

A.2 测量模型

$$e = L_m - L_b + L_m \cdot \alpha_m \cdot \Delta t_m - L_b \cdot \alpha_b \cdot \Delta t_b \quad (\text{A.1})$$

式中:

e ——齿轮千分尺的示值误差 (20℃条件下);

L_m ——齿轮千分尺的示值 (20℃条件下);

L_b ——量块的长度值 (20℃条件下);

α_m 和 α_b ——齿轮千分尺和量块的线胀系数;

Δt_m 和 Δt_b ——齿轮千分尺和量块偏离参考温度 20℃ 的数值。

A.3 方差和灵敏度系数

在公式 (A.1) 中:

为了简化运算, 舍去微小量, 并转化相关项影响。

令: $\delta\alpha = \alpha_m - \alpha_b$; $\delta t = \Delta t_m - \Delta t_b$;

$$L \approx L_m \approx L_b; \quad \alpha \approx \alpha_m \approx \alpha_b; \quad \Delta t \approx \Delta t_m \approx \Delta t_b$$

代入公式 (A.1) 后, 经整理可得:

$$e = L_m - L_b + L \cdot \Delta t \cdot \delta\alpha - L \cdot \alpha \cdot \delta t \quad (\text{A.2})$$

灵敏系数 c_i :

$$c_1 = \partial e / \partial L_m = 1; \quad c_2 = \partial e / \partial L_b = -1$$

$$c_3 = \partial e / \partial \delta\alpha = L \cdot \Delta t; \quad c_4 = \partial e / \partial \delta t = L \cdot \alpha$$

依据不确定度传播律公式, 输出量 e 估计值的方差为:

$$\begin{aligned}
 u_c^2 &= u^2(e) = c_1^2 \cdot u_1^2 + c_2^2 \cdot u_2^2 + c_3^2 \cdot u_3^2 + c_4^2 \cdot u_4^2 \\
 &= u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 \cdot u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 \cdot u_4^2
 \end{aligned}
 \tag{A.3}$$

A.4 标准不确定度一览表

L=25mm

表 A.1 不确定度汇总表

标准不确定度 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$
u_1	估读误差	0.58 μm	1	0.58 μm
u_2	量块不确定度	0.243 μm	1	0.243 μm
u_{21}	对零量块不确定度	0 μm		
u_{22}	读数量块不确定度	0.243 μm		
u_3	齿轮千分尺和量块的线胀系数差	$0.816 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t$	0.102 μm
u_4	齿轮千分尺和量块的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha$	0.050 μm
$u_c = 0.64 \mu\text{m}$				

L=175mm

表 A.2 不确定度汇总表

标准不确定度 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$
u_1	估读误差	0.58 μm	1	0.58 μm
u_2	量块不确定度	0.724 μm	1	0.724 μm
u_{21}	对零量块不确定度	0.49 μm		
u_{22}	读数量块不确定度	0.533 μm		
u_3	齿轮千分尺和量块的线胀系数差	$0.816 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t$	0.571 μm
u_4	齿轮千分尺和量块的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha$	0.348 μm
$u_c = 1.14 \mu\text{m}$				

L=300mm

表 A. 3 不确定度汇总表

标准不确定度 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$
u_1	估读误差	0.58 μm	1	0.58 μm
u_2	量块不确定度	1.03 μm	1	1.03 μm
u_{21}	对零量块不确定度	0.68 μm		
u_{22}	读数量块不确定度	0.775 μm		
u_3	齿轮千分尺和量块的线胀系数差	$0.816 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t$	0.979 μm
u_4	齿轮千分尺和量块的温度差	0.173 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha$	0.597 μm
$u_c = 1.65 \mu\text{m}$				

A.5 标准不确定度计算

A.5.1 读数误差引入的标准不确定度 u_1

选择 (150~175) mm 的齿轮千分尺, 对 175 mm 点用量块进行测量, 在重复性条件下连续测量 10 次, 经计算得出单次测量实验标准差 $s=0.48\mu\text{m}$ 。

齿轮千分尺的分度值为 0.01mm, 估读误差在 1/10 范围内为 $1\mu\text{m}$, 估计为均匀分布, 取 $k=\sqrt{3}$, 则分度值引入的标准不确定度为 $1\mu\text{m}/\sqrt{3}=0.58\mu\text{m}$ 。

由此可见, 分度值的估读误差引入的不确定度分量略大于测量重复性引入的不确定度分量, 因此以分度值引入的不确定度分量作为分析结果, 则:

$$u_1=0.58\mu\text{m}$$

A.5.2 量块不确定度引入的标准不确定度 u_2

5 等量块的测量不确定度为 $U=0.5\mu\text{m}+5 \times 10^{-6}L$, $k=2.58$ 。

A.5.2.1 对零量块引起的不确定度分量 u_{21}

齿轮千分尺测量上限 $L=25\text{mm}$ 时:

齿轮千分尺下限为零, 无需对零量块, 则:

$$u_{21}=0.00\mu\text{m}$$

齿轮千分尺测量上限 $L=175\text{mm}$ 时:

以 150 mm 量块对零, 不确定度为 $1.25\mu\text{m}$, $k=2.58$, 则:

$$u_{21} = 1.25 \mu\text{m} / 2.58 = 0.49 \mu\text{m}$$

齿轮千分尺测量上限 $L=300\text{mm}$ 时:

以 200mm 和 75mm 量块组合后对零, 不确定度分别为 $1.50\mu\text{m}$ 和 $0.88\mu\text{m}$, $k=2.58$, 则:

$$u_{21} = \sqrt{\left(\frac{1.50}{2.58}\right)^2 + \left(\frac{0.88}{2.58}\right)^2} = 0.68 \mu\text{m} \circ$$

A.5.2.2 读数用量块引起的标准不确定度分量 u_{22}

齿轮千分尺测量上限 $L=25\text{mm}$ 时:

测量点用 25mm 量块的不确定度为 $0.625\mu\text{m}$, $k=2.58$, 则:

$$u_{22} = 0.625 / 2.58 = 0.243 \mu\text{m};$$

齿轮千分尺测量上限 $L=175\text{mm}$ 时:

测量点用 175mm 量块的不确定度为 $1.375\mu\text{m}$, $k=2.58$, 则:

$$u_{22} = 1.375 / 2.58 = 0.533 \mu\text{m};$$

齿轮千分尺测量上限 $L=300\text{mm}$ 时:

测量点用 300mm 量块的不确定度为 $2.0\mu\text{m}$, $k=2.58$, 则:

$$u_{22} = 2.0 / 2.58 = 0.775 \mu\text{m};$$

以上两项合成, 得:

$L=25\text{mm}$ 时

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = \sqrt{0.000^2 + 0.243^2} = 0.243 \mu\text{m}$$

$L=175\text{mm}$ 时

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = \sqrt{0.49^2 + 0.533^2} = 0.724 \mu\text{m}$$

$L=300\text{mm}$ 时

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = \sqrt{0.68^2 + 0.775^2} = 1.03 \mu\text{m}$$

A.5.3 齿轮千分尺和量块间线胀系数差引入的标准不确定度 u_3

取齿轮千分尺和量块线胀系数均为: $\alpha = (11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$, 两者线胀系数差 $\delta\alpha$ 在 $\pm 2 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ 范围内, 服从三角分布, $k = \sqrt{6}$, 则:

$$u_3 = 2 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1} / \sqrt{6} = 0.816 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$$

A.5.4 齿轮千分尺和量块间的温度差引入的标准不确定度 u_4

齿轮千分尺和量块间有一定的温度差存在，并以等概率落于估计区间为 $(-0.3 \sim +0.3) \text{°C}$ 内，服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

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

A.6 合成标准不确定度

检测测量范围不超过 100mm 的齿轮千分尺时，规范要求的温度允许偏差为 $\Delta t = \pm 5 \text{°C}$ ；大于 100mm 时，要求为 $\Delta t = \pm 4 \text{°C}$ ，线胀系数取 $\alpha = 11.5 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ 。

$L = 25 \text{mm} = 0.025 \times 10^6 \mu\text{m}$ 时：

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 \cdot u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 \cdot u_4^2 \\ &= (0.58 \mu\text{m})^2 + (0.243 \mu\text{m})^2 + (0.025 \times 10^6 \mu\text{m} \times 5 \text{°C} \times 0.816 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1})^2 + (0.025 \times 10^6 \mu\text{m} \\ &\quad \times 11.5 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1} \times 0.173 \text{°C})^2 = 0.408 \mu\text{m}^2 \\ u_c &= 0.64 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$L = 175 \text{mm} = 0.175 \times 10^6 \mu\text{m}$ 时：

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 \cdot u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 \cdot u_4^2 \\ &= (0.58 \mu\text{m})^2 + (0.724 \mu\text{m})^2 + (0.175 \times 10^6 \mu\text{m} \times 4 \text{°C} \times 0.816 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1})^2 + (0.175 \times 10^6 \mu\text{m} \\ &\quad \times 11.5 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1} \times 0.173 \text{°C})^2 = 1.31 \mu\text{m}^2 \\ u_c &= 1.14 \mu\text{m} \end{aligned}$$

$L = 300 \text{mm} = 0.3 \times 10^6 \mu\text{m}$ 时：

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 \cdot u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 \cdot u_4^2 \\ &= (0.58 \mu\text{m})^2 + (1.03 \mu\text{m})^2 + (0.3 \times 10^6 \mu\text{m} \times 4 \text{°C} \times 0.816 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1})^2 + (0.3 \times 10^6 \mu\text{m} \times \\ &\quad 11.5 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1} \times 0.173 \text{°C})^2 = 2.71 \mu\text{m}^2 \\ u_c &= 1.65 \mu\text{m} \end{aligned}$$

A.7 扩展不确定度

取 $k = 2$ ，则扩展不确定度：

测量上限为 25mm 时

$$U=k \cdot u_c=2 \times 0.64 \mu\text{m}=1.28 \mu\text{m} \approx 1.3 \mu\text{m}$$

测量上限为 175mm 时

$$U=k \cdot u_c=2 \times 1.14 \mu\text{m}=2.28 \mu\text{m} \approx 2.3 \mu\text{m}$$

测量上限为 300mm 时

$$U=k \cdot u_c=2 \times 1.65 \mu\text{m}=3.3 \mu\text{m}$$

附录 B

数显齿轮千分尺示值误差测量结果的不确定度评定

B.1 测量方法

依据规范，测量范围在（0~100）mm 以内，测量温度为（20±3）℃，测量范围大于 100mm 至 175mm，测量温度为（20±2）℃，测量范围大于 175mm，测量温度为（20±1）℃，分辨力为 0.001mm 的数显齿轮千分尺示值误差是在规定条件下使用 5 等量块进行的。下面仅对（0~25）mm，（150~175）mm 和（275~300）mm 数显齿轮千分尺的测量上限点示值误差进行测量结果不确定度分析。

B.2 测量模型

$$e = L_m - L_b + L_m \cdot \alpha_m \cdot \Delta t_m - L_b \cdot \alpha_b \cdot \Delta t_b \quad (\text{B.1})$$

式中：

e ——数显齿轮千分尺的示值误差（20℃条件下）；

L_m ——数显齿轮千分尺的示值（20℃条件下）；

L_b ——量块的长度值（20℃条件下）；

α_m 和 α_b ——数显齿轮千分尺和量块的线胀系数；

Δt_m 和 Δt_b ——数显齿轮千分尺和量块偏离参考温度 20℃ 的数值。

B.3 方差和灵敏度系数

在公式（B.1）中：

为了简化运算，舍去微小量，并转化相关项影响。

令： $\delta\alpha = \alpha_m - \alpha_b$ ； $\delta t = \Delta t_m - \Delta t_b$ ；

$$L \approx L_m \approx L_b；\alpha \approx \alpha_m \approx \alpha_b；\Delta t \approx \Delta t_m \approx \Delta t_b$$

代入公式（B.1）后，经整理可得：

$$e = L_m - L_b + L \cdot \Delta t \cdot \delta\alpha - L \cdot \alpha \cdot \delta t \quad (\text{B.2})$$

灵敏系数 c_i ：

$$c_1 = \partial e / \partial L_m = 1；c_2 = \partial e / \partial L_b = -1$$

$$c_3 = \partial e / \partial \delta\alpha = L \cdot \Delta t；c_4 = \partial e / \partial \delta t = L \cdot \alpha$$

依据不确定度传播律公式，输出量 e 估计值的方差为：

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u^2(e) = c_1^2 \cdot u_1^2 + c_2^2 \cdot u_2^2 + c_3^2 \cdot u_3^2 + c_4^2 \cdot u_4^2 \\ &= u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 \cdot u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 \cdot u_4^2 \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

B.4 标准不确定度一览表

$L=25 \text{ mm}$

表 B.1 不确定度汇总表

标准不确定度 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度 值 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$
u_1	测量重复性	$0.3 \mu\text{m}$	1	$0.3 \mu\text{m}$
u_2	量块不确定度	$0.243 \mu\text{m}$	1	$0.243 \mu\text{m}$
u_{21}	对零量块不确定度	$0 \mu\text{m}$		
u_{22}	读数量块不确定度	$0.243 \mu\text{m}$		
u_3	齿轮千分尺和量块的线胀系数差	$0.816 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t$	$0.0612 \mu\text{m}$
u_4	齿轮千分尺和量块的温度差	$0.115 \text{ } ^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha$	$0.033 \mu\text{m}$
$u_c = 0.39 \mu\text{m}$				

$L=175 \text{ mm}$

表 B.2 不确定度汇总表

标准不确定度 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度 值 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$
u_1	测量重复性	$0.3 \mu\text{m}$	1	$0.3 \mu\text{m}$
u_2	量块不确定度	$0.724 \mu\text{m}$	1	$0.724 \mu\text{m}$
u_{21}	对零量块不确定度	$0.49 \mu\text{m}$		
u_{22}	读数量块不确定度	$0.533 \mu\text{m}$		
u_3	齿轮千分尺和量块的线胀系数差	$0.816 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t$	$0.2856 \mu\text{m}$
u_4	齿轮千分尺和量块的温度差	$0.115 \text{ } ^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha$	$0.232 \mu\text{m}$
$u_c = 0.87 \mu\text{m}$				

L=300 mm

表 B.3 不确定度汇总表

标准不确定度 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度 值 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x_i)$
u_1	测量重复性	0.3 μm	1	0.3 μm
u_2	量块不确定度	1.03 μm	1	1.03 μm
u_{21}	对零量块不确定度	0.68 μm		
u_{22}	读数量块不确定度	0.775 μm		
u_3	齿轮千分尺和量块的线胀系数差	$0.816 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L \cdot \Delta t$	0.2448 μm
u_4	齿轮千分尺和量块的温度差	0.115 $^\circ\text{C}$	$L \cdot \alpha$	0.397 μm
$u_c = 1.17 \mu\text{m}$				

B.5 标准不确定度计算

B.5.1 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

选择 (0~25) mm 的数显齿轮千分尺, 对 25 mm 点用量块进行测量, 在重复性条件下连续测量 10 次, 经计算得出单次测量实验标准差 $s=0.3\mu\text{m}$ 。

数显齿轮千分尺的分辨力为 0.001mm, 读数时的量化误差以等概率出现在其半宽区内, 取 $k=\sqrt{3}$, 半宽为 0.5 μm , 则分辨力引入的标准不确定度为 $0.5\mu\text{m}/\sqrt{3}=0.29\mu\text{m}$ 。

由此可见, 分辨力引入的不确定度分量略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, 则:

$$u_1 = s = 0.3\mu\text{m}$$

B.5.2 量块不确定度引入的标准不确定度 u_2

5 等量块的测量不确定度为 $U=0.5\mu\text{m}+5 \times 10^{-6}L$, $k=2.58$ 。

B.5.2.1 对零量块引起的不确定度分量 u_{21}

数显齿轮千分尺测量上限 $L=25\text{mm}$ 时:

数显齿轮千分尺下限为零, 无需对零量块, 则:

$$u_{21}=0.00\mu\text{m}$$

数显齿轮千分尺测量上限 $L=175\text{mm}$ 时:

以 150 mm 量块对零, 不确定度为 1.25 μm , $k=2.58$, 则:

$$u_{21} = 1.25 \mu\text{m} / 2.58 = 0.49 \mu\text{m}$$

数显齿轮千分尺测量上限 $L=300$ mm 时:

以 200mm 和 75mm 量块组合后对零, 不确定度分别为 $1.50\mu\text{m}$ 和 $0.88\mu\text{m}$, $k=2.58$, 则:

$$u_{21} = \sqrt{\left(\frac{1.50}{2.58}\right)^2 + \left(\frac{0.88}{2.58}\right)^2} = 0.68 \mu\text{m} \circ$$

B.5.2.2 读数用量块引起的标准不确定度分量 u_{22}

数显齿轮千分尺测量上限 $L=25$ mm 时:

测量点用 25mm 量块的不确定度为 $0.625\mu\text{m}$, $k=2.58$, 则:

$$u_{22} = 0.625 / 2.58 = 0.243 \mu\text{m};$$

数显齿轮千分尺测量上限 $L=175$ mm 时:

测量点用 175mm 量块的不确定度为 $1.375\mu\text{m}$, $k=2.58$, 则:

$$u_{22} = 1.375 / 2.58 = 0.533 \mu\text{m};$$

数显齿轮千分尺测量上限 $L=300$ mm 时:

测量点用 300mm 量块的不确定度为 $2.0\mu\text{m}$, $k=2.58$, 则:

$$u_{22} = 2.0 / 2.58 = 0.775 \mu\text{m};$$

以上两项合成, 得:

$L=25$ mm 时

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = \sqrt{0.000^2 + 0.243^2} = 0.243 \mu\text{m}$$

$L=175$ mm 时

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = \sqrt{0.49^2 + 0.533^2} = 0.724 \mu\text{m}$$

$L=300$ mm 时

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = \sqrt{0.68^2 + 0.775^2} = 1.03 \mu\text{m}$$

B.5.3 数显齿轮千分尺和量块间线胀系数差引入的标准不确定度 u_3

取数显齿轮千分尺和量块线胀系数均为: $\alpha = (11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$, 两者线胀系数差 $\delta\alpha$ 在 $\pm 2 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ 范围内, 服从三角分布, $k = \sqrt{6}$, 则:

$$u_3 = 2 \times 10^{-6} \text{C}^{-1} / \sqrt{6} = 0.816 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$$

B.5.4 数显齿轮千分尺和量块间的温度差引入的标准不确定度 u_4

齿轮千分尺和量块间有一定的温度差存在，并以等概率落于估计区间为 $(-0.2 \sim +0.2) \text{C}$ 内，服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_4 = 0.2 \text{C} / \sqrt{3} = 0.115 \text{C}$$

B.6 合成标准不确定度

检测测量范围不超过 100mm 的数显齿轮千分尺时，规范要求的温度允许偏差为 $\Delta t = \pm 3 \text{C}$ ，大于 100mm 至 175mm 时，要求 $\Delta t = \pm 2 \text{C}$ ，大于 175mm 时，要求 $\Delta t = \pm 1 \text{C}$ ，线胀系数取 $\alpha = 11.5 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ 。

$L = 25 \text{mm} = 0.025 \times 10^6 \mu\text{m}$ 时：

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 \cdot u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 \cdot u_4^2 \\ &= (0.3 \mu\text{m})^2 + (0.243 \mu\text{m})^2 + (0.025 \times 10^6 \mu\text{m} \times 3 \text{C} \times 0.816 \times 10^{-6} \text{C}^{-1})^2 + (0.025 \times 10^6 \mu\text{m} \times 11.5 \times 10^{-6} \text{C}^{-1} \times 0.115 \text{C})^2 = 0.15 \mu\text{m}^2 \end{aligned}$$

$$u_c = 0.39 \mu\text{m}$$

$L = 175 \text{mm} = 0.175 \times 10^6 \mu\text{m}$ 时：

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 \cdot u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 \cdot u_4^2 \\ &= (0.3 \mu\text{m})^2 + (0.724 \mu\text{m})^2 + (0.175 \times 10^6 \mu\text{m} \times 2 \text{C} \times 0.816 \times 10^{-6} \text{C}^{-1})^2 + (0.175 \times 10^6 \mu\text{m} \times 11.5 \times 10^{-6} \text{C}^{-1} \times 0.115 \text{C})^2 = 0.75 \mu\text{m}^2 \end{aligned}$$

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

$L = 300 \text{mm} = 0.3 \times 10^6 \mu\text{m}$ 时：

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u_1^2 + u_2^2 + (L \cdot \Delta t)^2 \cdot u_3^2 + (L \cdot \alpha)^2 \cdot u_4^2 \\ &= (0.3 \mu\text{m})^2 + (1.03 \mu\text{m})^2 + (0.3 \times 10^6 \mu\text{m} \times 1 \text{C} \times 0.816 \times 10^{-6} \text{C}^{-1})^2 + (0.3 \times 10^6 \mu\text{m} \times 11.5 \times 10^{-6} \text{C}^{-1} \times 0.115 \text{C})^2 = 1.37 \mu\text{m}^2 \end{aligned}$$

$$u_c = 1.17 \mu\text{m}$$

B.7 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度：

测量上限为 25mm 时

$$U=k \cdot u_c=2 \times 0.39\mu\text{m}=0.78\mu\text{m} \approx 0.8\mu\text{m}$$

测量上限为 175mm 时

$$U=k \cdot u_c=2 \times 0.87\mu\text{m}=1.74\mu\text{m} \approx 1.8\mu\text{m}$$

测量上限为 300mm 时

$$U=k \cdot u_c=2 \times 1.17\mu\text{m}=2.34\mu\text{m} \approx 2.4\mu\text{m}$$

附录 C

校准证书内页格式

温度：℃

相对湿度：%

序号	校准项目	校准结果	测量结果 不确定度 $U(k=2)$
1	测力		
2	刻线宽度和宽度差		
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	可换球测头的表面粗糙度		
6	可换球测头的直径差值		
7	可换球测头对示值的影响		
8	数显齿轮千分尺的示值变动性		
9	数显齿轮千分尺的数值漂移		
10	示值误差		
11	数显齿轮千分尺的细分误差		
12	校对用量杆		

