



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 989—2004

光栅式测微仪

Grating Micrometers

2004 - 09 - 21 发布

2004 - 12 - 21 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

光栅式测微仪检定规程

**Verification Regulation
of Grating Micrometers**



JJG 989—2004

本规程经国家质量监督检验检疫总局于 2004 年 09 月 21 日批准，并自 2004 年 12 月 21 日起施行。

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：中国科学院光电技术研究所

参加起草单位：中国测试技术研究院

本规程委托全国几何量工程参量计量技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

耿丽红 （中国科学院光电技术研究所）

匡 龙 （中国科学院光电技术研究所）

曹学东 （中国科学院光电技术研究所）

范天泉 （中国科学院光电技术研究所）

参加起草人：

李建民 （中国测试技术研究院）

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 概述	(1)
4 计量性能要求	(2)
4.1 测力	(2)
4.2 测杆受径向力引起的示值变化	(2)
4.3 重复性	(2)
4.4 示值误差	(2)
4.5 漂移	(2)
5 通用技术要求	(2)
5.1 外观	(2)
5.2 各部分相互作用	(3)
5.3 抗干扰性	(3)
6 计量器具控制	(3)
6.1 检定条件	(3)
6.2 检定项目	(4)
6.3 检定方法	(4)
6.4 检定结果的处理	(6)
6.5 检定周期	(6)
附录 A 测微仪示值误差检定计算实例 (量块和测微仪检定器组合法)	(7)
附录 B 示值误差测量结果不确定度 (激光测长装置法)	(8)
附录 C 示值误差测量结果不确定度 (量块和测微仪检定器组合法)	(12)
附录 D 检定证书和检定结果通知书内页格式	(18)

光栅式测微仪检定规程

1 范围

本规程适用于分辨力为 $0.01\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$ ，测量范围至 100mm 的光栅式测微仪的首次检定、后续检定和使用中检验。

2 引用文献

本规程引用下列文献：

JJF 1001—1998 通用计量术语及定义

JJF 1059—1999 测量不确定度评定与表示

JJF 1094—2002 测量仪器特性评定

JB/T10080.2—2000 光栅线位移传感器

使用本规程时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 概述

光栅式测微仪（以下简称测微仪）是以光栅副作为测量元件，将线位移量转换为光电信号，经电路处理并以数字显示的一种长度精密测量仪器。

测微仪按其准确度等级分为 5 级。测微仪按其结构分整体式和分体式两类。整体式测微仪的传感器与显示单元在一整体上，其结构示意图见图 1 (a)。分体式测微仪主要由传感器（含信号电缆）和数显表两部分组成，其结构示意图见图 1 (b)。

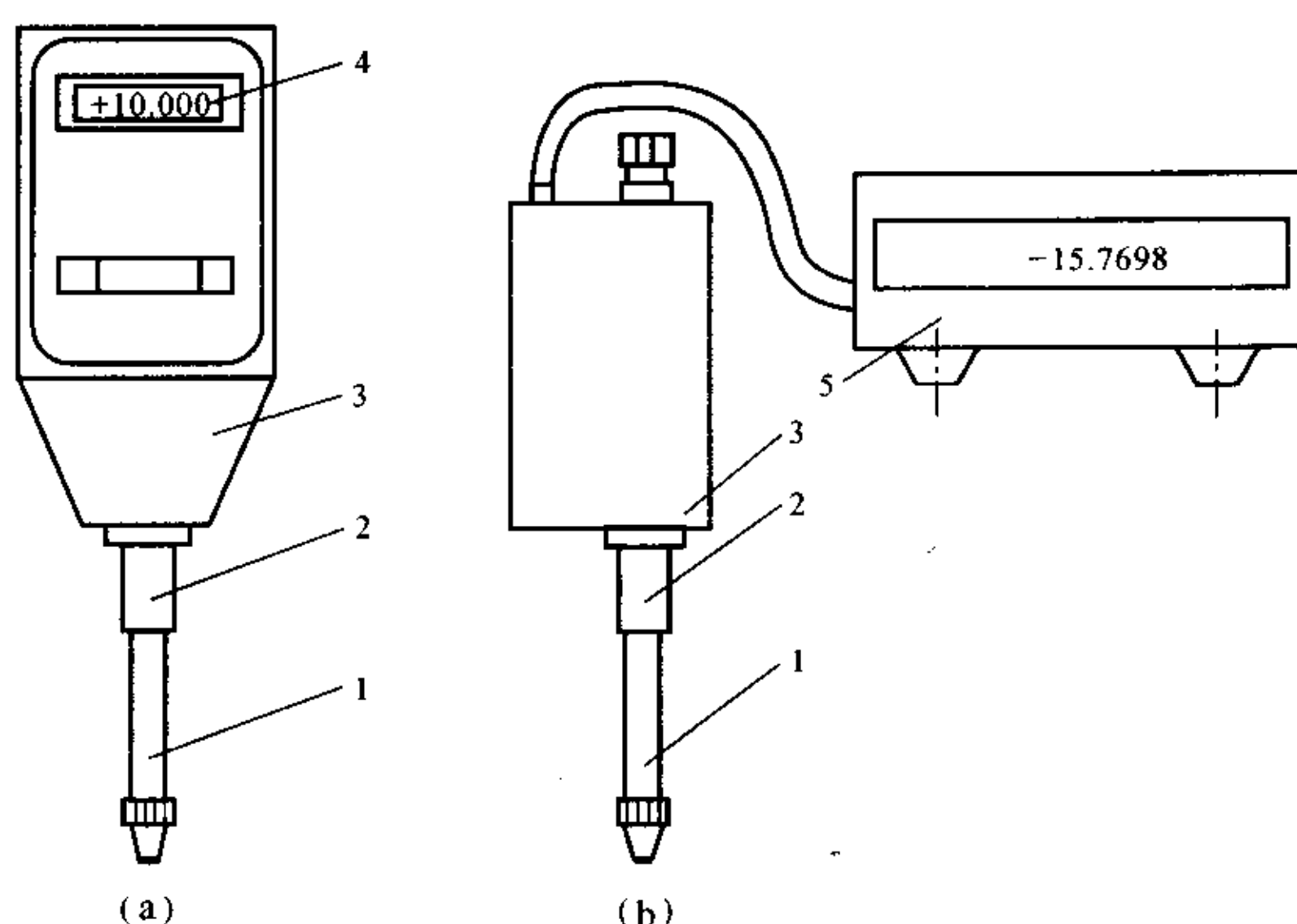


图 1 测微仪结构示意图

1—测杆；2—装夹套筒；3—测微仪主体；4—显示单元；5—数显表

4 计量性能要求

4.1 测力

测力应满足表 1 要求。

表 1 测力要求

测量范围/mm	0 ~ 10		0 ~ 30		0 ~ 50		0 ~ 100	
分辨力/ μm	< 0.1	≥ 0.1	< 0.1	≥ 0.1	< 0.1	≥ 0.1	< 0.1	≥ 0.1
测力/N	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 2.0	≤ 2.0	≤ 2.5	≤ 2.5	≤ 3.0

4.2 测杆受径向力引起的示值变化

测杆受 0.8N 径向力引起的示值变化应满足表 2 要求。

4.3 重复性

重复性应满足表 2 要求。

4.4 示值误差

示值误差应满足表 2 中最大允许误差的要求。

表 2 测微仪的重复性、示值误差和测杆受径向力引起的示值变化要求 μm

准确度等级	测杆受径向力引起的示值变化		重复性	最大允许误差
	示值变化量	除掉外力后示值与原位 的差值		
1 级	0.2	0.1	0.1	$0.4 + 0.004L$
2 级	0.4	0.2	0.2	$0.8 + 0.008L$
3 级	1	0.5	0.5	$1.5 + 0.01L$
4 级	2	1	1	$3 + 0.02L$
5 级	4	2	2	$5 + 0.04L$

注：L——测量范围，单位为 mm。

4.5 漂移


4h 内漂移应满足表 3 要求。

表 3 4h 内漂移要求 μm

分辨力	1	0.5	0.2	0.1	0.05	0.01
4h 内漂移	≤ 2	≤ 1	≤ 0.6	≤ 0.3	≤ 0.20	≤ 0.05

5 通用技术要求

5.1 外观

5.1.1 仪器应标有制造厂名称（或厂标）、出厂编号、仪器型号及  标志。

5.1.2 仪器工作面不应有锈蚀、碰伤及明显的划痕，涂覆层不应有脱落及影响外观质量的缺陷。

5.1.3 数字应显示清晰、完整。

后续检定的仪器，允许有不影响使用功能和计量性能的上述缺陷。

5.2 各部分相互作用

5.2.1 夹紧装夹套筒后测杆运动应灵活、平稳、无卡滞和晃动现象。

5.2.2 分体式测微仪其传感器与数显表的连接应牢固、接触可靠。

5.2.3 开关、按键应性能可靠。

5.2.4 测微仪计数应正常，并在任意位置上都能置零。

5.3 抗干扰性

在有干扰源的情况下，仪器示值变化量不超过分辨力的2倍。

6 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定、后续检定及使用中检验。

6.1 检定条件

6.1.1 主要检定器具及技术要求见表4。

表4 主要检定器具及技术要求

序号	主要检定器具	技术要求
1	测力计	分度值 $\leq 0.05\text{N}$
2	量块	2, 3级测微仪用3等量块 4级测微仪用4等量块 5级测微仪用5等量块
3	斜块式测微仪检定器	分度值为 $0.2\mu\text{m}$
4	激光测长装置	最大允许误差： $\pm (1.5 \times 10^{-6} L) \mu\text{m}$ (L ——测量长度， μm)
5	手电钻或台灯	手电钻为 $\phi 6\text{mm}$ 或台灯为 100W

6.1.2 环境条件

6.1.2.1 检定室的温度、温度变化及被检测微仪和检定用器具平衡温度时间应满足表5的要求。

表5 检定室的温度、温度变化及被检测微仪和检定用器具平衡温度时间要求

准确度等级	检定室内温度/ $^{\circ}\text{C}$	温度变化量/ $^{\circ}\text{C}/\text{h}$	平衡温度时间/ h
1级	20 ± 0.2	≤ 0.2	≥ 8
2级 3级	20 ± 0.5	≤ 0.5	≥ 4
4级	20 ± 1		
5级	20 ± 2		

6.1.2.2 测量应在被检测微仪通电预热 15min 后进行，测量过程中不应有影响测量的振动、气流、电磁干扰等。

6.2 检定项目

测微仪的检定项目见表 6。

表 6 检定项目一览表

序号	检定项目	首次检定	后续检定	使用中检验
1	外观	+	+	+
2	各部分相互作用	+	+	+
3	抗干扰性	+	-	-
4	测力	+	+	-
5	测杆受径向力引起的示值变化	+	+	-
6	重复性	+	+	-
7	示值误差	+	+	+
8	漂移	+	-	-

注：检定类别中“+”表示应检项目，“-”表示可不检项目。

6.3 检定方法

6.3.1 外观

目力观察。

6.3.2 各部分相互作用

目力观察和试验。

6.3.3 抗干扰性

在与被检测微仪同一电源接线板上启闭手电钻或插拔台灯 10 次，以测微仪示值最大变化量作为测量结果。

6.3.4 测力

将测微仪压在测力计的测头上，在测杆分别压缩至测微仪测量范围的始、中、末位置时进行读数，正反各测一次，以测力计读数的最大值作为测量结果。

6.3.5 测杆受径向力引起的示值变化

将测微仪垂直安装在台架上，并在台架的工作台面上放置一量块，使测头与量块接触。在测头滚花处沿垂直于测杆方向用测力计施 0.8N 的力，记录测微仪示值变化量，除掉外力后，记录测微仪示值与原位的差值。

测量应在测微仪测量范围的始、中、末三个位置相互垂直的四个方向上进行，取各位置和方向中绝对值最大者作为测量结果。

6.3.6 重复性

将测微仪垂直安装在台架上，并在台架的工作台面上放置一量块，测微仪测头与量块接触，重复测量 10 次，以最大值与最小值之差作为该位置的重复性。测量应在测微

仪测量范围的始、中、末三个位置进行，以三个位置重复性最大值作为测量结果。

6.3.7 示值误差

6.3.7.1 激光测长装置法

使用激光测长装置测量时，应按测微仪光栅尺材料的线膨胀系数对激光测长装置的示值进行自动补偿。

将测微仪安装在激光测长装置上，压缩测杆至 0.1mm 左右的位置。测微仪和激光测长装置置零后，以约为 1/5 测量范围的间隔进行测量。记录测微仪和激光测长装置在各点的示值，往、返行程各测一次。各点的示值误差的计算公式如下：

$$\Delta l_i = l_{ai} - l_{bi} \quad (1)$$

式中： Δl_i ——第 i 点的示值误差，mm；

l_{ai} ——第 i 点测微仪的示值，mm；

l_{bi} ——第 i 点激光测长装置的示值，mm。

分别在 Δl_i 中最大值 Δl_{\max} 与最小值 Δl_{\min} 的对应示值点 $l_{a-\max}$ 与 $l_{a-\min}$ 加密测量，激光测长装置的对应示值分别为 $l_{b-\max}$ 与 $l_{b-\min}$ 。

移动激光测长装置工作台使示值等于 $l_{b-\max}$ ，然后使用微调机构，使工作台以 $4\mu\text{m}$ 的间隔移动，每次移动后均记录测微仪和激光测长装置在各点的示值，共测量 10 点；移动激光测长装置工作台使示值等于 $l_{b-\min}$ ，然后使用微调机构，使工作台以 $4\mu\text{m}$ 的步距移动，每次移动后均记录测微仪和激光测长装置在各点的示值，共测量 10 点。各点示值误差的计算公式见式 (1)。

测微仪示值误差的计算公式如下：

$$\Delta L = \Delta l_{\max} - \Delta l_{\min} \quad (2)$$

式中： ΔL ——测微仪的示值误差，mm；

Δl_{\max} —— Δl_i 中最大值，mm；

Δl_{\min} —— Δl_i 中最小值，mm。

6.3.7.2 量块和测微仪检定器组合法

用于 2 级及以下各级测微仪示值误差的测量。

按测量范围等间隔分布受检点，受检点不应少于 5 个测点。

将测微仪安装在分度值 $0.2\mu\text{m}$ 斜块式测微仪检定器上，在测头下放置一适当尺寸的零位量块，并压缩测杆至 0.1mm 左右的位置。测微仪检定器的读数鼓轮对零，再将测微仪清零。依次放置不同量值的量块，每一量块组应重复放置 3 次，取 3 次读数的算术平均值作为各点的示值，各点示值误差的计算公式如下：

$$\Delta l_i = l_{ai} - (l_{bi} - l_{b0}) \quad (3)$$

式中： Δl_i ——第 i 点的示值误差，mm；

l_{ai} ——第 i 点测微仪的示值，mm；

l_{bi} ——第 i 点量块的实际长度，mm；

l_{b0} ——零位量块的实际长度，mm。

分别在 Δl_i 中最大值 Δl_{\max} 与最小值 Δl_{\min} 的对应示值点 $l_{a-\max}$ 与 $l_{a-\min}$ 加密测量，量

块的对应尺寸为 $l_{b-\max}$ 与 $l_{b-\min}$ 。

放置 $l_{b-\max}$ 量块，反行程旋转测微仪检定器的读数鼓轮，每间隔 $4\mu\text{m}$ 记录一次测微仪的示值，共测 10 点；再将测微仪检定器退回 $40\mu\text{m}$ ，放置 $l_{b-\min}$ 量块，反行程旋转测微仪检定器的读数鼓轮，每间隔 $4\mu\text{m}$ 记录一次测微仪的示值，共测 10 点。各点示值误差的计算公式如下：

$$\Delta l_j = l_{aj} - (l_b - l_{b0}) - l_{cj} \quad (4)$$

式中： Δl_j ——第 j 点的示值误差，mm；

l_{aj} ——第 j 点测微仪的示值，mm；

l_b ——与 Δl_{\max} 或 Δl_{\min} 相对应的量块的实际长度 ($l_{b-\max}$ 或 $l_{b-\min}$)，mm；

l_{b0} ——零位量块的实际长度，mm；

l_{cj} ——第 j 点测微仪检定器的位移量，mm。

测微仪示值误差的计算公式如下：

$$\Delta L = \Delta l_{\max} - \Delta l_{\min} \quad (5)$$

式中： ΔL ——测微仪的示值误差，mm；

Δl_{\max} —— Δl_j 中最大值，mm；

Δl_{\min} —— Δl_j 中最小值，mm。

检定计算实例见附录 A。

测微仪的示值误差也可采用满足测量不确定度要求的其他方法进行测量。不同测量方法的结果出现争议或仲裁检定时，以激光测长装置法为准。

6.3.8 漂移

将测微仪垂直安装在台架上，测微仪测头与工作台面接触，调整测杆压缩至测量范围的一半左右的位置。开机 15min 后每 0.5h 记录一次测微仪示值，4h 内测微仪示值最大值与最小值之差作为测量结果。

6.4 检定结果的处理

6.4.1 测微仪等级的判定

依据测量结果，按本规程表 2 规定的要求来判定测微仪的等级。

6.4.2 经检定符合本规程要求的测微仪，发给检定证书，注明准确度级别，具体要求见附录 D；不符合本规程最底等级要求的，发给检定结果通知书，并注明其不合格项目。

6.5 检定周期

测微仪的检定周期根据其使用情况而定，一般不超过 1 年。

附录 A

测微仪示值误差检定计算实例（量块和测微仪检定器组合法）

mm

序号 <i>i</i>	量块名义尺寸	量块偏差	量块实际长度 l_{bi}	测微仪示值				示值误差 $\Delta l_i = l_{ai} - (l_{bi} - l_{b0})$
				第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值 l_{ai}	
0	20	-0.0004	19.9996	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	
1	30	0.0007	30.0007	10.0014	10.0014	10.0012	10.0013	
2	40	-0.0006	39.9994	20.0019	20.0019	20.0019	20.0019	
3	50	-0.0007	49.9993	30.0020	30.0017	30.0017	30.0018	
4	60	-0.0009	59.9991	40.0014	40.0016	40.0017	40.0016	
5	70	-0.0005	69.9995	50.0025	50.0029	50.0031	50.0028	
在 Δl_i 最大值处加密测量 ($l_{b-\max} = 69.9995$)				在 Δl_i 最大值处加密测量 ($l_{b-\min} = 19.9996$)				
序号 <i>j</i>	测微仪检定器的位移量 l_{cj}	测微仪示值 l_{aj}	示值误差 $\Delta l_j = l_{aj} (l_{b-\max} - l_{b0}) - l_{cj}$	序号 <i>j</i>	测微仪检定器的位移量 l_{cj}	测微仪示值 l_{aj}	示值误差 $\Delta l_j = l_{aj} (l_{b-\max} - l_{b0}) - l_{cj}$	
0	0.0000	50.0028	0.0029	11	0.0000	0.0000	0.0001	
1	0.0040	50.0065	0.0026	12	0.0040	0.0042	0.0002	
2	0.0080	50.0108	0.0029	13	0.0080	0.0083	0.0003	
3	0.0120	50.0150	0.0031	14	0.0120	0.0125	0.0005	
4	0.0160	50.0186	0.0027	15	0.0160	0.0164	0.0004	
5	0.0200	50.0227	0.0028	16	0.0200	0.0203	0.0003	
6	0.0240	50.0265	0.0026	17	0.0240	0.0242	0.0002	
7	0.0280	50.0307	0.0028	18	0.0280	0.0279	-0.0001	
8	0.0320	50.0350	0.0031	19	0.0320	0.0322	0.0002	
9	0.0360	50.0386	0.0027	20	0.0360	0.0358	-0.0002	
10	0.0400	50.0427	0.0028	21	0.0400	0.0401	0.0001	
检定结果	测微仪的示值误差: $\Delta L = \Delta l_{\max} - \Delta l_{\min} = 0.0031 - (-0.0002) = 0.0033$ 测量结果不确定度 $U = 0.0004$ ($p = 95\%$)							

检测用器具：3 等量块（编号 × × × ×），0.2 μ m 分度值斜块式测微仪检定器（编号 × × × ×）

检定时条件：20.4℃

检定员：× × × × × ×

检定时间：2003 年 9 月 2 日

附录 B

示值误差测量结果不确定度 (激光测长装置法)

B.1 测量方法 (依据《光栅式测微仪检定规程》)

使用激光测长装置测量时,应按测微仪光栅尺材料的线膨胀系数对激光测长装置的示值进行自动补偿。

将测微仪安装在激光测长装置上,压缩测杆至 0.1mm 左右的位置。测微仪和激光测长装置置零后,以约为 1/5 测量范围的间隔进行测量。记录测微仪和激光测长装置在各点的示值,往、返行程各测一次。测微仪各点的示值误差的计算公式如下

$$\Delta l_i = l_{ai} - l_{bi} \quad (\text{B.1})$$

式中: Δl_i ——第 i 点的示值误差, mm;

l_{ai} ——第 i 点测微仪的示值, mm;

l_{bi} ——第 i 点激光测长装置的示值, mm。

分别在 Δl_i 中最大值 Δl_{\max} 与最小值 Δl_{\min} 的对应示值点 $l_{a-\max}$ 与 $l_{a-\min}$ 加密测量,激光测长装置的对应示值分别为 $l_{b-\max}$ 与 $l_{b-\min}$ 。

移动激光测长装置工作台使示值等于 $l_{b-\max}$, 然后使用微调机构,使工作台以 $4\mu\text{m}$ 的间隔移动,每次移动后均记录测微仪和激光测长装置在各点的示值,共测量 10 点;移动激光测长装置工作台使示值等于 $l_{b-\min}$, 然后使用微调机构,使工作台以 $4\mu\text{m}$ 的步距移动,每次移动后均记录测微仪和激光测长装置在各点的示值,共测量 10 点。各点示值误差的计算公式见 (B.1)。

测微仪示值误差的计算公式如下:

$$\Delta L = \Delta l_{\max} - \Delta l_{\min} \quad (\text{B.2})$$

式中: ΔL ——测微仪的示值误差, mm;

Δl_{\max} —— Δl_i 中最大值, mm;

Δl_{\min} —— Δl_i 中最小值, mm。

下面以分辨力为 $0.01\mu\text{m}$ 的 1 级测微仪为例进行分析。

B.2 数学模型

测微仪的示值误差:

$$\Delta L = \Delta l_{\max} - \Delta l_{\min} = (l_{a-\max} - l_{b-\max}) - (l_{a-\min} - l_{b-\min}) \quad (\text{B.3})$$

式中: ΔL ——测微仪的示值误差, mm;

Δl_{\max} —— Δl_i 中最大值, mm;

Δl_{\min} —— Δl_i 中最小值, mm;

$l_{a-\max}$ ——与 Δl_{\max} 对应的测微仪的示值, mm;

$l_{a-\min}$ ——与 Δl_{\min} 对应的测微仪的示值, mm;

$l_{b-\max}$ ——与 Δl_{\max} 对应的激光测长装置的示值, mm;

$l_{b-\min}$ ——与 Δl_{\min} 对应的激光测长装置的示值, mm。

B.3 方差和灵敏系数

$$u_c^2(\Delta L) = [c_1 u(l_{a-\max})]^2 + [c_2 u(l_{b-\max})]^2 + [c_3 u(l_{a-\min})]^2 + [c_4 u(l_{b-\min})]^2 \quad (\text{B.4})$$

$l_{a-\max}$ 的灵敏系数: $c_1 = 1$

$l_{b-\max}$ 的灵敏系数: $c_2 = -1$

$l_{a-\min}$ 的灵敏系数: $c_3 = -1$

$l_{b-\min}$ 的灵敏系数: $c_4 = 1$

其中, $u(l_{a-\max})$ 与 $u(l_{a-\min})$, $u(l_{b-\max})$ 与 $u(l_{b-\min})$ 的来源相同, 有

$$u^2(l_{a-\max}) = u^2(l_{a-\min}) = u^2(l_a)$$

$$u^2(l_{b-\max}) = u^2(l_{b-\min}) = u^2(l_b)$$

因此

$$u_c^2(\Delta L) = 2u^2(l_a) + 2u^2(l_b) \quad (\text{B.5})$$

B.4 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 B.1。

表 B.1 不确定度分量一览表

标准不确定度分量	不确定度的来源	标准不确定度值/ μm		c_i	自由度 ν	
		10mm 测微仪	100mm 测微仪		10mm	100mm
$u(l_a)$	与测微仪有关的误差	0.003	0.012	$\sqrt{2}$	∞	50
$u_1(l_a)$	测微仪的量化误差	0.003	0.003		∞	∞
$u_2(l_a)$	环境温度影响	0.001	0.012		50	50
$u(l_b)$	与激光测长装置有关的误差	0.009	0.087	$\sqrt{2}$	50	50

B.5 计算分量标准不确定度

B.5.1 与测微仪有关的误差引起的标准不确定度分量 $u(l_a)$ B.5.1.1 测微仪的量化误差引起的不确定度分量 $u_1(l_a)$

测微仪的数字分辨力为 $0.01\mu\text{m}$, 则示值的量化误差是以等概率落在半宽度为 $0.005\mu\text{m}$ 的区间内, 故由量化误差引起的标准不确定度分量为

$$u_1(l_a) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003(\mu\text{m})$$

自由度

$$\nu_1(l_a) \rightarrow \infty。$$

B.5.1.2 环境温度影响引起的标准不确定度分量 $u_2(l_a)$

在用激光测长装置测量测微仪示值误差时, 要按光栅尺材料的线膨胀系数对温度偏离 20°C 进行自动补偿。光栅尺的线膨胀系数为 $(\alpha_0 \pm 1) \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$, 假定在 $\pm 1 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 范围内等概率分布, 光栅尺的温度与标准温度 20°C 的偏差不超过 0.2°C , 则

$$u_2(l_a) = \frac{0.2 \times 1 \times 10^{-6} l_a}{\sqrt{3}}$$

估计其相对不确定度为 0.1, 自由度为 $\nu_2(l_a) = 50$ 。

对于 10 mm 测量范围的测微仪, $u_2(l_a) = 0.001\mu\text{m}$ 。

对于 100mm 测量范围的测微仪, $u_2(l_a) = 0.012\mu\text{m}$ 。

B.5.1.3 标准不确定度分量 $u(l_a)$ 的计算

以上两项合成, 得

$$u(l_a) = \sqrt{u_1^2(l_a) + u_2^2(l_a)}$$

自由度为

$$\nu(l_a) = \frac{u^4(l_a)}{\frac{u_1^4(l_a)}{\nu_1(l_a)} + \frac{u_2^4(l_a)}{\nu_2(l_a)}}$$

对于 10mm 测量范围的测微仪, $u(l_a) = 0.003\mu\text{m}$, $\nu(l_a) \rightarrow \infty$ 。

对于 100mm 测量范围的测微仪, $u(l_a) = 0.012\mu\text{m}$, $\nu(l_a) = 50$ 。

B.5.2 激光测长装置的误差引起的标准不确定度分量 $u(l_b)$

激光测长装置的最大允许误差为 $\pm(1.5 \times 10^{-6} l_b)$, 服从均匀分布, 则激光测长装置示值误差带来的标准不确定度分量为

$$u(l_b) = \frac{1.5 \times 10^{-6} l_b}{\sqrt{3}}$$

对于 10mm 测量范围的测微仪, $u(l_b) = 0.009\mu\text{m}$ 。

对于 100mm 测量范围的测微仪, $u(l_b) = 0.087\mu\text{m}$ 。

估计其相对不确定度为 0.1, 自由度为 $\nu(l_b) = 50$ 。

B.6 合成不确定度 $u_c(\Delta L)$

由式 (B.5), 得

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{2[u^2(l_a) + u^2(l_b)]}$$

对于 10mm 测量范围的测微仪:

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{2 \times (0.003^2 + 0.009^2)} = 0.013(\mu\text{m})$$

对于 100mm 测量范围的测微仪:

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{2 \times (0.012^2 + 0.087^2)} = 0.124(\mu\text{m})$$

B.7 有效自由度 ν_{eff}

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(\Delta L)}{\frac{u^4(l_a)}{\nu(l_a)} + \frac{u^4(l_b)}{\nu(l_b)}}$$

对于 10mm 测量范围的测微仪:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{0.013^4}{\frac{0.003^4}{\infty} + \frac{0.009^4}{50}} = 217$$

对于 100mm 测量范围的测微仪:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{0.124^4}{\frac{0.012^4}{50} + \frac{0.087^4}{50}} = 206$$

B.8 扩展不确定度 U_p

$$U_p = k_p u_c(\Delta L) = t_p(\nu_{\text{eff}}) u_c(\Delta L)$$

对于 10mm 测量范围的 1 级测微仪, $\nu_{\text{eff}} = 217$, 取置信概率 $p = 0.95$, 查表得 $k_{95} = t_{95}(217) = 1.98$, 则

$$U_{95} = k_{95} u_c(\Delta L) = 1.98 \times 0.013 = 0.03(\mu\text{m})$$

对于 100mm 测量范围的 1 级测微仪, $\nu_{\text{eff}} = 206$, 取置信概率 $p = 0.95$, 查表得 $k_{95} = t_{95}(206) = 1.98$, 则

$$U_{95} = k_{95} u_c(\Delta L) = 1.98 \times 0.124 = 0.25(\mu\text{m})$$

均小于测微仪最大允许误差的三分之一, 所以规程提出的示值误差的测量方法是可靠的, 规定的技术计量性能要求和检定条件是合理的。

附录 C

示值误差测量结果不确定度（量块和测微仪检定器组合法）

C.1 测量方法（依据 JJG 989—2004 光栅式测微仪检定规程）

将光栅式测微仪（以下简称测微仪）安装在分度值 $0.2\mu\text{m}$ 斜块式测微仪检定器上，在测头下放置一适当尺寸的零位量块，并压缩测杆至 0.1mm 左右的位置。测微仪检定器的读数鼓轮测微仪对零，再将测微仪清零。依次放置不同量值的量块，每一量块组应重复放置 3 次，取 3 次读数的算术平均值作为各点的示值，各点示值误差的计算公式如下：

$$\Delta l_i = l_{ai} - (l_{bi} - l_{b0}) \quad (\text{C.1})$$

式中： Δl_i ——第 i 点的示值误差，mm；

l_{ai} ——第 i 点测微仪的示值，mm；

l_{bi} ——第 i 点量块的实际长度，mm；

l_{b0} ——零位量块的实际长度，mm。

分别在 Δl_i 中最大值 Δl_{\max} 与最小值 Δl_{\min} 的对应示值点 $l_{a-\max}$ 与 $l_{a-\min}$ 加密测量，量块的对应尺寸为 $l_{b-\max}$ 与 $l_{b-\min}$ 。

测微仪的测头下放置 $l_{b-\max}$ 量块，反行程旋转测微仪检定器的读数鼓轮，每间隔 $4\mu\text{m}$ 记录一次测微仪的示值，共测 10 点；再将测微仪检定器退回 $40\mu\text{m}$ ，放置 $l_{b-\min}$ 量块，反行程旋转测微仪检定器的读数鼓轮，每间隔 $4\mu\text{m}$ 记录一次测微仪的示值，共测 10 点。各点示值误差的计算公式如下。

$$\Delta l_j = l_{aj} - (l_b - l_{b0}) - l_{cj} \quad (\text{C.2})$$

式中： Δl_j ——第 j 点的示值误差，mm；

l_{aj} ——第 j 点测微仪的示值，mm；

l_b ——与 Δl_{\max} 或 Δl_{\min} 相对应的量块的实际长度（ $l_{b-\max}$ 或 $l_{b-\min}$ ），mm；

l_{b0} ——零位量块的实际长度，mm；

l_{cj} ——第 j 点测微仪检定器的位移量，mm。

测微仪示值误差的计算公式如下：

$$\Delta L = \Delta l_{\max} - \Delta l_{\min} \quad (\text{C.3})$$

式中： ΔL ——测微仪的示值误差，mm；

Δl_{\max} —— Δl_j 中最大值，mm；

Δl_{\min} —— Δl_j 中最小值，mm。

下面以分辨力为 $0.1\mu\text{m}$ 的 2 级测微仪为例进行分析。

C.2 数学模型

测微仪的示值误差：

$$\begin{aligned} \Delta L &= \Delta l_{\max} - \Delta l_{\min} = [l_{a-\max} - (l_{b-\max} - l_{b0}) - l_{c-\max}] - [l_{a-\min} - (l_{b-\min} - l_{b0}) - l_{c-\min}] \\ &= (l_{a-\max} - l_{a-\min}) - (l_{b-\max} - l_{b-\min}) - (l_{c-\max} - l_{c-\min}) \end{aligned} \quad (\text{C.4})$$

式中： ΔL ——测微仪的示值误差，mm；

Δl_{\max} —— Δl_j 中最大值，mm；

Δl_{\min} —— Δl_j 中最小值，mm；

$l_{a-\max}$ ——与 Δl_{\max} 对应的测微仪的示值，mm；

$l_{a-\min}$ ——与 Δl_{\min} 对应的测微仪的示值，mm；

$l_{b-\max}$ ——与 Δl_{\max} 对应的量块长度，mm；

$l_{b-\min}$ ——与 Δl_{\min} 对应的量块长度，mm；

$l_{c-\max}$ ——与 Δl_{\max} 对应的测微仪检定器的位移量，mm；

$l_{c-\min}$ ——与 Δl_{\min} 对应的测微仪检定器的位移量，mm。

C.3 方差和灵敏系数

因为使用的是测微仪检定器的同一个 $40\mu\text{m}$ 段， $(l_{c-\max} - l_{c-\min})$ 引起的不确定度实际就是测微仪检定器在该段的示值误差所引起的不确定度，因此

$$u_c^2(\Delta L) = [c_1 u(l_{a-\max})]^2 + [c_2 u(l_{b-\max})]^2 + [c_3 u(l_{a-\min})]^2 + [c_4 u(l_{b-\min})]^2 + [c_5 u(l_c)]^2 \quad (\text{C.5})$$

$l_{a-\max}$ 的灵敏系数： $c_1 = 1$

$l_{b-\max}$ 的灵敏系数： $c_2 = -1$

$l_{a-\min}$ 的灵敏系数： $c_3 = -1$

$l_{b-\min}$ 的灵敏系数： $c_4 = 1$

l_c 的灵敏系数： $c_5 = -1$

其中， $u(l_{a-\max})$ 与 $u(l_{a-\min})$ ， $u(l_{b-\max})$ 与 $u(l_{b-\min})$ 的来源相同，则

$$u^2(l_{a-\max}) = u^2(l_{a-\min}) = u^2(l_a)$$

$$u^2(l_{b-\max}) = u^2(l_{b-\min}) = u^2(l_b)$$

因此

$$u_c^2(\Delta L) = 2u^2(l_a) + 2u^2(l_b) + u^2(l_c) \quad (\text{C.6})$$

C.4 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 C.1。

表 C.1 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值/ μm		c_i	自由度 ν	
		10mm 测微仪	100mm 测微仪		10mm	100mm
$u(l_a)$	与测微仪有关的误差	0.030	0.076	$\sqrt{2}$	∞	120
$u_1(l_a)$	测微仪的量化误差	0.029	0.029		∞	∞
$u_2(l_a)$	环境温度影响	0.004	0.040		50	50
$u_3(l_a)$	光栅尺与量块的温差	0.006	0.058		50	50
$u(l_b)$	与量块有关的误差	0.043	0.073	$\sqrt{2}$	34	27
$u_1(l_b)$	量块长度的测量不确定度	0.039	0.071		25	25

表 C.1 (续)

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值/ μm		c_i	自由度 ν	
		10mm 测微仪	100mm 测微仪		10mm	100mm
$u_2(l_b)$	量块的长度变动量	0.006	0.008		25	25
$u_3(l_b)$	放置量块的重复性	0.016	0.016		9	9
$u(l_c)$	测微仪检定器的示值误差	0.127	0.127	1	50	50

C.5 计算标准不确定度分量

C.5.1 与测微仪有关的误差引起的标准不确定度分量 $u(l_a)$ C.5.1.1 测微仪的量化误差引起的标准不确定度分量 $u_1(l_a)$

光栅测微仪的数字分辨力 $0.1\mu\text{m}$ ，量化误差以等概率落在半宽度为 $0.05\mu\text{m}$ 的区间内，则

$$u_1(l_a) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029(\mu\text{m})$$

自由度

$$\nu_1(l_a) = \infty$$

C.5.1.2 环境温度影响引起的标准不确定度分量 $u_2(l_a)$

考虑光栅尺材料为 F_6 玻璃的情况，其线膨胀系数为 $10.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，钢质量块的线膨胀系数 $11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，两者之差为 $1.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，环境温度为 $(20 \pm 0.5) \text{ } ^\circ\text{C}$ ，光栅尺的温度在半宽为 $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的范围内等概率分布，则

$$u_2(l_a) = \frac{0.5 \times 1.4 \times 10^{-6} l_a}{\sqrt{3}}$$

对于 10mm 测量范围， $u_2(l_a) = 0.004\mu\text{m}$ 。

对于 100mm 测量范围， $u_2(l_a) = 0.040\mu\text{m}$ 。

估计其相对不确定度为 0.1，自由度为 $\nu_2(l_a) = 50$ 。

C.5.1.3 光栅尺与量块的温差引起的标准不确定度分量 $u_3(l_a)$

在平衡温度 4h 后，光栅尺与量块的温度差不会超过 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，假定在半宽为 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 范围内等概率分布，则由 Δt 引起的标准不确定度为

$$u_3(l_a) = \frac{0.1 \times 10.1 \times 10^{-6} l_a}{\sqrt{3}}$$

对于 10mm 测量范围， $u_3(l_a) = 0.006\mu\text{m}$ 。

对于 100mm 测量范围， $u_3(l_a) = 0.058\mu\text{m}$ 。

估计其相对不确定度为 0.1，自由度为 $\nu_3(l_a) = 50$ 。

C.5.1.4 计算 $u(l_a)$

以上三项合成，得

$$u(l_a) = \sqrt{u_1^2(l_a) + u_2^2(l_a) + u_3^2(l_a)}$$

自由度为

$$\nu(l_a) = \frac{u^4(l_a)}{\frac{u_1^4(l_a)}{\nu_1(l_a)} + \frac{u_2^4(l_a)}{\nu_2(l_a)} + \frac{u_3^4(l_a)}{\nu_3(l_a)}}$$

对于 10mm 测量范围, $u(l_a) = 0.030\mu\text{m}$, $\nu(l_a) \rightarrow \infty$ 。

对于 100mm 测量范围, $u(l_a) = 0.076\mu\text{m}$, $\nu(l_a) = 120$ 。

C.5.2 与量块有关的误差引起的标准不确定度分量 $u(l_b)$

C.5.2.1 量块长度的测量不确定度引起的标准不确定度分量 $u_1(l_b)$

2 级测微仪用 3 等量块检定, 其测量不确定度为 $\pm(0.10 + 1 \times 10^{-6} l_b)$, $k = 2.8$, 则量块长度的测量不确定度引入的标准不确定度分量为

$$u_1(l_b) = \frac{0.10 + 1 \times 10^{-6} l_b}{2.8}$$

对于 10mm 量块, $u_1(l_b) = 0.039\mu\text{m}$ 。

对于 100mm 量块, $u_1(l_b) = 0.071\mu\text{m}$ 。

其自由度为 $\nu_1(l_b) = 25$ 。

C.5.2.2 量块的长度变动量引起的标准不确定度分量 $u_2(l_b)$

用测微仪检定器加密测量时, 测微仪的测头将偏离量块中心, 量块的长度变动量引起该分量, 服从均匀分布。由于 $0.2\mu\text{m}$ 分度值的测微仪检定器的斜度比是 1:50, 在 $40\mu\text{m}$ 的加密测量范围, 测头偏离量块中心为 2mm, 量块的长边长度为 30mm, 而 3 等量块的长度变动量为 $\pm(0.16 + 0.45 \times 10^{-6} l_b) \mu\text{m}$, 则

$$u_2(l_b) = \frac{2}{30} \frac{0.16 + 0.45 \times 10^{-6} l_b}{\sqrt{3}}$$

对于 10mm 量块, $u_2(l_b) = 0.006\mu\text{m}$ 。

对于 100mm 量块, $u_2(l_b) = 0.008\mu\text{m}$ 。

其自由度为 $\nu_2(l_b) = 25$ 。

C.5.2.3 放置量块的重复性引起的标准不确定度分量 $u_3(l_b)$

取一量块重复放置于测微仪检定器的工作台上 10 次, 用 $0.01 \mu\text{m}$ 分辨力的数显电感测微仪进行测量, 电感测微仪的 10 次示值如表 C.2。

表 C.2 放置量块的重复性数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电感测微仪示值/ μm	0.00	-0.01	0.04	0.01	0.04	0.00	0.03	0.00	0.06	0.07

实验标准差为

$$s = 0.028\mu\text{m} \quad (n = 10)$$

在检定示值误差时, 每个量块要重复放置三次, 取三次测量的平均值, 则

$$u_3(l_b) = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{0.028}{\sqrt{3}} = 0.016(\mu\text{m})$$

其自由度为 $\nu_3(l_b) = 9$ 。

C.5.2.4 计算 $u(l_b)$

以上三项合成，得

$$u(l_b) = \sqrt{u_1^2(l_b) + u_2^2(l_b) + u_3^2(l_b)}$$

自由度为

$$\nu(l_b) = \frac{u^4(l_b)}{\frac{u_1^4(l_b)}{\nu_1(l_b)} + \frac{u_2^4(l_b)}{\nu_2(l_b)} + \frac{u_3^4(l_b)}{\nu_3(l_b)}}$$

对于 10mm 量块， $u(l_b) = 0.043\mu\text{m}$ ， $\nu(l_b) = 34$ 。

对于 100mm 量块， $u(l_b) = 0.073\mu\text{m}$ ， $\nu(l_b) = 27$ 。

C.5.3 测微仪检定器的示值误差引起的标准不确定度分量 $u(l_c)$

0.2 μm 分度值的杠杆斜块式测微仪检定器，经检定其 40 μm 范围内的示值误差为 0.22 μm ，服从均匀分布，则

$$u(l_c) = \frac{0.22}{\sqrt{3}} = 0.127(\mu\text{m})$$

估计其相对不确定度为 0.1，则自由度 $\nu_3 = 50$ 。

C.6 合成不确定度 $u_c(\Delta L)$

由式 (C.6)，得

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{2u^2(l_a) + 2u^2(l_b) + u^2(l_c)}$$

对于 10mm 测量范围的测微仪：

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{2 \times 0.030^2 + 2 \times 0.043^2 + 0.127^2} = 0.147(\mu\text{m})$$

对于 100mm 测量范围的测微仪：

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{2 \times 0.076^2 + 2 \times 0.073^2 + 0.127^2} = 0.196(\mu\text{m})$$

C.7 有效自由度 ν_{eff}

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(\Delta L)}{\frac{u^4(l_a)}{\nu(l_a)} + \frac{u^4(l_b)}{\nu(l_b)} + \frac{u^4(l_c)}{\nu(l_c)}}$$

对于 10mm 测量范围的测微仪：

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{0.147^4}{\frac{0.030^4}{\infty} + \frac{0.043^4}{34} + \frac{0.127^4}{50}} = 88$$

对于 100mm 测量范围的测微仪：

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{0.196^4}{\frac{0.076^4}{120} + \frac{0.073^4}{27} + \frac{0.127^4}{50}} = 225$$

C.8 扩展不确定度 U_p

$$U_p = k_p u_c(\Delta L) = t_p(\nu_{\text{eff}}) u_c(\Delta L)$$

对于 10mm 测量范围的 2 级测微仪， $\nu_{\text{eff}} = 88$ ，取置信概率 $p = 0.95$ ，查表得 $k_{95} =$

$t_{95}(88) = 2.00$, 则

$$U_p = k_{95} u_c(\Delta L) = 2.00 \times 0.147 = 0.29(\mu\text{m})$$

对于 100mm 测量范围的 2 级测微仪, $\nu_{\text{eff}} \approx 225$, 取置信概率 $p = 0.95$, 查表得 $k_{95} = t_{95}(225) = 1.98$, 则

$$U_p = k_{95} u_c(\Delta L) = 1.98 \times 1.96 = 0.39(\mu\text{m})$$

均小于测微仪最大允许误差的三分之一, 所以规程提出的示值误差的测量方法是可靠的, 规定的技术计量性能要求和检定条件是合理的。

附录 D

检定证书和检定结果通知书内页格式

D.1 检定证书内页格式

检定结果

温度： ℃

相对湿度： %

序号	主要检定项目	检定结果
1	外观	
2	各部分相互作用	
3	测力	
4	测杆受径向力引起的示值变化	
5	重要性	
6	示值误差	
检定依据：JJG 989—2004 光栅式测微仪检定规程		

检定用标准器：

准确度等级：

D.2 检定结果通知书内页格式

具体要求同 D.1，不予评级并指出不合格项目。

检定结果：应给出量化的值（不要简单给“不合格”三字）