



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1093—2002

---

## 投影仪校准规范

Calibration Specification for Projectors

2002 - 11 - 04 发布

2003 - 05 - 04 实施

---

国家质量监督检验检疫总局 发布

# 投影仪校准规范

Calibration Specification  
for Projectors

JJF 1093—2002  
代替 JJG108—1982

---

本规范经国家质量监督检验检疫总局于 2002 年 11 月 04 日批准，并自 2003 年 05 月 04 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：**陕西省计量测试研究所

**参加起草单位：**广东省计量科学研究所

本规范由归口单位负责解释

**本规范主要起草人：**

常 青 （陕西省计量测试研究所）

张 辉 （陕西省计量测试研究所）

张 磊 （陕西省计量测试研究所）

**参加起草人：**

梁小什 （广东省计量科学研究所）

## 目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 概述	(1)
4 计量特性	(2)
4.1 工作台纵横(垂)向导轨移动的直线度	(2)
4.2 工作台纵横(垂)向导轨移动的相互垂直度	(2)
4.3 读数装置的正确性	(2)
4.4 数字显示器的示值稳定性	(3)
4.5 仪器示值误差	(3)
4.6 投影物镜光轴和投射照明光轴与工作台面的垂直度	(3)
4.7 投影仪放大倍数的正确性	(3)
4.8 影屏十字线的水平线对纵向导轨移动方向的平行度	(3)
4.9 回转影屏(或回转工作台)的示值误差	(3)
4.10 顶针的正确性	(3)
5 校准条件	(3)
5.1 环境条件	(3)
5.2 校准用标准器及其他设备	(3)
6 校准项目和校准方法	(4)
6.1 工作台纵横(垂)向移动的直线度	(4)
6.2 工作台纵横(垂)向移动的相互垂直度	(4)
6.3 读数装置的正确性	(5)
6.4 数字显示器的示值稳定性	(5)
6.5 仪器示值误差	(6)
6.6 投影物镜光轴和投射照明光轴与工作台面的垂直度	(6)
6.7 投影仪放大倍数的正确性	(6)
6.8 影屏十字线的水平线对纵向导轨移动方向的平行度	(7)
6.9 回转影屏(或回转工作台)的示值误差	(7)
6.10 顶针的正确性	(8)
7 校准结果的表达	(8)
8 复校时间间隔	(8)
附录 A 校准证书的内容	(9)
附录 B 投影仪示值误差的测量不确定度评定	(10)

# 投影仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于测量用立、卧式投影仪（不包括特殊用途投影仪）的校准。

## 2 引用文献

本规范引用下列文献：

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

JB/T6380—1993 投影仪

使用本规范时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

## 3 概述

投影仪是光学机械式计量仪器。主要结构形式分为立式投影仪（物镜光轴垂直于工作台面，结构形式见图 1）和卧式投影仪（物镜光轴平行于工作台面，结构形式见图 2），其工作原理见图 3。从光源发出的光束，通过聚光镜后变成平行光照亮被测物体，再经过物镜将其影像投影到影屏上，对工件进行轮廓测量或坐标测量。

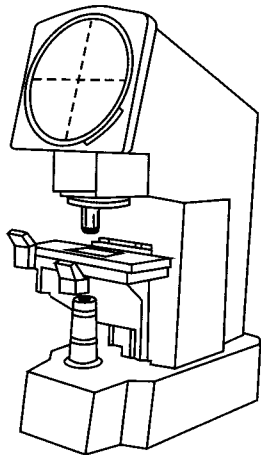


图 1 立式投影仪

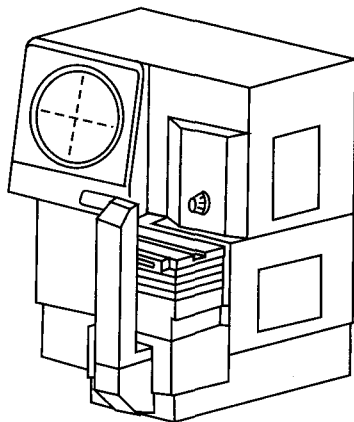


图 2 卧式投影仪

投影仪的工作台分为简易型（工作台无读数装置的）、轻型（工作台的行程小于等于  $150\text{mm} \times 75\text{mm}$ ）和重型（工作台的行程大于  $150\text{mm} \times 75\text{mm}$ ）三种。投影仪根据影屏

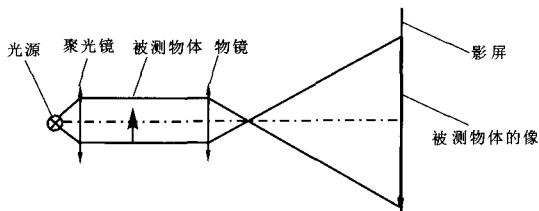


图3 工作原理图

直径大小分为小型（小于 400mm）、中型（等于 400mm ~ 800mm）和大型（大于 800mm）三种。

#### 4 计量特性

##### 4.1 工作台纵横（垂）向导轨移动的直线度

要求见表 1。

表 1 工作台纵横（垂）向导轨移动的直线度

工作台类型		简易型	轻 型	重 型	
				影屏直径不超过 800mm	影屏直径超过 800mm
直 线 度	角值/ (°)	—	15	10	12
	线值/ $\mu\text{m}$	—	5	5	8

##### 4.2 工作台纵横（垂）向导轨移动的相互垂直度

要求见表 2。

表 2 工作台纵横（垂）向导轨移动的相互垂直度

工作台类型	简易型	轻 型		重 型
		影屏直径不超过 400mm	影屏直径超过 400mm	
垂直度	—	0.015mm/100mm	0.01mm/100mm	0.0075mm/100mm

##### 4.3 读数装置的正确性

###### 4.3.1 光学机械式读数装置的正确性

要求见表 3。

表 3 光学机械式读数装置的正确性

校准项目	0.1mm 刻线和微米刻线的相符性	回程误差	物镜放大倍数的正确性
允许值/ $\mu\text{m}$	1.0	1.0	1.0

4.3.2 读数装置示值误差为  $(0, 2.0) \mu\text{m}$ 。

4.3.3 测微鼓轮回程误差为  $(0, 2.0) \mu\text{m}$ 。

4.4 数字显示器的示值稳定性

在 1h 时间内不超过 1 个分辨力值。

4.5 仪器示值误差

要求见表 4。

表 4 仪器示值误差

工作台类型	轻 型	重 型
示值误差/ $\mu\text{m}$	$4 + L/25$	$4 + L/50$
注：式中 $L$ 为相应测量段的尺寸。		

4.6 投影物镜光轴和投射照明光轴与工作台面的垂直度

应使量块两侧影像同样清晰，无可见的阴影。

4.7 投影仪放大倍数的正确性

要求见表 5。

表 5 投影仪放大倍数的正确性

类型	影屏直径不超过 600mm	影屏直径超过 600mm
放大倍数的正确性	$\leq 0.08\%$	$\leq 0.06\%$

4.8 影屏十字线的水平线对纵向导轨移动方向的平行度

固定式影屏的不超过  $40''$ ，可动影屏的不超过  $60''$ 。

4.9 回转影屏（或回转工作台）的示值误差

轻型的不超过  $6'$ ，重型的不超过  $5'$ 。

4.10 顶针的正确性

顶针轴线与纵向移动方向的平行度，对于影屏直径不超过 600mm 的投影仪为  $(0, 0.02) \text{mm}$ （外顶针）和  $(0, 0.03) \text{mm}$ （内顶针），对于影屏直径超过 600mm 的投影仪为  $(0, 0.03) \text{mm}$ （外顶针）和  $(0, 0.04) \text{mm}$ （内顶针）。顶针的径向磨损应为  $(0, 0.01) \text{mm}$ 。

注：作为校准，不判断合格与否，上述计量特性的指标仅供参考。

## 5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 校准室内温度为  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ ，室温变化不超过  $0.5^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

5.1.2 校准室内湿度不超过 75% RH。

被校准仪器在室内平衡温度时间不少于 24h，校准用标准器在室内平衡温度时间不少于 3h。

5.2 校准用标准器及其他设备

校准用标准器及其他设备	计量性能
千分表或扭簧比较仪	分度值为 0.001mm
专用四棱直尺	0 级
自准直仪	分度值为 1"
专用直角尺	0 级
刀口形直角尺	0 级
光学计管	$\pm 0.25\mu\text{m}$
量块	1.0mm, 1.03mm, 1.06mm, 1.09mm, 1.2mm, 1.4mm, 1.6mm, 1.8mm 和 2.0mm 的三等量块
标准玻璃刻度尺	2 等
工作用玻璃刻度尺	0.03mm

## 6 校准项目和校准方法

首先检查外观，确定没有影响校准计量特性的因素后再进行校准。

### 6.1 工作台纵横（垂）向移动的直线度

#### 6.1.1 直线度角值用分度值为 1"的自准直仪测量

对于立式投影仪，将平面反射镜放在工作台上，使镜面大致垂直于行程方向，自准直仪安装在投影仪主体上（或自准直仪与投影仪放在同一刚体上），并调整至与反射镜对准，移动工作台，以纵向（或横向）全行程内自准直仪的示值最大变化量作为该方向的校准结果。

对于卧式投影仪，将直角棱镜装夹在物镜管上，平面反射镜放在工作台上，自准直仪安装在投影仪主体上（或自准直仪与投影仪放在同一刚体上），并使三者调整至正确位置，垂向移动工作台全行程，以垂向全行程内自准直仪的示值最大变化量作为该方向的校准结果。

上述测量应在相互垂直的两个截面分别进行。

6.1.2 直线度线值用专用四棱直尺和扭簧比较仪测量。将四棱直尺固定在工作台中心位置，扭簧比较仪固定在投影仪主体上，并与四棱直尺垂直（或水平）工作面相接触，调整四棱直尺平行于工作台纵向（或横向）移动方向，移动工作台，在扭簧比较仪上读出该移动方向垂直（或水平）方向示值的最大变化量分别作为该方向的校准结果。

卧式投影仪垂向导轨移动的直线度线值用直角尺和扭簧比较仪测量。将直角尺立放在金属工作台中心位置，使其工作面与横向（或纵向）行程大致平行，并与固定在投影仪主体上的扭簧比较仪接触，调整直角尺，使工作面平行于垂向行程，垂向移动工作台，从扭簧比较仪上读得横向（或纵向）示值的最大变化量分别作为该方向的校准结果。

### 6.2 工作台纵横（垂）向移动的相互垂直度



用直角尺测量。测量时，将直角尺固定在工作台上，扭簧比较仪固定在投影仪主体上，并与直角尺长边工作面相接触，调整直角尺工作面与纵向行程相平行，然后将扭簧比较仪与直角尺短边相接触，横（垂）向移动工作台，在扭簧比较仪上读得工作台行程首尾两点之差即为校准结果。

影屏不超过  $\phi 400\text{mm}$  的投影仪也可用刀口形直角尺以影像法进行测量。

### 6.3 读数装置的正确性

#### 6.3.1 0.1mm 刻线和微米刻线的相符性

将微米分划板（或读数鼓轮）对在零位，标准玻璃刻度尺上任一毫米刻线对在 0.1mm 分划板的一条双刻线中间，转动微米分划板（或读数鼓轮）使玻璃刻度尺毫米刻线对在相邻的另一条 0.1mm 分划板的双刻线中间，从微米分划板（或读数鼓轮）上读出相对  $100\mu\text{m}$  的偏差为校准结果。此项测量应在 0.1mm 分划板均匀分布的三个位置进行。

#### 6.3.2 回程误差

对于光学机械式读数装置回程误差的测量，正（反）向移动微米读数装置对玻璃刻度尺上任一毫米刻线瞄准并读数，取正向三次读数的平均值与反向三次读数的平均值之差为回程误差。此项测量应在读数装置均匀分布的三个位置进行。

对于读数鼓轮回程误差的测量，以读数鼓轮各校准点正、反行程示值误差之差的最大值确定。

#### 6.3.3 物镜放大倍数的正确性

将微米分划板（或读数鼓轮）对在零位，玻璃刻度尺上任一毫米刻线对在 0.1mm 分划板的“0”双刻线中间，由微米分划板（或读数鼓轮）读出相邻的另一毫米刻线与 0.1mm 分划板的“10”双刻线的偏差值，以三次读数的平均值作为测得值。此项测量应在玻璃刻度尺均匀分布的三个位置进行，以三个位置测得值的平均值作为校准结果。

#### 6.3.4 读数装置的示值误差

安装三珠工作台使其定位面垂直于读数装置的测量方向，光学计管安装在投影仪主体上，使其测量轴线平行与读数装置的测量方向并大致通过三珠工作台的三珠中心位置，转动微米分划板使其零线与指标线对准，移动纵（横或垂）向工作台，使毫米玻璃刻度尺上任一毫米刻线对准 0.1mm 刻线的零位。在光学计管的测头与三珠间放入 1mm 量块，调整光学计管使其示值处于零位或某一值，移动工作台使玻璃刻度尺的毫米刻线与相应的双刻线对准，并依次在光学计管和三珠之间放入尺寸为 1.03, 1.06, 1.09, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 和 2.0mm 的量块，并依次在光学计上进行三次瞄准和读数，取其算术平均值作为该点的读数。各受检点的示值误差  $\delta_i$ （单位  $\mu\text{m}$ ）按下式计算：

$$\delta_i = (a_i - a_0) - (l_i - l_0) \quad (1)$$

式中： $a_i$ ,  $a_0$ ——分别为校准点和对零位时光学计的读数， $\mu\text{m}$ ；

$l_i$ ,  $l_0$ ——分别为测量点和对零位时所用量块的偏差， $\mu\text{m}$ 。

读数装置的示值误差以各点误差中最大与最小值之差确定。

也可采用满足校准要求的其他校准方法进行。

### 6.4 数字显示器的示值稳定性

待数字显示器稳定后，以起始读数值为准，每隔 15 分钟观察一次，以每次观测值与起始读数值差值的最大值作为校准结果。

### 6.5 仪器示值误差

用标准玻璃刻度尺以 50 倍物镜和透射光照明测量。

测量时，将玻璃刻度尺安置在工作台的中间位置，对于光学机械结构的，使投影仪毫米刻度尺的零位大致处于 0.1mm 刻度尺的 0.5mm 处；对于螺丝副结构的，使其示值处于零位附近。调整标准玻璃刻度尺与工作台移动方向平行。再在影屏中心的邻近位置上安置双刻线分划板与 mm 刻线平行，同时微调工作台使双刻线对准标准玻璃刻度尺的零位，在读数装置上读得  $A_0$ ，按校准间隔移动工作台，使各校准点处标准玻璃刻度尺与双刻线分划板的双线对准，并在读数装置上读得  $A_i$ ，各校准点处的示值误差  $\delta_i$ （单位 mm）按下式求得：

$$\delta_i = (A_i - A_0) - L_i \quad (2)$$

式中： $L_i$ ——标准玻璃刻度尺所用一段的实际尺寸，mm。

仪器示值误差以各校准点正向和反向行程时误差的最大值与最小值的差值确定。上述测量，对于工作台行程不超过 100mm 的应在工作行程均匀分布的 5 个位置进行，对于工作台行程超过 100mm 的应在工作行程均匀分布的 10 个位置进行。

具有垫放量块改变量程的投影仪，还需测量垫放量块时的示值误差。测量时，使双刻线对准标准玻璃刻度尺的零位，在读数装置上读得  $A_0$ ，依次在微分筒测杆和工作台滑板之间放入量块，使双刻线对准标准玻璃刻度尺的相应刻线，在读数装置上读得  $A_i$ ，垫放量块时各点的示值误差  $\delta_i$ （单位 mm）按下式求得。

$$\delta_i = (A_i - A_0) - \Delta L_i \quad (3)$$

式中： $\Delta L_i$ ——标准玻璃刻度尺所用一段的偏差，mm。

### 6.6 投影物镜光轴和投射照明光轴与工作台面的垂直度

在透射光照明下，正确调整灯丝的位置，将可变光阑调至最小，分别安装各倍物镜。将研和好的 2mm 和 20mm 量块平放在玻璃工作台上，调整工作台使量块影像清晰，并使量块影像大致处于影屏的中心位置，2mm 量块两侧应同样清晰且无可见之阴影。该项测量应在垂直于光轴平面内相互垂直的 4 个位置上进行。

上述测量对于卧式投影仪先将附加工作台调整至与工作台行程相平行后进行。

### 6.7 投影仪放大倍数的正确性

用标准玻璃刻线尺和工作用玻璃刻线尺测量。该项测量应在分别安装各倍物镜和透射光照明的条件下，在影屏相互垂直的两直径方向所示（见图 4）的相应位置进行。

对于影屏直径  $D < 800\text{mm}$  的投影仪可不测量中心对称的  $D/2$  和  $D/4$  两组尺寸，对于影屏直径  $D \geq 800\text{mm}$  的投影仪可不测量  $D/2$ 、 $2D/3$  和  $D$  三组尺寸。

校准时，将标准玻璃刻线尺放在工作台的中间位置。调整工作台使标准玻璃刻线尺刻线影像清晰，根据物镜的放大倍数用工作用玻璃刻线尺进行比较，借助仪器附带的大镜观察标准玻璃刻线尺两刻线影像间距离是否与工作用玻璃刻线尺的相应刻线相重合，不重合时借助工作台的读数装置读出其差值（三次测量的平均值） $\Delta_\beta$ ；对于简易

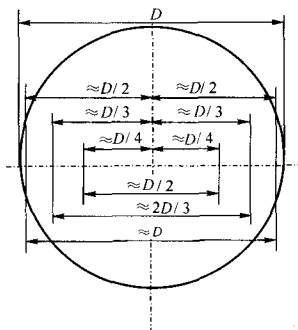


图 4

D—影屏直径

型投影仪直接估读出标准玻璃刻线尺两刻线影像间距离与工作用玻璃刻线尺的相应刻线不重合量（三次测量的平均值） $\Delta'_\beta$ 。投影仪的放大倍数误差  $\delta_\beta$  按下式计算求得：

$$\delta_\beta = \frac{\Delta'_\beta}{L} \times 100\%$$

或

$$\delta_\beta = \frac{\Delta'_\beta}{\beta L} \times 100\% \quad (4)$$

式中：L——标准玻璃刻线尺所用两刻线的实际尺寸；

$\beta$ ——物镜放大倍数的名义值。

### 6.8 影屏十字线的水平线对纵向导轨移动方向的平行度

用刀口直角尺以 20 倍物镜用透射光测量。将刀口直角尺固定在工作台上并调焦至刀口影像清晰，使刀口直角尺的长边（刀口）与工作台纵向行程相平行，转动影屏使十字线的水平线与刀口影像重合，按影屏的圆周刻度读出其零位偏差作为校准结果。对于固定式影屏，横（垂）向移动工作台使刀口直角尺长边影像与影屏十字线的水平线一端对准，再在另一端对准，测得横（垂）向工作台的移动量  $a$ （mm），然后按下式换算成角度值  $\alpha$ （"）作为校准结果：

$$\alpha = a\beta\rho/d \quad (5)$$

式中： $\beta$ ——物镜放大倍数；

$d$ ——视场直径，mm；

$\rho$ ——常数（ $\approx 2 \times 10^5$ ）。

### 6.9 回转影屏（或回转工作台）的示值误差

用刀口直角尺以 20 倍物镜用透射光测量，将影屏（或工作台）处于零位。使刀口直角尺固定在工作台上并调焦至刀口影像清晰，调整直角尺使影屏十字线的水平线与长边刀口影像重合，读取起始读数，然后依次转动影屏（或工作台）至  $90^\circ$ ， $180^\circ$ ， $270^\circ$ 附近，移动工作台使十字线水平线依次与直角尺短边和长边刀口影像重合，在影屏（或工

作台)的读数装置读取误差值。示值误差以四个读数中的最大与最小值的差值确定。

### 6.10 顶针的正确性

#### 6.10.1 顶针轴线与纵向移动方向的平行度

用专用心轴和扭簧比较仪测量。将专用心轴安装在顶针架上,扭簧比较仪固定在投影仪的主体上,并使其测量轴线垂直与专用心轴接触,心轴两端最高点读数值的差值为测量值。然后使扭簧比较仪测量轴线水平与专用心轴接触,同样测得两端的差值为测量值。该项测量还应在顶针和顶针杆处于不同位置时进行,以各方位测量值的最大值作为相应方位的校准结果。

#### 6.10.2 顶针的径向磨损

用20倍物镜在透射光照明下进行。校准时先对顶针进行调焦,在影屏上成清晰的顶针轮廓像,借助于影屏十字线的一个刻线(或影屏上画在纸上的线)与顶针轮廓影像一边相切。转动顶针,找出磨损最大处,以横(垂)向读数装置读出其磨损量作为校准结果。

## 7 校准结果的表达

经校准的投影仪填发校准证书。

## 8 复校时间间隔

复校时间间隔根据使用情况确定,建议一般不超过1年。

## 附录 A

## 校准证书的内容

- a) 标题, “校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点 (如果不在实验室内进行校准);
- d) 证书或报告的唯一性标识 (如编号), 每页及总页的标识;
- e) 送校单位的名称及地址;
- 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和应用有关时, 应对抽样程序进行说明;
- i) 对校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- k) 校准环境的描述;
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识, 以及签发日期;
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- o) 未经实验室书面批准, 不得局部复制证书或报告的声明。

## 附录 B

## 投影仪示值误差的测量不确定度评定

## B.1 测量方法

用 200mm 二等玻璃刻线尺对投影仪示值误差进行校准。校准时,使投影仪示值于零位,将玻璃刻度尺安置在工作台的中间位置,调整标准玻璃刻度尺与工作台移动方向平行。再在影屏中心的邻近位置上安置双刻线分划板使双刻线对准标准玻璃刻度尺的零位,在读数装置上读得  $L_0$ ,依次移动工作台,使各受校准点处标准玻璃刻度尺与双刻线分划板的双线对准,并在读数装置上读得  $L_i$ ,可得各受校准点处的误差。下面以光学机械式读数装置中校准 100mm 点为例进行评定。

## B.2 数学模型

$$\delta_i = (A_i - A_0) - L_i \quad (\text{B.1})$$

式中:  $\delta_i$ ——各点的示值误差;

$A_i$ ——各校准点上仪器的读数值;

$A_0$ ——起始点上仪器的读数值;

$L_i$ ——标准玻璃刻线尺所用的实际尺寸, mm。

## B.3 方差和灵敏系数

考虑各分量彼此独立,依据公式  $u_c^2(\delta_i) = \sum \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$  得

$$u_c^2 = u^2(\Delta) = c_1^2 u^2(A_i) + c_2^2 u^2(A_0) + c_3^2 u^2(L_i)$$

式中:  $c_1 = \partial \delta_i / \partial A_i = 1$ ;  $c_2 = \partial \delta_i / \partial A_0 = -1$ ;  $c_3 = \partial \delta_i / \partial L_i = -1$

## B.4 标准不确定度一览(见表 B.1)

## B.5 计算分量的标准不确定度

B.5.1 测量读数  $L_0$  和  $L_i$  的误差引起的标准不确定度分量  $u_1$ 

测量读数包括瞄准误差和估读误差,其中瞄准误差包含影屏瞄准和读数时的瞄准。以校准时使用 10 倍物镜计算,读数装置的放大倍数为 20 倍,则两项瞄准误差分别为

$$\delta_{\text{影}} = 5 \times 250/10 \times 2 \times 10^5 = 0.63 \mu\text{m}$$

$$\delta_{\text{读}} = 5 \times 250/20 \times 2 \times 10^5 = 0.31 \mu\text{m}$$

两项合成:  $\delta = \sqrt{\delta_{\text{影}}^2 + \delta_{\text{读}}^2} = \sqrt{0.61^2 + 0.31^2} = 0.70 \mu\text{m}$

估读误差为分度值的 1/10,即  $0.1 \mu\text{m}$ 。

B.5.1.1  $L_0$  估算的标准不确定度分量  $u_{11}$ 

包含由瞄准误差引起的标准不确定度分量  $u'$  和估读误差引起的标准不确定度分量  $u''$ ,全部以均匀分布估计,其相对不确定度为 20%。

$$u' = 0.70/\sqrt{3} = 0.40 \mu\text{m} \quad v' = (1/2) \times (20/100)^{-2} = 12$$

$$u'' = 0.1/\sqrt{3} = 0.06 \mu\text{m} \quad v'' = (1/2) \times (20/100)^{-2} = 12$$

表 B.1

标准不确定度分量 $u(x_i)$	标准不确定度来源	标准不确定度	$c_i$	$ c_i  u(x_i)$	自由度
$u_1$	测量读数误差	0.58 $\mu\text{m}$	1	0.58	27
	$L_0$ 的读数误差	0.41 $\mu\text{m}$	1		14
	瞄准误差	$0.70/\sqrt{3} = 0.40\mu\text{m}$			12
	估读误差	$0.1/\sqrt{3} = 0.06\mu\text{m}$			12
	$L_i$ 的读数误差	0.41	-1		14
	瞄准误差	0.40			12
	估读误差	0.06			12
$u_2$	标准玻璃刻线尺误差	0.35	-1	0.35	24
	刻线尺检定误差	$0.5/3 = 0.17\mu\text{m}$			50
	刻度尺线胀系数差	$100000 \times 3 \times 1.0 \times 10^{-6} / \sqrt{3} = 0.17\mu\text{m}$			50
	刻度尺温度差	$100000 \times 10.2 \times 10^{-6} \times 0.5/\sqrt{3} = 0.29\mu\text{m}$			12

两项合成： $u_{11} = \sqrt{u'^2 + u''^2} = \sqrt{0.39^2 + 0.06^2} = 0.41\mu\text{m}$

$$\nu_{11} = \frac{u_{11}^4}{\frac{u'^4}{\nu'} + \frac{u''^4}{\nu''}} = \frac{0.40^4}{\frac{0.39^4}{12} + \frac{0.06^4}{12}} = 14$$

B.5.1.2  $L_i$  估算的标准不确定度分量  $u_{12}$

与  $L_0$  估算的标准不确定度分量  $u_{11}$  相同：

$$u_{12} = 0.41\mu\text{m} \quad \nu_{12} = 14$$

B.5.1.3 测量读数误差引起的标准不确定度分量  $u_1$  的计算

$$u_1 = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2} = \sqrt{0.41^2 + 0.41^2} = 0.58\mu\text{m}$$

$$\nu_1 = \frac{u_1^4}{\frac{u_{11}^4}{\nu_{11}} + \frac{u_{12}^4}{\nu_{12}}} = \frac{0.58^4}{\frac{0.41^4}{12} + \frac{0.41^4}{12}} = 27$$

B.5.2 标准玻璃刻线尺  $L_s$  误差估算的标准不确定度分量  $u_2$

该项不确定度主要由标准玻璃刻线尺检定误差的不确定度  $u_{21}$ ，标准玻璃刻线尺和投影仪的刻度尺线胀系数差的不确定度  $u_{22}$ ，以及标准玻璃刻线尺和投影仪的刻度尺温度差的不确定度  $u_{23}$  组成。

B.5.2.1 标准玻璃刻线尺检定误差的标准不确定度  $u_{21}$

由检定证书给出为 0.5 $\mu\text{m}$ ，正态分布， $k=3$ ，估计相对不确定度 10%。

$$u_{21} = 0.5/3 = 0.17\mu\text{m}$$

$$\nu_{21} = (1/2) \times (10/100)^{-2} = 50$$

B.5.2.2 标准玻璃刻线尺和投影仪的刻度尺线胀系数差的标准不确定度  $u_{22}$

线胀系数差的界限在  $\pm 1.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  的范围内服从均匀分布， $\Delta t = 3^\circ\text{C}$ ，估计相对

不确定度 10%。

$$u_{22} = 100000 \times 3 \times 1.0 \times 10^{-6} / \sqrt{3} = 0.17 \mu\text{m}$$

$$\nu_{22} = (1/2) \times (10/100)^{-2} = 50$$

### B.5.2.3 标准玻璃刻线尺和投影仪的刻度尺温度差的标准不确定度 $u_{23}$

等温后，标准玻璃刻线尺和投影仪的刻度尺温度差估计在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  范围内服从均匀分布，相对不确定度 20%。

$$u_{23} = 100000 \times 10.2 \times 10^{-6} \times 0.5 / \sqrt{3} = 0.29 \mu\text{m}$$

$$\nu_{23} = (1/2) \times (20/100)^{-2} = 12$$

### B.5.2.4 $L_s$ 误差估算的标准不确定度分量 $u_2$ 的计算

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2 + u_{23}^2} = \sqrt{0.17^2 + 0.08^2 + 0.29^2} = 0.35 \mu\text{m}$$

$$\nu_2 = \frac{u_2^4}{\frac{u_{21}^4}{\nu_{21}} + \frac{u_{22}^4}{\nu_{22}} + \frac{u_{23}^4}{\nu_{23}}} = \frac{0.35^4}{\frac{0.17^4}{50} + \frac{0.08^4}{50} + \frac{0.29^4}{12}} = 24$$

### B.6 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.58^2 + 0.35^2} = 0.68 \mu\text{m}$$

### B.7 有效自由度

依据 Welch-Satterthwaite 公式有：

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\frac{u_1^4}{\nu_1} + \frac{u_2^4}{\nu_2}} = \frac{0.68^4}{\frac{0.58^4}{27} + \frac{0.35^4}{24}} = 44$$

### B.8 扩展不确定度

$$U_{99} = t_{0.99}(44) u_c = 2.7 \times 0.68 = 1.8 \mu\text{m}$$

注：按照 10mm 检定点计算的扩展不确定度为  $U_{99} = 1.4 \mu\text{m}$ ，200mm 检定点计算的扩展不确定度为  $U_{99} = 1.9 \mu\text{m}$ 。