

中华人民共和国工业和信息化部
有色金属计量技术规范

JJF(有色金属) XXXX—XXXX

光学显微镜畸变校准规范

Calibration Specification for Optical Microscope Distortion
(报批稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

光学显微镜畸变校准规范

Calibration Specification for Optical
Microscope Distortion

JJF（有色金属）XXXX—XXXX

归口单位：中国有色金属工业协会

主要起草单位：西安汉唐分析检测有限公司

广东省阳江市质量计量监督检测所

延安油气产品质量检验检测有限责任公司

西安建筑科技大学

西南铝业（集团）有限责任公司

中国石油集团工程材料研究院有限公司

中航金属材料理化检测科技有限公司

本规范委托有色金属行业计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

余泽利（西安汉唐分析检测有限公司）

郑 铨（西安汉唐分析检测有限公司）

谭文华（广东省阳江市质量计量监督检测所）

沙夜龙（延安油气产品质量检验检测有限责任公司）

房永强（西安汉唐分析检测有限公司）

邢海瑞（西安建筑科技大学）

熊 智（西南铝业（集团）有限责任公司）

全 珂（中国石油集团工程材料研究院有限公司）

毕革平（广东省阳江市质量计量监督检测所）

冯 琼（中航金属材料理化检测科技有限公司）

目 录

引言	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语.....	(1)
3.1 畸变.....	(1)
3.2 相对畸变.....	(1)
4 概述.....	(1)
5 计量特性.....	(2)
5.1 总放大倍数相对误差.....	(2)
5.2 目镜观察图像相对畸变.....	(2)
5.3 显示器(屏)图像相对畸变.....	(2)
6 校准条件.....	(2)
6.1 环境条件.....	(2)
6.2 测量标准及其他设备.....	(2)
7 校准项目和校准方法.....	(2)
7.1 校准项目.....	(2)
7.2 校准方法.....	(2)
8 校准结果表达.....	(5)
9 复校时间间隔.....	(6)
附录 A 米字线纹尺规格要求.....	(7)
附录 B 数字照相机畸变校准方法.....	(8)
附录 C 校准原始记录参考格式.....	(9)
附录 D 校准证书内页参考格式.....	(11)
附录 E 目镜观察图像相对畸变测量不确定度评定示例.....	(12)

引 言

JJF 1071 《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001 《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1 《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑校准规范制修订工作的基础性系列规范。

本规范主要参考了JJF 1914 《金相显微镜校准规范》。

本规范为首次发布。

光学显微镜畸变校准规范

1 范围

本规范适用于放大倍数不超过 $2000\times$ 的光学显微镜畸变的校准，其他类型显微镜可参照本规范校准。

2 引用文件

本规范无引用文件。

3 术语

以下术语和定义适用于本规范。

3.1 畸变 distortion

光学显微镜的横向放大率随视场的增大而变化所引起的一种与失去物像相似的像差。

3.2 相对畸变 relative distortion

光学显微镜目镜视场中心对称间距实际测量值和理论值的相对偏差。

4 概述

光学显微镜（以下简称显微镜）是进行材料微观检测分析的重要设备，由物镜、中间透镜和目镜组成，其总放大倍率一般不超过 $2000\times$ 。像差是指在光学系统中由透镜材料特性、折射或反射表面的几何形状引起的实际像和理想像的偏差，像差是实际光学系统成像的一系列缺陷。畸变则是横向（垂轴）放大率随视场的增大而变化所引起的与失去物像相似的像差。

显微镜的畸变按形状分为桶形畸变、枕形畸变和透视畸变，见图1。如果显微镜目镜中观察的图像不存在畸变，则4个方向的畸变均为0，见图1（a）；如果图像存在桶形畸变，则4个方向的畸变均小于0，见图1（b）；如果图像存在枕形畸变，则4个方向的畸变均大于0，见图1（c）；如果图像存在透视畸变，则4个方向的畸变出现大于0和小于0，见图1（d）。

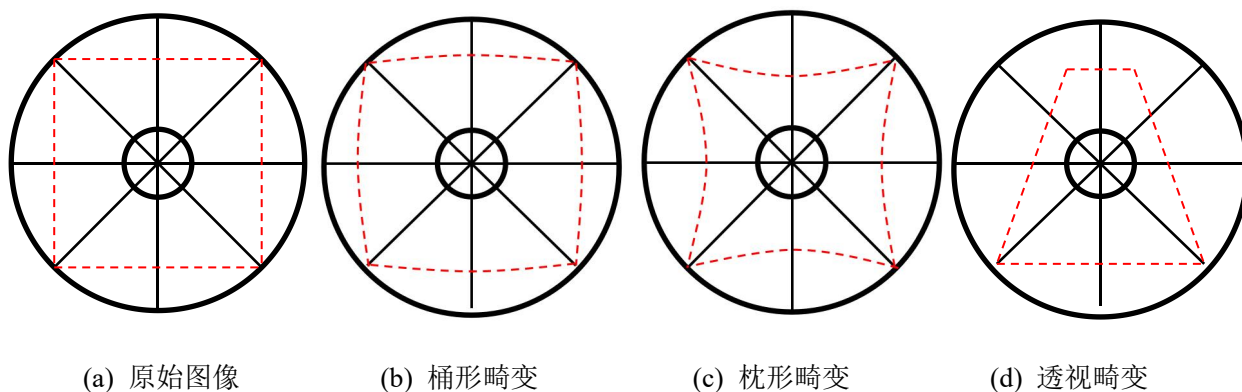


图1 显微镜畸变示意图

5 计量特性

5.1 总放大倍数相对误差

总放大倍数相对误差 $\beta_{\text{总}}$ 一般不超过 $\pm 5\%$ 。

5.2 目镜观察图像相对畸变

目镜观察图像相对畸变 $q_{\text{目}}$ 一般不超过 $\pm 4\%$ 。

5.3 显示器（屏）图像相对畸变

显示器（屏）图像上相对畸变 $q_{\text{屏}}$ 一般不超过 $\pm 4\%$ 。

6 校准条件

6.1 环境条件

校准试验应在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下进行，被校显微镜和测量标准在室内连续平衡温度的时间不少于2h，校准室内应无影响校准的灰尘、振动和腐蚀性气体。

6.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备的技术要求见表1。

表1 测量标准及其他设备技术要求

序号	测量标准	技术要求
1	A 型米字线纹尺	分度值 1mm, $U_{95} \leq 1.0\mu\text{m}$
2	B 型米字线纹尺	分度值 0.01mm, $U_{95} \leq 1.0\mu\text{m}$
3	数字照相机	采集图像分辨率不低于 900 万像素
4	量块	3 等
5	玻璃线纹尺	分度值 1mm, MPE: $\pm 0.03\text{mm}$
6	放大镜	--
注：1. A 型米字线纹尺和 B 型米字线纹尺规格要求见附录 A； 2. 数字照相机的校准方法见附录 B； 3. 允许使用满足计量特性要求的其他测量标准进行校准。		

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目分为总放大倍数相对误差、目镜观察图像相对畸变和显示器（屏）图像相对畸变。

7.2 校准方法

7.2.1 准备工作

首先检查仪器外观、各部分相互作用及视场清晰度。在确定仪器的光源、滤色片、孔径光阑、粗细调焦手轮及附件完好无损，运行正常，确定物镜、目镜等附件无影响测量的霉斑等因素后再进行校准。

7.2.2 总放大倍数相对误差

7.2.2.1 标准值的确定

使用 A 型米字线纹尺和数字照相机确定标准值校准方法见附录 B。标准值的确定在校准工作开始前完成，标准值确定后可在一定时间范围内直接使用，不需要在每次校准工作前重新测量确定，但应根据使用频次以及实验室自身情况做不定期核查。

使用数字照相机拍摄正前方 250mm 处正立的 A 型米字线纹尺图像。选取 A 型尺上图像中特定距离，通过软件测量其像数得到标准值。例如，选择 5mm，测量 5mm 对应的像素值 5 次，取 5 次测量结果平均值作为 5mm 长度的标准值 a 。

7.2.2.2 总放大倍数相对误差校准

将 B 型米字线纹尺放置在显微镜载物台上，数字照相机和显微镜目镜对中固定，通过调节载物台使 B 型米字线纹尺中心点和目镜中心点、数字照相机中心点重合，用数字照相机采集显微镜目镜中 B 型米字线纹尺图像。根据选取的标准值，以及总放大倍数，在拍摄的图像上选取相应的两条清晰的刻线，通过软件测量两刻线之间的像素值 5 次，取 5 次测量结果平均值作为测得结果 b ，总放大倍数相对误差按式（1）计算。例如 A 型尺选取 5mm 像素作为标准值，在总放大倍数为 100× 时，选取的刻线间距为 0.05mm，在总放大倍数误差为 0 的情况下，图像上呈现的像素值 b 与 a 应该相等。

$$\beta_{\text{总}} = \frac{b - a}{a} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$\beta_{\text{总}}$ ——总放大倍数相对误差，%；

a ——标准值，pixel；

b ——测得值，pixel。

7.2.3 目镜观察图像相对畸变

将 B 型米字线纹尺放置在载物台上，调整显微镜焦距至目镜图像清晰，将数字照相机装在显微镜目镜上，采集目镜中 B 型米字线纹尺图像。通过软件分别测量图像中选择的间距 d 和 D 的长度， d 选取一次即可， D 根据方向不同选取 4 次，每次选取均测量 5 次，取

5 次测量结果平均值作为 d 和 D 的结果，按式（2）、式（3）计算。各方向上显微镜相对畸变按式（4）计算。

$$\bar{d} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 d_i \quad (2)$$

$$\bar{D}_i = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 D_j \quad (3)$$

式中：

\bar{d} ——在 0° 方向上 d 的 5 次测量算术平均值，pixel；

d_i ——在 0° 方向上 d 的第 i 次测量值，pixel；

\bar{D}_i ——在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 方向上 D 的 5 次测量算术平均值， $i=0^\circ$ 、 45° 、 90° 、 135° ，pixel；

D_j ——在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 方向上 D 的第 j 次测量值，pixel。

$$q_x = \left(\frac{\bar{D}_i}{k \cdot \bar{d}} - 1 \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中：

q_x ——在 x 方向的显微镜相对畸变， $x=0^\circ$ 、 45° 、 90° 、 135° ；

k ——系数， $k=4\sim 10$ 。

k 尽量取最大值，根据视场内能看到的最大距离选择 D 和 d 的距离， D 在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 共 4 个方向选取 4 次， d 在 0° 方向选取， D 和 d 选取示意图见图 2。若视场内能看到的最大距离为 10mm，则 D 在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 共 4 个方向各选取 10mm， k 取 10， d 取 1mm。

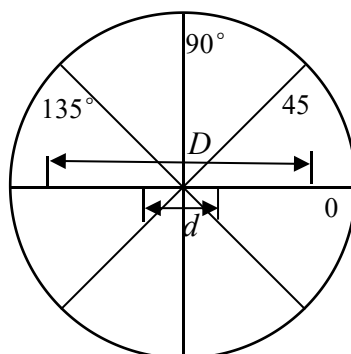


图2 D 和 d 选取示意图

在数字图像上分别测量 0° 方向的 d 和 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向的 D ，计算四个方向的相对畸变 q_x ，取 4 个相对畸变绝对值的算术平均值作为目镜中观察图像的相对畸变，按式 (5) 计算。

$$q_{\text{目}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |q_x| \quad (5)$$

式中：

$q_{\text{目}}$ ——目镜中观察图像的相对畸变。

7.2.4 显示器（屏）图像相对畸变

将 B 型米字线纹尺放置在载物台上，调整显微镜焦距至显示器（屏）图像清晰，用玻璃线纹尺配合放大镜分别测量显示器（屏）上 B 型尺在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向的 D 和在 0° 方向的 d ，按式 (4) 计算各方向上显微镜相对畸变 q_x ；也可以通过截屏获得显示器上的图像，通过软件测量 B 型尺在不同方向的 d 和 D ，按式 (4) 计算各方向上显微镜相对畸变 q_x 。取 4 个相对畸变绝对值的算术平均值作为显示器（屏）图像相对畸变，按式 (6) 计算。

$$q_{\text{屏}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |q_x| \quad (6)$$

式中：

$q_{\text{屏}}$ ——显示器（屏）图像相对畸变。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。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) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；

- i) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及测量不确定度的说明；
- l) 对校准规范的偏离的说明；
- 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，不得部分复制证书的声明。

校准原始记录参考格式见附录C，校准证书参考格式见附录D。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为1年。显微镜使用频繁时应适当缩短复校时间间隔，在使用过程中显微镜经过修理、更换重要部件的应重新校准。

附录 A

米字线纹尺规格要求

A.1 A 型米字线纹尺

(1) 材质：石英玻璃。

(2) 结构：主要由四条共交一点的直线线纹尺组成，对称分布，相邻两条直线线纹尺的夹角为 $(45 \pm 0.02)^\circ$ ，分别称为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 线，见图 A.1 a)。

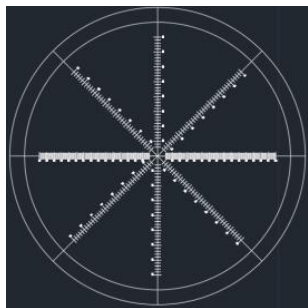
(3) 技术规格：各线最小分度 1mm，各线总长 100mm，刻线宽度 $(0.05 \sim 0.08)$ mm，线宽之差不大于 $10\mu\text{m}$ ；刻线长度 $(0.5 \sim 5)$ mm，不同尺寸对应的刻线长度应明确区分；刻线间间隔校准值的不确定度 $U_{95} \leq 1.0\mu\text{m}$ 。刻线面和非刻线面的平面度不大于 $4.0\mu\text{m}$ 。刻线面与非刻线面间的平行度不大于 $30\mu\text{m}$ 。轴线与刻线的垂直度不大于 $\pm 3'$ 。

A.2 B 型米字线纹尺

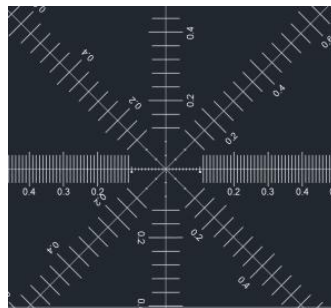
(1) 材质：石英玻璃。

(2) 结构：主要由四条共交一点的直线线纹尺组成，对称分布，相邻两条直线线纹尺的夹角为 $(45 \pm 0.02)^\circ$ ，分别称为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 线，见图 A.1 b)。

(3) 技术规格： 0° 方向最小分度 0.01mm，其它方向最小分度 0.04mm，各线总长 1.6mm，刻线宽度 $(4 \sim 8)\mu\text{m}$ ，线宽之差不大于 $1.0\mu\text{m}$ ；刻线长度 $(0.3 \sim 0.6)$ mm，规格相同的部分其刻线长度之差不大于 0.05mm，刻线间间隔校准值的不确定度 $U_{95} \leq 1.0\mu\text{m}$ 。刻线面和非刻线面的平面度不大于 $1.5\mu\text{m}$ 。刻线面与非刻线面间的平行度不大于 $30\mu\text{m}$ 。轴线与刻线的垂直度不大于 $\pm 3'$ 。



a) A 型



b) B 型

图A.1 米字线纹尺

附录 B

数字照相机畸变校准方法

使用 A 型米字线纹尺、3 级平板、3 等量块用来校准数字照相机的畸变。通过量块控制数字照相机镜头中心点距 A 型米字线纹尺间距离为 250mm，且数字照相机中心点和线纹尺中心点重合，用数字照相机采集相距 250mm 且垂直、对中的 A 型米字线纹尺图像，见图 B.1，通过测量图像上 d 在 0° 方向、 D 在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向所占的像素数来计算数字照相机的相对畸变。

数字照相机的相对畸变的最大允许误差为 $\pm 0.6\%$ 。

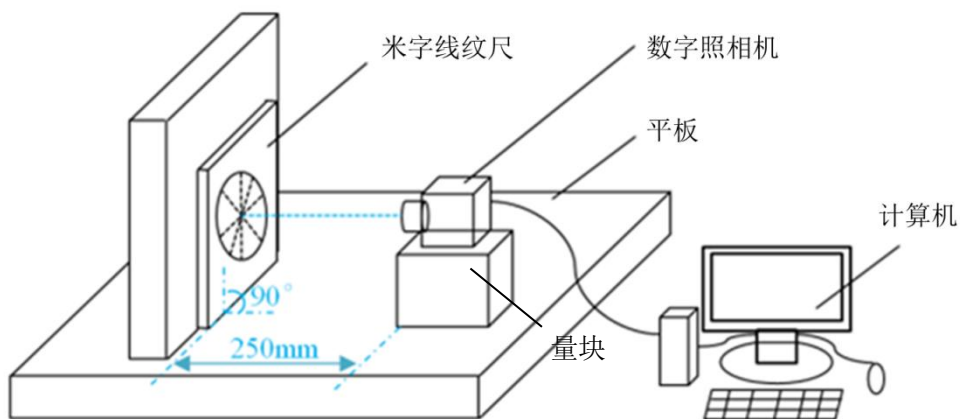


图 B.1 数字照相机采集 A 型米字线纹尺结构图

附录 C

校准原始记录参考格式

原始记录编号					证书编号					
送校单位					校准依据					
被校设备信息										
器具名称					出厂编号					
型号/规格					设备编号					
制造厂家										
校准地点					环境条件	温度 °C, 湿度: %RH				
测量标准信息										
名称	型号	编号	测量范围	不确定度/ 准确度等级/ 最大允许误差		证书编号		有效期至		
校准结果										
总放大倍数相对误差										
测量次数	测量结果 (a 为标准值, b 为测得值) / pixel									
	50×		100×		200×		500×		1000×	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1										
2										
3										
4										
5										
算术平均值/ pixel										
$\beta_{\text{总}}/\%$										
扩展不确定度 $U(k=2)$										
目镜观察图像相对畸变										
显微镜总放大倍数 (×)										
间距/mm			$d=$	$D=$						
尺型	线号		d	D						
			0°	0°	45°	90°	135°			
B 型	测得值/ pixel	1								
		2								
		3								
		4								
		5								
	平均值/ pixel									
	$q_x/\%$		--							
	$q_{\text{目}}/\%$									
扩展不确定度 $U(k=2)$										

校准原始记录参考格式 (续)

显示器 (屏) 图像相对畸变							
显微镜总放大倍数 (\times)							
间距/mm			$d=$	$D=$			
尺型	线号		d	D			
			0°	0°	45°	90°	135°
B 型	测得值 /pixel	1					
		2					
		3					
		4					
		5					
	平均值/ pixel						
	$q_x/\%$		--				
	$q_{屏}/\%$						
	扩展不确定度 $U (k=2)$						

附录 D

校准证书内页参考格式

校准证书编号: ××××

校准数据/结果				
总放大倍数相对误差				
总放大倍数 (×)	标准值 a/pixel	测得值 b/pixel	总放大倍数 相对误差/%	扩展不确定度 U , $k=2$
目镜观察图像相对畸变				
总放大倍数 (×)	$q_{\text{目}}/\%$		扩展不确定度 U , $k=2$	
显示器 (屏) 图像相对畸变				
总放大倍数 (×)	$q_{\text{屏}}/\%$		相对扩展不确定度 U , $k=2$	

附录 E

目镜观察图像相对畸变测量不确定度评定示例

E.1 概述

本附录以目镜观察图像相对畸变为例，对其测量不确定度评定，其他校准项目可参照本附录作类似评定。

E.1.1 测量依据

依据本规范 7.2.3。

E.1.2 被测对象

选用金相显微镜为被测对象，总放大倍数选择 500×。

E.1.3 主要设备

- (1) A 型米字线纹尺，分度值为 1mm，相对畸变为 0.0004%；
- (2) B 型米字线纹尺，分度值为 0.01mm，相对畸变为 0.13%；
- (3) 数字照相机，分辨力为 1 pixel，不确定度 $U=0.54\%$ ， $k=2$ 。

E.2 测量模型及不确定度来源分析

E.2.1 测量模型

被校显微镜相对畸变的测量模型见公式 (E.1)。

$$q_x = \left(\frac{\overline{D}_i}{k \cdot \overline{d}} - 1 \right) \times 100\% \quad (\text{E.1})$$

式中：

q_x ——在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 方向的显微镜相对畸变；

\overline{D}_i ——在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 方向上 D 的 5 次测量算术平均值，pixel；

\overline{d} ——在 0° 方向上 d 的 5 次测量算术平均值，pixel；

k ——系数， $k=4\sim 10$ 。

E.2.2 测量不确定度的主要来源分析

目镜观察图像相对畸变测量结果不确定度的主要来源：

- (1) 输入量 \overline{D}_i 引入的标准不确定度 u_1 ；
- (2) 输入量 \overline{d} 引入的标准不确定度 u_2 。

E.3 测量不确定度评定

E.3.1 输入量 \overline{D}_i 引入的标准不确定度 u_1 E.3.1.1 输入量 \overline{D}_i 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_{11}

\overline{D}_i 测量重复性引入的标准不确定度属于 A 类不确定度。在重复性条件下, 金相显微镜总放大倍率选择 500×, 对 B 型米字线纹尺 0°、45°、90°、135° 四个方向 D 重复测量 10 次, 计算四个方向 10 次测量结果的算术平均值分别为 1026.2 pixel、1028.6 pixel、1035.6 pixel、1033.6 pixel, 根据贝塞尔公式, 求得四个方向的标准偏差分别为 2.0 pixel、1.4 pixel、3.4 pixel、2.1 pixel。根据合并样本标准偏差公式, 求得:

$$s = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j^2} = \sqrt{\frac{(2.0^2 + 1.4^2 + 3.4^2 + 2.1^2)}{4}} = 2.3 \text{ pixel}$$

实际测量过程中, 取 4 个方向的测量结果平均值作为测量结果, 则求 \overline{D}_i 测量重复性得引入的标准不确定度分量为:

$$u_{11} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{2.3}{\sqrt{4}} = 1.15 \text{ pixel}$$

E.3.1.2 数字照相机引入的标准不确定度分量 u_{12}

根据校准证书可知, 数字照相机相对畸变引入的标准不确定度 $U=0.54\%$ ($k=2$), 四个方向测量结果的平均值 \overline{D} 为:

$$\overline{D} = \frac{\overline{D}_{0^\circ} + \overline{D}_{45^\circ} + \overline{D}_{90^\circ} + \overline{D}_{135^\circ}}{4} = \frac{1026.2 + 1028.6 + 1035.6 + 1033.6}{4} = 1031 \text{ pixel}$$

则数字照相机畸变引入的标准不确定度分量为:

$$u_{12} = \overline{D} \times \frac{U}{k} = 1031 \times \frac{0.54\%}{2} = 2.78 \text{ pixel}$$

E.3.1.3 B 型米字线纹尺畸变引入的标准不确定度分量 u_{13}

根据 B 型米字线纹尺校准证书可知, 相对畸变为 $q_B=0.13\%$, 当 $\overline{D}=1031 \text{ pixel}$ 时, B 型米字线纹尺畸变为:

$$\delta_B = \overline{D} \times q_B = 1031 \times 0.13\% = 1.34 \text{ pixel}$$

则区间半宽度 $a = \delta_B/2$, 假设服从均匀分布, 取 $k=\sqrt{3}$, 由 B 型米字线纹尺畸变引入的标准不确定度分量 u_{13} 为:

$$u_{13} = \frac{a}{k} = \frac{\delta_B}{2k} = \frac{1.34}{2\sqrt{3}} = 0.39 \text{ pixel}$$

E.3.1.4 输入量 $\overline{D_i}$ 引入的合成标准不确定度 u_1

由于测量重复性、数字照相机、B 型米字线纹尺之间彼此独立不相关，根据不确定度传播规律可知，输入量 $\overline{D_i}$ 引入的合成标准不确定度 u_1 为：

$$u_1 = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2} = 3.04 \text{ pixel}$$

E.3.2 输入量 \overline{d} 引入的标准不确定度 u_2 E.3.2.1 输入量 \overline{d} 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_{21}

\overline{d} 测量重复性引入的标准不确定度属于 A 类不确定度。在重复性条件下，总放大倍数选择 500×，对 B 型米字线纹尺 0° 方向 $d=0.02\text{mm}$ 重复测量 5 次，测试结果分别为 128 pixel，127 pixel，128 pixel，129 pixel，130 pixel，根据极差法，求得标准偏差：

$$s = \frac{\max - \min}{2.33} = 0.86 \text{ pixel}$$

实际测量过程中，取 5 次测量结果平均值作为测量结果，则 d 重复测量引入的标准不确定度分量 u_{21} 为：

$$u_{21} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.86}{\sqrt{5}} = 0.38 \text{ pixel}$$

E.3.2.2 数字照相机引入的测量不确定度分量 u_{22}

根据校准证书可知，数字照相机相对畸变引入的标准不确定度 $U=0.54\%$ ($k=2$)，根据 5 次重复测量结果可得 $\overline{d}=128.4\text{pixel}$ ，数字照相机引入的标准不确定度分量为：

$$u_{22} = \overline{d} \times \frac{U}{k} = 128.4 \times \frac{0.54\%}{2} = 0.35 \text{ pixel}$$

E.3.2.3 B 型米字线纹尺畸变引入的标准不确定度分量 u_{23}

根据 B 型米字线纹尺校准证书可知，相对畸变为 $q_B=0.13\%$ ，当 $\overline{d}=128.4\text{pixel}$ 时，B 型米字线纹尺畸变为：

$$\delta_B = \overline{d} \times q_B = 128.4 \times 0.13\% = 0.17 \text{ pixel}$$

则区间半宽度 $a = \delta_B/2$ ，假设服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，由 B 型米字线纹尺畸变引入的标准不确定度分量 u_{23} 为：

$$u_{23} = \frac{a}{k} = \frac{\delta_B}{2k} = \frac{0.17}{2\sqrt{3}} = 0.049 \text{ pixel}$$

E.3.2.4 输入量 \bar{d} 引入的合成标准不确定度 u_2

由于测量重复性、数字照相机、B型米字线纹尺之间彼此独立不相关，根据不确定度传播规律可知，输入量 \bar{d} 引入的合成标准不确定度 u_2 为：

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2 + u_{23}^2} = 0.52 \text{ pixel}$$

E.3.3 测量不确定度汇总

测量不确定度汇总见表 E.1。

表 E.1 不确定度汇总

不确定度来源	标准不确定度分量		标准不确定度/ pixel
输入量 \bar{D}_i 引入的标准不确定度	u_1	u_{11}	1.15
		u_{12}	2.78
		u_{13}	0.39
输入量 \bar{d} 引入的测量不确定度	u_2	u_{21}	0.38
		u_{22}	0.35
		u_{23}	0.049

E.3.4 合成标准不确定度

输入量 \bar{d} 与输入量 \bar{D}_i 采用同一套测量系统，故为正相关，其相关系数 $r(\bar{D}_i, \bar{d})=1$ ，根据不确定度传播规律可知，显微镜目镜观察图像相对畸变的合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{1}{kd}\right)^2 u_1^2 + \left(-\frac{\bar{D}_i}{k\bar{d}^2}\right)^2 u_2^2 + 2 \times \left(\frac{1}{kd}\right) \times \left(-\frac{\bar{D}_i}{k\bar{d}^2}\right) r(\bar{D}_i, \bar{d}) u_1 u_2} = 0.11\%$$

E.3.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 0.22\% \quad (k = 2)$$