



中华人民共和国工业和信息化部

电子计量技术规范

JJF(电子) 0000—2023

反射式分辨率测试卡校准规范

Calibration Specification for Reflective Resolution Test Card

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

反射式分辨率测试卡校准 规范

Calibration Specification for Reflective
Resolution Test Card

JJF(电子) 0000—2023

归口单位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：中国电子技术标准化研究院

参加起草单位：苏州市计量测试院
中国计量科学研究院

本规范技术条文委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

褚 楚（中国电子技术标准化研究院）
刘玉龙（苏州市计量测试院）
刘 勇（中国电子技术标准化研究院）

参加起草人：

王宇航（中国电子技术标准化研究院）
王 峥（中国计量科学研究院）
汤 坤（苏州市计量测试院）

目录

引言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语和计量单位.....	1
3.1 线宽 line width	1
3.2 分辨率 resolution.....	1
4 概述.....	1
5 计量特性.....	2
5.1 线宽.....	2
5.2 分辨率.....	2
5.3 反射密度.....	2
5.4 色度坐标.....	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.....	3
7.1 外观及工作正常性检查.....	3
7.2 线宽.....	3
7.3 分辨率.....	4
7.4 反射密度.....	4
7.5 色度坐标.....	6
8 校准结果表达.....	7
9 复校时间间隔.....	7
附录 A 原始记录格式.....	8
附录 B 校准证书内页格式.....	11
附录 C 测量不确定度评定示例.....	13

引言

本规范依据 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

反射式分辨率测试卡校准规范

1 范围

本规范适用于具有分辨率、色度、灰阶参数的反射式分辨率测试卡的校准，其他种类测试卡的分辨率、色度、灰阶参数的校准可参照本规范。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

ISO 12233: 2017 Photography - Electronic still picture imaging - Resolution and spatial frequency responses 图像-电子静态图像成像-分辨率和空间频率响应

JJG 453-2002 标准色板检定规程

JJF 1492-2014 反射式光密度计校准规范

JJF1032-2005 光学辐射计量名词术语及定义

CIE 15-2005 Colorimetry 色度学

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）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 线宽 line width

在一定宽度内，均匀地排列着若干条宽度相等的栅条，栅条的间距等于栅条的宽度，单位 mm。

3.2 分辨率 resolution

除锯齿外，可分辨精细图案的极限，以画面每单位高度的条数来表示。分辨率=测试卡总宽度/线宽。分辨率值表示可在测试目标高度内或摄像机垂直视野内边对边放置的相同宽度的线的总数，分辨率是量纲为 1 的量。

JJF1032-20052 《光学辐射计量名词术语及定义》定义的术语和计量单位适用于本规范。

4 概述

反射式分辨率测试卡可以提供实际拍摄的相机和相机镜头的参数的辅助测试，用于相机和相机镜头的垂直分辨率、水平分辨率、灰阶、色度、均匀性、畸变等参数的评价，对于相机镜头和相机的评测质量有重要作用。在一定的照明条件下，使用成像器件拍摄分辨率测试卡，并对成像质量进行分析，从而评价相机的各项参数。

分辨率测试卡通常由分辨率测试部分、灰阶测试部分和色度测试部分的一种或几种组成，如图 1 所示，分辨率测试部分由几组均匀排列的若干条宽度相等的栅条，通常具有一定的放大倍率，一般用线宽或分辨率值表示，可以评价成像的空间分辨特性；灰阶测试部分由不同反射率的灰阶图块组成，主要用于提供固定照明观测条件下的反射密度，可以评价成像的非线性和动态范围；色度部分由不同颜色的色度图块组成，主要用于提供固定照明观测条件下的标准色度坐标，可以评价成像的色彩准确度和色彩还原性。

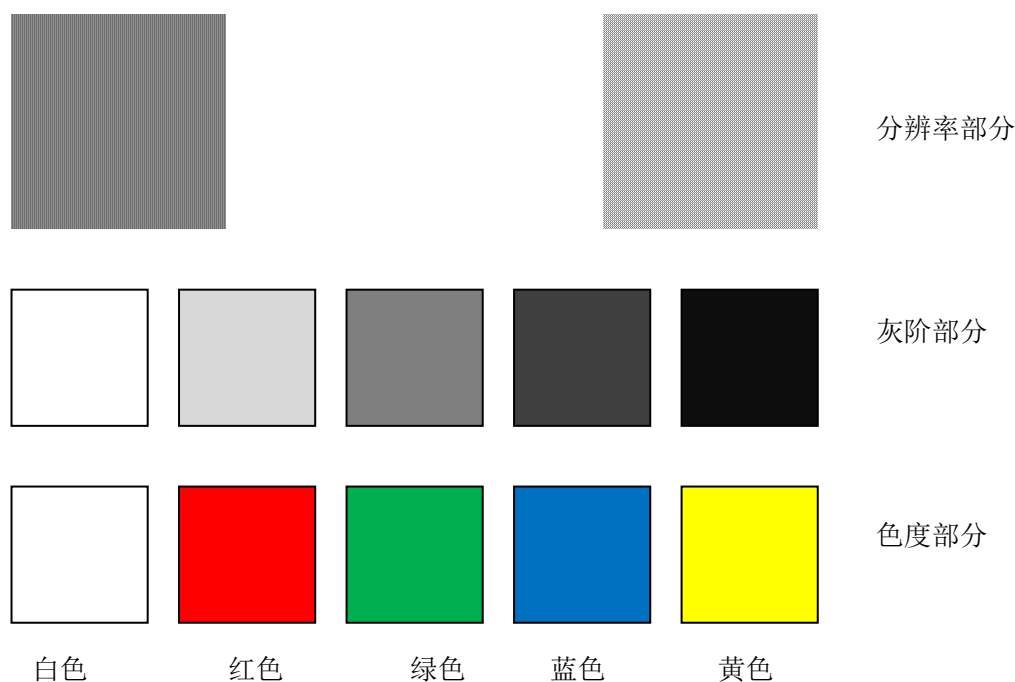


图1 典型的分辨率测试卡组成示意图

5 计量特性

5.1 线宽

0.01 mm~100 mm, $U=(8+L/12) \mu\text{m}$ ($k=2$)。

5.2 分辨率

100~8000, $U_{\text{rel}}=8\%$ ($k=2$)。

5.3 反射密度

0~6, 反射密度不确定度: $U_{\text{rel}}=5\%$ ($k=2$)。

5.4 色度坐标

色度坐标不确定度, $U_x=U_y=0.006$ ($k=2$)。

注: 以上技术指标仅供参考, 不作为合格判断依据。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度: $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$;

6.1.2 相对湿度: $\leq 75\%$;

6.1.3 电源要求: $(220 \pm 22)\text{ V}$ 、 $(50 \pm 1)\text{ Hz}$;

6.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 测量显微镜, 用于测量标称线宽 $> 0.1\text{ mm}$ 的反射式分辨率测试卡

分度值 $\leq 0.01\text{ mm}$, 最大允许误差: $\pm(5+L/15)\text{ mm}$;

其中: L ——被测长度, mm。

6.2.2 工具显微镜, 用于测量标称线宽 $\leq 0.1\text{ mm}$ 的反射式分辨率测试卡

分度值 $\leq 1\text{ }\mu\text{m}$, 最大允许误差: $\pm(1+L/100)\text{ }\mu\text{m}$;

其中: L ——被测长度, mm。

6.2.3 线纹尺

(0~1000) mm, 最大允许误差: $\pm(5+10L)\text{ }\mu\text{m}$;

其中： L ——被测长度，m。

6.2.4 标准光源

CIE 15 -2005 色度学定义的各种标准光源，色温测量不确定度： $U=100\text{ K}(k=2)$ ；在工作距离下照度不小于 500 lx ，如无工作距离要求，在 50 cm 处检测；工作区域的不均匀性小于 5% ，如无工作区域要求，在直径 20 cm 的圆形区域内检测；

6.2.5 标准白板

反射率 $>80\%$ ，测量不确定度 $U_Y=2.0(k=2)$ ；

6.2.6 光谱辐射亮度计

波长范围： $380\text{ nm}\sim 780\text{ nm}$ ，波长准确度最大允许误差： $\pm 1\text{ nm}$ ；

亮度： $(1\sim 3000)\text{ cd/m}^2$ ，测量不确定度： $U_{\text{rel}}=3.0\%(k=2)$ ；

色度坐标测量不确定度： $U_x=U_y=0.005(k=2)$ ；

6.2.7 分光测色仪

波长范围： $380\text{ nm}\sim 780\text{ nm}$ ，波长准确度最大允许误差： $\pm 1\text{ nm}$ ；

测试口径小于被校分辨率测试卡色块和密度块的二分之一；

反射率测量不确定度 $U_Y=2.0(k=2)$ ；

色度坐标测量不确定度： $U_x=U_y=0.005(k=2)$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 外观及工作正常性检查

7.1.1 被校反射式分辨率测试卡应结构完好，面板标识字符应正确、清晰，不应有任何影响仪器计量特性及使用功能的缺陷，并记录于附录 A.1 中；

7.1.2 被校反射式分辨率测试卡产品名称、制造厂家、型号和编号等均应有明确标记，并记录于附录 A.1 中。

反射式分辨率测试卡校准装置由测量显微镜、线纹尺、标准光源、标准白板、光谱辐射亮度计和分光测色仪组成，如图 2 所示。

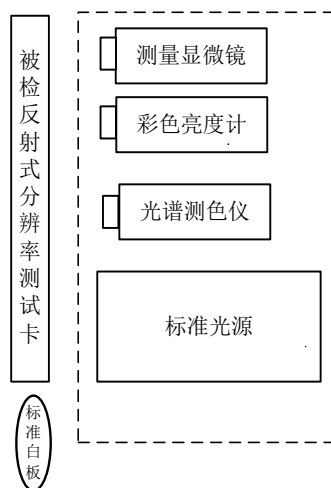


图 2 反射式分辨率测试卡校准装置组成示意图

7.2 线宽

7.2.1 按图 3 放置测量显微镜和被校反射式分辨率测试卡。调整被校反射式分辨率测试卡的位置，采用标准色温 2856 K 的照明光源或 6500 K 的照明光源，对测试卡进行漫射照明；

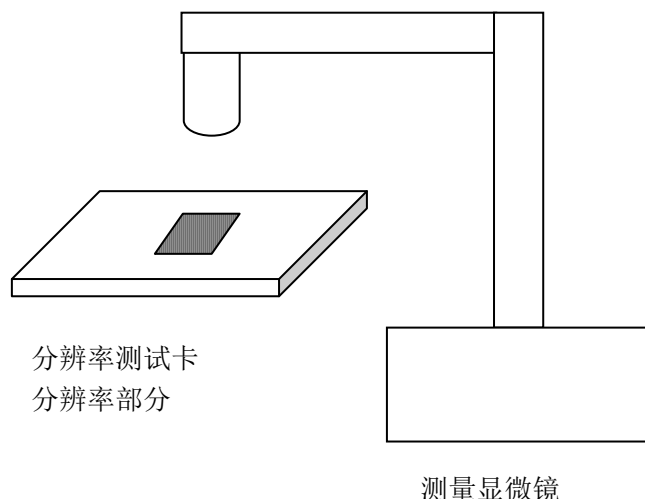


图3 分辨率校准示意图

7.2.2 采用测量显微镜对不同线对的宽度进行测试，并记录在附录 A 表 A.2 中。
线宽示值误差计算：

$$\Delta X = X - X_0 \dots\dots\dots (1)$$

式中：

ΔX ——线宽示值误差，mm；
 X ——被检分辨率测试卡线宽标称值，mm；
 X_0 ——线宽标准值，mm。

7.3 分辨率

7.3.1 按图 3 放置测量显微镜和被校反射式分辨率测试卡，调整被校反射式分辨率测试卡的位置，采用标准色温 2856K 的照明光源或 6500K 的照明光源，对测试卡进行漫射照明；

7.3.2 对分辨率测试卡进行充足照明，用测量显微镜测不同分辨率区域的线宽，用线纹尺测量测试卡的总宽度，分辨率=测试卡总宽度/线宽，测量其分辨率示值误差，并记录在附录 A 表 A.3 中。

分辨率示值误差计算：

$$\Delta X = X - X_0 \dots\dots\dots (2)$$

式中：

ΔX ——分辨率示值误差；
 X ——被检分辨率测试卡分辨率标称值；
 X_0 ——分辨率标准值。

7.4 反射密度

7.4.1 分光测色仪法

a) 按图 4 放置分光测色仪和被校反射式分辨率测试卡，设置分光测色仪的照明观测条件并记录；

b) 使用分光测色仪测量不同灰阶块的反射率 R ，测量点为各灰阶块中心点，测量

三次取平均值作为反射率测量值；

c) 不同灰阶块的反射密度 D :

$$D = \lg \frac{1}{R} \dots\dots\dots (3)$$

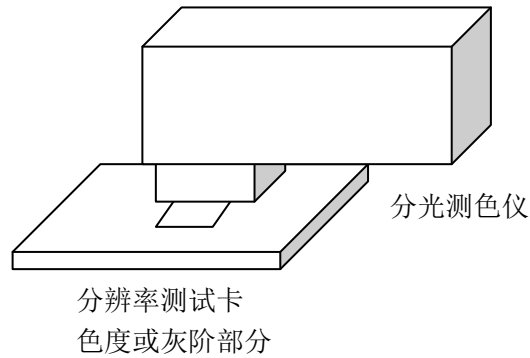


图4 分光测色仪法校准示意图

7.4.2 标准光源法

a) 按照图 5 放置标准光源，标准白板，光谱辐射亮度计和被校反射式分辨率测试卡，记录照明观测条件（光源种类，入射角度和探测角度）；

b) 将标准白板放入测量区域，测量标准白板中心点的亮度 L_0 ，将被校分辨率测试卡放入测量区域，测量被校分辨率测试卡灰阶的中心点的亮度 L ，则被校分辨率测试卡灰阶中心的反射率为： $R = LR_0/L_0$ ，式中， R_0 为标准白板的反射率值；

c) 不同灰阶块的反射密度 D :

$$D = \lg \frac{1}{R} \dots\dots\dots (4)$$

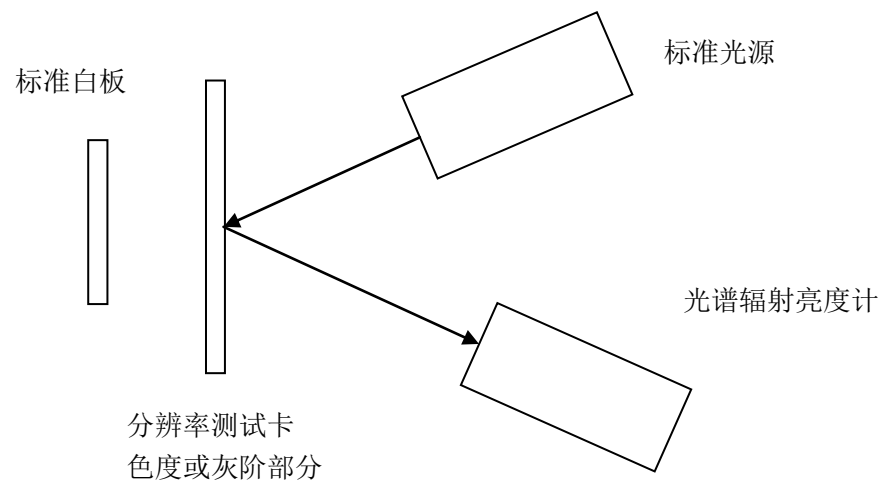


图5 标准光源法校准示意图

7.5 色度坐标

7.5.1 分光测色仪法

a) 按图 4 放置分光测色仪和被校反射式分辨率测试卡, 设置分光测色仪的照明观测条件并记录;

b) 使用分光测色仪测量不同色度块的色度坐标值(x, y), 测量点为各色度块中心点, 测量三次取平均值作为色度坐标测量值;

7.5.2 标准光源法

a) 按照图 5 放置标准光源, 标准白板, 光谱辐射亮度计, 测量与样品等厚度的空气的光谱响应, 记录其在各测量波长上相应的响应信号 $r'_0(\lambda)$;

b) 记录照明观测条件(光源种类, 入射角度和探测角度), 放置标准白板, 用光谱辐射亮度计测量标准白板中心点各测量波长相应的响应信号 $r'(\lambda)$, 放置被校分辨率测试卡, 用光谱辐射亮度计测量被校分辨率测试卡色度区域中心点各波长响应的响应, 计算得到上述照明观测条件下的色度坐标值(x, y), 测量三次取平均值作为色度坐标测量值, 色度坐标计算公式:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

其中三刺激值 X 、 Y 、 Z 的计算公式:

$$\begin{aligned} X &= K \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \tau(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= K \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) \Delta\lambda \quad \dots\dots\dots (6) \\ Z &= K \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned}$$

光谱反射比:

$$r(\lambda) = r_0(\lambda) \frac{r'(\lambda)}{r'_0(\lambda)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$r_0(\lambda)$ ——标准白板的光谱反射比;

λ ——波长。色度计算的波长范围为(380~780)nm;

$S(\lambda)$ ——CIE 标准照明体的相对光谱功率分布;

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ ——CIE 标准色度观察者光谱三刺激值;

$\Delta(\lambda)$ ——波长间隔;

K ——归一化系数 $K = 100 / \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y} \Delta(\lambda)$ 。

8 校准结果表达

校准后，出具校准证书。校准证书至少应包含以下信息：

- 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和应用有关时，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) 校准结果及其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说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定，一般推荐为 1 年。建议复校时间间隔不超过 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素决定的，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

原始记录格式

一、 外观检查

表 A.1 外观检查记录表

外观检查：正常 <input type="checkbox"/> 不正常 <input type="checkbox"/> ：_____
--

二、 校准结果

表 A.2 线宽记录表

序号	标称值	实测值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
1	mm	mm		
2	mm	mm		
3	mm	mm		
4	mm	mm		
5	mm	mm		

表 A.3 分辨率记录表

序号	标称值	实测值			示值误差	测量不确定度 $U_{rel}(k=2)$
		测试卡总宽度	线宽	分辨率计算值		
1		mm	mm			
2		mm	mm			
3		mm	mm			
4		mm	mm			
5		mm	mm			

表 A.4.1 反射密度记录表（分光测色仪法）

灰阶块	反射率				反射密度	测量不确定度 $U_{rel}(k=2)$
	第一次	第二次	第三次	平均值		

表 A.4.2 反射密度记录表 (标准光源法)

灰阶块	标准白板 中心点亮度 L_0	被校分辨率 测试卡 灰阶中心 点亮度 L	标准白板 反射率 R_0	反射率 R	反射密度 D	测量不确 定度 $U_{\text{rel}}(k=2)$

表 A.5.1 色度坐标记录表 (分光测色仪法)

色块	第一次		第二次		第三次		平均值		测量不 确定度
	x	y	x	y	x	y	x	y	

表 A.5.2 色度坐标记录表 (标准光源法)

(一) 光谱发射比记录表:

波长 λ (nm)	标准白板 光谱反射比 $r_0(\lambda)$	标准白板 各波长响应 $r'_0(\lambda)$	被校分辨率测试卡 各波长响应 $r'(\lambda)$	光谱反射比 $r(\lambda)$
380				
381				
382				
...				
779				
780				

(二) 色度坐标记录表:

色块	三刺激值 X	三刺激值 Y	三刺激值 Z	色度坐标 x	色度坐标 y	测量不确定度 $U(k=2)$

附录 B

校准证书内页格式

一、 外观检查

表 B.1 外观检查

项目	检查结果
外观检查	

三、 校准结果

表 B.2 线宽记录表

序号	线宽	测量不确定度 $U(k=2)$
1	mm	
2	mm	
3	mm	
4	mm	
5	mm	

表 B.3 分辨率记录表

序号	标称值	实测值	示值误差	测量不确定度 $U_{rel}(k=2)$
1				
2				
3				
4				
5				

表 B.4 反射密度记录表

灰阶块	反射密度测量值	测量不确定度 $U_{rel}(k=2)$

表 B.5 色度坐标记录表

色块	x	y	测量不确定度 $U(k=2)$

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 线宽不确定度评定

C.1.1 概述

采用直接测量法对反射式分辨率测试卡进行校准。标准器为测量显微镜。依据公式 (C.1) 计算线宽示值误差。

C.1.2 测量模型

线宽示值误差计算：

$$\Delta X = X - X_0 \dots\dots\dots (1)$$

式中：

ΔX ——线宽示值误差，mm；

X ——线宽标称值，mm；

X_0 ——线宽标准值，mm。

C.1.3 不确定度来源

- a) 标准器测量不准引入的不确定度 u_1 ；
- b) 标准器分辨率引入的标准不确定度 u_2 ；
- c) 测量重复性引入的标准不确定度 u_3 ；

C.1.4 标准不确定度评定

C.1.4.1 标准器测量不准引入的不确定度 u_1

以 L 测量值为 0.987 mm 为例，测量显微镜最大允许误差： $\pm(5+L/15)$ mm，最大允许误差为： $\pm(5+0.987/15) \mu\text{m} = \pm 5.1 \mu\text{m}$

认为其服从均匀分布，则标准器引入的不确定度分量：

$$u_1(x) = \frac{5.1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 2.9 \mu\text{m}$$

C.1.4.2 标准器分辨率引入的不确定度 u_2

分度值为 0.01 mm，认为其服从均匀分布，标准器分辨率引入的不确定度分量为：

$$u_2(x) = \frac{0.01 \text{ mm}}{2\sqrt{3}} = 3 \mu\text{m}$$

C.1.4.3 被校示值重复性引入的标准不确定度 u_3

按 A 类方法评定。选定某一分辨率测试卡，在相同条件下、短时间内，同一校准人员条件下，进行独立重复测量 10 组，算数平均值作为本次测量结果，重复性测试数据见表 C.1：

表 C.1 线宽重复性测试数据表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值(mm)	3.157	3.151	3.160	3.150	3.157	3.151	3.159	3.152	3.153	3.155
\bar{x} (mm)	3.1545									
$S_n(x)$ (mm)	0.004									

故由重复性引起的测量不确定度分量为:

$$u_3(x) = 0.004 \text{ mm}$$

C.1.5 不确定度分量一览表

不确定度分量一览表见表 C.2:

表 C.2 线宽主要标准不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源	u_i
u_1	显微镜测量不准	$2.9 \mu\text{m}$
u_2	分辨力	$3 \mu\text{m}$
u_3	测量重复性	$4 \mu\text{m}$

C.1.6 合成标准不确定度

以上各项标准不确定度分量互不相关, 则合成标准不确定度为:

$$\begin{aligned}
 u_c &= \sqrt{\left(\frac{\partial(\Delta X)}{\partial X}\right)^2 u^2(X) + \left(\frac{\partial\Delta(X)}{\partial X_0}\right)^2 u^2(X_0)} = \sqrt{u^2(X) + u^2(X_0)} \\
 &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \\
 &= 5.8 \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

按包含概率 $p=95\%$, 取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度为:

$$U = 0.12 \text{ mm}$$

C.2 分辨率不确定度评定

C.2.1 概述

采用直接测量法对反射式分辨率测试卡进行校准。标准器为测量显微镜、线纹尺。依据公式(C.2)计算分辨率示值误差。

C.2.2 测量模型

分辨率示值误差计算:

$$\Delta X = L / D - X_0 \dots\dots\dots (2)$$

式中:

ΔX ——分辨率示值误差;

L ——被校分辨率测试卡总宽度测得值, mm;

X_0 ——分辨率标称值;

D ——线宽测得值, mm。

C.2.3 不确定度来源

- 显微镜测量不准引入的不确定度 u_1 ;
- 显微镜分辨力引入的不确定度 u_2 ;
- 线纹尺测量不准引入的不确定度 u_3 ;
- 线纹尺分辨力引入的不确定度 u_4 ;
- 测量重复性引入的标准不确定度 u_5 。

C.2.4 标准不确定度评定

C.2.4.1 显微镜测量不准引入的不确定度 u_1

以 L 测量值为 0.987 mm 为例, 测量显微镜最大允许误差: $\pm(5+L/15)$ mm, 最大允许误差为: $\pm(5+0.987/15)$ $\mu\text{m} = \pm 5.1$ μm

认为其服从均匀分布, 则标准器引入的不确定度分量为:

$$u_1(x) = \frac{5.1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 2.9 \mu\text{m}$$

C.2.4.2 显微镜分辨率引入的不确定度 u_2

分度值为 0.01 mm, 认为其服从均匀分布, 标准器分辨率引入的不确定度分量为:

$$u_2(x) = \frac{0.01 \text{ mm}}{2\sqrt{3}} = 3 \mu\text{m}$$

C.2.4.3 线纹尺测量不准引入的不确定度 u_3

线纹尺最大允许误差: $\pm(5+10L)$ μm , 以 L 测量值为 0.711 m 为例, 最大允许误差为: $\pm(5+10*0.711)$ $\mu\text{m} = \pm 12.1$ μm

认为其服从均匀分布, 则标准器引入的不确定度分量为:

$$u_3(x) = \frac{12.1 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 7.0 \mu\text{m}$$

C.2.4.4 线纹尺分辨率引入的不确定度 u_4

分度值为 0.01 mm, 认为其服从均匀分布, 分辨率引入的不确定度分量为:

$$u_4(x) = \frac{0.01 \text{ mm}}{2\sqrt{3}} = 0.3 \mu\text{m}$$

C.2.4.5 被校示值重复性引入的标准不确定度 u_5

按 A 类方法评定。选定某一分辨率测试卡, 在相同条件下、短时间内, 同一校准人员条件下, 进行独立重复测量 10 组, 算数平均值作为本次测量结果, 重复性测试数据见表 C.3:

表 C.3 分辨率重复性测试数据表

测量次数	L 测量值(mm)	D 测量值(mm)	分辨率
1	710.51	0.987	719.9
2	710.70	0.987	720.1
3	710.39	0.986	720.5
4	710.62	0.988	719.3
5	710.58	0.987	719.9
6	710.71	0.988	719.3
7	710.42	0.987	719.8
8	710.68	0.987	720.0
9	710.53	0.986	720.6
10	710.64	0.987	720.0
\bar{x}	710.58	0.987	719.9
$S_n(\mathbf{x})$	0.11	0.0008	0.43

故由重复性引起的测量不确定度分量为:

$$u_5(L) = 0.11 \text{ mm}$$

$$u_5(D) = 0.0008 \text{ mm}$$

C.2.5 不确定度分量一览表

不确定度分量一览表见表 C.4:

表 C.4 分辨率主要标准不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源	u_i
$u_1(L)$	显微镜测量不准	$2.9 \mu\text{m}$
$u_2(L)$	显微镜分辨率	$3 \mu\text{m}$
$u_3(D)$	线纹尺测量不准	$7.0 \mu\text{m}$
$u_4(D)$	线纹尺分辨率	$0.3 \mu\text{m}$
$u_5(L)$	测量重复性	$110 \mu\text{m}$
$u_5(D)$	测量重复性	$0.8 \mu\text{m}$

C.2.6 合成标准不确定度

由测量模型 $\Delta X = L/D - X_0$ ，所以合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial(\Delta X)}{\partial L}\right)^2 u^2(L) + \left(\frac{\partial(\Delta X)}{\partial D}\right)^2 u^2(D)} = \sqrt{\frac{1}{D^2} u^2(L) + \left(\frac{L}{D^2}\right)^2 u^2(D)}$$

$$\text{由 } u(L) = \sqrt{u_1^2(L) + u_2^2(L) + u_5^2(L)} = 0.11, \quad u(D) = \sqrt{u_3^2(D) + u_4^2(D) + u_5^2(D)} = 0.008$$

$L=710.58 \text{ mm}$ ， $D=0.987 \text{ mm}$ ，代入公式后，则：

$$u_c = \sqrt{\frac{1}{(0.987)^2} (0.11)^2 + \left(\frac{710.58}{0.987^2}\right)^2 (0.008)^2} = 5.8$$

$$u_{\text{crel}} = 5.8 / 719.9 = 0.9\%$$

按包含概率 $p=95\%$ ，取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = 1.8\%$$

C.3 反射密度不确定度评定

C.3.1 分光测色仪法

C.3.1.1 概述

采用分光测色仪法对反射式分辨率测试卡进行校准。标准器为分光测色仪。依据公式(C.3)计算反射密度。

C.3.1.2 测量模型

$$D = D_0 \dots\dots\dots (3)$$

式中：

D ——被校分辨率测试卡反射密度测得值；

D_0 ——反射密度标准值。

C.3.1.3 不确定度来源

- 标准器上级溯源引入的不确定度 u_1 ；
- 测试卡不均匀性引入的不确定度 u_2 ；
- 测量重复性引入的标准不确定度 u_3 ；

C.3.1.4 标准不确定度评定

C.3.1.4.1 标准器上级溯源引入的不确定度 u_1

由分光测色仪的上级溯源证书：

$$U_{\text{rel}} = 2\% \quad (k=2)$$

则上级溯源引入的不确定度分量：

$$u_1 = \frac{2\%}{2} = 1\%$$

C.3.2.4.2 测试卡不均匀引入的标准不确定度 u_2

由经验，测试卡的不均匀性 1%，按均匀分布：

$$u_2 = \frac{1\%}{2\sqrt{3}} = 0.29\%$$

C.3.1.4.3 被校示值重复性引入的标准不确定度 u_3

按 A 类方法评定。选定某一分辨率测试卡，在相同条件下、短时间内，同一校准人员条件下，进行独立重复测量 10 组，算数平均值作为本次测量结果，重复性测试数据见表 C.5:

表 C.5 分光测色仪法反射密度重复性测试数据表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	2.06	2.05	2.05	2.07	2.06	2.05	2.05	2.06	2.06	2.07
\bar{x}	2.058									
$S_n(x)$	0.008									

则被校示值重复性引入的相对标准不确定度:

$$u_{3\text{rel}} = \frac{S(D)}{\bar{D}} \times 100\% = 0.5\%$$

C.3.1.5 不确定度分量一览表

不确定度分量一览表见表 C.6:

表 C.6 分光测色仪法反射密度主要标准不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源	u_i
u_1	标准器上级溯源	1%
u_2	测试卡不均匀	0.29%
u_2	测量重复性	0.4%

C.3.1.6 合成标准不确定度

以上各项标准不确定度分量互不相关，所以合成标准不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 1.2\%$$

按包含概率 $p=95\%$ ，取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = 2.4\%$$

C.3.2 标准光源法

C.3.2.1 概述

采用标准光源法对反射式分辨率测试卡进行校准。标准器为标准光源，标准白板，光谱辐射亮度计。依据公式 (C.4) 计算反射密度。

C.3.2.2 测量模型

$$D = \lg \frac{1}{R} = \lg \frac{L}{LgR_0} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

D ——被校分辨率测试卡反射密度测得值;

L ——标准白板值;

R_0 ——反射密度标准值。

C.3.2.3 不确定度来源

- 光谱辐射亮度计非线性引入的不确定度 u_1 ;
- 测试卡不均匀性引入的不确定度 u_2 ;

- c) 标准白板上级溯源引入的标准不确定度 u_3 ;
- d) 光源稳定性引入的标准不确定度 u_4 ;
- e) 测量重复性引入的标准不确定度 u_5 ;

C.3.2.4 标准不确定度评定

C.3.2.4.1 光谱辐射亮度计非线性引入的不确定度 u_1

由光谱辐射亮度计的上级溯源证书:

$$U_{\text{rel}}=1\% \quad (k=2)$$

则上级溯源引入的不确定度分量:

$$u_1 = \frac{1\%}{2} = 0.5\%$$

C.3.2.4.2 测试卡不均匀性引入的标准不确定度 u_2

由经验, 测试卡的不均匀性 1%, 按均匀分布:

$$u_2 = \frac{1\%}{2\sqrt{3}} = 0.29\%$$

C.3.2.4.3 标准白板上级溯源引入的标准不确定度 u_3

$$U_D=2.0 \quad (k=2) \quad \text{则 } u_{3\text{rel}} = 0.5\%$$

C.3.2.4.4 光源不稳定性引入的标准不确定度 u_4

根据以往实验经验, $u_4 = 0.5\%$

C.3.2.4.5 被校示值重复性引入的标准不确定度 u_5

按 A 类方法评定。选定某一分辨率测试卡, 在相同条件下、短时间内, 同一校准人员条件下, 进行独立重复测量 10 组, 算数平均值作为本次测量结果, 重复性测试数据见表 C.7:

表 C.7 标准光源法反射密度重复性测试数据表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	2.08	2.05	2.04	2.07	2.04	2.06	2.07	2.04	2.06	2.04
\bar{x}	2.055									
$S_n(x)$	0.015									

则被校示值重复性引入的相对标准不确定度:

$$u_{5\text{rel}} = \frac{S(D)}{\bar{D}} \times 100\% = 0.8\%$$

C.3.2.5 不确定度分量一览表

不确定度分量一览表见表 C.8:

表 C.8 标准光源法反射密度主要标准不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源	u_i
u_1	光谱辐射亮度计非线性	0.5%
u_2	测试卡不均匀性	0.29%
u_3	标准白板上级溯源	0.5%
u_4	光源不稳定性引入	0.5%
u_5	测量重复性	0.8%

C.3.2.6 合成标准不确定度

以上各项标准不确定度分量互不相关，所以合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 1.3\%$$

按包含概率 $p=95\%$ ，取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = 2.6\%$$

C.4 色度不确定度评定

C.4.1 分光测色仪法

C4.1.1 概述

采用分光测色仪法对反射式分辨率测试卡进行校准。标准器为分光测色仪。依据公式(C.5)计算色度坐标。

C.4.1.2 测量模型

$$x = x_0$$

$$y = y_0 \dots\dots\dots (5)$$

式中：

x ——被校分辨率测试卡色度 x 测得值；

x_0 ——色度 x 标准值；

y ——被校分辨率测试卡色度 y 测得值；

y_0 ——色度 y 标准值；。

C.4.1.3 不确定度来源

a)标准器上级溯源引入的不确定度 u_1 ；

b)测试卡不均匀性引入的不确定度 u_2 ；

c)测量重复性引入的标准不确定度 u_3 ；

C.4.1.4 标准不确定度评定

C.4.1.4.1 标准器上级溯源引入的不确定度 u_1

由光谱测色仪的上级溯源证书：

$$U=0.005 \quad (k=2)$$

则上级溯源引入的不确定度分量：

$$u_1 = \frac{0.005}{2} = 0.0025$$

C.4.1.4.2 测试卡不均匀性引入的标准不确定度 u_2

由经验, 测试卡的不均匀性 0.0005, 按均匀分布:

$$u_2 = \frac{0.0005}{2\sqrt{3}} = 0.00015$$

C.4.1.4.3 被校示值重复性引入的标准不确定度 u_3

按 A 类方法评定。选定某一分辨率测试卡, 在相同条件下、短时间内, 同一校准人员条件下, 进行独立重复测量 10 组, 算数平均值作为本次测量结果, 重复性测试数据见下表 C.9:

表 C.9 分光测色仪法色度坐标重复性测试数据表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	0.4930	0.4931	0.4929	0.493	0.4929	0.493	0.4931	0.4931	0.4932	0.4935
\bar{x}	0.4931									
$S_n(x)$	0.0002									

则被校示值重复性引入的相对标准不确定度:

$$u_{3\text{rel}} = 0.0002$$

C.4.1.5 不确定度分量一览表

不确定度分量一览表见表 C.10:

表 C.10 分光测色仪法色度坐标主要标准不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源	u_i
u_1	标准器上级溯源	0.0025
u_2	测试卡不均匀性	0.00015
u_3	测量重复性	0.0002

C.4.1.6 合成标准不确定度

以上各项标准不确定度分量互不相关, 所以合成标准不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.0025$$

按包含概率 $p=95\%$, 取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = 0.005$$

C.4.2 标准光源法

C4.2.1 概述

采用标准光源法对反射式分辨率测试卡进行校准。标准器为分光测色仪。依据公式 (C.6) 计算分辨率示值误差。

C.4.2.2 测量模型

$$x = x_0$$

$$y = y_0 \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- x ——被校分辨率测试卡色度 x 测得值;
 x_0 ——色度 x 标准值;
 y ——被校分辨率测试卡色度 y 测得值;
 y_0 ——色度 y 标准值;。

C.4.2.3 不确定度来源

- 标准器上级溯源引入的不确定度 u_1 ;
- 测试卡不均匀性引入的不确定度 u_2 ;
- 光源不稳定性引入的标准不确定度 u_3 ;
- 测量重复性引入的标准不确定度 u_4 ;

C.4.2.4 标准不确定度评定

C.4.2.4.1 标准器上级溯源引入的不确定度 u_1

由光谱测色仪的上级溯源证书:

$$U=0.005 \quad (k=2)$$

则上级溯源引入的不确定度分量:

$$u_1 = \frac{0.005}{2} = 0.0025$$

C.4.2.4.2 测试卡不均匀性引入的标准不确定度 u_2

由经验, 测试卡的不均匀性 0.0005, 按均匀分布:

$$u_2 = \frac{0.0005}{2\sqrt{3}} = 0.00015$$

C.4.2.4.3 光源不稳定性引入的标准不确定度 u

由经验, 光源不稳定性 0.001, 按均匀分布:

$$u_3 = \frac{0.0001}{2\sqrt{3}} = 0.00003$$

C.4.2.4.4 被校示值重复性引入的标准不确定度 u_4

按 A 类方法评定。选定某一分辨率测试卡, 在相同条件下、短时间内, 同一校准人员条件下, 进行独立重复测量 10 组, 算数平均值作为本次测量结果, 重复性测试数据见下表 C.11:

表 C.11 标准光源法色度坐标重复性测试数据表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	0.4930	0.4931	0.4929	0.493	0.4929	0.493	0.4931	0.4931	0.4932	0.4935
\bar{x}	0.4931									
$S_n(x)$	0.0002									

则被校示值重复性引入的相对标准不确定度:

$$u_4 = 0.0002$$

C.4.2.5 不确定度分量一览表

不确定度分量一览表见表 C.12:

表 C.12 标准光源法色度坐标主要标准不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源	u_i
u_1	标准器上级溯源	0.0025
u_2	测试卡不均匀性	0.00015
u_3	光源不稳定性	0.0002
u_4	测量重复性	0.0002

C.4.2.6 合成标准不确定度

以上各项标准不确定度分量互不相关，所以合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.0025$$

按包含概率 $p=95\%$ ，取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = 0.005$$