

《加德纳色度计校准规范》

实验报告

《加德纳色度计校准规范》起草小组

2023年10月

实验报告（一）

一、 实验目的

通过实验，验证《加德纳色度计校准规范》中各参数校准方法的可行性，核查指标是否能够完全覆盖校准规范中的规定，并对测量不确定度评定的合理性和准确性进行分析。

二、 实验地点及时间

实验地点：上海市浦东新区张衡路1500号电学楼408室；

实验时间：2023年09月27日。

三、 环境条件

实验室环境条件	测量开始时	测量结束时
温度/°C:	20	20
相对湿度(%):	70	70
其它特殊条件:	无	无
样品状况:	正常	正常

四、 校准用设备

名称/型号	编号	证书编号/ 有效期限	测量范围/准确度等级或 最大允差或不确定度
光谱测色仪/ 8400	000553	2022F49-20- 4297946001/ 2023.12.07	刺激值Y: 0.0~100.0; 色坐标x, y: 全色域/一级

五、 校准人员：

高建强、于磊

六、 被校样品信息：

名称	型号	编号	生产厂商
色度计	/	294890/294900	Orbeco-Hellige

七、 校准方法及结果：

（一）校准方法

1、示值误差

取出配套使用的比色板，在标准照明体C、2°标准色度观察者测量条件下，用光谱测色仪在（400~700）nm波长范围内，波长间隔取10nm，对比色板各色号对应玻璃片进行三刺激值Y和色品坐标x、y的校准，校准方法按照JJG 453-2002《标准色板检定规程》第5.3.3条进行，得到三刺激值Y和色品坐标x、y并按照附录A计算出对应的加德纳色号。

按公式（1）计算示值误差 ΔG ：

$$\Delta G = G_t - G_s \quad (1)$$

式中： G_t ——比色板标称值，加德纳色号；

G_s ——比色板（或加德纳色度标准玻璃片）标准值，加德纳色号。

（二）校准结果：

1、示值误差

比色板标称值 (加德纳色号)	色度量值实际值			标准值（加德纳色号）	示值误差（加德纳色号）	不确定度U (k=2)（加德纳色号）
	Y	x	y			
1	86.31	0.3177	0.3312	1.08	-0.08	0.25
2	83.59	0.3236	0.3351	2.01	-0.01	0.14

3	78.74	0.3363	0.3473	3.16	-0.16	0.09
4	78.54	0.3411	0.3604	3.78	0.22	0.09
5	75.39	0.3580	0.3856	5.09	-0.09	0.07
6	74.71	0.3728	0.4026	5.83	0.17	0.07
7	67.87	0.3995	0.4312	6.84	0.16	0.05
8	63.12	0.4205	0.4499	8.00	0.00	0.10
9	62.13	0.4324	0.4677	9.07	-0.07	0.11
10	56.68	0.4525	0.4743	10.05	-0.05	0.07
11	44.04	0.4802	0.4838	10.90	0.10	0.07
12	33.44	0.5059	0.4657	11.91	0.09	0.08
13	24.09	0.5432	0.4450	13.12	-0.12	0.08
14	20.28	0.5629	0.4272	13.95	0.05	0.08
15	15.76	0.5881	0.4055	15.16	-0.16	0.09
16	11.22	0.6013	0.3931	15.87	0.13	0.09
17	5.61	0.6307	0.3667	17.14	-0.14	0.09
18	4.83	0.6442	0.3544	17.84	0.16	0.09

八、 校准结果的不确定度评定

(一) 输入量的标准不确定度评定

1、测量模型

$$G_{TM} = G_I + G_F \quad (1.1)$$

其中：

$$G_I = G_n \quad (x_n \leq x_{TM} < x_{n+1})$$

$$G_F = \frac{(x_{n+1} - x_n)(x_{TM} - x_n) + (y_{n+1} - y_n)(y_{TM} - y_n)}{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2} \quad (1.2)$$

$$Y = Y_0$$

$$x = x_0$$

$$y = y_0$$

式中： G_{TM} —— 比色板的加德纳色度值；

G_I —— 比色板的加德纳色度值的整数部分；

G_F —— 比色板的加德纳色度值的小数部分；

G_n —— 比比色板浅的加德纳色度值；

x_n —— 比比色板浅的加德纳色度值的 x 色品坐标；

x_{TM} —— 比色板的 x 色品坐标；

x_{n+1} —— 比比色板深的加德纳色度值的 x 色品坐标；

y_n —— 比比色板浅的加德纳色度值的 y 色品坐标；

y_{TM} —— 比色板的 y 色品坐标；

y_{n+1} —— 比比色板深的加德纳色度值的 y 色品坐标；

Y 、 x 、 y —— 比色板的色度值测量结果；

Y_0 、 x_0 、 y_0 —— 光谱测色仪的测量值。

2、对于比色板的色度值测量结果 Y 、 x 、 y ，由于：

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

色品坐标 x 、 y 的合成标准不确定度由下式计算：

$$\begin{aligned} u_c^2(x) &= \left(\frac{\partial x}{\partial X}\right)^2 u^2(X) + \left(\frac{\partial x}{\partial Y}\right)^2 u^2(Y) + \left(\frac{\partial x}{\partial Z}\right)^2 u^2(Z) \\ &= \left[\frac{Y+Z}{(X+Y+Z)^2}\right]^2 u^2(X) + \left[\frac{-X}{(X+Y+Z)^2}\right]^2 u^2(Y) + \left[\frac{-X}{(X+Y+Z)^2}\right]^2 u^2(Z) \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned}
u_c^2(y) &= \left(\frac{\partial y}{\partial X}\right)^2 u^2(X) + \left(\frac{\partial y}{\partial Y}\right)^2 u^2(Y) + \left(\frac{\partial y}{\partial Z}\right)^2 u^2(Z) \\
&= \left[\frac{-Y}{(X+Y+Z)^2}\right]^2 u^2(X) + \left[\frac{Z+X}{(X+Y+Z)^2}\right]^2 u^2(Y) + \left[\frac{-Y}{(X+Y+Z)^2}\right]^2 u^2(Z)
\end{aligned} \tag{1.4}$$

其中：

$$u(X) = \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \times \tau(\lambda) u_{\text{crel}}(\tau) = X \times u_{\text{crel}}(\tau) \tag{1.5}$$

$$u(Y) = \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \times \tau(\lambda) u_{\text{crel}}(\tau) = Y \times u_{\text{crel}}(\tau) \tag{1.6}$$

$$u(Z) = \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \times \tau(\lambda) u_{\text{crel}}(\tau) = Z \times u_{\text{crel}}(\tau) \tag{1.7}$$

$u_{\text{crel}}(\tau)$ 主要来源于光谱测色仪测量透射比引入的标准不确定度。

2、光谱测色仪测量透射比的不确定度

2.1 标定用透射比标准滤光片所引入的标准不确定度分量 $u_{1\text{rel}}$

根据校准证书得知，透射比标准滤光片的透射比不确定度为 $U_{\text{rel}}=0.5\%$ ($k=2$)。

$$u_{1\text{rel}} = \frac{0.5\%}{2} = 0.25\%$$

2.2 光谱测色仪的零线引入的标准不确定度分量 $u_{2\text{rel}}$

根据文献资料，零线在 (380~780) nm 范围内不确定度分量 $u_{2\text{rel}} = 0.11\%$ 。

2.3 光谱测色仪的100%基线引入的标准不确定度分量 $u_{3\text{rel}}$

根据实验测得，100%基线在 (380~780) nm 范围内最大示值误差 $\pm 0.3\%$ (绝对值)，且多次100%基线测量数据中，出现最大值和最小值的波长点无明显规律，因此假设为均匀分布， $k = \sqrt{3}$

$$u_{3\text{rel}} = 0.3\% / (100\% \times \sqrt{3}) \times 100 \approx 0.173\%$$

2.4 光谱测色仪的波长准确度引入的标准不确定度分量 $u_{4\text{rel}}$

根据文献资料，光谱测色仪的波长准确度引入的不确定度分量 $u_{4\text{rel}} = 0.10\%$ 。

2.5 光谱测色仪的光度准确度（包括杂散光、探测器线性和均匀性等）引入的标准不确定度分量 $u_{5\text{rel}}$

根据文献资料，光谱测色仪的光度准确度（包括杂散光、探测器线性和均匀性等）引入的不确定度分量 $u_{5\text{rel}} = 0.04\%$ 。

2.6 光谱测色仪测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_{6\text{rel}}$

用光谱测色仪测量标称值为12 加德纳色号的比色板中心点位置10次，得到透射比测量值如下表所示：

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ (%)	33.41	33.45	33.46	33.41	33.45	33.42	33.48	33.47	33.45	33.43

根据贝塞尔公式，单次测量的重复性为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n-1}} = 0.025$$

$$u_{6\text{rel}} = \frac{s}{\bar{\tau}} = 0.075\%$$

2.7 光谱测色仪测量透射比的合成标准不确定度

以上各不确定度分量不相关，因此合成标准不确定度 u_{crel} 计算如下：

$$u_{\text{crel}}(\tau) = \sqrt{u_{1\text{rel}}^2 + u_{2\text{rel}}^2 + u_{3\text{rel}}^2 + u_{4\text{rel}}^2 + u_{5\text{rel}}^2 + u_{6\text{rel}}^2} = 0.35\%$$

3、比色板的色度值测量结果 Y 、 x 、 y 的不确定度

对于标称值 12 加德纳色号的比色板，采用光谱测色仪测量得到其三刺激值 $Y=33.44$ ， $x=0.5059$ ， $y=0.4657$ ，根据公式（1.3）～公式（1.7）可得： $u(X)=0.127$ ， $u(Y)=0.117$ ， $u(Z)=0.007$ ， $u_c(x)=0.00120$ ， $u_c(y)=0.00120$ 。

4、加德纳色度值的不确定度

根据公式（1.1）、（1.2）可知，由于 G_j 为常数，因此 $U(G_{TM})=U(G_F)$ 。

根据公式 (1.2)

$$u_{cG_F} = \sqrt{c_1^2 u_x^2 + c_2^2 u_y^2}$$

其中:

$$c_1 = \frac{(x_{n+1} - x_n)}{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}$$

$$c_2 = \frac{(y_{n+1} - y_n)}{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}$$

对于标称值12 加德纳色号的比色板, 采用光谱测色仪测量得到其三刺激值 $Y=33.44$, $x=0.5059$, $y=0.4657$, 根据公式 (1.1)、(1.2) 可计算得到其加德纳色度值为11.91 加德纳色号。

$$u_{cG_F} = \sqrt{c_1^2 u_{cx}^2 + c_2^2 u_{cy}^2} = 0.041 \text{ 加德纳色号}$$

扩展不确定度 U 由合成标准不确定度 u_c 以及包含因子 $k=2$ 之乘积。

$$\text{加德纳色度值: } U = k \times u_c = 2 \times 0.041 = 0.082 \approx 0.09 \text{ 加德纳色号}$$

九、 实验结论

本实验严格按照校准规范中的校准方法执行, 未出现有分歧性或模糊性的操作, 具有可操作性; 实验数据可靠。因此, 本实验很好的验证了校准规范的可操作性和参数指标的合理性。

实验报告（二）

一、 实验目的

通过实验，验证《加德纳色度计校准规范》中各参数校准方法的可行性，核查指标是否能够完全覆盖校准规范中的规定，并对测量不确定度评定的合理性和准确性进行分析。

二、 实验地点及时间

实验地点：上海市浦东新区张衡路1500号电学楼402室；

实验时间：2023年07月05日。

三、 环境条件

实验室环境条件	测量开始时	测量结束时
温度/°C:	22	22
相对湿度(%):	61	61
其它特殊条件:	无	无
样品状况:	正常	正常

四、 校准用设备

名称/型号	编号	证书编号/ 有效期限	测量范围/准确度等级或 最大允差或不确定度
标准滤光片/ Φ15	CS8420, CS8421, CS8422, CS8423	检定字第 202302000400号/ 2024.02.02	刺激值Y: 0.0~100.0; 色坐标x, y: 全色域/ $U_{rel}(\tau)=0.7\%$ ($k=2$), 加德纳 色度不确定度: $U=(0.07\sim0.14)$ ($k=2$)

五、 校准人员：

高建强、夏俊雯

六、 被校样品信息：

名称	型号	编号	生产厂商
色度计	PFXi 995	103051	Lovibond

七、 校准方法及结果：

（一）校准方法

1、示值误差

按照使用说明书设置和校正光电式加德纳色度计，进入加德纳色度测量模式，将加德纳色度标准玻璃片垂直稳固安置在样品室中，使测量光束完全通过玻璃片中心部位。

重复测量 3 次并取平均值，按以下公式计算示值误差 ΔG ：

$$\Delta G = \overline{G_t} - G_s$$

式中： $\overline{G_t}$ ——被校加德纳色度计 3 次测量值的算术平均值；

G_s ——加德纳色度标准玻璃片标准值。

2、测量重复性

对于光电式加德纳色度计，在重复性条件下测量（10~14）加德纳色号范围内的标准玻璃片 6 次，计算标准偏差作为加德纳色度计的测量重复性：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (G_{ii} - \overline{G_t})^2}{5}}$$

式中： G_{ii} ——被校加德纳色度计第 i 次测量结果；

$\overline{G_t}$ ——被校加德纳色度计 6 次测量值的算术平均值；

i ——光电式加德纳色度计的测量次数：1、2、3、4、5、6。

(二) 校准结果:

1、示值误差

标准值 (加德纳色号)	测量值 (加德纳色号)			平均值 (加德纳色号)	示值误差 (加德纳色号)	不确定度 (加德纳色号)
2.24	1.9	1.9	1.9	1.9	-0.3	U=0.2 (k=2)
8.28	7.9	8.0	7.9	7.9	-0.4	
12.26	12.1	12.0	12.1	12.1	-0.2	
17.25	17.0	16.9	16.9	16.9	-0.4	

2、测量重复性

测量次数	1	2	3	4	5	6	测量重复性
测量值 (加德纳色号)	12.1	12.0	12.1	12.1	12.0	12.1	0.052

八、 校准结果的不确定度评定

(一) 输入量的标准不确定度评定

1、加德纳色度标准玻璃片定值偏差引入的不确定度分量 u_1

输入量 G_s 的不确定度主要来源于加德纳色度标准玻璃片定值偏差引入的不确定度, 根据校准证书, 加德纳色度标准玻璃片的最大不确定度为 $U = 0.14$ 加德纳色号 ($k = 2$)。

$$u_1 = \frac{0.14}{2} = 0.070 \text{ 加德纳色号}$$

2、光电式加德纳色度计的测量重复性引入的不确定度分量 u_2

对标准值为12.26 加德纳色号的加德纳色度标准玻璃片重复测量6次, 得到6个测量值: 12.1, 12.0, 12.1, 12.1, 12.0, 12.1, 单位为加德纳色号。

单次实验标准差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_{ii} - \overline{G_{ii}})^2}{n-1}} = 0.052 \text{ 加德纳色号}$$

3、光电式加德纳色度计的分辨力引入的不确定度分量 u_3

光电式加德纳色度计的分辨力为0.1，其半宽 a 为0.05，按照按照均匀分布，

$$k = \sqrt{3}, \quad u_3 = a/\sqrt{3} = 0.05/\sqrt{3} = 0.029 \text{ 加德纳色号。}$$

由于分辨力引入的不确定度分量小于测量重复性引入的不确定度分量，故而不考虑分辨力引入的不确定度分量。

4、标准不确定度汇总表

标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	标准不确定度
u_1	加德纳色度标准玻璃片定值偏差	0.070 加德纳色号
u_2	光电式加德纳色度计的测量重复性	0.052 加德纳色号

5、合成标准不确定度

以上各不确定度分量不相关，因此合成标准不确定度 u_c 计算如下：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.070^2 + 0.052^2} = 0.087 \text{ 加德纳色号}$$

6、扩展不确定度

扩展不确定度 U 由合成标准不确定度 u_c 以及包含因子 $k = 2$ 之乘积。

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.087 = 0.174 \approx 0.2 \text{ 加德纳色号}$$

九、 实验结论

本实验严格按照校准规范中的校准方法执行，未出现有分歧性或模糊性的操作，具有可操作性；实验数据可靠。因此，本实验很好的验证了校准规范的可操作性和参数指标的合理性。