



超低亮度测量技术研究

孙宇楠 曹峰 赵俊成 刘瑞星 王乐 高婧 杨科

Study on measurement technology of ultra-low brightness

SUN Yu'nan, CAO Feng, ZHAO Juncheng, LIU Ruixing, WANG Le, GAO Jing, YANG Ke

引用本文:

孙宇楠, 曹峰, 赵俊成, 等. 超低亮度测量技术研究[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 701–706. DOI: 10.5768/JAO202243.0403002

SUN Yu'nan, CAO Feng, ZHAO Juncheng, et al. Study on measurement technology of ultra-low brightness[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 701–706. DOI: 10.5768/JAO202243.0403002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0403002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高分辨率超低畸变航天光学成像系统设计

Design of aerospace optical imaging system with high-resolution and ultra-low distortion

应用光学. 2019, 40(3): 363–368 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0301001>

基于图像分割和局部亮度调整的微光图像颜色传递算法

Low-light image color transfer algorithm based on image segmentation and local brightness adjustment

应用光学. 2020, 41(2): 309–317 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0202004>

用于MiniLED背光模组的亮度增强薄膜设计与制备

Design and preparation of brightness enhancement thin film for MiniLED backlight module

应用光学. 2019, 40(5): 887–893 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0505005>

色度亮度空间中的线束端子显微图像分割

Wire harness terminals microscopic image segmentation in chromaticity brightness space

应用光学. 2017, 38(6): 931–936 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0602005>

太赫兹源发散角测量技术研究

Research on divergence angle measurement technique of terahertz sources

应用光学. 2021, 42(3): 499–503 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0303001>

双飞秒激光频率梳光谱测量技术研究进展

Research progress of double femtosecond laser frequency comb spectroscopy measurement technology

应用光学. 2021, 42(1): 157–175 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0107003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2022) 04-0701-06

超低亮度测量技术研究

孙宇楠, 曹 锋, 赵俊成, 刘瑞星, 王 乐, 高 婧, 杨 科

(西安应用光学研究所 国防科技工业光学一级计量站, 陕西 西安 710065)

摘要: 光亮度是表征发光体的重要光度特性参数。提出了一种超低亮度计的设计方法, 描述了超低亮度计的工作原理和组成; 利用微弱光信号处理技术、非线性校准技术、制冷散热技术等实现了超低亮度的自动测量; 根据亮度计的测量原理, 对仪器进行了标定, 测量不确定度达到 5%。超低亮度计可适用于实验室和现场等测试场所, 为微光夜视装备、显示系统、特种光源、发光材料等的性能评估测试和校准提供计量保障。

关键词: 光亮度; 超低亮度计; 标定; 制冷散热技术; 测量不确定度

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202243.0403002](https://doi.org/10.5768/JAO202243.0403002)

Study on measurement technology of ultra-low brightness

SUN Yu'nan, CAO Feng, ZHAO Juncheng, LIU Ruixing, WANG Le, GAO Jing, YANG Ke

(The First Scale Optical Metrology Station of the Science, Technology and Industry for National Defense, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The brightness is an important parameter of photometric characteristics to characterize the luminescent materials. A design method of ultra-low brightness meter was proposed, and the working principle and composition of the device were described. The automatic measurement of ultra-low brightness was realized by using the technologies of weak light signal processing, nonlinear calibration, cooling and heat dissipation. According to the principle of brightness meter measurement, the calibration was carried out, and the uncertainty of measurement was up to 5%. The ultra-low brightness meter can be used in testing sites such as laboratory and field, which can provide metrological guarantee for performance evaluation and calibration of low-level-light night vision equipment, display system, special light source and luminescent materials.

Key words: brightness; ultra-low brightness meter; calibration; cooling and heat dissipation technology; measurement uncertainty

引言

光亮度是表征发光体的重要光度特征参数, 即光源在垂直于其光传输方向的平面上的正投影单位表面积单位立体角内发出的光通量^[1-5]。微弱光亮度是指在人眼视觉所需最低视场亮度水平以下的光亮度。现阶段的亮度计大多以硅光电池或光电倍增管为探测器, 没有制冷系统, 因此一般最低只能测到 10^{-4} cd/m^2 量级左右的亮度。随着国防科技工业的飞速发展, 在空间天文探测、荧光探测、

军用夜视侦察和微光技术等领域对弱光测量的要求越来越高, 现有的亮度计不能满足星际深空探测及军事特殊探测对微弱光光源亮度准确测量的需求。为此, 研制一种超低亮度计, 使用高灵敏度光子计数型光电倍增管作为探测器, 利用微弱光信号处理技术、非线性校准技术、制冷散热技术等实现超低亮度的自动测量, 最低可实现 10^{-6} cd/m^2 量级亮度测量, 可解决军用低照度夜视眼镜、微光像增强器、微光 ICCD 相机等微光夜视型号装备、

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-06-15

基金项目: 国防科技工业技术基础科研计划 (JSJL2019208D001)

作者简介: 孙宇楠 (1979—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事微光夜视及光谱光度计量技术研究。

E-mail: 1563226291@qq.com

武器装备多用途显示系统、军用特种光源、夜战环境微弱光辐射目标、液晶 LCD、LED 显示器、发光材料等的性能评估测试和校准问题, 同时可广泛应用于电光源、科研教学、冶金建筑、工业检测以及光照控制等民用领域。

1 成像式亮度计工作原理

成像式亮度计的一般工作原理如图 1 所示。

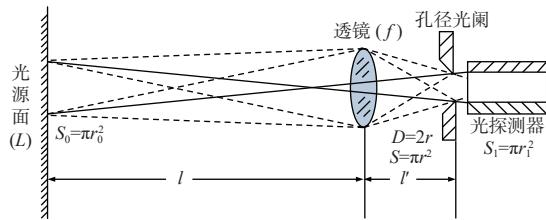


图 1 成像式亮度计工作原理

Fig. 1 Schematic of imaging brightness meter

根据图 1, 利用光度学和几何学原理, 可推出:

$$E = \frac{\pi\tau}{4f_m^2}(1-f/l)^2L \quad (1)$$

式中: E 为成像面上的照度; L 为发光面上的亮度; τ 为光学系统的透过率; f 为透镜焦距; l 为透镜与发光面的距离; f_m 为系统相对孔径数, $f_m = f/D$, 其中 D 为孔径直径。

当 f/l 小到可以忽略不计, 在一定的误差范围内, $(1-f/l)^2$ 近似等于 1, (1) 式可简化为

$$E = \frac{\pi\tau}{4f_m^2}L \quad (2)$$

(2) 式即为成像式亮度计的基本公式^[5-8]。

2 超低亮度计组成及工作原理

超低亮度计由瞄准目镜系统、变焦物镜系统、多视场反射镜及其驱动系统、衰减片转轮、视觉函数 $V(\lambda)$ 校正滤光片、光电倍增管 (PMT) 及其制冷系统、信号放大处理模块、嵌入式信号处理系统、触摸屏等组成, 组成及工作原理如图 2 所示。

待测光源发出的光透过变焦物镜镜头会聚到多视场反射镜后, 分为 2 路: 一路经目镜瞄准系统入射到人眼, 用以瞄准目标、调节光路; 另一路穿过多视场反射镜透过衰减片转轮、视觉函数校正滤光片入射到光电倍增管光阴极面上。入射到光电倍增管光阴极面上的待测光源光辐射转换为电信号, 由放大电路放大后, 经嵌入式信号

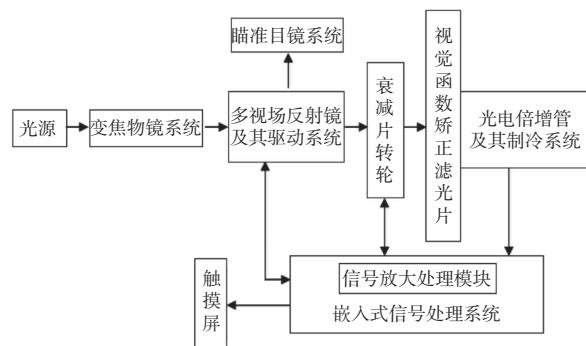


图 2 超低亮度计组成及工作原理图

Fig. 2 Composition and working principle of ultra-low brightness meter

处理系统处理, 得到待测光源亮度参数, 并在显示屏上显示^[9-11]。

3 超低亮度计解决的技术难题

3.1 微弱光信号处理技术

超低亮度的测量对信噪比要求很高。如果噪声较高, 光子计数级的测量信号将被淹没。因此, 提高信噪比是测量超低亮度的前提条件。为了降低噪声, 首先对其电源进行降低纹波处理; 其次, 研制信号处理电路对光电倍增管输出信号进行处理, 信号处理具有降低噪声放大与抗混叠低通滤波功能; 第三, 在微弱光信号情况下, 对于硬件处理后的数字电压信号, 进行软件数字滤波, 削减电路噪声; 在结构总体设计上采用多种方法进行电磁屏蔽, 保证超低亮度采样信号的高信噪比。

3.2 非线性校正技术

超低亮度计可实现 $(10^{-6} \sim 10^5)$ cd/m² 量级亮度的测量, 大量程范围的测量需设计 4 档放大电路对应 $10^3 \sim 10^9$ 量级的增益。在某一档位中, 选取标准亮度源 2 个亮度值 L_1 、 L_2 , 分别记录超低亮度计对应的电压输出值 u_1 、 u_2 , 可获得亮度与输出电压关系的线性方程:

$$\begin{cases} L_1 = k_1 u_1 + b_1 \\ L_2 = k_1 u_2 + b_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_1 和 L_2 为标准亮度源输出亮度值; u_1 和 u_2 分别为标准亮度源输出亮度值 L_1 和 L_2 对应超低亮度计的电压输出值。

从而得到该档放大电路的修正系数 k_1 和 b_1 , 同理可得其余每档放大电路的修正系数 (k_2, b_2) 、 (k_3, b_3) 和 (k_4, b_4) 。将 4 档放大电路的修正情况汇

总, 每一档放大电路的满电压均为 5 V, 形成非线性校正示意图, 如图 3 所示。由此建立起探测器每一档放大电路中不同亮度与不同输出电压之间的对应关系, 完成对 4 档放大电路信号的修正, 实现测量信号的非线性特征校正, 提高不同亮度的测量精度, 保证测量稳定性、线性度。

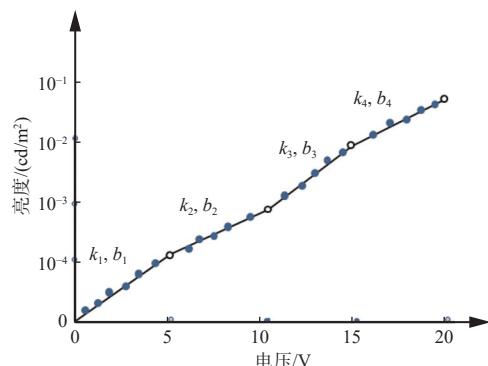


图 3 非线性校正示意图

Fig. 3 Schematic of nonlinear correction

3.3 制冷散热技术

超低亮度计使用的探测器为光子计数级光电倍增管, 需进行-20 ℃ 制冷。要实现对微弱光信号高精度、大动态范围的测量, 需要解决光电倍增管的高精度制冷、密封、散热等技术问题。

3.3.1 高精度制冷

光电倍增管温控系统包括 PMT、驱动电路、温度传感器、温控器件(TEC), 当温度传感器检测 PMT 及其驱动电路周围的环境温度高于-19.95 ℃ 时, 启动 TEC 制冷; PMT 工作一段时间后, 会使环境温度升高, 当温度传感器检测 PMT 及其驱动电路周围的环境温度低于-20.05 ℃ 时, 停止制冷, 实现 PMT 高精度制冷, 确保 PMT 一直在-20 ℃ 条件下工作, 提高其信噪比, 实现极弱信号的精准探测。

3.3.2 制冷腔体密封

制冷腔体密封包括前舱密封和后舱密封, 前舱负责隔热除霜, 后舱负责制冷散热, 制冷腔体密封方案如图 4 所示。窗口玻璃和视觉函数 $V(\lambda)$ 校正滤光片分别安装在前舱的两端, 用硅橡胶密封, 中间形成真空区域。前舱壁上安装气嘴用于抽真空; 后舱与前舱用螺钉连接, 后舱与 PMT 探测器用导热环支撑, 导热环位于光敏面位置处, 用于传导热量。后舱与探测器的空隙用保温棉填充形成保温层, 实现绝热保温。

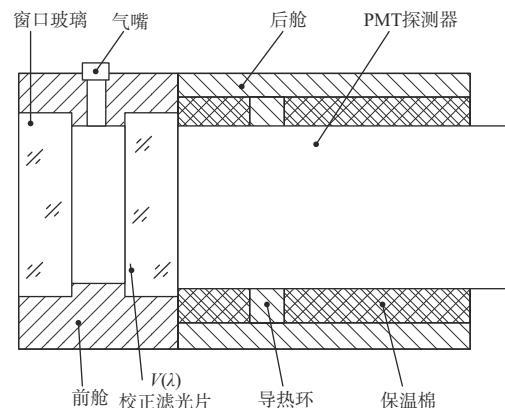


图 4 制冷腔体密封方案示意图

Fig. 4 Schematic of refrigeration chamber sealing scheme

3.3.3 TEC 散热

TEC 的散热方案如图 5 所示, 主要包括后舱、导热环、TEC 和散热头。TEC 消耗电能将热量从一侧移至另一侧, 达到制冷目的。制冷舱上下表面各放置 2 块 TEC, 2 块 TEC 冷端和热端串联起来, 形成 2 级制冷系统, 实现探测器光敏面-20 ℃ 的制冷。同时, 为降低 TEC 负载, 采用水循环散热, 在 TEC 热端设置水冷片, 水冷片内有 S 形水道, 增大散热面积, 分别用橡胶管连接水冷片的入水口和壳体上的水嘴、出水口与壳体上的水嘴, 入水口连接水泵, 将水泵置于仪器壳体外部的水容器中, 出水口与水容器连接, 将热能传递到仪器壳体外部, 实现 TEC 散热。

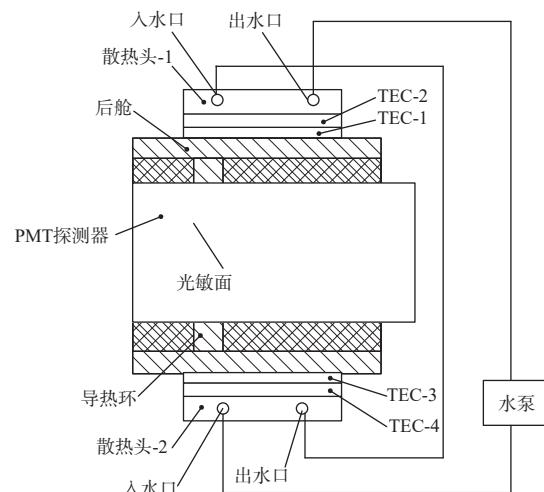


图 5 TEC 散热方案示意图

Fig. 5 Schematic of TEC heat dissipation scheme

在室温 25.6 ℃ 条件下, 使用 2 片 TEC, 目标温度设置为-20 ℃, 水温设定为 10 ℃, 利用 10 ℃ 恒温水循环 10 min, 得到 PMT 制冷系统制冷实验数据, 如表 1 所示。

表 1 PMT 制冷方案温控原理实验数据

Table 1 Experimental data of temperature control principle of PMT refrigeration scheme

时间/min	温度/℃	电流/A	备注
0	22.6	10	—
1	2.8	9.9	—
2	-6	9.8	—
3	-11.8	9.7	—
4	-15.6	9.6	—
5	-18.4	9.5	—
6	-20.3	9.4	5'50"时达到-20 ℃
7	-21.9	9.3	—
8	-19.85	9.2	8'50"时达到平衡
9	20.02	9.1	温度稳定
10	-20.05	9	温度稳定

实验数据表明, 制冷散热方案完全能够满足 PMT $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高精度制冷需求, 可有效降低 PMT 工作噪声, 保证超低亮度的测量精度。

4 实验结果与分析

4.1 亮度实验结果

使用光谱范围为 $380\text{ nm}\sim 780\text{ nm}$ 、出光口亮度均匀性优于 98%、电源稳定性为 1‰的高稳定输出双积分球均匀光源系统作为标准亮度源, 该亮度源内壁使用聚四氟乙烯喷涂, 在光谱范围内每个波长点反射率均达到 98%, 利用 2 组可更换变径光阑的组合搭配, 在不改变光源光谱特征的条件下改变积分球出光口亮度, 实现一系列稳定的亮度输出, 亮度源稳定性达到 2‰。将超低亮度计安装在二维平移台或三脚架上, 使超低亮度计的测光轴线与标准亮度源出光面垂直, 超低亮度计对准标准亮度源出光口中心, 进行亮度测量实验, 如图 6 所示。

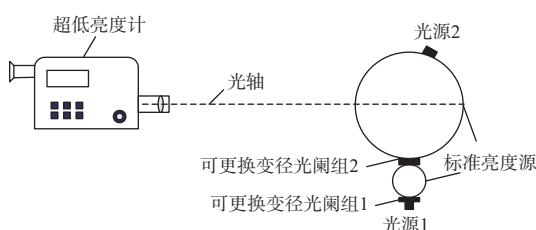


图 6 超低亮度计测量亮度源示意图

Fig. 6 Schematic of measuring luminance source by ultra-low brightness meter

超低亮度计亮度实验结果如表 2 所示。

表 2 超低亮度计亮度实验结果

Table 2 Brightness experimental results of ultra-low brightness meter

测量次数	亮度/ $\times 10^{-6}\text{ cd/m}^2$	亮度平均值/ $\times 10^{-6}\text{ cd/m}^2$	相对实验标准偏差/%
1	3.727		
2	3.812		
3	3.745		
4	3.539		
5	3.763	3.684	2.65
6	3.604		
7	3.756		
8	3.641		
9	3.535		
10	3.718		

4.2 亮度实验结果比较

超低亮度计对标准亮度源的亮度测量实验结果与标准亮度值进行比较, 标准亮度值为 $3.549\times 10^{-6}\text{ cd/m}^2$, 亮度测量平均值为 $3.684\times 10^{-6}\text{ cd/m}^2$, 相对示值误差为-3.8%, 表明超低亮度计亮度测量结果与标准亮度值一致性较好。

4.3 超低亮度计测量不确定度评估

4.3.1 数学模型

成像型亮度计的数学模型为公式(2)。

4.3.2 测量不确定度来源

- 1) 透镜焦距引入的不确定度分量 u_1
- 2) 成像面上的照度引入的不确定度分量 u_2
- 3) 光学系统的透过率引入的不确定度分量 u_3
- 4) 透镜与发光面的距离引入的不确定度分量 u_4

- 5) 孔径直径引入的不确定度分量 u_5

- 6) 测量重复性引入的不确定度分量 u_6 。

4.3.3 测量不确定度分量的评定

- 1) 透镜焦距引入的不确定度分量 u_1

透镜焦距由通用光学测试仪测量, 计量技术机构给出其扩展不确定度 $U_{\text{rel}}=0.1\% (k=2)$, 按 B 类不确定度评定, 则 $u_1=0.1\%/2=0.05\%$;

- 2) 成像面上的照度引入的不确定度分量 u_2

成像面上的照度由微弱光度计测量, 计量技术机构给出其扩展不确定度 $U_{\text{rel}}=4.0\% (k=2)$, 按 B 类不确定度评定, 则 $u_2=4.0\%/2=2.0\%$;

- 3) 光学系统的透过率引入的不确定度分量 u_3

光学系统的透过率由照度计测量, 计量技术机构给出其扩展不确定度 $U_{\text{rel}}=2.0\% (k=2)$, 按 B 类不确定度评定, 则 $u_3=2.0\%/2=1.0\%$;

确定度评定, 则 $u_3 = 2.0\% / 2 = 1.0\%$;

4) 透镜与发光面的距离引入的不确定度分量 u_4

透镜与发光面的距离由钢卷尺测量, 计量技术机构给出符合二级的检定结论, 其示值最大允许误差为 $\Delta = \pm 0.3 \text{ mm}$, 按 B 类不确定度评定, 当透镜与发光面的距离为 350 mm 时, $u_4 = 0.3 / (\sqrt{3} \times 350) \times 100\% = 0.1\%$;

5) 孔径直径引入的不确定度分量 u_5

孔径直径由测量显微镜测量, 计量技术机构给出其扩展不确定度为 $U = 1.5 \mu\text{m} (k=2)$, 按 B 类不确定度评定, 光度计最小视场角($1/8$)°对应的小孔直径为 0.175 mm 时, $u_5 = 1.5 / (2 \times 175) \times 100\% = 0.5\%$;

6) 测量重复性引入的不确定度分量 u_6

超低亮度计设有 4 档放大电路, 分别对应不同亮度的信号。强光信号大, 对应放大倍数较小的放大电路; 弱光信号小, 对应放大倍数较大的放大电路。放大倍数越大, 亮度测量重复性相对越差, 即测量重复性引入的不确定度分量越大。我们对超低亮度计测量重复性引入的不确定度分量相对最大的 10^{-6} cd/m^2 量级亮度测量结果进行分析, 10 次亮度测量结果如表 2 所示。10 次测量结果的相对实验标准偏差为 2.65%, 则测量重复性引入的标准不确定度为: $u_6 = 2.65\% / \sqrt{10} = 0.9\%$ 。

4.3.4 相对合成标准不确定度

超低亮度计测量不确定度分析如表 3 所示。

表 3 超低亮度计测量不确定度一览表

Table 3 List of ultra-low brightness photometer measurement uncertainties

测量不确定度分量 u_i	测量不确定度来源	测量不确定度/%	评定方法
u_1	透镜焦距引入的不确定度	0.05	B
u_2	成像面上的照度引入的不确定度	2.0	B
u_3	光学系统的透过率引入的不确定度	1.0	B
u_4	透镜与发光面的距离引入的不确定度	0.1	B
u_5	孔径直径引入的不确定度	0.5	B
u_6	测量重复性引入的不确定度	0.9	A

相对合成不确定度:

由于各分量不相关, 所以:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u_i)^2} = 2.5\%$$

4.3.5 相对扩展不确定度

要求置信水平为 95%, 取 $k = 2$, 可得相对扩展

不确定度为: $U_{\text{rel}} = k u_c = 5\%$ ^[12-15]。

5 结论

利用微弱光信号处理技术、非线性校准技术、制冷散热技术等设计了超低亮度计, 使用积分球标准亮度源对超低亮度计进行标定, 仪器测量不确定度达到 5%。该仪器可适用于实验室和现场等测试场所, 为微光夜视装备、显示系统、特种光源、发光材料等的性能评估测试和校准提供计量保障, 具有广泛的使用价值。

参考文献:

- 曹远生. JMS便携成像式亮度计的研制[J]. 实用测试技术, 2000(1): 21-24.
CAO Yuansheng. Development of JMS portable imaging luminance meter[J]. Practical Measurement Technology, 2000(1): 21-24.
- 刘玉龙, 黎俊. 图像色度亮度计的校准方法研究[J]. 工业计量, 2017, 27(2): 1-4.
LIU Yulong, LI Jun. Research on calibration method of image chroma luminance meter[J]. Industrial Metrology, 2017, 27(2): 1-4.
- 李默. 积分式与分光式测光测色仪器的计量校正[J]. 电视技术, 2012, 36(4): 71-77.
LI Mo. Metrological correction of integral and spectroscopic photometry and color measuring instruments[J]. Television Technology, 2012, 36(4): 71-77.
- 阮育娇. 显示用亮度计的校准[J]. 中国照明电器, 2017(8): 49-52.
RUAN Yujiao. Calibrating methods for luminance meters used on display industry[J]. China Light & Lighting, 2017(8): 49-52.
- 周拥军, 赵宝奇, 王鹏. CCD成像型亮度计测量方法研究[J]. 电学与控制, 2010, 17(12): 49-52.
ZHOU Yongjun, ZHAO Baoqi, WANG Peng. Study on a measurement method of CCD imaging luminance meter[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(12): 49-52.
- 温娜, 武晓光, 李默, 等. 成像式亮色度计测量特性分析[J]. 电视技术, 2014, 38(增刊1): 34-38.
WEN Na, WU Xiaoguang, LI Mo, et al. Analysis of measurement characteristics of imaging brightness colorimeter[J]. Television Technology, 2014, 38(S1): 34-38.
- 张雪静, 徐英莹, 曹峰梅. 两种不同类型的滤光片式彩

- 色亮度计性能比较[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(1): 146-151.
- ZHANG Xuejing, XU Yingying, CAO Fengmei. Performance contrast of two different types of optical filter color luminance meter[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 146-151.
- [8] 全国光学计量技术委员会. 亮度计检定规程: JJG 211-2005 [S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2005.
- National Optical Metrology Technical Committee. Verification regulation of luminance meters: JJG 211—2005 [S]. Beijing: State General Administration of the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine, 2005.
- [9] 魏建中, 王仲春, 苏学刚, 等. CCD成像型宽量程亮度计系统研究[J]. *光学技术*, 1999(1): 88-91.
- WEI Jianzhong, WANG Zhongchun, SU Xuegang. Study on measurement method of CCD imaging luminance meter[J]. *Optical Technology*, 1999(1): 88-91.
- [10] 孙德印, 姚军. BM-5彩色亮度计的改造设计[J]. *电视技术*, 2002(6): 99-100.
- SUN Deyin, YAO Jun. Redesign of BM-5 color luminance meter[J]. *Television Technology*, 2002(6): 99-100.
- [11] 郑喜凤, 黄娉, 刘贵华. 三基色亮度计的设计和应用[J]. *微计算机信息*, 2009, 25(2): 62-64.
- ZHENG Xifeng, HUANG Ping, LIU Guihua. Design and application of tricolor luminance meter[J]. *Microcomputer Information*, 2009, 25(2): 62-64.
- [12] 徐骏, 孟炳寰, 郑小兵, 等. 红外标准辐亮度计的研制及定标[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 863-868.
- XU Ju, MENG Binghuan, ZHENG Xiaobing, Development and calibration of infrared standard radiometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 863-868.
- [13] 黄蓓. 遮光筒式亮度计的不确定度分析[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2014, 32(1): 49-51.
- HUANG Bei. Uncertainty analysis for shading luminance meter[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2014, 32(1): 49-51.
- [14] 汪立文, 万蕴杰. 成像式亮度计亮度测量的不确定度分析[J]. *计量与测试技术*, 2009, 36(1): 69-70.
- WANG Liwen, WAN Yunjie. Luminance uncertainty evaluation for the measurement of luminance meter[J]. *Measurement and Testing Technology*, 2009, 36(1): 69-70.
- [15] 李振国. 光电成象式亮度计的特性及其误差表示方法[J]. *计量技术*, 1996(6): 23-25.
- LI ZhenGuo. Characteristics of photoelectric imaging luminance meter and expression method of measurement error[J]. *Measurement Technology*, 1996(6): 23-25.