

引用格式: LÜ Liang, JIANG Xiao-mei. Realizations of Luminance Units in Range of 10~200 000 cd/m<sup>2</sup>[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7):0712001

吕亮,姜晓梅. 10~200 000 cd/m<sup>2</sup>宽量程亮度量值复现[J]. 光子学报, 2020, 49(7):0712001

## 10~200 000 cd/m<sup>2</sup>宽量程亮度量值复现

吕亮,姜晓梅

(中国计量科学研究院 光学所, 北京 100029)

**摘要:**为了应对高亮度量程计量溯源需求并提高国家亮度计量标准的复现能力,建立了可覆盖 10~200 000 cd/m<sup>2</sup>量程的新一代国家亮度工作基准装置.研制了双光束注入式可调高亮度均匀光源并在光源出口安装了精密孔径限制光阑,研究了基于积分球亮度源法复现亮度绝对值的方法,对光源的稳定性及空间输出特性、复现装置定位精度、标准照度计的线性及光谱失配误差等关键计量特性进行了实验及分析,最终将复现的亮度标准值保存至标准亮度计用于未来的量值传递工作.实验结果表明:基于亮度源法的亮度复现装置在 10~200 000 cd/m<sup>2</sup>量程量值复现相对扩展不确定度为 0.7%(包含因子为 2);其复现量值与基于灯板法的 3~1 500 cd/m<sup>2</sup>国家亮度工作基准的偏差小于 0.2%;装置测量范围上限较原基准提高了 2 个量级,基本覆盖了常规亮度计的量程,可很好地满足当前更高亮度应用领域的计量校准需求.

**关键词:**测试计量仪器;亮度;高亮度;均匀光源;计量基准;量值复现

中图分类号:TP211.6;TH741

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204907.0712001

## Realizations of Luminance Units in Range of 10~200 000 cd/m<sup>2</sup>

LÜ Liang, JIANG Xiao-mei

(Optic Division, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to satisfy the increasing calibration demand for high range luminance and improve the luminance calibration ability in China, a new generation of national luminance work standard was established which covers the range of 10~200 000 cd/m<sup>2</sup>. A twin light source injection adjustable high luminance uniform source was developed, and a precision limiting aperture was installed at the export of the source. The realization of the unit based on integrating sphere source method was introduced, and the key system characteristics were analyzed by experimental data, including the stability and spatial output characteristics of source, the position accuracy of adjustment, the linearity and the spectral mismatch error of the standard photometer etc. Finally the realized scale was transferred to a standard luminance meter which would be used as a transfer-reference. The relative expanded uncertainty of the new cd/m<sup>2</sup> realization system is 0.7% (coverage factor is 2). Comparison between the proposed system and the current luminance work standard (3~1 500 cd/m<sup>2</sup>) shows a deviation less than 0.2%. The upper range of the proposed realization system is increased by 2 orders of magnitude compared with the original standard, and covers the ranges of normal luminance meters, which can well satisfy the calibration demand in the high level luminance application of industry.

**Key words:** Test and measurement instruments; Luminance; High level luminance; Uniform light source; Primary standard; Realization of unit

基金项目:国家重点研发计划(Nos.2016YFF0200303, 2018YFF0212402)

第一作者:吕亮(1978—),男,副研究员,博士,主要研究方向为光辐射计量技术. Email: lvliang@nim.ac.cn

通讯作者:姜晓梅(1969—),女,副研究员,硕士,主要研究方向为光辐射计量技术. Email: jiangxiaom@nim.ac.cn

收稿日期:2020-02-20;录用日期:2020-03-24

<http://www.photon.ac.cn>

OCIS Codes: 120.3940; 120.3930; 120.4800; 330.7325; 010.5630; 010.3920

## 0 引言

亮度是光度学的重要光度量之一,它是反映发光体(反光体)表面发光(反光)强弱的物理量,即单位投影面积上的发光强度,其国际制单位是坎德拉/平方米( $\text{cd}/\text{m}^2$ )。亮度一般用于衡量面光源的亮暗程度,对应的测量设备为亮度计。显示、照明、交通及医疗器械等领域广泛涉及到各种水平的亮度测量,使用的亮度计量程低至 $0.001 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,如显示屏对比度测量;高至 $2 \times 10^5 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,如医疗器械的特种照明光源。而我国现有的亮度计量基准能力仅覆盖 $3 \sim 1\,500 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,无法满足国家工业发展的需求<sup>[1]</sup>,因此需要尽快开展更宽量程亮度计量标准研究。

建于1986年的现有亮度国家基准由发光强度副基准灯组、亮度基准装置(光轨系统)和漫反射基准白板构成(简称灯板法),此种量值复现方法受标准灯光强度和测量距离的限制已经无法实现更高亮度量程的复现<sup>[1]</sup>。基于积分球均匀亮度源(简称亮度源法)复现亮度量值已经成为主流方法,亮度源法可使亮度量值复现和校准能力扩展至 $1 \times 10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$ 甚至更高成为可能,在扩展量程方面也具有先天的优势,而且其不确定度水平相较于灯板法更优。美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)采用灯板法和亮度源法两种方式复现了亮度量值<sup>[2]</sup>,由高强度氙灯和漫射板组成的灯板法装置校准能力上限为 $70\,000 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,基于 $2\,856 \text{ K}$ 亮度源法装置的校准能力上限为 $45\,000 \text{ cd}/\text{m}^2$ 。德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)近年一直开展基于可调谐激光的亮度辐射源研究,其特点是可实现光谱辐射亮度复现及校准<sup>[3]</sup>,对于常规亮度计的校准依然采用灯板法或亮度源法<sup>[4]</sup>,具备的校准能力上限为 $1 \times 10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$ 。英国国家物理研究院(National Physical Laboratory, NPL)基于亮度源法的校准能力上限<sup>[5]</sup>为 $3 \times 10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$ 。芬兰赫尔辛基工业大学(Helsinki University of Technology, HUT)2000年建立的亮度源法亮度工作基准测量上限为 $3 \times 10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,并用该装置同时复现了光谱辐射亮度量值<sup>[6]</sup>。

中国计量科学研究院从2013年开始了基于亮度源法的亮度量值复现研究工作,并于2016年起按照科技部重点研发计划项目任务进行了更高量程亮度量值的复现研究,最终基于亮度源法复现了 $10 \sim 2 \times 10^5 \text{ cd}/\text{m}^2$ 量程的亮度量值,建立了新一代亮度工作基准装置。

本文在介绍基于亮度源法的亮度量值复现原理基础上阐述了中国计量科学研究院新一代亮度工作基准的系统组成、实验方法、关键计量特性实验数据以及不确定度分析结果等。

## 1 亮度量值复现原理

### 1.1 基于灯板法的亮度复现方法

如图1所示,基于灯板法的亮度复现装置方法由发光强度副基准灯组、亮度基准装置(光轨系统)和漫反

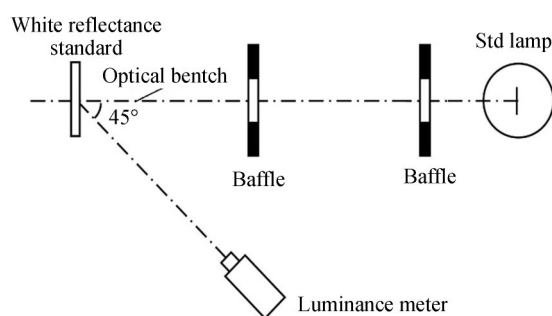


图1 基于灯板法的亮度量值复现装置原理

Fig.1 Block diagram of luminance unit realization based on white reflectance standard and luminous intensity standard lamp

射基准白板构成,其中副基准灯组由一组高稳定性发光强度灯组成。发光强度副基准灯在基准白板所在位置产生标准照度值,然后根据白板的漫反射比导出亮度值<sup>[2]</sup>,即

$$L = \frac{\rho \cdot I}{\pi \cdot l^2} \quad (1)$$

式中, $\rho$ 表示基准白板的反射比; $I$ 表示发光强度副基准灯的发光强度值,单位为cd; $l$ 表示基准白板与副基准标准灯灯丝平面的距离,单位为m.

此法通过改变灯与白板表面的距离复现出不同亮度量值.由于目前我国发光强度副基准灯组在2 856 K时光强最大值仅为1 200 cd左右,而且依据距离平方反比定律,灯与白板间距不能过小,故此法亮度最高值仅为1 500 cd/m<sup>2</sup>,量程存在局限性.另外漫射基准白板的积分漫反射比不确定度较大也限制了此法不确定度的进一步降低.

## 1.2 基于亮度源法的亮度复现方法

基于亮度源的亮度复现方法采用具有固定出光面积的均匀光源来实现,由亮度定义可知:均匀光源表面亮度 $L$ 等于在其垂直方向的发光强度 $I$ 与其出光面积 $S$ 之比.具体实现时一般采用出口安装精密孔径光阑的积分球均匀亮度源来实现<sup>[2,7]</sup>,如图2所示.

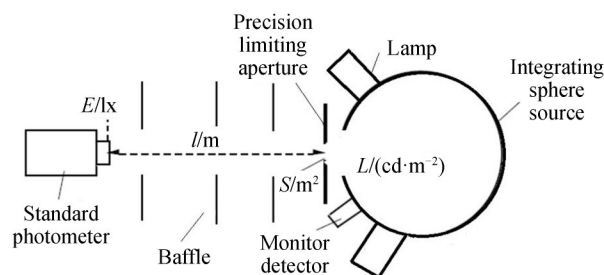


图2 基于亮度源法的亮度量值复现装置原理

Fig.2 Block diagram of luminance unit realization based on uniform luminance source

根据距离平方反比定律,发光强度 $I$ 又可以通过垂直于光线传播方向的照度计接收面的照度 $E$ ,与精密孔径光阑发光面到被照照度计接收面的距离 $l$ 的平方的乘积得到<sup>[7]</sup>.

$$L = \frac{I}{S} = \frac{k \cdot E \cdot l^2}{S} \quad (2)$$

$$k \approx 1 + \left(\frac{r_a}{l}\right)^2 + \left(\frac{r_b}{l}\right)^2 \quad (3)$$

式中, $L$ 为标准亮度源积分球出口精密孔径光阑表面亮度,单位为cd/m<sup>2</sup>; $E$ 为标准照度计接收面照度,单位为lx; $l$ 为精密孔径光阑发光面到标准照度计接收面的距离,单位为m; $S$ 为精密孔径光阑面积;单位为m<sup>2</sup>; $k$ 为几何修正系数; $r_a$ 为精密孔径光阑半径,单位为m; $r_b$ 为标准照度计接收面半径,单位为m.

从以上原理看出,如果能制备出更高亮度的积分球均匀光源,则可以将亮度标准的量程进一步向上扩展.另外相较于灯板法,此法避免了漫反射比这项较大的不确定度,具有先进性.基于以上技术考虑和社会对高量程亮度的校准需求,选择了亮度源法研制新一代亮度工作基准.

## 2 双光束注入式可调高亮度均匀光源的制备

任务所需高亮度光源需要具备的计量特性包括:亮度输出上限达到 $2 \times 10^5$  cd/m<sup>2</sup>;整体亮度均匀性尽可能好;很好的长期和短期稳定性;具备强度调节功能以便实现从 $1 \times 10^1 \sim 2 \times 10^5$  cd/m<sup>2</sup>的大动态范围量值复现;色温为2 856 K,以便与现有的亮度量值体系衔接融合;光源有效亮度区域应大于 $\Phi 15$  mm,满足一般瞄准点式亮度计各视场的校准<sup>[8-9]</sup>.

基于以上多方面考虑,选择了采用双光束注入的高亮积分球均匀光源方案.最终亮度输出上限大于 $2 \times 10^5$  cd/m<sup>2</sup>,实物见图3.光源系统中积分球直径为120 mm,出口直径为20 mm,内壁为高漫反射比耐高温材料,可见光区域漫反射比均值能达到97%以上,最高耐温400℃左右.球壁装有监控光度探测器,探测器与球体连接部分采用了极低导热率的工程材料进行热隔离.积分球入口方向,对称设计了两个风冷大功率2 856 K卤钨杯灯注入光源,两个注入光源和积分球中间设计安装了可调机械光阑机构用于实现亮度源输出大动态范围的控制,动态范围可达至少5个数量级.整套高亮度源配置了4维度调节支撑机构并安装在光轨上.

在积分球出射口安装有精密孔径光阑,由具有超低膨胀系数的特种因瓦合金钢加工而成,在200℃以下

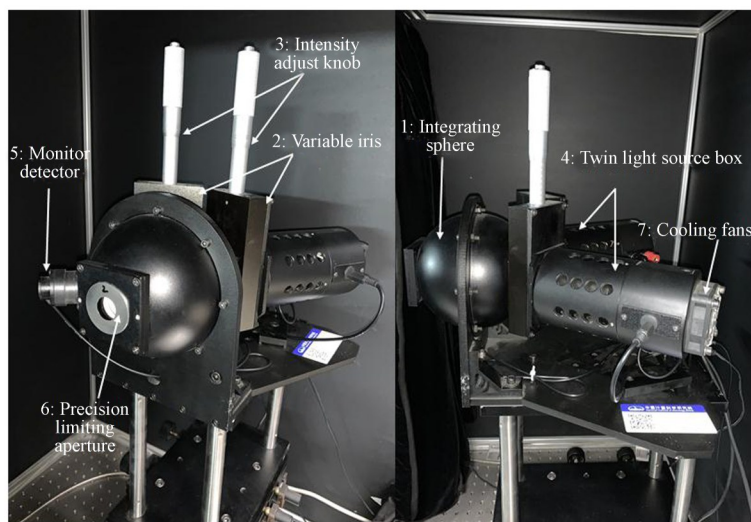


图3 可调式高亮度均匀光源照片  
Fig.3 Picture of adjustable high level uniform source

膨胀系数典型值为  $1.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{[10]}$ , 因此温度对孔径面积的影响可以忽略.

### 3 量值复现及特性实验数据

#### 3.1 装置空间定位方法及重复性实验结果

采用亮度源法复现亮度量值的基础实验环节是通过标准照度计在光轨上距亮度源孔径光阑一定距离下测量并计算出亮度源出口的发光强度, 因此光学轨道的精度、照度计与孔径光阑的距离、探测器及积分球口相对于测量光轴的空间角度偏差均是不确定度的重要来源.

图4为装置定位机构实物照片, 使用配有光栅尺的3 m线性导轨, 距离显示精度0.001 mm. 用望远式水准仪配合沿轨道移动的坐标网格靶板考察了轨道的直线度, 实验表明整个轨道平直性最大偏差为0.4 mm.

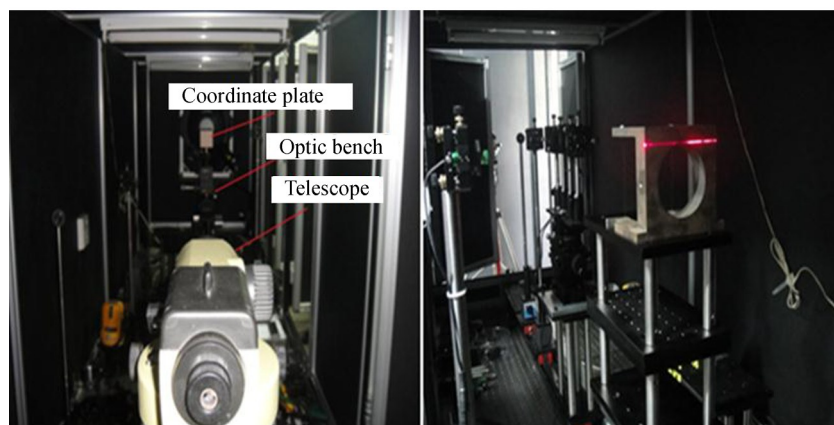


图4 定位实验装置图片  
Fig.4 Picture of alignment testing of setup

用点状激光定位法解决了标准照度计探测器和积分球口的定位及调整问题. 在导轨一端安装一个小发散角点状激光器, 调整好作为测量光轴的参考. 在严格垂直于光轴方向光轨的侧方安装了另一束定位激光, 标准照度计探测器接收面和孔径光阑端面均与此光束相切进行轨上定位. 经过对1 000 mm量块长度测量的实验验证, 这种方法轨上绝对位置坐标的定位准确度偏差小于0.05 mm, 定位重复性为0.2 mm.

对于探测器和孔径光阑在光轴方向上的空间定位问题, 研制了一套双向激光瞄准装置, 装置上的两束激光分别沿光轴向两个相反方向发射, 调整两个激光器空间姿态保证两束光均与光轴重合, 从而探测器和

孔径光阑的中心及其平面与光轴的垂直性均可使用激光束及其反射光束进行定位,经过实验各平面与光轴垂直偏差小于0.2°.

### 3.2 精密孔径光阑面积的测量

设计加工了4个精密孔径限制光阑,实验数据见表1,设计孔径的直径为18 mm.最终使用的2#光阑孔径面积由中国计量科学研究院二维多尺寸校准装置进行了测量.

表1 精密孔径限制光阑实验数据  
Table 1 Measuring result of precision limiting aperture

Parameter	Value	Expanded uncertainty( $k=2$ )
Diameter/mm	17.992	0.002
Roundness/mm	0.006	0.002
Area/mm <sup>2</sup>	254.25	0.16
Measuring conditions	Collect 25 points evenly on the edge of aperture to calculate the diameter and roundness	

### 3.3 光源特性实验

开启积分球光源并调节输出达到 $2 \times 10^5$  cd/m<sup>2</sup>后预热50 min,然后用标准照度计在光轨上距离出口0.5 m处对光源稳定性进行30 min考察实验,结果如图5所示,表明光源预热后30 min内稳定性优于0.05%.

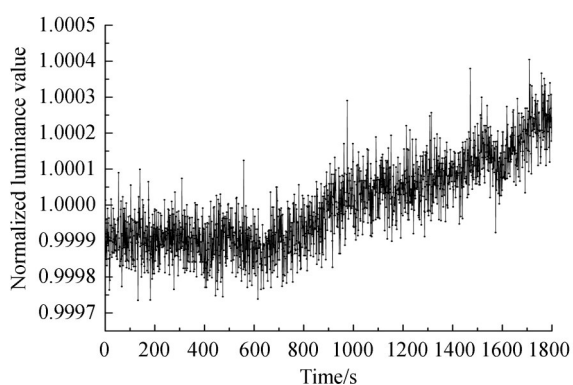


图5 光源30 min稳定性实验数据  
Fig. 5 Stability of light source in 30 min by experiment

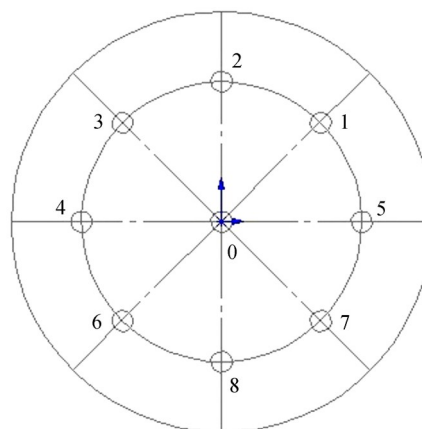


图6 亮度源面均匀性测量点分布示意图  
Fig. 6 Uniformity measurement points distribution diagram of luminance source export plane

用0.1°视场角的标准亮度计分别测量积分球口精密孔径光阑表面9点亮度值,测量点分布如图6所示,作为亮度源面均匀性指标<sup>[11]</sup>,表2给出了均匀性实验数据及偏差.

表2 亮度源出口面均匀性实验数据  
Table 2 Uniformity measurement data of luminance source export plane

Measurement point	Luminance / (cd·m <sup>-2</sup> )	Measurement point	Luminance / (cd·m <sup>-2</sup> )
1	1 028	6	1 028
2	1 030	7	1 029
3	1 027	8	1 027
4	1 028	9	1 029
5	1 027	Max deviation of uniformity	0.29%

在亮度源稳定输出的状态下,标准亮度计与光轴成+5°~-5°范围旋转并始终瞄准积分球出口中心,读出亮度计读数,计算角度特性偏差<sup>[12]</sup>.图7为亮度源角度特性数据曲线.实验表明:标准亮度源±5°内角度特性最大偏差为0.40%,±3°内角度特性最大偏差为0.20%.

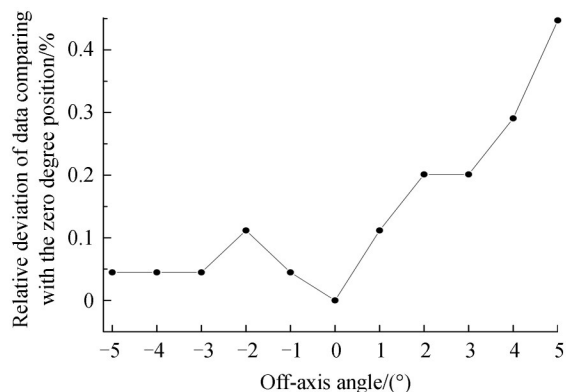


图7 亮度源角度特性实验数据

Fig. 7 Measurement data of source angle character

### 3.4 复现用标准照度计特性实验

用于复现的标准照度计由德国LMT实验室级光度探测器与keithley6485型皮安表组成,采用光度工作基准在10 lx点进行了校准且校准工作在亮度复现当日进行,从而可以消除其长期稳定性影响.照度校准的不确定度为0.5% ( $k=2$ ).

除绝对值外,所用照度计使用量程内的线性是另外一项不确定度来源,因此采用双光源叠加法<sup>[13]</sup>对非线性误差进行了实验考察. $S_A$ 和 $S_B$ 分别代表两个光源通道A、B单独开启时被测仪器的信号值, $S_{AB}$ 代表两个光源通道同时开启时的被测仪器信号值, $S_{A+B}$ 代表通道单独开启时两个通道信号算术相加值,最终用 $S_{AB}$ 与 $S_{A+B}$ 的比值作为非线性系数<sup>[14]</sup>.表3的实验数据表明:最大非线性误差为0.20%,累积的非线性误差为0.14%.

表3 标准照度计非线性测量数据

Table 3 Nonlinearity measurement data of standard photometer

Display value of standard photometer/nA				Nonlinear coefficient
$S_A$	$S_B$	$S_{AB}$	$S_{A+B}$	
0.102 5	0.098 5	0.201 4	0.201 0	1.002 0
0.180 5	0.172 7	0.353 4	0.353 2	1.000 6
0.339 2	0.346 5	0.685 3	0.685 7	0.999 4
0.721 5	0.722 1	1.441 2	1.443 6	0.998 3
1.459 8	1.397 5	2.854 5	2.857 3	0.999 0
3.114 6	3.102 5	6.211 8	6.217 1	0.999 1
6.296 5	6.139 5	12.44	12.436	1.000 3
12.614	12.266	24.915	24.880	1.001 4
25.080	24.902	50.008	49.981	1.000 5
50.707	50.077	100.80	100.78	1.000 2
98.837	97.097	196.03	195.93	1.000 5

研究过程中还对LMT公司光度探测器的 $V(\lambda)$ 光谱失配误差进行了修正.首先在中国计量科学研究院光学所光电探测器光谱响应度标准装置上测得了标准照度计探头的相对光谱响应度,然后用光谱辐射计测得亮度源2856 K色温下的相对光谱功率分布,计算得到标准照度计的色修正系数<sup>[15]</sup> $K$ ,即

$$K = \frac{\int_{380}^{780} P_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P_1(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_{380}^{780} P_1(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P_A(\lambda) S(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

式中, $P_A(\lambda)$ 为A光源的相对光谱功率分布; $P_1(\lambda)$ 为亮度源的相对光谱功率分布; $V(\lambda)$ 为CIE明视觉光谱光视效率; $S(\lambda)$ 为标准照度计探测器的相对光谱响应度.

计算结果表明标准光度探测器的  $V(\lambda)$  色修正系数仅为 1.000 033, 可以忽略。

### 3.5 亮度量值复现结果及验证

按照式(2)完成了宽量程亮度量值复现, 并将复现的标准值保存至长期稳定性优于 0.2% 的标准级光谱式亮度计上并记录标准亮度计在每个校准点的相对示值误差, 数据见表 4。

表 4  $1 \times 10^1 \sim 2 \times 10^5$  cd/m<sup>2</sup> 亮度量值复现结果  
Table 4  $1 \times 10^1 \sim 2 \times 10^5$  cd/m<sup>2</sup> unit realization data

Luminance standard value / (cd·m <sup>-2</sup> )	Display value of standard luminance meter / (cd·m <sup>-2</sup> )	Relative indication error
2 118×100	21 170	-0.05%
1 536×100	15 350	-0.07%
1 032×100	10 310	-0.10%
5 140×10	51 370	-0.06%
1 018×10	10 170	-0.10%
4 976.5	4 981.1	0.09%
1 109.2	1 110.1	0.08%
107.59	107.73	0.13%
10.015	10.007	0.10%

另外用校准后的标准亮度计分别在新装置和现有基于灯板法的亮度工作基准装置上进行测量, 从而对新装置所复现量值进行验证, 表 5 中比对结果表明: 在新装置与灯板法亮度工作基准装置上测量结果相对偏差小于 0.2%。

表 5 两种复现方法比对  
Table 5 Comparison between two realization methods

Luminance source method / (cd·m <sup>-2</sup> )	Standard lamp and reflectance plate method / (cd·m <sup>-2</sup> )	Relative deviation / %
10.03	10.05	0.20%
50.11	50.04	-0.14%
100.6	100.5	-0.10%
499.0	498.1	-0.18%

装置的测量重复性实际包含了光源的稳定性、积分球出口的亮度均匀性及角度特性等指标, 因此利用仪器进行重复性实验时须考虑尽量减小所用仪器自身带来的影响。最终选择在约 5 000 cd/m<sup>2</sup> 这个特征亮度水平下用标准亮度计对系统进行重复性考察实验, 因为过高的亮度水平持续照射会使亮度计探测器产生温漂, 低亮度水平时亮度计信噪比不是最优。10 次重复性测量结果被用于评估量值复现结果 A 类不确定度分量, 结果见表 6。

表 6 系统重复性实验数据  
Table 6 Repeatability data of system

Index	Luminance value / (cd·m <sup>-2</sup> )	Index	Luminance value / (cd·m <sup>-2</sup> )
1	4 988	6	4 990
2	4 988	7	4 990
3	4 989	8	4 989
4	4 990	9	4 990
5	4 989	10	4 988
Relative standard deviation		0.02%	

### 3.6 不确定度分析

表 7 给出了基于亮度源法亮度复现系统的不确定度分量来源及最终扩展不确定度计算结果<sup>[16]</sup>。

表7 基于亮度源法的亮度量值复现系统不确定度评估

Table 7 Uncertainty budgets of the luminance unit realization system based on luminance source

Source of uncertainty	Relative uncertainty	Sensitivity coefficient	Standard uncertainty component	Type of uncertainty
Repeatability	0.02%	1	0.02%	A
Scatter light	Negligible	/	/	B
Illuminance value	0.25%	1	0.25%	B
Nonlinearity of standard photometer	0.14%	1	0.14%	B
Spectral mismatch of detector	Negligible	/	/	B
Distance measurement	0.04%	2	0.08%	B
Alignment of detector and aperture	0.06%	2	0.12%	B
Area of aperture	0.06%	-1	0.06%	B
Combined standard uncertainty			0.33%	
Relative expanded uncertainty			0.7%, $k=2$	

## 4 结论

本文介绍了中国计量科学研究院光学所基于亮度源法建立新一代亮度工作基准的研究成果.采用双光束注入方式制备出了高至 $2 \times 10^5 \text{ cd/m}^2$ 的可调高亮度均匀光源,实现了激光空间定位方法,在此基础上对孔径光阑、光源、标准照度计等重要组成部分的各项计量特性进行了实验及分析,最终亮度量值复现的相对扩展不确定度为0.7% ( $k=2$ ),复现量程覆盖了 $10 \sim 200\,000 \text{ cd/m}^2$ .通过与灯板法亮度工作基准的比对,验证了新复现装置的量值可靠性.新复现装置的量程在覆盖现有亮度基准 $3 \sim 1\,500 \text{ cd/m}^2$ 量程的同时向上扩展了两个量级,可以很好地解决当前相关领域的迫切计量需求问题.

## 参考文献

- [1] JJG-2033-1989 光亮度计量器具检定系统[S]. 北京: 国家技术监督局, 1990.
- [2] ZONG Yu-qin. NIST measurement services photometric calibrations [J]. *NIST Special Publication*, 2018, **250**(95): 68-73.
- [3] SCHUSTER M, SAULIUS N, ARMIN S, *et al.* Spectral calibration of radiometric detectors using tunable laser sources [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(12): 1950-1961.
- [4] ERB W, SAUTER G. PTB network for realization and maintenance of the candela [J]. *Metrologia*, 1997, **34**(2): 115-124.
- [5] ZWINKELS J C, IKONEN E, FOX N P, *et al.* Photometry, radiometry and 'the candela': evolution in the classical and quantum world [J]. *Metrologia*, 2010, **47**(5): 15-32.
- [6] TOIVANEN P, HOVILA J, KARHA P, *et al.* Realizations of the units of luminance and spectral radiance at the HUT [J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 527-530.
- [7] OHNO Y, CROMER C L, HARDIS J E, *et al.* The detector-based candela scale and related photometric calibration procedures at NIST [J]. *Journal of Illuminating Engineer Society*, 1994, **23**(1): 88 - 98.
- [8] ZHANG Meng-ya, YUAN Yin-lin, ZHAI Wen-chao, *et al.* Design and test of infrared integrating sphere radiation source with wide dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(6): 0612006.  
张梦雅, 袁银麟, 翟文超, 等. 宽动态范围红外积分球辐射源的设计与检测[J]. 光学学报, 2019, **39**(6): 0612006.
- [9] MA Wen-long, QIU Ya-feng. Research on integrating sphere light hole brightness attenuation test system [J]. *Infrared Technology*, 2017, **39**(4): 317-322.  
麻文龙, 邱亚峰. 积分球出光孔亮度衰减测试系统研究[J]. 红外技术, 2017, **39**(4): 317-322.
- [10] 李成栋, 赵梅, 刘光启, 等. 金属材料速查手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [11] YUAN Yin-lin, XU Jun, ZHAI Wen-chao, *et al.* Design and test of a spectrally tunable integrating sphere reference light source with large exit aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(7): 204-211.  
袁银麟, 徐俊, 翟文超, 等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测[J]. 光学学报, 2013, **33**(7): 204-211.
- [12] SUN Jing-xu, LIU Hong-xing, XU Yan-jun, *et al.* 4m extended uniform source for radiometric calibration [J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(5): 823-832.  
孙景旭, 刘洪兴, 许艳军, 等. 4m直径均匀扩展定标光源[J]. 中国光学, 2015, **8**(5): 823-832.
- [13] WANG Xue-lian, WU Zhi-feng, SONG Gui-cai, *et al.* Measurement of absolute linearity using laser covering large-



- scale dynamic range [J]. *Applied Optics*, 2019, **40**(4): 681-685.
- 王雪莲, 吴志峰, 宋贵才, 等. 激光大动态范围线性测量[J]. 应用光学, 2019, **40**(4): 681-685.
- [14] LIU Hui, CHEN Hong-yao, SI Xiao-long, *et al.* Linear calibration of wide dynamic range response of silicon detectors based on double LEDs light source integrating sphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(9): 30-38.
- 刘辉, 陈洪耀, 司孝龙, 等. 基于双LED光源积分球的硅探测器宽动态范围响应线性定标[J]. 光学学报, 2017, **37**(9): 30-38.
- [15] 郝允祥, 等. 光度学[M]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [16] JJF 1059.1-2012, 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 北京理工大学出版社, 2012.