

一种国产近场分布式光度计的研发

王洪远, 闵锐, 李玉梅, 曹良才*

(清华大学精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 光度测量在基础科研以及工业生产两方面均具有广泛应用, 随着近年来柔性显示、新型照明、增强现实抬头显示等领域的迅猛发展, 对光度测量设备也提出了更高的检测要求。目前, 光度测量设备正在逐步实现远场测量向近场测量的升级。本工作研发了一种国产近场分布式光度计, 简要介绍了近场光度测量的现状及原理, 阐述了所研制近场分布式光度计的软、硬件结构, 并设计完成近、远场对比测量实验, 验证了所研光度计的近场测量效果, 实现了光度参量的近场测量。

关键词: 光度测量; 近场; 分布式光度计; 软、硬件结构

中图分类号: O432.2

文献标识码: A

Development of A Domestic Near Field Goniophotometer

Wang Hongyuan, Min Rui, Li Yumei, Cao Liangcai*

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision

Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Photometry is widely used in both basic scientific research and industrial production. With the rapid development of flexible display, latest lighting, AR head-up display and other fields in recent years, higher testing requirements have been put forward for photometric equipment. At present, photometric equipment is gradually realizing the upgrading from far-field measurement to near-field measurement. In this work, a domestic near-field goniophotometer is developed, the current situation and principle of near-field photometry are briefly introduced, the software and hardware structure of the developed near-field goniophotometer is elaborated, and the near-field and far-field comparative measurement experiments are designed and completed, which verifies the near-field measurement effect of the developed goniophotometer, and realizes the near-field measurement of the photometric parameters.

Keywords: photometry; near-field; goniophotometer; software and hardware structure

1 引言

1760 年朗伯在其发表的一部专著中第一次使光的测量成为一门学科——光度学。他建立了光度学中的许多基本概念，定义了光通量、发光强度、照度、亮度等主要的光度学参量^[1,2]。对光度参量的精确测量既是科学研究的基本保障，又是工业生产的迫切需求。近些年来随着发光材料、柔性显示、新型照明光源、超构透镜成像及增强现实抬头显示等领域的迅猛发展，对光度参量的精确检测提出了更高的要求。

测量发光体光度参量分布特性的仪器，按照测量距离相对于被测光源发光面尺寸的比例可分为近场和远场分布式光度计^[3,4]。远场分布式光度计在测量过程中将发光体看作一个点光源，能够高效测量和重建相关的光度参量，但其测量距离要求至少为发光体最大尺寸的 5 倍^[5]，这导致远场光度计占据空间较大。而近场分布式光度计通常将测量发光体看作面光源，直接对近距离的不同方向发射的光线特性进行测量^[6-8]，测量结果准确性更高，并且可以测量大尺寸光源，同时可根据光度参量之间的转换关系推演远场光度分布特性。因此，近场分布式光度计相比远场光度计具有更多的优势和应用前景。

自上世纪九十年代初到目前，已有很多国内外学者对近场光度测量进行了研究。早在 1992 年，德国伊尔梅瑙工业大学就开始对近场光度测量进行研究，并建立了硬件设备，根据测量的亮度图像推演其他光度参量，如光强和光通量等^[9]。继而，该大学研发团队成员创建了目前在近场光度测量领域仍处于国际领先水平的 TechnoTeam 公司，该公司产品在光度、色度测量精度以及测量尺寸方面均具有较大优势^[10-12]。近年研究学者继续在该领域深耕并不断突破现有技术瓶颈，Ingo Rotscholl 等人针对大视场成像式亮度测量过程中存在非均匀问题进行了深入研究，通过对目标表面亮度测量方向进行修正，实现了短焦距离下大尺寸显示器亮度均匀性的准确测量^[13]。Karel 等人对近场光度测量装置中的核心部件成像式亮度计进行了研究^[14]，提出了一种基于测量光敏原件光谱响应曲线同时评估相机捕获原始图像数据输出响应的方法，可以将消费级数码相机实现成像式亮度计的功能^[15]。近场测量过程中所获得的光线数据对于光线追踪的准确模拟必不可少，Audenaert 等人提出了一种基于采样的方法在保持光线数据高精度的同时实现了光源或灯具亮度分布的模拟，并通过对比实测亮度图像与模拟亮度图像对所提方法有效性进行了验证^[16]。浙江大学金耀辉等人针对近场分布光度测量系统中成像亮度计和驱动机械轴之间存在空间位置偏差而导致的测量误差问题进行了研究，提出了采用辅助灯进行辅助定位的解决方案^[17]。远方光电信息股份有限公司针对工业光源检测需求，自主研发了 GO-NR1000 小型近场光度计，可实现小尺寸光源光度参

量的检测，其测量精度已经达到国际水平^[18]。目前，国内对近场分布光度测量的研究一方面处于初步研发阶段，另一方面在大尺寸测量及精度方面还有待进一步提升。

本文对近场分布式光度计的测量原理、软硬件的具体结构，以及采用本文所提自主研发近场分布式光度计针对平面发光光源亮度空间分布、光强的测量结果均进行了详细介绍。自主研发大尺寸近场分布光度计可实现发光体亮度分布特性测量，并能够推演其他相关光度参量，包括远场光度参量，实现了国产大尺寸近场分布光度计的自主研发，将在照明显示、成像设计、机器视觉等诸多领域产生广泛的应用价值。

2 近场分布式光度计的测量原理

光源的空间亮度分布取决于对光源所有出射方向上的亮度测量，是光源的本质特征之一，式（1）表示了光源表面单位面积 $dS_l(x_l, y_l, z_l)$ 不同方向的亮度：

$$L(x_l, y_l, z_l, \theta_l, \varphi_l) = \frac{d\Phi_l}{dS_l(x_l, y_l, z_l) \cdot \cos \theta_l \cdot d\Omega_l(\theta_l, \varphi_l)} \quad (1)$$

其中，分子 $d\Phi_l$ 是方向 (θ_l, φ_l) 上单位立体角 $d\Omega_l(\theta_l, \varphi_l)$ 内的光通量， θ_l 是单位面源的法线 \overline{dS} 与单位立体角方向之间的夹角。如图 1 所示。

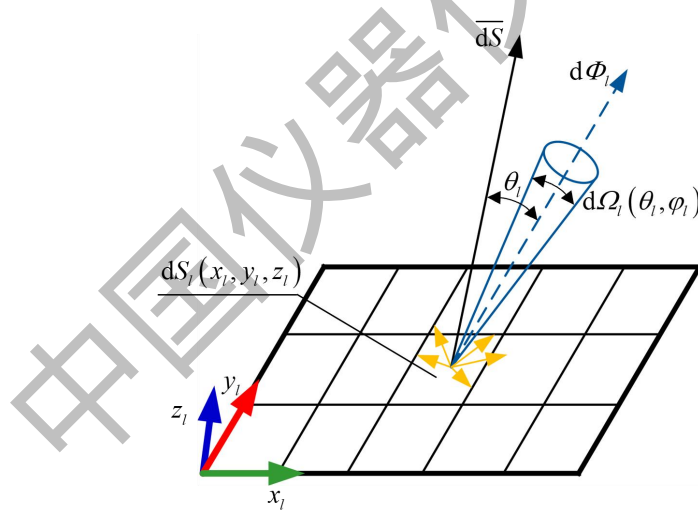


图 1 光源表面亮度分布图

近场分布式光度计采用特定的装置（成像亮度计）来捕获光源在各个光线出射方向上的亮度分布。通过将成像亮度计固定在机械转台上实现围绕光源的球面扫描，如图 2 所示。

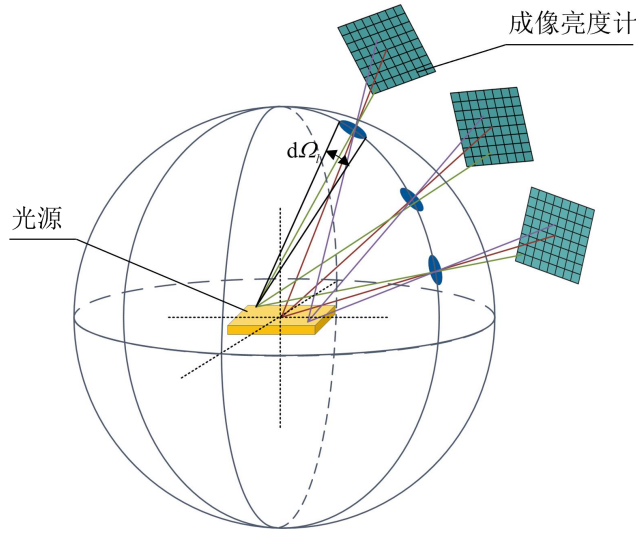


图 2 近场分布式光度计测量原理

实际上，发光平面与像平面的光通量关系如式（2）所示：

$$d\Phi_p(i, j) = d\Phi_l(x_l, y_l, z_l) \cdot \tau(i, j), \quad (2)$$

其中， $\tau(i, j)$ 代表成像亮度计物镜的透过率。 $d\Phi_l(x_l, y_l, z_l)$ 可写为公式（3）所示：

$$d\Phi_l(x_l, y_l, z_l) = L(x_l, y_l, z_l, \theta_l, \varphi_l) \cdot dS_l \cdot \cos\theta_l \cdot d\Omega_l. \quad (3)$$

由图 3 可知，若已知相机位置，则物体坐标可由成像亮度计 CCD 阵列上的图像坐标确定。为此，需确定相机入瞳位置，并校正物镜畸变。通过上述信息则可根据世界坐标系将图像数据转换成光线信息。

考虑光源的方向为 (θ_l, φ_l) ，那么在此方向上的光源的光强分布 $I(\theta_l, \varphi_l)$ 为^[19]：

$$I(\theta_l, \varphi_l) = \int_{S_l} L(x_l, y_l, z_l, \theta_l, \varphi_l) \cdot \cos\theta_l \cdot dS_l. \quad (4)$$

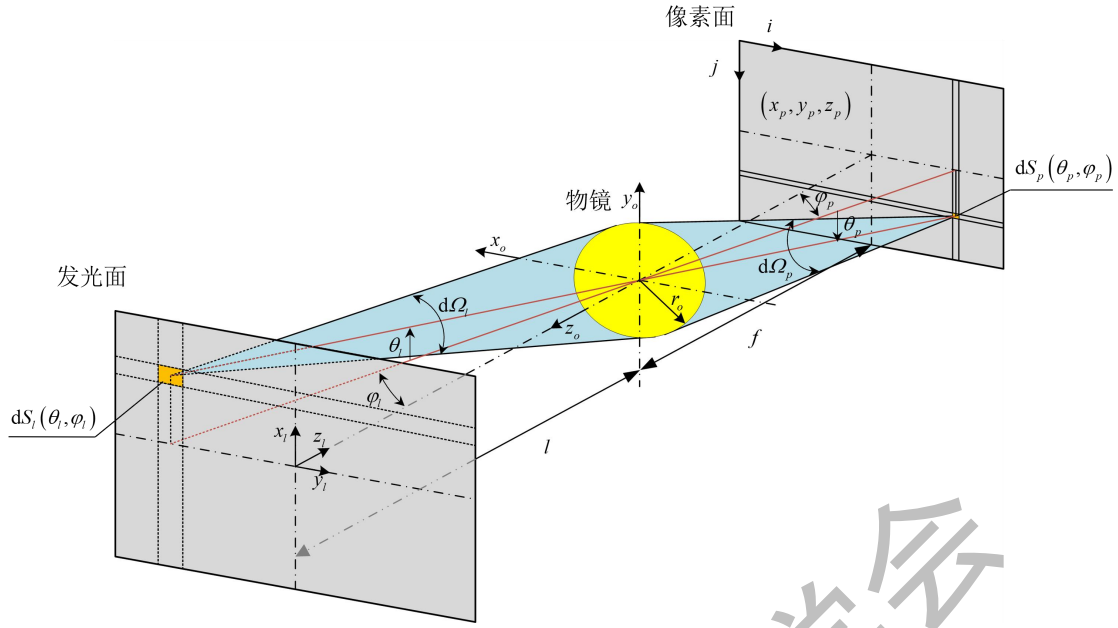


图3 光线数据传递示意图

近场测量利用采集得到的亮度信息构建待测光源的近场模型,通过光学参量转换反演出光强分布,同时获得包含光源光线矢量的光线数据。由于近场测试结果更接近光源的真实发光情况,因此,可将其用在 ZEMAX、TracePro 等光学仿真软件上^[20]。

为准确描述光源发光情况,实现光线数据的生成,对近场分布式光度计测量过程进行分析,建立以发光平面中心位置为原点的世界坐标系,以其起始方向所在直线为 x_l 轴,坐标系满足右手定则。初始状态下世界坐标系下虚拟平面光源任意一点位置 (x, y, z) 对应的像素位置为 (x_0, y_0, z_0) , 其绕 z_l 轴旋转 α , 绕 x_l 轴俯仰 β 后像素坐标变为 (x_p, y_p, z_p) , 转换关系如下式所示:

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = R_{x_l}(\beta) R_{z_l}(\alpha) \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + T, \quad (5)$$

其中, T 为平移矩阵, $R_{z_l}(\alpha)$ 为绕 z_l 轴旋转角度 α 的旋转矩阵, $R_{x_l}(\beta)$ 为绕 x_l 轴俯仰角度 β 的俯仰矩阵, $R_{z_l}(\alpha)$ 和 $R_{x_l}(\beta)$ 分别为

$$R_{z_l}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$R_{xy}(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

3 近场分布式光度计的研发

3.1 近场分布式光度计硬件结构

所研制的近场分布式光度计的硬件结构主要包括探测器单元、机械运动单元和控制主机单元。探测器单元包括成像亮度计模块和分光辐射度计模块，机械运动单元是一种精密角度控制装置，包括俯仰旋转台和水平旋转台，分别控制俯仰角和水平角，二者的角度精度和角度重复性精度是保证光学量测量精度的前提。控制主机单元包括电源模块、人机交互、微处理器模块、输入输出接口模块等，具体硬件设计框图如图 4 所示。

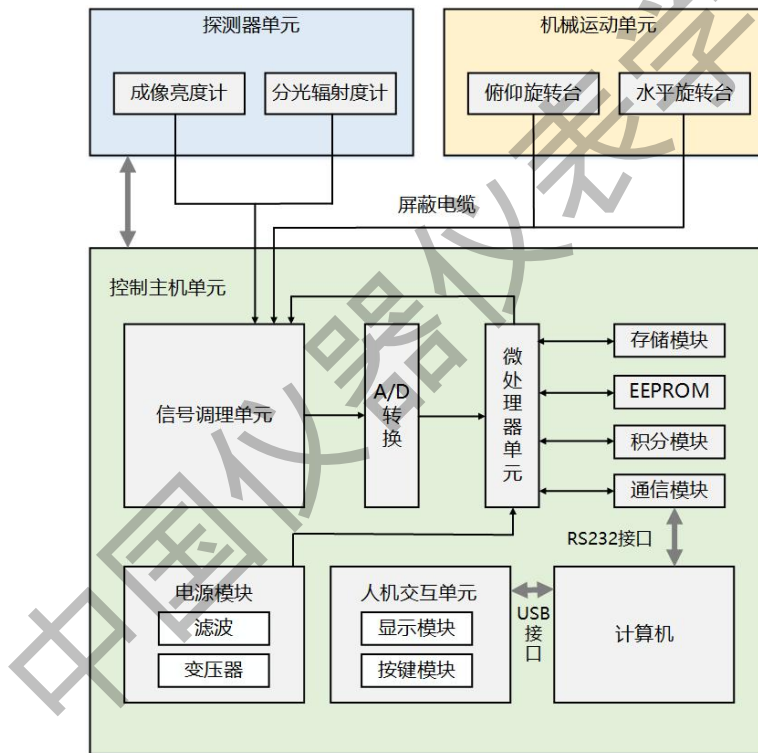


图 4 光度计硬件框图

其硬件结构示意图如图 5 所示。机械扫描采集单元包括机架支撑单元和测量执行单元两部分，外部框架为机架支撑单元，内部最小的矩形框为测量执行单元。

外部支撑单元由外铝型材框构成，其底部安装有方便调节水平的脚杯，外铝型材框内安装有拖链连接板、垫块、回转零点垫块和光电开关。测量执行单元主体由内铝型材框构成，为加强铝型材框强度，其两侧面位置分别安装了加强板，在其下端位置设计了直角连接板。顶部位置安装有上回转支撑板，上回转支撑板位置安装有调心球轴承，旋转轴连接板安装在

内铝型材框内右侧，在旋转轴连接板上安装旋转伺服电机和旋转谐波减速机。定心轴安装在旋转谐波减速机端面并与基座连接板相连接且定心轴上刻有 360°分度标识，同时在旋转轴连接板上安装有指针便于识别定心轴实时旋转角度。

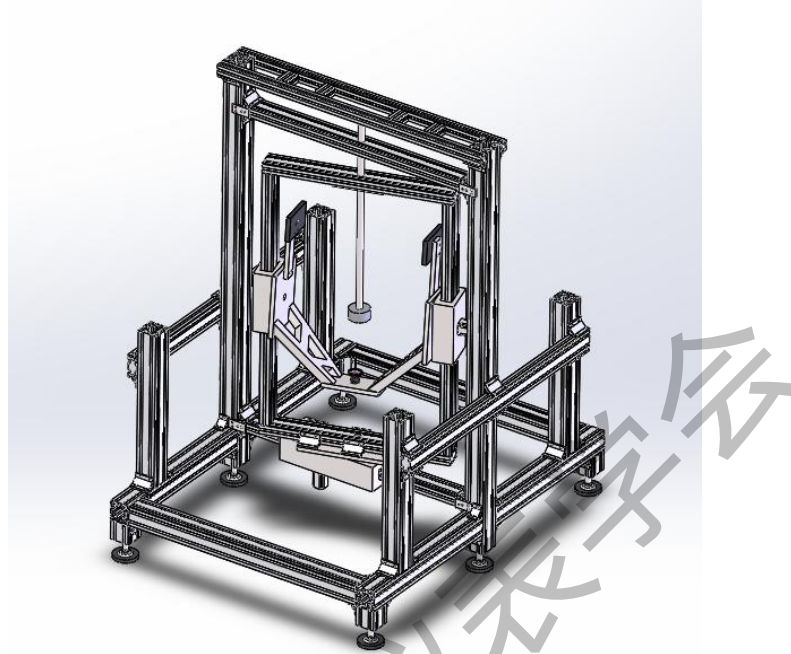


图 5 近场分布式光度计结构

因内框架上安装有成像亮度计和伺服电机，其通信线缆和电源线缆需与内框架一起回转，为避免线缆相互缠绕，特殊设计了近场分布式光度计的布线。回转电机安装板上安装有外圈，回转减速机法兰上安装有内圈，外圈和内圈之间安装有 S 型拖链并贴合在其表面上，线缆穿过 S 型拖链并从回转减速机法兰开孔处引出。如此设计可使得外框架和内框架在进行 360°旋转运动时，线缆一直在 S 型拖链内同步做旋转运动，从而确保线缆摆脱缠绕。

3.2 近场分布式光度计的软件架构

近场分布式光度计的软件配合硬件开发，集成了机械臂扫描功能、亮度采集功能、格式转换功能、数据导出功能、测量任务功能等，在近场分布式光度计国产化研制的过程中，数据处理与可视化软件是仪器软件开发的重要工作之一，由于近场测量采集的数据量大，对数据的高效处理并将处理后的数据进行可视化显示是研发的重点。另外，为了实现数据的采集，仪器的自动化控制也至关重要。

所研制软件架构如图 6 所示，其主要有四个模块：人机交互模块、业务逻辑模块、数据访问模块、通讯接口模块。人机交互模块主要包括图形操作界面，用户响应，数据的可视化显示和数据格式转换，业务逻辑模块主要包括指令请求，流程控制和数据处理，数据访问模

块包括数据存储和文件解析，通讯接口模块主要负责伺服电机和成像亮度计的通讯。各个模块配合确保仪器顺畅平稳运行。

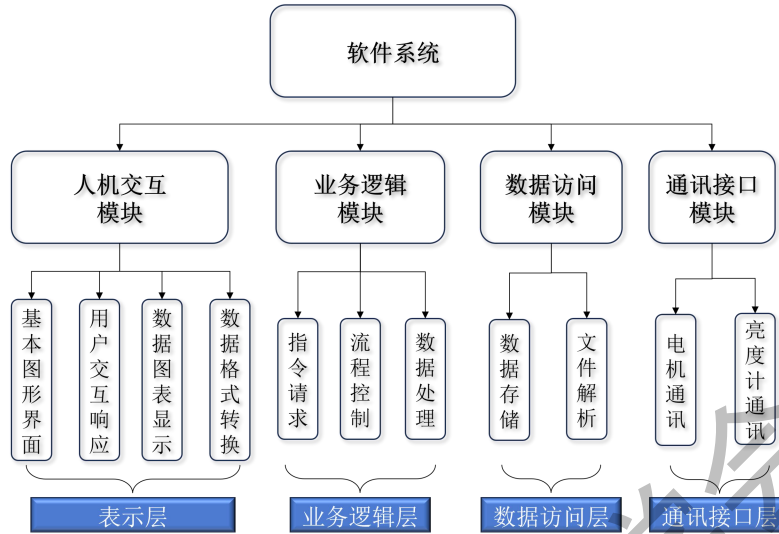


图6 软件架构

4 近场分布式光度计实验及结果

4.1 近场测量实验

为避免杂散光对实验结果造成的不良影响，降低测量误差，整个实验过程在标准暗室环境下进行。实验开始前，首先将被测发光体固定在测量系统水平轴和俯仰轴两者交叉轴线上。然后打开待测光源和成像亮度计开关，调节光度计的焦距使其焦平面与发光体的发光面重合，在垂直方向上保证发光体的几何中心和光度计的测量焦点在水平轴和俯仰轴的交叉轴线上。准备工作做好后，将发光体和测量系统开机预热，待各设备稳定后进行测量实验。

实验过程中，选取平面光源作为被测发光体，对其 2π 空间范围内的亮度和光强分布特性进行测量，具体水平轴和俯仰轴的旋转参数可在自研软件上位机界面设定，水平轴在 $0-180^\circ$ 范围间隔 5° 旋转，俯仰轴在 -90 到 90° 范围间隔 5° 旋转。规定水平轴每旋转 5° ，俯仰轴都遍历整个运动范围。待具体旋转方式和保存路径设定好后，开启设备使光度计扫描并采集图像，扫描过程光度计按照设定的角度围绕待测平面光源做球面运动，完成整个半球空间下光源亮度特性分布的数据采集。实验所采用成像亮度计分辨率为 1920×1200 。

4.2 结果分析与讨论

1) 亮度测试结果

光源在各个方位上的亮度分布数据是近场测试的基础数据，采用自研近场分布式光度计对待测光源在整个半球空间范围进行扫描测试，扫描半径为 300mm ，并选取水平轴在 0° 方向俯仰轴在 -75° 到 75° 方位间隔 5° 下的部分亮度图像进行展示，具体结果如图7所示，从图

7中可以观察到，随着俯仰轴在正负方向上的转动幅度增大，探测到的待测光源在亮度图像中的发光面积不断减小。扫描过程中得到的亮度图像可用于分析该方位发光面的亮度均匀性，可将其应用于显示器件以及灯具的亮度检测，例如对受不同发光芯片、内表面荧光粉涂布以及灯具装配等因素影响导致的LED平面光源阵列表面亮度分布不均进行检测，通过近场分布式光度计得到的亮度数据可为优化平面LED光源发光均匀性提供关键数据支撑。

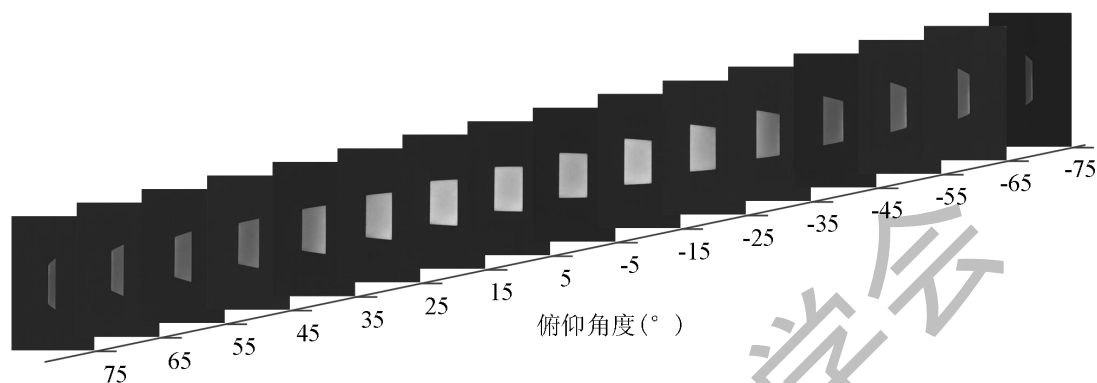


图7 平面光源在水平轴 0° 方向上不同俯仰方位的亮度图像

基于高精度的亮度扫描数据可以准确表征待测光源的发光分布特性，为保证获得的亮度扫描结果的准确性，分别采用自研成像式亮度计和经过标定的瞄点式亮度计对待测光源进行测量，作为测量标准的瞄点式亮度计为日本KONICA MINOLTA公司的CS2000型号，该设备已在中国计量科学研究院进行标定和校准。根据瞄点式亮度计测量的位置确定成像式亮度计测量得到的亮度图像的对应位置，比较相同位置下两种亮度计测量得到的亮度值，并将成像式与瞄点式两种亮度计获得的亮度数据进行比较分析如图8所示，图8(a)表示两亮度计在对应位置时测量的亮度值比较结果，图8(b)表示成像式亮度计测量结果的绝对和相对误差，从图8(a)中可以看出，在水平方位角相同俯仰角变化的情况下两者测量值趋势一致，图8(b)显示，两者最大绝对误差为 1227.39cd/m^2 ，亮度相对误差低于7.87%。

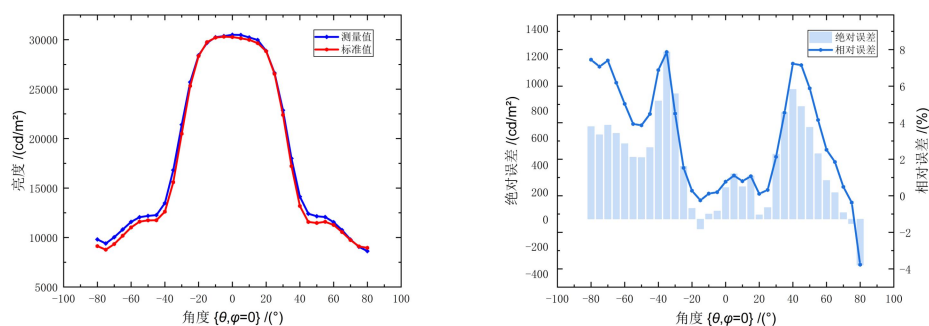


图8 两种亮度计测量结果对比 (a)亮度测量结果对比图; (b)亮度绝对和相对误差图

2) 光强测试结果

实验过程中, 成像亮度计绕待测光源旋转扫描, 对整个半球空间的发光面进行拍摄, 获得各个方向亮度图像。基于成像光度理论构建虚拟平面发光模型, 并根据获取的亮度图像和空间位姿变换得到光源的空间强度分布。为验证近场测量的方法的有效性, 将水平扫描轴方位角为 0° , 俯仰轴角度在 -80° 到 80° 范围内近场反演结果与远场测量结果进行比较, 远场光强分布结果采用计量院校正的 GO-R5000 全空间快速分布光度计在远场条件下进行测量, 将近场和远场的光强分布绘制在直角坐标系下, 其结果如图 9 所示。

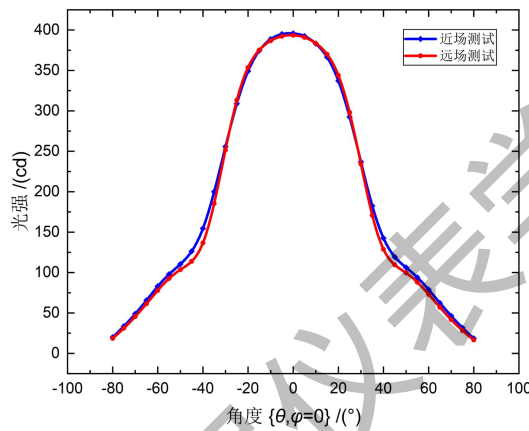


图 9 近场和远场光强分布结果对比图

图 9 展示了光强随俯仰角度变化的分布图, 从图中可以看出近场和远场光强角度分布特性曲线接近重合, 两者整体趋势一致, 根据光强匹配指数函数 ξ (见公式 8) 对近场和远场测试的光强分布一致程度进行了评估^[21], 两者光强匹配指数高达 98.47%。该结果表明采用自研的近场分布光度计可较为准确的测量计算被测光源的发光强度分布。

$$\xi = 100 \left(1 - \frac{\sum_{\phi=0}^{2\pi} \sum_{\theta=0}^{\pi} (I_1(\theta, \phi) - I_2(\theta, \phi))^2}{\sum_{\phi=0}^{2\pi} \sum_{\theta=0}^{\pi} (I_1(\theta, \phi) + I_2(\theta, \phi))^2} \right), \quad (8)$$

式中, $I_1(\theta, \phi)$ 为远场条件测试结果, $I_2(\theta, \phi)$ 为近场条件测试结果。

5 结论

本文对自主研发的大尺寸近场分布式光度计进行了介绍, 并采用该设备对平面光源的亮度分布特性进行扫描采集, 进一步基于成像光度理论建立虚拟平面光源发光模型, 根据获取的亮度图像和空间位姿变换得到光源的空间强度分布。为验证自研设备的准确性和可靠性,

采用中国计量研究院标定的设备分别对亮度以及远场条件下的光强分布特性进行了测量,并与自研近场分布式光度计的测量计算结果进行比较。结果表明两者测量的亮度相对误差低于7.87%,光强分布相似度指数高达98.47%。所研制近场分布式光度计可准确测量被测光源的近场亮度特性,并能推演计算其他相关光度参量,可作为一种高精度通用设备推广使用,将在照明显示、成像设计以及文物保护等领域产生广泛的应用价值。

参考文献:

- [1]郝允祥,陈遐举,张保洲. 光度学[M]. 北京:中国计量出版社,2010.
- [2]金伟其,王霞,廖宁放,等. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京:北京理工大学出版社,2016.
- [3]JACOBS V, FORMENT S, ROMBAUTS P, et al. Near-field and far-field goniophotometry of narrow-beam LED arrays [J]. *Lighting Research & Technology*, 2015, 47(4): 470-482.
- [4]胡博. 远场和近场分布光度测试系统的比较分析[D]. 大连:大连工业大学,2019.
- [5]中国国家标准化管理委员会. 灯具分布光度测量的一般要求: GB/T 9468-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [6]Schmähling F, Wübbeler G, Lopez M, et al. Virtual experiment for near-field goniophotometric measurements[J]. *Applied optics*, 2014, 53(7): 1481-1487.
- [7]Rotscholl I, Trampert K, Krüger U, et al. Spectral near field data of LED systems for optical simulations[C]. *Photonics and Education in Measurement Science 2019*. SPIE, 2019, 11144: 155-163.
- [8]Gassmann F, Krueger U, Bergen T, et al. Comparison of luminous intensity distributions[J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(1): 62-83.
- [9]RIEMANN M, SCHMIDT F, POSCHMANN R. Zur Bestimmung der Lichtstärkeverteilung von leuchten innerhalb der fotometrischen Grenzentfernung mittels eines bildauflösenden Gonimeters [J]. *Licht*, 1993, 7(8): 592-597.
- [10]ROTSCHOLL I, TRAMPERT K, KRÜGER U, et al. Determination of tailored filter sets to create rayfiles including spatial and angular resolved spectral information [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29543-29554.
- [11]GASSMANN F, KRUEGER U, BERGEN T, et al. Comparison of luminous intensity distributions [J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(1): 62-83.

- [12] Techno Team Bildverarbeitung GmbH. General specification: Model series 1400, 1500, 1800, 2000 [R]. Ilmenau: Techno Team Bildverarbeitung GmbH, 2018.
- [13] Rotscholl I, Krüger U. Short distance uniformity and BlackMURA measurements[J]. Journal of the Society for Information Display, 2021, 29(5): 370-381.
- [14] Krüger U, Rotscholl I, Fong A. 71 - 4: Imaging Luminance Measuring Devices (ILMDs) - Characterization and Standardization with Respect to Display Measurements[C].SID Symposium Digest of Technical Papers. 2020, 51(1): 1067-1070.
- [15] Fliegel K, Havlin J. Imaging photometer with a non-professional digital camera[C]. Applications of Digital Image Processing XXXII. SPIE, 2009, 7443: 504-511.
- [16] Audenaert J, Durinck G, Leloup, Frédéric Bernard, et al. Simulating the spatial luminance distribution of planar light sources by sampling of ray files[J]. Optics Express, 2013, 21(20):24099-24111.
- [17] 金耀辉. 近场分布光度测量技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [18] 李晓妮, 陈聪, 吕杰, 等. 近场光度测量技术及其应用实例分析[J]. 中国照明电器, 2018(9): 28-32.
- [19] Lopez M, Bredemeier K, Rohrbeck N, et al. LED near-field goniophotometer at PTB[J]. Metrologia, 2012, 49:S141-S145.
- [20] 范红忠, 曹民, 李抒智, 等. 光源近场测量在 LED 光学设计中的应用与研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12).
- [21] Bergen A. A practical method of comparing luminous intensity distributions[J]. Lighting Research & Technology, 2012, 44(1): 27-36.