

近场分布式光度计的研究进展及应用

何泽浩 王洪远 闵锐 曹良才

Research progress and applications of near-field goniophotometer

HE Zehao, WANG Hongyuan, MIN Rui, CAO Liangcai

引用本文:

何泽浩, 王洪远, 闵锐, 等. 近场分布式光度计的研究进展及应用[J]. 应用光学, 2024, 45(1): 17–25. DOI: 10.5768/JAO202445.0101003

HE Zehao, WANG Hongyuan, MIN Rui, et al. Research progress and applications of near-field goniophotometer[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(1): 17–25. DOI: 10.5768/JAO202445.0101003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0101003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一款新型高精度全自动多波段太阳光度计

Novel high-precision full autocontrol multi-waveband sun photometer

应用光学. 2019, 40(1): 105–112 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0105001>

基于累加平均的分布式光纤拉曼测温系统

Distributed fiber Raman temperature measurement system based on cumulative average

应用光学. 2018, 39(4): 590–594 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0408002>

基于分布式光纤的埋地自来水管多点泄漏定位方法分析

Analysis on underground water pipes multi-point leakage location method based on distributed optical fiber

应用光学. 2020, 41(1): 228–234 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0108002>

面向冰盖剖面的高空间分辨率分布式光纤测温系统设计

High spatial resolution distributed optical fiber temperature measurement system for ice cover profile

应用光学. 2021, 42(5): 941–948 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508003>

高能激光远场辐照度分布测量技术及其进展

High energy laser far-field irradiance distribution measurement technology and its developments

应用光学. 2020, 41(4): 675–680 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409004>

分布式光纤声波振动传感系统研发及应用

Development and application of distributed optical fiber acoustic vibration sensor system

应用光学. 2020, 41(6): 1298–1304 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0608002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0017-09

近场分布式光度计的研究进展及应用

何泽浩, 王洪远, 闵锐, 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: 亮度计成像精度、存储器数据容量和计算机运算能力决定了近场分布式光度计的探测能力。随着成像技术和计算机技术的发展, 近场分布式光度计的测量性能有了革命性的提升。介绍了近场分布式光度计的工作原理, 归纳了近场分布式光度计相对于远场分布式光度计的优势。综述了国内外近场分布式光度计的研究进展, 对比了部分国内外产品的性能指标。针对近场分布式光度计元数据精度不足、扫描重构速度偏慢和溯源装置适应性受限的现状, 从部件、软件和系统等方面归纳了相应的解决方案。结合近场分布式光度计的特点和优势, 展望了其在照明显示、交通运输、工业视觉和文物保护等领域的应用。

关键词: 光度测量; 照明测量; 显示测量; 分布式光度计; 近场分布式光度计

中图分类号: TN29; O432

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0101003

Research progress and applications of near-field goniophotometer

HE Zehao, WANG Hongyuan, MIN Rui, CAO Liangcai

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The performance of near-field goniophotometer (NFG) was determined by the imaging accuracy of the luminance meter, data capacity of the disk and computing power of the computer. With the development of imaging technology and computer technology, the performance of NFG has been improved dramatically. The theoretical principle of NFG was introduced, and the merits of NFG compared with far-field goniophotometer were summarized. The development status of NFG was reviewed, while some typical NFGs at home and abroad were compared. In view of the current situation of NFG, including insufficient accuracy of metadata, slow scanning reconstruction speed and limited traceability, the possible solutions from the aspects of components, software and systems were presented. Combined with the characteristics and advantages of NFG, its applications in lighting, display, transportation, industrial vision and cultural relic protection were prospected.

Key words: photometry; illumination measurement; display measurement; goniophotometer; near-field goniophotometer

引言

辐射度学是一门以电磁辐射为研究对象的科学, 测量辐射度学参量的仪器称为辐射度计。在光学领域, 辐射度学的研究对象主要是可见光及

其附近波段的电磁辐射。实际应用中, 可见光波段的研究不仅需要考虑到电磁辐射的客观度量, 还需要考虑到人眼视觉对电磁辐射的生理和心理响应。包含了人眼视觉因素的辐射度学又被称为光

收稿日期: 2023-04-26; 修回日期: 2023-08-03

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF0705500)

作者简介: 何泽浩 (1991—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事全息三维显示、全息视频通信和显示测量等研究。

E-mail: hezehao@mail.tsinghua.edu.cn

通信作者: 曹良才 (1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事全息光学、计算光学和光学测量研究。

E-mail: clc@tsinghua.edu.cn

度学,该学科涉及的物理参量包括发光强度、光通量、照度和亮度^[1]。测量上述光度学参量的仪器称为光度计。可见,光度计是一种具有“标准人眼”视觉响应的辐射度计。

发光体的辐射分布具有特定的空间特性,因此光度学测量必须考虑不同方向上的光度量。为此,测量过程需要在空间不同位置处部署光度计等测量设备,这一测量特性通常被描述为“分布式”。当前,在空间不同位置处部署光度计的任务通常通过机械扫描装置实现,这一装置也常被称为测角仪。机械扫描装置和光度计共同组成的设备被称为分布式光度计,其英文名称“goniophotometer”的前缀“gonio”即为希腊语“角度”之意^[2]。基于机械扫描装置,分布式光度计可测量 4π 球面全部或部分方向上特定种类的光度学参量,进而基于不同光度学参量间的换算关系可实现发光体空间光辐射分布的数值重构。重构结果常常被绘制为发光强度值相对于角度的变化曲线,该曲线称为配光曲线,是发光体光辐射分布的最常见呈现形式。

根据不同的分类标准,分布式光度计可被分为不同的类型。根据光度计和待测发光体构成的坐标系,可将分布式光度计分为A- α 型、B- β 型和C- γ 型等3个常见类别,它们各适用于交通灯具、投光灯具和室内灯具的光度测量^[3]。本文基于灯具尺寸和测量距离间的关系,将分布式光度计分为远场和近场两类^[4-6]。远场分布式光度计(far-field goniophotometer, FFG)基于远场近似条件实现光度参量的测量,近似条件包括将发光体视为点光源,将空间任意光线视为由该点出射和假设不同方向的出射光线性质相同。因为物理模型较为简单,FFG需处理的数据量少,空间辐射分布的重构速度快,对于朗伯发光体的重构效果较好。不过,FFG要求被测发光体和探测器之间的距离大于发光体最大尺寸的5倍以上,测量过程占用空间大;测量过程对发光体过度简化,限制了照明距离较近时空间辐射分布的重构精度。此外,不少新型发光体的辐射特性与朗伯体差异显著,FFG难以准确描述它们的光学性能。近场分布式光度计(near-field goniophotometer, NFG)的出现一定程度上解决了FFG面临的问题。本文将从NFG的原理出发,比较NFG相对FFG的优点,综述NFG的发展现状,分析NFG面临的挑战并提出相应的解

决方案,进而展望NFG在照明显示、交通运输、工业视觉和文物保护等领域的应用。

1 近场分布式光度计的测量原理

1987年,NGAI P Y首先提出了NFG的概念^[7]。如图1(a)所示,NFG通常由2个相互垂直的旋转轴组成,旋转轴连接扫描框架,而扫描框架上安装有NFG的核心组件——成像亮度计。扫描框架旋转时,成像亮度计的运动轨迹位于半径为 R 的扫描球面上,同时待测发光体放置于扫描球面内部。显然,待测发光体的最大尺寸应小于扫描球面的直径 $2R$ 。

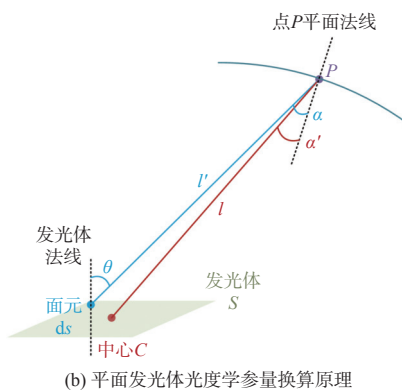
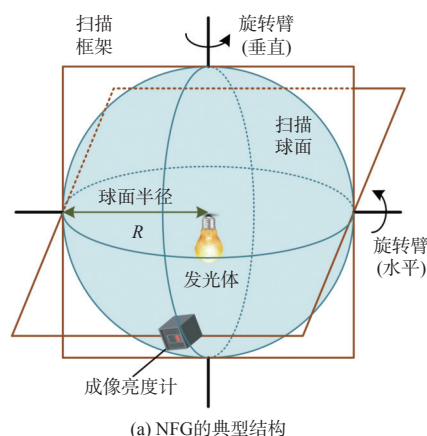


图1 NFG测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of NFG-based measurement

成像亮度计的核心器件是CCD和CMOS等二维成像传感器,它可以在球面扫描过程中采集所有可达位置的亮度图像^[8]。由于指定方向上的亮度值和光线传播距离无关,即使成像亮度计的运动轨迹始终位于扫描球面上,其特定位置上采集到的亮度图像也可描述该方向上任意距离处的光辐射特性,并可基于光度学参量间的换算关系求解不同距离上的发光强度和照度等参量。以

图 1(b)所示的面积为 S 的平面发光体为例, 已知亮度为 $L(x, y, \theta, \varphi)$ 时, 发光强度和照度可由式(1)和式(2)求解:

$$I(l, \theta, \varphi) = \frac{l^2}{\cos \alpha} \iint_S \frac{L(x, y, \theta, \varphi) \cos \theta \cos \alpha'}{(l')^2} ds \quad (1)$$

$$E(l, \theta, \varphi) = \iint_S \frac{L(x, y, \theta, \varphi) \cos \theta \cos \alpha'}{(l')^2} ds \quad (2)$$

式中: I 为发光强度; E 为照度; l 为发光体中心 C 到任意空间点 P 的距离; l' 为发光体上的面元 ds 到点 P 的距离; α 为 CP 连线与点 P 所在平面法线的夹角; α' 为 ds 发出的光线与点 P 所在平面法线的夹角; θ 为 ds 发出的光线与发光体平面法线的夹角。当点 P 与发光体之间的距离远远大于发光体尺寸时, l' 趋近于 l , α' 趋近于 α , 此时的发光强度可表示为

$$I(l, \theta, \varphi) = \iint_S L(x, y, \theta, \varphi) \cos \theta ds \quad (3)$$

式(3)表明, 基于 NFG 同样可以计算远场的空间光辐射分布。

与 FFG 相比, NFG 在设备体积和可推演性等方面具有显著优势, 极大扩展了应用范围, 主要体现在以下两个方面:

1) NFG 占用体积小, 测量过程鲁棒性强。FFG 的工作过程需要满足远场近似条件, 相比之下, NFG 的工作过程无需满足远场近似条件, 设备尺寸理论上大于被测发光体的最大尺寸即可。因此, 使用 NFG 进行光度测量时占用的空间体积较小, 适用于大尺寸发光体的光度测量。同时, 在获取 4π 全空间光辐射特性的过程中, NFG 通常无需对被测发光体进行旋转和平移, 避免了因发光体机械移动导致的性能波动, 提升了测量结果的鲁棒性。

2) NFG 可推演性强, 远/近场光度学参量的恢复精度高。FFG 的测量过程将发光体视为点光源, 相比之下, NFG 无需预设光源形状。NFG 可测量的发光体最大尺寸接近其扫描框架尺寸, 成像亮度计采集到的图像是被测发光体各角度下的近场亮度图像。根据亮度的距离不变性, NFG 可推演复杂形状光源任意传播距离处的光度分布, 突破了 FFG 难以重构近场光度分布的难题。同时, NFG 还可基于亮度和其他参量间的换算关系, 推演被测发光体的任意光度学参量, 极大扩展了可测量参数的种类。

基于上述特点, NFG 拥有更广的适用范围。由于 NFG 不会将发光体近似为点光源, 因此可用于平面、曲面等不同形状光源的检测。同时, NFG 上安装的成像亮度计可以在扫描过程中捕捉发光体在扫描球面上全部或部分区域的亮度图像。基于不同角度下的亮度图像进行配光计算, 可以获得 4π 全空间内发光体中心坐标、光线传播方向和任意方向光通量等特征信息。即使被测发光体具有各项异性的发光特性, NFG 也可以进行精确的测量与重构。随着 ASAP、Speos、Light Tools 和 Zemax 等常用光学设计软件的发展, 将 NFG 获取的光线文件应用于光学设计软件, 可进一步模拟光线经过滤波片、反射镜等光学组件后的传播特性, 进而大幅降低新型光学组件的开发难度, 在近场光学组件开发领域具有广阔的应用前景。

2 近场分布式光度计的发展现状

20 世纪 90 年代初, 德国伊尔梅瑙工业大学 RIEMANN M 团队率先开发了 NFG 原型机, 首次基于亮度图像实现了发光强度和总光通量的重构^[9]。团队成员 SCHMIDT F 等人创建的 Techno Team 公司当前已成长为 NFG 领域的龙头企业, 其推出的 RiGO801 系列 NFG 拥有众多细分型号, 可以实现各类发光体的光度测量, 如 LED/OLED 芯片、照明灯泡、固体照明模块、车用照明组件和特种光源等^[10-13]。其中, 型号为 RiGO801-2000 的大型 NFG 可测量直径为 2 000 mm, 其亮度测量误差、色坐标测量精度、发光强度测量误差和扫描角度定位精度等关键参数均到达了国际先进水平, 已在中大型发光组件的开发和制造领域得到了广泛应用, 是汽车照明行业的标杆性测量仪器。

美国 Radiant 公司是 NFG 领域的重要参与者。在 ALBRECHT 等人的带领下, 该公司于 1996 年推出了型号为 SIG-100 的第一代 NFG 产品。该产品一经面世便被电影放映行业关注, 随后在高功率弧光灯的表征和优化领域得到了广泛应用。当前, SIG 系列已更新至第四代产品 SIG-400, 主要用于测量直径小于 200 mm 的 LED 芯片和发光组件, 其优势体现在系统集成性强、近场测量精度高和软件功能完善等方面^[14]。其中, SIG-400 配套的软件 ProSource 可以推演指定距离处的光度分布, 生成的数据可导出为 IES 和 ELUMDAT 格式文件, 与常用光学设计软件的兼容性较好, 可为 LED 性

能表征和设计优化提供经济高效的解决方案^[15]。

加拿大 ASHDOWN I 团队自 1993 年开始进入 NFG 领域,在 NFG 光线重构理论、计算优化技术和光源建模方法等方面取得了开拓性成果^[16-19];德国联邦物理技术研究所针对 NFG 开展了长期研究,突破了系统仿真设计、光机电系统构建和杂散光抑制等方面的部分难题^[20-22];比利时鲁汶大学在 NFG 领域进行了系统性的研究,研究内容涵盖动态范围失配误差消除和基于 NFG 的光学组件精确建模等方面^[23];德国 Instrument Systems 公司制造了 LGS-1000 型号的分布光度计,可以实现远场测量和近场测量的模式切换,其近场测量模式通常针对直径小于 200 mm 的发光体^[24]。

国内研究团队正针对 NFG 软硬件领域的核心技术开展技术攻关。大连工业大学基于 CA2000 成像亮度计搭建了近场光度测试系统,比较了近场和远场光度测量的性能差异^[25-26];浙江大学研究了成像亮度计和机械扫描装置中可能存在的测量误差,并在 NFG 空间位置误差的消除方面开展了探索性研究^[27];杭州远方光电在 NFG 领域开展了系列研究^[28-29],领导撰写了该领域重要的标准性出版物 CIE 239: 2020^[30],同时自主研制了如图 2(a)所示的 GO-NR1000 型 NFG,实现了直径 30 mm 以下发光体的光度检测,可以精确测量远近场任意位置的光度分布,且发光强度测量误差等关键性能指标达到了国际先进水平;清华大学在 NFG 领域进行了深入探索^[31],其自主开发的 GP600 型 NFG,如图 2(b)所示,最大可测量直径已达 600 mm,光场重构速度接近国外高端产品水平,能够用于中大型照明与显示设备的精确检测。



图 2 国产 NFG 典型产品
Fig. 2 Typical domestic NFG products

国内外 NFG 领域部分代表性的研究机构、产品型号和功能特点如表 1 所示。总体来看,商业化的 NFG 产品虽然较少披露技术细节,但绝大多数

产品的基本原理均是分布式扫描和基于亮度不变性的光度学参量换算关系。经过 30 余年的发展,面向小尺寸发光体测量的小型 NFG 产品已较为成熟,部分国产设备的测量精度已达到了国际先进水平。但是,当前面向大尺寸发光体测量的大型 NFG 产品种类依然较少,Techno Team 公司的 RiGO801 系列占据了市场的大部分份额。清华大学在大尺寸 NFG 领域获得了阶段性的技术突破,但其产品的最大可测量直径和 Techno Team 比较仍有差距。相比于小型 NFG 产品,大型 NFG 产品面临的技术挑战主要集中在两个方面:第一,大型 NFG 产品对系统和部件的结构强度、控制精度和标定精度提出了更严格的要求,设计和制造需要更高的工艺技术水平;第二,大型 NFG 产品扫描测量过程中获取的数据量更大,数据的处理过程需要依靠更强大的硬件和更高效的算法。随着高端照明、先进显示、道路交通、工业检测和文物保护等领域的蓬勃发展,精确获知发光体的辐射分布正变得越来越重要。因此,突破 NFG 领域的技术挑战,实现大尺寸、高精度和超快速的光度学参量重构,具有越来越重要的经济和社会价值。

表 1 国内外代表性 NFG 产品对比
Table 1 Comparison of representative NFG products at home and abroad

序号	研发机构	国家	型号	特征
1	Techno Team	德国	RiGO801-2000	尺寸: 3.6×3.6×4.1 m ³ 最大测量直径: 2000 mm 最大转角(竖直): 360° 最大转角(水平): ±174°
2	Radiant	美国	SIG-400	尺寸: 0.71×0.56×1.25 m ³ 最大测量直径: 212 mm 最大转角(竖直): 360° 最大转角(水平): ±140°
3	Instrument Systems	德国	LGS-1000	尺寸: 1.85×1.49×1.80 m ³ 最大测量直径: 200 mm 最大转角(竖直): 360° 最大转角(水平): ±165°
4	杭州远方光电	中国	GO-NR1000	最大测量直径: 30 mm 最大转角(竖直): 360° 最大转角(水平): ±118°
5	清华大学	中国	GP600	尺寸: 2.0×1.6×2.2 m ³ 最大测量直径: 600 mm 最大转角(竖直): 360° 最大转角(水平): ±150°

3 近场分布式光度计的挑战与解决方案

3.1 高精度的亮度元数据测量

准确重构待测发光体各类光度学参量的前提是获得精确的亮度元数据。NFG 的元数据是不同角度上的亮度数据, 因此成像亮度计的测量精度和可靠性是 NFG 性能指标的关键影响因素。当前, 成像亮度计在视觉响应曲线匹配、线性动态范围扩展和非定标位置测量精度提升等方面面临技术挑战。成像亮度计的三刺激值光谱匹配是国际公认难题, 当成像亮度计的光谱响应度曲线偏离标准人眼视觉响应曲线时, 仪器测量不同光谱发光体时就会产生光谱失配误差, 进而制约 NFG 测量精度提升。同时, 成像传感器芯片的动态范围容易受到工作温度和电路制造工艺的影响, 有限的单元动态范围制约了亮度图像的线性动态范围, 进而限制了 NFG 的测量和重构精度。此外, 成像亮度计在定标距离处的测量精度最高, 当实际

测量距离受到待测目标尺寸和形状的影响而偏离定标距离时会产生测量误差, 进而降低 NFG 测量数据的精确性。

如图 3 所示, 提升成像亮度计的元数据测量精度, 需要提升器件的视觉响应曲线匹配精度, 优化电路工艺和制冷水平, 并消除非定标距离处的测量误差。为此, 需要面向成像亮度计研制透过波长与人眼三刺激值匹配度更高的膜系材料, 提升成像镜头和滤色片的镀膜工艺, 使成像亮度计的光谱响应函数更接近“标准人眼”视觉响应曲线; 开发自适应的光谱匹配算法, 基于传感器和人眼光谱响应曲线之间的对应关系, 将原始测量数据转换为与人眼三刺激值高度匹配的优化数据。同时, 需要提升成像亮度计的制冷水平, 优化采样和前置放大电路的制造工艺, 利用阻抗匹配和 AD 转换等手段, 结合成像传感器动态范围的校正方法, 实现低阈值和大范围的成像式亮度测量。

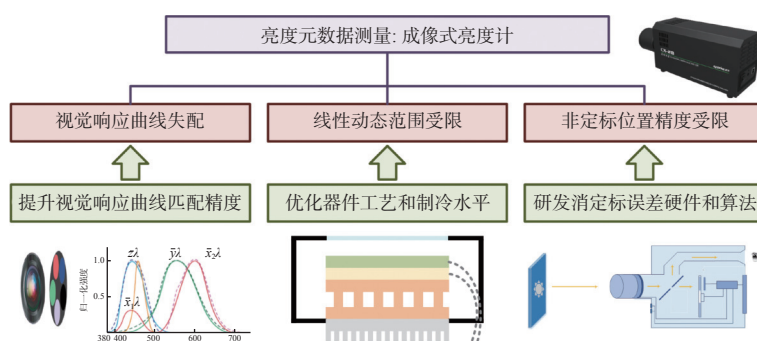


图 3 成像亮度计元数据测量精度的提升

Fig. 3 Measurement accuracy improvement of original data obtained by imaging luminance meter

3.2 超快速、高精度的光场重构

光场重构表示基于成像式亮度计测得的亮度图像求解发光强度、光通量、照度等参量并绘制全空间光度分布的过程, 是光度测量的核心环节之一。当前, 全空间光场重构通常难以兼顾速度和精度, 主要原因是机械扫描定位、选定角度处的亮度图像采集以及全空间光场拼接计算等环节难以兼顾速度和精度。全空间光场通常基于少数选定角度处的光度分布拼接计算获得, 因此要求成像亮度计在机械扫描过程中快速、准确到达选定位置, 需要突破快速扫描过程中的高精度定位难题。同时, 成像亮度计采集图像过程中, 更小的机械运动幅度和更长的曝光采样时间通常会带来更高的成像精度。“扫-停-采”成像模式可以满足上述要求, 但存在单帧图像采集时间长、全空间扫描

效率低的问题, 制约了光场重构的速度。此外, 更小的角度间隔、更多的亮度图像, 可以重构出精度更高的光场分布, 但增加了数据量和拼接计算时间, 降低了光场重构的效率。

为解决上述挑战, 需要开发扫描框架的高精度定位和控制方法, 研究连续快速扫描的高精度采样技术, 并设计全空间光场拼接计算加速方法, 如图 4 所示。为此, 需要开发具有超高转速、实时监控和精细控制等特性的新型伺服电机, 构建机械扫描框架和伺服电机间的传动系统, 设计针对机械扫描框架的数字控制电路, 实现超快速、高精度的机械扫描定位。同时, 需要开发连续扫描采样技术, 在扫描框架连续旋转中实现选定角度的精确识别, 完成在该角度下的亮度图像采集, 并基于算法降低机械运动对亮度图像采集质量的制约,

实现亮度图像的高效率、高精度采集。最后,建立全空间光场拼接计算方法,降低计算复杂度,减小

待处理数据量,设计基于硬件的计算加速技术,实现大规模高维光场的高精度实时重建。

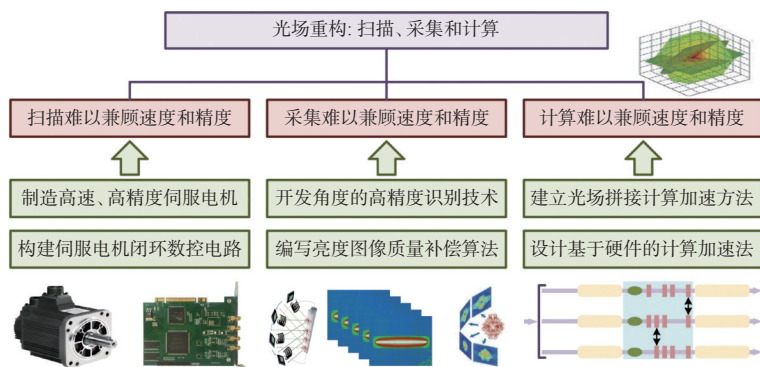


图 4 超快速、高精度的光场重构技术

Fig. 4 Ultrafast and high-precision reconstruction technology of optical field

3.3 高可靠性的溯源体系和计量标准装置

量值溯源表示通过 1 条具有规定不确定度的不间断比较链、使测量结果和规定的参考标准相关联的过程,这条具有规定不确定度的不间断比较链被称为量值溯源体系。作为光度学参量的测量仪器,为了保证仪器的测量准确度,NFG 的测量结果需要溯源至相关的国家计量基准。图 5 展示了 1 条适用于 NFG 的量值溯源链条。光度学参量的测量结果经现场计量校准、实验室计量校准后,最终可溯源至亮度、色度和发光强度等国家计量基准。

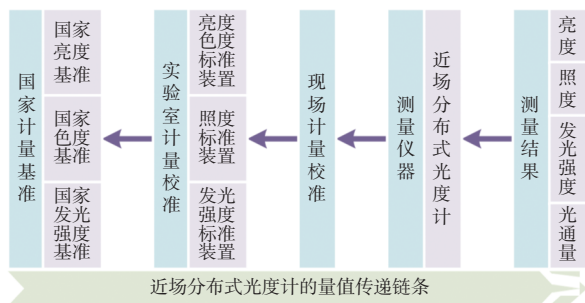


图 5 NFG 的量值溯源和传递体系

Fig. 5 Quantity traceability and transferability system for NFG

当前,NFG 的量值溯源面临缺乏符合产业需求的标准光源和现场计量校准装置的挑战。亮度和色度的量值溯源体系主要基于标准 A 光源进行计量校准,但实际被测的 LED、荧光灯和激光二极管等发光体的光谱分布与标准 A 光源存在较大差异,存在光谱失配问题。同时,NFG 尺寸较大,难以送检至实验室,但当前缺少性能可靠的亮度、照

度和发光强度现场计量校准装置,量值溯源工作的完成难度极高。

为解决上述挑战性问题,需要开发新型标准光源和高置信度的便携式计量校准装置。首先,开发适用于不同测量对象的标准光源(如高稳定性 LED 标准光源或具有多光谱输出能力的高强度稳定灯),在量值溯源体系中补充现有标准 A 光源的不足之处,实现在多个典型光谱范围内的稳定输出,满足 LED、荧光灯和激光二极管等发光体的测量精度需求^[32]。同时,开发适用于 NFG 的便携式现场计量校准装置并溯源至国家相关计量基准,实现 NFG 的原位计量校准,提升量值溯源标准装置的便捷性,避免大型设备因反复拆装和运输导致的测量精度偏移。

4 近场分布式光度计的应用

NFG 的元数据是不同角度上的亮度图像。伴随着成像式亮度计成像精度的提升,当前亮度图像的准确性也日益进步。处理这些亮度图像,可以得到亮度曲线、发光强度曲线和照度曲线等较为初级的数据。其中,基于清华大学 GP600 型 NFG 获得的发光强度曲线如图 6(a)所示。伴随着处理器计算能力的增强和数据可视化技术的进步,基于上述初级数据可以进一步获得空间光强分布图和空间光线分布图等较高级别的数据。其中,基于 GP600 型 NFG 亮度图像获取的空间光线分布图如图 6(b)所示,图中的 3 个坐标轴分别表示了发光方向 θ 、 φ 和相对发光强度。这些光线数据可以导入常用的光学设计软件,用于新型光学组件的

设计和开发,预期可以在照明、显示、交通运输、工业视觉和文物保护领域发挥重要的作用^[33]。

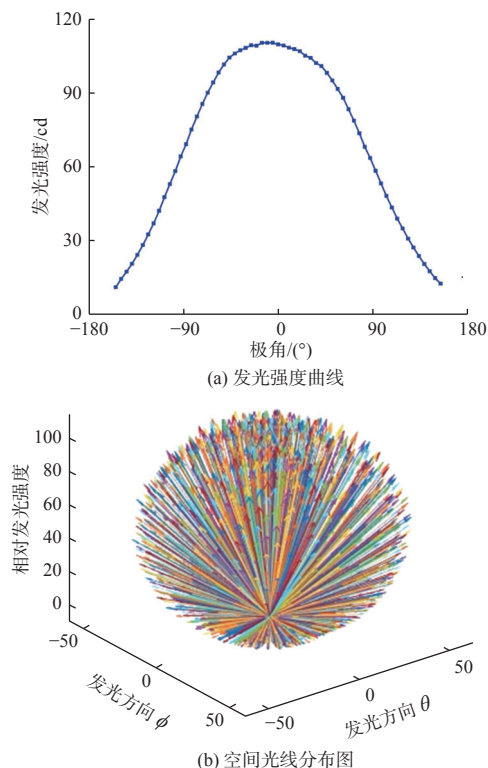


图6 清华大学 GP600 型 NFG 的测量结果

Fig. 6 Measurement results obtained by Tsinghua GP600 NFG

在照明领域,NFG有望引领LED迈向品质照明和健康照明的新阶段。伴随着LED技术的不断成熟,LED照明在光效、能耗和制造成本等方面逐渐体现出较为明显的边际效应。为了追求新的利润增长点,LED照明行业逐步将提升照明品质、聚焦照明健康作为新的工作重点。光度学参数的精确测量和重构可以为照明质量评价提供必要的支撑。灯具配光曲线的精确测量是教室照明灯具设计和改进的基础,特别是提高照度均匀性和降低室内不舒适眩光对中小学生视觉健康意义重大,NFG有机会在品质照明和健康照明时代大展拳脚。

在显示领域,NFG有望加速Micro-LED技术的成熟和商用。Micro-LED在亮度、响应速度、能耗和使用寿命等方面具有潜在优势,被认为是未来显示面板的发展方向。当前,制约Micro-LED面板大规模商用的主要因素是偏低的生产良率。由于Micro-LED面板通常基于巨量转移技术制造,保证每个像素拥有相同的亮度曲线是一项极富挑战

性的任务。基于NFG完成Micro-LED面板的检测和亮度曲线绘制,建立精准的亮度调控模型,对于提升面板显示质量具有重要的价值,也可以为提升Micro-LED面板制造工艺、降低生产成本提供坚实的数据支撑。

在交通照明领域,NFG有望促进智能化、高性能照明大灯的快速普及。随着车用照明技术的进步,矩阵式大灯、激光大灯和投影大灯等新型车灯相继被引入汽车市场。然而,新型车灯的发光特性与传统车用灯具存在显著差异,主要体现在发光面尺寸大、光强分布多样性强、存在时间调制特性和明暗对比强烈等方面。NFG可以用于测量新型车灯的光度分布,进而提取适当的表征参数对灯具的发光特性进行分析和改进,使其配光性能不仅满足相关标准和法规,也能与人眼的视觉感知相一致。

在工业检测领域,NFG有望推动高精度视觉感知时代的到来。工业视觉相机通常会使用结构光发射器将一定模式的结构光投射到被测物体表面,形成由被测物体表面形状所调制的三维图像。通过多个相机拍摄上述三维图像的二维分布,并利用光学三角测量原理,可以实现被测物体表面三维形貌的重建。结构光发射器投射图案的精确性和均匀性对工业视觉成像精度具有决定性的影响。基于NFG测量结构光发射器光度分布,建立结构光性能与工业视觉测量精度间的量化模型,对于优化工业视觉相机性能、提升工业视觉感知能力,具有十分重要的实用意义。

在文物保护领域,NFG将进一步促进文物无眩光成像技术和无损伤陈列技术的发展。照明灯光的强度分布和光谱分布等特性对文物成像和陈列展览具有十分显著的影响。其中,不适合的强度分布会导致眩光效应,导致文物成像结果丢失纹饰数据;不适合的光谱分布会导致文物成像结果发生色彩偏移,甚至可能在陈列展览过程中导致文物的光损伤。使用NFG对照明光源的关键光度学参数进行检测,可以确定适合各材质文物的最佳光学信息采集场景;同时,基于光度学参数可以研究不同照明环境对不同材质文物老化、损伤的影响,确定适宜文物照明的光学参数并形成相关标准在行业内推广。

5 结论

NFG具有占用体积小、可推演性强、适用范

围广和可扩展性强的特点,在鲁棒性、精确性、适应性和便捷性等方面具有显著优势,是面向未来的光度学参量测量仪器。高端 NFG 的设计和制造需要较高的工艺技术水平;同时,作为一种计算测量技术,NFG 数据处理算法和软件对测量精度也有很大的影响。国内外 NFG 的软硬件能力正在快速进步,在可测量尺寸、发光强度测量精度和扫描角度定位精度等关键参数上取得了显著的进步。然而,当前 NFG 仍面临成像式亮度计采集精度受限、光场重构速度和精度难以兼顾、量值溯源体系尚未完整构建的挑战。解决上述挑战,是占领 NFG 技术高地的必然选择。由于 NFG 优秀的功能性和便捷性,预计它将会广泛用在新型光学组件的设计和开发中,对照明、显示、交通运输、工业视觉和文物保护具有十分重要的应用价值。

参考文献:

- [1] MEYERS R A. Encyclopedia of physical science and technology[M]. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2002: 731-758.
- [2] CHEN C H. Goniophotometer[M]//Encyclopedia of Color Science and Technology. New York: Springer, 2016: 700-703.
- [3] 曾海朋. LED 灯具分布光度计硬件设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
ZENG Haipeng. Hardware design of LED lamp distribution photometer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [4] ANDERSEN M, DE BOER J. Goniophotometry and assessment of bidirectional photometric properties of complex fenestration systems[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(7): 836-848.
- [5] 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.
- [6] 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.
HU Bo. Comparative analysis of far-field and near-field distribution photometric testing systems[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2019.
- [7] NGAI P Y. On near-field photometry[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1987, 16(2): 129-136.
- [8] 周拥军, 赵宝奇, 王鹏. CCD 成像型亮度计测量方法研究[J]. *电光与控制*, 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.
- [9] RIEMANN M, SCHMIDT F, POSCHMANN R. Zur Bestimmung der Lichtst rkeverteilung von leuchten innerhalb der fotometrischen Grenzentfernung mittels eines bildaufl senden Gonimeters[J]. *Licht*, 1993, 7(8): 592-597.
- [10] KRÜGER U, SCHMIDT F. The impact of cooling on CCD-based camera systems in the field of image luminance measuring devices[J]. *Metrologia*, 2009, 46(4): S252-S259.
- [11] 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.
- [12] GASSMANN F, KRUEGER U, BERGEN T, et al. Comparison of luminous intensity distributions[J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(1): 62-83.
- [13] Techno Team Bildverarbeitung GmbH. General specification: model series 1400, 1500, 1800, 2000[R]. Ilmenau: Techno Team Bildverarbeitung GmbH, 2018.
- [14] Radiant Vision Systems. SIG-400: source imaging goniometer[R]. Redmond: Radiant Vision Systems, 2022.
- [15] Radiant Vision Systems. ProSource software[R]. Redmond: Radiant Vision Systems, 2020.
- [16] ASHDOWN I. Near-field photometry: a new approach[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1993, 22(1): 163-180.
- [17] ASHDOWN I. Luminance gradients: photometric analysis and perceptual reproduction[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1996, 25(1): 69-82.
- [18] ASHDOWN I, RYKOWSKI R. Making near-field photometry practical[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1998, 27(1): 67-79.
- [19] ASHDOWN I. Comparing photometric distributions[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 2000, 29(1): 25-33.
- [20] BIZJAK G, LINDEMANN M, SPERLING A, et al. Determination of stray light at the PTB goniophotometer facility[J]. *MAPAN*, 2009, 24(3): 163-173.
- [21] LÓPEZ M, BREDEMEIER K, ROHRBECK N, et al. LED near-field goniophotometer at PTB[J]. *Metrologia*,

- 2012, 49(2): S141-S145.
- [22] SCHMÄHLING F, WÜBBELER G, LOPEZ M, et al. Virtual experiment for near-field goniophotometric measurements[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(7): 1481-1487.
- [23] AUDENAERT J, ACUÑA R P C, HANSELAER P, et al. Practical limitations of near-field goniophotometer measurements imposed by a dynamic range mismatch[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2240.
- [24] Instrument Systems GmbH. LGS 1000 goniophotometer[R]. Munich: Konica Minolta Group, 2017.
- [25] 杨继乾. 基于CA2000二维亮度计的近场光度测试系统的设计与实现[D]. 大连: 大连工业大学, 2016.
YANG Jiqian. Design and implementation of near-field luminosity measurement system based on CA2000 two-dimensional luminometer[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016.
- [26] 杨继乾, 张竞辉, 刘倩, 等. 基于CA2000的近场光度测试系统[J]. *大连工业大学学报*, 2016, 35(2): 144-148.
YANG Jiqian, ZHANG Jinghui, LIU Qian, et al. Design of near-field goniophotometer based on CA2000[J]. *Journal of Dalian Polytechnic University*, 2016, 35(2): 144-148.
- [27] 金耀辉. 近场分布光度测量技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
JIN Yaohui. Study on photometric measurement technology of near-field distribution[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [28] 胡红英, 郭志军, 李倩. LED路灯全空间快速分布光度计系统[J]. *照明工程学报*, 2009, 20(增刊1): 59-61.
HU Hongying, GUO Zhijun, LI Qian. Full-field goniophotometer system for LED road lights[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2009, 20(S1): 59-61.
- [29] 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.
LI Xiaoni, CHEN Cong, LYU Jie, et al. Measurement technology and application analysis of near-field photometry[J]. *China Light & Lighting*, 2018(9): 28-32.
- [30] PAN J, BERGEN T, BLATTNER P, et al. Goniospectroradiometry of optical radiation sources: CIE 239-2020[S]. Vienna: CIE/Division 2 Physical Measurement of Light and Radiation, 2020.
- [31] 李兵, 胡皓程, 闵锐, 等. 一种成像式亮度计校正方法[J]. *应用光学*, 2022, 43(1): 9-16.
LI Bing, HU Haocheng, MIN Rui, et al. Correction method of imaging luminance measurement device[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(1): 9-16.
- [32] 俞凯雄, 朱星玥, 吴锴. 波长可调谐深紫外窄带光源模块的设计及验证[J]. *光电工程*, 2021, 48(8): 210173.
YU Kaixiong, ZHU Xingyue, WU Qi. Design and experiment of a tunable narrow-passband deep UV light source[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(8): 210173.
- [33] Techno Team Bildverarbeitung GmbH. Software manual: RiGO801 goniophotometer[R]. Ilmenau: Techno Team Bildverarbeitung GmbH, 2016.