

# 深度学习辅助远程光谱可调的 LED 光源集成系统

张仁主, 郭自泉, 朱丽虹, 陈国龙, 陈忠, 吕毅军

(1.厦门大学电子科学与技术学院, 2.福建省半导体照明工程研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 针对现有光谱光源系统存在的光谱范围较窄、匹配效果较差、占地面积大等关键问题, 研制了一套基于 LED (light-emitting diode) 的光谱可调光源集成系统。该系统基于深度学习离线训练和实时在线反馈微调技术, 集远程控制、精确供电和可靠散热于一体, 可以精确匹配目标光谱。常见目标光谱匹配在 380 nm-780 nm 范围内的最大偏差为 2.75%。系统输出在大动态范围内保持高水平的稳定性, 最大偏差仅为 2.03%。该系统的双光输出设计有助于实现标准亮度和照度校准光源的功能。该集成系统具有占地小、效率高和精确等优点, 可以成为多种应用的理想通用可调光源。

**关键词:** 光谱可调光源系统; 发光二极管; 深度学习; 校准光源; 双光输出

## A Deep Learning Aided Remote Spectrally Tunable LED Light Source Integrated System

Zhang Renzhu, Guo Ziquan, Zhu Lihong, Chen Guolong, Chen Zhong, Lu Yijun

(1.School of Electronic Science and Technology, Xiamen University, 2.Fujian Engineering Research Center for Solid-state Lighting, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A light-emitting diode (LED) based spectrally tunable light source integrated system was designed to address the crucial issues of the existing spectrally light source system, such as relatively narrow spectral ranges, poor fittings and relatively large sizes. Based on deep learning offline training and real-time online feedback fine-tuning technology, the system integrates remote control, precise power supply and reliable heat dissipation to precisely achieve target spectrum. The maximum deviation of common target spectral matching in the range of 380 nm ~ 780 nm is 2.75%. The system output maintains a high-level stability over a large dynamic range with only 2.03% maximum deviation. A dual-light output of the system facilitates the capability as standard luminance and illuminance calibration light source. The proposed integrated system has shown promising merits such as compact size, high efficiency and exactitude, making it an ideal universal tunable light source for multiple applications.

**Keywords:** Spectrally tunable light sources, LED, deep-learning, calibration source, dual-light output.

# 1 引言

近年来,光谱可调光源系统发展迅速,广泛应用于相机光谱定标、光学仪器光源、生物显微照明、色彩科学定标分析、太阳光谱模拟等各个照明领域[1-6]。传统的光谱可调光源系统大多是由多个光源和多个滤色片组成的,存在效率低、成本高、体积大及光谱匹配范围有限等缺点[1-4]。LED(light-emitting diode,发光二极管)的出现,使得光源尺寸小、响应速度快、使用寿命长、光谱匹配范围更宽、更灵活的光谱可调光源系统成为可能。因此,LED的组合可以用来模拟大多数光源的目标光谱。

改进基于LED的光谱可调光源系统的研究主要包括:(1)优化LED的数量和波长,以实现更宽的发射范围和应用;(2)目标光谱精确匹配的相关智能算法。

对于前者,美国国家标准研究所(NIST)和飞利浦开发了一系列可用于辐射、光度和色度测量的光谱可调光源系统,由80种不同的LED波长,一个积分球和256通道电流源组成,能够产生广泛的CIE(Commission Internationale de l'Eclairage,国际照明委员会)日光光源以及常用于比色测量的其他光源。此外,他们使用400个通道来控制22个不同波长的2000个LED,这可以提供高达75,250流明的高显色指数照明[7,8]。Nathan等人使用了900个LED和脉冲宽度调制电流控制系统,在400 nm~700 nm光合有效辐射区域,创造了一个类似太阳的光谱系统,可用于研究藻类[9]。这些光谱可调光源系统利用数百个LED和大量的电流控制器,需要适当的热管理来保持系统的稳定性,而且整个系统占用空间大,能耗大,控制复杂,不适合小规模应用。Fu等人开发了可调谐的(500 nm~900 nm)光谱系统,由14个不同波长的LED,小型积分球和自制控制电路组成,可用于估计柑橘的糖含量[10]。Lukovic等人构建了一个基于LED模拟黑体辐射源的光谱可调光源系统,采用24个LED提供模拟黑体辐射光谱700 nm~1070 nm,色温覆盖1073 K~1573 K[11]。Francisco等人将波长400 nm~700 nm的31个不同的LED集成到一个立方体中,可以产生D65、D50等流行的CIE标准光源,以及荧光灯、高压灯等窄峰光源[12]。以上使用较少的LED和控制器,系统在不同应用场景产生对应的单个光源,具有很高的可靠性,而复杂和陡峭的光谱,如类太阳光谱,也可以使用较少的光源。Kolberg等人基于LED创建了一个AAA太阳模拟器,覆盖紫外-可见-红外范围(350 nm~1100 nm),采用线性电流调节器控制40个不同波长的LED,以更好地模拟AM1.5G太阳光谱[13]。Eduardo等人用34个LED构建了一个太阳光谱模拟器,其峰值波长覆盖范围为350 nm~1100 nm,与AM1.5G太阳光谱相比,只有3%的光谱偏差[5]。上述研究主要集中在传统的CIE标准光源,如A、C、D65等,在CIE新发

布的 L41 光源方面所做的研究较少[14]。L41 光源是 CIE 于 2023 年发布的，用于取代光源 A 作为光度校准的标准光谱。

对于算法优化，Yuan 等采用高斯和非对称高斯分布函数拟合和优化 32 种不同的 LED，模拟 CIE A 和 D65 光源，偏差小于 5%[15]。Fan 等人采用机器学习算法辅助预测全光谱白光的光谱功率分布[16]。Yuan 等人开发了一个门控网络来预测基于深度学习技术的 LED 系统多种退化机制研究[17]。此外，还研究了 LED 光谱的多通道，以实现各种最佳视觉和颜色参数，如光通量、照度、光效、显色指数等[18]。为了获得与 AM1.5G 太阳光谱紧密匹配的合成光谱，对各种 LED 采用差分进化算法，最大光谱匹配偏差为 6.53%[19]。

许多公司已经开发了基于 LED 光源、光学设计和光纤耦合技术等多波长的 LED 光源 (Mightex 的 WFC 系列)，有多达 8 个通道的 LED 选择，覆盖 365 nm ~ 940 nm。Ocean Insight 的 LSM 系列 LED 光源具有可编程功能，可以实时监控输出特性。但是，在实验室和工业应用中，仍然有必要设计一个集成多种功能、高亮度和稳定性的光谱可调光源集成系统。

在这项工作中，我们提出、设计和构建了一个基于 LED 的远程控制光谱可调光源集成系统，运行在嵌入式 Linux 系统上。差分进化算法和遗传算法等传统的光谱优化方法，具有解释力强、超参数少等优点。虽然这种方法对于开发人员来说使用起来很简单，但是在更复杂多变的情况下应用起来仍然很困难。数据驱动算法利用广泛的超参数可以解决更广泛的动态挑战[20]。本系统引入 AutoGluon 神经网络进行离线训练；辅以实时在线反馈，实现 LED 光谱的精确调整，使其更适合在实验室中作为标准亮度和照度光源使用。

## 2 系统设计

### 2.1 系统总览

远程光谱可调光源集成系统示意图如图 1 所示。该系统由三部分组成:(a)控制和反馈模块，包括一个光谱仪(QE65 Pro)，一个基于 Linux 的高级 RISC (ARM) 服务器(Exynos 4412)和远程计算机;(b)光源模块，包括电流源单元、继电器、温度控制单元、LED 阵列板、集光装置;(c)光输出模块，由光纤、积分球和准直透镜组成。

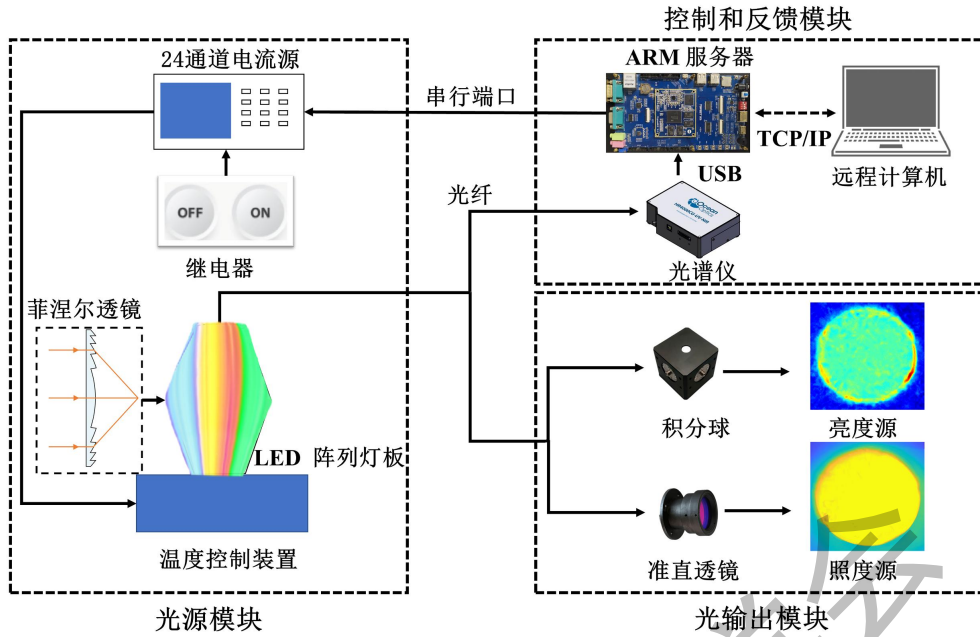


图 1 光谱可调光源集成系统结构示意图

如图 2 所示，本系统可以通过 TCP/IP 协议由上位机远程控制。自制 24 通道电流源单元通过上位机软件为 LED 阵列灯板提供 24 通道独立、可调且恒定的电流。LED 发出的光通过光纤传输。光谱仪从其中一束光纤中获取 LED 的光谱，并立即反馈给 ARM 服务器，来动态调整电流源输出，直到输出光谱与目标光谱匹配。光纤另一端口与光输出模块连接，可灵活切换积分球和准直透镜，实现亮度或照度源的双光源输出应用。

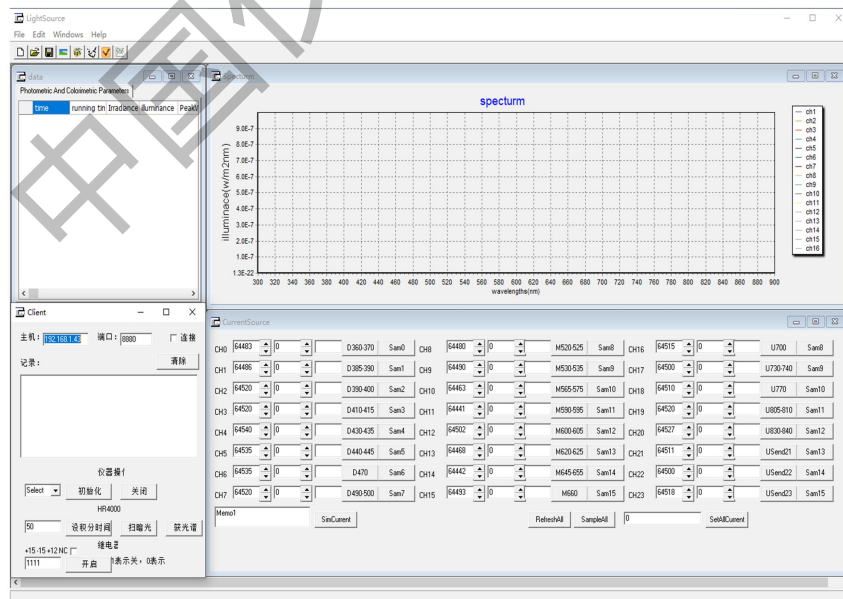


图 2 上位机软件界面

## 2.2 硬件设计

24通道独立电流源单元能够提供0~1000 mA连续调节的恒定电流,输出电压高达10V。如图3所示,24通道恒流源电路的主要组成部分包括STM32单片机、电平转换电路、数模转换电路、参考电压电路、电压调理电路、电压-电流转换电路及多通道模拟开关电路。

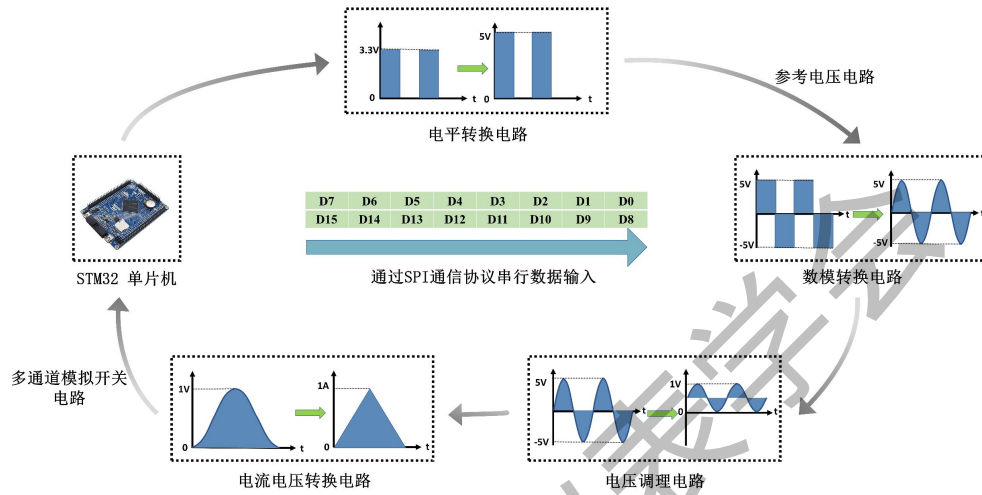
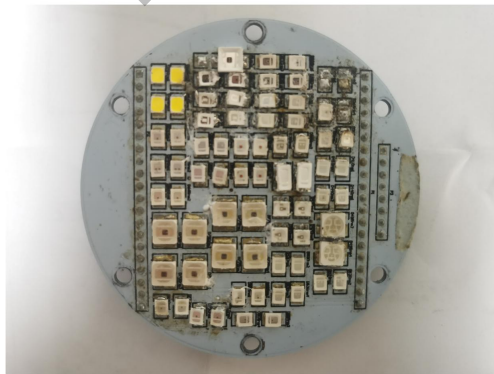
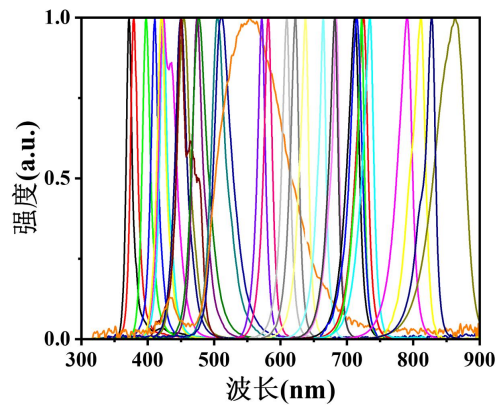


图3 24通道电流源结构图

具有24通道独立可控的铝基LED阵列板如图4(a)所示。24通道共分配了68个33种不同波长的LED,其中4个白光LED用于补偿550 nm单色光的不足。为了增加输出光谱范围和总输出功率,每个通道控制2~4个LED,输出波长覆盖300 nm~900 nm,如图4(b)所示。温控单元由热电冷却模块、热管和对流风扇组成,安装在铝基板背面,提高散热能力,减少电流增大时导致结温升高对光谱的热影响。铝基板温度可稳定保持在23.0°C~26.0°C。



(a)



(b)

图 4 (a) LED 阵列灯板照片; (b) 33 种归一化 LED 光谱。

LED 的发光角度通常为 120 度。当许多 LED 集成在一起时, 会产生更多的漫射光。我们利用两个真空镀铝反射器来有效地收集发射光。菲涅尔透镜夹在反光镜之间, 将光聚焦在光纤上。菲涅耳透镜的焦距和 LED 阵列板的距离先用 TracePro 软件进行模拟优化。

### 2.3 深度学习算法

目标光谱由多个 LED 进行全光谱拟合合成, 因此 LED 光谱合成的数学公式可以写为

$$L(\lambda) = \sum_{n=1}^n k_n I_n(\lambda) \quad (1)$$

其中  $L(\lambda)$  是目标光谱,  $I_n$  是单通道 LED 光谱,  $k_n$  是电流系数。

通过离散化  $L(\lambda)$ , 可以获得目标光谱的离散阵列  $\{\lambda_i, L(\lambda_i)\} (i=1, 2, \dots, m)$ 。每个通道的光谱可以表示为  $I_n = (I_n(\lambda_1), I_n(\lambda_2), \dots, I_n(\lambda_m))^T$ 。方便起见, 单通道 LED 光谱数据矩阵记为  $A = (I_1, I_2, \dots, I_n)$ , 电流系数矩阵记为  $X = (k_1, k_2, \dots, k_n)^T$ , 目标光谱数据矩阵记为  $Y = (L(\lambda_1), L(\lambda_2), \dots, L(\lambda_m))^T$ 。于是, 式(1)以矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} I_1(\lambda_1) & I_2(\lambda_1) & \cdots & I_n(\lambda_1) \\ I_1(\lambda_2) & I_2(\lambda_2) & \cdots & I_n(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_1(\lambda_{m-1}) & I_2(\lambda_{m-1}) & \cdots & I_n(\lambda_{m-1}) \\ I_1(\lambda_m) & I_2(\lambda_m) & \cdots & I_n(\lambda_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \cdots \\ k_{n-1} \\ k_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(\lambda_1) \\ L(\lambda_2) \\ \cdots \\ L(\lambda_{m-1}) \\ L(\lambda_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式可以简化为:

$$AX = Y \quad (3)$$

由于要拟合的目标光谱数据点的数量通常大于通道数, 即  $m \geq n$ , 因此方程 (3) 是超定方程组。在曲线拟合和数据计算中, 我们通常采用基于最小二乘的方法来求解这些方程。由于光电热耦合效应, 光谱功率分布、驱动电流和热量会相互耦合[21]。此外, LED 系统老化、散热器温度和其他环境因素也会影响光谱功率分布[22-24]。因此, 光谱功率分布和驱动电流之间的关系是非线性的, 不同电流下光谱形状和峰值波长会发生变化。

神经网络比其他方法具有更大的自由度, 通常被采用作为函数逼近算法, 可以精确模拟任何非线性输入和输出函数方程[25]。目前, 回归预测的技术有很多, 例如多层感知器、梯

度提升决策树、随机森林等[26]。然而，由于从光谱中收集的样本数量较少以及光谱与驱动电流之间复杂的相互作用，上述算法的预测输出会受到显著的偏差和方差的影响。因此，在设计中，我们采用了 AutoGluon 机器学习框架的堆叠技术，该技术使我们能够组合多个模型，降低模型的方差和偏差，在保持泛化性的同时提高有限数量样本的预测精度，更好地处理复杂的光谱与电流相关性。堆叠技术可以表示为：

$$f(x) = h(w_1g_1(x), w_2g_2(x), \dots, w_n g_n(x)) \quad (4)$$

其中  $x$  是输入数据， $g(x)$  是基础模型的输出， $w_n$  是基础模型的权重， $h(\cdot)$  是元模型的映射函数。有  $n$  个不同的基础模型，将原始数据分别传递给基础模型进行训练，得到  $n$  个输出结果，将其与权重拼接并重构，得到新的数据集。数据集用作元特征来训练元模型。该技术的主要思想是将基础模型的输出作为新特征提供给元模型，依次用于组合基础模型的预测结果，并进一步组合几种不同模型的训练效果。通过融合不同训练好的模型，可以增加模型的复杂度，减少预测结果的方差。同时，通过使用多层堆叠和加深网络结构，可以减少模型的偏差，使模型发挥最佳效果。

图 5 显示了 AutoGluon 神经网络方法的结构，该方法由 3 层组成，即两个堆叠层（第 1 层和第 2 层）和一个全连接层（第 3 层）。LED 光谱数据作为输入数据，传递给 XGBoost、随机森林、多层感知器等基础模型。这些基础模型的输出被视为要传递到后续堆叠层的特征，而原始特征和前一层的输出则一起传递到后续层。它利用残差网络的概念来重新训练未训练的部分。经过第二层堆叠后，我们在第三层连接一个全连接输出层，将  $n$  个输出进行线性组合，得到最终的 24 通道电流值。

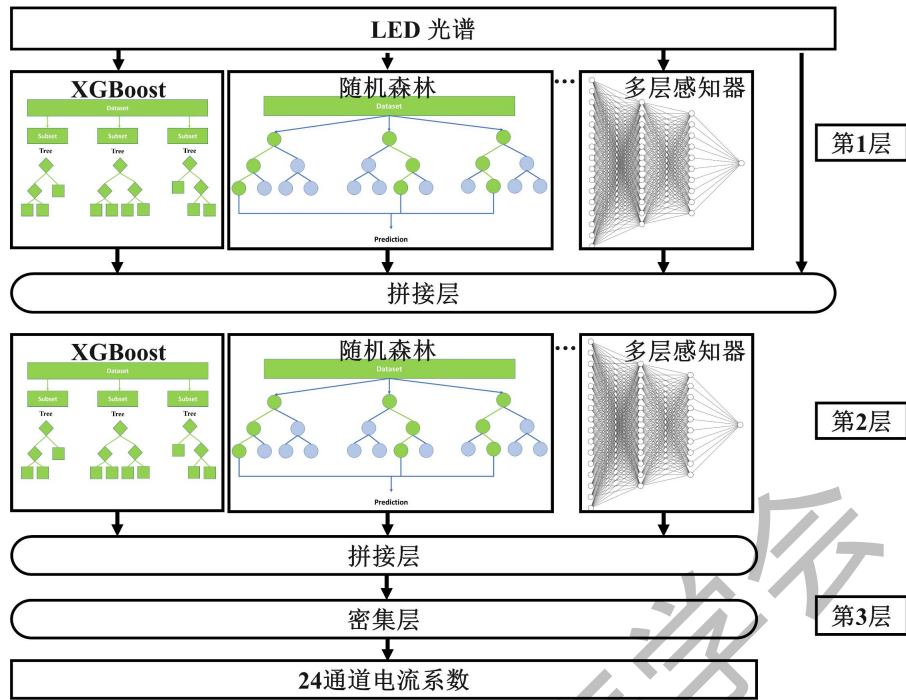


图 5 AutoGluon 神经网络结构。

### 3 实验结果

如图 6 所示，在光谱可调光源集成系统中，获得目标光谱需要三个步骤，即系统校准，利用 AutoGluon 神经网络预测驱动电流及优化并输出光谱。

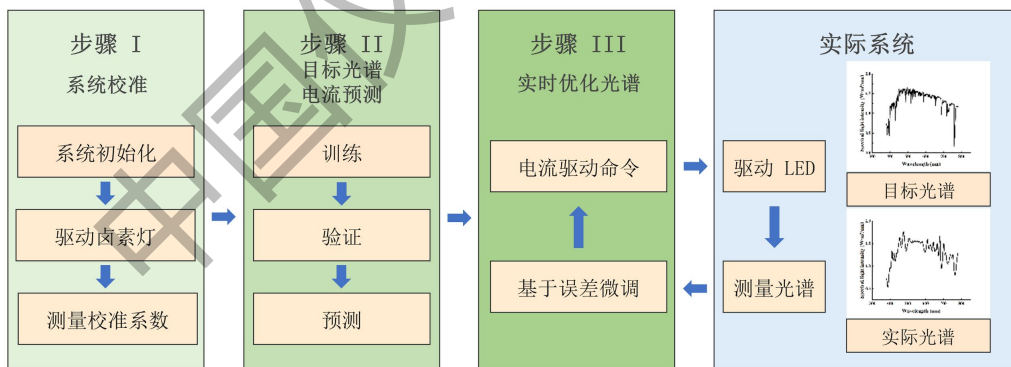


图 6 目标光谱采集的三个步骤。

#### 3.1 系统校准

在测量 LED 的光谱功率分布之前，光谱仪由计量学认证的卤素灯校准。通过应用光谱校正系数，光子计数分布可以很容易地转换为光谱功率分布[27]。

#### 3.2 系统验证



表 1 六种光源的输出光谱与目标光谱的偏差。

波长(nm)	A(%)	C(%)	L41(%)	D65(%)	D75(%)	AM1.5G(%)
380~480	12.58	3.78	29.32	3.57	3.03	0.37
480~580	1.56	0.90	2.02	0.65	0.74	0.01
580~680	1.19	0.76	4.89	0.88	0.85	0.73
680~780	0.74	0.29	7.82	0.85	1.02	0.67
380~780	0.05	0.48	2.75	0.61	0.60	0.37

表 2 AM1.5G 输出光谱与目标光谱偏差的比较。

波长(nm)	Michael [28]	Gabriele [29]	Eduardo [5]	本系统
380~480	1.97	13.13	2.71	0.37
480~580	4.52	1.94	32.32	0.01
580~680	2.62	2.37	33.85	0.73
680~780	20.80	40.35	0.68	0.67
380~780	2.72	11.72	18.54	0.37

为了验证系统的可靠性，我们选择了 5 个常见的标准光源作为目标光谱:A、C、L41、D65 和 D75。利用 AM1.5G 太阳光谱测试了系统在更复杂、更陡峭的光谱上的性能。我们选取 380 nm ~ 780 nm 波长范围内的光谱值，间隔 1 nm，共 401 个值作为输入特征，对应的 24 个通道电流值作为输出特征。训练数据由之前的系统数据组成，其中包括 24 通道光谱及其对应的通道电流，总共 470 个样本，均方根误差作为损失函数。使用 AutoGluon 离线训练的初始电流作为初始值，然后 ARM 服务器将当前驱动命令发送到电流源单元。ARM 服务器接收到来自光谱仪的实时反馈光谱后，将目标光谱与反馈光谱进行比较，然后重新调整所需的驱动电流，如此重复直到均方根误差函数收敛到一个稳定的值。

$$Deviation(\lambda_1, \lambda_2) = \left( \frac{\left| \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Goal(\lambda) - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Measured(\lambda) \right|}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Goal(\lambda)} \right) \times 100\% \quad (5)$$

图 7 显示了 A、C、L41、D65、D75 和 AM1.5G 太阳光谱的优化输出。由公式(5)可知，6 个标准光源的输出光谱与目标光谱的偏差如表 1 所示。6 个标准光源在 380 nm ~ 780 nm

光谱范围的最大偏差为 2.75%，说明系统具有出色的光谱匹配能力。特别是对于 AM1.5G 太阳光谱，如表 2 所示，与其他研究工作相比，得到了更好的结果，每个波长波段的偏差小于 0.8%。

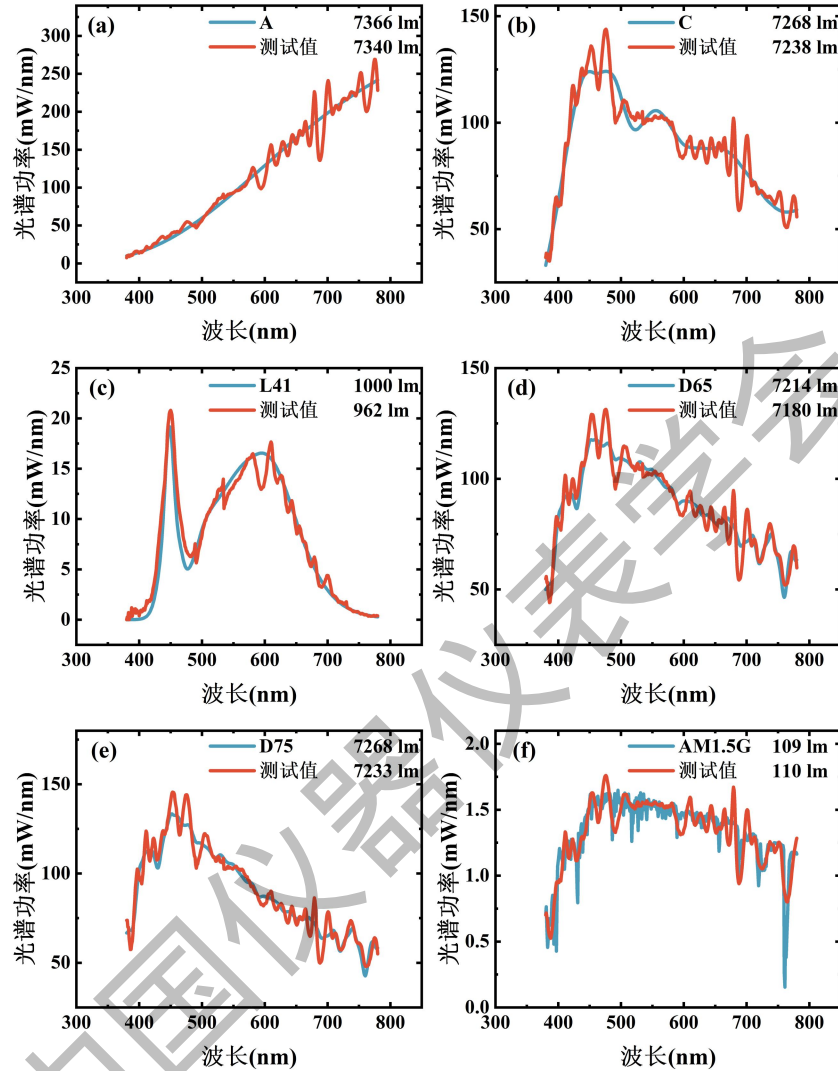


图 7 测量光谱与标准光源光谱的比较。(a)光源 A；(b)光源 C；

(c)光源 L41；(d)光源 D65；(e)光源 D75；(f)太阳光谱 AM1.5G。

我们还在 100 lm ~ 9000 lm 的大动态范围内测试了每个光源的输出光谱。输出光谱与目标光谱的对比如表 3 所示，从表中可以看出，在各种输出条件下，L41 的系统输出保持了较高的稳定性，最大平均偏差仅为 2.03%。输出光谱与目标光谱匹配良好。

表 3 六种光源在不同光通量下输出光谱与目标光谱的偏差。

光源	光通量(lm)						平均偏差
	100	1000	3000	5000	7000	9000	
A(%)	0.64	1.04	0.17	0.07	0.18	0.11	0.37

C(%)	0.77	0.66	0.82	0.52	0.39	0.02	0.53
L41(%)	1.55	1.89	2.69	2.47	1.72	1.86	2.03
D65(%)	0.94	0.28	0.25	0.46	0.20	0.04	0.36
D75(%)	0.38	0.08	0.66	0.42	0.60	0.08	0.37
AM1.5G(%)	0.07	0.97	0.09	0.19	0.28	0.17	0.29

### 3.3 双光源输出

该系统提供双光源输出选择，将光纤耦合到 1 英寸的微型积分球上可以作为均匀亮度源，或将光纤耦合到准直透镜上作为照度源。当作为亮度源时，可用于校准光谱辐射计；当作为照度源时，可以用来校准照度计或用于生物学研究，以调查光对生物体的生理，行为和生物钟的影响。

$$Homogeneity = \frac{I}{I_{MAX}} \times 100\% \quad (6)$$

通过标准 TOP-100 光谱仪(Instrument Systems Inc.)测量后，表 4 列出了六个标准亮度源的可调亮度范围，其中标准光源的可调亮度范围可达 5908 cd/m<sup>2</sup>。积分球输出出口的相对亮度分布如图 8(a)所示。根据均匀性公式(6)，图 8(b)-(c)分别描绘了水平方向和垂直方向的亮度分布。从图 8 中可以看出，水平方向的平均亮度均匀性为 98.9%，垂直方向的平均亮度均匀性为 99.3%，整个平面均匀性较好。

表 4 系统输出的六个光源亮度和照度可调范围。

光源	亮度(cd/m <sup>2</sup> )	照度(lx)
A	3.69-5908.00	3.5-3700
C	5.82-4370.25	3.4-4065
L41	4.91-3780.12	4.2-4025
D65	3.59-4309.84	3.4-4032
D75	3.49-3493.77	3.4-4062
AM1.5G	6.13-2192.34	5.2-4307

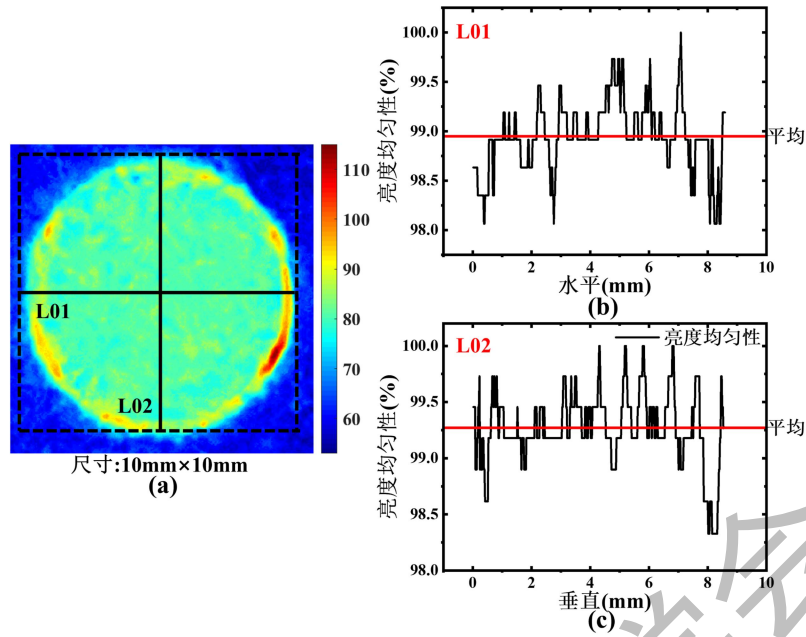


图 8 (a)积分球输出端口的相对亮度分布；(b)水平(L01)亮度分布；  
(c)垂直(L02)亮度分布。

将光纤耦合到准直透镜上作为照度源，可以输出均匀的光束。距准直透镜 0.6 m 和 2.2 m 处的光斑分别如图 9(a)和(d)所示。可以看出，随着距离的增加，光学均匀性仍然很好。在 0.6 m 处，光斑直径约为 25 mm，在 2.2 m 处，光斑直径约为 500 mm。如表 4 所示，一些常用光源的照度调节范围很广，可达 4307 lx。图 9 (a)-(d)分别为测量照度平面均匀性所选择的水平线和垂直线的相对值。在距离 0.6 m 处，平均水平和垂直方向均匀性分别为 99.4%和 98.8%。当距离增加到 2.2 m 时，平均水平方向均匀性为 99.7%，垂直方向均匀性为 99.6%。在边缘处，照明平面的均匀性较低。然而，整体平均均匀度仍然保持在 98.8%，表明整个平面高度均匀。

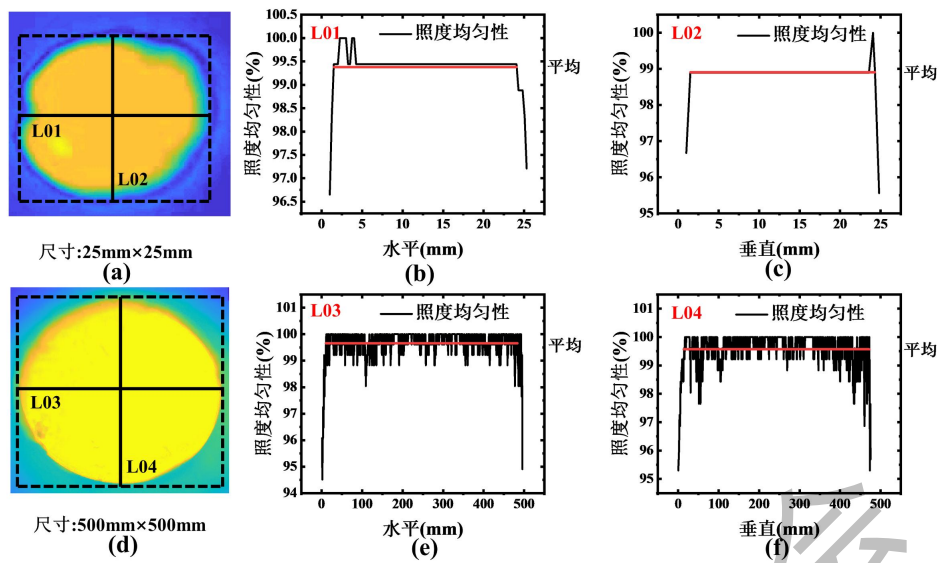


图9 标准光源输出端口相对照度分布, (a) 距准直透镜 0.6 m 处的光斑; (b-c) (a)的水平(L01)和垂直(L02)照度分布; (d) 2.2 m 处的光斑从准直透镜看; (e-f) (d)的水平(L03)和垂直(L04)照度分布。

## 4 总结

本设计实现了光谱范围为 380 nm ~ 780 nm 的远程在线的光谱可调光源集成系统。该系统具有四个显著的优点:(1)集电源、散热、集光、光谱匹配和控制于一体的硬件集成。(2)提出一种基于深度学习离线训练和实时在线反馈微调的混合离线和实时在线反馈技术,以方便、准确地获取电流系数,并提高与目标光谱匹配的准确性。混合反馈方法增强了系统的自适应能力,有效消除了负面因素对系统的影响,包括 LED 的非线性变化、系统退化和其他环境因素。(3)该系统实现了六种标准光源,特别是 CIE 新发布的 L41,目标光谱匹配最大偏差为 2.75%。此外,系统输出在大动态范围内保持高度稳定性,在各种输出条件下,L41 的最大平均偏差仅为 2.03%。(4)双光输出有利于亮度源和照度源应用,亮度/照度调节范围广,均匀性高。

### 参考文献:

- [1] E. F. Schubert and J. K. Kim. Solid-state light sources getting smart[J]. Science, 2005, 308(5276): 1274-1278
- [2] G. K, T. Y, and W. O. Illuminance meter calibration with an LED spectrally tunable light source[J]. LightingI. Res. Technol., 2020, 52(8): 1009-1019
- [3] J. Hyttinen, P. Fält, H. Jäsberg et al. Optical implementation of partially negative filters using

- a spectrally tunable light source, and its application to contrast enhanced oral and dental imaging[J]. *Opt Express*, 2019, 27(23): 34022-34037
- [4] I. Chew, D. Karunatilaka, C. P. Tan et al. Smart lighting: The way forward? Reviewing the past to shape the future[J]. *Energy Build.*, 2017, 149: 180-191
- [5] E. Lopez-Fraguas, J. M. Sanchez-Pena, and R. Vergaz. A low-cost LED-based solar simulator[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2019, 68(12): 4913-4923
- [6] R. Usamentiaga, D. F. Garcia, C. Ibarra-Castanedo et al. Highly accurate geometric calibration for infrared cameras using inexpensive calibration targets[J]. *Measurement*, 2017, 112: 105-116.
- [7] I. Fryc, S. W. Brown, G. P. Eppeldauer et al. LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric, and colorimetric applications[J]. *Opt. Eng.*, 2005, 44(11): 111309-111316
- [8] I. T. Ferguson, K. J. Dowling, C. Hoelen et al. The design of a spectrally tunable light source[C]. Ninth International Conference on Solid State Lighting, San Diego, California, United States, Aug. 2009, 742206: 1-12
- [9] Phillipps and Nathan. Design and construction of a tunable light source with light emitting diodes for photosynthetic organisms[D]. Mechanical and Aerospace Engineering, Utah State University, Logan, Utah, United States, 2012.
- [10] X. Fu, X. Wang, and X. Rao. An LED-based spectrally tuneable light source for visible and near-infrared spectroscopy analysis: A case study for sugar content estimation of citrus[J]. *Biosyst. Eng.*, 2017, 163: 87-93
- [11] M. Lukovic, V. Lukovic, I. Belca et al. LED-based Vis-NIR spectrally tunable light source - the optimization algorithm[J]. *J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Publ.*, 2016, 12(1): 1-9
- [12] F. J. Burgos-Fern, M. Vilaseca, E. Perales et al. Spectrally tunable light source based on light-emitting diodes for custom lighting solutions[J]. *Optica Applicata*, 2016, 46: 117-129
- [13] D. Kolberg, F. Schubert, N. Lontke et al. Development of tunable close match LED solar simulator with extended spectral range to UV and IR[J]. *Energy Procedia*, 2011, 8: 100-105.
- [14] T. Poikonen, T. Bergen, P. Blattner et al. LED Reference Spectrum for Photometer Calibration:CIE 251:2023[S]. CIE, Babenbergerstrasse, Vienna, Austria, Report TR.251.2023, Feb. 2023.

- [15] K. Y. Kun Yuan, H. Y. Huimin Yan, and S. J. Shangzhong Jin. LED-based spectrally tunable light source with optimized fitting[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2014, 12(3): 32301-32303
- [16] J. Fan, Y. Li, I. Fryc et al. Machine-learning assisted prediction of spectral power distribution for full-spectrum white light-emitting diode[J]. *IEEE Photonics J.*, 2020, 12(1): 1-18
- [17] C. C. A. Yuan, J. Fan, and X. Fan. Deep machine learning of the spectral power distribution of the LED system with multiple degradation mechanisms[J]. *J. Mech.*, 2021, 37: 172-183
- [18] W. Hertog, A. Llenas, and J. Carreras. Optimizing indoor illumination quality and energy efficiency using a spectrally tunable lighting system to augment natural daylight[J]. *Opt Express*, 2015, 23(24): 1564-1574
- [19] Q. G. Chen, X. Jin, and L. Y. Xue. Modeling and optimization of multi-LED solar spectrum synthesis with widely-tuning radiant flux output[J]. *Opt. Photonik*, 2019, 180: 276-284
- [20] C.-H. Huang, Y.-T. Cheng, Y.-C. Tsao et al. Micro-LED backlight module by deep reinforcement learning and micro-macro-hybrid environment control agent[J]. *Photonics Res.*, 2022, 10(2): 269-279
- [21] S. Y. Hui and Y. X. Qin. A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (LED) systems[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, 24(8): 1967-1976
- [22] H.-L. Lu, Y.-J. Lu, L.-H. Zhu et al. Efficient measurement of thermal coupling effects on multichip light-emitting diodes[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2017, 32(12): 9280-9292
- [23] V. N. Ferreira, M. Andresen, B. Cardoso et al. Pulse-shadowing based thermal balancing in multichip modules[J]. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2020, 56(4): 4081-4088
- [24] A. T. L. Lee, H. Chen, S.-C. Tan et al. Precise dimming and color control of LED systems based on color mixing[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016, 31(1): 65-80
- [25] X. Zhan, W. Wang, and H. Chung. A neural-network-based color control method for multi-color LED systems[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2019, 34(8): 7900-7913
- [26] S. Zhao, F. Blaabjerg, and H. Wang. An overview of artificial intelligence applications for power electronics[J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2021, 36(4): 4633-4658
- [27] J. Xiao, Z. Guo, Y. Xiao et al. Multichannel online lifetime accelerating and testing system for power light-emitting diodes[J]. *IEEE Photonics J.*, 2017, 9(3): 1-11.
- [28] M. Stuckelberger, B. Perruche, M. Bonnet-Eymard et al. Class AAA LED-based solar simulator for steady-state measurements and light soaking[J]. *IEEE J. Photovoltaics*, 2014,

4(5): 1282-1287

- [29] G. Grandi, A. Ienina, and M. Bardhi. Effective low-cost hybrid LED-halogen solar simulator[J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 2014, 50(5): 3055-3064

中国仪器仪表表学会