

基于全连接神经网络的自然光谱复现方法研究

任子茂^{1,2}, 路慧敏^{1,2*}, 冯丽雅¹, 杨录^{1,2}, 朱一帆¹, 王建萍¹¹北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083;²北京科技大学顺德创新学院, 广东 佛山 528000

摘要 为了能够精准和快速地复现可见光波段自然光谱,实现全光谱照明,使用具有强大非线性拟合能力的神经网络完成光谱匹配。首先,利用全连接神经网络的自学习能力,在采用基于修正高斯分布拟合函数的多个单色LED合成光谱模型生成训练和测试数据集的基础上,构建充分体现合成光谱和各单色LED光强系数比例关系的神经网络模型,即该模型能够针对输入光谱得到对应的单色LED光强比例系数,进而实现光谱复现。其次,针对标准太阳光谱和实测得到的不同时刻、天气的自然光谱进行光谱复现,并与采用基于遗传算法的光谱复现方法得到的结果进行对比。结果表明,基于全连接神经网络的自然光谱复现方法能够以小于5%的误差实现标准太阳光谱和实测太阳光谱的匹配,证明可使用同一个训练模型在不改变单色LED数量和种类的情况下得到多种与目标光谱高度吻合的不同类型光谱。对比其他光谱匹配算法,所提方法的拟合速度提高了数倍,还具有稳定性高、调控灵活、操作简便等优势。

关键词 光谱学; 自然光谱; LED; 神经网络; 光谱复现

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221663

1 引言

随着照明技术的不断发展,照明光源从白炽灯、荧光灯等传统光源变化到节能高效的发光二极管(LED),人们对于照明的需求也从最初的环保节能转向健康舒适照明。太阳光被普遍认为是最健康的照明光源,是一种全光谱光源。为满足人们对健康照明的要求,所提出的全光谱照明即是模拟太阳光照明,其不仅最适合人体视觉及非视觉上的需求^[1],还能够帮助进行植物生长实验、光疗设备研究等^[2],故实现太阳光谱照明成为近年来半导体照明领域新的发展目标。作为新一代照明光源的LED灯具具有节能高效、绿色环保、稳定性高、寿命长等优点^[3],为此,研究人员提出使用激发荧光粉产生白光LED等传统照明技术,白光LED的照明色温和光效等得到明显改善,但距离太阳光谱照明还是有较大的差距,并且其蓝光比例要高于红光比例,容易导致视觉疲劳和视觉损失^[4],无法成为健康照明光源。研究人员考虑到LED具有单色性好、半峰全宽窄等在光谱合成中有明显优势的特点^[5],提出多基色全光谱合成技术,利用光谱叠加原理,使用多种不同峰值波长的LED芯片合成目标光谱,最终根据应用需求复现出各种不同种类的光谱。

目前,国内外基于多芯片合成光谱技术,为复现出

显色指数高、光谱范围广的全光谱已经做了大量的研究工作。张玉宝等^[6]将有效集算法作为匹配算法,将单色LED的峰值波长和半峰全宽数据作为有效集建立数据库,并筛选有效集中的数据,得到高拟合精度的LED种类和数目。倪俊雄等^[7]提出目标光谱拟合反演法,利用最小二乘法对目标光谱进行局部仿真和全局仿真,再结合零点判别法对合成光谱所需的单色LED种类和数量进行调整,得到了模拟实测光谱的LED组合。柳丝婉等^[8]使用内三角形法和同色异谱法实现九基色合成全光谱白光LED,该方法可满足色温大范围可调和高显色性要求。甘汝婷等^[2]利用遗传算法(GA),通过求解超定方程组,优化不同峰值波长、峰值波长间隔、半峰全宽的单色LED匹配光源组合,达到模拟光谱匹配的目的。然而,传统光谱匹配算法如迭代法、模拟退火法等均存在算法复杂、运行速度慢等缺点,虽然遗传算法及其他智能算法对以上问题进行了优化,但仍无法稳定地模拟出各种类型的光谱,且匹配不同光谱时需要重新进行迭代计算,不能根据照明需求对光谱进行调整,匹配光谱时间依旧较长。因此,亟需一种更加灵活、高效、适用于多场景照明的光谱复现算法。

人工神经网络(ANN)是模仿生物神经元提出的一种抽象数学模型,能够模仿生物大脑的学习、记忆和

收稿日期: 2022-08-31; 修回日期: 2022-10-24; 录用日期: 2023-01-29; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2021B1515120086)、佛山市人民政府科技创新专项资金(BK20BF013)

通信作者: hmlu@ustb.edu.cn

输出过程进行信息处理^[9]。全连接神经网络(FCNN)即网络中每一层的每一个节点都与相邻网络层的每一个节点相连,是人工神经网络中最为常见的类型,由于神经网络不受因变量和自变量之间预定义数学关系的约束,有利于解决非线性和模式特征模糊的问题,因此适用于建模单色LED光谱分布和目标光谱之间的非线性关系^[10]。本文在380~680 nm峰值波长内选取20种USHIO品牌的单色LED和3种市面上普遍存在的国产单色LED,基于修正的高斯分布拟合函数,结合光谱叠加原理生成不同的光谱数据,将其作为训练集和测试集,搭建能够从合成光谱逆向获取LED比例参数的全连接网络。应用该全连接网络针对实地测量的不同时段的自然光谱以及不同类型的标准太阳光谱进行复现,即根据输入目标光谱数据预测得到合成目标光谱所需的单色LED辐照强度比例。本文进一步对基于全连接网络和智能优化算法的光谱复现方法的精确度和所需时间进行了对比分析。

2 理论和模型

2.1 LED光谱模型

太阳光谱是连续的宽波段光谱,每个波长对应相应的辐射通量,但波长被分割得足够小时,可以当作离散数据进行处理。依据光谱叠加原理,单色LED光谱分布可线性叠加产生新的光谱分布,LED光谱合成的基本数学模型^[11]为

$$\hat{S}(\lambda) = \sum k_i S_i(\lambda), \quad (1)$$

式中: $\hat{S}(\lambda)$ 为合成光谱分布; k_i 为LED拟合参数; $S_i(\lambda)$ 为单色LED光谱分布。基于单色LED良好的单峰窄带特性,且光轴方向上单位立体角内的辐射强度随波长的分布^[12],LED的光谱功率分布近似于洛伦兹分布或高斯分布。实际单色LED光谱并非关于峰值波长左右完全对称,故有学者提出使用修正的高斯分布函数来拟合光谱曲线^[13]。修正后的高斯函数模型不仅能够描述许多常见波长的LED光谱,还能够表征真实

LED光谱底部比简单高斯函数更宽的特点。采用修正的高斯分布拟合函数可以将单色LED光谱表示为

$$S_i(\lambda) = k_i \exp \left[-0.322139 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right)^2 \right] \times \exp \left(-0.3 \left| \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right| \right), \quad (2)$$

式中: λ_0 为峰值波长; $\Delta\lambda$ 为半峰全宽。

为了对光谱复现结果进行评估,引入拟合相关指数 R^2 ,其函数式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3)$$

式中: y_i 为预测得到的离散光谱值; \hat{y}_i 为目标光谱离散数据; \bar{y} 为目标光谱离散数据的平均值。相关指数常用来评价回归方程拟合时的吻合程度,值越接近1表示吻合程度越高。本研究采用相关指数表征复现光谱和目标光谱的差异,其值越接近1,二者的差异越小。

2.2 基于全连接神经网络的光谱复现方法

针对所涉及的自然光谱复现问题,拟采用全连接神经网络来实现光谱复现,即经过训练后搭建的全连接网络能够根据目标光谱获取LED组合的参数集,并用于目标光谱复现。所构建的全连接神经网络模型包括三层:将归一化处理后的包含300个离散值的目标光谱数据作为输入层的输入层、利用神经元对数据进行自学习处理的隐藏层(层数为5)、输出23种LED辐照强度比例和损失函数值的输出层。全连接神经网络结构如图1所示。网络结构中每层网络包含多个神经元,每个神经元对输入值进行权重和偏置线性处理,用线性方程模拟该过程,可得到

$$Z = \omega X^T + b, \quad (4)$$

式中: ω 表示权重; b 表示偏置。网络中5个隐藏层的神经元个数分别为254、207、161、114、68,以保证所提模型具有足够的学习能力和信息处理能力,而不会导致网络结构过于复杂、学习速度变慢和陷入局部最优。

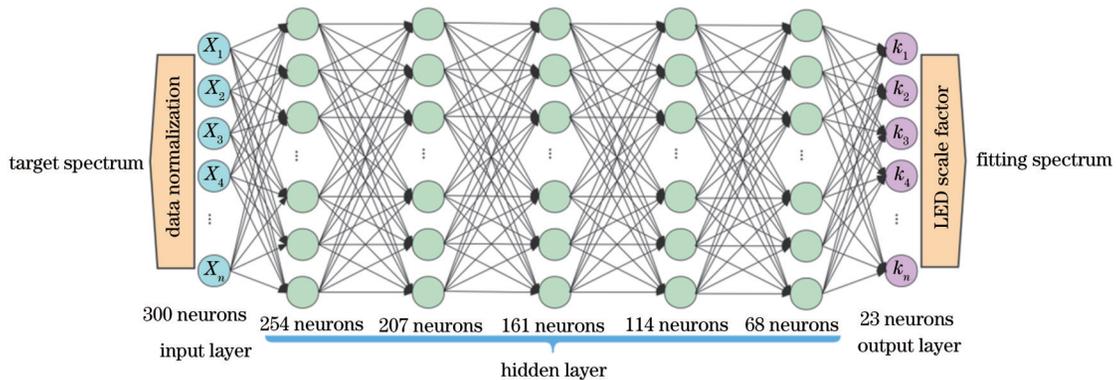


图1 全连接神经网络结构

Fig. 1 Structure of fully connected neural network

所建立的全连接网络模型在训练时分为正向传播和误差的反向传播两个过程:光谱数据从进入输入端,到输出预测值和损失函数值的过程称为正向传播;利用梯度下降法优化权重和偏置,减小神经网络输出与目标光谱之间误差的过程称为反向传播^[14]。在此网络中采用的反向传播损失函数为 Smooth L1 函数,该函数既避免 MAE 函数难以收敛到最高精度的缺陷和 MSE 函数可能引起的梯度爆炸现象,又能够以稳定的梯度下降,使模型更易收敛,最终获得最小的损失函数值,且具有较稳健的解。Smooth L1 损失函数的表达式^[15]为

$$\text{Smooth L1}(x) = \begin{cases} 0.5x^2, & |x| < 1 \\ |x| - 0.5, & |x| > 1 \end{cases} \quad (5)$$

在网络的隐藏层之间添加激励函数 ReLU 和 tanh,相应的函数公式^[16]为

$$\text{ReLU}(x) = \max(0, x), \quad (6)$$

$$\text{tanh}(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (7)$$

使用激活函数能够给神经元引入非线性因素^[17],提高中间输出的多样化,且可以降低计算量、解决梯度消失问题和缓解过拟合问题。

3 全连接网络构建和光谱复现

3.1 光谱数据采集和预处理

为了验证基于全连接神经网络的自然光谱复现方法的广泛适用性,借助杭州虹谱光色科技有限公司生产的 OHSP-350C 型光谱分析仪对太阳光进行收集和测量,数据集采自河北省石家庄市某社区公园内无遮挡和灯光影响处的夏季晴天当中多个时间点的光谱数据,以及夏季阴天时的光谱数据,并挑选光谱分布差别较大的部分数据进行仿真实验。在神经网络模型训练梯度下降过程中,为避免梯度爆炸问题,用激励函数 tanh 对数据进行归一化处理,且为使实测数据和计算数据处于同一个数量级,需要对实测数据进行归一化处理。本实验使用 min-max 标准化方法进行处理,将数据映射到(0,1)区间。转换函数为

$$\Phi^* = \frac{\Phi - \Phi_{\min}}{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}, \quad (8)$$

式中: Φ^* 为处理后的辐射通量值; Φ 为光谱中某波长对应的相对辐射通量值; Φ_{\min} 为光谱数据中最小辐射通量值; Φ_{\max} 为光谱数据中最大辐射通量值。

3.2 全连接网络训练和光谱复现

在工程实际应用中,由于仍存在单色 LED 的生产技术壁垒,现有 LED 无法保证峰值波长间隔相等,也无法保证半峰全宽满足窄度要求。为验证所提光谱拟合算法的可行性,在 380~680 nm 波长范围内选取 20 种 USHIO 品牌的单色 LED,其峰值波长和半峰全宽如表 1 所示。可以看到,20 种 LED 仍无法完全覆盖

380~680 nm 波长范围,在 565~590 nm、610~625 nm 等波长范围存在较大缺口,故本实验在此基础上补充 3 种市面上普遍应用的国产单色 LED 产品,峰值波长分别为 577、617、636 nm。即共使用 23 种单色 LED 进行模拟仿真。确定所选单色 LED 的基本参数后,在(0,1)区间随机生成 LED 的拟合比例系数 k ,使用式(1)、(2)生成单色 LED 的叠加光谱分布 $\hat{S}(\lambda)$ 并作为训练集和测试集,将波长间隔为 1 nm 的 300 个离散数据输入到网络中进行训练。对通过光谱模拟方法得到的单色 LED 光谱数据和实测数据进行比较,结果表明本实验制作数据集中使用的修正高斯拟合函数能够以足够高的吻合度模拟单色 LED 光谱。基于单色 LED 光谱并结合光谱叠加原理,也能够随机生成与实测数据相似度极高的不同光强比例的混合光谱,通过增加训练集数据量可以进一步提升数据多样性,进而保证算法性能。为提高拟合精度,共生成 4000 条拟合光谱用作训练集以及 800 条拟合光谱用作测试集进行模型训练,训练次数设置为 2000 次,在训练过程中记录拟合相关指数 R^2 最大时的网络模型参数,以便于使用同一训练模型复现不同光谱。模型训练和复现光谱的流程如图 2(a)所示,整体流程如下:

- 1) 采用基于修正高斯分布拟合函数的光谱模型,生成光谱数据训练集和测试集。
- 2) 适当调整隐藏层的层数、激励函数、损失函数等模型参数,搭建应用于自然光谱复现的全连接神经网络结构模型。
- 3) 输入训练集,由隐藏层计算偏置和权重,并返回损失函数值对偏置和权重再作用,使预测值不断接近真实值。训练过程中拟合相关指数 R^2 随迭代次数逐渐接近 1 的误差变化曲线如图 2(b)所示。
- 4) 重复步骤 2)、3),直到满足精度要求或训练结束,训练结束后将模型固定保存。
- 5) 调取全连接神经网络模型,输入经数据处理后的目标光谱,优化不同单色 LED 的匹配组合,得到最优比例系数组合。
- 6) 将预测得到的 LED 比例系数代入式(1)和式(2)生成模拟光谱,最终实现目标光谱复现。

4 结果和讨论

AM1.5 等标准太阳光谱是人们为了对在不同时间和地点测量的太阳能转换效率进行比较而定义的,通常作为太阳能转换系统标准测试的参考光谱。为了便于与其他算法进行对比,首先将标准太阳光谱的 380~680 nm 波长范围作为目标光谱,应用基于全连接神经网络的光谱复现方法,利用 23 种峰值波长间隔不等、半峰全宽不均匀的单色 LED 求得最优组合比例,以完成光谱复现。图 3 给出了 AM1.5、CIE-D65、CIE-A 标准太阳光谱的复现结果。首先应用该方法针

表 1 所选单色 LED 的峰值波长和半峰全宽($\Delta\lambda$)

Table 1 Peak wavelength and full width at half maximum ($\Delta\lambda$) of the selected monochrome LEDs

No.	Peak wavelength / nm	$\Delta\lambda$ / nm	No.	Peak wavelength / nm	$\Delta\lambda$ / nm
1	385	9	13	577	17
2	395	17	14	590	13
3	405	19	15	600	15
4	420	16	16	610	15
5	435	16	17	617	17
6	450	19	18	625	14
7	470	24	19	636	23
8	490	32	20	645	16
9	505	30	21	660	16
10	525	28	22	670	22
11	545	39	23	680	24
12	565	25			

对 AM1.5 标准太阳光谱进行复现,经过神经网络计算得到 23 种单色 LED 光强系数比例,并且为便于数据观察和对比,将系数比例进行同比例放大,得到 26:0:65:55:47:77:73:48:45:34:65:37:47:42:44:32:24:25:35:22:24:14:23,即目标光谱的变化可以通过单色 LED 的辐射强度系数来体现。复现的 AM1.5 标准太阳光谱与归一化后的标准太阳光谱 AM1.5 的结果对比如图 3(a)所示,可以看到二者具有明显的一致性,

以 R^2 表示的拟合相关指数达到 0.9670。图 3(b)、(c)所示分别为 CIE-D65、CIE-A 标准光谱与其复现结果的对比,拟合相关指数分别为 0.9812 和 0.9815,可以看到,以光照的相对辐射通量为纵坐标的两条曲线高度吻合,拟合生成的光谱分布与目标光谱分布十分相似,效果非常理想。

此外,为了进一步研究所提光谱复现模型的普适性,针对更多变性的实测光谱进行仿真实验,复现得到的光谱和实测光谱的对比结果如图 4 所示。图 4(a)~(d)分别表示实测公园无遮挡和灯光影响处正常晴天的 6 时、11 时、18 时和 19 时 30 分的自然光谱与复现光谱的对比,对应的拟合相关指数分别为 0.9520、0.9627、0.9855 和 0.9726,证明本文模型能够准确地复现实测太阳光谱。为进一步提高拟合精度,对比标准太阳光谱和实测自然光谱的复现结果,发现在实测光谱出现较大波动或尖峰处,复现光谱容易出现偏差。以 6 时和 18 时的复现结果为例:6 时的复现光谱在 405~425 nm 以及 470~560 nm 范围出现明显大于 18 时相同波段的频谱波动,导致其复现拟合度下降;18 时的实测光谱在整段波长范围内均偏向平稳,拟合度达到 0.98 以上。为减小频谱波动处的复现偏差,常用的方法是增加单色 LED 的种类,但现阶段无法生产出任意波长、半峰全宽足够窄的单色 LED,因此将全连接神经网络用于频谱波动大、复杂度高、变化性强的自然光谱匹配技术,具有重要的工程实践意义。

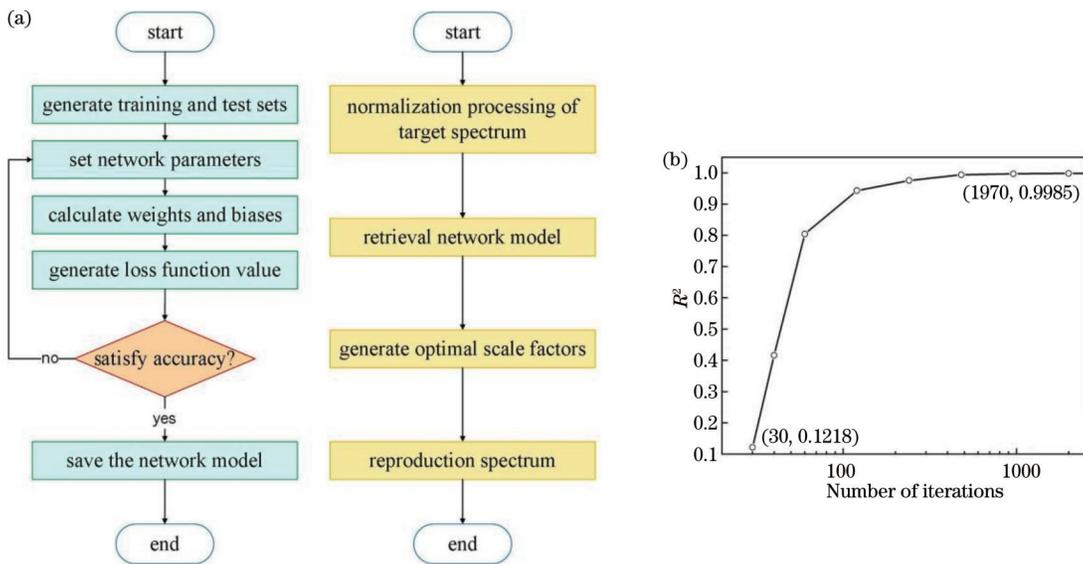


图 2 全连接网络训练和光谱复现。(a)光谱复现流程;(b)相关指数变化曲线

Fig. 2 Training and spectral reproduction in the fully connected network. (a) Process of spectral reproduction; (b) change curve of correlation index

为了分析更多采用所提方法的光谱复现结果,使用复现图 3 和图 4 中太阳光谱的同一网络模型对更多不同实测光谱进行复现,更多复现光谱的详细数据见表 2,其中目标光谱包括晴天中多个时刻的光谱分布、

阴天光谱分布和 3 条标准太阳光谱分布。通过观察最优系数比例可明显看出多种 LED 灯的不同辐射通量变化能够满足目标光谱中辐射通量的总体变化趋势,如晴天 11 时实测光谱的最优组合比例中 LED 的系数

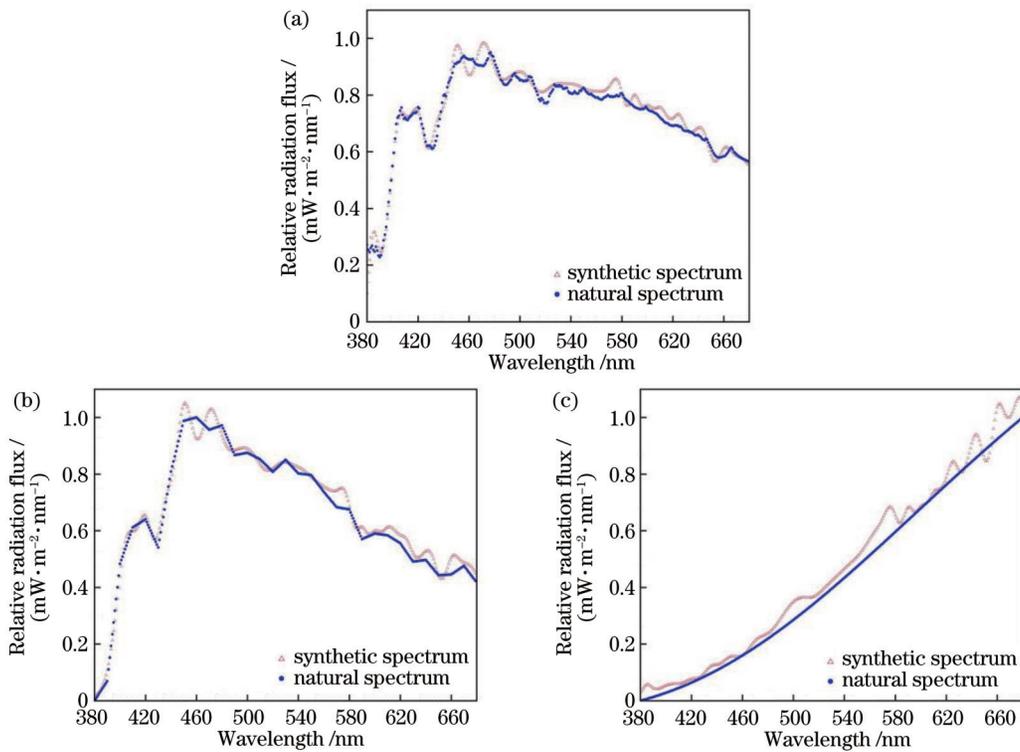


图 3 AM1.5、CIE-D65、CIE-A 标准光谱与复现光谱的对比。(a) AM1.5; (b) CIE-D65; (c) CIE-A

Fig. 3 Comparison of standard solar spectra of AM1.5, CIE-D65, and CIE-A and reproduction spectra. (a) AM1.5; (b) CIE-D65; (c) CIE-A

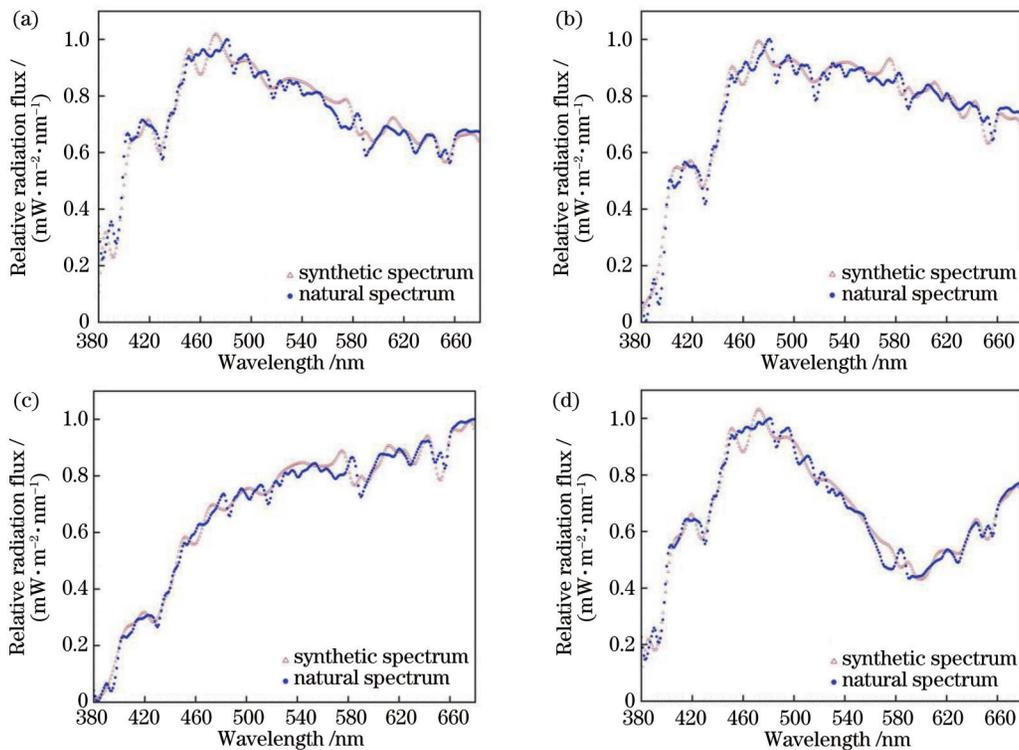


图 4 在同一晴天的不同时刻实测自然光谱与复现光谱的对比。(a) 6:00; (b) 11:00; (c) 18:00; (d) 19:30

Fig. 4 Comparison of measured natural spectra and reproduction spectra at different time on the same sunny day. (a) 6:00; (b) 11:00; (c) 18:00; (d) 19:30

从 4 上升到 48 后有少量下降再升至 71, 最后下降到 36, 通过此系数的变化就能预测出光谱分布在 400~

440 nm 范围存在尖峰, 且在第二个最高点后呈缓慢的波动下降趋势。同时, 比例系数如 54:44:36:72:39:

53:44:50 在小范围内的波动,反映了目标光谱的频谱波动现象。即无论是针对实测光谱还是标准太阳光谱,采用所提方法得到的合成光谱与自然光谱均高度

近似,并且相关指数能达到 0.95 以上,拟合效果稳定且准确。

表 2 用于仿真实验的目标光谱复现结果

Table 2 Target spectrum reproduction results used in simulation experiments

Target spectrum	R^2	Optimal combination ratio
Sunny day, 6:00	0.9520	26:1:56:53:47:75:73:55:43:36:66:34:41:33:36:30:26:17:34:20:23:18:29
Sunny day, 7:00	0.9570	17:0:52:48:43:73:72:55:43:36:69:17:45:36:41:35:29:21:39:25:28:21:35
Sunny day, 8:00	0.9512	30:1:62:57:49:77:74:53:42:33:61:32:39:29:33:26:19:15:26:11:12:12:11
Sunny day, 9:00	0.9515	25:0:58:52:46:75:73:53:43:34:65:35:44:34:38:31:23:19:32:18:20:14:21
Sunny day, 10:00	0.9631	3:2:47:41:36:70:71:54:45:36:74:40:54:46:51:42:33:30:48:36:41:24:51
Sunny day, 11:00	0.9627	4:0:48:41:36:70:71:54:44:36:72:39:53:44:50:41:32:30:47:35:39:23:49
Sunny day, 12:00	0.9548	23:2:60:53:46:77:73:53:42:33:63:34:42:33:37:39:22:18:30:16:18:14:18
Sunny day, 13:00	0.9596	5:8:49:42:36:70:71:53:44:35:71:37:51:42:48:39:30:28:44:33:36:21:45
Sunny day, 15:00	0.9527	32:1:66:59:49:78:74:53:40:31:58:30:36:25:30:24:17:12:23:8:8:12:05
Sunny day, 16:00	0.9604	16:0:55:52:46:76:73:54:42:34:65:35:44:34:39:32:25:20:35:21:24:17:28
Sunny day, 18:00	0.9855	0:0:22:24:22:45:48:41:37:32:67:38:51:42:51:42:40:31:58:44:54:30:76
Sunny day, 19:00	0.9763	0:0:28:28:25:48:50:42:35:30:60:32:42:35:40:36:35:24:51:40:47:31:72
Sunny day, 19:30	0.9726	17:0:49:49:46:75:74:56:42:34:54:24:26:26:22:18:23:12:31:27:29:21:45
Cloudy day	0.9522	4:0:31:31:27:51:50:43:34:31:64:36:40:31:38:38:33:20:44:29:32:29:45
CIE-D65	0.9812	0:0:51:48:45:84:76:51:43:36:63:33:41:31:38:27:28:20:34:23:29:17:32
CIE-A	0.9815	4:1:4:5:8:11:14:14:21:14:37:32:40:38:43:33:29:34:51:46:65:18:89
AM1.5	0.9670	26:0:65:55:47:77:73:48:45:34:65:37:47:42:44:32:24:25:35:22:24:14:23

对基于全连接神经网络模型在不同时段的实测光谱复现结果和基于传统智能优化算法得到的结果进行比较,结果如图 5 所示。图 5(a)所示为基于相同单色 LED 分别使用全连接神经网络模型和遗传算法对多条实测太阳光谱进行复现的光谱吻合度对比。由图 5(a)可知,遗传算法在多条光谱拟合时出现拟合度较低的情况,例如晴天 10 时的复现光谱和实测光谱的相关指数只有 0.88,而使用全连接神经网络模型拟合的光谱吻合度均在 0.95 以上,其能够稳定且高准确度地进行光谱复现,这主要得益于全连接神经网络具有能够准确把握输入和输出之间非线性关系的卓越能力。此外,

全连接神经网络在训练结束后将网络参数保存在模型中,之后预测数据时无须重新进行训练,直接使用模型的输入与输出关系即可。因此,当成功训练出目标光谱与单色 LED 比例系数之间的关系模型后,能够以足够快的速度进行预测,从而降低了模拟太阳光谱的时间成本。图 5(b)所示为分别使用全连接神经网络模型和使用遗传算法为匹配算法对太阳光谱进行拟合的时间对比,使用 CPU 为 AMD R5-5600H, GPU 为 RTX 3050Ti,内存为 16 GB 的计算机进行模拟仿真。从图 5(b)可看出:以遗传算法为光谱匹配算法时,在寻找最优解过程中计算量较大、迭代次数较多,导致模

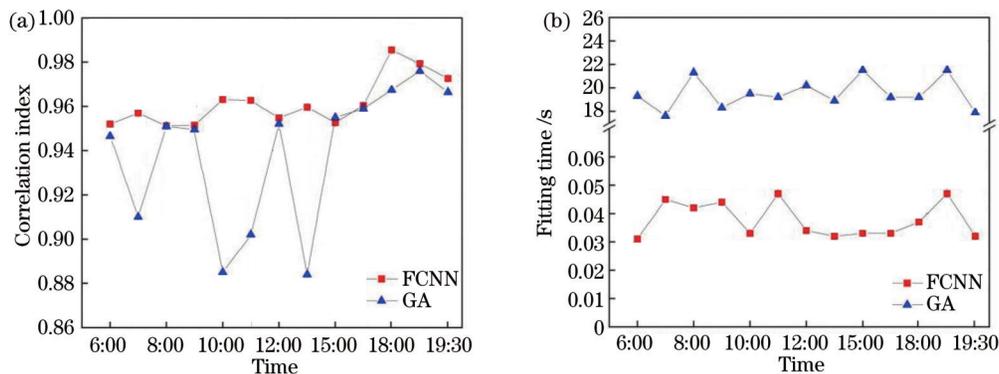


图 5 全连接神经网络模型和遗传算法复现光谱的对比。(a)吻合度对比;(b)拟合时间对比

Fig. 5 Comparison of spectrum reproduction between fully connected neural network model and genetic algorithm. (a) Coincidence comparison; (b) fitting time comparison

拟太阳光谱需要 20 s 左右的时间;所提光谱匹配算法能够使用同一个训练得到的网络模型对不同光谱进行复现,节省了遗传算法中每次匹配时的迭代计算时间。如果不计全连接网络模型的训练时间,使用神经网络复现一条目标光谱约需 0.04 s,仅为遗传算法的 1/500,拟合效率显著提高。

5 结 论

针对目前模拟全光谱分布、实现全光谱照明所采用的光谱匹配算法计算量大、拟合时间长、稳定性低等问题,提出一种基于全连接神经网络的自然光谱复现方法。在采用 23 个不同峰值波长和半峰全宽的单色 LED 的叠加光谱数据成功训练和测试,并完成全连接网络模型构建的基础上,对不同时段和天气情况下的实测自然光谱与标准太阳光谱进行复现,并且与基于遗传算法的光谱匹配法进行对比实验,着重关注拟合时间和拟合精度。结果表明,基于全连接神经网络的光谱复现方法的相关指数可达 0.95 以上,复现所需运行时间在 50 ms 以内。可见,该方法能够稳定、高效、精确地复现自然光谱,并且可使用同一个训练模型完成多种 LED 光谱的复现,其匹配速度较遗传算法提高了数倍,能够为多光谱照明的特殊光源开发提供一种全新的方法。

参 考 文 献

- [1] 唐帆. LED 全光谱合成方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
Tang F. Study on LED full spectrum synthesis method[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.
- [2] 甘汝婷, 郭震宁, 林介本, 等. 遗传算法在 LED 光源光谱匹配技术中的应用[J]. 光子学报, 2014, 43(7): 0730003.
Gan R T, Guo Z N, Lin J B, et al. The genetic algorithm in the application of the LED light source spectral matching technology [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(7): 0730003.
- [3] van der Broeck H, Sauerlander G, Wendt M. Power driver topologies and control schemes for LEDs[C]//APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 25-March 1, 2007, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2007: 1319-1325.
- [4] Fan J J, Li Y T, Fryc I, et al. Machine-learning assisted prediction of spectral power distribution for full-spectrum white light-emitting diode[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 12(1): 8200218.
- [5] Mohan M V A, Pavithran J, Osten K L, et al. Simulation of spectral match and spatial non-uniformity for LED solar simulator[C]//2014 IEEE Global Humanitarian Technology Conference-South Asia Satellite (GHTC-SAS), September 26-27, 2014, Trivandrum, India. New York: IEEE Press, 2014: 111-117.
- [6] 张玉宝, 董礼, 张国英. 基于有效集算法的大功率单色 LED 太阳光谱模拟仿真[J]. 发光学报, 2018, 39(6): 862-869.
Zhang Y B, Dong L, Zhang G Y. Simulation of high power monochromatic LED solar spectrum based on effective set algorithm[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(6): 862-869.
- [7] 倪俊雄, 白廷柱, 徐英莹. LED 可变光谱光源的多光谱拟合反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1606-1610.
Ni J X, Bai T Z, Xu Y Y. The research on multi-spectral fitting of LED spectrum tunable light source[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1606-1610.
- [8] 柳丝婉, 李福生, 韩秋漪, 等. 九基色合成全光谱白光 LED 的两种算法[C]//2018 年中国照明论坛——半导体照明创新应用暨智慧照明发展论坛论文集. 北京: 中国照明学会, 2018: 75-84.
Liu S W, Li F S, Han Q Y, et al. Two algorithms for synthesizing full spectrum white LEDs with nine primary colors [C]//2018 China Lighting Forum-Proceedings of semiconductor lighting innovation and application and smart lighting Development Forum. Beijing: China Illuminating Engineering Society, 2018: 75-84.
- [9] Liu G. It may be time to perfect the neuron of artificial neural network[EB/OL]. [2022-10-08]. <https://pdfs.semanticscholar.org/615e/4cd55e77770c6fbc2631f9e80e38ca7b2c0.pdf>.
- [10] 王崇, 李雯雯, 张露, 等. 基于人工神经网络的室内自然光照度预测[J]. 物联网技术, 2020, 10(9): 52-53, 57.
Wang C, Li W W, Zhang L, et al. Prediction of indoor natural light illumination based on artificial neural network[J]. Internet of Things Technologies, 2020, 10(9): 52-53, 57.
- [11] 朱继亦. 基于 LED 的光谱可调光源的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
Zhu J Y. The research of LED-based spectrally tunable source [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [12] 郭震宁, 廖炫, 甘汝婷, 等. 采用遗传算法的 LED 太阳光谱仿真[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 731-736.
Guo Z N, Liao X, Gan R T, et al. Spectrum simulation of LED solar light based on genetic algorithm[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2016, 37(6): 731-736.
- [13] 沈海平, 冯华君, 潘建根, 等. LED 光谱数学模型及其应用[C]//走近 CIE 26th 中国照明学会(2005)学术年会论文集. 北京: 中国照明学会, 2005: 97-99.
Shen H P, Feng H J, Pan J G, et al. Mathematical model of LED spectrum and its application[C]//Approaching CIE 26th Proceedings of the Academic Annual Meeting of China Lighting Society (2005). Beijing: China Illuminating Engineering Society, 2005: 97-99.
- [14] 杨丽娟. 基于全连接神经网络的量子导引研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
Yang L J. Research on quantum steering based on fully connected neural network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [15] 陈孝聪. 基于 smoothL1 改进的边框回归损失函数[J]. 大学数学, 2021, 37(5): 18-23.
Chen X C. Improved bounding box regression loss function based on smoothL1[J]. College Mathematics, 2021, 37(5): 18-23.
- [16] 张焕, 张庆, 于纪言. 激活函数的发展综述及其性质分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2021, 40(4): 1-10.
Zhang H, Zhang Q, Yu J Y. Overview of the development of activation function and its nature analysis[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2021, 40(4): 1-10.
- [17] 刘荣. 神经网络基本原理概述[J]. 计算机产品与流通, 2020(6): 35, 81.
Liu R. Overview of basic principles of artificial neural network [J]. Computer Products and Circulation, 2020(6): 35, 81.

A Method for Natural Spectral Reproduction Based on Fully Connected Neural Network

Ren Zimao^{1,2}, Lu Huimin^{1,2*}, Feng Liya¹, Yang Lu^{1,2}, Zhu Yifan¹, Wang Jianping¹

¹*School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*

²*Shunde Innovation School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528000, Guangdong, China*

Abstract

Objective With the continuous development of light sources based on light-emitting diodes (LEDs), the demand for illumination has shifted from initial environmental protection and energy conservation to healthiness and comfort. Sunlight is commonly considered to be a perfect lighting source due to its full spectrum characteristic, which not only is most suitable for human visual and non-visual needs but also is widely used in plant growth experiments, phototherapy equipment research, photovoltaic cell testing, camera fill light, etc. In recent years, realizing a light source close to the solar spectrum has become a new development goal of semiconductor lighting. However, due to low algorithm accuracy and operation speed, the existing spectral reproduction methods cannot flexibly reproduce the spectrum to meet industrial needs in practical applications. Therefore, we propose a method based on a fully connected neural network (FCNN) to reproduce natural spectra with high accuracy and speed.

Methods In this work, in order to reproduce the natural spectrum accurately and quickly, a neural network with strong nonlinear fitting ability is proposed to complete spectrum matching. First of all, according to the characteristics of the continuous wide band for natural spectra and spectral distribution for monochromatic LEDs, 23 monochromatic LEDs with different peak wavelengths and full widths at half maximum are selected to make up for the natural spectrum. Then, according to the modified Gaussian distribution spectrum fitting model and spectral superposition principle, different spectral data as the training set and test set for the FCNN model are generated by using monochromatic LEDs' spectra. On this basis, the trained FCNN model that fully reflects the proportional relationship between the synthetic spectrum and the light intensity coefficient of each monochromatic LED is constructed, which can reversely obtain LED ratio parameters from the synthetic spectrum. In other words, the method based on FCNN can obtain the corresponding proportional coefficient of monochromatic LED light intensity for the input target spectrum and then realize spectral reproduction.

Results and Discussions Firstly, the wavelength of 380–680 nm of the standard solar spectrum as the target spectrum is reproduced by using the proposed method based on FCNN. The results demonstrate that the fitting correlation indexes of the spectrum reproduction results for the standard spectra AM1.5, CIE-D65, and CIE-A are 0.9670, 0.9812, and 0.9815, respectively (Fig. 3). In order to verify the applicability of the proposed method for different spectra, the proposed network model is used to reproduce more natural spectra measured in different time periods, which reveals that the fitting correlation indexes of the reproduction results for the spectra at 6:00, 11:00, 18:00, and 19:30 are 0.9520, 0.9627, 0.9855, and 0.9726, respectively (Fig. 4). In other words, whether it is for the measured spectrum or the standard solar spectrum, the synthetic spectrum obtained by the proposed method based on FCNN can be highly similar to the target spectrum, and the correlation index can reach above 0.95. In addition, the fitting accuracy and time cost of natural spectrum reproduction using the proposed method are further compared with that using an intelligent optimization algorithm. As a result, the method based on FCNN not only has higher accuracy stability but also requires less fitting time than the genetic algorithm (GA) for spectrum reproduction (Fig. 5). This is because the FCNN can save the network parameters and fully reflect the relationship between target spectrum and the monochromatic LED scale coefficient, and the model after training can be used directly to reproduce natural spectrum with small time costs. The results show that the average running time of the proposed method is 0.04 s, which is several times faster than the method based on GA in reproducing different natural spectra.

Conclusions In this work, a method of natural spectrum reproduction based on FCNN is proposed to overcome the weakness of long fitting time and low accuracy stability of the current matching algorithms. After successfully training and testing the superimposed spectral data of 23 monochromatic LEDs with different peak wavelengths and full widths at half maximum, the FCNN model for natural spectrum reproduction can be constructed. On this basis, the standard solar spectrum and measured natural spectrum at different time are reproduced using the FCNN model and compared with that using the spectral matching method based on the GA in terms of the fitting time and fitting accuracy. The results show that

the correlation index of the reproduction results using the proposed method based on FCNN can all reach above 0.95, and the running time required for reproduction is all less than 50 ms for different natural spectra. Furthermore, the proposed natural spectrum reproduction method based on FCNN has higher accuracy stability and requires less fitting time than the GA. Therefore, the method proposed in this work can reproduce different natural spectra stably, efficiently, and accurately, which can provide a new solution for the development of light sources in full-spectrum illumination.

Key words spectroscopy; natural spectrum; LED; neural network; spectral reproduction