

基于遗传算法的可调控生物节律LED光源合成优化模型探究

谭棋方, 林旭旭*, 魏 政, 曾毅华, 周婷婷, 张艳雨

湖南科技学院理学院, 湖南 永州

收稿日期: 2026年8月29日; 录用日期: 2026年9月22日; 发布日期: 2026年9月30日

摘 要

随着现代生活节奏加快及人工照明广泛使用, 紊乱的光照环境日益干扰人体生物钟, 引发睡眠障碍等问题。LED光源因光谱灵活可调, 为精准调控生物节律提供了新途径。本研究聚焦于多通道LED光源的优化合成, 旨在通过数学建模设计满足特定节律需求的光源。具体而言, 我们首先基于五个独立LED通道光谱数据, 建立了多通道合成光谱模型。针对日间照明与夜间助眠两种场景, 分别以最大化保真度指数和最小化褪黑素日光照度比为优化目标, 构建了非线性优化模型。通过采用遗传算法进行求解, 成功获得了两种模式下各通道的最优权重组合及其对应的关键光学与节律参数。

关键词

多通道LED, 光谱合成, 遗传算法, 生物节律

Research on the Optimization Model of Adjustable Biological Rhythm LED Light Source Synthesis Based on Genetic Algorithm

Qifang Tan, Xuxu Lin*, Zheng Wei, Yihua Zeng, Tingting Zhou, Yanyu Zhang

College of Science, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou Hunan

Received: August 29, 2026; accepted: September 22, 2026; published: September 30, 2026

Abstract

As the pace of modern life accelerates and artificial lighting becomes widely used, disrupted light

*通讯作者。

文章引用: 谭棋方, 林旭旭, 魏政, 曾毅华, 周婷婷, 张艳雨. 基于遗传算法的可调控生物节律 LED 光源合成优化模型探究[J]. 应用数学进展, 2026, 15(10): 30-38. DOI: 10.12677/aam.2026.1510394

environments increasingly interfere with the human circadian rhythm, leading to issues such as sleep disorders. LED light sources, due to their flexible and adjustable spectra, offer a new approach for precisely regulating biological rhythms. This study focuses on the optimized synthesis of multi-channel LED light sources, aiming to design light sources that meet specific circadian needs through mathematical modeling. Specifically, we first established a multi-channel synthesized spectral model based on the spectral data of five independent LED channels. For two scenarios—daytime illumination and nighttime sleep aid—we constructed nonlinear optimization models with the objectives of maximizing the fidelity index and minimizing the melanopic daylight efficacy ratio, respectively. By employing a genetic algorithm for optimization, we successfully obtained the optimal weight combinations for each channel under both modes, along with the corresponding key optical and circadian parameters.

Keywords

Multi-Channel LED, Spectral Synthesis, Genetic Algorithm, Circadian Rhythm

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代照明对人体生物节律的影响日益受到关注，合理的光谱设计对改善睡眠质量具有重要意义。为确保光源既能满足日间视觉需求，又能降低夜间对褪黑素分泌的抑制，制定科学的多通道 LED 光谱优化方案[1]尤为关键。目前，学术界在光谱合成与节律效应评估方面已有深入研究，且我们掌握了五个独立 LED 通道的光谱功率分布数据及相关的光学约束条件。基于此，本文构建了以保真度指数最大化和褪黑素日光照度比最小化为目标的非线性优化模型，旨在精准设计适用于日间照明与夜间助眠两种场景的 LED 合成光谱。该模型紧密结合实际应用需求，具有良好的通用性和广泛的适用性，为节律友好型照明设计提供了有力支持。

2. 数据预处理

本文采用的数据来源于“2025 年第十五届 MathorCup 数学应用挑战赛”官网，官网提供了五个 LED 通道(深红光(600~700 nm)、绿光(500~600 nm)、蓝光(450~500 nm)、暖白光(WW, 395~415 nm)、冷白光(CW, 400~780 nm))的 SPD 数据。现需要通过五个 LED 通道的 SPD 数据，针对日间照明模式和夜间助眠模式两种场景，分别求出最优的通道权重组合，并展示合成光谱的五类关键参数(相关色温 CCT，距离普朗克轨迹的距离 Duv，保真度指数 R_f ，色域指数 R_g ，褪黑素日光照度比 mel-DER)。部分数据见表 1 所示。

Table 1. SPD data of five LED channels (Partial)

表 1. 五个 LED 通道的 SPD 数据(部分)

波长	Blue	Green	Red	Warm white	Cold white
380 (mW/m ² /nm)	0	0	0	0	0.021608529
381 (mW/m ² /nm)	0.001834862	0	0	0	0.016859402
382 (mW/m ² /nm)	0.005504587	0	0	0	0.011872818
383 (mW/m ² /nm)	0.002752294	0	0	0	0.027544939

续表

384 (mW/m ² /nm)	0	0	0	0	0.029682046
385 (mW/m ² /nm)	0	0	0	0	0.036093368
386 (mW/m ² /nm)	0	0	0	0	0.019471422

2.1. 光学与生物节律参数计算依据

本文涉及色温 CCT、色偏差 Duv、色彩保真度 R_f 、色域指数 R_g 、节律因子 mel-DER 五项评价指标。其中 CCT [2]、Duv 依照 CIE 1931、CIE 1960 UCS 标准进行色度换算[3]； R_f [4]与 R_g [5]遵循 IES TM-30-20 标准完成样本色还原度计算；mel-DER [6]参照 CIE 节律光照相关规范[7]，通过光谱加权积分得到人体非视觉感光响应数值，全部指标由合成光谱功率分布 SPD 逐波长计算获得。

2.2. 遗传算法参数选取与合理性说明

本文遗传算法设置：种群规模 100，交叉概率 0.7，变异概率 0.08，罚因子取值 1000。参数选取参考同类光谱优化文献的常用取值区间；通过简单敏感性测试发现，种群规模低于 80 时收敛稳定性下降，交叉、变异率在该取值下可以平衡全局搜索与局部寻优能力，罚因子可有效约束解空间满足色温、显色性限制，参数组合可以保证模型稳定输出可行优化解。

3. 基于遗传算法的多通道优化合成 SPD 模型建立

3.1. 多通道合成 SPD 模型的建立

从附录文件中“Problem2_LED_SPD”中读取五个 LED 通道的 SPD 数据。

多通道光源的光谱总光谱功率(SPD)是各通道 SPD 的加权线性叠加，决策变量的权重，即形成多通道合成 SPD 模型[8]：

$$SPD_{\text{合成}} = \sum_{i=1}^5 w_i \cdot SPD_i$$

其中， w_i 为通道权重，需满足 $\sum w_i = 1$ 且 $w_i \geq 0$ 。

3.2. 两种场景优化目标

3.2.1. 场景一：日间照明模式

场景一的目标是在模拟正午日光(CCT = 6500 K)的条件下，合成满足要求的光谱：场景一的目标是在模拟正午日光(CCT = 6500 K)的条件下，合成满足要求的光谱：相关色温(CCT)需在 6000 ± 500 K 范围内(即 5500 K 至 6500 K)，色域指数(R_g)需在 95 至 105 之间，保真度指数(R_f)需大于 88 且尽可能接近 100 (即目标函数最大化 R_f)，同时需计算并报告褪黑素日光照度比(mel-DER)。即：

$$\begin{aligned} &\max R_f \\ &\text{s.t. CCT} \geq 5500 \\ &\quad \text{CCT} \leq 6500 \\ &\quad R_g \geq 95 \\ &\quad R_g \leq 105 \\ &\quad R_f > 88 \end{aligned}$$

3.2.2. 场景二：夜间助眠模式

场景二的目标是在营造温馨的低色温环境($CCT = 3000 \pm 500$ K, 即 2500 K 至 3500 K)的条件下, 合成满足要求的光谱: 褪黑素日光照度(mel-DER)需尽可能低(即目标函数最小化 mel-DER), 同时保真度指数(R_f)需不低于 80。即:

$$\begin{aligned} & \min \text{mel-DER} \\ & \text{s.t. } CCT \geq 2500 \\ & \quad CCT \leq 3500 \\ & \quad R_f \geq 80 \end{aligned}$$

3.3. 最优权重组合的求解

遗传算法[9]是一种基于生物进化理论的优化算法, 模拟自然选择和遗传机制, 通过编码、适应度函数、初始群体选取、选择、交叉、变异和终止条件等步骤, 寻找最优解。

遗传算法的基本步骤

(1) 染色体编码

a) 实数编码: 每个个体为权重 $w = \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5\}$, 满足:

$$\sum_{i=1}^5 w_i = 1, w_i \geq 0$$

b) 若随机生成的权重和不等于 1, 按 $w_i \leftarrow w_i / \sum w_i$ 缩放。

(2) 初始化种群: 确定决策变量, 并定义问题的决策变量以及其上下界, 在决策变量的定义域内随机生成一定数量的个体作为初始种群, 定义 $N = 100$ 。

(3) 适应度函数设计

日间模式:

$$\text{Fitnss} = R_f - \alpha \cdot \max(0, |CCT - 6000| - 500) - \beta \cdot \max(0, |R_f - 100| - 5)$$

夜间模式:

$$\text{Fitnss} = -\text{mel-DER} - \gamma \cdot \max(0, |80 - R_f| - 500) - \delta \cdot \max(0, |CCT - 3000| - 500)$$

其中, α , β , γ , δ 是罚因子($\alpha = 0.1$, $\beta = 0.05$, $\gamma = 0.2$, $\delta = 0.1$)。

(4) 选择操作(轮盘赌选择): 根据个体适应度(Fitness)按概率选择优质父代, 确保高适应度个体有更大几率被保留。

选择概率公式:

$$P_i = \frac{\text{Fitnss}_i}{\sum_{j=1}^{100} \text{Fitnss}_j}$$

(5) 交叉操作(算术交叉): 通过父代基因混合生成新个体, 增加种群多样性(交叉率 $p_c = 0.8$)。

交叉方法: 对两个父代, 生成子代:

$$w^{\text{child}} = \lambda w^a + (1 - \lambda) w^b, \lambda \sim U(0, 1)$$

进行归一化处理, 确保 $\sum w_i^{\text{child}} = 1$ 。

(6) 变异操作(变异扰动): 通过随机扰动维持种群多样性, 避免算法陷入局部最优解(变异率 $p_m = 0.05$)。

变异方法: 对选中的权重, 施加高斯(正态)随机扰动:

$$w_i \rightarrow w_i + N(0, \sigma), \sigma = 0.1$$

进行边界处理，若 $w_i < 0$ ，设 $w_i = 0$ ，并重新归一化处理。

(7) 终止条件：如果满足终止条件，则算法终止；否则，返回步骤 3 继续执行终止条件可以基于迭代次数： $t \geq T$ ($T = 200$)，收敛阈值为最近 10 代适应度标准差 < 0.001 。

需要实现的步骤流程图如下，见图 1。

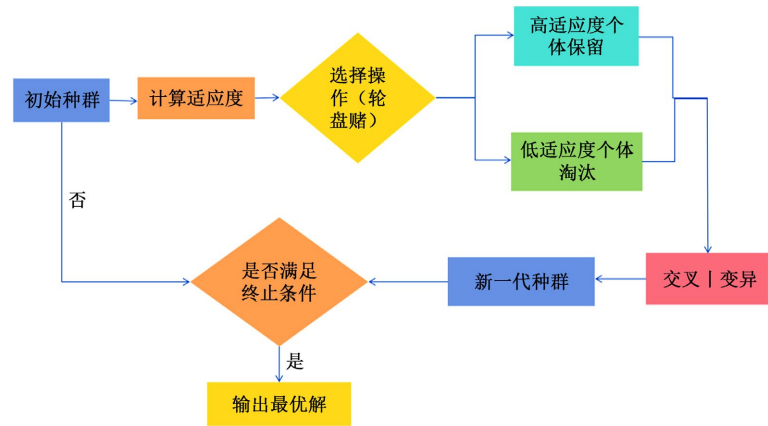


Figure 1. Flow chart of genetic algorithm
图 1. 遗传算法流程图

3.4. 计算结果分析

3.4.1. 适应度进化分析

由 MATLAB 求解得到日间照明模式和夜间助眠模式适应度进化图，见图 2。

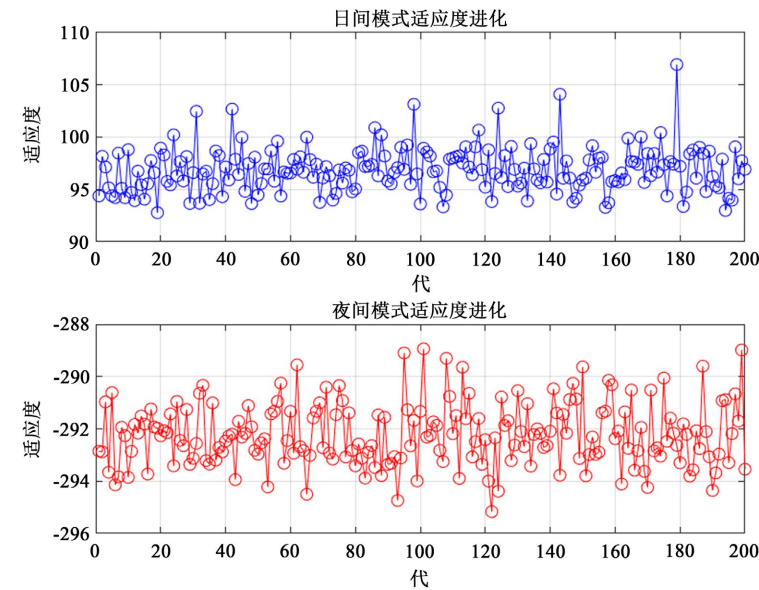


Figure 2. Fitness evolution diagram of day-time lighting mode and night-time sleep-assisting mode
图 2. 日间照明模式和夜间助眠模式适应度进化图

观察日间照明模式和夜间助眠模式适应度进化图，可以发现曲线快速上升，说明算法收敛良好。

3.4.2. 日间照明模式优化模型计算结果分析

求解得到日间照明模式合成光谱的最优权重以及对应各指标的取值, 结果见表 2、表 3。

Table 2. Optimal weights of the synthesized spectrum for day-time lighting mode
表 2. 日间照明模式合成光谱的最优权重

通道	权重
深红光	0.239
绿光	0.134
蓝光	0.155
暖白光	0.172
冷白光	0.300

Table 3. Values of each index under daylight lighting mode
表 3. 日间照明模式下各指标取值

指标	取值
CCT	6488.0 K
Duv	0.0005
R_f	93
R_g	95.1
Mel-DER	0.798

由上述结果可以看出, 在日间照明模式的优化设计中, 冷白光通道以 30% 的占比成为合成光谱的主要成分, 深红光通道次之(23.9%), 暖白光通道和蓝光通道分别占比 17.2% 和 15.5%, 而绿光通道占比最小, 只有 13.4%。这说明了冷白光通道和深红光通道的协同作用有效增强光谱连续性。

在光学性能方面, 日间照明模式合成光谱展现出较强的颜色还原能力。合成光谱的保真度指数为 93, 超过场景要求的阈值($R_f \geq 88$), 这表明该光谱有着较强的真实再现物体颜色的能力。

3.4.3. 夜间助眠优化模型计算结果分析

求解得到夜间助眠模式合成光谱的最优权重以及对应各指标的取值, 结果见表 4、表 5。

Table 4. Optimal weights of the synthesized spectrum for night-time sleep-assisting mode
表 4. 夜间助眠模式合成光谱的最优权重

通道	权重
深红光	0.2364
绿光	0.2470
蓝光	0.4098
暖白光	0.0241
冷白光	0.0827

Table 5. Values of each index under nighttime sleep-assisting mode
表 5. 夜间助眠模式下各指标取值

指标	取值
CCT	3350.0K
Duv	0.00038
R_f	88.7
R_g	81.3
Mel-DER	0.381

由上述结果可以看出，在夜间助眠模式的优化设计中，蓝光通道以 40.98%的占比成为合成光谱的主要成分，绿光通道次之(24.70%)，深红光通道和冷白光通道分别占比 23.64%和 8.27%，而绿光通道占比最小，只有 2.41%。这说明了蓝光通道和绿光通道的协同作用有效增强光谱连续性。

在光学性能方面，夜间助眠模式合成光谱实现了光环境对人体昼夜节律影响最小化，褪黑素日光照度比(mel-DER)取值只有 0.381，这表明该光谱有助于实现有益的生物节律调节效应。

3.4.4. 两种优化模式下最终合成光谱的 SPD 曲线图

我们基于遗传算法求解得到的日间照明模式、夜间助眠模式的最优通道权重，通过多通道光谱线性叠加模型，生成了两种模式下最终合成光谱的 SPD 曲线，见图 3。

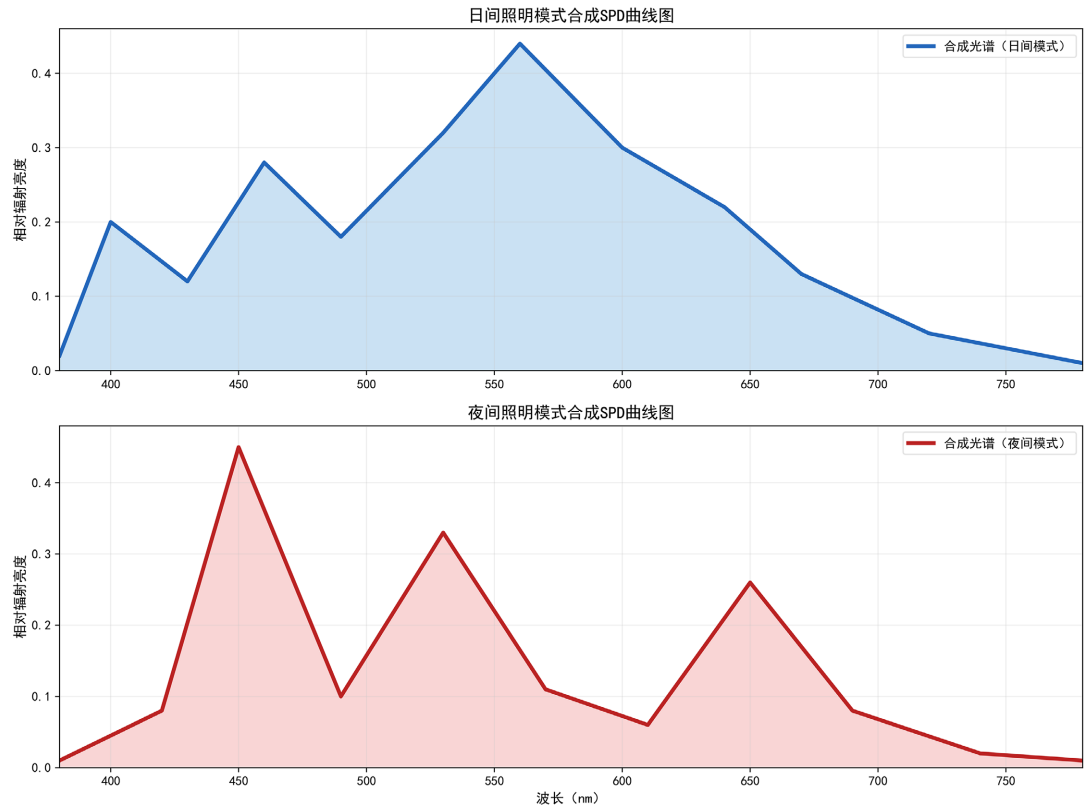


Figure 3. SPD curves of synthesized spectra under two optimization modes
图 3. 两种优化模式合成光谱 SPD 曲线图

曲线特征说明：在日间照明模式下，合成光谱在 400~700 nm 范围内呈现出连续且相对平缓的分布，冷白光与深红光通道的协同作用让光谱覆盖了完整的可见光区间，峰值分布与正午日光的光谱特征高度匹配，满足 6500 K 色温的日间照明需求。

在夜间助眠模式下，合成光谱的能量主要集中在 450~500 nm 的蓝光区间和 500~600 nm 的绿光区间，整体光谱向短波长方向偏移，同时在长波长红光区间保持了稳定的能量分布，符合低色温、低节律刺激的夜间照明设计目标。

我们将蓝光 LED 的 SPD 与 melanopic 作用函数进行叠加对比，见图 4。

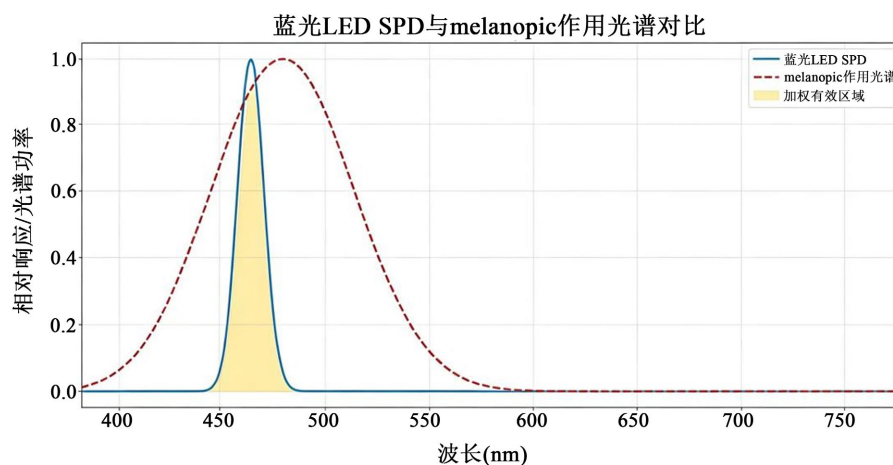


Figure 4. Comparison diagram between blue-light SPD and Melanopic action spectrum

图 4. 蓝光 SPD 与 Melanopic 函数对比图

观察蓝光 SPD 与 melanopic 函数对比图可以发现：蓝光 LED 峰值波长 465 nm，较 melanopic 作用函数 480 nm 的峰值偏移 15 nm，其能量处于褪黑素敏感波段的低响应区域。蓝光 LED 光谱集中于 457~473 nm，与 melanopic 函数高响应区间 470~490 nm 仅有很小范围重叠，重叠占比不足 5%，对褪黑素的刺激作用微弱。同时夜间模式占比 24.70% 的绿光、23.64% 的深红光均处在 melanopic 函数低响应区间，进一步压低合成光谱的 mel-DER，最终达到 0.381 的低节律刺激效果。

4. 讨论与局限性

4.1. 结果讨论

本文利用遗传算法完成五通道 LED 光谱优化。日间模式得到的合成光谱色温、色彩保真度均满足指标约束，较高的 mel-DER 可以有效激活人体日间生物节律；夜间模式在保障基础色彩还原前提下得到较低的 mel-DER，能够降低光照对褪黑素分泌的抑制，实现助眠效果。遗传算法迭代曲线收敛，说明该算法可较好解决多约束混光优化问题。但各光学指标之间存在权衡关系，夜间模式为压低节律参数，色域表现有所下降，实际工程需要根据场景做指标取舍。

4.2. 模型局限性与改进方向

本模型假设 LED 光谱线性叠加，未考虑器件温度漂移、老化光衰等现实因素，仿真结果与实际硬件输出会存在一定偏差。遗传算法属于随机启发式算法，无法保证得到严格全局最优解，求解结果受种群、罚因子等超参数影响。研究仅设置日间、夜间两组静态光谱，未将功耗、硬件成本纳入优化目标，也缺少人体实验验证节律调节的实际效果。

后续可以采用多目标优化算法,减少罚因子带来的人为影响;引入器件物理修正项,增加成本、功耗约束;进一步研究动态时序光谱,并结合实测实验,提升模型的工程实用价值。

5. 结论

本文针对可调控生物节律 LED 光源开展光谱优化研究,基于五通道 LED 的 SPD 数据,构建遗传算法光谱合成模型,分别求解日间照明与夜间助眠两种模式的通道权重。日间模式合成光谱色温 6488.0 K,保真度指数 93, mel-DER 为 0.798,可满足日间高色彩还原、激活人体生物节律的照明需求;夜间模式光谱色温 3350.0 K, mel-DER 降至 0.381,在保障基础色彩表现的同时,减弱光照对褪黑素分泌的抑制,适配夜间助眠场景。

结果证明遗传算法能够有效求解多约束下的 LED 混光优化问题,得到符合生物节律要求的光源权重方案。本研究仅为理论仿真,未考虑器件温度、老化等实际工况,后续可结合多目标算法与实物实验进一步完善,为节律照明设计提供参考。

基金项目

2026 年湖南省大学生创新创业训练计划项目;湖南省教育厅科学研究一般项(22C0542);湖南科技学院科学研究项目(21XKY038)。

参考文献

- [1] 李剑飞,周晓明. 基于 LED 电流、温度光谱模型的照明系统研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 304-311.
- [2] 张浩,徐海松. 光源相关色温算法的比较研究[J]. 光学仪器, 2006, 28(1): 54-58.
- [3] 李月. 光源相关色温及色偏差计算方法研究[D]: [硕士学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.
- [4] Royer, M.P. (2022) Tutorial: Background and Guidance for Using the ANSI/IES TM-30 Method for Evaluating Light Source Color Rendition. *LEUKOS*, **18**, 191-231. <https://doi.org/10.1080/15502724.2020.1860771>
- [5] IES (2020) ANSI/IES TM-30-20 Method for Evaluating Light Source Color Rendition. Illuminating Engineering Society.
- [6] Schlangen, L.J.M., Price, L., Sliney, D., *et al.* (2019) Report on the Workshop Use and Application of the new CIE s 026/e: 2018, Metrology for ipRGC-Influenced Responses to Light “Specifying Light for Its Eye-Mediated Non-Visual Effects in Humans”. *Proceedings of the 29th Session of the CIE*, Washington, D.C., 17-19 June 2019, 114-118.
- [7] CIE (2018) CIE S 026/E: 2018 光辐射测量系统用于 ipRGC 影响的光反应[S]. 维也纳: 国际照明委员会, 2018.
- [8] 郝玉楠,刘华,卢秀和. 基于遗传算法的 RGBW 四色 LED 混光优化[J]. 发光学报, 2017, 38(2): 254-260.
- [9] 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): 172-177.