doi:10.3788/gzxb20174608.0823006

RGBW 四色 LED 混光优化在日光模拟中的应用

熊晨雨[1],吴玉香[1],李杨[1],文尚胜[2]
(1 华南理工大学 自动化科学与工程学院,广州 510640)
(2 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室,广州 510640)

摘　要:根据全日日光色温和亮度的变化曲线,利用 RGBW 四色 LED 混光模拟全日日光色温和亮度的变化,并采用遗传算法优化混合光的显色指数.采用 Matlab 进行仿真,并基于 Arduino 开源平台搭建日光模拟系统对仿真结果进行验证.实验表明,该策略可准确模拟全日日光色温和亮度的变化规律,同时通过遗传算法的优化可使 LED 混合光兼具最优的显色性能,验证了所提策略的正确性和有效性.该策略可应用于密闭环境照明、植物照明等特殊照明领域的日光模拟仿真试验和工程实践.

关键词:日光模拟;LED 混光;遗传算法;色温;发光二极管
中图分类号:O439;TH74;TN29　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1004-4213(2017)08-0823006-10

Application of Mixed Light Optimization of RGBW-LEDs in Solar Simulation

XIONG Chen-yu[1], WU Yu-xiang[1], LI Yang[1], WEN Shang-sheng[2]
(1 *College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou* 510641, *China*)
(2 *State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou* 510640, *China*)

Abstract: According to the diurnal variation of color temperature and brightness of sunlight, a strategy was proposed to simulate the diurnal variation of color temperature and brightness of sunlight by light mixing of RGBW-LEDs, and the genetic algorithm was used to optimize the color rendering index. The simulation was conducted by Matlab, and the simulation results were validated by the sunlight simulation system based on the Arduino open source platform. The experiment shows that using mixed light based on RGBW-LEDs can accurately simulate the change rule of sunlight′ color temperature and brightness, and make LED mixed light have the optimal color rendering property through the optimization of genetic algorithm, so that the correctness and effectiveness of the proposed strategy were verified. The sunlight simulation strategy can be applied to the field of solar simulation and engineering practice for special lighting fields, such as enclosed environment lighting and plant lighting and so on.

Key words: Solar simulation; LED light mixing; Genetic algorithm; Color temperature; Light emitting diode
OCIS Codes: 230.0250; 230.3670; 120.4640; 220.2945

0　引言

随着人们生活水平的提高以及照明应用领域的拓展,单一色温的白光 LED 光源已无法满足实际应用的需求.在植物照明、日光模拟照明以及情趣照明等特殊应用方面,要求光照环境能够根据季节、情绪、昼夜等变化

基金项目:广东省科技计划项目(No. 2015YT02C093),广州市科技计划项目(Nos. 2013J4300021, 201601010051)资助
第一作者:熊晨雨(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为 LED 智能控制. Email:helloyucx@163.com
导师(通讯作者):吴玉香(1968—),女,教授,博导,主要研究方向为非线性系统的自适应神经网络控制、机器人控制及转子系统故障诊断等. Email:xyuwu@scut.edu.cn
收稿日期:2017-02-08;**录用日期**:2017-04-22

实现色温的智能、精确动态调节，获得精准照明亮度，并且，在满足色温的基础上获得高显色性，提高光照品质[1-2]. LED 动态色温主要通过 LED 混光实现，通过调节各 LED 的混合比例获得不同的色温和照明亮度.

由于人眼的生理特征以及人们的作息规律等因素，日光非常适合人们的照明需求[3-4]. 但日光易受气候、时间及地点等因素的影响，无法一直作为人们生活工作的照明光源. 在植物照明方面，由于植物在太阳光照下能获得最好的生长发育，目前在植物培养方面，越来越多地采用日光模拟技术，为植物的生长提供类似太阳光的生长环境. 在某些特殊照明领域，如地下室、潜艇等长期密闭的地方，长时间生活会导致人们的生理和心理受到严重影响，若提供模拟日光，根据人们的作息规律自动改变光照的色温和亮度，营造类似太阳光的舒适、自然光照环境，将大大提高人们的生活和工作品质.

早期，日光模拟技术所采用的人工光源以氙气灯、卤钨灯以及碳弧灯为主，氙气灯日光模拟器最早于 1962 年研制成功[5]. 随着 LED 光源研究的不断突破和广泛应用，基于 LED 混光实现日光模拟成为主流. 2006 年，K. Kamisako 等采用多颗蓝、红、红外以及白光四色小功率 LED 组合成灯阵，设计了小型日光模拟器，在光谱、辐照均匀性和稳定性方面都与日光有较高的匹配[6]. 2007 年，N. Poussct 等基于蒙特卡洛模拟计算进行日光模拟的方法，大大提高了模拟日光的辐照稳定性和均匀性[7]. 2012 年，Anon Namin 等采用总数为 1 024 颗红、绿、蓝、白(Red、Green、Blue、White，RGBW)四种单色 LED 和三基色 LED 设计了 5 种类型的日光模拟器，获得了很高的辐照强度、辐照均匀度和稳定性[8]. 2014 年，高雁等开发出一套大面积准直型太阳模拟器，其光谱匹配在 300～1 400 nm 波长范围内满足 AM0 B 级要求，能够用于航天有效载荷的热真空试验和热平衡试验[9]. 2015 年，孙高飞等设计了一种多功能太阳模拟器光学系统，可同时实现准直式和发散式太阳光模拟，并且具有较高的辐照均匀度[10].

目前，对日光模拟的研究主要从日光光谱匹配方面入手. 张译文等提出基于最小二乘算法的非均匀 LED 峰值波长来合成 AM1.5 光谱[11]；朱继亦等采用非对称高斯分布函数的数学模型来拟合单个 LED 光谱分布[12]. 这些研究主要关注单一光谱的匹配，难以模拟出日光在全天各时刻的变化，其实用性不强且匹配算法复杂. 本文从日光模拟的实用性出发，采用 RGBW 四色 LED 混光模拟全日日光色温和亮度的变化，并利用遗传算法优化混合光的显色指数，以实现更好的日光模拟效果.

1 RGBW 四色 LED 混光理论

1.1 RGBW 四色 LED 混光方程

脉宽调制(Pulse-Width Modulation，PWM)调光中，LED 的光通量近似正比于 PWM 占空比[13-14]，根据格拉斯曼颜色定律和 CIE-1931 色度标准，n 种已知色的混光方程组为[15-16]

$$\begin{cases} Y_{\mathrm{M}} = D_1Y_1 + D_2Y_2 + D_3Y_3 + \cdots + D_nY_n \\ x_{\mathrm{M}} = \dfrac{X_{\mathrm{M}}}{X_{\mathrm{M}} + Y_{\mathrm{M}} + Z_{\mathrm{M}}} = \dfrac{C_1D_1x_1 + C_2D_2x_2 + C_3D_3x_3 + \cdots + C_nD_nx_n}{C_1D_1 + C_2D_2 + C_3D_3 + \cdots + C_nD_n} \\ y_{\mathrm{M}} = \dfrac{Y_m}{X_{\mathrm{M}} + Y_{\mathrm{M}} + Z_{\mathrm{M}}} = \dfrac{C_1D_1y_1 + C_2D_2y_2 + C_3D_3y_3 + \cdots + C_nD_ny_n}{C_1D_1 + C_2D_2 + C_3D_3 + \cdots + C_nD_n} \end{cases} \tag{1}$$

式中，X_{M}、Y_{M}、Z_{M} 分别为混合光源 M 的三刺激值，对于 RGBW 四色 LED 混光，混合光源 M 由红(R)、绿(G)、蓝(B)三种单色 LED 和白光 LED 混合而成，$(x_{\mathrm{M}}, y_{\mathrm{M}})$为色品坐标. PWM 占空比是唯一的变量，$Y_{\mathrm{M}}$ 和 $(x_{\mathrm{M}}, y_{\mathrm{M}})$由各光源的占空比计算得到. 对于三色 LED 的混光，式(1)为三元适定方程组，在确定 Y_{M} 和$(x_{\mathrm{M}}, y_{\mathrm{M}})$后，根据式(1)可确定关于占空比的唯一解. 而对于三色以上的 LED 的混光，式(1)为欠定方程组，其方程未知变量数目大于方程数量，其解空间存在不定解.

RGBW 四色 LED 混光的混光方程组为

$$Y_{\mathrm{M}} = D_{\mathrm{R}}Y_{\mathrm{R}} + D_{\mathrm{G}}Y_{\mathrm{G}} + D_{\mathrm{B}}Y_{\mathrm{B}} + D_{\mathrm{W}}Y_{\mathrm{W}} \tag{2}$$

$$\begin{cases} x_{\mathrm{M}} = \dfrac{X_{\mathrm{M}}}{X_{\mathrm{M}} + Y_{\mathrm{M}} + Z_{\mathrm{M}}} = \dfrac{C_{\mathrm{R}}D_{\mathrm{R}}x_{\mathrm{R}} + C_{\mathrm{G}}D_{\mathrm{G}}x_{\mathrm{G}} + C_{\mathrm{B}}D_{\mathrm{B}}x_{\mathrm{B}} + C_{\mathrm{W}}D_{\mathrm{W}}x_{\mathrm{W}}}{C_{\mathrm{R}}D_{\mathrm{R}} + C_{\mathrm{G}}D_{\mathrm{G}} + C_{\mathrm{B}}D_{\mathrm{B}} + C_{\mathrm{W}}D_{\mathrm{W}}} \\ y_{\mathrm{M}} = \dfrac{Y_{\mathrm{M}}}{X_{\mathrm{M}} + Y_{\mathrm{M}} + Z_{\mathrm{M}}} = \dfrac{C_{\mathrm{R}}D_{\mathrm{R}}y_{\mathrm{r}} + C_{\mathrm{G}}D_{\mathrm{G}}y_{\mathrm{g}} + C_{\mathrm{B}}D_{\mathrm{B}}y_b + C_{\mathrm{W}}D_{\mathrm{W}}y_{\mathrm{w}}}{C_{\mathrm{R}}D_{\mathrm{R}} + C_{\mathrm{G}}D_{\mathrm{G}} + C_{\mathrm{B}}D_{\mathrm{B}} + C_{\mathrm{W}}D_{\mathrm{W}}} \end{cases} \tag{3}$$

式中，$C_i = Y_i / y_i$ 为光源 i(i=R、G、B、W)在满电流工作下的三刺激值之和. Y_i 为光源 i 在满电流工作状态下

的刺激值，在 CIE-1931 标准色度系统中刺激值 Y_i 等于光通量，D_i 和 (x_i, y_i) 分别为光源 i 对应的占空比及色品坐标.

式(2)、(3)以矩阵方程的形式表示为

$$\begin{bmatrix} Y_R, & Y_G, & Y_B, & Y_W \\ C_R x_R - C_R x_M, & C_G x_G - C_G x_M, & C_B x_B - C_B x_M, & C_W x_W - C_W x_M \\ C_R y_R - C_R y_M, & C_G y_G - C_G y_M, & C_B y_B - C_B y_M, & C_W y_W - C_W y_M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_R \\ D_G \\ D_B \\ D_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(4)为欠定方程组，其占空比的解空间存在不定解，这就为 RGBW 四色 LED 的混光提供了优化的空间.

1.2 色温与占空比的关系

光源一般采用相关色温 T_{cp} 来表征 LED 的色温，在 PWM 调光中，通过调节 PWM 占空比来调节混合光的色温[17]. 色温调节可采用基于普朗克黑体轨迹的查询法来实现，这种方法需要繁琐的查询和计算，而采用典型日光轨迹取代黑体轨迹的方法更为简便. 典型日光轨迹的色品坐标 (x_R, y_R) 之间存在关系[18]

$$y_R = -3.000x_R^2 + 2.870x_R - 0.275 \tag{5}$$

相关色温 T_{cp} 与色品坐标 x_R 存在关系

$$x_R = -4.607 \cdot \frac{10^9}{T_{cp}^3} + 2.967\,8 \cdot \frac{10^6}{T_{cp}^2} + 0.099\,11 \cdot \frac{10^3}{T_{cp}} + 0.244\,063 \quad 4\,000\ \mathrm{K} \leqslant T_{cp} \leqslant 7\,000\ \mathrm{K} \tag{6}$$

$$x_R = -2.006\,4 \cdot \frac{10^9}{T_{cp}^3} + 1.901\,8 \cdot \frac{10^6}{T_{cp}^2} + 0.247\,48 \cdot \frac{10^3}{T_{cp}} + 0.237\,04 \quad 7\,000\ \mathrm{K} \leqslant T_{cp} \leqslant 25\,000\ \mathrm{K} \tag{7}$$

式(5)～(7)建立了相关色温与色品坐标的函数关系，对低于 4 000 K 的色温，通过黑体轨迹获取对应的色品坐标；对 4 000～25 000 K 之间的色温，根据式(5)～(7)即可求得对应的色品坐标，结合式(3)所确定的占空比和色品坐标的函数关系，即可确定相关色温与 PWM 占空比的函数关系.

1.3 光通量与占空比的关系

在许多 LED 照明场合，都要求 LED 达到一定的照明亮度要求，并且不同的照明场合要求的照明亮度不同. LED 混光中，不仅要求混合光的色温达到要求，并且要求混合光的光通量也满足一定的要求. 由式(2)可知，RGBW 四色 LED 混合光的光通量是关于占空比的线性函数[19]，通过调节各色 LED 的占空比，即可获得不同的混合光光通量. 值得注意的是，由于 PWM 调光的占空比最多只能达到 100%，所以混合光的光通量最高只能达到各色 LED 的额定光通量之和.

1.4 一般显色指数与占空比的关系

一般显色指数取决于混合光的光谱功率分布，混合光的光谱功率符合线性叠加原理，在 RGBW 四色 LED 混光中，混合光的相对光谱功率分布函数定义为[20]

$$S_M(\lambda) = D_R \cdot S_R(\lambda) + D_G \cdot S_G(\lambda) + D_B \cdot S_B(\lambda) + D_W \cdot S_W(\lambda) \tag{8}$$

式中，S_R、S_G、S_B、S_W 分别为 RGBW 四色 LED 在满电流工作状态下的相对光谱功率分布函数，D_R、D_G、D_B、D_W 分别为 RGBW 四色 LED 的占空比. PWM 调光中，结温会产生一定的变化，而结温的变化会导致峰值波长和半峰全宽(Full Width at Half Maximum，FHWM)发生微小变化[21]. 为此，通过合理设计散热系统减小结温对 LED 光谱分布的影响. 因此，分析中只考虑 PWM 调光对光谱功率分布强度的影响，峰值波长和 FHWM 保持不变.

式(8)中，混合光的相对光谱功率分布是关于占空比 D_R、D_G、D_B、D_W 的函数，由此可知，混合光的显色指数也是关于占空比的函数，根据相对光谱功率分布，采用文献[22]所述的显色指数标准计算方法即可计算出混合光的显色指数.

为了更便捷地计算混合光的一般显色指数，利用 Matlab 软件编写混合光的一般显色指数计算函数 $R_a(D_R, D_G, D_B, D_W)$，调用此函数即可根据占空比计算出一般显色指数 R_a.

2 测量全日日光色温和亮度

在不同的季节、天气以及地点，日光的色温和亮度在全天中的变化情况各不相同. 日光的色温和亮度的测量采用 BM-7A 型亮度色度计在室外完成，测量从 7:00～18:00 每隔 30 min 的日光色温和亮度值. 由于日

光亮度非常高，因此设置反射板避免亮度色度计直接对准日光检测，如图 1(a)；在测量日光亮度时，将反射板置于空旷处平整地面上，以测量太阳角度变化过程中的亮度，如图 1(b).

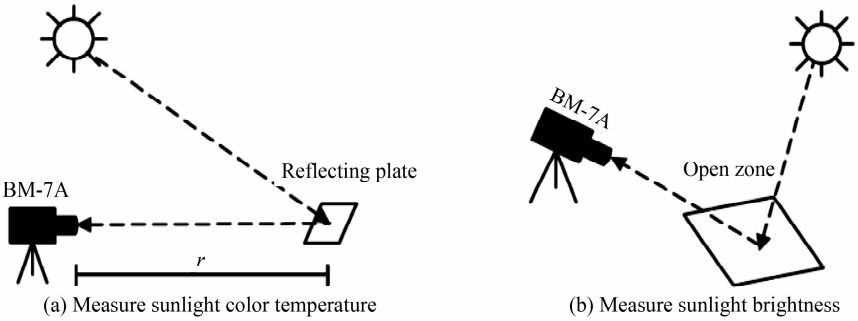


图 1 日光色温及亮度测量方法

Fig. 1 Measurement method of sunlight color temperature and brightness

为了获得日光的色温和亮度在全天的变化趋势，选取广州地区 3 月、5 月、8 月以及 11 月四个月，在状况良好的天气下测量日光的色温和亮度，以保证日光测量的准确，减小天气对日光的影响. 采用取均值法计算全年的全日日光色温和亮度的平均变化值并利用 Matlab 拟合曲线，以此作为日光模拟的日光参考曲线. 实验测量得到的各月全日日光色温变化及平均变化如图 2，各月全日日光亮度变化及平均变化如图 3.

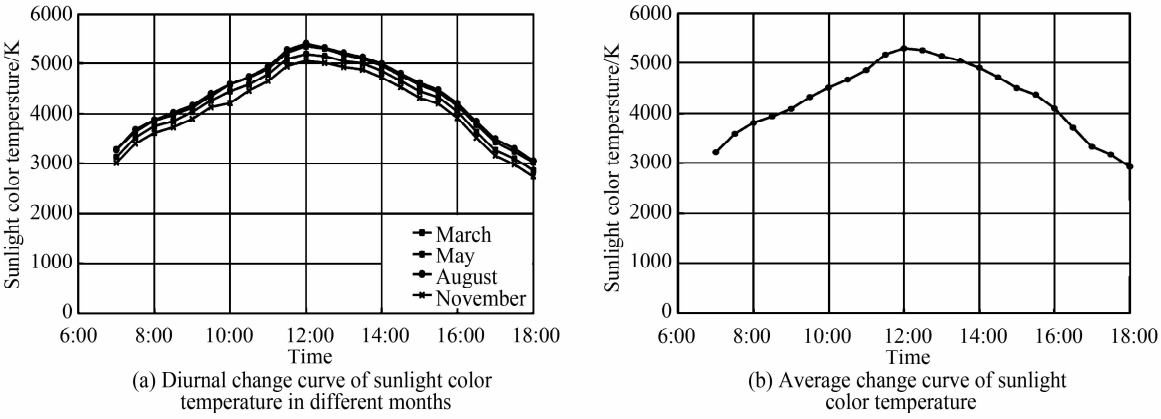


图 2 全日日光色温变化曲线

Fig. 2 Diurnal change curves of sunlight color temperature

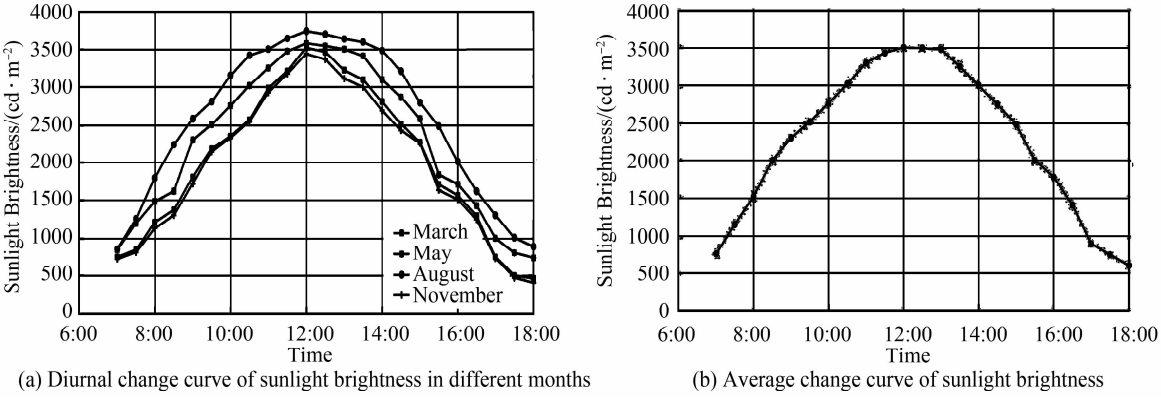


图 3 全日日光亮度变化曲线

Fig. 3 Diurnal change curve of sunlight brightness

3 基于 RGBW 四色 LED 混光优化的日光模拟

3.1 LED 日光模拟策略

对日光色温的模拟通过对某些时刻变化较大的典型色温点的模拟来实现. 从图 2(b)的全日日光色温变化曲线可看出，从日出到中午，日光色温变化较快，中午前后日光变化较缓慢，午后至日落，日光色温变化也

较快. 因此，为提高日光模拟的准确度，根据全日日光色温变化规律，利用 Matlab 拟合的曲线，选取适当间隔时刻的色温点进行模拟.

如图 3(b)，一天中日光的亮度随着时间呈现先增大后减小的变化规律. 在日光模拟中，除模拟日光色温变化外，同时也模拟日光亮度变化. 但日光的亮度在中午前后非常高，采用 LED 混光获得的混合光的亮度存在上限，难以达到日光的亮度，并且从实用的角度上也无需那么高的亮度. 因此，以上午 7:00 日光亮度为基准亮度，根据各时刻日光亮度相对基准亮度的比值，采用 LED 混光模拟全天日光亮度变化规律，全天日光亮度相对基准亮度的比值曲线如图 4.

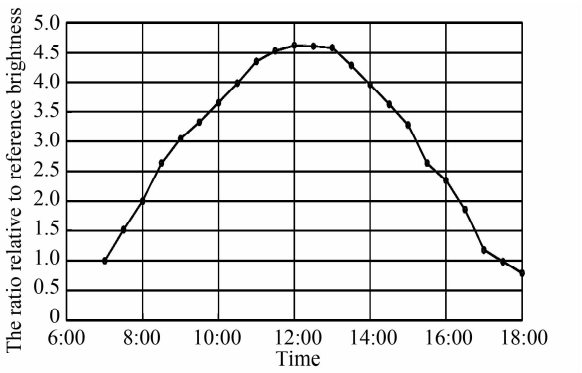


图 4　全日日光亮度相对基准比值

Fig. 4　Sunlight brightness ratio relative to the reference all day

采用的日光模拟策略为：

1)采用 PWM 驱动方式，通过 RGBW 四色 LED 混光获得混合光，根据选取的日光色温点，基于式(5)～(7)获得混合光的色品坐标，在式(3)的约束下调节 RGBW 四色 LED 的占空比，模拟全日日光的色温变化规律；

2)在满足模拟日光色温的前提下，RGBW 四色 LED 混合光的调光范围存在上下界，在模拟上午 7:00 日光的色温时，LED 混合光的光通量存在可调上界和下界，以上午 7:00 所对应的混合光光通量可调下界为基准，根据图 4 所示的比值曲线，调节混合光的光通量，以此模拟出全日日光亮度的变化规律.

3)采用 RGBW 四色 LED 混光模拟出全日日光色温和亮度变化规律的基础上，利用遗传算法优化混合光的显色指数，使 RGBW 四色 LED 混合光获得最佳的显色性能，实现更好的日光模拟效果.

3.2　遗传算法优化 LED 混合光的显色指数

遗传算法是一种进化算法，它通过模拟自然界遗传机制和生物进化论来寻找最优解，是一种并行随机搜索最优化算法. 它将问题的解集看作一个种群，通过不断地选择、交叉、变异等遗传操作，使解逐渐接近最优解. 遗传算法对待寻优的函数没有特定限制，对搜索空间没有特殊要求，具有计算简单、易于与其他算法结合等特点. 遗传算法是对群体的操作，包括选择、交叉及变异三大基本遗传算子，通过遗传操作产生更优秀的子代群体，在采用遗传算法解决优化问题时，需确定以下六大要素：1)确定参与遗传操作的参数以及编码方法；2)设置种群规模并初始化种群；3)确定个体适应度评价函数和目标函数；4)确定遗传操作算子；5)设置遗传算法的运行参数；6)算法终止条件[23-24].

式(3)的解空间存在多组可行解，不同的占空比可获得相同的混合光色温，但混合光的光谱功率分布不同，导致显色指数不同. 在混合光色温和光通量满足要求的多元约束条件下，采用遗传算法对一般显色指数 $R_a(D_R, D_G, D_B, D_W)$ 进行寻优，得到最佳占空比组合，使混合光的一般显色指数在目标色温和光通量下达到最大，实现更好的日光模拟效果. 其多元约束条件下寻优可表示为

$$\mathrm{Max}[R_a(D_R, D_G, D_B, D_W)]\ \mathrm{s.t.}\ (Y_M = Y_{Mx}\ \mathrm{and}\ T_{cpM} = T_{cpMx}) \tag{9}$$

式中，Y_M、T_{cpM} 分别表示混合光的光通量和色温，Y_{Mx}、T_{cpMx} 分别表示混合光的目标光通量和目标色温.

遗传算法寻优的步骤为[25]：

1)在式(9)的约束下，由黑体轨迹和式(5)～(7)计算得到混合光的色品坐标. 将 RGBW 四色对应的占空比(D_R, D_G, D_B, D_W)作为决策变量，确定决策变量的可行域范围，即 $0 \leqslant (D_R, D_G, D_B, D_W) \leqslant 1$.

2) 建立优化模型，确定目标函数 $J(D_R, D_G, D_B, D_W)$ 和个体适应度函数 $F(D_R, D_G, D_B, D_W)$. 由于优化目标是求取混合光的一般显色指数的最大值，故可将个体适应度函数直接取为待优化函数，即

$$F(D_R, D_G, D_B, D_W) = R_a(D_R, D_G, D_B, D_W) \tag{10}$$

遗传算法优化过程中，目标函数应随个体适应度函数的增大而收敛于最小值[26]，为此，目标函数取为个体适应度函数的负数，最优化时目标函数达到最小值，即

$$J(D_R, D_G, D_B, D_W) = -F(D_R, D_G, D_B, D_W) \tag{11}$$

3) 确定编码方法. 采用 10 位二进制编码串分别表示决策变量(D_R, D_G, D_B, D_W)，决策变量可行域的上

下界分别对应从0000000000(0)～1111111111(1023)之间的二进制编码.将表示决策变量的10位二进制编码串联起来组成40位长的染色体编码.

4)确定解码方法.与编码对应,解码时将40位长的染色体编码从中间切断成四个10位长的二进制编码串,再将二进制编码转换成十进制数即可得到决策变量的值.

5)选择复制、交叉以及变异算子,进行遗传操作.采用比例复制算子、单点交叉算子以及基本位变异算子进行遗传操作.

6)确定遗传算法的运行参数,选取种群大小 $M=100$,终止进化代数 $G=500$,交叉概率 $P_c=0.60$,变异概率 $P_m=0.10$,以便获得良好的寻优效果.

4 实验与分析

4.1 日光模拟控制系统设计

实验采用桥田电子有限公司生产的白光LED灯珠和六脚RGB三基色LED灯珠构成RGBW混光光源,各色LED在满电流下的色度学参数和相对光谱功率分布采用远方出品的PMS-80型光谱测试仪进行检测.测得的色度学参数见表1,各色LED的相对光谱功率分布如图5.在PWM调光过程中,由于结温的变化会导致色漂移的产生,进而影响混光实验的效果.因此,将LED固定在铝基板上,并将铝基板用导热胶固定在散热器上,以减小结温的变化对实验的影响.

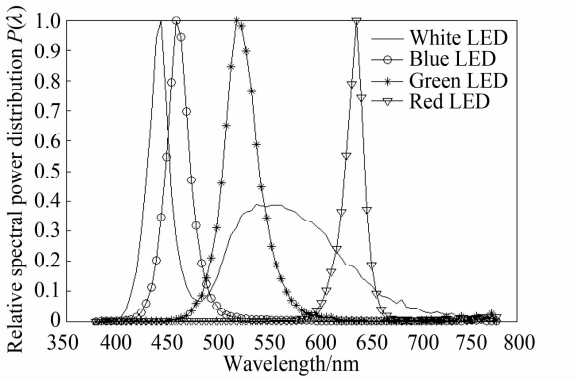


图5 RGBW四色LED的相对光谱功率分布

Fig. 5 Relative spectral power distribution of RGBW-LEDs

表1 RGBW四色LED光色参数

Table 1 Color parameters of RGBW-LEDs

LED	x	y	Luminous flux/lm	Peak wavelength/nm		Power/W
Red LED	0.699 3	0.299 1	19.307	640.0		1.053
Green LED	0.189 4	0.706 9	64.004	520.0		1.339
Blue LED	0.141 9	0.054 2	21.168	460.0		1.448
White LED	0.304 1	0.299 4	83.359	T_{cp}/K	R_a	1.337
				743	71.8	

日光模拟控制系统由DFRduino Mega2560 R3型Arduino开源平台、DD313恒流驱动芯片、DD311恒流驱动芯片,恒流恒压电源、1颗RGB三基色LED以及1颗白光LED组成.DFRduino MEGA2560 R3型Arduino开源平台由Arduino电路板和软件开发环境构成,具有多路模拟/数字、I/O端口,通过USB接口连接电脑在C语言IDE环境中编程并烧录程序至控制器,实现自动控制.DD313三通道恒流驱动芯片用于驱动RGB三基色LED调光,将三路PWM信号输入至三个使能端实现各单色LED的PWM调光,并通过调节外接电阻将PWM峰值电流调至额定电流.DD311恒流驱动芯片用于驱动白光LED调光,通过调节外接电阻将PWM峰值电流调至额定电流,硬件平台如图6.

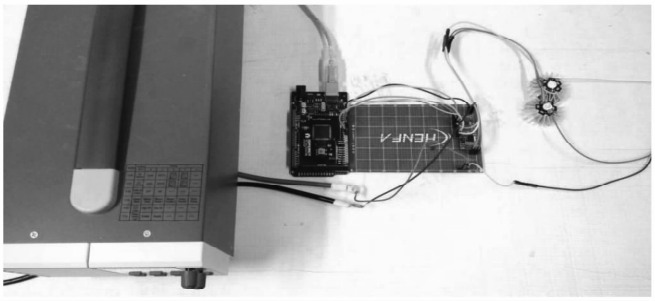


图6 日光模拟控制系统硬件平台

Fig. 6 Hardware platform of solar simulation control system

实验采用Arduino开源平台编程输出模拟全日日光色温和亮度变化所对应的四路PWM信号,将四路PWM信号分别输入至DD313和DD311驱动芯片的使能端口,控制RGBW四色LED混光产生模拟全日日

光色温和亮度变化的混合光，实现 LED 日光模拟.

4.2 实验结果分析

实验根据图 2(b)和图 3(b)所确定的全日日光色温和亮度变化曲线，按照日光模拟策略，选取 7:00～18:00 之间相隔 30 min 的典型日光色温点，由图 2(b)可知，全日日光的色温变化范围在 2 000～6 000 K之间，部分时刻的日光色温低于 4 000 K，根据色温与占空比的关系，低于 4 000 K 的日光色温，其色品坐标根据黑体轨迹获得，高于 4 000 K 的日光色温，其色品坐标根据典型日光轨迹中色温与色品坐标的关系式(5)～(7)计算得到. 由图 2(b)可知，上午 7:00 时刻日光的色温为 3 200 K，根据遗传算法优化混合光光通量的方法，RGBW四色LED混合光在满足色温为 3 223 K 时的光通量最大为 69.257 lm，最小为 28.486 lm，以最小光通量 28.486 lm 为基准，根据图 4 调节混合光的光通量，混合光的光通量变化曲线如图 7. 采用遗传算法优化得到的 7:00～18:00 全日日光模拟色温、光通量、最优显色指数以及四路 PWM 占空比数据见表 2.

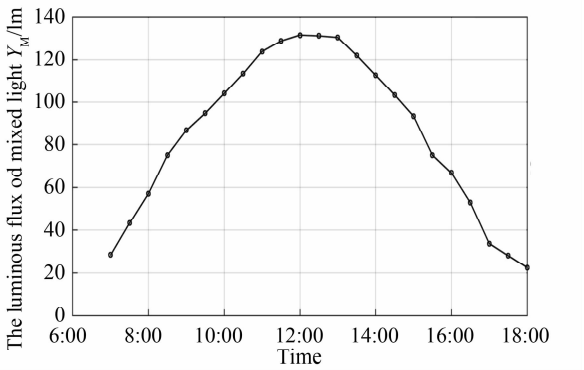


图 7 RGBW 四色 LED 混合光光通量变化曲线

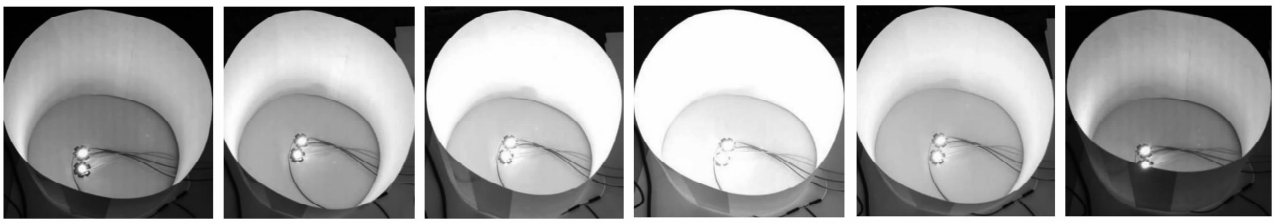
Fig. 7 Luminous flux curve of RGBW-LEDs mixed light

表 2 遗传算法优化 RGBW 四色 LED 混光的日光模拟数据

Table 2 Solar simulation data of RGBW-LEDs color mixing illumination based on genetic algorithm optimization

Time	Sunlight color temperature/K	Luminous flux/lm	Optimal color rendering index R_{abest}	D_{Rbest}	D_{Gbest}	D_{Bbest}	D_{Wbest}
7:00	3 223	28.486	48.8	0.41	0.19	0.00	0.10
7:30	3 595	43.295	54.6	0.54	0.28	0.01	0.18
8:00	3 812	57.113	58.8	0.65	0.35	0.00	0.27
8:30	3 937	75.099	61.3	0.80	0.45	0.01	0.37
9:00	4 087	86.739	63.5	0.87	0.51	0.02	0.45
9:30	4 321	94.775	67.2	0.85	0.52	0.01	0.54
10:00	4 510	103.937	69.5	0.85	0.54	0.01	0.63
10:30	4 667	113.399	71.2	0.86	0.56	0.02	0.73
11:00	4 855	123.951	73.2	0.85	0.58	0.01	0.84
11:30	5 167	129.020	76.0	0.75	0.55	0.03	0.95
12:00	5 286	131.798	76.9	0.72	0.54	0.02	1.00
12:30	5 249	131.423	76.7	0.73	0.54	0.01	0.99
13:00	5 132	130.672	75.7	0.77	0.56	0.01	0.96
13:30	5 045	122.036	75.0	0.76	0.54	0.00	0.87
14:00	4 902	112.648	73.6	0.76	0.52	0.03	0.78
14:30	4 718	103.261	71.8	0.76	0.51	0.01	0.67
15:00	4 501	93.423	69.4	0.77	0.49	0.02	0.57
15:30	4 368	75.099	67.8	0.66	0.41	0.01	0.44
16:00	4 101	66.838	63.8	0.67	0.39	0.02	0.35
16:30	3 712	52.945	57.2	0.62	0.33	0.01	0.24
17:00	3 332	33.795	48.4	0.47	0.23	0.02	0.12
17:30	3 172	28.162	44.0	0.42	0.20	0.01	0.10
18:00	2 921	22.530	40.6	0.37	0.17	0.02	0.06

采用图 6 中所示的硬件平台，将表 2 的数据编程烧录至 Arduino 开源平台的 ATmega2560 微控制器，输出随时间变化的四路 PWM 占空比，控制 RGBW 四色 LED 各自进行 PWM 调光，实现全日日光模拟控制，并采用光谱分析仪和积分球检测 RGBW 四色 LED 混合光的色温 T_{cp}、光通量 Y_M 以及显色指数 R_a. 图 8 为部分时刻的日光模拟效果，测量得到的混合光参数见表 3.



(a) 8:30 (b) 9:30 (c) 10:30 (d) 12:00 (e) 14:00 (f) 16:30

图 8 各时刻的日光模拟效果图

Fig. 8 Solar simulationresults at different moment

表 3 各时刻的日光模拟测得的混合光参数

Table 3 Mixed light parameters measured by solar simulation at different moment

Time	T_{cp}/K	Y_M/lm	R_a
8:30	3 952	73.521	60.7
9:30	4 340	92.402	66.7
10:30	4 685	111.657	70.9
12:00	5 299	129.225	76.2
14:00	4 913	108.782	72.7
16:30	3 720	50.497	56.8

实验得到的混合光实际色温和光通量变化规律如图 9.

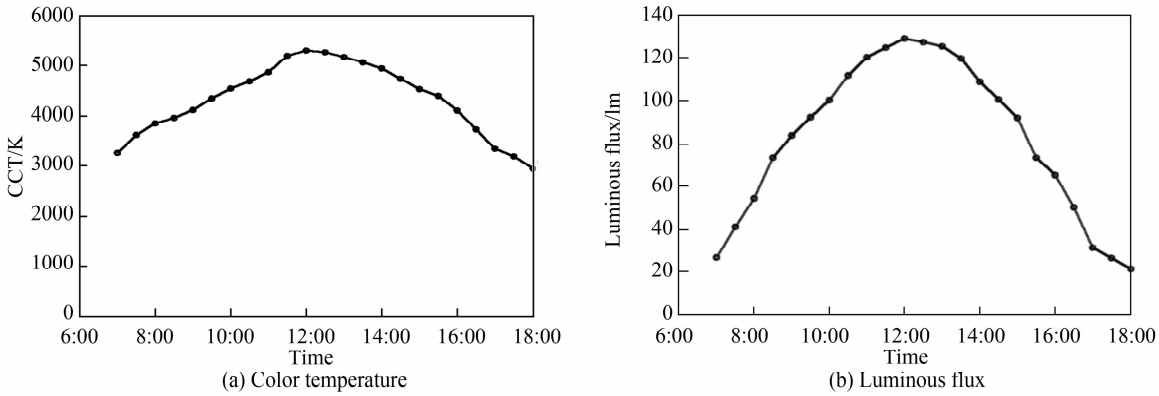


图 9 全日日光模拟中 LED 实际色温和光通量变化曲线

Fig. 9 Actual variation curves of LED color temperature and luminous flux in solar simulation

结合图 8 和图 9 可看出,采用 RGBW 四色 LED 混光能够准确模拟出全日日光色温及亮度的变化规律,效果较好,并且采用遗传算法优化 RGBW 四色 LED 混合光的显色指数,使混合光在模拟出日光色温和亮度变化规律的基础上实现最优的显色性能. 由于实验条件的限制,若采用显色性能更好的大功率 LED 混光实现全日日光模拟,则模拟的效果将更好.

5 结论

本文基于 RGBW 四色 LED 混光方程,根据全日日光色温和亮度的变化规律,调节各色 LED 的 PWM 占空比,使 RGBW 四色 LED 混合光的色温和光通量随时间动态变化. 由于 RGBW 四色 LED 混光方程为欠定方程,其解空间存在不定解,采用遗传算法优化混合光的显色指数,使混合光在模拟全日日光色温和亮度变化的同时兼具最佳的显色性能,实现更好的日光模拟效果. 采用本文提出的 LED 日光模拟策略进行实验,结果表明,采用 RGBW 四色 LED 混光能够准确模拟全日日光色温和亮度的变化规律,并能使混合光在各时刻获得最佳的显色性能.

参考文献

[1] SONG Peng-cheng, WEN Shang-sheng, SHANG Jun, *et al*. A dimming method for RGB LED based on three channels' PWM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(2): 0223001.
宋鹏程,文尚胜,尚俊,等. 基于 PWM 的三基色 LED 的调光调色方法[J]. 光学学报,2015,**35**(2):0223001.

[2] BELLIA L, BISRGNA F, SPADA G. Lighting in indoor environments: visual and non-visual effects of light sources

with different spectral power distributions[J]. *Building and Environment*, 2011, **46**(10): 1984-1992.

[3] ZHU Dang-hong. Studies on the chrominance of LED based light source with daylight spectrum[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2014.
朱丹红. LED 类日光光源色度学的研究[D]. 大连：大连工业大学，2014.

[4] JING Cong. Researches on the technology of solar simulation by LED[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2012.
姜聪. LED 太阳光模拟技术研究[D]. 杭州：杭州电子科技大学，2012.

[5] SU Shi, ZHANG Guo-yu, FU Yun, *et al*. New development of solar simulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(7): 070003.
苏拾，张国玉，付芸，等. 太阳模拟器的新发展[J]. 激光与光电子学进展，2012，**49**(7)：070003.

[6] KOHRAKU S, KUROKAWA K. A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006, **90**(18-19): 3364-3370.

[7] POUSSET N, ROUGIE B, RAZET A. Impact of current supply on LED colour[J]. *Lighting Research & Technology*, 2010, **42**(1): 371-383

[8] NAMIN A, JIVACATE C, CHENVIDHYA D, *et al*. Determination of solar cell electrical parameters and resistances using color and white LED-based solar simulators with high amplitude pulse input voltages[J]. *Renewable Energy*, 2013, **54**(6): 131-137.

[9] GAO Yan, LIU Hong-bo, WANG Li, *et al*. Design and manufacture of a large-area collimation solar simulator[J]. *Chinese Optics*, 2014, **4**(7): 657-664.
高雁，刘洪波，王丽，等. 大面积准直型太阳模拟器的设计与研制[J]. 中国光学，2014，**4**(7)：657-664.

[10] SUN Gao-fei, ZHANG Guo-yu, LIU Shi, *et al*. Design of optical system for multifunctional solar simulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(10): 1023001.
孙高飞，张国玉，刘石，等. 多功能太阳模拟器光学系统设计[J]. 光子学报，2015，**44**(10)：1023001.

[11] ZHANG Yi-wen, XU Lin, WANG Song. Synthesizing algorithm for LED standard solar spectrum lamp[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5): 596-600.
张译文，徐林，万松. 基于 LED 的标准太阳光谱灯拟合算法[J]. 光子学报，2013，**42**(5)：596-600.

[12] ZHU Ji-yi, REN Jian-wei, LI Bao-yong, *et al*. Synthesis of spectral distribution for LED-based source with tunable spectra[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, **31**(6): 882-887.
朱继亦，任建伟，李葆勇，等. 基于 LED 的光谱可调光源的光谱分布合成[J]. 发光学报，2010，**31**(6)：882-887.

[13] XU Dai-sheng, CHEN Xiao, ZHU Xiang, *et al*. A dimming lightings source based on cold and warm white LEDs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(1): 0123004.
徐代升，陈晓，朱翔，等. 基于冷暖白光 LED 的可调色温可调光照明光源[J]. 光学学报，2014，**34**(1)：0123004.

[14] ZHOU Xiao-ming, LUO Da, ZHANG Hui-ping. Human non-visual effects under LED light with different dimming methods[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(7): 892-898
周晓明，罗达，张惠平. 不同调光方式 LED 照射下的人体非视觉效应[J]. 发光学报，2016，**37**(7)：892-898

[15] SONG Peng-chen, WEN Shang-sheng, CHEN Ying-cong. Research on color mixing based on RGBW-LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(9): 313-321.
宋鹏程，文尚胜，陈颖聪. 基于 RGBW 四色 LED 的混光研究[J]. 光学学报，2015，**35**(9)：313-321.

[16] ZHANG Hang, YU Xi, PAN Hao, *et al*. Calculation of correlated color temperature in optical simulations for white LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(5): 583-587
张航，喻玺，潘浩，等. 白光 LED 光学仿真中的相关色温计算[J]. 发光学报，2015，**36**(5)：583-587

[17] HU Wei-jie. Modern color science and application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 390-397.
胡威捷. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京：北京理工大学出版社，2007：390-397.

[18] LIU Kang, GUO Zhen-ning, LIN Jie-ben, *et al*. Theoretical and experimental investigation on mixture of high brightness white LEDs[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2012, **23**(1): 51-57.
刘康，郭震宁，林介本，等. 高亮度白光 LED 混色理论及其实验研究[J]. 照明工程学报，2012，**23**(01)：51-57.

[19] JIN Wei-qi, HU Wei-jie. Radiation intensity, photometric and chromaticity and test[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009: 126-127.
金伟其，胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京：北京理工大学出版社，2009：126-127.

[20] YU Jian-hua, CHEN Ri-guang, E Lei, *et al*. Experimental study on tunable color temperature with high color rendering index[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, **35**(3): 395-401.
余建华，陈日广，鄂雷，等. 可调色温的高显色指数 LED 白光光源的实验研究[J]. 半导体光电，2014，**35**(3)：395-401.

[21] HUAN T C, SIEW C T , HUI S Y. Color variation reduction of GaN- based white light- emitting diodes via peak wavelength stabilization[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, **29**(7): 3709-3719.

[22] XIN Qi-chen. Colorimetry[M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 1979: 250-264.
邢其诚. 色度学[M]. 北京：北京科学技术出版社，1979：250-264.

[23] TIAN Ying, YUAN Wei-qi. Application of the Genetic Algorithm in Image Processing[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, **12**(3): 389-396 .
田莹,苑玮琦. 遗传算法在图像处理中的应用[J]. 中国图象图形学报,2007,**12**(3):389-396.

[24] JI Gen-lin. Survey on genetic algorithm[J]. *Computer Applications and Software*, 2004, **21**(2): 69-73.
吉根林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件,2004,**21**(2):69-73.

[25] LIU Jing-kun. Intelligent control[M]. BeiJing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
刘金琨著. 智能控制[M] . 北京:电子工业出版社,2005.

[26] WEI Ling-yun, CHAI Yue-tin, ZHAO Mei. A hybrid genetic algorithm for solving nonlinear programming problems with inequality constraints[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, (22): 49-49,65.
韦凌云,柴跃廷,赵玫. 不等式约束的非线性规划混合遗传算法[J]. 计算机工程与应用,2006,(22):46-49,65.

Foundation item: Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (No. 2015YT02C093), Science and Technology Planning Project of Guangzhou (Nos. 2013J4300021, 201601010051)