



光通信技术

Optical Communication Technology

ISSN 1002-5561, CN 45-1160/TN

## 《光通信技术》网络首发论文

题目：基于改进粒子群算法的室内可见光通信系统光源布局  
作者：周旭，张业荣  
收稿日期：2020-6-16  
网络首发日期：2020-11-12  
引用格式：周旭，张业荣. 基于改进粒子群算法的室内可见光通信系统光源布局. 光通信技术. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1160.TN.20201112.1407.004.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于改进粒子群算法的室内可见光通信系统光源布局

周旭，张业荣

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院，南京，210023)

**摘要：**针对传统室内可见光通信（VLC）系统中光源分布的不均匀性带来的通信盲区和通信质量不平稳等问题，提出一种位置和光源参数联合优化的方法。该方法在不改变传统布局的总功率前提下进行发光二极管（LED）阵列的重新分配，其次遍历搜寻各 LED 阵列的最优位置，最后运用改进的粒子群算法对各 LED 阵列中的参数进行优化。仿真结果表明：相较于传统光源分布，联合优化方法在满足室内照明的情况下不仅减少了光源布局的总功率，而且提高了接收面上光照度均匀度。

**关键词：**可见光通信；光源分布；粒子群算法；光照均匀度

**中图分类号：** TN929.1      **文献标识码：** A

## Research on light source distribution of indoor visible light communication system

ZHOU Xu, ZHANG Yerong

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of communication blindness and unsteady communication quality caused by uneven distribution of light source in traditional indoor visible light communication system, a method of joint optimization of location and light source parameters is proposed. This method firstly reallocates LED arrays without changing the total power of the traditional layout, then traverses and searches the optimal positions of each LED array, and finally optimizes the parameters of each LED array with the improved particle swarm optimization algorithm. The simulation results show that, compared with the traditional light source distribution, the combined optimization method not only reduces the total power of the light source layout, but also improves the illumination uniformity of the receiving surface when meeting the requirements of indoor lighting.

**Key words:** visible light communication; light source distribution; particle swarm optimization; uniformity of illumination

### 0 引言

可见光通信（VLC）是一种新型无线通信技术，它是通过发光二极管（LED）来实现照明和通信的双重功能。相较于传统的射频通信，它具有安全、高速、绿色、通信容量大以及应用范围广等优点<sup>[1]</sup>。在室内可见光通信系统中，不仅要考虑 LED 的能耗问题也要考虑接收面上的光照度和光照度均匀性，故对 LED 阵列的位置布局和参数设计使接收面上光照度和照度均匀性在较低的能耗下满足国际室内照明标准是十分有必要的<sup>[2]</sup>。

目前，室内 LED 灯的布局研究大致分为几类：

- ① 几何图形分布。王丽等人<sup>[3]</sup>在 5m×4m×3m 室内空间尺寸下提出一种基于房间长宽比例的椭圆分布模型。陈述等人<sup>[4]</sup>在此室内空间尺寸下提出了一种双纽线型光源布局。该类优化方式没有数学理论支撑，设计模型复杂且具有主观性，角落处的接收功率较低，不能保证良好的通信质量。
- ② 光源位置的算法优化。高明光等人<sup>[5]</sup>运用模拟退火混合遗传算法对光源的位置进行优化，解决了遗传算法的早收敛问题，并且通过适应度函数的构造，大大地提高了接收面的光照度均匀性，但该类算法因为通过位置的全局寻优，往往导致寻找到的位置随机性太大不具有美观性，实用性较低。

③ 光源参数的算法优化。杨智群等人<sup>[6]</sup>先进行模型的设计，后通过改进的蚁群算法对每个 LED 阵列的功率因子进行优化，也使接收面的光照度均匀性得到了显著的提高。但算法参数较多、复杂度较高，适应度函数的选取没有兼顾到接收面上的每个点。

本文将针对  $5\text{m}\times 5\text{m}\times 3\text{m}$  的室内空间尺寸下，提出一种光源位置遍历寻优联合改进粒子群算法优化光源参数策略。

## 1 室内 VLC 系统模型与光照度要求

### 1.1 传统模型

传统室内 VLC 模型的空间尺寸为  $5\text{m}\times 5\text{m}\times 3\text{m}$ <sup>[7]</sup>，如图 1 所示。以室内中心作为坐标系的原点 O，并分别以地面宽度与长度的中点与坐标原点的连线为 x 轴和 y 轴在室内空间建立三维坐标系。LED 阵列位于天花板上，其坐标分别为  $(1.25\text{m}, 1.25\text{m}, 3\text{m})$ 、 $(-1.25\text{m}, 1.25\text{m}, 3\text{m})$ 、 $(1.25\text{m}, -1.25\text{m}, 3\text{m})$  和  $(-1.25\text{m}, -1.25\text{m}, 3\text{m})$ 。接收机位于高于地面  $0.85\text{m}$  的平面内。为了简化仿真分析，本文不考虑 LED 阵列内部灯珠之间的间距。

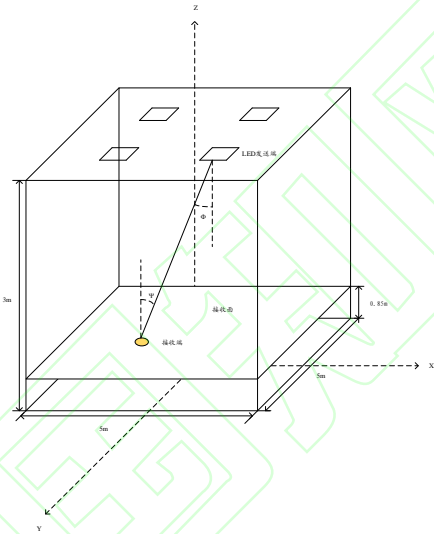


图 1 传统 VLC 系统模型

一般情况下，发射端发出的信号通过视距链路（LOS）和非视距链路（NLOS）这 2 种方式到达接收端，如图 2 所示。其中，LOS 和 NLOS 中一次反射占比最多，故本文将只考虑 LOS 和 NLOS 中一次反射的情况。

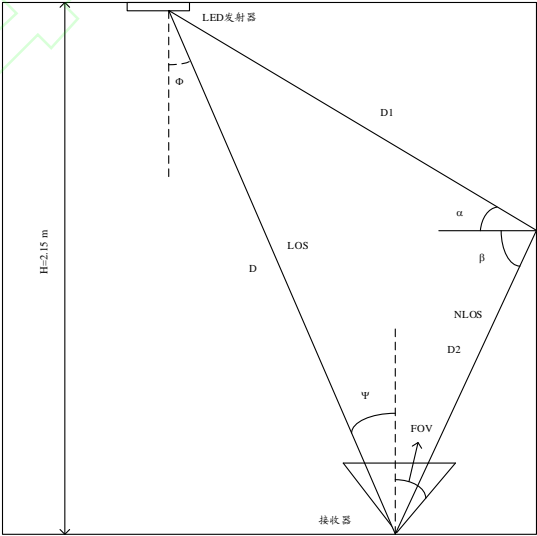


图 2 LOS 链路和 NLOS 链路

假设单个 LED 光源辐射强度满足朗伯辐射强度模型，则单个 LED 光源的发光强度为：

$$I(\phi) = I(0)\cos^m\phi \quad (1)$$

其中， $I(0)$ 是 LED 的中心发光强度， $m$  表示朗伯发射级数， $\phi$ 表示光线辐射角。

因为每个 LED 光源发出的光线会通过 LOS 和 NLOS 这 2 种方式到达接收端，所以接收面上某点接收的光照强度可以分为 $E_{LOS}$ 和 $E_{NLOS}$ ：

$$E_{LOS} = I(0)\cos^m\phi\cos\psi/D^2 \quad (2)$$

$$E_{NLOS} = \frac{1}{\pi D_1^2 D_2^2} I(0)\rho dA\cos^m\phi\cos\alpha\cos\beta\cos\psi \quad (3)$$

其中， $\psi$ 为入射光和与接收面上某点垂直的轴线的夹角， $D$ 是 LED 和接受面之间的距离， $\rho$ 是墙壁的反射率， $D_1$ 是 LED 到墙面反射点的距离， $D_2$ 是墙面反射点到接受面上某点的距离， $dA$ 是墙面反射点的面积， $\alpha$ 和 $\beta$ 分别是反射点与 LED 和反射点与接收点连线的水平角。由于 LED 光源为非相干光源，故 LED 阵列中每个 LED 灯珠对接收面上某点的光照度可以由 LOS 链路和 NLOS 链路的光照度相叠加。

## 1.2 室内 VLC 光照度要求

根据国际照明标准规定<sup>[8]</sup>，办公室的室内光照度应在 300~1500lx 之间，过低不满足室内照明的需求，过高会对人眼造成伤害。光照均匀度(UIR)是影响室内 VLC 通信的重要因素，它可以表示为室内最小光照与平均值之比，即 $UIR = E_{min}/E_{mean}$ 。该值越大说明光照分布越平均，可见光通信质量越好。室内照明标准规定 UIR 不应低于 0.7。所以，室内 VLC 系统的灯源布局需要满足这 2 点要求。

## 2 灯源布局理论分析

### 2.1 LED 布局位置优化

传统室内 VLC 系统布局采用 4 个 LED 阵列分布在天花板上。每个 LED 阵列采用 60×60 个灯珠排列，每个灯珠的中心发光强度为 0.73cd,通过仿真可以得出接收面上的光照度分布为 495~1057lx,波动幅度为 562lx，UIR 为 0.5487。传统模型接收面总光照度如图 3 所示，虽然照度分布满足国际标准，但是光照均匀度没有达到国际要求，导致通信质量不平稳。

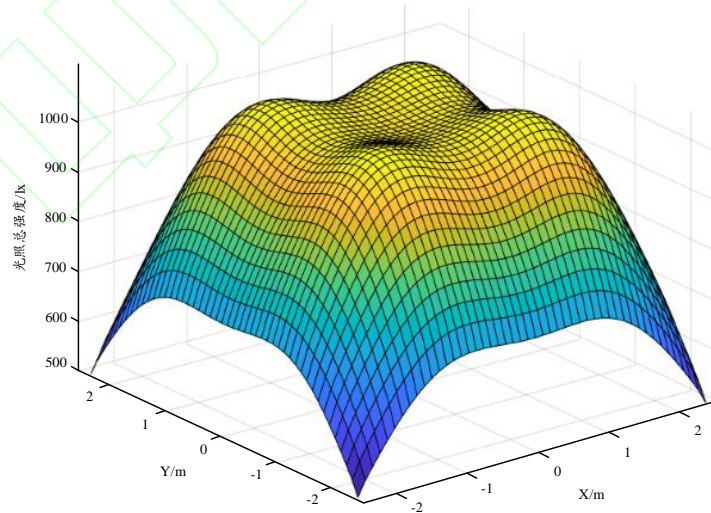


图 3 传统模型接收面总光照度

由传统模型分析，LED 阵列的位置分布，使得室内中心位置光照度过高，边缘位置光照度过低，这是导致传统模型 UIR 较低的重要原因。为了提高室内角落和边界的光照度以及整体光照均匀度，本文提出了一种新型布局方案。新型模型在不改变传统模型 LED 灯珠

数目（总能耗）下采用  $9 \times 40 \times 40$  的布局方式，坐标为  $A1(-L2, -L2, 3)$ 、 $A2(L2, -L2, 3)$ 、 $A3(-L2, L2, 3)$ 、 $A4(L2, L2, 3)$ 、 $B1(-L1, 0, 3)$ 、 $B2(0, -L1, 3)$ 、 $B3(L1, 0, 3)$ 、 $B4(0, L1, 3)$ 、 $C1(0, 0, 3)$ ，如图 4 所示。其中  $A1$ 、 $A2$ 、 $A3$  和  $A4$  阵列主要目的是提高室内角落光照， $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$  和  $B4$  阵列为了提高室内边界光照和室内整体光照， $C1$  阵列是补偿室内中心光照。使通过不同长度的  $L1$  和  $L2$  可以构造出接收面上的光照度  $I_x$  与  $L1$  和  $L2$  相关的函数  $I_x(L1, L2)$ 。本文将以光照度分布标准差作为优化标准。通过遍历搜寻找出其中的最小值所对应的  $L1$  和  $L2$  作为最终确定的新型模型。

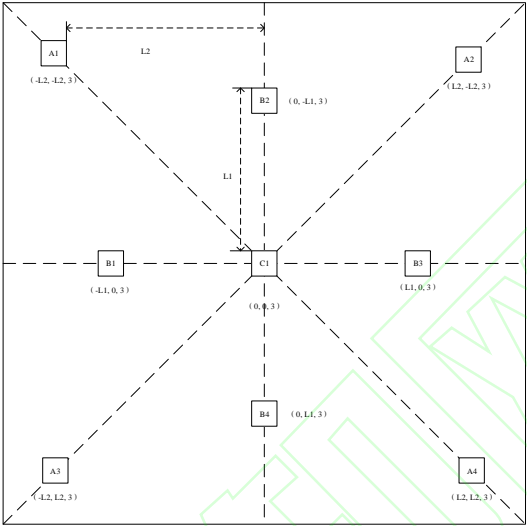


图 4 改进光源布局

## 2.2 LED 布局参数优化

为了进一步优化照度均匀度并且节约室内光源能耗，使用启发类算法对各个 LED 阵列进行参数调节是非常有必要的。本文在新型模型基础上通过改进粒子群算法对 LED 阵列内的灯珠数目进行优化，在有效的适应度函数下找到最优的一组灯珠数目。

### 2.2.1 粒子群算法基本原理

粒子群算法是一种启发式算法，源于对鸟群捕食的行为研究，在 1995 年由 Kennedy 和 Eberhart 提出<sup>[9]</sup>，算法流程如图 5 所示。

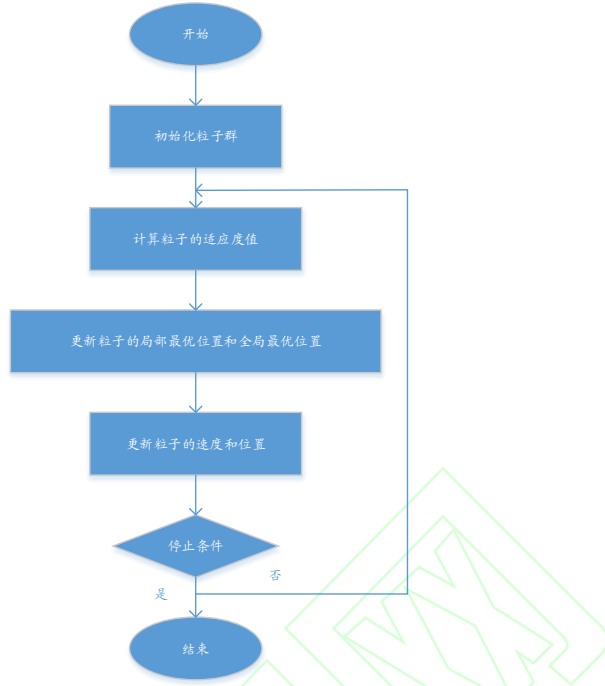


图 5 粒子群算法流程图

其基本原理是将待优化的解当作是搜索空间的一个粒子，将待优化的函数作为适应度函数，每个粒子都有其对应的适应度值，通过速度迭代公式和位置迭代公式对初始粒子进行更新，当算法满足停止条件时，全局最优粒子即为最优解。

### 2.2.2 粒子群算法重要参数

- 1) 惯性权重因子  $w$ : 粒子群算法中， $w$  数值的大小关系到算法的性能。 $w$  越大，粒子的全局寻优能力强，局部寻优能力弱。反之，全局寻优能力弱，局部寻优能力强。故此，一般要求收敛前期需要大的  $w$ ，便于全局寻优，收敛后期需要小的  $w$ ，便于快速收敛。Shi 提出了一种满足上述要求的递减策略<sup>[10]</sup>，但面对复杂问题精度不高。
- 2) 学习因子  $c_1$  和  $c_2$ : 学习因子  $c_1$  和  $c_2$  分别表示粒子向个体极值和全体极值飞行的能力。一般情况下， $c_1 = c_2 = 2$ 。

### 2.2.3 粒子群算法改进

- 1) 惯性权重因子  $w$ : 惯性权重因子  $w$  的改进方式有多种：线性权重递减、自适应权重、随机权重。根据对上述对惯性权重因子的分析，提出一种非线性递减策略，使  $w$  在迭代前期处于较大的数值，在迭代后期处于较小的数值，其调整公式为：

$$w = w_{min} + (w_{max} - w_{min}) \times \frac{\cos\left(\pi \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{t}{T}\right)\right) + 1}{2} \quad (4)$$

式中： $w_{min}$  是  $w$  的最小值， $w_{max}$  是  $w$  的最大值， $t$  是当前迭代次数， $T$  是总迭代次数。

- 2) 学习因子  $c_1$  和  $c_2$ : 搜索前期，较大的  $c_1$  和较小的  $c_2$  可以使粒子更好地往粒子个体极值方向移动，有利于全局搜索；搜索后期，较小的  $c_1$  和较大的  $c_2$  可以使粒子更好地往种群全体极值移动，加快收敛。迭代过程要求  $c_1$  递减、 $c_2$  递增。故本文提出一种非线性变化策略，其调整公式为：

$$c_1 = c_{min} + (c_{max} - c_{min}) \times \frac{\cos\left(\pi \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{t}{T}\right)\right) + 1}{2} \quad (5)$$

$$c_2 = c_{max} - (c_{max} - c_{min}) \times \frac{\cos\left(\pi \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{t}{T}\right)\right) + 1}{2} \quad (6)$$

其中， $c_{min}$  是  $c$  的最小值， $c_{max}$  是  $c$  的最大值。



### 3 仿真分析

#### 3.1 LED 位置优化仿真

本文仿真模型采用2.1节提出的新型布局模型。单个LED灯珠的中心发光强度为 $0.73\text{cd}$ ，半功率角为 $70^\circ$ 。墙面反射率为 $0.7$ ，反射微元为 $1\text{cm}^2$ 。L1 和 L2 的取值范围为 $[0, 2.5]$ ，步长为 $0.1$ 。根据2.1节分析，通过仿真可以得出光照标准差分布图，如图6所示。

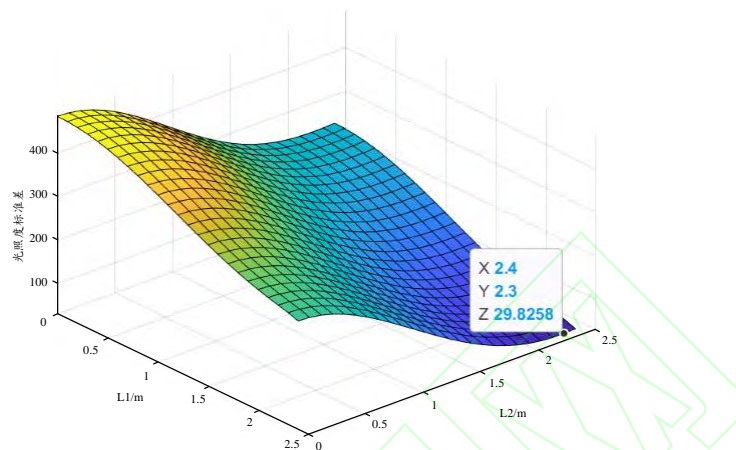


图6 不同(L1, L2)对应的光照度标准差

通过仿真图得出不同组(L1, L2)所对应的光照度标准差的最小值在(2.4, 2.3)处取得，此位置所对应的室内光照度分布如图7所示。

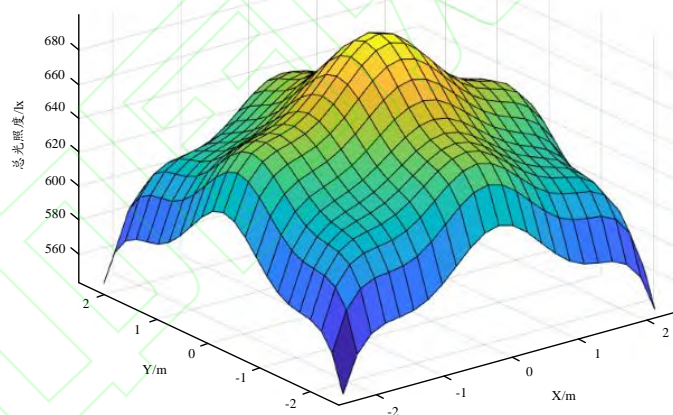


图7 (2.4,2.3)所对应的光照度

通过仿真，在(2.4, 2.3)位置下接收光照强度分布为 $543.1386 \sim 698.2065\text{lx}$ ，光照度波动幅度为 $155.0679\text{lx}$ ，UIR 为 $0.8606$ 。相较于传统的室内灯源布局，角落处的最小光照度提升了大约 $48\text{lx}$ ，照度均匀度提升了 $0.3119$ 。满足了室内照明的标准。

#### 3.2 PSO 性能优化仿真

根据上文对惯性权重因子的分析，将惯性权重的改进递减策略与线性递减策略进行对比，其数值随迭代次数 $t$ 增加的变化曲线如图8所示。

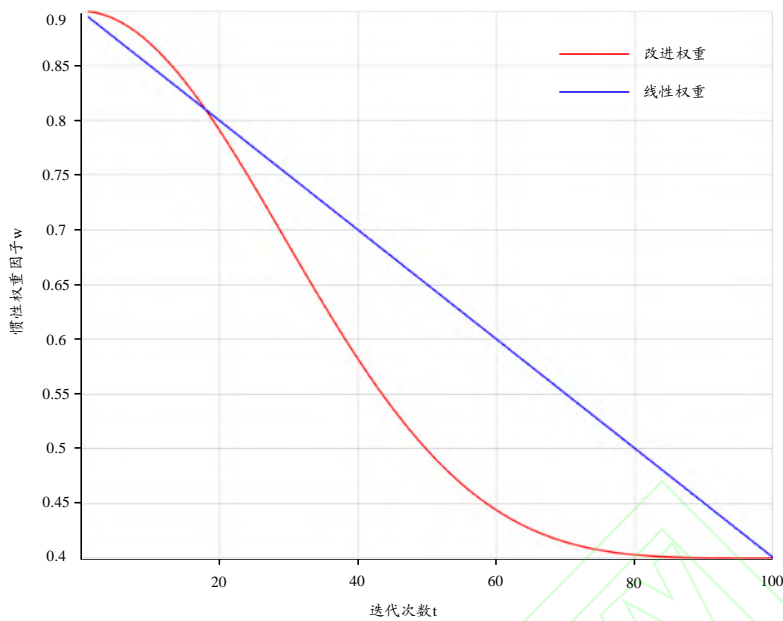


图 8 惯性权重因子对比

为了考虑接收面上所有接收点的光照均匀度,适应度函数选择为接收面上所有接收点的光照度标准差,约束条件为 $\min(E_i) > 350lx$ 。对改进权重因子 PSO 算法、改进权重因子联合改进学习因子 PSO 算法、线性 PSO 算法进行仿真并进行适应度对比,如图 9 所示。

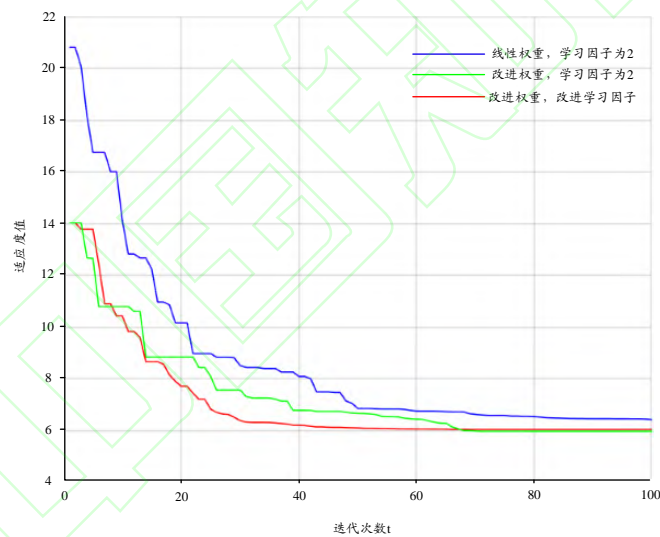


图 9 PSO 算法收敛对比

由仿真图分析,对比改进权重因子 PSO 算法和线性 PSO 算法,前者收敛速度优于后者,收敛精度高于后者。对比改进权重因子联合改进学习因子的 PSO 算法和改进权重因子的 PSO 算法,前者的收敛速度优于后者,收敛精度基本相同。通过以上分析可以得出本文提出的联合改进 PSO 算法性能明显优于线性 PSO 算法。

### 3.3 改进 PSO 优化后光照仿真

改进 PSO 算法优化后的灯珠数目如表 1 所示。

表 1 改进 PSO 优化的灯珠数目

灯珠数目	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1
联合改进 PSO	1140	1154	1142	1130	942	918	947	953	603



按照上表所示灯珠数目进行光照仿真，如图 10 所示。

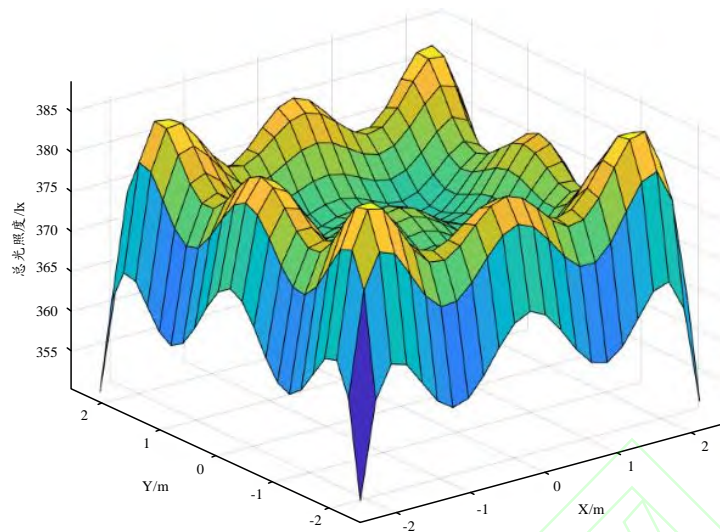


图 10 改进算法优化后的总光照

经过改进 PSO 算法优化后，接收光照度的分布为  $350\text{lx} \sim 385.7996\text{lx}$ ，光照度的波动幅度为  $35.7996\text{lx}$ ，UIR 为 0.9369。由此可见，该算法进一步提高了接收面的光照度均匀度，并降低了总 LED 灯珠数目（总能耗）。

将本文优化结果对比文献<sup>[4]</sup>和文献<sup>[6]</sup>，如表 2 所示。

表 2 各优化结果对比

	光照强度分布(lx)	波动幅度(lx)	UIR
文献[4]	388.56 ~ 514.64	126.08	0.8019
文献[6]	553 ~ 598	45	-
新型模型	543.1386 ~ 698.2065	166.0679	0.8606
算法优化新模型	350 ~ 385.7996	35.7996	0.9369

相比于几何图形分布的文献<sup>[4]</sup>，新型模型设计简单且光照均匀度更高。相比于蚁群算法优化的文献<sup>[6]</sup>，改进粒子群算法参数少、复杂度低、收敛速度快和精度高，优化后的新型模型光照波动幅度小。

#### 4 结束语

本文提出了一种新型室内灯源布局方式，提高了室内最小光照强度和光照度均匀度，并结合改进粒子群算法提出一种优化阵列 LED 灯珠数目的方案。通过添加约束条件，避免了算法在寻优过程中无法满足室内光照标准。仿真表明：新型模型的建立，满足室内光照强度标准，提高了光照度均匀度。改进的粒子群算法，提高了算法的收敛速度和精度。优化后的新型模型，在减少 LED 所需总能耗的基础上，进一步提升了光照度均匀度。

#### 参考文献：

- [1] 迟楠，卢星宇，王灿，等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. 中国激光，2017，44（3）：7-18.
- [2] 胡建宇. 基于神经网络的室内灯源布局的研究[D]. 南京：南京邮电大学，2019.
- [3] 王丽，郭茂田，田辉. 一种可见光通信光源布局模型及性能分析[J]. 激光杂志，2016，37（3）：92-94.
- [4] 陈述. 室内可见光通信 LED 光源布局方法研究[D]. 安徽：安徽理工大学，2019.
- [5] 高明光. 基于 LED 室内可见光通信系统的光源布局优化研究[D]. 北京：北京理工大学，

2016.

- [6] 杨智群, 梁继然, 毛陆虹. 蚁群算法优化室内可见光通信功率均匀性的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56 (22): 41-47.
- [7] Perez S R, Jimenez R P, Hernandez F J L, et al. Reflection model for calculation of the impulse response on IR-wireless indoor channels using raytracing algorithm[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2002, 32 (4) : 296-300.
- [8] 袁樵. 国际照明委员会照明标准——室内工作场所照明[J]. 照明工程学报, 2002 (4): 55-60.
- [9] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// International Conference on Neural Networks, 1995, Perth, Australia. Piscataway: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [10] SHI Y, EBERHART R. Empirical study of particle swarm optimization[C]//International Conference on Evolutionary Computation, July 6-9,1999, Washington. Piscataway: IEEE. 1999: 1945-1950.

**收稿日期:** 2020-6-16

**作者简介:** 周旭 (1994—), 男, 硕士研究生, 中国电子学会电波传播分会会员, 现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院电子与通信工程专业。研究方向为无线光通信, 主要从事室内无线光通信系统信道相关的研究与仿真验证工作。

