

# 基于光能传递方法的室内光环境模拟

傅军栋\*, 陈晴, 邱运霞, 叶聪

华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013

**摘要** 在已知光源光强分布和室内空间结构的条件下,对空间表面双向反射分布函数(BRDF)进行了假设,并建立数学模型,通过实验对相关参数进行了调整。模拟了不同类型空间模型中的光照情况,并将工作面相关参数值与DIALux仿真结果进行了比较,平均照度误差值小于 $\pm 3\%$ ,平面照度曲线分布基本相同。针对反射部分光能分布不均匀的问题,对墙面BRDF模型进行了改进,得到了较好的仿真效果。所提方法很好地解决了圆形底面空间、底部不等高空间下照度不能直接进行计算的问题。

**关键词** 机器视觉;光度学;光环境模拟;光能传递;漫反射表面;非朗伯体

中图分类号 O432.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.111502

## Indoor Light Environment Simulation Based on Light Energy Transfer Method

Fu Jundong\*, Chen Qing, Qiu Yunxia, Ye Cong

School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University,  
Nanchang, Jiangxi 330013, China

**Abstract** Based on the known light intensity distribution of a light source and indoor spatial structure, this study established a mathematical model and adjusted the relevant parameters through experiments with respect to a hypothesis about the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of the spatial surface. Further, the application of this mathematical model in different types of spatial models results in an average illuminance error of less than 3%. Moreover, the plane illumination curve distribution is basically similar to those obtained using the existing methods. The working-surface related parameter values are compared with the DIALux simulation results. This study also improves the BRDF model of a wall surface in terms of the application of the uneven light energy distribution on the reflective part. The proposed method improves the illuminance calculation accuracy in a circular bottom space or a space with its bottom not equal to height where a direct calculation is not available.

**Key words** machine vision; photometry; light environment simulation; light energy transfer; diffuse surface; non-Lambert

**OCIS codes** 150.2950; 290.1483; 240.4350

## 1 引言

为满足节能和舒适性需求,在对建筑空间进行照明设计时,需要对空间光环境进行描述,并评估空间中平均照度值、照度均匀性和其他相关指标。现有利用系数法和区域光效法的计算方便快捷,但精确度较低,且不能对空间内光线分布状况作出描述。专业照明设计软件DIALux在照明计算方面具有很高的权威性,其模拟计算值与实际环境测量值之间

误差非常小<sup>[1]</sup>,研究时可以将其模拟结果作为参照。

在光传输物理学中<sup>[2-3]</sup>,有许多经典的光能传递方法理论,包括光线追迹和Jacobi迭代法等,这些理论详细描述了物体间的光能传递;在设计灯具反射面时<sup>[4-6]</sup>,假设反射面为朗伯体近似发光光源,建立了反射器模型,计算和测量了检测平面上的照度分布,验证了理论的可行性;文献[7]中针对灯具表面朗伯体近似进行仿真和比较,验证了该方法的可靠性;文献[8]中提出了能量离散化的概念,将连续

收稿日期: 2018-12-17; 修回日期: 2018-12-21; 录用日期: 2019-01-02

\* E-mail: 8755915@qq.com

的反射光能量离散和量化,并利用连续的光能描述离散化;文献[9-10]中提出了更加贴合实际情况的非朗伯漫反射模型,模拟了粗糙物体表面实际的漫反射情况。

上述研究均没有将光能传递理论应用在室内光环境描述领域。本文以经典光能传递方法为基础,拓展了光线渲染理论,并应用于照明设计计算领域;通过建立数学模型对空间光能分布状况进行描述,并通过实验对模型参数进行调整,验证了该方法的可行性。

## 2 基本原理

依据适用场景不同,将实现全局照明的方法分为两大类,即适用于镜面场景的射线追踪方法<sup>[11]</sup>和适用于漫反射场景的光能传递方法。假设墙面属于典型的漫反射表面,其双向反射分布函数(BRDF)值在空间各方向和角度都相同,故将基于光能传递方法建立光环境模型。

### 2.1 经典光能传递方程

在建立空间光能计算模型时,有以下前提条件:

- 1)空气中没有参与反射的介质;
- 2)空间表面不透明,无透射光线;
- 3)空间表面反射特性为理想漫反射,且反射光线之间无相互作用。

按光能传递积分方程和 Galerkin 离散化过程,微面  $i$  处辐射所形成的平均照度等于微面  $i$  处辐射所形成的照度分量与空间其他面反射到  $i$  处辐射所形成的照度分量之和,即

$$B_i = B_{ei} + \rho_i \sum_j F_{ij} B_j, \quad (1)$$

式中: $B_{ei}$ 为微面  $i$  辐射所形成的照度分量; $\rho_i$ 为微面  $i$  的反射率; $F_{ij}$ 为面  $i$  与面  $j$  间反射因子; $B_j$ 为除面  $i$  以外所有的微面辐射所形成的照度和。

### 2.2 实际光能传递建模

结合光能传递理论,进行条件假设和公式推导,建立适合空间光环境描述的数学模型。由于模型中面  $i$  无光线辐射出来,则所有光线皆为反射光线。可将其按反射方式分为直射和间接两部分,并引入定期光能收集概念,追踪光线在空间内反射状况,对光能增量进行计算并叠加。起始光能分布来源于灯的直射,可表达为

$$E_i^{(0)} = E_{di} = \frac{I \cos \theta}{r^2}, \quad (2)$$

式中: $I$ 为光源在面  $i$  方向上的发光强度; $\cos \theta$ 为光

线与面  $i$  法向量之间的余弦角; $r$ 为光源到面  $i$  的距离。设光源坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ ,将(2)式转换成笛卡尔坐标  $(x, y, z)$ ,可表示为

$$E_{di}(x, y, z) = \frac{I_i(z_0 - z)}{[(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2]^{1.5}}. \quad (3)$$

经过  $k$  次光线反射之后,微面  $i$  的吸收光能  $E_i^{(k+1)}$  表示为

$$E_i^{(k+1)} = E_{di} + \rho_j \sum_j F_{ij} E_j^{(k)}, \quad (4)$$

则每次反射计算增加的光能分量为

$$\Delta E^{(k+1)} = \sum_j \Delta E_j^{(k)} F_{ij} \rho_j. \quad (5)$$

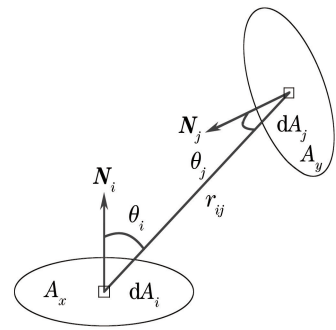


图1 计算两点间反射因子

Fig. 1 Calculation of reflection factor between two points

参照图1, $N_i$ 与 $N_j$ 分别指微面 $i$ 、 $j$ 的单位法向量。微面 $i$ 、 $j$ 间的反射因子 $F_{ij}$ 需要通过光线跟踪获得,可表示为

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r_{ij}^2} v_{ij} dA_j dA_i, \quad (6)$$

式中: $A_i$ 和 $A_j$ 分别为面 $i$ 、 $j$ 的面积; $\cos \theta_i$ 和 $\cos \theta_j$ 为光线与微面法向量之间的余弦角; $v_{ij}$ 指面 $i$ 、 $j$ 是否可见(可见为1,不可见为0); $r_{ij}$ 为面 $i$ 到面 $j$ 的距离。

为了便于叠加计算,将反射因子 $F_{ij}$ 离散化,因微面面积 $A$ 相同,则

$$F_{ij} = \frac{A \cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r_{ij}^2} v_{ij}. \quad (7)$$

光能的反射增量为

$$\Delta E^{(k+1)} = \sum_j \Delta E_j^{(k)} A \rho_j v_{ij} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r_{ij}^2}. \quad (8)$$

假设面 $i$ 与 $j$ 间向量为 $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ ,面 $i$ 、 $j$ 的法向量分别为 $\mathbf{n}_i = (x_{ni}, y_{ni}, z_{ni})$ 和 $\mathbf{n}_j = (x_{nj}, y_{nj}, z_{nj})$ ,那么(8)式转换成笛卡尔坐标可表示为

$$\Delta E^{(k+1)} = \sum_j \frac{-\Delta E_j^{(k)} A \rho_j v_{ij} (x_{ij} x_{ni} + y_{ij} y_{ni} + z_{ij} z_{ni}) (x_{ij} x_{nj} + y_{ij} y_{nj} + z_{ij} z_{nj})}{\pi (x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2)^2 [(x_{ni}^2 + y_{ni}^2 + z_{ni}^2)(x_{nj}^2 + y_{nj}^2 + z_{nj}^2)]^{0.5}} \quad (9)$$

### 3 模型的建立

光能传递计算过程中需要提供以下参数:每个光源空间位置、旋转方向和发光强度分布,以及光源在场景中的表面边界、反射率和透射率。

#### 3.1 空间案例建立

为更直观展现该方法的建模计算效果,建立4个有代表性的复杂空间模型,如表1所示。

表1 光环境模型案例

Table 1 Cases of light environment model

Number	Space bottom shape	Lighting arrangement
Case 1	Conventional rectangular space	Uniform arrangement
	Unequal space on the ground	Uniform arrangement
Case 3	Conventional rectangular space	Unequal heights
Case 4	Round floor space	Ring arrangement

为了简化计算,所有空间皆假设无窗,顶棚高为2.8 m、工作面高为0.75 m、墙面反射比 $\rho_w$ 为0.5、天花板反射比 $\rho_t$ 为0.7、地面反射比 $\rho_e$ 为0.2。此次模型建立中所使用的灯具皆是功率为30 W、光通量为1350 lm的长管荧光灯。将灯具光照强度分布、灯具的位置信息、墙面的位置信息与墙面的反射率作为条件输入,调整反射计算次数,并将工作面各照度分布状况、各类照度值、照度均匀度等作为结果输出。

#### 3.2 参数的赋值

为了在保证计算精度的同时能够尽可能地节省程序运行时间,需要通过实验的方法调整反射计算次数( $N_{RN}$ )的参数值。

如图2所示,平均照度 $E$ 的误差率随着反射计算次数的增多而减小, $N_{RN}=3$ 时误差率开始稳定不变; $N_{RN}=4$ 是运行时间开始急剧增加。综合考虑,将反射计算次数赋值为 $N_{RN}=3$ 。

### 4 模型仿真与误差分析

模型建立之后,将仿真计算结果输出与DIALux仿真结果进行对比和分析。

#### 4.1 结果分析

照度分布曲线的模型输出结果与DIALux软件运行结果的对比如图3所示,工作面照度分布状况

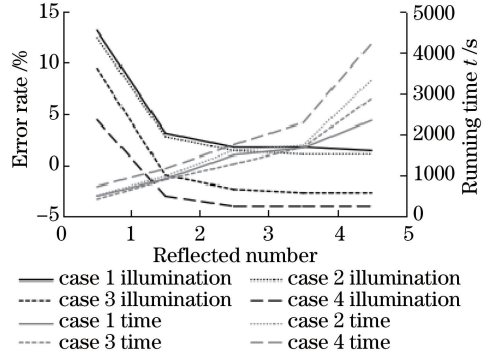


图2 平均照度误差率和运行时间随反射计算次数的变化图

Fig. 2 Average illuminance error rate and running time versus number of reflection calculations

大致相同,在墙角区域略有差异,需要对工作面各照度指标进行进一步分析。表2为工作面上直射照度 $E_d$ 、反射照度 $E_r$ 和总照度 $E$ 的均值结果对比,照度值指标误差率极小,稳定在±5%以内。照度均匀度是指工作面上最小照度与最大照度的比值,定义为

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \quad (10)$$

照度均匀度对比结果如表3所示,照度均匀度误差率比较大,其中最大照度值 $E_{\max}$ 误差率小于5%,但最小照度值 $E_{\min}$ 间存在巨大差异,下面对此展开进一步研究和探讨。

表2 平均照度计算结果对比

Table 2 Comparison of average illuminance calculation results

Case type	Average direct illumination /lx	Average reflected illuminance /lx	Average illumination /lx
Case 1 /lx	208	77	284
DIALux /lx	206	82	289
Error rate /%	-0.76	-6.48	0.76
Case 2 /lx	208	77	285
DIALux /lx	206	82	288
Error rate /%	0.77	-5.74	-1.08
Case 3 /lx	220	83	303
DIALux /lx	216	80	296
Error rate /%	2.05	3.76	2.52
Case 4 /lx	202	92	293
DIALux /lx	205	90	295
Error rate /%	-1.63	1.78	-0.60

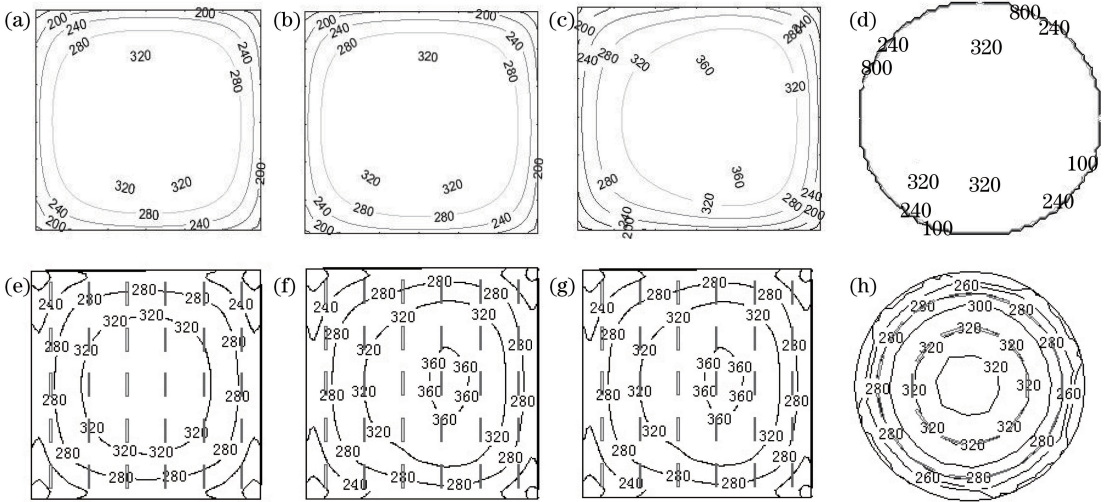


图 3 各案例工作面照度分布结果。(a) Case 1,模型仿真;(b) Case 2,模型仿真;(c) Case 3,模型仿真;(d) Case 4,模型仿真;(e) Case 1, DIALux 仿真;(f) Case 2, DIALux 仿真;(g) Case 3, DIALux 仿真;(h) Case 4, DIALux 仿真  
 Fig. 3 Illuminance distribution results of work surface for each case. (a) Case 1, model simulation; (b) Case 2, model simulation; (c) Case 3, model simulation; (d) Case 4, model simulation; (e) Case 1, DIALux simulation; (f) Case 2, DIALux simulation (g) Case 3, DIALux simulation; (h) Case 4, DIALux simulation

表 3 照度均匀度计算结果对比

Table 3 Comparison of illuminance uniformity calculation results

Case type	Minimum illumination /lx	Maximum illumination /lx	Illumination uniformity
Case 1 /lx	119	348	0.34
DIALux /lx	176	350	0.50
Error rate /%	33.9	0.6	32
Case 2 /lx	119	349	0.34
DIALux /lx	175	350	0.50
Error rate /%	34.1	0.3	32
Case 3 /lx	170	381	0.33
DIALux /lx	173	368	0.47
Error rate /%	26.6	3.5	29.8
Case 4 /lx	184	344	0.54
DIALux /lx	221	329	0.67
Error rate /%	16.7	-4.6	19.4

表 4 光能的直射分量和反射分量结果对比

Table 4 Comparison of direct and reflected components of light energy

Case type	$E_{dmax}$	$E_{dmin}$	$E_{fmax}$	$E_{fmin}$
Case 1 /lx	274	101	95	18
DIALux /lx	274	100	103	75
Error rate /%	0	0.50	-7.38	-75.6
Case 2 /lx	274	101	92	18
DIALux /lx	274	100	101	75
Error rate /%	0	0.50	-8.81	-75.8
Case 3 /lx	297	103	103	19
DIALux /lx	295	98	103	71
Error rate /%	0.68	5.10	0.00	-73.2
Case 4 /lx	246	140	138	44
DIALux /lx	242	141	114	75
Error rate /%	1.65	-0.71	21.05	-41.3

### 4.2 误差分析

为了确定误差产生的原因,用 DIALux 软件建立一组分离直射分量的空间模型。将空间各面的反射率皆设置为 0,分离出空间工作面照度直射分量,得出最大值  $E_{dmax}$ 、最小值  $E_{dmin}$  和平均值  $E_{dv}$ ,再通过照度表间差值计算反射分量,得出最大值  $E_{fmax}$ 、最小值  $E_{fmin}$  和平均值  $E_{fv}$ 。其数值对比结果如表 4 所示,各类照度值误差率的大小对比如图 4 所示。

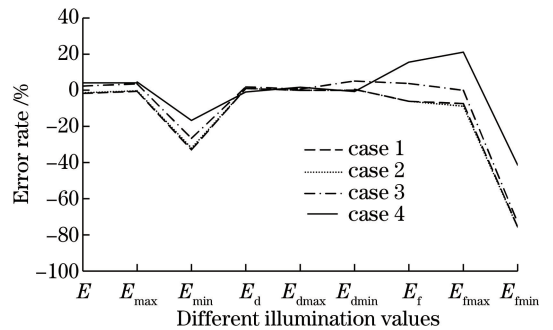


图 4 各类照度误差率

Fig. 4 Illumination error rates of each case

不难看出,直射照度部分模型计算结果与DIALux 仿真结果误差极小,其值小于±2%;造成结果差异的原因在于反射照度值误差过大,尤其是最小照度值,说明反射部分光能在空间表面分布不均匀,而且衰减过快。针对这个问题,对反射模型进行了改进和仿真。

### 5 反射模型的改进和仿真

用朗伯模型对物体表面光能进行描述时,接近物体边界的亮度与中心亮度差异较大,实际上同一平面光能分布相对均匀且差异较小。可通过神经网络对模型进行训练<sup>[12-13]</sup>,对反射部分能量分布进行调整,但模型普适性差。采用文献[9-10]中提出的针对表面粗糙度的综合反射模型,对墙面 BRDF 模型进行调整,使之更符合实际情况。

#### 5.1 改进的反射模型

图5定义了改进的漫反射模型中使用的参数符号, $\theta_i, \phi_i$ 分别指入射角和入射方位角, $\theta_r, \phi_r$ 分别指反射角和反射方位角,反射辐射亮度 $L_r$ 是相对入射辐射亮度 $L_i$ 的漫反射表达,其单位为 $\cos \theta \cdot \text{m}^2$ 。假设墙面是由V型朗伯微平面组成,其反射率为 $\rho$ ,粗糙度为高斯概率分布标准差,即 $\sigma$ 。

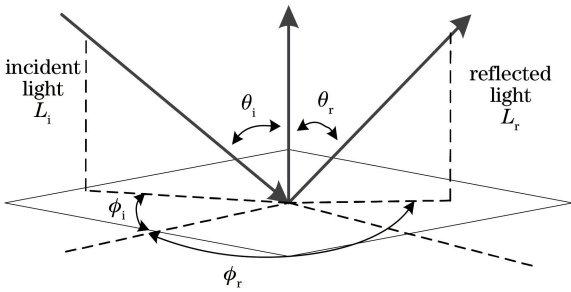


图5 漫反射参数定义

Fig. 5 Definition of diffuse reflection parameters

反射辐射亮度表达式由两部分组成,分别是光源直接照射引起的表面辐射亮度的 $L_{r1}$ 和互反射引起的辐射亮度 $L_{r2}$ ,即

$$L_r(\theta_r, \theta_i, \phi_r - \phi_i; \sigma) = L_{r1}(\theta_r, \theta_i, \phi_r - \phi_i; \sigma) + L_{r2}(\theta_r, \theta_i, \phi_r - \phi_i; \sigma), \tag{11}$$

其中, $L_{r1}$ 可表示为

$$L_{r1}(\theta_r, \theta_i, \phi_r - \phi_i; \sigma) = \frac{\rho}{\pi} L_i \cos \theta_i \{A + B \text{Max}[0, \cos(\phi_r - \phi_i)] \times \sin \alpha \tan \beta\}, \tag{12}$$

且系数  $A = 1 - 0.5 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33}, B = 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09}$ 。

$L_{r2}$ 可表达为

$$L_{r2}(\theta_r, \theta_i, \phi_r - \phi_i; \sigma) = 0.17 \frac{\rho^2}{\pi} \times L_i \cos \theta_i \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.13} \times \left[ 1 - \cos(\phi_r - \phi_i) \left( \frac{2\beta}{\pi} \right)^2 \right], \tag{13}$$

式中:系数 $\alpha = \text{Max}[\theta_i, \theta_r], \beta = \text{Min}[\theta_i, \theta_r]$ ,对各个案例中工作面照度进行计算。按图1的参数定义,辐射亮度与辐射照度的转换关系为<sup>[14]</sup>

$$E = L \Delta A_j \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{r_{ij}^2}. \tag{14}$$

#### 5.2 改进后结果分析

因反射模型过于复杂,应用在各案例中时导致运行时间过长。为此,建立了 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 立方体空间,将灯具数量减少到1盏,对粗糙度 $\sigma$ 进行参数调整,参数调试状况如图6所示。

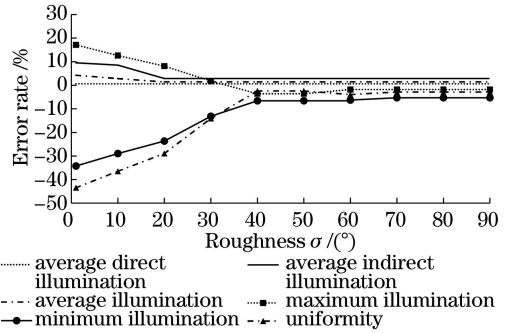


图6 各照度值误差率随粗糙度 $\sigma$ 变化图

Fig. 6 Error rate of each illuminance value as a function of roughness

不难看出,当 $\sigma = 1^\circ$ 时,最小照度值误差率约为30%,近似于朗伯模型计算结果。当粗糙度 $\sigma \geq 40^\circ$ 时,照度分布相对均匀,与DIALux运行结果几乎一致。将粗糙度 $\sigma = 40^\circ$ 反射模型代入各案例中,运行结果如表5所示。

案例1最小照度值误差率为9%,相对朗伯模型误差率大大减少,其余参数值误差率皆小于5%,该反射模型缓解了反射照度分布不均状况,缺点是运行时间过长,简化模型并加快运行速度问题有待解决。

### 6 结 论

基于传统的光能传递方法对室内光环境模拟进行研究,推导出用照度进行表达的光能计算公式,并通过建立不同的空间模型对方法进行仿真验证。针对反射照度不均匀问题改进了墙面BRDF模型,相对朗伯漫反射模型更加符合实际情况。解决了异型

表5 模型改进后仿真照度值和均匀度误差

Table 5 Simulated illuminance value and uniformity error after model improvement

Case type	$E_{dv}$	$E_{fv}$	$E_v$	$E_{max}$	$E_{min}$	$U$
Case 1 /lx	208	79	283	348	160	0.46
DIALux /lx	206	82	289	350	176	0.50
Error rate /%	-0.76	-3.66	0.31	0.6	9.10	8.05
Case 2 /lx	208	78	286	349	167	0.48
DIALux /lx	206	82	288	350	175	0.50
Error rate /%	0.77	-4.89	-1.08	0.3	4.57	4.30
Case 3 /lx	220	82	302	381	169	0.44
DIALux /lx	216	80	296	368	173	0.47
Error rate /%	2.05	2.56	2.02	3.5	2.31	2.64
Case 4 /lx	202	92	291	344	219	0.64
DIALux /lx	205	90	295	329	221	0.67
Error rate /%	-1.63	1.78	-1.36	-4.6	0.90	4.98

空间照度难以直接计算的问题,通过实验证明了方法的可行性和准确性。

### 参 考 文 献

- [1] Tagliabue L C, Buzzetti M, Arosio B. Energy saving through the Sun: analysis of visual comfort and energy consumption in office space [J]. Energy Procedia, 2012, 30: 693-703.
- [2] Suffern K. Raytracing from the ground up[M]. New York: A K Peters/CRC Press, 2016.
- [3] Cline D, Talbot J, Egbert P. Energy redistribution path tracing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 1186-1195.
- [4] Liu B F, Jin X L, Zhu Z M. Uniform illumination design based on LED array and diffuse reflection freeform surface [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(4): 598-602.  
刘百芬, 金小龙, 祝振敏. 基于LED阵列与漫反射自由曲面的均匀照明光源设计[J]. 应用光学, 2014, 35(4): 598-602.
- [5] Zhu Z M, Qu X H, Liang H Y, *et al.* Uniform illumination study by light-emitting diode ring array and diffuse reflection surface[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0115001.  
祝振敏, 曲兴华, 梁海昱, 等. 基于发光二极管环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0115001.
- [6] Qian W, Yang B. Free-form reflector design for multi-direction collimated beam [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 012201.  
钱伟, 杨波. 产生多向准直光束的自由曲面反光镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 012201.
- [7] Zhu Z M, Luo H. Design method of diffuse reflection

freeform surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 052201.

祝振敏, 罗慧. 漫反射自由曲面的设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 052201.

- [8] Xu Y Y, Jing X L, Ding J G, *et al.* Reflector design for LED based on uniform illumination[J]. Optical Technique, 2012, 38(3): 345-349.  
许耀云, 井西利, 丁金刚, 等. 基于均匀照明的LED反射器的设计[J]. 光学技术, 2012, 38(3): 345-349.
- [9] Wolff L B, Nayar S K, Oren M. Improved diffuse reflection models for computer vision [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 30(1): 55-71.
- [10] Wang G H, Han J Q, Zhang X M. A fast shape from shading method for diffuse surfaces[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(10): 7-10, 21.  
王国璋, 韩九强, 张新曼. 一种适合漫反射表面从明暗恢复形状的快速算法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 7-10, 21.
- [11] Yang Z H, Wei L, Zhang Q Q, *et al.* Ray-tracing algorithm of elliptical reflection zone plate[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0920001.  
杨祖华, 魏来, 张强强, 等. 椭圆反射式波带片光线追迹算法[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0920001.
- [12] Zhu Z M, Pei S, Chen S M, *et al.* Highlight removal of high reflectivity workpiece and vision measurement based on polarization information [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1112005.  
祝振敏, 裴爽, 陈世明, 等. 基于偏振信息的强反射工件高光去除及视觉测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1112005.
- [13] Chu J J, Cui G H, Liu Y W, *et al.* A method for measuring surface color based on spectral tunable

LED light source and multispectral imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0833001.

褚金金, 崔桂华, 柳耀武, 等. 一种基于光谱可调 LED 光源和多光谱成像技术的物体表面颜色测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0833001.

[14] Zhang X H, Ye P, Wang W L, *et al.* Gray uniformity of the wide field line CCD image [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(7): 62-66.

章秀华, 叶鹏, 王万里, 等. 大视场线阵 CCD 图像灰度均匀化[J]. 光电工程, 2015, 42(7): 62-66.