

文章编号:1000-582X(2008)10-1160-04

## 基于光通传递函数矩阵的照度比例模型

曾礼强, 王晓静, 张 瑞

(重庆大学 电气工程学院, 重庆 400030)

**摘 要:**考虑照明调光控制系统中在工作面上设置的照度传感器容易受到办公文件、人体等的遮挡而使控制系统误动作,以光通传递函数为基础,建立光通传递函数矩阵,分别提出基于光通传递函数矩阵的单光源和多光源照度比例模型,并采用最小二乘法对比例模型的参数进行估计。现场测试表明,采用该模型计算照度与实测相比较一致性较好,基于该模型的照度传感器设置方法,不但可以减小线路敷设的麻烦,还可以有效解决在工作面上设置传感器时,由于办公文件等的遮挡而导致的系统误动作。

**关键词:**照明;照度比例模型;光通传递函数矩阵;最小二乘法

**中图分类号:**TU113.19

**文献标志码:**A

## An illuminance ratio model based on a luminance transfer function matrix

ZENG Li-qiang, WANG Xiao-jing, ZHANG Rui

(Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** An illuminance ratio model of both single and multiple sources was proposed. The model tried to compensate for a lighting dimming system acting incorrectly as a result of an illuminance sensor aimed at a workplace sheltered by paper or a human body. The method was based on a luminance transfer function matrix, and the model parameters were estimated via the least squares method. Simulated and experimental results show the illuminance calculated using the model is consistent with the actual situation. The illuminance sensor setting based on this model can not only reduce difficulties associated with laying lines, but also avoid incorrect action caused by the illuminance sensor aimed at a workplace sheltered by paper or a human body. This research serves as a reference for the design of lighting dimming systems.

**Key words:** illuminance; illuminance ratio model; luminance transfer function matrix; least squares method

建筑电气工程学科的重要研究领域——照明设计是现代建筑电气设计中的关键技术之一。随着人们对人工照明光环境的舒适性、个性化、安全、节能、艺术品位等方面追求的提高,无论是基于功能上的需求还是节能上的需求,照明调光控制系统在日常生活中的应用越来越普遍。

目前,在调光控制系统中,照度传感器主要设置在室内墙面上或工作面上,但这 2 种方法各有其弊

端:目前,设置在墙面上的照度传感器是以检测墙面垂直面照度为主,然而,在实际的办公场所等地方,关注的往往是工作面的水平面照度;在工作面设置照度传感器能够准确地直接地测量工作面照度,但在工作面上设置照度传感器一方面给工作带来不便,同时设置在工作面上的照度传感器既线路敷设麻烦,又容易受到办公设备、人体等的遮挡,而使得调光控制系统误动作。笔者提出了一种基于光通传

收稿日期:2008-06-16

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ02A03-01-2)

作者简介:曾礼强(1981-),男,重庆大学教师,主要从事昼间人工照明及其控制方向的研究,(Tel)023-65102437;

(E-mail) zlqq2000@163.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

递函数矩阵的照度比例模型,基于该模型传感器设置方法综合 2 种方法的优点,能够在一定程度上解决上述问题。

## 1 基于光通传递函数矩阵的照度比例模型

### 1.1 光通量传递函数矩阵的建立

假设一闭合空间,共分成  $n$  个平面,各表面均具有均匀漫反射特性。点  $i$ 、 $j$  所在平面  $A_i$ 、 $A_j$  的位置关系如图 1 所示,其反射率分别为  $\rho_i$ 、 $\rho_j$ ,每个面都具有均匀的光出射度  $M_i$ 、 $M_j$ 。

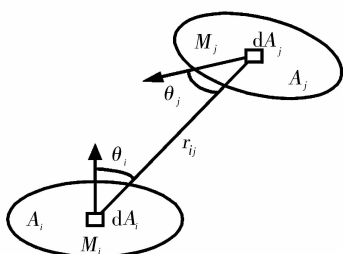


图 1 均匀漫反射面  $A_i$ 、 $A_j$  的位置关系示意

点  $i$  的照度  $E_i$  由 2 部分组成<sup>[1]</sup>:直射照度  $E_{oi}$  和间接照度  $E_{ri}$ ,即

$$E_i = E_{oi} + E_{ri} \tag{1}$$

具有均匀漫反射性的面光源  $A_j$  在点  $i$  所产生的直射照度为

$$E_{rij} = \int_{A_j} \frac{\rho_j E_j \cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r_{ij}^2} dA_j = \int_{A_j} \rho_j e_r(i, j) E_j dA_j \tag{2}$$

其中:  $e_r(i, j) = \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r_{ij}^2}$  为固有照度系数。于是,点  $i$  的照度为

$$E_i = E_{oi} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_{A_j} \rho_j e_r(i, j) E_j dA_j \tag{3}$$

式(3)对  $A_i$  进行积分

$$\int_{A_i} E_i dA_i = \int_{A_i} E_{oi} dA_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_{A_i} \int_{A_j} \rho_j e_r(i, j) E_j dA_j dA_i \tag{4}$$

在  $A_i$  足够小的情况下,可以视  $A_i$  上的照度为常数  $E_i$ ,那么

$$E_i A_i = E_{oi} A_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_{A_i} \int_{A_j} \rho_j e_r(i, j) E_j dA_j dA_i =$$

$$E_{oi} A_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_j A_i F_{ij} E_j \tag{5}$$

其中:  $F_{ij}$  为点  $i$  和点  $j$  间的固有光通系数。

由此

$$E_i = E_{oi} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \rho_j F_{ij} E_j \tag{6}$$

在均匀漫反射条件下,有

$$M_i = \pi L = \rho_i E_i \tag{7}$$

其中,  $M_i$  为包含  $i$  点的微小面积元上发射出来的光通量。则

$$\rho_i E_i = M_{oi} + \rho_i \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} E_j \rho_j \tag{8}$$

其中,  $M_{oi} = \Phi_i$  为从包含  $i$  点的微小面积元上发射出来的初始光通量。

用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \rho_1 & -\rho_1 \rho_2 F_{12} & \cdots & -\rho_1 \rho_n F_{1n} \\ -\rho_2 \rho_1 F_{21} & \rho_2 & \cdots & -\rho_2 \rho_n F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \rho_i & \vdots \\ -\rho_n \rho_1 F_{n1} & -\rho_n \rho_2 F_{n2} & \cdots & \rho_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_n \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_n \end{bmatrix} \tag{10}$$

即:

$$\mathbf{E} = \mathbf{G}\Phi \tag{11}$$

其中  $\mathbf{G}$  称为光通传递函数矩阵,  $G_{ij}$  称为  $j$  对  $i$  的光出射度比(或光通传递函数)。表示  $j$  有单位初始光出射度时,考虑室内各个面相互反射,在点  $i$  上产生的照度为  $G_{ij}$ 。在光源位置确定的情况下,  $G_{ij}$  由室内各点的相对位置唯一确定,不随光源输出光通量的改变而改变。

### 1.2 照度比例模型的建立

#### 1.2.1 单光源照度比例模型

如果室内只有一个光源,设  $\Phi_1 \neq 0$ ,  $\Phi_k = 0$ ,  $i = 2, 3, \dots, n$ 。  $E_i = G_{i1} \Phi_1$ ,  $E_j = G_{j1} \Phi_1$ , 故

$$f_{ij(x)} = \frac{E_i}{E_j} = \frac{G_{i1}}{G_{j1}} \tag{12}$$

由上式可知,在单一光源的情况下,任何 2 个面的照度之比恒定,不随光源输出光通量的改变而改变。

### 1.2.2 多光源照度比例模型

如果室内不止一个光源,  $\Phi_k \neq 0, k = 1, 2, \dots, n$ 。

$$\text{令: } \mathbf{G}_i = [G_{i1} \ G_{i2} \ \dots \ G_{in}]^T,$$

$$\mathbf{G}_j = [G_{j1} \ G_{j2} \ \dots \ G_{jn}]^T,$$

$$\Phi = [\Phi_1 \ \Phi_2 \ \dots \ \Phi_n]^T.$$

那么

$$f_{ij(G_i, G_j)} = \frac{E_i}{E_j} = \frac{G_{i1}\Phi_1 + \dots + G_{in}\Phi_n}{G_{j1}\Phi_1 + \dots + G_{jn}\Phi_n} = \frac{\mathbf{G}_i^T \Phi}{\mathbf{G}_j^T \Phi}. \quad (13)$$

可知, 在多光源的情况下, 任何 2 个面的照度之比由各个光源输出光通量唯一确定。

### 1.3 照度比例模型的估计

以多光源照度比例模型为例, 采用最小二乘法对参数  $G_{i1}, \dots, G_{im}, G_{j1}, \dots, G_{jn}$  进行估计。通过观测光源输出光通量改变的输入输出 ( $I/O$ ) 数据  $\{\Phi, f_{ij(x)}\}$  来估计这些未知的待定参数  $G_{i1}, \dots, G_{im}, G_{j1}, \dots, G_{jn}$ 。

$$\min_{G_i, G_j} \sum_{k=1}^m \{(f_{ij(x_k)} - y_k)^2\},$$

其中:  $y_k = \frac{E_{1k}}{E_{2k}}$ ;  $m$  为样本数目, 要求  $m > 2n$ ;  $n$  为光源数。

## 2 实验结果分析

为了验证笔者提出的照度比例模型的正确性, 在如图 2 所示房间进行现场测试, 顶棚(高度 2.8 m)为大白粉刷 ( $\rho = 0.7$ ), 四周墙壁(不考虑开窗)为白灰粉刷 ( $\rho = 0.5$ ), 地面为混凝土 ( $\rho = 0.2$ ), 均为均匀漫反射材料; 室内有 4 盏直径为 250 mm 的乳白玻璃球形吸顶灯 A、B、C、D 嵌入式安装, 内装一个输出光通量可调节的 46 W 节能荧光灯。观测点 1、2 分别设置于光源 A、C 正下方距地 0.85 m 处。

$$f_{12(G_1, G_2)} = \frac{\mathbf{G}_1^T \Phi}{\mathbf{G}_2^T \Phi},$$

其中,  $\mathbf{G}_1 = [G_{1A} \ G_{1B} \ G_{1C} \ G_{1D}]^T$ ;

$$\mathbf{G}_2 = [G_{2A} \ G_{2B} \ G_{2C} \ G_{2D}]^T;$$

$$\Phi = [\Phi_A \ \Phi_B \ \Phi_C \ \Phi_D]^T.$$

改变光源输出光通量, 测量室内观测点照度值, 如表 1 所示。

采用表 1 的数据对照度比例模型参数进行辨识, 辨识结果如下

$$\hat{\mathbf{G}}_1 = [0.052 \ 8 \ 0.003 \ 1 \ 0.002 \ 1 \ 0.013 \ 0]^T,$$

$$\hat{\mathbf{G}}_2 = [0.006 \ 5 \ 0.012 \ 3 \ 0.052 \ 3 \ 0.001 \ 5]^T.$$

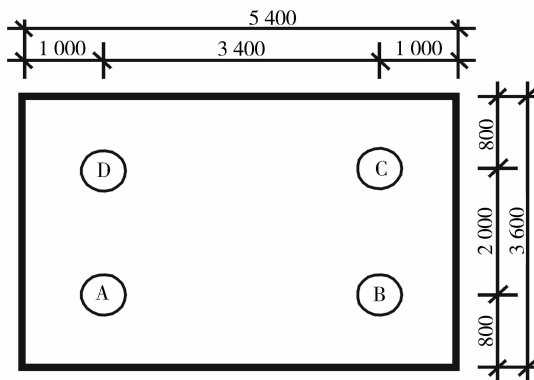


图 2 室内灯具布置平面图

表 1 室内观测点照度

光源输出光通量 /lm				照度 /lx		照度比
$\Phi_A$	$\Phi_B$	$\Phi_C$	$\Phi_D$	$E_{1k}$	$E_{2k}$	$y_k$
2 400	2 600	2 800	3 000	180	190	1.06
2 200	2 400	2 600	2 800	166	185	1.11
2 000	2 200	2 400	2 600	151	170	1.13
1 800	2 000	2 200	2 400	137	160	1.17
1 600	1 800	2 000	2 200	123	143	1.16
1 400	1 600	1 800	2 000	113	127	1.12

改变光源输出光通量, 测量观测点 2 照度, 采用所提照度比例模型算法, 进行照度计算。由表 2 可知, 采用所提照度比例模型计算结果与实测结果相接近。

表 2 照度比例模型照度计算和实测照度比较

灯具输出光通量 /lm				观测点 1 照度 /lx	
$\Phi_A$	$\Phi_B$	$\Phi_C$	$\Phi_D$	实测值	计算值
3 000	1 200	1 400	1 600	184	186.1
2 600	2 800	3 000	1 200	168	167.8
2 800	3 000	1 200	1 400	175	177.9
1 200	1 400	1 600	1 800	95	97.5

## 3 结 论

在照明控制系统中, 采用提出的照度比例模型, 可以避免在工作面上设置照度传感器, 不但可以减小线路敷设的麻烦, 还可以有效解决在工作面上设置传感器时, 由于办公文件等的遮挡而导致的系统误动作, 在实际工程中有较大的应用价值。

## 参考文献:

- [1] 孙建民. 电气照明技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 145-207.
- [2] 汪鲁才, 王耀南, 毛六平. 基于照度矩阵的照度计算方法研究[J]. 照明工程学报, 2002, 113(2): 40-42.  
WANG LU-CAI, WANG YAO-NAN, MAO LIU-PING. Method of computing illuminance based on illuminance matrix[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2002, 113(2): 40-42.
- [3] 高小敬. 智能照明系统中室内的自然光照水平预测[J]. 低压电器, 2004, 6: 12-14.  
GAO XIAO-JING. Prediction of inside's natural lighting levels in intelligent lighting control system[J]. Low Voltage Apparatus, 2004, 6: 12-14.
- [4] PARK K, ATHIENITIS K, ANDREAS K. Workplane illuminance prediction method for daylighting control systems[J]. Solar Energy, 2003: 277-284.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB50034-2004 建筑照明设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 1-114.
- [6] 曾礼强, 王晓静, 雍静. 基于光通传递函数矩阵的照度计算方法研究[J]. 照明工程学报. 2006, 17(4): 5-7.  
ZENG LI-QIANG, WANG XIAO-JING, YONG JING. Method of computing illuminance based on flux transfer function matrix [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2006, 17(4): 5-7.
- [7] 石野幸三. 肖挥乾, 庞蕴凡译. 室内照明计算方法[M]. 北京: 计量出版社, 1984.
- [8] 雍静, 吴锐. 室内照明系统的模糊优选综合评价方法[J]. 照明工程学报, 2005, 25(1): 8-11.  
YONG JING, WU RUI. Compositive evaluation of the indoor illumination system based on the fuzzy optimum model [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2005, 25(1): 8-11.
- [9] 刘炜, 王晓静, 曾礼强. 办公室光环境设计要素[J]. 照明工程学报. 2007, 18(3): 36-40.  
LIU WEI, WANG XIAO-JING, ZENG LI-QIANG. Design of office cuminsons environment [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2007, 18(3): 36-40.
- [10] REA M S, BULLOUGH J D, FIGUEIRO M G. Human melatonin suppression by light: a case for scotopic efficiency [J]. Neuroscience Letters, 2001, 9: 45-81.
- [11] REA M S, BULLOUGH J D, FIGUEIRO M G. Circadian photobiology: a new framework for lighting practice[J]. Lighting Research and Technology, 2001, 19(2): 90-105.
- [12] STONE P T. The effects of environmental illumination on melation bodily rhythms and mood states: a review[J]. Lighting Research & Technology, 1999, 31: 46-49.
- [13] ATHIENITIS A K, TZEMPELIKOS A. A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device [J]. Solar Energy, 2002, 72(4): 271-281.
- [14] MONCEF K, PAUL M. A simplified method to estimate energy saving of artificial lighting use from daylighting [J]. Building and Environment, 2005, 40: 747-754.
- [15] 刘加平. 建筑物理 [M]. 北京: 建筑工业出版社, 2000: 161.
- [16] 曾广达. 系统辨识与仿真 [M]. 四川: 电子科技大学出版社, 1998.

(编辑 赵 静)