

建筑物夜景亮度计算模型及修正系数

杨春宇, 梁树英, 张青文

(重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:为了解决国际照明委员会(CIE)推荐的照明计算公式不适合具有混合光反射性质的现代建筑饰面材料的问题,寻找一个能符合现代建筑饰面材料的亮度计算方法,达到建筑节能与城市夜景亮度控制目的。在光度学实验室对30种常用建筑饰面材料不同方向的亮度进行了测量,用测量获得的不同方向亮度值计算出亮度修正系数 $K(i, \beta)$,还分析了光在传播过程中受大气影响衰减与反射亮度的关系。将 $K(i, \beta)$ 值与视看距离、光源种类、灯具利用、材料清洁程度、照明系统维护等作为修正系数补充CIE计算公式,建立一个新的计算模型。通过计算对比,新模型计算的照度值仅为传统公式计算的1/3。

关键词:建筑材料;亮度;计算模型;修正系数

中图分类号:TU113.19 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)01-0071-05

Luminance Calculation Model and Modified Coefficient of Building Nightscape

YANG Chun-yu, LIANG Shu-ying, ZHANG Qing-wen

(Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The illumination computational formula recommended by the International Commission on Illumination (CIE) does not adapt to the modern construction materials with mixed reflection characters. In order to find a new luminance computational method adapting to the modern construction materials and to save building energy and control urban nightscape luminance, 30 frequently-used construction materials with respect to various directions in photometric laboratory were measured. Then the luminance modified coefficient $K(i, \beta)$ was figured out, and analysed the connection of reflection luminance and atmospheric attenuation in the process of divergence of light. The $K(i, \beta)$ and viewing distance, light kinds, luminaire use, material cleanliness, maintenance condition of lighting system as modified coefficient was adopted to amend the computational formula of CIE, and then a new calculation model is derived. Through calculating and comparing, the luminance value of the new calculation model is one-third as much as that of the traditional one.

Key words: building materials; luminance; calculation model; modified coefficient

城市许多建筑物因夜间景观需要用灯光照亮,建筑物饰面材料品种多样,不同颜色、质感与光泽度的饰面材料具有不同的光反射性质,相同照明条件对不同饰面材料产生的物理亮度有很大不同,建筑

物亮度大小既关系到夜景照明节能,也关系到城市光环境质量^[1-4]。但计算建筑物亮度是一项较为复杂的工作。国际照明委员会(CIE)推荐的传统计算公式是基于材料为漫反射性质,现代建筑饰面材料

收稿日期:2011-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078364)

作者简介:杨春宇(1953-),男,教授,博士生导师,主要从事建筑技术科学研究,(E-mail)ycu11@163.com。

发展迅速,不同品种的外墙面砖、涂料、铝塑板等已不是传统漫反射性质而是属于混合反射性质,其光反射特性 CIE 第 94 号出版物也认为需要通过实验确定。由于建筑物在城市中的空间性质,建筑物亮度又与灯光照射角度、人观看角度和观看距离有关,因此,还需对光照射角度、观察角度及变化的亮度值进行实验求得^[5-8]。根据光照产生的许多不同亮度值,如何进行建筑物反射光亮度计算,研究计算模型及亮度修正系数具有重要的意义。有关现代建筑装饰面材料光反射及亮度计算问题,目前还缺乏深入的研究,在美国召开的 CIE25 届大会上也仅见 1 篇有关混合反射特征照明的研究文章。文章仅从理论上讨论了材料反射系数、亮度系数和二者相互关系,缺乏实验数据证明^[9]。天津大学和重庆大学学者研究认为,照明与不同材质、反射率、距离、光投射方向和人观看方向等有关,CIE 推荐的计算公式未全面考虑这些因素^[10-11]。具有混合光反射性质饰面材料的建筑物夜景照明亮度计算问题仍一直没得到较好的解决,究其原因,主要是亮度计算须通过大量实验数据并转换计算获得亮度修正系数,这需要投入大量工作精力,且有一定难度。

针对上述问题,本文将通过亮度计算模型研究补充 CIE 计算公式的不足。通过材料不同方向亮度的实验测量,并将测量值转换计算出亮度系数,结合其他修正系数用于 CIE 计算公式,建立一个新的亮度计算式。将新计算式与 CIE 传统计算式进行计算对比,来证明新计算式的正确性。

1 建筑物夜景亮度计算模型研究

目前普遍采用 CIE 推荐的照度计算公式是:

$$E = L\pi/\rho \quad (1)$$

式中: E 为照度; L 为亮度; ρ 为材料反射比,该公式仅适用于被照面是均匀漫反射的情况,如砖墙、水泥砂浆墙等。现代建筑物已很少使用这些材料,而主要是使用各种釉面砖、胶溶质外墙涂料、铝塑板等,这些材料表面光泽度较大,属于混合反射性质,其表面照度和亮度之间的关系已不是某一常数,只能通过实验确定。由于不同颜色、质感与较大光泽度饰面材料大量出现,寻找一种适合的照明计算方法尤为重要。根据建筑物照明亮度计算所涉及到的因素有:光的不同入射角与观察角亮度、距离远近、被照表面清洁程度、不同种类光源、照明系统维护情况等^[12-13],用这些影响因素对 CIE 推荐的漫反射计算公式进行修正,建立一个新的计算模型:

$$E_0 = \frac{L \cdot K(i, \beta) \cdot K_v \cdot K_m \cdot K_i \cdot \pi}{U_f \cdot K_1 \cdot \rho} \quad (2)$$

式中: E_0 为初始照度; L 为平均亮度; $K(i, \beta)$ 为不同入射角、观察角亮度修正系数; K_v 为视看距离修正系数; K_m 为被照表面清洁程度修正系数; K_i 为不同种类光源修正系数; U_f 为灯具利用系数; K_1 为照明系统维护系数; ρ 为材料反射比。

这些因素中除视看距离修正系数 K_v 、亮度修正系数 $K(i, \beta)$ 需要通过计算, ρ 需要测量外,其它系数可直接查到。 ρ 测量相对简单,通过 $U_v - 260$ 型双光束紫外可见分光光度计可以很方便测得。视看距离修正系数和 $K(i, \beta)$ 则较为复杂。视看距离修正系数实际上就是大气衰减影响因素, $K(i, \beta)$ 需要先测得材料不同方向、不同角度的亮度值,再通过计算求得。

2 视看距离修正与不同方向亮度值测量

2.1 视看距离修正

光在传播过程中会受到大气影响而衰减,CIE 对此建议了修正值,当光源和被照面距离较远时,可取修正系数 1.3,较近时取 1。大气对光散射和吸收的影响表达式为

$$I = I_0 T_0^r = I_0 e^{-\sigma r} \quad (3)$$

式中: I 为光衰减后的发光强度; r 为视看距离; I_0 为初始发光强度; T_0 为大气透过率; σ 为大气衰减系数, km^{-1} 。考虑亮度 L_a 与光强 I_a 间的关系,当视看面积与辐射角 α 不变时,可近似认为 L_a 与 I_a 成正比

$$I_a \propto L_a \quad (4)$$

则式(3)可转化为

$$L_a = I_0 T_0^r = I_0 e^{-\sigma r} \quad (5)$$

如要达到近看的效果,则可在假定不考虑大气影响下提升亮度值,即乘以修正系数。

$$K_v = 1/T_0^r \quad (6)$$

对于各种具体情况需考察当地的大气状况得出 T_0 来进行研究。

2.2 不同方向亮度值测量

选择常用建筑饰面材料近 30 种进行实验测量,实验在全封闭,内表全涂黑的光度学实验室进行。实验仪器设备精度符合国家标准,主要设备是:日本 BM-5 型数字亮度计、北师大光电厂 ST-80C 数字照度计、重庆光学仪器厂平行光管及重叠刻度盘装置、贵州 30 V 直流稳压电源、华东光学厂 J6 型经纬仪、北京计量仪厂的 6 m 目视光度测量导轨。将建筑饰面材料置于导轨工作面上的同轴重叠刻度盘夹具上,连接可实现平行光束角度转换的平行光管,试件

与平行光管角度变换范围为 $0\sim 180^\circ$ 。亮度计置于光轨端头,照度计置于试件夹具上,用经纬仪分别校准亮度计物镜轴心线对试件表面垂直及试件表面与零刻度重合,保证角度定位精确,将试件和平行光管光源调零,以光源为变量,每间隔 10° 为测点(个别为 5°),测得试件在该刻度上光源各入射角的亮度值,然后转动试件,仍以 10° (个别为 5°)间隔为测点调节光束垂直于试件表面,转动光源。试件与光源角度

变化范围分别为 $-80^\circ\sim +80^\circ$ 和 $0\sim +80^\circ$ 。因试件的零度与平行光管、亮度计在同一平行轴线上,零度无法测量,故采用零度偏左右 3° ,偏上 2° 方法取得零度近似值。每种试件复测 3 次,取 3 次平均值为最终值,每种试件测得 231 个数据,每种共测有 693 个数据,总共获得近 2 万个数据,数据值见表 1、表 2 (仅列出 2 种材料)。

表 1 亚光型麻灰色外墙贴面砖表面亮度测量值

/($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)

入射角/ $^\circ$	入射光 照度/lx	观察角/ $^\circ$																			
		80	75	70	60	50	45	40	30	20	10	0	-10	-20	-30	-40	-45	-50	-60	-70	-75
80	50	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	3	3	3	6	7	7	12	22	28	36
75	103	17	17	16	13	11	10	8	7	7	7	7	7	7	10	11	12	16	24	28	28
70	146	19	20	21	18	16	14	12	11	11	11	12	11	11	13	14	15	18	24	28	26
60	244	19	22	23	24	24	22	21	19	18	17	17	17	17	18	20	20	24	24	24	19
50	336	18	22	27	31	29	29	27	25	23	22	23	22	22	24	25	27	28	24	21	16
45	392	17	22	17	32	31	30	30	27	26	26	25	25	25	25	27	29	29	24	21	15
40	420	17	22	27	33	34	33	32	31	29	28	28	27	27	27	29	31	31	24	21	15
30	494	16	22	27	37	37	37	37	37	33	33	32	32	32	32	32	33	33	25	22	14
20	558	14	22	28	35	37	37	37	37	36	36	35	35	35	34	34	34	34	26	23	14
10	564	13	21	28	35	38	38	38	38	39	39	40	38	38	37	36	36	35	26	23	14
0	588	12	21	28	35	38	38	38	38	39	41	43	42	41	38	38	38	36	27	23	14

表 2 浅灰色外墙涂料表面亮度测量值

/($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)

入射角/ $^\circ$	入射光 照度/lx	观察角/ $^\circ$																				
		80	75	70	60	50	45	40	30	20	10	0	-10	-20	-30	-40	-45	-50	-60	-70	-75	-80
80	50	18	22	22	21	21	20	20	18	18	18	18	21	21	21	21	21	24	40	50	308	
75	103	21	35	35	35	35	33	33	30	30	30	30	34	34	34	34	34	45	56	60	76	
70	146	24	48	48	48	47	47	43	43	43	43	47	47	47	47	48	48	53	68	64	50	
60	244	30	50	63	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	71	71	71	75	73	68	44	
50	336	34	61	75	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	95	83	71	44	
45	392	36	67	81	101	102	102	102	102	101	101	101	101	101	102	102	102	102	85	73	36	
40	420	43	72	89	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	112	112	112	88	77	37	
30	494	52	86	99	125	131	131	132	132	132	129	129	128	128	128	128	128	120	98	83	43	
20	558	52	87	106	132	142	142	142	143	143	143	143	142	142	142	140	140	140	133	105	47	
10	564	52	88	108	138	146	146	149	149	152	152	152	152	152	148	148	148	139	110	93	47	
0	588	53	93	112	141	147	147	151	151	153	157	160	157	154	154	152	151	151	142	112	94	52

通过实验可证明,相同的照明条件(角度、距离、光源、功率、照度等)对不同的饰面材料产生的物理亮度有很大的不同。也就是说,在建筑物夜晚被灯光照射下,用相同的照明方式,只要饰面材料不同,就会产生不同的亮度效果。如表 1 材料与表 2 材料照度同为 392 lx,光入射角同为 45° ,观察角都分别为 $80^\circ\sim -80^\circ$ 时,表 1 为 $15\sim 32\text{ cd/m}^2$ 。表 2 则为 $36\sim 102\text{ cd/m}^2$,差异非常大。要使建筑物夜景统一协调并节能,就应根据饰面材料光反射性质确定照明的光源、功率、角度、灯具数量等,要确定这些内

容,就需要进行照明计算,所测亮度值还不能直接用于计算,需要先计算出平均亮度并算出亮度修正系数后才能使用。

3 建筑物饰面材料表面亮度修正系数

相同照明条件对不同饰面材料会得到不同的物理亮度,测量得到的具体亮度值还不能直接用于计算,须计算出平均亮度并转换成修正系数之后才能使用。通过实验可知观测方向的视看亮度大小与光的照射方向、视看方向和材料表面反射比有关^[15-16]。

为便于照明计算应用,在一般情况下可采用不同方向的亮度系数。亮度系数是根据科特法“d/0”测量原理得出的,即样品亮度与某一测点表面亮度之比。在本研究中可将被照建筑材料表面看为均匀亮度表面时的平均亮度与视看方向亮度的比值。

$$K(i, \beta) = L_{av} / L(i, \beta) \quad (7)$$

式中: $K(i, \beta)$ 为亮度修正系数(i 为光的入射角,即入射光线与被照表面法线之间的夹角; β 为观察角,即观察方向与被照表面法线之间的夹角); L_{av} 为平均亮度; $L(i, \beta)$ 为视看方向亮度。表3是表1亮度值计算的修正系数 $K(i, \beta)$ 值(仅列出计算的一种材料)。

修正系数算法是先计算入射角 i 中某一角度的

观察角 β 平均亮度,再根据公式 $K(i, \beta) = L_{av} / L(i, \beta)$ 求出 β 中某一角度的修正系数 $K(i, \beta)$ 。如表1,当入射角 i 为 80° 时,观察角 β 共21个观察点总亮度为 172 cd/m^2 , 平均亮度为 8.19 cd/m^2 , 分别对应观察角 β 的21个观察点的亮度值的比值为: 2.05、2.05、2.05、2.05、2.05、2.05、2.05、2.05、2.05、1.64、2.73、2.73、2.73、1.37、1.17、1.17、0.68、0.37、0.29、0.23,见表3(仅列出计算的1种材料)。根据表1可计算出入射角 i , 观察角 β 平均亮度为 23.79 cd/m^2 。根据表3可计算出入射角 i 、观察角 β 的平均亮度修正系数为1.13。算出所测材料平均亮度和其亮度修正系数 $K(i, \beta)$ 后便可将其值代入新建公式中进行计算了。

表3 亚光型麻灰色外墙贴面砖不同方向亮度修正系数 $K(i, \beta)$

入射角/ (°)	平均亮度/ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	观察角/(°)																					
		80	75	70	60	50	45	40	30	20	10	0	-10	-20	-30	-40	-45	-50	-60	-70	-75	-80	
80	8.19	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	1.64	2.73	2.73	2.73	1.37	1.17	1.17	0.68	0.37	0.29	0.23	
75	12.86	0.76	0.76	0.80	0.99	1.17	1.29	1.61	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.29	1.17	1.07	0.80	0.54	0.46	0.46	
70	16.00	0.84	0.80	0.76	0.89	1.00	1.14	1.33	1.45	1.45	1.45	1.33	1.45	1.45	1.45	1.23	1.14	1.07	0.89	0.67	0.57	0.62	
60	20.29	1.07	0.92	0.88	0.85	0.85	0.92	0.97	1.07	1.13	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.13	1.01	1.01	0.85	0.85	0.85	1.07	
50	24.14	1.34	1.10	0.89	0.78	0.83	0.83	0.89	0.97	1.05	1.10	1.05	1.10	1.10	1.10	1.01	0.97	0.89	0.86	1.01	1.15	1.51	
45	25.14	1.48	1.14	1.48	0.79	0.81	0.84	0.84	0.93	0.97	0.97	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	0.93	0.87	0.87	1.05	1.20	1.68	
40	27.29	1.61	1.24	1.01	0.83	0.80	0.83	0.85	0.88	0.94	0.97	0.97	1.01	1.01	1.01	1.01	0.94	0.88	0.88	1.14	1.30	1.82	
30	30.24	1.89	1.37	1.12	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.92	0.92	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.92	0.92	1.21	1.37	2.16	
20	31.33	2.24	1.42	1.12	0.90	0.85	0.85	0.85	0.85	0.87	0.87	0.90	0.90	0.90	0.90	0.92	0.92	0.92	0.92	1.21	1.36	2.24	
10	32.67	2.51	1.56	1.17	0.93	0.86	0.86	0.86	0.86	0.84	0.84	0.82	0.86	0.86	0.88	0.91	0.91	0.91	0.93	1.26	1.42	2.33	
0	33.62	2.80	1.60	1.20	0.96	0.88	0.88	0.88	0.88	0.86	0.82	0.78	0.80	0.82	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.93	1.25	1.46	2.40

4 亮度修正算法与原算法结果比对

用实验的麻灰色面砖材料为例,当光入射角 i 对应观察角 β 时平均亮度为 23.79 cd/m^2 (表1), 计算出其亮度修正系数 $K(i, \beta)$ 值为1.13(表3)。查得 K_i 为0.038(高压钠灯), K_v 为1.3(距离较远), K_m 为1(饰面材料无污染), U_f 为0.3, K_l 为0.6, 若 ρ 为0.5, 利用新建计算公式可得出: $E = 23.79 \times 1.13 \times 1.3 \times 1 \times 0.038 \times 3.14 / 0.3 \times 0.6 \times 0.5 = 46.22 \text{ lx}$ 。传统算法: $E = 23.79 \times 3.14 / 0.5 = 149.4 \text{ lx}$ 。通过计算比对发现,相同条件下二者照度相差3倍,也就是说,在建筑物相同亮度情况下,用新建公式计算只需要46.22 lx照度就能达到,而传统公式计算则需要149.4 lx,浪费的能源是惊人的,可见修正算法对工程实际更具节能性,对控制城市夜晚建筑物亮度计算更具科学性。

5 结语

通过对常用建筑饰面材料反射光亮度测量,对测量亮度值进行修正系数转化计算,将计算出的不同方向亮度修正系数 $K(i, \beta)$ 及其它相关修正系数带入传统漫反射计算公式,建立一个新的亮度计算模型,是对CIE传统计算公式的补充。通过对实验测量数据分析,找到了材料反射光亮度与光入射角、观察角之间的函数关系,将新公式与传统公式计算结果比对,新模型计算结果更符合工程实际,可以更好地控制城市夜景亮度,控制照明能耗。

参考文献:

- [1] 杨春宇,陈永敢,张青文. 建筑饰面材料色度反射性能测量及方法[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(7): 834-838.
YANG CHUN-YU, CHEN YONG-GAN, ZHANG QING-WEN. Measurement methodology of color

- reflection performance of building facing materials[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(7): 834-838.
- [2] 牛盛楠,朱溢楠,刘刚. 建筑景观照明中材质色光情感定量化研究[J]. 照明工程学报, 2011, 22(3): 18-22.
NIU SHENG-NAN, ZHU YI-NAN, LIU GANG. A quantificational study on the chromatic-light emotion and preference of texture in architectural landscape Lighting[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2011, 22(3): 18-22.
- [3] 林怡,曹东,罗奕本,等. 世博会主题馆建筑外观照明的一体化设计实践[J]. 照明工程学报, 2011, 22(1): 30-34.
LIN YI, GAO DONG, LUO YI-BEN, et al. Architectural facade lighting integrated design of Expo theme pavilion [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2011, 22(1): 30-34
- [4] 杨春宇,陈仲林,黄彦. 重庆城市照明发展问题研究[J]. 灯与照明, 2005, 29(1): 23-24.
YANG CHUN-YU, CHEN ZHONG-LIN, HUANG YAN. Research of development of urban lighting of chongqing[J]. Light and Lighting, 2005, 29(1): 23-24.
- [5] 杨春宇,郑文崇,陈士群. 夜景亮度及建筑材料光反射特性与照明节能[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(5): 90-94.
YANG CHUN-YU, ZHENG WEN-CHONG, CHEN SHI-QUN. Light reflecting characteristics of building materials and energy saving of nightscape luminance [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2009, 31(5): 90-94.
- [6] JANGHOO SEO, SHINSUKE KATO, YUJI ATAKA, et al. Performance test for evaluating the reduction of VOCs in rooms and evaluating the lifetime of sorptive building materials[J]. Building and Environment, 2009, 44(1): 207-215.
- [7] BHUSAL P, TETRI E, HALONEN L. Lighting and energy in buildings [R]. Helsinki University of Technology, Lighting Unit, 2008.
- [8] BHUSAL P, ZAHND A, ELOHOLMA M, et al. Energy-efficient innovative lighting and energy supply solutions in developing countries [J]. International Review of Electrical Engineering, 2007, 2(5): 665-670.
- [9] DYBCZYNSKI WLANDYSLAW. Lighting properties of surfaces with mixed reflection characteristics[C]// The Symposium of the 25th Convention of CIE, 2003.
- [10] 杨春宇,张青文,陈仲林. 混合反射材料表面亮度、光泽度、反射系数实验研究[J]. 照明工程学报, 2004, 15(4): 6-10.
YANG CHUN-YU, ZHANG QING-WEN, CHEN ZHONG-LIN. The experiment research on the surface luminance, the gloss and the reflectance coefficient of mixed reflection material [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2004, 15(4): 6-10.
- [11] 杨春宇,陈仲林,张青文. 建筑物饰面材料不同方向反射光亮度测量误差研究[J]. 照明工程学报, 2003, 14(4): 35.
YANG CHUN-YU, CHEN ZHONG-LIN, ZHANG QING-WEN. A research on measuring error of the building facing materials' reflective luminance illuminated from different orientations [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2003, 14(4): 35.
- [12] HOCENSKI ZELJKO, DIZDAR ADRIANA, HOCENSKI VERICA. Illumination design of a control system for visual inspection of ceramic tiles[C]//2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge: IEEE, 2008: 1093-1097.
- [13] AHN JIN-SOO, LEE YONG-KEUN. Difference in the translucency of all-ceramics by the illuminant[J]. Dental Materials, 2008, 24(11): 1539-1544.
- [14] 日本照明学会. 照明手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 607-609.
- [15] 张巧芬,高健. 机器视觉中照明技术的研究进展[J]. 照明工程学报, 2011, 22(2): 31-37.
ZHANG QIAO-FEN, GAO JIAN. Research progress of lighting technology in machine vision [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2011, 22(2): 31-37.
- [16] 刘沁,张乘风,刘启能. 绿色照明设计中照度计算的解析方法[J]. 照明工程学报, 2010, 21(6): 9-12.
LIU QIN, ZHANG CHENG-FENG, LIU QI-NENG. Green lights design by analytical methods of illumination [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2010, 21(6): 9-12.

(编辑 胡英奎)