

夜景亮度及建筑材料光反射特性与照明节能

杨春宇, 郑文崇, 陈士群

(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:为了实现城市夜景照明节能,研究了城市夜间区域亮度变化所需的能耗变化。根据功率密度值 8.9 W/m^2 的能耗指标,计算出夜景亮度每提高 1 cd/m^2 将多耗电能 0.84 W ,夜间城市区域亮度提高 $1\sim 2 \text{ cd/m}^2$,在城市亮背景下人的视觉功能难以分辨其效果,但由此增加的电能耗费巨大。在照明条件相同的情况下,建筑饰面材料的光反射特性直接影响景物亮度,通过实验研究了不同建筑饰面材料的光反射特性,并在 CIE 推荐的漫反射材料照度计算公式的基础上,建立了建筑物照度计算模型。

关键词:建筑饰面材料;光反射;城市夜景亮度;照明计算;照明节能

中图分类号: TU113.19 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)05-0090-05

Light Reflecting Characteristics of Building Materials and Energy Saving of Nightscape Luminance

YANG Chun-yu, ZHENG Wen-chong, CHEN Shi-qun

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

Abstract: In order to realize energy saving of urban nightscape luminance, power consumption was studied with the change of urban luminance. Based on energy consumption indicator (LPD) of 8.9 W/m^2 , it was calculated that about 0.84 W more energy consumption would be for 1 cd/m^2 increase of luminance. The effect of 1 to 2 cd/m^2 increase was hard to distinguish for human's visual function under urban nightscape, while the energy consumption was great. Under the same lighting condition, the reflecting characteristics of building surface materials could affect directly the luminance of nightscape. With the study of the reflecting characteristics of different building surface materials, an illumination calculation model for building was proposed based on the formulation of CIE.

Key words: building materials; light reflection; urban nightscape illumination; illumination calculation; illumination energy-saving

城市道路、广场、建(构)筑物及环境景观在夜晚被灯光照射的明亮程度,影响着人们的使用功能和城市夜晚的审美心理感受^[1-2]。近些年,中国城市大力发展夜景照明,既提升了城市形象,满足了居民夜晚出行的使用功能要求,也推动了城市的旅游观

光、休闲娱乐、购物消费等,促进了城市夜间经济的发展^[3]。但是,随着城市夜晚亮度越来越高,除产生光污染、影响城市居民生活、影响城市动植物生长等方面外,严重的耗能也成为不可忽视的问题^[4]。控制城市夜景区域亮度值是实现节能的有效途径之

收稿日期: 2009-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678180)

作者简介: 杨春宇(1953-),男,教授,博士生导师,主要从事建筑技术与城市光环境、照明规划设计研究, (E-mail) ycu11@163.com。

一,目前国内外还未见有关具体亮度值变化所对应的能耗数值变化的研究。该文针对目前许多城市随意提高夜间照明亮度等级,严重浪费能源的情况,研究城市夜间区域亮度值的提高带来的能耗增加,为城市夜景照明节能提供依据。

国际照明委员会(CIE)推荐的漫反射计算公式 $E = \frac{L\pi}{\rho}$ 的前提是作了材料光反射实验研究。而有关建筑材料光反射特性的研究,中国未见有实验研究报告,其它国家近些年也仅见2003年在美国召开的CIE 25届大会上少量研究文章^[5],该文对23种常用建筑饰面材料进行了实验研究,以确定其光反射特性,并对CIE推荐的漫反射计算公式进行了修正。

1 城市夜间区域亮度值与照明节能

夜景照明不应使城市到处都亮,在功能方面如道路、桥梁、广场等应严格按照国家标准进行照明。在城市景观方面,要有暗有亮、相互衬托才显美感,不是越亮越好,要亮得适度,既达到美感又减少能耗^[6-7]。建设部、国家发改委建城[2004]204号文件《关于加强城市照明管理促进节约用电工作的意见》明确提出要进行城市照明规划,提出照明量化指标,用照明规划来指导城市照明建设。根据不同区域的功能性质确定其夜间光环境亮度,是城市照明规划的重要内容,也是节能的重要方面。中国2009年5月实施的标准规定^[8]:大城市乡村的工业或居住区等平均亮度为5 cd/m²,城郊工业或居住区平均亮度为10 cd/m²,城市中心和商业区平均亮度为25 cd/m²。又如,重庆市地方标准对主城区和其他区、县、城边或城乡结合部确定了不同的亮度值。规定重庆主城区中心商业区最高亮度不超过25 cd/m²,城市中心一般区亮度为10 cd/m²,一般区亮度为5 cd/m²,城乡结合部亮度为2.5 cd/m²。重庆市这个地方标准是综合考虑了各方面因素确定的亮度控制值,符合节能和对城市夜间光环境审美方面的要求。如果随意提高亮度等级,就会浪费电能。建(构)筑物是城市夜景照明的主要载体,照明能耗就和城市建筑物数量有密切关系。

根据有关资料,市民达到“小康”生活水平,人均居住建筑面积为30 m²^[9],根据建筑平面与建筑外立面比例计算,人均大约有16 m²的建筑外立面面积。按照建筑物立面夜景照明功率密度值(LPD)的节能

评价指标,当建筑物饰面材料反射比 ρ 为0.3~0.6时,功率密度值为8.9 W/m²,材料反射比 ρ 为0.6~0.8时,功率密度值为6.7 W/m²,材料反射比 ρ 为0.2~0.3时,功率密度值为13.3 W/m²。若按都市区亮度均值为10.6 cd/m²(重庆地方标准规定的四个区域亮度均值)和功率密度值为8.9 W/m²为基数计算,二者之间关系表明每1 cd/m²亮度耗电0.84 W。按照“小康”社会人均住房30 m²标准,重庆市“小康”社会都市区人口近800万人。据《重庆房地产志》统计,重庆市城镇居民2008年人均住房已达29.7 m²。若按人均占有居住建筑外立面16 m²计算,都市区800万人为1.28亿 m²。

研究表明,城镇公共建筑约占居住建筑的1/2^[10-11],即外立面面积为0.64亿 m²。二者合计外立面面积为1.9亿 m²。如果将城市其他景观如绿地、水体、桥梁、小品、护坡堡坎、步行街区、节日灯饰街景等装饰照明按建筑外立面的1/4估算,即折算为0.48亿 m²,二者合计约为2.4亿 m²,若都市区平均按25%面积进行夜景照明,约为0.6亿 m²。按节能评价指标功率密度值为8.9 W/m²,即为5.34亿 W。根据重庆市都市区平均亮度值为10.6 cd/m²和节能评价指标LPD值(功率密度值)耗电为8.9 W/m²,二者之间关系表明每1 cd/m²亮度耗电为0.84 W,重庆市都市区建筑立面照明面积为0.6亿 m²,二者之积约为0.5亿 W。这表明,重庆市都市区夜间环境亮度每提高1~2 cd/m²的亮度等级,将耗电5~10万 kW,根据人眼视觉功能特性,在城市夜景亮环境下提高1~2 cd/m²的亮度,人眼几乎感觉不出来。但从节约电能来看却意义重大。目前,中国许多城市照明规划中,区域亮度普遍提高几个 cd/m²,有的甚至高达10 cd/m²以上,如按重庆市都市区夜景照明平均亮度提高2 cd/m²,则每小时耗电增加10万 kW·h,按夜景照明每天开灯2.5 h计算,每天增加耗电25万 kW·h,全年增加耗电9 125万 kW·h。

据有关资料统计(2006年),中国城镇既有居住建筑存量约为85亿 m²,既有公共建筑存量约45亿 m²,共计130亿 m²。城乡每年新增加建筑10亿 m²^[10],若按城镇每年增加6亿 m²计算,到2009年止,中国城镇建筑已达近150亿 m²。若按建筑外立面50%估算为75亿 m²。若其中10%进行夜景照明则为7.5亿 m²(按中国各城市夜景照明已基本普及情况看,应该不低于这个数),如果再加上

如城市绿地、水体、桥梁、小品,护坡堡坎,步行街区,节日灯饰街景等装饰照明按建筑外立面的 1/4 估算,约为 1.9 亿 m^2 。全国城镇合计估算为 9.4 亿 m^2 。如果也提高 2 cd/m^2 亮度,则将耗电约为 1 579 200 kW ,若按夜景每天开灯 2 h 计算,则每天耗电 3 158 400 $\text{kW}\cdot\text{h}$,即全国城镇夜间光环境亮度提高 2 cd/m^2 ,全国年耗电将增加 11.5 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。这个数字是惊人的,增加 1~2 cd/m^2 的照明亮度,人的视觉察觉其效果变化并不明显。也就是说,为加强美感而增加的亮度并没有起多大作用,而耗电量却惊人(实际上许多城市增加的亮度不止 2 cd/m^2 ,其耗电量之巨大是可想而知的)。

因此,城市照明规划确定区域亮度等级及亮度标准,是节约能源所必须的^[12]。

2 建筑饰面材料光反射特性

建筑饰面材料有着各自的光学特性,相同的照明条件对不同的材料会产生差异很大的物理亮度。因此,研究材料反射光亮度就成为城市夜景照明节能的关键^[13]。

根据 CIE 推荐的传统漫反射计算公式,材料间光反射特性的区别主要是由反射比 ρ 决定。因此,反射比 ρ 是一个影响亮度值计算的重要因素,CIE 也推荐了一些传统材料的反射比值^[14-15],由于建筑饰面材料发展迅速,对于新的材料反射比需要通过

测量才能获得,该研究测量了 23 种常用饰面材料。

对每块材料的每一入射角和观察角组合的情况测 3 次,并以均值为测值,入射角 i 由 $0^\circ\sim 80^\circ$ 变化,观察角 β 由 $-80^\circ\sim 80^\circ$ 变化,包括特殊角度在内,11 个人射角度,21 个观测角度,共 231 个测量角值,每组测 3 个数据,则一块材料的数据为 639 个测量值。选择了 23 块材料,共测得数据 14 697 个。

通过对建筑材料的反射光特性实验结果分析可知,不同材料采用相同的灯具、光源、功率及照射角度,亮度会产生很大的差异。同时还发现,光泽度越大的材料,在混合反射中定向反射所占的比重就越大,其反射光方向上的峰值越大,越接近于标准黑玻璃反射面(镜面反射)的光功率分布特性。另外,从材料反射比测量得知,其整体亮度水平与反射比 ρ 密切相关,反射比 ρ 越大则整体亮度水平就大,反之则小。可见,材料反射比 ρ 对整体亮度具有很大的影响。因此,对于 CIE 所推荐的漫反射计算公式 $E = L\pi/\rho$,需要加以修正才能用于混合反射材料计算。

例如 A 号材料(浅灰色贴面砖),当观察角为 30° ,光源入射角为 20° 时,照度为 372 lx 时所产生的物理亮度为 63 cd/m^2 ,见表 1。而 B 号材料(浅褐色贴面砖),在观察角、入射角及耗电功率与 A 号材料完全相同时,所产生的物理亮度仅为 29 cd/m^2 ,见表 2。即消耗了相同的电能,产生的亮度还不及 A 号材料的一半。

表 1 A 号建筑材料(浅灰色贴面砖)表面亮度测量值

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	41	10	11	11	7	9	9	10	11	12	11	9	9	9	9	10	12	20	66	124	167	324
75	90	16	17	16	11	14	14	14	14	17	16	14	13	13	14	16	17	28	80	140	179	316
70	130	19	20	17	14	18	16	19	18	21	21	20	16	16	17	20	22	38	88	142	173	272
60	189	25	23	23	24	26	22	27	26	30	30	28	25	25	24	31	30	56	93	119	131	155
50	242	29	32	29	39	30	28	36	35	39	40	36	31	32	35	42	46	67	80	87	83	80
45	247	30	34	31	44	45	32	39	39	43	43	42	34	35	40	50	54	70	71	75	68	60
40	287	33	36	35	47	38	49	40	44	47	47	46	37	41	43	56	58	70	64	64	58	53
30	334	36	41	37	53	40	44	56	49	52	54	51	43	53	57	63	65	65	53	53	51	48
20	372	38	44	41	57	45	49	60	63	64	63	66	55	66	70	65	63	60	49	50	49	45
10	382	40	46	43	59	52	56	62	65	66	73	74	72	72	72	63	59	56	49	49	49	45
0	384	42	46	48	60	56	60	63	68	72	74	75	71	70	66	60	55	53	49	48	47	48

表 2 B号建筑材料(浅褐色贴面砖)表面亮度测量值

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	41	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	7	8	11	13	18	35	86	125	141
75	90	4	4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	8	9	11	14	18	23	46	105	149	172
70	130	6	7	7	8	8	8	9	9	9	9	10	10	12	14	19	22	27	52	115	149	163
60	189	10	10	11	12	12	14	14	14	14	14	15	20	18	20	27	32	38	62	93	104	96
50	242	14	14	15	15	16	16	19	19	19	19	20	20	23	28	37	38	46	60	60	63	60
45	247	15	16	17	18	18	19	19	19	20	21	22	23	26	31	39	43	47	51	50	52	52
40	287	19	20	21	22	22	22	23	23	23	24	24	25	29	36	43	44	48	46	44	46	41
30	334	22	23	25	25	25	26	26	26	27	27	28	32	35	40	45	43	41	41	35	32	18
20	372	23	24	26	27	28	28	29	29	29	32	33	36	41	43	39	38	37	35	28	24	17
10	382	24	24	26	29	29	29	30	30	33	39	39	42	40	38	36	35	33	32	25	19	12
0	384	25	26	27	29	30	31	31	31	36	41	42	41	36	34	33	32	32	30	23	17	11

综合考虑影响建筑材料照明计算的因素,为达到节能的要求,用实验所得到的材料反射光亮度值可算出修正系数 $K(i, \beta)$, 用 K 值及其他影响值对 CIE 推荐的漫反射算式进行修正, 建立一个新的建筑物照度(亮度)计算模型:

$$E_0 = \frac{L \cdot K(i, \beta) \cdot K_v \cdot K_m \cdot K_i \cdot \pi}{K_e \cdot K_l \cdot \rho} \quad (1)$$

E_0 为初始照度; L 为平均亮度; $K(i, \beta)$ 为不同方向修正系数; K_v 为视看距离修正系数; K_m 为表面清洁程度修正系数; K_i 为不同种类光源修正系数; K_e 为灯具利用系数; K_l 为照明系统维护系数; ρ 为材料反射比。

以所测 B 号材料为例, 当光入射角 30° 、 45° 、 60° 时平均亮度为 48.69 cd/m^2 , 算得 $K(i, \beta)$ 值为 1.32。查得 K_v 为 1.3, K_m 为 1, K_i 为 0.038(高压钠灯), K_l 为 0.7, K_e 为 0.3, 若 ρ 为 0.23, 修正后的算法数据即为:

$$E_0 = \frac{48.69 \times 1.32 \times 1.3 \times 1 \times 0.038 \times 3.14}{0.3 \times 0.7 \times 0.23} = 207.5 \text{ lx}$$

若 ρ 分别为 0.4、0.5、0.7, 则 E_0 分别 118.68 lx、94.85 lx、71.14 lx。

原有算法(国际照明委员会推荐的 $E = \frac{L\pi}{\rho}$): $E = \frac{48.69 \times 3.14}{0.23} = 664.72 \text{ lx}$ 。

若 ρ 为 0.4、0.5、0.7, 则 E 分别为 382.21 lx、305.77 lx、218.4 lx。

可以看出, 用修正算法计算照度分别为 207.5 lx、118.68 lx、94.85 lx、71.14 lx 时, 原有算法分别对应的是: 664.72 lx、382.21 lx、305.77 lx、218.4 lx, 用修正算法计算的照度值还不及原有算法计算照度值 1/3, 可看出修正算法更科学合理且节能。

3 结 语

1) 根据功率密度值 8.9 W/m^2 的能耗指标, 和都市区亮度均值为 10.6 cd/m^2 的亮度标准, 计算出夜景亮度每提高 1 cd/m^2 将多耗电能 0.84 W。由于需要照明的面积巨大, 随意提高夜景照明亮度, 将带来严重的能源浪费, 因此, 夜景照明亮度的确定应严格遵守相关规范。

2) 根据 CIE 推荐的漫反射照度计算公式, 在对 23 种常用饰面材料反射特性进行测量的基础上, 建立了新的建筑物照度(亮度)计算模型。

参考文献:

[1] 李伟, 沈天行. 天津市交通广场照明调查分析及评价研究[J]. 照明工程学报, 2007, 18(2): 42-47.
LI WEI, SHEN TIAN-XING. A survey and evaluation on lighting of traffic square in Tianjin [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2007, 18(2): 42-47.

[2] 杨芷汀, 王传松. 中国城市夜间经济发展研究[J]. 灯与照明, 2007, 31(1): 4-5.
YANG ZHI-TING, WANG CHUAN-SONG. Research

- of economy development of night in Chinese Cities[J]. *Light and Lighting*, 2007, 31(1):4-5.
- [3] 张青文, 杨春宇, 黄彦. 沿江山地城市景观照明设计理念及方法探究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(4):27-30.
- ZHANG QING-WEN, YANG CHUN-YU, HUANG YAN. Research on the concept and method of landscape lighting design of mountain city[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(4):27-30.
- [4] 胡耀祖, 李丽玲, 李宏俊, 等. 照明节能技术发展趋势[J]. *照明工程学报*, 2008, 19(6):1-6.
- HU YAO-ZU, LI LI-LING, LI HONG-JUN, et al. Trend in development of lighting energy-saving [J]. *China Illuminating Engineering Journal City*, 2008, 19(6):1-6.
- [5] DYBCZYNSKI WLANDYSLAW. 具有混合反射特征的表面照明特点[C]//CIE 第 25 届大会论文集, 2003.
- [6] 全国建筑电气设计技术协作及情报交流网. 中国智能建筑电气节能新进展[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2006:2-16.
- [7] BHUSAL P, TETRI E, HALONEN L. Lighting and energy in buildings [R]. Helsinki University of Technology, Lighting Unit, 2008.
- [8] JGJ/T 163-2008 城市夜景照明设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008:10-11.
- [9] 王一鸣, 蒋勇. 重庆市城镇发展战略研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004:89-227.
- [10] GOODMAN T, FORBES A, WALLEY H, et al. Mesopic visual efficiency IV: a model with relevance to night-time driving and other applications[J]. *Lighting Research and Technology*, 2007, 39(4): 365-392.
- [11] 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.
- [12] 杨赞, 郝洛西, 蔡烨震, 等. 节能降耗——城市照明规划的新视角[J]. *照明工程学报*, 2008, 19(3):12-17.
- YANG YUN, HAO LUO-XI, CAI YE-ZHEN, et al. Energy saving and consumption reduction——A New Perspective of Urban Lighting Master Plan[J]. *China Illuminating Engineering Journal City*, 2008, 19(3):12-17.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] AHN, JIN-SOO. Difference in the translucency of all-ceramics by the illuminant[J]. *Dental Materials*, 2008, 24(11): 1539-1544.
- [16] LIPPKE, BRUCE. Environmental performance improvement in residential construction: The impact of products, befoules, and processes[J]. *Forest Products Journal*, 2006, 56(10): 58-63.

(编辑 胡英奎)