

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201707116

HDR 图像测量天空亮度及在动态采光模拟中应用

边 宇^{1,2}, 遇大兴²

(1. 亚热带建筑科学国家重点实验室(华南理工大学), 广州 510640 ; 2. 华南理工大学 建筑学院, 广州 510640)

摘 要: 为解决在通用天空模型下进行建筑采光模拟所得到的结果准确程度不高的问题, 尝试使用实测的天空亮度分布 HDR 图像作为光源进行建筑采光/动态采光模拟并对该方法进行了验证. 首先, 说明了通过高动态范围(HDR)图像测量天空亮度分布的方法; 进而, 介绍并验证了基于图像的采光/动态采光模拟(IBL); 既使用 HDR 图像作为光源输入数值进行采光模拟的方法. 验证实验于 2017 年 7 月 4 日至 7 月 10 日及 2017 年 8 月 3 日至 8 月 12 日进行, 通过实测与模拟结果的比较分析验证了 HDR 图像测量天空亮度分布以及基于图像的采光模拟的准确程度. 最后, 文中讨论了基于天空数学模型的采光模拟以及基于图像的采光模拟的优缺点. 结果表明: 通过 HDR 图像可以准确地测量天空亮度分布; 基于图像的采光模拟准确度良好, 同一时刻模拟值与实测值之误差集中分布在 -15% ~ 47% 范围之内; 基于图像的动态采光模拟所求取的 100 lx < UDI < 3 000 lx 指标值最大误差限制于 ±25% 以内.

关键词: 建筑采光; HDR 图像; 基于图像的采光模拟; 动态采光; 有效采光度; 天空亮度分布

中图分类号: TM923 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)04-0188-05

HDR Image in measurement of sky luminance distribution & application in dynamic daylighting simulation

BIAN Yu^{1,2}, YU Daxing²

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science (South China University of Technology), Guangzhou 510640, China;
2. School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To solve the problem of low accuracy of the results generated by building daylighting simulations under the generic sky models, this paper attempts to use the on-site measured sky luminance distribution HDR images as the light source to conduct the building daylighting / dynamic daylighting simulation and has validated the method. First, the method of measurement of sky luminance distribution via HDR image is indicated, and the image-based day/daylight lighting / dynamic daylighting simulation (IBL) and the method that uses HDR image as the light source input value in daylighting simulation are introduced and validated. The validation experiments are carried out from: 4th to 10th Jul. and 3rd to 12th Aug. 2017. The interior illuminance and luminance distribution are measured via instruments and meanwhile, the sky luminance distribution (including the exterior environment) is measured simultaneously. After comparing and analyzing the measured and simulated results, the accuracy of HDR image in measurement of sky luminance distribution and image-based daylighting simulation is validated. Finally, the pros and cons of sky mathematical model based daylighting simulation and IBL image based daylighting simulation are discussed. The results show that the sky luminance distribution could be accurately measured via HDR image, the accuracy of IBL simulation results of IBL is well performed, the the errors between simulation and measurement in one instant are concentrated focused within the range of -15% ~ 47%, and the max error of 100 lx < UDI < 3000 lx generated from IBL image-based dynamic simulation limits within ±25%.

Keywords: building daylighting; HDR image; IBL; dynamic daylighting; UDI; sky luminance distribution

早在 1992 年 Kittler 等^[1]就使用天空扫描仪 (sky scanner) 测试天空亮度分布情况, 这类仪器 (Krochmann/EKO 天空扫描仪等) 均为测量天穹上

的 145 个点亮度. 2003 年 CIE^[2] 颁行了共计 15 种通用天空模型. 然而, 采光模拟中最常使用的是 CIE 标准全云天、中间天空、晴天空 3 种标准模型. 1993 年提出的 Perez all-weather sky 模型^[3]一直用做动态采光模拟中的天空亮度模型. 但上述通用天空数学模型均不代表某地区特定的天空状况^[4], 且解析度仅为 145 个点(面域).

通过高动态范围(HDR)图像测量环境亮度分布已经被广泛采用, 且准确度得到了验证^[5]. 基于图

收稿日期: 2017-07-15

基金项目: 西部绿色建筑国家重点实验室开放课题“建筑天然光环境视觉舒适度评价与标准研究”(LSKF201802); 亚热带建筑科学国家重点实验室自主课题“天然光环境视觉舒适度评价与建筑动态采光模拟研究”(2017KB11)

作者简介: 边 宇(1982—), 男, 博士, 副教授

通信作者: 遇大兴, yudaxing@126.com

像的照明/采光模拟(image-based lighting, IBL)使用HDR图像中包含的环境亮度信息作为光源数据^[6].由于HDR图像来源于实测且解析度足够高,基于HDR图像进行采光模拟计算具有准确度高的潜力.本文使用一序列包含天空亮度信息的HDR图像作为光源数据则可进行动态采光模拟.

1 HDR图像测量天空亮度分布

1.1 HDR图像测量环境亮度

国内外学者^[7-8]多次撰文阐述使用HDR图像进行环境亮度测量的方法,并用该方法从事建筑光学研究^[9].由于一般的数码照片所能记录的亮度范围有限,上世纪90年代Ward等^[10]提出了radiance RGBE图像格式,R/G/B/E四通道均使用浮点数值记录,如此使得此类图像可记录的亮度范围大幅提高,此图片被视为HDR图像中的一类.需要强调的是:对于使用180°视角的全景鱼镜头拍摄得到的HDR图像,由于图像边缘严重的畸变使得边缘记录的亮度值与实际亮度值存在差异,因此需要对此类

图像进行边缘校正后才可以获得较为准确的环境亮度值.

1.2 天空亮度测量方法

天空亮度远高于室内场景且亮度范围大.尤其当日冕可见时,由于日冕的亮度极高使得此时的天空亮度分布超过了以一个固定光圈配合不同曝光时间拍照后合成的HDR图像所能包含的亮度范围.据此,采用了两项额外措施采集天空亮度分布图像.

1)在镜头中使用减光滤片^[11],此措施的目的在于线性降低图像记录的天空亮度.在后期的图像数据校正阶段通过实测照度值再进行线性还原.

2)使用一大一小两个光圈按照不同曝光时间进行拍照后合成HDR图像,此措施旨在增大HDR图像所能记录的图像亮度动态范围.

表1中所示的拍摄参数是本文中所采用设置,在180°视角的鱼镜头中安装减光滤片正对天空进行拍照,设定光圈f/4曝光时间从8~1/30s连拍,设定光圈f/16曝光时间从1/15~1/4000s连续拍摄天空图像,ISO值为100,白平衡为daylight.

表 1 拍摄参数									
Tab.1 Shooting parameters									
光圈大小 1	f/4	f/4	f/4	f/4	f/4	f/4	f/4	f/4	f/4
曝光时间	8	4	2	1	1/2	1/4	1/8	1/15	1/3
光圈大小 2	f/16	f/16	f/16	f/16	f/16	f/16	f/16	f/16	f/16
曝光时间	1/15	1/30	1/60	1/125	1/250	1/500	1/1 000	1/2 000	1/4 000

全景鱼镜头拍摄的图像靠近边缘部分记录的亮度值较之实际亮度值存在一定程度的下降,且与光圈大小相关.有必要对全景图像进行边缘校正以确保所记录亮度信息的准确.因为测量天空亮度使用了两种光圈.所以分别针对两个光圈拍摄的图像进行边缘校正后再将其拼合生成HDR图像.遵循Jacobs^[12]提出的测试方法,图1中所示为本文中所使用的设备在f/4、f/16光圈大小下测试得到的边缘校正曲线及对应的数学表达式.以光圈f/4为例,其校正公式为 $y = -5 \times 10^{-5}x^2 - 0.0015x + 0.9902$,则可在radiance中使用pcomb命令对光圈f/4下拍摄的照片所生成的HDR图像进行边缘校正.分别对光圈f/4、f/16下生成的HDR图像进行边缘校正后,同样使用pcomb命令将两张HDR合成一副.

为了保证测试结果准确,尤其对于使用减光滤片拍摄的图像,要求对HDR图像中的亮度数值进行线性校正.鉴于使用亮度值进行校正可操作性不高,本文选择使用镜头所在平面上实际测试得到的照度值进行图像的线性校正.图2所示为2017年6月22日10:00(多云天,日冕可见)及同一日15:15(阴天)测得的广州地区天空HDR图像,可见日冕以及天空亮度分布合理,进一步的准确度验证工作在下文中的实验中开展.

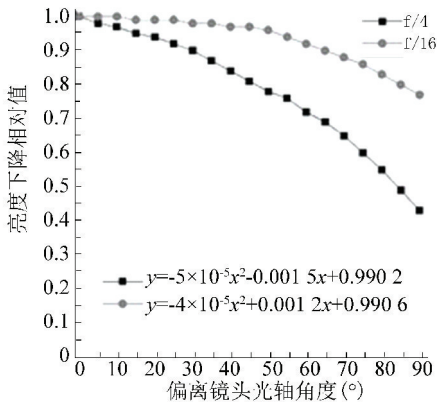


图1 不同光圈对应的边缘校正曲线

Fig.1 Vignetting correction curves of various aperture size

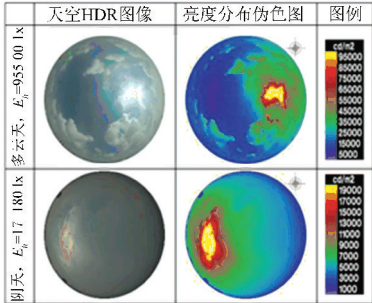


图2 采集的天空HDR图像示例

Fig.2 Examples of captured sky HDR images

2 基于图像的采光模拟

在天空数学模型下开展的采光模拟,除要求建立测试房间的数字模型外,还要求根据场地实际建立环境模型(包括:周围建筑、地、树等).基于图像的采光模拟则不同,对于侧窗采光房间而言,面向窗外采集的环境亮度图像包含了全部的亮度信息.如图3中所示,将环境 HDR 图像贴图到测试房间窗外的半球形面上即可在 radiance 中用 rpict 进行采光模拟计算,不需要额外的环境建模.

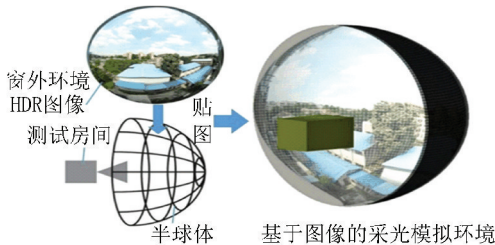


图 3 基于图像的采光模拟示意

Fig.3 Diagram of image-based daylight simulation

图4中所示为2017年7月10日12:00房间内现场实测 HDR 图像与使用 IBL 法模拟得到的同场景内亮度分布图.由此可知,模拟结果与实测结果一致性良好.

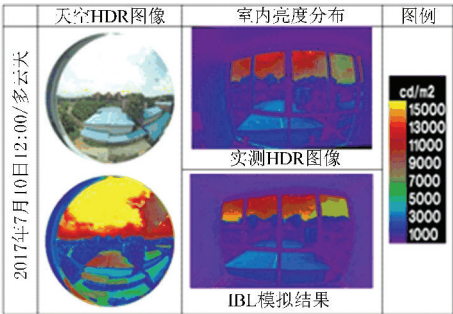


图 4 现场实测 HDR 图像与 IBL 模拟结果

Fig.4 On-site measured HDR images & IBL simulation results

在中国动态采光分析逐渐被认知,并在建筑采光分析得以应用^[13].静态采光分析具有明显的局限性,即便是在参考天空下使用改进后的采光系数,虽然在合理性上更进一步,但其优势仍在于多方案之间的比较择优^[14].动态采光分析是采光研究的主流方向,其中动态采光的模拟问题值得重点关注.以一定时间间隔在长周期上连续采集天空 HDR 图像,则具备了通过 IBL 法进行建筑动态采光模拟的基础,分别将每幅图像对应的采光模拟结果进行统计即获得动态采光指标值.

3 验证实验

3.1 实验方案

在选定的测试房间内进行了实测值与模拟值之

间的比较.在亚热带建筑科学国家重点实验室建筑光学实验室内选择一处东朝向的房间作为测试房间(如图5所示).该测试房间层高2 500 mm安装有高度2 300 mm的落地侧窗,窗宽为房间宽度,窗框为宽度50 mm白色铝材,窗玻璃为透光率0.77的单层玻璃,整个房间无人工照明.侧墙和屋顶为反射率0.70的白色粉刷面,地板为平均反射率为0.15的木板.



图 5 测试房间#1

Fig.5 Test room#1

整个测试房间的平面如图6中所示,测试房间#1与测试房间#2相邻,宽度均为2 800 mm,其中测试房间#1用于测量室内照度与亮度分布,测试房间#2中仅在窗外侧安置了相机#1以及照度计 Ev 用于测量天空亮度 HDR 图像.测试房间#1中布置两列照度计,每列10个共20个串联,列内间距400 mm,两列之间相距1 400 mm,照度探头高度距地面750 mm.相机#2镜头中心线高度距地面1 500 mm,镜头朝向正东.其余空间位置信息如图6中所示.

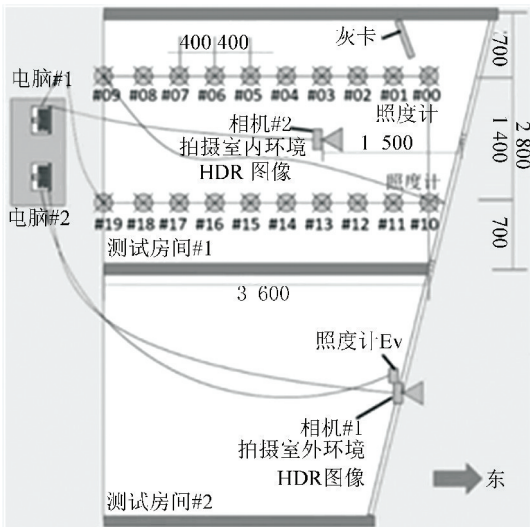


图 6 测试房间平面与仪器布置(单位:mm)

Fig.6 Plan of test room & equipment layout (units: mm)

测试为两轮,第1轮为2017年7月4日至7月10日,每天自8:00-18:00全部设备同步地以15 min为间隔进行取值,测试期间共获得280组数据.第2轮为2017年8月3日至8月12日,每天自8:00-18:00全部设备同步地以30 min为间隔进行取值,测试期间共获得191组数据.使用IBL法模

拟时,房间数字建模与测试房间尺寸、表面材料光学参数一致,照度取值点同测试房间内照度计位置.

3.2 结果分析

图 7 中所示为 2017 年 7 月 10 日 12 : 00 的实测结果与模拟结果比较结果,其中横坐标#0 表示图 6 中#00 与#10 两台照度计读数的平均值,#1~#9 以此类推.图 7 中百分比数值表示不同进深上模拟值与实测值的误差程度,即: (模拟值-实测值)/实测值.就此组同一时刻的数据而言模拟值与误差值介于-19.1%~37.3%之间.图 8 所示为基于第 1 轮 280 组数据的误差统计情况,图 9 所示为基于第 2 轮 191 组数据的误差统计情况.从图中可知在两轮测试中: 某一时刻的模拟值与实测值存在误差,从箱体图中可看出误差集中分布于-15%~47%范围之间,且误差中心值介于-5%~45%之间,对于同一时刻的采光模拟值与实测值之间的误差而言该程度已然较为理想.由于第 2 轮测试中阴雨天气较之第 1 轮出现次数多,也由此可知晴天空(日冕可见)条件下 IBL 模拟误差更大.

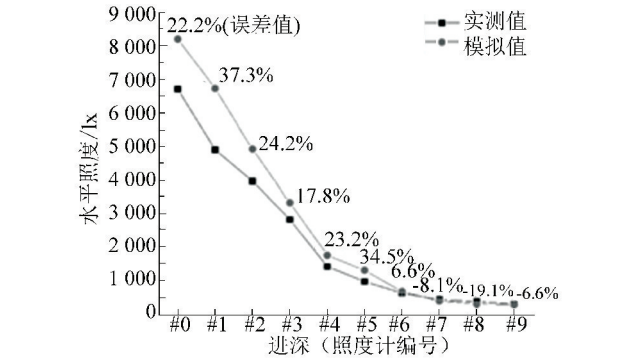


图 7 测量值与模拟值比较 (2017/07/10, 12 : 00)
Fig.7 Comparison between measured and simulated values (12 : 00, Jul/10/2017)

表 2 测量与模拟 UDI 值比较											
Tab.2 Comparison of measured & simulated UDI											
指标		#0	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
100 lx<UDI<3 000 lx	实测	0.241	0.356	0.522	0.754	0.669	0.704	0.660	0.660	0.687	0.678
	模拟	0.285	0.267	0.437	0.609	0.643	0.678	0.625	0.643	0.634	0.652
	误差/%	18.4	-24.9	-16.3	-19.2	-3.9	-3.7	-5.4	-2.6	-7.6	-3.8

4 讨 论

通用天空数学模型(如 CIE 标准天空模型,perez 天空模型等)下的采光模拟均将天空构建为罩在建筑顶上的半球形天穹,在这种模式下开展采光模拟优点在于通用性好以及输入数据易获得,以使用 CIE 标准中间天空\晴天空进行采光模拟为例,输入数据仅为项目地点、测试时间等.但通用天空模型下的采光模拟存在明显的误差,究其原因为:1) 并不代表实际的天况;2) 解析率低;3) 需求环境建模;4) 对于使用 perez 模型的动态采光模拟而言,气候数据

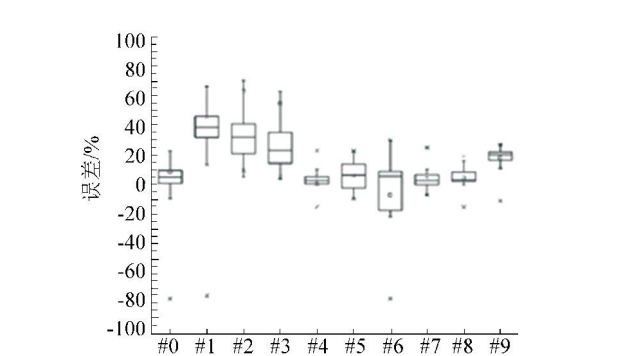


图 8 测量与模拟之误差 (第 1 轮)
Fig.8 Errors between measurement and simulation (1st round)

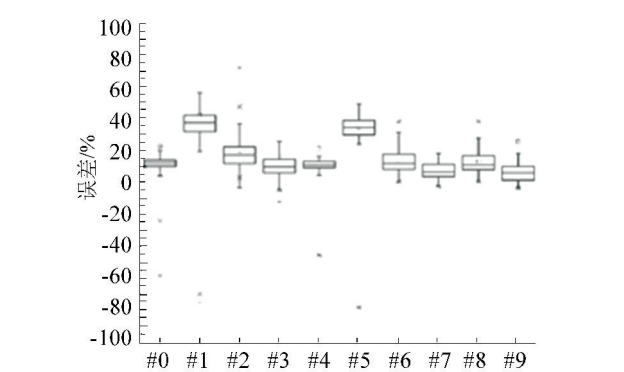


图 9 测量与模拟之误差 (第 2 轮)
Fig.9 Errors between measurement and simulation (2nd round)

本文以有效采光度 (useful daylight illuminance, UDI)^[15]为目标值进行数据整理并做分析,由于 UDI 反映的是测试时段内动态采光计算结果在<100 lx、100~3 000 lx、>3 000 lx 3 个区间内的出现频率,因此其结果误差对于某时刻模拟与测量值之误差包容性强,UDI 指标用于评价室内动态采光效果是最合理的指标^[16].从表 2 中可知,本实验中全部进深上的 100 lx<UDI<3 000 lx 值最大误差未超过±25%.

也是重要的误差来源,IWEC/CSWD 源气候数据误差显著,此类天气数据是气象部门综合某地区数十年天气数据综合后得出,而近些年中国主要城市光气候的变化明显^[17],于 2014~2015 年在广州地区开展的采光模拟验证研究发现使用 CSWD 源气候数据的采光模拟误差显著^[18].

IBL 由于无需环境建模且天空/环境亮度信息来源于实测,故而准确程度高,但该方法通用性差.为了提高通用性,将天空 HDR 图像视为罩在建筑物顶上的天穹也可进行采光模拟,此途径通用性较强且模拟结果准确性高.因此,通过 HDR 图像连续记录

某地区天空亮度分布是采光模拟中的重要数据,该数据也可用于半球形人工天穹(sky dome)的输入数据,积累该数据具有一定的应用价值。

5 结 论

1) HDR 图像可以准确地记录天空亮度分布,具体的方法为镜头上安装减光滤片并使用两种光圈大小连续拍摄不同曝光程度的图像,经边缘校正后合成 HDR 图像,再通过镜头平面上的实测照度值进行线性校正。

2) 基于图像的采光模拟是指使用包含天空亮度分布数据的 HDR 图像作为光源进行采光模拟,由于输入光源数据分辨率高、数值准确,因此在准确程度上具有优势。对于侧窗采光而言,本文验证实验中同一时刻的模拟值与实测值的误差集中分布于 $-15\% \sim 47\%$ 以内。

3) 使用以某间隔连续采集的一序列天空亮度 HDR 图像可以进行动态采光模拟,本文中以 $100 \text{ lx} < \text{UDI} < 3\ 000 \text{ lx}$ 指标为例,模拟与实测结果的最大误差未超过 $\pm 25\%$,在诸多动态采光模拟方式中准确程度较高。

参考文献

- [1] KITTILER R, HAYMAN S, RUCK N, et al. Daylight measurement data: methods of evaluation and representation[J]. *Lighting Research & Technology*, 1992, 24(4): 173–187. DOI: 10.1177/096032719202400402.
- [2] CIE International Commission on Illumination. Spatial distribution of daylight—CIE standard general sky: ISO-15469:2004(E)[S]. Switzerland: ISO, 2004.
- [3] PEREZ R, SEALS R, MICHALSKY J. All-weather model for sky luminance distribution—preliminary configuration and validation[J]. *Solar Energy*, 1993, 50(3): 235–245. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90017-1.
- [4] 马源, 边宇, 陈建华, 等. 华南区天空亮度分布的观测研究[J]. *照明工程学报*, 2015, 26(1): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2015.01.001.
MA Yuan, BIAN Yu, CHEN Jianhua, et al. Observation of the sky luminous distribution in southern China[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2015, 26(1): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2015.01.001.
- [5] 孙澄, 刘蕾, 孔哲. HDR-I 技术应用于光环境性能实测的方法[J]. *照明工程学报*, 2017, 28(2): 65–69. DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2017.02.014.
SUN Cheng, LIU Lei, KONG Zhe. The application of HDR-I technology in reflecting and recording the daylighting performance[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, 28(2): 65–69. DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2017.02.014.
- [6] DEBEVEC P. Image-based lighting[J]. *Computer Graphics and Applications IEEE*, 2002, 22(2): 26–34. DOI: 10.1109/38.988744.
- [7] INANICI M N. Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system[J]. *Lighting Research & Technology*, 2006, 38(2): 123–136. DOI: 10.1191/1365782806li164oa.
- [8] 沈天行, 陈财生, 王爱英. HDR 图像在照明辅助计算中的应用[J]. *灯与照明*, 2004, 28(4): 28–29. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5521.2004.04.008.
SHENG Tianxing, CHEN Caisheng, WANG Aiyang. The application of HDR image in assistant design of lighting calculation[J]. *Light & lighting*, 2004, 28(4): 28–29. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5521.2004.04.008.
- [9] BIAN Yu, LUO Tao. Investigation of visual comfort metrics from subjective responses in China: A study in offices with daylight[J]. *Building and Environment*, 2017, 123: 661–671. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.07.035.
- [10] WARD G, SHAKESPEARE R. *Rendering with radiance*[M]. Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- [11] STUMPFEL J, JONES A, WENGER A, et al. Direct HDR capture of the sun and sky[C]// *Proceeding ACM SIGGRAPH 2006 Courses on SIGGRAPH'06*. New York, NY: ACM, 2006. DOI: 10.1145/1185657.1185687.
- [12] JACOBS A. High dynamic range imaging and its application in building research[J]. *Advances in Building Energy Research*, 2007, 1(1): 177–202. DOI: 10.1080/17512549.2007.9687274.
- [13] 边宇, 马源. 间隙排列非均质 PV 面板在建筑顶部采光中的应用[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(7): 96–101. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2016.07.015.
BIAN Yu, MA Yuan. Application of heterogeneous PV panels arranged with gaps to top daylighting of buildings[J]. *Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition)*, 2016, 44(7): 96–101. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2016.07.015.
- [14] 边宇, 马源, 遇大兴. 参考天空亮度分布模型下的建筑采光设计优化[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(7): 100–105. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2015.07.014.
BIAN Yu, MA Yuan, YU Daxing. Optimization of building daylighting design on the basis of reference sky luminance distribution model[J]. *Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition)*, 2015, 43(7): 100–105. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2015.07.014.
- [15] NABIL A, MARDALJEVIC J. Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors[J]. *Energy & Buildings*, 2006, 38(7): 905–913. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.03.013.
- [16] CANTIN F, DUBOIS M C. Daylighting metrics based on illuminance, distribution, glare and directivity[J]. *Lighting Research & Technology*, 2011, 43(3): 291–307. DOI: 10.1177/1477153510393319.
- [17] 何荣, 陈彦君, 王爱英. 北京天然光总照度变化趋势分析[J]. *西部人居环境学刊*, 2013(6): 15–19. DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.2013.06.013.
HE Ying, CHEN Yanjun, WANG Aiyang. Trends of total illuminance of natural light in Beijing[J]. *Human Settlements Forum in West China*, 2013(6): 15–19. DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.2013.06.013.
- [18] BIAN Yu, MA Yuan. Analysis of daylight metrics of side-lit room in Canton, south China: A comparison between daylight autonomy and daylight factor[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 138: 347–354. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.059.