

DOI:10.11918/202105091

铁路客站候车厅光伏天窗自然采光优化设计

赵南森¹, 范征宇¹, 刘加平²

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室(西安建筑科技大学), 西安 710055)

摘要: 半透明光伏天窗因其特有的遮阳与发电协同增益特性,在高大空间公共建筑天窗中得到了广泛运用,其可变遮阳与透光特性加剧了应用于高大空间公共建筑天窗时自然采光机理的复杂性。为改善铁路客站候车厅高大空间自然采光问题,揭示半透明光伏天窗关键设计参数对自然采光的影响机制。本文选取北京作为中国北方太阳辐射水平适中且需兼顾自然采光、遮阳与得热地区的代表,选择并基于广泛调研提取了典型铁路客站候车厅、典型半透明薄膜光伏天窗为研究对象,通过 DAYSIM 工具完成了室内光环境全年动态模拟分析,研究验证了光伏天窗屋面面积比对其室内光环境质量的决定作用。结果表明:集中式和“一列多排”分散式半透明光伏天窗的天窗屋面面积比达标值是 40% 和 15%。为集中式天窗应用不同可见光透光率的光伏组件时,推荐了适宜的天窗面积比最小值,为“一列多排”分散式天窗提出了纵向天窗个数以及纵横向尺寸综合控制的设计建议。研究基于此为这两种典型分布方式下的半透明光伏天窗分别提出了自然采光优化设计策略。

关键词: 铁路客站;候车厅;光伏天窗;自然采光

中图分类号: TU113.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)05-0152-10

Optimal design of natural lighting of photovoltaic skylights in waiting halls of railway passenger stations

ZHAO Nansen¹, FAN Zhengyu¹, LIU Jiaping²

(1. College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory of Green Building in Western China (Xi'an University of Architecture and Technology), Xi'an 710055, China)

Abstract: Translucent photovoltaic skylights have unique synergistic characteristics of shading and power generation, which have been widely used in public skylights of tall buildings. Its variable shading and light transmission characteristics aggravate the complexity of natural lighting mechanism when applied to skylights in tall and large public buildings. This paper aims to improve the natural lighting problem in the tall and large space of railway passenger station waiting halls, and reveal the influence mechanism of the key design parameters of translucent photovoltaic skylights on the natural lighting. In this paper, Beijing is selected as the representative area in northern China, where solar radiation level is moderate, and natural lighting shading and heat gain need to be taken into account. Based on extensive investigation, the typical translucent film photovoltaic skylight of high space waiting hall of typical railway station was selected as the research object, and the DAYSIM tool was used to complete the dynamic simulation and analysis of indoor light environment throughout the year. The study verified the decisive effect of roof area ratio of photovoltaic skylights on the quality of the indoor light environment. Results show that the critical values of roof area ratios of centralized skylights and “one column and many rows” distributed skylights were 40% and 15% respectively. A suitable minimum area ratio of skylights was recommended for the centralized application of photovoltaic modules with different visible light transmittances. Comprehensive design suggestions for the “one column and many rows” distributed skylights were provided, including the number of longitudinal skylights and the vertical and horizontal dimensions. Based on this, the natural lighting optimization design strategies for translucent photovoltaic skylights were proposed for the two typical distribution modes respectively.

Keywords: railway passenger station; waiting hall; photovoltaic skylight; natural lighting

半透明光伏天窗作为一种新型一体化分布式光

伏组件,因其特有的遮阳与发电协同增益特性,以及在具备丰沛太阳辐射条件的大体量公共建筑屋面上适宜的应用条件,在大体量高大空间尤其是铁路客站建筑天窗中得到了广泛运用。因其多样化遮阳与透光特性(晶硅间隙式与薄膜满布式并存),半透明光伏组件在天窗中的应用进一步加剧了铁路客站高

收稿日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(52008325);
国家重点研发计划(2017YFC0702303)

作者简介: 赵南森(1993—),男,硕士研究生;
范征宇(1985—),男,副教授,博士生导师

通信作者: 范征宇, fanzhengyu@xauat.edu.cn

大空间建筑天窗自然采光机理的复杂性。

近年来,半透明光伏窗受到了国内外学者的广泛关注。文献[1]使用数值日光模拟技术,研究了不同光伏覆盖面积比对光伏侧窗采光性能的影响;文献[2]通过 EnergyPlus 能源模拟,从供暖和制冷负荷、采光和发电实效方面综合分析了办公建筑光伏侧窗的最佳太阳能电池透射率和窗墙比(WWR);文献[3]对不同电池覆盖面积比的光伏玻璃应用于不同朝向办公空间的全自然采光时间百分比(daylight autonomy,DA)、有效天然光照明(useful daylight illuminance,UDI)进行了对比分析;文献[4]利用 DAYSIM 和 EnergyPlus 工具对半透明光伏窗的透光率、建筑朝向以及窗墙比等设计参数对寒冷地区室内天然采光质量及综合能耗影响进行了研究。

现有针对公共建筑自然采光环境的研究仍主要集中于小空间侧窗采光,对采光机理较为不同的高

大空间天窗自然采光机理与实效的研究较为有限;且现有自然采光设计仍主要围绕窗墙比、朝向等侧窗关键设计参数,针对高大空间天窗采光的天窗面积比、分布形式等关键设计变量影响的考虑严重不足。

1 研究方法 与 模拟实验

本文针对上述现状,以太阳辐射水平适中典型地区北京的气象数据为基础,选取铁路客站候车厅高大空间为研究对象,运用 DAYSIM 采光模拟的方法,对室内光环境进行全年动态模拟分析,揭示了集中式和“一列多排”分散式两种典型半透明光伏天窗分布下的天窗屋面面积比、薄膜光伏透光率等关键设计参数与自然采光质量的关联规律,并以此为依据,进一步探索铁路客站高大空间半透明光伏天窗自然采光优化设计策略。研究技术路线见图1,本文分别以 P 和 U 表示指标 DA 和 UDI。

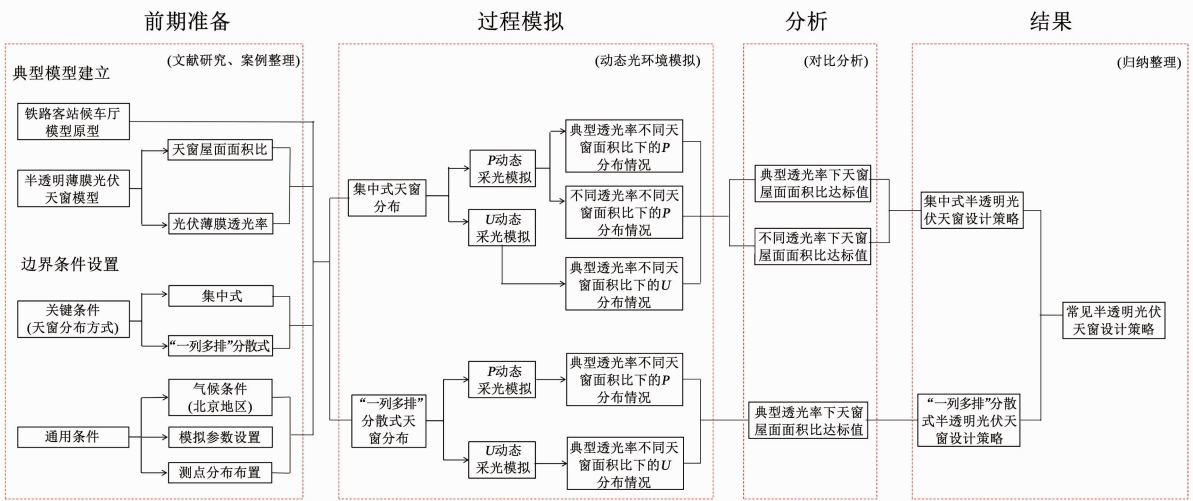


图1 研究技术路线
Fig.1 Research technical route

1.1 模型建立

针对中国铁路客站候车厅的共同特征,本文选取了全国不同气候区的30个典型案例进行调研,并对候车厅的基本建筑信息进行了整理分析。依据案例调研分析^[5-6],选取建筑面积适中(40 000 m²)的矩形平面方案建立典型实验模型,见图2。其平面尺寸为192 m×240 m,总高为14 m,首层与二层层高均为4.5 m。其中,中央候车厅的平面尺寸为168 m×240 m。考虑到大多数候车厅空间两侧的商业进深较大,侧面上部高度有限,侧窗采光难度大,为便于分析,研究选取了仅考虑天窗采光的典型工况,对模型的侧窗和遮阳构件进行了合理的忽略与简化。

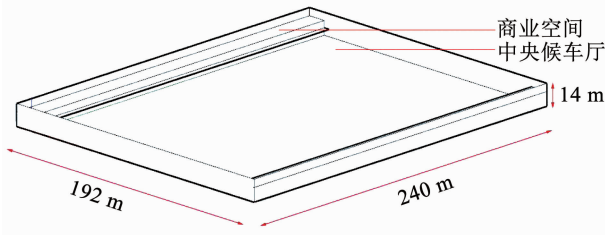


图2 铁路客站下部空间典型模型示意
Fig.2 Typical model of lower space of a railway passenger station

1.2 关键设计参数提取

1) 光伏天窗平面分布方式

铁路客站天窗形式一般根据气候特点、候车厅平面形状及结构方案进行选择,直接影响室内光环境水平。结合前期大量案例调研结果,可将中国高铁站候车厅主要天窗分布形式分为集中式和“一列

多排”分散式两种,见图 3。集中式分布:天窗水平布置在高铁站候车厅屋面正中心,长宽比选择了接近大多数情况下高铁站候车厅的标准窗口比例1.0。分散式分布:国内铁路客站候车厅目前较为常见的天窗分布方式分别为“一系列多排”分散式或“多列多

排”分散式,为了将运算量控制在切实可行的范围内,本文仅选取“一系列多排”分散式作为模拟研究对象。即天窗长宽尺寸保持恒定,通过改变开间和进深方向的天窗个数和天窗间距来控制天窗屋面面积比的取值范围,天窗保持均匀布置。

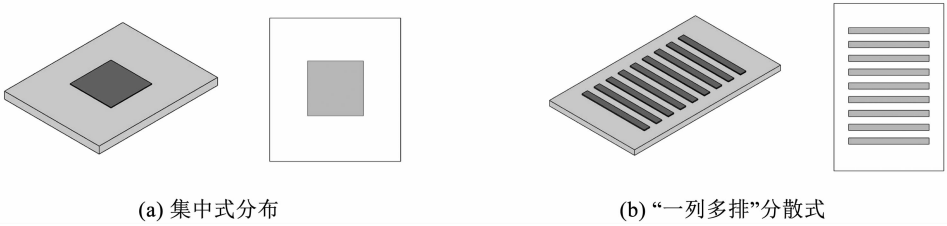


图 3 光伏天窗典型分布方式示意

Fig.3 Typical models of photovoltaic skylight distributions

2) 天窗屋面面积比
屋顶天窗面积大小用天窗屋面面积比反映,定义为屋顶透光部分面积与屋顶总面积之比。GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》^[7]规定,甲

类大型公共建筑的屋顶透光部分面积不应大于屋顶总面积的 20%,本研究选取窗屋面面积比取值范围为 10%~50%,变化步长为 5%,见图 4。

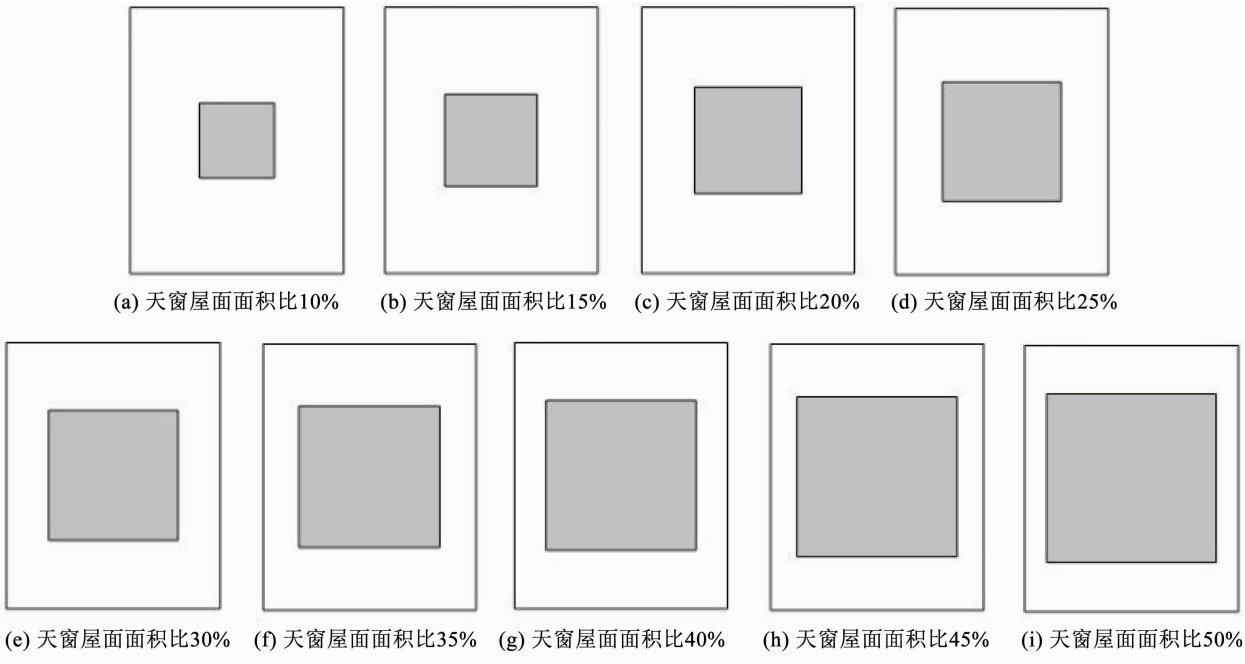


图 4 光伏天窗天窗屋面面积比设置

Fig.4 Layout of different roof area ratios of photovoltaic skylights

3) 薄膜光伏透光率 M_{VT}
本次研究主要选择市面上常见的应用于半透明光伏窗的薄膜光伏电池玻璃,其透光性能主要通过激光刻蚀已沉积制备的光伏功能材料薄膜实现。通过调整激光划刻非晶硅薄膜的面积百分比即可调整光伏玻璃的可见光透光率^[8]。市面上主要的半透明薄膜光伏组件大多实现标准化生产,透光率主要在 10%~50%之间,以 30%居多,透光率高于 50%的半透明光伏组件因发电性能减弱被认为表现更接近普通玻璃材料,考虑到其增量成本和发电效果,故

本次选取的透光率研究范围为 10%~50%之间,变化步长为 5%^[9]。针对在实际应用中可能存在由于后期维护不当造成屋顶天窗积灰,导致玻璃表面污染系数变化进而影响薄膜光伏透光率的现实问题,本研究明确了已开展的实验研究范围仅限于天窗玻璃表面无积灰的理想状况。

将厂商检测的光伏玻璃光热物性检测数据导入美国劳伦斯伯克利实验室的 Optics 和 Window 软件中进行计算,得到本研究中光伏样本所需参数,参数见表 1。

表 1 半透明薄膜光伏玻璃光热物性性能参数

Tab. 1 Photothermal properties of different translucent film photovoltaic modules

玻璃组件	可见光透射比	传热系数	遮阳系数	太阳得热系数
10% 透光薄膜光伏玻璃	0.079	3.125	0.216	0.188
15% 透光薄膜光伏玻璃	0.117	3.131	0.230	0.201
20% 透光薄膜光伏玻璃	0.160	3.143	0.251	0.219
25% 透光薄膜光伏玻璃	0.196	3.146	0.271	0.233
30% 透光薄膜光伏玻璃	0.233	3.149	0.285	0.248
35% 透光薄膜光伏玻璃	0.271	3.151	0.298	0.262
40% 透光薄膜光伏玻璃	0.309	3.152	0.316	0.275
45% 透光薄膜光伏玻璃	0.346	3.152	0.324	0.288
50% 透光薄膜光伏玻璃	0.383	3.153	0.345	0.301

表 2 中国不同光气候区典型城市太阳辐射条件

Tab. 2 Solar radiation conditions of typical cities in different light climate regions in China

光气候区	典型城市	全年总辐照量/ ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$)	全年总散射辐照量/ ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$)	年平均日照时数/h	年平均空气温度/ $^{\circ}\text{C}$
I 区	玉树	1 789	670	2 571.7	11.6
	拉萨	1 966	691	2 990.1	9.3
II 区	昆明	1 568	725	2 197.6	15.7
	吐鲁番	1 527	750	2 523.3	16.1
III 区	北京	1 365	825	2 749.7	12.9
	郑州	1 335	870	2 181.9	15.1
IV 区	济南	1 340	854	2 546.8	13.8
	石家庄	1 320	837	2 427.3	14.7
V 区	成都	987	735	1 073.2	17.4
	重庆	884	659	1 023.7	18.3

利用 EnergyPlus 全球气象数据库中基于典型气象年的小时气候数据作为输入气候数据,其原始实测气象数据集来自清华大学和中国气象局,对应的天空模型为 CIE 全阴天模型。

2) 其他模拟参数设置

由于 DAYSIM 软件不具备建模功能,因此使用通用建模软件 SketchUp 完成了铁路客站候车厅的建模。墙面、地面、顶棚的反射比,表面污染系数按普通建筑面层材料的性能设置;实际状况中,普通建筑面层材料的性能设置中的表面污染系数,可依据天气污染程度带来的积灰水平变化的不同状况,对该参数进行适时修正,以实现积灰水平动态变化条件下对天窗适宜薄膜光伏透光率的准确计算与设计决策。

照明性能的所有设定值均在 GB 50033—2013《建筑采光设计标准》^[10]的允许范围内,见表 3。

1.3 边界条件设置

1) 气候条件

在本次模拟研究中,选择北京市标准气象数据作为室外气候边界条件,北京地处寒冷地区、光气候 III 区,该地区夏季太阳辐射水平偏高,冬季太阳辐射水平偏低,综合全年辐射水平适中。参照中国光气候分区区划,并通过 Meteonorm 辐射分析收集软件进行典型城市气象数据系统梳理分析(表 2),可发现北京及其周边,以北京、石家庄、济南、郑州为代表的河北、山东以及河南等华北平原地区,具有较为相似的太阳辐射年分布规律。本研究故而选择以北京作为华北平原典型城市代表开展验证分析,研究结果在此区域内具有较广泛的推广和应用价值。

表 3 材料光学性能参数

Tab. 3 Optical parameters of different materials

位置	材料	颜色	反射比	透射比
地面	地砖	灰色	0.40	—
墙面	大白粉刷	白色	0.60	—
顶棚	铝扣板	白色	0.75	—
外窗	双层中空	无色	0.10	0.82

根据实际利用条件计算出的候车厅高度平面为底层,因此参考平面选距地面 0.75 m 处建立了分析网格。传感器阵列配置在 DAYSIM 中定位照度计算点,间隔设置为 3 m,共配置 80 个传感器,均匀分布在 168 m×240 m 候车厅地面区域。遮阳装置模式设置为静态,因为没有考虑特殊的遮阳装置。其他相对模拟参数,包括环境反射、限制反射频率等,见表 4。

表 4 DAYSIM 模拟设置
Tab.4 Simulation settings in DAYSIM

参数	设定数值
环境反弹	5
环境分区	1 000
环境解决方案	300
环境精度	0.1
限制反射	6
直接预测密度	512

模拟主要分析选项,包括占用时间表、照明需求、室内人员密度、照明和遮阳模式等,见表 5。基于预设模拟条件,对不同半透明光伏天窗应用条件下室内采光环境进行了全面模拟分析研究。

表 5 DAYSIM 分析设置
Tab.5 Analysis settings in DAYSIM

参数	设定数值
占用时间	9:00 ~ 17:00
最低照度/lx	450
室内最大人员密度/(人·m ⁻²)	0.2
人员平均代谢量/(W/人)	120
设备密度/(W·m ⁻²)	8
照明负荷密度/(W·m ⁻²)	15

1.4 动态采光评价指标

本文使用 DAYSIM 采光模拟软件,采用全自然采光时间百分比(DA)、有效天然光照明(UDI)作为主要的光环境评价指标,对建筑光伏天窗采光性能进行全年动态采光模拟。

P 表示全年中测点超过室内最小照明值要求的概率,描述建筑空间有效利用天然光的能力与照明节能潜力。与传统指标采光系数相比, P 的最大优势在于它考虑了全年天空类型的多样性,在描述天然采光的有效性方面具有整体性。北美照明学会

(IESNA)规定满足采光要求的最小照度为 300 lx。当 $P < 25\%$ 时认为自然采光非常差; $25\% \leq P < 55\%$ 时,认为采光量较低,不满足采光需求; $55\% \leq P < 75\%$ 时认为采光量中等; $P \geq 75\%$ 时,认为采光量非常理想。结合 GB 50033—2013《建筑采光设计标准》^[10],综合考虑高铁站候车厅人群使用特点,将高铁站候车厅的最低照度设置为 450 lx。参考北美照明学会制定的标准,设 9:00 ~ 17:00 为自然采光的工作时间段,并分别设置 P 达标阈值为 25%、55%、75%。

为了更好地评价高铁站候车厅半透明光伏天窗的采光均匀效果,在 P 的基础上增加有效天然光照明(U)指标, U 指 1 a 中工作面上的天然光在一定范围内有效照度的数据比例。参考北美照明学会规定,将指标 U 按 2 000 lx 和 100 lx 为临界值分为 3 个标准^[11]:有效($U_{100 \leq E \leq 2\,000}$)、过低($U_{E < 100}$)、过高($U_{E > 2\,000}$),分析有效 U 的数据分布特征,得出室内达标光环境均匀度情况^[12]。其中当 $U_{E < 100}$ 时认为需提供额外的照明以满足基本照明要求,而 $U_{E > 2\,000}$ 时会直接导致眩光现象产生。

P 值和 U 值均代表空间内所有照度计算点全年模拟结果统计值的平均值,其指标模拟计算遵循 DAYSIM 计算引擎的通用精度,可满足本研究模拟分析的误差需求。而在对全平面测点取平均值的过程中,选择了取小数点后两位的计算精度,该计算精度已可基本满足实验结果计算的准确性要求。

2 结果与分析

2.1 集中式分布下窗屋面积比对建筑采光的影响

本节共计算 9 个模型,光伏天窗长宽比为 1.0 保持恒定,半透明薄膜光伏选取最常见的 0.30 作为典型透光率。在实际应用合理范围内均匀增加天窗屋面面积比,具体模拟结果及计算数值见表 6。

表 6 集中式天窗分布模拟计算结果
Tab.6 Simulation results of centralized distributed skylights

实验组别	天窗尺寸/m	窗屋面积比	$P/\%$	$(U_{E < 100})/\%$	$(U_{100 \leq E \leq 2\,000})/\%$	$(U_{E > 2\,000})/\%$
1	67.88	0.10	30.73	9.55	80.67	9.84
2	83.14	0.15	38.39	6.44	79.53	14.03
3	96.00	0.20	48.43	3.65	78.15	18.13
4	107.33	0.25	58.24	2.88	75.28	21.84
5	117.58	0.30	70.23	2.28	71.20	26.48
6	126.99	0.35	80.00	1.88	66.83	31.23
7	135.76	0.40	89.51	1.51	57.00	41.43
8	144.00	0.45	90.52	1.43	54.36	42.11
9	151.79	0.50	92.80	1.29	51.76	46.91

1)对全自然采光时间百分比(P)的影响

由图5可见,在集中式分布下,当光伏薄膜取典型透光率0.3时,随着天窗屋面面积比的增加, P 值总体呈递增趋势。在天窗屋面面积比小于0.4时, P 随天窗屋面面积比呈近似线性增加;天窗屋面面积比大于0.4后, P 随天窗屋面面积比的增长速度明显放缓,且室内 P 达标率稳定在90%以上,采光状况非常理想;当天窗屋面面积比达到约0.32后,室内的 P 水平超过75%,可以满足动态采光功能评价标准对于室内自然采光的要求,采光状况总体达标。由此说明,天窗屋面面积比对高铁站候车厅采光强度起绝对控制作用,能明显提高候车厅下部区域照度,从而有效改善室内光环境。

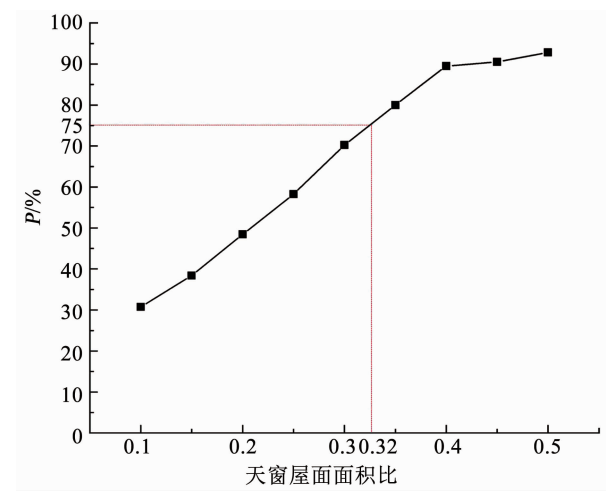


图5 集中式分布时不同窗屋面积比下的 P 数值变化曲线

Fig. 5 Variation of P values under different window-house area ratios in centralized distribution

2)对有效自然光照明(U)的影响

图6是集中式分布时不同天窗屋面面积比下的 U 数值变化趋势。可以清楚地看到,随着天窗面积比的增加, $U_{100\leq E\leq 2\,000}$ 数值迅速下降, $U_{E>2\,000}$ 的值比例迅速增加, $U_{E<100}$ 的值小幅下降且高窗屋面积比时基本保持恒定。说明增加天窗面积虽然能改善照

度,整体提升室内光环境质量,但也会增加眩光风险,导致部分区域实际光舒适度下降。

图7是不同天窗屋面面积比下的 $U_{100\leq E\leq 2\,000}$ 各照度计算点数值分布情况,明显看出,当天窗比较小时,天窗下部采光相对集中,有明显眩光风险,而空间边缘处因为距离天窗较远,采光情况不理想,候车厅光环境整体呈现较大的起伏波动;随着天窗面积不断增大,天窗下部眩光区域显著增大,边缘处采光效果相对理想。

3)不同透光率下窗屋面积比最小取值

针对所选代表性典型城市北京,在半透明薄膜光伏透光率于10%~50%取值范围内,计算天窗屋面面积比为0%~50%时的全自然采光时间百分比 P ,以评估其对 P 的影响并得出适宜取值。为控制模拟组数量,在模拟过程中针对不同透光率,仅选取了 P 值接近75%的关键工况进行了模拟验证,基于前述 P 值与窗屋面积比、薄膜透光率的基本正向关系,可确保各窗屋面积比最小取值范围的正确性,模拟结果见表7。

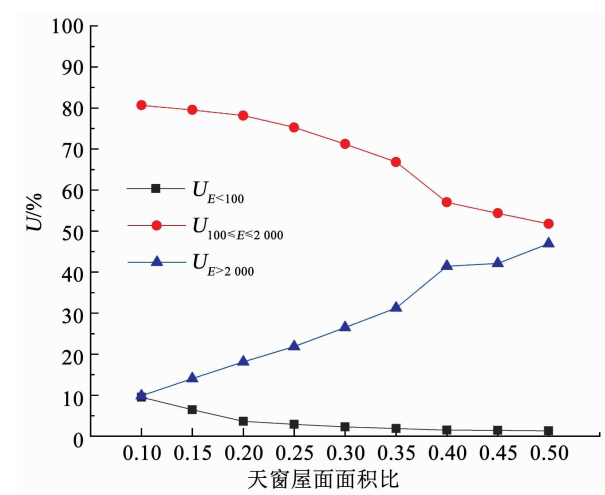


图6 集中式分布时不同天窗面积比下的 U 数值变化曲线

Fig. 6 Variation of U values under different skylight area ratios in centralized distribution

表7 北京地区集中式天窗不同天窗面积比与透光率下的年平均日光可用率 P (照度要求:450 lx)

Tab. 7 Annual average daylight availability P of centralized skylights under different skylight area ratios and light transmittances in Beijing area (illuminance requirement: 450 lx)

天窗屋面面积比	薄膜透光率/%							
	10	15	20	25	30	35	40	50
0.10								
0.15							47.76	51.36
0.20						53.15	47.84	67.55
0.25				52.49	58.24	64.37	69.92	78.42
0.30			53.49	67.52	70.23	76.25	80.85	84.32
0.35		53.88	65.59	75.80	80.00	84.55	84.65	89.30
0.40	51.19	64.17	75.60	82.37	89.51	88.34	89.98	
0.45	57.72	71.59	80.20	87.25	90.52			
0.50	63.76	77.59	86.40					

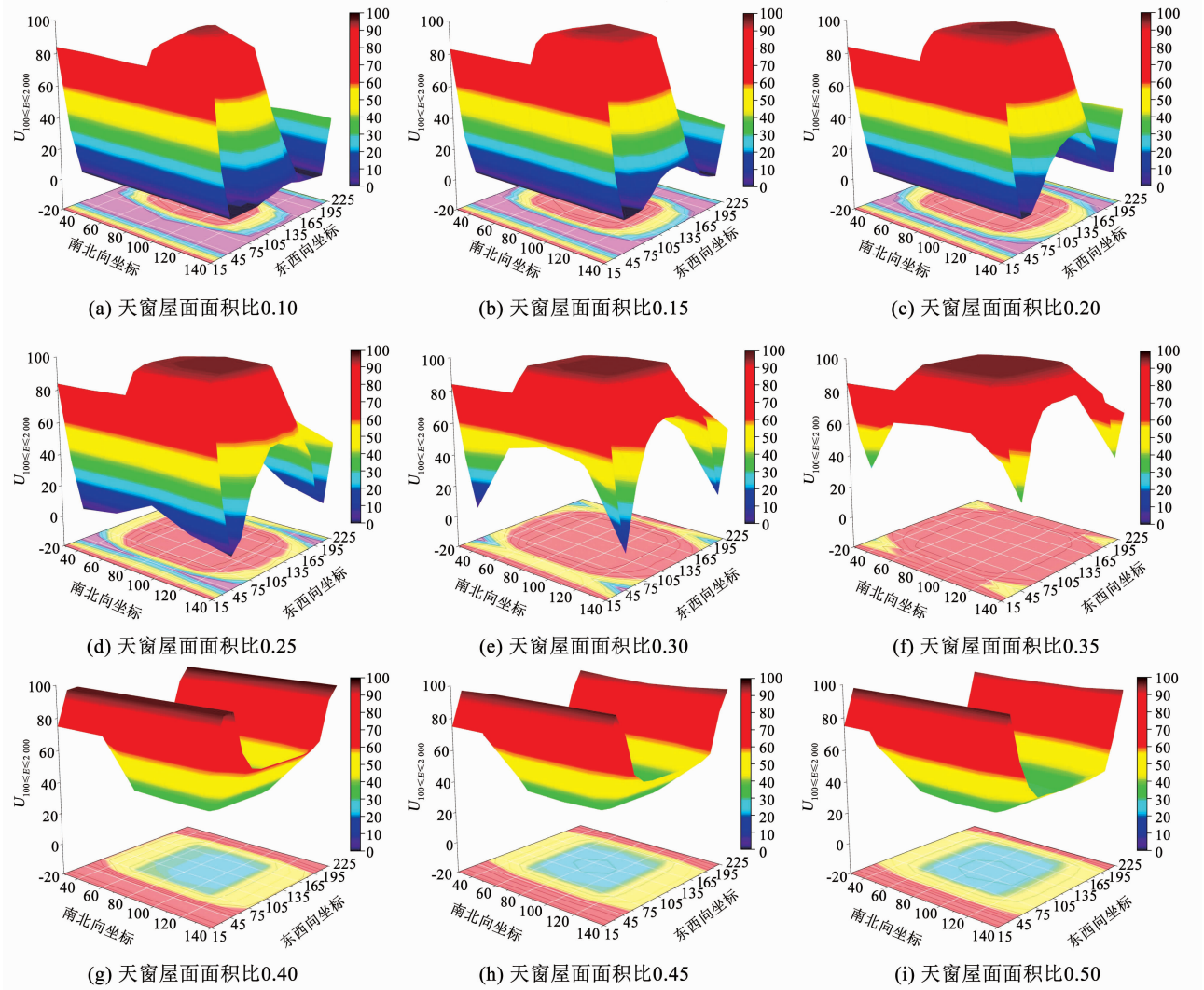


图 7 集中式分布时不同天窗屋面面积比下的 $U_{100 \leq E \leq 2\,000}$ 各照度计算点数值分布曲线

Fig. 7 $U_{100 \leq E \leq 2\,000}$ value distribution of each measurement point of centralized distribution under different skylight roof area ratios

当薄膜光伏透光率 $M_{VT} \leq 10\%$ 时,通过改变天窗面积比无法满足 $P \geq 75\%$,室内光环境质量始终不能达标;当 M_{VT} 接近 15% 时,天窗面积比最小取值 0.5 时, P 值基本达标;当 M_{VT} 接近 20% 时,天窗面积比最小取值 0.4 时, P 值基本满足室内光环境要求;当 $25\% \leq M_{VT} < 35\%$ 时,天窗面积比最小取值约为 0.35 时, P 值基本满足室内光环境要求;当 $35\% \leq M_{VT} < 45\%$ 时,天窗面积比最小取值约为 0.3 时, P 值基本达标;当 $45\% \leq M_{VT} < 50\%$ 时,最小取值约为 0.25。综上结果,当 M_{VT} 在 15% ~ 50% 之间变化时,窗屋面面积比推荐最小取值见表 8。

2.2 “一列多排”分散式分布下窗屋面面积比对建筑采光的影响

本节共计算 6 个模型,光伏天窗短边总尺寸与屋面短边尺寸的比值设为 0.5,且保持恒定,单个天窗长边尺寸设为 5 m,半透明薄膜光伏同样取 0.30

作为代表性典型透光率。在实际应用合理范围内均匀增加光伏天窗长边方向上的个数,天窗间距随之变化,天窗屋面面积比随之增大,具体实验设置及计算结果见图 8、9 及表 9。

表 8 北京地区集中式天窗不同透光率下窗屋面面积比推荐最小取值

Tab. 8 Recommended minimum values of skylight roof ratios under different light transmittances of centralized skylights in Beijing area

薄膜光伏透光率 $M_{VT}/\%$	建议最小天窗屋面面积比
$15 \leq M_{VT} < 20$	0.50
$20 \leq M_{VT} < 25$	0.40
$25 \leq M_{VT} < 35$	0.35
$35 \leq M_{VT} < 45$	0.30
$45 \leq M_{VT} < 50$	0.25

表 9 “一列多排”分散式天窗分布模拟计算结果

Tab. 9 Simulation results of “one column and many rows” distributed skylights

实验组别	天窗/个	天窗间距/m	窗屋面积比/%	$P/\%$	$(U_{E<100})/\%$	$(U_{100\leq E\leq 2\,000})/\%$	$(U_{E>2\,000})/\%$
1	3	102.50	3.10	15.13	48.17	49.40	2.49
2	6	38.00	6.30	22.12	18.45	78.07	3.49
3	9	21.88	9.40	35.97	10.40	84.60	4.99
4	12	14.55	12.50	47.12	7.55	86.31	6.05
5	15	10.36	15.60	53.04	6.15	86.67	7.09
6	18	7.65	18.80	49.92	5.01	76.73	18.19

1) 对全自然采光时间百分比(P)的影响

由图 8 可以看出,天窗长短边尺寸不变情况下,随着天窗个数增加,天窗屋面面积比也随之增大,达标的 P 面积比数值呈近线性递增关系,说明在分散式天窗采光设计过程中,天窗屋面面积比依然对建筑室内采光有较大影响。固定天窗尺寸下,天窗长边方向的个数对 P 表现起主要控制作用。

当天窗个数增加到 12、天窗屋面面积比达到 12.5% 后,全自然采光时间百分比 P 逐渐趋于稳定,变化斜率有明显减缓趋势,且天窗个数为 15 时, P 达到峰值 53.04%, 但室内光环境质量仍未能达标。说明当天窗尺寸一定时,增加天窗长边方向的个数可一定程度上提升天窗临近位置的室内采光质量,但不适宜的天窗尺寸依然不能有效满足铁路客站各区域基本照明水平需求,如天窗短边尺寸较小无法解决两侧外缘深处区域的照度不足问题,应在合理设置天窗尺寸下,综合考虑天窗个数、间距等因素对室内光环境的影响。

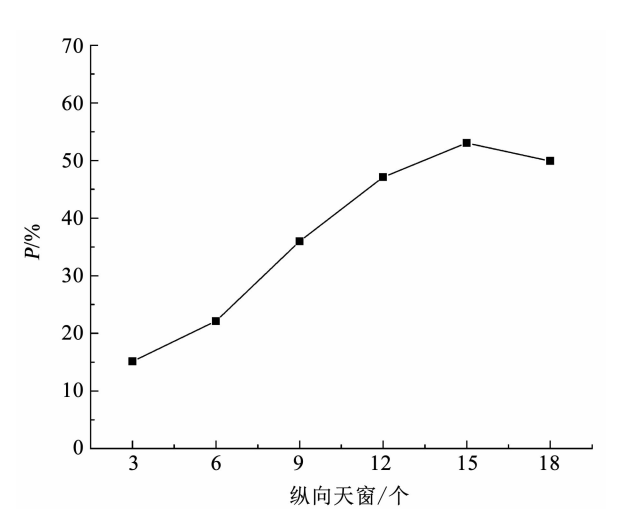


图 8 不同天窗个数下的 P 数值变化曲线

Fig. 8 Variation of P values under different numbers of skylights

2) 对有效自然光照明(U)的影响

由图 9 可看出,随着天窗个数由 3 增加至 6, $U_{100\leq E\leq 2\,000}$ 呈显著递增趋势,说明增加天窗个数和窗

屋面积比对于室内光环境有明显提升作用。当天窗个数增至 6、天窗屋面面积比达到 6.3% 以上后,随着窗屋面积比加大,有效照度值(U)增长趋于平缓,且个数为 15 时, $U_{100\leq E\leq 2\,000}$ 达到峰值 85.67%。当天窗个数进一步增至 18,天窗屋面面积比为 18.8 时, $U_{100\leq E\leq 2\,000}$ 下降且 $U_{E>2\,000}$ 最高,表明候车厅会有过多的天然光进入显著提升眩光概率而降低光舒适区域比例。

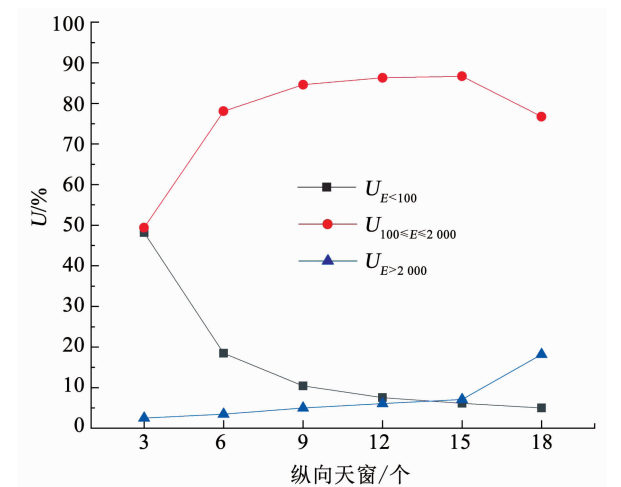


图 9 不同天窗个数下的 U 数值变化曲线

Fig. 9 Variation of U values under different numbers of skylights

图 10 显示了“一列多排”分散式天窗分布时,不同窗屋面积比下的 $U_{100\leq E\leq 2\,000}$ 数值分布。可以看出,随着窗屋面积比的增大,各测点的有效照度值呈现先逐渐均匀后逐渐分散的整体趋势,说明在有限范围内增加纵向天窗个数和窗屋面积比能显著提升室内整体采光均匀度以改善光环境质量。当天窗个数取 9 至 15,窗屋面积比在 9.4% ~ 15.6% 之间时,绝大多数测点有效照度数值保持在 90 附近,候车厅采光均匀度表现相对较好。而当天窗个数增至 18,天窗屋面面积比为 18.8% 时, $U_{100\leq E\leq 2\,000}$ 各测点数值又呈现出分散趋势,室内光环境不够均匀。说明在天窗屋面面积比相对较小的情况下,增加天窗个数能有效提升采光均匀度,但应该对其合理控制,避免因过高引发部分区域采光过度及眩光。

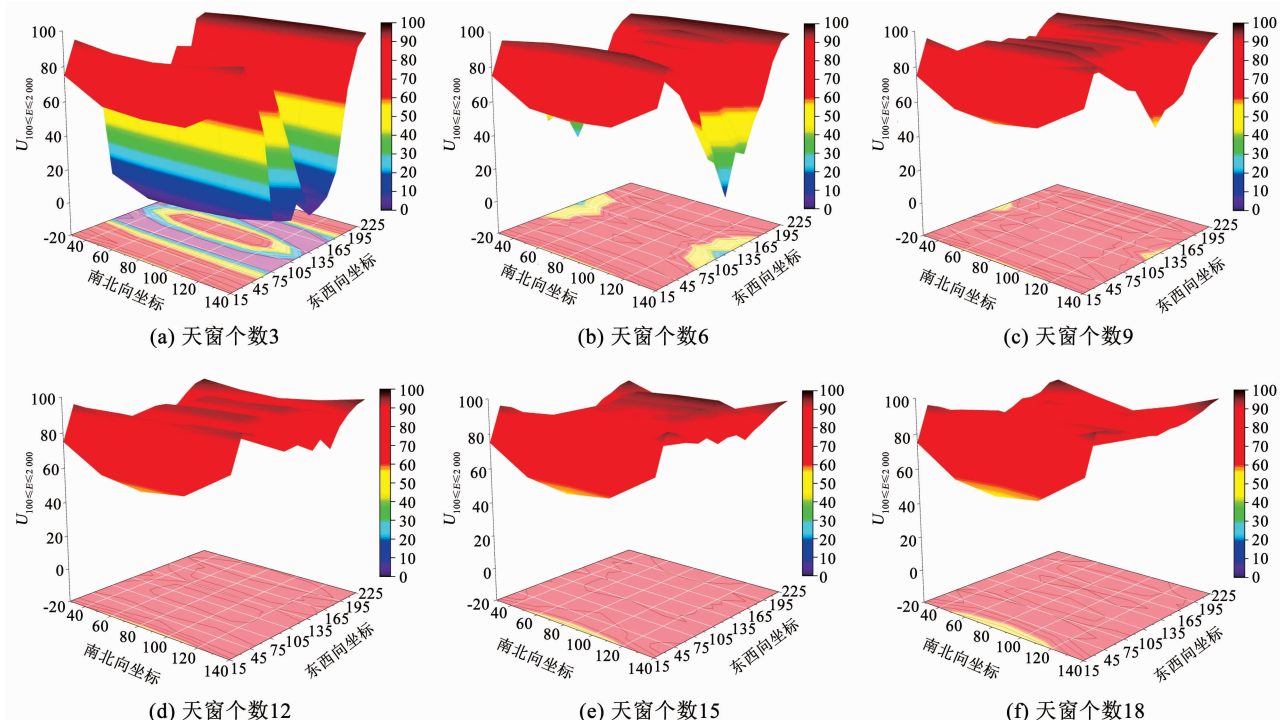


图10 “一列多排”分散式,不同天窗屋面面积比下的 $U_{100 \leq E \leq 2000}$ 各照度计算点数值分布曲线

Fig. 10 Numerical distribution of each measuring point of $U_{100 \leq E \leq 2000}$ under “one column and many rows” distributed skylights with different roof area ratios

3 结 论

针对铁路客站候车厅高大空间建筑,对应用集中式和“一列多排”分散式两种典型分布的半透明光伏天窗采光质量进行动态模拟,通过数据分析得到了不同关键设计参数对全自然采光时间百分比(P)和有效自然采光照度(U)表现实效的影响规律,并基于此提出两种典型分布方式下半透明光伏天窗自然采光优化设计策略。针对所选代表城市北京,主要结论如下:

1) 光伏天窗屋面面积比对高铁站建筑候车厅室内光环境起主要控制作用,在规范允许的范围内,可通过增加天窗屋面面积比来提高全自然采光时间百分比(P)和有效自然采光照度(U),改善室内自然采光水平。

2) 对于集中式分布来说,在候车厅的典型透光率光伏天窗设计中应在有限范围内(窗屋面积比 $\leq 40\%$)优先考虑增加天窗屋面面积比的取值,以提升总体自然采光水平,但在窗屋面积比较大($\geq 40\%$)时,应注意控制其进一步增加,以避免自然采光过度。

3) 集中式分布下,应避免过小的薄膜光伏透光率($\leq 10\%$),且针对不同光伏薄膜透光率应设置不同的适宜天窗屋面面积比:针对光伏薄膜透光率分别处于 $15\% \sim 20\%$ 、 $20\% \sim 25\%$ 、 $25\% \sim 35\%$ 、 $35\% \sim 45\%$

和 $45\% \sim 50\%$ 的不同区段,天窗面积比最小推荐值分别宜接近 0.5 、 0.4 、 0.35 、 0.3 与 0.25 ,可据此根据实际情况参考取值。

4) “一列多排”分散式天窗布局下,当各典型透光率光伏天窗尺寸固定时,可在一定范围内(窗屋面积比 $< 15\%$)增加天窗纵向个数以有效提升候车厅室内光环境质量,但应避免纵向天窗个数过大(窗屋面积比 $\geq 15\%$)导致天然采光基本水平下降与眩光现象的显著增加;在增加天窗长边方向个数仍不能有效解决天窗两侧区域照度不足问题时,可综合考虑天窗长短边尺寸等的综合控制设计以进一步提升采光效果。

参考文献

- [1] VARTIAINEN E, PEIPPO K, LUND P. Daylight optimization of multifunctional solar facades [J]. Solar Energy, 2000, 68 (3): 223. DOI: 10.1016/S0038-092X(99)00072-9
- [2] MIYAZAKI T, AKISAWA A, KSASHIWAGI T. Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows [J]. Renewable Energy, 2005, 30 (3): 281. DOI: 10.1016/j.renene.2004.05.010
- [3] 李卓, 王立雄, 张华. 光伏玻璃应用于办公空间的天然光环境研究——以天津地区为例[J]. 照明工程学报, 2015, 26(1): 23. LI Zhuo, WANG Lixiong, ZHANG Hua. Research on the lighting environment using photovoltaic glass in office space—A case study in Tianjin [J]. Zhaoming Gongcheng Xuebao, 2015, 26(1): 23. DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2015.01.005
- [4] 高敏, 陈思宇, 程远达, 等. 寒冷地区半透明光伏窗天然采光质

量与节能潜力的研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(5): 682

GAO Min, CHEN Siyu, CHENG Yuanda, et al. Semi-transparent PV windows: A study of daylighting quality and energy potential in cold region[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(5): 682. DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2018.05.009

[5] 李晓波. 基于旅客舒适认知的寒冷地区大型高铁站候车厅光热环境优化设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019

LI Xiaobo. Research on optimal design of the light-thermal environment of the large high-speed railway station waiting hall in cold area based on passengers' comfortable cognition[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019

[6] 闫利. 中小型铁路车站天然采光与空调能耗的耦合分析[J]. 暖通空调, 2017, 47(7): 90

YAN Li. Coupling analysis of natural lighting and air conditioning energy consumption of small and medium-sized railway stations[J]. HV & AC, 2017, 47(7): 90

[7] 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015

Design standard for energy efficiency of public buildings: GB 50189—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015

[8] 杨泽晖. 基于空间光环境质量的建筑中庭光伏天窗设计策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020

YANG Zehui. Research on design strategy of atrium photovoltaic skylight based on spatial light environment quality[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. DOI: 10.27393/d.cnki.gxazu.2020.000657

[8] 余愿. 基于采光标准的半透明薄膜光伏幕墙综合效能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018

YU Yuan. Study on the comprehensive performance of translucent thin film PV curtain wall based on daylighting standard[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018

[10] 建筑采光设计标准: GB 50033—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013

Standard for daylighting design of buildings: GB 50033—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013

[11] NABIL A, MARDALJEVIC J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(7): 905. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.03.013

[12] 吴蔚, 刘坤鹏. 浅析可取代采光系数的新天然采光评价参数[J]. 照明工程学报, 2012, 23(2): 1

WU Wei, LIU Kunpeng. An introduction of new daylighting evaluation criteria: A replacement for daylight factor[J]. Zhaoming Gongcheng Xuebao, 2012, 23(2): 1

(编辑 苗秀芝)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“摇摆结构体系框架柱脚 BRSP 耗能机制分析”, 是哈尔滨工业大学土木工程学院贾明明课题组提出的一种采用屈曲约束钢板(buckling restraint steel plate, BRSP)的可抬升钢框架柱脚的构造形式和耗能分析示意图。该柱脚由框架柱、内侧垫板、外侧盖板、屈曲约束钢板、加劲板和螺栓固定板构成, 其连接形式均采用装配式螺栓连接。在地震作用下框架柱脚能够通过抬升机制和 BRSP 的耗能作用达到减轻柱脚损伤的目的, 通过更换受损的 BRSP 可以实现结构的功能可恢复, 提高结构的抗震韧性。对结构的关键连接部位采用精细化实体单元建模, 其余部位采用杆单元建模, 既保证了有限元模型的精度又提高了计算效率, 且分析结果与试验结果吻合良好。结构的塑性损伤主要集中在可替换的 BRSP 和加劲板附近, 而钢框架柱应力水平较低, 从而有效地保护了主体结构。本文从 BRSP 与框架柱翼缘的厚度比、宽度比和轴向刚度比三个方面对柱脚的耗能性能进行了参数分析, 从能量的角度量化分析了各种尺寸的 BRSP 的耗能性能, 以探究其最优的构造形式, 从而为功能可恢复的柱脚设计提供有效的建议和参考。

(图文提供: 贾明明、李江红、陈寅圳、唐贞云。哈尔滨工业大学土木工程学院)