

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.09.008

引用格式:侯万钧,申开兴,席晖.基于多目标优化的双层天窗采透光系统设计[J].重庆大学学报,2025,48(9):76-92.



基于多目标优化的双层天窗采透光系统设计

侯万钧^{1,2},申开兴¹,席晖^{1,2}

(1. 河北工程大学 建筑与艺术学院,河北 邯郸 056000; 2. 天津大学 建筑学院,天津 300072)

摘要:天窗的开设能显著提升室内自然采光均匀度及照度值,空气间层能减弱室内外热量的传递且优化室内的光环境质量;以邯郸市既有综合市场建筑空间为例,使用 Grasshopper 仿真平台将天窗与空气间层相结合设计出具有 27 种组合形态的双层天窗采透光系统,借助 Octopus 实现以能耗和光舒适为目标的采透光系统寻优,并将自变量和评价指标数据集导入 Hiplot 平台进行相关性分析,判断变量参数与光环境评价指标之间的相关关系。结果表明,当空气间层厚度为 0.8 m、半透光材料厚度为 0.005 m、天窗面积占比为 0.3 时,优化效果最佳;室内有效日光照度占比提升了 10.97%,白昼眩光概率降低了 39.40%,南北向出入口及其背景面亮度比分别降低了 61.45% 和 45.10%,单位面积能耗降低了 18.42%。同时,在参数变化范围内,空气间层高度与采光系数、有效日光照度及白昼眩光概率之间负相关,但相关性较弱;天窗面积占比与有效日光照度负相关、半透光材料厚度与白昼眩光概率正相关,且相关性较强;最后,分析了该系统应用的经济性、普适性和可行性,为城市大空间公共建筑室内光环境设计和改造提供了新的思路和构件形态。

关键词:双层天窗采透光系统;多目标优化;室内光环境;相关性分析

中图分类号:TU113

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)09-076-17

Design of a double-layer skylight light transmission system based on multi-objective optimization

HOU Wanjun^{1,2}, SHEN Kaixing¹, XI Hui^{1,2}

(1. School of Architecture and Art, Hebei University of Technology, Handan Hebei, 056000, P. R. China;

2. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: The incorporation of skylights significantly improves indoor natural lighting uniformity and illumination levels. Additionally, the use of an air layer helps mitigate heat transfer between indoor and outdoor environments, thereby improving the overall quality of the indoor light environment. Using a comprehensive market building in Handan City as a case study, this research designs a double-layer skylight transmission system comprising 27 combination configurations by integrating skylights and air layers through the Grasshopper simulation platform. With the help of Octopus, a multi-objective optimization solution is developed to balance energy consumption and light comfort. The independent variables and evaluation index datasets are further analyzed using the Hiplot platform to evaluate correlations between design parameters and light environment

收稿日期:2025-01-12

基金项目:河北省自然科学基金面上项目(E2025402020)。

Supported Natural Science Foundation of Hebei Province of China(E2025402020).

作者简介:侯万钧(1980—),男,博士,硕士生导师,主要从事建筑照明、绿色建筑研究,(E-mail)houwanjun@tsinghua.org.cn。

indicators. Results show that the optimal configuration is achieved when the air layer thickness is 0.8 m, the semi-transparent material thickness is 0.005 m, and the skylight area ratio is 0.3. Under these conditions, the proportion of indoor effective daylight illumination increases by 10.97%, the probability of daytime glare decreases by 39.40%, the brightness ratio between north-south entrances and exits and their background surfaces decreases by 61.45% and 45.10% respectively, and energy consumption per unit area is decreased by 18.42%. Correlation analysis reveals that interlayer height is negatively correlated with daylight coefficient, effective daylight illumination, and daytime glare probability, although these correlations are weak. The skylight area ratio is negatively correlated with indoor effective daylight illumination, while the thickness of the interior light-transmitting panel is positively and strongly correlated with daytime glare probability. Finally, the system's economic viability, applicability, and feasibility are analyzed, offering a novel design approach and component model for enhancing the indoor light environment of large-scale public buildings in urban settings.

Keywords: double-layer skylight light transmission system; multi-objective optimization; indoor light environment; correlation analysis

农贸市场是一种广泛存在的城镇日常性公共空间,作为居民消费性的存在,其内部物理环境质量对市民生活及市场经营有着重要的影响^[1]。如今的市场逐渐脱离了“脏乱差”的状态,但作为最基础的生活单元,仍缺乏舒适的建筑物理环境,而光环境作为建筑物理环境中重要的组成部分,尤其是市场内部生鲜区照度分布情况对商品颜色呈现的影响,决定了居民对商品的购买性判断;此类建筑一般为顶部和侧窗采光相结合的大空间,天窗的开设能显著提升室内自然采光均匀度及照度值^[2],随着顶部开窗面积的增加,可进一步改善室内光环境质量,但增加了屋面的太阳辐射得热,从而使室温升高,加剧人体的热不舒适感。现有的农贸市场在设计或改造过程中重点聚焦于提升空间使用效率、利益最大化及便利性,忽略了室内光环境对居民消费行为的影响及建筑能耗的控制。因此,在控制空间辐射得热的情况下,改善室内光环境,使商品显色性提高,消费者获得正确的消费判断显得格外重要。

Irakoze等^[3]利用集成Radiance和EnergyPlus的仿真平台对不同天花板几何形状及天窗面积比的建筑模型进行模拟,以优化建筑光环境为目标,得出了天花板深度和天窗面积比的最佳组合状态;El-Abd等^[4]以开罗一家购物中心为基准模型,模拟了不同天窗开口面积及光线透射率下室内照度分布、眩光发生概率和建筑能耗大小,强调了天窗开口面积及玻璃透射率对室内光环境质量的影响;Tükel等^[5]研究了多层玻璃屋顶中空气间层厚度、玻璃涂层发射率和窗格数量对空气流动及传热特性的影响,评估了玻璃屋顶的热性能。赵南森等^[6]对国内典型城市大空间铁路客运站天窗的不同类型进行动态模拟,揭示了天窗面积比、薄膜透光率等关键设计参数与室内自然采光质量的关联规律;蒋涛等^[7]以天窗的面积比、数量、布局及材料透射率为变量对铁路客运站室内自然光的采光均匀度、日光照度占比、年度太阳暴露指数进行多目标优化和相关性分析,得到了大空间建筑天窗的最佳构造形态;周洪涛等^[8]通过对不同天窗位置形态的中庭光环境进行模拟,分析其对中庭采光系数、照度均匀度等的影响,合理布局天窗方位。

综上所述,结合双层玻璃和空气间层采光隔热特点,文中提出了一种双层天窗采透光系统,该系统在保证使用者基本功能空间需求条件下,将采光天窗与空气间层结合并代替室内装饰吊顶,利用Grasshopper和Octopus分别进行仿真模拟和多目标优化求解^[9],基于Hiplot平台进行相关性分析,获得了最优状态的双层天窗采透光系统及其变量之间相关关系。所得的采透光组件可根据消费者的主观感受和市场经营需要提高消费者购买性判断的正确性,同时改善室内自然采光效果,减少建筑照明能耗,获得更加健康舒适的城市公共活动空间。

1 邯郸市既有综合市场室内光环境调研及实测分析

1.1 现状调研及实测

选定空间、人流量、光环境特征较为典型的大空间建筑——邯郸市自强综合市场为调研实测对象；该市场位于河北省邯郸市丛台区，整体呈“一”字形，北侧接青年路，南临沁河，东西两侧环以建筑，采光形式为顶部采光与侧窗采光相结合，如图1所示，透光材料均为半透明PC耐力板，建于20世纪90年代，于2019年完成二次改造，为钢结构的单层大空间。

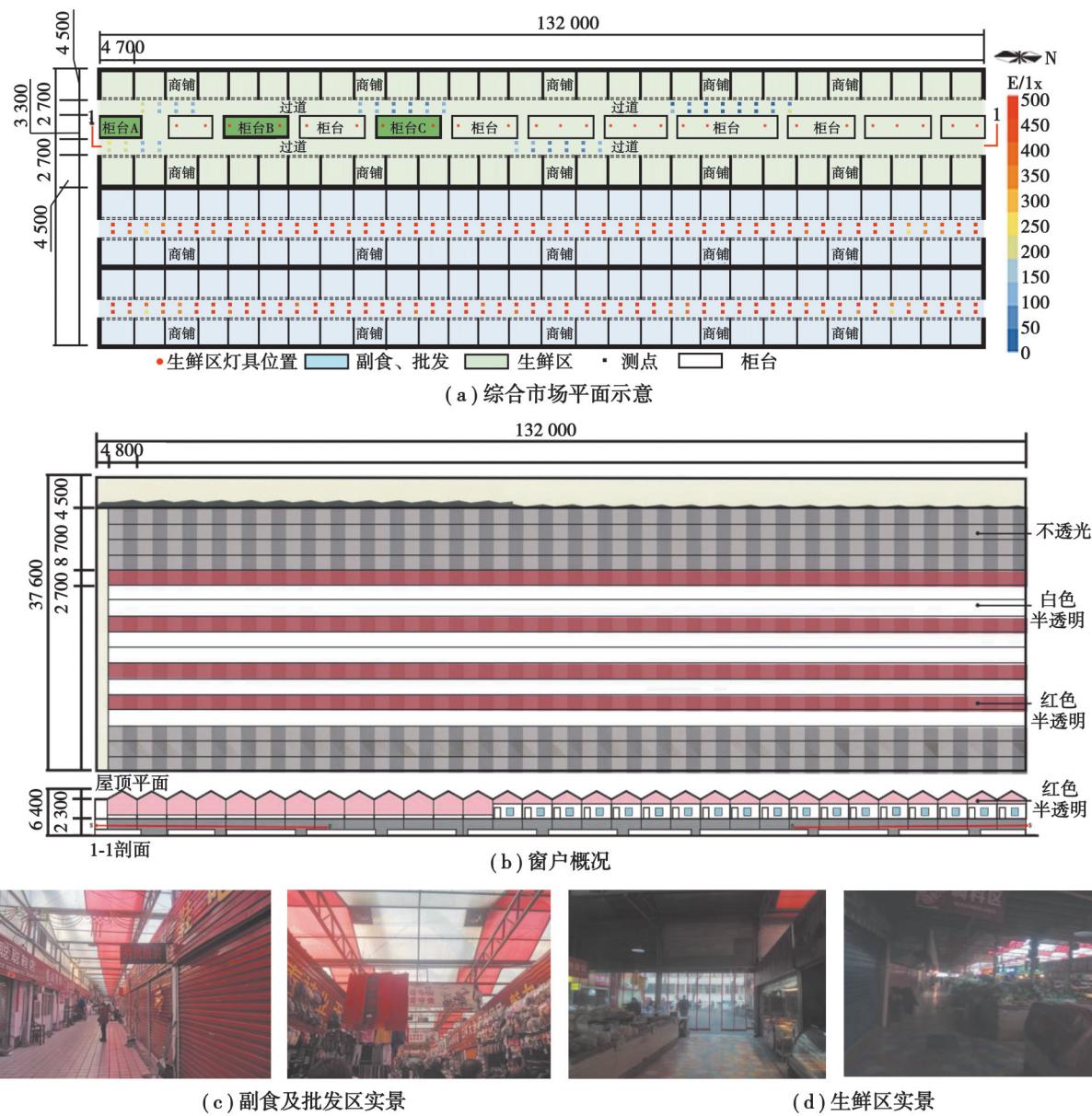


图1 建筑概况

Fig. 1 Building overview

为了解市场中光环境现有问题，使用照度计(DF-XYI-III全数字照度计 0.1~100000lux量程)对综合市场中过道及柜台水平工作面自然光环境进行实测，依据《照明测量方法》(GB/T 5700-2008)关于测量方法的描述得出中心布点与四角布点均可以用于水平照度的测量；为了弱化商铺立面材料差异对水平工作面照度测量结果的影响，选择中心布点法对其室内光环境进行测量。

虽然，空间中合适的立面照明可以为商贩和消费者提供亲切舒适的沟通环境，但由于市场中人、商品、建

筑表面存在差异,光反射系数不一,在对各垂直面照度进行模拟和优化数据对比分析时,缺乏可比性,很难确定各垂直面优化程度并筛选出最佳优化方案。综上所述,应选取中心布点法对市场内水平工作面照度进行实测及模拟优化。

综合市场南北进深132.0 m,东西宽37.6 m,层高5.1 m,生鲜区内设柜台12个,建筑详细信息如表1所示。

表1 综合市场详细信息

Table 1 Detailed information of comprehensive market measurement

建筑信息	尺寸/形式	建筑信息	尺寸/数量
开间/m	37.6	层高/m	5.1
进深/m	132.0	柜台个数/个	12.0
结构形式	钢桁架	柜台高度/m	0.9
采光形式	侧窗+顶部	过道宽度/m	1.5

1.2 实测分析

测试时间为2024年1月8日9:00~10:00;天气状况:多云;室外实测天然光照度为4 350 lx。为了减小误差,实测范围选择未租赁或未开设照明的柜台(柜台A、B、C)及过道,如图1所示。根据市场内部环境调研情况选择中心布点法进行测点布置,适当增加测点到各垂直面的距离,减小因立面材料差异而造成的测量误差^[10],测点间距为2 m;邯郸地区属于光气候分区的III类地区,其中,年日照时数超过2 500 h,光环境资源丰富,但由于建筑进深大、构件老化、市场物业管理不当及内部装饰材料表面污染物附着,导致室内采光存在诸多问题。

将得到的光环境质量参数与标准值对比可知,市场生鲜区采光均匀性较差,采光系数、照度均匀度未达到国家标准;同时,用亮度计(BZ-XYL-III全数字亮度计0.1~100 000 cd/m²量程)对生鲜区的出入口及其背景面进行亮度测量,其亮度比分别为441.3/18.8 cd/m²(北向)、352.6/15.9 cd/m²(北向)、849.5/45.3 cd/m²(南向)、821.7/41.9 cd/m²(南向),测量结果显示门洞与其背景面亮度比接近或大于20,易出现眩光,如图1(d)所示;而副食、批发区域采光良好,基本满足视觉需求,如图1(c)所示;这与市场内部空间形态、采光方式、材料性质等因素有关。

表2 生鲜区光环境实测值及标准值对比

Table 2 Comparison of measured and standard values of light environment in fresh area

光环境评价参数	实测值	标准值/适宜值	差值
照度均匀度	0.32	0.4	0.08
照度平均值/lx	147.90	200.0	52.10
采光系数/%	3.01	4.0	0.99

注:照度均匀度指照度最小值与照度平均值之比,用 U_0 表示, $U_0=E_{\min}/E_{\text{av}}$ 。根据《建筑照明设计标准》(GB50034—2013)中5.3.3规定了农贸市场0.75 m工作面的照度均匀度 $U_0 \geq 0.4$ 。

2 模拟对象及优化平台

2.1 模拟对象

为了研究双层天窗采透光系统的形态变化对室内光环境质量的影响,更好比较架设采透光系统前后建筑室内各项物理性能参数的差异,根据实测信息建立了基准模型。依据《建筑采光设计标准》(GB50033—2013)中对测量或模拟工作平面的规定,将照度模拟分析平面称为参考平面,民用建筑取距离地面0.75 m的水平工作面,此次模拟采用网格法均匀布点。按照消费者在室内空间中的活动情况、可能发生的视线方向、频率等将过道分成4段分析其眩光存在情况,确定眩光测点o为每段过道的中心点,高1.5 m处,门洞中心点s,视线方向为向量 \vec{os} 方向,如图1(b)中1-1剖面所示。

2.2 多目标优化平台(**Octopus**)

Octopus 是一款基于 Grasshopper 平台的多目标优化求解器, 相比于其自带的 Galapagos, **Octopus** 可以处理更加复杂的优化问题, 运用了帕累托最优原理和遗传算法, 拥有自定义优化目标及直观的可视化功能, 其优化过程中能够对参数化模型进行不断变更和实时模拟, 同时将每次模拟结果进行比较, 找出最佳的多目标设定参数, 通常以最小值为优化目标, 当目标函数需要求取最大值时则可以先求最小值后对目标值取倒数或相反数^[11]。选用 **Octopus** 平台通过一系列约束条件对变量进行调整, 在各目标之间进行协调权衡, 利用模拟结果反馈并调整采透光系统形态方案, 使所有目标函数尽可能达到最优, 并通过多个评价指标约束来找寻方案最优解集。

2.3 模拟及优化流程分析

结合对市场现状的实测分析, 基准模型以静态采光指标对其实测和模拟数据进行评价并将结果归纳、整理和分析, 得出模拟和实测数据误差均在可行范围内, 证明了模拟的可靠性; 同时, 为了增加基准模型和优化模型模拟的可比性, 以动态采光和静态采光指标作为评价依据对基准模型和优化模型进行仿真分析, 最后比较模拟结果筛选出最佳状态优化方案。

3 模型的可靠性判断

根据现状调研及实测统计分析, 确定了基准模型包括层高、房间形态、采光形式、尺寸、朝向、柜台数及过道分布等在内的参数, 建立了基准模型^[12], 并对其材质属性、人员在室率等进行设定。为确保模拟结果的可靠性, 将实测数据和基准模型模拟结果进行比较分析, 如表 3 所示。

表 3 光环境质量参数实测值与模拟值对比

Table 3 Comparison between measured and simulated values of optical environmental quality parameters lx

位置	实测值				模拟值		
柜台 A	276	209	167	157	305	296	262
	174	147	133	170	185	167	164
	99	137	119	134	155	141	137
	108	161	141	118	135	128	122
	129	166	154	133	125	147	128
	103	142	115	127	121	114	115
柜台 B	178	99	73	110	157	142	135
	171	140	55	99	197	140	124
	193	129	136	102	195	132	131
	140	198	123	98	151	141	129
	161	155	116	65	212	149	122
	177	139	133	82	222	125	136
	237	186	163	138	162	123	150
	202	173	174	96	160	122	118
柜台 C	135	114	134	64	159	159	147
	122	119	72	50	123	120	139
	134	128	106	74	182	159	142
	184	140	136	88	183	162	133
	170	99	64	58	143	126	128
	152	128	70	42	170	149	124
	123	127	76	80	159	133	110
	152	143	140	107	115	140	110
	194	152	146	139	147	140	111
	162	138	133	94	141	141	128
							105
							101

由表3分析得出,该市场采光系数及照度均匀度实测值与模拟值分别为 $3.03/3.13$, $0.32/0.35$,其误差率为3.1%、9.9%,均小于10%,表明模拟结果可靠性较强。依据表3数据进行误差分析,得到相应哑铃图,如图2所示。

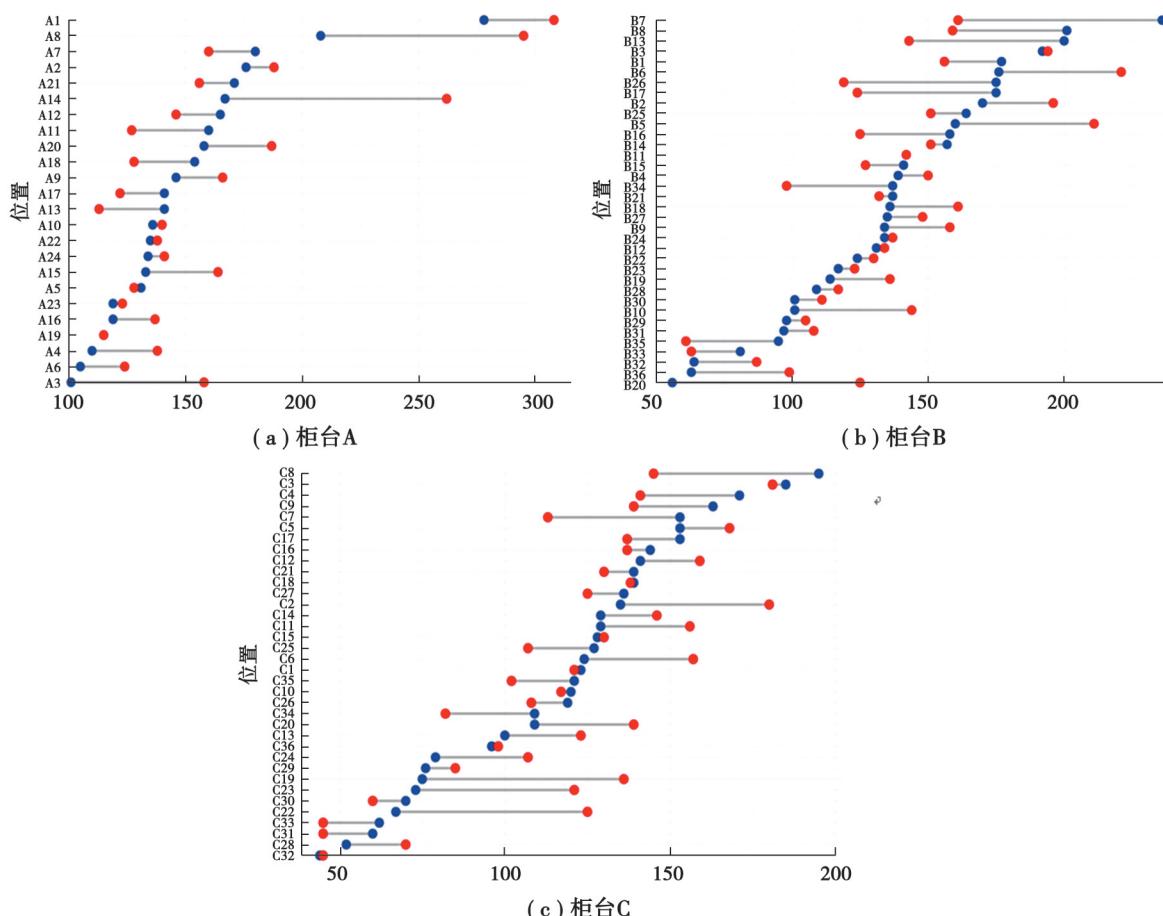


图2 实测与模拟误差分析

Fig.2 Error analysis of measurement and simulation

在图2实测与模拟误差分析中,两点间线段越长表示误差越大,而测点A8、A14、B7、B13、B20、C7、C8、C19、C22等存在较大误差的主要原因是:1)菜场室内装饰材料老化导致反射系数降低;2)测点周围商户室内外照明灯具间接增加了柜台水平工作面照度的实测值。

同时,对基准模型进行仿真模拟,结果如表4所示。

表4 基准模型室内光环境模拟结果

Table 4 Indoor light environment simulation results of the benchmark model

光环境参数	参数意义	模拟值
采光系数(DF)	指全阴天状态下,室内直接或间接地接收天空漫射光而产生的照度与同一时刻室外无遮挡同一水平面上产生的天空漫射光照度之比	0.09
有效日光照度 (UDI)/%	为室内照度评价指标,是指对使用者有效范围内的年度日光照度占比	39.09
白昼眩光概率 (DGP)	是一种眩光度量标准,可以考虑到直射日光、镜面反射的对比度来检测眩光源	0.328
单位面积能耗 (EUI)/(kW·h·m ⁻²)	指单位面积内建筑物所消耗的能源量,是衡量一个建筑能源利用率高低的重要指标	12.57

由表4可得,基准模型室内采光系数为0.09,有效日光照度占比为39.09%,白昼眩光概率为0.328,建筑单位面积能耗为 $12.57\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。

4 双层天窗采透光系统多目标优化设计流程

4.1 传统天窗采光系统与双层天窗采透光系统

传统天窗采光虽能大幅提升室内光环境质量如图3(a)所示,但无法避免天窗开设造成的室内光热矛盾,文中利用控制天窗面积占比和半透光材料厚度来调整进入到内部空间中的光能总量,结合空气间层对光线的散射作用,达到改善大空间建筑深处的采光质量,同时调整空气间层厚度以增加结构层热阻,提升采透光系统的隔热、隔声、保温性能,降低建筑能耗^[13-14]。如图3(b)所示,双层天窗采透光系统简化模型可实现以天窗采光为主的大空间在优化室内光环境质量、降低建筑能耗的同时,还能为室内提供舒适的热湿环境。



图3 双层天窗采透光系统简化模型

Fig. 3 Simplified model of double-layer skylight light transmission system

研究选取的既有综合市场模型位于中国邯郸,属于典型的寒冷地区,夏季炎热,冬季寒冷,采暖及制冷设备使用率较高;同时,多目标优化的评价指标采用了与过去静态评价指标不同的动态评价指标,并对采透光系统的形态变化参数进行设置,动态采光评价方法能准确反映建筑物朝向、布局情况与全年太阳轨迹变化引起的室内光环境变化,综合考虑建筑其他物理环境评价指标,可在天窗面积增加与建筑光热矛盾中找到一种均衡^[15]。

由实测分析得出,该市场中副食、批发区域光环境质量良好,基本满足人体视觉舒适;而生鲜区采光均匀性差,照度均匀度及采光系数均未达到国家标准。所以,选择生鲜区进行多目标优化和结果评价及对比分析,并将单位面积能耗作为优化目标评价采透光系统降低能耗的效果。在尽可能提高有效日光照度(UDI)、降低白昼眩光概率(DGP)的情况下,降低建筑单位面积能耗(EUI),保留空气间层的隔声、隔热优势,根据消费者与摊贩在市场内部空间的行为活动、范围及频率,选择过道及柜台部分作为评价区域。

4.2 双层天窗采透光系统不同形态设定

双层天窗采透光系统对室内光环境的优化程度取决于天窗面积及半透光材料的透射系数,前者影响进入空气间层的光能总量,后者使自然光发生不规则散射后进入到建筑室内,以减少不舒适眩光出现的概率。由于自然光入射角的变化是三维的,进入空气间层的光能总量主要受到天窗面积占比(s)影响,但最终进入室内的自然光线会受到室内侧透光板厚度(d)及空气间层高度(h)的制约^[16-18]。面对同一方向的太阳入射光线,双层天窗采透光系统设置了3种天窗窗地比、3种空气间层高度、3种半透光材料厚度;将其组合为27种结构形态的采透光系统,并利用多目标优化求解其最优状态,电池组如图4所示。

传统天窗一般与建筑屋面结合,利用控制天窗面积来改善室内光环境质量,但总避免不了天窗开设面积的增加而造成的室温提升^[19],结合空气间层和室内侧透光板构建了双层天窗采透光系统参数化简易模型,并

设空间层高度、天窗窗地比和室内侧透光板厚度3个变量参数,其对应的基本形态及变化模式如图5所示。

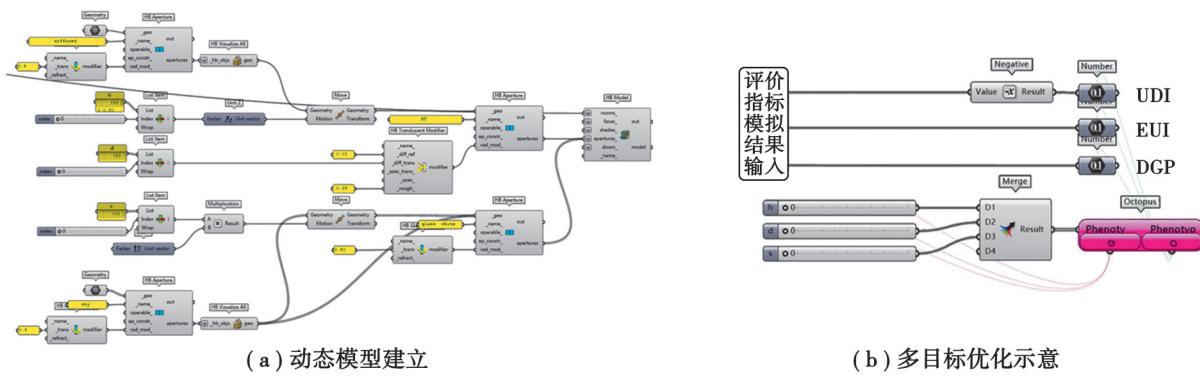


图4 动态模型及多目标优化电池组

Fig. 4 Dynamic model and multi-objective optimization battery pack

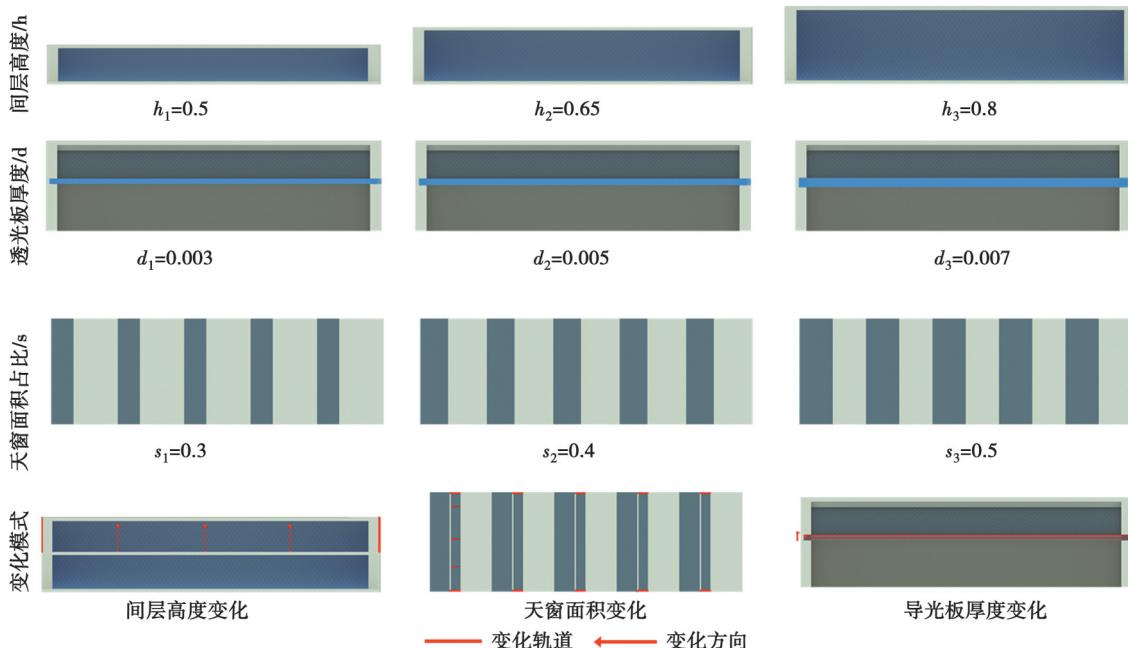


图 5 双层天窗采透光系统基本形态及变化模式

Fig. 5 Basic configuration and change mode of the double-layer skylight light transmission system

4.3 优化变量

研究设定天窗窗地比 s , 空气间层高度 h , 半透光材料厚度 d 为优化变量, 对优化变量进行参数设定, 如表 5 所示。

表 5 多目标优化参数设定

Table 5 Parameter setting of multi-objective optimization

双层天窗采透光系统变量参数	参数意义	取值	对应参数
h	间层高度/m	0.50, 0.65, 0.80	0, 1, 2
d	透光板厚度/m	0.003, 0.005, 0.007	2, 1, 0
s	天窗面积占比	0.3, 0.4, 0.5	0, 1, 2

4.3.1 天窗面积占比 s

改变天窗面积会直接影响空气间层接收的光能总量,但随着天窗面积的逐步增加其接收的辐射热也逐步增加,进而影响室内热环境,所以选择合理的天窗面积比显得格外重要。

4.3.2 空气间层高度 h

合理调节间层高度可有效控制天然光在空气中的不规则散射,并使天然光在传播过程中发生一定衰减,高效利用室内空间;根据《公共建筑吊顶工程技术规程》(JGJ345—2014)中对不上人吊顶的吊杆长度限制和要求,在不上人吊顶中,吊杆长度应小于1.0 m,结合所调研的菜市场内部布局及空间特征,将空气间层的高度设置为0.5~0.8 m。

4.3.3 室内侧透光板厚度 d

半透光材料的主要功能是使入射到空气间层的自然光均匀透射到建筑室内,提升内部空间的照度均匀度及有效日光照度占比,通过调整半透光材料厚度来控制其透射系数,从而改变材料的透射能力^[20]。

综上所述,建立综合市场多目标优化仿真模型,如图6所示,依据调研情况及相关规范设置主要参数,例如,天窗玻璃透射系数、饰面材料反射系数、城市气象数据、模拟时间段、网格分析尺寸等。

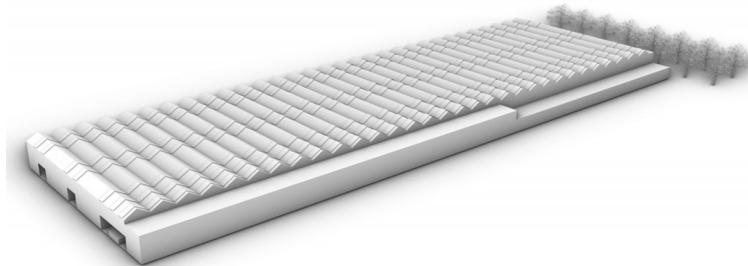


图6 仿真模型

Fig. 6 Simulation model

4.4 目标函数

对双层天窗采透光系统形态结构进行多方位约束,目的是筛选出既创造适宜的建筑光环境、降低建筑能耗又保持良好的隔声、隔热性能的采透光系统组件形态。

4.4.1 白昼眩光概率(DGP)

由于综合市场层高较高且人眼与天窗、高侧窗形成的视觉仰角较大,生鲜区内部不宜使用不舒适眩光指数(DGI)对其室内眩光出现概率进行评价,选择白昼眩光概率(daylight glare probability, DGP)作为其眩光评价指标^[21]。DGP是一种眩光度量标准,可以考虑到直射日光、镜面反射的对比度来检测眩光源,相较于UGR、DGI其评价体系更加全面,评价范围如表6所示。

表6 光环境动态评价

Table 6 Dynamic evaluation of light environment

指标	含义	范围	人体感受	指标	含义	范围	人体感受
DGP	白昼眩光概率	<0.3	无法感知	UDI	有效日光照度占比	<100 lx	较暗
		0.35~0.4	可感知			100~2 000 lx	舒适
		0.4~0.45	令人眩目			>2 000 lx	较亮

4.4.2 有效日光照度(UDI)

随着天窗面积和半透光材料厚度及透射系数的变化,导致的照度过高或过低均会引起人眼不舒适,为了

使评价结果更加准确,选择有效日光照度(useful daylight illuminance, UDI)为室内照度评价指标^[21]。UDI是指对使用者有效范围内的年度日光照度。常用的UDI分为3类,如表6所示。室内照度值过高或过低均会产生不舒适眩光,文中选取照度值在100~2 000 lx的时间百分比作为评价指标。

4.4.3 单位建筑面积能耗(EUI)

由于天窗窗地比的变化会引起建筑室内光热矛盾而导致能量消耗的异常,将单位面积能耗(energy use intensity,EUI)作为室内能耗评价的指标^[22]。EUI指单位面积内建筑物所消耗的能源量,是衡量一个建筑能源利用率高低的重要指标,其数值越小,建筑物能耗越小、节能越佳。

综上所述,双层天窗采透光系统的优化目标可以确定为白昼眩光概率最小值、有效日光照度占比最大值、单位面积能耗最小值,但由于Octopus程序只能进行最小化命令,则目标函数分别为 $F_{DGP}(X)$ 、 $-F_{UDI}(X)$ 、 $F_{EUI}(X)$ 。

4.5 优化流程

根据变量参数的数值范围在仿真平台上建立了动态模型并设置对应的滑竿参数,同时接入单位面积能耗、有效日光照度占比、白昼眩光概率计算电池组,得到实时变化的多参数建筑模型并计算其相应的EUI、UDI、DGP等值,将其接入到Octopus多目标优化电池组O端,将变量参数接入到电池组G端后,进行多目标优化,并得到相应帕累托前沿解集,其优化流程如图7所示。

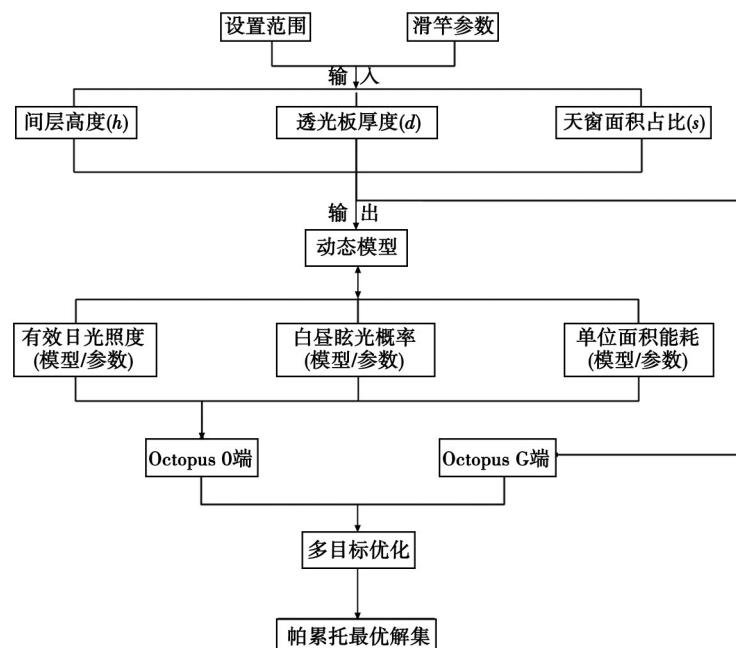


图7 多目标优化流程

Fig. 7 Multi-objective optimization process

4.6 模拟结果的收敛性判断

对计算结果进行收敛性评价,图8是双层天窗采透光系统多目标优化计算进程平稳程度的示意图。可以看出,所有解分布较为广泛,最优解集对于函数的权衡程度较好,总体分布较为符合优化预期。从第100代开始,深灰色的部分到后期基本没有波动,说明经过100代的优化模拟之后,3个优化的目标值对应的影响参数计算已经趋于稳定,结果收敛,表明其非支配解集已经出现^[23]。

4.7 优化结果分析

通过100代的计算之后,求解面板趋于稳定,如图9所示。由图可知,采透光系统所有组合形态模拟结果DGP为0.035~0.07;UDI为40.90%~44.06%;EUI为10.01~11.61 kW·h/m²。

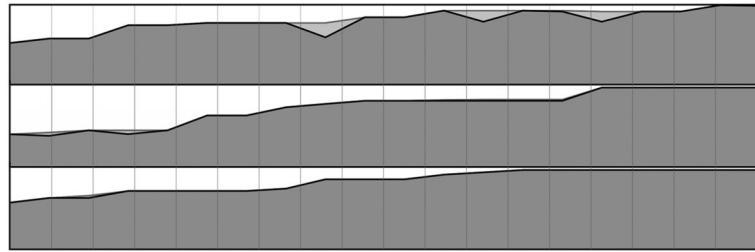


图 8 收敛图

Fig. 8 Convergence diagram

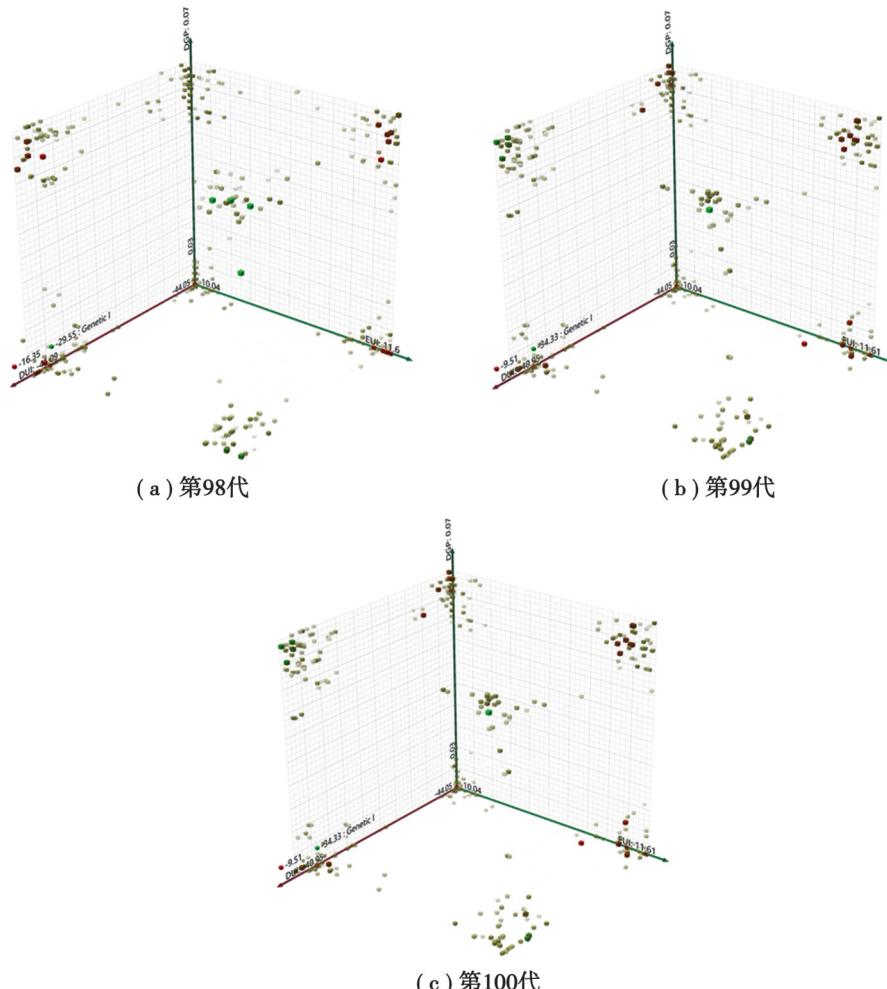


图9 求解面板迭代情况

Fig. 9 Solving panel iteration

使用 show 2D Front Line 功能显示每一代的帕累托前沿,根据其建筑能耗、不舒适眩光指数提取出 5 组数据的第 100 代帕累托最优解集,采透光系统构件状态及模拟结果如表 7 所示。

使用双层天窗采透光系统的目的是提高室内光舒适性,降低建筑照明能耗,选取出模拟结果中 DGP 值较小且均处于 0.35 以下的采透光系统组合,参数设定及模拟结果如表 7 所示。由表可知,每组 UDI、EUI 值相较基准模型优化程度明显。

4.7.1 室内光环境优化分析

架设双层天窗采透光系统前后建筑室内光环境质量有所改善,采光系数提高了 $23.12\% \sim 50.98\%$,白昼眩光概率降低了 $-7.57\% \sim 46.96\%$ 。对照度分布、有效日光照度、采光系数、白昼眩光概率进行可视化,如图10

所示。由图可知,市场生鲜区过道及柜台的照度水平、采光系数得到一定水平提升,同时均匀度更佳。

表7 最优解集构件状态及模拟结果

Table 7 Optimal solution set component states and simulation results

编号	$S(-)$	d/m	h/m	UDI	DGP	EUI/(kW·h·m ⁻²)	DF
1	0.3	0.005	0.8	43.38	0.04	10.254	4.18
2	0.5	0.003	0.5	41.07	0.054	11.402	4.77
3	0.5	0.005	0.5	42.06	0.048	10.101	4.41
4	0.3	0.003	0.5	42.82	0.056	10.586	4.44
5	0.3	0.007	0.65	43.91	0.035	10.295	4.34

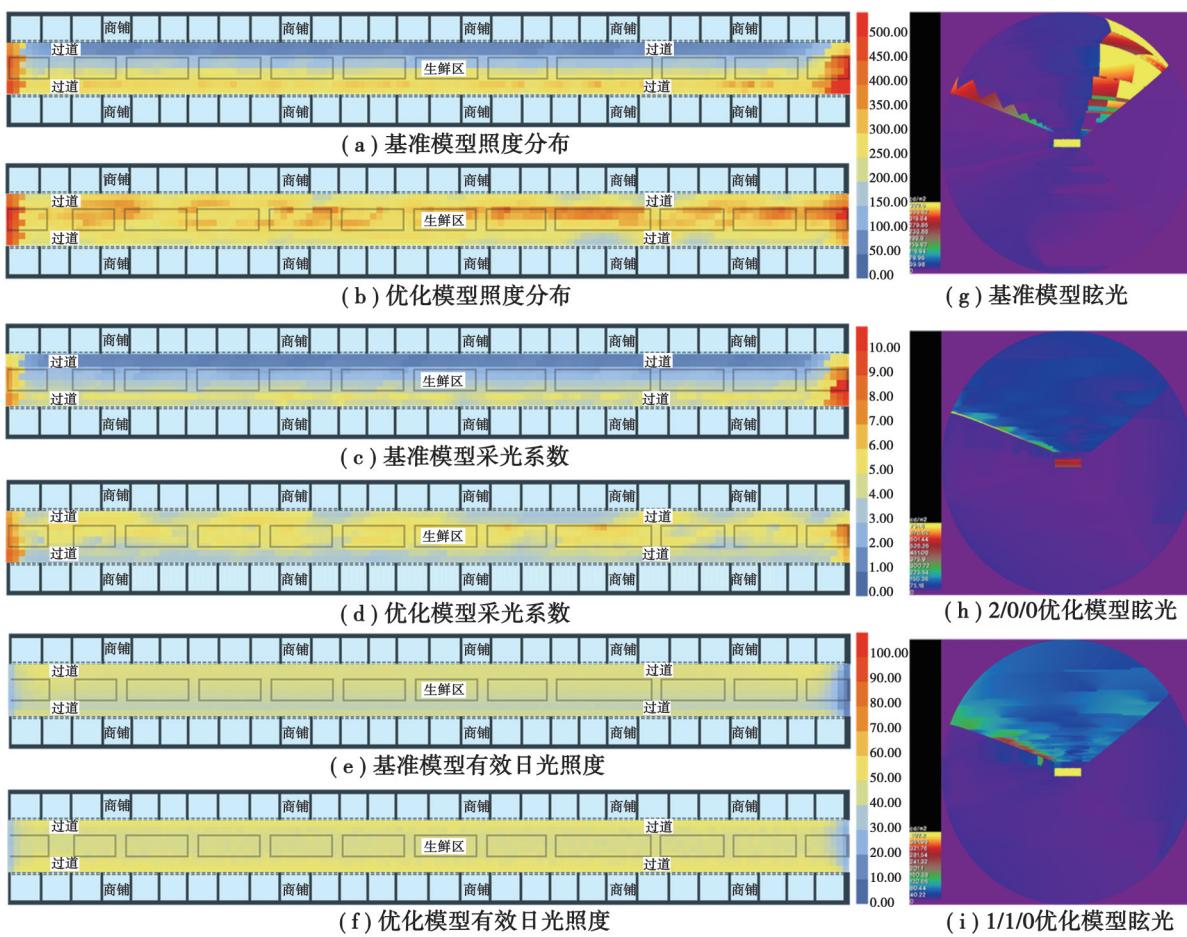


图10 综合市场室内光环境可视化

Fig. 10 Indoor light environment visualization of the comprehensive market building

4.7.2 能耗分析

双层天窗采透光系统能充分利用自然光,将其引入建筑室内改善光环境质量,降低建筑照明能耗^[24],但增加天窗窗地比、更换窗户材料会导致室内采暖制冷能耗增加。该系统充分利用空间间层保温、隔热及通风特性,抑制了采暖制冷能耗的提升,其单位面积能耗相较基准模型降低了9.29%~21.77%。

4.7.3 南北向出入口及其背景面亮度比优化分析

基于对优化模型生鲜区南北向出入口及其背景面亮度进行仿真模拟,得出当 $h=0.8\text{ m}$ 、 $d=0.005\text{ m}$ 、 $s=0.3$ 时,优化效果最佳,亮度比平均值分别为 $433.48/48.79\text{ cd/m}^2$ (北向)和 $775.08/73.61\text{ cd/m}^2$ (南向),相比基准模型亮度比分别降低了61.45%(北向)和45.10%(南向),表明双层天窗采透光系统可有效降低综合市场门洞

及其背景面亮度比,有利于减少市场内部眩光的出现。

当空气间层厚度为 0.8 m,半透光材料厚度为 0.005 m,天窗面积占比为 0.3 时,综合市场室内光舒适及能耗优化效果最佳,室内有效日光照度占比提升了 10.97%,白昼眩光概率降低了 39.40%,同时生鲜区出入口及其背景面亮度比得到有效改善,单位面积能耗降低了 18.42%。

4.7.4 变量参数与评价指标相关性分析

利用 Hiplot 平台对得到的变量参数与评价指标数据集进行相关性分析,通过散点图进一步判断变量参数与评价指标之间的相关关系,如图 11 所示,其中 3 个相关性模型的 P 值均小于 0.05,表明模型信号样本不存在偶然性,模拟结果可靠^[25]。模型显示,在双层天窗采透光系统中,天窗窗地比、室内侧透光板厚度、空气间层高度与有效日光照度、白昼眩光概率及采光系数之间存在相关关系,且相关关系明显。

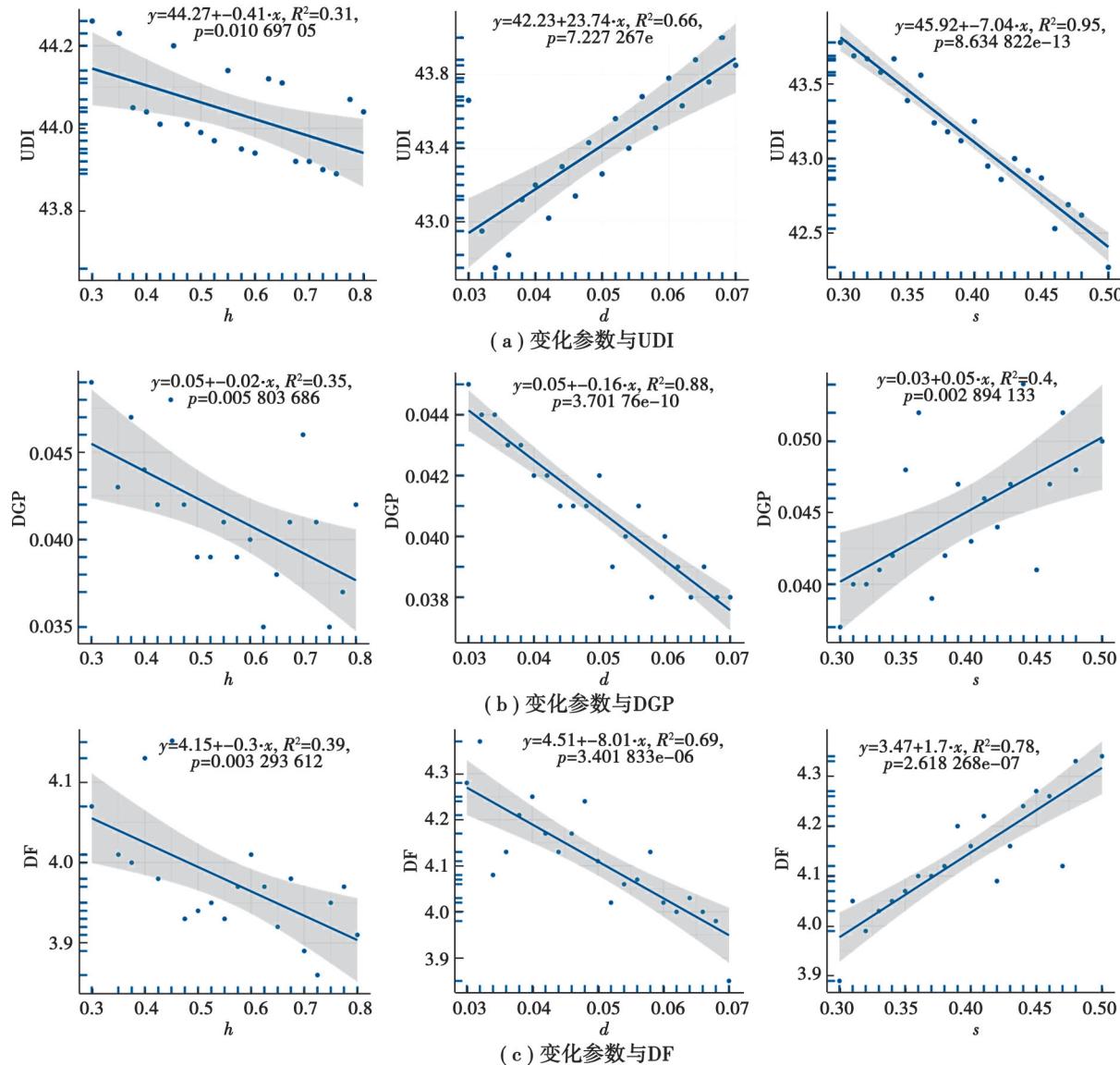


图 11 相关性分析示意

Fig. 11 Correlation analysis

1)在室内有效日光照度的相关性模型中,拟合优度分别为 0.95、0.66、0.31。天窗窗地比与有效日光照度负相关,模型表现较好;透光板厚度与有效日光照度正相关,但模型表现一般;而空气间层厚度与有效日光照度负相关,模型表现较差。

2)白昼眩光概率的相关性模型中,拟合优度分别为 0.35、0.88、0.40。空气间层高度、透光板厚度与白昼

眩光概率负相关,天窗窗地比与之正相关,但透光板厚度模型表现较好,空气间层高度和天窗窗地比模型表现较差。

3)采光系数的相关性模型中,拟合优度分别为0.39、0.69、0.78。空气间层高度、透光板厚度与白昼眩光概率负相关,天窗窗地比与之正相关,但透光板厚度和天窗窗地比模型表现较好,空气间层高度模型表现较差。

综上所述,天窗窗地比与有效日光照度、透光板厚度与白昼眩光概率之间负相关且相关性较强,而空气间层高度与采光系数、有效日光照度及白昼眩光概率之间负相关,但相关关系较弱。

5 导透光系统构造设计及经济性分析

5.1 构造设计

该系统由屋面、室外侧天窗、空气间层、反射材料、室内侧透光板及间层通风口等构成,如图12所示。双层天窗采透光系统将采光天窗与空气间层相结合,有利于降低建筑构造成本、简化施工,同时融合天窗和空气间层在隔热、隔声、改善光环境方面的优势;非透光区域内侧铺设反射系数大、辐射系数小的材料,可有效地减少采透光构件的热交换,达到夏季隔热的效果。

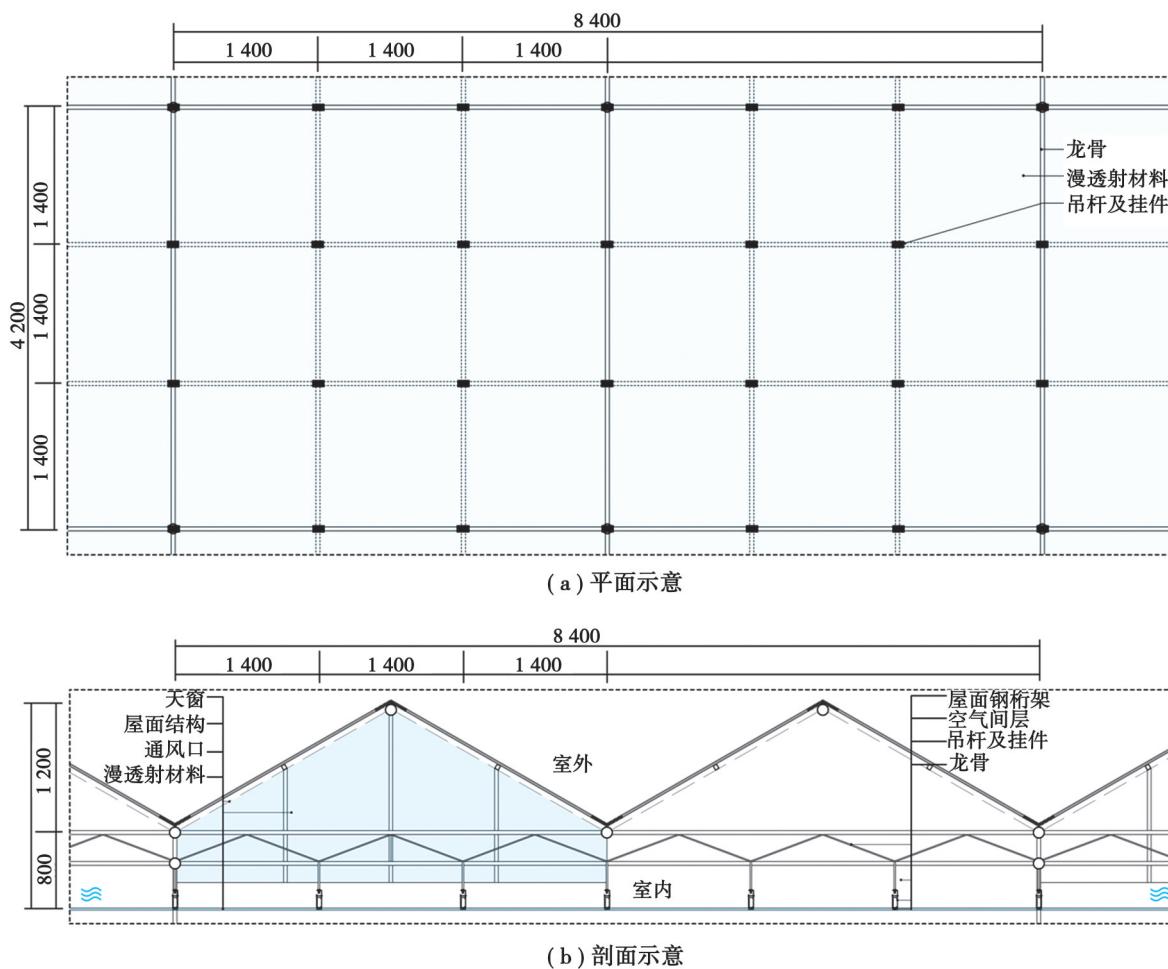


图 12 双层天窗采透光系统构造示意

Fig. 12 Structure of double-layer skylight light transmission system

5.2 经济性分析

根据河北政府采购网关于人工及改造材料的采购公示,对该综合市场双层天窗采透光系统改造成本进行粗算,如表8所示。由表8可知,以熟练工人工作效率为例,工人每天完成 10 m^2 吊顶,每天运输及其他费用为200元,则该系统改造成本为 $371\text{ 元}/\text{m}^2$,小于 $500\text{ 元}/\text{m}^2$ 。依据河北省商务厅关于印发《河北省2022年农贸

(菜)市场提档升级实施方案》的通知,省市级政府均会给予一定程度改造补贴;同时对优化方案进行能耗模拟及分析得出,双层天窗采透光系统的应用可使建筑单位面积能耗降低18.42%。

表8 双层天窗采透光系统改造成本粗算

Table 8 Rough calculation of renovation cost of double-layer skylight light transmission system

序号	材料名称	单价/元	工程量 (以每m ² 为例)	材料总费用		其他费用/元
				人工	运输及其他	
1	吊顶主龙骨	21.00/m				
2	吊顶次龙骨	18.00/m				
3	吊筋	25.00/m	3	321/m ²	300/日	200/日
4	吊顶配件	12.00/套				
5	吊顶边线	31.00/m				

综上可知,在地方政府对农贸(菜)市场提档升级的大力支持下,结合双层天窗采透光系统改造成本低、建筑能耗小的优势,优化方案的可行性、经济性和普适性得到提升。

6 结束语

文中从建筑能耗控制和消费者采光需求出发对邯郸既有综合市场进行调研及实测,借助Grasshopper平台建立其多目标优化仿真模型,将建筑性能模拟与遗传算法耦合,结合光舒适和建筑能耗评价指标选择出采透光系统的最优方案并与基准模型对比,将变量参数及评价指标数据集进行相关性分析,得出以下结论。

1)通过调研及实测分析得出,以天窗采光为主的邯郸市自强综合市场生鲜区存在室内光环境舒适度低、装饰材料老化、建筑能耗高等问题。

2)以有效日光照度、白昼眩光概率及单位面积能耗为评价指标对双层天窗采透光系统进行多目标寻优,筛选出相对最优状态,并将优化结果与基准模型对比:当空问层厚度为0.8 m,半透光材料厚度为0.005 m,天窗面积占比为0.3时,综合市场采透光系统优化效果最佳,室内有效日光照度占比提升了10.97%,白昼眩光概率降低了39.40%,南北向出入口及其背景面亮度分别降低了61.45%和45.10%,单位面积能耗降低了18.42%。

3)根据变量参数与评价指标的相关性分析得出,空问层高度与采光系数、有效日光照度及白昼眩光概率之间负相关,但相关性较弱;而天窗面积比与室内有效日光照度负相关、半透光材料厚度与白昼眩光概率正相关,且相关性较强。

4)对该系统进行改造成本粗算得出,双层天窗采透光系统改造成本低于500.00元/m²,结合各地方政府对于农贸(菜)市场提档升级的支持与奖励,优化方案的可行性、经济性及普适性得到一定程度增强。

研究表明,合理控制天窗窗地比、半透光材料厚度及空问层高度可以有效改善室内光环境质量,降低建筑能耗,为以天窗采光为主的大空间公共建筑室内光环境设计与改造提供新的构件形态。由于受时间、精力、资金等方面的限制,部分问题尚待进一步深入研究。在基准模型模拟中忽略了材料老化、积尘对模拟结果的影响;在相关性分析中,只分析了单个变量参数与各评价指标之间的相关性,未解释3个参数共同作用下对评价指标的影响权重及相关关系;未对双层天窗采透光系统的优化方案进行实际应用分析。

参考文献

- [1] 翁季,文怀伟,吴云涛,等.菜市场光环境对农产品颜色感知的影响[J].西部人居环境学刊,2023,38(2): 92-98.
Weng J, Wen H W, Wu Y T, et al. The impact of luminous environment in food markets on color perception of agricultural products[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2023, 38(2): 92-98. (in Chinese)
- [2] 范征宇,徐若姿,刘加平.夏热冬暖地区中小型铁路客站候车厅自然采光优化设计:以海口某高铁站为例[J].建筑节能(中英文),2023,51(7): 1-7.

- Fan Z Y, Xu R L, Liu J P. Optimal design of natural daylighting for waiting halls of small and medium-sized railway stations in hot summer and warm winter area: taking a railway station in Haikou as an example[J]. Building Energy Efficiency, 2023, 51(7): 1-7. (in Chinese)
- [3] Irakoze A, Kim K H. The impact of ceiling geometry and its sensitivity on daylighting and energy performance of skylights[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 505(1): 012011.
- [4] El-Abd W, Kamel B, Afify M, et al. Assessment of skylight design configurations on daylighting performance in shopping malls: a case study[J]. Solar Energy, 2018, 170: 358-368.
- [5] Tükel M, Mumcuoğlu K, Arıcı M, et al. Analysis of fluid flow and heat transfer characteristics in multiple glazing roofs with a special emphasis on the thermal performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 694-703.
- [6] 赵南森. 铁路客站候车厅高大空间半透明薄膜光伏天窗自然采光优化设计研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- Zhao N S. Daylighting oriented research on optimization design of natural lighting of translucent photovoltaic skylights in waiting hall of railway passenger stations waiting hall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. (in Chinese)
- [7] 蒋涛, 路洲. 高架铁路客运站平天窗的多目标优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(7): 13-24.
- Jiang T, Lu Z. Multi-objective optimization of flat skylights in the elevated railway station[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(7): 13-24. (in Chinese)
- [8] 周洪涛, 徐阳. 天窗方位对长春高校教学楼中庭光环境影响的模拟分析[J]. 低温建筑技术, 2022, 44(2): 30-33.
- Zhou H T, Xu Y. Simulation analysis of the effect of skylight orientation on the light environment of the atrium of Changchun university teaching building[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2022, 44(2): 30-33. (in Chinese)
- [9] 丁建华, 吕沐容, 邹欣怡, 等. 高校专业绘图空间双侧外窗几何参数与照明的碳排放量影响研究[J]. 建筑节能(中英文), 2023, 51(8): 32-37.
- Ding J H, Lyu M R, Zou X Y, et al. Influence of geometric parameters of opposing exterior windows on carbon emissions from lighting in professional drawing space of universities[J]. Building Energy Efficiency, 2023, 51(8): 32-37. (in Chinese)
- [10] Mondal A, Ghosh K. A study on the Energy Efficient Interior Lighting System of a Heritage Building[J]. International Journal of Engineering Technology Science and Research. 2018, 5(1): 1071-1082.
- [11] 刘德利, 王科奇, 闫海燕. 基于 Octopus 和 SVMs 的住区强排多目标优化设计研究[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(11): 21-27.
- Liu D L, Wang K Q, Yan H Y. Research on multi-objective optimization design of forced layout in residential area based on octopus and SVMs[J]. Building Energy Efficiency, 2022, 50(11): 21-27. (in Chinese)
- [12] Dino I G, Üçoluk G. Multiobjective design optimization of building space layout, energy, and daylighting performance[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(5): 04017025.
- [13] 陈庆英, 夏大为, 黄宇, 等. 透光可调围护结构研究发展综述及前景展望[J]. 建筑科学, 2023, 39(6): 256-265.
- Chen Q Y, Xia D W, Huang Y, et al. A review and prospect on research progress of adjustable transparent envelope[J]. Building Science, 2023, 39(6): 256-265. (in Chinese)
- [14] 张燚, 杨柳, 罗智星. 气凝胶玻璃住宅夏季室内光热环境研究与对策分析[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(9): 40-50.
- Zhang Y, Yang L, Luo Z X. Indoor light thermal environment and strategy analysis of aerogel glass residential building in summer[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(9): 40-50. (in Chinese)
- [15] 石峰, 陈艺丹. 基于采光性能优化的可变建筑表皮生成研究: 以厦门地区既有办公建筑为例[J]. 华中建筑, 2021, 39(5): 56-62.
- Shi F, Chen Y D. The generation of dynamic building skin based on the optimization of daylighting performance: taking the office buildings in Xiamen as an example[J]. Huazhong Architecture, 2021, 39(5): 56-62. (in Chinese)
- [16] 黄海静, 董张. 传统民居光环境实测与模拟优化: 以黔东南丹寨县黄土寨苗族民居为例[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(9): 17-30.
- Huang H J, Dong Z. Measurement and simulation optimization of light environment of traditional dwellings: the case study of Miao dwelling in Huangtu Village, Danzhai County, Southeast Guizhou[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(9): 17-30. (in Chinese)

- [17] Lyu Y J, Wu H J, Liu Y C, et al. Quantitative research on the influence of particle size and filling thickness on aerogel glazing performance[J]. Energy and Buildings, 2018, 174: 190-198.
- [18] Sun Y Y, Wu Y P, Wilson R. A review of thermal and optical characterisation of complex window systems and their building performance prediction[J]. Applied Energy, 2018, 222: 729-747.
- [19] 苏蓬石. 兰州老旧小区被动式建筑改造策略模拟[J]. 城市建筑, 2023, 20(3): 24-28.
Su P S. Simulation of passive building reconstruction strategy in old residential communities in Lanzhou[J]. Urbanism and Architecture, 2023, 20(3): 24-28. (in Chinese)
- [20] Manz H, Egolf P W, Suter P, et al. TIM – PCM external wall system for solar space heating and daylighting[J]. Solar Energy, 1997, 61(6): 369-379.
- [21] Liu D M, Sun Y Y, Wilson R, et al. Comprehensive evaluation of window-integrated semi-transparent PV for building daylight performance[J]. Renewable Energy, 2020, 145: 1399-1411.
- [22] Kangazian A, Emadian Razavi S Z. Multi-criteria evaluation of daylight control systems of office buildings considering daylighting, glare and energy consumption[J]. Solar Energy, 2023, 263: 111928.
- [23] 孙澄, 韩昀松, 王加彪. 建筑自适应表皮形态计算性设计研究与实践[J]. 建筑学报, 2022(2): 1-8.
Sun C, Han Y S, Wang J B. The research and practice of computational design of the form of self-adaptive building fa? des[J]. Architectural Journal, 2022(2): 1-8. (in Chinese)
- [24] 张兴艳, 严建伟. 高寒地区铁路站房天然采光模拟及其优化设计[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(5): 52-66.
Zhang X Y, Yan J W. Study on natural lighting simulation and optimization design of railway station in alpine region[J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(5): 52-66. (in Chinese)
- [25] 陈启宁, 吴蔚. 基于视觉与非视觉效应的教室采光多目标优化[J]. 照明工程学报, 2020, 31(6): 61-68, 80.
Chen Q N, Wu W. Multi-objective optimization of classroom lighting based on visual and non-visual effects[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, 31(6): 61-68, 80. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)