

耦合能耗与自然采光的北方航站楼值机厅 外窗比率优化研究

王超,赵伟峰,陈宇,孙玉廷

(沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究北方地区航站楼值机厅的围护结构外窗比率与能耗、自然采光的关联特征并提出优化途径.方法 以桃仙机场为例建立典型参数化模型,通过数字模拟技术对外窗比率的能耗和自然采光性能进行关联敏感度分析,通过耦合二者的模拟结果筛选出较优的外窗比组合.结果 天窗比与能耗的关联敏感度大约为北窗比的9~10倍,而北窗比与能耗的关联敏感度大约为南窗比的2~5倍;天窗比与自然采光的关联性远远高于侧窗比,在天窗比 <0.05 的情况下,提出对南窗比和北窗比之和的控制值;通过对能耗和采光的耦合分析,得出天窗比为0.02~0.05的35个外窗比优化组合,并进一步筛选出10个最低能耗外窗组合和3个兼顾高视线通透的外窗组合.结论 天窗比对能耗和自然采光性能的影响最为显著,在设计中应控制天窗比的取值范围,并根据视线通透性择优选择侧窗比组合,满足自然采光性能的同时使能耗处于较低的水平.

关键词 北方地区;航站楼值机厅;能耗模拟;自然采光模拟;外窗比率

中图分类号 TU248.6

文献标志码 A

Study on Optimizing Exterior Window Ratio of North Terminal Check-in Hall with Coupled Energy Consumption and Natural Lighting

WANG Chao, ZHAO Weifeng, CHEN Yu, SUN Yuting

(School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The relationship between the ratio of the external window of the envelope structure and energy consumption and natural lighting in the check-in Hall of the terminal building in the northern region is studied to put forward the optimization approach. Taking Taoxian Airport as an example, a typical parameterized model is established. The energy consumption and natural lighting performance of window ratio are analyzed by digital simulation technology, and a better combination

收稿日期:2019-07-10

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0700200);住房和城乡建设部科学技术计划项目(2017-K1-007)辽宁省高等学校基本科研青年项目(LJZ2017024);辽宁省自然科学基金面上项目(20180550981)

作者简介:王超(1984—),男,博士研究生,主要从事大空间建筑绿色设计及数字建筑技术方面研究.

of window ratio is selected by coupling the simulation results. The correlation sensitivity between skylight ratio and energy consumption is about 9-10 times that of North window ratio, while the correlation sensitivity between North window ratio and energy consumption is about 2-5 times that of south window ratio. The correlation between skylight ratio and natural lighting is much higher than that of side window ratio. When the skylight ratio is less than 0.05, the control value of the sum of south window ratio and North Window ratio is proposed. Through the coupling analysis of energy consumption and lighting, 35 combinations with window ratio of 0.02-0.05 were optimized. And 10 combinations with minimum energy consumption and 3 combinations with high line-of-sight penetration were further screened out among the 35 combinations. Skylight ratio has the most significant influence on energy consumption and natural lighting performance. The range of skylight ratio should be controlled firstly, and the combination of side window ratio should be selected according to line of sight permeability, which can satisfy the natural lighting performance while keeping the energy consumption at a lower level.

Key words: northern region; airport terminal check-in hall; energy consumption simulation; natural lighting simulation; exterior window ratio

随着人们越来越多地选择民用航空作为交通出行方式,机场航站楼的绿色设计日益受到重视。在我国北方地区,寒冷的气候条件使航站楼能耗负荷处于较高水平。据统计,国内机场航站楼平均电耗几乎达到商业办公建筑的两倍^[1]。值机厅作为航站楼的核心组成部分,其能耗与采光问题极具代表性。值机厅空间体量较大,其局部高度一般在10 m以上,大型值机厅很多甚至超过了20 m,导致其单位平米能耗和单位旅客运行能耗高居不下。围护结构的通透性使窗体成为建筑热工性能的薄弱环节。目前国内很多北方航站楼采用全玻璃幕墙导致开窗比例较高,屋顶的天窗集中且面积过大,造成了冬季能耗散失严重^[2-8]。与此同时,窗体设计的不合理也造成室内局部区域采光舒适情况较差,许多值机厅空间由于进深较大造成外围采光过高而内部仍需要人工采光补充照明的现象,造成了不必要的能源浪费^[9-12]。近年来,随着数字技术在绿色建筑设计中的广泛应用,建筑能耗与采光的性能模拟从单一性能分析和评价逐渐转向多目标的耦合研究发展。彭鹏等^[13]利用Equest软件通过对办公建筑的全天模拟,探讨了建筑窗体参数对能耗与采光的影响关系。冯乾乾等^[14]采用Ecotect软件对夏热冬冷地区

住宅的能耗采光性能综合分析,得出了外窗选择的建议和优化方法。石铁矛等^[15]阐述了Radiance与EnergyPlus在同平台运行全年动态采光与总能耗模拟方法。闫利^[16]采用EnergyPlus平台对中小型火车站的采光与空调能耗性能关联分析,提出了建筑开窗合理性的评判方法。笔者针对航站楼值机厅围护结构窗体比率与能耗和采光的紧密关联性,利用Grasshopper参数化平台的Ladybug和Honeybee建筑性能模拟工具,对航站楼值机厅能耗和采光进行全年动态模拟分析,阐释其围护结构外窗比率与能耗、采光的关联规律,提出不同外窗比率组合的优化方法,为我国的航站楼绿色设计实践提供合理依据。

1 典型信息模型构建

1.1 几何模型的确定

北方地区航站楼值机厅有诸多共同特征,笔者对省会和直辖市9个城市的航站楼进行实地调研,对其值机厅的基本建筑信息进行整理分析(见表1)。通过对其数据信息的分布状态进行图示化分析(见图1),桃仙机场T3航站楼值机厅的建筑数据在9个城市的航站楼中处于平均位置,符合北方航站楼值机厅建筑的一般特征。因此,笔者将桃仙

机场航站楼值机厅作为典型模型的参照对象,建立典型建筑信息模型。

表 1 北方航站楼值机厅数据统计

Table 1 Data statistics of check-in Hall of North terminal

样本序号	航站楼名称	建筑面积/万 m ²	值机厅			平面比例
			长/m	宽/m	平均高度/m	
1	北京首都机场 T3B	38.7	540	120	30.9	1/4.50
2	太原武宿国际机场	8.08	184	82	20.5	1/2.45
3	西安咸阳国际机场 T2	35.0	348	144	22.5	1/2.42
4	济南遥墙国际机场	11.0	488	101.5	23	1/4.81
5	沈阳桃仙国际机场 T3	24.8	432	120	20	1/3.60
6	天津滨海国际机场 T1	24.8	300	110	25	1/2.73
7	哈尔滨太平国际机场 T1	13.52	275	115	23	1/2.39
8	石家庄正定国际机场 T1	13.9	325	118	18	1/2.75
9	郑州新郑国际机场	48.6	546	248	28	1/4.54

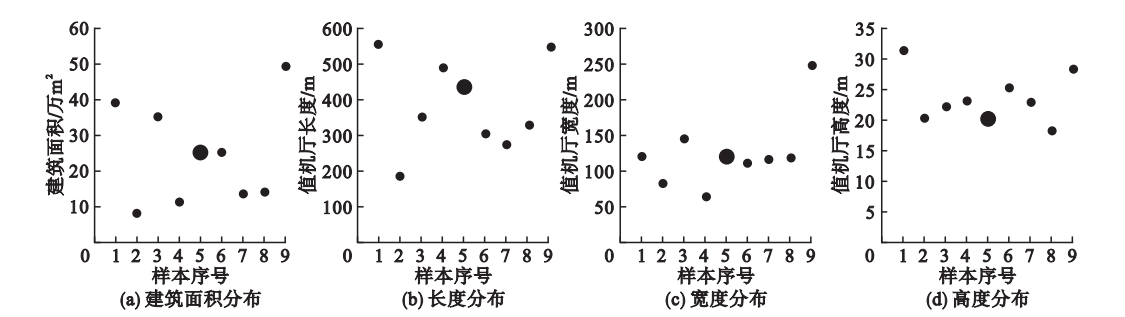


图 1 北方航站楼值机厅数据分布

Fig. 1 Data distribution of check-in Hall of North terminal

国内航站楼值机大厅有 80% 的平面形式为矩形. 根据模拟的需要, 笔者将桃仙机场 T3 航站楼值机厅典型模型形体简化为矩形体, 并确定其形体的长宽高为 432 m × 120 m × 20 m. 笔者以沈阳地区的气象参数作为模拟的气候条件, 以建筑长边为正南向为例进行模拟。

1.2 模拟参数的设定

1.2.1 围护结构参数设置

根据《公共建筑节能设计标准》(GB50189—2015)中关于严寒 C 区甲类公共建筑围护结构热工性能的要求, 设定其外墙和屋面的平均传热系数, 外窗的传热系数、太阳得热系数、可见光透射比则根据设计经验参照 LOW - E 双层玻璃幕墙的相关指标

确定(见表 2)。

表 2 模型围护结构热工参数设置

Table 2 Thermal parameter setting of envelope

位置	传热系数/ (W·m ⁻²)	太阳得 热系数	可见光 透射比
外墙	0.43	—	—
屋面	0.35	—	—
外窗	2.00	0.4	0.45

由于值机大厅一般位于航站楼顶层的平面中心部位, 其两侧与底面不直接与室外接触, 为了排除其他空间的热传递对值机厅的模拟产生干扰, 将典型模型的东西侧界面和底面分别设置为热工绝缘墙体和热工绝缘楼板(见图 2)。

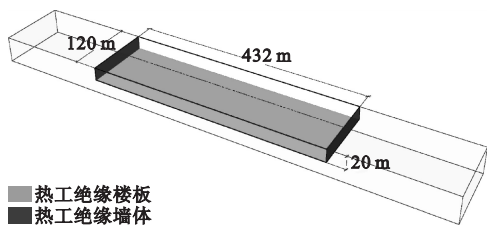


图2 围护结构界面设置

Fig. 2 Interface parameter setting of envelope

1.2.2 空调系统参数设置

参考《空气调节设计手册》的相关参数,将值机厅夏季室内空调设计温度设为26℃,冬季采暖温度设为20℃.笔者采用理想空气系统进行能耗模拟,仅对建筑全年采暖、制冷、照明和设备的总能耗负荷进行分析,排除因机组能耗效率不同、管线输送能耗损失以及不同风口末端形式等对能耗模拟结果的影响,利于针对围护结构进行直观的能耗与采光关联分析.根据沈阳地区的气候条件,将夏季制冷时间设置为6月1日至8月31日,冬季采暖时间设置为11月1日至次年3月

31日,并假设过度季不计算空调能耗,完全依靠自然通风调节温度.

1.2.3 运行人因参数设置

航站楼值机大厅的使用频率同航班的离港时间有着密切的关系,根据航空局官方统计资料,2018年1月至2018年6月沈阳桃仙机场T3航展楼出港航班平均每日的离港时刻分布如图3所示.上午6:00客机陆续起飞,因需要办理手续、托运以及安检的要求,值机厅需提前1h左右开始运行,上午7:00至9:00客流量陡然增加,出现航班早高峰.整个下午航班数量较多,直到晚9:00点之后,出行人数迅速减少,凌晨0:00~6:00几乎没有客运航班起降.据此估算值机厅人员分布状态绘制时间曲线(见图4).同时设定室内最大人员密度0.2人/m²,人员平均代谢量120W/人,设备密度8W/m²,照明负荷密度15.0W/m²,夜间照明开启时间设置为18:00点至次日早6:00点.

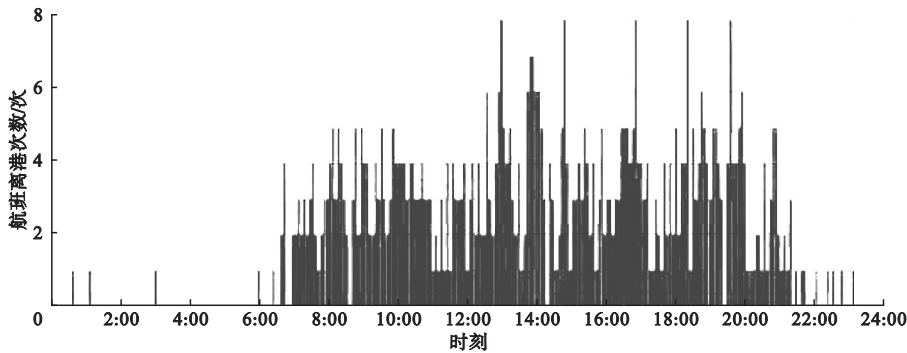


图3 沈阳桃仙机场T3航展楼出港航班时刻分布

Fig. 3 Departure flight time distribution in Shenyang taoyuan airport T3

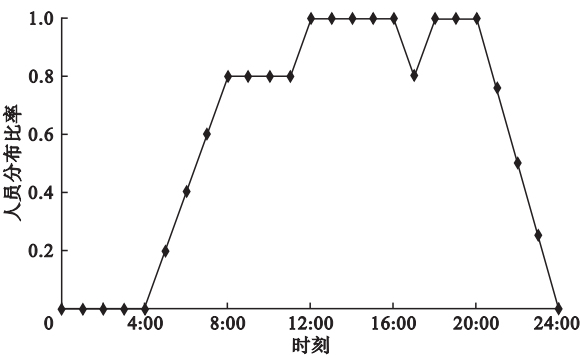


图4 人员分布时间曲线

Fig. 4 Personnel distribution time curve

2 值机厅能耗模拟分析

2.1 外窗比率的参数化设定

能耗模拟建模采用加载于Rhino下的Grasshopper参数化平台,通过将值机厅围护结构的开窗比率参数化实现批量化模拟.根据航站楼侧窗的设计经验,为保证水平视野的连续性,侧窗采用水平带形方式,由下至上将南北侧墙的窗墙比由0.0渐变增至0.9,取0.1为单位变化幅度(见图5).屋面天窗

选用采光均匀度较好的点式天窗进行模拟,根据《公共建筑节能设计标准》(GB50189—2015)严寒C区的规定,屋顶天窗面积不得

超过屋面总面积的20%,由此设定天窗比率由0.0变化至0.2,屋顶天窗比率设置如图6所示。

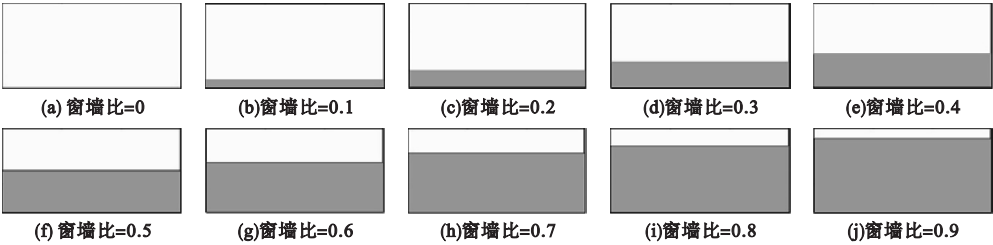


图5 侧墙窗比率设置

Fig. 5 Side wall window ratio setting

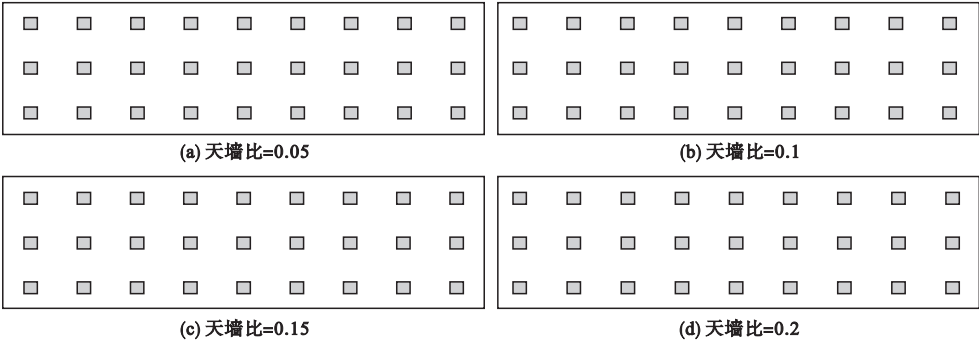


图6 屋顶天窗比率设置

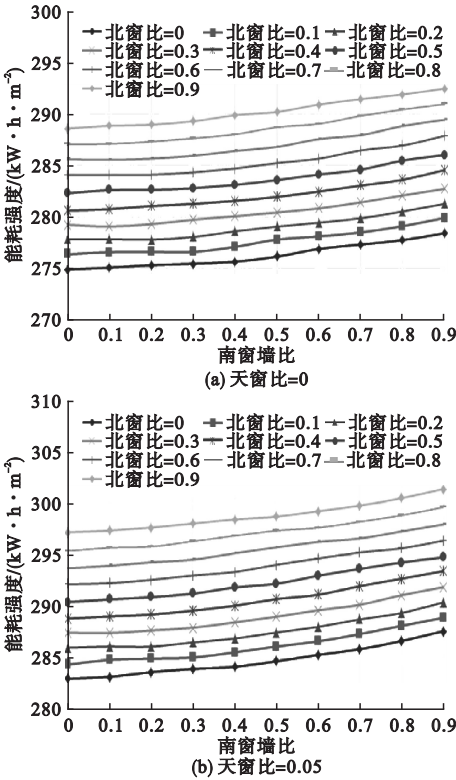
Fig. 6 Roof skylight ratio setting

2.2 窗墙比组合能耗关联度分析

将南窗比、北窗比和天窗比分别作为模拟的3个自变量,排列组合后进行全年逐时模拟计算单位建筑面积能耗.模拟结果中除局部数据呈现小范围异常波动外,数据分布存在较为显著的规律性,即随着外窗比率的增大,单位面积能耗随之上升,数据分布趋近于一元线性回归方程: $E(y_i) = Kxi + \alpha$. (见图7、图8、图9).

对南窗比的能耗关联度进行分析(见图7),回归曲线呈现缓慢上升的趋势,其变化率 K 呈现在2.55~5.93, K 受天窗比的影响要远远大于北窗比。

对北窗比的能耗关联度进行分析(见图8),回归曲线呈现近直线上升的趋势,其能耗变化率 K 呈现在12.99~15.27变化, K 受天窗比和北窗比的影响波动都较小。



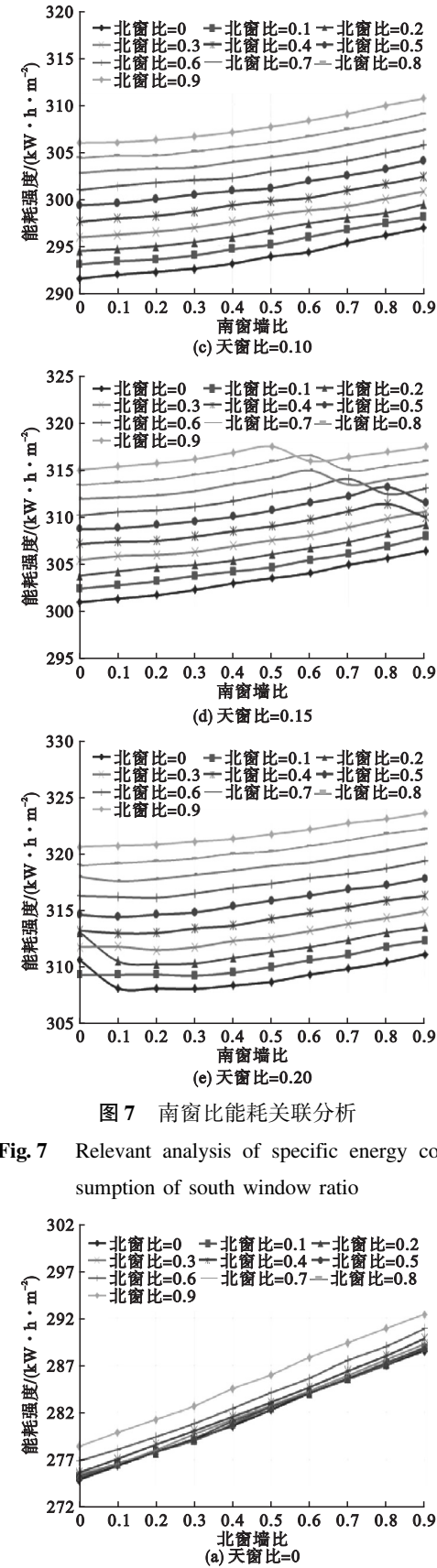


图7 南窗比能耗关联分析

Fig. 7 Relevant analysis of specific energy consumption of south window ratio

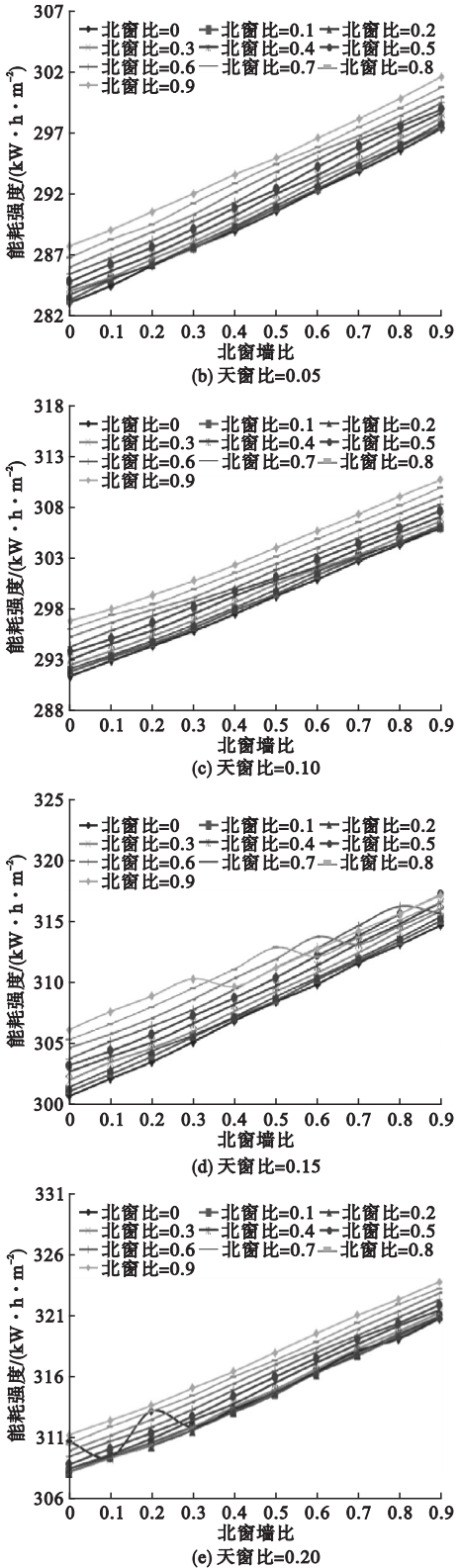


图8 北窗比能耗关联分析

Fig. 8 Relevant analysis of specific energy consumption of north window ratio

对北窗比的能耗关联度进行分析(见图9),回归曲线呈现近直线上升趋势并在最高点略有下降,其能耗变化率 K 呈现在

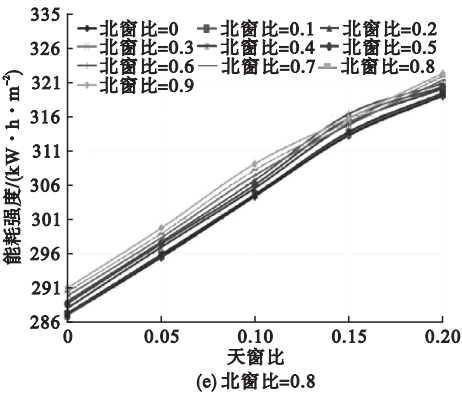
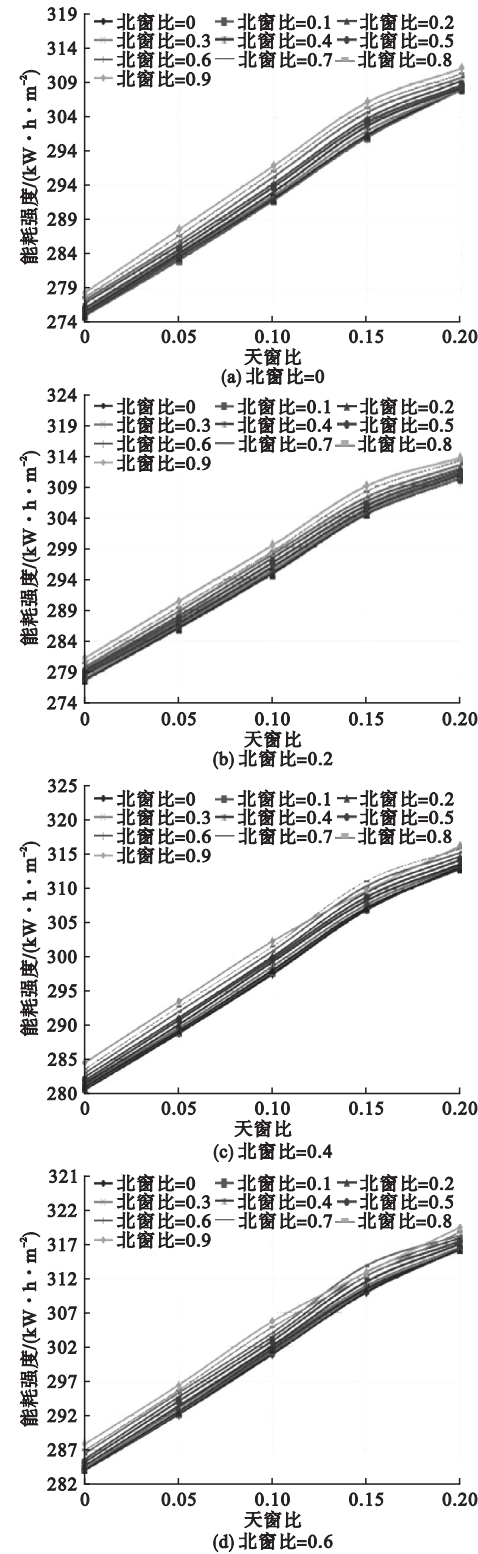


图9 天窗比能耗关联分析

Fig. 9 Relevant analysis of specific energy consumption of skylight window ratio

135.57~143.66变化,其取值受天窗比和北窗比的影响波动幅度都比较小。

由图7、图8、图9分析可知,天窗比对能耗的影响敏感度大约为北窗比的9~10倍,而北窗比对能耗的影响敏感度大约为南窗比的2~5倍,因此,在值机厅的围护结构设计中应优先控制天窗比的取值范围,并在此基础上对北窗比进行合理控制,以达到降低能耗的目的。

3 值机厅自然采光模拟分析

3.1 自然采光全年动态模拟方法

按照能耗模拟中所采用的外窗比率组合,采用Honeybee内的Daylight Simulation系列模块进行模拟分析.笔者采用全年动态日光模拟及评价方法,参照美国LEED v4评价标准中的sDA空间日光自主评价指标,将室内地面作为自然采光照度模拟的水平基准面,按照10 m×10 m为一个单元设置照度感应矩阵网格(见图10),取300 lx作为最低照度阈值,通过计算每个网格的全年平均照度,累加出在非人工照明时段内保证50%以上时间满足照度阈值的面积百分率,考虑到值机厅对光环境要求较高,笔者取sDA(300/50%)≥75%作为日光自主评价标准的最低限值。

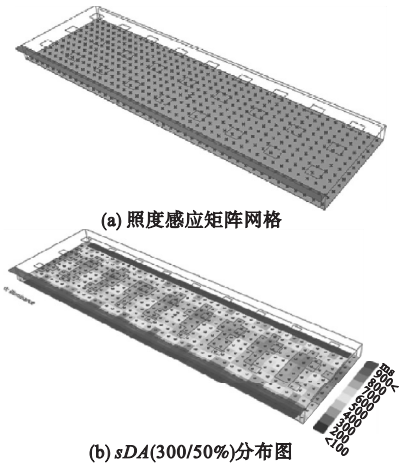


图 10 自然采光全年动态模拟与分析方法
Fig. 10 Illuminance induction matrix model and illuminance analysis

3.2 自然采光关联分析

对模拟数据进行关联度分析,绘制回归曲线如图 11 所示.从整体上分析, $sDA(300/50\%)$ 随天窗比的增大而提高,曲线在天窗比 q 取值 $0 \sim 0.025$ 内变化较为缓慢,在天窗比取值 $0.025 \sim 0.05$ 内变化较为剧烈,而在天窗比 >0.05 的区间趋近最高值 100% .

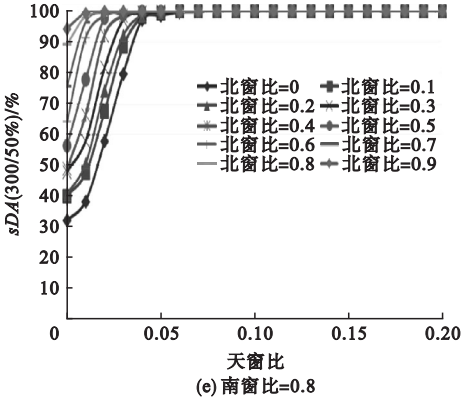
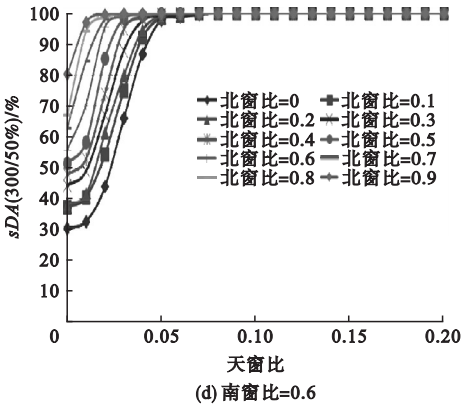
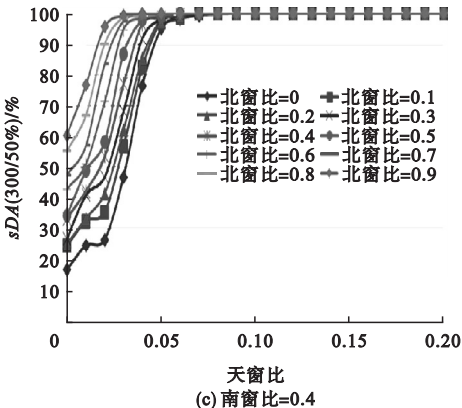
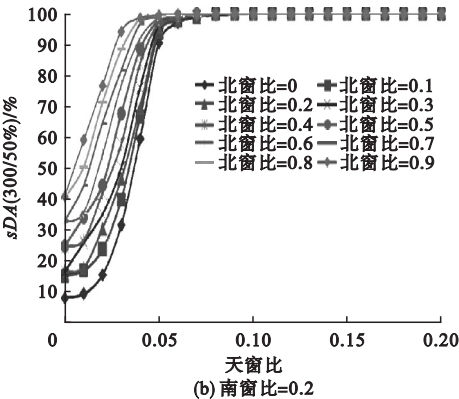
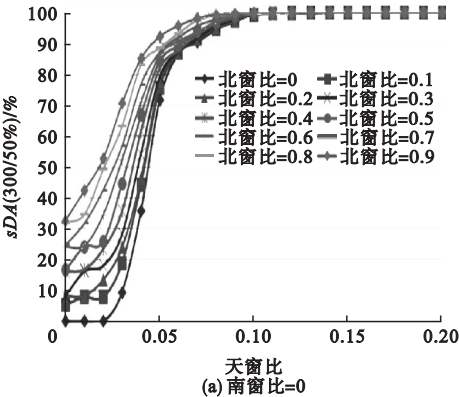


图 11 各开窗比率 $sDA(300/50\%)$ 分析
Fig. 11 Relevant analysis of window ratio sDA

当天窗比 $=0$ 时,满足南窗比 ≥ 0.5 ,北窗比 ≥ 0.6 ,且南窗比与北窗比之和 ≥ 1.5 时, $sDA(300/50\%)$ 符合大于 75% 的要求.当天窗比 $=0.01$ 时,满足南窗比 ≥ 0.4 ,北窗比 ≥ 0.5 ,且南窗比与北窗比之和 ≥ 1.3 时, $sDA(300/50\%)$ 符合大于 75% 的要求.

当天窗比 $=0.02$ 时,满足南窗比 ≥ 0.2 ,北窗比 ≥ 0.2 ,且南窗比与北窗比之和 ≥ 1.1



时, $sDA(300/50\%)$ 符合大于 75% 的要求. 当天窗比 = 0.03 时, 南窗比 ≥ 0.1 且满足南窗比与北窗比之和 $\geq 0.7 \sim 1.0$ 时, $sDA(300/50\%)$ 符合大于 75% 的要求.

当天窗比 = 0.04 时, 满足南窗比与北窗比之和 $\geq 0.3 \sim 0.4$ 时, $sDA(300/50\%)$ 符合大于 75% 的要求.

当天窗比 = 0.05 时, 除南窗比和北窗比都为 0 的情况, 其他组合的 $sDA(300/50\%)$ 全部符合大于 75% 的要求.

当天窗比 ≥ 0.06 时, 无论南窗比与北窗比如何取值, $sDA(300/50\%)$ 全部符合大于 75% 的要求. 由此可见, 天窗比对全年自然采光影响十分显著, 远远大于南窗比和北窗比的影响, 而对于天窗比 < 0.05 的情况下, 则需要根据南北窗墙比综合的控制达到自然采光的舒适标准.

4 值机厅能耗与自然采光综合分析

综合能耗模拟结果与自然采光模拟结果, 对数据进行筛选, 在满足 $sDA(300/50\%) \geq 75\%$ 的前提下, 得出能耗处于较低水平的外窗比率组合. 根据设计经验, 保证值机厅进出站处视线的通透性, 假定南窗比 ≥ 0.5 , 再次筛选结果对能耗较低的 35 个外窗比组合排序如表 3 所示. 从表 3 优化结果来看, 能耗较低的外窗组合主要分布于天窗比为 0.02 ~ 0.05. 其中能耗最低的 10 个组合集中于天窗比为 0.03 ~ 0.04 内, 且南窗比设计为 0.5 ~ 0.9, 北窗比设计为 0.0 ~ 0.2. 若在实际设计中考虑南北都有较高视线通透要求, 则天窗比 = 0.01, 南窗比 = 0.8, 北窗比 = 0.5; 天窗比 = 0.02, 南窗比 = 0.7, 北窗比 = 0.4; 天窗比 = 0.02, 南窗比 = 0.8, 北窗比 = 0.4 的 3 组数据较为理想, 可作为值机厅典型模型的围护结构外窗比率设计.

表 3 低能耗外窗比率组合
Table 3 Ratio combination of external window with low energy

能耗/(kW·h·m ⁻²)	天窗比	南窗比	北窗比
282.61	0.03	0.5	0.1
282.94	0.04	0.5	0.0
283.12	0.03	0.9	0.0
283.22	0.03	0.6	0.1
283.50	0.04	0.6	0.0
283.89	0.03	0.7	0.1
283.97	0.03	0.5	0.2
284.22	0.04	0.7	0.0
284.34	0.04	0.5	0.1
284.44	0.03	0.8	0.1
284.64	0.03	0.6	0.2
284.73	0.05	0.5	0.0
284.88	0.02	0.7	0.3
285.02	0.04	0.6	0.1
285.03	0.02	0.9	0.2
285.52	0.04	0.7	0.1
285.59	0.03	0.5	0.3
285.80	0.02	0.8	0.3
285.82	0.04	0.5	0.2
285.96	0.03	0.8	0.2
286.05	0.03	0.6	0.3
286.26	0.04	0.6	0.2
286.37	0.02	0.9	0.3
286.40	0.04	0.8	0.1
286.66	0.05	0.6	0.1
286.70	0.05	0.8	0.0
286.73	0.02	0.7	0.4
286.74	0.03	0.9	0.2
286.78	0.03	0.7	0.3
286.92	0.04	0.7	0.2
287.11	0.01	0.8	0.5
287.13	0.03	0.5	0.4
287.20	0.04	0.9	0.1
287.24	0.02	0.8	0.4
287.24	0.04	0.5	0.3

5 结 论

(1) 通过模拟验证, 外窗比率与建筑全年能耗存在明显关联性, 即能耗随外窗比的增大而整体升高, 外窗比能耗关联敏感度从高向低排序为: 天窗比、北窗比、南窗比.

(2) 通过全年动态日光模拟分析发现, $sDA(300/50\%)$ 与外窗比率存在正比关系, 即外窗比率升高, $sDA(300/50\%)$ 随之升高, 而天窗比的自然采光关联敏感度远大于南窗比和北窗比, 在天窗比 < 0.05 的情况下, 对南窗比和北窗比数值之和的最小值控制, 可以实现较好的自然采光性能.

(3)通过能耗与自然采光的耦合分析,结合设计经验权衡判断,发现优化的外窗比组合主要集中天窗比在0.02~0.05内,因此在设计中应优先选择此范围的天窗比。同时应结合视线通透性的要求合理筛选侧窗比范围,以获得即满足自然采光性能的同时使能耗处于较低的水平的最优组合。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 2018 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
(Building Energy Conservation Research centre of Tsinghua University. 2018 Annual report on china building energy efficiency [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.)
- [2] 王一帆. 机场航站楼耗模拟与节能设计研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
(WANG Yifan. Study of energy simulation and energy efficiency design of airport terminal [D]. Xian: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.)
- [3] 邓翠翠. 基于蒙皮热工效应的寒区航站楼节能效果研究[D]. 北京: 中国民航大学, 2016.
(DENG Cuicui. Research on energy saving of the terminal in cold area based on the diaphragm thermal effect [D]. Beijing: Civil Aviation University of China, 2016.)
- [4] 杨臣. 航站楼空调系统能耗分析与优化控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
(YANG Chen. Energy consumption evaluation and optimal control strategies research for the air conditioning system of the airport terminal building [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.)
- [5] 柳澎, 黄季宜, 晏庆模. 航站楼绿色设计[J]. 建筑创作, 2015(3): 179-201.
(LIU Peng, HUANG Jiyi, YAN Qingmo. Terminal green design [J]. Architectural creation, 2015(3): 179-201.)
- [6] 刘魁星. 航站楼负荷动态模拟和特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
(LIU Kuixing. Dynamic simulation and performance analysis for cooling and heating load of terminal [D]. Tianjing: Tianjing University, 2009.)
- [7] 司鹏飞, 戎向阳, 石利军, 等. 机场航站楼能耗构成特征案例分析[J]. 暖通空调, 2019, 49(6): 63-67.
(SI Pengfei, RONG Xiangyang, SHI Lijun, et al. Study on composition of energy consumption in airport terminal [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2019, 49(6): 63-67.)
- [8] 高志斌, 韩华, 王树军. 严寒地区绿色机场建设关键技术研究[J]. 民航学报, 2019, 3(3): 22-28.
(GAO Zhibin, HAN Hua, WANG Shujun. Research on key technologies for green airport construction in severely cold region [J]. Journal of civil aviation, 2019, 3(3): 22-28.)
- [9] LAM J C, TSANG C L, Yang L. Impacts of lighting density on heating and cooling loads in different climates in China [J]. Energy conversion and management, 2006, 47(13/14): 1942-1953.
- [10] 刘芳. 第II建筑气候区航站楼离港大厅自然采光设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
(LIU Fang. Research of day lighting design on the airport terminal departure hall to the second building climate zone [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.)
- [11] 遇大兴, 边宇. 机场建筑的采光设计分析[J]. 照明工程学报, 2018, 29(3): 124-128.
(YU Daxing, BIAN Yu. Analysis on daylighting design of airports building [J]. China illuminating engineering journal, 2018, 29(3): 124-128.)
- [12] 瞿燕. 航站楼采光优化设计研究与实践[J]. 绿色建筑, 2018(5): 31-34.
(QU Yan. Lighting optimization design for terminal building [J]. Green building, 2018(5): 31-34.)
- [13] 彭鹏, 郑洁. 天然采光对建筑能耗影响的研究[J]. 太阳能学报, 2007(12): 1375-1379.
(PENG Peng, ZHENG Jie. The influence of daylighting on building energy consumption [J]. Acta energiae solaris sinica, 2007(12): 1375-1379.)
- [14] 冯乾乾, 刘祥钊, 刘刚, 等. 浅析外窗对建筑能耗及自然采光的影响[J]. 建设科技, 2008(18): 100-103.
(FENG Qianqian, FU Xiangzhao, LIU Gang, et al. The influence of windows on building energy efficiency and daylight [J]. Construction science and technology, 2008(18): 100-103.)
- [15] 石铁矛, 吴子敬, 夏晓东, 等. 建筑全年动态采光与总能耗模拟方法研究[J]. 建筑技术, 2016, 11(47): 966-969.
(SHI Tiemao, WU Zijong, XIA Xiaodong, et al. Research on simulation method for annual climate-based dynamic daylighting energy consumption [J]. Architecture technology, 2016, 11(47): 966-969.)
- [16] 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): 90-93.
(YAN Li. Coupling analysis of natural lighting and air conditioning energy consumption of small and medium sized railway stations [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2017, 47(7): 90-93.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)