

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-82-08

大型机场航站楼天窗采光与建筑能耗优化研究 ——以长沙黄花机场 T3 航站楼为例

罗臣佑¹ 钟辉智¹ 王 晓¹ 窦 枚¹ 戴小罡² 彭宇怀²

(1. 中国建筑西南设计研究院有限公司 成都 610041;

2. 湖南省机场管理集团有限公司 长沙 410137)

【摘要】 绿色机场作为四型机场建设的重要内容,加之航站楼本身具有空间高大、运行时间长、能耗高、人员密集等特点,因此天窗设计的优劣对实现机场绿色低碳目标显得尤为关键。以长沙黄花机场 T3 航站楼为实例,通过本项目在天窗设计时对天然采光、照明能耗、空调能耗和采暖能耗的单一因素研究和多因素耦合研究,结果表明天窗的面积为其屋面面积的 5~7%为宜,同时太阳得热系数、传热系数建议不大于 0.30、2.0W/(m²·K),旨在打造以精细化采光分析实现综合用能最优的机场,并为我国绿色低碳机场的建设起到良好的示范效果和借鉴意义。

【关键词】 航站楼;天窗设计;能耗模拟;优化

中图分类号 TU111.19+5/TU241.4 文献标志码 A

Optimization of Skylight Lighting and Building Energy Consumption in Large Airport Terminal Buildings--Taking Changsha Huanghua Airport T3 as an Example

Luo Chenyou¹ Zhong Huizhi¹ Wang Xiao¹ Dou Mei¹ Dai Xiaogang² Peng Yuhuai¹

(1.China Southwest Architecture Design & Research Institute, Chengdu, 610041;

2.Hunan Airport Management Group Co., Ltd, Changsha, 410137)

【Abstract】 Green airport as an important content of the four airport construction, coupled with the terminal building itself has the characteristics of high space, long operation time, high energy consumption, and dense personnel, so the advantages and disadvantages of the skylight design is particularly critical to realize the airport green low-carbon goals. This paper takes Changsha Huanghua Airport T3 terminal building as an example, through the single-factor study and multi-factor coupling study of natural lighting, lighting energy consumption, air conditioning energy consumption and heating energy consumption in the skylight design of this project, concludes that the optimal area ratio of the skylight to its roof is ought to be 5-7%, meanwhile the recommended values of solar heat gain coefficient and thermal transmittance for skylights are not larger than 0.30 and 2.0 W/(m²·K), respectively. The purpose is to design an airport achieving optimal comprehensive energy through refined daylight analysis, and to provide a good demonstration effect and reference for the construction of green low-carbon airport in China.

【Keywords】 Airport Terminal Building; Skylight design; Energy simulation; Optimization

0 引言

习近平总书记 2020 年 9 月 25 日在北京大兴国

际机场提出了建设“平安、绿色、智慧、人文”四型机场的指示,民航局《关于印发<中国民航四型

基金项目: 中建股份科技研发课题“四型机场建设关键技术与示范”(CSCEC-2021-Z-34)

作者(通讯作者)简介: 罗臣佑(1992-),男,硕士,工程师, E-mail: Chenyou.l@foxmail.com

收稿日期: 2023-11-09

机场建设行动纲要(2020-2035年)的通知》^[1]中明确绿色机场即在全生命周期内实现资源集约节约、低碳运行、环境友好的机场。

据有关数据统计,2020年,我国民用航空机场总耗电量约为49.4亿~53.6亿kWh,航站楼耗电量约为21.3亿~23.5亿kWh^[2]。在航站楼的能耗中,空调能耗与照明能耗占有较大的比重^[3]。机场航站楼由于自身空间布局和使用功能的特点,因而对室内光环境的营造有着如下特殊要求:

航站楼的公共大厅、连接区域及联检大厅等空间尺度大的区域往往由于位于建筑中部而自然采光困难,候机厅等区域虽具备侧窗采光条件但由于空间进深较大即使采用全玻璃幕墙也无法有效改善其内区的自然采光^[4]。建筑高大空间寻求合理的天窗方案,以保证良好的自然采光照度以及均匀度是采光设计的重点。在单一纵向分散式天窗布局下,可在一定范围内(天窗面积比<15%)增加天窗纵向个数以有效提升高大空间的室内光环境质量,但应避免天窗面积比过高导致的天然采光基本水平下降与眩光现象的显著增加^[5]。天窗形式改变对采光均匀度也有较大影响,较小单一纵向和矩阵型天窗的引入均可显著提升其全年自然采光水平,相较于集中式和单一纵向天窗的不利影响,较小的矩阵型天窗即可显著提升室内自然采光均匀度^[6]。

自然采光、照明能耗、太阳辐射热、夏季空调能耗以及冬季采暖能耗有着密不可分的内在联系。相关测试及分析结果表明,交通枢纽内的光热环境受室外天然光影响较大,冬夏季天窗正下方照度值全天波动较大,而天窗下边缘区及人工照明区照度全天变化稳定,天窗设计应尽可能采用横向条形天窗,能够充分且均匀的接收太阳光,提高光资源利用率的同时减小眩光作用^[7]。合适的天窗窗地比和外遮阳设施的耦合设置可有效改善大型交通枢纽建筑室内直射光过量与日光得热过多的问题,同时优化顺序首先更应考虑满足光环境目标,其次再考虑满足热环境目标^[8]。所以研究有必要权衡考虑各因素间的相互耦合关系与影响,以空调和照明能耗总能耗最低为目标,为建筑设计中采光窗的设计寻求“最优解”。

1 国内航站楼天窗类型调研

本文针对国内15个航站楼天窗采用的布置形

式经过现场调研和资料收集相结合的方式,汇总情况如表1所示。

表1 国内大型航站楼天窗形式类型

Table 1 Types of skylights of domestic large airport

terminals		
序号	项目名称	天窗形式
1	北京大兴国际机场	主体:中央天窗+八个点式气泡窗 指廊:带状天窗
2	青岛胶东国际机场	主体:弧形高侧窗 北侧指廊:带状天窗
3	成都天府国际机场	主体:带状弧形高侧窗 指廊:弧形带状天窗
4	重庆机场T3B	主体:八条条形高侧斜天窗 指廊:带状天窗
5	哈尔滨国际机场T3	主体:四条带状天窗 指廊:带状天窗
6	郑州新郑国际机场T2	主体:293个点状独立天窗
7	广州白云国际机场T2	主体:带状天窗(每隔十八米) 指廊:带状天窗
8	桂林两江国际机场T2	主体:月牙形带状天窗 指廊:带状高侧窗
9	重庆江北国际机场T3A	主体:两条带状高侧窗+点状小天窗
10	西安咸阳国际机场T3	主体:14条带状天窗 指廊:带状天窗。
11	深圳宝安国际机场T3	主体:点状天窗均匀布置
12	天津滨海国际机场T2	主体:16个点状天窗 指廊:带状天窗
13	厦门高崎国际机场T4	主体:三条交汇的带状天窗 指廊:带状天窗
14	南宁吴圩国际机场T2	主体:点状天窗均匀布置 指廊:点状天窗线性布置
15	合肥新桥国际机场	主体:19条带状天窗均匀布置

通过分析得出以下结果:

(1) 主体主要以带状天窗为布置方式的有10个,以点式天窗为布置方式的有3个,带状与点式结合的有2个。可以得出航站楼主体部分屋面天窗主要采用带状天窗居多,有少部分采用点式天窗或两者结合的形式。

(2) 指廊屋面部分主要以带状天窗为主要布置方式,点式天窗也以线性排列,导向性较强。

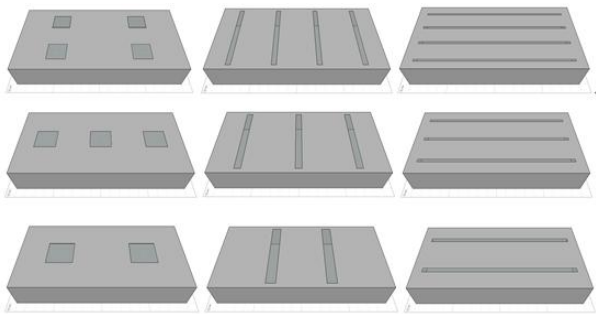
(3) 采光天窗形式为平天窗的有11个,高侧

(斜高侧)窗的有 4 个,平天窗是航站楼主要采用的形式,且平天窗的开窗形式逐渐趋向于大面积的模数化。

2 天窗形式对室内采光效果的影响分析

通过对国内航站楼的调研发现,航站楼天窗基本都采用了平天窗。本节将对平天窗下的不同天窗形式进行对比,通过改变天窗的形状和布置方式,比较不同天窗形式下室内光环境的分布情况。

采光模拟中所有模型天窗比为 0.10,天窗的可见光透射比为 0.40,基于 Grasshopper 和 Radiance 软件模拟不同分散程度的各天窗形式下的采光系数最小值、采光系数平均值和采光系数均匀度,模型如图 1 所示,模拟结果如表 2 所示。



(a) 中间集中 (b) 横向条形 (c) 纵向条形

图 1 不同分散程度的天窗形式采光模型

Fig.1 Skylight models with different degrees of dispersion

表 2 不同分散程度的天窗形式采光模拟结果

Table 2 Daylighting simulation results of skylight models with different degrees of dispersion

天窗形式		分散程度 (由低到高)		
中间集中	平均值 (%)	4.67	4.60	4.40
	最小值 (%)	1.69	1.87	1.78
	均匀度	0.36	0.41	0.40
横向条形	平均值 (%)	4.41	4.33	4.28
	最小值 (%)	1.81	1.92	2.4
	均匀度	0.41	0.44	0.56
纵向条形	平均值 (%)	4.38	4.30	4.27
	最小值 (%)	2.23	2.65	2.81
	均匀度	0.51	0.62	0.66

由表 2 可以看出,随着分散程度由低到高不断增大,三种天窗形式下采光均匀度的差异明显增大,纵向条形天窗分散布置后较中间集中和横向条形天窗有更好的采光均匀度。

3 航站楼天窗对顶层采光效果的影响分析

基于天窗形式的定性分析并结合建筑方案效果考虑,长沙黄花机场 T3 航站楼大厅和指廊拟采用平天窗和高侧窗相结合的方式,如图 2 所示。

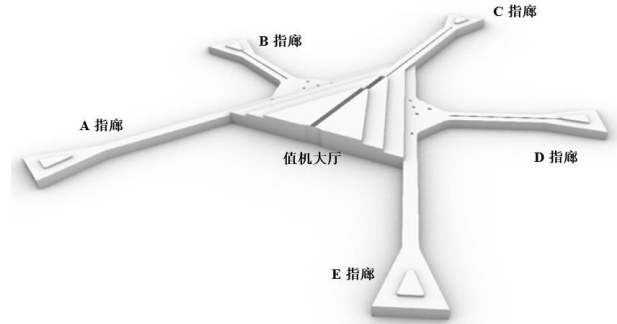
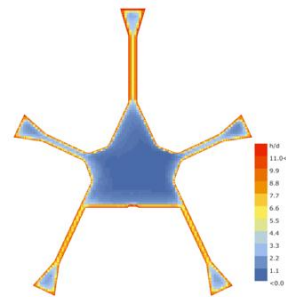


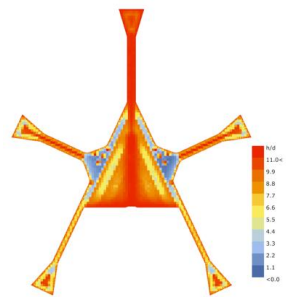
图 2 采光计算模型图

Fig.2 Airport model for Daylighting simulation

分别针对有无天窗时航站楼顶层的室内天然采光效果进行模拟分析,如图 3 所示。



(a) 无天窗时



(b) 有天窗时

图 3 顶层室内采光系数分布图

Fig.3 Distribution of daylight factor on the top floor

由图 3 可以看出,宽度较窄的指廊部分具有较好的室内采光,宽度较大的指廊部分以及值机大厅部分,由于进深较大,存在采光不足的情况。在大厅屋面中部通过设置面积适宜的天窗,合理的改善了室内采光,并具有良好的均匀度。再进一步分析其各个区域能否满足 GB50033-2013 《建筑采光设

计标准》^[9]中针对交通建筑室内天然光照度 $\geq 450lx$ 的要求, 模拟计算结果如图 4 所示, 统计结果如表 3 所示。

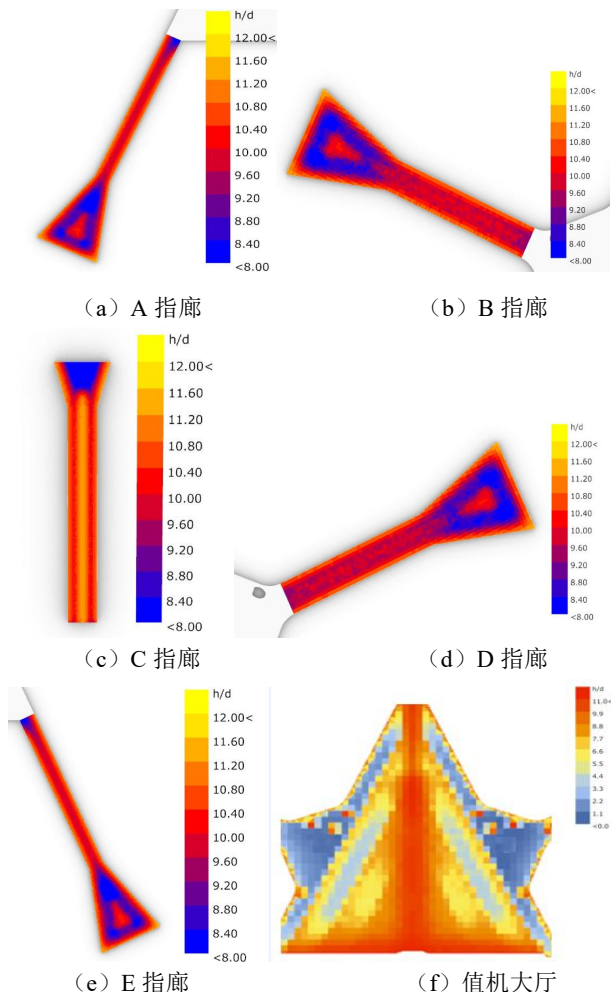


图 4 顶层各区域采光系数分布图

Fig.4 Regional distribution of daylight factor on the top floor

表 3 顶层各区域采光模拟分析结果

Table 3 Regional daylighting simulation results on the top floor

区域	满足自然采光要求 (4 小时、450Lx)	满足自然采光要求 (8 小时、450Lx)
A 指廊	100%	95.54%
B 指廊	100%	96.77%
C 指廊	100%	93.17%
D 指廊	100%	96.88%
E 指廊	100%	95.13%
值机大厅	98.30%	86.52%

由表 3 可以看出, 顶层区域满足 GB/T 50378-2019《绿色建筑评价标准》^[10]中要求至少 60%的面积比例不低于采光要求的小时数平均不少于 4/d。其中指廊部分 90%以上, 值机大厅区域(扣除非主要功能区域以及无采光要求的区域) 85%以上的区域能保证白天 8 小时达到自然采光照度 450lx 的标准。

4 航站楼天窗对照明能耗的影响分析

4.1 计算模型

采光系数将室外照度与室内照度联系起来。在缺乏室外光照度观察资料的情况下, “中国光气候分区” 通过式 (1) 将各地太阳辐射强度转换为光照度从而获得各地的光照度数据。

$$K = \frac{E}{G} = \frac{K_m \int_{380}^{780} G_\lambda V_\lambda d\lambda}{\int G_\lambda d\lambda} \quad (1)$$

其中: E 为光照度; G 为辐射照度; G_λ 为太阳辐射光谱分布; V_λ 为光谱光视效率; λ 为波长; K_m 为 683lm/W。

因此只要知道辐射光当量 K 的表达式, 便能从太阳辐射数据中获得光照度值。为此, 国内外学者提出了多个辐射光当量模型, 其中 Perez 辐射光当量模型在我国的气象条件下具有较高的准确度^[11]。基于此, 由 LBNL 开发的 EnergyPlus 建筑能耗软件将具体城市的气象数据加载后, 便能输出当地室外无遮挡水平面直射光照度与散射光照度的值。长沙逐时室外无遮挡水平面光照度如图 5 所示。

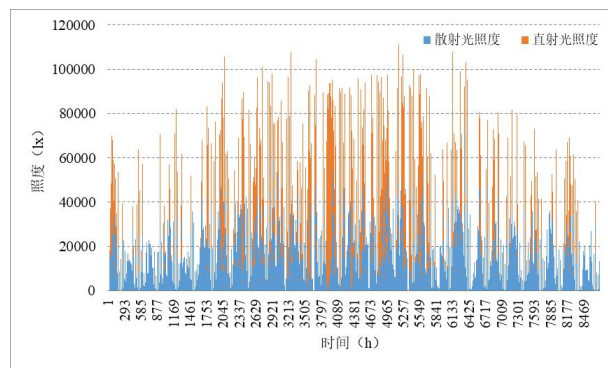


图 5 长沙室外无遮挡水平面光照度

Fig.5 Outdoor unobstructed horizontal illumination at Changsha

4.2 全年照明能耗分析

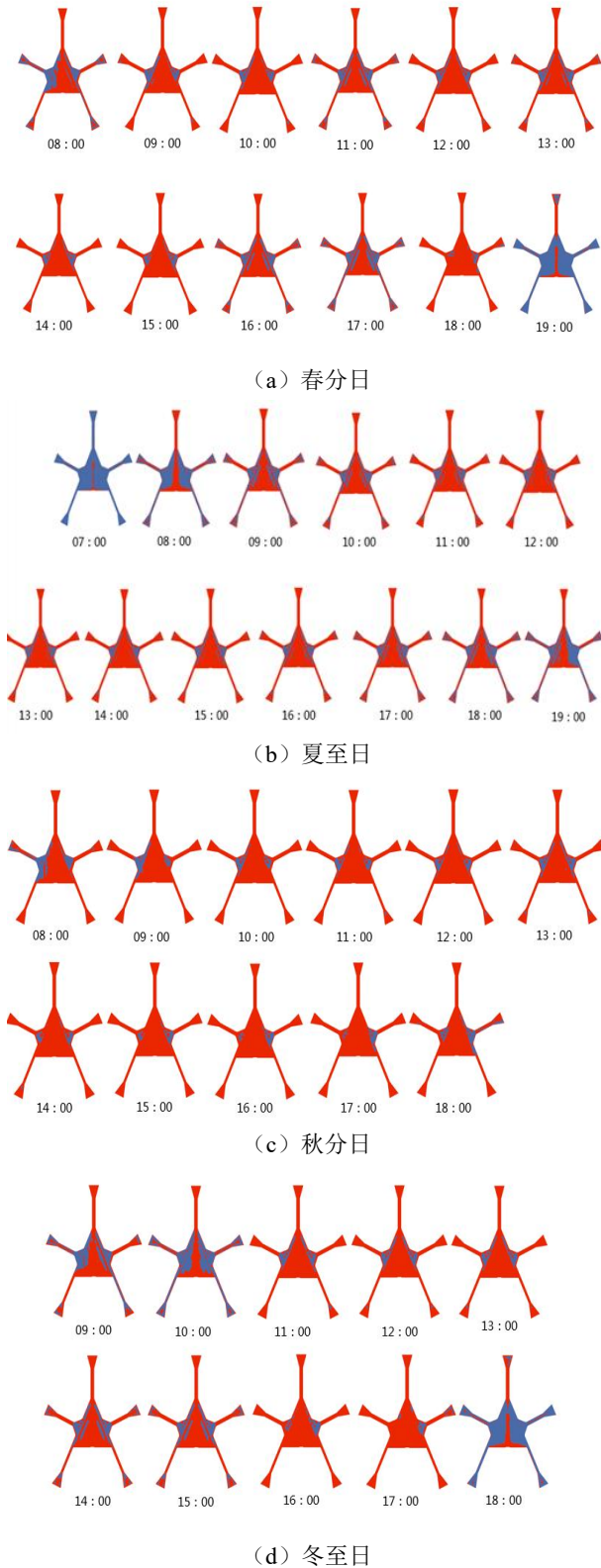


图 6 全年典型日顶层逐时自然采光达标分析图

Fig.6 Hourly daylighting qualified rates at typical days on the top floor

通过不同的开窗面积可得到不同的室内平均采光系数，结合计算模型模拟得到的室外水平面无遮挡光照度，可得到不同采光系数下全年室内平均照度逐时数据。按照标准中所确定的 450lx 为室内照度标准值，那么室内平均照度值大于 450lx 的时刻代表室内自然采光可以满足照明需求，即全年关灯小时数。图 6 为航站楼一年中各季节典型日的自然采光室内平均照度达标面积比例随逐时变化情况。

从图 6 可以大约看出航站楼全年中航站楼顶层哪些区域在白天需要补充人工照明，需要补充人工照明的区域建议单独设置照明控制开关，以便能实现各区域照明独立启停。图 7 给出了全年单位面积照明节能量随采光系数的变化情况。

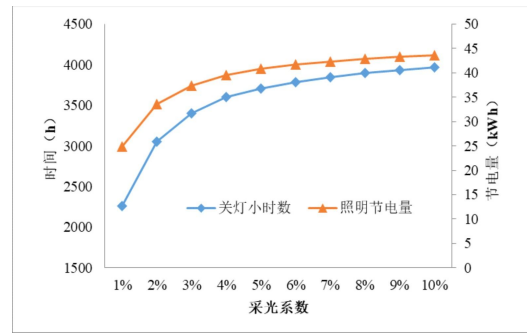


图 7 照明节能量随采光系数的变化

Fig.7 Variation of energy-saving along with daylight factor

随着采光系数的增加，全年关灯小时数与照明节能量增加。采光系数较小时，全年的关灯小时数随采光系数的增加而迅速增加，随后增幅不断的降低。表 4 为不同采光系数下的关灯小时数。

表 4 不同采光系数下的关灯小时数

Table 4 Hours of turn-off with different daylight factors					
采光系数 (%)	1	2	3	4	5
关灯小时数 (h)	2258	3052	3399	3599	3707
照明节能量 (kW/m ² ·年)	24.8	33.6	37.4	39.6	40.8
采光系数 (%)	6	7	8	9	10
关灯小时数 (h)	3789	3843	3900	3935	3968
照明节能量 (kW/m ² ·年)	41.7	42.3	42.9	43.3	43.9

5 航站楼天窗对采暖空调能耗的影响分析

航站楼建筑具有高大空间比重大的特点，研究

天窗对高大空间建筑能耗的影响有着重要的意义, 本节重点分析不同天窗比、太阳得热系数 $SHGC$ 、传热系数 K 、透光率 VT 对采暖空调能耗的影响。

5.1 天窗比的影响

天窗比为天窗面积与屋顶面积的比值, 通过改变天窗比, 使天窗比按 1%, 2%, …, 30% 变化, 对比分析其对全年总能耗 (包括夏季空调能耗、冬季空调能耗和照明能耗) 的影响, 如图 8 所示。

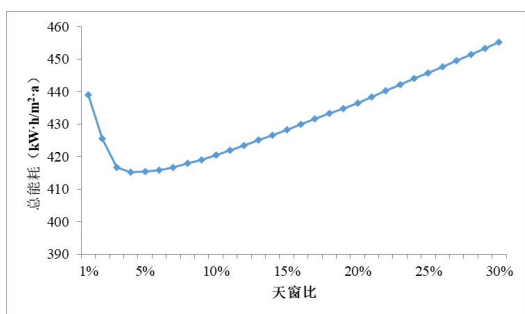


图 8 天窗比对总能耗的影响

Fig.8 Impact of the skylight-to-roof ratio on total energy consumption

由于长沙处于夏热冬冷地区, 全年总能耗中夏季空调能耗占主要部分, 因此总能耗随天窗比的变化与夏季空调能耗的变化趋势相近。总能耗随天窗比的增加同样是先减少, 在天窗比为 5% 时达到最低, 之后又随着天窗比的增加而增大。在天窗比为 30% 时, 总能耗比最低点高出约 10%。

5.2 太阳得热系数的影响

本项目的玻璃太阳得热系数 $SHGC$ 为 0.30, 分别以 $SHGC=0.2$ 、0.30、0.6 为三种工况, 模拟并分析太阳得热系数 $SHGC$ 对夏季空调能耗、冬季空调能耗以及全年总能耗的影响。

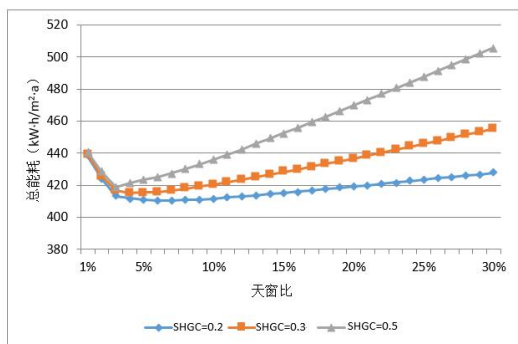


图 9 太阳得热系数对总能耗的影响

Fig.9 Impact of Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) on total energy consumption

图 9 给出了 3 种太阳得热系数下总能耗随天窗比变化的曲线。可以看出, 在相同的天窗比时, 太阳得热系数越大全年总能耗越大, 夏季空调能耗类同。这是因为太阳得热系数越大, 相同天窗面积下进入室内的太阳辐射得热量越大。而长沙属于夏热冬冷地区, 夏季空调冷负荷大与冬季热负荷, 夏季空调时间也比冬季采暖时间长。因此, 由照明能耗减少而引起的空调能耗减少量相同时夏季空调能耗的增加量大于冬季采暖的减少量, 夏季空调能耗的变化规律占主导地位。

5.3 传热系数的影响

分别对玻璃传热系数 K 为 $1.5W/(m^2 \cdot K)$ 、 $2.2W/(m^2 \cdot K)$ 、 $3.0W/(m^2 \cdot K)$ 三种工况, 模拟并分析传热系数对夏季空调能耗、冬季空调能耗以及全年总能耗的影响, 如图 10 所示。

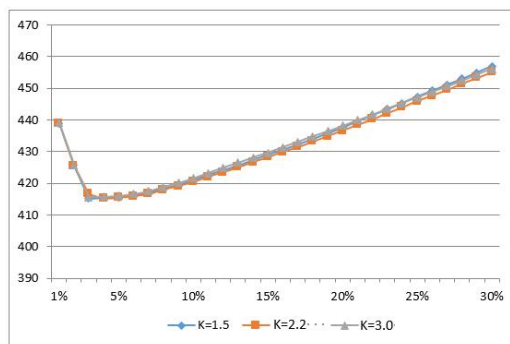


图 10 传热系数对总能耗的影响

Fig.10 Impact of thermal transmittance on total energy consumption

图 10 为玻璃传热系数 K 值对全年总能耗的影响。三种传热系数下, 总能耗值差异不大, 由于夏季传热系数大时空调能耗小, 而冬季采暖能耗又随传热系数的增大而增大, 夏季和冬季能耗的增减量相互抵消。因此全年总能耗传热系数对总能耗的影响较小。

5.4 透光率的影响

项目玻璃透光率为 0.40, 以 $VT=0.30$ 、0.40、0.60 为三种工况, 模拟并分析透光系数对全年总能耗 (包含照明能耗、夏季空调能耗和冬季采暖能耗) 的影响, 如图 11 所示。

图 11 为玻璃透光率 VT 对全年总能耗的影响。可以看出, 总能耗随窗墙比的变化趋势和夏季空调能耗相近。在天窗比较小时, 总能耗先是随天窗比的增大而减少, 达到最低点后, 总能耗值开始随天

窗比的增大而增大。随着天窗比的继续增加，自然采光增强而导致的照明能耗变化对室内总能耗的影响逐渐减弱，三种透光率下的总能耗值随着天窗比的增加逐渐趋于相同。

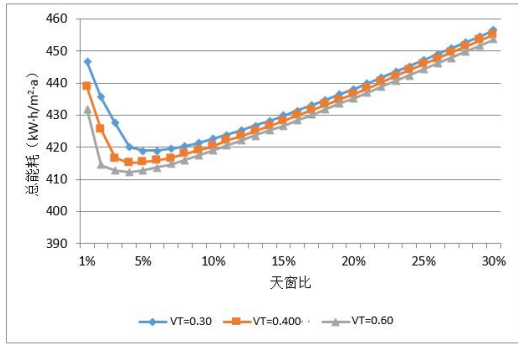


图 11 透光率对总能耗的影响

Fig.11 Impact of visible transmittance on total energy consumption

6 航站楼天窗对总能耗的耦合影响分析

通过上一节分析可知，天窗和侧窗的总能耗是一条随窗墙比的增加先减小再增加的曲线。本节分析天窗对室内各部分能耗构成产生的影响，以及如何判断某一开窗方案处于何种能耗状态，从能耗最低的角度寻找自然采光与照明、空调采暖能耗的最优解。

其中由于值机大厅空间的特殊性，其进深达较深，在仅靠侧窗采光的的情况下必然造成中心区域照度不足，理应设置天窗，满足昼间照明。因此按照前文的分析天窗采光可以减小照明能耗，但是过大的天窗设置会同时增加空调的制冷能耗，在长沙的气候条件和太阳轨迹条件下，如何在满足采光要求和减少空调能耗之间寻找一个“平衡点”，满足采光使用要求，并使得综合能耗最低。

随着天窗面积的增加，自然采光随之增加，通过透光围护结构进入室内的太阳辐射得热量增加。并且玻璃的传热系数与墙体相比通常较大，透光围护结构属于建筑室内外热量传递的薄弱环节，通过玻璃传递的室内外温差传热量也相应增加。同时，自然采光的增加，室内采光系数增大，人工照明能耗随之减少，而这一部分能耗的减少又使得照明灯具在室内所形成的得热量减少，从而进一步的减少了夏季空调能耗，但冬季空调能耗却由于室内得热量的减少有所增加。梳理能耗之间的逻辑关系后可

以得出图 12，该图表达了自然采光与室内各能耗构成间的相互作用关系。

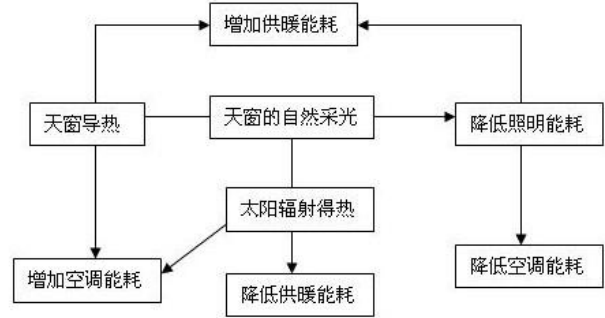


图 12 天窗与建筑能耗之间的相互作用

Fig.12 Interaction of skylight with building energy consumption

根据能耗之间的相关关系，设定 E_1 为空调能耗， E_2 为照明能耗，由于室内光环境改变而引起的能耗变化量 ΔE_l ，将这三项之和记为 $E_{(0,l)}$ ，如式 (2) 所示。

$$E_{(0,l)} = E_1 + E_2 + \Delta E_l \tag{2}$$

将开窗后围护结构传热性能改变引起的空调能耗变化量表示为 $\Delta E_{(l,w)}$ ，将总能耗 E' 表示为 $\Delta E_{(l,w)}$ 和 $E_{(0,l)}$ 之和，表示为式 (3)。

$$E' = \Delta E_{(l,w)} + E_{(0,l)} \tag{3}$$

通过采用 EnergyPlus 软件分别计算出 $\Delta E_{(l,w)}$ 和 $E_{(0,l)}$ 随开窗面积变化规律，叠加后就可以得出不同开窗情况下的总能耗，如图 13 所示。

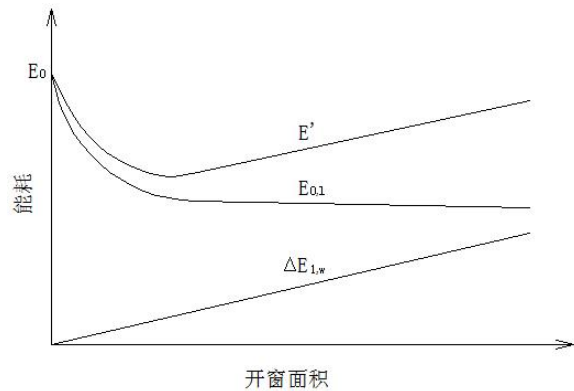


图 13 天窗面积对建筑能耗的影响

Fig.13 Impact of skylight area on building energy consumption

通过建立系列天窗的计算模型，得出了天窗面积与综合节能量之间的关系曲线。

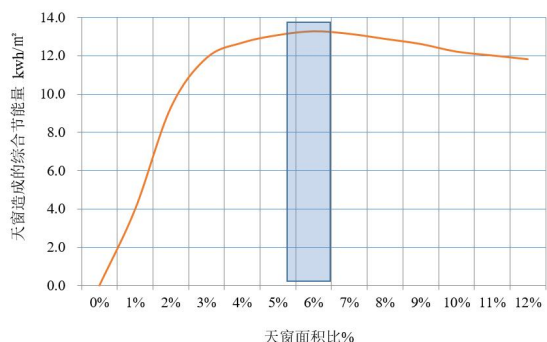


图 14 值机大厅天窗面积比与综合节能量的关系曲线图

Fig.14 Relation of the skylight-to-roof ratio in Check-in Hall with total amount of energy saving

由图 14 可以看出, 不同天窗面积比(天窗面积与需天窗采光的面积比)的综合节能量指标, 结合天窗布置对值机大厅的采光影响, 从而给出了天窗设置的范围和推荐面积在 5%~7% 为宜。

7 结论

在航站楼的能耗中, 需要针对自然采光、照明能耗、空调采暖能耗之间的耦合影响进行综合考虑, 以总能耗最低为目标, 为建筑设计中天窗的设计寻求“最优解”。本文从建筑方案出发针对天窗最佳比、透明围护结构最佳节能参数等进行了深入分析, 并提出了合理的技术方案, 用于指导方案设计, 研究结果表明:

(1) 夏季空调能耗随天窗比的增大先减少后增大, 冬季空调能耗随天窗比的增大先增大后减小, 总能耗随天窗比的增大先减少后增大;

(2) 在天窗比相同的情况下, 太阳得热系数对空调能耗的影响尤为突出, 总能耗随太阳得热系数的增大而增大, 建议该指标不大于 0.30;

(3) 传热系数对建筑能耗的影响不大, 建议天窗传热系数不大于 $2.0\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;

(4) 较高的玻璃可见光透射比对降低照明能耗效果明显, 但受制于玻璃制作工艺的限制, 在玻璃自身太阳得热系数 0.28 时, 可见光透射比建议为 0.52;

(5) 值机大厅和进深较大指廊应设置天窗,

天窗的面积为其屋面面积的 5~7% 为宜, 为便于排水, 减少天窗出现渗漏, 天窗位置建议设置在屋脊位置, 控制天窗面积并处理好构造措施。

综上, 通过对长沙黄花机场 T3 航站楼自然采光、照明能耗、空调能耗进行耦合研究与整体寻优设计, 以期打造以精细化采光分析实现综合用能最优的机场。

参考文献:

- [1] 民航局.关于印发《中国民航四型机场建设行动纲要(2020-2035年)》的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/25/content_5495472.htm.
- [2] 贺舒,韦航,李娟,等.航站楼暖通空调系统节能措施及节能技术应用探讨[J].暖通空调,2021,51(1):131-135.
- [3] 余娟,林波荣,黄彦祥,等.我国航站楼用能和室内环境质量调研与实测分析[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(12):977-984.
- [4] 王超,赵伟峰,陈宇,等.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[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(6):1089-1098.
- [5] 赵南森,范征宇,刘加平.铁路客站候车厅光伏天窗自然采光优化设计[J].哈尔滨工业大学学报,2022,(5):152-161.
- [6] 范征宇,徐若奕,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,(7):1-7.
- [7] 梁佳琪;刘京;郝爽,等.夏热冬暖地区采用天窗采光的地下交通枢纽光热环境分析[J].建筑节能(中英文),2023,(8):38-44.
- [8] 周智超.夏热冬冷地区交通建筑光热耦合天窗形态参数化优化研究[D].西安:西安建筑科技大学,2023.
- [9] GB 50033-2013,建筑采光设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [10] GB/T 50378-2019,绿色建筑评价标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [11] 徐文政,王茜,乐钟林.光环境模拟在航站楼高大空间照明设计中的应用[J].智能建筑电气技术,2020,16(2):33-39.