

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201608092

天津办公建筑空间设计因素节能分析与优化

刘立¹, 刘丛红¹, 吴迪¹, 李晓俊², 侯珊珊², 菲利普·琼斯²

(1.天津大学 建筑学院, 天津 300072; 2.卡迪夫大学 建筑学院, 英国 卡迪夫 CF10 3NB)

摘要:为改善天津地区办公建筑空间节能效果,以点式高层办公楼为例,研究空间设计因素对建筑能耗的影响及优化节能设计方案.首先基于案例调研总结其空间设计因素的典型值或值域,建立典型模型;然后选择6项空间设计因素展开分析,包括平面长宽比、建筑朝向、标准层面积、层高、窗墙比、外窗水平遮阳板长度,依次通过正交试验和列表法安排 DesignBuilder 能耗模拟试验,从而很快地获得优化节能设计方案.模拟试验考虑两种围护结构构造类型,分别代表常规构造和被动房构造.试验结果表明:层高与窗墙比构成建筑能耗的两项重要影响因素,其次为标准层面积、平面长宽比与建筑朝向、外窗水平遮阳板长度;优化节能设计方案中各因素的取值为:平面长宽比 2:1,建筑朝向南向,标准层面积 1 024 m²,层高 3.6 m,窗墙比 0.3,外窗水平遮阳板长度 300 mm.经过试验设计与模拟分析,实现天津地区点式高层办公楼空间节能效果最大化,为该地区办公建筑节能设计提供参考.

关键词:建筑能耗模拟;正交试验;空间设计因素;点式高层办公楼;天津

中图分类号: TU111.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)04-0181-07

Energy saving analysis and optimization of geometric factors of office buildings in Tianjin

LIU Li¹, LIU Conghong¹, WU Di¹, LI Xiaojun², HOU Shanshan², JONES Phillip²

(1.School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2.Welsh School of Architecture, Cardiff University, CF10 3NB, UK)

Abstract: To improve energy saving efficiency of Tianjin office buildings, we select high-rise office tower as an example and assess the effect of geometric factors on building energy performance, also identify the most energy-efficient geometric design. A prototype model is established based on survey data. We choose 6 geometric factors according to previous studies: plane aspect ratio (length to width), orientation, floor area, floor height, window-to-wall ratio and overhang depth. Then orthogonal method and the listing method are utilized to assign DesignBuilder energy simulation experiments. The purpose of minimize building energy consumption by optimizing the above listed factors is achieved. The effect of building fabric performance on result is also taken into account by setting 2 types of building fabric: conventional fabric and passive house fabric. Results show that floor height and window-to-wall ratio constitute two main related issues, followed by floor area, plane aspect ratio and orientation, and overhang depth. The optimal solution is characterized by plane aspect ratio of 2/1, orientation of south, floor area of 1 024 m², floor height of 3.6 m, window-to-wall ratio of 0.3 and overhang depth of 300 mm. The results can serve as a reference for passive design related to geometric factors in the practice of office building design in Tianjin.

Keywords: building energy simulation; orthogonal method; geometric factors; high-rise office tower; Tianjin

目前,中国建筑能耗成为与工业、交通能耗并列的三大能耗之一,2015年中国建筑总商品能耗为8.64亿 tce,占全国能源消费总量的20%^[1].能源与环境问题凸显,对建筑节能设计提出了更高的要求.以往节能研究多关注于围护结构和暖通空调系统,空间设计因素与建筑形态密切相关,在设计初期易于更改,空间设计因素的节能分析与优化为建筑节能

设计提供了另一种研究思路.

天津属于建筑气候区规划的IIA区^[2],该区建筑冬季需要采暖、夏季需要空调,能耗强度高,是建筑节能的重点.办公建筑是公共建筑中建设量大、代表性强的类型,IIA区办公建筑以采暖、空调、照明、办公设备为主要的能耗类型^[3].本文以天津地区点式高层办公楼为例,开展空间设计因素与建筑能耗的相关研究.

1 建筑能耗模拟

能耗模拟软件是分析建筑能耗的常用工具,本文使用 DesignBuilder 软件^[4]预测建筑的能耗表现. DesignBuilder 软件基于 EnergyPlus 内核,在 DesignBuilder 中完成三维建模和参数设置后,软件会自动调用 EnergyPlus 分析,输出模拟结果.

收稿日期: 2016-08-30

基金项目: 科技部国家国际科技合作专项项目(2014DFE70210);国家自然科学基金(51338006,51178292);住房城乡建设部建筑节能与科技司北京建筑大学开放课题(UDC2017031212);教育部高等学校学科创新引智计划(B13011)

作者简介: 刘立(1989—),女,博士研究生;
刘丛红(1968—),女,教授,博士生导师

通信作者: 刘丛红, conghong_liu@163.com

EnergyPlus 软件由美国能源部 (DOE) 资助开发, 用来模拟建筑采暖、空调、照明、通风及其他能量流动, 该软件综合了 BLAST 与 DOE-2 的优势, 模拟结果通过准确性校验。

EnergyPlus 能耗模拟将建筑热工性能模拟与室内光环境模拟耦合, 具备光控照明功能, 人工照明可根据逐时的室内自然采光照度来调节, 反映建筑空间变化 (如房间的进深、层高的改变) 对室内自然采光状况、照明能耗及总能耗的影响。具体原理为: 设置光控传感器于自然采光房间中, 分析获得感测点的自然光照度值, 当其大于目标照度时, 自动调低传感器所控那部分灯具的输出功率。

2 建立典型模型

2.1 几何参数

借助典型模型来分析特定类型建筑存量的能耗特征, 是能耗模拟研究常用的一种思路。本文调研了 II A 区 50 栋百米以下的新建点式高层办公楼, 总结建筑朝向、标准层面积、平面形态、标准层层高、窗墙比等空间设计因素的典型值或值域, 在此基础上确定典型模型的几何参数。点式高层办公楼以南向居多, 部分受城市道路或基地走向的影响而扭转; 标准层面积偏小, 集中在 $1\ 000\sim 2\ 000\ \text{m}^2$ 之间; 平面以直角形态居多, 多为方形或矩形平面; 层高在 $3.6\sim 4.5\ \text{m}$ 之间; 不同朝向的立面采用统一的外窗形态, 窗墙比在 $0.3\sim 0.7$ 之间。

典型模型为点式高层办公楼的标准层, 在能耗模拟中上、下均设热绝缘块如图 1 所示。典型模型为方形平面, 朝向南向, 建筑面积 $1\ 444\ \text{m}^2$ (长度 $38\ \text{m}$, 宽度 $38\ \text{m}$), 层高 $4.2\ \text{m}$, 窗墙比 0.5 , 外窗为横向长

窗。平面内部包括东、南、西、北 4 个办公区和核心筒, 核心筒包涵了走廊、楼梯间、电梯间、卫生间及设备用房, 核心筒占标准层面积的比例依据案例调研确定为 20% 。办公区设置了光控照明, 光控传感器共 4 个, 位于办公区的平面中部, 距离外墙 $7.5\ \text{m}$ 处, 放置高度为工作面高度 $0.8\ \text{m}$ 。

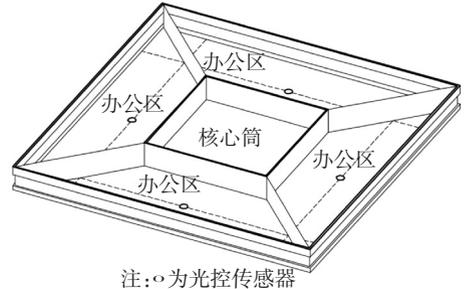


图 1 典型模型的平面布局

Fig.1 Plane layout of the prototype model

2.2 其他参数

气象数据是能耗模拟的基础数据, 本文使用天津市的 CSWD 格式气象数据, 该数据源于中国气象站的实时观测, 由清华大学和中国气象局合作开发, 属于典型气象年气象数据。分析不同围护结构构造时, 空间设计因素对能耗的影响: 类型 1 参照调研中的常规构造, 满足现行建筑节能设计标准^[5]的低限; 类型 2 参照被动房标准^[6], 在类型 1 的基础上提升了保温隔热和气密性能 (见表 1)。暖通空调系统、人员活动、照明及办公设备参数, 参考建筑节能设计标准^[5]和照明设计标准^[7] (见表 2)。暖通空调系统为办公建筑常见的风机盘管系统, 未考虑核心筒的采暖、制冷及新风负荷。时间表参考常规运行情况, 非工作日期间无人使用, 照明、办公设备、空调系统关闭, 采暖系统低负荷运行如图 2 所示。

表 1 围护结构构造与性能参数

Tab.1 Layers and properties of the fabric

结构	类型 1 常规构造	类型 2 被动房构造
外墙 (从外到内)	水泥砂浆 (20 mm)	水泥砂浆 (20 mm)
	加气混凝土保温砌块 (350 mm), 导热系数 $0.19\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 密度 $600\ \text{kg}/\text{m}^3$, 比热容 $1\ 000\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	挤塑聚苯板 (150 mm, 导热系数 $0.034\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 密度 $35\ \text{kg}/\text{m}^3$, 比热容 $1\ 400\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) 加气混凝土保温砌块 (350 mm, 导热系数 $0.19\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 密度 $600\ \text{kg}/\text{m}^3$, 比热容 $1\ 000\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)
性能参数	传热系数为 $0.488\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	传热系数为 $0.155\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
构造层次	双层 Low-E 玻璃窗	3 层 Low-E 玻璃窗
外窗	太阳得热系数为 0.450	太阳得热系数为 0.450
	性能参数 可见光透过率为 0.660 传热系数为 $2.270\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	可见光透过率为 0.660 传热系数为 $0.982\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
气密性 性能参数	0.700 次/h	0.300 次/h

表2 暖通空调系统、人员、照明及办公设备参数

Tab.2 Assumptions for the HVAC system, occupancy, lighting, and office equipment

暖通空调系统能源类型	采暖:燃气锅炉 空调:城市电网
采暖设计温度	20 ℃ (系统低负荷运行时,温度设定为5 ℃)
空调设计温度	26 ℃ (系统预冷时,温度设定为28 ℃)
机械通风	30 m ³ /h·人
自然通风	无
人员密度	8 m ² /人(办公区)、50 m ² /人(核心筒)
照明功率密度	9 W/m ² (办公区)、3 W/m ² (核心筒)
目标照度	300 lux(仅办公区)
办公设备功率密度	13 W/m ² (仅办公区)

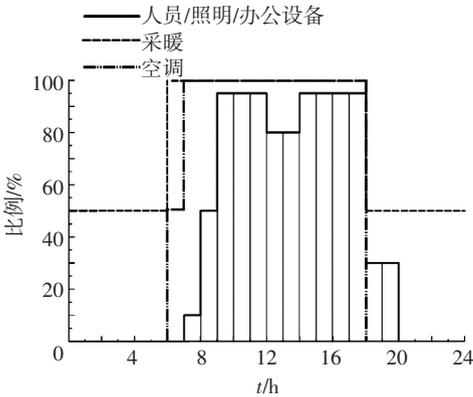


图2 人员/照明/办公设备及采暖空调系统时间表(工作日)
Fig.2 Schedules for occupancy/lighting/equipment, heating, and cooling for weekdays

2.3 能耗计算范围

以往建筑节能研究多针对建筑热工性能,能耗计算范围为采暖、空调和通风系统,忽视了室内光环境对照明能耗和总能耗的影响.实际上,自然采光可以节约照明能耗,同时,照明灯具的散热对于冬季采暖负荷而言为有利因素,对于夏季空调负荷而言为

不利因素.因此,有必要综合考虑空间设计因素对建筑总能耗(采暖、空调、照明能耗之和)的影响^[8].办公设备能耗与空间节能设计的关系不大,未计入此类能耗.考虑办公建筑能耗以电能为主,采用等效电法进行能耗换算.

能耗计算方程为

$$E = E_H + E_C + E_L \quad (1)$$

式中: E 为建筑能耗总量,kWh/(m²·a); E_H 为采暖能耗量,kWh/(m²·a); E_C 为空调能耗量,kWh/(m²·a); E_L 为照明能耗量,kWh/(m²·a).

$$E_H = \frac{Q_H}{A \times COP_H \times q_1 \times q_2} \times \varphi \quad (2)$$

$$E_C = \frac{Q_C}{A \times COP_C} \quad (3)$$

式中: Q_H 为采暖需求,kWh/a; A 为建筑面积,m²; COP_H 为采暖系统综合性能系数,取0.75; q_1 为标准天然气热值,取9.87 kWh/m³; q_2 为发电煤耗,取0.36 kgce/kWh; φ 为天然气与标煤折算系数,取1.21 kgce/m³; Q_C 为制冷需求,kWh/a; COP_C 为空调系统综合性能系数,取2.5.

3 空间设计因素与取值

基于已有研究成果,影响能耗的空间设计因素有建筑朝向^[9-10]、平面形态和布局^[11]、平面长宽比^[9,12]、窗墙比^[13-14].选择6项主要的空间设计因素展开分析,包括平面长宽比、建筑朝向、标准层面积、层高、窗墙比、外窗水平遮阳板长度(见表3).

表3 空间设计因素与取值

Tab.3 Geometry design parameters and schematic diagram

空间设计因素	取值
A.平面长宽比	
B.建筑朝向	
C.标准层面积	
D.层高	
E.窗墙比	
F.外窗水平遮阳板长度	

4 正交试验设计与结果分析

由于因素较多,即便分析各因素的边界值也需 64 次试验才能获得优化方案,模拟计算的工作量大.正交试验是一种相对于全面实验而言减少试验次数的方法,根据正交表来安排试验,能够从全面试验中挑选出代表点,这些点具备“均匀分散、齐整可比”的特点,通过分析这些试验结果可以了解全面试验的情况,从而能更快地快找出最优解,提高试验效率^[15-16].

试验流程为取各因素的两个边界值,设计 6 因素 2 水平正交试验.通过方差分析,确定各因素的最大变化区间对能耗的影响,获得初步优化组合方案.针对初步优化组合方案,按照列表法安排单一变量的能耗模拟试验,分析各因素的中间值对能耗的影响,获得最终优化节能方案如图 3 所示.正交表为 L16(2¹⁵),1、2、4、8、10、13 列放置 6 因素,3、5、6、7、9、12、14、15 列放置交互作用,11 列为空.能耗模拟

结果位于右侧,分别对应围护结构常规构造(类型 1)和被动房构造(类型 2)(见表 4).

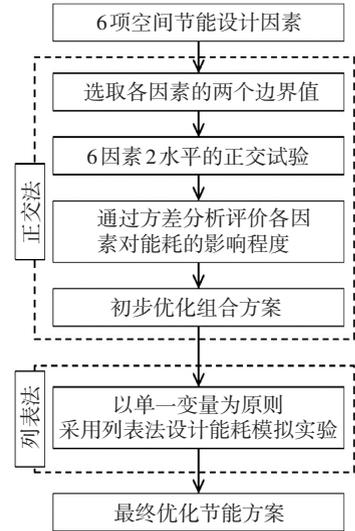


图 3 试验流程

Fig.3 Experiment process

表 4 L16(2¹⁵) 正交表与能耗模拟结果

Tab.4 L16(2¹⁵) orthogonal array and assignment of parameters and interactions, and the annual energy consumption results

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	总能耗/(kWh·(m ² ·a) ⁻¹)	
	A	B	A×B	C	A×C	B×C	E×F	D	C×F	E	空	C×D	F	C×E	B×F	围护结构 1	围护结构 2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	35.80	27.58
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	41.70	32.03
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	37.21	29.57
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	42.71	33.89
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	38.34	30.40
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	39.05	29.13
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	38.15	30.55
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	40.44	31.45
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	35.11	26.57
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	41.32	31.62
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	36.38	28.67
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	40.97	31.70
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	38.07	29.83
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	40.08	30.21
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	39.47	32.01
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	40.13	30.91

注:1)平面长宽比(A)1为1/1,2为2/1,建筑朝向(B)1为南,2为东,标准层面积(C)1为1 024 m²,2为2 025 m²,层高(D)1为3.6 m,2为4.5 m,窗墙比(E)1为0.3,2为0.7,外窗水平遮阳板长度(F)1为0(无遮阳),2为900 mm;2)围护结构1为常规构造,2为被动房构造.

经过方差分析(见表 5、6),依据显著性<0.05 原则筛选主要影响因素,按照 F 值判定影响程度.围护结构常规构造时,主要影响因素为:层高(D)>窗墙比(E)>标准层面积(C)>平面长宽比与建筑朝向(A×B)>外窗水平遮阳板长度(F),层高的影响程度高出其他;其次

是窗墙比,贡献率分别为67.0%和23.6%.围护结构被动房构造时,主要影响因素为:窗墙比(E)>层高(D)>标准层面积(C)>平面长宽比与建筑朝向(A×B)>外窗水平遮阳板长度(F).窗墙比、层高、标准层面积的贡献率分别为 40.0%、30.9%、16.1%.

表5 正交试验结果的方差分析—常规构造

Tab.5 The ANOVA of annual energy consumption data conventional fabric

Table with 7 columns: 因素, 离差平方和, 自由度, 均方/MS, F, 显著性, 贡献率/%. Rows include A, B, AxB, C, AxC, BxC, ExF, D, CxF, E, CxD, F, CxE, BxF, 误差.

表6 正交试验结果的方差分析—被动房构造

Tab.6 The ANOVA of annual energy consumption data passive house fabric

Table with 7 columns: 因素, 离差平方和, 自由度, 均方/MS, F, 显著性, 贡献率/%. Rows include A, B, AxB, C, AxC, BxC, ExF, D, CxF, E, CxD, F, CxE, BxF, 误差.

计算主要影响因素及交互作用各水平的平均能耗(见表7~10),加粗数字为初步优化组合方案对应水平的能耗,对于两类围护结构而言,初步优化组合方案均为:平面长宽比和外窗水平遮阳板长度取水平2,建筑朝向、标准层面积、层高、窗墙比取水平1.

针对初步优化组合方案进一步分析,通过列表法安排单一因素变化的试验,对比能耗模拟结果,寻找最终优化节能方案(见表11).表中粗体字代表初步优化组合方案,带黑色底的字代表最终优化节能方案.对于两类围护结构而言,最终优化节能方案均为:平面长宽比2:1、建筑朝南向、标准层面积1 024 m²,层高3.6 m、窗墙比0.3、外窗水平遮阳板长度300 mm、总能耗分别为34.68 kWh/(m²·a)(围护结构常规构造)和26.20 kWh/(m²·a)(围护结构被动房构造).

表7 主要影响因素各水平的平均能耗—常规构造

Tab.7 Average energy consumption for significant parameters corresponding to each level; conventional fabric

Table with 5 columns: 因素, C标准层面积, D层高各, E窗墙比各, F外窗水平遮. Rows include 水平1, 水平2.

注:标准层面积(C)水平1为1 024 m²、水平2为2 025 m²,层高(D)水平1为3.6 m、水平2为4.5 m,窗墙比(E)水平1为0.3、水平2为0.7,外窗水平遮阳板长度(F)水平1为0(无遮阳)、水平2为900 mm.

表8 交互作用各水平的平均能耗—常规构造

Tab.8 Average energy consumption for interactions corresponding to each level; conventional fabric

Table with 2 columns: 交互作用各水平因素, AxB平面长宽比与建筑朝向交互作用各水平的平均能耗. Rows include A平面长宽比水平1xB建筑朝向水平1, A平面长宽比水平1xB建筑朝向水平2, A平面长宽比水平2xB建筑朝向水平1, A平面长宽比水平2xB建筑朝向水平2.

注:平面长宽比(A)1为1/1、2为2/1,建筑朝向(B)1为南、2为东.

表9 主要影响因素各水平的平均能耗—被动房构造

Tab.9 Average energy consumption for significant parameters corresponding to each level; passive house fabric

Table with 5 columns: 因素, C标准层面积, D层高各, E窗墙比各, F外窗水平遮. Rows include 水平1, 水平2.

注:标准层面积(C)水平1为1 024 m²、水平2为2 025 m²,层高(D)水平1为3.6 m、水平2为4.5 m,窗墙比(E)水平1为0.3、水平2为0.7,外窗水平遮阳板长度(F)水平1为0(无遮阳)、水平2为900 mm.

表10 交互作用各水平的平均能耗—被动房构造

Tab.10 Annual energy consumption for interactions corresponding to each level; passive house fabric

Table with 2 columns: 交互作用各水平因素, AxB平面长宽比与建筑朝向交互作用各水平的平均能耗. Rows include A平面长宽比水平1xB建筑朝向水平1, A平面长宽比水平1xB建筑朝向水平2, A平面长宽比水平2xB建筑朝向水平1, A平面长宽比水平2xB建筑朝向水平2.

注:平面长宽比(A)1为1/1、2为2/1,建筑朝向(B)1为南、2为东.

表 11 单一因素变化的试验设计与结果

Tab.11 Parameters assignment of single-variable simulation cases by listing method and annual energy consumption

序号	因素						总能耗/(kWh·(m ² ·a) ⁻¹)	
	A 平面长宽比	B 建筑朝向	C 标准层面积/m ²	D 层高/m	E 窗墙比	F 外窗水平遮阳板长度/mm	围护结构 1	围护结构 2
1	2.0/1	南北	1 024	3.6	0.3	900	35.11	26.57
2	1.5/1	南北	1 024	3.6	0.3	900	35.50	27.08
3	1.0/1	南北	1 024	3.6	0.3	900	35.71	27.37
4	2.0/1	南偏东 30°	1 024	3.6	0.3	900	35.29	26.76
5	2.0/1	南偏东 60°	1 024	3.6	0.3	900	35.57	27.06
6	2.0/1	南偏西 60°	1 024	3.6	0.3	900	35.53	27.00
7	2.0/1	南偏西 30°	1 024	3.6	0.3	900	35.24	26.69
8	2.0/1	东西	1 024	3.6	0.3	900	35.67	27.17
9	2.0/1	南北	1 225	3.6	0.3	900	35.53	27.21
10	2.0/1	南北	1 444	3.6	0.3	900	35.86	27.72
11	2.0/1	南北	1 764	3.6	0.3	900	36.39	28.47
12	2.0/1	南北	2 025	3.6	0.3	900	36.64	28.87
13	2.0/1	南北	1 024	3.9	0.3	900	36.09	27.01
14	2.0/1	南北	1 024	4.2	0.3	900	37.19	27.56
15	2.0/1	南北	1 024	4.5	0.3	900	38.37	28.19
16	2.0/1	南北	1 024	3.6	0.4	900	35.01	26.46
17	2.0/1	南北	1 024	3.6	0.5	900	35.39	26.83
18	2.0/1	南北	1 024	3.6	0.6	900	35.83	27.28
19	2.0/1	南北	1 024	3.6	0.7	900	36.32	27.80
20	2.0/1	南北	1 024	3.6	0.3	300	34.68	26.20
21	2.0/1	南北	1 024	3.6	0.3	600	34.81	26.30
22	2.0/1	南北	1 024	3.6	0.3	0	34.93	26.50

注:围护结构 1 为常规构造,围护结构 2 为被动房构造。

5 结 论

1)空间设计因素往往同时影响建筑的采暖、制冷负荷和自然采光状况,为了使综合的节能效果最优,需要对其进行优化分析。

2)对于天津地区点式高层办公楼而言,在满足使用功能与办公空间视野的前提下,降低层高与减少窗墙比是两项重要的空间节能设计策略;其次为减少标准层面积、选择东西向拉长的南向平面以及外窗设置水平遮阳板。优化节能设计方案为:平面长宽比 2:1,建筑朝南向,标准层面积 1 024 m²,层高 3.6 m,窗墙比 0.3,外窗水平遮阳板长度 300 mm。

3)空间节能设计为建筑师提供一种新的设计逻辑,以应对能源危机带来的挑战。研究成果从节能的角度为建筑方案的优化提供参考,丰富了空间节能设计理论。采用的分析与优化方法,综合考虑了多项因素,帮助建筑师较快地找到最佳节能设计方案,对于其他气候区、不同建筑类型有借鉴意义。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2017[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 8.
Tsinghua University Building Energy Research Center. 2017 Annual report on China building energy efficiency [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017: 8.
- [2] 中华人民共和国建设部. 建筑气候区划标准: GB50178—93[S]. 北京: 中国计划出版社, 1993.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Standard of climatic regionalization for architecture: GB 50178—93[S]. Beijing: China Planning Press, 1993.
- [3] 薛志峰. 公共建筑节能[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 24.
XUE Zhifeng. Energy conservation for public buildings[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007: 24.
- [4] DesignBuilder 软件官方网站[EB/OL]. [2016-07-15] <http://www.designbuilder.co.uk>.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准: GB50189—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of housing and urban-rural development. design standard for energy efficiency of public buildings: GB 50189—2015[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.
- [6] 河北省住房和城乡建设厅. 被动式低能耗居住建筑节能设计标准: DB13(J)/T177—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

- Department of housing and urban-rural development, hebei. design standard for energy efficiency of passive low-energy residential buildings: DB 13 (J)/T177-2015 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑照明设计标准: GB50034—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. Ministry of housing and urban-rural development. Standard for lighting design of buildings: GB50034—2013 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.
- [8] 孙澄, 刘蕾. 严寒地区办公建筑整体能耗预测模型建构研究 [J]. 建筑学报 (学术论文专刊), 2014 (S2): 86-88. SUN Cheng, LIU Lei. Research on the construction of integrated energy consumption prediction model for office building in severe cold zone [J]. Architectural Journal (Special academic papers), 2014 (S2): 86-88.
- [9] AKSOY U T, INALLI M. Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region [J]. Building and Environment, 2006, 41 (12): 1742 - 1754. DOI: 10. 1016/j. buildev. 2005. 07. 011.
- [10] FLORIDES G A, TASSOU S A, KALOGIROU S A, et al. Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness [J]. Applied Energy, 2002, 73 (3/4): 299-328. DOI: 10. 1016/S0306-2619(02)00119-8.
- [11] LIU Ligang, LIN Borong, PENG Bo. Correlation analysis of building plane and energy consumption of high-rise office building in cold zone of China [J]. Building Simulation, 2015, 8 (5): 487-498. DOI: 10. 1007/s12273-015-0226-7.
- [12] 任彬彬. 寒冷地区多层办公建筑低能耗设计原型研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014. REN Binbin. Research on low energy consumption prototype for office building based on design level in the cold zone [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [13] PERSSON M L, ROOS A, WALL M. Influence of window size on the energy balance of low energy houses [J]. Energy and Buildings, 2006, 38 (3): 181-188. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2005. 05. 006.
- [14] FASI M A, BUDAIWI I M. Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates [J]. Energy and Buildings, 2015, 108: 307-316. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2015. 09. 024.
- [15] GONG Xinzhi, AKASHI Y, SUMIYOSHI D. Optimization of passive design measures for residential buildings in different Chinese areas [J]. Building and Environment, 2012, 58: 46-57. DOI: 10. 1016/j. buildev. 2012. 06. 014.
- [16] 王厚华, 庄燕燕, 吴伟伟. 夏热冬冷地区围护结构热工性能节能分析 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2010, 38 (11): 1641-1646. DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-374x. 2010. 11. 015. WANG Houhua, ZHUANG Yanyan, WU Weiwei. Energy saving analyses on envelop thermal properties in hot summer and cold winter region [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38 (11): 1641-1646. DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-374x. 2010. 11. 015.

(编辑 张红)

(上接第101页)

- [4] 安喜彬, 秦伟伟, 黄志兵, 等. 空间碎片碰撞概率数值计算方法 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (S2): 325-327. AN Xibin, QIN Weiwei, HUANG Zhibing, et al. Computing method for space debris collision probability [J]. Journal of Computer Application, 2016, 36 (S2): 325-327.
- [5] 吴波. 空间目标交会期间碰撞概率研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011. WU Bo. Research on collision probability between space objects during encounter [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2011.
- [6] LIDTKE A A, LEWIS H G, ARMELLIN R, et al. Considering the collision probability of active debris removal missions [J]. Acta Astronautica, 2016, 131: 10-17. DOI: 10. 1016/j. actaastro. 2016. 11. 012.
- [7] LETIZIA F, COLOMBO C, LEWIS H G. Small debris fragments contribution to collision probability for spacecraft in low earth orbits [C] // IAA Conference. Friedrichshafen: ISSF, 2014: 379-387. DOI: 10. 1007/978-3-319-15982-9_45.
- [8] REITER J A, SPENCER D B. Trading spacecraft propellant use and mission performance to determine the optimal collision probability in emergency collision avoidance scenarios [C] // International Astronautical Congress. Guadalajara, Mexico: IAF, 2016: IAC-16.A6.7.5.
- [9] SERRA R, ARZELIER D, JOLDES M, et al. Fast and accurate computation of orbital collision probability for short-term encounters [J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2016, 39 (5): 1-13. DOI: 10. 2514/1. G001353.
- [10] 张大伟, 宋申民, 裴润, 等. 非合作目标自主交会对接的椭圆蔓叶线势函数制导 [J]. 宇航学报, 2010, 31 (10): 2259-2268. DOI: 10. 3873/j. issn. 1000-1328. 2010. 10. 005. ZHANG Dawei, SONG Shenmin, PEI Run, et al. Ellipse cisoid-based potential function guidance for autonomous rendezvous and docking with non-cooperative target [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31 (10): 2259-2268. DOI: 10. 3873/j. issn. 1000-1328. 2010. 10. 005.
- [11] 赵育善, 师鹏. 航天器飞行动力学建模理论与方法 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 44-53. ZHAO Yushan, SHI Peng. Theory and method of spacecraft flight dynamics modeling [M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 44-53.
- [12] BRYSON J. Applied optimal control [M]. London: Taylor & Francis Group, 1975: 309-311.
- [13] WANG Wenping, WANG Jiaye, KIM M S. An algebraic condition for the separation of two ellipsoids [J]. Computer Aided Geometric Design, 2001, 18 (6): 531-539. DOI: 10. 1016 /S0167-8396 (01) 00049-8.
- [14] 刘洋, 申立勇. 判别平面上两个椭圆位置关系的代数条件 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15 (5): 555-560. DOI: 10. 3321/j. issn: 1003-9775. 2003. 05. 009. LIU Yang, SHEN Liyong. An algebraic condition for classifying the positional relationship of two planar ellipses [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15 (5): 555-560. DOI: 10. 3321/j. issn: 1003-9775. 2003. 05. 009.
- [15] 石昊, 赵育善, 师鹏. 航天器近距离相对运动的轨迹偏差分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43 (3): 636-644. DOI: 10. 13700/j. bh. 1001-5965. 2016. 0641. SHI Hao, ZHAO Yushan, SHI Peng. Analysis of trajectory deviation for spacecraft relative motion in close-range [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43 (3): 636-644. DOI: 10. 13700/j. bh. 1001-5965. 2016. 0641.

(编辑 张红)