

探究夏热冬冷地区办公建筑面积 对单位建筑面积能耗(EUI)的影响

秦冰月^a, 潘毅群^a, 于丽丽^a, 黄治钟^b

(同济大学 a. 机械与能源工程学院; b. 中德工程学院, 上海 201804)

摘要: 以上海地区的气象参数作为夏热冬冷气候区的典型代表,提出“H/S——建筑形状系数”并作为建筑形状分类指标,对办公建筑分类建模,采用能耗模拟软件 eQUEST 进行能耗估算,并用 SPSS 软件做逐步线性回归分析,探究建筑总面积、建筑形态与单位建筑面积年能耗(EUI)之间的数学关系。研究表明:①单位建筑面积能耗(EUI)随建筑总面积的增加而减少。②总面积越小的单体建筑,面积变化对能耗影响越大。③越“瘦高”的建筑,建筑能耗越大。

关键词: 办公建筑; 建筑面积; 单位建筑面积能耗(EUI); 能耗模拟; 线性回归

中图分类号: TU20 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2017)02-0112-05

Impact of Floor Area on Energy Use Intensity(EUI) of Office Buildings in Hot – Summer – and – Cold – Winter Area of China

QIN Bing – yue^a, PAN Yi – qun^a, YU Li – li^a, HUANG Zhi – zhong^b

(a. School of Mechanical Engineering; b. Chinese – Deutsche Hochschule für Ange Wandte
Wissenschaften, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This study is to explore the mathematical relationship among Energy Use Intensity(EUI), the floor area, the figure of the office buildings. As the index for classification of the building figure, building figure coefficient, ‘H/S’, is firstly introduced. Based on the climatic conditions in Shanghai representing typical hot – summer – and – cold – winter area, office building models are respectively set up with H/S. This paper employs eQUEST software to simulate the energy consumption and SPSS to conduct the stepwise linear regression analysis. It shows that 1) Along with the increase in floor area, EUI decreases. 2) This impact turns more remarkable when it comes to a single building with the smaller floor area. 3) The Building with lager figure coefficient(H/S) consumes more energy.

Keywords: office buildings; floor area; Energy Use Intensity (EUI); building performance simulation; linear regression

0 引言

伴随着城市化的推进及人们生活水平的提高,能源资源被大量消耗,建筑能耗作为能源消耗的主要组成部分,其占比也在不断上升,建设绿色建筑、节能改造既有建筑等一系列节能工作在相应地进行中。对建筑能耗的准确把握、合理预测是建筑节能设计的基础。建筑能耗受许多因素共同影响,如建筑形态、围护结构、系统参数、人行为及天气参数等,然而其中最重要的影响因素则是建筑面积。

在利用数据驱动方法探究面积与能耗关系的相关研究中,William Chung 等人将建筑面积作为众多变量(建筑面积、运行时间表、人员数量、顾客行为、建造时间)之一,建立单位面积年能耗(EUI)与多个变量的多元线性回归方程,得到建筑面积越大,EUI越小的规律^[1]。方舟等人针对办公类建筑,就建筑面积等因素对 EUI 进行相关性分析,得到建筑面积与 EUI 呈正相关性的结论,并在此基础上,用多项式回归方法建立 EUI 与物业费、建筑面积、租金、建造时间 4 个因素的函数关系式,并总结出建筑规模越大、级别越

收稿日期:2016-06-29; 修回日期:2017-02-17

高的建筑能耗越大的结论^[2]。Filippin 通过计算阿根廷中部地区多幢学校建筑的 EUI 和建筑面积数据,归纳出面积越大 EUI 越大的对应规律,并利用此对应关系建立了该类建筑的 EUI 基准线^[3]。但是这些研究均将建筑面积与其他因素对能耗的影响综合分析,而且建筑面积这一单一变量对单位建筑面积能耗到底有何种影响并不明确。

本文以上海作为夏热冬冷气候区的典型代表,按照“H/S——建筑形状系数”对办公建筑分类建模,采用能耗模拟软件 eQUEST 对建筑模型进行能耗计算,从不确定性分析的角度,研究建筑总面积与单位建筑面积能耗之间的关系,为建筑设计及被动式节能提供参考。

1 研究方法

1.1 软件模拟

eQUEST 能耗模拟软件是由美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)和 J. J. Hirsch 及其合作人共同开发的。该软件的计算核心是 DOE2-2,不仅吸收了能耗分析软件 DOE-2 的优点,并在此基础上做了许多优化,使建模更方便、结果输出更清晰。此外,eQUEST 软件通过计算前一时刻室内温度、冷热负荷及供暖空调设备的耗电量来影响后一时刻的相应计算,是一个动态平衡的计算过程。通过输入的建筑情况(建筑围护结构材料、采暖空调系统、室内人员活动规律、照明设备情况)和室内设定参数,软件可动态地计算出建筑的全年能耗^[4]。

1.2 多元逐步回归分析

多元逐步回归分析是指含有多个解释变量的线性回归,过程中对每一个引入回归方程的变量计算其偏回归平方和,对偏回归平方和最小的变量进行一定 F 水平下的显著性检验,如果通过显著性检验,则在回归方程中保留该变量。相反,则剔除,然后按偏回归平方和由小到大依次对方程中其他变量进行检验,直到回归模型中没有变量可剔除,且模型外没有变量可添加为止^[5]。多元逐步回归分析方法作为研究多变量之间关系的常用数学方法,有着快捷、准确的优势。

2 能耗模型设置

以经过校验后的上海典型办公建筑模型的建立

过程^[6]作参考,建筑、系统参数设置遵照公共建筑节能设计标准^[7],建立办公建筑模型。本文以建筑总面积作为变量,控制其他因素不变,寻找建筑总面积与单位建筑面积能耗之间的关系。可描述建筑几何尺寸的参数有:建筑高度、建筑总面积、建筑体形系数等。典型的办公建筑几何轮廓可以看成是一个近似的“长方体”,同一个建筑总面积可以有不同的建筑宽度、长度、高度,因此建筑总面积不能成为唯一的变量,需对建筑体态加以分类。

首先,本文欲按照体形系数对建筑分类,对同一体形系数下建立不同建筑面积的模型,但搭建过程中发现:建筑总面积越大,体形系数越小;体形系数小到一定程度(如 0.07)后,无法搭建总面积小于 1 万 m² 的建筑,否则会出现建筑长、宽不协调。故不采用体型系数分类法。本文提出“建筑形状系数——H/S”的新概念,将建筑总高度 H 与建筑单层面积 S 的比值作为代表建筑形状分类(即高瘦、矮胖程度)的定量指标,选取 6 个不同的 H/S 值(即 0.03~0.08)分别代表 6 类不同的形状建筑,对每一类建筑分别建立 7 个总建筑面积不同(层数不同、长与宽比值接近 2:1)的模型,使其建筑长宽值以及体形系数在合理的范围内,共 42 个模型。因国家现行标准中未规定夏热冬冷地区办公建筑的体形系数范围,故合理范围参照文献[8]。建筑形状系数与常用的建筑体形系数虽都描述建筑的体态,但有着本质的区别。本文提出的建筑形状系数 H/S,反映了一栋建筑的“高矮胖瘦”程度,形状系数值越大,表明建筑越“瘦高”,相反,则建筑越“矮胖”,该值可作为建筑物形状的分类指标。建筑体形系数定义为“建筑物与室外大气接触的外表面积与其所包围的体积的比值”^[9],它反映了一栋建筑体型的复杂程度和围护结构散热面积的多少,体型系数越大则建筑体形越复杂,建筑物围护结构传热耗热量就越大,可作为影响建筑物耗热量的指标,这是二者的区别和用途。模型外区设置为建筑外表面 5m 以内的建筑周边区域,建筑长边为南北方向作为建筑朝向,各朝向的建筑窗墙比均为 0.4,部分建筑模型的基本参数见表 1、2。

表 1 建筑模型基本参数(H/S=0.03)

Table 1 Parameters of building models(H/S=0.03)

建筑编号	层数	层高/m	总高/m	底面积/m ²	总建筑面积/m ²	长/m	宽/m	体型系数/m ⁻¹
31	30	4	120	4 005	120 150	89	45	0.067
32	24	4	96	3 200	76 800	80	40	0.075
33	20	4	80	2 775	55 500	75	37	0.081
34	18	4	72	2 450	44 100	70	35	0.086
35	15	4	60	2 016	30 240	63	32	0.094
36	12	4	48	1 596	19 152	57	28	0.107
37	9	4	36	1 176	10 584	49	24	0.124

表2 建筑模型基本参数(H/S=0.06)

Table 1 Parameters of building models(H/S=0.06)

建筑编号	层数	层高/m	总高/m	底面积/m ²	总建筑面积/m ²	长/m	宽/m	体型系数/m ⁻¹
61	30	4	120	2 016	60 480	63	32	0.094
62	24	4	96	1 568	37 632	56	28	0.107
63	21	4	84	1 352	28 392	52	26	0.115
64	18	4	72	1 176	21 168	49	24	0.124
65	15	4	60	990	14 850	45	22	0.135
66	12	4	48	800	9 600	40	20	0.150
67	9	4	36	595	5 355	35	17	0.175

模拟气象参数用上海市典型气象年数据。围护结构热工参数的设置参照 GB50189-2005《公共建筑节能设计标准》。每个模型的建筑围护结构热工参数见表3。

表3 建筑围护结构热工参数

Table 3 Thermal parameters of the building envelope

围护结构名称	材料	传热系数/(W/m ² ·K)
外墙	20 mm 水泥砂浆	0.888
	340 mm 砖	
	100 mm 加气混凝土 20 mm 水泥砂浆	
屋顶	20 mm 石棉水泥板	0.638
	20 mm 水泥砂浆	
	XPS-R	
	20 mm 水泥砂浆	
	140 mm 钢筋混凝土 20 mm 石灰水泥砂浆	
外窗	双层中空玻璃铝窗框	传热系数 2.73

模型夏季室内设定温度为 26℃,送风温度 16℃,冬季室内设定温度为 20℃,送风温度 35℃。室内人均新风量为 30 m³/(h·p),人员密度为 0.25 p/m²,设备密度为 20 W/m²,照明密度为 11 W/m²。建筑依靠额定 COP 为 5 的离心式制冷机组提供冷量以满足制冷要求,而额定热效率为 80% 的燃气热水锅炉作为热源可向建筑提供所需热量。模型设置 6-9 月为制冷季,11-3 月为制热季。末端空调系统选择风机盘管加新风系统的形式,室内热扰时间表设置见图 1。

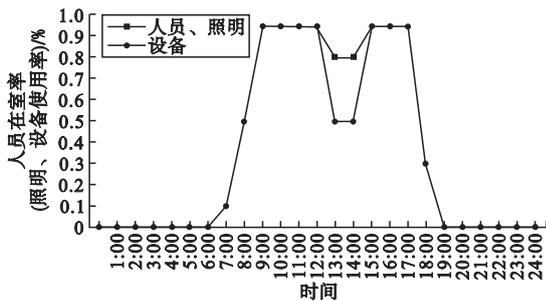


图1 人员、照明、设备时间表

Fig. 1 The schedule of people lighting and equipment

3 能耗结果

用 eQUEST 软件对 42 个建筑模型搭建完成后模拟其全年耗电量及耗天然气量,本文采用清华大学提出的“等效电法”^[10]对消耗天然气量进行转换,转换系数为 7.133 kW·h/m³。得到全年单位建筑面积电耗与全年单位建筑面积气耗结果如图 2、图 3 所示。

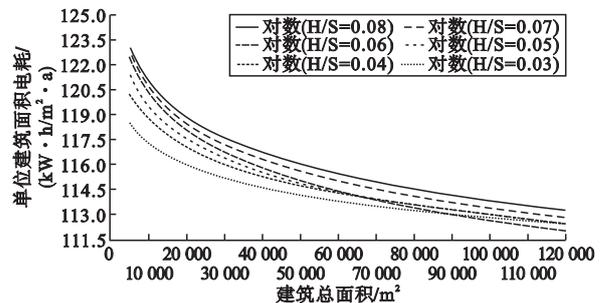


图2 建筑在不同形状系数下的单位建筑面积电耗与建筑总面积的关系

Fig. 2 The relationship between electricity energy unit intensity and building floor area under the different building figure coefficient

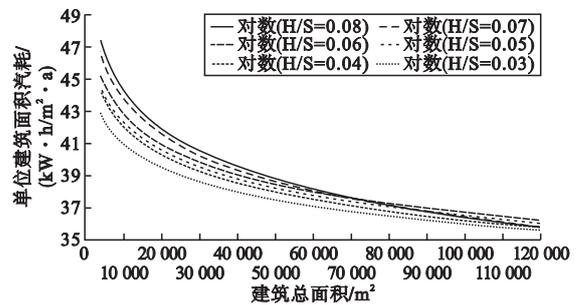


图3 建筑在不同形状系数下的单位建筑面积气耗与建筑总面积的关系

Fig. 3 The relationship between gas energy unit intensity and building floor area under different building figure coefficient

从图 2、图 3 各曲线趋势可知,单位建筑面积能耗(EUI)均随建筑总面积的增加而减少。主要原因是总建筑面积越大,建筑内区的比重随之增大,而往往内区的 EUI 较外区小,建筑总面积变大时,内区的能耗较外区变化幅度大。因此,建筑总面积越大,分担到单位面积上的能耗就越小。其次,不论是电耗图还是气耗图,EUI 随建筑总面积增加而减小的曲线呈先陡后缓趋势。建筑总面积越小的单体建筑,建筑能耗

受建筑面积的影响越大。这是因为建筑总面积越小的单体建筑,内区也小,整个建筑的能耗受外界环境影响比较明显,建筑面积稍稍改变,能耗变化幅度较大。再者,建筑总面积一定时,越“瘦高”的建筑(即H/S值越大),建筑能耗越大。这也说明了如“烟囱”般瘦高的建筑自身能耗较大,利用被动式技术的节能潜力更大,同时为建筑设计提供参考。

将能耗数据拟合回归分析得到,每条建筑能耗-建筑总面积曲线均可拟合成 $Y = A \ln X + B$ 的形式,其中Y为单位建筑面积电(气)耗值($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$),X为建筑总面积(m^2),拟合的 R^2 均在0.96以上。每条曲线常数A为负值,常数B代表在该形状系数下(该“瘦高”程度)的建筑的单位建筑面积年能耗的上限值。图2常数B的范围在 $135.35 \sim 151.53 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ 之间,图3常数B的范围在 $84.69 \sim 102.02 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ 之间。例如,H/S=0.07时,电耗曲线拟合为 $y = -3.144 \ln(X) + 149.6$, $R^2 = 0.99$ 。形状系数为0.07的建筑在保持建筑热扰和空调采暖系统各参数固定的情况下(与本文设置一致),无论其建筑尺寸(层数、建筑长宽)如何变化,该建筑的EUI都不会超过 $149.6 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$;气耗曲线同理此结论。

4 线性回归分析

将自变量——建筑总面积的自然对数值 $\ln X$ 、建筑形状系数H/S,以及其各自平方值 $(\ln X)^2$ 、 $(H/S)^2$ 和因变量——全年单位建筑面积电耗值 E_e 、全年单位建筑面积气耗值 E_g 分别导入SPSS软件中,建立逐步线性回归模型。电耗线性回归模型输出结果见表4~6。

表4 模型汇总

Table 4 The model summary

模型	R	R ²	调整后的R ²	标准估算的错误
1	0.941 ^a	0.885	0.882	0.927
2	0.982 ^b	0.964	0.962	0.529
3	0.994 ^c	0.989	0.988	0.299

a. 预测变量:(常量), $\ln(x)$
b. 预测变量:(常量), $\ln(x)$,H/S
c. 预测变量:(常量), $\ln(x)$,H/S, $\ln(x)^2$
d. 因变量: E_e

从表4~6可以看出,在电耗线性回归模型中,自变量 $(H/S)^2$ 的回归系数没有通过显著性检验被剔除在模型外。其余3个自变量 $\ln X$ 、H/S、 $(\ln X)^2$ 被选入模型,随着自变量被逐步引入回归方程,回归方程的相关系数R和决策系数 R^2 逐步增大。说明引入的自变量对电耗 E_e 的作用在增加。这3个自变量对因变量的预测能力分别为88.2%、8%、2.6%,共同解释了因变量98.8%的变异量(调整 R^2)。 $\ln X$ 对于 E_e 的预测能力要比其他两个自变量强。由于自变量之

表5 自变量系数

Table 5 The independent variable coefficient

模型	非标准化系数		标准化系数	t	显著性
	B	标准错误	β		
1 (常量)	149.148	1.841	-	80.993	0.000
$\ln(x)$	-3.162	0.182	-0.941	-17.331	0.000
2 (常量)	143.029	1.250	-	114.379	0.000
$\ln(x)$	-2.810	0.111	-0.836	-25.269	0.000
H/S	47.375	5.243	0.299	9.036	0.000
3 (常量)	205.653	6.950	-	29.592	0.000
$\ln(x)$	-15.449	1.397	-4.597	-11.060	0.000
H/S	52.357	3.013	0.330	17.379	0.000
$\ln(x)^2$	0.631	0.070	3.775	9.058	0.000

a. 因变量: E_e

表6 排除的变量

Table 6 Excluded variable

模型	输入 β	t	显著性	偏相关	共线性统计容许
1 H/S	0.299 _b	9.036	0.000	0.826	0.877
$\ln(x)^2$	2.453 _b	2.004	0.052	0.309	0.002
$(H/S)^2$	0.291 _b	8.527	0.000	0.810	0.890
2 $\ln(x)^2$	3.775 _c	9.058	0.000	0.830	0.002
$(H/S)^2$	-0.139 _c	-0.586	0.561	-0.096	0.017
3 $(H/S)^2$	-0.182 _d	-1.385	0.175	-0.225	0.017

a. 因变量: E_e
b. 模型中的预测变量:(常量), $\ln(x)$
c. 模型中的预测变量:(常量), $\ln(x)$,H/S
d. 模型中的预测变量:(常量), $\ln(x)$,H/S, $\ln(x)^2$

间存在共线性问题,因而选择调整型 $R^2 = 0.988$ 作为模型拟合度,说明拟合较好。单位建筑面积电耗与建筑总面积和建筑形状系数的线性回归方程总结为:

$$E_e = -15.449 \ln X + 52.357 (H/S) + 0.631 (\ln X)^2 + 205.653 \quad (1)$$

同样方法,得到单位建筑面积气耗与建筑总面积和建筑形状系数的关系,总结该线性回归方程为($R^2 = 0.987$):

$$E_g = -10.435 \ln X + 420.64 (H/S)^2 + 0.388 (\ln X)^2 + 104.549 \quad (2)$$

式中: E_e 、 E_g 分别为单位建筑面积电、气耗值, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$;

X为建筑总面积, m^2 ;

H为建筑高度,m;

S为建筑单层面积, m^2 。

5 实例验证

从上海市商用建筑信息数据库^[11]中选择2栋建筑对线性回归方程进行验证,结果表明:建筑1由回归方程预测得到的单位建筑面积电耗值与实际值的相对误差为15.30%,气耗误差为-25.76%;建筑2的

电、气耗相对误差分别为 -8.90% 和 -7.32% 。由于实际楼宇的建筑信息、内部热扰和 HVAC 系统参数与本文模型设置不同,所以可认为该误差结果在合理范围之内。因此认为用以上方法拟合得到的单位建筑面积电(气)耗与建筑总面积、建筑形状系数的线性回

归方程较为准确。由于方程是在 42 个建筑能耗模型的基础上得到的,根据模型设置参数范围可得出该线性回归方程适用于建筑面积在 $5\,000\sim 10\,000\text{ m}^2$,建筑形状系数 H/S 在 $0.04\sim 0.07$ 范围内夏热冬冷地区的办公建筑。

表 7 模型验证
Table 7 Model validation

	总建筑面积 $X/(\text{m}^2)$	建筑形状系数 $H/S/(\text{m}^{-1})$	模型验证			
			预测 $E_c/(\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2)$		预测 $E_g/(\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2)$	
建筑 1	48 000	0.06	115.04		38.67	
			99.78		52.08	
			15.30		-25.76	
建筑 2	59 000	0.04	113.63		37.41	
			124.74		40.37	
			-8.90		-7.32	

6 结论

本文提出建筑形状系数—— H/S 的新概念,将建筑总高度 H 与建筑单层面积 S 的比值作为代表建筑形状分类(即“高瘦”、“矮胖”程度)的定量指标,同时可弥补国家现行标准中在夏热冬冷地区办公类建筑无体形系数推荐值的空缺。基于 eQUEST 模拟建筑能耗数据,利用逐步线性回归方法得到单位建筑面积全年电(气)耗与建筑总面积的拟合方程,并利用 2 栋实际建筑验证了方程的准确性。该方程适用于建筑面积在 $5\,000\sim 10\,000\text{ m}^2$,建筑形状系数 H/S 在 $0.04\sim 0.07$ 范围内夏热冬冷气候区的办公类建筑。在快速节能改造工具研究及利用典型模型预测建筑能耗项目中,对与典型模型所用的建筑总面积不同的实际建筑,可利用该方法估算其能耗,节省了重新建模的步骤,解决了典型模型与实际建筑之间因建筑面积不同而引起的能耗估算偏差这一难点。

同时,本文得出几点结论:①单位建筑面积年能耗(EUI)随建筑总面积的增加而减少,且减少幅度呈先陡后缓趋势。②建筑总面积越小的单体建筑,建筑面积对建筑能耗的影响越大。③总面积相同的建筑,越“瘦高”建筑能耗越大。建议在夏热冬冷气候区,对于如办公类等室内负荷影响较大的建筑,避免建立过于“瘦高”的“烟囱”建筑,需增加内区以减少其自身能耗。

参考文献:

- [1] Chung W, Hui Y V, Lam Y M. Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings[J]. Applied Energy 2005 83(1): 1-14.
- [2] 方舟. 各类公共建筑统计能耗的规律、影响因素分析及建筑节能审计方法初探[D]. 上海: 同济大学机械与能源工程学院, 2008.
- [3] Filippí N C. Benchmarking the energy efficiency and greenhouse gases emissions of school buildings in central Argentina[J]. Building & Environment 2000 35(5): 407-414.
- [4] 马晓云. 建筑能耗模拟软件 eQUEST 及其应用[J]. 建筑热通风空调 2009 28(6): 77-80.
- [5] 白高峰, 张燕君, 宣学丽, 等. 线性回归法在地下水水质分析中的应用[J]. 地下水 2014 4(2): 14-16.
- [6] 沙华晶, 许鹏. 中国建筑典型模型的建立[C]//上海市制冷学会 2011 年学术年会论文集, 2011.
- [7] GB50189—2005, 公共建筑节能设计标准[S].
- [8] 林美顺, 潘毅群, 龙惟定. 夏热冬冷地区办公建筑体形系数对建筑能耗的影响分析[J]. 建筑节能 2015 4(10): 63-66.
- [9] 张燕雯. 上海地区建筑节能设计中的常见误区[J]. 绿色建筑, 2015 4(6): 34-37.
- [10] 江亿, 杨秀. 在能源分析中采用等效电方法[J]. 中国能源 2010, 32(5): 5-11.
- [11] 郑晓卫, 潘毅群, 黄治钟, 等. 基于建筑能耗数据库的建筑能耗基准评价工具的研究与应用[J]. 节能与环保 2006 4(12): 10-12.

作者简介: 秦冰月(1992), 女, 辽宁鞍山人, 硕士, 主要从事建筑节能改造、建筑能耗模拟方向的研究(2417612121@qq.com)。

指导教师: 潘毅群, 同济大学教授, 博士生导师, 主要从事建筑模拟与仿真、绿色建筑技术方向的研究(yiqunpan@tongji.edu.cn)。