

苏州地区工业建筑能耗快速预测方法研究

通过对苏州地区工业建筑的能耗数据调查与分析,建立电子类工业建筑的能耗回归模型,找出该类建筑的基准建筑。基于DeST能耗模拟获得该基准建筑能耗数据,结合电子类工业建筑的能耗账单,计算归一化的能耗系数,从而建立能耗快速预测方法。

袁 伟 赵书杰/苏州科技学院环境工程学院

0 引言

据统计,建筑领域、交通领域和工业领域是我国的三大“耗能大户”。目前,建筑领域的能耗已经占到总能耗近50%。在我国能源消费中,工业能耗占近70%,而工业建筑能耗占工业能耗的10%以上^[1]。苏州工业企业保有量大,用能高,用电紧张,如何减少、节约用能成为当前研究的重要内容。苏州是一个能源自给率低、外依赖型城市,能源消费有以下特点:能源消费主体为工业,煤在能源消费结构中占主要地位;电力在能源总体中占有重要地位。随着经济的发展,电力消费占能源消费总量的比例逐年上升。为满足生产环境的要求,建筑、空调系统设备消耗大量能源,由于工业建筑与其他类型建筑相比,在使用目的、环境要求和结构体型方面有所不同,其围护结构的节能效果低于其他建筑被视作理所当然。工业建筑的能耗特点是:建筑能耗大、环境控制要求高、设备发热量多和能耗影响因素多。虽然国家已经颁布了居住以及公共建筑的一些节能标准和规定,但还没有对工业建筑

节能作出明确的目标要求和具体规定。

1 工业建筑能耗多元线性回归模型

对苏州地区电子类工业建筑的能耗数据进行分析研究,样本类型、样本数据依据苏州市住建局和苏州市经信委《关于开展苏州市部分工业建筑能耗调研的通知》的要求,计25个工业建筑项目(其中电子类工业建筑16个)。对影响工业建筑能耗的因数进行偏相关分析与多元线性回归分析。

1.1 偏相关因数分析

工业建筑能耗主要包括采暖系统、通风系统、空调系统、净化系统、制冷系统、动力系统和照明系统等终端能耗。影响能耗的主要因数很多,其中建筑面积、空调系统能耗、建筑朝向、空调系统面积、照明功率、开灯时间和墙体传热系数这7个因数的影响较为明显。对这7个因数用数据分析软件SPSS进行偏相关分析,得到对工业建筑能耗影响程度。

各因数与建筑能耗的偏相关度如表1所示。

表1 各因数与建筑能耗的偏相关度

影响因数	R	P
空调系统能耗	0.713	0.021
建筑面积	0.819	0.004
空调系统面积	0.421	0.287
建筑朝向	0.683	0.148
照明总功率	0.715	0.020
开灯时间	0.461	0.259
墙体导热系数	0.995	0.001

从表1得出建筑能耗与建筑面积、空



袁 伟/硕士研究生

关键词/Keywords

工业建筑·
多元线性回归方程·
DeST·
能耗系数·

江苏高校优势学科建设工程资助项目。

调系统能耗、空调系统类型和照明总功率相关性较大且显著 ($|R| > 0.7, P < 0.05$)。故选取 X_1 为空调系统能耗; X_2 为建筑面积; X_3 为照明总功率; X_4 为墙体传热系数,为电子类工业建筑能耗多元线性回归方程的变量。

1.2 回归结果分析

对于所选样本进行回归分析,计算结果如表2所示。得出多元线性回归方程为

$$Y = 2\,210\,755 - 0.347X_1 - 1.692X_2 - 26\,860X_3 + 1.46 \times 10^8 X_4$$

方程调整判定系数 $R^2 = 0.912$,说明该模型拟合优度好,显著性水平 $\text{Sig} = 0.002 < 0.05$,拒绝了总体回归系数为0的原假设,说明模型是显著的。从表2中可以看出,常数项, X_1, X_2, X_3, X_4 都通过了 t 检验,说明每个回归系数都有统计意义,容许度 $\text{Tol} > 0.5, \text{VIF} < 2$,说明自变量之间不存在多元共线性^[2]。

表2 回归模型参数

模型	B	t	Sig.	Tol	VIF
常数项	2 210 755	2.62	0.021	—	—
X_1	-0.347	-2.51	0.029	0.96	1.04
X_2	-1.692	-2.03	0.006	0.81	1.23
X_3	-26 860	-2.16	0.025	0.52	1.92
X_4	1.46×10^8	14.20	0.032	0.72	1.39

1.3 基准建筑的选取

建筑模型如图1所示。对比图如图2所示。由图2可知,除去奇异点,序号为6的建筑的实际总能耗与计算总能耗误差值最小,故选取该栋建筑为基准建筑。

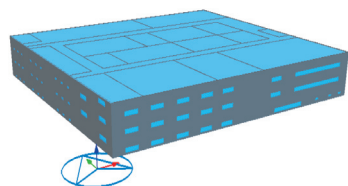


图1 建筑模型

2 基准建筑的能耗模拟

为获得基准建筑每小时的能耗数据,本文采用由清华大学设计研发的能耗模拟软件DeST (Designer's Simulation Toolkit) 进行计算机模拟

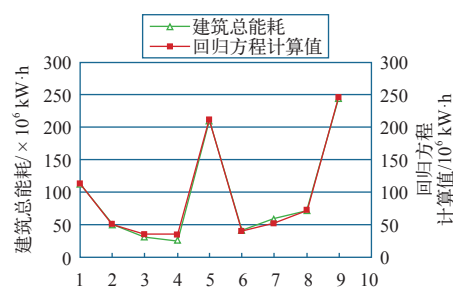


图2 对比图

试验。

2.1 能耗模拟

该建筑共有3层,建筑面积46 800 m²,建筑其他参数如表3所示,建筑物中心区域为生产车间,生产环境要求洁净空间,建筑南侧设有会议室、办公室和洗手间。

表3 建筑参数

因素	水平
建筑面积/m ²	468 00
层高/m	一层: 7.5; 二、三层: 7
外墙	4 mm复合铝塑板
外窗	单玻单层窗
建筑运行时间/h	8 760 (365 × 24)
窗墙比(%)	7.8
空调系统	集中式全空气系统
冷热源设备	水冷式机组
照明开启时间/h	8 760 (365 × 24)

室外气象参数是进行建筑及其系统动态模拟分析的重要基础数据。图3为苏州市气象数据,DeST选取典型气象年气象数据作为建筑能耗模拟分析的全年模拟基础数据。

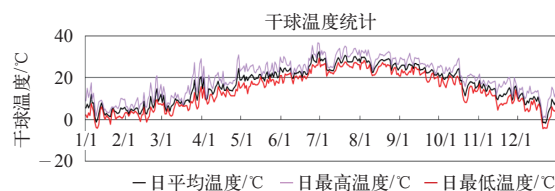


图3 苏州市气象参数

2.2 模型校检标准

文献[7-9]都对校验模拟的误差指标进行了规定,如表4所示。可以用月误差 E_m 、年误差 E_y 和均方差变异系数 δ_m 来检验模型的准确性,这三个值越

小，模型越准确^[3]。

表4 可接受误差范围^[3]

指标	文献[7]	文献[8]	文献[9]
E_m	± 15	± 5	± 20
E_y	± 10		
δ_m	± 10	± 15	± 5

3 能耗快速预测方法

能耗模拟结果及能耗账单如表5所示。分布因子如表6所示。归一化能耗系数如表7所示。通过基准建筑能耗模拟，可以获得基准建筑每个小时的能耗数据，将某小时能耗数据除以相应月份的能耗总值就可以获得某一小时的归一化能耗系数^[4]。归一化能耗系数（见表7）与实际的能耗账单（见表5）相乘，可得到每个小时建筑实际的能源消耗数值。通过能耗预测方程，预测某一小时的能源消耗的误差在10%以内。

表5 能耗模拟结果及能耗账单

月份	空调系统 /万kW·h	照明 /万kW·h	通风 /kW·h	模拟用电 /万kW·h	实际用电 /万kW·h
1月	127.4	21.6	1.59	150.6	158.4
2月	123.8	19.5	1.41	144.7	152.0
3月	113.8	21.6	1.55	136.9	143.3
4月	126.5	20.1	1.49	148.9	145.2
5月	129.7	21.6	1.59	152.9	158.7
6月	156.7	20.1	1.49	179.1	174.1
7月	156.3	21.6	1.55	179.3	171.0
8月	186.5	21.6	1.59	209.7	205.7
9月	178.3	20.9	1.46	200.67	190.4

(续)

月份	空调系统 /万kW·h	照明 /万kW·h	通风 /kW·h	模拟用电 /万kW·h	实际用电 /万kW·h
10月	159.2	21.6	1.59	182.37	172.5
11月	176.2	20.9	1.53	198.6	212.9
12月	154.9	21.6	1.52	177.9	171.4

表6 分布因子

月份	f_{B_e}	f_{V_e}
1月	0.15	0.85
2月	0.14	0.86
3月	0.17	0.83
4月	0.15	0.85
5月	0.15	0.85
6月	0.12	0.88
7月	0.13	0.87
8月	0.11	0.89
9月	0.11	0.89
10月	0.13	0.87
11月	0.11	0.89
12月	0.13	0.87

3.1 归一化能耗系数

本文所选样本的能源消耗结构以电力为主，故计算以下3个归一化能耗系数。

(1) 用电基准 (B_e)

建筑用电+室外照明用电计算公式为

$$(B_{e,coef}) = \left[\frac{(B_e)_i}{\sum (B_e)_i} \right]_m$$

(2) 用电变量 (V_e)

空调系统设备用电为总用电量- B_e ，计算公式为

表7 归一化能耗系数

小时数	日期/时刻	每小时能耗/kW·h		系数		ECB_e	ECV_e	ECB_e 误差	ECV_e 误差
		B_e	V_e	$B_{e,coef}$	$V_{e,coef}$				
1	01/01 01 : 00	290.02	934.5	0.001 251	0.000 734	304.98	983.70	0.051 6	0.052 7
2	01/01 02 : 00	290.02	946.4	0.001 251	0.000 743	304.98	995.76	0.051 6	0.052 2
732	01/31 12 : 00	334.06	788.17	0.001 492	0.000 619	363.73	829.58	0.088 8	0.052 5
733	01/31 13 : 00	304.77	779.91	0.001 371	0.000 612	334.23	820.19	0.096 7	0.051 7
3 012	05/06 12 : 00	317.65	902.48	0.001 315	0.000 696	316.31	937.36	0.004 2	0.038 7
3 013	05/06 13 : 00	304.77	923.71	0.001 315	0.000 712	316.31	988.94	0.037 9	0.070 6
5 052	07/30 12 : 00	325.76	1 986.35	0.001 364	0.001 245	300.96	1 862.22	0.075 8	0.066 3
5 053	07/30 13 : 00	317.65	2 026.84	0.001 364	0.001 296	301.07	1 930.64	0.052 2	0.047 5
8 758	12/31 23 : 00	290.02	621.59	0.001 319	0.000 378	293.42	563.76	0.011 7	0.093 0
8 759	12/31 24 : 00	290.02	639.25	0.001 316	0.000 386	292.75	575.69	0.009 4	0.099 4

$$(V_{e,coef})_i = \left[\frac{(V_e)_i}{\sum (V_e)_i} \right]_m$$

(3) 分布因子 (f_{B_e})

建筑用电 + 室外照明用电占建筑能耗的百分比计算公式为

$$(f_{B_e})_m = \left[\frac{B_e}{B_e + V_e} \right]_m$$

式中, i (小时数) 为一年 8 760 h 中的某一小时;
 m 为该时间所在月份。

3.2 能耗预测方程

为预测每小时的能耗, 建立以下方程: 固定用电量方程; 变化用电量方程。固定用电量包括建筑用电、室外照明; 变化用电量为空调系统的耗电量, 随室外气象变化而变化。

(1) 固定用电量

$$(ECB_e)_i = E_m (f_{B_e})_m [(B_{e,coef})_i]_m$$

(2) 变化用电量

$$(ECV_e)_i = E_m [1 - (f_{B_e})_m] [(V_{e,coef})_i]_m$$

式中, E_m 为每个月的实际耗电量。

3.3 实例预测

预测7月30日中午12点 (第5 052 h) 的能耗数据, 计算结果见表7。

$$\begin{aligned} (ECB_e)_{5052} &= E_{七月} (f_{B_e})_{七月} [(B_{e,coef})_{5052}]_{七月} \\ &= (1\,710\,424.632 \times 0.13 \times 0.001\,364) \text{ kW} \cdot \text{h} \\ &= 300.96 \text{ kW} \cdot \text{h} \\ (ECV_e)_{5052} &= E_{七月} [1 - (f_{B_e})_{七月}] [(V_{e,coef})_{5052}]_{七月} \\ &= (1\,710\,424.632 \times 0.87 \times 0.001\,25) \text{ kW} \cdot \text{h} \\ &= 1\,862.22 \text{ kW} \cdot \text{h} \end{aligned}$$

3.4 误差分析

造成误差的原因有很多, 其中主要的原因有:

1) 在建立模型时, 无法获得详细建筑参数的情况下, 一些参数设为缺省模式 (例如: 设备热扰等)。

2) 天气参数也对模拟结果产生很大的影响, 模拟时选取的典型气象年的气候参数与实际的气象参数还是存在一定的区别 (典型气象年参数日最高气温为35.4 °C, 日平均温度27.49 °C; 2014年苏州市夏季高温日数为6天, 平均气温25.9 °C, 市

区极端最高气温36.5 °C)。以上两点因素直接影响了能耗模拟的准确性, 从而在计算归一化能耗系数时带来一定的偏差。

由表5可见, 用系数法来预测每小时建筑能耗误差率在10%以内, 说明该能耗快速预测方法可靠。

4 结束语

通过对电子类工业建筑的能耗数据进行数值分析, 建立该类建筑能耗的多元线性回归模型, 确立电子类工业建筑的基准建筑, 基准建筑能耗多元线性回归方程计算值与实际值误差为2.6%, 验证了回归方程的适用性, 该方法可适用于其他行业基准建筑的确立。

对基准建筑进行计算机能耗模拟试验 (模拟值 E_y 误差最大为7%), 获得基准建筑的每小时的能耗账单, 建立每小时建筑能耗预测方程, 预测值误差在可接受范围10%以内, 说明该能耗快速预测方法准确可靠。

结合建筑实际的能耗账单与随时间变化的归一化能耗系数, 可以快速准确地预测该类建筑每小时的能耗数据, 绘制出能源消耗曲线, 为企业监测动态能耗提供依据, 指导能源管理。在采用节能措施时, 可快速检验节能效果。

能源中心在对企业进行能源审查时, 可通过各因子与实际账单相乘, 快速预知该企业是否达到节能要求。

参考文献

- [1] 张子静. 大空间工业建筑空调系统节能研究 [D]. 山西: 太原理工大学, 2013.
- [2] 严智勇, 许巧玲. 福州地区大型办公建筑能耗的多元线性分析 [J]. 能源与环境, 2009 (1).
- [3] 潘毅群, 黄治钟. 建筑能耗模拟的校验方法及其应用 [J]. 暖通空调, 2007, 37 (7).
- [4] Nelson Fumo. Methodology to estimate building energy consumption using energypplus benchmark models [J]. Energy and Buildings, 2010 (42): 2331-237.

(收稿日期: 2015-10-07) **EA**