

# 能源互联网系统用户侧冷热负荷预测模型研究

陈飞翔<sup>1</sup>, 胥建群<sup>1</sup>, 王晨杨<sup>1</sup>, 宋震<sup>1</sup>, 刘明涛<sup>2</sup>

(1. 东南大学, 江苏省 南京市 210096; 2. 江苏省电力设计院, 江苏省 南京市 210024)

## Research on Building Cooling and Heating Load Prediction Model on User's Side in Energy Internet System

CHEN Feixiang<sup>1</sup>, XU Jianqun<sup>1</sup>, WANG Chenyang<sup>1</sup>, SONG Zhen<sup>1</sup>, LIU Mingtao<sup>2</sup>

(1. Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;

2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 210024, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Developing energy internet system (EIS) is a necessary requirement for building resource-saving and environment-friendly society. Energy load prediction on user's side is the foundation for the design and operation of EIS. By taking typical non-industry production buildings in hot summer and cold winter zone as the research object, on the basis of heat transfer principle, this paper divided the influence factors of building's load into two parts: operational attribute and self-attribute parameters. Based on the operational attribute parameters, self-attribute parameters used for modification, a quick cooling and heating load prediction model of typical buildings was established, and the accuracy of model was validated. The results show that the proposed model has higher precision, higher engineering practical value for the energy management, regulation, transmission and distribution on user's side.

**KEY WORDS:** energy internet system; distributed energy system; non-industry production building; cooling and heating load; energy load prediction model; Energy Plus

**摘要:** 发展能源互联网系统是建设资源节约型、环境友好型社会的必然要求, 用户侧负荷预测是能源互联网系统设计和运行的基础。以夏热冬冷地区典型非工业生产建筑为研究对象, 依据传热学的基本原理, 将影响建筑负荷的因素分为运行属性和自有属性两类, 以运行属性参数为基准, 自有属性参数为修正, 依据主元解耦方法, 建立了典型建筑冷热负荷计算快速预测模型, 并验证了数学模型的准确性, 结果表明: 所提出的快速计算模型具有较高的精度, 对能源互联网系统用户侧的能量管理、调节和输配提供参考。

**关键词:** 能源互联网; 分布式能源; 非工业生产建筑; 冷热负荷; 能源负荷预测模型; Energy Plus

## 0 引言

能源互联网系统吸纳了大量的分布式能量采

集和储存装置, 综合了能源生产、传输和消费等环节, 满足系统内的电、冷、热、气等各种能量需求, 高效利用了各种品位的能源, 实现了能源的高效利用和可再生能源的兼容, 降低能源的系统风险。为实现能源互联网系统需求和供应的动态平衡, 能源互联网研究的重点包括4个部分: 分布式发电、智能配电、智能用电和用户侧服务<sup>[1-4]</sup>。其中用户侧的负荷预测是整个能源互联网系统设计和运行的基础, 目前用户侧服务在能量管理、调节和输配等方面有巨大提升潜力, 图1为能源互联网某一个节点的能量供需图, 简明地表示了能量的供需关系。

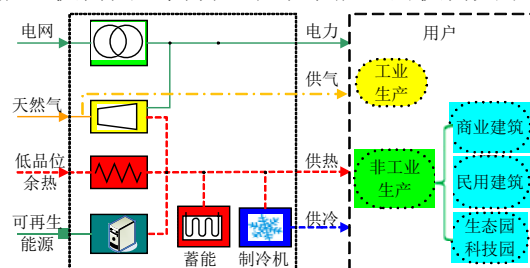


图1 能源互联网供需图

Fig. 1 Supply and demand of energy Internet

在图1中, 耗能用户包括工业生产、商业、民用、生态园和科技园等。其中, 非工业生产建筑的能耗占社会总能耗的1/3以上(2013年), 采暖、通风、制冷能耗占非工业生产建筑能耗的60%以上<sup>[5-6]</sup>。若建筑能耗全部使用电力, 会使社会用电的峰谷值相差巨大, 对电网产生冲击; 同时, 全部使用高品位的电能会大幅降低用能的综合使用效率。因此, 出现了能源互联网智能建筑板块, 完全可以用分布式能源或低品位余热满足建筑的冷热负荷需求, 有效地控制能源消耗总量和污染物排放, 达到能效高、清洁环保、安全性好、削峰填谷等目的<sup>[7]</sup>。

用户侧服务的基础是负荷的预测, 它的准确性将直接影响能源互联网系统的设计、配置和运行。为了准确地预测负荷, 目前广泛使用静态或动态负荷计算和软件模拟方法, 静态或动态负荷计算种类复杂, 常见的有 Mitalas 和 Stephenson<sup>[8-11]</sup>提出反应系数法来求解传热量和热负荷; Spitler<sup>[12]</sup>等提出了辐射时间序列法, 减少了传统计算方法中不必要的计算量; Kreider 和 Wang<sup>[13]</sup>最早将神经网络方法引入建筑物空调设备能耗预测工作; 中国学者提出基于系统辨识理论的频域回归方法计算非稳态传热<sup>[14]</sup>。软件模拟方法主要是采用 Design Builder 软件和 Energy Plus 软件计算建筑的冷热负荷, 软件的准确性得到美国暖通工程协会的验证<sup>[15-16]</sup>。

负荷计算和软件模拟方法均具有较高的准确性, 但是在实际应用中存在三大问题: 1) 两种方法需要提供建筑完整的施工图纸和参数, 在能源互联网系统规划前期, 通常对系统内建筑只有大致的了解, 无法获得完整参数; 2) 规划前期需要配置不同功能的建筑使得系统内负荷的峰谷差尽量小, 设计人员需要知道建筑负荷的动态特性及其功能分类的依据; 3) 人员密度、同时率和作息时间等参数可能会随着经济社会的发展而变化, 且和设计工况相差较大。因此需要掌握建筑负荷各种影响因素的影响作用, 建立既满足工程精度要求, 又能快速计算建筑的冷热负荷的预测方法。本文基于传热学的基本原理, 对影响建筑冷热负荷的参数进行归类、分析, 用主元解耦方法简化复杂的多因素耦合系统, 建立一种计算建筑冷热负荷的快速计算数学模型, 并验证模型的准确性。

## 1 建筑冷热负荷影响因素分析

### 1.1 传热模型

实际的建筑能耗模型相当复杂, 建筑冷热负荷快速计算模型中假设: 1) 房间由 4 个竖直的外墙、屋顶以及地板 6 个表面组成, 忽略房间内部蓄热量; 2) 内部热扰只有照明等用电设备、人员等; 3) 忽略内部空气流动; 4) 假设房间内温度分布均匀。

单位时间房间所需供给的冷负荷  $q_c$  和热负荷  $q_h$  应满足

$$\begin{cases} q_c = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \\ q_h = -q_1 - q_2 - q_3 - q_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $q_1$  为由于室内外温差引起的热量传递,  $\text{W/m}^2$ ;  $q_2$  为建筑吸收的太阳辐射,  $\text{W/m}^2$ ;  $q_3$  为外界空气渗透热,  $\text{W/m}^2$ ;  $q_4$  为建筑内部的综合散热功率,  $\text{W/m}^2$ 。

计算时间段内每小时的  $q_c$ ,  $q_h$  累加即为该时间段需要的冷热负荷总量。

依据国家标准<sup>[17]</sup>和传热学基本原理<sup>[18]</sup>,  $q_1$  满足式(2):

$$\begin{cases} q_1 = \frac{(T_o - T_i)(\frac{A_{wa}}{R_{wa}} + \frac{A_{wi}}{R_{wi}}) + k_f A_c (T_g - T_i)}{A_c} \\ r = \frac{A_{wi}}{A_{wa} + A_{wi}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $r$  为窗墙比, 即窗户面积和外墙总面积的比值;  $k_f$  为地面的综合传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $A_c$ 、 $A_{wa}$ 、 $A_{wi}$  和  $A_r$  分别为计算空调面积、外墙面积和窗户面积,  $\text{m}^2$ ;  $R_{wa}$ 、 $R_{wi}$  分别为外墙热阻和窗户热阻,  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。  $T_o$ 、 $T_i$  和  $T_g$  分别为外界环境温度、室内控制温度和地表温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。以夏热冬冷地区的典型城市(南京)为研究对象地理位置, 图 2 为南京全年环境温度变化图, 每小时 1 个测点。

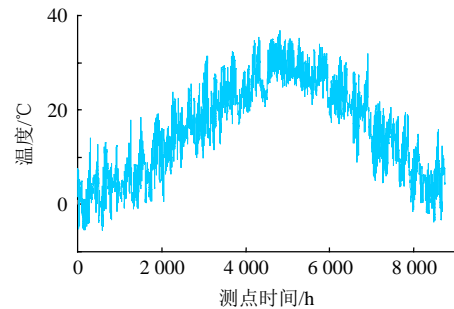


图 2 南京全年环境温度变化图

Fig. 2 Temperature of Nanjing

$q_2$  满足式(3)<sup>[17]</sup>:

$$q_2 = \frac{[(T_o - T_i) \sum \varepsilon_m k_m A_m + \varepsilon_g \xi_g A_c]}{A_c} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_i$  为围护结构传热修正系数;  $k_{mi}$  为围护结构的平均传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $A_{mi}$  为围护结构的面积;  $\varepsilon_g$  为通过窗户吸收阳光热量的修正系数;  $\xi_g$  为太阳辐射角修正系数, 这些系数都与建筑朝向  $\theta$  (即建筑正南方向和地理正南方向的夹角) 有关。

$q_3$  满足式(4):

$$q_3 = \frac{(T_o - T_i) C_p \rho N V}{A_c} \quad (4)$$

式中  $C_p$  为空气比热容;  $\rho$  为空气密度;  $N$  为换气次数;  $V$  为换气体积。

$q_4$  满足式(5),

$$q_4 = \frac{h}{3.6} (e_1 + 50 p_e) \quad (5)$$

式中:  $h$  为建筑单层实际高度;  $e_1$  为室内用电设备

密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $p_e$  为室内人员密度,  $\text{人}/\text{m}^2$ ; 人体平均散热功率取  $50 \text{ W}/\text{人}$ 。

## 1.2 冷热负荷研究方法

影响冷热负荷的因素可以分为2类:

1) 自有属性参数: 这类数据包括建筑的朝向、墙体和窗户的热阻、窗墙比等。当建筑建造好后, 这类参数几乎不变化。

2) 运行属性参数: 这类数据包括建筑的工作时间段、人员安排、人体舒适度要求、内部热源(如照明等用电设备)等。在实际使用过程中, 这类数据往往随着用户需求的变化而变化。

冷热负荷的计算属于多输入多输出模型, 为了简化分析, 把多变量过程分解成若干个子系统, 冷热负荷是各种因素的综合影响结果。数学模型的建立如图3。

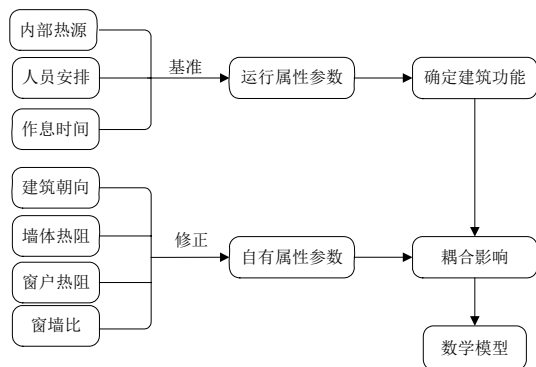


图3 研究思路图

Fig. 3 Research strategy

具体步骤包括:

1) 本模型认为影响建筑冷热负荷最大的因素是运行属性参数, 它直接决定建筑的功能。

2) 当建筑的功能确定后, 利用自有属性参数修正冷热负荷; 同时考虑到当室内的热源扰动大于某个值以后, 自有属性参数对冷热负荷会产生相反的变化趋势, 考虑了运行属性参数对自有属性参数的耦合影响。

3) 建筑的作息时间不同, 不同的时间段室内外的温差和建筑吸收的太阳辐射值也不同, 引入了温差系数矩阵和辐射系数矩阵。

## 1.3 影响因素参数分析

### 1.3.1 运行属性参数影响分析

研究运行属性参数对冷热负荷的影响时, 假定一组自有属性参数的值并且该组数值不变: 建筑位于江苏南京市, 朝向正南,  $R_{wa}=2 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ,  $R_{wi}=0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $r=0.5$ 。

当建筑 24 h 工作, 且夏季制冷温度  $26^\circ\text{C}$ , 冬

季制热温度  $20^\circ\text{C}$  时, 只变化  $q_4$ , 得到不同  $q_4$  时夏季典型日(7月15日)全天制冷功率、不同月份的制冷量、夏季平均和典型日的供冷密度随  $q_4$  的变化图, 分别见图4—6。

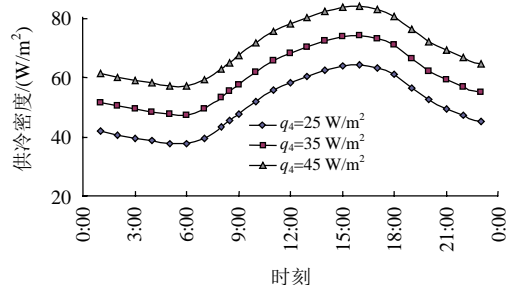


图4 夏季典型日不同  $q_4$  时全天供冷密度变化

Fig. 4 Changes of cooling density with  $q_4$  in summer typical day

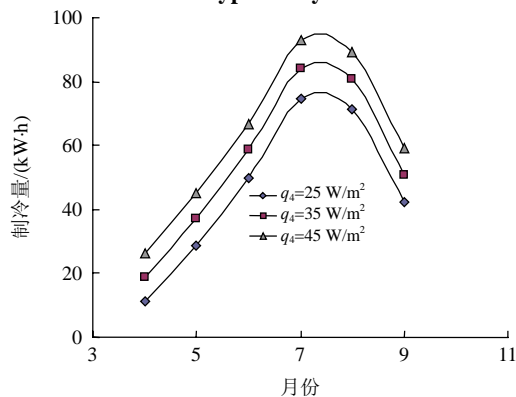


图5 不同  $q_4$  时各月制冷量的变化

Fig. 5 Changes of cooling power with  $q_4$  in cooling month

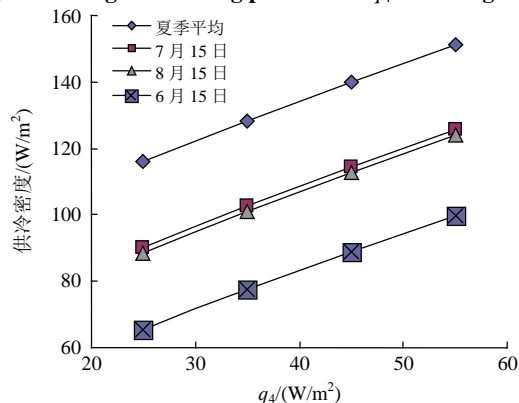


图6 夏季平均和典型日的供冷密度和  $q_4$  的关系

Fig. 6 Relationship between cooling density and  $q_4$

由图4—6可知, 典型日各时间段内的制冷量和全天制冷量之间满足一定的比例关系, 各月制冷量和全年制冷总量、不同月份典型日制冷功率以及热负荷也可以得到类似的规律。当  $q_4=25 \text{ W}/\text{m}^2$  时, 各时间段内制冷量比例系数  $a_c$  和制热量比例系数  $a_h$  见附录表A1。冷热负荷基准值用  $q_4$  和作息时间表示

$$\begin{cases} C_{ba} = f_1(q_4) \\ H_{ba} = f_2(C_{ba}) \end{cases} \quad (6)$$



式中： $C_{ba}$  为 6—8 月 24h 工作的平均制冷负荷基准值，实际的冷负荷需求按照作息时间表进行调整；同  $H_{ba}$  为热基准值，计算月份是 12—2 月。 $C_{ba}$ 、 $H_{ba}$  用多项式表示，多项式的系数列于附录表 A2，表中  $C_{ba}(1)$  表示  $C_{ba}$  的一次项系数，依此类推。

表 1 1、2 号楼计算结果对比

Tab. 1 Comparison of calculation results

参数	项目	1 号楼	2 号楼
夏季平均冷负荷/(W/m <sup>2</sup> )	Energy Plus	140	176.09
	本文模型	141.3	177
	相对误差/%	0.92	0.46
冬季平均热负荷/(W/m <sup>2</sup> )	Energy Plus	65.6	91.5
	本文模型	67.3	87
	相对误差/%	2.52	-5.17

### 1.3.2 自有属性参数影响分析

自有属性参数直接影响  $q_1$ — $q_3$ 。计算  $q_c$ 、 $q_h$  对  $\theta$ 、 $r$ 、 $R_{wa}$  和  $R_{wi}$  的偏导数，得到它们对冷热负荷的影响函数。影响函数用多项式表示，如式(7)所示，多项式系数列于附录表 A2，表中  $\theta_4(4)$  为  $G_h(\theta)$  的四次项系数； $R_{cwa}(3)$  表示  $G_c(R_{wa})$  的三次项系数，依此类推。

$$\begin{cases} G_c(\theta) = f_3(\theta) \\ G_h(\theta) = f_4(\theta) \\ G_c(r) = f_5(r) \\ G_h(r) = f_6(r) \\ G_c(R_{wa}) = f_7(R_{wa}) \\ G_h(R_{wa}) = f_8(R_{wa}) \\ G_c(R_{wi}) = f_9(R_{wi}) \\ G_h(R_{wi}) = f_{10}(R_{wi}) \end{cases} \quad (7)$$

### 1.3.3 运行属性和自有属性参数耦合影响

运行属性和自有属性参数的耦合主要包括： $q_4$  耦合项、辐射系数矩阵和温差系数矩阵。1) 当  $q_4$  较小时，墙体热阻和窗户热阻越大，冷热负荷越小；当  $q_4$  大于一定的值以后，会产生相反的效果。2) 为得到辐射系数矩阵，利用 Autodesk Ecotect Analysis 软件模拟日照、阴影和采光，选用南京的气象和辐射数据，模拟结果见图 7。7(a)、7(b)是同一个建筑(正南方向)在 7 月 15 日 8 点和 17 点时的太阳日照阴影图；7(c)为建筑朝向为南偏东 40° 时 8 点的太阳日照阴影图；7(d)是室内自然采光照度图。3) 温差系数矩阵的计算依据是南京地区不同时间室外环境温度和室内维持温度的差值。全天各时间段内的辐射系数  $\theta_c$ 、 $\theta_h$ ；温差系数  $t_c$ 、 $t_h$  (下标 c 表示制冷月份，h 表示制热月份) 见附录表 A1。

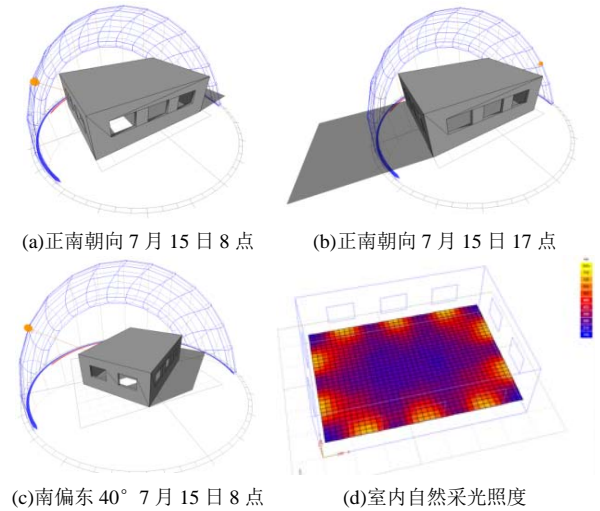


图 7 辐射系数矩阵分析图

Fig. 7 Analysis of radiation coefficient matrix

## 1.4 建筑冷热负荷数学模型

按照上文的分析，得到夏(冬)季单位面积平均冷热负荷的数学模型：

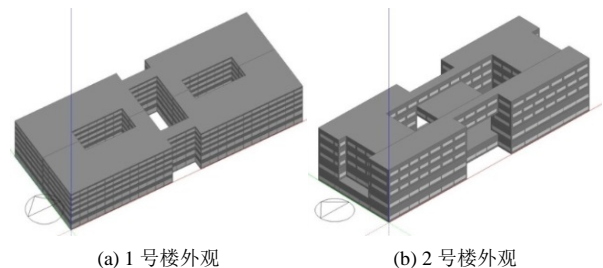
$$\begin{bmatrix} q_c \\ q_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{ba} T_c \\ H_{ba} T_h \end{bmatrix} \left[ 1 + \begin{bmatrix} G_c(\theta) \\ G_h(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_c(\theta) \\ S_h(\theta) \end{bmatrix} \right] \cdot \left( 1.04 - \frac{q_4}{205} \right) + \left[ \frac{1.78 - \frac{65 - q_4}{214.5}}{2.32 - \frac{65 - q_4}{214.5}} \right] \times \begin{bmatrix} S_c(t) \\ S_h(t) \end{bmatrix} \times \left( \begin{bmatrix} G_c(r) \\ G_h(r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_c(R_{wa}) \\ G_h(R_{wa}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_c(R_{wi}) \\ G_h(R_{wi}) \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

式中： $q_c$  和  $q_h$  为夏季和冬季单位面积平均冷热负荷，W/m<sup>2</sup>。 $T_c$  为工作时间段制冷量比例系数之和； $T_h$  表示工作时间段制热量比例系数之和； $S_c(\theta)$  表示制冷时间段辐射系数之和； $S_h(\theta)$  表示制热时间段辐射系数之和； $S_c(t)$  表示制冷时间段温差系数之和； $S_h(t)$  表示制热时间段温差系数之和。

## 2 建筑冷热负荷数学模型验证

### 2.1 能耗分析软件验证数学模型

Energy Plus 可以对建筑进行全面能耗模拟分析，选用它验证本文数学模型的准确性<sup>[19]</sup>。建立 2 类典型功能的建筑楼(1 号和 2 号楼，如图 8)并进行能耗模拟分析。



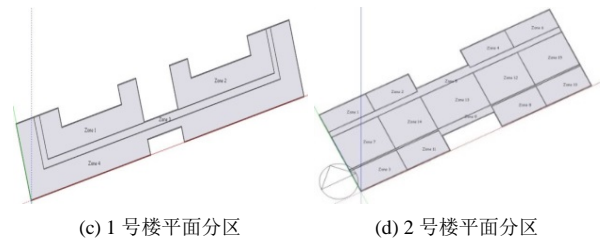


图 8 建筑总体外观图和某一层平面分区图

Fig. 8 Schematic Illustration of Buildings

1 号楼建筑朝向南偏西  $32.2^\circ$ ,  $A_c=40\,306\text{ m}^2$ ,  $R_{wa}=1.85\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ ,  $R_{wi}=0.435\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,  $r=0.54$ , 全天工作,  $p_e=0.08\text{ 人}/\text{m}^2$ ,  $e_l=67\text{ W}/\text{m}^2$ ,  $q_4=58\text{ W}/\text{m}^2$ 。2 号楼建筑朝向正南,  $A_c=7\,180.11\text{ m}^2$ ,  $R_{wa}=2.52\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ ,  $R_{wi}=0.427\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,  $r=0.57$ , 工作时间段 6—9 时, 11—13 时, 17—19 时,  $p_e=0.26\text{ 人}/\text{m}^2$ ,  $e_l=89\text{ W}/\text{m}^2$ ,  $q_4=92\text{ W}/\text{m}^2$ 。Energy Plus 和本文建立模型的计算结果对比列于表 1。

对比结果表明: 2 种方法得到的冷热负荷结果都很相近, 相对误差在工程允许范围内。

2.2 文献验证数学预测模型

文献[20]对东华大学某教学楼进行了能耗模拟, 并调研 2011 年和 2012 年的实际空调负荷。该楼位于上海, 和南京同属夏热冬冷地区, 朝向正南, 建筑参数见表 2。

表 2 教学楼参数

Tab. 2 Parameters of teaching building

参数	参数值
$R_{wa}$	0.6097
$R_{wi}$	0.1719
$r$	0.5134
$A_c$	15989.06
同时率	45%
$p_e$	0.08(取全天最大值)
$e_l$	35
$q_4$	35.04
夏季运行日期	5 月 20 日—10 月 1 日
冬季运行日期	11 月 20 日—3 月 20 日
运行时间段	7: 00—18: 00
全年运行时间/h	2816

按表 2 的参数值, 使用本文设计的数学模型进行计算, 得到建筑的冷热负荷。比较本文模型计算负荷和文献计算得到的负荷与该楼实际空调负荷数据如表 3 所示。

文献采用 Design Builder 软件计算结果本文预测模型相比较, 误差仅为 4.38%。但是和实际运行结果相比较, 误差高出了许多, 文献中指出, 在实际运行中, 随着学校的发展, 同时率比设计值略高,

表 3 教学楼负荷计算比较

Tab. 3 Comparison of load calculation results of teaching building

参数	数值
本文模型计算制冷量/(kW·h)	979681.025
本文模型计算制热量/(kW·h)	585728.440
本文模型空调负荷总量/(kW·h)	1565409.465
文献计算空调负荷总量/(kW·h)	1496673.038
调研 2011 年负荷总量/(kW·h)	1802218.580
调研 2012 年负荷总量/(kW·h)	1711907.958
本文模型与文献计算相差数值	4.38%
本文模型与 2011 年相差数值	13.14%
本文模型与 2012 年相差数值	8.56%

2011 年实际使用同时率大约比设计值高出 16%, 2012 年高出 13%, 使得实际空调负荷大于设计值。

验证结果表明: 本文负荷预测模型具有较高的精度和工程实用价值。同时, 在设计能源互联网系统时, 需考虑同时率随经济社会的变化规律。

3 结论

本文从能源互联网系统用户侧出发, 基于传热学的基本原理, 综合考虑了温差、辐射、空气渗透和室内活动等因素对建筑冷热负荷的影响, 建立了夏热冬冷地区典型非工业生产建筑的负荷预测模型并验证了它的准确性。具体来说得到以下结论:

影响建筑冷热负荷的因素分为自有属性和运行属性两类, 运行属性参数主要取决于室内综合散热功率和作息时间, 对冷热负荷影响最大, 决定建筑的功能分类。

建筑的自有属性参数值在建筑建成后一般不发生变化, 这些因素对建筑冷热负荷的影响可以用多项式函数表示。

不同时间太阳辐射强度和室内外温差有明显的区别, 引入了辐射系数矩阵表征不同时间建筑吸收太阳辐射的不同; 温差系数矩阵表征建筑室内外温差的变化。

确定了多影响因素的分析方法, 把复杂的问题分解成若干个子系统进行研究。预测模型以运行属性参数为基准, 自有属性参数为修正, 同时简化了两者复杂的耦合关系。

选用建筑能耗分析软件和文献验证负荷预测模型的准确性, 结果表明: 建立的负荷预测模型计算结果可靠, 满足工程应用要求。

本文的负荷预测模型对能源互联网系统用户侧的能量管理、调节和输配有工程参考价值。

## 参考文献

- [1] 查亚兵, 张涛. 关于能源互联网的认识与思考[J]. 国防科技, 2012, 33(5): 1-6.  
Zha Yabin, Zhang Tao. Understanding and thinking of Energy Internet[J]. National Defense Science and Technology, 2012, 33(5): 1-6(in Chinese).
- [2] 冯志兵, 金红光. 燃气轮机冷热电联产系统与蓄能变工况特性[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 25-30.  
Feng Zhibing, Jin Hongguang. Part load performance of CCHP with Gas turbine and storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 25-30(in Chinese).
- [3] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.  
Zhou Xiaoxin, Lu Zongxiang, Liu Yingmei. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008(in Chinese).
- [4] 中国科学院能源领域战略研究组. 中国至 2050 年能源科技发展路线图[M]. 北京: 中国科学出版社, 2009.  
Research Group of Strategy of Energy Field of China. Energy technologies roadmap to 2050 of China[M]. Beijing: Science Press, 2009(in Chinese).
- [5] 张士杰, 李宇红, 叶大均. 燃机热电冷联供自备电站优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 183-188.  
Zhang Shijie, Li Yuhong, Ye Dajun. Optimal planning of a gas turbine CCHP plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 183-188(in Chinese).
- [6] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 30-40.  
Jiang Yi. Current building energy consumption in China and effective energy efficiency measures[J]. HV&AC, 2005, 35(5): 30-40(in Chinese).
- [7] Wu D W, Wang R Z. Combined cooling, heating and power: a review[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(5): 459-495.
- [8] Mitalas G P, Stephenson D G. Room thermal response factors[J]. ASHRAE Transactions, 1967, 73(1): 261-266.
- [9] Stephenson D G, Mitalas G P. Cooling load calculation by thermal response factor method[J]. ASHRAE Transactions, 1967, 73(1): 152-165.
- [10] Stephenson D G, Mitalas G P. Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layerslabs [J]. ASHRAE Transactions, 1971, 77(2): 152-165.
- [11] Qiumin Dai, Xiande Fang. An approach to calculate transient heat flow through transparent materials [J]. American Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 1(1): 30-37.
- [12] Spitler, Jeffrey, Fisher, Daniel. Development of periodic response factors for use with the radiant time series method[J]. ASHRAE Transactions, 1999, 105(1): 491-509.
- [13] Wang S W, Chen Y M. Transient heat flow calculation for multi-layer constructions using frequency-domain regression method. Building and Environment, 2003, 38(1): 45-61.
- [14] 陈友明, 周娟, 王盛卫. 基于系统辨识的多层墙体 z-传递函数计算方法[J]. 湖南大学学报, 2004, 31(5): 82-87.  
Chen Youming, Zhou Juan, Wang Shengwei. Calculating method for the conduction z-transfer functions of multilayer walls based on system identification [J]. Journal of Hunan University, 2004, 31(5): 82-87(in Chinese).
- [15] Energy Plus<sup>TM</sup>, (2013), Energy plus engineering reference -The reference to energy plus calculations, 867-1008[R/OL].<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>.
- [16] ANSI/ASHRAE 2007. Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs[R]. Atlanta, GA American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007.
- [17] 中华人民共和国建设部. JGJ26—95 民用建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.  
Ministry of Construction. JGJ26—95 Energy conservation design standard for new heating residential buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 1996(in Chinese).
- [18] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006(2008 重印): 12-15.  
Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006(2008 Reprint): 12-15(in Chinese).
- [19] Energy Plus Development Team. Energy plus engineering reference : the reference to energy plus calculation[R/OL]. 2007- 08-01.<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>.
- [20] 周建. 东华大学某学院楼能耗模拟分析及其节能改造研究[D]. 上海: 东华大学, 2014: 19-27.  
Zhou Jian. Research on building energy consumption simulation and energy-saving reform plan[D]. Shanghai: Donghua University, 2014: 19-27(in Chinese).

附录 A

表 A1 全天各时间段内冷(热)负荷占比、  
辐射系数和温差系数

Tab. A1 Cooling (heating) load ratio, radiation  
coefficient and temperature coefficient %

时段	$\theta_c$	$\theta_h$	$t_c$	$t_h$	$a_c$	$a_h$
0—1	0	0	1.94	4.56	3.53	4.52
1—2	0	0	1.61	4.61	3.42	4.6
2—3	0	0	1.38	4.65	3.32	4.66
3—4	0	0	1.17	4.69	3.24	4.71
4—5	0	0	1	4.72	3.17	4.75
5—6	4.62	0	1.04	4.71	3.12	4.77
6—7	4.75	9.3	1.39	4.65	3.21	4.74
7—8	5.14	9.07	2.31	4.49	3.48	4.62
8—9	5.65	8.65	3.58	4.27	3.82	4.41
9—10	6.19	8.2	4.81	4.05	4.19	4.18
10—11	6.68	7.78	5.9	3.86	4.52	3.96
11—12	7.06	7.43	6.72	3.72	4.78	3.79
12—13	7.33	7.18	7.33	3.61	4.96	3.66
13—14	7.59	6.98	7.75	3.54	5.13	3.56
14—15	7.81	6.87	7.88	3.53	5.29	3.5
15—16	7.9	6.88	7.62	3.56	5.34	3.51
16—17	7.84	7.01	7.12	3.65	5.3	3.57
17—18	7.62	7.2	6.48	3.76	5.16	3.67
18—19	7.18	7.47	5.57	3.92	4.86	3.8
19—20	6.63	0	4.7	4.07	4.48	3.97
20—21	0	0	4.03	4.19	4.21	4.1
21—22	0	0	3.4	4.3	4	4.22
22—23	0	0	2.87	4.39	3.82	4.33
23—24	0	0	2.38	4.48	3.67	4.43

表 A2 影响函数多项式系数表

Tab. A2 Polynomial function coefficient

系数	数值	系数	数值
$C_{ba}(1)$	1.185	$r_c(1)$	$4.676 \times 10^{-1}$
$C_{ba}(0)$	$5.814 \times 10$	$r_c(0)$	$-2.059 \times 10^{-1}$
$H_{ba}(6)$	$-1.511 \times 10^{-11}$	$r_h(1)$	$-7.373 \times 10^{-2}$
$H_{ba}(5)$	$1.822 \times 10^{-8}$	$r_h(0)$	$3.266 \times 10^{-2}$
$H_{ba}(4)$	$-8.758 \times 10^{-6}$	$R_{cwa}(3)$	$1.480 \times 10^{-3}$
$H_{ba}(3)$	$2.134 \times 10^{-3}$	$R_{cwa}(2)$	$-6.902 \times 10^{-3}$
$H_{ba}(2)$	$-2.761 \times 10^{-1}$	$R_{cwa}(1)$	$8.912 \times 10^{-4}$
$H_{ba}(1)$	$1.837 \times 10$	$R_{cwa}(0)$	$1.270 \times 10^{-2}$
$H_{ba}(0)$	$-4.390 \times 10^2$	$R_{hwa}(3)$	$-4.983 \times 10^{-3}$
$\theta_c(4)$	$4.563 \times 10^{-9}$	$R_{hwa}(2)$	$4.692 \times 10^{-2}$
$\theta_c(3)$	$-1.062 \times 10^{-6}$	$R_{hwa}(1)$	$-1.653 \times 10^{-1}$
$\theta_c(2)$	$7.369 \times 10^{-5}$	$R_{hwa}(0)$	$1.771 \times 10^{-1}$
$\theta_c(1)$	$-6.544 \times 10^{-4}$	$R_{cwa}(2)$	$-9.988 \times 10^{-2}$
$\theta_c(0)$	$3.636 \times 10^{-5}$	$R_{cwa}(1)$	$1.696 \times 10^{-1}$
$\theta_h(4)$	$6.864 \times 10^{-10}$	$R_{cwa}(0)$	$-5.303 \times 10^{-2}$
$\theta_h(3)$	$-2.034 \times 10^{-7}$	$R_{hwa}(2)$	$4.749 \times 10^{-1}$
$\theta_h(2)$	$2.240 \times 10^{-5}$	$R_{hwa}(1)$	$-7.405 \times 10^{-1}$
$\theta_h(1)$	$-5.529 \times 10^{-4}$	$R_{hwa}(0)$	$2.249 \times 10^{-1}$
$\theta_h(0)$	$7.158 \times 10^{-5}$	—	—



陈飞翔

收稿日期: 2015-02-26。

作者简介:

陈飞翔(1991), 男, 硕士研究生, 主要从事冷热电联供系统用能特性研究,  
118566879@qq.com;

胥建群(1959), 男, 博士, 教授, 长期从事电站性能分析、仿真建模和分布式能源系统教学与研究工作, 本文通信作者,  
qlj1062@163.com;

王晨杨(1991), 女, 硕士研究生, 主要研究建筑能源与环境监控与管理,  
wangchenyang109@foxmail.com。

(责任编辑 王庆霞)