

# 应用蒙特卡罗模拟方法预测区域建筑负荷

王利珍<sup>1</sup>, 谭洪卫<sup>2</sup>

(1. 上海市建筑科学研究院, 上海 201108; 2. 同济大学 绿色建筑及新能源研究中心, 上海 200092)

**摘要:** 目前城市区域建筑能源规划阶段单体建筑信息不完备、无法同时使用常规负荷计算软件对各建筑进行冷热电力负荷预测, 本文提出采用蒙特卡罗模拟方法结合负荷计算原理预测区域建筑冷热电负荷的方法。该方法首先构建适用于新区多功能建筑的冷热电负荷预测随机模型, 并依据调研结果确定预测模型风险变量的特征分布, 再利用蒙特卡罗随机模拟技术应用 MATLAB 语言编制程序可求解研究区域峰值冷热负荷概率分布、电力峰值分布和全年逐时负荷。论文以某新区为例, 模拟了区域建筑的负荷特性, 仿真结果表明: 区域建筑负荷预测随机模型可以有效地模拟新区冷热电峰值负荷的频数分布和累积概率, 在典型应用场景下, 研究区域峰值电力负荷 95% 置信度下为 37 MW, 峰值冷负荷为 50 MW, 比传统方法下降 6%。

**关键词:** 能源规划; 负荷预测; 蒙特卡罗模拟; 随机模型

**中图分类号:** TU831.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2017)05-0763-08

## Prediction of the regional building load using Monte Carlo simulation method

WANG Lizhen<sup>1</sup>, TAN Hongwei<sup>2</sup>

(1. Shanghai Research Institute of Building Sciences, Shanghai 201108, China;

2. Research Center of Green Building & New Energy, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In light of the fact that detailed building parameters during the period of regional energy planning are hard to obtain and the conventional energy consumption simulation software for load calculation cannot accurately put in the parameter values and simulate every building's load relying only on the past experience, it is important to predict different kinds of load for the regional energy planning. This paper presents a new load forecasting method based on Monte Carlo simulation methodology, which is proposed for forecasting the regional building cooling, heating and electricity load. Regional building cooling, heating and electricity load prediction stochastic model (RBCHELPS model) is established followed by the risk characteristics of variable distribution in this model being determined. Besides, the distribution of peak cooling load probability for regional buildings as well as the annual average hourly cooling load can also be obtained by using Monte Carlo method. Furthermore, the simulation is performed according to the case study by considering the cooling, heating and electricity load characteristics of regional building. With RBCHELPS model the peak load of the frequency distribution and cumulative probability of the study area be effectively calculated. The simulation result shows that electrical load peak power under the confidence of 95% is about 37 MW, and the peak cooling load is 50 MW, lower than the traditional method decreased by 6%.

**Key words:** regional building; load prediction; Monte Carlo method; stochastic model; uncertainty

我国可持续的绿色生态城区已成为城市化建设的必然趋势, 以新区形式进行规划建设并建有区域能源中心的项目越来越多, 区域能源系统的复杂性增加, 负荷预测对系统容量的匹配有重大影响<sup>[1]</sup>。在区域建筑能源系统规划初期, 缺乏建筑详细信息。对区域建筑整体冷热电力负荷进行较为准确地预测, 还存在如参数和模型不确定性和未知性等问题。传统的区域负荷预测是由面积指标估

算法叠加来确定, 或者通过估计输入条件由软件进行模拟, 这两种方法预测精度不高, 且带有极大的经验成分和不确定性。

当前, 国内外已有区域建筑负荷计算和能耗计算方面的研究, 有建筑典型模型法<sup>[1]</sup>、非线性自回归模型<sup>[2-3]</sup>、人工神经网络<sup>[4]</sup>等方法, 这些方法可以在初步设计方案阶段后实现对单体建筑进行预测, 有的可以提前 1 h 预测, 有的在设计阶段完

收稿日期: 2016-12-14

修改稿日期: 2017-07-15

基金项目: 上海市建筑节能与绿色建筑技术创新服务平台(17DZ2292900)

第一作者: 王利珍(1980—), 女, 工程师, 博士, 主要研究能源规划和绿色建筑技术。E-mail: lizhen\_w@163.com

成负荷预测;还有的研究关注点在城市能耗层面<sup>[5]</sup>和能源系统模型方面<sup>[6-8]</sup>,有研究探索采用贝叶斯理论和模拟软件相结合的方法预测区域建筑负荷<sup>[9-10]</sup>,但在规划阶段,还很难获得建筑的特性参数和热工参数,使得上述方法难以实现区域建筑负荷预测。

蒙特卡罗模拟是通过大量的随机模拟试验,利用概率论解决问题的一种数值方法<sup>[11]</sup>。近年来,国内外学者对蒙特卡罗模拟方法在工程领域进行了相关研究,其主要应用于太阳能模拟、建筑热模拟、建筑能效提升潜力、地下水流动模型等方面<sup>[11-16]</sup>。本文针对规划阶段负荷预测,采用构建区域建筑冷、热、电负荷预测随机模型,并借助调研确定模型随机变量的分布,进而采用蒙特卡罗模拟技术来解决在规划阶段区域建筑负荷输入参数的诸多不确定性,给出在不确定条件下区域建筑负荷特征,最终为规划阶段复杂能源系统方案的优化设计和电力规划提供基础数据支撑。

## 1 蒙特卡罗模拟方法和区域建筑负荷预测模型

### 1.1 蒙特卡罗模拟方法

近年来,蒙特卡罗(Monte Carlo,简称MC)方法解决不确定性问题、多目标优化组合理论、地理信息系统(GIS)等方面研究有了明显的进展,为区域能源规划研究的进一步深入提供了新的理

论、方法和工具。针对能源规划不确定性的特点,本文选用蒙特卡罗数值模拟的方法对规划过程中存在的不确定性进行分析,解决规划阶段能源需求的不确定性。

MC方法是一种采用统计抽样理论近似地求解数学或物理问题的方法,它是一种同时处理多个变量的分析方法。应用MC方法解决区域建筑用能负荷复杂问题的基本思路为:第一步,建立描述区域建筑用能负荷与若干影响因素之间的数学模型,对模型中的不确定参数进行加工分析,确定其分布及相应的特征值;第二步,确定蒙特卡罗分析模型的主要风险变量,根据经验和历史数据,求出各个风险变量的概率分布;第三步,用计算机语言编写程序按照给定的概率分布生成大量的随机数;第四步,将随机数作为各变量的参数代入模型,求出区域建筑负荷值(即模型的目标变量),经过大量的模拟计算,可得到目标变量的概率分布及统计特征,从而预测多因素影响下的用能冷热电负荷峰值特征及其概率分布。本文采用Matlab语言编制程序来实现蒙特卡罗循环模拟,模拟流程见图1。

区域建筑用能负荷预测采用自下而上的方法<sup>[17]</sup>,对规划区内的建筑先按照功能进行分类,构建区域内规划典型建筑模型,构建如图2所示自下而上的方法进行负荷随机预测。

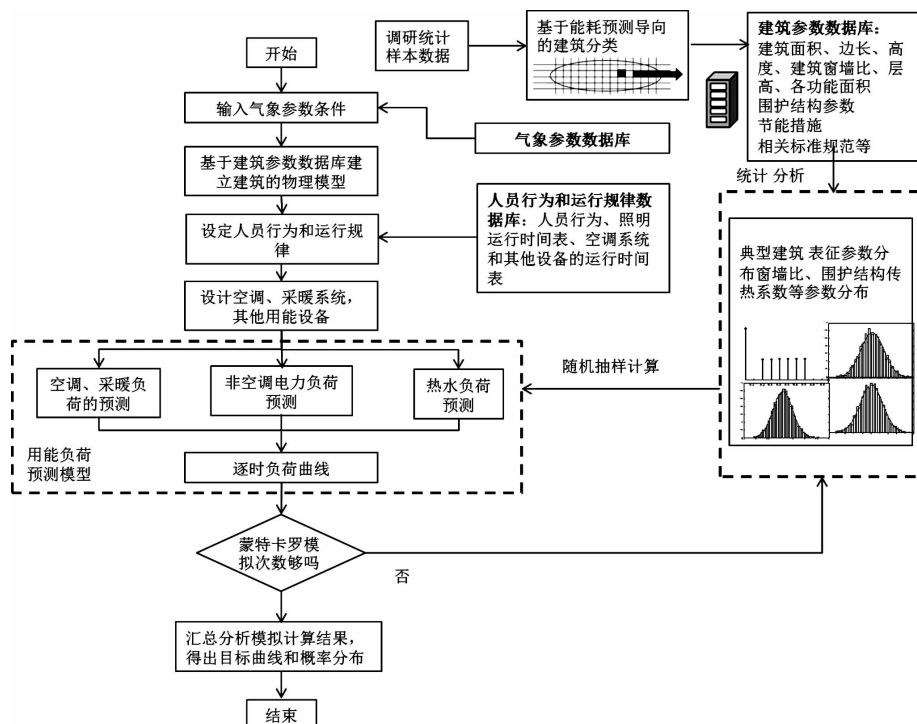


图1 蒙特卡罗模拟区域建筑负荷流程图

Fig. 1 Flowchart of Monte Carlo simulate building load

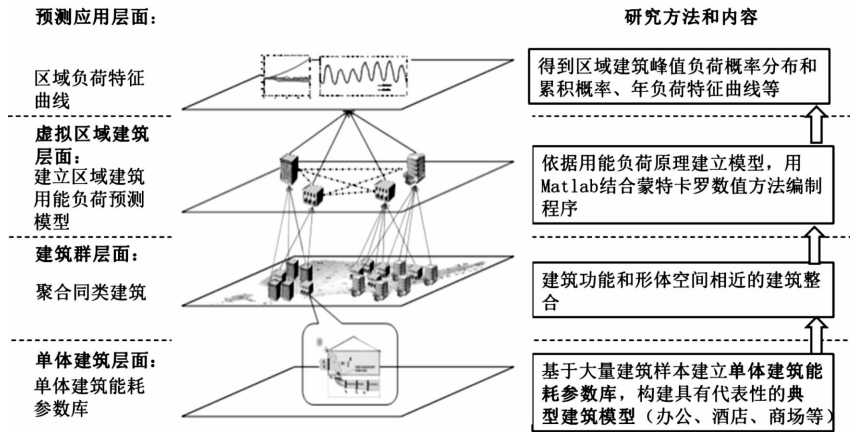


图2 区域建筑用能负荷预测方法

Fig. 2 Regional building energy load prediction method

区域建筑用能负荷的问题可以表述为: 在某个区域内有常见 6 类建筑, 规划区建筑的功能定位、容积率、总建筑面积、建筑高度等参数已确定, 在规划阶段简化建筑内部空间布局将同类型建筑看成一个整体, 如图 2 所示. 建立基于 MC 方法的区域建筑用能负荷预测随机模型, 包括空调冷负荷、热负荷、非空调电力负荷和热水负荷, 模型考虑建筑使用时间特性.

模型以调研统计样本建筑信息为基础, 建立基于能源需求为导向的建筑分类, 对分类建筑能耗信息参数进行统计分析, 获得表征参数的分布特征, 再结合当地所执行的公共建筑节能标准、居住建筑节能标准和绿色建筑评价标准. 不同类别建筑的负荷峰值时间不同, 将各类建筑的运行特性参数化, 输入到用能负荷预测模型中, 模型考虑了负荷变化互补特性和同时使用系数.

## 1.2 负荷预测随机模型的建立

### 1.2.1 空调冷负荷预测模型

采用冷负荷系数法结合区域建筑负荷不确定性因素, 建立区域建筑冷负荷预测随机模型:

$$CL_j = \sum_{n=1}^6 A^n \sum_{i=1}^5 \alpha_{i,j}^n q_i^n \quad j = 1, 2, \dots, 8760 \quad (1)$$

式中:  $n$  为建筑类型, 如  $n=1, 2, \dots, 6$  分别为办公类建筑、宾馆饭店类建筑、医院类建筑、学校类建筑、商场类建筑和住宅类建筑;  $q_i^n$  为第  $n$  类建筑单位面积第  $i$  类冷负荷指标 ( $W/m^2$ ),  $i=1, 2, \dots, 5$  分别为围护结构、新风、人员、照明、电气设备部分冷负荷.

$$\alpha_{1,j}^n q_1^n = \frac{T_j - T_1^n}{T_w - T_1^n} \left\{ 2[K_1 \Delta t_1 (1 - \bar{\epsilon}) + K_3 \Delta t_3 \bar{\epsilon} + C_z D_{j,\max} C_{LQ} \bar{\epsilon}] \frac{(M+1)h_0}{ma} + K_2 \Delta t_2 \frac{h_0}{h} \right\} \quad (2)$$

式中: 建筑的底边边长分别为  $a$ 、 $ma$ ,  $h$  和  $h_0$  分别为建筑高度和标准层高.

$$\alpha_{2,j}^n q_2^n = \left( \frac{h_j - h_1^n}{h_w - h_1^n} [d_p^n \lambda_j^n G^n \rho (h_w - h_1)] \right) \quad (3)$$

式中:  $h_j$ ,  $h_1^n$ ,  $h_w$  分别为室外空气逐时焓值, 室内设计条件焓值和夏季空调室外计算干球温度对应焓值,  $kJ/kg$ ;  $d_p^n$  为室内人员密度,  $p/m^2$ ;  $G^n$  为新风量,  $m^3/(h \cdot p)$ ;  $\rho$  为空气密度,  $kg/m^3$ ;

$$\alpha_{3,j}^n q_3^n = (d^n \phi^n \lambda_j^n C_{3,LQ}) q_3^n \quad (4)$$

式中:  $\phi^n$  为群集系数,  $\lambda_j^n$  为人员逐时在室率,  $C_{3,LQ}$  人体散热冷负荷系数;

$$\alpha_{4,j}^n q_4^n = \mu_j^n C_{4,CQ} q_4^n \quad (5)$$

式中:  $\mu_j^n$  为照明设施逐时使用率,  $C_{4,LQ}$  为照明散热冷负荷系数;

$$\alpha_{5,j}^n q_5^n = (\delta_j^n C_{5,LQ}) q_5^n \quad (6)$$

式中:  $\delta_j^n$  设备电器逐时使用率,  $C_{5,LQ}$  为电器设备冷负荷系数.

### 1.2.2 采暖热负荷预测模型

热负荷计算采用和空调冷负荷相同的简化思想, 即对区域建筑按照建筑功能类别划分进行整体考虑, 参照《实用供热空调设计手册》<sup>[16]</sup>.

$$HL_j = \sum_{n=1}^6 \sum_{k=1}^4 Q_{k,j}^n \quad j = 1, 2, \dots, 8760 \quad (7)$$

式中:  $Q_{k,j}^n$  为第  $n$  类建筑第  $j$  时刻第  $k$  类耗热量 ( $W$ ),  $k=1, 2 \dots 4$  分别为围护结构传热耗热量、外门窗缝隙冷空气渗入的耗热量、外门开启冲入冷风耗热量、附加耗热量.

$$Q_{1,j}^n = KF(t_n - t_j) \alpha_1 \quad (8)$$

式中:  $Q_{1,j}^n$  为第  $n$  类建筑第  $j$  时刻的围护结构基本耗热量,  $W$ ;  $F$  为传热面积,  $m^2$ ;  $t_n$ 、 $t_j$  分别为室内空气计算温度、室外空气温度,  $^{\circ}C$ ;  $\alpha_1$  为温差修正系数.

$$Q_{2,j}^n = 0.28c_p \rho (t_n - t_j) V \quad (9)$$

式中:  $Q_{2,j}^n$  为第  $n$  类建筑第  $j$  时刻的通过外门冷风渗透耗热量;  $W$ ;  $C_p$  为室外温度下空气比热容;  $V$  为渗透空气体积流量,  $V = \sum (lLM)$ ;  $l$  为房间某朝向上的门窗缝隙长度;  $L$  为每  $m$  门窗缝隙的基准缝隙长度进入室内空气量;  $M$  为门窗缝隙的渗风量综合修正系数,  $M = [d + (1+c)^b - 1](0.4H_x^{0.4})^b d$  是在风压单独作用下, 渗透冷空气量的朝向修正系数;  $b$  可取  $b = 0.67$ ;  $H$  是门窗的中心线标高;  $C$  是作用于门窗上的有效热压差与有效风压差之比。

$$Q_{3,j}^n = Q_{1,j}^n \times \beta_{kq} \quad (10)$$

式中:  $q_{3,j}^n$  通过外门冷风侵入耗热量 ( $W$ )  $Q_{1,j}^n$ ;  $\beta_{kq}$  为围护的基本耗热量; 为外门开启冲入冷风耗热量附加率。

### 1.2.3 非空调电力负荷预测模型

非空调电力负荷为建筑内除空调和采暖外的电力负荷模型, 包括室内照明插座、动力、其他特殊部分的电力负荷, 非空调电力负荷预测模型:

$$EL_j = \sum_{n=1}^6 (\mu_j^n q_4^n C_4^n A^n + \delta_j^n q_5^n C_5^n A^n + \tau A^n) \quad (12)$$

$i = 1, 2, \dots, 8\ 760$

其中  $\tau$  为其他特殊用电, 根据单体建筑用能特征分析结果, 在应用蒙特卡罗模拟方法时需结合经验和当地能耗监测系统的数据。

### 1.2.4 热水负荷预测模型

区域建筑如宾馆、医院、住宅建筑等考虑热水用水量需求; 热水负荷:

$$HWL_j = \sum_{n=1}^6 d_p^n \times Q_r^n \times (T_{hw} - T_{CL,j}) \quad (13)$$

$j = 1, 2, \dots, 8\ 760$

式中:  $T_{CL,j} = f(T_j)$  可通过测试获得冷水温度和室外空气温度的关系。

## 1.3 随机模型关键参数的确定

### 1.3.1 预测模型的关键参数及概率分布

随机模型的输入参数包括确定性参数和随机变量, 确定性参数主要包括规划区建筑面积、限高、层高、底边长、全年室外空气温度和焓值、热水温度等参数。对规划区所在区域的既有建筑进行问卷调查, 结合当地的统计年鉴, 同时将未来发展趋势和节能要求等预测参数设定于随机变量的分布函数中, 可得到各项随机变量的隶属度函数(表1), 对具有统一分布特征的随机变量进行随机抽样, 将抽样值代入模型中, 再多次循环计算, 每次循环计算结果可以得到一次区域建筑用能负

荷特征参数, 包括峰值参数和年逐时负荷。

表1 随机变量的分布

Tab. 1 Distribution of stochastic parameters

随机变量	分布
$T_f^n$	均匀分布
$K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$	正态分布
$d_p^n$	均匀分布
$q_4^n$ 、 $q_5^n$	三角型分布
$G^n$ 、 $\bar{\epsilon}$	离散型分布

本文采用反函数法对连续型和离散型随机变量进行直接抽样。

### 1.3.2 随机模型的求解

用 Matlab2012 编制程序进行仿真计算, 实现用能需求预测随机模型的蒙特卡罗模拟循环计算。设计的程序包含建筑信息, 气象信息, 温度, 湿度; 围护结构信息, 外墙、屋顶、窗户等; 内热源(照明、人员、设备); 用户输入和额外需求(温度设定值, 使用时间表, 新风量, 空调时间, 采暖时间, 动态计算出各类建筑的全年用能负荷情况, 并以各种表格形式输出。办公建筑、住宅建筑按照工作日和周末、节假日模式设置, 商场、宾馆按照全年模式设置。

气象参数从清华大学《中国建筑热环境分析专用气象数据集》导入程序。具体过程如下: 依据建立当地能耗数据库, 蒙特卡罗模拟过程随机数的生成由 Matlab 编程语言的随机数库函数, Normrnd 函数、Randi 函数生成正态分布、均匀分布等分布的伪随机数, 将产生的伪随机数代入预测模型进行求解计算, 获得目标变量数据。

## 2 仿真分析与实际案例研究

### 2.1 案例情况

以夏热冬暖地区某规划区为研究区域(图3), 规划区为办公、宾馆、商业、医疗卫生、教育和住宅为一体的综合行政区, 利用蒙特卡罗数值模拟法预测该区域建筑负荷。

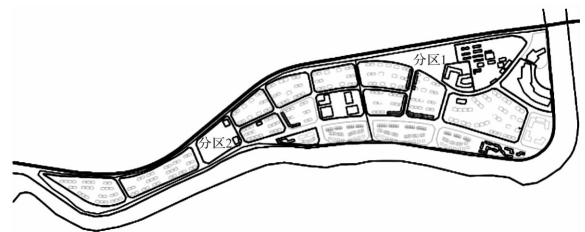


图3 研究区域规划分区

Fig. 3 Master plan of the study area

规划区分为分区1和分区2(见表2)。分区2

内 95.1% 的建筑为住宅, 住宅建筑布局较为分散, 列为二期开发规划. 本文将重点针对分区 1 进行用能负荷需求分析.

2.2 随机模型的参数确定

随机变量的确定是基于该地的建筑能耗信息

参数库, 其中参数分布的基准参数为满足建筑节能标准的推荐值, 性能参数优于基准值的为低碳情景区间值. 确定性参数取值方法见表 3.

《简明空调设计手册》<sup>[19]</sup>和《夏热冬暖地区居住建筑节能标准》<sup>[20]</sup>、《公共建筑节能设计标准》<sup>[21]</sup>

表 2 分区 1 和分区 2 建筑面积列表  
Tab. 2 Building area list of Zone I and Zone II

区域	A1 办公	A2 宾馆	A3 医院	A4 学校	A5 商场	A6 住宅	合计
分区 1	37 090	56 400	25 640	44 045	/	341 256	504 431
分区 2	/	/	/	17 382	1 296	337 769	355 151

表 3 随机模型中确定性参数取值方法  
Tab. 3 Deterministic parameters election method of stochastic model

数	备注
$A_n, h, h_0, a, m, F$	新区规划图
$T_j, h_j$	中国建筑热环境分析专用气象数据集
$T_w, h_w, D_{j,max}, \Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, h_w, \phi'', \lambda_j'', q_3'', C_{3,LQ}, \mu_j'', C_{4,LQ}, \delta_j'', C_{5,LQ}$ 等	《简明空调设计手册》 <sup>[19]</sup> 和《夏热冬暖地区居住建筑节能标准》 <sup>[20]</sup> 、《公共建筑节能设计标准》 <sup>[21]</sup>

程序编制时采用矩阵形式表达, 如确定性参数照明设施使用率:

$$\mu_j^n = \begin{bmatrix} \mu^1 \\ \mu^2 \\ \mu^3 \\ \mu^4 \\ \mu^5 \\ \mu^6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{11}^1 & \mu_{12}^2 & \cdots & \mu_{24}^1 \\ \mu_{11}^2 & \mu_{12}^2 & \cdots & \mu_{24}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{11}^6 & \mu_{12}^6 & \cdots & \mu_{24}^6 \end{bmatrix}_{6 \times 24}$$

随机变量的确定需要对既有城区各类建筑开展调研, 调研包括当地的经济水平、产业结构、人口状况, 在各类建筑中选取样本建筑, 调查用户的建筑信息、围护结构、用户信息、当地常规能源、用能模式、能源价格, 新能源补贴政策等, 建立该地的能耗信息基础数据库.

2.3 蒙特卡罗数值模拟结果

本案例每次按照关键参数的概率分布产生随机数, 随机数代入预测模型进行组合运算, 蒙特卡罗随机试验模拟次数设置为 2 000 次, 从而保障能够得到足够的统计信息. 对分区 1 运用负荷预测随机模型计算分析, 得到图 4 峰值冷负荷的频数和累积概率分布.

分区 1 的峰值冷负荷均值和标准差分别为 43.3 MW, 标准差为 3.93 MW, 累积概率 95% 时为 50 MW. 分区 1 非空调电力负荷结果见图 5.

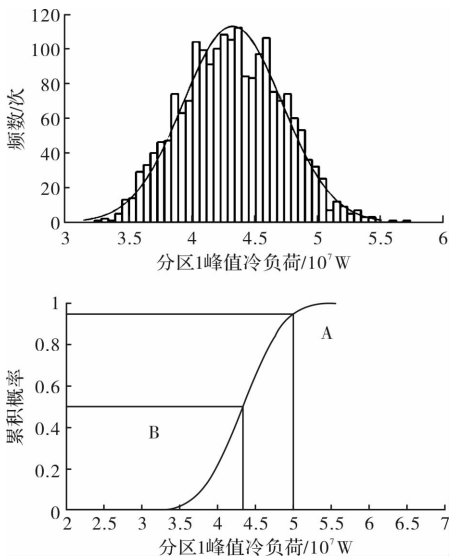
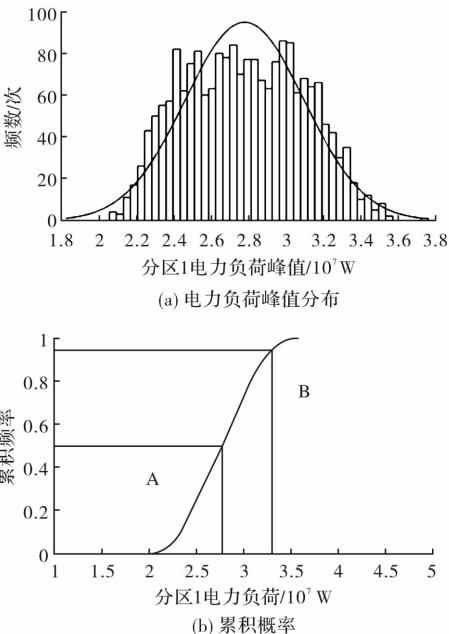


图 4 峰值冷负荷分布和累积概率分布  
Fig. 4 Peak cooling load frequency distribution and cumulative probability distribution



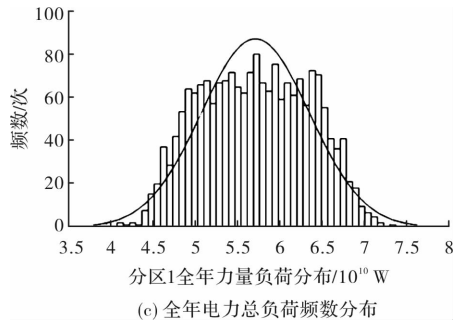


图5 电力负荷特征

Fig.5 Electrical load characteristic

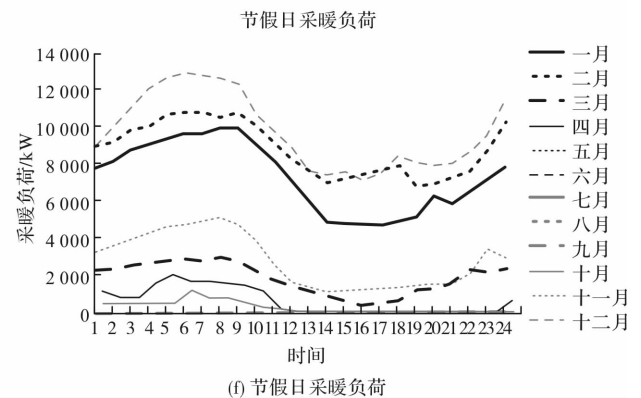
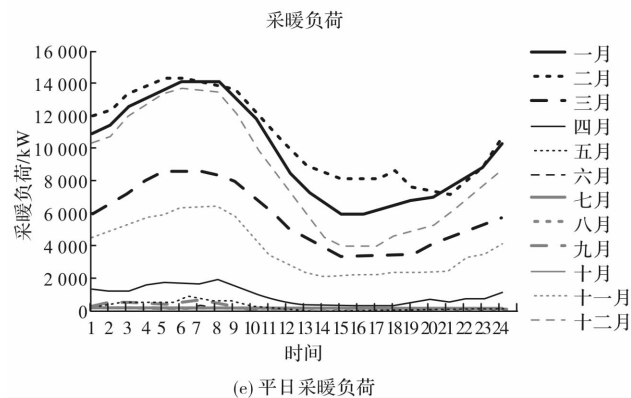
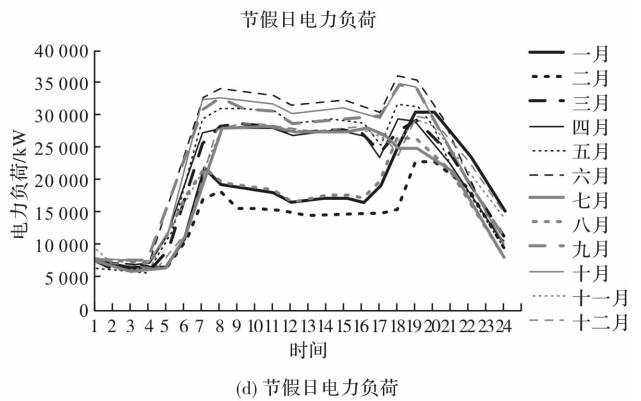
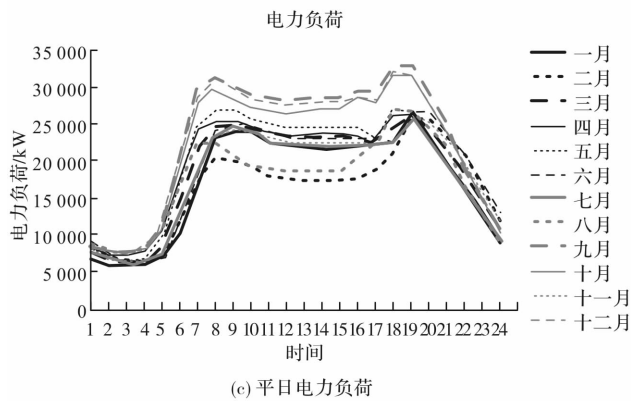
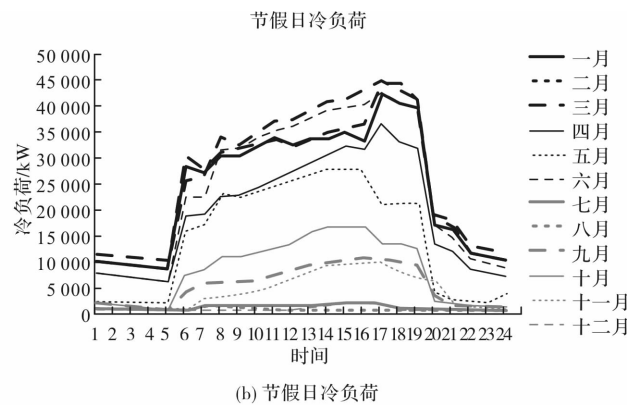
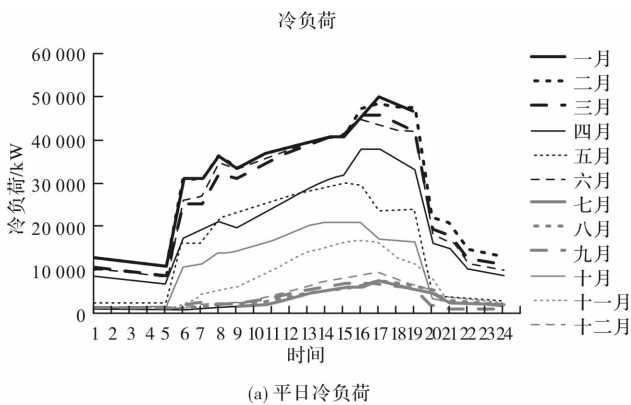
由图5可知,分区1的电力负荷呈现正态分布,均值点B处为出现概率最大时的负荷值,而A点为95%累积概率的负荷值。

图4中,分区1峰值冷负荷均值 $\mu$ 点是符合当

前节能设计标准的推荐值; $[\mu, \mu + \sigma] = [43.3, 47.23]$ 是常规情景区间值, $[\mu - \sigma, \mu] = [39.37, 43.3]$ 是采用先进技术的低碳情景区间值。若用单位面积空调冷负荷表示,则低碳情景区间值和常规情景区间值分别为 $(78.0, 85.8]$ 和 $(85.8, 93.6]$   $\text{W}/\text{m}^2$ 。

分区1在B点均值情景下的逐月典型日电、热、冷负荷动态特征见图6。

由图6可知分区1平日冷负荷的峰值高于节假日冷负荷。分区1在均值情景和95%情景(置信度)下,负荷参数见表4。采用传统负荷指标法得到该分区1的冷负荷为53.2 MW, MC方法计算95%情景下的冷负荷比指标法冷负荷降低6%,均值与指标法相比下降20%。



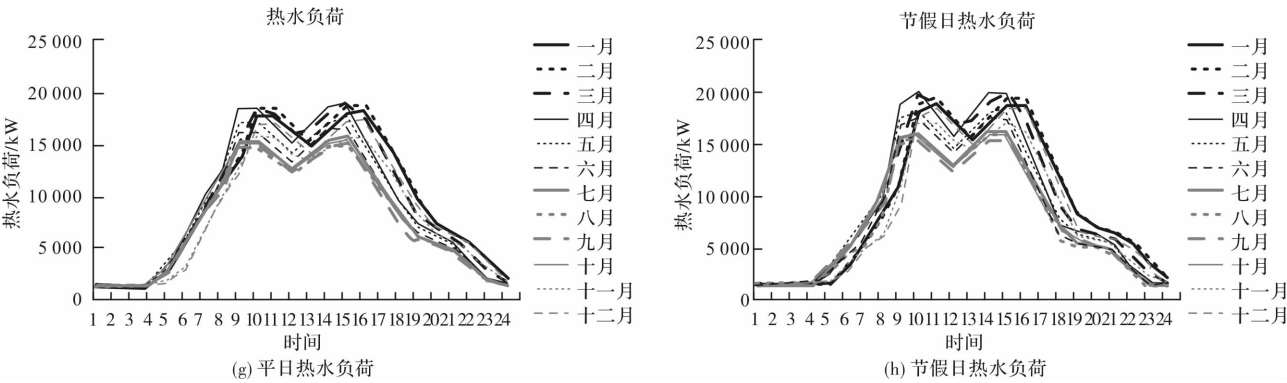


图 6 冷、热、电负荷动态特征(95%置信度情景下)

Fig. 6 Cooling, heating and electrical load characteristic(95% confidence coefficient)

表 4 研究区域负荷参数

Tab. 4 Load parameter of the study area

规划区域	冷负荷/MW		电力负荷/MW		热负荷/MW		热水负荷/MW		备注
	峰值	年总量	峰值	年总量	峰值	年总量	峰值	年总量	
分区 1	50	12901	37	16560	14.2	2890	19.1	74830	95%情景
	43.3	11611	27.8	14900	12.9	2061	17.2	67300	均值情景

因而, MC 模拟法求解规划阶段区域建筑用能负荷解决了不确定性参数问题, 获得了求解目标变量的特征分布, 在后期设计过程中实施节能技术, 提升建筑的性能使负荷趋于均值。

3 结论

通过 Matlab 工具结合蒙特卡罗方法, 建立区域建筑负荷预测随机模型, 模型可按照需求实现建筑冷热电负荷预测。区域建筑负荷可为区域能源系统和电力规划提供参考, 可实现能源系统投资的风险控制。论文以某规划区为例, 进行区域建筑冷热电负荷随机模拟预测。论文主要贡献如下:

- (1)区域建筑负荷预测随机模型解决了区域建筑负荷在规划阶段的不确定性和未知性问题, 为区域建筑能源规划提供新的思路。
- (2)通过随机预测模型得到区域建筑峰值冷热电负荷的概率分布和累积概率分布, 避免长期以来电力设备和能源供应系统存在的大容量设备配置问题, 为设计师和决策者提供技术支撑。
- (3)提出区域峰值负荷推荐值、常规情景区间值和低碳情景区间值预测方法。

本研究在综合考虑随机变量的条件下, 得到目标值的概率分布, 减少风险投资, 提出以区域峰值负荷推荐情景取值, 进行系统选型设计, 同时还可以降低输送系统能耗。该模型简化区域建筑负荷预测, 下一步将已运行的新区开展能耗测试对比, 为开展能源系统和电力设备的设计提供合理的方法支撑。

参考文献 References

[1] 龙惟定,白玮,范蕊,等. 低碳城市的区域建筑能源规划[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:182-194.  
LONG Weiding, BAI Wei, FAN Rui, et al. Community energy planning for built environment in low carbon cities[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011:182-194.

[2] POWELL K M, SRIPRASAD A, COLE W J, et al. Heating, cooling, and electrical load forecasting for a large-scale district energy system[J]. Energy, 2014, 74(5):877-885.

[3] YUN K, LUCK R, MAGO P J, et al. Building hourly thermal load prediction using an indexed ARX model [J]. Energy & Buildings, 2012, 54(54):225-233.

[4] SOLMAZ O, OZGOREN M, AKSOY M H. Hourly cooling load prediction of a vehicle in the southern region of Turkey by Artificial Neural Network[J]. Energy Conversion & Management, 2014, 82(4):177-187.

[5] 罗艳玲. 区域能源系统的优化设计[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.  
LUO Yanling. Optimization and design of regional energy system[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2012.

[6] YAMAGUCHI Y, SHIMODA Y, MIZUNO M. Development of district energy system model based on detailed energy demand model[C]//Proceedings of 8th International IBPSA conference 2003. Portugal: IBPSA, 2003:1443-1450.

[7] HENNING D, AMIRI S, HOLMGREN K. Modelling and optimization of electricity, steam and district heating production for a local Swedish utility[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175 (2): 1224-1247.

[8] AKOMENO Omu, RUCHI Choudhary, ADAM Boies. Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming [J]. Energy Policy, 2013, 61:249-266.

- [9] 俞东伟. 城市建筑能源需求预测模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2013: 72-104.  
YU Dongwei. Study on Forecast Model of Urban Building Energy Demand [D]. Shanghai: Tongji University, 2013: 72-104
- [10] 陶川, 韩杰, 欧阳磊鑫, 等. 基于贝叶斯模型的区域建筑冷/热负荷预测方法研究[C]//中国建筑学会建筑热动力分会学术交流大会论文集. 重庆: 中国建筑学会, 2015.  
TAO Chuan, HAN Jie, OUYANG Lei Xin, et al. Application and study of regional building cooling and heating load forecasting model based on Bayesian Theory[C]//China Architecture Society Building Thermal Energy Branch Academic Exchange Conference. Chongqing: The Architectural Society of China, 2015.
- [11] 刘军. 科学计算中的蒙特卡罗策略[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 2-15.  
LIU Jun. Monte Carlo strategies in scientific computing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 2-15.
- [12] JACOB D, BURHENNE S, FLORITA A R, et al. Optimizing building energy simulation models in the face of uncertainty[J]. IBPSA-USA Journal, 2010, 4 (1): 118-125.
- [13] SORATANA K, MARRIOTT J. Increasing innovation in home energy efficiency: Monte Carlo simulation of potential improvements [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(6): 828-833.
- [14] HAARHOFF J, MATHEWS E H. A Monte Carlo method for thermal building simulation [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(12): 1395-1399.
- [15] SORATANA K, MARRIOTT J. Increasing innovation in home energy efficiency: Monte Carlo simulation of potential improvements[J]. Energy & Buildings, 2010, 42(6): 828-833.
- [16] HASSAN A E, BEKHIT H M, CHAPMAN J B. Using Markov Chain Monte Carlo to quantify parameter uncertainty and its effect on predictions of a groundwater flow model[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(6): 749-763.
- [17] ZHAO F, MARTINEZ-MOYANO I J, AUGENBROE G. Agent-based modeling of commercial building stocks for policy support[C]//Proceedings of Building Simulation 2011; 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. Sydney: IBPSA, 2011: 2385-2392.
- [18] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 303-314.  
LU Yaoqing. Practical heating and air conditioning design manual. [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008: 303-314.
- [19] 赵荣义. 简明空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 26-61.  
ZHAO Rongyi. Concise Handbook of air conditioning system design [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998: 26-61.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准: JGJ 75-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Residential building energy saving standards in hot summer and warm winter area; JGJ 75-2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [21] 中国建筑科学研究院. 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.  
China Academy of Building Research. Design standard for energy efficiency of public buildings; GB50189-2015[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.

(编辑 桂智刚)

(上接第762页)

- [4] 中华人民共和国建设行业标准. 建筑物防雷设计规范: GB50057-94[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.  
Construction industry standard of the People's Republic of China. Design code for protection of structures against lightning: GB50057-94[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2000.
- [5] LI M, YUAN J, ZHAO Z. Lowvoltage SPD coordination analysis[C]// Lightning (APL), 2011 7th Asia-Pacific International Conference on. Yew york: IEEE, 2011: 913-916.
- [6] FIAMINGO F, MARZINOTTO M, MAZZETTI C, et al. Evaluation of SPD protection distance in low-voltage systems[J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(5/6): 363-370.
- [7] Protection against lightning electromagnetic impulse-Part 3: Requirements of surge protective devices (SPD): IEC61312-3[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2000.
- [8] 王玮菲, 仇一凡, 冯世涛, 等. 雷电流特性及其波形分析[J]. 黑龙江电力, 2010, 32(6): 404-407.  
WANG Weifei, QIU Yifan, FENG Shitao, et al. The characteristics of lightning current and its waveform analysis [J]. Heilongjiang Electric Power, 2010, 32 (6): 404-407.
- [9] LAI J S, MARTZLOFF F D. Coordinating cascaded surge protection devices: high-low versus low-high [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(4): 680-687.
- [10] WANG Xigui. The Standby Protection of SPD in the Field of Low Voltage Power System [J]. World of Power Supply, 2007, (8): 37-39.
- [11] 潘家利, 周茂华. 低压配电系统浪涌保护器及雷电浪涌防护[J]. 广西气象, 2002, 23(2): 61-63.  
PAN Jiali, ZHOU Maohua. High voltage distribution system surge protector and lightning surge protection [J]. Guangxi Meteorological, 2002, 23 (2): 61-63.
- [12] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
China aviation industry planning and design institute. Manual of industry and civil distribution [M]. Beijing: China Power Press, 2005.
- [13] 李庆君, 刘晓东, 马云海, 等. 低压配电系统中多级电涌保护器的能量配合[J]. 内蒙古气象, 2006(4): 56-57.  
LI Qingjun, LIU Xiaodong, MA Yunhai, et al. The energy of multistage surge protector in low voltage distribution system [J]. Inner Mongolia Meteorological, 2006 (4): 56-57.
- [14] LI X, YANG Z, TANG H. Studying of energy coordination on transparent theory [C]// International Conference on Information Science and Technology. Nanjing: IEEE, 2011: 947-952.

(编辑 沈波)