

冷热负荷预测在区域供能项目中的应用—— 以上海西虹桥1号能源站为例

吕岩¹, 潘毅群^{1*}, 刘海静¹, 严建宏²

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海市嘉定区 201804; 2. 上海西虹桥新能源有限公司, 上海市青浦区 201702)

Application of Cooling and Heating Load Prediction for District Energy Supply: A Case in West Hongqiao 1# Energy Station

LYU Yan¹, PAN Yiqun^{1*}, LIU Haijing¹, YAN Jianhong²

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Jiading District, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai West Hongqiao New Energy Co., Ltd., Qingpu District, Shanghai 201702, China)

Abstract: During design and planning stages of district energy systems, the accurate estimation of the cooling and heating loads of buildings can provide a reasonable calculation basis for the configuration of equipment and economic analysis of systems. However, load prediction methods are developing and mature with the progress of model simulation tools and algorithms, but few studies have evaluated the accuracy of load prediction from the perspective of actual case operation. Therefore, in this paper, a case study of West Hongqiao 1# energy station was conducted. In the early stage of project planning, an algorithm based on typical building model is used to predict the cooling and heating loads of various types of buildings in the project plot; in the operation stage, the real values of loads are obtained through pipeline measurement data, and “occupancy rate” is proposed to quantify the difference between the predicted and real data. The results show that the “occupancy rate” of the project reached 41.4%, 62.1% and 85.7% in the three years of its operation. This conclusion is consistent with the actual situation, proving the accuracy of load prediction for projects involving district energy supply.

Keywords: district energy supply; cooling and heating load prediction; building model; measurement data; model verification

摘要: 在区域供能系统的设计与规划阶段, 准确估算建筑群的冷热负荷, 能够为系统的设备容量配置与经济性分析提

供合理的计算依据。随着模型仿真工具与算法的进步, 建筑冷热负荷预测方法不断发展成熟, 但较少有研究从实际案例运行情况的角度评价冷热负荷预测的准确性。以上海西虹桥1号能源站作为应用案例, 在项目规划初期采用基于建筑典型模型的冷热负荷指标预测算法, 预测该项目地块内的各类型建筑的冷热负荷; 在运行阶段, 通过管路计量数据得出各类型建筑的真实冷热负荷, 并引入“入住率”的概念量化冷热负荷预测值与实际值的差异。结果表明, 该项目投入运行3年的“入住率”分别达到41.4%、62.1%、85.7%。该结论与实际情况基本一致, 证明了冷热负荷预测在区域供能项目应用中的准确性。

关键词: 区域供能; 冷热负荷预测; 建筑模型; 计量数据; 模型验证

0 引言

在区域供能系统的设计与规划阶段, 准确的负荷预测结果能为设备容量配置与经济性计算提供重要依据。通常, 区域供能系统的负荷包括冷、热、电三部分。与电负荷相比, 区域内建筑群的冷热负荷会受到更多因素的影响, 例如天气参数、建筑的围护结构、室内环境设计参数等。这使得冷热负荷不确定性更大, 在越来越多实际项目中, 采用建筑模型进行较为准确的冷热负荷预测, 已成为项目工作流程中的必需环节^[1]。随着建筑模型仿真工具与算法的进步, 冷热负荷预测方法不断推陈出新, 并在各类实际应用中趋于成熟^[2]。对于规划与设计阶段的区域供能项目, 单

基金项目: 国家自然科学基金(51978481); 世界银行全球环境基金技术援助项目。

National Natural Science Foundation of China (51978481); The World Bank/GEF (Global Environment Facility) Trust Fund.

位面积指标法常为实际工程的设计方采用。该方法简洁方便,但估算较为粗略、静态,准确性不足以反映冷热负荷的时间动态特性,且常常高估区域建筑的总冷热负荷强度^[3]。因此,有必要采用精度更高的方法预测区域冷热负荷。

随着计算机技术的进步,建筑能耗模拟软件的性能不断提升,这些软件工具能够对建筑的用能特性进行详尽的数值模拟,从而提供更精确的建筑冷热负荷预测值^[4]。韩传忠等以DeST软件中典型建筑模型为基础,预测了多类建筑的全年及峰值冷负荷^[5]。Ourghi等将DOE-2建筑模型中的多个几何参数作为控制条件,提出了一种办公建筑年制冷能耗简化预测方法^[6]。王国弟等将空调选型设计软件HDY-SMAD和能耗模拟工具DeST结合,实现了对区域全年供冷与供热量的预测^[7]。Xu等采用基于DOE-2建筑能耗模型,结合对实际项目的场景分析确定同时使用系数,预测了某一社区的用能指标^[8]。王利珍设计了一种基于Monte Carlo方法的冷热负荷预测算法,对某个处于规划阶段的建筑群进行分析,得到其峰值冷负荷及其在全年尺度上的分布概率^[9]。总体来说,此类方法的关键在于提取建筑参数信息,以提高模型输出即预测冷热负荷的仿真精度^[10]。

另一方面,在已有建筑冷热负荷数据积累的基础上,可利用统计学方法分析冷热负荷与各类因素的相关关系,在实际应用中以这些相关因素作为输入条件,直接得出冷热负荷预测结果^[11]。对于单体建筑,需要建筑供能系统的运行数据作为支持,这类冷热负荷预测方法更多适用于运行阶段的节能优化与故障诊断,例如多元线性/非线性回归^[12]、时间序列模型^[13]、人工神经网络^[14]、支持向量机^[15]等。

对于新建建筑群的冷热负荷预测,则需要更大规模的数据积累对多种不同类型的建筑进行数据计量,构建能涵盖多种设计场景的数据库,从而进行统计学分析。例如,Warnken等对澳大利亚旅游业建筑能耗数据库进行回归拟合,并以此对全行业相关建筑的用能负荷进行了预测^[16]。蒋小强等采用人工神经网络模型,以某区域供冷系统的计量数据作为训练集,对该区域的总逐时冷负荷在全年尺度上进行了预测^[17]。Wan等采用主成分分析法,以近30年的多类气候区中建筑的冷热负荷数据为基础,建立了建筑冷热负荷与天气参数的关联模型^[18]。受条件所限,这类研究并未得以广泛开展。

同样受到限制的还包括如何利用实际案例的运行

数据来评价建筑冷热负荷预测的准确性。对于建筑用电能耗的预测,采用电表计量数据对预测结果进行校验并不困难^[19],但与电耗数据不同,计量建筑空调系统的耗冷量与耗热量难度较大,使得目前多数可获得的建筑运行数据并不包含全年的冷热负荷。此外,在很多实际工程项目中,负责规划的设计团队并未参与供能系统的运行管理。随着区域供能项目的建设投产与运行,从系统实际运行的角度检验规划阶段冷热负荷预测的准确性尤为重要。

因此,本文以上海虹桥商务区能源站作为案例,分析了冷热负荷预测在该项目中的应用情况,利用能源站供给侧的测量数据得出建筑群的全年逐日冷热负荷,实现了对冷热负荷预测结果准确性的验证。具体来说,在设计阶段采用基于模型仿真的方法,根据区域内各类型建筑规划面积,预测其总冷热负荷;在运行阶段,监测能源站管路流量与供回水温差数据,实现对建筑群冷热负荷的逐日计量;最后,比较冷热负荷预测数据与系统运行后近3年的计量数据,分析冷热负荷预测结果与实际运行情况的差异。

1 案例简介

案例研究的对象为上海西虹桥1号能源站(建设效果如图1所示),位于上海市虹桥商务区西区,已于2018年年初建成并投产。目前,该能源站为其规划区域内占地面积约为160 hm²的大型建筑群供能。该项目是集商业、餐饮、办公于一体的大型城市综合体,其中包括了办公、集中商业、街区商业等在内的多栋单体建筑,功能综合性较强,建筑群卫星图如图2所示。



图1 能源站建设效果图

Fig. 1 Construction rendering of the energy station



图 2 已建成建筑群卫星图
Fig. 2 Satellite map of completed buildings

区域内的全部酒店建筑均采用自行配置的风冷热泵机组作为其空调系统的冷热源，因此能源站对该建筑群的供能任务不包含对其中酒店建筑的供冷与供热。与建筑群用电能耗预测相关的研究与准确度验证工作已相当成熟，本文重点关注能源站需承担的冷热负荷预测。

2 冷热负荷预测

2.1 冷热负荷预测方法

本文采用基于建筑典型模型的冷热负荷指标预测算法，并在模型仿真计算的过程中，结合对项目实际状况的场景分析，对参数设置进行相应调整。具体步骤如下：

- 1) 根据项目资料，确定需要使用的建筑典型模型的类型，本项目包含的建筑类型包括办公建筑、集中商业建筑、街区商业建筑；
- 2) 在现有研究成果基础上^[20]，建立建筑典型模型，完成其中不涉及场景分析的基本参数的设置；
- 3) 根据项目资料的已知设计参数，设置不同的内部冷热负荷场景，调整典型模型中的相关参数并通过模拟计算得到各场景下的单位面积冷热负荷；
- 4) 根据项目建筑图纸，统计并核实建筑面积和不同场景区域的空调面积，得到各类型建筑的典型冷热负荷指标；
- 5) 根据项目资料中各类型建筑的规划总面积，将建筑的典型冷热负荷指标通过区域层面的面积扩展，从而确定区域建筑群的总冷热负荷。

在场景分析之前，需事先分析冷热负荷预测模型的数学结构。建筑冷热负荷通常可按式（1）分为以下3部分：

$$Q_{c(h)} = Q_{en} + Q_{in} + Q_{oa} \tag{1}$$

式中： $Q_{c(h)}$ 为建筑的总冷（热）负荷； Q_{en} 为通过围护结构的传热； Q_{in} 为室内热源的散热； Q_{oa} 为因新风产生的得热或失热。表1归纳总结了这3部分的影响因素。在场景分析中，可参照该表选取待调整模型的参数。

表 1 冷热负荷与建筑模型参数的关系
Table 1 Relationship between cooling and heating loads and building model parameters

分项冷热负荷	影响因素	描述
Q_{en}	U_w	外墙的传热系数
	U_f	外窗的传热系数
	U_r	屋顶的传热系数
	S_{HGC}	外窗的太阳能得热系数
	$T_{sp,s}$	夏季室内设定温度
	$T_{sp,w}$	冬季室内设定温度
	S_F	建筑的体形系数
Q_{in}	W_{WR}	围护结构窗墙比
	q_{it}	照明功率密度
	q_{eq}	插座设备功率密度
	n	室内人员密度
Q_{oa}	n	室内人员密度
	V_{oa}	人均新风量
	$T_{sp,s}$	夏季室内设定温度
	$T_{sp,w}$	冬季室内设定温度
	$\varphi_{sp,s}$	夏季室内设定湿度
	$\varphi_{sp,w}$	冬季室内设定湿度

2.2 模型设置

2.2.1 典型模型的基本参数设置

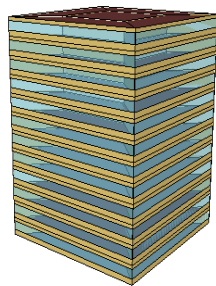
选用EnergyPlus软件计算典型建筑模型在各类场景下的冷热负荷指标。模拟计算中输入的气象参数选用上海市典型气象年数据^[21]。在典型模型中，不涉及场景分析调整的基本参数设置如表2和表3所示。

表 2 典型模型的几何参数设置
Table 2 Geometric parameter setting of typical model

办公建筑		
建筑面积/m ²	体形系数/m ⁻¹	窗墙面积比
19 200	0.1	0.5
层数	层高/m	朝向
12	4	南

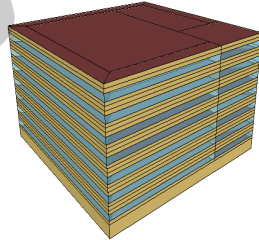
续表

几何示意图:



集中商业建筑		
建筑面积/m ²	体形系数/m ⁻¹	窗墙面积比
59 736	0.2	0.5
层数	层高/m	朝向
地上7+地下1	4.5	南

几何示意图:



街区商业建筑		
建筑面积/m ²	体形系数/m ⁻¹	窗墙面积比
1184	0.28	0.5
层数	层高/m	朝向
地上2+地下1	首层6+其余4.5	南

几何示意图:

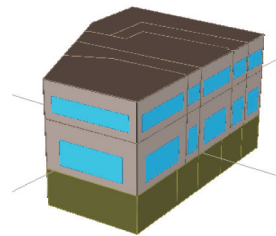


表3 典型模型的围护结构参数设置

Table 3 Envelope parameter setting of typical model

围护结构部位	参数	
屋顶	传热系数/(W·(m ² K) ⁻¹)	0.5
外墙	传热系数/(W·(m ² K) ⁻¹)	0.8
	传热系数/(W·(m ² K) ⁻¹)	2.5
外窗	遮阳系数	0.35
	太阳得热系数	0.31

2.2.2 基于场景分析的参数调整

根据项目资料提供的空调设计参数,对办公、集中商业、街区商业3类典型建筑模型分别设置若干场景,并根据表4和表5对各场景下的相关模型参数取值进行调整。

表4 各场景下室内环境参数的设置

Table 4 Setting of indoor environmental parameters

场景	室内设计温度/℃		室内设计湿度/%		新风量/ (m ² ·(h·人) ⁻¹)
	夏季	冬季	夏季	冬季	
办公建筑					
办公室	25	22	55	45	30
其他区域	26	20	55	—	10
集中商业建筑					
餐饮	24	20	60	—	25
商铺	25	20	60	—	20
连通廊	25	20	60	—	20
主力店	25	20	60	—	20
超市	24	20	60	—	20
影院	24	20	60	—	15
街区商业建筑					
餐饮	24	20	60	—	25
商铺	25	20	60	—	20
连通廊	25	20	60	—	20

表5 各场景下内热源参数的设置

Table 5 Setting of internal heat source parameters

场景	人员密度/(m ² /人)	照明功率密度/(W·m ⁻²)	设备功率密度/(W·m ⁻²)
办公建筑			
办公室	8	11	20
其他区域	10	14	0
集中商业建筑			
餐饮	2	30	20
商铺	6	30	30
连通廊	5	20	10
主力店	4	30	20
超市	5	30	20
影院	1.5	20	20
街区商业建筑			
餐饮	2	30	20
商铺	6	30	30
连通廊	5	20	10

办公建筑的其他区域包括公共区域、走道、电梯厅、办公大堂等。商业建筑典型模型中的“餐饮”不包括厨房，厨房的空调冷热负荷按如下方式计算：厨房排油烟量按60次/h的换气次数预留，补风量为排风量的90%，其中岗位补风（排风量的30%）经过预处理后送入，夏季冷却至26℃，冬季加热至15℃。

2.3 预测结果

通过全年尺度上的模拟计算，能够得到各类型建筑逐小时的单位面积冷热负荷指标。根据规划阶段的实际需求，为本项目提供了供能区域全年的逐时冷热负荷指标（如图3所示），并给出设计日峰值总冷热负荷强度（如表6所示），用以指导项目建设中的设备选型工作。

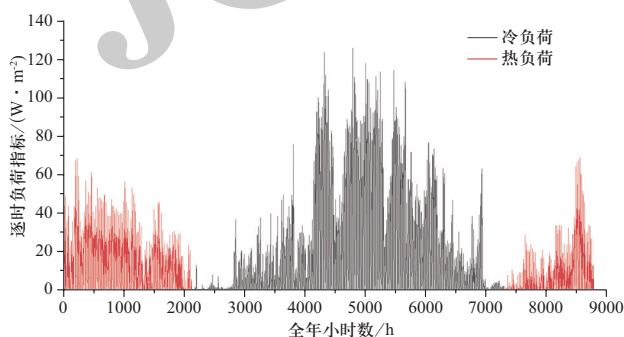


图3 全年逐时总冷热负荷指标预测值

Fig. 3 Predicted value of hourly total cooling and heating load throughout the year

表6 建筑群峰值冷热负荷预测值

Table 6 Predicted value of peak cooling and heating load of buildings

建筑类型	空调面积/m ²	冷负荷		热负荷	
		指标值/(W·m ⁻²)	总负荷/kW	指标值/(W·m ⁻²)	总负荷/kW
办公建筑	125 537	119.5	15 000.7	86.7	10 889.7
集中商业建筑	53 460	155.6	8 320.6	50.5	2 699.3
街区商业建筑	61 203	109.9	6 724.5	48.7	2 977.7
总和	240 200	125.1 (加权平均)	30 045.8	69 (加权平均)	16 566.7

3 计量数据及后处理

在本项目投产运行后，出于运营管理的需要，能

源站利用其机房的节能控制系统对供能过程中的部分关键数据（冷热水干管的流量、供回水的温差）进行计量，并按式（2）计算得到整个区域在某一时段的总耗冷、耗热量。

$$Q_{c(h)} = cmt|T_s - T_r| \quad (2)$$

式中： $Q_{c(h)}$ 为某一时段整个区域的总耗冷（热）量，kJ； c 为水的比热容，kJ/(kg·K)； m 为供水干管的质量流量，kg/h； t 为监测时长，h； T_s 为供水水温，℃； T_r 为回水温，℃。

在项目运行过程中，在每日固定时段由工作人员执行“抄表”操作，记录从上一个“抄表”时刻到当前时刻能源站供给的累计冷热量，相当于记录了区域内建筑群的逐日总冷热负荷。如图4所示，已记录数据涵盖了从项目开始投产（2018年5月）至2021年1月的全部供能系统运行日（即系统进行检修的时段除外）的实际冷热负荷。

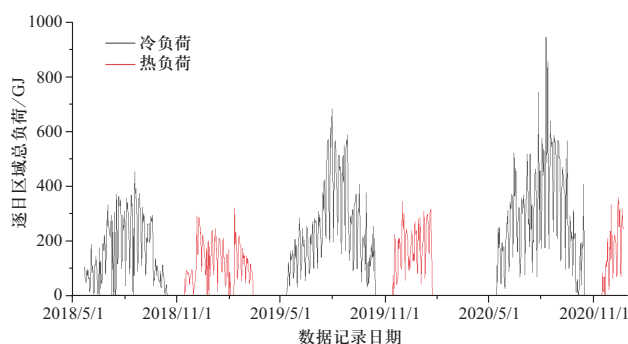


图4 区域逐日总冷热负荷记录结果

Fig. 4 Daily total cooling and heating load record of the district

针对该能源站采用的这种数据计量形式，可以先根据系统运行历史记录，将全部供能时段分割为若干个供冷季、供热季，并对各个供能季中的逐日冷热负荷求极值，将单日冷热负荷最大的运行日作为实际系统运行时应参照的设计日。通过比较设计日冷热负荷的预测值与实际值，实现对冷热负荷预测结果准确度的评价。

4 预测效果的比较与分析

根据图4，自2018年5月至2021年1月，已积累有3个完整的供冷季和1个完整的供热季数据。其中，2020年供热季因疫情期间的停工导致部分数据缺失，2020年末至2021年供热季则尚未结束。为了从全年的角度分析冷热负荷预测的准确度，本文将2018年11月

至2019年10月的完整供热季与供冷季视为一整年,通过比较计量数据得到的日冷热负荷实际值与模型计算得到的设计日冷热负荷预测值,即能确定冷热负荷预测与实际运行状态的差异程度(如表7所示)。

表7 设计日总冷热负荷的实际值与预测值的比较

Table 7 Comparison between actual and predicted values of the total cooling and heating load

	供热季设计日 总热负荷/GJ	供冷季设计日 总冷负荷/GJ
实际值	323	684
预测值	496	1102
实际值对预测值的占比	65.1%	62.1%

将冷热负荷二者综合来看,该年内能源站所需承担的峰值冷热负荷约占设计冷热负荷的65%。这一方面说明为保证设备容量的裕度,设计冷热负荷往往会选取偏大;另一方面,该结果也从侧面反映出新建建筑因入住率不足导致实际用能水平相较预测值偏低的情况。为了进一步探究“入住率”的变化情况,本文根据计量数据得出全部3个年份供冷季设计日的总冷热负荷实际值,并依次对比预测值,将该比值视为当年建筑群的“入住率”,如式(3)所示:

$$R = \frac{Q_{d,m}}{Q_{d,p}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R 为入住率; $Q_{d,m}$ 为设计日总冷热负荷测量值, GJ; $Q_{d,p}$ 为设计日总冷热负荷模型预测值, GJ。由于计量系统中仅包含一个完整的供热季数据,供热季设计日热负荷不参与对“入住率”参数的分析。

计算结果如图5所示,随着建筑投入使用的时间变长,“入住率”随之提升,对于办公、商业建筑而言,这一现象是合理的。此外,最近的供冷季(即2020年5月至10月)设计日的数据显示,其“入住率”达到了85.7%,考虑到设计冷热负荷预留10%的余量,这与“2020年该建筑群的入住已基本饱和”这一实际情况基本相符,也可说明规划阶段的冷热负荷预测结果比较准确,合理地指导了设备的选型设计。

5 结论

本文以上海西虹桥1号能源站作为冷热负荷预测的应用对象,工作内容贯穿其规划阶段直至运行阶段的全过程。在规划阶段,实现了对供能区域总冷热负荷的较准确预测,用以指导系统的设备选型;在运行阶段,对整个运行期的冷热负荷数据进行了记录

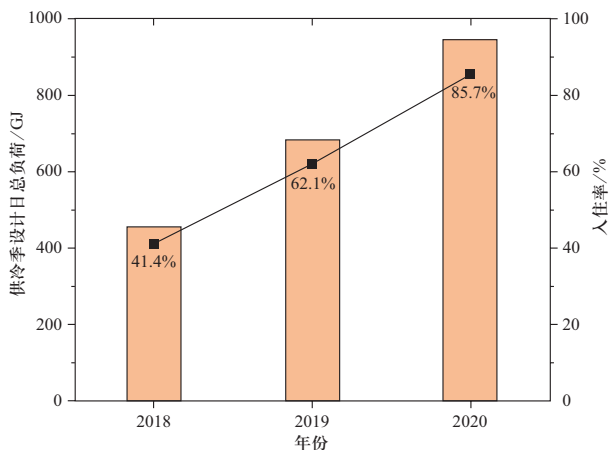


图5 近3年设计日冷负荷实测值及入住率

Fig. 5 Measurement data of the cooling load on design day and the occupancy rate in recent 3 years

与整理,得到了供能区域的逐日总冷热负荷实测值。随后,以设计日总冷热负荷为关注点,通过比较分析实测值与预测值,引入“入住率”这一参数来表示二者的差异,得到能源站在运行期3年内的“入住率”分别为41.4%、62.1%、85.7%。这一结果与该建筑群的实际运营状况基本相符。这种“入住率”的变化趋势反映出公共建筑在实际使用中会呈现出“建筑在建成初期时部分区域并未投入使用,但随着时间的推移,其使用区域的比例逐渐上升”这一特点。从第三年的计量数据来看,建筑群的实际峰值冷热负荷已与预测设计冷热负荷基本匹配,一定程度上显示了冷热负荷预测的准确性;此外,也正是通过对多年运行数据的积累与分析,才可能做出以上的判断,这也显示出了利用运行数据对冷热负荷预测结果进行验证的必要性。

仍有一些问题亟待进一步研究,例如:由于热负荷数据的缺失,本文的部分内容仅限于对冷负荷的分析,尤其是尚未获得最近一年“入住率”趋于饱和的情况下热负荷的实测值,这部分研究可在数据进一步积累后加以完善;由于计量系统的限制,当前的“抄表”数据仅限于对逐日冷热负荷的记录,而在建筑数据管理系统设计改造后,将能够对每5 min系统冷热负荷数据的计量与存储,这将为冷热负荷预测方法准确性的进一步验证与优化提供支持。

此外,随着该能源站规划范围内更多供能项目的建设完成与运营,采用本文提出的方法亦可分析其“入住率”的变化情况,从而有可能总结得到类似条件下办公及商业建筑的“入住率”变化规律。从实际应用的角度来说,将该指标作为一项影响验证过程的因素进行分析是很有意义的。这是因为“新建建筑的使用率在建成初期往往较低”这一客观现实

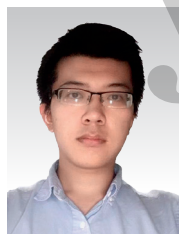
的存在, 会导致利用实测数据对冷热负荷预测结果进行验证时产生较大的误差; 同时, 又受到测量条件的限制, 在当前多数可获得的建筑运行数据中, 较难获得其冷热负荷数据, 即使其中的部分数据由于“入住率”的原因导致其质量不高, 依然需要考虑对其进行处理从而提升对这些有限数据的使用率, 例如可通过实地调研确定这一参数的取值。

参考文献

- [1] 龙惟定. 建筑节能管理的重要环节: 区域建筑能源规划[J]. 暖通空调, 2008, 38(3): 31-38.
LONG Weiding. Important stage of building energy efficiency: community energy planning[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(3): 31-38(in Chinese).
- [2] HONG T Z, LANGEVIN J, SUN K Y. Building simulation: Ten challenges[J]. Building Simulation, 2018, 11(5): 871-898.
- [3] 李娥飞. 暖通空调设计与通病分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [4] 潘毅群. 实用建筑能耗模拟手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [5] 韩传忠, 端木琳, 舒海文, 等. 区域供冷负荷预测模型的建立[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(1): 9-11.
HAN Chuansong, DUANMU Lin, SHU Haiwen, et al. Establishment of district building models for cooling load prediction[J]. Building Energy & Environment, 2012, 31(1): 9-11(in Chinese).
- [6] OURGHI R, AL-ANZI A, KRARTI M. A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(1): 300-305.
- [7] 王国弟, 翁彦, 徐巍, 等. 上海某能源中心空调负荷预测[J]. 发电与空调, 2014, 35(4): 67-70.
WANG Guodi, WENG Yan, XU Wei, et al. Air conditioning load prediction of a district energy center in Shanghai[J]. Power Generation & Air Condition, 2014, 35(4): 67-70(in Chinese).
- [8] XU L, PAN Y Q, LIN M S, et al. Community load leveling for energy configuration optimization: Methodology and a case study[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 35: 94-106.
- [9] 王利珍, 谭洪卫, 武涌, 等. 基于蒙特卡罗模拟的区域建筑冷负荷预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11): 4026-4032.
WANG Lizhen, TAN Hongwei, WU Yong, et al. Regional building cooling load prediction model based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(11): 4026-4032(in Chinese).
- [10] CLARKE J A. Energy simulation in building design (the 2nd Edition)[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd, 2001.
- [11] 朱明亚, 潘毅群, 吕岩, 等. 能耗预测模型在建筑能效优化中的应用研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(10): 35-46.
ZHU Mingya, PAN Yiqun, LYU Yan, et al. Application review of energy consumption prediction models in building energy efficiency optimization[J]. Building Science, 2020, 36(10): 35-46(in Chinese).
- [12] KOROLIJ I, ZHANG Y, MARJANOVIC-HALBURD L, et al. Regression models for predicting UK office building energy consumption from heating and cooling demands[J]. Energy and Buildings, 2013, 59: 214-227.
- [13] GAYESKI N T, ARMSTRONG P R, NORFORD L K. Predictive pre-cooling of thermo-active building systems with low-lift chillers[J]. HVAC&R Research, 2012, 18(5): 858-873.
- [14] SHOLAHUDIN S, HAN H. Simplified dynamic neural network model to predict heating load of a building using Taguchi method[J]. Energy, 2016, 115: 1672-1678.
- [15] LI Q, MENG Q L, CAI J J, et al. Applying support vector machine to predict hourly cooling load in the building[J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 2249-2256.
- [16] WARNKEN J, BRADLEY M, GUILDING C. Exploring methods and practicalities of conducting sector-wide energy consumption accounting in the tourist accommodation industry[J]. Ecological Economics, 2004, 48(1): 125-141.
- [17] 蒋小强, 龙惟定, 李敏. 区域供冷系统逐时冷负荷的分析及数值预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(1): 357-363.
JIANG Xiaoqiang, LONG Weiding, LI Min. Hourly cooling load analysis and prediction in a district cooling system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(1): 357-363(in Chinese).
- [18] WAN K K W, LI D H W, LIU D L, et al. Future trends of building heating and cooling loads and energy consumption in different climates[J]. Building and Environment, 2011, 46(1): 223-234.
- [19] LIM H, ZHAI Z J. Review on stochastic modeling methods for building stock energy prediction[J]. Building Simulation, 2017, 10(5): 607-624.
- [20] 陈智博, 沙华晶, 许鹏, 等. 中国公共建筑的建筑典型模型建立[J]. 建筑节能, 2020, 48(2): 97-99.
CHEN Zhibo, SHA Huajing, XU Peng, et al. Establishment of reference building models in China[J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(2): 97-99(in Chinese).
- [21] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Weather data by location: all regions - Asia WMO region 2 - China[EB/OL]. (2016) [2020-12-01]. https://www.energyplus.net/weather-location/asia_wmo_region_2/CHN//CHN_Shanghai.Shanghai.583620-CSWD/201805/t20180511_3171.htm.

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-02-18。

作者简介:



吕岩

吕岩(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为区域能源规划、能耗大数据分析, E-mail: 1610294@tongji.edu.cn。

潘毅群(1970), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为建筑能耗模拟、区域负荷预测、建筑大数据分析等。通信作者, E-mail:

yiqunpan@tongji.edu.cn。

(责任编辑 张宇)