

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.02.010



住宅建筑能耗基准确定及用能评价新方法

李郡, 俞准, 刘政轩, 张国强

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:针对当前建筑能耗基准确定及用能评价方法仍不完善的现状,提出了一种适用于住宅建筑的新方法。通过灰色关联分析确定了不同影响因素(即特征参数)与建筑能耗的关联度,将关联度作为该因素的权值并结合聚类分析对建筑进行合理分类。在此基础上采用累积频率分布法确定了每类建筑的能耗基准值,并对建筑住户进行用能评价。为验证该方法的可行性,将其应用于日本建筑学会所建立的住宅建筑能耗数据库,为聚类后的每类建筑确定了相应的能耗基准并对住户进行了用能评价。结果表明该方法能够综合考虑不同特征参数的影响大小,科学合理地对建筑细化分类,根据分类后的基准评价能够更好地评估住户的节能潜力并提供可行的节能建议。

关键词:基准;用能评价;聚类分析;灰色关联分析;住宅建筑

中图分类号: TU111.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)02-0075-09

A method for residential building energy benchmarking and energy use evaluation

Li Jun, Yu Zhun, Liu Zhengxuan, Zhang Guoqiang

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: To address the limitations of existing building energy benchmarking methods, a new method has been proposed for residential buildings. Grey relational analysis is used to define the correlation between different influencing factors (i. e., typical parameters) and total building energy consumption. The correlation is used as the weights of corresponding factors. Based on the weighted parameters, Cluster Analysis is performed to classify buildings into different groups. For each group, Accumulative Frequency Distribution is then conducted to identify its energy benchmarking value. This value also makes it possible to evaluate the energy-saving potentials of different buildings. The method was applied to a residential building energy consumption database established by the Architecture Institute of Japan. The results show that the method can classify buildings into different groups by both taking into consideration various influencing factors of building energy consumption as well as their weights. It can also determine building energy benchmarking values for each group and helps identify energy-saving potential of buildings and

收稿日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(51408205)

作者简介: 李郡(1991-),女,主要从事建筑节能、用户行为、蓄能系统研究,(E-mail)junl0609@hnu.edu.cn。

俞准(通信作者),男,博士,副教授,(E-mail)zhunyu@hnu.edu.cn。

Received: 2015-09-17

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51408205)

Author brief: Li Jun (1991-), main research interests: building energy conservation, occupant behaviour, energy storage system, (E-mail)junl0609@hnu.edu.cn.

Yu Zhun (corresponding author), PhD, associate professor, (E-mail)zhunyu@hnu.edu.cn.

provide energy-saving strategies for occupants.

Keywords: benchmarking; energy use evaluation; cluster analysis; grey relational analysis; residential buildings

加强建筑能源管理,合理评价建筑能耗水平是目前建筑节能的重要基础工作。建筑能耗基准可通过与其他同类建筑或与自身历史能耗对比进行确定^[1]。很多学者对其进行了深入研究,主要评估方法包含以下 3 种:建筑分值评估法、模拟分析法和统计分析法^[2]。建筑分值评估法是根据不同评价指标和标准对建筑各项性能进行评分,如美国绿色建筑 LEED 认证。该方法主要适用于单栋建筑性能评价,其主要局限是分值确定易受主观因素影响,并易因追求高分值导致采用不必要的建筑节能技术。模拟分析法是通过能耗模拟软件(如 Energy Plus 和 DOE-2)人为设定建筑模型参数,以模拟建筑能耗作为基准值来评价建筑能耗水平。该方法主要针对单栋建筑能耗评估,较多应用于新建建筑设计阶段,其主要缺点是难以合理设置模型参数值,尤其是用户行为相关参数^[3]。统计分析法是基于建筑实际能耗数据,采用统计学分析方法(如多元线性回归法和累积频率分布法)确定基准值,如美国能耗基准评价工具 Energy Star^[4]。该方法主要适用于多栋建筑能耗评估,同时为提高所得基准值准确度一般需要先根据建筑类型、面积等参数对建筑进行细化分类。由于能耗数据含有建筑运行信息,因此该方法能够反映各种因素对能耗的实际影响,从而合理评价建筑能耗水平,是当前国际建筑能耗基准评价研究的一个重点研究方向。然而,目前制约该方法研究进展的一个主要障碍是缺乏合理的建筑细化分类方法,导致难以得到符合预期要求的基准值准确度^[5]。已有建筑细化分类方法主要是根据建筑特征参数及其阈值进行逐层细分,如按建筑面积指标将建筑划分为小、中、大型建筑。该方法不足之处表现在:一是无法同时考虑多个特征参数对能耗的影响;二是主观性强,其分类指标选择、分类阈值确定以及不同特征参数间分类顺序均无统一标准。此外,若特征参数较多则需大量样本方能满足统计要求^[6]。

目前,已有研究针对上述缺陷提出改进方法,如文献[2]和文献[7]分别针对商业建筑和酒店建筑提出利用聚类分析对建筑进行细化分类,该方法能够同时考虑多个特征参数对能耗的影响合理划分建

筑,但其主要局限是忽略了不同特征参数对分类的影响程度大小,只是简单地将其等同处理,这样必然导致分类结果误差较大。此外,上述研究并未涉及居住建筑。考虑到居住建筑能耗构成及影响因素特殊性,有必要对其基准评价方法进行单独研究。

针对上述问题,笔者通过引入灰色关联分析和聚类分析,提出了一种适用于住宅建筑的能耗基准确定及用能评价新方法,并将其应用于日本建筑学会所建立的住宅建筑能耗数据库,分析了该方法的可行性和科学性。

1 能耗基准评价方法

本文提出的基于灰色关联及聚类分析的能耗基准评价方法主要包括以下几个步骤,如图 1 所示。

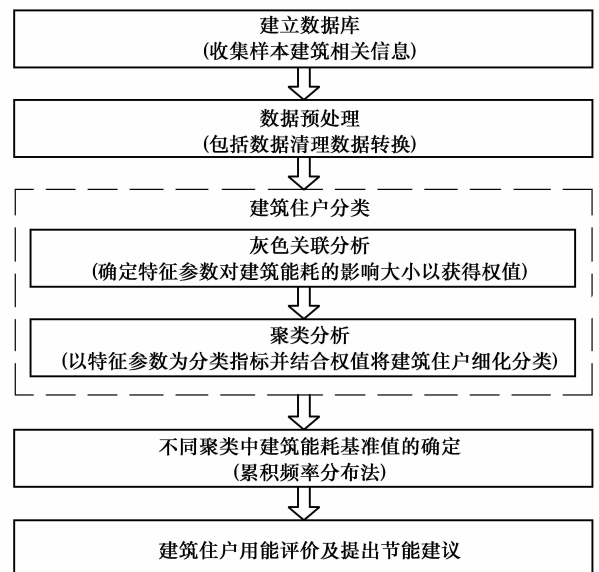


图 1 住宅建筑能耗基准评价方法流程图

Fig. 1 Procedure of the proposed methodology

该方法简单介绍如下:

1) 收集样本建筑信息并建立数据库。相关建筑信息主要包括气候参数、建筑参数、用户信息及实际能耗数据等。

2) 数据预处理。对数据属性及取值范围进行处理,转换为适合灰色关联分析和聚类分析的形式。

3) 建筑分类。通过灰色关联分析,计算不同特征参数与建筑能耗之间的灰色关联度并进行排序

(关联序),将灰色关联度作为权值赋予各特征参数,并结合聚类分析对建筑进行分类。

4) 基准值确定。采用累积频率分布法确定各类建筑的基准值。

5) 建筑住户用能评价。通过与基准值对比分析,确定建筑节能潜力,并提供相关节能建议。

1.1 数据预处理

由于数据库中不同参数具有不同属性,例如空调运行状态为分类属性(开或关),建筑面积为数值属性(150 m² 或 200 m²),难以直接进行比较分析。此外,各数值属性参数的取值范围不同(如[0, 30]和[100, 1000]),取值范围小的参数影响易被取值范围大的参数影响覆盖。为满足数据分析需要,应将分类属性参数转换为数值属性,并将所有数值属性参数无量纲化,转化为相同数值范围如[0, 1]以便进一步处理。转化方法如下:

1) 分类属性 对于二元变量,如空调运行状态[开, 关],可直接转换为[0, 1]或[1, 0]。

对于多元变量,如美国绿色建筑 LEED 认证的4个等级[认证级, 银级, 金级, 铂金级],需对其不同状态排序,并根据式(1)计算转换至[0, 1]区间内。

$$x_i = \frac{\text{rank}_i - 1}{\text{rank}_{\max} - 1} \quad (1)$$

式中: x_i 为某一状态的转换值; rank_i 为该状态的排序值; rank_{\max} 为所有状态的最大排序值。

采用该方法, LEED 认证4个等级可转换为[0, 1/3, 2/3, 1]。

2) 数值属性 对于数据库中的数值属性变量,

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k |y_0(k) - y_i(k)| + \alpha \min_k |y_0(k) - y_i(k)|}{|y_0(k) - y_i(k)| + \alpha \min_k |y_0(k) - y_i(k)|} \quad (3)$$

式中: α 为分辨系数,且 $\alpha \in [0, 1]$,通常取 $\alpha = 0.5$;

4) 计算 y_0 和 y_i 的灰色关联度 γ , 计算公式为

$$\gamma(y_0, y_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (4)$$

5) 根据灰色关联度大小排序,得出各变量的灰色关联序。

1.3 聚类分析

聚类分析是指根据数据对象(本文中为住宅建筑)特征的相似程度,将数据集划分为若干类或簇的过程,其目的是使同类中数据对象特征最大程度相似,而不同类间的相似度尽可能小。聚类分析的主要优势在于能够同时考虑所有特征参数,并通过数

采用无量纲化法将其全部转化为相同数值范围[0, 1],计算公式如(2)所示。

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: x'_i 、 x_i 、 x_{\min} 和 x_{\max} 分别为某一变量的转换值、原始值、最小值和最大值。

1.2 灰色关联分析

将数据库中所有参数转换至[0, 1]空间后,考虑到不同参数对建筑能耗的影响程度不同,应对不同参数根据其影响程度分配相应权值,以便进一步将建筑合理分类。本文采用灰色关联分析计算该权值,其基本思想是根据因素之间几何变化趋势的相似程度判断其关联程度(即灰色关联度,作为权值进行分配),并可通过对灰色关联度排序得到灰色关联序,以表征各因素间关联程度的相对主次顺序^[8]。与其他多因素统计分析法,如回归分析法、主成分分析法相比,灰色关联分析的主要优点在于计算简单,能够分析样本量小的数据集,且数据无需服从典型分布^[9]。

灰色关联分析的具体计算步骤如下:

1) 确定分析数列,由因变量构成参考序列为 y_0 (如建筑能耗);自变量构成比较序列 y_i (如建筑能耗的不同影响因素,即特征参数);

$$y_0 = (y_0(1), y_0(2), \dots, y_0(n))$$

$$y_i = (y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(n))$$

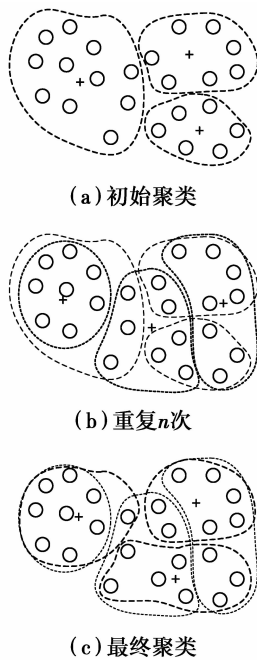
$$i = 1, 2, \dots, m$$

2) 对 y_0 和 y_i 进行无量纲化处理,详见 1.1 节;

3) 计算 y_0 和 y_i 之间的灰色关联系数 $\xi_i(k)$, 计算公式为

学方法得到合理分类阈值,避免主观因素的影响。该方法已在不同领域,如生物学、医学及商业等领域广泛应用^[10-11]。

目前,聚类分析常用的算法有 k 均值算法、 k 中心点算法和 CLARANS 算法等^[10-11]。其中, k 均值算法具有计算简单、收敛快、应用广泛等优点。本文采用该算法进行聚类分析,其基本原理是:假定数据集 X 中有 n 个对象 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$, 其中 x_{ij} 为 x_i 的特征参数(共 m 个),通过欧氏距离函数将数据集 X 划分为 k 类 ($k \geq 2$), 即 k 个真子集 C_1, C_2, \dots, C_k 使得 $C_i \subseteq X$ 且 $C_i \cap C_j (1 \leq i, j \leq k)$, 如图 2 所示。

图 2 k 均值聚类算法原理图

(“+”表示每个聚类的中心,圆圈表示 n 个对象)

Fig. 2 Schematic illustration of the k -means clustering algorithm (the cluster centroids and n objects are marked by + and \circ , respectively)

具体计算步骤如下:

1) 任意选择 k 个点作为初始的聚类中心 c_1, c_2, \dots, c_k ;

2) 计算 n 个对象与各聚类中心的欧式距离(如式(5)所示),并将它们指派到与其距离最近(如式(6)所示)的中心形成 k 个聚类,如图 2(a)所示。

$$d(i, j) =$$

$$\sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (x_{i2} - x_{j2})^2 + \dots + (x_{im} - x_{jm})^2} \quad (5)$$

$$E_{\min} = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} d(p, c_i)^2 \quad (6)$$

式中: c_i 聚类中心, $p \in C_i$;

3) 重新计算每个聚类中心各特征参数的平均值,即为新的聚类中心;

4) 重复步骤 2) 和 3) 直到迭代收敛,即聚类中心不再发生变化。

1.4 基准值的确定

能耗基准值是用于比较和评价建筑用能水平的标准和定位,通常采用统计学法确定,如回归分析法、累积频率分布法、平均值法等^[12-13]。其中,累积频率分布法具有简单易行、不受异常能耗影响、直观

反映建筑能耗分布并能够制定不同的基准水平^[13]等优点,是目前最为常用的建筑能耗基准值制定方法之一^[14]。本文采用该方法确定每类建筑的能耗基准值。

累积频率是指将数据对象划分为若干个数值区间,依次统计各区间数据出现的频率,并按从小到大的顺序逐段累加,能够用于表示小于某一特定值的概率。在能耗基准评价中,通常选用累积频率为 25% 和 50% 的值代表良好及典型水平^[14],本文以 50% 作为基准水平,用于评估建筑节能潜力;25% 作为目标水平,表示期望建筑达到的用能水平。

2 案例研究

2.1 数据库建立

日本建筑学会于 2002 年 12 月至 2004 年 11 月开展了“日本各地居民能耗调查”项目,建立了住宅能耗数据库,用于评估居住建筑能耗水平^[15]。它采集了详细的住户信息和终端能耗数据,因此,本文以该数据库为例来验证所提出的方法的可行性。该数据库将日本全国分为 6 个地区:北海道、东北、北陆、关东、关西和九州冲绳,并在这些地区共选择了 80 个住户(每个地区均选有独栋式和公寓式建筑住户)进行能耗数据及相关信息采集,数据采集的方法及内容如表 1 所示。其中,建筑能耗由 8 类分项能耗组成并分别测量:1) 采暖空调;2) 生活热水;3) 厨房,如电磁炉等;4) 照明;5) 制冷,如冰箱等;6) 娱乐 & 信息,如电视、电话等;7) 家务 & 卫生,如洗衣机、吸尘器等等;8) 其他。

表 1 数据收集方法及内容

Table 1 Data collection items and methods

方法	内容	测量频率
现场测量	各类能源不同	电 次/1 min
	终端的消耗量	天然气 次/5 min
	室内温度 (距地面 1.1 m 处)	燃油 次/5 min
问卷调查	生活习惯,经济收入,设备使用情况等	仅 1 次
电话采访	建筑基本信息	仅 1 次

通过数据检查发现,数据库中有 6 个住户数据不完整无法满足本文研究需要,因此将这部分数据剔除从而得到本文的样本数据(共 74 户),其分布情况如表 2 所示。

表2 样本量分布

Table 2 Distribution of the sample buildings

地区	数量	
	独栋式建筑	公寓式建筑
北海道	9	4
东北	9	3
北陆	9	4
关东	9	5
关西	9	4
九州冲绳	6	3

在进行数据分析前,需对数据进行集中和整合处理。例如,对具有不同量纲的建筑能源(包括电、燃油和天然气),可根据表3中的转换系数将其转换为同一量纲 MJ,以便直接计算建筑能耗。

表3 能源转换系数

Table 3 Conversion coefficients of different fuels

能源类型	转换系数	单位
电	3.6	MJ/kWh
天然气(4A-7C)	20.4	MJ/m ³
天然气(12A-13C)	45.9	MJ/m ³
液化石油气	50.2	MJ/m ³
燃油	36.7	MJ/L

2.2 特征参数选择

从数据库中选取 13 个能耗影响因素作为特征参数,具体参数及分类如表 4 所示。

表4 住宅建筑特征参数的选择

Table 4 Typical parameters of residential buildings

序号	分类	特征参数	属性	单位	简写	序号	分类	特征参数	属性	单位	简写
1	气象	年平均温度	数值	℃	T	8	建筑特征	热损失系数 ³	数值	W/m ² K	HLC
2		年平均相对湿度	数值	%	RH	9		等量泄漏面积 ⁴	数值	cm ² /m ²	ELA
3		年平均风速	数值	m/s	WS	10		家庭人数	数值		NO
4		年平均太阳辐射强度	数值	MJ/m ²	RA	11		采暖空调	分类		HC
5	建筑特征	建筑类型 ¹	分类		HT	12	建筑设备 ⁵	生活热水	分类		HWS
6		建筑面积	数值	m ²	BA	13		厨房设备	分类		KE
7		建筑结构 ²	分类		BC						

注:1. 建筑类型分为:独栋式建筑和公寓式建筑;2. 建筑结构分为:木制结构和非木制结构;3. 热损失系数是指室内外温差为 1℃时,围护结构热损失(包括墙、窗、地板和屋顶)和自然换气热损失之和除以房屋建筑面积,其值越小围护结构保温隔热性能越好^[16];4. 等量泄漏面积是门窗的气密性指标,用风机加压检测;5. 建筑设备类型根据使用能源的不同分为电力式和非电力式设备,电力式是指由电能驱动的设备,如电冰箱;非电力式是指由燃油、天然气等能源驱动的设备,如燃气热水器。由于空调设备均为电力式,因此采暖空调的设备类型由采暖设备决定。

2.3 结果与讨论

2.3.1 灰色关联分析 采用灰色关联分析的目的是确定不同特征参数对建筑能耗的影响大小,并将灰色关联度作为权值赋予各特征参数。建筑能耗指标一般为建筑能耗密度(Energy use intensity, EUI)且常以单位建筑面积的能耗表示,单位为 MJ/m²^[2, 4, 14]。因此,本文选取一年的 EUI 作为灰色关联分析的参考序列,不再单独考虑建筑面积的影响,其余 12 个参数均作为比较序列。其中,考虑到同一城市的 4 个气象参数在不同月份呈明显波动,且不同地区之间气象参数差异显著,首先计算同一城市某一住户逐月 EUI 与当月气象参数^[17]的灰色关联度并取 12 个月的平均值,再对同一地区不同城市气

象参数的灰色关联度取平均值。对于其他 8 个参数,所有住户统一计算并取平均值。灰色关联分析结果如表 5 所示,表中同时给出了 12 个特征参数的灰色关联序。

从表中综合排序结果可知,12 个特征参数中, T、HLC 和 NO 对 EUI 影响最显著,即对进一步分类的影响程度最大。因此,在确定各类建筑特征时应重点考察这 3 个参数。气象参数中,绝大部分地区室外温度对 EUI 影响最大(关西地区太阳辐射照度影响略高于室外温度),风速影响最小。此外,年平均室外温度相对较低的地区(包括北海道、东北和北陆)室外温度对 EUI 的影响比其他地区相对更加显著。非气象参数中,热损失系数、住户人数和等量

泄漏密度对 EUI 有更大影响,因此,建筑设计师在设计阶段应重点关注这 3 个参数并合理取值,以降低住宅能耗。

表 5 特征参数的灰色关联度和关联序

Table 5 Grey relational grades and grey relational sequences of the typical parameters

地区	T	WS	RH	RA	NO	HLC	ELA	HT	BC	HC	HWS	KE
北海道	0.799	0.646	0.652	0.676								
东北	0.835	0.636	0.735	0.708								
北陆	0.809	0.562	0.641	0.728	0.699	0.718	0.638	0.594	0.553	0.561	0.536	0.538
关东	0.738	0.601	0.718	0.685								
关西	0.709	0.584	0.644	0.715								
九州冲绳	0.679	0.650	0.674	0.659								
平均值 ¹	0.762	0.613	0.677	0.695	0.699	0.718	0.638	0.594	0.553	0.561	0.536	0.538
综合排序	1	7	5	4	3	2	6	8	10	9	12	11

注:1. 平均值用于表征所有地区气象参数的灰色关联度,基于该值用于获得综合排序。

2. 分类属性参数数据处理结果:建筑类型[独栋式,公寓式]、建筑结构[木制,非木制]、建筑设备[电力式,非电力式]均转换为[0,1]。

需要说明的是,由于各地区气象参数的灰色关联度差异显著,因此,4 个气象参数在分配权重以对建筑细化分类时,各地区住户应对其分别考虑。

2.3.2 聚类分析 聚类个数应根据样本容量确定,考虑到本文数据库大小,确定聚类个数 $k=4$ 。聚类分析通过开源数据挖掘软件 WEKA 实现^[18],结果如表 6 所示,表中同时给出各个聚类的聚类中心(即每个特征参数的平均值,代表每类住户的典型特征)、住户数量及其所占比例。

1) 各类住户特征 根据聚类中心比较可见,相对其他 3 类住户,第 2 类住户特征为室外年平均温度最高,太阳辐射最强,风速最小(T、RA 为最大,WS 值最小);围护结构隔热保温性能最差(HLC 为最大),均为非木制结构;厨房采用电力式设备(KE=0 表示设备类型均为电力式)。同理,其他 3 类住户的特征如下:

第 1 类住户:室外年平均温度最低,风速最大;围护结构的保温隔热性和门窗气密性最好,均为非木制结构;生活热水均采用非电力式设备。

第 3 类住户:室外年平均相对湿度最低,太阳辐射照度最小;门窗气密性差,均为独栋式、木制结构建筑,住户人数最少;生活热水采用非电力式设备。

第 4 类住户:室外年平均相对湿度最高;均为独栋式、木制结构建筑,住户人数最多。厨房均采用电力式设备。

表 6 聚类分析结果

Table 6 Results of cluster analysis

序号	特征参数	聚类中心				全体住户
		聚类 1	聚类 2	聚类 3	聚类 4	
1	T	0.405	0.602	0.550	0.444	0.479
2	WS	0.347	0.297	0.326	0.298	0.319
3	RH	0.351	0.317	0.301	0.457	0.367
4	RA	0.358	0.419	0.334	0.335	0.359
5	NO	0.245	0.287	0.242	0.310	0.272
6	HLC	0.129	0.236	0.217	0.143	0.169
7	ELA	0.077	0.120	0.172	0.128	0.117
8	HT	0.356	0.339	0.000	0.000	0.185
9	BC	0.553	0.553	0.000	0.000	0.291
10	HC	0.449	0.160	0.259	0.204	0.288
11	HWS	0.536	0.077	0.536	0.122	0.326
12	KE	0.409	0.000	0.538	0.000	0.233
住户总数		25	14	13	22	74
比例/%		34	19	18	30	100

值得说明的是,不同类住户之间特征差异显著,而同类住户特征相似,意味着特征参数对 EUI 的影响程度在不同类住户中具有明显差异,而在同类住户中较为接近,因而住户之间更具有可比性,这也是采用聚类分析方法的优势所在。

2) 各类住户总能耗及分项能耗特征 对各类住户总能耗及分项能耗特征进行分析比较可为建筑能耗基准值的确定提供参考信息,同时,可更好地掌

握建筑能源使用情况及节能潜力,明确住户节能的重点关注方向。图 3 给出了 4 类住户年平均总能耗、8 类分项年平均能耗及其所占年平均总能耗的比例。

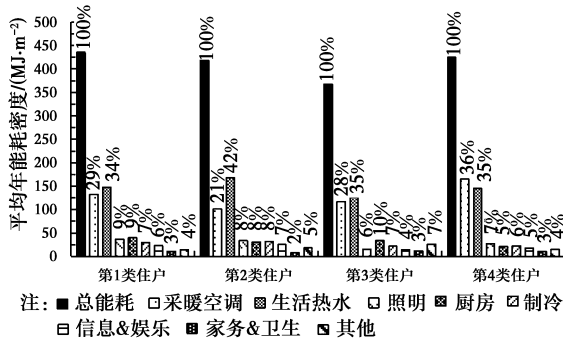


图 3 4 类住户的分项能耗特征

Fig. 3 End-use load characteristics of the four clusters

由图 3 可知,第 1 类住户平均总能耗最大,而第 3 类住户最小。8 类分项能耗中,采暖空调和生活热水在 4 类住户中占总能耗比例均超过 20%,且二者比例和均大于 60%,为居住建筑终端耗能“大户”,应成为住户节能的重点关注对象。其余 6 类分项能耗中,照明、厨房和制冷所占比例相对较大(第 3 类住户照明能耗最小且低于其他终端能耗,其可能原因是这类住户节能意识较强且照明设备采用节能灯)。除制冷外,照明和厨房能耗在各类住户间相互差异明显,其主要原因是制冷设备长期不间断运行,受用户行为影响小。

从图 3 中还可以看出,尽管第 1 类住户室外年平均温度最低,风速最大,但其采暖能耗却明显低于第 4 类住户,一个可能的原因是其围护结构具有更好的保温隔热性能。需要强调的是,住户人数虽然对生活热水能耗影响比较显著,但不能轻易得出住户人数最多就必然会导致生活热水能耗最高(例如,第 4 类住户人数最多,但生活热水能耗并非最高)。

2.3.3 每类建筑的能耗基准值 图 4 给出了第 1 类住户建筑总能耗 (total energy consumption, TEC)、采暖空调(heating and cooling, HC)以及生活热水(hot water supply, HWS)两类分项能耗的累积频率分布曲线,并取累积频率为 50%和 25%对应的能耗值为基准值和目标值。由图可知,第 1 类住户 TEC 的基准值为 391 MJ/m²/年,目标值为 305 MJ/m²/年。根据 HC 和 HWS 两类分项能耗的累积频率分布曲线,可为住户提供更加详细的分项能耗指标值,若同样以 50%水平作为基准线,它们的基准值分别为 111 MJ/m²/年和 127 MJ/m²/年。

同理可得其他 3 类住户的 TEC 基准值、目标值

以及其他能耗水平。为更加直观和清楚地对比同类住户、不同类住户之间能耗水平差异,图 5 给出了 4 类住户能耗水平的盒形图(盒形图能够反应数据的分散程度及是否对称,便于比较不同组间的分布差异。若中位值位于盒形的中间则数据分布均匀^[19])。

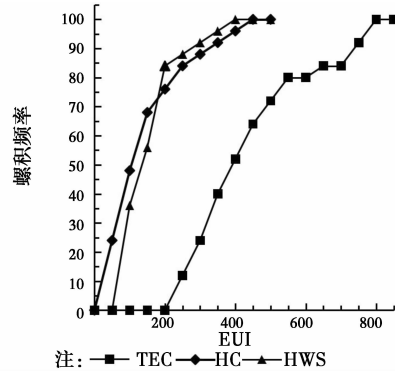


图 4 第 1 类住户建筑能耗的累积频率分布曲线

Fig. 4 Cumulative frequency distribution of the building energy consumption for the cluster 1

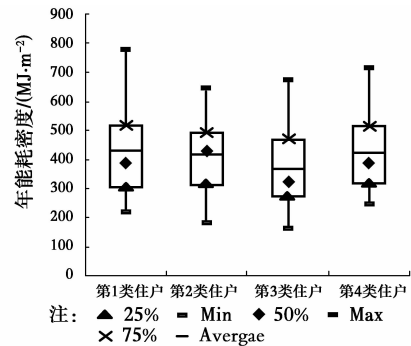


图 5 4 类住户建筑总能耗不同水平的盒形图

Fig. 5 Boxplot of different building energy consumption levels for the four clusters

由图 5 可知:1)同类住户之间能耗差异巨大,例如,第 3 类住户 TEC 的最大值与最小值分别为 168、670 MJ/m²,最大值约为最小值的 4 倍,由此可以看出建筑节能潜力较大。2)不同类住户间能耗分布不均且水平变化高低不同,从而导致建筑能耗基准值差异显著。其中,第 2 类住户的能耗基准值最大且与平均值接近,主要原因是该类住户能耗分布均匀且基本对称。第 3 类住户的能耗基准值最小,一个重要因素是该类住户总体能耗水平最低。值得注意的是,尽管第 1 类住户的整体能耗水平最高,但是由于能耗分布不均,其基准值并非最高。

2.3.4 住户用能评价 为合理评价某住户的能耗特性和节能潜力并提供可行的节能建议(如该住户不属于本文数据库,应首先确定该住户属于哪一类建筑住户,可通过该住户特征参数,计算其与各聚类

中心距离来确定)。可将该住户与同类住户中,能耗低于基准值且与该住户特征最相似的住户进行对比分析(两住户特征相似说明基于所有特征参数而言,这两个住户最具有可比性和参考价值)。两者相似度可通过欧式距离表征(如式(2)所示),距离越小则相似度越大。例如,对第1类住户中的A住户进行用能评价,通过计算其他住户与A住户的相似度可知,B住户是与它特征最为相似的住户,两个住户的详细特征参数如表7所示。

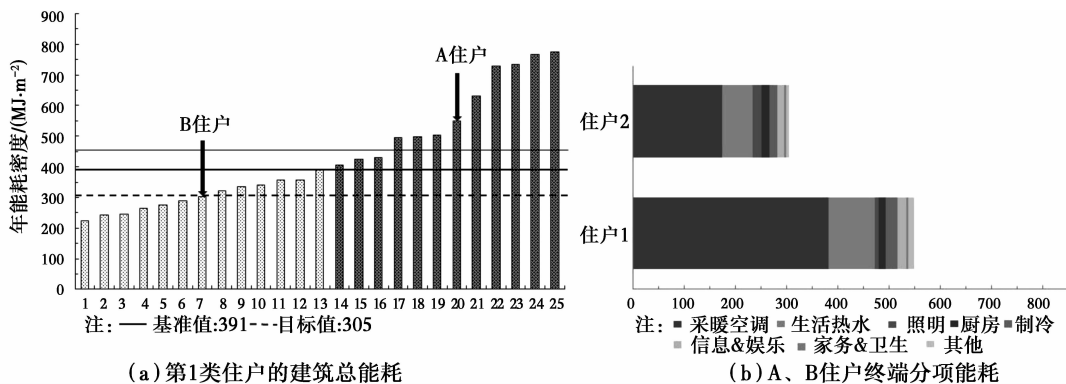
图6(a)给出了第1类住户所有建筑住户的总能耗

耗,并按升序排列。由图可知,A住户位于能耗基准线之上,能耗偏高属“不节能建筑”,B住户位于能耗目标值下方,能耗较低属较优的“节能建筑”。相对于能耗基准值,A住户的年节能潜力为: $548-391=157\text{ MJ/m}^2$;相对于B住户,其年节能潜力为: $548-304=244\text{ MJ/m}^2$ 。对比分析两个住户的建筑特征可知,围护结构的热损失系数及等量泄露面积差异较大,这可能是导致住户1能耗偏高的原因之一。因此,A住户可通过节能改造提高围护结构保温隔热性能及门窗气密性,降低建筑能耗。

表7 A、B住户的特征参数

Table 7 Typical parameters of building A and building B

住户	T	WS	RH	RA	NO	HLC	ELA	HT	BC	HC	HWS	KE	EUI
A	8.8	3.6	68	12.6	4	2.05	1.12	0	1	1	1	0	548
B	8.8	3.6	68	12.6	4	1.7	0.52	0	1	1	1	0	304



(a) 第1类住户的建筑总能耗

(b) A、B住户终端分项能耗

图6 住户能耗对比

Fig. 6 Comparison of energy consumption in different buildings

进一步分析两个住户的终端能耗特征,如图6(b)所示,A住户的采暖空调和生活热水能耗巨大,约为B住户的两倍,其节能潜力较大。由于建筑终端设备的用能行为对建筑能耗影响显著^[6],A住户可通过改进采暖空调和生活热水的用能行为降低建筑能耗,如减少采暖空调设备的启停次数、设置合理的空调温度等。

3 结论

对建筑进行细化分类,能够提高建筑能耗基准值的准确度,同时,保证被比较建筑间具有较高的“相似度”是合理评价建筑能耗水平的前提。本文中提出的能耗基准评价方法通过灰色关联分析确定了不同影响因素(即特征参数)与建筑能耗的关联度,将关联度作为该因素的权值并结合聚类分析对建筑进行合理分类。在此基础上采用累积频率分布法确定了每类建筑的能耗基准值,并对建筑住户进行用能评价。为

验证该方法的可行性,将其应用于日本建筑学会所建立的住宅建筑能耗数据库,并得出以下结论:

1)该方法同时考虑了不同特征参数对建筑能耗的影响程度大小,确定分类参数阈值时避免了主观因素的影响,能够根据建筑数据特征合理地划分建筑类别,并为每类建筑确定出相应建筑能耗基准值。

2)每类住户能耗基准值与该类建筑能耗分布密切相关,不同类住户间能耗分布不均且水平变化高低不同会导致其建筑能耗基准值差异显著。

3)该方法可评价某住户的能耗特性和节能潜力,并提供相应的节能建议。通过将该住户与同类住户中,能耗低于基准值且与该住户特征最相似的住户进行对比分析,确保了所得的节能潜力可信度高,节能建议可行性强。

4)该方法在进行基准能耗评价的同时还可提供大量建筑节能相关信息。例如,对各类住户总能耗及分项能耗特征进行分析比较可为建筑能耗基准值

的确定提供参考信息,可更好地掌握建筑能源使用情况及节能潜力,明确住户节能的重点关注方向并提供深入的节能建议。

参考文献:

- [1] LI Z W, HAN Y M, XU P. Methods for benchmarking building energy consumption against its past or intended performance; An overview [J]. *Applied Energy*, 2014, 124:325-334.
- [2] GAO X F, MALKAWI A. A new methodology for building energy performance benchmarking; an approach based on intelligent clustering algorithm [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 84:607-616.
- [3] WANG E D. Benchmarking whole-building energy performance with multi-criteria technique for order preference by similarity to ideal solution using a selective objective-weighting approach [J]. *Applied Energy*, 2015, 146:92-103.
- [4] MASTON N E, PIETTE M A. Review of California and national methods for energy performance benchmarking of commercial buildings [R]. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.
- [5] 曹勇, 刘益民, 于丹, 等. 德国与美国能耗基准确定方法在北京地区办公建筑空调系统能耗定额确定方面的应用及对比[J]. *建筑科学*, 2012, 28(4):17-24, 90.
CAO Y, LIU Y M, YU D, et al. Application and comparison of energy consumption quota determination of air-conditioning system of official buildings in Beijing using energy consumption benchmarking methods of Germany and United States [J]. *Building Science*, 2012, 28(4):17-24, 90. (in Chinese)
- [6] YU Z, FUNG B C M, HAGHIGHAT F, et al. A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(6):1409-1417.
- [7] 顾文, 庄智, 谭洪卫. 基于聚类分析的酒店建筑分类与用能评价[J]. *建筑技术*, 2014, 45(11):1026-1029.
GU W, ZHUANG Z, TAN H W. Hotel classification based on cluster analysis and evaluation of energy consumption [J]. *Architecture Technology*, 2014, 45(11):1026-1029. (in Chinese)
- [8] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析: 多因素统计分析新方法[J]. *统计研究*, 1995, 12(3):46-48.
TAN X R, DENG J L. Grey relational analysis: a new multi-factor analysis method [J]. *Statistical Research*, 1995, 12(3):46-48. (in Chinese)
- [9] 孙玉刚. 灰色关联分析及其应用的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- SUN Y G. Research on grey incidence analysis and its application [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007: 10-16. (in Chinese)
- [10] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究[J]. *软件学报*, 2008, 19(1):48-61.
SUN J G, LIU J, ZHAO L Y. Clustering algorithms research [J]. *Journal of Software*, 2008, 19(1):48-61. (in Chinese)
- [11] HAN J W, KAMBER M, PEI J. Data mining: concepts and techniques [M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [12] 朱能, 朱天利, 仝丁丁, 等. 我国建筑能耗基准线确定方法探讨[J]. *暖通空调*, 2015, 45(3):59-64.
ZHU N, ZHU T L, TONG D D, et al. Determination of building energy consumption baseline in China [J]. *HV&AC*, 2015, 45(3):59-64. (in Chinese)
- [13] XIN Y J, LU S L, ZHU N, et al. Energy consumption quota of four and five star luxury hotel buildings in Hainan province, China [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 45:250-256.
- [14] FARROUA I, KOLOKOTRONI M, SANTAMOURI M. A method for energy classification of hotels: a case-study of Greece [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 55:553-562.
- [15] MURAKAMI S, AKABAYSHI S, INOUE T, et al. Energy consumption for residential buildings in Japan [EB/OL]. Architectural Institute of Japan, Maruzen Corp, 2006. <http://tkkankyo.eng.niigatau.ac.jp/HP/HP/database/index.htm>.
- [16] 薛梅, 董华. 住宅热损失系数的确定与应用[J]. *煤气与热力*, 2004, 24(4):203-206.
XUE M, DONG H. Determination and application of heat loss coefficient for dwelling [J]. *Gas and Heat*, 2004, 24(4):203-206. (in Chinese)
- [17] Climate Statistics, Japan Meteorological Agency. Monthly mean and monthly total tables [EB/OL]. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/en/smp/index.html>.
- [18] Weka. The university of waikato, software [EB/OL]. <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>.
- [19] 庄作钦. BOX PLOT——描述统计的一个简便工具[J]. *统计与预测*, 2003(2):56-57.
ZHUANG Z Q. BOXPLOT—An easy tool of describing statistics [J]. *Statistics and Forecasting*, 2003(2):56-57. (in Chinese)