

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.154



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



夏热冬冷地区高校学生宿舍用电影响参数分析

林笑宇, 于航, 周弈伽, 王锰, 郑砚, 王奕苏

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要:学生宿舍作为高等院校不可或缺的一部分, 具有建筑总面积大、使用率高、建筑总能耗大等特点。现有研究基本上局限于整栋宿舍楼的用电量分析, 缺乏对学生宿舍中各个房间用电量的细化分析与研究。以上海某高等院校 533 间女生宿舍为研究对象, 划分 4 种用电偏好, 调研宿舍内学生的空调使用习惯, 分析影响学生宿舍用电的相关参数。研究发现, 学生的宿舍用电偏好与冬季空调的使用时长有关; 回归分析模型显示, 同一类型的学生宿舍用电和室外温度具有线性关系。结果表明, 通过聚类细分得到的学生用电偏好和室外平均温度是影响学生宿舍用电的重要参数, 获取这两个参数的回归方法可以有效掌握学生宿舍的用电情况。

关键词:宿舍用电; 两步聚类; 行为调研; 参数分析

中图分类号: TU852 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)04-0185-10

Analysis on the influence parameters of college student dormitory electricity consumption in hot summer and cold winter area

LIN Xiaoyu, YU Hang, ZHOU Yijia, WANG Meng, ZHENG Yan, WANG Yisu

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China)

Abstract: As a university-affiliated unit, student dormitories have many characteristics, such as large total building area, high utilization rates, and large total energy consumption. Existing research focuses on the electricity consumption analysis of the entire dormitory buildings, but lacks detailed analysis and research on the electricity consumption of each room in the student dormitory. In this study, 533 female dormitories of a university in Shanghai were divided into four types of electricity preferences, and the air-conditioning habits of students in the dormitories were investigated, and the relevant parameters affecting the electricity consumption of the student dormitories were analyzed. Research finds that student dormitory electricity preference is related to the length of time in winter the air conditioner is used. On the other hand, the regression analysis model shows that the electricity consumption of the same type of student dormitory has a linear relationship with the outdoor temperature. The case results show that the students' electricity preference and the average outdoor temperature obtained through clustering and segmentation are important

收稿日期: 2021-06-16

基金项目: 国网科技项目(52090020002X)

作者简介: 林笑宇(1996-), 男, 主要从事区域能源规划研究, E-mail: 1932726@tongji.edu.cn。

于航(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: tjyuhang@163.com。

Received: 2021-06-16

Foundation item: State Grid Technology Project (No. 52090020002X)

Author brief: LIN Xiaoyu (1996-), main research interest: regional energy planning, E-mail: 1932726@tongji.edu.cn.

YU Hang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: tjyuhang@163.com.

parameters that affect the electricity consumption of the student dormitory. The method of obtaining the regression of these two parameters can effectively grasp the electricity consumption of the student dormitory.

Keywords: electricity for dormitory; two-stage cluster; behavioral research; parametric analysis

高等院校是公共建筑中最特殊的一类,也是用能大户^[1]。随着校园构成的多元化及服务功能的综合化,高校的用能情况日趋复杂且用能水平也逐步升高^[2]。因此,掌握高校用能的基本情况是推进高校节能发展及清洁能源供给的首要任务。建筑能耗作为大学校园最主要的能耗组成部分,研究者们以建筑为单位拆解高校的能耗,可以更好地掌握学校各类型建筑的用电特点^[3]。对于高校能耗高这一问题,目前不少校园已经建立了能耗监测平台,为校园能耗的研究提供了极大的便利^[4]。

学生宿舍作为高校中最常见的建筑类型,有着建筑面积大、人员密集、使用率高、用电形式单一、建筑整体能耗高的特点^[5]。一方面,学生宿舍是由大量小房间构成的,每个房间的用电具有自主性和差异性,因此,分析不同学生宿舍的用电情况,可以更清楚地了解和掌握学生用电的偏好与差异情况;另一方面,由于不同宿舍间的建筑围护结构,其用电设备及建筑面积并无较大差异^[6],因此,将学生宿舍建筑能耗问题的研究重点放在用电行为差异和气象参数对用电量的影响上。目前,针对学生宿舍的能耗研究已经有不少成果。其中,文献^[7]使用聚类分析的方法,对学生的用电水平进行分类,将学生的用电水平分为奢侈型、适度型、节约型 3 种,通过调研的方法得出空调对学生用电的影响。文献^[8]利用学校监测系统研究了学生宿舍的逐时能耗,描述了学生宿舍每一时刻的用电水平。文献^[9]进一步利用宿舍的用电数据,给出了不同温度条件下学生宿舍空调的使用率,利用回归分析给出了温度与空调使用率之间的关系,并且讨论了学生培养层次、学科、性别、室外温度对宿舍空调使用的影响。文献^[10]认为,学生宿舍的空间位置影响了学生宿舍的用电量,层数越高,能耗越高。文献^[11]认为,用电量与温度之间成 U 型关系,且开窗朝向和楼层高度影响了温度与用电量之间的关系。

现有文献关于学生宿舍用电量的研究仅局限于宿舍楼用电量与某单一参数的关系,缺少对学生房

间用电偏好类型的特征分析以及对影响学生宿舍用电量关键因素的研究。笔者立足于学生宿舍的每日用电量,划分出学生不同的用电偏好,并对影响学生宿舍用电量的参数进行详细分析,最终给出影响学生宿舍逐日用电的主要参数。

1 研究方法

1.1 数据采集与聚类分析

为了解学生宿舍用电的基本特征,选取上海地区某综合型高校两栋学生宿舍为研究对象,宿舍楼的外观如图 1 所示。该宿舍建成于 2005 年,呈“一”型南北分布,宿舍房间开窗方向均为单一的朝南或朝北方向。建筑层高为 27 m,一共 7 层。宿舍的使用者均为女生,其中,第 1 栋建筑的 1~4 层为研究生宿舍,双人间,5~7 层为本科生宿舍,3 人间;第 2 栋建筑的使用者全部为研究生,其中 1~3 层为双人间,4~7 层为 3 人间。除少数房间外,每间房间的面积均为 25 m² 左右。每间学生宿舍内部包含独立卫浴,没有室外阳台。每间宿舍均安装有同一型号的储水式电热水器和分体式空调。除电热水器和空调之外,学生宿舍的用电设备还包括插座电子设备、电风扇以及照明电灯等,其中,电热水器和空调的功率均在 1 000 W 以上,高于其他用电设备,且在冬季使用比较频繁,是宿舍主要的用电设备。



图 1 上海某高等院校学生宿舍外观图

Fig. 1 Exterior view of a student dormitory in Shanghai

学生宿舍的用电在时间上不受控制,可在任意时段开启或关闭用电设备。但是,单间宿舍在用电功率上存在一定限制,即无法同时使用两个以上的

大功率设备。通过访问校园宿舍用电管理系统的后台数据库,获取了两栋学生宿舍楼中共计 533 间宿舍的用电数据。用电时间跨度为 2020 年 9 月至 2021 年 1 月,时间颗粒度为逐日连续用电量。每间宿舍的用电数据为包含了所有用电设备的总用电量。

另一方面,为了探讨时序参数对宿舍用电的影响,从中国气象数据网^[12]获取了在学校区域的逐日气象参数,包括室外平均温度、室外平均相对湿度、日照时长。

不同学生宿舍的用电数据之间存在明显的差异性,而同一宿舍的用电量则随着时间的变化而变化。学生宿舍从整体上存在用电的规律性,但不同宿舍之间又存在着明显的随机性和不确定性。为获得其规律,引入 K-means 聚类方法,将具备相似用电特征的宿舍聚成几个典型用电偏好,分别对每种偏好的特征进行分析研究。

聚类算法是一种无监督的机器学习算法。它能将数据集划分为若干类别,从而使同一类别内数据间的差异程度尽可能小,不同类别之间的差异程度尽可能大^[13]。同时,K-Means 算法是一种简单的迭代型聚类算法,使用距离作为相似性指标,而每个聚类的中心由类中所有数据的均值来决定。选取欧式距离作为相似度的指标,并使得聚类内部的平方和最小。欧式距离的计算式为

$$J = \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i - u_k\|^2 \quad (1)$$

式中: J 为聚类欧式距离总和; u_k 为类的均值; x_i 为类中数据的大小。

由于宿舍的用电种类不确定,通过计算轮廓系数的算法来决定聚类的种类,以及确定类别内的稠密程度和类别间的离散程度。轮廓系数的计算式为

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (2)$$

目前,对用电量的聚类分析可以分为直接聚类和间接聚类两大类^[14]。其中,直接聚类是指针对宿舍负荷曲线本身进行聚类计算;间接聚类则通过提取负荷曲线的数据特征,再根据曲线的特征进行聚类分析。针对学生宿舍用电数据,采用间接聚类与两步聚类相结合的方法,流程如下。

1)第 1 步聚类用于区分学生宿舍用电在整个学

年内的差异。首先,计算学生宿舍用电均值和用电方差,作为代表每间学生宿舍用电的聚类特征值并进行标准化处理。选取这两个间接参数作为聚类特征,可同时考虑学生用电的每日用电量大小和用电量数据的离散程度大小,进而可将相似用电程度和用电变化浮动相近的宿舍房间聚集在一起。

2)第 2 步聚类则考虑到学生宿舍在季节间的用电差异。根据温度划分季节的方法^[15],当室外平均温度稳定在 22 °C 以上时,定义为夏季;当室外平均温度稳定在 10 °C 以下时,定义为冬季;当温度介于两者之间时,定义为过渡季节。根据季节划分,分别计算夏季、秋季和冬季 3 个季节的用电量均值和标准差并进行标准化处理。之后,再利用聚类算法对第 1 步中的聚类结果实施进一步的聚类划分。

相比于直接聚类的方法,两步间接聚类的方法可以有效处理一组有着较长时间区间的用电数据。这是由于间接聚类直接抓住了宿舍的用电特征,而两步聚类中不仅区分了用电总量上的差异,也区分了具有不同季节特征的用电差异,从而更合理地将宿舍类别进行细分。

1.2 用电行为调研

通过聚类算法,可以利用用电数据反推出学生宿舍的用电偏好。然而,在无用电数据支撑的前提下,无法判断一间宿舍的用电偏好。而通过调研的方式获取学生的用电行为,可用于分析学生用电行为和聚类计算得到的用电偏好之间的关系^[16]。

1.2.1 问卷设计 相比于一般类型的居民建筑或办公建筑,高校宿舍内的用电并不是定时使用、有规律性的,这是因为不同的学生宿舍有着不同的用电习惯和用电行为,而空调的使用是造成不同宿舍之间差异的主要原因^[7]。因此,通过问卷调研的形式获取了部分宿舍在冬季的空调使用习惯,并对不同偏好类型的宿舍进行辨识,进而将学生的用电行为与用电偏好相对应。调研问卷中包含学生使用空调的各种行为,即空调的设定温度、使用控制习惯、在白天的使用频率和使用时间以及空调在夜晚的使用频率和使用时间 7 个维度上获取学生的空调使用行为差异。此外,由于问卷主要以单选题为主,可以使用标签编码的方法实现对学生问卷结果的提取。问卷中主要涉及的问题及选项如表 1 所示。

表 1 学生冬季空调行为调研问卷选项

Table 1 Questionnaire options for students' winter air conditioning behavior survey

问题设置	选项 1	选项 2	选项 3	选项 4
冬季是否使用空调	否	是		
冬季空调设定的温度	20 ℃ 以下	20~25 ℃	25~30 ℃	30 ℃ 以上
空调使用时间控制习惯	严格控制使用时间	控制使用时间	无控制意识	
空调白天的使用频率	偶尔使用	经常使用	频繁使用	
空调白天的使用时长	2 h 以内	2~4 h	长时间使用	
空调夜晚的使用频率	偶尔使用	经常使用	频繁使用	
空调夜晚的使用时长	2 h 以内	2~4 h	整夜使用	

1.2.2 构建行为参数 将学生的用电行为参数化,为了研究行为参数对用电量的影响,设置空调设定温度、空调控制和空调使用时间 3 个参数。其中,空调设定温度可以从调研问卷中直接获取,空调控制情况可以结合问卷中的冬季是否使用空调和空调使用强度两个问题来获取。从问卷中后 4 个问题分别获取空调在白天和夜间的使用时长和使用频率,并进行累加,以获取空调使用时间这一参数。

分别对问卷中各个选项进行参数化定义。在空调设定温度这一参数中,设置 0 表示在问卷中填写冬季在宿舍不使用空调,1~4 分别代表从左至右 4 个选项。在空调控制这一参数中,设置 0 表示在问卷中填写冬季在宿舍不使用空调,1~3 分别对应问卷中的选项“严格控制”“有控制意识”和“无控制意识”。而从问卷中获取空调使用的方法如下:

第 1 步,将问卷中空调的使用频率和使用时间进行组合,并分别定义短时间一定时间和长时间 3 种空调使用时间尺度,各时间尺度的组合结构见表 2。

表 2 冬季空调使用频率与使用时长组合

Table 2 Combination of frequency and duration air conditioning in winter

选项组合	不使用	偶尔使用	经常使用	频繁使用
不使用	短时间			
2 h 以内		短时间	一定时间	长时间
2~4 h		短时间	一定时间	长时间
长时间使用		一定时间	长时间	长时间

第 2 步,将上一步组合得到的白天和夜晚使用空调的时间尺度再进行组合,并分别定义为短时间、少数时间、一定时间、多数时间和长时间,各时间组合的长短定义见表 3。通过这样的组合分类方式,便将问卷中的强度和时长定性转化为宿舍空调整

体的使用时长,降低了数据的维度。最后再将各个时间尺度进行参数化标定,分别按时间长短从小到大标定为 1~5。

表 3 冬季空调白天与夜间使用时间组合

Table 3 Combination of air conditioning service time during day and night in winter

空调时间组合	白天短时间	白天一定时间	白天长时间
夜间短时间	短时间	少数时间	一定时间
夜间一定时间	少数时间	一定时间	多数时间
夜间长时间	一定时间	多数时间	长时间

2 试验结果与讨论

2.1 聚类结果

通过两步间接聚类方法对 533 间宿舍 144 d 的用电数据进行聚类分析,可得出 4 个不同的用电聚类。引入用电偏好用于描述不同聚类之间的用电策略差异,每一个聚类则对应一种用电偏好,即节约型、适宜型、舒适型以及奢侈型^[4],对应聚类中心的特征数值如表 4 所示。

表 4 用电偏好聚类中心

Table 4 Electricity consumption preference cluster center

偏好种类	夏季平均值	夏季标准差	秋季平均值	秋季标准差	冬季平均值	冬季标准差
偏好 1 (节约型)	2.54	1.84	3.12	1.49	4.35	2.64
偏好 2 (适宜型)	4.42	3.02	4.88	1.98	7.17	3.85
偏好 3 (舒适型)	4.67	3.22	5.43	2.32	11.38	5.23
偏好 4 (奢侈型)	6.99	4.12	7.60	3.50	14.67	6.13

对比季节间的差异可以看出,所有用电偏好的用电量均值和标准差都在冬季达到最大值,夏季的用电平均值最低,而秋季的用电标准差最低。这说明,多数学生在夏季的用电水平最低,而秋季的用电更加规律。根据聚类中心的计算结果,研究参考了文献[7]对学生宿舍用电类型的定义,并根据用电量水平由小到大分别定义了节约型、适宜型、舒适型和奢侈型宿舍。区别于文献[7]中的研究结果,额外增加了舒适型宿舍,该类型宿舍在空调季用电量平均值的聚类介于文献[7]中奢侈型与舒适型之间,舒适型宿舍的提出完善了学生宿舍的用电类型。

通过聚类分析可知,节约型宿舍共有 141 间,占宿舍总数的 26.5%;适宜型宿舍共有 176 间,占宿舍总数的 33%;舒适型宿舍共有 151 间,占宿舍总数的 28.3%;奢侈型宿舍共有 65 间,占宿舍总数的 12.1%。从数量分布上可以看出,大多数宿舍的用电量偏低,其中数量最多的类型为适宜型宿舍。为了体现各用电偏好宿舍之间的差异和用电量的数据分布,图 2 展示了各用电偏好房间在夏季、秋季(过渡季)以及冬季的用电均值小提琴图,图 3 展示了各偏好类型的宿舍每日平均用电量的逐月变化趋势。

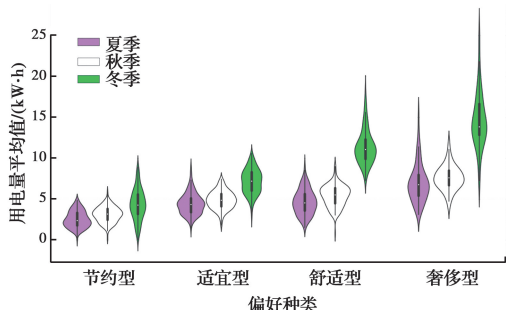


图 2 各聚类偏好用电均值小提琴图

Fig. 2 Violin graph of mean electricity consumption of each cluster preference

从图 2 可以看出各聚类之间的数据分布与差异,学生宿舍每日的用电量主要分布在 0~20 kW·h 之间。其中,节约型宿舍每日用电量在夏季、秋季和冬季都保持在 5 kW·h 及以下,而适宜型和舒适型宿舍夏季和秋季每日用电量在 5 kW·h 上下,而在冬季,舒适型宿舍明显增加了用电,该类型宿舍冬季的用电量集中在 10 kW·h,而适宜型宿舍在冬季的用电量普遍低于 10 kW·h。奢侈型宿舍夏季和秋季的用电量在 5 kW·h 以上,而在冬季高于其他

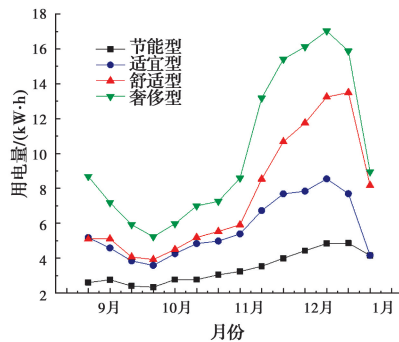


图 3 各聚类偏好逐月用电量分布图

Fig. 3 Distribution map of monthly electricity consumption for each cluster preference

用电偏好,其用电量在 10~15 kW·h 之间。

从图 3 可以看出,各偏好之间的用电量变化趋势相同。从 9 月至 10 月上旬,学生宿舍的用电量逐渐降低;从 10 月中旬至 11 月中旬,学生宿舍的用电量有一定幅度的增加;从 11 月中旬至 12 月底,学生宿舍的用电量开始有了明显的增加,并在 12 月底达到峰值。

结合图 2 和图 3 的结果,可得出如下规律:1)节能型宿舍在整个学期的用电量都保持在较低水平,但这类型宿舍在进入冬季时用电量也会小幅度增加。2)适宜型宿舍和舒适型宿舍在夏季和过渡季节的用电水平相同,而舒适型宿舍在冬季用电量大幅度增加。3)奢侈型宿舍全季节都保持最高水平的用电量,同时,和其他偏好相比,在夏季和冬季的用电量有着明显的区别。

2.2 调研问卷结果

在调研中共收取了 342 份问卷,剔除掉无效问卷以及同一间房间的重复问卷后,剩余有效问卷 241 份,调研得出的结果见表 5。

表 5 学生冬季空调行为调研问卷结果汇总

Table 5 Results of a questionnaire on students' winter air conditioning behavior

设置的问题	编号 0	编号 1	编号 2	编号 3
冬季是否使用空调		12.4%	87.5%	
冬季空调设定的温度	12.4%	3.7%	31.4%	61.9%
空调使用的习惯	12.4%	17.3%	46.1%	24.4%
空调白天的使用强度	17.4%	57.2%	19.9%	5.8%
空调白天的使用时长	17.4%	31.1%	17.4%	34.0%
空调夜晚的使用强度	17.4%	31.5%	25.7%	26.9%
空调夜晚的使用时长	17.4%	17.4%	51%	14.9%

从表 5 可以看出:1)在冬季,学生空调设定的温度集中在 25~30 ℃,少部分宿舍空调设定的温度为 20~25 ℃。2)大部分宿舍对空调具有控制使用时间的意识,但有 24.4%的学生则根据自身意愿任意使用空调。3)在白天,多数学生宿舍偶尔使用空调,但也有 25.7%的学生宿舍经常或频繁使用空调。另一方面,学生在白天使用空调的时间差异性较大,其中,空调使用时间在 2~4 h 的样本最多。4)在夜晚,学生宿舍使用空调的频率也有差异,其中,偶尔开启空调的样本较多,大部分在 2~4 h 左右,少部分使用时间在 2 h 以下或整夜使用。

为了验证用电偏好与用电行为两者之间的关系,将调研结果与聚类计算出的用电偏好联系起来,将相同偏好的学生填写的问卷进行整理和汇总,并计算同一偏好下所有宿舍在空调行为各维度上编号的平均值,同时,对各维度之间的数据进行归一化处理。各偏好与行为之间的雷达图如图 4 所示。其中,雷达图的数值范围是从 0~1,代表了各偏好宿舍空调使用行为各个维度上的强度,数值越大,由空调造成的能耗也越高。

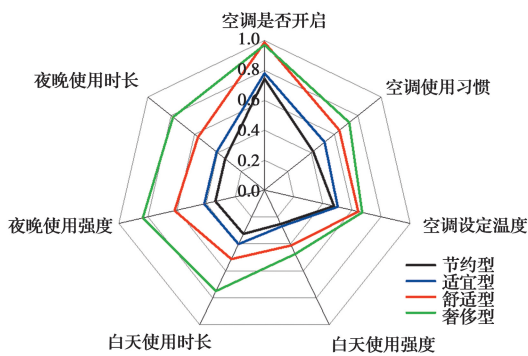


图 4 不同偏好空调使用习惯雷达图

Fig. 4 Radar chart of air conditioning using habits with different preferences

从图 4 的结果可以看出,用电偏好与行为之间有一定联系。用电量低的宿舍在冬季空调使用上偏保守,使用强度较低,而用电量高的宿舍空调使用强度更高。进一步分析可知,节约型宿舍和适宜型宿舍在空调行为上较为接近,尤其在“空调是否开启”和“空调设定温度”两个维度上。这说明在冬季空调使用的行为上,节约型宿舍和适宜型宿舍之间的差异性不明显。然而,在 7 个空调使用行为维度上,舒适型宿舍和奢侈型宿舍的数值均明显高于节约型和适宜型宿舍。同时可以发现,舒适型宿舍和奢侈型宿舍在“夜晚使用强度、时长”和“白天使用强

度、时长”上和其他用电偏好有明显的区分度。而在其他维度上,舒适型宿舍和奢侈型宿舍之间的差异性不大。

图 5 所示为不同空调使用时间下的用电偏好统计堆积柱状图。从图中可以看出,冬季短时间使用空调的宿舍最多,长时间使用空调的宿舍最少。其中,节能型宿舍和适宜型宿舍以短时间使用空调为主,奢侈型宿舍多数长时间使用空调,而舒适型宿舍在各时间段中都有一定数量。这说明宿舍的用电偏好和其空调的使用时长具有相关性,用电越节能的宿舍对应空调使用的时间越短,用电越注重舒适的宿舍对应空调使用的时间越久。但也应当注意到,舒适型宿舍中部分宿舍用电量偏高而空调使用时长并不长,可能是这些宿舍在冬季增加了热水器的使用频率和时间。

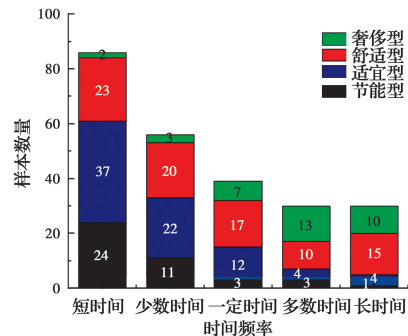


图 5 空调使用时间长短统计图

Fig. 5 Statistics chart of airconditioning time usage

通过式(3)计算案例中某一时间尺度下各偏好出现的条件概率,结果如表 6 所示。通过利用该条件概率,获取各时间尺度的宿舍数量,利用式(4)可以反推出各偏好的宿舍数量。通过该方法,可以比较容易地通过问卷的方式计算出一栋学生宿舍内宿舍用电偏好类型的数量。

表 6 确定空调使用时间条件下推测各偏好的概率

Table 6 Probability of each preference occurring given air conditioning using time

使用空调的时间	节能型	适宜型	舒适型	奢侈型
短时间使用	0.279	0.430	0.267	0.023
少数时间使用	0.196	0.393	0.357	0.054
一定时间使用	0.077	0.308	0.436	0.180
多数时间使用	0.03	0.133	0.333	0.433
长时间使用	0.01	0.133	0.50	0.333

$$P(\text{寝室偏好}_j | \text{时间尺度}_i) = \frac{P(\text{用电偏好}_j, \text{时间尺度}_i)}{P(\text{时间尺度}_i)} \quad (3)$$

$$s(\text{用电偏好}_j) = \sum_{i=1}^5 P(\text{用电偏好}_j | \text{时间尺度}_i) \times s(\text{时间尺度}_i) \quad (4)$$

式中: P 为概率大小; s 为某条件下寝室数量。

2.3 参数分析结果

为了确定影响学生宿舍用电量的主要参数,基于 Spearman 相关系数法计算宿舍用电与各参数之间的相关性,并绘制热图,如图 6 所示。图中红色表示正相关,蓝色代表负相关,白色代表无相关性。

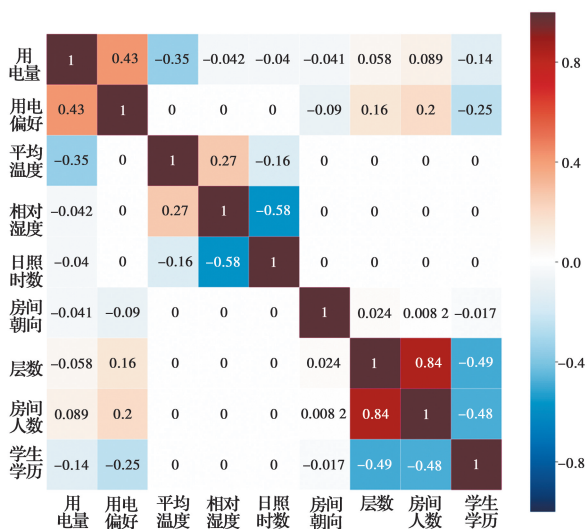


图 6 参数相关性分析热图

Fig. 6 Parameter correlation analysis heat map

由图 6 可知,用电偏好与用电量具有中度正相关,相关系数为 0.42,温度与用电量具有中度负相关,相关系数为-0.35,而宿舍固定参数对宿舍每日用电量的相关性较小。相较其他参数,室外气温和用电偏好是影响学生宿舍用电的最主要参数,适用于推测学生宿舍的每日用电量。同时也应注意到,固定参数与用电偏好之间的相关性高于固定参数与用电量之间的相关性。因此认为,宿舍的固定参数会通过影响宿舍的用电偏好进而间接影响宿舍的用电量。

除用电偏好外,室外平均气温与宿舍用电量存在中度相关性。由于室外平均气温为时序变量,因此,通过最小二乘回归方法分析宿舍各用电偏好下温度与用电量之间的关系,具体流程如下:首先,计算 4 种偏好每日用电量的均值,绘制不同用电偏好下该类别每日用电量的均值与室外温度之间的散点图。之后,对这两个参数进行多元回归拟合,并计算

回归模型的拟合优度。各用电偏好下温度与用电量之间的散点图以及拟合曲线如图 7 所示,其中,图 7 (a)~(d)分别展示了节约型寝室、适宜型寝室、舒适型寝室和奢侈型寝室的回归结果。表 7 为各偏好的多元回归拟合优度。

表 7 4 种用电偏好多元回归拟合优度

Table 7 Fit goodness of the four electricity consumption preferences in multiple regression

拟合优度	节能型	适宜型	舒适型	奢侈型
线性回归	0.78	0.78	0.83	0.78
二次回归	0.75	0.76	0.83	0.78
三次回归	0.82	0.82	0.88	0.86

对比 3 种回归曲线的拟合优度,筛选出用电量与室外温度之间的最优模型。从图 7 中可以看到,线性回归和二次回归的拟合曲线满足实际情况,而三次回归在温度低于 0 °C 时用电量反而下降,这与实际情况相悖。而从表 7 中的拟合优度结果可知,线性回归的拟合优度比二次回归更高。因此,线性回归模型可以较为准确地描述室外温度与学生每日用电量之间的数量关系。

为了进一步验证学生宿舍每日用电量与室外气温的线性回归模型,将线性回归模型用于验证 3 月份的学生宿舍用电情况,4 种偏好的模型验证结果如图 8(a)~(d)所示。图中,绿色直线代表该模型的回归曲线,红色散点表示学生宿舍在 9 月份~12 月份的数据,而蓝色散点表示 3 月份的数据。如图 8(b)~(d)所示,绿色的回归线在蓝色的散点上方,表明在相同的温度条件下,适宜型、舒适型和奢侈型中的部分宿舍在 3 月份用电量有一定程度的下降,其中,舒适型宿舍最为明显。表 8 给出了各种偏好在 3 月份用电数据的模型误差率,并统计了调整用电偏好的宿舍数量。该结果表明,除舒适型宿舍外,

表 8 4 种用电偏好多元回归结果分析

Table 8 Analysis of multiple regression results of four power consumption preferences

参数指标	节能型	适宜型	舒适型	奢侈型
模型误差率	0.09	0.12	0.21	0.15
调整用电偏好的宿舍数量	<10	30	40	23

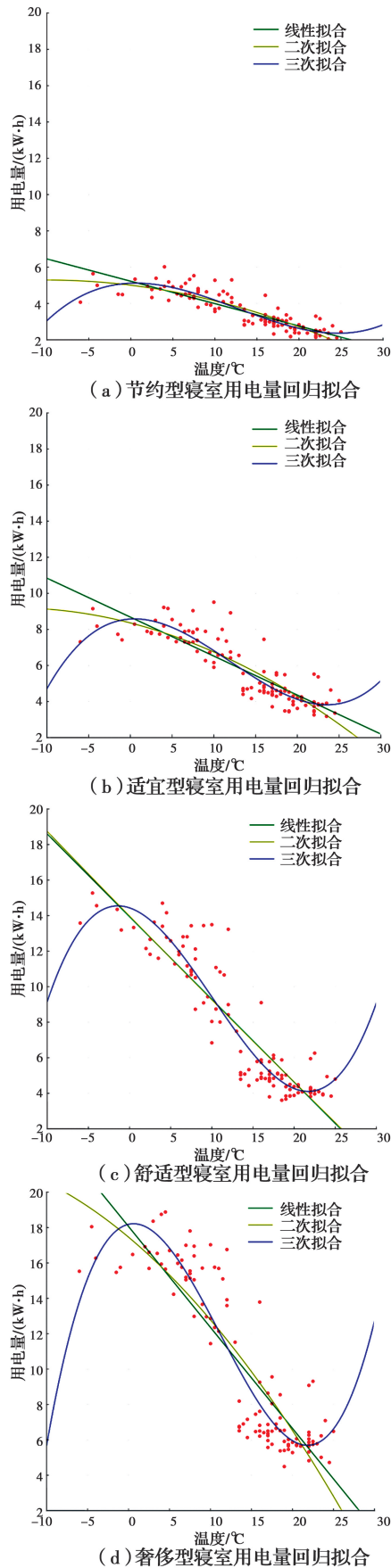


图 7 训练集散点与回归拟合曲线

Fig. 7 Training set scattered points and regression fitting curves

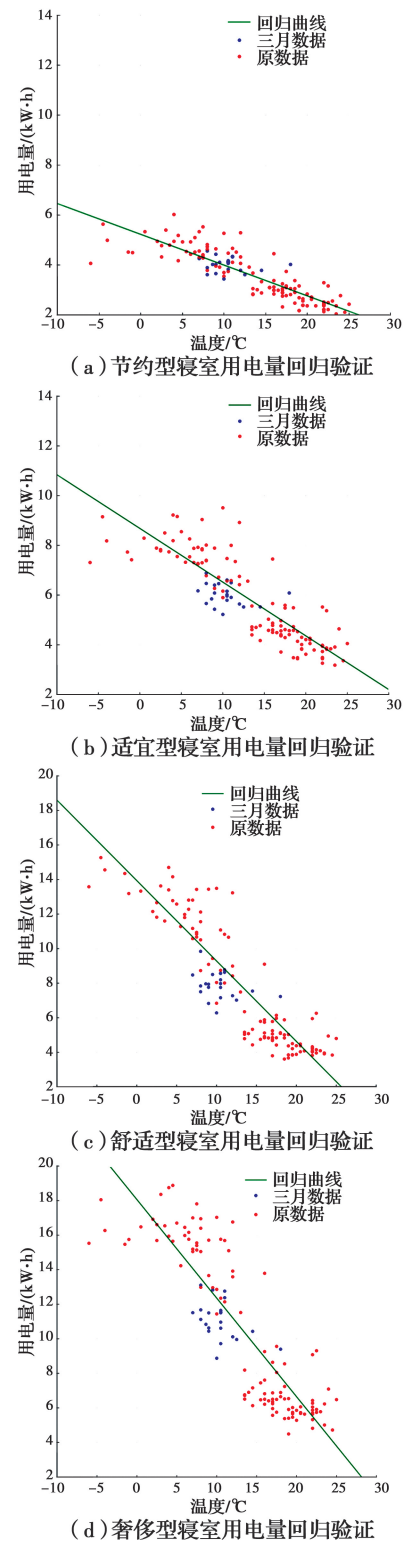


图 8 测试集模型验证曲线

Fig. 8 Test set model verification curves

其他类型的宿舍模型误差率均在 15% 以下,即线性回归模型体现出较好的准确性。此外,无法直接通过室外温度这一单一变量准确地验证舒适型宿舍每日的用电量大小。

3 结论

以上海某高等院校的学生宿舍为研究对象,调研获取了两栋学生宿舍共 533 间宿舍从 2020 年 9 月至 2021 年 1 月的逐日用电数据。通过对数据进行两步聚类分析,将宿舍的用电情况分为了 4 种类型,并提出 4 种用电偏好来描述各类型,即节能型、适宜型、舒适型和奢侈型。之后,分别对 4 种类型的学生宿舍进行空调用电行为调研。结果表明,通过获取冬季空调的使用时长可推测出节能型、适宜型和奢侈型宿舍用电偏好的占比大小。进而对影响学生每日用电量的各个参数展开相关性分析,参数包括时序参数(气象参数)和非时序参数(宿舍学生的培养层次、房间层高、房间朝向、房间人数和用电偏好)。最后,根据聚类分析结果,分别构建了 4 种用电偏好回归模型,并以 3 月份的实际用电数据对模型进行验证。主要结论如下:

1)通过两步聚类方法可区分出 4 种不同类型的典型聚类,并引入用电偏好以描述不同类别之间的差异性。各类别之间的用电偏好差异主要体现在冬季。除了舒适型宿舍之外,通过收集冬季学生在宿舍的空调使用时间可识别出各偏好在楼层中的占比情况,进而可估算出各偏好在一栋宿舍楼中的占比。

2)室外温度和用电偏好是影响学生宿舍每日用电量的两个最主要参数。相比之下,宿舍的固定参数对学生宿舍每日用电量的影响非常小。但是,用电偏好会受到培养层次和房间人数的共同影响,但几乎不受房间朝向的影响,这可能与学生普遍早出晚归的作息时间表有关。

3)在秋季入冬的时间段内,学生宿舍每日的用电量与室外温度呈线性关系。然而,在冬季入春时,较多的舒适型宿舍会大幅度降低用电量,而奢侈型也会小幅度降低用电水平。此时,用线性回归模型验证其他用电偏好的用电量准确率较高,但舒适型宿舍的线性回归模型存在较大误差。

参考文献:

[1] 高彪,谭洪卫,宋亚超. 高校校园建筑用能现状及存在问题分析:以长三角地区某综合型大学为例[J]. 建筑节能, 2011, 39(2): 41-44.
GAO B, TAN H W, SONG Y C. Campus building

energy consumption: Taking one comprehensive university as example [J]. Building Energy Efficiency, 2011, 39(2): 41-44. (in Chinese)

- [2] 陈淑琴,朱晟炜,谭洪卫,等. 我国高校校园建筑节能管理现状及问题研究[J]. 建设科技, 2015(12): 34-38.
CHEN S Q, ZHU S W, TAN H W, et al. Research on current situation and problems of energy conservation management in campus buildings of colleges and universities in China [J]. Construction Science and Technology, 2015(12): 34-38. (in Chinese)
- [3] 陈涛,谭洪卫,庄智. 上海地区高校建筑电耗现状及特征分析[J]. 建筑节能, 2013, 41(1): 59-61.
CHEN T, TAN H W, ZHUANG Z. Power consumption and characteristic of campus building in Shanghai area [J]. Building Energy Efficiency, 2013, 41(1): 59-61. (in Chinese)
- [4] 侯晓虎. 高校校园能耗监测综合管理平台的设计与实现[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2017.
HOU X H. Design and implementation of campus energy monitoring integrated management platform [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [5] 胡轩昂,屈利娟,葛坚. 夏热冬冷地区校园建筑能耗调查与能耗定额研究[J]. 建筑技术, 2017, 48(2): 173-176.
HU X A, QU L J, GE J. Energy consumption survey and quota study of campus building in regions with hot summer and cold winter [J]. Architecture Technology, 2017, 48(2): 173-176. (in Chinese)
- [7] 陈淑琴,杜博文,刘世杰,等. 高校宿舍建筑内使用者用能行为特征的统计学分析[J]. 建筑科学, 2015, 31(8): 133-139.
CHEN S Q, DU B W, LIU S J, et al. Statistical analysis on the characteristics of energy use behavior in students' dormitories in universities [J]. Building Science, 2015, 31(8): 133-139. (in Chinese)
- [8] 王曼伊,王志强,周霞,等. 基于能耗监管平台的某高校宿舍用能调查分析[J]. 建筑节能, 2016, 44(5): 70-74.
WANG M Y, WANG Z Q, ZHOU X, et al. Survey on energy utilization of a university dormitory based on the building energy consumption monitor platform [J].

- Building Energy Efficiency, 2016, 44(5): 70-74. (in Chinese)
- [9] CHEN S Q, ZHUANG Y F, ZHANG J Y, et al. Statistical characteristics of usage behavior of air conditioners in the university students' dormitories [J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 3593-3598.
- [10] 项慧珍, 程世丹, 黄凌江. 夏热冬冷地区高校学生宿舍空间位置对能耗的影响[J]. 建筑节能, 2020, 48(3): 63-69.
- XIANG H Z, CHENG S D, HUANG L J. Influence of spatial position of college students' dormitory on energy consumption in hot summer and cold winter area [J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(3): 63-69. (in Chinese)
- [11] LIU X Q, ZHANG C, ZHOU Y, et al. Temperature change and electricity consumption of the group living: A case study of college students [J]. Science of the Total Environment, 2021, 781: 146574.
- [12] 国家气象科学数据中心 [DB/OL]. <http://data.cma.cn/>.
- [13] 王建仁, 马鑫, 段刚龙. 改进的 K-means 聚类 k 值选择算法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(8): 27-33.
- WANG J R, MA X, DUAN G L. Improved K-means clustering k-value selection algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(8): 27-33. (in Chinese)
- [14] WANG Y, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Load profiling and its application to demand response: A review [J]. Tsinghua Science and Technology, 2015, 20(2): 117-129.
- [15] 丁艳蕊, 付祥钊. 夏热冬冷地区城市暖通空调季节划分[J]. 暖通空调, 2020, 50(8): 59-64.
- DING Y R, FU X Z. Seasonal division of HVAC in cities of hot summer and cold winter zone [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(8): 59-64. (in Chinese)
- [16] 谈雪, 郭强, 许健, 等. 夏热冬冷地区某高校典型建筑用能特征与用能行为影响分析[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(1): 101-107, 114.
- TAN X, GUO Q, XU J, et al. Characteristics of energy use of typical buildings and its behavioral influencing analysis in one university campus in hot summer and cold winter, China [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(1): 101-107, 114. (in Chinese)

(编辑 黄廷)