

北京市住宅空调开机行为和能耗的实测研究^{*}

航天低温推进剂技术国家重点实验室 总装备部工程设计研究总院 李兆坚[☆]
总装备部工程设计研究总院 谢德强 江红斌 卫 兴

摘要 为了解北京市住宅空调开机行为和能耗的真实状况和特点,2011年夏季通过在每台空调器上单独设置电表采用实测调查法对北京市某住宅小区中69台分体空调器的开机率和能耗状况进行了实测调查分析。结果表明:住户空调能耗的最小值为6 kW·h,最大值为596 kW·h,平均值为161 kW·h,最大值比最小值大了98倍。单台空调器的平均能耗为63 kW·h,空调季空调器平均每天的当量满负荷运行时间约为0.61 h。单位建筑面积平均空调能耗指标仅为2.0 kW·h/m²。空调器最大用户开机率为31.9%,最大日平均用户开机率为13.3%,空调季空调器平均用户开机率仅为6.0%。绝大部分住户自觉采取了空调行为节能措施,空调器为短期间歇运行,因此住宅分体空调方式的平均能耗水平很低,但不同住户的空调能耗差异很大,住户空调行为对空调能耗的影响很大。

关键词 住宅 空调 能耗 实测 空调开机率 北京市

Testing study on operating behavior and energy consumption of air conditioners in residential buildings in Beijing

By Li Zhaojian[★], Xie Deqiang, Jiang Hongbin and Wei Xing

Abstract In order to understand the behavior and energy consumption characteristics of air conditioners in residential buildings, investigates the operation status and energy consumption of 69 air conditioners of households in a quarter in Beijing by setting one power meter for each air conditioner in the summer of 2011. The results show that the air conditioning energy consumption of households varies from 6 kWh to 596 kWh with the average of 161 kWh. The maximum is 99 times of the minimum. The average energy consumption of the air conditioners is 63 kWh. The average full-load runtime for each air conditioner is about 0.61 h per day. Average energy consumption intensity of air conditioning per floor area is 2.0 kWh/m². The biggest turning-on ratio of air conditioners (TRAC) in the summer is 31.9% and the maximum daily average TRAC is 13.3%. The average TRAC in the summer is 6.0%. The average energy consumption of split air conditioners is rather lower, since most of the air conditioners in the households operate in a short time because most of the users have taken energy saving behaviors to reduce the air conditioning energy consumption. But the differences of air conditioning energy consumption of different households are very large. The air conditioning operating pattern is the most important influencing factor of the energy consumption.

Keywords residential building, air conditioning, energy consumption, test, turning-on ratio of air conditioner, Beijing

[★] State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Center for Engineering Design and Research under the Headquarters of General Equipment, Beijing, China

①

0 引言

我国住宅绝大多数采用分体空调方式,近10

①[☆] 李兆坚,男,1962年8月生,工学博士,研究员
100028 北京市4702信箱6室
(010) 66354154
E-mail: lizj03@126.com

收稿日期:2013-10-28

修回日期:2013-11-29

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:51078376)

多年来,随着人民生活水平的快速提高,我国住宅空调器拥有量快速增加。从1995年到2010年,我国城镇住宅空调器拥有量从0.09亿台增加到2.61亿台,15年间增长了28倍^[1],呈现出爆炸性增长的趋势,因此防止住宅空调能耗的过快增长是我国建筑节能工作面临的一个紧迫而重要的任务。准确掌握我国住宅空调的能耗状况与特点是做好住宅空调节能工作的重要基础。我国住宅空调器绝大多数为间歇运行,其能耗不仅与当地气候条件、建筑热工状况、建筑通风状况、人员和照明发热等内扰情况,以及空调器的台数、制冷量、能效比和调节特性等众多客观因素有关,还与住户空调开机行为这一主观因素有很大关系,而住户的空调开机行为呈现出很强的差异性、随机性和不确定性,采用目前的理论分析方法还难以对此进行准确计算分析。为了解住宅空调能耗的真实状况和特点,必须对住户空调能耗和空调开机行为进行实际调查研究,因此住宅空调能耗调查是住宅空调节能的一项重要的基础性研究工作。由于住宅分体空调器的数量很多、位置很分散,因此其能耗调查的难度和工作量都比集中空调大得多。以往不少学者进行了我国住宅分体空调能耗的调查工作^[2-23],但这些调查工作都是采用问卷调查法和抄表拆分调查法,这些都是间接调查方法,都存在一定误差,采用这些方法也无法对住户中不同空调器的实际运行状况和能耗进行详细深入分析。近年来,对住户空调行为的研究已开始受到关注,但以往通常采用问卷调查法进行空调开机行为的调查^[6-7],很少有学者对住宅空调器的开机状况进行直接实测调查,而采用问卷调查法进行空调开机行为调查的准确度如何?这也是一个值得研究的重要问题。空调开机率是评价住宅空调开机行为的一个重要指标,也是住宅空调节能设计和研究的一个重要基础数据。为了解住宅中住户空调开机行为和空调器能耗的真实状况,笔者于2011年夏季,采用在住户每台空调器上单独设置电表的实测调查法,对北京市住宅空调器的开机率和能耗进行实测调查分析。

1 调查对象概况

调查对象为北京市三环内某住宅小区30多个住户的80多台空调器,通过对实测调查结果的分析,剔除无效样本后,有效调查对象为27个住户的69台分体空调器。为了解调查对象的情况,对这

些住宅楼的设计图纸进行了调查,并对这些住户进行了问询调查,得到调查对象的主要情况如下。

1) 这些住户分别位于该住宅小区的6栋住宅楼中,这些住宅楼均为20世纪70—90年代建成的老旧住宅楼,其中1栋为高层住宅楼,其余5栋为多层住宅楼。它们的围护结构热工性能远低于北京市现行住宅节能设计标准的要求,按现行住宅节能标准,这些住宅均为非节能住宅。

2) 这些住户的户型包括3种:三室一厅,13户;二室一厅,12户;一居室,2户。有效调查对象的户均建筑面积为81.7 m²,略高于北京市2011年城镇居民户均建筑面积的统计平均值(79.4 m²)^[24]。

3) 这些住户均为某建筑设计院的职工,其平均收入水平高于北京市城镇居民的平均收入水平。这些住户共有69台空调器,户均空调器台数为2.59台/户,远高于2011年北京市城镇居民空调器拥有量的统计平均值1.71台/户^[24]。这也从一个方面证实了调查对象的平均收入水平远高于北京市平均水平。

4) 该设计院的办公楼就在该住宅小区中,其工作日上班时间为08:00—12:00,14:00—18:00,住户中午通常回家。

5) 在这些住宅空调器中只有1台是分体柜式空调器,其他均为分体壁挂空调器;变频空调器只有1台,其他均为定速空调器。可见既有居住建筑中绝大多数空调器为定速分体壁挂空调器。这些空调器的平均额定制冷量为2 713 W。

6) 在这些空调器中,能效比高于3.2的高能效空调器只有5台,变频空调器和高能效空调器仅占总数的7.0%,其他均为普通空调器,能效比为2.5~2.8。它们的平均额定能效比为2.64。可见在既有居住建筑中节能空调器所占比例较低。这些空调器的使用年限为2~15 a,平均使用年限为8 a。可见这些空调器大多数为能效水平较低的老旧空调器。

2 调查方法和空调开机率的定义

实测调查法是目前最准确的住宅空调能耗调查方法。笔者于2011年夏季,采用实测调查法对住户空调器的能耗和开机率进行了调查。在住户每台空调器电源上均设置一个无线电能计量插座,其测量精度为1级,测量误差在±1%的范围内。

通过无线接收器可以在住户门外接收到住户空调器实时的电压、电流、功率和累计用电量等数据,从而实现住户空调器能耗和开机状态的准确测量和调查。由于不同气温条件、周末和工作日、每天的不同时段,住宅空调开机率都是不同的,因此在空调季的不同时期选择工作日和周末分别进行一天内不同时段空调开机率的调查。同时定期对住户的总电表进行抄表调查。

空调器的开机状况包括用户开机和制冷开机两种状态。空调器的用户开机状态是指用户按下空调器遥控器的开机键,空调器室内机风扇运行的状态;空调用户开机率定义为被调查对象中处于用户开机状态的空调器台数与被调查的空调器总台数之比,该参数可用于评价用户的实际开机意愿。空调器的制冷开机状态是指空调器的制冷压缩机运行、室外机运转的状态;空调制冷开机率定义为被调查对象中处于制冷开机状态的空调器台数与总台数之比。由于定速空调器是通过压缩机的启停来控制室温的,在恒温阶段,其压缩机是自动间歇运行的,因此空调用户开机率一定大于空调制冷开机率。如未特殊说明,本文的空调开机率均为空调用户开机率。

3 调查结果与分析

3.1 气象参数调查结果

室外气象参数对住宅空调能耗有重要影响,根据相关统计数据^[25],北京市2011年空调季(6—8月)的室外平均温度为 26.8°C ,明显高于典型年同期室外温度的统计平均值 25.5°C ^[26]。

3.2 住户空调能耗调查结果与分析

按从小到大的顺序排列,27个住户的空调能耗调查结果见图1。对调查结果分析如下:

1) 住宅分体空调方式的平均能耗水平很低。尽管调查对象的建筑热工状况较差、空调器能效水平较低、住户收入水平较高、户均空调器台数较多,调查年份的空调季室外平均温度也显著高于北京市典型年同期的统计平均值,这些因素都会使住宅空调能耗增大,但实测的户均空调能耗仅为 $161\text{ kW}\cdot\text{h}$,单位建筑面积平均空调能耗指标仅为 $2.0\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。可见住宅分体空调方式的平均能耗水平确实很低。

2) 不同住户的空调能耗差异巨大,空调能耗集中度较高。在这些调查对象中,住户夏季空调能

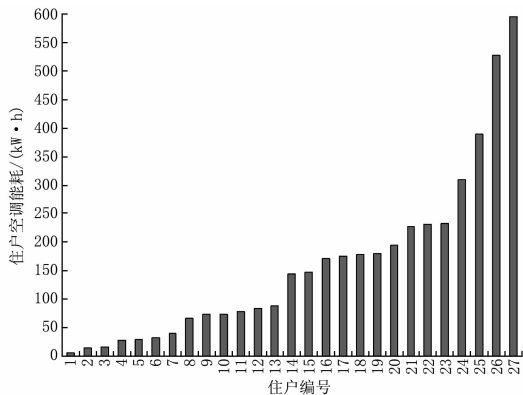


图1 27个住户2011年夏季空调能耗实测调查结果

耗的最小值为 $6\text{ kW}\cdot\text{h}$,最大值为 $596\text{ kW}\cdot\text{h}$,最大值比最小值大了98倍。能耗最高的住户的空调能耗大于能耗较低的12个住户的空调能耗之和。图1中6号住户和24号住户是同一住宅楼中楼层和户型完全相同、家庭人口数也相同的2个住户,但24号住户的空调能耗是6号住户的9.4倍。在这些调查对象中,空调能耗最低的住户是一个退休职工,三室一厅的住房,装有2台空调器,其空调器基本不开,所测得的电耗基本上为待机电耗。可见,住户的空调开机行为差异是造成不同住户空调能耗差异最大的最重要因素。由于住户是按自己的空调需求自由地开关调节他们的分体空调器,因此不同住户之间巨大的空调能耗差异实际上表明了不同住户的空调开机行为和空调需求存在很大差异。

3) 在空调季,调查对象的空调耗电量占总耗电量的27.8%。

3.3 空调器能耗调查结果与分析

由于客厅与卧室等其他房间的空调开机模式差异较大,因此将这两类房间的空调器分开研究。按从小到大的顺序排列,客厅和卧室等其他房间的空调能耗调查结果见图2和图3。测试结果表明:

1) 住宅空调器的平均能耗水平很低。单台空调器的能耗平均值为 $62.8\text{ kW}\cdot\text{h}$,空调季按100d计算,平均1台空调器每天的能耗为 $0.63\text{ kW}\cdot\text{h}$,空调器平均每天的当量满负荷运行时间仅为 0.61 h 。

2) 不同空调器的能耗差异巨大。单台空调器能耗的最大值为 $528\text{ kW}\cdot\text{h}$,最小值为 $2.3\text{ kW}\cdot\text{h}$,最大值比最小值大了229倍。同一住户不同空调器的能耗差异也很大,例如,27号住户的4台空

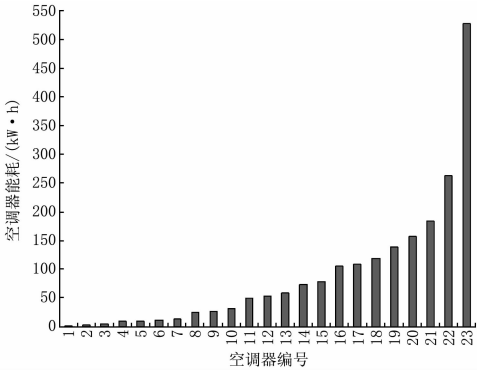


图2 客厅空调器能耗实测结果

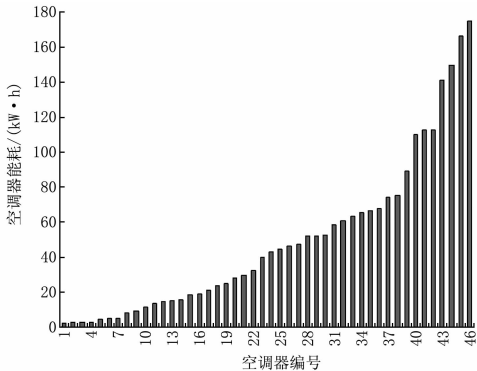


图3 卧室等其他房间空调器能耗实测结果

调器的能耗值中最大值为最小值的34倍。从图2和图3可见,不同住户的客厅和卧室等其他房间的空调能耗差异也很大。

3) 客厅空调器的平均能耗显著高于卧室等其他房间的空调器。客厅空调器的平均能耗为89.6 kW·h,卧室等其他房间空调器的平均能耗为49.4 kW·h,客厅空调器的平均能耗高了81%,这是由于客厅空调器的容量通常较大,且开机使用频率通常较高。但由于一套住房中卧室等其他房间的总面积通常比客厅大,其空调器的总量也比客厅多,因此这些住户中卧室等其他房间的空调总能耗比客厅高了10.3%。

4) 调查对象中初中和高中学生卧室空调器的平均能耗为141 kW·h,为全部卧室空调器能耗平均值的2.9倍。可见,在空调环境中成长起来的年轻一代对夏季自然热湿环境的耐受力更差,对空调环境的依赖性更强,这也是造成我国住宅空调能耗快速增长的一个值得关注的因素。

3.4 空调开机率调查结果与分析

2011年夏季对调查对象的空调开机率进行了大量的实测调查,由于篇幅所限,本文只选择7月

底2个典型日的调查数据进行分析。7月28日(工作日)和7月30日(周末)的空调开机率调查结果见图4和图5,其中7月28日的日平均温度为28.3℃,平均相对湿度为75.1%,7月30日的日平均温度为26.1℃,平均相对湿度为71.1%。

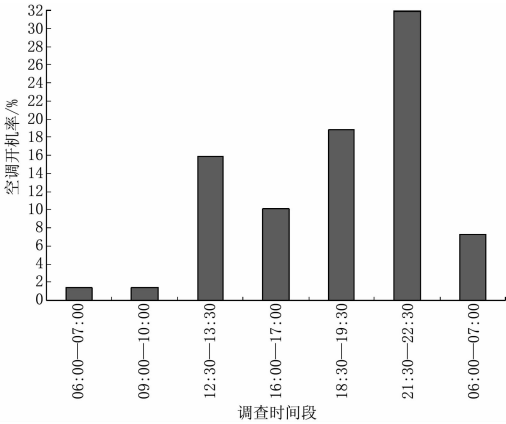


图4 住宅空调开机率调查结果(2011年7月28日,工作日)

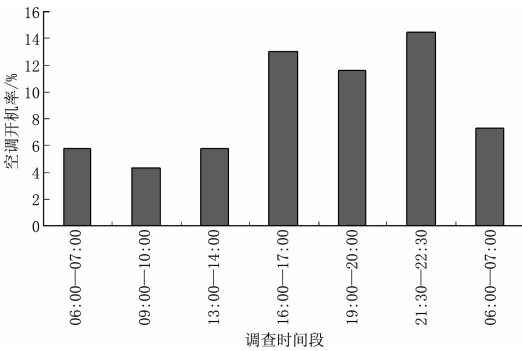


图5 住宅空调开机率调查结果(2011年7月30日,周末)

1) 住户空调器的平均开机率很低

2011年夏季,这些调查对象的空调开机率最大仅为31.9%,最大日平均空调开机率仅为13.3%,空调季的平均空调开机率仅为6.0%,而空调器的平均制冷开机率将更低。调查结果表明,只有当有人房间室温超过住户可忍受温度时住宅空调器才会被开启,因此住宅楼的空调需求特点是只有小部分空间、少部分时间需要空调,住宅空调器都是短期间歇运行。可见住户空调行为是影响空调能耗的最重要原因,因此空调行为节能的潜力很大。分散式空调方式可以很好地适应住宅空调需求的特点,满足不同住户的不同空调需求,充分发挥出住户行为节能的巨大潜力,实现住宅楼部分时间和局部空间的空调,因此其平均空调能耗水平很低。

2) 工作日不同时间段的空调开机率变化特点

由图4可见,在夏季炎热的气象条件下,工作日一天中住宅空调开机率的变化较大,上午上班时段(09:00—10:00)的空调开机率最低,晚上时段(21:30—22:30)的空调开机率最高,中午的空调开机率也较高。这是因为晚上时段住宅中人员在位率接近最高,而且室温较高;中午职工通常回家吃饭休息,住宅中人员在位率也较高,室外气温也最高,因此空调开机率较高。凌晨时段住户的在位率最高,但其空调开机率却较低,在最热的气象条件下也不超过8%,这主要是因为凌晨室内温度较低,且在睡眠状态下人体的发热量较少,可见空调开机率不仅与住宅中人员在位率有关,而且与室内温度和人员生活状态有关。调查结果表明北京市住户空调器很少通宵连续开机运行。

3) 周末不同时间段的空调开机率变化特点

由图5与图4的比较可知,周末空调开机率变化幅度比工作日小。上午的空调开机率最低,这是因为上午气温较低、周末有一部分住户外出活动,因此这一时段的人员在位率较低。下午和晚上的空调开机率较高,晚上时段(21:30—22:30)的空调开机率最高,这是因为这一时段室温较高,而且住宅中人员在位率较高。另外,7月30日的最大空调开机率只有7月28日的一半,这主要是因为7月30日的室外平均温度明显低于7月28日,可见室外气候条件对住户空调行为有显著影响。

4) 实测调查结果与问卷调查结果的比较

以往采用问卷调查法得到的北京市夏季最热时期住宅空调开机率为90%~100%^[6-7],而采用实测调查法得到的北京市住宅夏季的最大空调开机率仅为31.9%,最大日平均空调开机率仅为13.3%,远低于问卷调查法的调查结果,可见在对住户空调开机行为进行调查时,问卷调查法的误差较大,采用该方法难以对住户空调行为进行详细、准确的调查分析,因此对住宅空调行为的调查应采用实测或实证调查法。

4 结论

为了解北京市城镇住宅空调开机行为和能耗的真实状态,笔者于2011年夏季,采用实测调查法对北京市内27个住户69台空调器的运行情况和能耗状况进行测试调查分析,得到如下主要结论:

4.1 住宅分体空调的平均能耗水平很低。调查对

象的户均空调能耗平均值为161 kW·h,单位建筑面积的空调能耗指标仅为2.0 kW·h/m²。每台空调器的平均能耗为63 kW·h,空调季平均1台空调器每天的能耗为0.63 kW·h。在空调季,调查对象的空调耗电量占总耗电量的27.8%。

4.2 客厅空调器的平均能耗比卧室等其他房间高81%,但卧室等其他房间的空调总能耗比客厅高10.3%。调查对象中初中和高中学生卧室空调器的平均能耗为141 kW·h,为全部卧室空调器能耗平均值的2.9倍,这表明在空调环境中成长起来的年轻一代对夏季自然热湿环境的耐受力更差,对空调环境的依赖性更强,这是造成我国住宅空调能耗快速增长的一个值得关注的因素。

4.3 不同住户的空调能耗差异巨大。住户夏季空调能耗的最小值为6 kW·h,最大值为596 kW·h,最大值比最小值大了98倍。单台空调器能耗最大值为528 kW·h,最小值为2.3 kW·h,最大值比最小值大了229倍。同一住户中不同空调器的能耗差异也很大。这表明不同住户的空调开机行为和空调需求存在很大差异。

4.4 住宅空调器的平均用户开机率很低。最大用户开机率为31.9%,最大日平均用户开机率为13.3%,空调季的平均用户开机率为6.0%,单台空调器平均一天的当量满负荷运行时间约为0.61 h。这说明住宅空调的需求特点是只有小部分空间、少部分时间需要空调,绝大多数住宅空调器都是短期间歇运行,大部分时间处于停机状态,大部分住户自觉采取了“人走空调停”的空调行为节能措施。

4.5 住户空调行为对空调能耗的影响很大。分体空调方式调控方便,可以适应不同住户的不同空调需求,在空调电费自付的收费机制下,能充分发挥出住户行为节能的巨大潜力,实现住宅楼中只对有人所在的部分时间和局部空间进行空调降温,充分体现了建筑舒适性空调以人为本、为人服务的根本宗旨,大幅度提高了空调冷量的有效利用效率,而且没有输配能耗,因此其平均能耗水平很低,所以我国住宅空调应坚持走分散式空调的道路,这对防止我国住宅空调能耗的过快增长具有十分重要的意义。

4.6 采用问卷调查法难以对住户的空调开机行为进行详细、准确的调查,住宅空调行为调查应采用实测或实证调查法。

参考文献:

- [1] 李雨婷,李兆坚. 城镇住宅空调待机能耗调查分析[J]. 建筑科学,2012,28(S2):104-108
- [2] 凌浩恕,谢静超,杨威,等. 北京市住宅除采暖外能耗实测统计分析[J]. 建筑科学,2012,28(S2):266-270
- [3] 简毅文,李清瑞,白贞. 住宅夏季空调行为对空调能耗的影响研究[J]. 建筑科学,2011,27(12):16-19,86
- [4] 徐俊芳,田昕,江青文,等. 北京市住宅小区建筑全年能耗分析[J]. 节能技术,2011,29(3):252-255
- [5] 李兆坚,江亿. 住宅空调方式的夏季能耗调查与思考[J]. 暖通空调,2008,38(2):37-43,64
- [6] 万旭东,谢静超,赵耀华,等. 北京市夏季住宅用能节能潜力调查及分析[J]. 建筑科学,2008,24(6):19-24
- [7] 伍星,李振海,吉野博,等. 夏季城市住宅能源消耗调查与比较[J]. 能源技术,2008,29(1):41-44
- [8] 李兆坚,江亿,魏庆芄. 北京市某住宅楼夏季空调能耗调查分析[J]. 暖通空调,2007,37(4):46-51
- [9] 武海滨,朱颖心,周鹏. 北京市城市居民家用空调器用电量的调查研究[M]//暖通空调新技术 2. 北京:中国建筑工业出版社,2000
- [10] 李兆坚,王凡,李玉良,等. 武汉市住宅不同空调方案夏季能耗对比调查分析[J]. 暖通空调,2013,43(7):18-22
- [11] 叶隽,李运江. 武汉市住宅建筑能耗调查与分析[J]. 四川建筑科学研究,2012,38(1):277-280
- [12] 胡平放,江章宁,冷御寒,等. 湖北地区住宅热环境与能耗调查[J]. 暖通空调,2004,34(6):21-22,71
- [13] Long Weiding, Zhong Ting, Zhang Beihong. Situation and trends of residential building environment services in Shanghai[C]//Proceedings of the 2003-4th International Symposium on Heating, Ventilating and Air conditioning. Beijing: Tsinghua University Press, 2003:493-498
- [14] Chen Shuqin, Li Nianping, Guan Jun, et al. A statistical method to investigate national energy consumption in the residential building sector of China[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(4): 654-665
- [15] 余晓平,彭宣伟,廖小烽,等. 重庆市居住建筑能耗调查与分析[J]. 重庆建筑,2008,55(5):5-8
- [16] 马斌齐,闫增峰,桂智刚,等. 西安市节能住宅夏季能源使用结构的调查和分析研究[J]. 建筑科学,2007,23(8):53-56,60
- [17] 张英. 商丘市城市居民住宅能耗调查与分析[J]. 建筑科学,2007,23(6):68-71
- [18] 武茜. 杭州地区住宅能耗问题与节能技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2005
- [19] 方贤峰,卢玫,欧阳金龙. 杭州住宅建筑用电量调查及意义分析[J]. 建筑科学,2008,24(10):28-32
- [20] 任俊,孟庆林,刘娅,等. 广州住宅空调能耗分析与研究[J]. 墙材革新与建筑节能,2003(4):34-37
- [21] 任俊,刘加平. 广州居住建筑空调能耗实测研究[J]. 暖通空调,2004,34(5):18-22,58
- [22] 吴智辉,赵立华,孟庆林. 广州地区某节能住宅小区空调耗电量实测分析[C]//建筑环境科学与技术国际学术会议论文集. 南京,2010:322-326
- [23] 李兆坚,刘建华,田雨忠,等. 福州市某小区住宅夏季空调能耗调查分析[J]. 暖通空调,2014,44(1):66-68,41
- [24] 北京市统计局. 北京统计年鉴 2012[M]. 北京:中国统计出版社,2012
- [25] 国家统计局. 中国统计年鉴 2012[M]. 北京:中国统计出版社,2012
- [26] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005