

# 北京市某住宅楼夏季 空调能耗调查分析\*

清华大学 李兆坚<sup>☆</sup> 江 亿 魏庆芃

**摘要** 对北京市 1 栋普通住宅楼夏季空调能耗进行逐周调查分析,结果表明,目前北京市住宅空调器装得多、用得少,平均能耗水平较低,并且各住户空调能耗的差异很大、集中度很高,20%的空调能耗大户消耗了全楼约 70%的空调能量。该楼空调能耗分布的基尼系数为 0.64,因此空调运行模式是影响住宅空调能耗的最重要因素,住宅空调行为节能的潜力和“耗能”潜力均很大。

**关键词** 住宅建筑 空调器 夏季能耗 行为节能 调查 基尼系数

## Survey on energy consumption of air conditioning in summer in a residential building in Beijing

By Li Zhaojian<sup>★</sup>, Jiang Yi and Wei Qingpeng

**Abstract** Presents a weekly investigation result. Finds out that most of air conditioners in the building are functioned in a short period leading to relative low energy consumption level though there are so many room air conditioners equipped in the residential building. The difference of energy consumption among households in this building is quite large. Twenty percent of residents consume about seventy percent of the energy for cooling in the building. The Gini coefficient of energy consumption of air conditioners among households in this building is 0.64. The operation mode of air conditioners is the most important factor impacting energy consumption in residential buildings. The increasing potential and the decreasing potential of energy consumption for cooling in residential buildings in China are great.

**Keywords** residential building, air conditioner, energy consumption in summer, behavior energy saving, survey, Gini coefficient

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

### 0 引言

近年来,我国城镇住宅建筑面积迅速增加,到 2005 年底,我国城镇住宅建筑面积已达到 107.7 亿 m<sup>2</sup>[1],占城镇房屋总面积的 65.5%,是 2000 年的 2.4 倍[2]。与此同时我国城镇住宅空调器普及率也迅速提高,根据相关统计数据[1-2] 计算分析,2005 年底,全国城镇居民平均每百户空调器的拥有量为 80.7 台,全国城镇住宅空调器的总拥有量为 1.54 亿台,是 2000 年的 3.4 倍。大量住宅空调

器消耗了大量电能,给我国夏季电力供应带来了越来越大的压力,因此有必要对城镇住宅夏季空调能耗状况和特点进行深入研究,以找出减少住宅空调能耗的途径。

以往不少学者采用各种简化算法和模拟算

①<sup>☆</sup> 李兆坚,男,1962 年 8 月生,在读博士研究生,研究员(总装备部工程设计研究总院)

100028 北京市 4702 信箱 4 室

(010) 62777140/66358595

E-mail: li-zj03@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2006-10-26

修回日期:2006-12-27

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:50578079)

法<sup>[3-6]</sup>进行住宅空调能耗的计算和研究,但住宅空调能耗的影响因素很多,不少影响因素具有较强的随机性,目前的理论算法还无法详细考虑这些因素的影响,而且住宅空调能耗的相关计算结果的差异很大,甚至采用同一软件的计算结果也有较大的差异,因此各种算法包括比较准确的模拟计算的结果都需要调查数据的验证和修正。在住宅空调能耗调查方面,一些学者也做了不少工作<sup>[7-11]</sup>,但这些调查工作都是逐月进行的,因此数据信息量较少,无法对住宅空调实际能耗的特点进行深入分析。为此,笔者于 2006 年夏季对北京市 1 栋普通住宅楼的空调能耗进行了逐周调查分析,并对相关问题进行了分析讨论。

### 1 调查对象概况

目前在我国的既有建筑中非节能建筑超过 95%<sup>[12]</sup>,为了使调查分析的结果具有代表性,选择了北京地区的 1 栋 5 层非节能的普通住宅楼作为调查对象。该楼建于上世纪 80 年代,砖混结构,南北朝向,层高 2.9 m,外墙为 370 mm 砖墙,总建筑面积为 2 230 m<sup>2</sup>。该楼共 30 户,三种户型,其中建筑面积为 70 m<sup>2</sup>的两室一厅户型 20 户,建筑面积为 75 m<sup>2</sup>的两室一厅户型 5 户,建筑面积为 91 m<sup>2</sup>的三室一厅户型 5 户,全楼平均每户的建筑面积为 74.3 m<sup>2</sup>。主卧室使用面积为 13.6 m<sup>2</sup>,客厅使用面积为 14.9 m<sup>2</sup>。该楼标准层平面图见图 1。该楼的住户中,9 户的户主是 55 岁以上的退休人员,其余户主基本是 35~45 岁的中青年在职人员。该楼住户的平均收入水平较高。

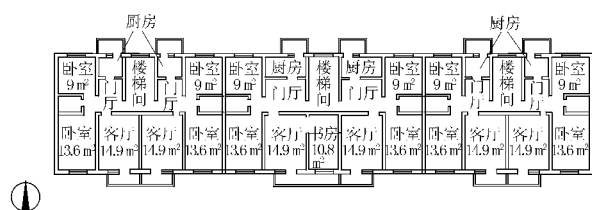


图 1 住宅楼平面图

### 2 调查方法

从 2006 年 4 月底到 10 月初,对该楼每户的电表进行读表调查,并对该楼空调器的设置情况进行调查。该楼采用电卡式预付费电表,准确度为 2.0 级,误差不大于 2.5%。由于城镇居民的生活通常是以 7 d 为循环周期的,因此调查工作采用逐周读表调查。调查工作采用不知情调查法,以确保住户

的空调器使用规律不受调查工作的暗示影响,对住户相关情况的访问工作在空调季结束后进行。在空调能耗调查过程中,采用温湿度自记录仪对该楼位于中间层的一住户的室内温湿度进行监测。

### 3 调查数据处理方法

#### 3.1 数据合理性检查

首先对调查数据的合理性进行分析。发现 4 户的电表读数异常,经调查发现,1 户电表不走字;两户别处有住房,基本不住;另有 1 户采用电热水淋浴器,其耗电量偏大。为了确保空调能耗调查结果的准确性和代表性<sup>[13]</sup>,在空调能耗数据处理时去除这 4 户的数据,因此有效样本为 26 户,其中有 1 户没有装空调器,因此有效空调户为 25 户。

#### 3.2 调查数据处理方法

住宅夏季空调能耗调查得到的耗电量数据是每户家中所有家用电器的总耗电量,需要从中拆出空调能耗,拆分估算方法对调查结果的准确性具有重要影响。文献<sup>[13]</sup>针对目前住宅空调能耗调查数据处理方法存在的一些问题,提出了一种新的改进算法,本文参照该方法进行调查数据的处理分析,具体算法如下:

$$E_a = E_t - n_d E_b - E_f \quad (1)$$

$$E_f = \frac{n_f N_e n_d n_h}{1000} \quad (2)$$

式(1),(2)中  $E_a$  为住户空调季的空调耗电量, kWh;  $E_t$  为该户空调季总耗电量, kWh;  $n_d$  为空调季天数, d, 由调查数据确定;  $E_b$  为该户每天的基础耗电量, kWh, 为春秋两个过渡季的日平均耗电量;  $E_f$  为该户空调季电风扇的耗电量, kWh;  $n_f$  为该户电风扇台数, 根据抽样调查的结果, 住户电风扇台数约为住户的主要房间数减去该户的空调器台数;  $N_e$  为一台电风扇的平均功率, 按 40 W 估算;  $n_h$  为空调季每台电风扇平均每天的运行时间, 按 3 h/d 估算。

### 4 调查结果与分析

#### 4.1 空调器设置情况

对该楼空调器设置情况进行了调查, 结果见表 1。安装空调器的住户比例为 97%, 多数住户装了 1~2 台空调, 其中装有 2 台空调器的住户比例最大。全楼共装 58 台空调器, 平均每户空调器台数为 1.93 台, 根据国家统计局的相关统计数据<sup>[1]</sup>, 2005 年底, 北京市城镇居民平均每户空调器台数

为 1.46 台,可见该楼的平均每户空调器拥有量比统计数据高一些。这也从一个方面说明该楼住户的平均收入水平高于北京市城镇居民的平均水平。户内空调器设置情况见表 1,其中客厅装空调器的比例最大,其次是南向主卧室,北向卧室较少。绝大多数空调器为分体壁挂空调器,全楼只有 1 台窗机,占空调器总数的 2%。

表 1 空调器设置情况调查结果(2006 年 6 月)

	1 户空调器台数					设置位置		
	无	1 台	2 台	3 台	4 台	客厅	南卧室	北卧室
户数	1	9	12	7	1	27	22	9
百分比/%	3	30	40	23	3	90	73	30

注:表中的百分比均是与全楼总户数(30 户)之比。

### 4.2 耗电量随时间变化的特点分析

全楼空调季逐月和逐周耗电量调查数据见图 2 和图 3,过渡季(4 月 21~5 月 28 日)五周内 4 个住户耗电量变化情况见图 4。从中可以看出下列特点:

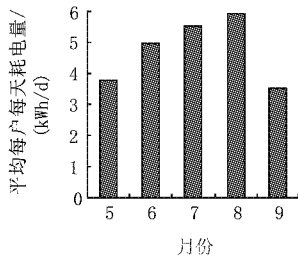


图 2 全楼逐月耗电量变化

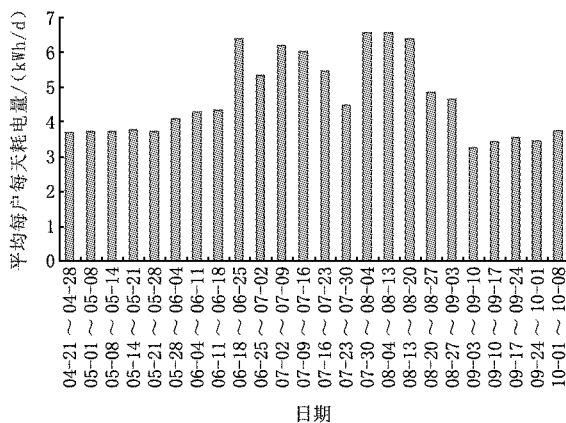


图 3 全楼逐周耗电量变化

1) 通过全楼逐周耗电量数据可以比较准确地确定空调季的时间段。由图 3 可见该楼的空调季为 5 月 28 日到 9 月 3 日,总共 98 d。

2) 住户的基础耗电量波动较大,全楼的基础

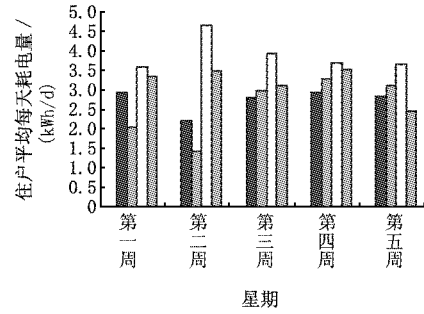


图 4 过渡季 4 个住户耗电量变化

耗电量比较稳定。由图 4 可见,过渡季各住户的逐周耗电量有一定幅度的随机波动,2 号住户周耗电量波动的峰值比谷值大 1 倍多,因此不能依据一周的耗电量数据对具体一户的基础耗电量进行判断。由图 3 可以看出,过渡季全楼逐周耗电量变化不大,这说明全楼的基础耗电量是比较稳定的。全楼 5 月份的基础耗电量比 9 月份略高,因此基础耗电量应取春秋两个过渡季的平均值。

3) 空调季全楼逐周耗电量变化较大。由图 3 可见,空调季全楼逐周耗电量的峰值约比谷值大 1 倍,而且呈现无规律的随机波动,这主要是由于气候条件的随机波动对空调耗电量的影响所造成的,因此不能简单地依据一周的空调能耗数据推断其他时间段的空调能耗数据。

4) 该楼 2006 年夏季的用电量峰值出现在 8 月上旬。

5) 采用逐月调查法无法对气候条件随机波动与空调能耗的影响进行研究。由图 2 可以看出,全楼逐月耗电量的变化比较有规律,8 月份的耗电量最高。由图 2 和图 3 的对比可以看出,采用逐月调查统计的方法,会消除气候条件随机波动对空调能耗的影响,因此采用逐周调查法可以对住宅夏季空调能耗变化特点进行比较详细的研究。

### 4.3 住户空调能耗分布特点分析

根据调查数据,按前面介绍的算法,计算出各住户的空调能耗,将该楼 25 个空调用户的空调能耗按从小到大排列,结果见图 5。由图 5 可以看出下列特点:

1) 该楼中各住户的空调能耗差别很大

3 户的空调能耗为 0,最大 1 户的空调能耗为 991 kWh,按 25 个有效样本空调户计算,平均每户

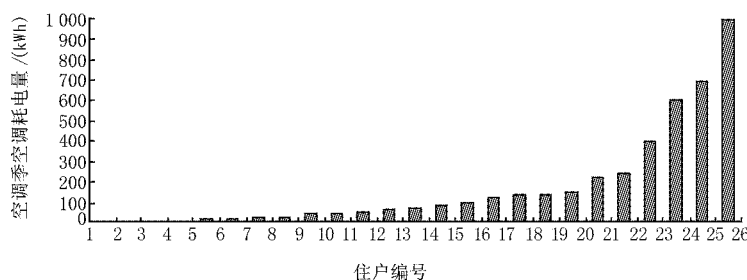


图5 全楼空调能耗分布图

空调季的空调能耗为 170 kW。

## 2) 空调的能耗集中度很高

3 个空调耗能大户消耗了全楼 54% 的空调能耗, 能耗最高的 1 户的空调耗电量大于空调能耗较低的 18 户空调耗电量的总和, 其空调能耗是全楼平均值的 5.82 倍; 全楼 76% 的住户的空调能耗低于全楼平均值。

应用社会统计学对社会收入分配差异的分析方法<sup>[14]</sup>对各住户空调能耗差异进行分析, 根据图 5 的调查数据, 以该楼家庭户数累计百分比为  $x$  轴, 以家庭空调能耗累计百分比为  $y$  轴, 绘出该楼住户空调能耗的洛伦茨曲线, 见图 6。由图 6 可以看出, 70% 的空调低能耗户能耗仅约为全楼空调能耗

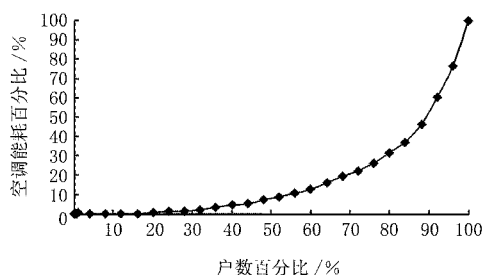


图6 住户空调能耗的洛伦茨曲线

的 20%, 而 20% 的空调高能耗户能耗却约占全楼空调能耗的 70%。基尼系数是衡量统计数据差异程度的重要参数, 其计算公式为:  $1 - 2 \times (\text{洛伦茨曲线与横坐标之间的面积})$ 。基尼系数为 0.2 以下说明差异较小, 基尼系数超过 0.4 则表明差异较大, 超过 0.6 表明差异很大, 通过计算得到该楼空调能耗分布的基尼系数为 0.64, 这说明各住户空调能耗的差异很大。

## 4.4 住户空调能耗差异大的原因分析

为了找出该楼各住户空调能耗巨大差异的原因, 对空调高能耗户和空调低能耗户进行了访问调查。结果表明, 空调能耗最大住户和最小住户的气

候条件、建筑热工状况、户型和建筑面积均相同, 也都是中间层的住户, 但他们之间的空调运行模式相差很大, 空调能耗最大的住户每天空调运行时间通常大于 10 h, 经常通宵开机, 空调运行期间开窗通风; 与其相反, 一些空调能耗很少的住户的空调器基本不开或开机时间很短, 可见, 各住户空调运行模式差异很大, 而空调运行模式对住宅空调能耗的影响很

大, 起到决定性作用。另外, 空调耗能大户的收入水平普遍较高, 可见收入水平是影响住户空调运行模式的一个重要因素。住宅空调能耗的这一特点说明下列三方面问题:

1) 尽管目前我国住宅空调的总体能耗水平较低, 但其增长空间很大。随着居民生活水平的不断提高, 空调耗能大户的比例会不断增加, 即使有 12% 的中等空调耗能户加入到空调耗能大户的行列(达到 3 个空调耗能大户的平均水平), 该楼的空调能耗也会增加约 42%, 因此不科学的空调运行方式以及对空调舒适度的过度追求, 都将使我国住宅空调能耗大幅度增加, 甚至成倍增加, 这种可能的发展趋势应引起我们的高度警惕。

2) 尽管目前我国住宅空调的总体能耗水平较低, 但其节能潜力仍然较大。即便将该楼 3 个空调耗能大户的空调能耗降到全楼平均空调能耗的 2 倍, 也可使该楼的空调能耗减少 31%, 可见住宅空调行为节能的潜力很大, 而且成本很低, 因此加强行为节能和对空调耗能大户的控制将是我国住宅空调节能的重要方向。

3) 由于空调耗能大户的比例对住宅能耗指标的影响很大, 而空调耗能大户的分布具有一定的随机性, 但在高档住宅中的比例会明显高于普通住宅, 因此不同档次住宅楼的空调能耗指标会有较大的差别。在对一个城市或地区的住宅空调能耗进行统计调查分类抽样时, 应考虑不同档次住宅楼空调能耗的差别, 不能仅按单层、多层、高层住宅分类。

## 4.5 不同年龄住户的空调能耗特点

对 25 个有效样本空调户的空调能耗进行分类统计分析, 结果见表 2, 从中可以看出, 退休住户的空调能耗大大低于在职住户的空调能耗, 后者的平均空调能耗约为前者平均值的 3 倍。通过调查发现, 退休人员受体质较弱、消费观念比较保守和收



表 2 住户空调能耗分类分析

	住户所在楼层			户主情况		户型(建筑面积/m <sup>2</sup> )			住户空调器台数/台		
	首层	中间层	顶层	退休户	在职户	91	75	70	1	2	3
平均空调能耗/(kWh/户)	108	179	192	75	220	249	67	190	68	290	147

人水平相对较低等因素的影响,其空调开机模式与年轻在职人员明显不同,开机时间大为减少,可见住户的消费观念、收入水平、体质状况都是影响空调运行模式的重要因素。

#### 4.6 不同楼层空调能耗的特点

由表 2 可以看出,首层住户的空调能耗明显低于中间层和顶层住户的空调能耗,中间层和顶层住户的空调能耗差别不大。这与有关模拟计算的结果<sup>[6]</sup>和调查测试结果是一致的。对该楼首层住户的调查表明,住户普遍反映比较凉快,开空调的时间不长。7月22日中午,采用红外温度计测得的该楼各层地面温度见表 3。结果表明,首层地面的温度较低,这种自然冷壁作用使首层房间的空调负荷和能耗明显低于中间层房间。对于北方地区,由于地下土壤温度较低,这种自然冷壁的作用更加明显。但按照目前空调负荷设计算法<sup>[15]</sup>,首层通常还要计算地面传热负荷,出现了首层空调负荷大于中间层的结果,因此在首层房间空调负荷计算时通常不应附加地面传热冷负荷,准确计算时还应对空调冷负荷适当扣减。

表 3 各层地面温度测量结果

	1层	2层	3层	4层	5层
地面温度/℃	26.4	28.9	28.8	29.7	30.1

注:测试时室外气温为 30.7℃。

#### 4.7 不同建筑面积住户的空调能耗特点

由表 2 可以看出,建筑面积对空调能耗影响的规律性不明显,建筑面积为 75 m<sup>2</sup> 的住户的空调能耗却大大低于建筑面积为 70 m<sup>2</sup> 的住户。这说明建筑面积对空调能耗的影响很弱,受到空调运行模式这一强干扰因素的影响,出现了这种反常情况。

#### 4.8 空调器台数对住户空调能耗的影响

由表 2 可以看出,拥有 2 台或 3 台空调器的住户的空调能耗大大高于只有 1 台空调器的住户,但拥有 3 台空调器的住户的空调平均能耗却低于拥有 2 台空调器的住户。从理论上说,空调器台数增加说明住户的经济条件较好、住户对空调的需求增加、空调器开机时间可能增加,因此其空调能耗通常会增加,但由于一户的多台空调器通常不会同时开启,多数家庭最多同时开 2 台。因此住户拥有的

空调器数量达到 2 台以后,空调器台数和空调能耗的相关性不明显,空调器台数的增加并不一定会使住户的空调能耗增加。另外,受到空调运行模式差异这一强干扰因素的影响,结果出现了这种反常情况。尽管该楼平均每户的空调器拥有量很高,接近每户 2 台,但平均空调能耗水平并不高,平均每个空调户的空调能耗为 170 kWh,平均每台空调器每天的连续运行时间约为 1 h。空调器装得多、用得少、平均开机时间短、平均能耗水平较低,这是我国住宅空调的一个显著特点。因此住宅空调设计方案比较和相关研究工作都应充分考虑这一特点,否则可能得出错误的结论。

#### 4.9 空调开机率调查

在空调季天气较热的时候,多次对该楼空调器的开机率进行实际调查,发现空调开机率较低。其中开机率最高的是 8 月 18 日晚 9:00 的调查结果,这是一个桑拿天,这时无空调卧室的自然室温为 29.0℃(在 2006 年空调季下班时间段,没有空调的卧室的实测最高温度为 29.1℃、相对湿度为 74%)。调查结果显示,按空调开机的住户数计算,空调最大开机率约为 60%,按空调器开启台数计算,空调最大开机率约为 40%,可见实际的空调开机率不高。通过对北京市南郊观象台室外气温记录数据<sup>[16]</sup>的分析,得到 2006 年北京市空调季平均气温为 26.0℃,略高于典型年空调季的平均气温 25.6℃,可见调查的空调开机率较低,并不是由于凉夏造成的。空调开机率较低与地区气候条件、各住户空调运行模式和活动规律差异有关。在住宅空调能耗计算时应考虑空调开机率的问题,否则计算结果可能偏大。

### 5 结语

#### 5.1 空调运行模式是影响住宅空调能耗的最重要因素

尽管住宅空调能耗的影响因素很多,包括建筑围护结构热工状况、遮阳与否、室内发热量大小、楼层、户型、建筑面积、窗墙比、门窗通风情况等客观因素,但影响最大的是住户空调运行模式这一主观因素。气候条件以及住户的消费观念、收入水平和

身体状况则是影响住户空调运行模式的主要因素。因此在进行住宅空调技术节能研究的同时,应重视和加强对住宅空调行为节能的研究。

### 5.2 目前城镇住宅空调的平均能耗水平较低

目前城镇住宅空调器装得多、用得少,住宅空调的平均能耗水平较低,这是住宅空调与商业建筑空调的一个显著区别。该楼平均每户空调器数量高达 1.93 台,高于国家统计局的统计平均值,但平均每户的空调耗电量仅为 164 kWh,单位建筑面积空调能耗指标为 2.2 kWh/m<sup>2</sup>,住户空调最大开机率约为 60%,每台空调器空调季平均每天连续运行时间约为 1 h。因此在住宅空调方案比较、住宅节能设计、相关节能标准的制定时应充分考虑这一特点,否则就可能得出错误的结论。这就要求住宅空调节能工作要更重视一次投资问题。

### 5.3 城镇住宅空调能耗的差异大、集中度高,其行为节能潜力和耗能潜力均很大

尽管住宅空调平均能耗水平较低,但各住户空调能耗的差异很大、集中度很高,这是住宅空调与商业建筑空调的又一显著区别。该楼空调耗能第一大户的空调耗电量大于 18 家低能耗户(全楼有效样本的空调住户为 25 户)空调耗电量的总和,20%的空调能耗大户能耗约占全楼空调能耗的 70%,该楼各住户空调能耗分布的基尼系数达到 0.64。这反映出各住户的空调运行模式差异很大,说明我国住宅空调的行为节能潜力和耗能潜力均很大,不科学的空调使用方式以及对空调舒适度的过度追求,都将使我国住宅空调能耗大幅度增加;而加强行为节能和对空调耗能大户的控制则可使住宅空调能耗大幅度减少,这是住宅空调节能的一个重要方向。

### 5.4 住宅空调能耗的一些影响因素分析

首层住户的空调能耗明显低于中间层和顶层,在首层房间空调负荷计算时通常不应附加地面传热冷负荷;该楼在职住户的空调能耗约为退休住户空调能耗的 3 倍;建筑面积与空调能耗的相关性不明显;住户逐周的基础耗电量具有一定的波动性,全楼的逐周基础耗电量则比较稳定;空调季全楼逐周耗电量变化较大,峰值比谷值约大 1 倍,而且呈现无规律的随机波动。因此不能简单地依据一两天或一周的空调能耗数据推断其他时间段的空调能耗。

通过本次调查可以看出,住宅分体空调的问题并不简单,在这方面还需要做更多的调查研究工作,本文的结论也需要更多的调查数据的验证。在本次调查过程中,还对一些行为节能措施的效果进行了测试分析,由于篇幅所限,测试分析结果将另文介绍。

### 参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2006 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴 2001 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001
- [3] 燕达, 谢晓娜, 宋芳婷, 等. 建筑环境设计模拟分析软件第 1 讲 建筑模拟技术与 DeST 发展简介[J]. 暖通空调, 2004, 34(7): 48-56
- [4] 刘洋, 刘俊杰, 朱能. 住宅建筑能耗的动态模拟[J]. 煤气与热力, 2004, 24(1): 17-20
- [5] 简毅文, 江亿. 住宅供暖空调能耗计算模式的研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(2): 11-14
- [6] 李兆坚, 江亿. 北京市住宅空调负荷和能耗特性研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(8): 1-6, 11
- [7] Long W D, Zhong T, Zhang B H. 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 武海滨, 朱颖心, 周鹏. 北京市城市居民家用空调器耗电量的调查研究[M] // 暖通空调新技术 2. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 52-56
- [12] 涂逢祥, 王庆一. 建筑节能研究报告[M] // 建筑节能 42. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 11-32
- [13] 李兆坚, 江亿. 住宅夏季空调能耗调查方法分析[J]. 暖通空调, 2006, 36(9): 35-37
- [14] 李敏, 李东坡, 李志宏. 基尼系数的简化计算方法初探[J]. 河北农业科学, 2006, 10(2): 89-92
- [15] 电子工业部第十设计研究院. 空气调节设计手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995
- [16] 北京天气网. 奥运气象在线[EB/OL]. [http://www.bjweather.com/oly\\_aws.asp](http://www.bjweather.com/oly_aws.asp)