

北京冬季住宅供暖 热舒适与经济性研究^{*}

清华大学 罗茂辉[☆] 李 敏 曹 彬 冯潇潇 朱颖心[△] 欧阳沁

摘要 对集中供暖用户和分户燃气壁挂炉供暖用户进行了对比调查。结果表明,居民对住宅供暖热环境的需求差异较大。相对于集中供暖,分户供暖更能满足用户个性化需求,并充分调动用户行为调节的积极性。就供暖费而言,分户供暖用户的平均费用低于集中供暖用户。因此,分散式或末端可控的集中式系统更适合住宅供暖。

关键词 住宅 热舒适 室内热环境 供暖能耗 集中供暖 分户供暖

Research on heating economics and indoor thermal comfort of residential buildings in Beijing in winter

By Luo Maohui[★], Li Min, Cao Bin, Feng Xiaoxiao, Zhu Yingxin and Ouyang Qin

Abstract Compares and surveys central heating users and household wall mounted gas boiler users. The result shows that there is significant difference between users in needs of heating environment. Compared with central heating, household heating meets better the need of user's individuation and increases enthusiasm of behave adjustment better. As to the heating fee, the average cost for household heating is lower than that of central heating. Hence, distributed systems or terminal controllable central systems are more suitable for residential building heating.

Keywords residential building, thermal comfort, indoor thermal environment, heating energy consumption, central heating, household heating

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

1 研究背景

住宅室内热环境质量直接影响到居民生活水平,如何营造舒适、健康的室内热环境,一直备受关注。居住建筑应该使用集中供暖还是分户供暖与使用者对供暖热环境的需求、供暖方式的特点、建筑所在地的气候条件、地方供暖政策等因素有关。本研究从居民供暖需求入手,对北方集中供暖用户和分户供暖用户进行调研,分析两类供暖用户的热环境参数、主观热感受以及热期望等数据,探索适宜的住宅供暖形式。

燃气壁挂炉供暖作为分户供暖的形式之一,近年来逐渐被用于一些新建住宅。然而,这种分散式燃气供暖的效果和能耗费用如何?本研究结合供暖热环境调查,分析了北京市分户供暖用户的用气量,从热舒适性和经济性等方面对住宅供暖提出建议。

2 研究方法

本次调研于2012年12月1日至2013年3月31日在北京及其周边地区开展,选取集中供暖用户和分户供暖用户进行普查和深入调查。用户样本量见表1,其中集中供暖用户末端均不可调。

表1 调研样本统计

	住户供暖类型	户数/户	有效问卷/份
普查	分户供暖	41	47
	集中供暖	45	49
深入调查	分户供暖	17	195
	集中供暖	15	164

1) 普查住户。入户调查一次,内容包括室内环境参数测量和人员主观感受,并询问住户燃气使

①☆ 罗茂辉,男,1989年8月生,在读博士研究生

△ 朱颖心(通信作者)

100084 清华大学建筑技术科学系

(010) 62782746

E-mail: zhuyx@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2013-04-10

* 国家自然科学基金重点项目(编号:50838003),中国博士后科学基金面上资助项目(编号:2013M530633)

用情况。测量的环境参数包括干球温度、相对湿度、风速以及黑球温度,结合调查员记录的室内人员衣着情况,计算 PMV 值。主观问卷的设计依据是 ISO 7730:2005^[1]。问卷内容包括衣着情况、热感觉、热期望、热舒适、热可接受度等信息。

2) 深入调查住户。在受访家庭根据房间功能放置 2~3 台 WSZY-1 温湿度自记仪,长期记录室内温度和湿度,仪器测量精度如表 2 所示。调查期间,受访住户的常住成员每周填写一次热舒适问卷,问卷内容与普查问卷类似。对于分户供暖用户,还记录了用户供暖开始前和结束后的燃气表读数。

表 2 温湿度自记仪测量精度

	测量范围	测量精度
空气温度 $t_a/^\circ\text{C}$	5~35	± 0.5
相对湿度 $\varphi/\%$	20~80	± 3

3 调研结果

3.1 调研概况

调研期间,共收回有效问卷 455 份(见表 1)。表 3 为与样本问卷对应的室外日均温度,室内空气温度、相对湿度。

表 3 调查样本的室内外环境参数

	最小值	最大值
室外日均温度/ $^\circ\text{C}$	-9.4	13.4
室内空气温度/ $^\circ\text{C}$		
分户供暖	14.5	25.9
集中供暖	14.4	27.6
室内相对湿度/ $\%$		
分户供暖	21.6	78.1
集中供暖	19.7	75.5

3.2 居民对供暖热环境的需求

满足用户对室内热环境的需求是供暖系统的基本任务。对于末端不可调的集中供暖系统,用户缺乏对热环境控制的有效途径,是热环境的被动接受者。相比之下,分户供暖用户可以根据自身情况随时调控室内热环境,因此,分析这类供暖用户的供暖情况可以了解不同用户对供暖热环境的需求。

图 1 显示了 11 户分户供暖用户的室温分布,从图中可见,各用户的供暖室温都存在较大的波动范围,平均供暖室温从 17.3 $^\circ\text{C}$ 到 23.1 $^\circ\text{C}$ 不等,相

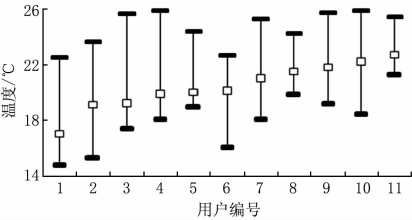


图 1 分户供暖用户的室内温度

差近 6 $^\circ\text{C}$,反映了用户对供暖热环境的差异性需求。造成这种需求差异的原因有多种,例如家庭构成、个人习惯、供暖费用等因素。

居民对供暖热环境的差异性需求,使得集中供暖用户和分户供暖用户对室内热环境的接受程度不同,这可以从居民的热期望投票结果中分析得出。

本次调研的主观问卷中,对用户的热期望进行了询问,分别为希望变暖、保持现状和希望变凉 3 个选项,在 14~27 $^\circ\text{C}$ 室温范围内统计选择各选项的比例。图 2,3 分别显示了分户供暖用户和集中供暖用户的热期望与室温的关系。对比两图可以

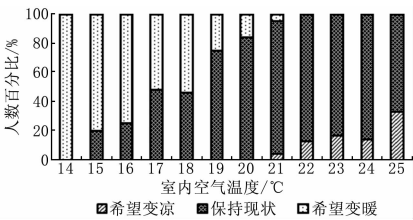


图 2 分户供暖用户的热期望值随室温的变化

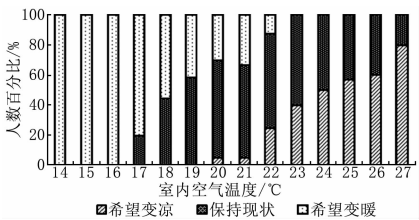


图 3 集中供暖用户的热期望值随室温的变化

发现以下规律:1) 相同室温下,分户供暖用户对热环境的接受度高于集中供暖用户。这主要体现在,各温度下分户供暖用户希望保持室温现状的比例更高。2) 分户供暖用户可接受的室温范围更宽。室温为 15 $^\circ\text{C}$ 时,就有 18% 的分户供暖用户能够接受,愿意保持现状;而若要集中供暖用户达到相近的接受度,需要 17 $^\circ\text{C}$ 的室温才能实现。

分户供暖形式允许用户根据个人喜好选择合适的供暖温度,能够满足不同用户群体的个性化需求,从而提高用户对室内热环境的接受程度。

3.3 供暖方式与人体热舒适性分析

热舒适性是供暖环境营造过程中需要着重考虑的因素。调研中让对集中供暖和分户供暖这两种供暖方式都有过经历的住户进行选择性投票,结果见图 4。88% 的受访住户认为分户供暖更舒适,而在综合考虑了舒适性和供暖费用之后,有 90%

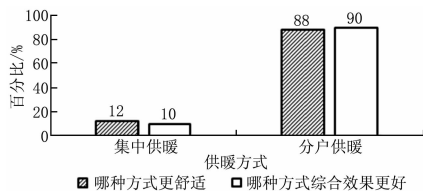


图4 供暖方式喜好性投票

的受访住户认为分户供暖优于集中供暖。

调研中 TSV(用户热感觉投票)采用 7 点标尺^[1],即: -3(冷), -2(凉), -1(微凉), 0(中性), +1(微暖), +2(暖), +3(热), 而 PMV 的计算方法参考文献[2-3]。

图 5,6 所示为两类用户的 TSV, PMV 随室温的变化趋势。对比两图发现,相同室温时,分户供

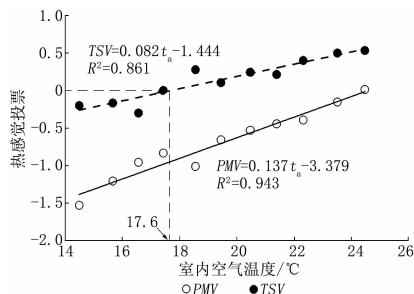


图5 分户供暖用户 PMV, TSV 与室内温度的关系

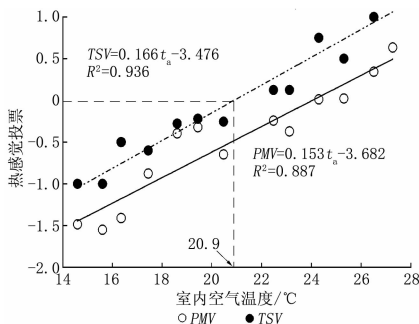


图6 集中供暖用户 PMV, TSV 与室内温度的关系

暖用户的 TSV 更接近热中性(0)。在偏冷室温下(14~20℃),分户供暖用户的 TSV 高于集中供暖用户;并且分户供暖用户的 TSV 随温度变化较为平缓,对温度变化的敏感性较弱,说明各室温段下的分户供暖用户通过其他方式调节,改善了人体热感觉。这一结果也佐证了图 2,3 的差别:分户供暖用户对供暖热环境接受度更高。此外,在用户热中性温度方面,分户供暖用户为 17.6℃,与集中供暖用户的 20.9℃相比,低了 3.3℃。

衣着量对人体热感觉影响较大,是住户改善自身热感觉的重要途径之一。图 7 为参与调研的两

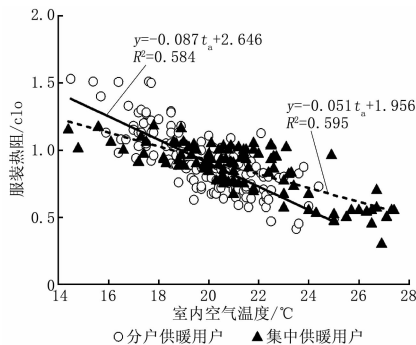


图7 两类供暖用户的服装热阻与室内温度的关系

类供暖用户服装热阻随室温变化的分布情况。对比两组拟合曲线可知,分户供暖用户的服装热阻随室温变化的斜率更大,用户衣着量的调节更为积极。当室内温度偏低时,分户供暖用户通过主动调整衣着量等行为方式来改善自身热感觉,是导致分户供暖用户热感觉高于集中供暖用户的原因之一。

调研样本中,分户供暖与集中供暖用户的一个重要区别在于,前者能有效调控室内热环境而后者不能。周翔、曹彬等人曾分别在人工气候室试验和现场调研中发现并论证:环境温度的控制能力能影响受试者或用户的热感觉和热舒适水平^[4-5]。这一结论同样可以解释图 5,6 中的现象。分户供暖用户具备供暖温度的调控能力,这使得用户根据自身需求选择性供暖,并调动了用户行为调节的积极性,从而改善了人体热感觉。

3.3 供暖能耗和费用分析

燃气壁挂炉以其方便个性化调节的优势逐渐被居民接受,然而,作为一种相对新型的分户供暖形式,燃气壁挂炉供暖的能耗和经济性如何?

本次调研对北京市 41 户采用壁挂炉供暖用户的供暖用气情况进行了普查,调查方式主要以询问为主,结果见图 8。与此同时,还选取了 11 户分户

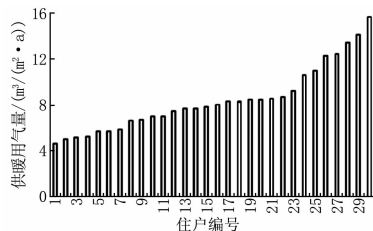


图8 普查分户供暖用户用气情况

供暖用户进行了深入的调查,记录用户供暖前和供暖后的燃气表读数,得到供暖期间用户的总用气量,并从中扣除炊事、生活热水等消耗的燃气量(参

考同一时期集中供暖用户的生活用气量,根据家庭成员、生活作息等情况,取 $0.5\sim 1.5\text{ m}^3/\text{d}$ 不等),得到供暖用气量,结果见图9。普查用户的供暖用

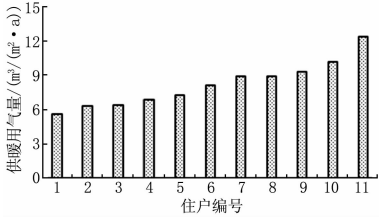


图9 深入调查分户供暖用户用气情况

气从 $4.6\sim 15.6\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 不等,户均供暖用气量为 $8.4\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{a})$;深入调查用户供暖用气量分布在 $5.6\sim 12.4\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 之间,户均用气量为 $8.2\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,各用户的供暖用气量差别较大。

除了热环境的舒适性,供暖用气量是多数用户关心的问题。图10为供暖用气量差异性原因的分析,供暖用气量与平均供暖温度之间有一定的线性

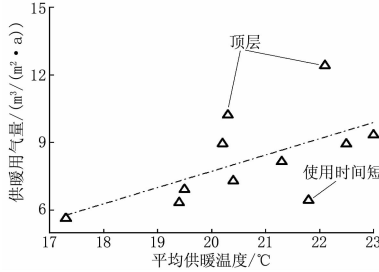


图10 分户供暖用气量差异性原因分析

关系,同时还受其他因素的影响。对于分户供暖用户,供暖用气量主要取决于供暖模式,即供暖温度的高低和时间长短等因素。此外,用户所处楼层位置也会导致用气量差异较大,例如位于顶层的用户,由于外围护结构面积较大,为了获得相同室内温度所消耗的供暖用气量也较多。

如何合理设定供暖温度,可以既保证室内热环境舒适度高,又维持较低的供暖费用水平?图11a给出了3种室温控制模式,其中用户A和用户B的平均室温分别为 $23.4, 23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相差不大,用户C的平均室温较低,为 $19.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时,用户B和用户C的室温波动模式相近,用户A的室温波动幅度小。图11b则反映了3种室温控制模式对壁挂炉工作时间的影

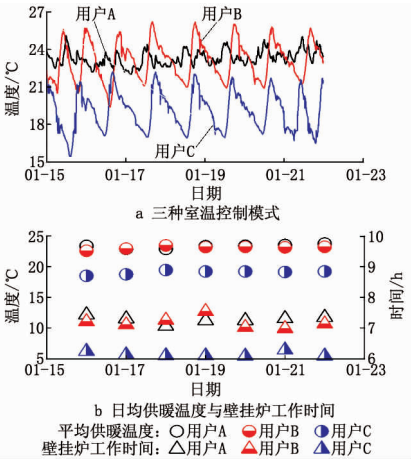


图11 室温控制模式及其对应的壁挂炉工作时间

主要因素,相比之下,室温波动对供暖用气的影响不大。然而,需要注意的是,如果适当地将室温波动模式和用户作息相结合,则可以提高室内有人时段的舒适性。

根据供暖用气情况调研的结果,对燃气分户供暖的经济性进行分析。表4为燃气分户供暖与集中供暖用户的费用对比。如果仅考虑供暖燃气费用,分户供暖用户的燃气费用为 $1\,154\sim 2\,554\text{ 元/a}$ 不等,这主要与用户选择的供暖模式有关。

表4 分户供暖经济性分析(以某 100 m^2 住户为例)

	分户供暖	集中供暖
供暖用气量/ $(\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{a}))$	$5.6\sim 12.4$	0
燃气价格/ $(\text{元}/\text{m}^3)$	2.06	0
初投资/ $(\text{元}/\text{a})$	600	0
燃气费用/ $(\text{元}/\text{a})$	$1\,154\sim 2\,554$	0
供暖费用/ $(\text{元}/\text{a})$	$1\,754\sim 3\,163$	$2\,500\sim 3\,000$

注:1)分户供暖用户的初投资中不包含供暖末端费用,取 $9\,000\text{ 元}$,使用寿命取 15 a ,折合 600 元/a ;2)部分分户供暖用户有供暖补贴,计算中未予以考虑。

4 讨论

4.1 集中与分散理念在住宅供暖中的争论

集中供暖和分户供暖代表了集中和分散两种不同的理念,近来南方住宅应该集中供暖还是分散供暖的争论颇为激烈。集中还是分散,成为住宅室内环境控制模式的一个争论焦点[6]。

尽管本次调研的对象大部分在北京,且大都有过较长的集中供暖经历,但分户供暖居民对热环境的需求仍然有较大的差异,这种差异是居住建筑的特点之一,是居民成员构成、生活习惯等因素综合影响的结果。面对这样的差异性需求,分散系统可以让用户“按需索求”,满足用户个性化需求。而集中系统既存在调控难的挑战,又需要克服输配能耗

高的问题^[6]。

未来住宅环境的控制应该充分发挥住户的主动调控作用。本次调研结果和之前的研究^[4-5]都表明,环境控制能力使分散供暖用户主动参与到热环境的营造环节,既提高了用户行为调节的积极性,又提高了用户对热环境的接受度。而不具备环境调控能力的集中系统用户作为热环境的被动接受者,对热环境的要求显得更为苛刻。

4.2 住宅分户燃气供暖的应用

分户燃气供暖在系统形式和用户可控方面有其优势,能否大面积推广?如果这种燃气供暖方式广泛应用,对地区能源结构又会有怎样的影响?

以北京市为例,2011年共有住宅面积4.06亿 m^2 ,其中集中供热面积3.46亿 m^2 ,住宅集中供暖消耗天然气约为7.24亿 m^3 ,以天然气为热源的住宅集中供热面积约为7258万 m^2 ^[7]。如果将此7.24亿 m^3 天然气用于分户燃气供暖,供暖用气量取 $8.2\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,则可以供应8800多万 m^2 的住宅。

分散式燃气供暖可以避免集中供暖带来的各种管网损失,加上天然气燃烧效率高、排污小,以及管道输送方便等特点^[8],供暖用天然气应更多地用于分散式燃气供暖系统。当然,对于没有或很少将天然气用于集中供暖热源的城市,则应根据当地能源结构情况,酌情考虑是否推广分散供暖方式。

5 结论

5.1 住宅居民对供暖热环境的需求和期望差异较大,末端不可调的集中供暖系统无法兼顾这种差异,用户对被动给予的热环境接受度较低。分户供暖方式能让用户“按需索求”,满足用户对热环境的个性化需求。

5.2 分户供暖或末端可调的集中供暖给用户提供了室内热环境的调控途径,各用户可以权衡热舒适、供暖费用等因素,选择合适的供暖模式,并调动用户采用行为调节来改善热感觉。

5.3 分户燃气供暖各用户之间的用气量差别较大,这主要取决于供暖模式和用户所处楼层位置等因素。分户燃气供暖有一定的节能和节省的潜力。

参考文献:

- [1] Technical Committee ISO/TC 159 and Technical Committee CEN/TC 122. ISO 7730: 2005 Ergonomics of the thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort critical [S]. British: European Committee for Standardization, 2006
- [2] Fanger P O. Thermal comfort—analysis and application in environment engineering [M]. Copenhagen: Danish Technology Press, 1970
- [3] 曹彬,朱颖心,欧阳沁,等. 不同气候区住宅建筑冬季室内热环境及人体热适应性对比[J]. 清华大学学报:自然科学版,2012,52(4):499-503
- [4] 周翔,朱颖心,欧阳沁,等. 环境控制能力对人体热感觉影响的实验研究[J]. 建筑科学,2010,26(10):177-180
- [5] 曹彬. 气候与建筑环境对人体热适应性的影响研究[D]. 北京:清华大学,2012:84-88
- [6] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2013[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2013
- [7] 北京市统计局. 北京统计年鉴2012[M]. 北京:中国统计出版社,2012
- [8] 田贯三,付林. “西气东输”中天然气合理应用方式研究[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:133-138