

北方地区典型城市既有非节能居住建筑 集中供暖节能分析

冯国会,王棣炜,刘馨,王晨辰,梁传志

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 分析北方既有非节能居住建筑供暖能耗总量巨大的问题,挖掘其中的节能潜力.方法 对北方某城市2015—2016采暖季采暖能耗进行了调研和实测,从供暖参数、间歇运行以及气候补偿3个方面对实际供暖的节能措施和运行效果进行分析.结果 在低温采暖情况下,该地区既有非节能居住建筑能耗接近于节能50%的水平;末寒期间歇运行时,热水停供期间室内温度下降不超过 2°C .结论 散热器低温采暖以及末寒期间歇运行在该地区效果良好,有利于降低采暖能耗;采用气候补偿措施可以使供水温度随室外温度做出有效的调整,增强热网的气候适应性.

关键词 集中供暖;低温采暖;间歇运行;气候补偿

中图分类号 TU201.5;TU241;F426.92

文献标志码 A

Energy Saving Analysis on Central Heating of Existing Non-Energy-Saving Residential Building in Typical City of Northern China

FENG Guohui, WANG Zhiwei, LIU Xin, WANG Chenchen, LIANG Chuannzhi

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to excavate the energy saving potential from the huge energy consumption of existing non-energy-saving residential building, according to the information from a research on heating energy of 2015—2016 heating period in a city of northern China, the methods and effects in heating energy saving are analyzed from water temperature, intermittent running and climate compensation to know the effective approach for heating energy saving of residential building. The result shows that under low temperature heating situation, the building energy consumption in this area is close to the level of 50%. And at the end of heating season, when system runs intermittently, the room temperature will decline less than 2°C during the pause of heating. It is indicated that low-temperature heating of radiator and intermittent heating in the end of heating period running effectively and can benefit to energy reducing. Furthermore, climate compensation unit can make

收稿日期:2017-06-19

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0700104-07);能源基金会项目(G1506-23358)

作者简介:冯国会(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事可再生能源综合利用方面研究.

the water temperature changes with outdoor temperature more effectively, enhances the adaptability of heating network.

Key words: central heating, low-temperature heating, intermittent running, climate compensation

2008年以来,我国在北方采暖地区大力推动既有非节能居住建筑的节能改造工作,主要从围护结构、热计量和供暖管网等方面展开,有力地改善了民生,降低了采暖的能耗水平^[1].大量学者在供暖节能改造方面进行了研究;刘玉明等^[2]结合波兰及德国经验,对我国既有建筑改造政策激励措施进行了探讨;金占永^[3]则从经济学角度,对经济激励方面进行了研究;孔凡红^[4]从建筑维护结构热耦合原理出发,分析了维护结构的改善对于建筑节能的关键性作用;顾婷婷^[5]将“适宜性技术”理念引入我国采暖区居住建筑围护结构的节能改造,达到节能效果与改造成本间的优化平衡;李沛峰等^[6]从热源角度对供暖节能潜力进行了分析,通过改进技术使热电联产机组能效性能得到大的提升;李先庭等^[7]对“高效低温型”热源系统进行了研发,可实现最高60%的节能效果;林文卓^[8]对我国热计量项目进行了统计和分析,对各种热计量方式的应用提出了改进意见;杜涛等^[9]以天津地区居住建筑为研究对象对用户供暖耗热量进行了采集和统计,结果表明通过合理的控制措施可实现节能22%的效果;王侃宏等^[10]以北方供暖地区既有建筑节能改造项目作为研究对象,提出了既有建筑节能改造的碳排放量化方法;郝斌等^[11]对北方地区不同城市的供暖单位进行了调研,计算分析得到了不同城市的供暖能耗定额,为促进供暖领域合理用能提供了借鉴.

但与研究领域相比,作为供暖主体的供暖企业的节能工作则相对滞后.一方面,随着供暖的市场化改革,出现了一批管理到位、技术先进的现代化热企,但不能否认的是整个行业仍处于转型期,多数的技术管理水平低,观念落后,不重视热网的运行节能,严重制约

了节能工作的推进.另一方面,虽然长期以来人们对供暖系统做了大量的研究分析,但结果多停留在理论层面,由于集中供暖的复杂性与特殊性(热网规模大、地域特征明显等),特别是用户自主调节也会对热网产生影响^[12],决定了实现供暖精确调控、节能运行必须依据大量的实际运行数据并参考供暖企业运行经验,而这些则是以往所忽视的.

从集中供暖的特点看,在保证室内舒适度的前提下,实现能耗的降低既要努力减少热量在建筑侧的消耗和输送过程中的损失,又要设法完善热源供给和用户消耗的优化匹配,减少过量供暖带来的热量浪费.目前,我国的供暖节能工作主要围绕前者进行展开,而对于后者则多有赖于供暖企业的自身行为,依企业的运行调控水平差异明显.笔者基于对北方某典型城市2015—2016年采暖季既有非节能居住建筑供暖能耗实测研究的结果,对比分析了各企业的运行调节方式、实际能耗水平以及居民室内的舒适度情况,重点在于发现实际供暖运行中存在的问题和有益的经验,探讨不同的节能措施在热网运行中的实际效果,从运行调节角度挖掘节能潜力.

1 调研情况概述

本次调研针对北方某典型城市既有非节能居住建筑展开,对位于老城区的6座换热站(供暖区域)进行了数据采集与实测,时间为2016-01-01至2016-04-01.各换热站基本情况如表1所示.调研期间从各换热站获取了整个采暖季的二次网温度、压力、耗电量、补水量等数据及换热站的设备信息和调节方式.在换热站出口以及建筑入口处测得供回水温度及热水循环流量,用温度流量法得到实际热量.居民室内舒适度通过放置在

住户家中的温湿度自记录仪得到,所选取的住户覆盖供暖管网的近端、中间点及远端.同时,在

所调研区域发放了 100 份问卷,获取居民实际的供暖评价.能耗测试方案如图 1 所示.

表 1 调研换热站基本情况

Table 1 Basic situation of the heat exchange stations

换热站	供暖面积/10 ⁴ m ²	供暖区域建筑年代	末端形式
CN01	30.50	20 世纪 80 年代	散热器
CN02	3.30	20 世纪 80 年代	散热器
CN03	55.50	20 世纪 90 年代	散热器
CN04	28.00	20 世纪 90 年代	散热器
CN05	12.50	20 世纪 90 年代	散热器
CN06	0.61	20 世纪 90 年代	散热器

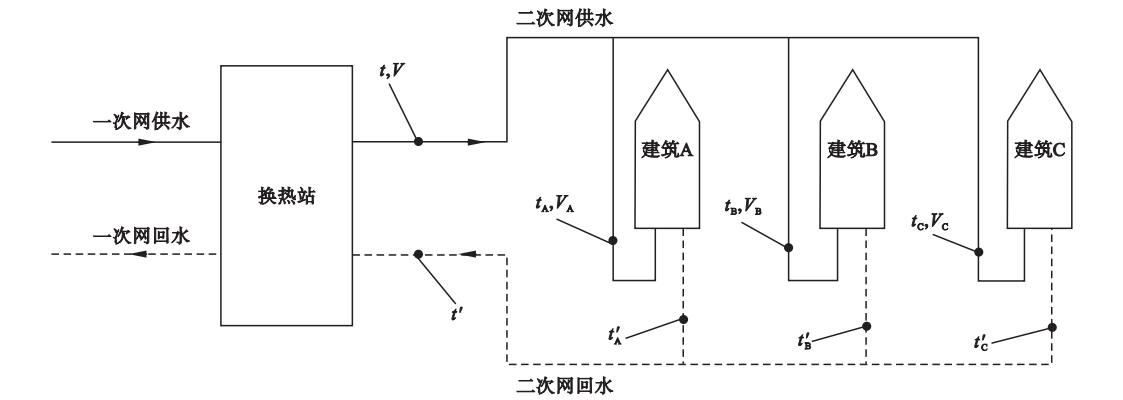


图 1 能耗测试方案图示

Fig. 1 Energy consumption testing scheme

图 1 中,建筑 A、B、C 分别表示热网近端、中间点和远端用户; t_A 、 t_B 、 t_C 分别代表建筑 A、建筑 B 与建筑 C 的供水温度测点; t'_A 、 t'_B 、 t'_C 分别代表建筑 A、建筑 B 与建筑 C 的回水温度测点; V_A 、 V_B 、 V_C 分别代表建筑 A、建筑 B 与建筑 C 的热水循环流量测点; t 、 t' 分别代表换热站支路总管供水、回水温度测点; V 代表换热站支路总管循环流量测点.根据以上测点测得的数据,可由下式计算得出实际耗热量.

$$Q = C_p \times \rho \times V \times \Delta t \quad (1)$$

式中: Q 为实际耗热量, kJ; C_p 为水的定压比热容, 4.2 kJ/(kg·℃); ρ 为水的密度, 1000 kg/m³; V 为实测热水循环流量, m³/h; Δt 为实测供回水温差, ℃.

各建筑的实际耗热量反映了建筑的实际

能耗水平,是衡量建筑节能性的重要指标.供热管网的热损失无法直接得到,可由换热站出口处支路总耗热量与各建筑实际耗热量相减得出.

2 低温采暖能耗水平及室内舒适度

2.1 采暖实测能耗

目前我国的供暖设计仍较为保守,二次网供回水温度多按 95/70 ℃ 设计^[13]. 欧洲许多国家已经开始采用 60 ℃ 以下的低温热水采暖,国内目前也开始提倡低温连续供暖^[14]. 该城市早在 2001 年颁布的《城市供暖管理办法》中就已提到“实行低温连续供暖”. 调研结果显示,该地区实际供暖参数较

低,所调研的换热站二次网供水温度均小于 60℃,供回水温差均小于 10℃,具体如表 2 所示.

表 2 各换热站实际供回水温度
Table 2 Supply and return water temperatures at the heat exchange stations

换热站	设计供/回水 温度	实际供/回水 温度	实际供/回水 温差
CN01	55/40	44/36	8
CN02	55/40	44/36	8
CN03	80/60	52/45	7
CN04	95/75	43/35	8
CN05	85/50	43/37	6
CN06	85/50	43/37	6

注:表中实际供回水温度取最冷月平均值.

从表 2 中看出,所调研的换热站供水温度在最大为 52℃,最小为 43℃,供回水温差均小于 10℃,与设计值相差较大. 供回水温度低、温差小,可能会引起循环流量偏大或供暖量不足的问题,下面分别从能耗和舒适度两方面对该地区低温采暖参数下的供暖情况进行分析. 表 3 为根据实测结果得到的采暖期能耗数据.

表 3 调研地区各换热站采暖季能耗统计
Table 3 Heating energy consumption statistics in research area

换热站	建筑耗热量	节能 50% 指标	节能 65% 指标
CN01	0.36	0.33	0.27
CN02	0.37	0.33	0.27
CN03	0.40	0.33	0.27
CN04	0.30	0.33	0.27
CN05	0.39	0.33	0.27
CN06	0.28	0.33	0.27

测试建筑能耗最低为 0.28 GJ·m⁻²,最高为 0.40 GJ·m⁻²,接近于节能 50% 的标准. 而测试建筑为未进行外墙保温改造的既有非节能建筑,建于 20 世纪 80~90 年代,执行的

为节能 30% 标准,耗热指标为 0.54 GJ·m⁻². 可以看出,在低温采暖工况下,能耗指标较同类建筑有明显的下降,说明降低供暖温度对于降低能耗具有积极的作用. 而在调研中发现,由换热站至热用户段二次网热损失较大,在 15%~20%,若采取有效的保温措施并加强维护,则供暖能耗将得到进一步的降低.

2.2 室内舒适度

供暖涉及实际民生,能耗的降低不能以牺牲舒适度为代价. 2.1 节所述的结果只能表明在低温采暖情况下,建筑的实际采暖能耗较低,但这并不意味着在此条件下的采暖效果较好. 因为在住户室内温度不能保障的情况下,再低的能耗也没有任何实际意义. 调研中根据放置于住户家中的温湿度记录仪的记录结果,选取各供暖区域内位于热网前端、中间点及末端住户作为样本,整理得到了住户的室温不达标情况如表 4 所示. 根据《室内空气质量标准》(GB/T18883—2002)规定,冬季室内采暖温度应为(19±2)℃,不同地区存在差异. 这里以供该市供暖办公室规定的 18℃ 为标准,若室温低于 18℃ 认为温度不达标,高于 18℃ 为达标. 测试期 91 d 内测试用户室温不达标情况如表 4 所示.

从表 4 中看出,所有供暖公司供暖区域内均出现了住户室温不达标的情况,且呈现出从热网前端到末端不达标率增加的趋势. 同时,热网前端和中间点用户差别并不大,而末端用户过冷的现象非常明显. 表中 CN05 换热站热网末端用户处在环路最不利点,且外墙未经过保温改造. 测试期间其室温不达标率达到 62.64%,温度最低时仅有 12℃,供暖效果非常差. 随着输送距离的增加,管网热损失和压力损失加剧,用户的热力失调问题越来越严重,最终表现为末端用户实际室温过低. 当然实际中由于设备管路集气堵塞及跑冒滴漏等问题的存在,管网的最不利点并不总出现在热网的最末端,也说明热网的维护对于提高供暖质量具有重要意义.

表 4 测试用户各月室温不达标率统计

Table 41 Statistics of substandard rate of room temperature in each month

换热站	建筑位置	不达标时间/d				不达标率/%
		1月	2月	3月	合计	
CN01	前端	0	0	0	0	0
	中间点	4	0	0	4	4.40
	末端	6	5	0	11	12.09
CN02	前端	2	1	0	3	3.30
	中间点	6	3	0	9	9.89
	末端	10	5	0	15	16.48
CN03	前端	3	0	0	3	3.30
	中间点	2	0	0	2	2.20
	末端	21	3	0	24	26.37
CN04	前端	2	0	0	2	2.20
	中间点	3	0	0	3	3.30
	末端	20	9	1	30	32.97
CN05	前端	6	0	0	6	6.59
	中间点	10	10	4	24	26.37
	末端	11	26	20	57	62.64
CN06	前端	3	1	0	4	4.40
	中间点	3	1	0	4	4.40
	末端	4	2	0	6	6.59

应当注意,由于热网为一个整体,各用户间存在相互影响,且目前既有建筑的热量计及平衡调节措施尚不完备,供暖企业为保证不利点用户室温达标只能在热源(换热站)处进行调节,其结果是出现大面积过量供暖,造成了极大的能量浪费.调研结果显示,在较低的供水温度下,过量供暖的问题依然存在.图2~图5为各换热站中间点用户测试期间室内温度频率分布情况.

从图中可以看出,测试区域热网中间点住户室温多位于在19~22℃,低于18℃的情况较少,高于19℃的情况能达到80%以上. CN01站和CN03站供暖期室温最高频率出现在19~20℃, CN04站室内温度最高频率出现在20~21℃, CN05站室温最高频率出现在21~22℃. 供暖中,通常将室温低于

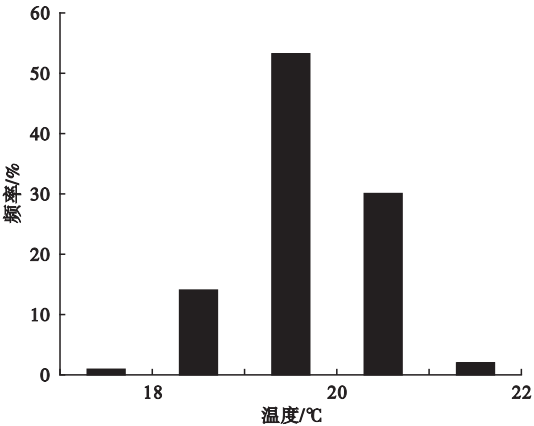


图 2 CN01 站中间点用户室温频率分布图

Fig. 2 Room temperature frequency distribution chart of middle user in CN01

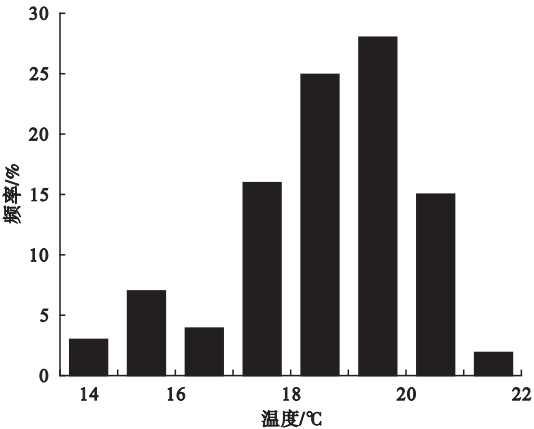


图 3 CN03 站中间点用户室温频率分布图

Fig. 3 Room temperature frequency distribution chart of middle user in CN03

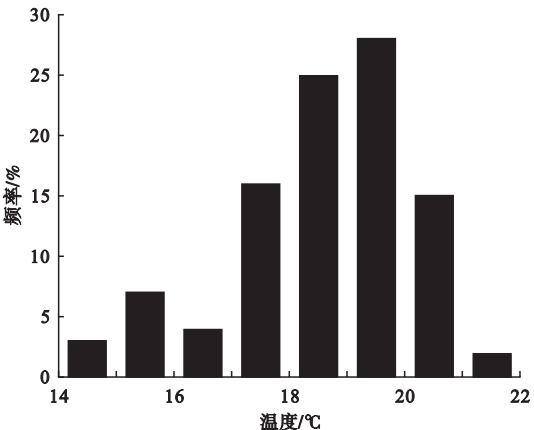


图 4 CN04 站中间点用户室温频率分布图

Fig. 4 Room temperature frequency distribution chart of middle user in CN04

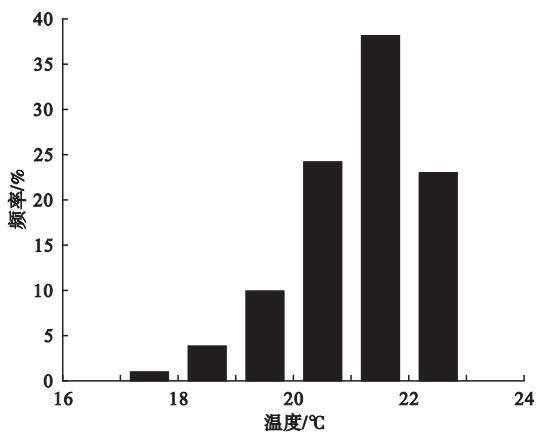


图5 CN05站中间点用户室温频率分布图

Fig.5 Room temperature frequency distribution chart of middle user in CN05

18℃定义为温度不达标,而将室温高于20℃认为是过量供暖^[15].根据图2~图5的结果,在低温供暖条件下,依然出现大面积的过量供暖情况,说明实际供暖中通过技术手段维持用户室温在合理舒适范围内,对于进一步降低能耗,提高供暖品质具有重要意义.

当然,室内舒适度作为一项主观性指标,根据受众的不同差别很大.调研中选取了调研区域内的100名住户进行了“采暖室内舒适度问卷调查”,受访者涵盖青年、中年、老年,男性和女性,但不涉及儿童.室内舒适度问卷回收结果如图6所示.

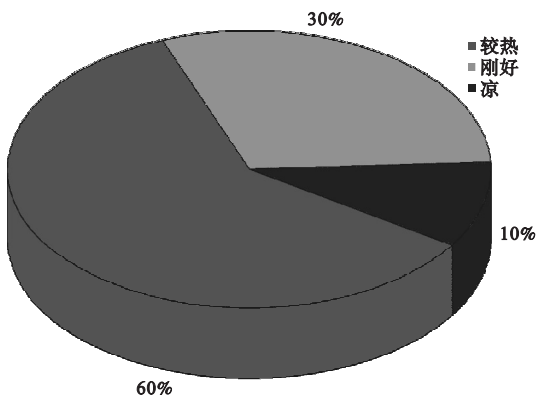


图6 居民热舒适评价

Fig.6 Residents evaluation of thermal comfort

由图6可以看到,只有10%的用户认为室内温度较凉,即有90%的居民对供暖效果表示认可,总体认为供暖效果良好.需要引起注意的

是,调查结果显示,在调研范围内有60%的用户认为室内温度“较热”,事实上“较热”和“凉”都是不舒适的体现,只是前者建立在对供暖室温的认可上(即供暖量是满足的),而后者则表明用户对于供暖效果是不认可的.此结果也与上述图2、图3的结果相一致,表明“过量供暖”的情况普遍存在,应当引起重视.

本次调研测试区域内多数建筑为未经过保温改造的老旧建筑,实测已经达到了较好的供暖效果.那么对于经过保温改造的建筑及新建节能建筑而言,在此供暖参数下,用户的室内温度会更为理想,说明散热器低温采暖在实际应用中切实可行,具有推广价值.

3 供暖运行调节

各换热站多采用阶段性改变流量的质调节作为主要调节方式,即在一段时间内保持循环泵定频运行,通过改变供水温度满足用户要求.同时,根据室外温度的变化,阶段性改变热网循环流量. CN05和CN06换热站虽然循环泵为变频泵,但实测整个采暖期流量变化不大,故认为其主要调节方式为质调节.辅助调节措施上,CN01、CN02和CN04换热站采用了间歇调节的手段,只有CN01和CN02两座换热站采用了气候补偿装置.各换热站的运行调节措施如表5所示.

表5 各供暖公司运行调节措施

Table 5 Regulation measures of each heating company

换热站	主要调节方式	气候补偿	间歇调节
CN01	阶段性改变流量的质调节	有	有
CN02		有	有
CN03		无	无
CN04	质调节	无	有
CN05		无	无
CN06		无	无

由于流量的变化极易引起管网的水力失调,故各供暖企业均以质调节为主要的调节方式,根据室外温度的变化阶段性调节热网循环流量,这种调节方式可以最大限度地保

证供暖管网的水力稳定性,同时根据实际情况灵活调整热源输热量,被行业内多数企业所认可和采用.这里重点结合实际情况,探讨阶间歇调节和气候补偿装置在集中供暖运行调节中的应用效果.

3.1 间歇调节

间歇调节作为一种热网辅助调节措施,许多学者通过数值模拟的方法对此做过研究,多数结果显示热水停供会引起室内温度的快速下降,影响室内舒适度^[16-18].同时,由于多数地区分户热计量还未有效实现,热企只能在热源处做整体调节,为兼顾所有用户需求,只能在整个供暖期内 24h 不间断运行.

表 6 CN01 与 CN04 站末寒期供暖时间对比

Table 6 Heating time comparison between CN01 and CN04

换热站	3 月上旬		3 月下旬	
	供暖时间段	供暖时长/h	供暖时间段	供暖时长/h
CN01	0:00—9:00	19	0:00—7:00	10
	14:00—24:00		19:00—24:00	
CN04	2:00—10:00	16	8:00—12:00	8
	14:00—22:00		20:00—24:00	

图 7、图 8 分别为 CN04 站热网中间点住户 3 月 1 日~3 月 7 日和 3 月 24 日~3 月 30 日室内外温度折线图.

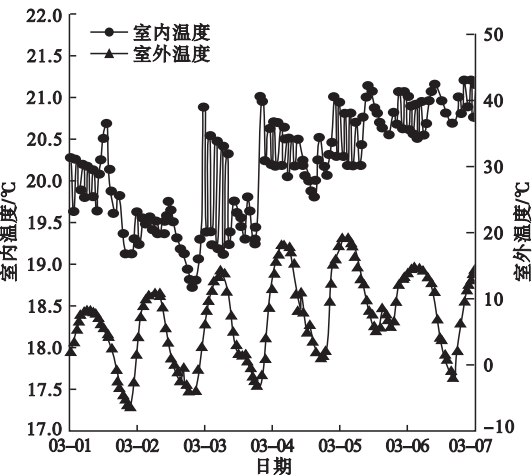


图 7 CN04 站中间点住户 3 月 1 日~3 月 7 日室内外温度折线图

Fig. 7 Room and outdoor temperature line graph of middle user in CN04 from 03-01 to 03-07

但事实上,在室外温度较高时(如初末寒期),不间断供暖会造成室内温度过热,实际上影响了室内的热舒适性,同时也增加了供暖的能耗.图 6 中的结果显示,大量住户对室内实际温度做出了“较热”的评价.

这里以采取了间歇运行的 CN01 和 CN04 两座换热站为例进行说明,其中 CN04 换热站在整个供暖期内均存在间歇运行(初寒期和严寒期部分时间中午停炉 2 h),而 CN01 站只在末寒期(3 月份)进行间歇运行,其余时间则 24 h 连续运行.两家换热站末寒期的间歇运行时间如表 6 所示.

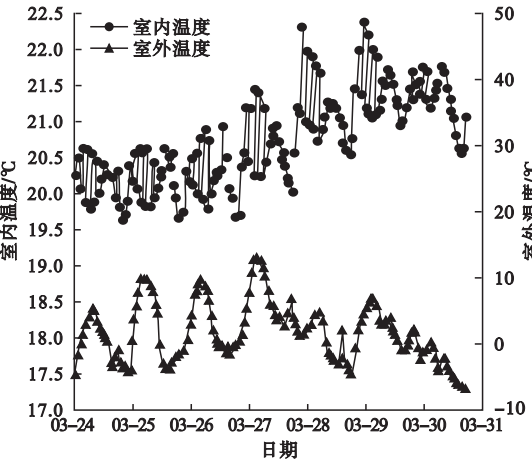


图 8 CN04 站中间点住户 3 月 24 日~3 月 30 日室内外温度折线图

Fig. 8 Room and outdoor temperature line graph of middle user in CN04 from 03-24 to 03-30

从图中看出,无论是 3 月初还是 3 月末,换热站的间歇运行均未对住户室内温度产生

大的影响. 停炉期间室内温度没有出现大的波动,温度的下降在 2℃ 以内且未出现低于 18℃ 的情况. 同时可以看到,由于建筑热惰性的存在,热源处的启停并不能很快反馈到用户侧. 住户室温的下降出现在 15:00 – 21:00,而 3 月 1 日 ~ 3 月 7 日停供时间为 10:00 – 14:00,3 月 24 日 ~ 3 月 30 日停供时间为 12:00 – 20:00. 结合室外温度曲线看,住户室温的变化与室外温度的变化在趋势上具有一致性,但要总体滞后于室外温度的变化. 说明在末寒期采取间歇供暖的方式是可行的,且不会引起住户室温的快速的大幅下降.

根据实测结果 CN04 站在末寒期平均供回水温度为 40/32℃,循环流量约 320 m³/h. 在忽略其他因素的情况下,每天停供 8 h 用户侧日节省热量 85606.4 kJ,考虑到管网热损失、水泵耗电量以及锅炉效率等因素,实际节能量十分可观. 所以,末寒期的间歇运行是一种有效的节能手段,且由于此阶段本身室外温度高,建筑负荷小,可尽量使用热电厂余热进行供暖,减少锅炉的使用,达到节能环保

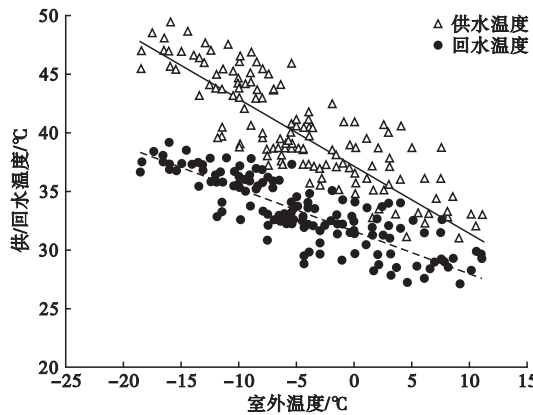


图 9 CN01 站供回水温度与室外温度拟合曲线
Fig. 9 Fitting curve of water temperature and outside temperature in CN01

的目的.

3.2 气候补偿

由于历史等多方面原因,我国的供暖行业整体管理水平较低,“看天烧火”的情况较为普遍^[19]. 气候补偿器通过采集室外实际温度,根据预设的调节曲线计算得到供水参数,实现供暖的自动调节^[20]. 气候补偿并不是新兴技术,但从调研结果看,该地区的气候补偿仍未得到大规模应用. 而对于气候补偿器在实际应用中的效果,也存有一定争议. 文献 [15] 通过 DeST 软件北京某建筑的气候补偿对供暖效果的影响进行了模拟和定量分析,指出即使使用气候补偿器仍然会产生过量的问题,同时不能仅仅根据室外温度进行气候补偿而需综合考虑内扰、太阳辐射等因素进行综合修正. 为分析所调研使用气候补偿装置后的实际效果,将采集到的 CN01 和 CN04 站的供回水温度与对应的室外温度进行线性拟合,结果如图 9 和图 10 所示,线性拟合的相关指标参数如表 6 所示.

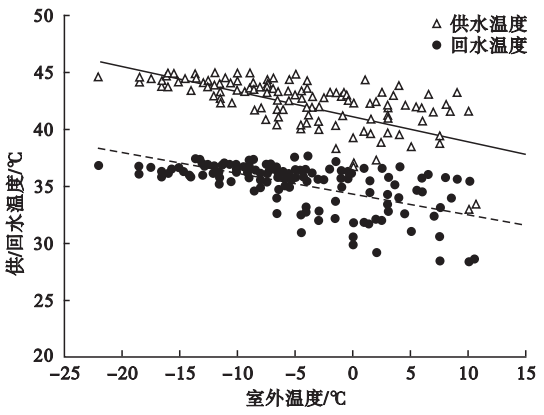


图 10 CN04 站供回水温度与室外温度拟合曲线
Fig. 10 Fitting curve of water temperature and outside temperature in CN04

表 6 线性拟合结果

Table 6 Linear regression results

换热站	显著性水平 α	相关性系数(供/回)	R^2 (供/回)
CN01	0.01	0.812/0.776	0.659/0.602
CN04	0.01	0.584/0.510	0.341/0.264

从拟合结果来看,在0.01的显著性水平下,使用了气候补偿器的CN01站供暖供水温度随室外温度的变化要明显优于没有使用气候补偿器的CN04站。从表6看出,后者供水温度与室外温度的相关性系数低于0.6,拟合优度低于0.35,呈现弱相关性。而前者的相关性系数在0.8左右,但拟合优度在0.65附近,依然不是最理想的情况,说明仍存在优化的空间。这里需要指出的是,由于CN04站没有自主气象站,为在同一基准下比较,在拟合时室外温度数值均采用中国气象数据网的气象资料。事实上CN01站供暖的气候补偿器在实际运行时依据的是自建气象站的数据,如果采用此数据进行分析,其结果会更为理想。虽然从能耗水平CN04站要低于CN01站,但应当注意前者在非末寒期也存在间歇运行,不能因此否认气候补偿措施对于供暖节能的积极作用。

4 结 论

(1)散热器低温采暖在调研地区应用效果良好,实测在42/35℃的供暖参数下,热网近端及中间点用户室温可以满足18℃以上的要求,但当管线过长时,由于水力失调的存在,最不利点用户的室温明显偏低。实际供暖中应当优化管线布置,同时做好不利点用户的保温措施。

(2)在供暖末期间歇供暖是一种行之有效的调节方式,实测该地区末寒期(3月)热网间歇运行情况下,用户室温可以满足18℃以上的要求。同时,在热网停供期间,用户室内温度未出现大幅下降的情况,室内温度的降低更多是受室外温度的影响,且具有明显的滞后性。

(3)气候补偿器的使用可以有效增强热网的气候适应性,使热网供水参数随室外温度的变化而做出相应的调节,从而达到节能的目的,在供暖的运行调节中值得推广。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部. 中国建筑节能发展报告2014[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014:110-120.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Reports of China building energy conservation development 2014[M]. Beijing:China Architecture and Building Press, 2014:110-120.)
- [2] 刘玉明,刘长滨. 德国、波兰既有居住建筑节能改造与经验借鉴研究[J]. 建筑经济,2011(3):92-95.
(LIU Yumin, LIU Changbin. Research on energy saving transformation and experience reference of existing residential buildings in Germany and Poland[J]. Construction economy, 2011(3):92-95.)
- [3] 金占勇. 北方采暖地区既有居住建筑节能改造经济激励研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
(JING Zhanyong. Research on economic incentives for energy-efficiency renovation for existing residential buildings in northern heating areas[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [4] 孔凡红. 节能建筑围护结构热质耦合传递的影响综述[J]. 太阳能学报,2012(增刊1):91-97.
(KONG Fanhong. Review on effect of energy-saving building envelope heat and moisture coupled transfer[J]. Actaenergie solaris sinica, 2012(S1):91-97.)
- [5] 顾婷婷. 我国采暖区居住建筑围护结构节能改造方案优选研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
(GU Tingting. The research on optimization of residential buildings' envelope's energy saving reconstruction scheme in heating region of China[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.)
- [6] 李沛峰,杨勇平,陈玉勇,等. 热电联产供暖系统节能分析及改进[J]. 工程热物理学报,2013,34(8):1411-1415.
(LI Peifeng, YANG Yongping, CHEN Yuyong, et al. Energy conservation analysis and improvement on combined heat and power heating system[J]. Journal of engineering thermophysics, 2013, 34(8):1411-1415.)
- [7] 李先庭,吴伟. 高效低温热水系统的研究进展[J]. 科学通报,2015(18):1661-1677.

- (LI Xianting, WU Wei. Research progress of high-efficiency, low-temperature hot water systems[J]. Chinese science bulletin, 2015(18): 1661–1677.)
- [8] 林文卓. 国内分户热计量方法技术浅析[J]. 暖通空调, 2016, 46(5): 84–88.
(LIN Wenzhuo. Technological status of domestic household heat metering methods[J]. Heating ventilating and air conditioning, 2016, 46(5): 84–88.)
- [9] 杜涛, 黄珂, 周志华, 等. 中国北方城镇居住建筑供暖能耗现状与节能潜力分析[J]. 暖通空调, 2016, 46(10): 75–81.
(DU Tao, HUANG Ke, ZHOU Zhihua, et al. Analysis on present situation and energy saving potential of heating energy consumption of residential building in Chinese northern cities[J]. Heating ventilating and air conditioning, 2016, 46(10): 75–81.)
- [10] 王侃宏, 罗景辉, 刘欢, 等. 北方供暖地区既有建筑节能改造项目碳减排量化方法研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(6): 96–100.
(WANG Kanhong, LUO Jinghui, LIU Huan, et al. Study on the quantitative method for carbon emission reduction of energy-efficient reconstruction of the existing buildings in the northern heating areas[J]. Building science, 2014, 30(6): 96–100.)
- [11] 郝斌, 刘珊, 任和, 等. 我国供暖能耗调查与定额方法的研究[J]. 建筑科学, 2009, 25(12): 18–23.
(HAO Bin, LIU Shan, REN He, et al. Study on investigation and quota method of heating energy consumption[J]. Building science, 2009, 25(12): 18–23.)
- [12] 王宏伟, 李善可, 郭海丰, 等. 室内供暖系统调节对集中供暖管网的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2): 360–364.
(WANG Hongwei, LI Shanke, GUO Haifeng, et al. Analysis on the influence of indoor heating regulation upon heating network[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(2): 360–364.)
- [13] 张群力, 狄洪发. 集中供暖二次网供暖参数优化研究[J]. 暖通空调, 2012, 42(7): 33–41.
(ZHANG Qunli, DI Hongfa. Optimal research on secondary network temperature of central heating systems[J]. Heating ventilating and air conditioning, 2012, 42(7): 33–41.)
- [14] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(China Academy of Building Research. Civil building design specification for heating ventilation and air conditioning: GB50736—2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.)
- [15] 简毅文, 李毅, 田园泉, 等. 气候补偿器应用效果及影响特性的模拟研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(4): 134–139.
(JIAN Yiwen, LI Yi, TIAN Yuanquan, et al. Simulation study on application effects of climate compensator[J]. Building science, 2016, 32(4): 134–139.)
- [16] 徐宝萍, 郝玲, 付林, 等. 北京地区办公建筑间歇供暖模拟与分析[J]. 建筑科技, 2011, 27(8): 51–55.
(XU Baoping, HAO Ling, FU Lin, et al. Simulation and analysis on intermission heating of office buildings in Beijing[J]. Building science, 2011, 27(8): 51–55.)
- [17] 陈玲, 董重成. 间歇供暖负荷计算方法研究[J]. 暖通空调, 2012, 42(7): 42–48.
(CHEN Lin, DONG Zhongcheng. Calculation method of intermittent heating load[J]. Heating ventilating and air conditioning, 2012, 42(7): 42–48.)
- [18] 李兆坚, 江亿, 燕达. 住宅间歇供暖模拟分析[J]. 暖通空调, 2005, 35(8): 110–113.
(LI Zhaojian, JIANG Yi, YAN Da. Simulation and analysis of intermittent heating in residential buildings[J]. Heating ventilating and air conditioning, 2005, 35(8): 110–113.)
- [19] 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 2015[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(Building Energy Conservation Research Center of Tsinghua University. Annual research reporter of China building conservation development 2015[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.)
- [20] 陈亮. 气候补偿器在供暖系统中的应用[J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 42–46.
(CHEN Liang. Application of climate compensator in heating system[J]. Building sciences, 2010, 26(10): 42–46.)