

# 北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造方案分析

天津大学 丁 研<sup>☆</sup>

住房和城乡建设部建筑节能与科学技术司 武 涌

天津大学 朱 能 田 喆

**摘要** 介绍了改造方案和验收情况,逐项分析了改造内容的基本要素,并提出衡量改造效果的综合评估方法。比较分析了德国、波兰的改造方案和我国吉林省的“暖房子工程”方案,提出“暖房子工程”方案是我国北方地区应遵循的改造方案。

**关键词** 北方采暖地区 供热计量 节能改造 改造方案 暖房子工程

## Scheme analysis of heat metering and energy efficiency retrofit for existing residential buildings in China's northern heating region

By Ding Yan<sup>★</sup>, Wu Yong, Zhu Neng and Tian Zhe

**Abstract** Presents the retrofit schemes and the acceptance results, analyses item by item the retrofit content, and puts forward a comprehensive evaluation method of the retrofit effect. Compares and analyses the retrofit schemes of German and Poland and the “warm-house project” scheme of Jilin Province in China, and recommends the “warm-house project” scheme as the retrofit scheme of China's northern heating region.

**Keywords** northern heating region, heat metering, energy efficiency retrofit, retrofit scheme, warm-house project

★ Tianjin University, Tianjin, China

①

### 0 引言

#### 0.1 北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造工作现状

为贯彻落实《国务院关于印发节能减排综合性工作方案的通知》<sup>①</sup>的要求,完成“十一五”期间北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造1.5亿m<sup>2</sup>的任务,北方地区各省(区)、市认真组织改造工作。截至2009年采暖季前,北方15省市已经完成及正在实施的改造面积共计10907万m<sup>2</sup>,占“十一五”期间1.5亿m<sup>2</sup>改造任务的73%,预计改造任务目标将于2010年底顺利完成。

“十一五”期间,北方既有居住建筑供热计量及节能改造工作取得了积极进展,并在多个方面获得

了良好的效益。节能改造不仅提高了北方地区居住建筑的室内采暖温度,还解决了建筑室内发霉、结露的卫生问题,民生效益显著。同时,改造工作的节能减排效果突出,已完成的改造项目具有年节约75万t标准煤的节能能力,并可以减少CO<sub>2</sub>排放200万t。另外,改造工作有效带动了建材生产、仪表制造、建筑施工、工程咨询、能源服务等相关产业的发展,提供了近6万个就业机会,对经济结构的转型和经济社会的发展起到了有力的支撑作用。

#### 0.2 改造方案研究的必要性

①☆ 丁研,男,1984年6月生,在读博士研究生  
300072 天津大学环境科学与工程学院  
(0) 13811342700  
E-mail: jensxing@126.com

收稿日期:2010-08-11

修回日期:2010-10-07

① 国务院关于印发节能减排综合性工作方案的通知(国发[2007]15号),2007-05-23

在“十一五”期间 1.5 亿  $\text{m}^2$  改造任务的执行过程中,各地均对改造方案进行了积极的探索,积累了有价值的改造经验。然而,在 2009 年底财政部门组织的验收评审中,有 2 723 万  $\text{m}^2$  的改造项目未能通过验收,从而没有得到相应的中央财政奖励资金。其原因在于既有居住建筑供热计量及节能改造工作的内容及其意义尚未得到清晰的认识,改造的验收方式也没有得到准确的理解。部分改造项目不能顺应建筑节能的总体目标要求,成为了推进节能改造工作的最大障碍。因此,对各项改造内容及其意义进行综合分析,提出合理的改造方案将是“十二五”期间继续推动节能改造的根本保障。

## 1 改造方案及验收情况

### 1.1 改造方案

根据我国北方采暖地区居住建筑的特点和建筑节能发展总体规划,北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造工作确定了建筑室内采暖系统热计量及温度调控改造、热源及管网热平衡改造、建筑围护结构节能改造 3 项基本内容<sup>①</sup>。住房和城乡建设部在 2008 年发布的《北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造技术导则》(下文简称《导则》)中对 3 项基本改造工作内容同步作出了明确的规定:在建筑围护结构进行节能改造时,必须同步进行供热计量改造;对围护结构符合国家建筑节能标准的,应进行供热系统计量改造;供热采暖系统的节能改造应与热计量改造同步进行<sup>②</sup>。各项改造方案见表 1。

表 1 《导则》中确定的各项改造方案

| 改造方案  | 基本内容             | 实施条件                  |
|-------|------------------|-----------------------|
| 1     | 供热计量改造           | 围护结构符合节能标准,管网系统具备调控能力 |
| 1+2   | 供热计量及管网平衡改造      | 围护结构符合节能标准            |
| 1+3   | 供热计量及围护结构改造      | 管网系统具备调控能力            |
| 1+2+3 | 供热计量、管网平衡及围护结构改造 | 综合改造                  |

### 1.2 改造验收情况

2009 年底,财政部组织各地财政监察专员办事处对各地开展的既有居住建筑供热计量及节能改造项目进行了实地核查,核查的标准根据表 1 中确定的改造方案进行认定。根据核查结果(见图 1),约有 25% 的改造项目不符合《导则》中规定的改造方案,从而没有得到相应的奖励资金。

## 2 改造方案基本要素分析

我国北方城镇建筑采暖能耗占全国城镇建筑

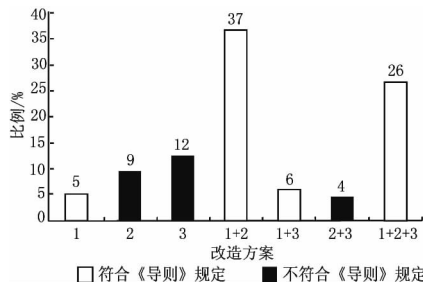


图 1 2009 年底验收核查中的不同改造方案比例

总能耗的 40%, 占全国建筑总能耗的 25%, 是建筑能耗的最大组成部分<sup>[1]</sup>。集中供热是北方城镇主要采用的采暖方式,截至 2009 年采暖期前,我国北方地区既有居住建筑面积为 54.5 亿  $\text{m}^2$ ,而集中供热所覆盖的面积约为 35.6 亿  $\text{m}^2$ ,这部分面积是北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造工作所针对的改造对象。

利用采用集中供热系统的建筑的采暖能耗简化模型<sup>[2]</sup>可以清楚地看到在我国北方城镇开展采暖节能工作的主要任务和目标,而《导则》中规定的三项基本改造内容正是基于对各项采暖能耗来源的分析。

采用集中供热系统的建筑的采暖能耗  $W$  为

$$W = P + (Q + C_1 A + C_2 A) C_3 \quad (1)$$

式中  $P$  为管网水泵能耗,  $W$ , 占采暖建筑能耗的比例为 3%~5%, 当供热量一定时, 与供回水温差有关, 温差越大,  $P$  越小;  $Q$  为建筑物实际需热量,  $W$ ,  $Q = KF\Delta t$ , 其中  $K$  为建筑围护结构传热系数, 与建筑物保温性能有关,  $F$  为建筑围护结构表面面积, 与建筑物形状有关,  $\Delta t$  为室内、外平均温差, 与地域有关;  $C_1$  为局部失调损失,  $W/\text{m}^2$ , 指由于局部过热而造成的开窗热损失, 范围为 3~8  $W/\text{m}^2$ , 局部失调越严重,  $C_1$  越大;  $A$  为系统的供热面积,  $\text{m}^2$ ;  $C_2$  为管网损失,  $W/\text{m}^2$ , 范围为 2~8  $W/\text{m}^2$ , 由管网保温性能和水管漏损决定;  $C_3$  为热源损失系数, 范围为 1.2~2, 热源效率越低,  $C_3$  越大。

### 2.1 外围护结构保温性能改造

通过将模型中建筑物实际需热量公式变形可以推导出单位体积建筑需热量, 即

$$q = \frac{Q}{V} = \frac{KF\Delta t}{V} = K\epsilon\Delta t \quad (2)$$

① 住房和城乡建设部. 关于推进北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造工作的实施意见(建科[2008]95 号), 2008-06-13

② 住房和城乡建设部. 关于印发《北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造技术导则》(试行)的通知(建科[2008]126 号), 2008-07-10

式中  $q$  为单位体积建筑需热量,  $\text{W}/\text{m}^3$ ;  $V$  为建筑物体积,  $\text{m}^3$ ;  $\epsilon$  为体形系数,  $\text{m}^{-1}$ 。

既有建筑的体形系数  $\epsilon$  为常数, 则建筑物的单位体积需热量主要取决于围护结构的传热系数  $K$ , 即建筑围护结构的保温性能。

在我国北方地区城镇中 76.5% 的建筑为非节能建筑, 墙体多为红砖墙、空心砖墙等, 缺少必要的保温措施; 门窗破旧, 多为木、钢、铝合金单玻窗。由于建筑围护结构的保温性能差, 造成“干烧不热”的局面, 即在采暖管道供水温度较高、室内暖气热得烫手的情况下, 由于通过围护结构的大量热损失, 室内温度仍很难达到供暖要求的  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。解决“干烧不热”现象的根本出路是对外围护结构保温性能进行改造。

外围护结构的改造效果可结合实地测量结果和设计图纸资料根据测算得到。室内计算温度为  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 室外计算温度根据当地气象资料取采暖期平均室外温度, 根据不同朝向和地带划分, 分别对通过外墙、外窗、屋顶和地面的传热量进行计算, 如下:

$$Q_E = (t_i - t_o) \left( \sum KF \right) \quad (3)$$

$$Q_L = (t_i - t_o) \times 0.000\ 278 n_k V_n c_p \rho \quad (4)$$

$$M_1 = \sum (Q'_E + Q'_L - Q_E - Q_L) t_h A \sigma_1 \quad (5)$$

式(3)~(5)中  $Q_E$  为建筑外围护结构传热量,  $\text{W}$ ;  $t_i, t_o$  分别为室内、外温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $Q_L$  为冷风渗透热损失,  $\text{W}$ ; 0.000 278 为换算系数,  $\text{h}/\text{s}$ ;  $n_k$  为房间换气次数,  $\text{h}^{-1}$ ;  $V_n$  为渗透空气量,  $\text{m}^3$ ;  $c_p$  为空气比定压热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\rho$  为室外空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $M_1$  为围护结构改造的节能效果(以标准煤节省量来衡量),  $\text{t}$ ;  $q'_E$  为改造后外围护结构传热量,  $\text{W}$ ;  $q'_L$  为改造后冷风渗透热损失,  $\text{W}$ ;  $t_h$  为当地采暖时间,  $\text{d}$ ;  $A$  为改造项目的建筑面积,  $\text{m}^2$ ;  $\sigma_1$  为换算系数,  $\text{t}/(\text{W} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^2)$ 。

## 2.2 热源及管网热平衡改造

我国北方地区集中供热管网的总长度约为 6.6 万  $\text{km}$ , 而多数管网建成于 20 世纪 80 年代, 迄今运行 15 年以上的老旧管网长度为 1.7 万  $\text{km}$ , 约占管网总长度的 26%<sup>[3]</sup>。老旧管网“跑冒滴漏”现象极为普遍, 造成供热系统平均失水率达到 2.8%, 平均温降达到  $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ <sup>[3]</sup>, 远远超过设计限定指标。部分城市供热管网与市政污水管网敷设于同一管道井中, 在污水的长期浸泡侵蚀下, 供热管道保温层破损、锈蚀十分严重。

根据采暖规范的要求, 热水供暖系统各并联环

路之间(不包括共同管段)的计算压力损失相对差额不应大于 15%<sup>[4]</sup>。然而老旧供热管网普遍缺乏调控措施, 致使部分建筑热水循环量过大, 部分建筑热水循环量过小, 用户端冷热不均, 水力失调严重。对于大型城市热网, 因末端不均匀造成的热损失最高可达 30%<sup>[5]</sup>。

管网的不平衡率为

$$\delta = \frac{\Delta t_p - \Delta t_r}{\Delta t_p} \times 100\% \quad (6)$$

式中  $\delta$  为不平衡率, %;  $\Delta t_p$  为换热站供回水温差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta t_r$  为热力入口供回水温差,  $^{\circ}\text{C}$ 。

对供热管网的节能改造, 不仅可使系统补水量降低、管网不平衡率降低, 同时还能提高热源的供热能力。根据长春某供热企业的改造经验, 通过对供热管线的无补偿直埋设计, 建立能够联网监控运行且一次网无泄漏的热网工程, 可以在不增加热源的前提下, 使供热面积从原先的 500 万  $\text{m}^2$  增加到 900 万  $\text{m}^2$ 。热源供热能力的提高不仅可以缓解因当前城市化进程加速造成的热源紧张的局面, 使供热系统高效节能运行, 还可以避免对城镇基础设施的盲目投资, 达到促进社会经济发展向资源节约型和环境保护型转变的目的。

管网的输配热量与供热管网改造后节能效果的计算式为

$$L = \Delta t c G \quad (7)$$

$$M_2 = (L' - L) \sigma_2 \quad (8)$$

式(7), (8)中  $L$  为管网的输配热量,  $\text{W}$ ;  $\Delta t$  为供回水温差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $c$  为水的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $G$  为供热系统输配流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $M_2$  为供热管网改造后的节能效果,  $\text{t}$ ;  $L'$  为改造后管网的输配热量,  $\text{W}$ ;  $\sigma_2$  为换算系数,  $\text{t}/\text{W}$ 。

## 2.3 供热计量及室内温控改造

建筑节能改造是一项系统工程, 各个环节之间密不可分, 如果只对建筑围护结构改造而不进行供热计量和温度调控, 则不仅达不到理想的节能效果, 还有可能造成能源的浪费。

目前北方地区城镇既有建筑中非节能建筑的比例约为 76.5%, 节能建筑约占 23.5%。在非节能建筑普遍存在“干烧不热”现象的同时, 节能建筑还存在着“高烧不退”的现象。北方多数地区都存在着节能建筑与非节能建筑共用热源和管网的情况, 供热系统缺乏调节与计量手段, 水

力失调严重,为保证管网末端或非节能建筑的供热质量,造成节能建筑过量供热,室内采暖温度普遍偏高,个别的室内温度可高达 30℃左右,开窗散热现象普遍,节能效果无法体现,造成了节能建筑不节能的局面。

供热计量和温控改造是供热体制改革中的一环,是供热体制改革能否顺利实施的关键。长期计划经济形成的带有“福利性”的供热体制早已不适应时代的发展趋势,改变采暖费的补贴方式、实行用热商品化和推行按用热量分户计量收费是供热体制改革的三项主要内容。其中,按用热量分户计量收费的前提就是对新建建筑和既有建筑安装供热计量和温控装置。因此,计量改造是节能改造中必须落实的内容,也是检验改造工作完成程度的核心标准。

节能率 = (改造前能耗 × 对应的气象修正系数 - 改造后能耗 × 对应的气象修正系数) × 供热计量收费价格系数 × 热环境修正系数 ÷ (改造前能耗 × 对应的气象修正系数) (10)

式中 能耗 = 采暖能耗 + 0.404 × 电耗(按火力发电煤耗计算,每年各不相同,为便于对比,以国家统计局每 kWh 电折合 0.404 kg 标准煤,作为电力折算标准煤系数);某地区能耗的气象修正系数 = 该地区的标准度日数/该地区对应采暖季的度日数;对于改造前进行了建筑热环境测试的项目:热环境修正系数 = (改造后室内的平均温度 - 该地区的采暖室外平均温度)/(改造前室内的平均温度 - 该地区的采暖室外平均温度),对于改造前未进行建筑热环境测试的项目:热环境修正系数 = (0.8 × 不满意户数 + 1.0 × 较满意户数 + 1.1 × 满意户数 + 1.2 × 非常满意户数)/总户数;供热计量收费价格系数根据两部制热价中固定热价所占比例确定(见表 2),不同于表 2 中比例的可按内插法确定。

表 2 供热计量收费价格系数参考值

| 固定热价所占比例/% | 供热计量收费价格系数 |
|------------|------------|
| 50         | 1.0        |
| 30         | 1.1        |
| 20         | 1.2        |

3.2 经济性分析

由于各地区经济发展水平不同,融资方式不同,改造方案也不会完全相同。各地可以在确保供热计量及温控改造的基础上,根据实际情况,因地制宜地选择改造方案。确定改造方案时应首先预测改造效果,并根据改造内容计算改造费用,根据费效比和静态投资回收期优选最佳的改造方案。

改造方案的综合节能效果:

$$M_3 = \frac{(E' - E)\sigma_3}{\xi\eta} \tag{9}$$

式中  $M_3$  为供热计量改造后的节能效果,t; $E'$ 为改造后建筑热力入口处的输入热量,kWh; $E$ 为改造前建筑热力入口处的输入热量,kWh; $\sigma_3$ 为换算系数,t/(kWh); $\xi$ 为供热管网输配效率; $\eta$ 为热源效率。

3 综合改造效果评估

3.1 节能效果评估

结合建筑室内采暖系统热计量及温度调控改造、热源及管网热平衡改造和建筑围护结构节能改造三项内容,最终的节能效果将集中反映为供热企业日平均耗煤量及用电量的减少。根据节能率计算公式(见下式)<sup>①</sup>,可以得到改造工作的综合节能效果。

$$M = \max(M_1 + M_2 + M_3, M_2 + M_3, M_1 + M_3, M_3) \tag{11}$$

费效比:

$$\Phi = \frac{\sum S}{M\gamma} \tag{12}$$

静态投资回收期:

$$\Psi = \frac{\Phi}{R} \tag{13}$$

式(11)~(13)中  $M$  为改造方案的节能效果,t; $\Phi$ 为费效比,元/(kWh · a); $S$ 为改造方案的投资,元; $\gamma$ 为换算系数,kWh/t; $\Psi$ 为投资回收期,a; $R$ 为热价,元/(kWh)。

3.3 改造案例

吉林省通化县完成了室内供热计量及温度控制改造、热源和供热管网平衡改造、建筑围护结构节能改造 1 762 718 m<sup>2</sup>,对全县的 449 栋既有建筑全部进行了节能改造,全面超额完成了计划任务。通化县采取争取国家奖励资金、财政配套、企业投资和居民自筹的融资方式,共投入既有居住建筑改造资金约 16 988 万元,按照每 t 标准煤 700 元计算,投资回收期约为 11 a。改造后的供热系统降低了热量损耗,产生了良好的社会效益、环境效益和经济效益。通化县的改造方案评估见表 3。

① 住房和城乡建设部.关于印发《北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造项目验收办法》的通知(建科[2009]261号),2009-11-12

表 3 吉林省通化县的改造方案评估<sup>①</sup>

| 改造内容    |                               | 改造效果                          |                   |                                    |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| 建筑围护结构  | 改造前耗热量 50.49 W/m <sup>2</sup> | 改造后耗热量 25.52 W/m <sup>2</sup> | 节能率 49.46%        | 折合标准煤 12.51 kg/(m <sup>2</sup> ·a) |
| 热源管网平衡  | 改造前不平衡率 71.43%                | 改造后不平衡率 14.5%                 | 日节约标准煤 99.668 t/d |                                    |
| 供热计量及温控 | 改造前不满意率 2.84%                 | 改造后不满意率 0.95%                 | 不满意率降低 1.89%      |                                    |
| 综合节能效果  | 改造前日耗煤量 330.9 t/d             | 改造后日耗煤量 194 t/d               | 平均节能率 48.75%      | 总计节煤量 23 101.3 t                   |

4 改造方案对比分析

4.1 德国改造方案

德国的既有居住建筑节能改造始于 20 世纪 90 年代,主要针对的是原东德地区存在的大量板式建筑。这些房屋质量差,围护结构保温性能不良,墙体存在结露、渗水的现象,不仅影响居民的生活质量,而且能源浪费现象严重。德国的既有居住建筑改造方案综合考虑了节能环保方面的因素,同时兼顾居住质量的改善和提高,包括增加建筑外保温措施、更换节能门窗、提高采暖系统效率,以及对周边环境甚至道路、绿化等基础设施进行全方位的改造。供热计量方式主要采用按楼计量按户分配热量的方法,依据 70% 的浮动热费和 30% 的固定热费进行计量收费。德国的既有居住建筑经过节能改造取得了很好的成效,从政府公布的数字来看,住宅 CO<sub>2</sub> 的排放量已经减少 40 kg/(m<sup>2</sup>·a)。

德国的综合性改造方案具体包括<sup>[6]</sup>:

- 1) 住宅的室内环境和室内管网改造,包括增大面积,改造厨房和卫生间,更换水、电、燃气和供热系统的管网等;
- 2) 节能与节水改造,包括屋顶、外墙、地下室顶板、窗户的节能改造,分户采暖改为集中供热,采用节水器具等;
- 3) 建筑物(小区)周边的环境改造,包括道路、绿化和居民儿童公共活动场所等配套设施的改造。

4.2 波兰改造方案

波兰的既有居住建筑节能改造同样采取了综合节能改造的方案。采用高效锅炉、换热器及现代化的控制设备以提高热源供热效率,采用高效保温管道、水力平衡设备及温度补偿器以减少供热管网系统的输配能耗和热损失,以及采用供热计量并安装温度调控装置。此外,还对分散锅炉房进行了技术改造,使其与集中供热管网相连接,并将小锅炉从燃煤方式改为燃气方式,提高了小锅炉的供热效率。

其中,最值得我国借鉴的是波兰在供热计量方面的改造经验。在对波兰的既有建筑进行改造期间,华沙部分地区也曾出现过只改造围护结构的保温性能而不改变原有室内采暖系统的项目案例<sup>[7]</sup>,

结果住户开窗散热,节能改造收效甚微。通过调整改造方案,波兰对整个采暖系统实现了动态调节,加之外热计量收费改革逐步深化,整体改造工程实现了快速发展,节能效果明显。

4.3 “暖房子工程”方案

为提高城市冬季供热水平,降低采暖能耗,改善居民住房保温条件和供热环境,吉林省结合通化县改造的成功经验,提出了实施“暖房子工程”的改造方案。计划自 2010 年起,利用 3 年时间,完成既有居住建筑节能及供热计量改造 1 500 万 m<sup>2</sup>,改造陈旧供热主干管网 1 800 km,改造撤并小锅炉 2 000 座,深化供热体制改革,推进按用热量计量收费,基本完成全省供热信息化监管平台建设。

该方案的改造内容包括:1) 实施既有居住建筑节能改造,加快推进既有居住建筑节能和危旧房屋改造,降低居民建筑能耗,提高保温性能,改善老旧住宅保温条件,使房子真正“暖”起来;2) 改造小锅炉和陈旧管网,加快改造更新陈旧管网和设施,围绕旧城区改造,有计划取缔小锅炉,尽早实现热网布局的优化和技术更新;3) 加快集中供热热源建设,作好区域热源规划,根据当地实际情况科学合理确定各种热源类型和比例,大力发展集中供热,以热电联产和大型区域锅炉供热为主,多种供热方式互为补充,形成科学合理的热源结构,加快热源建设的步伐。

“暖房子工程”方案是顺应我国北方采暖地区既有居住建筑供热现状的综合改造方案,同时也与德国、波兰等同纬度发达国家在既有居住建筑节能改造上的思路相吻合,可以将“十一五”期间 1.5 亿 m<sup>2</sup> 节能改造任务的示范带动作用扩大化,值得在我国北方地区推广。

5 结语

北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造工作是一件利国利民的重要工作,不仅具有节能减排的效果,同时还有改善民生和经济社会的效

(下转第 47 页)

① 长春工程学院,吉林省土木建筑学会热能动力分会.通化县既有居住建筑供热计量及节能改造评估报告,2010-05-10