

Energy Saving Analysis of Heat Supply System Based on Elaborate Control

Yucai Guo¹, Yang Bai², Chao Jiang³

¹Xi'an Xin Hong Ye Investment & Development Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Xi'an Railway Survey and Design Institute Co. Ltd., Xi'an Shaanxi

³Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Email: 15091336209@126.coms

Received: Aug. 7th, 2018; accepted: Aug. 24th, 2018; published: Aug. 31st, 2018

Abstract

Comprehensively considering various factors such as weather conditions, building properties, users' habits and so on, the heat load of the district heating system is predicted in real time by using the neural network algorithm. To eliminate the effect of building thermal inertia, as well as the time delay in heat supply system and heat transfer process, the distributed frequency conversion technology is used to actively and continuously adjust the operating mode of the primary pumps in the heat source plant and each heat consuming installation. Based on data wireless transmission technology, the linkage control of heating station and heat exchange station is realized. The elaborate control strategy has achieved excellent operating state and energy saving effect when applied to a district heating system in a heat supply company in Xi'an. The energy saving rate is above 50%, which indicates great application value.

Keywords

District Heating, Load Prediction, Distributed Frequency Conversion, Elaborate Control, Energy Saving

基于精细化控制的供热系统节能分析

郭玉才¹, 白 杨², 江 超³

¹西安新鸿业投资发展有限公司, 陕西 西安

²中铁西安勘察设计研究院有限责任公司, 陕西 西安

³长安大学, 陕西 西安

Email: 15091336209@126.coms

收稿日期: 2018年8月7日; 录用日期: 2018年8月24日; 发布日期: 2018年8月31日

摘要

综合考虑气象条件、建筑性质、用户使用习惯等多种因素,采用神经网络算法对集中供热系统的热负荷进行了实时预测。结合建筑的热惰性、供热系统和传热过程的时滞性,采用分布式变频技术对主热源水泵和各用户的一次水泵进行主动连续调节。基于数据无线传输技术,实现了供热站与换热站的联动控制。将精细化控制用于西安某热力公司供热系统,取得了良好的运行和节能效果,节能率在50%以上,有良好的推广应用价值。

关键词

集中供热, 负荷预测, 分布式变频, 精细化控制, 节能

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国北方城镇地处寒冷和严寒地区,由于采暖期长、供热面积基数大,采暖能耗占中国建筑用能的很大一部分,是我国目前建筑节能的主要对象。随着锅炉效率的提高及建筑围护结构保温性能的加强,我国单位面积采暖能耗逐渐降低,但是随着集中供热市场的逐年扩大,总体采暖能耗仍持续增长[1]。北方地区为了应对冬季的寒冷气候,供热系统大都采用连续运行的方式,运行时间基本上都在100天以上。北方城镇建筑供暖典型的“全时间、全空间”特征,是导致采暖能耗大的主要原因。

为减少建筑能耗,我国对北方地区既有和新建采暖建筑提出了一系列的节能要求,使得建筑单位面积能耗有明显的下降。然而,在实际运行过程中,由于运行调节不到位,建筑室温偏高的现象普遍存在,能源浪费严重。当维持室温为 18°C 时,北方城镇建筑采暖需热量在 $0.23\sim 0.42\text{ GJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 之间[2]。实际上,由于大部分建筑的室内温度高于 18°C ,甚至有的用户高达 25°C 以上,导致北方城镇建筑采暖实际用热量在 $0.4\sim 0.55\text{ GJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 之间,平均约为 $0.47\text{ GJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ [2]。究其原因,一方面是供热按面积收费的方式,用户没有节能的积极性;另一方面是换热站及末端设备调节手段不到位,无法适应负荷变化的要求。

西安市城区内现有不同体制不同规模的供热企业共9家、锅炉总台数达到179台,集中供热面积达到1.78亿 m^2 。目前,西安市主城区建筑总面积约为3.70亿 m^2 ,集中供热普及率仅为48.1%,供热市场广阔。若所有建筑采暖用热量控制为 $0.31\text{ GJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,3.70亿 m^2 供热面积的节能量为0.592亿GJ。按西安市集中供热收费标准的44元/GJ计算,年节能集中供热费用约26.048亿元,节能潜力巨大。

本文分析了西安市新建建筑的理论耗热量,然后给出了实际负荷的预测方法;结合西安某热力公司的管网和用户分布设计了分布式变频供热系统,并编制了精细化控制软件;通过一个采暖期的运行,对系统的节能效果进行了评价。

2. 理论耗热量

西安冬季采暖室外计算温度为 -3.4°C ,实际采暖期为120天,接近日平均温度 $\leq +8^{\circ}\text{C}$ 的天数,因此,采暖期室外平均温度按 2.6°C 计算[3]。热负荷指标按规范[3]推荐的节能建筑数值选取。考虑到住宅建筑、办公建筑、宾馆建筑、工业建筑的用热时段及室温设定值不同,对这几类建筑的理论耗热量分别进行推算。

2.1. 住宅建筑

住宅建筑热指标取 40 W/m^2 ，24 h 室内温度设定为 20°C ，由此可得平均热指标为：

$$q = \frac{20 - 2.6}{18 - (-3.4)} \times 40 = 32.52 \text{ W/m}^2$$

年耗热量为：

$$Q = 32.52 \times 120 \times 24 \times 3600 / 10^9 = 0.3372 \text{ GJ/m}^2$$

2.2. 办公建筑

办公建筑热指标取 60 W/m^2 ，6:00~20:00 室内设计温度为 20°C ，20:00~6:00 室内设计温度为 5°C 。由此可得平均热指标为

$$q = \left[\frac{20 - 2.6}{18 - (-3.4)} \times \frac{15}{24} + \frac{5 - 2.6}{18 - (-3.4)} \times \frac{9}{24} \right] \times 60 = 33.01 \text{ W/m}^2$$

年耗热量为：

$$Q = 33.01 \times 120 \times 24 \times 3600 / 10^9 = 0.3422 \text{ GJ/m}^2$$

对于 24 h 要求室温 20°C 的办公建筑，年耗热量为：

$$Q = 60 \times 120 \times 24 \times 3600 / 10^9 = 0.6221 \text{ GJ/m}^2$$

2.3. 宾馆建筑

宾馆建筑热指标取 45 W/m^2 ，24 h 室内温度设定为 22°C ，由此可得平均热指标为

$$q = \frac{22 - 2.6}{18 - (-3.4)} \times 45 = 40.79 \text{ W/m}^2$$

年耗热量为：

$$Q = 40.79 \times 120 \times 24 \times 3600 / 10^9 = 0.4229 \text{ GJ/m}^2$$

2.4. 工业建筑

工业建筑热指标取 50 W/m^2 ，6:00~20:00 室内设计温度为 20°C ，20:00~6:00 室内设计温度为 5°C 。由此可得平均热指标为

$$q = \left[\frac{20 - 2.6}{18 - (-3.4)} \times \frac{15}{24} + \frac{5 - 2.6}{18 - (-3.4)} \times \frac{9}{24} \right] \times 50 = 27.51 \text{ W/m}^2$$

年耗热量为：

$$Q = 27.51 \times 120 \times 24 \times 3600 / 10^9 = 0.2852 \text{ GJ/m}^2$$

3. 集中供热系统精细化控制

3.1. 分布式变频系统设计

3.1.1. 分布式变频系统原理

目前，我国北方城市的供热系统仍以枝状管网为主。在热能输送方式上，多采用传统的设计及运行

方式,即在热源厂统一设置循环水泵,由其承担热源内部阻力、输送及输配管网阻力、换热站或其他末端系统阻力,用户处不需在城市热网侧设置水泵。热源循环水泵扬程依据最不利环路的阻力进行配置,以满足远端用户的用热需求;近端用户资用压差过大,采用阀门进行强制节流,以达到近端与远端的水力平衡要求。实际运行中,对于规模较大的供热管网,由于近端用户调节阀处的压差远大于阀门的调节范围,导致近端用户超流量现象大量存在,成了北方地区城镇供暖每年都要面临的困扰。为了解决末端不热的问题,热力公司往往采取加大流量的措施,从而进一步扩大了超流量用户的范围。

相比于调节阀,基于变频技术的水泵调节流量的方式更为方便、可靠。在实际应用中,降低热源厂主循环水泵的扬程,让其仅克服热源厂内部的阻力,这样使得热源厂设备承受的压力大为降低,水泵的运行能耗也大幅度降低。由于热源水泵扬程不能克服热源厂外的阻力,因此,所有热用户都必须要在城市热网侧设置水泵,用以克服热源厂至热用户之间的阻力。在热用户处设置的这一水泵称为分布式变频水泵。这样一来,将在热源处形成大流量、小扬程水泵,在用户处形成小流量、扬程随距离热源距离逐渐增大的水泵。热源大流量水泵与各用户的小流量水泵串联运行,各用户的小流量水泵并联运行。所有水泵均通过频率控制实现各供暖用户的水力平衡。这一系统即为分布式变频供热系统。自动化程度较好的分布式变频系统可省去调节阀,同时可降低供热系统供水管道的压力水平,系统更加安全。

3.1.2. 分布式变频系统设计

在分布式变频系统中,设计时按以下步骤进行:

- 1) 管网系统进行水力计算,确定系统所需的流量和压力分布。
- 2) 按照供热的经济性,合理选择压差控制点位置,一般控制在热源厂内部。
- 3) 选择主循环泵,流量满足全网流量需求,扬程克服压差控制点之前的系统阻力。
- 4) 选择用户一次水泵,满足该分支用户的阻力和流量。用户一次水泵应满足用户近、远期负荷发展要求,并能适应外网压力变化。

3.2. 集中供热系统精细化控制

3.2.1. 负荷预测

供热管网系统的热负荷预测指导着供热管网系统的运行调节和控制。影响热负荷的因素较多。按照主客观分为气象因素、建筑因素和人为因素。按照是否为热计量建筑分为非热计量、热计量和用户行为。用户行为的不可预知性,使其成为负荷预测中的偶然因素。

供热系统具有时变性、时滞性、随机性和偶然性等特点,神经网络方法对热负荷的预测拥有巨大优势。本文依据为每个换热站专门开发的神经网络算法进行了热负荷的预测,并基于预测的结果对供热系统进行控制和调节。神经网络算法有专门文献可查,本文不再赘述。

3.2.2. 检测参数

检测参数作为神经网络系统的输入参数,主要包括室外气象参数(温度、湿度、风速、太阳辐射等),城市热网供、回水温度,用户热网供、回水压力,城市热网流量,用户热网供、回水温度,用户热网供、回水压力,分布式水泵运行反馈。

3.2.3. 控制对象

根据检测参数进行神经网络运算,得到各用户的热负荷预测结果。通过调节用户分布式变频水泵的转速,改变城市热网在用户处的回水温度,从而保证城市热网的供、回水平均温度在所需的数值上,保证换热器的传热温差,进而保证热用户的供热量。用户管网侧的流量,按照压差调节的方法进行用户处水泵转速的调整。

3.2.4. 控制方法

用户管网温度调节方程为:

$$t_{pj} = \frac{t_g + t_h}{2} = \frac{q_h}{q_{h0}} (t_{pj0} - t_{n0}) + t_n \quad (1)$$

式中, t_{pj} 为用户管网供、回水平均温度, t_g 为用户管网供水温度, t_h 为用户管网回水温度, q_h 为热负荷实时预测值, t_n 为室温设定值, 下标 0 表示设计工况。

在不同的预测负荷下, 通过调节城市管网循环水泵的转速调节控制城市管网的流量来控制用户管网供回水平均温度进行用户管网的温度调节。

用户管网流量调节根据最不利用户压差要求调节变频水泵的转速。

根据板式换热器传热方程, 城市管网与用户管网供、回水温度有如下关系:

$$\frac{(\tau_1 - t_g) - (\tau_2 - t_h)}{\lg \frac{\tau_1 - t_g}{\tau_2 - t_h}} = \frac{(\tau_{10} - t_{g0}) - (\tau_{20} - t_{h0})}{\lg \frac{\tau_{10} - t_{g0}}{\tau_{20} - t_{h0}}} \frac{q_h}{q_{h0}} \quad (2)$$

式中, τ_1 、 τ_2 分别为城市管网供、回水温度, 下标 0 表示设计工况。

城市管网和用户管网供、回水温度均通过换热站内的温度传感器进行实时采集, 因此, 式(2)可以用来判定负荷预测的准确性, 并用于预测模型的修正。

4. 运行效果分析

4.1. 设计条件

2016~2017 年采暖季共有 4 家用户投入运行, 分别为第一学校、第六小学、公安局、消防站。各换热站设计条件见表 1 (其中, 第一学校换热站夜间仅维持 5℃ 的值班温度)。

4.2. 运行效果

2016~2017 年采暖季的实际运行效果表明, 基于精细化控制的供热系统具有十分可观的节能潜力。对于夜间仅维持值班温度的热用户(第一学校), 节能潜力尤为可观(表 2)。表中所有用户的实际耗热量均小于理论耗热量, 平均实际耗热量指标为 0.1569 GJ/m², 平均实际热负荷仅 15.13 W/m²。

图 1~图 4 给出了第一学校换热站的实际运行曲线。由曲线可以明显看出, 整个运行过程中, 城市热网和用户热网的参数均在不断变化中。正是这种变化, 充分利用了整个系统的供给和消耗的时间差, 最大限度地实现了节能运行。

由图 1 可以看出城市热网的水温是不断变化的, 说明城市热网为典型的质调节过程。图 2 说明用户热网的水温也是不断变化的, 用户热网也为典型的质调节。图 3 体现了城市热网的水量是不断变化的,

Table 1. Design conditions of heating users in 2016-2017

表 1. 2016~2017 采暖季用户设计条件

序号	用户名称	采暖面积(万 m ²)	设计负荷(kW)	用户管网设计温度(℃)	理论耗热量(万 GJ)
1	第一学校	3.48	1915	80/60	1.19
2	第六小学	5.25	2515	75/50	3.27
3	公安局	1.57	705	85/60	0.98
4	消防站	0.80	420	50/40	0.50
合计		11.10	5555		5.94

Table 2. Operating results of heating users in 2016-2017
表 2. 2016~2017 采暖季用户运行效果

序号	用户名称	理论耗热量(万 GJ)	实际耗热量(万 GJ)	实际耗热量指标(GJ/m ²)	平均热负荷(W/m ²)
1	第一学校	1.19	0.29	0.0846	8.16
2	第六小学	3.27	1.06	0.2015	19.43
3	公安局	0.98	0.23	0.1472	14.20
4	消防站	0.50	0.16	0.1975	19.05
合计		5.94	1.74	0.1569 (平均)	15.13 (平均)

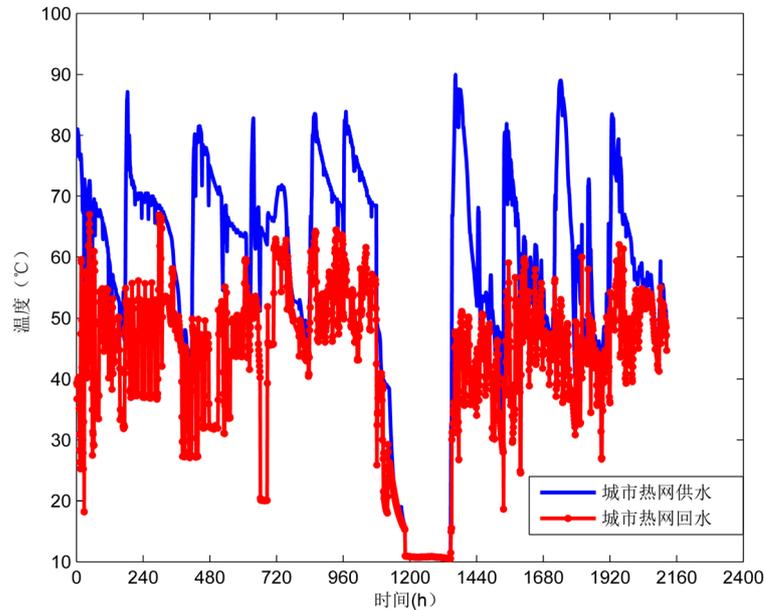


Figure 1. Curve: supply and return temperature of urban heating network
图 1. 城市热网供、回水温度变化曲线

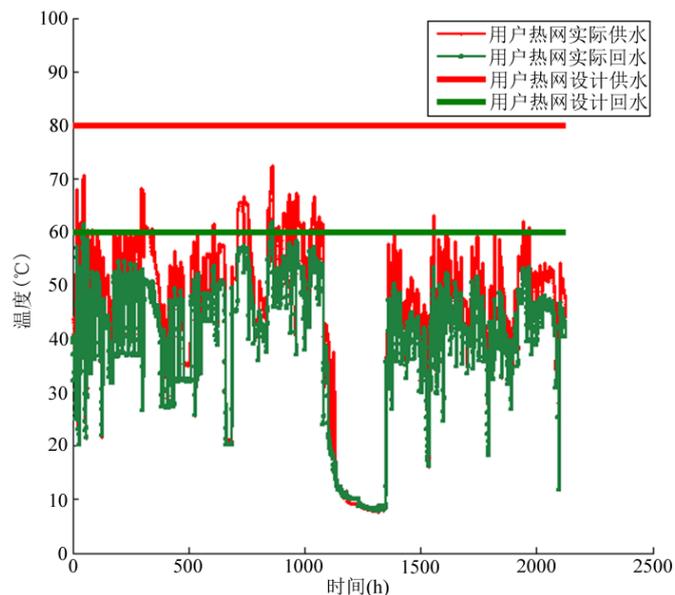


Figure 2. Curve: supply and return temperature of user's heating network
图 2. 用户热网供、回水温度变化曲线

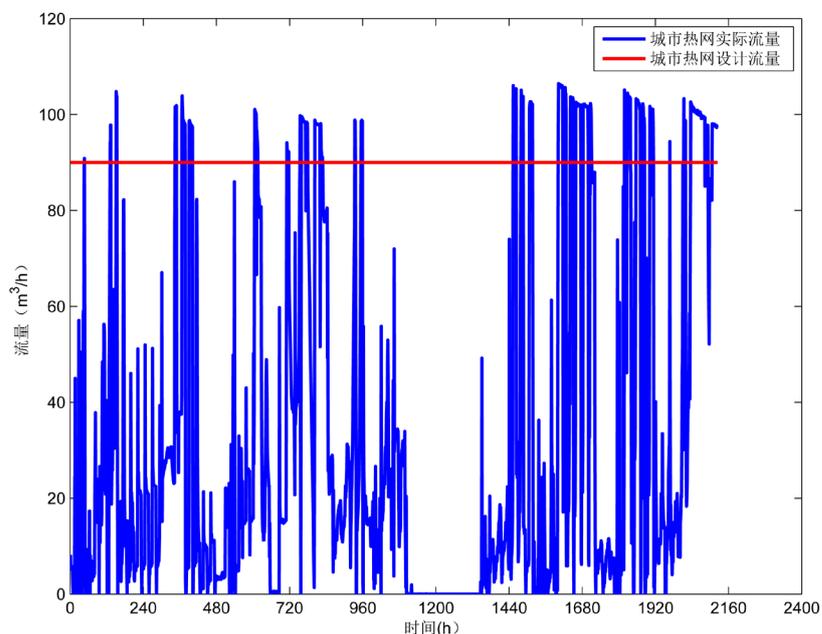


Figure 3. Curve: flow rate of urban heating network

图 3. 城市热网流量变化曲线

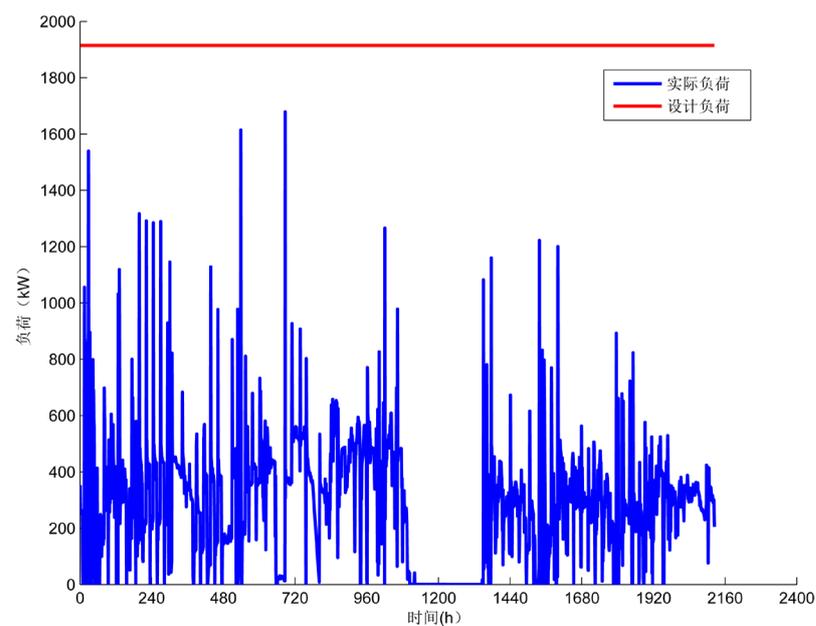


Figure 4. Curve: heating load

图 4. 供热负荷变化曲线

说明城市热网为典型的量调节。因此，整个供热系统的运行为典型的质量 - 流量调节过程。图 4 体现了供热负荷不是定值，说明了控制系统在不停地对供热负荷进行预测和调整，有效避免了过量供热。因此，图 1~图 4 展现了以负荷预测为基准的质量 - 流量调节精细化供热过程。

5. 结论与建议

综合考虑各种内外扰动对建筑热负荷的影响，并充分利用建筑的热惰性，基于精细化控制的供热系

统具有巨大的节能潜力。西安某热力公司供热系统的运行结果表明，西安市新建建筑采用该精细化控制策略后，节能率在 50%以上，取得了良好的运行和节能效果，有较好的推广应用价值。

基金项目

本研究为中央高校基本科研专项资金(310828171005)资助项目。

参考文献

- [1] 彭琛, 江亿. 中国建筑节能路线图[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 76-79.
- [2] 江亿. 中国建筑及节能理念思辨[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 87-91.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ 34-2010 城镇供热管网设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org