

计量供热系统动态特性及控制策略研究综述

清华大学 徐宝萍[☆] 付 林 狄洪发

摘要 针对国内外不同的研究背景,综述及评价了计量供热系统的动态特性及控制策略的研究情况,指出应立足于我国集中供热系统的特点来探索与之相适应的研究方法。

关键词 计量供热系统 控制策略 仿真模拟 负荷预测

Review of dynamic performance and control strategy of heat metering systems

By Xu Baoping[★], Fu Lin and Di Hongfa

Abstract Based on the different study backgrounds at home and abroad, reviews and estimates the research on dynamic performance and control strategy of heat metering systems, and points out that the research method according to the characteristics of domestic district heating systems should be explored.

Keywords heat metering system, control strategy, simulation, load prediction

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

0 引言

计量供热系统安装散热器温控阀后,用户可以根据自己的用热需求进行调节,既满足了用户用热多样化的要求,又促进了用户节能的积极性;同时温控阀的自动调节功能有利于合理利用太阳辐射热、设备发热、炊事热等自由热,减少过热开窗等热量浪费现象,最终达到既舒适又节能的目的。

使用散热器温控阀带来的一系列变化是:分散的众多用户成为主动的调节者,而供热公司和热源处则变为被动的适从者;用户不同的生活习惯及冷热喜好增加了负荷变化的不确定性;热网不能再使用传统的定流量质调节方式。热源及热网该如何调节来适应这种变化是我国当前计量供热系统调控技术中亟待解决的问题,也是计量供热系统能否真正发挥节能作用、能否给供热企业带来经济效益、能否让用户满意的关键。

因此,研究计量供热系统动态特性及控制策略具有十分重要的意义。鉴于国内外的研究背景不同,本文对国内外学者在这方面的探索和研究分别进行综述。

1 国内研究综述

1.1 研究背景

我国从 1993 年开始在北京、天津、长春、唐山、烟台等城市进行计量供热的试点工作,至今仍处于试点阶段^[1]。试点工程测试主要偏重于测量用户室内温度变化,检验温控阀的节能效果及国外仪表在我国的适用性,很少对小区变流量系统运行工况进行测试,并且只是对几栋楼进行系统改造和实验,没有对热网整体进行实验,因此无法体现按热量计量收费变流量系统调节、控制的特点以及整体的节能效益。由于缺乏供热管网采用变流量系统运行的经验,有的试点小区系统虽配置了变频泵却仍以定转速运行,温控阀没有感温元件,计量供热系统名不副实,难以发挥其应有的节能作用和优越性。

1.2 系统特性研究

国内学者对计量供热系统中的设备特性、室温变化规律、邻室传热等问题进行了一系列的基础研究^[2-5],但至今

①☆ 徐宝萍,女,1979 年 12 月生,在读博士研究生
100084 北京市清华大学建筑节能研究中心
(010) 62791542 62773885
E-mail: xbp03@mails.tsinghua.edu.cn
收稿日期:2006-08-15
修回日期:2007-07-09

还没有系统层次的特性研究,更多地只是关注用户侧的局部特性,将研究对象从系统中孤立地分离出来,没有考虑整体的关联性。例如文献[3]进行分户计量供热系统室温及热负荷动态模拟软件研究时,没有考虑散热器及温控阀的联合控制过程,在一定程度上掩盖了系统的真实变化过程,其次以集总热容的方法对围护结构的温度场进行简化,可能导致动态变化过程中墙体热惰性对室温的影响偏离实际情况。袁涛对计量供热单热源枝状网的变流量特性进行了初步研究^[6],模拟计算中忽略了一些因素,比如温控阀控制过程的时滞现象、热网部件的热惰性,而这些因素均会影响系统的控制特性,因此还需进一步完善和深入研究。

1.3 调控技术研究

目前国内在该领域的研究主要处在工程应用研究层次,包括系统改造与设计,系统运行方式、调控设备的选择等方面,多为定性或经验分析,仅给出一些政策方面的建议,以及少量的稳态计算分析^[7-12],而实际供热系统的运行调节与控制是动态变化过程,需要从热网动态控制特性出发进行量化研究。

文献[13]进行了动态控制理论初探,出发点是研究基于全局控制的考虑计量供热系统负荷动态变化的优化方法,但也仅给出了大致的轮廓,没有进行具体的计算。文献[14]提出了基于 BP 神经网络的供热计量系统热负荷短期预测方法,由于目前小区安装供热计量调控装置的系统很少,按热量收费且热用户热源可以调节的系统则几乎没有,因此文中所采用的训练样本来自于传统供热方式下的运行数据,无法反映用户调节产生的随机影响。

可见,系统特性基础研究的薄弱使得工程应用研究亦无法深入,同时由于实际问题的复杂性和研究本身的局限性,目前变流量调控技术仍无法在实际工程中得到应用,理论研究与实际应用相脱离,两者成为彼此牵制的不利因素。

1.4 其他领域相关研究

相比计量供热系统,传统的集中供热系统以及空调变流量系统在我国具有较为长久的应用历史,该领域的研究亦更为深入^[15-17],尽管研究对象不一样,但集中供热系统以及空调变流量系统的研究方法对计量供热系统动态特性及控制策略的研究还是具有一定的启示作用的。为利用集中供热系统的热惰性解决热电联产电力调峰的热电耦合问题,秦冰针对集中供热系统的结构特点提出了分层研究方法,建立了周期性条件下管道、散热器、房间、换热站的动态数学模型,采用谐波反应分析方法研究了系统的频率响应^[15]。

2 国外研究综述

2.1 研究背景

欧洲实行供暖热计量已有 70 余年的历史^[18]。丹麦、瑞典、芬兰等北欧国家的集中供热系统均采用动态变流量技术,并将控制技术与计算机技术相结合实现了热网的在

线监测与控制,其调控技术与设备均很先进。监控与数据采集(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统的广泛应用为控制策略的研究及其成果的应用创造了有利条件。

许多学者出于不同的研究目的,采用不同的方法进行了研究,并把研究成果运用在实际工程中,取得了一系列的成果。一个系统的控制策略研究过程包括负荷预测、仿真模拟、优化运行决策,三者相互联系,以负荷预测为依据给出相应控制策略,通过仿真模拟、对比、测试进而获取最优运行方法。

2.2 热负荷研究

Werner 对瑞典多个区域供热系统进行了测试,分析了影响热负荷的主要因素:室外温度、自然风以及太阳辐射。研究表明,热网总热负荷的 60% 可认为是受室外温度的影响,自然风的影响将使热负荷增加 1%~4%,太阳辐射得热可使热负荷减少 1%~5%,生活热水的耗热量会因工作日或周末而不同,平均生活热水负荷占总负荷的 30%,管网热损失占总负荷的 5%~8%^[19]。

由于供热系统的复杂性及建筑物和系统的热惰性,通过物理模型来建立预测供热负荷的数学模型较为困难,所以目前大多数的预测方法都建立在对历史数据的统计分析基础上。热负荷预测模型中可能包含的变量有室外温度、太阳辐射、风速、湿度、供回水温度、流量、时序信息等,常用的有广义传递函数模型、非线性传递函数模型、指数平滑模型及神经网络模型,研究发现其中的线性模型最适用于控制策略中的负荷研究^[20]。文献[20]基于 ARMAX 模型对负荷进行预测,该方法对短期负荷预测的误差较小,其不足之处在于预测误差随预测步数的增加而增加,无法反映实际供热系统的非线性及时变性,当系统结构发生变化时,原有负荷模型不再适用。

Nielsen 等人提出了用灰盒法进行区域供热系统耗热量的模拟研究,并在实际工程中实现了基于气象预报数据和 SCADA 系统的耗热量在线预测。首先根据物理意义建立初始模型结构,得到耗热量与室外温度、风速、太阳辐照量等变量的关系框架;接着利用实测数据通过局部回归和最小二乘准则逐步完成结构模型的系数拟合;最后引入高斯白噪声干扰项,对残余值序列进行 ARMA 模型拟合,并用相关性及似然比对模拟结果进行了分析^[21]。

灰盒法基于一定物理意义建立模型,可减小搜索空间以防止溢出,同时又保留了统计方法的优势。无论是黑盒法还是灰盒法,现有负荷研究方法均没有考虑室温变化情况,而依赖于实测得到的数据仅有耗热量,要全面反映负荷情况,还须考虑室温。其次,耗热量、气象等实测参数往往是逐时采集的,计算模型的时间步长几乎都以小时计,而温控阀等控制器的时间响应过程往往仅有几分钟,因此上述模型无法反应出控制过程中参数的高频响应。

2.3 动态仿真模型

动态仿真模拟是控制策略研究中极为重要的内容,它以控制策略为输入,对实际系统进行变工况模拟,从而对控制策略进行测试和优化。计量供热系统中,动态仿真模型包含气象模型、用户模型、热网模型及热源模型。其中,热源的仿真模拟往往与运行控制策略的研究相融合。

2.3.1 气象模型

天气条件是对热网的运行特性有着决定性影响的因素之一。Madsen 提出了基于时间序列的气象模型^[22]。Nielsen 讨论了该如何利用和改进气象局给出的天气预报数据^[23]。基于气象局预报数据的模型比时间序列模型准确性更高,但天气预报数据一般只能一天更新一次,而时间序列预测数据可随时更新。Arvastson 将两者结合应用,以瑞典气象水文局(SMHI)给出的预报数据为基础,当发生数据传送丢失或错误等情况时则采用时间序列模型给出预测^[24]。

2.3.2 用户模型

对用户行为随机性的考虑是用户模型中的难点。Nielsen 等人引入两个时变因子来分别表示随着作息时间、工作日/非工作日的变化用户随机行为对耗热量的影响,得到了变系数模型^[21]。但是模型的时变特性使问题变得十分复杂,因此选择冬季供暖期作为研究时间段并认为模型的时变特性可忽略。Arvastson 根据热平衡微分方程建立了单体建筑的状态空间模型,对用户换热站则采用经验公式进行描述,在此基础上考虑用户随机行为等不确定因素,用黑盒法完成随机部分模型的建立,整体构成为半物理模型,但在用户模型中没有考虑太阳辐射、风速等气象条件的影响^[24]。目前尚未有文献考虑温控阀的控制过程对用户动态特性的影响,这会在一定程度上掩盖系统的真实变化过程。

2.3.3 热网模型

热网模型用来描述水在流动中的时间延迟、管网热损失及管网蓄热量,建模方法主要有物理方法、集总参数法及黑盒法。

物理方法最为复杂,但应用较为灵活,具有明确的意义和因果关系,适合对事物本质及规律的探索研究。Bennonysson 等人使用了一种称为 node 的方法,在已知系统结构参数、热源供水温度变化过程和用户热负荷变化的条件下,模拟了各管道的流量和各节点的温度的动态变化过程^[25]。

集总参数法是一种简化的物理建模方法,通过减少热网部件(管段、节点、用户换热站等)数量来简化热网结构。Larsen 等人提出了简化实际热网拓扑结构的集总参数模型,并将其应用于一个具有 1 000 多个管段的实际热网,最终可将其简化至少于 10 个管段的等价热网,减少了热网仿真模拟的计算时间,但是等价热网的假设前提较为苛刻:流

量始终成比例变化,各个换热站的一次回水温度相等^[26]。

黑盒法最为简单,只考虑研究所关注的变量,但无法分析结果形成的原因,且不具有通用性,当系统结构、运行条件等发生变化时需要重新测量和辨识。Madsen 等人用统计传递函数描述热源供水温度与各用户供水温度的关系,用单输入、单输出的 ARX 结构表示,并以艾斯堡(Esbjerg)区域供热系统为例进行分析,指出供水温度的时间延迟会随流量的变化而变;根据实测逐时供水温度进行参数估计,并且可以逐时更新^[20]。

2.4 控制策略研究

北欧集中供热系统一般采用多热源、多泵联合供热,因此控制策略的研究集中在各热源的经济调度以及供水温度的优化选择上。由于问题的复杂性,大多文献仅是讨论问题中的一部分,其他部分不考虑或作为已知给定。

热源的经济调度包括各热源之间的负荷分配、启停控制以及对蓄热的考虑,常用的研究方法有线性规划法、动态规划法以及模糊逻辑控制法等。Arvastson 从经济学角度出发,以追求利润最大化为优化目标,采用模糊逻辑函数表示锅炉运行台数、启停顺序进行热源优化调度研究^[24]。该研究中供水温度由室外温度线性函数给定,流量由用户侧的热平衡求得。

出于减少管网热损失的目的,需要尽可能降低供水温度,但同时会引起泵耗的增加、管网蓄热能力减弱以及用户供热质量下降,优化运行策略的研究需考虑这几个因素的权衡关系。Madsen 等人针对 CHP 系统提出了供水温度最小化的控制理念,由几个子控制器完成:流量子控制器根据负荷预测,使得流量接近且小于最大流量限制,多个用户供水温度控制器,保证几个控制点的供水温度高于且接近最小供水温度限值,该限值由室外温度确定;限制热源供水温度的变化率;取各子控制器得到的最高供水温度值作为下一时刻热源出口供水温度的控制值^[20]。Liao 等人指出,当锅炉供水温度控制不合理时,即使室内散热器安装有温控阀,也不能很好地控制室温,甚至会引起过冷或过热。他们利用简化物理模型估算室内温度的波动情况,并应用于锅炉控制的推理中,建立了室温与锅炉出水温度的反馈闭合回路,并用标准能耗比及舒适度对控制效果进行评价^[27-28]。上述研究中均没有考虑泵耗、管网的蓄热,以及不同用户不同的温控阀调节行为的影响。

3 结语

调控技术是计量供热系统是否能成功运行的关键,对系统动态特性及控制策略进行研究有利于解决该问题。目前国内尚未有系统层次的控制特性研究,由于基础研究的相对薄弱,工程应用研究也难以深入,实际试点工程中几乎没有变流量调控技术的应用,理论研究与实际应用相脱离,两者成为彼此牵制的不利因素。

北欧等国在该领域的研究和技术较为成熟和系统化,研究思路值得借鉴。由于研究对象的特点不同,完全借鉴其研究方法有不足之处,需要立足我国集中供热系统的实际情况来探索与之相适应的研究方法。

3.1 北欧计算机监控系统完善,变流量技术成熟,更注重对实测数据的统计分析与应用;我国在该领域的研究尚处于探索阶段,因此首先更应注重物理过程的分析,虽然该方法较为复杂,但有利于认识问题的本质与规律。

3.2 由于国内的气候、建筑形式、生活习惯、经济水平等与国外存在差异,必然造成热网终端水流量变化规律与国外热网终端水流量变化规律的较大不同。比如,国外现有仿真模拟中对用户模型的描述十分简单,几乎不考虑建筑热动态特性,或仅为单体住宅模型。而我国的住宅模式不同于北欧,多为公寓式住宅,邻室传热、住户用热多样性等问题不可忽略。

3.3 尚未见文献考虑温控阀的控制过程,而这是引起计量供热系统不同于传统供热系统特性的“源”,是影响系统变流量特性的重要因素,因此有必要作深入研究。

3.4 北欧集中供热系统一般为多热源、多泵运行模式,换热站分散且规模小,因此在优化运行控制策略中更注重减少管网热损失,很少考虑泵耗;而在我国换热站集中且规模较大,管网热损失及泵耗这两个相互制约的因素该如何平衡还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王智超,狄洪发. 供暖计量收费的现状与问题[J]. 区域供热, 2002(3):1-5
- [2] 李建兴,涂光备. 散热器调节特性分析[J]. 暖通空调, 2001, 31(5):83-85
- [3] 王淞,刘威. 分户计量供热系统室温及热负荷动态模拟软件研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(2):108-111
- [4] 官燕玲,习红军. 住宅供暖分户控制室内热环境分析[J]. 暖通空调, 2005, 35(10):127-129
- [5] 王海峰,方修睦. 户间传热量的计算方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(11):1534-1536
- [6] 袁涛. 计量供热单热源枝状网运行调节策略[D]. 北京:清华大学, 2004
- [7] 狄洪发,江亿,秦绪忠,等. 热量计量收费后供热网的运行管理[J]. 暖通空调, 2000, 30(5):83-86
- [8] 狄洪发,王智超,王威. 供暖系统调节设备的合理选用[J]. 暖通空调, 2001, 31(4):50-53
- [9] 潘云刚,徐稳龙. 供暖分户计量及调节对设计热负荷的影响[J]. 暖通空调, 2000, 30(5):47-49
- [10] 邹瑜,徐伟,黄维. 适合热计量的室外供热系统控制方式与分析[J]. 暖通空调, 2000, 30(1):57-59
- [11] 李建兴,涂光备,王毅. 量调节公式在计量供热系统中的应用[J]. 暖通空调, 2001, 31(6):112-114
- [12] 文成功,吴家瑾. 热量计量收费供暖热网变流量压差控制点的位置分布[J]. 暖通空调, 2006, 36(2):112-114
- [13] 李德英,郝有志,郝斌. 计量供热系统动态控制理论初探[J]. 北京建筑工程学院学报, 2001, 17(4):10-15
- [14] 郝有志,李德英,郝斌. 基于神经网络的供热计量系统热负荷短期预测[J]. 暖通空调, 2003, 33(6):105-107
- [15] 秦冰. 集中供热系统热动态特性研究[D]. 北京:清华大学, 2004
- [16] 朱伟峰. 空调冷冻水系统特性研究[D]. 北京:清华大学, 2002
- [17] 秦绪忠. 区域供热供冷输配系统研究[D]. 北京:清华大学, 2000
- [18] 于瑾,方修睦. 欧洲采暖热计量评述[J]. 节能, 2005(5):54-56
- [19] Werner S. The heat load in district heating systems[D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 1984
- [20] Madsen H, Sejling K, Søgard H T. On flow and supply temperature control in district heating system[J]. Heat Recovery Systems & CHP, 1994, 14(6): 613-620
- [21] Nielsen H A, Madsen H. Modelling the heat consumption in district heating systems using a grey-box approach[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(1): 63-71
- [22] Madsen H. Statistically determined dynamical models for climate processes [D]. Lyngby: Technical University of Denmark, 1985
- [23] Nielsen T S. On-line prediction and control in non-linear stochastic systems [D]. Lyngby: Technical University of Denmark, 2001
- [24] Arvastson L. Stochastic modeling and operational optimization in district heating system[D]. Sweden: Lund University, 2001
- [25] Bennonysson A, Bøhm B, Ravn H F. Operational optimization in a district heating system [J]. Energy Conversion and Management, 1995, 36(5):297-314
- [26] Larsen H V, Palsson H, Bøhm B, et al. A simplified physical model for estimating the average air temperature in multi-zone heating system [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(8): 995-1019
- [27] Liao Z, Decter A L. On the control of heating systems in the UK[J]. Building and Environment, 2005, 40(3):343-351
- [28] Liao Z, Decter A L. A simplified physical model for estimating the average air temperature in multi-zone heating system[J]. Building and Environment, 2004, 39(9):1013-1022