

基于集中供暖系统数学模型的分户热计量方法^{*}

苏玉刚^{*,1} 叶本利¹ 阎琳² 王智慧¹

(1. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044; 2. 成都电子机械高等专科学校, 成都 611730)

摘要:对目前常用的热计量方法存在的问题进行分析,提出了一种基于集中供暖系统数学模型的分户热计量方法。以传热学和流体力学的相关理论为基础,建立了集中供暖系统的流量、压力和热损失数学模型,推导出了用户流量、供水端温度计算公式。该方法只需安装少量传感器就可实现分户热计量,降低了系统成本和维护费用,有利于热计量的推广使用。

关键词:供暖系统;热计量系统;数学模型;参数辨识;分户热计量

中图分类号:TQ316.241

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1006-6055.2013.04.012

Household Heat-metering Method Based on Mathematical Model of Central Heating System^{*}

SU Yugang^{*,1} YE Benli¹ LV Lin² WANG Zhihui¹

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. Chengdu Electromechanical College, Chengdu 611730)

Abstract: The problems of existing heat-metering methods are analyzed. A household heat-metering method is proposed based on mathematical model of the central heating system. Basing on the related theory of heat transfer and fluid mechanics, the mathematical model of flow, pressure and heat loss of the central heating system are constructed, with the calculative formulas of flow rate and inlet temperature of heat consumers derived. Therefore the household heat-metering can be realized with only one fewer sensors. The expenses and maintenance costs of system is reduced, helpful for promoting the implement of heat-metering.

Key words: heating system; heat-metering system; mathematical model; parameter identification; household heat-metering

1 引言

“热商品化”这个概念越来越多地为人们所接受,未来我国供暖事业也将朝着这个方向发展。2001年3月颁布的国标《采暖通风与空气调节设计规范》(GBJ11-87)第3.9.1条中规定:“新建住宅热水集中采暖系统,应设置分户热计量和室温控制装置。对建筑内的公共用房和公用空间,应单独设置采暖系统和热计量装置”,并将此条规定为强制性条文。计量方法一定要和温控配合使用,才能相辅相成,既能实现房间温度调节,节约能源,又能保证房间热舒适度^[1]。要实现这个目标,就必须要有成熟的、公平的和低成本的热计量技术。因此,如何对用户用热量进行计量,是目前的研究热点和难点。

目前常用的热计量方法是热量表法和热量分配表法。热量表价格贵,系统初始投资高;安装效率低,维护困难,需要进行周期性的检测和矫正,增加维护费用;对水质要求高,不然会影响计量精度^[2,3]。热量分配表法又分为蒸发式热分

配表和电子式热分配表,前者不利于节能;它们都只适合几种特殊的散热器类型,不具有通用性,管理成本高,安装质量和外界因素对计量精度影响大^[4],使其难以得到推广使用。针对上述热计量方法的不足之处,本文以传热学和流体力学的相关理论为基础,提出了一种基于集中供暖系统数学模型的分户热计量方法。

2 分户热计量系统及其原理

集中供暖系统在我国北方地区得到了广泛的应用,其结构如图1所示。它主要由热源(锅炉房)、一次管网、热力站(换热器)、二次管网和供暖单元(1个)组成。这里的供暖单元指一对立水管(一根供水立管和一根回水立管)所负责的供暖区域。本文以双管下供下回式单用户供暖单元为例,来阐述基于集中供暖系统数学模型的分户热计量方法的系统组成和原理。

2.1 分户热计量系统

对于图1所示的集中供暖系统,每个供暖单元的热计量

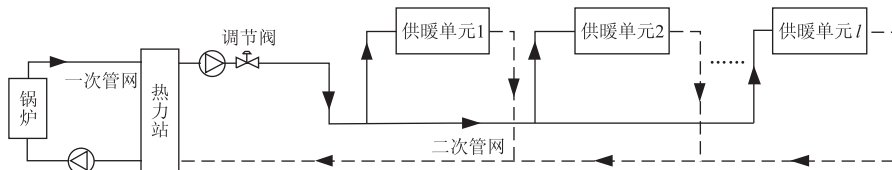


图1 集中供暖系统结构图

Figure 1 The sketch map of central heating system

^{*} 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20100191120024)资助

^{**} E-mail: yugangsu@gmail.com

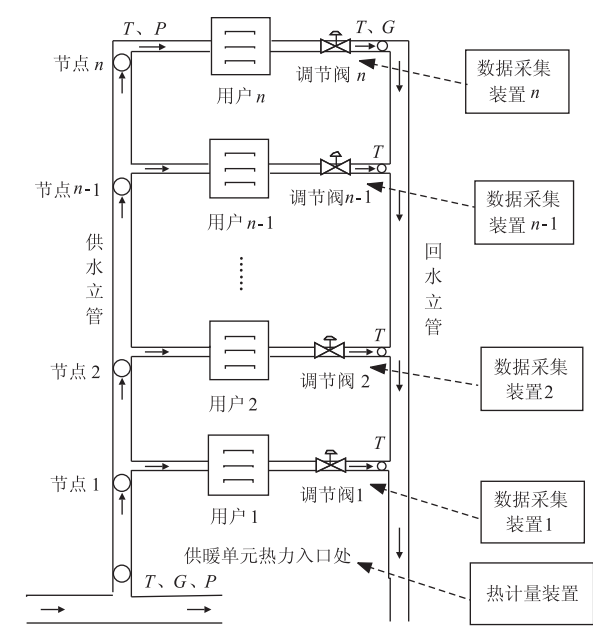


图2 分户热计量系统

Figure 2 Household heat-metering system

图2中,字符“T”、“P”和“G”分别表示温度、压力和流量传感器,符号“○”表示模型计算节点。节点旁边标有传感器字符的表示安装了相应的传感器,且该节点的值由传感器测得;节点旁边未标有传感器字符的表示该节点的值由模型计算得到。

传感器的主要作用是检测供暖单元的流量、压力和温度等数据,用这些数据来估算模型的相关参数,计算用户流量和供水端温度。数据采集装置采集传感器送来的数据和调节阀的开度,并以无线或者电力载波通信方式把数据传送给热计量装置。热计量装置安装在供暖单元热力入口处,对数据采集装置传来的数据进行分析 and 处理,就可得到各用户用热量。

该热计量系统不仅可以通过热计量装置就地显示各用户用热量,还可通过网络与小区集中供暖系统管理中心进行通信。既便于用户及时查询用热信息,又为小区能源管理和决策提供依据。

2.2 分户热计量原理

如图2所示,根据传热学理论和热平衡方程,可得每个采样周期Δt时间内用户用热量为[5]

$$W_i = c_i \beta_i G_i [T_{si} - T_{ri}] \Delta t \tag{1}$$

其中,下标*i*为第*i*个用户,*i* = 1,2,3,⋯,*n*; *W_i*为用户用热量(KJ); *c_i*为热水比热容,单位为(KJ/kg·℃); *β_i*为流量修正系数; *G_i*为用户流量(kg/s); *T_{si}*、*T_{ri}*为用户供、回水温度(℃); Δ*t*为系统采样周期(s)。用户全年用热量就等于用户用热期间所有采样周期Δ*t*时间内用热量的总和。

式(1)中, *T_{ri}* 由温度传感器测得; Δ*t* 由热计量装置设定;根据文献[6]可以推导出 *c_i* 为

$$c_i = 0.0002T_{si}^2 + 4.16T_{si} + 1.35 \tag{2}$$

因此, *W_i* 求解的关键之处在于 *β_i*、*G_i* 和 *T_{si}* 的计算。下面从传热学和流体力学的相关理论出发,对 *β_i*、*G_i* 和 *T_{si}* 进行求解。

3 用户流量 *G_i* 的计算

G_i 的模型为

$$G_i = f_G(P_{si}, G_{max,i}, K_i, \alpha_i) \tag{3}$$

其中, *P_{si}* 为用户供水端压力(Pa); *G_{max,i}* 为用户最大流量; *K_i* 为调节阀开度; *α_i* 为调节阀流量系数。模型(3)中的4个变量共同决定 *G_i* 的取值。

3.1 用户供水端压力 *P_{si}* 的计算

如图2所示,根据热水供暖系统管路水力计算相关理论,可得相邻用户供水端之间的压力损失模型为[7]

$$P_{s(i-1)} - P_{si} = A_i \left(\sum_{\chi=i}^n G_{\chi} \right)^2 + B_i \left(\sum_{\chi=i}^n G_{\chi} \right)^{1.5} + C_i \tag{4}$$

其中, $A_i = \frac{8}{\rho_s \pi^2 D_i^4} \left[\left(0.0096 + \sqrt{\frac{\Delta}{D_i}} \right) \frac{(L_i + H_i)}{D_i} + \left(\sum \zeta \right)_i \right]$, $B_i = \frac{6.7882 \sqrt{\mu} (L_i + H_i)}{\rho_s \pi^{1.5} D_i^{4.5}}$ 和 $C_i = \rho_s g H_i$ 为常数,只与供暖单元室外管网结构和管道参数有关。Δ为一种正比于管壁平均凹凸的粗糙性长度(cm),只与管道参数有关; *g* 为重力加速度(m/s²); *L_i* 为水平管道长度(m); *H_i* 为垂直管道长度(m); *D_i* 为管道直径(m); $\sum \zeta$ 为管段中总的局部阻力系数之和,只与管网结构和管道参数有关。*ρ_s* 表示温度为 *T_s* 时对应的水的密度,根据文献[6]可以推导出 *ρ_s* 为[6]

$$\rho_s = -0.0025 \times T_s^2 - 0.215 \times T_s + 1005.25 \tag{5}$$

其中, *T_s* 表示热力入口处供水端热水温度,其值由温度传感器测得。*μ* 表示热水动力粘度系数(10⁻³Pa·s),为[8]

$$\mu = 2.4852e^{-0.0302T_s} \tag{6}$$

3.2 用户最大流量 *G_{max,i}* 的计算

如图2所示,当用户调节阀全开时,用户流量达到最大,为 *G_{max,i}*。根据流体力学的相关理论可推导出 *G_{max,i}* 的模型为

$$D_i G_{max,i}^2 + E_i G_{max,i}^{1.5} = \lambda_1 P_{si} (1 - e^{\frac{\lambda_2}{P_{si}}}) \tag{7}$$

其中, *D_i* 和 *E_i* 均为常数,只与用户管网结构和管道参数有关。模型(7)中参数 *λ₁* 和 *λ₂* 的辨识将在第5节介绍。

3.3 调节阀流量系数 *α_i* 的计算

如图2所示,数据采集装置每隔一个采样周期Δ*t*采集一次调节阀的开度值 *K_i*。则 *α_i* 的模型为

$$\alpha_i = f_{\alpha}(K_i, R_i) \tag{8}$$

α_i 与调节阀的参数和类型有关,模型(8)可根据标准实验测得。例如,对于线性流量特性的调节阀而言,有[9]

$$\alpha_i = \alpha_0 + \frac{R_i - 1}{R_i} K_i \tag{9}$$

其中, $R_i = \frac{G_{max,i}}{G_{min}}$ 为调节阀可调比;其值随着 *G_{max,i}* 的变化而变化, *G_{max,i}* 可根据模型(7)求得; *G_{min}* 为常数,其值可根据调节阀相关参数求得; *α₀* 为常数,它等于 *K_i* = 0 时对应的调节阀流量系数。

根据式(7)和(9)可求得 *G_i* 为

$$G_i = \alpha_i G_{max,i} \tag{10}$$

4 流量修正系数 *β_i* 的计算

根据式(10)可得热力入口处的总流量为

$$G_c = \sum_{i=1}^n G_i \quad (11)$$

通常情况下,热力入口处总流量的计算值 G_c 和测量值 G_m 存在一个偏差 ΔG 。当这个偏差不满足允许值 δ_c 时,要对 G_i 进行修正。用户流量修正系数为

$$\beta_i = \frac{G_m - \delta_c}{G_c} \quad (12)$$

其中, δ_c 为

$$\delta_c = \frac{\rho_r - \rho_s}{\rho_s} G_c \quad (13)$$

ρ_r 表示温度为 T_r 时对应的水的密度, ρ_r 可根据式(5)求得。其中, T_r 表示热力入口处回水端热水温度,为^[10]

$$T_r = \sum_{i=1}^n \frac{G_i T_{ri}}{G_c} \quad (14)$$

5 用户供水端温度 T_{si} 的计算

根据式(1)可得相邻用户供水端之间产生的管网热损失为

$$\Delta Q_i = c_{(i-1)} \sum_{\chi=i}^n (\beta_\chi G_\chi) (T_{s(i-1)} - T_{si}) \quad (15)$$

从传热学理论和热量平衡出发,用等效热阻抗法来分析管网热损失,可得到单位长度(即管道长度为 1m 时)下管道的热损失模型为^[11]

$$\Delta Q_0 = \frac{\gamma_1 \left(\sum_{\chi=i}^n \beta_\chi G_\chi \right)^e}{1 + \gamma_2 \left(\sum_{\chi=i}^n \beta_\chi G_\chi \right)^e} (T_{s(i-1)} - T_a) \quad (16)$$

其中,指数 e 工程上一般取 0.8; T_a 为管外空气温度,其值由大气温度传感器测得。 γ_1 和 γ_2 为模型参数,其辨识将在第 5 节介绍。由式(15)和(16)可得, T_{si} 为

$$T_{si} = T_{s(i-1)} - \frac{\Delta Q_0 (L_i + H_i)}{c_{(i-1)} \sum_{\chi=i}^n (\beta_\chi G_\chi)} \quad (17)$$

其中, $T_{s0} = T_s$ 为已知, $c_{(i-1)}$ 可根据式(2)计算得到。根据式(17)逐步向上求解,就可计算出用户供水端温度 T_{si} 。

6 模型参数的辨识

位于建筑物不同位置的用户,取得相同热舒适度所消耗的热量是不一样的。位于屋顶的用户消耗热量最多,位于角落的用户其次,位于中间的用户消耗的热量最少^[12]。因此,不同位置的用户会选择热容量不同的散热器,室内管网布置可能有所差异。但是,前面得到的所有模型都是通用的,唯一的不同之处就在于模型参数不一样。

模型参数 λ_1 和 λ_2 的辨识过程:

1) 把最后一个用户调节阀全开;

2) 调节用户供水端压力,一共记录 y 组用户流量和供水端压力数据;

3) 把得到的 y 组数据代入式(7),得到关于模型参数 λ_1 和 λ_2 的 y 个方程组;

4) 用 Levenberg-Marquardt 方法对步骤 3 中的方程组进行求解,就可解得模型参数 λ_1 和 λ_2 ^[13]。

模型参数 γ_1 和 γ_2 的辨识过程:

1) 只打开最后一个用户调节阀,其于用户调节阀都关闭;

2) 改变流量和温度,一共记录 y 组流量、热水温度和空气温度数据;

3) 根据式(15)计算出 y 个 ΔQ_0 值;

4) 把步骤 2、3 得到的 y 组数据代入式(16),得到关于模型参数 γ_1 和 γ_2 的 y 个方程组;

5) 用 Levenberg-Marquardt 方法对步骤 3 中的方程组进行求解,就可解得模型参数 λ_1 和 λ_2 ^[13]。

7 结论

本文以传热学和流体力学的相关理论为基础,以下供、下回式单用户供暖单元为研究对象,得到了用户流量和供水端温度的求解模型,对模型相关参数提出了明确的辨识方法。热计量装置计算出每个用户的用热量,实现了集中供暖系统的分户热计量。该方法具有以下特点:不需要用户安装热量表或者是热量分配表,不仅降低系统初始成本,还避免了维修、更换大量热计量表和流量计等设备带来的麻烦。在实现分户热计量的同时,还为热负荷的自动调节,实现节能减排,提高用户供热舒适性打下了基础。

由于篇幅限制,本文只对由下供、下回式单用户供暖单元组成的集中供暖系统进行了分析,实现了分户热计量。实际上,这种热计量方法的原理和系统也可以实现其它形式的集中供暖系统分户热计量。

参考文献

- [1] 孙颖,李宜山. 浅析分户热计量方法的选择[J]. 黑龙江纺织, 2010, (3): 32-33.
- [2] LIU L B, FU L, JIANG Y, et al. Major issues and solutions in the heat-metering reform in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 673-680.
- [3] 王红杰. 浅析北方采暖区热量表使用的现状[J]. 中国外资, 2010, (8): 205.
- [4] 李世民. 串联式热量表: 中国, 200520079973. 5 [P]. 2006-04-12. <http://www1.drugfuture.com/cnpat/search.aspx>.
- [5] 官克勤, 李浩洁, 张大英, 等. 供热系统散热器的热特性敏感性分析[J]. 节能技术, 2009, 27(6): 513-514.
- [6] CJ-128 2007, 中华人民共和国建设部《热量表》标准[S]. 中华人民共和国建设部, 2007.
- [7] 闫秋会, 赵建会, 张联英. 供热工程[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 59-62.
- [8] 贾月梅. 流体力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 12-13.
- [9] 程怀济. 调节阀流量系数与可调比关系的研究[J]. 自动化仪表, 2000, 21(1): 11-14.
- [10] XU B P, FU L, DI H F. Dynamic simulation of space heating systems with radiators controlled by TRVs in buildings[J]. ENERGY AND BUILDINGS, 2008, 40(9): 1755-1764.
- [11] WANG Y W, CAI W J, SOH Y C, et al. A simplified modeling of cooling coils for control and optimization of HVAC systems[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45: 2915-2930.
- [12] XU B P, HUANG A, FU L, et al. Simulation and analysis on control effectiveness of TRVs in district heating systems[J]. Energy and Buildings, 2011, 43: 169-174.
- [13] JIN G Y, CAI W J, LU L, et al. A simplified modeling of mechanical cooling tower for control and optimization of HVAC systems[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48: 355-365.