对“通断时间面积法”计量原理及实践中几个问题的研讨*

石家庄市自动化研究所 张全悦☆ 邵立平 郝 培

摘要 分析了通断时间面积法计量原理，指出该方法看似简单、实际十分复杂，难以经过修正达到计量基本公平的目的，因此建议在认真研究并得出确切结论后再大面积推广。给出通断时间面积法新的计量表达式。

关键词 热计量 通断时间面积法 值班流量 户间传热 供暖

Measuring principle of on-off time and area method and some issues in practice

By Zhang Quanyue★, Shao Liping and Hao Pei

Abstract Analyses the measuring principle of this method of heat metering. Points out that the method seems simple and is very complex in fact. It is difficult to achieve basically fair metering by means of revising. Suggests that the method may be put into wider application after serious research is made and definite results are obtained. Gives the new metering expressions for the method.

Keywords heat metering, on-off time and area method, standby flow rate, heat transfer between households, heating

★ Shijiazhuang Institute of Automation, Shijiazhuang, China

①

1 通断时间面积法的来历

对于通断时间面积法，文献[1]是这样描述的：“在美国还广泛采用一种计时方式的计量。即通过计量温控设备的开启时间及室内温度(也可设定)，并依据散热器尺寸、类型等修正来确定各户用热量的分配。该方式价格低，易于安装，但由于未考虑经过散热器的平均水温影响，故准确度较差，目前欧洲极少使用”。

关于通断控制，文献[2]指出：“北美方案(在美国、加拿大广泛应用的设计方案)采用温控器(通常设在客厅内)和装在各套公寓单元回水出口管上的电磁阀来单独控制室温，保证能够符合本单元用户的需要，并且不会影响其他用户，也不会出现过热现象，既舒适又节能”。

根据文献[1]，可以把通断时间面积法归纳为三个关键词：室温、开启时间、散热器面积。

在美国，采用通断时间面积法热计量时，是把户内所有散热器看作一组大散热器，因此，F 代表的是各户所有房间散热器面积的总和。

我国学者对通断时间面积法的改进，主要是将各户散热器面积 F 用各户建筑面积 A 替代，这种替代既简化了计量及收费的过程，又便于理解，是值得肯定的。

通断时间面积法有两个优点，一是将温控器与热计量相结合；二是设备简单。但热计量准确度较差，因为各户之间和各楼栋之间的水力状况往往是失调的。水力失调将导致用户计量出现流量小者受热少、室温低，阀门开启时间长，从而多计量、多缴费的“反计”情况。

2 通断式供暖控制时，散热设备的散热、蓄热和蓄热转移

通断式供暖的特点是，供暖热水以“忽而全流

* 石家庄市供热计量工程技术研究中心建设项目(编号：12813047A)，换热站节能控制系统研究开发项目(编号：12113293A)

①☆ 张全悦，男，1952 年 2 月生，大学，高级工程师
050026 石家庄市南二环东路 88 号
(0) 15081199561
E-mail：zhangquanyue168@163.com
收稿日期：2012-09-18
修回日期：2012-11-28

量、忽而零流量"的交替方式流入供暖住户的散热器(或地面辐射供暖系统)中。

为了说明通断式供暖过程中各个阶段的耗热情况,给出图 1。图 1 是参考文献[3]绘制的。

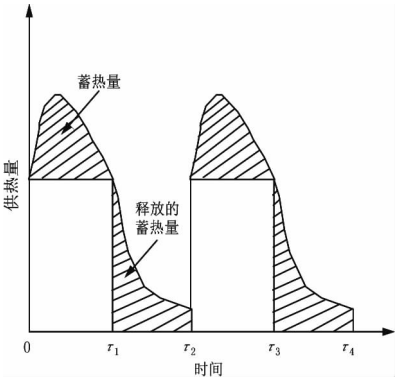

图 1　通断式供暖热耗情况示意图

在图 1 中,$0\sim\tau_1$,$\tau_2\sim\tau_3$ 为供暖阶段;$\tau_1\sim\tau_2$,$\tau_3\sim\tau_4$ 为停暖阶段,这个阶段蓄存在建筑物及家具中的热量释放到房间里。蓄热量与蓄热体的性质、质量等有关,也与室内外温差有关。在 $\tau_1\sim\tau_2$,$\tau_3\sim\tau_4$ 停暖阶段(阀门关断后,还有一部分热量留存在散热器(或地面辐射供暖系统加热管)的热水中,将继续向户内散热,这部分热量称为"容水散热量"[4]。

3　值班供暖、值班流量和具有值班流量的通断控制

在公共建筑或工业建筑中有值班供暖的规定,值班供暖温度为 5 ℃。

实行热计量收费后,居住建筑中有些住户白天上班,为了节省热费就停止供暖。白天关断供暖的住户室温必然降低,但存在与供暖邻户的户间传热。采用通断时间面积法计量热,邻户将多计量、多缴费,这是不公平的。所以,建议居住建筑供暖应保证最低温度供暖,本文称之为值班供暖。

对应于值班供暖,值班流量是指,即使阀门设定为关闭状态,各户仍保持一个最小流量,这个最小流量一般确定为各户总流量的 10%(此流量下的供热量可达额定供热量的 30%~50%或更多)。目前,可实现值班流量的阀门已在多个地区应用多年。

有了值班流量,各户间的室温相差不会太大,户间传热现象将大为减少,供暖系统将更稳定,供暖设备容量的利用率将会提高,阀门的动作次数将减少,从而提高阀门的使用寿命和降低阀门电耗。

需要说明的是,各户总耗热量不因值班流量而增加,它只与设定室温相关。

4　对通断时间面积法计量原理的研讨

笔者认为,国内对通断时间面积法计量原理的理论分析最深、理解最透的莫过于文献[5],其他文献则多以实测(或实验)数据为基础,阐明通断时间面积法的可行性。

但笔者发现,文献[5]虽然进行了许多数学推导,并得出了"通断时间面积法计量原理正确"的结论,但是,存在一个失误,即把前人基于连续供暖状况下得出的结论用于通断时间面积法这种非连续供暖状况了。

4.1　文献[5]对通断时间面积法计量原理分析的介绍

为了阅读方便,将文献[5]中使用的部分字母用常用的字母替代,部分名词和数学表达式也作了改动,但均不失原意。

4.1.1　热用户的供暖设计热负荷

$$Q_1'=K_1'F_1'(t_n-t_w) \tag{1}$$

式中　Q_1'为热用户 1 的供暖设计热负荷,W;K_1'为热用户 1 的围护结构平均传热系数,W/(m² · K);F_1'为热用户 1 的围护结构传热面积,m²;t_n 为室内设计温度,℃;t_w 为室外供暖计算温度,℃。

4.1.2　热用户的散热器散热量

$$Q_1=K_1F_1(t_{pj}-t_n) \tag{2}$$

式中　Q_1 为热用户 1 的散热器散热量,W;K_1 为热用户 1 的散热器传热系数,W/(m² · K);F_1 为热用户 1 的散热器面积,m²;t_{pj}为散热器热媒平均温度,℃。

4.1.3　通断阀门开启和关闭时散热器的散热量

1) 通断阀门开启时间段散热器的散热量 Q_k

$$Q_k=\int_0^{\Delta\tau_1'}Q_1\,d\tau=\int_0^{\Delta\tau_1'}Q_1'\,d\tau+mc_{p1}\Delta t \tag{3}$$

式中　$\Delta\tau_1'$为阀门开启时间;m 为热用户室内蓄热体的质量;c_{p1}为热用户室内蓄热体的平均比热容;Δt 为热用户室内蓄热体的温升。

将式(3)中 Q_1,Q_1'展开,得

$$\int_0^{\Delta\tau_1'}K_1F_1(t_{pj}-t_n)\,d\tau=\int_0^{\Delta\tau_1'}K_1'F_1'(t_n-t_w)\,d\tau+mc_{p1}\Delta t \tag{4}$$

2）通断阀门关闭时间段散热器的散热量 Q_g

$$Q_g = 0 = \int_0^{\Delta\tau_1''} K_1' F_1' (t_n - t_w) d\tau - mc_{p1}\Delta t \quad (5)$$

$$\int_0^{\Delta\tau_1'} K_1 F_1 (t_{pj} - t_n) d\tau = \int_0^{\Delta\tau_1'} K_1' F_1' (t_n - t_w) d\tau + \int_0^{\Delta\tau_1''} K_1' F_1' (t_n - t_w) d\tau$$

简化后得

$$\int_0^{\Delta\tau_1'} K_1 F_1 (t_{pj} - t_n) d\tau = \int_0^{\Delta\tau_1} K_1' F_1' (t_n - t_w) d\tau \quad (6)$$

式中 $\Delta\tau_1$ 为总供暖时间。

4.1.4 文献[5]的后续论证

文献[5]由推导得到式(6)，得出对通断时间面积法计量原理的结论。

文献[5]的假设条件是：在计算周期 $\Delta\tau_1$ 内，室内供暖温度波动对散热器的影响可忽略，室内、外温度可取积分平均温度，且热媒平均温度 t_{pj} 恒定。故式(6)中的积分区间可用 $\Delta\tau_1'$ 和 $\Delta\tau_1$ 表示，进而得出：

$$K_1 F_1 (t_{pj} - t_n)\Delta\tau_1' = K_1' F_1' (t_n - t_w)\Delta\tau_1 \quad (7)$$

所以有：

$$\frac{\Delta\tau_1'}{\Delta\tau_1} = \frac{K_1' F_1' (t_n - t_w)}{K_1 F_1 (t_{pj} - t_n)} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\tau_1'}{\Delta\tau_1} = \frac{\Delta\tau_2'}{\Delta\tau_2} \quad (9)$$

文献[5]由此认为“通断控制阀的开启时间和累计时间之比，代表了热用户的采暖需求和采暖状态。……这是供热通断调节模式下，可以按照通断控制阀的开启时间（比）进行热（费）分摊的理论依据”。

4.2 对文献[5]关于通断时间面积法计量原理分析的讨论

笔者认为，文献[5]对通断时间面积法计量原理的分析存在一些问题，主要在于式(1)，(2)与式(6)的矛盾上，其根源在于对式(4)的理解出了问题。

在供热工程中，有以下热平衡方程：

$$Q_1 = qV(t_n - t_w) \quad (10)$$

$$Q_2 = K_1 F_1 \left(\frac{t_g + t_h}{2} - t_n\right) = K_1 F_1 (t_{pj} - t_n) \quad (11)$$

$$Q_3 = 1.163G(t_g - t_h) \quad (12)$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (13)$$

式(10)～(13)中 q 为建筑物供暖体积热指标；V 为建筑物体积；G 为散热器热水流量；t_g 为供水温度；t_h 为回水温度。

式中 $\Delta\tau_1''$ 为阀门关断时间。

3）文献[5]给出的通断阀门开启时段的散热量 Q_k

文献[5]认为可由式(4)，(5)导出：

4.2.1 对 Q_1，Q_2，Q_3 的理解

Q_1 为“供暖建筑的热负荷”，在围护结构传热系数和建筑体积（或面积）一定的情况下，Q_1 只与室内外温差成正比。Q_2 为散热器向供暖住户连续供暖时，计算散热器散热量的半试验、半理论准则方程式。在地面辐射供暖系统中，也存在类似方程式。Q_1，Q_2 为前人在连续供暖状况下得出的结论。Q_3 为供暖系统向供暖住户“连续供暖或非连续供暖”时的供热量，该供热量和“供热流量与供回水温差之积”对供热时间的积分成正比。这里需要注意的是，只有当“供热流量、供回水温差”均恒定时，该供热量才可以由“供热流量与供回水温差之积”与时间的乘积得到，否则必须进行积分运算。

需要区别的是，Q_2 指的是散热器在连续供暖状态下的散热量，而 Q_3 既可以是连续供暖状态，也可以是非连续供暖状态下的供热量。这点在以往的教科书中没有特殊说明，原因是以往的供暖设计是以连续供暖为前提的。

4.2.2 对式(4)的讨论

式(4)其实是个不等式，等式左边用的是散热器的散热量实验公式 Q_2。在阀门时通时断状态下，Q_2 计算式中回水温度 t_h 是变化的，因为散热器是忽冷忽热的，导致 t_h 忽高忽低，而且 t_h 的平均值将比连续供暖时小，这样，t_{pj} 只会降低，故用 Q_2 计算不妥。

采用 Q_3 才能反映“在阀门开启时段内，散热器比连续供暖时，散出了更多的热量”这个事实。即：

$$Q_k = \int_0^{\Delta\tau_1'} Q_3 d\tau = \int_0^{\Delta\tau_1'} Q_1' d\tau + mc_{p1}\Delta t \quad (14)$$

将 Q_3 和 Q_1' 展开，得

$$\int_0^{\Delta\tau_1'} G(t_g - t_h) d\tau = \int_0^{\Delta\tau_1'} K_1' F_1' (t_n - t_w) d\tau + mc_{p1}\Delta t \quad (15)$$

由式(5)和式(15)，可以得到下式：

$$\int_0^{\Delta\tau_1'} G(t_g - t_h)\mathrm{d}\tau = \int_0^{\Delta\tau_1} K_1' F_1'(t_n - t_w)\mathrm{d}\tau \quad (16)$$

笔者认为 Q_3 能表达通断控制时供热系统提供给用户的真实热量。

由式(16)可以看出，阀门在开启后的 $\Delta\tau_1'$ 时段内，用户消耗的热量与总供暖 $\Delta\tau_1$ 时段内用户的热负荷是相等的。由式(16)还可以看出，由于式中 t_h 为变量，故不能将积分形式简化为时间与函数的乘积形式。

4.2.3　对文献[5]后续论证的讨论

文献[5]中由于式(7)有问题，故得到的式(8)和式(9)不能成立。

可以说，文献[5]不能从理论上证明通断时间面积法的正确性。

4.3　小结

通断时间面积法看似简单，实际非常复杂，目前尚未看到有说服力的理论和实践支撑。因此，通断时间面积法暂不宜大面积推广，但应积极进行研究。

5　对通断时间面积法实际应用中几个问题的探讨

5.1　各户间水力失调问题

对于通断时间面积法，若各户水力失调，将造成计量不准，难以通过“修正”方法解决。

文献[5]的作者认为，水力失调可以通过实验得到半经验关联式，然后用关联式去修正，但没有介绍修正方法，故笔者对这种修正无法作出正确与否的判断。

5.2　各户室温设定范围太大和户间传热问题

JG/T 379—2012《通断时间面积法热计量装置技术条件》规定，温度设定范围宜为 10～25 ℃。这么大的温度范围，将导致户间传热现象和“反计”现象加剧。

笔者认为，各户室温设定范围应由行为节能的预期节能率来限定，笔者预测，行为节能的预期节能率不会超过 20%。按室温每降低 1 K 节能 5% 计算，建议应规定各户室温设定范围为 16～20 ℃ 或 16～22 ℃。

5.3　通断阀门常通、常断问题

实际供暖时，常有用户要求较高的室温，但由于种种原因，即使用户把室温设定得再高，也达不到要求。在这种情况下，各户阀门开启时间相同，通断时间面积法热计量相当于按面积收费，这样做不如室温面积法更公平。

还有一种情况，每天早晨上班前，用户将室温设定在 12 ℃；晚上下班后将室温设定为 20 ℃。这些住户白天室温设定值偏低，阀门将在白天关断，热量计量值为零，但室温却不一定低，且各户室温不同。在这种情况下，这些用户阀门开启时间均为零，通断时间面积法因只收基本费，热计量还不如室温面积法更公平。

以上情况实际上使通断时间面积法变成了“常通或常断时间面积法”了。

5.4　通断时间面积法以楼栋热计量为基础存在的问题

通断时间面积法以楼栋热计量为基础的问题，目前有两种看法。多数人持肯定态度，认为《供热计量技术规程》等就是这样规定的，且对供热系统的运行和管理有益处。

笔者对楼栋热计量持不同意见，且提出了一种采用热负荷式楼栋热量表、无需增加硬件设备的楼栋热计量方法。

5.5　小结

1）通断时间面积法实际应用中问题较多，建议在认真研讨、并得出确切结论后再行大面积实施。

2）通断时间面积法是美国人首先提出的，但并未在美国广泛推广。在我国推广这种计量方式需要谨慎。

6　对通断时间面积法的改进建议

JG/T 379—2012《通断时间面积法热计量装置技术条件》规定：“对于不符合本标准第 4.2.1 条要求的供暖系统，宜对式(4.2－1)计算结果进行修正。修正时应采用供回水温度或室温等与供暖状态相关的参数进行修正，修正算法应明确、可查”。笔者赞成“修正算法应明确、可查”的规定。

各户供回水温度，尤其是回水温度的变化规律非常复杂，用它去修正计量值，容易事与愿违。

6.1　通断时间面积法计量表达式改进建议之一

引入值班流量，在计量表达式中引入各户室温，可称其为“室温时间面积法”。计量表达式如下：

$$Q=\frac{(\tau_k+0.5\tau_g)A}{\tau}\int_0^{\tau}t_n d\tau=\frac{0.5(\tau_k+\tau)A}{\tau}\int_0^{\tau}t_n d\tau \quad (17)$$

式中 τ_k 为阀门开启时间，h；τ_g 为阀门关断时间，h；$(\tau_k+0.5\tau_g)$ 为等效阀门开启时间，h；τ 为总供暖时间，h。

几点说明：

1）在阀门关断时段内，由于存在值班流量，也消耗一定热量，为了简便，规定为阀门开启时单位时间供热量的 50%。

2）实际上式中 A 是不参与计量的，只是在热费分摊时参与计算。

3）在实际的计量仪表中，每 10 min 测量一次 t_n 并暂存，每 60 min 计算一次 t_n 的平均值，与上次的平均值累加后存贮并显示，且称其为累积室温，单位为℃·h。供暖期结束后，将各户累积室温除以 τ，得到各户供暖期平均室温。

同时，每 10 min 测量一次 τ_k 和 τ_g，将其按 $(\tau_k+0.5\tau_g)$ 暂存，每 60 min 计算一次 $(\tau_k+0.5\tau_g)$ 的平均值，与上次的平均值累加后存贮并显示，且称其为等效阀门开启时间。

供暖期结束后，将各户供暖期平均室温、等效阀门开启时间、建筑面积相乘，作为该户热计量值，进行相应热费计算。

4）测量室温 t_n 的传感器（称之为内墙温度传感器）宜装在客厅的内墙里或紧贴墙面，这样可防止恶意开窗；另外需再设置一个室内空气温度传感器，它只测量和显示实时温度，不参与计量。

5）若内墙温度传感器无法装在客厅的内墙里或紧贴墙面，可安装于各户外门内侧的温控器中。此时，内墙温度传感器宜安装于热容量较大的材料中，而室内空气温度传感器则宜安装在温控器的通风孔处。

6.2 通断时间面积法计量表达式改进建议之二

引入值班流量，在计量表达式中引入各户热媒平均温度，称其为“水温时间面积法”。计量表达式如下：

$$Q=\frac{(\tau_k+0.5\tau_g)A}{\tau}\int_0^{\tau}(t_{pj}-t_n)d\tau=\frac{0.5(\tau_k+\tau)A}{\tau}\int_0^{\tau}(t_{pj}-t_n)d\tau \quad (18)$$

几点说明：

1），2）同上节。

3）在实际的计量仪表中，每 10 min 测量一次 $(t_{pj}-t_n)$ 并暂存，每 60 min 计算一次 $(t_{pj}-t_n)$ 的平均值，与上次的平均值累加后存贮并显示，且称其为累积水温。供暖期结束后，将各户累积水温除以 τ，得到各户供暖期平均水温。

4）供暖期结束后，将各户供暖期平均水温、等效阀门开启时间、建筑面积相乘，作为该户热计量值，进行相应热费计算。

室温 t_n 取计算值而不取实际值，是为了弱化户间传热现象带来的计量不公平问题。

6.3 小结

1）对通断时间面积法来说，改进它比修正它容易得多，因为该方法很复杂。

2）笔者提出的对通断时间面积法的两种改进建议，即两个计量表达式，是基于对通断时间面积法的本来思想、存在问题、改进方向的理解，以及对供暖基本原理的理解，综合考虑各方面因素后，通过“模型假设”和“模型构成”得到的。

建模的后续步骤是，模型求解、模型分析、模型检验及模型应用等。所以，两种改进建议仅仅是初步的，后面还有大量的工作要做。

7 结语

通断时间面积法在计量原理上缺乏有说服力的理论依据；实践中问题较多，且难以从根本上解决。笔者提出对通断时间面积法计量原理及实践的理解，愿与业内人士进行交流，以促进该方法的健康发展。

参考文献：

[1] 董重成，赵立华. 关于按户计量供暖系统的探讨[M]//暖通空调新技术. 北京：中国建筑工业出版社，1999：59-62

[2] 吴展豪，朱炳藩. 北美流行的散热器及供暖设计方案[J]. 暖通空调，1998，28(4)：30-32

[3] [美]罗杰·海因斯，刘易斯·维尔森. 供热通风与空气调节系统设计手册[M]. 陈超，李俊梅，译. 北京：机械工业出版社，2008

[4] 孙淑慧. 通断式计量供热系统动态仿真模拟[D]. 天津：河北工业大学，2010

[5] 齐承英，苗庆伟，杨华. 基于通/断式供热控制模式的热分摊技术[J]. 暖通空调，2009，39(5)：36-42

[6] [德]海因茨·巴赫. 室内采暖工程[M]. 倪进昌，译. 北京：中国建筑工业出版社，2010

[7] 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