

几种基于楼栋总供热量的热计量方法测量不确定度评价

大连市建筑设计院 孙 杰[☆]

中冶南方工程技术有限公司 单 滨

哈尔滨工业大学 方修睦[△] 姜永成

哈尔滨市计量院 朱继光

摘要 基于楼栋总供热量的热计量方法的热量分摊模型涉及多个测量参数,直接测量参数的误差直接影响分摊热量的不确定度。利用不确定度相关理论,分析了几种基于楼栋总供热量的热计量方法的不确定度分量的变化范围,对其不确定度进行了评价,并对如何减小热计量方法的测量不确定度提出了建议。

关键词 供热计量 总供热量 分摊模型 不确定度 评价

Uncertainty evaluation on some heat metering methods based on total heating load of whole building

By Sun Jie[★], Shan Bin, Fang Xiumu, Jiang Yongcheng and Zhu Jiguang

Abstract For the heat metering methods based on total heating load of the whole building, heat allocation models involve many measurement parameters. The error of the direct measurement parameter directly influences the uncertainty of the heat allocation. Analyses the variation range of the uncertainty components of some heat metering methods based on total heating load of the whole building, and evaluates the uncertainty. Besides, proposes a way to reduce the measurement uncertainty of heat metering methods.

Keywords heat metering, total heating load, allocation model, uncertainty, evaluation

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

热计量系统不确定度来源主要有 2 个方面:一是计量原理引入的不确定度,它反映了计量方法的合理性;二是测量系统引入的不确定度,它反映了直接测量量对分摊结果的影响。由于任何热计量方法都涉及测量,而任何测量都存在误差,因此误差是任何热计量方法都无法逃避的问题。一种热计量方法的好坏,不仅要看其计量方法如何合理、原理如何正确,还要看它的测量误差有多大。分摊模型中物理量越多,其测量不确定度可能越大。本文利用不确定度相关理论,对几种基于楼栋总供热量的热计量方法的热计量模型的不确定度进行分析评价,以期对热计量方法的实际应用有所帮助。

1 温度面积法不确定度评价

1.1 数学模型

某分摊周期下的热量分摊模型可以表示为

$$\frac{Q_i}{Q} = \frac{(t_{in} - t_w)F_i}{\sum_{i=1}^m (t_{in} - t_w)F_i} \quad (1)$$

式中 Q_i 为某分摊周期下用户 i 分摊的热量, $J; Q$ 为

①☆ 孙杰,男,1987 年 1 月生,硕士研究生,助理工程师

△ 方修睦(通信作者)

150090 哈尔滨市南岗区海河路 202 号 2644 信箱

(O) 13845113053

E-mail: fxm490@163.com

收稿日期:2013-11-05

修回日期:2013-12-26

某分摊周期全楼的总供热量, J ; t_{in} 为某分摊周期下用户 i 的室内温度, $^{\circ}\text{C}$; t_w 为某分摊周期下的室外温度, $^{\circ}\text{C}$; F_i 为用户 i 的建筑面积, m^2 ; m 为用户数。

式(1)可变形为

$$\frac{Q_i}{Q} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \quad (2)$$

$$L_1 = (t_{in} - t_w)F_i \quad (3)$$

$$L_2 = \sum_{j=1, j \neq i}^m (t_{jn} - t_w)F_j \quad (4)$$

式中 t_{jn} 为用户 j 的室内温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

分摊模型的不确定度由 L_1, L_2 两项的不确定度合成得到。

1.2 L_1 项的不确定度

1.2.1 L_1 项不确定度分量

1) 任意分摊周期下室内温度的测量不确定度 $u(t_{in})$

任意分摊周期下用户 i 室内温度的测量不确定度由两部分组成: 室温传感器示值误差导致的不确定度和室温传感器分辨力导致的不确定度。

① 室温传感器示值误差导致的不确定度 $u_1(t_{in})$

若室温传感器的最大允许误差为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 以均匀分布估计, 则

$$u_1(t_{in}) = \frac{0.5^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.29^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

② 室温传感器分辨力导致的不确定度 $u_2(t_{in})$

若室温传感器的分辨力为 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$, 以均匀分布估计, 则

$$u_2(t_{in}) = \frac{0.01^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.006^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

$$u_r(L_1) = \frac{u(L_1)}{L_1} = \sqrt{\frac{u^2(t_{in})}{(t_{in} - t_w)^2} + \frac{u^2(t_w)}{(t_{in} - t_w)^2}} = \frac{\sqrt{u^2(t_{in}) + u^2(t_w)}}{t_{in} - t_w} \quad (9)$$

将相应的标准不确定度代入式(9)中, 得

$$u_r(L_1) = \frac{\sqrt{u^2(t_{in}) + u^2(t_w)}}{t_{in} - t_w} = \frac{\sqrt{0.29^2 + 0.29^2}}{t_{in} - t_w} = \frac{0.410}{t_{in} - t_w} \quad (10)$$

由式(10)可知, 室内温度越低、室外温度越高, 计算出的 L_1 项的相对不确定度越大。本文用户室内温度取温度下限 16°C , 室外温度取开始或停暖时的室外温度 5°C 。

L_1 项的相对不确定度为

$$u_r(L_1) = 3.73\% \quad (11)$$

1.3 L_2 项的不确定度

令 $L_1 = D_i, L_2 = \sum_{j=1, j \neq i}^m D_j$, 则

两者合成后, 得出 t_{in} 测量的标准不确定度为

$$u(t_{in}) = \sqrt{0.29^2 + 0.006^2}^{\circ}\text{C} = 0.29^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

2) 任意分摊周期下室外温度的测量不确定度 $u(t_w)$

任意分摊周期下室外温度的测量不确定度也是由传感器示值误差导致的不确定度和传感器分辨力导致的不确定度两部分组成, 其标准不确定度取式(7)的计算结果 0.29°C 。

3) 建筑面积的测量不确定度 $u(F_i)$

本文不确定度评定过程中, 认为该值为真值, 忽略它带来的误差。

4) 其他因素引起的不确定度

计算器在进行热费分摊计算时会由于数据修约引起不确定度, 在本文不确定度评定过程中, 忽略该项不确定度。

L_1 项不确定度分量汇总见表 1。

表 1 L_1 项不确定度分量汇总

不确定度分量	误差限/ $^{\circ}\text{C}$	分布类型	$u(x)/^{\circ}\text{C}$
任意分摊周期下用户室内温度			
示值误差	0.5	均匀分布	0.29
分辨力误差	0.01	均匀分布	0.006
任意分摊周期下室外温度			
示值误差	0.5	均匀分布	0.29
分辨力误差	0.01	均匀分布	0.006

1.2.2 L_1 项不确定度计算

由式(3)可知, L_1 项标准不确定度 $u(L_1)$ 为

$$u(L_1) = \sqrt{F_i^2 u^2(t_{in}) + (-F_i)^2 u^2(t_w)} \quad (8)$$

L_1 项相对不确定度 $u_r(L_1)$ 为

$$D_i = (t_{in} - t_w)F_i \quad (12)$$

$$D_j = (t_{jn} - t_w)F_j \quad (13)$$

由式(12), (13)可知:

$$u_r(D_i) = u_r(D_j) \quad (14)$$

L_2 项的标准不确定度 $u(L_2)$ 为

$$u(L_2) = \sqrt{\sum_{j=1, j \neq i}^m u^2(D_j)} \quad (15)$$

L_2 项的相对合成标准不确定度 $u_r(L_2)$ 为

$$u_r(L_2) = \frac{\sqrt{\sum_{j=1, j \neq i}^m u^2(D_j)}}{\sum_{j=1, j \neq i}^m D_j} = \frac{\sqrt{u^2(D_1) + u^2(D_2) + \cdots + u^2(D_{i-1}) + u^2(D_{i+1}) + \cdots + u^2(D_m)}}{\sum_{j=1, j \neq i}^m D_j} \quad (16)$$

由标准不确定度和相对不确定度概念有

$$u(D_i) = D_i u_r(D_i) \quad (17)$$

结合式(17), (14)对式(16)进行简化,得到

$$u_r(L_2) = \frac{u_r(D_i) \sqrt{\sum_{j=1, j \neq i}^m D_j^2}}{\sum_{j=1, j \neq i}^m D_j} \quad (18)$$

假设下式成立:

$$D_1 = D_2 = \cdots = D_{i-1} = D_i = D_{i+1} = \cdots = D_m \quad (19)$$

则式(18)变为

$$u_r(L_2) = \frac{u_r(D_i)}{\sqrt{m-1}} = \frac{u_r(L_1)}{\sqrt{m-1}} \quad (20)$$

事实上,式(19)并不成立,实际 L_2 项的相对合成标准不确定度比式(20)的计算值偏大,但由于在计算各个不确定度分量的标准不确定度时留有余量,因此作上述假设是可以接受的。

$$u_r(y) = \sqrt{u_r^2(L_1) + u_r^2(L_2)} = \sqrt{(3.73\%)^2 + (0.63\%)^2} = 3.78\% \quad (25)$$

温度面积法热量分摊公式的扩展相对合成不确定度 $U_r(y)$ 为

$$U_r(y) = k u_r(y) = 3 \times 3.78\% = 11.34\% \quad (26)$$

式(26)中包含因子 k 取值为 3, 置信概率为 99.73%。

2 流量温度法不确定度分析

流量温度法有 3 种形式:将热用户的流量比视为常数;分别测量流量及温差;将用户流量固定。

2.1 将热用户流量比视为常数

2.1.1 数学模型

将热用户流量比视为常数的流量温度法某分摊周期下热量分摊模型可以表示为

$$\frac{Q_i}{Q} = \frac{\phi_i(t_{ig} - t_{ih})}{\sum_{i=1}^m \phi_i(t_{ig} - t_{ih})} \quad (27)$$

式中 t_{ig} 为某分摊周期用户 i 的供水温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{ih} 为某分摊周期用户 i 的回水温度, $^{\circ}\text{C}$; ϕ_i 为用户 i 的流量比。

当用户数目比较少时, L_2 项的相对合成标准不确定度较大, 考虑到实际情况, 用户数取 36, L_2 项的相对合成标准不确定度为

$$u_r(L_2) = \frac{u_r(L_1)}{\sqrt{m-1}} = \frac{3.73\%}{\sqrt{35}} = 0.63\% \quad (21)$$

1.4 分摊公式不确定度合成

令

$$y = \frac{Q_i}{Q} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \quad (22)$$

由不确定度理论可知:

$$u_r(y) = \frac{u(y)}{y} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} \sqrt{u_r^2(L_1) + u_r^2(L_2)} \quad (23)$$

由式(3), (4)知 L_1 远小于 L_2 , 因此, 式(23)可以变为

$$u_r(y) \approx \sqrt{u_r^2(L_1) + u_r^2(L_2)} \quad (24)$$

温度面积法热量分摊公式的相对合成不确定度为

$$u_r(y) = \sqrt{u_r^2(L_1) + u_r^2(L_2)} = \sqrt{(3.73\%)^2 + (0.63\%)^2} = 3.78\% \quad (25)$$

同温度面积法, 将热用户流量比视为常数的流量温度法分摊公式(27)也可变形为式(2)的形式, 其中 L_1, L_2 项表达式如下:

$$L_1 = \phi_i(t_{ig} - t_{ih}) \quad (28)$$

$$L_2 = \sum_{j=1, j \neq i}^m \phi_j(t_{jg} - t_{jh}) \quad (29)$$

式(29)中 t_{jg}, t_{jh} 分别为用户 j 的供、回水温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.1.2 L_1 项的不确定度

2.1.2.1 L_1 项不确定度分量

1) 任意分摊周期下用户供回水温差的测量不确定度 $u_r(t_{ig} - t_{ih})$

对供回水温度传感器进行配对, 使温差的测量精确度达到 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 以均匀分布估计, 则其标准不确定度为

$$u(t_{ig} - t_{ih}) = \frac{0.3^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.17^{\circ}\text{C} \quad (30)$$

对于不同的供回水温差, 其相对不确定度也不相同, 当供回水温差最小(即供暖初期)时, 相对不

确定度最大,为了保险起见,取供、回水温度分别为 47 °C/40 °C,则其相对不确定度为

$$u_r(t_{ig} - t_{ih}) = \frac{0.17}{7} = 2.43\% \quad (31)$$

2) 用户流量比的测量不确定度 $u_r(\phi_i)$

该方法认为用户流量比为一个定值。实际上,随着用户对散热器的调节,用户流量比是不断变化的,对于带跨越管的单管系统,文献[5-6]显示,其最大变化率达到了±16.01%,以均匀分布估计,

$$u_r(L_1) = \sqrt{u_r^2(\phi_i) + u_r^2(t_{ig} - t_{ih})} = \sqrt{(9.24\%)^2 + (2.43\%)^2} = 9.55\% \quad (33)$$

2.1.3 L_2 项的不确定度

该项相对不确定度计算同温度面积法,当用户数为 36 时,利用式(20)可以计算出该方法 L_2 项的相对不确定度为

$$u_r(L_2) = \frac{u_r(L_1)}{\sqrt{m-1}} = \frac{9.55\%}{\sqrt{35}} = 1.61\% \quad (34)$$

2.1.4 分摊公式不确定度合成

利用式(24)可得,将热用户流量比视为常数的流量温度法热量分摊公式的相对合成不确定度为

$$u_r(y) = \sqrt{u_r^2(L_1) + u_r^2(L_2)} = \sqrt{(9.55\%)^2 + (1.61\%)^2} = 9.68\% \quad (35)$$

将热用户流量比视为常数的流量温度法热量分摊公式的扩展相对合成不确定度为

$$U_r(y) = ku_r(y) = 3 \times 9.68\% = 29.04\% \quad (36)$$

式(36)中包含因子取值为 3,置信概率为 99.73%。

2.2 分别测量流量及供回水温度的流量温度法不确定度分析

2.2.1 数学模型

通过测量用户流量及供回水温度对全楼总供热量进行分摊时,某分摊周期下热量分摊模型可以表示为

$$\frac{Q_i}{Q} = \frac{G_i(t_{ig} - t_{ih})}{\sum_{i=1}^m G_i(t_{ig} - t_{ih})} \quad (37)$$

式中 G_i 为用户 i 的流量, m^3/h 。

同温度面积法,该方法热量分摊公式(37)也可变形为式(2)的形式,其中 L_1, L_2 项表达式如下:

$$L_1 = G_i(t_{ig} - t_{ih}) \quad (38)$$

$$L_2 = \sum_{j=1, j \neq i}^m G_j(t_{jg} - t_{jh}) \quad (39)$$

2.2.2 L_1 项的不确定度

2.2.2.1 L_1 项不确定度分量

由于将用户流量比视为定值导致的相对不确定度为

$$u_r(\phi_i) = \frac{16.01\%}{\sqrt{3}} = 9.24\% \quad (32)$$

3) 其他因素引起的不确定度

与温度面积法分析相同,该方法同样忽略由于数据修约引起的不确定度。

2.1.2.2 L_1 项不确定度计算

L_1 项相对不确定度为

1) 任意分摊周期下用户供回水温差的测量不确定度 $u_r(t_{ig} - t_{ih})$

该项的相对不确定度与将热用户流量比视为常数的流量温度法中式(31)的计算结果相同,其相对不确定度为 2.43%。

2) 任意分摊周期下用户流量的测量不确定度 $u_r(G_i)$

对于分体式热量表,流量的误差极限 E 的规定为

$$\text{一级表: } E = 1 + 0.01 \frac{G_p}{G} \quad (40)$$

$$\text{二级表: } E = 2 + 0.02 \frac{G_p}{G} \quad (41)$$

$$\text{三级表: } E = 3 + 0.05 \frac{G_p}{G} \quad (42)$$

式(40)~(42)中 G_p 为常用流量, m^3/h ; G 为使用范围内流量, m^3/h 。

若流量计的相对误差限取 3%,以均匀分布估计,则相对不确定度为

$$u_r(G_i) = \frac{3\%}{\sqrt{3}} = 1.73\% \quad (43)$$

3) 其他因素引起的不确定度

同样忽略由于数据修约引起的不确定度。

2.2.2.2 L_1 项不确定度计算

L_1 项相对不确定度为

$$u_r(L_1) = \sqrt{u_r^2(G_i) + u_r^2(t_{ig} - t_{ih})} = \sqrt{(1.73\%)^2 + (2.43\%)^2} = 2.98\% \quad (44)$$

2.2.3 L_2 项的不确定度

该项的相对不确定度计算同温度面积法,当用户数为 36 时,利用式(20)可以计算出该方法 L_2 项的相对不确定度:

$$u_r(L_2) = \frac{u_r(L_1)}{\sqrt{m-1}} = \frac{2.98\%}{\sqrt{35}} = 0.50\% \quad (45)$$

2.2.4 分摊公式不确定度合成

利用式(24)可得,测量流量及供回水温度热计

$$u_r(y) = \sqrt{u_r^2(L_1) + u_r^2(L_2)} = \sqrt{(2.98\%)^2 + (0.50\%)^2} = 3.02\% \quad (46)$$

测量流量及供回水温度热计量方法热量分摊公式的扩展相对合成不确定度为

$$U_r(y) = ku_r(y) = 3 \times 3.02\% = 9.06\% \quad (47)$$

式(47)中包含因子取 3,置信概率为 99.73%。

2.3 用户流量固定的流量温度法

用户流量固定的流量温度法也称为基准室温的流量温度法。

2.3.1 数学模型

基准室温的流量温度法热量分摊模型如下:

$$\frac{Q_i}{Q} = \frac{\frac{G_i}{G_{i0}} \overline{\Delta t_{i0}} F_i (t_{ig} - t_{ih})}{\sum_{i=1}^m \frac{G_i}{G_{i0}} \overline{\Delta t_{i0}} F_i (t_{ig} - t_{ih})} \quad (48)$$

式中 $\overline{\Delta t_i}$ 为用户 i 的初始温差;式中下标“0”表示各参量在初始分摊周期内的相应值,即供暖系统调试平衡后的相应值。

同温度面积法,基准室温的流量温度法热量分摊式(48)也可变形为式(2)的形式,其中 L_1, L_2 项的表达式如下:

$$L_1 = \frac{G_i}{G_{i0}} \overline{\Delta t_{i0}} F_i (t_{ig} - t_{ih}) \quad (49)$$

$$L_2 = \sum_{j=1, j \neq i}^m \frac{G_j}{G_{j0}} \overline{\Delta t_{j0}} F_j (t_{jg} - t_{jh}) \quad (50)$$

2.3.2 L_1 项的不确定度

2.3.2.1 L_1 项的不确定度分量

$$u_r(L_1) = \sqrt{u_r^2\left(\frac{G_i}{G_{i0}}\right) + u_r^2(t_{ig} - t_{ih}) + u_r^2(\overline{\Delta t_{i0}})} = \sqrt{(2.89\%)^2 + (2.43\%)^2 + (3.2\%)^2} = 4.95\% \quad (52)$$

2.3.3 L_2 项的不确定度

该项相对不确定度计算同温度面积法,当用户数为 36 时,利用式(20)可以计算出该方法 L_2 项的相对不确定度:

$$u_r(L_2) = \frac{u_r(L_1)}{\sqrt{m-1}} = \frac{4.95\%}{\sqrt{35}} = 0.84\% \quad (53)$$

2.3.4 分摊公式不确定度合成

利用式(24)可得,基准室温的流量温度法热量分摊公式的相对合成不确定度为

$$u_r(y) = \sqrt{u_r^2(L_1) + u_r^2(L_2)} = \sqrt{(4.95\%)^2 + (0.84\%)^2} = 5.02\% \quad (54)$$

量方法热量分摊公式的相对合成不确定度为

1) 流量变化的测量不确定度 $u_r(G_i/G_{i0})$

在基准室温的流量温度法热计量系统中,用户供水管上安装流量控制器,整个供暖季用户流量不变,因此实际分摊公式中认为该值为 1。但实际测试结果和检定报告显示,用户安装定流量流量控制器后,用户流量仍可能发生变化,但一般不会超过 $\pm 5\%$ 。以均匀分布估计,则相对不确定度为

$$u_r\left(\frac{G_i}{G_{i0}}\right) = \frac{5\%}{\sqrt{3}} = 2.89\% \quad (51)$$

2) 任意分摊周期下用户供回水温差的测量不确定度 $u_r(t_{ig} - t_{ih})$

该项的相对不确定度同将热用户流量比视为常数的流量温度法中式(31)的计算结果,其值为 2.43%。

3) 初始分摊周期下初始温差测量不确定度 $u_r(\overline{\Delta t_{i0}})$

由于初始分摊周期和任意分摊周期下用户供回水温度传感器相同,采用上述分析方法可得初始分摊周期下初始温差测量不确定度 $u_r(\overline{\Delta t_{i0}}) = 3.2\%$ 。

4) 其他因素引起的不确定度

同温度面积法分析相同,该方法同样忽略用户建筑面积和数据修约引起的不确定度。

2.3.2.2 L_1 项不确定度计算

L_1 项的相对不确定度为

基准室温的流量温度法热量分摊公式的扩展相对合成不确定度为

$$U_r(y) = ku_r(y) = 3 \times 5.02\% = 15.06\% \quad (55)$$

式(55)中包含因子取 3,置信概率为 99.73%。

该方法在计算 L_1 项的不确定度时,没有考虑各个不确定度分量的相关性。由于任意分摊周期用户供回水温度之差的相关系数为负值,因此,上述计算结果偏大,对限制不确定度有利。

3 结论

3.1 置信概率为 99.73% 时, 温度面积法、固定流量比的流量温度法、分别测量流量及供回水温度的流量温度法和基准室温的流量温度法测用户分摊热量的扩展相对合成不确定度分别为 11.34%, 29.04%, 9.06%, 15.06%。

3.3 在应用基准室温的流量温度法时,应对用户供回水温度传感器进行配对,且应在本文基础上进一步减小配对后的测量误差。

- [1] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 北京:中国计量出版社,2004
- [2] 孙杰. 几种基于楼栋总供热量的热计量方法分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013
- [3] 单滨. 供热空调计量相关问题的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010
- [4] 中国建筑科学研究院. JG/T 379—2012 通断时间面积法热计量装置技术条件[S]. 北京:中国标准出版社,2012
- [5] 方修睦,姜永成,单滨,等. 基准室温的流量温度热分配方法的计量原理[J]. 暖通空调,2010,40(12):9-12
- [6] 孟金玲. 温度法供暖热计量分配系统的分析与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008