

一种高温空气湿度测量的方法

清华大学 余延顺[☆] 李先庭 石文星 田长青

摘要 基于能量平衡及质量平衡,提出了一种通过冷、热风混合测量高温空气湿度的方法。该方法通过温度传感器对冷风、混风的干湿球温度及被测高温空气干球温度进行测量,利用湿空气热力性质关系计算被测高温空气的湿度及各状态参数,也可由常规仪表对高温空气湿度进行测量。该方法具有测量简单、精度高、测量成本低、易于实现的优点。运用误差传递理论对该方法的合成误差进行了计算,结果表明,测量高温低湿($t \leq 140\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi \leq 15\%$)的空气湿度,其测量精度可达到 $\pm 0.5\%$ 。

关键词 高温空气 湿度测量 测量误差 混风比

Method to measure humidity of high temperature air

By Yu Yanshun[★], Li Xianting, Shi Wenxing and Tian Changqing

Abstract Based on the energy and mass balance principles, presents a new method to measure the humidity of high temperature air by mixing cold and hot air in which the dry and wet bulb temperature of the cold air and mixed air and the dry bulb temperature of high temperature air are measured by temperature sensors, then the humidity and other parameters of high temperature air can be found by the thermodynamic relationship. And the humidity can also be measured conventionally. The method has the advantages of easy measurement, high precision, low cost and easy realization. Calculates and analyses the integrated error based on the error transfer theory. The result shows that the precision of relative humidity for the high temperature(up to $140\text{ }^\circ\text{C}$) and low humidity(up to 15%) air is within $\pm 0.5\%$ by the proposed method.

Keywords high temperature air, humidity measurement, measurement error, mixing ratio

★ Tsinghua University, Beijing, China

0 引言

空气湿度表征空气中水蒸气的含量或空气的干湿程度,它是空气状态参数中一个非常重要而又难以准确测量的物理量。空气的含湿量随空气湿度的升高而增大,在高温状态下(温度在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 以上),即使空气的相对湿度相差很小,但其含湿量(或空气的水蒸气含量)的差异可能会很大,因此对于高温空气,其湿度测量的精度宜以其含湿量的测量精度指标来衡量。目前对空气湿度的测量主要有以下几种方法^[1~8]:

a) 利用毛发、纤维等物质随周围空气湿度变化而伸缩的特性来测量空气的含湿量。该测量方法简单,成本低,但测量量程窄,精度低(量程为 $15\% \sim 80\%$, $-35 \sim 45\text{ }^\circ\text{C}$, 测量精度为 $\pm 5\%$),维

护管理麻烦。

b) 测量空气的干湿球温度来测量空气的含湿量。该方法是最古老、最常用的湿度测量方法之一,在量程范围内相对湿度测量精度较高,可达到 $\pm 2\% \sim \pm 3\%$;但只适用于 $0 \sim 85\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内的空气湿度测量。

c) 露点湿度计。该方法通过测量空气的露点温度来间接测量空气的湿度,主要由冷却装置、结露面和温度计组成。测量精度高、量程宽,特别适

[☆] 余延顺,男,1975年11月生,工学博士,博士后
100084 清华大学建筑学院建筑技术科学系
(010) 62794194

E-mail: yuyanshun@126.com

收稿日期:2004-12-13

修回日期:2005-02-01

用于低温、低湿空气的湿度测量;但该测量方法费用高,装置复杂。同时为保证镜面的结露温度,需进行精确控制。

d) 阻抗式湿度计^[6,7]。它是根据湿敏传感器的阻抗值变化来求得湿度的一种测量方法,该方法具有响应快、湿滞性小、测量精度高、量程宽的优点;但在高温、高湿环境中测头工作不稳定,易老化。

e) 微波湿度计^[1,8]。它是通过空气吸收微波辐射的程度来测量空气的湿度,该方法虽测量量程宽,但仪表加工要求严格,成本高,且不适用于湿度变化快的测量场合。

在干燥、工业窑炉及锅炉烟气分析中,经常涉及到高温空气湿度的测量问题。而目前现有的各种空气湿度测量方法和仪表,测量精度一般都是以相对湿度的测量精度为指标,适用于高温环境空气湿度测量的不多,并且在测量精度和测量成本(或仪表的价格)等方面也不尽如人意。因此,采用目前常规的测量方法及仪表很难满足高温空气湿度的高精度测量要求。虽然目前已有高温范围的温湿度测量仪表(温度范围为 $-40\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$),在经过特殊标定以后其相对湿度的测量精度可达到 $\pm 1\%$ ($0\sim 98\%$ 范围内)^[9],但对于高温空气,如干球温度为 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 7% 时,应用该仪表测量时其含湿量的测量绝对误差可达到 $\pm 35\sim \pm 40\text{ g/kg}$,相对误差为 10% 左右,如此大的测量误差是难以接受的。特别是在实验室高温、大风量工况下的干燥实验测量中, $\pm 1\%$ 的相对湿度测量精度可能导致完全错误的实验结果。因此,对于一些特殊的高温环境空气湿度测量场合,迫切需要一种新的测量手段和仪表,以便对被测对象进行高精度的测量。

鉴于此,笔者在某干燥实验台研究的基础上,提出了一种采用冷、热风混合的方法,用常规温度测量仪表实现对高温空气湿度的高精度测量,该方法简单、经济,测量精度高,易于实现。

1 测量原理

冷、热风混合湿度测量是通过调节高温及低温空气的混风比,控制混合后空气的温度在常规测量仪表的工作量程范围内。在高温空气的入口设置温度测点,以测量高温空气的干球温度;在冷风入口及排风口处分别设置干湿球温度计,以测量冷风

及混风的干湿球温度。通过测量上述 5 个温度参数,便可通过热力学关系计算出高温空气的各状态参数,从而实现采用常规仪表对高温空气状态参数的高精度测量。冷、热风混合测量方法的原理如图 1 所示。在该测量方法中,冷、混风的干湿球温度

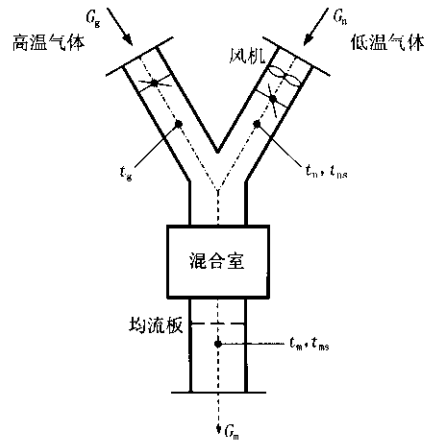


图 1 高温、低温空气温湿度测量原理图

(t_n, t_{ns})和(t_m, t_{ms})及热风的干球温度 t_g 均采用高精度温度传感器(如铂电阻温度计)测量,温度的测量精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冷、热风混合过程的 $h-d$ 图如图 2 所示。由图 2 可知,为实现高温空气湿度的

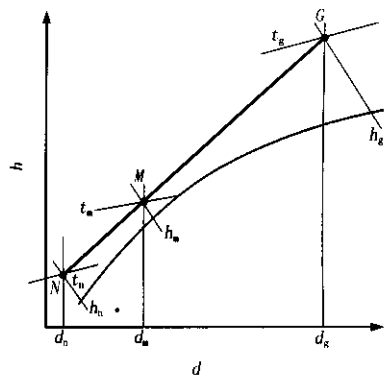


图 2 冷、热空气混合的 $h-d$ 图

可靠、高精度测量,要求冷、热风的混合点 M 处于合适的温度区间, M 点的位置可通过调节冷、热风的混风比来控制;同时要求混风点处于 $h-d$ 图的非结露区,并且在入口空气测点断面至出口测点断面间的所有管道作保温处理,减少管道的热量损失,以减小测量误差。

在图 1、2 分析的基础上,根据热力学的热、湿平衡关系,可建立如下的冷、热空气混合过程的热量平衡与湿量平衡关系式:

$$G_g h_g + G_n h_n = G_m h_m \quad (1)$$

$$G_g d_g + G_n d_n = G_m d_m \quad (2)$$

$$G_m = G_g + G_n \quad (3)$$

式(1)~(3)中 G_g, G_n, G_m 分别为高温空气、冷空气及混合后空气的质量流量, kg/s; d_g, d_n, d_m 分别为高温空气、冷空气及混合后空气的含湿量, g/kg; h_g, h_n, h_m 分别为高温空气、冷空气及混合后空气的比焓, kJ/kg。

定义冷、热风的混风比 r 为

$$r = \frac{G_n}{G_g} \quad (4)$$

因此由式(1),(2)可得高温空气的含湿量及比焓, 分别为

$$d_g = (1+r)d_m - rd_n \quad (5)$$

$$h_g = (1+r)h_m - rh_n \quad (6)$$

湿空气比焓的计算公式:

$$h_g = 1.01t_g + 0.001d_g(2501 + 1.84t_g) \quad (7)$$

式中 t_g 为高温空气的干球温度, °C。

由于式(7)中高温空气的干球温度 t_g 已知, 所以式(7)可表达为:

$$h_g = a + bd_g \quad (8)$$

式中 a, b 分别为常数, $a = 1.01t_g, b = 2.501 +$

$$p_{qb} = 98.065.5 \exp \left[0.0326889 - 7.235425 \left(\frac{10^3}{273.16 + t} - \frac{10^3}{373.16} \right) + 8.21 \ln \left(\frac{373.16}{273.16 + t} \right) - 0.00571133(100 - t) \right] \quad (11)$$

而湿空气中水蒸气的分压力为

$$p_q = p_{qbs} - A(t - t_s)B \quad (12)$$

式中 p_q 为湿空气中水蒸气的分压力, Pa; p_{qbs} 为对应湿球温度的饱和水蒸气压力, 可按式(11)计算, Pa; t, t_s 分别为空气的干湿球温度, °C; B 为当地大气压力, Pa; A 为与风速有关的系数, 其经验公式为^[12]

$$A = \left(593.1 + \frac{135.1}{\sqrt{v}} + \frac{48}{v} \right) \times 10^{-6} \quad (13)$$

式中 v 为风速, m/s。

所以湿空气的含湿量、相对湿度和比焓可分别为

$$d = 662 \frac{p_q}{B - p_q} \quad (14)$$

$$\varphi = \frac{Bd}{(622 + d)p_{qb}} \quad (15)$$

$$h = 1.01t + 0.001d(2501 + 1.84t) \quad (16)$$

0.00184 t_g 。

由式(5),(6)及式(8)可得冷、热空气的混风比及高温空气的含湿量, 分别为

$$r = \frac{h_m - bd_m - a}{b(d_m - d_n) - (h_m - h_n)} \quad (9)$$

$$d_g = \frac{(h_n - a)d_m - (h_m - a)d_n}{b(d_m - d_n) - (h_m - h_n)} \quad (10)$$

对于被测的高温空气, 在已知其干球温度和含湿量后, 便可通过热力学关系式计算出其他各参数。

2 测量结果的合成误差

由于采用冷、热风混合测量高温空气湿度的方法是一种间接的测量方法, 实测过程中需要测量的参数相对较多, 而各测点的测量仪表都是在一定的精度范围内工作的, 因此各仪表的测量结果都会存在一定的误差。由误差的传递理论^[10~11], 这些测点的测量误差将会传递至最终的测量结果中去, 从而对高温空气状态参数的测量精度产生直接的影响。

在进行误差分析与计算过程中, 忽略管道的热损失影响。据文献^[12], 湿空气的饱和水蒸气压力 p_{qb} 可拟合为如下关系式:

根据误差传递理论, 对于冷风及混风状态点, 测点空气的含湿量及比焓的合成误差与干湿球温度计测量精度之间的关系为

$$\delta d = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial p_q} \frac{\partial p_q}{\partial t} \right)^2 \delta^2 t + \left(\frac{\partial d}{\partial p_q} \frac{\partial p_q}{\partial t_s} \right)^2 \delta^2 t_s} \quad (17)$$

$$\delta h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)^2 \delta^2 t + \left(\frac{\partial h}{\partial d} \right)^2 \delta^2 d} \quad (18)$$

式(17),(18)中 $\delta t, \delta t_s$ 分别为干湿球温度的测量精度。

因此在测得冷空气及混风的干湿球温度 (t_n, t_{ns}) 和 (t_m, t_{ms}) 后, 便可根据式(17),(18)计算出湿空气的含湿量及比焓的合成误差 $\delta d_n, \delta d_m$ 及 $\delta h_n, \delta h_m$ 。

对于被测高温空气, 在式(10)的基础上由误差传递理论, 可将其含湿量及相对湿度测量值的合成误差表达为下面的形式:

$$\delta d_g = \sqrt{\left(\frac{\partial d_g}{\partial h_n}\right)^2 \delta^2 h_n + \left(\frac{\partial d_g}{\partial h_m}\right)^2 \delta^2 h_m + \left(\frac{\partial d_g}{\partial d_m}\right)^2 \delta^2 d_m + \left(\frac{\partial d_g}{\partial d_n}\right)^2 \delta^2 d_n + \left(\frac{\partial d_g}{\partial a}\right)^2 \delta^2 a + \left(\frac{\partial d_g}{\partial b}\right)^2 \delta^2 b} \quad (19)$$

$$\delta \varphi_g = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi_g}{\partial p_{qb}} \frac{\partial p_{qb}}{\partial t_g}\right)^2 \delta^2 t_g + \left(\frac{\partial \varphi_g}{\partial d_g}\right)^2 \delta^2 d_g} \quad (20)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \delta a &= 1.01 \delta t_g \\ \delta b &= 0.00184 \delta t_g \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

3 测量误差的影响因素分析

在实际的测量过程中,影响测量误差的因素是多方面的。这些因素主要包括被测高温空气的状态、冷、热风的混风比及干湿球温度计的测量精度等,本文将主要对这些影响因素进行分析与比较。

3.1 混风比对测量结果合成误差的影响

在分析和研究冷、热风的混风比对测量误差的影响时,设定各测点空气干湿球温度的测量精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,风速为 2.5 m/s ,当地大气压为 101.325 kPa 。测试条件为:高温空气干球温度 140°C ,相对湿度 7.7% ;冷空气干球温度 20°C ,相对湿度 65% 。

在上述测试条件下,对不同混风比下的含湿量及相对湿度测量结果的合成误差进行了计算,结果如图 3~5 所示。

由图 3 可知,在该测试条件下,为使干湿球温度计的测量可靠、精确,冷、热风的混风比宜控制在

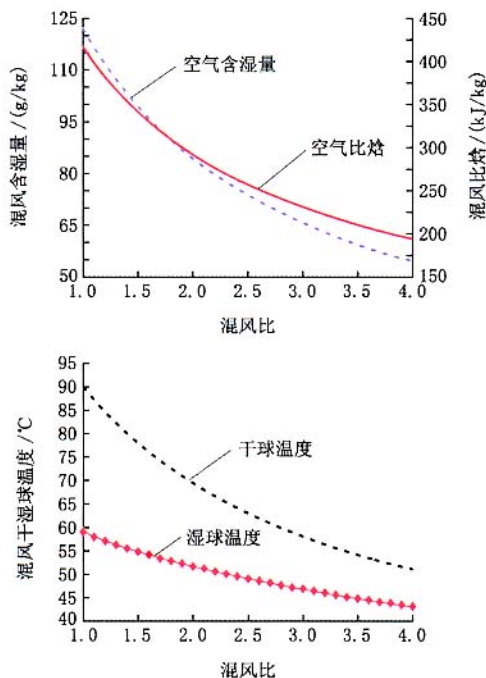


图 3 不同混风比下混风的状态参数

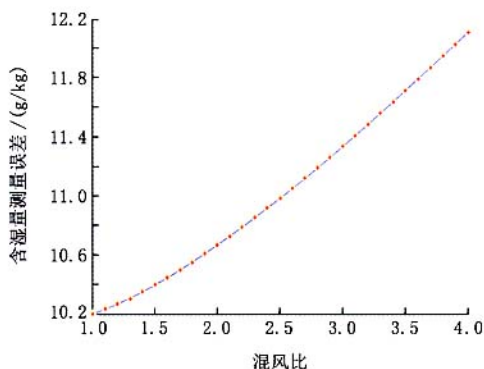


图 4 不同混风比下含湿量测量误差

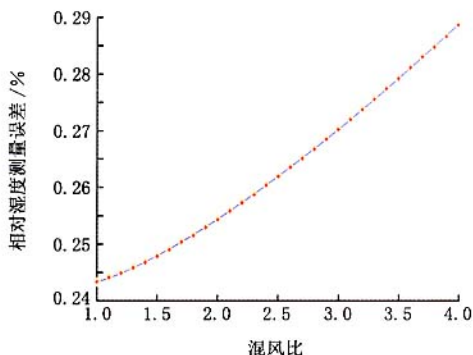


图 5 不同混风比下相对湿度测量误差

1.5 以上,这样才能保证混风的干球温度在 80°C 以下。同时由图 4 和图 5 可知,被测高温空气的含湿量及相对湿度的合成误差随混风比的增加而近似呈线性关系增长。如在混风比由 1 增加到 4 时,相对湿度的合成误差由 0.244% 增大到 0.288% ,增加了 0.044% ;而对应含湿量的合成误差也由 10.2 g/kg 增大到 12.1 g/kg ,净增 1.9 g/kg ,增幅为 18.63% 。这是由于在混风比增大的过程中,虽然混风的含湿量及比焓的合成误差逐渐减小,但式(19)中各项的误差传递系数却逐渐增大,最终导致被测空气参数的合成误差随混风比的增加而增大。

因此,在实际测量过程中,在保证混风温度在干湿球温度计可测范围内的条件下,应尽量减小混风比,以提高被测高温空气各参数的测量精度。

3.2 被测高温空气状态对测量结果合成误差的影响

为了研究被测空气状态对测量结果精度的影响,本文以干球温度为 $100\sim 140^\circ\text{C}$,相对湿度为 $0.2\%\sim 20\%$ 范围的高温空气进行了计算与分析。

计算时干湿球温度计的测量精度为±0.1℃,冷空气的干球温度为 20℃,相对湿度为 65%,混风比为 1.5,风速为 2.5 m/s。计算结果如图 6,7 所示。

140℃,相对湿度 7.7%;冷空气干球温度 20℃,相对湿度 65%。冷、热风的混风比为 1.5,风速为 2.5 m/s,并且假设各温度测点的精度相同。在该设定测试条件下,计算出被测空气的含湿量及相对湿度测量结果的合成误差与干湿球温度计测量精度的关系如图 8 和图 9 所示。

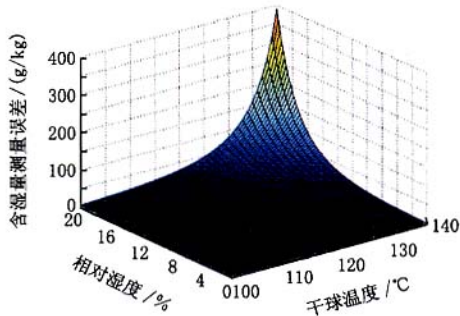


图 6 不同空气状态对含湿量测量误差的影响

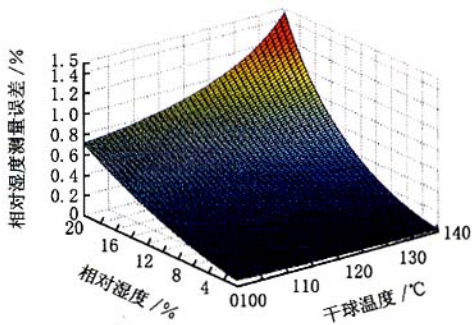


图 7 不同空气状态对相对湿度测量误差的影响

由图 6,7 可知,在混风比及干湿球温度计测量精度一定的条件下,随着被测高温空气干球温度及相对湿度的升高,被测空气含湿量及相对湿度测量结果的合成误差也在逐渐增大;而对于高温低湿空气($\phi \leq 15\%$),其相对含湿量的测量误差能控制在±0.5%的范围内。但当被测空气温度超过 130℃,相对湿度大于 18%以后,采用冷、热风混合的方法测量结果将会产生较大的误差,如在被测空气温度为 140℃,相对湿度为 20%时,相对湿度及含湿量的测量误差分别为 1.45%和 389.66 g/kg。因此,对于高温低湿状态下被测空气,采用冷、热风混合的方法能够保持较高的测量精度。

3.3 干湿球温度计测量精度对测量结果合成误差的影响

由于在该测量方法中,高温空气的温湿度是通过测量冷风、混风的干湿球温度及高温空气的干球温度来实现,因此,干湿球温度计的测量精度直接决定了被测参数测量结果合成误差的大小。本文为了比较与分析干湿球温度计测量精度对测量结果的影响,设定测试条件为:高温空气干球温度

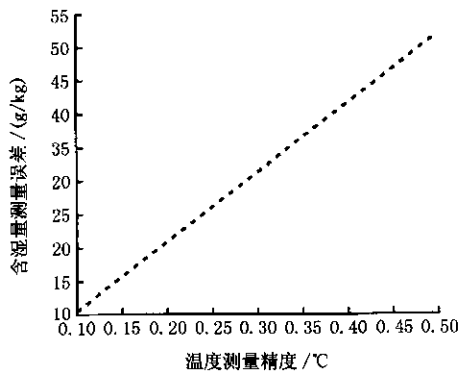


图 8 温度测量精度对含湿量测量误差的影响

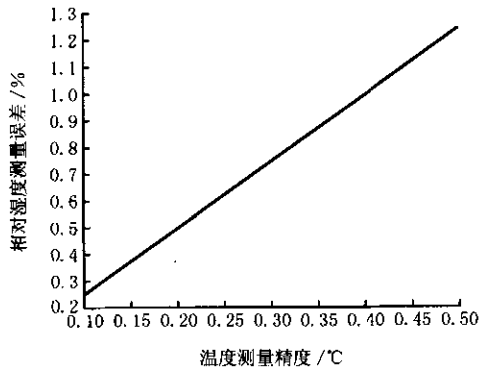


图 9 温度测量精度对相对湿度测量误差的影响

由图 8,9 可知,随着干湿球温度计测量误差的增大(或精度降低),高温空气含湿量及相对湿度的合成误差随之呈线性关系增大。如在该测试条件下,当干湿球温度计的测量精度由±0.1℃降低到±0.5℃时,高温空气的相对湿度合成误差由 0.25%增大到 1.25%,增加了 1.0%;对应地其含湿量的合成误差由 10 g/kg 增大到 52.5 g/kg,净增 42.5 g/kg。由此可见,为了提高被测对象的测量精度,应采用高精度的温度测量仪表对各点空气的干湿球温度进行高精度的测量。

4 计算实例

若被测空气的干球温度为 $t_g = 140^\circ\text{C}$,冷空气及混风的干湿球温度分别为: $t_n = 20^\circ\text{C}$, $t_{ns} = 15.76^\circ\text{C}$; $t_m = 62^\circ\text{C}$, $t_{ms} = 43.31^\circ\text{C}$;各温度测试仪表的测量精度为±0.1℃。求被测空气状态参数及含

湿量与相对湿度的测量误差。

由湿空气的 $h-d$ 图可得冷空气及混风的含湿量与比焓分别为

$$d_n = 9.471 \text{ g/kg}, h_n = 44.2355 \text{ kJ/kg};$$

$$d_m = 51.107 \text{ g/kg}, h_m = 196.2689 \text{ kJ/kg}.$$

由式(8)计算可得 $a=141.4 \text{ kJ/kg}; b=2.7586 \text{ kJ/kg}$ 。

由式(9),(10)可得混风比及高温空气含湿量分别为

$$r = \frac{h_m - b d_m - a}{b(d_m - d_n) - (h_m - h_n)} = 2.3164$$

$$d_g = \frac{(h_n - a)d_m - (h_m - a)d_n}{b(d_m - d_n) - (h_m - h_n)} = 147.552 \text{ g/kg}$$

由被测空气的干球温度 t_g 及含湿量 d_g 便可通过热力学关系计算被测空气的其他各参数,分别为相对湿度 $\varphi=5.4\%$;露点温度 $t_l=59.44 \text{ }^\circ\text{C}$;湿球温度 $t_s=63.34 \text{ }^\circ\text{C}$;比焓 $h=547.59 \text{ kJ/kg}$ 。

根据式(19)和(20)可分别计算出相对湿度及含湿量的测量误差为 0.1541% 和 5.1415 g/kg 。

5 结论

5.1 该方法只需测量高温空气的干球温度及冷、混风的干湿球温度,而不需测量混风比,测量方法简单,成本低,易于实现。

5.2 被测对象的测量误差随混风比的增大而近似呈线性关系增加。因此,在保证混风温度在干湿球温度计可测范围内的条件下,应尽量减小混风比,以提高被测对象的测量精度。

5.3 在被测空气干球温度 $t_g \leq 140 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 $\varphi \leq 15\%$ 及温度测量仪表精度为 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,其相对湿度的测量精度可保持在 $\pm 0.5\%$ 以内。但随着被测空气的温度及相对湿度的升高,被测对象的测量精度逐渐降低。因此,该测量方法特别适用于高温低湿空气参数的高精度测量。

5.4 被测对象的测量误差与温度测量仪表的精度呈线性递增关系,提高温度测量仪表的精度是减小被测对象测量误差的前提。

参考文献

- Humidity Measurement Technology. http://www.testo.de/US/lig/upload/mwmlus_1034594054750_1.pdf, 2004
- Technical report: state of the art of sensors. Galileo Ferraris Istituto Elettrotecnico Nazionale, CHE-TR-IEN-0001, 2001. 1-9
- 程起范. 空气湿度及其测量方法. 辽宁气象, 1996(4): 36
- 彭哲方. 气体湿度测量误差分析. 广东教育学报, 1995(2): 48-53
- Nguyen Thi Thu Ha, Dao Khac An, Phan Viet Phong, et al. Study and performance of humidity sensor based on the mechanical-optoelectronic principle for the measurement and control of humidity in storehouses. Sensors and Actuators, 2000, 66(B): 200-202
- 龙庆华. 湿敏电容及湿度测量仪表. 自动化与仪器仪表, 1999(3): 44-49
- Luijten C C M, van Dongen M E H, Stormbom L E. Pressure influence in capacitive humidity measurement. Sensors and Actuators, 1998, 49(B): 279-282
- Maximino Bedoya, Guillermo Orellana, Moreno Bondi. Fluorescent optosensor for humidity measurements in air. Helvetica Chimica Acta, 2001, 84: 2628-2639
- EE29/EE31 多功能温湿度变送器. http://www.bjpride.com/product_E+E_2.html, 2004
- 蒋维铭, 徐向农, 周守仁. 误差理论及试验设计. 成都: 电子科技大学出版社, 1993. 37-43
- 梁晋文, 陈林才, 何贡. 误差理论与数据处理. 北京: 中国计量出版社, 1989. 75-78
- 张子慧. 热工测量与自动调节. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982. 59-61

· 会讯 ·

2005 中国城镇供热体制改革研讨会

2005 年 9 月 24~25 日, 2005 中国城镇供热体制改革研讨会在北京召开。建设部供热质量监督检验中心徐伟主任、中国建筑科学研究院空调所李先瑞教授、北京市建筑设计研究院张锡虎顾问总工、清华大学石兆玉教授、中国城市建设研究院许文发教授、中国建筑科学研究院空调所标准规范室黄维主任、天津市建筑设计院孙恺尧总工、天津大学

王荣光教授、德国 Erlangen 大学物理系客座教授陆伯祥、国家发改委宏观经济研究院价格所姜润宇处长和一些企业界代表分别作了报告。本次会议突出三个主题: 供热改革环境; 供热改革现状及经验; 供热新技术、新产品的推广应用。共有 200 多人参加了会议。

(本刊特约通讯员 吴延鹏)