

# 高温环境下相对湿度测量误差及干湿球系数计算

黄晓因<sup>1</sup> 徐丽芬<sup>2</sup>

(1 云南农业大学计算机科学系,昆明 650201; 2 云南农业大学气象教研室,昆明 650201)

**摘要** 对干湿球系数  $A$  与环境温度  $t$  的关系进行了研究。结果指出,  $A$  不仅与风速有关, 也与环境温度有关, 如果不考虑风速和环境温度, 使用干湿球测湿法获得的测量结果没有使用价值。  $t > 40$  °C 以后, 随着  $t$  的升高, 使用  $A$  的拟合公式计算得到的相对湿度值其误差愈来愈大, 在相对湿度较低时情况更为明显。为此提出了在  $40$  °C  $< t < 80$  °C 范围内  $A$  的计算公式。经验证, 使用此计算公式获得  $A$  值后再计算出相对湿度, 其误差小于 1.4%。

**关键词** 干湿球系数 环境温度 相对湿度 计算方法

## 引言

随着生产力的发展和生活水平的不断提高, 湿度的测量和控制已显得愈来愈重要。湿度从最初的气象参数, 不断渗透到农业、食品、化纤、木材、煤炭以及工业原材料的加工、贮藏和许多金属的热处理、焊接、铸造工艺等各个领域。然而湿度的测量技术却远远落后于温度、气压等其他环境参数的测量技术。

目前, 相对湿度的测量方法一般有两种: 一是采用湿度传感器, 二是采用干湿球法。采用湿度传感器的测量方法的效果, 主要取决于传感器的效果, 目前湿度传感器技术仍然处于研发阶段, 虽然基于不同原理不同结构的传感器时有推出, 但它们在测量范围和长期可靠性方面还存在许多问题<sup>[1]</sup>。干湿球测湿法是通过测量温度来间接测量湿度, 而温度测量技术相对来说已很成熟。所以自从 1887 年德国人 Richard Assmann 创制阿斯曼型通风干湿表以来, 干湿球测湿法便以其原理明确、性能稳定可靠、维护性好等特点在各国气象部门乃至其他行业中得到非常广泛的应用<sup>[2]</sup>。

从近年来公开发表的研究报道来看, 风速(湿球表面的空气流动速度)对干湿球测湿法测量精度的影响已有较多、较深入的研究, 而环境温度对测量精度是否有影响却未见有报道。1999 年, 我们在温湿度分时段测量系统的设计过程中, 偶尔发现干湿球

法在较高的温度环境下使用时其测量误差很大, 后来改用了高分子膜湿敏电容传感器来测量湿度, 故没有深究其原因<sup>[3]</sup>。也有报道对干湿球法在高温环境下的测量精度提出过质疑<sup>[4, 5]</sup>, 但仅此而已。由于干湿球测湿法一直使用在许多高温环境中(我国广大农村的烤烟房普遍采用干湿球法测量相对湿度就是一个典型例子), 如果测量误差过大, 将会产生难以估量的后果。为此, 我们对高温环境下(温度范围为  $40 \sim 80$  °C)干湿球测湿法的精度进行了研究。

## 1 干湿球法测量湿度的基本原理

干湿球测湿的结构原理是在温度表的水银球体(或铂电阻温度传感器的敏感部分)包上脱脂纱布, 纱布的下端浸入盛水的容器中, 纱布在毛细管作用下经常处于湿润状态, 此温度计称为湿球。湿球纱布中的水分必然向空气中蒸发, 即在湿球与通过湿球的空气之间发生湿交换。水的蒸发量与空气中的水汽压平衡并使湿球温度维持在一定的数值。如果再用一支温度表或同等准确度的铂电阻温度传感器测量当时的气温(此温度计称为干球), 就可以利用干湿球温度的差值和其它测量条件来计算空气中的水汽压。

由道尔顿蒸发定律可知, 水分蒸发质量与周围空气的水汽饱和差及蒸发面积成正比, 与当时的大

作者简介: 黄晓因, 男, 1953 生, 副教授, 现从事计算机测控技术的研究, Email: xiaoyin48@ynmail.com

收稿日期: 2004 年 4 月 7 日; 定稿日期: 2004 年 6 月 6 日

气压力成反比,因此,蒸发质量公式可写成<sup>[6]</sup>:

$$M = cs(E - e)/p \tag{1}$$

式中,  $M$  为水分蒸发的质量,  $E$  为湿球温度对应的饱和水汽压(hPa),  $e$  为空气中的实际水汽压(hPa),  $c$  为空气和湿球间的水分交换系数,  $s$  为蒸发面积( $\text{cm}^2$ ),  $p$  为大气压力(hPa)。

湿球因表面蒸发所消耗的热量为:

$$Q_1 = ML = cs(E - e)L/p \tag{2}$$

式中,  $Q_1$  为蒸发耗热;  $L$  为蒸发潜热。

此外,由于湿球温度一般要低于周围空气的温度,根据热平衡原理,周围空气将向湿球传递热量。根据牛顿热传导公式,由温差导致空气对湿球的传热量  $Q_2$  为:

$$Q_2 = hs(t - t_w) \tag{3}$$

式中,  $Q_2$  为空气向湿球传递的热量,  $h$  为热量交换系数,  $t$  为干球温度,  $t_w$  为湿球温度。

当湿球温度稳定时,蒸发耗热  $Q_1$  和空气向湿球的传热量  $Q_2$  就达到了平衡状态,即  $Q_1 = Q_2$ ,于是

$$cs(E - e)L/p = hs(t - t_w) \tag{4}$$

$$e = E - (h/cL)p(t - t_w) \tag{5}$$

若设  $A = h/cL$ ,则式(6)可简写为:

$$e = E - Ap(t - t_w) \tag{6}$$

由式(6)可进一步确定空气的相对湿度<sup>[7]</sup>

$$U = \frac{e}{e_w} \times 100\% = \frac{E - Ap(t - t_w)}{e_w} \times 100\% \tag{7}$$

式(5)、(6)、(7)中,  $A$  为干湿球系数,  $e_w$  为干球温度下的饱和水汽压(hPa)。

式(7)即为用于干湿球法计算相对湿度的一般公式,其中的干湿球系数  $A$  采用以下拟合公式求得:

$$A = 10^{-5} (65 + \frac{6.75}{v}) \tag{8}$$

式中的  $v$  为流过湿球表面的空气流速。

式(8)表明,干湿球系数  $A$  仅与  $v$  有关而与测量的环境温度(干球温度  $t$ ) 无关,其科学性和准确性有必要重新论证。

## 2 实验与分析

我们对干湿球系数  $A$  与风速  $v$ 、干球温度  $t$  的关系进行了实验。实验装置采用自己设计的干燥控制箱,箱内温度、湿度和风速可在一定范围内随意调节。为确保实验数据的准确性,另外使用了一台温湿度高精度测量仪作为基准。干湿球及高精度测量仪探头均放入控制箱内。实验方法是:在  $40 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内,每间隔  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,对不同的风速,由基准测量仪测得湿度值后通过式(7)计算得到对应的  $A$  值。这样,对每一组确定的干球温度  $t$ 、风速  $v$ ,获得了  $A$  的一系列对应值(表1)

对表中数据分析,验算后得到如下结果:干球温度  $t \leq 40 \text{ }^\circ\text{C}$  时,  $t$  对  $A$  的影响不明显,  $A$ 、 $v$  值基本上与  $A$ 、 $v$  拟合公式(8)吻合;干球温度  $t > 40 \text{ }^\circ\text{C}$  后,随着温度的增加,表1中的  $A$  值与由式(8)计算得到的  $A$  值相比较,相差愈来愈大。譬如当  $t$  为  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $v$  为  $1.2 \text{ m/s}$  时,表中对应的  $A$  值是  $0.001051$ ,然而由式(4)计算得相应的  $A$  值是  $0.000706$ 。如设干湿球温差为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,大气压  $p = 1000 \text{ hPa}$ ,进而由式(7)计算得相对湿度分别为  $58\%$  和  $61\%$ ,相差  $3\%$ 。由此可见,干湿球系数  $A$  不仅与风速  $v$  有关,而且与测量环境温度  $t$  有关,计算  $A$  值的拟合公式(4)不适合在高温环境下使用。

表 1 干湿球系数  $A$  与风速  $v(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  和环境温度  $t(^\circ\text{C})$  的相关测量数据

$A$ $t$	$v$	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
20		4.032	2.008	1.332	0.994	0.791	0.722	0.713	0.704	0.694	0.685	0.678	0.675	0.672
30		4.041	2.021	1.341	1.001	0.802	0.735	0.726	0.712	0.703	0.696	0.694	0.687	0.686
40		4.049	2.028	1.357	1.010	0.808	0.742	0.731	0.722	0.707	0.703	0.700	0.699	0.701
50		4.110	2.080	1.410	1.070	0.871	0.800	0.788	0.779	0.768	0.761	0.757	0.753	0.751
60		4.170	2.145	1.470	1.130	0.930	0.863	0.861	0.840	0.829	0.822	0.818	0.814	0.812
70		4.250	2.230	1.560	1.220	1.020	0.950	0.936	0.935	0.914	0.907	0.903	0.899	0.897
80		4.371	2.343	1.671	1.332	1.131	1.062	1.051	1.041	1.032	1.021	1.022	1.010	1.011

注:表中  $A$  值为实际值  $\times 10^3$ 。

### 3 高温环境下系数 A 的计算方法

设 A 与变元 v、变元 t 的关系为  $A = A(v, t)$ ，由二维函数逼近理论可知<sup>[7]</sup>，表 1 中数值分布规律符合变元可分离条件(其中变元 v 为主变元)，因此可确定函数  $A = A(v, t)$  是变元可分离的，且具有  $A(v, t) = f(v) + g(t) - c$ (c 为待定系数)的形式。以下根据表中测量数据，采用最小二乘法求出  $f(v)$  和  $g(t)$  的拟合表达式。

将表 1 中的第一行 v 值与其余各行 A 值对应组合后描绘成曲线，根据曲线形状，把  $f(v)$  的拟合函数定为  $a + b/v$  是比较合适的。为确定系数 a、b，取第 1 行数据和第 4 行数据的组合：(0.02, 4.049)，(0.05, 2.028)，…，(4.0, 0.701)，依次代入  $f(v) = a + b/v$  中，获得以下超定方程组：

$$\begin{cases} 4.049 \times 10^{-3} = a + 0.02b \\ 2.028 \times 10^{-3} = a + 0.05b \\ \vdots \\ 0.701 \times 10^{-3} = a + 4b \end{cases}$$

设 U 为方程组等号右端 a、b 的系数构成的矩阵，V 为方程组等号左端的常数构成的矩阵：

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0.02 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 4 \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} 4.049 \times 10^{-3} \\ \vdots \\ 0.701 \times 10^{-3} \end{bmatrix}, \text{ 于是}$$

$$\text{有: } U^T U = \begin{bmatrix} 13 & 19.57 \\ 19.57 & 52.454 \end{bmatrix}$$

可见  $|U^T U|$  不等于零，由最小二乘解公式<sup>[8]</sup>得：

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (U^T U)^{-1} U^T V = \begin{bmatrix} 0.175 & -0.065 \\ -0.065 & 0.043 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ 0.02 & \dots & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4.049 \times 10^{-3} \\ \vdots \\ 0.701 \times 10^{-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.649 \times 10^{-3} \\ \vdots \\ 0.068 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$f(v) = 0.649 \times 10^{-3} + \frac{0.072 \times 10^{-3}}{v} \quad (9)$$

类似地，根据表 1 中第一列 t 值与其余各列 A 值对应组合后描绘而成的曲线，可确定  $g(t)$  的拟合函数形如  $a + bt^3$ ，根据上述同样步骤可求得系数  $a = 0.722 \times 10^{-3}$ ， $b = 0.068 \times 10^{-3}$ ，即

$$g(t) = 0.722 \times 10^{-3} + 0.068 \times 10^{-3} \times t^3 \quad (10)$$

$$A = A(v, t) = 0.649 \times 10^{-3} + \frac{0.068 \times 10^{-3}}{v} +$$

$$0.072 \times 10^{-3} \times t^3 \quad (11)$$

为验证式(11)的正确性，我们在  $0.2 \text{ m/s} < v < 4 \text{ m/s}$ ， $40 \text{ }^\circ\text{C} < t < 80 \text{ }^\circ\text{C}$  和相对湿度大于 60% 的范围内进行了随机实验，结果表明：采用式(11)计算得到的相对湿度与基准仪器的测量结果相比，其最大误差不超过 1.4%，而采用式(8)计算得到的相对湿度与基准仪器的测量结果有时相差可达 5% (如果相对湿度更低，测量误差还会更大)。由此可见，式(11)计算的准确性明显高于式(8)。

### 4 结束语

干湿系数 A 不仅与风速 v 有关，也与环境温度 t 有关。然而长期以来，人们在实践中使用干湿球测湿法时，不仅忽略了环境温度，甚至很多时候连风速也不考虑，他们通常将 A 值看成一个常数。譬如在烤烟房内测量湿度时，不少人将 v 定为 0.12 m/s，这样通过式(8)得到的 A 值为 0.0012125。但实际上，烤烟房内的风速受空气含湿量多少、进风洞和排气窗打开大小、装烟稀密等环境条件的影响变化很大，变化范围一般在 0.02 ~ 1 m/s 内。如果  $v = 0.02 \text{ m/s}$ ，计算的 A 值为 0.004025。假设干球温度 40 °C，干湿球温差为 5 °C，大气压  $p = 1000 \text{ hPa}$ ，按  $A = 0.0012125$  和  $A = 0.004025$  计算得到的相对湿度分别是 49% 和 30%，相差甚大。由此可见，如果不考虑风速和环境温度，使用干湿球测湿法获得的测量数据将失去使用价值。

### 参考文献

- 1 黄晓因，张连根. 单片机干湿球法测量相对湿度的计算方法研究. 云南民族大学学报, 2003, (3): 155 - 157
- 2 罗宗炎. 气象观测领域湿度传感器性能分析. 气象水文海洋仪器, 1999, (1): 11 - 16
- 3 黄晓因. 温湿度分时段控制研究. 电子设计应用, 2003, (4): 34 - 36
- 4 Srivastava R C, Sekhon R S. WMO air conditioning principles and systems. J. Atmos. Sci., 1990, (10): 669 - 680
- 5 李乃智. 智能空气湿度测量中的数学模型. 电子测量技术, 1991, (3): 17 - 21
- 6 朱乐坤, 温晓清. 标准通风干湿表的测湿原理及附加误差. 现代计量测试, 2001, (4): 37 - 39
- 7 赵元民. 函数逼近方法. 哈尔滨: 黑龙江省科学出版社, 1981
- 8 吴筑筑, 潭信民, 邓秀勤. 计算方法. 北京: 电子工业出版社, 2001. 76 - 80

# Measuring Error Analysis of Relative Humidity and Calculation of Psychrometric Coefficient at High Temperature

Huang Xiaoyin<sup>1</sup> Xu Lifan<sup>2</sup>

(1 Computer Science Department, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201; 2 Agricultural Meteorology office, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201)

**Abstract:** The relationship between psychrometric coefficient  $A$  and ambient temperature was studied. It was pointed out that when temperature is higher than 40 °C, the error of the relative humidity obtained according to the formula of psychrometric coefficient  $A$  increases with temperature. It is more evident when temperature is higher and relative humidity is lower. A new formula of coefficient  $A$  was presented and it has higher veracity. Tests indicate that the error of the relative humidity obtained according to the new formula is lower than 1.4% RH.

**Key words:** psychrometer coefficient, ambient temperature, relative humidity, calculation