

§ 1 干湿球测量法

在湿度测量中，干湿球测量法应用很广。精密的阿斯曼通风干湿表长期以来作为多种工作湿度计的标准。然而，干湿球测湿法基本上是一种间接测量方法，无论在理论上和实践上都还存在不少问题。本节较为详细地介绍根据传热和传质理论推导的干湿球方程，常用的各种干湿表及其测量误差的分析。

一、干湿球测湿的历史

1750 年，Richman^[1] 发现，当温度计的温泡上有水时，它所指示的温度低于周围空气的温度，这一偶然的发现引起了人们的注意。经研究，查明这种致冷现象产生的原因是由于水蒸发的结果。早期的研究者发现，干球和湿球的温度差，即干湿差，不仅取决于温度和空气中的水份含量，而且还和湿球表面空气的流速有关，因而被命名为通风干湿表。1799 年 Lesslie 利用干湿球法的测湿原理制造了一种湿度计，这种早期的仪器由一根 U 型管连接的两个玻璃球组成，一个球染成蓝色，另一个球不上色。后者用湿纱布包裹，U 型管内装带色的硫酸。玻璃球起气体温度计的作用。由于蒸发，湿球的温度下降，其中的气体收缩，因此引起 U 型管内着色液体的位移，其高度的变化反应了湿球的蒸发率，而我们知道，蒸发率与湿度是相关的，因此液体的位移可以作为空气湿度的尺度。

1802 年，Boechman 制造了以他的名字命名的干湿球湿度计。其后，这种湿度计又得到进一步改进，无论在结构形式或测量准

确度方面均已进入实用阶段。它由两支规格尽可能相同的温度计组成，其中一支的温泡用丝绸包着并通过上水芯子和盛水容器相连。1836年Manson使这种湿度计商品化，尽管其原理和结构没有超过前人的研究范围，但他的产品充分考虑了轻便性，1860年Negretli生产的湿度计中已有了最高和最低温度计的使用，干湿差可以自记，以便记录夜间无人观测时的湿度值。

从十九世纪初起，人们开始对湿球理论进行深入研究^[2]，其中心内容是风速的影响。在此期间，从事干湿球湿度计研究的学者在湿球理论方面存在分歧，其原因在于当时缺乏湿度计的生产知识和统一的计量标准。直到十九世纪末，在干湿球系数值上的分歧才初步获得解决，但在理论和实践上仍存在矛盾之处。

十九世纪二十年代到三十年代Apjohn和August基于对流理论建立了干湿球方程。该世纪后半期Maxwell根据扩散理论导出了完全相同的结果。他们的研究构成了湿球理论的基础^[3]。Ferrel给出了采用强烈通风的Assmann干湿表的湿球系数值为 $6.70 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ 。

到了本世纪三十年代，以Svensson^[4]和Arnold^[5]为代表的学者，在前人研究的基础上，利用当代传热、传质方面的新成就建立了比较完整的湿球理论。近年来，Wylie^[6]对干湿表的理论和实践进行了深入的研究，并取得了进展，为通风干湿表的国际标准化作了准备工作。我们将在湿球理论中详细介绍Wylie的研究结果。

一个多世纪以来，有关干湿球测湿学方面的文献浩如烟海。有人统计，到本世纪六十年代为止，共有一千多篇。干湿表的发展集中在两个方面：一个是温度测量方法问题。人们使用了包括膨胀原理的温度计、电阻温度计、热敏电阻、热电偶等在内的当代几乎所有的温度测量技术，以提高测量精度和满足各种场合的测量需要。另一个是建立在对流热平衡和扩散理论基础上的干湿球基础理论的研究。其目的是使干湿球系数A的理论值和实际

值统一起来,或者说,确定更准确的 A 值,以提高方法的可靠性和重复性。由于干湿球湿度计具有坚实的理论基础,尽管还不能说是完美无缺,然而,这种方法在测湿法中一直占有牢固的地位,这并不是偶然的。

精密的阿斯曼通风干湿表长期以来作为检定其它湿度计的第二标准。一般通风干湿表所能达到的精度是 $1-2\%RH$,在接近饱和时,仪器的准确度和灵敏度大大下降。针对这个问题, Gregory^[7] 研制了平衡温度干湿表,这种干湿表在高湿时仍然十分灵敏。另外,通风干湿表用于零度以下时不仅操作十分不便,其准确度也大大下降,这是干湿球测湿法所固有的局限性。

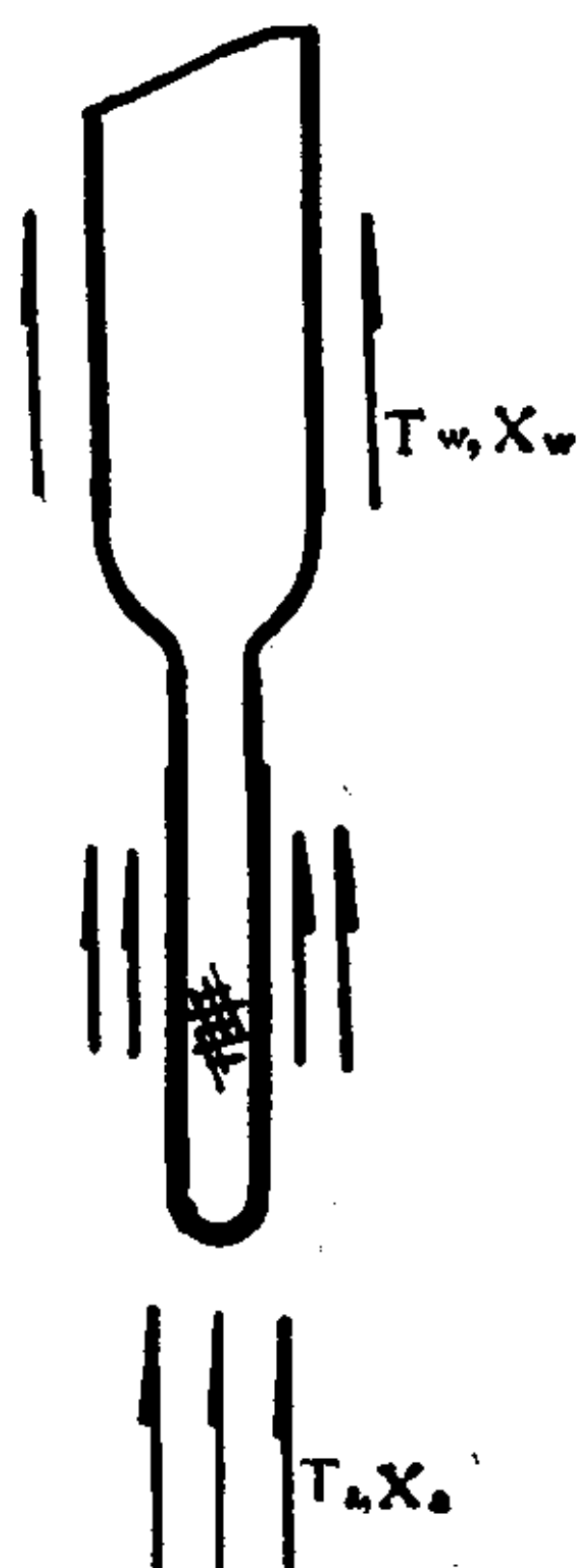
二、干湿球湿度计的基本原理

干湿球由两支规格完全相同的温度计组成,一支称为干球温度计,它像普通的温度计一样,温泡暴露在空气中,用以测量环境温度,示值用 T_a (或 t_a) 表示。另一支为湿球温度计,其温泡用特制纱布包裹,通过上水芯子与盛有纯水的容器相连,或临时加水,使纱布套保持湿润。当湿球周围的空气处于不饱和状态时,湿球纱布套上的水分就会不断蒸发,由于水分蒸发需要吸收热量,从而使湿球的温度下降,其示值用 T_w (或 t_w) 表示。人们通常把干球温度 T_a 与湿球温度 T_w 之差称为干湿差 (或湿球温度降)。显然,湿球水分蒸发的速度与其周围气体的水份含量有关,当气体湿度越低时,水份蒸发越快,湿球温度亦越低,反之亦然。由此可见,空气的湿度与干球温度和湿球温度之间呈某种函数关系。因此干湿球测湿的关键是如何获得准确的干、湿球温度,然后借助干湿球方程 (或根据该方程编制的图表) 换算出湿度值。如前所述, August 和 Maxwell^[8] 分别从对流理论和扩散理论建立了相同的干湿球方程。为了深入探讨湿球理论,我们首先说明建立干湿球方程的基本原理。

当空气流经湿球表面时,发生热质交换过程,此时空气供给

水份蒸发需要的热量。我们把温度计的湿球及其周围的空气当作一个系统，根据能量守恒原理导出干湿球方程。其过程示意图见图 2.1.1。

为了计算方便，我们用摩尔分数 X 来表示气体的湿度。若一摩尔温度为 T_a ，湿度为 X 的湿空气通过湿球表面，当气体离开湿球时温度为 T_w ，水汽含量为 X_w ，显然 X_w 是 T_w 时的饱和摩尔分数。若 C_p 是以 g 为质量单位的定压比热， M_a 是空气的摩尔质量，则通过湿球表面的湿空气显热的变化为



$$\Delta H_s = -C_p M_a (T_a - T_w) \quad (2.1.1) \quad \text{图2.1.1 干湿球原理示意图}$$

若 L 是每 g 水的蒸发潜热， M_v 是水蒸气的摩尔质量，则水蒸发需要的潜热是

$$\Delta H_L = L M_v (X_w - X) \quad (2.1.2)$$

按照前面的假设，其值和显热相等，即代数和为零。

$$L M_v (X_w - X) - C_p M_a (T_a - T_w) = 0 \quad (2.1.3)$$

整理得

$$X = X_w - C_p M_a (T_a - T_w) / (L M_v) \quad (2.1.4)$$

由第一章知道，摩尔分数与水汽压的关系可以写成

$$X = e/P \quad (2.1.5)$$

所以式(2.1.4)可以变成

$$\begin{aligned} e &= e'_w - P C_p (T_a - T_w) / (\epsilon L) \\ e &= e'_w - A P (T_a - T_w) \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

式中

$$A = \frac{C_p}{L} \cdot \frac{M_a}{M_v} = \frac{C_p}{\epsilon L} \quad (2.1.7)$$

A 称为干湿球系数， P 为气体总压力， M_a 和 M_v 分别为空气和

水的分子量, C_p 为空气的等压比热, L 为水的气化潜热, e 为温度 T 下空气中的水汽分压, e'_w 为 T_w 时的饱和水汽压($e'_w = f_w e_w$, 在一般应用中可取 $e'_w \approx e_w$, 参看第一章 § 2)。这就是著名的 August-Apjohn 干湿球方程^[9]。显然这个方程没有涉及辐射热的影响, 也没有考虑温度计本身的导热损失。这里应指出, 该方程只有在风速足够高时才是正确的, 给出的 A 值才是基本准确的。如果 P 变化很小, $C_p = 1007 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $L = 2.43 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ (近似地取 10°C 时的值), $\varepsilon = 0.622$, 则得到 $A = 6.66 \times 10^{-4} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$, 这样, 从干湿球湿度计上读得 t_a 和 t_w 后, 进一步从饱和水汽压表中查得 t_w 所对应的 e_w , 则可计算出 e , 进而换算到其它湿度表示方法。

干湿球测湿法原理简单, 但其测量受到风速、温度计本身准确度、大气压力测量准确度等各种因素的影响。尤其是方程系数 A 值, 取决于仪器结构、使用条件等多种因素, 尽管它接近于一个常数, 现在人们称之为干湿表系数, 而不叫做干湿表常数。因此对于干湿表的测量状况和湿度值计算方法必须十分注意。