

分流式湿度发生器的设计原理

李占元¹ 杨菊¹ 卓华³ 郑胜请² 任长青¹

(1.中国计量科学研究院,北京市北三环东路18号100029;2江苏省计量科学研究院,南京市栖霞区文澜路95号210023;3.新疆维吾尔自治区计量测试研究院,乌鲁木齐市河北东路188号830011;)

摘要: 本文介绍了分流式湿度发生器的工作流程,比较详细地阐述了发生器湿度量值计算的推导过程,并给出了在一般的校准或检定过程中经常使用的简化公式。

关键词: 分流式湿度发生器 干气 饱和湿气 相对湿度

中图分类号: X859

文献标识码: A

The Design Principle of Two-flow Humidity Generator

LI Zhanyuan¹, YANG Ju¹, ZHUO Hua³, ZEHNG Shengqing², REN Changqing¹

(1.National Institute of metrology, China,18 Beisanhuan East Road, Beijing 100029;2. Jiangsu Institute of Metrology, No. 95, Wenlan Road, Qixia District, Nanjing City210023;3. Thermal Metrology Testing Institute, Xinjiang Uygur Autonomous Region Research Institute of Measurement & Testing, Hebei Street, No.258, Urumqi, China, 830011)

Abstract: The two-flow humidity generator is widely used as a reference for calibrating various hygrometer and transmitters. In this paper, we describe the design principle of the generator. It also demonstrates the calculating formula in detail.

Key words: shunt type humidity generator; dry gas; saturation humidity; relative humidity

CLC number: X859

Document identification code: A

1 概述

湿度是一项重要的环境参数,随着社会的发展和水平的提高,人们对湿度进行测控的要求越来越迫切。在湿度量值传递过程中,湿度发生器作为湿度标准源,是不可缺少的关键设备。

有多种方法能够产生已知湿度量值的标准湿气,主要有饱和盐湿度发生器,双温法湿度发生器以及双压法湿度发生器,而分流式湿度发生器以其操作简单,能够迅速连续地改变湿度量值,使用范围广、造价低廉等特点而成为最受欢迎的湿度标准源。

2 分流式湿度发生器的工作原理

采用干燥的空气或氮气作为气源，用两台质量流量控制器将这股干燥气体按不同比例准确地分为两股，其中的一股在一定温度下通过饱和器增湿，使之成为饱和湿气（即相对湿度为 100%RH），然后在相同的温度下与另一股干气混合，通过两台质量流量计调节饱和湿气和干气的流量，便可得到相对湿度恒定并且连续可调的恒湿气流。

3 分流式湿度发生器的结构示意图

1. 干燥气源
2. 湿气质量流量控制器
3. 干气质量流量控制器
4. 饱和器
5. 测试室
6. 恒温槽
7. P_S : 饱和室内气体总压力
8. P_C : 测试室内气体总压力
9. e_s' : 饱和室内水蒸气分压力
10. e : 测试室内水蒸气分压力

4 分流式湿度发生器计算公式的推导

假设分流式湿度发生器的饱和湿气流量为 Q_W ，干气流量为 Q_D ，分流分数 F 为

$$F = \frac{Q_W}{Q_D + Q_W} \quad (1)$$

参照图 1，在单位时间内，通过点 A 的干空气质量为 m_a ，其中残余含水量为 m_v^o ，根据式 (1)，单位时间内通过点 C 的干空气质量 m_{ac} 和残余水蒸气含量 m_{vc}^o 分别为：

$$m_{ac} = m_a (1 - F) \quad (2)$$

$$m_{vc}^o = m_v^o (1 - F) \quad (3)$$

同理，单位时间内通过点 B （即通过水饱和器）的干空气质量 m_{aB} 和残余水蒸气含量 m_{vB}^o 分别为：

$$m_{aB} = m_a F \quad (4)$$

$$m_{vB}^o = m_v^o F \quad (5)$$

当通过点 C 的气流 $Q_D = 0$ 、即 $F = 1$ 时，设定气流由饱和器中所带出的水蒸气的质量

为 m'_v ，则在饱和器出口 D 点，单位时间内通过的水蒸气的总质量为：

$$m''_v = m_v^o F + m'_v F \quad (6)$$

当干气、饱和湿气两股气流在 E 点混合后，干空气的质量仍为 m_a （与通过点 A 时的干空气质量相同），单位时间内通过点 E 的水蒸气的总质量为：

$$\begin{aligned} m_v &= m_v^o(1-F) + m''_v \\ &= m_v^o(1-F) + m_v^o F + m'_v F \\ &= m_v^o + m'_v F \end{aligned} \quad (7)$$

根据质量混合比的定义，混合湿气在 E 点处的质量混合比 r 为：

$$r = \frac{m_v}{m_a} = \frac{m_v^o + m'_v F}{m_a} \quad (8)$$

假设水蒸气和干空气均为理想气体，根据气体状态方程，如果在湿度发生器测试室内的气体总压力为 P_c ，水蒸气分压为 e ，则有：

$$\begin{aligned} m_v &= \frac{e V M_v}{RT} \\ m_a &= \frac{(P_c - e) V M_a}{RT} \end{aligned} \quad (9)$$

(10)

上面式中， M_v 为水蒸气的摩尔质量 18.0653 克/摩尔，

M_a 为干空气的摩尔质量 28.9635 克/摩尔，

将 (9)、(10) 两式带入 (8) 中：

$$r = \frac{e}{P_c - e} \times \frac{M_v}{M_a} = \frac{m_v^o + m'_v F}{m_a} \quad (11)$$

设定常数项 $\varepsilon = \frac{M_v}{M_a}$ ，整理 (11) 式得到

$$e = \frac{P_c(m_v^o + m'_v F)}{\varepsilon m_a + m_v^o + m'_v F} \quad (12)$$

在湿度发生器的饱和室内，设定其总压力为 P_s ，水蒸气分压为 e'_s ，则在饱和器出口 D 点的质量混合比 r_s 为：

$$r_s = \frac{m_v^o F + m'_v F}{m_a F} = \frac{m_v^o + m'_v}{m_a} \quad (13)$$

根据气体状态方程：

$$m_v^o + m_v' = \frac{e_s' VM_v}{RT} \quad (14)$$

$$m_a = \frac{(P_S - e_s') VM_a}{RT} \quad (15)$$

整理 (14)、(15) 两式可得：

$$\frac{m_v^o + m_v'}{m_a} = \varepsilon \frac{e_s'}{P_S - e_s'}$$

$$\text{得：} \quad m_v' = \varepsilon \frac{e_s'}{P_S - e_s'} - m_v^o \quad (16)$$

将 (16) 式带入 (12) 式可得：

$$e = \frac{P_C \left[m_v^o + \left(\varepsilon \frac{m_a e_s'}{P_S - e_s'} - m_v^o \right) F \right]}{\varepsilon m_a + m_v^o \left(\varepsilon \frac{m_a e_s'}{P_S - e_s'} - m_v^o \right) F} \quad (17)$$

设定在湿度发生器的测试室内的饱和水蒸气压为 e_s ，那么根据相对湿度的计算公式，可以得到发生器相对湿度的计算公式为：

$$U = \frac{e}{e_s} (\times 100\%RH)$$

$$= \frac{P_C \left[m_v^o + \left(\varepsilon \frac{m_a e_s'}{P_S - e_s'} - m_v^o \right) F \right]}{\varepsilon m_a + m_v^o \left(\varepsilon \frac{m_a e_s'}{P_S - e_s'} - m_v^o \right) F} \cdot \frac{1}{e_s}$$

$$= \frac{P_C}{e_s} \cdot \frac{m_v^o (1-F) + \varepsilon m_a \frac{e_s'}{P_S - e_s'} \cdot F}{m_v^o (1-F) + \varepsilon m_a \left(1 + \frac{F e_s'}{P_S - e_s'} \right)} (\times 100\%RH) \quad (18)$$

式 (18) 为分流式湿度发生器的计算公式，它基于以下两个假设条件：

- (1) 水蒸气和干空气视为理想气体。
- (2) 干空气经过水饱和和器饱和后（为多级饱和），认为相对湿度为 100%RH。

虽然式 (18) 已经有所简化，但仍难以投入日常的计算，我们通常再做以下假定：

干燥空气中的水蒸气残余量视为零，即 $m_v^o = 0$ 。

- (1) 湿度发生器恒温槽的温场均匀，饱和室的温度与测试室的温度相等。
- (3) 在发生器的整个系统中，没有压降，饱和室的压力 (P_S) 等于测试室的压力 (P_C) 等于大气压力 (P)，此时 $e'_s = e_s$

整理 (18) 式，可得：

$$U = \frac{F}{1 - (1 - F) \frac{e_s}{P}} (\times 100\%RH) \quad (19)$$

在式 (19) 中：

F 为分流分数

e_s 为发生器工作温度下的饱和水蒸气压 (P_a)

P 为大气压力 (P_a)

公式 (19) 即为目前普遍使用的分流式湿度发生器的计算公式。

5 小结：

分流式湿度发生器是目前应用最广泛的二级标准湿度设备，通过本文，读者可以更加清楚了解分流式湿度发生器的工作原理及设计原理。

参考文献：

李英干、范金鹏，《湿度测量》，气象出版社，1990年。