

控制高湿度应用

利用露点温度

白皮书



VAISALA

目录

将露点温度用作控制参数的好处	3
无论是否考虑过程压力， 根据露点和干球温度计算相对湿度	5
考虑过程压力时的计算公式	7
为高湿度测量应用选择测量仪表时的考虑因素	9

将露点温度用作控制参数的好处

露点温度在很多工业应用中都是有用的参数。它通常用于测量干燥度，例如塑料制造以及使用干燥的压缩空气的应用，其中相对湿度 (RH) 通常低于 10%RH。

与相对湿度不同，露点温度并不受温度变化影响。我们举个例子，有一间洁净室，控制目标设置为在 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 的温度下相对湿度为 40%RH，允许 2%RH 的误差。由于加湿或干燥可能会改变温度，而加热或冷却会改变 RH，因此使用 RH 作为湿度控制参数可能难以保持稳定的状态。解决方法是改用露点温度作为控制参数。





另一个应用示例是燃料电池，其中高湿度对提高电池的效率和寿命至关重要。在此类应用中，测量传感器上形成的冷凝水会使其在充分干燥之前无法进行测量。要避免出现这种情况，可以使用具有传感器加热技术的测量仪表。加热技术可以使湿度传感器温度始终高于露点温度，防止冷凝水形成。这样可以延长传感器的使用寿命，并确保即使在冷凝环境中也能进行可靠且可重复的露点温度测量。

但是，如果可以直接用传感器测量相对湿度，为什么还要测量露点温度呢？相对湿度是一个依赖于温度测量的输出参数，这意味着如果使用传感器加热技术，探头的温度读数将会失真。因此，可以使用单独的仪表测量环境的真实温度，或者将温度数据输入 Modbus 寄存器。探头加热对露点温度测量没有影响，这就是可以选择将其用作输出参数的原因。

无论是否考虑过程压力，根据露点和干球温度计算相对湿度

在本节中，我们将介绍两种使用露点温度计算相对湿度的方法。第一种是不考虑过程压力或增强因子的简化方法。该公式适用于大气压力下的环境，其中气体是氮气或空气。另一种计算相对湿度的方法是将所有相关因素都考虑在内，其中包括过程压力和增强系数。

不考虑过程压力时的计算公式

相对湿度 (RH) 定义为：在任何温度和压力下，水汽压 (e_w) 与当前气体温度和压力下的水面上饱和水汽压 (e_{ws}) 的比值。可以使用公式 [1] 计算。

$$RH = \frac{f(T_d, p)e_w(T_d)}{f(T, p)e_{ws/is}(T)} \cdot 100 \% RH \approx \frac{e_w(T_d)}{e_{ws/is}(T)} \cdot 100 \% RH, \text{ 其中} \quad (1)$$

e_w = 水汽压, Pa

e_{ws} = 饱和水汽压 (水面上), Pa

e_{is} = 饱和水汽压 (冰面上), Pa

f = 增强因子

水汽压 (e_w) 和饱和水汽压 (e_{ws}/e_{is}) 是该计算中重要的因素。因为利用函数、迭代过程或辅助参数 (温度和压力)，通过它们可以得出其他参数。

在本白皮书中，我们利用 Sonntag 公式 [2] 使用露点和环境温度计算相对湿度。该公式适用于温度范围 $-100^\circ\text{C} \dots +100^\circ\text{C}$ 且在环境压力下。另请注意，在公式 [2] 中，温度为开尔文。

$$\left. \begin{matrix} e_{ws}(T_K) \\ e_{is}(T_K) \end{matrix} \right\} = a_0 \times \exp \left[\frac{a_1}{T_K} + a_2 + a_3 T_K + a_4 T_K^2 + a_5 \ln(a_6 \times T_K) \right], \text{ 其中} \quad (2)$$

$$e_w(T_{dK}) = a_0 \times \exp \left[\frac{a_1}{T_{dK}} + a_2 + a_3 T_{dK} + a_4 T_{dK}^2 + a_5 \ln(a_6 \times T_{dK}) \right], \text{ 其中} \quad (2)$$

T_{dK} = 露点温度, K

T_K = 温度, K

a_n = 系数 (请参见表 1)

表 1. 系数 a0 ... a6 的数值

系数 a _n	水面上 (P _{ws}) (0 ...100°C)	冰面上 (P _{is}) (-100 ...0°C)
a ₀	1 Pa	1 Pa
a ₁	-6.0969385E+03 K	-6.0969385E+03 K
a ₂	2.12409642E+01	2.932707E+01
a ₃	-2.711193E-02 K ⁻¹	1.0613868E-02 K ⁻¹
a ₄	1.673952E-05 K ⁻²	1.3198825E-05 K ⁻²
a ₅	2.433502	-4.9382577E-01
a ₆	1 K ⁻¹	1 K ⁻¹

示例:

计算 T = 25 °C 且 Td = 20 °C 时的相对湿度:

1.将温度从摄氏度或华氏度转换为开尔文

摄氏度:

$$T = 25 \text{ °C} \Rightarrow T_K = 25 + 273.15 = 298.15 \text{ K}$$

$$T_d = 68 \text{ °F} \Rightarrow T_{dK} = 20 + 273.15 = 293.15 \text{ K}$$

华氏度:

$$T = 77 \text{ °F} \Rightarrow T_K = \frac{77 + 32}{1.8} + 273.15 = 298.15 \text{ K}$$

$$T_d = 68 \text{ °F} \Rightarrow T_{dK} = \frac{68 + 32}{1.8} + 273.15 = 293.15 \text{ K}$$

2.使用公式 [1] 和 [2] 计算 RH。

$$RH = \frac{P_w(T_{dK})}{P_{ws}(T_K)} \cdot 100\%rh \quad (1)$$

$$RH = \frac{a_0 \times \exp \left[\frac{a_1}{T_{dK}} + a_2 + a_3 T_{dK} + a_4 T_{dK}^2 + a_5 \ln(a_6 \times T_{dK}) \right]}{a_0 \times \exp \left[\frac{a_1}{T_K} + a_2 + a_3 T_K + a_4 T_K^2 + a_5 \ln(a_6 \times T_K) \right]} \cdot 100\%rh \quad (1) + (2)$$

将系数 a0-a6 和温度放入公式中, 得到 RH = 73.80 %

考虑过程压力时的计算公式

水汽压描述至少两种成分形成气体混合物的情况。因此，不能将气体视为理想气体，并且引入增强因子 (f) 来校正潮湿气体的非理想效应。

对于大气压力和真空压力，这种效应通常可以忽略不计，但随着气压的增加，非理想效应也会随之增加。在加压过程中，必须将增强因子 (f) 添加到水汽压公式中，以便涵盖 0...2 MPa 的压力范围。请注意，公式 [3]、[4]、[4.1] 和 [4.2] 使用摄氏度，而不是开尔文。

$$\left. \begin{array}{l} P_w(T_d) \\ P_{ws}(T) \\ P_{is}(T) \end{array} \right\} = e_w/e_{ws}/e_{is} \cdot f(T/T_d, P), \text{ 其中} \quad (3)$$

f = 增强因子

p = 总压力, Pa

T = 温度, °C

T_d = 露点温度, °C

对于大于 1100 hPa 的气压的增强因子，通常使用 Lewis Greenspan 提出的公式 [4] 来确定。本白皮书中使用的系数 [5] 由 Bob Hardy 计算得出。请注意，此公式的值适用于不含 CO₂ 的潮湿空气。通常，这些值适用于氮气和空气，但如果载气是其他气体，例如 CO₂ 或 CH₄，公式不再有效。

$$f(T, P) = \exp[\alpha(T) \cdot (1 - \frac{P_{ws/is}}{P}) + \beta(T) \cdot (\frac{P}{P_{ws/is}} - 1)], \text{ 其中} \quad (4)$$

$$\alpha(T) = \sum_{i=0}^3 \alpha_i \cdot T^i \quad (4.1)$$

$$\beta(T) = \exp[\sum_{i=0}^3 \beta_i \cdot T^i] \quad (4.2)$$

系数 $\alpha_0 \dots \alpha_3$ 及 $\beta_0 \dots \beta_3$ 可以在表 2 中找到：

表 2. 系数 $\alpha_0 \dots \alpha_3$ 和 $\beta_0 \dots \beta_3$ [5] 的数值

系数 α_n 和 β_n	水面上 (0 ...100°C)	冰面上 (-100 ...0°C)
α_0	3.5362400E-04	3.64449000E-04
α_1	2.9328363E-05 °C ⁻¹	2.9367585E-05 °C ⁻¹
α_2	2.6168979E-07 °C ⁻²	4.8874766E-07 °C ⁻²
α_3	8.5813609E-09 °C ⁻³	4.3669918E-09 °C ⁻³
β_0	-1.07588000E+01	-1.07271000E+01
β_1	6.3268134E-02 °C ⁻¹	7.6215115E-02 °C ⁻¹
β_2	-2.5368934E-04 °C ⁻²	-1.7490155E-04 °C ⁻²
β_3	6.3405286E-07 °C ⁻³	2.4668279E-06 °C ⁻³

使用智能手机计算和转换湿度参数

维萨拉湿度计算器可以简化复杂的湿度计算和换算。它可以帮助您根据唯一的已知参数值和允许的误差，计算出多个湿度参数。您可以进行单位转换，查看环境条件（例如温度和压力）变化的影响，并相应地调整环境条件。您可以通过智能手机或笔记本电脑上的网络浏览器使用该计算器。



要使用计算器，请访问

www.vaisala.cn/zh/lp/humidity-calculator

为高湿度测量应用选择测量仪表时的考虑因素

测量仪表的特性和功能应始终采用高标准，因为测量精度和稳定性对工艺过程和最终产品质量有重大影响。

在选择测量仪表时可以提出下列问题：

- 测量技术是否可靠？是否是在制造商自己的洁净室中开发？
测量仪表是否符合全球标准？
- 是否有采用传感器加热技术的产品？
仪器的 IP 等级是否满足您的需求？
- 可用的测量参数和输出选项是否满足您的需求？
- 制造商是否值得信赖并能够提供持续的支持？
- 在需要时，制造商能否在全球范围内快速交付？
- 从长远来看，制造商是否能开发满足您需求的产品生态系统？



要寻找满足您要求的测量仪表，请访问

www.vaisala.cn

或联系您当地的维萨拉代表。



VAISALA
www.vaisala.cn

参考编号 B212644ZH-A © Vaisala 2023

本资料受版权保护，所有版权为维萨拉及其各个合作伙伴所有。保留所有权利。所有徽标和/或产品名称均为维萨拉或其单独合作伙伴的商标。未经维萨拉事先书面同意，严禁以任何形式复制、转让、分发或存储本手册中的信息。所有规格（包括技术规格）如有变更，恕不另行通知