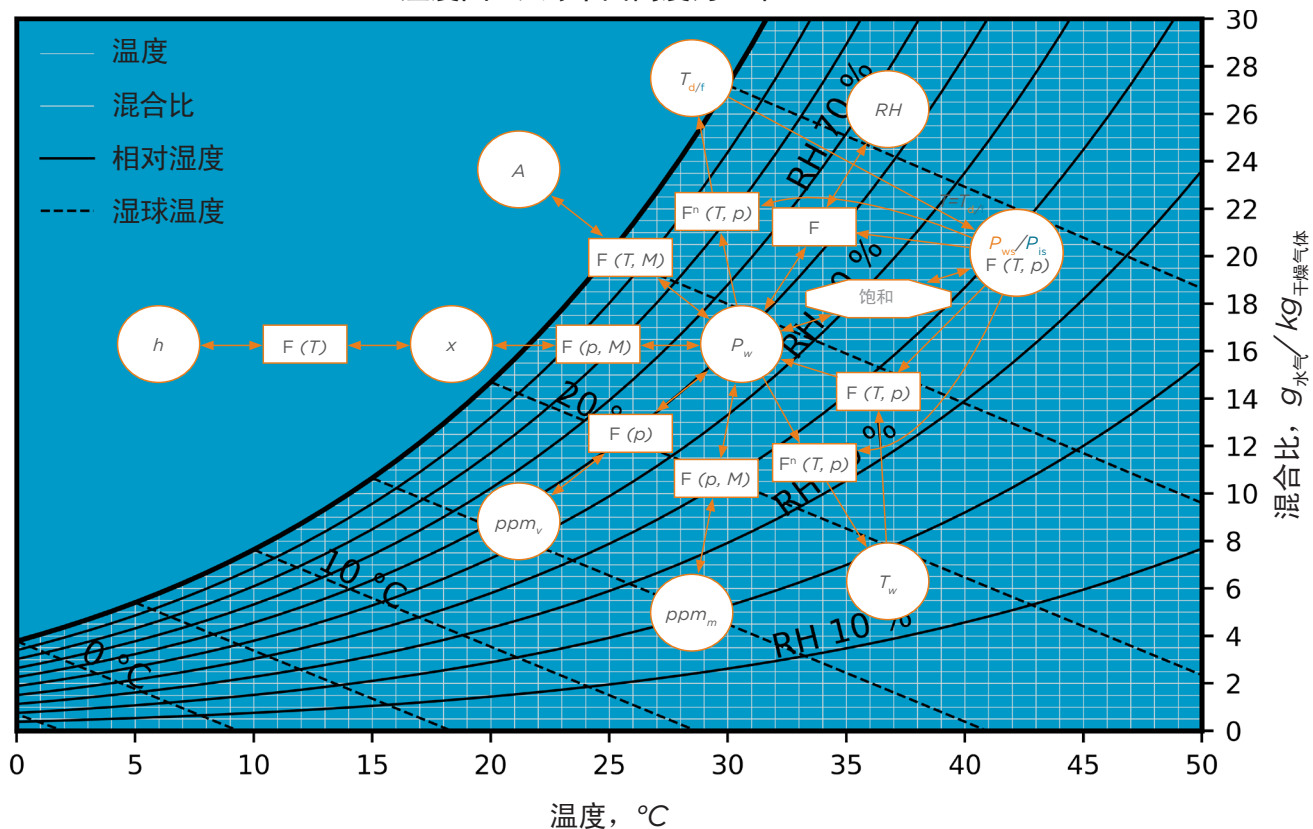


湿度参数换算

计算湿度参数的公式和方法

湿度图 (以海平面高度为基准)



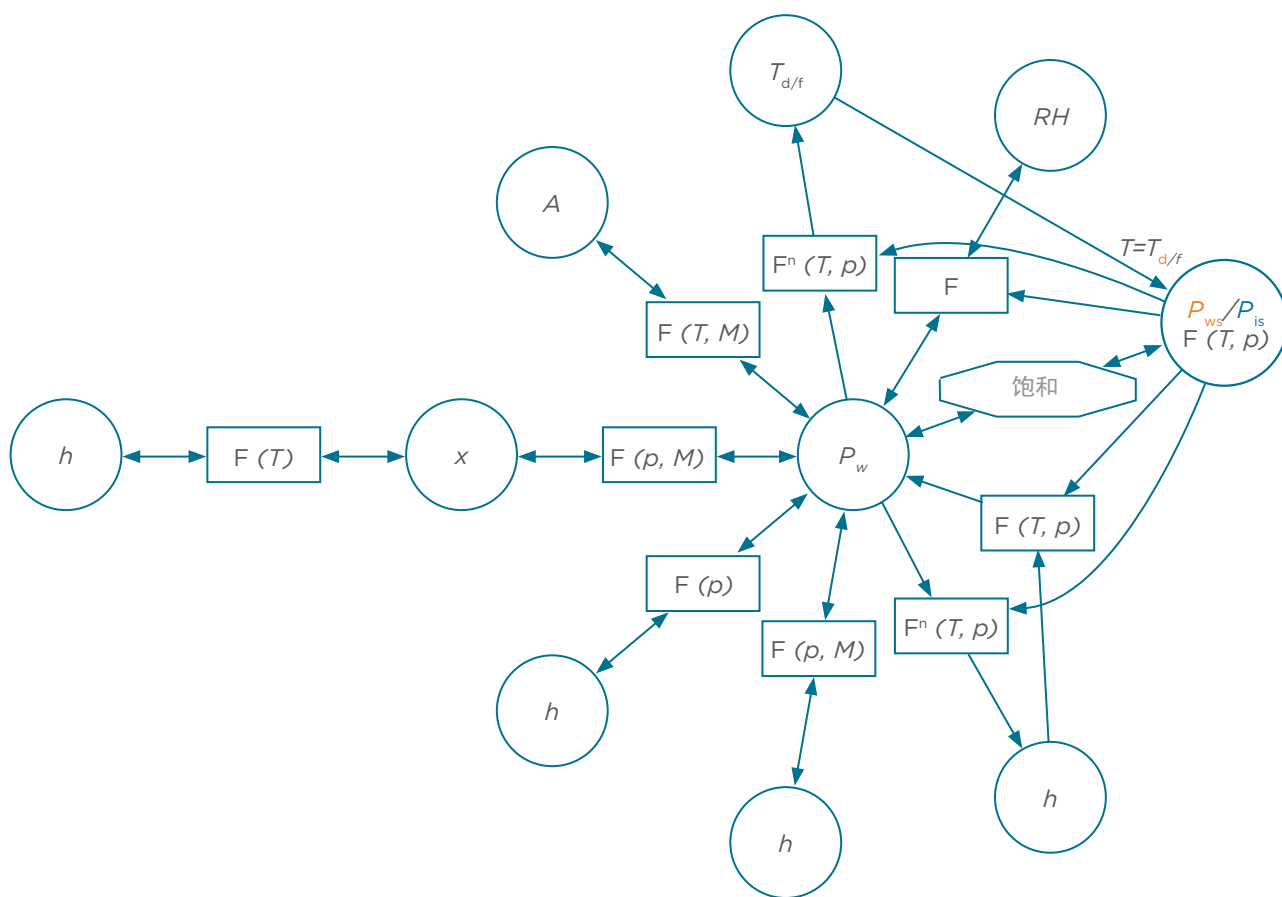
目录

1. 前言	3
2. 饱和水气压力 - P_{ws} 和 P_{is}	4
2.1 增强因子 - f	5
3. 相对湿度 - RH	6
4. 露点和霜点 - $T_{d/f}$	6
4.1 根据露点计算水蒸气压力 - T_d 到 P_w	6
4.2 根据水蒸气压力计算露点 - P_w 到 T_d	6
4.3 根据霜点计算水蒸气压力 - T_f 到 P_w	8
4.4 根据水蒸气压力计算霜点 - P_w 到 T_f	9
5. 绝对湿度 - A	10
6. 混合比 - x	10
7. 焓值 - h	11
8. H_2O 含量 - ppm (百万分之几)	12
8.1 $ppm_{V干}$ - 体积(水气)/体积 _(干气)	12
8.2 $ppm_{m干}$ - 质量 _(水气) /质量 _(干气)	12
8.3 $ppm_{V湿}$ - 体积 _(水气) /体积 _(湿气)	12
8.4 $ppm_{m湿}$ - 质量 _{H_2O} /质量 _湿	12
9. 湿球温度 - T_w	13
9.1 根据湿球温度计算水蒸气压力 - T_w 到 P_w	13
9.2 根据水蒸气压力计算湿球 - P_w 到 T_w	13
10. 分子质量	15
11. 换算为英制单位	16
12. 参考文献	16

湿度参数换算

1. 前言

本文档说明了用于计算不同湿度变量的函数和方法。如下图所示，水蒸气分压 (P_w) 和饱和水蒸气压力 (P_{ws}/P_{is}) 是参数计算中的关键要素。其他参数可以通过使用函数、迭代方法和辅助参数从这些参数中导出：温度和气压。本文档使用国际单位制 (SI) 中的单位；第 11 章提供了英制单位换算方法。



P_{ws}/P_{is}	=	水面/冰面上水蒸气饱和压力 (单位: Pa)
P_w	=	水蒸气压力 (Pa)
RH	=	相对湿度
$T_{d/f}$	=	露点/霜点 (°C)
绝对湿度	=	绝对湿度 (g/m ³)
x	=	混合比 (g/kg)
h	=	焓值 (kJ/kg)
ppm_v	=	百万分之几 (体积 H_2O /体积 气体)
ppm_m	=	百万分之几 (质量 H_2O /质量 气体)
$T_{w/i}$	=	湿球/霜球温度 (°C)
$F(T, p, M)$	=	带辅助量的函数: 温度、气压或摩尔质量
$F^n(T, p)$	=	带辅助量的迭代法: 温度和气压

2. 饱和水气压力 —— P_{ws} 和 P_{is}

有许多饱和水蒸气压力公式可用于计算水蒸气在液态水 (P_{ws}) 或冰 (P_{wi}) 的表面的饱和压力。水蒸气饱和压力可以使用 Sonntag [1] 公式等方式计算得出。该公式的适用温度范围在 -100 °C 到 100 °C 之间。

$$\left. \begin{matrix} e_{ws}(T_K) \\ e_{is}(T_K) \end{matrix} \right\} = a_0 \cdot \exp \left[\frac{a_1}{T_K} + a_2 + a_3 T_K + a_4 T_K^2 + a_5 \ln(a_6 \cdot T_K) \right], \text{ 其中} \quad (1)$$

e_{ws} = 水面上饱和蒸气压力 (Pa)

e_{is} = 冰面上饱和蒸气压力 (Pa)

T_K = 温度 (K, 开尔文)

表 1. 系数 $a_0 \dots a_6$ 的数值

系数 a_n	水面上饱和水气压 (P_{ws}) (0 °C 至 +100 °C)	冰面上 饱和水气压(P_{is}) (-100 °C 至 0 °C)
a_0	1 Pa	1 Pa
a_1	-6.0969385E+3 K	-6.0245282E+3 K
a_2	2.12409642E+1	2.932707E+1
a_3	-2.711193E-2 K^{-1}	1.0613868E-2 K^{-1}
a_4	1.673952E-5 K^{-2}	-1.3198825E-5 K^{-2}
a_5	2.433502	-4.9382577E-1
a_6	1 K^{-1}	1 K^{-1}

在本文档中, 该公式补充了增强因子 (f), 以覆盖 0 至 2 MPa 的压力范围。

$$\begin{aligned} P_{ws}(T_K, p) &= e_{ws} \cdot f(T_K - 273.15, p), \text{ 或} \\ P_{is}(T_K, p) &= e_{is} \cdot f(T_K - 273.15, p), \text{ 其中} \end{aligned} \quad (2)$$

P_{ws} = 水面上饱和蒸气压力 (Pa)

P_{is} = 冰面上饱和蒸气压力 (Pa)

f = 增强因子, 具体参见下一章。

p = 总压力 (Pa)

示例:

20 °C 下的水蒸气饱和压力是多少?

T = 20 °C $\Rightarrow T_K = 20 + 273.15 = 293.15 K$

p = 海平面 = 101325 Pa

P_{ws} = 2339.25 Pa

2.1 增强因子 - f

水气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，并且需要引入增强因子 (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。对于大于 1100 hPa 的气压，通常使用 Lewis Greenspan [2] 提出的公式来确定增强因子。本文档中使用的系数通过 Bob Hardy [3] 计算的。如果可以接受稍高的不确定度，这些系数也可用于计算氮中的增强因子。

$$f(T, P) = \exp \left[\alpha(T) \cdot \left(1 - \frac{e_{ws/is}}{P} \right) + \beta(T) \cdot \left(\frac{P}{e_{ws/is}} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

$$\alpha(T) = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot T^i \quad (3.1)$$

$$\beta(T) = \exp \left[\sum_{i=0}^3 b_i \cdot T^i \right], \text{ 其中} \quad (3.2)$$

e_{ws} = 水面上饱和蒸气压力 (Pa)

e_{is} = 冰面上饱和蒸气压力 (Pa)

T = 温度 (°C)

P = 总压力 (Pa)

表 2. 系数 $a_0 \dots a_3$ 和 $b_0 \dots b_3$ [3] 的数值

系数 a_n 和 b_n	水面上 (0 °C 到 +100 °C)	过冷水水面上 (-50 °C 到 0 °C)	冰面上 (-100 °C 到 0 °C)
a_0	3.5362400E-4	3.6218300E-4	3.6444900E-4
a_1	2.9328363E-5 °C ⁻¹	2.6061244E-5 °C ⁻¹	2.9367585E-5 °C ⁻¹
a_2	2.6168979E-7 °C ⁻²	3.8667770E-7 °C ⁻²	4.8874766E-7 °C ⁻²
a_3	8.5813609E-9 °C ⁻³	3.8268958E-9 °C ⁻³	4.3669918E-9 °C ⁻³
b_0	-1.0758800E+1	-1.0760400E+1	-1.0727100E+1
b_1	6.3268134E-2 °C ⁻¹	6.3987441E-2 °C ⁻¹	7.6215115E-2 °C ⁻¹
b_2	-2.5368934E-4 °C ⁻²	-2.6351566E-4 °C ⁻²	-1.7490155E-4 °C ⁻²
b_3	6.3405286E-7 °C ⁻³	1.6725084E-6 °C ⁻³	2.4668279E-6 °C ⁻³

示例:

T = 20 °C

P = 10 bar (绝压) = 1 MPa = 1 000 000 Pa

f = 1.0307

3. 相对湿度 - RH

相对湿度 (RH) 的定义为: 在所有温度和压力下, 水气压 (P_w) 与气体温度下的水面上饱和水汽压 (P_{ws}) 的比值:

$$RH = \frac{P_w}{P_{ws}} \cdot 100 \% rh \quad (4)$$

总压力不属于定义的一部分。在 100 °C 以上, 适用同样的定义。但由于水气饱和压力 P_{ws} 大于 1013 hPa (正常环境压力), 在无压系统中, 相对湿度无法达到 100%。在 0 °C 以下, 定义也同样有效。这里 100% 的相对湿度也是不可能的, 因为在低于 100% 相对湿度 (以冰面上饱和水汽压为基准) 就会发生冷凝。冰上的相对湿度 (RH_i) 可使用 P_{is} 的系数计算:

$$RH_i = \frac{P_w}{P_{is}} \cdot 100 \% rh_i \quad (5)$$

4. 露点和霜点 - $T_{d/f}$

露点温度 (T_d) 是空气由于水蒸气变得完全饱和而必须冷却到的温度。霜点 (T_f) 是空气在冰面上水蒸气饱和时的温度。 $T_{d/f}$ 表示当露点温度等于或高于 0 °C 时, 将使用露点 (T_d) 计算, 低于 0 °C 时将使用霜点 (T_f) 计算。

4.1 根据露点计算水蒸气压力 - T_d 到 P_w

根据 T_d 计算水蒸气压力只需直接运算。使用公式 (1) 计算 T_d 条件下的水蒸气饱和压力:

$$P_w(T_d) = P_{ws}((T_d + 273.15)) \quad (6)$$

4.2 根据水蒸气压力计算露点 - P_w 到 T_d

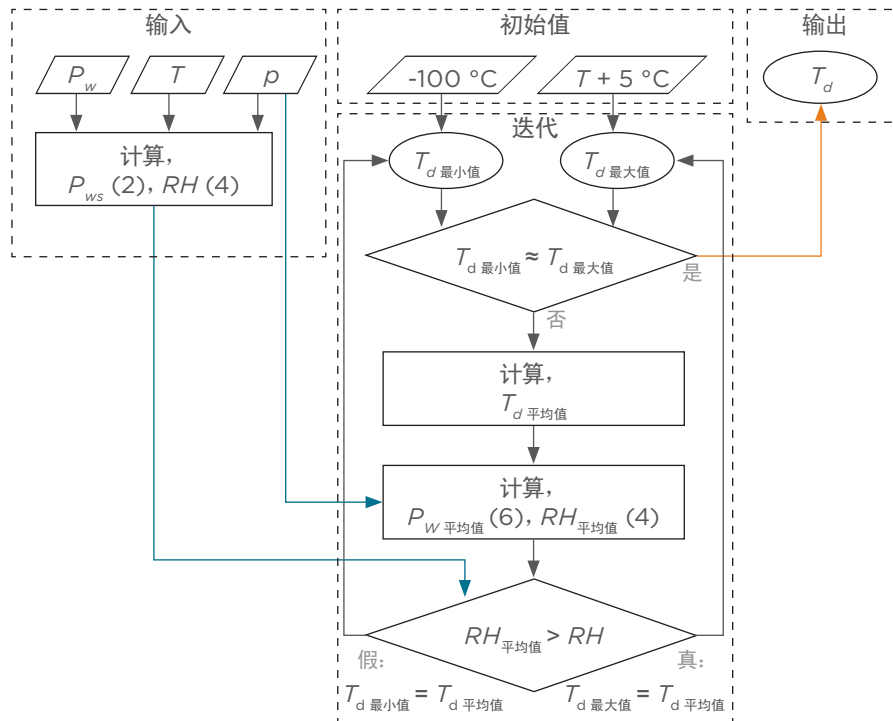
根据水蒸气压力、温度和压力, 计算露点涉及复杂的公式, 因为增强因子和水蒸气压力都将取决于露点本身。可使用一个迭代过程计算露点:

试错过程的初始值应足够宽泛, 以便在其边界内包含将要计算出的结果。大多数应用的正确值如下所示。

$$T_{d \min} = -100 \text{ } ^\circ\text{C}, T_{d \max} = T + 5 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ 但温度最高不超过 } 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

在本文中, $T_{d \text{ 最小值}}$ 限定在 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因为这是 P_{ws} 计算 (1) 的指定准确度限值。在此引入一个小的差值 ($+5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 以防初始参数不准确。根据水蒸气压力计算露点的迭代过程显示在下面的示意图中:

示例:



计算以下条件下的 T_d :

$$\begin{aligned}
 P_w &= 233.92 \text{ Pa} \\
 T &= 20\text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow T_k = 293.15 \text{ K} \\
 p &= 101325 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{ws} (1) &= 2339.25 \text{ Pa} \\
 RH (3) &= 10.0 \%rh
 \end{aligned}$$

迭代					
步骤	T_d 最小值 (°C)	T_d 最大值 (°C)	平均值		
			T_d °C	P_w Pa	RH %rh
1	-100 [初始值]	25 [T+5 初始值]	-37.5	24.68	1.051
2	-37.5	25	-6.25	385.0	16.39
3	-37.5	-6.25	-21.9	107.2	4.563
4	-21.9	-6.25	-14.1	207.5	8.837
5	-14.1	-6.25	-10.2	284.1	12.10
6	-14.1	-10.2	-12.1	243.1	10.35
7	-14.1	-12.1	-13.1	224.7	9.568
8	-13.1	-12.1	-12.6	233.7	9.954
..	..	..	..	..	..
19	-12.5404	-12.5400	-12.5402	234.9	10.00
20	-12.5404	-12.5402	-12.5403	234.9	10.00

答案: $T_d = -12.540$ °C

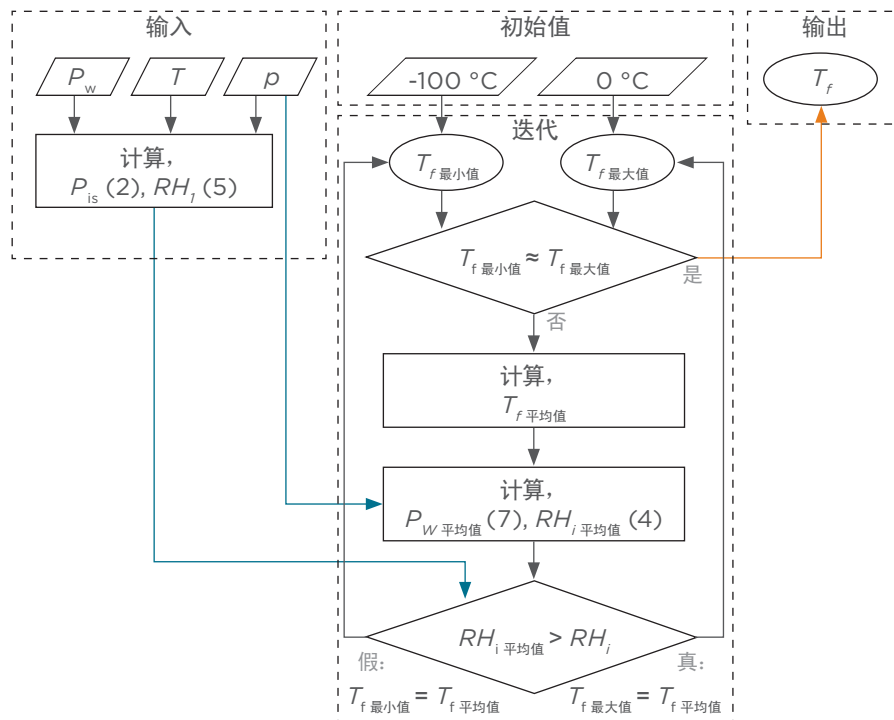
4.3 根据霜点计算水蒸气压力 - T_f 到 P_w

使用“冰上”系数 (1) 将霜点转换为水气压:

$$P_w(T_K) = P_{is} \left((T_f + 273.15) \right) \quad (7)$$

4.4 根据水蒸气压力计算霜点 - P_w 到 T_f

霜点 (T_f) 等于露点 (T_d) (若 $T_d \geq 0\text{ °C}$)。在其他情况下, 可以使用与计算 T_d 相似的方法计算 T_f , 但要使用冰面上系数 P_{is} (1):



示例:

在第 4.2 章的示例计算中, T_d 结果低于 0 ($T_d = -12.540\text{ °C}$)。使用相同的初始值计算 T_f :

$$\begin{aligned}
 P_w &= 233.92\text{ Pa} \\
 T &= 20\text{ °C} \Rightarrow T_k = 293.15\text{ K} \\
 \rho &= 101325\text{ Pa} \\
 P_{is}(1) &= 2339.25\text{ Pa} \\
 RH(3) &= 10.0\text{ \%rh}
 \end{aligned}$$

答案: $T_f = -11.18\text{ °C}$

5. 绝对湿度 - A

绝对湿度定义为一定体积中的水蒸气的质量。如果采用理想的气体行为，则可使用以下公式计算绝对湿度：

$$A = \frac{M_{H_2O} \cdot P_w}{R \cdot T_K}, \text{ 其中} \quad (8)$$

绝对湿度 = 绝对湿度 (g/m³)

M_{H_2O} = 水的摩尔质量 (g/mol)

R = 通用气体常数 8.3145 J·K⁻¹·mol⁻¹

P_w = 水蒸气压力 (Pa)

T_K = 温度 (K)

示例:

计算以下条件下的空气绝对湿度：

RH = 80.0%rh

T = 20 °C => T_K = 293.15 K

P = 101325 Pa

水的摩尔质量 = 18.0154 g/mol¹

$P_{ws}(1)$ = 2339.25 Pa

$P_w(5)$ = 1871.51 Pa

$$A = \frac{18.0154 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 1871.51 \text{ Pa}}{8.3145 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \cdot 293.15 \text{ K}} = 13.8 \text{ g/m}^3$$

6. 混合比 - x

混合比（水蒸气质量/干燥气体质量）的计算方法如下：

$$x = B \frac{P_w}{P - P_w}, \quad (9)$$

x = 混合比 g_{H₂O}/kg_{干燥气体}

$$B = \frac{M_{H_2O}}{M_{\text{气体}}} \cdot 1000 \text{ in g/kg, 其中}$$

M_{H_2O} = 水的摩尔质量 = 18.0154 g/mol¹

$M_{\text{气体}}$ = 气体的摩尔质量 (g/mol) (空气 = 28.965 g/mol¹ -> Bair = 621.97 g/kg)

P_w = 水蒸气压力 (Pa)

P = 总压力 (Pa)

¹请参见第 10 章“分子量”

可以用其他气体的分子量来计算其他气体的 B。例如，计算氢气 (H_2) 可使用 [4]:

$$B = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} \cdot 1000 = \frac{18.0154 \text{ g/mol}}{2.0156 \text{ g/mol}} \cdot 1000 = 8938.0 \text{ g/kg}$$

示例:

计算以下条件下的混合比:

$$\begin{aligned} RH &= 50.0\%rh \\ T &= 80\text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow T_k = 353.15 \text{ K} \\ p &= 101325 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{ws}(1) &= 47415.54 \text{ Pa} \\ P_w(5) &= 23703.69 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$x = 621.97 \cdot 23703.69 / (101325 - 23703.69) = 189.93 \text{ g/kg}$$

7. 焓值 - h

在恒压下, 可使用以下公式从混合比计算出水蒸气的特定焓值。请注意, 以下公式中给定的系数取决于温度和气压。这些常量可计算出常压下的准确结果。可使用水蒸气表中的温度特定值来提高蒸发热焓 h_{we} 的准确度:

$$h = C_{pg} \cdot T + \frac{x}{1000} (C_{pw} \cdot T + h_{we}), \text{ 其中} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} h &= \text{焓值 (kJ/kg)} \\ C_{pg} &= \text{恒压下的特定气体比热: 空气} = 1.006 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \\ C_{pw} &= 0\text{ }^{\circ}\text{C 时, 恒压下的特定水蒸气比热: } 1.84 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \\ h_{we} &= 0\text{ }^{\circ}\text{C 时, 水蒸发所消耗的热量: } 2501 \text{ kJ/kg} \\ x &= \text{混合比 } g_{H_2O} / \text{kg}_{\text{干燥气体}} \\ T &= \text{温度 (}^{\circ}\text{C)} \end{aligned}$$

示例:

计算以下条件下的焓值:

$$x = 190 \text{ g/kg}$$

$$T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h = C_{pg} \cdot T + \frac{x}{1000} (C_{pw} + h_{we} \cdot T),$$

8. H₂O 含量 - ppm (百万分之几)

有四种不同的方式可用于表示 H₂O 含量, 使用正确的方式很重要。含水量可指质量分数或体积分数。除此之外, ppm 可以表示为干燥气体占比或总气体占比。以下各章将介绍这四种不同的变化形式。

8.1 ppm_{v干} - 体积(水气)/体积(干气)

$$ppm_{v干} = \frac{P_w}{p - P_w} \cdot 10^6, \text{ 其中} \quad (11)$$

$$P_w = \text{水蒸气压力 (Pa)}$$

$$p = \text{总压力 (Pa)}$$

8.2 ppm_{m干} - 质量(水气)/质量(干气)

$$ppm_{m干} = \frac{M_{H_2O} \cdot P_w}{M_{\text{气体}} \cdot (p - P_w)} \cdot 10^6, \text{ 其中} \quad (12)$$

$$M_{H_2O} = \text{水的分子质量 g/mol (18.0146)}$$

$$M_{\text{气体}} = \text{干燥气体的摩尔质量 g/mol (空气 = 28.965)}^2$$

8.3 ppm_{v湿} - 体积(水气)/体积(湿气)

$$ppm_{v湿} = \frac{P_w}{p} \cdot 10^6 \quad (13)$$

8.4 ppm_{m湿} - 质量_{H₂O}/质量_湿

$$ppm_{m干} = \frac{M_{H_2O} \cdot P_w}{M_{\text{气体}} \cdot p} \cdot 10^6 \quad (14)$$

²请参见第 10 章“分子量”

9. 湿球温度 - T_w

可通过称为干湿计的装置利用物体湿表面的冷却效应来测量湿度。如今，这些装置大多被现代电容式薄膜湿度计所取代。不过，该参数在使用蒸发冷却的其他应用领域中得到了应用。由于气化过程中存在许多不确定因素，例如通风、材质等，因此指定该参数的准确度较为困难，但在确定干湿表系数时，可以综合考虑这些因素。本文档将使用维萨拉湿度仪表中已确定的系数。

9.1 根据湿球温度计算水蒸气压力 - T_w 到 P_w

干球温度 T_d 和湿球温度 T_w 可转换为 P_w

使用以下公式：

$$\begin{aligned} P_w &= P_{ws}(T_w, p) - p \cdot K_A \cdot (T - T_w) \cdot (1 + K_B \cdot T_w), \text{ 其中} \\ P_w &= \text{水蒸气压力 (Pa)} \\ T_w &= \text{湿球 (}^\circ\text{C)} \\ p &= \text{总压力 (Pa)} \\ K_A &= \text{水的干湿表系数 A: } 0.000662 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \\ K_B &= \text{水的干湿表系数 B: } 0.00115 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned} \tag{15}$$

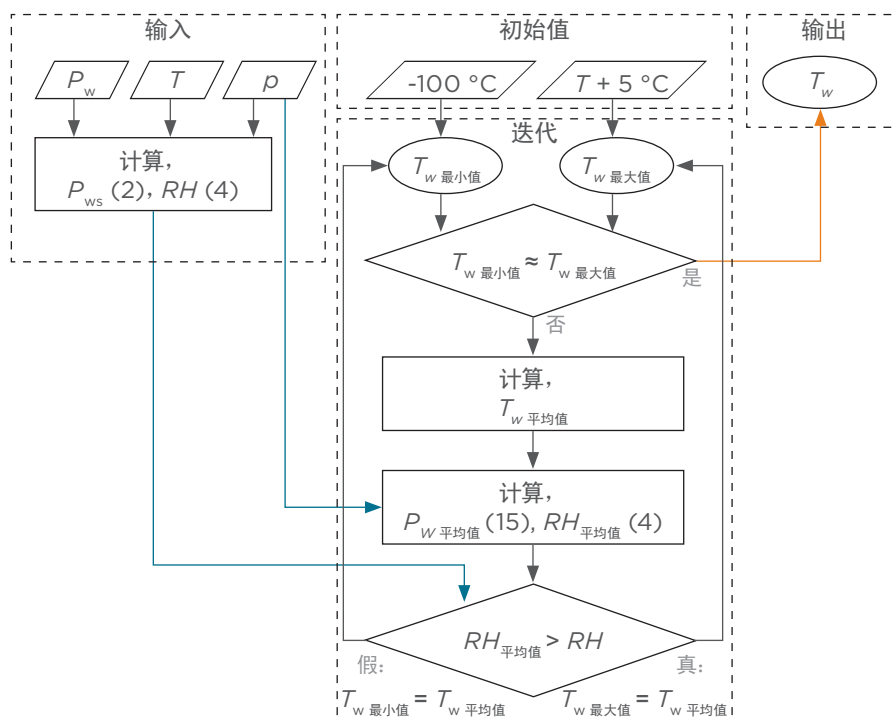
9.2 根据水蒸气压力计算湿球 - P_w 到 T_w

根据水蒸气压力、温度和总压力计算湿球温度涉及复杂的公式，因为增强因子和水蒸气压力都将影响湿球温度的结果。可使用一个迭代过程计算湿球温度：

试错过程的初始值应足够宽泛，以便在其边界内包含计算结果。大多数应用的正确值如下所示。

$$T_{d \text{ 最小值}} = -100 \text{ }^\circ\text{C}, T_{d \text{ 最大值}} = T + 5 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ 但最大值为 } 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

在本文档中， $T_{d \text{ 最小值}}$ 限定在 $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ ，因为这是 P_{ws} 计算 (1) 的指定准确度限值。实际上，不应使用低于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的湿球读数，而应改用霜球计算。在此引入一个小的差值 ($+5 \text{ }^\circ\text{C}$)，以防初始参数不准确。根据水蒸气压力计算湿球温度的迭代过程显示在下面的示意图中：



示例:

计算以下条件下的湿球温度:

$$RH = 10.0 \%rh$$

$$T = 20\text{ °C} \Rightarrow Tk = 293.15\text{ K}$$

$$P = 101325\text{ Pa}$$

$$P_{ws}(1) = 2339.25\text{ Pa}$$

$$\text{答案: } T_w = 7.8\text{ °C}$$

10. 分子质量

在基于质量的湿度计算（如绝对湿度和混合比）中，需要使用物质的分子量（摩尔质量） M 。物质的分子质量是气体成分的摩尔分数乘以它们的摩尔质量的总和 [4]。以干燥空气为例：空气成分有季节性变化以及连续性变化（尤其是 CO_2 含量的连续性变化）。以下是干燥空气的四组分简化表：

成分	摩尔比 ($\text{mol/mol}_{\text{空气}}$)	摩尔质量 [4] (g/mol)	空气中的摩尔质量 ($\text{g/mol}_{\text{空气}}$)
氮气 N_2	0.7808	28.013	21.872
O_2	0.2095	31.999	6.7037
Ar	0.0093	39.948	0.3715
CO_2	0.0004	44.01	0.0176
总计	1		28.965

空气的摩尔质量为 28.965 g/mol。

可使用类似方法计算其他气体混合物。

水的化学分子式是 H_2O ，这意味着每个分子包含一个氧原子和两个氢原子。

成分	摩尔质量 [4] (g/mol)
H_2	2.0156
O	15.999
总计	18.0146

水的摩尔质量为 18.0146 g/mol。

11. 换算为英制单位

华氏度: $T_{\circ F} = T_{\circ C} \cdot \frac{9}{5} + 32$

psi (磅/平方英寸): $p_{psi} = 6894.76 \cdot p_{Pa}$

绝对湿度 (格令每立方英尺): $A_{gr/ft^3} = 2.2883 \cdot A_{g/kg}$

混合比 (格令每磅): $x_{gr/lb} = 0.14286 \cdot x_{g/kg}$

焓值 (英国热量单位每磅): $h_{BTU/lb} = 2.324 \cdot h_{g/kg}$

请注意零焓值有不同的基础温度: 0 °F 经常与 Btu/lb 单位一同使用。

12. 参考文献

- [1] D. Sonntag, "The history of formulations and measurements of saturation water vapour pressure," in *Papers and abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture, vol.1*, Teddington, 1998.
- [2] L. Greenspan, "Functional Equations for the Enhancement Factors for CO₂ -free moist air," *Journal of Research of NBS 80A*, pp.41-44, 1975.
- [3] B. Hardy, "Formulations for vapor pressure, frostpoint, temperature, dewpoint temperature, and enhancement factors in range -100 °C to 100 °C," in *Papers and abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture, vol.1*, Teddington, 1998.
- [4] J. Meija, T. B. Coplen, M. Berglund, W. A. Brand, P. De Bièvre, M. Gröning, N. E. Holden, J. Irrgeher, R. D. Loss, T. Walczyk and T. Prohanska, "Atomic weights of the elements 2013," IUPAC, 2015.

VAISALA

www.vaisala.cn

请联系我们，网址为：
[www.vaisala.com/zh/lp/
contact-form](http://www.vaisala.com/zh/lp/contact-form)



扫描二维码获取更多
信息

参考编号B210973ZH-L ©Vaisala 2022

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。