

焓湿表的研究及应用

深圳艺洲建筑工程设计有限公司 杨英明[☆]

摘要 将湿空气参数之间的关系式转化为 Visual Basic 程序代码定义的 Excel 自定义函数,并在 Excel 中调用,以简洁的形式计算饱和水蒸气分压力、含湿量、比焓、露点温度、湿球温度,得到焓湿表。使用焓湿表可大幅减小焓湿图法空气处理计算过程中的人工操作误差。

关键词 焓湿表 焓湿图 空气处理 湿球温度 露点温度

Research and application of psychrometric table

By Yang Yingming[★]

Abstract The relationships between the parameters of moist air is transformed to self-defining Excel functions defined by Visual Basic code. Then the saturated water vapour pressure, humidity ratio, specific enthalpy, dew-point temperature, wet-bulb temperature of moist air can be calculated in an Excel table with concise way, and a psychrometric table is obtained. Manual errors in calculating air treatment process using psychrometric chart can be greatly decreased by means of this table.

Keywords psychrometric table, psychrometric chart, air handling, wet-bulb temperature, dew-point temperature

★ Shenzhen Yizhou Architects & Engineers Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong Province, China

①

焓湿图是专业人员进行空气处理过程分析的常用工具,具有直观、易用的特点,但是用于定量计算,误差会很大,如果结合焓湿表使用,就能大大提高计算的精度。

1 焓湿表的理论基础

笔者用 Excel 制作了焓湿表。如何分析湿空气各参数之间的关系式并将其转换为 Visual Basic 准确代码是焓湿表可靠性的关键。

假定在大气压力 p 下,已知湿空气的干球温度 t 和相对湿度 φ ,求湿空气的饱和水蒸气分压力 p_{qb} ,含湿量 d ,比焓 h ,露点温度 t_d 和湿球温度 t_w 。这 5 个状态参数均由给定的 p, t, φ 中的一个或多个参数求出。其中除了饱和水蒸气分压力 $p_{qb}(t)$ 函数为经验公式,其余求解式均为理想气体的理论公式。

1) 饱和水蒸气分压力 p_{qb} 计算

p_{qb} 为干球温度 t 的函数:

$$\ln p_{qb} = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 T^4 + C_7 \ln T \quad (1)$$

式中 $C_1 \sim C_7$ 为 Hyland-Wexler 公式常数^[1]; T 为热力学温度, K。

当 $t = -100 \sim 0$ °C 时

$$C_1 = -5.674\ 535\ 9 \times 10^3, C_2 = 6.392\ 524\ 7,$$

$$C_3 = -9.677\ 843\ 0 \times 10^{-3}, C_4 = 6.221\ 570\ 1 \times 10^{-7}, C_5 = 2.074\ 782\ 5 \times 10^{-9}, C_6 = -9.484\ 024\ 0 \times 10^{-13}, C_7 = 4.163\ 501\ 9;$$

当 $t = 0 \sim 200$ °C 时

$$C_1 = -5.800\ 220\ 6 \times 10^3, C_2 = 1.391\ 499\ 3, C_3 = -4.864\ 023\ 9 \times 10^{-2}, C_4 = 4.176\ 476\ 8 \times 10^{-5}, C_5 = -1.445\ 209\ 3 \times 10^{-8}, C_6 = 0, C_7 = 6.545\ 967\ 3.$$

$$\lim_{t \rightarrow 0^{\circ} \text{C}} p_{qb}(t) = 611.153\ 6\ \text{Pa},$$

$$\lim_{t \rightarrow +0^{\circ} \text{C}} p_{qb}(t) = 611.212\ 9\ \text{Pa}$$

可见在 0 °C 时用 2 组不同的系数计算出来的湿空气饱和水蒸气分压力的偏差仅为 0.009 7%。

2) 含湿量 d 计算

d 为 p, t, φ 的函数:

$$d = \frac{0.622 p_{qb}(t) \varphi}{p - p_{qb}(t) \varphi} \quad (2)$$

3) 比焓 h 计算

h 为 p, t, φ 的函数:

①[☆] 杨英明,男,1982年9月生,工学学士,工程师,注册公用设备工程师

518046 深圳市福田区深南大道 4005 号联通大厦 9 楼

(0) 13538189660

E-mail: kiangsi@163.com

收稿日期:2012-06-28

$$h = 1.01t + (2500 + 1.84t)d(p, t, \varphi) \quad (3)$$

4) 露点温度 t_d 计算

t_d 为 p, t, φ 的函数。

等含湿量线和 100% 相对湿度线相交时的干球温度为露点温度, 根据含湿量相同, 有表达式:

$$d(p, t_d, 1) = d(p, t, \varphi) \quad (4)$$

式(4)中包含一个变量 t_d , 其余 p, t, φ 都为给定值。将式(2)代入式(4)得到:

$$p_{qb}(t_d) = p_{qb}(t)\varphi \quad (5)$$

严格意义上说露点温度 t_d 与大气压力 p 无关, 之所以将 t_d 表达为 $t_d(p, t, \varphi)$ 、自变量统一为 p, t, φ 是为了形式上的统一和简洁。

5) 湿球温度 t_w 计算

t_w 为 p, t, φ 的函数。在恒定大气压 p 下, 绝热条件初态为 p, t, φ 的湿空气中加入温度为 t_w 的纯净水, 过程中空气的显热转化为水的潜热, 使干球温度下降, 含湿量上升, 当达到饱和时, 空气的干球温度(同时也是湿球温度)恰好为 t_w 。其过程为

向湿空气中加入了温度为 t_w 的液态水的显热, 即 $4.186t_w[d(p, t_w, 1) - d(p, t, \varphi)]$, 由于这个量很小, 在焓湿图上可认为等湿球温度线为等焓线。数值计算时并不忽略这个小量。

根据能量守恒, 有

$$h(p, t, \varphi) + 4.186t_w[d(p, t_w, 1) - d(p, t, \varphi)] = h(p, t_w, 1) \quad (6)$$

式(6)中包含一个变量 t_w , 其余 p, t, φ 都为给定值。

2 焓湿表介绍

湿空气参数之间的关系式转化为 Visual Basic 程序代码定义的 Excel 自定义函数, 并在 Excel 中调用 5 个自定义函数 $p_{qb}(t), d(p, t, \varphi), h(p, t, \varphi), t_d(p, t, \varphi), t_w(p, t, \varphi)$, 就能以很简洁的形式计算饱和水蒸气分压力、含湿量、比焓、露点温度、湿球温度。拖动数据框, Excel 能自动按相同规则生成 $-20 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间间隔 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 干球温度和 2% 相对湿度下的焓湿表。限于篇幅, 摘录局部, 见表 1。

表 1 焓湿表

| | | 相对湿度/% | | | | | | | | | |
|--|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| 干球温度 -20.0 °C $p_{qb}=103.26 \text{ Pa}$ | 含湿量/(g/kg) | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.09 | 0.10 | 0.11 | 0.13 |
| | 比焓/(kJ/kg) | -20.17 | -20.14 | -20.11 | -20.08 | -20.04 | -20.01 | -19.98 | -19.95 | -19.92 | -19.89 |
| | 露点温度/°C | -55.11 | -49.62 | -46.27 | -43.84 | -41.91 | -40.32 | -38.95 | -37.75 | -36.69 | -35.73 |
| | 湿球温度/°C | -21.37 | -21.34 | -21.31 | -21.29 | -21.26 | -21.23 | -21.20 | -21.17 | -21.15 | -21.12 |
| | | 相对湿度/% | | | | | | | | | |
| | | 52 | 54 | 56 | 58 | 60 | 62 | 64 | 66 | 68 | 70 |
| 干球温度 -20.0 °C $p_{qb}=103.26 \text{ Pa}$ | 含湿量/(g/kg) | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.37 | 0.38 | 0.39 | 0.41 | 0.42 | 0.43 | 0.44 |
| | 比焓/(kJ/kg) | -19.39 | -19.36 | -19.33 | -19.29 | -19.26 | -19.23 | -19.20 | -19.17 | -19.14 | -19.11 |
| | 露点温度/°C | -26.63 | -26.26 | -25.90 | -25.55 | -25.21 | -24.88 | -24.57 | -24.26 | -23.96 | -23.66 |
| | 湿球温度/°C | -20.67 | -20.64 | -20.61 | -20.58 | -20.56 | -20.53 | -20.50 | -20.47 | -20.45 | -20.42 |
| | | 相对湿度/% | | | | | | | | | |
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| 干球温度 -19.8 °C $p_{qb}=105.26 \text{ Pa}$ | 含湿量/(g/kg) | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.09 | 0.10 | 0.12 | 0.13 |
| | 比焓/(kJ/kg) | -19.97 | -19.93 | -19.90 | -19.87 | -19.84 | -19.81 | -19.78 | -19.74 | -19.71 | -19.68 |
| | 露点温度/°C | -54.96 | -49.46 | -46.11 | -43.67 | -41.75 | -40.15 | -38.78 | -37.58 | -36.51 | -35.55 |
| | 湿球温度/°C | -21.19 | -21.17 | -21.14 | -21.11 | -21.08 | -21.05 | -21.02 | -20.99 | -20.97 | -20.94 |
| | | 相对湿度/% | | | | | | | | | |
| | | 52 | 54 | 56 | 58 | 60 | 62 | 64 | 66 | 68 | 70 |
| 干球温度 -19.8 °C $p_{qb}=105.26 \text{ Pa}$ | 含湿量/(g/kg) | 0.34 | 0.35 | 0.36 | 0.37 | 0.39 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.44 | 0.45 |
| | 比焓/(kJ/kg) | -19.17 | -19.14 | -19.11 | -19.07 | -19.04 | -19.01 | -18.98 | -18.95 | -18.91 | -18.88 |
| | 露点温度/°C | -26.45 | -26.07 | -25.71 | -25.36 | -25.02 | -24.69 | -24.37 | -24.06 | -23.76 | -23.47 |
| | 湿球温度/°C | -20.48 | -20.45 | -20.42 | -20.39 | -20.37 | -20.34 | -20.31 | -20.28 | -20.25 | -20.22 |
| | | 相对湿度/% | | | | | | | | | |
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| 干球温度 -19.6 °C $p_{qb}=107.29 \text{ Pa}$ | 含湿量/(g/kg) | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.11 | 0.12 | 0.13 |
| | 比焓/(kJ/kg) | -19.76 | -19.73 | -19.70 | -19.67 | -19.63 | -19.60 | -19.57 | -19.54 | -19.50 | -19.47 |
| | 露点温度/°C | -54.81 | -49.30 | -45.95 | -43.51 | -41.58 | -39.98 | -38.61 | -37.41 | -36.34 | -35.37 |
| | 湿球温度/°C | -21.02 | -20.99 | -20.96 | -20.93 | -20.90 | -20.87 | -20.84 | -20.81 | -20.79 | -20.76 |
| | | 相对湿度/% | | | | | | | | | |
| | | 52 | 54 | 56 | 58 | 60 | 62 | 64 | 66 | 68 | 70 |
| 干球温度 -19.6 °C $p_{qb}=107.29 \text{ Pa}$ | 含湿量/(g/kg) | 0.34 | 0.36 | 0.37 | 0.38 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 0.44 | 0.45 | 0.46 |
| | 比焓/(kJ/kg) | -18.95 | -18.92 | -18.89 | -18.85 | -18.82 | -18.79 | -18.76 | -18.72 | -18.69 | -18.66 |
| | 露点温度/°C | -26.26 | -25.88 | -25.52 | -25.17 | -24.83 | -24.50 | -24.18 | -23.87 | -23.57 | -23.27 |
| | 湿球温度/°C | -20.29 | -20.26 | -20.23 | -20.20 | -20.18 | -20.15 | -20.12 | -20.09 | -20.06 | -20.03 |

注: 大气压为 101 325 Pa。

焓湿表中干球温度和相对湿度间隔可以根据要求随意调整。焓湿表内参数的计算误差取决于两个因素:

- 1) 把湿空气当作理想气体带来的误差;
- 2) 湿空气饱和水蒸气分压力经验公式带来的误差。

这两个近似是湿空气分析不得已的假设,除此之外其余的计算都采用理论公式(有很多软件对露点温度和湿球温度的计算用的是近似公式),可以认为是可靠的。相较于在焓湿图上截取数值的方法,焓湿表数值已经可靠了很多。相信焓湿表参数的计算精度还有提高的可能。

3 焓湿表在空气处理计算过程中的实用性

下面通过计算说明焓湿表的应用。101.325 kPa 标准大气压力下,夏季某房间室内干球温度 25 °C,相对湿度 60%,室外干球温度 33 °C,湿球温度 27.9 °C,新风比 30%,空气处理机机器露点为 90%,送风温差为 7 °C,室内冷负荷为 4.5 kW,湿负荷为 0.000 6 kg/s。空气处理过程见图 1。

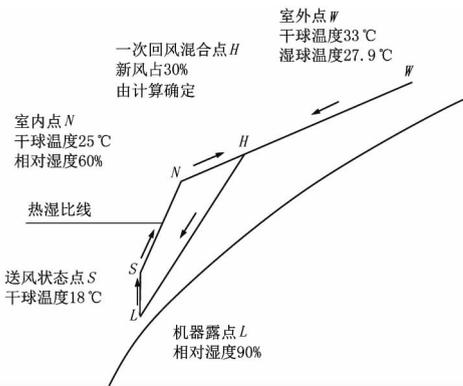


图 1 空气处理过程示意图

为方便论述,以干球温度、相对湿度、比焓、含湿量来表征各状态点的参数。查焓湿表得到室内状态点 $N(25\text{ °C}, 60\%, 55.54\text{ kJ/kg}, 11.9\text{ g/kg})$, 室外点 $W(33\text{ °C}, 68\%, 89.02\text{ kJ/kg}, 21.75\text{ g/kg})$ 的参数。

- 1) 根据室内热湿负荷和室内状态点 N 求送风状态点 S

送风状态点 $S(18\text{ °C}, \varphi_s, h_s, d_s)$:

$$h_s = 1.01 \times 18 + (2.5 + 0.001\ 84 \times 18) d_s$$

$$= 18.18 + 2.533\ 12 d_s$$

根据热湿比的定义:

$$\frac{h_N - h_s}{d_N - d_s} = \frac{Q}{W} \quad (7)$$

式中 h_N, h_s 分别为室内和送风状态点的比焓; d_N, d_s 分别为室内和送风状态点的含湿量; Q 为室内热负荷; W 为室内湿负荷。

将已知参数代入式(7),求出 $d_s = 10.45\text{ g/kg}$, 查焓湿表,送风状态点 S 的参数为 $(18\text{ °C}, 81\%, 44.62\text{ kJ/kg}, 10.45\text{ g/kg})$ 。

- 2) 根据送风状态点 S 求机器露点 L

机器露点 L 参数为 $(t_L, 90\%, h_L, 10.45\text{ g/kg})$ 。查焓湿表,在 90% 相对湿度一列找到最接近的状态点参数为 $(16.4\text{ °C}, 90\%, 43.08\text{ kJ/kg}, 10.48\text{ g/kg})$ 。

- 3) 根据新风比求一次回风混合点

一次回风混合点 H 参数包括 t_H, φ_H, h_H, d_H 。

根据能量守恒:

$$h_H = 0.7h_N + 0.3h_W = 65.58\text{ kJ/kg}$$

根据物质(水的质量)守恒:

$$d_H = 0.7d_N + 0.3d_W = 14.86\text{ g/kg}$$

很多计算过程并不需要知道混合点的干球温度,下面的计算仅为了得出完整的混合点参数。

已知状态点的比焓和含湿量,在焓湿表上并不好查找,因为焓湿表是以干球温度和相对湿度为行列制作的。但可以通过简单换算找出干球温度:

$$t_H = \frac{h_H - 2.5d_H}{1.01 + 0.001\ 84d_H} = 27.41\text{ °C}$$

查焓湿表得到一次回风混合点 H 的参数为 $27.4\text{ °C}, 65\%, 65.58\text{ kJ/kg}, 14.86\text{ g/kg}$ 。

这样,就求出了所有空气状态点参数如下:

送风状态点 $S(18\text{ °C}, 81\%, 44.62\text{ kJ/kg}, 10.45\text{ g/kg})$; 机器露点 $L(16.4\text{ °C}, 90\%, 43.08\text{ kJ/kg}, 10.48\text{ g/kg})$; 一次回风混合点 $H(27.4\text{ °C}, 65\%, 65.58\text{ kJ/kg}, 14.86\text{ g/kg})$ 。

其余根据冷负荷和焓差算风量等的计算与采用焓湿图计算并无差别。

综合以上算例可以看出,由已知的室内状态点 N 的参数和热湿比及送风温差求出送风点参数的关键在于:送风状态点 $S(t_s, \varphi_s, h_s, d_s)$ 的干球温度 t_s 可根据送风温差简便地算出,假定含湿量 d_s

为自变量,比焓 h_s 可以表达为 d_s 的一次函数,继而可以将热湿比转化为关于含湿量 d_s 的一元一次方程,可以很方便地求解,从而解决了焓湿图方法中找热湿比线和平移热湿比线不准的问题,大大提高了计算的精确度。

4 存在的问题

1) 焓湿表制作的两个前提:将湿空气当作理想气体和湿空气的饱和水蒸气分压力计算公式是近似处理,因此焓湿表的参数值不是绝对准确的,随着湿空气理论研究的进步和实验水平的提高,焓湿表的精度有进一步提高的空间。

2) 以包含待求状态点的含湿量的简单的一元一次方程代替热湿比线,虽然消除了焓湿图法手工操作的误差,但是始终带来了计算量的增加。

5 焓湿表的现实意义

空气的处理过程计算比较复杂,一般设计人员依赖软件计算,但对软件计算的可靠性没有自己的判断。焓湿表不是一个软件,而是一个和焓湿图一

样可以脱机使用的工具。设计人员只要掌握简单 Excel 技能就能方便地制作焓湿表。焓湿表法这种手工计算手段可作为空气处理计算软件可靠性的判断依据。

6 结语

焓湿表内的参数和用来作空气处理计算的过
程是接近湿空气学原理的理论方法。由于作了部分近似,因此焓湿表的精度还有待提高。焓湿表法消除了空气处理计算焓湿图法的人工操作误差,大幅提高计算的精度和可靠性。因此建议设计人员用焓湿图作定性分析和估算,用焓湿表作定量计算或作为空气处理计算软件可靠性的校验手段。

参考文献:

- [1] Hyland R W, Wexler A. Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H_2O from 173. 15 K to 473. 15 K[G]// ASHRAE Trans, 1983, 89(2A): 500-519