

# 一种湿度试验中计算露点温度的方法

陈晓晨<sup>1</sup>, 张倩<sup>2</sup>, 吴飒<sup>2</sup>

(1. 海军驻沈阳地区航空军事代表室, 沈阳 110000; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** **目的** 研究在气候环境试验中如何把露点温度作为控制目标的方法。**方法** 选择干湿球温度表作为测量湿度的传感器, 饱和水汽压是计算湿度量的一个重要参数, 探究出便于在微控制器上应用的计算饱和水汽压的公式, 然后建立露点温度计算模型, 得出水汽压与露点温度的关系式。**结果** 通过0~100℃的100组样本值的验证, 与《湿度查算手册》值比较, 平均误差较小。**结论** 该公式适用于湿度试验箱中微控制器中露点温度的处理问题。

**关键词:** 干湿球温度表; 饱和水汽压; 露点温度; 湿度查算手册

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.016

**中图分类号:** TJ01; TB114.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2016)02-0088-04

## A Method for Calculating Dew Point Temperature in the Humidity Test

CHEN Xiao-chen<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>2</sup>, WU Sa<sup>2</sup>

(1. Naval Aviation Military Agent's Room in Shenyang Area, Shenyang 110000, China;  
2. Beihang University, Beijing 100191, China)

**ABSTRACT: Objective** To study a method to set the dew point temperature as a control target in the climate environment test. **Methods** Wet and dry bulb thermometer was selected as the sensor to measure the vapor pressure, and the saturation vapor pressure was used as an important parameter to calculate the humidity, in order to explore an equation for calculating saturation vapor pressure applicable in micro-controller. Then a dew point temperature calculation model was established to obtain the relationship between the dew point temperature and vapor pressure. **Results** The values of 100 groups of samples in the range of 0-100℃ had small average error in comparison with the values in "Psychrometric Handbook". **Conclusion** This formula could be applied to calculate the dew point temperature in the humidity test.

**KEY WORDS:** wet and dry bulb thermometer; saturation vapor pressure; dew point temperature; psychrometric handbook

在某一气压下, 如果给定的空气在水汽压不变的情况下, 通过降低气温, 使空气中的水汽达到饱和时的温度称为露点温度, 确切地说应为热力学露点温度。在这个温度下空气的水汽含量等于该空气达到

收稿日期: 2015-10-08; 修订日期: 2015-10-30

Received: 2015-10-08; Revised: 2015-10-30

作者简介: 陈晓晨(1980—), 男, 辽宁沈阳人, 工程师, 主要研究方向为航空电子装备监造。

**Biography:** CHEN Xiao-chen(1980—), Male, from Shenyang, Liaoning, Engineer, Research focus: avionics equipment supervising.

通讯作者: 张倩(1988—), 女, 河北石家庄人, 硕士, 主要研究方向为可靠性与环境技术。

**Corresponding author:** ZHANG Qian(1988—), Female, from Shijiazhang, Hebei, Master, Research focus: the reliability and environmental technology.

饱和时的水汽含量,如同表示水分含量的水汽压力一样,露点温度常常用来表示气体的湿度。在气压一定时,容积内所含的水汽含量越多,露点越高,反之,露点越低。在实际大气中,空气经常处于未饱和状态,露点温度常比环境温度低。

空气湿度的表现形式还有水汽压、相对湿度、绝对湿度等。目前,湿度试验大多是以相对湿度(RH)作为湿度的衡量参数,而且空气中的温度和相对湿度的测量与研究已经相当普遍,露点温度还没有受到应有的关注。

露点仪可以用于直接测量露点温度,不过露点仪是一个比较精密复杂的仪器<sup>[1]</sup>,对观测人员的技术水平要求很高,一旦出现操作失误和维护不当,将对测量结果带来很大的误差,因此计算露点一般采用公式反推的形式。

传统的干湿球测湿法是一种间接测量方法<sup>[2]</sup>,理论和实践上都有相当坚实的基础,在众多湿度测试方法中,干湿球测湿法在环境试验领域一直占有牢固地位。因此,文中采用干湿球温度计作为测量湿度的传感器。

## 1 饱和水汽压公式

在某一给定温度下,水汽压恰好处在某一适当值时,水与水汽或冰与水汽的蒸发与凝结过程能够保持动态平衡状态,此时大气中的水汽压力为饱和水汽压<sup>[3]</sup>。饱和水汽压是用来计算空气中绝对湿度、相对湿度、露点温度、比湿等各湿度要素不可缺少的关键因子<sup>[4]</sup>。

### 1.1 戈夫-格雷奇公式

戈夫-格雷奇公式是世界公认最准确的计算纯水平面饱和水汽压的公式,也是世界气象组织(WMO)1966年推荐使用的,其形式为:

$$\log_{10} e_w = 10.79574 \left( 1 - \frac{273.15}{T_0} \right) - 5.028 \cdot \log_{10} \left( \frac{T_0}{273.15} \right) + 1.50475 \times 10^{-4} \left( 1 - 10^{-8.2969 \times \left( \frac{T_0}{273.15} - 1 \right)} \right) + 0.42873 \times 10^{-3} \left( 10^{4.76955 \times \left( 1 - \frac{T_0}{273.15} \right)} - 1 \right) + 0.78614 \quad (1)$$

式中: $e_w$ 为纯水平面饱和水汽压,hPa; $T$ 为绝对温度,K; $T_0$ 为水的三相点温度,其值为273.16 K。

由于戈夫-格雷奇公式计算烦琐,且计算有不可逆性,难于用于计算露点温度<sup>[5]</sup>。

### 1.2 马格努斯公式

马格努斯公式是国家气象局推荐使用的饱和水

汽压计算公式<sup>[5]</sup>。该公式形式简洁,计算简单,见式(2):

$$e_w = e_0 \times 10^{a/(b+t)} \quad (2)$$

式中: $e_0=6.11$  hPa,是0℃时的饱和水汽压; $t$ 为温度,℃。对于纯水面来说,系数 $a=7.5$ , $b=237.3$ 。

将戈夫-格雷奇公式与马格努斯公式分别计算的饱和水汽压作比较,在0~100℃范围内饱和水汽压的计算差值如图1所示<sup>[5]</sup>。

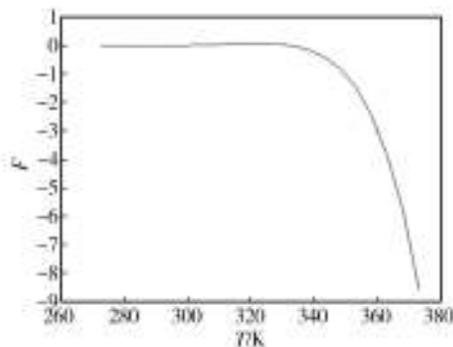


图1 公式(1)与公式(2)计算饱和水汽压差异曲线

Fig.1 Difference curve of the saturation vapor pressure calculated using equations (1) and (2)

由图1可知,0~60℃温度范围时两个公式差异不大,差值 $\Delta e_w$ 在0.04 hPa内上下波动。当温度大于80℃时,差值 $\Delta e_w$ 逐渐偏大,到100℃时达8.55 hPa。

### 1.3 胡珀公式

胡珀推导出了6次多项式来计算纯水平面的饱和水汽压,见式(3):

$$e_w = \exp(L_0 + L_1 t + L_2 t^2 + L_3 t^3 + L_4 t^4 + L_5 t^5 + L_6 t^6) \quad (3)$$

式中: $e_w$ 为纯水平面饱和水汽压,hPa; $t$ 为温度,℃; $L_0 \sim L_6$ 为系数, $L_0=1.809567918$ , $L_1=7.266296315 \times 10^{-2}$ , $L_2=-2.996403370 \times 10^{-4}$ , $L_3=1.160464233 \times 10^{-6}$ , $L_4=-4.606513971 \times 10^{-9}$ , $L_5=2.315159066 \times 10^{-11}$ , $L_6=-1.103513358 \times 10^{-13}$ 。

戈夫-格雷奇公式与胡珀公式在0~90℃范围内饱和水汽压的计算差值如图2所示。

从图2可以看出,胡珀公式计算的饱和水汽压偏小,在0~60℃温度范围时两个公式差异不大,差值在0.02 hPa内波动,之后随着温度的升高,差值急剧变大<sup>[6]</sup>。

### 1.4 理查兹公式

理查兹提出了一个近似于戈夫-格雷奇公式的方程,这个公式对大多数用途有足够的精确度。理查兹公式为:

$$e_w = e_{ws} \exp[13.3185 \times (1 - T_0/T) - 1.9760 \times (1 - T_0/T)^2 -$$

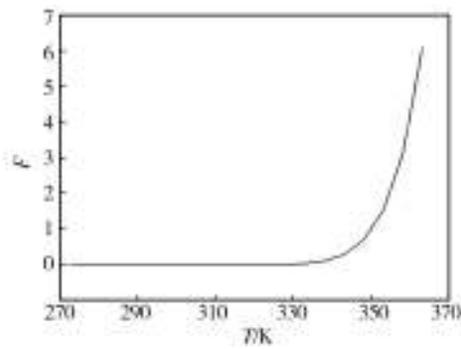


图2 公式(1)与公式(3)计算饱和水汽压差异曲线

Fig.2 Difference curve of the saturation vapor pressure calculated using equations (1) and (3)

$$0.6445 \times (1-T/T)^3 - 0.1299 \times (1-T/T)^4] \quad (4)$$

式中： $e_w$ 为纯水平面饱和水汽压，hPa； $T$ 为绝对温度，K； $T_s$ 为绝对温度时的沸点温度，其值为373.16 K； $e_{ws}$ 为沸点温度时的饱和水汽压，其值为1013.25 hPa。

戈夫-格雷奇公式与理查兹公式在0~100 °C范围内饱和水汽压的计算差值如图3所示。

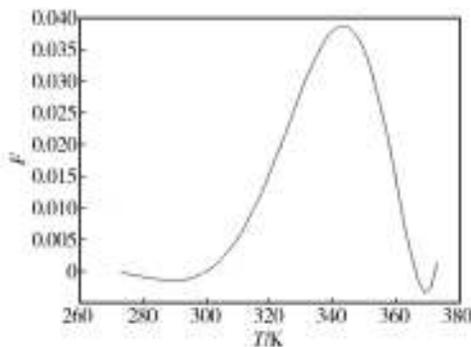


图3 公式(1)与公式(4)计算饱和水汽压差异曲线

Fig.3 Difference curve of the saturation vapor pressure calculated using equations (1) and (4)

由图3可知，在0~100 °C范围内，用理查兹公式计算的饱和水汽压与戈夫-格雷奇公式的差值较小，最大差值小于0.04 hPa。

综上所述，理查兹公式与戈夫-格雷奇方程相比，误差最小，并且公式格式较简单，文中计算饱和水汽压采用理查兹公式<sup>[6]</sup>。

## 2 露点温度的计算

根据饱和水汽压公式得其随温度的变化曲线如图4所示。

图4中饱和水汽压曲线被划分为三个区域，在区域I中，空气处于未饱和状态(如A点)，在区域II中，空

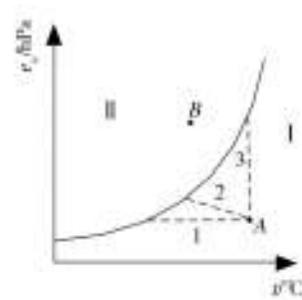


图4 饱和水汽压随温度变化

Fig.4 Variation of saturation vapor pressure with temperature

气处于过饱和状态(如B点)，在该曲线上的点，空气恰好处于饱和状态。通常空气处于未饱和状态(如A点)时，要通过降温使空气达到饱和，其降温的路径大致有如图4所示的三条路径，即1,2,3，而分别通过这三条路径降温使空气达到饱和时的温度是不相同的。如果在露点温度的定义中不限定空气的降温路径，那么露点温度就不能唯一确定，因此必须在空气中水汽含量和气压不变的前提条件下定义露点温度<sup>[7-8]</sup>。

空气中的水汽含量可以表示为  $q = \frac{m_v}{m}$ ， $m_v$ 为水汽的质量， $m$ 为湿空气的质量。分子分母同除以容积  $V$ ，得  $q = \frac{\rho_v}{\rho}$ ，根据大气状态方程  $P = \rho RT$ ，可得  $q \approx 0.622 \cdot \frac{e}{P}$ 。由此可知，当空气中的水汽含量  $q$  和气压  $P$  不变时，空气中的当前水汽压  $e$  也不发生变化，即确定了空气的降温路径是沿着等水汽压线进行的(即路径1)。这样，空气在达到饱和时所对应的温度，即露点温度，才是可确定并且唯一的。

## 3 计算露点温度模型的选择

### 3.1 计算环境水汽压

在计算露点温度之前，先利用式(5)算出当前环境水汽压的值：

$$e = e'_w - AP(T_1 - T_2) \quad (5)$$

式中： $e$ 为环境水汽压，hPa； $e'_w$ 为湿球温度  $T_2$  对应的饱和水汽压，hPa； $T_1, T_2$ 分别为干球温度和湿球温度； $A$ 为通风系数<sup>[9-10]</sup>； $P$ 为当前大气压力，hPa。

### 3.2 露点温度数学模型

根据理查兹公式计算的饱和水汽压以及《湿度查

算手册》的相关数据,对理查兹公式利用零点迭代求逆<sup>[7]</sup>,得出多组环境水汽压 $e$ 与露点温度 $T_d$ 一一对应的数据<sup>[11]</sup>,在仿真环境中拟合出露点温度 $T_d$ 关于环境水汽压 $e$ 的多项式为:

$$T_d = n_0 + n_1 \ln e + n_2 (\ln e)^2 + n_3 (\ln e)^3 + n_4 (\ln e)^4 + n_5 (\ln e)^5 + n_6 (\ln e)^6 \quad (5)$$

式中: $T_d$ 为所求露点温度,℃; $e$ 为环境水汽压,hPa; $n_0 \sim n_6$ 为多项式系数, $n_0 = -2.259\ 529\ 963 \times 10^1$ , $n_1 = 1.133\ 418\ 988 \times 10^1$ , $n_2 = 5.756\ 940\ 348 \times 10^{-1}$ , $n_3 = 3.025\ 080\ 051 \times 10^{-2}$ , $n_4 = 1.778\ 276\ 954 \times 10^{-3}$ , $n_5 = 7.443\ 287\ 646 \times 10^{-5}$ , $n_6 = 1.129\ 170\ 314 \times 10^{-5}$ 。

根据式(5),露点温度随水汽压变化如图5所示<sup>[12-13]</sup>。

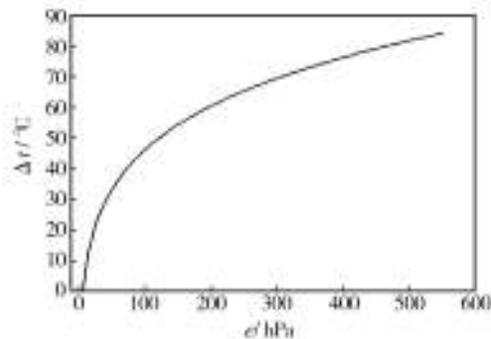


图5 露点温度随环境水汽压变化

Fig.5 Variation of the dew point temperature with environmental vapor pressure

## 4 与标准数据对比验证

假设相对湿度为100%,将《湿度查算手册》中0~100℃的饱和水汽压值代入公式(5),求出对应的露点温度值,再与各个饱和水汽压值对应的真实温度值比较<sup>[14]</sup>,发现差值在+0.02℃范围内上下波动,见表1。

表1 计算结果与真实值比较结果

Table 1 Comparison results between the calculation results and the actual values

℃					
$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$
0	0.0049	35	34.9976	70	69.9928
5	4.9995	40	39.9969	75	74.9907
10	9.9998	45	44.9964	80	79.9875
15	14.9997	50	49.9959	85	84.9827
20	19.9994	55	54.9955	90	89.9759
25	24.9989	60	59.9949	100	99.9537
30	29.9982	65	64.9941		

即所求的数值按四舍五入原则,露点温度完全满足1℃的准确度,可以满足工程要求<sup>[15]</sup>。

## 5 结语

目前露点温度的直接测量还较难实现,我国主要利用干湿球温度表并通过公式计算得到,通过以上的计算和分析,文中讨论的露点温度范围为0~100℃。对几种常用的计算饱和水汽压的公式进行了介绍,并通过公式以环境水汽压为自变量逆求露点温度。不过通过假设空气饱和的理想试验存在一定误差,文中探讨的计算公式在一定精确度内可以应用于工业控制领域的控制器中<sup>[15]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 马志宏,葛莉. 环境测试设备中湿度传感器的研究与分析[J]. 装备环境工程,2008,5(4):63—66.  
MA Zhi-hong, GE Li. Study and Analysis of Hygrometer Sensor in Environmental Test Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008.5(4):63—66.
- [2] SARKAR M, A New Theoretical Formulation of Dew Point Temperatures Applicable for Comfort Air-cooling Systems[J]. Energy and Buildings, 2015, 86:243—256.
- [3] 张志富,希爽. 关于露点温度计算的探讨[J]. 干旱区研究, 2011(2):275—281.  
ZHANG Zhi-fu, XI Shuang. Discuss about the Dew Point Temperature Calculation[J]. Research in Arid Areas, 2011(2): 275—281.
- [4] 白建波,王孟,苗国厂,等. 基于广义预测控制算法的表冷器出风温度控制[J]. 制冷与空调,2015(1):78—82.  
BAI Jian-bo, WANG Meng, MIAO Guo-chang, et al. Based on the Generalized Predictive Control Algorithm Puts out the Wind Temperature Control[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2015(1):78—82.
- [5] 袁世通,韩璞,孙明. 基于大数据的多变量系统建模方法研究[J]. 系统仿真学报,2014,26(7):1454—1459.  
YUAN Shi-tong, HAN Pu, SUN Ming. Multivariable System Modeling Method based on Big Data Research[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(7):1454—1459.
- [6] 周建壮. 基于自校正PID算法的电炉温度控制系统设计[J]. 吉林大学学报,2014,12(32):1671—6531.  
ZHOU Jian-zhuang. Electric Furnace Temperature Control System Based on Self-tuning PID Algorithm Design[J]. Journal of Jilin University, 2014, 12(32):1671—6531.
- [7] 吴峰华,王德福,姜传贤. 干湿球法湿度测量精度算法研究[J]. 装备环境工程,2009,6(5):81—83.

(下转第122页)

- 皇岛:燕山大学,2006.
- WANG Wei-wei. Study on the Multi Pole Boundary Element Method for the Three Dimensional Potential and Elasticity Problems[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006.
- [6] AMAYA K, AOKI S. Effective Boundary Element Methods in Corrosion Analysis[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2003, 27(3): 507—519.
- [7] 田志定, 武兴伟. 船舶海水管系电偶腐蚀及其防护措施[J]. 船舶, 2012, 23(5): 52—56.
- TIAN Zhi-ding, WU Xing-wei. Galvanic Couple Corrosion and Countermeasures for Sea Water Piping[J]. Ship and Boat, 2012, 23(5): 52—56.
- [8] BIRBILIS N, BUCHHEIT R G. Investigation and Discussion of Characteristics for Intermetallic Phases Common to Aluminum Alloys as a Function of Solution pH[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155: 117—126.
- [9] CHEN G S, LIAO C M, WAN K C, et al. Pitting Corrosion and Fatigue Crack Nucleation, Effects of the Environment on the Initiation of Crack Growth[J]. American Society for Testing and Materials, 1997, 1298: 18—33.
- [10] 郑凯, 李红艺, 韩玉华. 电化学工作站在金属腐蚀实验教学中的应用[J]. 山东化工, 2014, 43(9): 129—130.
- ZHENG Kai, LI Hong-yi, HAN Yu-hua. Application of Electrochemistry Station During Performing the Experiments on Metallic Corrosion and Protection[J]. Shandong Chemical Industry, 2014, 43(9): 129—130.
- [11] JEFF D. Smart Sensor Hub for Aircraft Corrosion Monitoring [J]. Luna Innovations Incorporated, 2006, 18(8): 7—169.
- [12] EINAR Bardal, ROY Johason. Rerolay Garrland[J]. Corrosion, 1984, 40(12): 628—633.
- [13] ALMEIDA J R M, Effects of Distilled Water and Saline Solution on the Interlaminar Shear Strength of an Aramid/Epoxy Composite[J]. Composites, 1991, 22(6): 448—550.
- [14] DEGIORGI V G. Corrosion Basics and Computer Modeling in Industrial Application of the BEM[M]. Southampton: Computational Mechanics Publication, 1992.
- [15] VARGEL C. Corrosion of Aluminium[J]. Metal Science and Technology, Amsterdam, 2004, 48(23): 546—550.
- [16] WARKUS J, RAUPACH M, GULIKERS J. Numerical Modeling of Corrosion—Theoretical Backgrounds[J]. Materials and Corrosion, 2006, 57(8): 614—617.

(上接第91页)

- WU Feng-hua, WANG De-fu, JIANG Chuan-xian. Research on Algorithm of Relative Humidity Measurement Precision with Dry-and-Wet Bulb[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(5): 81—83.
- [8] 陈云生, 杨冬甫, 何芬. 风速4.6 m/s柱状水银温度计相对湿度查算表的编制[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 83—86.
- CHEN Yun-sheng, YANG Dong-fu, HE Fen. The Write of Relative Humidity Table of Wind Speed of 4.6 m/s and Column Mercurial Thermometer[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 83—86.
- [9] 陈云生. 寻求湿度系数与风速关系的数学表达式[J]. 装备环境工程, 2006, 3(6): 37—40.
- CHEN Yun-sheng. Mathematical Formula for Resolving the Relation between A and V[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(6): 37—40.
- [10] KISI O, KIM S, SHIRI J. Estimation of Dew Point Temperature Using Neuro-fuzzy and Neural Network Techniques[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 114(3-4): 365—373.
- [11] NISHIDA K, YOKOI Y, ASA M, et al. Quantitative Estimation of Water Vapor Distribution in Low-humidity Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Humidity Test Paper[J]. Journal of Power Sources, 2013, 234: 111—118.
- [12] 陈云生. 干湿球法测量相对湿度的测量不确定度讨论[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 65—69.
- CHEN Yun-sheng. Discussion on the Uncertainty of Measurement of Relative Humidity with Dry and Wet Bulb Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(1): 65—69.
- [13] BERNING T. The Dew Point Temperature as a Criterion for Optimizing the Operating Conditions of Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(13): 10265—10275.
- [14] ROSNER D E, ARIAS-ZUGASTI M. Soret- 'shifted' Dew-point Temperatures for Surfaces Exposed to Hydrocarbon Vapors Dilute in Compressed Nitrogen[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(15): 3962—3969.
- [15] 赵曦晶, 汪立新, 何志昆, 等. 基于改进模糊推理的光纤陀螺温度漂移建模[J]. 机械工程学报, 2014, 50(6): 15—21.
- ZHAO Xi-jing, WANG Li-xin, HE Zhi-kun, et al. Based on Improved Fuzzy Reasoning of Fiber Optic Gyro Temperature Drift Modeling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(6): 15—21.