

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.02.13

精密露点仪的露点与相对湿度换算及验证研究

张文东, 崔体运, 沈淘淘, 张勇

(上海市计量测试技术研究院, 上海 201203)

摘 要: 为验证精密露点仪内置相对湿度换算结果的准确性, 将国际上普遍认可的 Sonntag 饱和水蒸气压公式和 Hardy 湿空气增值系数公式应用于露点与相对湿度换算公式中, 作为标准换算方法对多款常用精密露点仪的内置相对湿度换算结果进行了验证, 结果表明 0.01 °C 分辨力的仪器相对湿度显示值与计算值的偏差均不超过 $\pm 0.03\% \text{RH}$; 个别 0.1 °C 分辨力仪器的相对湿度偏差则达到 $\pm 0.5\% \text{RH}$ 。可见, 0.1 °C 分辨力的仪器难以满足作为相对湿度标准器的要求。对于无露霜点判别功能的仪器, 结果显示按露点与按霜点换算得到的相对湿度差异很大, 且与实际相对湿度差异也很大, 因此不能用于负露点条件下相对湿度的测量。由该公式还得到以下结论: 增值系数在常温常压下对露点与相对湿度换算结果影响很小, 可忽略, 在高温低压时则有一定影响, 不可忽略。

关键词: 增值系数; 饱和水蒸气压公式; 露点与相对湿度换算公式; 精密露点仪

中图分类号: TB943

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)02-0097-05

Study on dew point and relative humidity conversion and verification of precision dew point hygrometer

ZHANG Wendong, CUI Tiyun, SHEN Taotao, ZHANG Yong

(Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract: In order to verify the accuracy of the built-in relative-humidity conversion results of the precision dew point hygrometer, the internationally recognized Sonntag's saturated water vapor pressure formula and Hardy's wet air enhancement factor formula were applied to the dew point and relative humidity conversion formula, which was used as a standard conversion method to verify the built-in relative humidity conversion results of a variety of commonly used precision dew point hygrometers. The results show that the deviation between the displayed value and the calculated value of relative humidity is no more than $\pm 0.03\% \text{RH}$ for the instrument with resolution of 0.01 °C, and the relative humidity deviation of individual instruments with resolution of 0.1 °C reaches $\pm 0.5\% \text{RH}$. So it is difficult for an instrument with resolution of 0.1 °C to meet the requirements of a relative humidity standard. For the instrument without dew and frost point discrimination function, the results show that the relative humidity obtained by dew point and frost point conversion is very different, and it is also very different from the actual relative humidity, so it cannot be used for the measurement of relative humidity at negative dew point. The formula also results in the following conclusions: the enhancement factor has little effect on the results of the dew point and relative humidity conversion under normal temperature and pressure, which is negligible, but has a certain effect at high temperature and low pressure, which cannot be ignored.

Key words: enhancement factor; saturated water vapor pressure formula; dew point and relative humidity conversion formula; precision dew point hygrometer

收稿日期: 2022-02-16; 修回日期: 2022-04-02

引用格式: 张文东, 崔体运, 沈淘淘, 等. 精密露点仪的露点与相对湿度换算及验证研究 [J]. 计测技术, 2022, 42 (2): 97-101.

Citation: ZHANG W D, CUI T Y, SHEN T T, et al. Study on dew point and relative humidity conversion and verification of precision dew point hygrometer [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (2): 97-101.



0 引言

精密露点仪具有体积较小、稳定性好、便于量值溯源等特点^[1-2],为国家湿度量值传递系统中的湿度一级和二级标准^[3-6]。因精密露点仪测量参数为露点温度,当被检/校对象为温湿度计或温湿度传感器时,需要将露点换算成相对湿度,还需要测量温度、压力等参数。为方便使用,目前大多数精密露点仪都具有温度(甚至压力)测量功能,在仪器内部完成露点和相对湿度的换算,从而直接显示相对湿度^[7-12]。由于饱和水蒸汽压计算公式有很多种,且露点与相对湿度换算中还涉及水面、冰面饱和水蒸汽压不同的问题,导致目前常用的几款精密露点仪显示的换算相对湿度值之间存在差异,而且与国际上普遍认可的换算公式计算得到的换算值之间也存在差异,因此有必要采用标准的换算方法,对精密露点仪的换算结果进行验证。

针对上述情况,本文根据相对湿度的定义^[13]得到了露点与相对湿度换算公式(该公式已经在JJG 499-2021《精密露点仪检定规程》和JJG 205《机械式温湿度计检定规程》修订报批稿中采用),并将Sonntag饱和水蒸汽压公式^[14]和Hardy湿空气增值系数公式^[15]应用于该换算公式中,对精密露点仪的露点与相对湿度换算结果进行验证。

1 换算公式

JJF 1012-2007《湿度与水分计量名词术语及定义》中,相对湿度的定义为湿气中水蒸气的摩尔分数与相同温度和压力条件下饱和水蒸气的摩尔分数之百分比^[13]。将湿气视为理想气体时,由气体状态方程和道尔顿分压定理,可以推导出露

点与相对湿度的换算公式

$$H = \frac{f(p, T_d) \times e_s(T_d)}{f(p, T) \times e_s(T)} \times 100 \quad (1)$$

式中: H 为被测气体相对湿度, %RH; f 为被测气体增值系数(被测气体温度与压力的函数,此处采用Hardy公式计算); T_d 为被测气体露点或霜点, °CDP; T 为被测气体温度, °C; p 为被测气体压力, Pa; e_s 为纯水面或冰面饱和水蒸汽压(温度的函数,此处采用Sonntag公式计算), Pa。

水面和冰面分别对应露点和霜点,采用不同的饱和水蒸汽压公式和增值系数公式计算。在地面上温度低于0 °C的过冷水为非稳定状态,所以当 T_d 小于0 °CDP时,一般将其作为霜点考虑,除非仪器具有分辨露霜点的功能且明示为露点时,才作为露点进行计算。

另外,当温度 T 小于0 °C时,若用于气象监测,则一律采用过冷水面(露点)计算;若用于一般工业测量,则较多采用冰面(霜点)计算。

2 增值系数的影响

为确定增值系数在露点与相对湿度换算中的影响,先将一组常温、常压下的不同露点参数代入式(1)计算相对湿度,然后将该组参数在默认增值系数 $f=1$ 的条件下代入式(1)进行计算,将两种计算结果进行比较,如表1所示,可知在常温、常压下两者间的差异小于0.01 %RH,一般可忽略增值系数。因压力只影响增值系数,故在常温、常压下进行露点与相对湿度换算时可不测量压力。

再将不同温度、压力、露点参数代入式(1)计算相对湿度,结果见图1,可知增值系数对露点

表1 增值系数的影响

Tab.1 Influence of enhancement factor

温度/°C	露点/°CDP	压力/kPa	相对湿度($f \neq 1$) H / %RH	相对湿度($f=1$) H' / %RH	$\Delta H = (H' - H)$ / %RH
20.00	-11.18	101.13	10.0007	10.0002	-0.0005
20.00	1.92	101.13	30.0032	30.0073	0.0041
20.00	9.28	101.13	50.0148	50.0214	0.0066
20.00	14.37	101.13	70.0042	70.0104	0.0062
20.00	19.18	101.13	95.0301	95.0316	0.0015

与相对湿度换算结果的影响，常温时极小、低温略有增加、高温时明显增加，尤其是高温、低压下影响较大，超过1 %RH。

3 精密露点仪相对湿度换算结果验证

选择多款常用精密露点仪，在双温双压湿度发生器上进行试验，将被测精密露点仪的温度、露点和压力（对于无压力显示的精密露点仪，采用湿度发生器测试室内的实际压力代替）显示值

代入式（1）进行计算，将计算结果与该露点仪的相对湿度值进行比较，以验证该露点仪的相对湿度换算结果的准确性。

试验在常压（气压为102.10 kPa）条件下进行，以双温双压湿度发生器值为标准值，常温下正露点的试验点为20℃，80.0 %RH，负露点的试验点为20℃，10.0 %RH。负温下试验点为-30℃，80.0 %RH（以冰面计算）。试验验证结果见表2和表3。

表2 常温下验证结果
Tab.2 Verification results at normal temperature

湿度标准值 (20℃) H_s /%RH	精密露点仪				湿度计算值 H_c /%RH	湿度偏差 /%RH	
	型号/编号	温度/℃	露点/霜点 指示/℃CDP	湿度 H /%RH		$H-H_c$	$H-H_s$
10.0	473-SH2/15-0713	20.07	-11.09,霜点	10.04	10.04	0.00	0.04
80.0		20.08	16.53	80.01	80.02	-0.01	0.01
10.0	OPT401-GP5-C1/169261/169159/169263	19.99	-11.14,霜点	10.03	10.04	-0.01	0.03
80.0		19.97	16.64	81.10	81.13	-0.03	1.10
10.0	373LXHX/17-0728	20.00	-11.24,霜点	9.95	9.95	0.00	-0.05
80.0		19.99	16.41	79.85	79.85	0.00	-0.15
10.0	新款 S8000 Remote/169377/156800/169270	20.02	-12.50,霜点	8.87	10.01	-1.14	-1.13
80.0		19.99	16.47	80.16	80.18	0.02	0.16
10.0	OPV/138998/136418 ST2/138999	19.9	-12.6,无露/ 霜点指示	8.70	按霜点 8.86 按露点 10.01	-0.16 -1.31	-1.3
80.0		20.0	16.5	80.70	80.26	0.44	0.7
10.0	DewMaster/53260/2A5291X/190596	19.99	-11.71,无露/ 霜点指示	9.54	按霜点 9.54 按露点 10.70	0.00 1.16	-0.46
80.0		19.98	16.42	79.97	79.96	0.01	-0.03
10.0	S-1S-8k/S-1M-0/110E09	20.05	-12.66,无露/ 霜点指示	8.74	按霜点 8.73 按露点 9.87	0.01 -1.13	-1.26
80.0		20.06	16.40	79.45	79.46	-0.01	-0.55
10.0	PDM843 /2101093	20.09	-12.84,无露/ 霜点指示	8.56	按霜点 8.56 按露点 9.71	0.00 -1.15	-1.44
80.0		19.99	16.40	79.80	79.81	0.01	-0.19

表3 负温下验证结果
Tab.3 Verification results at negative temperature

湿度标准值(-30℃) H_s /%RH	精密露点仪				湿度计算值 H_c /%RH	湿度偏差/%RH	
	型号/编号	温度/℃	露点/℃CDP	湿度 H /%RH		$H-H_c$	$H-H_s$
80	373LXHX/17-0728	-30.25	-32.35	80.20	80.19	0.01	0.20

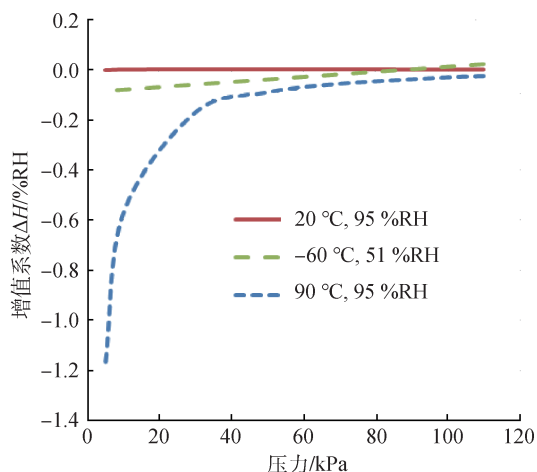


图1 不同温度压力条件下增值系数对露点与相对湿度换算结果的影响

Fig.1 Effect of enhancement factor on conversion results of dew point and relative humidity under different temperature and pressure

从表2可知,在正露点时,除一款仪器(OPV)外,其余所有被测露点仪的相对湿度显示值与按式(1)计算所得值相差不超过0.03 %RH。而仪器OPV的相对湿度显示值与按式(1)计算所得值的差异较大,这是因为其露点和温度的分辨力均为0.1 °C,而其余各款仪器的分辨力均为0.01 °C(仪器内部的实际分辨力甚至更高)。

在负露点时,四款具有露霜点识别功能的露点仪中,有三款仪器的相对湿度显示值与按式(1)计算所得值相差不超过0.01 %RH,而新款S8000 Remote仪器的相对湿度显示值与按式(1)计算所得值的差异较大,原因是该款仪器露霜点识别功能不完善,将露点作为霜点计算导致的。

另四款露点仪不具有露霜点识别功能(有的虽有观测窗,但实际上仅凭人眼难以进行露霜点识别),不能应用于负露点,为进行比较,这里将其试验数据也一并列出。经推算,这四款仪器在负露点时均按霜点计算相对湿度,但实际值更接近露点。当然,露/霜的形成与试验条件有很大关系,不是一成不变的,所以不具有露霜点识别功能的仪器理论上不能用于负露点测量。

另外,从表2可知,多款无露霜点识别功能的露点仪,尽管在负露点时的相对湿度显示值与采用标准换算方法中霜点计算公式得到的数值十分吻合,但却和相对湿度实际值相差甚远,说明尽管这些仪器内置的霜点与相对湿度的换算公式是

正确的,但它们对露霜点的判别是错误的,导致得到的结果也是完全错误的。

在负温度下测量相对湿度的精密露点仪比较少,这里试验了一款仪器,采用抽气法测量,结果见表3(在计算时,式(1)中 $e_s(T)$ 采用冰面饱和水蒸气压计算,仪器的显示档位设为“RH”,而非“RH_{WHO}”)。根据表3可知,在负温时该仪器的相对湿度显示值与采用标准换算方法得到的数值一致(仅为0.01 %RH),且与相对湿度实际值相吻合。

4 结论

根据本文推导的露点与相对湿度换算公式,增值系数在常温常压下对露点与相对湿度换算结果影响很小,可忽略;在高温低压时则有一定影响,不可忽略。因为压力只影响增值系数,故在常温、常压下进行露点与相对湿度换算时可以不测量压力。

采用该公式对多款常用精密露点仪的内置相对湿度换算结果进行了试验验证,结果显示:正露点时,0.01 °C分辨力的仪器的相对湿度显示值与计算值的偏差不超过0.03 %RH,而分辨力为0.1 °C的仪器的相对湿度显示值与计算值的偏差较大。在负露点时,标称具有露霜点识别功能的露点仪中,有三款仪器的偏差不超过0.01 %RH,另一款则偏差较大。可见,0.1 °C分辨力的仪器难以满足作为相对湿度标准器的要求。

对于无露霜点判别功能的仪器,结果显示按露点与按霜点换算得到的相对湿度差异很大,与实际相对湿度差异也很大,因此不能用于负露点时相对湿度的测量。

以上结论对精密露点仪的实际应用具有重要借鉴意义。

参考文献

- [1] 张文东,张勇.宽温压力可变标准湿度发生器的研制[J].计量学报,2012,30(4):326-330.
ZHANG W D, ZHANG Y. Development of wide temperature and pressure variable standard humidity generator[J]. Journal of metrology, 2012, 30(4): 326-330. (in Chinese)
- [2] 李英干,范金鹏.湿度测量[M].北京:气象出版社,1990.
LI Y G, FAN J P. Humidity measurement[M]. Beijing:

- Meteorological Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 机械式温湿度计: JJG 205-2005[S]. 北京: 中国质检出版社, 2005.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Mechanical hygrometer: JJG 205-2005[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2005. (in Chinese)
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. 精密露点仪: JJG 499-2004[S]. 北京: 中国质检出版社, 2004.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Precision dew point meter: JJG 499-2004[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2004. (in Chinese)
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. 湿度计量器具计量检定系统: JJG 2046-1990[S]. 北京: 中国质检出版社, 1990.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Measurement verification system of humidity measuring instruments: JJG 2046-1990[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 1990. (in Chinese)
- [6] BSI. Humidity-part1: Term definitions and formulae: BS1339-1:2002[S]. 2002.
- [7] 张文东. 《机械式温湿度计检定规程》修订说明[J]. 计测技术, 2006, 26(增刊): 84-85.
- ZHANG W D. Revision of 《Verification regulation of mechanical hygrometer》[J]. Metrology and measurement technology, 2006, 26(Supplement): 84-85. (in Chinese)
- [8] 张文东, 易洪, 崔体运, 等. 精密露点仪全国量值比对及结果分析[J]. 工业计量, 2019, 29(6): 72-75.
- ZHANG W D, YI H, CUI T Y, et al. Comparison and result analysis of national quantity value of precision dew point instrument [J]. Industrial measurement, 2019, 29(6): 72-75. (in Chinese)
- [9] GEE R M, BELL S A, STEVENS M. A comparison of humidity calculation software[C]. 5th ISHM, 2006.
- [10] 吕国义, 陈勇, 杜耀蕊. 湿度换算软件包[J]. 计测技术, 2004, (1): 29-33.
- LV G Y, CHEN Y, DU Y R. Humidity conversion software package [J]. Metrology and measurement technology, 2004, (1): 29-33. (in Chinese)
- [11] 张文东, 崔体运. 空气流速和自热效应对湿度传感器测量准确度的影响[J]. 计测技术, 2012, 32(3): 36-39.
- ZHANG W D, CUI T Y. Influence of air velocity and self heating effect on measurement accuracy of humidity sensor[J]. Metrology and measurement technology, 2012, 32(3): 36-39. (in Chinese)
- [12] 张文东, 崔体运, 沈淘淘. 采用干气稀释法测量高温高湿[J]. 工业计量, 2021, 31(6): 7-8.
- ZHANG W D, CUI T Y, SHEN T T. Dry gas dilution method is used to measure high temperature and high humidity[J]. Industrial measurement, 2021, 31(6): 7-8. (in Chinese)
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 湿度与水分计量名词术语及定义: JJF 1012-2007[S]. 北京: 中国质检出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Moisture and moisture measurement terms and definitions: JJF 1012-2007[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2007. (in Chinese)
- [14] SONNTAG D. Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae[J]. Z meterol, 1990, 70: 340-344.
- [15] HARDY B. ITS-90 formulations for vapor pressure, frostpoint temperature, dewpoint temperature, and enhancement factors in the range -100 °C to 100 °C[C]. 3th ISHM, 1998: 214-222.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 张文东(1965—), 男, 教授级高级工程师, 从事湿度与水分计量测试技术研究工作。