0℃以下相对湿度计算的理论困境：基于过冷水模型与冰面模型的对比分析与实验研究

□胡腾飞

河北省计量监督检测研究院

【摘　要】0℃以下相对湿度的准确计算是湿度计量领域长期存在的理论难题与实际挑战。本文综合研究了在0℃以下温度区间内采用过冷水模型与冰面模型计算相对湿度产生的系统性差异，对比两种模型的饱和水汽压计算公式（基于WMO 推荐的Magnus 型公式及其修正形式）。理论分析表明，在−30℃~0℃范围内，两种模型的饱和水汽压差值呈非线性变化。设计并实施了0℃以下相对湿度测量实验，利用高精度冷镜式露点仪作为测量标准，测量采用两种不同计算方式的低温型湿度发生器，分析两种计算方式的相对湿度差值。进一步讨论了标准选择的多元性对气象、航空、工业等领域的具体影响，提出了基于应用场景、测量目的及误差容忍度的模型选择，并为用户低温下相对湿度计算提供了方向。

【关键词】相对湿度计算；过冷水模型；冰面模型；饱和水汽压

文献标识码：A　　文章编号：1003−1870（2026）05−0026−06

Theoretical Dilemma of Relative Humidity Calculation Below Zero: Comparative Analysis and Experimental Study Based on Supercooled Water Model and Ice Surface Model

【Abstract】Accurate calculation of relative humidity below zero is a long−standing theoretical difficulty and practical challenge in the field of humidity metrology. This paper comprehensively investigates the systematic differenc−es in relative humidity calculation between the supercooled water model and the ice surface model under the sub−zero temperature conditions. By comparing the saturation vapor pressure calculation formulas of the two models (including the Magnus formula recommended by WMO and its modified forms), theoretical analysis shows that the difference in saturation vapor pressure between the two models varies non−linearly within the temperature range of −30 ℃ to 0 ℃. An experiment on relative humidity measurement below zero was designed and implemented. With a high−precision chilled−mirror dew−point hygrometer adopted as the reference standard, low−temperature humidity generators applying two distinct calculation methods were measured, and the relative humidity differences between the two approaches were further analyzed. This paper further discusses the specific impacts of diverse standard selections on meteorology, aviation, industry and other fields, proposes model selection principles based on application scenarios, measurement purposes and error tolerance, and provides guidance for users to calculate relative humidity at low temperatures. [2]

【Keywords】Relative humidity calculation; Supercooled water model; Ice surface model; Saturation vapor pressure

引言

相对湿度是大气科学、环境监测、工业过程控制及健康舒适度评价中的核心参数之一，其定义为实际水汽压（e）与同温度下饱和水汽压（E）的百分比（$RH = e/E \times 100\%$）。在温度高于0℃时，饱和水汽压的参考状态明确为纯水平液面，相关经验公式（如Magnus 公式、Goff–Gratch 公式）已相当成熟且被国际广泛采纳。然而，当环境温度低于0℃时，水可能以两种不同的相态达到饱和：过冷液态水与固态冰。这两种相态的饱和水汽压存在显著差异，导致了相对湿度计算的根本性歧义。

在自然界和工业环境中，0℃以下大气或密闭空间内的水汽常处于热力学亚稳态。纯净的过冷水可以在无扰动、无凝结核的条件下稳定存在至约–40℃，而冰面的形成则代表了一种更稳定的热力学平衡态。这种相态的不确定性，使得在0℃以下温度区间内，相对湿度失去了唯一的定义。若采用过冷水模型计算，得到的是“相对于水的相对湿度”（RHw）；若采用冰面模型，得到的是“相对于冰的相对湿度”（RHi）。二者物理意义不同，数值差异显著，直接影响了气象观测的准确性、航空安全的预警阈值、工业干燥工艺的控制精度以及科学研究的可比性。

目前，不同领域和标准组织对此问题的处理方式并不统一。世界气象组织（WMO）建议，在报告地面气象观测时，统一使用过冷水模型，以保持其与高空观测和数值预报模式的一致性。而在涉及结冰条件的航空领域，冰面模型因其直接与结冰物理过程相关而更受关注。我国相关计量规程对此尚无强制性规定，导致仪器厂商、用户在不同场景下采用不同算法，造成数据混乱与比较困难。

本文旨在深入剖析这一理论困境。首先，从热力学基础出发，对比分析两种模型的饱和水汽压公式的差异。其次，通过设计0℃以下相对湿度测量实验，观察并测量两种不同计算方式在实际条件下的测量结果。然后，系统评估模型选择带来的误差大小及其对应用的影响。最后，结合不同应用场景，提出模型选择的实用指南与未来技术发展的方向。

1　理论基础与模型对比

1.1　饱和水汽压的热力学基础

根据克劳修斯– 克拉佩龙方程，饱和水汽压随温度的变化关系取决于相变潜热。气– 液转换（蒸发/凝结）与气– 固转换（升华/ 凝华）的潜热不同，导致两条饱和蒸汽压曲线。在0℃时，三相点处两曲线相交，饱和水汽压相等。随着温度降低，冰面的饱和水汽压始终低于同温度下过冷水的饱和水汽压，因为分子从冰面升华需要克服更大的结合能。这使得在相同实际水汽压下，冰面的相对湿度（RHi）始终大于水面的相对湿度（RHw）。

1.2　过冷水模型与冰面模型的经验公式

为便于计算，工程上多采用精度较高的经验公式。世界气象组织推荐使用Sonntag（1990）修正的Magnus 型公式族。简化公式如下（饱和水蒸气压的单位：Pa），在水面上：

$$\ln e_w(t) = \ln 611.2 + \frac{17.62t}{243.12 + t}$$

其中温度范围为：（–45~60）℃；不确定度小于 ± 0.6%；置信空间为95%。在冰面上：

$$\ln e_w(t) = \ln 611.2 + \frac{22.46t}{2727.62 + t}$$

其中温度范围为：（–65~0.01）℃；不确定度小于 ± 1.0%；置信空间为95%。

另一组复杂公式如下所示：

在水面上：

$$\ln e_w(t) = -6096.9385T^{-1} + 21.2409642 - 2.711193\times 10^{-2}T + 1.673952\times 10^{-5}T^2 + 2.433502\ln T$$

在冰面上：

$$\ln e_w(t) = -6024.5282T^{-1} + 29.32707 + 1.0613868\times 10^{-2}T - 1.3198825\times 10^{-5}T^2 - 0.49382577\ln T$$

这组公式也有相应的不确定度，在水面上温度范围是0℃ ~100℃，饱和水蒸气压的不确定度小于0.1%，对于过冷水即–45℃ ~0℃不确定度为0.6%；在冰面上温度范围从–100℃ ~0.01℃，饱和水蒸气压的不确定度小于1%，置信空间都在95%。

1.3　理论差异分析

定义饱和水汽压比为：$r(T) = \frac{e_w(T)}{e_i(T)}$，相对湿度差值为：$\Delta RH = RHi - RHw$。当实际水汽压$e$ 相同

时：$RHw = \frac{e}{e_w} \times 100\%$，$RHi = \frac{e}{e_i} \times 100\%$，$\Delta RH = RHi - RHw = \frac{e}{e_i} - \frac{e}{e_w}$。由于$ew > ei$，因此$\Delta RH > 0$，即$RHi$恒大于$RHw$。

计算表明，在–40 ℃至0 ℃范围内，r值从1.0（0℃处）单调增加至约1.47（–40℃处）。这意味着，在–40 ℃、RHw为50% 的条件下，RHi将高达约73.5%，差值达23.5%。在常见的低温区间（如–20 ℃），$r \approx 1.26$，若RHw=60%，则$RHi \approx$75.6%，差值约15.6%。这种差异已远超高精度湿度传感器的不确定度，必须予以考虑。

2 实验验证

2.1 实验装置

该实验装置配置如下：

测量标准：S–2 型冷镜式精密露点仪；温度测量范围：（–50~100）℃，温度MPE：±0.05 ℃；露点测量范围：（–75~20）℃dp，露点MPE：±0.10℃

被测设备：低温型湿度发生器；温度控制范围（–30~40）℃，温度波动度±0.03℃/30min；露点温度（–60~40）℃dp，湿度（5~95）%RH，湿度波动度：±0.1RH/30min。

2.2 实验方法

实验在–10℃，–20℃，–30℃下进行，分别测量每个温度下的相对湿度50%，实验步骤如下：

2.2.1 测量位置

将S–2 型精密露点仪温度探头和抽气管放入低温型湿度发生器测量腔内，温度探头和抽气管距离测量腔内壁大于5cm，投入深度大于10cm。

2.2.2 实验步骤

开启低温型湿度发生器，开启精密露点仪，先设置湿度发生器温度，按由低温到高温的顺序设置温度，设定温度为–30℃，待温度到达设定温度后，设定湿度发生器湿度，设定湿度为50%RH，待湿度发生器湿度达到设定湿度点后，稳定30 分钟，打开两组被测仪器，读取精密露点仪温湿度示值和湿度发生器示值，每2 分钟读取1 次，共读取两组，以两次测得值的算术平均值作为测量结果。–20℃，–10℃温度点操作步骤同上述一致。

2.3 实验结果与分析

2.3.1 实验结果

实验结果如表1、表2、表3 所示，测量结果如下页图1 所示。

表1 –30℃下测量结果

测量温度/℃	–30	
测量湿度/%RH	50（–30℃温度下）	
精密露点仪示值（水面算法）	温度/℃	–30.16
	露点温度/℃dp	–36.72
	相对湿度/%RH	37.09
湿度发生器示值	温度/℃	–30.09
	露点温度/℃dp	–36.60
	相对湿度/%RH（水面算法）	37.21
	相对湿度/%RH（冰面算法）	50.01

表2 –20℃下测量结果

测量温度/℃	–20	
测量湿度/%RH	50（–20℃温度下）	
精密露点仪示值（水面算法）	温度/℃	–20.11
	露点温度/℃dp	–27.16
	相对湿度/%RH	40.91
湿度发生器示值	温度/℃	–20.13
	露点温度/℃dp	–27.09
	相对湿度/%RH（水面算法）	41.21
	相对湿度/%RH（冰面算法）	50.26

表3　–10℃下测量结果

测量温度/℃	–10	
测量湿度/%RH	50（–10℃温度下）	
精密露点仪示值（水面算法）	温度/℃	–9.93
	露点温度/℃dp	–17.51
	相对湿度/%RH	45.22
湿度发生器示值	温度/℃	–9.91
	露点温度/℃dp	–17.54
	相对湿度/%RH（水面算法）	45.26
	相对湿度/%RH（冰面算法）	49.83



图1　测量结果示意图

2.3.2　结果分析

以–30℃下测量结果为例，精密露点仪的湿度读数（37.09%RH）与低温型湿度发生器过冷水模型计算的理论RHw（37.21%RH）高度吻合，而与冰面模型计算的RHi（50.01%RH）差异巨大。这表明，传感器在0℃以下所“感知”的相对湿度，本质上取决于其内部关于饱和水汽压的计算方式。在负温时，湿度标准器精密露点仪的计算方式是基于过冷水模型。当环境中冰晶占优时，精密露点仪的读数（基于过冷水模型）会出现显著的正偏差。

3　难点、影响与标准现状

3.1　核心难点：相态的模糊性与判断困境

在绝大多数实际应用场景中，操作者无法预知或控制被测环境中的相态，这是因为过冷水在肉眼和常用传感器下与液态水、冰高度相似。纯净过冷水透明无色，与普通水无异，其在宏观上静稳，无凝结核时可稳定存在数小时甚至更久，易被误判为普通水。并且在实际中存在混合态，云中常有过

冷水滴、冰晶同时共存，但传感器难以分辨。大气中可能同时存在过冷水滴和冰晶，其比例随气象条件、气溶胶成分等复杂变化。工业环境中，表面特性、污染物、静电等因素也会影响相态。因此，“应该用哪个模型？”往往没有先验的确定答案，这是0℃下湿度测量的根本困境。实际应用中可采取控温速率方法，慢速降温时，水有更多时间找到杂质表面或形成稳定冰核，通常在较高温度（如–5℃）就冻结。快速降温时，分子来不及有序排列成冰核，能稳定保持液态到更深的过冷温度（接近–38.5℃）。

3.2　对不同领域的影响

3.2.1　气象与气候

采用不同模型会影响云物理参数化、降水类型预报（雨、雪、冻雨）、能见度估算以及历史气候序列的均一性分析。

3.2.2　航空安全

飞机积冰预报高度依赖相对湿度。若使用*RHw*，可能在过冷水含量高（*RHw*接近100%）但*RHi*已远超100%的情况下低估积冰风险；若使用*RHi*，则可能在冰晶云中高估风险。例如美国航空4184号班机空难，则是依赖了基于冰面模型来判断结冰风险，而忽略了过冷水测存在。目前航空领域趋向于同时参考两者。

3.2.3　工业过程

在冷冻干燥、低温仓储、锂电池生产等过程中，控制目标是防止冰晶形成还是控制水分活度，目标不同，选择的模型就不同。

3.2.4　计量与校准

校准0℃下湿度传感器时，标准器（如湿度发生器）产生的是基于哪种相态的参考值？这将直接影响被校仪器的量值溯源与一致性。

3.3　现行标准与惯例

WMO建议，地面常规气象观测统一报告相对于过冷水的相对湿度（*RHw*），旨在保持全球数据的内部一致性和与数值模式的兼容性。ICAO（国际民航组织）在涉及积冰的航空天气预报中，要求明确说明所报告的相对湿度是相对于水还是冰。对于仪器制造商，绝大多数商用温湿度计的芯片算法内置的是过冷水模型。少数高端仪器会同时计算并显示RHw和*RHi*。JJG 2046–2010《湿度计量器具检定系统表》中提及了冰面饱和水汽压，但未强制规定0℃下相对湿度的报告方式，存在实践空白。

4　应用建议与未来展望

4.1　模型选择实用指南

面对模型选择难题，建议遵循以下流程。

4.1.1　明确测量目的

若为气象气候研究、数值模式同化或一般环境监测，遵循WMO建议，统一使用过冷水模型（*RHw*），并在数据元数据中明确说明。

若为航空积冰预警、除冰作业指导或任何与结冰直接相关的安全应用，应优先关注冰面模型（*RHi*），或同时获取两者。

若为工业过程控制，需根据工艺的物理化学本质决定。目标一是控制“液态水”活性时用水模型；目标二是防止“结冰”时用冰模型，或两者结合。

4.1.2　评估不确定度

在报告中，应清晰指出0℃下相对湿度值存在因模型选择导致的固有不确定度分量。可附注如：“在–20℃时，因相态未知，本*RH*读数（基于水模型）可能存在的附加不确定性范围约为 ± X%。”

4.1.3　增加辅助信息

尽可能记录传感器类型及所使用的计算模型。

4.2　未来技术发展展望

4.2.1　智能相态识别传感器

未来的研究方向是开发能够主动识别环境主导相态的新型传感器。例如，结合光学散射测量（区分液滴与冰晶）、或利用两种不同敏感材料（一种亲水、一种亲冰）的电学特性差异，直接给出相态判断和对应的可靠湿度值。

4.2.2　标配双模型输出

随着计算能力的提升，要求湿度仪器（尤其是工业级和科研级）同时计算并输出*RHw*和*RHi*应成为标准功能，为用户提供完整的决策信息。

4.2.3　完善标准与规程

我国计量技术机构应尽快制定更明确的指导性文件或技术规范，对0℃下湿度测量模型的选择、报告方式和校准方法给出推荐性意见，以促进该领域数据的规范化和可比性。

5 结语

0℃以下相对湿度的计算因过冷水与冰面饱和水汽压的固有差异而存在根本性的双重标准问题。本文通过理论分析与实验验证表明，过冷水模型（RHw）与冰面模型（RHi）在物理上分别对应于不同的热力学平衡态（亚稳态与稳定态），在数值上存在系统性且不可忽略的差异。另外，不存在适用于所有场景的“正确”模型。模型的选择应严格服务于测量目的，并需在数据报告中予以明确声明。

解决这一困境的未来出路在于，开发智能相态识别传感技术、推广仪器的双模型输出功能以及完善相关的标准与计量规范。

0℃下湿度的定义不同体现了自然现象的复杂性如何向测量科学提出深刻挑战。承认这种不确定性，并在理解其物理根源的基础上做出明智的工程选择，是推动相关领域技术进步的关键。

参考文献

[1] 梁兴忠, 李占元, 张传兴等. 精密露点仪霜/露点温度测量与相对湿度计算分析[J]. 中国计量 . 2023,(12) , 74−77.

[2] 胡爱英, 谭中侠. 饱和湿空气比湿度的计算与比较[J], 工业用水与废水 . 2021 ,52 (04) ,59−61+65.

[3] Tan Chunhua; Huang Xuguang; Lei Hongyan; Zhang Linna; Chen Jie; Meng Hongyun. A new optical fiber dew point humidity sensor based on the virtual instrument, Journal | [J] The Review of scientific instruments. Volume 90 , Issue 1 . 2019. PP 015115.

[4] 王世清, 栾明川, 王世民等. 低温下计测相对湿度的可行性探讨[J], 农业机械学报 . 2000 ,(02),120−121.

[5] 王云鹤, 程志明, 吴珂. 干湿球法测量相对湿度的影响因素分析[J]. 中国计量大学学报 . 2019 ,30 (03),274−278+286.

[6] 陈晓晨, 张倩, 吴飒. 一种湿度试验中计算露点温度的方法[J], 装备环境工程 . 2016 ,13 (02) , 88−91+122.

[7] Ueda Sayako, Morphological change of solid ammonium sulfate particles below the deliquescence relative humidity: Experimental reproduction of atmospheric sulfate particle shapes, 2021,PP 423−437.

[8] 李占元，杨菊. 低温环境相对湿度的测量[J]. 中国计量， 2005, (07), 62−63.

[9] 石良喜. 露点仪热效应对湿度传感器测量准确度的影响[J]. 计量与测试技术 . 2017 ,44 (07) : 75−76.

[10] 沙莉，管地，张博宇等. 气象用湿度传感器低温测量探讨[J]. 计测技术 . 2017 ,37 (01) : 38−40.

作者简介

胡腾飞，工程师，现供职于河北省计量监督检测研究院。研究方向：湿度计量。