

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.14

冷镜式精密露点仪光电信号特征参数试验研究

高雅, 王毅, 胡艳青, 柴源, 李心怡, 孟苏

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了提高露点温度的测量准确度, 寻找不同露点温度对应的最佳变化量, 设计并进行了光电信号特征参数试验。使用自主研发的精密露点仪, 调整不同的电压变化量对露点温度进行测量, 将测量数据与 MBW373 型参考精密露点仪采集得到的数据进行对比, 并计算误差, 得到 $-30 \sim -10$ °C 温度区间内的光电信号特征参数与露点温度对应的关系表, 分析得出该温度区间的光电信号特征参数, 证实了光电信号特征参数试验方案的可行性, 为之后进一步研究露点测量过程提供了数据参考和理论支撑。

关键词: 湿度测量; 冷镜式精密露点仪; 光电信号特征参数试验; 露点测量

中图分类号: TB943; TB96; TB97 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2023) 06-0121-06

Research on testing photoelectric signal characteristic parameters of cold mirror precision dew point meter

GAO Ya, WANG Yi, HU Yanqing, CHAI Yuan, LI Xinyi, MENG Su

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of dew point temperature and find the optimal change corresponding to different dew point temperatures, the characteristic parameter test of photoelectric signal was designed and conducted. The test uses a self-developed precision dew point meter to adjust different voltage changes to measure the dew point temperature, and MBW373 cold mirror precision dew point meter as the reference. Then, the collected data was analyzed and the error was calculated. Finally, the relationship table between the photoelectric signal characteristic parameters and the dew point temperature in the temperature range of $-30 \sim -10$ °C was obtained, and the photoelectric signal characteristic parameters in this temperature range were analyzed, which confirmed the feasibility of the test scheme. It provides data reference and theoretical support for further research on the dew point measurement process in the future.

Key words: humidity measurement; cold mirror precision dew point meter; photoelectric signal characteristic parameter test; dew point measurement

0 引言

露点是体现待测气体中水汽含量的重要物理量, 也是湿度的重要表征形式。冷镜式精密露点仪是测量露点的设备, 在计量领域常作为标准检

定器具使用, 并在湿度量传体系中具有很高的地位^[1-3]。

国外针对冷镜式精密露点仪的理论研究以及实际应用均比国内早。国外有关冷镜式精密露点仪的理论研究十分成熟, 针对露点测量过程中的

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2023-11-30

引用格式: 高雅, 王毅, 胡艳青, 等. 冷镜式精密露点仪光电信号特征参数试验研究[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 121-126.

Citation: GAO Y, WANG Y, HU Y Q, et al. Research on testing photoelectric signal characteristic parameters of cold mirror precision dew point meter[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 121-126.



各阶段均进行了详细的理论分析,有关光电信号特征参数的研究最早可以追溯至20世纪60年代^[4-7]。国外厂商制作的产品准确度高,例如瑞士MBW公司生产的MBW373冷镜式露点仪,其最大允许误差不超过 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

国内冷镜式精密露点仪的理论研究和产品与国外相比仍存在差距。国内对露点仪的理论研究较为基础,相关研究多集中于冷镜式露点仪温度控制的方法探究,缺少对冷镜式露点仪露点测量过程中各个变化量的分析,尤其是对光电信号特征参数和露点温度之间关系的研究分析^[8-13]。由于测量露点温度的准确度相较国外冷镜式精密露点仪差距较大,大多数国内研制的露点仪产品仅适合在工业环境中使用,不适合在实验室或计量检定机构中使用^[14-15]。

在冷镜式露点仪的露点测量过程中,关键变化量有两个:露点仪的镜面温度和光电信号的电压变化量。镜面温度反映露点温度,光电信号的电压变化量反映镜面的状态。通过对露点仪露点测量过程的分析可以发现:在初始状态下,镜面上没有凝结物生成,随着温度的改变,凝结物开始出现在镜面上;当温度到达露点温度,精密露点仪测量光电信号得到的电压发生改变,这是因为镜面上有凝结物生成,光线在镜面上由反射变为漫反射。露点测量设备测得的露点温度是指气体的凝结速度和液体的蒸发速度相同时,镜面上的露层到达饱和状态的温度值。在饱和状态下,镜面上的凝结物厚度保持不变,而不同的露点温度对应着不同的凝结物厚度,因此不同的露点温度对应的电压变化量也不同。由于电压变化量具有特殊性,可将电压变化量称作光电信号特征参数,选取合适的特征参数,可以提升露点测量的准确度。在实际测量中,被测气体的流量和压力等参数也会对最终测得的露点温度的准确性产生影响,但是这些参数产生的影响与光电信号的电压值产生的影响相比十分微弱。

在实际露点测量过程中,全部找出每个露点温度下的光电信号特征参数非常困难。相较于温度,光电信号特征参数的变化速度较慢,在一定温度范围内,可以选取相同的光电信号特征参数。因此,本文设计了测量试验,在不同的温度区间

下寻找对应的光电信号特征参数,提高冷镜式露点仪露点测量的准确度。

1 光电信号特征参数试验设计

1.1 冷镜式露点仪工作原理

冷镜式露点仪由冷镜面、光电信号发射管与接收管、铂电阻、半导体制冷片和散热片等部分组成,如图1所示。镜面是露滴生成的平台,光电信号发射管用于向镜面发射稳定的光线,而接收管则用来接收反射的光线,铂电阻用于测量镜面温度,半导体制冷片用于对镜面降温或升温,散热片用于散去半导体制冷片多余的热量。

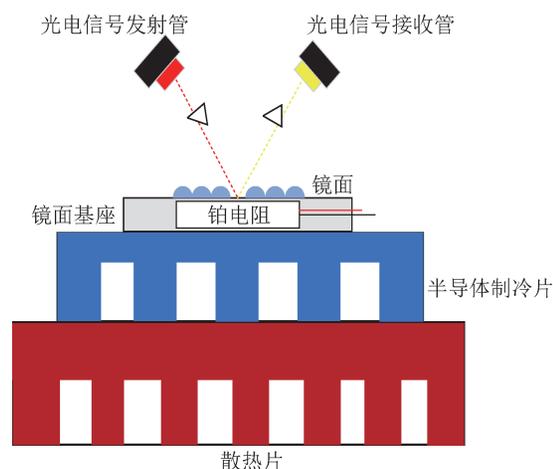


图1 冷镜式露点仪结构图

Fig.1 Structure diagram of cold mirror dew point meter

冷镜式露点仪的工作流程如下:当有气体通入露点仪中时,半导体制冷片开始降温,光源发出的光照射在镜面上,镜面将光线反射至接收管,得到一个初始电压值。当镜面上有凝结物生成,光线会在镜面上由反射变为漫反射,接收管接收到的电压信号会发生改变。如图2所示,监测并读取电压信号改变时刻铂电阻的温度值,即可得到露点温度。但是,目前冷镜式露点仪灵敏度较低,且电压值微小的变化极易淹没在噪声中,所以准确监测到电压改变的时机非常困难。在实际露点测量中,需要选取一个合适的电压变化值特征参数 Δu (Δu 为初始电压值与设备到达露点温度的电压值之间的差值),可以根据 Δu 的特殊性,找到最终的露点温度。

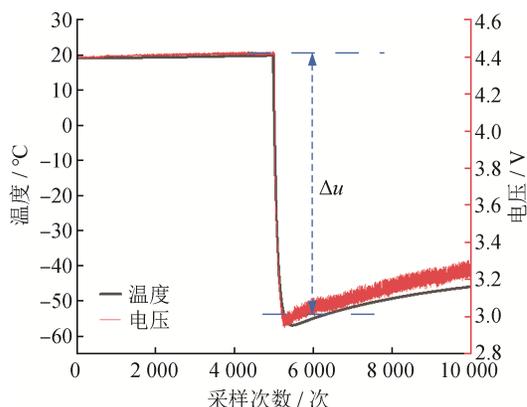


图2 电压随温度改变示意图

Fig.2 Schematic diagram of voltage change with temperature

1.2 光电信号特征参数试验设计方案

试验设计方案如图3所示,在同一露点温度下,设置不同的 Δu 值,将稳定后的露点温度与标准值对比并计算误差,最终得到不同温度对应的最佳 Δu 值。在试验中,控制器控制精密露点仪到达露点温度后,且测得的温度在30 min内波动度小于等于 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 时,认为精密露点仪到达稳定状态。选择的试验温度区间为 $-30\sim-10\text{ }^\circ\text{C}$,根据实际测量情况和理论分析,选择电压变化值为200、500、800 mV,以上三个电压变化值对于不同的露点温度具有较强的普适性,便于之后进行数据分析和模型建立。

2 光电信号特征参数试验过程

2.1 试验条件及设备

试验的环境温度为 $(23\pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度为50%,测试现场无剧烈震动和冲击,周围无强电磁干扰。

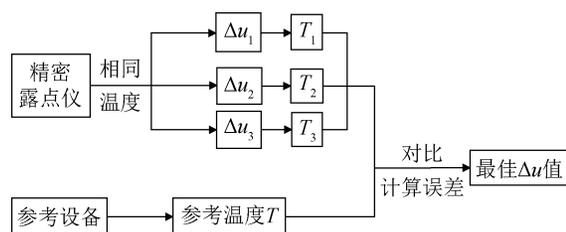


图3 试验设计方案框图

Fig.3 Block diagram of experiment design

试验中使用的低霜点湿度发生器(型号: CIMM-TH-0506)为自主研发的设备,其露点范围为 $-30\sim 0\text{ }^\circ\text{C}$,露点最大允许误差不超过 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$,稳定性优于 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}/30\text{ min}$,流量为 $0\sim 10\text{ L}/\text{min}$,供电电压为AC 220 V / 50 Hz,功率为3 kW,环境温度 $10\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度10%~80%RH。

试验中选取的标准冷镜式精密露点仪为瑞士MBW公司生产的MBW373冷镜式露点仪(型号: MBW 373LX),该露点仪测温准确度高、测试时间短,经常作为实验室内标准仪器使用。其露点范围为 $-95\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$;露/霜点误差不超过 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$,供电电压为200~240 V,50/60 Hz,功率为500 W。

2.2 试验步骤

在试验过程中,设备连接图如图4所示。操作步骤为:

- 1) 开启低霜点湿度发生器,设置露/霜点温度,等待发生器到达设定温度并稳定30 min后,开始进行试验。
- 2) 将标准气(氮气)气瓶接入MBW373露点仪,确认接通后打开MBW373露点仪,调节气体流量为 $0.5\sim 0.8\text{ L}/\text{min}$ 。之后开始露点测量程序,直到MBW373露点仪测得露点温度并保持稳定30

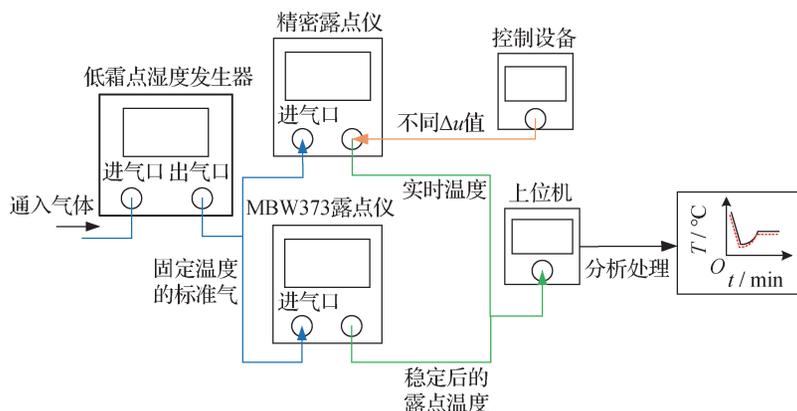


图4 光电信号特征参数试验设备连接图

Fig.4 Connection diagram of photoelectric signal characteristic parameter testing equipment

min后, 开启数据采集软件, 进行数据采集。

3) 将标准气输入精密露点仪, 调节气体流量为0.5~0.8 L/min, 开启露点仪, 通过电压变化量控制温度, 并同时开启数据采集软件采集数据, 比较稳定状态下精密露点仪温度与MBW373露点仪测得的露点温度。光电信号电压变化值分别设定为200、500、800 mV, 低霜点湿度发生器设定露/霜点温度值为-30、-20、-10℃。

3 光电信号特征参数试验结果

通过使用上述试验设备进行多次重复测量, 并将试验得到的数据与MBW373露点仪标准参考值进行对比, 绘制成曲线图, 如图5~图7所示。

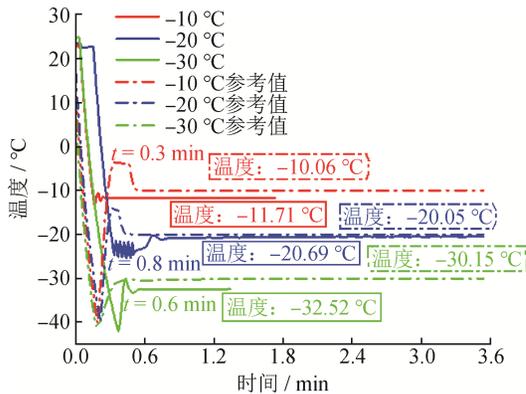


图5 200 mV 曲线图

Fig. 5 200 mV curve diagram

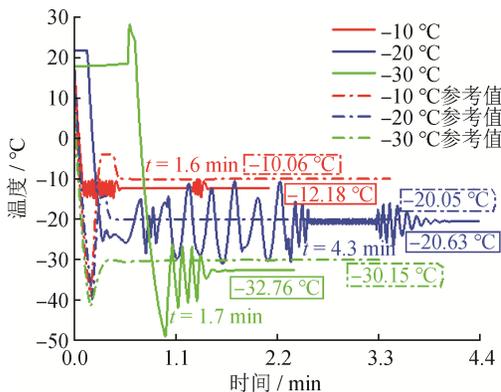


图6 500 mV 曲线图

Fig.6 500 mV curve diagram

将-30~-10℃区间内不同光电信号特征值下冷镜式精密露点仪测得的露点温度与MBW373露点仪参考值进行对比, 并计算误差。

1) $\Delta u = 200$ mV

由图5计算得到, 温度为-10℃时, 露点温度

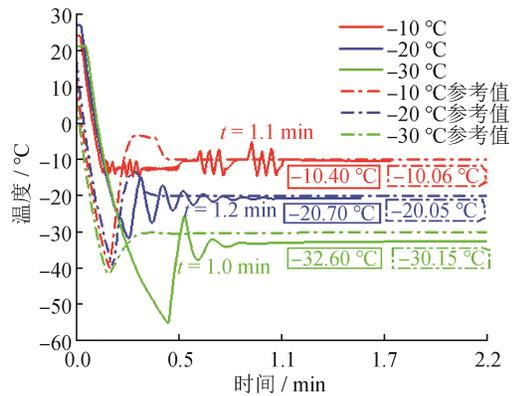


图7 800 mV 曲线图

Fig.7 800 mV curve diagram

与参考值相差1.65℃; 温度为-20℃时, 露点温度与参考值相差0.64℃; 温度为-30℃时, 露点温度与参考值相差2.37℃。

2) $\Delta u = 500$ mV

由图6计算得到, 温度为-10℃时, 露点温度与参考值相差2.12℃; 温度为-20℃时, 露点温度与参考值相差0.58℃; 温度为-30℃时, 露点温度与参考值相差2.61℃。

3) $\Delta u = 800$ mV

由图7计算得到, 温度为-10℃时, 露点温度与参考值相差0.34℃; 温度为-20℃时, 露点温度与参考值相差0.65℃; 温度为-30℃时, 露点温度与参考值相差2.45℃。

不同露点范围对应的绝对误差 ΔT 见表1。

表1 不同露点范围对应的绝对误差 ΔT

Tab.1 Absolute error ΔT corresponding to different dew point ranges

露点温度 / °C	ΔT / °C		
	200 mV 时	500 mV 时	800 mV 时
-10	1.65	2.12	0.34
-20	0.64	0.58	0.65
-30	2.37	2.61	2.45

4 结束语

根据试验得到的曲线图与关系表, 可以得到如下结论:

1) 当露点温度为-10℃时, 不同电压变化值对露点温度的影响差别很大, 这可能是因为-10℃

时镜面上存在过冷水, 导致稳定后的露点温度波动较大;

2) 露点温度设为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 稳定后的温度与参考温度之间相差较小, 但是温度到达稳定状态花费的时间相较于其他两个温度点更长, 由于镜面上存在过冷水, 导致露点仪在测量温度时镜面上的状态难以判定;

3) 通过综合对比温度误差与稳定时间, 可以将 $\Delta u = 200\text{ mV}$ 作为该区间的光电信号特征值。

由 $-30\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间光电信号特征参数的初步试验和数据分析可知, 通过控制光电信号特征参数得到稳定后的露点温度的方法是可行的, 可以根据试验结果, 设计精密露点仪的软件算法。但是, 基于当前的试验结果还不足以建立完整的露点温度与光电信号特征参数间的关系, 后续还需要进行的研究如下:

1) 当前使用的湿度发生器可提供的标准气温度范围较小, 之后将更换范围更宽的湿度发生器, 对更多温度点进行试验, 并对试验数据进行建模, 分析总结其中的规律, 探索具有普适意义的模型。

2) 通过得到的误差表可知, 试验数据与标准设备之间仍存在误差, 可能因为是镜面温度与实际测得温度之间存在温度梯度, 未来需将温度梯度值预加载至精密露点仪的软件设计中。

3) 通过对参考值温度曲线的分析可以看到, MBW373露点仪在 -10 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 采取的温度控制方式与 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的存在差异, 这可能是因为存在过冷水, 目前的精密露点仪在这三个温度点使用的是相同的温度控制方式, 之后将通过进一步的试验, 优化温度控制。

4) 目前精密露点仪得到稳定温度花费的时间相比MBW373露点仪更长, 且平衡时的波动曲线不稳定, 之后需在软件功能设计中解决该问题。

参考文献

[1] 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.
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 & Measurement Technology, 2022, 42(2): 97-101. (in Chinese)

[2] 白雪松, 王国华, 刘嘉, 等. 基于双半导体制冷器的谐

振式露点仪主控温系统设计[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 73-78.

BAI X S, WANG G H, LIU J, et al. Design of main temperature control system of resonant dew point meter based on double TEC [J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(2): 73-78. (in Chinese)

[3] 孙锦程. 基于显微冷镜原理的露点仪研制[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.

SUN J C. Development of dew-point meter based on micro-cold mirror principle [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[4] 孙文慧. 基于微型制冷机的冷镜式露点仪研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

SUN W H. Research on cold mirror dew-point meter based on micro-refrigerator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[5] 李庆辉, 王晓蕾, 赵世军, 等. 基于凝结物覆盖率的露点仪自适应PID温控算法[J]. 测控技术, 2020, 39(7): 98-102.

LI Q H, WANG X L, ZHAO S J, et al. Adaptive PID temperature control algorithm of dew point meter based on condensate coverage [J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(7): 98-102. (in Chinese)

[6] 陈新准, 李娜, 张宾, 等. 基于专利分析的中国露点仪技术态势研究[J]. 现代信息科技, 2021, 5(14): 24-28.

CHEN X Z, LI N, ZHANG B, et al. Research on the technical situation of China's dew point meter based on patent analysis [J]. Modern Information Science and Technology, 2021, 5(14): 24-28. (in Chinese)

[7] 魏骞骞. 可远程传输数据的小型露点仪研制[D]. 济南: 山东大学, 2021.

WEI Q Q. Development of small dew point meter that can transmit data remotely [D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)

[8] 聂晶, 孟晓风, 郑睿, 等. 一种谐振式露点测量方法[J]. 测试技术学报, 2012, 26(5): 393-396.

NIE J, MENG X F, ZHENG R, et al. A resonant dew point measurement method [J]. Chinese Journal of Testing Technology, 2012, 26(5): 393-396. (in Chinese)

[9] 雷声. 基于声表面波及微纳技术的高性能湿敏传感器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

LEI S. Research on high-performance moisture-sensitive sensor based on surface acoustic wave and micro-nano technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

- (in Chinese)
- [10] 许馨尹, 于军琪, 李红莲, 等. 露点温度计算方法对比研究[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(3): 107-111. (in Chinese)
- XYU X Y, YYU J Q, LI H L, et al. Comparative study of dew point temperature calculation methods[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(3): 107-111. (in Chinese)
- [11] 杨会兵. 露点型湿度传感器性能优化研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- YANG H B. Research on performance optimization of dew point humidity sensor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] 李亚萍, 晏云昌, 王三霞, 等. 新型双光路镜面露点仪设计[J]. 仪表技术与传感器, 2015(1): 38-40.
- LI Y P, YAN Y C, WANG S X, et al. New dual-path mirror dew point meter design [J]. Instrument Technology and Sensor, 2015(1): 38-40. (in Chinese)
- [13] 李丙旺. 基于PID智能温度控制系统的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- LI B W. Design and implementation of PID-based intelligent temperature control system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] 廖艳春. 冷镜式露点仪计量标准检定或校准结果的测量不确定度评定[J]. 中国计量, 2021, 3: 109-110.
- LIAO Y C. Evaluation of measurement uncertainty of measurement standard verification or calibration results of chilled mirror dew point meter [J]. China Metrology, 2021, 3: 109-110. (in Chinese)
- [15] 胡艳青, 柴源, 陈洁新, 等. 高露点湿度标准装置的研制[J]. 计测技术, 2021, 41(3): 34-38.
- HU Y Q, CHAI Y, CHEN J X, et al. Development of high dew point humidity standard device[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(3): 34-38. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 高雅 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湿度测量测试技术。