

高压水分发生器的研制

陈洁新, 胡艳青, 柴源, 李心怡, 孟苏, 吕国义

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 对于高温高压下的湿度参数校准, 尤其是温度高于 100 °C 条件下的相对湿度或水汽含量校准、露点温度高于 100 °C 的露点温度校准, 目前我国仍缺乏有效的方法及装置。为解决此问题, 研制了一套基于单温单压法原理的高压水分发生器。该发生器由饱和系统、气路系统、恒温系统与控制系统组成, 其中饱和系统完成设定温度与压力下的水汽饱和; 气路系统与恒温系统实现不同压力与温度条件下的气体传输; 控制系统实现整体温度、压力精准控制, 最终可产生体积分数为 0.5% ~ 15% (对应露点温度范围为 -2.8 ~ 110 °C) 的标准湿气, 绝对压力范围为 0.1 ~ 1 MPa, 露点温度扩展不确定度为 0.50 ~ 0.52 °C ($k=2$)。该高压水分发生器具有稳定时间短、准确度高、操作方便、实用性强等优点, 可作为高温高压条件下的校准湿度源, 具有重要技术应用价值。

关键词: 高温高压; 湿度校准; 高压水分发生器

中图分类号: TB94; TH89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)05-0062-07

Development of high pressure moisture generator

CHEN Jiexin, HU Yanqing, CHAI Yuan, LI Xinyi, MENG Su, LYU Guoyi

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

Abstract: At present, there is still a lack of effective methods and devices for the calibration of humidity parameters under high temperature and pressure in China, especially for the calibration of relative humidity or water vapor content under conditions of temperature above 100 °C, and for the calibration of dew point temperature above 100 °C. To address this issue, a high-pressure moisture generator based on the principle of single temperature and single pressure method has been developed. The generator consists of a saturation system, an air circuit system, a constant temperature system, and a control system. The saturation system completes water vapor saturation at the set temperature and pressure; The air circuit system and constant temperature system achieve gas transmission under different pressure and temperature conditions; The control system achieves precise control of overall temperature and pressure. The standard moisture with a volume fraction of 0.5% to 15% (corresponding to a dew point temperature range of -2.8 to 110 °C) can be ultimately produced, with an absolute pressure range from 0.1 to 1 MPa, and an expanded uncertainty from 0.50 to 0.52 °C ($k=2$) for dew point temperature. The high-pressure moisture generator has the advantages of short stability time, high accuracy, convenient operation, and strong practicality. It can be used as a calibration humidity source under high-temperature and high-pressure conditions, and has important technical application value.

Key words: high temperature and high pressure; humidity calibration; high pressure moisture generator

收稿日期: 2023-10-17; 修回日期: 2023-10-23

引用格式: 陈洁新, 胡艳青, 柴源, 等. 高压水分发生器的研制[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 62-68.

Citation: CHEN J X, HU Y Q, CHAI Y, et al. Development of high pressure moisture generator[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 62-68.



0 引言

当前对高温高压下的湿度参数校准需求日益增多,例如燃料电池、核动力系统的应用环境下,经常需要在温度高于100℃的情况下对相对湿度进行监测^[1];一些干燥行业也需要对高温下的相对湿度进行测量。目前常用的耐高温的温湿度计包括:瑞士Rotronic生产的HC2-IC湿度传感器,测量温度范围为-100~200℃,相对湿度范围为5%~95%RH;芬兰Vaisala生产的HMP7湿度传感器,测量温度范围为-70~180℃,相对湿度范围为0%~100%RH等。

美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)在2010年开展了高露点湿度标准装置研究,并建立了相关标准。NIST研制的高露点湿度标准装置可产生露点温度范围为85~200℃,压力范围为0.2~1.6MPa的标准湿气。中国计量科学研究院研制了高温湿度发生装置,该装置可产生露点温度为80℃的标准湿气。

目前我国湿度基准露点温度上限为80℃^[2],缺乏针对高温(特别是100℃以上)高压条件下湿度参数的校准手段。为解决该问题,本文研制了一套高压水分发生器,用于产生体积分数范围为0.5%~15%(对应露点温度范围为-2.8~110℃),绝对压力范围为0.1~1MPa的标准湿气,以满足高温高压条件下湿度参数的溯源需求,为实现高温高压环境中湿度参数高准确度计量奠定基础。

1 高压水分发生器的原理及构成

1.1 系统原理

高压水分发生器的工作原理如图1所示。该水分发生器基于单温单压法原理,即通过改变湿度发生器内饱和器的温度与压力,最终得到所需压力与温度下的标准湿气^[3]。气源可使用高纯氮气或空气,气源出气需经过减压阀,以减小气源波动对高压水分发生器的影响^[4]。

气体进入发生器后,首先通过压力控制器将进气压力调节至所需压力值,发生器的内部气体流量通过质量流量控制器进行控制。气体经过控

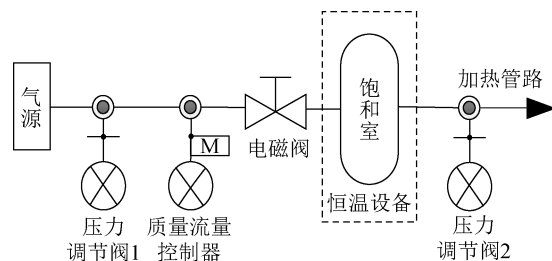


图1 高压水分发生器原理图

Fig.1 Schematic diagram of high-pressure moisture generator

压后进入特定温度环境的饱和器内,在饱和器内产生设定温度与压力下的饱和湿气,经过加热管路后,最终输出体积分数范围为0.5%~15%(对应露点温度范围为-2.8~110℃),绝对压力范围为0.1~1MPa的标准湿气。

已知体积分数 w 与饱和器压力 P ,则饱和器内的饱和水蒸气压 e_w 的计算公式为

$$e_w = \frac{wP}{1+w} \quad (1)$$

计算对应的饱和器所需设定的露点温度 T_d 为

$$T_d = \frac{\sum_{i=0}^3 c_i (\ln e_w)^i}{\sum_{i=0}^3 d_i (\ln e_w)^i} \quad (2)$$

式中: T_d 为露点温度(开氏温度); c_i 、 d_i 为计算系数,数值分别为 $c_0 = 207.982\,33$, $c_1 = -20.156\,028$, $c_2 = 0.467\,789\,25$, $c_3 = -9.228\,806\,7 \times 10^{-6}$, $d_0 = 1$, $d_1 = -0.133\,196\,69$, $d_2 = 5.657\,751\,8 \times 10^{-3}$, $d_3 = -7.517\,286\,5 \times 10^{-5}$ 。

换算得到摄氏露点温度 t_d ,即

$$t_d = T_d - 273.15 \quad (3)$$

根据式(1)~式(3),通过用户设定的压力 P 与体积分数 w ,在压力范围0.1~1.0MPa的条件下,生成体积分数范围0.5%~15%的标准湿气,可对应计算出饱和器所需发生的露点温度范围为-2.8~110℃。

1.2 高压水分发生器结构组成

高压水分发生器由饱和系统、气路系统、恒温系统与控制系统组成。饱和器结构分为两部分,分别为高露点段与低露点段,需根据饱和温度的不同选择不同露点温度段的饱和器进行水汽饱和;气路系统由调压装置、换热管路、加热管路、气路切换装置等组成,为气体在发生器内提供不同

压力或温度条件下的传输路径;控制系统完成对压力、进气流量、饱和器温度的调控,并负责实

现饱和器气路切换、加热管路温度监测。高压水分发生器系统结构如图2所示。

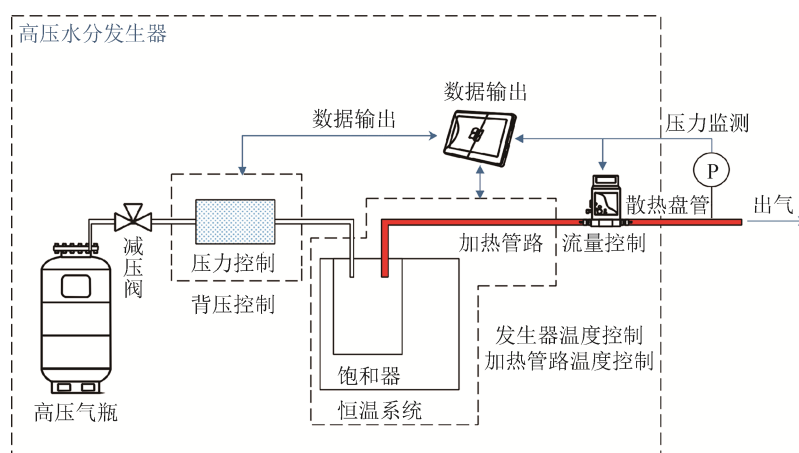


图2 高压水分发生器系统结构图

Fig.2 Structure diagram of high-pressure moisture generator system

各系统之间气路采用1/4卡套接头与1/4NPT接头连接,通讯线路采用RS485连接。该发生器的各系统部件协同工作,最终可产生所需的高温高压下的标准湿气。

2 高压水分发生器的设计

2.1 饱和系统

饱和系统属于两相流接触的场合^[5],气体的传热传质过程在饱和系统内完成,其设计原则是:确保气体与水有充分的接触时间且出气不能夹带水滴,同时还要减少气体在饱和系统内的压力损失^[6]。

根据1.1节计算出的饱和器的露点温度范围,为了提高饱和器的饱和效率,该发生器的饱和器设计为低露点与高露点两个饱和器并联的形式。低露点与高露点饱和器分别设计有进水口与排水口,同时高露点饱和器内设计有液位计,可提醒用户及时加水。

在高露点段($t_d > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$),饱和器结构设计为鼓泡式饱和器。为了提高饱和器的饱和效率,饱和器设计为二级饱和,分为预饱和器与主饱和器。气体先进入换热盘管进行换热,然后进入该饱和器进行水汽饱和;在低露点段($t_d \leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$),饱和器结构设计为多层叠盘式,气体先经过该饱和器增湿或除湿,再进入换热盘管中进行换热^[7]。同时

在低温叠盘式饱和器的进气口设计有聚甲醛绝热盖,防止气源中水汽过多导致饱和器内发生冰堵现象。两个饱和器进气与出气管路上均设计有电磁阀,可通过控制电磁阀的通断选择特定的饱和器进行水汽饱和。

为了防止气体在高温饱和器出气气路中发生水汽冷凝,饱和器出气段设计有加热管路,管路的加热温度根据饱和器当前发生的露点温度进行设定,通常需要比饱和器当前露点温度值高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右^[8]。

饱和器材质选取316型不锈钢,内壁均采取化学电抛光处理,根据饱和器的压力范围,设计饱和器壁厚为 3 mm 。饱和器设计结构图如图3所示。

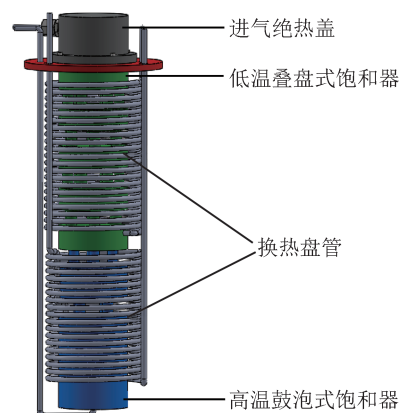


图3 饱和器设计结构图

Fig.3 Structure diagram of saturator design

2.2 气路系统

气路系统包括调压装置、换热管路、加热管路、气路切换管路等,为气体在发生器内提供不同压力或温度条件下的路径。调压装置由压力控制器、高温气体流量控制器组成,用于控制饱和器和内部压力与管路内的气体流量;加热管路设计在高温饱和器出气段与测量室进气段之间,防止高温露点气体在饱和器与测量室之间的管路中冷凝,在对应的管路中紧密缠绕加热带与保温材料,加热驱动元件选用单相功率调整器。

加热管路的保温材料需使用耐热胶进行粘贴固定。比较了橡塑保温棉、硅酸铝保温棉、聚氨酯发泡与酚醛树脂发泡等材料^[9],综合考虑保温性能、安装及拆卸的难易程度、环保性、价格等因素,最终选用橡塑保温棉作为保温材料。橡塑保温棉多适用于 $-40 \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的设备保温,导热系数约为 $0.034\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ^[10],具有隔热、隔音、易加工、便于安装操作等优点。

气体切换管路位于高温与低温饱和器的进气口与出气口,共包含4个电磁阀。通过设定的水分含量与绝对压力计算饱和器设定的露点温度,当 $t_d > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,高温饱和器气路的2个电磁阀开启,低温饱和器气路的2个电磁阀关闭,气体通过高温鼓泡饱和器进行水汽饱和;当 $t_d \leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,低温饱和器气路的2个电磁阀开启,高温饱和器气路的2

个电磁阀关闭,以此达到气路切换的目的。气路系统连接如图4所示。

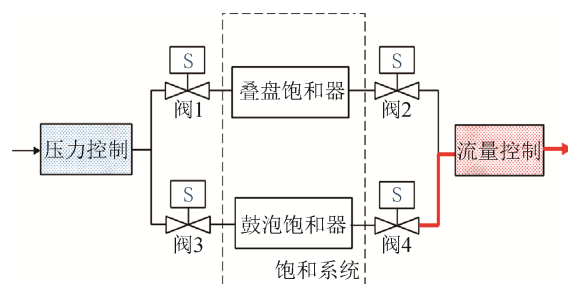


图4 气路系统连接图

Fig.4 Air circuit system connection diagram

2.3 控制系统

控制系统由控制电路、触摸屏、压力控制器、质量流量控制器等部分组成。控制电路的核心为微控制器,微控制器的外围电路可细分为通讯接口电路、数据采集电路、输出驱动电路、供电电路等,数据采集电路可细分为开关量采集电路、测温电路等。控制电路完成恒温系统温度、加热管路温度、饱和器进气压力、饱和器进气流量等参数的采集、控制与信号输出;触摸屏完成对以上各参数的集中显示与设置。

通过控制电路与相应元器件进行通讯连接,完成进气流量、饱和温度、加热管路温度、饱和器压力控制的数据监测与控制^[11]。控制系统连接图如图5所示。

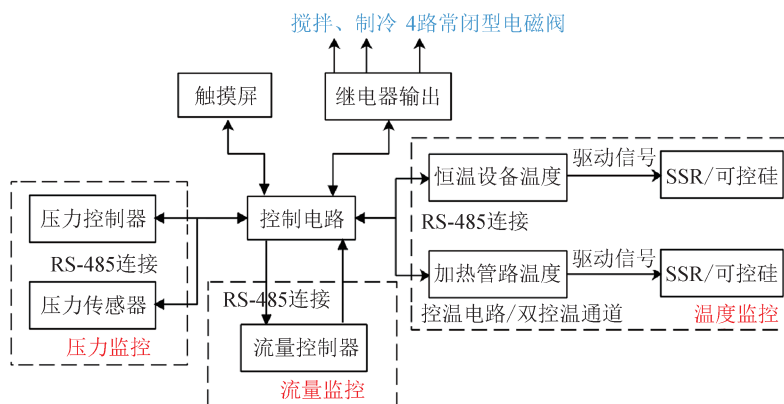


图5 控制系统连接图

Fig.5 Control system connection diagram

为了便于导出试验数据,触摸屏及软件均设计有上位机通讯功能,可通过上位机输入相应指令,对各参量值进行实时设定与读取,便于用户

后续统一监控以及进行数据分析与处理。触摸屏的人机交互界面包括主界面、参数监控界面、参数修正界面,其中主界面如图6所示。

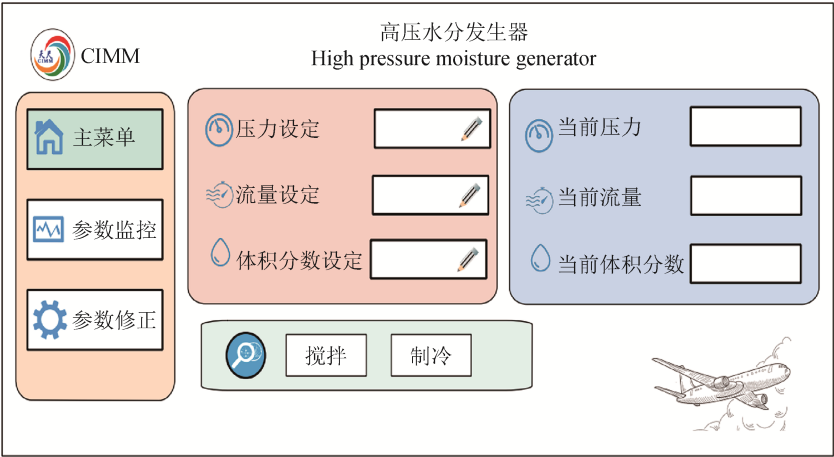


图6 触控屏主界面

Fig.6 Main interface of touch screen

3 性能试验及不确定度分析

为了验证该高压水分发生器在体积分数范围0.5% ~ 15%(对应露点温度范围-2.8 ~ 110℃),绝对压力范围0.1 ~ 1 MPa下的技术指标,选用MBW 373LX精密露点仪作为标准器,测量高压水分发生器在常压下的露点温度 t_{d373} 。将精密露点仪测量的常压露点温度转换为当前饱和器压力下的露点温度 t'_{d373} ,再与高压水分发生器显示的露点温度 t_d 进行比较^[12]。

气路连接方式为在高压水分发生器出气口接入减压阀,将出气压力减至0.1 MPa(常压),再接入精密露点仪的进气口。为了防止连接管路中有水冷凝,加热管路的设定温度应高于当前高压水分发生器发生的露点温度约10℃。试验气路连接图如图7所示。

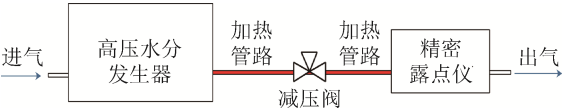


图7 试验气路连接图

Fig.7 Test gas circuit connection diagram

开启高压水分发生器,饱和器压力 P 、体积分数 w 、进气流量 Q 设定值如表1所示。

将高压水分发生器显示的露点温度 t_d 与精密露点仪在当前饱和器压力下的露点温度 t'_{d373} 的值进行对比^[13],结果如图8所示。

表1 高压水分发生器设定值

Tab.1 Set value of high-pressure moisture generator

P/MPa	$w/\%$	$Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
1.0	15.0	5
1.0	0.50	5
0.5	15.0	5
0.5	0.50	5
0.1	15.0	5
0.1	0.50	5

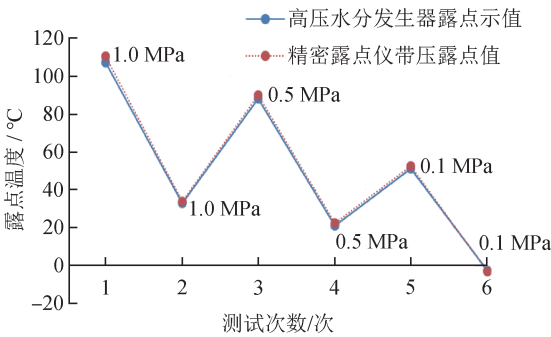


图8 高压水分发生器露点值与精密露点仪露点值对比图

Fig.8 Comparison of dew point values between high pressure moisture generator and precision dew point instrument

根据图8可知,高压水分发生器可实现体积分数范围为0.5% ~ 15%(对应露点温度范围为-2.8 ~ 110℃),绝对压力范围为0.1 ~ 1 MPa的标准湿气。

根据式(2)可知,高压水分发生器产生露点与饱和器内的饱和水蒸气压有关,饱和器内的饱和水蒸气压计算公式为

$$e_w(T_s) = \exp\left(\sum_{i=0}^6 g_i T_s^{i-2} + g_7 \ln T_s\right) \quad (4)$$

式中： T_s 为混气室内气体的露点温度(开氏温度)， g_i 为计算系数，数值分别为 $g_0 = -2\,836.574\,4$ ， $g_1 = -6\,028.076\,559$ ， $g_2 = 19.542\,636\,12$ ， $g_3 = -0.027\,378\,301\,886$ ， $g_4 = 1.626\,169\,8 \times 10^{-5}$ ， $g_5 = 7.022\,905\,6 \times 10^{-10}$ ， $g_6 = -1.868\,000\,9 \times 10^{-13}$ ， $g_7 = 2.715\,030\,5$ 。

根据式(2)和式(4)，保证 T_s 、 P 任意一个参数不变，微小地改变第二个参数值，计算灵敏系数。灵敏系数如表2所示。

表2 灵敏系数

Tab.2 Sensitivity coefficient

$t_d/^\circ\text{C}$	$t_s/^\circ\text{C}$	P/MPa	C_1	$C_2/(^\circ\text{C}\cdot\text{MPa}^{-1})$
110.0	110.0	1.0	1	0.000 03
32.4	32.4	1.0	1	0.000 03
91.3	91.3	0.5	1	0.000 03
20.8	20.8	0.5	1	0.000 03
53.9	53.9	0.1	1	0.000 20
-2.8	-2.8	0.1	1	0.000 12

高压水分发生器露点温度不确定度的主要分量包括饱和系统内温度测量与控制引入的标准不确定度 u_1 、饱和系统压力测量与控制引入的不确定度 u_2 、饱和系统饱和度引入的不确定度 u_3 、饱和水蒸气压引入的不确定度 u_4 ^[14]、水蒸气浓度变化引入的不确定度 u_5 ^[15]。各不确定度分量大小如表3所示。

露点温度的合成标准不确定度的计算公式为

$$u_c(t_d) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} \quad (5)$$

表3 标准不确定度分量

Tab.3 Standard uncertainty component

不确定度分量	标准不确定度	灵敏系数	露点温度标准不确定度
u_1	0.014 $^\circ\text{C}$	1	0.014
u_2	0.104 kPa	0.03 ~ 0.12 $^\circ\text{C}/\text{kPa}$	0.003 ~ 0.012 $^\circ\text{C}$
u_3	0.060 $^\circ\text{C}$	1	0.060
u_4	0.250 $^\circ\text{C}$	1	0.250
u_5	0.020 $^\circ\text{C}$	1	0.020

取包含因子 $k = 2$ ，高压水分发生器露点温度的扩展不确定度为

$$U = k \times u_c \quad (6)$$

计算得到 $U = 0.50 \sim 0.52\,^\circ\text{C}$ ($k = 2$)。

4 结论

基于单温单压原理，自主研制了一套高压水分发生器，其可产生体积分数范围为 0.5% ~ 15% (对应露点温度范围为 $-2.8 \sim 110\,^\circ\text{C}$)，绝对压力范围为 0.1 ~ 1 MPa 的标准湿气，能够有效满足高温高压环境下湿度量值的溯源需求。该高压水分发生器结构紧凑、操作便捷、准确性好，具有很好的经济效益，为推动我国高温高压条件下湿度计量技术发展提供了有力支撑，同时为湿度计量领域国产化仪器研制提供了重要借鉴。

参考文献

- [1] 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 a high dew point humidity standard device[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(3): 34-38. (in Chinese)
- [2] 吕国义, 巩娟, 何萌, 等. 便携式高温露点湿度发生器的研制[J]. 计测技术, 2018, 38(1): 28-31.
LYU G Y, GONG J, HE M, et al. Development of a portable high-temperature dew point humidity generator[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(1): 28-31. (in Chinese)
- [3] 张文东, 殷龙德, 丁逸民, 等. 双温双压法低露点标准湿度发生器[J]. 上海计量测试, 2002, 29(1): 24-26.
ZHANG W D, YIN L D, DING Y M, et al. Dual temperature and dual pressure low dew point standard humidity generator[J]. Shanghai Metrology and Testing, 2002, 29(1): 24-26. (in Chinese)
- [4] CHOI B I, NHAM H S, WOO S B, et al. The new KRISS low frost-point humidity generator[J]. International Journal of Thermophysics, 2008, 29(5): 1578-1588.
- [5] XIN Z, JUN Q X, EN L, et al. Design of high precision instrument for measuring temperature, humidity & dew point[J]. Instrument Technique and Sensor, 2006.
- [6] MARTINS L L, RIBEIRO A S, SOUSA J A E, et al.

- Measurement uncertainty of dew-point temperature in a two-pressure humidity generator[J]. International Journal of Thermophysics, 2012, 33(8-9): 1568-1582.
- [7] ZVIZDIC D, HEINONEN M, SESTAN D. Investigation of primary dew-point saturator efficiency in two different thermal environments[J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(8): 2215-2230.
- [8] TISTOMO A S, ACHMADI A, RIFAI I A. Characterization of KIM LIPI's relative humidity standard[J]. Mapan, 2014, 29(1): 51-55.
- [9] 侯志全, 赵军明, 何勃, 等. 隔热保温材料的研究进展[J]. 广东化工, 2018, 45(7): 163, 171.
- HOU Z Q, ZHAO J M, HE B, et al. Research progress in thermal insulation materials[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(7): 163, 171. (in Chinese)
- [10] 寿文杰, 周连琴, 夏海雷. 基于双温法的大型温湿度检定装置的研究[J]. 工业计量, 2013, 23(1): 30-31.
- SHOU W J, ZHOU L Q, XIA H L. Research on a large temperature and humidity calibration device based on double temperature method [J]. Industrial Metrology, 2013, 23(1): 30-31. (in Chinese)
- [11] 余云飞, 孟晓风, 张卫军. 双温双压法湿度测量不确定度的综合评定[J]. 宇航计测技术, 2009, 29(4): 16-21.
- YU Y F, MENG X F, ZHANG W J. Comprehensive evaluation of uncertainty in humidity measurement using dual temperature and dual pressure method [J]. Aerospace Measurement Technology, 2009, 29(4): 16-21. (in Chinese)
- [12] 郑胜清, 张强, 杨逸. 单压法标准湿度发生器的设计及不确定度评定[J]. 环境技术, 2014(3): 55-58.
- ZHENG S Q, ZHANG Q, YANG Y. Design and uncertainty evaluation of a single pressure standard humidity generator[J]. Environmental Technology, 2014(3): 55-58. (in Chinese)
- [13] 吕国义, 王莉, 范敏. 湿度发生器的测量不确定度评定[C]//国防军工热学, 流量计量与测试技术交流会. 2008: 83-84, 86.
- LYU G Y, WANG L, FAN M. Evaluation of measurement uncertainty of humidity generators [C]// National Defense and Military Engineering Thermal, Flow Measurement and Testing Technology Exchange Conference. 2008: 83-84, 86. (in Chinese)
- [14] 巩娟, 何萌, 吕国义. -80℃湿度发生器的不确定度分析[J]. 工业计量, 2013, 23(5): 54-58.
- GONG J, HE M, LYU G Y. Uncertainty analysis of -80℃ humidity generator [J]. Industrial Metrology, 2013, 23(5): 54-58. (in Chinese)
- [15] 陈勇, 吕国义, 武建红. 双压法湿度发生器校准结果的不确定度评定[J]. 计测技术, 2006, 26(增刊1): 87-90.
- CHEN Y, LYU G Y, WU J H. Evaluation of uncertainty in calibration results of dual pressure humidity generators [J]. Metrology & Measurement Technology, 2006, 26 (Supplement 1): 87-90. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 陈洁新 (1991—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为湿度计量。