

采用水焓值法的制冷量源及其不确定度分析*

杭晨哲^{1,2}, 马国远¹, 张海云², 徐定华², 许树学¹

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院 北京 100124; 2. 中国计量科学研究院 新能源环境计量研究所 北京 100029)

摘要:制冷量值统一对促进空调器行业节能减排有基础性作用,采用水焓值法的制冷量源能够应用于制冷量的量值传递,提供数值可测、可控的制冷量量值。首先,提出了水焓值法制冷量源的装置原理,减少了输出制冷量测量参数;然后,设计并研制了制冷量源实验装置,并在平衡环境型量热计中进行了实验研究,实验结果显示,量热计测得值与量源输出制冷量最大相对偏差不超过 $\pm 0.7\%$;最后,详细给出制冷量源的不确定度评定过程和结果:制冷量源重复性为11.4 W,源输出由1 660.8增大至5 810.4 W时,合成标准不确定度由12.3增大至18.2 W,对应相对扩展不确定度由1.5% ($k=2$)减小至0.6% ($k=2$)。采用水焓值法的制冷量源第1次从计量学角度实现了制冷量量值的溯源,输出量值可溯源至温度、压力、流量和功率单位,可作为校准制冷量测量装置的标准源使用。

关键词: 计量学; 制冷量源; 水焓值法; 平衡环境型量热计; 不确定度

中图分类号: TH89 TK39 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510

Cooling capacity source and its uncertainty analysis with water-enthalpy method

Hang Chenzhe^{1,2}, Ma Guoyuan¹, Zhang Haiyun², Xu Dinghua², Xu Shuxue¹

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Division of Energy and Environmental Measurement, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Unifying the cooling capacity measurement result has a fundamental effect on energy conservation and emission reduction in air-conditioner industry. The water-enthalpy method cooling capacity source could be applied in the calibration of cooling capacity measuring apparatus; it could supply a cooling capacity that is measurable and controllable. In this research, the principle of the water-enthalpy method, which reduces the number of measuring parameters, was illustrated first. Then, the physical structure of the source was designed and developed, and the source was experimentally investigated with a balanced ambient room-type calorimeter. The experiment results show that the maximum relative difference of cooling capacity between the source and the calorimeter is less than $\pm 0.7\%$. Finally, the uncertainty evaluation process and result of the cooling capacity output of the source are given in detail. The evaluation results show that the repeatability of the source is 11.4 W; as the cooling capacity increases from 1 660.8 to 5 810.4 W, the combined standard uncertainty increases from 12.3 to 18.2 W, and the relative expanded uncertainty decreases from 1.5% ($k=2$) to 0.6% ($k=2$). With the water-enthalpy method the traceability of cooling capacity source is achieved for the first time from the perspective of metrology, the cooling capacity could be traced to temperature, pressure, flow rate and electric power, and the source apparatus could be used as standard cooling capacity source in calibration.

Keywords: metrology; cooling capacity source; water-enthalpy method; balanced ambient room-type calorimeter; uncertainty

1 引言

制冷量的准确测量是探究空调产品运行状态和提高

其能源效率的技术基础,因此制冷量值准确、统一就显得非常重要。采用水焓值法的制冷量源可以作为标准源应用于制冷量的量值传递过程,解决制冷量量值溯源问题。该装置采用水作为载冷剂,室内侧换热器采用强制对

流换热方式,输出的制冷量考虑进出室内侧换热器的水焓值差和室内侧风机消耗功率。相较于空气焓值法或量热计法,其具有体积小、易控制、易测量和重复性好等特点。

目前,制冷量测量装置的校准分为两个部分:1)针对测量装置中的传感器进行校准,被校准设备包括铂电阻、热电偶、数字压力计和功率计等计量设备^[1-3];2)使用经考核的窗式空调或分体式空调在不同实验室间进行制冷量比对^[4],但由于空调器换热状态复杂多变,因此比对过程的准确性和复现性无法得到保证。

水焓值法多应用在风冷换热器特性研究,在不同干、湿空气等条件下对空气侧和水侧换热量进行测量^[5-8],其最终换热量取稳定条件下空气侧换热量和水侧换热量的平均值。Kwon K. C. 等人^[9]的测试中,同时测量了水的温度和绝对压力,用于计算水的焓值^[9]。水的焓值和密度等物理性质一般参考国际水和水蒸气热力性质协会(IAPWS)给出的 IAPWA-IF97 系列公式^[10-11]。

制冷量的测量不仅受被测空调本身特性影响,而且还受测试环境因素,诸如室内干湿球温度、室外干湿球温度等参数的测量误差影响^[12-13]。因此,制冷量的准确测量不仅需要被测设备运行在稳定状态,而且测量装置提供给被测设备的环境条件也应当控制准确。针对空气焓值法,湿球温度测量误差对于制冷量测量误差贡献较大^[14-16],为了准确测量测量湿球温度需要将空气取样装置中的风速控制在 5 m/s 左右^[17]。

不确定度作为计量仪器最重要的特性,能够体现仪器的能力^[18-19]。家用空调器制冷量测量方法主要包括空气焓值法和量热计法,空气焓值法测量不确定度约为 3% ($k=2$)^[14-16],量热计法测量不确定度约为 1% ($k=2$)^[20-21]。关于空气焓值法测量制冷量不确定度评定,使用直接测试量评定可以避免间接测试量间相关性对评定结果的影响^[22],使评定结果更为可靠。

在水焓值法测量制冷量原理的基础上,本文自主设计研制了一套水焓值法制冷量源实验装置,并在平衡环境型量热计中进行了测量,对采用不同原理得到的制冷量进行了比较分析,最后详细给出了不确定度评定过程和结果。水焓值法制冷量源装置第 1 次实现了制冷量值的溯源,输出量值可溯源至温度、压力、流量和功率,为制冷量量值传递奠定了基础。

2 装置原理与结构

2.1 装置原理

采用水焓值法的制冷量源原理如图 1 所示。通过制冷机、加热器等调控出来的稳定温度、流量的冷水进入到制冷量源装置的风冷换热器中。安装在绝热腔体中的风机以恒定转速运转,将温度、湿度和流量恒定的湿空气在

密闭风道中与水冷换热器换热。系统达到稳态后,流经制冷量源的湿空气比焓降低,并有一定量的冷凝水析出;同时,流经换热器的水比焓升高,水流量在换热器入口和出口保持不变。为得到空气侧制冷量,可以测量换热器水侧焓值的增加。与直接测量空气侧参数获得制冷量相比,水焓值法避免了测量空气湿度和析出冷凝水质量,减少了测量参数,提高了测量准确性。

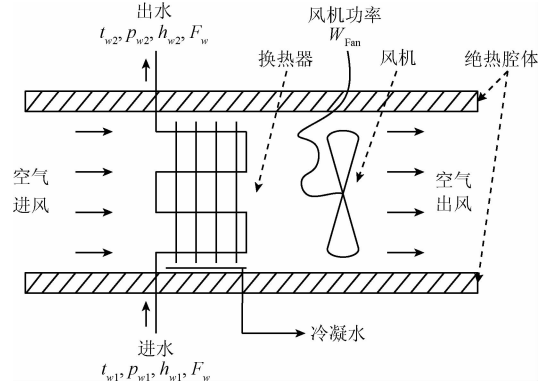


图 1 水焓值法原理

Fig. 1 Schematic diagram of the water-enthalpy method

室内侧换热器换热量公式为:

$$Q_w = \frac{\dot{m}_w \times (h_{w2} - h_{w1})}{3.6} \quad (1)$$

式中: Q_w 室内侧换热器水侧换热量,单位为 W; \dot{m}_w 为水的质量流量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; h_{w1} 、 h_{w2} 分别为进水、出水的比焓值,单位为 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

水焓值法实验装置中流量计测量结果为体积流量,因此需要水的密度参数来计算水的质量流量,如式(2)所示。

$$\dot{m}_w = \rho_w \times F_w \quad (2)$$

式中: ρ_w 为出水口处水的密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$; F_w 为水的体积流量测量值,单位为 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

整理得到水的焓值和密度公式如式(3)和(4)所示。

$$h(p, T) = R \cdot T^* \cdot \sum_{i=1}^{34} n_i \cdot \left(7.1 - \frac{p}{p^*}\right)^{I_i} \cdot J \cdot \left(\frac{T^*}{T} - 1.222\right)^{J_i-1} \quad (3)$$

$$\rho(p, T) = \frac{-p^*}{R \cdot T \cdot \sum_{i=1}^{34} n_i \cdot I \cdot \left(7.1 - \frac{p}{p^*}\right)^{I_i-1} \cdot \left(\frac{T^*}{T} - 1.222\right)^{J_i}} \quad (4)$$

式中: h 为水的比焓值,单位为 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; ρ 为水的密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$; p 为水的绝对压力测量值,单位为 MPa; T 为水的绝对温度测量值,单位为 K; R 为水的气体常数, $0.461\ 526\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T^* 为水的绝对温度常数, $1386\ \text{K}$; p^* 为水的绝对压力常数, $16.53\ \text{MPa}$ 。式(3)、(4)中使用的系数 I 、 J 和指数 n 参考文献[10]。

风机消耗功率最终全部变为热量,因此将室内侧换热器换热量减去风机功率作为最终制冷量,如式(5)所示。

$$Q = Q_w - W_{Fan} \quad (5)$$

式中: Q 为水焓值制冷量源装置输出制冷量,单位为 W; W_{Fan} 为室内侧风机消耗功率测量值,单位为 W。

综合以上计算公式,得到制冷量源输出制冷量函数为:

$$Q = F(t_{w1}, p_{w1}, t_{w2}, p_{w2}, F_w, W_{Fan}) \quad (6)$$

其具体函数关系如图2所示。

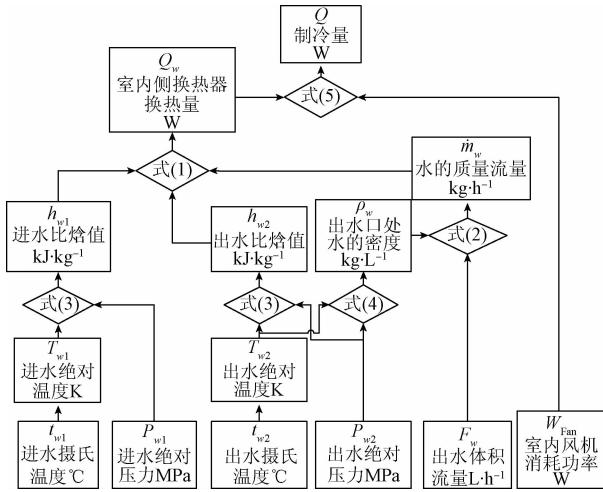


图2 制冷量函数关系

Fig. 2 Relation diagram of cooling capacity function

分析图2中的函数关系,可以得到采用水焓值法的制冷量源需要测量的物理量包括进水温度、进水压力、出水温度、出水压力、体积流量和室内侧风机功率,实际测量这6个参数就可以计算出输出制冷量值。

2.2 装置结构

制冷量源实验装置由室内侧部分、室外侧部分和测量控制部分组成,装置结构如图3所示。

室内侧部分由换热器和风机组成,并封装在一体式的外壳中。室外侧部分由压缩机、蒸发器盘管、冷凝器、热力膨胀阀、水箱、电加热和水泵组成。实验装置的稳态运行对于制冷量精确测量和计算有至关重要的作用。测量和控制部分包括计算机、数据采集器 cDAQ9174、6位半数字多用表 8846A、功率计 WT230、工业铂电阻 PT100、压力变送器 AKS33 和电磁流量计 AFX015G 等。

铂电阻温度计 PT100 由下向上安装在管道转向部分的中心处,以保证测量温度时铂电阻与水充分接触换热,使温度测量更加准确和稳定。在与铂电阻感温区域相同高度的管道上安装压力变送器 AKS33,避免由于水本身压力引入的测量误差。温度和压力的测量结果通过数据采集器 cDAQ9174 采集并传送至计算机。

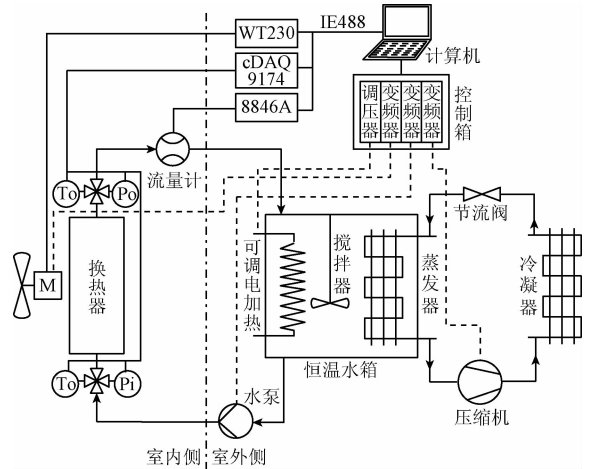


图3 水焓值法制冷量源装置结构

Fig. 3 Structure diagram of the water-enthalpy method cooling capacity source

电磁流量计 AFX015G 应安装在载冷剂管路中尽量低的位置,使流经电磁流量计的载冷剂液体中含有尽量少的气泡,以保证流量测量结果更加稳定和可靠。使用 8846A 的电流档功能测量流量计输出的 (4 ~ 20) mA 信号,连同 WT230 测量的室内侧风机消耗功率,通过 IE488 接口传送至计算机。然后计算机根据各项参数测量结果,使用自动控制算法调节水泵转速、电加热功率、压缩机转速和风机转速达到设定值,实现控制温度、风速和载冷剂流量的功能。

3 制冷量输出

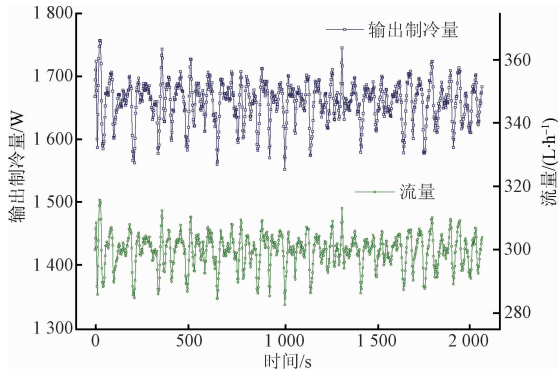
3.1 平衡环境型量热计测量结果

制冷量源中的各个测量传感器完成校准后,该实验装置被安装在平衡环境型量热计中进行测量。制冷量源的室内侧部分处于量热计的室内侧内套,制冷量源的室外侧部分和测控部分处于量热计的室外侧内套。制冷量源室内侧和室外的部分由直径 25 mm 的不锈钢波纹管连接,暴露在室内侧内室的金属软管外覆盖 15 mm 厚隔热材料。室内侧部分风机采用三相贯流式风机,由 FUJIFILM 变频器控制转速。

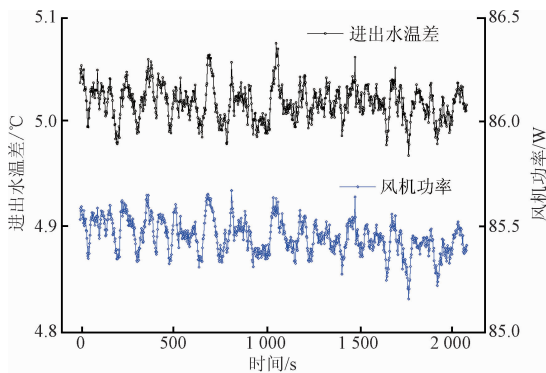
实验所使用的量热计已被中国计量科学研究院申请成为国家空调器制冷量测量标准装置([2014]国量标计证字第 277 号),其测量范围为 1 400 ~ 14 000 W,不确定度为 1% ($k=2$)。量热计使用 T1 工况^[18-19],室内侧内室干、湿球温度分别为 27℃ 和 19℃,室内侧外室干球温度为 27℃,室外侧内室干、湿球温度分别为 35℃ 和 24℃,室外侧外室干球温度为 35℃。

图4所示为在制冷源输出 1 660.8 W 时 35 min 结果

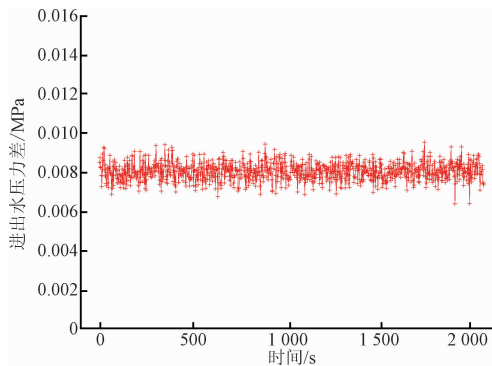
曲线。由图可知室内侧部分进出水压力差非常稳定,对最终制冷量波动贡献不大。进出水温差与风机功率曲线变化趋势非常相似,说明风机转速的微小波动影响了温差的稳定性,温差平均值 5.02°C , 波动范围 $\pm 0.06^{\circ}\text{C}$, 标准差 0.02°C 。制冷量与流量曲线变化相似,可见制冷量波动主要由流量引起,制冷量平均值 $1\ 660.8\ \text{W}$, 波动范围 $\pm 102.2\ \text{W}$, 标准差 $32.9\ \text{W}$ 。其余测量点上也有类似曲线结果。为消除波动影响,最终结果取平衡情况下 $35\ \text{min}$ 平均值。



(a) 输出制冷量和流量曲线
(a) Curves of cooling capacity and water flow



(b) 进出水温差和风机功率曲线
(b) Curves of the temperature difference between outlet and inlet water and the power of fan



(c) 进出水压力差曲线
(c) Curve of the pressure difference between inlet and outlet water

图4 制冷量源输出曲线($1\ 660.8\ \text{W}$)

Fig. 4 Output curve of cooling capacity source ($1\ 660.8\ \text{W}$)

对制冷量源进行了5次测量,测量结果如表1所示。在5个测量点上平衡环境型量热计制冷量测量结果与制冷量源输出制冷量的最大相对偏差不超过 $\pm 0.7\%$ 。

表1 制冷量源输出与平衡环境型量热计测量结果比较

Table 1 Comparison between the outputs of the cooling capacity source and the measurement results of the balanced ambient room-type calorimeter

编号	量热计 测量值/W	标准器 输出/W	示值 误差/W	相对示值 误差/%
1	1 662.9	1 660.8	2.1	0.1
2	2 912.7	2 894.0	18.7	0.6
3	3 751.5	3 725.8	25.7	0.7
4	4 842.0	4 831.4	10.6	0.2
5	5 802.0	5 810.4	-8.4	-0.1

3.2 制冷量源输出多种方法间比较

为节省测量成本,实际应用时一般不测量室内侧换热器进出口处绝对压力,水的比焓值需参照水的定压比热计算得到,室内侧换热器水侧换热量计算公式变为:

$$Q_{wp} = \frac{\dot{m}_w \cdot C_p \cdot (t_{w2} - t_{w1})}{3.6} \quad (7)$$

式中: Q_{wp} 为使用定压比热计算出的水侧换热量,单位为 W ; C_p 为水的定压比热,单位为 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; t_{w1} 、 t_{w2} 分别进水温度、出水温度测量值,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

对于水的定压比热又有两种常用的取值方法:1) 采用常数比热 $4.200\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; 2) 依据饱和水的热物性表,采用换热器进出口温度平均值计算得到的定压比热值。结合实际测量数据,使用常数比热和温度平均值比热计算输出制冷量结果如表2所示。由表2可得,采用常数比热计算得到的输出制冷量相对示值误差为 $0.2\% \sim 0.4\%$, 采用温度平均值比热计算得到的制冷量相对示值误差为 $-0.1\% \sim 0.1\%$ 。由此比较结果可知,在测量不确定度要求不高的情况下,可以只测量室内侧换热器进出口的温度,并采用进出口水温平均值计算得到的水定压比热,此条件下会引入 $\pm 0.1\%$ 的测量误差。

表2 不同定压比热下得到的输出与标准器输出比较

Table 2 Comparison between the output of the source and the outputs calculated under different specific heat at constant pressure

标准器 输出/W	方法1		方法2	
	输出/W	相对示值 误差/%	输出/W	相对示值 误差/%
1 660.8	1 667.1	0.4	1 659.6	-0.1
2 894.0	2 900.0	0.2	2 892.1	-0.1
3 725.8	3 732.0	0.2	3 722.9	-0.1
4 831.4	4 848.9	0.4	4 835.9	0.1
5 810.4	5 828.6	0.3	5 814.5	0.1

注:方法1使用常数, $4.200\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; 方法2使用进水、出水温度平均值查表得到的

4 制冷量输出不确定度讨论

制冷量源输出制冷量数学模型见式(6),依据不确定度合成原理^[23],输出制冷量的合成标准不确定度计算采用式(8),其中为不确定度的A类分量,各偏导数项为灵敏系数。

$$u_c(Q) = \left[u_A^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t_{w1}} \cdot u(t_{w1}) \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_{w1}} \cdot u(p_{w1}) \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t_{w2}} \cdot u(t_{w2}) \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p_{w2}} \cdot u(p_{w2}) \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial F_w} \cdot u(F_w) \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial W_{Fan}} \cdot u(W_{Fan}) \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

4.1 标准不确定度的A类评定讨论

对于平衡环境型量热计中进行的制冷量源实验测量,标准不确定度的A类评定指在重复性测量条件下使用统计方法得到的不确定度分量,用多次重复测量的实验标准差表示。而重复性指在重复性测量条件下,所得测量结果的一致程度,也可使用实验标准差表示。因此,标准不确定度的A类评定与重复性结果相同。对制冷量源装置在输出制冷量5 300 W附近时进行了3次独立重复测量,输出制冷量数据如表3所示。

表3 输出制冷量5次独立测量结果

Table 3 Cooling capacity output measurement results in 5 independent measurements

标准器输出/W	平均值/W	级差/W	级差系数	u_A/W
5 292.9				
5 312.1	5 299.4	19.2	1.69	11.4
5 293.3				

由于测量次数小于10次,因此依据级差法得到输出制冷量的A类不确定度分量和重复性为11.4 W。

4.2 标准不确定度的B类评定讨论

铂电阻PT100是测量温度的关键传感器,其测量结果直接影响水焓值的计算。本文所述制冷量源装置采用了A级工业用铂电阻,最大允许误差为 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 。这样大的误差对输出制冷量测量将产生极大影响,故须使用校准、曲线拟合等方法控制误差。采用标准二等铂电阻,选取0~30°C间隔1°C的温度点进行了校准,并采用二阶多项式最小二乘法对测量结果进行了拟合修正,进、出水温度校准及修正后计算结果如图5(a)和(b)所示。

由图5(a)可见,校准前进水温度测量值与标准铂电阻测量值的示值误差约为0.08~0.13°C,经过修正后与标准铂电阻测量值的示值误差小于 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 。由图5(b)可见,校准前出水温度测量值与标准铂电阻测量值的示值误差约为0.02~0.05°C,经过修正后与标准铂电阻测量值的示值误差也小于 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 。

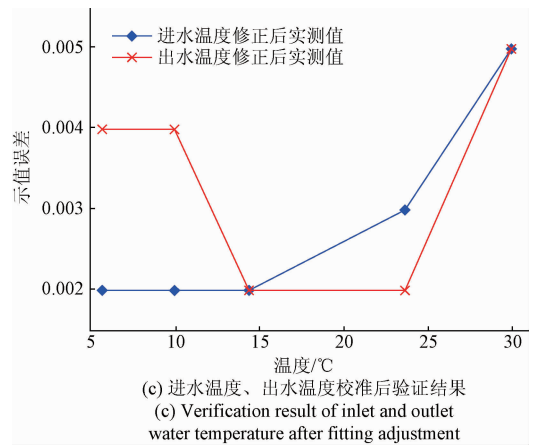
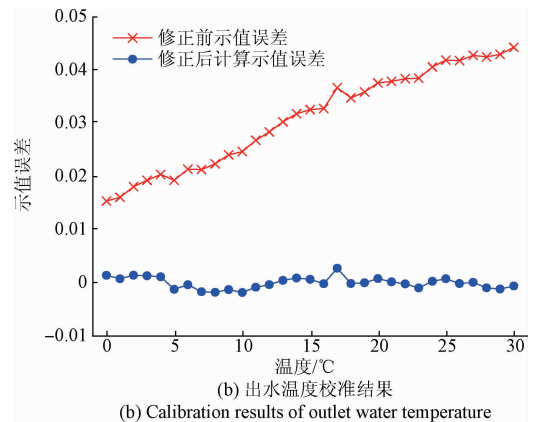
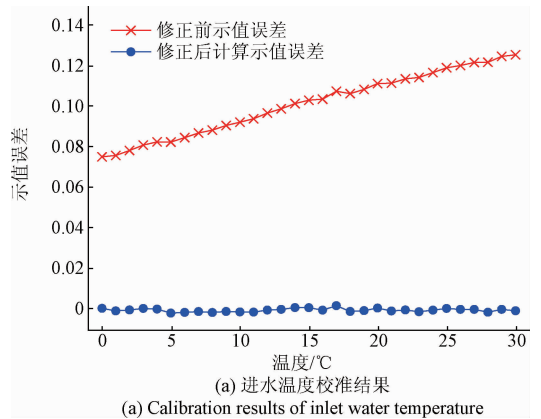


图5 进、出水温度测量校准及验证结果
Fig. 5 Calibration and verification results of the inlet and outlet water temperature measurement

为了进一步确认修正结果,随机选取了5个温度点进行了校准后结果验证,验证结果如图5(c)所示,其中示值误差为0.002~0.005°C。依据以上校准及验证结果,结合铂电阻使用经验,可以认为校准后进、出水温度最大测量误差不会超过 $\pm 0.015^\circ\text{C}$,取包含因子 $k=2$,可得水温测量的标准不确定度 $u(t_{w1})$ 和 $u(t_{w2})$ 为 $7.5 \times 10^{-3}^\circ\text{C}$ 。

制冷量源中进、出水压力测量结果也参与水焓值和密度等参数的计算,因此也需要对压力变送器 AKS33 进行校准。采用量程为(0~0.4)MPa,不确定度为0.05%FS的压力校验仪,选取0.090~0.200MPa间隔0.010MPa的压力点进行了校准,并采用二阶多项式最小二乘法对测量结果进行了拟合修正,进、出水压力校准及修正后计算结果如图6(a)和(b)所示。由图6可见,经过修正后的绝对压力测量值与压力校验仪测量值的示值误差小于 ± 0.001 MPa。依据以上校准结果,结合压力变送器使用经验,可以认为校准后进、出水绝对压力最大测量误差不会超过 ± 0.002 MPa,取包含因子 $k=2$,可得绝对压力测量的标准不确定度 $u(p_{w1})$ 和 $u(p_{w2})$ 为0.001MPa。

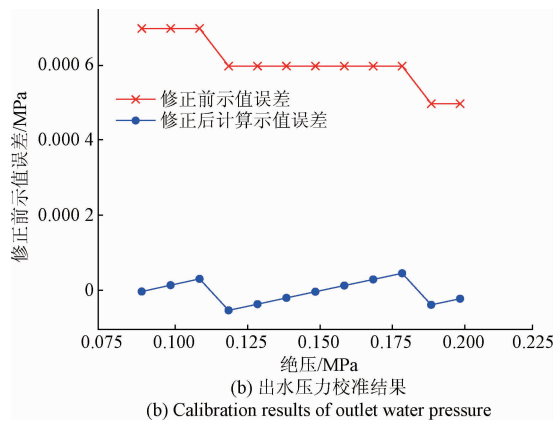
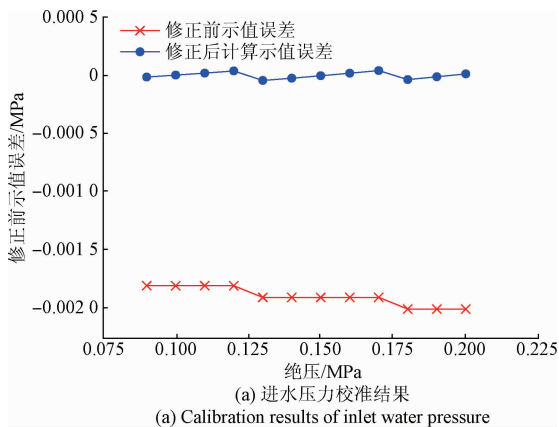


图6 进、出水压力测量校准及验证结果

Fig.6 Calibration and verification results of the inlet and outlet water pressure measurement

制冷量源中采用了电磁流量计测量水的体积流量,根据该电磁流量计的校准报告及使用说明书提供的信息,认为流量测量最大误差不会超过测量值的0.3%,取包含因子 $k=2$,可得水体积流量测量的相对标准不确定度 $u_{rel}(F_w)$ 为0.15%。

制冷量源中采用了数字功率计测量室内侧风机消耗功率,根据功率计使用说明书提供的信息,认为功率测量最大误差不会超过测量值的0.1%,取包含因子 $k=2$,可得功率测量的相对标准不确定度 $u_{rel}(W_{Fan})$ 为0.05%。

4.3 不确定度合成讨论

在输出制冷量2894.0W时,不确定度分量一览表参加表4所示。依据公式8对数据进行合成,得到合成标准不确定度为12.8W,取包含因子 $k=2$,则可得扩展不确定度 U 为25.6W,相对扩展不确定度 U_{rel} 为0.9%。

表4 输出制冷量标准不确定度分量及灵敏系数表(2894.0W)

Table 4 Standard uncertainty components and sensitivity coefficients of cooling capacity output (2894.0W)

参数	测量值	灵敏系数 c_i	标准不确定度 u_i	$c_i \cdot u_i / W$
u_A	-	1	11.4 W	11.4
t_{w1}	7.99 °C	349.49 W/°C	7.5×10^{-3} °C	2.6
p_{w1}	0.113 MPa	81.83 W/MPa	1.0×10^{-3} MPa	0.1
t_{w2}	16.54 °C	348.06 W/°C	7.5×10^{-3} °C	2.6
p_{w2}	0.105 MPa	80.64 W/MPa	1.0×10^{-3} MPa	0.1
F_w	300.0 L/h	9.94 W/(L/h)	0.45 L/h	4.5
W_{Fan}	85.8 W	1	0.04 W	0.1

不确定度的A类分量是所有分量中最大的一个,可能的原因是:制冷量源输出不仅与本身的运行状态有关,还与量热计提供的运行环境有关,输出制冷量受到环境及自身多个随机误差影响。另外,与其他参数的灵敏系数相比,进水温度和出水温度的灵敏系数较大,说明这两个参数对输出制冷量的测量影响强烈,因此水温测量需要尽量准确。由于对铂电阻PT100进行了拟合修正,控制了温度测量的标准不确定度,最终进、出水温度各自对于最终制冷量不确定度的贡献都控制在2.6W。流量引入的不确定度分量同样不可忽略,测试过程中需要注意维持电磁流量计的最佳测量状态。其余不确定度分量都比较小,在简化评定不确定度时可以忽略不计^[24]。

依据制冷量输出不确定度评定方法,对输出不同制冷量状态下分别进行了不确定度评定,结果如表5所示。在输出制冷量由1660.8增大至5810.4W时,合成标准不确定度由12.3增大至18.2W。由于与扩展不确定度增加速度相比,输出制冷量增加速度更快,因此相对扩展不确定度反而由1.5%减小至0.6%。

表5 不同测量状态下的不确定度评定结果($k=2$)

Table 5 Uncertainty evaluation results in different measurement conditions ($k=2$)

$t_{w1}/^{\circ}\text{C}$	p_{w1}/MPa	$t_{w2}/^{\circ}\text{C}$	p_{w2}/MPa	$F_w/(L \cdot h^{-1})$	W_{Fan}/W	Q/W	u_c/W	U/W	$U_{rel}/\%$
15.32	0.113	20.33	0.105	300.0	86.2	1 660.8	12.3	24.6	1.5
7.99	0.113	16.54	0.105	300.0	85.8	2 894.0	12.8	25.6	0.9
6.01	0.113	16.94	0.105	300.0	88.7	3 725.8	13.3	26.6	0.7
10.01	0.145	14.73	0.111	900.0	101.8	4 831.4	17.6	35.2	0.7
8.99	0.146	14.67	0.112	900.0	126.6	5 810.4	18.2	36.4	0.6

5 结论

提出采用水焓值法的制冷量源原理,减少了测量参数,提高了测量准确性。所研制的制冷量源装置从计量科学的角度实现了制冷量量值的溯源,其输出的制冷量可以溯源至温度、压力、流量和功率,可作为校准制冷量测量装置的标准源使用。

在平衡环境型量热计(国家空调器制冷量测量标准装置,[2014]国量标计证字第277号)中测量水焓值法制冷量源装置。量热计室内侧运行T1工况,制冷量源输出范围为1 660.8~5 810.4 W时,量热计测得制冷量与源输出制冷量最大相对偏差不超过 $\pm 0.7\%$ 。

通过校准及拟合修正进、出水温度和压力测量结果,不仅使温度、压力测量结果准确,而且减小了对应的不确定度分量,控制了水焓值法制冷量源输出的不确定度。经分析:装置重复性为11.4 W,在输出制冷量范围为1 660.8~5 810.4 W时,合成标准不确定度为12.3~18.2 W,取包含因子 $k=2$,可得对应相对扩展不确定度为1.5%~0.6%。

参考文献

[1] 茅晓晨. 试验用空气焓值法试验装置校准方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 12-30.
MAO X CH. Research on calibration method of air-enthalpy test device [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 12-30.

[2] 张力, 盛晓岩, 许新民, 等. 高准确度压力和温度校准装置的控制系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(21): 151-153.
ZHANG L, SHENG X Y, XU X M, et al. Study on the control system of High accuracy pressure and temperature calibration device [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(4): 151-153.

[3] 余国瑞, 丁鼎, 吴志群, 等. 空调焓差试验装置的检测方法[J]. 低温与超导, 2013, 41(3): 82-86.
YU G R, DING D, WU ZH Q, et al. Development and research on detection technology of air enthalpy difference text device [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2013, 41(3): 82-86.

[4] 原遵东, 王池, 林延东. 确定量值比对参考值的准则[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2381-2385.
YUANG Z D, WANG CH, LIN Y D. Criteria of reference value determination in measurement standard comparisons [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10): 2381-2385.

[5] WANG C C, LIN Y T, LEE C J. Heat and momentum transfer for compact louvered fin-and-tube heat exchangers in wet conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(18): 3443-3453.

[6] WANG C C, CHI K Y. Heat transfer and friction characteristics of plan fin-and-tube heat exchangers, part I: new experimental data [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(15): 2681-2691.

[7] YUN J Y, LEE K S. Investigation of heat transfer characteristics on various kinds of fin-and-tube heat exchangers with interrupted surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(13): 2375-2385.

[8] HU H T, WEN X M, ZHUANG D W, et al. Heat transfer and pressure drop characteristics of wet air flow in metal foam under dehumidifying conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93(1): 1124-1134.

[9] KWON Y C, KO K W, KWON J T. Experimental study on heat transfer and pressure drop of heat exchangers for cooling fan coil unit [J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2008, 9(3): 599-604.

[10] WAGNER W, COOPER J R, DITTMANN A, et al. The IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(1): 150-182.

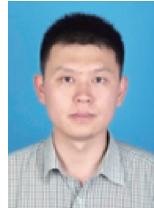
[11] GIBBINS J. Implementing the IAPWS Industrial formulation 1997 for thermodynamic properties of water and steam in mathcad [J]. Journal of Power and Energy, 2003, 217(6): 653-658.

[12] 葛云亭, 彦启森, 彭雄兵. 制冷空调系统仿真数学模型的理论及实验研究 [J]. 制冷学报, 1995(4): 9-18.
GE Y T, YAN Q S, PENG X B. Theory and experimental study on simulation mathematics of refrigeration and air conditioning system [J]. Journal of Refrigeration, 1995 (4): 9-18.

[13] 邵双全, 石文星, 彦启森. 空气焓值的测量方法对空调

- 器性能测试的影响[C]. 全国暖通空调制冷学术年会论文集, 2000:565-568.
- SHAO SH Q, SHI W X, YAN Q S. The influence on air conditioner performance test caused by enthalpy measurement methods of air [C]. The china national conference on HVAC&R, Proceedings, 2000:565-568.
- [14] 张恺, 张小松, 陈向阳, 等. 空调器空气焓差法性能测试不确定度分析[J]. 流体机械, 2006, 34(11):72-75, 49.
- ZHANG K, ZHANG X S, CHEN X Y, et al. Analysis on uncertainty in testing of air conditioner by means of air enthalpy method[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(11):72-75, 49.
- [15] 江明旒, 茅晓晨, 余国瑞. 基于空气焓差法空调制冷量的不确定度评定[J]. 低温与超导, 2011, 39(12):36-40.
- JIANG M L, MAO X CH, YU G R. Research on evaluating the uncertainty of cooling capacity for air conditioners using air-enthalpy method[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2011, 39(12):36-40.
- [16] 何曙, 陈巍, 陈荣, 等. 焓差法空调制冷量测量不确定度分析[J]. 低温与超导, 2010, 38(8):52-55.
- HE SH, CHEN W, CHEN R, et al. Uncertainty of air conditioners cooling capacity measured by enthalpy method [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2010, 38(8):52-55.
- [17] 邱信立. 热力学湿球温度与湿球温度[J]. 暖通空调, 1988(6):18-21.
- QIU X L. The thermodynamic wet-bulb temperature and wet-bulb temperature[J]. Journal of HV&AC, 1988(6):18-21.
- [18] 胡鹤鸣, 王池, 孟涛, 等. 超声流量计几何参数测算方法及其不确定度分析[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(7):1583-1587.
- HU H M, WANG CH, MENG T, et al. Study on geometric parameter calculation method and uncertainty estimation of ultrasonic flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(7):1583-1587.
- [19] 凌明祥, 李会敏, 黎启胜, 等. 含相关性的测量不确定度拟蒙特卡罗评定方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6):1385-1392.
- LING M X, LI H M, LI Q SH, et al. Quasi montecarlo method for the measurement uncertainty evaluation considering correlation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6):1385-1392.
- [20] 王文斌, 杜军, 余国瑞, 等. 房间型量热计法测量空调制冷量的不确定度评定[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2012(2):37-40.
- WANG W B, DU J, YU G Y, et al. Uncertainty of air conditioners cooling capacity measured by calorimeter test method [J]. Instrument Standardization & Metrology, 2012(2):37-40.
- [21] DIAZ N F. Methodology for uncertainty calculation of net total cooling effect estimation for rating room air conditioners and packaged terminal air conditioners [J]. International Journal of Refrigeration. 2009, 32(6):1472-1477.
- [22] 滕俊恒, 杭晨哲, 徐定华, 等. 空气焓值法制冷量测量的两种不确定度评定方法[J]. 计量学报, 2011, 32(4):229-332.
- TENG J H, HANG CH ZH, XU D H, et al. Two kinds of uncertainty evaluation in the air-enthalpy method measuring cooling capacity [J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(4):229-332.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 转速可控型房间空气调节器能源效率标识计量检测规则: JJF1261.4-2014 [S]. 北京:中国质检出版社, 2014:50-56.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Rules of metrology testing for energy efficiency label of variable-speed room air conditioners; JJF 1261.4-2014 [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2014:50-56.
- [24] 戴世龙, 王敏, 齐淑芳, 等. 房间空调器空气焓值法测量不确定度简化计算研究[J]. 制冷学报. 2010, 31(6):51-55.
- DAI SH L, WANG M, QI SH F, et al. Simplified calculation of uncertainty in room air-conditioner measurement with air enthalpy test method [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(6):51-55.

作者简介



杭晨哲, 分别在 2005 年和 2008 年于北京交通大学获得学士学位和硕士学位, 现为北京工业大学博士生、中国计量科学研究院助理研究员, 主要研究方向为制冷量计量。
E-mail: Hangez@nim.ac.cn

Hang Chenzhe received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Beijing Jiaotong University in 2005 and 2008, respectively. Now, he is a doctoral student in Beijing University of Technology, he also holds the post of research assistant in National Institute of Metrology. His main research interest includes cooling capacity metrology.



马国远(通讯作者), 1985 年于华中工学院获得学士学位, 分别在 1988 年和 1998 年于西安交通大学获得硕士学位和博士学位, 现为北京工业大学环境与能源工程学院教授, 主要研究方向为制冷空调系统的节能环保技术。

E-mail: magy@bjut.edu.cn

Ma Guoyuan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1985, received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Xi'an Jiaotong University in 1988 and 1998, respectively. Now, he is a professor in Beijing University of Technology. His main research interests focus on environment - friendly and efficient HVAC system.