

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.04.015

0℃以下湿球温度测量法及实验验证

袁朝阳, 路阳, 程诚, 陈旭

(英格索兰亚太工程技术中心, 江苏太仓 215400)

摘要:环境温度在0℃以下的工程测试中,湿球纱布测量法因蒸馏水结冰会出现测量失真的问题。为此,课题组提出了一种等湿加热的湿球温度计测法。笔者首先阐释了计测湿球温度的原理;其次依据该原理设计了一种新的湿球温度测量装置并用于实验;最后分析了该测量装置的不确定度,对比了计测值与实测值之间的差异。结果表明:环境温度0℃以上,计测得到的湿球温度与PT100铂电阻的测量值之间的相对偏差均在±0.1℃以内;环境温度0℃以下,计测得到的相对湿度与温湿度传感器的测量值之间的相对偏差均在±3%以内。该计测法满足替代测量要求,具有较好的适用性。

关键词:温度测量;湿球;等湿加热;相对湿度

中图分类号:TU83

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2019)04-0079-05

Wet Bulb Temperature Measurement and Experimental Verification Below 0℃

YUAN Chaoyang, LU Yang, CHENG Cheng, CHEN Xu

(Ingersoll Rand Engineering & Technology Center-Asia Pacific, Taicang, Jiangsu 215400, China)

Abstract: It is often found in engineering test that the method of obtaining wet bulb temperature by measuring the temperature of distilled water after evaporation and heat absorption is no longer applicable in the low temperature environment below 0℃. In this regard, the author proposed a wet bulb temperature calculation method to solve this problem. Firstly, the measuring accuracy of air source heat pump under several common working conditions was calculated theoretically, which proved the reliability of the measuring method. Secondly, a wet bulb temperature measuring device was designed according to the measuring theory and applied to the experiment. The difference between the measured value and the measured value in the whole cooling process of the enthalpy difference environment chamber was compared. The results show that the relative error between the wet bulb temperature measured by the method and the platinum resistance measured by PT100 is less than 0.1℃ when the inlet air temperature is above 0℃, the relative error between the relative humidity measured by the measuring method and the relative humidity measured by the relative humidity meter is less than 3% when the inlet air temperature is below 0℃, which meets the requirements of replacing the PT100 platinum resistance and the relative humidity meter by the measuring method and has good applicability.

Keywords: temperature measuring; wet bulb; equal humidity heating; relative humidity

近年来,随着我国煤改电的不断推行,北方寒冷地区的传统供暖方式发生了改变,空气源热泵逐渐兴起,对空调设备的制热能力提出了新的考验,其中就包括如何解决换热器低温除霜的问题,而除霜效果的好坏与空气湿度的大小息息相关^[1-3]。同时,在空调产品的许多验证试验中,对空气温湿度的控制都提出了极高

的要求,由于换热器风侧换热能力与空气的温湿度有关,因此湿球温度的测量是必要的。传统的湿球温度一般采用包裹湿润纱布的温度计来测量,但是在环境温度0℃以下工况时,会导致湿润纱布的蒸馏水因结冰而无法正确测得此时的湿球温度。传统方法限制了焓差实验室的测试能力。

收稿日期:2018-12-09;修回日期:2019-06-01

第一作者简介:袁朝阳(1992),男,河南信阳人,硕士,工程师,主要研究方向为制冷循环系统优化。E-mail: chaoyang.yuan@irco.com

此外,果蔬等产品在低温下的运输保存对空气湿度同样有着较高的要求,在果蔬贮藏保鲜的过程中,相对湿度是仅次于温度的重要影响因素,贮藏库内稳定的低温、高湿度环境是保证贮藏保鲜产品质量和货架寿命的关键^[4,6]。如何实现这一参数的测量对提高机械冷库的管理水平有着重要的意义。因此,寻找合适的方法来控制和测量低温下的湿球温度具有重要的实用价值。

鉴于此,课题组利用空气状态参数之间的相互关系,依据空气在干式加热过程中含湿量不变的原理,提出一种等湿加热的湿球温度计测方法,并探讨计测法替代铂电阻直接测量的可靠性和可行性。

1 测量装置

测试中,对空气的调节主要通过制冷系统持续运转降温除湿,干球、湿球温度控制仪表则分别控制加热器和加湿器功率的输出来调节投入空气中的热量和水份,从而获得测试所需要的空气温湿度^[7]。

在测试标准中,通常只需给出空气的干球温度和湿球温度即可确定一个具体的实验工况,换言之,确定了空气的干湿球温度也即确定了空气的状态。一般空气状态参数包括大气压力 p_a 、干球温度 t 、比焓 h 、含湿量 d 、相对湿度 φ 、水蒸气分压力 p_q 、饱和水蒸气分压力 $p_{q,b}$ 等参数。在大气压力 p_a 一定的情况下,已知 t , h , d 和 φ 中任何 2 个参数即可在 $h-d$ 图上确定空气状态点,从而查取其他参数^[8]。

1.1 测量原理

等湿加热的计测方法又可称为“低温高测法”。即将需要测量的低温空气用取样风机引出后先经过电加热箱内的加热器,使其经历一个等湿、增焓和升温的过程,这样干湿球温度皆处于 0℃ 以上,就可以使用铂电阻准确测出加热后的干球温度和湿球温度。由于是等湿加热,因此可以得到加热前后不变的空气含湿量,再结合加热前的干球温度,逆推出加热前的湿球温度。具体原理如图 1 所示,湿球温度可通过作图法求得。

在数据的采集调试过程,为了保证数据的即时性和有效性,作图法并不适用。但可采用事先编辑好的公式来计算需要监控的数据,当输入加热后的干球温度、湿球温度以及加热前的干球温度后,即可得到加热前的湿球温度。

在图 1 中,常温下,由铂电阻测得的干、湿球温度分别为 t 和 t_s 点,由 t 和 t_s 2 点可在图 1 中确定空气的状态点 D 。该点的水蒸气分压力 p_q 可由下式计算:

$$p_q = p_{q,b}^* - A(t - t_s)p_{a,0} \quad (1)$$

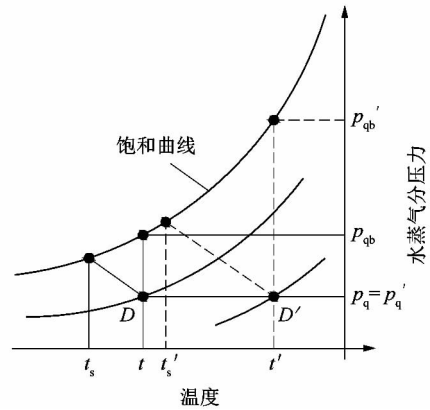


图 1 湿空气温湿度图

Figure 1 Wet air temperature and humidity chart

式中: $p_{q,b}^*$ 为湿球温度下的饱和水蒸气分压力; A 为干湿球温度计常数。

$$A = (65 + 6.75/v) \times 10^{-5}.$$

已知空气的湿球温度 t_s 条件下, $p_{q,b}^*$ 的计算公式:

1) 若 $t_s = -100 \sim 0^\circ\text{C}$

$$\ln(p_{q,b}^*) = \frac{c_1}{T_s} + c_2 + c_3 T_s + c_4 T_s^2 + c_5 T_s^3 + c_6 T_s^4 + c_7 \ln(T_s). \quad (3)$$

式中: $c_1 = -5\,674.535\,9$; $c_2 = 6.392\,524\,7$; $c_3 = -0.967\,784\,3 \times 10^{-2}$; $c_4 = 0.622\,157\,01 \times 10^{-8}$; $c_5 = 0.207\,478\,25 \times 10^{-18}$; $c_6 = 0.948\,402\,4 \times 10^{-12}$; $c_7 = 4.163\,501\,9$; T_s 是空气的湿球温度, 为 $(273.15 + t_s)\text{K}$ 。

2) 若 $t_s = 0 \sim 200^\circ\text{C}$

$$\ln(p_{q,b}^*) = \frac{c_8}{T_s} + c_9 + c_{10} T_s + c_{11} T_s^2 + c_{12} T_s^3 + c_{13} \ln(T_s). \quad (4)$$

式中: $c_8 = -5\,800.220\,6$; $c_9 = 1.391\,499\,3$; $c_{10} = -0.048\,602\,39$; $c_{11} = 0.417\,647\,68 \times 10^{-4}$; $c_{12} = -0.144\,520\,93 \times 10^{-7}$; $c_{13} = 6.545\,967\,3$ 。

同理, 已知空气的干球温度 t 条件下, 由式(3)和(4)亦可得出 $p_{q,b,0}$ 。

由此, 可进一步确定空气的相对湿度 φ 和含湿量 d :

$$\varphi = \frac{p_q}{p_{q,b}} \times 100\% \quad (5)$$

$$d = 622 \times p_q / (p_a - p_q). \quad (6)$$

上述公式中, $p_a, p_q, p_{q,b}^*$ 和 $p_{q,b}$ 的单位均为 Pa; 空气流速 v 的单位为 m/s; 含湿量 d 的单位为 g/kg。从中可以看出, 若空气的干球温度已知, 只要再确定湿球温度、相对湿度和含湿量三者中的一个, 即可计算得出剩

余的2个空气参数。

1.2 取样空气电加热器的设计计算

等湿加热法主要通过空气电加热器来实现。笔者以某焓差法空调综合性能实验室为对象设计了一台空气电加热箱。已知室外侧运行环境为:干球温度 $-20\sim 60\text{℃}$,相对湿度 $20\%\sim 95\%$ 。为保证加热后的取样空气湿球温度均在 0℃ 以上,设计计算中将温升 Δt 设定为 30℃ 。图2为取样空气电加热箱的示意图。

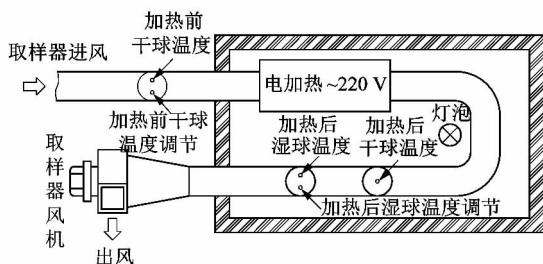


图2 取样空气电加热箱示意图

Figure 2 Figure 2 Legend of sampling air electric heating box

1.2.1 取样空气电加热器

测试前必须用风速仪预先测量湿球温度采样处截面的风速,保证PT100铂电阻在湿球温度采样处截面的平均风速 v 在 $(5.0\pm 1.0)\text{m/s}$ 。

在图2中,选用的空气取样器管径 d_0 为 8cm ,截面积为:

$$S = \pi \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 = 0.005 \text{ m}^2. \quad (7)$$

送风量为:

$$q_m = S \times v \times 3600 = 90 \text{ m}^3/\text{s}. \quad (8)$$

由此可得取样空气电加热器的功率:

$$P = \frac{q_m \times \Delta t}{3600} \times \eta. \quad (9)$$

式中: P 为取样空气电加热器的功率, kW ; q_m 为送风量, m^3/s ; Δt 为空气温升, ℃ ; η 为电加热器的热效率,一般为 85% 。

代入以上数据可得 $P=0.6375\text{ kW}$ 。

1.2.2 补偿电加热器

为了保证电加热箱对取样空气加热的稳定性,在设计中还需要考虑整个加热箱壁的保温问题。设计中,可对加热箱的漏热功率进行计算,从而得出所需要的补偿电加热器功率。

已知电加热箱箱体厚度 L 为 4cm ,取样空气温升 Δt 为 30℃ 。箱体6个内表面的表面积 $A_0 = (0.9 \times 0.5 + 0.54 \times 0.49 + 0.9 \times 0.49) \times 2 = 2.31 \text{ m}^2$ 。加热

箱壁面采用保温效果良好的挤塑板,其导热系数 λ 为 $0.030 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (25℃),加热箱壁面热阻:

$$R = \frac{L}{\lambda} = \frac{0.04}{0.030} = 1.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}. \quad (10)$$

则加热箱体的传热系数为 $K=1/R=0.75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;加热功率 $P'=K \cdot A_0 \cdot \Delta t=0.75 \times 2.311 \times 30=52.00 \text{ W}$ 。考虑电灯泡的热效率,因此最终选用一个 60 W 的灯泡作为电加热器。

2 测量方法的准确性

2.1 不确定度分析

假定加热前的取样空气状态为1,加热后的取样空气状态为2,由等湿加热原理可知 $d_1=d_2$,根据1.1节中的方法可得到加热前湿球温度 t_{s1} 的计算公式:

$$t_{s1} = t_1 - t_2 + t_{s2} - \frac{P_{q,b1}^* - P_{q,b2}^*}{(65 + 6.75/v)p_a \times 10^{-5}}. \quad (11)$$

从式(11)中可以看出,加热前湿球温度 t_{s1} 与湿球温度下的饱和水蒸气分压力 $p_{q,b}^*$ 、空气流速 v 、大气压力 p_a 、加热前干球温度 t_1 、加热后干球温度 t_2 和 t_{s2} 相关。其中, p_a 和 v 为一次测量后的固定值,对计算的影响可忽略,而 $p_{q,b}^*$ 是 t_s 的单值函数, t_1 , t_2 和 t_{s2} 之间又相互独立,因此加热前湿球温度 t_{s1} 的函数可以表示为:

$$t_{s1} = f(t_1, t_2, t_{s2}). \quad (12)$$

常温下,湿球温度通常由铂电阻直接读取,其测量结果的准确度仅受一个铂电阻温度测量系统的计量特性影响。但从式(12)中可以看出, t_{s1} 与 t_1 , t_2 和 t_{s2} 3个测量值有关系,所以计测法必定使 t_{s1} 的可靠性同时受到3个铂电阻准确度的综合影响。其影响程度可通过 t_{s1} 的不确定度考查。

测量不确定度通常分为A类不确定度、B类不确定度、标准不确定度以及扩展不确定度^[9]。A类不确定度分量的评定是对观察列进行统计分析所做的评估,一般要对被测样品进行多次测量,加热前湿球温度 t_{s1} 的A类不确定度计算公式如下^[9]:

$$u_A(t_{s1}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{s1,i} - \bar{t})^2}{n(n-1)}}. \quad (13)$$

表1给出了连续10次的测量和计算数据,根据表1的数据可以计算 t_{s1} 的A类不确定度。

B类不确定度则是从测量所使用的仪器仪表、参考数据等方面来分析。根据标定证书可知,本文所使用的PT100铂电阻准确度为 0.04℃ ,满足矩形分布,由此获得不确定度分量:

$$u(t_1) = u(t_2) = u(t_3) = \frac{0.04}{\sqrt{3}} = 0.02 \text{℃}. \quad (14)$$

表1 测试以及计算数据
Table 1 Tested and calculated data

测试组	加热前干球温度 t_1			加热前湿球温度 t_{s1}			加热后干球温度 t_2			加热后湿球温度 t_{s2}		
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3
1	-19.98	-17.78	-8.36	-20.30	-18.28	-9.35	10.56	11.35	26.84	1.61	2.16	10.46
2	-19.99	-17.77	-8.34	-20.28	-18.27	-9.35	10.57	11.35	26.88	1.63	2.15	10.48
3	-20.01	-17.78	-8.34	-20.31	-18.27	-9.36	10.59	11.35	26.86	1.63	2.16	10.46
4	-20.00	-17.77	-8.33	-20.29	-18.30	-9.36	10.59	11.38	26.88	1.64	2.15	10.47
5	-20.01	-17.77	-8.32	-20.27	-18.28	-9.33	10.56	11.35	26.87	1.64	2.15	10.47
6	-20.00	-17.77	-8.31	-20.29	-18.28	-9.34	10.57	11.33	26.86	1.63	2.14	10.46
7	-20.00	-17.78	-8.32	-20.28	-18.30	-9.34	10.58	11.33	26.86	1.64	2.13	10.46
8	-20.00	-17.77	-8.32	-20.27	-18.28	-9.37	10.57	11.37	26.87	1.64	2.16	10.45
9	-20.00	-17.76	-8.33	-20.28	-18.30	-9.37	10.59	11.41	26.86	1.64	2.16	10.45
10	-19.99	-17.77	-8.32	-20.29	-18.31	-9.38	10.58	11.42	26.84	1.63	2.16	10.43

再根据不确定度传播公式,加热前湿球温度 t_{s1} 的 B 类不确定度的评定公式^[10]为:

$$u_B^2(t_{s1}) = c_{t1}^2 u^2(t_1) + c_{t2}^2 u^2(t_2) + c_{t_{s2}}^2 u^2(t_{s2})。 (15)$$

这里讨论加热前干球温度 t_1 不确定度分量 $c_{t1} u(t_1)$,其他分量的计算方法类似。由不确定度传播系数公式可知:

$$c_{t1} = \frac{\partial f}{\partial t_1} = \lim_{\Delta t_1 \rightarrow 0} \frac{f(t_1 + \Delta t_1, t_2, t_{s2}) - f(t_1, t_2, t_{s2})}{\Delta t_1}。 (16)$$

由于加热前湿球温度 t_{s1} 是 t_1 的单向函数,因此不确定分量可由下式近似求得:

$$c_{t1} u(t_1) \approx f(t_1 + u(t_1), t_2, t_{s2}) - f(t_1, t_2, t_{s2})。 (17)$$

同样可以得出其他测量值的不确定度分量:

$$c_{t2} u(t_2) \approx f(t_1, t_2 + u(t_2), t_{s2}) - f(t_1, t_2, t_{s2}); (18)$$

$$c_{t_{s2}} u(t_{s2}) \approx f(t_1, t_2, t_{s2} + u(t_{s2})) - f(t_1, t_2, t_{s2})。 (19)$$

表2给出了计算所得到的 t_{s1} 的 A 类不确定度和 B 类不确定度各分量。

表2 加热前湿球温度 t_{s1} 的不确定度列表

Table 2 Uncertainty list of wet bulb temperature before heating

工况	A 类不确定度 $u_A(t_{s1})$	B 类不确定度分量		
		$c_{t1} u(t_1)$	$c_{t2} u(t_2)$	$c_{t_{s2}} u(t_{s2})$
1	3.86×10^{-3}	0.02	-0.02	0.04
2	3.92×10^{-3}	0.02	-0.02	0.04
3	4.62×10^{-3}	0.02	-0.02	0.04

标准不确定度是 A 类和 B 类不确定度的合成;扩展不确定度是在特定范围内的不确定度。因此,根据表2的计算结果可得出工况 1,工况 2 和工况 3 中 t_{s1} 的标准不确定度 $u(t_{s1})$,结果均为 $0.05\text{ }^\circ\text{C}$,扩展不

确定度为:

$$U(t_{s1}) = u(t_{s1}) \times 2 = 0.10\text{ }^\circ\text{C}。 (20)$$

其中,包含因子 $k=2$,包含概率 95%。

从上述结果中可以看出,与使用一个铂电阻直接测量相比较,计测法的不确定度略有增长,这是因为参与计算的测量铂电阻增多所致。 t_{s1} 的不确定度主要由 A 类和 B 类合成得到。图 3 给出了 t_{s1} 测量的各分量的贡献值(绝对值)。从图中可以看出,加热后湿球温度 t_{s2} 的不确定度贡献值最大,干球温度 t_1 和 t_2 次之,而 A 类不确定度对总不确定度的贡献值最小。

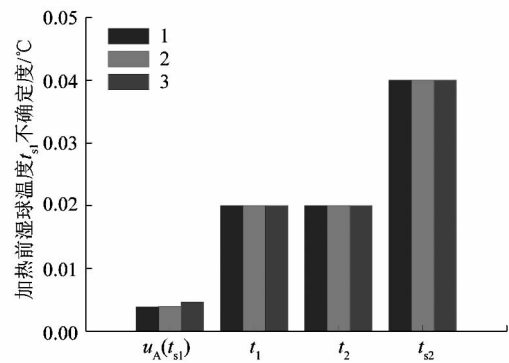


图3 各测量参数对 t_{s1} 不确定度贡献

Figure 1 Each parameter contributes to uncertainty of t_{s1}

2.2 实验验证

2.2.1 0 °C 以上湿球温度验证

由等湿加热的原理可知,计测法不仅适用于 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以下的低温环境,在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的环境中依然适用。为了进一步验证该方法的可靠性,在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的环境中,笔者对 PT100 铂电阻测量的湿球温度和计测法得到的湿球温度进行比较,结果如图 4 所示。在图中,进风

干球温度由 2℃ 到 18℃ 的变化过程中,计测法得到的湿球温度和 PT100 铂电阻测得的进风湿球温度基本吻合,相对偏差均在 ± 0.1 ℃ 以内,满足代替铂电阻直接测量时的测量要求。

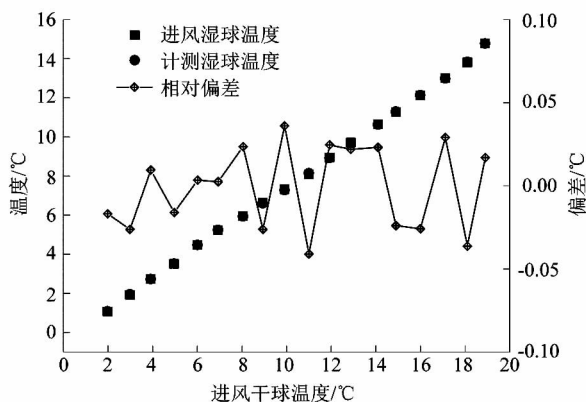


图4 湿球温度对比

Figure 4 Comparison of wet bulb temperature

2.2.2 0℃以下相对湿度验证

在 0℃ 以下的低温环境中,为了验证计测法的可靠性,笔者采用 HMT333 型高精度温湿度传感器,精度 $\pm 3\%$ 。温湿度传感器可直接测量空气的相对湿度,与公式(5)中的计测相对湿度比较,结果如图 5 所示。在图中,进风干球温度由 -12 ℃ 到 0℃ 的变化过程中,计测相对湿度和温湿度传感器之间的差异较小,相对偏差均在 $\pm 3\%$ 以内,证明计测法同样可以替代温湿度传感器来测量空气的相对湿度,进而求得空气的湿球温度。计测法具有较好的适用性。

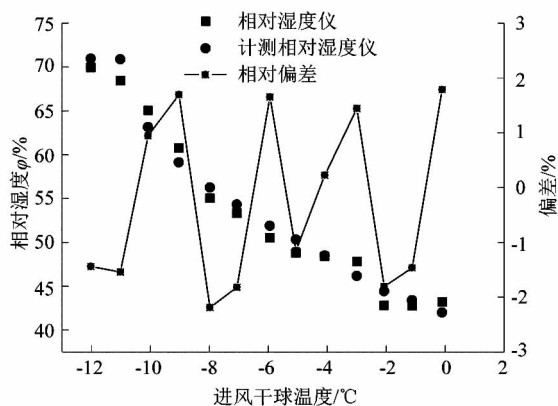


图5 相对湿度对比

Figure 5 Comparison of relative humidity

3 结论

针对传统的湿球温度测量法不适用于 0℃ 以下低温环境的问题,课题组提出了一种“低温高测”的方法,以计算代替测量来得到空气的湿球温度。同时通过理论分析和实验验证得出以下结论:

1) 计测湿球温度的可靠性受到进风干球温度、加热后干球温度、加热后湿球温度 3 个测量铂电阻精度的影响,计测法的不确定度略有增长,加热后湿球温度 t_{s2} 的不确定度贡献值最大。

2) 环境温度 0℃ 以上,计测所得湿球温度与 PT100 铂电阻的测量值之间的相对偏差均在 ± 0.1 ℃ 以内;环境温度 0℃ 以下,计测所得相对湿度与温湿度传感器的测量值之间的相对偏差均在 $\pm 3\%$ 以内,计测法满足替代测量要求,具有较好的适用性。

3) 采用等湿加热的计测装置可以连续获得低温下的空气温湿度参数,操作方便,效果好,具有很大的实用价值。计测方法的提出对提高低温制冷和果蔬贮藏保鲜方面都有着积极而有效的现实意义。

参考文献:

- [1] 董建锴,闫森,顾冬明,等. 基于辐射和对流换热新型供暖末端的空气源热泵除霜性能试验研究[J]. 制冷与空调,2018,18(8):83-88.
- [2] 罗超,黄兴华,陈江平. 不同环境参数对间冷式冰箱蒸发器结霜换热性能的影响[J]. 制冷学报,2008,29(1):17-22.
- [3] 陈镇凯,胡文举,江辉民,等. 制约空气源热泵推广应用的技术因素的研究现状[J]. 制冷与空调,2012,12(1):12-18.
- [4] 梁洁玉,朱丹实,冯叙桥,等. 果蔬气调贮藏保鲜技术研究现状与展望[J]. 食品安全质量检测学报,2013(6):1617-1625.
- [5] 孟祥春,黄泽鹏,毕方铨,等. 干雾湿度控制系统的组建及果蔬贮藏保鲜应用试验[J]. 农业工程学报,2016,32(11):271-276.
- [6] 张平,陈绍慧. 我国果蔬低温贮藏保鲜发展状况与展望[J]. 制冷与空调,2008,8(1):5-10.
- [7] 黄翔,孙铁柱,汪超. 蒸发冷却空调技术的诠释(3)[J]. 制冷与空调,2012,12(4):1-3.
- [8] 黄翔. 空调工程[M]. 北京:机械工业出版社,2014:27-27.
- [9] 中国合格评定国家认可委员会. 测量不确定度要求的设施指南: CNAS-CL05[S/OL]. [2011-02-15]. <https://wenku.baidu.com/view/4eae8090a76e58fafa003e1.html>.
- [10] 郁夏夏,路阳,张维加,等. 空气焓差法测量制冷量不确定度的理论与实验分析[J]. 制冷技术,2013(4):15-18.