

湿球温度快速计算方法研究及误差来源分析

左河疆 高娜 高睿娜

(宁夏回族自治区气候中心, 银川 750002)

摘要: 湿球温度是进行暖通空调和建筑设计等工程中必需的一个重要环境参数。但由于各种原因, 国内各地气象站自2000年之后已经陆续停止了湿球温度的人工观测项目。为解决工程设计中缺少这个环境参数的问题, 本文设计了一种利用气温、相对湿度和气压快速计算湿球温度的算法, 并给出了Python语言实现的该算法的关键部分。经过比测, 计算结果与传统人工观测相差较小, 大部分情形下与观测结果一致。与常用的遍历法给出的结果差别很小 ($< 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)。此方法计算速度极快, 绝大多数情况下可在3步循环内计算得到精度在 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的结果, 完全可以满足实际工作中湿球温度的计算需求。最后给出了宁夏地区不同年代的夏季室外计算湿球温度的统计结果, 分析了计算结果误差产生的主要来源, 并给出了提高计算精度的思路。

关键词: 湿球温度, 快速算法, 误差来源, Python

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.04.019

Research on Rapid Calculation Method of Wet Bulb Temperature and Analysis of Error Source

Zuo Hejiang, Gao Na, Gao Ruina

(Climate Center of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002)

Abstract: Wet bulb temperatures are an important environmental parameter for construction projects such as HVAC and building design. However, due to various reasons, meteorological stations across China have stopped the manual observation of wet bulb temperature since 2000. In order to solve the problem of the lack of this environmental parameter in the engineering design, this paper not only puts forward an algorithm that uses air temperature, relative humidity and air pressure to quickly calculate the temperature of the wet bulb, but also gives the key part of the algorithm implemented in python language. The comparative measurement shows that the differences between the calculation results and the traditional manual observations remain small, and in most cases the former is consistent with the latter. To be specific, the difference between the calculated results and those from the commonly used traversal lookup method is tiny ($< 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$). The calculation speed of the proposed method is extremely fast, and in most cases, the result with an accuracy of $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ can be calculated in a 3-step cycle, which can fully meet the calculation needs of the wet bulb temperature in actual work. Finally, the statistical results of the calculated summertime outdoor wet bulb temperature in different years in Ningxia are listed to analyze the main sources of error in calculation results and to offer suggestions for improving the calculation accuracy.

Keywords: wet bulb temperature, rapid calculation method, error source, Python

0 引言

建筑物内人体舒适度是建筑设计时的一个重要控制指标, 而夏季室外计算湿球温度是计算该值时的一个必要环境参数^[1-3]。同时, 湿球温度也是火力发电厂空气冷却器、仓储干燥设施等工程设计中亟需的参数之一^[4-8]。历史上, 湿球温度一般由观测员使用干湿球温度计于百叶箱内进行人工观测得到^[9]。2000年后,

随着自动气象站的普及, 各地气象站陆续停止了人工湿球温度观测项目。在宁夏区域, 大部分长期气象站在1966—1979年间未进行湿球温度观测, 仅有1980—2003(部分站观测延续至2005年)的观测资料, 缺少连续30年的观测数据, 这就给实际应用造成了一定的困难。此外, 由于观测时需要人工进行湿球观测, 难以避免会受到水的纯度、观测温差、操作误差、读数误差以及后期纸质历史资料电子化等因素的影响, 精度有限。

传统上, 当缺失湿球温度要素时可以通过查表法^[10], 使用温度、气压、湿度和风速查取湿球温度。不过此法精度有限且极度费时费力, 使用相当不便。

投稿日期: 2022年4月6日; 修回日期: 2022年8月15日

第一作者: 左河疆(1980—), Email: lj.zuo@qq.com

资助信息: 区域气候可行性论证评估技术应用研究(CAMP-202003); 宁夏自然科学基金优秀青年项目(2022AAC05065)

实际上,在给定的观测条件下(例如在不受风速影响的标准观测百叶箱内,使用热传导系数固定的标准干湿球温度计),湿球温度是由空气温度、大气压、空气湿度决定的^[11-12]。在缺少湿球温度观测时,理论上可以使用空气温度、大气压、空气湿度计算得到相应的湿球温度,查表法本质上也是基于这一原理。已有很多研究探讨了计算湿球温度的原理^[11-14],并对计算方法进行了一定的研究^[11-25]。其中,目前广泛使用的是程智等^[12]给出的一种较为简单且易于实现的试算法(亦可称为遍历法),通过误差最小原理一般可以在15000步内得到0.001℃精度的湿球温度。魏华兵等^[13]基于空气水汽压计算公式和纯平液面饱和水汽压给出了一种基于Excel实现的迭代计算方法,文中说明仅需6步计算即可算得,但没有给出具体实现过程。徐正等^[14]也提出了一种使用Excel VBA语言实现的二分法求解方法,但计算过程依赖于所给出的经验系数,且仍需要结合Excel软件才能使用。因此目前使用较多的方法仍然为程智等^[12]给出的遍历法。

本文利用干湿温度平衡原理,参考湿球温度的干湿表计算公式和以上几种方法,设计了一种利用气温、相对湿度和气压快速计算湿球温度的算法,利用Python语言实现了这一快速迭代计算算法。并使用宁夏境内长期气象站的观测资料与计算结果进行了对比。

1 算法原理

根据干湿表公式^[2, 12],湿球温度与水汽压、温度以及大气压力之间的平衡方程为:

$$e = e_{tw} - AP(t_{dry} - t_{wet}), \quad (1)$$

式中, e 为水汽压 (hPa); e_{tw} 为湿球温度 t_{wet} (°C) 所对应的纯平液/冰面饱和水汽压 (hPa); P 为本站气压 (hPa); t_{dry} 为干球温度 (°C); A 为热传导系数,一般取 0.815×10^{-3} , 亦可根据实际情况选取^[9]。 e_{tw} 可以采用世界气象组织 (WMO) 推荐的戈夫-格雷奇 (Goff-Gratch, 1945) 公式^[12]得到,此公式计算较为复杂,但是在 $-60 \sim 60$ °C 有较高精度^[26]。由于 e_{tw} 也是 t_w 的函数,且公式较为复杂,此方程成为一个超越方程,难以直接得到其解析解,可使用数值方法计算得到近似值。

实际观测中一般没有水汽压 (e) 的直接观测,可由相对湿度 (rh) 算得,其公式为:

$$e = \frac{rh}{100} \times e_{td}, \quad (2)$$

式中, e_{td} 为干球温度 t_{dry} (°C) 对应的纯平液/冰面饱和水汽压 (hPa), 是干球温度 t_{dry} 的函数。

联立公式 (1) 和 (2), 可得关于干球温度、相对湿度、气压和湿球温度的方程:

$$\frac{e_{tw} - AP(t_{dry} - t_{wet})}{e_{td}} = rh / 100. \quad (3)$$

公式 (3) 可由不同的数值计算方法解得数值解,其中较为简单的经验解法之一为程智等^[12]提出的遍历法。其具体计算过程是:当空气温度为 t °C 时,在 $[t-15, t)$ 的区间内每隔 0.001 °C 使用水汽压公式 (1) 试算一个 e_{tw} ,并将此值与实际饱和水汽压值(可由观测得到的相对湿度计算得出)相对比,取 15000 个待选值中使得相对湿度差别最小者,即为湿球温度。这个计算方法思路虽然简单但实际上相当实用,因为湿球温度很少低于气温很多,多数情况下不会低于干球温度 15 °C 以上(西北地区因相对湿度较小,推荐遍历范围扩大至 $[t-20, t)$),且工程设计多数要求精度为 0.1 °C 即可,此方法完全能够满足需求。此法的缺点是计算量比较大。此外,亦可使用如下方法解此方程。具体方法是,将平衡方程写为 $f(x)=0$ 的标准形式:

$$f(t_{wet}) = \frac{E_w(t_{wet}) - AP(t_{dry} - t_{wet})}{E_w(t_{dry})} - rh / 100 = 0. \quad (4)$$

其中 $E_w(t)$ 为计算纯水平液面饱和水汽压的戈夫-格雷奇公式。将该式写成差分形式,然后使用 $f(t_{wet})$ 的导数进行迭代求解。但由于此处 $E_w(t)$ 的形式比较复杂并且是分段函数(需要考虑结冰情况),导致难以直接求得导数。在此情况下需使用数值微分代替,求取方法由此演变为埃特金 (Aitken) 迭代法,此方法实际上也是牛顿下山法的一个改进算法^[27]。算法可归结为:求取方程 $f(t_{wet})=0$ 在 $t_{wet}=t_{dry}-10$ 附近方程的一个实根。

将方程 (4) 改写成 $t_{wet} = \phi(t_{wet})$ 的形式:

$$t_{wet} = t_{dry} - \left[E_w(t_{wet}) - \frac{rh \times E_w(t_{dry})}{100} \right] \times \frac{1}{AP}. \quad (5)$$

这里由物理特性和经验,可设初值 t_0 为: $t_0 = t_{dry} - 10$, 试验过程中发现初值选取影响不大。该方法收敛速度相当快,试验中绝大多数情况下迭代 3 步即可收敛到 0.01 °C 以内。此方法不需要计算 15000 次 t_{wet} 的估计值,并且由于 $\phi(t_{wet})$ 的形式比较简单,数值微分计算方便。此外,由于 Aitken 方法使用导数作为斜率计算下一个猜测值,收敛速度要比二分法查找法快得多。程序的具体实现及测试数据可从网站 (<https://github.com/enomlap/CalEW>) 下载。

2 计算结果与分析

2.1 计算结果对比

目前所广泛使用的是程智等^[12]所给出的遍历法,

经过检验，遍历法的计算结果与实际观测相比是相当接近的。使用本方法与遍历法，分别在冬季和夏季使用2000年银川市（宁夏北部）和固原市（宁夏南

部）的观测数据进行了为期一年的抽样对比，表1为部分对比结果。可以看出两种计算结果基本一致（差别 $\leq 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），均与观测结果比较接近。

表1 2000年银川站、固原站快速计算法和遍历法部分计算结果与观测值对比

Table 1 Comparison between partial results from rapid calculation method and traversal method and the observed values at Yinchuan and Guyuan Stations in 2000

气温/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	气压/hPa	湿球温度/ $^{\circ}\text{C}$			气温/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	气压/hPa	湿球温度/ $^{\circ}\text{C}$		
			观测值	快速计算法	遍历法				观测值	快速计算法	遍历法
-7.0	72	889.2	-7.8	-7.82	-7.82	19.3	81	883.9	17.2	17.17	17.16*
-5.9	63	893.6	-7.1	-7.08	-7.08	-6.1	79	826.9	-6.7	-6.79	-6.79
5.2	23	895.5	-0.3	-0.38	-0.38	3.0	47	828.9	-0.5	-0.60	-0.60
2.2	23	896.1	-2.5	-2.30	-2.30	-4.8	47	830.5	-6.9	-6.74	-6.74
-7.5	59	894.6	-8.7	-8.65	-8.65	-5.4	57	827.5	-7.0	-6.90	-6.90
0.5	32	886.9	-3.4	-2.99	-2.99	2.9	38	823.6	-1.2	-1.19	-1.19
-3.5	49	887.1	-5.6	-5.45	-5.45	10.3	18	820.8	2.5	2.60	2.60
-6.3	63	885.8	-7.5	-7.45	-7.45	-0.5	35	820.3	-4.2	-3.73	-3.73
-2.3	41	884.2	-5.0	-4.77	-4.77	-2.3	51	821.6	-4.6	-4.44	-4.43*
3.2	31	884.4	-1.3	-1.23	-1.23	-7.5	74	819.3	-8.2	-8.27	-8.28*
20.7	50	883.8	14.5	14.71	14.71	17.5	67	821.2	13.8	13.78	13.78
21.3	68	884.2	17.5	17.47	17.47	18.0	70	821.3	14.6	14.58	14.58
30.1	43	881.4	20.9	21.35	21.35	25.7	41	819.8	16.9	17.23	17.23
29.8	39	879.9	20.0	20.46	20.46	23.0	51	819.6	16.4	16.50	16.50
23.6	57	882.0	18.0	18.07	18.07	17.0	78	820.1	14.6	14.57	14.57
23.2	68	882.5	19.2	19.17	19.17	17.9	71	820.0	14.6	14.60	14.60
30.0	36	881.3	19.5	20.12	20.12	20.7	57	818.9	15.3	15.36	15.36
29.8	30	879.8	18.2	18.97	18.96*	17.3	80	819.0	15.1	15.08	15.08
22.5	60	882.3	17.4	17.51	17.51	16.6	83	819.5	14.8	14.75	14.75

此外，也与宁夏境内同期的观测数据进行了对比（图1），计算结果和观测记录的对比统计如表2所示。银川站2000年全年有效观测数据共1380条，可以看出，在大多数时刻观测结果与计算结果是非常接近的，误差 $\leq 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的比例占73.91%，误差 $> 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的占

表2 2000年银川站湿球温度快速计算法计算结果与观测值对比统计

Table 2 Statistics of wet bulb temperature results from rapid calculation method and the observed values at Yinchuan Station in 2000

误差/ $^{\circ}\text{C}$	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.5	> 1
数量	793	1020	1241	41
占比/%	57.46	73.91	89.86	2.97

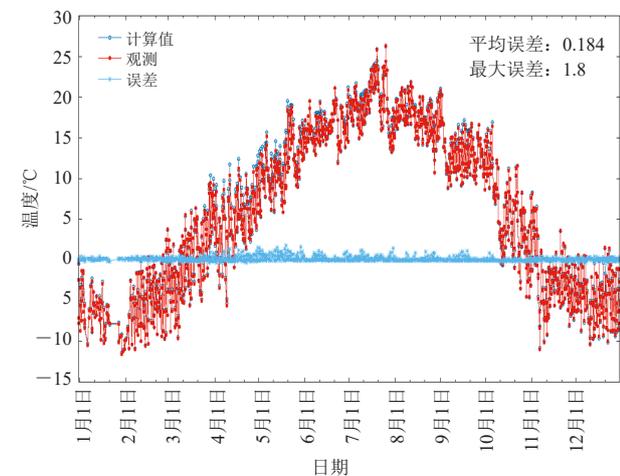


图1 2000年银川站湿球温度快速计算法计算结果与观测值对比
Fig. 1 Comparison of wet bulb temperature results from rapid calculation method and the observed values at Yinchuan Station in 2000

比2.97%，总体误差绝对值为 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

统计结果表明，误差 $> 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的记录共有41条，摘取误差最大20项并通过查表法^[10]查找对应的湿球温度，其对比结果如图2所示。由于查算表中列出的气压、湿度、温度均为离散值，因此无法由查表法查得精确的湿球温度，查表时使用了最接近的 $P=900\text{ hPa}$ 所对应的表格进行，温度、湿度也使用了最接近的离散数据代替。从图中可以看出，多数情况查表法与观测误差在 $0.5\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

工程设计中广泛使用夏季空调室外计算湿度这一参数用以计算暖通负荷。根据已有的观测记录和以上快速计算法，对宁夏境内的长期气象观测站数据统计了夏季空调室外计算湿球温度。其结果如表3，可供

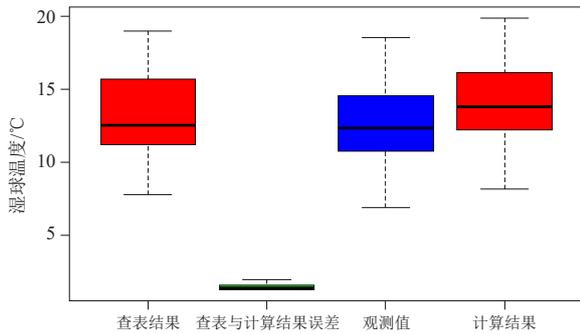


图2 2000年银川站湿球温度快速算法计算结果和观测结果误差>1℃记录(部分)与查表结果($A=0.815 \times 10^{-3}$, $P=900$ hPa)对比

Fig. 2 Comparison of records (partial) of error > 1 °C between wet bulb temperature results from rapid calculation method and observed values with the results from table look-up method ($A=0.815 \times 10^{-3}$, $P=900$ hPa) at Yinchuan Station in 2000

表3 宁夏区域各长期站夏季空调室外计算湿球温度

Table 3 Calculated summertime outdoor wet bulb temperature at long-term meteorological stations in Ningxia

站名	观测值*/°C (1971-2000年)	快速算法对应 值**/°C (1971-2000年)	快速算法计算值***/°C			
			1961-1990年	1971-2000年	1981-2010年	1991-2020年
银川	22.1	22.6	29.9	24.2	29.8	26.7
石炭井	/	/	26.1	29.2	25.7	28.6
石嘴山	21.2	22.5	32.6	31.6	24.8	29.4
惠农	21.5	22.1	26.3	23.7	30.0	32.8
贺兰	21.0	22.4	32.0	24.6	23.7	32.6
平罗	21.6	23.0	26.8	25.2	28.1	32.7
吴忠	22.2	23.2	30.0	24.5	25.2	27.9
陶乐	21.8	22.4	25.8	26.7	32.4	33.5
青铜峡	22.3	23.3	26.5	25.8	29.8	28.4
永宁	22.0	23.2	26.5	23.8	31.0	30.7
灵武	22.2	23.3	28.1	25.1	26.4	28.2
中卫	21.3	22.7	26.2	22.9	24.1	30.6
中宁	21.7	22.1	23.3	25.5	24.2	29.1
兴仁	/	/	24.9	21.1	20.9	22.4
盐池	20.1	20.6	30.2	27.8	28.6	29.4
麻黄山	/	/	25.8	21.6	29.1	30.8
海原	18.2	18.6	29.5	20.0	18.0	27.8
同心	20.7	21.1	27.0	24.3	27.1	33.4
固原	19.0	19.3	19.0	20.6	24.7	20.4
韦州	/	/	31.0	29.5	23.5	28.7
西吉	18.4	18.6	26.8	18.1	21.3	19.5
六盘山	13.9	14.9	11.8	12.2	16.9	16.9
隆德	17.4	18.3	16.2	21.1	22.6	19.7
泾源	18.3	19.3	16.3	18.5	19.9	23.4

注: *由于历史原因观测资料序列存在大量缺测,统计时按缺测处理,排序时不剔除缺测时段; **使用与湿球观测历史数据同期的温度、湿度、气压历史数据计算的结果,缺测时段不做处理; ***利用温度、湿度、气压历史数据计算的结果,缺测率<5%。

测值有差异; 3) 湿球温度观测受水的纯度、人工读数误差等多要素的影响,与真实值会有一定差异; 4) 后期纸质记录电子化也会有一定机率出现录入错误。

与遍历法结果的差异: 两种计算方法所得结果差别非常小。造成此差别的可能原因有: 1) 由于水的液态和固态物理性质不同,实际上液面和冰面的饱和水汽压在0℃附近是有一定不连续性的,液面 $A_w=8.15 \times 10^{-4}$,冰面 $A_i=7.19 \times 10^{-4}$,计算结果如下图3所示。这就使得在使用快速算法计算湿球温度时会发生跳跃现象(从实验数据来看此误差不大,最大跳跃区间<0.02℃); 2) 使用柱状干湿表导热系数时,系数A不连续,这同样会导致在0℃附近发生不连续现象(图略),如图3和图4所示,计算结果

实际设计时参考。

由表中数据可以看出,由于气候背景的变化,部分站点不同年代统计时段的夏季空调室外计算湿球温度差别较大。需要说明的是,观测数据序列中大部分有10 a以上的缺测时段,并不适宜直接作为设计依据。此外,为与已发布的参考标准^[2-3]一致,观测记录选用一日4次的定时观测。统计夏季空调室外计算湿球温度时,均使用了文献^[2-3]给出的标准方法。

2.2 计算误差分析

与观测记录的差异: 多数情景下差异很小,部分结果与观测有一定差别。差别的主要来源可能为: 1) 计算所使用的热力学导热系数A是在理想情况下测出的^[9],与实际观测设备的散热系数会有一定差异; 2) 实际观测难以避免地会出现误差,包括温度、气压、湿度,以及人工观测的湿球温度,会导致计算值与观

有可能会在冰面系数和液面系数的两个结果之间不收敛,或收敛于此区间内任意一个值。

若实际工作中需要提高计算精度,可以有以下改进方法: 1) 根据情况选用同时适合冰面与液面的观测百叶箱散热系数A值,此法可以有效避免计算值在0℃附近发生不连续现象; 2) 和纸质记录对比,并对观测数据进行高标准的质量检查,降低计算时使用的温度、气压、相对湿度误差水平; 3) 在程序中提高误差控制阈值精度,此法虽然会造成计算量加大但可以有效提高计算精度。

3 结论与讨论

1) 利用宁夏地区历史湿球温度观测记录与快速算法结果进行了对比,以银川站2000年为例,误差

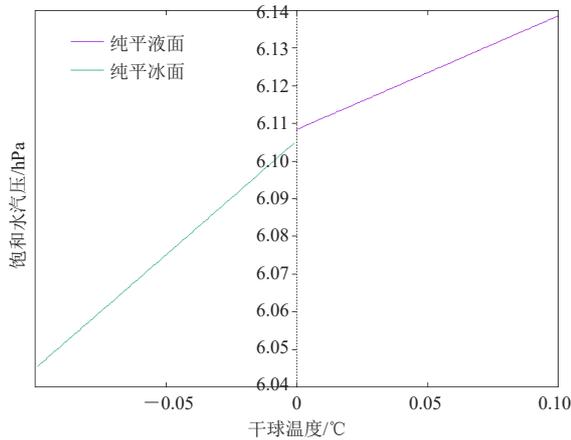
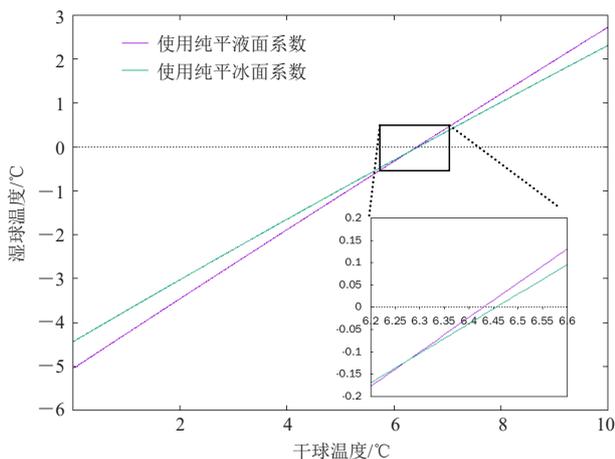


图3 冰面和液面饱和水汽压

Fig. 3 Saturated water vapor pressure of ice and liquid water surface

图4 分别采用纯平液面、冰面导热系数A计算的湿球温度
($rh=17.0\%$, $P=896.5$ hPa)Fig. 4 Calculated wet bulb temperature using water and ice thermal conductivity A ($rh=17.0\%$, $P=896.5$ hPa)

在 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内的比例占73.91%，误差在 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的占比2.97%，最大误差为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，总体误差绝对值为 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 使用相同的温度、相对湿度、气压观测记录，分别使用快速算法及遍历法计算了湿球温度，发现两者结果差别很小，通常不大于 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3) 快速算法使用迭代算法求解隐函数方程，并使用微分作为斜率计算下一个猜测值，相比于遍历法通常需要计算15000次而言，计算速度极快，多数情况下仅需要迭代3次即可满足精度要求。

4) 此方法计算结果可靠，计算速度快。当缺失湿球温度但是有温度、相对湿度、气压记录的情况下，可以取代遍历法对湿球温度数据进行快速插补计算，能够满足工程设计需求。

参考文献

- [1] 陆耀庆. 供暖通风设计手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [2] 中国有色金属协会. 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范 (GB50019—2015). 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [3] 中国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 (GB50736—2012). 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4] 朱冬生, 沈家龙, 蒋翔, 等. 湿空气对蒸发式冷凝器性能的影响. 制冷技术, 2006, 4(2): 17-22.
- [5] 袁业畅, 陈正洪. 大坂核电站拟址空气湿球温度推算. 气象, 2008, 34(11): 69-73.
- [6] 李永安, 赵堂虎. 空调用冷却塔室外气象条件的确定. 制冷, 1996, 54(1): 60-63.
- [7] 吴俊云, 王磊, 陈芝久, 等. 湿球温度与饱和焓值经验关系式. 暖通空调, 2000, 30(3): 27-29.
- [8] 刘鸣, 曾婷婷. 夏季空调室外计算湿球温度的选用问题. 暖通空调, 2015(5): 7-11.
- [9] 中国气象局. 地面观测规范第6部分: 空气温度和湿度观测 (QX/T50—2007). 北京: 气象出版社, 2007.
- [10] 国家标准局. 环境试验用相对湿度查算表 (GB/T6999—2010). 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [11] 赵永胜, 刘德平, 胡长权. 无资料地区湿球温度计算方法研究. 电力勘测设计, 2009, 10(5): 32-35.
- [12] 程智, 吴必文, 朱保林, 等. 湿球温度循环迭代算法及其应用. 气象, 2011, 37(1): 112-115.
- [13] 魏华兵, 郭江峰. 自动气象站湿球温度快速计算方法. 气象, 2011, 37(8): 1038-1041.
- [14] 徐正, 张晴, 徐妍. 湿球温度计算方法研究. 河北工业科技, 2018, 35(2): 123-127.
- [15] 富高四郎, 李任承. 由水汽压计算露点温度的方法. 沙漠与绿洲气象, 1993, (3): 56-60.
- [16] 张志富, 希爽. 关于露点温度计算的探讨. 干旱区研究, 2011, 28(2): 275-281.
- [17] Sargent G P, 王正业. 从干球和湿球温度表算水汽压露点和相对湿度. 气象科技, 1981, 14(4): 51-55.
- [18] 张磊, 孟庆林, 赵立华, 等. 室外热环境评价指标湿球黑球温度简化计算方法. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(5): 108-111.
- [19] 许馨尹, 于军琪, 李红莲, 等. 露点温度计算方法对比研究. 气象与环境学报, 2016, 32(3): 107-111.
- [20] 王海军. 两种湿球温度估计方法比较及误差分析. 气象, 2011, 37(4): 497-502.
- [21] 蔡子颖, 韩素芹, 张长春, 等. 室外热环境指标的简化计算和应用研究. 气象, 2011, 37(6): 701-706.
- [22] 凌光坤. 干湿球温度快速估算相对湿度. 广东气象, 2002, (3): 42-42.
- [23] 司鹏, 罗传军, 姜罕盛, 等. 天津地面相对湿度资料的非均一性检验及订正. 气象, 2018, 44(10): 1332-1341.
- [24] 程起范. 空气湿度及其测量方法. 辽宁气象, 1996, 12(4): 36-36.
- [25] 王士杰. 采用ASHRAE推荐公式的湿空气热力学性质的计算程序. 制冷技术, 1997, (2): 20-22.
- [26] 罗丽, 王晓蕾, 余鹏. 饱和水汽压计算公式的比较研究. 气象水文海洋仪器, 2003, (4): 24-27.
- [27] 徐士良. Fortran常用算法程序集 (第二版). 北京: 清华大学出版社, 1995.