

程智, 吴必文, 朱保林, 等. 湿球温度循环迭代算法及其应用[J]. 气象, 2011, 37(1): 112-115.

# 湿球温度循环迭代算法及其应用<sup>\*</sup>

程 智<sup>1</sup> 吴必文<sup>1</sup> 朱保林<sup>2</sup> 郭秀云<sup>1</sup>

1 安徽省气候中心, 合肥 230031

2 云南省气象科技服务中心, 昆明 650034

**提 要:** 许多大型能源项目的前期可行性论证工作都必须计算干湿球温度的设计参数, 但从 2001 年开始, 按照中国气象局的要求, 安徽省各台站陆续将干湿球温度表更换为湿敏电容传感器, 至 2007 年, 所有台站的自动观测设备安装完毕。新的自动观测仪器对湿球温度不再进行观测。为了解决缺少资料的问题, 设计了一种计算湿球温度的循环迭代算法, 并把结果数据与查表计算的结果相比较, 误差小于 0.1 °C 的占 92.52%, 小于 0.2 °C 的占 99.49%, 结果可靠, 与传统查表方法相比, 具有方便快捷的特点, 适合作为补充历史湿球温度序列的方法, 满足了气候应用服务的需要, 可以在电站设计标准计算上得到广泛的应用, 也可以作为地面历史资料审核程序的有益补充。

**关键词:** 湿球温度, 误差分析, 迭代算法

## Wet-Bulb Temperature Looping Iterative Scheme and Its Application

CHENG Zhi<sup>1</sup> WU Biwen<sup>1</sup> ZHU Baolin<sup>2</sup> GUO Xiuyun<sup>1</sup>

1 Anhui Climate Center, Hefei 230031

2 Meteorological Science and Technology Service Center of Yunnan, Kunming 650034

**Abstract:** Many climate feasibility demonstration studies of major energy projects have to involve the designed parameters of dry or wet bulb temperature, but since 2001, according to the request of the China Meteorological Administration, observation stations of Anhui begin to change the observation apparatus to humidity sensors. The new apparatus does not observe wet-bulb temperature. To solve this problem about data shortage, we have designed a looping iterative scheme to compute wet-bulb temperature and compared the calculated results with data from humidity table. The comparison results show that the errors less than 0.1 °C are within 92.84 percent, the errors less than 0.2 °C are within 99.80 percent. The method is reliable and is more convenient and fast comparing with the traditional method. Thus it is suitable for becoming the solution of complement wet bulb data series, the scheme meets the requirement of climate feasibility demonstration work and can be widely used in power station designing, also it can be a helpful complementarity for ground historical data checking programs.

**Key words:** wet bulb temperature, error analysis, looping iterative scheme

## 引 言

湿球温度是指同等焓值空气状态下, 空气中水蒸汽达到饱和时的空气温度, 它是标定空气湿度的

一种手段, 将其与干球温度相结合, 即可算出空气中的相对湿度。早期地面气象台站利用干湿球温度表来观测湿球温度, 即用两支同样的玻璃液体温度表, 一支直接测量温度, 另一支在其球部包脱脂纱布并蘸蒸馏水<sup>[1-4]</sup>。

\* 安徽省气象局《安徽省气象数据资源建设与共享服务》(2005DKA31700-06-22)资助  
2009 年 12 月 14 日收稿; 2010 年 5 月 31 日收修定稿  
第一作者: 程智, 气象资料应用和影响评估研究. Email: alexclimate@sina.com.cn

随着我国能源建设的不断发展,许多电厂最终热阱设计基准的制定必须考虑一定保证率下的干湿球温度,即通过一定的统计方法计算湿球温度累积频率分布曲线<sup>[5-7]</sup>,这就引起了资料方面的困难,因为从 2001 年开始,按照中国气象局推广自动观测设备的要求<sup>[8-9]</sup>,安徽省各气象台站陆续将干湿球温度表更换为湿敏电容湿度传感器,至 2007 年,所有台站的自动观测设备安装完毕。新的自动观测仪器只观测相对湿度,而不再观测湿球温度。由于资料缺乏,计算出来的湿球温度累积频率曲线就有了很大的误差,考虑到气候变化的影响,采用旧资料和规范的结果势必会影响资料的准确性,影响电站设计参数的准确性和安全性。

传统的补充湿球温度数据的方法是查取《湿度查算表》<sup>[10]</sup>,但由于资料庞大,效率很低,因此势必要求一种简单可靠的计算方法。但相关的公式侧重于利用湿球温度来计算相对湿度,这也是由观测方式造成的。以下将利用计算机循环迭代的方式,寻求一种计算湿球温度的新算法,最终得到合理的湿球温度取值。

## 1 算法说明

根据干湿表公式<sup>[9]</sup>,空气的水汽压  $e$ (hPa)为:

$$e = e_{tw} - AP(t - t_w) \quad (1)$$

式中  $e$  为水汽压(hPa),  $e_{tw}$  为湿球温度  $t_w$  所对应的纯水平液面的饱和水汽压(hPa)(当湿球结冰时,即为纯水平冰面的饱和水汽压),  $A$  为干湿表系数,取  $8.15 \times 10^{-4}$ ,  $P$  为本站气压(hPa),  $t$  为干球温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_w$  为湿球温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

可以看出,  $t_w$  是  $e, t, p, e_{tw}$  的函数,  $e, t, p$  为观测值,但  $e_{tw}$  为计算值,依赖  $t_w$  变化,需通过世界气象组织推荐的戈夫-帕雷奇(Goff-Gratch)<sup>[12-13]</sup>公式来计算,即:

(1) 对于纯水平液面饱和水汽压计算公式

$$\begin{aligned} \log E_w = & 10.79574(1 - T_1/T) - 5.02800 \log(T/T_1) + \\ & 1.50475 \times 10^{-4} [1 - 10^{-8.2969(T/T_1-1)}] + \\ & 0.42873 \times 10^{-3} [10^{4.76955(1-T_1/T)} - 1] + \\ & 0.78614 \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $E_w$  为纯水平液面饱和水汽压,  $T_1 = 273.16$ ;  $T = 273.15 + t$   $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 对于纯水平冰面饱和水汽压的计算公式

$$\log E_i = -9.09685(T_1/T - 1) - 3.56654 \log(T_1/T) +$$

$$0.87682(1 - T/T_1) + 0.78614 \quad (3)$$

由式(2)、(3)可知  $t_w$  是  $e_w$  的函数,即  $t_w = f(e_{tw})$ ,但若要与式(1)联立,必须推出其反函数  $e_{tw} = f^{-1}(t_w)$ ,从式(2)、(3)很难得出解析解。因此这种方案不可行。

为此,设计一种新的计算方法,产生一组湿球温度  $t_w$  的估计值序列  $A\{t'_w\}$ ,即:

$$\begin{cases} A\{t'_w\} = \{t'_w(0), t'_w(1), \dots, t'_w(n)\} \\ t'_w(i+1) = t'_w(i) + 0.01 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $t'_w(0) = t_w - 15$ ,  $t'_w(n) = t_w$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ ,其含义如下:

(1) 从干球温度以下  $15$   $^{\circ}\text{C}$  的范围内选取湿球温度的估计值,每次将湿球温度估计值递增  $0.01$   $^{\circ}\text{C}$  (根据实际经验,  $15$   $^{\circ}\text{C}$  的范围是足够宽的),因此可以得到  $n+1$  个估计值,  $n=1500$ ;

(2) 将  $n+1$  个估计值依次代入式(2)、(3)算出  $e'_{tw}$ ,再代入式(1)中可以很容易得出  $e$  的计算值  $e'$ ,因为  $e$  为已知真实值,两者比较,可以得到计算误差  $\sigma = |e' - e|$ ;

(3) 对序列  $A\{t'_w\}$  算出的  $\sigma$  结果逐步逼近,在误差序列  $\{\sigma(0), \sigma(1), \dots, \sigma(n)\}$  中选取最小的;

(4)  $\sigma_{\min}$  对应的  $t'_{w\min}$  视为合理的  $t_w$  估计值,至此便可得出湿球温度的值,可以将其用来补充原序列,再利用计算机循环处理下个时段的数据,如此便可生成各时段的湿球温度序列。这一算法的思想即利用假定的湿球温度代入公式,利用一系列要素的相互关系公式,将误差逐步缩小,一直到生成最合理的相对湿度取值为止。

## 2 误差分析

为了检验上述算法的可行性,利用安徽省 8 个代表气象站(站名见表 2)的资料来进行验证,这 8 个站均匀地分布于安徽省淮北、江淮、沿江和江南 4 个气候区划,且具有较长的湿球温度观测序列,序列最长的芜湖站达到了 41 年,序列最短的六安站也有 33 年。

利用上述算法得到湿球温度  $t_w$  的计算值,并与观测值相比较,表 1 为其结果分析,由表可见,在参与比较的 426322 个湿球温度数据中,有 394438 个计算值与原始值的误差在  $0.1$   $^{\circ}\text{C}$  范围内,占样本比例的 92.52%,而 424160 个即 99.49% 的样本误差在  $0.2$   $^{\circ}\text{C}$  范围内,表明这一计算方法得出的结果十

分可靠,完全满足工程的需要,误差较大达到 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的样本仅有23个,平均每个站约2.9个,约占

$0.01\%$ ,属于小样本。

为了找出这些个例中湿球温度观测值与计算值

表1  $|t'_w - t_w|$ 在一定范围内的出现次数和百分比

Table 1 Sample numbers and percentages of  $|t'_w - t_w|$  in a given bound

	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8以上
样本数/个	394438	29722	1141	630	271	48	32	17	23
百分比/%	92.52	6.97	0.27	0.15	0.06	0.01	0.01	0.00	0.01

产生较大差异的原因,查阅了地面气象观测原始纸质报表“气簿-1”,如表2所示,这三个时次的信息化文件都有与“气簿-1”不一致的问题。以阜阳站1961年5月11日02时的记录为例,信息化资料中的湿球温度记录为 $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而翻阅原始报表后可以看出应为 $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;再如芜湖站2001年4月26日02时的记录,信息化资料记载湿球温度为 $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而“气簿-1”中对该时次的湿球温度没有记录。其他个

例也都存在类似不一致的问题,这就表明造成较大差异的原因是从原始报表录入到信息化文件的过程中有误,也间接地显示出该算法的结果是可信的。

因此,该算法也可用于检验台站历史记录的可靠性。在早期地面气象观测档案信息化的过程中,因录入错误,会造成资料的误差。上面的分析表明,该算法对这些错误有一定的显示作用,可以作为历史资料审核程序的有益补充。

表2 上述个例中信息化文件资料和“气簿-1”资料的比较,若两个来源的资料一致,则只给一个值,若要素存在差异,用括号内的字表示“气簿-1”中的资料

Table 2 Comparison of informational documents with “Meteorological Book-1” in the examples mentioned above; if they are the same, then one value is given; if they are different, then the value in parentheses and in bold represents the record from “Meteorological Book-1”

台站	时间	干球/ $^{\circ}\text{C}$	湿球/ $^{\circ}\text{C}$	气压/hPa	水汽压/hPa	相对湿度/%
阜阳	1961年5月11日2时	22.2	11.5(21.5)	1001.7	25.1	94
蚌埠	1953年9月16日8时	15.0(20.6)	13.8(17.2)	1015.0(1015.6)	21.6(12.9)	88(71)
蚌埠	1983年4月9日14时	17.3	15.4	1004.0	10.0(16.0)	81
六安	1958年7月11日2时	28.3	26.7	997.0	38.8(33.8)	88
六安	1960年12月5日8时	1.4	-0.7(0.7)	1028.9	5.9	87
六安	1981年3月21日14时	19.9	11.5	1005.5	9.9(6.9)	30
合肥	1985年1月15日8时	-0.8	-0.4(-2.4)	1019.0	4.1	71
合肥	1986年8月16日2时	26.2	26.6(25.6)	1003.4	32.4	95
安庆	1960年7月25日14时	31.6	25.2(26.5)	999.7	30.6	66
安庆	1990年7月3日2时	23.2	22.1	1004.3	22.6(25.7)	90
芜湖	1983年11月28日20时	9.0	9.0(7.0)	1029.4	8.4	73
芜湖	1985年12月17日20时	1.0	0.7(-0.7)	1024.3	4.7	71
芜湖	1986年11月5日8时	10.1	0.0(无值)	1019.7	10.0	81
芜湖	1991年9月8日20时	20.2	28.5(18.5)	1008.3	20.0	84
芜湖	1993年12月18日8时	-0.9	-13.8(-1.3)	1034.1	5.1	90
芜湖	1994年1月1日8时	-1.0	1.9(-1.9)	1024.1	4.6	81
芜湖	2001年4月26日2时	12.3	0.0(无值)	1016.9	9.3	65
泾县	1959年12月28日14时	10.5	7.7	1022.7	6.6(8.3)	65
泾县	1960年7月31日14时	34.8	33.5	999.7	0.8(50.8)	91
泾县	1991年11月16日20时	8.4	2.2(7.2)	1023.0	9.2	84
泾县	1991年12月23日20时	7.2	2.0(6.2)	1021.7	8.7	85
屯溪	1961年1月13日20时	0.3	-2.4(-1.4)	1014.8	4.2	67
屯溪	1962年1月11日20时	6.7	3.7(5.7)	1004.1	8.4	85

### 3 结论

为了得到湿球温度的序列,设计了一种新的计算方法,在一定范围内产生 $t'_w$ 序列,利用水汽压和饱和

水汽压计算公式,计算出水汽压的估计值 $e'$ ,得到水汽压估计值与真实值误差最小时所对应 $t'_{wmin}$ 作为湿球温度的估计值 $t'_w$ ,并把结果数据与查表计算的结果相比较,误差很小,小于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的占92.52%,小于 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的占99.49%,结果可靠,与传统查表方法相

比,具有方便快捷的特点,适合作为补充历史湿球温度序列的方法,满足了气候应用服务工作的要求,可以在气候可行性论证上得到广泛的应用,也可以作为地面历史资料审核程序的有益补充。

## 参考文献

- [1] 李宜章. 湿球溶冰应注意的两个问题[J]. 气象,1995,21(1): 57-57.
- [2] 谢华生. 谈谈“湿球”[J]. 气象,1978,4(1):40-40.
- [3] 柯金. 对“湿球温度记录处理规定”之我见[J]. 气象,1989,15(6):封二.
- [4] 冯洪君. 干湿球同值的缘由[J]. 气象,1991,17(4):封三.
- [5] 国家核安全局. HAD101/10 核电厂厂址选择的极端气象事件(不包括热带气旋)[G]. 核安全导则汇编(上册),北京:中国法制出版社,1998:739-741.
- [6] 国家核安全局. HAD102/09 核电厂最终热阱及其直接有关的输热系统[G]. 核安全导则汇编(下册),北京:中国法制出版社,1998:1110-1112.
- [7] 袁业畅,陈正洪. 大坂核电站拟址空气湿球温度推算[J]. 气象,2008,34(11):69-73.
- [8] 吕文华,边泽强. 地面气象观测站自动检测系统研究[J]. 气象,2009,35(2):106-110.
- [9] 苑跃,赵晓莉,王小兰,等. 相对湿度自动与人工观测的差异分析[J]. 气象,2010,36(2):102-108.
- [10] 湿度查算表[G]. 北京:气象出版社,1980.
- [11] 地面气象观测规范[G]. 北京:气象出版社,2004.
- [12] Goff J A, Gratch S. Low-pressure properties of water from-160 to 212 F[G]. in Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, pp 95-122, presented at the 52nd annual meeting of the American society of heating and ventilating engineers, New York, 1946.
- [13] Goff J A. Saturation pressure of water on the new Kelvin temperature scale[G]. Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, pp 347-354, presented at the semi-annual meeting of the American society of heating and ventilating engineers, Murray Bay, Que. Canada, 1957.