

文章编号:1005-0523(2016)01-0100-07

室内敞开水面水蒸发量计算公式探讨

罗新梅,盛家康

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:回顾国内外常见的室内敞开水面水蒸发量计算公式,利用国内外已发表的实测数据,将各公式的计算值与实测值进行对比,分别找出与实测值较为接近的无扰动和有扰动时的室内敞开水面水蒸发量计算公式。比对国内室内敞开水面设计计算时常用的计算表格,并利用推荐公式在水温 $<40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、水面风速为 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下计算得出单位蒸发率表格,为工程设计提供参考。

关键词:室内敞开水面;水蒸发量;经验公式

中图分类号:TU83 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.01.015

在一些建筑物里有大面积敞开水面,室内湿负荷较大^[1]。这些水面有的是静止、无扰动的,比如说室内水池景观,也有的是受扰动的,比如说水帘景观,游泳池等。这些水面的水蒸发量对空调设备的选型以及游泳池的加热设备选型至关重要。蒸发量计算值过小会造成空调设备选型过小,无法满足室内除湿要求,使得室内人员产生不舒适感,并可能引起建筑物内表面结露甚至腐蚀;蒸发量计算值过大则会造成空调设备选型过大,带来初投资和能耗增大等问题。同时蒸发量计算也是游泳池加热设备选型的重要基础。选型过大会造成初投资过大,选型过小则会造成水加热时间过长、不能满足游泳池间歇运行等问题。

目前国内外关于室内敞开水面水蒸发量的计算公式较多,这些计算公式多为经验公式,对于使用哪个公式得到的计算结果较为精确尚未得到公认。由于现行的2009版《全国民用建筑工程设计技术措施》(暖通空调·动力)中未提供散湿量计算公式,国内设计师在设计时多采用2003版《全国民用建筑工程设计技术措施》(暖通空调·动力)^[2]中的公式或计算表格及《实用供热空调设计手册》^[3]中的表格,但两个表格的数据相差较大,使得设计师在选用时感到无所适从。本文结合实验测试数据,将各公式计算结果与实测蒸发量结果进行比对,分别找出了与实测值较为接近的无扰动和有扰动时的室内敞开水面水蒸发量计算公式,通过计算得到单位蒸发率表格,为设计师进行设计计算提供参考。

1 室内敞开水面水蒸发量计算公式

国外学者Carrier提出的室内敞开水面水蒸发量计算公式^[4],在国外应用较为广泛,该公式基于平静水面的游泳池实验数据,于1982年被ASHRAE Handbook录入,并作为计算室内敞开水面水蒸发量的推荐公式

$$E=Am(89+78.2v)\frac{(P_w-P_r)}{Y}\times 3.6 \quad (1)$$

收稿日期:2015-04-19

作者简介:罗新梅(1967—),男,副教授,研究方向为空调系统节能与自动控制。

式中: E 为室内敞开水面水蒸发量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; A 为室内敞开水面面积, m^2 ; v 为蒸发表面空气流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; P_w 为相应于水表面温度下的饱和空气的水蒸气分压力, kPa ; P_r 为室内空气温度对应的水蒸气分压力, kPa ; Y 为水温所对应的汽化潜热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; m 为人员修正系数, 学校或公共泳池时 m 取 1, 居民自用泳池取 0.5, ASHRAE Handbook 中给出了详细取值^[5]。

目前国内设计师采用较多的是 2003 版《全国民用建筑工程设计技术措施》(暖通空调·动力)中的蒸发量计算公式

$$E = A (0.000\ 17 + 0.000\ 13\ v) (P_w - P_r) \frac{B}{B'} \times 10^3 \quad (2)$$

式中: 0.000 17 实际上是对应于室内空气温度 15~30 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 水温低于 30 $^{\circ}\text{C}$ 的水蒸气扩散系数; B 为标准大气压, 101.325 kPa ; B' 为当地大气压, 其他水温的水蒸气扩散系数取值详见 2003 版《全国民用建筑工程设计技术措施》(暖通空调·动力)。

《游泳池和水上游乐池给水排水设计规程》(CECS 14:2002) 中也给出了室内敞开水面水蒸发量的计算公式^[6], 该公式在国内也有较为广泛的应用, 公式如下

$$E = \frac{1}{\beta} \rho \cdot (0.017\ 4\ v + 0.022\ 9) (P_w - P_r) \frac{B}{B'} \quad (3)$$

式中: β 为压力换算系数, 0.133 32 kPa ; ρ 为水的密度, $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

除了上文提及的公式外, 国内外常见的室内敞开水面水蒸发量计算公式见表 1。

表 1 蒸发量计算公式汇总
Tab.1 Equations for water evaporation

公式	说明
$E = 3.6 A K (P_w - P_r)$	(4) ^[7] $K = 0.02$
$\left. \begin{aligned} E &= 3.6 A m (a + b v + c v^2) (P_w - P_r)^d \\ m &= 1.04 + 0.043\ n \quad 0 < n \leq 16 \\ m &= 1.728 \quad n > 16 \\ m &= 1 \quad n = 0 \end{aligned} \right\}$	$a = 2.06 \times 10^{-2}; b = 2.901 \times 10^{-2}; c = 6.92 \times 10^{-3};$ $d = 1.22 - 0.19 v + 0.038\ v^2;$ n 为使用人员密度, $\text{人} \cdot (100\ \text{m}^2)^{-1}$
$\left. \begin{aligned} E_0 &= 3.6 A (65 + 66.4\ v) (P_w - P_r) / Y \\ m &= (1.04 + 0.043\ n) E_0 \quad 0 < n \leq 16 \\ m &= 1.728 E_0 \quad 16 < n \end{aligned} \right\}$	(6) ^[9] E_0 为无扰动时室内敞开水面水蒸发量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
$E = 7.5 A (0.0152\ v + 0.0178) (P_w - P_r)$	(7) ^[10]
$E = A C \rho_w (\rho_r - \rho_w)^{\frac{1}{3}} (W_w - W_r)$	(8) ^[11] $\rho_r - \rho > 0.02$ 时, $C = 35$; $\rho_r - \rho \leq 0.02$ 时, $C = 40$
$\left. \begin{aligned} E &= A \left(0.113 - \frac{0.000079}{F_u} + 0.059 (P_w - P_r) \right) \quad F_u \geq 0.1 \\ E &= (1.3\ F_u + 1.2) E_0 \quad F_u < 0.1 \\ F_u &= \frac{4.5}{A/N} \end{aligned} \right\}$	(9) ^[12] N 为使用人数; F_0 为泳池利用系数

为统一单位, 本文中公式均作了单位换算处理, 表 1 中 A 为室内敞开水面面积, m^2 。公式(8)中, ρ_w 为池水温度对应的空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_r 为室内空气温度对应的空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; W_w 为水面温度对应的湿空气含

湿量, kg/kg_{da} ; W_r 为室内空气温度对应的湿空气含湿量, kg/kg_{da} 。其他符号单位均同前。

在有扰动时,如室内游泳池有人游泳时,游泳水面出现的水花和波浪,水花飞溅润湿的游泳池周边地面,以及游泳者湿润的皮肤都会增加蒸发面积,使得蒸发量加大,上文所给出的公式中,式(2)、式(3)、式(4)、式(7),以及式(8)均未考虑人员活动的影响,因此上述几式不适用于计算有扰动时室内敞开水面水蒸发量的计算。

除公式(8)外,其他公式均涉及 $P_w - P_r$ 项,准确计算 $P_w - P_r$ 项直接影响到计算结果的准确性。本文根据 ASHRAE Handbook 中的湿空气状态参数计算公式^[13]计算 $P_w - P_r$ 项,公式如下

$$\ln P_w = f(T_w) \tag{10}$$

$$\ln P_r = f(T_r) \tag{11}$$

$$P_r = P_r' \varphi \tag{12}$$

其中: P_r' 项为室内空气温度对应的饱和水蒸气分压力; φ 项为室内相对湿度,具体公式详见文献[13]。实验测试时,只需测得室内空气干球温度、室内相对湿度、水表面温度,即可求出 $P_w - P_r$ 项,将 $P_w - P_r$ 项代入式(1)~式(9)中即可得出室内敞开水面水蒸发量的计算值。

2 无扰动时室内敞开水面水蒸发量计算公式比较

利用文献[9]以及文献[11]中的实验数据来考察上文所述公式计算无扰动时室内敞开水面水蒸发量的准确性。所用实验数据来源既包括实验室测试,也包括无扰动游泳池现场测试,其中大部分为现场测试数据。实验室测试是通过观察水平面变化得到蒸发量,游泳池现场测试则是通过空调盘管中的冷凝水量计算蒸发量。由于实测数据多为现场测试数据,如通过空调盘管中的冷凝水量计算蒸发量而非直接测得蒸发量,这也使得大多实测数据与公式计算结果存在一定误差。实验数据如表 2 所示。

表 2 无扰动时游泳池水蒸发量实验数据
Tab.2 Experimental data of undisturbed swimming pool water evaporation

编号	水温/ $^{\circ}\text{C}$	空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	实测蒸发率/ $(\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1})$	出处
1	94.20	24.70	98	21.070	Boelter(1946)
2	16.50	17.20	78	0.040	Rohwer(1931)
3	13.90	21.70	53	0.018	Sharpley(1938)
4	33.40	21.70	53	0.402	
5	30.10	34.60	68	0.154	Biasin Sharpley(1974)
6	28.50	31.00	55	0.235	Sprenger(1968)
7	25.00	20.00	50	0.168	Tang et al(1993)
8	23.00	25.50	71	0.035	Reeker(1978)
9	28.30	27.80	73	0.246	Smith et al(1993)
10	25.00	27.50	28	0.175	Doering(1979)
11	32.20	27.80	60	0.171	Kiesling(1989)
12	28.30	27.80	72	0.098	Smith C C(1998)
13	28.30	27.80	73	0.117	Smith C C(1998)
14	28.30	25.60	57	0.190	Smith C C(1998)
15	28.30	22.80	53	0.245	Smith C C(1998)
16	28.30	21.70	51	0.269	Smith C C(1998)
17	28.10	28.20	66	0.162	Smith C C(1998)

利用表 2 数据,将室内空气干球温度、室内相对湿度、水表面温度代入式(1)~式(9)并与表中实验测试蒸发率列对比,可得各式计算相对误差如表 3,其中相对误差=(计算值-实测值)/实测值 $\times$ 100%。

表 3 无扰动室内敞开水面水蒸发量计算相对误差

Tab.3 Relative error on calculating evaporation of undisturbed indoor open water

%

编号	式(1)	式(2)	式(3)	式(4)	式(5)	式(6)	式(7)	式(8)
1	-47.24	-36.21	-35.52	-72.97	-27.18	-49.66	-37.05	140.52
2	12.72	47.19	48.79	-37.63	-49.12	7.55	45.26	-93.41
3	52.92	100.17	102.35	-15.18	-37.89	45.91	97.56	198.44
4	24.11	59.45	61.18	-32.44	-6.81	18.42	57.36	-63.54
5	-54.85	-41.81	-41.17	-75.34	-77.94	-56.92	-42.57	-54.95
6	175.68	255.86	259.73	50.79	68.95	163.04	251.21	-73.06
7	56.16	102.27	104.47	-14.29	2.82	49.01	99.62	-79.44
8	84.19	139.03	141.63	1.28	-10.74	75.75	135.91	-45.03
9	-40.09	-22.65	-21.81	-67.22	-65.39	-42.84	-23.66	-98.86
10	60.48	107.85	110.11	-11.93	7.25	53.12	105.14	-95.44
11	95.09	150.94	153.66	6.33	34.79	86.15	147.66	-74.18
12	56.17	101.63	103.82	-14.57	-9.13	49.01	98.99	-97.18
13	25.62	62.18	63.95	-31.28	-27.43	19.86	60.06	-97.62
14	36.68	76.46	78.38	-25.23	-10.53	30.41	74.16	-89.96
15	27.93	65.17	66.97	-30.01	-12.78	22.07	63.02	-80.15
16	23.71	59.72	61.46	-32.32	-14.54	18.04	57.64	-78.48
17	3.81	34.05	35.51	-43.20	-38.24	-0.95	32.30	-99.82

从表 3 可以看出,式(4)和式(5)相对误差较小,其计算结果较接近实验结果。目前国内设计师较为广泛采用的式(2)偏差较大,大部分相对误差在 40%以上,其中第 6 组误差达到 255.86%,式(3)的最大误差达到 259.73%。另从表 3 中可以看出,公式(8)整体误差偏大,这可能是因为公式所涉及的密度差项和含湿量差项与实验所在地当地大气压力值有关造成的,而各实验未给出具体当地大气压值,所以该式的准确性有待进一步验证。

3 有扰动时室内敞开水面水蒸发量计算公式比较

由上文分析,水面有扰动时,如室内游泳池有人游泳时,游泳活动会使得水面出现水花和波浪,飞溅的水花会润湿游泳池周围地面,以及游泳者湿润的皮肤都会增加蒸发面积,从而使得有人游泳时的水蒸气蒸发量要大于无人游泳时的蒸发量,因此不能直接使用无扰动时的蒸发量计算公式来计算有扰动的游泳池蒸发量,必须考虑人员活动的影响。表 4 给出了有扰动时泳池蒸发量的实验测试数据^[14],泳池面积为 525 m²。

表 4 有扰动时游泳池蒸发量实验数据
Tab.4 Experimental data of disturbed swimming pool water evaporation

编号	使用人数/人	水温/℃	空气温度/℃	相对湿度/%	实测蒸发率/(kg·(m ² ·h) ⁻¹)	人员密度/人·(100 m ²) ⁻¹	v/(m·s ⁻¹)
1	32.025	28.10	27.60	63.70	0.224	6.10	0.120
2	19.425	28.00	28.20	63.60	0.239	3.70	0.130
3	30.450	28.10	28.40	64.40	0.156	5.80	0.090
4	15.750	28.00	28.40	66.80	0.146	3.00	0.100
5	39.375	28.00	28.30	70.50	0.163	7.50	0.130

考虑人员活动因素的公式有式(1)、式(5)、式(6),及式(9)。各式计算相对误差如表 5。

表 5 有扰动室内敞开水面水蒸发量计算相对误差
Tab.5 Relative error on calculating evaporation of disturbed indoor open water %

编号	式(1)	式(5)	式(6)	式(9)	式(4)	式(5')
1	7.86	-20.84	-8.86	-11.32	-53.29	-39.22
2	-6.21	-36.77	-26.37	-19.64	-59.38	-47.27
3	39.58	-4.20	13.59	21.68	-39.56	-25.70
4	36.66	-15.47	1.77	25.75	-40.82	-27.69
5	8.72	-20.42	-3.01	7.58	-52.91	-41.59

由表 5 可以看出,各式相对误差尚在可接受的范围内,其中式(6)相对误差最小达到 1.77%。表 5 中还可以看出,无扰动时的室内敞开水面水蒸发量计算公式不适用于计算有扰动用的情况,如式(4)相对误差较大;表 5 中式(5')列为不乘以人员活动系数 m 时的计算结果,相对误差明显大于式(5)列。

4 文献[2]和文献[3]中室内敞开水面单位蒸发量计算表格比对

在进行室内敞开水面水蒸发量计算时,常采用文献[2]和文献[3]中的敞开水表面的单位蒸发率表格,表格针对水面风速 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的特定热湿环境给出,其中文献[3]中的表格还给出了不同水温下的水蒸气扩散系数。文献[2]和文献[3]中的两个表格数据相差较大,不尽一致,使得设计师在选用计算表格时无所适从。笔者经过核算后发现,文献[2]中的室内敞开水表面单位蒸发量表格正是利用式(2)在风速 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下结合不同的水蒸气扩散系数计算而得,根据本文前文所述,式(2)在计算无扰动时的室内敞开水面水蒸发量存在较大偏差。在进行游泳池设计计算时,水温通常设定在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,本文利用式(4)在水面风速 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水温 $<40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下进行蒸发量计算,得出如表 6。

由于缺乏水温 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的实验数据,且根据表 3,在水温 $94.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下式(4)的误差达到了 -72.97% ,式(4)在水温 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的情况下计算结果的准确性尚无法确定。因此表 6 仅利用式(4)针对水面风速 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水温 $<40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况对室内敞开水面单位蒸发量进行了计算。

对比文献[2]和文献[3]中的表格,表 6 数据与文献[3]中的表格更为接近。

5 结论与建议

利用表1 和表 3 的实验数据进行比对,建议在计算无扰动室内敞开水面水蒸发量时采用式(4)或式(5),式(2)及式(3)偏差较大,建议不采用。计算有扰动室内敞开水面水蒸发量建议采用式(6)。

表 6 水面风速 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水温 $<40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时泳池单位蒸发量

Tab.6 Swimming pool unit evaporation under the condition of $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ surface wind speed and water temperature below $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

水温/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	下列室温时敞开水表面单位蒸发量/ $(\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1})$					
		18 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$	22 $^{\circ}\text{C}$	24 $^{\circ}\text{C}$	26 $^{\circ}\text{C}$	28 $^{\circ}\text{C}$
20	40	0.175	0.160	0.144	0.126	0.107	0.086
	45	0.161	0.145	0.127	0.107	0.086	0.064
	50	0.147	0.129	0.110	0.089	0.066	0.042
	55	0.134	0.114	0.093	0.071	0.047	0.022
	60	0.120	0.100	0.077	0.053	0.029	0.005
	65	0.107	0.085	0.062	0.037	0.012	-0.101
	70	0.095	0.071	0.047	0.021	-0.001	-0.104
30	40	0.452	0.435	0.417	0.396	0.373	0.348
	45	0.436	0.417	0.396	0.373	0.348	0.320
	50	0.420	0.400	0.377	0.351	0.323	0.293
	55	0.405	0.382	0.357	0.329	0.299	0.265
	60	0.389	0.364	0.337	0.307	0.274	0.239
	65	0.374	0.347	0.318	0.285	0.250	0.212
	70	0.358	0.330	0.298	0.264	0.227	0.186
40	40	0.966	0.947	0.926	0.903	0.877	0.849
	45	0.948	0.927	0.904	0.878	0.849	0.817
	50	0.931	0.907	0.881	0.853	0.821	0.786
	55	0.913	0.887	0.859	0.827	0.793	0.754
	60	0.896	0.868	0.837	0.802	0.765	0.723
	65	0.878	0.848	0.814	0.777	0.737	0.692
	70	0.861	0.828	0.792	0.753	0.709	0.661

文献[2]和文献[3]表格中的单位蒸发量数据出入较大,本文利用式(4)针对水面风速 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水温 $<40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况对室内敞开水面单位蒸发量进行计算,所得表格与文献[3]中表格更为接近。式(4)在水温 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的准确性尚未确定,建议利用水温 $>40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的实验数据。

参考文献:

[1] 罗新梅. 空调送风的两种干燥冷却方式[J]. 华东交通大学学报,2001,18(4):28-29.
[2] 住房和城乡建设部工程质量安全监督司. 中国建筑标准研究院.全国民用建筑工程设计技术措施 暖通空调·动力[M]. 北京:中国计划出版社,2003:106-107.
[3] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2008:1559-1560.
[4] CARRIER W H. The temperature of evaporation[J]. ASHRAE Transactions,1918(24):25-50.
[5] ASHRAE. ASHRAE application handbook (SI)[M]. Atlanta: ASHRAE Inc,2011.

- [6] 中国建筑设计研究院. CECS 14:2002 游泳池和水上游乐池给水排水设计规程[S]. 北京:中国计划出版社,2003:34-35.
- [7] 于凌燕,刘传聚,林亚宏. 室内游泳池水分蒸发量的实测与分析[J]. 暖通空调,2006,36(9):68-71.
- [8] PAUKEN M T, FARLEY B, JETER S M, et al. An experimental investigation of water evaporation into low-velocity air currents[J]. ASHRAE Transactions, 1995, 101(1):90-96.
- [9] SMITH C C, LOF G O G, JONES R W. Rates of evaporation from swimming pools in active use[J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104(1):514-523.
- [10] 邹月琴,贺绮华. 体育建筑空调设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1993:85-86.
- [11] SHAH M M. Rate of evaporation from undisturbed water pools to quiet air; evaluation of available correlations[J]. International Journal HVAC R Research, 2002, 8:125-131.
- [12] SHAH M M. Prediction of evaporation from occupied indoor swimming pools[J]. Energy&Buildings, 2003, 35(7):707-713.
- [13] ASHRAE. ASHRAE fundamental handbook (SI) [M]. Atlanta:ASHRAE Inc, 2009.
- [14] 林亚宏. 游泳馆室内热湿环境控制问题的研究[D]. 上海:同济大学, 2005.

Study on Equations for Water Evaporation from Indoor Open Water Surface

Luo Xinmei, Sheng Jiakang

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper reviews equations available for water evaporation from indoor open water surface, compares the equations based on the measured data published at home and abroad, and then presents the equations for water evaporation from undisturbed and disturbed indoor open water surface which are relatively close to the measured data. It compares the calculation forms commonly used in indoor open water surface design calculation and calculates the unit evaporation form with the recommended equations under the condition of $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ surface wind speed and water temperature below 40°C , which may provide reference for engineering design.

Key words: indoor open water surface; water evaporation; empirical equation

(责任编辑 姜红贵)