

文章编号: 1671-4229(2023)05-0033-08

# 游泳馆泳池湿负荷计算方法对比分析

金五朵<sup>1a</sup>, 程新红<sup>2</sup>, 周孝清<sup>1b,c\*</sup>, 丁普贤<sup>1b,c</sup>

(1. 广州大学 a. 土木工程学院, b. 建筑节能研究院, c. 广东省建筑节能与应用技术重点实验室, 广东 广州 510006;

2. 广州华森建筑设计工程顾问有限公司, 广东 广州 510180)

**摘要:** 游泳馆湿负荷计算是游泳馆空调系统方案确定的基础。游泳馆内泳池散湿量大小与泳池水温、泳池水表面特性、室内温湿度、水表面空气流速、人员活动情况等多种因素相关。目前采用的游泳馆泳池湿负荷计算方法都是依据传质理论并结合实验数据提出来的,具有一定的适用条件,尚未形成一种统一的计算方法。文章通过对目前游泳馆泳池湿负荷计算方法进行定量计算分析,对比分析了其影响因素及差异性,研究发现:各关系式计算结果差异较大,但变化趋势总体一致,与池面气流速度、水温变化成正比,与室内空气温度及相对湿度变化成反比。同时,验证了湿负荷测试结果与关系式计算结果,得出结论:游泳馆湿负荷大小受室内空气相对湿度变化影响较小,受人员活动影响大,经过验证,推荐现阶段游泳馆空调工程设计采用ASHRAE手册关系式计算湿负荷。

**关键词:** 游泳馆; 游泳池; 湿负荷; 蒸发; 空调系统

中图分类号: TU111.19 文献标志码: A

## Comparative analysis of calculation methods of humidity load in swimming pools

JIN Wu-duo<sup>1a</sup>, CHENG Xin-hong<sup>2</sup>, ZHOU Xiao-qing<sup>1b,c\*</sup>, DING Pu-xian<sup>1b,c</sup>

(1. a. School of Civil Engineering, b. Academy of Building Energy Efficiency,

c. Guangdong Provincial Key Laboratory Building Energy Efficiency and Application Technologies, Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Huasen Architectural and Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Guangzhou 510180, China)

**Abstract:** The calculation of humidity load is the basis of the air-conditioning system design in swimming pools. The wet load of the swimming pools is related to many factors, such as the water temperature, the water surface characteristics, the indoor temperature and humidity, the air velocity of the water surface, and personnel activities. At present, the wet load calculation methods of swimming pools are all based on mass transfer theory and combined with experimental data, which has applicable conditions and has not formed a unified calculation method. This paper compares and analyzes the differences and various influencing factors of these methods through calculation and analysis of several commonly used methods of wet load calculation in swimming pools. The research finds that: the calculation results of each relation differ greatly, but the change trend is generally consistent, which is proportional to the changes of the air velocity and water temperature, and inversely proportional to the changes of air temperature and relative humidity. At the same time, the humidity load test results and the relational results are verified, and the conclusion is drawn that the wet load of natatorium is less affected by indoor air relative humidity and more affected by personnel activities. After verification, it is recommended to use the ASHRAE method to calculate the wet load in the current design of natatorium air conditioning engineering.

**Key words:** natatorium; swimming pools; humidity load; evaporation; air condition system

收稿日期: 2023-01-20; 修回日期: 2023-02-25

作者简介: 金五朵(1998—),女,硕士研究生. E-mail: Jin5duo@163.com

\*通信作者. E-mail: zhou\_xiaoqing03@163.com

引文格式: 金五朵,程新红,周孝清,等. 游泳馆泳池湿负荷计算方法对比分析[J]. 广州大学学报(自然科学版),2023,22(5):33-40.

近年来,随着我国经济社会的发展和人们生活水平的提高,多地兴建了各类游泳场馆,以满足人们日益增长的需求。与其他公共场所的空调系统设计相比,游泳馆的湿负荷计算具有其特殊性,即泳池水蒸发致使湿负荷较大,因此对湿度的控制要求更严格。游泳馆内空气湿度的高低,直接影响①人员舒适性。湿度过低,活动人员皮肤表面水分蒸发速率加快,使人感觉到寒冷。②围护结构安全性。湿度过高,会腐蚀围护结构。③空调冷负荷。空调系统常采用降温除湿方式,此时,湿负荷的计算会影响冷负荷的计算。④泳池水加热负荷<sup>[1]</sup>。为了维持泳池水温恒定,需要知道水分蒸发量进而计算热量损失。由此可见,研究游泳馆湿负荷计算方法是一个重要课题。

目前,游泳馆的泳池湿负荷计算并没有公认的方法<sup>[2-4]</sup>。众多学者采用理论与实验相结合的方法,提出了相应的经验计算关系式:①综合公式。1968年Carrier<sup>[5]</sup>提出了水盘水分蒸发速率计算关系式,ASHRAE手册采用了该计算关系式<sup>[6]</sup>。其后多位学者修正了该关系式<sup>[7-8]</sup>。②池边散湿量计算。游泳馆内除泳池外,还有相当面积池边湿地,有学者针对池边湿地提出相应的计算关系式<sup>[9]</sup>。③人员散湿量计算。游泳馆内人员散湿与其他场所不同,目前有3种常用的计算方法:①依据实验,修正综合公式<sup>[6]</sup>;②将人体视为圆柱体,建立其表面水分蒸发模型<sup>[10]</sup>;③采用一般民用建筑空调设计中人员散湿量公式<sup>[11-13]</sup>。

我国游泳馆空调工程设计中,通常采用《体育建筑空调设计》<sup>[14]</sup>或《游泳馆空调设计》<sup>[11]</sup>所提供的计算方法。其中,《体育建筑空调设计》提供了以压差传质原理为基础的游泳馆湿负荷计算关系式;《游泳馆空调设计》则将湿负荷分为泳池、池边、人体3个部分计算,即泳池散湿量计算关系式基于压差传质原理,池边散湿量采用干湿球温度差作为变量进行计算,人员散湿量的计算引用了我国《实用供热空调设计手册》中人员散湿量计算关系式<sup>[15]</sup>。两种方法本文均有详细说明,需要注意的是,上述两种资料中,并没有给出游泳馆湿负荷计算方法来源及部分系数的取值,故我国在已有游泳馆空调工程设计中,湿负荷计算方法尚未统一<sup>[16-17]</sup>。

游泳馆湿负荷计算方法各异,但式中多采用同样的变量,包括水面气流速度、水面附近饱和水蒸气分压力及室内空气水蒸气分压力。由此可知,游泳馆泳池湿负荷主要影响因素为泳池水温、室内空气温湿度和水面气流速度。

本文归纳了游泳馆湿负荷的常用计算方法,并针对上述影响因素进行了定量计算,对比分析了各计算方法。此外,人员活动也对泳池散湿量的计算影响较大,本文还分别讨论了无人活动泳池(静态水泳池)、有人活动泳池(非静态水泳池)的湿负荷,再通过对比不同工况下湿负荷实验结果与关系式计算结果,选出误差较小的计算关系式,以期能为工程设计提供参考。

## 1 游泳馆泳池湿负荷计算方法归纳

### 1.1 游泳馆泳池湿负荷经典计算方法

#### 1.1.1 Carrier 计算方法

Carrier采用压差传质原理,提出含有待定常数的关系式。同时,进行了水盘水分蒸发实验,用实验数据拟合出待定常数取值,得到水盘水分蒸发速率计算关系式:

$$E = \frac{3.6F(0.089 + 0.0782v)(P_w - P_a)}{i}, \quad (1)$$

式中, $E$ 为湿负荷,kg/h; $F$ 为水池面积,m<sup>2</sup>; $v$ 为水面气流速度,m/s; $P_w$ 为水温下饱和水蒸气分压力,Pa; $P_a$ 为室内空气水蒸气分压力,Pa; $i$ 为水的气化潜热,kJ/kg,(取2436.8 kJ/kg)。

Carrier关系式虽然在游泳馆湿负荷计算的研究中被广泛使用和探讨,但其是基于实验室内水盘表面蒸发实验提出的,没有考虑实际游泳馆人员活动等因素的影响。Smith等<sup>[18]</sup>及ASHRAE手册分析了人员活动对湿负荷的影响,修正了该式。根据Smith的研究,Carrier关系式适用于一定人数下的游泳馆湿负荷计算。

#### 1.1.2 Smith 计算方法

Smith等<sup>[18]</sup>分析了人员活动对游泳馆湿负荷的影响,修正了Carrier的关系式。提出非静态水泳池湿负荷的计算关系式,见式(2);静态水泳池湿负荷计算关系式,见式(3)。同时,Smith指出,每93 m<sup>2</sup>泳池超过15人时,式(2)不再适用,此时蒸发量为Carrier关系式计算值的1.26倍,见式(4)。下述各公式中物理量含义及单位与式(1)一致。

$$ER = 1.04 + 0.046C,$$

$$E = ER \times E_0, \quad (2)$$

$$E_0 = \frac{3.6F(0.089 + 0.0782v)(P_w - P_a)}{i},$$

$$E = \frac{2.664F(0.089 + 0.0782v)(P_w - P_a)}{i}, \quad (3)$$

$$E = \frac{4.536F(0.089 + 0.0782v)(P_w - P_a)}{i}, \quad (4)$$

式中,  $ER$  为 Smith 关系式与 Carrier 关系式比值;  $C$  为每  $93 \text{ m}^2$  泳池人数;  $E_0$  为 Carrier 计算关系式, 见式(1)。

有学者指出, Smith 计算关系式在室内工况变化时误差较大<sup>[19]</sup>。尽管如此, 在游泳馆蒸发量的测量和人员散湿影响的分析方面, Smith 都给出了修正方法<sup>[19-20]</sup>: ①Smith 认为测量游泳馆湿负荷时, 不能将空调冷凝水量视为泳池水蒸发量, 因为这种测量方式基于一个假设, 就是认为从泳池蒸发的所有水分都会在系统的冷凝过程中析出。但在实际工程中, 围护结构表面的凝结水使得这种测量方式误差增大。Smith 提出了两种改进测量方式。对于静态水泳池, 直接测量水位变化; 而对于非静态水泳池, 则采用能量平衡原理进行测量, 对池水建立能量平衡方程, 蒸发量即为能量平衡方程中热量损失的一部分, 通过监测水温, 计算泳池热量损失以确定蒸发量。②在分析人员活动对蒸发量的影响时, Smith 将 15 分钟内泳池的平均人数作为泳池的计算平均人数。依据实验数据, 拟合  $ER$  随平均人数的变化关系, 见式(2)<sup>[18]</sup>。

### 1.1.3 Shah 计算方法

Shah<sup>[21-22]</sup>将传质准则数  $Sh$  与传热准则数  $Nu$  类比, 得到水面传质系数, 同时分析了人员活动对池面湿负荷的影响。经多年研究, Shah 共提出两种计算方法:

(1) 静态水泳池湿负荷计算关系式, 见式(5)<sup>[21]</sup>, 下文称(Shah1)。

$$\begin{aligned} E &= 0.001CF\rho_w(d_w - d_a)(\rho_a - \rho_w)^{\frac{1}{4}}, \\ C &= 35 \text{ for } (\rho_a - \rho_w) > 0.02, \\ C &= 40 \text{ for } (\rho_a - \rho_w) \leq 0.02, \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\rho_w$  为水面饱和空气的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_a$  为室内空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $d_w$  为水面饱和空气含湿量,  $\text{g}/\text{kg}$  干空气;  $d_a$  为室内空气含湿量,  $\text{g}/\text{kg}$  干空气。

对于非静态水泳池, Shah 引入与人数有关的变量  $Fu$  (池的使用系数), 提出活跃使用时游泳池湿负荷的计算关系式, 见式(6):

$$E = F \left[ 0.113 - \frac{0.000079}{Fu} + 0.000059(P_w - P_a) \right], \quad (6)$$

式中,  $Fu$  为泳池利用率因子,  $Fu = \frac{A_{\text{pool}}}{A_{\text{max}} \times N}$ ;  $A_{\text{max}}$  为每人最大泳池面积,  $4.5 \text{ m}^2$ ;  $A_{\text{pool}}$  为泳池面积,  $\text{m}^2$ ;  $N$  为泳池人数。

式(6)只适用于  $Fu > 0.1$ ; 若  $Fu < 0.1$ , 对式(5)和式(6)进行线性插值。

(2) Shah<sup>[22]</sup>于 2014 年修正了“人员活动对泳池蒸发量的影响只与人数有关”的假设, 提出非静态水泳池的湿负荷不仅与人员密度有关, 还与水-气界面密度差有关<sup>[22]</sup>, 对游泳馆湿负荷计算方法进行了调整, 见式(7)~式(9), 下文称(Shah2)<sup>[19,23-24]</sup>。

$$E = 35F\rho_w(d_w - d_a)(\rho_a - \rho_w)^{\frac{1}{4}}, \quad (7)$$

$$E = 0.00005F(P_w - P_a), \quad (8)$$

$$E = 0.00005F \left( \frac{v}{0.12} \right)^{0.8} (P_w - P_a). \quad (9)$$

(i) 静态水泳池: 自然对流时取式(7)和式(8)较大值; 受迫对流时取式(7)和式(9)较大值。

(ii) 非静态水泳池见式(10)。

$$E = E_0 [1.9 - 21(\rho_w - \rho_a) + 5.3N^*], \quad (10)$$

式中,  $E_0$  为非静态水泳池湿负荷, 式(7)~式(9);  $N^*$  为泳池内单位面积人数 ( $\text{人}/\text{m}^2$ ), 若  $N^* = 0 - 0.05$ , 使用插值法计算。

## 1.2 工程标准中采用的游泳馆泳池湿负荷计算方法

### 1.2.1 ASHRAE 手册计算方法

ASHRAE 手册中游泳馆湿负荷章节一直使用 Carrier 的关系式<sup>[6]</sup>。1987 年, 该式表示静态水泳池湿负荷, 非静态水泳池湿负荷计算值增大 50%; 1991 年, 该式用于正常活动状态的游泳馆湿负荷计算, 其他用途的游泳池水分蒸发量会减少 50%; 1995 年, ASHRAE 手册提出活动因子  $Fa$  修正该式; 在 2019 年的 ASHRAE 手册中, 仍然采用  $Fa$  修正法,  $Fa$  取值见表 1。

表 1 不同种类泳池的活动因子  $Fa$

Table 1 Typical activity factors of various pools

泳池种类	$Fa$
基准泳池(无人使用)	0.5
住宅池	0.5
公寓泳池	0.65
治疗池	0.65
酒店	0.8
公共、学校	1.0
旋涡池、水疗	1.0
波浪、划水	1.5(最小值)

注: 表格由 ASHRAE handbook 2019 提供; 本文计算中, 有人活动泳池的活动因子  $Fa = 1$ 。

### 1.2.2 VDI 规范计算方法

德国工程师协会 VDI 采用了综合公式计算游泳馆湿负荷<sup>[25]</sup>。

$$E = \frac{\beta_{u,b}}{R_D(T+273.15)}(P_w - P_a)F, \quad (11)$$

式中,  $\beta_{u,b}$  为水传递系数( $u$  为静态水泳池;  $b$  为非静态水泳池), 取值见表 2,  $m/h$ ;  $R_D$  为水蒸气的气体常数(取 461.25),  $J/kg \cdot K$ ;  $T$  为水与空气的平均温度,  $^{\circ}C$ 。

表 2 水传递系数  $\beta_u$ 、 $\beta_b$

Table 2 Values of water transfer coefficients  $m/h$

泳池种类	$\beta_u$	$\beta_b$
溢流管表面	0.7	-
住宅或私人泳池	7	21
室内泳池(水深大于 1.35 m)	7	28
室内泳池(水深小于 1.35 m)	7	40
室内泳池(波浪池)	7	50
室内泳池(滑水池)	-	50

注: 本文计算中, 静态水泳池  $\beta_u = 7 m/h$ ; 非静态水泳池  $\beta_b = 28 m/s$ 。

### 1.2.3 《体育建筑空调设计》计算方法

该资料(下文称“体建空调”)提供了游泳馆空调系统设计时应考虑的通风除湿量, 见式(12), 但资料中未说明其适用范围<sup>[14]</sup>。

$$E = 0.0075F(0.0178 + 0.0152v)(P_w - P_a)。 \quad (12)$$

### 1.2.4 《游泳馆空调设计》计算方法

该书提出, 游泳池湿负荷主要由 3 个部分组成: 池水、池边和人体<sup>[11]</sup>。

(1) 池水蒸发量计算关系式:

$$E = \frac{1}{133.322} CF(P_w - P_a), \quad (13)$$

式中,  $C$  为蒸发系数,  $mmHg \cdot m^2 \cdot h$ , 取 0.032 ~ 0.038, 但资料中未提供取值依据(本文计算中取中值 0.035)。

(2) 池边散湿量计算关系式:

$$E = 0.0171F'\varepsilon(T_{干} - T_{湿}), \quad (14)$$

式中,  $\varepsilon$  为湿润系数, 取 0.2 ~ 0.4, 取值依据: 国际比赛类场馆, 湿润面积小, 取小值; 娱乐性场馆, 人员密集, 湿润面积大, 取较大值(本文计算中取 0.4);  $T_{干}$  为室内空气温度,  $^{\circ}C$ ;  $T_{湿}$  为室内空气湿球温度,  $^{\circ}C$ (本文计算中湿球温度由焓湿图读取);  $F'$  为池边面积,  $m^2$ , 资料中未说明其概念(计算中将泳池周围 1 m 宽处视为池边)。

(3) 人体散湿量计算关系式:

$$E = 0.001\Phi Ng, \quad (15)$$

式中,  $\Phi$  为群集系数, 体育馆取 0.92;  $N$  为人数, (不同类别泳池的人员密度见表 3);  $g$  为每人单位小时散湿量,  $g/h$ , 取值见表 4, 取室内空气平均温度下的  $g$  值, 即 123  $g/h$ 。

表 3 不同泳池类别下的人员密度

Table 3 Density of person in different categorical natatorium

泳池类别	人员密度 $m^2/人$
比赛池	10
跳水池	3 ~ 4.5
水球	25 ~ 42
公共设施和练习池	2 ~ 5
儿童池	2

表 4 不同温度下, 游泳馆内每人每单位小时散湿量  $g$  取值

Table 4 Personnel humidity load under different temperature

温度/ $^{\circ}C$	$g/(g \cdot h^{-1})$
23	89
24	96
25	102
26	109
27	115
28	123

## 2 游泳馆泳池湿负荷计算方法对比分析

游泳馆湿负荷主要影响因素为泳池水温、室内空气温湿度和水面气流速度。现以上述因素作为单一变量, 分析各计算方法。

取标准泳池面积  $21 \times 50 = 1050 m^2$ <sup>[26]</sup>。有人活动泳池人数按《游泳馆空调设计》中训练池均值 3.5  $m^2/人$  计算。室内设计工况见表 5, 其中, 水温取《游泳池给水排水工程技术规程》<sup>[27]</sup> 中训练池水温, 其他工况选取参照《游泳馆空调设计》中训练池有关规定, 各参数取中值作为标准值进行分析。

表 5 游泳馆室内环境设计参数范围及标准取值

Table 5 Range and standard value of natatorium air conditioning system

工况	参数范围	标准值
室内空气相对湿度/%	60 ~ 70	65
水温/ $^{\circ}C$	26 ~ 28	27
室内空气温度/ $^{\circ}C$	27 ~ 29	28
室内空气流动速度/ $(m \cdot s^{-1})$	0 ~ 0.2	0.1

注: 由于室内空气流动速度  $v = 0 m \cdot s^{-1}$  时, 多数计算关系式取值为 0, 所以计算中取气流速度为 0.02 ~ 0.2  $m \cdot s^{-1}$ 。

其他物理量按式(16) ~ 式(21)计算。

(1) 池面附近饱和空气水蒸气分压力( $P_w$ ):

$$P_w = 611.2 e^{\frac{17.67t_w}{243.5 + t_w}} \quad (16)$$

(2) 室内空气水蒸气分压力( $P_a$ ):

$$P_a = 611.2 \Phi e^{\frac{17.67t_a}{243.5 + t_a}} \quad (17)$$

(3) 池面附近饱和空气密度( $\rho_w$ ):

$$\rho_w = 3.84 \left( \frac{101.325}{(t_w + 273.15)} \right) \left( 1 - 0.378 \frac{P_w}{101.325} \right) \quad (18)$$

(4) 室内空气密度( $\rho_a$ ):

$$\rho_a = 3.84 \left( \frac{101.325}{(t_a + 273.15)} \right) \left( 1 - 0.378 \frac{P_a}{101.325} \right) \quad (19)$$

(5) 池面附近饱和空气含湿量( $g/kg$  干空气):

$$d_w = 6.22 \times 10^{-5} \frac{P_w}{101.325 - P_w} \quad (20)$$

(6) 室内空气含湿量( $g/kg$  干空气):

$$d_a = 6.22 \times 10^{-5} \frac{P_a}{101.325 - P_a} \quad (21)$$

### 2.1 游泳馆静态水泳池湿负荷计算分析

用控制变量法分析游泳馆静态水泳池湿负荷计算关系式,见图 1。

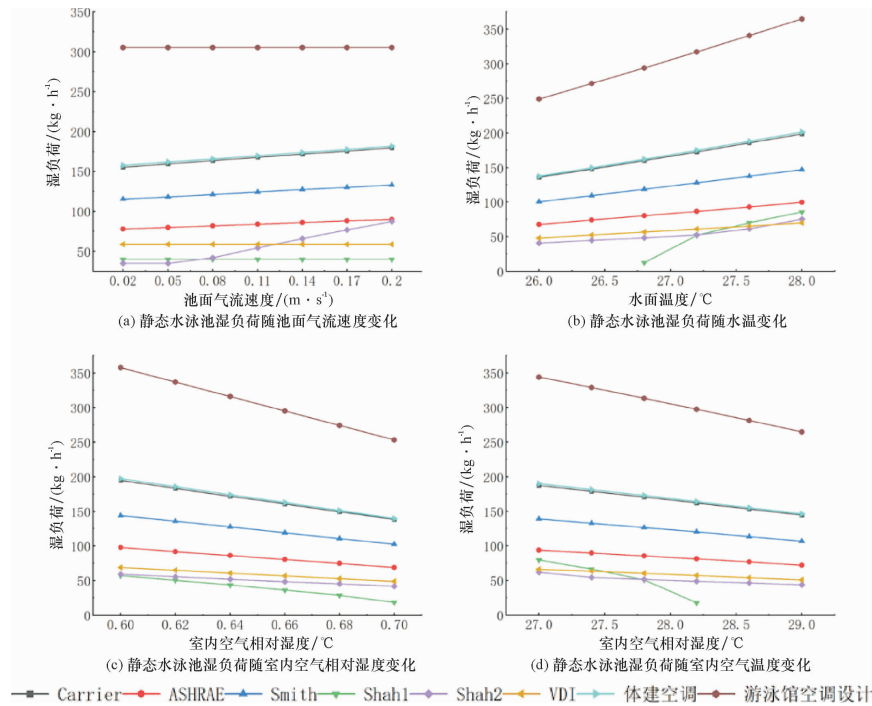


图 1 静态水泳池湿负荷计算结果

Fig. 1 Calculation results of unoccupied pool

由图 1 可见,各关系式计算结果差异较大。《游泳馆空调设计》关系式计算结果最大,文献中未说明关系式理论依据。Carrier 关系式在该领域应用广泛,但其是依据风洞下的蒸发实验数据提出的,静态水泳池水面气流速度很小,故计算结果存在一定误差。Smith 与 ASHRAE 手册关系式都是考虑了游泳馆的实际散湿情况,对 Carrier 关系式进行了修正。Shah1 是基于传质传热类比原理,以密度差为变量,当水温较低或室内温度较高时,室内空气密度高于水面附近空气密度,使得计算结果为负值。Shah2 将传质传热类比原理与压差传质原理结合,得到的关系式受水温及室内温湿度等条件变化影响较大。Shah 提出的方法为该领域的研究提供了思路:在不同室内工况下采用分段函数形式进行计算。图 1(a)~图 1(d)反映了静态水泳池中,不同因素对各

式计算结果的影响。

图 1(a) 自变量为池面气流速度,可见随池面气流速度的增大,游泳馆湿负荷增大。《游泳馆空调设计》、VDI 及 Shah1 中关系式不随池面气流速度变化。Shah2 在池面气流速度小于 0.06 m/s 时保持不变,当气流速度大于 0.06 m/s,变化率最大,即当池面气流速度达到一定值以后,池面风速对湿负荷计算结果影响较大。Shah 两种方法与 VDI 公式均有交点,说明该工况下,两种方法计算结果一致。

图 1(b) 自变量为泳池水温,可见随水温的升高,湿负荷增大。其中,Shah1 变化率最大,约 27.6 °C 时,由于室内空气与水面附近饱和空气密度差增大,计算系数改变,变化率减小。Shah2 与 VDI 关系式在水温约为 27.5 °C 时有交点。

图 1(c) 自变量为室内空气相对湿度,可见随室内空气相对湿度的增大,湿负荷减小。体建空调与 Carrier 关系式变化率较大,Shah2 变化率最小,湿负荷计算结果稳定,变化不敏感。在相对湿度约为 60% 时,Shah 两种计算方法有交点。

图 1(d) 自变量为室内空气温度,可见随室内空气温度的增大,湿负荷减小。与上述不同的是,Shah2 湿负

荷计算结果随室内空气温度变化敏感,变化率最大。Smith 关系式变化率最小。室内空气温度较低时,Shah 两种方法分别与 VDI 关系式有交点。

## 2.2 游泳馆非静态水泳池湿负荷计算分析

采用控制变量法分析有人活动的游泳馆非静态水泳池湿负荷,计算关系式见图 2。

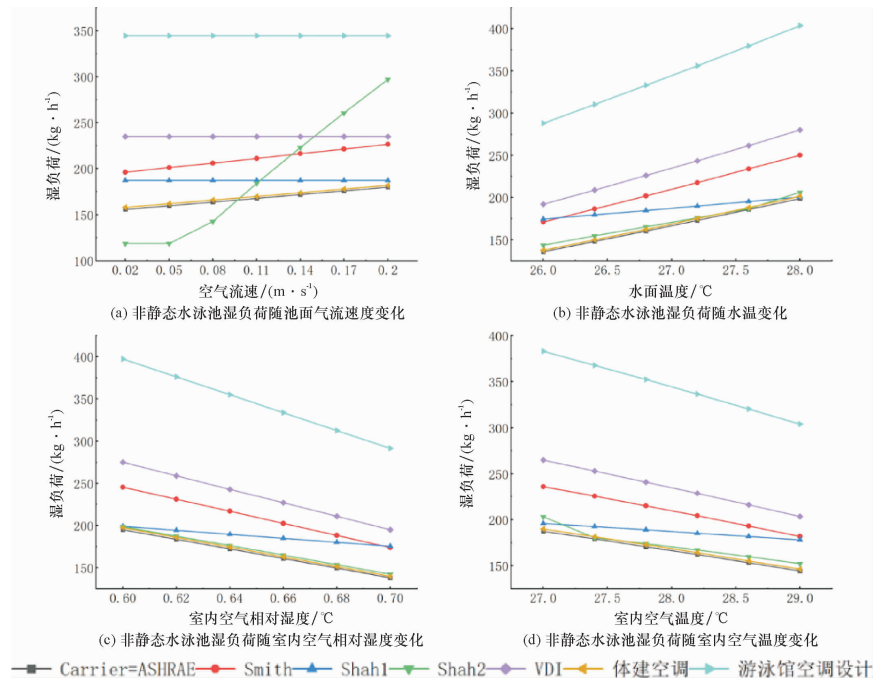


图 2 非静态水泳池湿负荷计算结果

Fig. 2 Calculation results of occupied pool

由图 2 可见,各关系式计算结果差异较大。《游泳馆空调设计》将湿负荷分成了池水散湿、池边散湿、人体散湿 3 个部分,计算结果较大。Smith 对 Carrier 关系式进行了人员活动的修正,由于本文计算中,选取的人员密度较大,故其计算结果大于 Carrier 关系式的。ASHRAE 手册提供的活动因子在公共泳池中取 1,故其结果与 Carrier 一致。Shah2 变化规律与安静泳池一致。在本文设计工况内,Shah2 与 ASHRAE 手册、Carrier、体建空调关系式有交点。图 2(a) ~ 图 2(d) 反映了非静态水泳池中,不同室内工况对各关系式计算结果的影响。

图 2(a) 自变量为池面气流速度。与静态水泳池不同的是,此时,体建空调、Carrier 及 ASHRAE 手册关系式湿负荷计算结果和变化率均较小。

图 2(b) 自变量为泳池水温。此时,《游泳馆空调设计》与 VDI 关系式变化率较大,而 Shah1 变化率最小。Shah2、体建空调、Carrier、ASHRAE 手册关系式的计算结果相近,交点多,在温度较高时分别与 Shah1 曲线有交

点。温度较低时,Smith 方法与 Shah1 曲线有交点。

图 2(c) 自变量为室内空气相对湿度。此时,Shah2、体建空调、ASHRAE 手册、Carrier 关系式在室内空气相对湿度约为 60% 时,分别与 Shah1 关系式有交点。

图 2(d) 自变量为室内空气温度。可见,Shah2 在室内空气温度低于  $27.5^{\circ}\text{C}$  时变化率较大,且与 Shah1 有交点。当室内空气温度升高时,Shah2 变化率降低,与体建空调、ASHRAE、Carrier 关系式计算结果接近且有交点。

## 3 游泳馆泳池湿负荷计算结果验证

以上海外国语大学游泳馆实测结果为例,验证各计算方法<sup>[28-29]</sup>。游泳馆面积  $1\ 000\ \text{m}^2$ , 体积  $5\ 100\ \text{m}^3$ , 泳池尺寸为  $25\ \text{m} \times 21\ \text{m}$ 。测试时游泳馆内维持正压,保证空调送风量即为通风量,则室内空气水蒸气含量与空调送风口送风水蒸气量差值就是该游泳馆湿负荷。通过热电偶、湿湿度仪、风速计分别记录水温、室内温湿度、

池面风速及通风量并取均值作为工况条件,同时每隔5分钟统计游泳馆内人数并记录。由已有分析得出结论,《游泳馆空调设计》计算结果普遍偏大,且个别系数取值无参考依据,故不予验证。

3.1 游泳馆静态水泳池湿负荷对比

游泳馆工况条件如表6所示,湿负荷实验及计算结果如图3所示,取10%误差线。

表6 游泳馆静态水泳池湿负荷测试工况  
Table 6 Unoccupied pool testing condition

指标	工况	
	1	2
室内空气温度/°C	28.2	28.2
室内空气相对湿度/%	62.5	65.68
水温/°C	28.1	28.1
池面空气流速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.11	0.11

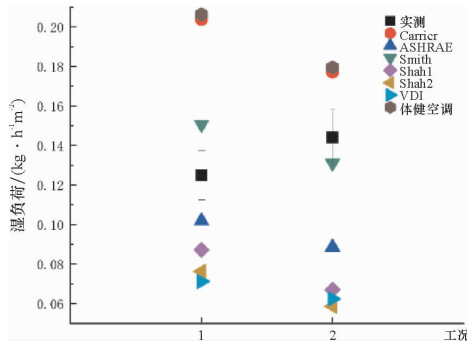


图3 静态水泳池湿负荷测试及计算结果

Fig. 3 Testing and calculation results of unoccupied pool

可见,各关系式计算结果与实测结果相差较大,其中,ASHRAE手册与Smith提出的关系式计算结果与实测较为接近,其提出原理均在Carrier关系式基础上考虑了人员活动对湿负荷的影响,对静态水泳池湿负荷的计算增添了系数。值得注意的是,表6所示两工况条件除相对湿度外,其余影响因素均相同,而湿负荷实测结果与本文2.1节图1(c)中湿负荷计算结果随室内空气相对湿度变化呈现了相反的趋势,工况2室内空气湿度较大,湿负荷测试结果增大。可见,从传质理论上来说,室内空气湿度增大,蒸发减弱,游泳馆湿负荷减小,而在实际环境中,由于多种因素的作用,会出现相反的趋势。原因如下:①湿负荷测试方法的选用。实验中用室内空气水蒸气含量作为排风水蒸气含量以计算湿负荷,而游泳馆空间较大,无法保证室内热湿环境的均匀,故室内空气水蒸气含量的计算存在误差。②其他泳池散湿量影响因素,如室内温度、水温、池面气流速度不同。由图1可见,与其他影响因素相比,室内空气相对湿度对游泳

馆湿负荷影响较弱,从式(17)可以看出,室内空气相对湿度仅影响室内空气水蒸气分压力值,故在实际条件中,由于多种因素的综合作用,会出现室内空气湿度增大,游泳池散湿增大的情况。

除此之外,图3中工况2与图1(b)中水温为28°C时条件接近,此时,各关系式计算结果对比基本一致,仅VDI关系式计算结果有明显差异。从表达式上看,VDI关系式中不含池面气流速度这一变量,但温度变量体现在平均温度、压差两个变量中,故VDI关系式湿负荷计算结果对温湿度工况变化反应较敏感。

3.2 游泳馆非静态水泳池湿负荷对比

游泳馆工况条件如表7所示,湿负荷实验及计算结果如图4所示,取10%误差线。

表7 游泳馆非静态水泳池湿负荷测试工况  
Table 7 Occupied pool testing condition

指标	工况	
	1	2
室内空气温度/°C	28.2	28.2
室内空气相对湿度/%	62.5	65.68
水温/°C	28.1	28.1
池面空气流速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.11	0.11
人数/(人·100 <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	6.1	3

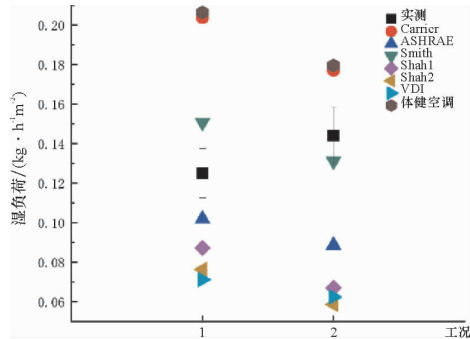


图4 非静态水泳池湿负荷测试及计算结果

Fig. 4 Testing and calculation results of occupied pool

可见,有人活动时,ASHRAE手册、Carrier、体键空调与Shah提出的关系式计算结果与实测较为接近。其中,体键空调与Shah关系式考虑了具体的人数,故当人数变化时,计算结果差异较大。而ASHRAE手册对Carrier关系式进行了一定的修正,在学校游泳馆内,修正系数取1,因此,计算结果一致。

图2与图4所分析计算条件,人员密度取值差异较大,而各关系式对人员活动因素的修正不同,故其计算结果不具有可比性。

### 3.3 综合对比与讨论

上述 4 种条件下,游泳馆泳池湿负荷测试结果如图 5 所示。

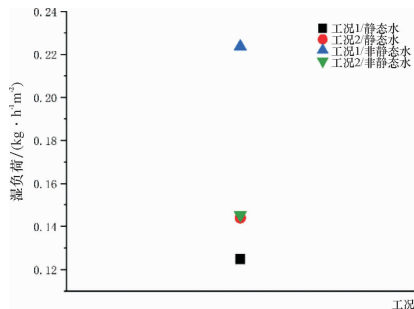


图 5 湿负荷测试结果

Fig. 5 Humidity load testing results

## 4 结论与讨论

游泳馆泳池湿负荷影响因素多,测试实验复杂,无法全面考虑游泳馆实际情况,现有计算关系式理论上均有一定的使用条件,如室内热湿工况、游泳场馆种类、活动人员密度和游泳馆空调运行方式等。本文针对游泳馆室内流场以及温湿度场的变化,定量分析了各关系式

计算结果,并与实验结果进行了对比分析。

### 4.1 结论

(1)已有游泳馆湿负荷计算方法表明,游泳馆湿负荷与池面气流速度、水温变化成正比,与室内空气温度、室内空气相对湿度变化成反比。

(2)经过实测结果对比分析,无人活动的静态泳池中,ASHRAE 手册与 Smith 关系式计算结果误差较小;有人活动时,ASHRAE 手册、Carrier、体建空调与 Shah 提出的关系式误差较小。

(3)室内空气相对湿度对游泳馆泳池湿负荷影响小,人员活动对游泳馆湿负荷影响大。

### 4.2 讨论

根据计算结果发现,各因素对游泳馆湿负荷影响不同,并且不同形式游泳馆湿负荷计算关系式结果差异大,随各类工况变化敏感程度也不同。在接下来的研究中,应综合考虑各影响因素及设计工况变化范围,选择合适的关系式形式进行优化。

随着计算机技术的发展,有学者通过计算流体力学软件模拟了游泳馆内不同工况。在湿负荷计算方法的研究中,可以借鉴此方法,对实际工程项目进行模拟,结合上述结论,提供合理湿负荷计算方法。

### 参考文献:

- [1] 骆艳. 游泳馆热负荷计算方法[J]. 暖通空调, 2009, 39(5):123-127.
- [2] 林亚宏. 室内游泳池水面蒸发量计算公式的探讨[J]. 暖通空调, 2012, 42(12):68-69,38.
- [3] 罗新梅,盛家康. 室内敞开水面水蒸发量计算公式探讨[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(1):100-106.
- [4] 张伟伟,梁庆庆. 游泳馆空调负荷计算探讨[J]. 暖通空调, 2007, 37(4):96-97.
- [5] Carrier W H. The temperature of evaporation[J]. ASHVE Transactions, 1968, 24:25-50.
- [6] ASHRAE. ASHRAE handbook; Heating, ventilating and air-conditioning applications[M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Incorporation, 2019.
- [7] Shah M M. Analytical formulas for calculating water evaporation from pools[J]. ASHRAE Transactions, 2008, 114:610-618.
- [8] Asdrubali F. A scale model to evaluate water evaporation from indoor swimming pools[J]. Energy & Buildings, 2009, 41(3):311-319.
- [9] 王瑾,赵路平,赵凯,等. 娱乐性室内游泳馆湿负荷计算方法的研究与分析[J]. 暖通空调, 2014, 44(8):42-46.
- [10] 马晨钰,刘凯月,姜益强. 游泳馆湿负荷计算公式研究[J]. 低温建筑技术, 2019, 41(5):15-18.
- [11] 魏文字. 游泳馆空调设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [12] 蒋能飞. 娱乐性游泳馆热湿负荷计算探讨[J]. 洁净与空调技术, 2017(4):92-95.
- [13] 虞霞,赵磊. 娱乐性游泳馆的空调设计[J]. 制冷空调, 2005, 26(3):43-49.
- [14] 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, 1991.
- [15] 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.
- [16] 杨勇. 上海某大学游泳馆空调通风设计[J]. 建筑热能通风空调, 2020, 39(4):99-101.
- [17] 王微微. 中国地质大学(北京)综合游泳馆池区通风空调设计[J]. 暖通空调, 2009, 39(8):12-16,74.
- [18] Smith C C, Lof G O G, Jones R W J. Rates of evaporation from swimming pools in active use[J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104:514-523.

(下转第 51 页)