

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S0.018

有效湿渗透深度模型 EMPD 对建筑热湿耦合模拟的适用性研究

陈鹏, 秦孟昊

(南京大学建筑与城市规划学院, 江苏南京 210093)

摘要:介绍了能耗模拟软件中使用最多的3种热湿耦合模型:有效湿渗透深度模型 EMPD、热湿耦合传递模型 HAMT 以及有效湿容模型 EC,分析了3种模型的公式基础及优劣。以南京地区办公室为例,使用能耗软件 EnergyPlus 作为计算平台,详细分析了 EMPD 模型对室内温湿度和全年能耗预测的准确度,比较了其 EC 和 HAMT 的误差并分析了原因。研究表明,3种模型中 EMPD 在计算湿方面更接近作为参照标准的 HAMT 模型,尤其是在模拟夏季高温高湿情况下,误差小于5%,在计算能耗方面同样比 EC 模型更接近 HAMT,误差小于8%,并且计算用时只有 HAMT 模型的几十至几百分之一,因此在需要兼顾计算精度和速度的情况下,可以选用 EMPD 模型进行建筑模拟。针对现有 EMPD 公式基础提出修改建议,以进一步提高计算精度。

关键词:热湿耦合传递;建筑模拟;湿传递;湿渗透深度;能耗

中图分类号:TU111.19 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S0-0089-07

Analysis about applicability of effective moisture penetration (EMPD) model to simulate hygrothermal transfer in buildings

Chen Peng, Qin Menghao

(School of Architecture and Urban Design, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China)

Abstract: Three most commonly used model are introduced: effective moisture penetration depth (EMPD) model; effective capacitance (EC) model and combined heat and moisture transfer (HAMT) model. The formulation foundation as well as strength and weakness of these three model are analyzed. Taking a small office building in Nanjing for example, the accuracy of EMPD is examined while predicting the indoor hygrothermal environment and yearly energy consumption based on the EnergyPlus platform. Reasons that account for the errors comparing with EC and HAMT are presented. Results show that among three models EMPD shows more similarities to HAMT than EC in terms of moisture and energy prediction with errors less than 5% and 8% respectively. Besides, EMPD runs several orders of magnitude more quickly than HAMT. So EMPD can be chosen to simulate buildings when taking both accuracy and speed into consideration. Some suggestions are proposed to further modify EMPD for a better accuracy.

Key words: hygrothermal transfer; building simulation; moisture transfer; penetration depth; energy consumption

收稿日期:2015-03-15

基金项目:国家自然科学基金(51108229);博士学科点专项科研基金(2013009111005)

作者简介:陈鹏(1990-),男,主要从事建筑热湿模拟研究,(E-mail)chenpengnju@qq.com。

秦孟昊(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)mqin@nju.edu.cn。

建筑室内热湿环境和能耗一直是学术界和居住者关注的问题。过高的室内湿度可能会导致物品发霉、墙体材料损害等问题,过低的室内湿度同样会引起人体不适,比如皮肤干燥以及干眼症等。建筑能耗则与热舒适性和建筑运行成本息息相关^[1]。因此,合理控制建筑热湿环境和能耗显得尤为重要,而准确预测建筑室内温湿度和能耗则是前提。目前建筑能耗模拟软件被广泛地运用来预测建筑的热湿负荷,指导空调设备的选择,由此提供舒适的室内热湿环境。随着建筑节能标准的不断提高,外围护结构的保温性能和门窗气密性越来越好,建筑的显热负荷大大减少^[2]。然而由于建筑的内部得湿和必要的自然通风,其潜热负荷始终没有降低。考虑热湿耦合传递的相互影响可以更准确地模拟建筑内部的温湿度和潜热负荷,从而得到更精确的建筑总能耗以及更好的热湿控制。尤其是在湿热地区,考虑热湿耦合传递对模拟结果的精度改善尤为明显,所以热湿耦合计算模块在模拟软件中显得十分重要^[3]。目前很多计算模型在算湿的时候没有考虑到材料的吸放湿作用^[4],在计算精度越来越高的情况下,显然已经不能满足要求,对考虑材料吸放湿计算模型的开发研究成了当务之急。

在考虑材料吸放湿的热湿耦合模型中,有 3 种模型最为常用,分别为 Effective Capacitance Model (EC) 模型、Combined Heat and Moisture Transfer Model (HAMT) 模型和 Effective Penetration Depth Model (EMPD) 模型^[5], 本文将以 HAMT 模型为参照,讨论 EMPD 模型和 EC 模型的公式基础以及模拟结果,在得出现有 EMPD 是在速度和精度之间较好的折中后,提出公式上的进一步改进建议,以达到更高的精度。

1 EC、HAMT 及 EMPD 模型

一般而言,计算室内湿传递的总公式为^[5]:

$$\rho_{\text{air}} V_{\text{zone}} \frac{d\omega_{\text{zone}}}{dt} = \dot{m}_{\text{air,ventilation}} (\omega_{\text{amb}} - \omega_{\text{zone}}) + \dot{m}_{\text{v}} |_{\text{gain}} - \dot{m}_{\text{v}} |_{\text{matl-sorption}} \quad (1)$$

式中: ρ_{air} 是室内干燥空气的密度, kg/m^3 ; V_{zone} 是房间体积, m^3 ; ω_{zone} 和 ω_{amb} 分别是室内外的空气含湿量, $\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{air}}$; t 是时间, s 。等式左边为室内空气中所含湿的总变化,等式右边第 1 项为室内由于通风导致的湿变化,第 2 项为室内湿源产生的湿变化,第 3 项为室内材料吸放湿导致的湿变化。等式两侧

显然是相等的。

1.1 EC 模型

EC (Effective Capacitance) 模型的公式为^[5]:

$$\rho_{\text{air}} V_{\text{zone}} \frac{d\omega_{\text{zone}}}{dt} N = \dot{m}_{\text{air,ventilation}} (\omega_{\text{amb}} - \omega_{\text{zone}}) + \dot{m}_{\text{v}} |_{\text{gain}} \quad (2)$$

EC 模型并没有明确地求解室内材料吸湿项,而是将它们吸湿作用与室内空气吸湿作用集总在一起。系数 N 为房间综合考虑材料吸放湿后的等效湿容量,它的数值代表室内材料加上空气总共能吸收的湿与空气本身吸收的湿的比值。2001 年的 1 份报告显示,根据房间类型的不同,EC 的数值可以从 10~25 不等^[6]。EC 模型将材料的吸放湿情况大为简化,使模拟的速度相比于其他模型有很大提高。如果将其计算时间计为 1,那么 EMPD 模型的计算时间约为 1.05,而 HAMT 模型则达到了 10^2 到 10^4 。然而系数 N 的数值只是经验值,并没有实际物理意义,且难以估计,模拟时需要尝试不同的数值来寻求最准确的预测值。同时,把材料和空气的吸湿作用集总显然忽略了空气和材料之间的换湿阻,这也会导致理论的不先进和模拟结果的不够精确。

1.2 HAMT 模型

HAMT (Combined Heat and Moisture Transfer) 模型由 Künzel 提出,是一维热湿耦合传递模型,它采用了有限元法来求解材料中的热湿传递和储存,考虑湿缓冲的同时,能模拟热湿在墙体及室内材料中的传递并得出具体分布情况,找出材料中高湿区域,从而采取措施预防材料发霉腐蚀。它的热湿传递和储存的公式为^[7]:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (k^w \frac{\partial T}{\partial x}) + h_v \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (D^w \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (4)$$

$$\delta = \frac{(2 \times 10^{-7} \times (T + 273.15))^{0.81}}{P_{\text{ambient}}} \quad (5)$$

式中: δ 是湿扩散系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; k^w 是导热系数, W/m ; D^w 是液态水传递系数, m^2/s ; h_v 是水的蒸发焓, J/kg ; μ 是湿扩散阻系数; ω 是含湿量, kg/m^3 ; φ 是相对湿度, $\%$; P_{ambient} 是周围大气压, Pa ; ω/φ 是材料蓄湿容量, kg/m^3 ; H/T 是材料蓄热容量, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

式(3)、(4)从热湿平衡方程推导而来,描述了热

湿通过材料传递的理论模型。式(3)的 3 项分别描述了蓄热、传热和产热。式(4)的 3 项则分别描述了蓄湿、液态水和水蒸气的传递。HAMT 是现有热湿耦合传递模型中最精确的,通常被用来作为不同模型比较的参照,在模拟建筑材料中湿传递和存储时具有更现实的物理意义。此外,不光是湿气传递, HAMT 还能计算液体水的传递,这种优势在含湿量很高的时候更为明显。然而 HAMT 模型的计算时间是其他模型的数百到数千倍,在模拟较为复杂情况时,耗费时间极长,普通个人计算机甚至出现算不出的情况,这在需要快速反馈的建筑设计初步阶段是很不利的。

1.3 EMPD 模型

EMPD (Effective Moisture Penetration Depth) 模型,分别由 Kerestecioglu 和 M. J. Cunningham 在 1989 年和 1990 年独立提出^[8-11],模型假设材料与室内空气接触的一侧只有较薄一层参与湿传递,这一层中的含湿量是均匀的,并且是室内空气相对湿度的函数。材料中更深层的部分不参与湿传递,由此可以理解为是对真实湿传递的合理简化,大大减少了运算量。EMPD 的数学公式基础为:

$$\rho_{\text{matl}} A_{\text{dEMPD}} \frac{du}{dt} = h_m A (\omega_{\text{zone}} - \omega) \quad (6)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial \omega} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\partial u}{\partial T} \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

$$u = a\phi^b + c\phi^d \quad (8)$$

式中: ρ_{matl} 是吸湿材料的干密度, kg/m^3 ; d_{EMPD} 是有效湿渗透深度, m ; u 是材料吸湿率, $\text{kg}_{\text{moisture}}/\text{kg}_{\text{dry}}$; A 是表面积, m^2 ; h_m 是对流传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; ω 是空气的含湿量, $\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{air}}$; ϕ 是相对湿度, $\%$; t 是时间, s ; T 是温度, $^{\circ}\text{C}$ 。等式左侧为材料中的湿变化,等式右侧为空气通过对流向材料传的湿,这两者必然是相等的。可以看出,EMPD 是一个热湿耦合方程,通过式(7)将温度和湿度耦合在一起。

EMPD 模型假设室内空气湿变化是周期性的,这正是湿渗透深度 d_{EMPD} 可以被计算的前提。当材料周边湿环境呈绝对周期变化时,如果已知材料的等温吸放湿线 $u(\phi)$ 以及水蒸气渗透率 δ_{perm} ,那么 d_{EMPD} 就可以用公式表达。用于计算 d_{EMPD} 公式分为 2 种,一种是目前普遍使用的^[5]

$$d_{\text{EMPD}} = \sqrt{\frac{\delta_{\text{permsat}} \tau_p}{\rho_{\text{dry}} \frac{du}{d\phi}}} \quad (9)$$

式中: τ_p 是湿变化周期, s ; $u(\phi)$ 虽然是非线性的,但是在计算时采用拟合的直线斜率来代替。

另一种是 EnergyPlus 软件自述文件中提出的,为^[7]:

$$d_{\text{EMPD}} = 12.567\ 024 - 12.213\ 73 \times \exp(-267.0211 \times D_v^{0.7} \times \xi^{-0.7}) \quad (10)$$

$$\xi = \left| \frac{\Delta\phi}{\Delta\tau} \right| \quad (11)$$

式中: D_v 是水蒸气扩散系数, m^2/s ; ξ 是水蒸气激发率, $1/\text{h}$;用这 2 种公式计算出的湿渗透深度并不相等,后者计算结果比前者约高 50%^[5],在本文的计算中,采用了更多为学者所验证^[12-14]的前者。

2 案例分析

以能耗软件 EnergyPlus 为平台,通过典型热湿地区南京具体案例来分析比较 3 种模型的区别和优劣。

2.1 案例选择

选取如图 1 所示 $3\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的办公室,位于长江中下游的南京市。墙体构造为 200 mm 厚混凝土,室外侧涂有 25 mm 厚粉刷。朝南的外墙上开有一扇 $1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的双层中空玻璃窗,窗台高 1 m,窗高 1.5 m。地板为 100 mm 厚混凝土,上覆 25 mm 粉刷。屋面为 100 mm 混凝土,两侧涂有 25 mm 粉刷。为了避免其他无关因素对模拟结果的影响,对模拟条件做如下简化:1)房间内的空气充分混合;2)室内不放置家具。

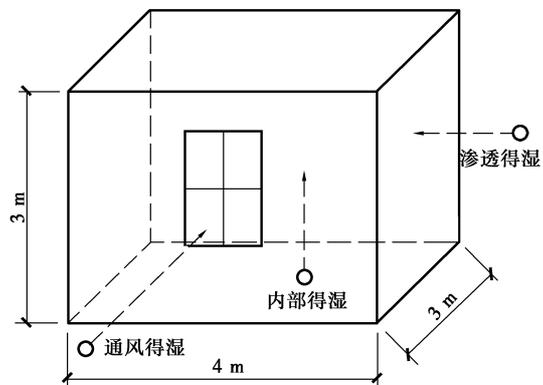


图 1 案例示意

2.2 参数设置

案例模拟的材料属性和初始输入条件分别如表 1、2 所示。

表 1 材料属性

材料名	粗糙度	导热系数/ (W·(m·K) ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热/ (J·(kg·K) ⁻¹)	热吸 收率	太阳 辐射 吸收率	可见 光吸 收率
混凝土	粗糙	1.6	2 300	850	0.9	0.7	0.7
粉刷	粗糙	0.14	1 500	1 880	0.9	0.7	0.7

表 2 模拟初始输入条件

数据来源	南京典型气象年逐时气象数据 ^[15]
冬季设计日	最高干球温度:-1℃;全天干球温差:5℃;风速: 3 m/s
夏季设计日	最高干球温度:37℃;全天干球温差:10℃;风速: 4.9 m/s
EMPD 参数	短周期(日)湿渗透深度:0.0 065 m;长周期(季) 湿渗透深度:0.073 m
HAMT 参数	混凝土孔隙率:0.76;初始含湿量:0.01(kg/kg); 粉刷层孔隙率:0.5;初始含湿量:0.05(kg/kg); 内表面湿传递系数:2×10 ⁻⁸ ;
EC 参数	等效湿容量系数 N:15

2.3 模拟气象边界条件

2.3.1 常气象参数 室外温度 20℃,相对湿度 65%,考虑太阳辐射和自然风的影响。分别以换气次数和室内潜热作为变量,考察不同模型预测室内温湿度的能力。其中换气次数分别为 0.5/h 和 1/h,室内分别有 0、1 和 2 人活动,人均散热负荷为 136 W^[16],其中潜热散热和辐射散热各占 50%,人在室内活动的时间为每日上午 9 时至下午 5 时。

2.3.2 真实气象参数 使用南京典型气象年逐时气象数据^[15]作为室外环境条件,由于人的室内活动以及通风和渗透作用,使得室内存在以天为单位的短周期湿度变化以及以季节为单位的长周期湿度变化。用常气象参数下得到的合理换气次数和湿渗透深度作为此次模拟的输入,考察不同模型预测真实环境下室内温湿度的能力。

2.4 模拟结果分析

2.4.1 常气象参数

1)EMPD 模型 如图 2 所示,当室外气象参数为恒温恒湿时,室内在没有湿源的情况下,空气含湿量稳定为 0.009 3,墙体的吸湿作用使得其略低于室外 0.009 5。在开启周期性内湿源后,室内空气的含

湿量也相应呈周期性变化。随着上午 9 时湿源的开启,室内的空气含湿量在短时间内快速增加,随后增速放缓,下午 5 时达到最高值。湿源关闭时规律相同,空气含湿量的降低经历了先快速后缓慢的过程。由于粉刷层吸湿能力有限,换气次数相同时,室内湿源增大,室内空气的含湿量随之增大,并且增幅也会变大。室内湿源一定的情况下,换气次数越大,室内空气含湿量越低,最高值从 136 W 时的 0.014 9(换气次数 0.1)降到了 0.010 6(换气次数 1),272 W 时的 0.015 2(换气次数 0.1)降到了 0.011 6(换气次数 1)。同时室内湿源和换气次数的增大都会导致室内空气含湿量变化幅度的增大:136 W 换气次数 0.5 时变化幅度为 0.000 6,换气次数 1 时变化幅度为 0.000 7;272 W 换气次数 0.5 时变化幅度为 0.001 1,换气次数 1 时变化幅度为 0.001 2。可见 EMPD 模型可以正确反映出室内得湿和对流散湿对室内空气含湿量的影响。

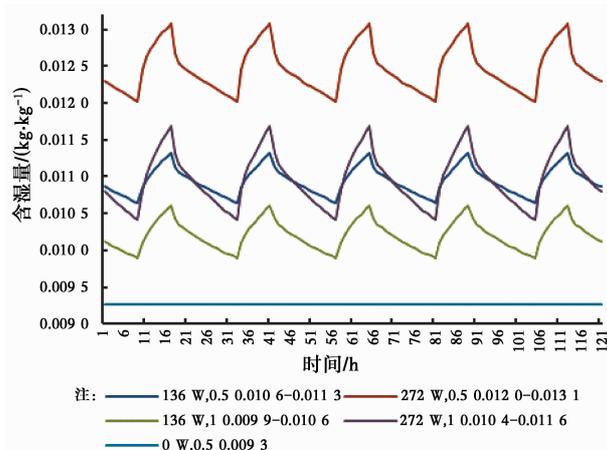


图 2 室内空气含湿量

2)HAMT 模型 HAMT 模型在运算一段时间后,室内材料与空气充分热湿交换,达到平衡,室内气温稳定在 20℃,室内空气含湿量稳定在 0.008 8,比 EMPD 模型计算出的 0.009 3 略小。图 3 显示,当加入室内湿源后,HAMT 计算结果依然比 EMPD 模型略小,造成这一情况的原因是两者的公式基础不同,HAMT 模型考虑通过围护结构的湿传递,而 EMPD 和 EC 均不考虑这一因素,因此当室内空气含湿量高于室外时,HAMT 模型中室内的空气含湿量会由于墙体吸湿、室内外空气对流换湿以及围护结构湿传递等 3 种方式除去,而 EMPD 仅有前 2 种,所以 EMPD 算出的值会略高于 HAMT 模型。

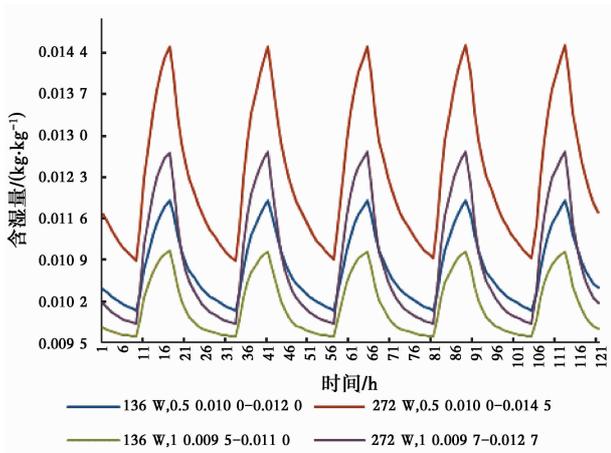


图 3 室内空气含湿量

3) EC 模型 EC 的模拟结果如图 4 所示,在没有室内湿源的情况下,室内空气含湿量为 0.009 5,跟室外空气设置值相同,高于 EMPD 的 0.009 3 和 HAMT 的 0.008 8。而在加入室内湿源后,EC 表现出明显的湿变化幅度过大的情况,当室内湿源关闭时,室内外换气使得室内空气含湿量降低,趋于室外空气含湿量,此时由于 EC 模型并未考虑室内材料和室内空气之间的湿交换以及换湿阻,仅仅等价于给室内空气赋予了一个较大的湿容,导致室内空气含湿量下降较快,并最终和室外空气含湿量一致。这一特征在图 4 中可以明显看出,不同的室内湿源和换气次数最后得到了同样的最低室内空气含湿量,

且和室外一致。从这点来看,EC 模型的理论基础存在缺陷。

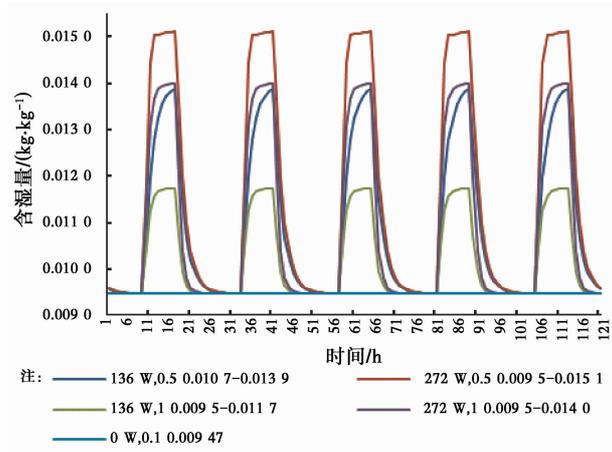


图 4 空气含湿量

4) EMPD、HAMT 和 EC 对比 通过图 5 可以发现,在湿源关闭后,EC 得出的空气含湿量下降迅速,变化幅度明显超过 EMPD 和 HAMT。当室内湿源小,换气次数大,即室内湿度较低时,3 种模型的计算结果更能说明差别所在,EC 由于有效湿容系数的难以确定以及对换湿阻的忽略导致了室内空气含湿量变化幅度最大,夜间室内空气含湿量跟室外一致,室内材料吸放湿的作用没有得到体现。对比 HAMT,EC 的误差远大于 EMPD,但 EMPD 预测的含湿量变化幅度过小,同样存在一定误差。

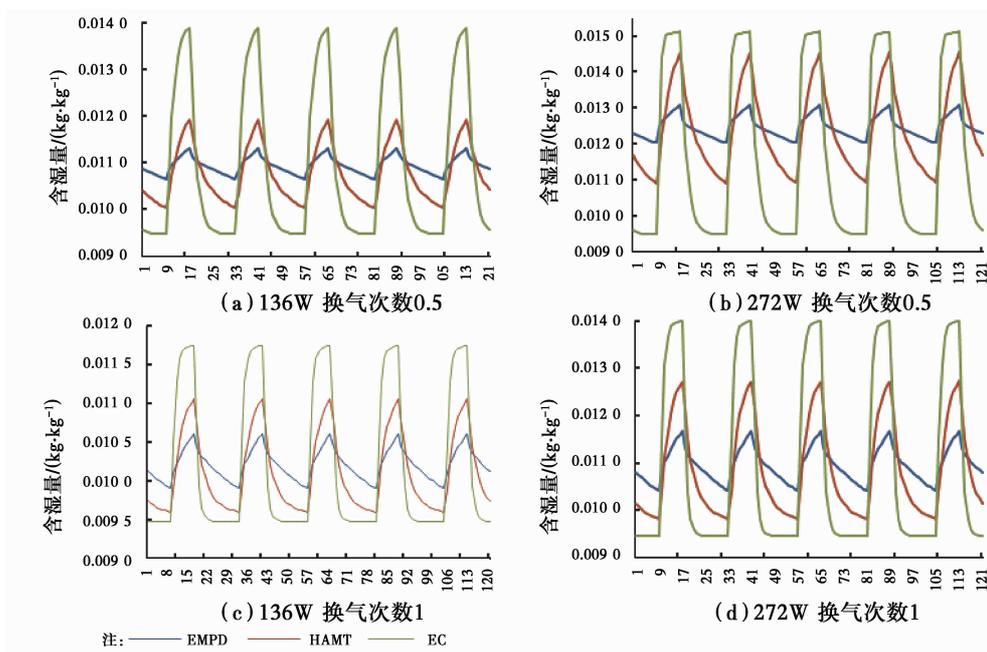


图 5 EMPD、HAMT 和 EC 模拟对比

2.4.2 真实气象参数 使用南京典型气象年逐时气象数据作为室外气象参数,不使用空调系统对室内热湿环境进行调节,分别基于不同模型计算室内空气含湿量。

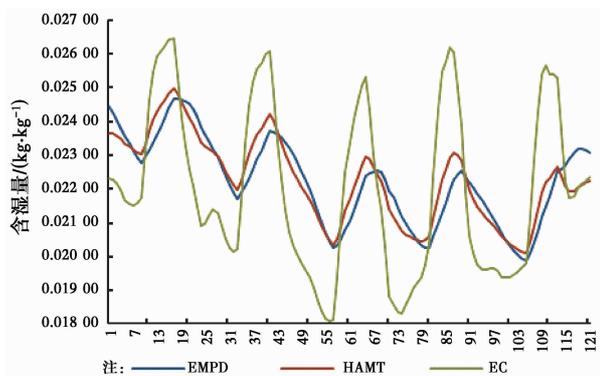


图 6 7 月 1 日至 5 日室内逐时空气含湿量

计算表明,3 种模型都反映出全年室内空气含湿量先增后减的趋势,即冬天含湿量低,夏天含湿量高。冬天时和 HAMT 相比,EMPD 的变化幅度略小,EC 的变化幅度过大,跟 HAMT 都有一定差距。而在夏天时,如图 6 所示,以 7 月 1 日至 7 月 5 日为例,EMPD 和 HAMT 高度吻合,变化幅度几乎完全一致,二者逐时误差在 5% 以内,而 EC 的逐时误差平均值则达到了 45%。同时 EC 在不同季节的湿变化幅度误差也不一致,可见同一个等效湿容量系数 N 并不能正确表达不同湿度环境的情况。EMPD 在模拟含湿量较高的夏季时具有很大的优势。

2.4.3 能耗模拟 能耗模拟的设置条件为在每天 9:00~17:00 时,空调控制温度在 18~26 °C 之间,相对湿度在 45%~65% 之间,旨在模拟一个真实舒适的室内环境。

表 3 不同模型能耗值和峰值负荷

	总能耗/ kWh	制冷能耗/ kWh	采暖能耗/ kWh	峰值制冷 负荷/W	峰值采暖 负荷/W
EMPD	1 244	734	510	1 937	1 227
HAMT	1 349	816	533	2 201	1 193
EC	1 162	651	511	1 666	1 217

表 4 EMPD 与 EC 误差分析

	总能耗 误差	制冷能 耗误差	采暖能 耗误差	峰值制冷 负荷误差	峰值采暖 负荷误差
EMPD	-7.8%	-10.0%	-4.3%	-11.9%	2.8%
EC	-13.9%	-20.2%	-4.3%	-24.3%	2.0%

如表 3 所示,HAMT 得到的全年能耗值最大,为 1 349 kWh,EMPD 算出的 1 244 kWh 比其小了 7.8%,而 EC 算出的 1 162 kWh 则小了 13.9%。这部分差别主要是由于 HAMT 模型考虑围护结构传湿,而在空调控湿 45%~65% 的情况下,室内外传湿方向主要是室外传向室内,除去这部分湿所多用的能耗使得 HAMT 的计算结果较大,而 EMPD 只考虑房间内墙面的吸放湿,使得计算结果小于 HAMT。不过 EMPD 模型考虑了空气与墙体湿交换的换湿阻,与不考虑换湿阻的 EC 模型相比,少吸收了一部分湿,而这部分湿需要空调除去,因而 EMPD 模型计算出的能耗值会介于 HAMT 和 EC 之间。通过表 4 可以看出,在制冷能耗和峰值制冷负荷方面,EMPD 均比 EC 更为接近 HAMT,这得益于 EMPD 模型的数学基础,其把墙体分为参与吸放湿的表层和不参与吸放湿的深层,这是对采用有限差分法求解热湿耦合传递的 HAMT 的合理简化,而 EC 则是把室内墙体和家具的吸放湿能力集总到室内空气中,等效湿容量系数难以确定,且无法跟真实的物理意义挂钩,因此计算出的结果相比 EMPD 来说误差更大,只能用作粗略估计,不能代替 HAMT。

3 结 论

3 种常用热湿耦合计算模型中,HAMT 是考虑墙体吸放湿和热湿耦合的精确模型,但是其计算时间极长,模拟运行前需设置的材料湿参数过多,同时缺乏合理的缺省设置,个人计算机在复杂情况如模拟 1 栋大楼时甚至会出现算不出的情况,因而在精度要求不是特别高的情况下特别是建筑设计的方案阶段,使用 HAMT 模型存在很多不便。EC 模型则由于过于简化,在理论上存在缺陷,反映到计算结果上表现为变化幅度和误差都过大。公式分析及计算结果表明 EMPD 模型在计算湿方面更接近作为参照的 HAMT 模型,尤其是在模拟夏季高温高湿情况下室内温湿度时。EMPD 在计算能耗方面同样比 EC 模型更接近 HAMT,并且计算用时远远小于 HAMT 模型,因此在需要兼顾计算精度和速度的情况下,可以选用 EMPD 模型进行建筑模拟。然而在对模拟精度要求越来越高的今天,EMPD 模型的精度仍然需要进一步提高。现有 EMPD 模型假设墙体只有表面一层参与吸放湿,这种假设能反映以天

为单位的短周期湿变化,但当同时存在更长周期的季节性湿变化时,现有 EMPD 则无法体现,因此模拟的结果还有一些误差。如果在模型中再加入一层湿渗透深度,使得浅层材料参与短周期吸放湿,深层材料参与长周期吸放湿,那么 EMPD 模型将能更准确地模拟自然条件下的室内温湿度。目前已经有理论开始研究包括两层湿渗透深度的 EMPD 模型,当新的 EMPD 模型加入 EnergyPlus 中后,在几乎不增加运算时间的情况下,相信计算精度将会得到进一步增加。

参考文献:

[1] Fang L, Clausen G, Fanger P O. Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality [J]. *Indoor Air*, 1998, 8(2): 80-90.

[2] 陈友明, 陈在康. 考虑吸放湿的室内环境及空调负荷模拟分析[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 1998, 25(6): 70-74.

[3] Qin M, Walton G, Belarbi R, et al. Simulation of whole building coupled hygrothermal-airflow transfer in different climates [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(2): 1470-1478.

[4] Woloszyn M, Rode C. Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings[C]//*Building Simulation*. Springer-Verlag, 2008, 1(1): 5-24.

[5] Woods J, Winkler J, Christensen D. Evaluation of the effective moisture penetration depth model for estimating moisture buffering in buildings [J]. *Contract*, 2013, 303: 275-3000.

[6] Henderson H, Parker D, Huang Y. Improving DOE-2's RESYS routine: User defined functions to provide more accurate part load energy use and humidity predictions[C]// *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, Pacific Grove, CA, 2000.

[7] EnergyPlus, Engineering Reference. 2011, Department

of Energy, Lawrence Berkeley National Laboratory.

[8] Kerestecioglu A. Detailed simulation of combined heat and moisture transfer in building components [C]// *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV*, 1989: 4-7.

[9] Kerestecioglu A, Swami M, Kamel A. Theoretical and computational investigation of simultaneous heat and moisture transfer in buildings: effective penetration depth theory [J]. *Ashrae Transactions*, 1990, 96(1): 447-454.

[10] Cunningham M J. Effective penetration depth and effective resistance in moisture transfer [J]. *Building and Environment*, 1992, 27(3): 379-386.

[11] Cunningham M J. The moisture performance of framed structures -a mathematical model [J]. *Building and Environment*, 23 (1988) 123-135.

[12] Steeman H J, Janssens A, Carmeliet J, et al. Modelling indoor air and hygrothermal wall interaction in building simulation: Comparison between CFD and a well-mixed zonal model [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(3): 572-583.

[13] Janssens A, De Paepe M. Effect of moisture inertia models on the predicted indoor humidity in a room [C]//*Proceedings of the 26th AIVC conference*, Brussels, Belgium, 2005.

[14] Abadie M, Mendes N. Comparative analysis of response-factor and finite-volume based methods for predicting heat and moisture transfer through porous building materials [J]. *Journal of Building Physics*, 2006, 30(1): 7-37.

[15] 宋芳婷, 诸群飞, 吴如宏, 等. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[J]. *全国暖通空调制冷: 学术年会资料集*, 2006.

[16] 吴慧娟. 全国民用建筑工程设计技术措施节能专篇 [J]. *电气*, 2005(4): 76-77.

(编辑 薛婧媛)