

预制舱类工业建筑能耗模拟软件 PCES 的设计与开发

张军^{1,2}, 张宇峰¹, 孟庆林¹, 李日毅¹

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640;
2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]建筑能耗模拟软件是建筑节能设计与建筑能耗评估重要的支持工具, 而现行的建筑能耗模拟软件难以满足预制舱类工业建筑能耗分析及机柜级微环境控制设计的需求。[方法]提出了预制舱类建筑热平衡模型, 基于该物理模型开发出预制舱类建筑能耗计算软件 PCES, 通过工程案例证明了 PCES 能客观地反映建筑物的能耗分布规律。[结果]计算表明: PCES 可以实现对预制舱建筑围护结构、舱内热状况以及机柜级热环境状况进行求解, 适用于工程节能设计与能耗分析。[结论]研究成果可实现建筑参数设定、能耗模拟与建筑热过程及能耗分析。

关键词: 预制舱类工业建筑; 能耗模拟; 节能设计

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)03-0094-08

Design and Development of Energy-consumption Analysis Software for Prefabricated Cabin Type of Industrial Building

ZHANG Jun^{1,2}, ZHANG Yufeng¹, MENG Qinglin¹, LI Riyi¹

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] Building energy simulation is an important supporting tool for green building design and building energy consumption assessment. At present, building energy simulation software can't meet the needs of energy consumption analysis and cabinet level micro environment control design of prefabricated building. [Method] Thermal physical model of prefabricated building was proposed in this paper, then the energy consumption calculation software of prefabricated cabin building (PCES) was developed based on the physical model. Finally the software PCES was proved to reflect the energy-consumption distribution objectively in buildings by the project example. [Result] The results showed that a new way was put forward to solve the envelope of prefabricated cabin, cabin thermal condition and cabinet thermal environment, which was suitable for energy saving design and energy consumption analysis of engineering. [Conclusion] We demonstrate the feasibility of building parameter setting, energy consumption simulation and building thermal process and energy consumption analysis by PCES.

Key words: prefabricated cabin type of industrial building; energy-consumption analysis; energy-saving design

预制舱类工业建筑能耗模拟软件 PCES 设计与开发的背景主要有以下三个方面:

1) 预制舱类工业建筑面临前所未有的发展机

遇: 随着智能电网的大力发展, 作为电力调度与控制中枢, 智能变电站迎来一波新的建设浪潮。变电站数量和规模迅速增长, 微机监控和综合自动化系统取代了常规控制方式, 热负荷也不断增加, 其能源消耗和运营成本问题日益突出, 加之城市变电站落地难的问题日趋严峻。由此集预制装配式、集约紧凑化等诸多优点于一身的预制舱类建筑应运

而生。

在实际工程应用中,预制舱类建筑不止存在于电力行业,如通信行业的集装箱式数据中心、移动式基站等均属预制舱类建筑范畴,其共性特征为全预制整体式建筑,采用轻质围护结构,内热扰以设备显热发热为主;其区别为舱体内所搭载的设备功率不一,故能量密度各有不同。

2)工业建筑能耗高企不下,成为制约预制舱类工业建筑发展的瓶颈,以电网行业为例,珠三角城市群电网建设架构巨大,分布广泛。仅广州、深圳及东莞三地,110 kV及以上变电站数量多达771座,尽管电力工业建筑工艺能耗基数巨大,变电站建筑耗电量(不含工艺能耗)依然占总耗电量的26%^[1]。在预制舱类建筑应用广泛的通信行业,状况也不容乐观,全通信行业的全年耗电量已经超过20 TWh^[2],其中基站耗电量占总耗电量的73%^[3]。

工业建筑能耗居高不下,而预制舱建筑的工程现状堪忧,大部分工程应用的预制舱体围护结构未经节能设计,在能耗优化方面潜力巨大。

3)当前建筑能耗模拟软件非专门针对预制舱类工业建筑,有其局限性,难以满足预制舱类建筑能耗分析及机柜级微环境控制设计的需求。

20世纪60年代中期建筑能耗模拟研究开始起步,研究者使用动态模拟的方法分析建筑围护结构传热性能并计算动态能耗。伴随着计算机技术的迅速发展及能源危机的发生,建筑能耗模拟倍受重视,大量复杂运算可以通过计算机运算得以实施,众多建筑能耗模拟软件涌现出来,包括美国的BLAST^[4]、DOE-2^[5],欧洲的ESP-r^[6],日本的HASP^[7]与中国的DeSt^[8]等。时至今日,建筑能耗模拟软件得以不断完善,具有代表性的是Energy Plus^[9-10],与此同时,建筑能耗模拟的研究重心逐渐由模拟建模向应用模拟转变,越来越多的实际工程运用建筑能耗模拟软件进行节能优化与能耗分析,以求改善建筑系统热工性能与能效^[11-12]。但以上研究多是以人的热舒适度为环境控制目标的民用建筑类型,且多以建筑功能分区级热环境作为研究主体,设备核心部件运行所在的机柜级微环境的模拟几乎没有。

基于以上研究背景,亟需开发专门针对预制舱设计和运行管理人员应用的,适用于工业建筑节能设计与能耗模拟分析的简易高效工具。

1 预制舱类工业建筑能耗简化计算模型

1.1 建筑热物理模型建立的基础

预制舱类工业建筑热过程扰量具备以下特征:

- 1)周期性双外扰:太阳辐射与室外空气温度呈周期性变化。
- 2)稳定性单内扰:预制舱类工业建筑均为无人值守运行方式,无人散热,另外舱内电气设备功能为信号采集及电力系统的继电保护、工业控制。在信号采集数据点及控制保护动作方式确定的条件下,其设备发热量内扰波动可忽略,呈稳定状态。
- 3)无邻室扰量:预制舱独立布置,无邻室。
- 4)无空气渗透及湿量扰量:舱内设备的散湿量很小,故热湿比近似无穷大。且舱体围护系统为整体式,气密性优良,来自室外空气的渗透扰量及湿量可忽略不计。

基于建筑热过程影响因素的复杂性,其中所涉及的参数错综复杂,在保证模型计算精度及速度在工程应用领域尚可的前提条件下,必要的外部条件假定及模型参数简化是不可避免,同时也可保证研究成果具备必要的通用性。为此,本文有必要对外部条件予以简化假定,以达到简化计算规模与扩展适用范围的目的^[13]。

1)外部辐射条件假设:建筑外表面辐射得热由长波辐射与短波辐射构成,令建筑外表面与环境的长波辐射为三部分:与空气温度辐射换热、与天空温度辐射换热和与地表温度辐射换热,其余长波辐射忽略不计^[14]。

2)稳态导热条件假设:预制舱建筑围护体系属于轻质围护结构,可忽略其蓄热性,故将其传热过程简化为一维稳定传热考虑。

3)热源分布条件假设:将机柜内模块箱表面视为均匀分布的面热源,其散热方式为对流与辐射耦合作用:机柜内空气的通风换气对流换热及与柜内空气对流换热及机柜顶面的辐射换热。

4)热物性条件假设:预制舱建筑的同一材料表面具有同一物性,如:黑度、对流换热系数、辐射吸收系数等。

1.2 建筑热物理模型的建立

预制舱建筑热物理模型的示意如图1所示,图中各符号含义如表1所示。

基于上述假定条件下,并按照建筑热过程的各

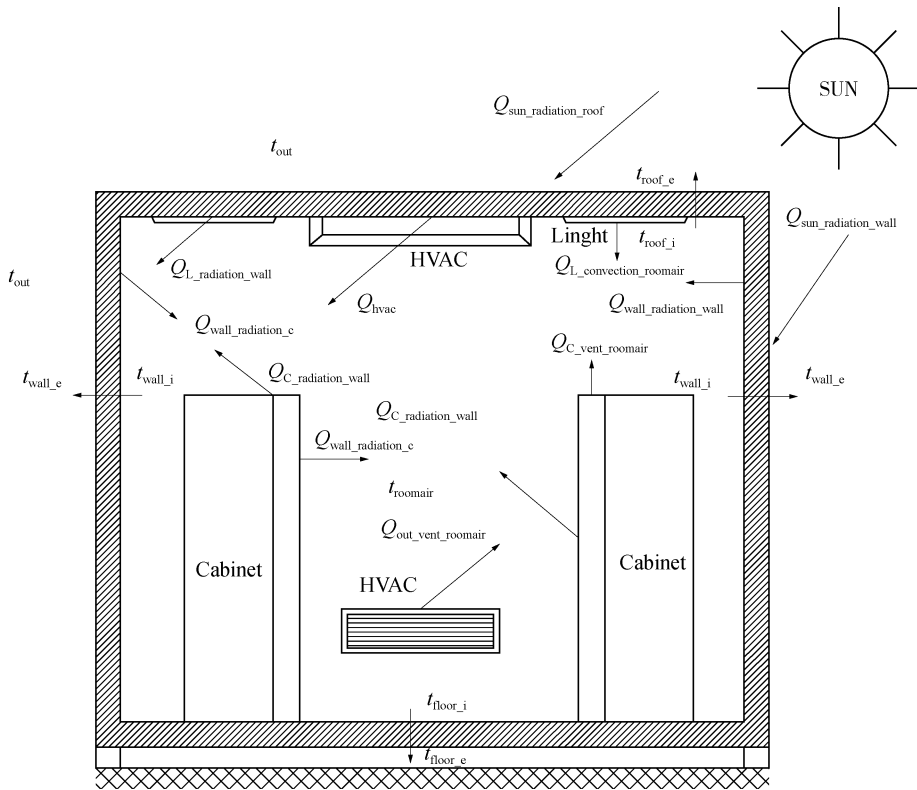


图1 建筑热过程的物理模型

Fig. 1 A physical model of building thermal processes

表1 建筑热过程的各种参量

Tab. 1 Various parameters of building thermal process

t_{out}	室外干球温度	$t_{roomair}$	室内空气温度
t_{wall-e}	围护结构外表面温度	$t_{wall-air}$	围护结构内表面温度
t_{roof-e}	屋面外表面温度	t_{roof-i}	屋面内表面温度
$t_{floor-e}$	地面外表面温度	$t_{floor-i}$	地面内表面温度
$Q_{l-radiation-roomair}$	灯具长波辐射热扰	$Q_{l-convection-roomair}$	灯具对流换热热扰
$Q_{sun-radiation-wall}$	墙体太阳辐射热扰	$Q_{sun-radiation-roof}$	屋面太阳辐射热扰
$Q_{c-convection-roomair}$	机柜对流换热热扰	$Q_{c-vent-roomair}$	机柜通风换热热扰
$Q_{c-radiation-c}$	机柜对其它机柜壁面长波辐射热扰	$Q_{c-radiation-wall}$	机柜对围护结构壁面长波辐射热扰
$Q_{wall-radiation-wall}$	围护结构壁面对其它壁面长波辐射热扰	$Q_{wall-radiation-c}$	围护结构壁面对机柜壁面长波辐射热扰
Q_{hvac}	房间空调供冷量	$Q_{out-vent-roomair}$	室外通风热扰

个阶段，可以将预制舱建筑的热平衡模型系统人为划分为围护结构外墙外表面热平衡模型、围护结构传热模型、围护结构内表面热平衡模型、舱内空气热平衡模型、机柜热平衡模型及机柜内空气热平衡模型六个部分。下文对各平衡模型一一论述。

对于围护结构外表面可建立热平衡方程：

$$q_e = \rho I + h_{c,e}(t_0 - t_e) + h_{r-e,0}(t_0 - t_e) + h_{r-e,sky}(t_{sky} - t_e) + h_{r-e,g}(t_g - t_e) \quad (1)$$

式中： q_e 是外墙导热热流密度($W \cdot m^{-2}$)； ρ 是围护结构外表面对短波辐射的吸收系数； I 是围护结构外表面总的短波辐射强度($W \cdot m^{-2}$)； $h_{c,e}$ 是外墙外表面对流换热系数($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)； t_0 是室外的干球温度(K)； t_e 是围护结构外表面温度(K)； t_{sky} 是天空温度(K)； t_g 是地表温度(K)； $h_{r-e,0}$ 是外墙表面与室外空气间的长波辐射换热系数($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)； $h_{r-e,sky}$ 是外墙表面与天空的长波辐

射换热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$); $h_{r-e,g}$ 是外墙表面与地表间的长波辐射换热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)。

围护结构的热平衡方程为:

$$q_{\lambda} = \frac{t_e - t_i}{\sum R} \quad (2)$$

$$\sum R = \frac{d}{\lambda} \quad (3)$$

式中: q_{λ} 是围护结构导热热流密度 (W/m^2); $\sum R$ 是围护结构的热阻 ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$); t_i 是外墙内表面温度 (K)。

对于围护结构内表面可建立热平衡方程:

$$q_i = h_{c,i}(t_r - t_i + \sum_{k=1}^{N_i} h_{r-ik}(t_{i-k} - t_i) + \sum_{k=1}^{N_c} h_{r-ik}(t_{ce-k} - t_i) + \frac{Q_L(1 - C_1)}{F_{tol}}) \quad (4)$$

式中: q_i 是通过建筑围护结构, 由室外传入室内的热流密度 (W/m^2); $h_{c,i}$ 是围护结构内表面对流换热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$); t_i 是该围护结构内表面温度 (K); t_r 是室内空气温度 (K); t_{i-k} 是第 k 个墙面的温度 (K); t_{ce-k} 是第 k 个机柜表面的温度 (K); h_{r-ik} 是第 k 个墙面对该壁面的辐射换热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$); h_{r-ik} 是第 k 个机柜壁面对该墙面的辐射换热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$); N_i 是参与辐射换热墙面的数量; N_c 是参与辐射换热机柜的数量; Q_L 是照明设备的得热量 (W); C_1 是照明设备的得热量中对流部分所占的百分比; F_{tol} 是所有围护结构内壁面面积和。

对于舱内空气可建立热平衡方程:

$$c_p \rho_e V_{ra} \frac{d t_{ra}}{d \tau} = \sum_{k=1}^{N_i} h_{c,i} F_{i-k} (t_{i-k} - t_{ra}) + c_p \rho_e V_e (t_o - t_{ra}) + Q_L C_1 + \sum_{k=1}^{N_c} F_{ce-k} h_{c,c} (t_{ce-k} - t_{ra}) + \sum_{k=1}^{N_c} c_p \rho_e V_{ca-k} (t_{ca} - t_{ra}) + Q_{ac} \quad (5)$$

式中: $c_p \rho_e V_{ra} \frac{d t_{ra}}{d \tau}$ 是单位时间内房间空气中显热量的增量 (W); F_{i-k} 是第 k 个墙面的表面积 (m^2); t_{ra} 是舱内空气温度 (K); c_p 是空气的定压比热容 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$); ρ_e 是空气密度 (kg/m^3); V_e 是室内外通风换气量 (m^3); $h_{c,c}$ 是机柜外壁面对流换热系

数; t_{ce-k} 是第 k 个机柜外壁面温度 (K); F_{ce-k} 是第 k 个机柜外壁面的表面积 (m^2); V_{ca-k} 是第 k 个机柜的通风换气量 (m^3); Q_{ac} 是空调系统显热除热量 (W)。取单个机柜为隔离体, 可建立热平衡方程:

$$\frac{d Q_C}{d \tau} = Q_C + c_p \rho_e V_{ca} (t_{ra} - t_{ca}) + F_{ce} h_{c,c} (t_{ra} - t_{ce}) + \sum_{k=1}^{N_i} h_{r-ci} F_{ce} (t_{i-k} - t_{ce}) + \sum_{k=1}^{N_{cc}} F_{ce} h_{r-cc} (t_{ce-k} - t_{ce}) \quad (6)$$

式中: $\frac{d Q_C}{d \tau}$ 是单位时间内机柜蓄热量变化量 (W); V_{ca} 是机柜的通风换气量 (m^3); h_{r-ci} 是第 k 个围护结构壁面对该机柜壁面的辐射换热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$); h_{r-cc} 是第 k 个机柜壁面对该机柜壁面的辐射换热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)。

对于机柜内空气可建立热平衡方程:

$$c_p \rho_e V_{ra} \frac{d t_{ca}}{d \tau} = F_{ce} h_{c,c} (t_{c,i} - t_{ca}) + F_{ce} h_{c,c} (t_{c,e} - t_{ca}) + c_p \rho_e V_{ca} (t_{ra} - t_{ca}) \quad (7)$$

式中: $c_p \rho_e V_{ra} \frac{d t_{ca}}{d \tau}$ 是单位时间内机柜内空气热量的增量 (W); $t_{c,i}$ 是机柜内发热模块表面温度 (K)。

将上述热平衡方程组成热平衡方程组并联立求解即可求得建筑围护结构、舱体级热环境及机柜级微环境热状况。

2 预制舱类工业建筑能耗模拟软件开发

预制舱类工业建筑能耗模拟软件是基于建筑热平衡物理模型的计算机程序开发, 通过软件的界面设计以及流程划分实现能耗求解及热状况分析的功能需求。

2.1 需求分析与界面设计

2.1.1 需求分析

预制舱类建筑能耗计算软件 PCES 定位为供预制舱设计人员及运行管理人员使用, 在 Windows 操作系统下运行。主要功能为建筑性能及环境控制系统参数设定、能耗模拟与建筑热过程及能耗分析。建筑能耗模拟指在给定气候参数及环境控制目标等边界条件下对建筑各分项能耗进行求解; 建筑热过程分析指在给定气候参数及环境控制目标或能耗目标等边界条件下对舱内、外壁面温度、舱内空气温度、舱内机柜及机柜内空气温度分布进行

求解。

2.1.2 界面设计

在界面中输入与能耗计算有关的参数项，分不同的功能模块输入，包括建筑及其地理位置设定、建筑围护结构参数设定，室内照明、热源等参数的设定，环境控制系统性能参数设定等。在软件基本界面划分两个区域：参数设定区与对象选定区。界面信息表达直观简洁，且易于操作。

2.2 开发语言与开发环境

鉴于 VB.NET 在软件编程中应用广泛，运行较为稳定，且支持继承、重载和接口，是一门真正面向对象的计算机语言，PCES 采用 VB.NET 作为本程序的编程语言，编程平台采用微软公司的 Visual Studio 2005，它稳定性和兼容性俱佳，是 Visual Studio 系列中运用最为广泛的版本，已被证明颇为强大的程序开发平台，可以充分保证软件设计工作的有序进行。

2.3 软件流程介绍

2.3.1 计算方法简介

现行建筑能耗计算方法主要有两种：一者为非稳态模拟建筑热过程，即依据统计的典型年气象数据及建筑环境设计参数，运用计算机进行全年或某时段的逐时能耗模拟计算，获取建筑物能耗；二者为稳态简化的计算方法，如温频法、度日法、当量运行小时法等。两种方法各有其适用性，本文认为能耗计算方法选用原则是：从研究对象的热特性出发，适度简化模型参数与计算过程，在计算精度与复杂程度两者间权衡出适于工程应用的计算方法。

基于预制舱类建筑热特性及能耗计算方法的选用原则，PCES 采用稳态的逐时模拟计算方法，相对传统的稳态计算方法，PCES 采用的算法更趋于精确，相比非稳态计算方法复杂的计算过程，PCES 结合预制舱类建筑热特性予以适当简化。

2.3.2 软件流程

首先需要在建筑参数设定界面对建筑进行命名，选择建筑物功能属性、建筑物地理位置并输入建筑的相关几何参数如建筑平面尺寸、建筑高度等，另外还需输入建筑围护结构的热工性能参数。然后，单独输入预制舱体环境控制技术参数。最后，输入单项能耗计算相关的技术参数，依照程序设定，计算出各单项逐时能耗，发热能耗的计算结

果，然后进行室内净能耗的汇总计算，再依次计算出建筑通风、空调、采暖等能耗。将各项能耗值累加求得建筑总能耗值。



图2 PCES 计算流程图

Fig. 2 Processing flow of PCES

PCES 计算流程主体可以划分为四大板块，第一板块为建筑相关参数的输入部分，第二板块为环境控制技术参数的输入部分，第三板块为能耗计算值的输出部分，第四板块为建筑热过程分析的输出部分。针对核心板块，具体计算流程简述如下：

1) 太阳辐射得热计算

在计算通过围护结构的辐射换热时，添加预制舱建筑所包含的围护结构面数，然后输入几何尺寸，选择墙体、屋面的颜色，逻辑过程如图 3 所示。

2) 围护结构与外界换热量计算

围护结构与外界换热量由以下三个部分组成：建筑外墙与外部环境之间换热、建筑屋面与外部环境的换热、建筑地面与外部环境的换热。三者有着相似的计算方法，均可用如图 4 表示计算过程。

3) 通风换热量计算

预制舱与外界的通风换热主要包括：门窗渗透、机械通风以及邻室通风。其计算原理基本一致，可归并计算，计算流程如图 5 所示。

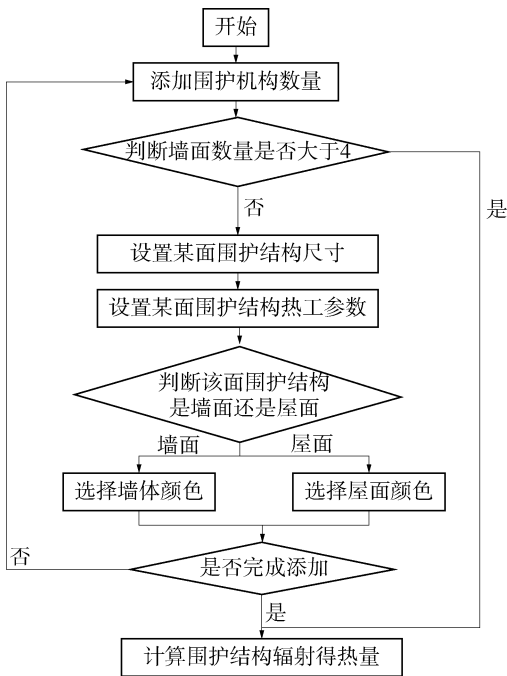


图3 辐射得热计算逻辑图

Fig. 3 Processing flow of radiation heat calculation

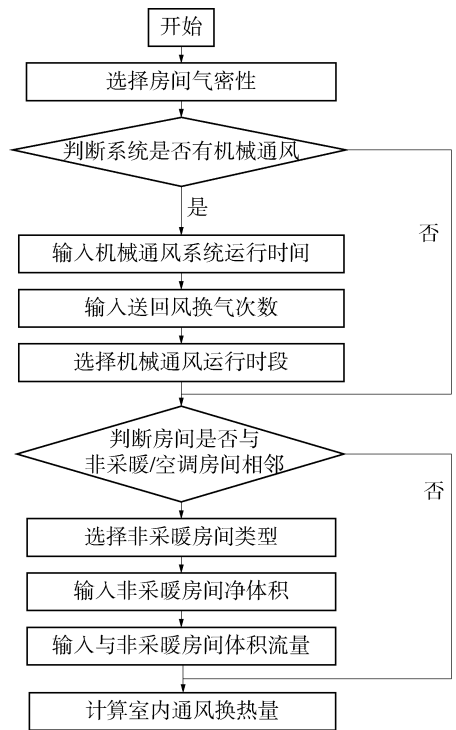


图5 通风换气热量计算逻辑图

Fig. 5 Processing flow of ventilation heat exchange

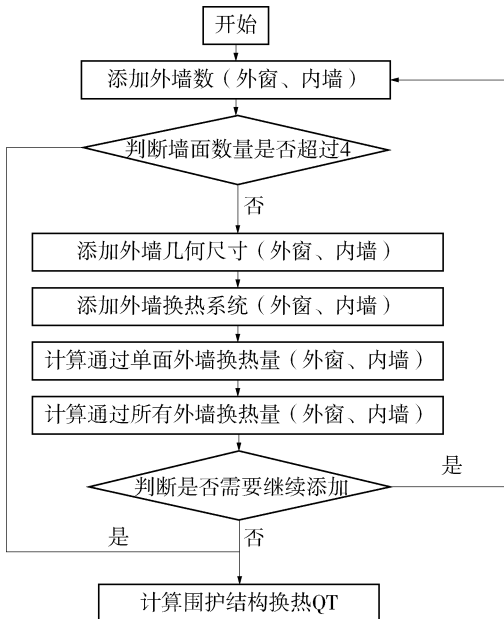


图4 围护结构与外界换热热量计算逻辑图

Fig. 4 Processing flow of heat exchange between enclosure and outside

3.1 实验测试方案

选择深圳地区某典型预制舱(如图6所示)进行现场调研与实地测试,测试时间为2016年6月3日18:00至6月10日18:00,该预制舱现场布置于实际工程应用场景基本一致,位于空旷场地,建筑无外窗,建筑各面围护结构均为独立表面(建筑地面架空),且四周均无遮挡,利于分析围护结构对能耗的影响。



图6 典型预制舱外观

Fig. 6 Typical prefab appearance

3 软件验证

选取典型的预制舱进行实测,并用实测数据与软件模拟计算值验证分析。

该预制舱为标准II型预制舱体,长为9.2 m,宽为2.8 m,高3.133 m,舱内高度2.464 5 m,机

柜 2.26 m × 0.6 m × 0.6 m 双列布置舱内维护通道宽度 1.05 m。围护结构构造做法如表 2 所示。

表 2 典型预制舱围护结构构造做法

Tab. 2 Construction practice of typical prefabricated cabin envelope

围护结构	构造做法	导热阻/ ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
外墙	16 mm 厚金邦板 + 50 mm 厚岩棉板 + 9 mm 厚欧松板 + 100 mm 空气间层 + 0.6 mm 厚钢板 + 30 mm 厚岩棉板 + 5 mm 厚铝塑板	3.49
屋面	钢板泡沫(50 mm 厚聚苯乙烯泡沫)夹芯板	1.19
楼板	10 mm 陶瓷地砖 + 38 mm 木质基层 + 200 mm 空气间层 + 50 mm 厚岩棉板 + 16 mm 厚金邦板	3.16

3.2 实验测试结果对比验证

3.2.1 舱内空气温度模拟计算结果验证

在计算过程中将测试所得围护结构内表面温度、机柜壁面温度及机柜内空气温度作为输入条件，对比舱内空气温度测试值进行验证分析，如图 6 所示。

由图 7 可知：(1) 舱体模型计算值与实际测试值总体的温度变化规律较为一致；(2) 模型计算获得的温度最高值与最低值均高于实际测试值；(3) 模型计算的温度最高值与最低值出现的时间均与实际测试值较为接近。

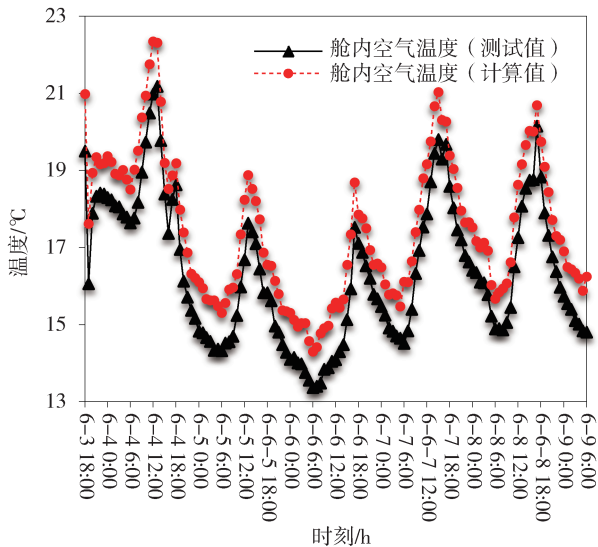


图 7 舱内逐时空气温度

Fig. 7 Hourly air temperature in cabin

3.2.2 机柜内空气温度模拟计算结果验证

机柜内空气模型计算过程将测试所得机柜通风

换气量、舱内空气温度及机柜表面温度作为输入条件，在计算结果中选取有代表性的 P4 机柜与 P10 机柜的计算值进行验证分析，其中 P10 机柜是所有测试机柜中计算值与测试值差异最大，P4 机柜则反之。

由图 8 与图 9 可知：(1) 不论对于 P4 机柜还是 P10 机柜，模型计算值与实际测试值的总体温度变化趋势基本一致；(2) 对于 P4 机柜，模型计算获得的温度最高值低于实际测试值，最低值高于实际测试值，而对于 P10 机柜，模型计算获得的温度最高值与最低值均低于实际测试值与最低值均高于实际测试值；(3) 模型计算的温度最高值与最低值出现的时间均与实际测试值基本一致。

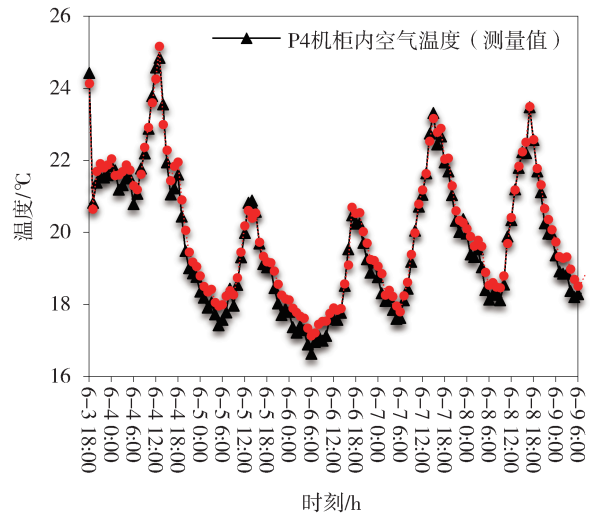


图 8 P4 机柜内逐时空气温度

Fig. 8 Hourly air temperature in cabinet-P4

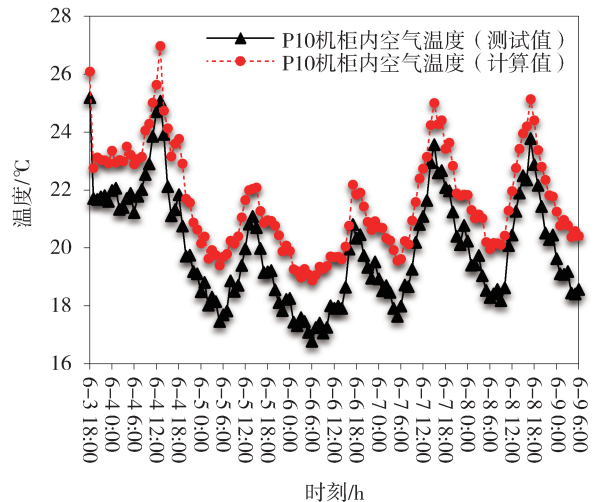


图 9 P10 机柜内逐时空气温度

Fig. 9 Hourly air temperature in cabinet-P10

4 结论

依据建筑传热学理论构建理想预制舱建筑热物理模型,并基于该物理模型开发出预制舱类建筑能耗计算软件 PCES,实现建筑参数设定、能耗模拟与建筑热过程及能耗分析,最后通过实测方式对该模型计算结果的准确性进行验证,主要结论如下:

1)对围护结构传热的处理:关键在于舱体围护结构传热的处理,基于预制舱类工业建筑轻质围护结构的基本属性,采用稳态传热对围护结构传热模型予以简化,解的稳定性及误差与时间步长相关,计算简单,物理概念清晰。

2)通过机柜及机柜内空气热平衡方程的验证分析可知:待测机柜的表面温度及内部空气温度计算值与实测值的变化规律比较接近,极值点的时间分布趋于一致,可以认为热源条件假设是可取的。

4)综上,通过实测验证,预制舱类建筑能耗计算软件 PCES 可以实现对预制舱建筑围护结构、舱内热状况以及机柜级热环境状况进行求解,且结果较为准确,适用于工程节能设计与能耗分析。

参考文献:

- [1] 国宏美亚工业节能减排技术促进中心. 中国工业节能进展报告. 2013;“十二五”中期进展 [M]. 中国质检出版社, 2014.
- [2] 秦婷. 通信基站能耗分析 [J]. 西安邮电大学学报, 2011, 16(2): 76-78.
QIN T. A survey and analysis of energy consumption in communication base station [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2011, 16(2): 76-78.
- [3] 廖小芳, 向兵, 谢峰竹, 等. 移动通信基站能耗分析与综合节能解决方案 [J]. 电信工程技术与标准化, 2010, 23(4): 53-57.
LIAO X F, XIANG B, WANG C Y, et al. Analysis of energy consumption of mobile communication base station and comprehensive Energy-saving solution [J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2010, 23(4): 53-57.
- [4] HITTLED C. The building loads analysis and system thermodynamics (BLAST) program, version 2.0, users manual, volume 1 [R]. U. S. A. : Final Report Army Construction Engineering Research Lab Champaign IL, 1979.
- [5] YORKD A, CAPPIELLO C C. DOE-2 engineers manual (ver-

- sion 2.1 A) [R]. U. S. A. : Lawrence Berkeley Lab, 1981.
- [6] CLARKE J A. A building and plant energy simulation system [M]. Bristol(UK): Adam Hilger Ltd., 1985.
- [7] SUZUKI K, OZAKI A, LEE M X, et al. 4035 Numerical Simulation of Thermal Environment in the Office Buildings : Part2 Comparison of the basic theory of HASP and THERB [R]. Tokyo: Architecture Institute of Japan, 2010: 137-140.
- [8] YAND, XIA J, Tang W, et al. De ST—An integrated building simulation toolkit Part I: Fundamentals [J]. Building Simulation, 2008, 1(2): 95-110.
- [9] FISHERD E, TAYLOR R D, BUHL F, et al. A modular, loop-based approach to HVAC energy simulation and its implementation in EnergyPlus [C/OL]. In Proceedings of Building Simulation 1999. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS1999/BS99_B-31.pdf.
- [10] WITTEM J, HENNINGER R H, GLAZER J, et al. Testing and validation of a new building energy simulation program [J]. Building Simulation, 2008(54): 407-417.
- [11] HONGT, CHOU S K, BONG T Y. Building simulation: an overview of developments and information sources [J]. Building & Environment, 2000, 35(4): 347-361.
- [12] 清华大学 DeSt 开发组. 建筑环境系统模拟分析方法—DeSt [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [13] 谢晓娜, 宋芳婷, 燕达, 等. 建筑环境设计模拟分析软件 DeSt 第 2 讲: 建筑动态热过程模型 [J]. 暖通空调, 2004, 34(8): 35-47.
XIE X N, SONG F T, YAN D, et al. Building environment design simulation software DeSt(2): dynamic thermal process of buildings [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2004, 34(8): 35-47.
- [14] 屈睿瑰. 建筑热平衡模型及南昌市建筑能耗初步分析 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2007.

作者简介:



ZHANG J

张军(通信作者)

1983-, 男, 湖南岳阳人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师, 华南理工大学建筑学在读博士, 主要从事电网土建技术设计及研究的工作(e-mail)zhangjun@gedi.com.cn。

(责任编辑 郑文棠)