

文章编号: 2095-2163(2020)12-0116-06

中图分类号: TU831.2

文献标志码: A

半嵌套式围护结构耦合地热换热器参数优化研究

奉皓明¹, 林尧林², 黄兴华¹

(1 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 本文将半嵌套式围护结构与地热换热器进行耦合, 来调节室内空气温度。以位于夏热冬冷地区的上海市为例, 利用 TRNSYS 进行建模和仿真。采用全因子实验对地热换热器的关键几何参数管长, 管内直径, 空气夹层间距和管内风速进行了分组数值模拟, 得出了考虑室内不舒适度时数及建筑能耗下的最优设计参数, 分别为管长 50 mm, 管内直径 240 mm, 空气夹层间距 240 mm 以及管内风速 1m/s。

关键词: 半嵌套式围护结构; 地热换热器; 最优设计参数

Design Parameter Optimization of Semi-Nested Building Coupled with Earth-to-air Heat Exchanger

FENG Haoming¹, LIN Yaolin², HUANG Xinghua¹

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2 School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] In this paper, the semi nested enclosure is coupled with the geothermal exchanger to regulate the indoor air temperature. Taking Shanghai in hot summer and cold winter area as an example, TRNSYS is used for modeling and simulation. The key geometric parameters (pipe length, pipe diameter, air interlayer spacing and wind speed) of earth-to-air heat exchanger were simulated by full factor experiment. The optimal design parameters of the pipe length, inner diameter, air-gap distance and air velocity were found to be 50 m, 240 mm, 300 mm and 1 m/s, respectively.

[Key words] Semi-nested enclosure; Earth-to-air heat exchanger; Optimal design parameters

0 引言

能耗的日益增长使得建筑节能与可再生资源利用成为焦点^[1]。如何在保证室内热舒适的前提下降低建筑能耗是其中的关键问题。一方面, 建筑围护结构优化设计在降低能耗方面具有很大的潜力^[2]; 另外一方面, 充分利用可再生的清洁能源, 能够在降低一次性能源消耗及温室气体排放起到重要作用。通风双重围护结构耦合地热换热器既可以利用外围护结构, 构造出一个缓冲内气候带, 又能够利用地热对室内进行冬季加热及夏季降温, 对保持室内的热舒适性及降低建筑能耗起到良好作用。

Butler 和 Smith 最早于 1977 年在美国加州建立了第一个双层围护结构建筑 (double-envelop house), 利用太阳房的热空气在两层围护结构之间循环对整个建筑进行加热^[3]。此后几年间建成了几百个双层围护结构建筑, 其特点为: 双层南北墙及屋顶, 单层东西墙+地下室模式^[4]; 2009 年 Pressnail 等进一步提出嵌套式建筑 (Nested House) 的概念, 提出在外围护结构的基础上套加一个内围护结

构^[5]; Dixon 等对嵌套式建筑在加拿大的应用进行了模拟研究, 得出其能在基准建筑上节能 85% 的结论^[6]; Rumeo 对多伦多地区的嵌套式建筑进行实地测量, 发现在标准运行及低能耗运行工况下, 与安大略省建筑规范要求的标准房相比, 其节能效果分别为 25% 及 63%^[7]。

地热换热器利用了深层土壤温度较为稳定的特点, 在空气与土壤之间进行热交换, 达到冬天加热、夏天冷却的效果。Santamouris 等采用平衡点温度的方法建立了建筑耦合地热换热器的模型, 并研究其冷却效果^[8]; Mihalakakou 采用多年气候数据, 建立了地热换热器采暖潜力评价模型, 并以气象参数作为输入, 建立了基于神经网络预测的地热换热器出口温度预测模型^[9]; Khabbaz 等在摩洛哥对地热交换器的性能进行实验和数值研究, 地理管理深 2.2~3.2 m, 地理管长 72 m, 结果表明地热交换器的性能在很大程度上取决于气候和土壤特性^[10]; Davila 等在墨西哥 3 个城市进行了地热换热器数值模拟研究, 发现其适用于夏热冬冷地区^[11]。

作者简介: 奉皓明(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 建筑节能; 林尧林(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 可持续建筑与建筑节能。

通讯作者: 林尧林 Email: ylin@usst.edu.cn

收稿日期: 2020-08-22

目前几乎没有嵌套式围护结构耦合地热换热器方面的研究。本文试图在这方面做出突破, 提出了半嵌套式建筑耦合地热交换器的系统, 建立了建筑系统的传热数学模型, 并在 TRNSY 环境下建模, 最后采用全因子实验的方法, 对建筑系统在上海市(夏热冬冷地区)的关键设计参数管长, 管内直径, 空气夹层间距, 管内风速进行优化模拟, 为探索新型建筑耦合地热利用提供参考。

1 系统描述

1.1 系统结构

该系统由埋在地下的地热换热器与半嵌套式围护结构建筑组合而成, 其中建筑结构为双层内外墙及屋顶结构, 窗户及门为单层, 便于开关和自然通风。空气在埋管中的流动假设为基本稳定, 且周围的地面具有规则和不热的物理特性。热力系统中包括 4 个相互独立的地热换热器, 其中两个地热交换器的进出气口分别接入建筑东西方向的空气夹层, 另外两个地热交换器的进出气口分别接入建筑南北方向的空气夹层中, 埋管(PVC 管)埋深 10m, 因土壤温度在 10m 以下几乎没有任何季节性变化, 故而通过利用稳定的土壤温度与地热换热器进行热交换, 可以达到调节室内温度的目的^[12]。

半嵌套式围护结构建筑与地热换热器(EAHE)耦合示意图如图 1 所示。每一个地热交换器的进气口处都有一个独立的风扇, 促使空气在埋管中循环, 使得空气由进气口出发, 途经埋管, 到达出气口。从而促使双层围护结构中的南北(东西)双层墙体间的空气夹层以及双层屋顶的空气夹层之间形成一个内循环。在外界气候变化的情况下, 通过土壤-埋管-管内空气的热交换, 使得室内保持足够的舒适性。

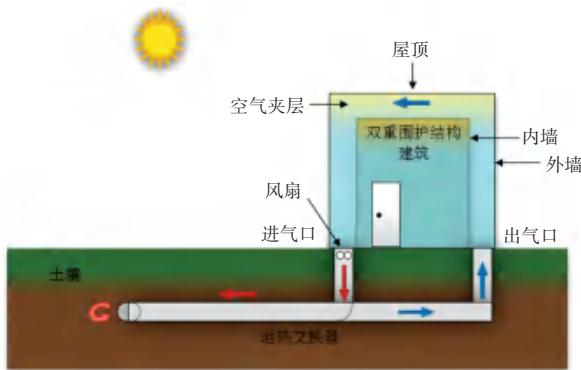


图 1 半嵌套式围护结构建筑与地热换热器(EAHE)耦合示意图
Fig. 1 Coupling schematic diagram of semi-nested envelope building and earth-air heat exchanger (EAHE)

埋管在地下的排列方式如图 2 所示。墙与墙及墙与门窗户之间用混凝土浇筑闭合, 防止空气

夹层之间发生空气交换。埋管间距大于 1.5 m, 这被认为足以确保最佳的热交换率。

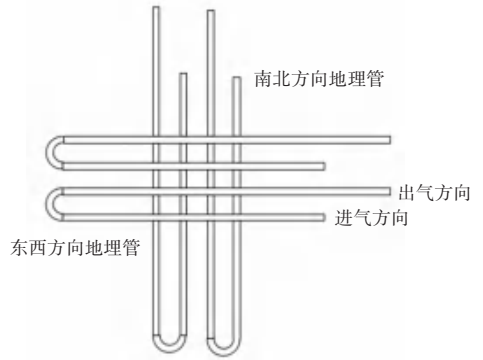


图 2 PVC 管道的排列方式

Fig. 2 Arrangement of PVC ducts

1.2 土壤热模型

土壤温度使用 Kasuda 模型并集成到 TRNSYS. 16 动态计算程序中。该模型可以用来计算不同深度土壤的温度分布, 式(1):

$$T(Z, t) = T_s + A_s * [Exp - (Z) \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}] * Cos\{\frac{2\pi}{365} * [(t - t_0) - \frac{\omega}{\omega} * \sqrt{365/\pi\alpha}]\} \quad (1)$$

当 $Z = 0$, 表示土壤表面温度变化的方程式(2)为:

$$T(0, t) = T_s + A_s + Cos\{\frac{2\pi}{365} * (t - t_0)\} \quad (2)$$

当 $Z = \infty$ 时时, 公式(3)如下:

$$T(\infty, t) = T_s \quad (3)$$

1.3 地气换热器模型

假设风管位于受周围土壤包围的大圆筒内, 将热传递视为关于管道轴线对称, 如图 3 所示。采用有限差分法和能量守恒原理, 土壤与热交换器热交换量可按式(4)计算^[13]:

$$\varphi = m_{air} * C_{p,air} * dT(x) = \frac{dx}{R_{conv} + R_{pipe} + R_{soil}} * [T(Z, t) - T(x)] \quad (4)$$

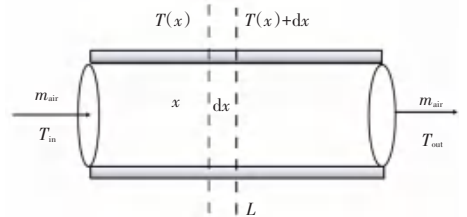


图 3 埋管纵向截面

Fig. 3 Buried duct longitudinal section

1.4 空气夹层的对流换热系数

假定湍流转为层流的临界雷诺数为 $Re_{x,c} = 5 \times 10^5$; 空气温度 $T \approx 300 K$; 密度 $\rho = 1.1614 \text{ kg/m}^3$;

粘滞系数 $\mu = 184.6 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。由于局部对流换热系数很大程度取决于气流状态为层流还是湍流,因此首先要通过求解流态过渡发生的位置 x_c 来确定这些状态存在的范围。在 300K 时,墙体间空气夹层的平均对流换热系数为式(5):

$$\bar{h} = \frac{1}{4} [0.322\lambda Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \ln x_0^{x_c} + 0.296\lambda Re^{\frac{4}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} \ln x_c^L]. \quad (5)$$

表1 建筑围护结构物理参数

Tab. 1 Physical Properties of the Building Envelope

建筑组成	组成	导热系数(W/m·K)	密度(kg/m ³)	比热容(J/kg·K)	厚度(m)
外墙	砖	0.89	1 800	1 000	0.2
	混凝土	2.10	2 400	800	0.15
	保温层	0.04	40	800	0.1
	石膏板	0.21	1 200	1 000	0.1
内墙	石膏板	0.21	1 200	1 000	0.012
	混凝土	2.10	2 400	800	0.06
	保温层	0.04	40	800	0.035
	石膏板	0.21	1 200	1 000	0.012
屋顶	砖	0.89	1 800	1 000	0.04
	混凝土	2.10	2 400	800	0.06
	保温层	0.04	40	800	0.16
	石膏板	0.21	1 200	1 000	0.012
地板	底板	0.07	800	1 000	0.015
	混凝土	2.10	2 400	800	0.06
	保温层	0.04	40	800	0.11
	混凝土	2.10	2 400	800	0.06
门	木头	0.06	600	1 600	0.05
窗户	单窗	0.33	2 750	830	0.004

土壤的热物理特性见表2。

表2 土壤热物理性质

Tab. 2 Thermo-physical properties of soils

土壤类型	密度(Kg/m ³)	热容量(J/Kg K)	热扩散系数(m ² /s)
粘壤土	1530	920	1.06 * 10 ⁻⁶

2.2 TRNSYS 建模

TRNSYS 系统模型如图4所示。建筑模型采用 Type 56,将半嵌入式围护结构建筑中内外墙之间的空气夹层划分为5个区域,分别是A区(东方向空气夹层),B区(西方向空气夹层),C区(北方向空气夹层),D区(南方向空气夹层)以及E区(顶部空气夹层)。ABE之间互通,CDE之间互通。

地热换热器采用 Type 556,该模型考虑了突然季节性温度变化及回填物料特性。通过管道的空气循环采用 Type3C。

2 案例分析

2.1 物性参数

建筑位于上海,单层结构,几何尺寸为 10 m × 10 m × 4 m,由双层墙体和双层屋顶组成,窗户和门都是传统的单层结构,分别为 2.5 m² 和 2 m²。窗户分别安装在南墙、东墙和西墙上,门安置在北向。外墙、内墙、屋顶、地板、窗以及门的热物理特性见表1。

具体计算步骤如下:

(1)将气候数据中的室外温度,相对湿度,太阳直接辐射,太阳散射辐射等数据导入;

(2)使用 TENSYS 建立了 A,B,C,D,E 共计5个空间,分别代表东,西,北,南以及屋顶的5个空气夹层。A区和C区与进气口相连接;B区和D区与出气口相连接;风机分别设置在进气口处;

(3)风机将气流从A区或C区的进气口送入地埋管,空气在地埋管中与土壤发生热交换,由B区或D区的出气口流出,分别进入E区,最终回到A区或C区,使得气流在双重围护结构建筑的空气夹层中实现从进气口-地埋管-出气口-B区-E区-A区-进气口以及从进气口-地埋管-出气口-D区-E区-C区-进气口的内循环,实现室内环境温度的热舒适性调节。

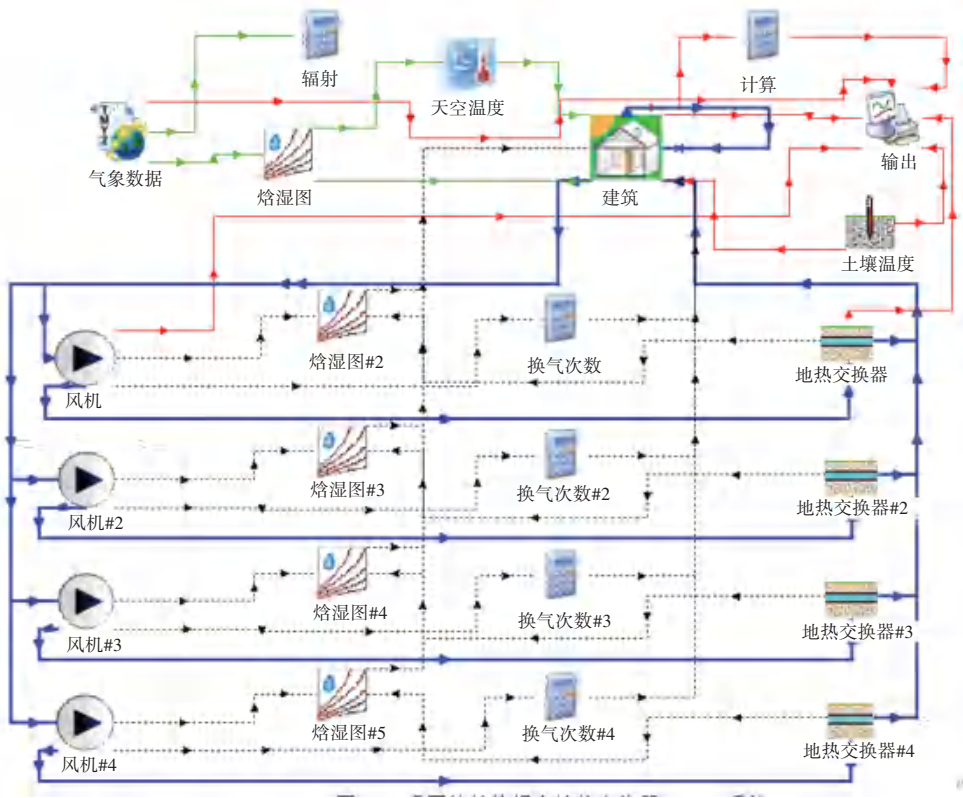


图 4 双重围护结构耦合地热换热器 TRNSYS 系统

Fig. 4 TRNSYS system of semi-nested-envelope coupled earth-to-air heat exchanger

3 基于全因子实验的建筑热舒适性研究

为了研究半嵌套式建筑耦合地热换热器的性能, 本文对相同的条件下影响室内空气温度的关键设计参数, 包括埋管长度、空气夹层间距、管径和风速, 进行了全因子实验研究。参数取值范围见表 3。

表 3 参数取值范围表

Tab. 3 Variation range of the key design parameters

参数	取值范围
埋管长度/m	30-50-70-90
埋管直径/mm	240-300-360
空气夹层间距/mm	240-300-400
管内风速/($m \cdot s^{-1}$)	0.1-0.5-1-1.5-2-2.5-3-3.5-4

3.1 埋管长度对室内空气温度的影响

地热交换器的长度是相当重要的参数, 越长的管道与土壤的热交换就越多, 从而降低了输出端的温度。选取风速 3 m/s, 空气夹层间距 400 mm, 管内直径 360 mm, 在不同管长下室内温度的变化如图 5 所示, 30 m~50 m 的区间中室内温度呈显著下降趋势, 室内最高温度由 28.66 °C 下降到 25.66 °C, 室内最低温度由 17.13 °C 下降到 15.74 °C, 室内平均温度由 23.17 °C 下降至 21.02 °C。超过 50 m, 室内温度

变化趋于平缓下降, 差异不显著。

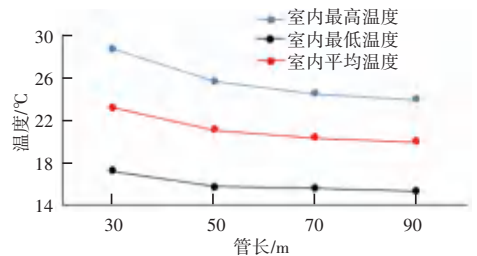


图 5 埋管长度变化时的温度变化示意图

Fig. 5 Schematic diagram of temperature change when buried pipe length changes

3.2 换热器直径对室内空气温度的影响

室内温度随地埋管直径增大而降低, 如图 6 所示。当风速为 3 m/s, 空气夹层间距为 400 mm, 管长为 50 m 时, 通过改变直径, 发现管内直径大于 300 mm 时, 温度变化并不明显, 当管内直径等于 360 mm 时室内最高温度达到 25.66 °C, 室内最低温度达到 15.74 °C, 室内平均温度达到 21.02 °C。

3.3 空气夹层间距对室内空气温度的影响

由于埋管部分要与建筑的空气夹层部分连接形成空气之间的循环, 所以埋管直径必然会小于等于空气夹层间距。基于对变量的考虑, 以夏季代表日

的室内空气温度为例,通过分析以下3种情况来研究室内空气温度的变化规律,如图7所示。

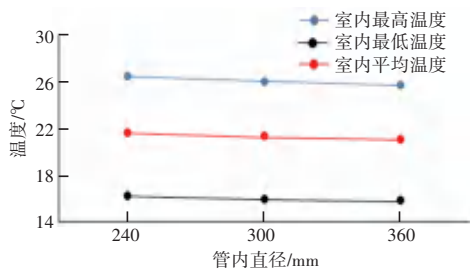


图6 换热器直径变化时的温度变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of temperature change when the diameter of heat exchanger changes

室内温度的变化趋势具有相同的几何特征。在风速为 3.5 m/s,埋管长度为 50 m,埋管直径为 240 mm的前提下,当空气夹层间距为 240 mm时,室内环境温度在 16.43 °C~26.91 °C,当空气夹层间距增大时,室内空气温度会出现小幅度下降,室内最高温度降低了 0.41 °C,室内最低温度降低了 0.03 °C,室内平均温度降低了 0.21 °C。

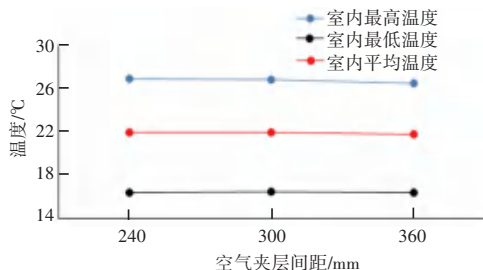


图7 换热器空气夹层间距变化时的温度变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of temperature change when air interlayer spacing of heat exchanger changes

3.4 风机风速对室内空气温度的影响

模拟了 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 m/s 等不同风速下室内温度的变化情况。现选两组情况进行阐述, A 组的其余变量选择为空气夹层间距为 0.4 m,埋管半径为 0.18 m,埋管长度为 30 m; B 组的其余变量选择为空气夹层间距为 0.24 m,埋管半径为 0.12 m,埋管长度为 90 m。

风速对室内空气温度的影响呈现下降再上升的趋势。A 组在 2.5 m/s 的风速时到达谷底,室内最高温度达到 28.12 °C;随着风速的升高,室内温度不再下降,反而有上升的趋势,如图 8 所示。B 组同样在 2.5 m/s 的风速时到达谷底,最高温度达到 24.06 °C,与 A 组有着相似的变化趋势,如图 9 所示。

本文计算了采用分体式空调的半嵌套式围护结

构建筑,一年的能耗为 1 658.84 kWh,与地热换热器耦合半嵌套式围护结构的组合建筑相比,地热系统在节能方面更为有利。在一年的周期内,0.25 h 为一个步长,进行的 82 组模拟计算,得出其可以有效的保持室内温度,室内空气平均温度为 22.06 °C,与室外环境温度相比,室内最高温度下降 8.49 °C,室内最低温度上升 23.21 °C。

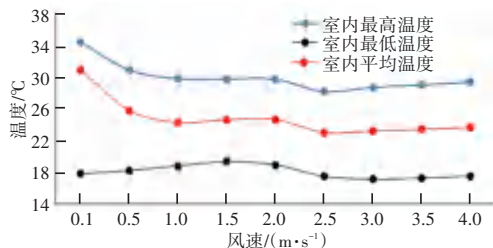


图8 风速变化时的温度变化示意图(A组)

Fig. 8 Schematic diagram of temperature change when wind speed changes (group A)

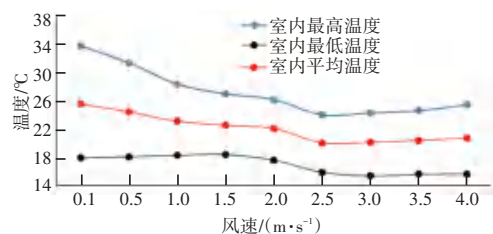


图9 风速变化时的温度变化示意图(B组)

Fig. 9 Schematic diagram of temperature change when wind speed changes (group B)

4 结束语

半嵌套式建筑耦合地热换热器有助于保持室内热舒适性。

(1)管道长度 ($L = 50$ m) 为最佳。超过此长度时,室内空气温度稳定在 21.02 °C 左右;

(2)选择的半径 (120 mm) 是可以接受的;因为使用较高的管道直径不会显著影响室内温度(降低约 0.54 °C);

(3)空气夹层间距,对于室内温度的影响很小,空气夹层间距的变化更多的是为了适应埋管半径以及改变了夹层与夹层之间的换气次数;

(4)虽然模拟结果论证了较高的风速能提供更低,更为稳定的室内温度,但考虑其经济适用性,风速为 1 m/s 时温度的波动范围处于 18–30 °C 之间,且全年能耗低于分体式空调全年能耗,夏季室内温度被控制到相对低的状态,0.1–0.5 m/s 之间的风速的变化对室内温度的影响极为剧烈,而当风速到达 0.5 m/s 之后,通过增加风速的方式并不能够有效地降低室内空气温度。文章中涉及的符号见表 4。

(下转第 125 页)