

文章编号:0253-4339(2025)02-0120-09

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.02.120

埋管地源热泵长度设计影响因素及其敏感性分析

毕伟蔷^{1,2} 韩宗伟^{1,2} 张雪平^{1,2} 张宏志^{1,2} 杨灵艳³

(1 东北大学冶金学院 沈阳 110819; 2 辽宁省流程工业节能与绿色低碳技术工程研究中心 沈阳 110819;
3 中国建筑科学研究院 北京 100013)

摘要 针对埋管地源热泵工程应用中出现的埋管长度设计不合理问题,搭建了地源热泵三维动态仿真平台,将动态模拟的出口温度与规范要求的设计出口温度进行对比,评估埋管设计长度的合理性。以北京某建筑为应用对象,研究了埋管设计长度的误差随土壤热物性参数与钻孔相关参数变化的规律,并用敏感性分析法量化了各因素对埋管长度的影响程度。研究表明:随着土壤导热系数、土壤容积热容、钻孔深度、钻孔间距的增加,埋管设计长度的相对误差逐渐增大。各因素的相对误差变化范围分别为:10.7%~27.3%、8.0%~23.8%、7.3%~12.5%、12.5%~17.4%。土壤导热系数敏感性分析的量化指标的绝对值为0.909,是埋管长度的显著影响因素,其余因素的影响程度由高到低分别为土壤容积热容、钻孔间距、钻孔排列列数和钻孔深度。

关键词 地源热泵;埋管换热器;埋管设计长度;敏感性分析

中图分类号:TB61⁺1;TK172;TK521

文献标识码:A

Analysis of Influencing Factors and Sensitivity Analysis of the Design Length of Buried Pipe Ground-Source Heat Pump

Bi Weiqiang^{1,2} Han Zongwei^{1,2} Zhang Xueping^{1,2} Zhang Hongzhi^{1,2} Yang Lingyan³

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, 110819, China; 2. Liaoning Engineering Research Center of Process Industry Energy Saving and Low-carbon Technologies, Shenyang, 110819, China; 3. China Academy of Building Research, Beijing, 100013, China)

Abstract To address the issue of unreasonable buried pipe length design in ground-source heat pump projects, a three-dimensional dynamic simulation platform was developed. The reasonableness of the buried pipe length was evaluated by comparing the simulated outlet temperature with the designed outlet temperature based on specifications. Using a building in Beijing as a case study, the effects of soil thermal properties and borehole-related parameters on the design error in buried pipe length were analyzed. A sensitivity analysis further examined the impact of these factors. Results indicate that the relative error in buried pipe design length increases with rising soil thermal conductivity, soil volumetric heat capacity, borehole depth, and borehole spacing. Relative error ranges were 10.7%–27.3%, 8.0%–23.8%, 7.3%–12.5%, and 12.5%–17.4% for the respective factors. Sensitivity analysis revealed soil thermal conductivity as the most significant factor influencing pipe length, with a quantitative index of 0.909. Other influential factors, in descending order, were soil volumetric heat capacity, borehole spacing, number of borehole columns, and borehole depth.

Keywords ground-source heat pump; ground heat exchanger; design length of the buried pipe; sensitivity analysis

埋管地源热泵系统作为一种节能、高效的空调系统冷热源,已经得到广泛应用^[1]。在地源热泵系统实际工程中,经常出现埋管设计长度不合理的问题,不仅会影响地源热泵系统运行性能,还会影响地源热泵系统的经济性,因此开展对埋管长度设计的研究尤为重要。

埋管长度设计方法中使用最广泛的是半经验

公式法,其中最具代表性的包括中国建筑科学研究院编订的GB 50366—2005《地源热泵系统工程技术规范》^[2](简称:规范),IGSHPA(国际地源热泵协会,International Ground Source Heat Pump Association)推荐的ISBN 9780929974071《Ground source heat pump residential and light commercial design and installation guide》^[3]以及ASHRAE(美国采暖、制冷与空调工程

基金项目:国家自然科学基金(521706180)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 521706180).)

收稿日期:2023-12-11;修回日期:2024-01-15;录用日期:2024-02-26

师学会, American Society of Heating, Refrigerating) 推荐的 ISBN 9781936504077 《ASHRAE handbook—HVAC applications》^[4] 3种半经验公式法。Han Zongwei 等^[5]发现规范推荐的半经验公式法设计的地理管管长与最佳管长间存在较大偏差,造成地理管动态运行过程中最高和最低出口温度与设计值的相对误差分别达到-10.38%、19.73%。张宏志等^[6]以北京某建筑为例,发现半经验公式法比使用出口温度约束条件设计的地理管管长增加11.6%。郝赫^[7]对比了半经验公式与EED(earth energy designer)软件计算的地理管管长,发现半经验公式的计算结果较EED高37.86%~56.73%。J. R. Cullin 等^[8]发现对某地源热泵使用专业设计软件设计的地理管管长误差小于6%,而ASHRAE方法由于使用了平均换热量计算地理管管长,其误差可达到-21%~102%。周营营等^[9]发现冷峰值负荷下蒙特卡罗方法计算的地理管管长比半经验公式法减小11.4%。

除地理管长度设计方法外,不同的土壤热物性参数与钻孔相关参数(钻孔间距、深度以及排列方式等)也会影响地理管长度^[10]。Zhang Wenke 等^[11]利用解析模型分析了土壤种类、回填材料导热系数对地理管设计长度的影响,结果表明,花岗岩、砂岩、混凝土和干土4种土壤类型所需的地理管管长依次增加,地理管设计管长随回填材料导热系数的增加而减小。S. Bae 等^[12]利用仿真模型分析了地理管管长的影响因素,研究表明回填材料的导热系数和管道间距对地理管设计管长影响较大。T. Kurevija 等^[13]利用柱热源模型分析了钻孔间距与排列方式对管长的影响,在钻孔排列分别为21×2和7×2下,钻孔间距由9m变为4m,地理管管长分别增加19.7%和36.7%;在钻孔间距分别为9m和4m时,钻孔排列由21×2变为7×2,地理管管长分别增加2.9%和17.5%。

综上所述,现有研究已关注到半经验公式法设计的地理管长度不合理的问题,但大多集中于地理管长度随某因素(如钻孔间距、管群排列等)的变化规律,缺少对地理管长度设计误差的全方面量化研究,也缺少对地理管长度各因素影响程度的评估,对实际工程的借鉴意义有限。为解决上述问题,本文搭建了地源热泵系统三维动态仿真模型,研究了地理管设计长度的误差随土壤热物性参数和钻孔相关参数变化的规律,并用敏感性分析法评估上述因素对地理管长度的影响程度,以期为地理管长度的设计提供一些参考。

1 地源热泵系统仿真平台的建立及验证

地理管长度设计方法中使用最广泛的是半经验

公式法,它采用一维稳态热阻模型来描述地理管的传热过程,与三维瞬态模型的换热过程存在一定的误差。为了评估土壤热物性参数和钻孔相关参数对上述误差的影响,本文搭建了地源热泵系统三维动态仿真模型,并对该仿真模型进行了验证。

1.1 数学模型

地理管与土壤的实际换热过程是复杂的瞬态换热过程。因此,为了加快计算速度,简化模型求解过程,本文进行如下假设:

- 1) 土壤视为各向同性的均匀介质,其热物性参数在整个模拟过程中保持不变;
- 2) 流体视为不可压缩的牛顿流体,忽略黏性耗散产生的热量;
- 3) 忽略土壤与回填材料、回填材料与管壁之间的接触热阻;
- 4) 仅考虑导热工况,忽略地下水渗流、土壤冻结及热湿迁移等因素。

地理管管内流体的流动换热过程满足质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程,表达式分别如下^[14]:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\nu} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{\nu})}{\partial t} + \nabla(\rho \boldsymbol{\nu} \cdot \boldsymbol{\nu}) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla^2 \boldsymbol{\nu}) + \rho \boldsymbol{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla(\rho T \nabla \boldsymbol{\nu}) = \nabla \left(\frac{k}{c_p} \nabla T \right) \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\nu}$ 为流体的矢量方向,m/s; ρ 为地理管内换热流体密度,kg/m³; p 为地理管内换热流体的压力,Pa; μ 为地理管内换热流体的动力黏度,Pa·s; k 为流体导热系数,W/(m·K); T 为流体温度,K; c_p 为流体比定压热容,J/(kg·K); \boldsymbol{g} 为重力加速度,取9.8m/s²。

土壤与回填材料的热传导过程可用三维非稳态热传导微分方程表示^[15]:

$$\rho'c' \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中: ρ' 为土壤或回填材料的密度,kg/m³; c' 为土壤或回填材料的比热容,J/(kg·K); λ 为土壤或回填材料的导热系数,W/(m·K); t 为时间,s。

变负荷工况条件下机组的制热量、制热功率、制冷量、制冷功率的关系可由式(5)~式(8)表示,式(5)~式(8)实现了地理管换热器进出口温度与建筑动态负荷的实时耦合^[15]:

$$Q_h = Q_{hd}(a_1 T_{out,h} + b_1) \quad (5)$$

$$P_h = P_{hd}(c_1 T_{out,h} + d_1) \quad (6)$$

$$Q_c = Q_{cd}(a_2 T_{out,c} + b_2) \quad (7)$$

$$P_c = P_{cd}(c_2 T_{out,c} + d_2) \quad (8)$$

式中： Q_h 、 Q_c 分别为热泵机组制热量和制冷量，kW； Q_{hd} 、 Q_{cd} 分别为热泵机组额定制热量和额定制冷量，kW； P_h 、 P_c 分别为热泵机组制热、制冷工况下的功率，kW； P_{hd} 、 P_{cd} 分别为热泵机组制热、制冷工况下的额定功率，kW； $T_{out,h}$ 、 $T_{out,c}$ 分别为制热、制冷工况下的地埋管换热器出口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 为拟合参数。

在制冷和制热工况下，地埋管的进口温度可由式 (9) 和式 (10) 得到：

$$T_{in,c}^{i+1} = T_{out,c}^i + \frac{Q_c^i + P_c^i}{c\rho Sv} \quad (9)$$

$$T_{in,h}^{i+1} = T_{out,h}^i - \frac{Q_h^i - P_h^i}{c\rho Sv} \quad (10)$$

式中： $T_{in,c}$ 、 $T_{in,h}$ 分别为制热、制冷工况下的地埋管换热器进口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； i 与 $i+1$ 分别表示某时刻与其下一时刻； c 为地埋管换热器内循环流体比热容， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； S 为地埋管总横截面积， m^2 ； v 为管内循环流体的速度， m/s 。

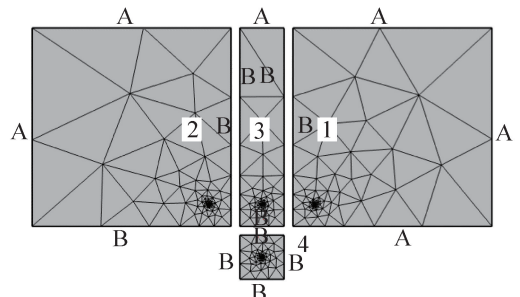
1.2 物理模型

利用 Comsol Multiphysics 软件建立了三维地埋管换热模型，如图 1 所示。根据钻孔在管群中所处位置的不同，可将其分为 4 类钻孔：1#角钻孔、2#边角钻孔、3#边心钻孔、4#中心钻孔，通过改变钻孔周围土壤的边界条件表征不同类型的钻孔^[16]。1#、2#、3#这 3 类钻孔侧面的远边界土壤设置为等温条件，1#、2#、3#、4#这 4 类钻孔的侧面与其它钻孔接壤的区域设置为绝热条件。钻孔侧面边界条件设置如图 1(a) 所示。钻孔的顶部和底部分别设置为对流边界和等温边界^[17]。在网格划分上，为了提高计算速度，将远离钻孔中心、温度梯度变化较小的土壤区域设置为元素大小为粗化的自动网格；为保证仿真模型的准确性，将温度梯度变化较大的钻孔及 U 型地埋管区域划分为定制网格尺寸的细化网格。

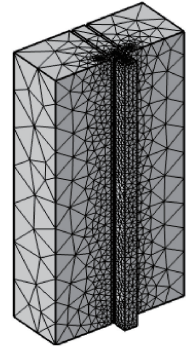
1.3 模型验证

根据上述数学模型的假设和图 1(a) 所示简化的地埋管管群模型，将模型验证分为两部分：1) 基于上述数学模型的假设，验证模拟地埋管换热器与土壤、管内流体换热过程的准确性；2) 验证以图 1(a) 的简化地埋管管群换热模型，代替完整的地埋管管群换热模型的准确性。

首先利用文献[18]中沙箱实验的实测数据验证模拟地埋管换热器与土壤、管内流体的换热过程的可行性。沙箱实验系统由水泵、电加热器、地埋管换热器组成，地埋管换热器的进口和出口处测量流体温



A 等温边界；B 绝热边界。
(a) 水平网格分布



(b) 垂直网格分布

图 1 网格划分

Fig.1 Grid partitioning

度，水泵入口处使用流量计测量回路中的流体流速。为尽量减少周围环境温度变化对沙箱的干扰，实验中用一个更大的木箱围绕沙箱，因此在模拟中将沙箱实验的周围均设置为等温边界条件。根据表 1 所示沙箱实验的参数，建立了对应的模型，并对比了沙箱实验的实测数据与仿真模型的地埋管进出口温度的差异，结果如图 2 所示。实测数据与模拟数据的地埋管进、出口温度最大相对误差分别为 4.58%、3.82%，均在 5% 以内。因此，基于上述数学模型的假设，模拟地埋管换热器与土壤、管内流体的换热过程是准确的。

表 1 沙箱实验参数设置

Tab.1 Parameter settings for sandbox experiments

参数	数值	参数	数值
钻孔直径/m	126.00	U 型管管间距/mm	53.00
U 型管长度/m	18.30	地埋管管材导热系数/ $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	0.39
U 型管内径/mm	27.33	土壤导热系数/ $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	2.82
管外径/mm	33.40	回填材料导热系数/ $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	0.73
管内介质(水)流速/ (L/s)	0.20	电加热功率/kW	1.06

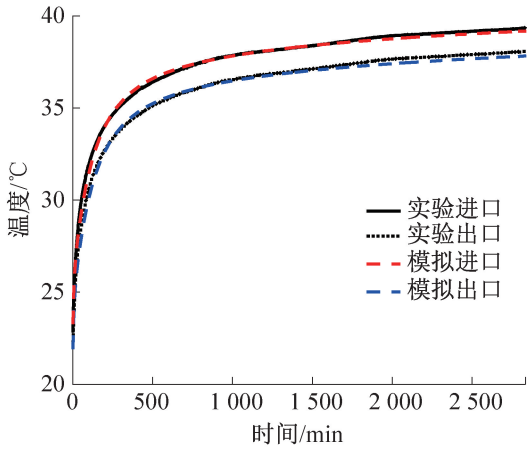
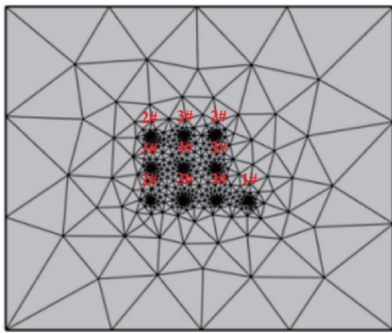


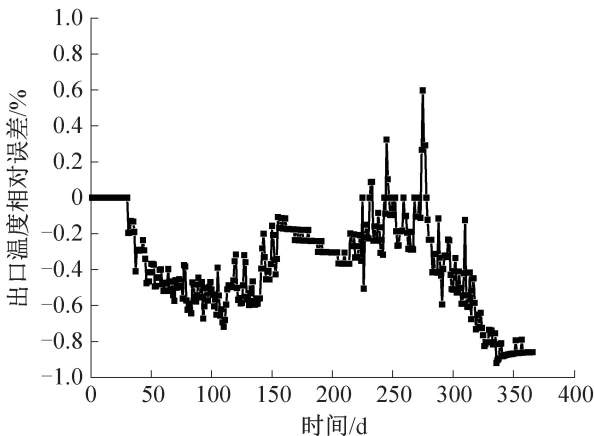
图 2 地理管进出口温度对比

Fig.2 Comparison between inlet and outlet temperatures of buried pipes

为验证图 1(a)中建立的简化地理管管群换热模型的可行性,本文建立了如图 3(a)所示的完整的地理管管群换热模型,该管群模型包括所有类型的钻孔(1#、2#、3#、4#),为对比两种模型间的差异,对图 1(a)和图 3(a)两种模型下地理管出口温度的相对误差进行了对比,结果如图 3(b)所示,图 1(a)模型与图 3(a)模型间的最大相对误差为 0.92%。因此,验



(a) 地理管管群换热模型



(b) 地理管进出口温度误差

图 3 管群换热模型的验证

Fig.3 Validation of the pipe group heat transfer model

证了图 1(a)所示简化的地理管管群换热模型替代完整的地理管管群换热模型是准确的。

2 地理管长度校核方法与流程

规范推荐的半经验公式法地理管长度计算式如下:

$$L_h = \frac{[R_f + R_{pe} + R_b + R_s F_h + R_{sp}(1 - F_h)]}{T_\infty - T_{\min}} \times 1000 Q_h \left(\frac{COP - 1}{COP} \right) \quad (11)$$

$$L_c = \frac{[R_f + R_{pe} + R_b + R_s F_h + R_{sp}(1 - F_h)]}{T_\infty - T_{\min}} \times 1000 Q_c \left(\frac{EER + 1}{EER} \right) \quad (12)$$

式中: L_h 、 L_c 分别为制热和制冷工况下所需的钻孔总长度, m; R_f 为传热介质与 U 型管内壁的对流换热热阻; R_{pe} 为 U 型管的管壁热阻; R_b 为钻孔内材料热阻; R_s 为地层热阻; R_{sp} 为短期连续脉冲负荷引起的附加热阻, 单位均为 $m \cdot K/W$; F_h 、 F_c 分别为制热和制冷运行份额; T_∞ 为土壤未受扰动的初始温度, $^\circ C$; T_{\min} 为供热工况下, 地理管换热器中传热介质的最低出口温度, $^\circ C$; T_{\max} 为制冷工况下, 地理管换热器中传热介质的最高出口温度, $^\circ C$; COP 为热泵机组的供热性能系数; EER 为热泵机组的制冷性能系数。

规范规定: 夏季运行期间, 地理管换热器出口最高温度宜低于 $33\text{ }^\circ C$; 冬季运行期间, 不添加防冻剂的地理管换热器出口最低温度宜高于 $4\text{ }^\circ C$ 。针对地源热泵系统实际运行中所出现的地理管设计长度不合理问题, 本文利用建立的地源热泵动态仿真模型, 将模拟的最高、最低出口温度与规范要求的设计最高、最低出口温度进行对比, 评估地理管设计长度的合理性, 通过改变钻孔数量对地理管长度进行校核, 获得运行过程中满足出口温度约束且最接近设计值的地理管长度, 地理管长度具体校核流程如图 4 所示。

3 结果与讨论

为研究地理管设计长度的误差随土壤热物性和钻孔相关参数的变化规律, 本文以北京地区某办公建筑为研究对象, 利用 DeST 软件模拟了该建筑的全年动态负荷, 模拟结果如图 5 所示。该建筑最大冷负荷为 124.56 kW , 最大热负荷为 71.78 kW , 全年累计冷热负荷之比为 1.05。供冷期和供暖期的起止时间分别为 5 月 19 日至 9 月 15 日, 11 月 6 日至次年 3 月 15 日。

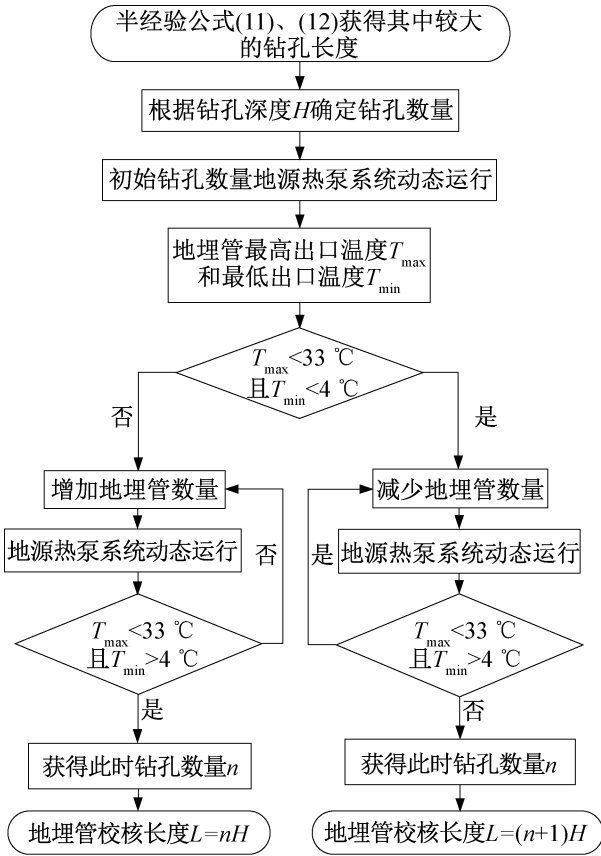


图 4 埋地管长度的校核流程图

Fig.4 Verification flow chart of the length of buried pipe

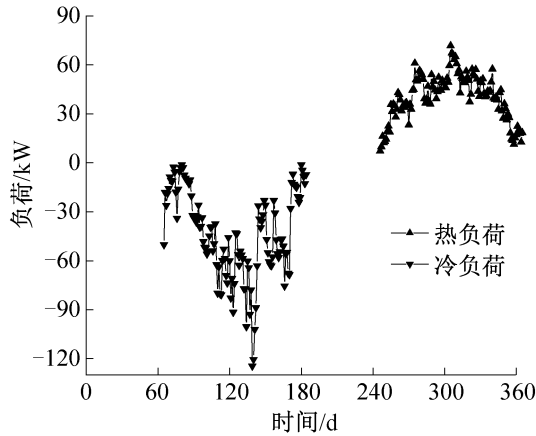


图 5 北京某办公建筑的全年负荷曲线

Fig.5 Annual load curve of an office building in Beijing

3.1 土壤热物性参数对埋地管长度的影响

3.1.1 土壤导热系数

土壤导热系数影响埋地管换热器与土壤的换热效果。本文利用式(11)、式(12)的半经验公式法计算了不同土壤导热系数下的埋地管设计长度,并根据图 4 的校核流程确定了对应的埋地管校核长度,分别获得相应的最高(低)出口温度,结果如图 6 所示。埋地管的设计长度均大于校核长度,埋地管设计长度

过长导致埋地管最高、最低出口温度与设计值的偏差较大,影响了地源热泵系统经济性。在满足设计出口温度要求的前提下,通过调整埋地管的数量改变埋地管长度,减少出口温度设计值的偏差,埋地管的校核长度得以缩短,从而提高了地源热泵系统运行的经济性。埋地管设计长度存在一定的误差,一是由于半经验公式法未考虑动态负荷对埋地管换热的影响,二是由于埋地管设计长度是根据一维稳态模型来描述埋地管的传热过程,因此埋地管校核长度的计算结果更精确。土壤导热系数由 $1.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 逐渐增至 $4.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,埋地管设计长度与校核长度的差值相同,与对应土壤导热系数下的埋地管校核长度相比,设计长度分别增加了 10.7%、15.0%、18.8%、23.1%、27.3%,是埋地管的设计长度随土壤导热系数的增加逐渐减小导致。

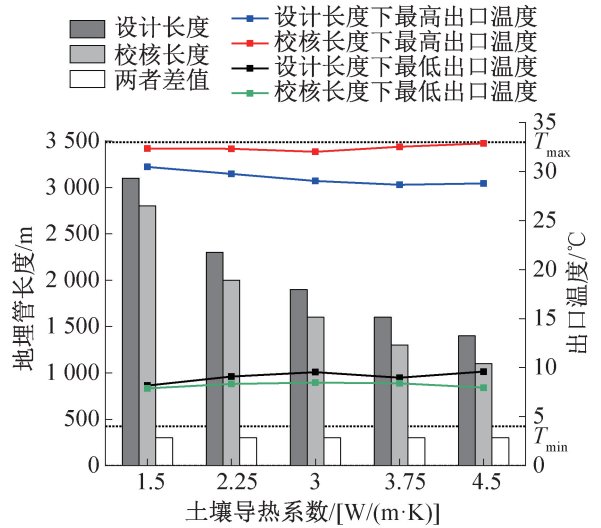


图 6 埋地管长度及其最高(低)出口温度随土壤导热系数的变化

Fig.6 Variation of buried pipe length and its highest (lowest) outlet temperature with soil thermal conductivity

3.1.2 土壤容积热容

容积热容作为土壤的另一热物性参数,其大小对埋地管长度有一定影响。图 7 所示为埋地管长度及其最高(低)出口温度随土壤容积热容的变化,埋地管设计长度相同时,土壤容积热容越大,土壤与埋地管交换相同的热量,其温度变化越小,供冷期最高出口温度越低,因此埋地管校核长度随土壤容积热容的增加而减小。随着土壤容积热容由 $2000 \text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 逐渐增至 $5000 \text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$,与对应土壤容积热容下的埋地管校核长度相比,设计长度分别增加 8.0%、12.5%、13.0%、18.2%、23.8%,是由于半经验公式法计算的埋地管设计长度忽略了钻孔内材料的容积热容对传热过程的影响,而埋地管校核长度考虑了钻孔

内材料的容积热容。因此,土壤容积热容逐渐增加时,与未考虑钻孔内材料的容积热容相比,考虑钻孔内材料容积热容的工况下供冷期地理管出口温度更低,因此地理管校核长度减小的幅度更大,地理管设计长度误差越大。

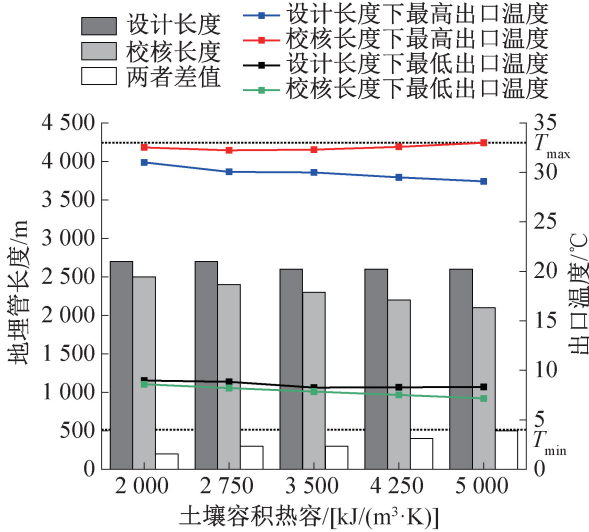


图7 地理管长度及其最高(低)出口温度随土壤容积热容的变化

Fig.7 Variation of buried pipe length and its highest (lowest) outlet temperature with soil volumetric heat capacity

3.2 钻孔相关工程参数对地理管长度的影响

3.2.1 钻孔深度

除土壤热物性参数外,钻孔相关参数也会对地理管长度产生影响。深度是钻孔的重要设计参数,合理选择深度有利于减小地理管长度。图8所示为地理管长度及其最高(低)出口温度随钻孔深度的变化。地理管设计长度是半经验公式的结果除以钻孔深度得到的钻孔数量取整所得,因此设计长度在不同钻孔深度下略有不同,但相差较小。钻孔深度由60 m 逐渐增至100 m 时,与对应钻孔深度的地理管校核长度相比,设计长度分别增加了7.3%、8.6%、10.0%、11.5%、12.5%,是由于半经验公式法未考虑钻孔深度对地理管长度的影响,而校核长度考虑了钻孔深度对地理管换热的影响,因此钻孔深度增加时,供冷期土壤堆积的热量越少,土壤温度越低,供冷期地理管最高出口温度越低,地理管校核长度越小,地理管设计长度与校核长度的差值越大,地理管设计长度的误差逐渐增大。

3.2.2 钻孔间距

钻孔间距的大小决定钻孔排列的紧密程度,从而影响地理管的换热效果。图9所示为地理管长度及其最高(低)出口温度随钻孔间距的变化,在地理管

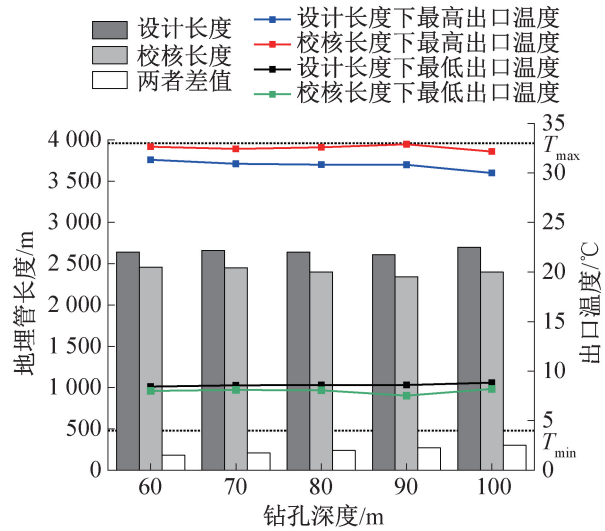


图8 地理管长度及其最高(低)出口温度随钻孔深度的变化
Fig.8 Variation of buried pipe length and its highest (lowest) outlet temperature with depth of borehole

设计长度下,钻孔间距由4 m 增至6 m 时,钻孔排列越疏松,供冷期土壤中堆积的热量越少,土壤温度越低,供冷期地理管最高出口温度依次降低,地理管校核长度越小。钻孔间距由4 m 增至6 m 时,与对应钻孔间距的地理管校核长度相比,设计长度分别增加了12.5%、12.5%、12.5%、17.4%、17.4%,半经验公式法计算的地理管设计长度是根据供冷期中的最大冷负荷计算的,但其地层热阻计算时考虑了整个供冷期的能量堆积的影响,导致地层热阻偏大,地理管设计长度偏大。因此,钻孔间距越大,供冷期堆积的能量越少,地理管设计长度的误差越大。

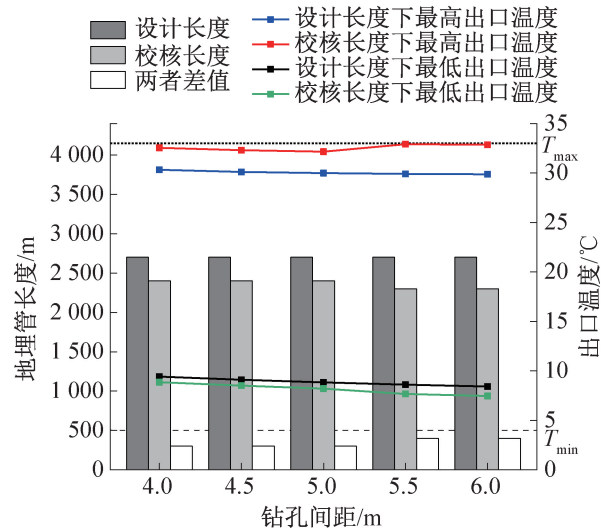


图9 地理管长度及其最高(低)出口温度随钻孔间距的变化
Fig.9 Variation of buried pipe length and its highest (lowest) outlet temperature with borehole spacing

3.2.3 钻孔排列方式

不同的钻孔排列方式造成钻孔排列的紧密程度不同,从而影响埋管换热性能。在本文的研究管数中,钻孔排数分别为单排、双排、三排和四排时,钻孔排列的密集程度依次增加。表 2 所示为埋管长度设计的最高(低)出口温度随钻孔排数的变化。当钻孔排数由单排变化到四排时,埋管设计长度下供冷期最高出口温度依次增加了 0.05、0.02、0.01 °C。随着钻孔排列逐渐变密集,供冷期堆积的热量越多,供冷期埋管出口温度逐渐升高,因此埋管长度将逐渐增加。钻孔排数在研究范围内变化时,与对应钻孔间距的埋管校核长度相比,设计长度的增加范围为 12.5%~17.4%。

表 2 埋管最高(低)出口温度随钻孔排数的变化

Tab.2 Variation of the highest (lowest) outlet temperature of the buried pipe with the number of borehole rows

钻孔排数	最高出口温度/°C		最低出口温度/°C	
	设计长度	校核长度	设计长度	校核长度
单排	29.91	32.91	8.08	7.07
两排	29.96	32.97	8.55	7.61
三排	29.98	32.99	8.77	7.82
四排	29.99	32.18	8.83	8.20

3.3 埋管长度模型的敏感性分析

上述研究均为单因素变化对埋管长度的影响研究,但实际换热过程是有多因素共同作用的换热过程,因此目标影响因素变化引起的敏感性大小一般受模型中其他影响因素取值的影响^[19]。本文使用基于 SRC(标准回归系数, standard regression coefficient) 的全局敏感性分析方法量化各影响因素,评估单因素的敏感性在其他影响因素作用下对埋管长度模型的响应^[20]。SRC 的正负表示输入与输出的正负相关性,绝对值大小表示输入对输出参数的重要性, SRC 整体模型的拟合效果常用决定系数 R^2 表示, $R^2 > 0.7$ 认为拟合效果较好。假设各影响因素之间互不关联,计算如式(13)~式(17)所示^[21]:

$$\frac{y - \bar{y}}{s_y} = \sum_j \frac{k_j s_j}{s_y} \frac{x_j - \bar{x}_j}{s_j} \quad (13)$$

$$s_y = \left[\sum_{j=1}^n \frac{(y_j - \bar{y})^2}{n-1} \right]^{0.5} \quad (14)$$

$$s_i = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n-1} \right]^{0.5} \quad (15)$$

第 i 个变量的标准回归系数为:

$$m_i = \text{SRC}_i = \frac{k_i s_i}{s_y} \quad (16)$$

决定系数 R^2 的计算式为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (17)$$

式中: s 为模型输出参数的总标准差; $i (N = 1, 2, \dots, N)$ 表示实验的次数; y_i 为第 i 次实验时的输出参数; \bar{y}_i 为 y_i 的均值; j 表示第 j 个输入参数; s_j 为第 j 个输入参数的标准差; x_{ij} 表示第 j 个输入参数在第 i 次实验中的取值; \bar{x}_j 表示 x_{ij} 的均值,即第 j 个输入参数下 i 次实验的均值; k_j 为每个输入参数 x_j 的系数; \hat{y}_i 为预测值。

依据相关文献选定了相对全面的输入参数的范围,土壤导热系数与土壤容积热容分别为 1.5~4.5 W/(m·K)^[22] 和 2 000~5 000 kJ/(m³·K)^[22]。对于浅层地源热泵,其钻孔深度、钻孔间距、钻孔排数的取值分别为:50~100 m^[23]、4~6 m^[2]、1~6 排。在埋管长度模型中 R^2 为 0.89,说明土壤热物性参数和钻孔相关工程参数与埋管长度模型的拟合程度较好。表 3 所示为各影响因素的标准回归系数分析结果,除钻孔排数外,其余影响因素的 SRC 均为负值。土壤导热系数的 SRC 的绝对值最大,为 0.909,因此土壤导热系数是埋管长度的显著影响因素;其次为土壤容积热容, SRC 的绝对值为 0.148,土壤容积热容对埋管长度的影响较大;钻孔深度、钻孔间距,钻孔排数的 SRC 的绝对值均小于 0.1,对埋管长度的影响较小。由表 3 可知,各影响因素对埋管长度影响程度由高至低为:土壤导热系数、土壤容积热容、钻孔间距、钻孔列数与钻孔深度。

表 3 标准回归系数分析结果

Tab.3 Results of SRC analysis

影响因素	土壤导热系数	土壤容积热容	钻孔深度	钻孔间距	钻孔排数
SRC	-0.909	-0.148	-0.016	-0.061	0.059

4 结论

针对地源热泵系统存在的埋管设计长度不合理问题,本文利用数值模拟的方法,将动态模拟的出口温度与规范中的设计值进行对比,评估埋管设计长度的合理性,基于此研究了埋管设计长度的误差随土壤热物性参数与钻孔相关参数变化的规律,并用

敏感性分析法量化了各因素对地理管长度的影响程度,得到如下结论:

1) 由于忽略了建筑动态负荷对地理管换热的影响,以及使用了简化的一维稳态换热模型,导致半经验公式法计算的地理管设计长度存在一定的误差。随着土壤导热系数、土壤容积热容、钻孔深度、钻孔间距在所研究范围内增加,地理管设计长度的相对误差逐渐增大。在上述研究范围内,土壤导热系数、土壤容积热容、钻孔深度、钻孔间距、钻孔排数的变化导致相对误差的变化范围分别为:10.7%~27.3%、8.0%~23.8%、7.3%~12.5%、12.5%~17.4%、12.5%~17.4%。

2) 土壤导热系数的敏感性分析量化指标的绝对值为0.909,远大于其他影响因素,是地理管长度的显著影响因素。其余各因素对地理管长度模型的影响程度由高到低依次为:土壤容积热容、钻孔间距、钻孔排数与钻孔深度。

参考文献

[1] 赵鹏,张东海,李晓昭,等. 基于p阶线性模型的地理管换热器流体温度分布研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(6): 51-59. (ZHAO Peng, ZHANG Donghai, LI Xiaozhao, et al. Study on fluid temperature distribution of buried tube heat exchanger based on p-order liner model [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(6): 51-59.)

[2] 地源热泵系统工程技术规范: GB 50366—2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (Technical code for ground-source heat pump system: GB 50366—2005[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.)

[3] Ground source heat pump residential and light commercial design and installation guide: ISBN 9780929974071[S]. Stillwater: Ground Source Heat Pump Publications, 2009.

[4] ASHRAE handbook—HVAC applications: ISBN 9781936504077[SI]. Atlanta: ASHRAE Publications, 2011.

[5] HAN Zongwei, LI Biao, ZHANG Shuwei, et al. Study on design error of ground source heat pump system and its influencing factors [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 144: 1030-1036.

[6] 张宏志,韩宗伟,杨灵艳,等. 管长设计方法对地源热泵长期性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1846-1853. (ZHANG Hongzhi, HAN Zongwei, YANG Lingyan, et al. Influence of pipe length design method on long-term performance of ground source heat pump [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(6): 1846-1853.)

[7] 郝赫. GB 50366《地源热泵系统工程技术规范》中附录B算法适用性探讨[J]. 制冷与空调(北京), 2016, 16(2): 1-6. (HAO He. Discussion on applicability of algorithm stated in Appendix B of GB 50366 Technical code for ground-source heat pump system [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2016, 16(2): 1-6.)

[8] CULLIN J R, SPITLER J D, MONTAGUD C, et al. Validation of vertical ground heat exchanger design methodologies[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2015, 21(2): 137-149.

[9] 周营营,施志钢. 土壤源热泵地理管换热器可靠性设计方法[J]. 青岛理工大学学报, 2016, 37(1): 77-81. (ZHOU Yingying, SHI Zhigang. Reliability design of GSHP ground heat exchanger [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2016, 37(1): 77-81.)

[10] 杨卫波. 土壤源热泵技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015. (YANG Weibo. Technology and application of ground source heat pump [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.)

[11] ZHANG Wenke, YANG Hongxing, LU Lin, et al. Investigation on influential factors of engineering design of geothermal heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 84: 310-319.

[12] BAE S, KIM H, NAM Y. Sensitivity analysis on design factor of ground heat exchanger for optimum design of vertical ground source heat pump system[J]. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 2018, 34(3): 87-93.

[13] KUREVIJA T, VULIN D, KRAPEC V. Effect of borehole array geometry and thermal interferences on geothermal heat pump system [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 60: 134-142.

[14] 李贵,韩宗伟,杨灵艳,等. 地理管流体速度对地源热泵系统运行性能影响研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(10): 1334-1339. (LI Gui, HAN Zongwei, YANG Lingyan, et al. Study on the influence of buried pipes fluid velocity on the operation performance of ground source heat pump system [J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(10): 1334-1339.)

[15] ZHANG Hongzhi, HAN Zongwei, YANG Lingyan, et al. Analysis of influence of the length of ground heat exchangers on the operation characteristics and economy of ground source heat pumps [J]. Energy and Built Environment, 2021, 2(2): 127-136.

[16] 王俊清,袁艳平,曹晓玲,等. 基于混合解换热模型的地源热泵系统井群热干扰特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 194-200. (WANG Junqing, YUAN Yanping, CAO Xiaoling, et al. Thermal interference characteristics of wells in ground source heat pump system

- based on analytical and numerical calculation of mixed solution [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 194–200.)
- [17] 张辉, 侯宏娟, 汉京晓, 等. 跨季节地理管储热性能模拟及分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(5): 1148–1154. (ZHANG Hui, HOU Hongjuan, HAN Jingxiao, et al. Simulation and analysis of performance of seasonal borehole thermal energy storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(5): 1148–1154.)
- [18] BEIER R A, SMITH M D, SPITLER J D. Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis[J]. Geothermics, 2011, 40(1): 79–85.
- [19] 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 等. 环境模型中敏感性分析方法评述[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4889–4896. (CHEN Weiping, TU Hongzhi, PENG Chi, et al. Comment on sensitivity analysis methods for environmental models [J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4889–4896.)
- [20] KRISTENSEN M H, PETERSEN S. Choosing the appropriate sensitivity analysis method for building energy model-based investigations [J]. Energy and Buildings, 2016, 130: 166–176.
- [21] ZHU Li, CHEN S, YANG Yang, et al. Global sensitivity analysis on borehole thermal energy storage performances under intermittent operation mode in the first charging phase[J]. Renewable Energy, 2019, 143: 183–198.
- [22] WOŁOSZYN J. Global sensitivity analysis of borehole thermal energy storage efficiency for seventeen material, design and operating parameters [J]. Renewable Energy, 2020, 157: 545–559.
- [23] CHEN Shangyuan, MAO Jinfeng, HAN Xu. Heat transfer analysis of a vertical ground heat exchanger using numerical simulation and multiple regression model [J]. Energy and Buildings, 2016, 129: 81–91.

通信作者简介

韩宗伟,男,教授,博士,东北大学冶金学院,15040168696, E-mail:honzongwei_neu@163.com。研究方向:制冷与热泵技术、可再生能源利用。

About the corresponding author

Han Zongwei, male, professor, Ph. D., School of Metallurgy, Northeastern University, 86–15040168696, E-mail:honzongwei_neu@163.com. Research fields: refrigeration and heat pump technology, utilization of renewable energy.