

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.08.014

竖直地埋管换热器多个钻孔地层热阻计算方法

张雪丹,姜益强,张甜甜,董建锺

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院,150090 哈尔滨)

摘 要:为解决国家规范中关于多个钻孔热干扰下的地层热阻计算问题,针对竖直地埋管换热器系统,提出了矩形阵列钻孔布置中不同参考钻孔下的地层热阻数值计算方法,并通过算例模拟分析研究了不同钻孔布置形式以及不同钻孔间距情况下的地层热阻分布.结果表明:规则矩形阵列钻孔布置的中心位置地层热阻最大,且布置形式越趋近正方形,钻孔间距越小,地层热阻越大;而不规则矩形阵列钻孔布置的最大地层热阻位置会根据未布置钻孔点位发生相对偏移,但偏移量可忽略.研究成果可为竖直地埋管换热器设计提供理论参考.

关键词:地埋管换热器;地层热阻;钻孔布置;数值计算

中图分类号: TU18 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)08-0071-04

Multi-boreholeground thermal resistance calculation method for vertical ground heat exchanger

ZHANG Xuedan, JIANG Yiqiang, ZHANG Tiantian, DONG Jiankai

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: In order to solve the problem of multi-borehole ground thermal resistance calculation concerning thermal interference in the national standard, a numerical method for vertical ground heat exchanger is presented in this paper. And ground thermal resistance distributions of different borehole configurations and different separation space between two neighboring boreholes were studied through a case study. The results show that for regular rectangular-array borehole configuration, the ground thermal resistance in the central position is largest, also, the more the configuration reaches a square, the smaller the separation space is, the larger the total subsurface thermal resistance is; while for irregular rectangular-array borehole configuration, the position where largest subsurface thermal resistance is located will exist at a new negligible offset. The research output can provide theoretical reference for the design of vertical ground heat exchanger.

Keywords: ground heat exchanger; subsurface thermal resistance; borehole configuration; numerical calculation

目前国际上通常采用标准规范中推荐的半经验式方法来进行竖直地埋管换热器系统设计,如ASHRAE方法^[1],IGSHPA方法^[2]等.中国规范^[3]推荐的设计方法即由IGSHPA方法改进而成,文中简称GB方法.这类方法是由权威机构对无限长线热源模型或无限长柱热源模型的解析解归纳整理而来,考虑最不利情况下地埋管换热器的传热特性,以满足热泵机组最低效率要求下的最小总理管长度为

设计目标.本文基于GB方法进行竖直地埋管换热器的研究,主要贡献是通过改进的多个钻孔热干扰下的地层热阻计算公式,基于MATLAB开发了换热器管群矩形阵列平面布置下不同参考钻孔下的地层热阻分布模拟程序,并利用该程序进行实际工程算例分析,研究了给定钻孔数目下不同矩形阵列形式、不同钻孔间距对多个钻孔地层热阻分布的影响,以及模拟钻孔数目不足以构成标准阵列情况下未布置钻孔点位对最大地层热阻位置偏移的影响.

1 模型推导

竖直地埋管换热器设计计算方法在GB5366—2005(2009年版)《地源热泵系统工程技术规范》附录B中给出:

收稿日期:2014-11-14.

基金项目:黑龙江省自然科学基金面上项目(E201435).

作者简介:张雪丹(1986—),女,博士研究生;

姜益强(1973—),男,教授,博士生导师.

通信作者:姜益强,jyq7245@sina.com.

$$L_c = \left(\frac{1\,000Q_c [R_f + R_p + R_g + R_s \times F_c + R_{sp} \times (1 - F_c)]}{T_{\max} - T_{\infty}} \right) \left(\frac{\text{EER} + 1}{\text{EER}} \right), \quad (1)$$

$$L_h = \frac{1\,000Q_h [R_f + R_p + R_g + R_s \times F_h + R_{sp} \times (1 - F_h)]}{T_{\infty} - T_{\min}} \left(\frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}} \right). \quad (2)$$

式中: L_c 、 L_h 分别为制冷和制热工况下竖直地埋管换热器所需钻孔的总长度, m; Q_c 、 Q_h 分别为水源热泵机组的额定冷负荷和额定热负荷, kW; EER、COP 分别为机组的制冷性能系数和制热性能系数; F_c 、 F_h 分别为制冷和制热运行份额; $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为制冷和制热工况下传热介质的设计平均温度, °C; T_{∞} 为埋管区域岩土体的初始温度, °C; R_f 、 R_p 、 R_g 分别为传热介质与 U 形管内壁的对流换热热阻、U 形管的管壁热阻以及钻孔回填材料的热阻, $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$.

而对于地层热阻 R_s 以及短期连续脉冲负荷引起的附加热阻 R_{sp} , $\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$, 规范中给定的单个钻孔计算公式为:

$$R_s = I(r_b / \sqrt{4\alpha_s \tau}) / 2\pi\kappa_s, \quad (3)$$

$$R_{sp} = I(r_b / \sqrt{4\alpha_s \tau_{sp}}) / 2\pi\kappa_s. \quad (4)$$

对于多个钻孔则为

$$R_s = [I(r_b / \sqrt{4\alpha_s \tau}) + \sum_{j=2}^N I(x_i / \sqrt{4\alpha_s \tau})] / 2\pi\kappa_s. \quad (5)$$

式中: κ_s 为岩土体的平均导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; α_s 为岩土体的热扩散率, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; r_b 为钻孔半径, m; τ 为供冷或供热系统运行时间, s; τ_{sp} 为短期脉冲负荷运行时间, s; N 为管群中的钻孔数目; x_i 为第 i 个钻孔与所计算参考钻孔之间的距离, m. 指数积分公式 I 为:

$$I(u) = \left(\int_u^{\infty} e^{-s}/s ds \right) / 2 = E_1(u) / 2, \quad (6)$$

$$E_1(u) = \int_u^{\infty} e^{-s}/s ds = -\gamma - \ln(u) - \sum_{N=1}^{\infty} [(-u)^N / (N! N)]. \quad (7)$$

E_1 为通用指数积分的特殊形式, 式中 γ 为欧拉常数, 值等于 0.577 2.

鉴于 GB 方法由 IGSHPA 方法改进而成, 且两种设计方法均起源于 kelvin^[4] 的无限长线热源模型闭合解析解, 而规范中给出的地层热阻及短期连续脉冲负荷引起的附加热阻却与 IGSHPA 方法中的定义以及 Kelvin 模型推论结果不一致, 推导过程见文献[3, 5]. IGSHPA 方法单个钻孔地层热阻公式为

$$R'_s = E_1(r_b^2 / 4\alpha_s \tau) / 4\pi\kappa_s = I(r_b^2 / 4\alpha_s \tau) / 2\pi\kappa_s, \quad (8)$$

表 1 地层热阻计算基准参数

钻孔半径	运行时间	密度	比热容	导热系数	热扩散系数
r_b/m	τ/s	$\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c_s/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	$\kappa_s/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	$\alpha_s/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
0.076	2.592×10^6	2 000	1 125	3	1.333×10^{-6}

考虑多个钻孔热干扰下的地层热阻计算公式为

$$R'_s = [E_1(r_b^2 / 4\alpha_s \tau) + \sum_{j=2}^N E_1(x_j^2 / 4\alpha_s \tau)] / 4\pi\kappa_s = [I(r_b^2 / 4\alpha_s \tau) + \sum_{j=2}^N I(x_j^2 / 4\alpha_s \tau)] / 2\pi\kappa_s. \quad (9)$$

观察可知, IGSHPA 方法导出的热阻计算公式与 GB 规范中原式的主要区别在于指数积分的积分下限不同, 可见规范中积分公式的引用存在错误. 雷建平^[6]通过对比 GB 与 IGSHPA 方法也得出了相同结论, 并且证明单个钻孔地层热阻及短期负荷脉冲附加热阻的计算结果相差一倍以上, 李井会等^[7]也利用该结论进行了单个钻孔的热阻分析, 发现地层热阻及短期脉冲负荷引起的附加热阻是构成换热器热阻的主要部分.

在已有的公开文献中, 针对地层热阻计算问题仅仅考虑单个钻孔情况, 而 GB 方法中关于多个钻孔热干扰下的计算方法公开文献中尚没有深入研究^[8]. 事实上, 公式(9)表明: 多个钻孔地层热阻的计算是由单个参考钻孔的地层热阻及整个管群中各钻孔孔壁到参考钻孔中心处的地层热阻叠加而成; 参考钻孔的选取不同, 其他钻孔到所计算的参考钻孔的距离和也不同, 则叠加地层热阻的计算数值也不同. 因此设计过程中, 应针对地埋管管群中所有的钻孔进行计算, 找出地层热阻受其他多个钻孔热干扰效应最大的一个钻孔为参考钻孔, 以这个最不利条件下的地层热阻值作为总理管长度设计的依据. 本文针对这一问题, 提出了规则矩形钻孔布置以及不规则矩形钻孔布置的地层热阻分布数值计算方法, 并进行算例分析.

2 数值实验

2.1 基准参数

竖直地埋管换热器平面布置多为矩形阵列, 各钻孔之间多为并联管路连接方式, 通常一定数目的钻孔集成为一个环路, 多个环路流道并联运行^[9]. 地层热阻的计算依赖于地下岩土体的热物理性质, 这些参数常规上需要通过热响应测试方法获得. 本文以文献[10]的测试结果为基准参数, 见表 1. 运行时间选为一年中夏季最热月或最冷月, 以 30 d 为准.

2.2 数值实验方法

假设地埋管换热器的平面布置为矩形阵列, 钻孔数目为 $m \times n$ (行 $\times$ 列) 个, 各钻孔等间距分布, 相邻钻孔距离为 d , 见图 1。

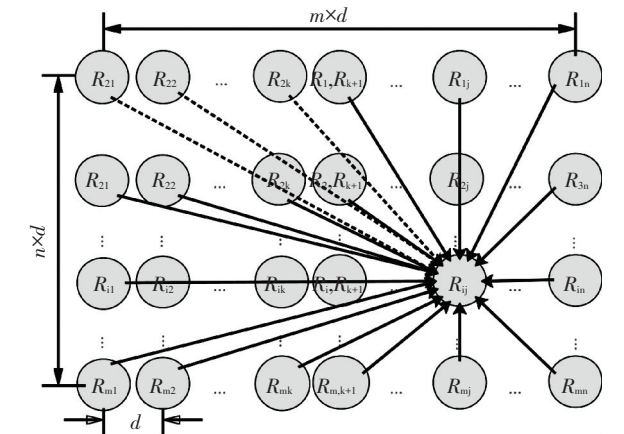


图 1 矩形阵列钻孔平面布置示意

参考钻孔所在坐标 (p, q) , 则任一钻孔 (i, j) 到参考钻孔的距离为

$$x_{p,q} = \sqrt{(p-i)^2 + (q-j)^2} d, \tag{10}$$

矩形阵列钻孔布置以第 i 行第 j 列所在钻孔为参考钻孔的多个钻孔地层热阻则为

$$R'_{pq} = [E_1(r_b^2/4\alpha_s\tau) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_1(x_{p,q}^2/4\alpha_s\tau)]/4\pi\kappa_s. \tag{11}$$

式中 $i \neq p, j \neq q$ 。

根据方程 (11), 通过 MATLAB 编程进行数值计算, 可以求得以任意钻孔为参考钻孔时的多个钻孔

热干扰下的地层热阻分布。下面以 36 个钻孔数目的工程需要为前提, 通过算例分析研究矩形阵列平面布置方式、钻孔间距以及不规则矩形阵列钻孔布置的多个钻孔地层热阻分布情况。

3 算例分析

3.1 规则矩形阵列钻孔布置

3.1.1 不同布置形式对地层热阻的影响

假设矩形阵列每一行为一个环路集成, 共 m 个环路并联, 每个环路 n 个钻孔串联, 则 36 个钻孔可布置成 $1 \times 36, 2 \times 18, 3 \times 12, 4 \times 9, 6 \times 6$ 五种形式。当钻孔间距为 5 m 时, 经计算, 1×36 单排布置两个边缘钻孔的地层热阻为 $0.1928 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$, 其余为 $0.1945 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$, 相差不大, 证明单排布置各计算钻孔受其他钻孔热干扰的影响很小。其余 4 种布置形式见图 2。从图 2 可知, 边缘位置的地层热阻较小, 越靠近管群中心地层热阻越大, 热干扰效果越强。图中 (b)、(c)、(d) 中心深色区域代表钻孔中地层热阻值大于 $0.1985 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$ 的部分, 最大地层热阻出现在中心处, 但与其周围钻孔处的热阻值相比相差很小。然而钻孔数目不同, 平面布置不同, 最大地层热阻的辐射范围没有确定的量化标准。因此推荐设计时仅计算管群最中心处的参考钻孔在热干扰下的地层热阻值即可。以上模拟结果也显示, 单排布置的排列方式最好, 各钻孔地层热阻最小。可见在给定钻孔数目的情况下, 长方形布置要优于正方形布置。

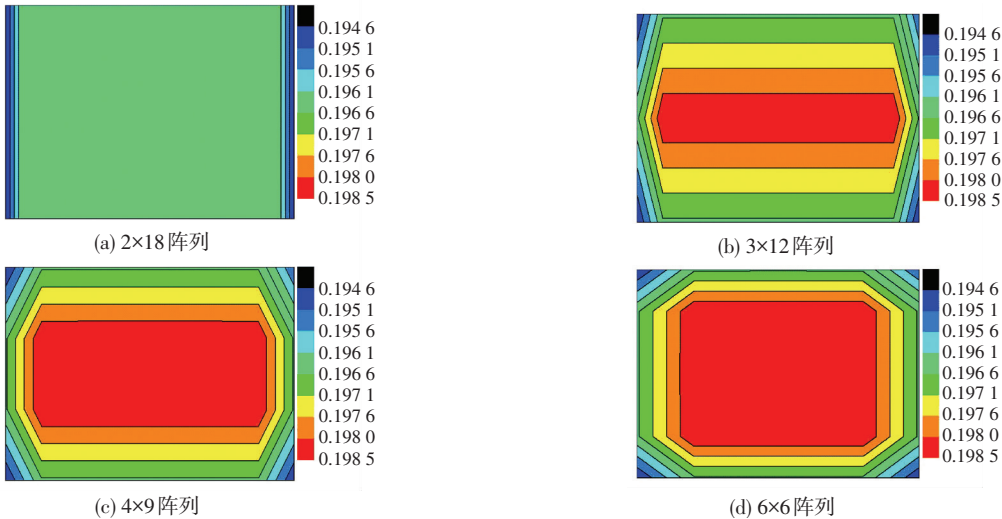


图 2 不同矩形阵列地层热阻分布

3.1.2 不同钻孔间距对地层热阻的影响

以 4×9 矩形阵列为例研究钻孔间距对地层热阻分布的影响, 见图 3。钻孔间距改变时, 地层热阻的分布规律不变, 但随着钻孔间距变大, 整个管群地层热阻随之减小。当钻孔间距为 3 m 时, 最大地层热阻为 $0.2523 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$, 而当距离增大为 6 m 时, 该值

为 $0.1935 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$, 减少了 23.3%。可见钻孔间距的影响较大。

理论研究结果表明, 地埋管换热器的钻孔平面布置越分散越好, 矩形阵列的长边越长, 各相邻钻孔间距越大, 整个管群的总地层热阻越小, 多个钻孔的热干扰效应越弱。

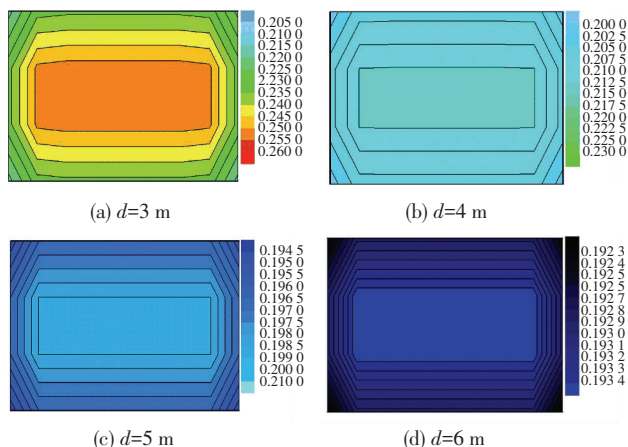


图 3 不同钻孔间距地层热阻分布

3.2 不规则矩形阵列钻孔布置

以钻孔间距为 5 m 的 4×9 矩形阵列布置为例,假设由于场地限制,矩形左上角第一行钻孔点位空置,无法足数布置 36 个钻孔,在减少钻孔数目 k 为 2、4、6、8 的情况下,分别进行地层热阻分布的计算,见图 4。当钻孔数目不超过环路集钻孔个数一半时,场地中心处地层热阻仍为最大,而超过半数时最大地层热阻位置则发生偏移。最大地层热阻位置偏移量较小。本文同时也对不布置钻孔的点位分别布置在矩形阵列长边或短边的地层热阻分布进行了模拟,结果显示其位置影响不大。

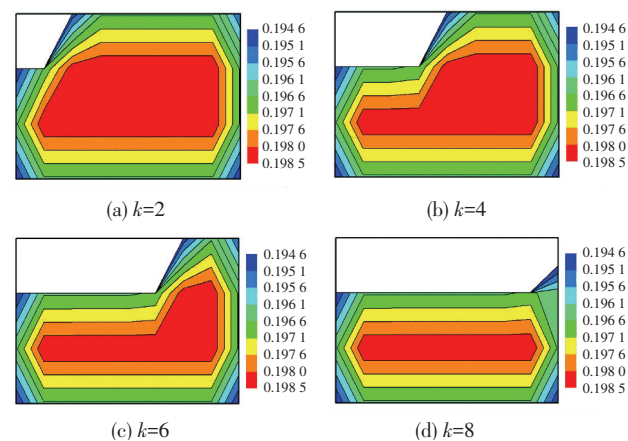


图 4 不规则矩形阵列地层热阻分布

4 结 论

1) 基于改进的多个钻孔地层热阻计算公式开发的 MATLAB 程序能够有效地以任一钻孔为参考钻孔进行数值计算,从而得到整个管群的地层热阻分布。

2) 对于规则矩形阵列钻孔布置,最大地层热阻出现在管群中心位置及其附近,推荐设计计算以中心位置处最大地层热阻为准。

3) 钻孔平面布置越分散,即给定钻孔数目条件下,矩形长边越长,钻孔间距越大,整个管群总地层热阻越小,越利于地埋管换热器的高效运行。

4) 不规则矩形阵列,即当阵列中有位置不布置钻孔时,最大地层热阻位置会发生偏移,但阵列中心处地层热阻与最大地层热阻相差很小。

参考文献

- [1] American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. 2011 ASHRAE Handbook-HVAC applications[S]. Atlanta, GA: ASHRAE Inc., 2011.
- [2] International Ground Source Heat Pump Association. Ground source heat pump residential and light commercial: design and installation guide [M]. OK: Oklahoma State University, 2009.
- [3] GB 50366—2009 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [4] KELVIN T W. Mathematical and physical papers [M]. London: Cambridge University Press, 1882.
- [5] CANE, R L D, FORGAS D A. Modeling of ground-source heat pump performance [J]. ASHRAE Transactions, 1991, 97 (1): 909-925.
- [6] 雷建平, 於仲义. 关于《地源热泵系统工程技术规范》地层热阻计算式的商榷及应用分析[J]. 暖通空调, 2009, 39(6): 27-31.
- [7] 李井会, 孟兰美, 王建奎, 等. 竖直地埋管换热器热阻的数值计算及分析[C]//2013 浙江省暖通空调动力学术年会、杭州市暖通空调学术年会论文集. 杭州: [s.n.], 2013.
- [8] 马最良. 地源热泵系统设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 136-138.
- [9] 刁乃仁, 方肇洪. 地埋管地源热泵技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] RAINIERI S, BOZZOLI F, PAGLIARINI G. Modeling approaches applied to the thermal response test: a critical review of the literature[J]. HVAC&R Research, 2011, 17 (6): 977-990.

(编辑 赵丽莹)