

地埋管地源热泵水平埋管冬夏季 工况换热性能及土壤温度场^{*}

哈尔滨工业大学 深圳市建筑科学研究院有限公司 那 威[☆]

深圳市建筑科学研究院有限公司 刘俊跃

哈尔滨工业大学 宋 艳

摘要 建立了水平埋管的二维数学模型,使用边界离散、保形变换方法对模型进行求解,用 VB 编制了地埋管地源热泵水平埋管土壤温度场计算软件。运用模型和软件,详细模拟了冬季和夏季工况下水平埋管及其周围土壤温度场和热流分布规律。冬季水平埋管周围土壤温度纵向呈不对称单峰状分布,横向呈完全对称的单峰状分布。夏季水平埋管周围土壤温度纵向呈不对称单谷状分布,横向呈完全对称的单谷状分布。随着位置远离埋管,土壤温度变化幅度减小。埋管外表面温度分布和土壤沿与埋管同心圆的圆周上温度分布都呈正弦曲线。埋管上部各单元的热流量相对较高,下部各单元的热流量相对较低。求解了给定工况下水平埋管的单位管长换热量,并通过文献中的实验数据对算法进行了验证,误差为 6.2%,模型算法具有可靠性。

关键词 地埋管地源热泵 水平埋管 温度场

Heat transfer performance and temperature field of soil around horizontal buried heat exchangers for ground-coupled heat pump system

By Na Wei[★], Liu Junyue and Song Yan

Abstract Presents a new two-dimension model, solved by the boundary discrimination and conformal mapping methods, and compiles the calculating software by Microsoft Visual Basic language. By the model and software, simulates the temperature field and the heat flow distribution for horizontal buried pipes of the heat exchanger for the GSHP in winter and summer conditions. The temperature field around the pipe shows a single-peak asymmetrical profile on vertical plant and a single-peak symmetrical profile on horizontal plant in winter condition, and shows a single-hollow asymmetrical profile on vertical plant and a single-hollow symmetrical profile on horizontal plant in summer condition. The soil temperature varies slightly increasingly away from the buried pipes. The temperature for the outer surface of the pipe and for the concentric circle with the pipe all show sine profile. The heat flow is higher through the top units of the pipe than that through the bottom units. The results agree with the data in the experiments reported by Chongqing University, and the residual error is 6.2%.

Keywords ground-coupled heat pump, horizontal buried pipe, temperature field

[★] Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

国内外地埋管地源热泵的主要研究内容可以归纳为以下几个方面:地埋管换热器传热模型的研究;地埋管的敷设形式及管材的研究;土壤特性对

地埋管换热器传热性能的影响;系统的设计和安装;回填材料的研究;地埋管地源热泵系统的能耗

^{*} 国家科技支撑计划课题“建筑能耗统计方法与能效标识技术研究”(编号:2006BAJ01A13)

①[☆] 那威,男,1979 年 1 月生,博士研究生
100044 北京市西城区车公庄大街 9 号五栋大楼 B1-1402 室
(0) 13581724940
E-mail:nawei79@126.com
收稿日期:2009-08-21

分析及技术经济评价;带辅助装置的混合式地埋管地源热泵系统的研究。这些研究的基础是土壤与地埋管的换热情况,即埋管管壁及其周围土壤温度场分布^[1]。

水平埋管地源热泵系统在国外已有几十年的历史,特别是北美和欧洲对水平埋管地源热泵系统进行了很多研究^[2]。据统计,在瑞士大约有 6 000 多个水平埋管地源热泵系统在运行。我国关于竖直埋管换热器的实验与理论研究相对较多,而水平埋管换热器相对较少,对水平埋管周围土壤温度场分布情况的研究也不够细致和全面。故本文重点介绍水平埋管换热器周围土壤的温度场分布。

1 模型简介和给定工况

以地埋管地源热泵水平埋管换热器为研究对象,建立水平埋管的二维数学模型,见图 1,该模型属于圆柱理论模型。采用边界离散法对水平埋管换热器的热力状况进行分析,通过保形变换(见图 2)、分离变量及区域衔接得到了温度场的级数解。在确定级数各项系数时,对于正交部分,采用传统的 Fourier 方法;对于非正交问题,采取积分边界元的方法^[3-5]。用 VB 编制软件,软件界面如图 3、4 所示,进而计算水平埋管及其周围的土壤温度场及热流分布规律和单位管长换热量。

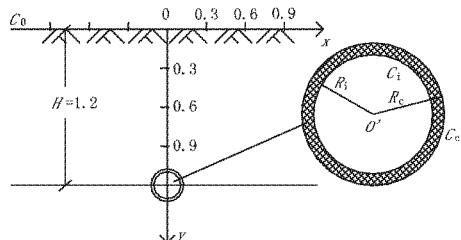


图 1 水平埋管模型示意图(原平面)

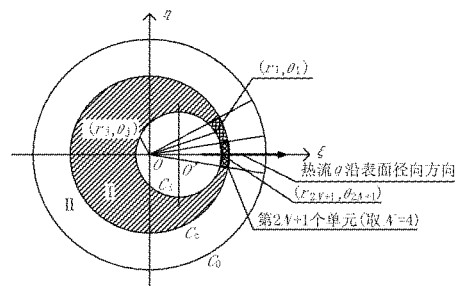


图 2 经保形变换的水平埋管模型示意图(像平面)

为便于分析定解问题的规律和现象,并用文献中的一些实验数据进行简单验证,本文选取 2001 年重庆大学水平地埋管地源热泵实验条件为给定

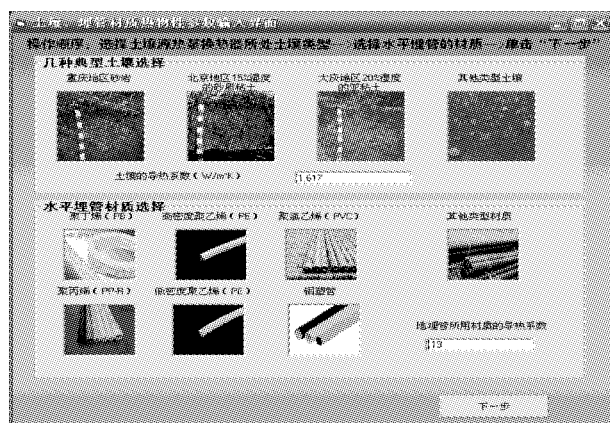


图 3 土壤、埋管材质热物性参数输入界面

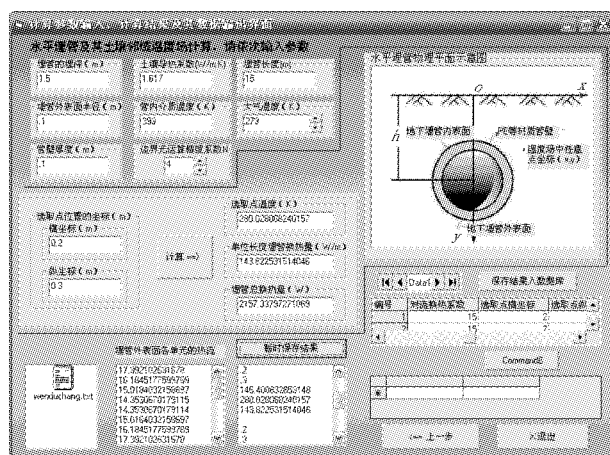


图 4 水平埋管及其土壤领域温度场计算及数据存、输出界面

工况^[6]。具体如下。

1) 地下土质为重庆地区的砂岩,其热物性参数:导热系数 λ_s , 2 W/(m·°C);密度 ρ_s , 2 400 kg/m³;比热容 c_s , 921.1 J/(kg·°C)。需要说明的是,假设回填土是匀质土壤的一部分,其热物性性质与上述土壤性质一样。本文模型也作此假设,忽略了回填土的压实程度、湿度变化等影响。

2) 地埋管采用聚乙烯管(PE),导热系数 λ_p 为 0.35 W/(m·°C),密度 ρ_p 为 1 230 kg/m³,比热容 c_p 为 1 510 J/(kg·°C)。埋管规格 25 mm×2 mm。水平埋管总长为 60 m,不包括与地上连接的一小段竖直接管部分,埋管间距为 300 mm,单层埋设,埋设深度为 1.2 m。

3) 管内流体为水。根据文献^[6],冬季系统中水温一般为 5~15 °C,计算出管内流体冬季平均温度为 10 °C,将其作为模型冬季工况的特征温度。计算出管内流体夏季平均温度为 23 °C,将其作为模型夏季工况的特征温度。

4) 管道上方土壤表面的空气温度为重庆地区的室外平均温度,冬季为 -4°C (269 K),夏季为 36.5°C (309.5 K)。

利用本文模型和软件,将上述各参数代入,可以求解出固定工况下埋管及其周围土壤温度场分布和管壁表面热流分布及埋管换热量。本文只模拟计算地下1层埋管一个支路内埋管及其周围土壤的温度分布。管道规格、埋设深度、土壤导热系数、管材导热系数、管内流体温度和大气温度等相关参数改变时水平埋管及其周围土壤的温度分布规律见文献[7]。

2 土壤纵向温度分布研究

纵向主要选取4个典型值,即: $x=0, 0.3, 0.6, 1.2\text{ m}$ (见图1)。在纵轴上以 0.15 m 为间隔从 $y=0$ 到 $y=2.4\text{ m}$ 取温度测点,再补充埋管外壁最上方及最下方两点在各纵轴上的垂足为外加温度测点,每条纵轴共计19个测点。通过软件计算出冬、夏季给定工况下各测点的土壤温度值,并绘制土壤温度分布曲线,如图5和图6所示。而 $x=-0.3, -0.6, -1.2\text{ m}$ 时的温度分布分别与 $x=0.3, 0.6, 1.2\text{ m}$ 时的温度分布完全一致,这样就可以描绘出整个区域的土壤纵向温度场分布。

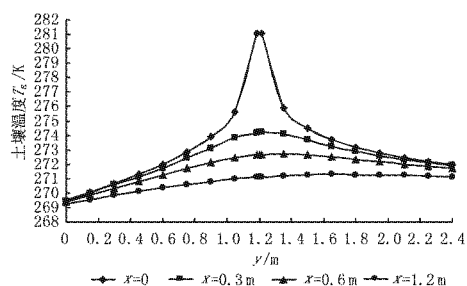


图5 冬季给定工况下水平埋管周围土壤纵向温度分布

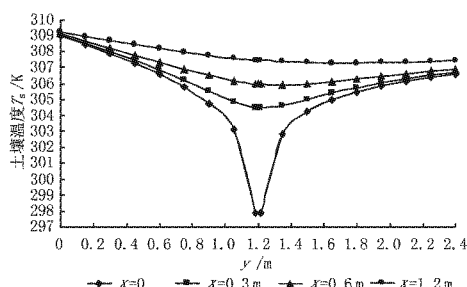


图6 夏季给定工况下水平埋管周围土壤纵向温度分布

由图可见:1) 冬季工况下,土壤温度沿纵轴方向呈不对称单峰状分布,从埋管所在位置($y=1.2\text{ m}$)沿纵向向两头远离埋管时,土壤温度逐渐降低。

在 $x=0.3, 0.6, 1.2\text{ m}$ 3条纵轴上,温度曲线有以 $y=1.2\text{ m}$ 为中心向两边下降的趋势,即土壤温度在 $y=1.2\text{ m}$ 处温度最高,向两边逐渐降低。夏季夏季工况下,土壤温度沿纵轴方向呈不对称单谷状分布。从埋管所在位置($y=1.2\text{ m}$)沿纵向向两头远离埋管,土壤温度逐渐升高。温度曲线有以 $y=1.2\text{ m}$ 为中心向两边上升的趋势,在 $x=0.3, 0.6, 1.2\text{ m}$ 3条纵轴上,土壤温度在 $y=1.2\text{ m}$ 处温度最低。夏季变化趋势与冬季正好相反,这是由于冬季大气温度低、土壤温度高,埋管从土壤中吸热,所以越靠近埋管土壤温度越高;夏季埋管向土壤放热,且大气温度高、埋管温度低,所以越靠近埋管土壤温度越低。在 $x=0$ 这条纵轴上,无论冬夏,温度分布不连续,在管外壁最上端 $y=1.1855\text{ m}$ 和管外壁最下端 $y=1.2145\text{ m}$ 之间断开,这是水平埋管位置所在。2) 两图每条温度曲线以 $y=1.2\text{ m}$ 为中心,左半部分都比右半部分陡,并不以 $y=1.2\text{ m}$ 为中心对称。这是因为埋管上方土壤(y 小于 1.2 m)比下方土壤(y 大于 1.2 m)受大气温度影响更大。3) 每图4条曲线的变化幅度不同,这说明随着位置横向远离埋管,土壤温度的纵向变化逐渐趋缓。横向足够远时,土壤最终的纵向温度变化即不为埋任何管道时土壤随深度的自然变化规律。

土壤沿深度方向通常可分为三层:变温层、恒温层、增温层。变温层在地面以下 $0\sim 15\text{ m}$ 范围内,其温度分布受大气条件影响较大。地埋管地源热泵系统埋管位置较浅,都属于变温层,一些地埋管模型不考虑大气温度变化对土壤温度场的影响是不够准确的。

3 土壤横向温度分布研究

横向主要选取4个典型值,即: $y=1.2, 0.9, 0.6, 0\text{ m}$ (见图1)。在每条横轴上以 0.2 m 为间隔从 $x=-1.2\text{ m}$ 到 $x=1.2\text{ m}$ 之间取温度测点,并补充埋管中心和埋管外壁最上方及最下方两点在各纵轴上的垂足为外加温度测点,每条纵轴共计15个测点。通过软件计算冬夏季给定工况下各测点的土壤温度,并绘制土壤温度分布曲线,如图7和图8所示。

由图可见:1) 冬季工况下,土壤温度沿横轴方向呈完全对称的单峰状分布,从埋管所在位置($x=0$)沿横向向两头远离埋管,土壤温度逐渐降

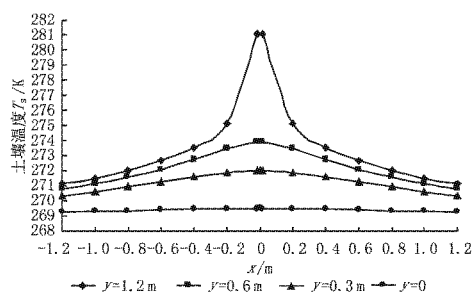


图7 冬季给定工况下水平埋管周围土壤横向温度分布

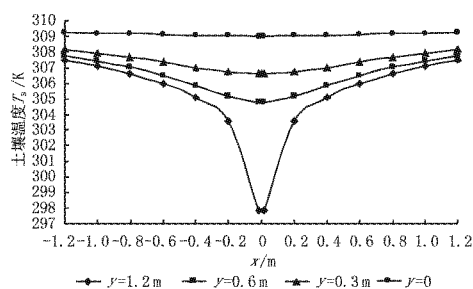


图8 夏季给定工况下水平埋管周围土壤横向温度分布

低。在 $y=0.9, 0.6, 0$ m 3 条横轴上, 温度曲线有以 $x=0$ 为中心向两边下降趋势, 即在 $x=0$ 处土壤温度最高, 向两边降低。夏季工况下, 土壤温度沿横轴方向呈完全对称的单谷状分布, 从埋管所在位置($x=0$)沿横向向两头远离埋管, 土壤温度逐渐升高。在 $y=0.9, 0.6, 0$ m 3 条横轴上, 土壤温度在 $x=0$ 处温度最低, 向两边升高。同样两图在 $y=1.2$ m 这条纵轴上, 温度分布不连续, 在管外壁最左端 $x=-0.0145$ m 和管外壁最右端 $x=0.0145$ m 之间间断, 这是水平埋管位置所在。2) 每图 4 条曲线的变化幅度不同, $y=1.2$ m 横轴上的土壤温度变化最大, $y=0$ 横轴上的温度变化最小。这说明随着位置纵向远离埋管, 土壤温度的横向变化逐渐趋缓。可以设想埋管下方位置纵向足够远时, 土壤最终的横向温度变化将趋近一致。3) 图中最下方曲线($y=0$ 轴上), 即为大地表面的土壤温度分布情况。

4 土壤沿与埋管同心圆周方向上的温度分布

选取 3 个与埋管截面圆周同圆心的圆周, 即: $R=0.1, 0.3, 0.5$ m。在每个圆周上以圆心角 $\pi/6$ 取温度测点, 每个圆周上有 12 个测点。通过软件计算冬夏给定工况下各测点土壤温度值, 并绘制出土壤温度分布曲线, 如图 9 和图 10 所示。

由图可见: 1) 冬夏土壤温度沿圆周方向都呈正弦状分布, 但温度分布曲线达到波峰波谷的位置

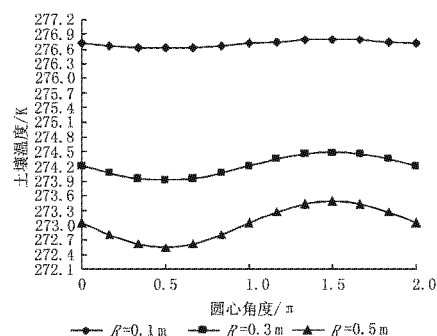


图9 冬季给定工况下水平埋管周围土壤沿圆周方向温度分布

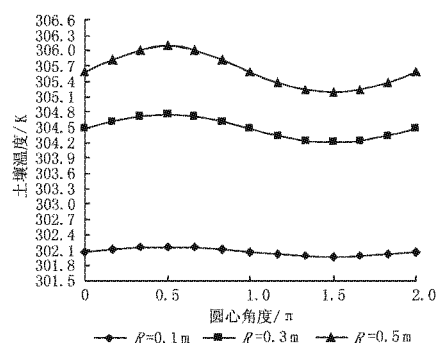


图10 夏季给定工况下水平埋管周围土壤沿圆周方向温度分布

不同, 二者相差 π 。冬季每个圆周上温度最高点(曲线波峰)都是出现在原平面的 $3\pi/2$ 方向, 即圆周最底端; 温度最低点(曲线波谷)出现在原平面的 $\pi/2$ 方向, 即圆周最顶端。夏季每个圆周上温度最高点(曲线波峰)都是出现在原平面的 $\pi/2$ 方向, 即圆周最顶端; 温度最低点(曲线波谷)出现在原平面的 $3\pi/2$ 方向, 即圆周最底端。冬夏相反。冬夏出现不同的原因是夏天埋管放热, 且大气温度高于土壤温度, 则越靠近地面的土壤温度越高, 远离地面的土壤温度低。2) 随到埋管中心距离的不同, 每个圆周上的土壤平均温度不同, 即土壤温度沿 3 条正弦曲线都在自己的中心线附近变化。冬季随着位置远离埋管土壤温度逐渐降低, $R=0.1$ m 圆周上的土壤平均温度高于 $R=0.3$ m 和 $R=0.5$ m 圆周上的土壤平均温度, 其温度曲线在最上方。而夏季随着位置远离埋管土壤温度逐渐升高, $R=0.1$ m 圆周上的土壤平均温度低于 $R=0.3$ m 和 $R=0.5$ m 圆周上的土壤平均温度, 其温度曲线在最下方。3) 每个圆周上的土壤温度变化的幅度各不相同, 即温度沿正弦曲线变化的振幅不同。 $R=0.1$ m 的曲线振幅最小, $R=0.5$ m 的曲线振幅最大,

即到管中心距离越近的圆周,其上土壤温度变化程度越小,距离埋管中心越远的圆周,其上土壤温度变化幅度越大,这是由于受大气温度影响不同造成的。冬季埋管上方的土壤随着位置越远离埋管越易受到大气低温的影响,所以埋管上方的土壤随着位置远离埋管,温度逐渐降低,而且降低的速度越来越快,而埋管下方的土壤随着位置越远离埋管受大气低温的影响越小,这部分土壤,由于远离埋管温度也逐渐降低,但由于深度加大受大气低温影响减小,这种降低的速度却是越来越慢的,这样就导致在距离埋管越远的圆周上,土壤温度差距越大,即同一圆周上土壤的温度变化越剧烈,变化的范围越大。夏季变化原理与冬季相似。而土壤温度变化幅度还与埋深有关,笔者将作进一步的详细研究。

5 水平埋管外表面热流分布研究

求解冬夏给定工况下水平埋管外表面各单元的热流值,绘制成曲线,如图 11 和图 12 所示。

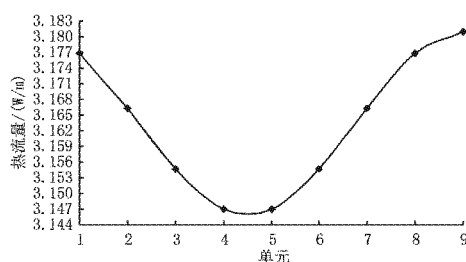


图 11 冬季给定工况下水平埋管外表面各单元热流分布

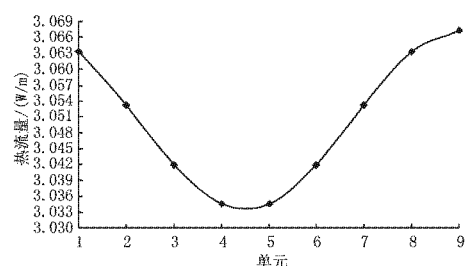


图 12 夏季给定工况下水平埋管外表面各单元热流量分布

由图可见,埋管外表面上各单元的热流量并不是均匀分布的,且冬夏变化规律相同。像平面上(见图 2)的单元 9 热流量最高,单元 4、5 热流量最低,其他对称单元(单元 3 与 6、单元 2 与 7、单元 1 与 8)的热流量相等。经保形变换对应到原平面上,即埋管上部各单元的热流量相对较高,下部各单元的热流量相对较低,管道底部单元(单元 4、5)的热流量最低;管道顶部单元(单元 9)的热流量最

高,管道两侧各单元的热流量沿原平面 y 轴对称分布,对称单元热流量相等。因为埋管外表面沿圆周温度不同,埋管外表面各单元的热流量也不等,故管道外表面热流量呈不均匀分布。且无论冬夏,埋管上部各单元热流量相对较高,下部各单元热流量相对较低,这是由于大气影响作用,埋管上部的管壁与土壤的温差都要比下部管壁与土壤的温差大。

单位管长换热量等于各单元热流量的和,经计算冬季给定工况下的换热量为 28.47 W/m 。根据文献[6]数据可知,实验获得的单位管长换热量的平均值为 30.35 W/m 。与其比较,本文模拟出的结果误差为 6.2% ,具有一定的可靠性。

6 结论

利用模型软件,根据设定的冬夏季工况,详细模拟计算了水平埋管周围土壤温度场的横向、纵向和沿圆周方向的分布和热流量分布,并对比冬夏同异,详细分析其规律。模拟结果显示,冬季工况下,水平埋管周围土壤温度纵向呈不对称单峰状分布,横向呈完全对称的单峰状分布,埋管外土壤沿与埋管同心圆的圆周上温度呈正弦曲线分布。随着位置远离埋管,土壤温度变化幅度减小。埋管上部各单元的热流量相对较高,下部各单元的热流量相对较低。通过重庆大学实验数据对本文计算得到的水平埋管单位管长换热量加以验证,误差为 6.2% ,具有可靠性。这些结果与分析将为地埋管地源热泵系统地埋管的设计及运行研究提供有益参考。

参考文献:

- [1] 李元旦,张旭. 土壤源热泵的国内外研究和应用现状及展望[J]. 制冷空调与电力机械, 2002, 23(1): 4-7
- [2] Bose J E, Parker J D. Ground-coupled heat pump research [G]// ASHRAE Trans, 1983, 89(2): 375-390
- [3] 樊洪明,史守峡,何钟怡. 地下直埋管道的温度场分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(5): 60-65
- [4] 郭敦仁. 数学物理方法[M]. 北京:人民教育出版社, 1965: 30-50
- [5] 吴国忠,张九龙,王英杰. 埋地管道传热计算[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2003: 70-90
- [6] 张素云. 水平埋管换热器地源热泵实验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2001: 38-44
- [7] 那威,宋艳,姚杨. 土壤源热泵地下水平埋管换热性能及其周围土壤温度场研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 475-479