

# 水平地埋管多沟槽换热及环境影响分析

於仲义 陈焰华 雷建平

(中信建筑设计研究总院有限公司 武汉 430014)

**摘要:** 基于人工开挖湖底多沟槽水平埋管布局和取排热负荷条件,采用数值模拟对多沟槽水平地埋管换热过程进行动态模拟研究,详细分析了多沟槽布局土壤热交换规律和沟槽间距对换热过程效果的作用,并引入“夏季周平均最大温升”、“冬季周平均最大温降”评价全年水体平均温度周变化对环境的影响,为水平埋管地源热泵系统设计提供技术支持。

**关键词:** 多沟槽 水平埋管 土壤热平衡 环境影响

## 引言

利用大范围地表面积或已开挖的工程场地敷设水平地埋管作为地源热泵系统的地下换热器,一般采用多沟槽的取、排热技术,其基本规律和特征特性与单沟槽有明显区别。多沟槽埋管与岩土体之间的传热是一个无限大区域内的多热源相互作用的非稳态传热问题,传热过程十分复杂。受限于大规模实验的难度和高昂的成本,本文将结合某埋设于人工湖底的多沟槽水平埋管系统利用《人工湖底水平地埋管换热性能分析》一文中建立的动态传热模型,研究了地下换热器水平地埋管多沟槽热源换热的运行模式及影响规律。

## 1 多沟槽数值模型

### 1.1 多沟槽设计布局

某工程利用人工湖底敷设水平地埋管作为地源热泵系统的热源热汇,水平埋管承担的夏季总排热量为2379kW,冬季总吸热量为1312kW。在平均深度为2.0m的人工湖湖底开挖长100m、宽1.0m、深1.5m的水平管沟,沟壁之间的净距为2.5m,每条管沟内设3组U型埋管,本项目人工湖底可开挖的总沟槽数为305条,

如图1所示<sup>[1]</sup>。

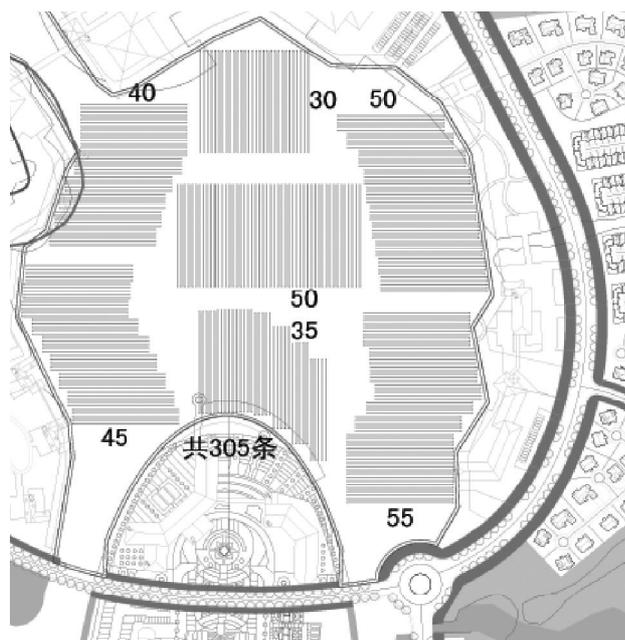


图1 多沟槽水平埋管平面布置图

理想情况下,多热源沟槽的水平地埋管换热过程受到岩土体热物性、沟槽间距、运行模式等诸多因素对传热的影响。需要通过模拟计算充分认识既有设计方案的多沟槽热源的特性关系,诸如冷热负荷、排列布置、运行时间等影响特性和规律,建立多沟槽适配控制方

作者简介: 於仲义 博士、工程师

收稿日期:2011年12月

法和技术,提出管槽优化布置方案、优化系统运行模式,实现水平埋管地源热泵系统节能高效运行。

### 1.2 模拟区域与构造

根据埋管设计初定方案,利用所获取的热物性数据,对水平埋管换热过程进行模拟计算与分析,沟槽宽 1m, 沟槽壁之间的间距为 2.5m。限于计算机处理能力,选取图 1 中间最不利换热区域 200m×100m 作为模拟区域。如果该区域的水平埋管换热效果能够达到设计要求,则其他换热条件较好的区域也能满足设计要求。考虑到水平埋管埋设沟槽区域结构尺寸在物理上的对称性,取用 1/2 平面(100m×100m)作为模拟计算区域。

模拟计算采用有限差分方法划分空间区域,并对守恒方程进行离散。为实现有效的长时间模拟,采用二维简化区域,考虑地面以下浅层土壤温度变化分析水平埋管周边温度场和水体温度变化以分析换热效果。由于水平埋管区域几何体形状的不规则性,把几何模型分成多个块,分别对每个块进行网格的划分。在管壁处,由于几何尺寸变化剧烈,且曲度较大,所以要加密对网格的划分,避免网格有较大的倾斜角,模拟区域网格划分共计 20 万。在远处的岩土体边界上设定为定温度工况,对称面上实施物理量法向输运等于零的对称边界条件。

### 1.3 水平埋管取排热负荷

水平埋管地源热泵空调系统运行时间为:夏季制冷季为 5 月 15 日~10 月 15 日(五个月,计 153 天),冬季供暖季为 12 月 15 日~3 月 15 日(三个月,计 90 天)。其余月份为水平埋管地源热泵空调系统停止运行期,也是土壤温度恢复期。制冷供热季节水平地

埋管地源热泵系统连续运行。考虑到空调系统设计时是以典型日设计负荷为准,水平埋管地源热泵系统供给范围内建筑物逐时负荷变化如图 2、图 3 所示。

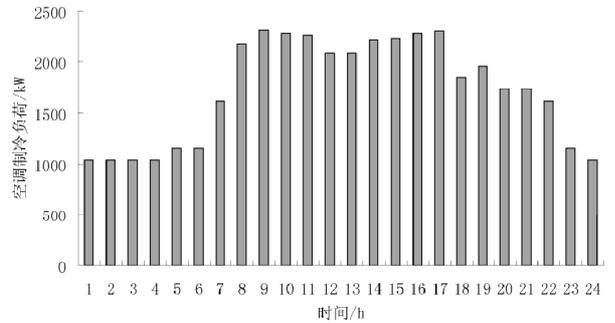


图 2 典型设计日逐时冷负荷

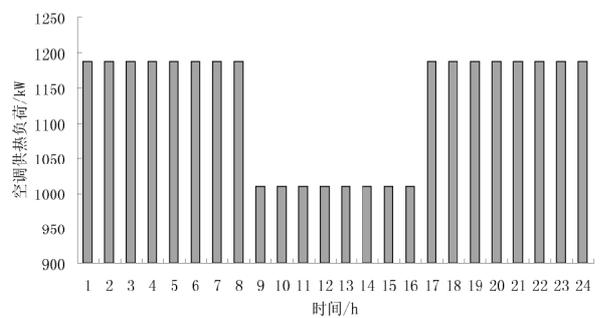


图 3 典型设计日逐时热负荷

## 2 多沟槽布局土壤温度热平衡

为详细了解水平埋管阵列局部点土壤温度变化规律,在整个埋管区域设置 18 个监测点,其中 A 点、B 点、C 点、E 点、G 点、H 点、I 点、J 点、M 点、N 点、R 点和 S 点是埋设在土壤中,其余 6 个点为水体温度测点,具体的位置和坐标(相对于建模的坐标原点)如图 4 所示,其中心点坐标为(0,0)。

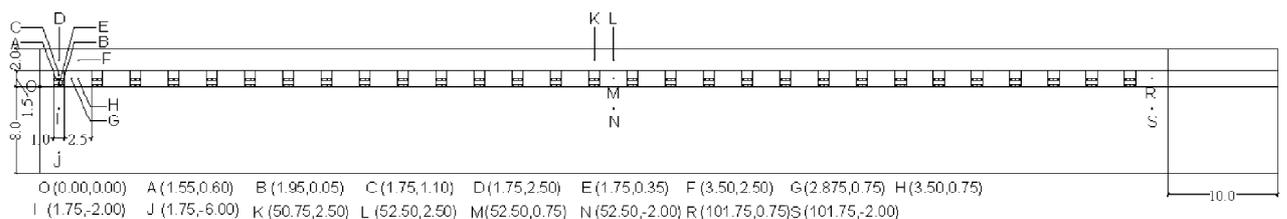


图 4 沟槽壁间距为 2.5m((2.5+1.0)×29)的水平埋管监测点位置(Case0)

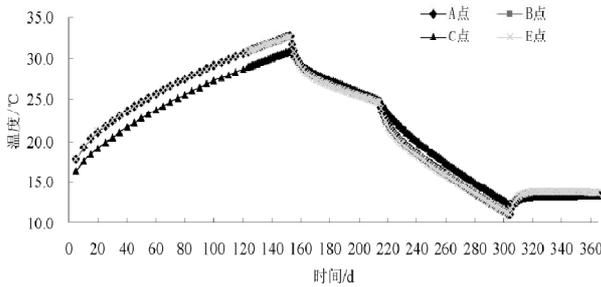


图5 A点、B点、C点、E点四监测点温度变化

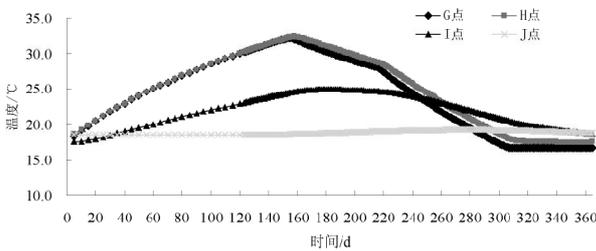


图6 G点、H点、I点、J点四监测点温度变化

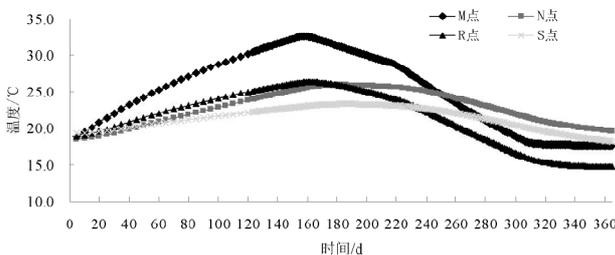


图7 M点、N点、R点、S点四监测点温度

土壤温度监测点位置A点、B点、C点、E点、G点、H点、I点、J点、M点、N点、R点和S点的温度变化如图5~图7所示。从温度的变化曲线可以看出,沟槽内的A点、B点、C点、E点温度在全年运行过程变化幅度最大,这是因为四个测点距离水平埋管位置较近,温度上升程度比距离埋管位置较远的要大,主要是土壤自身的蓄热性能使得热量传递过程中具有减弱、滞后的效应。I点、J点、N点和S点,特别N点和S点,处于埋管阵列的边缘部位的温度受到干扰的时间较后,温度变化范围幅度较小, M点的最大温度上升到32.5℃,而R点最大温度仅上升到26.3℃,这说明水平埋管所处位置不同,由于土壤蓄能和热堆积作用导致换热量会发生变化。而M点和H点的温度变化趋势基本保持一致,温度变化值相差仅在0.1℃以内,这说明水平埋管的换热过程主要是通过水体或土壤与周围空气进行热交换,而水平埋管沟槽之间的干扰较少,沟槽间距保持在2.5m左右,再加大沟槽壁之间的距离,在一定程度上已不能增强水平埋管换热效果。

### 3 沟槽间距换热影响分析

在沟槽横向长度100m不变的情形下,采用如图4、图8和图9所示的不同沟槽间距研究改变沟槽壁之间的距离对多沟槽换热效果的影响,其检测点温度变化如图10~图12所示。

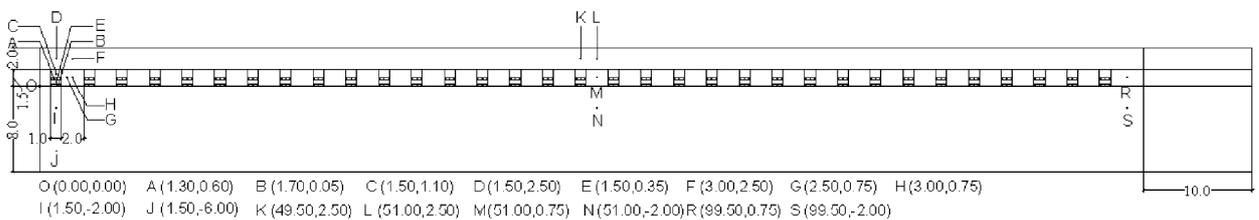


图8 沟槽壁间距为2.0m((2.0+1.0)×33)的水平埋管布置截面图(Case1)

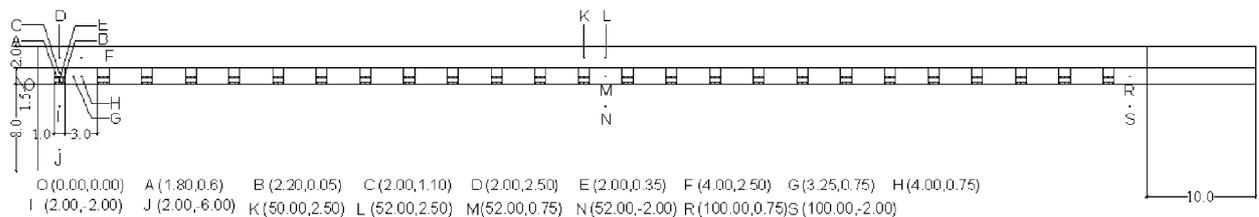


图9 沟槽壁间距为3.0m((3.0+1.0)×25)的水平埋管布置截面图(Case2)

从图 10~图 12 中可以看出,三种工况下处于沟槽中间位置 M 点和 H 点全年的温度变化规律基本一致,表现为:在夏季地源热泵系统水平埋管排热时,监测点温度逐步上升,秋季非空调期温度逐步下降,趋于土壤初始温度,而冬季空调系统供热开始后,监测点温度迅速下降,直至春季温度又逐渐上升,基本恢复到初始平均温度。可见,水平埋管换热主要是通过回填材料与周围土壤及水体在竖直方向上进行,在水平方向上进行换热强度不大,使得各沟槽之间的换热干扰影响不大,因而沟槽间热干扰不能够作为水平方向上沟槽壁之间的距离选取依据。

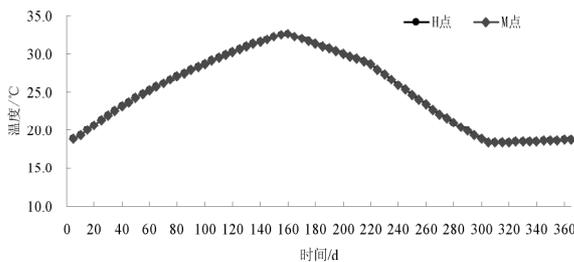


图 10 Case 0 工况 H 点和 M 点监测温度变化

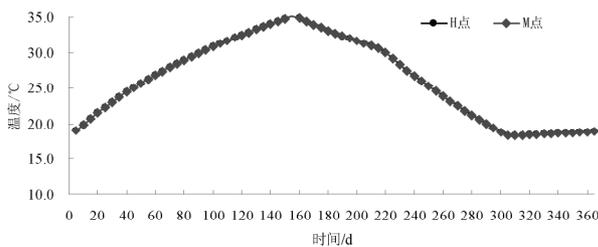


图 11 Case 1 工况 H 点和 M 点监测温度变化

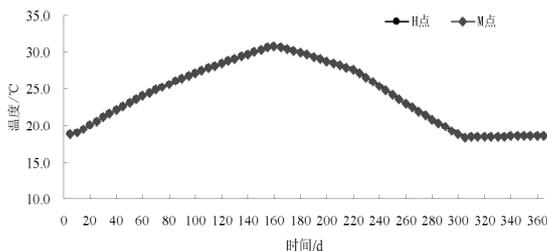


图 12 Case 2 工况 H 点和 M 点监测温度变化

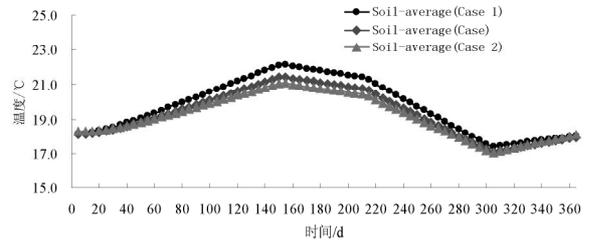


图 13 三工况土壤平均温度变化

当然,并不是说沟槽壁之间的距离大小不影响水平埋管整体换热效果,这一点可从监测点温度随时间的变化强度看出。在基准工况 Case 0 下,H 点和 M 点的检测温度最高可达到 32.4℃,而 Case 1 工况下已达到 35℃,在 Case 2 工况下则改变为 30.7℃,可见沟槽壁之间的距离影响到土壤温度上升程度,从而影响水平埋管整体换热效果,这一点也可以从土壤平均温度变化反映出,如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,三种工况下土壤的平均温度基本保持在 23℃,增加沟槽间距可降低在夏季制冷排热产生的土壤温升,同时提高冬季吸热产生的土壤温降。但并非无限制增大沟槽间距都能产生显著效果,对于工况 Case 1 和 Case 2 在设计沟槽间距的基础上减小 0.5m 和增加 0.5m,土壤夏季的平均温度最高值从 21.4℃分别上升到 22.7℃和下降到 21.1℃,上升比例达到 6.1%,而夏季比例仅为 1.4%。综上所述,同时考虑到本项目地源热泵系统设计了全热回收功能,夏季有相当一部分空调排热被回收用于加热卫生热水,地源热泵水平埋管沟槽壁设计间距取为 2.5m,既达到水平埋管较好的换热效果,同时也减少了单沟槽的埋设面积,增加沟槽的个数,从而整体提高沟槽群的换热能力。

#### 4 人工湖水体环境评价分析

人工湖底采用大规模水平埋管取排热,水体温升/降幅度将会对水体生态环境产生一定的影响,该过程与湖水吸收净辐射热量,水面蒸发、湖水紊动和对流等诸多复杂因素有关。为此,在水体设置了如图 4 所示的温度监测点实时监测水体温度,如图 14 所示。

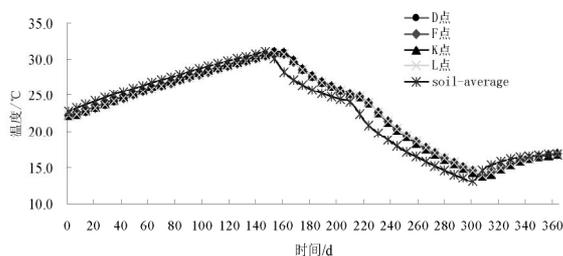


图14 人工湖水体测点和水体平均温度变化

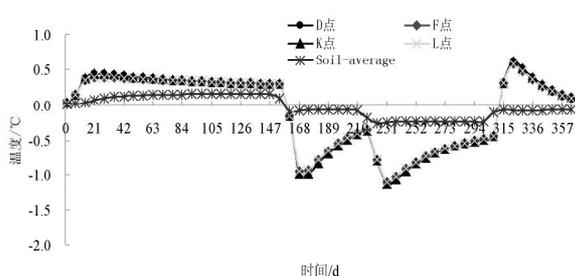


图15 人工湖全年周平均温度

从图14中可以看出,在地源热泵系统全年运行工况下处于人工湖水体中的监测点D点、F点、K点和L点的温度变化趋势基本一致,表现为:在夏季地源热泵系统水平埋管排热时,监测点温度逐步上升,秋季非空调期的恢复期温度逐步下降,趋于土壤初始温度,而冬季空调系统供热开始后,水平埋管开始吸热,监测点温度迅速下降,直至春季温度又逐渐上升,基本恢复到初始平均温度。但四个监测点的温度值并不相同,其中位置相同D点和K点、F点和L点则表现出相同的温度变化,而位于沟槽上方位置不同的D点和F点、K点和L点存在温度变化差值,但差值很小,基本保持在 $0.5^{\circ}\text{C}$ 以内。人工水体整体的平均温度也是随着时间变化而变化,其主要原因是太阳辐射的热量,但是水的比热大,水温变化较缓和,夏季最高平均温度为 $31.2^{\circ}\text{C}$ ,

冬季最低温度为 $13.1^{\circ}\text{C}$ ,变化幅度也较小且呈滞后变化,随深度增加逐渐减小,变幅约为湖面气温日变幅的20%~70%。

结合文献<sup>[2]</sup>中定义的“夏季周平均最大温升”、“冬季周平均最大温降”,分析全年水体温度变化,如图15所示。人工湖水体温度在设计方案下的“夏季周平均最大温升”基本保持在 $0.5^{\circ}\text{C}$ 以下,而“冬季周平均最大温降”基本保持在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 以下,满足相关标准,表明水平埋管地源热泵系统运行不会引起水温大幅度变化,应用于工程设计是可行的。

## 5 结论

5.1 多沟槽水平埋管周围土壤温度经历着“升温→降温→升温”的周期性变化过程,其换热主要是通过回填材料与周围土壤及水体在竖直方向上进行,在水平方向上进行换热强度不大,使得各沟槽之间的换热干扰影响不大,可根据实际换热效果选取 $2.5\text{m}$ 的沟槽壁间距。

5.2 结合《地面水环境质量标准》中定义的“夏季周平均最大温升”、“冬季周平均最大温降”,分析全年水体监测点和水体平均温度周变化范围,均符合相关标准要求,表明水平埋管地源热泵系统运行没有引起水温大幅度变化,应用于工程设计是可行的。

## 参考文献

- [1] 武汉市建筑设计院. 武汉某酒店地源热泵系统专项研究技术报告[R]. 2011
- [2] 中国环境科学研究院. GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002