

文章编号: 1671-6612 (2008) 02-058-05

地源热泵地埋管换热设计计算

程宗科^{1*} 柯军² 刘秋新³ 杨二平³ 高春雪³

(1.军事经济学院 武汉 430035; 2.中国轻工业武汉设计工程有限责任公司 武汉 430060;
3.武汉科技大学 武汉 430081)

【摘要】 对武汉地质构造特点,对地下一定深度的温度场进行研究,并对地埋管的换热设计计算中的若干问题进行了研究,在简化计算换热模型的基础上,在 Excel 上用 VBA 编写宏功能,得到实用的地埋管换热的工程设计计算方法,是一种工程易用的计算软件。同时将这种计算方法应用到了一个实际工程中。

【关键词】 地源热泵; 温度场; 土壤换热器
中图分类号 TK124 文献标识码 A

Design Calculation of Heat Exchange for Ground-Source Heat Pump Buried Pipes

Cheng Zongke¹ Ke Jun² Liu Qiuxin³ Yang Erping³ Gao Chunxue³

(1.Military Economic Institute, WuHan, 430035,China; 2.China Light Industry Wuhan Design Engineering Co., Ltd., WuHan, 430060, China; 3.Wuhan University of Science & Technology, WuHan, 430081, China)

【Abstract】 Temperature field for some depth under the ground was studied to the geological tectonic features of Wuhan. We studied several problems for design calculation of heat exchange of ground buried pipes. Engineering design for heat exchange of ground buried pipes and an engineering calculation software were acquired by using VB macro function in Excel based on simple calculation model. We apply the calculation methods to an actual project.

【Key words】 Ground-source heat pump; Temperature field; Soil heat exchanger

0 前言

地埋管地源热泵空调系统由土壤换热器、热泵主机和空调末端三部分组成,其中系统的关键是土壤换热器的设计与施工。在现有的工程实践中,垂直地埋管方式居多。这是因为垂直地埋管要比水平地埋管经济一些。

土壤换热器的设计计算要根据实测岩土体及回填料热物性参数,采用专用软件进行计算,或者按《地源热泵系统工程技术规范》附录 B 的方法进行计算。由于上述两种方法在工程应用中都有诸多不便,在实际工程设计中并不实用。一般工程设计都常用指标法。为了保证计算结果安全可靠,在

此,对现有的方法作了一些改进,在 EXCEL 上用 VBA 编写宏功能,得到一种工程上易用的计算软件,并应用于工程实践。通过一个实际工程来验证计算的正确性。

1 地质条件及温度场

1.1 地勘柱状图及温度分布

图 1 为武汉市汉口的一个工程的地质条件及岩土体的情况,图 2 为武汉市汉阳的一个工程的地质条件及岩土体的情况。图 3 为工程一地下温度场分布曲线图,图 4 为工程二地下温度分布曲线图。

收稿日期: 2007-05-11

*程宗科,男,1965 年 3 月生,工程师。

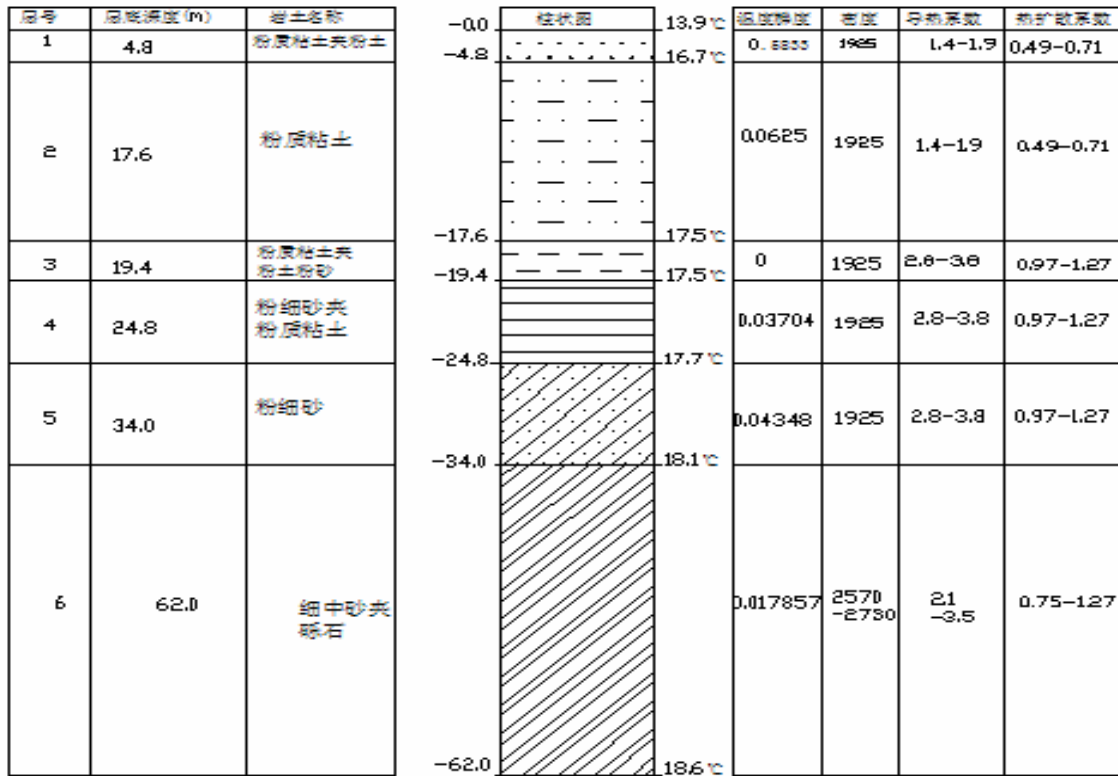


图 1 地质条件及岩土体的情况图

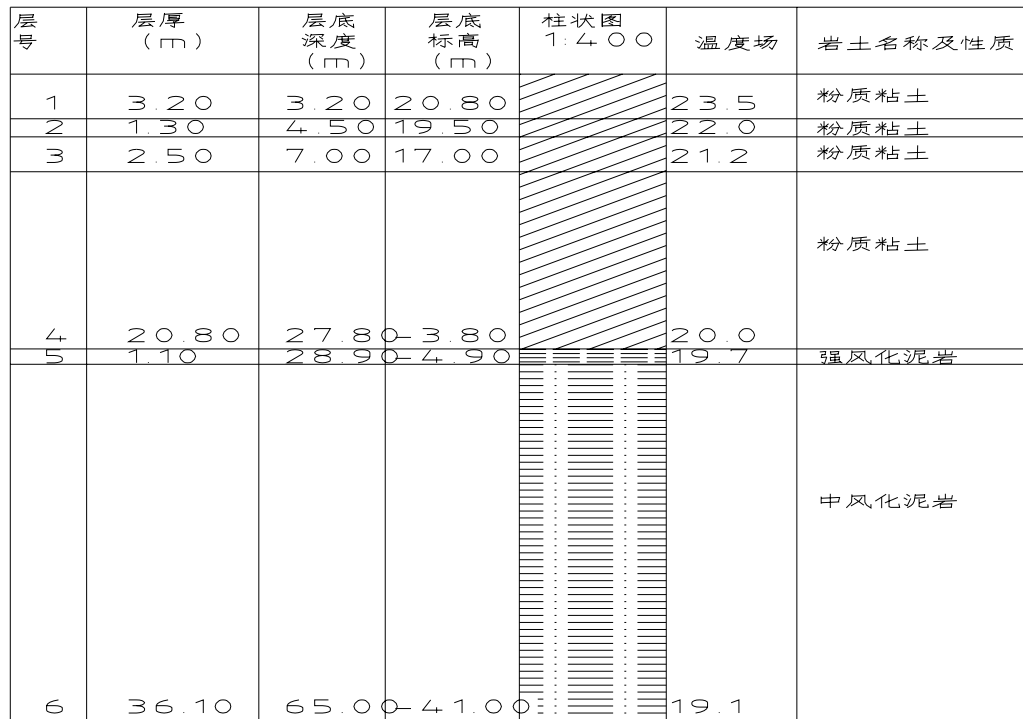


图 2 地质条件及岩土体的情况图

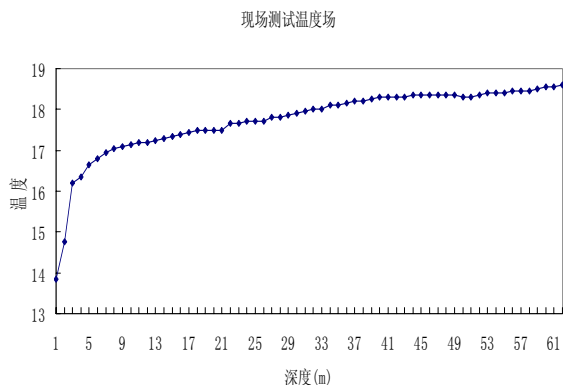


图3 工程一地下温度场分布曲线图

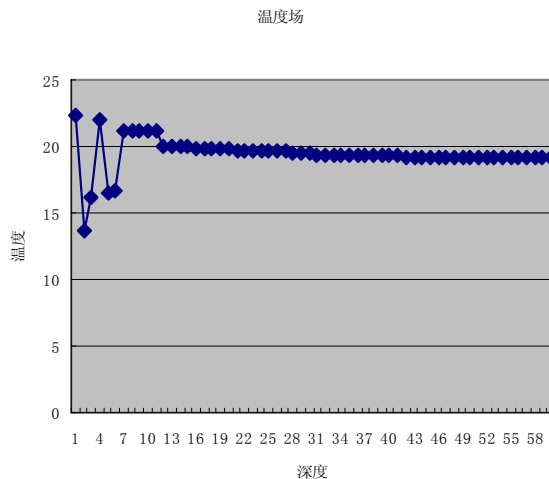


图4 工程二地下温度分布曲线图

1.2 测试结果分析

由现场测试的结果可知：两工程地区跨度大，地质结构也有所不同，但地下平均温度却变化不大。工程一所在地的地下平均温度为 18.4 度，工程二所在地的地下平均温度为 19.4 度。由此可知，地区跨度较大，但地下的平均温度基本稳定在 18 度到 19 度之间。

2 换热计算及其若干问题

2.1 换热计算中几个问题的简化处理

- (1) 沿垂直方向，不同地质结构，分别计算换热。
- (2) 进出口温差，沿垂直方向，根据地质结构不同分段，确定热交换温度。
- (3) 冬夏季进出口初始设计温度，按最不利情况考虑。
- (4) 埋管管井距，按 3m<H<6m 考虑。

2.2 计算公式

(1) 传热介质与 U 形管内壁的对流换热热阻计算公式

$$R_f = \frac{1}{\pi d_i K} \quad (1)$$

式中 R_f — 传热介质与 U 形管壁的对流换热热阻，
m · K/W；
 d_i — U 形管的内径，m；

K — U 形管内壁的对流换热系数，
W/(m² · K)；

(2) U 形管管壁热阻计算公式

$$R_{pe} = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \ln\left(\frac{d_e}{d_e - (d_o - d_i)}\right) \quad (2)$$

$$d_e = \sqrt{n}d_o \quad (3)$$

式中 R_{pe} — U 形管管壁热阻，m · K/W；

λ_p — PE 管的导热系数，W/(m² · K)；

d_o — U 形管外径，m ；

d_i — U 形管内径，m ；

d_e — U 形管当量直径，m ；对单 U 管，

$n=2$ ；双 U 管， $n=4$ 。

(3) 钻孔灌浆回填材料的热阻计算公式

$$R_b = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \ln\left(\frac{d_b}{d_e}\right) \quad (4)$$

式中 R_b — 钻孔灌浆回填材料的热阻，m ·
K/W ；
 λ_b — 灌浆材料导热系数，W/(m² · K)；

d_b —钻孔的直径, m。

(4) 地层热阻计算公式
讨论单个钻孔, 计算公式为:

$$R_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s} I\left(\frac{r_b}{2\sqrt{a\tau}}\right) \quad (5)$$

$$I(u) = \frac{1}{2} \int_u^\infty \frac{e^{-s}}{s} ds \quad (6)$$

对于多个钻孔:

$$R_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s} \left[I\left(\frac{r_b}{2\sqrt{a\tau}}\right) + \sum_2^N I\left(\frac{x_i}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right] \quad (7)$$

其中 R_s —地层热阻, $m \cdot K/W$;

I —指数积分公式;

λ_s —岩土层的平均导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

a —岩土体的热扩散率, m^2/s ;

r_b —钻孔半径, m ;

τ —为运行时间, s ;

x_i —第 i 个钻孔与所计算钻孔之间的距离。

(5) 单个孔的传热量计算公式

$$Q = \sum_i^n \left(\frac{1}{R_i} L_i \Delta t_i \right) \quad (8)$$

式中 Q —单孔的传量, W;

R_i —各个地层的总热阻, $m \cdot K/W$;

L_i —各个地层的长度, m;

Δt —各个地层的平均温度与各地层管内平均温度的差值;

i —各地层号。

(6) 打孔数量计算公式

$$N = \frac{\sum_{i=1, j=1}^n (Q_i \pm Q_j)}{Q} \quad (9)$$

式中: N —打孔的数量, 个;

Q_i —每台地源热泵机组额定制冷量; KW;

Q_j —每台地源热泵机组额定电功率, KW (冬季 $Q_j=0$);

Q —单个孔的传热量; W。

2.3 计算程序编写

计算程序的编写是在对计算模型进行简化后, 在 EXCEL 上用 VBA 编写宏功能而成。此计算机软件简单好用。

2.4 计算公式中需要说明的问题

2.4.1 U 形管内壁对流换热系数的确定

对于 U 形管内壁对流换热系数, 可用下述的方法来计算:

制冷工况: 当管内流体温度 t_f 大于管壁温度 t_w 时;

$$N_f = 0.023 R_{ef}^{0.8} P_{rf}^{0.3} \quad (10)$$

制热工况: 当管内流体温度 t_f 小于管壁温度 t_w 时;

$$N_f = 0.023 R_{ef}^{0.8} P_{rf}^{0.4} \quad (11)$$

式中: N_f —努谢尔特准则; $N_f = \frac{k_f d}{\lambda_f}$

K —U 形管内壁换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

d —U 形管直径, m;

λ_f —U 形管内流体导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

R_{ef} —雷诺数; $R_{ef} = \frac{u_m d}{\nu_f}$

u_m —U 形管内流速, m/s;

ν_f —运动粘性系数, m^2/s ;

于是可得: $K_f = \frac{N_f \lambda_f}{d}$

2.4.2 关于 $I(u)$ 的计算

在工程计算中 $I(u) = \frac{1}{2} \int_u^\infty \frac{e^{-s}}{s} ds$ 的计算是困难的, 需要简化计算且满足计算精度的要求, 为此, 用级数展开式来描述 $I(u)$ 的计算。

(1) 当 $0 < u \leq 1$ 时

$$I(u) = 0.5[-\ln x^2 - 0.57721566 + 0.99999193x^2 - 0.024991055x^4 + 0.05519968x^6 - 0.00975004x^8 + 0.00107857x^{10}] \quad (12)$$

(2) 当 $u \geq 1$ 时

$$I(u) = \frac{A}{2x^2 \exp(x^2) B} \quad (13)$$

$$A = x^8 + 8.5733287x^6 + 18.059017x^4 + 8.637609x^2 + 0.2677737$$

$$B = x^8 + 9.5733223x^6 + 25.6329561x^4 + 21.0996531x^2 + 3.9684969$$

2.4.3 关于管内温度的确定

文献[2]描述了循环液进出埋管水温随时间的变化，它是一个工程实测的数据。

从实验的结果来看，夏天运行稳定后的温度为在 34-29℃，冬天运行稳定后的温度为在 3-6.5℃。根据规范规定埋管：制冷 10℃~40℃；制热 -5℃~25℃。以厂家产品样本看，设计工况大多数厂家的设计工况参数为 35℃~30℃，然后根据各地方使用情况再进行修正，综合起来看采用 40℃~35℃作为设计工况计算是可以的。

2.4.4 埋管井间距问题

查文献[8]，是采用数值模拟方法对埋管井间距作为数值计算，以换热的结果来看，3m 的埋管间距是可行的。文献[9]是两个实验结果，也描述了 3m 的埋管间距是可行的。这样可以大大缩小埋管井的占地面积，加强了使用埋管的可能性。

3 工程计算实例

3.1 工程概况

上述工程一位于武汉市汉口地区，是一学校图书馆工程。该图书馆工程位于其校内，总建筑面积达 15000 m²，共有六层。本工程总空调面积约 10500 m²，空调冷负荷为 1890kW，热负荷为 1400kW。

3.2 土壤换热器换热计算

地源热泵机组参数见表 1。

表 1 地源热泵机组参数表

制冷量 (kW)	制热量 (kW)	制冷功率(kW)	制热功率(kW)	冷却水循环水量(m ³ /h)	台数 (台)
1070	988	205	247	218	2

夏季换热计算结果见表 2。

表 2 夏季换热计算结果

Q1 (kW)	Q2 (kW)	Q (W)	N (个)
2140	410	3800	675

冬季换热计算结果见表 3。

表 3 冬季换热计算结果

Q1 (kW)	Q2 (kW)	Q (W)	N (个)
1976	-594	2300	600

由表 2 和表 3 比较可得打孔数应为 675 个，考虑到此为学校的工程，在最热和最冷时的假期以及时同时使用系数，取系数 0.7，最后确定打井数量为 480 个。

4 结论

通过一个实际工程，对地源热泵空调系统地下换热器换热计算方法以及打孔数量的确定等问题进行了思考，对计算设计中的问题进行了研讨，编写了一套简单易制的计算平衡。这些都将给以后地源热泵系统地下换热器的设计计算起到指导性作用。

参考文献

- [1] GB5036-2005, 地源热泵系统工程技术规范[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 韩慧民. 土壤源热泵在中央空调系统中的应用[J]. 制冷空调与电力机械, 2005, 29(2).
- [3] 马最良, 吕悦. 地源热泵系统设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] 徐伟. 地源热泵工程技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [5] 章熙民. 传热学(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [6] GB5002-2001, 岩土工程勘察规范[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [7] CJJ7-85, 城市勘察物探规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- [8] 高青, 李明, 阎燕. 群井地下换热系统初温和构造因素影响传热的研究[J]. 热科学与技术, 2005, 4(1).
- [9] 刘猛, 何雪冰, 刘宪英. 地源热泵系统夏季运行测试研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(1).