

地埋管长度计算中关键参数的计算方法研究

田慧峰¹, 曹伟武²

(1. 上海理工大学动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海工程技术大学机械工程学院, 上海 200336)

摘要:地埋管换热器是地源热泵系统的核心组件,文中对基于线热源理论的地埋管换热器长度计算中的关键参数计算进行了讨论。将典型气象年数据应用在确定最热月、最冷月和地表面年平均温度上。引入平衡温度的概念,计算建筑物逐时负荷。进而提出由建筑物逐时负荷和水源热泵机组性能拟合曲线,计算地源热泵系统制冷运行系数和制热运行系数的方法。给出热泵机组最高进液温度、最低进液温度、钻孔热阻和土壤热阻等地埋管长度计算关键参数的选取、计算方法。最后提出垂直 U 形地埋管换热器长度计算步骤。

关键词:地埋管地源热泵系统;地埋管换热器;典型气象年;平衡温度

中图分类号:TK124 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)01-0110-04

The Key Parameters Method of Calculating Geothermal Heat Exchanger Length

TIAN Hui-feng¹, CAO Wei-wu²

(1. College of Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, P. R. China; 2. College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 200336, P. R. China)

Abstract: The geothermal heat exchanger is the key component of ground-coupled heat pump systems. We discuss the key parameters method of calculating geothermal heat exchanger length based on line-source theory. Typical meteorological year data is used to determine the hottest month, the coldest month and annual average surface temperature. The building hourly load can be obtained by introducing the concept of equilibrium temperature. The cooling fraction and the heating fraction then can be calculated using building hourly load and performance parameters curve-fit of a water source heat pump unit. The method for selecting the hottest and lowest entering fluid temperature and calculating the borehole and ground thermal resistance is given. A vertical U-tube heat exchanger length calculation procedure is proposed.

Key words: ground-coupled heat pump system; geothermal heat exchanger; typical meteorological year; equilibrium temperature

地源热泵是随全球能源环境问题的可持续发展而兴起的一种节能环保的地热利用技术。我国《可再生能源法》已于 2005 年颁布,同年推出了国家标准《地源热泵系统工程技术规范》,为我国推广地源热泵技术的应用提供了政策保障和技术准则。地埋

管地源热泵系统是地源热泵系统的一种形式,由于该系统只取热,不取水,没有地下水位下降和地面沉降问题,不存在腐蚀和开凿回灌井问题,也不存在对大气排热、排冷的热污染和排烟、排尘、排水等污染问题,所以应用最为广泛。地埋管换热器是地埋管

收稿日期:2008-07-12

基金项目:上海市重点学科建设项目(P1401)

作者简介:田慧峰(1979-),男,上海理工大学博士研究生,主要从事建筑节能、能源系统优化等方面的研究,(E-mail) thufeng@gmail.com。

地源热泵系统不同于传统空调系统之处,亦是体现其优越性的关键性组件。在实际地理管地源热泵工程中,由于更换和维修的不便,要求地理管换热器的设计寿命至少应在 20~30 年以上。由于地理管换热器设计的好坏,直接关系到地理管换热器的性能,因此,对地理管换热器的长度计算进行优化研究,找出更适合实际工程且操作性强的地理管换热器长度计算方法,很有必要和现实意义。

目前我国工程技术人员进行地理管换热器长度计算,大多采用估算方法,即根据经验值得出单位管长(或孔长)的换热量,然后用夏季或冬季地下负荷除以单位管长的换热量得到地理管设计长度。为了保证系统的空调能力,使用该方法设计时单位管长(或孔长)换热量的选取均偏于保守,从而导致系统过大,不必要地增加初投资。也有少部分设计人员采用国外软件进行地理管长度计算,例如 EED、GCHPCALC 等^[1],由于这些软件输入复杂且许多参数不易获得,难于在国内推广。

线热源理论(Line-source theory)较早应用于地理管换热器长度计算中,该理论没有考虑进水管内流体的温度分布和出水管流体的温度分布是不一致的,存在不足。其优点是计算快捷,便于工程应用。文献[2]建立了垂直 U 形地理管换热器的三维模型,采用 CFD 软件对埋管深度、进口水温、管内流速等一系列因素在冬夏不同工况下对埋管传热量的影响进行了数值模拟研究,为地理管长度计算提供了有益参考,但因其建模、参数设置均较复杂,暂无法推广使用。

在《地源热泵系统工程技术规范》中提供了垂直 U 形地理管换热器长度计算方法,该方法基于线热源理论^[3]。由于该方法涉及到几个不易直接获得的数据(例如大地热阻、制冷制热运行系数等),使得该方法在实际工程中难以应用。本文基于线热源理论,引入平衡温度的概念,运用典型气象年数据,给出制冷、制热运行系数等地理管长度计算中关键参数的计算方法,并提出了易操作应用的地理管长度计算步骤。

1 建筑物逐时负荷与水源热泵机组性能确定

建筑物全年逐时负荷和光源热泵机组性能是地理管换热器长度计算的必要前提。

1.1 建筑物逐时负荷

使用 DOE-2、EnergyPlus 等建筑能耗模拟软件

可以得到建筑全年逐时负荷,但该方法费时费力,且不易掌握,在实际工程中应用较少。在计算出建筑物夏季峰值冷负荷 Q_{BC} 和冬季峰值热负荷 Q_{BH} 后,可根据以下方法计算建筑物逐时负荷。

这里先引入平衡温度的概念。夏季平衡温度 t_{SB} 是指建筑物不需要制冷时所对应的最高室外温度;冬季平衡温度 t_{WB} 是指建筑物不需要供热时的最低室外温度。当室外温度在冬季平衡温度和夏季平衡温度之间时,建筑物既不需制冷也不需供热。文献[4]讨论了平衡温度,并给出了推荐取值。设冬季空调室外计算温度为 t_{DW} ;夏季空调室外计算温度为 t_{DS} 。则当室外温度 t_{hr} 大于夏季平衡温度 t_{SB} 时,建筑物在该时刻的冷负荷为:

$$Q_{BChr} = \frac{Q_{BC}}{t_{DS} - t_{SB}} \times (t_{hr} - t_{SB}) \quad (1)$$

当室外温度 t_{hr} 小于冬季平衡温度 t_{WB} 时,建筑物在该时刻的热负荷为:

$$Q_{BHhr} = \frac{Q_{BH}}{t_{WB} - t_{DW}} \times (t_{WB} - t_{hr}) \quad (2)$$

1.2 水源热泵机组的性能

水源热泵机组的性能主要与进液温度(Enter Fluid Temperature, EFT)有关,EFT 会随室内负荷以及水源热泵本身特性的变化而变化。如果要让地理管换热器的设计更符合实际情况,最好的方法是让用户输入水源热泵的参数。考虑到大多数水源热泵厂商给出的数据为对应 EFT 下的热泵制冷量/制热量、输入功率,所以在本文的设计方法中,将给定的水源热泵制冷量、制热量、输入功率拟合成 EFT 的多项式。这样,只需确定 EFT 就可以根据拟合公式计算出热泵的制冷量、制热量和输入功率。

图 1 是根据美意 MSR-L030H/V 水源热泵机组的性能参数拟合的二次曲线图。

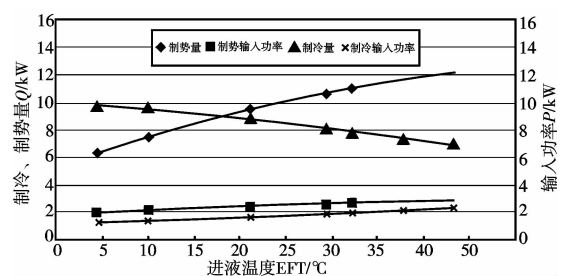


图 1 美意 MSR-L030H/V 机组性能参数拟合曲线

根据图 1 可计算在所需 EFT 下的水源热泵机组制冷能效比 EER 和制热性能系数 COP。

2 典型气象年数据应用

典型气象年是以近 30 年气象数据的月平均值

为依据,从近 10 年的资料中选取一年各月接近 30 年的气象参数平均值,并对月间做平滑处理。九十年代以来,典型气象年被广泛应用到建筑能耗模拟领域。利用典型气象年数据可以得到地表面年平均温度、最热月、最冷月等用于埋管换热器长度计算的重要参数。

2.1 地表面年平均温度确定

在埋管地源热泵的研究工作中,必须确定不同深度的土壤温度,最好的办法是采用现场测试工具。对于工程设计而言,只需要确定打孔深度范围内的土壤温度平均值即可。经过比较计算^[5],地表面年平均温度大致等于全年空气温度的平均值,所以本文中的地表面年平均温度是根据典型气象年全年空气温度数据,计算其平均值得到。

2.2 最冷月和最热月确定

典型气象年数据提供了全年逐时室外干球温度,通过计算可得到每月室外干球温度的平均值,最大者即为最热月,最小者即为最冷月。例如,经过计算可得出上海的最冷月为 1 月,平均温度为 4.3 °C;最热月为 8 月,平均温度为 27.7 °C。

3 制冷运行系数和制热运行系数

制冷运行系数用于描述热泵的间歇运行,定义为:

$$F_c = \frac{\text{最热月份运行小时数}}{\text{最热月份天数} \times 24} \quad (3)$$

制热运行系数定义为:

$$F_h = \frac{\text{最冷月份运行小时数}}{\text{最冷月份天数} \times 24} \quad (4)$$

为了计算 F_c 和 F_h ,需要首先确定最热月和最冷月运行小时数。最热月某时刻的运行率可使用下式计算:

$$f_c = \frac{Q_{\text{BChr}}}{Q_c(t_{\text{max}})} \quad (5)$$

最冷月某时刻的运行率为:

$$f_h = \frac{Q_{\text{BHhr}}}{Q_h(t_{\text{min}})} \quad (6)$$

其中: $Q_c(t_{\text{max}})$ 为热泵机组在 t_{max} 下的制冷量, kW; $Q_h(t_{\text{min}})$ 为热泵机组在 t_{min} 下的制热量, kW。当 f_c 和 f_h 大于 1 时取 1。对整个最热月的 f_c 进行累加即可得到最热月运行小时数;对整个最冷月的 f_h 进行累加即可得到最冷月运行小时数。

4 埋管长度计算

可采用以下工程设计计算公式来确定埋管换

热器的长度^[4,6]:

制冷工况:

$$L_c = \frac{1000Q_c(R_b + R_q \times F_c)}{(t_{\text{max}} - t_{0m})} \left(\frac{\text{EER} + 1}{\text{EER}} \right) \quad (7)$$

供热工况:

$$L_h = \frac{1000Q_h(R_b + R_q \times F_h)}{(t_{0m} - t_{\text{min}})} \left(\frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}} \right) \quad (8)$$

式中,

L_c ——由制冷工况确定的埋管换热器所需长度, m;

L_h ——由供热工况确定的埋管换热器所需长度, m;

Q_c ——水源热泵机组额定制冷量, kW;

Q_h ——水源热泵机组额定制热量, kW;

F_c ——制冷运行系数;

F_h ——供热运行系数;

t_{max} ——水源热泵机组制冷时冷凝器设计最高进液温度, °C;

EER ——在 t_{max} 下水源热泵机组的制冷能效比;

t_{min} ——水源热泵机组制热时蒸发器设计最低进液温度, °C;

COP ——在 t_{min} 下水源热泵机组的制热性能系数;

t_{0m} ——地表面年平均温度, °C;

R_b ——钻孔热阻, (m · K)/W;

R_q ——土壤热阻, (m · K)/W。

式(7)和式(8)中仍需讨论的有 t_{max} 、 t_{min} 、 R_b 和 R_q 。

4.1 热泵机组最高进液温度 t_{max} 和最低进液温度 t_{min}

在用户侧进口水温或空气温度一定的情况下,热泵机组的制冷或制热能力是由机组进液温度(即埋管换热器出口流体温度)决定的,而埋管换热器的长度与热泵机组的进液温度有关^[9-12]。在制冷工况时,设定的热泵机组最高进液温度越低,机组运行的 COP 就越高,机组的运行费用就越低,但所需的埋管换热器的长度就越长,系统的初投资就越高。可见这个问题涉及到热泵系统最佳经济性的研究。目前国内仍缺乏这方面的研究,也没有统一的计算方法。

根据文献[7],对垂直埋管换热器,夏季的设计最高出口温度一般为土壤温度加上 11~14 °C,冬季的设计最低出口温度为土壤温度减去 8~11 °C。文献[8]通过编制的设计软件计算表明,按照上述方

法确定的地理管换热器的初投资太大,建议热泵机组的设定温度如下:夏季制冷时,地理管换热器循环流体最高出口温度为当地地下岩土温度加上 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$;冬季制热时,地理管换热器循环流体最低出口温度为地下岩土温度减去 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。实际工程中,若埋管场地受限,水温将超过这个限度,采用复合式热泵系统比较经济。文献[6]推荐 $t_{\max} = 37^{\circ}\text{C}$, $t_{\min} = 2\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。设计者可按照上述方法之一取值。

4.2 钻孔热阻 R_b

钻孔热阻 R_b 取决于钻孔直径 d_b 、埋管内径 d_{pi} 、埋管外径 d_{po} 、回填料导热系数 λ_g 及其热阻 R_g 、钻孔内U形埋管数量及埋管在钻孔内的位置^[13-15],也取决于管壁热阻 R_p ,对流换热热阻 R_f 。具体计算方法参见文献[4]。

4.3 土壤热阻 R_q

按照文献[1], R_q 可近似表达为:

$$R_q = \frac{1}{2\pi\lambda} \left(\ln \frac{\sqrt{4\alpha\tau}}{r_b} - \frac{\gamma}{2} \right), \tau_b \leq \tau \leq \tau_s \quad (9)$$

$$R_q = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{H}{2r_b}, \tau \geq \tau_s \quad (10)$$

式中, R_q —钻孔周围的土壤热阻, $(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}$; λ —土壤导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; τ —运行时间, s ; r_b —钻孔半径, m ; H —钻孔深度, m ; γ —欧拉常数, $\gamma \approx 0.5772$; τ_s —由非稳态传热达到稳态传热所需时间,简称稳态时间, $\tau_s = H^2/(9\alpha)$, s ; τ_b —钻孔内近似为稳态所需最短时间,由式(11)描述。

$$\tau_b = \frac{5r_b^2}{\alpha} \quad (11)$$

其中, α 为土壤的导温系数, m^2/s ;

5 地理管换热器长度计算步骤

根据上面的论述,地理管换热器长度的计算步骤总结如下:

1)根据建筑物的结构尺寸,确定建筑物的设计冷负荷和设计热负荷。

2)根据设计地点典型气象年室外逐时温度计算出地表面年平均温度 t_{0m} ,确定机组的最高进液温度 t_{\max} 和最低进液温度 t_{\min} ,然后根据设定的温度和和设计负荷选取水源热泵机组型号及台数。

3)根据水源热泵机组的水流量确定地理管并联数。

4)确定钻孔、地理管以及土壤参数,包括钻孔直径、地理管管材、地理管规格、U形管布置方式、土壤导热系数、土壤热扩散率等。

5)由设计冷负荷和水源热泵机组在 t_{\max} 下的制冷EER确定地理管换热器的放热量;由设计热负荷和水源热泵机组在 t_{\min} 下的制热COP确定地理管换热器的吸热量。

6)根据典型气象年室外逐时温度确定最热月和最冷月。

7)根据设计冷负荷和最热月室外逐时温度计算出建筑物的逐时冷负荷;根据设计热负荷和最冷月室外逐时温度计算出建筑物的逐时热负荷。

8)由建筑物的逐时冷负荷、水源热泵机组在 t_{\max} 下的制冷量计算出 F_c ;由建筑物的逐时热负荷、水源热泵机组在 t_{\min} 下的制热量计算出 F_h 。

9)根据地理管单管流量、地理管内径以及流体特性参数计算管内流体流速 v_i 、 Re 和 Pr 等。

10)根据 F_c 、 F_h 和钻孔参数分别计算制冷工况和制热工况下的土壤热阻 R_q ;根据钻孔、地理管、管内流体参数以及土壤参数计算钻孔热阻 R_b 。

11)最后根据式(7)和式(8)计算制冷工况下地理管换热器所需长度 L_c 和供热工况下地理管换热器所需长度 L_h 。 L_c 和 L_h 中较大者为设计长度。

6 结论

论文对基于线热源理论的地理管换热器长度计算中的关键参数计算进行了讨论,并探讨了地理管换热器的长度计算步骤。结论表明:1)运用典型气象年数据,引入平衡温度概念,在已知建筑物设计负荷的前提下,可计算出建筑物的逐时负荷;2)可将水源热泵机组制冷量、制热量拟合为进液温度(EFT)的二次曲线,并应用到地理管换热器长度计算中;3)运用典型气象年数据及建筑物逐时负荷,可以求出地理管换热器长度计算的重要参数——制冷运行系数 F_c 和制热运行系数 F_h 。

笔者已根据文中计算步骤编制了地理管换热器设计软件——GHETool。

参考文献:

- [1] 田慧峰,王鹏英,曹伟武. 大地耦合热泵系统国内外研究近况[J]. 制冷与空调, 2006, 6(3):15-20.
TIAN HUI-FENG, WANG PENG-YING, CAO WEI-WU. Domestic and overseas study of ground-coupled heat pump system [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2006, 6(3):15-20.

(下转第124页)

- characteristics and mechanism of groundwater movement in an oilfield in Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 178-185
- [12] JACOB B. Dynamics of fluid in porous media[M]. New York: Elsevier, 1972.
- [13] 叶为民, 金麒, 等. 地下水污染试验研究进展[J]. *水利学报*, 2005, 36(2): 251-255.
YE WEI-MIN, JIN QI, et al. Review on advance in experimental study of pollution dispersion in groundwater [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(2): 251-255.
- [14] CHEVALIER L R, WALLACE R B. 2-D Experimental Investigation of Surfactant Mobilization of Light Nonaqueous Phase Liquid [J]. ASCE National Convention, Washington D. C., November 12-14, New York, ASCE, 1996, 357-368.
- [15] 黄军旗. 求解水动力弥散方程的多单元均衡法[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 1990, 5(4): 19-26.
HUANG JUN-QI. A Method of Multi-element Balance for Solving Hydrodynamic Dispersion Equation [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1990, 5(4): 19-26.
- [16] 吕凤翥. C++语言基础教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
LV FENG-ZHU. C++ basic teaching book [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [17] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
XUE YU-QUN. Dynamical Mechanics of Ground Water[M]. Beijing: Geology Press, 1997.
- (编辑 胡 玲)

(上接第 113 页)

- [2] 吴玉庭, 顾中焯, 马重芳, 等. U型管传热量影响因素的数值模拟研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(1): 116-118.
WU YU-TING, GU ZHONG-XUAN, MA CHONG-FANG, et al. Numerical study on the influencing factors on the heat transfer of the U-tube[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(1): 116-118.
- [3] 田慧峰. 垂直 U 形埋管换热器传热模型和设计方法[D]. 上海: 上海理工大学, 2006.
- [4] 谢汝镛. 地源热泵系统的设计[J]. *现代空调*, 2001, 3: 33-74.
XIE RU-YONG. Design method of Ground-source heat pump system[J]. *Modern Air Conditioning*, 2001, 3: 33-74.
- [5] 丁勇, 刘宪英, 胡鸣明等. 地源热泵系统实验研究综述[J]. *现代空调*, 2001, 3: 11-32.
- [6] 中华人民共和国建设部. GB50366-2005 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.
- [7] STEVE K. Design consideration for ground and water source heat pumps in southern climates[J]. *ASHRAE trans.* 1989, 95(1): 1139-1148.
- [8] 曲云霞. 地源热泵系统模型与仿真[D]. 西安: 西安建筑科技大学. 2004.
- [9] ARIF HEPBASLI. Thermodynamic analysis of a ground-source heat pump system for district heating[J]. *International Journal of Energy Research*, 2005, 29(7): 671-687.
- [10] DIAO NAI-REN, LI QIN-YUN, FANG ZHAO-HONG. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2004, 43(12): 1203-1211.
- [11] ONDER OZGENER, ARIF HEPBASLI. Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system[J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(1): 101-110.
- [12] BURKHARD SANNER. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe[J]. *Geothermics*, 2003, 32(4): 579-288.
- [13] MUSTAFA NALL, IKMET ESEN. Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(14): 2219-2232.
- [14] HIKMET ESENNA, MUSTAFA INALLIB, MEHMET ESEN. Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(9): 1281-1297.
- [15] ZENG HE-YI, DIAO NAI-REN, FANG ZHAO-HONG. Efficiency of vertical geothermal heat exchangers in the ground source heat pump system[J]. *Journal of Thermal Science*, 2003, 12(1): 77-81.
- (编辑 陈 蓉)