基于负荷自适应分配的地埋管换热器传热分析

贺泽群1 于明志1,2 毛煜东1,2 方肇洪1

(1. 山东建筑大学热能工程学院,济南 250101;2. 山东省绿色建筑协同创新中心,济南 250101)

摘 要 本文采用自适应负荷法分析地埋管换热器长期运行时各埋管换热量、进口水温及土壤温度分布情况,并与目前 广泛应用的均分负荷法进行对比。自适应负荷法计算结果表明各埋管换热量并不相同,呈中心区域低周边区域高的分布趋势,长期运行后土壤温度分布仍较为均匀,中心区域土壤冷热量累积较周边区域并不十分明显;均分负荷法采用各埋管换 热量相同的假设与实际不符,导致其计算的各埋管进口水温明显不同的结果与实际不符。采用均分负荷法计算结果显示埋 管中心区域冷热量累积严重,这与自适应负荷法得到的结果存在显著差异。分析认为,自适应负荷法计算结果更可信。

关键词 地理管换热器; 自适应负荷法; 均分负荷法 中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2020)08-2044-08

Heat Transfer Analysis of Ground Heat Exchanger Based on Self-adaption Load Distribution Method

HE Ze-Qun¹ YU Ming-Zhi^{1,2} MAO Yu-Dong^{1,2} FANG Zao-Hong¹

(1. School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. The Co-Innovation Center for Green Building of Shandong Province, Jinan 250101, China)

Abstract In this paper, the self-adaption load distribution method (SLDM) is used to analyze the thermal loads and inlet water temperature of each buried tube of ground heat exchangers (GHE), the soil temperature distribution during long-term operation and the results were compared with those obtained based on the mean load distribution method (MLDM) which is widely used presently. The results calculated by the SLDM show that the thermal loads of different buried pipe are not same, and those of the pipes in the central zone are relatively low while those of the pipes in the side area are relatively high. Even after long-term operation, the soil temperature distribution is still relatively uniform, and the thermal accumulation in the central area is not obviously serious compared with that in the side area. The MLDM assumed that all buried pipes have the same thermal loads which is obviously deviated from the real situation, therefore, the calculated result that the inlet temperatures of buried pipes by MLDM are not same is not in accordance with the actual case. The MLDM results show that thermal accumulation in the central area is quite serious which is different from that obtained by the SLDM. However, analysis shows that the results obtained by SLDM are more reliable.

Key words ground heat exchanger; self-adaption load distribution method; mean load distribution method

0引言

近些年受全球能源现状的影响,地源热泵技术 以其节能环保等优势得到广泛发展及应用^[1-3]。地 埋管换热器作为地源热泵的主要部分,其传热研究 是影响系统设计的关键因素。

目前地埋管传热模型主要有三类^[4]:第一类是 线热源和柱热源模型为代表的解析模型。此类模型 便于数学分析且计算速度较快^[5-7]。第二类是数值 模型^[8-10]。数值模型具有更好的灵活性和准确性 (特别是研究短时间问题),但是地埋管换热器通常 涉及空间大且运行时间长,当网格数量很大时,计 算非常耗时。第三类方法为混合模型。此类模型与 实际情况较为接近,但存在计算繁琐等问题^[11-13]。

收稿日期: 2020-03-13; 修订日期: 2020-07-22

基金项目:山东省自然科学基金项目 (No.ZR2017MEE037);国家重点研发计划项目 (No.2016YFC0700803-01)

作者简介: 贺泽群 (1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事动力工程及工程热物理研究. 通信作者: 于明志, 教授, yumingzhiwh@163.com.

无论采用哪类模型,目前国内外对地埋管换 热器进行传热分析时通常将热冷负荷平均分配给各 埋管且默认埋管承担的热或冷负荷可完全释放给土 壤^[14-17]。由于假设各埋管换热负荷相同,只需 考虑埋管负荷对地下温度场的影响,而不考虑地 下温度场变化对各埋管实际可承担负荷的影响,传 热计算时无需对各埋管负荷进行单独计算,因而 采用均分负荷方法计算相对简单。实际上,当其 他条件相同时,各埋管与地下土壤的换热量是由埋 管进口水温与其埋管周围土壤温度共同决定的。由 于各埋管循环水来自热泵机组、其进口水温通常相 同,因而各埋管换热负荷相同的情况只有地下温度 场分布均匀时才成立,这通常只出现在地源热泵系 统运行初始阶段。众所周知、具有较多埋管的地 源热泵系统运行一段时间后,各埋管周围土壤温度 大都不再相同,因此各埋管均分负荷的假定在地源 热泵系统绝大部分运行期内都不成立, 据此计算得 到的长期运行条件下传热情况也会和实际存在一定 差距。

基于上述分析,本文在统一埋管内循环水进口 温度的前提下,计算各地埋管实际承担负荷,分析 地下土壤温度分布及埋管承担负荷变化,并与均分 负荷方法计算结果进行对比,分析采用两种方法得 到结果的差异,以期为地源热泵系统设计与运行提 供参考借鉴。

1 地埋管换热器自适应负荷法简介

地埋管换热器运行时,对于某一时刻,各埋 管承担的热负荷由其进口水温、流量和各埋管钻 孔壁温等共同确定,并且各埋管所承担负荷之和 为地埋管换热器总换热负荷。由于地埋管换热器 总换热负荷必须满足地源热泵空调系统负荷需求, 因此实际上其进口水温及各埋管承担的负荷由当前 时刻各钻孔壁温及地埋管换热器须承担的总负荷决 定,各埋管负荷是当前时刻由地源热泵空调系统自 我分配,非人为控制,本文称之为负荷自适应分 配,基于此得到的换热器传热分析方法为自适应负 荷法。

基于各埋管负荷自适应分配的地埋管换热器传 热分析过程中,对某个时刻的传热分析时,由于计 算开始时循环水进口温度未知,故先假定进口水温, 然后通过迭代运算,当各埋管负荷之和等于地热换 热器须承担的总热负荷时,此时的进口水温和各埋 管的负荷即为该时刻的相应数值 (具体计算过程见 图 1)。 由于该方法是通过假定各管同一进口水温度进 行传热计算的,与系统中各埋管的循环水均来自热 泵机组,进口水温度近乎相等的实际运行过程较为 贴切,故可认为采用此计算方法得到的结果与实际 较为接近,这也是与常用的均分负荷法计算过程相 比存在的最大不同之处。



Fig. 1 Calculation flow chart of SLDM

2 地埋管换热器传热模型

2.1 钻孔外换热模型^[4,18-20]

假定大地为表面温度恒定、初始温度分布均匀 且物性均匀不变的半无限大介质,地埋管为有限长 线热源。基于此,可采用有限长线热源模型,埋管传 热对土壤中温度影响:

$$\Delta T_{\rm FLS} = \frac{q_{\rm L}}{4\pi\lambda_{\rm s}} \times \\ \int_{0}^{H} \left[\begin{array}{c} \frac{\operatorname{erfc}(\sqrt{r^2 + (z-h)^2}/2\sqrt{at})}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} \\ \frac{\operatorname{erfc}(\sqrt{r^2 + (z+h)^2}/2\sqrt{at})}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \end{array} \right] \mathrm{d}h \tag{1}$$

式中, ΔT_{FLS} 为距钻孔中心 r处的温升,°C; q_L 为钻孔每延米换热量, $W \cdot m^{-1}$; λ_s 为土壤导热系 数, $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$; a为土壤导温系数, $m^2 \cdot s^{-1}$; r为 距钻孔中心的距离, m; z为深度方向坐标, m; H为 钻孔深度, m。

结合阶跃负荷及叠加原理,可以得到地埋管换 热器所在区域任一点的温升:

$$\Delta T(x, y, z)_{\rm FLS} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \frac{q_{i,j} - q_{i,j-1}}{4\pi\lambda_{\rm s}} \times \int_{0}^{H} \left[\frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r_{i}^{2} + (z-h)^{2}}}{2\sqrt{a(t_{m} - t_{j-1})}}\right)}{\sqrt{r_{i}^{2} + (z-h)^{2}}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r_{i}^{2} + (z+h)^{2}}}{2\sqrt{a(t_{m} - t_{j-1})}}\right)}{\sqrt{r_{i}^{2} + (z+h)^{2}}} \right] dh$$
(2)

式中, i 为地埋管换热器钻孔个数, 共 n 个; j 为一 定负荷的作用时刻, 总时刻为 m 个; $q_{i,j}$ 为第 i 个钻 孔第 j 时刻的每延米换热量, $W \cdot m^{-1}$.

2.2 钻孔内换热模型

准三维模型是在二维模型的基础上考虑了温度 在轴向的变化,采用该模型可得到更为精确的传 热热阻,同时也能对 U 型管内的循环水温进行计 算^[21],其计算模型:

$$T_{\rm in} = T_{\rm b} + \frac{q_{\rm L} \cdot H}{cm \left(1 - \theta\right)} \tag{3}$$

$$T_{\rm x} = T_{\rm b} + \frac{q_{\rm L} \cdot H \cdot \theta}{cm \left(1 - \theta\right)} \tag{4}$$

$$\theta = \frac{T_{\rm x} - T_{\rm b}}{T_{\rm in} - T_{\rm b}} = \frac{\beta S_1 \cdot ch\beta - sh\beta}{\beta S_1 \cdot ch\beta + sh\beta}$$
(5)

其中,

$$S_1 = \frac{cm}{H} \left(R_{11} + R_{12} \right) \tag{6}$$

$$S_{12} = \frac{cm}{H} \left(\frac{R_{11}^2 - R_{12}^2}{R_{12}} \right) \tag{7}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{S_1^2} + \frac{2}{S_1 S_{12}}} \tag{8}$$

式中, c 为流体比热容, J·(kg·K)⁻¹; m 为流体质量 流量, kg·s⁻¹; T_x 为埋管出口温度, °C; T_{in} 为埋 管进口温度, °C; T_b 为钻孔壁温, °C; R_{11} 为管 内循环液与钻孔壁间热阻, m²·K·W⁻¹; R_{12} 为两管 之间热阻, m²·K·W⁻¹; R_p 为循环液至管外壁间热 阻, m²·K·W⁻¹.

$$R_{11} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\rm b}} \left(\ln \frac{r_{\rm b}}{r_0} + \sigma \cdot \ln \frac{r_{\rm b}^2}{r_{\rm b}^2 - D^2} \right) + R_{\rm p} \qquad (9)$$

$$R_{12} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\rm b}} \left(\ln \frac{r_{\rm b}}{2D} + \sigma \cdot \ln \frac{r_{\rm b}^2}{r_{\rm b}^2 + D^2} \right) \tag{10}$$

$$R_{\rm p} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\rm p}} \ln\left(\frac{r_0}{r_{\rm pi}}\right) + \frac{1}{2\pi r_{\rm pi}h} \tag{11}$$

$$\sigma = \frac{\lambda_{\rm b} - \lambda_{\rm s}}{\lambda_{\rm b} + \lambda_{\rm s}} \tag{12}$$

式中, λ_b 、 λ_p 为回填材料、管壁导热系数, W·(m·K)⁻¹; r_b 为钻孔半径, m; r_0 为管内径, m; r_{pi} 为管外径, m; D为两管中心间距的一半, m; h为流体与埋管表面传热系数, W·(m²·K)⁻¹.

3 计算结果与分析

以 12×12 方形等间距布置的地埋管换热器 (见 图 2) 为例,利用自适应负荷法计算各埋管换热量、 进口水温变化以及埋管区域土壤温度场的分布情况, 并与采用均分负荷方法计算得到的结果进行对比。



3.1 参数设定

取地下管群夏季平均换热功率为 432 kW (折合 埋管每延米换热量为 30 W·m⁻¹),冬季平均换热功 率为 288 kW (折合埋管每延米换热量为 20 W·m⁻¹), 春秋两季停止运行,为土壤恢复期,计算时间步长

41 卷

2046

为 24 h. 地埋管尺寸及地下岩土层热物性参数见表 1.

表 1 地埋管及岩土相关参数

Table 1 The parameters of the ground and

Dorenoies	
	数值
钻孔半径/m	0.075
钻孔深度/m	100
钻孔间距/m	5
埋管外径/m	0.032
埋管内径/m	0.026
两管中心间距/m	0.06
埋管导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.33
流体与埋管表面传热系数/W·(m ² ·K) ⁻¹	1985
流体比热容/J· $(kg\cdot K)^{-1}$	4187
流体质量流量/kg·s ⁻¹	0.27
回填材料导热系数/W·(m·K ⁾⁻¹	1.0
土壤导热系数/W·(m·K) ⁻¹	1.5
土壤比体积热容/ J · $(m^3 \cdot K)^{-1}$	$2.0 imes 10^{6}$
土壤初始温度/°C	15

3.2 结果对比分析

3.2.1 各埋管换热量

图 3 是自适应负荷法得到的地热换热器运行 至第 10 年及第 20 年夏季结束时各埋管所承担的 换热量分布图,可以看出,各埋管承担的热负荷呈 中心区域低周边区域高的分布趋势,其中运行至第 10 年夏季结束时,图 2 所示中心区域埋管 6 的每 延米换热量为 27.93 W·m⁻¹,边角处埋管 11 每延 米换热量为 35.13 W·m⁻¹,二者相差 25.8%,运行 至第 20 年时,中心区域埋管 6 的每延米换热量为 27.42 W·m⁻¹,边角处埋管 11 每延米换热量为 36.6 W·m⁻¹,二者相差 33.5%,即随着运行时间的增加, 中心区域与边角处的埋管承担的换热量差距有一定 增大。

众所周知,处于地埋管换热器周边区域的埋管 由于热扩散条件显著优于中心区域埋管,因此在循 环水进口温度相同的情况下,周边区域埋管实际承



担的换热负荷要大于中心区域埋管负荷,图3所示 结果与此相符,表明采用自适应负荷法比较符合实 际运行情况。采用均分负荷法进行计算时各埋管换 热量均相等,因此各埋管夏季每延米负荷均为30 W·m⁻¹,不随时间和钻孔位置改变。显然采用均分 负荷法时各埋管负荷相同的假定与实际运行情况有 相当差距。

3.2.2 各埋管进口水温

采用自适应负荷法计算时,由于各埋管循环液 进口温度均相等,所以地埋管换热器运行至第10年 及第20年夏季结束时各埋管进口水温均为43.41°C 及48.63°C,即在地埋管换热器承担总负荷一定的 情况下,各埋管循环液进口温度只随运行时间增加 而升高,与其所在位置无关,这与系统实际运行情 况相符。图4 为采用均分负荷法得到的各管进口 温度分布图,可以看出,各埋管进口水温呈中心高 四周低的分布趋势,其中,运行至第10年夏季结 束时钻孔6埋管的进口水温为47.60°C,钻孔11 埋管的进口水温为39.16°C,运行至第20年夏季 结束时钻孔6埋管的进口水温为55.24°C,钻孔11







图 4 均分负荷法下各埋管进口水温分布

Fig. 4 The inlet water temperature of each buried pipe with $$\mathrm{MLDM}$$

埋管的进口水温为 42.97°C,即每根管的进口水温 与时间及其所在位置有关,随着运行时间的增加, 中心区域与边角处的埋管的循环液进口温差日益增 大,这与进口水温通常相同的实际运行状况明显 不符。

3.2.3 地埋管换热器区域土壤温度分布

图 5 和图 6 是分别采用自适应负荷法和均分负 荷法得到的第 20 年夏季结束时地下土壤温度分布。 由图 5 可知,采用自适应负荷法时,管群区域土壤温 度分布较为均匀,中心区域钻孔6的壁温为42.18°C, 边角处钻孔 11 的壁温为 40.01°C, 两者差值较小, 这 表明地埋管换热器运行 20 年后管群中心区域土壤热 量累积现象较周边区域并不显著,这表明当前业内 广泛认为冬夏季负荷不平衡时地埋管换热器长期运 行会导致土壤中心区域较周边区域存在严重冷热量 累积的担心是多余的。以夏季为例,如果某区域温 度明显高于其他区域时,由于实际运行时各埋管进 口水温几乎相同,则该区域埋管放热量显然会小于 其他区域埋管、因此该区域温度升高速度会低于其 他区域温升,反之亦然。也就是说,地埋管换热器工 作时,各埋管承担的负荷与地下温度场间具有自我 调节功能,因此不会存在各区域间温度场分布过于 失衡的问题。

图 6 所示,采用均分负荷法计算时,管群区域四周温度较低,中心温度较高,其中埋管区域钻孔 6 的 壁温为 48.13°C,钻孔 11 的壁温为 35.86°C,温差较 大。这是因为均分负荷法认定各埋管的换热量相同, 众所周知,周围区域埋管的散热条件优于中心区域, 若各埋管换热量相同,地埋管换热器中心区域热量 累积必然会严重。实际运行中,当各埋管周围土壤 温度存在显著差异时,各埋管换热量是不可能保持 相同的。



图 5 自适应负荷法下第 20 年夏季结束时土壤温度分布 Fig. 5 The soil temperature distribution at the 20 th summer end with SLDM



图 6 均分负荷法下第 20 年夏季结束时土壤温度分布 Fig. 6 The soil temperature distribution at the 20 th summer end with MLDM

70

图 7 是采用不同方法得到的地埋管换热器运行 20 年后埋管区域代表位置 (见图 2) 温度分布,可以 看出,采用均分负荷法计算的中间区域土壤中温度 较自适应负荷法得到的温度明显偏高,中心埋管钻 孔处温度高 6.0°C,边角处的土壤温度则反之,而是 较自适应负荷法得到的温度明显偏低,最边角埋管 钻孔处温度低 4.2°C。采用均分负荷法得到的各代表 点处钻孔壁温较采用自适应负荷法的温度差 ΔT 及 偏差 E 见表 2,计算式见式 (13)、(14)。

$$\Delta T = T_{\text{Bisich diffs}} - T_{\text{byd} \text{diffs}} \tag{13}$$

$$E = \frac{\Delta T}{T_{\text{lidentified}}} \times 100\% \tag{14}$$





通过与均分负荷法下地埋管换热器区域土壤温 度场分布情况对比可知,采用自适应负荷法计算时, 土壤温度分布较为均匀,即使埋管换热器运行20年, 各钻孔壁最大温差仅为2.1°C,故在地热换热器实际 运行过程中,与管群周边区域相比,其中心区域并 不会出现严重的热量累积现象。

3.2.4 代表位置钻孔壁温对比

图 8 分别是采用自适应负荷法及均分负荷法计 算得到的管群中心位置处钻孔 6 和边角位置处钻 孔 11 的壁温随运行时间变化的趋势图。由图可知, 采用自适应负荷法计算时,钻孔 6 的壁温始终要低

表 2 采用均分负荷法得到的代表点钻孔壁温度较自适 应负荷法的温差 △T 及偏差 E(运行 20 年)

Table 2 The temperature difference ΔT and deviation E of the borehole wall calculated by MLDM compared with those by SLDM (at the end of the 20 th year)

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	• ,			
钻孔	$\Delta T/^{\circ}C$	E/%		
1	0.4	1.0		
2	-1.6	-3.8		
3	-3.3	-7.9		
4	-4.6	-11.0		
5	-5.5	-13.1		
6	-6.0	-14.1		
7	-5.1	-12.1		
8	-3.5	-8.2		
9	-1.1	-2.6		
10	1.6	3.9		
11	4.2	10.3		





于均分负荷法计算值,并且随着运行时间的增加,两 者温差逐渐增大,即采用均分负荷计算的偏差越大 (见表 3)。对于钻孔 11,采用自适应负荷法计算时其 壁温度始终要高于均分负荷计算值,并且随着运行 时间的增加,两者温差也逐渐增大(见表 3),其原因 可参见 2.2.3 节。通过对比可知,随着地源热泵系统 运行时间的增加,采用均分负荷法计算的结果偏差 越来越大。

表 3 代表钻孔壁温度差 △T 及偏差 E 随运行 时间的变化

Table 3 The variation of temperature difference ΔT and deviation E of the borehole wall vs.

operation time

运行时	时间/a	5	10	15	20
钻孔 6	$\Delta T/^{\circ}C$	-1.74	-3.64	-5.00	-5.95
	E/%	-5.30	-9.89	-12.54	-14.10
钻孔 11	$\Delta T/^{\circ}C$	1.93	3.08	3.75	4.14
	E/%	6.08	8.76	9.90	10.35

4 结 论

本文采用自适应负荷法对地热换热器传热进行 分析计算,并与当前普遍采用的均分负荷方法计算 结果进行对比,所得结论如下:

1) 自适应负荷法基于各埋管进口水温相等的前提,考虑了由土壤温度差异而导致的各埋管传热负荷差异,消除了目前广泛采用的均分负荷法假设各埋管承担负荷相同的缺陷,更符合地源热泵系统运行实际情况,计算结果也更为可靠。

2)各埋管承担的负荷量呈中心区域低周边区域 高的分布趋势,随运行时间增加,该趋势日益显著。 其原因是地埋管换热器边界区域散热条件优于中心 区域,当进口水温相同时,周边区域埋管承担的负 荷必然大于中心区域埋管所承担的负荷。

3) 地埋管换热器中心区域与周边区域温度分布 比较均匀,相差不大,说明中心区域与周边区域的 冷热量累积程度比较接近。该结果表明,当前业内 普遍认为地埋管换热器中心区域会存在较严重冷热 量累积问题的认知是值得商榷的。因此,在模拟地 埋管换热器的传热过程时,为保证结果准确,建议 使用自适应负荷法进行计算。

参考文献

[1] 徐伟. 中国地源热泵发展研究报告 [M]. 北京: 中国建筑工 业出版社, 2018

XU Wei. The Research Report on the Development of GSHP in China [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018

- [2] LIU Zhijian, XU Wei, QIAN Cheng, et al. Investigation on the Feasibility and Performance of Ground Source Heat Pump (GSHP) in Three Cities in Cold Climate Zone, China [J]. Renewable Energy, 2015, 84: 89–96
- Biglarian H, Saidi M H, Abbaspour M. Economic and Environmental Assessment of a Solar-assisted Ground Source Heat Pump System in a Heating-Dominated Climate [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(7): 23-31
- [4] YANG Hongxing, CUI Ping, FANG Zhaohong. Vertical-Borehole Ground-Coupled Heat Pumps: A Review of Models and Systems [J]. Applied Energy, 2010(87): 16– 27
- [5] Louis L, Philippe P. Higher-Order Temporal Scheme for Ground Heat Exchanger Analytical Models [J]. Geothermics, 2019, 78: 111-117
- [6] Kavanaugh S P. Simulation and Experimental Verification of Vertical Ground-Coupled Heat Pump Systems [D]. Stillwater: Oklahoma State University, 1985
- [7] Ghoreishi-Madiseh S A, Kuyuk A F, Brito M A R. An Analytical Model for Transient Heat Transfer in Ground-Coupled Heat Exchangers of Closed-Loop Geothermal Systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150: 696-705
- [8] Lee C K. A Modified Three-Dimensional Numerical Model for Predicting the Short-Time-Step Performance of Borehole Ground Heat Exchangers [J]. Renewable Energy, 2016, 87: 618–627
- [9] 陈梅倩,万锐,李正浩,等.竖直U型地埋管传热性能数值 模拟 [J].北京交通大学学报,2016,40(1):61-66 CHEN Meiqian, WAN Rui, LI Zhenghao, et al. Numerical Simulation on Heat Transfer Behavior of a Ground Vertical U-Shaped Tube [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(1): 61-66
- [10] 鲍谦,张旭, 王松庆,等. 条形地埋管区域土壤换热特性的 数值模拟 [J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(5): 76-79 BAO Qian, ZHANG Xu, WANG Songqing, et al. Numerical Simulation of Soil Heat Transfer Characteristics in the Area of Strip Buried Pipes [J]. Building Energy & Environment, 2010, 29(5): 76-79
- [11] Eskilson P. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes [D]. Lund: University of Lund, 1987
- [12] Naldi C, Zanchini E. Effects of the Total Borehole Length and of the Heat Pump Inverter on the Performance of a Ground-Coupled Heat Pump System [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 306–319
- [13] HU Pingfang, YU Zhongyi, ZHU Na, et al. Performance Study of a Ground Heat Exchanger Based on the Multipole Theory Heat Transfer Model [J]. Energy and Buildings, 2013, 65: 231-241
- [14] LI Wenxin, LI Xingdong, WANG Yong, et al. An Integrated Predictive Model of the Long-term Performance Ofground Source Heat Pump (GSHP) Systems [J]. Energy and Buildings, 2018, 159: 309–318
- [15] Lamarche L, Pasquier P. Higher-Order Temporal Scheme for Ground Heat Exchanger Analytical Models [J]. Geothermics, 2019, 78: 111–117
- [16] YU Mingzhi, MA Tengteng, ZHANG Kai, et al. Simplified Heat Transfer Analysis Method for Large-Scale Boreholes

Ground Heat Exchangers [J]. Energy and Buildings, 2016, 116: 593-601

- [17] 让红梅. 集群地埋管换热器分区运行策略研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2017
 RANG Hongmei. Study on Zoning Operation Strategy of Multi-Borehole Ground Heat Exchanger [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2017
- [18] 李永, 茅靳丰, 耿世彬, 等. 基于动态负荷的地埋管管群换热 模型对比分析 [J]. 化工学报, 2014, 65(3): 890-897
 LI Yong, MAO Jinfeng, GENG Shibin, et al. Evaluating Heat Transfer Models of Ground Heat Exchangers with Multi-Boreholes Based on Dynamic Loads [J]. CI-ESC Journal, 2014, 65(3): 890-897
- [19] 曾和义, 刁乃仁, 方肇洪. 地源热泵竖直埋管的有限长线热 源模型 [J]. 热能动力工程, 2003, 18(2): 166-169

ZENG Heyi, DIAO Nairen, FANG Zhaohong. Finite Length Line Heat Source Model of Ground Source Heat Pump [J]. Thermal Energy Power Engineering, 2003, 18(2): 166–169

- [20] 杨卫波, 施明恒. 基于线热源理论的垂直 U 型埋管换热器 传热模型的研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(5): 482-488 YANG Weibo, SHI Mingheng. Study on Heat Transfer Model of Vertical U-Tube Ground Heat Exchangers Based on Line Heat Source Theory [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2007, 28(5): 482-488
- [21] 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, 2005
 DIAO Nairen, FANG Zhaohong. Ground Coupled Heat Pump Technology [M]. Beijing: High Education Press, 2005