

文章编号 :1003-0344(2013)06-005-5

项目规模对地埋管土壤热平衡的影响研究

范蕊¹ 花莉² 潘毅群¹ 高岩³

1 同济大学中德工程学院

2 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司

3 北京建筑工程学院供热供燃气通风及空调工程北京市重点实验室

摘要 项目规模(地埋管规模)对土壤源热泵系统土壤全年热平衡问题影响至关重要,因此本文针对不同规模、不同冷热负荷比情况下地埋管土壤温度变化进行了研究分析。结果表明,当建筑全年累计冷热负荷比从 1:1 变化至 4:1 时,地埋管区域土壤 10 年累计温升从 4.18℃升高到 9.11℃,影响较大;对于 5~10 口井的小规模建筑,即使当建筑累计冷热负荷比达到 4:1 时,热平衡问题都可以忽略不计,但是当埋管规模增至 20 口管井时,热平衡问题必须要予以重视。最后,本文针对小规模建筑应用土壤源热泵系统时如何缓解并解决土壤热平衡问题进行了研究,为土壤源热泵系统的研究和应用提供了理论支持。

关键词 土壤源热泵 土壤热平衡 项目规模 TRNSYS

Study on Project Scale's Effect to Heat Balance of Ground-coupled Heat Pump System

FAN Rui¹, HUA Li², PAN Yi-qun¹, GAO Yan³

1 Sino-German College of Applied Sciences of Tongji University

2 Tongji Architecture Design (Group) Co., Ltd.

3 Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture

Abstract: Project scale (GHP scale) has a very important effect to annual heat balance of ground-coupled heat pump system, therefore, the article analyses the ground temperature variation from such aspects as project scale and different cool and heat load ratio. Results show that when the building annual accumulative cool and heat load ratio change from 1:1 to 4:1, the storage volume's soil temperature rise from 4.18℃ to 9.11℃ in 10 years running, which rises a lot. Whereas, for the small-scale project such as 5-10 well, the heat balance problem can be neglected, even though the building annual accumulative cool and heat load ratio reach 4:1. But the heat balance problem can't be neglected when the project scale rise to 20 well. At last, the paper discusses how to ease and solve the ground heat balance problem when ground ground-coupled heat pump system is used in the small-scale project, which is helpful to the further study and reasonable application of GCHP system.

Keywords: GCHP, soil heat balance, project scale, TRNSYS

0 引言

土壤源热泵以地表能(包括土壤、地下水和地表

水等)为热源(热汇),通过输入少量的高品位能源(如电能),实现低品位热能向高品位热能转移的热泵空调系统^[1]。根据利用地表资源的不同,土壤源热泵系统分

收稿日期:2013-3-11

作者简介:范蕊(1977~),博士,副教授,上海市四平路 1239 号同济大学综合楼 801(201804),E-mail: fan_rui@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(No.50806052)北京市重点实验室研究基金资助课题

为三种形式：土壤源热泵系统（Ground-Coupled Heat Pump, 简称 GCHP）、地下水源热泵系统（Ground Water Heat Pump, 简称 GWHP）和地表水源热泵系统（Surface Water Heat Pump, 简称 SWHP）^[2]，以下文中所指的土壤源热泵都特指土壤源热泵（GCHP）。

在夏热冬冷地区，由于建筑物冬夏负荷差异，单一的土壤源热泵系统长期运行中会引起土壤逐年温度升高/降低，其不利于系统的持续稳定运行，已经成为制约该系统大规模广泛应用的瓶颈问题。虽然土壤源热泵的运行特性受诸多因素的影响，作者也在该方面进行了大量的研究^[3]，结果表明通过调节管间距、深度、或者土壤和回填料的导热系数增加都可以缓解该问题，但不能从根本上解决该问题，尤其当土壤全年累计吸放热量差异较大时^[4]。对于土壤源热泵系统而言，建筑物全年累计冷热负荷比（即建筑全年冷负荷累计值与热负荷累计值之比）和项目规模（即埋管规模）是影响土壤热平衡问题的两个关键因素，因此下面本文将从建筑全年累计冷热负荷比和项目规模这两个因素出发，研究土壤源热泵系统长期运行的热平衡问题，并对缓解小规模土壤源热泵系统热平衡问题进行了研究分析，以期对土壤源热泵的发展提供借鉴。

1 土壤源热泵系统模型的搭建

本文的建筑模型基于上海某土壤源热泵实验项目，按照普通办公楼运行，空调设计冷负荷 300kW，热负荷 117kW。根据土壤热响应测试结果，按照夏季单位井深换热量为 60W/m 进行设计，最终确定了 80 口、83m 深竖直换热井，钻孔间距为 4m。同样也经热响应测试测得埋管区域岩土层土壤竖向平均导热系数为 1.62W/(m·K)，平均比热容为 1432kJ/(kg·K)，土壤平均初始温度为 19.07℃。土壤源热泵系统中主要设备参数如表 1 所示。

表 1 主要设备参数

设备	制冷/热能力 (kW)	流量 (m³/h)	功率 (kW)	台数
地源热泵	330 (制冷)	56.5 (蒸发器)	68.8 (制冷)	1
	396 (制热)	80 (冷凝器)	91 (制热)	1
负荷侧循环泵	井-7mH ₂ O	28.2	1.1	2
埋管侧循环泵	井-28mH ₂ O	40	5.5	2

本文利用 TRNSYS17 来搭建复合式地源热泵系统的仿真模型，TRNSYS 是模块化的动态仿真软件，所谓模块化，即认为所有系统均由若干个小的系统（即模块）组成，一个模块实现某一种特定的功能^[5]。在

TRNSYS 中的埋管换热器模型是 DST (Duct Ground Heat Storage) 模型，其利用空间重叠法来获得土壤中的温度分布，其主要包括以下三个部分：整个储热装置与外部的热传递；在短时间尺度内钻孔周围的热传递；与最近的埋管稳流热传递。此模型利用数值方法来解决前两个问题，用解析方法来解决第三个问题^[6]。

本文在模拟计算时，首先利用 eQuest 软件来计算建筑全年逐时负荷，将包括新风和热损失在内的建筑逐时冷热负荷导出，再通过 Type9 Data Reader 导入 TRNSYS，从而有效地简化 TRNSYS 模型，减少模拟计算时间。

接下来，将针对该系统长期运行特性、不同建筑累计负荷比以及不同项目规模情况进行研究分析，从而明确土壤热平衡问题并提出解决方案。

2 土壤源热泵系统长期运行性能分析

利用 eQuest 计算了该栋实验建筑的全年逐时冷热负荷，经计算得到，建筑物峰值冷热负荷之比为 2.56:1，累计冷热需求之比为 1.93:1，根据已选取的地源热泵机组，经 TRNSYS 模拟计算得到埋管区域土壤累计排热量与吸热量之比为 3.39:1，由此可见该实验建筑采用土壤源热泵系统时土壤冷热不平衡度较大。其中，建筑全年逐时冷热负荷和土壤全年逐时吸放热分别见图 1、图 2。

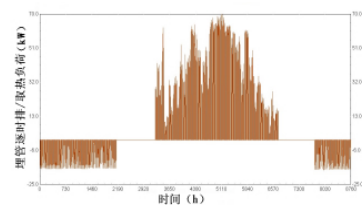


图 1 建筑全年逐时冷热负荷

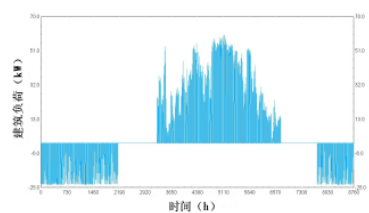


图 2 埋管全年逐时排/取热负荷

土壤源热泵系统采用定流量运行模式，按照办公楼运行时间表连续运行了 50 年。50 年运行期间，由于土壤的吸热量远高于放热量，因此土壤温度呈现明显逐渐升高的趋势，平均温度由 19.07℃ 升高到了 30.72℃。而且前几年温度升高较快，最终土壤的平均

温度趋向于稳定,如图 3 所示。

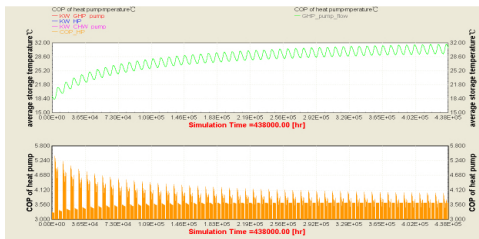


图 3 土壤均温和热泵 COP(运行 50 年)

如图 3 所示,在地源热泵系统运行的前 10 年,土壤的平均温度由 19.07℃变为 26.32℃,升高了 7.25℃;从第 10 年到第 20 年,土壤的平均温度由 26.32℃变为 28.76℃,升高了 2.44℃;从第 20 年到第 30 年,土壤的平均温度由 28.76℃变为 29.56℃,升高了 0.8℃;而后 20 年间,土壤的平均温度由 29.56℃变为 30.72℃,总共升高了 1.16℃。

综合来看,第一个十年土壤温度占 50 年温升的比率为 62.2%,第二个十年温升贡献率为 20.9%,第三个十年温升贡献率为 6.8%,最后二十年温升贡献率仅为 9.9%。由此可见,土壤源热泵系统的冷热不平衡特性在前 10 年体现的较明显,从第 10 年到第 20 年间温度有一定的升高,而后 30 年间的土壤平均温度变化较小,这主要是因为随着土壤温度的不断升高,土壤与周围岩土的温度梯度随之变大,散热量变大的缘故。因此,在本文后续分析中,都以 10 年作为基础进行研究。

此外,50 年运行期间,热泵机组的性能系数(COP)也逐年降低。土壤源热泵的夏季、冬季平均 COP 从第一年的 4.65、3.27 分别降低到第十年的 3.89、3.48,以及第五十年的 3.49 和 3.62。由此可见,随着土壤温度的逐年升高,冬季机组性能系数逐渐升高,而代价为夏季机组 COP 值的降低。综合全年来看,机组的能耗是逐渐增加的。因此,必须要从根本上缓解并解决土壤热平衡问题以实现系统长期高效运行。

3 冬夏累计冷热负荷比对热平衡的影响

建筑物全年累计冷热负荷不同以致造成的土壤累计吸放热量不一致是导致土壤出现温变的最根本原因,因此本小节将对建筑物和土壤全年累计冷热负荷差异的影响程度进行研究。为了分析方便,在此提出了两个定义,一是单位累计建筑冷热负荷差异温变,即 1MWh 的建筑累计冷热需求差异所引起的土壤温升;二是单位累计土壤负荷差异温变,即 1MWh 的

地埋管累积排热量与取热量差异所引起的土壤温升。

本文案例是按照夏季进行设计地埋管,因此对于夏热冬冷地区不同的负荷比时,都能满足冬季热负荷的需求。不同累计冷热负荷比时,地埋管区域土壤的温升如图 4 所示。

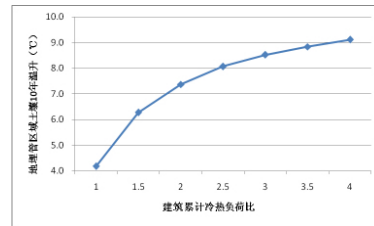


图 4 不同建筑累计冷热负荷比引起的土壤 10 年温升

从图 4 可以看出建筑累计冷热负荷比变大时,其引起的土壤温升逐渐变大,但是变化的幅度越来越小。当累计负荷比从 1:1 变化至 4:1 时,地埋管区域土壤 10 年累计温升从 4.18℃升高到 9.11℃,升幅较大。即便是当建筑累计冷热负荷比 1:1 时,由于此时地埋管换热器的累积排热量与累计吸热量之比为 1.72:1,因此土壤源热泵系统连续运行 10 年后土壤的平均温度还是升高了 4.18℃,由此可见保持土壤取放热量相一致的迫切性。鉴于此,本文又对土壤累计冷热负荷差异为 1:1 情况进行了分析,经过十年的运行土壤温度几乎没有变化,实现了土壤的温度恢复。由此可见,土壤的热平衡取决于土壤中实际累积排热量与取热量的差异,欲达到真正的热平衡,即土壤温度近似不变,需要保证地埋管累积排热量与吸热量相等或近似相等。

表 2 累计冷热负荷比对地埋管区域土壤温升的影响

建筑累计 冷热负荷比	土壤累计 冷热负荷比	年累计地埋管 取放热量差异 (MWh)	10 年后 土壤温升 (°C)	单位累计建筑 冷热负荷差异温变 (°C/MWh)	单位累计土壤 负荷差异温变 (°C/MWh)
1	1.72	83	4.18	?	0.051
1.5	2.59	121	6.27	0.111	0.052
2	3.52	141	7.37	0.087	0.052
2.5	4.51	154	8.07	0.079	0.053
3	5.51	162	8.52	0.075	0.053
3.5	6.53	167	8.84	0.073	0.053
4	7.62	172	9.11	0.072	0.053

进一步,不同累计冷热负荷比计算结果具体值亦列于表 2 中,由表可知,随着建筑累计冷热负荷比的增加,土壤的温度虽然在逐渐升高,但是单位累计建筑冷热负荷差异引起的土壤温度变化几乎不变,只有在负荷比 1.5 时是个特例,此外,单位累计土壤取放热量差异引起的土壤温变也几乎是个常数,由此可见,在该项目规模、该种地质条件下,单位土壤累计负荷差异引起的土壤温变可视为常数,这对于项目初期估算土壤源

热泵系统长期运行过程后土壤温升大有帮助,因此后续将继续对此参数展开研究,再次不再赘述。

4 项目规模对热平衡的影响

对于地埋管换热器来说,项目规模越大则埋管规模越大,因此土壤热平衡问题越严重。因此,本文在此对表3中所列6种项目规模进行了计算分析,建筑设计冷负荷依次从18.75kW变化至600kW,系统的运行模式与前述相同,建筑物全年累计冷热负荷比均为1.93:1,计算结果列于表3中。

表3 项目规模对土壤温度的影响

设计冷负荷 (kW)	钻孔数量	10年后土壤平均温度 (°C)	地埋管区域土壤10年温升 (°C)
18.75	5	20.41	0.7
37.5	10	21.55	1.9
75	20	23.03	3.3
150	40	25.14	5.4
300	80	26.32	6.6
600	160	28.11	8.4

从表3中可以看出,项目规模越大,地埋管区域10年温升也越大,可见越是大型的建筑,其使用土壤源热泵系统时的热平衡问题越是不容忽视,对于设计冷负荷达到600kW的系统,10年后土壤区域的温升达到了8.4°C,而对于小规模建筑,其长期运行引起的土壤温升较小,例如5口井和10口井的情况下10年运行后土壤温升仅有0.7°C和1.9°C,为了进一步明确小规模系统应用时的土壤温度变化问题,本文又针对小规模建筑进行了土壤热平衡问题分析

5 小规模建筑的热平衡分析

由前述分析可知,对于小规模建筑而言,热平衡问题可能不重要,那么究竟多么小规模的建筑,再加上在什么冷热负荷比情况下,可以不考虑热平衡问题值得商榷。因此,接下来主要对5口换热井(冷负荷18.75kW)、10口换热井(冷负荷37.5kW)以及20口换热井(冷负荷75kW)情况进行阐述。

经模拟分析得知,当土壤温度升高1°C时,热泵的制冷COP下降3.3%;当土壤温度升高2°C时,热泵的制冷COP下降5.2%;当土壤温度升高3°C时,热泵的制冷COP下降6.9%。要实现系统长期运行后土壤温度完全不变是不现实的,制冷COP下降6.9%也还在可接受的范围内,因此我们认为系统运行10年引起的温升不超过3°C是可以接受的。

图5为不同建筑累计冷热负荷比情况下三种土壤源热泵系统运行10年引起的土壤温度变化。通过图5可以直观地看出,当项目规模很小,如5口井(冷负荷18.75kW)的情况,即使累计冷热负荷比很大,如比值为4的时候,地埋管区域土壤10年温升也只有1.76°C,此时即为可不考虑热平衡的情况。当项目规模大到10口井时(冷负荷37.5kW),在累计冷热负荷比为3时,地埋管区域土壤10年温升是2.95°C,但是当累计冷热负荷比再增加时,就不得不考虑热平衡问题了。当管井数为20口时,即使在较小的负荷比情况下,也必须要考虑热平衡问题。

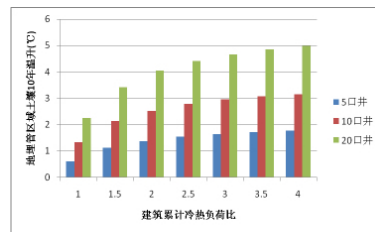


图5 项目规模与累计冷热负荷比对土壤温升的综合影响

表4 项目规模与负荷比对土壤温升的综合影响

项目规模	累计冷热负荷比	年累计地埋管取放热量差 (MWh)	土壤10年温升 (°C)	单位累计建筑冷负荷差异温变 (°C/MWh)	单位累计土壤负荷差异温变 (°C/MWh)
5口井 冷负荷 18.75kW	1	4.95	0.60	∞	0.121
	1.5	7.44	1.11	0.314	0.149
	2	8.71	1.37	0.259	0.157
	2.5	9.48	1.53	0.241	0.161
	3	9.99	1.63	0.231	0.163
	3.5	10.36	1.70	0.225	0.164
10口井 冷负荷 37.5kW	4	10.64	1.76	0.222	0.165
	1	9.90	1.33	∞	0.134
	1.5	14.89	2.12	0.300	0.142
	2	17.42	2.52	0.238	0.145
	2.5	18.97	2.78	0.219	0.147
	3	19.99	2.95	0.209	0.148
20口井 冷负荷 75kW	3.5	20.72	3.06	0.202	0.148
	4	21.29	3.14	0.198	0.148
	1	19.80	2.25	∞	0.114
	1.5	29.77	3.42	0.242	0.115
	2	34.84	4.04	0.191	0.116
	2.5	37.98	4.41	0.173	0.116
75kW	3	39.98	4.66	0.165	0.117
	3.5	41.44	4.85	0.160	0.117
	4	42.37	4.98	0.157	0.117

此外,由表4可知,随着管井数从5口、变化到10口、再到20口时,单位土壤累计冷热负荷差异温变从0.164°C/MWh到0.148°C/MWh再到0.117°C/MWh,由此进一步验证了前文所说,即在项目规模一定、地质参数一定的前提下单位土壤累计冷热负荷差异所引起的土壤温变近乎为常数,有利于工程估算。

在这种小规模建筑情况下,由于土壤热不平衡程度较小,考虑到增设辅助散热装置较为繁琐且增加初投资、控制较为复杂,因此建议通过增大埋管间距或者

将埋管容量设计偏大一点的方法来缓解土壤的温升,具体如下所述。

6 小规模建筑热平衡问题的缓解措施

对于小规模建筑应用土壤源热泵系统时,由于埋管区域较小,所以无论从占地面积还是打井费用来说都不会带来太大的困难,因此与大规模系统不同,本文拟通过钻孔间距、以及钻孔深度的增加来缓解该问题,研究结果表明效果非常明显。

本文以20口换热井(冷负荷75kW)、建筑物累计冷热负荷比3:1的情况为例进行计算,钻孔间距为4m,钻孔深度为83m,系统运行10年后埋管区域土壤温升为4.66℃。接下来将继续分析增加钻孔间距和深度对该问题的缓解。

1)钻孔间距。钻孔间距从3m变化到6m时,埋管区域土壤温升情况如图6所示。由该图可知,当孔间距为3m时,10年后土壤温升几乎达到了6℃,而当孔间距增大到6m时,10年后土壤温升降低为3℃,由此可以明显看出增加管间距对于热平衡问题的缓解程度。

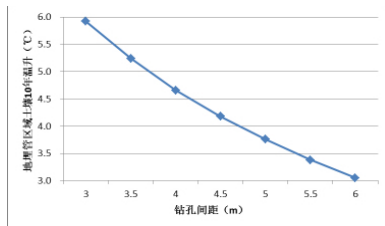


图6 钻孔间距对热平衡的影响

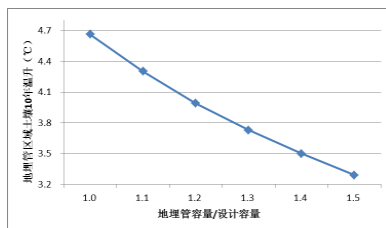


图7 埋管容量对热平衡的影响

2)增大埋管容量。增大管井数量或者增大管井深度对于埋管区域的换热能力来说相差不大,因此在此对增加埋管容量这种措施的缓解程度进行研究分析,但实际应用中究竟是增加管井数量还是增深管井深度取决于现场条件。由图7可知,在正常设计容量下,埋管区域土壤10年温升为4.66℃,但当地

埋管容量增加到负荷的1.2倍时,10年后埋管区域温升降低到4.0℃,当容量设计大到1.5倍时10年土壤温升仅为3.3℃。这种办法虽然可以有效地缓解热平衡问题,但是最不利的后果就是投资的增加,不管是管井数量的增多还是管井深度的增大。

当上述两种办法都无法解决热平衡问题时,则必须要增加辅助冷源,组成复合式土壤源热泵系统进行联合运行,但该复合式系统能否解决该问题一是取决于设计方案,二是取决于运行策略。

7 结论

通过本文研究分析可知,项目规模和建筑累计冷热负荷差异是引起土壤源热泵系统长期运行时出现土壤热平衡问题的关键因素,但是对于小规模建筑情况应区分对待。

1)建筑累计冷热负荷比和项目规模越大,土壤热平衡问题越严重,当累计负荷比达到4:1时,10年里土壤平均温升达到9.11℃,由此可见有必要解决热平衡问题,以实现土壤源热泵系统的长期高效运行。

2)某些小规模土壤源热泵系统可以不考虑土壤热平衡问题。本例中5口井土壤源热泵系统以及10口井埋管且当建筑全年累计冷热负荷比小于3时均可以不予考虑。

3)对于小规模系统出现热平衡问题时,可以通过增大管间距和埋管设计容量来缓解该问题,但当累计负荷差异较大时,必须增设辅助冷源组成复合式土壤源热泵系统来缓解并解决该问题。

参考文献

- [1] 胥晓旻. 土壤源热泵的 TRNSYS 模拟与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2008
- [2] 土壤源热泵系统工程技术规范(GB 50366-2005)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- [3] 花莉, 潘毅群, 范蕊, 等. 基于 TRNSYS 的土壤源热泵热平衡问题的影响因素分析[J]. 建筑节能, 2012, 40(3): 23-27
- [4] 马宏全, 龙惟定. 地源热泵系统的热平衡问题[C]. 见: 中国制冷学会 2009 年学术年会[C]. 北京: 中国制冷学会, 2009: 101-106
- [5] 谢鹏. 混合式地源热泵系统不同控制策略的分析与比较[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008
- [6] J D Spittle, J R Cullin, E Lee. Preliminary intermodel comparison of ground heat exchanger simulation models[A]. In: Proceedings of 11th International Conference on Thermal Energy Storage [C]. Stockholm: Effstock, 2009: 14-17