

土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统^{*}

清华大学 余延顺[☆]

哈尔滨工业大学 姚 杨

清华大学 李先庭

哈尔滨工业大学 马最良

摘要 以平衡电网负荷、削峰填谷及利用可再生浅层地热能作为基本出发点,提出了土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统的新设想。该集成系统将蓄冷装置与地下埋管换热器合二为一,在夏季空调工况时,利用电力低谷时段的廉价电力,将冷量全部或部分储存到土壤中,以供白天用电高峰期空调使用;在需供冷的过渡季,系统按土壤耦合热泵系统的供冷工况运行,将系统的冷凝热排至土壤中,为冬季供暖储备热量;供暖季节,系统按土壤耦合热泵系统的供暖工况运行,土壤作为热泵系统的低位热源。介绍了该集成系统的形式、技术特点及核心研究内容,并在前期研究工作的基础上对影响集成系统运行特性、冷量损失的因素进行了较全面的总结。

关键词 土壤蓄冷 土壤耦合热泵 集成系统

Integrated soil cool storage and ground coupled heat pump system

By Yu Yan shun[☆], Yao Yang, Li Xian ting and Ma Zui liang

Abstract For the purpose of leveling electric load and utilizing the renewable ground thermal energy, presents an integrated soil cool storage and ground coupled heat pump system. In the integrated system, the buried pipes serve as both the thermal storage devices and geothermal heat exchangers. In cooling season, the cooling load is stored in the underground soil partially or fully during nighttime (off peak period) to treat the load requirement of buildings during daytime (peak period). In transitional cooling season, the system operates on cooling mode of ground coupled heat pump system (GCHPS), and rejects the heat to soil for utilizing in winter. In heating season, the system operates on heating mode of GCHPS, and the soil is taken as its heat source. Summarizes the system forms, technical characteristics and pivotal research points of the integrated system. Analyses the factors that influence the operation characteristics and cooling loss based on the previous work.

Keywords cool storage in soil, ground coupled heat pump, integrated system

★ Tsinghua University, Beijing, China

0 引言

迫于能源危机与环境保护的压力,改善能源结构,提高能源利用效率、开发利用可再生能源已成为当前能源工业的一项迫切任务。由于土壤耦合热泵系统使用可再生的浅层地热能,符合能源的可持续发展战略,被称为是目前和将来最有前途的节

能系统,是空调和制冷行业的前沿课题之一^[1]。在上世纪 70 年代末到 80 年代,欧洲和北美的一些国家对土壤耦合热泵技术进行了大规模的研究,这一

☆ 余延顺,男,1975 年 11 月生,博士研究生,工学博士,博士后
100084 北京清华大学建筑技术科学系
(0) 13552475126

E-mail: yuyanshun@126.com

收稿日期:2004-10-21

修回日期:2004-11-22

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50378024)

时期的研究工作主要集中在地下埋管换热器的传热模型^[2-5]、传热特性^[4,6-7]、模拟计算及设计方法^[8-10]等方面;90年代以后,研究的热点集中在埋管换热器的换热机理^[11-15]、强化传热^[16-19]及工程应用^[20-24]。近年来,虽然土壤耦合热泵技术有了很大的发展与应用,但在夏热冬暖地区全年使用土壤耦合热泵系统时,因冬夏负荷不平衡,土壤的温度场得不到有效的恢复,导致土壤耦合热泵系统年久运行出力衰减;同时由于土壤耦合热泵系统的初投资和埋管占地面积大,极大地削弱了其与常规空调系统的市场竞争力。因此,如何有效地解决这些问题将是土壤耦合热泵技术应用的一个突破点。

随着城市用电结构的不断变化,用在建筑物空调系统的电力负荷比例日益增加。同时由于空调系统用电负荷一般集中在白天用电高峰时段,加大了城市电网的峰谷差。如果能把空调制冷系统的部分或全部用电负荷转移至夜间电力低谷时段,则将会对平衡电网负荷、提高电网负荷利用效率、减少环境污染产生十分积极的作用。因此,发展空调蓄冷技术将是一种有效的平衡电网峰谷差的重要技术措施。

基于上述两个背景,以缓解我国电力供应紧张局面、平衡电网峰谷负荷及利用可再生浅层地热能作为基本出发点,在整合集成蓄冷技术与土壤耦合热泵技术各要素与成果的基础上,提出了一种以空调负荷为主、供暖负荷为辅的空调系统——土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统^[25-26]。该系统充分利用了蓄冷技术和土壤耦合热泵技术的优点,将蓄冷装置与埋管换热器合二为一,解决了传统蓄冷系统蓄冷装置占地面积大与配置困难的问题。在夏热冬暖地区,将土壤蓄冷与土壤耦合热泵系统(GCHPS)结合在一起,可通过不同的土壤蓄冷方案来调节和控制土壤的温度,解决土壤耦合热泵系统年久运行出力不足的问题。同时由于采用土壤蓄冷,可以减小地下埋管换热器的设计尺寸,使系统运行更经济有效。

1 土壤蓄冷与耦合热泵集成系统

1.1 集成系统的工作原理

夏季空调工况运行时,利用电网低谷时段的廉价电力,将建筑物所需的冷量部分或全部贮存到土壤中;在电力高峰时段,耗电量大的冷水机组避峰停止运行,将蓄存于土壤中的冷量提取出来供给空

调系统使用,从而实现电力高峰负荷的转移;在要求供冷的过渡季节,系统按土壤耦合热泵系统的供冷工况运行,将系统的冷凝热排至土壤中,补偿土壤的季节性能量收支平衡,为冬季供暖工况储备热量;在供暖季,系统按土壤耦合热泵系统的供暖工况运行,土壤作为热泵系统的低位热源。

1.2 集成系统的特点

a) 地下埋管换热器具有双重功效,既是土壤耦合热泵系统的换热装置,又是蓄冷系统的蓄冷装置。

b) 为实现集成系统的各种功能,在集成系统中采用集低温工况、空调工况和制热工况为一体的三工况冷水机组。

c) 在夏热冬暖地区可通过调整土壤蓄冷方案来调节和控制盘管周围的土壤温度,解决土壤耦合热泵年久运行出力不足的问题。

d) 该系统通过水流换向来实现供冷与供热、蓄冷与释冷等运行模式的转换,并在系统中增设了冷却水系统。

e) 该系统既能达到电力削峰填谷的目的,又实现了可再生能源在空调中的应用。

1.3 集成系统研究的关键技术

虽然以土壤作为蓄热、蓄冷介质早有研究,但都是作为季节性的长期蓄热或蓄冷^[27-32],而以土壤作为短周期的、以电力削峰填谷为目的的蓄冷及与土壤耦合热泵系统有机结合应用方面的研究至今尚未见有关报道。因此,对于这种集成系统,其亟待研究解决的关键技术在于:

a) 具有双重功效的地下埋管换热器的结构形式与布置方式的优化。

b) 地下埋管换热器周期性蓄冷、释冷换热过程的研究。

c) 土壤蓄冷、释冷过程的热力特性研究。

d) 土壤蓄冷、释冷过程冷量损失的研究。

1.4 集成系统的流程

在土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统中,由于地下埋管换热器具有双重功效,并且在系统的各运行时段,因建筑物负荷特点及系统运行控制策略等因素的影响,要求系统在不同的工作模式下运行,以实现系统的蓄冷与释冷、供冷与供暖等功能。

1.4.1 土壤蓄冷、释冷流程

在电力低谷时段,三工况冷水机组在低温工况下运行制备冷量,并通过地下埋管环路将建筑物所

需的冷量全部或部分储存到地下土壤中, 系统的冷凝热则通过冷却塔排放至周围环境中; 在电力高峰时段, 冷水机组停止运行, 通过循环水泵将储存于土壤中的冷量提取出来供给空调系统使用, 从而达到电力系统高峰负荷的转移。土壤的蓄冷、释冷运行流程如图 1, 2 所示。

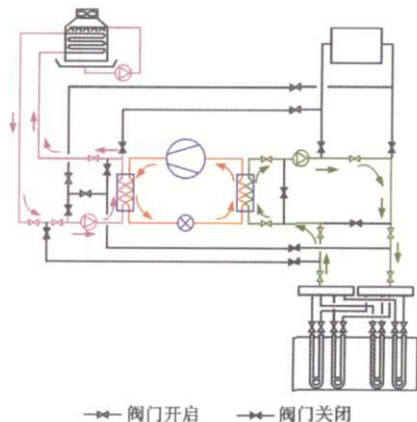


图 1 土壤蓄冷流程

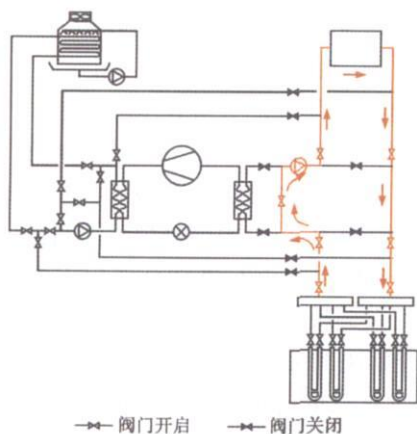


图 2 土壤释冷流程

1.4.2 冷水机组与埋管换热器的串联释冷流程

由于在土壤蓄冷、释冷过程中, 蓄存于土壤中的冷量在温差传热的作用下存在冷量损失, 且冷量品质会下降, 导致集成系统在释冷运行周期的后期出水温度较高。因此, 为保证空调系统的水温要求及充分发挥土壤的蓄冷能力, 在集成系统串联释冷运行时宜采用地下埋管优先释冷运行模式, 其流程如图 3 所示。

1.4.3 空调工况的复合式系统流程

在夏热冬暖地区, 夏季空调工况运行时, 可使从冷凝器出来的高温水(或防冻液)先通过冷却塔, 将一部分冷凝热排放至周围环境中, 使进入地下埋

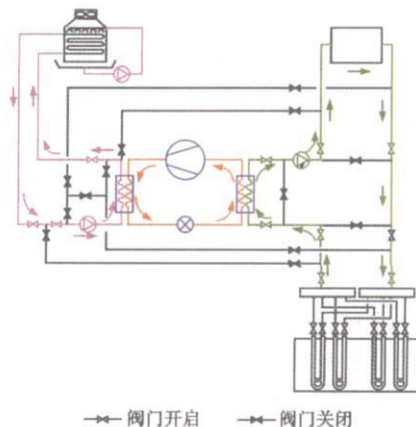


图 3 冷水机组与埋管换热器串联释冷流程

管换热器的水温降低, 减小埋管的排热负荷, 形成冷却塔与地下埋管换热器串联排热的复合式系统运行模式, 系统流程如图 4 所示。采用该系统可以

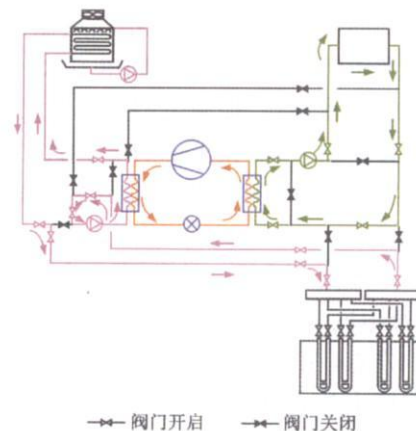


图 4 复合式系统流程

减小单一土壤耦合热泵系统地下埋管换热器的尺寸与容量, 从而减小埋管的占地面积及降低系统的初投资。该系统模式主要应用于可资埋管面积有限的夏热冬暖地区, 且尤适用于土壤耦合热泵系统工程的改造, 目前该系统已有许多成功的例子^[33~34]。

1.4.4 土壤耦合热泵系统的供暖与供冷流程

在冬季及过渡季节, 为保证土壤温度场的有效恢复及盘管周围土壤的能量平衡, 集成系统按传统的土壤耦合热泵系统的供冷、供暖工况运行, 系统流程如图 5, 6 所示。在该运行模式下, 集成系统充分发挥其可利用可再生浅层地热能的优势, 以土壤作为热泵系统的低位冷热源。

2 集成系统的蓄冷释冷运行特性

在土壤蓄冷、释冷系统中, 系统的冷量损失主

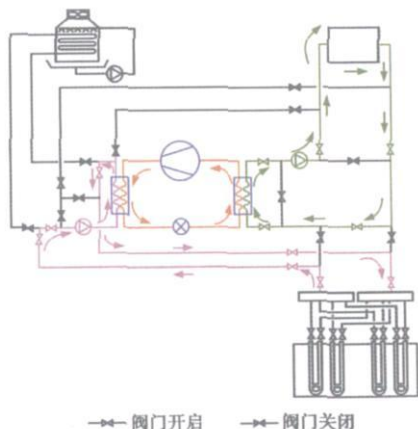


图5 GCHPS供冷流程

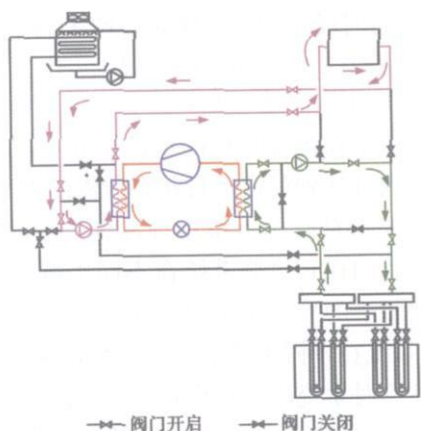


图6 GCHPS供暖流程

要来源于蓄冷区域与远边界原状土壤间的温差传热。因此,在埋管换热器管束区域土壤体积一定的条件下,应尽量减少埋管换热器管束外层盘管数。基于此,地下埋管换热器采用如图7所示的一个或多个等间距正多边形排列的管束布置形式,图中 L_0 为盘管间距。

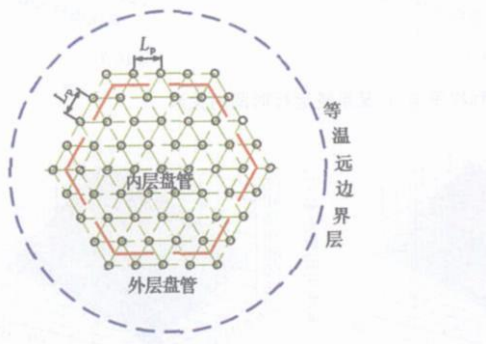


图7 地下埋管管束平面布置图

土壤的蓄冷、释冷过程是一个含湿多孔介质体内带有周期性冻融相变的热湿传递耦合过程,其运

行特性受诸多因素的相互影响和制约,如埋管的管材与尺寸、埋管间距、土壤状况、预蓄冷时间、流体的流量及蓄冷入口温度等。文献[25~26]在对土壤蓄冷、释冷传热过程分析的基础上建立了土壤蓄冷、释冷冻融相变过程的数学模型,并将冶金领域的固相增量法模型引入到土壤相变过程的求解过程中,对集成系统的蓄冷、释冷运行特性进行了详细的研究与分析,得出如下结论:

a) 导热性能好的塑料管有利于提高系统的日蓄冷、释冷量及降低释冷运行时的出水温度,因此选择导热性能好的塑料管有利于提高土壤蓄冷、释冷系统的运行特性。

b) 导热性能好、含水能力强的土壤更适于采用土壤蓄冷系统,其中土壤的含水率是影响土壤蓄冷、释冷系统运行特性的一个主要因素^[25]。

c) 埋管间距是影响系统运行特性的一个重要因素。对于管束的内层盘管,埋管间距只对系统稳定运行前的特性产生影响,当系统达到稳定运行后,埋管间距对内层盘管运行特性的影响可忽略;而对管束外层盘管,其日蓄冷量随埋管间距的增大而增加,日释冷量则随其增大而减小。对于土壤蓄冷系统,埋管间距越小越有利于改善系统的蓄冷、释冷性能;而对于土壤耦合热泵系统,则要求较大的埋管间距。因此,应根据系统的负荷特点及运行控制策略来合理确定管束的埋管间距。

d) 为保证土壤蓄冷系统的出水温度在释冷时间内达到空调要求,应对系统进行前期预蓄冷运行。模拟结果表明,预蓄冷时间的长短只对系统运行前期的特性有影响,当系统达到稳定以后,系统的运行特性与预蓄冷时间无关^[25]。

e) 在释冷入口温度一定的条件下,盘管的逐时释冷出水温度随蓄冷温度的降低而下降,而盘管的逐时蓄冷、释冷量则随其降低而增大。

f) 在埋管尺寸一定的条件下,增大管内流体的流量有利于改善盘管换热性能,提高换热量,但换热量的增加并不与流量的增加成正比。因此,为保证释冷运行时的空调出水温度要求,流体入口状态的雷诺数宜控制在3 000左右^[25]。

g) 在盘管入口流体雷诺数一定($Re=2\ 400$)的条件下,盘管的换热量与埋管管径呈线性增长关系;但盘管的释冷出水温度随管径的增大而逐渐升高,蓄冷出水温度随其增大而逐渐降低。因此,为

了保证释冷出水温度的要求,埋管管径以 15~20 mm 为宜。

3 集成系统的冷量损失

在土壤蓄冷、释冷系统中,由于管束外边界为等温边界,在温差传热的作用下,蓄存于土壤中的冷量会源源不断地传至周围土壤中,造成系统的冷量损失与冷量品质的下降。

3.1 冷量损失的构成

在土壤蓄冷系统中,冷量损失主要由两部分构成:a)管束区域土壤温度场降低导致的土壤热力学能下降而产生的垫层冷量损失 $Q_n^{[25]}$,它是一个状态量,取决于土壤初始及终了状态。垫层冷量损失又由土壤显热力学能及潜热力学能降低所产生

$$R(d)=\frac{n_iQ_{si,us}R_{i,us}+n_oQ_{so,us}R_{o,us}+n_iq_{si,s}R_{i,s}(d-d_{i,us})+n_oq_{so,s}R_{o,s}(d-d_{o,us})}{n_iQ_{si,us}+n_oQ_{so,us}+m_iq_{si,s}(d-d_{i,us})+n_oq_{so,s}(d-d_{o,us})}\tag{1}$$

式中 n_i,n_o 分别为管束中外层盘管数所占的份额,%; $Q_{si,us},Q_{so,us}$ 分别为内外层单根盘管在系统稳定运行前的总蓄冷量,MJ; $R_{i,us},R_{o,us}$ 分别为系统稳定运行前内外层盘管的平均释冷率,%, $R_{i,us}=Q_{ri,us}/Q_{si,us},R_{o,us}=Q_{ro,us}/Q_{so,us}$ 其中 $Q_{ri,us},Q_{ro,us}$ 分别为内外层单根盘管在系统稳定运行前的总释冷量,MJ; $q_{si,s},q_{so,s}$ 分别为系统稳定运行时内外单根盘管日蓄冷量,MJ; $R_{i,s},R_{o,s}$ 分别为系统稳定运行时内外层盘管日平均释冷率,%, $R_{i,s}=q_{ri,s}/q_{si,s},R_{o,s}=q_{ro,s}/q_{so,s}$ 其中 $q_{ri,s},q_{ro,s}$ 分别为系统稳定运

的冷量损失组成。b)在温差传热的作用下,管束外边界与周围土壤间不可逆温差传热所造成的温差传热冷量损失 Q_b 。在整个管束系统中,管束外层埋管的冷量损失主要是外边界温差传热冷量损失和系统运行时土壤热力学能降低所产生的垫层冷量损失;对于内层盘管,由于其与相邻盘管间的界面为绝热界面,因此其冷量损失主要为盘管区域土壤热力学能降低所产生的垫层冷量损失。

3.2 冷量损失的因素分析

为了研究土壤蓄冷、释冷过程的冷量损失,定义平均释冷率为系统某运行时段盘管的总释冷量与蓄冷量的比值。对于整个管束系统,在达到稳定运行后,系统运行时段 d 的平均释冷率 $R(d)$ 为^[25]

行时内外层单根盘管日释冷量,MJ; $d_{i,us},d_{o,us}$ 分别为内外层盘管达到稳定运行状态所需的天数,d。

文献[25]对砂砾土壤中埋深为 50 m 的高密度聚乙烯管(HDPE)群系统在不同土壤初始温度及埋管间距下的冷量损失进行了详细的分析与计算,得出系统在不同条件下的平均释冷率如图 8、9 所示。计算时系统的运行模式为 3 d 预蓄冷,然后进入以日为周期(10 h 蓄冷、8 h 释冷、6 h 停机)的正常蓄冷、释冷运行。通过计算分析得出如下结论:

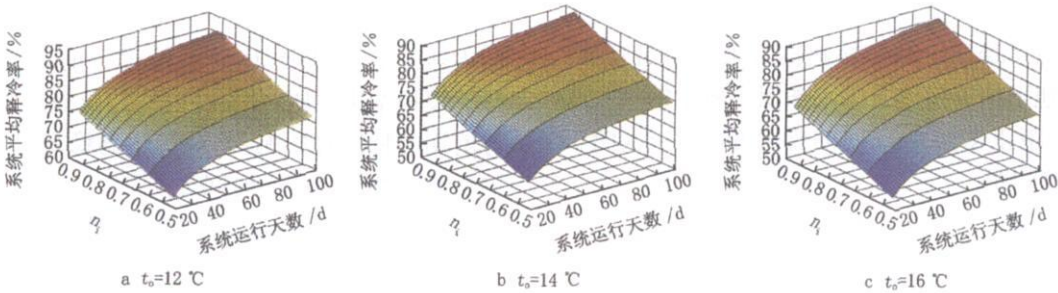


图 8 不同土壤初始温度 t_0 下系统平均释冷率与 n_i 及系统运行时间的关系

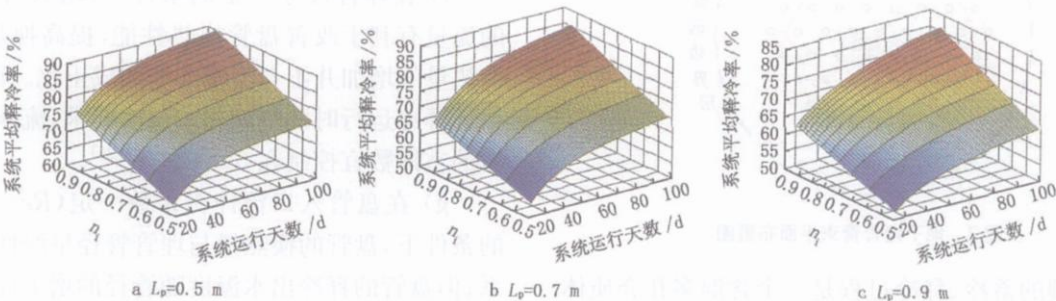


图 9 不同埋管间距 L_0 下系统平均释冷率与 n_i 及系统运行时间的关系

a) 随着土壤初始温度的升高, 系统的垫层冷量损失及温差传热冷量损失线性增加; 并且在总冷量损失中, 温差传热冷量损失所占的比例也逐渐增加。

b) 随埋管间距的增大, 系统的垫层冷量损失与冷量传递损失急剧增加, 而系统的平均释冷率逐渐减小; 在系统的总冷量损失中, 系统通过外界界的冷量传递损失所占的比例随埋管间距的增大而减小。

c) 系统正常蓄冷、释冷运行的时间越长, 系统的平均释冷率越大, 冷量损失相对越小。

d) 在布置埋管管束时, 应力求增加管束中内层盘管数、减少外层盘管数, 从而减小整个管束系统运行的冷量损失。

4 集成系统的实验验证

为了验证土壤蓄冷、释冷过程所建数学模型及算法的正确性, 搭建了模拟土壤蓄冷、释冷系统的实验台, 系统如图 10 所示。该实验系统主要由室

表 1 设备规格

设备名称	规格及数量
风机盘管	风量 780 m ³ /h, 功率 65 W
管道泵	流量 0.6 m ³ /h, 扬程 6 m
水箱	650 mm×650 mm×650 mm
粗调电加热器	1 000 W×2, 500 W×1
微调电加热器	500 W×1
砂箱	2 500 mm×1 250 mm×1 800 mm
埋管	PE, D _i × ϕ =12 mm×2 mm
铂电阻温度计	Pt100, 精度 0.1 ℃

系统正常蓄冷、释冷运行即将结束之前, 通过升高释冷入口水温来回收系统的部分垫层冷量损失而采取的只释冷不蓄冷的运行工况。

通过对这两个不同阶段的实验测试与模拟计算结果的比较分析表明, 盘管逐时出水温度及蓄冷、释冷量的实测值与模拟值在数据分布趋势上表现出很好的一致性, 并且在数值上也表现出较好的吻合性, 二者的平均偏差在 10%左右的范围内^[25]。

5 结论

在电力供应日益紧张的今天, 发展空调蓄冷技术将是一种有效平衡电网峰谷差的重要技术措施之一; 而以土壤作为冷热源的土壤耦合热泵技术则因其使用可再生的浅层地热能, 符合能源的可持续发展战略。将蓄冷技术与土壤耦合热泵技术有机地结合在一起而提出的土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统, 充分利用了二者技术之优点, 融合了蓄冷技术与土壤耦合热泵技术的各个要素与成果, 用一个系统同时解决了目前空调用电负荷峰谷转移与可再生能源在空调工程中的利用这两个热点问题。该集成系统的提出为 21 世纪的建筑提供了一种节能、环保的热泵型蓄冷空调方式, 可为空调的可持续发展提供理论支持与技术储备。

参考文献

[1] 张旭. 土壤源热泵的实验及相关基础理论研究[J]. 现代空调: 空调热泵设计方法专辑, 2001(3): 75-87

[2] Mei V C, Fischer S K. Vertical concentric tube ground coupled heat exchangers[G] //ASHRAE Trans. 1983, 89(2B): 391-406

[3] Bose J E, Parker J D. Ground coupled heat pump research[G] //ASHRAE Trans. 1983, 89(2): 375-390

[4] Mei V C, Baxter V D. Performance of a ground coupled heat pump with multiple dissimilar U tube coils in series[G] //ASHRAE Trans, 1986, 92(2A): 30-41

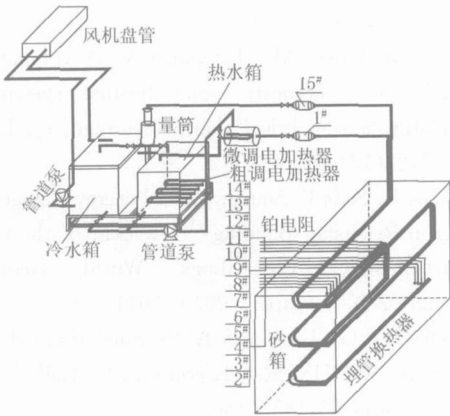


图 10 实验系统图

外自然冷源部分、温度调控装置、砂箱蓄冷系统及温度测试装置等几部分组成。该实验台利用冬季室外的自然低温环境, 通过室外风机盘管换热制备低温冷水作为系统蓄冷运行时的冷源, 砂箱中埋管的总长度为 33 m。实验台主要设备规格如表 1 所示。

在该实验台的基础上, 对土壤蓄冷、释冷系统进行了两个阶段的实验验证。第一个阶段是验证夏季空调工况下土壤的正常蓄冷、释冷运行工况。该工况是先进进行前期 2 d 预蓄冷, 而后进行 7 d 以日为周期的 12 h 蓄冷、8 h 释冷、4 h 停机的正常蓄冷、释冷运行。第二个阶段则是验证空调过渡季在

- [5] Kavanaugh S P. Simulation and experimental verification of vertical ground coupled heat pump systems[D] . Oklahoma: Oklahoma State University, 1985
- [6] Svec O J, Goodrich L E, Palmer J H L. Heat transfer characteristics of in ground heat exchangers[J] . Energy Research, 1983(7): 265 - 278
- [7] Mei V C. New approach for analysis of ground coil design for applied heat pump systems[G] //ASHRAE Trans 1985, 91(2): 1216 - 1224
- [8] Couvillion R J. Field and laboratory simulation of earth coupled heat pump coils[G] //ASHRAE Trans 1985, 91(2): 1326 - 1334
- [9] Ball D A, Fischer R D, Hodgett D L. Design methods for ground source heat pumps[G] //ASHRAE Trans 1983, 89(2B): 416 - 440
- [10] Parker J D, Bose J E, McQuiston F C. The ASHRAE design/data manual for ground coupled heat pumps[G] //ASHRAE Trans, 1985, 91(2): 1169 - 1183
- [11] Zhang Qiang. Heat transfer analysis of vertical U-tube heat exchangers in multiple borehole field for ground source heat pump systems[D] . Kentucky: University of Kentucky, 1999
- [12] Yavuzturk C. Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems [D] . Oklahoma: Oklahoma State University, 1999
- [13] Philippacopoulos A J, Berndt M L. Influence of debounding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps[J] . Geothermics, 2001, 30: 527 - 545
- [14] Zeng H Y, Diao N R, Fang Z H. A finite line source model for boreholes in geothermal heat exchangers [J] . Heat Transfer, 2002, 31(7): 558 - 567
- [15] Yavuzturk C, Spitler J D. Field validation of a short time step model for vertical ground loop heat exchangers[G] //ASHRAE Trans 2001, 107(1): 617 - 625
- [16] Kavanaugh S P, Allan M L. Testing of thermally enhanced cement ground heat exchanger grouts[G] //ASHRAE Trans 1999, 105(1): 446 - 449
- [17] Smith M D, Perry R L. Borehole grouting: field studies and thermal performance testing[G] //ASHRAE Trans 1999, 105(1): 451 - 450
- [18] Remund C P. Borehole thermal resistance: laboratory and field studies[G] //ASHRAE Trans, 1999, 105(1): 439 - 445
- [19] Gu Y, O' Neal D L. Modeling the effect of backfills on U-tube ground coil performance[G] //ASHRAE Trans 1998, 104(2): 356 - 365
- [20] Bernier M A. Ground coupled heat pump system simulation[G] //ASHRAE Trans 2001, 107(1): 605 - 616
- [21] Bernier M A. Uncertainty in the design length calculation of vertical ground heat exchangers[G] //ASHRAE Trans, 2002, 108(1): 939 - 943
- [22] Parent M. A simplified tool for assessing the feasibility of ground source heat pump projects[G] //ASHRAE Trans, 2001, 107(1): 120 - 129
- [23] Yavuzturk C, Chiasson A D. Performance analysis of U tube, concentric tube, and standing column well ground heat exchangers using a system simulation approach[G] //ASHRAE Trans, 2002, 108(1): 925 - 938
- [24] Ramamoorthy M, Jin H. Optimal sizing of hybrid ground source heat pump systems that use a cooling pond as a supplemental heat rejecter—a system simulation approach[G] //ASHRAE Trans, 2001, 107(1): 26 - 37
- [25] 余延顺. 土壤蓄冷与耦合热泵集成系统的蓄冷与释冷特性研究[D] . 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004
- [26] 余延顺, 马最良, 姚杨. 土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统中土壤蓄冷与释冷过程的特性研究[J] . 暖通空调, 2004, 34(5): 1 - 6
- [27] Inalli M, Unsal M, Tanyildizi V. A computational model of a domestic solar heating system with underground spherical thermal storage[J] . Energy, 1997, 22(12): 1163 - 1172
- [28] Kabus F, Seibt P. Aquifer thermal energy storage for the Berlin Reichstag Building—New Seat of the German Parliament[C] //Proceedings World Geothermal Congress 2000. Japan, 2000: 3611 - 3615
- [29] Hellstrom G, Larson S A. Seasonal thermal energy storage—the HYDROCK concept[J] . Bull Eng Geol Env, 2001, 60: 145 - 156
- [30] Mangold D, Schmidt T, Lottner V. Seasonal thermal energy storage in Germany[C] //Status of Seasonal Thermal Energy Storage in Germany Terrastock 2000. Germany, 2000
- [31] Ohga H, Mikoda K. Energy performance of borehole thermal energy storage systems[C] //Seventh International IBPSA Conference. Brazil, 2001: 1009 - 1016
- [32] Seibt P. Reinjection of thermal waters into sandstone reservoirs in the North German Basin[C] //International Geothermal Conference. Reykjavik, 2003: 15 - 20
- [33] Kavanaugh S P. A design method for hybrid ground source heat pumps[G] //ASHRAE Trans 1998, 104(2): 691 - 698
- [34] 殷平. 地源热泵在中国[J] . 现代空调, 2001(3): 1 - 8