

武汉地区地源热泵技术应用存在的主要问题及对策分析*

武汉市建筑设计院 陈焰华[★] 於仲义 雷建平

华中科技大学 胡平放 孙启明

武汉地质工程勘察院 刘红卫 杨 柳

摘要 基于武汉地区地源热泵工程的调查,分析了地下水地源热泵系统和埋管地源热泵系统在实际工程应用中存在的问题,并提出了相应的技术和管理对策。

关键词 地下水地源热泵 埋管地源热泵 问题 对策

Main existed problems and respective countermeasures of ground-source heat pump technique applications in Wuhan area

By Chen Yanhua[★], Yu Zhongyi, Lei Jianping, Hu Pingfang, Sun Qiming, Liu Hongwei and Yang Liu

Abstract Based on the investigation results of ground-source heat pump projects in this area, analyses the problems of groundwater heat pump systems and ground heat pump systems existed in project application, and puts forward respective technical and management countermeasures.

Keywords groundwater heat pump, ground heat pump, problem, countermeasure

① ★ Wuhan Architectural Design Institute, Wuhan, China



陈焰华

主要设计业绩

- ▶ 武汉东湖宾馆
- ▶ 武汉瑞通广场
- ▶ 武汉群光广场
- ▶ 武汉销品茂商城
- ▶ 武汉塔子湖全民健身中心

0 引言

在全球能源短缺的大背景下,地源热泵技术以其节能、环保、可利用低位热能特性短期内在我国快速发展起来。随着地源热泵空调项目的逐渐增多,其设计、施工和使用过程中存在的一些问题也逐步暴露出来^[1],使地源热泵系统的技术优势未能得到充分发挥。相对而言,热泵技术是一个较成熟的技术,利用地下浅层地热的“源”问题才是地源热泵系统与传统空调技术不同的关键所在。解

决好“地下源”这一热泵机组获取冷热量的途径和源头问题,地源热泵系统高效、稳定和节能环保的特性才能得以充分发挥。

武汉地区第四系沉积主要受长江、汉江控制,大体分布着一级、二级与三级阶地和以海陆交互的碎屑岩、碳酸盐为主的基岩^[2]。地源热泵系统在该地区的应用需要根据工程场地的实际水文地质情况,因地制宜地进行设计和施工。目前,武汉地区地源热泵空调工程主要采用地下水地源热泵系统和埋管地源热泵系统,在设计、施工和运行过程中都存在一些问题。结合武汉地区地源热泵工程普查和典型工程运行测试的研究成果,笔者系统归纳分析了这两种地源热泵空调形式在实际工程应用中存在的问题,并提出相应的对策和解决方法。

①☆ 陈焰华,男,1963年11月生,大学,工学学士,教授级高级工程师,设备所所长,暖通总工程师
430014 武汉市汉口四唯路8号武汉市建筑设计院
(027) 82739230
E-mail: chenyl918@yahoo.com.cn

收稿日期:2009-03-25

修回日期:2009-05-07

* 武汉市建委2007年科技专项“武汉地区地源热泵系统推广应用研究”项目(编号:200624)资助

1 地下水地源热泵应用存在的主要问题

1.1 地下水源的探测开采问题

水源的探测、开采技术与相应的开采成本制约着地下水地源热泵系统的广泛应用。地下水地源热泵系统理论上可以利用一切地下水资源,但在实际工程中,不同的地下水资源利用的成本差异是相当大的,而且地下水地源热泵系统对水源系统有原则性的选择要求:水量充足、水温适度、水质适宜、供水稳定。水源的水量必须能满足用户供热负荷或制冷负荷的需要;水源的水温应符合机组运行工况要求;水源的水质应适宜于热泵系统机组、管道和阀门的性能要求,不至于产生严重的堵塞和腐蚀损坏。另外水源的供水保证率要高,供水功能应具有长期可靠性,能保证地下水地源热泵空调系统长期稳定运行。所以在不同的地区、不同的水文地质条件下是否有合适的水源成为地下水地源热泵应用的一个关键问题。

地下水资源条件好的地域,不仅可以减少水井的单位打井费用,而且回灌也较容易,整个系统的初投资和运行费用都将大幅度降低,必将增大系统的经济优势。反之,如果水文地质条件差,打井深度将增加,打井费用也会加大;回灌困难也将使打井数量增加,从而使系统的费用大幅增加。在不同的地区、不同的水文地质条件下,地下水地源热泵系统的投资经济性会有所不同。

1.2 热源井设计

井群是深井回灌式地下水地源热泵系统的一个关键组成部分,要满足地源热泵空调系统的使用要求,除了成井工艺要到位外,热源井群的设计也相当重要,其正常运行与否决定了水源热泵系统工程成败,井群的设计布局应当是实际工程中慎之又慎的关键环节。

目前国内此类工程的井群设计中,系统方案的可行性判据基本取决于单井出水量是否满足要求,以及能否实现良好的人工回灌,实际上这是不全面的。

热源井的设计应在水文地质勘察的基础上进行,试验井的开凿和抽水、回灌试验环节尤为重要,这些基础性技术数据是决定热源井井群设计的关键,如单井取水量、回灌量、地下水径流方向、径流速度、渗透系数、影响半径等,很多工程因经验不足或受场地限制,抽水井间距、抽水和回灌井间距都

未能达到设计要求,井群的抽水、回灌干扰和热干扰都很严重,既影响抽水的全部回灌又影响地下水的出水温度。不同的水文地质结构、热源井的设计和成井工艺也是至关重要的,井的结构、过滤方式、回填方式都直接影响到成井质量和使用寿命。井群设计时,抽水、回灌井各井之间的水力平衡也往往被忽视,这同样会影响总取水量和总回灌率。

热源井设计和施工时,应同时留出观测井或观测孔,抽水、回灌井应安装计量仪表,在达到上述监测手段的基础上,还应对抽水及回灌量、水位、水质进行在线监测,有利于地下水地源热泵系统的合理取水并避免对地下水的破坏和污染。

1.3 水井堵塞及回灌问题

水井堵塞的产生,一方面是水井施工质量不过关,另一方面是相当多工程取水井、回灌井轮换使用,反复的抽、回灌可能引起井壁周围细颗粒介质的重组。这种水井堵塞的形成,是造成水井回灌率不能达到要求的重要原因,即使正常的抽水、回灌无法进行,又会加速水井的枯竭,影响地下水地源热泵系统的长期稳定运行。

根据井的堵塞性质和原因,目前国内普遍采用的解决方法是回扬和洗井。每口回灌井回扬次数和回扬持续时间主要由含水层颗粒大小和渗透性确定,其次要考虑井的特征、水质、回灌量和回灌技术方法。在回灌过程中,采取适当回扬次数和时间,才能获得较好的回灌效果。取水井、回灌井使用过程中,应定期进行洗井,既可保证取水井、回灌井的正常使用,又能够提高热源井的使用寿命。

从武汉市普查项目情况来看,由于热源井设计、施工工艺、回灌技术、运行维护等方面的原因,在实际运行过程中达到 100% 回灌的项目不多,回灌率在 70%~100% 之间。对武汉地区来说,地下水的回灌还会受到长江、汉水的季节性涨落影响,一般来说,冬季江水水位较低时,回灌效果较好,夏季江水水位较高时,回灌难度较大。

1.4 地质灾害问题

地下水的回灌问题是地下水地源热泵技术应用中首先要考虑的重要问题。如何解决取水与回灌的水位平衡问题,以及长期取水和回灌是否会给周围的建筑物、构筑物造成质量和安全上的问题,是否会对地质环境产生较大的影响,是否会由于不合理地大量开采地下水而导致地面塌陷,以上这些是取用

地下水时,必须要认真研究和严肃考虑的问题。

若大量开采地下水而不采取回灌措施,地下水位下降必然导致上层土体孔隙水压力减小,上部土体的有效应力增加,容易产生地面沉降和导致采用天然地基作为基础的建筑物的不均匀沉降;在岩溶地区,由于地下水位不断变化容易形成空洞,从而导致地面塌陷。因此,为了恢复含水层的水位和水量,防止区域地下水位下降和保持取水建筑物供水能力,防止地下水资源枯竭,地源热泵空调系统抽取地下水后必须进行回灌。《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366—2005)和《武汉市地下水管办法》中都明确规定,必须采取可靠回灌措施,确保置换冷量或热量后的地下水全部回灌到同一含水层,并不得对地下水资源造成浪费及污染。同时在系统设计时应考虑设置监测孔,监测地下水的水位和水质,防止发生地下水水位的异常下降和地下水质的恶化。

对武汉市典型地下水地源热泵空调工程多年连续的建筑物沉降观测表明,地源热泵空调系统在取水并切实回灌的情况下,建筑物及地面沉降均在正常范围内^[3]。

1.5 地下水水质与污染防治问题

腐蚀、结垢和生锈是地下水地源热泵系统遇到的普遍问题。地下水的水质是引起腐蚀的根源因素,对地下水水质的基本要求是:澄清、水质稳定、不腐蚀、不滋生微生物或生物、不结垢等。地下水对水源热泵机组的有害成分有:铁、锰、钙、镁、二氧化碳、溶解氧、氯离子、盐碱度等。地下水的混浊度高,会在系统中形成沉积,阻塞管道,影响正常运行。地下水的含砂量高对机组、管道和阀门造成磨损,加快钢材等的腐蚀速度,严重影响机组的使用寿命,而且混浊度和含砂量高还会造成地下水回灌时含水层的阻塞,影响地下水的回灌。为保证地下水地源热泵机组长期稳定运行,原则上应采用间接式系统,即地下水通过板式换热器与水源热泵机组间接换热。从武汉市普查的项目情况来看,基本上都采用了板式换热器间接换热的方式。

为了避免地下含水层的污染,一般要求地下水在回灌时,注入水的水质要等于或优于原有含水层水质。如果地下水地源热泵机组利用地下水源的进出温差过大,将会导致地下水在土壤中的温度调节效果达不到预期状态或不能接近初始状态,造成

地下水资源的热污染问题。另外,由于地下水地源热泵的地下水回路都不是严格意义上的密封系统,回灌过程中的回扬、水回路中产生的负压和沉砂池,都会使外界的空气与地下水接触,导致地下水中离子氧化过程发生。而武汉市地下水 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 含量偏高,与空气接触后极易氧化,回灌到地下后,很容易引发或加剧地下水质的恶化及污染,导致地下水质量下降。2006 年武汉市水务局对武汉市地下水地源热泵空调系统的取水、回灌水质的监测结果表明,水温、高锰酸盐指标等总体变化幅度不大,但总硬度不太稳定,变化幅度较大。

1.6 地下水地源热泵系统设计

地下水地源热泵系统设计首要问题是确定合适的水源热泵机组运行温差和地下水循环水量。地下水在夏季和冬季的实际需要量,与空调系统选择的水源热泵机组性能、地下水温度、建筑物室内设计参数和冷热负荷以及换热器的型式、水泵能耗等都有密切关系。最佳的地下水温差和地下水量应使地下水地源热泵系统达到较高的能效比(EER)和性能系数(COP)^[4]。

加大地下水使用温差,可以减少地下水使用量,减小井泵功率和环路功率,但在一定条件下会增大水源热泵机组的使用功率;反之则相反。因此,一定要根据实际工程的使用情况,在两者之间进行分析和比较,得到最优结合点。一般来说,在地下水温度较低、单井出水量较小的情况下,可选择较大的地下水利用温差;在地下水温度较高、单井出水量较大的情况下,可选择较小的地下水利用温差。如此因地制宜、合理搭配,才可能既提高地下水地源热泵系统的能源利用效率,又尽可能减少地下水的开采量,保护珍贵的水资源。

1.7 规划、管理和评判体系问题

按照“在保护中开发,在开发中保护”的原则,各地应根据实际情况制订地下水开发利用保护规划和地源热泵系统发展规划,按照规划合理开发利用地下水资源,做到资源开发和地下水保护并举。

各地水行政主管部门应当根据当地地下水的分布、开发利用情况以及地质环境条件,划定当地行政区域内地下水的可开采区、限制开采区和禁止开采区。在可开采区,应严格按照各地地下水管理办法进行地下水合理开发和科学利用。取用地下水的单位或个人,必须向水行政主管部门提出取水

许可申请,按照程序申报并经批准后,方可开凿热源井,热源井竣工验收合格后,应由审批机关核发取水许可证。在地下水禁止开采区和限制开采区内,不得新建地下水取水工程。

同时,应进一步开展地下水资源开发利用对环境影响评估工作,防止因无序开采地下水而造成地面沉降、水质污染和热污染等环境地质问题。目前国内关于地下水地源热泵系统的性能评价标准还不是很完善,地下水地源热泵系统的性能分析测试和经济性比较也不太规范,地下水开采后的环境影响评价体系和指标也不健全,这些都不利于地下水地源热泵空调系统的健康发展。

2 地埋管地源热泵应用中存在的主要问题

2.1 初投资及能源政策问题

由于传热介质与岩土体的换热是间接换热,换热效率较低,因此需要布置大量管线,初投资相对较高,且要求场地大,仅适用于占地面积较大的单体公共建筑、学校或住宅小区。地埋管地源热泵系统地下换热器初投资较高,这在相当大程度上延缓和制约了该技术的推广。主要有两方面原因,一是钻孔费用较高,地质结构越复杂,钻井越深,地层越坚硬,钻井成本越高;二是地埋管换热器管材及回填材料的限制,因为没有切实有效的提高换热效果的技术措施,地埋管设计余量系数较大,这也导致初投资加大。

正是基于地埋管地源热泵系统初投资偏大,国家和地方政府在政策及资金上对采用地埋管地源热泵系统的支持对于该项技术的推广起到重要的引导作用。

2.2 施工质量问题

地埋管地源热泵系统是一种较新的空调系统,特别是地下埋管的施工工艺较复杂,并需要多方面密切配合、协调,但目前相关的管理措施和技术手段缺乏,施工单位没有相应市场准入机制,主管部门监管不力,缺乏切实可行的施工监理操作规范等,在项目实施中引发了较多问题。

在地源热泵系统施工过程中,钻井及回填是重要环节。不同地质结构应采用相应的效率较高的钻井设备和钻井方法,钻井过程中应有效控制成孔质量并提高钻井效率。而回填材料介于地埋管换热器与钻井壁之间,是岩土体与 U 形管间换热的桥梁,用来增强埋管和周围岩土体的换热,同时防止地表

水通过钻井向地下渗透,以保护地下水不受地表水的污染,并防止各个蓄水层之间的交叉污染。高效回填材料可防止岩土体冻结、收缩、板结等对地埋管传热造成影响,并提高地埋管的换热效率。

地埋管地源热泵系统的地下换热器属于地下隐蔽工程,设计寿命一般情况下不低于 50 a,在换热器材质及制备方法、换热器安装方法、回填料选择及回填方式、水力平衡措施等方面都需要切实可行的施工技术及操作规范,并对施工人员进行技术培训,持证上岗,以便于切实控制地埋管换热器施工质量。

2.3 岩土体物性问题

在实际工程中,地埋管换热器设计中最大的难题就是不能确定岩土体的各种物性参数。地埋管换热器钻井的数目和深度主要取决于周围岩土体的传热、蓄热性能。如果岩土体物性参数有 10% 的偏差,就会导致钻井数目和深度有 5% 的变化,从而影响初投资成本。因此,准确测量计算岩土体热物性参数是一项十分重要和关键的工作。

确定地下岩土体物性参数的传统方法是首先根据钻孔时取出的样本确定钻孔周围的地质构成,再通过有关手册和经验确定热物性参数。然而地下地质结构构成复杂,即使同一种岩石成分,由于水文地质结构的差异,其热物性参数的差异也较大,在工程设计时为保险起见一般选择较小的数据,从而使得初投资加大。通过热探针等手段也可对钻孔取样进行分析,但一方面热探针太短,数据局部化;另一方面取出的样本由于水分、密度变化等原因,其结构与其在地下的初始状态相比已发生了较大变化,其物性参数与原来数值并不相符,因此只有在现场直接测量才能得到地下岩土体的准确平均热物性参数。

2.4 建筑物空调负荷问题

地埋管地源热泵系统是为调节室内热湿环境服务的,因此地源热泵系统不可避免地会受到室内空调负荷变化的影响。如果室内空调负荷发生变化,热泵机组的运行特性也会相应改变,低位热源的使用状态也会随之变化,即地埋管的换热状态也是随之动态变化,这种动态变化表明地埋管的换热性能与其承担的换热负荷间是相互耦合的。考虑到作为地埋管地源热泵机组换热的中间媒介,地埋管的换热性能极大地影响整个空调系统的运行性

能,这种耦合特性不仅仅表现在地埋管的设计上,更重要的是地埋管是否能长期保持良好的运行工况,以保证在不同的空调负荷特征下地埋管地源热泵系统能够高效、节能运行。因此,地埋管地源热泵冷、热负荷的全年变化特征分析是地埋管地源热泵系统地下换热器设计及性能分析的前提,事关实际工程中地埋管地源热泵方案的可行性,从这点来说,地埋管地源热泵地下换热负荷特征的分析 and 确定比传统空调更为重要。

2.5 地埋管地源热泵设计

地埋管换热器在某种单一工况下的运行时间较长时,地埋管换热能力将会逐渐下降,埋管进出水温差将越来越小,越来越不能够保证热泵机组在高效工况范围内运行。因此,地埋管换热器单一工况下持续高负荷运行的时间必须得到有效控制,否则,由于换热器周围岩土体热量或冷量堆积使得岩土体的温度会过度升高或降低,地埋管换热能力下降,当积累到一定程度时,准饱和换热区的长度会越来越大,出口水温将不能满足热泵机组换热要求,地埋管换热能力的不足将导致热泵机组无法正常工作。

不同地域的地理环境和气候条件不同,一旦运用不当,地埋管地源热泵系统的优势就不能得到充分发挥,很有可能适得其反,不仅不节能,反而多耗能。因而在地埋管换热器环路设计时,应根据不同地区空调负荷的变化特点,特别是全年冷、热负荷不平衡时设计辅助散热或取热源,即复合式地埋管地源热泵系统,既满足空调负荷变化的需要,又让地埋管换热器存在一个恢复期,有利于地埋管地源热泵系统保持长期稳定运行。

武汉地区属夏热冬冷气候分区,一般建筑物夏季的总冷负荷远远大于冬季的总热负荷。另外一些特殊用途的建筑,如学校,由于暑假的存在,夏天大部分时间不需要空调,这必然导致夏天的总冷负荷小于冬天的总热负荷。由此需采用复合式地埋管地源热泵系统,将地埋管地源热泵与其他形式的加热(散热)设备相结合;在经济性方面,采用复合式地埋管地源热泵系统可以根据冷、热负荷较小值来设计地埋管换热器,可以减小钻井长度,减少系统的初投资。

对于复合式地源热泵系统来说,控制地埋管换热器与辅助加热或散热设备按一定的机制运行,促

使地埋管换热器换热负荷具有不同的间歇特性与周期特性,能最大程度利用岩土体的蓄、放热特性,使得地埋管换热器始终能够进行高效换热并延长其使用寿命。

3 武汉地区地源热泵应用对策分析与建议

地源热泵技术具有节能、环保、可再生能源利用、减少运行成本的优点,但由于不同热泵技术的局限性,决定了其只能因地制宜,适度发展。因此武汉市地源热泵技术的发展要站在科学发展观的高度,从建设资源节约型、环境友好型社会的需要和满足城市发展和人民生活水平提高的需要来统一规划、统筹协调,采用一定手段来控制地源热泵技术的发展,以发挥综合效益。

3.1 统一规划,合理布局

为充分发挥各种供热、供冷工程技术的优势,发挥综合效益,要将发展地源热泵技术纳入集中供热、供冷工程总体规划,统一布局,有机结合,相互补充。根据发展地源热泵技术的资源分布和可利用情况,制定专项发展规划,并提出地源热泵技术发展的规划指导意见。不同的地质条件、不同的室内环境要求适用不同的热泵系统,要根据每个项目的具体特点和条件进行具体分析,找出适合工程需要的方案,避免盲目性,避免对资源的非合理性利用,切实把握地源热泵技术在推广中的适用性和可行性。

3.2 科学论证,适度发展

地下水地源热泵空调系统要实现全部回灌,对成井工艺设计和施工要求极高。因此,地下水地源热泵系统热源井的勘察、设计、施工和监理必须由具有相关资质的单位承担,并严格按照国家和地方的相关法规按程序进行论证和审批。此外,为避免多个项目高密度集中实施而产生综合效应破坏水文地质环境,导致地面沉降或地质塌陷,地下水地源热泵系统应尽量做到布局合理,不能过于集中,尤其是在中心城区和地质条件不理想的区域,更要慎重,发展规模要适度。

3.3 统筹协调,出台政策

地源热泵技术的发展和运用横跨了多个学科领域,地源热泵系统的建设和管理牵涉到多个政府职能部门。为有序发展、合理建设、规范管理,各地应成立地源热泵规划建设管理办公室,统一各部门规划、协调、管理职能,并结合当地实际情况制定相

应的专项发展规划和建设管理办法。

目前,国家对地源热泵技术的推广应用已相继出台了一些法规和鼓励扶持政策。全国各地也应结合本地实际情况制定和出台相应的鼓励和优惠政策。武汉市为国家“两型社会”配套改革试验区,应在“两型社会”配套改革实施方案中纳入推广地源热泵技术的相关内容。从产业政策、城市规划、能源建设等方面统筹协调,给地源热泵技术发展以有力支持。在建设项目方面,结合节能减排、绿色建筑技术的推行,制定相应的鼓励、支持地源热泵技术发展的优惠政策。

3.4 加强宣传,示范先行

公众对地源热泵技术的认知程度有待提高。政府要充分利用电视、报纸、广播、网络、刊物等宣传媒体,加大可再生能源利用及地源热泵技术的宣传力度,向全社会普及地源热泵的基础知识,充分认识到地源热泵技术在可再生能源利用中的重要作用。应通过各种媒体及时将政府决策、工作进展、开展的活动等工作内容向社会宣传,将地源热泵技术发展和应用作为节能减排、“两型社会”建设的重要内容。

应积极发挥示范项目的作用,在建立示范项目管理体系的基础上,可以依托示范项目组织现场参观调研、技术交流和产品展示活动,增进社会各界对地源热泵技术的了解,使示范项目发挥良好的宣传、示范效应。同时应加强对示范项目的管理,提高相关技术水平,并对示范项目管理部门安排相应的项目管理、检测、培训等费用,确保示范项目顺利实施并达到预期效果。

3.5 严格审批,全面评价

严格按照国家、地方的相关法律法规和地源热泵管理办法对地源热泵项目实施申报审批制度,依法办事、按章管理。同时加强对地源热泵系统设计、施工、监理、验收等各环节的审查和规范管理工作。参与地源热泵工程的企业应具备系统的测试能力和设计能力,且能对施工的不同类型工程作出系统监测和评价,这样才能更加准确地对地源热泵系统运行的经济性、环保性、安全性及节能性进行准确评价。通过监测还可以判断何时应该对地源热泵系统进行调试、维修和改造,从而延长系统使用寿命,通过最小的投资为开发商和用户带来最大的效益。

3.6 规范市场,降低投入

通过专业技术学会搭建与地源热泵系统相关的集勘察、设计、施工、生产等相关企业为一体的技术创新和服务平台,既为政府推进该技术的发展和起到参谋助手作用,又能够在科技攻关、技术支持、产品研发、技术培训、咨询服务、质量控制、市场规范、行业自律、信息交流等方面发挥作用。

在技术支撑方面,目前现行的国家规范、标准还远不能适应地源热泵技术发展和应用的需要,还有待深化和完善,应加大相关技术研究的力度,并在总结实践经验和研究成果的基础上,进一步编制和完善适应各地地源热泵技术推广应用的技术规范和标准。

3.7 资源整合,促进发展

地源热泵系统是一个跨学科、跨专业的新兴的可再生能源利用技术,地源热泵技术的发展需要各相关学科的协作和攻关,地源热泵技术的应用需要各相关勘察、设计、施工、监理、运行管理部门和设备供应商的紧密配合,并形成一个完整的地源热泵技术发展产业链。应结合各地的实际条件和工程应用情况,进一步探讨地源热泵空调系统在商业化、市场化运作中一些亟待解决的问题,加强各地现有技术资源整合,推动地源热泵空调系统在各地的规模化应用和产业化发展。

4 结论

在总结分析武汉地区地源热泵技术应用存在问题的基础上,提出了相应的技术和管理对策,以促进地源热泵系统在各地的规模化应用。此项研究既可为武汉市可持续发展战略的实施、建设“两型社会”做出必要的贡献,又能够推动地源热泵产业的发展,为武汉市的经济建设带来新的增长点,为社会提供新的就业领域和就业机会。武汉地区的工程实践经验和应用研究成果,对推动地源热泵技术在全国的发展同样能起到借鉴和参考作用。

参考文献:

- [1] 陈焰华. 地源热泵空调系统及其在武汉地区的应用[J]. 墙材革新与建筑节能, 2007(3): 40-43
- [2] 李玉云. 武汉地区地下水地源热泵的应用与分析[J]. 暖通空调, 2006, 36(6): 111-115
- [3] 黄天荣, 徐照彪. 武汉市地下水源热泵应用情况分析[J]. 工程建设与设计, 2007(7): 9-12
- [4] 陈焰华. 地下水地源热泵空调系统设计与运行工况分析[C]// 全国暖通空调制冷 2008 年学术年会资料集, 2008