

地源热泵地埋管系统地温监测技术研究

王珏

北京建筑大学，北京，100044；

摘要：地埋管换热器作为地源热泵系统的一个重要组成部分，对于系统的稳定运行起着至关重要的作用。该设备借助了土壤中恒定的温差来实现与地面间的能量转换，从而为建筑提供空调及取暖服务。然而，当地源热泵系统运转时，地底管道式加热区内地层温度场的变动会对地底管道式加热设备的热传输效率产生重大影响，并进一步影响整体热泵系统的运行能效。因此，建设地源热泵地温监测系统，并对地埋管系统运行进行长期有效的监测及分析是十分必要的。本文详细介绍了地温监测系统的建设要点及运行管理措施，建设内容主要涵盖前端数据收集系统、数据传输系统以及控制系统。

关键词：地源热泵；地温影响；地温监测；运行管理

DOI:10.69979/3041-0673.25.05.067

引言

浅层地热能资源(shallow geothermal resources)具备稳定的供应、庞大的储备、快速恢复能力、节约环保特性、双季使用及易于开采等优点，逐渐被更广范围的采用，例如通过利用热泵技术从地下环境提取热量并输送储存，从而实现建筑物与地下环境间的能量交换以提供冬季供暖和夏季制冷。然而，长时间大量使用地源热泵系统可能引发地层温度场的转变，并对地底管道换热的效能带来重大影响，进一步降低了整体热泵系统的运作效果^[1]。尽管如此，在实践中的地源热泵项目往往过于注重基础设施构建而忽视监控环节，部分已经投用的设施因缺少必要检测和运营管理手段，致使其功能无法充分展现，甚至对地质环境造成了不良后果。因此，建设地源热泵地温监测系统，并对地埋管系统的运行状况进行长期有效的监测及分析是十分必要的。

1 国内外研究综述

目前，许多国外的研究人员已经对地埋管换热器内部以及与周围地层之间的热量传递进行了深入研究，这些研究为地源热泵系统的设计和运行提供了有力参考，解决了在设计和运行过程中所遇到的各种实际问题^[2-4]。L. Bodri等^[5]从1986年开始进行了长达10多年地源热泵垂直地埋管换热器周围温度场的监测和研究，除了分析实测数据外，他们还预测了30年后的地层温度，得出结论称地层在热泵停止运行30年后才会基本恢复原始状态。天津大学的周志华^[6]对垂直埋管式地源热泵地层温度分布进行了研究，并预测了系统运行30年后

地层温度的变化。Li S. H.等^[7]在长江中下游典型气候特征的条件下，模拟了地源热泵长期运行时地埋管换热器周围地层温度场的分布和变化。研究结果显示，由于夏季土体受到过多热量输入，长江中下游地区如果不进行调节，地埋管周围地层温度将持续升高，导致系统性能下降甚至最终导致系统瘫痪。大连理工大学的尚妍等^[8]对地源热泵机组间歇运行进行了测试，指出在制热运行模式下采用间歇运行策略可以改善地层温升现象，提高热泵系统性能系数。

根据当前的国际和国内相关研究，地温监测主要集中在理论分析和数值模拟阶段，并已经取得了一些研究成果。然而，对于地温监测系统的构建以及如何科学获取监测数据的研究却相对较少。因此，本文着重阐述地埋管地源热泵地温监测系统的建设要点。

2 地温监测系统的建设

2.1 监测点位置的选择

换热区中心是容易积聚热量、不利于热量扩散的地方，温度波动最为显著。因此，在埋管区内进行地温监测时，应重点监测换热中心区域，即换热孔密集区。监测孔应根据监测需求和换热孔的布置方式确定其具体位置。

根据《地埋管地源热泵系统工程技术规范》(DB11/T 1253-2015)中8.1.2条要求“地质环境影响检测内容包含：室外环境温度监测，换热监测孔地层温度监测，换热影响监测孔地层温度监测，常温监测孔地层温度监测。”且8.3.3条做出了详细要求：“换热监测孔的位

置,应包含布控区域的中心和边缘。换热影响监测孔的位置应包含布孔区域内部和外围。监测孔的布置应考虑地下水流动方向。”如下图1所示。

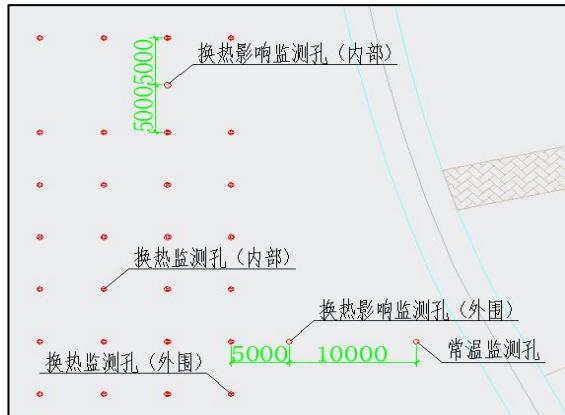


图1 地温监测孔孔位布置示意图

2.1.1 换热监测孔布置方案

通常情况下,换热监测孔在换热孔群中的位置有三种布置方式:第一种是在换热管旁边(或在U形换热管的中间);第二种是在相邻的两个换热孔之间;第三种是在正方形或菱形排列的四个换热孔对角线的中点位置。

监控孔的位置靠近或者处于U型换热管的中部,它们的温度变动与内部循环水的温度变迁有着良好的吻合性,这表明它们所记录的数据能有效描绘出附近地质的热量消耗及温度转变状况(如当需要采用间歇运行方式时,确定间歇运行时间等)有很大帮助。而四边形的两个对角线的中心位置则是地温波动最微弱的地方,这个地方的温度变化可真实反映整个加热区域的地温整体变化趋势,因此选择此地点作为长时期观测用地温的监控孔较为适宜。

但基于施工可行性考虑,由于垂直换热孔深度通常为60~150m,换热孔越深,施工过程中越容易造成串孔影响,破坏已完成的换热孔,因此换热监测孔的布置通常采用第一种方案。

2.1.2 换热影响外监测孔布置方案

换热影响外监测孔用于监测换热影响范围内的地层温度变化。一般结合工程实际情况,宜在距离换热区域5m范围内布设换热影响监测孔。

2.1.3 常温监测孔布置方案

常温监测孔用于监测换热区域地层的初始温度,作为分析过程中的参考数值,通常布设在换热影响范围以外的区域,结合工程实际情况,常温监测孔的布设位置

与换热区域距离不宜小于10m。

2.2 监测深度

为了满足特定需求,确定温度传感器的地点及数目是必要的。在需深入了解各层次的地温状况时,应充分考虑地层特性来决定其数量和深度,每一主要土层设置一个传感器。对于普通的项目检测,可以适当地降低传感器的安装数量,但至少不能低于三台,宜在上、中、下三个深度等距设置。这是由于热泵系统经过多年运行后,换热区上部土层与下部土层温度仍然不同,存在垂直方向上的地温梯度,在上、中、下三个深度上设置传感器能够相对准确的取得埋管深度内的地温平均值。此外,由于换热区的表面地温受到外部气温的大幅影响,为防止这种影响干扰到测量数据,建议将顶部的传感器设定的深度超过10m。

2.3 监测孔施工

地温监测系统应保证长期稳定的要求,监测时间长达数年甚至更长,监测设备应能满足长期监测的需要。地温监测孔的施工过程通常为先钻孔,然后在成孔内下入满足孔径要求的PE管作为测温线缆的套管,形成监测孔,随后在套管中下入测温线缆,用于后续的地温监测。建议如场地条件允许,可在监测孔上方或周边区域设置检查井,并将监测设备引入检查井中,这种结构形式可保证随时进入检查井中进行测试或者维修。既可进行人工测温,也可在井内不同深度布设温度传感器进行自动化监测,具有监测方式灵活的特点。当采用自动监测设备时,可将测温设备定期取出进行校准,若传感器损坏时也可随时进行更换,便于维修,保证监测工作长期稳定的进行。

2.4 监测设备选型

依据监测系统的特性,选择测量设备通常会遵循以下准则:

可靠性:设备的运行必须保持稳定且可靠,满足长期监测的需求;

先进性:在选择传感器时,首要考虑技术成熟度,并考虑性能先进;

耐用性:所有设备使用寿命越长越好;

易维护:传感器易于维护和更换;

精度要求:在满足监测需求的基础上,选择适当精度的传感器。考虑到现行监测技术和监测精度对分析结

果的影响,地温监测设备的精确度不应低于 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$;

采集频率:热泵系统启动后,地温监测设备应持续运作。考虑到换热区域的地温变化趋势和特性,建议在热泵运行期间每30min进行一次地温数据收集,而在运行中断时,可以将地温数据收集频率调整为每24h一次。

3 数据传输系统的建设

数据传输系统通常按采集及传输方式的不同分为直接传输系统和远程传输系统。

3.1 直接传输系统

直接传输系统适用于机房与监测点距离较近,采集数据单一的小型监测系统。待温度传感器的安装完毕后通过屏蔽电缆被引至机房内。一旦地下管道温度传感器成功接入设备室,便使用专用的数据收集主机进行信号捕捉。数据采集主机应具备通讯接口和开放通讯协议,通过RS485通讯接口和通讯线缆与监测系统机房内的地埋管温度采集计算机进行通讯连接,采集并存储地层温度信号,以供数据分析时进行提取或上传到更高一级的能源监测平台。

3.2 远程传输系统

远程传输系统以其精确性和效率的优势特别适合于多个参数同步检测的环境下使用,通过自动采集和远程传输的功能将地温监测数据以及温度、压力、流量、电量等数据传输至现场数据采集主机,现场数据采集主机具备数据存储和远程传输功能,保证本地安全存盘的同时将数据传送至监测中心服务器;通过监测中心服务器进行数据采集,并将数据进行实时展示和保存在监测数据库中^[9]。如图2所示。

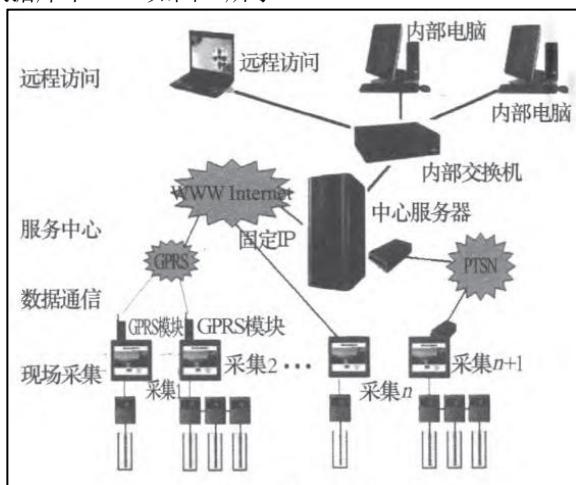


图2 远程传输系统示意图

数据采集系统采集的数据可通过发射器利用有线网络(Internet)或无线传输(GPRS, CDMA)进行远程传输,并通过用户数据中心的服务器进行接收。有线传输要求能够通过非对称数字用户线路将信号传输到监测站,这种方式的优点是信号稳定;而无线传输则无需互联网连接,但通信质量受信号强度影响较大,因此在数据传输速率及反应时间方面表现得较为迟缓,甚至可能会出现数据丢失的情况。

4 控制系统的建设

所有的数据监测与传输宜达到自动化及实时同步化的功能,监测数据可现场查看及储存,也可远程传输至数据中心进行储存、查询、分析、统计等,并通过输出Excel格式或自动绘制成图表形式显示。数据发射系统需包含DTU(Data Transfer unit)模块、网口工控机、组态软件等,数据中心由工控机、显示器、VPN(虚拟专用网络)、软件等组成,并应配备网桥。

5 数据分析及运行管理措施

地源热泵系统的主要功能依赖于其地埋管换热器的性能来实现建筑物内的空调和取暖需求。然而,由于地下“冷热积累”的现象,这可能会影响到系统的工作效率,阻碍了其推广应用。为此,在设计地源热泵系统时,应充分考虑到地层温度变化对于系统工作效率的影响,在日运行高峰时段及月运行高峰时间应该采用间隔运行或者分区分段运行的方式来减少设备的使用频率,以保证系统的高效运行。针对一些已建成并投入运行的项目,运行策略的优化主要是利用复合式地埋管地源热泵系统调整地下管段所承担的负荷量,从而减少局部地区的冷热聚集现象,有助于保持系统的稳定运作。

对于已投入使用的项目,建议结合地温监测系统并通过以下方案实现系统运行策略的分析和优化:当地源热泵系统第二个夏(冬)季运行前一个月,DDC(Direct Digital Control)通过地层温度传感器收集地层温度并计算平均值,与第一个夏(冬)季运行前监测的平均值进行比较。当平均温度高(低)于第一个夏(冬)季平均温度设定值时(如 0.3°C),可开启辅助能源系统进行调整。

6 案例介绍

北京城市副中心某能源站地源热泵项目拟通过地温监测系统对地源热泵地埋管区域的地层温度进行长

期有效的地温监测及数据采集工作,结合本项目实际情况,拟采用监测孔结合单总线测温电缆的设计方法实现地温监测功能,且监测过程不影响监测孔的换热使用。

6.1 监测孔设置

本项目地源热泵系统共计1442个地埋换热孔,布置于北京城市副中心某项目的7个地块内,本方案拟以地块为单位,分别对各地块地层温度进行监测,并根据各地块地埋孔的数量确定监测孔个数,如表1所示:

表1 监测孔设置表

地块编号	1#	2#	7#	8#	10#	11#	12#	共计
地埋孔数(个)	132	207	183	332	389	54	145	1442
监测孔数(个)	1	1	1	3	3	1	0	10

地温监测孔布孔方案详见图3-9。



图3 监测孔平面布置示意图-总图



图4 监测孔平面布置示意图-1#地块

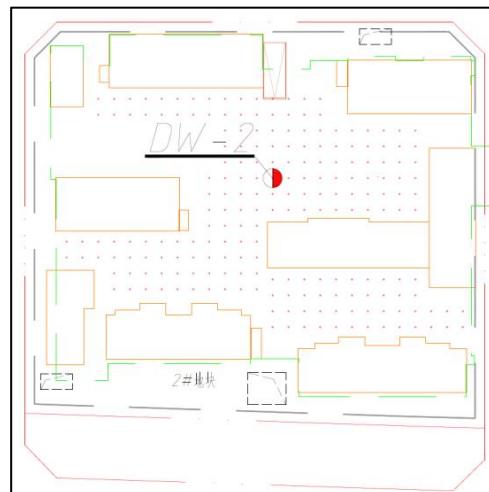


图5 监测孔平面布置示意图-2#地块

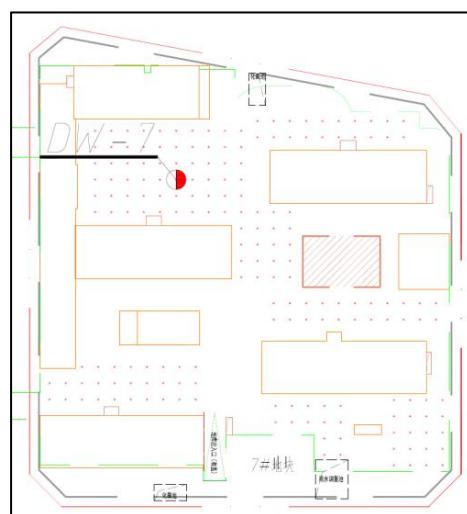


图6 监测孔平面布置示意图-7#地块

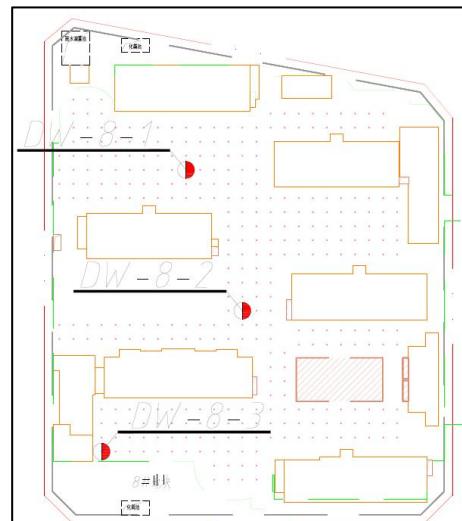


图7 监测孔平面布置示意图-8#地块

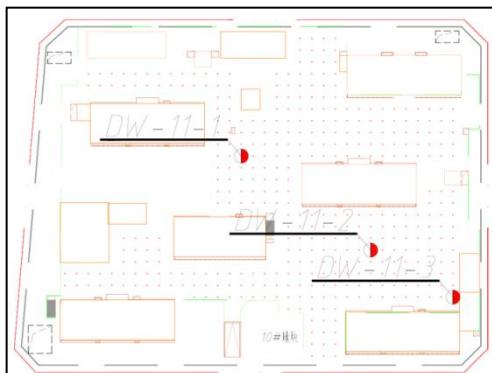


图 8 监测孔平面布置示意图-10#地块

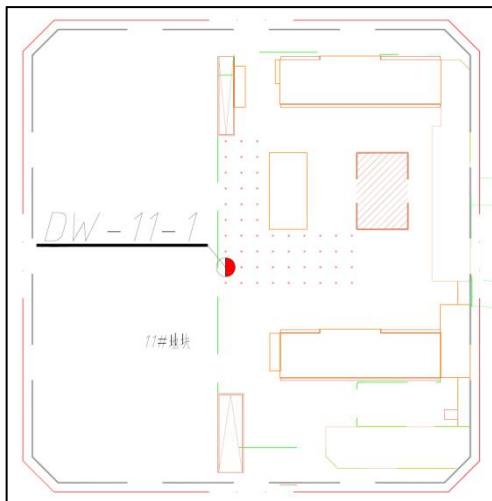


图 9 监测孔平面布置示意图-11#地块

每个监测孔拟布置 5 个温度采集点, 根据采集深度不同划分为 30m、60m、90m、120m 和 150m, 本项目拟设温度采集点共计 50 个。

6.2 监测孔施工

本方案拟在地埋管施工过程中将监测孔所需数据线及套管一并下入地埋孔内, 完成监测孔数据线的埋设施工, 具体实施内容如下:

6.2.1 监测孔钻进

根据各地块实际情况, 分别选取 1~2 个地源热泵地埋换热孔作为地温监测孔, 监测孔钻进施工工艺与常规地源热泵地埋换热孔施工工艺相同。

6.2.2 监测孔数据线套管下管

监测孔钻进完成后, 配合地埋管下管过程将监测孔数据线套管同时下入地埋孔中。监测孔数据线套管采用 De32 的 PE 管且对管头一端进行封堵, 单根套管长度为 153m 且确保下管长度不小于 151m。下管时将套管绑扎于双 U 管中心, 封堵端朝下, 配合双 U 管下管过程将套管一同下入孔中。在下管过程中要求对套管进行注水保

压, 保压方式与常规地源热泵地埋换热孔施工工艺相同。

6.2.3 监测孔数据线布设

数据线套管下管完成后, 将预制数据线缓步下入套管, 当数据线下到设计的深度后将孔口处剩余数据线进行盘绕并做好成品保护。待基坑内水平地埋管施工时, 将数据线及其套管(数据线套管仍采用 De32 的 PE 管, 套管连接部位采用电熔连接)沿水平地埋管走向引至基坑支护桩冠梁处并做好成品保护, 详见图 10。

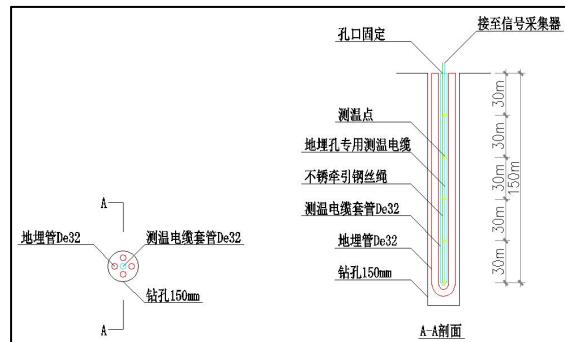


图 10 地温监测孔示意图

6.3 地源热泵地温监测系统介绍

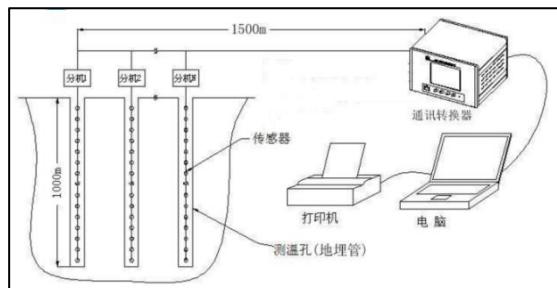


图 11 地源热泵地温监测系统

如图 11 所示, 电脑服务器通过总线将现场温度采集模块相连, 温度采集模块通过单总线将各温度传感器相连。每个温度采集模块可连接内置多个温度传感器的防水测温电缆(防水测温电缆采用特种材质加工而成, 经测试与检测具备一定的防水、耐压、抗拉、耐磨、防腐蚀的能力, 可以常年稳定运行于地下环境场中)。

地源热泵测温系统特点:

温度采集器 RTU 型号: YF-60 系列 (标配 YF-D20 数字温度传感器)

传感器型号: YF-D20 数字温度传感器

测量范围: -50℃~100℃

测量精度: 温度 ±0.2℃

分辨率: 温度 0.1℃

温度传感器具体位置可根据客户要求定制

电脑监控软件：中文版本

电源：220V 外接电源

通讯接口：RS485 通信接口，可与电脑实时通讯，最远通讯距离 1500 米。

数据记录：产品能全程跟踪温度随环境等的变化，自动记录温度数据，10 分钟自动记录一次数据，温度记录联机实时保存至电脑硬盘。

报警输出方式：设定报警温度，画面会自动闪烁以提示报警状态（温度过高报警、温度过低报警等）并有声音报警输出，短信报警功能可选。

最远端温度传感器距离温度采集设备 RTU 能够达到 1000 米。

电脑上可以实时监控温度、记录温度、查询温度、打印温度报表、查看温度历史曲线等。

提供传感器配电输出和信号输出带有标准的 RS485 通讯接口，客户工程应用可进行二次开发。

采用工业电路板全隔离设计，所有控制器都具有较强的防雷措施。

6.4 测温电缆及温度传感器

6.4.1 图 12 为不锈钢防水封装单支进回水温度传感器：



图 12 不锈钢防水封装单支进回水温度传感器

6.4.2 图 13 为封装完成的成品测温电缆(可直接放入监测孔中)：



图 13 封装完成的成品测温电缆

测温电缆结构如图 14 所示，测温电缆为三芯电缆且内置有多个温度传感器，最大外径为 16mm，电缆直径为 8mm，并内置了抗拉绳。为保证长期能够在水下工作，测温电缆每个传感器均经过多层防护封装。

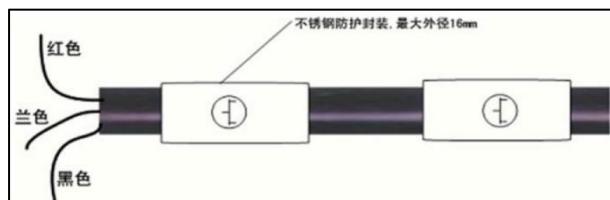


图 14 测温电缆结构图

如图 15 所示，电缆传感器采用三层密封防护的防水工艺，电缆传感器最外层采用不锈钢外壳起保护与密封作用。

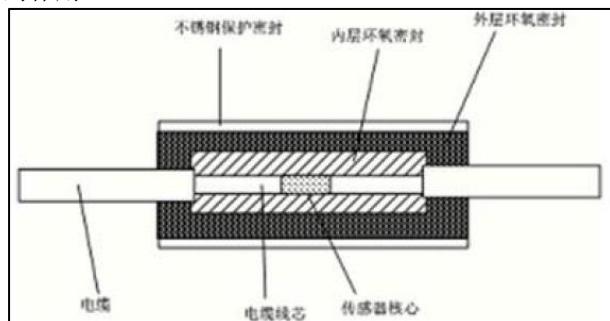


图 15 电缆传感器封装图

6.4.3 传统测温线电缆与单总线测温电缆比较

传统测温电缆：为了方便研究地层、水质等环境对地埋换热孔能效等方面的研究或温度测量，目前地埋管测温电缆对于地埋换热井有口径小、深度较深等特点。如采用传统测温方式测量地下 200 米的井（如图 16 所示），平均 10m 放一个温度探头，需设置 20 个 PT100（或 PT1000）传感器及 2100m 测温电缆，且需配置一个至少 20 个通道的巡检仪。虽然选择高精度的 PT100（或 PT1000）可提高系统的测温精度，但对于模拟量数据采集，提高测量精度最有效的方法是提供仪器 AD 转换器的位数，即提供巡检仪的测量精度，若能够在长距离测温条件下进行多点测温且做到 0.5 °C 的精度，则非常不易。PT100（或 PT1000）传感器由于输出模拟量电阻信号，通讯线缆的阻抗对测量温度的精度影响比较大，且会随着时间的延长造成误差的漂移变大。此外，所有的模拟量的感知设备都依赖于模拟信号来运行并输出结果，而检测环境往往存在电场、磁场等不确定因素，这会给原始的数据带来巨大的扰动效应，从而测定值的影响程度及系统稳态造成不利后果，且每年均需对其重新校对，因此它的应用范围受到了极大的限制。

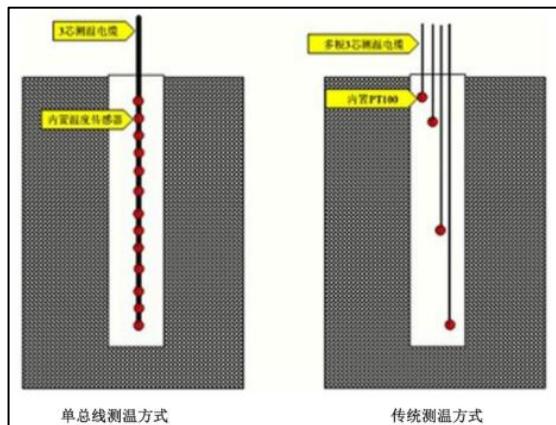


图 16 传统测温方式与单总线测温方式

单总线测温电缆: 单总线式数字温度传感器采用使用了专门设计的测量单元来感知环境中的变化, 这种设计使得其能够保持高精确性和稳定性, 而不需要额外的校对过程。此外, 因数据传输采用总线方式, 总线电缆或传感器外径可做得很小(最大直径不大于16mm), 同时, 由于它是以数字形式传递信息, 这意味着长度并不会对其准确性产生负面影响, 这是传统的热电偶检测方法所不能达到的效果。因此, 单总线测温电缆被认为是最适合用于深度钻孔或是地下温度监控的设备。

单总线式数据传感器本身自带12位高精度数据转换器和现场总线管理器, 可直接将温度数据转换成适合远距离传输的数字信号, 并且每台设备都拥有唯一的识别ID, 因此许多这样的传感器可以简单地连接到总线上, 以实现在一条导线上监测多点温度的功能。

其特点为:

全程封闭, 防水防腐, 耐用性强, 能够在水下长时间运作;

可依据用户需求来定制传感器的位置;

所有的传感器都拥有唯一的识别码和编号, 便于辨认;

精度高, 可达0.2℃, 且不会受到通讯距离的影响; 长期维持高精度, 无需校正。

综上所述, 本方案建议采用监测孔结合单总线测温电缆的设计方法实现地温监测功能。

7 结语

浅层地热能开发利用时间短, 建设单位经验不足, 往往重视工程建设, 忽视能源开发对地质环境的影响, 多数工程没有相应监测系统, 即使设有监测系统, 监测项目也较少, 管理不到位, 使得监测成为形式, 目前热

泵工程运行5年、10年或更长时间对地质环境到底有多大影响, 影响程度如何, 尚缺乏强有力的数据进行佐证。因此, 建设完善地源热泵监测系统或区域动态监测网, 科学分析监测数据, 及时发现并解决问题, 才能保障热泵工程经济、高效、节能、持久运行。

参考文献

- [1] 高新宇, 范伯元, 张宏光, 等. 浅层地温能开发利用对地质环境影响程度的探索性研究[J]. 现代地质, 2009, 23 (6) : 1185-1193.
- [2] Cui Ping, Yang Hongxing, Fang Zhaohong. Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined boreholes[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 1169—1175.
- [3] Demir H, Koyun A, Temir G. Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29 (2-3) : 224—233.
- [4] Pussoli B F, Barbosa J R, da Silva L W, et al. Heat transfer and pressure drop characteristics of peripheral finned tube heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55 (11-12) : 2835—2843.
- [5] BODRI L, RYBACH L, BUNTEBARTH G. Relationship between seismic velocity and heat production: comparison of two sets of data and test of validity[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1990, 99 (2) : 48-57.
- [6] 周志华, 张丽英, 黄珂, 等. 垂直埋管式地源热泵地层温度分布研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35 (8) : 1480—1485.
- [7] LI S H, YANG W H, ZHANG X S. Soil temperature distribution around a U-tube heat exchanger in a multifunction ground source heat pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 3679.
- [8] 尚妍, 李素芬, 代兰花. 地源热泵间歇运行地温变化特征及恢复性研究[J]. 大连理工大学学报, 2012, (3) : 350-356.
- [9] 黄坚, 孙婉, 屠越栋. 地埋管地源热泵系统地温监

- 测技术试验研究[J]. 制冷与空调, 2018, 1 (1) : 55-59.
- [10] 吴春玲, 惠超微, 王雯霞, 等. 地源热泵间歇运行方式对地温恢复和机组效能的影响[J]. 制冷与空调, 2014, 28 (4) : 410-414.
- [11] DB11/T 1253-2015, 地埋管地源热泵系统工程技术规范 [S].
- [12] 刘文学, 唐志伟, 张宏宇, 等. 地源热泵间歇制热运行的试验研究[J]. 可再生能源, 2008, 26 (1) : 59-61.
- [13] 王艳霞, 蒋绿林, 高伟. 地源热泵长期运行对生态环境的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (24) : 671-672.
- [14] 程向明, 张玉瑾. 地源热泵多年长期运行工况对地层温度场的影响[J]. 苏州科技学院学报(自然科学版), 2016, 33 (3) : 71-75.
- [15] 刁乃仁, 崔萍, 方肇洪. 坚直地埋管换热器常见设计问题分析[J]. 地源热泵, 2012, (10) : 5-10.
- [16] 余斌, 王沣浩, 颜亮. 钻孔间距和布置形式对地埋管管群传热影响的研究[J]. 制冷与空调, 2010, 10 (5) : 31-34.
- [17] 陆观立. 地下水渗流对地埋管换热影响分析[J]. 福建建设科技, 2011, (1) : 62-63.
- [18] 耿毅男. 浅层地温能监测系统设计 [J]. 中国煤炭工业, 2016, (9) : 50-51.
- [19] 卫万顺, 郑桂森, 冉伟彦, 等. 浅层地温能资源评价 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2010: 163-169.
- [20] 卫万顺, 李宁波, 冉伟彦, 等. 中国浅层地温能资源 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2010: 126-130.
- [21] 何潇楠. 浅层地温能开发利用动态监测网建设[J]. 科技创新与应用, 2015, (15) : 257.
- [22] 张晓力, 廉小亲. 地源热泵远程监测系统及数据处理分析[J]. 可再生能源, 2010, 28 (3) : 126-129.
- [23] 闫岩, 汪旭, 杨锐, 等. 我国浅层地温能开发利用应注意的一些问题及对策建议[J]. 西部资源, 2014, (6) : 201-204.
- [24] 孔祥军, 孙振添, 张国山, 等. 浅层地温能可持续开发利用几点建议[J]. 城市地质, 2014, (1) : 135-139.
- [25] 柴慧鹏, 张建. 对浅层地温能开发利用探讨[J]. 地球, 2015, (7) : 345.
- [26] 徐亚昆等, 地层源热泵系统地埋管施工过程研究[J]. 建材世界, 2010, 31 (2) : 129-131.
- [27] 丁勇, 李百战, 卢军, 等. 地源热泵系统地下埋管换热器设计[J]. 暖通空调, 2005, 35(3): 86-9.
- [28] 乃仁, 方肇洪. 地埋管地源热泵技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 50-53.
- [29] 周晋, 汪庆军, 张国强. 垂直埋管换热器布置形式对地下换热特性的影响分析[J]. 制冷空调, 005-0329(2012)09-0056-06.
- [30] 于立强. 垂直埋管地源热泵系统实验研究[C]. 全国暖通空调制冷学术年会论文集, 北京: 中国建筑工业出版社, 2000, 470-474.
- [31] 刘文正, 王伟, 耿靖功, 等. 地源热泵施工技术[J]. 建筑施工, 2012 (1) : 70-74.

作者简介: 王珏(1996-), 男, 汉族, 北京市, 学生, 在读硕士研究生, 北京建筑大学, 工程管理 MEM