

光纤光栅传感在地源热泵系统中的应用



深圳市简测科技有限公司

二〇一四年九月

引言

地源热泵是指利用土壤或地下水的低温位热能和它们的蓄热性能的一种热泵系统。冬季通过热泵把大地中的热量升高温度后对建筑供热，同时使大地中的温度降低，即蓄存了冷量，可供夏季使用；夏季通过热泵把建筑物中的热量传输给大地，对建筑物降温，同时把大地中蓄存热量供冬季使用，这样在地源热泵系统中大地起到了蓄能器的作用。应用地源热泵技术不但有良好的节能环保效益，也有非常可观的经济效益。

地源热泵技术作为一种很有前途的可再生能源技术，其设计和应用的关键问题是土壤热性能和盘管换热器性能的优劣。地温值的分布和变化规律直接影响到地下换热器的换热性能，是研究盘管换热性能的基础。对垂直埋管式地源热泵来说，充分了解地下埋管周围的土壤温度场是十分重要的。只有充分了解地下土壤温度在热泵运行前后的分布状况，才有可能设计出合理的地下埋管埋深、数量及间距，有利于地源热泵的实际运行，提高系统的性能系数及地源热泵的经济性，降低设备的初投资。这就需要在地下换热器埋管周围布置温度传感器来测量埋管附近的土壤温度。

目前，比较常用的温度传感器主要是热电偶温度传感器和热敏电阻温度传感器，大多数地源热泵中应用的温度传感器都属此类。热电偶温度传感器主要用来测量温度差，为了得到正确的温度值，必须用一种基准温度对接点进行修正，而且热电偶温度传感器输出的信号比较小，因此在常温附近如不注意测量方式，则其测量精度较低；热敏电阻温度传感器的响应速度快，电阻随温度的变化能力强，但长期稳定性差^{错误!未找到引用源。}；而且电类温度传感器都有易受电磁辐射干扰、精度低、长期稳定性差以及信号传输距离短的缺点，无法满足在如强电磁辐射等恶劣工作环境中的工作需要。

基于光纤光栅技术的温度传感器与传统的温度传感器相比，具有灵敏度高，体积小，耐腐蚀，抗电磁辐射，光路可弯曲，便于实现遥测等优点。而且由于光纤光栅温度传感器采用波长编码技术，消除了光源功率波动及系统损耗的影响，适用于长期监测。多个光纤光栅串联起来，组成准分布式温度测量系统，使用光缆连接线路，可实现远程监测。

温度监测系统

我们使用了 3 个光纤光栅温度传感器分别间隔 10 米布置在深 25 米的竖井内，3 个传感器的中心波长分别为 1540nm, 1555nm 和 1560nm，它们的相对位置如图 8.1 所示，分别在地下 5m, 15m 和 25m 处。3 个温度传感器串联在一起，通过一条 150m 长的光缆将传感器的波长反

射信号传输到波长解调器。光纤光栅中心波长的测量采用简测科技的四通道解调系统 JEME-iFBG-S04, 该设备集成了扫频激光光源和可调光纤滤波器解调模块, 仪器的扫描频率为 10Hz , 波长分辨率为 1pm。工作波长范围为 1510-1590nm。

图 8.1 给出了光纤光栅温度传感系统布置图, 该温度传感系统信号识别采用波分复用方式。每个光纤光栅传感器占用一个波长通道, 每个光纤光栅传感器的波长变化信号代表该处土壤的温度变化信息, 并通过一根 150m 传输光缆对传感系统进行远程监测。图 8.2 为光纤远距离温度监测系统的监测界面。

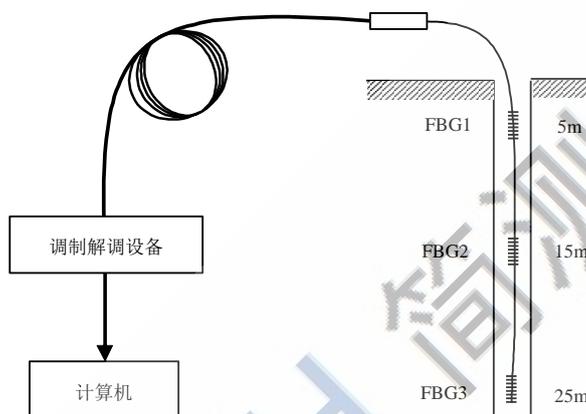
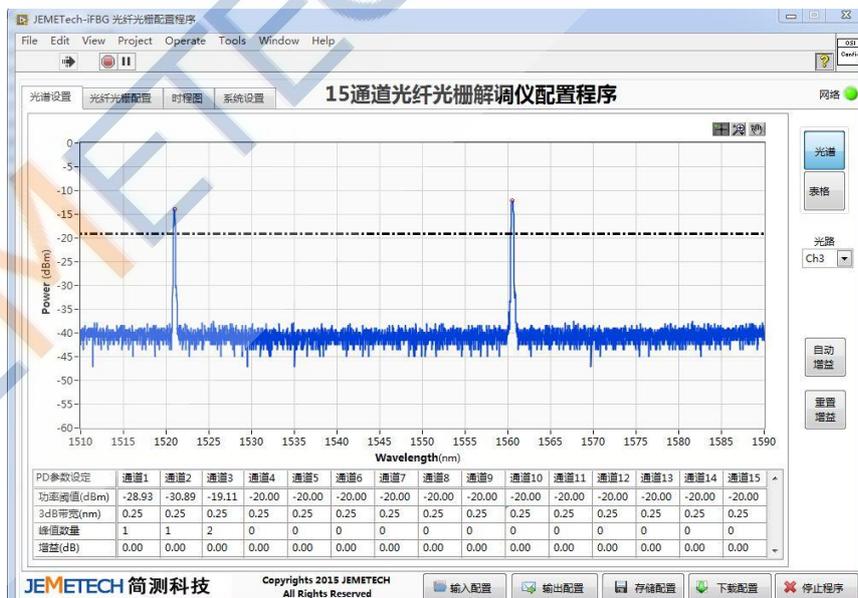


图 8.1 光纤光栅温度传感系统布置图



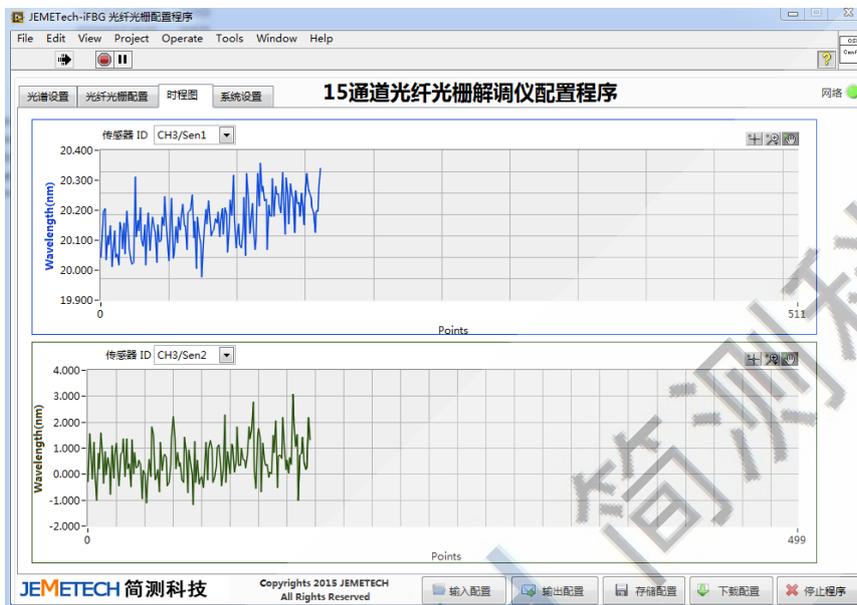
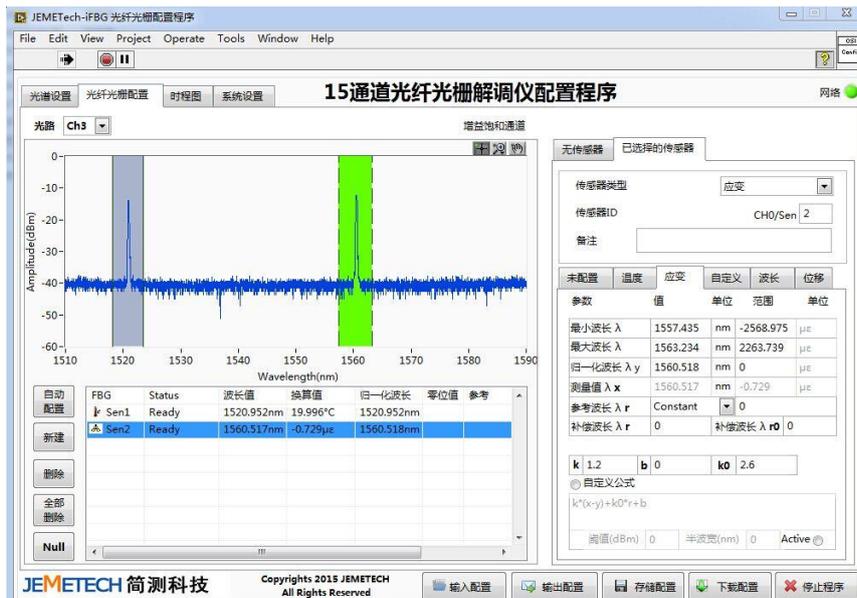


图 8.2 远距离监测系统界面

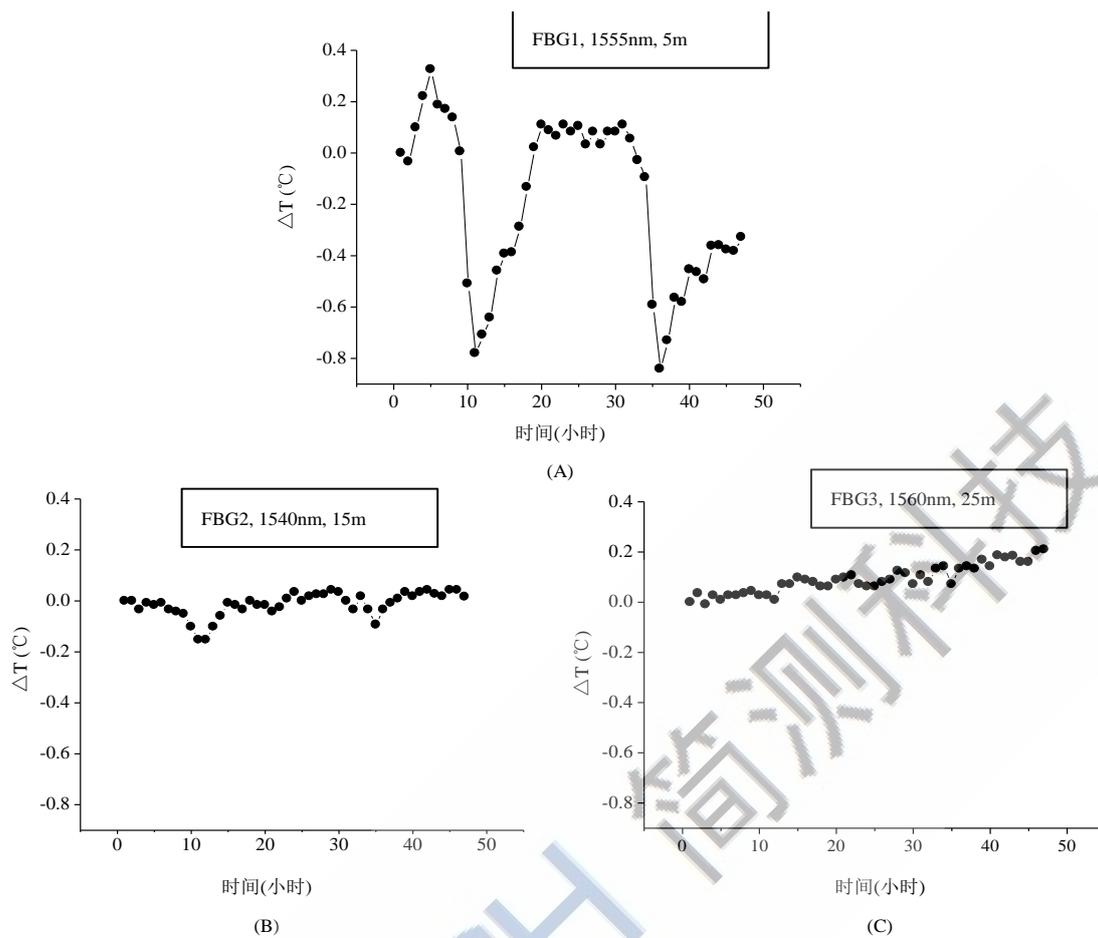


图 8.3 光纤光栅温度传感器现场安装图



图 8.4 25 米处光纤光栅温度传感器

光纤光栅温度传感器埋设于地下，为了防止地下水对温度传感器的影响，要对光纤光栅温度传感器进行防水处理。将光纤跳线穿入 5mm 的塑料管内，用于传感的光纤光栅部分（即不锈钢管封装处）露在塑料管外，在不锈钢管端部与塑料管接头处用环氧树脂封好，待环氧树脂固化后，将连着 3 个光纤光栅温度传感器的光纤固定在地下换热器的水管上。将温度传感器固定在地下换热器上有几个好处：首先易于光纤光栅温度传感器的布设，其次可以准确的确定待测点的位置，另外还可以防止在地下换热器垂直盘管的安装过程中对光纤光栅的拉伸作用，以及光纤本身的自重产生的拉伸作用。图 8.3 给出了光纤光栅温度传感器现场安装图。在图 8.4 中，箭头所指的为地下换热器垂直盘管 25 米处的光纤光栅温度传感器，因为此传感器位于盘管的最下端，所以仅在一头接上光纤跳线。



图

8.5 光纤光栅温度传感器在 48 小时内的温度变化

监测结果分析

垂直盘管安装完后，采用光纤光栅调制解调系统进行数据采集。图 8.5 给出几天内的光纤光栅的温度变化，每个数据点代表一小时内的温度平均变化值。从图 8.5 中可以看出，离地面最近的 5 米处的温度变化明显高于在其他两个位置的温度变化，而在 25 米处的温度变化最小。监测数据表明，在 25 米深度范围内，深度越深，温度变化的幅度越小。5 米处与 15 米处的传感器监测到的温度变化周期为 24 小时，与一天内的温度变化曲线相一致。尽管监测的季节为秋季，地面的温度在降低，但地下的温度变化不大（如图 8.5 所示），25 米处的温度还有小幅上升现象，这是因为地下土壤温度变化要比地表的温度变化滞后，滞后的时间与土壤的深度和土壤的成分等因素有关。这种现象与理论上地下土壤的温度分布是一致的。

为说明该监测结果的正确性，对大连地区的土壤温度变化进行计算，并将计算结果与实际监测到的结果进行比较。土壤温度场的计算公式为：错误!未找到引用源。

$$T(z, \tau) = T_m e^{-\sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}z} \cdot \cos\left(\frac{2\pi\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}z\right) + T_0 \quad (0 \leq z \leq 10) \quad (8.1)$$

式(8.1)中, T 为土壤温度, T_0 为地表的平均温度, T_m 为简谐运动的初始振幅, τ_0 为振动周期, 按年或者昼夜计算, a 为常温下板岩的导温系数, τ 为时间, z 为土壤深度。大连地区 T_0 为 11.3°C , T_m 为 15.1°C 。

图 8.6 和图 8.7 给出两个月内监测到的 5 米处和 15 米处的温度变化曲线, 每个数据点为一天温度变化的平均值。温度的监测时间为 03 年的 11 月到 04 年的 1 月, 大气温度处于下降状态, 图 8.6 中, 上部较光滑的曲线为计算的土壤温度变化曲线, 下部为光纤光栅温度传感器监测到的土壤温度实际变化曲线。经过计算, 从 11 月末到 12 月末的温度变化为 $\Delta T_{\text{计算}} = 1.2696^\circ\text{C}$, 而实际监测到的 11 月末到 12 月月末的温度变化为 $\Delta T_{\text{实际}} = 1.1614^\circ\text{C}$, 实际监测到温度变化与计算得到的温度变化相差仅 0.1°C 。从图 8.7 中可看出 5 米处监测到的温度变化一直处于下降状态, 实际监测曲线与计算曲线趋势符合的很好。

一般说来, 在大地 10 米以下的土壤温度受大气温度周期变化影响较小, 称之为恒温带^{错误!}未找到引用源。图 8.7 中, 15 米处的温度变化幅度很小, 两个月内温度变化仅 1°C 左右, 该现象与实际土壤温度变化相一致。

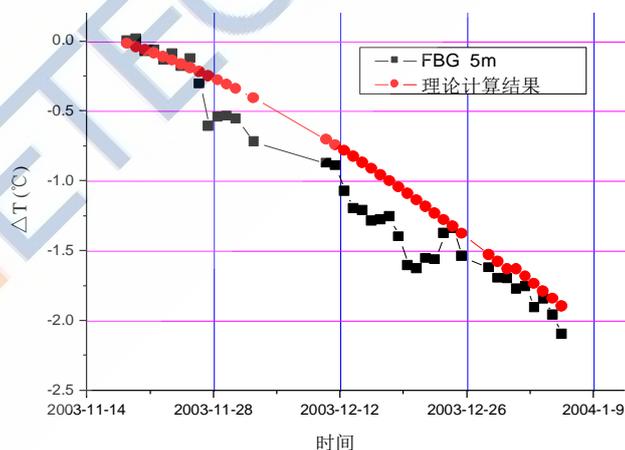


图 8.6 5m 处光纤光栅温度传感器在 2 个月内的温度变化

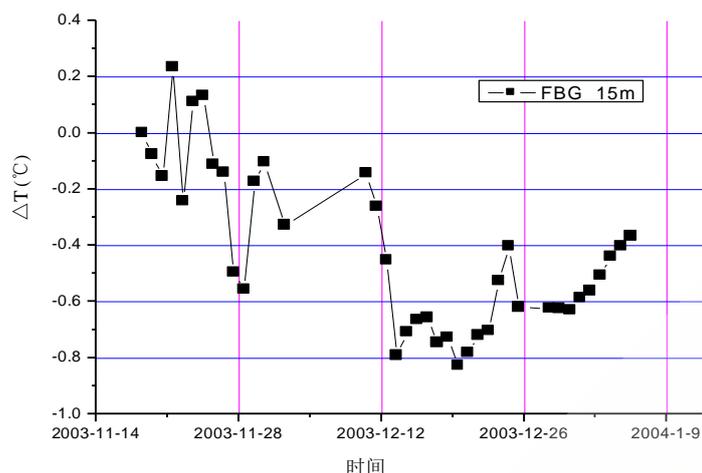


图 8.7 15m 处光纤光栅温度传感器在 2 个月内的温度变化

目前常用的温度传感器有热电偶温度传感器和热敏电阻传感器，但热电偶温度传感器的测量精度很低，误差范围为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。图 8.7 给出的 15 米深处土壤温度变化在两个月内的变化为 1°C 左右，很显然热电偶不能精确测量该处的温度变化，而光纤光栅温度传感器的测量精度为 0.033°C ，在测量效果上明显优于热电偶温度传感器。而热敏电阻温度传感器随温度的变化能力强，但长期稳定性差，无法满足在恶劣环境中的工作需要。

小结

光纤光栅具有灵敏度高、抗干扰能力强、可靠性好等优点。本节介绍了利用 3 个自行研制的光纤光栅温度传感器监测地源热泵系统中地下埋管周围的土壤温度变化，该光纤光栅温度传感系统监测到的温度变化与分析相一致，并与理论计算结果进行了比较，监测数据表明，在 25 米深度范围内，温度变化的幅度随着深度的增加而降低，光纤光栅温度传感器长期稳定性好，测量精度高，优于传统的温度传感器。布设的传感系统可以对地源热泵进行长期温度监测。