

Freeze Soil and Dry Soil Automatic Observer Design

Linmao Ye¹, Zhigang Wu², Guohe Yu², Peng Li², Jin Ye², Guangzhou Zhang¹, Haibo Chen¹, Likui Shi¹

¹Henan Institute of Meteorology, Zhengzhou Henan

²Zhengzhou Aoyuan Electronic Co. Ltd., Zhengzhou Henan

Email: yjx819@163.com

Received: Apr. 2nd, 2016; accepted: Apr. 22nd, 2016; published: Apr. 25th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper introduces a permafrost soil and dry automatic observation instrument. The equipment used control unit, temperature acquisition unit and frequency acquisition unit. A frequency acquisition circuit board with a hard, capacitance and temperature acquisition unit uses flexible circuit boards. Mild soil moisture instrument is measured directly, frozen soil and dry soil thickness of these two variables is determined by a mathematical algorithm. Based on soil moisture and temperature, it determines automatically whether a certain layer is frozen soil or dry soil, and continues automatic observation.

Keywords

Freeze Soil, Dry Soil, Sensor, Thin Soft Circuit Board

冻土和干土层自动观测仪设计

冶林茂¹, 吴志刚², 余国河², 李 鹏², 冶 金², 张广周¹, 陈海波¹, 师丽魁¹

¹河南省气象科学研究所, 河南 郑州

²中原光电测控技术有限公司, 河南 郑州

Email: yjx819@163.com

收稿日期: 2016年4月2日; 录用日期: 2016年4月22日; 发布日期: 2016年4月25日

文章引用: 冶林茂, 吴志刚, 余国河, 李鹏, 冶金, 张广周, 陈海波, 师丽魁. 冻土和干土层自动观测仪设计[J]. 地球科学前沿, 2016, 6(2): 101-107. <http://dx.doi.org/10.12677/ag.2016.62013>

摘要

本文介绍了一种冻土及干土层自动观测仪器，仪器采用控制处理单元，频率采集单元和温度采集单元；频率采集电路采用硬质电路板，电容和温度采集单元采用柔性电路板，地温和土壤水分含量是仪器直接测得，冻土和干土层厚度是这两个变量通过数学算法求得，根据土壤含水量及温度，自动判断土壤某层是否冻结、是否为干土，并实现连续自动观测。

关键词

冻土，干土，传感器，柔性版

1. 引言

国内传统的测量冻土深度的一般方法是将灌满蒸馏水、两端密封的塑胶管，垂直放在埋入土中的铜管中，根据水的冻结情况来判断冻土深度，该方法实际上是观测地温 0°C 的位置，并不能准确测量冻土的位置。由于土壤质地、水溶液的成分和浓度及外界条件如压力的不同，其冻结(冰点)温度并不相同，因此该方法的观测冻土深度并不科学，而且当冻土层较深时，观测不方便、工作量大、耗时耗力，且测量数据密度不够，不能实时监测冻土深度及其发展变化情况[1]。而干土层的观测完全依靠目测，无量化标准、客观性差。

冻土深度及干土层厚度的判定需要确定土壤温度和土壤含水量。目前，自动测量土壤水分的传感器在结构工艺上大多采用插针地理式或铜环插管式，插针地理式传感器虽然能够与土壤紧密接触，但是，其安装维护特别困难，安装时需要首先挖一个剖面深坑，工作量非常大[2]。另外，一旦传感器出现问题，就需要把传感器挖出来，重新安装，而且还需要一个土壤自然沉降和仪器稳定的过程，因此大面积推广难度较大。铜环插管式传感器首先使用专用安装工具在不破坏土壤结构的前提下把防护管打入地下土壤中，铜环传感器安装在防护管内，但由于机械加工和结构设计的问题，传感器的感应部分与防护管壁很难紧密接触，会影响测量精度。而且，通常自动地温和土壤水分观测是分离的，不能自动获取冻土深度和干土层厚度。

冻土及干土层自动测量仪器是集数据采集、处理、传输于一体的智能自动观测设备。传感器包括控制处理单元、频率采集单元以及温度采集单元。为了减少测量误差，在结构工艺上采用柔性电路板设计，柔性电路板是以聚酰亚胺或聚酯薄膜为基材制成的一种具有高度可靠性，绝佳可挠性的印刷电路板，具有配线密度高、重量轻、厚度薄的特点。传感元件设计到柔性电路板上，当传感器安装到管内后，柔性电路板通过自身的张力能够与管壁紧密接触，避免了过去由于机械加工的问题而引起的传感器误差。

2. 冻土和干土层自动观测仪器

2.1. 传感器原理

冻土及干土层测量仪器主要由控制处理单元，频率采集单元以及温度采集单元组成(见图 1)。

控制处理单元包括一个嵌入式微处理器 CPU，该处理器具有多组 IO 口，具备一个 SPI 总线，一个 USART 串口，一个供电单元；包括一个 4 芯的插头一个 10 芯的排线端子；4 芯插头与采集器连接，实现供电及通讯，10 芯排线端子通过排线，与频率采集单元连接；该控制处理单元主要通过控制信号实现

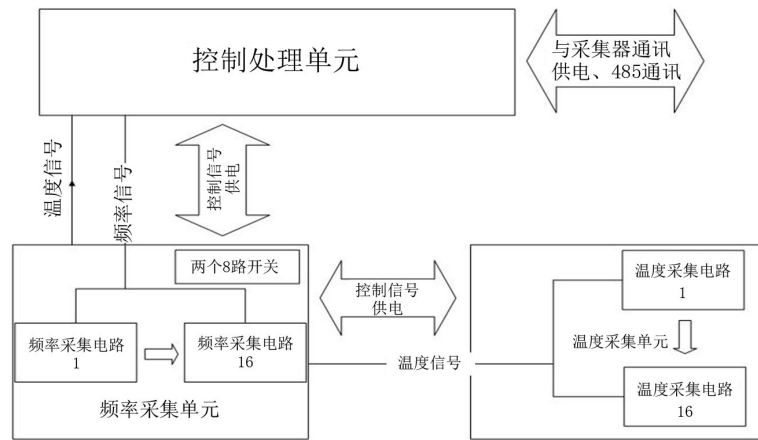


Figure 1. Block diagram of permafrost soil and dry measuring instruments
图 1. 冻土及干土层测量仪器原理框图

频率采集单元的分时供电、频率信号的最终采集、温度信号的最终采集，并最终对采集到的温度、频率信号进行处理计算，实现数据存储、传输和相应的通讯功能。

频率采集电路包括一个电源转换单元 G1，控制处理单元在采集频率前将电源 V1 供给电源转换单元 G1，1)2)连接温度采集单元的覆铜，组成电容，该电容与 L1 电感及运放 D1 组成振荡电路，频率信号经 D2 以及 D3 分频后输出至频率采集单元的 10 芯排线端子的频率信号线，最终传送至控制处理单元进行频率信号处理计算。

整个冻土及干土层测量仪器基于电容式土壤水分测量技术和半导体测温技术，结构上采用柔性电路板工艺，土壤水分和温度测量传感元件设计集成到柔性电路板上，使其与管壁紧密接触，减少因机械加工问题引起的测量误差。数据采集器基于嵌入式微处理器技术设计，实现对各层传感器的数据采样、远程命令控制、数据计算处理、质量控制、通信和传输，并通过大容量存储器扩展技术，实现数据记录的存储和传输。

土壤水分含量的测量是基于电容传感器工作原理，即土壤充当电介质，土壤含水量变化可以转换为电容量变化。我们将土壤视为由空气、水或冰及固态土组成，其中，空气的介电系数约为 1，水的介电系数则约为 80，冰的约为 3~4，固态土约为 3~8。由于电容量的变化会受介电常数的影响，当部分水与冰之间发生相变，土壤的介电系数发生变化，导致土壤总电容量的值的改变[3]。土壤水分测量传感元件主要由一对电极构成一个电容，电容与固定电感组成一个振荡电路，振荡器工作频率随土壤电容的变化而变化。因此，当土壤中的水变为冰晶时，其介电常数发生了明显的变化，传感元件测得的水分值会明显下降；而当温度上升，冻土解冻时，冰融化成水，介电系数变化，水分值会明显上升。

根据建立的冻土深度及干土层厚度判定数学模型，判定冻土及干土层需要确定土壤的冻结温度、土壤含水量、地温、冻结(融化)周期 T 和经验常数 C，其中土壤含水量、地温通过土壤水分和温度传感器测量实现；土的冻结温度、冻结(融化)周期 T 和经验常数 C 通过土壤类型冻结特性试验研究分析确定。

整个传感器由一块控制处理单元(图 2)和若干采集电路组成，采用插管式结构，在不破坏土壤结构的前提下使用专用安装工具把防护管打入地下土壤中，传感器安装在防护管内。传感器结构为硬质电路板和柔性板结合，传感器外部有热缩性保护膜，控制处理单元(图 3)处理采集单元传输来的数据并通过 RS485 总线与数据采集器通信。

振荡电路的振荡频率变化在 65 MHz~110 MHz 之间。

垂直测量分辨率为 2.5 cm 的传感器，每组传感器的传感元件的数量 16 个。

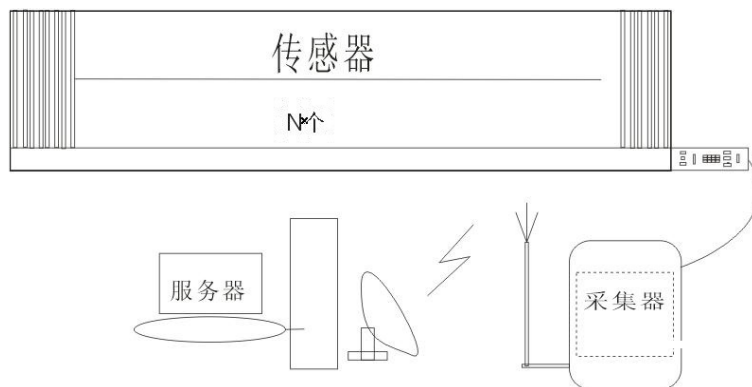


Figure 2. Dry soil and permafrost automatic observer structure diagram
图 2. 冻土及干土层自动观测仪结构示意图

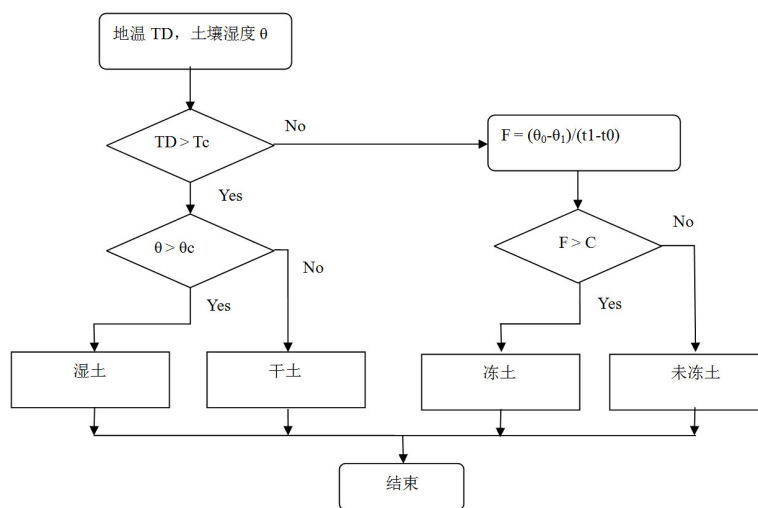


Figure 3. Flowchart of normalized frequency, soil moisture and soil temperature inversion and permafrost soil dry thickness
图 3. 归一化频率、土壤水分和地温反演冻土及干土层厚度的流程图

最终传感器采集到的数据，通过采集器传向服务器，实现数据的实时采集以及冻土及干土层厚度的判定。

2.2. 基于土壤水分、地温反演冻土及干土层厚度的数学模型

土壤含水量的变化主要是由于介电系数发生变化引起的。水的介电常数是 80，冰的约 3~4。因此，当土壤中的水变为冰晶时，其介电常数发生了明显的变化，传感器测得的水分值会明显下降，而当温度上升，冻土解冻时，水分值会明显上升。我们首先依据土壤含水量把土壤类型分为干土、湿土和冻土[4]，初步判别数学模型如下：

- a) 当 $TD > T_c$ ， $\theta \leq \theta_c$ 时，可判定为干土；而当 $\theta > \theta_c$ 时，可判定为湿土(其中：TD 为地温； T_c 为冻结温度； θ 为土壤含水量； θ_c 为凋萎湿度)；
- b) 当 $TD = T_c$ ，记录当前含水量 θ_0 和时间 t_0 ，作为后续判别的基准；
- c) 当 $TD < T_c$ ，经过一个时间周期 T ，记录当前土壤含水量 θ_1 和时间 t_1 ，然后进行计算土壤水分变化率 $F = (\theta_0 - \theta_1) / (t_1 - t_0)$ ，如果 $F > C$ (常数)，可判定为冻土，否则未冻土(其中：t 为时间；T 为周期；C 为经验常数)。

3.应用与分析

3.1. 土壤冻结过程中土壤水分变化试验及分析

在土壤冻结过程中随着温度的变化，土壤中水发生相变由水变成冰，介电常数发生强烈变化，电容值也随之变化，求得土壤含水量也随之变化，为了得到土壤中水冻结成冰过程中土壤含水量的变化曲线，并通过曲线找到土壤冻结过程土壤含水量的变化趋势，做了如下试验。

将三根电容式冻土深度测量传感器分别装置在模拟冬季环境试验室砂土、壤土和粘土三种土槽中，其中，三种土壤的初始含水量分别为 6.7%，27.2%，32.3%(试验过程中不考虑蒸发和传感器周围水分的迁移)。每 10 分钟采集一次数据，整理得到土壤冻结过程土壤水分变化曲线如图 4 所示。

从图 4 曲线分析可知，在不同的土壤类型，不同的初始土壤含水量情况下，冻结过程中不能通过土壤含水量精确确定土壤是否冻结，但能看到土壤中水结冰的过程中土壤含水量在急剧减小，说明水相变成冰后介电常数在急剧减小，当水完全结冰，即土壤完全冻结后，随着温度的降低，土壤含水量变化幅度不大，即介电常数变化幅度不大。由此可知，0℃并不能做为判定冻土的唯一条件，土壤冻结过程开始后有两种状态存在，即正冻土和已冻土[5]，在正冻土状态下判定是冻土还是未冻土要根据不同的土壤类型，结合土壤水分含量和温度变化情况综合来考虑。

3.2. 外场冻土深度试验及分析

2012 年 10 月份在黑龙江佳木斯、内蒙满洲里、青海刚察安装了三套试验设备，根据《地面气象观测规范第 14 部分冻土观测》的要求，冻土深度观测时间是从地表温度降到零度或零度以下，土壤开始冻结时，每日 08 时观测，直到次年土壤完全解冻为止。因此，取土壤冻结期内每天 08 时的传感器测量的数据与人工进行对比。分析整理了三个台站验站的机测和人工数据资料(见表 1)。其中，数据资料时间从 2012 年 10 月 04 日至 2012 年 12 月 30 日。

人工测量冻土深度值与传感器测量深度值对比曲线图如图 5、图 6、图 7 所示。从图中和表 1 中可以看到各站两组数据相关系数达 0.99 以上，佳木斯相关系数达 1.00；满洲里最大误差比较大，误差小于 5 的都在 80%以上。仪器能够很好反应冻土深度变化情况，但是，由于对比时间短，还需进一步进行试验研究。

4. 讨论

冻土和干土自动观测传感器采用电容式土壤归一化频率传感原理和半导体温度传感器结合高工艺的

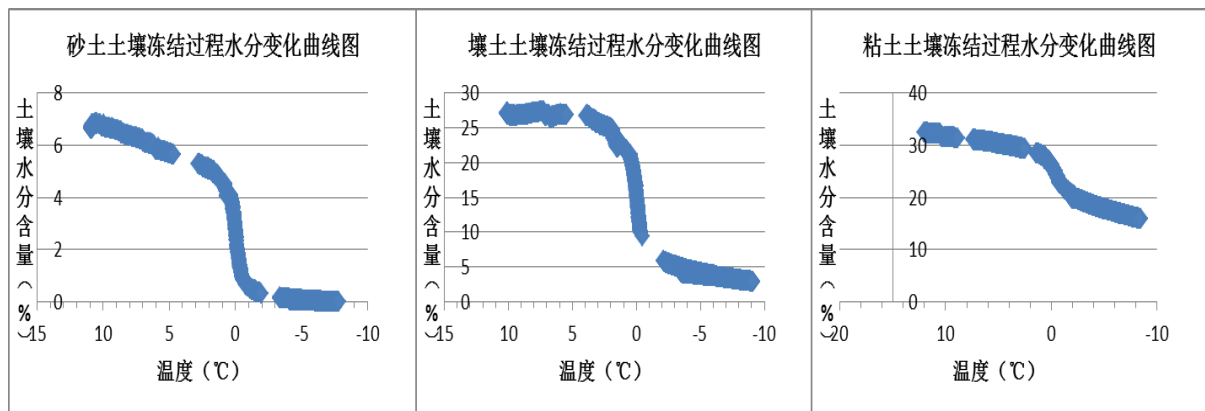


Figure 4. Soil moisture freezing process variation graph

图 4. 土壤冻结过程水分变化曲线图

Table 1. Each station is measured value and Artificial measurement error analysis table
表 1. 各台站器测值与人工测值误差分析表

| 试验站 | 样本 | 最大误差 | 最小误差 | 平均误差 | 相关系数 | 一致性 | |
|-----|-----|----------|--------|---------|------|-------------|-----------|
| | | | | | | 误差 ≤ 2.5 cm | 误差 ≤ 5 cm |
| 佳木斯 | 151 | 8.08 cm | 0.0 cm | 2.25 cm | 1.00 | 64.9% | 83.4% |
| 满洲里 | 59 | 18.05 cm | 0.0 cm | 2.13 cm | 0.99 | 74.5% | 84.7% |
| 刚 察 | 84 | 5.86 cm | 0.0 cm | 2.53 cm | 0.99 | 48.8% | 89.3% |

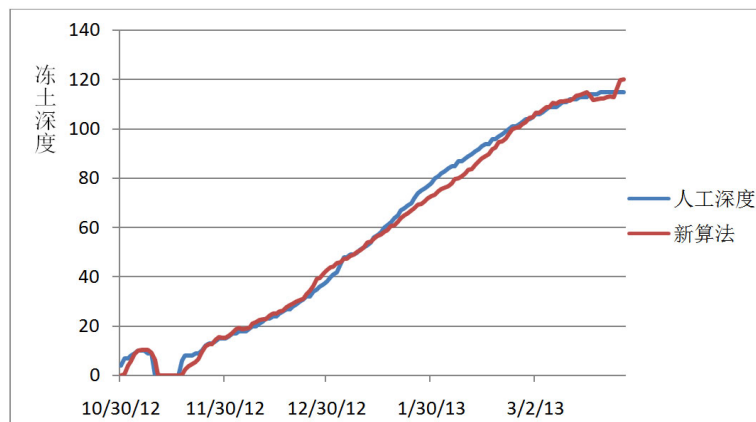


Figure 5. October 30, 2012-March 29, 2014 Jiamusi station artificial machine measured value comparison chart

图 5. 2012 年 10 月 30 日~2014 年 3 月 29 日佳木斯站人工机测值对比图

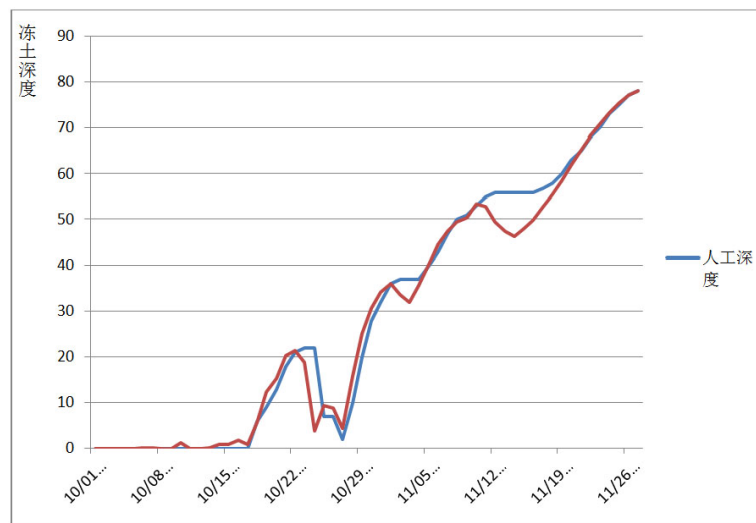


Figure 6. October 1, 2012-November 28, 2012 Manzhouli artificial machine measured value comparison chart

图 6. 2012 年 10 月 1 日~11 月 28 日满洲里人工机测值对比图

柔性版电路, 实现对冻土层和干土层的高分辨的自动观测, 它是一种冻土及干土层测量仪器, 结果表明: 测量误差小, 一致性较好, 满足气象业务对冻土深度测量技术的要求; 仪器能够连续自动观测土壤水分、地温和冻融状态变化, 减少了观测站人员工作量, 填补了我国对冻土自动测量仪器的空白。提供

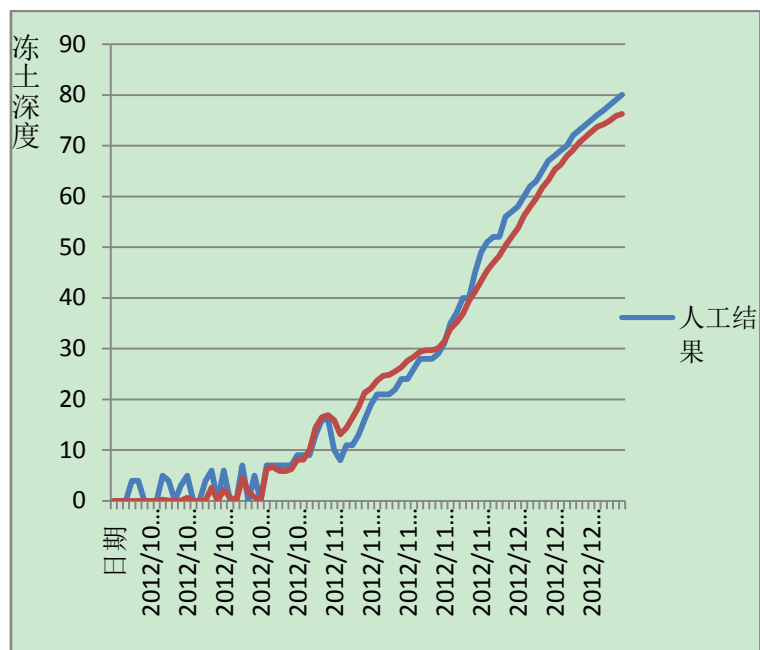


Figure 7. November 1, 2012-December 23 Gangcha artificial machine measured value comparison chart

图 7. 2012 年 11 月 1 日~12 月 23 日刚察人工机测值对比图

为农业生产管理、交通建设、气候变化研究有重大的意义。

基金项目

“公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106042)资助。

参考文献 (References)

- [1] 郭卫华, 李波, 等. FDR 系统在土壤水分连续动态监测中的应用[J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 247-248.
- [2] 王宗海, 韩秀兰, 徐长芹, Erik van der, E., et al. 造成冻土观测记录误差的原因分析[J]. 山东气象, 2006, 12(4): 49-50.
- [3] 冶林茂, 吴志刚, 等. 电容式土壤水分传感器设计与应用研究[J]. 地球科学进展, 2007, 22(特刊): 12.
- [4] 陈家宙, 陈明亮, 何圆球. 各具特色的当代土壤水分测量技术[J]. 湖北农业科学, 2001(3): 25-28.
- [5] 龚元石, 李子忠, 李春友. 利用时域反射仪测定的土壤水分估算农田蒸散量[J]. 应用气象学报, 1998, 9(1): 72-78.