

TDR 技术及其工程地质应用

史彦新 张青 孟宪玮 杨丽萍

(中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所 保定 071051)

[摘要] 时间域反射测试技术 (Time Domain Reflectometry) 是一种电子测量技术, 许多年来, 一直用于各种物体的空间定位和形态特征的测量。本文简要描述了 TDR 的原理, 介绍了其在水位监测、岩石及土壤变形监测、土壤湿度测量方面的应用, 提出了 TDR 技术应用于滑坡监测的技术方法。

[关键词] 时间域反射测试技术; 同轴电缆; 工程地质; 滑坡监测

1 前言

时间域反射测试技术 (Time Domain Reflectometry) 简称 TDR, 是一种电子测量技术, 许多年来, 一直被用于各种物体形态特征的测量和空间定位。早在三十年代, 美国的研究人员开始运用时间域反射测试技术检测通讯电缆的通断情况。在八十年代初期, 国外的研究人员将时间域反射测试技术用于工程地质勘查和监测工作, 尤其在煤田地质方面应用较为广泛, 常用于监测地下煤层和岩层的变形位移等。到九十年代中期, 美国的研究人员将时间域反射测试技术开始用于滑坡等地质灾害变形监测的研究, 针对岩石和土体滑坡曾经作过许多的试验研究^[1]。在国外, TDR 技术的应用研究已经引起研究人员的广泛关注和政府部门的极大重视; 国内在这方面的研究工作尚属于起步阶段。

2. TDR 的原理

TDR 的早期形式是雷达, 可以追溯到十九世纪三十年代, 多数人比较熟悉。雷达通常由无线电发送装置、天线和无线电接收装置三部分组成, 发射装置向外发射电磁波短脉冲, 接收装置接收从被测物体返回的反射波, 通过测量入射波与反射波的间隔时间, 就能判定该物体的空间位置; 对反射波进行细致的分析 (例如振幅分析), 可以得出更多的关于被测物体的信息。时间域反射测试 (TDR) 就是采用电缆中的“雷达”测试技术 (Andrews, 1994), 在电缆中发射脉冲信号, 同时进行反射信号的监测。

在 TDR 中, 一个脉冲波 (快速的阶跃信号) 被发射入同轴电缆 (如图 1 所示) 中, 脉冲信号在同轴电缆中传播的过程中, 能够反映同轴电缆的阻抗特性。电缆的特性阻抗是电缆固有的属性, 它取决于电缆内部的介质以及电缆的直径等因素。当电缆发生扭绞、拉长、中断等变形或者遇到象水之类的外界物质时, 它的特性阻抗将发生变化。

当测试脉冲遇到电缆的特性阻抗变化时, 就会产生反射波。对入射波与反射波进行比较, 根据二者的异常情况就可以判别同轴电缆的状态 (断路、短路以及变形等)。如果 TDR 测试脉冲信号在测试电缆中的传播速度为 V_p , 发射信号与反射信号的时间间隔为 T_d , 那么电缆至变形处的距离 d 可由式(1) 来表示

$$d = V_p \times T_d / 2 \quad (1)$$

由此可以推断出同轴电缆的状态发生变化的位置。

另外, 如果测试脉冲信号为 V_1 , 反射信号为 V_2 , 那么其反射系数为

$$\rho = V_2 / V_1 \quad (2)$$

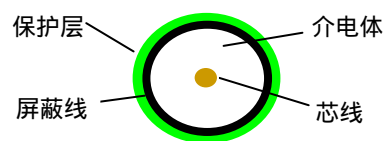


图 1 同轴电缆示意图

根据线性传输理论,可以知道:

$$\rho = \frac{R_t - R_0}{R_t + R_0} \quad (3)$$

式中: R_t — 变形后电缆的阻抗

R_0 — 变形前电缆的阻抗

由 (3)式可以得出:

$$R_t = \frac{1+\rho}{1-\rho} R_0 \quad (4)$$

因此可以得出结论: 当 $\rho = 0$ 时, $R_t = R_0$, 表示电缆的特征阻抗与电缆末端等效阻抗相匹配, 发射信号得到了很好的传输, 没有反射信号产生。当 $\rho = +1$ 时, $R_t \rightarrow \infty$, 表示电缆末端处于开路状态, 发射信号完全被反射。当 $\rho = -1$ 时, $R_t = 0$, 表示电缆末端处于短路状态, 发射信号完全被吸收。当 $-1 < \rho < +1$ ($\rho \neq 0$) 时, 表示电缆发生变形, 并且产生反射波信号。这样, 通过测量反射系数 ρ , 即测量反射信号的振幅, 就可以判定电缆变形量的大小。

3. TDR 技术在工程地质中的应用

根据 TDR 测试信号遇到电缆阻抗发生变化时, 就产生反射波的原理, 可把 TDR 用于工程地质的很多方面。

3.1 TDR 用于监测水位的变化^[2]

选择空气作填充介质的电缆, 把电缆安装在监测井内, 在空气与水的接触面, 电缆的特性阻抗会大大减小。若向电缆内发射 TDR 测试脉冲, 在空气与水的接触面处, 就会产生反射波。测量反射波的时间, 就可以推算出水位。当井内水位发生变化时, 反射波到达的时间也发生变化, 当水位上升, 反射波到达的时间提前, 当水位下降, 反射波到达的时间延长 (如图 2 所示)。这样通过监测反射信号的变化, 就可以达到监测水位的目的。

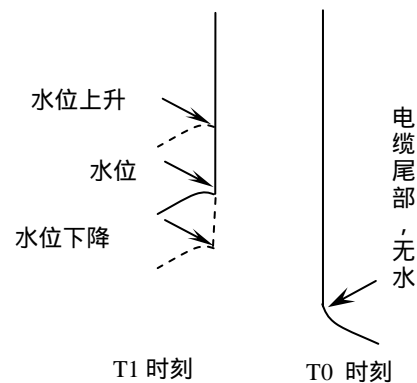


图 2 TDR 监测水位

3.2 TDR 用于监测岩石及土的变形

把电缆浇筑在钻孔中, 使之与周围地层紧密结合。当周围岩石或土发生位移时, 会对电缆进行剪切, 使电缆发生变形, 通过测量电缆变形的的位置及变形量, 就可判定周围地层发生形变的位置及位移量。

向电缆中发射 TDR 测试脉冲, 当测试脉冲遇到电缆变形处时, 就会产生反射波。通过测量反射波到达的时间和幅度, 就可知电缆变形的的位置及变形量, 进而判定周围岩石及土的变形。

3.3 TDR 用于测量土壤湿度^[3]

TDR 用于测量土壤湿度, 是基于电缆中 TDR 测试信号的传播速度对电缆所接触的外界环境很敏感的特性。由于水、空气、土壤颗粒的相对介电常数有很大差别, 所以含水率不同的土壤, 其介电常数是不同的, TDR 信号在其中传播的速度也就不同。通过测量 TDR 反射波到达的时间, 又已知同轴电缆传感器探杆的长度, 就可求出 TDR 信号的传播速度, 进而求出土壤的介电常数, 这样, 根据土壤介电常数与含水率的对应关系, 就可以确定土壤的湿度。

4. TDR 用于滑坡监测

在自然地质作用和人类活动造成了地质环境恶化的条件下,斜坡发生变形破坏乃至整体移动就会产生滑坡。为了分析滑坡的形成机理、活动状态及其发展趋势,位移与变形的长期观测是滑坡动态监测的重要组成部分。由于 TDR 技术可用于监测岩石及土的变形,因此采用 TDR 技术对滑坡进行监测,就可以了解和掌握滑坡深部的位移与变形的动态变化过程。从理论上来说,TDR 技术可以完成大量程的滑坡监测,其量程的大小只与测试电缆的特性有关,与监测钻孔的受损坏程度无关。

在滑坡的长期监测过程中,根据滑坡的实际情况,用钻孔打穿滑动面后直达稳定的地层,并且将同轴电缆放入监测钻孔,然后回填钻孔,使同轴电缆与周围地层紧密结合,对滑坡进行深部定位监测,以确定滑动面位置及其上部不同深度滑坡体的位移动态(如图 3 所示)。

在安放好测试电缆之后,滑坡体一旦产生滑移,其位移就会引起电缆产生形变,电缆变形导致电缆阻抗特性的变化,这时,安装在地面的滑坡监测系统对钻孔内测试电缆的这种形变进行监测。在发射测试脉冲信号的同时,对反射波信号进行数据自动采集,通过对监测数据(包括时间和幅度等)进行分析和自动处理,就能得到电缆变形处地层的变化过程,实现对滑坡的动态监测,为滑坡预测、预报、评价以及防治研究等提供可靠的数据基础。

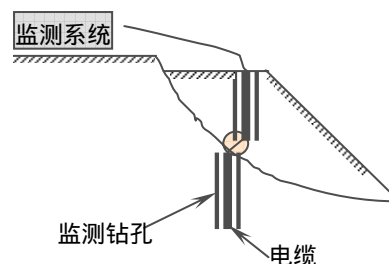


图 3 TDR 滑坡监测示意图

5. 结束语

由上可见,根据 TDR 技术的基本原理,可将其用于工程地质的许多方面。中国地质调查局水文地质工程地质研究所潜心研究 TDR 技术原理的基础上,研制了 TDR 滑坡监测系统,并应用到长江三峡地质灾害监测的实际工程中,取得了不错的效果。

参考文献:

- [1] 张青,史彦新,TDR 滑坡监测技术的研究.中国地质灾害与防治学报,2001,6(2).
- [2] 史彦新,张青,TDR 技术监测地下水位.严重缺水地区地下水勘查论文集(第 2 集),地质出版社出版,2003,12.
- [3] 孙玉龙,郝振纯,TDR 技术及其在土壤水分及土壤溶质测定方面的应用,灌溉排水,2000,2.