

Study of the Mechanism of Parallel Helical Sensing Cable Used for Rock Mass Deformation Distributed Measurement*

WU Xiushan¹, TONG Renyuan², Li Qing^{2*}

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China;

2. China Jiliang University, National Joint Engineering Laboratory for Disaster Monitoring Technology and Instruments, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A kind of parallel helical sensing cable was proposed as a sensing cable for distributed measurement of rock mass deformation. The stretched structure model of distribution parameters for designed parallel helical sensing cable was established to derive the theoretical formula and fitting curve from the stretched deformation and characteristic impedance. The positioning measurement of the rock mass deformation was realized based on change of measured characteristic impedance by the host computer program, the stretched deformation variable was obtained according to the fitting curve, and the amount of stretched deformation was calculated. In order to verify the correctness of the theoretical analysis, the multi-point stretching positioning and deformation measurement experiment of parallel helical sensing cable were carried out on the designed tensile measurement system based on the time domain reflection technique. The measurement results are in good agreement with the theoretical calculation results which provides a powerful theoretical analysis and experimental verification for the application of parallel spiral transmission lines in distributed measurement of rock mass.

Key words: rock mass deformation; parallel helical sensing cable; TDR; distributed parameter; characteristic impedance
EEACC: 7730 doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2020.01.010

平行螺旋传输线用于岩土形变分布式测量的机理研究*

吴秀山¹, 童仁园², 李青^{2*}

(1. 浙江水利水电学院电气工程学院, 杭州 310018; 2. 中国计量大学, 灾害监测技术与仪器国家地方联合工程实验室, 杭州 310018)

摘要: 提出了一种平行螺旋传输线作为传感电缆用于岩土形变位移的分布式测量, 基于建立的拉伸分布参数模型, 推导了传感电缆特性阻抗与岩土拉伸量的关系并给出了拟合函数。根据编写的上位机程序计算出其特性阻抗的变化从而实现了岩土拉伸位置的定位测量, 再利用拟合函数, 确定拉伸量的大小, 最终求得岩土形变的拉伸总量。为了验证理论分析的正确性, 设计了基于时域反射技术的形变测量系统, 对平行螺旋传输线进行了局部多点拉伸的定位及形变测量实验, 实验测量结果和理论计算结果吻合度很好, 为平行螺旋传输线在岩土形变分布式测量的应用提供了有力的理论分析和实验验证。

关键词: 岩土形变; 平行螺旋传输线; 时域反射法; 分布参数; 特性阻抗

中图分类号: TH762

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2020)01-0051-06

近年来, 全球气候变化异常, 地震活跃地带的滑坡、泥石流及其他自然地质灾害频繁发生, 这些都严重威胁着人类的生命安全和经济安全^[1]。地质灾害的监测与预测依然是人们亟需解决的问题, 为了使地质灾害的发生得到监测、控制及预测, 人们提出了基于地表形变量、地下形变量、土壤含水率、坡体倾斜角及降雨强度等多种物理量单一或者融合的监测手段, 而岩土形变量是重要测量物理量之一。当前岩土形变位移量的监测传感技术主要有遥感技术^[2-3]、导航卫星定位技术^[4-6]、全站仪观测技

术^[7-9]、拉线位移传感技术^[10-11]、同轴电缆形变传感技术^[12-14]、光纤形变传感技术^[15]和平行螺旋传输线形变传感技术等。前三种的测量方法测量范围广, 精度可达到 1 mm, 但是容易受植被的影响; 拉线位移传感技术测量精度较高, 但是抗干扰能力较差。一般小于 2 mm 微小形变的分布式测量常采用分布式光纤测量技术, 但是针对岩土的相对较大形变的分布式测量目前还缺少类似的传感方法和元件, 文章提出了一种利用平行螺旋传输线作为分布式传感器用于岩土较大形变量的测量, 并且实现了地表或

项目来源: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804604, 2017YFF0205501)

收稿日期: 2019-07-28 修改日期: 2019-11-25

地下发生的形变的位置确定和形变的大小测量,可用于滑坡、塌陷等形变量较大的位移测量场合,是一种经济易于实现的测量方法。与同轴电缆相比,两者均能实现形变位置的精确定位;与同轴电缆不同的是,它可以测量横向的拉伸形变,且测量范围更大,平行螺旋传输线的可拉伸量约为自身尺寸的一半,所以对平行螺旋传输线对于岩土形变机理的研究显得非常重要。

本文通过两条平行螺旋传输线实现岩土拉伸的分布式测量,即实现拉伸位置定位测量和拉伸总量的测量,提出了两条平行螺旋传输线分布参数的求解模型、分布参数的求解方法,从而得到了螺旋传输线特性阻抗与岩土拉伸量的理论公式和拟合函数;上位机程序基于时域反射技术测量的特性阻抗^[15],根据特性阻抗的变化实现岩土拉伸位置的定位测量;再利用拟合函数,确定拉伸量的大小,进一步根据拉伸区间的线圈圈数最终得到岩土拉伸总量。通过建立的测量实验平台,进行了拉伸的定位测量和拉伸量的测量实验,实验结果验证了平行螺旋传输线用于岩土形变分布式测量的有效性。

1 传输线的结构

两条平行螺旋传输线由中心硅胶条、硅胶外皮包裹的两条中间粘连的导线和外层硅胶保护套组成^[16]。两条导线中间粘连为了保证两根导线导体之间的距离保持一定,由于硅胶材质具有一定的弹性,且平行铜导线是螺旋密绕在中心硅胶条上的,因此平行螺旋传输线具有可拉伸量大的特点,其实物如图 1(a)所示,结构示意图为 1(b),之所以称为平行螺旋传输线是因为两条螺旋导线始终处于平行状态。用来制作平行螺旋传

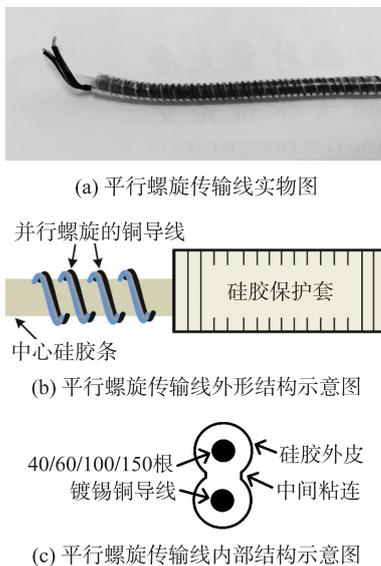


图 1 平行螺旋传输线

输线导线的中间导体分别为 40 根/60 根/100 根/150 根直径 0.08 mm 的镀锡铜丝绕制而成,材料的电阻率 ρ 为 $0.018\ 51\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$,等效半径 r 分别为 0.253 mm、0.310 mm、0.400 mm 和 0.490 mm,其内部结构示意图如 1(c)所示。

2 平行螺旋传输线传感原理分析

平行螺旋传输线作为岩土形变分布式测量的传感元件,将平行螺旋传输线沿山体铺设后,如无地质形变发生,所有参数固定不变,其特性阻抗也将不会变化;而一旦其局部被拉伸,就会引起该处结构的变化,从而导致该处其特性阻抗发生变化,特性阻抗变化能够准确反映出拉伸位置和拉伸量的大小,那么便实现了拉伸形变到特性阻抗的传感,从而实现地表或地下发生形变的位置确定和形变量的测量。为了解螺旋传输线特性阻抗与拉伸形变位置、拉伸形变量之间的关系,需建立螺旋传输线拉伸时分布参数的求解模型,从而得到分布电容和分布电感,进一步的得到螺旋传输线的特性阻抗与拉伸量的理论公式和拟合函数。

截取一段处于拉伸区域的平行螺旋传输线,建立的拉伸形变模型如图 2 所示, A 与 B 分别表示两条螺旋平行线,下标 R 和 L 分别表示左边和右边,下标数字表示左右螺旋线的条数。两根中间粘连的螺旋线导体之间的距离固定为 $d = 1.6\ \text{mm}$;中心硅胶条的直径 $D = 4.6\ \text{mm}$,相对介电常数 $\epsilon = 5.5$;每根平行线绕制的螺旋传输线与垂直方向的夹角 $\theta = 30^\circ$ 。平行线绕制的螺旋传输线导程 p 为 $(d+s)$, s 的初始值等于 d , s 随拉伸而逐渐变大,导程值也随之逐渐增大,理想情况下其他参数不会随拉伸变形产生变化。平行螺旋传输线在拉伸时,中间为拉伸区域, s 为最大值,往左右两边经渐变区域逐渐变为正常未被拉伸区域,渐变区域与未被拉伸区域未在图 2 中标出。

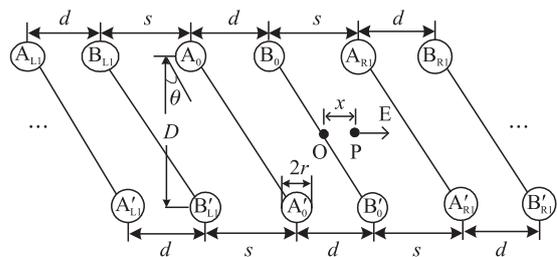


图 2 平行螺旋传输线分布参数计算模型

当传输线中加入入射信号时,假设两条导线为均匀带电导线,其电荷线密度分别为 $-\eta$ 与 η ,选取位于拉伸中心区域 B_0 和 A_{R1} 之间离 B_0 距离 x 处任

意一点 P , 根据毕奥-萨伐尔定理^[17-18], 带电均匀导线产生的垂直于该导线的径矢量方向的电场强度如图 3 所示, 其 $E_{B_0\beta_0}$ 值为:

$$E_{B_0\beta_0} = \frac{\eta}{2\pi\epsilon} \frac{L_p}{x\sqrt{x^2+L_p^2}} \quad (1)$$

式(1)中: ϵ 为介质的相对介电常数, $L_p = D/2\cos\theta$ 。

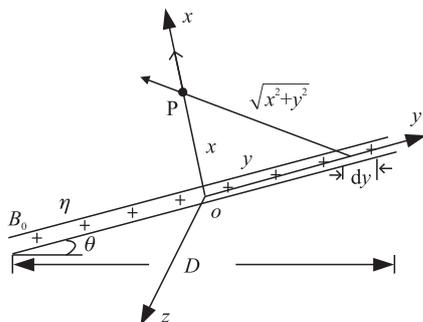


图 3 电场强度分布示意图

根据叠加定理所有的带电螺旋线在 P 点产生的电场强度为:

$$E = E_{AL} + E_{BR} + E_{BL} + E_{AR} \quad (2)$$

式中: 等式右侧下标第一个字母表示螺旋线为 A 或 B , 下标第二个字母表示螺旋线位置位于 P 点的左侧(L)或右侧(R)。

根据式(1), 式(2)中右边 4 项电场强度求解结果分别为:

$$E_{AL} = -\frac{\eta L_p}{2\pi\epsilon} \sum_{i=0}^K \frac{1}{[i(s+d)+d+x]} \times \frac{1}{\sqrt{[i(s+d)+d+x]^2+L_p^2}} \quad (3a)$$

$$E_{BL} = \frac{\eta L_p}{2\pi\epsilon} \sum_{i=0}^K \frac{1}{[i(s+d)+x]} \times \frac{1}{\sqrt{[i(s+d)+x]^2+L_p^2}} \quad (3b)$$

$$E_{AR} = \frac{\eta L_p}{2\pi\epsilon} \sum_{i=0}^K \frac{1}{[i(s+d)+s-x]} \times \frac{1}{\sqrt{[i(s+d)+s-x]^2+L_p^2}} \quad (3c)$$

$$E_{BR} = -\frac{\eta L_p}{2\pi\epsilon} \sum_{i=0}^K \frac{1}{[(i+1)(s+d)-x]} \times \frac{1}{\sqrt{[(i+1)(s+d)-x]^2+L_p^2}} \quad (3d)$$

式中: K 为 P 点左右两侧所有的螺旋线条数。

根据高斯定理可得 B_0 和 A_{R1} 之间的电压为:

$$U = \int_r^{s-r} E dx = \frac{\eta}{2\pi\epsilon} (-\zeta_{AL} + \zeta_{BL} + \zeta_{AR} - \zeta_{BR}) \quad (4)$$

为了简化计算并保证一定的计算精度, 现取 $K=3$, 则有:

$$\zeta_{AL} = \zeta_{BR} = \sum_{i=0}^3 \ln \frac{\sqrt{[(i+1)(s+d)-r]^2+L_p^2}-L_p}{\sqrt{[i(s+d)+(d+r)]^2+L_p^2}-L_p} \times \frac{i(s+d)+d+r}{(i+1)(s+d)-r} \quad (5a)$$

$$\zeta_{AR} = \zeta_{BL} = \sum_{i=0}^3 \ln \frac{\sqrt{[i(s+d)+s-r]^2+L_p^2}-L_p}{\sqrt{[i(s+d)+r]^2+L_p^2}-L_p} \times \frac{i(s+d)+r}{i(s+d)+s-r} \quad (5b)$$

根据两根单位长度导线间的电容为两导线之间的电荷密度与电压之比, 得到分布电容为:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\eta}{U} = \frac{\pi\epsilon}{(\zeta_{AR} - \zeta_{AL})} \quad (6)$$

根据本构参数(μ, ϵ)的媒介中电感电容的公式 $LC = \mu\epsilon$, 即可以得到分布电感, 即分布电感表达式为:

$$L = \frac{\mu}{\pi} \times (\zeta_{AR} - \zeta_{AL}) \quad (7)$$

式中: μ 为相对磁导率。

对于平行螺旋线理想的认为低损耗传输线^[19], 其特性阻抗表达式为:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \times \frac{\zeta_{AR} - \zeta_{AL}}{\pi} \quad (8)$$

从式(8)可得平行螺旋传输线的特性阻抗仅与其结构特征参数($r, d, D, \theta, \epsilon, \mu$)有关。

将螺旋线的结构特征参数 $d = 1.6 \text{ mm}$ 、 $D = 4.6 \text{ mm}$ 、 $r = 0.253 \text{ mm}/0.310 \text{ mm}/0.400 \text{ mm}/0.490 \text{ mm}$ 、 $\theta = 30^\circ$ 、 $\epsilon = 5.5$ 及 $\mu = 1$ 全部代入式(8), 得到的四种规格的螺旋传输线被拉伸的特性阻抗 Z 随 s 变化的规律如图 4 所示。从图 4 中可得, 随着拉伸量 s 的增大, 特性阻抗逐渐增大, 但是增大的趋势逐渐减小。当拉伸量 s 为固定值时, 传输线的特性阻抗在拉伸区域中间点为最大值, 经渐变区域逐步减小为未被拉伸区域的正常值^[20]。

时域反射技术是基于测量的特性阻抗来确定拉伸量 s , 那就需要得到理论式(8)的反函数, 但是式

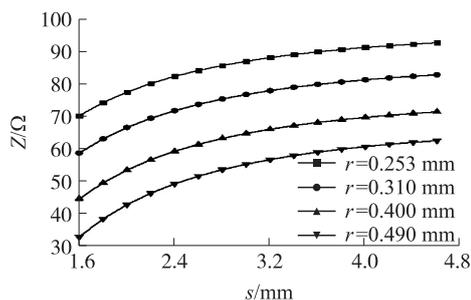


图 4 4 种螺旋传输线特性阻抗随 s 变化的曲线

(8)很复杂,为便于实际应用和计算,将图 4 中特性阻抗随拉伸量 s 的关系采用函数拟合的方法进行处理,拟合函数可采用幂函数或倒指数函数形式,经过比较倒指数函数的残差平方和更小,因此采用倒指数函数形式作为拟合曲线模型,得到的拟合公式为:

$$s = \frac{a}{\ln\left(\frac{Z+b}{c}\right)} \quad (9)$$

式中: a, b 与 c 为拟合系数,对于图 4 中 $r=0.253$ mm 时拟合系数为: $a=4.046, b=-97.200$ 及 $c=-3.525$ 。根据式(9),利用时域反射技术测量的特性阻抗就可以确定拉伸量。

3 实验平台及分布式测量方法

为了验证图 4 所示的平行螺旋传输线在拉伸形变时特性阻抗的变化规律并实现对拉伸量的分布式测量,需进行平行螺旋传输线模拟岩土形变拉伸测量实验,建立的基于时域反射技术的平行螺旋传输线的形变分布式测量系统包含时域反射测量平台、平行螺旋传输线拉伸装置和上位机三部分。时域反射测量平台主要由泰克的 DSA8300 构成,该测量仪器获取平行螺旋传输线的反射电压信号,进一步转换成特性阻抗并将其发送给上位机;平行螺旋传输线拉伸装置模拟平行螺旋传输线埋设于岩土中的情况,将岩土形变量反映到平行螺旋传输线的拉伸位移上,该装置主要由机械结构和步进电机控制两部分组成,装置如图 5 所示;上位机根据接收的测量数据实现拉伸位置定位和拉伸量计算,上位机软件的流程图如图 6 所示^[21]。要完成平行螺旋传输线局部拉伸形变量测量,就需要先确定螺旋线拉伸位置与结构状态,在已知平行螺旋传输线初始状态的情况下,通过测量的形变区域的特性阻抗的最大值再根据式(9)求得拉伸区域的拉伸量 s ,在一个局部区间进行拉伸时,忽略渐变区域,根据拉伸区间内平行螺旋传输线的圈数 N ,那该区间的总的拉伸形变



图 5 平行螺旋传输线拉伸实验平台

总量为 $N(s-d)$ 。

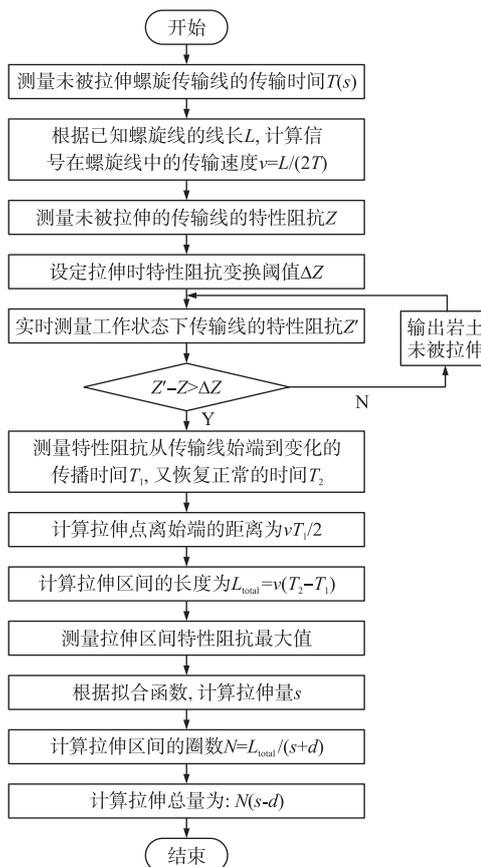


图 6 岩土形变分布式测量的流程图

4 实验验证

4.1 定位测量实验

使用建立好的形变拉伸测量系统进行多点拉伸定位实验,选择特征参数为 $d=1.6$ mm、 $D=4.6$ mm、 $r=0.253$ mm、 $\theta=30^\circ$ 、 $\varepsilon=5.5$ 及 $\mu=1$,长度为 6.6 m 一条平行螺旋传输线用于拉伸实验,拉伸点设定为距离始端 2.0 m、3.5 m 和 5.0 m 位置处,拉伸时选择拉伸点的前后各 70 mm 处进行固定,然后在该区间位置进行局部拉伸,拉伸总量固定为 20 mm,末端开路,多点拉伸的定位实验如图 7 所示,表 1 为随机选择的一组多点定位测量结果,其引用误差为测量的绝对误差与线长 6.6 m 的百分比,测量精度等级能够保持在 0.2 级。

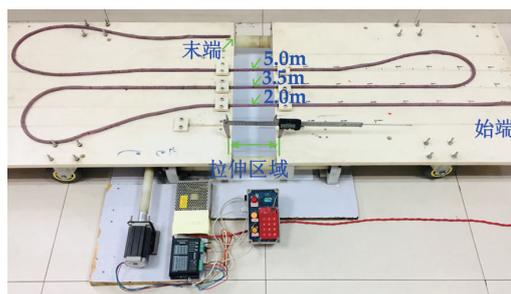


图 7 定位测量实验图

表 1 平行螺旋传输线多点定位测量结果

拉伸位置/m	测量结果/m	绝对误差/mm	引用误差/%
2.000	1.993	-7	-0.106
3.500	3.501	1	0.015
5.000	5.006	6	0.091

4.2 局部拉伸量测量

仍采用 6.6 m 长的平行螺旋传输线 ($d=1.6\text{ mm}$ 、 $D=4.6\text{ mm}$ 、 $r=0.253\text{ mm}$ 、 $\theta=30^\circ$ 、 $\varepsilon=5.5$ 及 $\mu=1$) 进行局部拉伸形变测量,选择 2.5 m 和 4.5 m 位置的前后各 10 cm 区间进行固定。拉伸总量从 0 mm 每次递增 5 mm,拉伸总量到 50 mm,将每次测量的特性阻抗曲线叠加后的效果图如图 8 所示,将 2.5 m 和 4.5 m 处的特性阻抗曲线放大,从图中可得两处拉伸位置的特性阻抗都随着拉伸量的增加而增加,在中间点处特性阻抗最大,往左右两边逐渐减小为未被拉伸的正常值,测量的波形与理论分析相吻合。

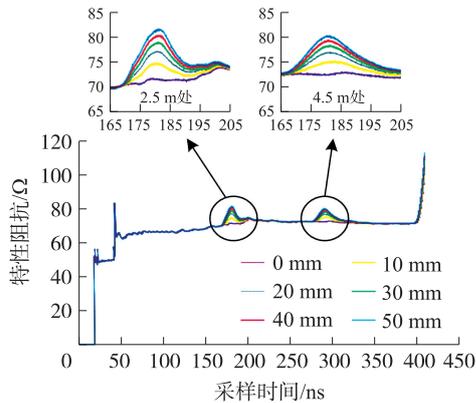


图 8 拉伸时的特性阻抗采样值

多次测量的实验数据中选取一组如表 2 所示。

表 2 平行螺旋传输线局部拉伸形变测量结果

设定的拉伸总量/mm	拉伸量/mm	拉伸位置/m	Z_{MAX}/Ω	测量结果/mm	绝对误差/mm
5	1.68	2.50	72.96	4.879	-0.121
		4.50	73.79	3.944	-1.056
10	1.76	2.50	74.52	9.601	-0.399
		4.50	74.83	9.081	-0.919
15	1.84	2.50	75.81	14.112	-0.888
		4.50	75.89	15.806	0.806
20	1.92	2.50	76.96	18.959	-1.041
		4.50	76.76	21.221	1.221
25	2.00	2.50	77.77	23.593	-1.407
		4.50	77.46	26.147	1.147
30	2.08	2.50	78.67	28.785	-1.215
		4.50	78.21	31.47	1.470
35	2.16	2.50	79.46	33.566	-1.434
		4.50	78.57	36.747	1.747
40	2.24	2.50	80.17	38.478	-1.522
		4.50	79.14	41.964	1.964
45	2.32	2.50	80.94	43.196	-1.804
		4.50	79.66	47.415	2.415
50	2.40	2.50	81.37	47.740	-2.260
		4.50	80.05	52.820	2.820

从表 2 中可得两处拉伸位置的特性阻抗都随着拉伸量的增加而增加,当拉伸量较小时,误差在 2 mm 之内,随着拉伸量变大,误差有所增大,在 5 mm ~ 50 mm 拉伸区间内均小于 3 mm。将拉伸量及螺旋传输线的特征参数代入式(8),计算得到的最大特性阻抗与测量的最大特性阻抗对比结果如图 9 所示,从图中可得测量结果与理论计算结果吻合度很高,从而验证了测量方法及步骤与公式推导的正确性。

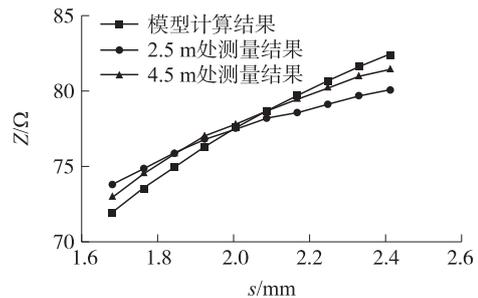


图 9 2.5 m 与 4.5 m 处测量的特性阻抗与理论值的比较

5 结论

本文对平行螺旋传输线用于岩土形变的分布式测量机理进行了研究,实验验证了设计的平行螺旋传输线用于岩土分布式测量的有效性。设计了平行螺旋传输线用于岩土形变的分布式测量,建立了平行螺旋传输线的分布参数求解的模型,并求解了平行螺旋传输线的分布电容和分布电感,进一步求得了螺旋传输线的特性阻抗的理论公式和拟合公式,测量结果和理论结果吻合较好,验证了理论分析的正确性。平行螺旋传输线的特性阻抗随着拉伸量的增大而逐步增大,但是随着 s 的增大其增大趋势逐渐减小。平行螺旋传输线的特性阻抗随着导线的等效直径增大而逐渐减小。平行螺旋传输线在拉伸时,拉伸区域中间点的特性阻抗最大,拉伸量经渐变区域逐渐过渡到未被拉伸的正常区域,特性阻抗也逐步减小到未被拉伸区域时的初始值。

参考文献:

[1] 陈红旗. 四川茂县“6·24”特大山体滑坡灾害[J]. 中国地质灾害与防治学报,2017,3:51-52.

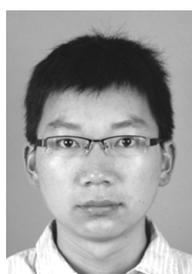
[2] Martire D D, Iglesias R, Monells D, et al. Comparison Between Differential SAR Interferometry and Ground Measurements Data in the Displacement Monitoring of the Earth-dam of Conza Della Campania (Italy) [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 148 (S2): 58-69.

[3] Tapete D, Casagli N, Luzi G, et al. Integrating Radar and Laser-Based Remote Sensing Techniques for Monitoring Structural Deformation of Archaeological Monuments [J]. Journal of Archaeological Science, 2013, 40(1): 176-189.

- [4] Yigit C O, Coskun M Z, Yavasoglu H, et al. The Potential of GPS Precise Point Positioning Method for Point Displacement Monitoring: A Case Study[J]. *Measurement*, 2016, 91: 398–404.
- [5] Yigit C O. Experimental Assessment of Post-Processed Kinematic Precise Point Positioning Method for Structural Health Monitoring [J]. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 2016, 7(1): 360–383.
- [6] Xu Y, Brownjohn J M W, Hester D, et al. Long-Span Bridges: Enhanced Data Fusion of GPS Displacement and Deck Accelerations [J]. *Engineering Structures*, 2017, 147: 639–651.
- [7] Kang G C, Kim B J, Hong S W, et al. Improving Reliabilities of Dam Displacement Based on Monitoring Given Points by Total Station [J]. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, 2017, 16(1): 1–8.
- [8] Luo Y, Chen J, Xi W, et al. Analysis of Tunnel Displacement Accuracy with Total Station [J]. *Measurement*, 2016, 83: 29–37.
- [9] Faggion P L, Veiga L A K, Silva T F. Application of Total Stations for the Determination of Relative Displacements in Laboratory [J]. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 2013, 19(1): 34–44.
- [10] 黄圣伟, 魏世玉, 谢吉恩. 拉线式地表位移监测系统在许家坪滑坡监测中的应用 [J]. *科技创新与应用*, 2016, 10: 147–147.
- [11] Li Y H, Xu S D, Liu J P. A New Convergence Monitoring System for Tunnel or Drift based on Draw-Wire Displacement Sensors [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 49: 92–97.
- [12] Lin C P, Tang S H, Lin W C, et al. Quantification of Cable Deformation with Time Domain Reflectometry—Implications to Landslide Monitoring [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(1): 143–152.
- [13] Suits L D, Sheahan T C, Lin C P, et al. Comprehensive Wave Propagation Model to Improve TDR Interpretations for Geotechnical Applications [J]. *Asm Geotechnical Testing Journal*, 2007, 30(2): 90–97.
- [14] Grecksch G, Hans-Joachim Kumpel. Statistical Analysis of Strong-Motion Accelerograms and its Application to Earthquake Early-Warning Systems [J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 129(1): 113–123.
- [15] Aghda S M Fatemi, GanjaliPour K, Nabiollahi K. Assessing the Accuracy of TDR-Based Water Leak Detection System [J]. *Results in Physics*, 2018, 8: 939–948.
- [16] Bishop J A, Pommerenke D J, Chen G. A Rapid Acquisition Electrical Time-Domain Reflectometer for Dynamic Structure Analysis [J]. *IEEE Transaction on Instrumentation & Measurement*. 2010, 60(2): 655–661.
- [17] Griffiths, David J, Heald, et al. Time-Dependent Generalizations of the Biot-Savart and Coulomb Laws [J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1991, 59(2): 111–117.
- [18] De M e S R, Cougo-Pinto M V, Farina C, et al. Multipole Radiation Fields from the Jefimenko Equation for the Magnetic Field and the Panofsky-Phillips Equation for the Electric Field [J]. *American Journal of Physics*, 2009, 77(1): 67–0.
- [19] Lin Y S, Chen I H, Ho S C, et al. Applying Time Domain Reflectometry to Quantification of Slope Deformation by Shear Failure in a Landslide [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(5): 123–133.
- [20] Tong R Y, Ming L, Li Q. Study on Elastic Helical TDR Sensing Cable for Distributed Deformation Detection [J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 9586–9602.
- [21] Todoroki A, Kurokawa H, Mizutani Y, et al. Self-Sensing Time Domain Reflectometry Method for Damage Monitoring of a CFRP Plate Using a Narrow-Strip Transmission Line [J]. *Composites Part B—Engineering*, 2014, 58: 59–65.



吴秀山(1974–),男,浙江水利水电学院副教授,硕士生导师,主要从事检测技术及自动化装置的教学科研工作, wuxs@zjweu.edu.cn;



童仁园(1984–),男,中国计量大学讲师,博士,硕士生导师,主要从事传感检测技术及自动化装置的教学科研工作, tongrenyuan@126.com;



李青(1955–),男,中国计量大学教授,硕士生导师,主要科研方向为动态测量与控制、传感技术, lq13306532957@163.com。