



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 106918604 B

(45) 授权公告日 2023.03.10

(21) 申请号 201710288983.7  
 (22) 申请日 2017.04.27  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 106918604 A  
 (43) 申请公布日 2017.07.04  
 (73) 专利权人 重庆交通大学  
 地址 400074 重庆市南岸区学府大道66号  
 (72) 发明人 周建庭 廖棱 张洪 赵瑞强  
 屈英豪 庞草原  
 (74) 专利代理机构 重庆博凯知识产权代理有限公司 50212  
 专利代理师 黄河

CN 104297265 A, 2015.01.21  
 CN 102262096 A, 2011.11.30  
 CN 102313680 A, 2012.01.11  
 CN 102084538 A, 2011.06.01  
 CN 103984837 A, 2014.08.13  
 US 5185579 A, 1993.02.09  
 US 2016344156 A1, 2016.11.24  
 US 4123703 A, 1978.10.31  
 EP 2538192 A1, 2012.12.26  
 US 2009007678 A1, 2009.01.08  
 US 4471294 A, 1984.09.11  
 US 2017045571 A1, 2017.02.16  
 US 6873827 B1, 2005.03.29

(51) Int. Cl.  
 G01N 22/02 (2006.01)

(56) 对比文件  
 CN 206818638 U, 2017.12.29  
 CN 103278558 A, 2013.09.04  
 CN 103163211 A, 2013.06.19  
 CN 104407045 A, 2015.03.11  
 CN 106248681 A, 2016.12.21  
 CN 103499591 A, 2014.01.08  
 CN 1375694 A, 2002.10.23

Mathew Legg等.Increased range of ultrasonic guided wave testing of overhead transmission line cables using dispersion compensation.《Ultrasonics》.2015,第62卷

武新军等.斜拉桥线索缺陷检测系统的研制.《机械科学与技术》.2001,第901-904页.

覃新育.磁通量传感器在柳州文惠桥吊索监测中的应用.《煤炭技术》.2008,

审查员 宋钦剑

权利要求书3页 说明书9页 附图2页

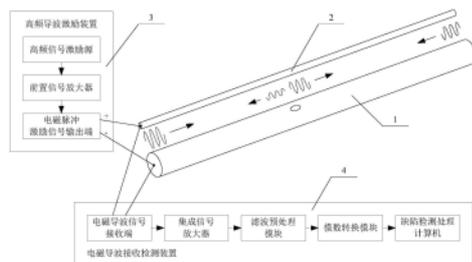
(54) 发明名称

基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统及其检测方法

(57) 摘要

本发明提供了一种基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统及其检测方法,该拉索缺陷检测系统的整体结构设计较为简单,不需要使用高精密度设备和仪器,硬件设备成本低廉,检测操作流程简单方便,并且能够采用高频的激励源用以产生高频的电磁导波进行检测,大幅延长了检测的有效范围,并且具有稳定性好、抗干扰能力强的优点;该拉索缺陷检测系统结合其检测方法,不需要利用探测设备对拉索进行扫描探测,也不会产生辐射污染,检测过程简单、快速,并且

受温度、湿度等环境因素的影响小,其检测结果能够用以准确的确定被检测拉索上各个缺陷处的具体所在位置,并较为真实、客观的反映被检测拉索上相应缺陷处的损伤程度,具有很好的技术推广应用价值。



CN 106918604 B

1. 基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统,其特征在于,包括临近并平行于被检测拉索方向拉伸布置的拉索外部输电线,且拉索外部输电线与被检测拉索的起始端和延伸末端均对齐设置,使得拉索外部输电线和被检测拉索构成平行双线传输线结构;还包括用于输出高频且频率固定的电磁脉冲激励信号的高频电磁脉冲激励装置,以及用于进行拉索缺陷检测的电磁导波接收检测装置;所述高频电磁脉冲激励装置的激励信号输出端的正极端子和负极端子分别与拉索外部输电线和被检测拉索的起始端进行电连接,使得拉索外部输电线和被检测拉索被高频电磁脉冲激励装置施加电磁脉冲激励信号后,能够在拉索外部输电线与被检测拉索之间产生沿被检测拉索延伸方向传播的电磁导波,且拉索外部输电线和被检测拉索的延伸末端保持开路;所述电磁导波接收检测装置的电磁导波信号接收端的两个接收端子并联在高频电磁脉冲激励装置的激励信号输出端的正极端子和负极端子,用于通过电磁导波信号接收端接收高频电磁脉冲激励装置输出的电磁脉冲激励信号以及被检测拉索上电磁导波传播过程中被反射的电磁导波回波信号,且根据电磁脉冲激励信号与电磁导波回波信号的时间差和信号强度比分别确定被检测拉索上缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息;

其中,被施加电磁脉冲激励信号的拉索外部输电线与被检测拉索之间产生的导波在沿被检测拉索延伸方向传播的过程中,若被检测拉索上存在缺陷,沿被检测拉索延伸方向传播的导波会在被检测拉索的缺陷处被分离为向后反射的电磁导波回波和向前继续传播的电磁导波余波,直至传播至被检测拉索的延伸末端时电磁导波余波被完全反射形成向后传播的末端电磁导波回波,由电磁导波接收检测装置通过电磁导波信号接收端接收被检测拉索上各次被反射的电磁导波回波;

电磁导波接收检测装置在接收到电磁脉冲激励信号时,记录接收到电磁脉冲激励信号的时间 $t_0$ ,且检测得到电磁脉冲激励信号强度 $P_0$ 并加以记录;

电磁导波接收检测装置分别接收各次电磁导波回波信号,分别记录接收到各次电磁导波回波信号的时间 $t_i$ ,且分别检测得到各次电磁导波回波信号的回波信号强度 $P_i$ 并加以记录;其中, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ , $N$ 表示接收到电磁导波回波信号的总次数;

将接收到的各次电磁导波回波信号中接收时间最靠后、且回波信号强度最强的一个电磁导波回波信号判定为末端电磁导波回波信号,将末端电磁导波回波信号之前接收到的各次电磁导波回波信号均判定为缺陷处电磁导波回波信号,且计算末端电磁导波回波信号的接收时间 $t_N$ 与电磁脉冲激励信号的接收时间 $t_0$ 的时间差 $\Delta t_N = t_N - t_0$ ,并根据被检测拉索从起始端至延伸末端之间的延伸距离 $L$ 计算确定导波传播速度 $v = 2L / \Delta t_N$ ;

针对任意的第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号, $i \in \{1, 2, \dots, N-1\}$ ,根据该缺陷处电磁导波回波信号的接收时间 $t_i$ 与电磁脉冲激励信号的接收时间 $t_0$ 的时间差 $\Delta t_i = t_i - t_0$ ,计算得到第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处在被检测拉索上相对于起始端位置处的间隔距离 $x_i = (v \times \Delta t_i) / 2$ ,作为用以指示第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处在被检测拉索上的具体位置的缺陷位置信息,并根据第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号的回波信号强度 $P_i$ 与电磁脉冲激励信号强度 $P_0$ 的比值作为第 $i$ 个缺陷处损伤比例参数 $\alpha_i = P_i / P_0$ ,用以作为表征第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处的损伤程度的损伤程度信息;由此确定被检测拉索上各处缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息。

2. 根据权利要求1所述基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统,其特征在于,所述

高频电磁脉冲激励装置输出电磁脉冲激励信号的频率范围为 $10^9 \sim 10^{10}$ Hz,输出电磁脉冲激励信号的信号长度为2~5个波长。

3. 根据权利要求1所述基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统,其特征在于,所述高频电磁脉冲激励装置包括高频信号激励源、前置信号放大器和电磁脉冲激励信号输出端;所述高频信号激励源的信号发射端通过前置信号放大器电连接至电磁脉冲激励信号输出端,用于产生高频且频率固定的电磁脉冲激励信号并经过前置信号放大器放大后从电磁脉冲激励信号输出端加以输出。

4. 根据权利要求1所述基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统,其特征在于,所述电磁导波接收检测装置包括电磁导波信号接收端、集成信号放大器、滤波预处理模块、模数转换模块和缺陷检测处理计算机;所述电磁导波信号接收端依次通过集成信号放大器、滤波预处理模块和模数转换模块电连接至缺陷检测处理计算机的数据采集端,用于将接收到的电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号经过集成信号放大器放大后,由滤波预处理模块进行滤波预处理,并由模数转换模块转换为数字信号后,传输至缺陷检测处理计算机;所述缺陷检测处理计算机用于分别记录电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号的接收时间,并检测电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号的信号强度,从而根据电磁脉冲激励信号与电磁导波回波信号的时间差和信号强度比分别确定被检测拉索上缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息。

5. 一种拉索缺陷检测方法,其特征在于,具体包括如下步骤:

1) 针对被检测拉索,布置一根临近并平行于被检测拉索方向拉伸的拉索外部输电线,且拉索外部输电线与被检测拉索的起始端和延伸末端均对齐设置,使得拉索外部输电线和被检测拉索构成平行双线传输线结构,并增加设置用于输出高频且频率固定的电磁脉冲激励信号的高频电磁脉冲激励装置,以及用于进行拉索缺陷检测的电磁导波接收检测装置,将高频电磁脉冲激励装置的激励信号输出端的正极端子和负极端子分别与拉索外部输电线和被检测拉索的起始端进行电连接,且拉索外部输电线和被检测拉索的延伸末端保持开路,将电磁导波接收检测装置的电磁导波信号接收端的两个接收端子并联在高频电磁脉冲激励装置的激励信号输出端的正极端子和负极端子,构成如权利要求1所述基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统;

2) 控制高频电磁脉冲激励装置向拉索外部输电线和被检测拉索输出高频且频率固定的电磁脉冲激励信号,使得被施加电磁脉冲激励信号的拉索外部输电线与被检测拉索之间产生沿被检测拉索延伸方向传播的电磁导波;被施加电磁脉冲激励信号的拉索外部输电线与被检测拉索之间产生的导波在沿被检测拉索延伸方向传播的过程中,若被检测拉索上存在缺陷,沿被检测拉索延伸方向传播的导波会在被检测拉索的缺陷处被分离为向后反射的电磁导波回波和向前继续传播的电磁导波余波,直至传播至被检测拉索的延伸末端时电磁导波余波被完全反射形成向后传播的末端电磁导波回波,由电磁导波接收检测装置通过电磁导波信号接收端接收被检测拉索上各次被反射的电磁导波回波;

3) 由电磁导波接收检测装置通过电磁导波信号接收端接收高频电磁脉冲激励装置输出的电磁脉冲激励信号以及被检测拉索上电磁导波传播过程中被反射的电磁导波回波信号,且根据电磁脉冲激励信号与电磁导波回波信号的时间差和信号强度比分别确定被检测拉索上缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息;该步骤具体为:

31) 电磁导波接收检测装置在接收到电磁脉冲激励信号时,记录接收到电磁脉冲激励信号的时间 $t_0$ ,且检测得到电磁脉冲激励信号强度 $P_0$ 并加以记录;

32) 电磁导波接收检测装置分别接收各次电磁导波回波信号,分别记录接收到各次电磁导波回波信号的时间 $t_i$ ,且分别检测得到各次电磁导波回波信号的回波信号强度 $P_i$ 并加以记录;其中, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ , $N$ 表示接收到电磁导波回波信号的总次数;

33) 将接收到的各次电磁导波回波信号中接收时间最靠后、且回波信号强度最强的一个电磁导波回波信号判定为末端电磁导波回波信号,将末端电磁导波回波信号之前接收到的各次电磁导波回波信号均判定为缺陷处电磁导波回波信号,且计算末端电磁导波回波信号的接收时间 $t_N$ 与电磁脉冲激励信号的接收时间 $t_0$ 的时间差 $\Delta t_N = t_N - t_0$ ,并根据被检测拉索从起始端至延伸末端之间的延伸距离 $L$ 计算确定导波传播速度 $v = 2L / \Delta t_N$ ;

34) 针对任意的第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号, $i \in \{1, 2, \dots, N-1\}$ ,根据该缺陷处电磁导波回波信号的接收时间 $t_i$ 与电磁脉冲激励信号的接收时间 $t_0$ 的时间差 $\Delta t_i = t_i - t_0$ ,计算得到第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处在被检测拉索上相对于起始端位置处的间隔距离 $x_i = (v \times \Delta t_i) / 2$ ,作为用以指示第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处在被检测拉索上的具体位置的缺陷位置信息,并根据第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号的回波信号强度 $P_i$ 与电磁脉冲激励信号强度 $P_0$ 的比值作为第 $i$ 个缺陷处损伤比例参数 $\alpha_i = P_i / P_0$ ,用以作为表征第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处的损伤程度的损伤程度信息;由此确定被检测拉索上各处缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息。

## 基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统及其检测方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于拉索结构安全性监测技术领域,具体涉及一种基于微波传输线理论的拉索缺陷检测系统及其检测方法。

### 背景技术

[0002] 随着交通行业的迅速发展,拉索在桥梁方面的应用非常广泛,但由于拉索因雨水,风的原因会造成腐蚀、断丝等损伤现象,这对桥梁安全造成了很大的隐患。为了避免拉索的损伤缺陷对桥梁造成隐患,需要定期对拉索进行缺陷检测和维护。

[0003] 目前测试拉索锈蚀的方法有:(1)人工检测法,主要是通过人工检查拉索系统是否遭受锈蚀,索体是否有破损,定期对索体各部件涂刷防护漆,对已锈蚀的及时除锈,其优点是可定性地直观检查,但缺点是检测费人力物力,检查范围有限,且检测结果仅可用于定性评估,难满足定量评定要求,无法实现对突发性事故隐患的及时发现。(2)超声波检测法,主要通过超声波探测器沿拉索延伸方向进行扫描,依据超声波的不同振动频率来判别被测拉索表面是否存在裂纹、锈坑等情况,以检测拉索表面的缺陷,但该方法无法检测到拉索内部的断裂、锈蚀等缺陷,存在较大的盲区,且需要沿拉索延伸方向对拉索的整个索体进行逐步扫描,操作复杂、效率低,在实际工程中便利性不足。(3)放射线检测法:根据拉索上锈蚀部位与未锈蚀部位对射线吸收能力的不同来实现缺陷检测,可以检测拉索表面及内部的损伤和缺陷,但其缺点是为了屏蔽对人体的辐射,射线装置的整体体积往往较大,难以适用于实时长期监测,而且如果射线泄漏可能会带来辐射污染,存在较大的安全隐患。(4)电化学检测法:电化学方法主要是根据电位差的范围判断缆索的锈蚀的可能性,实现缺陷检测,但受测试局部区域可能会受到温度、湿度等环境因素的影响,容易导致出现检测偏差。(5)磁致伸缩导波检测法:现有的导波检测方法通常是先采用磁化器将拉索的钢材料磁化达到磁致伸缩效应敏感状态,然后采用通有交变电流的激励线圈产生激励磁场作用在拉索上,利用拉索的磁致伸缩效应,在拉索上产生沿拉索传播的磁致导波,若拉索上存在缺陷,则磁致导波将在缺陷处被反射返回,从而可以根据磁致导波的回波检测来实现拉索缺陷的检测,但该方法由于需要先借助专门的磁化器对拉索进行磁化后才能实施检测,系统设备较为复杂、操作工序较为繁琐,且若拉索不同部位的磁化不均衡可能导致磁致伸缩效应产生的导波存在多个不同模态,导致产生的磁致导波回波呈现多模态现象而难以进行有效的分析和缺陷识别,影响检测准确性和有效性,此外通过磁致伸缩效应产生磁致导波的激励频率不能太高(受到材料磁导特性的限制,通常不能高于2000Hz),所产生的低频磁致导波在传播过程中衰减损耗较大,因此可检测的拉索长度范围较为有限。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术中存在的上述不足,本发明目的在于提供一种基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统,该系统利用传输线理论,能够通过高频的电磁脉冲激励信号分别激励被检测拉索和与之平行布置的拉索外部输电线,使得被施加电磁脉冲激励信号的拉索

外部输电线与被检测拉索之间产生沿被检测拉索延伸方向传播的电磁导波,用以实施拉索缺陷检测,从而解决现有技术中拉索缺陷检测的系统设备和操作工序复杂、检测准确性不足、难以适用于对拉索缺陷的实时长期监测等问题。

[0005] 为解决上述技术问题,实现发明目的,本发明采用的技术方案如下:

[0006] 基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统,包括临近并平行于被检测拉索方向拉伸布置的拉索外部输电线,且拉索外部输电线与被检测拉索的起始端和延伸末端均对齐设置,使得拉索外部输电线和被检测拉索构成平行双线传输线结构;还包括用于输出高频且频率固定的电磁脉冲激励信号的高频电磁脉冲激励装置,以及用于进行拉索缺陷检测的电磁导波接收检测装置;所述高频电磁脉冲激励装置的激励信号输出端的正极端子和负极端子分别与拉索外部输电线和被检测拉索的起始端进行电连接,使得拉索外部输电线和被检测拉索被高频电磁脉冲激励装置施加电磁脉冲激励信号后,能够在拉索外部输电线与被检测拉索之间产生沿被检测拉索延伸方向传播的电磁导波,且拉索外部输电线和被检测拉索的延伸末端保持开路;所述电磁导波接收检测装置的电磁导波信号接收端的两个接收端子并联在高频电磁脉冲激励装置的激励信号输出端的正极端子和负极端子,用于通过电磁导波信号接收端接收高频电磁脉冲激励装置输出的电磁脉冲激励信号以及被检测拉索上电磁导波传播过程中被反射的电磁导波回波信号,且根据电磁脉冲激励信号与电磁导波回波信号的时间差和信号强度比分别确定被检测拉索上缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息。

[0007] 上述基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统中,作为优选方案,所述高频电磁脉冲激励装置输出电磁脉冲激励信号的频率范围为 $10^9\sim 10^{10}$ Hz,输出电磁脉冲激励信号的信号长度为2~5个波长。

[0008] 上述基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统中,具体而言,所述高频电磁脉冲激励装置包括高频信号激励源、前置信号放大器和电磁脉冲激励信号输出端;所述高频信号激励源的信号发射端通过前置信号放大器电连接至电磁脉冲激励信号输出端,用于产生高频且频率固定的电磁脉冲激励信号并经过前置信号放大器放大后从电磁脉冲激励信号输出端加以输出。

[0009] 上述基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统中,具体而言,所述电磁导波接收检测装置包括电磁导波信号接收端、集成信号放大器、滤波预处理模块、模数转换模块和缺陷检测处理计算机;所述电磁导波信号接收端依次通过集成信号放大器、滤波预处理模块和模数转换模块电连接至缺陷检测处理计算机的数据采集端,用于将接收到的电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号经过集成信号放大器放大后,由滤波预处理模块进行滤波预处理,并由模数转换模块转换为数字信号后,传输至缺陷检测处理计算机;所述缺陷检测处理计算机用于分别记录电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号的接收时间,并检测电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号的信号强度,从而根据电磁脉冲激励信号与电磁导波回波信号的时间差和信号强度比分别确定被检测拉索上缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息。

[0010] 相应地,本发明还提供了采用上述基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统的方法。为此,本发明采用了如下的技术方案:

[0011] 一种拉索缺陷检测方法,具体包括如下步骤:

[0012] 1) 针对被检测拉索,布置一根临近并平行于被检测拉索方向拉伸的拉索外部输电线,且拉索外部输电线与被检测拉索的起始端和延伸末端均对齐设置,使得拉索外部输电线和被检测拉索构成平行双线传输线结构,并增加设置用于输出高频且频率固定的电磁脉冲激励信号的高频电磁脉冲激励装置,以及用于进行拉索缺陷检测的电磁导波接收检测装置,将高频电磁脉冲激励装置的激励信号输出端的正极端子和负极端子分别与拉索外部输电线和被检测拉索的起始端进行电连接,且拉索外部输电线和被检测拉索的延伸末端保持开路,将电磁导波接收检测装置的电磁导波信号接收端的两个接收端子并联在高频电磁脉冲激励装置的激励信号输出端的正极端子和负极端子,构成如权利要求1所述基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统;

[0013] 2) 控制高频电磁脉冲激励装置向拉索外部输电线和被检测拉索输出高频且频率固定的电磁脉冲激励信号,使得被施加电磁脉冲激励信号的拉索外部输电线与被检测拉索之间产生沿被检测拉索延伸方向传播的电磁导波;

[0014] 3) 由电磁导波接收检测装置通过电磁导波信号接收端接收高频电磁脉冲激励装置输出的电磁脉冲激励信号以及被检测拉索上电磁导波传播过程中被反射的电磁导波回波信号,且根据电磁脉冲激励信号与电磁导波回波信号的时间差和信号强度比分别确定被检测拉索上缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息。

[0015] 上述的拉索缺陷检测方法中,具体而言,所述步骤2)中,被施加电磁脉冲激励信号的拉索外部输电线与被检测拉索之间产生的导波在沿被检测拉索延伸方向传播的过程中,若被检测拉索上存在缺陷,沿被检测拉索延伸方向传播的导波会在被检测拉索的缺陷处被分离为向后反射的电磁导波回波和向前继续传播的电磁导波余波,直至传播至被检测拉索的延伸末端时电磁导波余波被完全反射形成向后传播的末端电磁导波回波,由电磁导波接收检测装置通过电磁导波信号接收端接收被检测拉索上各次被反射的电磁导波回波。

[0016] 上述的拉索缺陷检测方法中,具体而言,所述步骤3)具体为:

[0017] 31) 电磁导波接收检测装置在接收到电磁脉冲激励信号时,记录接收到电磁脉冲激励信号的时间 $t_0$ ,且检测得到电磁脉冲激励信号强度 $P_0$ 并加以记录;

[0018] 32) 电磁导波接收检测装置分别接收各次电磁导波回波信号,分别记录接收到各次电磁导波回波信号的时间 $t_i$ ,且分别检测得到各次电磁导波回波信号的回波信号强度 $P_i$ 并加以记录;其中, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ , $N$ 表示接收到电磁导波回波信号的总次数;

[0019] 33) 将接收到的各次电磁导波回波信号中接收时间最靠后、且回波信号强度最强的一个电磁导波回波信号判定为末端电磁导波回波信号,将末端电磁导波回波信号之前接收到的各次电磁导波回波信号均判定为缺陷处电磁导波回波信号,且计算末端电磁导波回波信号的接收时间 $t_N$ 与电磁脉冲激励信号的接收时间 $t_0$ 的时间差 $\Delta t_N = t_N - t_0$ ,并根据被检测拉索从起始端至延伸末端之间的延伸距离 $L$ 计算确定导波传播速度 $v = 2L / \Delta t_N$ ;

[0020] 34) 针对任意的第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号, $i \in \{1, 2, \dots, N-1\}$ ,根据该缺陷处电磁导波回波信号的接收时间 $t_i$ 与电磁脉冲激励信号的接收时间 $t_0$ 的时间差 $\Delta t_i = t_i - t_0$ ,计算得到第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处在被检测拉索上相对于起始端位置处的间隔距离 $x_i = (v \times \Delta t_i) / 2$ ,作为用以指示第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处在被检测拉索上的具体位置的缺陷位置信息,并根据第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号的回波信号强度 $P_i$ 与电磁脉冲激励信号强度 $P_0$ 的比值作为第 $i$ 个缺陷处损伤比例参数 $\alpha_i$

$=P_i/P_0$ ,用以作为表征第*i*个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处的损伤程度的损伤程度信息;由此确定被检测拉索上各处缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息。

[0021] 相比于现有技术,本发明具有如下优点:

[0022] 1、本发明基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统的结构设计较为简单,其检测过程不需要使用精密传感器或仪器设备,也不需要借助专门的磁化器设备,只需要利用高频的激励源用以产生高频的电磁导波、结合电磁导波接收检测装置进行处理和检测,使得系统设备和操作工序的复杂度都得到了降低,硬件设备成本低廉,检测操作流程简单方便。

[0023] 2、本发明拉索缺陷检测系统施拉索缺陷检测的工作原理不受到拉索材料磁导特性的限制,而借助了传输线理论,因此能够采用高频的激励源用以产生高频的电磁导波进行检测,相比于低频信号而言,高频的电磁导波在传播过程中的衰减损耗极小,大幅延长了检测的有效范围,特别适用于对拉索这种长结构器件的检测。

[0024] 3、在本发明拉索缺陷检测系统及其检测方法中,由于在检测时施加的电磁脉冲激励信号的频率是固定的,加之免去了磁化处理流程,电磁导波的传播也不会受到磁化不均衡等因素的影响,因此保证了激励产生的电磁导波在沿拉索延伸方向传播的过程中呈现为单一模态,导波信号数据复杂度低,并且结合高频电磁导波在拉索设计长度范围内传播衰减损耗小的特点,保证了电磁导波和回波传播过程稳定性好、抗干扰能力强,更易于检测到拉索上存在的微小缺陷,与现有的拉索缺陷检测技术相比具有较好的技术优势。

[0025] 4、本发明的拉索缺陷检测系统结合其检测方法,不需要利用探测设备对拉索进行扫描探测,也不会产生辐射污染,只需要利用高频的激励源用以产生高频的电磁导波、结合电磁导波接收检测装置进行处理和检测即可,检测过程简单、快速,并且受温度、湿度等环境因素的影响小,非常利于在桥梁上进行组网式的拉索缺陷检测,同时也适用于对拉索缺陷的实时长期监测,具有很好的技术推广应用价值。

## 附图说明

[0026] 图1为平行双线传输线理论的等效电路示意图。

[0027] 图2为平行双线传输线的等效电路单元的示意图。

[0028] 图3为本发明基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统的结构示意图。

[0029] 图4为本发明拉索缺陷检测系统的检测方法流程图。

## 具体实施方式

[0030] 针对现有技术中各不同拉索缺陷检测方法存在的系统设备和操作工序复杂、检测准确性不足、难以适用于对拉索缺陷的实时长期监测等问题,本发明提供了一种以传输线理论为依据的拉索缺陷检测系统和检测方法,其目的是在探索一种全新的、更有效、更高效的拉索缺陷无损检测方案。其原理是基于传输线产生电磁导波,电磁导波遇到缺陷会发生反射,就可以通过在发射端设置接收器对反射回来的电磁回波进行接收分析,从而用以推断得出缺陷的缺陷位置信息和损伤程度信息。

[0031] 本发明所应用的传输线上电磁导波理论简述如下:描写传输线电磁状态的变量是线间电压*U*和线上电流*I*,它们都是时间*t*及传输方向设为*z*的函数,在电路理论中,如图1和

图2所示,传输线的参量是两导体间的单位长度电容 $C_0$  (F/m),单位长度漏电导 $G_0$  (S/m),他们是并联在线上的;导体上的单位长度电感 $L_0$  (H/m)和单位长度电阻 $R_0$  ( $\Omega$ /m),它们是串联在传输线上。因此可将传输线分成许多无穷小的微分段 $dz$ ,每个微分段都有并联的电容 $C_0 dz$ ,电导 $G_0 dz$ 及串联的电感 $L_0 dz$ ,电阻 $R_0 dz$ 。整个传输线是由无穷个这样的微分段级联而成,其等效示意图如图1所示,基于基尔霍夫定律可得传输线方程:

$$[0032] \quad \begin{cases} \frac{dU(z)}{dz} = -Z_0 I(z) \\ \frac{dI(z)}{dz} = -Y_0 U(z) \end{cases}; \quad (1)$$

[0033]  $Z_0$ 和 $Y_0$ 分别表示导体上的单位长度阻抗和单位长度导纳,很容易判断,传输线方程是典型的波动方程,方程(1)解出为:

$$[0034] \quad \begin{cases} U(z,t) = (U_+ e^{-\gamma z} + U_- e^{\gamma z}) e^{j\omega t} \\ I(z,t) = \left( \frac{U_+}{Z_c} e^{-\gamma z} - \frac{U_-}{Z_c} e^{\gamma z} \right) e^{j\omega t}; \end{cases} \quad (2)$$

[0035] 方程(2)中,下角标+和-分别表示传输方向 $z$ 的正方向(即入射波方向)和负方向(即反射波方向), $\gamma$ 为描述电压或电流行波沿传输线行进过程中的衰减和相移的传播常数, $\omega$ 为传输线的时谐信号角频率, $Z_c$ 表示传输线的特征阻抗。由方程(2)可以看出,承载波动的物理量可以表达为线间电压 $U$ 和线上电流 $I$ 的振荡传播,因此,此电磁导波为沿着传输线方向传播的导波。

[0036] 基于上述的传输线理论,本发明提供了一套拉索缺陷检测系统,如图3所示,该系统包括临近并平行于被检测拉索1方向拉伸布置的拉索外部输电线2,且拉索外部输电线2与被检测拉索1的起始端和延伸末端均对齐设置,使得拉索外部输电线2和被检测拉索1构成平行双线传输线结构;还包括用于输出高频且频率固定的电磁脉冲激励信号的高频电磁脉冲激励装置3,以及用于进行拉索缺陷检测的电磁导波接收检测装置4。高频电磁脉冲激励装置3的激励信号输出端的正极端子和负极端子分别与拉索外部输电线2和被检测拉索1的起始端进行电连接,使得拉索外部输电线和被检测拉索被高频电磁脉冲激励装置施加电磁脉冲激励信号后,能够在拉索外部输电线与被检测拉索之间产生沿被检测拉索延伸方向传播的电磁导波,且拉索外部输电线和被检测拉索的延伸末端保持开路。电磁导波接收检测装置4的电磁导波信号接收端的两个接收端子并联在高频电磁脉冲激励装置3的激励信号输出端的正极端子和负极端子,用于通过电磁导波信号接收端接收高频电磁脉冲激励装置输出的电磁脉冲激励信号以及被检测拉索上电磁导波传播过程中被反射的电磁导波回波信号,且根据电磁脉冲激励信号与电磁导波回波信号的时间差和信号强度比分别确定被检测拉索上缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息。

[0037] 从具体技术实现而言,系统中的高频电磁脉冲激励装置可以设计包括高频信号激励源、前置信号放大器和电磁脉冲激励信号输出端;高频信号激励源的信号发射端通过前置信号放大器电连接至电磁脉冲激励信号输出端,用于产生高频且频率固定的电磁脉冲激励信号并经过前置信号放大器放大后从电磁脉冲激励信号输出端加以输出。而电磁导波接收检测装置可以设计包括电磁导波信号接收端、集成信号放大器、滤波预处理模块、模数转换模块和缺陷检测处理计算机;所述电磁导波信号接收端依次通过集成信号放大器、滤波

预处理模块和模数转换模块电连接至缺陷检测处理计算机的数据采集端,用于将接收到的电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号经过集成信号放大器放大后,由滤波预处理模块进行滤波预处理,并由模数转换模块转换为数字信号后,传输至缺陷检测处理计算机;缺陷检测处理计算机则用于分别记录电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号的接收时间,并检测电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号的信号强度,从而根据电磁脉冲激励信号与电磁导波回波信号的时间差和信号强度比分别确定被检测拉索上缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息;具体实施时,缺陷检测处理计算机可以采用频谱仪等设备实现,也可以采用专门编程执行缺陷检测运算处理的计算机设备实现。

[0038] 本发明基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统的工作原理如下。在临近被检测拉索位置处平行地布置一根拉索外部输电线,使得被检测拉索和拉索外部输电线构成平行双线传输线结构,从而通过高频电磁脉冲激励装置的电磁脉冲激励信号输出端向拉索外部输电线和被检测拉索输出高频且频率固定的交流的电磁脉冲激励信号,由传输线理论可知,由此施加的电磁脉冲激励信号能够使得被检测拉索与被施加交流的电磁脉冲激励信号的拉索外部输电线之间产生电磁导波,并沿被检测拉索延伸方向传播。高频电磁脉冲激励装置输出的电磁脉冲激励信号的频率范围最好设定在 $10^9\sim 10^{10}$ Hz之间,因为 $10^9\sim 10^{10}$ Hz交流电信号的波长是亚厘米级的,根据瑞利法则,波长越短表征精度越高,这个波段的电磁脉冲激励信号已能够满足对拉索缺陷检测的精度要求,其检测精度能够达到1厘米误差范围以内,而电磁脉冲激励信号的频率再高就进入光学频段无法激励产生电磁导波了;而高频电磁脉冲激励装置输出电磁脉冲激励信号的信号长度优选为2~5个波长,该信号长度范围便于对其激励产生的电磁导波信号进行识别,同时较短的信号长度也有助于减小识别时间的误差。激励产生的电磁导波在沿被检测拉索延伸方向传播的过程中,若被检测拉索上存在缺陷(如锈蚀、断丝等),缺陷会改变缺陷位置的特性阻抗,因此沿被检测拉索延伸方向传播的电磁导波会在被检测拉索的缺陷处因为阻抗不匹配而被分离为向后反射的电磁导波回波和向前继续传播的电磁导波余波,直至传播至被检测拉索的延伸末端时,电磁导波余波被完全反射形成向后传播的末端电磁导波回波,并且由于导波在拉索的延伸末端是被完全反射,因此末端电磁导波回波是功率较强的反射波,相对而言,缺陷处反射的电磁导波回波是功率较弱的反射波。在高频电磁脉冲激励装置输出电磁脉冲激励信号时能够被电磁导波接收检测装置通过其电磁导波信号接收端接收到,且电磁导波接收检测装置还能够通过其电磁导波信号接收端接收被检测拉索上各次被反射的电磁导波回波,从而可以根据电磁脉冲激励信号与电磁导波回波信号的时间差和信号强度比,分别确定被检测拉索上缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息,实现对拉索的缺陷检测。

[0039] 由上述的系统结构和工作原理可以看到,本发明基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统的结构设计较为简单,虽然也采用了导波检测的手段,但与现有的导波检测法相比,其检测过程不需要使用精密传感器或仪器设备,也不需要对被检测拉索进行专门的磁化处理,因此也不需要借助专门的磁化器设备,只需要利用高频的激励源用以产生高频的电磁导波、结合电磁导波接收检测装置进行处理和检测,使得系统设备和操作工序的复杂度都得到了降低,硬件设备成本低廉,检测操作流程简单方便;同时,由于其实施拉索缺陷检测的工作原理不受到拉索材料磁导特性的限制,而借助了传输线理论,因此能够采用高频的激励源用以激励产生高频的电磁导波进行检测,相比于低频信号而言,高频的电磁

导波在传播过程中的衰减损耗极小,大幅延长了检测的有效范围,特别适用于对拉索这种长结构器件的检测;不仅如此,由于在检测时施加的电磁脉冲激励信号的频率是固定的,加之免去了磁化处理流程,电磁导波的传播也不会受到磁化不均衡等因素的影响,因此保证了激励产生的电磁导波在沿拉索延伸方向传播的过程中呈现为单一模态,导波信号数据复杂度低,并且结合高频电磁导波在拉索设计长度范围内传播衰减损耗小的特点,保证了电磁导波和回波传播过程稳定性好、抗干扰能力强,更易于检测到拉索上存在的微小缺陷,与现有的拉索缺陷检测技术相比具有较好的技术优势。

[0040] 由此,利用本发明的基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统对被检测拉索进行缺陷检测的检测流程如图4所示,检测执行步骤如下:

[0041] 1) 针对被检测拉索,布置一根临近并平行于被检测拉索方向拉伸的拉索外部输电线,且拉索外部输电线与被检测拉索的起始端和延伸末端均对齐设置,使得拉索外部输电线和被检测拉索构成平行双线传输线结构,并增加设置用于输出高频且频率固定的电磁脉冲激励信号的高频电磁脉冲激励装置,以及用于进行拉索缺陷检测的电磁导波接收检测装置,将高频电磁脉冲激励装置的激励信号输出端的正极端子和负极端子分别与拉索外部输电线和被检测拉索的起始端进行电连接,且拉索外部输电线和被检测拉索的延伸末端保持开路,将电磁导波接收检测装置的电磁导波信号接收端的两个接收端子并联在高频电磁脉冲激励装置的激励信号输出端的正极端子和负极端子,构成如权利要求1所述基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统。

[0042] 该步骤主要用于布置构建本法发明基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统,其中,在具体执行拉索外部输电线、被检测拉索、高频电磁脉冲激励装置和电磁导波接收检测装置之间的电连接操作时,可以选择拉索外部输电线被检测拉索和对齐的任意一端作为起始端,相应地,被检测拉索和拉索外部输电线的另一端则作为延伸末端。至于系统中各组成部分的设备和技术要求已在前述段落中加以说明,这里不再重复阐述。

[0043] 2) 控制高频电磁脉冲激励装置向拉索外部输电线和被检测拉索输出高频且频率固定的电磁脉冲激励信号,使得被施加电磁脉冲激励信号的拉索外部输电线与被检测拉索之间产生沿被检测拉索延伸方向传播的电磁导波。

[0044] 该步骤中,被施加电磁脉冲激励信号的拉索外部输电线与被检测拉索之间产生的电磁导波在沿被检测拉索延伸方向传播的过程中,若被检测拉索上存在缺陷,沿被检测拉索延伸方向传播的导波会在被检测拉索的缺陷处被分离为向后反射的电磁导波回波和向前继续传播的电磁导波余波,直至传播至被检测拉索的延伸末端时电磁导波余波被完全反射形成向后传播的末端电磁导波回波,由电磁导波接收检测装置通过电磁导波信号接收端接收被检测拉索上各次被反射的电磁导波回波。

[0045] 3) 由电磁导波接收检测装置通过电磁导波信号接收端接收高频电磁脉冲激励装置输出的电磁脉冲激励信号以及被检测拉索上电磁导波传播过程中被反射的电磁导波回波信号,且根据电磁脉冲激励信号与电磁导波回波信号的时间差和信号强度比分别确定被检测拉索上缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息。

[0046] 该步骤的具体就处理流程为:

[0047] 31) 电磁导波接收检测装置在接收到电磁脉冲激励信号时,记录接收到电磁脉冲激励信号的时间 $t_0$ ,且检测得到电磁脉冲激励信号强度 $P_0$ 并加以记录;

[0048] 32) 电磁导波接收检测装置分别接收各次电磁导波回波信号,分别记录接收到各次电磁导波回波信号的时间 $t_i$ ,且分别检测得到各次电磁导波回波信号的回波信号强度 $P_i$ 并加以记录;其中, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ , $N$ 表示接收到电磁导波回波信号的总次数;

[0049] 33) 将接收到的各次电磁导波回波信号中接收时间最靠后、且回波信号强度最强的一个电磁导波回波信号判定为末端电磁导波回波信号,将末端电磁导波回波信号之前接收到的各次电磁导波回波信号均判定为缺陷处电磁导波回波信号,且计算末端电磁导波回波信号的接收时间 $t_N$ 与电磁脉冲激励信号的接收时间 $t_0$ 的时间差 $\Delta t_N = t_N - t_0$ ,并根据被检测拉索从起始端至延伸末端之间的延伸距离 $L$ 计算确定导波传播速度 $v = 2L / \Delta t_N$ ;

[0050] 34) 针对任意的第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号, $i \in \{1, 2, \dots, N-1\}$ ,根据该缺陷处电磁导波回波信号的接收时间 $t_i$ 与电磁脉冲激励信号的接收时间 $t_0$ 的时间差 $\Delta t_i = t_i - t_0$ ,计算得到第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处在被检测拉索上相对于起始端位置处的间隔距离 $x_i = (v \times \Delta t_i) / 2$ ,作为用以指示第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处在被检测拉索上的具体位置的缺陷位置信息,并根据第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号的回波信号强度 $P_i$ 与电磁脉冲激励信号强度 $P_0$ 的比值作为第 $i$ 个缺陷处损伤比例参数 $\alpha_i = P_i / P_0$ ,用以作为表征第 $i$ 个缺陷处电磁导波回波信号所对应的缺陷处的损伤程度的损伤程度信息;由此确定被检测拉索上各处缺陷处的缺陷位置信息和损伤程度信息。

[0051] 在上述步骤31)~34)的处理过程中,电磁导波接收检测装置接收到电磁导波回波信号的总次数 $N$ 与被检测拉索上存在的缺陷数量有直接的联系,因为除了第 $N$ 次电磁导波回波信号是由于导波传播至被检测拉索的延伸末端时反射形成的之外,其余 $N-1$ 次电磁导波回波信号均是由于电磁导波传播至拉索上缺陷处被分离而形成的,因此接收到电磁导波回波信号的总次数 $N = n_{缺陷} + 1$ , $n_{缺陷}$ 即为被检测拉索上存在缺陷位置的数量。同时,虽然电磁导波接收检测装置所记录的接收到电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号的时间与高频电磁脉冲激励装置发出电磁脉冲激励信号的实际时间以及电磁导波回波返回到被检测拉索起始端的实际时间可能存在偏差,但由于电磁导波接收检测装置接收到的电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号都经过集成信号放大器进行放大、经过滤波预处理模块进行滤波预处理、经过模数转换模块转换为数字信号后传输至缺陷检测处理计算机进行处理,也就是说电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号传输到缺陷检测处理计算机之前所经过的处理流程是一致的,因此,电磁导波接收检测装置记录到的电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号接收时间之间的时间差与导波信号收发装置采集到电磁脉冲激励信号和电磁导波回波信号的时间差是相一致的,从而能够很好的确保电磁导波接收检测装置对于导波传播速度和被检测拉索上缺陷处间隔距离的计算精度,从而能够用以准确的确定被检测拉索上各个缺陷处的具体所在位置;此外,借助高频电磁导波在拉索设计长度范围内传播衰减损耗小的特性,每个缺陷处所分离的电磁导波回波的功率占原始电磁脉冲激励信号功率的比例(即得到的缺陷处损伤比例参数)能够较为真实、客观的反映被检测拉索上相应缺陷处的损伤程度,因此能够根据电磁导波接收检测装置所处理得到的缺陷处损伤比例参数,对拉索缺陷处的损伤程度进行有效的分析应用,例如可以根据缺陷处损伤比例参数所呈现的损伤程度实现对拉索缺陷处的损伤成像等,具有很好的技术应用价值。

[0052] 综上所述,可以看到,本发明基于电磁波传输线理论的拉索缺陷检测系统的整体结构设计较为简单,而且不需要使用高精密度设备和仪器,硬件设备成本低廉,检测操作流

程简单方便,并且能够采用高频的激励源用以产生高频的电磁导波进行检测,大幅延长了检测的有效范围,并且保证了激励产生的电磁导波在沿拉索延伸方向传播的过程中呈现为单一模态,保证了电磁导波和回波传播过程具有稳定性好、抗干扰能力强的优点,更易于检测到拉索上存在的微小缺陷;此外,本发明的拉索缺陷检测系统结合其检测方法,不需要利用探测设备对拉索进行扫描探测,也不会产生辐射污染,只需要利用高频的激励源用以产生高频的电磁导波、结合电磁导波接收检测装置进行处理和检测即可,检测过程简单、快速,并且受温度、湿度等环境因素的影响小,其检测结果能够用以准确的确定被检测拉索上各个缺陷处的具体所在位置,并较为真实、客观的反映被检测拉索上相应缺陷处的损伤程度,非常利于在桥梁上进行组网式的拉索缺陷检测,同时也适用于对拉索缺陷的实时长期监测,具有很好的技术推广应用价值。

[0053] 最后说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制,尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,而不脱离本发明技术方案的宗旨和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

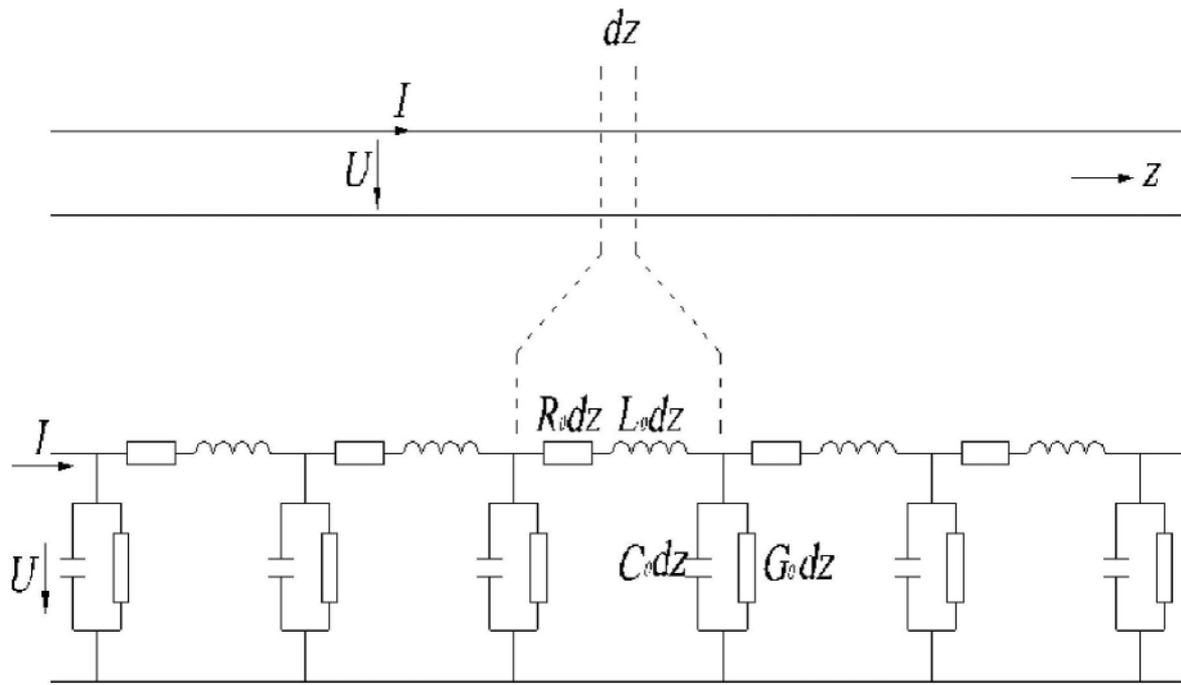


图1

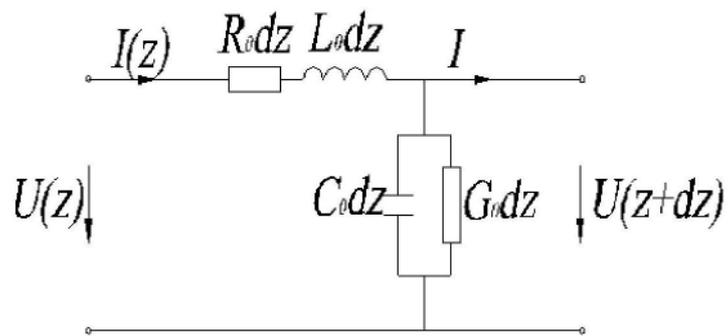


图2

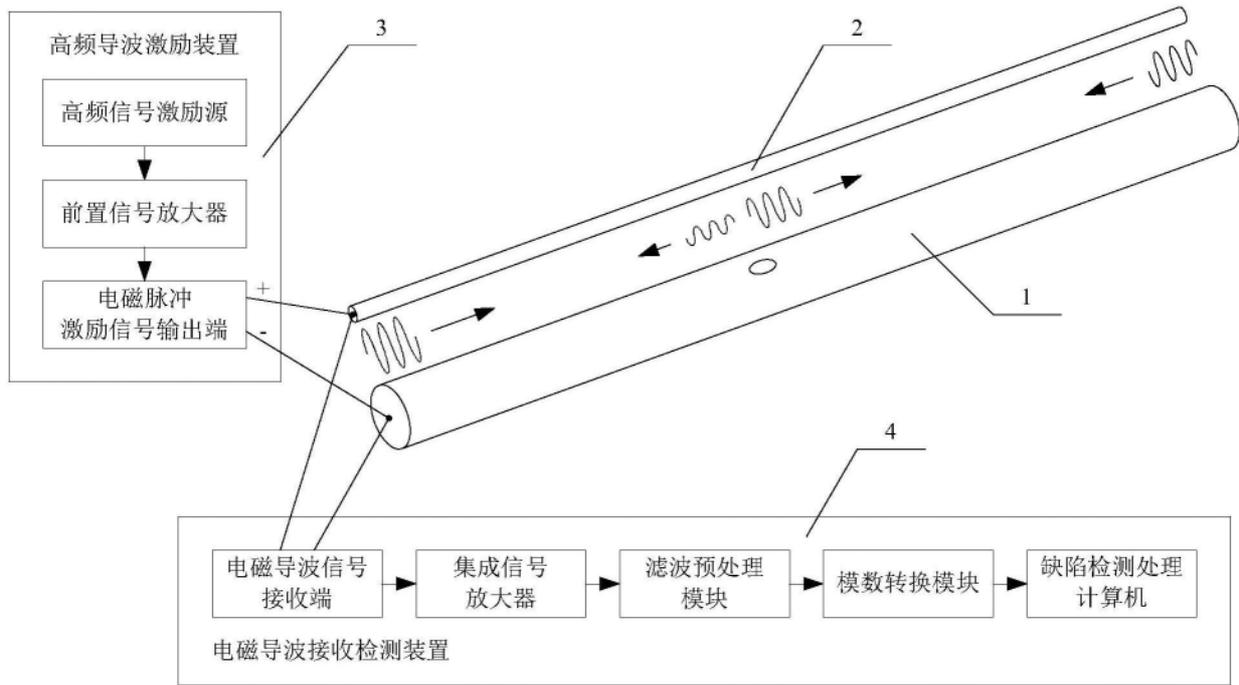


图3

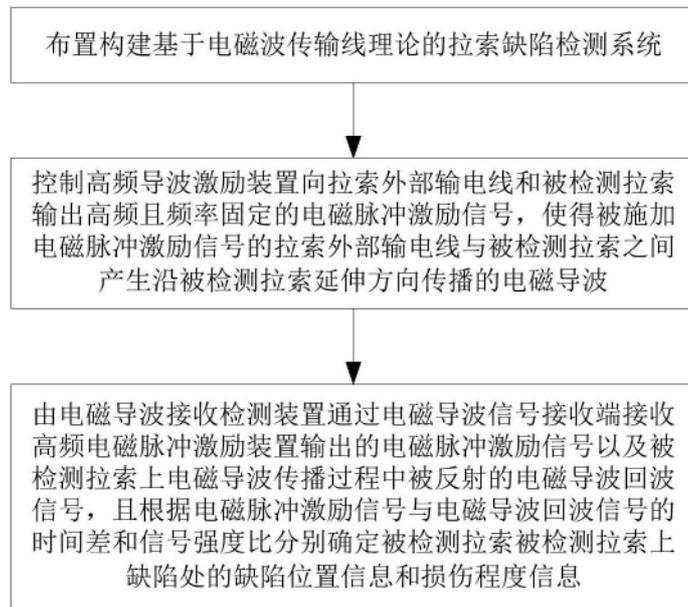


图4