



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113820054 B

(45) 授权公告日 2022. 09. 30

(21) 申请号 202111105298.9

审查员 刘嘉

(22) 申请日 2021.09.22

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113820054 A

(43) 申请公布日 2021.12.21

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 黄国君 程桂军 杨国伟 张玲芳

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理

事务所(普通合伙) 11390

专利代理师 焦海峰

(51) Int. Cl.

G06F 17/10 (2006.01)

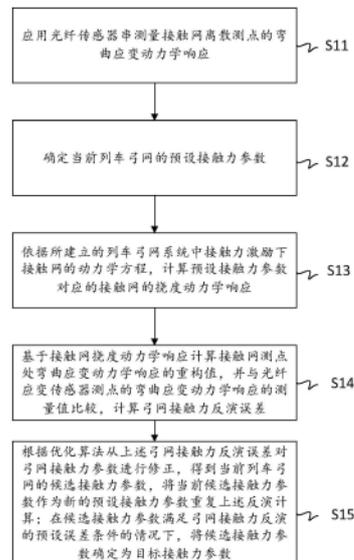
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种列车刚性弓网接触力全光纤测量方法及系统

(57) 摘要

本申请公开了一种列车刚性弓网接触力全光纤测量方法及系统,包括:本申请技术基于接触网动力学响应的光纤测量和优化反演计算实现弓网接触力的反演测量,是一种新颖的弓网接触力测量技术,较传统的基于受电弓动力学响应的间接测量技术具有所测结构及其受力简单(无气动力作用)、所需传感器种类单一、传感系统抗电磁干扰并对所测结构的动力学特性影响小、轨道振动对测量的噪声干扰小等优点,因而可提高弓网接触力的间接测量精度。



1. 一种列车刚性弓网接触力全光纤测量方法,其特征在于,包括:

应用光纤传感器串测量接触网离散点的弯曲应变动力学响应;

确定当前列车弓网的预设接触力参数;

依据所建立的列车弓网系统中接触力激励下接触网的动力学方程计算所述预设接触力参数对应的接触网的挠度动力学响应;

基于所述计算所得接触网挠度动力学响应计算接触网测点处的弯曲应变,并与光纤应变传感器所测到的测点弯曲应变动力学响应比较,计算弓网接触力反演误差;

根据优化算法从上述弓网接触力反演误差对弓网接触力参数进行修正,得到当前列车弓网的候选接触力参数,将当前候选接触力参数作为新的预设接触力参数重复上述反演计算;在所述候选接触力参数满足弓网接触力反演的预设误差条件的情况下,将所述候选接触力参数确定为目标接触力参数。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据光纤传感器串测量接触网离散点的弯曲应变动力学响应,包括:

应用多只布拉格光纤光栅传感器串测量接触网上多个离散测点处的梁弯曲应变,将所述梁弯曲应变确定为所述弯曲应变动力学响应的测量值。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述依据所建立的列车弓网系统中弓网接触力激励下接触网的动力学方程计算所述预设接触力参数对应的接触网的挠度动力学响应,包括:

依据列车弓网系统中弓网接触力激励下的接触网动力学方程,所述动力学方程如下:

$$\rho(x)A(x)\frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial t^2} + c(x)\frac{\partial Y(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}[E(x)I(x)\frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial x^2}] + \sum_{j=1}^N m_j \frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial t^2} \delta(x-x_j) + \sum_{j=1}^N k_j Y(x,t) \delta(x-x_j) = f_c(t) \delta(x-x_c(t))$$

式中, $Y(x,t)$ 为梁的挠度; $\rho(x)$ 和 $A(x)$ 为梁的体密度和横截面积; $c(x)$ 为材料阻尼系数; $E(x)$ 表示梁的弹性模量; $I(x)$ 为梁截面惯性矩; $m_j$ 和 $k_j$ 分别为悬挂机构的等效弹簧的质量和刚度, $x_j$  ( $j=1,N$ )为弹簧位置坐标, $N$ 为弹簧总数, $\delta(x)$ 为狄拉克函数; $f_c(t)$ 和 $x_c(t)$ 分别为接触力参数插值得到的接触力大小和接触位置随时间变化的分布函数;

将所述预设接触力参数表达的接触力和接触位置函数输入到所述动力学方程中,得到所述接触网的挠度动力学响应。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,基于所述接触网的挠度动力学响应计算接触网测点处弯曲应变动力学响应的重构值,并与光纤应变传感器测点的弯曲应变动力学响应的测量值作比较,计算两者的差异作为弓网接触力反演误差,所述方法包括:

基于所述接触网挠度动力学响应计算接触网测点处的弯曲应变动力学响应的重构值 $\varepsilon^R$ 如下式表示:

$$\varepsilon^R(x_k, b_{t_i}, b_{f_c}, t) = -h(x_k) \frac{\partial Y^2(x, b, b_{f_c}, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=x_k}, k=1, M$$

式中 $h(x_k)$ 为接触网测点 $x_k$ 处传感器安装点距接触网等效梁中性面的高度, $M$ 为接触网应变测点总数, $b_{t_i}$ 和 $b_{f_c}$ 为接触力参数向量,其分量分别表示受电弓到达给定的不同识别点

处的时刻及接触力大小；

根据测点处弯曲应变的测量值和重构值计算弓网接触力反演误差,所述弓网接触力反演误差的计算公式为:

$$E(b_{t_r}, b_{f_c}) = \sum_{k=1}^M \int_0^T (\varepsilon^M(x_k, t) - \varepsilon^R(x_k, b_{t_r}, b_{f_c}, t))^2 dt$$

式中,  $\varepsilon^M(x_k, t)$  为测点处弯曲应变的测量值,  $T$  为总测量时段。

5. 根据权利要求4所述的方法,其特征在于,所述根据优化算法从上述弓网接触力反演误差对弓网接触力参数进行修正,得到当前列车弓网的候选接触力参数,将当前候选接触力参数作为新的预设接触力参数重复上述反演计算;在所述候选接触力参数满足弓网接触力反演的预设误差条件的情况下,将所述候选接触力参数确定为目标接触力参数,包括:

以弓网接触力和接触时间参数为优化变量,进行计算使得所述弓网接触力反演误差取最小值:

$$\min E(b_{t_r}, b_{f_c}) = \sum_{k=1}^M \int_0^T (\varepsilon^M(x_k, t) - \varepsilon^R(x_k, b_{t_r}, b_{f_c}, t))^2 dt$$

根据优化算法从上述弓网接触力反演误差对弓网接触力参数进行修正,得到当前列车弓网的接触力参数作为新的所述预设接触力参数,重复上述反演计算,经迭代运算在所述弓网接触力反演误差满足预设的误差条件的情况下,将当前的候选接触力参数确定为目标接触力参数,从而获得接触力及接触位置的时程变化。

6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于,所述方法还包括:

对所述总测量时段进行划分得到多个时间测量区间;

按照所述时间测量区间的时间顺序,对所述时间测量区间对应的接触力参数进行优化迭代计算,直至误差值收敛;

其中分段优化计算公式如下:

$$\min E(b_{t_r}, b_{f_c}) = \sum_{i=1}^Q \min E(b_{t_r}^i, b_{f_c}^i) = \sum_{i=1}^Q \min \sum_{k=1}^{M_i} \int_0^{t_i} (\varepsilon^M(x_k^i, t) - \varepsilon^R(x_k^i, b_{t_r}^i, b_{f_c}^i, t))^2 dt$$

式中 $Q$ 为时间测量区域的数量, $M_i$ 为第 $i$ 段的测点总数; $x_k^i$ 为第 $i$ 段的第 $k$ 个测点坐标; $\mathbf{b}_{t_r}^i$ 和 $\mathbf{b}_{f_c}^i$ 第 $i$ 段的接触时刻及接触力识别参数分向量; $t_{i-1}$ 和 $t_i$ 分别为第 $i$ 段的开始和结束时刻。

7. 一种列车刚性弓网接触力全光纤测量系统,应用权利要求1-6任一项所述的列车刚性弓网接触力全光纤测量方法,其特征在于,包括:受电弓、接触网、测量装置;

所述受电弓的底部安装于列车顶部,所述受电弓的顶部与所述接触网滑动连接,以使所述接触网向所述受电弓提供电能,所述测量装置中的光纤传感器安装在所述接触网的离散测点上;

其中,所述接触网包括:汇流排、接触线以及支撑结构,所述接触线镶嵌于所述汇流排中,所述支撑结构设置于所述汇流排外侧,用于支撑所述汇流排。

## 一种列车刚性弓网接触力全光纤测量方法及系统

### 技术领域

[0001] 本申请涉及轨道交通技术领域,尤其涉及一种列车刚性弓网接触力全光纤测量方法及系统。

### 背景技术

[0002] 列车受电弓网系统是实现从变电所向列车输送电能而驱动列车运行的装置,包括架空接触网和安装在车顶上的受电弓,其安全性和可靠性是决定列车平稳运行的重要保障。接触网分为柔性接触网和刚性接触网。柔性接触网主要用于高铁等快速轨道交通;刚性接触网是架空梁结构,相比柔性接触网刚性大,它由周期性布置的固定悬挂机构支撑,具有结构相对简单、抗风、建设和维护成本低等优点,适合城轨线路包括地铁和城际轨道交通,也适于隧道占比较高的干线铁路。

[0003] 目前刚性接触网的列车车速受到制约,其关键影响因素是弓网接触力的波动,它是弓网耦合振动的体现。随着列车速度的提高弓网接触力的波动也增加,导致列车的受流脉动增加降低受流质量,严重时出现弓网脱离并产生拉弧放电现象,导致受电弓碳滑板和接触网局部烧蚀,进一步降低受流品质。因此,弓网接触力的波动(方差及最大、最小值)是刚性弓网系统的一个主要性能指标。

[0004] 弓网接触力的准确测量是对其控制的前提技术条件。传统的弓网接触力测量都是通过列车车顶上的受电弓碳滑板的支撑力和动力学响应测量来间接获得,通过附加安装在碳滑板两端的测力传感器和其中的加速度或应变传感器测量碳滑板的受力和动力学响应信号,由碳滑板的所受的支撑力、气动力、惯性力、弓网接触力之间的平衡关系间接测得弓网接触力。一般将碳滑板视为刚体或弹性体,需同步测量碳滑板上接触点位置的变化,所以需测量的力学量及其传感系统种类较多。同时碳滑板受到的气动力为分布力难于直接测量需采用经验公式估算,所以弓网接触力的测量存在一定的力学近似。此外,轨道振动通过车顶传导到受电弓,使得弓网接触力的测量受到较为显著的轨道振动噪声干扰。并且所用传感器一般采用电学传感器,易于受到受电弓网高压电磁工作环境的影响,所以这些传感器需要屏蔽封装才能在受电弓上正常工作,这势必对碳滑板及受电弓附加了额外的质量,从而导致其动力学特性改变、结构动力学响应失真。

### 发明内容

[0005] 为了克服上述传统弓网接触力测量方法存在的力学、传感器、轨道振动干扰的问题,本申请提供了一种列车刚性弓网接触力全光纤测量方法及系统,可应用于实验室或实际线路检测段的刚性弓网系统接触力的测量。

[0006] 根据本申请实施例的一个方面,提供了一种列车刚性弓网接触力全光纤测量方法,包括:

[0007] 应用光纤传感器串测量接触网离散点的弯曲应变动力学响应;

[0008] 确定当前列车弓网的预设接触力参数;

[0009] 依据所建立的列车弓网系统中接触力激励下接触网的动力学方程计算所述预设接触力参数对应的接触网的挠度动力学响应；

[0010] 基于所述计算所得接触网挠度动力学响应计算接触网测点处的弯曲应变，并与光纤应变传感器所测到的测点弯曲应变动力学响应比较，计算弓网接触力反演误差；

[0011] 根据优化算法从上述弓网接触力反演误差对弓网接触力参数进行修正，得到当前列车弓网的候选接触力参数，将当前候选接触力参数作为新的预设接触力参数重复上述反演计算。在所述候选接触力参数满足弓网接触力反演的预设误差条件的情况下，将所述候选接触力参数确定为目标接触力参数。

[0012] 进一步的，所述根据光纤传感器串测量接触网离散点的弯曲应变动力学响应，包括：

[0013] 应用多只布拉格光纤光栅 (FBG) 传感器串测量接触网上多个离散测点处的梁弯曲应变，将所述梁弯曲应变确定为所述弯曲应变动力学响应的测量值。

[0014] 进一步的，所述依据所建立的列车弓网系统中弓网接触力激励下接触网的动力学方程计算所述预设接触力参数对应的接触网的挠度动力学响应，包括：

[0015] 依据列车弓网系统中接触力激励下的接触网动力学方程，所述动力学方程如下：

$$[0016] \quad \rho(x)A(x)\frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial t^2} + c(x)\frac{\partial Y(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}[E(x)I(x)\frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial x^2}] + \sum_{j=1}^N m_j \frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial t^2} \delta(x-x_j) + \sum_{j=1}^N k_j Y(x,t) \delta(x-x_j) = f_c(t)\delta(x-x_c(t))$$

[0017] 式中， $Y(x, t)$  为梁的挠度； $\rho(x)$  和  $A(x)$  为梁的体密度和横截面积； $c(x)$  为材料阻尼系数； $E(x)$  表示梁的弹性模量； $I(x)$  为梁截面惯性矩； $m_j$  和  $k_j$  分别为悬挂机构的等效弹簧的质量和刚度， $x_j$  ( $j=1, N$ ) 为弹簧位置坐标， $N$  为弹簧总数， $\delta(x)$  为狄拉克函数； $f_c(t)$  和  $x_c(t)$  分别为接触力参数插值得到的接触力大小和接触位置随时间变化的分布函数；

[0018] 将所述预设触力参数表达的接触力和接触位置函数输入到所述运动学方程中，得到所述接触网的挠度动力学响应。

[0019] 进一步的，基于所述接触网的挠度动力学响应计算接触网测点处弯曲应变动力学响应的重构值，并与与光纤应变传感器测点的弯曲应变动力学响应的应测量值作比较，计算两者的差异作为弓网接触力反演误差，所述方法包括：

[0020] 基于所述接触网挠度动力学响应计算接触网测点处的弯曲应变动力学响应的重构值  $\varepsilon^R$  如下式表示：

$$[0021] \quad \varepsilon^R(x_k, \mathbf{b}_{t1}, \mathbf{b}_{fc}, t) = -h(x_k) \frac{\partial Y^2(x, \mathbf{b}_{t1}, \mathbf{b}_{fc}, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=x_k}, \quad k=1, M$$

[0022] 式中  $h(x_k)$  为接触网测点  $x_k$  处传感器安装点距接触网等效梁中性面的高度， $M$  为接触网应变测点总数， $\mathbf{b}_{t1}$  和  $\mathbf{b}_{fc}$  为接触力参数向量，其分量分别表示受电弓到达给定的不同识别点处的时刻及接触力大小；

[0023] 根据测点处弯曲应变的测量值和重构值计算弓网接触力反演误差，所述弓网接触力反演误差的计算公式为：

$$[0024] \quad E(\mathbf{b}_{fl}, \mathbf{b}_{fc}) = \sum_{k=1}^M \int_0^T (\varepsilon^M(x_k, t) - \varepsilon^R(x_k, \mathbf{b}_{fl}, \mathbf{b}_{fc}, t))^2 dt$$

[0025] 式中,  $\varepsilon^M(x_k, t)$  为测点处弯曲应变的测量值,  $T$  为总测量时段。

[0026] 进一步的, 所述根据优化算法从上述弓网接触力反演误差对弓网接触力参数进行修正, 得到当前列车弓网的候选接触力参数, 将当前候选接触力参数作为新的预设接触力参数重复上述反演计算; 在所述候选接触力参数满足弓网接触力反演的预设误差条件的情况下, 将所述候选接触力参数确定为目标接触力参数, 包括:

[0027] 以弓网接触力和接触时间参数为优化变量, 进行计算使得所述弓网接触力反演误差取最小值:

$$[0028] \quad \min E(\mathbf{b}_{fl}, \mathbf{b}_{fc}) = \sum_{k=1}^M \int_0^T (\varepsilon^M(x_k, t) - \varepsilon^R(x_k, \mathbf{b}_{fl}, \mathbf{b}_{fc}, t))^2 dt$$

[0029] 根据优化算法从上述弓网接触力反演误差对弓网接触力参数进行修正, 得到当前列车弓网的接触力参数作为新的所述预设接触力参数, 重复上述反演计算, 经迭代运算在所述弓网接触力反演误差满足预设的误差条件的情况下, 将当前的候选接触力参数确定为目标接触力参数, 从而获得接触力及接触位置的时程变化。

[0030] 进一步的, 所述方法还包括:

[0031] 对所述总测量时段进行划分得到多个时间测量区间;

[0032] 按照所述时间测量区间的时间顺序, 对所述时间测量区间对应的接触力参数进行优化迭代计算, 直至所述误差值收敛;

[0033] 其中分段优化计算公式如下:

$$[0034] \quad \min E(\mathbf{b}_{fl}, \mathbf{b}_{fc}) = \sum_{i=1}^Q \min E_i(\mathbf{b}_{fl}^i, \mathbf{b}_{fc}^i) = \sum_{i=1}^Q \min \sum_{k=1}^{M_i} \int_{t_{i-1}}^{t_i} (\varepsilon^M(x_k^i, t) - \varepsilon^R(x_k^i, \mathbf{b}_{fl}^i, \mathbf{b}_{fc}^i, t))^2 dt$$

[0035] 式中  $Q$  为时间测量区域的数量,  $M_i$  为第  $i$  段的测点总数;  $x_k^i$  为第  $i$  段的第  $k$  个测点坐标;  $\mathbf{b}_{fl}^i$  和  $\mathbf{b}_{fc}^i$  第  $i$  段的接触时刻及接触力识别参数分向量;  $t_{i-1}$  和  $t_i$  分别为第  $i$  段的开始和结束时刻。

[0036] 根据本申请实施例的另一个方面, 提供了一种列车刚性弓网接触力全光纤测量系统, 包括: 受电弓、接触网、测量装置;

[0037] 所述受电弓的底部安装于列车顶部, 所述受电弓的顶部与所述接触网滑动连接, 以使所述接触网向所述受电弓提供电能, 所述测量装置中的光纤传感器安装在所述接触网的离散测点上;

[0038] 其中, 所述接触网包括: 汇流排、接触线以及支撑结构, 所述接触线镶嵌于所述汇流排中, 所述支撑结构设置于所述汇流排外侧, 用于支撑所述汇流排。

[0039] 本申请实施例提供的上述技术方案与现有技术相比具有如下优点: 本申请实施例采用测量刚性接触网的弯曲动力学响应, 并通过结构动力学的反问题求解反演弓网接触力。由于所测结构对象结构和受力简单, 能够从力学上提高接触力的反演精度; 此外由于所需的测量变量种类单一, 简化了传感系统, 并且采用尺寸小、重量轻、抗电磁干扰的光纤传感器可实现大量测点测量的同时, 减小对所测结构对象的动力学特性影响; 同时轨道振动

的影响通过接触力传导到接触网上,而接触力正是所测信号,所以既保留了轨道振动对目标接触力的贡献,又避免了其在传统测量方法中作为噪声对传感器工作的干扰。

### 附图说明

[0040] 此处的附图被并入说明书中并构成本说明书的一部分,示出了符合本申请的实施例,并与说明书一起用于解释本申请的原理。

[0041] 为了更清楚地说明本申请实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,对于本领域普通技术人员而言,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0042] 图1为本申请实施例提供的一种列车刚性弓网接触力全光纤测量方法的流程图;

[0043] 图2为本申请实施例提供的一种FBG光纤传感系统的示意图;

[0044] 图3为本申请实施例提供的一种列车刚性弓网接触力全光纤测量系统的框图;

[0045] 图4为本申请实施例提供的一种列车刚性弓网接触力全光纤测量系统的结构示意图。

### 具体实施方式

[0046] 为使本申请实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本申请实施例中的附图,对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本申请的一部分实施例,而不是全部的实施例,本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请,并不构成对本申请的不当限定。基于本申请中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例,都属于本申请保护的范围。

[0047] 需要说明的是,在本文中,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0048] 根据本申请实施例的一方面,提供了一种列车刚性弓网接触力全光纤测量方法的方法实施例。图1为本申请实施例提供的一种列车刚性弓网接触力全光纤测量方法的流程图,如图1所示,该方法包括:

[0049] 步骤S11,应用光纤传感器串测量接触网离散测点的弯曲应变动力学响应。

[0050] 在本申请实施例中,应用光纤传感器串测量接触网离散测点的弯曲应变动力学响应,包括:应用多只布拉格光纤光栅(FBG)传感器串测量接触网上多个离散测点处的梁弯曲应变,将所述梁弯曲应变确定为所述弯曲应变动力学响应的测量值。

[0051] 本申请实施例采用FBG传感器串测量刚性接触网梁上离散测点的动态弯曲应变。将FBG串粘贴在接触网汇流排上(顶部或侧面),通过离散分布的FBG应变测量信息实现梁弯曲应变的准分布测量。如图2所述,FBG光纤传感系统包括:FBG传感器串、光纤引线、波长解调仪,其中波长解调仪用于发射激光并接受从各传感器反射的激光,并分辨出其波长;波长信息的数字信号通过网线传给计算机采集。

[0052] 本申请实施例采用FBG光纤传感器进行测量具有以下有益效果:

[0053] 1) 波长调制的光学测量, 抗电磁干扰, 特别适合刚性接触网的高电压的电磁工作环境, 不需屏蔽保护;

[0054] 2) FBG作为传感元件可直接测量应变;

[0055] 3) 采用波分复用技术, 可实现传感器串联测量, 大大简化走线复杂性;

[0056] 4) 尺寸小重量轻, 不影响接触网结构自身的动力学特性。

[0057] 因此, 本发明采用的全光纤测量, 在传感精度上也优于传统基于受电弓动力学响应间接测量时采用(或部分采用)的电测技术, 从传感技术上进一步提高了弓网接触力的测量精度。

[0058] 步骤S12, 确定当前列车弓网的预设接触力参数。

[0059] 步骤S13, 依据所建立的列车弓网系统中接触力激励下接触网的动力学方程计算预设接触力参数对应的接触网的挠度动力学响应。

[0060] 在本申请实施例中, 步骤S13, 依据所建立的列车弓网系统中接触力激励下接触网的动力学方程计算预设接触力参数对应的接触网的挠度动力学响应, 包括以下步骤A1-A2:

[0061] 步骤A1, 建立列车弓网系统中接触力激励下接触网的动力学方程, 其中, 动力学方程如下:

$$[0062] \quad \rho(x)A(x)\frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial t^2} + c(x)\frac{\partial Y(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}[E(x)I(x)\frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial x^2}] + \sum_{j=1}^N m_j \frac{\partial^2 Y(x,t)}{\partial t^2} \delta(x-x_j) + \sum_{j=1}^N k_j Y(x,t) \delta(x-x_j) = f_c(t) \delta(x-x_c(t))$$

[0063] 式中,  $Y(x, t)$  为梁的挠度;  $\rho(x)$  和  $A(x)$  为梁的体密度和横截面积;  $c(x)$  为材料阻尼系数;  $E(x)$  表示梁的弹性模量;  $I(x)$  为梁截面惯性矩;  $m_j$  和  $k_j$  分别为悬挂机构的等效弹簧的质量和刚度,  $x_j$  ( $j=1, N$ ) 为弹簧位置坐标,  $N$  为弹簧总数,  $\delta(x)$  为狄拉克函数;  $f_c(t)$  和  $x_c(t)$  分别为接触力参数插值得到的接触力大小和接触位置随时间变化的分布函数;

[0064] 步骤A2, 将所述预设触力参数表达的接触力和接触位置函数输入到所述运动学方程中, 得到所述接触网的挠度动力学响应。

[0065] 在本申请实施例中, 结构动力学响应可以是结构位移或应变等。如果给定某一结构响应, 求解弓网接触力  $f_c(t)$  和接触位置  $x_c(t)$  就构成该动力学的反问题, 本申请将该动力学反问题转化为优化问题求解。

[0066] 步骤S14, 基于接触网挠度动力学响应计算接触网测点处弯曲应变动力学响应的重构值, 并与光纤应变传感器测点的弯曲应变动力学响应的测量值比较, 计算弓网接触力反演误差。

[0067] 在本申请实施例中, 步骤S14, 基于接触网挠度动力学响应计算接触网测点处弯曲应变动力学响应的重构值, 并与光纤应变传感器测点的弯曲应变动力学响应测量值比较, 计算弓网接触力反演误差, 方法包括以下步骤B1-B2:

[0068] 步骤B1, 基于接触网挠度动力学响应计算接触网测点处弯曲应变动力学响应的重构值, 计算测点处弯曲应变重构值  $\varepsilon^R$  的公式如下:

$$[0069] \quad \varepsilon^R(x_k, \mathbf{b}_{t_1}, \mathbf{b}_{f_c}, t) = -h(x_k) \frac{\partial Y^2(x, \mathbf{b}_{t_1}, \mathbf{b}_{f_c}, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=x_k}, \quad k=1, M$$

[0070] 式中  $h(x_k)$  为接触网测点  $x_k$  处传感器安装点距接触网等效梁中性面的高度;

[0071] 步骤B2,根据接触网测点处弯曲应变的测量值和重构值计算弓网接触力反演误差,弓网接触力反演误差的计算公式为:

$$[0072] \quad E(\mathbf{b}_{il}, \mathbf{b}_{fc}) = \sum_{k=1}^M \int_0^T (\varepsilon^M(x_k, t) - \varepsilon^R(x_k, \mathbf{b}_{il}, \mathbf{b}_{fc}, t))^2 dt$$

[0073] 式中,  $\varepsilon^M(x_k, t)$  为测点弯曲应变的测量值,  $T$  为总测量时段。

[0074] 步骤S15,根据优化算法从上述弓网接触力反演误差对弓网接触力参数进行修正,得到当前列车弓网的候选接触力参数,将当前候选接触力参数作为新的预设接触力参数重复上述反演计算;在候选接触力参数满足弓网接触力反演的预设误差条件的情况下,将候选接触力参数确定为目标接触力参数。

[0075] 在本省实施例中,步骤S15具体包括:

[0076] 以弓网接触力和接触时间参数为优化变量,进行计算使得所述弓网接触力反演误差取最小值:

$$[0077] \quad \min E(\mathbf{b}_{il}, \mathbf{b}_{fc}) = \sum_{k=1}^M \int_0^T (\varepsilon^M(x_k, t) - \varepsilon^R(x_k, \mathbf{b}_{il}, \mathbf{b}_{fc}, t))^2 dt$$

[0078] 根据优化算法从上述弓网接触力反演误差对弓网接触力参数进行修正,得到当前列车弓网的接触力参数作为新的所述预设接触力参数,重复上述反演计算,经迭代运算在所述弓网接触力反演误差满足预设的误差条件的情况下,将当前的候选接触力参数确定为目标接触力参数,从而获得接触力及接触位置的时程变化。

[0079] 本申请实施例中采用的测量原理为:测量刚性接触网的多测点弯曲应变动力学响应,然后基于刚性接触网的动力学方程从该应变动力学响应反演出弓网接触力。本技术不需测量其它力学量,反演计算不涉及气动力,且接触网结构简单,反演精度高。反演计算最终转化为以弓网接触力参数为设计变量、以弓网接触力反演误差为目标函数的优化问题,寻求使得弓网接触力反演误差取最小值的弓网接触力参数。

[0080] 在本申请实施例中,步骤S15中的优化算法还包括以下步骤C1-C2:

[0081] 步骤C1,应用常用优化算法从上述弓网接触力反演误差对弓网接触力参数进行修正,得到当前列车弓网的候选接触力参数作为预设接触力参数;

[0082] 步骤C2,重复动力学方程求解及弓网接触力反演误差计算,当误差值落入反演误差条件的情况下,确定候选接触力参数满足反演计算预设收敛条件,并将候选接触力参数确定为目标接触力参数。

[0083] 在本申请实施例中,优化计算可分段递推进行,从而实现弓网接触力的分段识别或移动识别,以提高接触力识别效率。

[0084] 在本申请实施例中,步骤S15中的优化可分段进行,包括以下步骤D1-D2:

[0085] 步骤D1,获取对总测量时段进行划分得到多个时间测量区间;

[0086] 步骤D2,按照时间测量区间的时间顺序,对时间测量区间对应的接触力参数进行优化迭代计算,直至误差值收敛;

[0087] 其中分段优化计算公式如下:

$$[0088] \quad \min E(\mathbf{b}_{il}, \mathbf{b}_{fc}) = \sum_{i=1}^Q \min E_i(\mathbf{b}_{il}^i, \mathbf{b}_{fc}^i) = \sum_{i=1}^Q \min \sum_{k=1}^{M_i} \int_{t_{i-1}}^{t_i} (\varepsilon^M(x_k^i, t) - \varepsilon^R(x_k^i, \mathbf{b}_{il}^i, \mathbf{b}_{fc}^i, t))^2 dt$$

[0089] 式中 $Q$ 为时间测量区域的数量, $M_i$ 为第 $i$ 段的测点总数; $x_k^i$ 为第 $i$ 段的第 $k$ 个测点坐标; $\mathbf{b}_\eta^i$ 和 $\mathbf{b}_{f_c}^i$ 第 $i$ 段的接触力及接触时间识别参数分向量; $t_{i-1}$ 和 $t_i$ 分别为第 $i$ 段的开始和结束时刻。

[0090] 本申请实施例中的优化问题可通过遗传算法或梯度法等优化算法求解,给定参数向量 $\mathbf{b}_\eta^i$ 和 $\mathbf{b}_{f_c}^i$ 的初值,采用插值分析计算第 $i$ 段弓网接触力 $f_c(t)$ 和接触位置 $x_c(t)$ ;然后通过有限元法或模态法求解动力学方程,计算测点的重构应变;当重构应变与测量应变的分段误差泛函 $E_i$ 收敛到一定精度以下时,第 $i$ 段优化计算结束、输出接触力及接触位置参数,然后进入下一区段的优化;否则通过上述优化算法,调整参数向量 $\mathbf{b}_\eta^i$ 和 $\mathbf{b}_{f_c}^i$ ,重复上述计算。这样上述优化求解过程实际上是将载荷识别的反问题转化为正问题的迭代求解,算法实现简单有效,可避免一般反问题求逆存在的奇异性问题。

[0091] 如图3所示,本申请实施例提供了一种列车弓网接触力全光纤测量系统,包括:受电弓51、接触网52以及测量装置53;

[0092] 受电弓51的一端设置于列车顶部,受电弓51的另一端与接触网52滑动连接,以使接触网52向受电弓提供电能,测量装置与接触网52机械连接;

[0093] 其中,如图4所示,接触网52包括:汇流排10、接触线20以及支撑结构30,接触线镶嵌于汇流排中,支撑结构设置于汇流排外侧,用于支撑汇流排。

[0094] 以上仅为本申请的较佳实施例而已,并非用于限定本申请的保护范围。凡在本申请的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换、改进等,均包含在本申请的保护范围内。

[0095] 以上所述仅是本申请的具体实施方式,使本领域技术人员能够理解或实现本申请。对这些实施例的多种修改对本领域的技术人员来说将是显而易见的,本文中所定义的一般原理可以在不脱离本申请的精神或范围的情况下,在其它实施例中实现。因此,本申请将不会被限制于本文所示的这些实施例,而是要符合与本文所申请的原理和新颖特点相一致的最宽的范围。

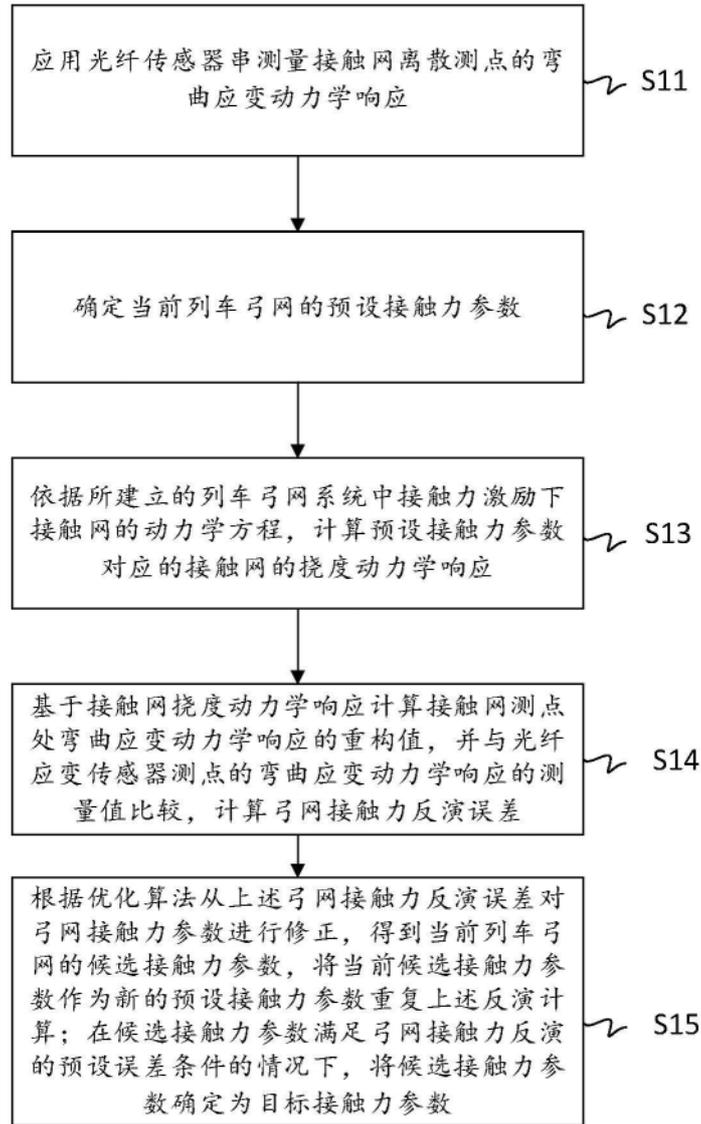


图1

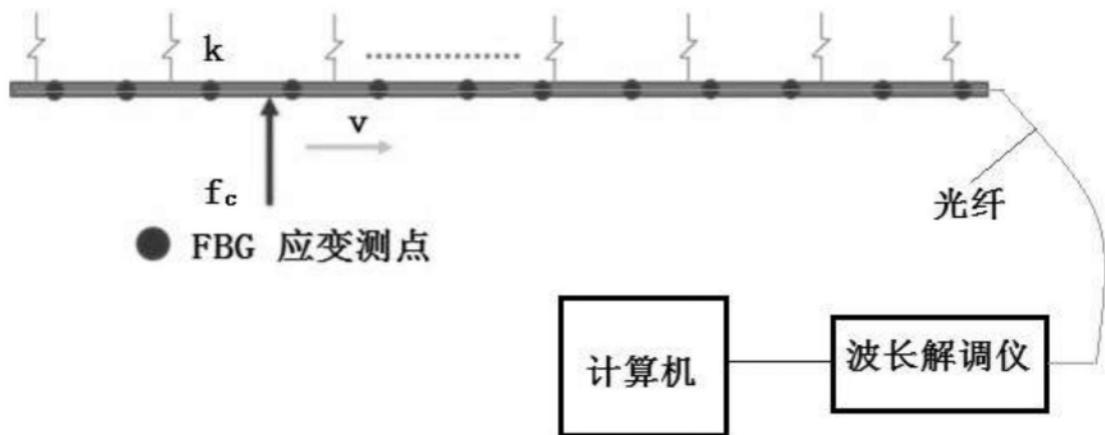


图2

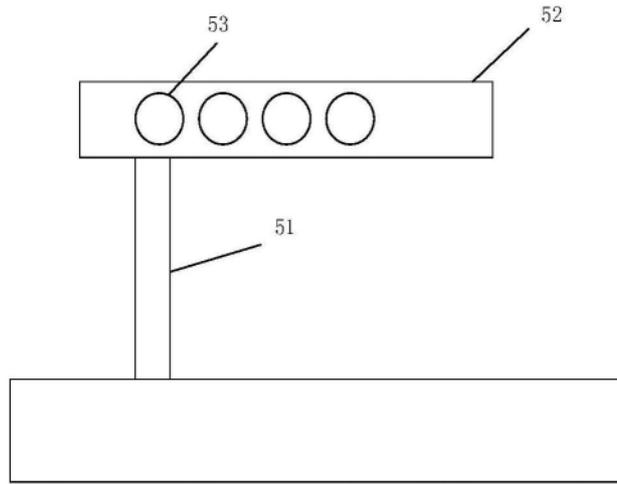


图3

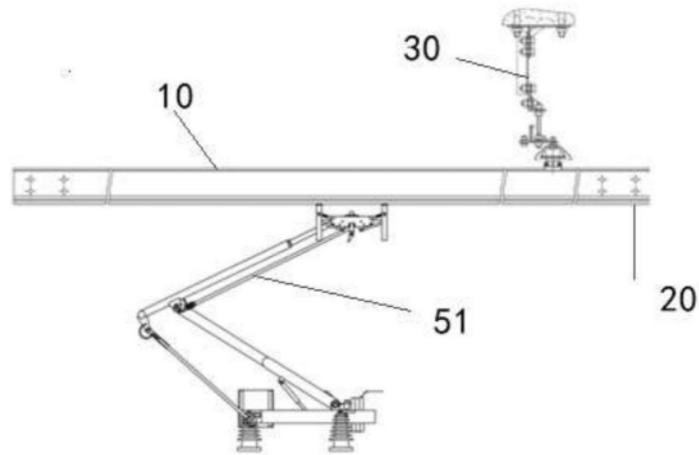


图4