



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115698625 A

(43) 申请公布日 2023.02.03

(21) 申请号 202180041905.1

(74) 专利代理机构 上海和跃知识产权代理事务

(22) 申请日 2021.06.03

所(普通合伙) 31239

(30) 优先权数据

10-2020-0072048 2020.06.15 KR

专利代理人 洪磊

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

(51) Int.Cl.

2022.12.09

G01B 7/16 (2006.01)

(86) PCT国际申请的申请数据

G01P 15/02 (2013.01)

PCT/KR2021/006978 2021.06.03

G06F 17/16 (2006.01)

G06F 17/17 (2006.01)

(87) PCT国际申请的公布数据

W02021/256749 K0 2021.12.23

(71) 申请人 韩国科学技术院

地址 韩国大田市儒城区大学路291 34141

(72) 发明人 孙勋 马占雄

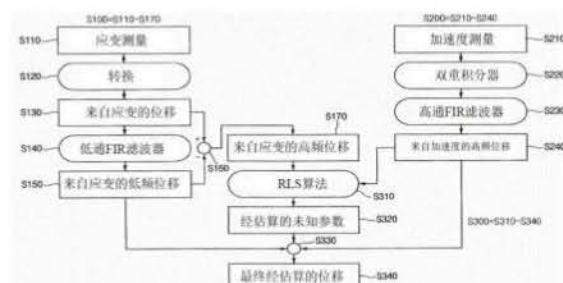
权利要求书5页 说明书10页 附图14页

## (54) 发明名称

一种估算桥梁位移的方法和一种估算桥梁位移的电子装置

## (57) 摘要

在估算桥梁的位移的方法中，包括低频分量和第一高频分量的第一位移是基于由安装在桥梁中从参考点沿第一方向的多个位置的多对应变仪所测量的应变而生成；包括第二高频分量的第二位移是基于由安装在第一位置的加速度计所测量的加速度而生成，所述第一位置在所述桥梁中沿所述第一方向与所述参考点间隔开第一距离；所述桥梁的最终位移是基于与所述位移相关联的未知参数、所述所述低频分量和所述第二高频分量而生成。所述未知参数是通过对所述第一高频分量和所述第二高频分量应用递归最小二乘算法而生成。



1. 一种估算桥梁的位移的方法,所述方法包括:

基于由多对应变仪测量的应变,生成包括低频分量和第一高频分量的第一位移,所述多对应变仪安装在桥梁中从参考点沿第一方向的多个位置;

基于由加速度计测量的加速度,生成包括第二高频分量的第二位移,所述加速度计安装在第一位置,所述第一位置在所述桥梁中沿所述第一方向与所述参考点间隔开第一距离;和

基于与所述位移相关联的未知参数、所述第一位移的所述低频分量和所述第二位移的所述第二高频分量,生成所述桥梁的最终位移,

其中,所述未知参数是通过对所述第一位移的所述第一高频分量和所述第二位移的所述第二高频分量应用递归最小二乘(RLS)算法而生成。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中生成所述第一位移包括:

通过所述多对应变仪测量子应变;

将所述经测量的子应变转换为子位移;

基于所述子位移生成所述第一位移;

通过对所述第一位移应用低通滤波器,得到所述第一位移的所述低频分量;和

通过对所述第一位移提取所述低频分量,得到所述第一位移的所述第一高频分量。

3. 根据权利要求1所述的方法,其中生成所述第二位移包括:

通过所述加速度计测量所述加速度;

对所述经测量的加速度进行双重积分;和

通过对所述经双重积分的加速度应用高通滤波器,得到所述第二位移的所述第二高频分量。

4. 根据权利要求1所述的方法,其中生成所述最终位移包括:

对所述第一位移的所述第一高频分量和所述第二位移的所述第二高频分量应用所述RLS算法;

基于所述RLS算法的结果估算所述未知参数;和

通过基于所述第一位移的所述低频分量、所述未知参数和所述第二位移的所述第二高频分量进行运算,提供所述最终位移。

5. 根据权利要求1所述的方法,其中由以下方式得到所述最终位移:

将所述第一位移的所述低频分量除以所述经估算的未知参数;和

将所述第二位移的所述第二高频分量与所述除法运算的结果相加。

6. 根据权利要求4所述的方法,其中所述经估算的未知参数对应于比例因子,所述比例因子与补偿所述桥梁的估算模态形状和所述桥梁的真实模态形状之间的差异相关联。

7. 根据权利要求1所述的方法,其中所述多对应变仪中的每一个包括第一应变仪和第二应变仪,所述第一应变仪和所述第二应变仪在所述多个位置中的一处沿垂直于所述第一方向的第二方向彼此间隔开第二距离。

8. 根据权利要求7所述的方法,其中由所述第一应变仪和所述第二应变仪测量的子应变之间的差由以下式1表示:

[式1]

$$\Delta \varepsilon(x, k) = h(x) \frac{d^2 u(x, k)}{dx^2}$$

其中 $\Delta \varepsilon$ 代表子应变之间的差,x代表所述第一方向上的位置,k代表第k个时点,u(x,k)代表所述第一位移,h(x)代表所述第二距离。

9. 根据权利要求8所述的方法,其中所述第一位移由以下式2表示:

[式2]

$$u(x, k) = \sum_{j=1}^L \varphi_j(x) q_j(k)$$

其中 $\varphi_j$ 代表第j个模态形状, $q_j$ 代表第j个模态响应,L代表模态数,

其中当式2被代入至式1时,得到如下式3:

[式3]

$$\Delta \varepsilon(x, k) = h(x) \sum_{j=1}^L \frac{d^2 \varphi_j(x)}{dx^2} q_j(k)$$

10. 根据权利要求9所述的方法,其中式3由以下式4的向量表示来表示:

[式4]

$$\Delta \varepsilon(k) = H \Phi q(k),$$

其中通过以下式5、式6、式7和式8来满足式4:

[式5]

$$\Delta \varepsilon(k) = [\Delta \varepsilon(x_1, k) \dots \Delta \varepsilon(x_m, k)]^T_{1 \times m},$$

其中m代表所述多个位置,

[式6]

$$q(k) = [q_1(k) \dots q_L(k)]^T_{1 \times L},$$

[式7]

$$\Phi = \begin{bmatrix} \frac{d^2 \varphi_1(x_1)}{dx^2} & \dots & \frac{d^2 \varphi_L(x_1)}{dx^2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d^2 \varphi_1(x_m)}{dx^2} & \dots & \frac{d^2 \varphi_L(x_m)}{dx^2} \end{bmatrix}_{m \times L},$$

[式8]

$$H = \begin{bmatrix} h(x_1) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & h(x_m) \end{bmatrix}_{m \times m},$$

其中所述模态响应q(k)从式4推导至以下式9:

[式9]

$$q(k) = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T H^{-1} \Delta \varepsilon(k).$$

11. 根据权利要求10所述的方法,其中将式9代入至式2时,在所述第一位置的所述第一位移由以下式10表示:

[式10]

$$u(k) = TH^{-1} \Delta \varepsilon(k),$$

其中通过以下式11和式12来满足式10,

[式11]

$$\mathbf{T} = \Psi(\mathbf{x}_d) [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T$$

[式12]

$$\boldsymbol{\Psi} = [\varphi_1(\mathbf{x}_d) \ \dots \ \varphi_L(\mathbf{x}_d)]_{1 \times L}$$

其中当引入与补偿所述桥梁的估算模态形状和所述桥梁的真实模态形状之间的差异相关联的比例因子 $\alpha$ 时,所述第一位移由以下式13表示:

[式13]

$$u(k) = \frac{1}{\alpha(k)} \mathbf{T}_a \mathbf{H}^{-1} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}(k)$$

其中,  $\mathbf{T}_a$  是矩阵  $\mathbf{T}$  的近似矩阵。

12. 根据权利要求11所述的方法,其中当通过以下式14表示有限响应脉冲时,

[式14]

$$\mathbf{u}^* = (\Delta t)^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{L}_a \mathbf{a} + \lambda^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{u},$$

其中  $\mathbf{u}^*$  代表所述最终位移的向量表示,  $\mathbf{u}$  代表从所述应变转换的所述第一位移的向量表示,  $\mathbf{a}$  代表所述加速度的向量表示,  $\mathbf{L}_a$  代表第  $(2N+1)$  阶对角权矩阵,  $\lambda$  代表由以下式15满足的归一化因子,

[式15]

$$\lambda = 46.81 (2N+1)^{-1.95},$$

其中  $\lambda$  由以下式16满足,

[式16]

$$\lambda = 2N + 1 = \frac{2.68}{f_1 \Delta t}$$

其中  $f_1$  代表所述桥梁的第一固有频率

当对式14应用叠加时,推导出以下式17,

[式17]

$$\mathbf{u}^*(k) = \mathbf{c}_H \mathbf{a} + \mathbf{c}_L \mathbf{u},$$

其中,  $\mathbf{c}_H$  代表  $(\Delta t)^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{L}_a$  的第  $(N+1)$  行且对应于双重积分和高通滤波器的组合, 并且  $\mathbf{c}_L$  代表  $\lambda^2 (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1}$  的低通滤波器。

13. 根据权利要求12所述的方法,其中所述第一位移由以下式18表示:

[式18]

$$\mathbf{u}_s = \{\mathbf{T}_a \mathbf{H}^{-1} \mathbf{A} \boldsymbol{\varepsilon}\}^T,$$

其中所述第一位移的所述低频分量和所述第一高频分量由以下式19和式20表示:

[式19]

$$u_s^l(k) = \mathbf{c}_L \mathbf{u}_s$$

[式20]

$$u_s^h(k) = \mathbf{c}_H \mathbf{a}$$

其中所述第二位移的所述第二高频分量由以下式21表示:

[式21]

$$u_s^h(k) = u_s(k) - u_s^l(k),$$

其中所述经估算的最终位移由以下式22表示：

[式22]

$$u^*(k) = \frac{1}{\alpha(k)} u_s^l(k) + u_a^h(k) = \frac{1}{\alpha(k)} \mathbf{C}_L \{\mathbf{T}_a \mathbf{H}^{-1} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}\}^T + \mathbf{C}_H \mathbf{a},$$

其中 $\alpha(k)$ 代表所述比例因子。

14. 根据权利要求1所述的方法，其中所述最终位移对应于位在所述第一位置的所述桥梁的位移。

15. 根据权利要求1所述的方法，其中所述多对应变仪以第一采样频率测量应变，且所述加速度计以大于所述第一采样频率的第二采样频率测量所述加速度，并且

其中使用三次样条插值对所述第一位移进行上采样。

16. 一种估算桥梁的位移的方法，所述方法包括：

通过多对应变仪测量子应变，所述多对应变仪安装在桥梁中从参考点沿第一方向的多个位置；

将所述子应变转换为子位移；

基于所述子位移生成第一位移；

通过对所述第一位移应用低通滤波器，得到所述第一位移的低频分量；

通过从所述第一位移提取所述低频分量，得到所述第一位移的所述第一高频分量；

通过加速度计测量加速度，所述加速度计安装在第一位置，所述第一位置在所述桥梁中沿所述第一方向与所述参考点间隔开第一距离；

对所述经测量的加速度进行双重积分；

通过对所述经双重积分的加速度应用高通滤波器，得到所述第二位移的所述第二高频分量；

对所述第一位移的所述第一高频分量和所述第二位移的所述第二高频分量应用所述RLS算法；

基于所述RLS算法的结果估算与所述位移相关联的未知参数；和

基于所述第一位移的所述低频分量、所述未知参数和所述第二位移的所述第二高频分量进行运算，生成所述桥梁的最终位移。

17. 一种被配置为估算桥梁的位移的电子装置，所述电子装置包括：

通信电路，其被配置为与多对应变仪和加速度计通信，并且被配置为接收由所述多对应变仪测量的应变和由所述加速度计测量的加速度，其中所述多对应变仪安装在所述桥梁中从参考点沿第一方向的多个位置，并且所述加速度计安装在第一位置，所述第一位置在所述桥梁中沿所述第一方向与所述参考点间隔开第一距离；

控制电路，其被配置为从所述通信电路接收所述应变和所述加速度，并且被配置为基于所述应变和所述加速度估算所述桥梁的最终位移；和

显示器，其被配置为从所述控制电路接收所述经估算的最终位移并且被配置为显示所述经估算的最终位移，

其中所述控制电路被配置为：

基于所述应变生成包括低频分量和第一高频分量的第一位移；

基于所述加速度生成包括第二高频分量的第二位移；  
通过对所述第一位移的所述第一高频分量和所述第二位移的所述第二高频分量应用递归最小二乘(RLS)算法，生成与所述位移相关联的未知参数；和  
基于所述未知参数、所述第一位移的所述低频分量和所述第二位移的所述第二高频分量，生成所述桥梁的所述最终位移。

## 一种估算桥梁位移的方法和一种估算桥梁位移的电子装置

### 技术领域

[0001] 实施方式涉及位移估算，并且更具体地涉及一种基于桥梁的应变和加速度来估算桥梁的位移的方法以及执行所述方法的电子装置。

### 背景技术

[0002] 土木工程结构尤其是桥梁的耐久性可能会由于汽车或风的负载而降低。混凝土桥梁中耐久性的降低会导致混凝土出现裂缝，提前发现裂缝是非常重要的。然而，通过目测发现裂缝需要大量的时间和大量的人力资源，并且难以评估裂缝的深度和裂缝造成的影响。当桥梁出现裂缝时，桥梁的中性点会发生变化。桥梁的中性点代表截面中应变为零的位置。

[0003] 通常，由于桥梁的上部经受压缩并且桥梁的下部经受拉伸，因此通过在桥梁的上表面和下表面安装应变仪来估算桥梁的中性点。

[0004] 另外，通过将应变仪测量的应变转换到频域来估算未知参数，从频域来看会存在误差。

### 发明内容

[0005] 示例实施方式提供了一种估算桥梁的位移的方法，能够提高准确性。

[0006] 示例实施方式提供了一种用于估算桥梁的位移的电子装置，能够提高准确性。

[0007] 根据示例实施方式，一种估算桥梁的位移的方法中，包括低频分量和第一高频分量的第一位移是基于由安装在桥梁中从参考点沿第一方向的多个位置的多对应变仪所测量的应变而生成，包括第二高频分量的第二位移是基于由安装在第一位置的加速度计所测量的加速度而生成，所述第一位置在所述桥梁中沿所述第一方向与所述参考点间隔开第一距离，所述桥梁的最终位移是基于与所述位移相关联的未知参数、所述第一位移的所述低频分量和所述第二位移的所述第二高频分量而生成。所述未知参数是通过对所述第一位移的所述第一高频分量和所述第二位移的所述第二高频分量应用递归最小二乘 (recursive least square, RLS) 算法而生成。

[0008] 为了生成所述第一位移，通过所述多对应变仪测量子应变，将所述经测量的子应变转换为子位移，基于所述子位移生成所述第一位移，通过对所述第一位移应用低通滤波器，得到所述第一位移的所述低频分量；和通过从所述第一位移提取所述低频分量，得到所述第一位移的所述第一高频分量。

[0009] 为了生成所述第二位移，通过所述加速度计测量所述加速度，所述经测量的加速度被双重积分并且通过对所述经双重积分的加速度应用高通滤波器，得到所述第二位移的所述第二高频分量。

[0010] 为了生成所述最终位移，对所述第一位移的所述第一高频分量和所述第二位移的所述第二高频分量应用所述RLS算法，基于所述RLS算法的结果估算所述未知参数，并且通过基于所述第一位移的所述低频分量、所述未知参数和所述第二位移的所述第二高频分量进行运算，提供所述最终位移。

[0011] 根据示例实施方式，一种估算桥梁的位移的方法中，通过多对应变仪测量子应变，所述多对应变仪安装在桥梁中从参考点沿第一方向的多个位置，将所述子应变转换为子位移，对所述第一位移应用低通滤波器，得到所述第一位移的低频分量，通过从所述第一位移提取所述低频分量，得到所述第一位移的所述第一高频分量，通过加速度计测量加速度，所述加速度计安装在第一位置，所述第一位置在所述桥梁中沿所述第一方向与所述参考点间隔开第一距离，所述经测量的加速度被双重积分，通过对所述经双重积分的加速度应用高通滤波器，得到所述第二位移的所述第二高频分量，对所述第一位移的所述第一高频分量和所述第二位移的所述第二高频分量应用所述RLS算法，基于所述RLS算法的结果估算与所述位移相关联的未知参数并且基于所述第一位移的所述低频分量、所述未知参数和所述第二位移的所述第二高频分量进行运算，生成所述桥梁的最终位移。

[0012] 根据示例实施方式，一种用于估算桥梁的位移的电子装置包括通信电路、控制电路和显示器。所述通信电路与多对应变仪和加速度计通信，并且接收由所述多对应变仪测量的应变和由所述加速度计测量的加速度。所述多对应变仪安装在所述桥梁中从参考点沿第一方向的多个位置，并且所述加速度计安装在第一位置，所述第一位置在所述桥梁中沿所述第一方向与所述参考点间隔开第一距离。控制电路从所述通信电路接收所述应变和所述加速度，并且基于所述应变和所述加速度估算所述桥梁的最终位移。显示器从所述控制电路接收所述经估算的最终位移并且显示所述经估算的最终位移。所述控制电路基于所述应变生成包括低频分量和第一高频分量的第一位移，基于所述加速度生成包括第二高频分量的第二位移，通过对所述第一位移的所述第一高频分量和所述第二位移的所述第二高频分量应用递归最小二乘(RLS)算法，生成与所述位移相关联的未知参数，并且基于所述未知参数、所述第一位移的所述低频分量和所述第二位移的所述第二高频分量，生成所述桥梁的所述最终位移。

[0013] 因此，根据示例实施方式的估算桥梁的位移的方法和电子装置可以更准确地估计桥的位移，因为比例因子是在时域中而不是在频域中使用RLS算法估算位移来估算，且经估算的位移和经估算的比例因子不受固有频率精度的影响。

## 附图说明

[0014] 本公开的上述和其他特征将通过参照附图对其实施方式的详细描述而变得更加明白。

[0015] 图1示出根据示例实施方式，依据估算桥梁的位移的方法将多对应变仪和加速度计安装在桥梁中。

[0016] 图2为示出根据示例实施方式的估算桥梁的位移的方法的流程图。

[0017] 图3示出具有不同横截面的真实桥梁所经受的轴向负载和垂直负载。

[0018] 图4示出由安装在图3的桥梁中的多对应变仪中的一者所测量的应变。

[0019] 图5为示出根据示例实施方式，估算图2的桥梁的位移的方法的流程图。

[0020] 图6A示出应用根据示例实施方式的估算桥梁的位移的方法的样品桥梁，且图6B示出样品桥梁的横截面尺寸。

[0021] 图7示出应用于图6A的样品桥梁的地面上运动信号。

[0022] 图8A至8C示出当图7中的地面运动信号被分别应用于图6A的样品桥梁时的经估算

的位移的示例。

[0023] 图9示出具有变化的横截面的样品桥梁的示例,根据示例实施方式的估算桥梁的位移的方法被应用于该样品桥梁。

[0024] 图10示出当根据示例实施方式的估算桥梁的位移的方法被应用于图9中的第一样品桥梁时,真实模态形状(mode shape)和估算模态形状之间的差异。

[0025] 图11示出根据示例实施方式的估算桥梁位移的方法被应用于真实桥梁。

[0026] 图12是示出根据示例实施方式的用于执行估算桥梁的位移的方法的电子装置的示例的框图。

## 具体实施方式

[0027] 应当理解,尽管在本文中可以使用术语第一、第二、第三等来描述各种元件、组件和/或部分,但是这些元件、组件和/或部分不应受这些术语限制。这些术语仅用于将一个元件、组件或部分与另一个元件、组件或部分进行区分。因此,在不脱离示例实施方式的教示的情况下,以下讨论的第一元件、组件或部分可以被称为第二元件、组件或部分。

[0028] 应当理解,当一个元件或层被称为“连接于”或“耦合于”另一个元件时,其可直接位于、连接或耦合于另一个元件,或者可存在中间的组件或层。相反地,当一个元件被称为“直接在”、“直接连接于”或“直接耦合于”另一个元件时,不存在中间元件。相似或类似的附图标记始终指代相似或类似的元件。如本文所用,术语“和/或”包括一个或多个相关联的被列出的项目的任何和所有组合。

[0029] 本文使用的术语仅出于描述特定示例实施方式的目的,并非旨在限制本发明。如本文所用,单数形式“一”、“一个”和“所述”也旨在包括复数形式,除非上下文另有明确指示。将进一步理解,当在本说明书中使用时,术语“包括”、“包含”指定了所述特征、整数、步骤、操作、元件和/或组件,但不排除存在或添加一个或多个其他特征、整数、步骤、操作、元件、组件和/或它们的组。

[0030] 除非另有定义,本文中使用的所有术语(包括技术和科学术语)具有与本发明所属领域的普通技术人员通常理解的相同含义。将进一步理解,术语,例如在常用字典中定义的术语,应被解释为与其在相关技术的上下文中的含义一致,并且不会以理想化或过于正式的意义来解释,除非本文中明确如此定义。

[0031] 下文将参照附图更全面地描述示例实施方式,其中示出了各种实施方式。

[0032] 图1示出根据示例实施方式,依据估算桥梁的位移的方法将多对应变仪和加速度计安装在桥梁中。

[0033] 参照图1,多对应变仪20a、20b、…、20m被安装在从桥梁10中的参考点RP沿第一方向D1的多个位置x1、x2、…、xm,并且加速度计30被安装在桥梁10中沿第一方向D1与参考点RP隔开第一距离xd的第一位置。

[0034] 多对应变仪20a、20b、…、20m中的每一个可以包括第一应变仪和第二应变仪,第一应变仪和第二应变仪在多个位置x1、x2、…、xm中的一处,沿垂直于第一方向D1的第二方向D2彼此间隔开第二距离。

[0035] 由多对应变仪20a、20b、…、20m测量的应变可以转换为第一位移,由加速度计30测量的加速度可以转换为第二位移,并且桥梁10的位移可以通过结合第一位移和第二位移来

估算。

[0036] 图2是示出根据示例实施方式的估算桥梁的位移的方法的流程图。

[0037] 参照图1和2,基于由安装在桥梁10中从参考点RP沿第一方向D1的多个位置x1、x2、…、xm的多对应变仪20a、20b、…、20m测量的应变,生成(即,计算)包括低频分量和第一高频分量的第一位移(操作S100)。

[0038] 包括第二高频分量的第二位移是基于由加速度计20测量的加速度生成,所述加速度计20安装在第一位置,所述第一位置在所述桥梁10中沿所述第一方向D1与所述参考点RP间隔开第一距离xd(操作S200)。

[0039] 基于与所述位移相关联的未知参数、所述第一位移的所述低频分量和所述第二位移的所述第二高频分量,生成所述桥梁10的最终位移(操作S300)。可通过对所述第一位移的所述第一高频分量和所述第二位移的所述第二高频分量应用递归最小二乘(RLS)算法而生成所述未知参数。

[0040] 为了生成第一位移(操作S100),通过所述多对应变仪20a、20b、…、20m测量子应变(操作S110),将所述经测量的子应变转换为子位移(操作S120),基于所述子位移生成所述第一位移(操作S130),通过对所述第一位移应用低通滤波器(操作S140),得到所述第一位移的所述低频分量(即低频位移)(操作S150),并且通过从所述第一位移提取所述低频分量(操作S160),得到所述第一位移的第一高频分量(即高频位移)(操作S170)。

[0041] 为了生成第二位移(操作S200),通过所述加速度计20测量所述加速度(操作S210),所述经测量的加速度被双重积分(操作S220),并且通过对所述经双重积分的加速度应用高通滤波器(FIR)(操作S230),得到所述第二位移的所述第二高频分量(即高频位移)(操作S240)。

[0042] 为了生成最终位移(操作S300),对所述第一位移的所述第一高频分量和所述第二位移的所述第二高频分量应用所述RLS算法(操作S310),基于所述RLS算法的结果估算所述未知参数(操作S320),并且通过基于所述第一位移的所述低频分量、所述未知参数和所述第二位移的所述第二高频分量进行运算(操作S330),提供所述最终(经估算的)位移(操作S340)。

[0043] 在实施方式中,可以通过以下方式得到所述最终位移,即将所述第一位移的所述低频分量除以所述经估算的未知参数并且将所述第二位移的所述第二高频分量与所述除法运算的结果相加。

[0044] 在实施方式中,所述经估算的未知参数可对应于比例因子,所述比例因子与补偿所述桥梁10的估算模态形状和所述桥梁的真实模态形状之间的差异相关联。

[0045] 图3示出具有不同横截面的真实桥梁所经受的轴向负载和垂直负载。

[0046] 参照图3,桥梁10a可具有不同横截面而且桥梁10a可经受轴向负载和垂直负载。

[0047] 图4示出由安装在图3的桥梁中的多对应变仪中的一者所测量的应变。

[0048] 图4示出由安装在图3的桥梁10a中的任意位置的应变仪所测量的应变。

[0049] 一对应变仪可以包括沿第二方向D2彼此隔开第二距离h(x)的第一应变仪21和第二应变仪21。

[0050] 在桥梁10a中的任意位置测量的子应变 $\epsilon(x, y, k)$ :可以包括均匀的轴向子应变 $\epsilon^u(x, k)$ 和线性变化的弯曲子应变 $\epsilon^b(x, y, k)$ 。

- [0051] 图4中,0代表桥梁10a在第二方向D2上的截面的中心。  
 [0052] 应变和来自当前应变的位移之间的关系由以下式1表示。  
 [0053] [式1]

$$\varepsilon^b(x, y, k) = y \frac{d^2 u(x, k)}{dx^2}$$

- [0054] 这里,u代表桥梁10a沿第二方向D2的位移。  
 [0055] 参照图4所示,当多对应变仪中的每一对包括第一应变仪和第二应变仪时,由第一应变仪和第二应变仪测量的子应变之间的差由以下式2表示。  
 [0056] [式2]

$$\Delta \varepsilon(x, k) = h(x) \frac{d^2 u(x, k)}{dx^2}$$

- [0057] 这里, $\Delta \varepsilon$ 代表子应变之间的差,x代表第一方向上的位置,k代表第k个时点,u(x,k)代表第一位移,且h(x)代表第二距离。  
 [0058] 第一位移由以下式3表示。

- [0059] [式3]

$$u(x, k) = \sum_{j=1}^L \varphi_j(x) q_j(k)$$

- [0060] 这里, $\varphi_j$ 代表第j个模态形状, $q_j$ 表示第j个模态响应(modal response),且L代表模态数。  
 [0061] 当式3被代入到式2时,获得以下式4。  
 [0062] [式4]

$$\Delta \varepsilon(x, k) = h(x) \sum_{j=1}^L \frac{d^2 \varphi_j(x)}{dx^2} q_j(k)$$

- [0063] 式4由以下式5的向量表示(vector representation)来表示。

- [0064] [式5]

$$A\varepsilon(k) = H\Phi q(k)$$

- [0065] 通过以下式6、式7、式8和式9满足式5。

- [0066] [式6]

$$\Delta \varepsilon(k) = [\Delta \varepsilon(x_1, k) \dots \Delta \varepsilon(x_m, k)]^T_{1 \times m}$$

- [0067] 这里,m代表多个位置。

- [0068] [式7]

$$q(k) = [q_1(k) \dots q_L(k)]^T_{1 \times L}$$

- [0069] [式8]

$$\Phi = \begin{bmatrix} \frac{d^2 \varphi_1(x_1)}{dx^2} & \dots & \frac{d^2 \varphi_L(x_1)}{dx^2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d^2 \varphi_1(x_m)}{dx^2} & \dots & \frac{d^2 \varphi_L(x_m)}{dx^2} \end{bmatrix}_{m \times L}$$

- [0070] [式9]

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h(x_1) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & h(x_m) \end{bmatrix}_{m \times m}$$

[0071] 模态响应 $q(k)$ 是从式5推导至以下式10。

[0072] [式10]

$$q(k) = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi T H^{-1} \Delta \varepsilon(k)$$

[0073] 将式10代入至式3时,在第一位置的第一位移由以下式11表示。

[0074] [式11]

$$u(k) = TH^{-1} \Delta \varepsilon(k)$$

[0075] 通过下式12和式13来满足式11。

[0076] [式12]

$$T = \Psi(x_d) [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T$$

[0077] [式13]

$$\Psi = [\varphi_1(x_d) \dots \varphi_L(x_d)]_{1 \times L}$$

[0078] 当引入与补偿桥梁的估算模态形状和桥梁的真实模态形状之间的差异相关联的比例因子 $\alpha$ 时,第一位移由以下式14表示。

[0079] [式14]

$$u(k) = \frac{1}{\alpha(k)} T_a H^{-1} \Delta \varepsilon(k)$$

[0080] 这里, $T_a$ 是矩阵 $T$ 的近似矩阵。

[0081] 有限响应脉冲(finite response pulse)由以下式15表示。

[0082] [式15]

$$u^* = (\Delta t)^2 (L^T L + \lambda^2 I)^{-1} L T L_a a + \lambda^2 (L^T L + \lambda^2 I)^{-1} u$$

[0083] 这里, $u^*$ 代表最终位移的向量表示, $u$ 代表从应变转换的第一位移的向量表示, $a$ 代表加速度的向量表示, $L_a$ 代表第(2N+1)阶对角权矩阵(diagonal weight matrix),且 $\lambda$ 代表由以下式16满足的归一化因子。

[0084] [式16]

$$\lambda = 46.81 (2N+1)^{-1.95}$$

[0085] 这里, $\lambda$ 由以下式17满足。

[0086] [式17]

$$\lambda = 2N + 1 = \frac{2.68}{f_1 \Delta t}$$

[0087] 这里, $f_1$ 代表桥梁10a的第一固有频率。

[0088] 当对式15应用叠加时,推导出以下式18。

[0089] [式18]

$$u^*(k) = C_H a + C_L u$$

$$C_H (\Delta t)^2 (L^T L + \lambda^2 I)^{-1} L T L_a$$

[0090] 这里,代表的第(N+1)行 $C_L$ 且对 $\lambda^2 (L^T L + \lambda^2 I)^{-1}$ 应于双重积分和高通滤波器的组合,并且代表的低通滤波器。

[0091] 第一位移由以下式19表示。

[0092] [式19]

$$u_s^l = \{T_a H^{-1} \Delta \varepsilon\}^t$$

[0093] 这里,第一位移的低频分量和第一高频分量由以下式20和式21表示。

[0094] [式20]

$$u_s^l(k) = C_L u_s$$

[0095] [式21]

$$u_a^h(k) = C_H a$$

[0096] 第二位移的第二高频分量由以下式22表示。

[0097] [式22]

$$u_s^h(k) = u_s(k) - u_s^l(k)$$

[0098] 当比例因子 $\alpha(k)$ 被应用于第一位移的第一高频分量时,第二位移的第二高频分量与第一位移的第一高频分量相似,且第二位移的第二高频分量由以下式23表示。

[0099] [式23]

$$u_a^h(k) \approx \frac{1}{\alpha(k)} u_s^h(k)$$

[0100] 当基于RLS算法估算比例因子 $\alpha(k)$ 时,比例因子 $\alpha(k)$ 由以下式24表示。

[0101] [式24]

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) + p(k) u_a^h(k) [u_s^h(k) - u_a^h(k) \alpha(k-1)]$$

[0102] 这里, $p(k)$ 代表分配给当前测量值和先前估算值的相对权重。

[0103] 式24中, $p(k)$ 由以下式25表示。

[0104] [式25]

$$p(k) = \frac{p(k-1)}{1 + p(k-1)[u_a^h(k)]^2}$$

[0105] 当经估算的比例因子 $\alpha(k)$ 用于缩放第一位移的低频分量时,经估算的最终位移由以下式26表示。

[0106] [式26]

$$u^*(k) = \frac{1}{\alpha(k)} u_s^l(k) + u_a^h(k) = \frac{1}{\alpha(k)} C_L \{T_a H^{-1} \Delta \varepsilon\}^T + C_H a$$

[0107] 多对应变仪20a、20b、…、20m中的每一个能够以第一采样频率测量应变,并且加速度计30能够以大于第一采样频率的第二采样频率测量加速度。可以使用三次样条插值(cubic spline interpolation)对从应变转换的第一位移进行上采样(up-sample)以匹配第二采样频率。此外,可以将具有奈奎斯特截止频率(Nyquist cut-off frequency)的低通巴特沃斯滤波器(low-pass Butterworth filter)应用于第一位移的第一高频分量和第二位移的第二高频分量。

[0108] 参照式1至式26,根据示例实施方式的估算桥梁的位移的方法可以更准确地估算桥梁的位移,因为比例因子 $\alpha(k)$ 是在时域中而不是在频域中使用RLS算法估算位移来估算,并且经估算的位移和经估算的比例因子不受固有频率精度的影响。

- [0109] 图5为示出根据示例实施方式,估算图2的桥梁的位移的方法的流程图。
- [0110] 图5中,在每个操作中测量或生成的参数被一起示出。
- [0111] 参照图5,当与图2的方法相比时,进一步包括基于比例因子 $\alpha$  ( $k$ ) 估算比例因子 $\alpha$  ( $k$ ) 的操作 (S320) 和缩放第一位移的低频分量的操作 (S325)。
- [0112] 图6A示出应用根据示例实施方式的估算桥梁的位移的方法的样品桥梁,且图6B示出样品桥梁的横截面尺寸。
- [0113] 参照图6A,样品桥梁50具有10m的长度,多对应变仪安装在沿第一方向D1与参考点分别间隔开2m、5m和8m距离的多个位置,且加速度计安装在沿第一方向D1与参考点间隔开5m的位置60。在位置60,测量样品桥梁50的位移。图6A中,标号110表示地面运动信号。
- [0114] 参照图6B,样品桥梁50的横截面可以具有由120mm\*120mm限定的尺寸。
- [0115] 图7示出应用于图6A的样品桥梁的地面运动信号。
- [0116] 参照图7,具有不同加速度的地面运动信号121、122和123被应用于样品桥梁50。
- [0117] 图8A至8C示出当图7中的地面运动信号被分别应用于图6A的样品桥梁时估算位移的示例。
- [0118] 参照图8A至8C,连同传统技术被应用于样品桥梁50时的参考位移参考Reference和经估算的位移,示出图7中的地面运动信号121、122和123被分别应用于图6A的样品桥梁50时的经估算的位移。
- [0119] 图8A至8C中,假定传统技术对应于功率谱密度 (power spectral density, PSD) 技术。
- [0120] 参照图8A至图8C,注意到随着地面运动信号的加速度的变化增加,根据本公开的方法的位移与参考值Reference之间的差异变得小于根据PSD技术的方法的位移与参考值Reference之间的差异。
- [0121] 图9示出具有变化的横截面的样品桥梁的示例,根据示例实施方式的估算桥梁的位移的方法被应用于该样品桥梁。
- [0122] 图10示出当根据示例实施方式的估算桥梁的位移的方法被应用于图9中的第一样品桥梁时,真实模态形状和估算模态形状之间的差异。
- [0123] 参照图9和图10,当桥的横截面作为第一样品桥梁I变化时,注意到第一阶131和第三阶133的真实模态形状和估算模态形状之间几乎没有差异,并且在第二阶132中于真实模态形状和估算模态形状之间存在差异。
- [0124] 图11示出根据示例实施方式的估算桥梁位移的方法被应用于真实桥梁。
- [0125] 参照图11,注意到根据本公开的方法的位移与参考值Reference之间几乎没有差异,并且在13秒至17秒的定时范围内,根据PSD技术的方法的位移与参考值Reference之间存在差异。
- [0126] 图12是示出根据示例实施方式的用于执行估算桥梁的位移的方法的电子装置的示例的框图。
- [0127] 参照图1和图12,用于估算桥梁的位移的电子装置200可以包括通信电路210、控制电路220和显示器230。
- [0128] 通信电路210可与安装在桥梁10中从参考点RP沿第一方向D1的多个位置x1、x2、...、xm的多对应变仪20a、20b、...、20m和安装在桥梁10中沿第一方向D1与参考点RP间

隔开第一距离 $x_d$ 的第一位置的加速度计30通信,其可接收由多对应变仪20a、20b、…、20m测量的应变STS,且可接收由加速度计30测量的加速度ACS。

[0129] 通信电路210通常可以包括一个或多个模块,这些模块允许诸如电子装置200与无线通信系统之间的无线通信、电子装置200与另一电子装置之间的通信、电子装置200与外部服务器之间的通信。此外,通信电路210可包括广播接收模块、移动通信模块、无线互联网模块、短距离通信模块和位置信息模块。

[0130] 广播接收模块可以经由广播频道从外部广播管理实体接收广播信号和/或广播相关信息。广播频道可以包括卫星频道、地面频道或两者。广播管理实体可以使用生成和发送广播信号和/或广播相关信息的服务器或系统,或接收预先生成的广播信号和/或广播相关信息并将这些项目发送至移动终端的服务器。可以使用TV广播信号、无线电广播信号、数据广播信号及其组合中的任何一者来实现广播信号。在一些情况下,广播信号还可以包括与TV或无线电广播信号组合的数据广播信号。

[0131] 广播相关信息的示例可以包括与广播频道、广播节目、广播事件、广播服务提供商等相关的信息。广播相关信息也可以经由移动通信网络提供,并且在这种情况下,由移动通信模块接收。

[0132] 移动通信模块可以向一个或多个网络实体发送和/或从一个或多个网络实体接收无线信号。经由移动通信模块发送和/或接收的无线信号的示例包括音频呼叫信号、视频(电话)呼叫信号或支持文本和多媒体消息的通信的各种数据格式。

[0133] 无线互联网模块可以促进无线互联网存取。该模块可以内部地或外部地耦合于电子装置200。无线互联网模块可以根据无线互联网技术经由通信网络发送和/或接收无线信号。这种无线互联网存取的示例包括无线局域网(Wireless LAN,WLAN)、无线保真(Wireless Fidelity,Wi-Fi)、无线宽带(Wireless Broadband,WiBro)、全球微波互通存取(Worldwide Interoperability for Microwave Access,WiMAX)、高速下行链路分组存取(High Speed Downlink Packet Access,HSDPA)等。

[0134] 短程通信模块可以促进短程通信。用于实现此类短程通信的合适技术包括BLUETOOTH™、射频识别(Radio Frequency Identification,RFID)、红外数据协定(Infrared Data Association,IrDA)、超宽带(Ultra-WideBand,UWB)、ZigBee、近场通信(Near Field Communication,NFC)、无线保真(Wireless Fidelity,Wi-Fi)、Wi-Fi Direct、无线USB(Wireless Universal Serial Bus,无线通用串行总线)等。

[0135] 位置信息模块可以检测、计算、导出或以其他方式识别电子装置200的位置。作为示例,位置信息模块可以包括全球定位系统(Global Position System,GPS)模块。

[0136] 控制电路220可以从通信电路210接收应变STS和加速度ACS,可以根据估算桥梁的位移的方法基于应变STS和加速度ACS估算桥梁的最终位移,并且可以在显示器230中显示经估算的最终位移。

[0137] 控制电路220可以基于应变STS生成包括低频分量和第一高频分量的第一位移,可以基于加速度ACS生成包括第二高频分量的第二位移,可以通过将RLS算法应用于第一位移的第一高频分量和第二位移的第二高频分量来生成与位移相关联的未知参数,并且可以基于未知参数、第一位移的低频分量和第二位移的第二高频分量来生成桥梁的最终位移。

[0138] 本公开可以不同地应用于测量桥梁的位移的方法和装置。

[0139] 前述内容是示例实施方式的说明，并且不应被解释为对其进行限制。尽管已经描述了几个示例实施方式，但是本领域技术人员将容易理解，在示例实施方式中可以进行许多修改，而不会实质上背离本公开的新颖教示和优点。因此，所有这些修改旨在被包括于如所附权利要求中定义的本公开的范围内。

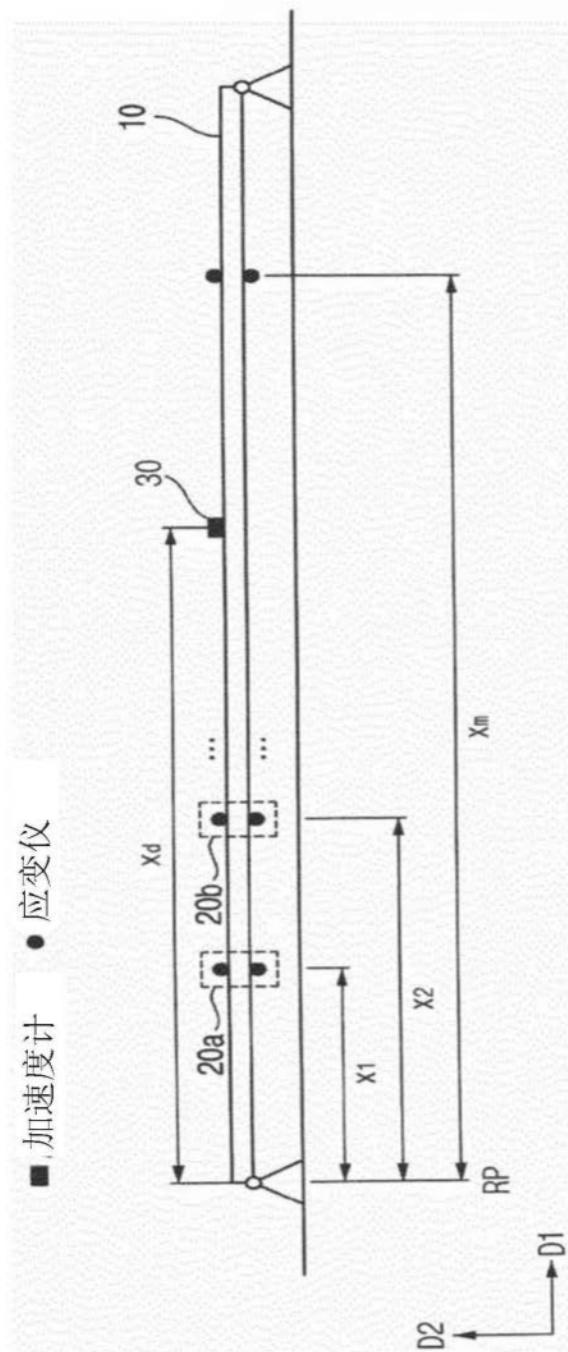


图 1

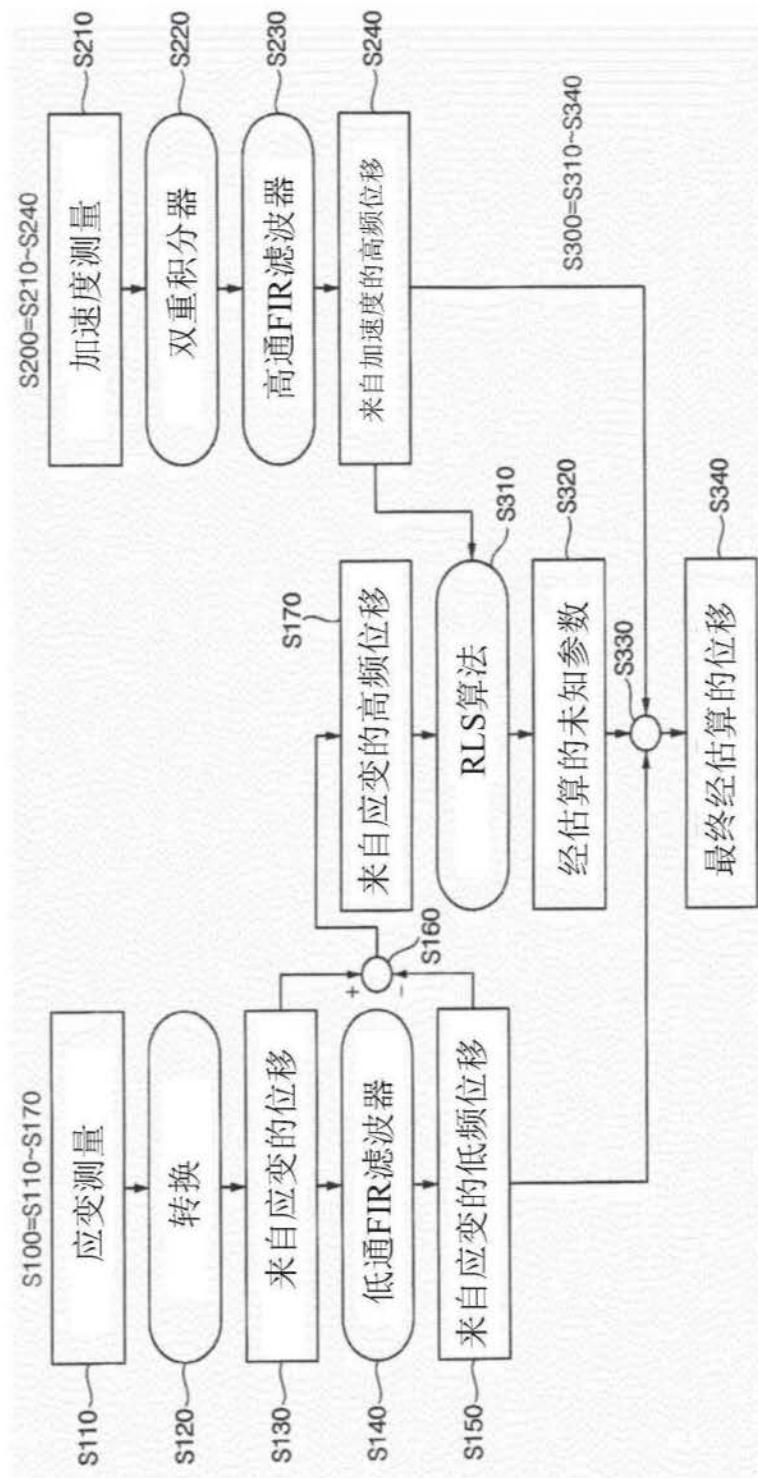


图2

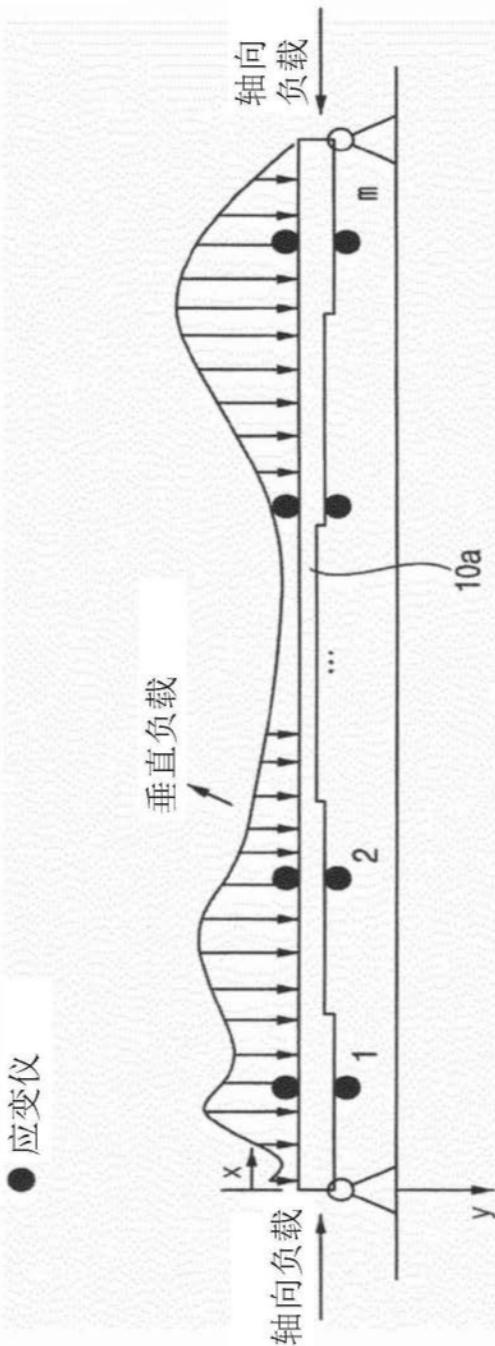


图3

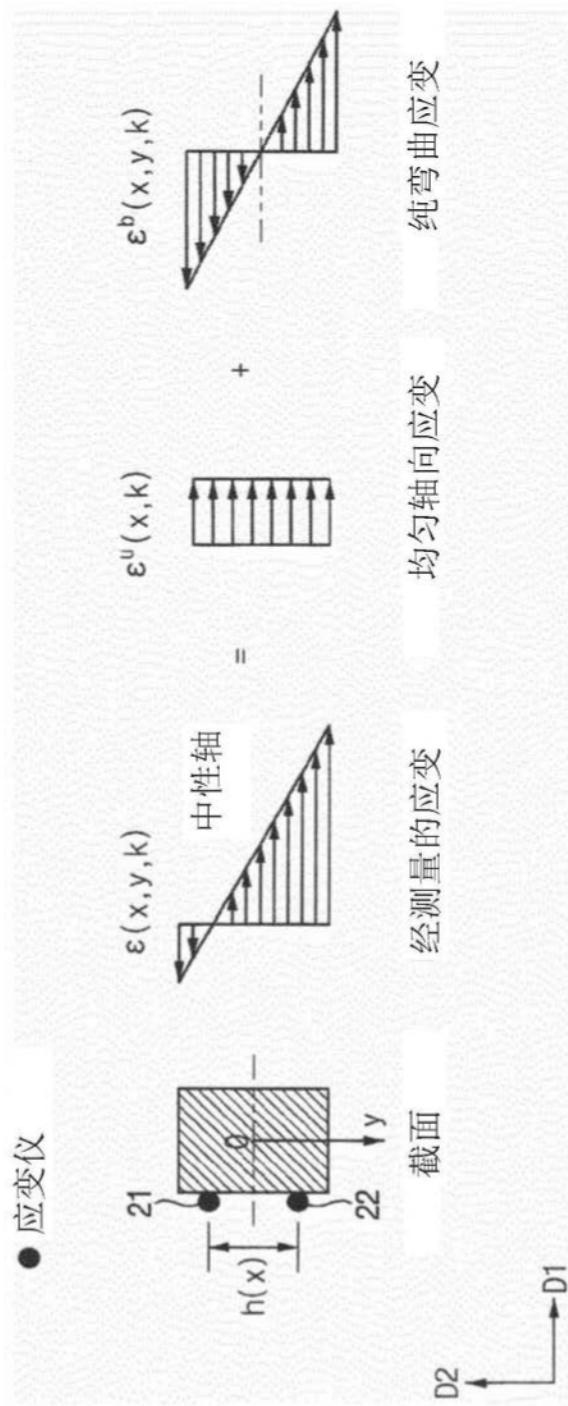


图4

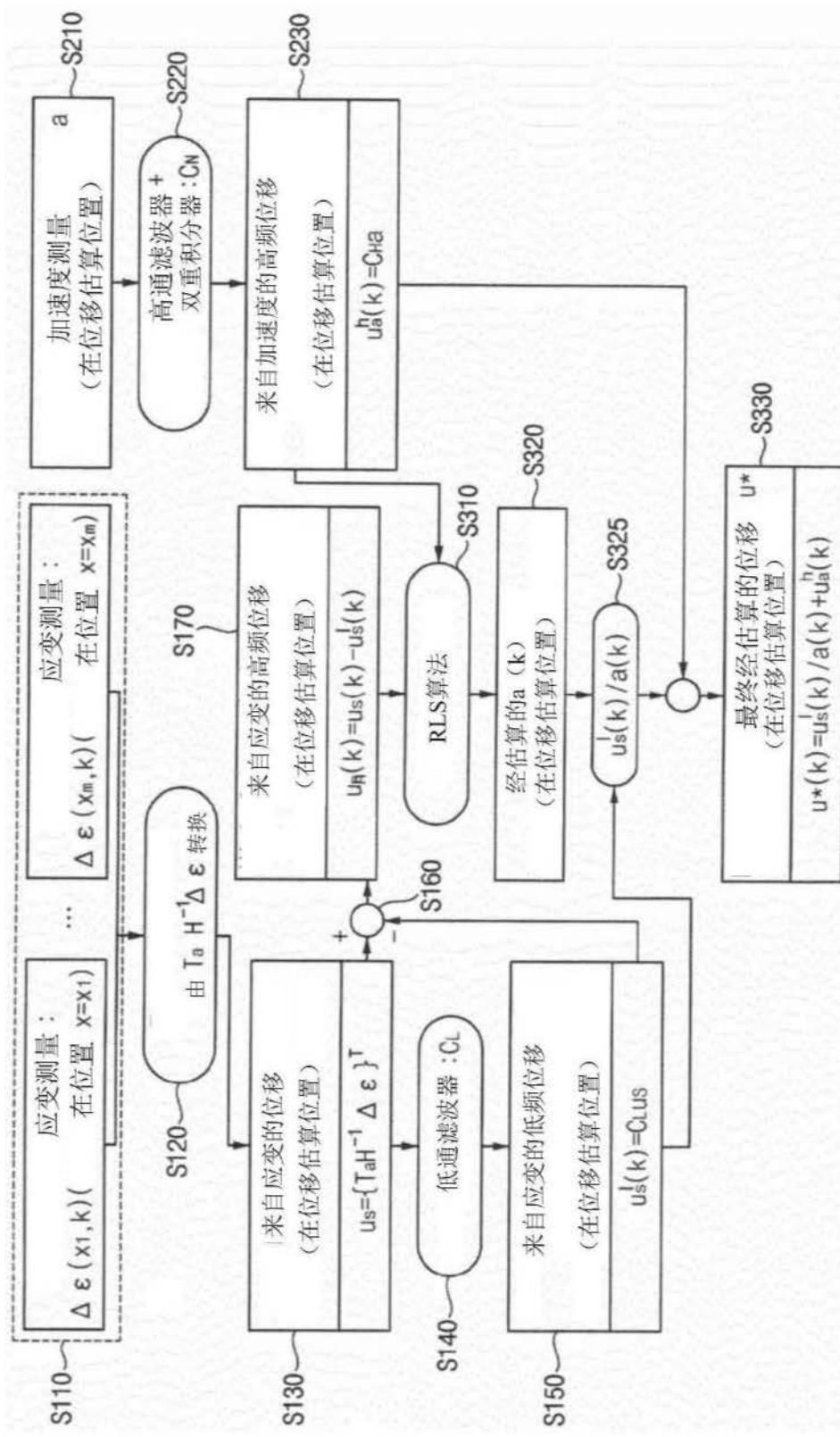


图5

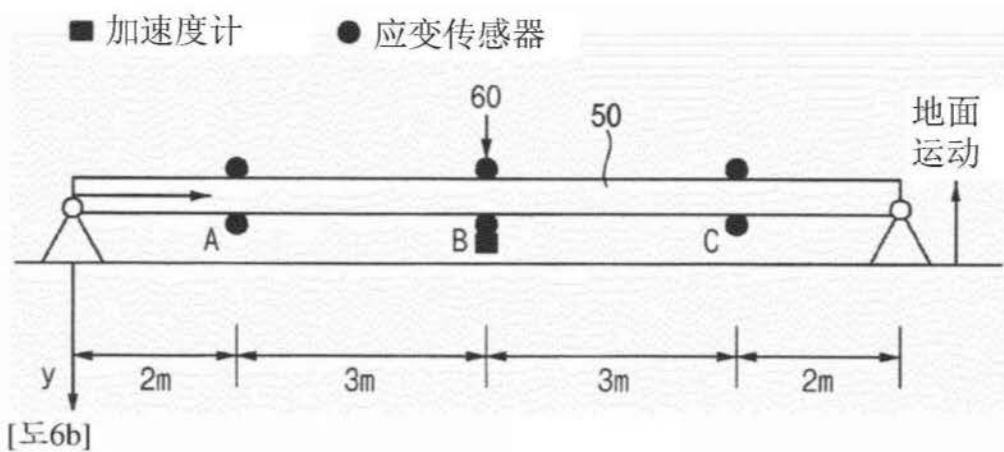


图6a

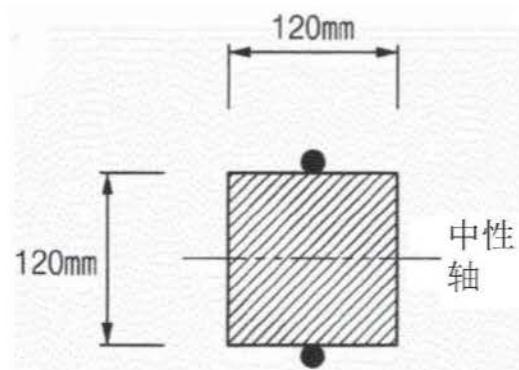


图6b

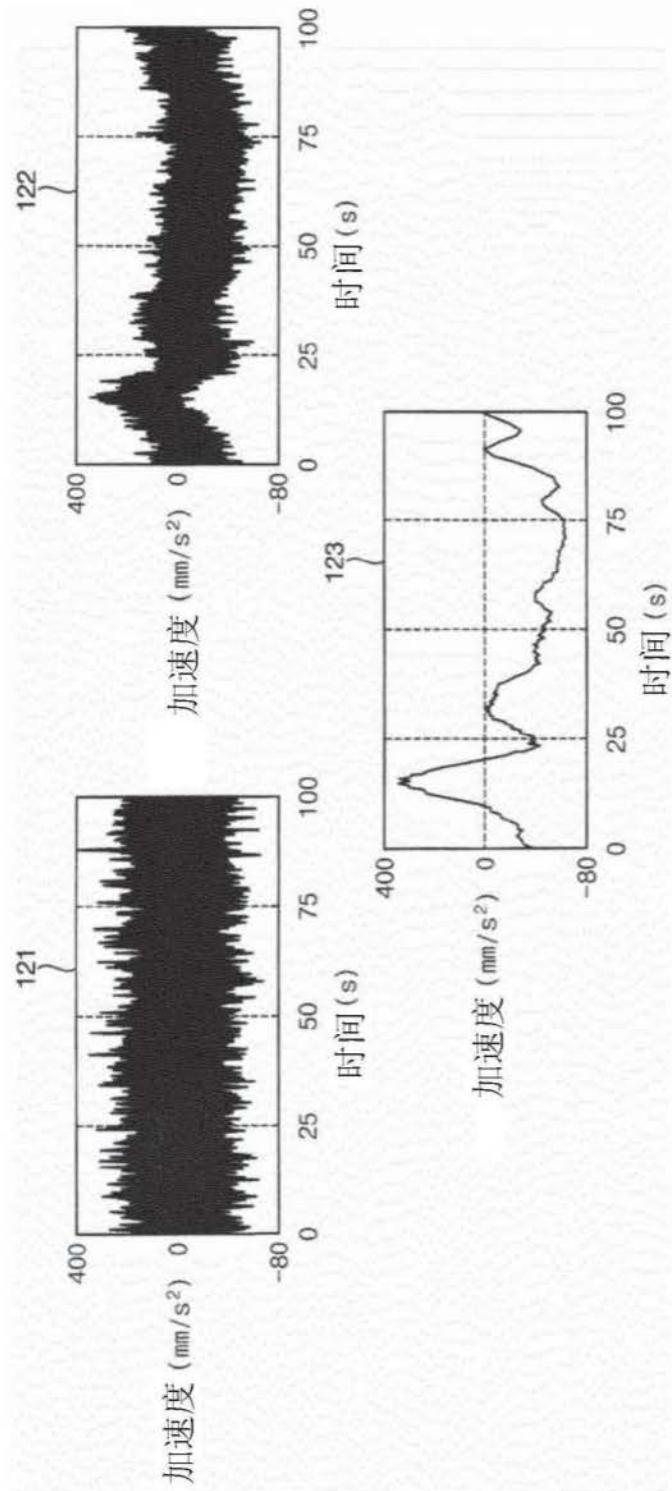


图 7

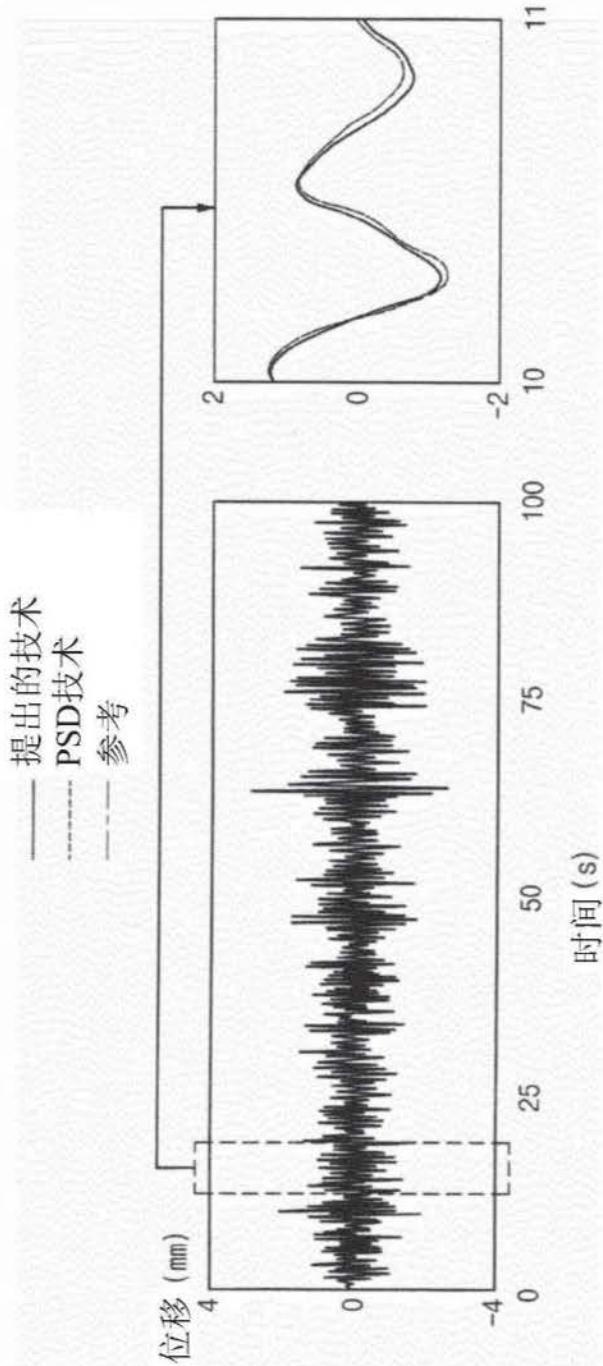


图8a

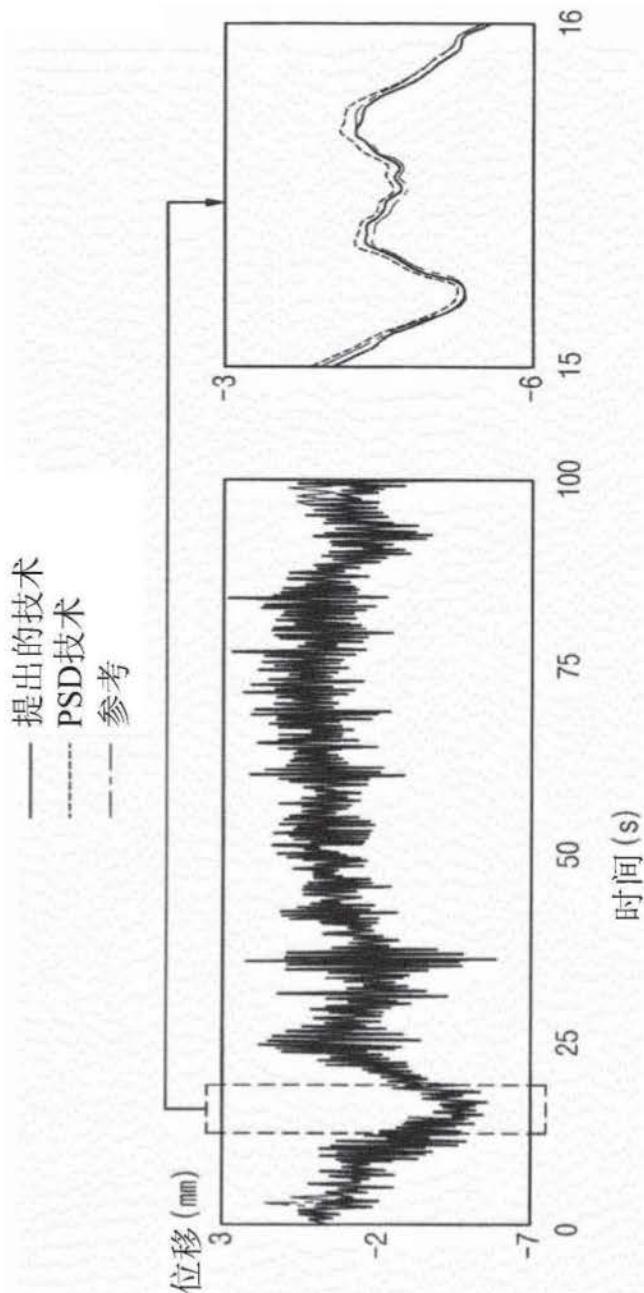


图8b

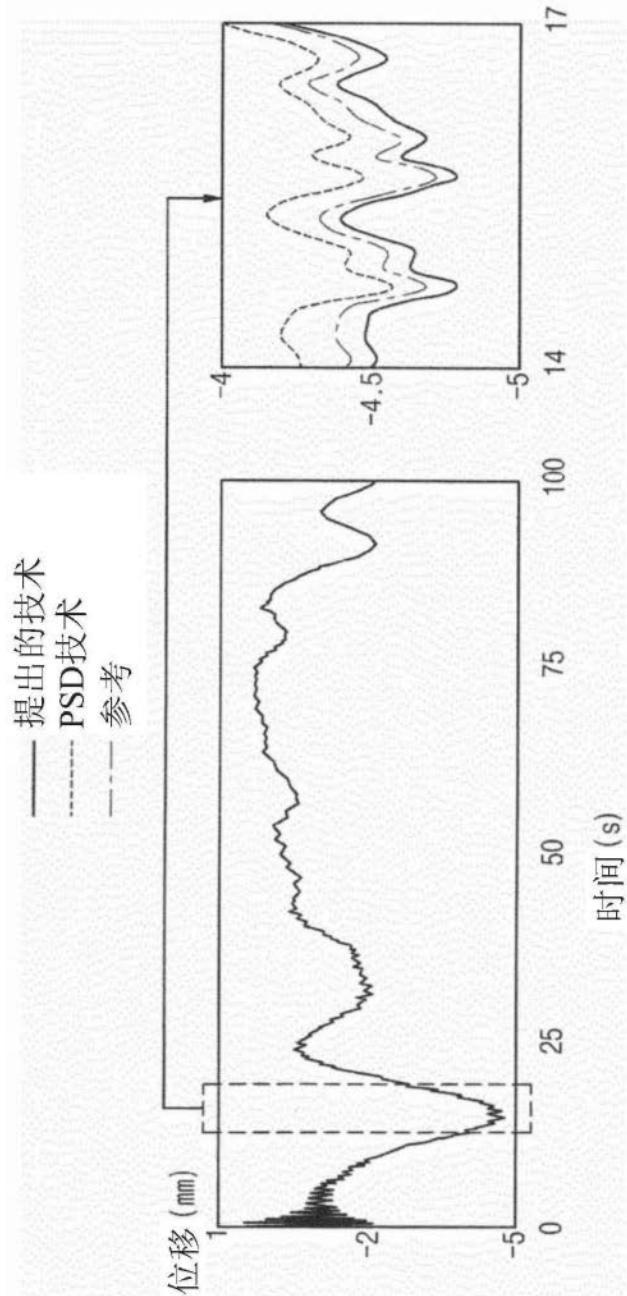


图8c

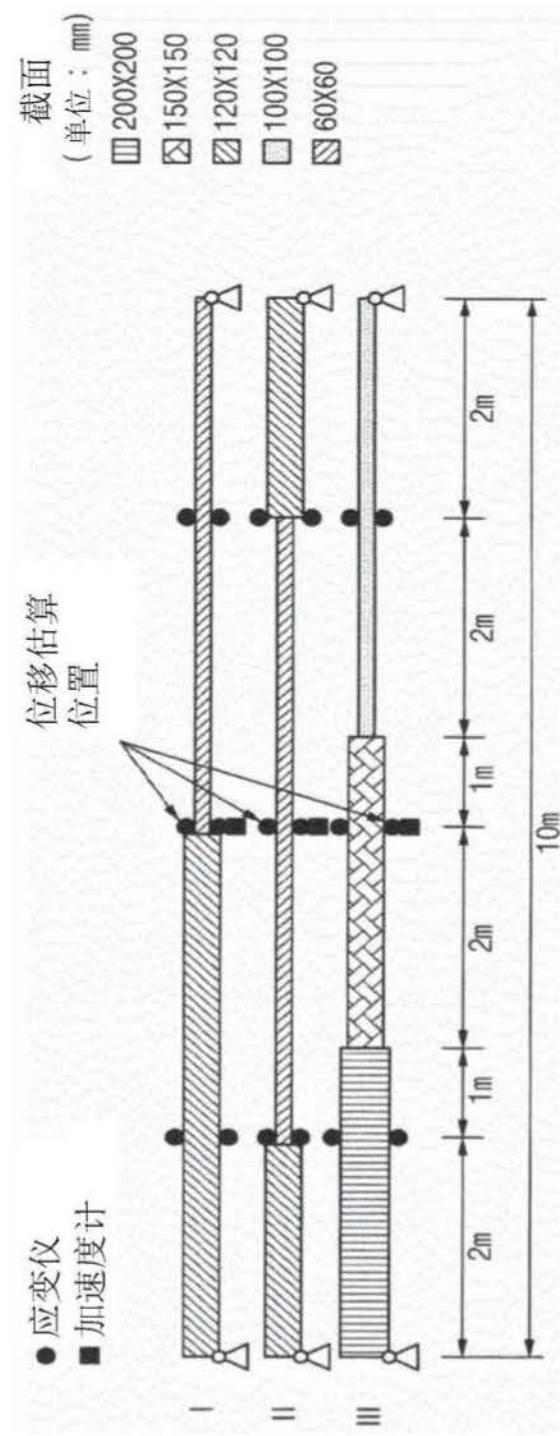


图9



图10

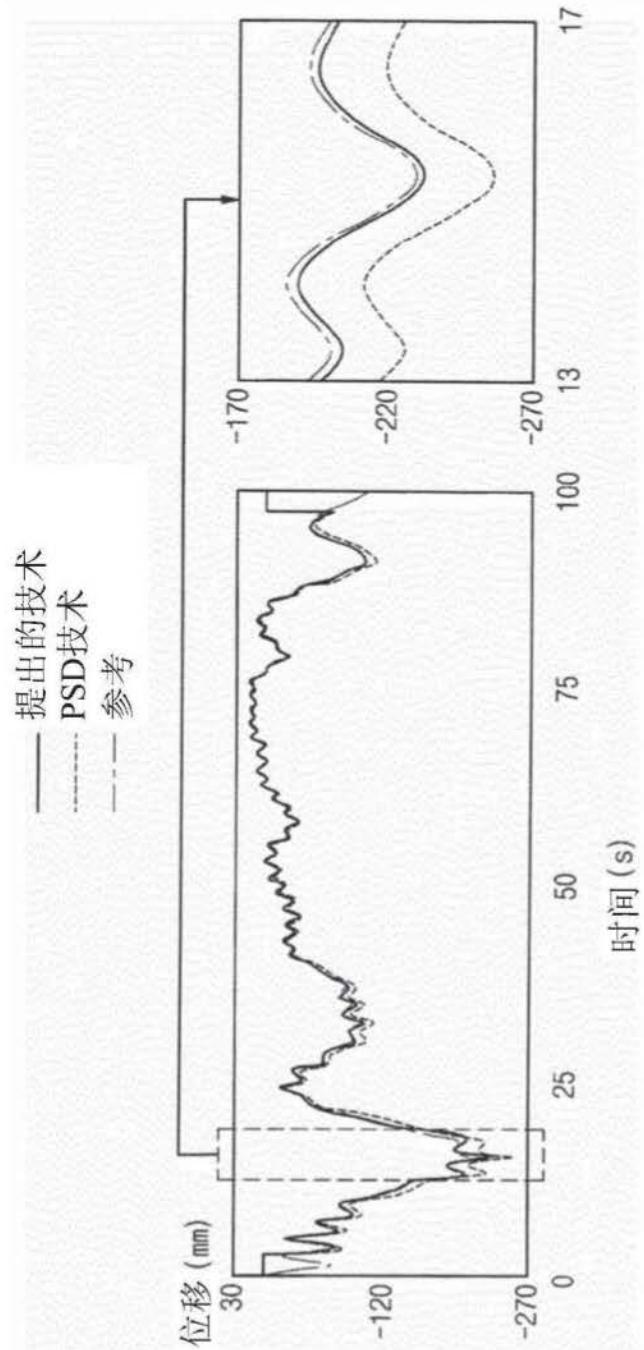


图11

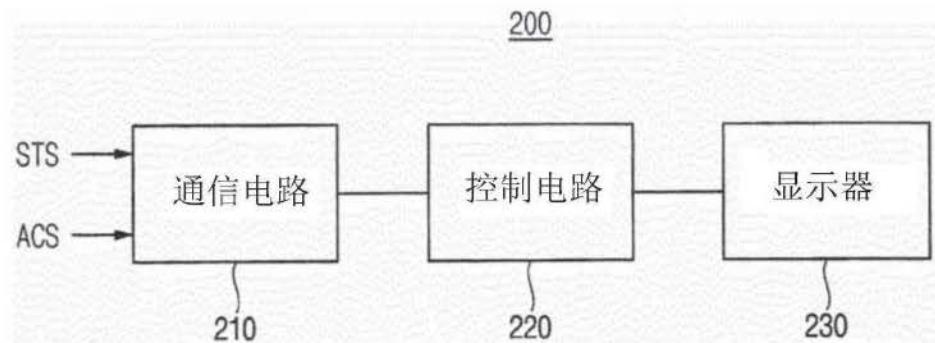


图12