



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102066920 A

(43) 申请公布日 2011.05.18

(21) 申请号 200980104720.X

(22) 申请日 2009.02.12

(30) 优先权数据

032142/08 2008.02.13 JP

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010.08.10

(86) PCT申请的申请数据

PCT/JP2009/052311 2009.02.12

(87) PCT申请的公布数据

W02009/101978 JA 2009.08.20

(71) 申请人 国立大学法人京都工艺纤维大学

地址 日本京都府

(72) 发明人 增田新

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 岳雪兰

(51) Int. Cl.

G01N 29/14 (2006.01)

G01M 5/00 (2006.01)

G01N 29/42 (2006.01)

G01N 29/44 (2006.01)

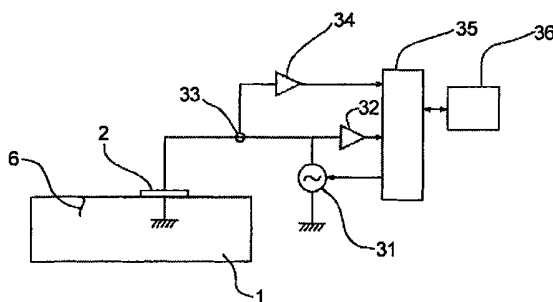
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 6 页

(54) 发明名称

结构物损伤的诊断方法及装置

(57) 摘要

在结构物的诊断中,以一定振幅的交流电压驱动安装于诊断对象的结构物的一个以上的机电转换元件,测量流过机电转换元件的电流。对该电流信号分离出以机电转换元件的驱动频率为中心的高频范围的高频分量。利用高频分量的振幅解调和/或相位解调提取损伤的调制信息,基于调制信息评价损伤的指标。由此,使用一个以上的机电转换元件,不需要基准数据,通过一次测量就能够判定结构物的完好性。



1. 一种结构物的诊断方法,包括:

以一定振幅的交流电压驱动安装于诊断对象的结构物的一个以上的机电转换元件,测量流过该机电转换元件的电流,

从该电流信号分离出以所述机电转换元件的驱动频率为中心的高频范围的高频分量,利用所述高频分量的振幅解调提取出损伤的调制信息,基于所述调制信息评价损伤的指标。

2. 如权利要求 1 所述的结构物的诊断方法,其特征在于,

所述指标是解调后的电流波形的振幅与解调后的电流波形的平均值的比值,将该比值与阈值进行比较来诊断损伤的产生。

3. 一种诊断装置,包括:

分离装置,其根据在以交流电压驱动安装于试验对象的结构物的一个以上的机电转换元件时由机电转换元件测量出的电流信号,检测出以机电转换元件的驱动频率为中心的高频范围的高频分量;

提取装置,其利用所述高频分量的振幅解调来提取出损伤的调制信息;

指标评价装置,其基于所述调制信息评价损伤的指标。

4. 一种结构物的诊断方法,包括:

以一定振幅的交流电压驱动安装于诊断对象的结构物的一个以上的机电转换元件,测量流过该机电转换元件的电流,

从该电流信号分离出以所述机电转换元件的驱动频率为中心的高频范围的高频分量,利用所述高频分量的相位解调提取出损伤的调制信息,基于所述调制信息评价损伤的指标。

5. 如权利要求 4 所述的结构物的诊断方法,其特征在于,

所述指标是解调后的电流波形的振幅与解调后的电流波形的平均值的比值,将该比值与阈值进行比较来诊断损伤的产生。

6. 如权利要求 4 所述的结构物的诊断方法,还包括:

利用所述高频分量的振幅解调提取出损伤的调制信息,根据相位解调后的所述调制信息和振幅解调后的所述调制信息来评价损伤的指标。

7. 一种诊断装置,包括:

分离装置,其根据在以交流电压驱动安装于试验对象的结构物的一个以上的机电转换元件时由机电转换元件测量出的电流信号,检测出以机电转换元件的驱动频率为中心的高频范围的高频分量;

提取装置,其利用所述高频分量的相位解调来提取出损伤的调制信息;

指标评价装置,其基于所述调制信息评价损伤的指标。

8. 如权利要求 7 所述的诊断装置,其中,

所述提取装置还利用所述高频分量的振幅解调来提取出损伤的调制信息,所述指标评价装置根据相位解调后的所述调制信息和振幅解调后的所述调制信息来评价损伤的指标。

结构物损伤的诊断方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及机械结构物或设备、建筑、土木结构物、航空宇宙结构物等建筑物的损伤检测或完好性评价。

背景技术

[0002] 结构物的损伤检测或完好性评价通过各种方法进行。作为能够早期检测结构物产生损伤的方法,有“压电阻抗法”(例如参照(日本)特开 2007-085733 号公报、(日本)特开 2004-028907 号公报、(日本)特开 2001-099760 号公报)。在压电阻抗法中,在结构物表面粘贴压电元件,检测出结构物中产生的损伤引起的结构物的动特性变化,并作为压电元件的数十 kHz ~ 数百 kHz 的超声波频带的电阻抗的变化。压电元件的电阻抗的倒数(导纳)依赖于压电元件的静电电容和从压电元件侧得的结构物的驱动点可动性。由于压电元件的粘贴位置附近的结构部位产生的损伤,而使数十 kHz ~ 数百 kHz 频带的结构物的驱动点可动性大幅变化,由于上述结构物的动特性与电阻抗(或者导纳)的关系,使该频带的压电元件的电阻抗(或者导纳)大幅变化。因此,通过压电元件的电阻抗的测定,能够灵敏度良好地检测出压电元件的粘贴位置附近的微小损伤。为了测量电阻抗,使用阻抗分析仪或者专用的阻抗测量电路。

[0003] 然而,在压电阻抗方法中,利用频率响应(阻抗)来评价损伤对高频波动的影响,但这只不过是关注损伤造成的力学影响的时间平均。损伤被看做是静的损伤,忽略了损伤部界面的各种非线性效果或负荷与高频波动的相互作用等。此外,由于通过粘贴于结构物的压电元件的电阻抗在损伤前后的“变化”来检测损伤,所以评价是相对的,必须需要成为评价基准的“基准”数据。当然,成为基准的完好时的阻抗或导纳对每个结构物来说完全不同,由于压电元件的粘贴位置或尺寸不同而存在很大差异,因此,通过计算等进行预测是不现实的,只能通过实测。这意味着在原理上不能通过一次测量来判定完好性,这是实用上、操作上的大问题。

[0004] 而且,初始阶段的损伤经常以封闭裂纹、接合(kissing bond)等“隐藏性损伤”的方式存在,看不见这些损伤,这在安全管理上有可能成为极大的威胁。但是,由于封闭的裂纹等透过超声波,所以采用压电阻抗法难以检测这些损伤。

[0005] 另一方面,在原理上不需要基准数据,作为对“隐藏性损伤”检测有效的方法,迄今为止提案的其中之一有“非线性波动调制法”(例如,参照 C. Liang, F. P. Sun, C. A. Rogers, An impedance method for dynamic analysis of active material systems, Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME, Vol. 116, pp. 120-128, 1994、G. Park, H. Sohn, C. R. Farrar, D. J. Inman, Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward, The Shock and Vibration Digest, Vol. 35, No. 6, pp. 451-463, 2003、K. E. -A. VanDen Abeele, P. A. Johnson and A. Sutin, Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part I: Nonlinear wavemodulation spectroscopy (NWMS), Res Nondestr Eval, Vol. 12,

pp. 17-30, 2000、V. Zaitsev, V. Gusev, B. Castagnede and P. Sas, "Micro-damage detection using a modulation technique based on dissipative nonlinear effects", Proceedings of Forum Acusticum Sevilla 2002, 2002、V. Zaitsev and P. Sas, "Nonlinear response of a weakly damaged metal sample: a dissipative mechanism of vibro-acoustic interaction", Journal of Vibration and Control, Vol. 6, pp. 803-822, 2000)。该方法着眼于伴随面与面的接触状态的变化的结构物中产生的裂纹、螺栓的松动、粘接面的剥离等损伤,将作用于损伤部位的低频率的动态负荷变动引起的面与面的接触状态的变化作为从压电元件等机电转换元件输入的高频波动的振幅调制及相位调制取出。如果损伤不存在,则不发生调制,因此,原理上为绝对评价,非线性波动调制法通过一次测量能够判定完好性。此外,该方法由于利用的是作用于损伤部位的低频率的动态负荷变动引起的损伤部位的动特性的变动,所以也具有在原理上能够检测出“隐藏性损伤”的特点。

[0006] 然而,在非线性波动调制法中,高频波动的发送用和接收用最低限需要两个压电元件,因此存在用于压电元件粘贴的空间限制严格的状况下是否能够应用的问题。因此,将这些压电元件汇集成一个的自诊断方法的开发成为课题。

发明内容

[0007] 本发明的目的是容易早期检测出结构物产生的损伤。

[0008] 在本发明的结构物的诊断方法中,以一定振幅的交流电压驱动安装于诊断对象的结构物的一个以上的机电转换元件,测量流过该机电转换元件的电流。接着,将该电流信号分离成以所述机电转换元件的驱动频率为中心的高频范围的高频分量和比该高频范围低的频率范围的低频分量。接着,利用所述高频分量的振幅解调和 / 或相位解调提取出损伤的调制信息,基于所述调制信息评价损伤的指标。

[0009] 本发明的诊断装置包括:分离装置,其根据在以交流电压驱动安装于试验对象的结构物的一个以上的机电转换元件时由机电转换元件测量出的电流信号,检测出以机电转换元件的驱动频率为中心的高频范围的高频分量和频率低于该高频范围的低频分量;提取装置,其利用振幅解调和 / 或相位解调,从所述高频分量提取出损伤的调制信息;指标评价装置,其基于振幅解调后的调制信息和 / 或相位解调后的调制信息评价损伤的指标。

[0010] 发明效果

[0011] 在本发明的损伤诊断中,不需要将完好时的状态作为基准数据存储,通过一次测量就能够判定结构物的完好性。此外,也能够适用于既存结构物的评价。

[0012] 此外,在本发明的损伤诊断中,由于作为最小限结构,仅利用单一的机电转换元件的自诊断,就可以评价结构物的损伤,因此,可以构成更简单的系统。

附图说明

[0013] 图 1 是具有预置裂纹的试验片的图;

[0014] 图 2 是组装有试验片的结构体的图;

[0015] 图 3 是表示试验装置整体的图;

[0016] 图 4 是在完好状态下对于式 (6) 的第一项进行振幅解调后的波形及傅立叶频谱的曲线图;

- [0017] 图 5 是在损伤状态下对于式 (6) 的第一项进行振幅解调后的波形及傅立叶频谱的曲线图；
- [0018] 图 6 是针对完好状态的试验片设调制度为纵轴、设等效刚度降低率为横轴时的曲线图；
- [0019] 图 7 是针对损伤状态的试验片设调制度为纵轴、设等效刚度降低率为横轴时的曲线图；
- [0020] 图 8 是设振幅调制度为纵轴、设等效刚度降低率为横轴的曲线图；
- [0021] 图 9 是设相位调制度为纵轴、设等效刚度降低率为横轴的曲线图；
- [0022] 图 10 是设动态刚度调制度为纵轴、设等效刚度降低率为横轴的曲线图；
- [0023] 图 11 是损伤诊断装置的图；
- [0024] 图 12 是表示信号处理装置的信号处理内容的图；
- [0025] 图 13 是信号的软件处理的流程图。

具体实施方式

[0026] 以下,参照附图对发明的实施方式进行说明。

[0027] 在结构物表面粘贴有压电元件时,在压电元件的变形速度 V 、压电元件从结构物受到的力 F 、压电元件端子之间的电压 E 、流过压电元件的电流 I 之间成立以下的关系式 (1)。

$$[0028] \quad \begin{bmatrix} F(\omega) \\ I(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p(\omega) & -A(\omega) \\ A(\omega) & Y_p(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(\omega) \\ E(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0029] 其中, Z_p 是使压电元件的端子间短路时的机械阻抗, Y_p 是限制压电元件变形时的导纳, A 是力系数, ω 是频率。另一方面,当设从压电元件侧得的结构物的机械阻抗为 Z_m 时,下式 (2) 成立。

$$[0030] \quad F(\omega) = -Z_m(\omega)V(\omega) \quad (2)$$

[0031] 根据式 (1) 和式 (2),压电元件端子之间的导纳成为下式 (3)。

$$[0032] \quad Y(\omega) = I(\omega)/E(\omega) = Y_p(\omega) + \frac{A(\omega)^2}{Z_p(\omega) + Z_m(\omega)} \quad (3)$$

[0033] 此外,对结构物作用外部负荷 W 时,流过压电元件的电流 I 如下式 (4) 所示。

$$[0034] \quad I(\omega) = Y(\omega)E(\omega) + G(\omega)W(\omega) \quad (4)$$

[0035] 其中, G 为从外部负荷对电流的传递系数。利用高频 ω_p 的一定振幅 E 的正弦波电压 $e(t)$ (t 表示时间) 来驱动压电元件,

$$[0036] \quad e(t) = E \cos \omega_p t \quad (5)$$

[0037] 当假定外部负荷 W 的频率充分低于 ω_p 时,时间范围的式 (4) 变为下式。

$$[0038] \quad i(t) = |Y(\omega_p)| E \cos \{ \omega_p t + \angle Y(\omega_p) \} + w_g(t) \quad (6)$$

[0039] 其中, $w_g(t)$ 为 $G(\omega)W(\omega)$ 的时间范围的波形。

[0040] 此外,在结构物中存在伴随面与面接触的损伤时,由于外部负荷 $w(t)$ 而使面与面的接触状态产生变化。由于接触状态的变化使界面的高频的弹性波动的散乱条件产生变化,因此,高频的机械阻抗 Z_m 依赖于 $w(t)$ 发生变化。考虑到此,在存在损伤的状况下的频率 ω_p 的式 (3) 可以写成下式。

$$[0041] \quad Y(\omega_p, w(t)) = Y_p(\omega_p) + \frac{A(\omega_p)^2}{Z_p(\omega_p) + Z_m(\omega_p, w(t))} \quad (7)$$

[0042] 因此,此时的电流 $i(t)$ 用下式 (8) 表示。

$$[0043] \quad i(t) = |Y(\omega_p, w(t))| \text{Ecos}\{\omega_p t + \angle Y(\omega_p, w(t))\} + w_g(t) \quad (8)$$

[0044] 该式 (8) 的第一项由高通滤波器分离,第二项由低通滤波器分离。第一项是依赖于外部负荷 $w(t)$ 且接收了振幅调制及相位调制的正弦波波形。根据第二项能够得到与外部负荷 $w(t)$ 有关的信息。由于第一项的振幅调制或相位调制的强度依赖于损伤度,因此,可以使用对第一项进行振幅解调后的波形和 / 或对第一项进行相位解调后的波形来判断损伤度。

[0045] 基于调制的强度的损伤度的定量化,可以考虑各种各样的指标,其中的一例为下式 (9) 的振幅调制度 AMI。振幅调制度 AMI 为式 (8) 的第一项振幅解调后的波形的振幅除以振幅解调后的波形的平均值得到的值。

$$[0046] \quad AMI = \frac{\max a_{HF}(t) - \min a_{HF}(t)}{\max a_{HF}(t) + \min a_{HF}(t)} \quad (9)$$

[0047] 其中, $a_{HF}(t)$ 为由式 (10) 计算的瞬时振幅比。

$$[0048] \quad a_{HF}(t) = |i_{HF}(t)|/E \quad (10)$$

[0049] 其中, $i_{HF}(t)$ 为式 (8) 的第一项即电流的高频分量,绝对值符号表示振幅包络线。在诊断实际的装置时,例如将振幅调制度 AMI 与阈值进行比较,超过阈值时,诊断为结构物产生了损伤。

[0050] 此外,作为诊断的指标,也可以使用式 (8) 的第一项的相位解调后的波形的振幅除以相位解调后的波形的平均值得到的相位调制度 PMI。相位调制度 PMI 由下式 (11) 计算。

$$[0051] \quad PMI = \frac{\max \theta_{HF}(t) - \min \theta_{HF}(t)}{\max \theta_{HF}(t) + \min \theta_{HF}(t)} \quad (11)$$

[0052] 其中, $\theta_{HF}(t)$ 为由下式 (12) 计算的瞬时相位差。

$$[0053] \quad \theta_{HF}(t) = \angle i_{HF}(t) - \angle e(t) \quad (12)$$

[0054] 其中, $i_{HF}(t)$ 为式 (8) 的第一项即电流的高频分量,角度符号表示瞬时相位角。在诊断实际的装置时,例如将相位调制度 PMI 与阈值进行比较,超过阈值时,诊断为结构物产生了损伤。

[0055] 或者,也可以将振幅解调后的波形 $a_{HF}(t)$ 及相位解调后的波形 $\theta_{HF}(t)$ 组合使用而构成诊断的指标。例如,利用下式定义复数 $Z_{HF}(t)$ 时,

$$[0056] \quad z_{HF}(t) = a_{HF}(t)e^{i\omega\theta_{HF}(t)} \quad (13)$$

[0057] 复数 $Z_{HF}(t)$ 表示压电元件的瞬时导纳,可以从该平均值的变动的大小由下式 (14) 的导纳调制度 YMI 进行评价,并将其作为损伤指标。

$$[0058] \quad YMI = \max \left| \frac{z_{HF}(t) - \overline{z_{HF}}}{z_{HF}} \right| \quad (14)$$

[0059] 其中,上标的横线表示时间平均值。

[0060] 除此之外,还可以利用评价结构物的瞬时可动性 (Mobility) 变动的大小的下式 (15) 的可动性调制度 MMI

$$[0061] \quad MMI = \max \left| \frac{z_{HF}(t) - \overline{z_{HF}}}{z_{HF} - Y_p(\omega_p)} \right| \quad (15)$$

[0062] 或者,进而将其换算成瞬时动态刚度的变动大小的下式 (16) 的动态刚度调制度 KMI

$$[0063] \quad KMI = \max \left| \frac{\{z_{HF}(t) - Y_p(\omega_p)\}^{-1} - \{\overline{z_{HF}(t) - Y_p(\omega_p)}\}^{-1}}{\{z_{HF}(t) - Y_p(\omega_p)\}^{-1}} \right| \quad (16)$$

[0064] 等构成各种各样的指标。

[0065] 以下,说明试验的一例。图 1 表示具有预置裂纹的试验片的例子。图 1 中,上侧是上面图,下侧是正面图。在钢材 SS400 的梁 1 (例如,44×550×6mm 的长方形) 上利用电火花加工导入预置裂纹 3,并以此为起点通过加振而使疲劳裂纹延展。预置裂纹 3 例如为宽 1mm 的槽。在试验片 1 上粘贴压电元件 (例如 PZT) 2。将试验片 1 利用固定部 4 和支承部 5 组装到图 2 的结构物上。

[0066] 图 2 表示组装有试验片 1 的结构物。图 2 中,左侧是正面图,右侧是侧面图。试验片 1 的固定部 4 通过固定夹具 14 被螺栓固定于底板 11。另一方面,试验片 1 的支承部 5 经由硬质橡胶制的半圆柱 15 与平板 12 连结。底板 11 和平板 12 通过四个板簧 13 连结,其结果,该结构物成为相对于底板 11 使平板 12 产生剪切变形的振动系统。

[0067] 图 3 表示试验装置的整体。将结构物 22 整体放置到加振台 21 上进行水平加振,进行使试验片 1 疲劳裂纹延展的实验。加振台 21 通过控制器 23 以及放大器 24 被正弦波驱动。经由信号发生器 25 和放大器 26 对粘贴在试验片 1 的压电元件 2 施加高频的正弦波电压,此时利用电流检测部 27 测量流过压电元件 2 的电流。通过数据收录装置 28 收录测量数据,再通过个人计算机 (未图示) 进行信号处理。

[0068] 实验按照以下步骤进行。首先,以与结构物 22 的固有频率相一致的频率对加振台 21 水平加振 1 分钟,使试验片 1 的疲劳裂纹延展。然后,以高频扫描波驱动压电元件 2,此时通过电流检测部 27 测量流过压电元件 2 的电流,由此,调查压电元件 2 的导纳,将其峰值频率作为 ω_p 采用。接着,一边为施加外部负荷以 10Hz 的正弦波使加振台 21 振动,一边测量以频率 ω_p 的正弦波电压驱动粘贴于试验片 1 的压电元件 2 时的电流。将裂纹延展、导纳调查及电流测量作为一个组合,重复进行上述的步骤,直到试验片的等效刚度降低率超过 40%。

[0069] 图 4 及图 5 分别相对于时间 (time) 及频率 (frequency) 表示完好状态及损伤状态 (等效刚度降低率 5%) 的对于式 (8) 的第一项进行振幅解调后的波形 (包络线 envelope) 及据此得到的傅立叶频谱 (Fourier spectrum)。可以看出在损伤状态下显著发生振幅调制。

[0070] 图 6 及图 7 分别相对于时间 (time) 及频率 (frequency) 表示完好状态及损伤状态 (等效刚度降低率 5%) 的对于式 (8) 的第一项进行相位解调后的波形 (phase difference) 及据此得到的傅立叶频谱 (Fourier spectrum)。可以看出在损伤状态下显著发生相位调制。

[0071] 图 8 表示利用式 (9) 的振幅调制度评价振幅调制的大小的曲线图,是设振幅调制度 (modulation index) 为纵轴、等效刚度降低率 (change of equivalentstiffness

ratio) 为横轴的曲线图。

[0072] 图 9 表示利用式 (11) 的相位调制度评价相位调制的大小的曲线图,是设相位调制度 (phase modulation index) 为纵轴、等效刚度降低率 (change of equivalent stiffness ratio) 为横轴的曲线图。

[0073] 图 10 表示评价组合振幅解调后的波形和相位解调后的波形计算出的式 (16) 的损伤指标的曲线图,是设动态刚度调制度 (dynamic stiffness modulation index) 为纵轴、等效刚度降低率 (change of equivalent stiffness ratio) 为横轴的曲线图。

[0074] 从图 8、图 9、图 10 的任一个可以看出,通过损伤指标的评价,能够检测出初始的裂纹或监视裂纹的成长。

[0075] 图 11 表示损伤诊断装置的例子。粘贴于具有裂纹等损伤 6 的结构物 1 表面的压电元件 2 利用交流电源 31 以高频的正弦波电压被驱动。驱动电压经由放大器 32 测量。此外,经由电流检测部 33 和放大器 34 测量此时流过压电元件 2 的电流。测量出的电压信号和电流信号经由接口 35 被送往信号处理装置 36,进行信号处理。此外,交流电源 31 的电压振幅、频率等波形参数从接口 35 进行控制。

[0076] 图 12 表示信号处理装置 36 的信号处理内容。所测量的电流信号由高通滤波器 (HPF) 41 被分成含有与外部负荷有关的信息的低频分量和含有与损伤有关的信息的高频分量 (以压电元件的驱动频率为中心的分量)。高频分量在振幅解调部 42 或相位解调部 43 进行振幅解调或相位解调,提取出损伤的调制信息。接着,通过损伤指标评价部 44 根据低频分量、振幅解调后的波形、相位解调后的波形来评价损伤指标。上述处理可以全部通过软件进行,但特别优选的是由虚线包围的部分 (HPF41、振幅解调部 42 及相位解调部 43),作为硬件安装。

[0077] 图 13 表示通过信号处理装置 36 的 CPU 由软件进行全部的信号处理时的流程图。首先,由上述的测量设备经由接口 35 取得电流信号和电压信号 (S10)。接着,利用电流信号的高通滤波器处理,将含有与损伤有关的信息的高频分量分离 (S12)。接着,对所分离出的高频分量进行振幅解调,然后根据所分离出的高频分量和电压信号进行相位解调 (S14),提取损伤的调制信息。接着,根据振幅解调后的波形和 / 或相位解调后的波形计算损伤指标 (S16)。然后,显示结果 (S18)。其中,在只要损伤指标没有超过 40%,即测量没有结束时 (S20 的“否”),就返回步骤 S10,重复进行上述的测量处理。

[0078] 此外,在上述的损伤诊断装置的例子中使用了压电元件,但并不仅限于压电元件,可以将任意的机电转换元件作为传感器使用。此外,不限于粘贴式的转换器,也可以使用压接式的转换器构成为移动式装置。

[0079] 以下,对本发明的损伤诊断的作用效果进行说明。本发明的损伤诊断利用了如下情况,即,表示安装于结构物上的一个以上的机电转换元件的电阻抗由于内含于结构物的损伤部的非线性引起的非线性波动调制效果而与结构物振动同步的调制。即,利用了结构物的高频范围的机械阻抗特性与外部负荷的损伤部位的面接触状态的变化同步进行变动的原理,作为流过以恒定电压振幅被高频驱动的压电元件的电流波形的调制,使损伤量化。由于在不存在损伤的非线性的完好的结构物时,不发生调制,因此,原理上能够进行损伤的绝对评价。由于通过一次测量就能够判定完好性,因此,也可以适用于既存结构物的评价。此外,在实际的结构物中,即使是完好状态,也可以观测到一定程度的调制,只要预先合

理地设定用于判断完好性的调制等级的阈值即可。与此相对,在现有的压电阻抗法中,需要将完好时的状态作为实测基准数据存储,这是实用上 / 运用上的大问题,但在本发明中可以解决这样的问题。

[0080] 此外,在现有的压电阻抗法中,忽略了损伤部界面的各种非线性效果或负荷与高频波动的动态相互作用等。与此相对,在本发明中,通过在时间范围精密检测相对于电压输入的电流输出,能够充分利用以非线性波动调制为代表的各种各样的非线性效果作为有用的信息。其结果,能够实现“隐藏性损伤”的检测,此外,可以期待飞跃性提高对于微小损伤的灵敏度。

[0081] 此外,与现有的压电阻抗法不同,在原理上可以适用于机械阻抗动态变动的轴承或齿轮等机械部件的损伤检测。

[0082] 在现有的非线性波动调制法中,用于高频波动的发送和接收最低限也需要两个机电转换元件,但本发明的损伤检测,作为其最小限结构,只要单一的机电转换元件,就能够通过自诊断而评价损伤,因此,能够构成更简单的系统。这样,能够飞跃性增大对结构物的安装自由度,例如具有如下实用上的优点,即,在安装空间受到严格限制的情况下也可以容易应用,容易构成移动式装置等。此外,在最小限结构中,由于不需要多个机电转换元件之间的布线,因此,容易实现使机电转换元件和微处理器一体化的智能元件化,还可以看到面向实现具有自诊断功能的智能结构物的未来的发展方向。

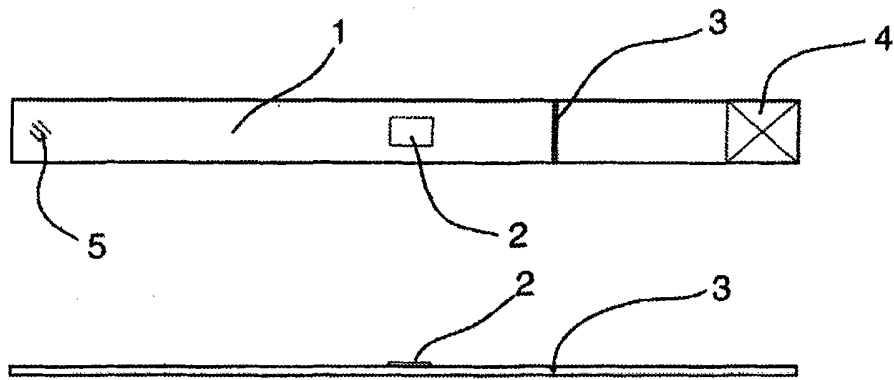


图 1

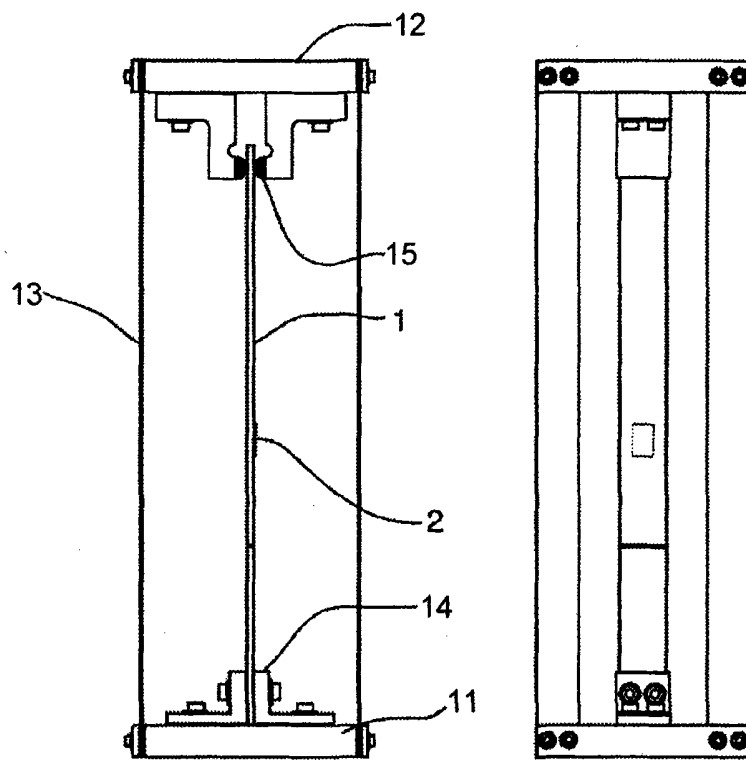


图 2

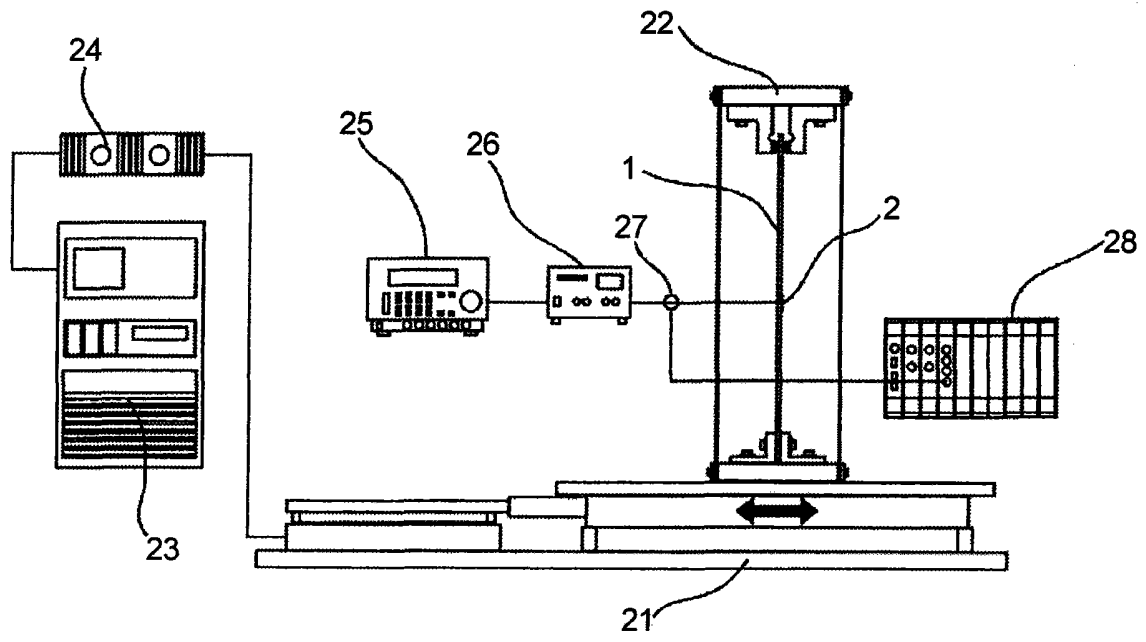


图 3

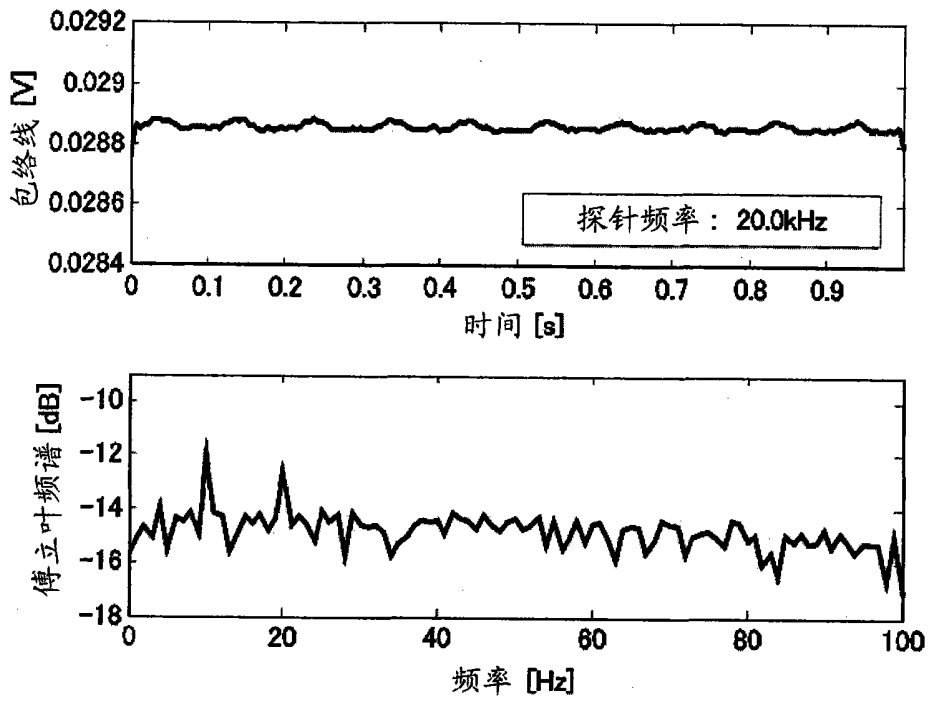


图 4

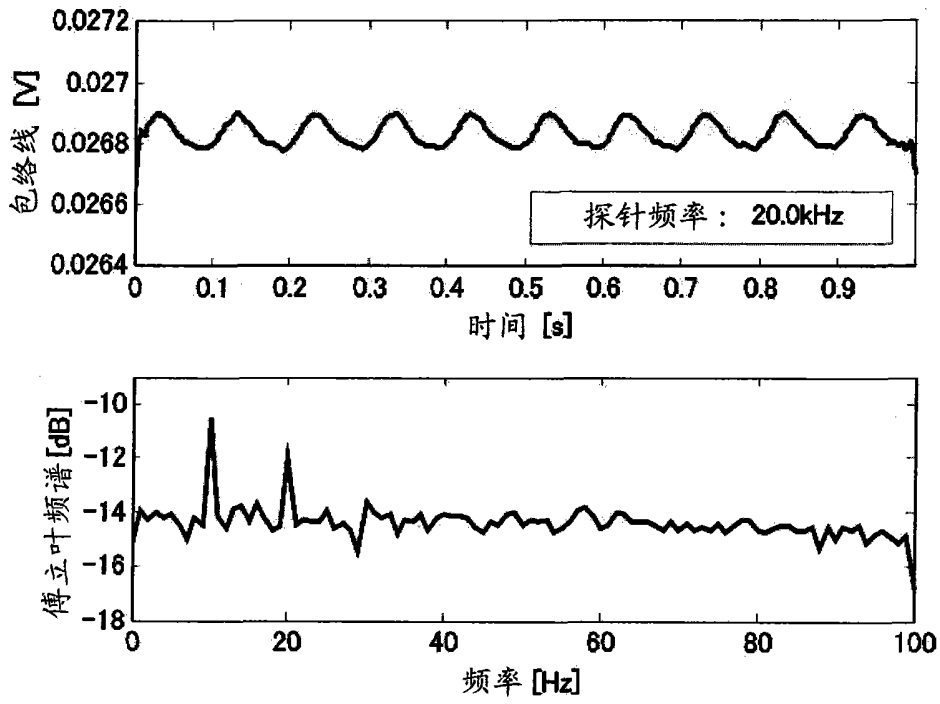


图 5

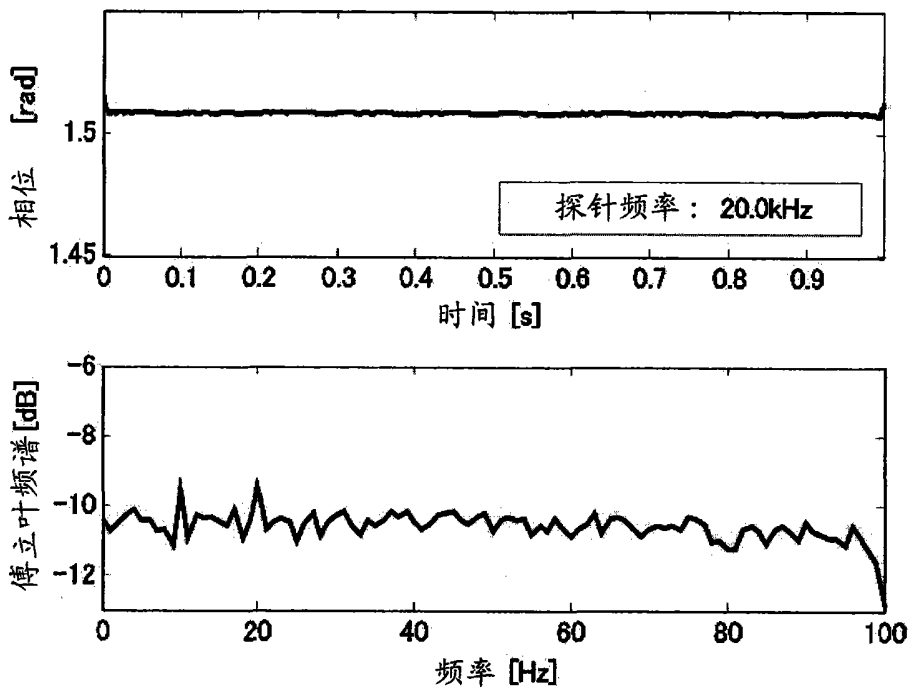


图 6

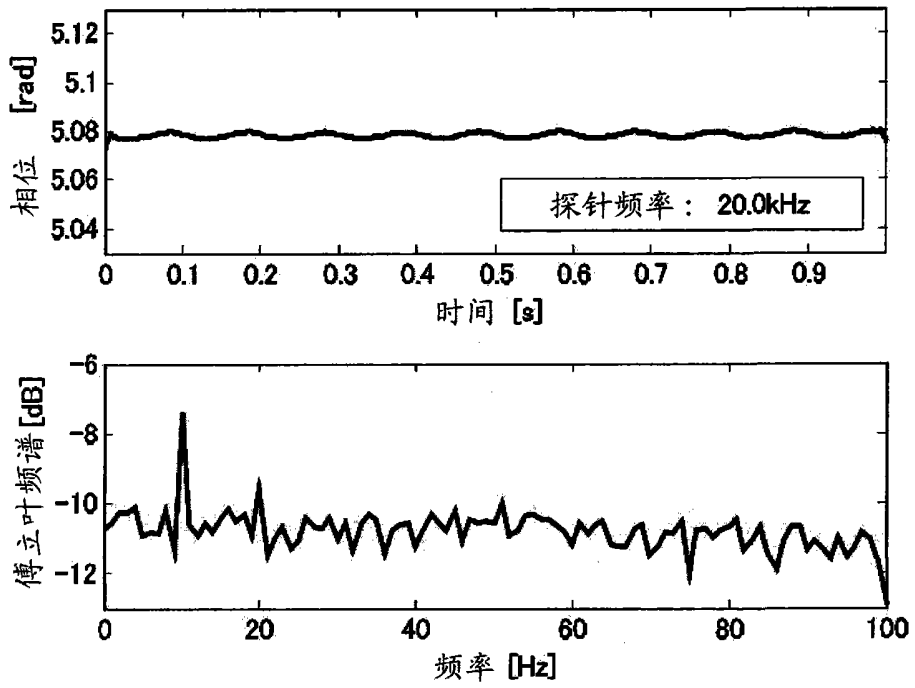


图 7

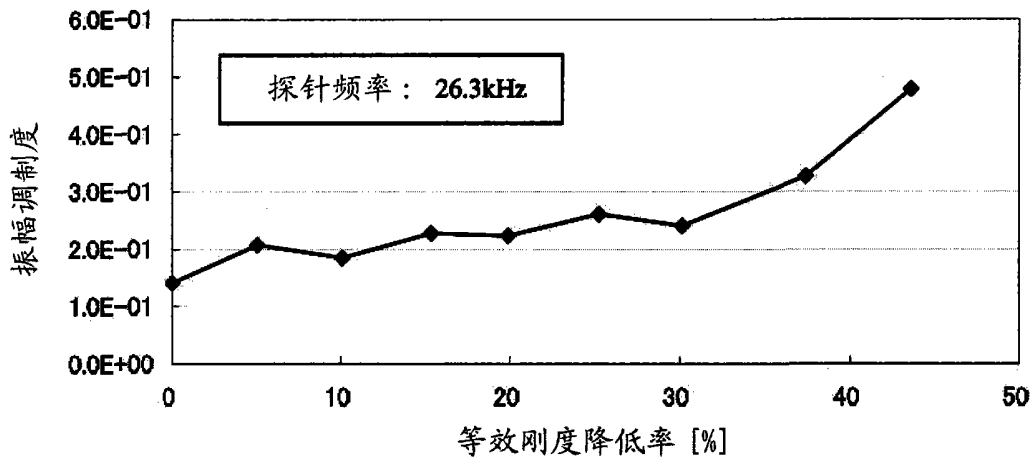


图 8

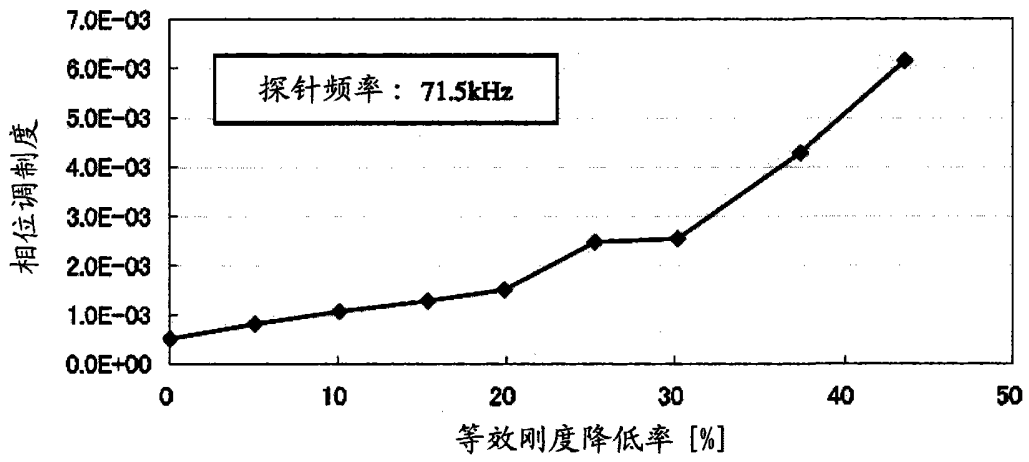


图 9

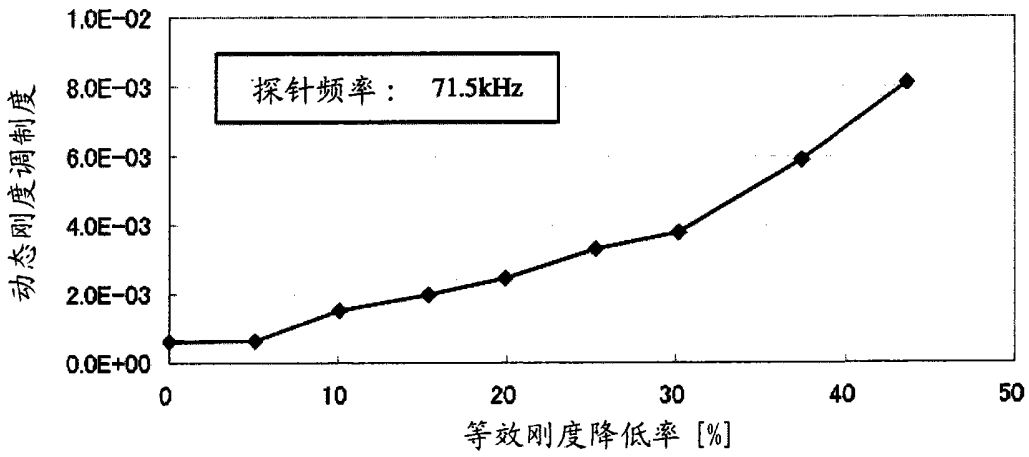


图 10

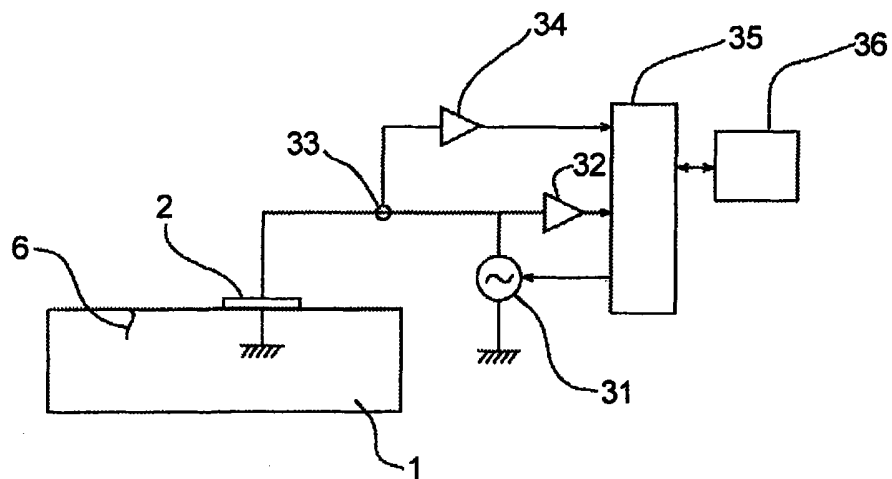


图 11

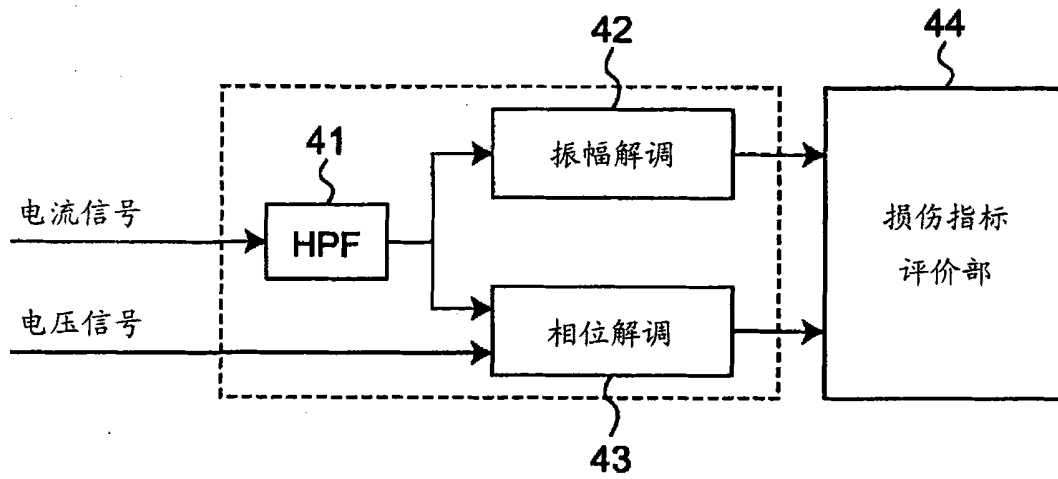


图 12

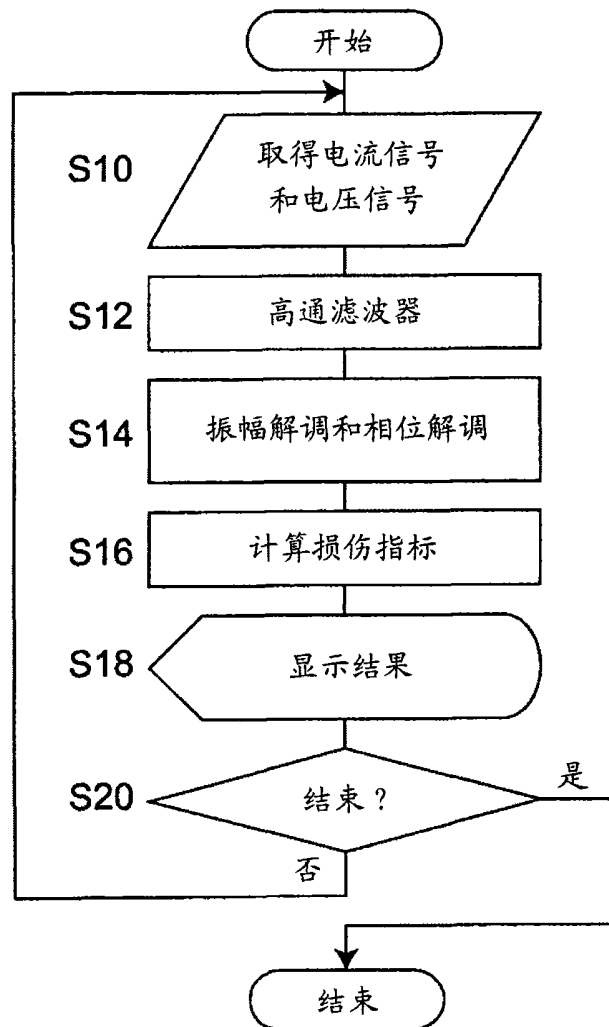


图 13