



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104595112 B

(45)授权公告日 2018.01.16

(21)申请号 201310526002.X

(22)申请日 2013.10.30

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104595112 A

(43)申请公布日 2015.05.06

(73)专利权人 通用电气公司

地址 美国纽约州

(72)发明人 付旭 吴之林 邱海

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公
司 31100

代理人 侯颖嫒

(51)Int.Cl.

F03D 9/00(2016.01)

F03D 7/00(2006.01)

F03D 17/00(2016.01)

(56)对比文件

EP 1075600 B1,2002.08.07,

CN 101245765 A,2008.08.20,

DE 202008005030 U1,2008.10.09,

DE 102011116961 A1,2013.05.02,

WO 2013/110215 A1,2013.08.01,

审查员 龚洋

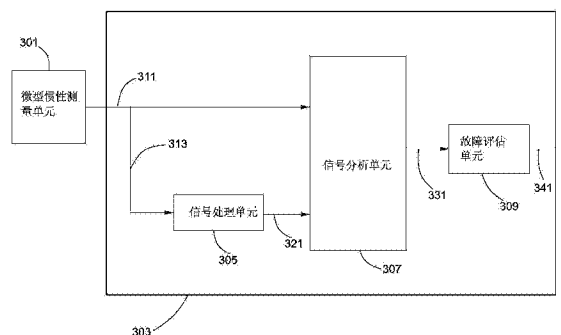
权利要求书2页 说明书9页 附图10页

(54)发明名称

风力涡轮机及评估其上叶片健康状态的方法

(57)摘要

本发明涉及风力涡轮机及评估其上叶片健康状态的方法,其中的风力涡轮机,其包括多个叶片、微型惯性测量单元和监控系统。微型惯性测量单元安装于每个叶片上,用于感应对应安装位置处的多个检测参数信号。监控系统用于监控该多个叶片的运行状态,监控系统包括信号处理单元、信号分析单元和故障评估单元。信号处理单元基于该多个检测参数信号计算得到处理参数信号。信号分析单元对每个分析参数信号进行分析以得到故障估计信号。其中,分析参数信号选自多个检测参数信号和该处理参数信号,每个故障估计信号用于估计对应的叶片是否工作于故障状态。故障评估单元用于基于该多个故障估计信号评估对应叶片是否发生故障或发生故障的概率。本发明还揭示一种用于评估风力涡轮机叶片健康状态的方法。



1. 一种风力涡轮机,包括多个叶片,其特征在于:该风力涡轮机还包括:

微型惯性测量单元,安装于每个叶片上,用于感应对应安装位置处的多个检测参数信号;及

监控系统,用于监控该多个叶片的运行状态,该监控系统包括:

信号处理单元,用于基于该微型惯性测量单元得到的多个检测参数信号计算得到处理参数信号;

信号分析单元,用于对每个分析参数信号进行分析以得到故障估计信号,其中,该分析参数信号选自该多个检测参数信号和该处理参数信号,每个故障估计信号用于估计对应的叶片是否工作于故障状态,其中,该信号分析单元包括比较器,该比较器用于对该分析参数信号和预设参数信号的幅频特性进行比较分析,当该分析参数信号的幅频特性与该预设参数信号的幅频特性的偏差大于设置的阈值时,对应的叶片被估计工作于故障状态,以生成该故障估计信号;及

故障评估单元,用于基于该故障估计信号评估对应叶片是否发生故障或发生故障的概率。

2. 如权利要求1所述的风力涡轮机,其中,该比较器用于对该分析参数信号和该预设参数信号的幅频特性各自的幅频特性的特征频率点进行比较分析,当该分析参数信号的幅频特性与该预设参数信号的幅频特性的特征频率点的偏差大于设置的阈值时,对应的叶片被估计工作于故障状态。

3. 如权利要求2所述的风力涡轮机,其中,该比较器用于对该分析参数信号和该预设参数信号的幅频特性各自的幅频特性曲线进行比较分析,当该分析参数信号的幅频特性与该预设参数信号的幅频特性曲线的偏差大于设置的阈值时,对应的叶片被估计工作于故障状态。

4. 如权利要求3所述的风力涡轮机,其中,该预设参数信号来自基于叶片模型的对应于该分析参数信号的仿真数据、基于叶片运行时对应于该分析参数信号的测试数据或历史数据。

5. 如权利要求1所述的风力涡轮机,其中,该故障评估单元采用基于该故障估计信号的加权算法来评估相应叶片发生故障的概率。

6. 如权利要求5所述的风力涡轮机,其中,该监控系统还包括生命周期预测器,该生命周期预测器用于通过该故障的概率进行分析以预测对应叶片的生命周期。

7. 一种风力涡轮机,包括多个叶片,其特征在于:该风力涡轮机还包括:

微型惯性测量单元,安装于每个叶片上,用于感应对应安装位置处的多个检测参数信号;及

监控系统,用于监控该多个叶片的运行状态,该监控系统包括:

信号处理单元,用于基于该微型惯性测量单元得到的多个检测参数信号计算得到处理参数信号;

信号分析单元,用于对每个分析参数信号进行分析以得到故障估计信号,其中,该分析参数信号选自该多个检测参数信号和该处理参数信号,每个故障估计信号用于估计对应的叶片是否工作于故障状态,其中,该信号分析单元包括比较器,该比较器用于比较该多个叶片所对应的相同分析参数信号,当其中一个叶片的分析参数信号与其余任何一个叶片的分

析参数信号的偏差大于设置的阈值且其余叶片的分析参数信号之间的偏差均小于该设置的阈值时,该叶片被估计工作于故障状态;及

故障评估单元,用于基于该故障估计信号评估对应叶片是否发生故障或发生故障的概率。

8.如权利要求7所述的风力涡轮机,其中,该比较器用于比较该多个叶片所对应的相同分析参数信号的幅频特性或统计特性。

9.一种评估包括多个叶片的风力涡轮机叶片健康状态的方法,其特征在于,该方法包括:

通过安装于每个叶片上的微型惯性测量单元来感应对应安装位置处的多个检测参数信号;

基于该多个检测参数信号计算得到处理参数信号;

对每个分析参数信号进行分析以得到故障估计信号,其中,该分析参数信号选自该多个检测参数信号和该处理参数信号,每个故障估计信号用于估计对应的叶片是否工作于故障状态,其中该得到故障估计信号的步骤包括:

将该分析参数信号与预设参数信号的幅频特性进行比较;及

当该分析参数信号与该预设参数信号的偏差大于设置的阈值时,对应的叶片被估计工作于故障状态;及

基于该故障估计信号评估对应叶片是否发生故障或发生故障的概率。

10.如权利要求9所述的方法,其中将该分析参数信号与预设参数信号的幅频特性进行比较包括将该分析参数信号和该预设参数信号的幅频特性的特征频率点进行比较分析。

11.如权利要求10所述的方法,其中将该分析参数信号与预设参数信号的幅频特性进行比较包括将该分析参数信号和该预设参数信号的幅频特性曲线进行比较分析。

12.如权利要求9所述的方法,其中将该分析参数信号与预设参数信号的幅频特性进行比较包括:

将该多个叶片所对应的相同分析参数信号进行比较分析;及

当其中一个叶片的分析参数信号与其余任何一个叶片的分析参数信号的偏差大于设置的阈值且其余叶片的分析参数信号之间的偏差均小于该设置的阈值时,该叶片被估计工作于故障状态。

13.如权利要求12所述的方法,其中将该多个叶片所对应的相同分析参数信号进行比较分析包括对该多个叶片所对应的相同分析参数信号的幅频特性或统计特性进行比较分析。

14.如权利要求9所述的方法,其中,该评估对应叶片发生故障的概率的步骤包括采用基于该故障估计信号的加权算法来评估相应叶片发生故障的概率。

风力涡轮机及评估其上叶片健康状态的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及风力涡轮机,尤其涉及一种评估其上叶片健康状态的方法。

背景技术

[0002] 风能作为一种清洁能源广泛应用于发电领域。风力涡轮机(Wind Turbine)常用于将风能转换为电能。然而,风力涡轮机通常在偏远地区、严峻的环境下运行,尤其受到冰冻、沙尘、大风环境影响,风力涡轮机易发生故障如叶片裂纹、叶片卡滞、叶片劳损、叶片覆冰、过载等故障。因此,为延长风力涡轮机的运行寿命,需对风力涡轮机进行定期检修维护以防止潜在故障的发生。然而,人工检修一方面成本较高,一方面故障检测可靠性不高。实时监测风力涡轮机的叶片参数信号并评估风力涡轮机工作于故障状态的概率以减少不必要的定期维护可提高可靠性并降低维护成本。

[0003] 为评估风力涡轮机的故障状态,通常需要在风力涡轮机运转过程中实时监控多种参数,如叶片桨叶角(blade pitch)、叶片挠度(blade deflection)、叶片局部偏移角(local blade angle)、叶片弯矩(bending moment)、叶片转速(blade rotating speed)、偏航(yaw)、转子速度(rotor speed)、结构振动(structural vibration)等,然后对这些参数进行分析以评估故障的发生。然而,由于风力涡轮机的各个部分需要同时安装不同类型的传感器,有时某一位置还需要同时安装两种或两种以上类型的传感器,会造成参数监控复杂、成本高等问题。如何利用最少的传感器,分析尽量多的检测参数以评估风力涡轮机工作于故障状态的概率成为亟待解决的关键技术问题。

[0004] 所以,需要提供一种改进的风力涡轮机来解决上述技术问题。

发明内容

[0005] 现在归纳本发明的一个或多个方面以便于本发明的基本理解,其中该归纳并不是本发明的扩展性纵览,且并非旨在标识本发明的某些要素,也并非旨在划出其范围。相反,该归纳的主要目的是在下文呈现更详细的描述之前用简化形式呈现本发明的一些概念。

[0006] 本发明的一个方面在于提供一种风力涡轮机,包括:

[0007] 微型惯性测量单元,安装于每个叶片上,用于感应对应安装位置处的多个检测参数信号;及

[0008] 监控系统,用于监控该多个叶片的运行状态,该监控系统包括:

[0009] 信号处理单元,用于基于该微型惯性测量单元得到的多个检测参数信号计算得到处理参数信号;

[0010] 信号分析单元,用于对每个分析参数信号进行分析以得到故障估计信号,其中,该分析参数信号选自该多个检测参数信号和该处理参数信号,每个故障估计信号用于估计对应的叶片是否工作于故障状态;及

[0011] 故障评估单元,用于基于该多个故障估计信号评估对应叶片是否发生故障或发生故障的概率。

[0012] 本发明的再一方面在于提供一种评估风力涡轮机叶片健康状态的方法。该方法包括：

[0013] 通过安装于每个叶片上的微型惯性测量单元来感应对应安装位置处的多个检测参数信号；

[0014] 基于该多个检测参数信号计算得到处理参数信号；

[0015] 对每个分析参数信号进行分析以得到故障估计信号，其中，该分析参数信号选自该多个检测参数信号和该处理参数信号，每个故障估计信号用于估计对应的叶片是否工作于故障状态；及

[0016] 基于该多个故障估计信号评估对应叶片是否发生故障或发生故障的概率。

[0017] 相较于现有技术，本发明采用微型惯性测量单元为监控系统提供检测参数信号，微型惯性测量单元可同时检测多种参数信号并通过计算得到多种处理参数信号，因此，通过安装较少数目的微型惯性测量单元可节约成本并降低参数信号检测的复杂度。该检测参数信号和该处理参数信号均可用作分析参数信号，每个分析参数信号经过分析可得到故障估计信号以用于评估对应的叶片是否发生故障或工作于故障状态的概率。本发明采用的监控系统结构简单，且对多个分析参数信号进行故障分析可提高故障状态评估的准确性。

附图说明

[0018] 通过结合附图对于本发明的实施方式进行了描述，可以更好地理解本发明，在附图中：

[0019] 图1为本发明风力涡轮机的一个实施方式示意图；

[0020] 图2为如图1所示风力涡轮机上的一个叶片的示意图；

[0021] 图3为本发明风力涡轮机叶片故障监控系统的一个实施方式示意框图；

[0022] 图4为如图2所示叶片的简化等效悬臂梁模型示意图；

[0023] 图5为如图3所示的信号分析单元的一个实施方式示意图；

[0024] 图6为对如图2所示叶片实时测量的叶片局部偏移角和仿真得到的叶片局部偏移角的幅频特性曲线；

[0025] 图7为如图1所示3个叶片分别对应的实时测量的叶片局部偏移角的幅频特性曲线；

[0026] 图8为如图1所示3个叶片分别对应的处理得到的叶尖偏移的统计特性曲线；

[0027] 图9为本发明风力涡轮机叶片故障监控系统的另一个实施方式示意框图；以及

[0028] 图10为本发明风力涡轮机叶片健康状态评估方法的一个实施方式的流程图。

具体实施方式

[0029] 以下将描述本发明的具体实施方式，需要指出的是，在这些实施方式的具体描述过程中，为了进行简明扼要的描述，本说明书不可能对实际的实施方式的所有特征均作详尽的描述。应当可以理解的是，在任意一种实施方式的实际实施过程中，正如在任意一个工程项目或者设计项目的过程中，为了实现开发者的具体目标，为了满足系统相关的或者商业相关的限制，常常会做出各种各样的具体决策，而这也会从一种实施方式到另一种实施方式之间发生改变。此外，还可以理解的是，虽然这种开发过程中所作出的努力可能是复杂

并且冗长的,然而对于与本发明公开的内容相关的本领域的普通技术人员而言,在本公开揭露的技术内容的基础上进行的一些设计,制造或者生产等变更只是常规的技术手段,不应当理解为本公开的内容不充分。

[0030] 除非另作定义,权利要求书和说明书中使用的技术术语或者科学术语应当为本发明所属技术领域内具有一般技能的人士所理解的通常意义。本发明专利申请说明书以及权利要求书中使用的“第一”、“第二”以及类似的词语并不表示任何顺序、数量或者重要性,而只是用来区分不同的组成部分。“一个”或者“一”等类似词语并不表示数量限制,而是表示存在至少一个。“包括”或者“包含”等类似的词语意指出现在“包括”或者“包含”前面的元件或者物件涵盖出现在“包括”或者“包含”后面列举的元件或者物件及其等同元件,并不排除其他元件或者物件。“连接”或者“相连”等类似的词语并非限定于物理的或者机械的连接,而是可以包括电气的连接,不管是直接的还是间接的。

[0031] 请参考图1,为本发明风力涡轮机10的一种实施方式示意图。更具体地,该风力涡轮机10为水平轴风力涡轮机。该风力涡轮机10包括一个塔架12及一个转子14。该转子14包括若干叶片例如如图1所示的三个叶片141、142、143。该三个叶片141、142、143安装在一个轮毂144上。工作时,该三个叶片141、142、143在风能的推力下旋转,然后产生传动扭矩以转动与该转子14连接的主轴(未示出),进而驱动发电机(未示出)进行旋转发电。该主轴和发电机等元件安装在一个机舱16内,该机舱16被旋转的安装在该塔架12上,该塔架12与该机舱16之间具有一个偏航系统,可实时调节该机舱16的方向,以便使叶片141、142、143实时地处于最佳的风向位置以获得最大的转动扭矩。图1仅是举例给出了风力涡轮机10的主要组成部分,在其他实施方式中,该风力涡轮机10也可为其他类型的风力涡轮机如垂直轴风力涡轮机。

[0032] 请参照图2,为该风力涡轮机10上的一个叶片142的示意图,其他叶片141、143也具有相似的结构,此处仅以一个为例进行说明。在图2的实施方式中,该叶片142的外表面上安装有一个微型惯性测量单元(Micro Inertial Measurement Unit, MIMU) 20,在其他实施方式中,该微型惯性测量单元20也可安装在该叶片142的内表面或者嵌入在叶片142的本体内,并且该微型惯性测量单元20的数量也可为多个,可分别安装在叶片的不同位置上如叶片的尖部、中部、顶部、底部,以利于感应足够的参数信号为后续计算之用。这里的词语“根部”、“尖部”、“底部”、“中部”及“顶部”并不是指绝对的某一点,可能是附近的某一区域均可,这里仅是使用不同的词语对其加以区别。例如如图2所示的该叶片142的中部安装一个微型惯性测量单元20,具体安装可根据实际需要进行调整。在其他实施方式中,还可在该风力涡轮机10的其他部位安装微型惯性测量单元20,例如在塔架12或机舱16上安装,以根据需要提供不同位置、种类的参数信号。

[0033] 需要说明的是,该微型惯性测量单元20是一种全面的运动捕获感应装置,用于感应但不局限于三维方向信号(俯仰角、横滚角和偏航角)、三维加速度信号、三维转速信号、三维磁场信号等。在非限定实施方式中,该微型惯性测量单元20可能包括三维加速计、三维陀螺仪、三维磁力计或只包括上述三种测量仪器中的一种或两种。为评估风力涡轮机10的故障状态尤其是若干叶片的故障状态时,需对叶片的若干参数进行监测并分析以确定具体叶片的故障状态。选用合适类型的微型惯性测量单元来监测若干参数可降低成本。

[0034] 请参照图3,为该风力涡轮机10的监控系统303的较佳实施方式的框图。在一些实

施方式中,该监控系统303可安装于塔架12或机舱16内。在其他实施方式中,该监控系统303可安装于监控室内供监控人员观测。为了评估该风力涡轮机10是否工作于故障状态或工作于故障状态的概率,本发明提出一种基于微型惯性测量单元的检测参数信号以评估风力涡轮机工作于故障状态的概率的方法。故障状态在这里包括但不限于叶片裂纹、叶片卡滞、叶片劳损、叶片覆冰、过载等故障。

[0035] 该监控系统303用于根据微型惯性测量单元20感应的多个检测参数信号311以监控该叶片141、142、143的健康状态,更具体地,用于监控该叶片141、142、143的一个或多个是否工作于故障状态。该监控系统303包括信号处理单元305、信号分析单元307和故障评估单元309。在一些实施方式中,该信号处理单元305、该信号分析单元307和该故障评估单元309可集成在同一处理芯片内,在其他实施方式中,该信号处理单元305、该信号分析单元307和该故障评估单元309可分属于不同处理芯片中。

[0036] 该信号处理单元305用于接收该叶片141、142、143上的微型惯性测量单元20所感应的多个检测参数信号311,再通过内嵌的算法程序得出具体的一个或多个处理参数信号321。在非限定实施方式中,根据如图2所示叶片142上的微型惯性测量单元20感应到的部分检测参数信号313,该信号处理单元305可计算得到处理参数信号321。该处理参数信号321可包括但不限于叶片螺距、叶片转速、结构振动、叶片挠度、叶片局部偏移角、叶片扭矩、叶尖偏移、三维运动轨迹等。

[0037] 以下给出计算其中叶片挠度和叶片局部偏移角参数信号的一种数学模型方法,具体的算法程序除可应用该数学模型进行编程外,还可应用其他类型的模型方法进行编程,不局限于本实施方式。

[0038] 叶片142可以简化等效为如图4所示的悬臂梁模型。假设叶片承受的平均载荷为 w (牛/米),叶片挠度 $y(x)$ 与悬臂梁横轴坐标 x 以及叶片局部偏移角 (x) 与悬臂梁横轴坐标 x 的关系可分别用下面的公式来表示:

$$[0039] \quad y(x) = \frac{-w}{24EI(x)}(x^4 - 4Lx^3 + 6L^2x^2) \quad (1),$$

$$[0040] \quad (x) = \frac{dy(x)}{dx} = \frac{-w}{6EI(x)}(x^3 - 3Lx^2 + 3L^2x) \quad (2),$$

[0041] 其中, $EI(x)$ 为弹性模量, L 为叶片的总长度。叶片的弹性模量 $EI(x)$ 随叶片位置 x 的变化而变化,如图4所示,将叶片142从根部 A_0 到尖部 A_n 的总长度 L 分成 n 部分,其中,该 n 部分可以为长度相等的 n 等分也可以为长度不等的 n 部分,分割 n 部分的节点依次为 $A_1, A_2, \dots, A_{n-1}$,假设从叶片142的根部 A_0 到各个节点 $A_1, A_2, \dots, A_{n-1}$ 及尖部 A_n 的长度为 L_k (其中, $k \in 1, 2, \dots, n$),例如,根部 A_0 到第1节点 A_1 长度为 L_1 ,根部 A_0 到第2节点 A_2 处长度为 L_2 ,根部 A_0 到第 k 节点 A_k 处长度为 L_k 。对应每一部分的弹性模量为 EI_k (其中, $k \in 1, 2, \dots, n$)。第 k 部分对应的叶片挠度 $y(x)$ 和叶片局部偏移角 (x) 可分别用下面的公式来表示:

[0042]

$$y_k = \frac{-w}{24EI_k}[(L_k - L_{k-1})^4 - 4(L_n - L_{k-1})(L_k - L_{k-1})^3 + 6(L_n - L_{k-1})^2(L_k - L_{k-1})^2] \quad (3),$$

[0043]

$$\theta_k = \frac{-w}{6EI_k}[(L_k - L_{k-1})^3 - 3(L_n - L_{k-1})(L_k - L_{k-1})^2 + 3(L_n - L_{k-1})^2(L_k - L_{k-1})] \quad (4),$$

[0044] 叶片142第k部分的总叶片挠度 y_{ktotal} 和总叶片局部偏移角 θ_{ktotal} 可分别用下面的公式来表示:

$$[0045] \quad y_{ktotal} = y_{k-1total} + y_k + \theta_{k-1} (L_k - L_{k-1}) \quad (5),$$

$$[0046] \quad \theta_{ktotal} = \theta_{k-1total} + \theta_k \quad (6),$$

[0047] 当其中一部分的叶片局部偏移角和叶片挠度已知时,通过迭代的算法可计算得到任意部分的叶片挠度和叶片局部偏移角。因此,当接收位于叶片142的该微型惯性测量单元20检测到的安装位置处的叶片挠度和叶片局部偏移角后,叶片142上任意位置的叶片挠度和叶片局部偏移角可通过该信号处理单元305计算得到。同理,其他类型的处理参数信号321可通过相应的算法进行计算获得,这里不再一一说明。

[0048] 再次参阅图3,该信号分析单元307可接收该检测参数信号311和该处理参数信号321当中的至少一个信号作为分析参数信号。在一些实施方式中,当分析叶片的不同故障状态时需选择不同的分析参数信号。该信号分析单元307用于对每个分析参数信号分别进行分析以输出各自的故障估计信号331。每个故障估计信号331用于估计对应的叶片是否工作于故障状态。在一种实施方式中,该故障估计信号331可包括用于估计对应的叶片工作于故障状态的故障值和估计对应的叶片工作于正常状态的正常值。在一种实施方式中,该故障值可设置为“1”,该正常值可设置为“0”。在其他实施方式中,故障值和正常值可设置为其他数值。在一些实施方式中,采用同一种分析方法对不同分析参数信号进行分析。在一些实施方式中,分别采用不同的分析方法对不同分析参数信号进行分析。

[0049] 参照图5,为如图3所示的信号分析单元307的一个实施方式示意图。作为一种分析方法的一个例子,如图5所示,该信号分析单元307包括第一比较器501,该第一比较器501用于将该分析参数信号511与预设参数信号512进行比较分析以生成一个故障估计信号531。在一些实施方式中,该预设参数信号512可来自基于叶片142仿真模型的仿真数据,更具体地,为在模拟真实环境条件下得到的与该分析参数信号511相对应的高度仿真数据。在一些实施方式中,该预设参数信号512可来自叶片正常运行时得到的与该分析参数信号511相对应的运行数据。该运行数据可包括叶片出厂时正常运行的测试数据以及组装于该风力涡轮机10后在实际环境中运行的历史数据。例如,该历史数据可选取对应叶片运行于一定时间段内的存储数据中对应的数据。

[0050] 更具体地,在一种实施方式中,该第一比较器501用于实施一种频域比较方法。如图2所示安装于叶片142上的微型惯性测量单元20检测到的叶片局部偏移角用作该分析参数信号511,基于叶片仿真模型在模拟相同环境下得到的叶片局部偏移角数据用作该预设参数信号512。对该实时测量的叶片局部偏移角数据511以及该仿真得到的叶片局部偏移角数据512分别进行傅里叶变换(FFT)以得到各自对应的幅频特性曲线。如图6所示,曲线601为该实时测量的叶片局部偏移角数据511的幅频特性曲线,曲线602为该仿真得到的叶片局部偏移角数据512的幅频特性曲线。在一些实施方式中,幅值偏差/幅值偏差比可用于估计该叶片142是否工作于故障状态,一种幅值偏差比的算法如下式所示:

$$[0051] \quad \frac{|y_1(f) - y_2(f)|}{y_2(f)} > y_{threshold} \quad (7),$$

[0052] 其中, $y_1(f)$ 为幅频特性曲线601的幅值函数, $y_2(f)$ 为幅频特性曲线602的幅值函数, $y_{threshold}$ 为设置的阈值。对于每一个频率点 f ,对应的 $y_1(f)$ 与 $y_2(f)$ 的差值的绝对值与 y_2

(f)的比值大于该阈值 $y_{\text{threshold}}$ 如10%时,即当幅值偏差比过大时该叶片142被估计工作于故障状态,该第一比较器501生成的故障估计信号531为故障值。

[0053] 否则,当该实时测量的叶片局部偏移角数据511的幅频特性曲线的特征频率点和/或幅值与该仿真得到的叶片局部偏移角数据512的幅频特性曲线大致相同时,例如如公式(7)所示,当 $y_1(f)$ 与 $y(f)$ 的差值的绝对值与 $y_2(f)$ 的比值小于该阈值 $y_{\text{threshold}}$ 如10%时即大致相同时,该叶片142被估计工作于正常状态,该第一比较器501生成的故障估计信号531为正常值。

[0054] 在一些实施方式中,也可通过监视器直接观测幅频特性曲线601和幅频特性曲线602的特征频率点以估计该叶片142是否工作于故障状态。幅频特性曲线601的特征频率点为 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 ,幅频特性曲线602的特征频率点为 B_0 、 B_1 、 B_2 。从曲线可知,幅频特性曲线601和幅频特性曲线602的幅频特性的特征频率点不同。更具体地, A_0 与 B_0 的频率和幅值大致相同; A_1 与 B_1 相比频率出现偏移; A_2 无对应的频率点; A_3 与 B_2 相比, B_2 处对应的频率带较 A_3 的宽。当特征频率点不完全对应时即频率特性不同时,该叶片142被估计工作于故障状态,该第一比较器501生成的故障估计信号531为故障值。

[0055] 否则,若幅频特性曲线601和幅频特性曲线602的所有特征频率点完全对应即大致相同时,该叶片142被估计工作于正常状态,该第一比较器501生成的故障估计信号531为正常值。以特征频率点 A_0 和特征频率点 B_0 为例进行说明,若特征频率点 A_0 和特征频率点 B_0 的幅值和频率相同或偏差较小如频率偏差仅为1Hz时,可以认为大致相同。

[0056] 在其他实施方式中,如上所述幅频特性还可通过其他算法如希尔伯特变换算法、维纳变换算法运算得到。

[0057] 在其他实施方式中,该第一比较器501对该分析参数信号511和该预设参数信号512的比较也可通过时域比较方法来实现如直方图分析算法、方差分析算法、功率谱分析算法、参数模型分析算法等统计方法。此时,可对各自的统计特性如分布点概率进行分析比较以估计该叶片142是否工作于故障状态。

[0058] 作为另一种分析方法的一个例子,如图5所示,该信号分析单元307还包括第二比较器502,该第二比较器502用于对该多个叶片141、142、143的相同分析参数信号521、522、523相互之间进行比较以生成一个故障估计信号532。

[0059] 更具体地,在一种实施方式中,该第二比较器502用于实施一种频域比较方法。例如如图2所示安装于叶片141、142、143上的微型惯性测量单元20检测到的相同位置处的叶片局部偏移角分别用作该分析参数信号521、522、523。对该实时测量的叶片局部偏移角数据521、522、523分别进行傅里叶变换(FFT)以得到各自对应的幅频特性曲线。如图7所示,曲线701为该叶片141实时测量的叶片局部偏移角数据521的幅频特性曲线,曲线702为该叶片142实时测量的叶片局部偏移角数据522的幅频特性曲线,曲线703为该叶片143实时测量的叶片局部偏移角数据523的幅频特性曲线。

[0060] 在一些实施方式中,如公式(7)所示的计算式可用于对其中每两个幅频特性曲线对应的幅值偏差/幅值偏差比进行计算以估计其中一个叶片是否工作于故障状态。作为一个例子,当 $y_a(f)$ 与 $y_b(f)$ 的差值的绝对值与 $y_a(f)$ 的比值大于该阈值 $y_{\text{threshold}}$ 如10%时, $y_a(f)$ 与 $y_c(f)$ 的差值的绝对值与 $y_a(f)$ 的比值小于该阈值 $y_{\text{threshold}}$ 10%时, $y_b(f)$ 与 $y_c(f)$ 的差值的绝对值与 $y_a(f)$ 的比值大于该阈值 $y_{\text{threshold}}$ 10%时,即当幅频特性曲线702与幅频特性曲

线701、703的幅频特性不同且幅频特性曲线701、703的幅频特性大致相同时,该叶片142被估计工作于故障状态,该第二比较器502生成的故障估计信号532为故障值。

[0061] 否则,若以上每两个叶片的幅值偏差比均小于10%时,即当幅频特性曲线701、702、703的幅频特性大致相同时,该叶片142被估计工作于正常状态,该第二比较器502生成的故障估计信号532为正常值。

[0062] 在一些实施方式中,也可通过监视器直接观测幅频特性曲线701、702、703幅频特性的特征频率点以估计其中一个叶片工作于故障状态。幅频特性曲线701的特征频率点为 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 ,幅频特性曲线702的特征频率点为 B_0 、 B_1 、 B_2 ,幅频特性曲线703的特征频率点为 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 ,从曲线可知,幅频特性曲线701和幅频特性曲线702的幅频特性的特征频率点不同。更具体地, A_0 与 B_0 的频率和幅值大致相同; A_1 与 B_1 相比频率出现偏移; A_2 无对应的频率点; A_3 与 B_2 相比, B_2 处对应的频率带较 A_3 的宽。幅频特性曲线701和幅频特性曲线703的幅频特性的特征频率点大致相同。更具体地, A_0 与 C_0 、 A_1 与 C_1 、 A_2 与 C_2 、 A_3 与 C_3 的频率和幅值分别大致相同。幅频特性曲线703和幅频特性曲线702的幅频特性的特征频率点不同。更具体地, C_0 与 B_0 的频率和幅值大致相同; C_1 与 B_1 相比频率出现偏移; C_2 无对应的频率点; C_3 与 B_2 相比, B_2 处对应的频率带较 C_3 的宽。即与其余叶片141、143相比,叶片142的特征频率点不完全对应,该叶片142被估计工作于故障状态,该第二比较器502生成的故障估计信号532为故障值。

[0063] 否则,若幅频特性曲线701、702、703对应的所有特征频率点完全对应即大致相同时,叶片141、142、143被估计工作于正常状态,该第二比较器502生成的故障估计信号532为正常值。以特征频率点 A_0 、特征频率点 B_0 、特征频率点 C_0 为例进行说明,若特征频率点 A_0 、特征频率点 B_0 、特征频率点 C_0 的幅值和频率相同或偏差较小如频率偏差仅为1Hz时,可以认为大致相同。

[0064] 在其他实施方式中,如上所述幅频特性还可通过其他算法如希尔伯特变换算法、维纳变换算法运算得到。

[0065] 在其他实施方式中,该第二比较器502可实施一种时域比较方法如直方图分析算法、方差分析算法、功率谱分析算法、参数模型分析算法等方法。例如如图2所示安装于叶片141、142、143上的微型惯性测量单元20处理得到的相同位置处的叶尖偏移分别用作该分析参数信号521、522、523。对该实时处理得到的叶尖偏移521、522、523分别采用直方图分析方法以得到叶尖偏移在0到3米距离内的概率统计特性曲线。

[0066] 如图8所示,曲线801为该叶片141实时处理得到的叶尖偏移521的统计特性曲线,曲线802为该叶片142实时处理得到的叶尖偏移522的统计特性曲线,曲线803为该叶片143实时处理得到的叶尖偏移523的统计特性曲线。在一些实施方式中,可通过计算统计特性曲线的概率值的差值的绝对值与设置的阈值做比较来估计其中一个叶片是否工作于故障状态。例如统计特性曲线801与统计特性曲线803在所有叶尖偏移距离值对应的概率差值的绝对值均小于设置的阈值1%,统计特性曲线802与统计特性曲线801在不同叶尖偏移距离值的概率差值部分或全部大于1%,且统计特性曲线802与统计特性曲线803在不同叶尖偏移距离值的概率差值部分或全部大于1%时,即当叶片141、143的统计特性大致相同且该叶片142的统计特性与叶片142、143的统计特性不同时,该叶片142被估计工作于故障状态,该第二比较器502生成的故障估计信号532为故障值。

[0067] 否则,若统计特性曲线801,802,803中每两条统计特性曲线在所有叶尖偏移距离

值对应的概率差值均小于1%时即统计特性大致相同时,叶片141、142、143被估计工作于正常状态,该第二比较器502生成的故障估计信号532为正常值。

[0068] 返回图3所示,该故障评估单元309根据该多个故障估计信号331以采用相应的算法来评估相应叶片工作于故障状态的概率。

[0069] 作为一种算法的例子,该故障评估单元309采用基于该多个故障估计信号331的加权算法来评估相应叶片工作于故障状态的概率。该加权算法可用下面的公式来表示:

$$[0070] \quad P = \sum_{i=1}^n w_i F_i$$

$$[0071] \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \in [0,1]$$

[0072] 其中,P代表发生故障概率信号, F_i 为第*i*个故障估计信号(故障状态: $F_i=1$ 正常状态: $F_i=0$)。 w_i 为第*i*个分析参数信号对应的权重值, $w_i \in (0,1)$ 。在一些实施方式中,第*i*个分析参数信号对应的权重值 w_i 可通过训练算法如神经网络算法(Neural Algorithm)或模糊算法(Fuzzy Algorithm)来训练得到。在其他实施方式中,第*i*个故障估计信号对应的权重值 w_i 可根据分析参数信号对故障状态的评估重要性依据经验来设置,例如当叶片挠度作为第*i*个分析参数信号对评估叶片裂纹故障状态的影响较大时,可将权重值 w_i 设置为0.4。当P大于设置的阈值如0.75时,对应的叶片被评估工作于故障状态。在一些实施方式中,该故障评估单元309的输出信号341为该故障概率信号P。在其他实施方式中,当该叶片被评估工作于故障状态时,该输出信号341为1,当该叶片被评估工作于正常状态时,该输出信号341为0。

[0073] 在其他实施方式中,该故障评估单元309可采用基于该多个故障估计信号的其他算法。例如,当一定比例以上的故障估计信号为故障值时如2/3以上的故障估计信号为故障值时,相应叶片被评估为工作于故障状态。否则,相应叶片被评估为工作于正常状态。相类似地,在一些实施方式中,该输出信号341为故障值的故障估计信号的比例值。在其他实施方式中,当该叶片被评估工作于故障状态时,该输出信号341为1,当该叶片被评估工作于正常状态时,该输出信号341为0。

[0074] 参照图9,为本发明风力涡轮机叶片故障监控系统903的另一个实施方式示意框图。与图3所示监控系统303相比,该故障监控系统903进一步包括生命周期预测器350。该生命周期预测器350用于对该故障评估单元309的输出信号341进行分析以得到被监测叶片如叶片142的生命周期预警信号351。该生命周期预警信号351可用于估计该叶片142还可运行的时间以便于对该叶片142进行维护或更换。

[0075] 在一种实施方式中,该生命周期预测器350可实施一种累加算法,如当该输出信号341为故障概率信号P时,对P进行累加,当累加结果大于一设置的阈值如100时,该生命周期预测器350生成该生命周期预警信号351以预测该叶片142的生命周期即将结束,需对该叶片142进行更换。

[0076] 在其他实施方式中,该生命周期预测器350可实施一种统计方法如雨流计数方法(Rainflow Cycle Counting Method),当该输出信号341为故障概率信号P时,对P进行雨流

计数方法进行统计,当P大于一设置的阈值(如2/3)的次数多于一设置的阈值(如100)时,该生命周期预测器350生成该生命周期预警信号351以预测该叶片142的生命周期即将结束,需对该叶片142进行更换。

[0077] 参照图10,为一种用于评估风力涡轮机叶片健康状态的方法1000的较佳实施方式的流程图,该方法1000用于执行如图3所示监控系统303对叶片状态监控过程。该方法1000包括如下步骤:步骤1001,通过安装于每个叶片141、142、143上的微型惯性测量单元20来感应对应安装位置处的多个检测参数信号311。步骤1003,基于该多个检测参数信号311计算以得到处理参数信号321。步骤1005,通过对分析参数信号进行分析以得到故障估计信号331,其中,该分析参数信号选自该多个检测参数信号311和该处理参数信号321,每个故障估计信号331用于估计对应的叶片是否工作于故障状态。步骤1007,基于该多个故障估计信号331以评估对应叶片是否发生故障或发生故障的概率。上述各步骤中具体的工作过程前面段落已经描述,这里不再赘述。

[0078] 虽然结合特定的实施方式对本发明进行了说明,但本领域的技术人员可以理解,对本发明可以作出许多修改和变型。因此,要认识到,权利要求书的意图在于覆盖在本发明真正构思和范围内的所有这些修改和变型。

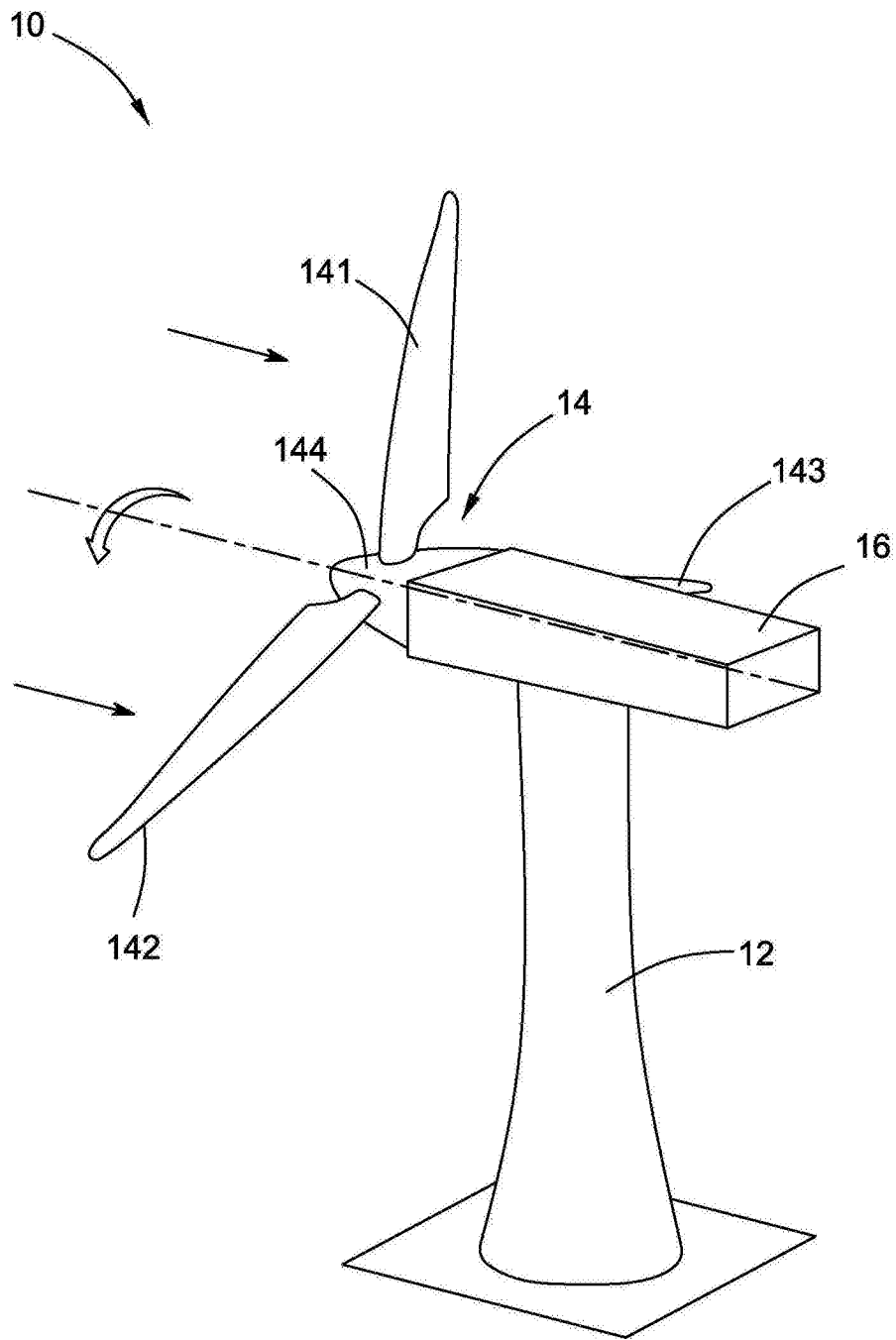


图1

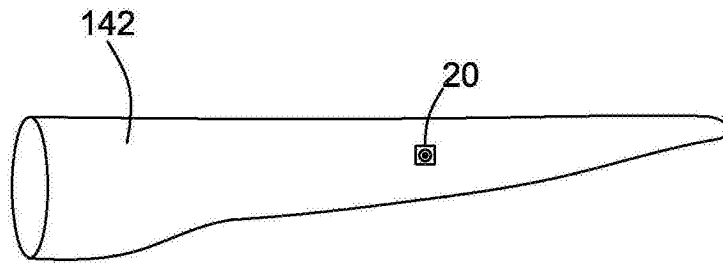


图2

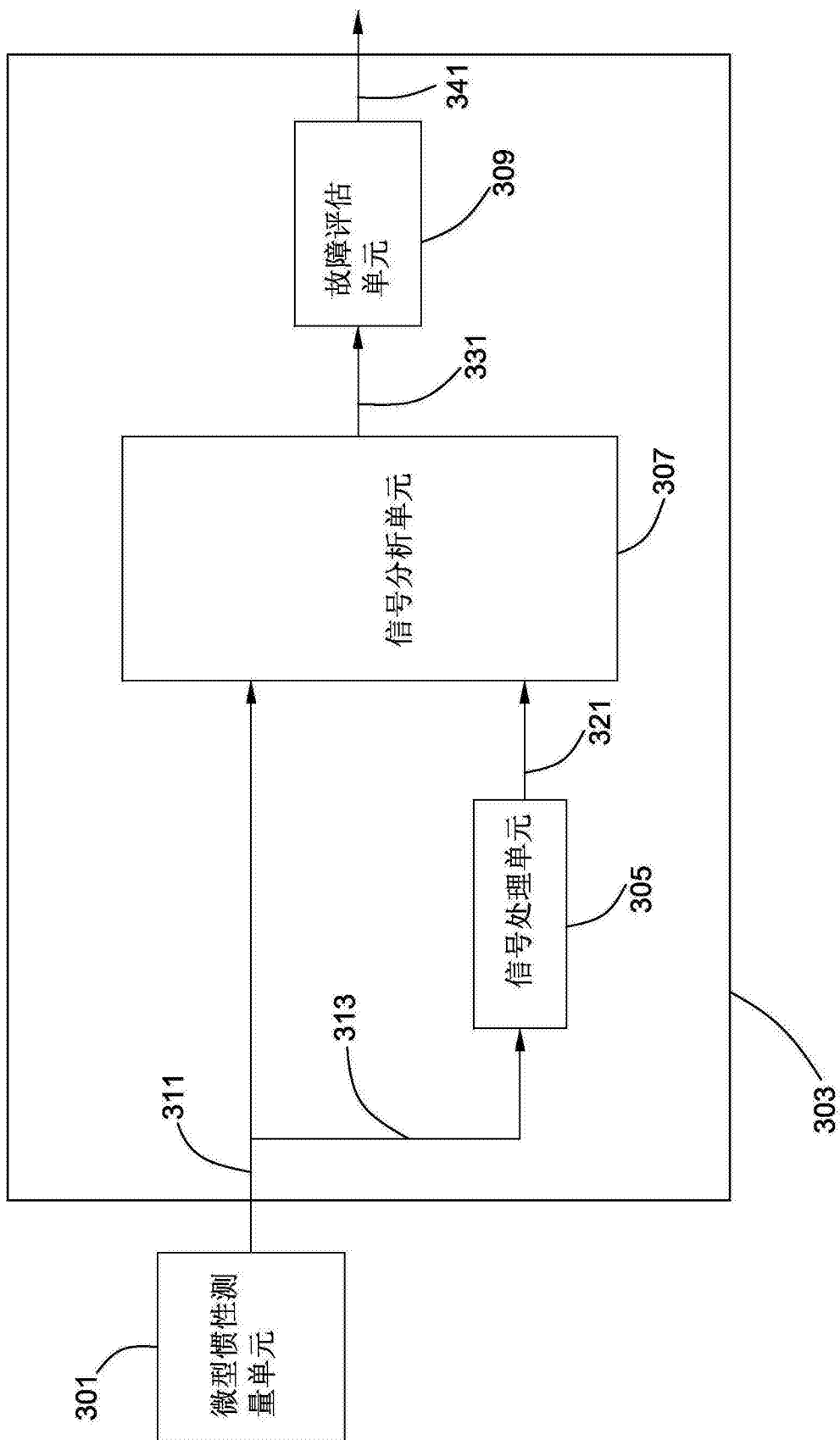


图3

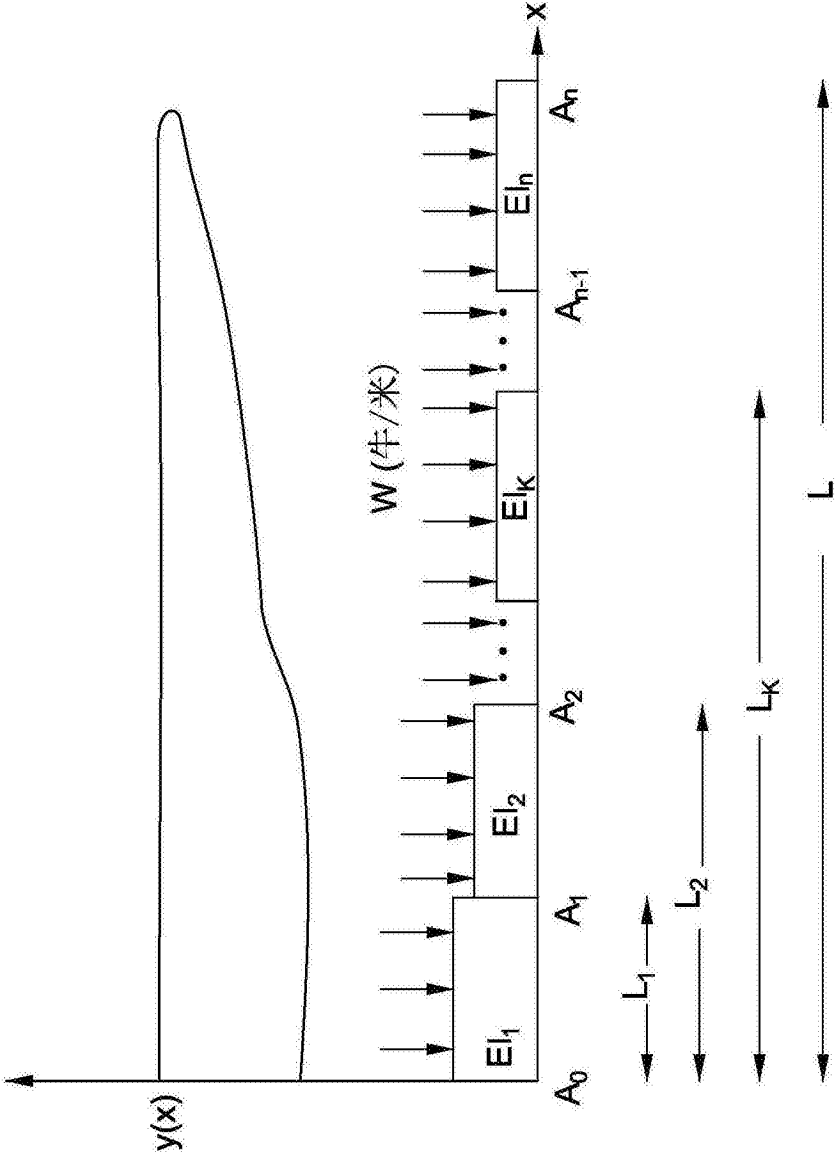


图4

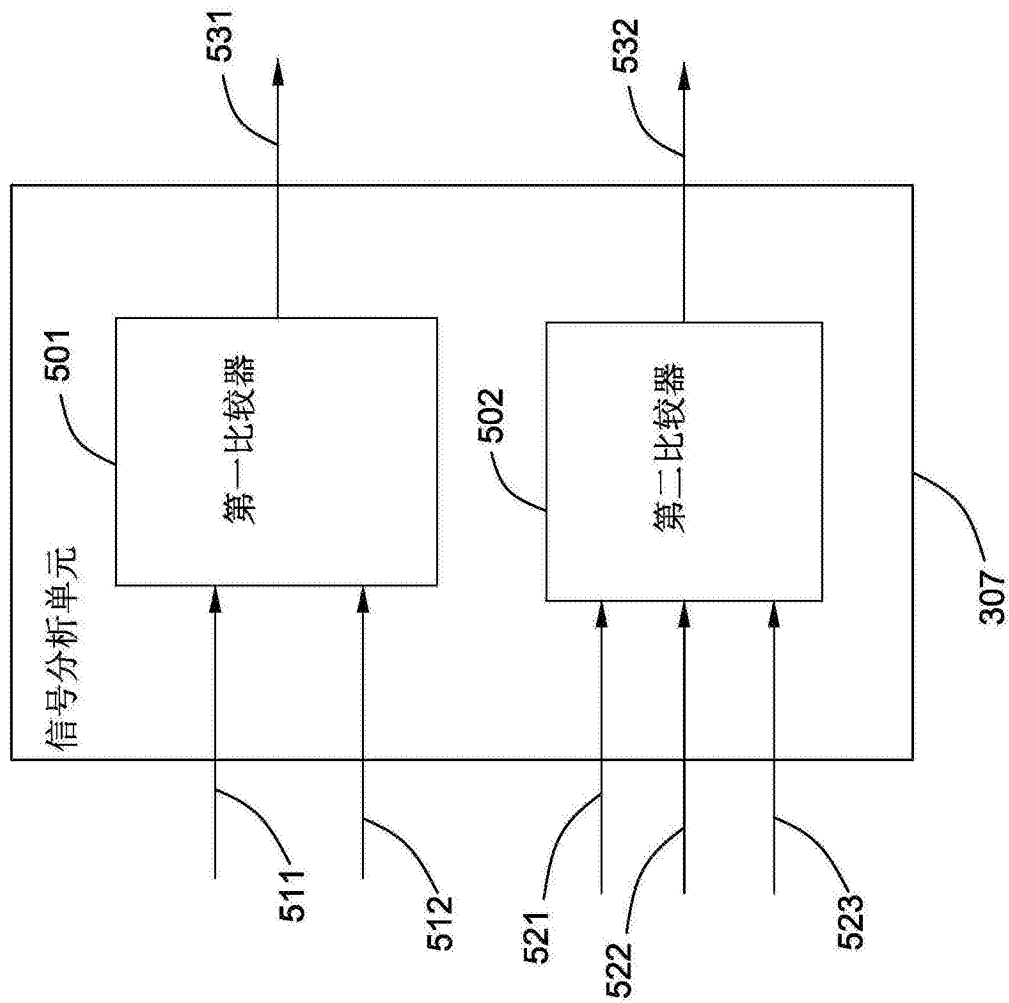


图5

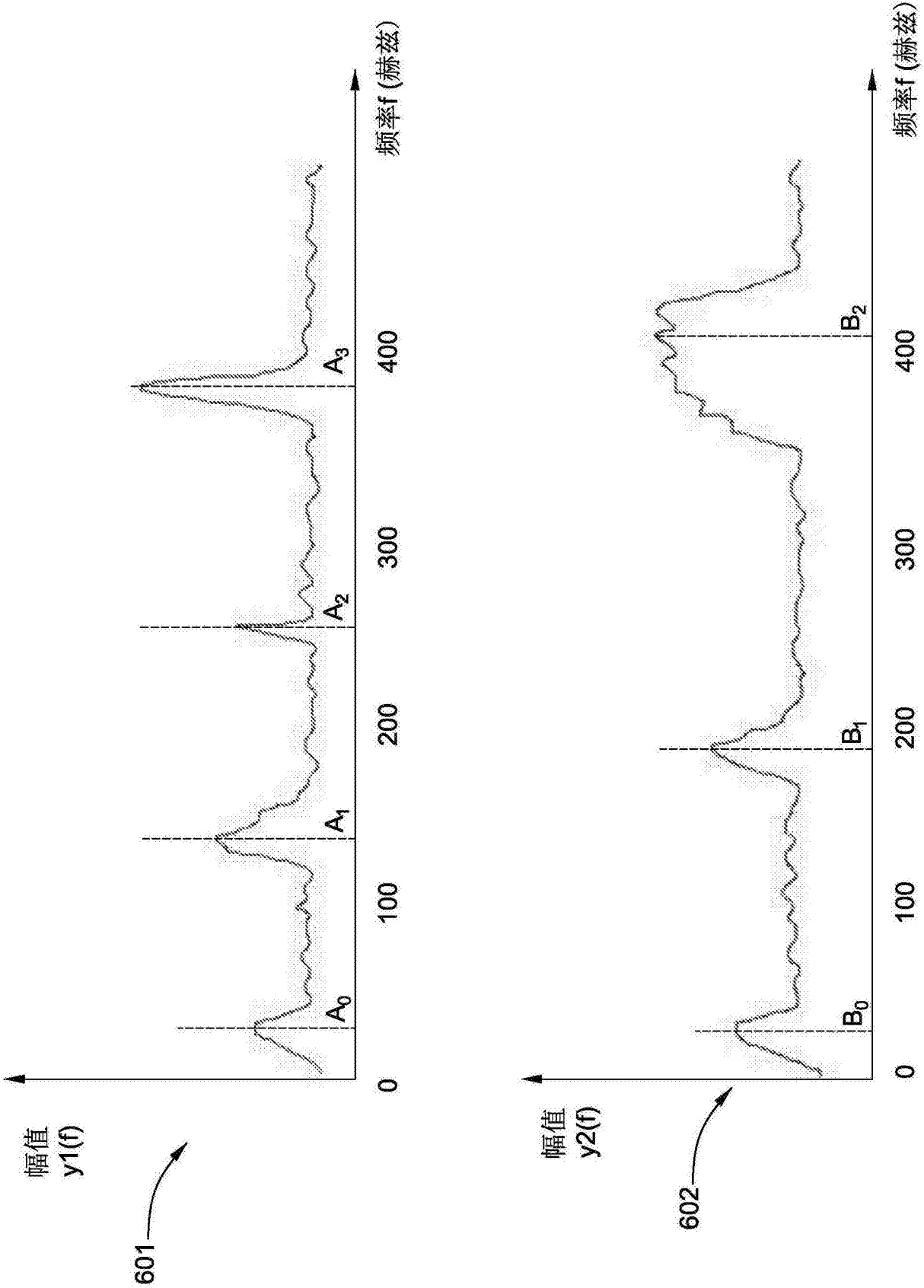


图6

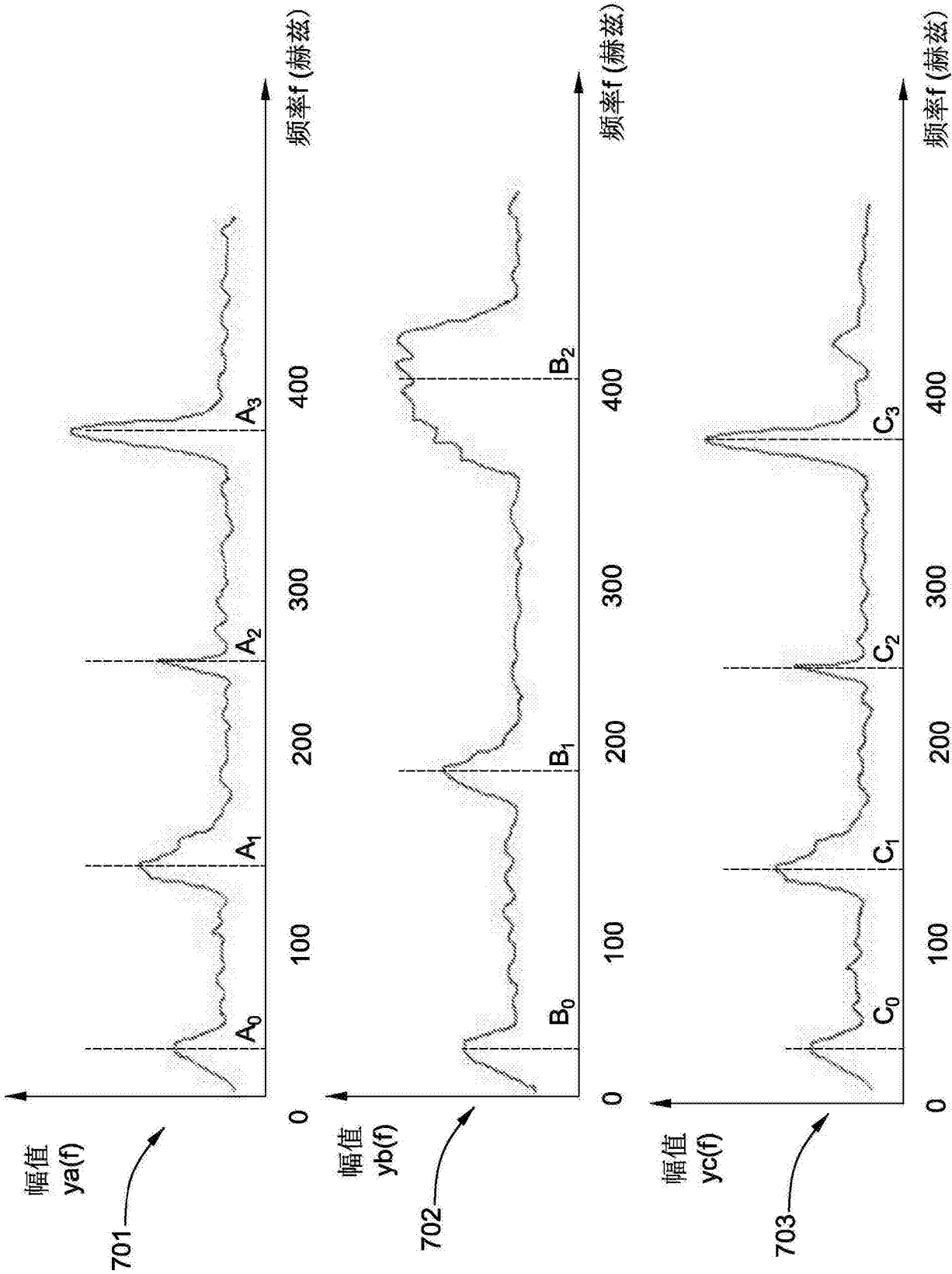


图7

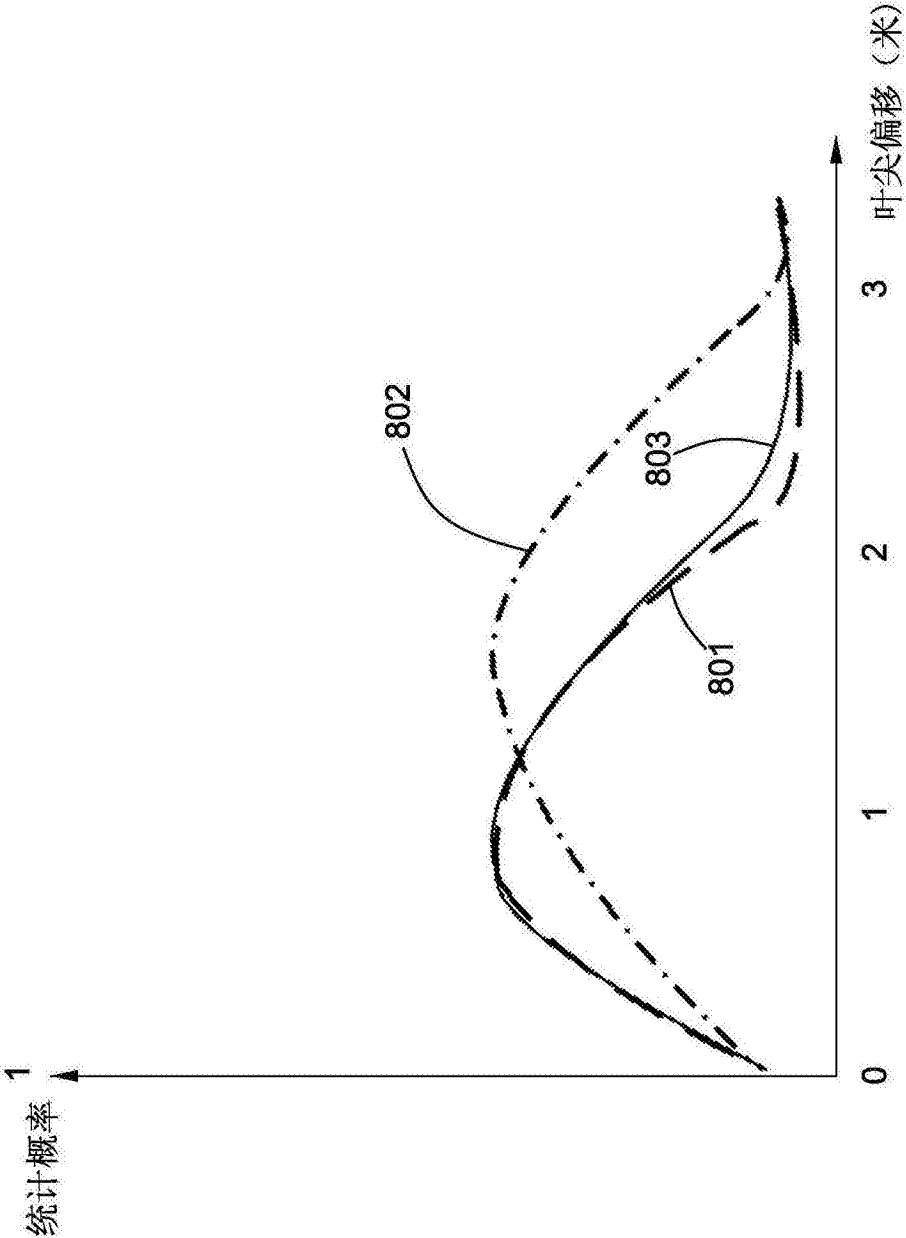


图8

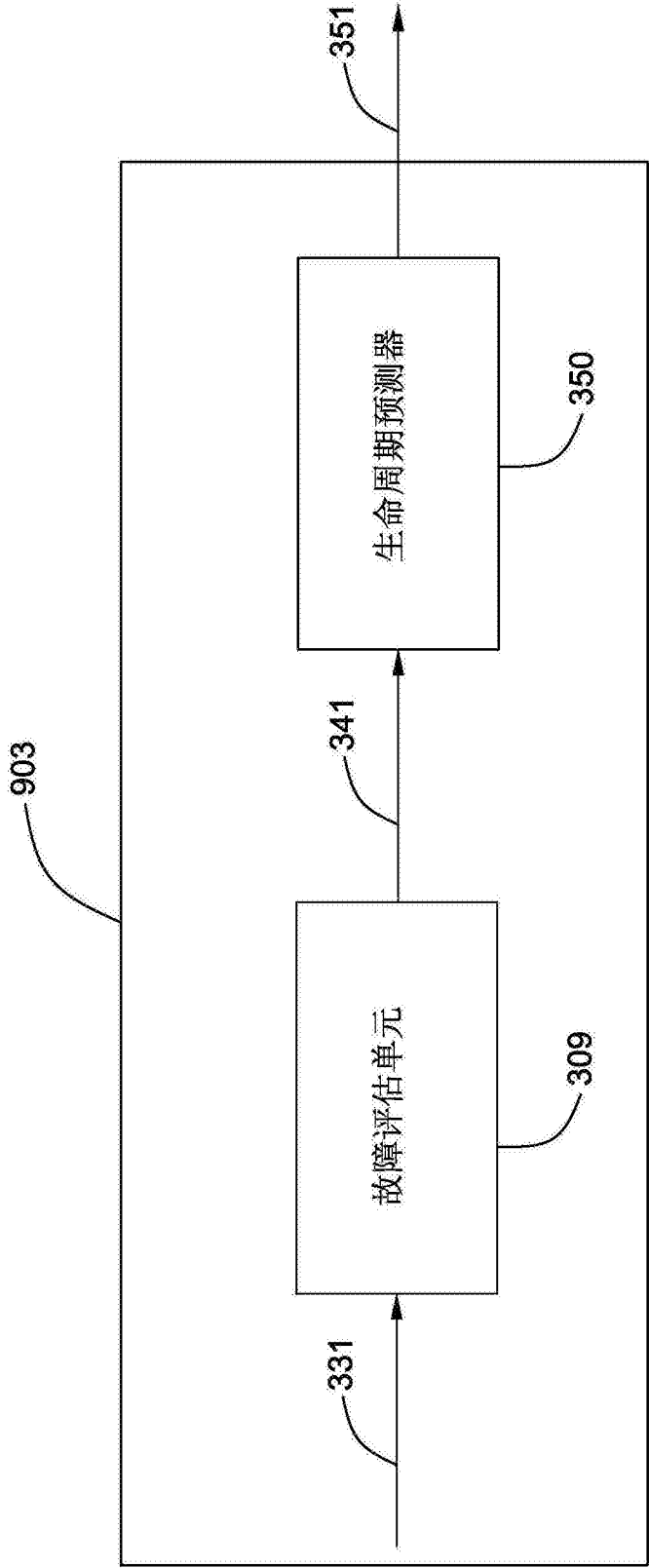


图9

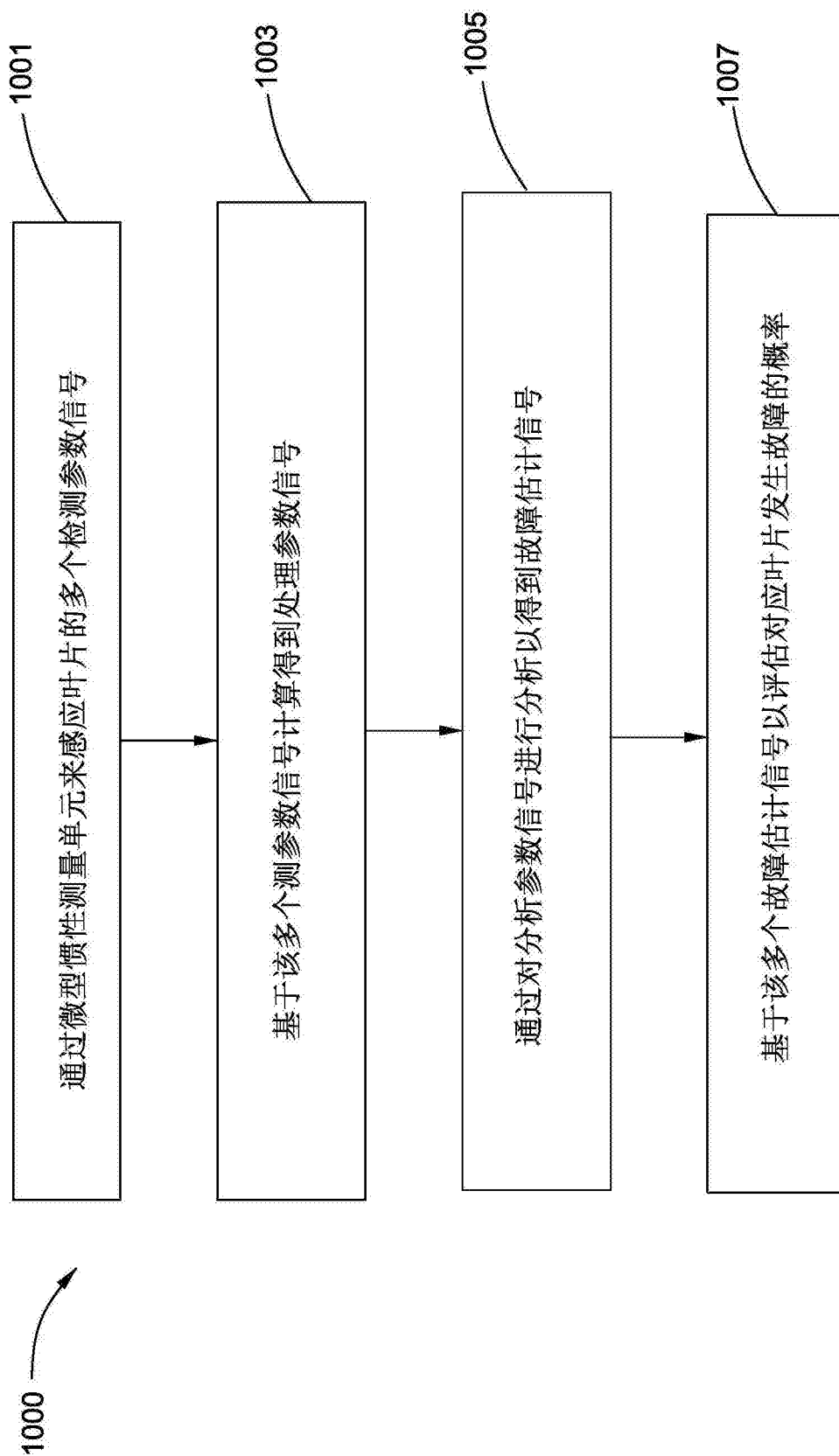


图10