



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 99808623.1

[45] 授权公告日 2004 年 11 月 10 日

[11] 授权公告号 CN 1175253C

[22] 申请日 1999.6.23 [21] 申请号 99808623.1

[30] 优先权

[32] 1998. 7.16 [33] US [31] 09/116,410

[86] 国际申请 PCT/US1999/014101 1999.6.23

[87] 国际公布 WO2000/004345 英 2000.1.27

[85] 进入国家阶段日期 2001.1.15

[71] 专利权人 微动公司

地址 美国科罗拉多州

[72] 发明人 T·J·昆宁哈姆 D·F·诺尔门

G·E·帕夫拉斯 S·J·舍利

审查员 周胜生

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

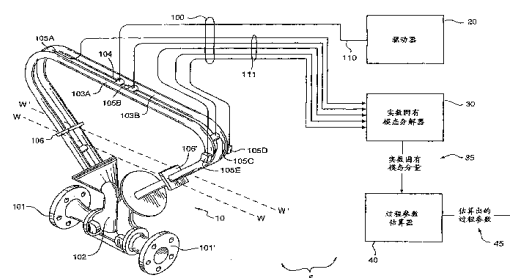
代理人 王 岳 王忠忠

权利要求书 8 页 说明书 23 页 附图 13 页

[54] 发明名称 用于振荡导管的使用固有模态分解的参数传感器及方法

[57] 摘要

接收多个运动信号，这些信号表示包含有物质的振荡导管的多个位置处的运动。对接收到的多个运动信号进行处理，以便将所述运动分解成多个实数固有模态分量。根据上述多个实数固有模态分量中的一个实数固有模态分量来估算过程参数。可通过提供一波模滤波器而对上述运动信号进行处理，以便生成一输出，该输出最佳地表示与振荡导管的实数固有波模相关联的运动分量。可用通常的相位差技术根据上述经过滤的输出来估算过程参数。根据接收到的多个运动信号来估算实数固有模态运动，并且，根据所估算的实数固有模态运动来估算过程参数。例如，可估算出相应第一和第二实数固有波模下的运动，而第二实数固有波模则最佳地与科里奥利力相关。



1、一种估算流经被驱动器(104)振动的导管(103A—103B)的物质的过程参数(45)的设备(5)，其中所述过程参数是从多个表示所述导管的运动的运动信号中估算出来的，该运动信号是由
5 固定在所述的导管上的多个运动感受器(105A—105D)来产生的，该设备(5)的特征在于包括：

一实数固有模态分解器(30)，它从与导管(103A—103B)相关的多个运动感受器(105A—105D)中接收所说的多个运动信号并对所述多个运动信号进行处理，从而将由上述多个运动信号
10 所表示的运动分解成多个实数固有模态分量(35)；以及

一过程参数估算器(40)，它对上述多个实数固有模态分量(35)的生成进行响应并根据上述多个实数固有模态分量(35)中的一个实数固有模态分量来估算过程参数(45)。

2、如权利要求1的设备(5)，其特征在于，所述实数固有模态分解器(30)包括一波模滤波器(330)，它可进行操作以便
15 根据所述多个运动信号来生成一输出，该输出能最佳地表示与导管(103A—103B)的实数固有波模相关联的运动分量；以及

所述过程参数估算器(40)对上述波模滤波器所产生的输出进行响应并且根据前述输出来估算过程参数。

20 3、如权利要求2的设备(5)，其特征在于，所述波模滤波器(330)进行操作以最佳地传送导管运动的与实数固有波模相关联的分量。

4、如权利要求2的设备(5)，其特征在于，所述波模滤波器(330)表示实数固有模态变换与有选择的逆实数固有模态变换的积，所述实数固有模态变换将物理域中的运动映射成多个单自由度(SDOF)系统中的
25 运动，而所述有选择的逆实数固有模态变换则将上述多个单自由度系统中预定一组内的运动映射成物理域中的运动。

5、如权利要求2的设备，其特征在于，所述波模滤波器(330)进行操作以生成一优先表示导管运动的与实数固有波模相关的分量的输出，所述实数固有波模最佳地与科里奥利力相关，该科里奥利力则
30 与所述导管中的物质相关。

6、如权利要求2的设备(5)，其特征在于，所述过程参数估算器(40)包括一质量流量估算器(544)。

7、如权利要求2的设备(5)，其特征在于，所述设备还包括这样的装置(436)，它用于对接收到的运动信号进行处理，以生成运动向量(437)，并且，所述波模滤波器包括这样的装置(438)，它用于使上述运动向量乘以一波模滤波器矩阵，以生成一经过滤的运动向量。

8、如权利要求2的设备(5)，其特征在于：

所述波模滤波器(330)进行操作，以表示导管(103A—103B)的第一位置处的运动的第一经过滤的信号以及表示导管(103A—103B)的第二位置处的运动的第二经过滤的信号；
10 以及

所述过程参数估算器(40)包括：

用于确定所述第一经过滤的信号与第二经过滤的信号之间相位差的装置(542)；以及

对上述相位差的确定进行响应以便根据所确定的相位差来估算质量流量的装置(544)。

9、如权利要求1的设备(5)，其特征在于：

所述实数固有模态分解器(30)包括一实数固有模态运动估算器(1330)，它可进行操作以便根据接收到的多个运动信号来估算实数固有模态运动；以及

20 所述过程参数估算器(40)可进行操作以便根据估算出的实数固有模态运动来估算过程参数(35)。

10、如权利要求9的设备(5)，其特征在于，所述实数固有模态运动估算器(1330)可进行操作，以便将实数固有模态变换作用于接收到的多个运动信号，从而生成实数固有模态运动的估算值。

11、如权利要求9的设备(5)，其特征在于：

所述实数固有模态运动估算器(1330)包括：

用于生成运动向量的装置(436)；以及

用于使运动向量乘以实数固有模态变换以便生成实数固有模态运动向量的装置(1438)；以及

所述过程参数估算器(40)包括这样的装置，它用于根据上述实数固有模态运动向量来估算过程参数(35)。

1 2、如权利要求9的设备(5),其特征在于:

所述实数固有模态运动估算器(1330)可进行操作以便估算出多种实数固有波模下的运动;以及

5 所述过程参数估算器(40)可进行操作以便根据估算出的用于多种实数固有波模的一个子集的运动来估算过程参数。

1 3、如权利要求12的设备(5),其特征在于:

所述实数固有模态运动估算器(1330)包括:

用于估算出第一实数固有波模下的运动的装置(1532);以及

10 用于估算出第二实数固有波模下的运动的装置(1534),所述第二实数固有波模最佳地与科里奥利力相关;以及

所述过程参数估算器(40)包括:

装置(1542),它用于使估算出的第二实数固有波模下的运动相对估算出的第一实数固有波模下的运动规一化,以便生成第二实数固有波模下的运动的规范估算值;以及

15 用于根据第二实数固有波模下的运动的规一化估算值来估算过程参数的装置(1544)。

1 4、如权利要求13的设备(5),其特征在于,所述用于规一化的装置(1542)包括这样的装置,它用于使估算出的第二实数固有波模下的运动的虚数分量相对估算出的第一实数固有波模下的运动的实数分量规一化。

1 5、如权利要求14的设备(5),其特征在于,所述用于估算第一实数固有波模下的运动的装置(1544)包括这样的装置,它用于估算实数固有波模下的运动,而所述实数固有波模则最佳地与作用于所述导管的触发相关。

1 6、如权利要求13的设备(5),其特征在于,所述过程参数估算器(40)包括这样的装置,它用于根据第二实数固有波模下的运动的规一化估算值、周知的质量流量以及有该周知质量流量时第二实数固有波模下的运动的预定规范估算值来估算过程参数。

30 1 7、如权利要求16的设备(5),其特征在于,所述过程参数估算器(40)包括用于估算质量流的装置。

1 8、如权利要求 1 3 的设备 (5)，其特征在于：

所述用于估算第一实数固有波模下的运动的装置 (1 5 3 2) 包括用于估算对称波模下的运动的装置；

5 所述用于估算第二实数固有波模下的运动的装置 (1 5 3 4) 包括用于估算非对称波模下的运动的装置；

所述用于规一化的装置 (1 5 4 2) 包括这样的装置，它用于确定所述非对称波模下的估算出的运动的虚数分量与所述对称波模下的估算出的运动的实数分量之比；以及

10 所述用于根据第二实数固有波模下的运动的规范化估算值来估算过程参数的装置 (1 5 4 4) 包括这样的装置，它用于根据上述确定的比率来估算过程参数。

1 9、如权利要求 1 8 的设备 (5)，其特征在于，所述用于根据上述确定的比率来确定过程参数的装置 (1 5 4 4) 包括这样的装置，它用于根据所确定的比率、周知的质量流量以及与该周知质量流量
15 量相对应的预定比率来估算过程参数。

2 0、如权利要求 1 9 的设备 (5)，其特征在于，所述用于根据前述确定的比率来估算过程参数的装置包括用于估算质量流量的装置。

2 1、如权利要求 1 的设备，其特征在于，所述多个运动信号表示一超定信息源，以便将前述导管的运动分解成上述多个实数固有模态分量。

20 2 2、一种从固定在导管上的多个运动感受器中产生的多个运动信号中估算流过由固定在所述导管上的驱动器来振动的所述导管的物质的过程参数 (4 5) 的方法 (6 0 0)，该方法的特征在于包括下列步骤：

25 从与包括物质的振动导管 (1 0 3 A—1 0 3 B) 相关的多个运动感受器 (1 0 5 A—1 0 5 E) 中接收 (6 2 0) 所述多个运动信号，这些信号表示上述振动导管的多个位置处的运动；

对接收到的多个运动信号进行处理 (6 3 0)，以便将所述运动分解成多个实数固有模态分量；

30 根据上述多个实数固有模态分量中的一个实数固有模态分量来估算 (6 4 0) 过程参数。

2 3、如权利要求 2 2 的方法 (6 0 0)，其特征在于，

所述处理步骤 (6 3 0) 包括这样的步骤：对运动信号进行处理

以便生成一输出，该输出最佳地表示与上述振动导管的实数固有波模相关联的运动分量；以及

所述用于估算的步骤（640）包括这样的步骤：根据上述输出来估算过程参数。

- 5 24、如权利要求23的方法（600），其特征在于，所述处理步骤（630）包括这样的步骤：使一波模滤波器（330）作用于上述多个运动信号。

- 10 25、如权利要求24的方法（600），其特征在于，所述波模滤波器（330）表示实数固有模态变换与有选择的逆实数固有模态变换的积，所述实数固有模态变换将物理域中运动映射成多个单自由度（S D O F）系统中的运动，而所述有选择的逆实数固有模态变换则将上述多个单自由度系统内的选定的一组中的运动映射成物理域中的运动。

- 15 26、如权利要求24的方法，其特征在于，所述处理步骤（620）包括这样的步骤：生成一最佳地表示导管运动的与实数固有波模相关的分量的输出，所述实数固有波模则最佳地与科里奥利力相关。

27、如权利要求24的方法（600），其特征在于，所述估算步骤（630）包括估算量流量这样的步骤。

- 20 28、如权利要求24的方法（600），其特征在于，所述处理步骤（610）包括下列步骤：

对接收到的多个运动信号进行处理（720），以生成运动向量；以及

- 25 使上述运动向量乘以（730）一波模滤波器矩阵，以生成一经过滤的运动向量。

29、如权利要求24的方法，其特征在于：

所述处理步骤（620）包括这样的步骤：生成表示所述导管的第一位置处的运动的第一经过滤的信号以及表示所述导管的第二位置处的运动的第二经过滤的信号；以及

- 30 所述估算步骤（630）包括下列步骤：

确定所述第一经过滤的信号与第二经过滤的信号之间的相位差；以及

根据所确定的相位差来估算出质量流量。

30、如权利要求23的方法(600)，其特征在于：

所述处理步骤(620)包括这样的步骤(1620)：根据接收到的多个运动信号来估算实数固有模态运动；以及

5 所述估算过程参数的步骤(630)包括这样的步骤(1630)：根据估算出的实数固有模态运动来估算与前述物质相关的过程参数。

31、如权利要求30的方法(600)，其特征在于，所述估算实数固有模态运动的步骤(1620)包括这样的步骤：将实数固有模态变换作用于接收到的多个运动信号，从而生成实数固有模态运动的估算值。

32、如权利要求31的方法(600)，其特征在于：

所述估算实数固有模态运动的步骤(1620)包括这样的步骤：

15 根据前述多个运动信号生成(1720)运动向量；以及
使运动向量乘以(1730)实数固有模态变换矩阵以便生成实数固有模态运动向量；以及

所述估算过程参数的步骤(1630)包括这样的步骤(1750)：根据上述实数固有模态运动向量来估算出过程参数。

20 33、如权利要求30的方法(600)，其特征在于：

所述估算实数固有模态运动的步骤(1620)包括：估算出用于多种实数固有波模的实数固有模态运动的步骤；以及

所述估算过程参数的步骤(1630)包括：根据估算出的多种实数固有波模的一个子集的实数固有模态运动来估算过程参数的步骤。

34、如权利要求33的方法(600)，其特征在于：

所述估算实数固有模态运动的步骤(1620)包括这样的步骤：

估算出第一实数固有波模下的运动；以及

30 估算出第二实数固有波模下的运动，所述第二实数固有波模最佳地与科里奥利力相关；以及

所述估算过程参数的步骤(1630)包括这样的步骤：

使估算出的第二实数固有波模下的运动相对估算出的第一实数固有波模下的运动规一化(1 7 4 0),以便生成第二实数固有波模下的运动的规范估算值;以及

5 根据第二实数固有波模下的运动的规一化估算值来估算出(1 7 5 0)过程参数。

3 5、如权利要求3 4的方法(6 0 0),其特征在于,所述规一化的步骤(1 7 4 0)包括这样的步骤:使估算出的第二实数固有波模下的运动的虚数分量相对估算出的第一实数固有波模下的运动的实数分量规一化。

10 3 6、如权利要求3 4的方法(6 0 0),其特征在于,
所述接收多个运动信号的步骤(6 1 0)包括这样的步骤:接收上述多个运动信号,同时使触发作用于前述导管;

所述用于估算第一实数固有波模下的运动的步骤(6 3 0)包括这样的步骤:估算实数固有波模下的运动,所述实固有数波模最佳地
15 与作用于所述导管的触发相关。

3 7、如权利要求3 4的方法,其特征在于,所述估算过程参数的步骤(6 3 0)包括这样的步骤(1 7 5 0):根据第二实数固有波模下的运动的规一化估算值、周知的质量流量以及有该周知质量流量时第二实数固有波模下的运动的预定规范估算值来估算过程参
20 数。

3 8、如权利要求3 7的方法,其特征在于,所述估算过程参数的步骤包括估算质量流量的步骤。

3 9、如权利要求3 4的方法(6 0 0),其特征在于:
所述估算第一实数固有波模下的运动的步骤包括估算对称波模
25 下的运动的步骤;

所述估算第二实数固有波模下的运动的步骤包括估算非对称波模下的运动的步骤;

所述规一化的步骤(1 7 4 0)包括这样的步骤:确定所述非对称波模下的估算出的运动的虚数分量与所述对称波模下的估算出的
30 运动的实数分量之比;以及

所述根据第二实数固有波模下的运动的规范化估算值来估算过程参数的步骤(1 7 5 0)包括这样的步骤:根据上述确定的比率来

估算过程参数。

4 0、如权利要求 3 9 的方法 (6 0 0)，其特征在于，所述估算过程参数的步骤 (6 3 0) 包括这样的步骤：根据所确定的比率、周知的质量流量以及与该周知质量流量相对应的预定比率来估算过程参数。

4 1、如权利要求 4 0 的方法 (6 0 0)，其特征在于，所述用于根据前述确定的比率来估算过程参数的步骤 (6 3 0) 包括估算质量流量的步骤。

4 2、如权利要求 2 2 的方法 (6 0 0)，其特征在于，所述位置的数量超过分解的实数固有模态分量，因此，所述多个运动信号表示一超定信息源，以便将前述导管的运动分解成上述多个实数固有模态分量。

4 3、如权利要求 2 2 的方法 (6 0 0)，其特征在于，所述接收步骤 (6 1 0) 的前面是这样的步骤：触发前述导管中的多个实数固有波模，并且，所述接收步骤包括这样的步骤：响应上述触发而接收表示运动的多个运动信号。

4 4、如权利要求 4 3 的方法，其特征在于，所述触发步骤包括这样的步骤：使一宽带触发作用于前述导管。

4 5、如权利要求 4 3 的方法，其特征在于，所述触发步骤包括这样的步骤：提供一系列有不同频率的基本上连贯的触发。

4 6、如权利要求 4 3 的方法，其特征在于，所述触发步骤包括这样的步骤：转换来自前述导管中的物质的能量，以便触发多种实数固有波模。

用于振荡导管的使用固有模态分解的参数传感器及方法

本发明涉及过程参数传感器、操作方法以及计算机程序产品，具体地说，本发明涉及振荡导管参数传感器、操作方法以及计算机程序产品。

科里奥利效应质量流量计通常用于测量流经导管的物质的质量流量及其它信息。J. E. Smith 等人的 1978 年 8 月 29 日的美国专利 4109524 号、1985 年 1 月 1 日的美国专利 4491025 号以及 1982 年 2 月 11 日的美国专利 Re 31450 号中公开了示例性的科里奥利流量计。这些流量计一般包括一个或多个具有平直或弯曲结构的导管。每个导管均可被看作是具有一组振荡波模，例如包括简单弯曲、扭曲、径向和耦合波模。在典型的质量流量测定应用中，当有物质流经导管时，每个导管都受驱按其固有波模中的一种以谐振的方式振荡。所述导管的质量和硬度特征与导管中流动的物质的特征结合起来会影响与所述振荡的填充有物质的系统的振荡波模。

科里奥利流量计的典型组件是驱动或触发系统。该驱动系统能进行操作以便将周期性的物理力施加给导管，从而使导管振荡。所述驱动系统一般包括至少一个启动器，它安装于流量计的导管。该启动器可包括诸如音圈装置之类的多种公知机电装置中的一种，所述音圈带有一安装于第一导管的磁体以及按与该磁体有相对向关系的方式安装于第二导管的线圈。一驱动器通常将一周期性例如正弦或方波的驱动信号提供给上述启动线圈。所述周期性驱动信号会使得启动器按相反的周期图形驱动所说的两个导管。

在存在有有效的“零”流量流过受驱的流量计导管时，沿导管的点会根据受驱振动的波模的不同而相对驱动器按大致相同的相位或“零流量”相位振荡。随着物质开始从流量计的入口经由所述导管流出流量计的出口，源于物质流的科里奥利力会导致沿导管的在空间上相间隔的点之间的相移，导管入口侧的相位一般滞后于启动器，而导管出口侧的相位则一般超前于启动器。导管的两个位置之间产生的相移约与经由导管的物质的质量流速成比例。

不幸的是，流量计结构的非线性和不对称性以及通过诸如泵之类的外部源引入流量计结构的振动会使得用通常相移或时间延迟法所获得的测定结果的精确性打折扣。例如用能减少外部振动作用的平衡机械结构以及用频率域过滤法除掉与不应有的振动相关的频率分量，可以减少上述现象。但是，机械结构法受限于几何形状上的考虑，频率域过滤法在除掉在有关谐振频率或几乎在有关谐振频率下例如在用于触发所述导管的驱动频率下出现的不想要振动能量时是效率低下的。

根据上述内容，本发明的目的是提供振动导管参数传感器、操作方法以及计算机程序产品，它们能在存在有外部振动的情况下精确地估算具有结构非线性和非对称性的传感器导管中的过程参数。

用振动导管参数传感器、操作方法以及计算机程序产品可以实现上述和其它目的、特征和优点，在上述振动导管参数传感器、操作方法以及计算机程序产品中，对表示振动导管运动的运动信号进行处理，以便将所述导管运动分解成多个实数固有模态分量，可根据这些分量来估算诸如质量流量之类的过程参数。在本发明的一个实施例中，使一波模过滤器作用于上述运动信号，以形成一输出，该输出最佳地表示所述导管运动的与一个或多个实数固有波模有关的分量，所述一个或多个实数固有波模例如是最好与科里奥利力相关的波模，而所述科里奥利力则与导管内的物质有关。然后，用例如通常的相位差技术根据上述输出生成诸如质量流量之类的过程参数的估算值。在本发明的另一个实施例中，根据所述多个运动信号来估算实数固有模态运动，并根据所估算出的实数固有模态运动的一个子集例如根据最好与科里奥利力相关的实数固有波模中的运动来估算过程参数。

由于将导管的运动分解成实数固有模态分量，故可以获得过程参数的更为精确的估算值。例如，一波模过滤器可传送导管运动的对应于与科里奥利力紧密相关的实数固有波模的分量，同时减少导管运动的与外部噪音源相关的分量。因此，经过滤的输出很少会因噪音和振动而出错，从而可最佳地用于生成诸如质量流量之类的过程参数的精确估算值。与此相类似，估算出的与科里奥利力相关的选定波模的实数固有模态运动可用于生成过程参数的精确估算值，同时忽略源于其它来源的模态运动。

具体地说, 依照本发明, 用于确定过程参数的过程参数传感器包括: 一配置成包含有物质的导管; 以及, 多个运动感受器, 它们能进行操作以生成多个表示导管多个位置处运动的运动信号。一实数固有模态分解器对上述多个运动感受器进行响应并能进行操作以便对所述多个运动信号进行处理, 从而将由上述多个运动信号所表示的运动分解成多个实数固有模态分量。一过程参数估算器对上述实数固有模态分解器进行响应并可进行操作以便根据上述实数固有模态分量中的一个实数固有模态分量来估算过程参数。

在本发明的一个实施例中, 所述实数固有模态分解器包括一波模滤波器, 它可进行操作以便根据所述多个运动信号来生成一输出, 该输出能最佳地表示与导管的实数固有波模相关的运动的分量, 而所述导管的实数固有波模则例如是最佳地与科里奥利力相关的实数固有波模。所述过程参数估算器可对上述波模滤波器进行响应并且可进行操作以便根据前述输出来估算过程参数。

在本发明的另一个实施例中, 所述实数固有模态分解器包括一实数固有模态运动估算器, 它可进行操作以便根据接收到的多个运动信号来估算实数固有模态运动。所述过程参数估算器可进行操作以便根据上述估算出的实数固有模态运动例如根据估算出的与科里奥利力紧密相关的一组实数固有波模的运动来估算过程参数。所述实数固有模态运动估算器可包括用于估算第一实际固有波模下的运动的装置以及用于估算第二实际固有波模下的运动的装置, 所述第二实际固有波模最好与科里奥利力相关。所述过程参数估算器可包括这样的装置, 它用于使估算出的第二实数固有波模下的运动相对估算出的第一实数固有波模下的运动规一化, 以便生成第二实数固有波模下的运动的规范估算值。可设置这样的装置, 它用于根据第二实数固有波模下的运动的规范估算值来估算过程参数。

依照本发明的方法方面, 接收多个运动信号, 这些信号表示包含有物质的振动导管的多个位置处的运动。对接收到的多个运动信号进行处理, 以便将所述运动分解成多个实数固有模态分量。根据上述多个实数固有模态分量中的一个实数固有模态分量来估算过程参数。

依照本发明的方法方面, 可对运动信号进行处理以便生成一输出, 该输出最佳地表示与振动导管的实数固有波模相关联的运动分

量。一波模滤波器可作用于上述多个运动信号以及根据经过滤的输出所估算出的过程参数。例如，可生成第一和第二经过滤的信号，它们表示所述导管的相应第一和第二位置处的运动。通过确定上述第一经过滤的信号与第二经过滤的信号之间的相位差并根据所确定的相位差来估算质量流量，可以估算出过程参数。

依照本发明的另一个方法方面，可根据接收到的多个运动信号来估算实数固有模态运动即多个单一自由度（S D O F）系统中的运动。可根据所估算的实数固有模态运动来估算过程参数。例如，可估算出相应第一和第二实数固有波模下的运动，而第二实数固有波模则最佳地与科里奥利力相关。可通过使估算出的第二实数固有波模下的运动相对估算出的第一实数固有波模下的运动规一化以便生成第二实数固有波模下的运动的规范估算值，从而估算出过程参数。可根据第二实数固有波模下的运动的规范估算值来估算过程参数。

依照本发明的其它方法方面，在导管内触发多个实数固有波模，接收多个运动信号，这些信号表示响应上述触发的运动，对所述多个运动信号进行处理，以便将所述导管运动分解成多个实数固有模态分量，可根据这些实数固有模态分量来估算过程参数。上述作用于导管的触发可以是宽带触发，诸如是一系列基本上连贯的有不同频率的触发或者是通过例如流体结构相互作用（F S I）转换来自导管中物质的能量而形成的触发。

本发明用于估算过程参数的计算机程序产品包括第一计算机可读程序代码装置，它用于对多个表示含有物质的导管的运动的信号进行处理，以便将该运动分解成多个实数固有模态分量。第二计算机可读程序代码装置根据上述多个实数固有模态分量的一个实数固有模态分量来估算过程参数。在一第一实施例中，所述第一计算机可读程序代码装置包括这样的计算机可读程序代码装置，该装置用于对上述多个运动信号进行处理，以便生成一输出，它最佳地表示与振动导管的实数固有波模相关的运动分量。所述第二计算机可读程序代码装置包括这样的计算机可读程序代码装置，该装置用于根据上述输出来估算过程参数。在另一个实施例中，所述计算机可读程序代码装置包括这样的计算机可读程序代码装置，该装置用于用于根据上述多个运动信号来估算实数固有模态运动。所述第二计算机可读程序代码装置包

括这样的计算机可读程序代码装置，该装置用于根据所估算出的实数固有模态运动来估算与所述物质有关的过程参数。从而，可以提供改进的过程参数估算值。

- 图 1 示出了一示例性的过程参数传感器导管结构；
5 图 2 示出了本发明的过程参数传感器的一个实施例；
图 3 示出了本发明的过程参数传感器的另一个实施例；
图 4 示出了本发明的波模滤过器的一个示例性实施例；
图 5 示出了本发明的过程参数估算器的一个示例性实施例；
图 6 和 7 示出了依照本发明波模滤过方面的示例性操作；
10 图 8 — 1 2 示出了过程参数传感器导管结构的模态数量；
图 1 3 示出了本发明的过程参数传感器的另一个实施例；
图 1 4 示出了本发明的实数固有模态运动估算器的一个示例性实施例；

- 图 1 5 示出了本发明的过程参数估算器的一个示例性实施例；
15 图 1 6 和 1 7 示出了依照本发明方面的用于根据估算出的实数固有模态运动来估算过程参数的示例性操作；
图 1 8 A 和 1 8 B 示出了用源于流体结构相互作用 (F S I) 的宽带触发所触发的实数固有波模。

- 以下参照附图更全面地说明本发明，附图中示出了本发明的实施
20 例。本领域普通技术人员应该注意，可用多种不同的形式来实现本发明，本发明不应被看作只限于本文所述的实施例，相反，这些实施例是为了使所公开的内容更全面和完整并将本发明的范围完全地传达给本领域的普通技术人员而提供的。在附图中，相同的标号始终是指相同的部件。

- 25 以下的说明大部分都是指科里奥利流量计，在这种流量计中，就诸如流过振动导管的流体之类的物质而言，可估算出物质处理系统的过程参数例如质量流速。但是，本领域普通技术人员应该认识到，本发明还可应用于除串联传感器以外的振动导管过程参数传感器。例如，本发明可应用于包括一导管的抽样式振动导管密度计，所述导管
30 配置成含有从物质处理系统中抽出的物质的样本。

在本文所述的实施例中，对表示传感器导管的运动的运动信号进行处理，以便将该导管运动分解成多个实数固有模态分量。可按多种

方式进行实数固有模态分解。例如，可用波模滤波器传送传感器导管运动的与一组预定实数固有波模相关的分量，同时减少该导管运动的与其它不应有的实数固有波模相关的分量。尽管无需明确地确定与导管运动相对应的模态响应，但是，所述波模滤波器会将导管运动“分解”成相应的与相应实数固有波模相关的分量。

另外，可根据运动信号明确地估算出实数固有模态运动即多个单自由度（S D O F）系统中的坐标系统中的运动，并且，该运动可用于生成过程参数估算值。例如，可用两步处理法来实现波模滤过，所述两步处理法包括用模态变换来将导管的运动变换成相应的实数固有模态运动以及将有选择的模态逆变换应用于所述实际固有模态运动，以便生成经过滤的输出，该输出最佳地表示所述导管运动的与一种或多种预定实数固有波模相关的分量。可对上述经过滤的输出进行处理，以使用例如通常的相位差技术来估算过程参数。

依照本发明的另一个方面，可根据估算出的实数固有模态运动直接确定过程参数。例如，使与科里奥利力紧密相关的实数固有波模的实数固有模态运动相对另一种波模的实数固有模态运动归一化，以便生成一比例因子。该比例因子可用于估算质量流量。

振动导管的模态行为

以下就具有相关自然振动频率的一种或多种自然波模说明诸如传感器导管之类的振动结构的行为。可在数学上用特征向量和相关特征值来描述所述波模和相关自然频率，所述特征向量在相对数量上而不是在绝对数量上是唯一的并且与上述结构的质量和硬度相正交。可在变换时将上述一组线性独立的矢量用于分解的等式，这些等式描述了上述结构的运动。具体地说，所述结构对触发的响应可表示为成比例波模的叠加，所说的比例表示各波模对所述结构的运动的贡献。依照所述触发的不同，某些波模会比其它波模有更多的贡献。某些波模是不应该有的，因为，这些波模会提供预定波模的谐振频率下的能量，从而会使在诸如驱动频率下获取的相位差测定结果之类的在预定波模的谐振频率下获得的测定结果出错。

通常的流量计一般使用了结构和时间过滤，以减少不应有的波模的影响。通常的结构过滤技术包括：利用诸如设计成能消除同相和异相的弯曲波模的支承条之类的机械特征，使用启动器，这些启动器设

置成它们不太可能触发不应有的波模，以及，使用感受器，这些感受器设置成它们对不应有的波模不太敏感。结构过滤技术在减少不应有的波模的能量方面是非常有效的，但会受限于几何形状和结构限制。

时间过滤技术一般可根据时间域或频率域参数改变感受器的信号。例如，典型的科里奥利流量计包括频率域过滤器，这些过滤器设计成能消除与不应有的波模显著相关的频率分量。但是，来自不应有波模的非谐振能量会对预定波模谐振频率下的能量产生显著影响。由于频率域过滤器一般在区分给定频率下多个波模的贡献时是无效的，故测定频率下的不应有波模的贡献是过程参数测定结果中的错误的显著来源。

可假定有可忽略不计的衰减和零流量的传感器导管具有完全的实数自然或固有振动波模，也就是说，在每种波模中，所述结构的每个点均能同时达到最大的位移。但是，带有不可忽略不计的衰减以及从中流过的物质的实际导管对触发一般有复杂的响应，也就是说，所述结构上的点一般不同时达到最大振幅。可将上述导管结构的运动描述为有实数和虚数分量或者有数量和相位分量的复数波模。流动的物质所施加的科里奥利力会将这种复杂性引入传感器导管的运动。

即使是复数的，也可将导管结构的运动描述为成比例的自然或“固有”波模的叠加，因为，复数波模的实数和虚数部分按定义是线性独立的。为了表示复杂运动，在组合上述组成的实数固有波模时使用复数比例系数。具体的实数固有波模可紧密地与复数波模的虚分量相关，并且明显地不太与该复数波模的实数分量相关。因此，这些特定的实数固有波模可与这样的科里奥利力更加紧密地相关，所述科里奥利力与传感器导管中的物质相关，从而所述特定的实数固有波模能提供这样的信息，该信息用于生成与所述物质相关的参数的精确估算值。

作为一个示例性实例，对双弯管3英寸科里奥利流量计进行分析。图1中示出了这种流量计的导管结构的理论模型。定向成测定方向 z 上的速度的通常速度感受器105A、105B、105C分别位于导管组件10上的左侧、驱动和右侧位置。相应的加速计105D、105E在靠近右侧感受器位置处设置在导管103A、103B的相应的一个上并且定向成能测定沿方向 x 的横向加速度。将加速

计 1 0 5 D、1 0 5 E 的输出综合起来以生成横向绝对速度信息。

可根据运动感受器 1 0 5 A—E 来形成响应向量 $\{x_{\text{response}}\}$ ：

$$5 \quad \{x_{\text{response}}\} = \begin{bmatrix} \text{右侧响应, } z \\ \text{驱动响应, } z \\ \text{左侧响应, } z \\ \text{斜的横向响应, } x \ z \\ \text{横向响应, } x \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中，所述斜的横向响应是相对 x 和 y 轴 45 度方向的响应。实数固有模态“过滤器”矩阵 $[\Phi]$ 即使得物理运动向量 $\{x_{\text{response}}\}$ 与实数固有模态运动向量 $\{\eta\}$ 相关的实数固有模态变换矩阵可定义成：

$$\{x_{\text{response}}\} = [\Phi] \{\eta\} \quad (2)$$

可用多种技术来确定实数固有模态变换矩阵 $[\Phi]$ 。例如，可如 1 9 9 7 年 7 月 1 1 日提交的转让给本申请的受让人的美国专利申请 0 8 / 8 9 0 7 8 5 以及 1 9 9 8 年 2 月 2 5 日提交的转让给本申请的受让人的题为“用于振动导管过程参数传感器的一般性模态空间驱动控制”的美国专利申请书所述那样使用试错或逆技术，本文引用了上述两份申请书的全部内容，就好象它们的文本在本申请文件中存在一样。

就图 1 的示例性导管结构 1 0 而言，可用实验的方式确定实数固有模态变换矩阵：

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} 1.355 & 0.0139 & 0.084 & -5.058 & 5.054 \\ 6.334 & 0.036 & -0.287 & -3.242 & -4.394 \\ 2.548 & -0.063 & -0.071 & 5.208 & 5.177 \\ 0.799 & 0.193 & 0.562 & 1.523 & 1.634 \\ 0.052 & 0.730 & -1.517 & 0.0837 & 0.098 \end{bmatrix} \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{sec}^2}{\text{cm}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

所述实数固有模态变换矩阵 $[\Phi]$ 的列从左至右分别表示第一异相弯曲波模、同相横向波模、异相横向波模、异相扭曲波模以及第二

异相弯曲波模。

可用模态变换矩阵 $[\Phi]$ 将运动向量 $\{x_{\text{response}}\}$ 所表示的物理运动分解成实数固有模态分量。例如，就模态运动向量 $\{\eta\}$ 而言，可通过预先将等式 (2) 的两边乘以模态变换矩阵 $[\Phi]$ 的逆来明确地求解等式 (2)：

$$\{\eta\} = [\Phi]^{-1} \{x_{\text{response}}\} \quad (4)$$

其中，就图 1 的示例性结构而言

$$[\Phi]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.002 & 0.0165 & 0.0138 & 0.0057 & 0.003 \\ 0.034 & 0.00008 & -0.0846 & 0.272 & 0.105 \\ -0.001 & 0.00008 & -0.0387 & 0.132 & -0.067 \\ -0.176 & 0.00 & 0.0167 & 0.002 & 0.0008 \\ 0.017 & -0.0103 & 0.009 & 0.004 & 0.001 \end{bmatrix} \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{sec}^2}{\text{cm}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

正如本文详细所述那样，可直接用实数固有模态运动 $\{\eta\}$ 来估算与上述导管结构的一种或多种实数固有波模相关的过程参数，所述一种或多种实数固有波模例如是与科里奥利力相关的波模。另外，可用模态变换矩阵 $[\Phi]$ 来确定一波模滤波器，它可应用于物理运动 $\{x_{\text{response}}\}$ ，以生成一经过滤的物理域响应，该响应最佳地包括与所述导管的一种或多种波模相关的物理运动 $\{x_{\text{response}}\}$ 的分量。可用这种经过滤的响应来估算过程参数。

图 2 示出了本发明振动导管参数传感器 5 的示例性实施例。传感器 5 包括导管组件 10。导管组件 10 包括一入口凸缘 101、一出口凸缘 101'、一总管 102 以及第一和第二导管 103A、104A。支承条 106、106' 将导管 103A、103B 连接起来。一启动器 104 与导管 103A、103B 相连，启动器 104 可进行操作以便响驱动 20 使导管 103A、103B 振动。多个运动感受器 105A—E 可进行操作以生成多个表示导管 103A、103B 的多个位置处的运动的运动信号即生成表示导管 103A、103B 的位移、速度或加速度的信号。运动感受器 105A—E 可包

括诸如线圈式感受器、光学或或超声运动传感器、加速计、惯性速率传感器以及其它装置之类的多个装置。导线100与启动器104和运动感受器105A—E相连。

当把导管组件10插进物质处理系统时。在该物质处理系统中流
5 动的物质会通过入口凸缘101进入导管组件10。然后，所述物质
流过总管102，在总管中所述物质被引进导管103A、103
B。离开导管103A、103B之后，所述物质会流回进总管10
2并通过出口凸缘101'离开仪表组件10。所述物质在流经导管
103A、103B时会引发科里奥利力，该力会使导管103A、
10 103B扰动。

启动器104可沿相反的方向绕相应的弯曲轴线W—W和W'—
W'驱动导管103A、103B，从而导致导管组件10中的通常
所称的第一异相弯曲波模。启动器104可包括诸如线性启动器之
类的多种周知装置中的任何一种，所述线性启动器包括安装于第一导管
15 103A的磁体以及安装于第二导管103B的相对向的线圈。驱动
器20通过驱动导线110提供的驱动信号所导致的交流电流会经
过上述线圈，以而产生使导管103A、103B振动的机械力。启
动器104所提供的触发基本上是连贯的例如限于一狭窄的频率范
围或者如以下详细说明的那样是宽带的。

20 尽管图2所示的参数传感器5被显示为包括一整体启动器10
4，但是，本领域普通技术人员应该认识到，可用其它技术来使本发
明的导管103A、103B振动。例如，可用诸如泵或压缩机之类的
的动力源在导管组件10的外部形成宽带触发并例如通过凸缘10
1、101'之一将这种触发传给导管组件10。与此相类似，如以
25 下详细所述那样，通过用流体结构相互作用(FSI)机构传递来自
导管103A、103B中的物质的能量，也可形成宽带触发。

实数固有模态分解器30对运动感受器105A—E进行响应
并能进行操作以便将导线111上的信号所代表的导管103A、1
03B的运动分解成多个实数固有模态分量35。过程参数估算器4
30 0对实数固有模态分解器30进行响应并进行操作以便根据上述多
个实数固有模态分量35生成过程参数的估算值45。正如本文所述
那样，实数固有模态分解器30以诸如对导管运动进行波模滤过或估

算与导管运动相对应的实数固有模态运动之类的多种方式对导管运动进行分解。

波模滤过

依照本发明的一个方面，可将“波模滤过器”用于运动信号，以生成一表示导管运动的经过滤形式的输出，其中，减少了与不应有波模相关联的导管运动分量。所述波模滤过器表示实数固有模态变换与有选择的逆实数固有模态变换的积，所述实数固有模态变换将导管运动映射成多个单自由度（S D O F）系统中的运动即实数固有模态运动，而所述有选择的逆实数固有模态变换则将上述实数固有模态运动的选定部分即一组预定实数固有波模中的运动映射回物理域。

可用有选择的逆实数固有模态变换矩阵 $[\Phi^*]$ 将实数固有模态运动向量 $\{\eta\}$ 转换成经过滤的运动向量 $\{x_{\text{filtered}}\}$ ，其中，可消除与不应有的实数固有模态相关的分量：

$$\{x_{\text{filtered}}\} = [\Phi^*] \{\eta\} \quad (6)$$

就图1的示例性结构而言，可根据实数固有模态变换矩阵 $[\Phi]$ 通过替换实数固有模态变换矩阵 $[\Phi]$ 中那些与带零的不应有实数固有波模相关的元素来构造有选择的逆实数固有模态变换矩阵 $[\Phi^*]$ ：

$$[\Phi^*] = \begin{bmatrix} 2.492 & 0 & 0 & -5.058 & 0 \\ 6.333 & 0 & 0 & -3.242 & 0 \\ 2.55 & 0 & 0 & 5.208 & 0 \\ 0.800 & 0 & 0 & 1.522 & 0 \\ 0.052 & 0 & 0 & 0.083 & 0 \end{bmatrix} \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{sec}^2}{\text{cm}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

如等式(6)和(7)所示，通过用与带零的实数固有模态变换矩阵 $[\Phi]$ 相对应的有选择的逆实数固有模态变换矩阵 $[\Phi^*]$ 来替换固有模态变换矩阵 $[\Phi]$ 中那些与带零的不应有实固有波模相关的元素，可以消除与不应有的实数固有模态相对应的导管运动向量 $\{x_{\text{response}}\}$ 的分量。但是，本技术的专家应该认识到，可用有选择的逆实数固有模态变换矩阵 $[\Phi^*]$ 的上述元表的非零值来消除所

说的分量。

将等式 (4) 和 (6) 结合起来:

$$\{x_{\text{filtered}}\} = [\Phi^*][\Phi]^{-1}\{x_{\text{response}}\} = [\psi]\{x_{\text{response}}\} \quad (8)$$

其中, 波模过滤器矩阵 $[\psi]$ 是由下式给出的:

$$[\psi] = [\Phi^*][\Phi]^{-1} \quad (9)$$

波模过滤器矩阵 $[\psi]$ 对导管运动向量 $\{x_{\text{response}}\}$ 进行处理, 因此, 经过滤的输出运动向量 $\{x_{\text{filtered}}\}$ 最佳地表示导管运动向量 $\{x_{\text{response}}\}$ 的与一种或多种预定波模相关的分量。波模过滤器矩阵 $[\psi]$ 还可由下式生成:

$$[\psi] = [\Phi][A][\Phi]^{-1}$$

其中, $[A]$ 是这样的矩阵, 其对角线以外的元素是零, 与预定波模相对应的对角线元素置为 1, 例如,

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & & 1 \end{bmatrix}$$

对经过滤的输出 $\{x_{\text{filtered}}\}$ 进行处理, 以生成诸如质量流量之类的过程参数的精确估算值。例如, 可根据通常的相位或时间差科里奥利测定技术对经过滤的输出 $\{x_{\text{filtered}}\}$ 进行处理。就图 1 所示的示例性系统而言, 做到这一点的方法是: 例如用诸如授予 Smith 的美国专利 R E 3 1 4 5 0、授予 Zolock 的美国专利 4 8 7 9 9 1 以及授予 Zolock 的美国专利 5 2 3 1 8 8 4 所述之类的零交叉或者类似的用数字信号处理器 (DSP) 或类似数字计算设备的相位或时间差技术通过确定与右和左感受器 1 0 5 A、1 0 5 C 相对应的经过滤的输出的分量之间的相位差。从而, 可用附加感受器 1 0 5 B、1 0 5 D、1 0 5 E 所提供的信息过滤掉导管运动的与例如不应有的

横向波模相关的分量。

可有意地将运动信号所表示的传感器导管上的位置的数量选定成超过将导管运动所分解成的实数固有模态分量的数量。在这种情况下，所述实数固有模态变换矩阵和所述有选择的逆实数固有模态变换矩阵具有多于列的行。因此，在计算等式(9)的波模滤波器矩阵时使用实数固有模态变换矩阵的通用的逆。通过这种方式，所述运动信号会提供一超定的信息源，以便将导管运动分解成给定数量的实数固有波模。因此，可对根据这种超定信息估算出的过程参数在空间上进行积分，以提供可能更精确的估算值。转让给本申请受让人并与本申请书同时提交的题为“改进型振动导管参数传感器以及用空间积分的操作的方法”的美国专利申请书中说明了上述空间积分。

图3示出了示例性参数传感器5，该传感器实现了本发明的波模滤过。实数固有模态分解器30包括一波模滤过器330，它可对运动感受器105A—E进行响应。波模滤过器30可通过生成一经过滤的输出35而将感受器105A—E生成的运动信号所表示的导管103a、103B的运动分解成多个实数固有模态分量，经过滤的输出35最佳地表示导管103A、103B的运动的与多种实数固有波模中的一种或多种相关的一个或多个分量，而所述多种实数固有波模则例如是与包含在导管103A、103B中的物质所施加的科里奥利力相关的实数固有波模。

图4示出了波模滤过器330和过程参数估算器40的一个示例性实施例。例如是取样和保存或类似电路的取样器432提供了这样的装置，它用于接收运动感受器的运动信号431、对运动信号431进行取样并根据上述信号生成样本433，以便以后由模数转换器(A/D)434转换成数字信号值435。取样器433和A/D 434的详细操作可由本领域的普通技术人员所周知的多种电路来执行，因此无需在本文中作更详细地说明。本领域的普通技术人员应该认识到，可用多种方式来处理运动信号431。例如，可使用去假频过滤、后取样过滤以及类似的信号处理。还应认识到，一般地说，可用专用硬件、固件或在专用或通用数据处理装置上运行的软件或它们的组合来实现图3所示的接收和转换装置。例如，可使取样和模数转换功能包括在感受器105A—E内。

波模滤波器 330 部分可包括在计算机 50 例如微处理器、微控制器、数字信号处理器 (DSP) 或类似装置内。计算机 50 可例如包括诸如德州仪器公司出售的 TMS 320C4X 系列的 DSP 之类的专门适用于线性代数计算的流水线 DSP。使计算机 50 配置有适当的程序代码例如软件和 / 或固件以及例如存储在诸如随机存取存储器 (RAM)、电可擦除可编程只读存储器 (EEPROM)、磁盘或类似装置之类的存储介质 60 内的数据, 计算机 50 可提供这样的装置 436, 它用于根据数字值 435 生成表示传感器导管运动的运动向量 437。波模滤波器 330 包括这样的装置 438, 它用于使运动向量 437 乘以一波模滤波器矩阵, 以生成一经过滤的运动向量 35, 它最佳地表示导管运动向量的与一种或多种预定波模相关的分量。

也可在计算机 50 中实现过程参数估算器 40。通过例如实现为在计算机 50 上运行的软件或固件, 过程参数估算器 40 可经过滤的运动向量 35 来计算过程参数的估算值 45 例如计算出估算的质量流速。例如, 如图 5 所示, 过程参数估算器 40 可包括用于确定经过滤的输出 35 的分量之间的相位差的装置 542 以及用于根据所确定的相位差来估算质量流量的装置 544。

图 6 示出了本发明波模滤过方面的用于估算过程参数的操作 600。可接收多个运动信号, 它们表示包含有来自物质处理系统的物质的振动导管的多个位置处的运动 (框 610)。对接收到的信号进行处理, 以便通过生成一输出而将所述导管运动分解成多种实数固有波模下的运动, 所述输出最佳地表示导管运动的与实数固有波模相关的分量, 而所述实数固有波模则最佳地与经过导管的物质所施加的科里奥利力相关的波模 (框 620)。根据上述输出来估算过程参数 (框 630)。

图 7 示出了本发明另一个波模滤过方面的用于估算过程参数的操作 700。接收运动信号 (框 710), 并对其进行处理以生成表示传感器导管运动的运动向量 (框 720)。所述运动向量乘以有选择的逆实数固有模态变换矩阵, 以生成一经过滤的运动向量, 该向量最佳地表示所述运动向量的与一个或多种实数固有波模相关的分量 (框 730)。根据经过滤的运动向量来估算过程参数 (框 740)。

应该认识到，可用计算机可读程序代码例如在诸如图4所示计算机之类的计算机或数据处理器上运行的程序指令和/或数据来实现图6和7中所示的框及框的组合。正如本文中所使用的那样，计算机可读程序代码包括但不限于诸如操作系统命令（例如目标码）、高层语言指令等之类的内容以及可连同上述程序指令一道读取、访问或以其它方式使用的数据。

所述程序代码可装载进计算机或类似的数据处理设备，所述计算机或类似的数据处理设备包括但不限于微处理器、微控制器、数字信号处理器（DSP）等。所述程序代码与计算机的组合可提供这样的设备，它可进行操作以便实现所述流程图的框中所指定的功能。与此相似，所述程序代码可装载进计算机或数据处理设备，因此，该程序代码和计算机可提供用于执行流程图中的框中所指定的功能的装置。

所述程序代码还可存储在诸如磁盘或磁带、磁泡存储器、可编程存储器如电可擦除可编程只读存储器（EEPROM）或类似装置之类的计算机可读存储介质内。所存储的程序代码可使访问所述存储介质的计算机发挥功能，因此，存储在存储介质内的程序代码构成了包括用于实现流程图框中指定的功能的程序代码装置在内的产品。所述程序代码还可装载进计算机，以便执行一系列操作步骤，从而进行处理，因此，所述程序代码可连同计算机提供用于实现流程图框中指定的功能的步骤。因此，流程图的框支持可进行操作以便执行指定的功能的装置、用于执行指定功能的装置的组合、执行指定功能的步骤的组合以及包括在计算机可读存储介质内用于执行指定功能的计算机可读程序代码装置。

还应认识到，一般地说，可用专用硬件、在通用计算机上执行的软件或固件或它们的组合来实现流程图的各个框和流程图中框的组合。例如，可用应用程序专用集成电路（ASIC）、可编程序门阵列或类似的专用设备或者通过装载到并由微处理器、微控制器、DSP或其它通用计算设备执行的程序指令和数据来实现流程图的框的功能。

根据估算出的模态运动来估算过程参数

依照本发明的另一个方面，可根据估算出的实数固有模态运动即

根据包括多个单自由度 (S D O F) 系统的传感器导管类型的运动的估算值直接估算诸如质量流量之类的过程参数。如上所述, 可将复数波模表示为用复数比例系数确定比例的实数固有波模的叠加:

$$\{ \Phi_{\text{complex}} \} = [\Phi] \{ \alpha \} \quad (10)$$

其中, $\{ \Phi_{\text{complex}} \}$ 是复数波模向量, $[\Phi]$ 是用于复数波模向量 $\{ \Phi_{\text{complex}} \}$ 构成的实数固有波模向量的矩阵, $\{ \alpha \}$ 是通常的复数比例系数的向量。

在科里奥利流量计中, 用与在传感器导管中流动的流体相关的科里奥利加速度使传感器导管的运动成为复数的。因此, 用于复数流动波模的虚数部分的比例系数与流速成比例并且能提供用于确定流速的信息。但是, $\{ \alpha \}$ 的数量会受实数固有模态运动的绝对数量的影响, 所述实数固有模态运动的绝对数量如上所述可以是任意的。图 8 和 10 示出了比例系数 α_1 的实数分量 $(\text{Re} [\alpha_1])_{m1}$ 、 $(\text{Re} [\alpha_1])_{m2}$, 所述实数分量 1 对应于相应第一和第二绝对模态数量 $m1$ 、 $m2$ 下的第一异相弯曲波模, 图 9 和 11 就图 1 所示的 3 英寸双管科里奥利流量计示出了比例系数 α_2 的虚数分量 $(\text{Im} [\alpha_2])_{m1}$ 、 $(\text{Im} [\alpha_2])_{m2}$, 所述虚数分量对应于模态数量 $m1$ 、 $m2$ 下的一定质量流速范围内的第一输出相位扭曲波模。正如在图 8 和 10 中可以看到的那样, 用于第一比例系数 α_1 的实数分量 $(\text{Re} [\alpha_1])_{m1}$ 、 $(\text{Re} [\alpha_1])_{m2}$ 一般与流速无关, 而图 9 和 11 则示出了第二比例系数 α_2 的虚数分量 $(\text{Im} [\alpha_2])_{m1}$ 、 $(\text{Im} [\alpha_2])_{m2}$ 基本上以线性的方式与流速有关。但是, 第一比例系数 α_1 的实数分量 $(\text{Re} [\alpha_1])_{m1}$ 、 $(\text{Re} [\alpha_1])_{m2}$ 和第二比例系数 α_2 的虚数分量 $(\text{Im} [\alpha_2])_{m1}$ 、 $(\text{Im} [\alpha_2])_{m2}$ 均与绝对模态数量有关。

本发明的一个方面源于这样的情况: 由于表示复数运动的实数固有波模的相对数量是不变的 (假定没有结构的变化), 故可通过使 α_2 的虚数分量 $\text{Im} [\alpha_2]$ 相对 α_1 的实数分量 $\text{Re} [\alpha_1]$ 规一化, 可以进行以对绝对模态数量不敏感的扭曲波模比例系数 α_2 为基础的流量测定。如图 12 所示, 使图 9 的虚数分量 $(\text{Im} [\alpha_2])_{m2}$ 的曲线相对实数分量 $(\text{Re} [\alpha_1])_{m2}$ 规一化会形成用于规一化的虚

数分量 $(1 \text{ m} [\alpha_2])_{m2, \text{normalized}}$ 的曲线, 该曲线基本上与用于虚数分量 $(1 \text{ m} [\alpha_2])_{m1}$ 的曲线相同, 从而说明了 α_2 的归一化虚数分量一般对波模绝对数量是不敏感的。

就上述示例性 3 英寸科里奥利传感器而言, 通过确定第一异相扭曲波模比例系数的归一化虚数分量并除以周知的流速, 可以确定该周知流速下的流速校准因子 K_{cal} :

$$k_{cal} = \frac{\left(\frac{\text{Im}[\alpha_2]}{\text{Re}[\alpha_1]} \right)_{known}}{rate_{known}}$$

(1 1)

为了确定未知的质量流速, $rate_{known}$, 确定第一异相扭曲波模比例系数的与该未知流速相对应的归一化虚数分量, 并将该分量乘以校准因子 K_{cal} :

$$rate_{unknown} = \frac{1}{k_{cal}} \left(\frac{\text{Im}[\alpha_2]}{\text{Re}[\alpha_1]} \right)_{unknown}$$

(1 2)

对等式 (1 0) 移项:

$$\{ \alpha \} = [\Phi]^{-1} \{ \Phi_{\text{complex}} \} \quad (1 3)$$

等式 (1 3) 的形式与等式 (4) 的形式相类似。通过类比, 所述导管运动向量对应于单模复数运动向量, 而所述比例系数向量则对应于实数固有模态运动向量。因此, 可通过确定估算出的用于导管扭曲和弯曲波模的模态响应之比, 可估算出用于示例性 3 英寸科里奥利传感器的质量流量。

上述技术可以一般化。例如, 通过用与科里奥利力相关的波模的比例系数的组合可实现较高阶的估算, 而所述比例系数则相对一个或多个与这样的波模相关的比例系数是归一化的, 所述波模例加与作用与传感器导管的触发相关。就示例性的弯管 3 英寸科里奥利仪表而

言, 包括使用分别与较高阶的扭曲和弯曲波模相关的系数。

上述技术还可应用于不同的导管结构。就示例性 3 英寸双管科里奥利传感器所述的弯曲波模和扭曲波模一般可被分别分成对称的波模和非对称的波模。一般地说, 通过限定与传感器导管的流动轴线相垂直的对称平面, 对称波模可表示这样的波模, 其中, 对称平面第一面上的运动可被对称平面第二面上的运动所反射。例如, 图 1 的 U 形科里奥利传感器导管的弯曲波模相对所示的 $y-z$ 平面是对称的。非对称波模则表示这样的波模, 其中, 对称平面第一面上的运动表示该对称平面第二面上的运动的反射和相位旋转。例如, 图 1 的 U 形传感器导管的扭曲波模相对图 1 的 $y-z$ 平面是非对称的。直管软件有相类似的对称和非对称波模。因此, 本发明还可推广至使用一个或多个直管的参数传感器, 并且, 一般地说可推广至使用多种导管结构的传感器。

如以上就波模滤过而言, 可将传感器导管上的位置的数量选定成超过实数固有模态运动估算方面的数量。这就意味着所述实数固有模态变换矩阵 $[\Phi]$ 具有多于列的行。为了能估算出实数固有模态运动 $[\eta]$, 使用实数固有模态变换矩阵 $[\Phi]$ 的一般性逆 $[\Phi]^+$, 即:

$$\{\eta\} = [\Phi]^+ \{x_{\text{response}}\} \quad (14)$$

因此, 在空间上对实数固有模运动的最终估算值进行积分, 所述运动信号可提供超定信息源, 以便将导管运动 $\{x_{\text{response}}\}$ 分解成实数固有模态运动 $\{\eta\}$ 。

图 1 3 示出了一示例性参数传感器 5, 它用于直接根据实数固有模态运动进行过程参数估算。实数固有模态分解器 3 0 包括一实数固有模态运动估算器 1 1 3 0, 它可对多个运动感受器 1 0 5 A—E 所产生的运动信号进行响应。实数固有模态运动估算器 1 1 3 0 通过产生实数固有模态运动 3 5 的估算值而对由前述运动所表示的导管 1 0 3 A、1 0 3 B 的运动进行分解。过程参数估算器 4 0 根据估算出的实数固有模态运动 3 5 来生成估算出的过程参数 4 5。

图 1 4 示出了实数固有模态运动估算器 1 3 3 0 的示例性实施例。实数固有模态运动估算器 1 3 3 0 可包括在计算机 5 0 例如微处

理器、微控制器、数字信号处理器(DSP)或类似装置中。例如,计算机50可包括诸如德州仪器公司出售的TMS320C4X系列中的DSP中的一种之类的专门适用于线性代数计算的流水线DSP。使计算机50配置有适当的程序代码例如软件和/或固件以及例如存储

5 如存储在诸如随机存取存储器(RAM)、电可擦除可编程只读存储器(EEPROM)、磁盘或类似装置之类的存储介质60内的数据,计算机50可提供这样的装置1438,它用于使运动向量437乘以一模式变换矩阵,以便生成估算出的实数固有模式运动向量35。还可在计算机50内实现过程参数估算器40。通过例加实现为在计

10 算机50上运行的软件或固件,过程参数估算器40可计算出过程参数的估算值45,例如根据估算出的实数固有模式运动向量35计算出质量流速。

如图15所示,实数固有模式运动估算器1330可包括用于生成第一实数固有波模下的运动的估算值1533的装置1532以及用于生成第二实数固有波模下的运动的估算值1535的装置1534。例如,就诸如图1所示的双U形管流量计而言,所述第一和第二波模可分别对应于前述第一异相弯曲波模和第一异相扭曲波模。过程参数估算器40可包括这样的装置1542,该装置用于使第二实数固有模式运动1535相对第一实数固有模式运动1533

20 3规一化,以便生成第二实数固有波模下的运动的规一化估算值1543。用于估算过程参数的装置1544可对规一化装置1542进行响应,以便根据规一化的估算值1543来生成估算出的过程参数45。如图所示,估算出的模式响应1533、1535可反馈给驱动器28,以便有选择地触发一种或多种选定的实数固有波模,如前述专利申请书“用于振动导管过程参数传感器的一般性模式空间驱动控制”所述。

25

图16示出了本发明一个方面的用于估算过程参数的操作1600。接收表示传感器导管运动的多个运动信号(框1610)。对所述运动信号进行处理,以便通过估算多个实数固有波模下的运动而将导管运动分解成多种实数固有波模(框1620)。根据上述估算出的实数固有模式运动来估算过程参数(框1630)。

30

图17示出了本发明另一个方面的用于估算过程参数的操作1

7 0 0。接收表示传感器导管运动的多个运动信号(框1 7 1 0),并据此生成一运动向量(框1 7 2 0)。所述运动向量乘以一模式变换矩阵,以生成一实数固有模式运动向量,该向量表示与所述导管运动相对应的实数固有模式运动(框1 7 3 0)。相对所述实数固有模式运动向量的与第二波模相对应的分量规范该实数固有模式运动向量的与第一波模相对应的分量(框1 7 4 0),所述第一波模例如是与传感器导管中的物质所施加的科里奥利力相关的波模,而所述第二波模则例如是诸如驱动波模之类的基本上与科里奥利力不相关的波模。根据估算出的波模响应的归一化分量来估算诸如质量流量之类的过程参数(框1 7 5 0)。

应该认识到,可用计算机可读程序代码例如在诸如图1 4所示计算机之类的计算机或数据处理器上运行的程序指令和/或数据来实现图1 6和1 7中所示的框及框的组合。正如本文中所使用的那样,计算机可读程序代码包括但不限于诸如操作系统命令(例如目标码)、高层语言指令等之类的内容以及可连同上述程序指令一道读取、访问或以其它方式使用的数据。

所述程序代码可装载进计算机或类似的数据处理设备,所述计算机或类似的数据处理设备包括但不限于微处理器、微控制器、数字信号处理器(DSP)等。所述程序代码与计算机的组合可提供这样的设备,它可进行操作以便实现所述流程图的框中所指定的功能。与此相似,所述程序代码可装载进计算机或数据处理设备,因此,该程序代码和计算机可提供用于执行流程图的框中所指定的功能的装置。

所述程序代码还可存储在诸如磁盘或磁带、磁泡存储器、可编程存储器如电可擦除可编程只读存储器(EEPROM)或类似装置之类的计算机可读存储介质内。所存储的程序代码可使访问所述存储介质的计算机发挥功能,因此,存储在存储介质内的程序代码构成了包括用于实现流程图框中指定的功能的程序代码装置在内的产品。所述程序代码还可装载进计算机,以便执行一系列操作步骤,从而实现一次处理,因此,所述程序代码可连同计算机提供用于实现流程图框中指定的功能的步骤。因此,流程图的框支持可进行操作以便执行指定的功能的装置、用于执行指定功能的装置的组合、执行指定功能的步骤的组合以及包括在计算机可读存储介质内用于执行指定功能的计

计算机可读程序代码装置。

还应认识到，一般地说，可用专用硬件、在通用计算机上执行的软件或固件或它们的组合来实现流程图的各个框和流程图中框的组合。例如，可用应用程序专用集成电路（ASIC）、可编程序门阵列或类似的专用设备或者通过装载到并由微处理器、微控制器、DSP或其它通用计算设备执行的程序指令和数据来实现流程图的框的功能。

宽带触发

本发明的实数固有模态分解可使用宽带触发。事实上，宽带触发是应有的，因为，对预定和不应有的实数固有波模进行触发可以提供更多的完整信息，以便标识预定的实数模态响应并据此生成精确的参数估算值。所述宽带触发可包括但不局限于随机或频率扫描触发。可通过一个或多个在操作上与传感器导管相关的启动器例如通过按不同的频率使一系列基本上连贯的触发作用于传感器导管来提供频率扫描触发。可通过一个或多个使用例如宽带启动器驱动信号或有预定持续时间的脉冲的启动器来使随机扫描触发作用于导管。还可通过作用于传感器导管的随机环境力例如通过转换来自包含在传感器导管的物质的能量例如流体结构相互作用（FSI）或者通过以其它方式从泵、压缩机或类似装置传给所述导管结构的振动来提供宽带触发。

业已用 Micro Motion, Inc 生产的以被动方式即在没有来自启动器的触发的情况下进行操作的双管 CFM 300 型科里奥利流量计研究了用诸如 FSI 所提供的外部触发的宽带触发的功效。图 18A 和 18B 分别示出了与每分钟 200 磅和每分钟 600 磅质量流速时的传感器的实数固有波模相对应的频率下的振幅。正如从这些附图 25 中看到的那样，所述与第一异相扭曲波模 1801A、1801B 和第二异相弯曲波模 1802A、1802B 相对应的频率下的振幅随质量流量而变，从而说明了外部宽带触发可以提供用于导管运动的实数固有模态分解的信息，以便依照诸如以上详细说明书的实数固有模态分解技术来确定诸如质量流量之类的过程参数。

使用诸如 FSI 之类的外部振动源所提供的宽带触发的能力允许构建出“被动”式振动导管传感器即不包括启动器的传感器。这种被动式传感器在能量有限的应用中或在驱动能量有安全上的考虑的

应用中例如在爆炸性或易燃环境里的应用中有特别的优点。

结论

正如本文所述的那样，可用传感器导管对触发的响应的实数固有模态分解来生成过程参数的估算值。将所述导管响应分解成实数固有模态分量例如多种实数固有波模下的运动或者导管运动与这种实数固有波模相关的分量。然后用所述实数固有模态分量生成诸如质量流量、密度、粘度等之类的过程参数的估算值。

由于将所述导管响应分解成了实数固有分量，故可通过忽略、消除、减少或以其它方式过滤掉不与科里奥利力相关的实数固有模态分量而过滤掉来自诸如泵振动和流体扰动之类来源的影响。通过这种方式，可以获得这样的参数估算值，这些参数估算值可能比用通常技术获得的估算值更加精确。

而且，由于本发明的传感器可对波模作出区分，故不需要单模态或近单模态触发。事实上，可仅用环境触发来触发传感器导管。因此，可以构建出“被动式”参数传感器即仅包括运动感受器但不包括启动器的传感器，这种结构在爆炸性环境或在能耗是重要的考虑因素的应用中有特别的优点。

本发明的实数固有模态分解可用于改进通常的参数传感器的效率。例如，可通过提供额外的运动感受器来改进通常的弯管科里奥利流量计，所述运动感受器能生成运动信号，这些信号可用波模过滤器来加以处理，从而提供在模态上经过滤的信号，以供通常的相位差科里奥利测定法使用。还可例如通过用基于DSP的传感器电子组件来代替通常的科里奥利测定电子装置而更新通常的流量计，所述传感器电子组件可实现一实数固有模态运动估算器以及一能根据估算出的实数固有响应来直接计算质量流量或其它过程参数的过程参数估算器。除通常的直管和弯管传感器以外，本发明所使用的模态分解在有非通常的例如非对称或非平衡的导管几何形状的传感器中也是最佳的。

本领域的普通技术人员应该认识到，本发明的技术可与其它技术相结合，以形成改进型的过程参数技术。例如，本文所述的实数固有模态分解技术所提供的空间上的过滤可与频率域过滤相结合，以实现时空过滤。由于本发明适于线性代数计算，故可连同本发明一道通过

- 生成运动信号而提供空间积分，所述运动信号能提供用于多个位置的信息，所述多个位置超过将导管运动所分解成的实数固有模态分量的数量。因此，可如上述美国专利申请书“改进型振动导管参数传感器以及用空间积分的操作的方法”所述那样，提供一超定的信息源，
- 5 以便将导管运动分解成给定数量的实数固有波模。

本发明的附图和说明书公开了本发明的实施例。尽管使用了专门术语，但这些术语仅在一般和说明性的意义上使用，而不是为了进行限定。本领域的普通技术人员可以制造、使用或销售以逐字或内容等价方式在本发明所附权利要求范围内实现的另种实施例。

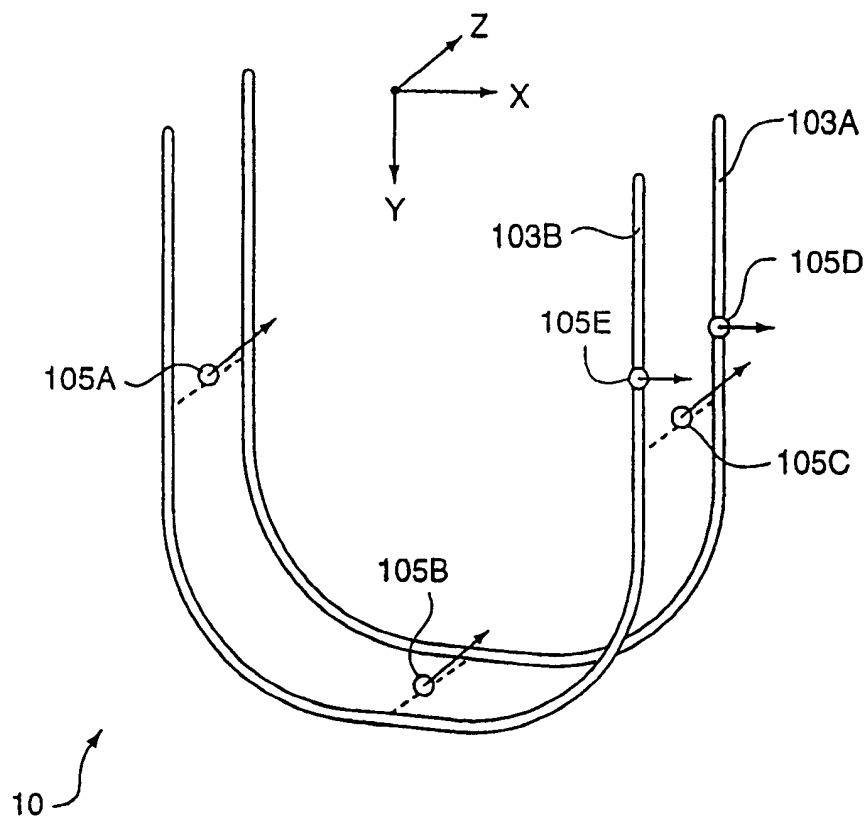


图 1

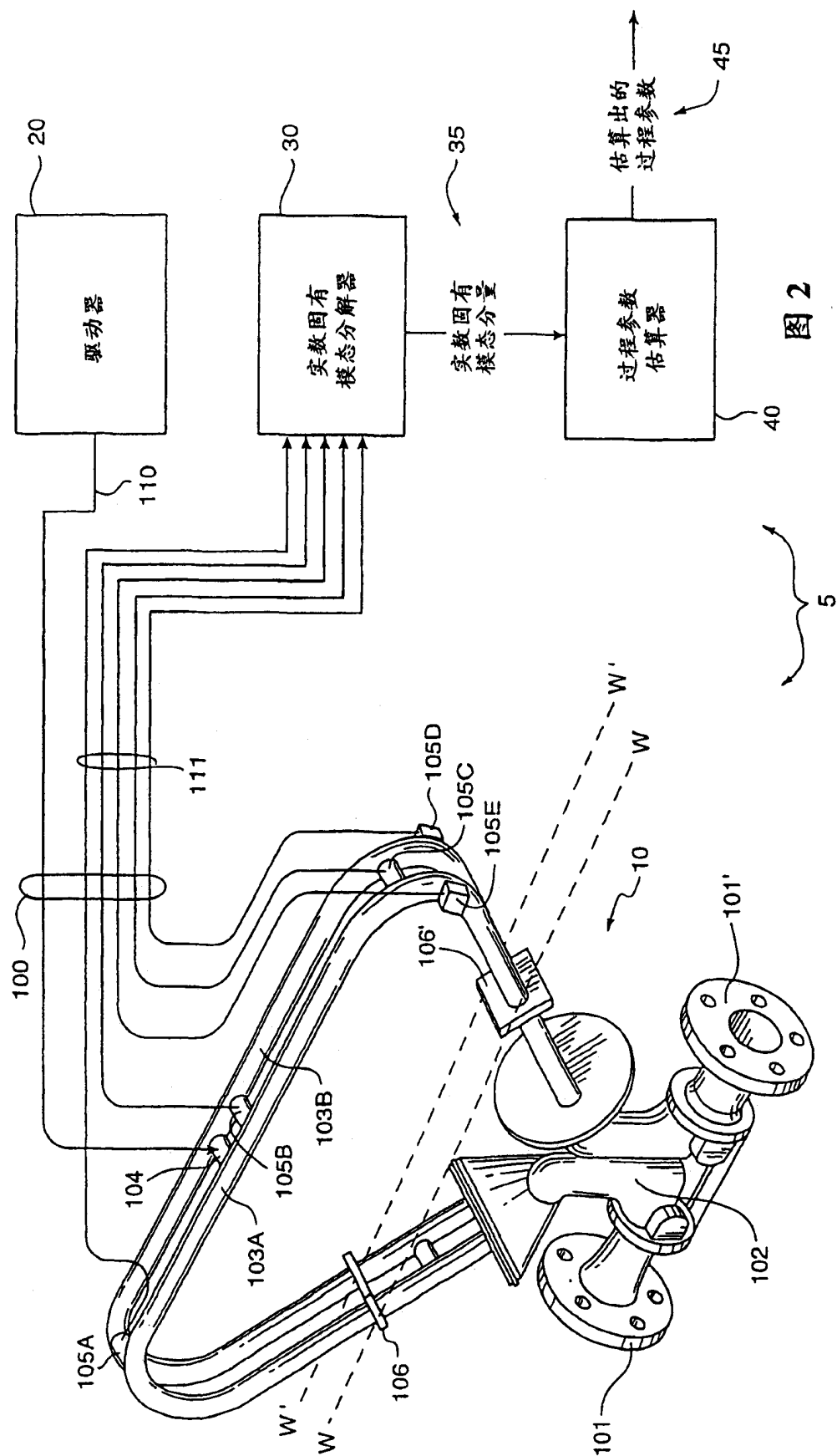


图 2

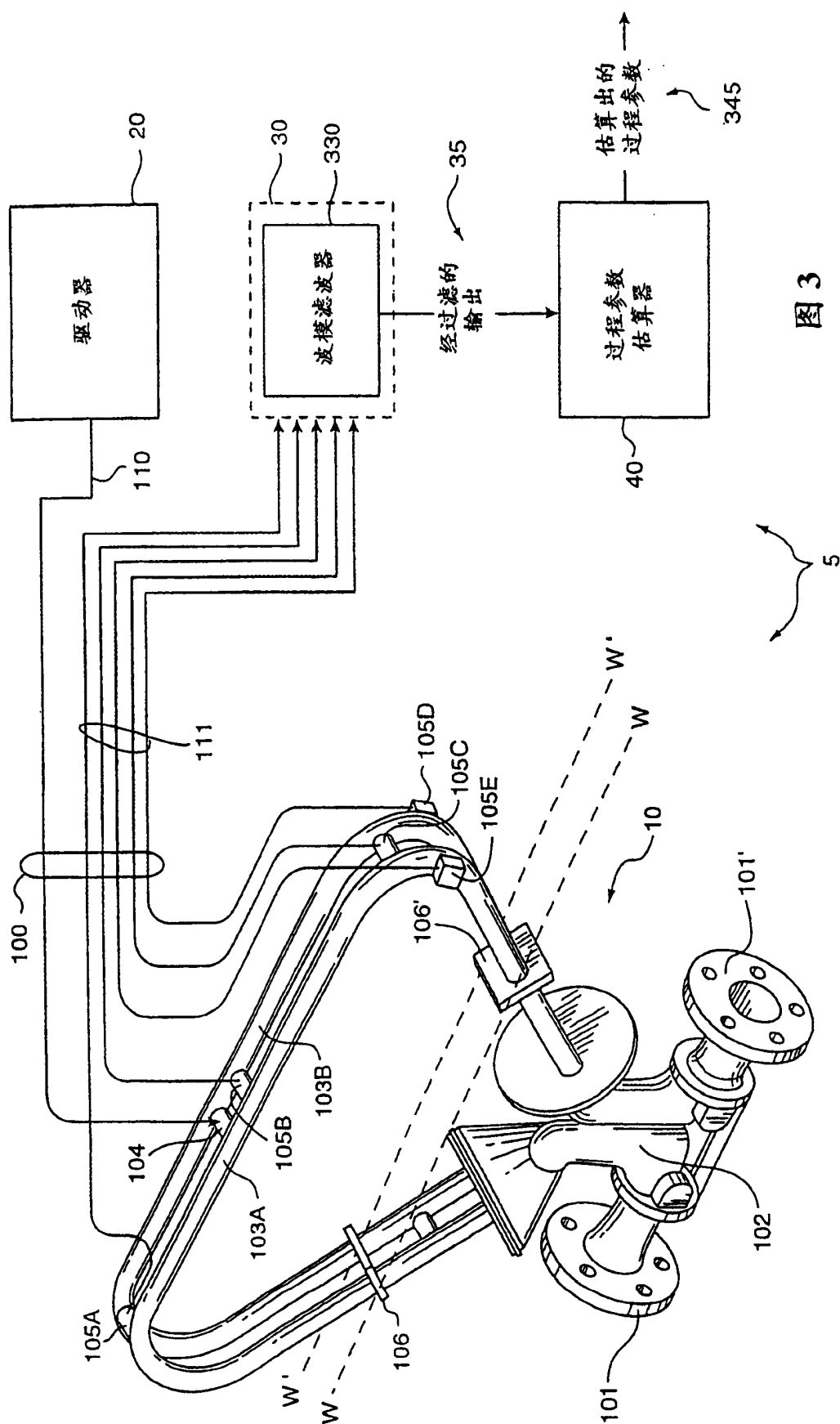


图 3

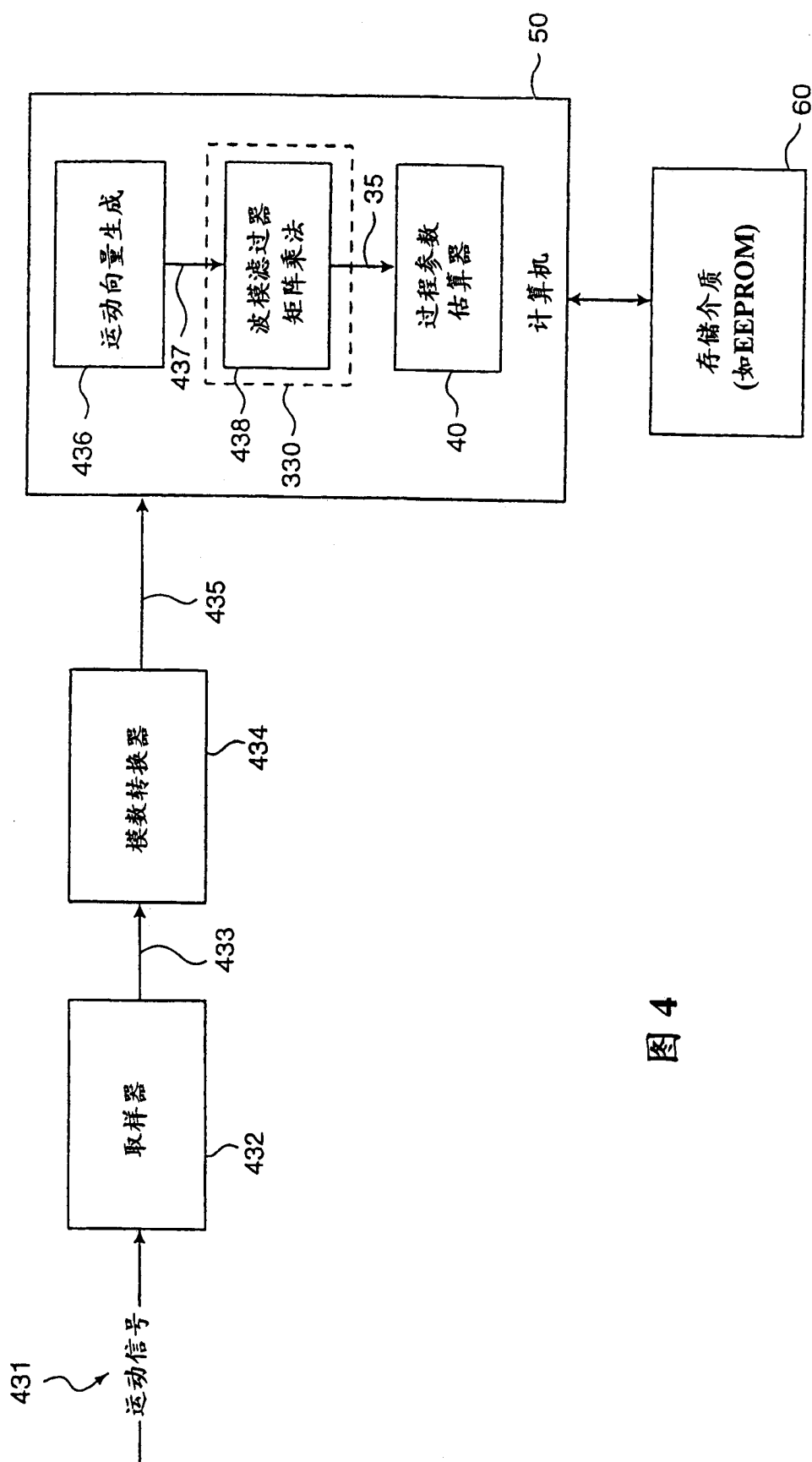


图 4

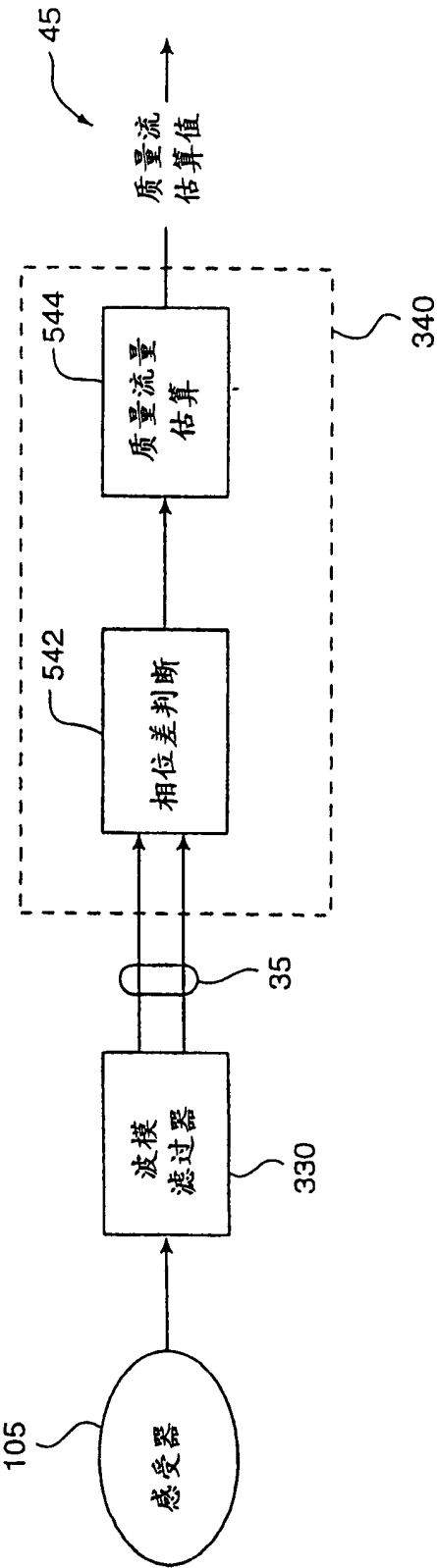
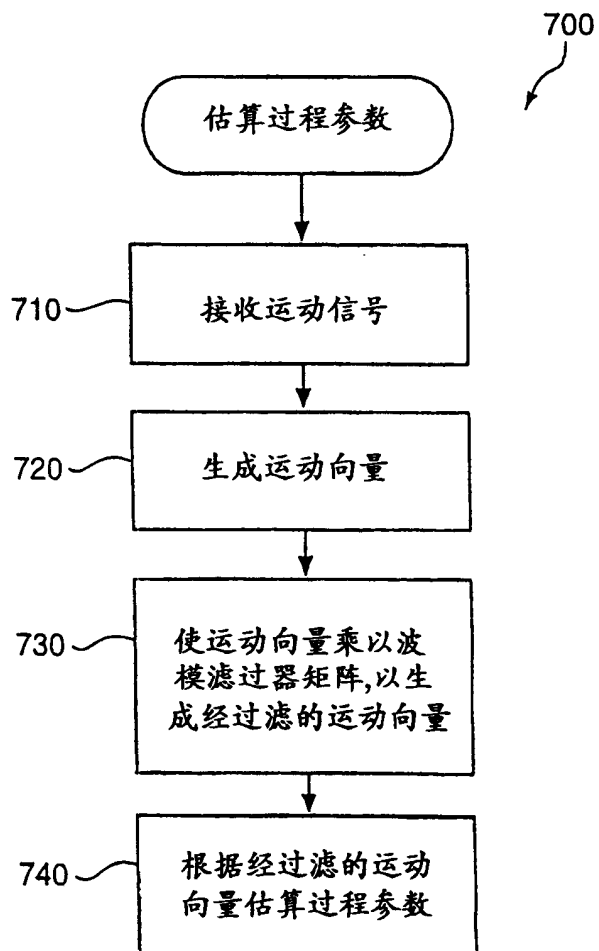
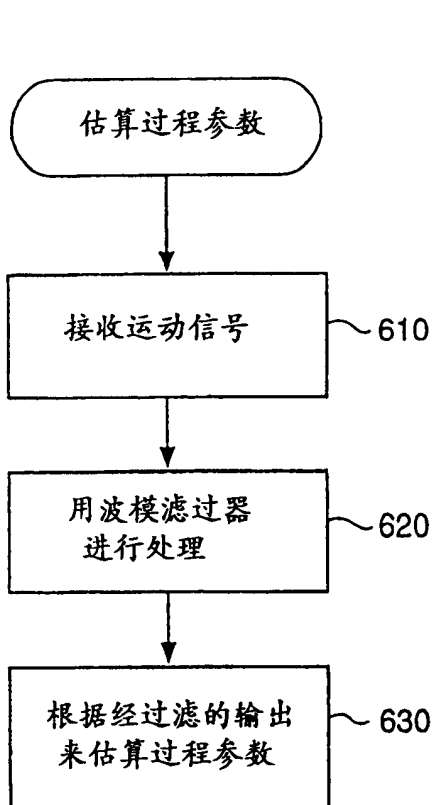


图 5



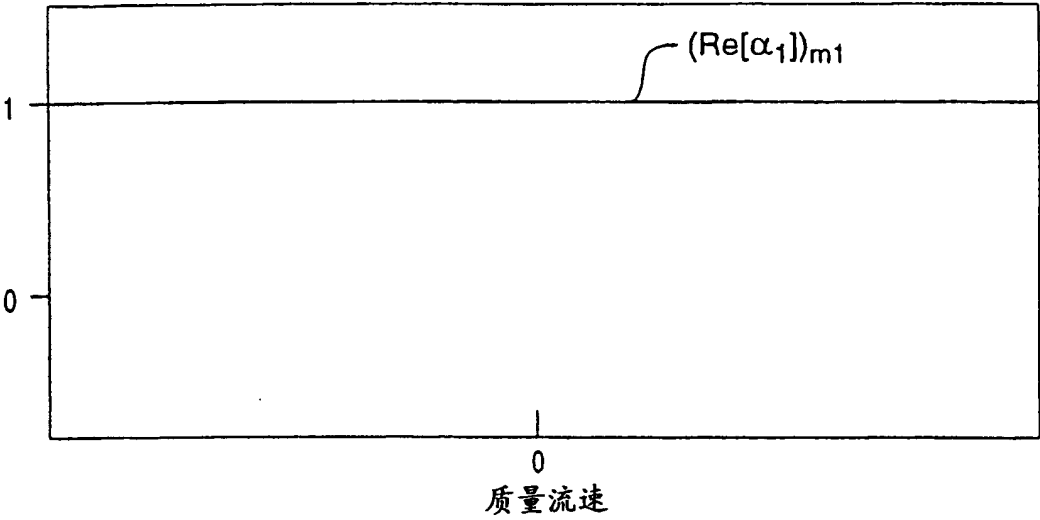


图 8

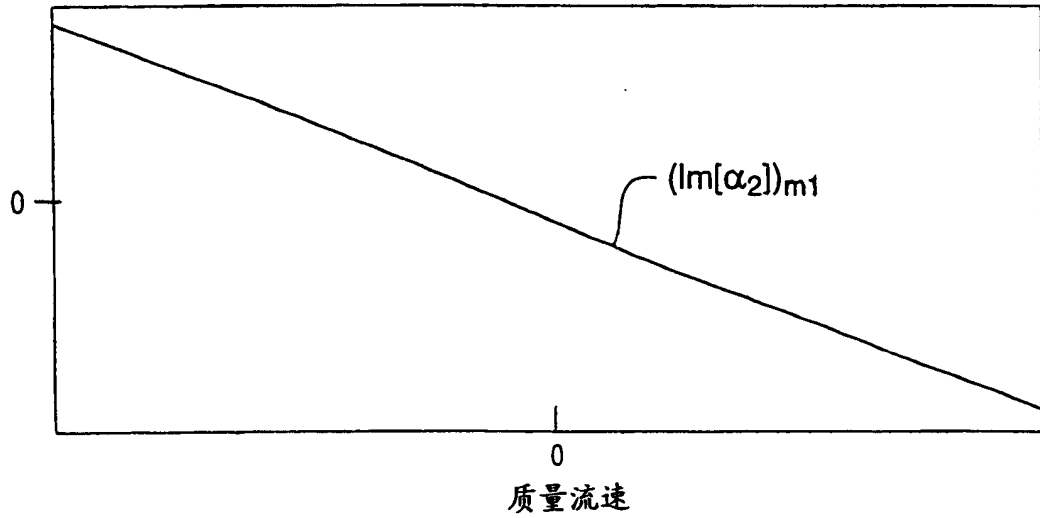


图 9

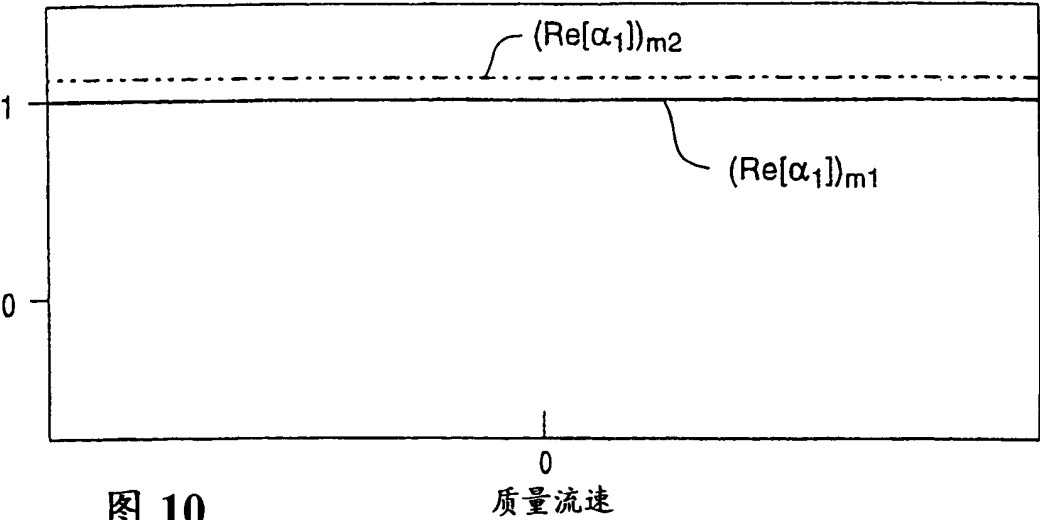


图 10

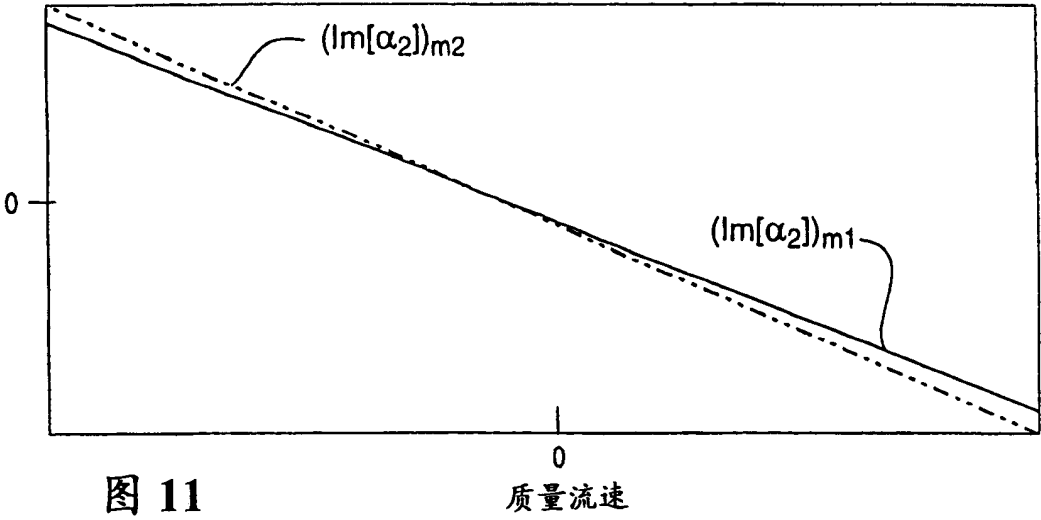


图 11

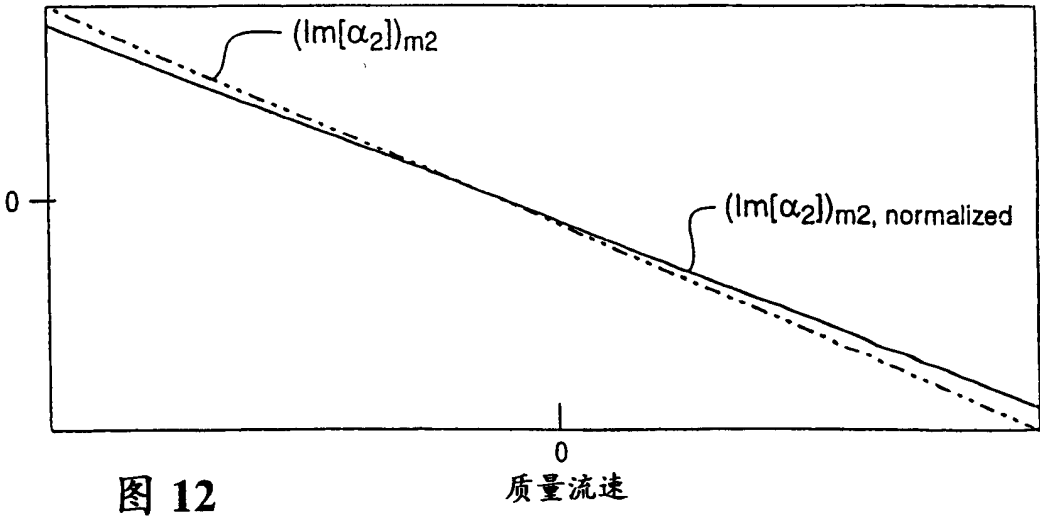


图 12

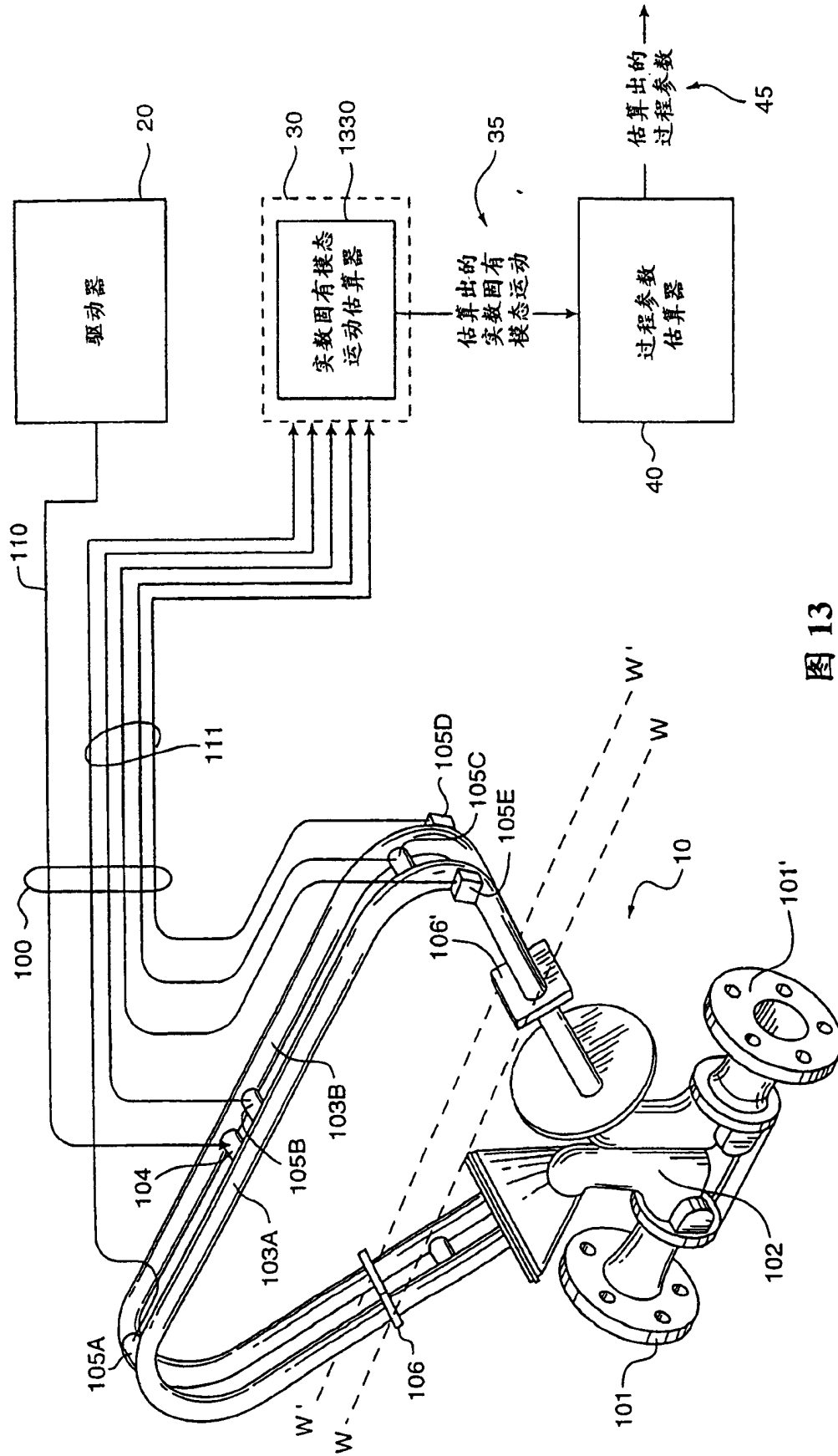


图 13

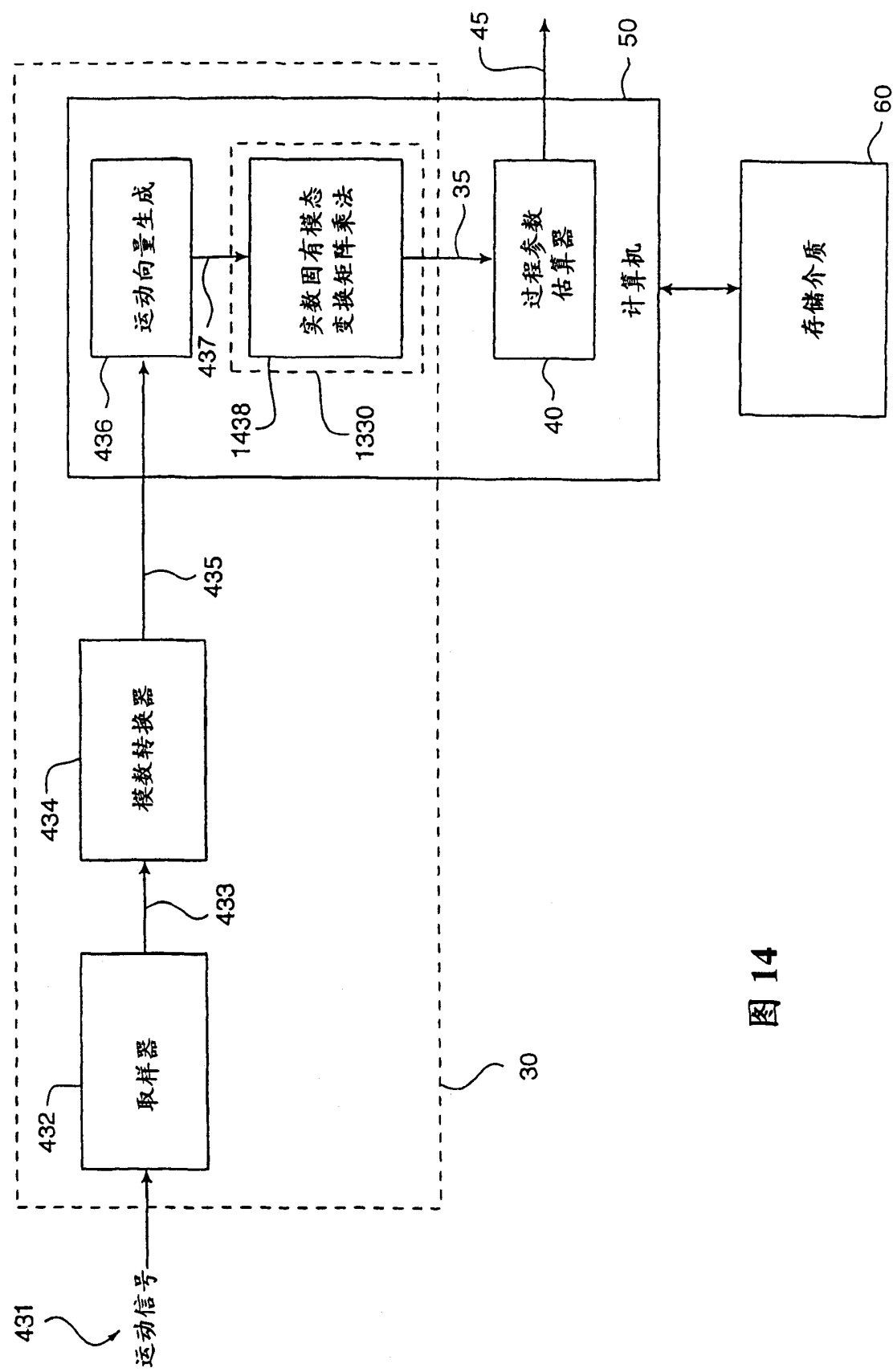


图 14

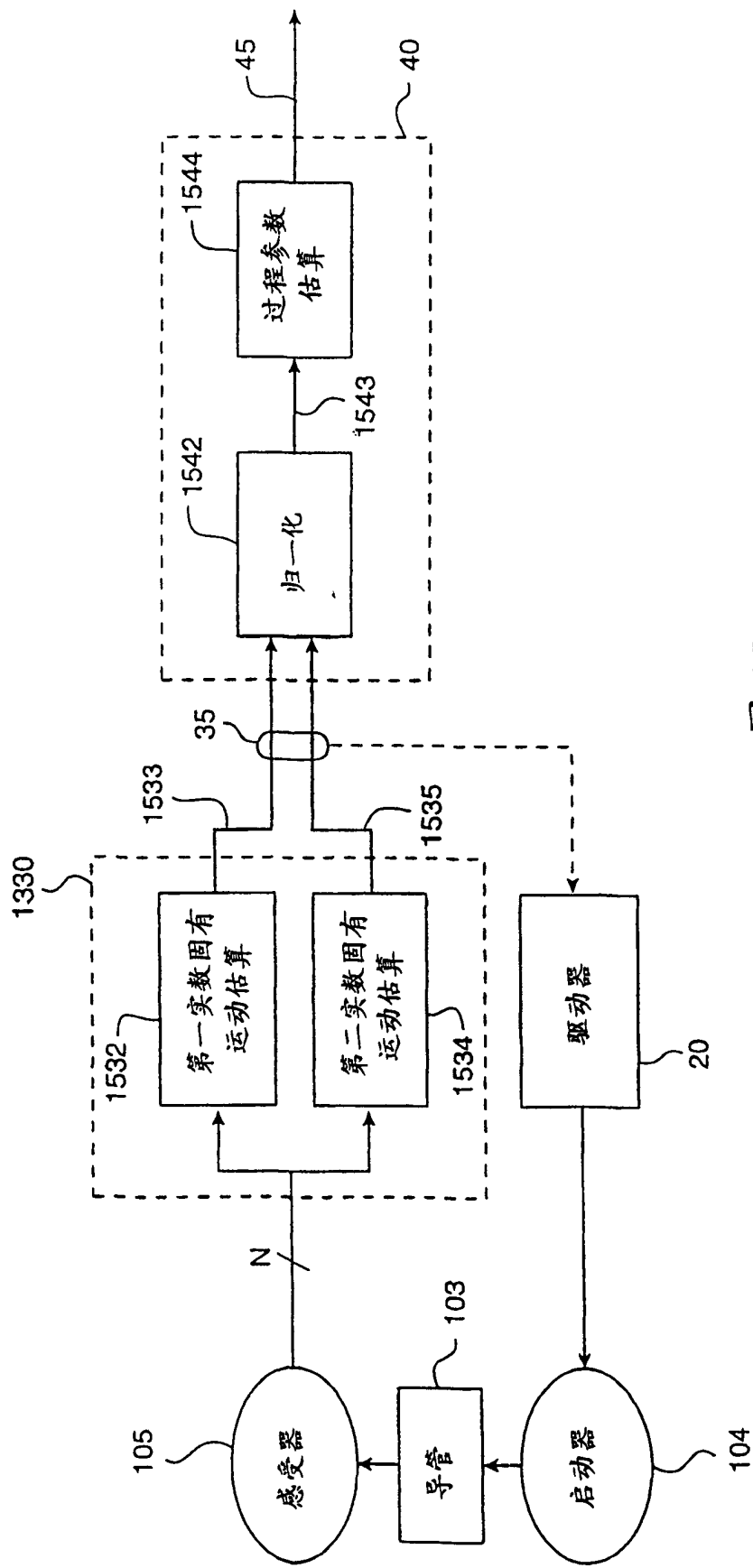


图 15

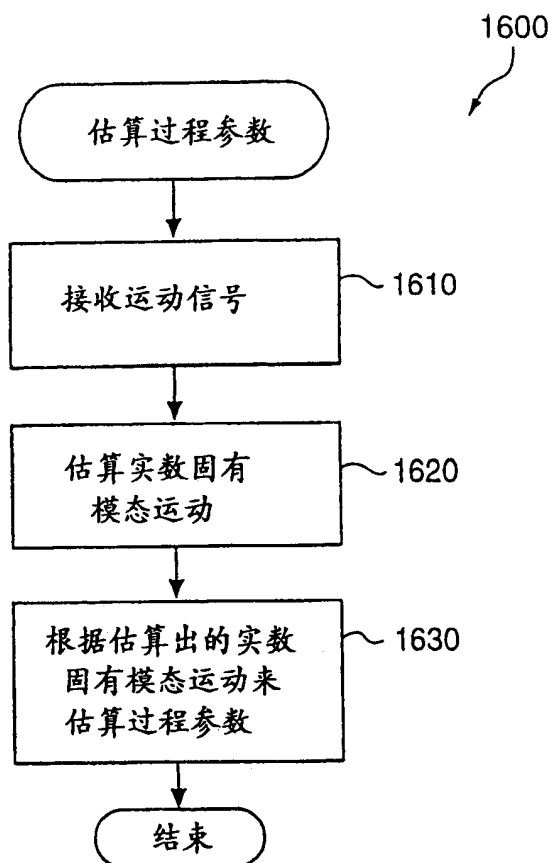


图 16

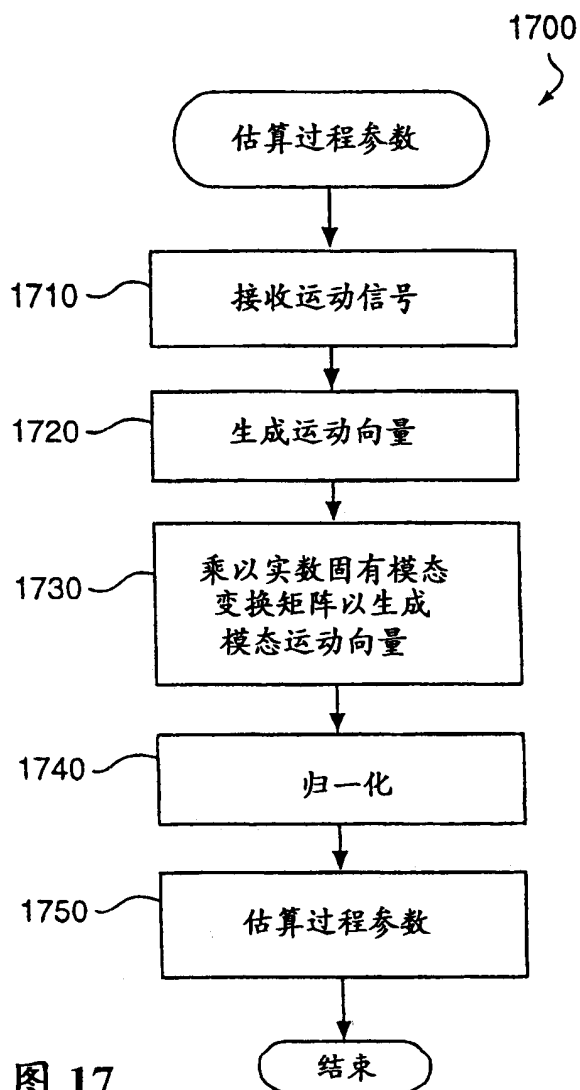


图 17

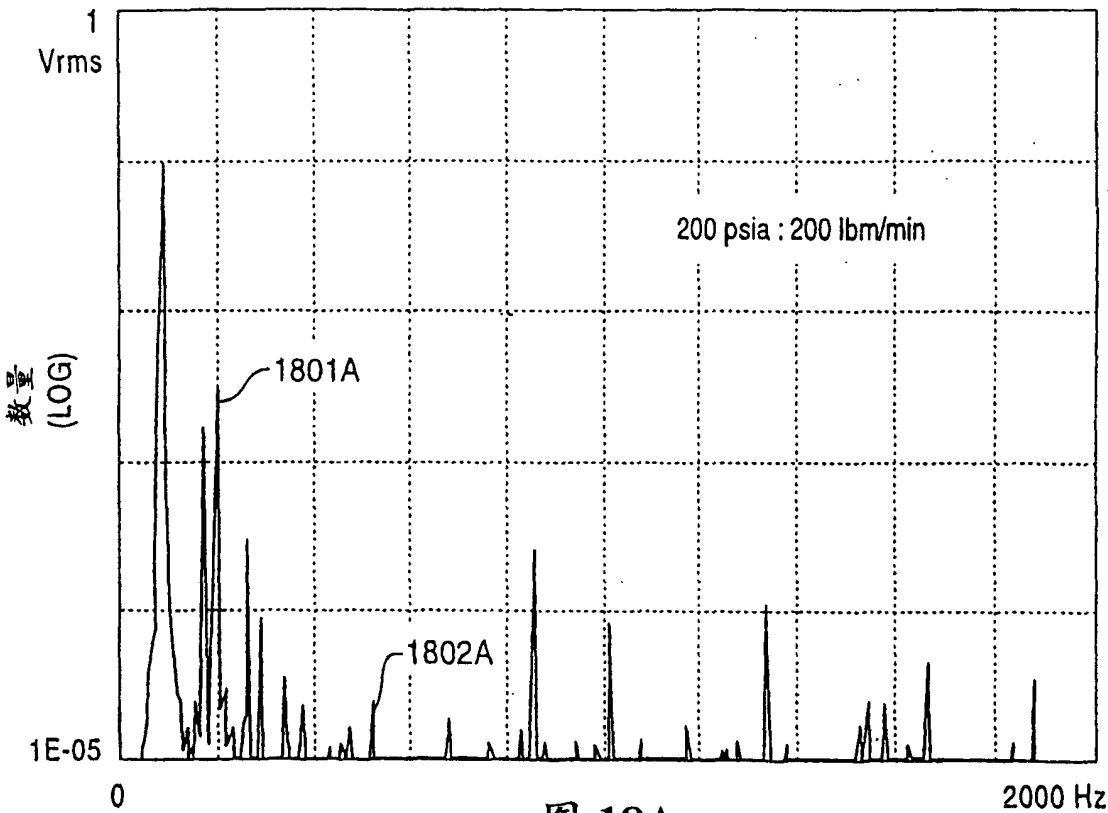


图 18A

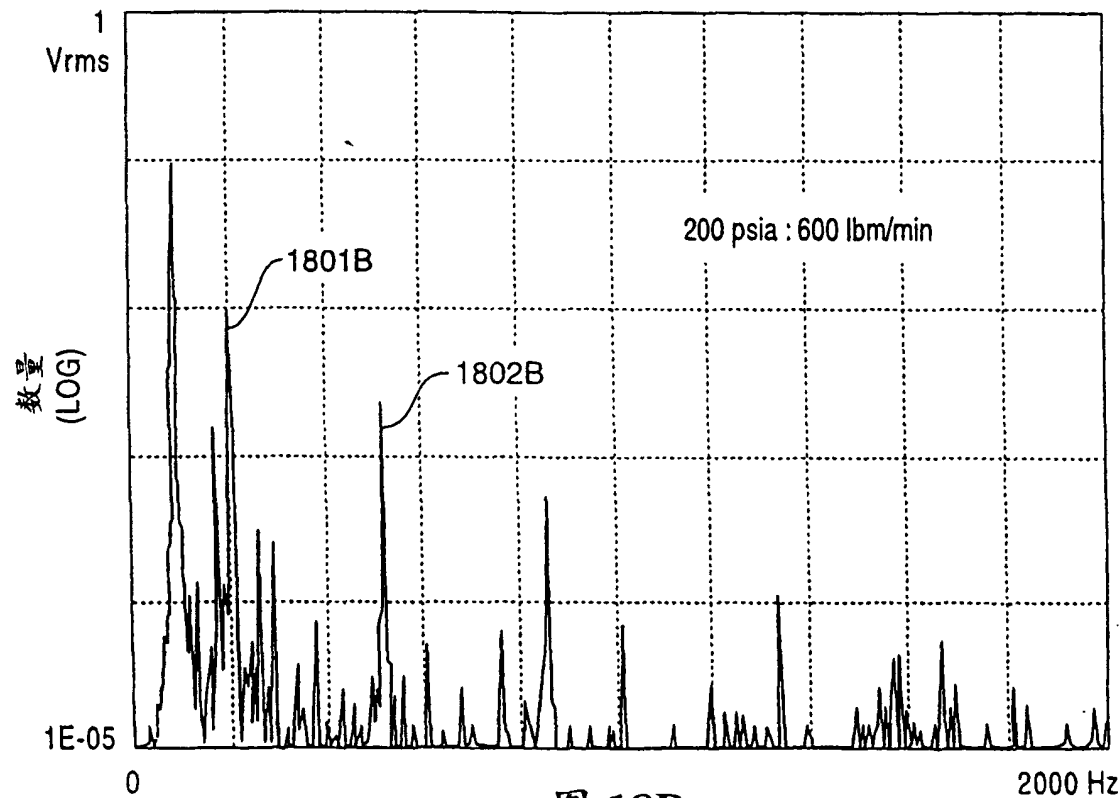


图 18B