



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108291828 B

(45)授权公告日 2020.07.14

(21)申请号 201680062979.2

(22)申请日 2016.10.25

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108291828 A

(43)申请公布日 2018.07.17

(30)优先权数据

14/927,080 2015.10.29 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2018.04.27

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2016/058635 2016.10.25

(87)PCT国际申请的公布数据

WO2017/074924 EN 2017.05.04

(73)专利权人 施耐德电子系统美国股份有限公司

地址 美国马萨诸塞

(72)发明人 M·P·亨利

(74)专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事务所 11038

代理人 高文静

(51)Int.Cl.

G01F 1/84(2006.01)

G01F 7/00(2006.01)

(56)对比文件

US 5115683 A,1992.05.26

US 2012255369 A1,2012.10.11

审查员 孙世新

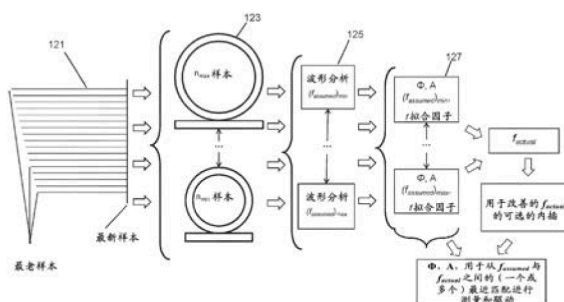
权利要求书3页 说明书11页 附图37页

(54)发明名称

Coriolis流量计

(57)摘要

Coriolis流量计具有振荡导管的驱动器,被配置为生成指示导管在第一位置处的移动的第一传感器信号的第一传感器,以及被配置为生成指示导管在第二位置处的移动的第二传感器信号的第二传感器。第一位置和第二位置被布置成使得当导管被驱动器振荡时第一信号与第二信号之间的相位差与通过流量计的流体的质量流量相关。数字信号处理器包括被调谐到一组不同频率的多个检测器。检测器被配置为并行地分析第一传感器信号并且生成指示第一传感器信号的实际频率与相应的检测器被调谐到的频率有多接近的输出。



1. 一种Coriolis流量计, 包括:

导管, 被配置为输送流体通过流量计;

驱动器, 被配置为振荡导管;

第一传感器, 被配置为生成指示导管在第一位置处的移动的第一传感器信号;

第二传感器, 被配置为生成指示导管在第二位置处的移动的第二传感器信号, 第一位置和第二位置被布置成使得当由驱动器振荡导管时第一信号与第二信号之间的相位差与通过流量计的流体的质量流率相关;

数字信号处理器, 被配置为检测相位差并使用检测到的相位差来确定流体的质量流率, 并且输出指示所确定的质量流率的信号,

其中数字信号处理器包括被调谐到一组不同频率的多个检测器, 检测器被配置为并行地分析传感器信号中的至少一个传感器信号并且生成指示传感器信号中的所述至少一个传感器信号的实际频率与相应检测器被调谐到的频率匹配得有多紧密的输出。

2. 如权利要求1所述的Coriolis流量计, 其中所述多个检测器中的每一个检测器包括缓冲器, 缓冲器被配置为存储传感器信号中的所述至少一个传感器信号的一系列数字样本, 所述系列具有被选择为将相应的检测器调谐到所述一组不同频率中的相应频率的多个数字样本;

其中指示传感器信号中的所述至少一个传感器信号的实际频率与相应检测器被调谐到的频率多紧密匹配的所述输出是基于对由存储在缓冲器中的数字样本表示的传感器信号中的所述至少一个传感器信号的波形的分析; 以及

其中分析包括将传感器信号中的所述至少一个传感器信号的波形的当前相位估计与该波形的先前相位估计进行比较。

3. 如权利要求2所述的Coriolis流量计, 其中先前相位估计与在当前相位估计和先前相位估计之间存在预期关系的时间 t 对应, 其中预期关系是基于 t 和具有检测器被调谐到的频率的理想波形的周期之间的关系, 并且分析包括将当前相位估计和先前相位估计之间的实际关系与当前相位估计和先前相位估计之间的预期关系进行比较。

4. 如权利要求2所述的Coriolis流量计, 其中波形的先前相位估计包括来自当前处于与最老数据对应的一系列数字样本的末尾处的样本处于与最新数据对应的一系列数字样本的末尾处时的时间的相位估计。

5. 如权利要求2-4中任一项所述的Coriolis流量计, 其中所述数字信号处理器使用正交分析来获得相位估计; 并且

其中检测器被配置为使用静态正弦值和余弦值来执行正交分析。

6. 如权利要求2所述的Coriolis流量计, 其中Coriolis流量计具有特征(a)和(b)中的一个或两者:

(a) 缓冲器包括环形缓冲器; 以及

(b) 数字信号处理器被配置为识别被调谐到与传感器信号中的所述至少一个传感器信号相邻的频率的检测器, 并且使用内插来确定在识别出的检测器被调谐到的频率之间的频率测量结果。

7. 如权利要求1所述的Coriolis流量计, 其中Coriolis流量计具有特征(i), (ii)及(iii)中的一个或多个:

(i) 与传感器信号中的所述至少一个传感器信号相关联的所述频率与导管的弯曲振动模式的频率对应,

(ii) 数字信号处理器被配置为使用从检测器确定的频率估计来确定流经导管的流体的密度,以及

(iii) 所述多个检测器是第一多个检测器并且被配置为测量与传感器信号中的所述至少一个传感器信号相关联的第一频率,数字信号处理器还包括第二多个检测器,第二多个检测器被配置为彼此并行操作以测量与传感器信号中的所述至少一个传感器信号相关联的第二频率,第二频率不同于第一频率。

8. 如权利要求7所述的Coriolis流量计,其中Coriolis流量计具有特征(iii)并且还具有特征(I),(II)及(III)中的一个或多个:

(I) 第一频率与导管的第一弯曲模式的频率对应,并且第二频率与导管的第二弯曲模式的频率对应,

(II) 数字信号处理器被配置为使用测得的第一频率和第二频率来确定导管中的流体的密度;以及

(III) 数字信号处理器被配置为向驱动器输出用于驱动导管的振荡的驱动信号,其中驱动信号包括被选择为以第一频率驱动导管的振荡的第一分量以及被选择为以第二频率驱动导管的振荡的第二分量,驱动信号发生器被配置为将第一分量和第二分量彼此并发地组合,使得驱动器同时以第一弯曲模式和第二弯曲模式驱动导管。

9. 如权利要求1-4中任一项所述的Coriolis流量计,还包括数字驱动信号发生器,该数字驱动信号发生器被配置为基于第一传感器信号和第二传感器信号中的至少一个产生驱动信号并将驱动信号发送到驱动器以振荡导管,其中驱动信号包括被选择为以第一振动弯曲模式驱动导管的振荡的第一分量和被选择为以不同于第一振动弯曲模式的第二振动弯曲模式驱动导管的振荡的第二分量,驱动信号发生器被配置为将第一分量和第二分量彼此并发地组合,使得驱动器同时以第一振动弯曲模式和第二振动弯曲模式驱动导管;

其中:

驱动器是第一驱动器并且驱动信号是第一驱动信号,

该Coriolis流量计还包括被配置为振荡导管的第二驱动器,

第一驱动器和第二驱动器位于导管上不同位置处,

数字驱动信号发生器被配置为基于第一传感器信号和第二传感器信号中的至少一个产生第二驱动信号,

其中第二驱动信号包括第一分量和第二分量,以及

驱动信号发生器被配置为在第二驱动信号中将第一分量和第二分量彼此并发地组合,使得第一驱动器和第二驱动器同时以第一振动弯曲模式和第二振动弯曲模式共同驱动导管。

10. 如权利要求9所述的Coriolis流量计,其中驱动信号发生器被配置为控制导管在第一振动弯曲模式下的振荡的振幅,并且控制导管在第二振动弯曲模式下的振荡的振幅;

其中驱动信号发生器被配置为使用PID控件来控制第一振动弯曲模式和第二振动弯曲模式下的导管的振幅;以及

其中PID控件包括两个输入和两个输出,其中两个输入分别与关于第一弯曲模式和第

二弯曲模式下的振荡的振幅的信息对应,并且两个输出与关于被选择为将第一模式和第二模式下的振荡的振幅维持在相应设定点的驱动电平的信息对应。

11.如权利要求9所述的Coriolis流量计,其中所述相位差是第一相位差,第一相位差与由通过导管的质量流引起的第一振动弯曲模式的失真相关,数字信号处理器被配置为检测与由通过导管的质量流引起的第二振动弯曲模式的失真相关的第二相位差,其中数字信号处理器被配置为使用第一相位差和第二相位差来确定流体的质量流率。

12.如权利要求9所述的Coriolis流量计,其中数字信号处理器被配置为使用第一振动弯曲模式和第二振动弯曲模式中的至少一个的频率来测量导管中的流体的密度;以及

其中数字信号处理器被配置为使用第一振动弯曲模式的频率和第二振动弯曲模式的频率来确定导管中的流体的密度。

13.一种用于计量多相流体的流的系统,该系统包括:

第一Coriolis流量计和第二Coriolis流量计,其中每一个如权利要求1-8中任一项所述,其中第一Coriolis流量计和第二Coriolis流量计中的每一个输出流经相应流量计的流体的时变质量流率测量结果和流经相应流量计的流体的时变密度测量结果;

信号相关器,将来自第一Coriolis流量计的时变质量流率测量结果和时变密度测量结果中的至少一个与来自第二Coriolis流量计的相应时变质量流率或时变密度测量结果进行比较,并且确定匹配的测量结果之间的时间延迟;以及

测量系统,使用所确定的时间延迟来导出多相流的分量的估计速度,并且使用估计速度来校正质量流和密度测量结果中的至少一个。

14.如权利要求13所述的系统,其中该系统具有特征(A)、(B)及(C)中的一个或多个:

(A)该系统被配置为使用估计速度来表征多相流体的气相与液相之间的滑移并且根据该滑移校正质量流和密度测量结果中的所述至少一个;

(B)该系统被配置为将来自第一Coriolis流量计的时变质量流率测量结果与来自第二Coriolis流量计的相应时变质量流率测量结果相关联,使用时间延迟来导出多相流体的液相的估计速度,并且使用估计的液相速度来校正质量流和密度测量结果中的至少一个;以及

(C)该系统被配置为将来自第一Coriolis流量计的时变密度测量结果与来自第二Coriolis流量计的时变密度测量结果相关联,使用时间延迟导出多相流体的气相的估计速度,并且使用估计的气相速度来校正质量流和密度测量结果中的至少一个。

15.一种驱动Coriolis流量计的导管的振荡的方法,所述Coriolis流量计包括:导管,被配置为输送流体通过流量计;驱动器,被配置为振荡导管;第一传感器,被配置为生成指示导管在第一位置处的移动的第一传感器信号;第二传感器,被配置为生成指示导管在第二位置处的移动的第二传感器信号,第一位置和第二位置被布置成使得当由驱动器振荡导管时第一信号与第二信号之间的相位差与通过流量计的流体的质量流率相关;该方法包括:

使用被调谐到一组不同频率的多个检测器来并行地分析第一传感器信号并且生成指示第一传感器信号的实际频率与相应检测器被调谐到的频率匹配得有多密切的输出;

向驱动器供给驱动信号,该驱动信号包括基于使用来自检测器的输出确定的估计频率的频率。

Coriolis流量计

技术领域

[0001] 本发明一般而言涉及流量计,并且更具体地涉及Coriolis流量计。

背景技术

[0002] 在工业中使用各种不同的流量计来提供关于多相流体的流速的信息。被计量的流体可以包括液体和气体的混合物。这种情况在油气行业中经常遇到,其中所产生的流体通常是油、水和气体的混合物。但是,在其它行业也需要计量多相流体。流量计在不涉及多相流体的应用中也是重要的。

[0003] 一种类型的流量计是Coriolis流量计。Coriolis流量计包括电子发送器和可振动流管,待计量的流体可以通过该流管。发送器通过向一个或多个驱动器发送驱动信号来维持流管振动,并基于来自测量流管的移动的一对传感器的信号执行测量计算。设备的物理特性决定了Coriolis力沿着传感器之间的流管的一部分发生作用,从而导致大致正弦的传感器信号之间的相位差。这个相位差一般与通过流管的测量部分的流体的质量流率成比例。因此,相位差为流经流管的流体的质量流率测量提供基础。Coriolis流量计流管的振荡频率随流管中过程流体(process fluid)的密度而变化。可以从传感器信号中提取频率值,使得也可以通过分析传感器信号来获得流体的密度。

[0004] Coriolis流量计广泛用于各种不同的行业。质量流的直接测量通常优于基于体积的计量,因为材料的密度和/或体积可以随着温度和/或压力而变化,但质量不受影响。这在油气行业中尤其重要,其中能源含量和因此的产品价值是质量的函数。术语“净采油量(Net Oil)”在油气行业中用来描述三相或液体(油/水)流内的油流率。油气行业的共同目标是确定多口井中每口井产出的净采油量,因为这个信息在做出影响油气田产量的决策和/或优化油气田生产时会是很重要的。

[0005] 在液体流中包括气体会引起Coriolis流量计的质量流率和密度测量的误差。实验室试验可以用来表征质量流率和密度误差如何与其它参数(诸如观察到的流率以及观察到的密度与纯流体密度相比的减少)相关。这些试验可以用来开发提供校正以解决与包括气相和液相在内的多相流体存在相关联的一些误差的经验模型。这些基于经验的校正可以提高Coriolis仪表在现场作业中的性能。关于使用Coriolis流量计来测量多相流体的其它细节在美国专利No.6311136;6505519;6950760;7059199;7313488;7617055;以及8,892,371中提供,这些专利的内容通过引用被结合于此。

[0006] 在许多常规的Coriolis流量计中,流管的振荡频率通过测量传感器信号上的过零点之间的时间来计算。傅立叶技术通常被用来计算流管振动的振幅和相位。例如,图1图示了已经在许多常规Coriolis流量计中使用的正交(quadrature)技术。在这种技术中,传感器信号乘以正交正弦波并且还乘以正交余弦波。正交积在一个周期上(其长度基于频率计算)进行积分,以产生通过积分正弦积获得的积分 I_s 和通过积分余弦积获得的积分 I_c 。每个传感器信号的相位被计算为 (I_c/I_s) 的正切值。每个传感器信号的振幅被计算为 $(I_s^2+I_c^2)$ 的平方根。计算出的频率和相位为测量流体密度和质量流率提供基础。随着流体密度的增加,

传感器信号的频率将降低。而且,两个传感器信号的相位差将随着质量流率的增加而增加。在一些Coriolis流量计中,计算出的频率、振幅和相位还被用来生成用于驱动流管振荡的合成驱动信号。

[0007] 因为流管的频率改变(例如,响应于流经流管的流体的密度的改变),过零点之间的时间与计算出的频率也在流量计的操作期间改变。因此,常规的Coriolis流量计在每个新的周期或者在一些情况下是每半个周期更新用于正弦函数和余弦函数的值。例如,用于正交函数的值通常每半个周期使用基于最新的过零点新计算的频率重新计算。而且,如图1所示的技术那样,当每个周期的开始和结束被约束到过零点时,对于过零点之间的中间点处的频率、振幅或相位没有更新。

[0008] 本发明人已经进行了适用于Coriolis流量计领域并且适用于净油气测试领域各种改善,这些将在下面详细描述。

发明内容

[0009] 本发明的一方面是Coriolis流量计,该Coriolis流量计具有被配置为输送流体通过流量计的导管、被配置为振荡导管的驱动器、被配置为生成指示导管在第一位置处的移动的第一传感器信号的第一传感器、被配置为生成指示导管在第二位置处的移动的第二传感器信号的第二传感器。第一位置和第二位置被布置成使得当由驱动器振荡导管时第一信号与第二信号之间的相位差与通过流量计的流体的质量流率相关。Coriolis流量计具有数字信号处理器,该数字信号处理器被配置为检测相位差并使用检测到的相位差来确定流体的质量流率,并且输出指示所确定的质量流率的信号。数字信号处理器包括被调谐到一组不同频率的多个检测器。检测器被配置为并行地分析第一传感器信号并且生成指示第一传感器信号的实际频率与相应的检测器被调谐到的频率有多接近的输出。

[0010] 本发明的另一方面是驱动Coriolis流量计的导管的振荡的方法,这种类型的Coriolis流量计包括被配置为输送流体通过流量计的导管、被配置为振荡导管的驱动器、被配置为生成指示导管在第一位置处的移动的第一传感器信号的第一传感器、被配置为生成指示导管在第二位置处的移动的第二传感器信号的第二传感器,第一位置和第二位置被布置成使得当由驱动器振荡导管时第一信号与第二信号之间的相位差与通过流量计的流体的质量流率相关。该方法包括使用被调谐到一组不同频率的多个检测器来并行地分析第一传感器信号并且生成指示第一传感器信号的实际频率与相应的检测器被调谐到的频率有多接近的输出。向驱动器供给驱动信号,该驱动信号包括基于使用来自检测器的输出确定的估计频率的频率。

[0011] 其它目标和特征将部分地显而易见,并且部分地在下文中指出。

附图说明

[0012] 图1是图示用于分析Coriolis流量计中的传感器信号的现有技术的示意图;

[0013] 图2是Coriolis流量计的一个实施例的透视图;

[0014] 图3是图2中所示的Coriolis流量计的侧视图;

[0015] 图4是Coriolis流量计的示意图;

[0016] 图5是图示用于处理来自Coriolis流量计的一个或多个传感器的信号的检测器组

的示意图；

[0017] 图6和7是分别示出用于在分析73.2Hz和82.56Hz处的信号的检测器组中的每个检测器的频率和振幅估计以及频率拟合因子的曲线图；

[0018] 图8是图示在两种不同的弯曲模式下Coriolis流量计的导管的振荡的一个实施例的示意图；

[0019] 图9是图示将第一弯曲模式的频率成分与第二弯曲模式的频率成分分开的处理器的一个实施例的示意图；

[0020] 图10是图示驱动模式密度测量与Coriolis模式密度测量之比和密度下降之间的关系的关系的曲线图；

[0021] 图11是使用时间相关技术来改善两相流期间的测量的系统的一个实施例的示意图；

[0022] 图12是图示来自图11的系统中的流量计的质量流率测量的0.5s延迟的曲线图；

[0023] 图13-16是图示Coriolis流量计对模拟的频率扫描(sweep)的响应的曲线图；

[0024] 图17-21是图示在补偿之后改善Coriolis流量计对模拟的频率扫描的响应的曲线图；

[0025] 图22-26是图示Coriolis流量计对模拟的频率扫描、振幅和相位差的响应的曲线图；

[0026] 图27示出了Coriolis流量计对从100Hz到85Hz的频率阶跃变化的响应；

[0027] 图28示出了Coriolis流量计对从0.3V到0.05V的振幅阶跃变化的响应；

[0028] 图29示出了对从零度到4度的相位差的阶跃变化的响应；

[0029] 图30-35示出了对这样的信号的响应,该信号具有100Hz的稳定频率、1度的稳定相位差以及在10Hz频率下在0.2V和0.3V之间循环的振幅；以及

[0030] 图36-38示出了响应于具有与在两相流期间期望的特性类似的特性的模拟的信号的对频率、振幅和相位差的跟踪。

[0031] 对应的标号在整个附图中指示对应的部分。

具体实施方式

[0032] Coriolis流量计的一个实施例(总体上指定为215)在图2和3中图示。流量计215包括一个或多个导管18、20(也称为流管),用于驱动(一个或多个)导管的振荡的一个或多个驱动器46a、46b,以及生成指示(一个或多个)导管的振荡的信号的一对运动传感器48a、48b。在所示的实施例中,存在两个导管18、20,两个驱动器46a、46b以及两个运动传感器48a、48b,并且驱动器和运动传感器定位在导管之间,因此每个驱动器和运动传感器都可操作于两个导管。但是,可以理解的是,Coriolis流量计可以只有单个导管和/或可以具有单个驱动器。还可以理解的是,(一个或多个)导管可以具有与所示实施例中的导管18、20不同的构造。

[0033] 如图2和3中所示,流量计215被设计为插入管道(未示出),该管道具有被移除或预留的小部分,以便为流量计腾出空间。流量计215包括用于连接到管道的安装凸缘12,以及支撑垂直于管道定向的两个平行平面导管环18和20的中央歧管块16。驱动器46a、46b和传感器48a、48b附接在环18和20的每个端部之间。在环18、20的相对端上的驱动器46a、46b由

数字控制器(未示出)以相等量值但是符号相反的电流(即,异相 180° 的电流)激励,以使环18、20的直线部分26围绕它们的共面垂直平分线56旋转(图2)。重复地反转(例如,以正弦方式控制)供给驱动器46a、46b的激励电流使每个直线部分26经历振荡运动,该振荡运动围绕环的对称轴56扫出水平面中的领结形状。环18、20在下圆角转弯(rounded turn)38和40处的整个横向偏移是小的,对于具有1英寸直径的管的两英尺长的直线部分26而言,大约为1/16英寸。振荡的频率通常大约为70至110赫兹,但是这可以取决于(一个或多个)流管的尺寸和配置而变化。

[0034] 传感器48a、48b被定位成检测流管在流管上不同位置处的移动并且输出指示检测到的移动的传感器信号。如本领域技术人员将理解的,Coriolis效应在两个传感器48a、48b之间引起一般与质量流率成比例的相位差。而且,环18、20的谐振频率将根据流过其中的流体的密度而变化。因此,质量流率和密度可以通过分析来自传感器48a、48b的信号来测量。Coriolis流量计215具有处理器101(图3),该处理器101被配置为接收来自传感器48a、48b的传感器信号,确定传感器信号之间的相位差并且使用确定的相位差来确定通过流管的流体流率。处理器101还被配置为确定传感器信号中的一个或多个的频率并且使用确定的频率来确定流管中流体的密度。

[0035] 各种校正可以应用于由来自传感器48a、48b的信号之间的相位差与频率得到的基本测量值。例如,多相流在流管上引入高度可变的阻尼,比单相条件下高3个数量级。此外,在多相流条件下生成的质量流和密度测量结果受到大的系统误差和随机误差的影响,对此可以由处理器101定义和实现校正算法。关于Coriolis流量计的操作的更多细节在美国专利Nos.6,311,136;6505519;6950760;7059199;7188534;7614312;7660681;以及7,617,055中提供,这些专利的内容通过引用被结合于此。

[0036] 参考图4,Coriolis流量计215的处理器101适当地是发送器,被配置为接收来自传感器48a、48b以及在一些情况下其它仪器(例如,压力和/或温度传感器)的信号,使用所接收的信号来确定流管中流体的质量流率和/或密度以及为驱动器46a、46b生成合适的驱动信号并且(例如,向分布式控制系统)输出测量和诊断信息。如下面将更详细解释的,发送器101以不同于常规Coriolis流量计的方式适当地处理传感器信号。

[0037] 发送器101适当地包括用于接收来自传感器48a、48b的模拟信号的输入端,被定位成测量流体管线压力(line pressure)的压力传感器54,以及被定位成测量流体的温度的温度传感器52。发送器101适当地将模拟信号(具体而言包括来自传感器48a、48b的模拟信号)转换成数字信号。可以使用硬件和软件的各种组合来数字化信号。例如,现场可编程门阵列(FPGA)适于用来数字化样本。具有执行本文描述的技术所需的速度和功率的合适FPGA可以从Xilinx Inc.商购获得,诸如Zynq 7010、Zynq 7015、Zynq 7020、Zynq 7030、Zynq 7035、Zynq 7045或Zynq 7100,所有这些是片上系统(SoC)设备,它们将FPGA与在同一芯片上提供附加处理能力的附加集成电路相结合。虽然精确的规格可以在本发明的范围内变化,但是这些SoC的典型特性包括 **ARM®** 双核Cortex、866MHz至1GHz、1066至1333Mb/s DDR3、28k至444k LC FPGA架构、80至2020DSP片以及6.25至12.5GB/s收发器。要注意的是,虽然上面列出的Zynq产品使用 **ARM®** 体系架构,但是在不脱离本发明范围的情况下有可能使用其它体系架构。同样,在不脱离本发明的范围的情况下,产品规格可以不同于上面列出的规格。

[0038] 如图5中所示,处理器101包括多个检测器121(有时被称为检测器组),被配置为使用包括多个彼此不同的频率的一组假设频率并行地分析传感器信号之一。假设频率被适当地选择为落在与流管振荡的主要弯曲模式的最高和最低期望频率对应的频率范围内。流管的各种振动模式的频率范围将取决于流管的物理属性而变化。仅举一个示例,假设频率的集合中的频率的合适频率范围为大约70Hz至大约110Hz,这是覆盖图2和3中所示的Coriolis流量计的驱动模式的所有预期频率的范围。

[0039] 检测器121可以在本发明的广泛范围内采取各种形式。在图5所示的实施例中,例如,合适的检测器121一般包括缓冲器123、使用经调谐的频率分析信号的波形分析器125,以及评估经调谐的频率与实际频率多接近并且输出用于挑选一个或多个具有接近当前实际频率的假设频率的检测器的拟合因子的频率拟合评估器127。

[0040] 缓冲器123适当地包括被配置为存储来自传感器信号的最近n个样本的循环缓冲器。存储在循环缓冲器123中的样本数n根据经调谐的频率和采样率而变化。例如,存储在环形缓冲器中的样本串的长度适当地与经调谐的频率处的一个周期的长度对应,在这种情况下,对于相应的检测器,n等于采样率除以经调谐的频率。因此,被表示为可以存储在其中的数字样本的数量的每个缓冲器123的尺寸被适当地选择,以将相应的检测器调谐到特定的调谐的频率。使用上面假设频率在大约70Hz到大约110Hz范围内并与大约49.9kHz采样率结合的示例,环形缓冲器123被配置为保持714个采样(70Hz)和454个采样样本(110赫兹)之间。例如,检测器121可以适当地包括具有环形缓冲器123的检测器,该环形缓冲器123保持在最短样本串(与频率范围中的最高频率对应)的样本数与最长样本串(与频率范围中的最低频率对应)的样本数之间的每个可能的整数数量的样本。在上面的示例中,这与260个具有循环缓冲器123的不同检测器121对应,循环缓冲器123被配置为存储具有在454和714之间的每个整数值的样本串。以彼此紧密间隔的许多不同假设频率操作的大量检测器121从准确性的观点来看是期望的,但是要理解的是,如果是优选的,那么在本发明的范围内可以使用更少的检测器(例如,可以存储在每个环形缓冲器123中的样本的数量可以增加n+2、n+3、n+4等)。

[0041] 检测器121适当地包括波形分析器125,其使用经调谐的频率来计算传感器信号的相位和振幅。波形分析器125适当地使用正交技术来计算相位和振幅。例如,波形分析器125适当地将传感器信号乘以在经调谐的频率处生成的正交函数,通过积分积来获得 I_s 和 I_c 积分,并且使用等式 $\Phi = (I_c/I_s)$ 的正切来计算相位(Φ)和 $A = (I_s^2 + I_c^2)$ 的平方根来计算振幅(A)。每个检测器121的经调谐的频率在流量计215的操作期间是静态的。因而,用于每个特定检测器121的波形分析器125被适当地配置为对正交函数使用静态正弦值和余弦值。例如,由每个检测器121使用的正弦和余弦值可以存储在查找表中。波形分析器125适当地避免在流量计215的操作期间为正交函数生成新的值。

[0042] 检测器121被配置为基于假设经调谐的频率是传感器信号的实际频率来分析传感器信号。即使当流管振荡的频率与相应检测器的经调谐的频率显著不同时,检测器121也连续地操作。因此,由于检测器的经调谐的频率与实际频率之间的巨大差异,由一些或甚至大部分检测器121计算出的振幅和相位将最小至无值。但是,检测器121中的一个或多个将具有相对接近传感器信号的实际频率的经调谐的频率。

[0043] 检测器被配置为基于对由存储在缓冲器中的数字样本表示的第一传感器信号的

波形的分析来评估它们的经调谐的频率与传感器信号的实际频率多接近。可以表示为频率拟合因子的接近度由检测器适当地输出,供处理器用于识别其经调谐的频率接近实际频率的一个或多个检测器。可替代地,处理器可以在本发明的范围内评估检测器并计算每个检测器的频率拟合因子。有多种方法来检测检测器的经调谐的频率与实际频率多接近。例如,检测器被适当地配置为使用在不同时间的相位计算之间的差异来评估经调谐的频率与当前实际频率多接近。当特定波形分析器的经调谐的频率接近传感器信号的实际频率时,先前在环形缓冲器中最老的样本是最新样本时计算的相位将大约等于在最新样本被添加到缓冲器中之后计算的相位。检测器被适当地配置为存储先前的相位计算值,因此它们可以与更近期的相位计算值进行比较。一般而言,检测器被配置为通过比较一个或多个存储的相位值(例如,来自整个周期前、半个周期前、四分之一周期前或其倍数的相位值)与如果经调谐的频率等于实际频率将存在的对应预期相位值来评估假设频率与当前实际频率有多接近。一般而言,先前的相位估计与在当前相位估计与先前相位估计之间存在预期关系的时间 t 对应,其中该预期关系基于 t 与理想波形的周期之间的关系,该理想波形具有检测器被调谐到的频率,并且分析包括将当前相位估计和先前相位估计之间的实际关系与当前相位估计和先前相位估计之间的预期关系进行比较。

[0044] 图6和7进一步图示检测器121的操作。图6图示了当检测器121被用于处理具有73.2Hz的频率和0.3V的振幅的信号时的操作。每个检测器计算频率(上部曲线图)、振幅(中间曲线图)和频率拟合因子(下部曲线图),在这种情况下频率拟合因子是当前相位值与从缓冲器123中最老的样本是缓冲器中的最新样本时开始所存储的相位值之差。检测器121中有几个(例如,被调谐到大约100Hz和105Hz之间的那些检测器)产生实质上偏离73.2Hz的实际频率的频率估计。几个其它检测器121(例如,被调谐到大约87.5Hz以下的那些检测器,尤其是被调谐到大约85Hz以及被调谐到小于大约75Hz的那些检测器)产生与实际频率相当接近的频率估计值。但是,被调谐到大约73.2Hz的检测器121产生接近于它们被调谐到的频率的估计频率(基于波形分析器的计算)。而且,如中间曲线图所示,只有那些被调谐到大约73.2Hz的检测器产生接近于0.3V的实际振幅的振幅估计。另外,对于被调谐到大约72.3Hz的检测器121,频率拟合因子(即,当前相位值与在经调谐的频率处从一个周期前开始的存储的相位值之差)是最好的(在这种情况下最接近于零)。因此,具有最佳拟合因子的检测器121的波形分析器123的输出是对信号的实际频率、相位和振幅的良好估计。可以由处理器101用来识别最佳检测器121的另一个因素是由最佳检测器产生的计算频率接近检测器被调谐到的频率。而且,图6和7示出了仅在一个时刻的频率检测器输出。一些不接近实际频率的检测器可能暂时看起来产生具有低误差的输出(例如,对于图6中频率计算,参见在大约85Hz处的频率检测器)。但是,对于不接近实际频率的频率检测器,输出可以在相对短的时间内发生变化。相比之下,接近实际频率的检测器的误差水平一般会比那些不接近实际频率的检测器在时间上更稳定,同时振幅也低。这个特性也可以包括在用于选择接近实际频率的频率检测器的标准中和/或作为交叉检查以确认选择合适的频率检测器作为接近实际频率的频率检测器。

[0045] 除信号频率已改变为82.56Hz之外,图7是相似的。在这里再一次,具有最佳拟合因子的频率检测器121(例如,被调谐到大约82.56Hz的频率检测器)提供准确的信号振幅估计和准确的频率计算。而且,从被调谐到大约82.56Hz的检测器计算出的频率再次大约等于那

些检测器被调谐到的频率。因此,拟合因子为识别被调谐到接近信号实际频率的的检测器提供基础。

[0046] 处理器101适当地使用来自被调谐到接近实际频率的频率的一个或多个检测器121的计算出的相位和振幅以及经调谐的频率(例如,基于上面描述的频率拟合因子和其它标准)来确定实际传感器信号的频率、相位和振幅。如果期望,那么处理器101可以适当地被配置为挑选被调谐到最接近当前实际频率的频率的检测器121(例如,通过识别其当前相位计算与从缓冲器中最老的样本是缓冲器中的最新样本时开始所存储的相位计算之差最接近于零的检测器),并使用经调谐的频率以及由最接近的检测器计算出的相位和振幅作为频率、相位和振幅的最佳测量。

[0047] 但是,实际频率通常将在假设频率中的两个之间。在任何假设频率与实际频率之间很少会有非常接近的匹配。而且,当实际频率改变时,必然存在实际频率在两个最接近的假设频率之间的中途时间。因此,处理器被适当地配置为使用内插(例如,二次内插)来改善针对传感器信号的频率、相位和振幅所获得的值。这可以被用来将振幅误差从大约 10^{-3} V降低到大约 10^{-6} V。

[0048] 由处理器101针对来自最佳拟合检测器121的频率、相位和振幅获得的值适合用来测量流过流量计的流体的密度和/或质量流率。频率、相位和振幅的这些值也适合用来生成供给驱动器46a、46b中的一个或多个以振荡导管的驱动信号。

[0049] 与常规Coriolis流量计相比,本文所述的处理技术提供了几个不同的优点。与常规的Coriolis流量计频率跟踪相反,本文描述的流量计215不依赖过零点来跟踪频率。这至少出于几个原因而改善了流量计215的频率跟踪和准确性。因为低振幅数据点更易受到噪声影响,尤其是在多相流期间,所以传感器信号邻近过零点的部分不如传感器信号的其它部分准确。而且,常规的对过零点的依赖仅使用传感器信号的一小部分来跟踪频率。而且,用来确定传感器信号的振幅和相位的正交函数基于估计的频率,因此估计频率中的误差造成振幅和相位确定中的误差。

[0050] 常规的过零点技术的另一个限制是由于需要等待过零点而使得每个周期不能多于两个测量。在100Hz传感器信号的情况下,这意味着每次更新需要等待5ms。这会是重大的延迟,尤其是在多相流期间。

[0051] 与常规的过零点技术相反,本文描述的用于Coriolis流量计215的处理技术除了传感器信号的较低振幅部分之外还利用传感器信号的较高振幅部分来跟踪频率。因此,Coriolis计量器215的频率跟踪不易受噪声影响。而且,没必要等待过零点来执行更新。相反,更新可以在每个半周期内执行多次。如果期望,那么可以利用每个新的传入的数字样本执行更新。因此,每个周期有可能执行几百次更新。以这种速率执行更新的能力允许更好的频率跟踪,尤其是在多相流期间。

[0052] 以上描述说明了如何使用单个检测器121组来处理第一传感器信号。同一组检测器121也可以被配置为以相同的方式处理第二传感器信号。同样,也可以以相同的方式使用同一组检测器121来基于第一传感器信号和第二传感器信号处理第三信号(例如,第一传感器信号和第二传感器信号的加权和,第一传感器信号与第二传感器信号之差,和/或第一传感器信号和第二传感器信号的其它组合)。在一些情况下,可以期望仅使用可用信号之一来获得单个频率估计,然后使用这个频率来计算信号的振幅和相位。例如,可以期望使用从组

合的传感器信号获得的频率估计作为频率估计并且使第一传感器信号和第二传感器信号的振幅和相位计算基于那个频率。由于组合信号中降低的噪声,基于第一传感器信号和第二传感器信号的组合的信号可以提供频率的最佳估计。循环缓冲器123适当地存储要由检测器121组分析的所有信号,并且信号是由检测器组并行地分析的。处理器被配置为使用频率估计中的至少一个(例如,基于组合的传感器信号的分析的最佳频率)来确定流过导管的流体的密度。同样,处理器被适当地配置为使用来自第一传感器信号和第二传感器信号的相位数据来确定相位差,并基于相位差确定通过导管的相位差和质量流率。

[0053] 可替代地,Coriolis流量计215适当地包括一个或多个附加的检测器组,其适当地基本上与上述检测器组完全相同。如上所述,附加的检测器组用于以基本相同的方式处理第二传感器信号和组合的传感器信号。处理器101被适当地配置为使用来自检测器组的一个或多个频率值来确定流过导管的流体的密度。同样,处理器101被适当地配置为使用来自第一传感器信号和第二传感器信号的相位数据来确定通过导管的流体的质量流率。

[0054] 同时以两种模式驱动导管

[0055] Coriolis流量计215可选地被配置为同时以两种不同模式驱动导管18、20。常规的Coriolis流量计在操作期间以两种不同的弯曲模式使其导管振荡。参考图8,在传统的Coriolis流量计中,导管被驱动以一种模式(通常称为“驱动模式”)振荡,并且当流体流过振荡导管时与Coriolis效应相关的力以不同的弯曲模式(通常称为“Coriolis模式”)激励次级振荡。要认识到的是,上述检测器组处理可以被用于驱动导管18、20同时以两种弯曲模式振荡。这对于对导管18、20的振荡施加更大的控制可能是期望的,这可以在困难的操作条件期间(诸如在多相流期间)产生驱动信号的更好跟踪和更准确的测量。

[0056] 如图9中示意性示出的,处理器101适当地包括一个或多个滤波器151,其被配置为将第一弯曲模式(例如,传统驱动模式)下的传感器信号的频率成分153与第二弯曲模式155(例如,传统上称为Coriolis模式)下的传感器信号分离。基本上如上面所指示的,包含“驱动模式”频率的信号的部分由检测器组121处理。处理器101包括第二检测器组121',其被配置为处理包含“Coriolis模式”的信号的部分。除了对于Coriolis模式的不同频率成分可能需要调整第二检测器组121'的频率范围(例如,通过选择具有不同尺寸的循环缓冲器)来优化第二检测器组之外,用于Coriolis模式的检测器组121'可以基本上与上述检测器组完全相同。

[0057] 处理器101适当地使用从第一检测器组121和第二检测器组121'获得的频率、相位和振幅值来确定流过导管的流体的质量流率和密度。关于在“Coriolis模式”下振荡的频率、相位和振幅的附加信息可以提供附加的输入(例如,用于神经网络或经验模型),其可以产生更准确的密度和质量流率测量。

[0058] 可替代地,有可能直接根据从分析“Coriolis模式”频率成分的检测器组获得的频率、相位和/或振幅值来计算附加的质量流率和/或密度测量值,并且对这些测量值和其它测量值求平均或以其它方式组合这些测量值和其它测量值,以获得改善的结果。例如,正如与Coriolis效应相关联的力在驱动模式下使振荡失真以产生相位差,也将存在与Coriolis效应相关联的、可以在Coriolis模式下使振荡失真以产生第二相位差的力。处理器适当地被配置为检测与“驱动模式”相关联的相位差和与“Coriolis模式”相关联的相位差并且使用这两个相位差来确定质量流率。

[0059] 图10是图示如上所述使用“驱动模式”频率计算的密度与也如上所述使用“Coriolis模式”频率计算的密度之比根据在从0.5kg/s到3.0kg/s范围的各种流率的密度下降(其可以与两相流的开始相关联)的曲线图。在这个比率中存在基本上线性的关系,从大约0到大约30%的密度下降,尤其是从大约0到大约20%的密度下降。这指示驱动模式密度与Coriolis模式密度之比可以与两相流的开始相关。这仅提供了处理器101可以如何使用来自“驱动模式”的测量结合来自“Coriolis模式”的测量来导出可以改善准确性和其它性能标准的关系的一个示例。

[0060] 处理器101还适当地具有驱动信号发生器,该驱动信号发生器被配置为将驱动信号输出到一个或多个驱动器46s、46b,驱动器46s、46b包括被选择以第一频率(例如,在“驱动模式”的频率)驱动导管的振荡的第一部件153和被选择为以第二频率(例如,在“Coriolis模式”的频率)驱动导管的振荡的第二部件155。而且,驱动信号发生器被适当地配置为将第一部件和第二部件彼此并发地组合,使得(一个或多个)驱动器同时以第一弯曲模式(例如,“驱动模式”)和第二弯曲模式(例如,Coriolis模式)驱动导管。例如,本文描述的Coriolis流量计215具有两个驱动器46a、46,并且驱动信号发生器被适当地配置为向每个驱动器供给双模驱动信号。对于在具有两个驱动器的Coriolis流量计的情况下的驱动模式,驱动信号需要彼此不同相。但是,对于以所谓的Coriolis模式驱动,驱动信号应当是同相的。因此,使用d1来指与驱动模式对应的驱动信号的分量并且用d2来指与Coriolis模式对应的驱动信号的部分,处理器101被适当地配置为向驱动器之一供给包括d1+d2的信号并且向另一个驱动器提供包括-d1+d2的信号。可替代地,在不脱离本发明的范围的情况下,可以将双模驱动信号供给两个驱动器中的仅一个驱动器。而且,使用本文描述的技术,可以同时以两种弯曲模式驱动仅具有单个驱动器的Coriolis流量计。

[0061] 因为Coriolis流量计215以“驱动模式”并且还以“Coriolis模式”驱动导管18、20,所以可以更精确地控制导管的运动,尤其是在困难的操作条件期间。处理器101同时适当地控制两种弯曲模式下的振荡的振幅。例如,适当地调整驱动信号以使用PID控件来控制第一振动弯曲模式和第二振动弯曲模式下导管18、20的振幅。合适的PID控件有两个输入(每个弯曲模式下的振荡的振幅有一个)和两个输出(每个弯曲模式下的驱动电平有一个)。PID控件适当地选择驱动电平,以在相应设定点处维持两个不同弯曲模式下的振荡的振幅。可以根据需要彼此独立地调整驱动电平,以将每个弯曲模式下的振荡维持在其期望的水平。

[0062] 基于两个流量计之间的时间相关性的测量

[0063] 上述Coriolis流量计215或类似的Coriolis流量计可以与另一Coriolis流量计215'组合,以产生用于基于两个Coriolis流量计的测量之间的时间相关性来计量多相流体的流的系统171。如图11中所示,在这个实施例中基本上彼此完全相同并且与上述Coriolis流量计215完全相同的第一Coriolis流量计215和第二Coriolis流量计215'安装在同一管道181中的不同位置处。Coriolis流量计215、215'中的每一个输出流经相应流量计的流体的时变质量流率测量结果和流经相应流量计的流体的时变密度测量结果。处理器183适当地包括相关器,其将来自第一Coriolis流量计215的时变质量流率测量结果和时变密度测量结果中的至少一个与来自第二Coriolis流量计215'的相应时变质量流率或时变密度测量结果进行比较,并确定对应测量结果之间的时间延迟。例如,图12示出了来自流量计215、215'的时变质量流率测量结果的对应部分中的0.5s延迟。处理器183使用所确定的时间延

迟来导出管道181中的多相流的成分的估计速度。

[0064] 测量系统171使用估计速度来校正质量流率和密度测量结果中的至少一个。例如，系统171适当地使用估计速度来表征多相流体的气相和液相之间的滑移并且根据该滑移校正质量流率和/或密度测量。一般而言，与质量流率测量结果相关联的延迟与液相速度相关，而与密度测量结果相关的延迟与气相速度相关。液相速度估计可以被用于校正质量流率和/或密度测量结果。气相速度也可以被用于校正质量流率和/或密度测量结果。如果期望，那么可以组合使用液相速度估计和气相速度估计，以提供对质量流率和/或密度测量结果的校正。校正可以以许多方式导出，包括通过使用神经网络和/或经验模型。如图11中所示，系统171适当地使用附加信息，包括来自压力和温度传感器的集合185及其它传感器187的压力和温度测量结果，作为输入来确定校正。而且，当流体进入流量计215、215'时确保两相流的良好混合会是有益的。因此，图11中所示的系统171包括与每个流量计215、215'相邻并在其上游的流量调节器189。

[0065] 以下示例涉及Coriolis流量计215，特别是处理器101，如何使用各种模拟的信号进行操作的说明。这些示例说明了各种条件下的健壮性能。这些示例还说明了如何实现各种校正来改善性能。

[0066] 图13-16示出了处理器101在与频率改变对应的频率改变的简化模拟期间的操作，频率的改变可以在导管从空到充满液体的过渡期间遇到。频率在0.5s内从100Hz降至85Hz。图13中的上部曲线图示出在频率响应中存在一个周期的延迟，这导致下部曲线图中的误差。图14和15示出，在振幅和相位差响应中也存在与半周期延迟相关联的误差。图16示出了在频率改变开始时测量信号的误差。而且，图13-16示出，在与快速改变（诸如在频率扫描期间频率的快速改变）相关联的许多测量中存在结构化的调制误差。

[0067] 图17-22图示了在进行以下补偿之后处理器101的性能的改善。首先，补偿动态响应，以解释振幅和相位差的半周期延迟以及频率响应中的全周期延迟。另一种补偿是使用基于数据的最后一个周期的二次外推(extrapolation)来改善测量。另外，调制误差得到补偿。其结果是图17-22上下部曲线图中所表示的误差低于未补偿示例的对应曲线图中的误差。补偿总体上是成功的，但在快速过渡的开始和结束时没有那么成功。

[0068] 图22-26图示了处理器101对频率、振幅和相位差的模拟同时改变的响应。频率从100Hz下降到85Hz，振幅从0.3V下降到0.05V，并且相位差从0度增加到4度，全部在0.5秒内。这表示对用液体填充流量计期间可能经历的条件更真实模拟，不仅谐振频率改变（类似于模拟的信号中从100Hz到85Hz的下降），而且导管上的阻尼增加有可能导致振荡振幅的下降（类似于模拟的信号中从0.3V到0.05V的振幅下降），而流率从零快速改变到正值并由此造成相位差的突然增加（类似于模拟的信号中从0度到4度的相位差增加）。应用与图17-21中使用的补偿类似的补偿。再次，补偿一般而言对于最小化误差是成功的，但在快速过渡期的开始和结束时没有那么成功。

[0069] 图27示出了对从100Hz到85Hz的频率阶跃改变的响应。这种瞬时改变不太可能由与现实生活中的流动条件相关联的任何物理改变引起，但是模拟阶跃改变被用于测试系统101对非常突然的改变的健壮性。图28示出了对从0.3V到0.05V的振幅阶跃改变的响应。图29示出了对从零度到4度的相位差阶跃改变的响应。图27-29的下部曲线图中的误差信号示出，与过渡相关联的误差被限制到改变的两个周期内。相反，常规的Coriolis流量计处理器

通常需要大约300ms才能从这些阶跃改变中恢复。因此,图27-29中所示的测试证明,对于突然的改变,系统101比传统Coriolis流量计显著更强健。

[0070] 图30-35图示了处理器101对具有100Hz的稳定频率和1度的稳定相位差的信号的响应。信号的振幅是在10Hz处调制的 $0.25V \pm 0.05V$,10Hz是大约驱动频率的10%。图30-35上的下部曲线图中的误差信号说明跟踪一般而言是相当好的。但是,如前所述,误差在过渡期的开始和结束最高,并且在模拟的信号在整个调制过程中信号中存在各种较小的调制误差。通过补偿这些误差,可以有可能进一步改善性能。例如,图31示出了未校正的振幅误差,并且图32示出了校正后的振幅误差,该误差显著更小。

[0071] 图36-38图示了在模拟两相流期间处理器101的性能。模拟的信号频率在90Hz左右随机变化。振幅在0.1V左右随机变化。相位差在2度左右随机变化。测得的频率、振幅和相位差与模拟的信号很好地匹配。这指示在两相流期间处理器101对这些模拟条件的性能与现有Coriolis流量计的处理器相比更有利。

[0072] 当介绍本发明的各方面或其实施例的要素时,冠词“一”、“该”和“所述”旨在意味着存在一个或多个该要素。术语“包括”、“包含”和“具有”旨在是包含性的并且意味着除了列出的要素之外还可以存在附加的要素。

[0073] 鉴于以上内容,将会看到,实现了本发明的各方面的几个优点并且获得了其它有利的结果。

[0074] 并非所有图示或描述的所绘出的部件都是需要的。此外,一些实现和实施例可以包括附加的部件。在不脱离本文阐述的权利要求的精神或范围的情况下,可以对部件的布置和类型进行变化。此外,可以提供不同的或更少的部件,并且部件可以被组合。可替代地或此外,部件可以由若干部件来实现。

[0075] 以上描述以示例而非限制的方式说明了本发明的各方面。本描述使本领域技术人员能够制作和使用本发明的各方面,并且描述了本发明的各方面的若干实施例、适应、变化、替代方案和使用,包括目前被认为是执行本发明的各方面的最佳模式的内容。此外,应当理解的是,本发明的各方面在应用中不限于在以下描述中阐述或在附图中图示的部件的构造和布置的细节。本发明的各方面能够具有其它实施例并且能够以各种方式来实践或执行。而且,将理解的是,本文使用的措辞和术语是为了描述的目的,而不应当被认为是限制性的。

[0076] 已经详细描述了本发明的各方面,清楚的是,在不脱离如所附权利要求定义的本发明的各方面的范围的情况下,可以进行修改和变化。预期在不脱离本发明的各方面的范围的情况下可以对上述结构、产品和处理进行各种改变。在前面的说明书中,已经参考附图描述了各种优选实施例。但是,显然,在不脱离如以下权利要求中阐述的本发明的方面的更宽范围的情况下,可以对其做出各种修改和改变,并且可以实现附加的实施例。因而,说明书和附图应当被认为是说明性的而不是限制性的。

[0077] 提供摘要是为了帮助读者快速确定技术公开的性质。提交时的理解是,它将被用来解释或限制权利要求的范围或含义。

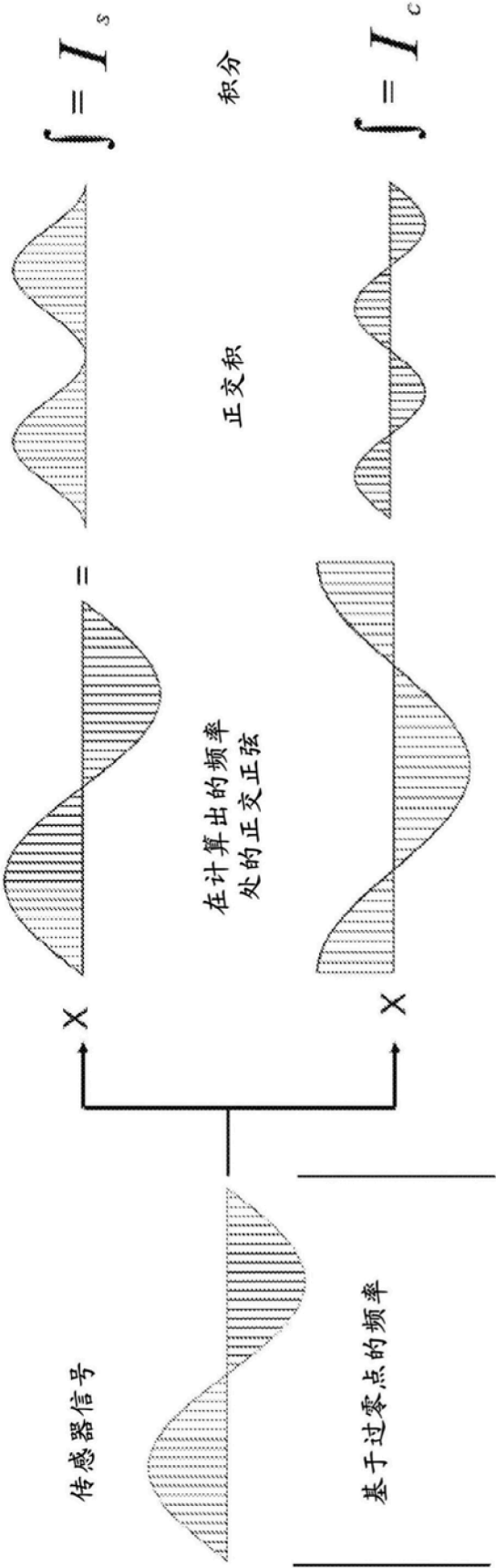


图1

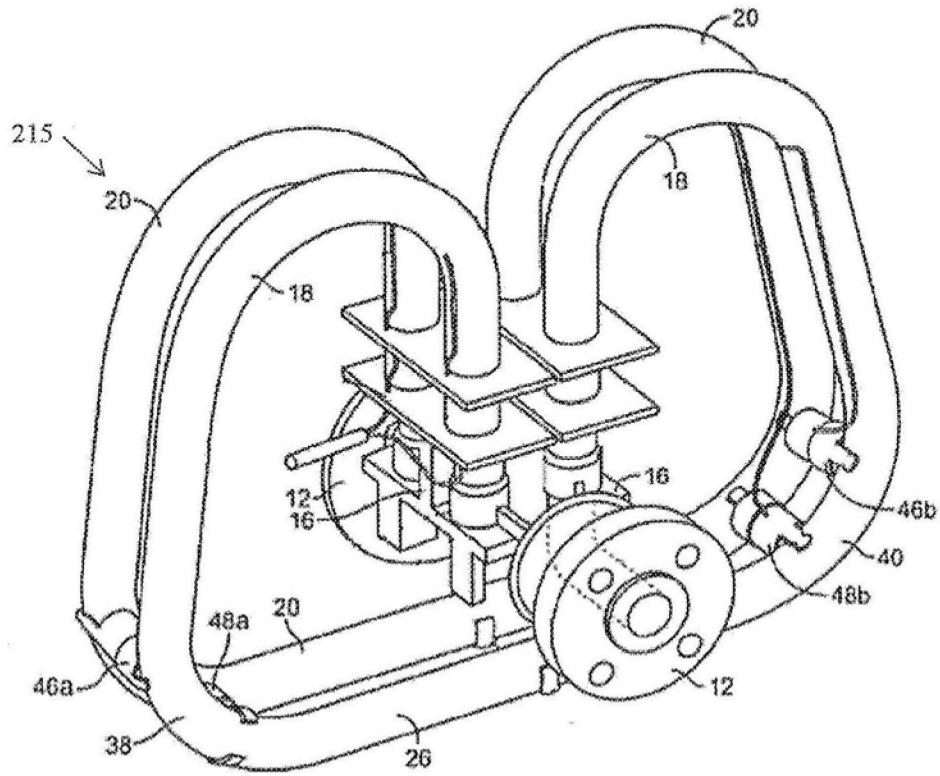


图2

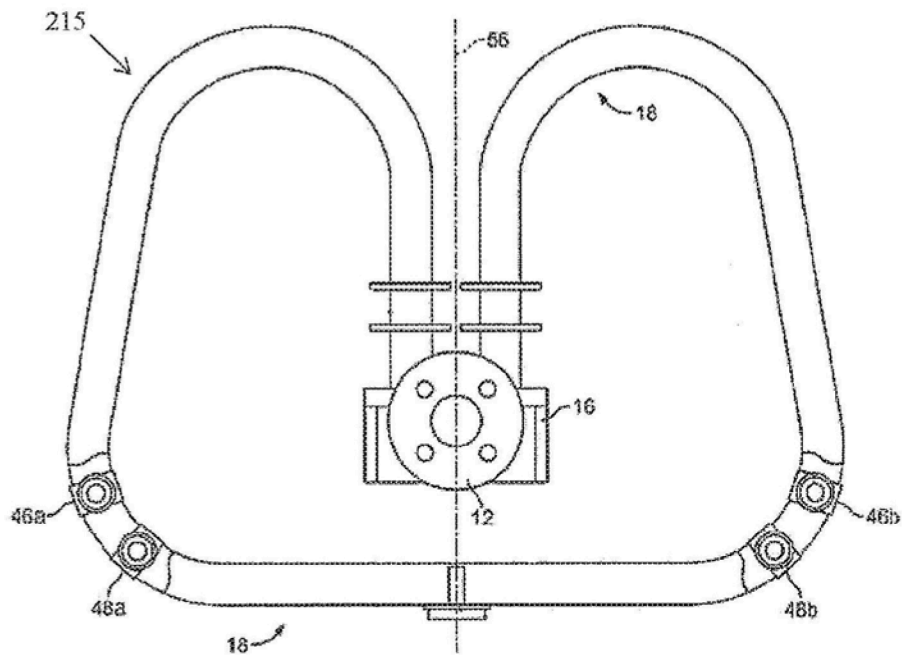


图3

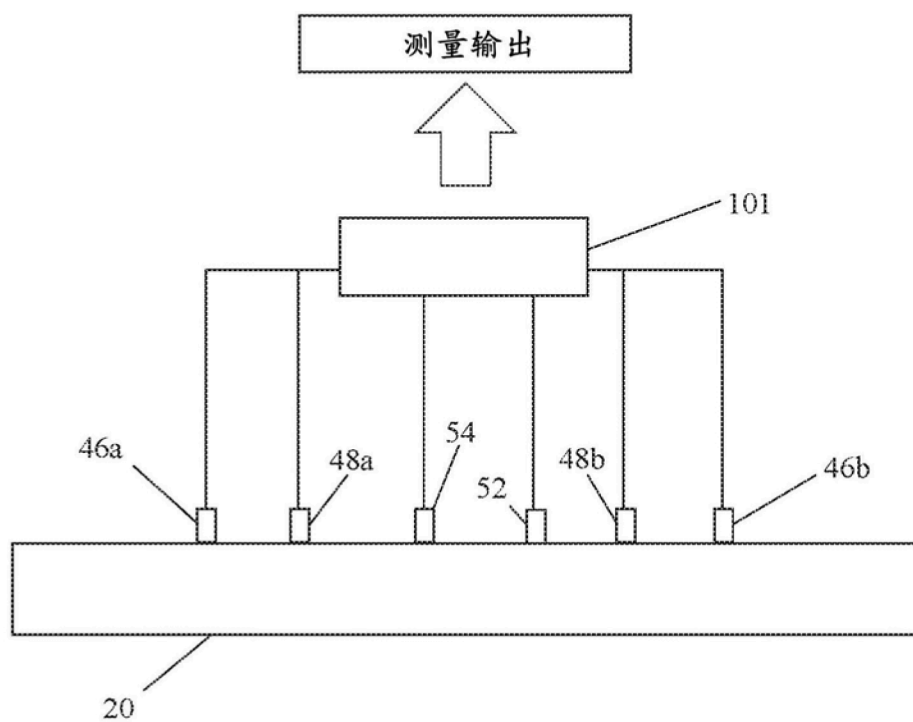


图4

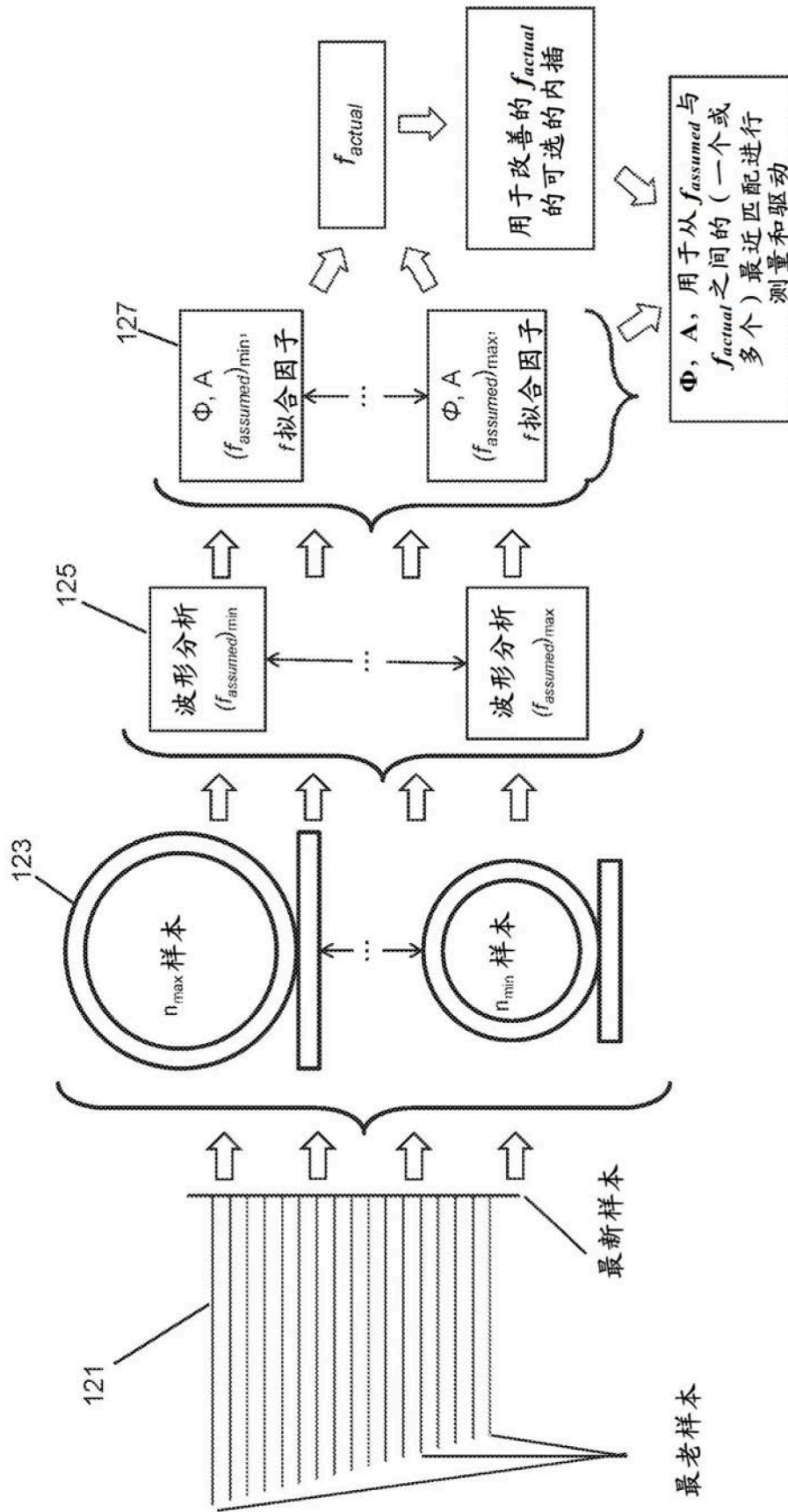


图5

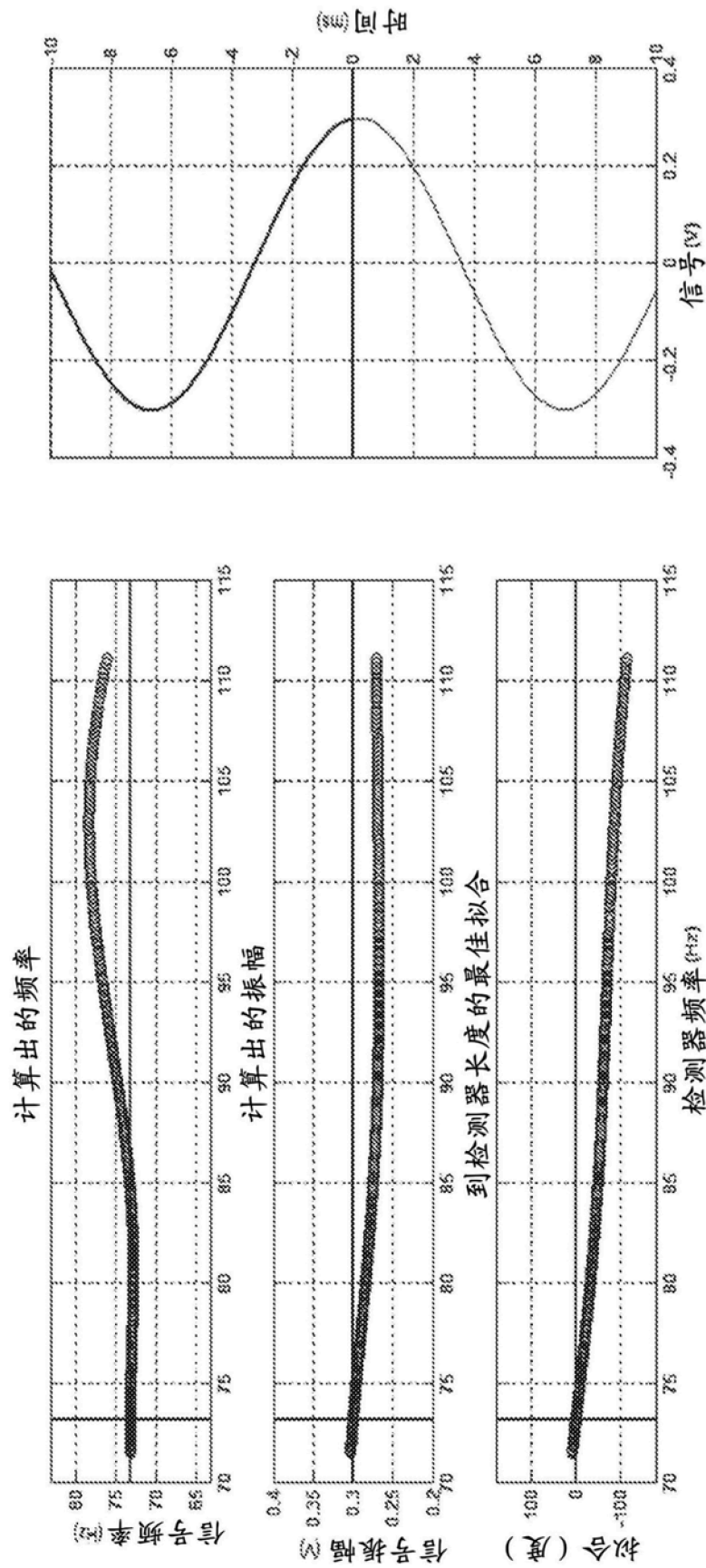


图6

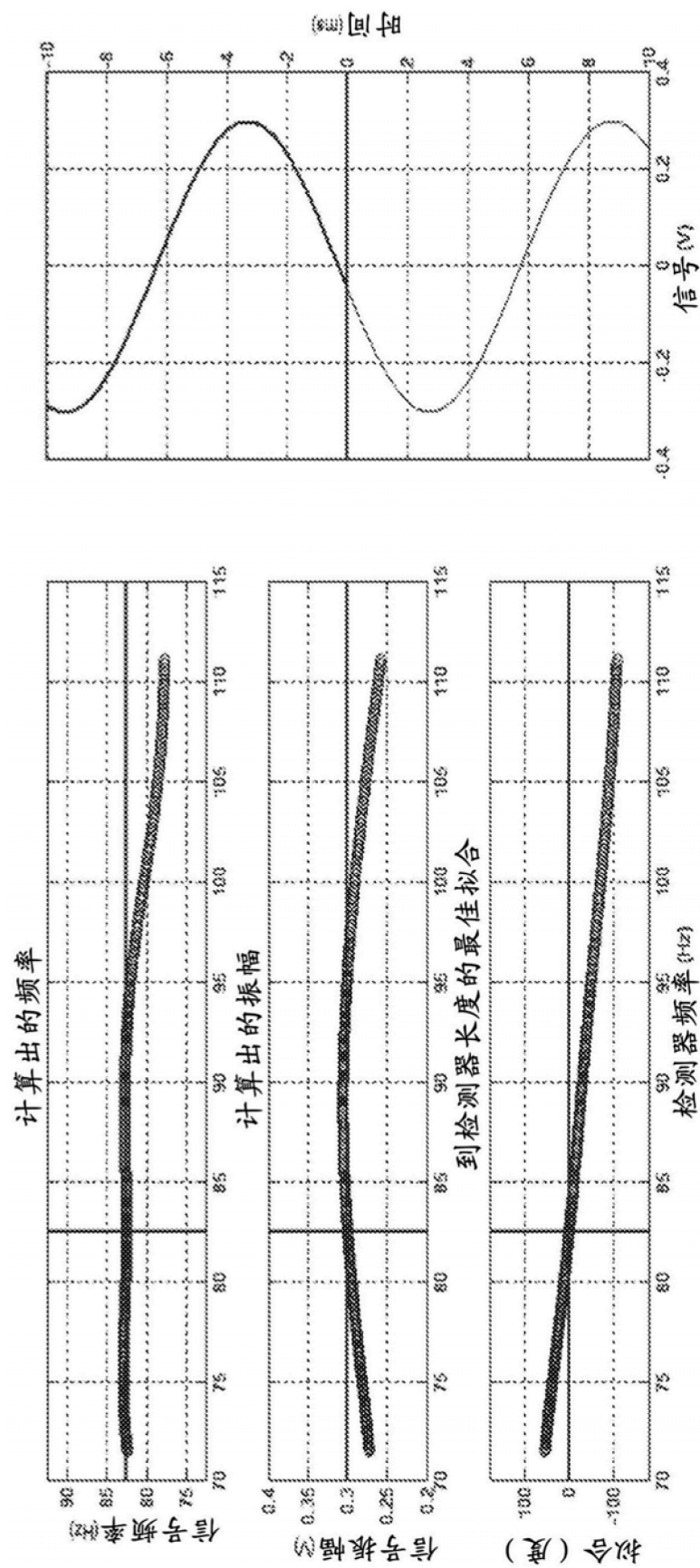


图7

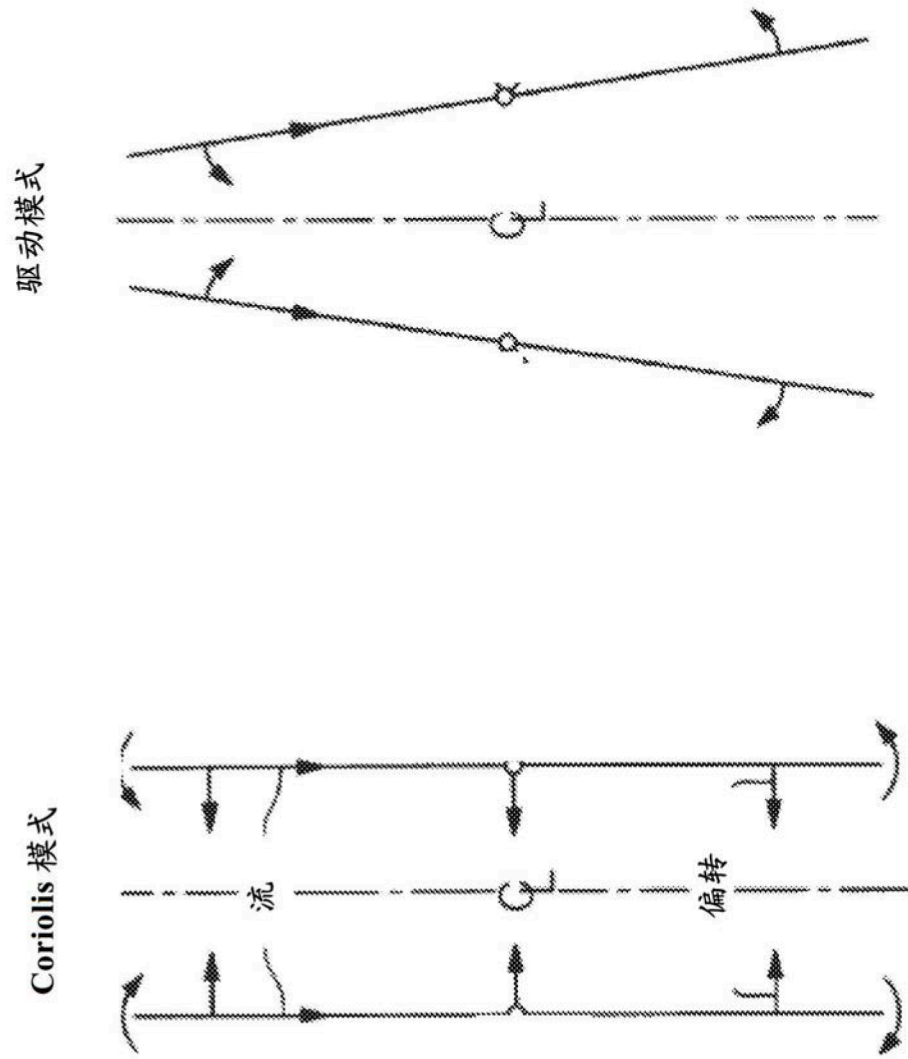


图8

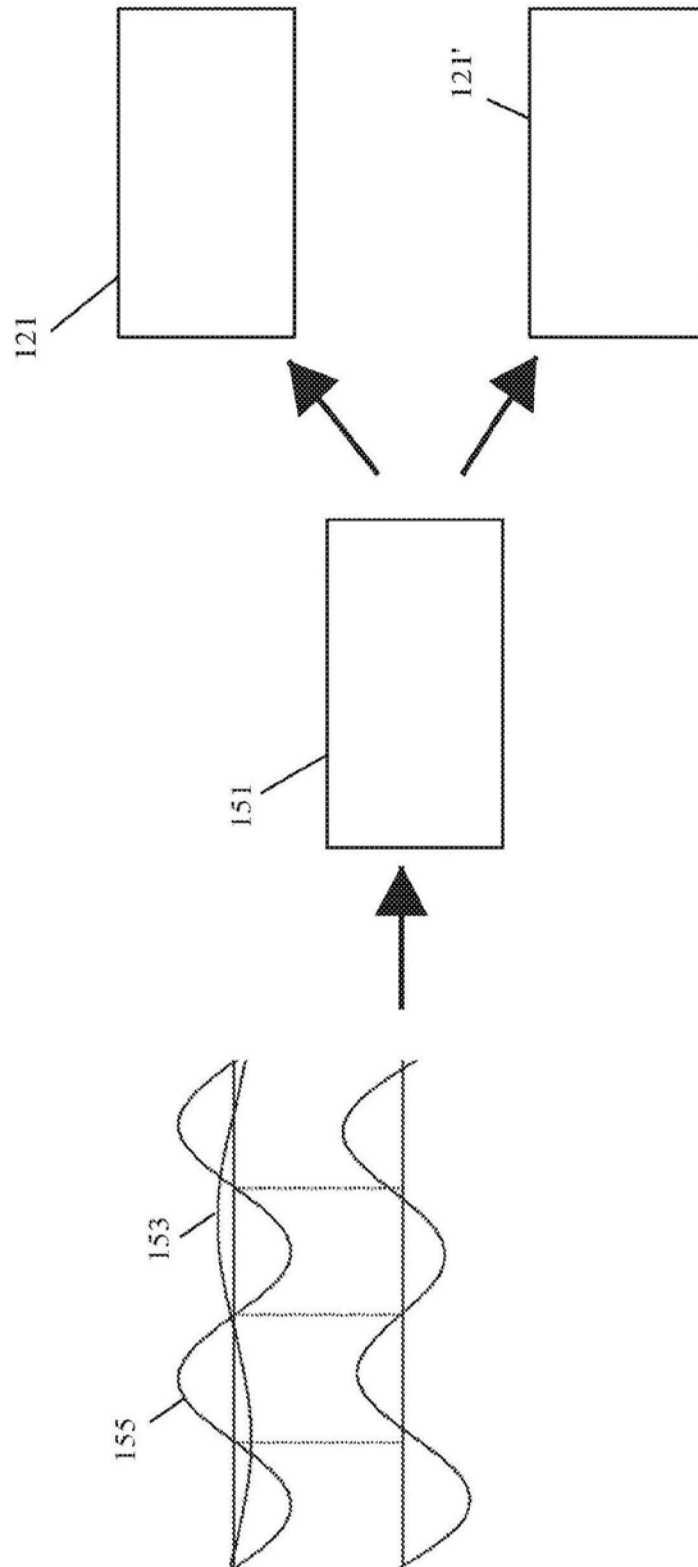


图9

驱动模式密度与 Coriolis 模式密度之比 - 空气&水, 1''流量计

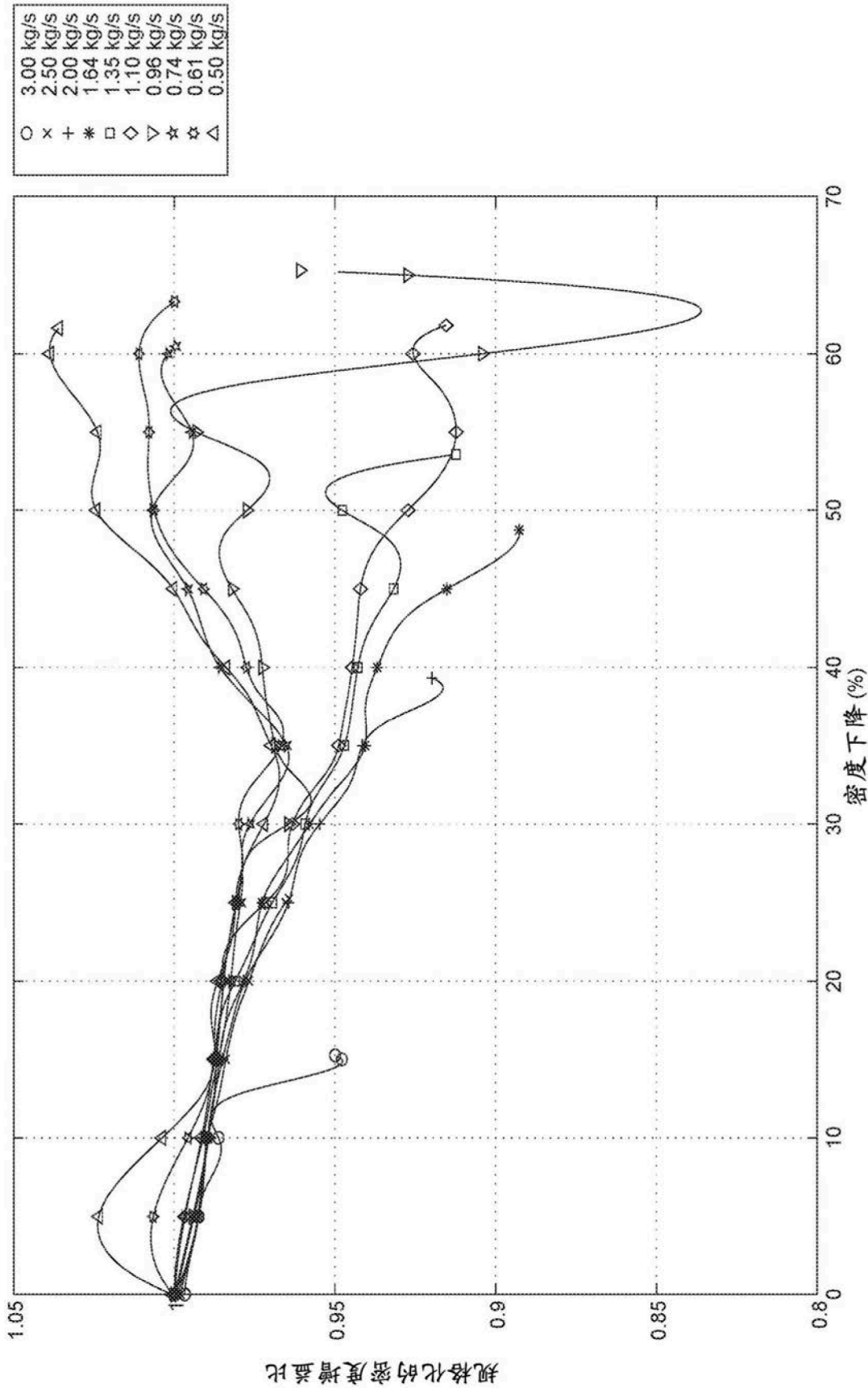


图10

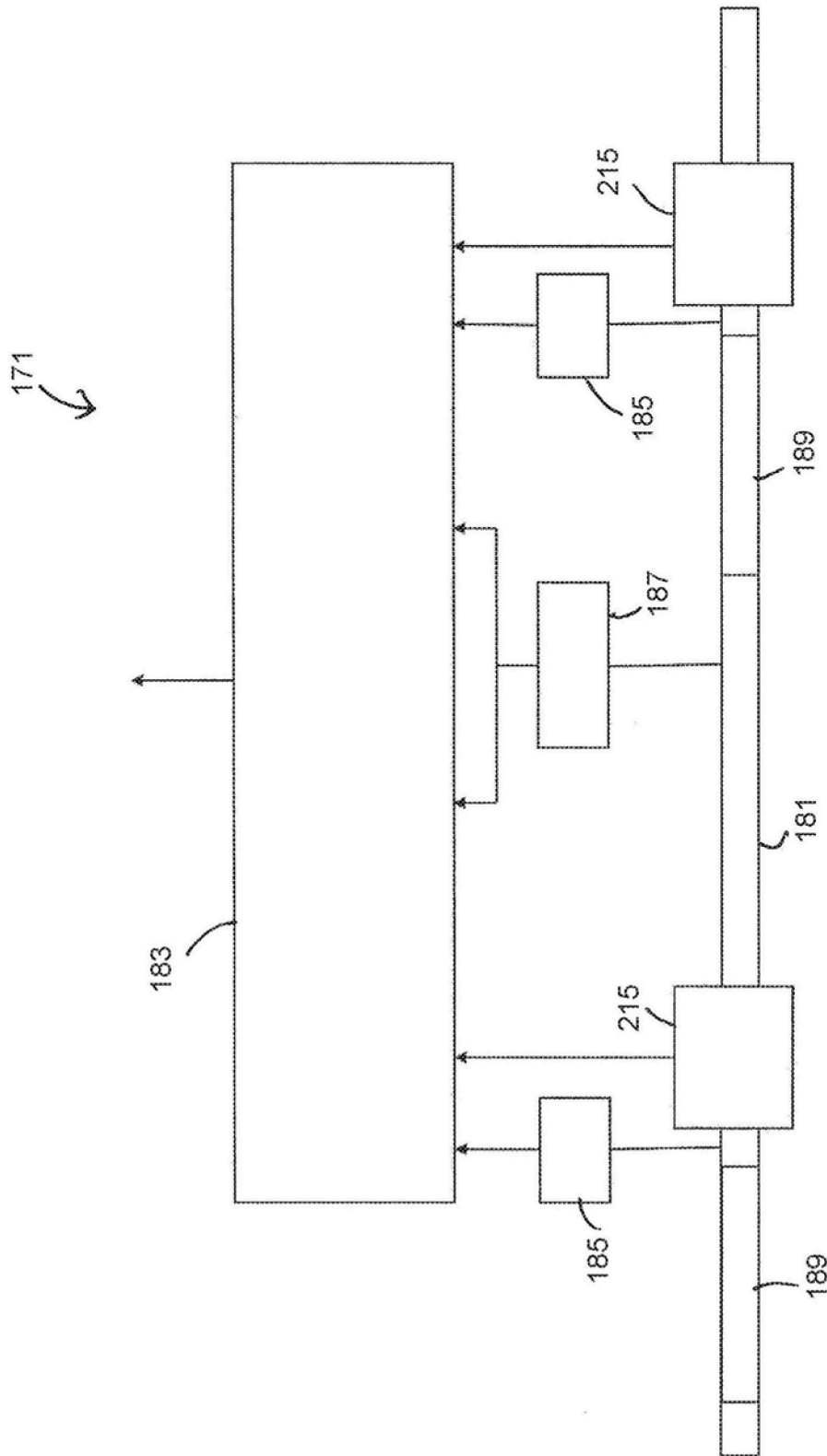


图11

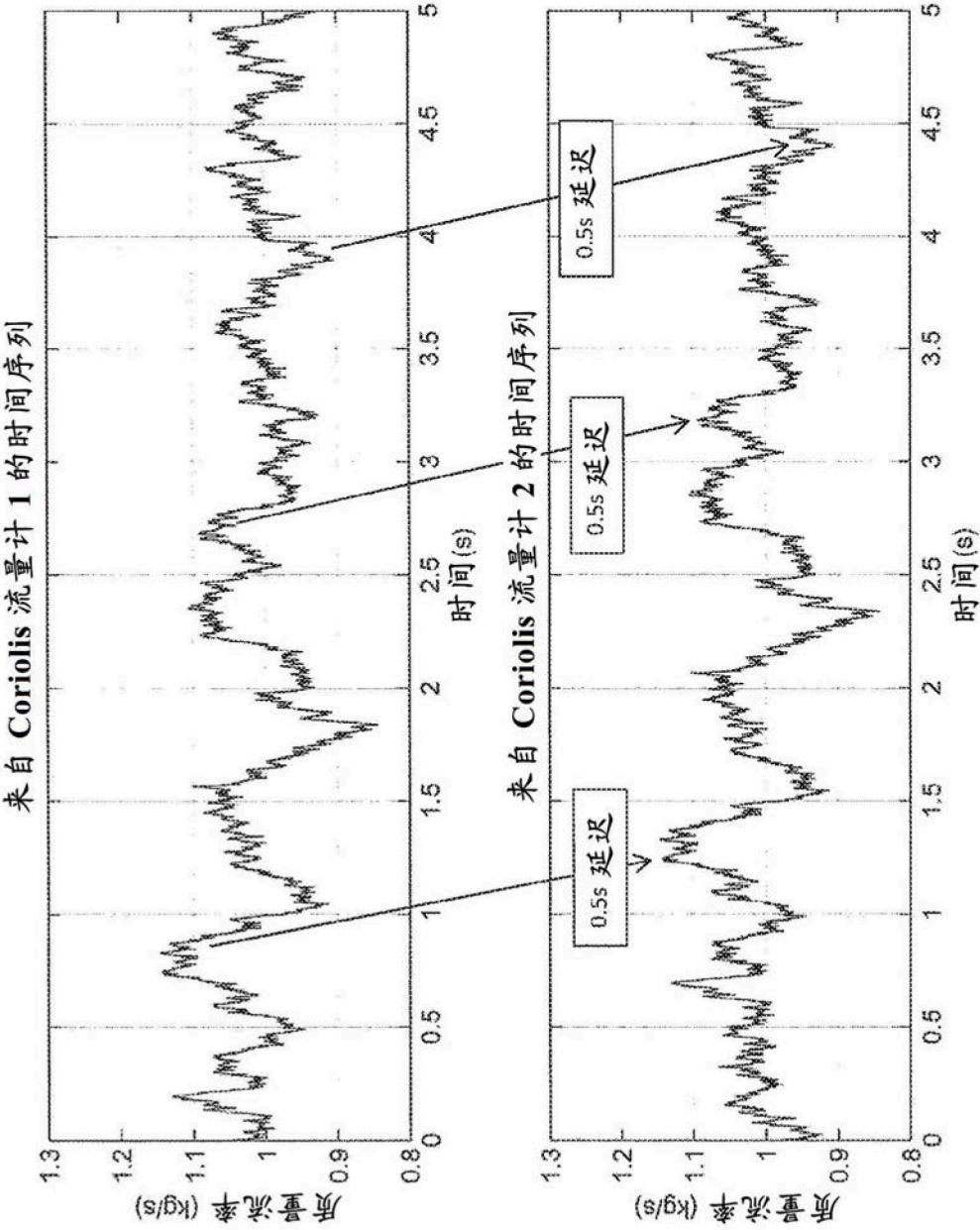


图12

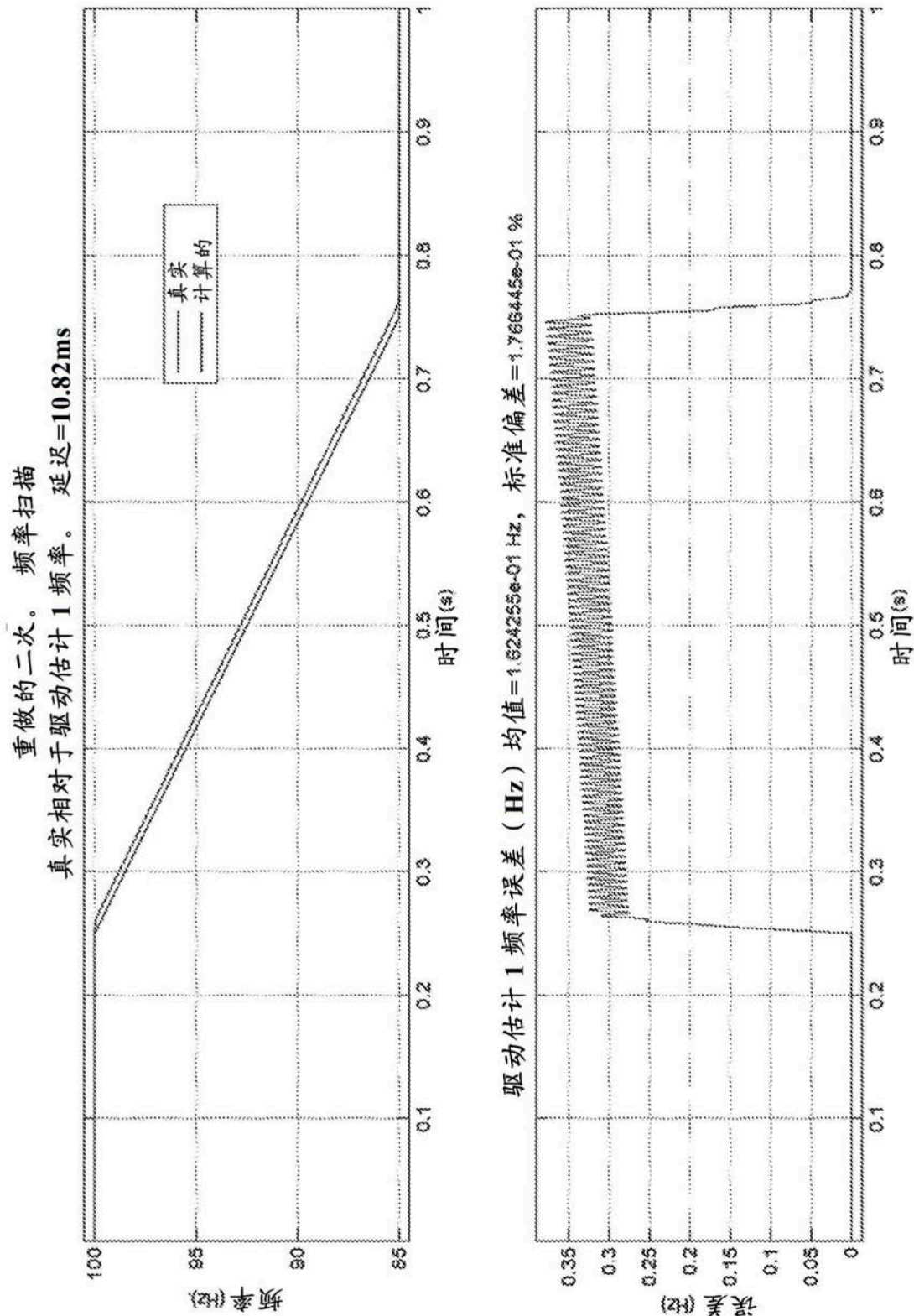


图13

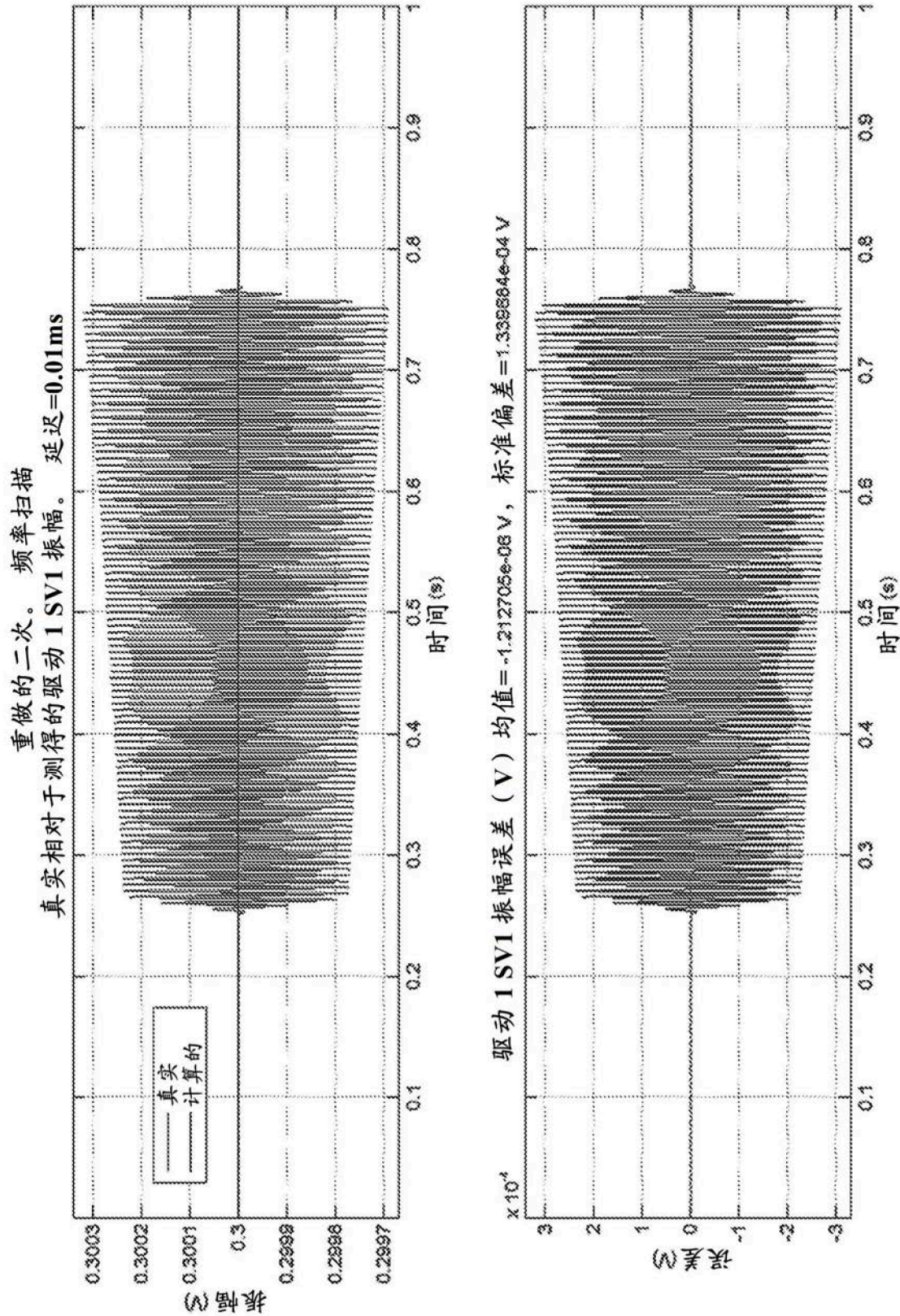


图14

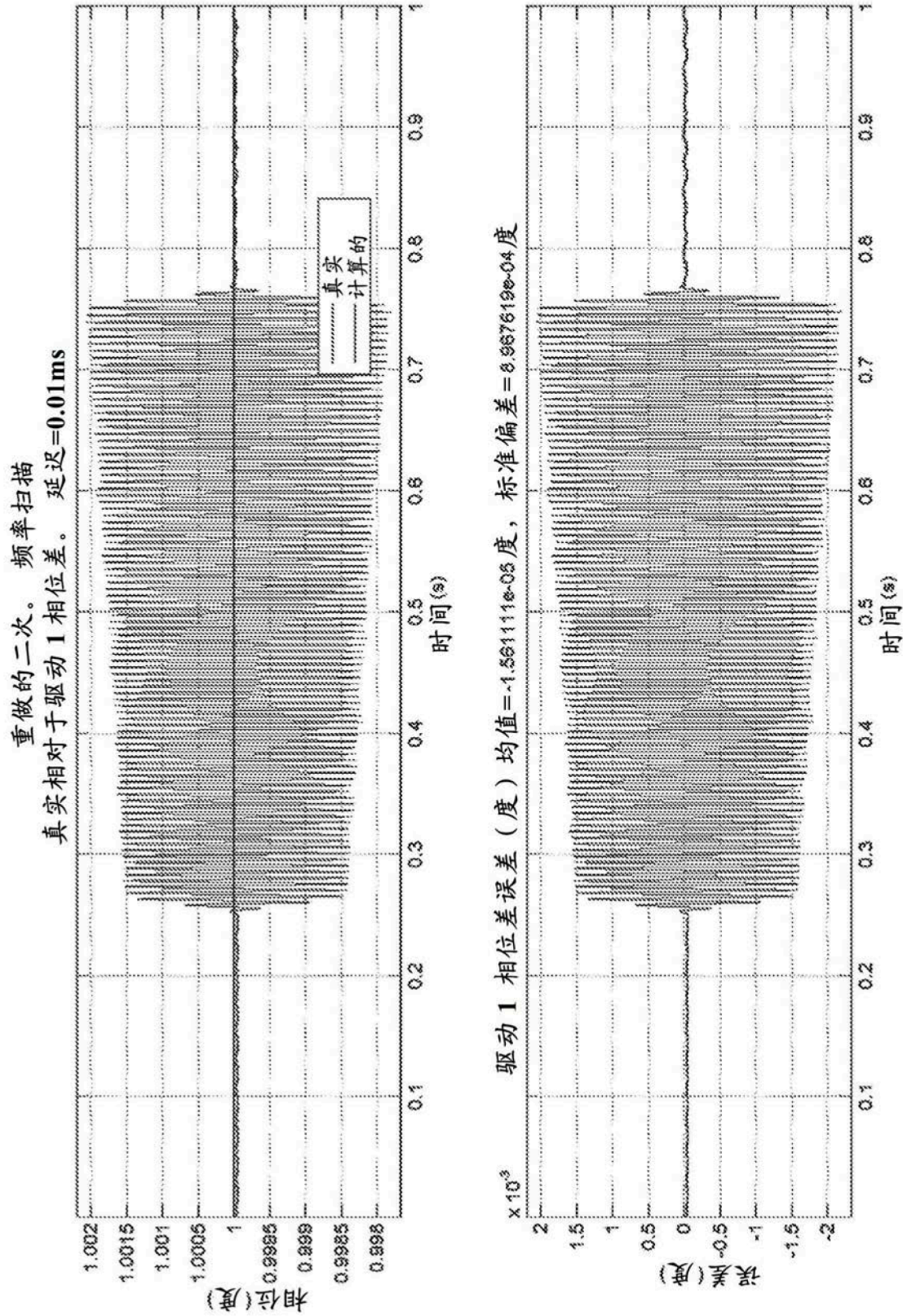


图15

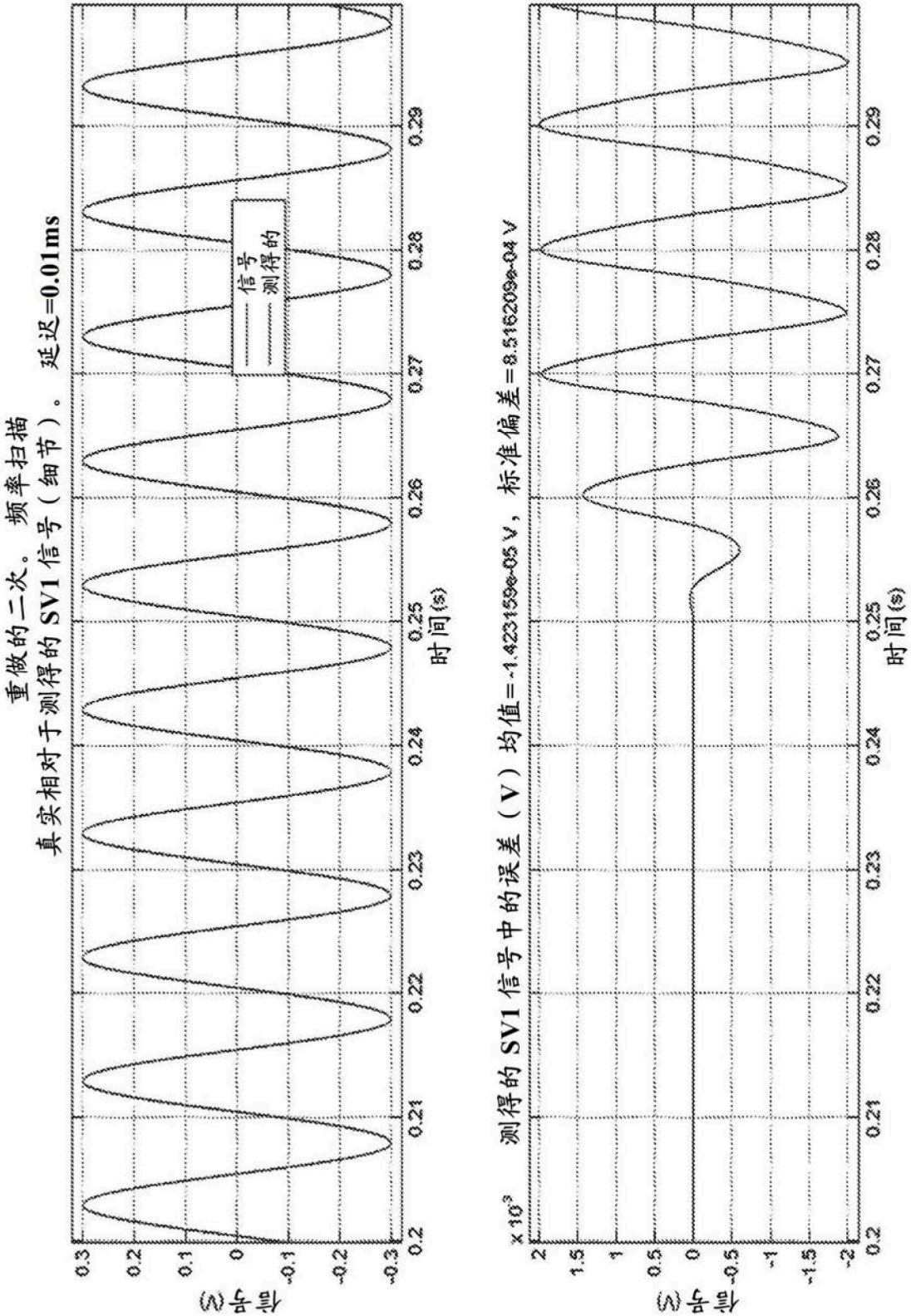


图16

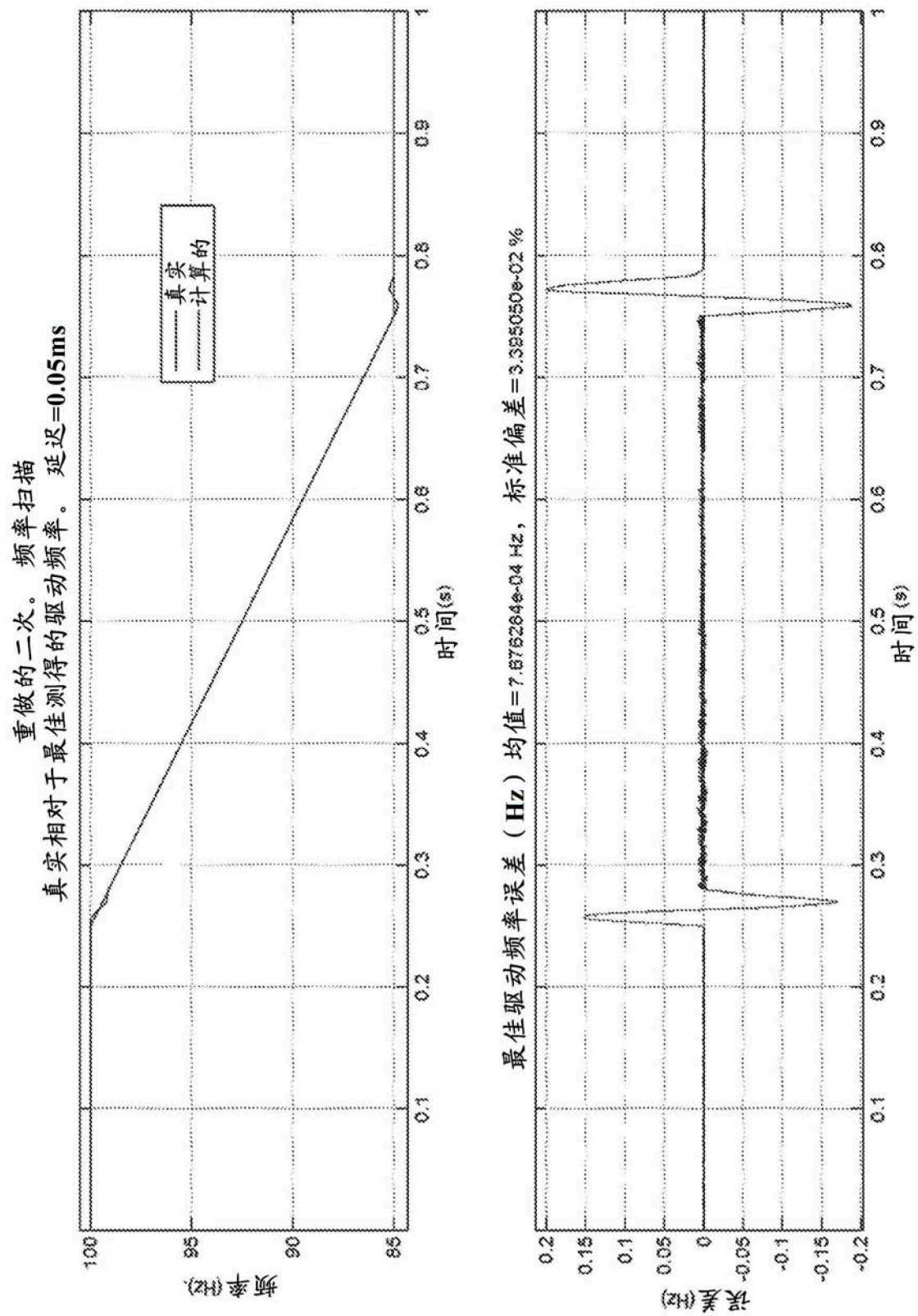


图17

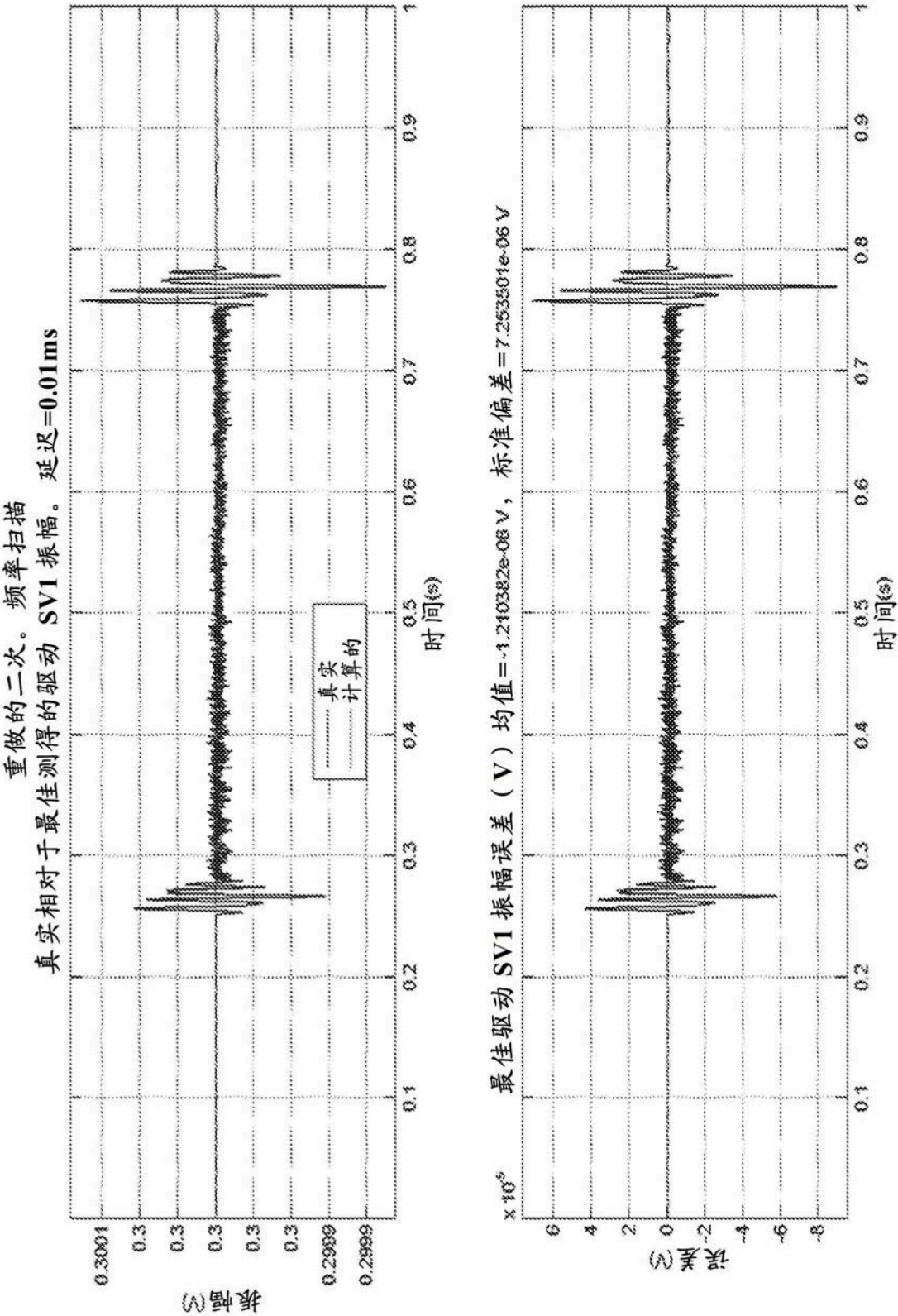


图18

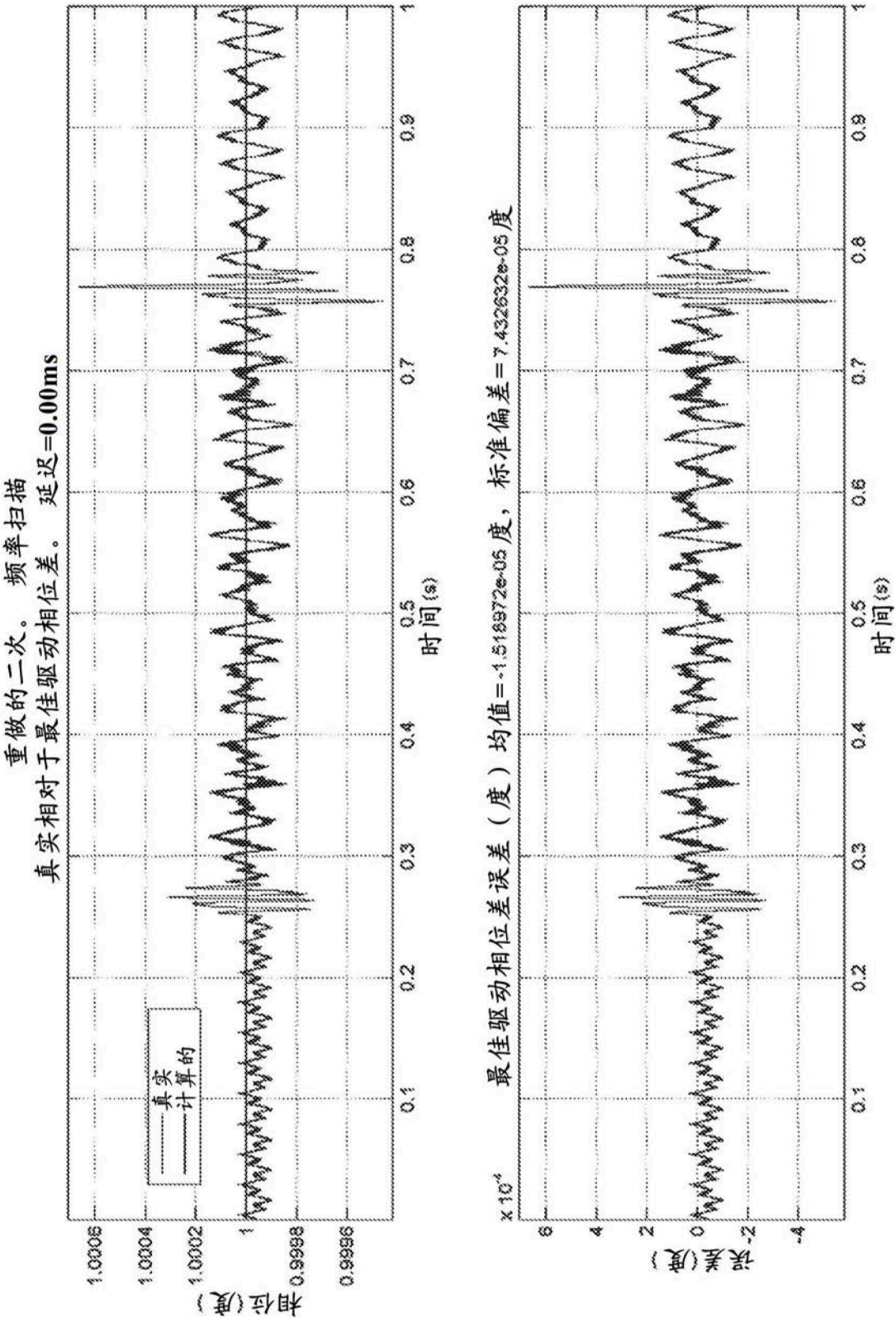


图19

重做的二次。频率扫描
真实相对于最佳驱动模式 SV1 信号

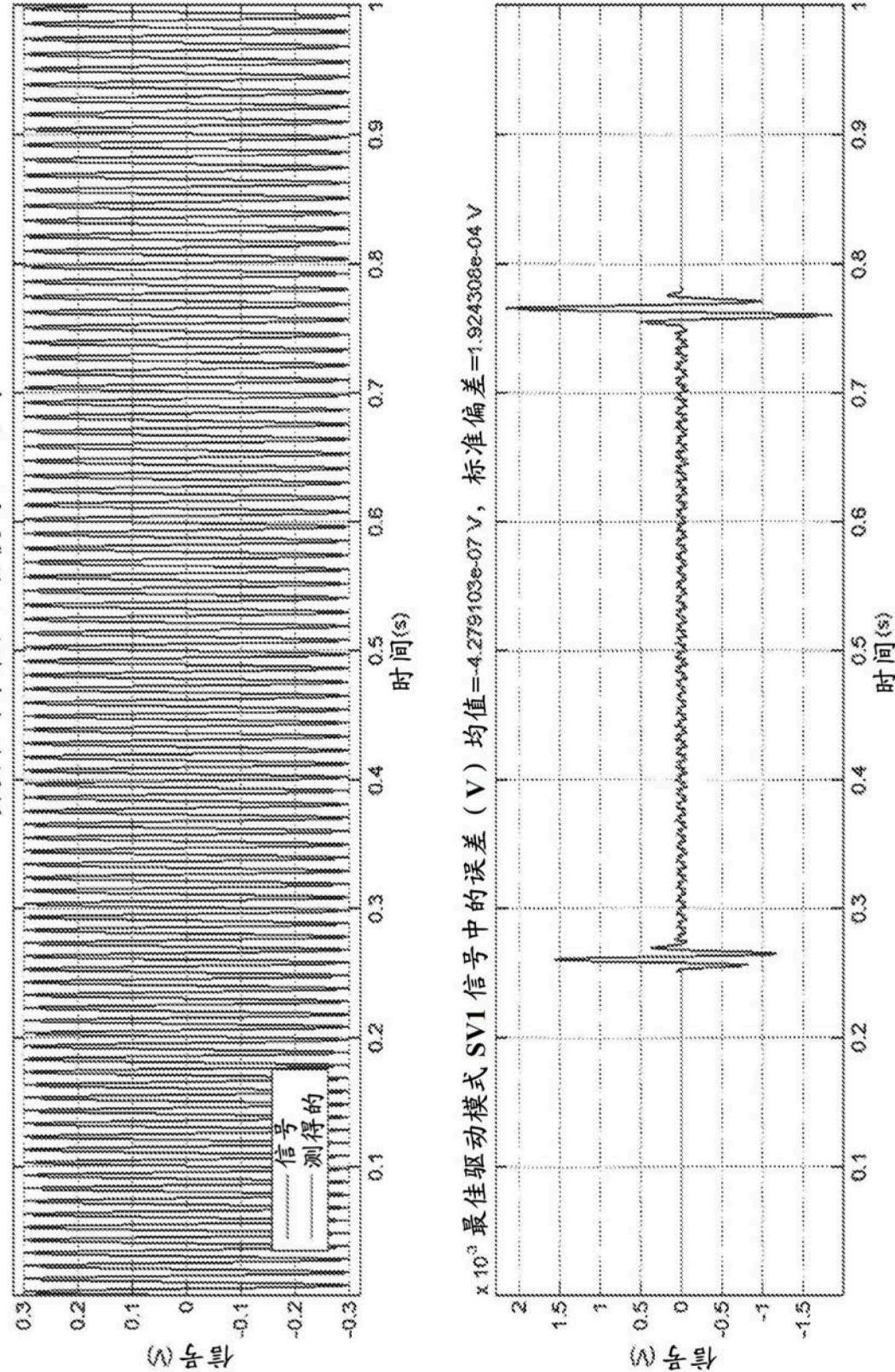


图20

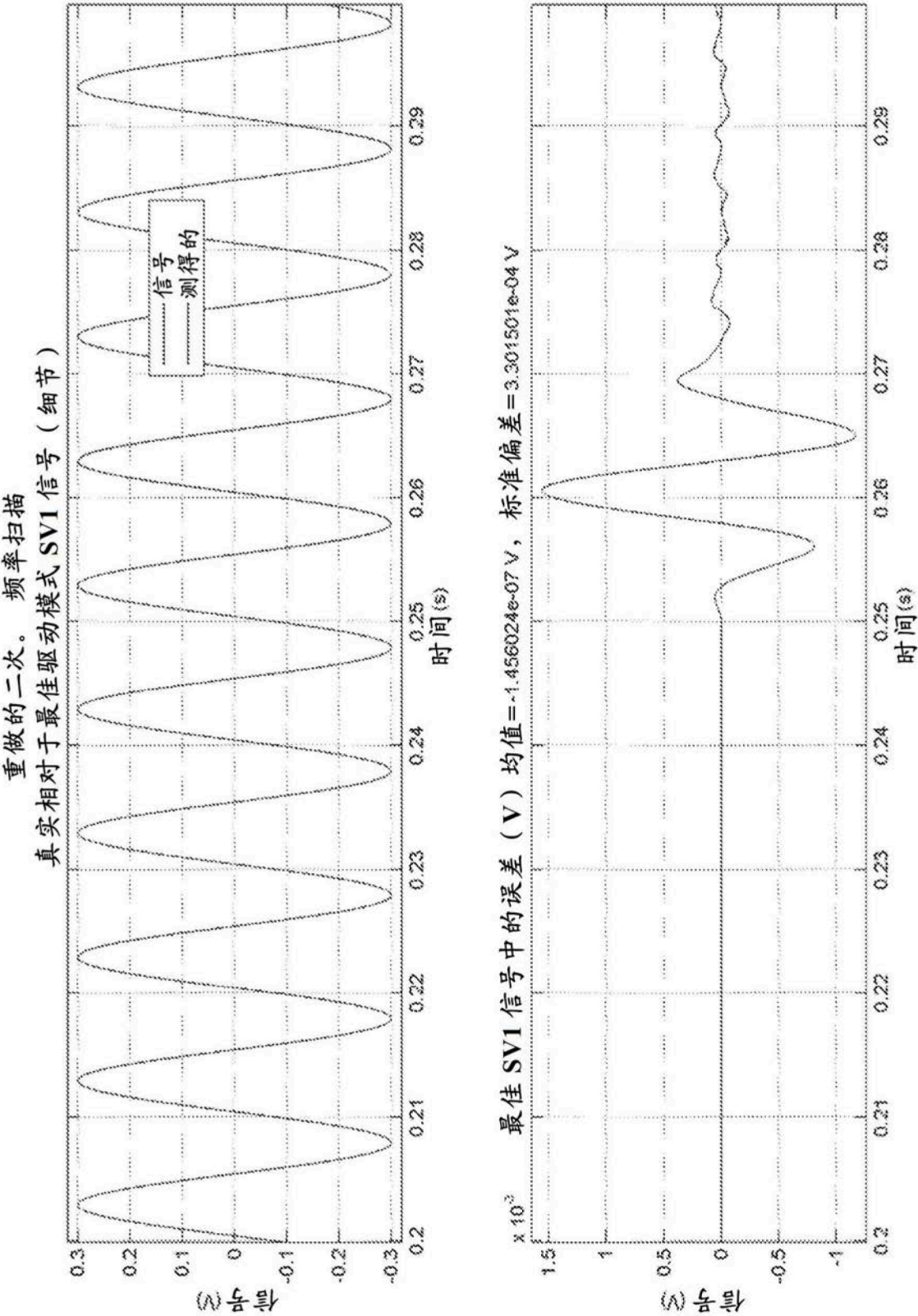


图21

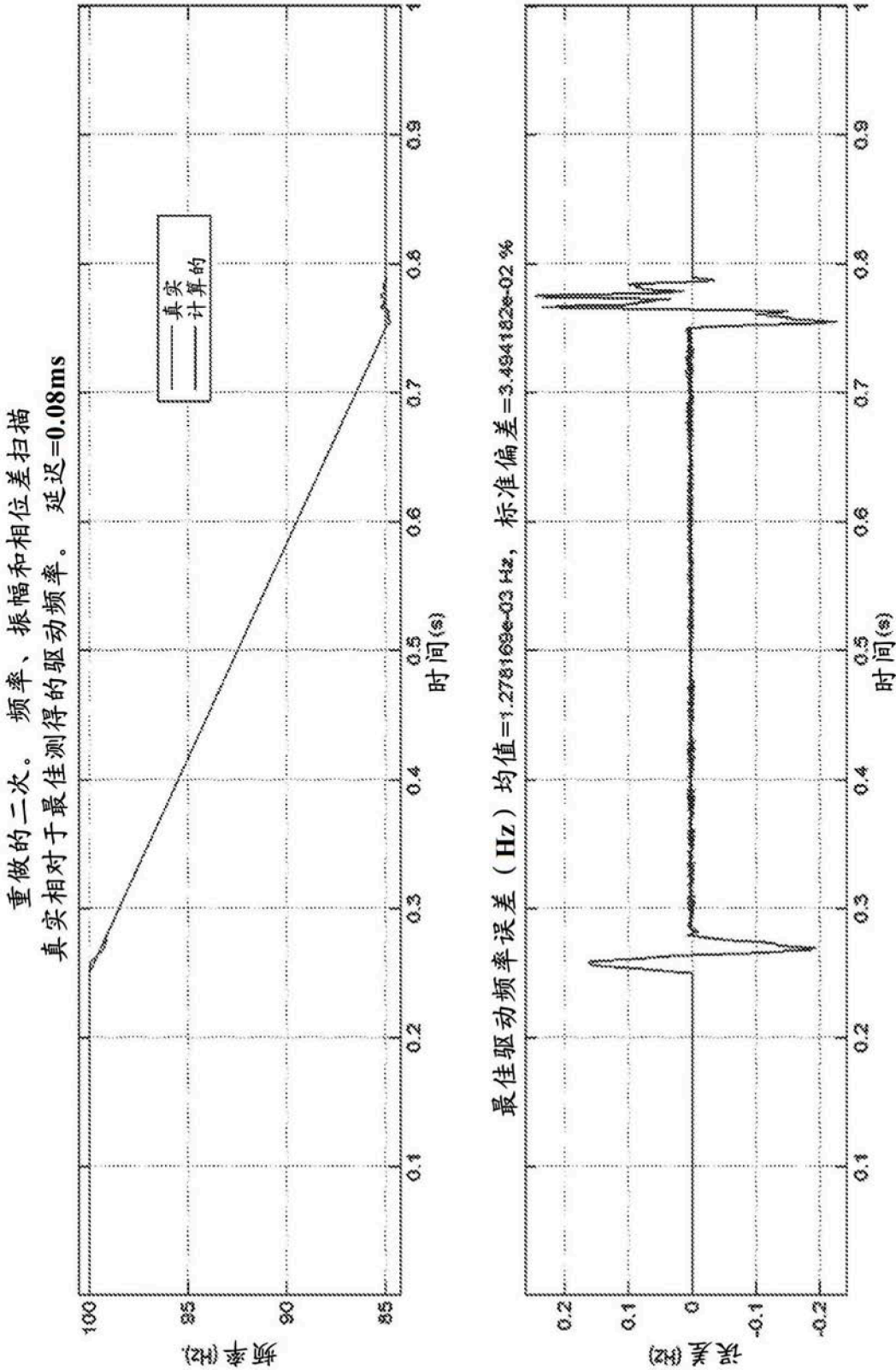


图22

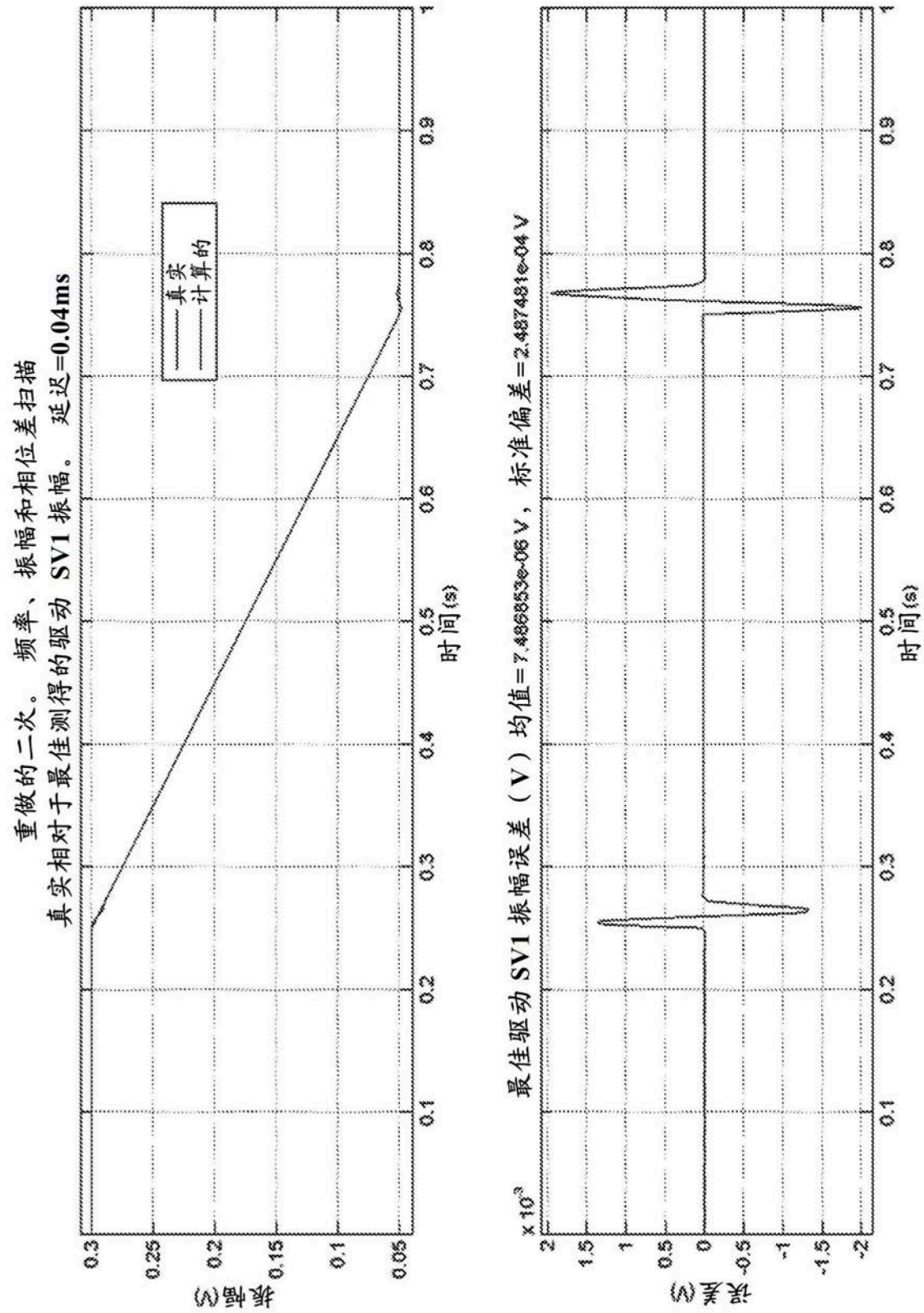


图23

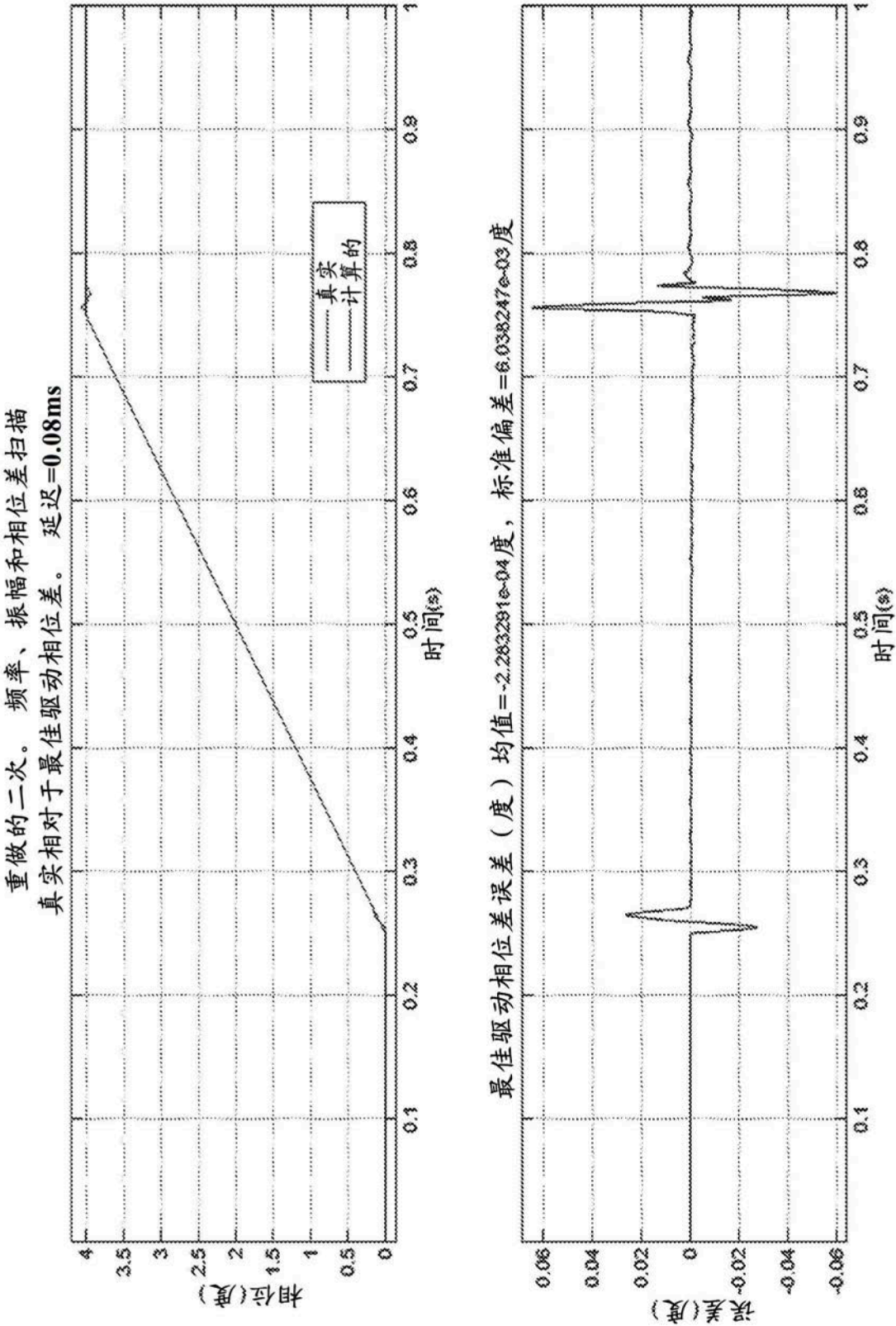
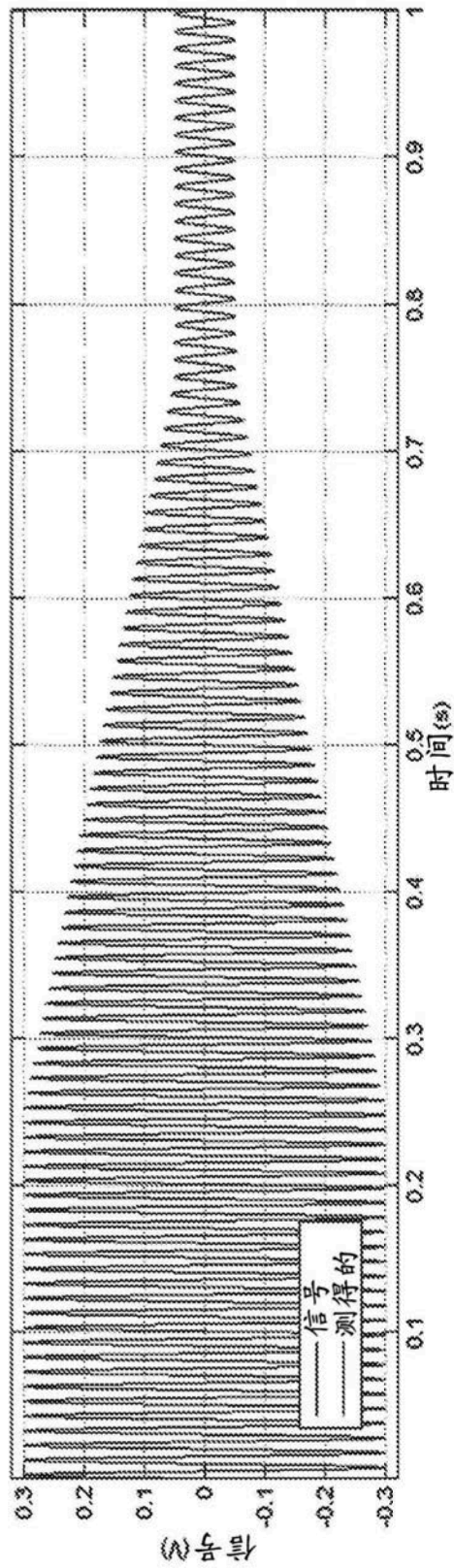


图24

重做的二次。频率、振幅和相位差扫描
真实相对于最佳驱动模式 SV1 信号



最佳驱动模式 SV1 信号中的误差 (V) 均值 = 2.061129×10^{-6} V, 标准偏差 = 2.034403×10^{-4} V

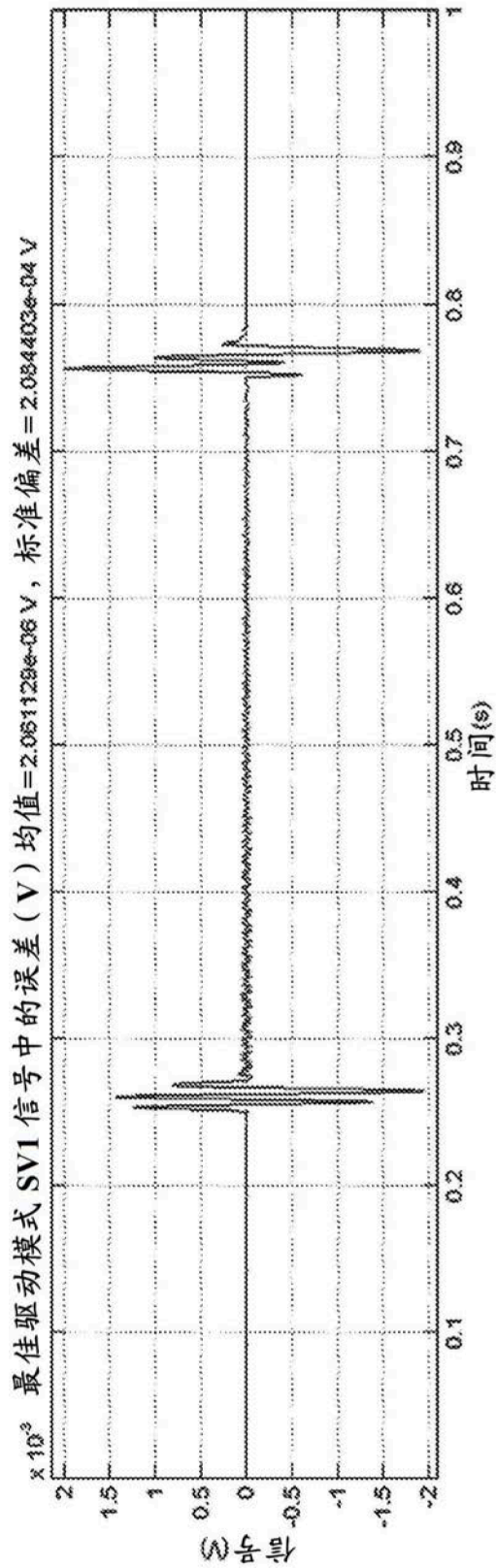


图25

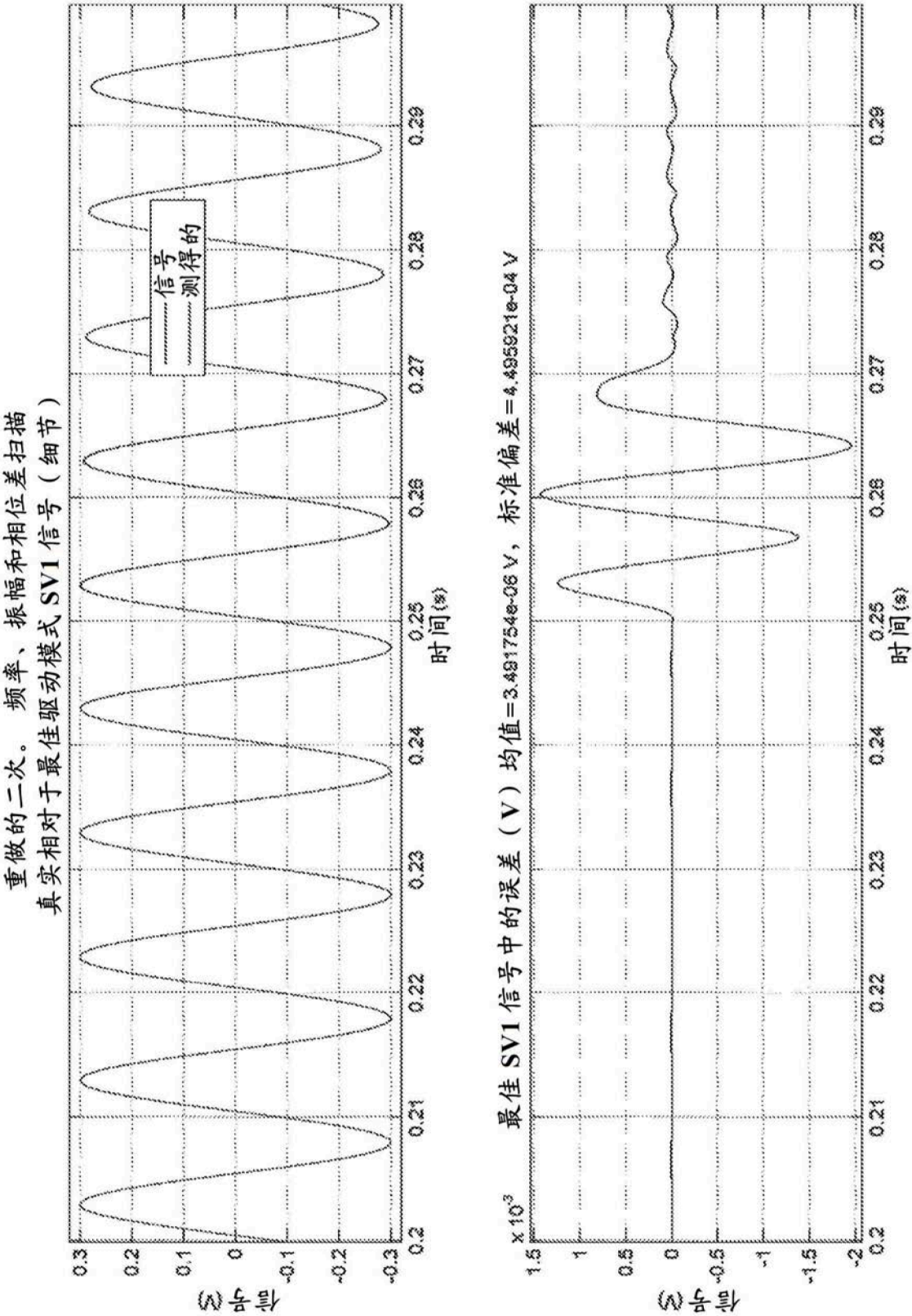
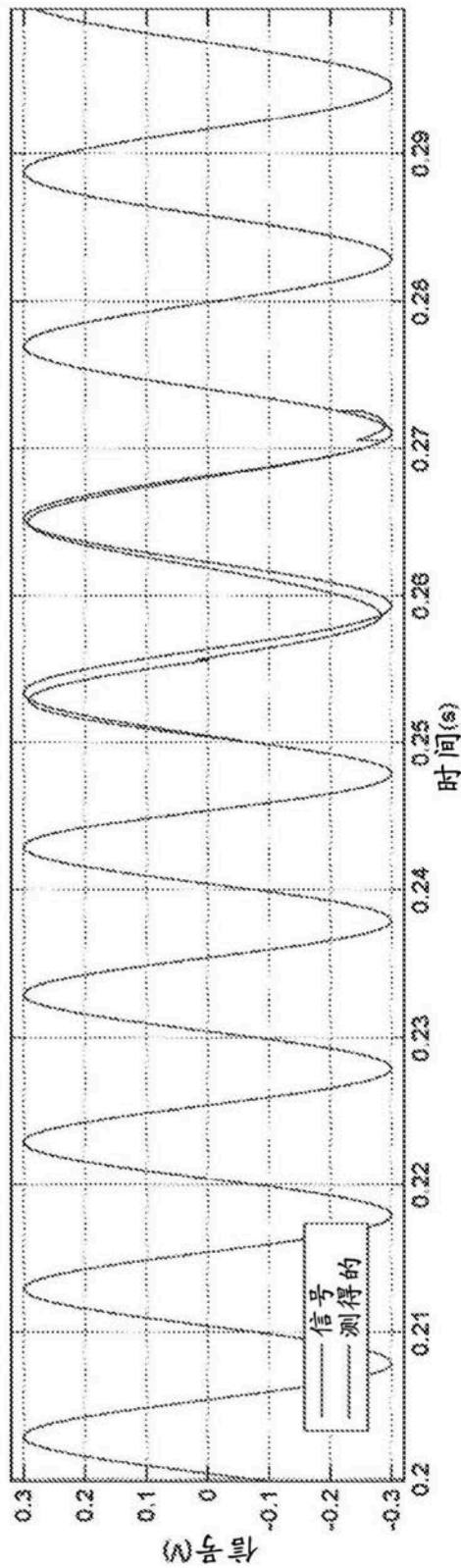


图26

重做的二次。频率阶跃改变
真实和最佳驱动模式 SV1 信号 (细节)



最佳 SV1 信号中的误差 (V) 均值=-9.777744e-04 V, 标准偏差=2.195476e-02 V

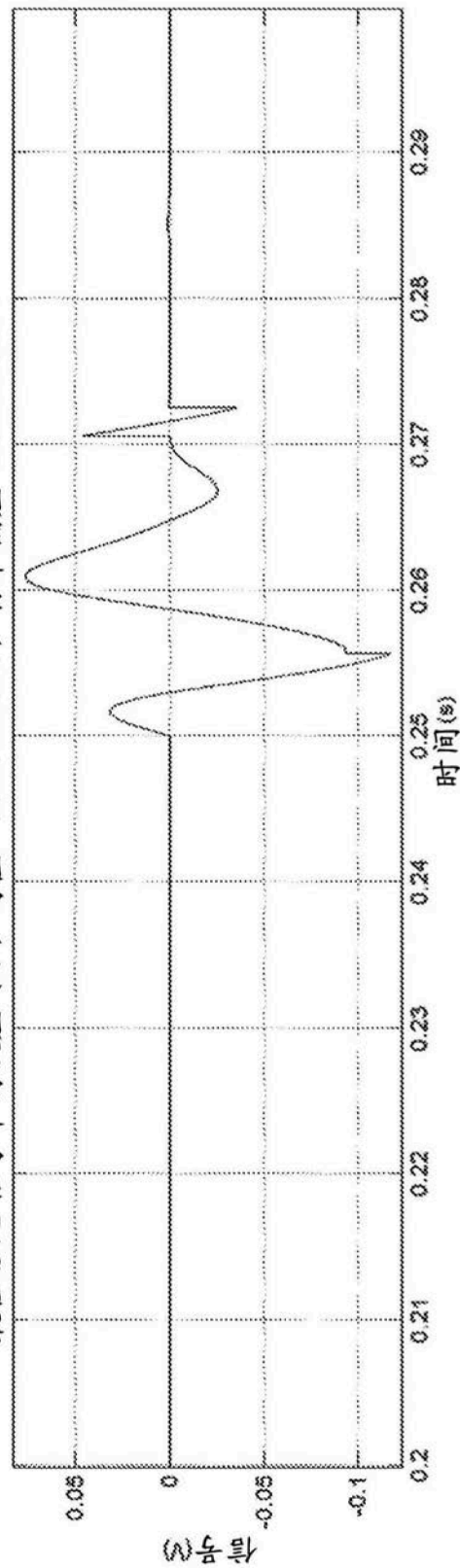


图27

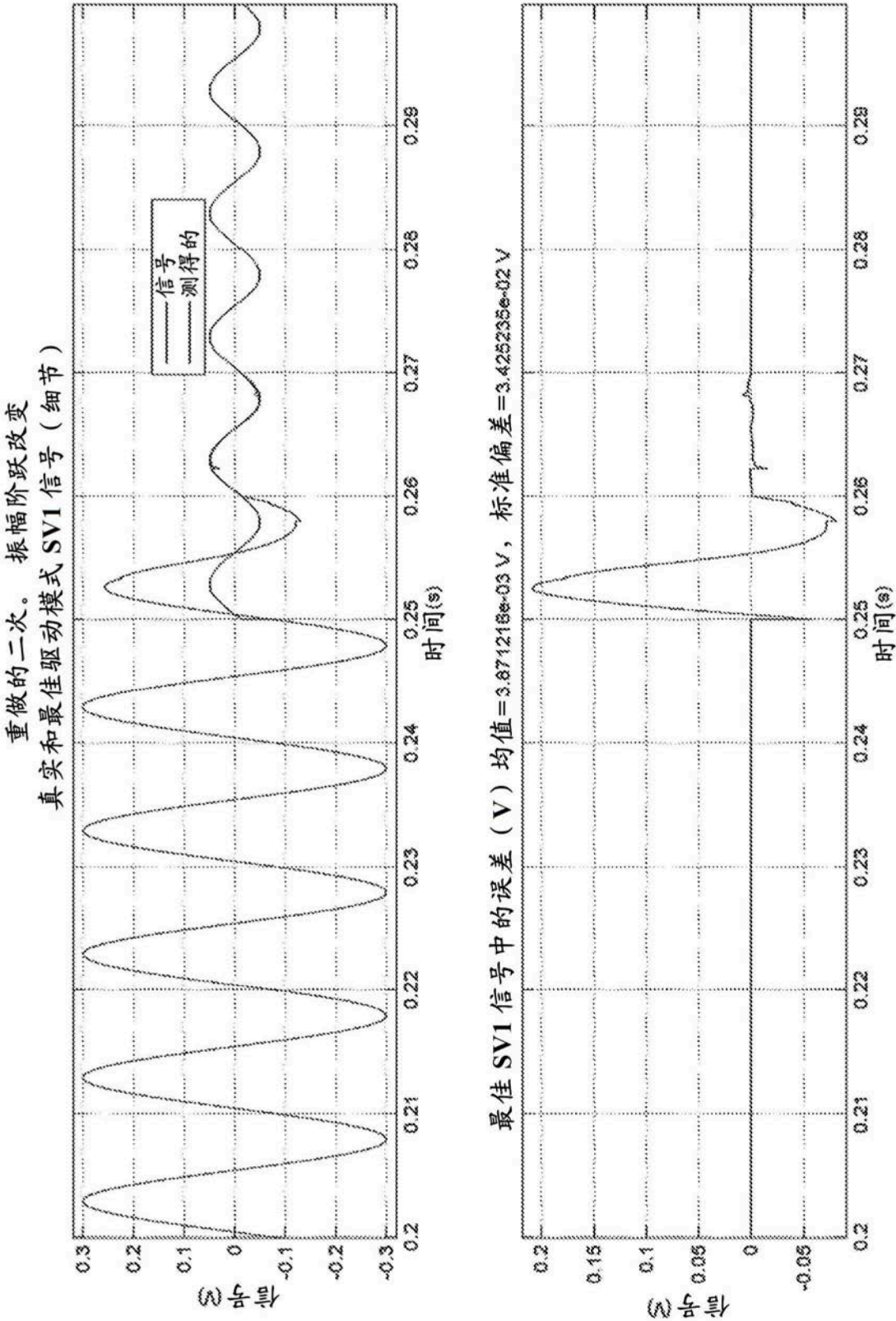


图28

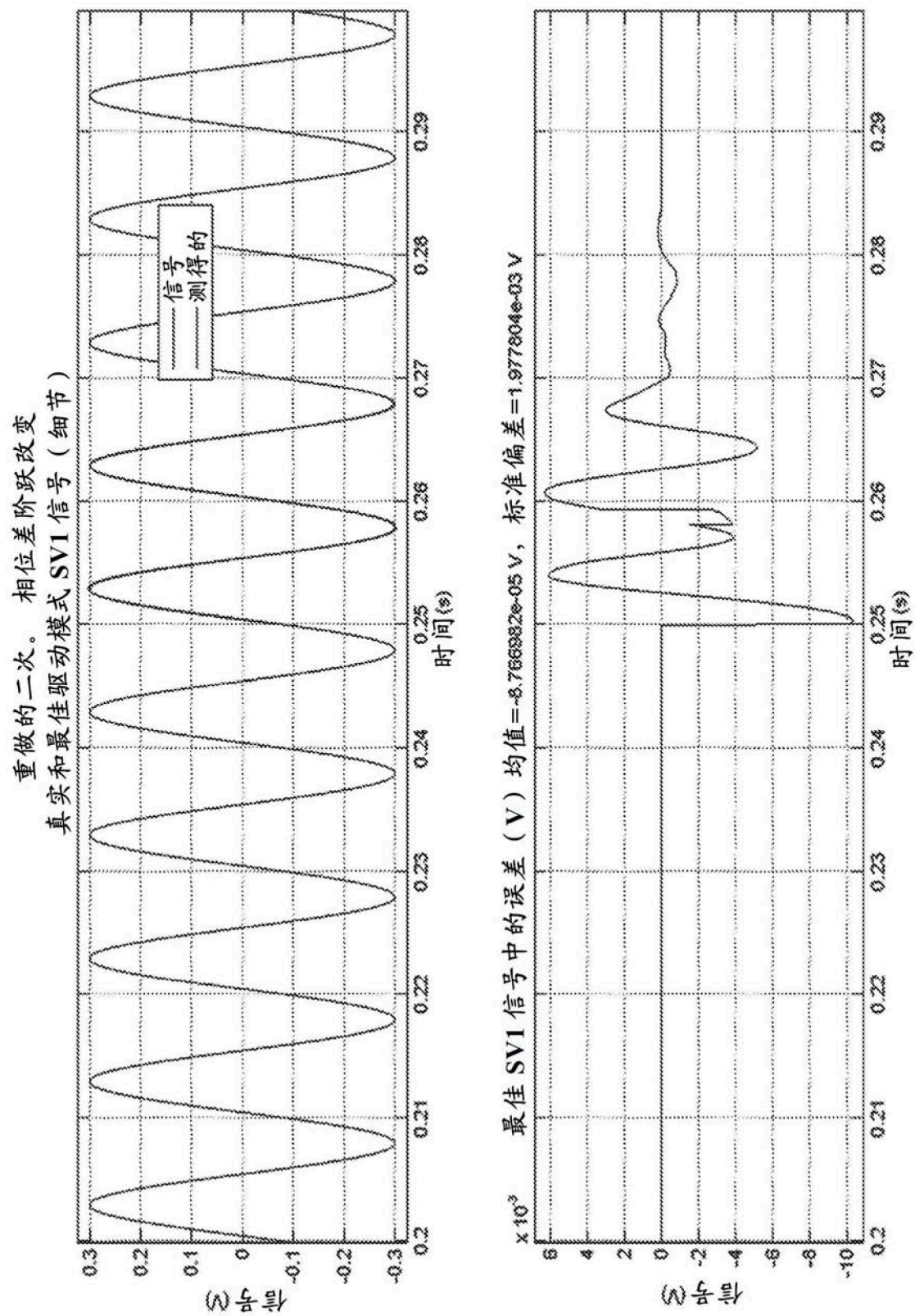


图29

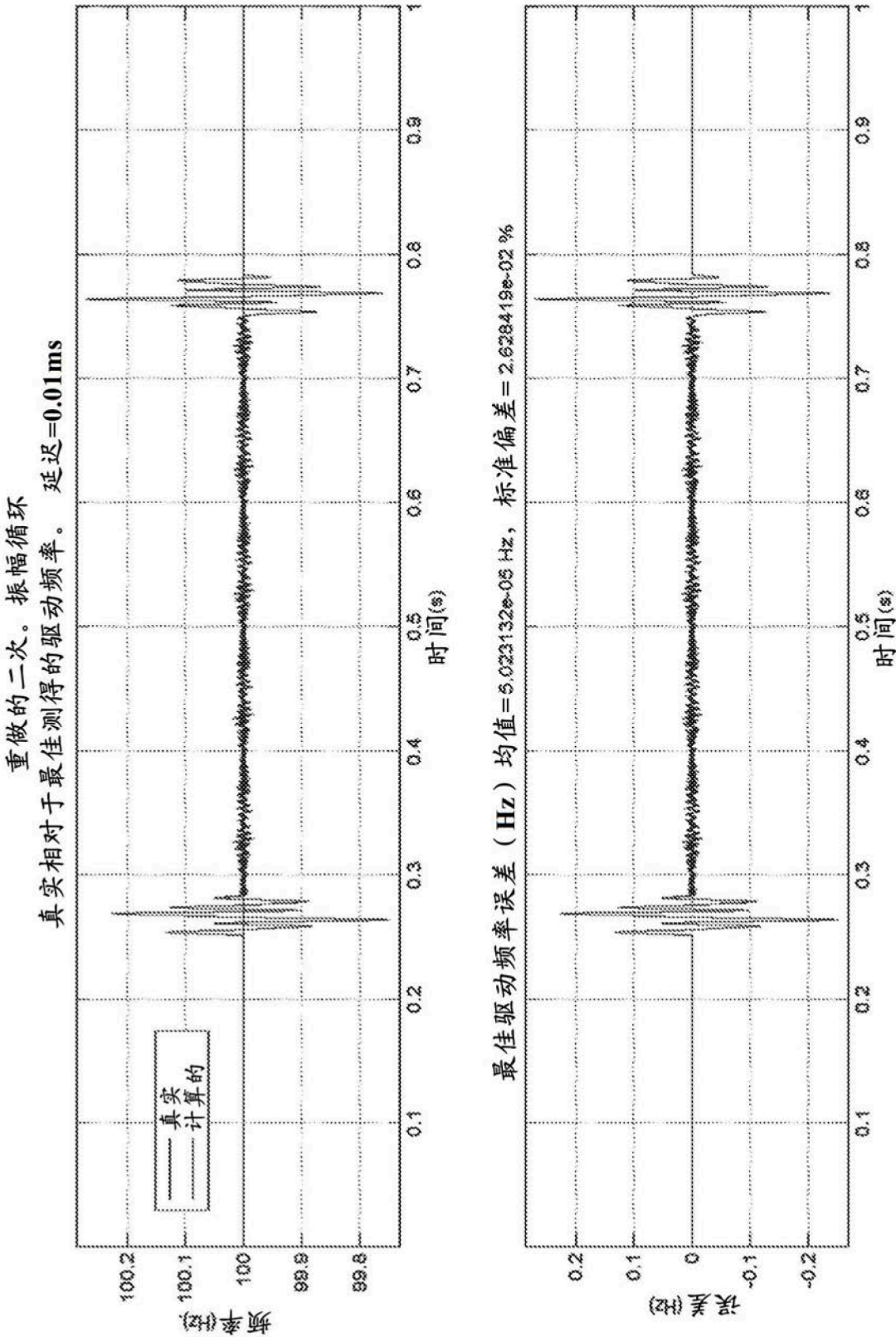


图30

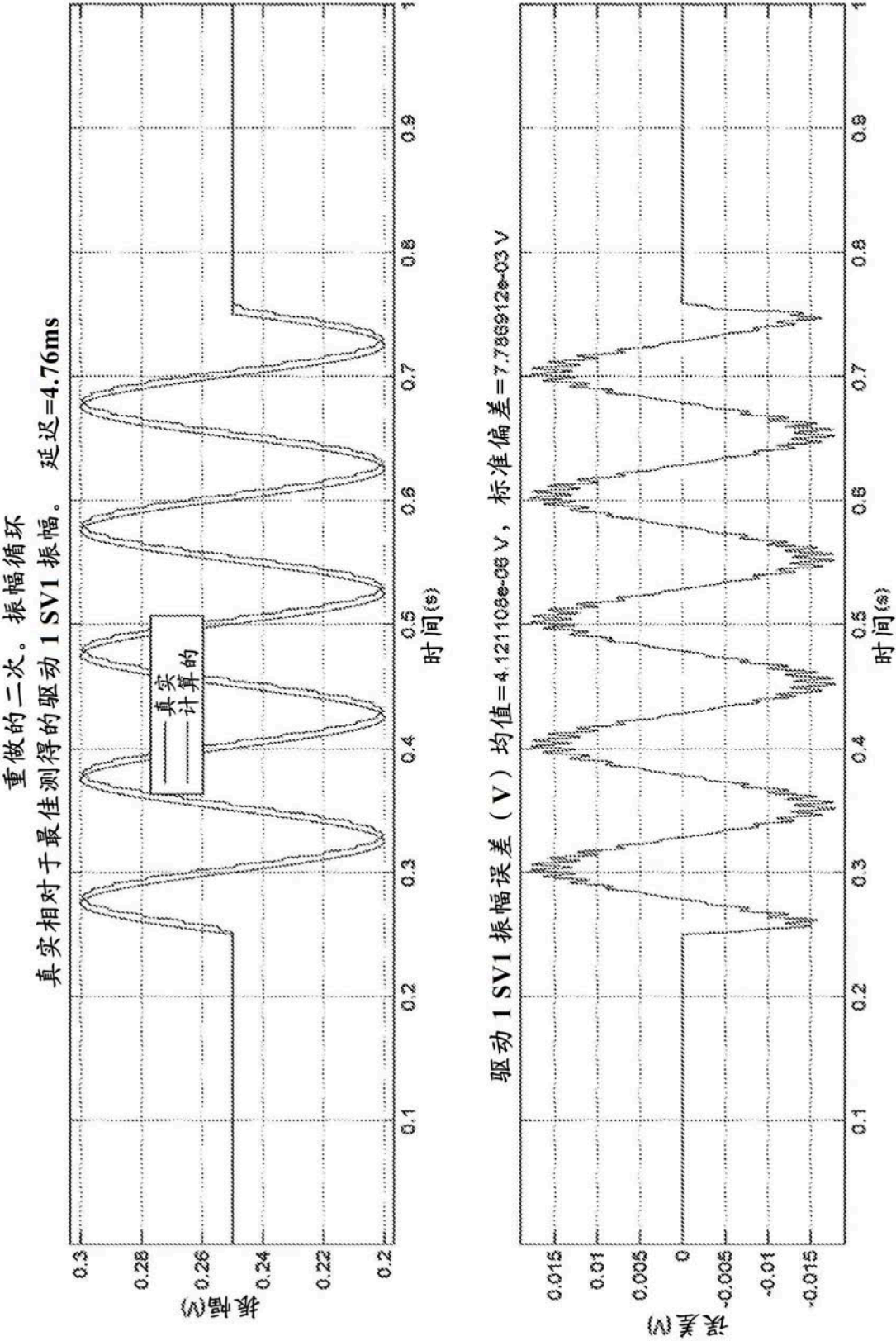


图31

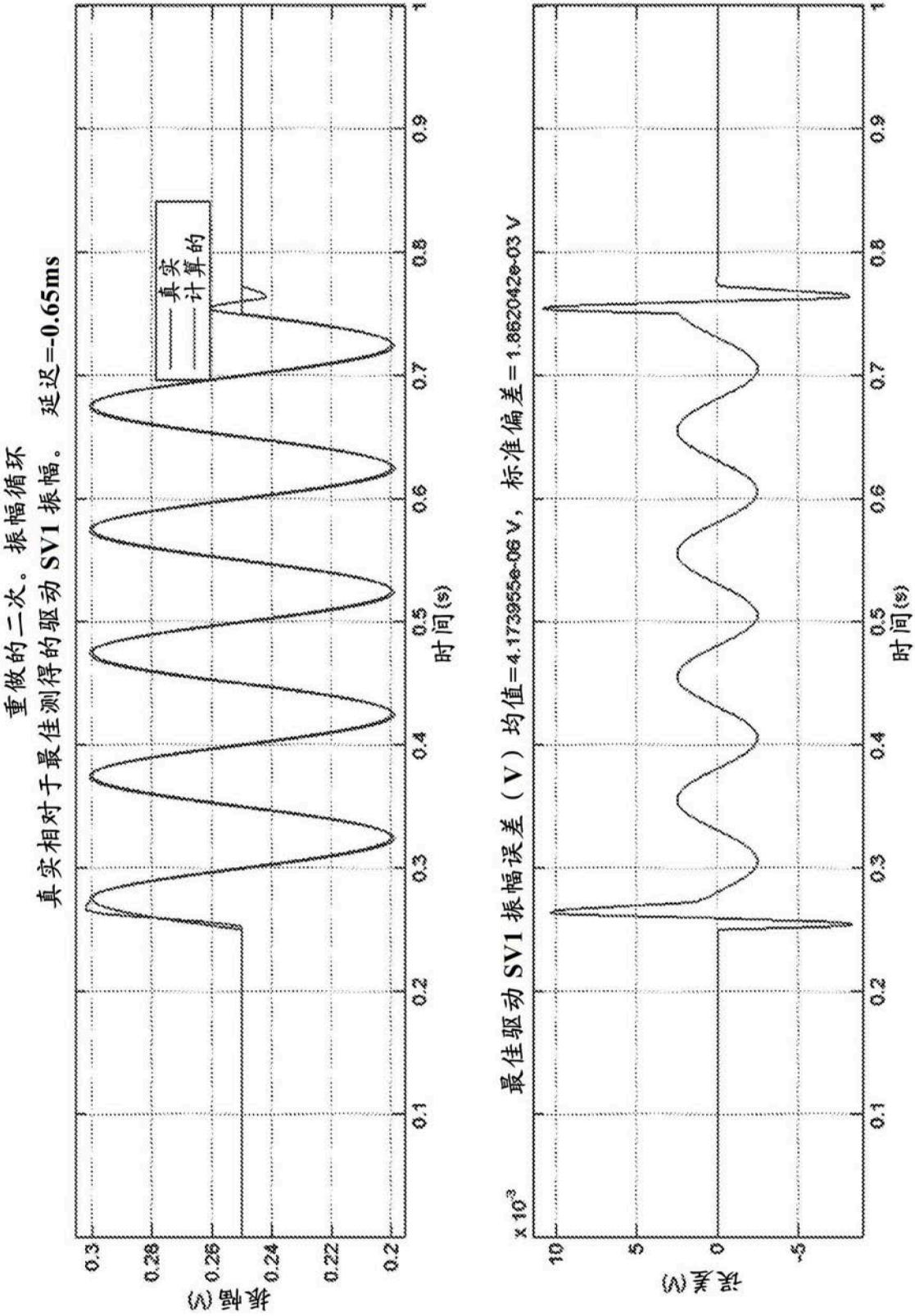


图32

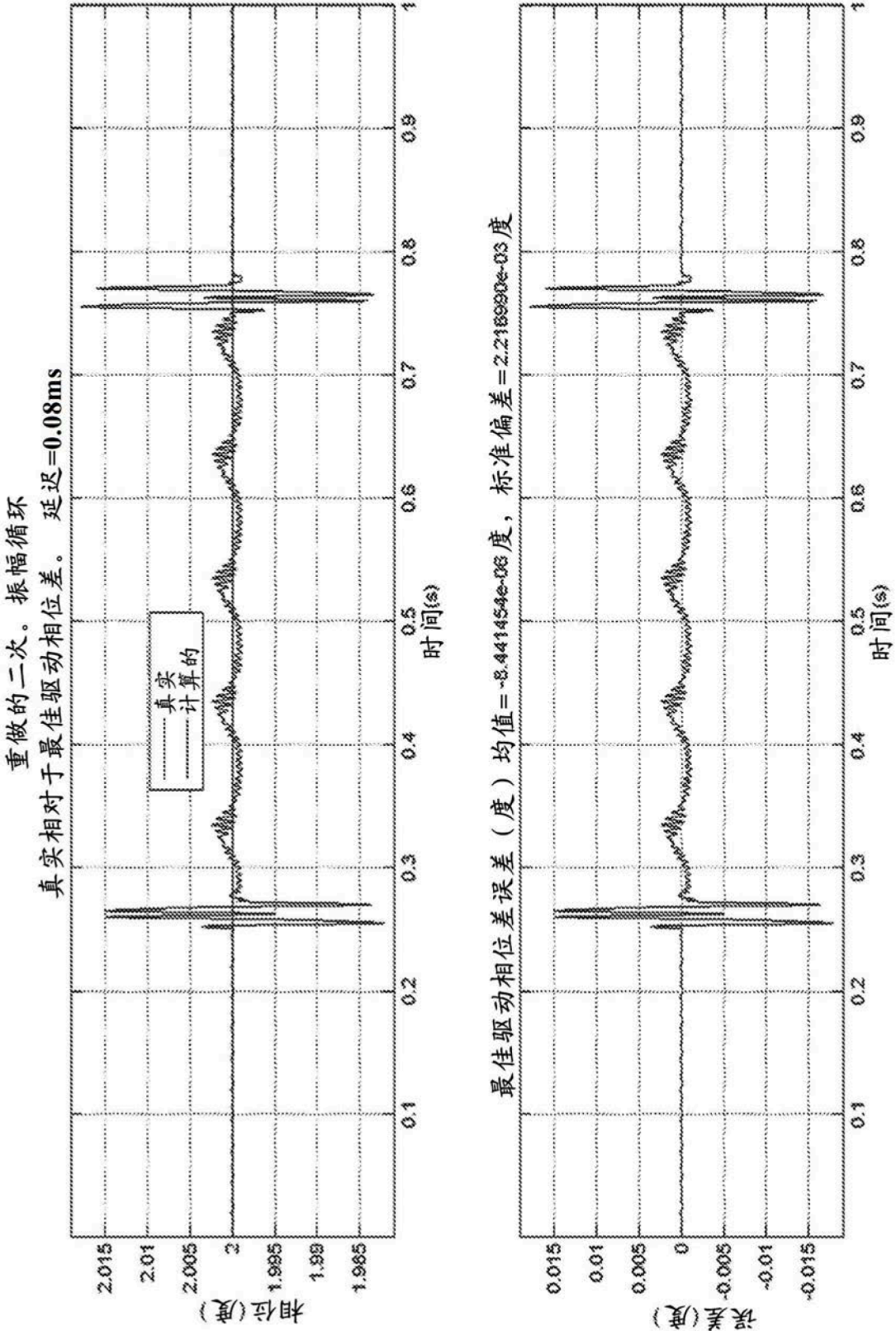


图33

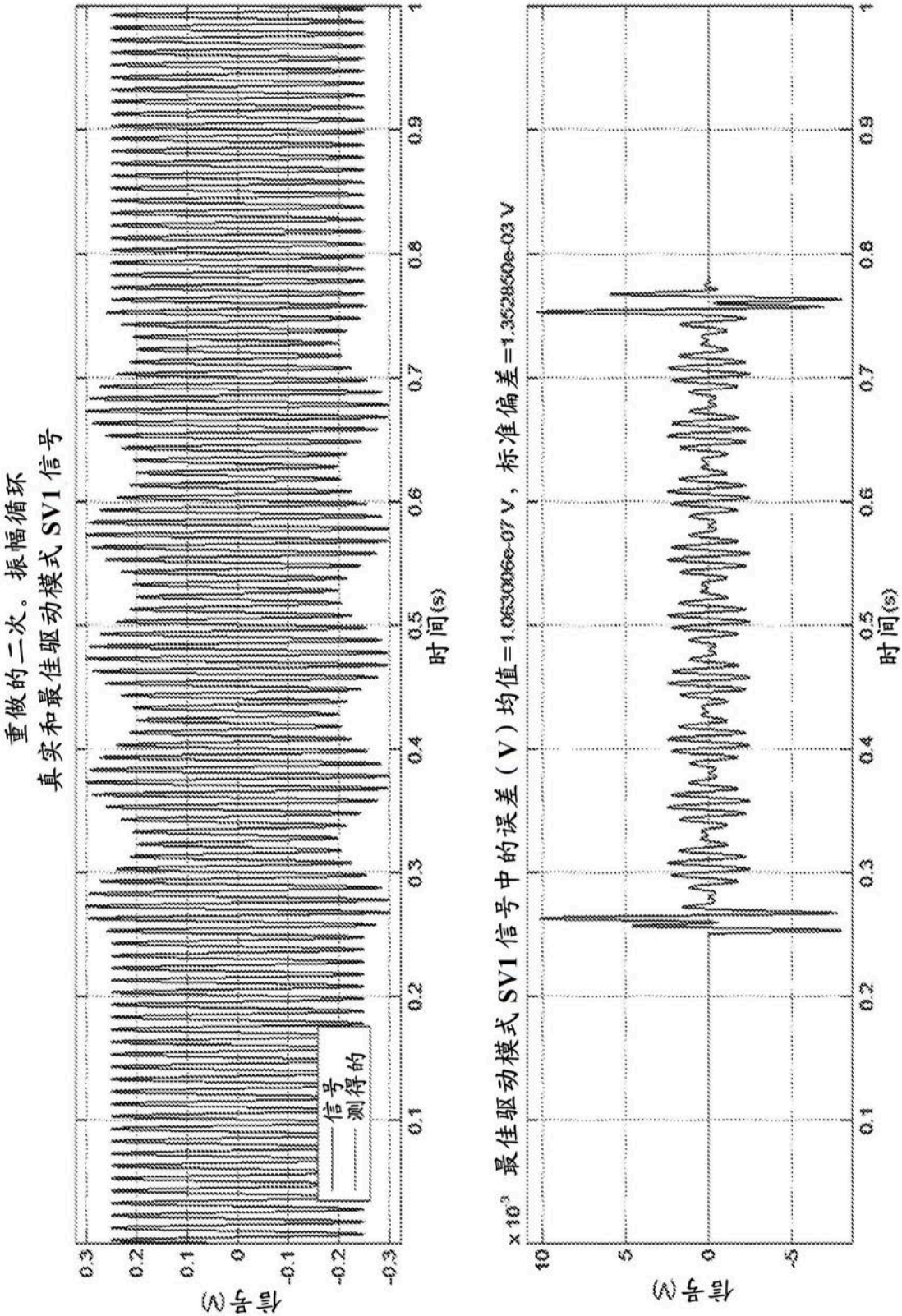


图34

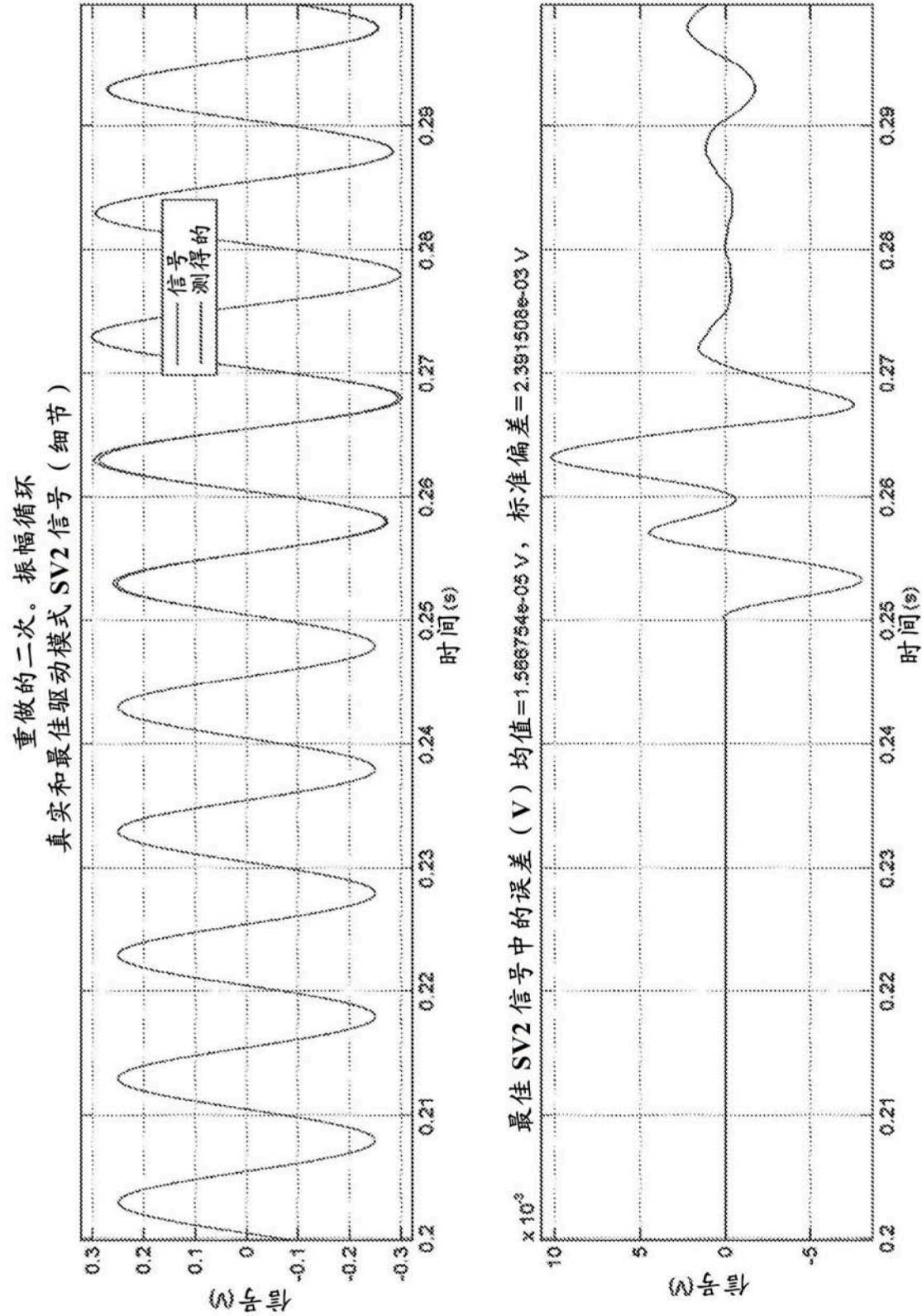


图35

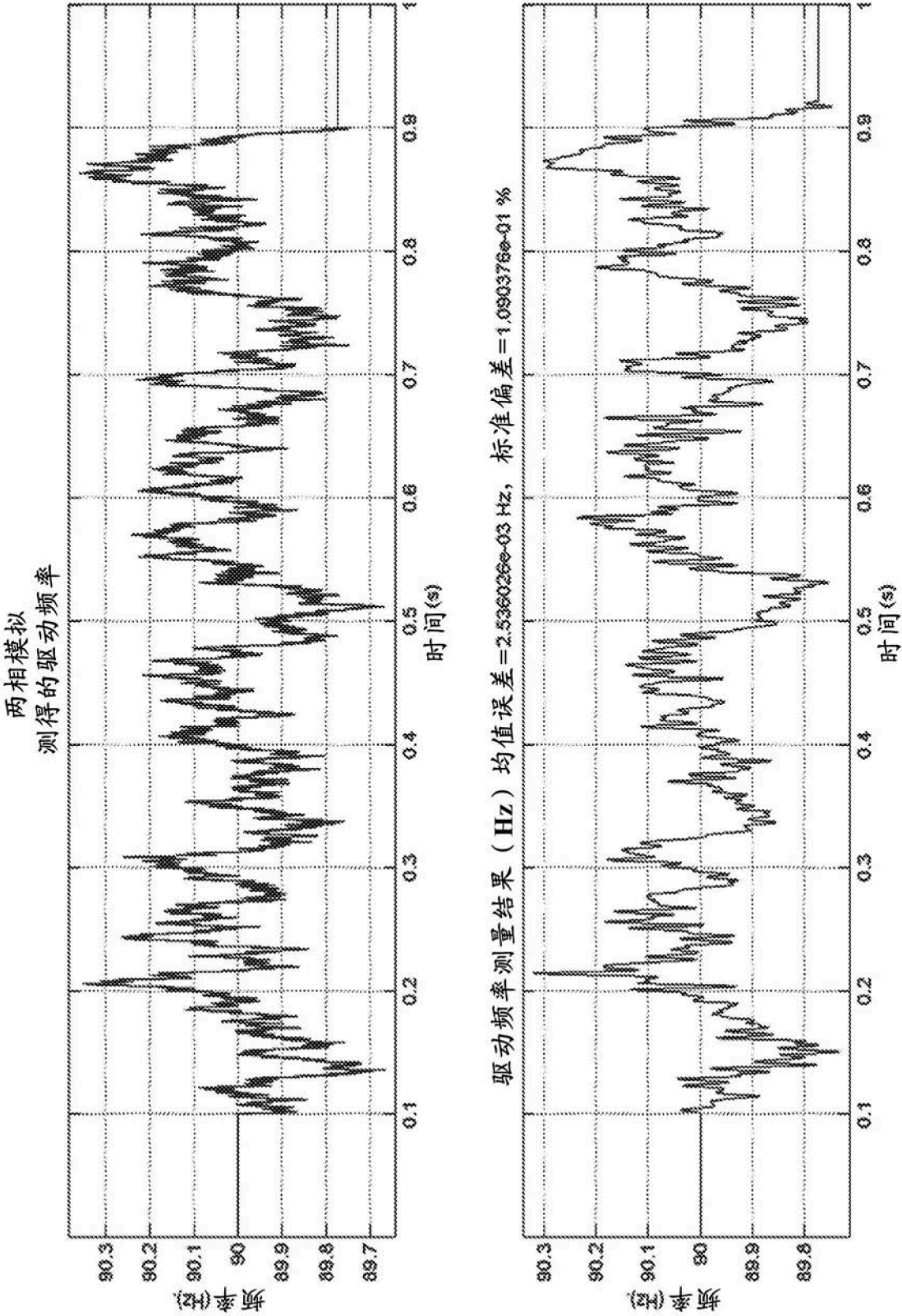


图36

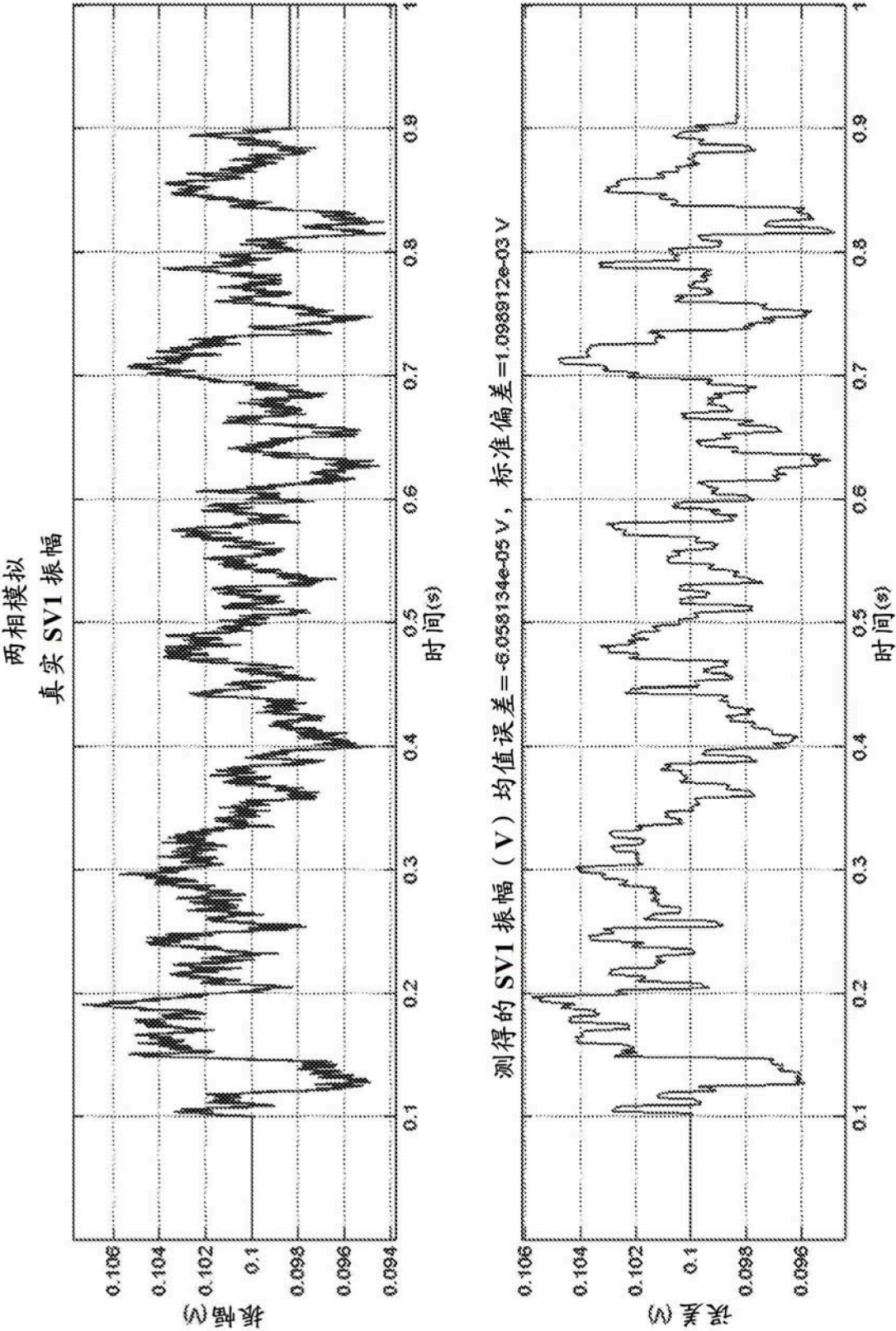


图37

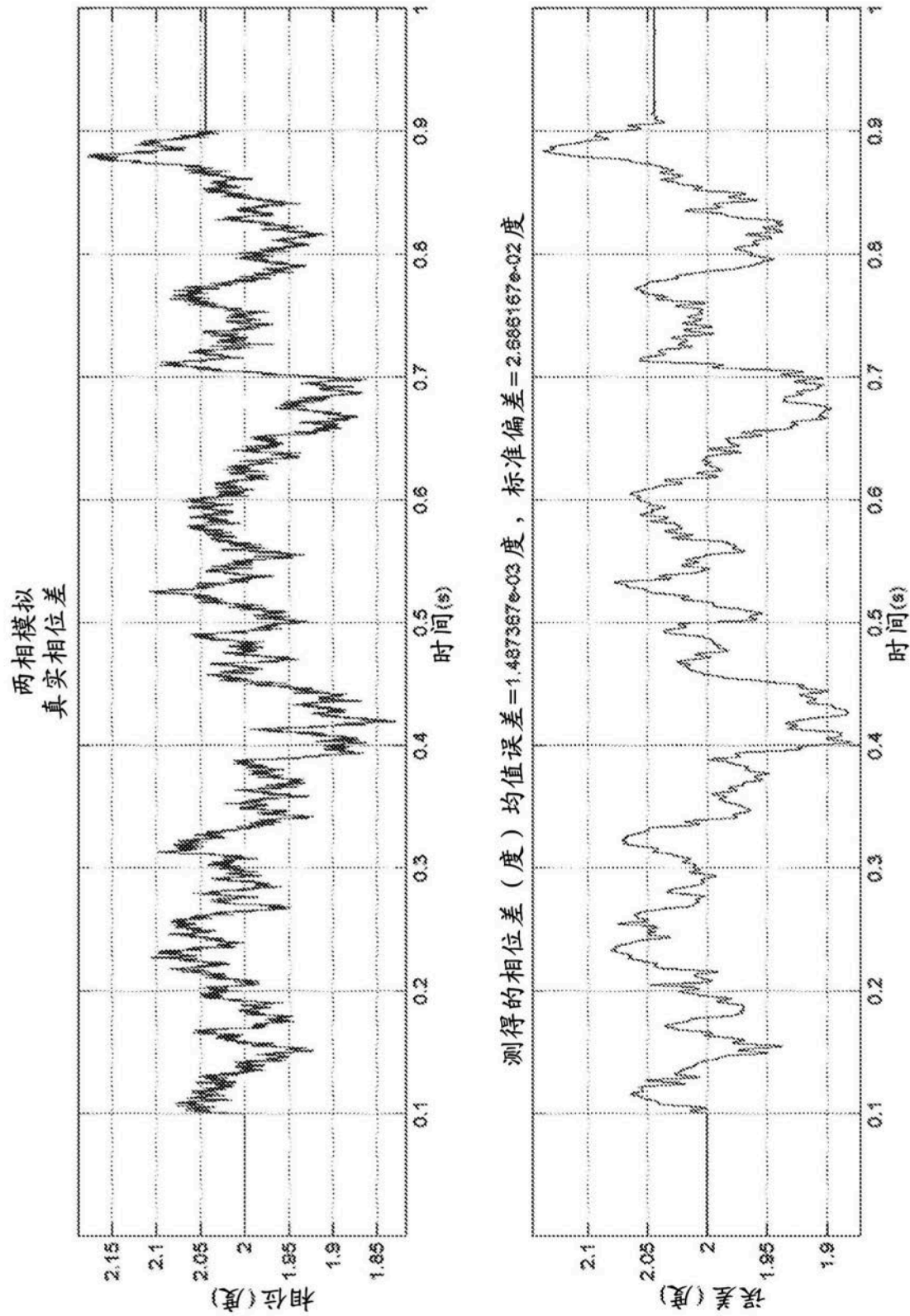


图38