[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
H02N 1/00 (2006.01)

[12] 发 明 专 利 说 明 书

专利号 ZL 03157391.6

[45] 授权公告日 2007 年 2 月 7 日

[11] 授权公告号 CN 1299427C

[22] 申请日 2003.9.19 [21] 申请号 03157391.6

[73] 专利权人 清华大学

地址 100084 北京市 100084 – 82 信箱

[72] 发明人 周 斌 高钟毓 张 嵘 陈志勇

[56] 参考文献

CN1054485A 1991.9.11

US4553099 1985.11.12

US6140737A 2000.10.31

JP8 – 14940A 1996.1.19

审查员 项晓娟

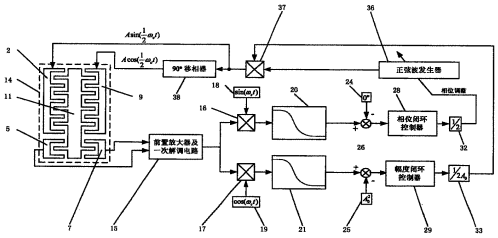
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 2 页

[54] 发明名称

用于微机械传感器的半频驱动及闭环方法

[57] 摘要

用于微机械传感器的半频驱动及闭环方法，属于微机械传感器的控制技术领域。 为了克服现有方法中电耦合和引入的 1/f 噪声的影响，本发明公开了一种用于微机械传感器的半频驱动方法，其特征在于：在静电式差动驱动器的两个驱动电极上，施加两路纯交流电压进行驱动，且所述两路电压相差 90°，其频率为动子振动频率的一半。 该方法可消除由驱动电压到传感器检测输出的电耦合，并能减小由驱动电压上引入的 1/f 噪声的影响，并针对这种驱动方法利用小范围内作近似的的办法消除电压到静电力的非线性影响，实现了闭环控制。



1．用于微机械传感器的半频驱动方法，其特征在于：在微机械传感器中的静电式差动驱动器的两个驱动电极上，施加两路交流电压进行驱动，且所述两路交流电压相差 90°，其频率为静电式差动驱动器的动子振动频率的一半。

2．根据权利要求 1 所述的半频驱动方法，其特征在于：所述加在静电式差动驱动器的两个驱动电极上的交流电压幅度相等。

3．用于微机械传感器的半频驱动闭环方法，其特征在于该方法包括如下步骤：

1）利用微机械传感器中的静电式差动驱动器的两个检测电极得到反映静电式差动驱动器的动子振动的检测信号；

2）将所述的检测信号经过前置放大和一次解调后，经由相敏解调得到反映结构振动的幅度和相位；

3）将所述幅度和相位分别同幅度设定值 A_0^2 和相位设定值进行比较，所得到的误差值分别经由校正控制器进行调整，再分别乘以幅度和相位调整因子，得到相应的幅度和相位控制信号；

4）将所述的相位控制信号送入可调相位的正弦波发生器进行移相处理，将幅度控制信号和正弦波发生器的输出相乘进行幅度调整，产生一路频率为动子振动频率一半的交流电压；

5）将上述频率为动子振动频率一半的交流电压经由 90° 移相器后，得到相差 90° 且幅度相等的另一路驱动电压；

6）将所述的两路驱动电压分别送入静电式差动驱动器的两个驱动电极，驱动动子振动，使检测电极上的电信号发生变化，从而实现闭环控制。

4．根据权利要求 3 所述的半频驱动闭环方法，其特征在于：所述的幅度调整因子为 $\frac{1}{2A_0}$。

5．根据权利要求 3 所述的半频驱动闭环方法，其特征在于：所述的相位调整因子为 1/2。

6．根据权利要求 3、4 或 5 所述的半频驱动闭环方法，其特征在于：所述的校正控制器为比例积分控制器。

用于微机械传感器的半频驱动及闭环方法

技术领域

本发明涉及一种用于静电式微机械差动驱动器的驱动及其闭环方法，属于微机械传感器的控制技术领域。

背景技术

目前，在微机械领域普遍采用的静电驱动器由动片和差动驱动极板两部分组成，驱动器结构主要有平行板结构和梳齿结构两大类，驱动方式均为在驱动极板上施加一个由直流偏置和交流电压叠加所形成的驱动电压，由此方法所产生的驱动力和驱动电压中交流成分同频，因此驱动电压中的同频成分会通过空间电容耦合到检测电路中；另一方面，当驱动频率不太高时，驱动电压中的 1/f 噪声会直接作用到驱动极板上产生较大的噪声力，使极板振动的噪声增大，驱动效果变差，尤其是当采用静电式差动驱动方法去实现力平衡闭环时，驱动力上的噪声作用效果会直接影响力平衡效果，从而直接影响器件的精度。

发明内容

为了克服现有方法中电耦合和引入的 1/f 噪声的影响，本发明提出了一种新的用于静电式微机械差动驱动器的驱动方法，该方法可有效的消除由驱动电压中交流成分带来的电耦合，并将 1/f 噪声在频域中移到测量带宽之外，达到减小噪声的作用，另外，当采用该驱动方案直接驱动器件时，本发明提出了一种简单的线性化和比例积分（PI）校正方案，实现了驱动闭环，从而达到提高驱动性能的目的。

本发明的技术方案如下：

用于微机械传感器的半频驱动方法，其特征在于：在微机械传感器中的静电式差动驱动器的两个驱动电极上，施加两路交流电压进行驱动，且所述两路交流电压相差 90°，其频率为静电式差动驱动器的动子振动频率的一半。

所述加在静电式差动驱动器的两个驱动电极上的交流电压幅度相等。

本发明的另一个技术方案如下：

用于微机械传感器的半频驱动闭环方法，其特征在于该方法包括如下步骤：

1）利用微机械传感器中的静电式差动驱动器的两个检测电极得到反映静电式差动驱动器的动子振动的检测信号；

2）将所述的检测信号经过前置放大和一次解调后，经由相敏解调得到反映结构振动的幅度和相位；

3）将所述幅度和相位分别同幅度设定值 A_0^2 和相位设定值进行比较，所得到的误差值分别经由校正控制器进行调整，再分别乘以幅度和相位调整因子，得到相应的幅度和相位控制信号；

4）将所述的相位控制信号送入可调相位的正弦波发生器进行移相处理，将幅度控制信号和正弦波发生器的输出相乘进行幅度调整，产生一路频率为动子振动频率一半的交流电压；

5）将上述频率为动子振动频率一半的交流电压经由 90° 移相器后，得到相差 90° 且幅度相等的另一路驱动电压；

6）将所述的两路驱动电压分别送入静电式差动驱动器的两个驱动电极，驱动动子振动，使检测电极上的电信号发生变化，从而实现闭环控制。

上述方案中的幅度调整因子是$\frac{1}{2A_0}$。

上述方案中的相位调整因子为 1/2。

上述中的校正控制器为比例积分控制器。

本发明的有益效果是，可提高传感器的驱动精度，降低由驱动电压上引入的噪声，并能减小或消除由驱动信号耦合到检测输出电路的电耦合。

附图说明

下面结合附图对本发明作进一步说明。

图 1 是本发明的驱动原理图。

图 2a 是驱动电压噪声谱。

图 2b 是采用半频驱动的力噪声移频效果图。

图 3 是闭环方案原理图。

图中，2.差动梳齿驱动器左侧定子，5.左侧差动检测电极，7.右侧差动检测电极，9.差动梳齿驱动器右侧定子，11.动子，12.余弦驱动电压，13.正弦驱动电压，14．差动梳齿驱动器，15．前置放大器和一次解调电路，16．相位环乘法器，17．幅度环乘法器，18．相位解调参考，19．幅值解调参考，20．相位环低通滤波器，21．幅度环低通滤波器，24．相位闭环设定值，25．幅度闭环设定值，28．相位闭环控制器，29．幅度闭环控制器，32．相位调整因子，33．幅度调整因子，36．正弦波发生器，37．乘法器，38．90° 移相器。

具体实施方式

下面结合附图来详述一下本发明的原理和具体的实施方式。

本发明所述技术方案的原理在于：在差动梳齿驱动器左、右侧定子上施加一对相差 90° 无直流偏置的交流电压，其频率为差动梳齿驱动器所需产生的驱动力频率的一半，由于驱动电压和驱动力之间的平方关系，驱动极板上将产生一个带直流分量和倍频交流成分的驱动力，此时利用差动驱动的原理，两个差动驱动极板上的直流分量对消，而剩下的交流成分由于符

号相反而合成为所需频率的驱动力，该驱动力可驱动动子按驱动力频率振动。由于驱动电压的频率为驱动力频率的一半，因此驱动信号耦合到器件输出端的电信号其频率是所需器件运动频率的一半，这样在频域上检测信号和耦合信号是分离的，从而达到消除电耦合的效果。另一方面，在噪声影响上，由于电压和力的平方关系，噪声力被调制到驱动电压的频率上，是所需驱动力频率一半处，从而将 1/f 噪声中低频段转移到该频率附近。

在图 1 中，一对相差 90°、频率相同且电压幅度相等的余弦驱动电压 12 和正弦驱动电压 13 分别施加到差动梳齿驱动器左侧定子 2 和差动梳齿驱动器右侧定子 9 上，导致定子上的梳齿和动子上的梳齿间产生静电力，该静电力驱动动子 11 以交流电压频率一倍的频率振动。

现考虑噪声模型，设两电压表达式如下所示：

$$u_a = A\cos(\tfrac{1}{2}\omega_c t) + w_1,\quad u_b = A\sin(\tfrac{1}{2}\omega_c t) + w_2 \tag{1}$$

在方程(1)中，A 是驱动电压幅度，ω_c 是动子驱动频率，w_1、w_2 分别为余弦驱动电压和正弦驱动电压上的噪声，u_a 为余弦驱动电压，u_b 正弦驱动电压。

静电驱动器作为一个非线性能量转换器，是将电压按平方关系转换到驱动力输出，因此差动静电驱动器产生的作用在动子 11 上的力可表示为：

$$F_{drv} = F(u_a) - F(u_b) = k_s\left[A^2\cos(\omega_c t) + 2Aw_1\cos(\tfrac{1}{2}\omega_c t) - 2Aw_2\sin(\tfrac{1}{2}\omega_c t) + w_1^2 - w_2^2\right] \tag{2}$$

其中 k_s 是与静电驱动器结构相关的常数。

在方程(2)中，第一项为主要作用力，第二、三项为噪声被驱动电压调制项，第四、五两项为小量的平方，可忽略，因此作用在动子 11 上的主要作用力就是第一项。故而加在驱动电极 2、9 的电压频率与最后作用在动子 11 上的力频率不同，因而静电力作用在动子 11 上使其产生的运动频率也与驱动电压频率不同，最终使左侧差动检测电极 5 和右侧差动检测电极 7 的输出电信号的频率与驱动电压频率不同，从而可在频域上分离来自驱动电压的电耦合和真正的位移检测输出，达到减小驱动电压电耦合的效果。另一方面，分析第二、三项为驱动电压造成的力噪声影响，驱动电压中的电压噪声一般不是白噪声而是 1/f 噪声，根据方程(2)可知，该噪声电压通过静电驱动器变成力噪声后，被调制在 $\frac{1}{2}\omega_c$ 频率上，如图 2a 和图 2b 所示，图 2a 为加载到驱动电极上的电压噪声谱，图 2b 为此电压噪声在动子上产生的力噪声谱。这样，1/f 噪声中大谱密度段并不直接作用在动子 11 振动频率上，从而大幅的减小了驱动噪声力，提高了驱动性能。这种方法同目前经常采用的直流叠加交流的驱动方式相比，直流加交流的驱动方式会把噪声直接调制到动子 11 的振动频率上，这样 1/f 噪声中大谱密度段直接作用到动子 11 振动频率上，造成动子 11 振动噪声变大。

采用本发明的驱动方法，可以工作在开环和闭环两种方式下。

如果用于传感器的力平衡闭环，由于驱动力本身就是作为一种反馈力方式去平衡传感器的受力，因此，半频驱动工作方式为开环方式。具体实施时，直接将一路正弦驱动电压加在

差动梳齿驱动器左侧定子 2 上，另一路与所述正弦驱动电压相位差为 90° 的余弦驱动电压加在差动梳齿驱动器右侧定子 9 上，两电压频率和幅度相等，通过产生的静电力使动子运动达到平衡状态。由于本发明的驱动方法具有将噪声移频至$\frac{1}{2}\omega_c$处的特性，降低了驱动电压到传感器工作频率处的噪声和电耦合，从而提高传感器力平衡性能。

如果用于直接驱动传感器达到稳定的振动，即工作于主动驱动方式，此时应采用闭环工作方式以保证传感器振动的振幅和相位稳定。此时，由于静电驱动器的非线性特性，驱动电压到驱动力为平方非线性关系，因此闭环时需要进行线性化处理，本发明提出了一种简单可行的闭环方案，如图 3 所示。

在图 3 中，差动梳齿驱动器 14 的检测输出由左侧差动检测电极 5 和右侧差动检测电极 7 送到前置放大器和一次解调电路 15 中得到反映动子 11 振动的信号，经过相位环乘法器 16、幅度环乘法器 17 与相位解调参考 18、幅度解调参考 19 进行相敏解调，并通过相位环低通滤波器 20 和幅度环低通滤波器 21 滤波，去除二倍频分量，从而得到动子 11 振动的相位和幅度。为了稳定动子 11 的振幅和相位，需要经过幅度和相位两路闭环来进行反馈控制。

在幅度闭环中，由于驱动电压和驱动力的关系是平方关系，是一个非线性环节，为了使闭环控制器容易实现，就要进行适当的线性化处理。假设动子 11 需要驱动到如幅度闭环设定值 25 所示值A_0^2，则在A_0^2的小范围内，设检测得到的振幅为A^2，则有：

$$\Delta A = A - A_0 \approx \frac{A^2 - A_0^2}{2A_0} = \frac{\Delta A^2}{2A_0} \tag{3}$$

采用式(3)的近似线性关系，可得到相应的幅度调整因子 33 为$1/(2A_0)$，从而消除由方程(2)中的平方关系带来的非线性影响，使幅度闭环易于实现。具体实施过程为：将幅度值与幅度闭环设定值 25 所示值A_0^2比较，得到幅度差值；幅度差值经由幅度闭环控制器 28 进行调整，在本发明中，幅度闭环控制器采用比例积分（PI）控制器，因为其形式简单；然后根据方程(3)将幅度闭环控制器的输出乘以幅度调整因子 33 所示值$1/(2A_0)$进行修正，通过乘法器 37 与正弦波发生器 36 的输出相乘，改变正弦波发生器输出的幅度，达到幅度控制的效果。幅度闭环控制器的传递函数如下所示：

$$C_1(s) = K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s} \tag{4}$$

其中K_{p1}为比例调节系数，K_{i1}为积分调节系数，s 为拉普拉斯变量。

在相位闭环中，从控制电压相位ϕ_c到陀螺输出相位ϕ_d的关系为线性关系：

$$\phi_c = \frac{1}{2}\phi_d \tag{5}$$

由式(5)可得到相位调整因子 32 为 1/2，相位闭环的具体实施过程为：将相位值与相位设定值 24 比较，得到相位差值；相位差值经由相位闭环控制器 29 进行调整，在本发明中，相位闭环控制器采用比例积分（PI）控制器；根据方程(5)以相位调整因子 32 所示值 1/2 进行修

正，得到的相位反馈值去调整正弦波发生器 36 的相位或者频率，使动子 11 振动相位发生变化，来保持相位稳定。相位闭环控制器传递函数如下所示：

$$C_2(s) = K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} \tag{6}$$

式(6)中参数含义同式(4)。

正弦波发生器 36 的输出经过幅度和相位调整后，即得到一路频率为动子振动频率一半的交流驱动电压。该交流驱动电压经过 90° 移相器 38 进行移相处理，得到相差 90° 且幅度相等的另一路交流驱动电压。

将这两路交流驱动电压分别送入静电式差动驱动器的差动梳齿驱动器左侧定子 2、差动梳齿驱动器右侧定子 9 上，驱动动子 11 振动，使检测电极上的电信号发生变化，从而实现闭环控制。

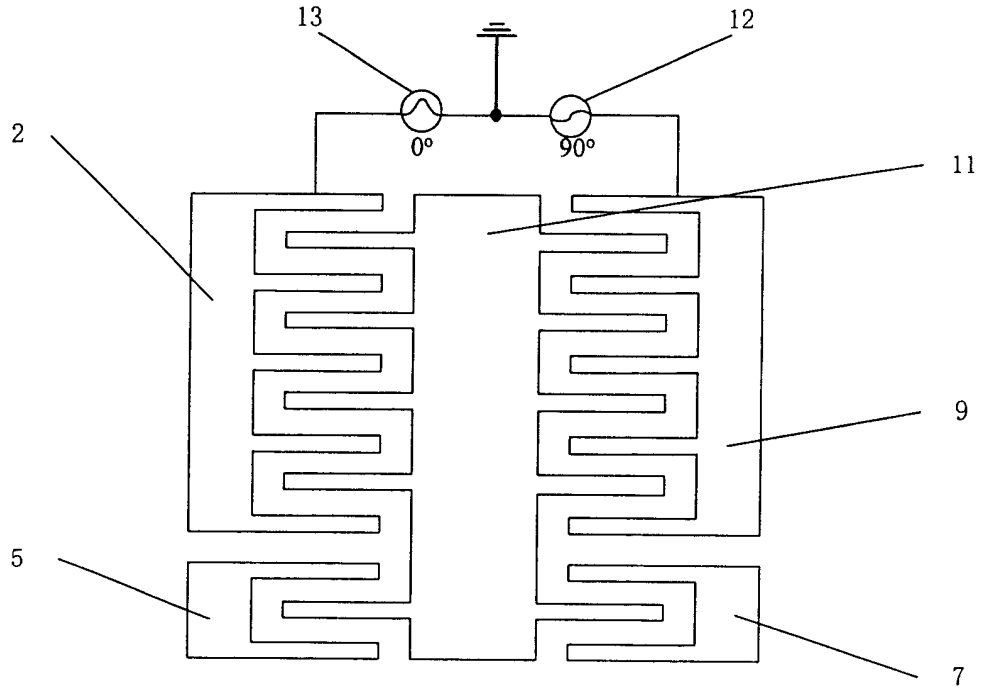

13
12
2
0°
90°
11
9
5
7

图 1

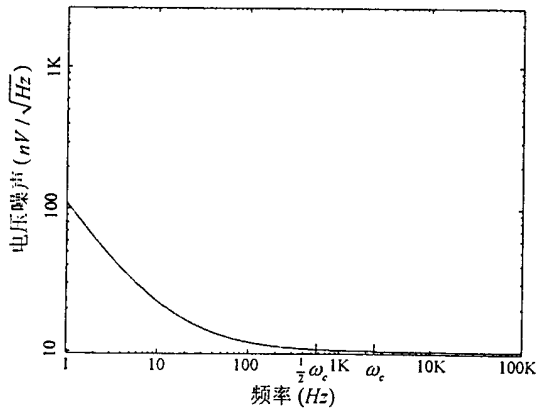

电压噪声 (nV/√Hz)
1K
100
10
1
10
100
1/2 ω_c
1K
ω_c
10K
100K
频率 (Hz)

图 2a

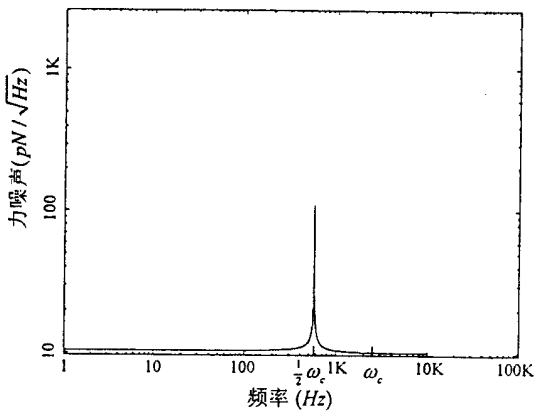

力噪声(pN/√Hz)
1K
100
10
1
10
100
1/2 ω_c
1K
ω_c
10K
100K
频率 (Hz)

图 2b

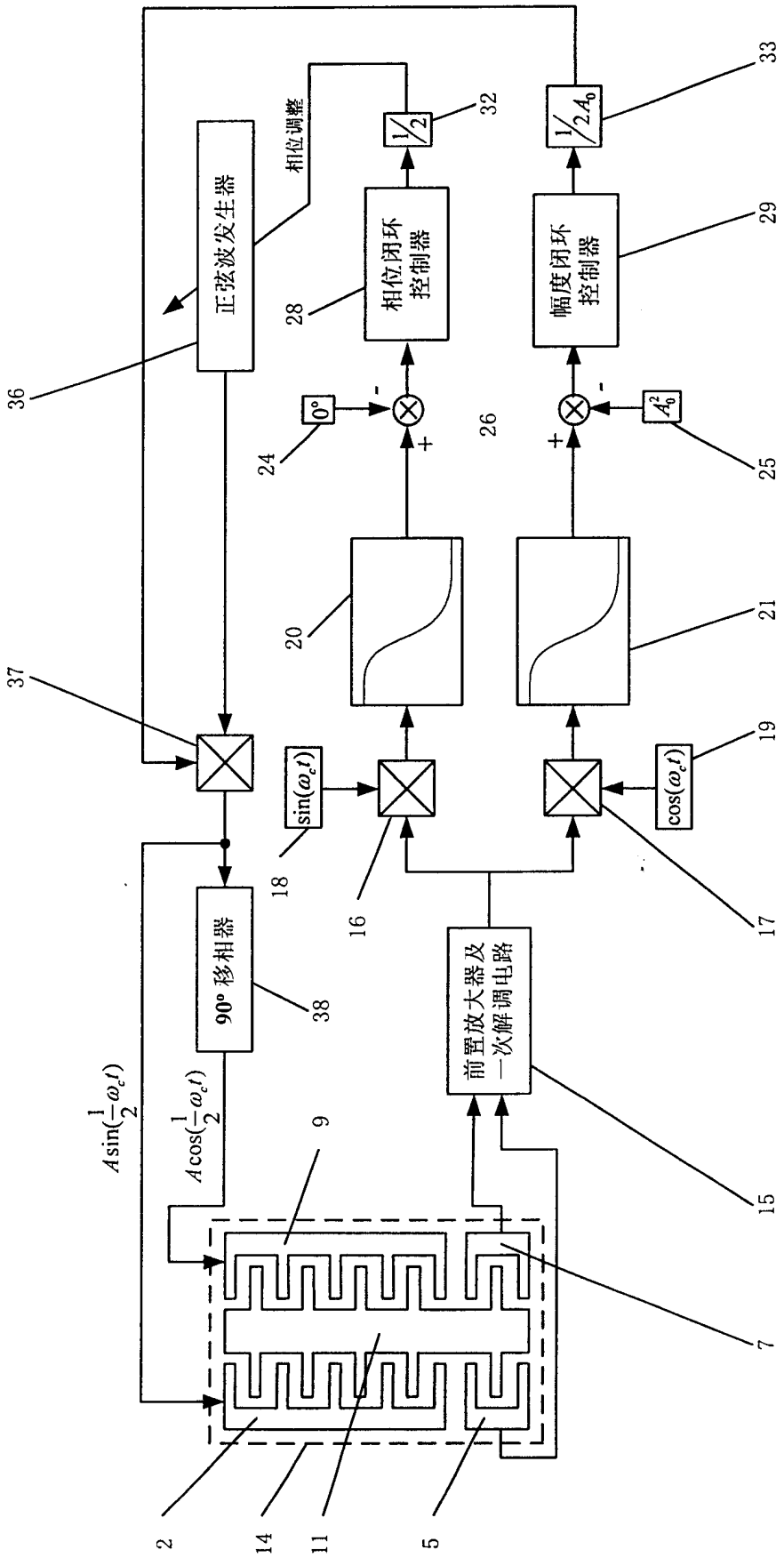

正弦波发生器
相位调整
36
37
90° 移相器
38
$A\sin(\frac{1}{2}\omega_c t)$
$A\cos(\frac{1}{2}\omega_c t)$
9
2
14
11
5
前置放大器及一次解调电路
15
7
$\sin(\omega_c t)$
18
16
$\cos(\omega_c t)$
19
17
20
21
相位闭环控制器
28
幅度闭环控制器
29
$\frac{1}{2}$
32
$\frac{1}{2A_0}$
33
0°
24
A_0^2
25
26

图3