



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106597839 B

(45)授权公告日 2019.04.09

(21)申请号 201611120617.2

(22)申请日 2016.12.08

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106597839 A

(43)申请公布日 2017.04.26

(73)专利权人 东南大学
地址 210000 江苏省南京市江宁区东南大
学路2号

(72)发明人 杨波 吴磊 陆城富 王刚
王斌龙

(74)专利代理机构 南京瑞弘专利商标事务所
(普通合伙) 32249
代理人 张耀文

(51)Int.Cl.
G05B 11/42(2006.01)
G01C 25/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 102353384 A,2012.02.15,全文.
DE 19654304 A1,1997.07.03,全文.
CN 103822620 A,2014.05.28,全文.
CN 104535057 A,2015.04.22,全文.

杨波 等.利用负刚度效应调谐的硅调谐式陀螺仪.《光学精密工程》.2010,第18卷(第11期),2398-2406.

F.Yesil 等.AN AUTOMATIC MODE MATCHING SYSTEM FOR A HIGH Q-FACTOR MEMS GYROSCOPE USING A DECOUPLED PERTURBATION SIGNAL.《Transducers 2015》.2015,1148-1151.

杨成 等.基于低频调制激励的硅微陀螺仪自动模式匹配技术.《中国惯性技术学报》.2016,第24卷(第4期),542-547、560.

审查员 李江平

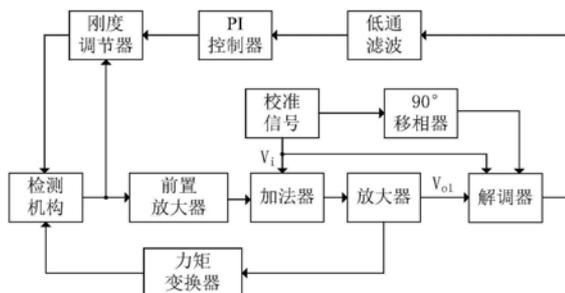
权利要求书2页 说明书4页 附图3页

(54)发明名称

一种基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模式匹配控制装置及方法

(57)摘要

本发明提供一种基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模式匹配控制装置,采用了外部校准信号输入,并以此获得所需的模式匹配控制量。外部校准信号由两组频率不同的余弦信号a和b叠加而成,一组频率高于驱动模式的中心频率,一组低于驱动模式的中心频率,且二者与驱动模式的中心频率的频差相等,以此来实现自动模式匹配,而不需要额外的参考量。该装置抑制了在模式匹配过程的信号耦合和干扰。使用两路与驱动信号同频差的校准信号,PI控制器参考信号设置为0即可,不需要开环寻找参考点。该装置中,校准信号以力反馈的形式加载在检测机构上,将检测机构置于反馈回路中,充分发挥检测模式的幅频特性,使得校准信号的经过检测机构的输出幅度较大。



1. 一种基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制装置,其特征在于:包括检测机构、前置放大器、加法器、放大器、解调器、力矩变换器、校准信号发生器、移相器、低通滤波器、PI控制器、刚度调节器;

所述检测机构的输出端连接前置放大器的输入端,使得检测机构的输出信号经过前置放大器变换放大后提取出来;

所述前置放大器的输出端与校准信号的输出端分别连接加法器的输入端,使得前置放大器的输出与校准信号的输出在加法器内实现信号融合;

所述加法器的输出端连接放大器的输入端,使得加法器的输出经过放大器作相应的放大处理;

所述放大器的输出端分别连接解调器的输入端和力矩变换器的输入端,使得放大后的信号一方面作为解调器的输入信号,另一方面经过力矩变换器实现电压到力的转化;

所述力矩变换器的输出端连接检测机构的输入端,实现将电压信号变换为对应的力施加在检测机构上,完成力反馈;

所述校准信号的输出端连接移相器的输入端,利用移相器对输入信号作 90° 移相后输出;

所述校准信号的输出端与移相器的输出端同时连接解调器的输入端,作为解调器的输入信号,解调器实现对放大器输出信号的解调;

所述解调器的输出端连接低通滤波器的输入端,低通滤波器的输出端连接PI控制器的输入端,利用PI控制器对输入信号作相应的比例-积分控制;

所述PI控制器的输出端连接刚度调节器的输入端,刚度调节器的输出端连接检测机构的输入端,刚度调节器将PI控制器的输出作相应的处理后,将输出信号施加在检测机构上,完成对检测机构的刚度调节;

所述刚度调节器内部包含两个乘法器,机械参数 k_m ,输入信号为PI控制器的输出信号 V_p 以及检测机构的检测输出信号;第一个乘法器用于实现对PI控制器输出信号作平方处理,第一个乘法器的输出作为第二个乘法器的输入,与机械参数及检测机构的输出相乘,第二个乘法器的输出结果为刚度调节器的输出;刚度调节器的输出施加在反馈电极 F^+ 和 F^- 上,实现对检测机构的刚度调节。

2. 根据权利要求1所述的一种基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制装置,其特征在于:所述检测机构的简化模型包括一对检测电极 S^+ 和 S^- ,一对反馈电极 F^+ 和 F^- ,一个公共电极 G ;所述检测电极与前置放大器相连,完成对检测模态信号的提取;所述反馈电极同时与力矩变换器和刚度调节器相连,分别实现力反馈和刚度调节的作用。

3. 根据权利要求1所述的一种基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制装置,其特征在于:所述解调器内部包含8个乘法器,4个低通滤波器,3个加法器;所述解调器的输入信号为放大器的输出 V_{o1} 、移相器的输出 c 和 d 以及校准信号的输出 a 和 b ;首先将放大器的输出 V_{o1} 与移相器的输出 c 和 d 以及校准信号的输出 a 和 b 相乘,得到信号 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 ,然后四路信号经过低通滤波器后作平方处理,得到信号 a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 ,分别将 a_2 和 c_2 、 b_2 和 d_2 相加,得到信号 db 、 ca ,最后将 db 与 ca 的差值作为解调器的输出;所述解调器实现对检测机构输出信号幅值大小的测量,并去除相位的影响。

4. 根据权利要求1所述的一种基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制装置实现

的基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制方法,其特征在于:采用了外部校准信号输入,获得所需的模态匹配控制量;所述外部校准信号由两组频率不同的余弦信号a和b叠加而成,一组频率高于驱动模态的中心频率,一组低于驱动模态的中心频率,且二者与驱动模态的中心频率的频差相等,实现自动模态匹配,而不需要额外的参考量;所述移相器实现对两组校准信号 90° 精确移相,移相后的两组信号c和d与校准信号a和b一起作为后续解调所需要的输入信号;模态匹配完成后,PI控制器的输入信号在0附近小幅波动。

5. 根据权利要求4所述的基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制方法,其特征在于:所述外部校准信号的输入是通过力反馈的形式来实现的,具体如下:以外部校准信号 V_i 为开环系统的输入端,放大器的输出 V_{o1} 为开环系统的输出端,则所述开环系统将检测机构置于反馈回路上;模态匹配过程中,通过参数配置拉大第一谐振峰与第二谐振峰之间的频差,使系统工作频率在第一个谐振峰对应的频率范围内。

6. 根据权利要求4所述的基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制方法,其特征在于:所述低通滤波器的截止频率参考校准信号的频率大小作相应设置,确保能够完全滤除交流分量,提取出有效的控制信号。

一种基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及微机电系统 (MEMS) 和微惯性器件测量技术,具体涉及到一种基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制装置

背景技术

[0002] MEMS陀螺仪在近二十多年的研究历程中已经取得了长足的进步,目前已基本能满足中低端的导航、制导和控制等军事、工业和消费类应用需求。随着MEMS陀螺仪研究的推进和深入,MEMS陀螺仪能否突破目前精度成为学术界和工业界普遍关注的焦点问题。因此,如何进一步提高MEMS陀螺仪的精度,挖掘MEMS陀螺仪的潜在能力,甚至突破其极限精度,是近年来MEMS陀螺仪研究的热点问题。模态匹配技术主要是指通过一定的控制技术或者工艺手段实现MEMS陀螺仪的驱动模态和检测模态匹配。早期有诸多文献进行了相关技术的研究,如采用额外辅助工艺沉积或刻蚀多晶硅来改变模态频率,应用局部热应力或静电负刚度来软化弹簧刚度,或者采用自适应控制方法实现模态匹配。早期研究都有诸多缺陷,如需要人工介入,很难满足大规模生产,同时也很难实现稳定完全模态匹配控制;或者控制方法复杂,难以采用实际电路实现等缺陷。随着研究的推进,后续出现多种借助控制技术的自动模态匹配方法,取得了较好的效果。

发明内容

[0003] 发明目的:针对现有技术的不足,本发明设计了一种基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制装置,将驱动模态和检测模态之间的频差调整为零。可以实现最大的机械灵敏度,且机械灵敏度与品质因数成线性关系,可以充分发挥检测模态品质因数对机械灵敏度的放大作用,理论上可以在极限品质因数(几十万甚至几百万)条件下达到极限机械灵敏度,具有很大的潜力。使用两路与驱动信号同频差的校准信号(一路频率高于驱动模态中心频率,一路频率低于驱动模态中心频率),PI控制器参考信号设置为0即可,不需要开环寻找参考点。校准信号以力反馈的形式加载在检测机构上,将检测机构置于反馈回路中,充分发挥检测模态的幅频特性,使得校准信号的经过检测机构的输出幅度较大,便于后续信号提取。

[0004] 技术方案:一种基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制装置,包括检测机构、前置放大器、加法器、放大器、解调器、力矩变换器、校准信号发生器、移相器、低通滤波器、PI控制器、刚度调节器;

[0005] 所述检测机构的输出端连接前置放大器的输入端,使得检测机构的输出信号经过前置放大器变换放大后提取出来;

[0006] 所述前置放大器的输出端与校准信号的输出端分别连接加法器的输入端,使得前置放大器的输出与校准信号的输出在加法器内实现信号融合;

[0007] 所述加法器的输出端连接放大器的输入端,使得加法器的输出经过放大器作相应

的放大处理；

[0008] 所述放大器的输出端分别连接解调器的输入端和力矩变换器的输入端,使得放大后的信号一方面作为解调器的输入信号,另一方面经过力矩变换器实现电压到力的转化；

[0009] 所述力矩变换器的输出端连接检测机构的输入端,实现将电压信号变换为对应的力施加在检测机构上,完成力反馈；

[0010] 所述校准信号的输出端连接移相器的输入端,利用移相器对输入信号作 90° 移相后输出；

[0011] 所述校准信号的输出端与移相器的输出端同时连接解调器的输入端,作为解调器的输入信号,解调器实现对放大器输出信号的解调；

[0012] 所述解调器的输出端连接低通滤波器的输入端,低通滤波器的输出端连接PI控制器的输入端,利用PI控制器对输入信号作相应的比例-积分控制;PI控制器的控制参数需要参考校准信号的频率作相应的调整设计,以确保系统工作在调节速度快,调节稳定的状态。

[0013] 所述PI控制器的输出端连接刚度调节器的输入端,刚度调节器的输出端连接检测机构的输入端,刚度调节器将PI控制器的输出作相应的处理后,将输出信号施加在检测机构上,完成对检测机构的刚度调节。检测机构的谐振频率因刚度改变而改变,最终完成检测模态与驱动模态间的模态匹配。

[0014] 进一步的,所述检测机构的简化模型包括一对检测电极S+和S-,一对反馈电极F+和F-,一个公共电极G;所述检测电极与前置放大器相连,完成对检测模态信号的提取;所述反馈电极同时与力矩变换器和刚度调节器相连,分别实现力反馈和刚度调节的作用。

[0015] 进一步的,所述刚度调节器内部包含两个乘法器,机械参数 k_m ,输入信号为PI控制器的输出信号 V_p 以及检测机构的检测输出信号;第一个乘法器用于实现对PI控制器输出信号作平方处理,第一个乘法器的输出作为第二个乘法器的输入,与机械参数及检测机构的输出相乘,第二个乘法器的输出结果为刚度调节器的输出;刚度调节器的输出施加在反馈电极F+和F-上,实现对检测机构的刚度调节。

[0016] 进一步的,所述解调器内部包含8个乘法器,4个低通滤波器,3个加法器;所述解调器的输入信号为放大器的输出 V_{o1} 、移相器的输出c和d以及校准信号的输出a和b;首先将放大器的输出 V_{o1} 与移相器的输出c和d以及校准信号的输出a和b相乘,得到信号a1、b1、c1、d1,然后四路信号经过低通滤波器后作平方处理,得到信号a2、b2、c2、d2,分别将a2和c2、b2和d2相加,得到信号db、ca,最后将db与ca的差值作为解调器的输出;所述解调器实现对检测机构输出信号幅值大小的测量,并去除相位的影响。

[0017] 进一步的,为了提高MEMS陀螺模态匹配过程中的抗干扰能力,该装置采用了外部校准信号输入,获得所需的模态匹配控制量;所述外部校准信号由两组频率不同的余弦信号a和b叠加而成,一组频率高于驱动模态的中心频率,一组低于驱动模态的中心频率,且二者与驱动模态的中心频率的频差相等,实现自动模态匹配,而不需要额外的参考量;所述移相器实现对两组校准信号 90° 精确移相,移相后的两组信号c和d与校准信号a和b一起作为后续解调所需要的输入信号;模态匹配完成后,PI控制器的输入信号在0附近小幅波动。

[0018] 进一步的,所述外部校准信号的输入是通过力反馈的形式来实现的,具体如下:以外部校准信号 V_i 为开环系统的输入端,放大器的输出 V_{o1} 为开环系统的输出端,则所述开环系统将检测机构置于反馈回路上;模态匹配过程中,通过参数配置拉大第一谐振峰与第二

谐振峰之间的频差,使系统工作频率在第一个谐振峰对应的频率范围内。

[0019] 进一步的,所述低通滤波器的截止频率参考校准信号的频率大小作相应设置,确保能够完全滤除交流分量,提取出有效的控制信号。

[0020] 有益效果:

[0021] (1) 模态匹配是指将驱动模态和检测模态之间的频差调整为零。模态匹配主要优势是可以实现最大的机械灵敏度,且机械灵敏度与品质因数成线性关系,可以充分发挥检测模态品质因数对机械灵敏度的放大作用,理论上可以在极限品质因数(几十万甚至几百万)条件下达到极限机械灵敏度,具有很大的潜力。

[0022] (2) 使用外部校准信号输入,抑制在模态匹配过程的信号耦合和干扰。

[0023] (3) 使用两路与驱动信号同频差的校准信号(一路频率高于驱动模态中心频率,一路频率低于驱动模态中心频率),PI控制器参考信号设置为0即可,不需要开环寻找参考点。

[0024] (4) 校准信号以力反馈的形式加载在检测机构上,将检测机构置于反馈回路中,充分发挥检测模态的幅频特性,使得校准信号的经过检测机构的输出幅度较大,便于后续信号提取。

[0025] (5) 解调模块去除了相位的影响,在模态匹配过程中,简化了系统的控制难度。

附图说明

[0026] 图1是本发明的基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制装置结构图;

[0027] 图2是本发明的检测机构的简化模型;

[0028] 图3是本发明的校准信号的构成示意图;

[0029] 图4是本发明的开环系统的波特图;

[0030] 图5是本发明的刚度调节器结构示意图;

[0031] 图6是本发明的解调器结构示意图。

具体实施方式

[0032] 下面结合附图对本发明做更进一步的解释。

[0033] 图1为本发明的基于负刚度效应的MEMS陀螺自动模态匹配控制装置结构图,包括检测机构、前置放大器、加法器、放大器、解调器、力矩变换器、校准信号发生器、移相器、低通滤波器、PI控制器、刚度调节器。检测机构的输出与刚度调节器相连,而刚度调节器的输出又作为检测机构的输入,以此达到调节检测机构刚度的目的。同时,检测机构的输出端与前置放大器相连,以此实现对检测机构输出信号的提取。前置放大器的输出与校准信号一同作为加法器的输入,实现二者的叠加。加法器的输出与放大器的输入相连,通过放大器进行相应的幅值放大。放大器的输出一方面作为解调器的输入信号,一方面与力矩变换器相连,力矩变换器的输出与检测机构相连,力矩变换器实现电压到力的变化,将放大器的输出信号施加在检测机构上。90°移相器的输入为校准信号,实现对校准信号的90°移相。90°移相器的输出与加法器的输出以及校准信号同时作为解调器的输入信号,解调器通过相应的解调方法提取所需的控制信号。解调器的输出与低通滤波器的输入相连,进一步滤除不需要的交流信号。低通滤波器的输出作为PI控制器的输入,PI控制器实现相应的比例-积分控制。PI控制器的输出作为刚度调节器的输入,通过刚度调节器改变检测机构的刚度,进而改

变其谐振频率,实现模态匹配。

[0034] 图2所示为本发明的检测机构的简化模型。检测机构简化模型主要包括一个公共电极G、一对检测电极S⁺和S⁻、一对反馈电极F⁺和F⁻,检测电极S⁺和S⁻、反馈电极F⁺和F⁻分别与公共电极(G)构成检测电容器和反馈电容器。检测电极S⁺和S⁻与前置放大器相连,实现对检测电容器电容变化的提取。检测电极S⁺和S⁻与刚度调节器输入端相连,刚度调节器的输出与反馈电极F⁺和F⁻相连,实现对检测机构的刚度调节。反馈电极与力矩变换器的输出相连,力矩变换器将电压信号变换成力施加在反馈电极上。

[0035] 图3为本发明中的校准信号的构成示意图。校准信号为两组频率不同的余弦信号a和b组成,其中,信号a的频率为 w_1 ,信号b的频率为 w_2 。假设驱动模态的中心频率为 w_d ,则 $w_1-w_d=w_d-w_2$ 。信号a、b经过加法器混合后作为校准信号,同时,信号a、b作为90°移相器的输入,90°移相器实现对信号a、b的90°移相,输出对应的信号c、d。校准信号a、b和移相后的信号c、d分别作为解调器的输入信号。

[0036] 图4为本发明中的开环系统波特图。以校准信号为输入端,放大器的输出为输出端,其传递函数 $H(s)=\frac{V_{o1}}{V_i}$ 。由于把检测机构放置在反馈回路中,因此其幅相曲线中会出现两个峰值。在参数配置中,通过增益的选择,将第二个谐振峰的位置向频率大的方向移动,避免在模态匹配过程中有信号落入第二谐振峰的频率范围内。

[0037] 图5为本发明中的刚度调节器结构示意图。内部包含两个乘法器,机械参数 k_m ,输入信号为PI控制器的输出信号 V_p 以及检测机构的检测输出信号。第一个乘法器用于实现对PI控制器输出信号作平方处理,第一个乘法器的输出作为第二个乘法器的输入,与机械参数及检测机构的输出相乘,第二个乘法器的输出结果为刚度调节器的输出。刚度调节器的输出施加在反馈电极F⁺和F⁻上,实现对检测机构的刚度调节。

[0038] 图6为本发明中的解调器结构示意图。解调器内部包含8个乘法器,4个低通滤波器,3个加法器。解调器的输入信号为放大器的输出 V_{o1} 、移相器的输出c和d以及校准信号的输出a和b。首先将放大器的输出 V_{o1} 与移相器的输出c和d以及校准信号的输出a和b相乘,得到信号a1、b1、c1、d1,然后四路信号经过低通滤波器后作平方处理,得到信号a2、b2、c2、d2,分别将a2和c2、b2和d2相加,得到信号db、ca,最后将db与ca的差值作为解调器的输出。该解调器实现对检测机构输出信号幅值大小的测量,并去除相位的影响。

[0039] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

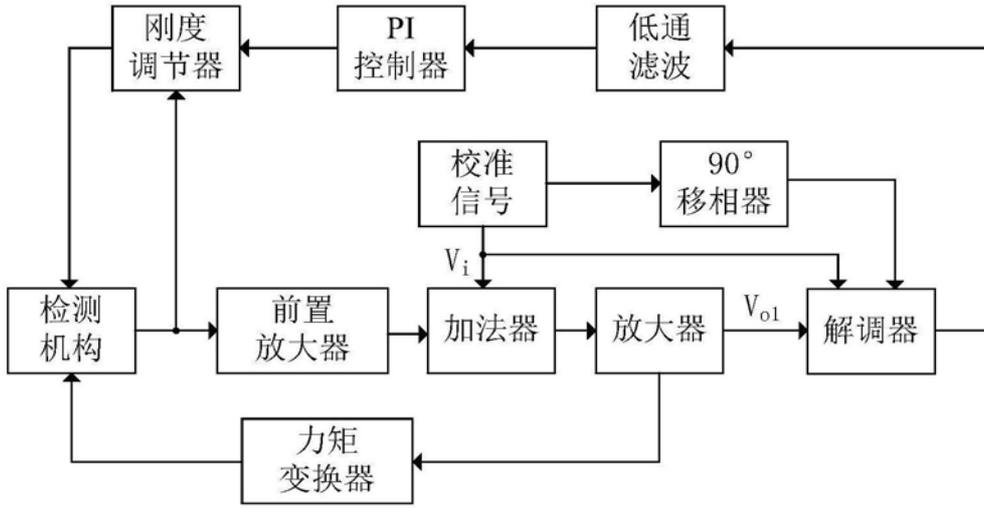


图1

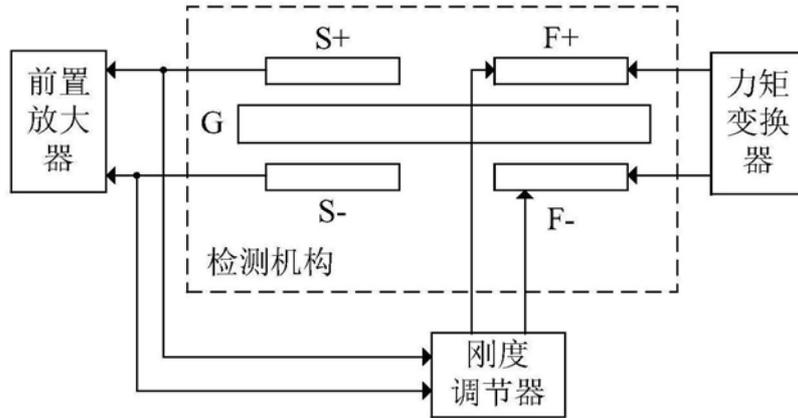


图2

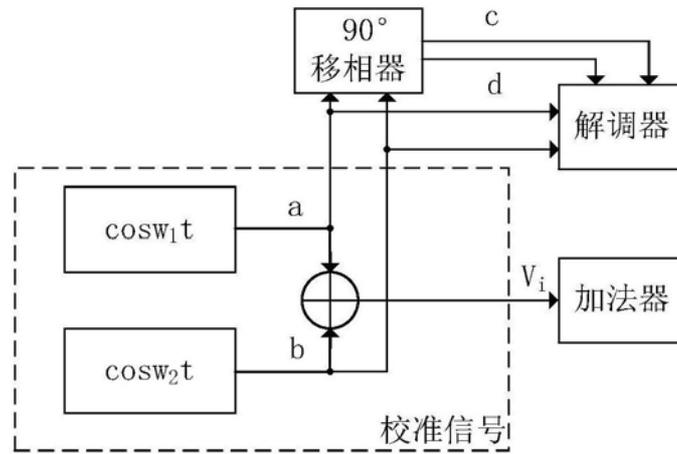


图3

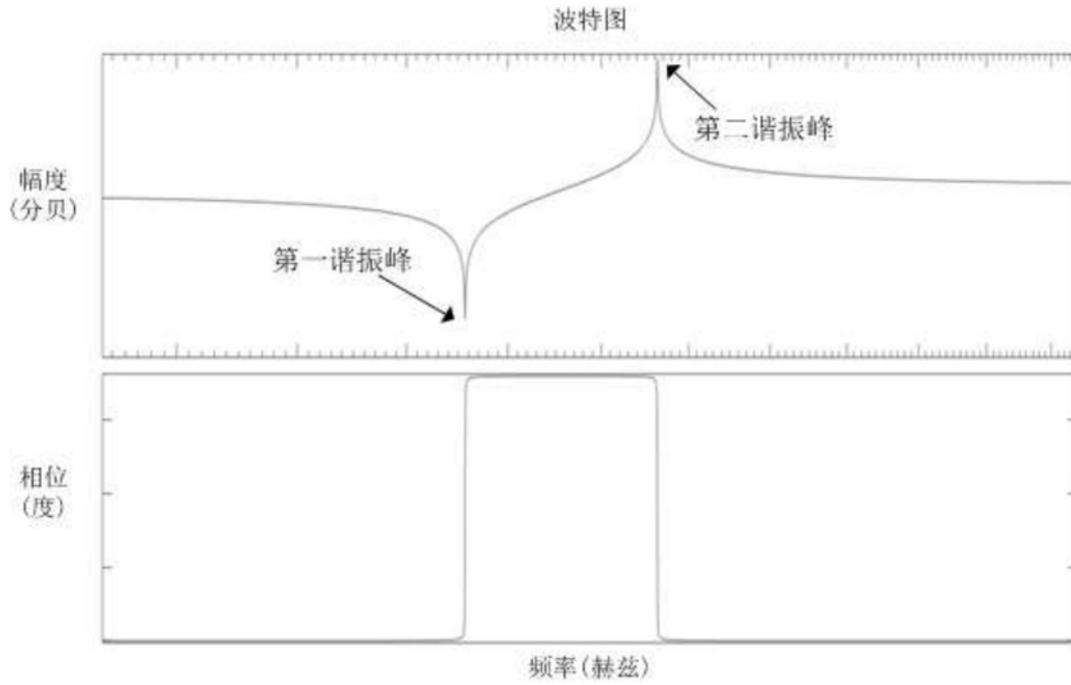


图4

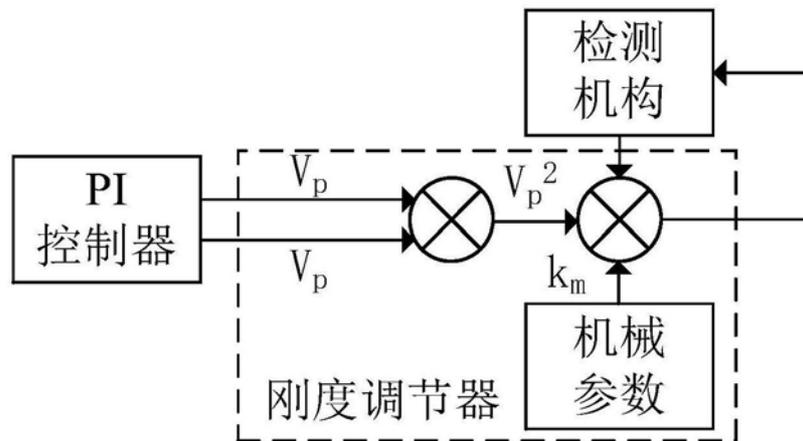


图5

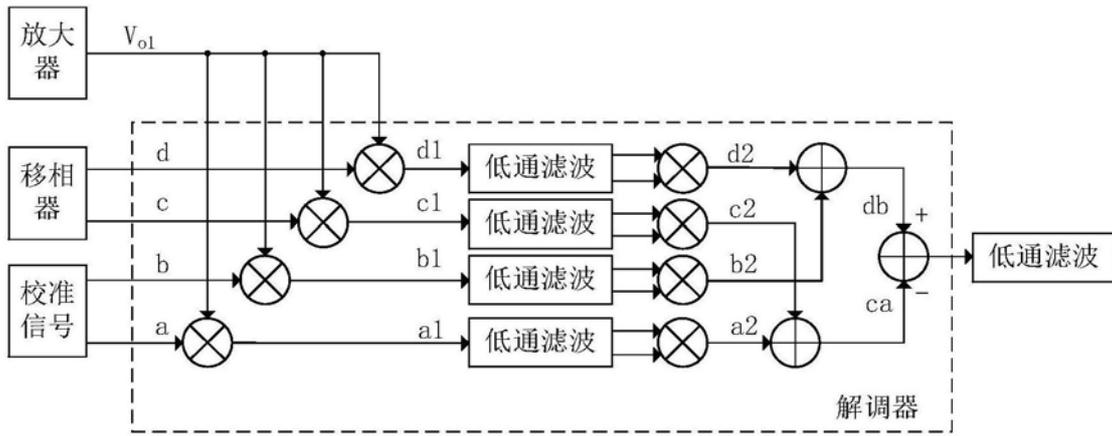


图6