



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113949325 B

(45) 授权公告日 2024. 04. 09

(21) 申请号 202111290970.6

H02P 25/06 (2016.01)

(22) 申请日 2021.10.29

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113949325 A

- DE 10321962 A1, 2004.12.09
- JP 2017192294 A, 2017.10.19
- US 2005031132 A1, 2005.02.10
- US 2007196214 A1, 2007.08.23
- US 2009028371 A1, 2009.01.29
- US 2014049201 A1, 2014.02.20
- US 5465035 A, 1995.11.07
- WO 2020228064 A1, 2020.11.19

(43) 申请公布日 2022.01.18

(73) 专利权人 歌尔股份有限公司  
地址 261031 山东省潍坊市高新技术产业  
开发区东方路268号

(72) 发明人 刘兵 刘钰佳 杨鑫峰

审查员 石二微

(74) 专利代理机构 深圳市世纪恒程知识产权代  
理事务所 44287  
专利代理师 关向兰

(51) Int. Cl.

H02P 23/14 (2006.01)

H02P 23/20 (2016.01)

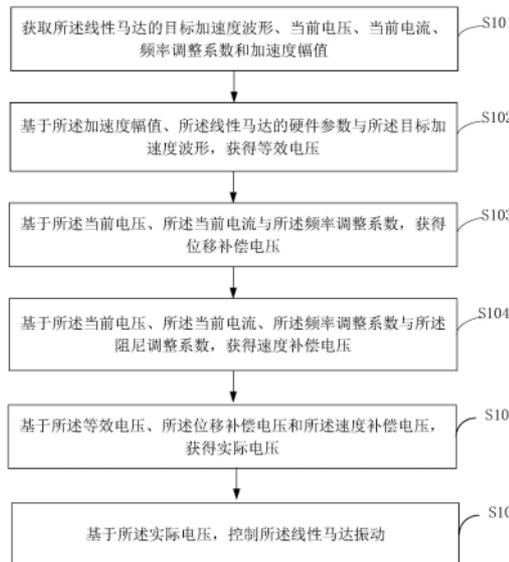
权利要求书3页 说明书12页 附图4页

(54) 发明名称

线性马达的控制方法、控制装置、设备以及  
介质

(57) 摘要

本发明公开了一种线性马达的控制方法、控制装置、设备以及介质,属于线性马达技术领域,该方法包括:获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值;基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形,获得等效电压;基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得位移补偿电压;基于所述当前电压、所述当前电流、所述频率调整系数与所述阻尼调整系数,获得速度补偿电压;基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得速度补偿电压;基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压,获得实际电压;基于所述实际电压,控制所述线性马达振动。采用本发明的控制方法,可实现加速度幅值和波形的准确控制。



1. 一种线性马达的控制方法,其特征在于,所述方法包括:

获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值;其中,频率调整系数为调整等效扫频特性后等效谐振频率相对于实际谐振频率的比值;

基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形,获得所述目标加速度波形对应的等效电压;

基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得位移补偿电压;

基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得速度补偿电压;

基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压,获得实际电压;

基于所述实际电压,控制所述线性马达振动;

所述基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得位移补偿电压,包括:

基于所述当前电压和所述当前电流,获得振子当前速度;

对所述当前速度求导得到当前加速度;

基于所述振子当前速度、所述当前加速度与所述当前电流,获得当前位移;

基于所述当前位移、所述频率调整系数和第四预设公式,获得位移补偿电压;第四预设公式为:

$$u_{cx}(t) = (1 - k_{\omega}^2) \frac{kR}{Bl} x(t);$$

其中, $u_{cx}(t)$ 为所述位移补偿电压, $Bl$ 为磁场强度, $R$ 为线圈直流电阻, $k_{\omega}$ 为所述频率调整系数;

所述基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得速度补偿电压,包括:

基于所述当前电压与所述当前电流,获得振子当前速度;

基于所述振子当前速度、所述频率调整系数与第五预设公式,获得速度补偿电压;所述第五预设公式为:

$$u_{cv}(t) = (1 - k_{\omega}) \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t);$$

其中, $u_{cv}(t)$ 为所述速度补偿电压, $Bl$ 为磁场强度, $r$ 为阻尼系数, $R$ 为线圈直流电阻, $k_{\omega}$ 为所述频率调整系数, $v(t)$ 为所述振子当前速度, $k$ 为弹簧劲度系数;

所述基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压,获得实际电压,包括:

将所述等效电压、所述位移补偿电压以及所述速度补偿电压的和,作为所述实际电压。

2. 根据权利要求1所述的线性马达的控制方法,其特征在于,所述基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形,获得所述目标加速度波形对应的等效电压,包括:

基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数和第一预设公式,获得等效电压幅值;

基于所述等效电压幅值、所述目标加速度波形与第二预设公式,获得等效电压;

第一预设公式为:

$$u'_m = \frac{a_m}{K},$$

其中,  $u'_m$  为所述等效电压幅值,  $a_m$  为所述加速度幅值,  $K = \frac{Bl}{Rm}$ ,  $m$  为线性马达的振子质量,  $Bl$  为磁场强度,  $r$  为阻尼系数,  $R$  为线圈直流电阻;

第二预设公式为:

$$u'_1(t) = u'_m a(t);$$

其中,  $u'_1(t)$  为所述等效电压,  $a(t)$  为所述目标加速度波形,  $t$  为时刻。

3. 根据权利要求1所述的线性马达的控制方法, 其特征在于, 所述基于所述振子当前速度、所述当前加速度与所述当前电流, 获得当前位移, 包括:

基于所述振子当前速度、所述当前加速度、所述当前电流和第三预设公式, 获得当前位移; 第三预设公式为:

$$x(t) = \frac{1}{k} [Bl \cdot i_{fdb}(t) - ma(t) - rv(t)];$$

其中,  $x(t)$  为所述当前位移,  $k$  为弹簧劲度系数,  $i_{fdb}(t)$  为当前电流,  $a(t)$  为所述当前加速度,  $v(t)$  为所述振子当前速度,  $r$  为阻尼系数。

4. 根据权利要求1所述的线性马达的控制方法, 其特征在于, 所述获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值, 包括:

获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数、阻尼调整系数和加速度幅值; 其中, 阻尼调整系数为调整等效扫频特性后等效阻尼相对于实际阻尼比值;

所述基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数, 获得速度补偿电压, 包括:

基于所述当前电压与所述当前电流, 获得振子当前速度;

基于所述振子当前速度、所述频率调整系数、所述阻尼调整系数、与第六预设公式, 获得速度补偿电压;

第六预设公式为利用所述阻尼调整系数对所述第五预设公式进行修改得到, 具体为:

$$u_{cv}(t) = (1 - k_\xi k_\omega) \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t);$$

$k_\xi$  为所述阻尼调整系数。

5. 一种线性马达的控制装置, 其特征在于, 包括:

参数获取模块, 用于获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值; 其中, 频率调整系数为调整等效扫频特性后等效谐振频率相对于实际谐振频率的比值;

等效电压获得模块, 用于基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形, 获得所述目标加速度波形对应的等效电压;

位移补偿电压获得模块, 用于基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数, 获得位移补偿电压;

速度补偿电压获得模块,用于基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得速度补偿电压;

实际电压获得模块,用于基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压,获得实际电压;

马达控制模块,用于基于所述实际电压,控制所述线性马达振动;

所述位移补偿电压获得模块,具体用于基于所述当前电压和所述当前电流,获得振子当前速度;对所述振子当前速度求导得到当前加速度;基于所述振子当前速度、所述当前加速度与所述当前电流,获得当前位移;基于所述当前位移、所述频率调整系数和第四预设公式,获得位移补偿电压;

第四预设公式为:

$$u_{cx}(t) = (1 - k_{\omega}^2) \frac{kR}{Bl} x(t);$$

其中, $u_{cx}(t)$ 为所述位移补偿电压, $Bl$ 为磁场强度, $R$ 为线圈直流电阻, $k_{\omega}$ 为所述频率调整系数;

所述速度补偿电压获得模块,具体用于基于所述当前电压与所述当前电流,获得振子当前速度;基于所述当前速度、所述频率调整系数与第五预设公式,获得速度补偿电压;

$$\text{所述第五预设公式为: } u_{cv}(t) = (1 - k_{\omega}) \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t);$$

其中, $u_{cv}(t)$ 为所述速度补偿电压, $Bl$ 为磁场强度, $r$ 为阻尼系数, $R$ 为线圈直流电阻, $k_{\omega}$ 为所述频率调整系数, $v(t)$ 为所述振子当前速度, $k$ 为弹簧劲度系数;

所述实际电压获得模块,具体用于将所述等效电压、所述位移补偿电压以及所述速度补偿电压的和,作为所述实际电压。

6. 一种电子设备,其特征在于,包括:

线性马达;

驱动模块,所述驱动模块与所述线性马达连接,所述驱动模块用于为所述线性马达提供驱动电压,以驱动振动单元振动;以及

电压与电流检测模块,用于检测所述线性马达的当前电流与当前电压;

处理模块,所述处理模块分别与所述电压与电流检测模块和所述驱动模块连接,用于执行如权利要求1至4任一项所述的线性马达的控制方法。

7. 一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质上存储有线性马达的控制程序,所述线性马达的控制程序被处理器执行时实现如权利要求1至4任一项所述的线性马达的控制方法。

## 线性马达的控制方法、控制装置、设备以及介质

### 技术领域

[0001] 本发明涉及线性马达技术领域,尤其涉及一种线性马达的控制方法、控制装置、设备以及介质。

### 背景技术

[0002] 线性马达(Linear Resonant Actuator,LRA)凭借其振感强烈、丰富、清脆,能耗低等优点,已经广泛应用于电子设备的各种振动场合。对于电子设备的应用而言,通过构造多样化的宽频振动波形(加速度波形),线性马达可以实现非常丰富、真实的振感反馈。

[0003] 其中,线性马达的振感主要通过驱动振子产生加速度来实现,加速度响应越快,振感越清脆;加速度幅值越大,振感越强。

[0004] 其中,当电压为谐振频率时,线性马达的加速度响应幅值最大,振感最强,但是,相关技术中,在谐振频率附近,线性马达的电压波形与加速度波形形状差异巨大,难以实现准确的加速度幅值和波形控制。

[0005] 上述内容仅用于辅助理解本发明的技术方案,并不代表承认上述内容是现有技术。

### 发明内容

[0006] 本发明的主要目的在于提供一种线性马达的控制方法、控制装置、设备以及介质,旨在解决线性马达难以精确控制加速度的响应时间的问题。

[0007] 为实现上述目的,第一方面,本发明提供一种线性马达的控制方法,所述方法包括:

[0008] 获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值;

[0009] 基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形,获得等效电压;

[0010] 基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得位移补偿电压;

[0011] 基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得速度补偿电压;

[0012] 基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压,获得实际电压;

[0013] 基于所述实际电压,控制所述线性马达振动。

[0014] 在一实施例中,所述基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形,获得等效电压,包括:

[0015] 基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数和第一预设公式,获得等效电压幅值;

[0016] 基于所述等效电压幅值、所述目标加速度波形与第二预设公式,获得等效电压;

[0017] 第一预设公式为:

$$[0018] \quad u'_m = \frac{a_m}{K},$$

[0019] 其中,  $u'_m$  为所述等效电压幅值,  $a_m$  为所述加速度幅值,  $K = \frac{Bl}{Rm}$ ,  $m$  为线性马达的

振子质量,  $Bl$  为磁场强度,  $R$  为线圈直流电阻;

[0020] 第二预设公式为:

$$[0021] \quad u'_1(t) = u'_m a(t);$$

[0022] 其中,  $u'_1(t)$  为所述等效电压,  $a(t)$  为所述目标加速度波形,  $t$  为时刻。

[0023] 在一实施例中, 所述基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数, 获得位移补偿电压, 包括:

[0024] 基于所述当前电压和所述当前电流, 获得振子当前速度;

[0025] 对所述当前速度求导得到当前加速度;

[0026] 基于所述振子当前速度、所述当前加速度与所述当前电流, 获得当前位移;

[0027] 基于所述当前位移和所述频率调整系数, 获得位移补偿电压。

[0028] 在一实施例中, 所述基于所述振子当前速度、所述当前加速度与所述当前电流, 获得当前位移, 包括:

[0029] 基于所述振子当前速度、所述当前加速度、所述当前电流和第三预设公式, 获得当前位移; 第三预设公式为:

$$[0030] \quad x(t) = \frac{1}{k} [Bl \cdot i_{fdb}(t) - ma(t) - rv(t)];$$

[0031] 其中,  $x(t)$  为所述当前位移,  $k$  为弹簧劲度系数,  $a(t)$  为所述当前加速度,  $v(t)$  为所述振子当前速度,  $r$  为阻尼系数。

[0032] 在一实施例中, 所述基于所述当前位移和所述频率调整系数, 获得位移补偿电压, 包括:

[0033] 基于所述当前位移、所述频率调整系数和第四预设公式, 获得位移补偿电压; 第四预设公式为:

$$[0034] \quad u_{cx}(t) = (1 - k_\omega^2) \frac{kR}{Bl} x(t);$$

[0035] 其中,  $u_{cx}(t)$  为所述位移补偿电压,  $Bl$  为磁场强度,  $R$  为线圈直流电阻,  $k_\omega$  为所述频率调整系数。

[0036] 在一实施例中, 所述基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数, 获得速度补偿电压, 包括:

[0037] 基于所述当前电压与所述当前电流, 获得振子当前速度;

[0038] 基于所述振子当前速度、所述频率调整系数与第五预设公式, 获得速度补偿电压; 所述第五预设公式为:

$$[0039] \quad u_{cv}(t) = (1 - k_\omega) \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t);$$

[0040] 其中,  $u_{cv}(t)$  为所述速度补偿电压,  $Bl$  为磁场强度,  $r$  为阻尼系数,  $R$  为线圈直流电

阻,  $k_{\omega}$  为所述频率调整系数,  $v(t)$  为所述振子当前速度,  $k$  为弹簧劲度系数。

[0041] 在一实施例中, 所述获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值, 包括:

[0042] 获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数、阻尼调整系数和加速度幅值;

[0043] 所述基于所述振子当前速度、所述频率调整系数与第五预设公式, 获得速度补偿电压, 包括:

[0044] 基于所述振子当前速度、所述频率调整系数与第六预设公式, 获得速度补偿电压; 第六预设公式为:

$$[0045] \quad u_{cv}(t) = (1 - k_{\xi} k_{\omega}) \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t);$$

[0046]  $k_{\xi}$  为所述阻尼调整系数。

[0047] 第二方面, 本发明还提供了一种线性马达的控制装置, 包括:

[0048] 参数获取模块, 用于获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值;

[0049] 等效电压获得模块, 用于基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形, 获得等效电压;

[0050] 位移补偿电压获得模块, 用于基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数, 获得位移补偿电压;

[0051] 速度补偿电压获得模块, 用于基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数, 获得速度补偿电压;

[0052] 实际电压获得模块, 用于基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压, 获得实际电压;

[0053] 马达控制模块, 用于基于所述实际电压, 控制所述线性马达振动。

[0054] 第三方面, 本发明还提供了一种电子设备, 包括:

[0055] 线性马达;

[0056] 驱动模块, 所述驱动模块与所述线性马达连接, 所述驱动模块用于为所述线性马达提供驱动电压, 以驱动振动单元振动; 以及

[0057] 电压与电流检测模块, 用于检测所述线性马达的当前电流与当前电压

[0058] 处理模块, 所述处理模块分别与所述电压与电流检测模块和所述驱动模块连接, 用于执行: 获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值; 基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形, 获得等效电压; 基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数, 获得位移补偿电压; 基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数, 获得速度补偿电压; 基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压, 获得实际电压; 基于所述实际电压, 控制所述线性马达振动。

[0059] 第四方面, 本发明还提供了一种计算机可读存储介质, 所述计算机可读存储介质上存储有线性马达的控制程序, 所述线性马达的控制程序被处理器执行时实现如上述的线

性马达的控制方法。

[0060] 本发明提出的一种线性马达的控制方法、控制装置、设备及介质。该方法获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值；基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形，获得等效电压；基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数，获得位移补偿电压；基于所述当前电压、所述当前电流、所述频率调整系数，获得速度补偿电压；基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压，获得实际电压；基于所述实际电压，控制所述线性马达振动。

[0061] 由此，本发明根据当前电压和当前电流以及频率调整系数和加速度幅值，构造线性马达的位移补偿电压和速度补偿电压来改变线性马达实际扫频特性，使得调整后的扫频特性在原来的谐振频率处的相位基本为 $0^\circ$ ，即输入信号到输出信号的传递过程中基本无相位改变，从而实现加速度幅值和波形的准确控制。

### 附图说明

[0062] 图1为本申请线性马达的控制方法第一实施例的流程示意图；

[0063] 图2为本申请线性马达的控制方法第二实施例的流程示意图；

[0064] 图3为本申请一实施例的目标加速度形状曲线；

[0065] 图4为本申请一实施例的扫频特性调整前的马达驱动电压和加速度曲线；

[0066] 图5为本申请一实施例的扫频特性调整后的马达等效电压和加速度曲线；

[0067] 图6为本申请一实施例的扫频特性调整算法根据反馈信号自行计算补偿电压之后的实际电压波形；

[0068] 图7为本申请实施例线性马达的控制装置的模块示意图；

[0069] 图8为本申请电子设备的结构示意图。

[0070] 本发明目的的实现、功能特点及优点将结合实施例，参照附图做进一步说明。

### 具体实施方式

[0071] 应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0072] 线性马达 (Linear Resonant Actuator, LRA) 凭借其振感强烈、丰富、清脆以及能耗低等优点，已经广泛应用于各种消费级电子设备的各种振动场合。通过构造多样化的宽频振动波形 (加速度波形)，马达可以实现非常丰富、真实的振感反馈。线性马达的振感主要通过驱动振子产生加速度来实现，加速度响应越快、余震越短，振感越清脆；加速度幅值越大，振感越强。

[0073] 其中，当电压为谐振频率时，马达的加速度响应幅值最大，振感最强。

[0074] 对于线性马达，线性马达的驱动电压为：

$$[0075] \quad u(t) = \frac{kR}{Bl} x(t) + \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t) + \frac{mR}{Bl} a(t)$$

[0076] 其中， $u(t)$  为电压； $x(t)$  为位移； $v(t)$  为速度； $a(t)$  为加速度； $m$  为振子质量； $Bl$  为磁场强度； $k$  为弹簧劲度系数； $r$  为阻尼系数； $R$  为线圈直流电阻。

[0077] 根据前述的电压方程推导马达扫频特性 (加速度除以电压) 的传递函数  $G(s)$ ：

$$[0078] \quad G(s) = \frac{a}{u} = \frac{Bl s^2}{Rk + (Bl^2 + Rr)s + Rms^2} = K \frac{s^2}{s^2 + \xi \omega_c s + \omega_c^2};$$

$$[0079] \quad \text{其中, } K = \frac{Bl}{Rm}, \quad \omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \xi = \frac{Bl^2 + r}{mR \omega_c}。$$

[0080] 可见,线性马达在谐振频率 $\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 处可实现最高幅值的加速度反馈,因此电子设备的应用开发人员一般在谐振频率附近构造驱动波形,以利用最低的电压幅值实现最强共振输出。然而,线性马达在谐振频率附近的相位变化剧烈,导致在谐振频率附近的加速度波形与电压波形存在明显差异,不利于加速度波形的准确控制。

[0081] 为此,本实施例提供了一种线性马达的控制方法,通过频率调整系数改变线性马达的实际扫频特性,使得调整后的扫频特性在原来的谐振频率 $\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 处的相位基本为 $0^\circ$ ,即输入信号到输出信号的传递过程中基本无相位改变,从而实现加速度幅值和波形的准确控制。

[0082] 下面结合一些具体实施方式进一步阐述本申请的发明构思。

[0083] 本申请提供一种线性马达的控制方法第一实施例,参阅图1,图1为本申请线性马达的控制方法第一实施例的流程示意图。

[0084] 本实施例中,所述方法包括:

[0085] 步骤S101、获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值。

[0086] 本实施例中,方法的执行主体为电子设备中线性马达的硬件电路中的处理模块。处理模块与驱动模块连接,驱动模块通过功率放大器与线性马达连接,从而处理模块可发出一驱动信号至驱动模块,驱动模块为线性马达提供电压。

[0087] 本实施例中,处理模块可通过电子设备的用户接口获取到用户输入的目标加速度波形数据 $a(t)$ 。其中,目标加速度波形数据 $a(t)$ 限定为马达谐振频率。

[0088] 处理模块还可接收用户限定的加速度幅值 $a_m$ 、阻尼调整系数 $k_\xi$ 、频率调整系数 $k_\omega$ 。其中,阻尼调整系数 $k_\xi$ 为调整等效扫频特性后等效阻尼相对于实际阻尼比值,频率调整系数 $k_\omega$ 为调整等效扫频特性后等效谐振频率相对于实际谐振频率的比值。

[0089] 且处理模块还连接有电压和电流检测模块,以接收电压和电流检测模块实时反馈的线性马达的当前电压和当前电流。

[0090] 步骤S102、基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形,获得等效电压。

[0091] 具体而言,本步骤用于计算得到电压在补偿前的基准电压数据。线性马达的硬件参数包括线性马达的振子质量 $m$ ,磁场强度 $Bl$ ,阻尼系数 $r$ ,线圈直流电阻 $R$ 等。

[0092] 其中,步骤S102包括:

[0093] 步骤A10、基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数和第一预设公式,获得

等效电压幅值;第一预设公式为:

$$[0094] \quad u'_m = \frac{a_m}{K},$$

[0095] 其中, $u'_m$ 为所述等效电压幅值, $a_m$ 为所述加速度幅值, $K = \frac{Bl}{Rm}$ , $m$ 为线性马达的

振子质量, $Bl$ 为磁场强度, $r$ 为阻尼系数, $R$ 为线圈直流电阻。

[0096] 步骤A20、基于所述等效电压幅值、所述目标加速度波形与第二预设公式,获得等效电压;第二预设公式为:

$$[0097] \quad u'_1(t) = u'_m a(t);$$

[0098] 其中, $u'_1(t)$ 为所述等效电压, $a(t)$ 为所述目标加速度波形, $t$ 为时刻。

[0099] 如目标加速度形状曲线为:

$$[0100] \quad a(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\omega_c}{3}t\right)\sin(\omega_c t), t \in \left[0, \frac{3\pi}{\omega_c}\right] \\ 0, t \in \left[\frac{3\pi}{\omega_c}, +\infty\right] \end{cases}, \text{则等效电压为:}$$

$$[0101] \quad u'_1(t) = \begin{cases} u_m \sin\left(\frac{\omega_c}{3}t\right)\sin(\omega_c t), t \in \left[0, \frac{3\pi}{\omega_c}\right] \\ 0, t \in \left[\frac{3\pi}{\omega_c}, +\infty\right] \end{cases}。$$

[0102] 步骤S103、基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得位移补偿电压。

[0103] 本实施例中,用于当前状态信息,从位移这一角度对电压进行补偿。

[0104] 具体而言,步骤S103包括:

[0105] 步骤B10、基于所述当前电压和所述当前电流,获得振子当前速度。

[0106] 振子当前速度 $v(t) = \frac{1}{Bl} [u_{fdb}(t) - Ri_{fdb}(t)]$ ,其中, $u_{fdb}(t)$ 为当前电压, $i_{fdb}(t)$

为当前电流, $R$ 为线圈直流电阻。

[0107] 步骤B20、对所述当前速度求导得到当前加速度。

[0108] 步骤B30、基于所述振子当前速度、所述当前加速度与所述当前电流,获得当前位移。

[0109] 基于所述振子当前速度、所述当前加速度、所述当前电流和第二预设公式,获得当前位移;第二预设公式为:

$$[0110] \quad x(t) = \frac{1}{k} [Bl \cdot i_{fdb}(t) - ma(t) - rv(t)];$$

[0111] 其中, $x(t)$ 为所述当前位移, $k$ 为弹簧劲度系数, $a(t)$ 为所述当前加速度, $v(t)$ 为所述振子当前速度, $r$ 为阻尼系数。

[0112] 步骤B40、基于所述当前位移和所述频率调整系数,获得位移补偿电压。

[0113] 本步骤中,基于计算出的位移状态信息,从位移角度构造相应的位移补偿电压。

[0114] 具体而言,步骤B40具体为:基于所述当前位移、所述频率调整系数和第三预设公式,获得位移补偿电压;第三预设公式为:

$$[0115] \quad u_{cx}(t) = \left(1 - k_{\omega}^2\right) \frac{kR}{Bl} x(t);$$

[0116] 其中, $u_{cx}(t)$ 为所述位移补偿电压, $Bl$ 为磁场强度, $R$ 为线圈直流电阻, $k_{\omega}$ 为所述频率调整系数。

[0117] 步骤S104、基于所述当前电压、所述当前电流、所述频率调整系数与所述阻尼调整系数,获得速度补偿电压。

[0118] 本步骤中,基于计算出的速度状态信息,从速度角度构造相应的速度补偿电压。

[0119] 具体而言,步骤S104包括:

[0120] 步骤C10、基于所述当前电压与所述当前电流,获得振子当前速度。

[0121] 步骤C20、基于所述振子当前速度、所述频率调整系数与第四预设公式,获得速度补偿电压;所述第四预设公式为:

$$[0122] \quad u_{cv}(t) = \left(1 - k_{\omega}\right) \left(\frac{rR}{Bl} + Bl\right) v(t);$$

[0123] 其中, $u_{cv}(t)$ 为所述速度补偿电压, $Bl$ 为磁场强度, $R$ 为线圈直流电阻, $k_{\omega}$ 为所述频率调整系数, $k_{\xi}$ 为所述阻尼调整系数, $v(t)$ 为所述振子当前速度, $k$ 为弹簧劲度系数。

[0124] 步骤S105、基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压,获得实际电压。

[0125] 具体而言,将所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压的和作为所述实际电压。即实际电压 $u(t) = u'_1(t) + u_{cx}(t) + u_{cv}(t)$ 。

[0126] 步骤S106、基于所述实际电压,控制所述线性马达振动。

[0127] 本实施例中,为了达到通过频率调整系数改变线性马达的实际扫频特性的目的,

以使得调整后的扫频特性在原来的谐振频率 $\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 处的相位基本为 $0^\circ$ ,具体通过当前电

压和当前电流计算出线性马达的当前速度状态信息和位移状态信息,从而构造相应的速度补偿电压和位移补偿电压,使得线性马达的实际振动时输入信号到输出信号的传递过程中基本无相位改变,从而实现加速度幅值和波形的准确控制。

[0128] 基于上述实施例,本发明还提供了一种线性马达的控制方法第二实施例,参阅图2,图2示出了本发明线性马达的控制方法第二实施例的流程示意图。

[0129] 本实施例中,方法包括:

[0130] 步骤S201、获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、阻尼调整系数、频率调整系数和加速度幅值。

[0131] 处理模块还可接收用户限定的阻尼调整系数 $k_{\xi}$ 。其中,阻尼调整系数 $k_{\xi}$ 为调整等效扫频特性后等效阻尼相对于实际阻尼的比值。

[0132] 步骤S202、基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形,获得等效电压。

[0133] 步骤S203、基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得位移补偿

电压。

[0134] 步骤S204、基于所述当前电压、所述当前电流、所述频率调整系数与所述阻尼调整系数,获得速度补偿电压。

[0135] 本步骤中,基于计算出的速度状态信息,从速度角度构造相应的速度补偿电压。

[0136] 具体而言,步骤S204包括:

[0137] 步骤C10、基于所述当前电压与所述当前电流,获得振子当前速度。

[0138] 步骤C20、基于所述振子当前速度、所述频率调整系数与第四预设公式,获得速度补偿电压;所述第四预设公式为:

$$[0139] \quad u_{cv}(t) = (1 - k_{\xi}k_{\omega}) \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t);$$

[0140] 其中, $u_{cv}(t)$ 为所述速度补偿电压, $Bl$ 为磁场强度, $R$ 为线圈直流电阻, $k_{\omega}$ 为所述频率调整系数, $k_{\xi}$ 为所述阻尼调整系数, $v(t)$ 为所述振子当前速度, $k$ 为弹簧劲度系数。

[0141] 其中, $k_{\xi}=1$ 时,即为前述实施例提供的第四预设公式,即阻尼不做调整的情况。

[0142] 步骤S205、基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压,获得实际电压。

[0143] 步骤S206、基于所述实际电压,控制所述线性马达振动。

[0144] 本实施例中,为了更佳地达到通过频率调整系数改变线性马达的实际扫频特性的目的,以使得调整后的扫频特性在原来的谐振频率 $\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 处的相位基本为 $0^{\circ}$ ,具体通过

当前电压和当前电流计算出线性马达的当前速度状态信息和位移状态信息,从而并通过频率调整系数和阻尼调整系数构造相应的速度补偿电压和位移补偿电压,使得线性马达的实际振动时输入信号到输出信号的传递过程中基本无相位改变,从而实现加速度幅值和波形的准确控制。

[0145] 为了便于理解,示出一具体实施方式:

[0146] 以构造一个频率为 $\omega_c$ 、幅值为 $100\text{m/s}^2$ 、形如:

$$[0147] \quad a(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\omega_c}{3}t\right) \sin(\omega_c t), t \in \left[0, \frac{3\pi}{\omega_c}\right] \\ 0, t \in \left[\frac{3\pi}{\omega_c}, +\infty\right] \end{cases} \text{的短振加速度波形为例,然后以 } k_{\omega} = 0.1 \text{ 进行缩}$$

小,使得谐振频率缩小至原来的0.1倍。对比扫频特性调整前后的加速度波形控制效果。

[0148] 图3为目标加速度形状曲线;图4为扫频特性调整前的马达驱动电压和加速度曲线;图5为扫频特性调整后的马达等效电压和加速度曲线;图6为扫频特性调整算法根据反馈信号自行计算补偿电压之后的实际电压波形。

[0149] 由图4可见,使用扫频特性调整前,马达的加速度波形与预期构造的加速度波形差异巨大,且余震明显;由图5可见,通过本实施例提供的线性马达控制方法,马达加速度波形与预期构造的加速度波形基本一致,从而实现了准确的加速度控制。

[0150] 基于同一发明构思,参阅图7,本发明还提供了一种线性马达的控制装置,包括:

[0151] 参数获取模块,用于获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、

频率调整系数和加速度幅值；

[0152] 等效电压获得模块,用于基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形,获得等效电压；

[0153] 位移补偿电压获得模块,用于基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得位移补偿电压；

[0154] 速度补偿电压获得模块,用于基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得速度补偿电压；

[0155] 实际电压获得模块,用于基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压,获得实际电压；

[0156] 马达控制模块,用于基于所述实际电压,控制所述线性马达振动。

[0157] 在一实施例中,等效电压获得模块还用于基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数和第一预设公式,获得等效电压幅值；第一预设公式为：

$$[0158] \quad u'_m = \frac{a_m}{K},$$

[0159] 其中, $u'_m$ 为所述等效电压幅值, $a_m$ 为所述加速度幅值, $K = \frac{Bl}{Rm}$ , $m$ 为线性马达的

振子质量, $B$ 为磁场强度, $r$ 为阻尼系数, $R$ 为线圈直流电阻；

[0160] 基于所述等效电压幅值、所述目标加速度波形与第二预设公式,获得等效电压；第二预设公式为：

$$[0161] \quad u'_1(t) = u'_m a(t);$$

[0162] 其中, $u'_1(t)$ 为所述等效电压, $a(t)$ 为所述目标加速度波形, $t$ 为时刻。

[0163] 在一实施例中,位移补偿电压获得模块,用于基于所述当前电压和所述当前电流,获得振子当前速度；对所述当前速度求导得到当前加速度；基于所述振子当前速度、所述当前加速度与所述当前电流,获得当前位移；

[0164] 基于所述当前位移和所述频率调整系数,获得位移补偿电压。

[0165] 在一实施例中,位移补偿电压获得模块,用于所述基于所述振子当前速度、所述当前加速度与所述当前电流,获得当前位移,包括：

[0166] 基于所述振子当前速度、所述当前加速度、所述当前电流和第三预设公式,获得当前位移；第三预设公式为：

$$[0167] \quad x(t) = \frac{1}{k} [Bl \cdot i_{fdb}(t) - ma(t) - rv(t)];$$

[0168] 其中, $x(t)$ 为所述当前位移, $k$ 为弹簧劲度系数, $i_{fdb}(t)$ 为当前电流, $a(t)$ 为所述当前加速度, $v(t)$ 为所述振子当前速度, $r$ 为阻尼系数。

[0169] 在一实施例中,位移补偿电压获得模块,用于基于所述当前位移、所述频率调整系数和第四预设公式,获得位移补偿电压；第四预设公式为：

$$[0170] \quad u_{cx}(t) = \left(1 - k_{\omega}^2\right) \frac{kR}{Bl} x(t);$$

[0171] 其中, $u_{cx}(t)$ 为所述位移补偿电压, $B$ 为磁场强度, $R$ 为线圈直流电阻, $k_{\omega}$ 为所述频率调整系数。

[0172] 在一实施例中,速度补偿电压获得模块,用于基于所述当前电压与所述当前电流,获得振子当前速度;

[0173] 基于所述振子当前速度、所述频率调整系数与第五预设公式,获得速度补偿电压;所述第五预设公式为:

$$[0174] \quad u_{cv}(t) = (1 - k_{\omega}) \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t);$$

[0175] 其中, $u_{cv}(t)$ 为所述速度补偿电压, $Bl$ 为磁场强度, $R$ 为线圈直流电阻, $k_{\omega}$ 为所述频率调整系数, $v(t)$ 为所述振子当前速度, $k$ 为弹簧劲度系数。

[0176] 在一实施例中,参数获取模块,用于获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数、阻尼调整系数和加速度幅值;

[0177] 速度补偿电压获得模块,用于基于所述振子当前速度、所述频率调整系数与第六预设公式,获得速度补偿电压;第六预设公式为:

$$[0178] \quad u_{cv}(t) = (1 - k_{\xi}k_{\omega}) \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t);$$

[0179]  $k_{\xi}$ 为所述阻尼调整系数。

[0180] 此外,参阅图8,本发明还提供了一种电子设备,包括:

[0181] 线性马达400;

[0182] 驱动模块200,所述驱动模块200与所述线性马达400连接,所述驱动模块用于为所述线性马达400提供驱动电压,以驱动振动单元振动;以及

[0183] 电压与电流检测模块500,用于检测所述线性马达400的当前电流与当前电压

[0184] 处理模块100,所述处理模块100分别与所述电压与电流检测模块500和所述驱动模块200连接,用于获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数和加速度幅值;基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数与所述目标加速度波形,获得等效电压;基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得位移补偿电压;基于所述当前电压、所述当前电流与所述频率调整系数,获得速度补偿电压;基于所述等效电压、所述位移补偿电压和所述速度补偿电压,获得实际电压;基于所述实际电压,控制所述线性马达振动。

[0185] 在一实施例中,处理模块还用于执行:基于所述加速度幅值、所述线性马达的硬件参数和第一预设公式,获得等效电压幅值;第一预设公式为:

$$[0186] \quad u'_m = \frac{a_m}{K},$$

[0187] 其中, $u'_m$ 为所述等效电压幅值, $a_m$ 为所述加速度幅值, $K = \frac{Bl}{Rm}$ , $m$ 为线性马达的

振子质量, $Bl$ 为磁场强度, $r$ 为阻尼系数, $R$ 为线圈直流电阻;

[0188] 基于所述等效电压幅值、所述目标加速度波形与第二预设公式,获得等效电压;第二预设公式为:

$$[0189] \quad u'_1(t) = u'_m a(t);$$

[0190] 其中,  $u'_1(t)$  为所述等效电压,  $a(t)$  为所述目标加速度波形,  $t$  为时刻。

[0191] 在一实施例中, 处理模块还用于执行: 基于所述当前电压和所述当前电流, 获得振子当前速度; 对所述当前速度求导得到当前加速度; 基于所述振子当前速度、所述当前加速度与所述当前电流, 获得当前位移;

[0192] 基于所述当前位移和所述频率调整系数, 获得位移补偿电压。

[0193] 在一实施例中, 处理模块还用于执行: 所述基于所述振子当前速度、所述当前加速度与所述当前电流, 获得当前位移, 包括:

[0194] 基于所述振子当前速度、所述当前加速度、所述当前电流和第三预设公式, 获得当前位移; 第三预设公式为:

$$[0195] \quad x(t) = \frac{1}{k} [Bl \cdot i_{fdb}(t) - ma(t) - rv(t)];$$

[0196] 其中,  $x(t)$  为所述当前位移,  $k$  为弹簧劲度系数,  $i_{fdb}(t)$  为当前电流,  $a(t)$  为所述当前加速度,  $v(t)$  为所述振子当前速度,  $r$  为阻尼系数。

[0197] 在一实施例中, 处理模块还用于执行: 基于所述当前位移、所述频率调整系数和第四预设公式, 获得位移补偿电压; 第四预设公式为:

$$[0198] \quad u_{cx}(t) = (1 - k_{\omega}^2) \frac{kR}{Bl} x(t);$$

[0199] 其中,  $u_{cx}(t)$  为所述位移补偿电压,  $Bl$  为磁场强度,  $R$  为线圈直流电阻,  $k_{\omega}$  为所述频率调整系数。

[0200] 在一实施例中, 处理模块还用于执行: 基于所述当前电压与所述当前电流, 获得振子当前速度;

[0201] 基于所述振子当前速度、所述频率调整系数与第五预设公式, 获得速度补偿电压; 所述第五预设公式为:

$$[0202] \quad u_{cv}(t) = (1 - k_{\omega}) \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t);$$

[0203] 其中,  $u_{cv}(t)$  为所述速度补偿电压,  $Bl$  为磁场强度,  $R$  为线圈直流电阻,  $k_{\omega}$  为所述频率调整系数,  $v(t)$  为所述振子当前速度,  $k$  为弹簧劲度系数。

[0204] 在一实施例中, 处理模块还用于执行: 获取所述线性马达的目标加速度波形、当前电压、当前电流、频率调整系数、阻尼调整系数和加速度幅值;

[0205] 速度补偿电压获得模块, 用于基于所述振子当前速度、所述频率调整系数与第六预设公式, 获得速度补偿电压; 第六预设公式为:

$$[0206] \quad u_{cv}(t) = (1 - k_{\xi} k_{\omega}) \left( \frac{rR}{Bl} + Bl \right) v(t);$$

[0207]  $k_{\xi}$  为所述阻尼调整系数。

[0208] 一些实施例中, 驱动模块200和线性马达400之间还设置有一功率放大器300, 功率放大器300对驱动模块200传输至功率放大器300的驱动电压进行功率匹配。其中, 驱动电压可以是模拟信号, 还可以是数字信号。功率放大器可以是本领域常见的如A类, B类, AB类, 或者D类驱动器。

[0209] 此外,本发明实施例还提出一种计算机存储介质,存储介质上存储有线性马达的控制程序,线性马达的控制程序被处理器执行时实现如上文的线性马达的控制方法的步骤。因此,这里将不再进行赘述。另外,对采用相同方法的有益效果描述,也不再进行赘述。对于本申请所涉及的计算机可读存储介质实施例中未披露的技术细节,请参照本申请方法实施例的描述。确定为示例,程序指令可被部署为在一个计算设备上执行,或者在位于一个地点的多个计算设备上执行,又或者,在分布在多个地点且通过通信网络互连的多个计算设备上执行。

[0210] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程,是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,上述的程序可存储于一计算机可读取存储介质中,该程序在执行时,可包括如上述各方法的实施例的流程。其中,上述的存储介质可为磁碟、光盘、只读存储记忆体(Read-Only Memory,ROM)或随机存储记忆体(Random AccessMemory, RAM)等。

[0211] 以上仅为本发明的优选实施例,并非因此限制本发明的专利范围,凡是利用本发明说明书及附图内容所作的等效结构或等效流程变换,或直接或间接运用在其他相关的技术领域,均同理包括在本发明的专利保护范围内。

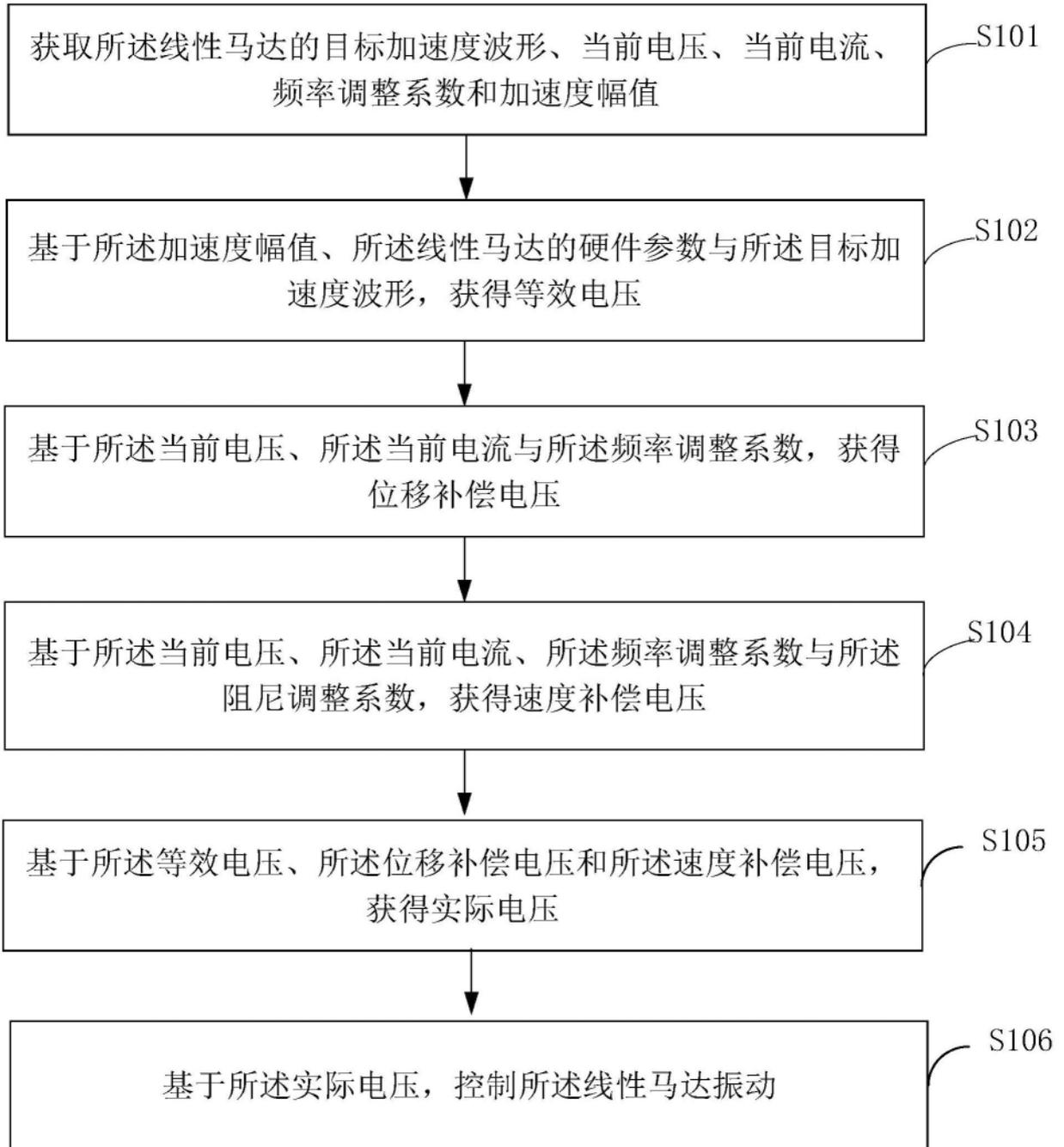


图1

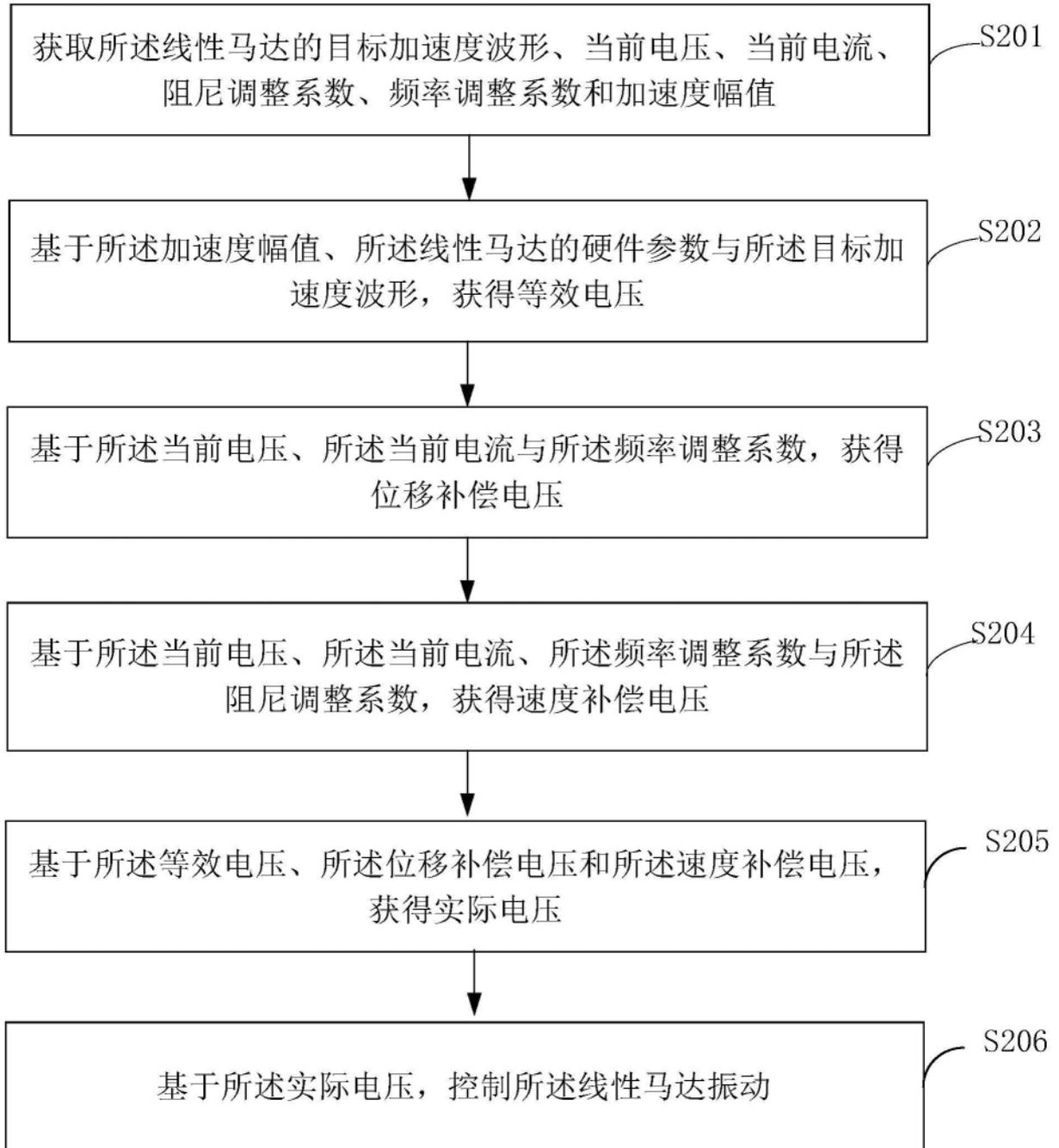


图2

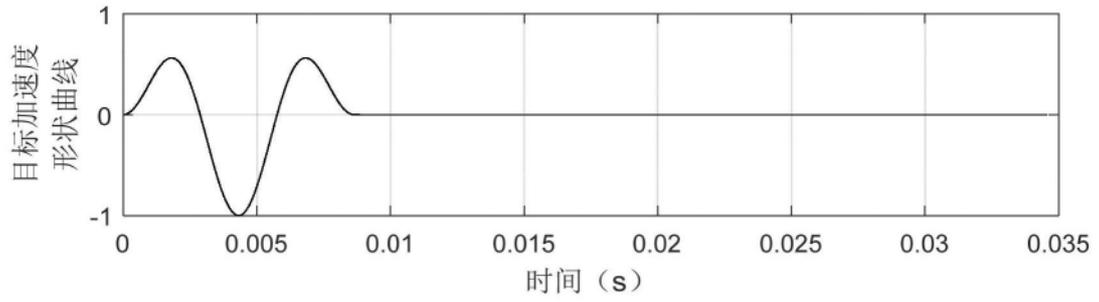


图3

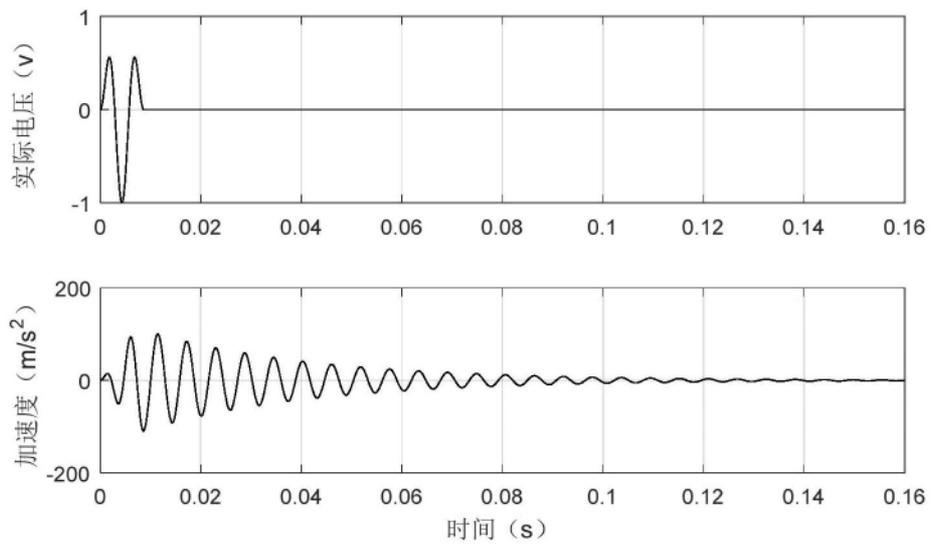


图4

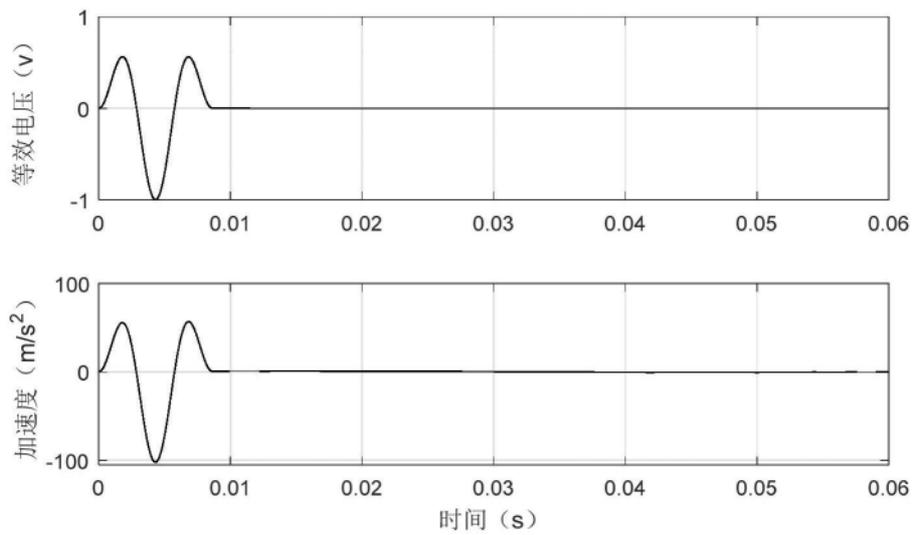


图5

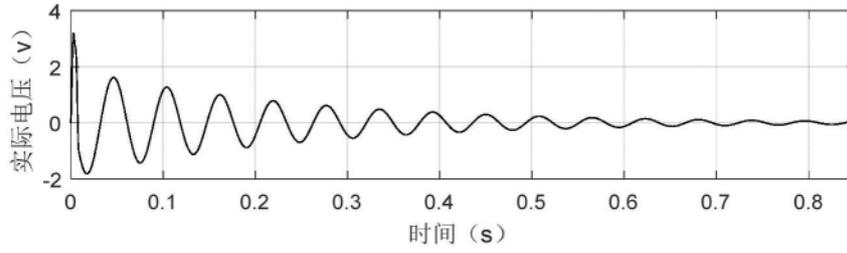


图6



图7

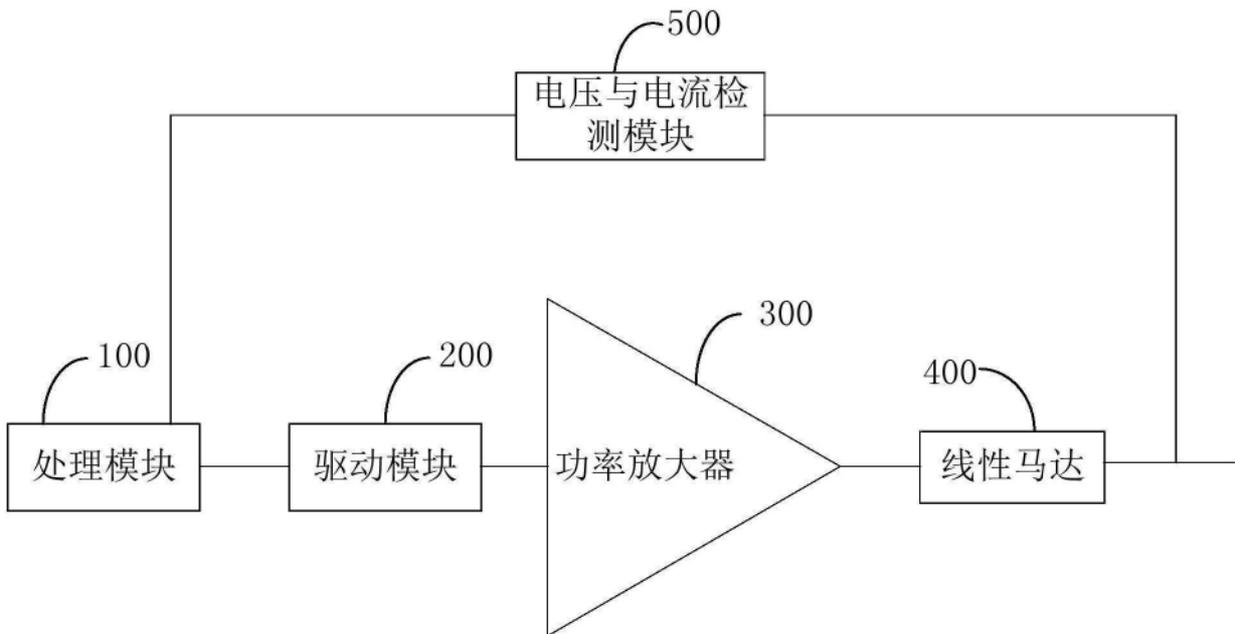


图8