

# (12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局

(43) 国际公布日  
2018 年 3 月 8 日 (08.03.2018)



(10) 国际公布号  
**WO 2018/041265 A1**

(51) 国际专利分类号:  
**G06F 17/50** (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2017/100517

(22) 国际申请日: 2017 年 9 月 5 日 (05.09.2017)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:  
201610803117.2 2016 年 9 月 5 日 (05.09.2016) CN

(71) 申请人: 歌尔股份有限公司(GOERTEK INC.) [CN/CN]; 中国山东省潍坊市高新技术产业开发区东方路268号, Shandong 261031 (CN)。

(72) 发明人: 冯勇强(FENG, Yongqiang); 中国山东省潍坊市高新技术产业开发区东方路268号, Shandong 261031 (CN)。 吴立德(WU, Lide); 中国山东省潍坊市高新技术产业开发区东方路268号, Shandong 261031 (CN)。 李波(LI, Bo); 中国山东省潍坊市高新技术产业开发区东方路268号, Shandong 261031 (CN)。

(74) 代理人: 北京市隆安律师事务所(BEIJING LONGAN LAW FIRM); 中国北京市朝阳区建国门外大街21号北京国际俱乐部188室, Beijing 100020 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(54) Title: METHOD FOR ACQUIRING OUTPUT QUANTITY OF LINEAR RESONANT ACTUATOR, AND CIRCUIT

(54) 发明名称: 一种获取线性谐振致动器输出量的方法和电路

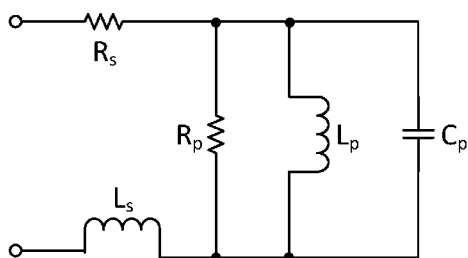


图 2

(57) Abstract: A method for acquiring an output quantity of a linear resonant actuator, and a circuit. The method comprises: according to an electrical parameter and a kinematics parameter of a linear resonant actuator, using passive electric devices to establish a circuit simulating the linear resonant actuator, wherein the passive electric devices at least comprise a resistor, a capacitor and an inductor (S110); selecting a measurement point in the circuit according to an output quantity required by the linear resonant actuator (S120); and inputting a drive signal of an input source to an input end of the circuit, and collecting an electric signal output by the measurement point to obtain the output quantity of the simulated linear resonant actuator (S130). In the method and circuit, by establishing a circuit model or system model simulating a linear resonant actuator, during the development and debugging process of a project, the scheme of directly using a physical actuator is replaced by the established circuit model or system model, thus being able to improve the efficiency and preventing the dependence on a physical actuator.

---

**(57) 摘要：**一种获取线性谐振致动器输出量的方法和电路。该方法包括：根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟线性谐振致动器的电路，无源电器件至少包括电阻、电容和电感（S110）；根据线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点（S120）；将输入源的驱动信号输入至电路的输入端，采集测量点输出的电信号得到被模拟的线性谐振致动器的输出量（S130）。该方法和电路通过建立模拟线性谐振致动器的电路模型或系统模型，在项目的开发和调试过程中，利用所建立的电路模型或系统模型替换直接使用物理致动器的方案，从而可以提高效率，避免对物理致动器的依赖。

## 一种获取线性谐振致动器输出量的方法和电路

### 技术领域

本发明涉及触觉反馈技术领域，特别涉及一种获取线性谐振致动器输出量的方法和电路。

### 背景技术

针对人们听觉、视觉的音视频技术在过去的几十年得到充分的发展和应用。近几年，工业界开始将目光转向其它感官通道，针对触觉的力反馈、振动技术开始被开发，触觉反馈技术逐渐在消费电子、家电、工业中得到应用。从早期的寻呼机振动提示，到近期的手机、穿戴设备触控技术，基于触觉相关技术已经成为人机交互技术中的重要组成部分。

触觉反馈系统中产生振动的部件是致动器（俗称马达），致动器的振动传递给所在设备，然后传导到用户肢体、躯体的皮肤，产生振动触觉。现有方案，大多直接使用物理的致动器，进行驱动和控制算法的开发和调试。现有技术方法不但效率低，而且致动器的性能会有损耗甚至有损坏的风险。

### 发明内容

本发明提供了一种获取线性谐振致动器输出量的方法和电路，以解决现有技术直接利用物理的致动器进行项目的开发和调试时，效率低、易损耗或损坏致动器性能的问题。

为达到上述目的，本发明的技术方案是这样实现的：

一方面，本发明实施例提供了一种获取线性谐振致动器输出量的方法，该方法包括：

根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟线性谐振致动器的电路，无源电器件至少包括电阻、电容和电感；

根据线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点；

将输入源的驱动信号输入至电路的输入端，采集测量点输出的电信号得到被模拟的线性谐振致动器的输出量。

另一方面，本发明实施例提供了一种获取线性谐振致动器输出量的方法，该方法包括：

根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟线性谐振致动器的电路，无源电器件至少包括电阻、电容和电感；

根据线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点；

计算从电路的输入端至测量点的传递函数；

根据输入源的驱动信号和传递函数计算得到被模拟的线性谐振致动器的输出量。

又一方面，本发明实施例提供了一种获取线性谐振致动器输出量的电路，该电路包括：第一电阻、第一电感、电容、第二电感和第二电阻；

电容、第二电感和第二电阻相互并联形成并联谐振电路，第一电阻的一端为正极输入端，第一电感的一端为负极输入端，第一电阻的另一端和第一电感的另一端分别连接并联谐振电路的两端；

或者，

电容、第二电感和第二电阻相互串联形成串联谐振电路，第一电阻的一端为正极输入端，第一电感的一端为负极输入端，第一电阻的另一端连接耦合器的第一输入端，第一电感的另一端连接耦合器的第二输入端，耦合器的第一输出端和第二输出端分别连接所述串联谐振电路的两端；

其中，第一、第二电阻的电阻值，第一、第二电感的电感值以及电容值由所述线性谐振致动器电学参数和运动学参数确定。

本发明实施例的有益效果是：一方面，本方案利用无源电器件建立模拟线性谐振致动器电路模型或系统模型，在项目的开发和调试过程中，可用本方案替换直接使用物理致动器的方案，达到提高工作效率，避免对物理致动器的依赖的效果；另一方面，本方案基于电路模型采集测量点输出的电信号得到被模拟的线性谐振致动器的输出量，或者基于电路模型计算电路的输入端至测量点的传递函数，由传递函数直接计算出被模拟的线性谐振致动器的输出量，提供了计算机仿真的方案，在不使用致动器或其他电子器件的情况下，通过算法得到测试过程中致动器的输出量，避免了现有技术中易于损坏致动器、易于受到外界环境干扰、效率低的缺点。

本方案依据线性谐振致动器的工作原理对其合理地建立模型，基于高效、简洁的模型进行致动器工作过程的仿真，能有效地缩短致动器的驱动和控制系统的研发周期、也能模拟触觉振动的测试效果等；另外，建模和仿真还可以用于线性谐振致动器的设计阶段，在建立物理模型前进行仿真并预测其性能。在触觉反馈系统的设计和开发过程中，本方案具有重要的实际意义。

## 附图说明

图 1 为本发明一个实施例提供的获取线性谐振致动器输出量的方法流程图；

图 2 为本发明另一个实施例提供的模拟线性谐振致动器的第一电路的电路结构图；

图 3 为本发明另一个实施例提供的模拟线性谐振致动器的第二电路的电路结构图；

图 4 为本发明另一个实施例提供的获取线性谐振致动器输出量的第一电路的电路结构图；

图 5 为本发明另一个实施例提供的获取线性谐振致动器输出量的第二电路的电路结构图；

图 6a 为本发明另一个实施例提供的一种驱动信号的示意图；

图 6b 为本发明另一个实施例提供的在图 6a 驱动信号的激励下，相应测量点输出线性谐振致动器负载电流的示意图；

图 6c 为本发明另一个实施例提供的在图 6a 驱动信号的激励下，相应测量点输出线性谐振致动器反电动势电压的示意图；

图 6d 为本发明另一个实施例提供的在图 6a 驱动信号的激励下，相应测量点输出线性谐振致动器振子加速度的示意图；

图 7 为本发明另一个实施例提供的获取线性谐振致动器输出量的方法流程图。

## 具体实施方式

为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合附图对本发明实施方式作进一步地详细描述。

触觉反馈系统中的致动器（actuator）是执行控制指令、将驱动信号转换为物理振动的关键部分。致动器通常包括偏心旋转质量致动器（ERM）和线性谐振致动器（LRA）两种，本发明以线性谐振致动器为例来进行说明。

线性谐振致动器的工作原理为：交变的电信号施加在线性谐振致动器的导电线圈上，从而在磁场中产生交变的驱动力，驱动线性谐振致动器里面的可移动质量块（或简称振子）沿直线进行往返运动。

为了在触觉反馈系统的研发阶段前期减少对物理致动器的依赖，提高研发效率，降低研发成本，一种解决方案就是对致动器的工作机制进行计算机仿真。基于此，本发明一个实施例提供了一种获取线性谐振致动器输出量的方法。图 1 为本发明一个实施例提供的获取线性

谐振致动器输出量的方法流程图，如图 1 所示，该方法包括：

S110，根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟线性谐振致动器的电路，无源电器件至少包括电阻、电容和电感。

基于上述线性谐振致动器的工作原理可知，线性谐振致动器是一种电磁机械系统，由于线性谐振致动器包括导电线圈，因此线性谐振致动器本身就有电阻属性和电感属性，且线性谐振致动器的谐振部分是由质量块和弹簧组成的机械结构，因此可以用电阻-电感-电容谐振电路（即 RLC 谐振电路）来描述。

S120，根据线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点。

其中，所需要的输出量包括振子合力、振子速度、振子加速度、振子位移、线性谐振致动器的负载电流、反电动势电压，设计人员可根据实际需求，选择其中一个或多个输出量，则测量每个输出量的数据的测量点可以对应电路中一条线路或电路中的一个器件，如通过流经该条线路中的电流信号、流经该器件的电流信号或加载在该器件两端的电压信号等等获取到输出量。

S130，将输入源的驱动信号输入至电路的输入端，采集测量点输出的电信号得到被模拟的线性谐振致动器的输出量。

所得到的输出量可以辅助线性谐振致动器控制算法的开发，以及辅助触觉效果的设计和开发。

其中，驱动信号可以根据需要进行选择，例如可选择短时脉冲信号、一个或多个周期的方波、正弦波、脉宽调制（PWM）信号等。

在实际应用中，可以通过下述方法采集测量点输出的电信号：

在电路的每个测量点上连接电流传感器或电压传感器，采集电流传感器或电压传感器输出的电信号，根据每个测量点输出的电信号计算得到线性谐振驱动器相应的输出量。

由上，图 1 中的方法通过建立电路模型模拟线性谐振致动器，使用无源电子元件电阻、电容、电感形成电路，从而在电路层面上模拟线性谐振致动器的属性，并可以基于简洁的电路模型进行线性谐振致动器工作过程的仿真，从而有效地缩短致动器驱动和控制系统的研发周期；还可以在线性谐振致动器的设计阶段，基于电路模型预测线性谐振致动器的性能。

在发明的另一个实施例中，图 1 中的步骤 S110 可以具体为：根据线性谐振致动器导电线圈的电学参数，选取第一电阻和第一电感；以及根据线性谐振致动器导电线圈的电学参数和振子的运动学参数，选取电容、第二电阻和第一电感。该发明实施例可以通过下述两种实

现方案中的一种来建立模拟线性谐振致动器的电路：

#### 实现方案一

将第一电阻和第一电感串联以及将电容、第二电感和第二电阻并联建立模拟所述线性谐振致动器的第一电路，其中，第一电阻的一端连接输入源的正极端，第一电感的一端连接输入源的负极端，电容、第二电感和第二电阻相互并联形成并联谐振电路，并联谐振电路的两端分别串联连接在第一电阻的另一端和第一电感的另一端之间。

采用本实现方案连接成的第一电路的电路结构可参考图 2，图 2 中的电阻  $R_s$  和电感  $L_s$  依次为本实现方案中的第一电阻和第一电感，通过电阻  $R_s$  和电感  $L_s$  模拟线性谐振致动器的导电线圈；图 2 中的电阻  $R_p$ 、电感  $L_p$  和电容  $C_p$  依次为本实现方案中的第二电阻、第二电感和电容，通过相互并联的电阻  $R_p$ 、电感  $L_p$  和电容  $C_p$  组成的并联谐振电路模拟线性谐振致动器的振子。

#### 实现方案二：

将第一电阻和第一电感串联，以及将电容、第二电感和第二电阻串联建立模拟线性谐振致动器的第二电路，其中，第一电阻的一端连接输入源的正极端，第一电感的一端连接输入源的负极端，第一电阻的另一端连接耦合器的第一输入端，第一电感的另一端连接到耦合器的第二输入端，电容、第二电感和第二电阻相互串联形成串联谐振电路，串联谐振电路的两端分别串联连接在耦合器的第一输出端和第二输出端之间。

采用本实现方案连接成的第二电路的电路结构可参考图 3，图 3 中的电阻  $R_s$  和电感  $L_s$  依次为本实现方案中的第一电阻和第一电感，通过电阻  $R_s$  和电感  $L_s$  模拟线性谐振致动器的导电线圈；图 3 中的电阻  $R_r$ 、电感  $L_r$  和电容  $C_r$  依次为本实现方案中的第二电阻、第二电感和电容，通过相互串联的电阻  $R_r$ 、电感  $L_r$  和电容  $C_r$  组成的串联谐振电路模拟线性谐振致动器的振子。串联的电阻  $R_s$  和电感  $L_s$  通过电压耦合器  $T$  与串联的电阻  $R_r$ 、电感  $L_r$  和电容  $C_r$  耦合连接。

由于线性谐振致动器振子振动过程中，振子受到三种力的作用，分别为根据振子加速度与振子质量的乘积计算得到的牛顿力、根据振子振动过程中所受摩擦系数与振子速度的乘积计算得到阻碍力，以及根据振子弹性系数与振子位移的乘积计算得到的弹力，这三种力的合力即为振子合力。

在利用图 2 中的电路模拟线性谐振致动器时，可以用电路中并联的 RLC 谐振电路模拟振子的振动过程，由于 RLC 谐振电路的总电流分别为流经电阻  $R_p$  的电流、电感  $L_p$  的电流和

电容  $C_p$  的电流的和。那么在设计过程中,可以将振子合力与 RLC 谐振电路的总电流建立对应关系,对于振子振动过程中形成的振子加速度、振子速度和振子位移,以振子速度为基准值,通过对振子速度进行微分运算即可得到振子加速度,通过对振子速度进行积分运算即可得到振子位移;而在 RLC 谐振电路中,通过对作用在电阻  $R_p$  上的电压进行除法运算即可得流经电阻  $R_p$  的电流值,通过对作用在电感  $L_p$  上的电压进行积分运算即可得到流经电感  $L_p$  的电流值,通过对作用在电容  $C_p$  上的电压进行微分运算即可得到流经电容  $C_p$  的电流值,通过分析可以将涉及微分运算的振子加速度与 RLC 谐振电路中流经电容  $C_p$  的电流建立对应关系,将涉及积分运算的振子位移与 RLC 谐振电路中流经电感  $L_p$  的电流建立对应关系,将不涉及积分运算也不涉及微分运算的振子速度与 RLC 谐振电路中流经电阻  $R_p$  的电流建立对应关系。

在确定上述对应关系后,即可通过下述方法确定各个无源电器件的参数:

将线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值分别设置为第一电阻值(即电阻  $R_s$ )和第一电感值(即电感  $L_s$ );根据线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值及线性谐振致动器工作电流、工作电压,以及线性谐振致动器振子的谐振频率和频率带宽计算得到第二电阻值、电容值和第二电感值。

例如,在图 2 所示的第一电路中,可根据线性谐振致动器导电线圈电阻值和电感值及线性谐振致动器工作电流  $I$ 、工作电压  $V$ ,以及线性谐振致动器振子的谐振频率  $\omega_0$  计算得到第二电阻值(即电阻  $R_p$ );根据第二电阻值和线性谐振致动器振子的频率带宽  $B_0$  计算得到电容值(即电容  $C_p$ );以及根据电容值和线性谐振致动器振子的谐振频率  $\omega_0$  计算得到第二电感值(即电感  $L_p$ )。而在图 3 所示的第二电路中,可根据线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值及线性谐振致动器工作电流  $I$ 、工作电压  $V$ ,以及线性谐振致动器振子的谐振频率  $\omega_0$  计算得到第二电阻值(即电阻  $R_r$ );根据第二电阻值和线性谐振致动器振子的频率带宽  $B_0$  计算得到第二电感值(即电感  $L_r$ );根据第二电感值和线性谐振致动器振子的谐振频率  $\omega_0$  计算得到电容值(即电容  $C_r$ )。

需要说明的是,由于线性谐振致动器的供应商一般不会提供致动器的电磁参数  $K_m$ 、致动器振子质量、振子的弹性系数、振子的摩擦系数等参数,通常提供线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值,线性谐振致动器工作电流  $I$ 、工作电压  $V$ ,以及线性谐振致动器振子的谐

振频率和频率带宽工作参数，因此，本发明优选使用上述工作参数计算第一电路或第二电路中各无源电器件的参数值。若线性谐振致动器的供应商提供致动器的电磁参数  $K_m$ 、致动器振子质量、振子的弹性系数、振子的摩擦系数等参数，也可以基于振子的力学方程与第一电路或第二电路中的电学方程之间的对应关系，利用线性谐振致动器电磁参数  $K_m$  以及线性谐振致动器振子质量、振子的弹性系数、振子的摩擦系数计算得到第二电阻值、电容值和第二电感值。

对比图 2 和图 3，图 2 中用于模拟线性谐振致动器的导电线圈的第一电阻值（电阻  $R_s$ ）和第一电感值（电感  $L_s$ ）与图 3 中用于模拟线性谐振致动器的导电线圈的第一电阻值（电阻  $R_s$ ）和第一电感值（电感  $L_s$ ）相同，但图 2 中用于模拟线性谐振致动器振子谐振运动的第二电阻值（电阻  $R_p$ ）、第二电感值（电感  $L_p$ ）和电容值（电容  $C_p$ ）与图 3 中用于模拟线性谐振致动器振子谐振运动的第二电阻值（电阻  $R_r$ ）、第二电感值（电感  $L_r$ ）和电容值（电容  $C_r$ ）并不相同。

在依照上述方法建立好模拟线性谐振致动器的电路后，本发明通过另一个实施例详细说明图 1 中步骤 S120 选取测量点的方法，选取测量点的方法如下所示：

在模拟线性谐振致动器的电路为第一电路时，选取第一电阻的一端或第一电感的一端作为线性谐振致动器振子合力的测量点；选取第二电阻连接第一电感的一端作为线性谐振致动器振子速度的测量点；选取第二电感连接第一电感的一端作为线性谐振致动器振子位移的测量点；选取电容连接第一电感的一端作为线性谐振致动器振子加速度的测量点；选取电容作为线性谐振致动器反电动势电压的测量点，测量时，在电容  $C_p$  的两端连接电压传感器，电压传感器输出电压即可模拟线性谐振致动器振子合力。根据需要上述测量点可以选取一个或多个。

在模拟线性谐振致动器的电路为第二电路时，选取第二电阻的一端或第二电感的一端或电容的一端作为线性谐振致动器振子合力的测量点；选取第二电阻作为线性谐振致动器振子速度的测量点；选取第二电感作为线性谐振致动器振子加速度的测量点；选取电容作为线性谐振致动器振子位移的测量点；选取耦合器的输入端作为线性谐振致动器反电动势电压的测量点，测量时，在耦合器的两个输入端接入电压传感器，电压传感器输出电压即可模拟线性谐振致动器振子合力。根据需要上述测量点可以选取一个或多个。

在依照上述方法选好测量点后，本发明通过另一个实施例详细说明图 1 中步骤 S130 获取线性谐振致动器的输出量的方法，获取方法如下。

在模拟线性谐振致动器的电路的每个测量点上连接电流传感器或电压传感器，采集电流传感器或电压传感器输出的电信号，并根据每个测量点输出的电信号计算得到线性谐振驱动器相应的输出量。

在本实施例的一个实现方案中，通过下述计算方法得到线性谐振驱动器的输出量：

根据线性谐振致动器导电线圈的长度和磁通量密度计算电磁参数  $K_m$ ，该电磁参数又称为线性谐振致动器的马达参数；根据电磁参数  $K_m$  和电路中无源电器件的参数计算对应于每个测量点输出的电信号的转换系数；通过计算每个测量点输出的电信号与其对应的转换系数的乘积，得到线性谐振致动器相应的输出量。

其中，每个测量点输出的电信号的转换系数的计算方法如下：

在模拟线性谐振致动器的电路为第一电路时，根据电磁参数  $K_m$  计算得到线性谐振致动器振子合力  $f$  对应的测量点输出的电信号的转换系数  $G_{LRA}$ ；根据电磁参数  $K_m$  和第二电阻值（即电阻  $R_p$ ）计算得到线性谐振致动器振子速度  $v$  对应的测量点输出的电信号的转换系数  $G_R$ ；根据电磁参数  $K_m$  和第二电感值（即电感  $L_p$ ）计算得到线性谐振致动器振子位移  $d$  对应的测量点输出的电信号的转换系数  $G_L$ ；根据电磁参数  $K_m$  和电容值（即电容  $C_p$ ）计算得到线性谐振致动器振子加速度  $a$  对应的测量点输出的电信号的转换系数  $G_C$ 。

参考图 4 所示，测量时，可以在电感  $L_s$  连接电阻  $R_p$  的一端  $P_{t_f}$  依次连接电流传感器和转换器，当然也可以在电感  $L_s$  连接输入源负极端的一端、或在电阻  $R_s$  连接电阻  $R_p$  的一端、或在电阻  $R_s$  连接输入源正极端的一端依次连接电流传感器和转换器，通过该电流传感器采集流经电感  $L_s$  的电流信号  $I_{LRA}$ ，该电流信号为线性谐振致动器的负载电流，利用转换系数为  $G_{LRA}$  的转换器将电流信号  $I_{LRA}$  转换为模拟线性谐振致动器振子合力的输出量；在电阻  $R_p$  连接电感  $L_s$  的一端  $P_{t_v}$  依次连接电流传感器和转换器，通过该电流传感器采集流经电阻  $R_p$  的电流信号  $I_R$ ，并利用转换系数为  $G_R$  的转换器将电流信号  $I_R$  转换为模拟线性谐振致动器振子速度的输出量；在电感  $L_p$  连接电感  $L_s$  的一端  $P_{t_d}$  依次连接电流传感器和转换器，通过该电流传感器采集流经电感  $L_p$  的电流信号  $I_L$ ，并利用转换系数为  $G_L$  的转换器将电流信号  $I_L$  转换为模拟线性谐振致动器振子位移的输出量；在电容  $C_p$  连接电感  $L_s$  的一端  $P_{t_a}$  依次连接电流传感器和转换器，通过该电流传感器采集流经电容  $C_p$  的电流信号  $I_C$ ，并利用转换系数为  $G_C$  的转换器将电流信号  $I_C$  转换为模拟线性谐振致动器振子加速度的输出量。

在模拟线性谐振致动器的电路为第二电路时，根据电磁参数  $K_m$  计算得到线性谐振致动

器振子合力  $f$  对应的测量点输出的电信号的转换系数  $M_{LRA}$ ；根据电磁参数  $K_m$  和第二电阻值（即电阻  $R_r$ ）计算得到线性谐振致动器振子速度  $v$  对应的测量点输出的电信号的转换系数  $M_R$ ；根据电磁参数  $K_m$  和第二电感值（即电感  $L_r$ ）计算得到线性谐振致动器振子加速度  $a$  对应的测量点输出的电信号的转换系数  $M_L$ ；根据电磁参数  $K_m$  和电容值（即电容  $C_r$ ）计算得到线性谐振致动器振子位移  $d$  对应的测量点输出的电信号的转换系数  $M_C$ 。

参考图 5 所示，测量时，可以在电感  $L_s$  连接电阻  $R_r$  的一端  $P_{t1}'$  依次连接电流传感器和转换器，由于电阻  $R_r$ 、电感  $L_r$  和电容  $C_r$  相互串联，流经电阻  $R_r$ 、电感  $L_r$  和电容  $C_r$  的电流相同，因此也可以在电阻  $R_r$  连接电感  $L_r$  的一端、或在电感  $L_r$  连接电阻  $R_r$  的一端、或在电感  $L_r$  连接电容  $C_r$  的一端，或在电容  $C_r$  连接耦合器的一端依次连接电流传感器和转换器，通过该电流传感器采集流经电感  $L_s$  的电流信号  $I_{LRA}$ ，该电流信号为线性谐振致动器的负载电流，利用转换系数为  $M_{LRA}$  的转换器将电流信号  $I_{LRA}$  转换为模拟线性谐振致动器振子合力的输出量；在电阻  $R_r$  两端（ $P_{t1}'$ ， $P_{t2}'$ ）并联接入电压传感器，并使该电压传感器连接到转换器，通过电压传感器采集电阻  $R_r$  两端的电压信号  $V_R$ ，并利用转换系数为  $M_R$  的转换器将电压信号  $V_R$  转换为模拟线性谐振致动器振子速度的输出量；在电感  $L_r$  的两端（ $P_{t1}'$ ， $P_{t2}'$ ）并联接入电压传感器，并使该电压传感器连接到转换器，通过电压传感器采集电感  $L_r$  两端的电压信号  $V_L$ ，并利用转换系数为  $M_L$  的转换器将电压信号  $V_L$  转换为模拟线性谐振致动器振子加速度的输出量；在电容  $C_r$  的两端（ $P_{t1}'$ ， $P_{t2}'$ ）并联接入电压传感器，并使该电压传感器连接到转换器，通过电压传感器采集电容  $C_r$  两端的电压信号  $V_C$ ，并利用转换系数为  $M_C$  的转换器将电压信号  $V_C$  转换为模拟线性谐振致动器振子位移的输出量。

上述转换器在图 4 和图 5 中分别表示为放大器，转化器的转换系数对应为放大器的放大系数。

需要说明的是，本发明的测试方法可由处理器执行程序指令实现，该程序指令存储在机器可读存储介质中，被处理器执行时实现本发明上述实施例的方法步骤。在不同的实施例中，机器可读存储介质可以是内存或者非易失性存储器。其中非易失性存储器可以是：存储驱动器（如硬盘驱动器）、固态硬盘、任何类型的存储盘（如光盘、DVD 等），或者类似的存储介质，或者它们的组合。内存可以是：RAM（Random Access Memory，随机存取存储器）、易失存储器、非易失性存储器、闪存。可以理解为，可以在 Simulink、SPICE 等仿真平台上执行本发明上述实施例的方法步骤。下面以在 Simulink 仿真平台上获取线性谐振致动器的输出量为

例进行说明：

假设针对一个谐振频率为 175Hz 的致动器，需要获取的仿真结果为负载电流  $I_{LRA}$ 、反电动势电压  $V_{BEMF}$  和模拟线性谐振致动器振子加速度  $a$  的输出量。

首先在 Simulink 仿真平台上搭建图 2 中的电路结构；然后根据线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点。基于上述假设，可以在电感  $L_s$  连接电阻  $R_p$  的一端连接电流传感器，在电容  $C_p$  的两端并联电压传感器，在电容  $C_p$  连接电感  $L_s$  的一端依次连接电流传感器和转换器；再根据需求选择相应的驱动信号，采集并显示各个测量点的电流传感器或电压传感器或转换器的输出量。

示例地，可以选择方波信号为驱动信号，如图 6a 所示，图 6a 示出了在 0~0.2 秒的时间轴上，交变频率为 175Hz、低电平和高电平分别为 -2V 和 2V，共持续 10 个周期的驱动电压信号  $V_{DRV}$ ；图 6b~图 6d 依次示出了在方波信号  $V_{DRV}$  的驱动下，电路的相应测量点输出的负载电流  $I_{LRA}$ 、反电动势电压  $V_{BEMF}$  和模拟线性谐振致动器的振子加速度  $a$  的输出量的信号曲线图，其中，负载电流  $I_{LRA}$  大致在 -0.08A 至 0.08A 之间，也表现为方波信号，反电动势电压  $V_{BEMF}$  和模拟线性谐振致动器振子加速度  $a$  的输出量都表现为震荡的正弦信号。

由上，本发明通过上述实施例从电路层面上获取了线性谐振致动器的输出量。

在电路模型的基础上，还可以用单输入多输出或单输入单输出的系统模拟线性谐振致动器，因此可以基于系统模型获取线性谐振致动器的输出量。

如图 7 所示，图 7 为本发明另一个实施例提供的获取线性谐振致动器输出量的方法流程图，该方法包括：

S710，根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟线性谐振致动器的电路，无源电器件至少包括电阻、电容和电感。

S720，根据线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点。

S730，计算从电路的输入端至测量点的传递函数。

S740，根据输入源的驱动信号和传递函数计算得到被模拟的线性谐振致动器的输出量。

其中，图 7 中的步骤 S710 和 S720 的具体内容可参见图 1 中的步骤 S110 和 S120，在此不再赘述。

在本发明的另一个实施例中，对于图 7 中的步骤 S730，可以根据下述方法计算从电路的输入端至测量点的传递函数包括：

确定线性谐振致动器输出量与电路测量占输出的由信号之间的转换关系；参考图 4 中连

在各测量点的相应转换器的转换系数的计算方法，即可获得线性谐振致动器输出量与电路测量点输出的电信号之间的线性关系；

根据对应关系以及电路的电路结构、无源电器件参数，计算以线性谐振致动器输出量为输出变量、输入端的驱动信号为输入变量的传递函数。

为便于理解，基于图 4 中的电路结构，以获取模拟线性谐振致动器振子合力的输出量为例进行说明：

模拟线性谐振致动器振子合力的输出量对应的测量点为电路中电感  $L_s$  连接电阻  $R_p$  的一端，根据电路结构以及基本的电路定律，如基尔霍夫电流定律 KCL 或基尔霍夫电压定律 KVL，可以得到以测量点的输出电流  $I_{LRA}$  为输出变量  $y(t)$ ，驱动信号  $V_{DRV}$  为输入变量  $x(t)$  的关系，可以用函数表示为  $y(t)=F\{x(t)\}$ ，计算方法可采用现有技术中的方法，如对输入变量  $x(t)$  和输出变量  $y(t)$  进行连续时域上的拉普拉斯变换，利用变换后的输入变量  $X(s)$  和输出变量  $Y(s)$  计算得到连续时域上的系统传递函数  $H(s)=Y(s)/X(s)$ ；也可以对输入变量  $x(t)$  和输出变量  $y(t)$  进行离散时域上的 Z 变换，利用 Z 变换后的输入变量  $X(z)$  和输出变量  $Y(z)$  计算得到离散时域上的系统传递函数  $H(z)=Y(z)/X(z)$ 。

在本发明的另一个实施例中，可以通过下述两种方式中的一种，建立电路的输入端至测量点的传递函数：

方式一：

利用两个电感、一个电容和两个电阻建立模拟线性谐振致动器的电路，该电路结构可以参照图 2 或图 3 所示，根据两个电感的电感值、两个电阻的电阻值和电容值计算得到电路的输入端至测量点的三阶传递函数。

示例性地，以获取模拟线性谐振致动器振子加速度的输出量为例。如图 4 所示，该输出量对应的测量点为电容  $C_p$  连接电感  $L_s$  的一端，则根据电路结构以及基本的电路定律可以得到，以该测量点对应的转换器的输出量为输出变量  $Y(s)$ 、以方波信号为输入变量  $X(s)$ ，根据

$H(s)=Y(s)/X(s)$  计算得到  $H(s)=\frac{s^2}{L_s s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0}$ ；其中，系数  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  由电路结构中的

无源电器件的参数（即两个电感的电感值、两个电阻的电阻值和电容值）决定。

方式二：

利用一个电感、一个电容和两个电阻建立模拟线性谐振致动器的电路，该电路结构可以参见图 2 或图 3 中电感  $L_s$  被导线替代后的电路结构，可以先根据电感值、电容值和两个电阻

的电阻值计算得到电路的输入端至测量点的二阶传递函数，再将该二阶传递函数进行系数代换，使该二阶传递函数为关于电路的谐振频率、阻尼比和增益的表达式。

对于上述两种方式，方式一传递函数的精度较高，复杂度也较高，因此不便于分析该传递函数对应的谐振系统（也即被模拟线性谐振致动器）的动态性能；方式二通过忽略电感  $L_s$  所建立的二阶传递函数对应为二阶的欠阻尼谐振系统，由于该二阶的欠阻尼谐振系统的传递函数可以利用电路的谐振频率、阻尼比和增益来表示，而系统的动态性能由谐振频率和阻尼比决定，因而利用简化后的二阶传递函数模拟线性谐振致动器，方便分析致动器性能。

基于与获取线性谐振致动器输出量的方法相同的设计构思，本发明实施例还提供了一种获取线性谐振致动器输出量的电路。

该电路包括：第一电阻、第一电感、电容、第二电感和第二电阻，第一、第二电阻的电阻值，第一、第二电感的电感值以及电容值由线性谐振致动器电学参数和运动学参数确定；

本实施例中上述无源电器件采用如下两种连接方式中的至少一种：

方式一：

电容、第二电感和第二电阻相互并联形成并联谐振电路；

第一电阻的一端为正极输入端，所述第一电感的一端为负极输入端，第一电阻的另一端和第一电感的另一端分别连接并联谐振电路的两端。

上述方式连接成的电路结构可参考图 2，图 2 中的电阻  $R_s$  和电感  $L_s$  依次为本实现方案中的第一电阻和第一电感，图 2 中的电阻  $R_p$ 、电感  $L_p$  和电容  $C_p$  即依次为本实现方案中的第二电阻、第二电感和电容。

其中，线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值分别为第一电阻的电阻值和第一电感的电感值，第二电阻的电阻值、电容的电容值和第二电感的电感值由线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值及线性谐振致动器工作电流  $I$ 、工作电压  $V$ ，以及线性谐振致动器振子的谐振频率  $\omega_0$ 、频率带宽  $B_0$  计算得到。

在本实施例的一个优选方案中，图 2 中的电路还包括：与第一电阻的一端或第一电感的一端相连接的第一电流传感器，第一电流传感器的输出量为线性谐振致动器的负载电流；和/或，与第二电阻连接第一电感的一端相连接的第二电流传感器；和/或，与第二电感连接第一电感的一端相连接的第三电流传感器；和/或，与电容连接第一电感的一端相连接的第四电流传感器；和/或，与电容并联的电压传感器，电压传感器的输出量为线性谐振致动器的反电动

势电压。

如图 4 所示，相比于图 2，图 4 中的电路还包括：与第一电流传感器相连接的第一转换器，第一转换器的输出量为线性谐振致动器的振子合力；和/或，与第二电流传感器相连接的第二转换器，第二转换器的输出量为线性谐振致动器的振子速度；和/或，与第三电流传感器相连接的第三转换器，第三转换器的输出量为线性谐振致动器的振子位移；和/或，与第四电流传感器相连接的第四转换器，第四转换器的输出量为线性谐振致动器的振子加速度。

其中，第一转换器的转换系数  $G_{LRA}$  为线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$ ，第二转换器的转换系数  $G_R$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和第二电阻的电阻值计算得到；第三转换器的转换系数  $G_L$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和第二电感的电感值计算得到；第四转换器的转换系数  $G_C$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和电容的电容值计算得到。

方式二：

电容、第二电感和第二电阻相互串联形成串联谐振电路；

第一电阻的一端为正极输入端，第一电感的一端为负极输入端，第一电阻的另一端连接耦合器的第一输入端，第一电感的另一端连接耦合器的第二输入端，耦合器的第一输出端和第二输出端分别连接串联谐振电路。

上述方式连接成的电路结构可参考图 3，图 3 中的电阻  $R_s$  和电感  $L_s$  依次为本实现方案中的第一电阻和第一电感，图 3 中的电阻  $R_r$ 、电感  $L_r$  和电容  $C_r$  即依次为本实现方案中的第二电阻、第二电感和电容。

其中，线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值分别为第一电阻的电阻值和第一电感的电感值，第二电阻的电阻值、第二电感的电感值和电容值由线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值及线性谐振致动器工作电流  $I$ 、工作电压  $V$ ，以及线性谐振致动器振子的谐振频率  $\omega_0$ 、频率带宽  $B_0$  计算得到。

在本实施例的一个优选方案中，图 3 中的电路还包括：与第二电阻的一端或第二电感的一端或电容的一端相连接的第一电流传感器，第一电流传感器的输出量为线性谐振振动器的负载电流；和/或，与第二电阻并联的第一电压传感器；和/或，与第二电感并联的第二电压传感器；和/或，与电容并联的第三电压传感器；和/或，与耦合器输入端并联的第四电压传感器，第四电压传感器的输出量为线性谐振振动器的反电动势电压。

如图 5 所示，相比于图 3，图 5 中的电路还包括：与第一电流传感器相连接的第一转换

器，第一转换器的输出量为线性谐振致动器的振子合力；和/或，与第一电压传感器相连接的第二转换器，第二转换器的输出量为线性谐振致动器的振子速度；和/或，与第二电压传感器相连接的第三转换器，第三转换器的输出量为线性谐振致动器的振子加速度；和/或，与第三电压传感器相连接的第四转换器，第四转换器的输出量为线性谐振致动器的振子位移。

其中，第一转换器的转换系数  $M_{LRA}$  为线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$ ；第二转换器的转换系数  $M_R$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和第二电阻的电阻值计算得到；第三转换器的转换系数  $M_L$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和第二电感的电感值计算得到；第四转换器的转换系数  $M_C$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和电容的电容值计算得到。

综上所述，公开了一种获取线性谐振致动器输出量的方法和电路，一方面，本方案利用无源电器件建立模拟线性谐振致动器电路模型或系统模型，在项目的开发和调试过程中，可用本方案替换直接使用物理致动器的方案，达到提高工作效率，避免对物理致动器的依赖的效果；另一方面，本方案基于电路模型采集测量点输出的电信号得到被模拟的线性谐振致动器的输出量，或者基于电路模型计算电路的输入端至测量点的传递函数，由传递函数直接计算出被模拟的线性谐振致动器的输出量，提供了计算机仿真的方案，在不使用致动器或其他电子器件的情况下，通过算法得到测试过程中致动器的输出量，避免了现有技术中易于损坏致动器、易于受到外界环境干扰、效率低的缺点。

本方案依据线性谐振致动器的工作原理对其合理地建立模型，基于高效、简洁的模型进行致动器工作过程的仿真，能有效地缩短致动器的驱动和控制系统的研发周期、也能模拟触觉振动的测试效果等；另外，建模和仿真还可以用于线性谐振致动器的设计阶段，在建立物理模型前进行仿真并预测其性能。在触觉反馈系统的设计和开发过程中，本方案具有重要的实际意义。

为了便于清楚描述本发明实施例的技术方案，在发明的实施例中，采用了“第一”、“第二”等字样对功能和作用基本相同的相同项或相似项进行区分，本领域技术人员可以理解“第一”、“第二”等字样并不对数量和执行次序进行限定。

以上所述，仅为本发明的具体实施方式，在本发明的上述教导下，本领域技术人员可以在上述实施例的基础上进行其他的改进或变形。本领域技术人员应该明白，上述的具体描述只是更好的解释本发明的目的，本发明的保护范围以权利要求的保护范围为准。

## 权利要求

1、一种获取线性谐振致动器输出量的方法，其中，所述方法包括：

根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟所述线性谐振致动器的电路，所述无源电器件至少包括电阻、电容和电感；

根据所述线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点；

将输入源的驱动信号输入至电路的输入端，采集所述测量点输出的电信号得到被模拟的线性谐振致动器的输出量。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟所述线性谐振致动器的电路包括：

根据所述线性谐振致动器导电线圈的电学参数，选取第一电阻和第一电感；以及根据所述线性谐振致动器导电线圈的电学参数和振子的运动学参数，选取电容、第二电阻和第二电感；

将第一电阻和第一电感串联以及将电容、第二电感和第二电阻并联建立模拟所述线性谐振致动器的第一电路，其中，所述第一电阻的一端连接输入源的正极端，所述第一电感的一端连接输入源的负极端，所述电容、所述第二电感和所述第二电阻相互并联形成并联谐振电路，所述并联谐振电路的两端分别串联连接在所述第一电阻的另一端和所述第一电感的另一端之间；

或者，将第一电阻和第一电感串联以及将电容、第二电感和第二电阻串联建立模拟所述线性谐振致动器的第二电路，其中，所述第一电阻的一端连接输入源的正极端，所述第一电感的一端连接输入源的负极端，第一电阻的另一端连接耦合器的第一输入端，第一电感的另一端连接到耦合器的第二输入端，所述电容、所述第二电感和所述第二电阻相互串联形成串联谐振电路，所述串联谐振电路的两端分别串联连接在耦合器的第一输出端和第二输出端之间。

3、根据权利要求 2 所述的方法，其中，所述根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟所述线性谐振致动器的电路还包括：

将所述线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值分别设置为所述第一电阻的电阻值和所述第一电感的电感值；根据所述线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值及所述线性谐振致动器的工作电流、工作电压，以及所述线性谐振致动器振子的谐振频率

和频率带宽计算得到所述第二电阻的电阻值、所述电容的电容值和所述第二电感的电感值。

4、根据权利要求 2 所述的方法，其中，在模拟所述线性谐振致动器的电路为第一电路时，所述根据所述线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点包括：

选取所述第一电阻的一端或所述第一电感的一端作为所述线性谐振致动器振子合力的测量点；

和/或，选取所述第二电阻连接第一电感的一端作为所述线性谐振致动器振子速度的测量点；

和/或，选取所述第二电感连接第一电感的一端作为所述线性谐振致动器振子位移的测量点；

和/或，选取所述电容连接第一电感的一端作为所述线性谐振致动器振子加速度的测量点；

和/或，选取所述电容作为所述线性谐振致动器反电动势电压的测量点；

在模拟所述线性谐振致动器的电路为第二电路时，所述根据所述线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点包括：

选取所述第二电阻的一端或所述第二电感的一端或所述电容的一端作为所述线性谐振致动器振子合力的测量点；

和/或，选取所述第二电阻作为所述线性谐振致动器振子速度的测量点；

和/或，选取所述第二电感作为所述线性谐振致动器振子加速度的测量点；

和/或，选取所述电容作为所述线性谐振致动器振子位移的测量点；

和/或，选取所述耦合器的输入端作为所述线性谐振致动器反电动势电压的测量点。

5、根据权利要求 4 所述的方法，其中，所述采集所述测量点输出的电信号得到被模拟的线性谐振致动器的输出量包括：

在所述电路的每个测量点上连接电流传感器或电压传感器；

采集所述电流传感器或电压传感器输出的电信号；

根据每个测量点输出的电信号计算得到所述线性谐振驱动器相应的输出量。

6、根据权利要求 5 所述的方法，其中，所述根据每个测量点输出的电信号计算得到所述线性谐振驱动器相应的输出量包括：

根据所述线性谐振致动器导电线圈的长度和磁通量密度计算电磁参数  $K_m$ ;

根据所述电磁参数  $K_m$  和电路中无源电器件的参数计算对应于每个测量点输出的电信号的转换系数;

通过计算每个测量点输出的电信号与其对应的转换系数的乘积,得到所述线性谐振致动器相应的输出量。

7、根据权利要求 6 所述的方法,其中,在模拟所述线性谐振致动器的电路为第一电路时,所述根据所述电磁参数  $K_m$  和电路中无源电器件的参数计算对应于每个测量点输出的电信号的转换系数包括:

根据所述电磁参数  $K_m$  计算得到所述线性谐振致动器振子合力对应的测量点输出的电信号的转换系数;

根据所述电磁参数  $K_m$  和第二电阻值计算得到所述线性谐振致动器振子速度对应的测量点输出的电信号的转换系数;

根据所述电磁参数  $K_m$  和第二电感值计算得到所述线性谐振致动器振子位移对应的测量点输出的电信号的转换系数;

根据所述电磁参数  $K_m$  和电容值计算得到所述线性谐振致动器振子加速度对应的测量点输出的电信号的转换系数。

8、根据权利要求 6 所述的方法,其中,在模拟所述线性谐振致动器的电路为第二电路时,所述根据所述电磁参数  $K_m$  和电路中无源电器件的参数计算对应于每个测量点输出的电信号的转换系数包括:

根据所述电磁参数  $K_m$  计算得到所述线性谐振致动器振子合力对应的测量点输出的电信号的转换系数;

根据所述电磁参数  $K_m$  和第二电阻值计算得到所述线性谐振致动器振子速度对应的测量点输出的电信号的转换系数;

根据所述电磁参数  $K_m$  和第二电感值计算得到所述线性谐振致动器振子加速度对应的测量点输出的电信号的转换系数;

根据所述电磁参数  $K_m$  和电容值计算得到所述线性谐振致动器振子位移对应的测量点输出的电信号的转换系数。

9、一种获取线性谐振致动器输出量的方法,其中,所述方法包括:

根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟所述线性谐振致动器的电路，所述无源电器件至少包括电阻、电容和电感；

根据所述线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点；

计算从所述电路的输入端至所述测量点的传递函数；

根据输入源的驱动信号和所述传递函数计算得到被模拟的线性谐振致动器的输出量。

10、根据权利要求 9 所述的方法，其中，所述根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟所述线性谐振致动器的电路包括：

根据所述线性谐振致动器导电线圈的电学参数，选取第一电阻和第一电感；以及根据所述线性谐振致动器导电线圈的电学参数和振子的运动学参数，选取电容、第二电阻和第二电感；

将第一电阻和第一电感串联以及将电容、第二电感和第二电阻并联建立模拟所述线性谐振致动器的第一电路，其中，所述第一电阻的一端连接输入源的正极端，所述第一电感的一端连接输入源的负极端，所述电容、所述第二电感和所述第二电阻相互并联形成并联谐振电路，所述并联谐振电路的两端分别串联连接在所述第一电阻的另一端和所述第一电感的另一端之间；

或者，将第一电阻和第一电感串联以及将电容、第二电感和第二电阻串联建立模拟所述线性谐振致动器的第二电路，其中，所述第一电阻的一端连接输入源的正极端，所述第一电感的一端连接输入源的负极端，第一电阻的另一端连接耦合器的第一输入端，第一电感的另一端连接到耦合器的第二输入端，所述电容、所述第二电感和所述第二电阻相互串联形成串联谐振电路，所述串联谐振电路的两端分别串联连接在耦合器的第一输出端和第二输出端之间。

11、根据权利要求 10 所述的方法，其中，所述根据线性谐振致动器的电学参数和运动学参数，利用无源电器件建立模拟所述线性谐振致动器的电路还包括：

将所述线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值分别设置为所述第一电阻的电阻值和所述第一电感的电感值；根据所述线性谐振致动器导电线圈的电阻值和电感值及所述线性谐振致动器的工作电流、工作电压，以及所述线性谐振致动器振子的谐振频率和频率带宽计算得到所述第二电阻的电阻值、所述电容的电容值和所述第二电感的电感

值。

12、根据权利要求 10 所述的方法，其中，在模拟所述线性谐振致动器的电路为第一电路时，所述根据所述线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点包括：

选取所述第一电阻的一端或所述第一电感的一端作为所述线性谐振致动器振子合力的测量点；

和/或，选取所述第二电阻连接第一电感的一端作为所述线性谐振致动器振子速度的测量点；

和/或，选取所述第二电感连接第一电感的一端作为所述线性谐振致动器振子位移的测量点；

和/或，选取所述电容连接第一电感的一端作为所述线性谐振致动器振子加速度的测量点；

和/或，选取所述电容作为所述线性谐振致动器反电动势电压的测量点；

在模拟所述线性谐振致动器的电路为第二电路时，所述根据所述线性谐振致动器所需要的输出量在电路中选取测量点包括：

选取所述第二电阻的一端或所述第二电感的一端或所述电容的一端作为所述线性谐振致动器振子合力的测量点；

和/或，选取所述第二电阻作为所述线性谐振致动器振子速度的测量点；

和/或，选取所述第二电感作为所述线性谐振致动器振子加速度的测量点；

和/或，选取所述电容作为所述线性谐振致动器振子位移的测量点；

和/或，选取所述耦合器的输入端作为所述线性谐振致动器反电动势电压的测量点。

13、根据权利要求 9 所述的方法，其中，所述计算从所述电路的输入端至所述测量点的传递函数包括：

确定所述线性谐振致动器输出量与所述电路测量点输出的电信号之间的转换关系；

根据所述对应关系以及所述电路的电路结构、无源电器件参数，计算以所述线性谐振致动器输出量为输出变量、所述输入端的驱动信号为输入变量的所述电路的传递函数。

14、根据权利要求 13 所述的方法，其中，所述利用无源电器件建立模拟所述线性谐振致动器的电路包括：利用两个电感、一个电容和两个电阻建立模拟所述线性谐振致

动器的电路，

则所述计算从所述电路的输入端至所述测量点的传递函数具体为：

根据两个电感的电感值、两个电阻的电阻值和电容值计算得到所述电路的输入端至所述测量点的三阶传递函数。

15、根据权利要求 13 所述的方法，其中，所述利用无源电器件建立模拟所述线性谐振致动器的电路包括：利用一个电感、一个电容和两个电阻建立模拟所述线性谐振致动器的电路；

则所述计算从所述电路的输入端至所述测量点的传递函数具体为：

根据所述电感值、电容值和两个电阻的电阻值计算得到所述电路的输入端至所述测量点的二阶传递函数。

16、一种获取线性谐振致动器输出量的电路，其中，所述电路包括：第一电阻、第一电感、电容、第二电感和第二电阻；

所述电容、所述第二电感和所述第二电阻相互并联形成并联谐振电路，所述第一电阻的一端为正极输入端，所述第一电感的一端为负极输入端，所述第一电阻的另一端和所述第一电感的另一端分别连接所述并联谐振电路的两端；

或者，

所述电容、所述第二电感和所述第二电阻相互串联形成串联谐振电路，第一电阻的一端为正极输入端，第一电感的一端为负极输入端，所述第一电阻的另一端连接耦合器的第一输入端，所述第一电感的另一端连接耦合器的第二输入端，所述耦合器的第一输出端和第二输出端分别连接所述串联谐振电路的两端；

其中，第一、第二电阻的电阻值，第一、第二电感的电感值以及电容值由所述线性谐振致动器电学参数和运动学参数确定。

17、根据权利要求 16 所述的电路，其中，在所述电容、所述第二电感和所述第二电阻相互并联形成并联谐振电路时，所述电路还包括：与第一电阻的一端或第一电感的一端相连接的第一电流传感器，第一电流传感器的输出量为线性谐振致动器的负载电流；和/或，与第二电阻连接第一电感的一端相连接的第二电流传感器；和/或，与第二电感连接第一电感的一端相连接的第三电流传感器；和/或，与电容连接第一电感的一端相连接的第四电流传感器；和/或，与电容并联的电压传感器，电压传感器的输出量为线

性谐振致动器的反电动势电压。

18、根据权利要求 17 所述的电路，其中，所述电路还包括：与第一电流传感器相连接的第一转换器，第一转换器的输出量为线性谐振致动器的振子合力；和/或，与第二电流传感器相连接的第二转换器，第二转换器的输出量为线性谐振致动器的振子速度；和/或，与第三电流传感器相连接的第三转换器，第三转换器的输出量为线性谐振致动器的振子位移；和/或，与第四电流传感器相连接的第四转换器，第四转换器的输出量为线性谐振致动器的振子加速度；

其中，第一转换器的转换系数  $G_{LRA}$  为线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$ ，第二转换器的转换系数  $G_R$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和第二电阻的电阻值计算得到；第三转换器的转换系数  $G_L$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和第二电感的电感值计算得到；第四转换器的转换系数  $G_C$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和电容的电容值计算得到。

19、根据权利要求 16 所述的电路，其中，在所述电容、所述第二电感和所述第二电阻相互串联形成串联谐振电路时，所述电路还包括：与第二电阻的一端或第二电感的一端或电容的一端相连接的第一电流传感器，第一电流传感器的输出量为线性谐振振动器的负载电流；和/或，与第二电阻并联的第一电压传感器；和/或，与第二电感并联的第二电压传感器；和/或，与电容并联的第三电压传感器；和/或，与耦合器输入端并联的第四电压传感器，第四电压传感器的输出量为线性谐振振动器的反电动势电压。

20、根据权利要求 19 所述的电路，其中，所述电路还包括：与第一电流传感器相连接的第一转换器，第一转换器的输出量为线性谐振致动器的振子合力；和/或，与第一电压传感器相连接的第二转换器，第二转换器的输出量为线性谐振致动器的振子速度；和/或，与第二电压传感器相连接的第三转换器，第三转换器的输出量为线性谐振致动器的振子加速度；和/或，与第三电压传感器相连接的第四转换器，第四转换器的输出量为线性谐振致动器的振子位移；

其中，第一转换器的转换系数  $M_{LRA}$  为线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$ ；第二转换器的转换系数  $M_R$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和第二电阻的电阻值计算得到；第三转换器的转换系数  $M_L$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和第二电感的电感值计算得到；第四转换器的转换系数  $M_C$  由线性谐振致动器的电磁参数  $K_m$  和电容的电容值计算得到。

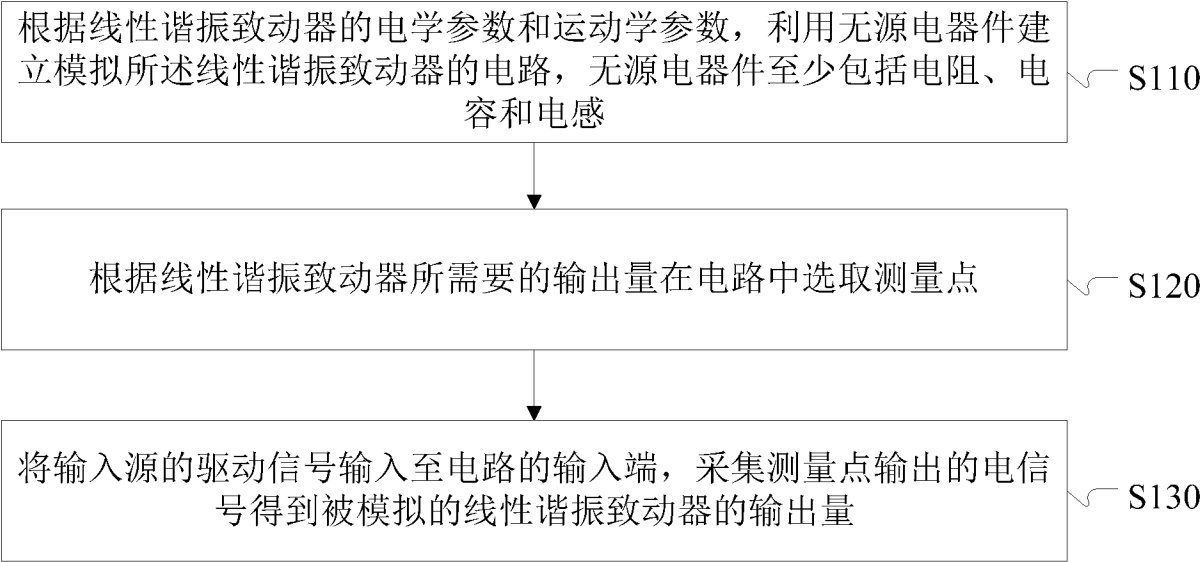


图 1

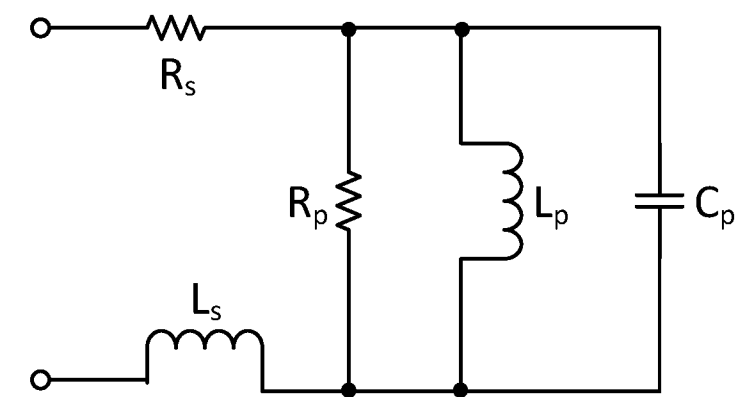


图 2

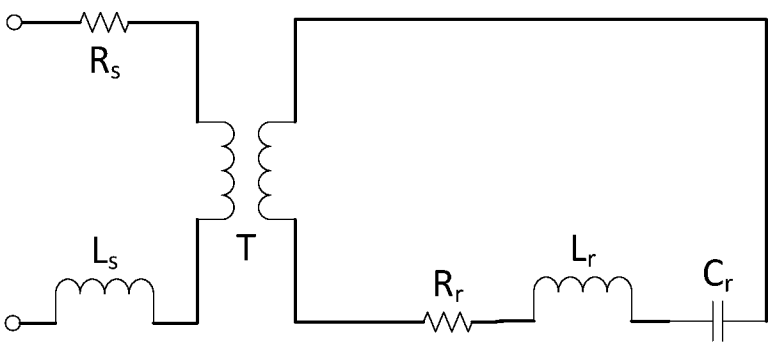


图 3

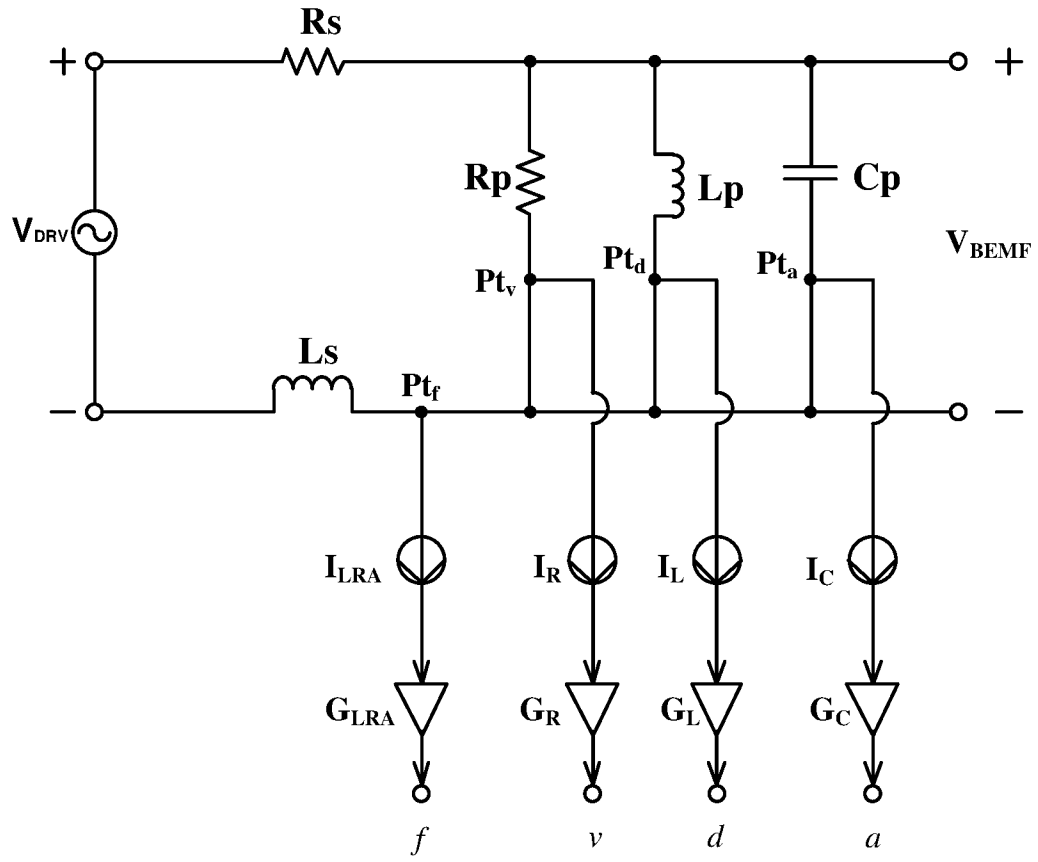


图 4

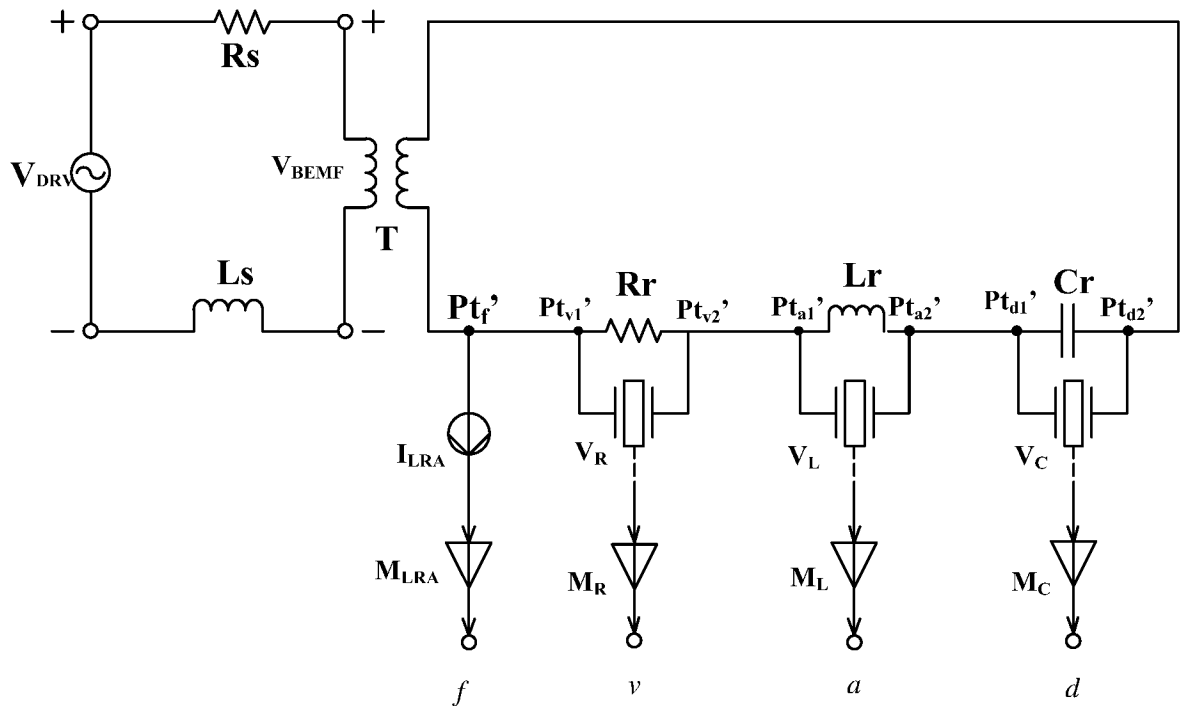


图 5

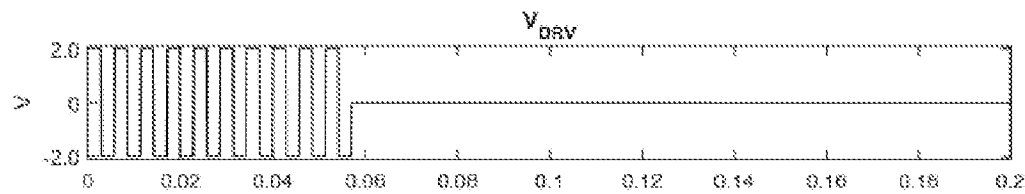


图 6a

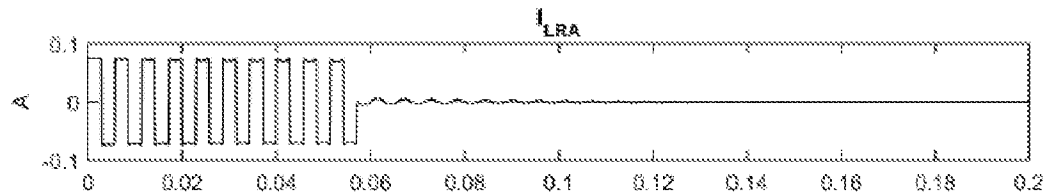


图 6b

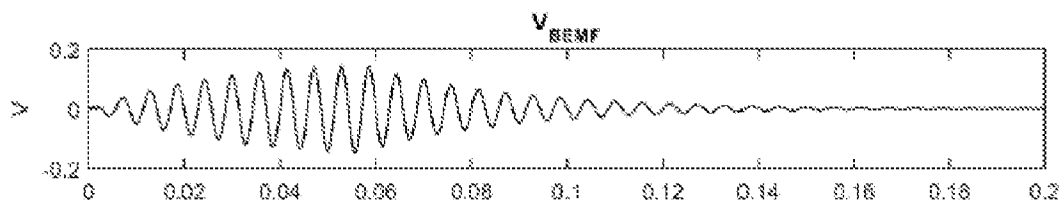


图 6c

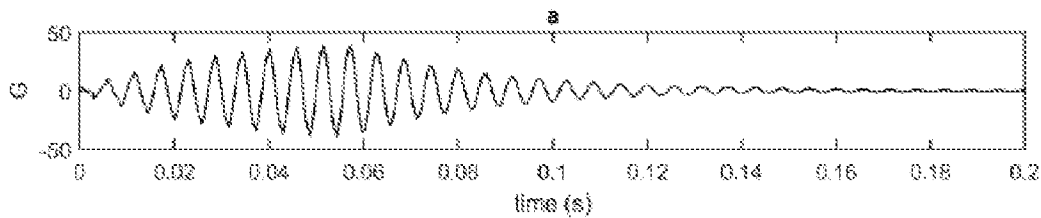


图 6d

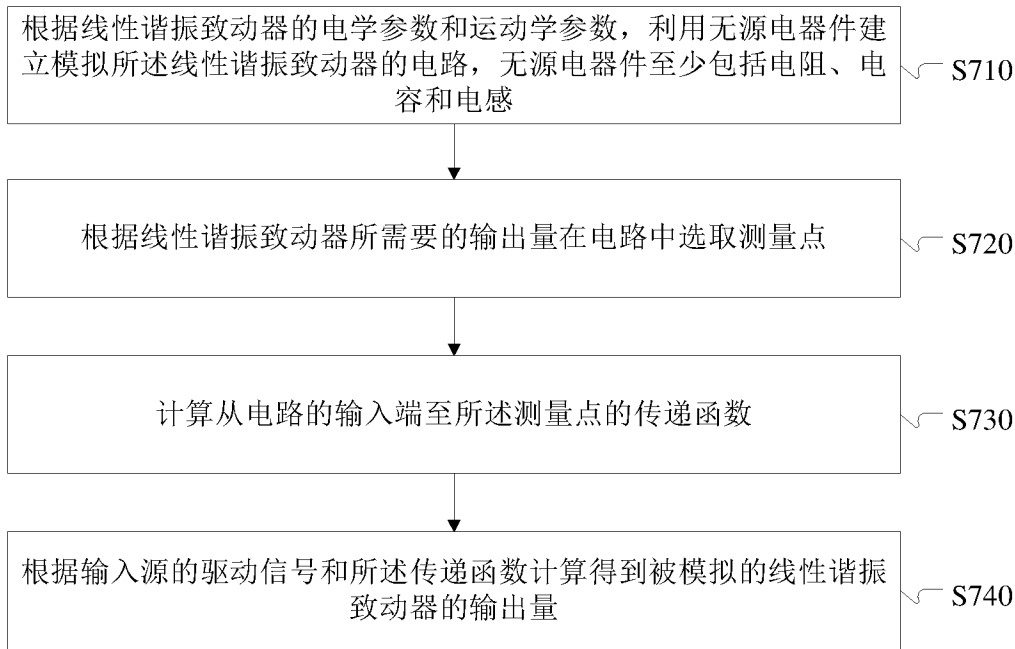


图 7

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/CN2017/100517

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F, H02M

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 线性谐振, 致动器, 模型, 电路, 电感, 电容, 电阻, linear resonant, actuator, model, circuit, inductor, capacitor, resistor

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                           | Relevant to claim No. |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| PX        | CN 206312138 U (GOERTEK INC.), 07 July 2017 (07.07.2017), description, paragraphs [0025]-[0067], and figures 1-5                             | 1-20                  |
| PX        | CN 106326594 A (BEIJING NO.9 LAB TECHNOLOGY CO., LTD.), 11 January 2017 (11.01.2017), description, paragraphs [0032]-[0115], and figures 1-7 | 1-20                  |
| X         | CN 103576858 A (CAI, Congzhong), 12 February 2014 (12.02.2014), description, paragraphs [0046]-[0047], and figures 1-4                       | 1, 2, 9, 10, 13-17    |
| A         | CN 103620525 A (ANALOG DEVICES, INC.), 05 March 2014 (05.03.2014), entire document                                                           | 1-20                  |
| A         | KR 101108248 B1 (IMAGIS TECHNOLOGY), 31 January 2012 (31.01.2012), entire document                                                           | 1-20                  |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

|                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| * Special categories of cited documents:                                                                                                                                | “T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention                                              |
| “A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance                                                                | “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone                                                                     |
| “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date                                                                               | “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art |
| “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) | “&” document member of the same patent family                                                                                                                                                                                                    |
| “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                  |
| “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                  |

|                                                                                                                                                                                                               |                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Date of the actual completion of the international search<br>29 November 2017                                                                                                                                 | Date of mailing of the international search report<br>06 December 2017 |
| Name and mailing address of the ISA<br>State Intellectual Property Office of the P. R. China<br>No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao<br>Haidian District, Beijing 100088, China<br>Facsimile No. (86-10) 62019451 | Authorized officer<br>LIANG, Xuefeng<br>Telephone No. (86-10) 62413648 |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
Information on patent family members

International application No.  
PCT/CN2017/100517

| Patent Documents referred<br>in the Report | Publication Date | Patent Family    | Publication Date  |
|--------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| CN 206312138 U                             | 07 July 2017     | None             |                   |
| CN 106326594 A                             | 11 January 2017  | None             |                   |
| CN 103576858 A                             | 12 February 2014 | CN 103576858 B   | 09 March 2016     |
| CN 103620525 A                             | 05 March 2014    | WO 2012122443 A1 | 13 September 2012 |
|                                            |                  | EP 2684108 A4    | 26 November 2014  |
|                                            |                  | US 2012229264 A1 | 13 September 2012 |
|                                            |                  | JP 2014509026 A  | 10 April 2014     |
|                                            |                  | CA 2829568 A1    | 13 September 2012 |
|                                            |                  | JP 5756872 B2    | 29 July 2015      |
|                                            |                  | EP 2684108 A1    | 15 January 2014   |
| KR 101108248 B1                            | 31 January 2012  | None             |                   |

## 国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/100517

## A. 主题的分类

G06F 17/50(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

## B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06F; H02M

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE:线性谐振, 致动器, 模型, 电路, 电感, 电容, 电阻, linear resonant, actuator, model, circuit, inductor, capacitor, resistor

## C. 相关文件

| 类 型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落                                                                       | 相关的权利要求        |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| PX   | CN 206312138 U (歌尔股份有限公司) 2017年 7月 7日 (2017 - 07 - 07)<br>说明书第[0025]-[0067]段、图1-5       | 1-20           |
| PX   | CN 106326594 A (北京第九实验室科技有限公司) 2017年 1月 11日 (2017 - 01 - 11)<br>说明书第[0032]-[0115]段、图1-7 | 1-20           |
| X    | CN 103576858 A (蔡从中) 2014年 2月 12日 (2014 - 02 - 12)<br>说明书第[0046]-[0047]段、图1-4           | 1、2、9、10、13-17 |
| A    | CN 103620525 A (美国亚德诺半导体公司) 2014年 3月 5日 (2014 - 03 - 05)<br>全文                          | 1-20           |
| A    | KR 101108248 B1 (IMAGIS TECHNOLOGY) 2012年 1月 31日 (2012 - 01 - 31)<br>全文                 | 1-20           |

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

\* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&amp;” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2017年 11月 29日

国际检索报告邮寄日期

2017年 12月 6日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)  
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

梁雪峰

电话号码 (86-10)62413648

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/100517

| 检索报告引用的专利文件 |           |    | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利 |            |    | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|-----------|----|----------------|------|------------|----|----------------|
| CN          | 206312138 | U  | 2017年 7月 7日    | 无    |            |    |                |
| CN          | 106326594 | A  | 2017年 1月 11日   | 无    |            |    |                |
| CN          | 103576858 | A  | 2014年 2月 12日   | CN   | 103576858  | B  | 2016年 3月 9日    |
| CN          | 103620525 | A  | 2014年 3月 5日    | WO   | 2012122443 | A1 | 2012年 9月 13日   |
|             |           |    |                | EP   | 2684108    | A4 | 2014年 11月 26日  |
|             |           |    |                | US   | 2012229264 | A1 | 2012年 9月 13日   |
|             |           |    |                | JP   | 2014509026 | A  | 2014年 4月 10日   |
|             |           |    |                | CA   | 2829568    | A1 | 2012年 9月 13日   |
|             |           |    |                | JP   | 5756872    | B2 | 2015年 7月 29日   |
|             |           |    |                | EP   | 2684108    | A1 | 2014年 1月 15日   |
| KR          | 101108248 | B1 | 2012年 1月 31日   | 无    |            |    |                |

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)