

(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
2012 年 11 月 8 日 (08.11.2012)



(10) 国际公布号
WO 2012/149899 A1

- (51) 国际专利分类号:
B06B 1/04 (2006.01) *B06B 1/02* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2012/075025
- (22) 国际申请日: 2012 年 5 月 3 日 (03.05.2012)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201110113959.2 2011 年 5 月 4 日 (04.05.2011) CN
- (71) 申请人 (对除美国外的所有指定国): 浙江大学 (ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号浙江大学, Zhejiang 310058 (CN)。 中国计量科学研究院 (NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY P.R.CHINA) [CN/CN]; 中国北京市海淀区北三环东路 18 号中国计量科学研究院, Beijing 100013 (CN)。
- (72) 发明人: 及
- (75) 发明人/申请人 (仅对美国): 何闻 (HE, Wen) [CN/CN]; 中国浙江省杭州西湖浙大路 38 号浙江大学现代制造工程研究所, Zhejiang 310027 (CN)。 王春宇 (WANG, Chunyu) [CN/CN]; 中国浙江省杭州

西湖浙大路 38 号浙江大学现代制造工程研究所, Zhejiang 310027 (CN)。 沈润杰 (SHEN, Runjie) [CN/CN]; 中国浙江省杭州西湖浙大路 38 号浙江大学现代制造工程研究所, Zhejiang 310027 (CN)。 贾叔仕 (JIA, Shushi) [CN/CN]; 中国浙江省杭州西湖浙大路 38 号浙江大学现代制造工程研究所, Zhejiang 310027 (CN)。 于梅 (YU, Mei) [CN/CN]; 中国北京市海淀区北三环东路 18 号中国计量科学研究院, Beijing 100013 (CN)。 马明德 (MA, Mingde) [CN/CN]; 中国北京市海淀区北三环东路 18 号中国计量科学研究院, Beijing 100013 (CN)。

(74) 代理人: 浙江杭州金通专利事务所有限公司 (ZHEJIANG HANGZHOU JINTONG PATENT AGENCY CO. LTD); 中国浙江省杭州市武林广场 8 号省科协大楼 19 楼/赵芳, Zhejiang 310003 (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, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO,

[见续页]

(54) Title: ELECTROMAGNETIC VIBRATION PLATFORM SYSTEM WITH ADJUSTABLE ELECTRIC ELASTIC SUPPORT DEVICE

(54) 发明名称: 具有可调电粘弹性支撑装置的电磁式振动台系统

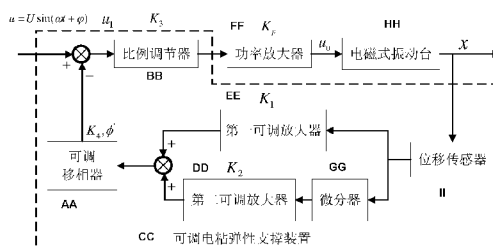


图 4 / Fig. 4

AA ADJUSTABLE PHASE SHIFTER
BB PROPORTION REGULATOR
CC ADJUSTABLE ELECTRIC ELASTIC SUPPORT DEVICE
DD THE SECOND ADJUSTABLE AMPLIFIER
EE THE FIRST ADJUSTABLE AMPLIFIER
FF POWER AMPLIFIER
GG DIFFERENTIATOR
HH ELECTROMAGNETIC VIBRATION PLATFORM
II DISPLACEMENT SENSOR

(57) Abstract: An electromagnetic vibration platform system with an adjustable electric elastic support device is provided. The vibration platform system includes an electromagnetic vibration platform, a power amplifier and an adjustable electric elastic support device. The support device of the electromagnetic vibration platform is the adjustable electric elastic support device. The adjustable electric elastic support device includes a displacement sensor for detecting the displacement of the electromagnetic vibration platform moving element, the first adjustable amplifier, the second adjustable amplifier, a differentiator, a summing junction, an adjustable phase shifter, a subtractor and a proportion regulator. Through changing the magnification ratio of the controllable amplifier, the controllable phase shifter, the proportion regulator and so on, the support rigidity character parameter and damp character parameter of the vibration platform can be directly adjusted, which has better linearity. The electromagnetic vibration platform system is provided with adjustable parameter and better linearity and is convenient to realize.

[见续页]

WO 2012/149899 A1



RS, RU, RW, 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。

RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

- (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, 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,

根据细则 4.17 的声明:

— 发明人资格(细则 4.17(iv))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

(57) 摘要:

具有可调电粘弹性支撑装置的电磁式振动台系统, 包括电磁式振动台、功率放大器和可调电粘弹性支撑装置, 电磁式振动台的支承装置为可调电粘弹性支撑装置; 可调电粘弹性支撑装置包括监测电磁式振动台运动部件位移的位移传感器、第一可调放大器、第二可调放大器、微分器、加法器和可调移相器、减法器、比例调节器。通过改变可控放大器、可控移相器、比例调节器等的放大倍数, 可直接调节振动台的支撑刚度特征参数和阻尼特征参数, 且具有良好的线性。所述电磁式振动台系统具有参数可调、线性好, 方便实现的优点。

说明书

具有可调电粘弹性支撑装置的电磁式振动台系统

技术领域

本发明涉及一种具有可调电粘弹性支撑装置的电磁式振动台系统。

5 技术背景

电磁式振动台一般包括固定基座、励磁系统、运动部件、导向及支撑系统等部分。而随着科学技术的发展，电磁式振动台越来越被要求能够输出大位移的振动信号，如用于低频乃至超低频段输出时，为了得到信噪比大的振动信号，振动台输出位移峰峰值可达到 1000mm，大行程振动台对弹性支撑装置提出了新的要求。

电磁式振动台一般采用板簧、乳胶管等机械式弹性支撑装置，对运动部件进行支撑和定位。在振动台工作位移较小时，机械弹性支撑装置工作于线性区，对振动台输出指标的影响可以忽略；当振动台运动位移较大时（如在低至 0.01Hz 的超低频工作时，输出位移峰峰值可以达到 1000mm），常规振动台的机械弹性支撑装置将呈现较大的非线性特征，从而对振动台性能指标产生较大的影响；另外，振动台位移越大，要求机械弹性支撑装置的刚度较小，然而为减小台面零漂及外界环境噪声的影响，又要求支撑装置具有较大的阻尼，设计这种刚度小而阻尼大的机械弹性支撑装置存在困难；此外，由于机械弹性支撑装置材料性能的变化，其定位重复性也无法保证；最后，安装完毕的机械弹性支撑装置，其支撑刚度和阻尼参数不能随意改变。故而机械弹性支撑装置已无法满足电磁式振动台不断发展的要求，尤其是大行程振动台。

发明内容

为克服现有技术的上述缺点，本发明提供了一种具有电粘弹性支撑装置的电磁式振动台系统，该电粘弹性支撑装置可替代机械弹性支撑装置，使电磁式振动台中运动部件的支撑刚度和阻尼参数可根据实际运行要求方便调节，且在大行程工作条件下具有良好的线性，从而可极大地提高电磁式振动台大行程下的工作性能。

具有可调电粘弹性支撑装置的电磁式振动台系统，包括电磁式振动台和功率放大器；

其特征在于：所述的电磁式振动台的支撑装置为可调电粘弹性支撑装置；所述的可调电粘弹性支撑装置包括监测电磁式振动台运动部件位移的位移传感器、第一可调放大器、第二可调放大器、微分器、加法器和可调移相器、减法器、比例调节器；

所述的位移传感器获取的位移信号一路经第一可调放大器形成第一放大信号，所述的位移信号另一路依次经微分器和第二可调放大器后形成第二放大信号，所述的第一放大信号和第二放大信号经所述的加法器相加形成加信号，所述的加信号输入可调移相器中，可调移相器输出的移相信号作为减数输入减法器中，所述的减法器与产生标准信号的信号发生器连接，所述的标准信号作为减法器的被减数，所述的减法器的输出端与比例调节器的输入端连接，所述的比例调节器的输出端与功率放大器的输入端连接，所述的功率放大器的输出信号作为电磁式振动台的驱动信号。

所述的振动台系统的传递函数为：

$$\begin{aligned}
G(s) &= \frac{X(s)}{U(s)} \\
&= K_3 K_p \cdot \frac{Bl}{mLs^3 + (mR + c_2 L)s^2 + [Rc_2 + (Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl]s + K_1 K_3 K_4 K_p Bl} \\
&= \frac{K_3 K_p Bl}{R} \cdot \frac{Bl}{\frac{mL}{R}s^3 + \left(m + \frac{c_2 L}{R}\right)s^2 + \left[c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}\right]s + \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}}
\end{aligned}
\tag{1}$$

式中， m 为运动部件及负载的总质量； c_2 为由支承系统以外的其他因素产生的阻尼，如空气阻尼； B 为工作空气隙的磁感应强度； l 为动圈绕组的长度； L 为动圈绕组的等效电感； R 为动圈绕组的等效电阻； K_1 是第一可调放大器的放大倍数； K_2 是第二可调放大器的放大倍数； K_3 是比例调节器的放大倍数； K_4 是可
5 调移相器的放大倍数； K_p 是功率放大器的放大倍数； $s=j\omega$ ，为复频率；

式 (1) 中，参数 $C = c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}$ 反映了系统的阻尼特征，参数
 $K = \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}$ 反映了系统的刚度特征。 c_2 主要由空气阻尼产生，通过合理设

10 置其中的 K_2 、 K_3 、 K_4 ，可以使 $\frac{K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R} \gg c_2$ ，从而 $C \approx \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}$ 。

假设磁感应强度 B 是与位移 x 无关的常数，则振动台系统的阻尼特征参数 C 和刚度特征参数 K 为常数参数，系统因此具有更好线性；且通过改变 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 参数，即可使系统获得合适的阻尼和刚度参数。

进一步，所述的振动台系统在低频和超低频运动情况下的传递函数为：

$$\begin{aligned}
G(s) &= \frac{X(s)}{U(s)} = K_3 K_p \cdot \frac{Bl}{mRs^2 + [Rc_2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl + (Bl)^2]s + K_1 K_3 K_4 K_p Bl} \\
&= \frac{K_3 K_p \cdot Bl}{R} \cdot \frac{1}{ms^2 + \left[c_2 + \frac{K_2 K_3 K_4 K_p Bl + (Bl)^2}{R}\right]s + \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}}
\end{aligned}
\tag{2}$$

式(2)中, 系统等效阻尼系数为 $C = c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_P Bl}{R}$, 系统等效刚度系数为 $K = \frac{K_1 K_3 K_4 K_P Bl}{R}$ 。 c_2 主要由空气阻尼产生, 通过合理设置其中的 K_2 、 K_3 、 K_4 , 使 $\frac{K_2 K_3 K_4 K_P Bl}{R} \gg c_2$, 从而 $C \approx \frac{K_2 K_3 K_4 K_P Bl + (Bl)^2}{R}$ 。假设磁感应强度 B 是与位移 x 无关的常数, 则系统等效刚度和阻尼系数 K 和 C 为常数参数, 系统因此具有更好线性。通过改变可控放大器、可控移相器、比例调节器等的放大倍数, 可直接调节振动台支撑的等效刚度系数和阻尼系数 K 和 C 。

本发明的技术构思是: 取消机械系统中非可控、线性差的环节因素, 改由方便可控、线性好、精度高的电气环节实现。具体是通过对电磁式振动台位移信号的比例加微分及移相处理, 构成系统的反馈信号, 实现所替代机械环节的功能。

电磁式振动台一般包括固定基座、励磁系统、运动部件、导向及支撑系统等部分, 其中, 传统的电磁式振动台常采用板簧、乳胶管等机械式弹性支撑装置对运动部件进行支撑和定位。运动部件中动圈、动圈骨架、工作台面连接良好, 其一阶共振频率通常被设计为工作频率的 5 倍以上, 故在振动台工作时, 运动部件可视为一刚性体, 进而可将电磁式振动台简化为单自由度力学模型, 同时考虑到驱动线圈的电气方程, 其机电耦合方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Bli \\ L\frac{di}{dt} + Ri + Bl\dot{x} = u_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, m 为运动部件及负载的总质量; k 为运动部件的支撑弹簧刚度; c 为运动部件的运动阻尼系数, $c = c_1 + c_2$, 其中 c_1 为机械弹性支撑装置的阻尼, c_2 为由其他因素产生的阻尼, 如空气阻尼; B 为工作空气隙的磁感应强度; l 为动圈绕组的长度; L 为动圈绕组的等效电感; R 为动圈绕组的等效电阻; i 为动圈内驱动

电流； u_0 为功放输入绕组两端的电压； x 为振动台的输出位移。

故传统的电磁式振动台传递函数为：

$$G_2(s) = \frac{X(s)}{U_0(s)} = \frac{Bl}{mLs^3 + (mR + cL)s^2 + [Rc + (Bl)^2 + kL]s + Rk} \quad (4)$$

传统的振动台系统由功率放大器和电磁式振动台构成，功率放大器传递函

5 数 $G_I(s) = K_p$ ，故传统的振动台系统传递函数为：

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{X(s)}{U(s)} = K_p \cdot \frac{Bl}{mLs^3 + (mR + cL)s^2 + [Rc + (Bl)^2 + kL]s + Rk} \\ &= \frac{K_p Bl}{R} \cdot \frac{Bl}{\frac{mL}{R}s^3 + \left(m + \frac{cL}{R}\right)s^2 + \left[c + \frac{(Bl)^2 + kL}{R}\right]s + k} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， K_p 为功率放大器的放大倍数。

式 (5) 中，参数 $C = c + \frac{(Bl)^2 + kL}{R}$ 反映了系统的阻尼特征，参数 $K = k$ 反

映了系统的刚度特征。电磁式振动台安装完成后， K 和 C 均是不易改变的，且

10 均与非线性参数 k 、 c 有关，所以 K 和 C 也具有非线性特征。

本发明中取消了机械式弹性支承装置，故在式 (3) 中 $k = 0$ ， $c = c_2$ ，振动台机电耦合方程变为：

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_2\dot{x} = Bli \\ L\frac{di}{dt} + Ri + Bl\dot{x} = u_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 c_2 主要由空气阻尼产生。此时振动台系统传递函数为：

$$15 \quad G_2(s) = \frac{X(s)}{U_0(s)} = \frac{Bl}{mLs^3 + (mR + c_2L)s^2 + [Rc_2 + (Bl)^2]s} \quad (7)$$

同时，本系统引入了可调电粘弹性支撑装置，其实现过程是：位移传感器检测电磁式振动台运动部件的位移 x ，该位移信号 x 一路经第一可调放大器（放大倍数 K_I ），另一路先后经微分器，第二可调放大器（放大倍数 K_2 ）处理，这

两路处理后的信号经加法器相加，再经过可调移相器（放大倍数为 K_4 ，相移 φ ）后，与信号发生器输出的标准信号 u 进行求差运算，得偏差信号 u_1 ，接着经过比例调节器（放大倍数 K_3 ）后输出给功率放大器（放大倍数 K_p ），驱动电磁式振动台。

5 引入可调电粘弹性支撑装置后，反馈单元的传递函数为：

$$G_3(s) = (K_1 + K_2 s) \cdot K_4 e^{-j\varphi} \quad (8)$$

令可控移相器相移 $\varphi = 0$ ，则：

$$G_3(s) = (K_1 + K_2 s) \cdot K_4 \quad (9)$$

功率放大器传递函数 $G_1(s) = K_p$ ，比例调节器传递函数 $G_4(s) = K_3$ ，故系统传递函

10 数为：

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{X(s)}{U(s)} \\ &= K_3 K_p \cdot \frac{Bl}{mLs^3 + (mR + c_2 L)s^2 + [Rc_2 + (Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl]s + K_1 K_3 K_4 K_p Bl} \\ &= \frac{K_3 K_p Bl}{R} \cdot \frac{Bl}{\frac{mL}{R}s^3 + \left(m + \frac{c_2 L}{R}\right)s^2 + \left[c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}\right]s + \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}} \end{aligned} \quad (10)$$

由式 (10) 可知，参数 $C = c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}$ 反映了系统的阻尼特征，

参数 $K = \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}$ 反映了系统的刚度特征。通过合理设置其中的 K_2 、 K_3 、

15 K_4 ，可以使 $\frac{K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R} \gg c_2$ ，从而 $C \approx \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}$ 。与式 (5) 相比，

振动台系统的 K 和 C 参数均未出现非线性参数 k 、 c 。假设磁感应强度 B 也是与位移 x 无关的常数，则振动台系统的阻尼特征参数 C 和刚度特征参数 K 为常数参数，系统因此具有更好线性；且通过改变 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 参数，即可使系

统获得合适的阻尼和刚度参数。

特别地，对于振动台低频、超低频运动情况， $\frac{di}{dt}$ 很小，故可令式 (3) 中的 $L\frac{di}{dt}$ 项为 0，则传统振动台机电耦合方程为：

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Bli \\ Ri + Bl\dot{x} = u_0 \end{cases} \quad (11)$$

5 相应地，传统振动台系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = K_p \cdot \frac{Bl}{mRs^2 + [Rc + (Bl)^2]s + Rk} = \frac{K_p Bl}{R} \cdot \frac{1}{ms^2 + (c + \frac{(Bl)^2}{R})s + k} \quad (12)$$

该系统为典型的单自由度振动系统模型，其中等效阻尼系数为 $C = c + \frac{(Bl)^2}{R}$ ；

等效刚度系数为 $K = k$ 。电磁式振动台安装完成后， K 和 C 均是不易改变的，且均与非线性参数 k 、 c 有关，所以 K 和 C 也具有非线性特征。

10 取消机械式弹性支承装置后，振动台机电耦合方程式 (6) 为：

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_2\dot{x} = Bli \\ Ri + Bl\dot{x} = u_0 \end{cases} \quad (13)$$

引入可调电粘弹性支撑装置后，振动台系统传递函数为：

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{X(s)}{U(s)} = K_3 K_p \cdot \frac{Bl}{mRs^2 + [Rc_2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl + (Bl)^2]s + K_1 K_3 K_4 K_p Bl} \\ &= \frac{K_3 K_p \cdot Bl}{R} \cdot \frac{1}{ms^2 + \left[c_2 + \frac{K_2 K_3 K_4 K_p Bl + (Bl)^2}{R} \right]s + \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}} \end{aligned} \quad (14)$$

该系统也为典型的单自由度振动系统模型，其中等效阻尼系数为

15 $C = c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}$ ，等效刚度系数为 $K = \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}$ 。 c_2 主要由空气

阻尼产生，通过合理设置其中的 K_2 、 K_3 、 K_4 ，使 $\frac{K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R} \gg c_2$ ，从而

$C \approx \frac{K_2 K_3 K_4 K_p B l + (B l)^2}{R}$ 。假设磁感应强度 B 是与位移 x 无关的常数，则式 (14)

中等效刚度和阻尼系数 K 和 C 为常数参数，系统因此具有良好线性，从而可改善系统性能。对照式 (12) 和式 (14)，可以更明显地看出，通过改变可控放大器、可控移相器、比例调节器等的放大倍数，可直接调节振动台支撑的等效

5 刚度系数和阻尼系数 K 和 C 。

为解决当工作频率增高时引起振动台输入电压与输出位移出现的相移问题，可通过调节可调移相器保证反馈信号与信号源之间的相位差不变。

本发明具有参数可调、线性好，方便实现的优点。

附图说明

10 图 1 为电磁式振动台运动部件动力学模型。

图 2 为电磁式振动台机电耦合模型。

图 3 为具有机械弹性支撑装置的系统模型。

图 4 为本发明的结构框图。

图 5 为引入电粘弹性支撑装置的系统模型。

15 具体实施方式

参照附图，进一步说明本发明：

具有可调电粘弹性支撑装置的电磁式振动台系统，包括电磁式振动台和功率放大器；

所述的电磁式振动台的支撑装置为可调电粘弹性支撑装置；所述的可调电
20 粘弹性支撑装置包括位移传感器、第一可调放大器、第二可调放大器、微分器、加法器和可调移相器、减法器、比例调节器；

所述的位移传感器获取的位移信号一路经第一可调放大器形成第一放大信号，所述的位移信号另一路依次经微分器和第二可调放大器后形成第二放大信

号，所述的第一放大信号和第二放大信号经所述的加法器相加形成加信号，所述的加信号输入可调移相器中，可调移相器输出的移相信号作为减数输入减法器中，所述的减法器与产生标准信号的信号发生器连接，所述的标准信号作为减法器的被减数，所述的减法器的输出端与比例调节器的输入端连接，所述的
5 比例调节器的输出端与功率放大器的输入端连接，所述的功率放大器的输出信号作为电磁式振动台的驱动信号。

本发明的技术构思是：取消机械系统中非可控、线性差的环节因素，改由方便可控、线性好、精度高的电气环节实现。具体是通过对电磁式振动台位移信号的比例加微分及移相处理，构成系统的反馈信号，实现所替代机械环节的
10 功能。

电磁式振动台一般包括固定基座、励磁系统、运动部件、导向及支撑系统等部分，其中，传统的电磁式振动台常采用板簧、乳胶管等机械式弹性支撑装置，对运动部件进行支撑和定位。电磁式振动台运动部件中动圈、动圈骨架、工作台面连接良好，其一阶共振频率通常被设计为工作频率的 5 倍以上，故在
15 振动台工作时，运动部件可视为一刚性体，进而可将电磁式振动台简化为单自由度力学模型，如图 1 所示，同时考虑到驱动线圈的电气方程，传统的电磁式振动台机电耦合模型如图 2 所示，其机电耦合方程为：

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Bli \\ L\frac{di}{dt} + Ri + Bl\dot{x} = u_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， m 为运动部件及负载的总质量； k 为运动部件的支撑弹簧刚度； c 为运动
20 部件的运动阻尼系数， $c=c_1+c_2$ ，其中 c_1 为机械弹性支撑装置的阻尼， c_2 为由其他因素产生的阻尼，如空气阻尼； B 为工作空气隙的磁感应强度； l 为动圈绕组的长度； L 为动圈绕组的等效电感； R 为动圈绕组的等效电阻； i 为动圈内驱动

电流； u_0 为功放输入绕组两端的电压； x 为振动台的输出位移。

故传统的电磁式振动台传递函数为：

$$G_2(s) = \frac{X(s)}{U_0(s)} = \frac{Bl}{mLs^3 + (mR + cL)s^2 + [Rc + (Bl)^2 + kL]s + Rk} \quad (2)$$

传统的振动台系统的整体模型如图 3 所示，功率放大器传递函数 $G_I(s) = K_p$ ，

5 故系统传递函数为：

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{X(s)}{U(s)} = K_p \cdot \frac{Bl}{mLs^3 + (mR + cL)s^2 + [Rc + (Bl)^2 + kL]s + Rk} \\ &= \frac{K_p Bl}{R} \cdot \frac{Bl}{\frac{mL}{R}s^3 + \left(m + \frac{cL}{R}\right)s^2 + \left[c + \frac{(Bl)^2 + kL}{R}\right]s + k} \end{aligned} \quad (3)$$

式中， K_p 为功率放大器的放大倍数。

式 (3) 中，参数 $C = c + \frac{(Bl)^2 + kL}{R}$ 反映了系统的阻尼特征，参数 $K = k$ 反

映了系统的刚度特征。电磁式振动台安装完成后， K 和 C 均是不易改变的，且

10 均与非线性参数 k 、 c 有关，所以 K 和 C 也具有非线性特征。

本发明中取消了机械式弹性支承装置，故在式 (1) 中 $k = 0$ ， $c = c_2$ ，振动台机电耦合方程变为：

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_2\dot{x} = Bli \\ L\frac{di}{dt} + Ri + Bl\dot{x} = u_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 c_2 主要由空气阻尼产生。此时电磁式振动台传递函数为：

$$15 \quad G_2(s) = \frac{X(s)}{U_0(s)} = \frac{Bl}{mLs^3 + (mR + c_2L)s^2 + [Rc_2 + (Bl)^2]s} \quad (5)$$

同时，本系统引入了可调电粘弹性支撑装置，其结构组成如图 4 所示。可调电粘弹性支撑装置由位移传感器，第一可调放大器、第二可调放大器、微分器、可调移相器和加法器、减法器、比例调节器等组成。其实现过程是：位移

传感器检测电磁式振动台运动部件的位移 x ，该位移信号 x 一路经第一可调放大器（放大倍数 K_1 ），另一路先后经微分器，第二可调放大器（放大倍数 K_2 ）处理，这两路处理后的信号经加法器相加，再经过可调移相器（放大倍数为 K_4 ，相移 φ ）后，与信号发生器输出的标准信号 u 进行求差运算，得偏差信号 u_1 ，接着经过比例调节器（放大倍数 K_3 ）后输出给功率放大器（放大倍数 K_p ），驱动电磁式振动台。

引入可调电粘弹性支撑装置后，系统模型进一步可简化为如图 5 所示。其中，反馈单元的传递函数为：

$$G_3(s) = (K_1 + K_2s) \cdot K_4 e^{-j\varphi} \quad (6)$$

10 令可控移相器相移 $\varphi = 0$ ，则：

$$G_3(s) = (K_1 + K_2s) \cdot K_4 \quad (7)$$

功率放大器传递函数 $G_1(s) = K_p$ ，比例调节器传递函数 $G_4(s) = K_3$ ，故系统传递函数为：

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{X(s)}{U(s)} \\ &= K_3 K_p \cdot \frac{Bl}{mLs^3 + (mR + c_2L)s^2 + [Rc_2 + (Bl)^2 + K_2K_3K_4K_pBl]s + K_1K_3K_4K_pBl} \\ &= \frac{K_3K_pBl}{R} \cdot \frac{Bl}{\frac{mL}{R}s^3 + \left(m + \frac{c_2L}{R}\right)s^2 + \left[c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2K_3K_4K_pBl}{R}\right]s + \frac{K_1K_3K_4K_pBl}{R}} \end{aligned} \quad (8)$$

由式（8）可知，参数 $C = c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2K_3K_4K_pBl}{R}$ 反映了系统的阻尼特征，

参数 $K = \frac{K_1K_3K_4K_pBl}{R}$ 反映了系统的刚度特征。通过合理设置其中的 K_2 、 K_3 、

K_4 , 可以使 $\frac{K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R} \gg c_2$, 从而 $C \approx \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}$ 。与式 (3) 相比, 振动台系统的 K 和 C 参数均未出现非线性参数 k 、 c 。假设磁感应强度 B 也是与位移 x 无关的常数, 则振动台系统的阻尼特征参数 C 和刚度特征参数 K 为常数参数, 系统因此具有更好线性; 且通过改变 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 参数, 即可使系

5 统获得合适的阻尼和刚度参数。

特别地, 对于振动台低频、超低频运动情况, $\frac{di}{dt}$ 很小, 故可令式 (1) 中的 $L \frac{di}{dt}$ 项为 0。采用机械式弹性支承装置的振动台机电耦合方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Bli \\ Ri + Bl\dot{x} = u_0 \end{cases} \quad (9)$$

相应地, 振动台系统的传递函数式为:

$$10 \quad G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = K_p \cdot \frac{Bl}{mRs^2 + [Rc + (Bl)^2]s + Rk} = \frac{K_p Bl}{R} \cdot \frac{1}{ms^2 + (c + \frac{(Bl)^2}{R})s + k} \quad (10)$$

该系统为典型的单自由度振动系统模型, 其中等效阻尼系数为 $C = c + \frac{(Bl)^2}{R}$; 等效刚度系数为 $K = k$ 。电磁式振动台安装完成后, K 和 C 均是不易改变的, 且均与非线性参数 k 、 c 有关, 所以 K 和 C 也具有非线性特征。

取消机械式弹性支承装置后, 振动台机电耦合方程式 (4) 为:

$$15 \quad \begin{cases} m\ddot{x} + c_2\dot{x} = Bli \\ Ri + Bl\dot{x} = u_0 \end{cases} \quad (11)$$

引入可调电粘弹性支撑装置后, 振动台系统传递函数为:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{X(s)}{U(s)} = K_3 K_p \cdot \frac{Bl}{mRs^2 + [Rc_2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl + (Bl)^2]s + K_1 K_3 K_4 K_p Bl} \\ &= \frac{K_3 K_p \cdot Bl}{R} \cdot \frac{1}{ms^2 + \left[c_2 + \frac{K_2 K_3 K_4 K_p Bl + (Bl)^2}{R} \right]s + \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}} \end{aligned} \quad (12)$$

该系统也为典型的单自由度振动系统模型，其中等效阻尼系数为

$$C = c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}, \text{ 等效刚度系数为 } K = \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}。c_2 \text{ 主要由空气}$$

阻尼产生，通过合理设置其中的 K_2 、 K_3 、 K_4 ，使 $\frac{K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R} \gg c_2$ ，从而

$$C \approx \frac{K_2 K_3 K_4 K_p Bl + (Bl)^2}{R}。假设磁感应强度 B 是与位移 x 无关的常数，则式 (12)$$

- 5 中等效刚度和阻尼系数 K 和 C 为常数参数，系统因此具有良好线性，从而可改善系统性能。对照式 (10) 和式 (12)，可以更明显地看出，通过改变可控放大器、可控移相器、比例调节器等的放大倍数，可直接调节振动台支撑的等效刚度系数和阻尼系数 K 和 C 。

- 10 为解决当工作频率增高时引起振动台输入电压与输出位移出现的相移问题，可通过调节可调移相器保证反馈信号与信号源之间的相位差不变。

本说明书实施例所述的内容仅仅是对发明构思的实现形式的列举，本发明的保护范围不应当被视为仅限于实施例所陈述的具体形式，本发明的保护范围也及于本领域技术人员根据本发明构思所能够想到的等同技术手段。

权利要求书

1、具有可调电粘弹性支撑装置的电磁式振动台系统，包括电磁式振动台和功率放大器；

其特征在于：所述的电磁式振动台的支撑装置为可调电粘弹性支撑装置；

5 所述的可调电粘弹性支撑装置包括监测电磁式振动台运动部件位移的位移传感器、第一可调放大器、第二可调放大器、微分器、加法器和可调移相器、减法器、比例调节器；

所述的位移传感器获取的位移信号一路经第一可调放大器形成第一放大信号，所述的位移信号另一路依次经微分器和第二可调放大器后形成第二放大信号，
10 号，所述的第一放大信号和第二放大信号经所述的加法器相加形成加信号，所述的加信号输入可调移相器中，可调移相器输出的移相信号作为减数输入减法器中，所述的减法器与产生标准信号的信号发生器连接，所述的标准信号作为减法器的被减数，所述的减法器的输出端与比例调节器的输入端连接，所述的比例调节器的输出端与功率放大器的输入端连接，所述的功率放大器的输出信
15 号作为电磁式振动台的驱动信号；

所述的振动台系统的传递函数为：

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{X(s)}{U(s)} \\
 &= K_3 K_p \cdot \frac{Bl}{mLs^3 + (mR + c_2L)s^2 + [Rc_2 + (Bl)^2 + K_2K_3K_4K_pBl]s + K_1K_3K_4K_pBl} \\
 &= \frac{K_3K_pBl}{R} \cdot \frac{Bl}{\frac{mL}{R}s^3 + \left(m + \frac{c_2L}{R}\right)s^2 + \left[c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2K_3K_4K_pBl}{R}\right]s + \frac{K_1K_3K_4K_pBl}{R}}
 \end{aligned}$$

式中，m 为运动部件及负载的总质量；c₂ 为由支承系统以外的其他因素产生的阻尼，如空气阻尼；B 为工作空气隙的磁感应强度；l 为动圈绕组的长度；L 为

动圈绕组的等效电感； R 为动圈绕组的等效电阻； K_1 是第一可调放大器的放大倍数； K_2 是第二可调放大器的放大倍数； K_3 是比例调节器的放大倍数； K_4 是可调移相器的放大倍数； K_p 是功率放大器的放大倍数； $s=j\omega$ ，为复频率；

参数 $C = c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}$ 反映了系统的阻尼特征，参数

$$5 \quad K = \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R} \text{ 反映了系统的刚度特征。}$$

2、如权利要求 1 所述的具有可调电粘弹性支撑装置的电磁式振动台系统，其特征在于：所述的电磁式振动台在低频和超低频运动情况下，振动台系统的传递函数为：

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{X(s)}{U(s)} = K_3 K_p \cdot \frac{Bl}{mRs^2 + [Rc_2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl + (Bl)^2]s + K_1 K_3 K_4 K_p Bl} \\ &= \frac{K_3 K_p \cdot Bl}{R} \cdot \frac{1}{ms^2 + \left[c_2 + \frac{K_2 K_3 K_4 K_p Bl + (Bl)^2}{R} \right] s + \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}} \end{aligned}$$

$$10 \quad \text{系统等效阻尼系数为 } C = c_2 + \frac{(Bl)^2 + K_2 K_3 K_4 K_p Bl}{R}, \text{ 系统等效刚度系数为}$$

$$K = \frac{K_1 K_3 K_4 K_p Bl}{R}。$$

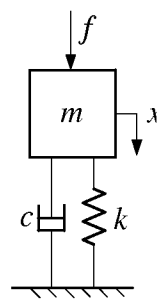


图 1

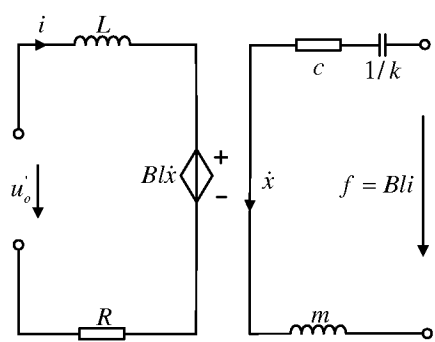


图 2

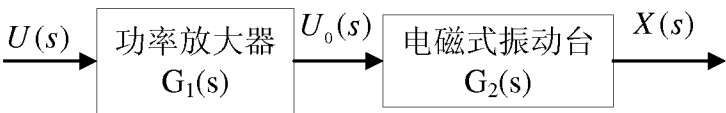


图 3

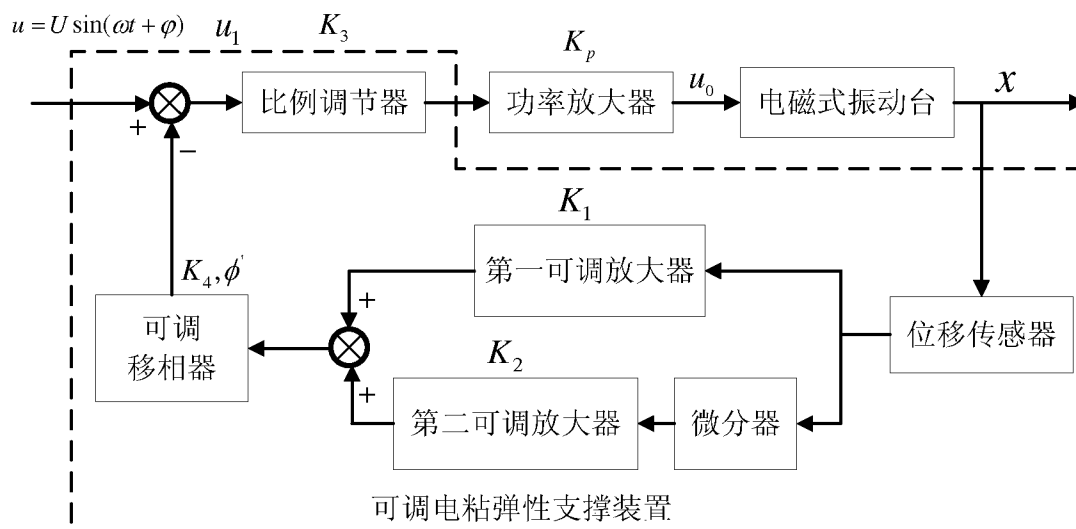


图 4

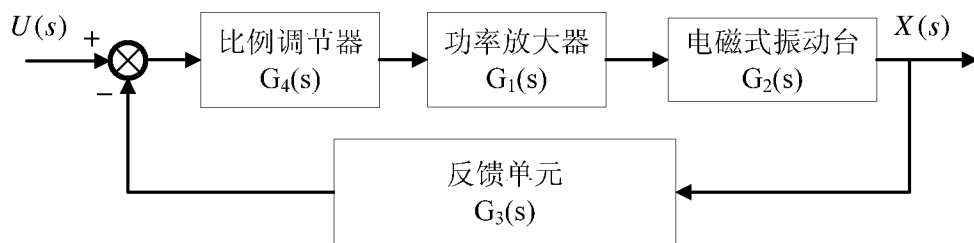


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2012/075025

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

see the extra sheet

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)

IPC: B06B1/00,B06B1/02,B06B1/04, G05D19/00,G05D19/02, G09B23/00, G09B21/00,G09B21/04, F16F7/00

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: VIBRAT+, AMPLIFIER?, MAGNET+, ELECTROMAGNET+, SENS+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN102319664A (ZHEJIANG UNIVERSITY et al.) 18 Jan. 2012 (18.01.2012) figures 1-5, description, paragraphs [0062]-[0102].	1-2
A	CN101576752A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 11 Nov. 2009 (11.11.2009) figures 1-2, description, page 5 line 28 - page 9 line 12	1-2
A	CN2618237Y (SHANGHAI SCIENCE AND TECHNOLOG) 26 May 2004 (26.05.2004) the whole document	1-2
A	GB2458533A (COLLISON R.) 30 Sep. 2009(30.09.2009) the whole document	1-2
A	US2010/0284554A1 (ASTON M. et al.) 11 Nov. 2010 (11.11.2010) the whole document	1-2

☐ 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 19 July 2012 (19.07.2012)	Date of mailing of the international search report 09 Aug. 2012 (09.08.2012)
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10)62019451	Authorized officer WANG, Jian Telephone No. (86-10) 62414261

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2012/075025

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN102319664A	18.01.2012	NONE	
CN101576752A	11.11.2009	NONE	
CN2618237Y	26.05.2004	NONE	
GB2458533A	30.09.2009	NONE	
US2010/0284554A1	11.11.2010	WO 2009044209 A2	09.04.2009
		WO 2009044209 A3	02.07.2009
		GB 2466753 A	07.07.2010
		CN 101821870 A	01.09.2010
		EP 2253029 A2	24.11.2010
		JP 2011502033 A	20.01.2011
		GB 2466753 B	18.01.2012

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2012/075025

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B06B1/04 (2006.01) i

B06B1/02 (2006.01) i

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2012/075025

A. 主题的分类

参见附加页

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)

IPC: B06B1/00,B06B1/02,B06B1/04, G05D19/00,G05D19/02, G09B23/00, G09B21/00,G09B21/04, F16F7/00

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: 振动+震动, 电磁, 放大, 微分, 传感; VIBRAT+, AMPLIFIER?, MAGNET+, ELECTROMAGNET+, SENS+

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	CN102319664A (浙江大学 等) 18.1 月 2012 (18.01.2012) 附图 1-5、说明书第[0062]-[0102]段	1-2
A	CN101576752A (南京航空航天大学) 11.11 月 2009 (11.11.2009) 附图 1-2、说明书第 5 页第 28 行至第 9 页第 12 行	1-2
A	CN2618237Y (上海科技馆) 26.5 月 2004 (26.05.2004) 全文	1-2
A	GB2458533A (COLLISON R.) 30.9 月 2009(30.09.2009) 全文	1-2
A	US2010/0284554A1 (ASTON M. et al.) 11.11 月 2010 (11.11.2010) 全文	1-2

☐ 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

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期
19.7 月 2012 (19.07.2012)

国际检索报告邮寄日期
09.8 月 2012 (09.08.2012)

ISA/CN 的名称和邮寄地址:
中华人民共和国国家知识产权局
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

王健
电话号码: (86-10) **62414162**

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2012/075025

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN102319664A	18.01.2012	无	
CN101576752A	11.11.2009	无	
CN2618237Y	26.05.2004	无	
GB2458533A	30.09.2009	无	
US2010/0284554A1	11.11.2010	WO 2009044209 A2	09.04.2009
		WO 2009044209 A3	02.07.2009
		GB 2466753 A	07.07.2010
		CN 101821870 A	01.09.2010
		EP 2253029 A2	24.11.2010
		JP 2011502033 A	20.01.2011
		GB 2466753 B	18.01.2012

A. 主题的分类

B06B1/04 (2006.01) i

B06B1/02 (2006.01) i