



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111897421 B

(45) 授权公告日 2021.08.03

(21) 申请号 202010675172.4

G06F 17/16 (2006.01)

(22) 申请日 2020.07.14

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 111190490 A, 2020.05.22

申请公布号 CN 111897421 A

CN 106227346 A, 2016.12.14

CN 105900044 A, 2016.08.24

(43) 申请公布日 2020.11.06

审查员 孙阳丹

(73) 专利权人 武汉大学

地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山
武汉大学

(72) 发明人 袁志勇 李潇洒 赵俭辉

(74) 专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 42222

代理人 魏波

(51) Int. Cl.

G06F 3/01 (2006.01)

G06F 3/046 (2006.01)

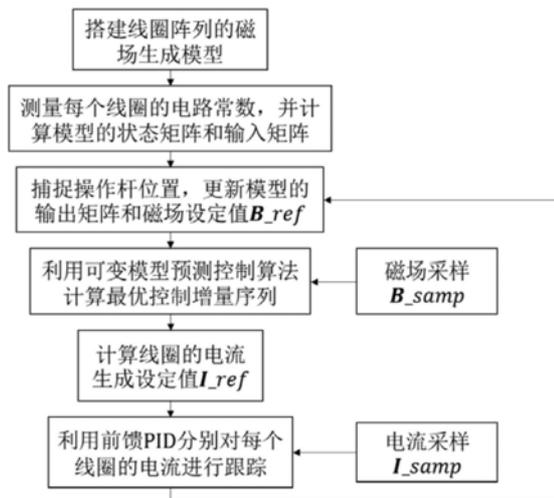
权利要求书2页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

一种电磁式触觉再现系统、方法及磁场预测控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种电磁式触觉再现系统、方法及磁场预测控制方法,系统使用三个位姿可调的铁芯线圈来激发电磁场,配合顶端带有永磁体的操作杆上来生成动态变化的磁力反馈,来产生满足人体皮肤横向拉扯和竖向挤压等动态感知频率的虚拟触觉。本发明根据驱动电压占空比和励磁电流的线性关系,以及多个线圈磁场的叠加方式,设计了一种具有可变模型的预测控制方法。该方法利用每个线圈的位姿和操作杆的位置来实时地调整磁场预测模型,并结合综合考虑磁场生成误差和平滑度的目标函数来计算限制电流范围内的最优控制量,来精确地控制线圈阵列生成触觉再现所需的磁场。动态的电磁触觉装置结合精确的磁场生成控制算法,保证了电磁式触觉再现系统的沉浸感。



1. 一种磁场预测控制方法,采用电磁式触觉再现系统;

其特征在于:所述系统包括虚拟物理模型、磁性操作杆、电磁线圈阵列、电流驱动电路、磁场控制器、定位设备;

所述虚拟物理模型,是根据操作对象的形变特性建立的虚拟物理模型;

所述磁性操作杆,用于向使用者提供单点的力反馈;其杆顶部固定设置有永磁体、杆中部设置有磁力计和视觉标记点;

所述电磁线圈阵列,由三个位姿可调的铁芯线圈组成;每个线圈的规格相同,用于在空间中激发具有分布可控的磁场;

所述电流驱动电路,通过控制铁芯线圈两端电压的方向和持续时间,使铁芯线圈中产生特定电流,并通过检测电流大小进行反馈调节;每个铁芯线圈具有独立的驱动电路;

所述磁场控制器,检测铁芯线圈阵列生成的磁感应强度,根据生成误差结合控制算法重新计算应向每个线圈施加的电流,并传递给线圈驱动电路;

所述定位设备,用于捕捉磁性操作杆和铁芯线圈的运动状态,用于计算虚拟物理模型的理论反馈力和搭建磁场控制的预测模型;

所述方法包括以下步骤:

步骤1:选定三个铁芯线圈的电流值为磁场生成过程的状态量 $x(t)$,各个铁芯线圈驱动电压的占空比为输入量 $u(t)$,磁性操作杆所在位置的磁感应强度三维值为输出量 $y(t)$;结合驱动电压占空比、线圈电流和空间磁场之间的线性和叠加关系,搭建线圈阵列磁场生成模型:

$$\begin{cases} \Delta x(t+1) = A \cdot \Delta x(t) + B \cdot \Delta u(t) \\ \Delta y(t) = C \cdot \Delta x(t) \end{cases}$$

其中,A、B、C分别表示线圈阵列磁场生成模型的状态矩阵、输入矩阵和输出矩阵, $\Delta x(t)$ 、 $\Delta u(t)$ 、 $\Delta y(t)$ 分别表示状态量 $x(t)$ 、输入量 $u(t)$ 和输出量 $y(t)$ 的增量;

步骤2:测量铁芯线圈阵列中每个铁芯线圈的电路常数,包括阻抗 R_i 和感抗 L_i , $i=1,2,3$;并据此计算线圈阵列磁场生成模型的状态矩阵A和输入矩阵B;记 $\tau_i=R_i/L_i$,驱动电压峰值为 U_s ;由于在限制电路范围内电路的阻抗和感抗可视为常数,因此计算出的A和B具有固定值:

$$A = \begin{bmatrix} -\tau_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\tau_2 & 0 \\ 0 & 0 & -\tau_3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \tau_1 U_s / R_1 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_2 U_s / R_2 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_3 U_s / R_3 \end{bmatrix};$$

步骤3:使用定位设备捕捉磁性操作杆在当前时刻 t 的位置 Q ,以及线圈阵列中每个线圈的位置 o_i 和姿态 R_i ,并据此计算磁场生成模型中的输出矩阵C;由于操作杆的位置会随着触觉交互过程而发生变化,因此在每个预测时域内,都要重新计算矩阵C的值:

$$C = \begin{bmatrix} R_1^{-1} \cdot f(R_1 \cdot (Q - O_1)) \\ R_2^{-1} \cdot f(R_2 \cdot (Q - O_2)) \\ R_3^{-1} \cdot f(R_3 \cdot (Q - O_3)) \end{bmatrix}^T;$$

其中, $f(R_i \cdot (Q - O_i))$ 表示单个线圈 i 在点 Q 处激发的磁场激发系数;

步骤4:在铁芯线圈阵列的磁场控制环节,接收磁感应强度设定值 B_{ref} 和采样值 B_{s}

samp;记预测控制的预测时域和控制时域分别为 N_p 和 N_c ,根据最新的磁场生成模型计算最优的控制增量序列 $(\Delta u(t+1), \Delta u(t+2), \dots, \Delta u(t+N_p))$;记磁场生成模型的输入矩阵、控制矩阵和输出矩阵分别为A、B和C,最优化过程的目标函数设计为:

$$J(t) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{y}(t) + \sum_{j=1}^i \mathbf{CBA}^{-1} \Delta \mathbf{u}(t+j) - \mathbf{y}_{ref}(t+i)\|^2 + \sum_{i=1}^{N_c} \|\Delta \mathbf{u}(t+i)\|^2;$$

其中, $y(t)$ 表示当前时刻 t 的实际输出量, $y_{ref}(t)$ 分别表示当前时刻 t 的参考输出量;

步骤5:选取最优控制增量序列的第一个值 $\Delta u(t+1)$,结合当前的驱动电压占空比作为下一时刻的控制量输入,并计算对应的电流控制量作为线圈电流控制的参考值 I_{ref} ;

步骤6:在每个铁芯线圈的电流控制环节,接收电流的采样值 I_{samp} ;首先根据电流参考值计算出对应的电压占空比作为前馈,然后结合误差的比例和积分对前馈值进行微调,来实现无稳态误差的电流生成,进而达成精确的磁场生成。

2.根据权利要求1所述的方法,其特征在于:所述铁芯线圈为圆柱形铁芯线圈,由绕在骨架上的铜线和铁芯组成;其中铁芯由磁性材料纯铁DT4C制作而成。

3.根据权利要求1所述的方法,其特征在于:所述铁芯线圈中的驱动电路,为H桥结构的电路,通过控制四个桥臂上功率三极管的开关状态来改变铁芯线圈中励磁电流的方向,从而反转磁场来生成方向相反的引力和斥力。

4.根据权利要求3所述的方法,其特征在于:所述铁芯线圈中的驱动电路,使用四路高频互补的脉冲信号来控制H桥桥臂的开关状态。

一种电磁式触觉再现系统、方法及磁场预测控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于虚拟现实技术领域,涉及一种电磁式的触觉再现系统及方法,具体涉及一种动态精确的电磁式触觉再现系统、方法及磁场预测控制方法,来进行电磁线圈阵列的磁场跟踪,从而动态准确地模拟虚拟现实中的触觉反馈。

背景技术

[0002] 人体皮肤触觉的再现不仅能够让用户触摸和感知物体对象,还允许其操作物体来完成与虚拟对象的双向交互,在虚拟现实技术中扮演着独特的地位([文献1])。人类的皮肤触觉可以分为力觉感知和触觉感知两部分,其中力觉感知主要包括通过肌肉和关节等机械感受器感知的作用力大小、空间位置和时间变化等信息([文献2]),也是本发明中触觉再现的关注内容。现有的电磁式触觉再现设备通常采用线圈阵列激发可控磁场,对位于磁场中的磁性操作介质直接输出磁力作用([文献3])。这种方式能够无摩擦地产生斥力和吸力,理论上具有完整的力反馈六自由度,然而实施过程中却难以达到。

[0003] Holis等人([文献4])最先研制了一种基于洛伦兹力的六自由度磁悬浮触觉交互系统MLHI。该系统使用三对定子永磁铁产生磁场,通电的转子线圈在磁场中运动时受到洛伦兹力作用。该装置基于磁悬浮进行触觉反馈,其摩擦力和迟滞现象相对于机械式触觉设备显著降低,但仅有 $\pm 12.5\text{mm}$ 的平移空间和 ± 7.5 度的旋转空间。

[0004] 为了提升磁悬浮触觉交互设备的操作范围,Bekelman等人([文献5])使用电磁线圈阵列代替永磁铁来产生磁场,设计了一种平面的磁悬浮系统。该系统改用顶端包含3个永磁体的操作杆,能够在线圈阵列上方25mm处感受到几牛顿大小的全方向转矩力,且移动平面范围提高至 $100*120\text{mm}$ 。由于使用电磁线圈代替永磁铁,系统在磁场中的操作自由度有了明显提升。

[0005] Qianqian Tong等人([文献6-7])使用三个呈120度角分布、俯仰角可调的空心线圈来产生磁场,通过对线圈电流的控制来微调空间磁场的强度,借助顶端带有永磁铁的磁笔来实现软组织刚度的精确感知。该系统通过对线圈电流进行控制,提高了触觉反馈的精度,且多方面的定性实验证明了他们的电磁式触觉比起机械式触觉具有更好的沉浸感。

[0006] Zhang等人([文献8])在使用位姿相同的电磁线圈阵列进行3D表面模拟时,证明了单个线圈电流和反馈力在特定范围内的线性关系,以及多个线圈磁场的叠加方法,并使用快速收敛的RLS控制算法来自适应地进行线性系统中多个输入输出之间的转换矩阵估计,从而实现了平滑准确的力反馈生成。

[0007] Alaa Adel等人([文献9-10])设计了一种用于指尖磁力反馈的电磁触觉接口。该系统借助一种阻抗型的触觉渲染算法来对永磁体提供一个可控的电磁力,使操作者能够在空间中感知三维虚拟物体的形状。结合操作杆的位置反馈,他们系统在4种三维物体的识别上可达66.8%的准确率。

[0008] 本发明认为,电磁式触觉再现系统的设计不仅需要关注电磁式触觉系统的操作范围自由度,而且需要重点考虑触觉再现的动态性能和精确度。在本发明中,位姿可调的铁芯

线圈在空间中激发中快速变化的电磁场,配合带有永磁体的操作杆来实现完整的电磁式触觉反馈。此外,通过分析位姿可调铁芯线圈阵列的电流生成、磁场生成以及位姿不同的多个线圈的磁场叠加过程,本发明将整个线圈阵列的磁场生成过程归纳为一个耦合的多输入多输出控制系统,并设计了一种双闭环的可变模型预测控制算法,在电流和磁场两个环节进行跟踪,以保证电磁式触觉再现系统的沉浸感。

[0009] 参考文献:

[0010] [文献1]:Burdea,Grigore C.“Haptic feedback for virtual reality,” Virtual reality and prototyping workshop,Vol.2,1999.

[0011] [文献2]:H.Culbertson,S.B.Schorr,and A.M.Okamura,“Haptics:The presentand future of artificial touch sensation,”Annual Review of Control, Robotics,and Autonomous Systems,vol.1,pp.385-409,2018.

[0012] [文献3]:D.Wang,Y.Guo,S.Liu,Y.Zhang,W.Xu and J.Xiao,“Haptic display for virtual reality:progress and challenges,”Virtual Reality&Intelligent Hardware,vol.1,no 2,pp.136-162,2019.

[0013] [文献4]:P.Berkelman and R.L.Hollis,“Lorentz magnetic levitation for hapticinteraction:Device design,performance,and integration with physicalsimulations,”The International Journal of Robotics Research,vol.19, no.7,pp.644-667,2000.

[0014] [文献5]:P.Berkelman,M.Miyasaka,and J.Anderson,“Co-located 3d graphic and haptic display using electromagnetic levitation,”in Haptics Symposium (HAPTICS) ,2012IEEE.IEEE,2012,pp.77-81.

[0015] [文献6]:Q.Tong,Z.Yuan,M.Zheng,W.Zhu,G.Zhang,and X.Liao,“A novel magnetic levitation haptic device for augmentation of tissue stiffness perception,”in Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology.ACM,2016,pp.143-152.

[0016] [文献7]:Q.Tong,Z.Yuan,X.Liao,M.Zheng,T.Yuan,and J.Zhao,“Magnetic levitation haptic augmentation for virtual tissue stiffness perception,”IEEE transactions on visualization and computer graphics,vol.24,no.12,pp.3123-3136,2017.

[0017] [文献8]:Q.Zhang,H.Dong,and A.El-Saddik,“Magnetic field control for hapticdisplay:System design and simulation,”IEEE Access,vol.4,pp.299-311, 2016.

[0018] [文献9]:A.Adel,M.A.Seif,G.Holz1,M.Kranz,S.Abdennadher,and I.S.M.Khalil,“Rendering 3d virtual objects in mid-air using controlled magnetic fields,”in 2017IEEE/RSJ International Conference on IntelligentRobots and Systems (IROS) .IEEE,2017,pp.349-356.

[0019] [文献10]:A.Adel,M.M.Micheal,M.A.Self,S.Abdennadher,and I.S.Khalil,“Rendering of virtual volumetric shapes using an electromagneticbased haptic interface,”in 2018IEEE/RSJ International Conference onIntelligent Robots and

Systems (IROS) . IEEE, 2018, pp.1-9.

发明内容

[0020] 针对现有电磁式触觉装置无法产生用于双向实时交互的触觉反馈的问题,本发明展示了一种动态精确的电磁式触觉再现系统。三个位姿可调的电磁线圈被用于磁场的生成,结合磁性操作杆来产生六自由度的触觉反馈。在电流生成阶段,本发明使用高频脉冲来配合桥式电路来驱动线圈,并论证了装置的刷新频率能够模拟人体皮肤挤压、拉扯等动态触觉感知。在线圈阵列的磁场生成过程中,本发明分析了电流环节和磁场环节的生成模型,并提出了一种包括两个闭环的可变模型预测控制算法。该算法通过检测线圈阵列的位姿和操作杆的位置来实时调整预测模型,实现了平滑稳定的磁场跟踪。动态的电磁式触觉装置结合精确的磁场生成控制算法,从而实现高沉浸感的逼真触觉交互。

[0021] 本发明首先提供一种电磁式触觉再现系统,其特征在于:包括虚拟物理模型、磁性操作杆、电磁线圈阵列、电流驱动电路、磁场控制器、定位设备:

[0022] 所述虚拟物理模型,是根据操作对象的形变特性建立的虚拟物理模型;

[0023] 所述磁性操作杆,用于向使用者提供单点的力反馈;其杆顶部固定设置有永磁体、杆中部设置有磁力计和视觉标记点;

[0024] 所述铁芯线圈阵列,由三个位姿可调的铁芯线圈组成;每个线圈的规格相同,用于在空间中激发具有分布可控的磁场;

[0025] 所述线圈驱动电路,通过控制铁芯线圈两端电压的方向和持续时间,使铁芯线圈中产生特定电流,并通过检测电流大小进行反馈调节;每个铁芯线圈具有独立的驱动电路;

[0026] 所述磁场控制器,检测铁芯线圈阵列生成的磁感应强度,根据生成误差结合控制算法重新计算应向每个线圈施加的电流,并传递给线圈驱动电路;

[0027] 所述定位设备,用于捕捉磁性操作杆和铁芯线圈的运动状态,用于计算虚拟物理模型的理论反馈力和搭建磁场控制的预测模型。

[0028] 本发明还提供了一种电磁式触觉再现方法,其特征在于:磁性操作杆触击操作对象的虚拟物理模型,通过定位设备采集磁性操作杆的当前位置,并根据虚拟物理模型来计算理论反馈力;然后使用线圈驱动电路来控制铁芯线圈中的电流,从而使铁芯线圈阵列激发出具有特定分布的动态磁场;磁场控制器通过检测生成磁场的强度,结合磁场预测控制方法来提高磁场生成的精度;磁性操作杆在磁场中特定位置受到磁力作用,从而带给使用者逼真的触觉反馈。

[0029] 本发明还提供了一种磁场预测控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0030] 步骤1:选定三个铁芯线圈的电流值为磁场生成过程的状态量 $x(t)$,各个铁芯线圈驱动电压的占空比(即磁场生成的控制量)为输入量 $u(t)$,磁性操作杆所在位置的磁感应强度三维值为输出量 $y(t)$;结合驱动电压占空比、线圈电流和空间磁场之间的线性和叠加关系,搭建线圈阵列磁场生成模型:

$$[0031] \quad \begin{cases} \Delta x(t+1) = A \cdot \Delta x(t) + B \cdot \Delta u(t) \\ \Delta y(t) = C \cdot \Delta x(t) \end{cases}$$

[0032] 其中,A、B、C分别表示线圈阵列磁场生成模型的状态矩阵、输入矩阵和输出矩阵, $\Delta x(t)$ 、 $\Delta u(t)$ 、 $\Delta y(t)$ 分别表示状态量 $x(t)$ 、输入量 $u(t)$ 和输出量 $y(t)$ 的增量。

[0033] 步骤2:测量铁芯线圈阵列中每个铁芯线圈的电路常数,包括阻抗 R_i 和感抗 L_i , $i=1,2,3$;并据此计算线圈阵列磁场生成模型的状态矩阵 A 和输入矩阵 B ;记 $\tau_i=R_i/L_i$,驱动电压峰值为 U_s ;由于在限制电路范围内电路的阻抗和感抗可视为常数,因此计算出的 A 和 B 具有固定值:

$$[0034] \quad A = \begin{bmatrix} -\tau_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\tau_2 & 0 \\ 0 & 0 & -\tau_3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \tau_1 U_s / R_1 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_2 U_s / R_2 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_3 U_s / R_3 \end{bmatrix};$$

[0035] 步骤3:使用定位设备捕捉磁性操作杆在当前时刻 t 的位置 Q ,以及线圈阵列中每个线圈的位置 O_i 和姿态 R_i ,并据此计算磁场生成模型中的输出矩阵 C ;由于操作杆的位置会随着触觉交互过程而发生变化,因此在每个预测时域内,都要重新计算矩阵 C 的值:

$$[0036] \quad C = \begin{bmatrix} R_1^{-1} \cdot f(R_1 \cdot (Q - O_1)) \\ R_2^{-1} \cdot f(R_2 \cdot (Q - O_2)) \\ R_3^{-1} \cdot f(R_3 \cdot (Q - O_3)) \end{bmatrix}^T;$$

[0037] 其中, $f(R_i \cdot (Q - O_i))$ 表示单个线圈 i 在点 Q 处激发的磁场激发系数;

[0038] 步骤4:在铁芯线圈阵列的磁场控制环节,接收磁感应强度的设定值 B_{ref} 和采样值 B_{samp} ;记预测控制的预测时域和控制时域分别为 N_p 和 N_c ,根据最新的磁场生成模型计算最优的控制增量序列 $(\Delta u(t+1), \Delta u(t+2), \dots, \Delta u(t+N_p))$;记磁场生成模型的输入矩阵、控制矩阵和输出矩阵分别为 A 、 B 和 C ,最优化过程的目标函数设计为:

$$[0039] \quad J(t) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{y}(t) + \sum_{j=1}^i \mathbf{CBA}^{-1} \Delta \mathbf{u}(t+j) - \mathbf{y}_{ref}(t+i)\|^2 + \sum_{i=1}^{N_c} \|\Delta \mathbf{u}(t+i)\|^2;$$

[0040] 其中, $y(t)$ 表示当前时刻 t 的实际输出量, $y_{ref}(t)$ 分别表示当前时刻 t 的参考输出量;

[0041] 步骤5:选取最优控制增量序列的第一个值 $\Delta u(t+1)$,结合当前的驱动电压占空比作为下一时刻的控制量输入,并计算对应的电流控制量作为线圈电流控制的参考值 I_{ref} ;

[0042] 步骤6:在每个铁芯线圈的电流控制环节,接收电流的采样值 I_{samp} ;首先根据电流参考值计算出对应的电压占空比作为前馈,然后结合误差的比例和积分对前馈值进行微调,来实现无稳态误差的电流生成,进而达成精确的磁场生成。

[0043] 与现有技术相比,本发明具有如下的创新和优势:

[0044] 1.电磁式触觉再现系统的完整框架,包括虚拟物理模型、磁性操作杆、电磁线圈阵列、电流驱动电路、磁场控制器、定位设备等六个模块,能够无接触地产生完整六自由度的单点力反馈。

[0045] 2.动态电磁式触觉装置(电磁式触觉再现系统中,磁性操作杆、线圈阵列和线圈驱动电路直接关系着电流、磁场和反馈力的生成,因此被合称为电磁式触觉装置)的设计方式,利用H桥电路配合高频脉冲驱动铁芯线圈阵列产生电磁场,并论证了装置的动态性能能够满足推拉、挤压、低频振动等触觉的模拟。

[0046] 3.双闭环的可变模型预测控制算法,根据线圈阵列的电流和磁场生成过程来建立磁场预测模型,并利用结合磁场生成误差和电流控制增量的目标函数来计算当前每个线圈的最优电流控制量,能够快速准确地生成所需磁场。

附图说明

- [0047] 图1为本发明实施例的电磁式触觉再现的概念示意图；
- [0048] 图2为本发明实施例的电磁式触觉再现系统的框架结构图；
- [0049] 图3为本发明实施例的铁芯线圈的结构和设计参数示意图；
- [0050] 图4为本发明实施例的铁芯线圈电流和电感的电磁关系图；
- [0051] 图5为本发明实施例的双闭环的可变模型预测控制算法结构原理图；
- [0052] 图6为本发明实施例的电磁式触觉装置的磁场预测控制流程图。

具体实施方式

[0053] 为了便于本领域普通技术人员理解和实施本发明，下面结合附图及实施例对本发明作进一步的详细描述，应当理解，此处所描述的实施例仅用于说明和解释本发明，并不用于限定本发明。

[0054] 在虚拟现实技术中，电磁式触觉再现通过提供触觉感官的模拟，不仅能够让使用者触摸和感知物体对象，还允许操作物体来完成与虚拟对象的双向交互过程。作为一种综合运动、电流、磁场等多种信息的实时信息物理系统，电磁式触觉再现系统将捕捉操作杆的运动信息，根据交互对象的虚拟物理模型来计算理论反馈力的大小和方向，并利用电磁线圈阵列对操作杆产生磁力作为触觉反馈。其概念如图1所示。

[0055] 本发明展示了一种动态精确的电磁式触觉再现系统。本发明使用三个位姿可调的铁芯线圈来激发空间磁场，配合磁性操作杆来产生手持式的单点触觉再现。在电流生成阶段，本发明使用PWM驱动H桥电路，分别控制单个线圈生成高频的双向电流，并分析了该驱动方式下的电流阶跃过程，从而总结出了电磁式触觉装置满足人体触觉感知频率的条件，并证明了本发明所设计的触觉装置的动态性能能够满足对推拉和挤压等触觉进行模拟的需求。

[0056] 在磁场生成阶段，本发明将整个线圈阵列的磁场生成过程归纳为一个具有耦合多输入多输出的时变系统，并分析了电流闭环和磁场闭环中的线性和叠加关系。在磁场生成控制过程中，借助线圈阵列的位姿和操作杆的位置来实时调整电磁式触觉再现系统的磁场预测模型，并结合综合考虑了生成误差和平滑度的目标函数，来计算电流限制范围下最优控制增量，并根据此增量对每个线圈的电流进行前馈PID控制，并从而形成了一种用于包括两个闭环的可变模型预测控制算法。动态的电流驱动方式结合精确的磁场生成控制算法，保证了电磁式触觉再现的沉浸感。

[0057] 作为虚拟现实技术中的触觉模拟部分，本发明所展示的电磁式触觉再现系统是一种面向人机自然交互的非接触式单点磁力生成系统，其框架如图2所示。该系统通过定位设备采集操作杆的当前位置，并根据操作对象的虚拟物理模型来计算理论反馈力。然后使用线圈驱动电路来控制铁芯线圈中的电流，从而使线圈阵列激发出具有特定分布的动态磁场。磁场控制模块通过检测生成磁场的强度，结合预测控制算法来提高磁场生成的精度。磁性操作杆在磁场中特定位置受到磁力作用，从而带给使用者逼真的触觉反馈。根据上述工作流程，系统主要包括虚拟物理模型、磁性操作杆、电磁线圈阵列、电流驱动电路、磁场控制器、定位设备：

[0058] 虚拟物理模型，是根据操作对象的形变特性建立的虚拟物理模型；能够根据操作

位置返回相应的触觉反馈力大小,作为触觉装置的参考值;

[0059] 磁性操作杆,用于向使用者提供单点的力反馈;其杆顶部固定设置有永磁体、杆中部设置有磁力计和视觉标记点;

[0060] 铁芯线圈阵列,由三个位姿可调的铁芯线圈组成;每个线圈的规格相同,用于在空间中激发具有分布可控的磁场;

[0061] 线圈驱动电路,通过控制铁芯线圈两端电压的方向和持续时间,使铁芯线圈中产生特定电流,并通过检测电流大小进行反馈调节;每个铁芯线圈具有独立的驱动电路;

[0062] 磁场控制器,检测铁芯线圈阵列生成的磁感应强度,根据生成误差结合控制算法重新计算应向每个线圈施加的电流,并传递给线圈驱动电路;

[0063] 定位设备,用于捕捉磁性操作杆和铁芯线圈的运动状态,用于计算虚拟物理模型的理论反馈力和搭建磁场控制的预测模型。

[0064] 在本发明所提出的电磁式触觉再现系统中,磁性操作杆、线圈阵列和线圈驱动电路直接关系着电流、磁场和反馈力的生成,因此被合称为电磁式触觉装置。本发明通过对电磁式触觉装置的选材、结构和驱动进行设计,来确保触觉再现的动态性能。该动态电磁式触觉装置的设计要点主要包括:

[0065] 设计要点1:使用圆柱形铁芯线圈进行空间电磁场的生成。铁芯线圈主要由绕在骨架上的铜线和铁芯组成,其中作为磁性材料的纯铁DT4C铁芯的磁导率很高,具有被强烈磁化的特性。磁化铁芯的磁场与通电导线的磁场相互叠加,能够有效增大空气中的磁通势。比起空心线圈,相同大小电流驱动的铁芯线圈在空间中生成磁场的磁感应强度能够明显提高,这在增大力反馈强度、提高操作空间、减小功耗等方面都具有重要的意义。此外,纯铁铁芯的矫顽磁力较小,受磁滞现象影响较小,适合进行动态的磁场生成。本发明所使用的铁芯线圈的结构和参数如图3所示;

[0066] 设计要点2:使用H桥结构的电路进行线圈的电流驱动。H桥电路通过控制4个桥臂上功率三极管的开关情况来改变线圈中励磁电流的方向,从而反转磁场方向来生成引力和斥力。同时,使用周期固定的高频互补PWM信号进行来H桥桥臂的开关控制。在保持H桥的驱动电压 U_s 大小不变的情况下,通过H桥桥臂的开关情况来设置线圈两端电压的极性,通过占空比 d 来调整电压极性的持续时间,从而控制线圈电流的大小和方向;

[0067] 设计要点3:使用三个位姿可调的线圈构成线圈阵列,进行空间电磁场的生成。每个线圈激发的磁场会进行叠加,从而使空间磁场的强度、方向、范围等都发生变化,以满足各种触觉交互场景的需要。在此过程中,单个线圈的磁场强度,以及线圈阵列中每个线圈的位置和姿态,都会对最终的磁场分布产生影响。由于本发明使用铁芯线圈代替空心线圈,单个线圈生成的磁场强度有了较大提升,所需的线圈数目有所减少。三个不共面的磁场向量通过调整大小,可以合成空间中一个任意大小和方向的磁场向量,从而对位于其中的磁性操作杆产生完整的六自由度单点磁力反馈;

[0068] 在上述设计要点中,由于使用高频的双极性方波来进行线圈的电流驱动,能够快速而准确地在线圈中生成设定强度的电流。此外,较少的电磁线圈数目使得整个线圈阵列的电流驱动更加简单,也降低了磁场生成时求解电流的复杂性。由于每个线圈的位姿在一定范围内可自由调整,线圈阵列生成磁场的多样性大大提高,可以根据交互场景需求来调整线圈阵列的拓扑结构。合理的拓扑不仅能消除单个线圈磁场强度有限的局限,也能够有

效降低整个线圈阵列的功耗。

[0069] 在进行铁芯线圈的电流驱动时,通电导线所产生的少量磁通经过空气隙和线圈骨架等非导磁介质而闭合,这部分漏磁通的大小与励磁电流成线性关系,因此铁芯线圈的漏磁电感 L_0 为常数。其余的大部分磁通经过铁芯而闭合,这部分磁通称为主磁通。由于铁芯的磁导率会随磁场强度的变化而变化,因此由主磁通变化而产生的主磁电感 L 不是一个常数。考虑到参数确定的线圈的磁场强度和电流成正比,则主磁电感随励磁电流而变化的关系与铁芯磁化强度随磁场强度变化的变化率相似。根据图4中的铁芯磁化曲线和对应的线圈电感变化可知,在线圈的励磁电流处在一定范围内时,通电导线产生的磁场强度较小,铁芯的磁化程度与电流近似为线性关系,此时铁芯线圈的总电感基本保持不变。本发明将线圈的励磁电流限定在该范围内,以确保电流生成和磁场生成的可控性。

[0070] 当对铁芯线圈电路的电流变化情况进行分析时,可将其等效为由电阻和电感组成的电路。忽略涡流损耗,电路可等效为由线圈电阻 R 、主磁电感 L 和漏磁电感 L_0 组成的串联电路。假设电路中当前的电流值为 I_0 ,以控制线圈电流从 I_0 进行正向阶跃变化为例,此时对电路施加持续的正向电压。线圈中的瞬时电流 i 随时间 t 的响应为:

$$[0071] \quad i(t) = I_0 e^{-\frac{tR}{L+L_0}} + \frac{U_s}{R} \left(1 - e^{-\frac{tR}{L+L_0}} \right)$$

[0072] 在上式中,当 $t \geq t_d = \frac{5(L+L_0)}{R}$, $e^{-\frac{tR}{L+L_0}}$ 的值趋近于0,此时电流的阶跃过程基本完成。本发明根据此动态响应时间常数对由铁芯线圈构成的电磁触觉装置的动态性能进行评估。具体为:

[0073] 评估标准1:若 $t_d < 0.001s$,表明该线圈中电流从任何值向峰值阶跃所需的时间小于1ms,响应频率高于1kHz。该频率高于人体皮肤任意触觉感受器的感知频率,即可认为由该线圈生成的磁场能够完全满足包括高频振动在内的人类力觉感知的动态性要求;

[0074] 评估标准2:若 $t_d < 0.0167s$,表明线圈的动态响应频率高于60Hz。该频率高于用于感知皮肤垂直和水平拉扯的Ruffini末梢和Meissner小体的频率上限,则认为该装置可用于进行挤压拉扯等操作的触觉再现;

[0075] 本发明所设计的电磁式触觉装置的动态响应时间常数为0.014s,可以用于模拟推拉、挤压、低频振动等在内的触觉反馈,适用于游戏、远程机械操控、虚拟手术培训等应用场景。

[0076] 本发明提供了一种电磁式触觉再现方法,虚拟物理模型的构建,是事先在线下完成的,建立好的虚拟模型被保存在计算机内,结合定位设备的操作杆位置信息,来直接输出理论的触觉反馈力大小。磁性操作杆触击操作对象的虚拟物理模型,通过定位设备采集磁性操作杆的当前位置,并根据虚拟物理模型来计算理论反馈力;然后使用线圈驱动电路来控制铁芯线圈中的电流,从而使铁芯线圈阵列激发出具有特定分布的动态磁场;磁场控制器通过检测生成磁场的强度,结合磁场预测控制方法来提高磁场生成的精度;磁性操作杆在磁场中特定位置受到磁力作用,从而带给使用者逼真的触觉反馈。

[0077] 本发明根据电磁式触觉装置的物理信息流向,触觉反馈的生成主要包括电流生成、磁场生成和力生成三个阶段。其中,电流生成是指准确控制单个线圈的电流大小和方向,用来在线圈周围激发出强度可控的磁场。磁场生成是指通过调整线圈阵列中各个线圈

的位置和姿态,配合电流生成对磁场强度的控制,使多个线圈的磁场在空间中叠加为具有特定分布的磁场。然后,磁场对位于其中的磁性操作杆产生磁力,作为力生成阶段。考虑到磁性操作杆的轻便性,本发明通过在操作杆上固定小型永磁体来进行磁力感知。永磁体在恒定磁场中的受力情况是一个确定的过程,因此本发明的后续研究主要聚焦于磁场生成的控制,从而确保触觉再现的精确性。

[0078] 在本发明的电磁式触觉装置中,线圈阵列的磁场生成过程被归纳为一个具有耦合的多个输入和输出的时变系统。在该系统中,三个线圈的电流被选为状态向量 $x(t)$,控制量 $u(t)$ 是各个线圈驱动电压的占空比,输出量 $y(t)$ 为操作杆所在位置的磁感应强度。该磁场控制系统具有如下特点:(1)在电流生成环节,各个线圈的电流生成是彼此相互独立地,且作为状态量的电流值可以检测;(2)在磁场生成环节,由于交互过程中操作杆位置的改变,系统的磁场生成模型是不断变化的。

[0079] 为了快速准确的控制线圈阵列的电流和磁场生成,本发明提出了一种包括两个闭环的可变模型预测控制方法,其框架如图5所示。其中,电流生成环节将接收线圈电流的设定值,并利用前馈PID计算和输出驱动电压占空比的控制量。而磁场生成环节将接收磁场生成点的位置和强度,并通过可变模型预测控制输出线圈阵列中的驱动电路控制量,作为各个电流环的输入参考值。整个双闭环可变模型预测控制方法的步骤如图6所示,具体为:

[0080] 步骤1:选定三个铁芯线圈的电流值为磁场生成过程的状态量 $x(t)$,各个铁芯线圈驱动电压的占空比(即磁场生成的控制量)为输入量 $u(t)$,磁性操作杆所在位置的磁感应强度三维值为输出量 $y(t)$;结合驱动电压占空比、线圈电流和空间磁场之间的线性和叠加关系,搭建线圈阵列磁场生成模型:

$$[0081] \quad \begin{cases} \Delta x(t+1) = A \cdot \Delta x(t) + B \cdot \Delta u(t) \\ \Delta y(t) = C \cdot \Delta x(t) \end{cases}$$

[0082] 其中,A、B、C分别表示线圈阵列磁场生成模型的状态矩阵、输入矩阵和输出矩阵, $\Delta x(t)$ 、 $\Delta u(t)$ 、 $\Delta y(t)$ 分别表示状态量 $x(t)$ 、输入量 $u(t)$ 和输出量 $y(t)$ 的增量。

[0083] 步骤2:测量铁芯线圈阵列中每个铁芯线圈的电路常数,包括阻抗 R_i 和感抗 L_i , $i=1,2,3$;并据此计算线圈阵列磁场生成模型的状态矩阵A和输入矩阵B;记 $\tau_i=R_i/L_i$,驱动电压峰值为 U_s ;由于在限制电路范围内电路的阻抗和感抗可视为常数,因此计算出的A和B具有固定值:

$$[0084] \quad A = \begin{bmatrix} -\tau_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\tau_2 & 0 \\ 0 & 0 & -\tau_3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \tau_1 U_s / R_1 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_2 U_s / R_2 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_3 U_s / R_3 \end{bmatrix};$$

[0085] 步骤3:使用定位设备捕捉磁性操作杆在当前时刻 t 的位置 Q ,以及线圈阵列中每个线圈的位置 O_i 和姿态 R_i ,并据此计算磁场生成模型中的输出矩阵C;由于操作杆的位置会随着触觉交互过程而发生变化,因此在每个预测时域内,都要重新计算矩阵C的值:

$$[0086] \quad C = \begin{bmatrix} R_1^{-1} \cdot f(R_1 \cdot (Q - O_1)) \\ R_2^{-1} \cdot f(R_2 \cdot (Q - O_2)) \\ R_3^{-1} \cdot f(R_3 \cdot (Q - O_3)) \end{bmatrix}^T;$$

[0087] 其中, $f(R_i \cdot (Q - O_i))$ 表示单个线圈 i 在点 Q 处激发的磁场激发系数(在线圈自身坐标系中), Q 表示实时捕捉磁性操作杆在当前时刻 t 的位置;

[0088] 步骤4:在铁芯线圈阵列的磁场控制环节,接收磁感应强度的设定值 B_{ref} 和采样值 B_{samp} ;记预测控制的预测时域和控制时域分别为 N_p 和 N_c ,根据最新的磁场生成模型计算最优的控制增量序列 $(\Delta u(t+1), \Delta u(t+2), \dots, \Delta u(t+N_p))$;记磁场生成模型的输入矩阵、控制矩阵和输出矩阵分别为A、B和C,最优化过程的目标函数设计为:

$$[0089] \quad J(t) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{y}(t) + \sum_{j=1}^i \mathbf{CBA}^{-1} \Delta \mathbf{u}(t+j) - \mathbf{y}_{ref}(t+i)\|^2 + \sum_{i=1}^{N_c} \|\Delta \mathbf{u}(t+i)\|^2;$$

[0090] 其中, $y(t)$ 表示当前时刻 t 的实际输出量, $y_{ref}(t)$ 分别表示当前时刻 t 的参考输出量; i 和 j 是累加公式里的索引, i 的取值范围是 $1 \sim N_p$, j 的取值范围是 $1 \sim i$ 。

[0091] 步骤5:选取最优控制增量序列的第一个值 $\Delta u(t+1)$,结合当前的驱动电压占空比作为下一时刻的控制量输入,并计算对应的电流控制量作为线圈电流控制的参考值 I_{ref} ;

[0092] 步骤6:在每个铁芯线圈的电流控制环节,接收电流的采样值 I_{samp} ;首先根据电流参考值计算出对应的电压占空比作为前馈,然后结合误差的比例和积分对前馈值进行微调,来实现无稳态误差的电流生成,进而达成精确的磁场生成。

[0093] 本发明中的双闭环可变模型预测控制算法设计充分考虑了电磁式触觉装置中线圈阵列的电流生成和磁场生成过程,并利用了多种电流、磁场、运动等多种信息间的关系。磁场环利用装置中线圈和操作杆的运动信息来更新磁场生成模型,并使用模型预测控制算法来计算每个线圈的最优电流控制序列,保证对磁场设定值的平滑跟踪。电流环对每个线圈的电流进行检测,以消除线圈发热等物理因素带来的误差。磁场环消除了系统的时变特性和输入输出间的耦合关系,和电流环彼此独立又相互配合,来实现稳定准确的电磁式触觉生成。

[0094] 应当理解的是,本说明书未详细阐述的部分均属于现有技术;上述针对较佳实施例的描述较为详细,并不能因此而认为是对本发明专利保护范围的限制,本领域的普通技术人员在本发明的启示下,在不脱离本发明权利要求所保护的范围情况下,还可以做出替换或变形,均落入本发明的保护范围之内,本发明的请求保护范围应以所附权利要求为准。

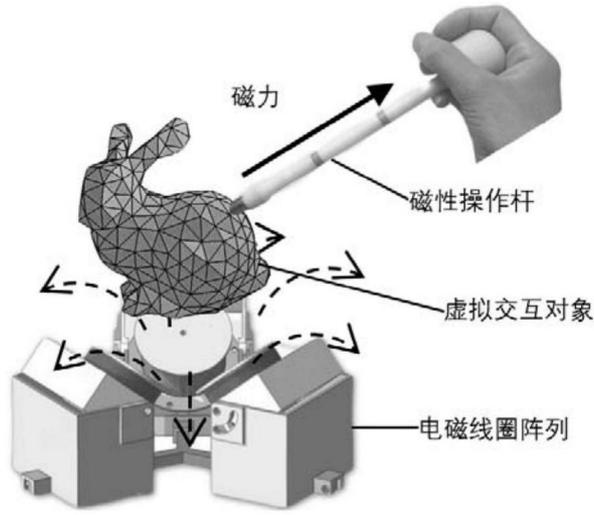


图1

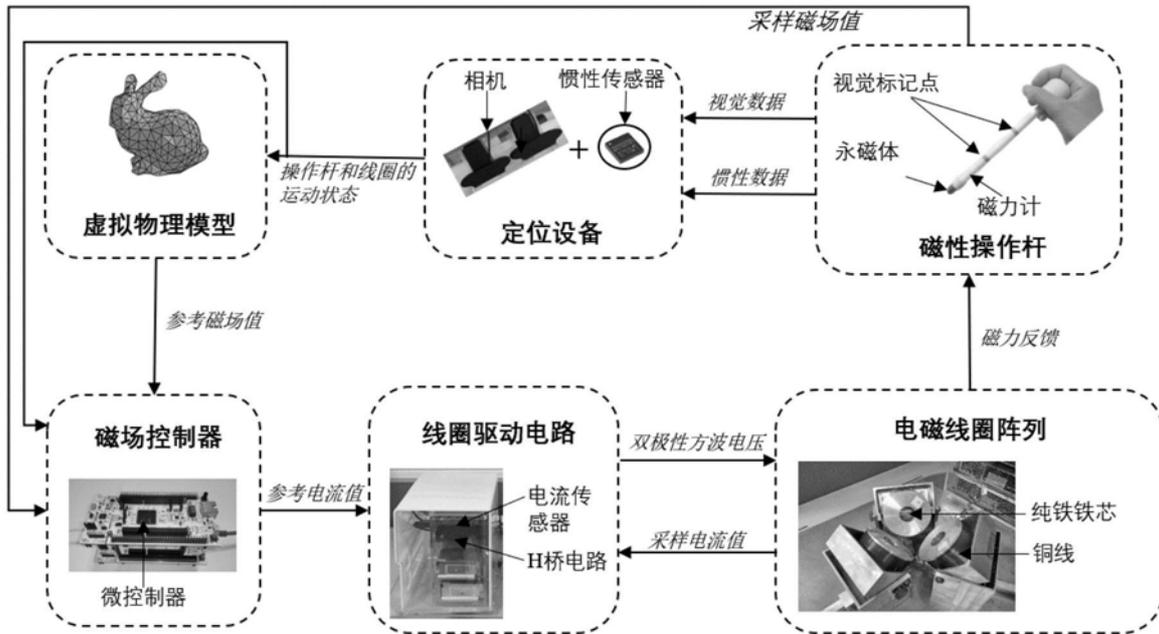


图2

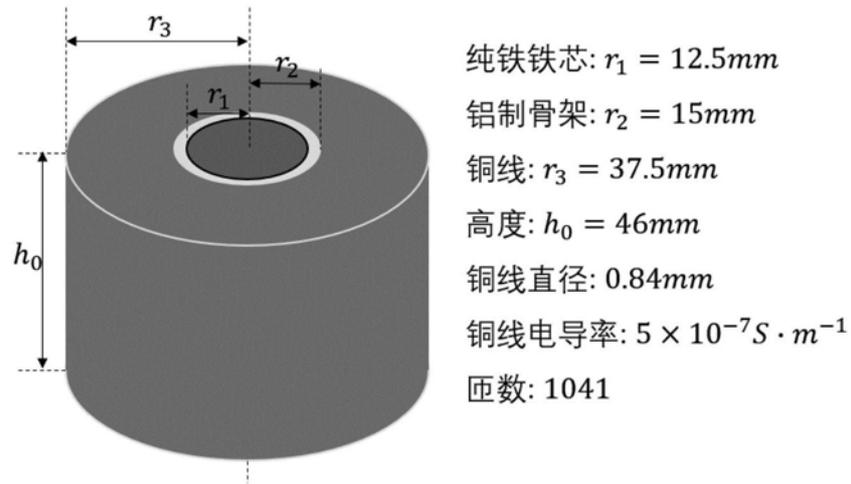


图3

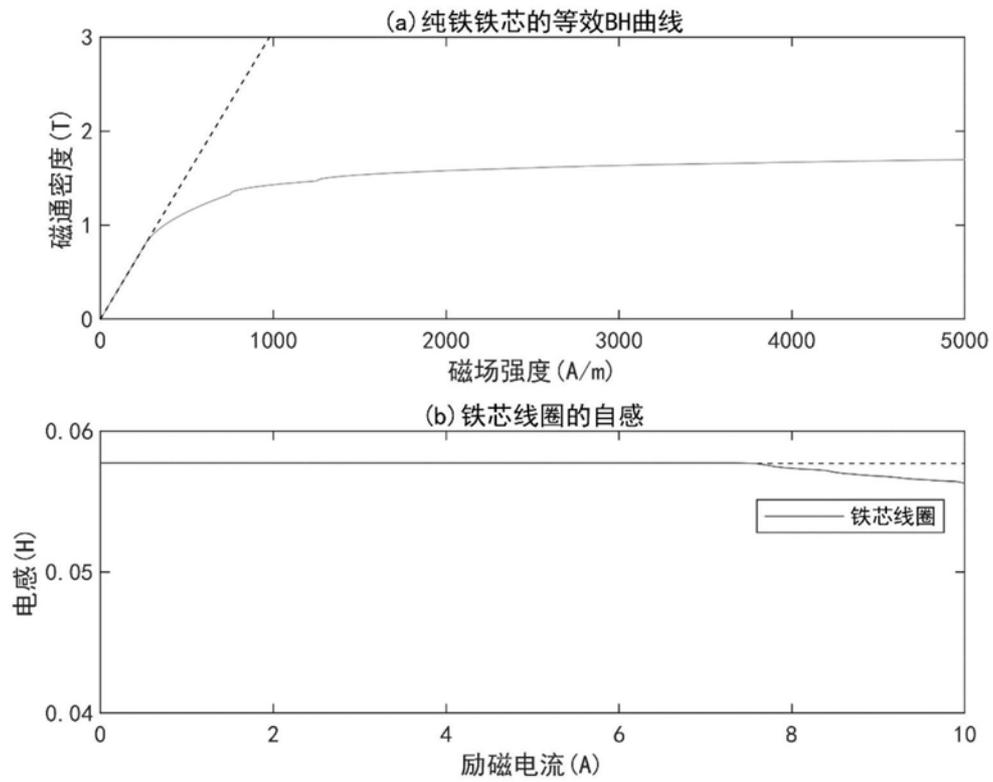


图4

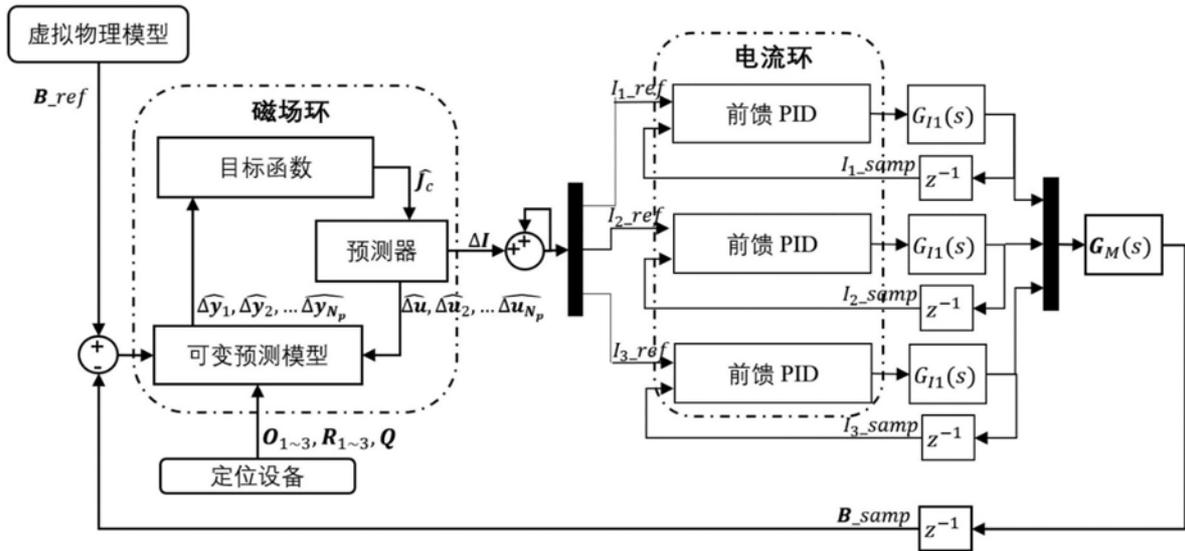


图5

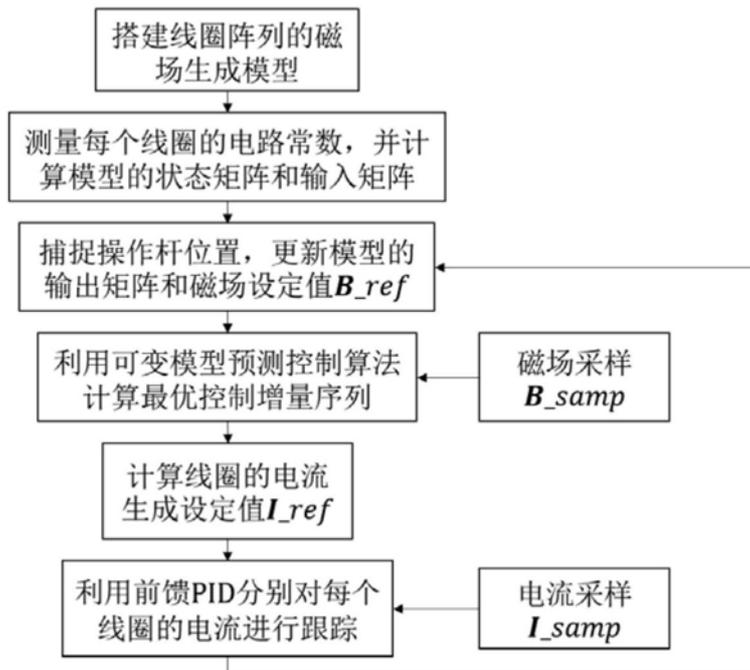


图6