



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103273502 B

(45) 授权公告日 2015. 05. 20

(21) 申请号 201310244097. 6

(22) 申请日 2013. 06. 19

(73) 专利权人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路 37 号

(72) 发明人 高志慧 邓玉春 边宇枢

(51) Int. Cl.
B25J 19/00(2006. 01)
B25J 13/08(2006. 01)
B25J 18/06(2006. 01)
F16F 9/53(2006. 01)

审查员 薛超志

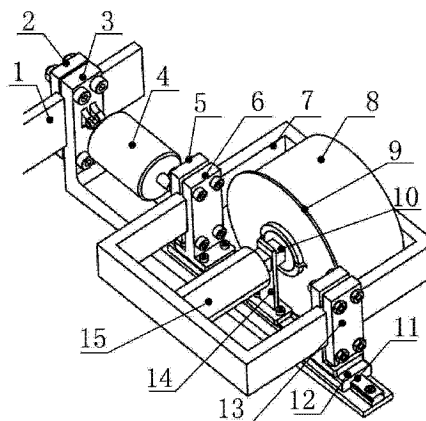
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置与方法

(57) 摘要

本发明涉及基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置与方法,属于柔性机械臂的振动控制技术领域。减振装置包括柔性机械臂、磁流变减振装置以及起连接作用的直线导轨组件,其中柔性机械臂为振动控制对象,磁流变减振装置由磁路铁芯、励磁线圈、线圈挡板、磁流变弹性体和磁流变液阻尼器组成,直线导轨组件由柔性机械臂夹板、导轨安装梁、直线导轨、滑块、磁流变减振装置夹板和弹性体安装板组成。磁流变减振装置中弹性体刚度和阻尼器阻尼均可通过改变励磁电流来控制,从而满足系统中机械臂与磁流变减振装置之间的内共振要求,并通过阻尼器消耗振动能量。本发明具有减振频带宽、效果好,适合大振幅减振的特点。



1. 基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于它包括柔性机械臂(1)、安装在柔性机械臂(1)上的磁流变减振装置(20)以及起连接作用的直线导轨组件,其中:

柔性机械臂(1)为振动控制对象,磁流变减振装置(20)由磁路铁芯(7)、励磁线圈(8)、线圈挡板(9)、磁流变弹性体(10)和磁流变液阻尼器(4)组成,直线导轨组件由柔性机械臂夹板(2)、导轨安装梁(3)、直线导轨(11)、滑块(12)、磁流变减振装置夹板A(5)、磁流变减振装置夹板B(6)、磁流变减振装置夹板C(13)和弹性体安装板(14)组成;直线导轨组件通过柔性机械臂夹板(2)与导轨安装梁(3)相互配合定位于柔性机械臂(1)上,并通过四套螺栓、螺母夹紧,导轨安装梁(3)上加工有若干螺纹孔,用于安装直线导轨(11);磁流变液阻尼器(4)通过两个阻尼器销轴(16)安装于导轨安装梁(3)和磁流变减振装置夹板A(5)之间;励磁线圈(8)缠绕于磁路铁芯(7)的线圈杆(15)上,并使用线圈挡板(9)限位;将磁路铁芯(7)与励磁线圈(8)组成的整体作为振子,通过磁流变减振装置夹板A(5)、磁流变减振装置夹板B(6)和磁流变减振装置夹板C(13)夹紧安装于滑块(12)上;弹性体安装板(14)下端安装于直线导轨上,上端通过磁流变弹性体(10)与磁路铁芯(7)连接。

2. 根据权利要求1所述的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于:柔性机械臂(1)始端可以安装在其他机械臂系统中,末端可以安装有机械手。

3. 根据权利要求1所述的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于:导轨安装梁(3)中安装直线导轨(11)处的伸出臂截面为“凹”字形,侧面为梯形,满足强度要求,且节省材料。

4. 根据权利要求1所述的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于:安装在柔性机械臂(1)上的磁流变减振装置(20)阻尼和刚度均可控,且磁流变液阻尼器(4)作为可控阻尼元件,磁流变弹性体(10)作为可控刚度元件;两种元件为独立的部件,使得减振装置中的刚度和阻尼可以分别独立控制。

5. 根据权利要求1所述的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于:磁路铁芯(7)的左右两个线圈杆(15)均绕制励磁线圈(8)并安装线圈挡板(9),且线圈挡板(9)呈环形,环形内圈开有缺口,用于过盈安装于线圈杆(15)上。

6. 基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振方法,其特征在于:减振控制方法主要通过反馈控制回路来完成,反馈控制回路由加速度传感器(21)、电荷放大器(22)、数据采集系统(23)、PC上位机(24)和程控电源(25)组成;加速度传感器(21)的反馈信号经过电荷放大器(22)放大后传入数据采集系统(23),然后PC上位机(24)对数据采集系统(23)采集的数据进行处理并向程控电源(25)发出控制信号,改变励磁线圈(8)和磁流变液阻尼器(4)两端的电压,形成不同的减振刚度和阻尼,消耗振动能量;

该方法具体步骤如下:

步骤1:将基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置中的各部件按照权利要求1所述的连接关系正确安装,并将加速度传感器(21)安装在柔性机械臂(1)的末端;

步骤2:根据柔性机械臂(1)理想位姿确定关节电机(26)的驱动参数,启动所有硬件设备并使柔性机械臂(1)运动,同时采集加速度传感器(21)信号并保存,对振动信号进行离线处理,经FFT变换得到模型的近似固有频率;

步骤3:确定减振装置的固有频率;由柔性机械臂的非线性动力学模型及实验可知,柔

性机械臂振动时会出现 $\omega_1:\omega_2 \approx 2:1$ 的内共振现象,故可以取柔性机械臂(1)的固有频率的2倍作为磁流变减振装置(20)的固有频率;

步骤4:确定程控电源(25)的输出电压;根据磁流变弹性体的剪切刚度与磁场强度、剪切刚度与固有频率以及磁场强度与电压之间的对应关系得到励磁线圈(8)两端的电压;

步骤5:确定磁流变液阻尼器的供电电压;根据磁流变阻尼器阻尼与供电电压之间的关系以及振动幅值的变化规律,得到磁流变液阻尼器两端的电压;

步骤6:重复步骤2~步骤5的过程,实现柔性机械臂振动的实时控制;通过调整励磁线圈(8)两端的电压,从而控制磁流变弹性体(10)的固有振动频率,使系统形成内共振,能够在柔性机械臂(1)的振动模态与磁流变减振装置(20)运动模态之间实现能量传递;另一方面,通过控制磁流变减振装置(20)中磁流变液阻尼器(4)阻尼,可以有效地耗散柔性机械臂(1)的振动能量,使得柔性机械臂(1)的振动得到快速控制。

7. 根据权利要求6所述的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振方法,其特征在于:在柔性机械臂(1)上可以安装两套或者两套以上的磁流变减振装置(20),并通过控制各套减振装置中励磁线圈(8)和磁流变液阻尼器(4)两端的电压来确定各自的减振频率和阻尼,增加减振带宽,提高减振效率。

基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置与方法

技术领域

[0001] 本发明涉及基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置与方法,它从非线性的角度构造基于磁流变技术的可控刚度和阻尼式减振装置,使柔性机械臂和减振装置组成的系统发生内共振现象,并形成能量交换的通道,将柔性机械臂的振动能量迁移至减振装置并由阻尼耗散,属于机械振动、柔性机械臂的运动控制等技术领域。

背景技术

[0002] 随着机器人技术的发展,应用轻质、快速、高负载自重比的柔性机械臂成为工业制造和航空航天领域的一种趋势。由于柔性机械臂阻尼很小,振动会持续很长时间,影响正常的工作,因此抑制振动、提高机械臂的操作精度成为当前研究的热点。

[0003] 针对柔性机械臂固有柔性和分布参数特征所引发的大幅非线性振动问题,人们从不同视角对柔性机械臂的振动控制开展了广泛研究。例如,在结构设计方面,通过合理选取几何尺寸或形状提高基频,降低机械臂的柔性变形和振动;在减振构型设计方面,采用滑动质量可控的杆件实现柔性机械臂的轨迹控制;在控制规律设计方面,主动控制逐步取代传统被动控制,成为振动控制的主要发展方向。其中,利用伺服电机控制刚体运动的同时,附加压电陶瓷、形状记忆合金等机敏材料作为作动器,抑制柔性机械臂的弹性动力响应的方法已经成为当前的一个研究热点。当前的振动控制方法已在柔性效应较弱、可做线性化处理的柔性机械臂的一般振动方面取得了显著进展,但是,大幅非线性振动通常蕴含了强烈的振动能量,主动控制方法将不得不消耗更多的能量转变为控制力来抑制这种大幅振动。显然,这种做法并非总是妥当的,其能耗高、易过载的不足甚至使之得不偿失。更为重要的是,一般机敏材料的输出功率往往有限,因而难以提供足够能量来克服这种强烈振动,甚至面临着过载破坏的危险。由此可见,现有的控制方法难以应对柔性机械臂的大幅振动问题。此外,在高加速度、复杂名义运动环境下,柔性机械臂非线性动力学效应显著而致使动力学行为变得十分复杂,致使以线性振动控制为核心的动态性能优化问题进展缓慢、困难重重。

[0004] 通过对现有文献检索发现,近年来,已有人利用磁流变材料来设计减振装置。例如,申请号 CN200910071707.0 的专利公开的船用磁流变弹性体智能吸振器和申请号 CN200510094882.3 的专利公开的磁流变弹性体移频式吸振器及控制方法,对于柔性结构振动控制具有比较好的效果,但对于名义运动作用下刚柔耦合的柔性机械臂的大幅振动控制将难以实施,并且吸振器的阻尼均无法做出合理地改变。应当指出,柔性机械臂是一个高度耦合的非线性动力学与非线性控制系统。当在机械臂中考虑了柔性因素的时候,柔性机械臂的运动往往呈现非线性特征,柔性机械臂运动的特点是大范围的刚体运动与弹性运动之间相互影响、高度耦合。根据非线性振动理论,该系统的高度耦合非线性、低基频大柔性导致的几何非线性、模态密集以及多种控制力的联合作用,使该动力学系统存在着发生内共振的极大可能性,因此从非线性角度来分析柔性机械臂的动力学和控制问题有利于探索更有效的减振方法。

[0005] 内共振作为非线性多自由度系统特有的性质,一直视为有害而予以避免。然而,从

积极的观点来研究内共振,有望为柔性机械臂的非线性振动控制提供新的途径。内共振是非线性多自由度系统的一种特有现象,在两自由度系统的非线性动力学方程中,如果线性部分的固有频率满足可公度或者接近可公度关系,也就是说 $m_1\omega_1 \pm m_2\omega_2 \approx 0$ (其中 m_1 、 m_2 是正整数, ω_1 、 ω_2 是线性部分固有频率),这些频率的可公度关系能够引起相应模态很强的耦合,这就称为内共振。正是这些耦合的存在,使得能量能够在模态之间不断地交换,并且由系统内的阻尼耗散。

[0006] 因此,为解决航空航天、微电子制造、精密机械等领域中具有柔性机构,特别是具有单柔性机械臂的机械系统的大幅振动控制问题,本发明从非线性振动角度出发,应用内共振原理,提出了基于磁流变技术的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置与方法。

发明内容

[0007] 本发明的目的是针对当前柔性机械臂大幅非线性振动控制方法的欠缺及不足,为解决柔性机械系统(特别是具有刚柔耦合的柔性机械臂)在工作过程中的振动控制问题,提供基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置与方法。

[0008] 为达到上述目的,本发明采用如下技术方案予以实现。

[0009] 本发明基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于它包括柔性机械臂、安装在柔性机械臂上的磁流变减振装置以及起连接作用的直线导轨组件,其中:

[0010] 柔性机械臂(1)为振动控制对象,磁流变减振装置由磁路铁芯(7)、励磁线圈(8)、线圈挡板(9)、磁流变弹性体(10)和磁流变液阻尼器(4)组成,直线导轨组件由柔性机械臂夹板(2)、导轨安装梁(3)、直线导轨(11)、滑块(12)、磁流变减振装置夹板 A(5)、磁流变减振装置夹板 B(6)、磁流变减振装置夹板 C(13)和弹性体安装板(14)组成;直线导轨组件通过柔性机械臂夹板(2)与导轨安装梁(3)相互配合定位于柔性机械臂(1)上,并通过四套螺栓、螺母夹紧,导轨安装梁(3)上加工有若干螺纹孔,用于安装直线导轨(11);磁流变液阻尼器(4)通过两个阻尼器销轴(16)安装于导轨安装梁(3)和磁流变减振装置夹板 A(5)之间;励磁线圈(8)缠绕于磁路铁芯(7)的线圈杆(15)上,并使用线圈挡板(9)限位;将磁路铁芯(7)与励磁线圈(8)组成的整体作为振子,通过磁流变减振装置夹板 A(5)、磁流变减振装置夹板 B(6)和磁流变减振装置夹板 C(13)夹紧安装于滑块(12)上;弹性体安装板(14)下端安装于直线导轨上,上端通过磁流变弹性体(10)与磁路铁芯(7)连接。

[0011] 所述的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于:柔性机械臂(1)始端可以安装在其他机械臂系统中,末端可以安装有机械手。

[0012] 所述的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于:导轨安装梁(3)中安装直线导轨(11)处的伸出臂截面为“凹”字形,侧面为梯形,满足强度要求,且节省材料。

[0013] 所述的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于:安装在柔性机械臂(1)上的磁流变减振装置阻尼和刚度均可控,且磁流变液阻尼器(4)作为可控阻尼元件,磁流变弹性体(10)作为可控刚度元件;两种元件为独立的部件,使得减振装置中的刚度和阻尼可以分别独立控制。

[0014] 所述的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于:磁路铁芯

(7)的左右两个线圈杆(15)均绕制励磁线圈(8)并安装线圈挡板(9),且线圈挡板(9)呈环形,环形内圈开有缺口,用于过盈安装于线圈杆(15)上。

[0015] 本发明基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振方法,其特征在于:减振控制方法主要通过反馈控制回路来完成,反馈控制回路由加速度传感器(21)、电荷放大器(22)、数据采集系统(23)、PC上位机(24)和程控电源(25)组成;加速度传感器(21)的反馈信号经过电荷放大器(22)放大后传入数据采集系统(23),然后PC上位机(24)对数据采集系统(23)采集的数据进行处理并向程控电源(25)发出控制信号,改变励磁线圈(8)和磁流变液阻尼器(4)两端的电压,形成不同的减振刚度和阻尼,消耗振动能量。

[0016] 该方法具体步骤如下:

[0017] 步骤1:将基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置中的各部件正确安装,确保磁流变减振装置(20)和柔性机械臂(1)的相对空间位置,务必确保加速度传感器(21)的正确安装;

[0018] 步骤2:根据柔性机械臂(1)理想位姿确定关节电机(26)的驱动参数,启动所有硬件设备并使柔性机械臂(1)运动,同时采集加速度传感器(21)信号并保存,对振动信号进行离线处理,经FFT变换得到模型的近似固有频率;

[0019] 步骤3:确定减振装置的固有频率;由柔性机械臂的非线性动力学模型及实验可知,柔性机械臂振动时会出现 $\omega_1:\omega_2 \approx 2:1$ 的内共振现象,故可以取柔性机械臂(1)的固有频率的2倍作为减振装置(20)的固有频率;

[0020] 步骤4:确定程控电源(25)的输出电压;根据磁流变弹性体的剪切刚度与磁场强度、剪切刚度与固有频率以及磁场强度与电压之间的对应关系得到电磁线圈(8)两端的电压;

[0021] 步骤5:确定磁流变液阻尼器的供电电压;根据磁流变阻尼器阻尼与供电电压之间的关系以及振动幅值的变化规律,得到磁流变液阻尼器两端的电压;

[0022] 步骤6:重复步骤2~步骤5的过程,实现柔性机械臂振动的实时控制;通过调整励磁线圈(8)两端的电压,从而控制磁流变弹性体(10)的运动频率,使系统形成内共振;能够在柔性机械臂(1)的振动模态与减振装置(20)运动模态之间实现能量传递;另一方面,通过控制减振装置(20)中磁流变液阻尼器(4)阻尼,可以有效地耗散柔性机械臂(1)的振动能量,使得柔性机械臂(1)的振动得到快速控制。

[0023] 所述的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振方法,其特征在于:在柔性机械臂(1)上可以安装两套或者两套以上的磁流变减振装置(20),并通过控制各套减振装置中电磁线圈(8)和磁流变液阻尼器(4)两端的电压来确定各自的减振频率和阻尼,增加减振带宽,提高减振效率。

[0024] 本发明与现有技术相比的优点在于:

[0025] (1)本发明突破了现有的运用线性振动理论来解决非线性振动问题的理论方法层面的束缚,充分利用了非线性振动系统发生内共振时,模态能量在不同模态之间交互的特性,提供了一种理论基础更为科学且简单可行的非线性减振方法及其实现装置。

[0026] (2)减振频带宽,效果好。本发明根据磁流变弹性体剪切刚度随外加磁场强度改变的性质实现柔性机械臂和减振装置之间的内共振,根据磁流变液流变性能随外加磁场强度改变的性质调整阻尼器阻尼值。因而针对不同的控制状态,减振装置均能满足频率和阻尼

匹配的要求 ;通过调节程控电源的输出电压改变磁流变弹性体和磁流变液阻尼器两端的磁场强度,使减振装置充分吸收柔性机械臂的振动能量,消减柔性机械臂的大幅振动。

[0027] (3) 该减振装置消耗能量少,只要提供减振装置正常工作时的基本电压,不需要额外输入能量来抵消振动能量 ;而且把磁流变减振装置设计为一个独立的整体,使得整套装置结构简单,使用方便。

附图说明

[0028] 图 1 为本发明的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置示意图 ;

[0029] 图 2 为本发明中磁流变液阻尼器安装结构示意图 ;

[0030] 图 3 为本发明中磁流变减振装置的振子结构示意图 ;

[0031] 图 4 为本发明中直线导轨组件结构示意图 ;

[0032] 图 5 为本发明中减振装置实际工作原理图 ;

[0033] 图 6 为本发明的基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振方法流程图 ;

[0034] 以上的图中有 :柔性机械臂(1),柔性机械臂夹板(2),导轨安装梁(3),磁流变液阻尼器(4),磁流变减振装置夹板 A(5),磁流变减振装置夹板 B(6),磁路铁芯(7),励磁线圈(8),线圈挡板(9),磁流变弹性体(10),直线导轨(11),滑块(12),磁流变减振装置夹板 C(13),弹性体安装板(14),线圈杆(15),阻尼器销轴(16),固定安装座(17),刚性机械臂(18),刚柔机械臂连接座(19),磁流变减振装置(20),加速度传感器(21),电荷放大器(22),数据采集系统(23),PC 上位机(24),程控电源(25),关节电机(26),驱动器(27),PMAC 下位机(28)。

具体实施方式

[0035] 下面结合附图及具体实例对本发明作进一步详细说明,但本发明的实施不限于此。

[0036] 如图 1 所示,本发明基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置,其特征在于它包括柔性机械臂、安装在柔性机械臂上的磁流变减振装置以及起连接作用的直线导轨组件,其中 :

[0037] 柔性机械臂 1 为振动控制对象,磁流变减振装置由磁路铁芯 7、励磁线圈 8、线圈挡板 9、磁流变弹性体 10 和磁流变液阻尼器 4 组成,直线导轨组件由柔性机械臂夹板 2、导轨安装梁 3、直线导轨 11、滑块 12、磁流变减振装置夹板 A5、磁流变减振装置夹板 B6、磁流变减振装置夹板 C13 和弹性体安装板 14 组成 ;直线导轨组件通过柔性机械臂夹板 2 与导轨安装梁 3 相互配合定位于柔性机械臂 1 上,并通过四套 M5×20 螺栓、M5 螺母夹紧,导轨安装梁 3 上加工有若干 M2 螺纹孔,用于安装直线导轨 11 ;磁流变液阻尼器 4 通过两个 Ø3 阻尼器销轴 16 安装于导轨安装梁 3 和磁流变减振装置夹板 A5 之间 ;励磁线圈 8 缠绕于磁路铁芯 7 的线圈杆 15 上,并使用线圈挡板 9 限位 ;将磁路铁芯 7 与励磁线圈 8 组成的整体作为振子,通过磁流变减振装置夹板 A5、磁流变减振装置夹板 B6 和磁流变减振装置夹板 C13 夹紧安装于滑块 12 上,且磁流变减振装置夹板之间通过 M4×20 螺栓、M4 螺母夹紧 ;弹性体安装板 14 下端通过 M2×16 螺钉安装于直线导轨上,上端通过磁流变弹性体 10 借助 502 强力胶粘贴于磁路铁芯 7 上,具体细节如图 2、图 3 与图 4 所示。

[0038] 如图 5 所示,本发明中减振装置实际工作原理图中还包括固定安装座 17、刚性机械臂 18、刚柔机械臂连接座 19、加速度传感器 21、电荷放大器 22、数据采集系统 23、PC 上位机 24、程控电源 25、关节电机 26、驱动器 27 和 PMAC 下位机 28。如此,受机械臂名义运动的影响,柔性机械臂 1 的固有频率会随着刚性机械臂 18 的运动状态的改变而改变,实验过程中减振装置不仅能够对单一固有频率的振动问题进行处理,还可以对连续变化固有频率的振动问题进行处理。

[0039] 以上所述的柔性机械臂 1 为几何尺寸 800mm×30mm×5mm 的钢梁;固定安装座处谐波减速器为北京众合天成精密机械制造有限公司生产的 XSF-80-100-1-1/1 型齿轮减速机,其减速比为 100:1,精度在 1 角分以内,伺服电机为安川公司生产的 SGMJV-04ADE6S 伺服电机,功率为 400W;关节电机 26 为日本富士公司生产的 GYS401DC2-T2C 交流伺服电机,功率 400W;电磁线圈 12 采用直径 1.2mm 的漆包铜线绕制;磁流变弹性体 10 使用作为基体的 704 硅胶,作为磁性颗粒的羰基铁粉以及作为润滑剂的少量硅油自己研制;加速度传感器 21 为 B&K 公司的单轴向加速度传感器;数据采集系统 23 为江苏联能电子有限公司生产的 YE6261B 数据采集系统;电荷放大器 22 为江苏联能电子有限公司生产的 YE5871 电荷放大器;PMAC 下位机为美国 Delta Tau 公司生产的 Turbo PMAC2-Eth-Lite Clipper 型 4 轴运动控制卡;其他各部件均为自己设计加工。

[0040] 本发明基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振方法主要通过反馈控制回路来完成,反馈控制回路由加速度传感器 21、电荷放大器 22、数据采集系统 23、PC 上位机 24 和程控电源 25 组成;加速度传感器 21 的反馈信号经过电荷放大器 22 放大后传入数据采集系统 23,然后 PC 上位机 24 对数据采集系统 23 采集的数据进行处理并向程控电源 25 发出控制信号,改变励磁线圈 8 和磁流变液阻尼器 4 两端的电压,形成不同的减振刚度和阻尼,消耗振动能量。

[0041] 如图 6 所示,该方法具体步骤如下:

[0042] 步骤 1:将基于可控刚度和可控阻尼的柔性机械臂减振装置中的各部件正确安装,确保磁流变减振装置 20 和柔性机械臂 1 的相对空间位置,务必确保加速度传感器 21 的正确安装;

[0043] 步骤 2:根据柔性机械臂 1 理想位姿确定关节电机 26 的驱动参数,启动所有硬件设备并使柔性机械臂 1 运动,同时采集加速度传感器 21 信号并保存,对振动信号进行离线处理,经 FFT 变换得到模型的近似固有频率;

[0044] 步骤 3:确定减振装置的固有频率;由柔性机械臂的非线性动力学模型及实验可知,柔性机械臂振动时会出现 $\omega_1:\omega_2 \approx 2:1$ 的内共振现象,故可以取柔性机械臂 1 的固有频率的 2 倍作为减振装置 20 的固有频率;

[0045] 步骤 4:确定程控电源 25 的输出电压;根据磁流变弹性体的剪切刚度与磁场强度、剪切刚度与固有频率以及磁场强度与电压之间的对应关系得到电磁线圈 8 两端的电压;

[0046] 步骤 5:确定磁流变液阻尼器的供电电压;根据磁流变阻尼器阻尼与供电电压之间的关系以及振动幅值的变化规律,得到磁流变液阻尼器两端的电压;

[0047] 步骤 6:重复步骤 2~步骤 5 的过程,实现柔性机械臂振动的实时控制;通过调整励磁线圈 8 两端的电压,从而控制磁流变弹性体 10 的运动频率,使系统形成内共振;能够在柔性机械臂 1 的振动模态与减振装置 20 运动模态之间实现能量传递;另一方面,通过控制

减振装置 20 中磁流变液阻尼器 4 阻尼,可以有效地耗散柔性机械臂 1 的振动能量,使得柔性机械臂(1)的振动得到快速控制。

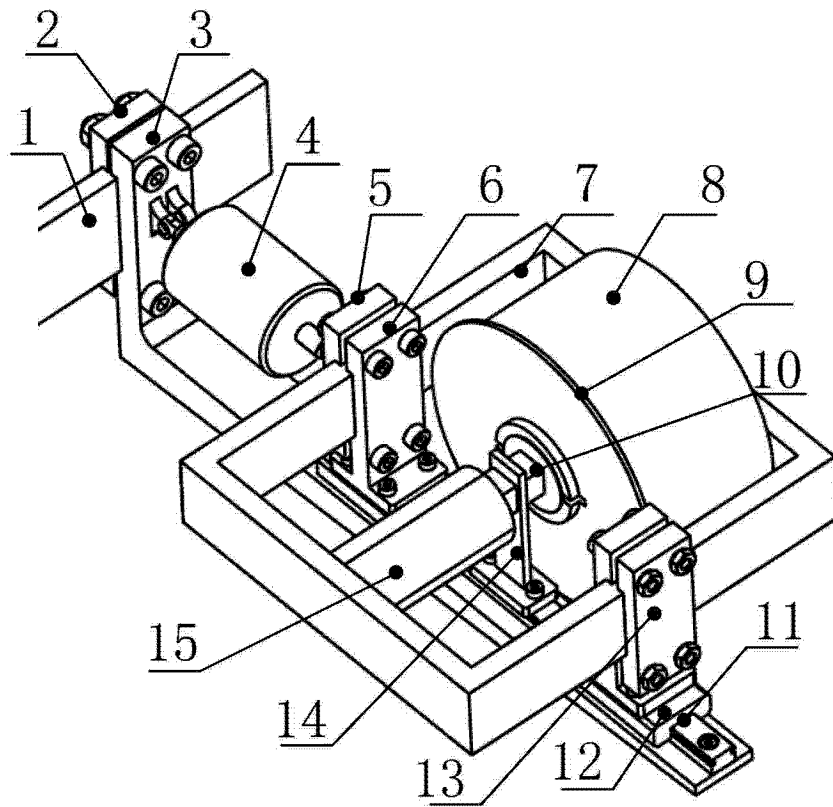


图 1

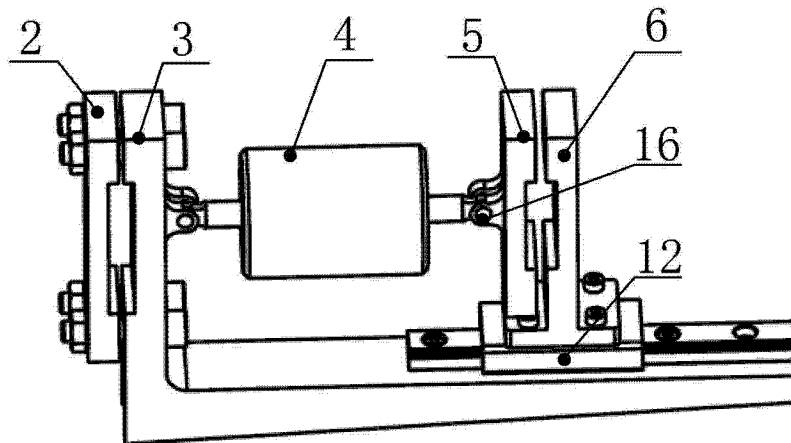


图 2

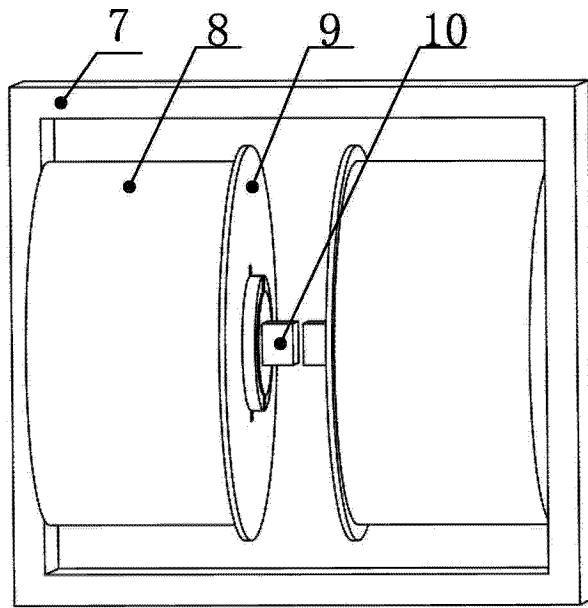


图 3

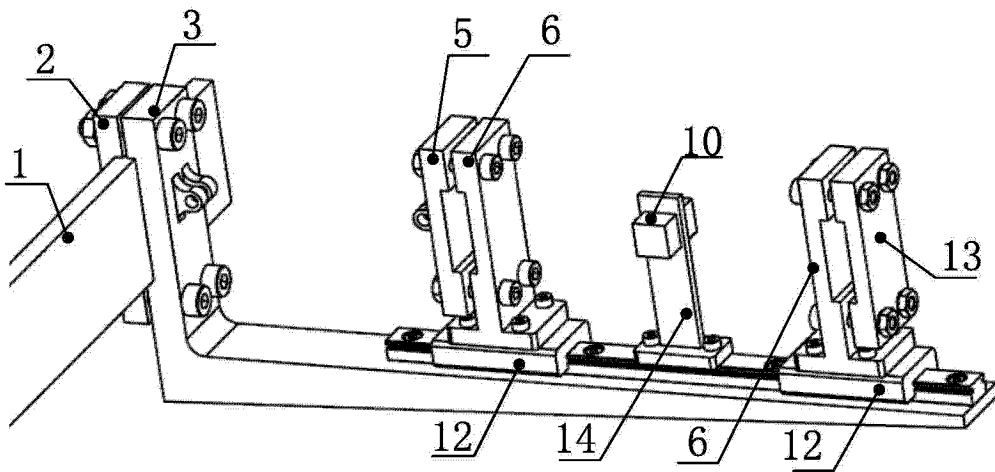


图 4

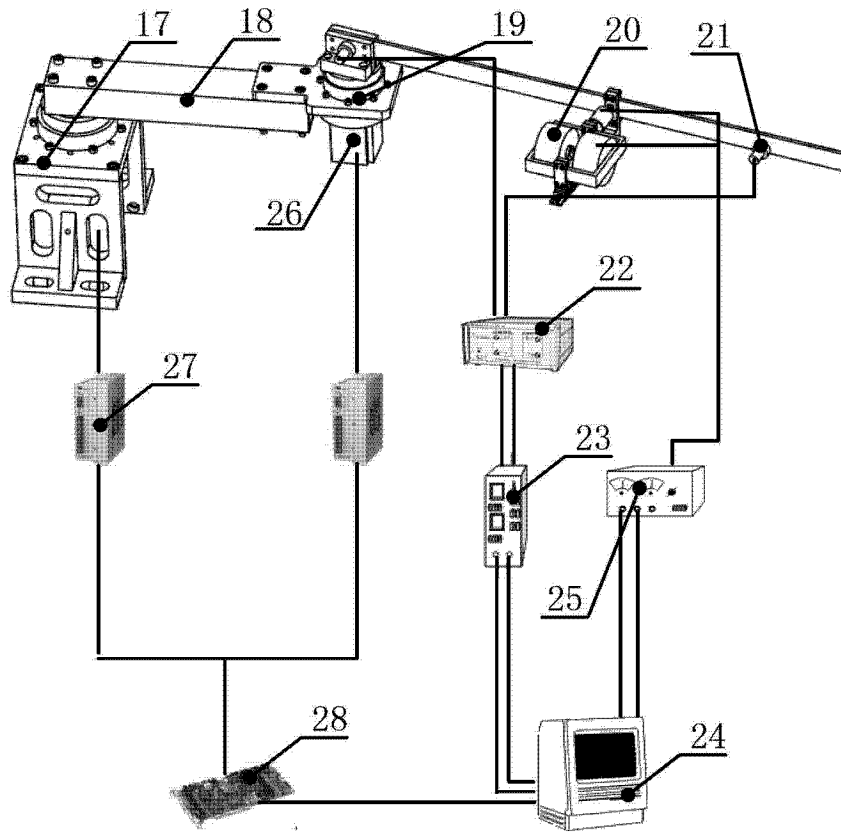


图 5

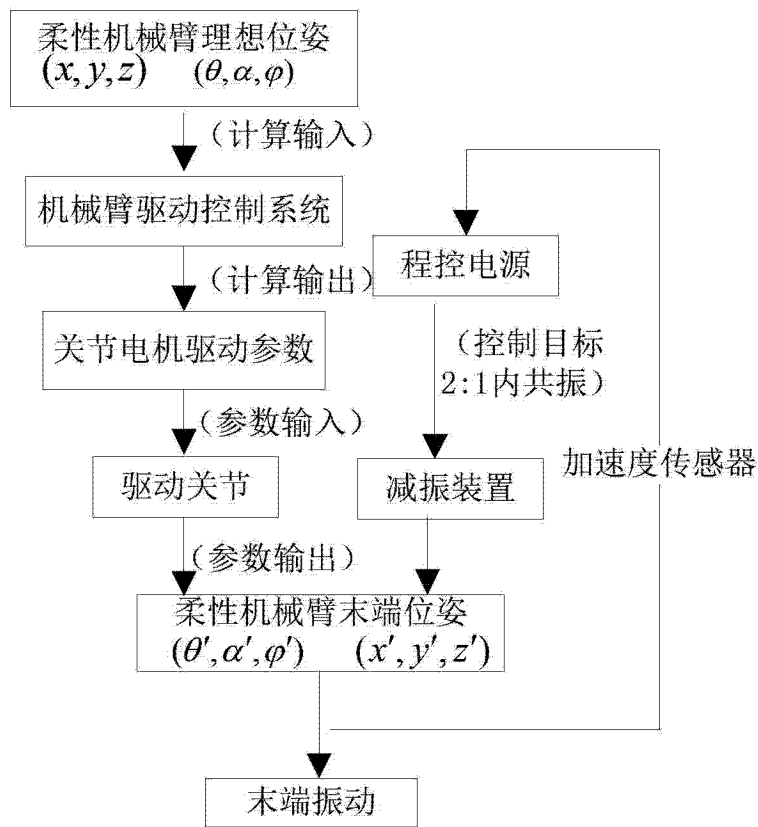


图 6