



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106742088 B

(45)授权公告日 2020.02.21

(21)申请号 201611025601.3

(22)申请日 2016.11.16

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106742088 A

(43)申请公布日 2017.05.31

(73)专利权人 南京航空航天大学
地址 210016 江苏省南京市秦淮区御道街
29号

(72)发明人 王寅 陈金宝 王治易 耿海峰
王小涛 王道波

(74)专利代理机构 江苏圣典律师事务所 32237
代理人 贺翔 吴庭祥

(51)Int.Cl.
B64G 7/00(2006.01)

(56)对比文件

- CN 103196629 A, 2013.07.10,
- CN 103279037 A, 2013.09.04,
- CN 103323175 A, 2013.09.25,
- CN 102866030 A, 2013.01.09,
- CN 101451933 A, 2009.06.10,
- KR 10-2016-0079404 A, 2016.07.06,
- CN 103308338 A, 2013.09.18,

审查员 时绒

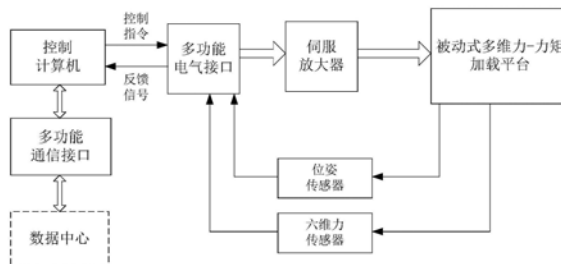
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统及其控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统及其控制方法,属于试验与测试技术领域。包括被动式多维力-力矩加载平台、控制单元、电气接口模块、伺服信号功放单元、位姿传感器和六维力传感器;控制单元连接电气接口模块,电气接口模块连接伺服信号功放单元,伺服信号功放单元连接被动式多维力-力矩加载平台;位姿传感器固定安装在被动式多维力-力矩加载平台上与电气接口模块电连接;六维力传感器与被加载对象固定连接,电气接口模块与电连接。本发明可以实现力矩电机在力-力矩和位移控制条件下的动力加载试验,能够有效提高被动式多维力-力矩加载平台和被测对象在试验过程中的安全性,降低测试和维护成本。



1. 一种被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统,其特征在于:包括被动式多维力-力矩加载平台、控制单元、电气接口模块、伺服信号功放单元、位姿传感器和六维力传感器;

所述控制单元连接电气接口模块,电气接口模块连接伺服信号功放单元,伺服信号功放单元连接被动式多维力-力矩加载平台;

所述位姿传感器固定安装在被动式多维力-力矩加载平台上,位姿传感器电连接电气接口模块,用于实时采集被动式多维力-力矩加载平台的位姿信号;

所述六维力传感器与被加载对象固定连接,六维力传感器电连接电气接口模块,用于实时采集被加载对象所受加载力-力矩信号;

所述被动式多维力-力矩加载平台刚性连接被加载对象,并根据控制指令对其进行加载;

所述控制单元用于向多功能控制接口模块发出控制指令,并经电气接口模块采集运动位姿信号和加载力-力矩信号进行处理;

所述电气接口模块用于将控制指令传输到伺服信号功放单元,并将运动位姿信号和加载力-力矩信号反馈至控制单元;

所述伺服信号功放单元用于向被动式多维力-力矩加载平台输出功率信号驱动其运行。

2. 根据权利要求1所述的被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统,其特征在于:所述控制单元经通信接口模块连接数据中心。

3. 权利要求1或2所述被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统的控制方法,其特征在于包括以下步骤:

1)、将被加载对象与被动式多维力-力矩加载平台进行刚性连接,启动被动式多维力-力矩加载平台控制系统;

2)、按照预定的工作模式,在控制单元中设置加载控制参数,确定加载模式,对各传感器信号清零处理;

3)、控制单元发出控制指令经伺服信号功放单元传递给被动式多维力-力矩加载平台对被加载对象进行加载;

4)、传感器实时采集运动位姿信号和加载力-力矩信号并通过多电气接口模块反馈至控制单元,控制单元进行信号处理后再发出控制指令对被加载对象完成伺服加载。

4. 根据权利要求3所述被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统的控制方法,其特征在于所述步骤3)中采用如下的对于力-力矩加载控制算法实现对被加载对象完成伺服加载:

设速度内环的控制律为:

$$\Delta \dot{x}(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_d(t) \quad (1)$$

式中, $\dot{x}_d(t)$ 为被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统理想的速度给定信号, $x(t)$ 为被动式多维力-力矩加载平台的实时位姿, $\dot{x}(t)$ 为速度;

设被加载对象各连接面的各维力 $f_c(t)$ 所形成接触力的刚度模型为:

$$f(t) = k(t) [x(t) - x_e(t)] \quad (2)$$

式中, $f(t)$ 为被加载力的理论值, k 表示被动式多维力-力矩加载平台与被加载对象之

间接触的等效刚度, $x_e(t)$ 为被加载对象的实时运动位姿; 用 $\gamma = 1/k$ 表示柔度, 则

$$x(t) = \gamma(t) f(t) + x_e(t) \quad (3)$$

通过在线辨识获得被加载对象各自由度的等效柔度, 其控制规律为:

$$\dot{x}_d(t) = -\hat{\gamma}(t) f_d(t) + K_f \Delta f(t) + \dot{x}(t) \quad (4)$$

式中, $f_d(t)$ 为加载力期望值, $\Delta f(t)$ 为加载力误差, K_f 为力反馈系数, $\hat{\gamma}(t)$ 为等效柔度的在线估计值, 其自适应更新律为:

$$\dot{\hat{\gamma}}(t) = -\alpha F(t) \quad (5)$$

式中, 参数 α 是自适应增益, $F(t)$ 为待定的自适应估计器;

根据刚度与柔度的关系 $k = 1/\gamma$, 代入式 (3):

$$k\dot{x}(t) - f_d(t) + kK_f \Delta f(t) = k(\hat{\gamma}(t) - \gamma(t)) f_d(t) + k\dot{x}_d(t) \quad (6)$$

由式 (2) 可知:

$$f(t) = k(\dot{x}(t) - \dot{x}_e(t)), \Delta f(t) = f(t) - f_d(t) \quad (7)$$

从而式 (6) 为:

$$\Delta f(t) + kK_f \Delta f(t) = k(\hat{\gamma}(t) - \gamma(t)) f_d(t) + \psi(t) \quad (8)$$

式中, $\psi(t)$ 为中间变量, $\psi(t) = k(x_d(t) - x_e(t))$,

定义标量函数:

$$V(t, \Delta f, \tilde{\gamma}) = 0.5 \Delta f(t)^2 + \frac{1}{2\alpha} k \tilde{\gamma}(t)^2 + M - \frac{1}{4kK_f} \int_0^t \psi^2(\tau) d\tau, \tilde{\gamma}(t) = \hat{\gamma}(t) - \gamma(t) \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 对于所有 t , 有 $V(t, \Delta f, \tilde{\gamma}) \geq 0$, 对式 (9) 微分后

$$\dot{\hat{\gamma}}(t) \gg \dot{\gamma}(t), \text{ 故有 } \tilde{\gamma}(t) = \hat{\gamma}(t)$$

代入 (5), 得

$$V(t, \Delta f, \tilde{\gamma}) = - \left\{ \sqrt{kK_f} \Delta f(t) - \frac{1}{2\sqrt{kK_f}} \psi(t) \right\}^2 + k\tilde{\gamma}(t)(f_d(t)\Delta f(t) - F(t))$$

可知, 所求解待定的自适应估计器 $F(t)$ 为

$$F(t) = -\alpha f_d(t) \Delta f(t)。$$

被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统及其控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种伺服加载平台控制系统,具体讲是一种被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统及其控制方法,属于试验与测试技术领域。

背景技术

[0002] 电动负载模拟器是航空航天产品在空间运动过程中机构所受外力的加载模拟装置,其功能是在实验室条件下模拟被测试产品在空间运动过程中所受到的机构载荷,从而测试产品驱动系统带载条件下的性能,是航空航天产品生产和研制过程中的必备设备。

[0003] 现有的加载平台控制系统大多仅适应于单向力-力矩的加载控制,输入输出接口单一,可扩展性差,不能满足加载平台的控制需求。从力-力矩加载控制算法上来看,目前的力-力矩伺服加载控制方法大多仅限于单自由度、简单运动条件下的扭矩、径向力和轴向力的加载控制,无法适应各维加载力-力矩之间耦合性强的加载条件,制约试验过程中各类加载测试。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题在于克服现有技术缺陷,提供一种能对复杂运动条件下被加载对象进行加载试验的被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统及控制方法。

[0005] 为了解决上述技术问题,本发明提供的被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统,包括被动式多维力-力矩加载平台、控制单元、电气接口模块、伺服信号功放单元、位姿传感器和六维力传感器;

[0006] 所述控制单元连接电气接口模块,电气接口模块连接伺服信号功放单元,伺服信号功放单元连接被动式多维力-力矩加载平台;

[0007] 所述位姿传感器固定安装在被动式多维力-力矩加载平台上,位姿传感器电连接电气接口模块,用于实时采集被动式多维力-力矩加载平台的位姿信号;

[0008] 所述六维力传感器与被加载对象固定连接,六维力传感器电连接电气接口模块,用于实时采集被加载对象所受加载力-力矩信号;

[0009] 所述被动式多维力-力矩加载平台刚性连接被加载对象,并根据控制指令对其进行加载;

[0010] 所述控制单元用于向多功能控制接口模块发出控制指令,并经电气接口模块采集运动位姿信号和加载力-力矩信号进行处理;

[0011] 所述电气接口模块用于将控制指令传输到伺服信号功放单元,并将运动位姿信号和加载力-力矩信号反馈至控制单元;

[0012] 所述伺服信号功放单元用于向被动式多维力-力矩加载平台输出功率信号驱动其运行。

[0013] 本发明中,所述控制单元经通信接口模块连接数据中心。

[0014] 本发明还提供上述被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统的控制方法,包括

以下步骤:

[0015] 1)、将被加载对象与被动式多维力-力矩加载平台进行刚性连接,启动被动式多维力-力矩加载平台控制系统;

[0016] 2)、按照预定的工作模式,在控制单元中设置加载控制参数,确定加载模式,对各传感器信号清零处理;

[0017] 3)、控制单元发出控制指令经伺服信号功放单元传递给被动式多维力-力矩加载平台对被加载对象进行加载;

[0018] 4)、传感器实时采集运动位姿信号和加载力-力矩信号并通过多电气接口模块反馈至控制单元,控制单元进行信号处理后再发出控制指令对被加载对象完成伺服加载。

[0019] 本发明中,上述步骤3)中采用如下的对于力-力矩加载控制算法实现对被加载对象完成伺服加载:

[0020] 设速度内环的控制律为:

$$[0021] \quad \Delta \dot{x}(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_d(t) \quad (1)$$

[0022] 式中, $\dot{x}_d(t)$ 为被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统理想的速度给定信号, $x(t)$ 为被动式多维力-力矩加载平台的实时位姿, $\dot{x}(t)$ 为速度;

[0023] 设被加载对象各连接面的各维力 $f_c(t)$ 所形成接触力的刚度模型为:

$$[0024] \quad f(t) = k(t) [x(t) - x_e(t)] \quad (2)$$

[0025] 式中, $f(t)$ 为被加载力的理论值, k 表示被动式多维力-力矩加载平台与被加载对象之间接触的等效刚度, $x_e(t)$ 为被加载对象的实时运动位姿;用 $\gamma = 1/k$ 表示柔度,则

$$[0026] \quad x(t) = \gamma(t) f(t) + x_e(t) \quad (3)$$

[0027] 通过在线辨识获得被加载对象各自由度的等效柔度,其控制规律为:

$$[0028] \quad \dot{x}_d(t) = -\hat{\gamma}(t) f_d(t) + K_f \Delta f(t) + \dot{x}(t) \quad (4)$$

[0029] 式中, $f_d(t)$ 为加载力期望值, $\Delta f(t)$ 为加载力误差, K_f 为力反馈系数, $\hat{\gamma}(t)$ 为等效柔度的在线估计值,其自适应更新律为:

$$[0030] \quad \dot{\hat{\gamma}}(t) = -\alpha F(t) \quad (5)$$

[0031] 式中,参数 α 是自适应增益, $F(t)$ 为待定的自适应估计器;

[0032] 根据刚度与柔度的关系 $k = 1/\gamma$, 代入式(3):

$$[0033] \quad k\dot{x}(t) - f_d(t) + kK_f \Delta f(t) = k(\hat{\gamma}(t) - \gamma(t)) f_d(t) + k\dot{x}_d(t) \quad (6)$$

[0034] 由式(2)可知:

$$[0035] \quad f(t) = k(\dot{x}(t) - \dot{x}_e(t)), \Delta f(t) = f(t) - f_d(t) \quad (7)$$

[0036] 从而式(6)为:

$$[0037] \quad \Delta f(t) + kK_f \Delta f(t) = k(\hat{\gamma}(t) - \gamma(t)) f_d(t) + \psi(t) \quad (8)$$

[0038] 式中, $\psi(t)$ 为中间变量, $\psi(t) = k(x_d(t) - x_e(t))$,

[0039] 定义标量函数:

$$[0040] \quad V(t, \Delta f, \tilde{\gamma}) = 0.5 \Delta f(t)^2 + \frac{1}{2\alpha} k \tilde{\gamma}(t)^2 + M - \frac{1}{4kK_f} \int_0^t \psi^2(\tau) d\tau, \tilde{\gamma}(t) = \hat{\gamma}(t) - \gamma(t) \quad (9)$$

[0041] 由式(9)可知,对于所有t,有 $V(t, \Delta f, \tilde{\gamma}) \geq 0$,对式(9)微分后

$$[0042] \quad \dot{\hat{\gamma}}(t) \gg \dot{\gamma}(t), \text{故有 } \tilde{\gamma}(t) = \dot{\hat{\gamma}}(t)$$

[0043] 代入(5),得

$$[0044] \quad V(t, \Delta f, \tilde{\gamma}) = - \left\{ \sqrt{kK_f} \Delta f(t) - \frac{1}{2\sqrt{kK_f}} \psi(t) \right\}^2 + k \tilde{\gamma}(t) (f_a(t) \Delta f(t) - F(t))$$

[0045] 可知,所求解待定的自适应估计器F(t)为

$$[0046] \quad F(t) = -\alpha f_d(t) \Delta f(t)。$$

[0047] 本发明的有益效果在于:(1)、通过以控制单元为中心,将被动式多维力-力矩加载平台、电气接口模块、伺服信号功放单元、位姿传感器和六维力传感器进行有机结合,克服传统加载系统的缺陷,可以实现力矩电机在力-力矩和位移控制条件下的动力加载试验;(2)、本发明的控系统操作简单、容错能力强,具有软件、电气和机械三级自我保护功能,能够有效提高被动式多维力-力矩加载平台和被测对象在试验过程中的安全性,降低测试和维护成本;(3)、本发明控制方法能够减小加载过程中出现的超调,提高力-力矩伺服加载的控制精度,并且能有效抑制多余力-力矩对加载稳定性的影响,提高系统的响应速度。

附图说明

[0048] 图1本发明被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统结构示意图;

[0049] 图2本发明控制方法的算法原理图。

具体实施方式

[0050] 下面结合附图对本发明作进一步详细说明。

[0051] 如图1所示,本发明被动式多维力-力矩伺服加载平台控制系统,包括控制计算机、多功能电气接口模块、伺服放大器、被动式多维力-力矩加载平台、位姿传感器和六维力传感器。

[0052] 控制计算机连接多功能电气接口模块,向多功能电气接口模块控制指令、接收多功能电气接口模块的反馈信号并进行融合与解算。本发明中,控制计算机为数字计算机,配置有输入输出接口电路的基本控制部件,包括多功能通信模块、六路模拟量输入/出接口、AD输入模块、光电编码器信号采集模块和电气信号控制模块。

[0053] 多功能通信模块包括网络接口与串行接口,控制计算机通过串行接口连接多功能通信模块,多功能通信模块通过网络接口连接数据中心,用于被动式多维力-力矩控制与数据中心的信息交互。

[0054] 六路模拟量输出接口采用16位高性能D/A转换芯片,通过PCI总线与控制计算机连接,具有电压转换精度高、相应速度快的优点。六路模拟量输入接口采用16为高性能A/D转换芯片,转换时间小于1us,通过PCI总线与控制计算机连接,用于采集力-力矩反馈、位姿信号。

[0055] 六路正交编码信号接口通过PCI总线与控制计算机连接,具有自适应输入电平配平芯片,能够适应多种光电编码器的输入电平,用于位姿传感器信号的采集。

[0056] 控制计算机安装运行加载控制软件,加载控制软件采用本领域现有使用的软件,如南京航空航天大学开发的被动式多维力-力矩伺服加载系统控制软件,用于实时监控整个系统运行状况,向多功能电气接口发送控制指令并采集被动式多维力-力矩加载平台的位姿和力-力矩数据。本发明的力-力矩加载控制算法通过融合位姿信息与力-力矩信息,实时解算控制信号。

[0057] 多功能电气接口模块连接伺服放大器,向伺服放大器传输控制指令。伺服放大器连接被动式多维力-力矩加载平台,伺服放大器向被动式多维力-力矩加载平台输出功率信号,驱动被动式多维力-力矩加载平台运动和实现力-力矩的加载。被动式多维力-力矩加载平台采用力矩电机拖动,直接传动。

[0058] 被加载对象通过法兰与被动式多维力-力矩加载平台刚性连接。本发明中,被动式多维力-力矩加载平台采用现有技术中公开的如上海理工大学申请的申请号为2015101671972公开的三轴多维度加载力学性能测试试验台、济南大学申请的申请号为2013102241563所公开的多能力加载装置及燕山大学申请的申请号201410171514.3所公开的自平衡式空间六维力/力矩加载装置等,在此本发明中不再展开描述。

[0059] 位姿传感器包括3个角度传感器和3个直线位移传感器,角度传感器采用德国海德汉ECA4492,角度移传感器与被动式多维力-力矩加载平台的回转轴同轴安装,角度移传感器连接多功能电气接口模块,用于实时采集被动式多维力-力矩加载平台的角度信息。

[0060] 直线位移传感器采用德国海德汉LC115,直线位移传感器沿被动式多维力-力矩加载平台的轴向力加载方向平行安装在加载平台上,直线位移传感器电连接多功能电气接口模块,用于实时采集被动式多维力-力矩加载平台的位置信息。

[0061] 六维力传感器采用瑞士奇石乐SKB-Z20,六维力传感器通过法兰与被加载对象刚性连接,六维力传感器电连接多功能电气接口模块,用于实时采集被动式多维力-力矩加载平台加载力-力矩信息。

[0062] 下面是利用本发明被动式多维力-力矩加载平台控制系统进行多维力-力矩伺服加载的控制过程:

[0063] 1、将被加载对象与被动式多维力-力矩加载平台通过法兰进行刚性连接,然后整个系统供电,启动控制计算机中的加载控制软件;

[0064] 2、按照预定的工作模式,在加载控制软件设置所述加载控制装置参数,确定加载模式,然后控制计算机设置所采集的信息并对所有传感器信号进行清零处理。

[0065] 3、控制计算机控制启动被动式多维力-力矩加载平台,此时控制计算机的控制指令通过多功能电气接口模块经由所述伺服放大器将功率信号传递给被动式多维力-力矩加载平台,被动式多维力-力矩加载平台按照控制计算机的伺服控制指令进行加载。

[0066] 4、任一时刻的位姿传感器与六维力传感器所采集的信号通过多功能电气接口反馈至控制计算机进行信号的综合与解算,控制计算机发出新的控制指令对被加载对象完成伺服加载。本发明采用如下的对于力-力矩加载控制算法用于实现力-力矩的伺服加载控制,如图2所示,图中S表示微分运算, \dot{x} 表示加载机构与被加载对象之间的相对运动速度的反馈值, f_c 为加载对象所承受的载荷力、 \dot{x}_d 表示加载机构与被加载对象之间的相对运动速

度的给定值、 $\hat{\gamma}$ 表示估计的等效刚度、 f_d 表示加载力的设定值。

[0067] 对于位姿内环,采用PI控制器进行速度控制,可以实现速度的误差跟踪,速度内环的控制律为:

$$[0068] \quad \Delta \dot{x}(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_d(t) \quad (1)$$

[0069] 其中, $\dot{x}_d(t)$ 为被动式多维力-力矩加载平台控制系统理想的速度给定信号,即速度闭环的输入质量, $x(t)$ 为被动式多维力-力矩加载平台的实时位姿, $\dot{x}(t)$ 为被动式多维力-力矩伺服加载平台的三轴角速度和三向线速度。对具有闭环位姿控制的运动系统而言,其动力学特性可以由二阶系统近似,因此PI控制器可以实现速度环的误差跟踪。

[0070] 被动式多维力-力矩加载平台与被加载对象之间采用刚性连接,在被加载装置上安装的六维力传感器,可以实时检测加载对象连接面上的各维力 $f(t)$,该接触力的刚度模型可以表述为:

$$[0071] \quad f(t) = k(t) [x(t) - x_e(t)] \quad (2)$$

[0072] 其中, $f(t)$ 为被加载力的理论值, k 表示被动式多维力-力矩加载平台与被加载对象之间接触的等效刚度,它是一个与被动式多维力-力矩加载平台与被加载对象之间相对运动、被加载对象的机构特性以及外部约束作用相关的变化物理量, $x_e(t)$ 表示被加载对象的实时运动位姿,通过位姿传感器实时获取。用 $\gamma = 1/k$ 表示柔度,则

$$[0073] \quad x(t) = \gamma(t) f(t) + x_e(t) \quad (3)$$

[0074] 由于被加载对象存在空间六自由度的运动,且被加载对象在运动过程中受外部作用的约束,其反应在各自由度上的等效刚度为变化量,为了描述这种变化的关系。本发明通过在线辨识获得各自由度的等效柔度,其控制规律为:

$$[0075] \quad \dot{x}_d(t) = -\hat{\gamma}(t) f_d(t) + K_f \Delta f(t) + \dot{x}(t) \quad (4)$$

[0076] 其中, $f_d(t)$ 为加载力期望值, $\Delta f(t)$ 为加载力误差, K_f 为力反馈系数, $\hat{\gamma}(t)$ 为等效柔度的在线估计值,其自适应更新律为:

$$[0077] \quad \dot{\hat{\gamma}}(t) = -\alpha F(t) \quad (5)$$

[0078] 其中,参数 α 是自适应增益, $F(t)$ 为待定的自适应估计器,待定的自适应估计器是独立于控制器选择的,其核心原则是使所设计的自适应估计器和控制器共同作用下系统能渐进稳定,所以先确定了估计率的一般形式,然后根据所构造的能量梯度函数的要求来确定 $F(t)$ 。

[0079] 正常操作时,被加载对象与被动式多维力-力矩加载平台接触面上的等效作用力和作用力矩不会发生突变,因此可以假设接触力-力矩是一个存在二阶导数且二阶导数为有界的物理量,即 $f(t) \in L_2$ 。基于这一点,对其稳定性进行分析,并确定具体的自适应更新律表达式。根据刚度与柔度的关系 $k = 1/\gamma$,代入式(3)整理后得

$$[0080] \quad k\dot{x}(t) - f_d(t) + kK_f \Delta f(t) = k(\hat{\gamma}(t) - \gamma(t)) f_d(t) + k\dot{x}_d(t) \quad (6)$$

[0081] 由力模型式(2)可知

$$[0082] \quad f(t) = k(\dot{x}(t) - \dot{x}_e(t)), \Delta f(t) = f(t) - f_d(t) \quad (7)$$

[0083] 从而式(6)可以写成:

$$[0084] \quad \Delta f(t) + kK_f \Delta f(t) = k(\hat{\gamma}(t) - \gamma(t))f_a(t) + \psi(t) \quad (8)$$

[0085] 其中, $\psi(t) = k(x_d(t) - x_e(t))$, $\psi(t)$ 为中间变量, 表示系统的位置误差; 由于系统的速度控制是无差系统,

$$[0086] \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_d(t) - \dot{x}(t) = 0$$

[0087] 又因为被动式多维力-力矩加载平台与被加载对象之间相对运动与力-力矩的加载值相关, 当把加载力-力矩增大时, 这种相对运动就会变小, 可以认为满足:

$$[0088] \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}(t) - \dot{x}_e(t) = 0, \text{ 且 } \lim_{t \rightarrow \infty} \gamma = 0$$

[0089] 故有

$$[0090] \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \psi(t) = k\{\lim_{t \rightarrow \infty} [\dot{x}_d(t) - \dot{x}(t)] + \lim_{t \rightarrow \infty} [\dot{x}(t) - \dot{x}_e(t)]\} = 0$$

[0091] 这说明 $\psi(t) \in L_2$ 。因此存在一个正数: $0 \leq M < \infty$, 满足

$$[0092] \quad \int_0^t \psi^2(\tau) d\tau \leq 4kK_f M$$

[0093] 式中, $(\tau) d\tau$ 表示对 τ 积分, τ 为时间变量, M 为一常数

[0094] 定义标量函数:

$$[0095] \quad V(t, \Delta f, \tilde{\gamma}) = 0.5\Delta f(t)^2 + \frac{1}{2\alpha} k\tilde{\gamma}(t)^2 + M - \frac{1}{4kK_f} \int_0^t \psi^2(\tau) d\tau, \tilde{\gamma}(t) = \hat{\gamma}(t) - \gamma(t) \quad (9)$$

[0096] 由式 (9) 可知, 对于所有 t , 有 $V(t, \Delta f, \tilde{\gamma}) \geq 0$, (因 (9) 式前两项为平方项, 恒大于 0, 又因为 $\int_0^t \psi^2(\tau) d\tau \leq 4kK_f M$, 所以 (9) 式恒大于 0), 对式 (9) 微分后

$$[0097] \quad \dot{\tilde{\gamma}}(t) \gg \dot{\gamma}(t), \text{ 故有 } \tilde{\gamma}(t) = \dot{\tilde{\gamma}}(t)$$

[0098] 代入 (5), 得

$$[0099] \quad V(t, \Delta f, \tilde{\gamma}) = - \left\{ \sqrt{kK_f} \Delta f(t) - \frac{1}{2\sqrt{kK_f}} \psi(t) \right\}^2 + k\tilde{\gamma}(t)(f_a(t)\Delta f(t) - F(t))$$

[0100] 可知, 所求解待定的自适应估计器 $F(t)$ 为

$$[0101] \quad F(t) = -\alpha f_d(t) \Delta f(t)$$

[0102] 5、当被加载对象完成加载过程后, 控制计算机将发送停止指令, 被动式多维力-力矩加载平台对被加载对象停止加载。

[0103] 本发明的应用途径很多, 以上所述仅是本发明的优选实施方式, 应当指出, 对于本技术领域的普通技术人员来说, 在不脱离本发明原理的前提下, 还可以做出若干改进, 这些改进也应视为本发明的保护范围。

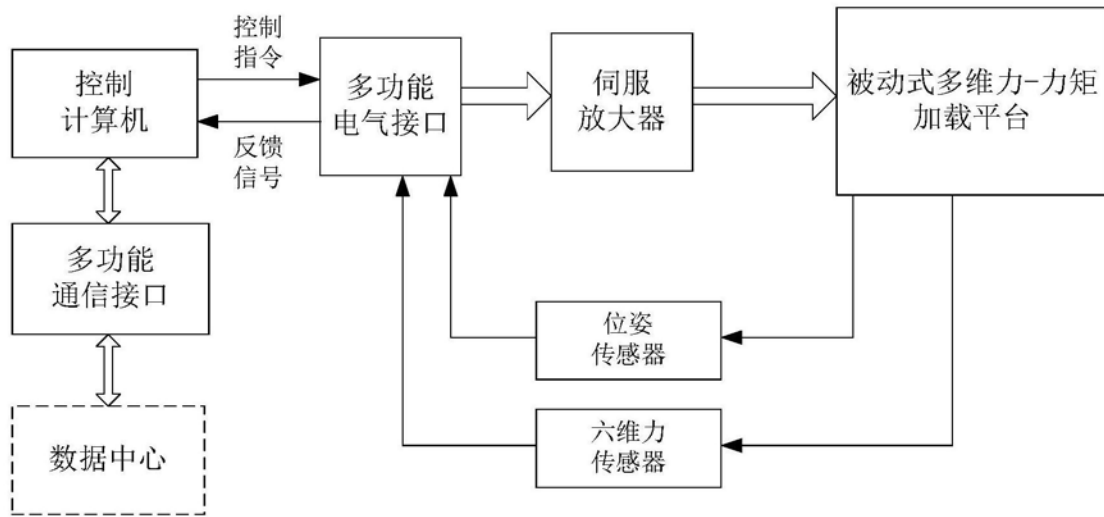


图1

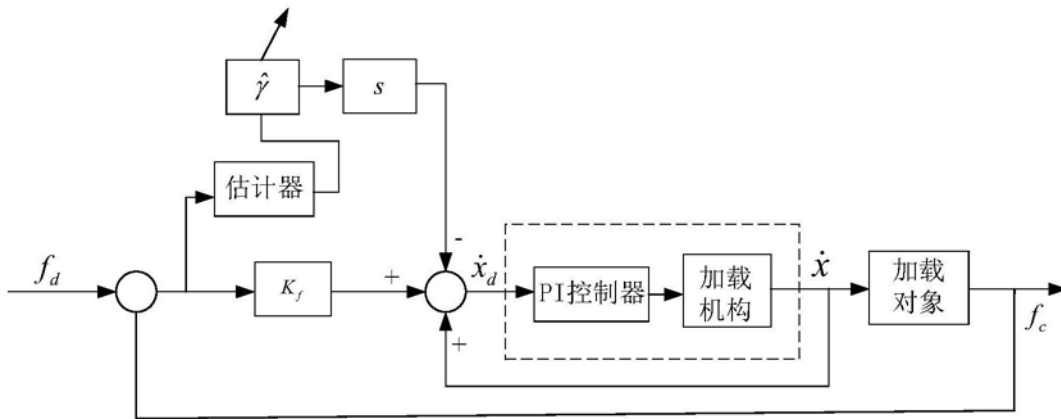


图2