

文章编号: 1000-8152(2009)06-0607-06

柔性支撑Stewart平台自适应交互PID隔振控制

段学超, 仇原鹰

(西安电子科技大学 电子装备结构教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 为了实现500 m口径球面射电望远镜(five hundred meter aperture spherical radio telescope, FAST)二级精调稳定平台对馈源舱隔振控制的定位和指向精度, 首先提出了基于并联机构学原理的3维机动目标跟踪预测算法, 对柔性支撑Stewart平台的基座运动进行跟踪预测. 进而, 在Stewart平台关节空间设计了自适应交互PID控制器, 引入自适应交互算法解决PID参数的实时调整, 以适应柔性支撑Stewart平台的参数变化对不同控制参数的需求. 采用现代机电系统仿真策略, 对柔性支撑Stewart平台隔振系统的动力学与控制问题进行了仿真, 结果表明: 与传统的PID控制器相比, 自适应交互PID控制器大大改善了隔振效果, 完全满足隔振目标的要求.

关键词: 大射电望远镜; Stewart平台; 柔性支撑; 隔振控制; 自适应交互PID

中图分类号: TN823, TP242 **文献标识码:** B

Vibration isolation of the flexibly supported Stewart platform using adaptive interactive PID control

DUAN Xue-chao, QIU Yuan-ying

(The Ministry of Education Key Laboratory of Electronic Equipment Structure, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: To achieve the required precision in position and orientation for the feeding platform of a 500 m aperture spherical radio telescope(FAST), we employ a tracking-prediction control based on the kinematics theory of parallel mechanisms to track and predict the motion of the flexibly supported base of the Stewart platform. Adaptive interactive PID controllers, which utilize the adaptive interactive algorithm to adjust the parameters of the conventional PID controller, are developed for controlling the joint space of the Stewart platform. Based on the modern mechatronic system simulation strategy, the simulation of the dynamics and control of the vibration isolation system in a flexibly supported Stewart platform vibration is conducted. The results show that the adaptive interactive PID controller has superior effects in vibration isolation control over the canonical PID controllers, and satisfy the specifications for the vibration isolation control.

Key words: large radio telescope; Stewart platform; flexibly supported; vibration isolation; adaptive interactive PID

1 引言(Introduction)

500 m口径球面射电望远镜(FAST)已作为国家重大科技基础设施之一立项建设, 它将极大延伸我国的天文观测能力, 致力于宇宙深空探索. FAST的馈源支撑系统采用宏微并联机器人结构实现. 对射电天体跟踪时, 6根大跨度悬索和馈源舱构成的巨型柔性并联机器人完成馈源舱的动态定位^[1], 采用激光全站仪对馈源舱位姿进行动态检测, 装置在馈源舱内的微型刚性并联机器人(Stewart平台)对馈源舱因悬索滞后、非线性以及风荷作用而产生的振动进行隔离控制, 从而使安装在Stewart平台末端执行器上的馈源以既定的精度运行在期望的天文观测轨迹上.

从并联机构学的观点看, Stewart平台的机构学特性和数控技术目前已达到可实现虚拟轴机床的程度. 在机床应用中其实现的是几何运动控制, 作为馈源位置、姿态的二级稳定Stewart平台因系统的柔性支撑而不能实现单纯的几何控制, 问题转化为柔性约束多体系统在干扰作用下实现末端执行器高精度3维定位、定向的动力学耦合与控制问题^[2]. 从控制工程的角度看, 在硬件条件一定时, 系统的性能主要取决于控制器的性能, 而控制器的参数又直接决定着最终控制控制效果. 柔性支撑Stewart平台隔振机构的运动范围较大, 结构的变化对其对象的本质影响不容忽略, 因此实现控制器参数的自适应调节有着重要的工程意义. 本文建立了柔性支

撑Stewart平台的多体动力学模型,在其关节空间设计了自适应交互PID控制器,采用现代机电系统模型进行的数值仿真结果表明,基于自适应交互PID控制的柔性支撑Stewart平台具有良好的隔振效果。

2 柔性支撑Stewart平台模型(Model of the flexibly supported Stewart platform)

2.1 模型结构(Model structure)

室内柔性支撑Stewart平台模型如图1所示。刚性支架通过三根弹簧将Stewart平台的基座悬吊起来,基座平台和运动平台(馈源平台)之间通过6根电动

缸(线性电动执行器)连接,电动缸两端分别通过虎克铰、球铰与基座和运动平台相连。电动缸由交流伺服电机驱动并通过同步传送带和丝杠实现电机转动运动到缸体直线运动的转换,在驱动控制器和伺服驱动器的控制下,电动缸能够以位置模式和速度模式运行。

FAST的馈源安装在Stewart平台的运动平台上,当馈源舱和基座由于风荷或其他未知激励的扰动而振动时,基座平台相对于馈源即为振源,期望通过合理控制6个电动缸的运动来隔离此振动效应,从而实现馈源的高精度定位。

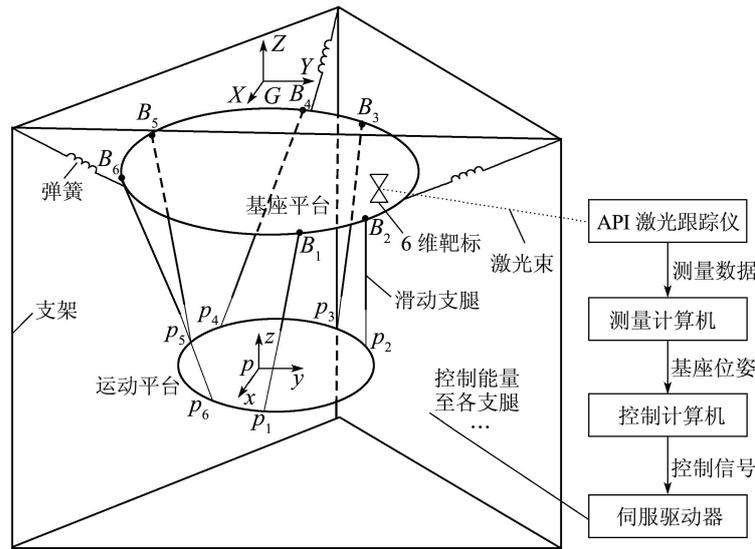


图1 柔性支撑Stewart平台室内模型简图

Fig. 1 Schematic diagram of the flexibly supported Stewart platform indoor model

2.2 动力学模型(Dynamical model)

从控制的观点看,Stewart平台控制系统是多变量和本质非线性的控制系统,同时又是复杂的耦合动力系统。每个控制任务本身就是一个动力学任务。对机器人进行期望的控制,首先要解决的是机器人系统动力学建模问题。将Stewart平台的上下平台以及各个滑动支腿视为刚体,对此多刚体系统利用拉格朗日方程,可以获得欧拉角形式的拉格朗日方程^[3,4]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial q} \right)^T + \Phi_q^T \lambda + \theta_q^T \mu = Q. \quad (1)$$

完整约束方程:

$$\Phi(q, t) = 0.$$

非完整约束方程:

$$\theta(q, \dot{q}, t) = 0.$$

式中: $q_i = [x_i, y_i, z_i, \psi_i, \theta_i, \phi_i]^T$, $q = [q_1^T, q_2^T, \dots, q_n^T]^T$ 为各刚体的质心笛卡尔坐标和反映各刚体方位的欧拉角广义坐标,本文中 $i = 1, 2, \dots, 14$; T 为系统动能, λ, μ 为拉格朗日乘子矢量,下标 q 和 \dot{q} 分别表示对 q 和 \dot{q} 的偏导数, Q 为广义力矩阵。

3 自适应交互算法(Adaptive interactive algorithm)

前已述及,控制器的参数直接决定着系统的最终控制效果。柔性支撑Stewart平台隔振控制系统运行周期长、连续性强,系统参数在外界扰动以及时变效应的影响下会发生较大变化,采用固定参数的控制器很难取得理想的控制效果,因此实现控制参数的自适应调节具有重要的工程意义。

自适应交互算法起源于Brand和Lin提出的自适应交互理论^[5,6],该算法实现简单、鲁棒性好,已被应用到神经网络学习以及PID参数调整领域^[7]。

自适应交互理论将一个复杂系统分为 N 个子系统, 每个子系统的输入 x_i 、输出 y_i 均是可积的. 每个子系统的动态关系由一个因果函数表示为

$$y_i(t) = (F_i \circ x_i)(t) = F_i[x_i(t)], \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

式中: x_i, y_i 分别第 i 个子系统的输入、输出信号, “ \circ ”表示函数结构.

假定 F_i 满足Frechet可微条件, 并进一步假设各子系统为单输入—单输出系统. 子系统间的交互作用可以通过对外部输入和其他子系统输出的函数依赖关系构成, 若子系统间仅存在线性交互作用, 即第 i 个子系统的输入是其余子系统输出和外部输入的线性组合, 则系统的动态关系可表示为

$$y_i(t) = F_i[u_i(t) + \sum_{c \in I_i} \alpha_c y_{ic}(t)], \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

自适应交互算法的目的就是通过自适应调节子系统间的连接权值 α_c 使得所选择的性能函数 $E(y_1, y_2, \dots, y_i, u_1, u_2, \dots, u_i)$ 最小化. 文献[6]已证明如果式(3)中的连接权值按照式(4)变化, 则式(5)是式(4)唯一的解, 并且性能函数 E 随时间单调递减:

$$\dot{\alpha}_c = \left(\sum_{s \in O_{oc}} \alpha_s \dot{\alpha}_s \frac{\frac{dE}{dy_{os}} \circ F'_{os}}{\frac{dE}{dy_{os}} \circ F'_{os} \circ y_{oc}} - \gamma \frac{\partial E}{\partial y_{oc}} \right) \circ F'_{oc} \circ y_{oc}, \quad (4)$$

$$\dot{\alpha}_c = -\gamma \frac{dE}{d\alpha_c}. \quad (5)$$

式中: y_{oc} 为 c 连接到子系统的输出信号, O_{oc} 为 c 的输出连接集合, γ 是自适应系数, 为正实数.

4 柔性支撑Stewart平台自适应交互PID控制(Adaptive interactive PID control of the flexibly supported Stewart platform)

PID控制算法简单、鲁棒性强及可靠性强, 被广

泛应用于过程控制和运动控制中^[8,9]. 从本质上讲, PID控制器是一种线性控制器, 它将偏差信号的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量, 对被控对象进行控制. 根据自适应交互理论PID控制系统应分解为4个子系统: 比例回路、积分回路、微分回路和被控对象回路.

系统中的自适应连接权值 $\alpha_c = [K_P, K_I, K_D]$, $O_4 = y_4$. 将系统绝对误差函数定义为性能指标, 即 $E = e^2 = (u - y_4)^2$, 则式(5)可以等价式为(6):

$$\begin{cases} \dot{K}_P = 2\gamma e F'_4[x_4] \circ y_1, \\ \dot{K}_I = 2\gamma e F'_4[x_4] \circ y_2, \\ \dot{K}_D = 2\gamma e F'_4[x_4] \circ y_3. \end{cases} \quad (6)$$

可见, K_P, K_I, K_D 的自适应调节算法具有相同的形式, 它们都取决于控制系统的误差量和 $F_4[x_4]$ 的Frechet微分以及PID3个环节的输出生量 y_i , 与系统的本质特性无关. 在许多场合下: $F'_4[x_4] \circ y_1, F'_4[x_4] \circ y_2, F'_4[x_4] \circ y_3$ 可以进行线性化近似^[6], 则式(6)可以简化为式(7):

$$\dot{K}_P = 2\gamma e y_1, \quad \dot{K}_I = 2\gamma e y_2, \quad \dot{K}_D = 2\gamma e y_3. \quad (7)$$

由于自适应交互PID控制器是单输入单输出的, 而从任务空间看, Stewart平台是一个多输入多输出的强耦合、非线性系统, 所以必须将控制器置于经过解耦的Stewart平台关节空间, 最终的柔性支撑Stewart平台隔振控制系统如图2所示. 图中位置逆解程序将任务空间的位姿映射到关节空间, AIPID(adaptive interactive PID)环节表示六路自适应交互PID控制器, L^T 为支腿长度的理论值矢量, L^R 为支腿长度的实际值矢量, L^C 为支腿长度的控制量, ${}^G X_{PT}$ 为运动平台在全局坐标系下的理论位姿, ${}^G X_{BR}$, ${}^G \tilde{X}_{BR}$ 分别为基座在全局坐标系下的实际位姿和预测位姿, 电动缸的执行层采用带加速度前馈的PID控制算法. 基座位姿预测算法将在第3节详细介绍.

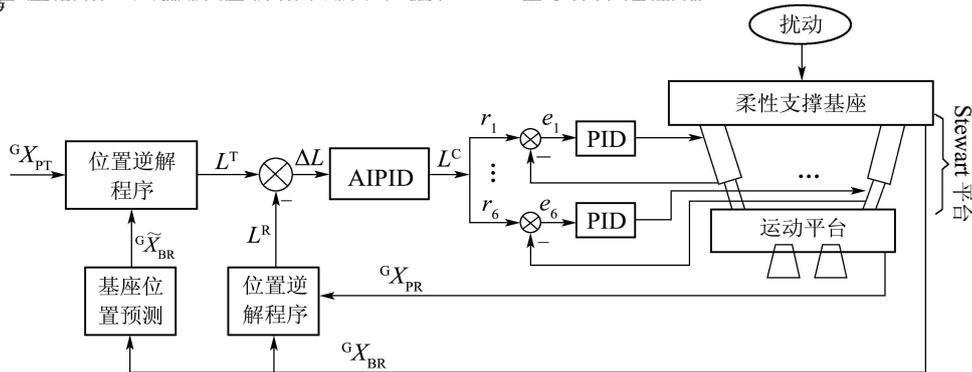


图2 柔性支撑Stewart平台自适应交互PID控制系统

Fig. 2 Control system of the adaptive interactive PID for the flexibly supported Stewart platform

5 柔性支撑基座的位姿跟踪与预测(Tracking and prediction of the position and pose of the flexibly supported base)

为了克服控制过程的时滞对末端平台定位精度的影响,将柔性支撑Stewart平台在当前时刻 t 的控制量规划为 $t + \Delta t$ (Δt 为控制周期)时刻下平台位姿和基座位姿的函数,前者根据控制目标已有既定的解析表达式,后者则是柔索支撑系统在外界随机扰动以及与Stewart平台之间动力耦合作用的响应量,需要根据当前和历史测量信息进行跟踪预测.因此,有如下关系^[10]:作为3维机动目标,Stewart平台基座具有6个自由度,即表示其参考点位置的 (x, y, z) 和表示其方位的偏转、俯仰、横滚角集合^[11] (ϕ, θ, ψ) .采用基于并联机构学原理的预测方法对基座的位姿进行跟踪预测,主要思想为:构造一个以基座平台为末端执行器、具有良性条件数的6自由度Stewart平台^[12],由API激光跟踪仪测量得到的基座位姿进行位置逆解运算得出6条支链的长度,Stewart平台位姿在支腿关节空间内是解耦的,因此,对下一时刻的各支链长度分别进行预测,得

$$\tilde{L}_i(t + \Delta t) = L_i(t) + v_{li}(t)\Delta t + 0.5a_{li}(t)\Delta t^2. \quad (8)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, 6$, \tilde{L}_i 为第 i 个支链长度的预测值, $v_{li}(t)$, $a_{li}(t)$ 分别为第 i 个支链长度变化的速度、加速度.再由6条支腿的预测长度通过并联机构的实时位置正解得出基座的预测位姿 ${}^G\tilde{\mathbf{X}}_{BR}$.

位置、速度和加速度三者之间存在线性关系,但是在传统的预测算法中,从位置或速度信号得到加速度信号,需要经过差分运算,而常规的差分运算对噪声有放大作用.为了加以改进,需要将差分算法与低通滤波相结合^[13],但是低通滤波器在抑制高频噪声的同时又会带来相位延迟,将影响系统的响应带宽,甚至破坏系统的稳定性.因此采用高质量微分信号提取功能的非线性跟踪微分器从支腿长度值列中提取支腿的速度、加速度.跟踪微分器(TD)是自抗扰控制器(ADRC)的重要组成环节^[14],其作用就是为了解决在实际工程中,由不连续或带随机噪声的测量信号合理提取连续信号及微分信号的问题.而该算法就需要从支腿长度信号中合理准确地提取出支腿的速度和加速度信号.2阶跟踪微分器的数学表达式为^[14]

$$\begin{cases} \dot{r}_1(t) = r_2(t), \\ \dot{r}_2(t) = \text{fst}(r_1(t) - r(t), r_2(t), \delta, h). \end{cases} \quad (9)$$

其中: h 为采样步长,为决定过渡过程快慢的参数.非线性函数 $\text{fst}(x_1, x_2, \delta, h)$ 的定义如下:

$$\text{fst}(x_1, x_2, \delta, h) = \begin{cases} -\delta \cdot \text{sgn } a, & |a| > d, \\ -\delta \cdot a/d, & |a| \leq d. \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; a 与 d 由下式确定:

$$a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sgn } y, & |y| > d_0, \\ x_2 + y/2, & |y| \leq d_0, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} d = h\delta, & d_0 = hd, \\ y = x_1 + hx_2, \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8\delta|y|}. \end{cases} \quad (12)$$

对于任何有界可积函数 $r(t)$,式(9)提供的两个信号 $r_1(t)$, $r_2(t)$ 能够高品质跟踪 $r(t)$, $\dot{r}(t)$,本文中参数 $\delta = 25000$,初始状态 $r_1(0) = 0$, $r_2(0) = 0$.由于本算法需要提取支腿长度的2阶微分信号,故采用两个2阶跟踪微分器串联来实现所需功能.

6 基于现代机电系统仿真模型的控制仿真(Control simulation based on the Simulation model of modern mechatronic system)

6.1 现代机电系统仿真模型(Simulation model of modern mechatronic system)

采用MATLAB的SIMULINK工具箱和多体动力学分析软件ADAMS^[15],建立柔性支撑Stewart平台的机电系统仿真模型,进行跟踪预测、控制和动力学求解的机电一体化仿真.

柔性支撑Stewart平台的主要参数为:基座平台质量为45.59 kg,运动平台质量为5.56 kg,铰接点在基座、运动平台各自坐标系中的位置矢量表示为(单位: mm):

$$\begin{cases} \mathbf{p}_i = [r_p \cos(\pm i\alpha_p/2), r_p \sin(\pm i\alpha_p/2), 0]^T, \\ \mathbf{b}_i = [r_b \cos(\pm i\alpha_b/2), r_b \sin(\pm i\alpha_b/2), 0]^T. \end{cases} \quad (13)$$

式中: $i = 1, 2, 3$, $r_p = 140$ mm, $r_b = 360$ mm为基座平台和运动平台的几何尺度; $\alpha_p = 30^\circ$, $\alpha_b = 90^\circ$ 分别为同组虎克铰、球铰所张的圆心角.虎克铰和球铰处的粘性阻尼系数 C_{ui} 和 C_{si} 均取为0.001,下部和上部支腿的质量分别是1.24 kg和3.96 kg,支撑基座平台的弹簧阻尼器刚度系数为 8×10^3 N/m,阻尼系数为535 Ns/m.电动缸采用带加速度前馈的PID控制,可以无差跟踪位置信号.Stewart平台的自适应交互PID控制参数为 $\gamma = 32.0$.

6.2 仿真结果(Simulated results)

由所建立的机电系统仿真模型性质可知, 柔性支撑Stewart平台基座和馈源平台的静平衡位置分别为

$$(0, 0, -100.86)^T (\text{mm}) \text{ 和 } (0, 0, -730.86)^T (\text{mm}).$$

启动控制系统后, 在Stewart平台基座平台上的 B_6 点施加沿 X 方向的扰动作用力 $f_X(t)$, 在 B_2 点施加沿 Y 方向的扰动作用力 $f_Y(t)$, 在 O 各点施加沿 Z 方向的力 $f_Z(t)$, 其中:

$$\begin{cases} f_X(t) = f_Y(t) = 20 \sin [2.4\pi(t - 2.0)] (\text{N}), \\ f_Z(t) = -20 \sin [2.4\pi(t - 2.0)] (\text{N}). \end{cases} \quad (14)$$

馈源平台的期望轨迹为: $(0, 0, -730.86)^T (\text{mm})$, 在控制过程中馈源平台的期望值位姿为始终保持水平. 基座与馈源平台的 X 方向的位移曲线如图3所示, 馈源平台分别采用PID($K_P = 30.2$, $K_I = 1.24$, $K_D = 6.5$)和自适应交互PID控制的情况下 X 方向的位移曲线如图4所示, 馈源平台的综合定位误差如图5所示. 限于论文篇幅, 其他自由度方向的位移曲线未在文中给出.

由图3可知, 在周期性外扰力的作用下, 基座的位移响应产生了拍现象, 拍的周期取决于外扰力频率和机构固有频率的差异, 但是由于Stewart平台基座与支腿的动力学耦合作用, 使得XYZ各方向位移响应的周期性不是十分严格.

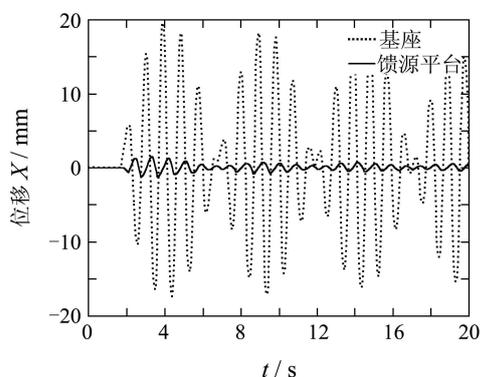


图3 基座和馈源平台分别在 X 方向的位移曲线
Fig. 3 Displacement in X direction of the base and feed platform

从隔振效果来看方向, 采用自适应交互PID隔振控制时, XYZ 各方向的振动隔离度依次为21.94 dB, 21.02 dB和22.16 dB. 从图4还可以看出, 采用自适应交互PID控制的Stewart平台隔振效果要明显优于标准PID控制, 从而证实了采用控制参数在线自适应调节的必要性. 此外, 在整个控

制过程中, 馈源平台的位姿控制结果光滑连续、稳定, 表明了所采用的控制律具有较强的鲁棒性. 图5给出了在两种控制算法下隔振过程中运动平台综合定位误差, 尽管两种控制算法虽然均达到了FAST二级精调的精度($\text{RMS} \leq 4 \text{ mm}$)要求, 但是自适应交互PID算法可以均方根值降至1.035 mm, 增大了控制精度指标的裕量, 为二级精调目标的最终实现奠定了更为坚实的基础.

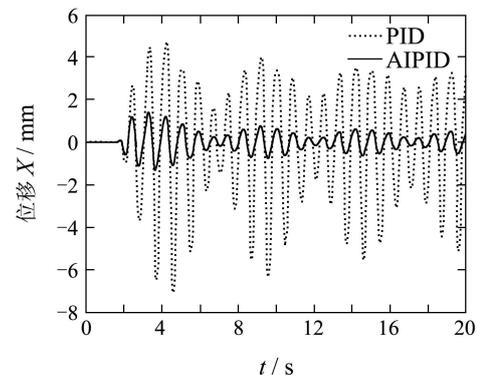


图4 两种控制作用下馈源平台在 X 方向的位移曲线(均方根值分别为3.250 mm和1.035 mm)

Fig. 4 Displacement in X direction of the feed platform with PID and AIPID control

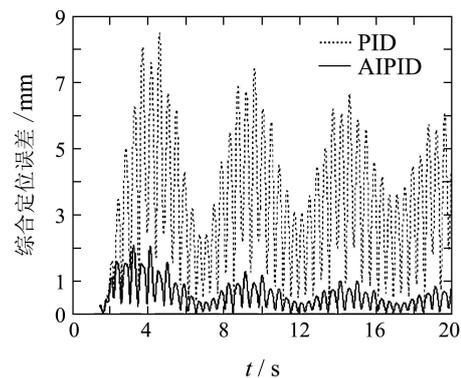


图5 两种控制作用下馈源平台的综合定位误差(均方根值分别为3.250 mm和1.035 mm)

Fig. 5 Synthesized positioning error of the feed platform with PID and AIPID control (RMS values equal 3.250 mm and 1.035 mm)

7 结论(Conclusions)

针对FAST二级精调Stewart平台隔振系统的动力学建模、基座运动的跟踪预测、控制系统的设计与仿真展开研究, 得到的主要结论如下:

1) 基于并联机构学原理的预测方法可有效地对3维机动目标的位姿进行跟踪预测, 克服了系统的控制时滞对控制精度的影响.

2) 对自适应交互算法进行线性化后的简化算法无需预知被控系统的精确模型, 就能实现系统控制性能的优化. 将自适应交互PID控制器应用到FAST二级精调隔振Stewart平台控制系统当中, 取得了较传统PID控制器更好的控制效果, 完全达到了FAST目标定位的精度要求.

3) 采用现代机电系统仿真模型可以实现复杂机电系统的动力学与控制仿真, 大大提高了研究效率.

参考文献(References):

- [1] QIU Y Y, DUAN B Y, WEI Q, et al. Optimal distribution of the cable tensions and structural vibration control of the cable-cabin flexible structure[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2002, 14(1): 39 – 56.
- [2] CHENG Y, REN G, DAI S L. Vibration control of Gough-Stewart platform on flexible suspension[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(3): 489 – 493.
- [3] 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. (HONG Jiazhen. *Computational Multibody Systems Dynamics*[M]. Beijing: High Education Press, 1999.)
- [4] HAUG E J. *Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems*[M]. Needham Heights: Allyn and Bacon, 1989.
- [5] BRANDT R D, LIN F. Supervised learning in neural networks without feedback network[C] // *Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. Dearborn: IEEE, 1996: 86 – 90.
- [6] LIN F, BRANDT R D, SAIKALIS G. Self-tuning of PID controllers by adaptive interaction[C] // *Proceeding of American Control Conference*. Chicago: IEEE, 2000: 3676 – 3680.
- [7] 邹俊, 傅新, 杨华勇, 等. 自适应交互PID在液压伺服系统中的应用[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 179 – 183. (ZOU Jun, FU Xin, YANG Huayong, et al. Application of adaptive interaction PID controller in hydraulic servo system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(11): 179 – 183.)
- [8] ANG K H, CHONG G, LI Y. PID control system analysis, design, and technology[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, 13(4): 559 – 576.
- [9] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真(第2版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. (LIU Jinkun. *MATLAB Simulation of Advanced PID Control(2nd Edition)*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.)
- [10] 段宝岩. 柔性天线结构分析、优化与精密控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (DUAN Baoyan. *Analysis, Optimization and Precise Control of Flexible Antenna Structures*[M]. Beijing: Science Press, 2005.)
- [11] CRAIG J J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*[M]. Third edition ed. MA: Prentice Hall, 2004.
- [12] 李铁民, 郑浩峻, 汪劲松, 等. 并联机床不同位形下的运动精度评价指标[J]. 机械工程学报, 2002, 38(9): 101 – 105. (LI Tiemin, ZHENG Haojun, WANG Jinsong, et al. Precision measures for various configurations of parallel kinematic machine tools[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(9): 101 – 105.)
- [13] 何玉庆, 韩建达. 基于卡尔曼滤波及牛顿预测的角加速度估计方法试验研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 226 – 232. (HE Yuqing, HAN Jianda. Experimental study of angular acceleration estimation based on Kalman filter and Newton predictor[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(2): 226 – 232.)
- [14] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007, 1(1): 24 – 31. (HAN Jingqing. Auto disturbances rejection control technique[J]. *Frontier Science*, 2007, 1(1): 24 – 31.)
- [15] 范成建, 熊光明, 周明飞. 虚拟样机软件MSC.ADAMS应用与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. (FAN Chengjian, XIONG Guangming, ZHOU Mingfei. *Application and Improvement of the Virtual Prototype Software MSC.ADAMS*[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006.)

作者简介:

段学超 (1981—), 男, 讲师, 博士, 目前研究方向为机电一体化系统优化设计与控制, E-mail: xchduan@xidian.edu.cn;

仇原鹰 (1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为机械CAD/CAE、机电光一体化, E-mail: yyqiu@mail.xidian.edu.cn.