DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.036

基于稳定性的并联机构自适应控制

鲁开讲^{1,2} 师俊平¹ 淡卜绸²

(1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048; 2. 宝鸡文理学院机电工程系, 宝鸡 721016)

【摘要】 针对并联机构存在参数变化及不可预测的未建模误差的特点,提出一种基于模型的参考自适应控制 策略。将机构系统的参数变化及未建模误差看成对实际系统的扰动,建立理想的参考模型,依靠系统状态及其误 差构造自适应反馈律,利用稳定性理论推导自适应控制律,使得实际机构与参数模型具有相同的动态特性。实例 显示,自适应控制器对参数变化及未建模误差引起的运动误差具有很好的抑制作用,保证机构对规划的目标运动 具有很高的跟踪精度。

关键词:并联机构 稳定性 自适应控制 中图分类号:TH112 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2012)01-0202-06

Adaptive Controller for Parallel Mechanism Based on Stability

Lu Kaijiang^{1,2} Shi Junping¹ Dan Bochou²

(1. School of Mechanical and Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Electromechanical Engineering Department, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, China)

Abstract

The strategy was proposed based on model and reference to adaptive control according to the properties of parameter variations and unpredictable, un-modeled error in parallel mechanism. Parameter variations and un-modeled error of mechanism system were treated as a disturbance to the practical system, an ideal reference model was established, and adaptive feedback rule was constructed depend on system status and the error. The adaptive control rule was derived by stability theory, and the practical mechanism had the same dynamic characteristics as parameter model. Example showed that adaptive controller could effectively restrain motion error which caused by parameter variations and un-modeled error, the mechanism has high tracking precision to planed target movement.

Key words Parallel mechanism, Stability, Adaptive control

引言

并联机构具有刚度精度高、承载能力强等优点, 因此在许多精密操作场合得到了广泛的应用。机构 的运动精度在很大程度上取决于动力学模型的准确 程度和控制系统的性能,然而在许多情形,并联机构 是一个变参数强耦合的高度非线性系统,尤其是一 些6自由度并联机构,这种耦合作用随机构位形变 化,并在各分支控制通道中彼此影响,给控制造成困 难,而对于少自由度机构,如果选型适当则可以完全 解耦,便于控制^[1-2]。另外实际应用中,因为不能准 确地预知机构动力学参数,如摩擦效应、运动副间 隙、构件质量及其分布,而不能得到精确的动力学模 型,导致机构实际运动与规划的目标运动之间产生 误差,很难满足高精度的使用要求。同时并联机构 输出姿态难以测量,而不能形成闭环控制。为了提 高并联机构运动跟踪精度,国内外许多学者对并联 机构动力学建模及其动力学特性进行了深入研 究^[3-5],借鉴传统工业机器人控制的成功经验,对并 联机构设计了运动控制器,实现了高精度轨迹控 制^[6-8],在许多情形,为了适应并联机构复杂的非线 性特性,采用 PID 控制,使得控制器的结构和算法过

收稿日期: 2011-05-29 修回日期: 2011-09-02

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB724406)和陕西省自然科学研究计划资助项目(2011JM7015) 作者简介:鲁开讲,博士生,宝鸡文理学院副教授,主要从事机器人动力学及其控制研究,E-mail: lkj81456@163.com

于复杂,且很难适应参数随时间变化的影响^[9-13], 对于高精度控制系统,为了抑制未建模因素对系统 性能的影响,提出了扰动补偿及自适应的方 法^[14-16]。本文针对存在参数变化及未建模误差的 情形,采用李雅普诺夫稳定性理论,推导模型的自适 应控制律,对参数变化及未建模误差进行补偿,以提 高系统的抗扰能力,使机构具有稳定的动态性能。

1 机构系统的状态空间方程

平面3自由度并联机构的运动平台,通过相同 的3条支链与基座相连,每条支链包括1个连架杆、 1个连杆和3个转动副,基座和动平台上的转动副 中心分别位于两个等边三角形的顶点上,这两个三 角形的边长分别为 *a* 和 *b*,如图1所示。机构的动力 学方程式可以写成

式中 u—主动关节输入力矩矢量, $u \in \mathbb{R}^{m}$,m = 3

x——动平台位姿, $x \in \mathbb{R}^n$,n = 3

θ——动平台的方位角

- x、y——动平台中心的坐标
- *M*——*n*×*n* 阶惯量矩阵

V——与转动关节向心加速度、哥氏加速度 有关的项, $V ∈ \mathbf{R}^n$

G——克服重力所需的关节驱动力矩, $G \in \mathbb{R}^n$

F──克服摩擦力、工作负载所需的关节驱 动力矩,F∈R^{*}



图 1 平面 3 自由度并联机构运动简图 Fig. 1 Kinematic sketch of the plannar 3-DOF parallel mechanism

如果模型是准确的,并且系统参数不变,按 式(1)计算的关节驱动力矩为机构的输入,自然能 精确实现规划的目标运动。然而,并联机构是一个 变参数强耦合的高度非线性系统,现实应用中,由于 不能准确预知摩擦效应和参数变化,而无法得到准 确模型。多数情况下,非线性方程的稳定性可以由 其一阶近似来决定,将式(1)作准线性化处理

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{\ddot{x}} + \boldsymbol{E}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\dot{x}})\boldsymbol{\dot{x}} + \boldsymbol{H}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{x}$$
(2)

- 式中 E——关节输入力矩中与速度有关的项对动 平台速度的偏导数矩阵
 - H——关节输入力矩中与速度加速度无关的 项对动平台位姿的偏导数矩阵

选取状态向量

$$\boldsymbol{x}_{p} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} & \dot{\boldsymbol{x}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^{2}$$

则系统的状态方程

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{p} = \boldsymbol{A}_{p}\boldsymbol{x}_{p} + \boldsymbol{B}_{p}\boldsymbol{u} \tag{3}$$

其中
$$A_p(x,\dot{x}) =$$

$$\begin{bmatrix} P & I \\ -M^{-1}(x)H(x) & -M^{-1}(x)E(x,\dot{x}) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$$
$$B_{p}(x) = \begin{bmatrix} Q \\ -M^{-1}(x) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n \times m}$$

式中 A_p——状态矩阵,与机构结构参数、位形、摩 擦效应及运动副间隙等因素有关

P——n×n 阶零矩阵

 B_p ——控制矩阵,与机构结构参数及位形有 关

Q——n×m 阶零矩阵

对关节的摩擦效应、参数变化等因素给予近似 或看作对系统的扰动而予以忽略,建立一个与真实 系统近似的参考模型

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{m} = \boldsymbol{A}_{m}\boldsymbol{x}_{m} + \boldsymbol{B}_{m}\boldsymbol{r} \tag{4}$$

式中 **x**_m——参数模型的状态变量,由规划的目标 运动决定

> 𝗛_m、𝘕_m→参考模型的状态矩阵和控制矩 阵,是与目标运动有关的时变矩 阵,但参数不变

r——参考模型中的控制向量

2 并联机构自适应控制器设计

为了使机构的真实运动与参考模型的目标运动 相一致,采用自适应控制的策略,由于矩阵 A_p 、 B_p 的元素存在参数变化及不可预测的未建模因素,因 而是不能直接进行调整的,为了改善机构的动态特 征,采用前馈控制与反馈控制,调整机构的输入,如 图 2 所示,控制律由前馈与反馈回路合成

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{K}\boldsymbol{r} + \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{p} \tag{5}$$

式中 K——前馈增益矩阵

F——反馈增益矩阵

将式(5)代入式(3)得

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{p} = (\boldsymbol{A}_{p} + \boldsymbol{B}_{p}\boldsymbol{F})\boldsymbol{x}_{p} + \boldsymbol{B}_{p}\boldsymbol{K}\boldsymbol{r}$$
(6)
系统的误差矢量

 $\boldsymbol{e} = \boldsymbol{x}_m - \boldsymbol{x}_p$



Fig. 2 Structure diagram of adaptive controller

由式(4)和式(6)得

$$\dot{\boldsymbol{e}} = \dot{\boldsymbol{x}}_m - \dot{\boldsymbol{x}}_p =$$

 $A_m e + (A_m - A_p - B_p F) x_p + (B_m - B_p K) r$ (7) 在理想情况下,式(7)的后两项应等于零,设 F 和 K 的理想值分别为 \overline{F} 和 \overline{K} ,故有

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_{p} + \boldsymbol{B}_{p} \overline{\boldsymbol{F}} = \boldsymbol{A}_{m} \\ \boldsymbol{B}_{p} \overline{\boldsymbol{K}} = \boldsymbol{B}_{m} \\ \boldsymbol{B}_{p} = \boldsymbol{B}_{m} \overline{\boldsymbol{K}}^{-1} \\ \boldsymbol{A}_{m} - \boldsymbol{A}_{m} = \boldsymbol{B}_{m} \overline{\boldsymbol{F}} = \boldsymbol{B}_{m} \overline{\boldsymbol{K}}^{-1} \overline{\boldsymbol{F}} \end{cases}$$
(8)

代入式(7)得

$$\dot{\boldsymbol{e}} = \boldsymbol{A}_{m}\boldsymbol{e} + \boldsymbol{B}_{m}\overline{\boldsymbol{K}}^{-1}(\overline{\boldsymbol{F}} - \boldsymbol{F})\boldsymbol{x}_{p} + \boldsymbol{B}_{m}\overline{\boldsymbol{K}}^{-1}(\overline{\boldsymbol{K}} - \boldsymbol{K})\boldsymbol{r} = \boldsymbol{A}_{m}\boldsymbol{e} + \boldsymbol{B}_{m}\overline{\boldsymbol{K}}^{-1}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{X}_{p} + \boldsymbol{B}_{m}\overline{\boldsymbol{K}}^{-1}\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{r}$$
(9)

其中 $\Phi = \overline{F} - F \quad \psi = \overline{K} - K$ 式中 $\Phi \setminus \psi$ 可调参数误差矩阵 选取李雅普诺夫函数

$$\boldsymbol{V} = \frac{1}{2} \left[\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \boldsymbol{e} + \operatorname{tr} \left(\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{1}^{-1} \boldsymbol{\Phi} + \boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{2} \boldsymbol{\psi} \right) \right] \quad (10)$$

式中 P, Γ_1, Γ_2 ——正定对称矩阵

将式(10)对时间求导

$$\dot{\boldsymbol{V}} = \frac{1}{2} \left[\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \boldsymbol{e} + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \dot{\boldsymbol{e}} + \operatorname{tr} \left(\dot{\boldsymbol{\Phi}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{1}^{-1} \boldsymbol{\Phi} + \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{1}^{-1} \dot{\boldsymbol{\Phi}} + \right. \right.$$

$$\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_{2}^{-1}\boldsymbol{\psi}+\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_{2}^{-1}\boldsymbol{\psi})]$$

将式(9)代入得

$$\dot{\boldsymbol{V}} = \frac{1}{2} \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{A}_{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} + \boldsymbol{P} \boldsymbol{A}_{m}) \boldsymbol{e} + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \boldsymbol{B}_{m}^{\mathrm{T}} \overline{\boldsymbol{K}}^{-1} \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{x}_{p} + \\ \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \boldsymbol{B}_{m} \overline{\boldsymbol{K}}^{-1} \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{r} + \frac{1}{2} \operatorname{tr} (\dot{\boldsymbol{\Phi}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{1}^{-1} \boldsymbol{\Phi} + \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{1}^{-1} \dot{\boldsymbol{\Phi}} + \\ \dot{\boldsymbol{\psi}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{2}^{-1} \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{2}^{-1} \dot{\boldsymbol{\psi}})$$

根据矩阵的性质

$$\operatorname{tr}(\boldsymbol{A}) = \operatorname{tr}(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}) \quad \boldsymbol{x}\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} = \operatorname{tr}(\boldsymbol{x}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})$$

化简得

$$\dot{\boldsymbol{V}} = \frac{1}{2} \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{P} \boldsymbol{A}_{m} + \boldsymbol{A}_{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}) \boldsymbol{e} + \operatorname{tr} (\dot{\boldsymbol{\Phi}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{1}^{-1} \boldsymbol{\Phi} + \boldsymbol{x}_{p} \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \boldsymbol{B}_{m} \overline{\boldsymbol{K}}^{-1} \boldsymbol{\Phi}) + \operatorname{tr} (\dot{\boldsymbol{\psi}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{2}^{-1} \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{r} \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \boldsymbol{B}_{m} \overline{\boldsymbol{K}}^{-1} \boldsymbol{\psi})$$

$$(11)$$

因为 A_m 为稳定矩阵,则存在正定对称矩阵Q使

 $PA_{m} + A_{m}^{T}P = -Q$ 成立,因式(11)第1项是负定的, 如果后两项也都为零,则V为负定的,为此选取

 $\dot{\boldsymbol{\Phi}} = -\boldsymbol{\Gamma}_1(\boldsymbol{B}_m \overline{\boldsymbol{K}}^{-1}) \boldsymbol{Pex}_p^{\mathsf{T}} \quad \dot{\boldsymbol{\psi}} = -\boldsymbol{\Gamma}_2(\boldsymbol{B}_m \overline{\boldsymbol{K}}^{-1})^{\mathsf{T}} \boldsymbol{Per}^{\mathsf{T}}$ 则式(11)后两项均为零,根据李雅普诺夫稳定性第 一近似理论,式(1)描述的非线性系统具有渐近稳 定的动态特征。同时 V 最终表示为

$$\dot{\boldsymbol{V}} = \frac{1}{2} \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q} \boldsymbol{e} \leq 0$$

由于 Q 是正定的,因而 $e \equiv 0$ 。机构参考模型的动力 学参数一般取为确定值或随时间慢变,因而 $\dot{F} = O$, $\dot{K} = O$ 。则可得自适应调节规律

$$\begin{cases} \dot{F} = \dot{\overline{F}} - \dot{\Phi} = \Gamma_1 \left(B_m \overline{K}^{-1} \right)^{\mathrm{T}} Pex_p^{\mathrm{T}} & (F(0) = O) \\ \dot{K} = \dot{\overline{K}} - \dot{\psi} = \Gamma_2 \left(B_m \overline{K}^{-1} \right)^{\mathrm{T}} Per^{\mathrm{T}} & (K(0) = I) \end{cases}$$
(12)

式中 0----零矩阵

可以看出,实现自适应控制必须依赖两个条件, 系统的状态(动平台的位姿及速度)是能通过检测 直接或间接测量的,这是构成自适应规律的基础,也 是构成各种闭环控制的必不可少的环节,且按 式(8)之一确定的前馈矩阵的理想值 \overline{K} 是精确的。 由式(3)可见, A_p 和 B_p 相比, B_p 仅与机构结构参数 (构件几何形状尺寸及密度)、位形有关,这些参数 可以进行准确测量,因此控制矩阵 B_p 容易且可以精 确得到,参考模型的系统矩阵 A_m 和 B_m 本身就是精 确的,从而按式(8)确定的前馈矩阵的理想值 \overline{K} 是 精确的。

动平台的运动学特征是平面运动,可以分解为 随动平台中心的平动与绕中心点的转动。为了得到 系统状态的检测值,采用如图3所示的参考方案,在 动平台中心安装心轴,心轴与动平台用键连接,具有 相同的转动,连杆空套在心轴上,在连杆和机座上加 工出导槽,连杆通过十字形滑块与机座连接,这样就 使得连杆的运动是随动平台中心的平动,而不随动 平台转动。机座上的两处导槽与机构的运动平面在 同一层次上,导槽的位置以不与机构运动部件干涉 为度,导槽的起止范围分别由动平台中心在 x、y 坐 标方向的极限位置确定。为了测量动平台的位移并 具有足够的量程,采用2个光栅位移传感器(分辨 率为0.1 µm),分别测量动平台中心在 x、y 坐标方 向的位移,光栅读数头固定在十字滑块上,标尺光栅 安装在机座上,光栅传感器得到的是代表动平台中 心位移 Δx 、 Δy 的脉冲信号,通过对数显表的对零和 标定,可以得到动平台中心的x、y坐标,同时测定相 邻脉冲的时间间隔 Δt ,就可得到动平台的平动速度 \dot{x} , \dot{y} 。为了测量动平台的转动,采用脉冲编码器(分 辨率为0.012°),脉冲编码器通过十字接头与心轴 连接,它的法兰盘固定在连杆上,编码器测得的是代 表动平台角位移 $\Delta \theta$ 的脉冲信号,同时测定相邻脉 冲的时间间隔 Δt ,就可得到动平台的转动角速度 θ 。影响测量精度的主要因素是运动副的间隙,应 用中要采取措施,减小误差。另外检测装置对机 构动力学性能的影响,可以简化为心轴处的负载 力和转矩。



图 3 检测装置安装示意图

Fig. 3 Diagram of installation of detection device

1. 标尺光栅 2. 光栅读数头 3. 法兰盘 4. 电路板 5. 光源 6. 圆光栅 7. 指示光栅 8. 调整垫片 9. 光敏元件 10. 十字槽轴 套 11. 心轴 12. 连杆 13. 动平台 14. 十字滑块

并联机构姿态的测量 1、z/2 是有一定难度的。对于最 复杂的6自由度并联机 构,动平台的运动可以分 解为随参考点 P 的平动和 绕参考点的定点转动。在 5 动平台上固连动坐标系。 $Px_iy_iz_i$,随动平台运动,又 7 在动平台参考点 P 固连平 8 动坐标系 $Px_iy_iz_i$, 它随参 考点 P 运动, 但坐标轴的 方向保持不变,始终与基 础坐标系的坐标轴对应平 行,如图4所示。动坐标 系{*j*}的方向可看作是由 平动坐标系 { i } 连续进行 3 个欧拉角旋转得到的:坐 标系 $\{i\}$ 先绕 z_i 轴旋转 α 角, 使 x_i 轴与节线 PN 重 合,节线同时垂直于zi与 10. 十字滑块 z; 轴; 再绕节线旋转β角, 12. 连杆 13. 滑块 即到达坐标系 { ; } 的方向。



图 4 动平台位置和 姿态的测量

Fig. 4 Measurement of the position and attitude of moving platform

1、6.脉冲编码器 2. 滑套 3. 心轴 4. 动平台 5. 弧形滑 块 7.连杆 8.导杆 9.连杆 11. 心轴

使 z_i 轴旋转到与 z_i 轴重合;最后绕 z_i 轴旋转 γ 角,

动平台的位姿参数包括参考点坐标 P(x,y,z)

及动平台的3个姿态角,分别称为进动角、章动角和 自转角。为了检测参考点的坐标,导杆8以球面副 连接在P点,连杆9通过移动副与杆8连接,并通过 十字滑块10与机座连接,在这3个移动副处,分别 安装光栅位移传感器,就可以测量出参考点 P 在 3 个坐标方向的位移。

采用脉冲编码器 1 测量自转角 γ,其外壳通过 球面副与机座连接。在动平台中心安装心轴3随动 平台运动,心轴和编码器的十字接头通过一个带键 槽的长套2连接,心轴可以在长套内伸缩,补偿动平 台的移动。

进动角 α 是绕 z_i 轴使 x_i 旋转到节线 PN 的转 角, PN 为坐标面 Px_iy_i 与 Px_jy_j 的交线, PN 始终处于 水平,即动平台底圆半径中处于水平的那一条。在 动平台底端加工出弧形槽,滑块5可以在弧形槽内 滑动。连杆7一端通过转动副与杆8连接,可以绕 杆8旋转,另一端与P点等高,并与滑块5以球面副 连接,因此 P 到滑块 5 的连线始终处于水平,代表 了节线的方向,连杆7绕杆8的转角即是进动角 α 。 脉冲编码器6的十字接头与杆8连接,这部分不转 动,编码器的外壳法兰固连在连杆7上,随连杆转 动。

以上两个姿态角都有明显的回转轴线,可以直 接测量。而章动角 β 是动平台绕节线的转动, 是 z_i 与 z_j轴的夹角,在动平台下方安装心轴 11,滑块 13 与杆 8 用圆柱副连接,心轴与滑块通过连杆 12 用转 动副连接,在滑块上安装光栅位移传感器,测量滑块 到 P 点距离,在 ΔPEF 中,3 条边长度已知,可以唯 一确定出姿态角 β。

以上附属于机构的检测装置,集中分布于机构 的中心部位,不容易引起它们与机构本体的干涉。 检测装置中各运动部件的行程,可以参考对机构运 动分析和工作空间解析的结果予以确定。为了提高 测量精度,需要提高运动副的制造精度,并采取间隙 消除或补偿的措施。

3 应用实例

以机构名义尺寸作为参考模型的结构参数: $a = 2554 \text{ mm}, b = 360 \text{ mm}, l_1 = 1674 \text{ mm}, l_2 = 953 \text{ mm},$ 杆直径 $d_1 = d_2 = 52 \text{ mm}_{\odot}$ 构件密度 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3_{\odot}$ 给定动平台目标运动及工作负载 $x_d = 0.2t\cos(6t)$, $y_d = 0.2t\sin(6t)$, $\theta_d = 0.3\sin(6t)$, $t \in [0, 1.05 \text{ s}]$, $F_x = F_y = 100 \text{ N}, M = 60 \text{ N} \cdot \text{m}_{\odot}$

按式(1)求得各主动关节驱动力矩,用于对参 考模型进行开环控制,理论上机构能实现给定的目 标运动。用四阶 Runge - Kutta 方法求解微分方程 (式(4)),实际轨迹与目标运动累积误差小于 2 mm,这是由每步截断误差累积的总体误差。

现实中系统动力学方程不可能完全准确,实际参数与模型参数不一致,如果将各杆的长度和 直径增加 2%,基础平台边长增加 3%,动平台边 长和厚度减少 5%,按前面确定的关节驱动力矩输 入,同样采用四阶 Runge - Kutta 法求解实际机构 的运动,如图 5 所示,实际轨迹逐渐偏离了目标运动,跟踪误差越来越大,远远大于数值方法的总体 误差,这是由参数扰动引起的动态性能的较大波动。



Fig. 5 Actual trajectory of the moving platform center

采用图 2 的自适应控制策略增加前馈和反馈 环节,由于缺少机构实体模型,状态变量 x_p 无法依 靠检测获得,而是按式(2)求得后代替状态变量的 测量值,这样做并不影响方法的效果,按式(12)及 式(5)求得自适应控制律,作为实际机构的输入。 自适应控制下,动平台的实际轨迹如图 6 所示,实 际轨迹与目标运动接近并多次交汇,因而实际轨 迹不会偏离目标运动太远,在自适应规律作用下, 又能返回目标运动,符合渐进稳定的动态特征,使 机构保持了较高的跟踪精度,最大累积误差 6.968 mm,它是状态计算的数值微分和控制律计 算的数值积分以及参数变化三方面误差的综合表 现。图 7 给出了动平台的速度特征,实际运动速 度与目标运动速度误差更小。在具备实体模型和 传感元件时直接测量状态变量作为反馈,这样状 态矩阵 *A_p* 可以是未知的,达到对未建模误差进行 补偿的效果。



4 结束语

利用自适应控制策略,增加前馈和反馈环节,在 机构系统参数变化或存在不可预测的未建模误差的 情况下,通过调整机构的输入,依然能保证机构对目 标运动具有很高的跟踪精度,机构的动态特征是李 雅普诺夫意义下的渐进稳定,具有很高的抗扰能力。 控制器结构简单,控制能量小,变化平稳,工程上容 易实现。状态检测是构成各种闭环控制的必不可少 的环节,给出了状态检测的参考方案,为其它构型的 机构状态检测提供了参考。

参考文献

- 杭鲁滨,王彦,杨廷力. 一种新型三平移一转动解耦并联机构分析[J]. 中国机械工程,2004,15(12):1035~1038.
 Hang Lubin, Wang Yan, Yang Tingli. Analysis of a new type 3 translations-1 rotation decoupled parallel manipulator [J].
 China Mechanical Engineering, 2004, 15(12):1035~1038. (in Chinese)
- 2 杨启志,郭宗和,马履中,等. 三平移全柔性微动机器人机构的位置运动分析[J]. 农业机械学报,2006,37(11):96~99. Yang Qizhi, Guo Zonghe, Ma Lüzhong, et al. Kinematics of a novel 3-DOF translational fully compliant parallel micromanipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 96~99. (in Chinese)
- 3 刘爽,郭希娟,刘彬. 4-RR(RR)R并联机构的动力学性能指标分析 [J]. 机械工程学报,2008,44(7):63~68. Liu Shuang, Guo Xijuan, Liu Bin. Analysis of dynamic performance indices of 4-RR(RR)R parallel mechanism [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(7):63~68. (in Chinese)
- 4 Guo Xijuan, Chang F Q. Acceleration and dexterity performance indices for 6-DOF and lower-mobility parallel mechanism [J]. ASME 2004 DETC, 2004, 4:851 ~ 855.
- 5 Xu Younan, Xi F F. A real-time method for sowing the forward kinematics of a tripod with fixed-length legs [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(1):1~9.
- 6 Sirouspour M R, Salcudean S E. Nonlinear control of a hydraulic parallel manipulator [J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001(4): 3760 ~ 3765.
- 7 张秀峰,孙立宁. 精密并联机器人控制算法及控制系统研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 177~180. Zhang Xiufeng, Sun Lining. Research of precise parallel robot control method and system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 177~180. (in Chinese)
- 8 Oh S R, Agrawal S K. A reference governor based controller for a cable robot under input constraints [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4): 639 ~ 645.
- 9 孔德庆,黄田,张洪波,等.考虑交流伺服电机动力学特性的并联机构鲁棒轨迹跟踪控制方法研究[J].自动化学报, 2007,33(1):34~43.

Kong Deqing, Huang Tian, Zhang Hongbo, et al. Dynamic modeling and robust trail tracking control of 3-DOF translational parallel kinematic machine driven by AC servo motors [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(1): 34 ~43. (in Chinese)

- 10 Su Y X, Duan B Y. The application of Stewart platform in the large spherical radio telescope [J]. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(7): 375 ~ 383.
- 11 Fang S, Franitza D, Torlo M, et al. Motion control of a tension-based parallel manipulator using optimal tension distribution [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(3): 561 ~ 568.
- 12 Dong Hwan Kim, Jiyoon Kang, Kyoil Lee. Robust tracking control design for a 6 DOF parallel manipulator [J]. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(10): 527 ~ 547.
- 13 Mao L N, Meng J E. Comment on "a new robust control for a class of uncertain discrete-time systems" [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(3): 509 ~ 511.
- 14 Alter D M, Tsao T C. Control of linear motors for machine tool feed drives: design and implementation of optimal feedback control [J]. ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, 1996, 118(4): 649 ~ 656.
- 15 Li Xu, Bin Yao. Adaptive robust precision motion control of linear motors with negligible electrical dynamics: theory and experiments [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2001, 6(4): 444 ~ 452.
- 16 赵杰,杨永刚,刘玉斌. 高精度轨迹跟踪的 6-PRRS 并联机器人自抗扰控制研究[J]. 控制与决策,2007,22(7):791~794. Zhao Jie, Yang Yonggang, Liu Yubin. 6-PRRS parallel robot of auto-disturbance rejection controller on high-precision trajectory tracking [J]. Control and Decision, 2007, 22(7): 791~794. (in Chinese)
- 17 贾晓辉,田延岭,张大卫. 3 PRR 柔性并联机构动力学分析[J]. 农业机械学报,2010,41(10):199~203.
 Jia Xiaohui, Tian Yanling, Zhang Dawei. Dynamics analysis of 3 PRR compliant parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(10):199~203. (in Chinese)
- 18 崔国华,李权才,张艳伟,等. 空间转动 4 SPS-1-S型并联机构动力学性能指标分析[J]. 农业机械学报,2010, 41(7):214~218.

Cui Guohua, Li Quancai, Zhang Yanwei, et al. Dynamic performance indices analysis of 4 - PS - 1 - S spatial rotation parallel manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 214 ~ 218. (in Chinese)