

文章编号 1004-924X(2006)03-0456-07

双重驱动 2-DOF 平面并联机器人系统的研究

楚中毅¹, 崔晶², 孙立宁³, 曲东升³

(1. 清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084; 2. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084;
3. 哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要:研制了一种新颖的高速高精度柔性机器人机构。采用高速精密直线电机驱动 2-DOF 平面并联压电智能杆机构, 针对柔性机器人机构的振动问题, 以直线伺服电机作为机器人的主驱动源实现高速精密点位控制并采用脉冲整形技术减小末端残余振动, 以压电陶瓷作为从驱动源采用闭环反馈控制策略抑制末端残余振动。实验研究和测试结果表明: 机器人系统的最大加速度为 2 g, 稳定时间小于 150 ms, 重复定位精度小于 $\pm 5 \mu\text{m}$, 实现了高速高精度的点位控制。

关键词: 柔性机器人; 振动抑制; 双重驱动

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Research of a novel dual-driven 2-DOF planar parallel robot

CHU Zhong-yi¹, CUI Jing², SUN Li-ning³, QU Dong-sheng³

(1. *Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
2. *Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
3. *Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China*)

Abstract: A novel high speed/high precision robot with two permanent linear motors driven a 2-DOF planar parallel piezo smart mechanism was proposed. By taking a linear motors as master driver to realize fast precision positioning in large displacement motion and by preshaping input command technique to suppress vibration, and using a piezo as slave driver and closed loop feedback controller to restrain residual vibration, the dual driving structure could suppress the vibration of robot ideally. Experiment results indicate that this approach realizes high performance point-to-point control precisely, the maximum acceleration is 2 g, steady time is less than 150 ms, and repeatability is less than $\pm 5 \mu\text{m}$.

Key words: flexible robot; vibration control; dual driving

1 引言

随着机器人应用领域的不断扩大,人们不仅要求机器人具有质量轻、载荷/自重比高、能耗低

等特点,而且还要求其能够快速精密的定位,从而对机器人机构的设计提出了更高意义上的要求。然而,运动速度和加速度的不断增大,使得机器人惯性力增大;而杆件轻型化,又使其在高速运动时不可避免地产生振动,从而降低系统精度并延长

收稿日期:2005-05-07;修订日期:2005-09-24.

基金项目:国家“863”计划资助(No. 2001AA423110)。

稳定时间。所以,抑制轻质柔性机器人的振动,提高系统位置分辨率和精密定位精度,实现高速、高精度操作是柔性机器人研究的主要问题。

柔性机器人机构抑振主要有两种方法:被动抑振和主动抑振。被动抑振通常是指系统的被动阻尼设计,其目标就是最大程度地吸收并耗散所关心频段内模态的应变能^[1]。这种方法虽然在一定程度上减少了机器人的振动,但仍存在着诸多缺点:被动减振器件的体积较大,增大了机器人机构的体积和重量,受到操作空间的限制;不能自动适应不确定因素引起的振动,当工作环境、操作负载等发生变化时,不能自动调整参数以适应外界的变化。

主动抑振方法克服了上述缺点,其与被动抑振的区别在于它是一种有源控制,具有明显的反馈回路。用于主动抑振的智能结构中,多用压电材料作传感器和驱动器^[2],将其贴于梁、板、壳等结构元件的表面或嵌入内部,在受到交变电场的作用时,产生交变的伸缩变形^[3-4],当它与由于结构振动而引起的变形相反时,产生控制作用,从而抑制结构振动。

此外,输入指令整形减振技术^[5]作为一种简单实用的开环控制方法在柔性机构的抑振中得到了大量的应用。它通过对输入系统的指令信号进行整形处理,将系统的指令输入和脉冲序列进行卷积,产生一个整形后的输入来实现振动抑制的目的。

本文针对 IC 制芯关键装备、IC 后封装设备对高速高精度作业系统的需求,研制出一种结构紧凑、简单实用的新型 2-DOF 平面并联机器人,即采用直线电机驱动-平面并联压电智能杆机构。该系统采用直线电机作为机器人的主驱动源实现高速精密点位控制并采用脉冲整形技术减小末端残余振动,以压电陶瓷作为从驱动源采用闭环反馈控制策略抑制末端残余振动。最后进行了实验研究和系统测试,结果表明,基于双重驱动思想可以有效抑制柔性机器人机构的残余振动,实现高速高精度的点位控制。

2 2-DOF 平面并联机器人系统及其模型

2-DOF 平面并联机器人^[6]机构如图 1 所示,

采用两直线电机驱动一平面并联杆机构,直线电机的位置反馈信号由内部光栅提供,压电陶瓷作为驱动器对称粘贴于两并联杆中部两侧,电阻应变片作为传感器测量该处的变形情况,构成一典型的压电智能结构,使其具有一定的驱动和测量功能,充分体现了驱动、机构、测量一体化的设计思想。该系统的结构框图如图 2 所示。

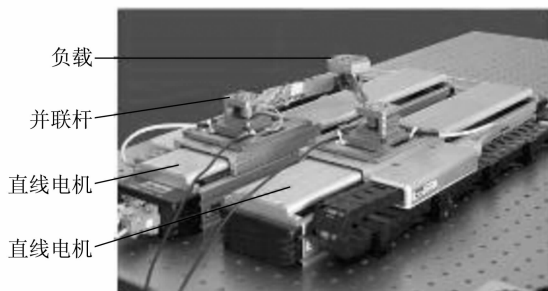


图 1 2-DOF 平面并联机器人
Fig. 1 2-DOF planar parallel robot

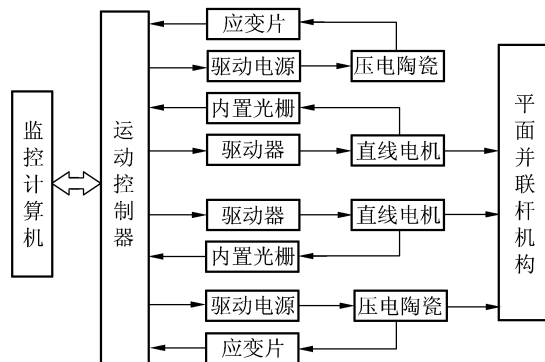


图 2 系统结构框图
Fig. 2 Structural diagram

采用有限元分析方法,通过引入单元位移和电势的场函数,依据 Hamilton 虚功原理,可建立智能结构的动力学方程^[7]:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{V} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{V} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{uv} \\ K_{uv}^T & K_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ V \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ G \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中:

- M ——质量矩阵;
- C ——阻尼矩阵
- K_{uu} ——结构刚度矩阵
- K_{uv} ——压电耦合矩阵
- K_{vv} ——介电系数矩阵

\mathbf{u} 、 \mathbf{V} ——系统的结点位移和电势向量

采用 Guyan 凝聚方法,将电势自由度凝聚掉,可得修正后的系统动力学方程:

$$[M]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [C]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [K]\{\mathbf{u}\} = \{F_s\} + \{F_p\}, \quad (2a)$$

$$[K] = [K_{uu}] - [K_{uv}][K_{vv}^{-1}][K_{vu}^T]. \quad (2b)$$

其中, $\{F_p\}$ 是智能结构的电载荷部分。

电阻应变片的传感方程为:

$$\varepsilon = [B_u]\{\mathbf{u}\}|_X$$

$$[B_u] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} [N^u]^T, \quad (3)$$

下标 X 为应变片粘贴的位置, N^u 对应位移型函数。

对式(2)作变换

$$\{\mathbf{u}\} = [\Phi]\{\eta\}, \quad (4)$$

将式(2)转化到模态空间,在比例阻尼情况下,可得智能结构的平衡方程:

$$\{\ddot{\eta}\} + [\mathbf{A}]\{\dot{\eta}\} + [\mathbf{Q}]\{\eta\} = \{F_s'\} + \{F_p'\}, \quad (5)$$

$$\{F_s'\} = [\Phi]^T \{F_s\}, \{F_p'\} = [\Phi]^T \{F_p\}. \quad (6)$$

式中

$[\Phi]$ ——模态向量;

$\{\eta\}$ ——与之对应的模态坐标;

$[\mathbf{Q}] = \text{diag}\{\omega_i^2\}$ ——系统固有频率矩阵;

$[\mathbf{A}] = \text{diag}\{2\xi_i\omega_i\}$ ——系统模态阻尼矩阵;

F_s' ——系统模态力;

F_p' ——模态控制力

模态坐标下电阻应变片的传感方程为:

$$\varepsilon = [B_u] \sum_{k=1}^n \phi_k(X) \eta_k(t) = \sum_{k=1}^n H_k \eta_k$$

$$H_k = [B_u] \phi_k(X), \quad (7)$$

当采用闭环反馈控制时,电载荷可以看成反馈控制力。考虑智能结构及其控制系统的特点,本系统采用比例反馈和微分反馈两种控制律,基于模态控制理论方法,仅对系统前 n_c 阶模态进行

控制,由式(6-7)可得实际比例微分控制器的增益描述的模态控制力参数:

$$\{F_p'\} = [\Phi]^T \sum_{k=1}^{n_c} (K_{pk} - K_{dk} d/dt) [B_u]$$

$$\phi_k(X) \eta_k = -[K_p]\{\eta\} - [K_d]\{\dot{\eta}\}, \quad (8)$$

式中, K_p 、 K_d 分别为比例、微分反馈增益系数。将式(8)代入到式(5)整理后可得:

$$\{\ddot{\eta}\} + ([\mathbf{A}] + [K_d])\{\dot{\eta}\} + ([\mathbf{Q}] - [K_p])\{\eta\} = \{F_s'\}, \quad (9)$$

由上式可得,采用比例反馈控制规律,相当于在原系统的刚度阵上加了一个修正项,调整 $[K_p]$ 会改变系统的刚度阵,从而改变智能结构的动态特性,达到结构振动抑制的目的。采用微分反馈控制律后,系统的阻尼项由两项组成,一项是智能结构本身的模态阻尼,另一项是由反馈控制力引起的等效阻尼。调整 $[K_d]$ 会改变系统的总阻尼,从而改变结构的瞬态响应,达到结构振动抑制的目的。

3 控制系统设计

机器人主驱动源采用快速、精密的直线电机,避免了滚珠丝杠(齿轮、减速器)等传动机构中的反向间隙、惯性和刚度不足等缺点,可获得高速、高精度的位移运动。但由于直线电机是直接驱动型的,推力波动、摩擦力等非线性因素会对控制性能产生较大影响^[8-9]。为解决这些问题,本系统引入扰动观测器进行扰动补偿,抑制外部扰动的影 响。直线电机控制器的结构框图^[10]如图 3 所示,控制器由前馈环节和反馈环节构成。整形器设计在前馈环中,反馈控制器由速度环和位置环构成,均采用比例控制律。速度信号通过位置差分获得,扰动观测器设计在速度环中,保证控制器具有良好的速度响应,同时可对外部扰动进行有效抑制。

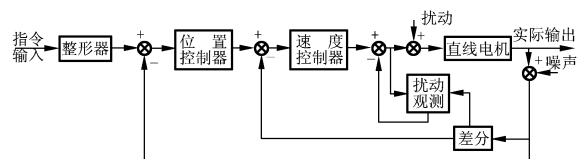


图 3 直线电机控制器结构框图

Fig. 3 Controller of linear motor

系统以压电陶瓷作为从驱动源,采用电阻应

变片的测量信号作为反馈,采用经典 PD 控制器对压电陶瓷进行闭环反馈控制。

3.1 输入指令整形技术的减振原理及整形器的设计

为描述简单,假设只考虑系统一阶模态影响,即认为系统是一简单的二阶振荡环节。二阶环节均具有两个共轭极点,其对脉冲响应的输出为衰减的正弦波形,如图 4(a)所示,其表达式为:

$$y(t) = \left[A \frac{\omega_0}{\sqrt{1.0 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega_0 (t - t_0)} \right] \sin(\omega_0 \sqrt{1.0 - \zeta^2} (t - t_0)), \quad (10)$$

式中 A —— 输入脉冲的幅值;
 ω_0 —— 被控对象的无阻尼固有频率;
 ζ —— 被控对象的阻尼比;
 t_0 —— 输入脉冲发生的时刻

为消除振荡,如图 4(b)所示,可在第一个脉冲输入信号(即输入指令信号的瞬时值)结束后的半个振动周期的时刻再输入一个脉冲信号,如果控制这个滞后的脉冲信号与前一个脉冲信号的振动幅度差正好是第一个脉冲经过半个振荡周期后的衰减量,那么如图 4(c)所示,两个脉冲响应叠加后,系统在第二个脉冲输入结束后可实现无振动运动,这就是输入指令整形技术的减振原理。

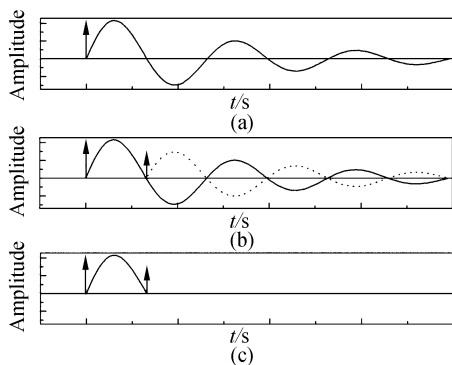


图 4 输入指令整形技术减振原理

Fig. 4 Principles of input preshaping command

采用数学符号来描述图 4 的结果,即将两个分别由公式(10)表达的脉冲响应相叠加,类似地,对于 N 个脉冲输入的振动幅值响应可以表示为:

$$A_{amp} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N B_j \cos \phi_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N B_j \sin \phi_j \right)^2}, \quad (11a)$$

$$\phi_j = \omega \sqrt{10 - \zeta^2} \cdot t_j, \quad (11b)$$

式中 B_j —— 表达式(10)中正弦项的系数;
 t_j —— 对应脉冲发生的时刻;
 ω —— 固有频率

要使脉冲序列输入结束后系统实现无振动运动,要求正弦响应的幅度 A_{amp} 在脉冲序列结束时刻 t_N 衰减为零,即:

$$B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2 + \dots + B_N \cos \phi_N = 0, \quad (12a)$$

$$B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2 + \dots + B_N \sin \phi_N = 0, \quad (12b)$$

$$B_j = A_j \frac{\omega}{\sqrt{1.0 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega (t_N - t_j)}. \quad (12c)$$

如果选择 N 个脉冲组成的输入信号,那么方程组(12)含有 N 项。对于两脉冲输入的情况,公式(12)中仅包括两项。如果选择第一个脉冲发生的时刻 t_1 为时间零点,那么公式(12)中的两个未知数 t_2 和 A_2 就可以求得,方程式的解就生成了如图 5 所示的脉冲序列。如此生成的脉冲整形器称之为 ZV (Vibration Zero) 输入整形器,类似也可得到多脉冲输入的整形器结构^[5]。通过分析可以看出,整形器的设计关键在于确定两个参数:系统固有频率和阻尼比,并由此可以确定参数 K 和 ΔT 。

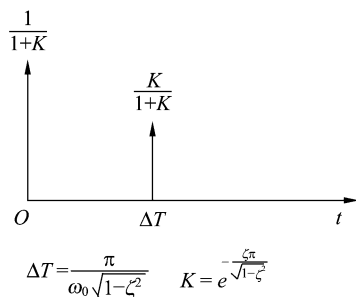


图 5 ZV 整形器的设计

Fig. 5 Design of ZV shaper

3.2 扰动观测器

扰动观测器如图 6 所示,其中 u , d , n 和 v 分别为指令,扰动,噪声和输出。信号 \tilde{d} 和 d_f 分别为低通滤波器 Q 滤波前后的扰动估计, $G_n(s)$ 为系统的标称模型,一般为实际系统 $G_p(s)$ 的低阶近似模型。通常,实际系统中的时间延迟不包含在该标称模型。

基于低通性能与稳定性考虑,一般采用三阶低通滤波器,其形式为:

$$Q(s) = \frac{3\tau s + 1}{\tau^3 s^3 + 3\tau^2 s^2 + 3\tau s + 1}, \quad (13)$$

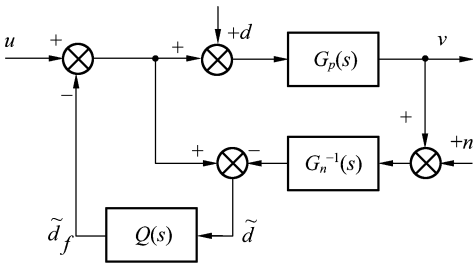


图 6 扰动观测器

Fig. 6 Disturbance observer

为减小时间延迟对扰动观测器带宽的影响,本系统在离散域内对扰动观测器进行设计。考虑系统中的时间延迟,被控对象可表示为:

$$G_n(z^{-1}) = \frac{z^{-p} B_n(z^{-1})}{A_n(z^{-1})}, \quad (14)$$

低通滤波器 $Q(s)$ 采用双线性变换离散化,得到的离散形式的扰动观测器如图 7(a) 所示,实际应用中采用其等效的实现形式^[11],如图 7(b) 所示。

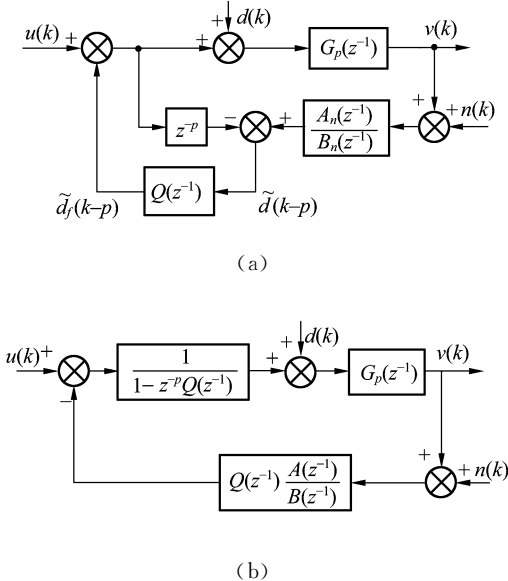


图 7 离散域内的扰动观测器

Fig. 7 Discrete disturbance observer

4 实验研究和系统测试

实验系统的结构框图如图 2 所示,直线电机为 Parker 公司的永磁无刷直流伺服电机,其位置反馈采用电机内置的精密光栅,分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$,实时控制的采样周期为 $0.5 \mu\text{s}$ 。柔性杆和陶瓷片的物理参数见表 1。直线电机 1 和 2 的轨

道中心距 $S = 140 \text{ mm}$ 。经试验测试,速度环约有 $0.9 \sim 1.1 \text{ ms}$ 的时间延迟,为此在扰动观测器的设计中引入 2 个单位时间延迟,低通滤波器的带宽为 125 Hz 。

表 1 柔性杆和压电陶瓷的物理参数

Tab. 1 Parameters of flexible link and PZT

	长 (mm)	宽 (mm)	厚 (mm)	密度 (kg/m^3)	杨氏模量 (N/m^2)
柔性杆	190	25	1	2700	7.0×10^{10}
压电陶瓷	25	20	1.5	7100	7.0×10^{10}

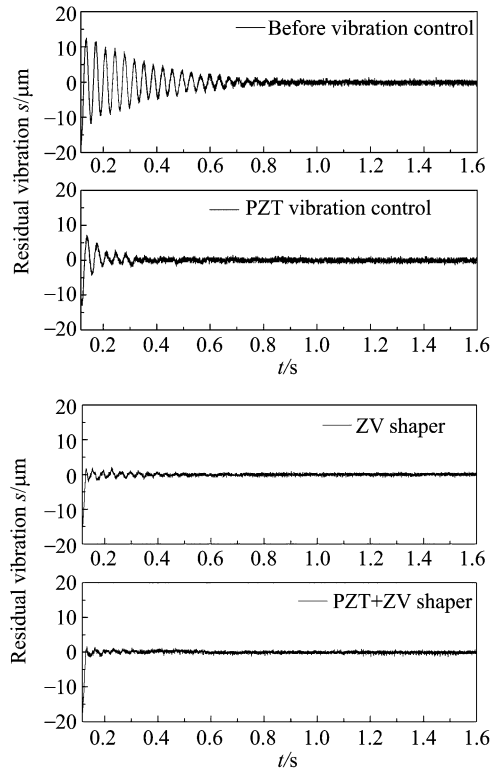


图 8 同向运动下杆末端残余振动的比较

Fig. 8 Comparison of residual vibration under same direction motion of motors

实验中两直线电机采用行程为 20 mm 、最大速度 0.5 m/s 、最大加速度 2 g 的钟型运动曲线。图 8 为采用德国 polytec 仪器测试的振动控制前后末端的残余振动曲线,当两电机反向运动时的试验结果见图 9。

从图中可以看出,采用输入命令整形减振技术和压电陶瓷相结合的抑振策略,克服了采用单一输入指令整形技术无法有效抑制两电机反向运动时残余振动的缺点,并进一步提高了单纯采用

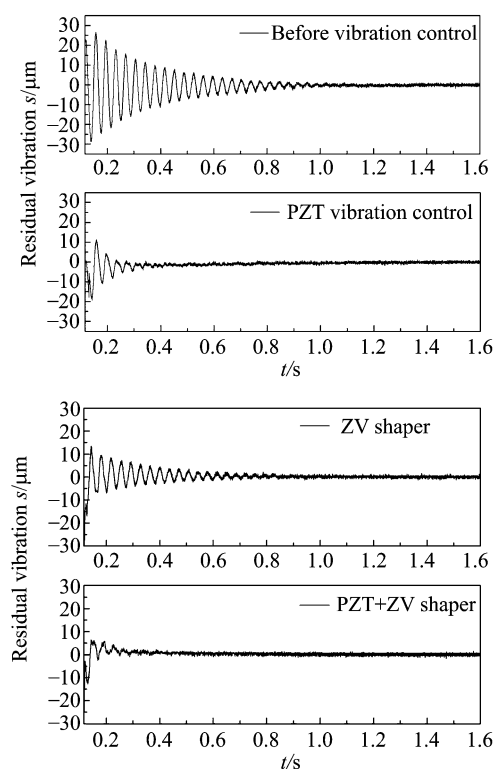


图 9 反向运动下杆末端残余振动的比较

Fig. 9 Comparison of residual vibration under reverse direction motion of motors

压电陶瓷驱动的抑振效果。双重驱动控制下,两电机同向运动时系统的稳定时间从振动抑制前的 430 ms 缩短到 40 ms;反向运动时从振动抑制前的 640 ms 缩短到 115 ms。

最后根据 GB12645-90 进行了性能测试,在 100×100 工作空间的对角线设置 5 个测试点,采用德国 Micro Epsilon 公司的 capaNC DT 620 型非接触式电容测微仪对各点位姿重复性进行测试,根据 GB/T12642 所规定的公式对 30 次测量数据进行计算,得到各点重复定位精度如表 2 所

示,采用 polytec 测振仪对各点位姿稳定时间进行测试,重复 3 次后取平均值,各点进入 $\pm 5 \mu\text{m}$ 稳定域的稳定时间如表 3 所示,从表 2、3 可以看出,系统重复定位精度小于 $\pm 5 \mu\text{m}$,稳定时间从振动抑制前的 430 ms 缩短到振动抑制后的 150 ms。

表 2 重复定位精度(μm)

Tab. 2 Repeatability(μm)

负载	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
0.25 kg	1.43	1.12	1.12	2.52	4.19

表 3 位姿稳定时间(ms)

Tab. 3 Stable time(ms)

测试点	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
抑振前	101	118	423	130	165
抑振后	40	40	150	63	80

5 结束语

柔性机器人机构由于具有轻质、高效、低能耗的特点,受到人们的普遍重视,但其振动问题是影响其性能的关键所在,本文针对 IC 制芯关键装备、IC 后封装设备对高速高精度作业系统的需求,基于双重驱动的思想研制出一种新型 2-DOF 平面并联机器人,并进行了实验研究,实验结果证明了采用直线电机和压电陶瓷双重驱动实现高速高精度点位控制的可行性。系统测试结果表明,2-DOF 平面并联机器人的最大加速度为 2 g,稳定时间小于 150 ms,重复定位精度小于 $\pm 5 \mu\text{m}$,实现了高速高精度的点位控制。

参考文献:

- [1] JOHNSON C D. Design of passive damping system [J]. *Special 50th Anniversary Design Issue. Transaction of ASME*, 1995, 117(1):171-176.
- [2] TZOU H S, ZHONG J P, HOLLKOMP J J. Spatially distributed orthogonal piezoelectric shell actuator theory and application[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 177(3):363-378.
- [3] 曲东升, 荣伟彬. 压电陶瓷微位移器控制模型的研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6):602-607.
QU D SH, RONG W B. Research on the control model of piezoelectric micro positioning actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6):602-607. (in Chinese)
- [4] 张涛, 孙立宁, 蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(5):26-32.

- ZHANG T, SUN L N, CAI H G. Study on the characteristics of piezoelectric element[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(5): 26-32. (in Chinese)
- [5] SINGER N C, SEERING W P. Preshaping command inputs to reduce system vibration[J]. *Journal of Dyn. Syst. Mea. & Con.*, 1990, 112(1): 76-82.
- [6] 楚中毅. 高速高精度平面并联机器人动力学建模及主动抑振的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
CHU ZH Y. *Dynamics modeling and active vibration control of high speed/high precision planar parallel robot* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
- [7] 孙立宁, 楚中毅, 曲东升, 等. 压电智能结构有限元动力方程及其振动主动控制的研究[J]. *高技术通讯*, 2004, 14(11): 61-64.
SUN L N, CHU ZH Y, QU D SH, *et al.* Research of finite element dynamical model and active vibration control for piezo smart structure[J]. *High Technology Letters*, 2004, 14(11): 61-64. (in Chinese)
- [8] ALTER D M, TSAO T C. Control of linear motors for machine tool feed drives: Design and implementation of optimal feedback control[J]. *ASME J. Dynamic Syst., Meas., Contr.*, 1996, 118(3): 649-656.
- [9] TAN K K, LEE T H. Precision motion control with disturbance observer for pulse width-modulated-driven permanent-magnet linear motors[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2003, 39(3): 1813-1818.
- [10] 崔晶. 两自由度平面并联机器人控制方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
CUI J. *Study on 2-DOF planar parallel robot control system* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
- [11] 孙立宁, 崔晶, 曲东升, 等. 基于离散型扰动观测器的直线电机控制研究[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(12): 164-167.
SUN L N, CUI J, QU D SH, *et al.* Research of discrete-time disturbance observer for linear motor[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(12): 164-167 (in Chinese)

作者简介: 楚中毅(1977—), 男, 河北清河人, 2000年毕业于哈尔滨工业大学机器人研究所, 现为清华大学计算机科学与技术系博士后, 主要研究方向为机器人动力学及控制等。