

直线超声电机驱动的并联微夹持器的振动控制*

耿冉冉¹, 姚志远², 徐豪², 张阳阳²

(1. 南京工程学院工业中心、创新创业学院 南京, 211167)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 针对直线超声电机驱动的并联微夹持器手指的振动问题,提出了一种基于状态反馈的主动控制方法来抑制微夹持器手指的振动,提高了微夹持器的稳定性。首先,利用有限单元法建立了微夹持器系统中圆盘与活动手指的动力学模型,并推导其状态方程;其次,分析该振动系统的能控性和稳定性,采用极点配置法得到状态反馈矩阵,设计了振动反馈控制律,通过 Simulink 对该反馈系统进行仿真分析,验证了主动控制对手指振动的抑制效果;最后,利用该控制系统分别对微米级的钢珠以及茶花花粉细胞进行夹取实验。结果表明,该主动控制策略下微夹持器的夹持性能及稳定性能够满足微纳定位精度的要求。

关键词 微夹持器;直线超声电机;振动控制;状态反馈

中图分类号 TP24; TH113

引言

近些年来,微夹持器作为微观世界的探索和操作工具,成为国内外学者研究的热点^[1],对其操作性能的要求也越来越高。压电作动器具有体积小、位移精度高、响应快等特点,作为驱动器被广泛应用于微夹持器中^[2-3]。压电陶瓷迟滞现象带来的非线性问题很大程度上影响了压电作动器的定位精度^[4]及微操作的精度,学者们对此进行了大量研究。Tang 等^[5]利用 Preisach 理论对压电驱动器建立了非线性模型,提出了一种前馈非线性比例积分微分(feed-forward nonlinear proportion-integration-differentiation,简称 FNPID)控制策略。胡俊峰等^[6]针对压电驱动器的迟滞现象,提出一种前馈补偿与反馈调节相结合的复合控制算法。目前,大部分控制方法主要针对旋转式超声电机,而直线超声电机结构形式多样、工作方式复杂多变,很难建立精确的数学模型。另外,超声电机瞬时输出力大、作用时间极短,使微夹持器末端产生振动,影响精度。文献[7-8]通过建立操作手的摩擦模型和运动速度模型来抑制操作手的振动。张阳阳等^[9]构造了微夹持器手指尖端振动的参数化模型,通过改变结构参数抑制其振动。随着对微夹持器控制精度要求的提高,被动控制难以满足其高精度要求,因此需要主动控制来满足其

性能指标。张泉等^[10]提出了采用比例微分(proportion-differentiation,简称 PD)反馈控制器和应变率反馈(strain rate feedback,简称 SRF)控制器相结合的混合控制方法来抑制并联机器人的柔性杆残余振动,提高了平台的定位精度。

直线超声电机具有运行速度快、不受磁场干扰、断电自锁和纳米级的位移分辨率等优点^[11],将其作为微夹持器的驱动器可提高系统的运行效率,提升操作空间^[12]。由于直线超声电机具有瞬时输出力大、作用时间极短的特点,故使微夹持器的振动变得难以控制。因此,如何控制微夹持器手指的振动成为目前急需解决的一个问题。笔者针对该问题提出了一种主动控制策略,采用状态反馈法设计了振动反馈控制律,通过 Simulink 对该反馈系统进行仿真。利用该控制器对钢珠以及花粉进行抓取实验,提升了微夹持器的夹持性能和稳定性。

1 微夹持器振动物理模型

1.1 微夹持器主体结构

图 1 为微夹持器主体结构示意图,可按其工作状态分为固定部分和运动部分。固定部分主要包括手臂、固定手指和直线超声电机定子;运动部分包括电机动子(导轨)、圆盘和活动手指。

* 国家自然科学基金资助项目(52075261);江苏省自然科学基金资助项目(BK20191018);江苏省高等学校自然科学基金研究重大资助项目(20KJA510007)

收稿日期:2020-08-28;修回日期:2020-12-16

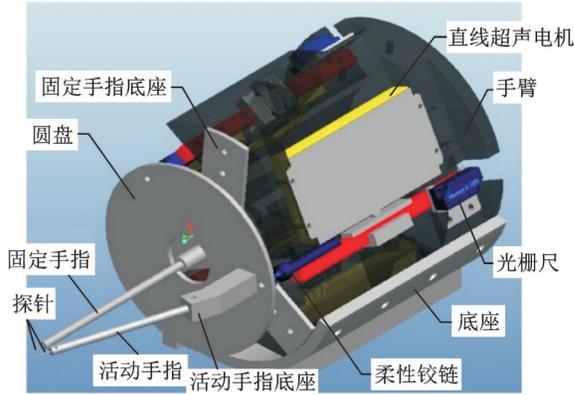


图1 微夹持器的主体结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the microgripper

为避免出现传统传动机构中存在的摩擦磨损、间隙、传动误差等问题,采用柔性铰链将导轨与圆盘连接。通过驱动直线超声电机实现圆盘的翻转和平移,进而驱动固定在圆盘上的手指进行微操作。在2个手指端部装有探针,用于抓取微小物体。在导轨末端安装光栅尺用以实时反馈超声电机的输出位移。

1.2 基于物理坐标的状态方程

直线超声电机通过驱动与圆盘相连接的柔性铰链发生弯曲变形,进而完成活动手指的运动。简化的手指物理模型如图2所示。该模型包括活动手指、固定手指、圆盘及柔性铰链。将电机的驱动简化为作用在柔性铰链端部的位移激励,令电机作用在圆盘上的等效控制力为 u 。圆盘与活动手指在工作过程中主要发生弯曲和转动,故笔者将其假设为梁结构。忽略梁的轴向振动,利用有限单元法得到其结构动力学方程为

$$\mathbf{K} = \frac{EI_2}{l_2^3} \begin{bmatrix} 12r_1 + 12 \cos^2 \theta & -6l_1r_1 - 6l_2 \cos \theta & -12 \cos^2 \theta & -6l_2 \cos \theta \\ -6l_1r_1 - 6l_2 \cos \theta & 4l_1^2r_1 + 4l_2^2 & -6l_2 \cos \theta & 2l_2^2 \\ -12 \cos^2 \theta & -6l_2 \cos \theta & 12 \cos^2 \theta & 6l_2 \cos \theta \\ -6l_2 \cos \theta & 2l_2^2 & 6l_2 \cos \theta & 4l_2^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{M} = \frac{A_2 \rho l_2}{420} \begin{bmatrix} 156r_2 + 156 \cos^2 \theta & -22l_1r_2 - 22l_2 \cos \theta & 54 \cos^2 \theta & 13l_2 \cos \theta \\ -22l_1r_2 - 22l_2 \cos \theta & 4l_1^2r_2 + 4l_2^2 & -13l_2 \cos \theta & -3l_2^2 \\ 54 \cos^2 \theta & -13l_2 \cos \theta & 156 \cos^2 \theta & 22l_2 \cos \theta \\ 13l_2 \cos \theta & -3l_2^2 & 22l_2 \cos \theta & 4l_2^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $r_1 = \frac{l_2^3 I_1}{l_1^3 I_2}$; $r_2 = \frac{A_1 l_1}{A_2 l_2}$; EI_2 为手指的弯曲刚度。

2个梁结构单元的材料和结构参数如表1所示。采用Rayleigh阻尼作为振型的阻尼矩阵

$$\mathbf{C} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{K} \quad (5)$$

阻尼系数由活动手指的振动实验计算得出: $a_0 = 1.3138$, $a_1 = 4.74 \times 10^{-9}$ 。令 $\mathbf{X}_1 = \boldsymbol{\delta} = [w_1 \ \varphi_1 \ w_2 \ \varphi_2]^T$, $\mathbf{X}_2 = \dot{\boldsymbol{\delta}} = [\dot{w}_1 \ \dot{\varphi}_1 \ \dot{w}_2 \ \dot{\varphi}_2]^T$

$$\mathbf{M} \ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{C} \dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K} \boldsymbol{\delta} = \mathbf{D} \mathbf{u} \quad (1)$$

其中: $\boldsymbol{\delta}$ 为位移向量, $\boldsymbol{\delta} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$; \mathbf{u} 为控制力, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$; \mathbf{M} 为质量矩阵, $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$; \mathbf{C} 为阻尼矩阵, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$; \mathbf{K} 为刚度矩阵, $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$; \mathbf{D} 为载荷分配矩阵, $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ 。

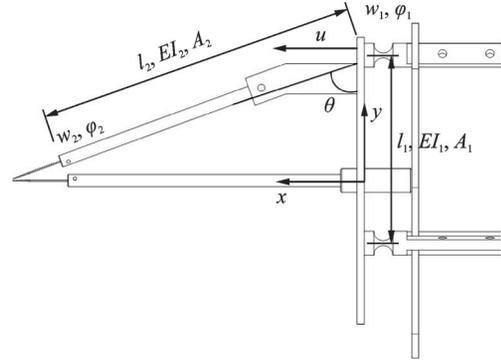


图2 简化的手指物理模型

Fig.2 Physical model of the fingers

该动力学模型包括2个单元,共4个自由度,即 $\boldsymbol{\delta} = [w_1 \ \varphi_1 \ w_2 \ \varphi_2]^T$,其中: w_1 和 φ_1 分别为圆盘变形的挠度和转角; w_2 和 φ_2 分别为活动手指变形的挠度和转角。两单元之间的转置矩阵为

$$\mathbf{T}^e = \begin{bmatrix} -\cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: θ 为圆盘和活动手指之间的夹角。

整体刚度矩阵 \mathbf{K} 和整体质量矩阵 \mathbf{M} 可通过式(2)由单元刚度矩阵和单元质量矩阵组合而成,分别为

作为状态变量,则该系统的状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{u} = \mathbf{C} \mathbf{X} \quad (6)$$

其中: \mathbf{X} 为系统的状态矢量, $\mathbf{X} = [X_1 \ X_2]^T$; $\dot{\mathbf{X}} = [\dot{X}_1 \ \dot{X}_2]^T$; \mathbf{A} 为状态矩阵, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} \end{bmatrix}$; \mathbf{B} 为输入矩阵, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{8 \times 1}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{D} \end{bmatrix}$; \mathbf{C} 为输出矩阵, $\mathbf{C} =$

表 1 单元的材料和结构参数

Tab.1 Material and structural parameters of the elements

参数	数值
弹性模量/Pa	7.00×10^{10}
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 700
铰链间距 l_1/m	0.06
手指长度 l_2/m	0.05
圆盘截面积 A_1/m^2	9.00×10^{-5}
手指截面积 A_2/m^2	1.26×10^{-5}
圆板惯性矩 I_1/m^4	8.10×10^{-10}
手指惯性矩 I_2/m^4	1.26×10^{-11}
夹角/(°)	70
r_1	37.32
r_2	1.2

$[0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; y 为系统的输出量。

2 主动控制器的设计

为了抑制微夹持器手指末端的振动,需根据受控对象的实时状态施加外加控制,即对微夹持器施加闭环控制。相较于输出反馈,由于状态变量 X 可以描述受控系统的所有动态特性,故采用状态反馈法设计控制律能达到更好的控制效果。本研究中微夹持器系统通过直线超声电机驱动,通过给超声电机外加控制信号来实现微夹持器手指末端的振动控制。

通过状态反馈设计控制律,必须保证该系统是完全能控且稳定的。原开环系统的能控矩阵为

$$T_c = [B \ AB \ A^2B \ A^3B] \in R^{8 \times 8} \quad (7)$$

$$\text{rank} T_c = 8 \quad (8)$$

由于 T_c 为满秩矩阵,说明该系统是完全能控的,只有稳定的控制系统才能实现所要求的控制性能^[13]。表 2 为开环系统的特征值。实部均为负,表明原系统是渐进稳定的。可见,该系统满足能控性和稳定性,可通过状态反馈设计控制律达到控制效果。

受控系统的控制输入状态线性反馈控制律 u 为

$$u = r - KX \quad (9)$$

表 2 开环系统的特征值

Tab.2 Eigenvalues of open-loop systems

实部	虚部	实部	虚部
-273	3.49×10^5	-4.120 3	3.94×10^4
-273	-3.49×10^5	-4.120 3	-3.94×10^4
-11.5	6.96×10^4	-0.768	7.04×10^3
-11.5	-6.96×10^4	-0.768	-7.04×10^3

其中: r 为外部输入; X 为状态矩阵; K 为反馈矩阵。

将其代入式(6),可得状态反馈闭环系统的状态方程为

$$\dot{X} = (A - BK)X + Br \quad (10)$$

图 3 为微夹持器的状态反馈系统框图。系统的动态特性主要由极点,即特征值决定。采用极点配置算法得到状态反馈矩阵 K ,将一个多变量闭环系统的极点配置在期望的位置上,设计主动控制器,从而使控制系统得到所需要的动态特性,达到稳态和预期的控制效果^[14]。调用 Matlab 函数,采用直接法进行极点配置。极点配置的命令为

$$K = \text{acker}(A, B, p) \quad (11)$$

其中: p 为期望极点构成的向量。

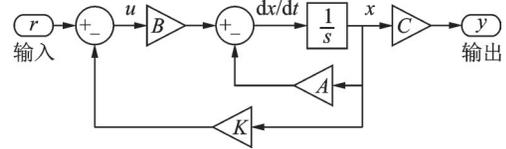


图 3 状态反馈系统框图

Fig.3 Block diagram of state feedback system

计算得到的配置极点和反馈矩阵系数如表 3,4 所示。

表 3 配置极点

Tab.3 Value of the poles

实部	虚部
-2.73×10^4	3.46×10^4
-2.73×10^3	-3.46×10^3
-1.14×10^4	0
-7.51×10^3	-3.82×10^3
-7.51×10^3	3.82×10^3
-7.28×10^2	0
-2.88×10^3	2.22×10^3
-2.88×10^3	-2.22×10^3

表 4 反馈矩阵系数

Tab.4 Coefficient of the feedback matrix

参数	数值	参数	数值
k_1	8.90×10^6	k_5	-4.57
k_2	-3.93×10^5	k_6	-1.84×10^{-1}
k_3	-1.84×10^5	k_7	9.92×10^{-1}
k_4	-1.43×10^4	k_8	1.04×10^{-1}

3 振动控制系统仿真

采用 Matlab 软件中的 Simulink 模块对设计的

状态反馈控制系统进行仿真计算,设置仿真步长为 0.15 s,终止时间为 8 s。图 4 为开、闭环响应的流程框图。图中:阶跃信号代表直线超声电机在 50 ms 内输出的力,其幅值为 1.67。

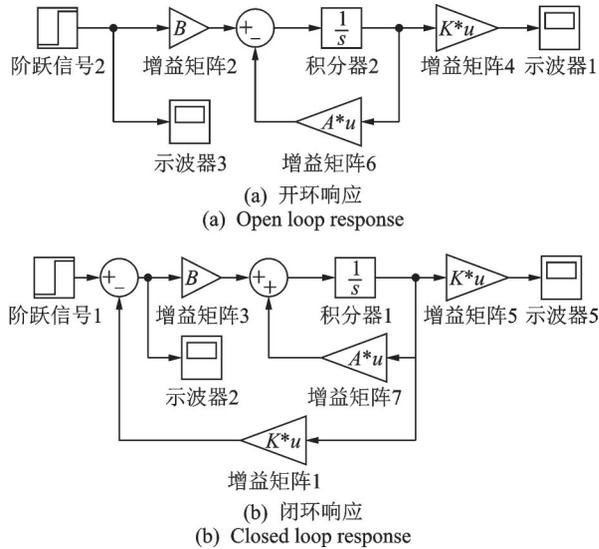


图 4 开、闭环响应流程框图

Fig.4 Flow chart of open loop response and closed loop response

图 5 为系统的开、闭环振动响应。开环系统振动响应的最大幅值为 $12 \mu\text{m}$,在 7.3 s 内达到稳态。闭环系统振动响应的最大幅值为 $5.6 \mu\text{m}$,在 0.015 s 内达到稳态,且响应不会形成周期往复振动。由仿真结果可知,所设计的反馈系统对微夹持器手指末端的振动有良好的抑制效果。

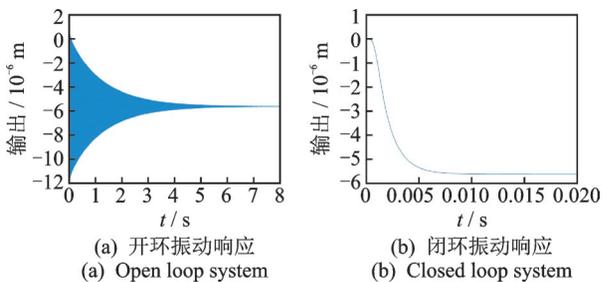


图 5 系统的开、闭环振动响应

Fig.5 Vibration displacement response of open loop system and closed loop system

4 微夹持器抓取实验

为了验证该控制系统对微夹持器手指末端振动抑制的有效性,分别以微米级的钢珠以及茶花花粉细胞作为夹取对象来进行夹取稳定性实验。微夹持器夹取实验装置如图 6 所示,主要包括日本 Ketence 公司的 VHZ500R 高精度电子显微镜系统,用来观

测微夹持器探针的夹取性能;针对本研究制作的控制箱,用来驱动微夹持器系统中各个直线超声电机,具有控制精度高、实时位移反馈及操作简单等优点;可升降载物台用来放置被夹取对象,在夹取成功后调节载物台高度,使被夹取物体脱离平台表面。图 7 为微夹持器夹取过程流程图。

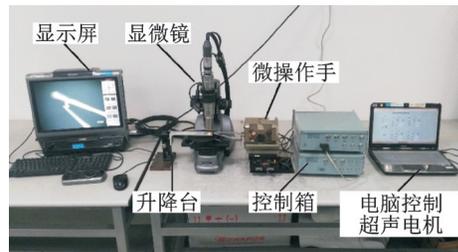


图 6 微夹持器夹取实验装置

Fig.6 Grasping experimental device of the microgripper

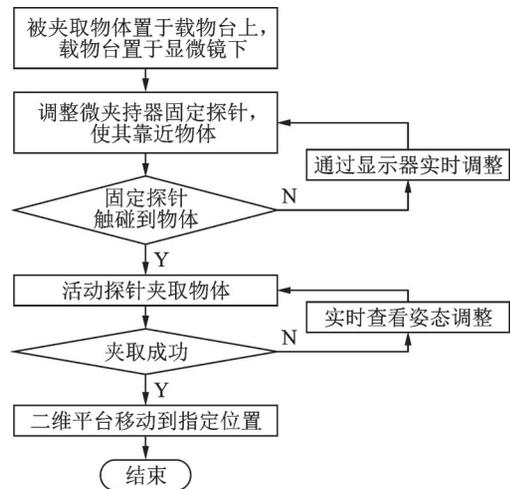
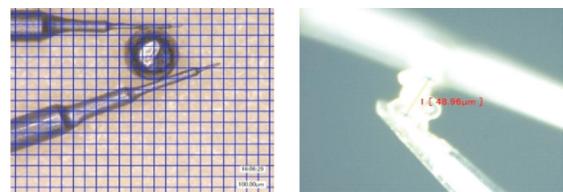


图 7 微夹持器夹取过程流程图

Fig.7 Flow chart of the microgripper grasping process

按照上述步骤分别对半径为 $250 \mu\text{m}$ 的钢珠以及几十微米的花粉细胞进行了夹取实验。为避免偶然性,分别对被夹取对象进行 8 组实验,均成功实现了夹取操作,并能够保持夹取状态稳定。微夹持器操作末端对钢珠和花粉细胞的夹取效果如图 8 所示。

与原来没有状态反馈主动控制系统的抓取效果相比,由于微夹持器活动手指的振动得到有效抑制,



(a) 半径为 $250 \mu\text{m}$ 的钢珠 (a) Steel ball with radius of $250 \mu\text{m}$ (b) 花粉细胞 (b) Pollen cell

图 8 夹取效果图

Fig.8 Picture of grasping effect

在夹持过程中被夹取对象不会因为手指的振动而被弹开,因此将夹取精度从原本半径为 $400\ \mu\text{m}$ 的钢珠提升到半径为 $250\ \mu\text{m}$ 的钢珠以及半径更小的茶花粉细胞。此外,被夹取对象能够稳定地保持在显示屏中央。实验结果表明,该振动控制方法可有效提高微夹持器的稳定性,增加了微夹持器的实用性。

5 结束语

将微夹持器手指的振动模型简化为一个两单元四自由度系统,推导了基于物理坐标的状态空间表达式,验证了该系统完全可控且渐近稳定。采用极点配置法得到状态反馈矩阵,设计了振动反馈控制律。通过Simulink对该反馈系统进行仿真分析。结果表明,该反馈系统对微夹持器手指末端的振动有良好的抑制效果。通过对微小物体的夹取实验结果表明,该控制系统驱动下微夹持器能够稳定的夹取微米级物体,提高了微夹持器的控制精度和实用性。

参 考 文 献

- [1] VURCHIO F, URSI P, ORSINI F, et al. Toward operations in a surgical scenario: characterization of a microgripper via light microscopy approach[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9):1901.
- [2] SHANG W, CONG S, JIANG S. Dynamic model based nonlinear tracking control of a planar parallel manipulator[J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 60(4): 597-606.
- [3] DAS T K, SHIRINZADEH B, GHAFARIAN M, et al. Design, analysis and experimental investigations of a high precision flexure-based microgripper for micro/nano manipulation [J]. Mechatronics, 2020, 69: 102396.
- [4] 季宏丽,孙宏君,裘进浩,等.扫描隧道显微镜扫描器的迟滞非线性控制[J].振动、测试与诊断,2017,37(2):221-227.
- JI Hongli, SUN Hongjun, QIU Jinhao, et al. Control of hysteresis nonlinearity for scanning stage in scanning tunneling microscope [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(2): 221-227. (in Chinese)
- [5] TANG H, LI Y. Feedforward nonlinear PID control of a novel micromanipulator using Preisach hysteresis compensator [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2015, 34: 124-132.
- [6] 胡俊峰,杨明立,郑昌虎.压电微操作平台的复合控制[J].振动、测试与诊断,2018,38(3):494-501.

HU Junfeng, YANG Mingli, ZHENG Changhu. Compound control for a piezoelectric micro-manipulation stage[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(3): 494-501. (in Chinese)

- [7] LENIOWSKA L, LENIOWSKI R. The joint vibration analysis of a multi-link surgical manipulator [J]. Archives of Acoustics, 2012, 37(4): 475-482.
- [8] YAVUZ Ş, MALGACA L, KARAGÜLLE H. Vibration control of a single-link flexible composite manipulator [J]. Composite Structures, 2016, 140: 684-691.
- [9] 张阳阳,姚志远,耿冉冉.基于超声电机驱动的微操作手优化设计[J].机械与电子,2017,35(4):65-69,74.
- ZHANG Yangyang, YAO Zhiyuan, GENG Ranran. Optimal design of micromanipulator driven by ultrasonic motors[J]. Machinery & Electronics, 2017, 35(4): 65-69,74. (in Chinese)
- [10] 张泉,王瑞渊,周丽平,等.柔性并联平台的动力学建模及主动振动控制[J].振动、测试与诊断,2013,33(6):1025-1031.
- ZHANG Quan, WANG Ruiyuan, ZHOU Liping, et al. Dynamic modeling and active vibration control of flexible parallel manipulator [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(6): 1025-1031. (in Chinese)
- [11] 赵淳生.超声电机技术与应用[M].北京:科学出版社,2007:1-22.
- [12] GENG R R, MILLS J K, YAO Z Y. Design and analysis of a novel 3-DOF spatial parallel microgripper driven by LUMs[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 42: 147-155.
- [13] 郭亮,王俐,杨宵,等.现代控制理论基础[M].北京:北京航空航天大学出版社,2013:4-8.
- [14] 黎明安.动力学控制基础与应用[M].北京:国防工业出版社,2013:54-74.



第一作者简介:耿冉冉,女,1987年12月生,博士、副教授。主要研究方向为微型机械结构的设计、动力学建模、振动控制及试验。

E-mail:rrgeng@nuaa.edu.cn

通信作者简介:姚志远,男,1961年6月生,教授、博士生导师。主要研究方向为结构振动特性分析和动力学建模、超声电机的结构动力学分析、建模及结构设计。

E-mail:zyyao@nuaa.edu.cn