

文章编号 1004-924X(2007)02-0248-06

压电陶瓷驱动球基微驱动器的动力学研究

陈海初

(浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:研制出了尺寸为 30 mm×30 mm×50 mm 的压电陶瓷驱动的球基微驱动器样机,并对该微驱动器进行动力学分析以及微型轴孔装配的实验研究。建立了微驱动器金属球空间坐标关系,分析了球基微驱动器的动力学特征,并建立了其动力学模型。采用龙格-库塔法计算出了微驱动器的动力学参数,并利用 MATLAB 的 SIMULINK 模块搭建了微驱动器的仿真模型,并对其进行了动力学仿真分析。研制出了球基微驱动器样机,并在此基础上,集成微夹持器形成微操作器,对微驱动器性能进行了实验测试,并开展了 $\Phi 180\ \mu\text{m}$ 微型轴与 $\Phi 200\ \mu\text{m}$ 微型孔之间的精密微装配实验研究。最后,分析了微驱动器金属球质量、驱动信号频率、以及金属球与微驱动单元摩擦块接触表面摩擦系数对其性能的影响。实验结果表明:该球基微驱动器的转动分辨率为 $0.000\ 1^\circ$,转动定位精度为 $0.000\ 5^\circ$,微驱动器最大工作频率为 1 200 Hz。实验结果验证了逆转振动模型的正确性,由该微驱动器所集成的微操作器,完全可以满足对微小元器件的微米级操作与装配等精密作业的要求。

关键词:球基微驱动器;动力学;压电陶瓷;微操作

中图分类号:TP242.2 **文献标识码:**A

Dynamical research on spherical micro actuator with PZT drivers

CHEN Hai-chu

(*State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: A 30 mm×30 mm×50 mm spherical micro actuator driven by piezoelectric ceramic stacks (PZT) was developed, and the dynamics of the spherical micro actuator was analyzed, the micro assembly between micro shaft and micro spindle sleeve by the micro actuator was researched. First, this paper set up a space coordinate relationship of the spherical micro actuator to analyze dynamical characteristics. Following that, it used the Runge-Kutta arithmetic to calculate the dynamical parameters of the micro actuator and to built a dynamical model to simulate it by the SIMULINK module of MATLAB. After these, a spherical micro actuator experimental sample was developed, and a micromanipulator with a micro-gripper based on the sample spherical micro actuator was integrated, By the micro assembly experimental research between a micro shaft of $\Phi 180\ \mu\text{m}$ and a micro spindle sleeve of $\Phi 200\ \mu\text{m}$, the characteristics of the spherical micro actuator impacted by the metal sphere mass of the micro actuator, driving signal frequency, friction coefficient of the contact surface between the metal sphere and the friction block of the micro driving unit were analyzed. The experimental results

收稿日期:2006-11-21;修订日期:2006-12-19.

基金项目:国家“863”计划资助项目(2003AA404190);浙江大学流体传动及控制国家重点实验室博士后专项基金

indicate that the rotate resolution, the rotate positioning precision and the maximum working frequency of the micro actuator are 0.0001° , 0.0005° and 1200 Hz , respectively. The experimental results validate the back rotation and vibration model of the spherical micro actuator, it shows that the micromanipulator integrated by the spherical micro actuator can meet requires of precise micro operation and assembly for MEMS or other microelements in micron fields.

Key words: spherical micro actuator; dynamics; PZT; micromanipulation

1 引言

随着精密工程、机电系统技术(MEMS)、等研究的发展,对能实现多种精密微操作任务的微操作器产生了迫切需求,例如微/纳米级元件的装配,特别是在生物医学与遗传基因研究过程中对各种细胞进行切割、分离、搬运、微定量药物的注射等,可大大减轻烦琐的体力劳动,节省人力资源,为生物医学工程提供自动或半自动的微操作系统,对提高医疗手段和病情诊断成功率具有重要意义^[1,2]。此外,微操作、微驱动技术的发展,又能为进一步加强对微/纳米世界的认识提供有效的技术手段与方法。球基微操作器集精密驱动与精密操作于一体,它既具有体积小、重量轻的特点,又能实现微/纳米级精度的定位控制,而且能实现空间复杂的扫描运动,是近年来微/纳米等精密操作研究领域的研究热点。如德国在开展 MiniMan 系列机器人的研究过程中所开发的球基微操作器^[3],可以驱动微执行器完成空间多自由度的扫描运动并在显微镜下实现 $\Phi 500\ \mu\text{m}$ 微型行星齿轮减速器的装配、花粉细胞分离等精密微作业。日本的 Fuchiwaki 及其他教授在研究微型桌面装配工厂过程中,所研制开发的球基微操作器,也顺利实现了 $\Phi 200\ \mu\text{m}$ 微型轴孔的精密装配^[4]。作者在开展面向 MEMS 精密作业的微小机器人系统的研究过程中,开展了对球基微操作器的运动学、振动等方面研究^[5-7]。本文主要对球基微驱动器进行了动力学建模,利用 MATLAB 的 SIMULINK 模块建立其仿真模型并进行动力学仿真分析,最后对其进行性能测试,并利用所集成的微操作器进行了微型轴孔装配实验研究,实验结果证明由该微驱动器所集成的球基微操作器具有微米级的定位精度,可以满足对 MEMS 等微小元器件的精密微操作任务。

2 球基微驱动器动力学分析

球基微操作器照片如图 1 所示,它由球基微驱动器与微夹持器组成。微驱动器采用三个微驱动单元成空间 120° 安装支撑金属球的对称式结构,尺寸为 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,微驱动单元



图 1 球基微操作器照片

Fig. 1 Photo of spherical micromanipulator

采用柔性铰链实现无间隙微位移传递^[8],压电陶瓷作为微驱动元件安装在柔性铰链内并驱动其输出微位移与力^[9]。由于压电陶瓷具有多种振型模式,从而可以驱动柔性铰链沿不同的方向运动,进而驱动直径 20 mm 的金属球实现空间复杂的轨迹运动。压电陶瓷尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 18\text{ mm}$,最大输出位移为 $9\ \mu\text{m}$ 。微夹持器由压电陶瓷驱动并集成于金属球上。驱动器基于惯性摩擦驱动原理工作^[6,7],当压电陶瓷缓慢伸缩时,微驱动单元驱动柔性铰链发生弹性变形并带动摩擦块输出微小位移,由于金属球惯性力较小,因此驱动摩擦力足以驱动金属球转动一个微小角度;当压电陶瓷快速伸缩时,由于金属球惯性力较大,摩擦力不足以克服并使金属球发生相应转动,此时,金属球保持惯性运动,而压电陶瓷、柔性铰链及摩擦块发生伸缩运动。由于压电陶瓷的充放电特性,决定了微驱动器在运动过程中存在逆转及振动特性^[5]。微驱动器及集成微夹持器后的空间坐标关

系如图 2 所示^[10]。其中, $O-XYZ$ 为基坐标系, $O'-X'Y'Z'$ 为金属球转动时的动坐标系, $O''-X''Y''Z''$ 为微夹持器末端坐标系, 由于微夹持器与金属球刚性连接, 因此, $O''-X''Y''Z''$ 是跟随 $O'-X'Y'Z'$ 变化的附属坐标系, 其运动姿态与 $O'-X'Y'Z'$ 相同。

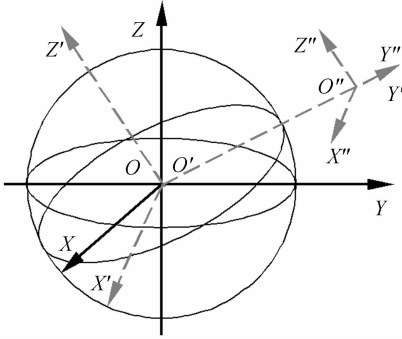


图 2 微操作器空间坐标关系

Fig. 2 Space coordinate relationship of micromanipulator

以驱动金属球绕 X 轴转动为例来进行微操作器的力学特性分析。金属球在转动过程中, 除了 X 微驱动单元的静摩擦驱动力外, 还受到 120° 对称安装的微驱动单元的滑动摩擦阻力作用。由于结构上的对称性, 另外两个微驱动单元的摩擦阻力经矢量合成后, 与摩擦驱动力在同一个平面内。假定金属球在运动过程中其势能不发生变化 (即金属球球心始终与基坐标原点重合), 则金属球的动能为:

$$T = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2, \quad (1)$$

式中: I 为金属球绕过球心的任意直径的转动惯量, $I = \frac{2}{5} \cdot mR^2$; m 为金属球质量; R 为金属球半径, $R = 10 \text{ mm}$ 。

将式(1)代入拉格朗日第二动力学方程可得:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\dot{\theta}} \right) - \frac{dT}{d\theta} = M, \quad (2)$$

$$I \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = M. \quad (3)$$

式中: M 为微驱动器金属球的摩擦力矩, $M = \text{sign} \left(\frac{d(\Delta l)}{dt} - \frac{d\theta}{dt} R \right) M_1 - 2 \text{sign} \left(\frac{d\theta}{dt} R \right) M_2$; sign 为符号函数; Δl 为压电陶瓷的输出位移; θ 为金属球的转角; M_1 为金属球所受到的驱动力矩, $M_1 = \frac{\sqrt{3}}{3} \mu mgR$; M_2 为金属球所受到的阻力矩, $M_2 = \frac{\sqrt{6}}{18}$

μmgR 。

由式(1)-(3)可得描述微驱动器动力特征的微分方程:

$$I \frac{d}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = \text{sign} \left(\frac{d(\Delta l)}{dt} - \frac{d\theta}{dt} R \right) \frac{\sqrt{3}}{3} \mu mgR - 2 \text{sign} \left(\frac{d\theta}{dt} R \right) \frac{\sqrt{6}}{18} \mu mgR, \quad (4)$$

式中: μ 为微驱动器驱动单元摩擦块与金属球间的滑动摩擦系数。

令 $\frac{d\theta}{dt} = y$, 将式(4)降阶处理后可得:

$$y' = \frac{\mu mgR}{I} \cdot \text{sign} \left(\Delta l' - \frac{6\sqrt{3} + \sqrt{6}}{18} \cdot yR \right), \quad (5)$$

式中: $\Delta l'$ 为微驱动单元摩擦块的伸缩速度^[9], $\Delta l' = \begin{cases} a & n \cdot T_s \leq t \leq (n+1) \cdot T_s \\ -b & n \cdot T_0 \leq t \leq (n+1) \cdot T_0 \end{cases}$ ($n = 1, 2, 3 \dots$); T_s 为压电陶瓷驱动信号周期; T_0 为压电陶瓷驱动摩擦块伸缩运动转折时刻。

对于公式(5), 采用龙格-库塔数值算法, 利用 MATLAB 专用的 ODE45 函数来进行求解, 可以得到微驱动器的动力学参数如表 1 所示:

表 1 微驱动器动力学参数

Tab. 1 Dynamical parameters of micro actuator

μ	a	b	T_0	T_1
0.18	8.3 mm/s	74.7 mm/s	0.2×10^{-4}	0.18×10^{-4}

根据式(4)、(5)及表 1 的参数, 采用 MATLAB 的 SIMULINK 工具箱来建立描述球基微操作驱动器金属球的动力学仿真模型如图 3 所示。由于在实际应用中, 压电陶瓷放电需要一定的时间, 根据表 1 的计算结果, 采用升降时间比为 9:1, 幅值为 1, 频率为 100 Hz 的锯齿波代替理想的三角波作为驱动信号, 电压经放大 150 倍后作用在压电陶瓷两极, 位驱动单元最大位移为 4 μm , 仿真结果如图 4 所示。

从图 4(a)中可以看出, 金属球存在明显的加速、匀速及减速运动阶段, 但加减速时间较短, 金属球大部分时间均处于匀速运动状态; 就加减速运动阶段而言, 加速时间明显少于减速时间, 这主要是因为加速过程中, 作用在金属球上的除了静摩擦力外, 还有表面力、粘附力等, 而在减速阶段, 则是金属球与微驱动单元之间的滑动摩擦力

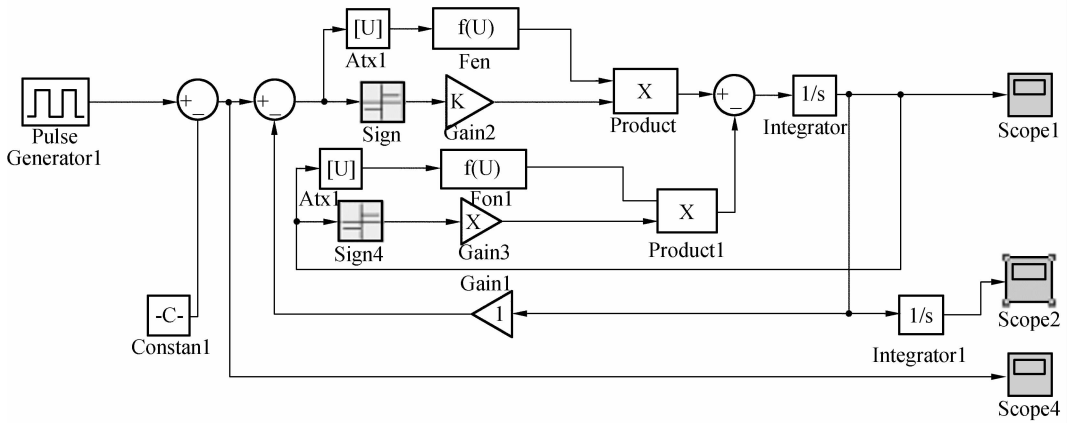
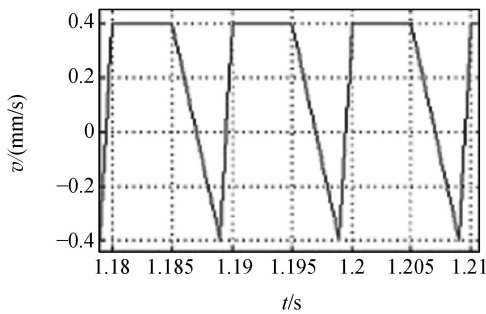


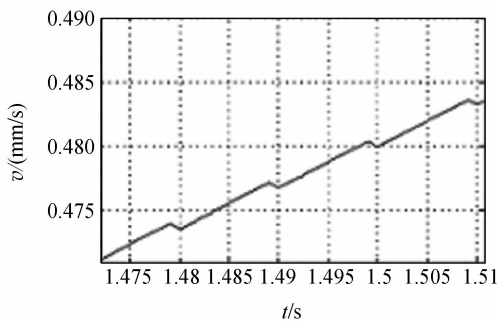
图 3 微驱动器动力学仿真原理图

Fig. 3 Dynamical simulating block diagram of micro actuator



(a) 速度仿真曲线

(a) Velocity simulating curve



(b) 位移仿真曲线

(b) Displacement simulating curve

图 4 微驱动器仿真曲线

Fig. 4 Simulating curve of micro actuator

起主要作用,且该力对金属球的加速作用远远小于前者;另外,速度还出现了负值,说明金属球出现了逆转运动。

从图 4(b)中可以看出,金属球在完成每个周

期的转动后,其线位移并没有在前一个周期的基础上直线增加,而是先减少了一段位移,然后再线性增加,这说明金属球发生了反向转动,即逆转,而这种逆转运动的存在,也带来了微驱动器的振动并对微驱动器的性能产生很大的影响。除改善压电陶瓷材料特性外,设计良好的压电陶瓷驱动电路,尽可能地减少压电陶瓷的放电时间,对降低微驱动器的振动,提高其微驱动特性具有重要的意义。

3 测量实验与结果

在研制球基微操作器样机后,对其进行了振动位移实验测试,如图 5 所示。从图 5 中可以明显看出,在每个运动周期内,金属球的线位移曲线既存在线性增加阶段,又存在线性减少阶段,即金属球既存在正转运动,又存在逆转运动,总的来说,金属球是沿着某个方向转动的,这也就是微驱动器的振动特性。

利用纳米级电容测微仪对该微驱动器性能测试可知,该微驱动器转动分辨率可达 0.0001° ,转动定位精度可达 0.0005° 。在实验过程中发现,随着驱动信号频率的变化,这种正传、逆转以及振动噪声等特性也发生相应的变化。实验结果显示,该微驱动器的最大有效工作频率为 1200 Hz ,在此范围内,随着驱动信号频率的增加,金属球的转动速度基本成线性增加,而振动噪声则呈非线性增加趋势。采用较低的信号频率驱动,可以有效地提高微驱动器的定位精度;采用较高的

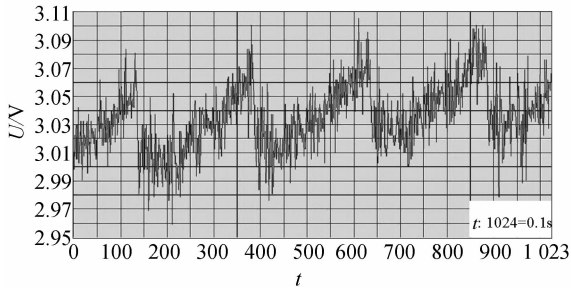


图 5 振动位移测试曲线

Fig. 5 Vibration and displacement test curve

信号频率驱动,则可以有效提高微驱动器的转动速度。因此,在实际微操作过程中,当需要大范围快速移动时,可以对微操作器采用高频驱动;当需要精密定位,实现微操作时,则应采用较低频率来驱动微操作器。

通过对不同质量金属球的实验测试发现,金属球的质量对其动力特性有较大的影响,质量太小,振动噪声及逆转位移较大;质量太大,由于金属球惯性力过大,则又容易出现驱动难等问题。

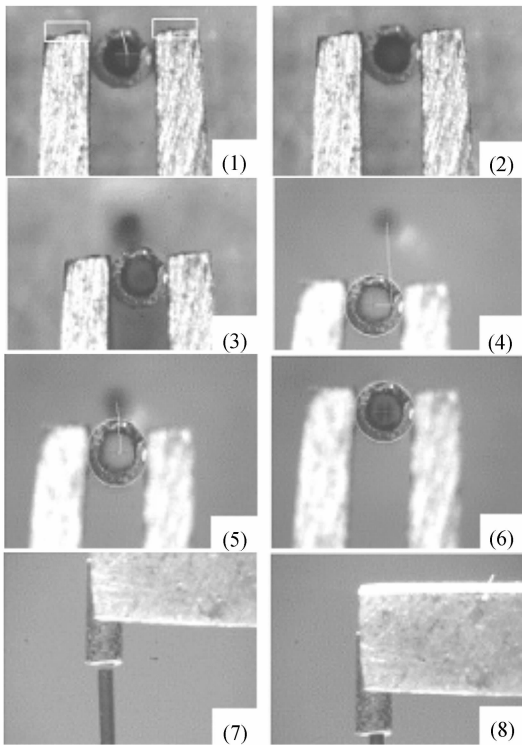


图 6 微型轴孔装配过程

Fig. 6 Micro assembly process of micro shaft and micro spindle sleeve

此外,金属球与驱动单元接触表面摩擦系数对微驱动器性能也存在很大的影响。通过对不同精度等级滚珠钢球的实验研究发现,接触表面越粗糙,微驱动器振动越明显,并且运动越容易出现无规律性和不可控制性。这主要是由于接触面越光滑,接触面之间的接触点就相对越多,当压电陶瓷缓慢伸缩时,微驱动器金属球接触面内各接触点所受摩擦力的矢量合成方向就越有规律,在该合成力的作用下,保证了金属球运动轨迹的规律性以及定位精度的准确性。

图 6 是利用该微驱动器所集成的球基微操作器,在显微视觉以及三维微力传感器所组成的力-视觉混合控制下,实现 $\Phi 180 \mu\text{m}$ 的微型轴与 $\Phi 200 \mu\text{m}$ 的微型孔之间的精密微装配的实验研究结果。

4 结 论

根据精密微操作过程中定位精度高,操作稳定的要求,研制了压电陶瓷驱动精密驱动的球基微驱动器实验样机,在分析球基微驱动器动力学特征,建立其动力学模型,分析影响微驱动器动力学特性因素,以及实验研究后,可得到以下结论:

(1)微驱动器的分辨率可达 0.0001° ,转动定位精度可达 0.0005° ,由微驱动器集成的微操作器末端定位精度可达微米级。逆转振动特性决定了其定位精度、运动速度等微驱动特性。

(2)微驱动器逆转振动特性与微驱动器金属球的质量、金属球与位驱动单元接触表面的摩擦系数以及驱动信号的频率密切相关,信号频率越高,微驱动器振动噪声越大,振动也越明显,当驱动信号频率高于 1200 Hz 时,容易引起金属球出现无规律运动,导致微驱动器精密定位运动失效。

(3)金属球与微驱动单元摩擦块接触表面越光滑(摩擦系数越小),微驱动器定位精度就越高,金属球运动轨迹就越规则。

(4)由该微驱动器所集成的微操作器可以满足对多种 MEMS 等微小元器件的精密微操作任务。

参考文献:

- [1] 王会香, 陈立国, 孙立宁. 生物显微切割微操作仪的设计与研制[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 416-421.
WANG H X, CHEN L G, SUN L N. Design of micromanipulation instrument for bio-microdissection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 416-421. (in Chinese)
- [2] 刘国君, 程光明, 杨志刚. 一种压电式精密输液微泵的试验研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 612-616.
LIU G J, CHENG G M, YANG ZH G. Experimental research on a piezoelectric micro-pump for precision pumping [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 612-616. (in Chinese)
- [3] BREGUET J M, CLAVEL R. Stick and slip actuators: design, control, performances and applications [C]. *International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya, Japan*, 1998: 89-95.
- [4] FUCHIWAKI O, AOYAMA H. Design and control of versatile micro robot for microscopic manipulation [J]. *Am. Soc. Precision Eng.*, 2001: 204-207.
- [5] SUN L N, CHEN H C, LI M T. 3D. O. F. ball base microactuator with piezoelectric tube drivers [C]. *3rd International Symposium on Instrumentation Science and Technology, Xian, China*, 2004: 1007-1011.
- [6] 孙立宁, 陈海初, 李满天, 等. 基于惯性-摩擦驱动的球基微驱动器的逆转现象分析[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(5): 480-483.
SUN L N, CHEN H CH, LI M T, *et al.*. Analysis of the back rotation phenomenon in ball base microactuators based on the inertia-friction driving principle [J]. *Tribology*, 2005, 25(5): 480-483. (in Chinese)
- [7] SUN L N, CHEN H CH, LI M T. Dynamics analysis of microactuator with PZT drivers based on inertia-friction driving principle [C]. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics, Taipei, Taiwan*, 2005: 334-339.
- [8] 王姝歆, 陈国平, 周建华. 复合型柔性铰链机构特性及其应用研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增): 91-97.
WANG SH X, CHEN G P, ZHOU J H. Compliant mechanisms consisted of compound flexible hinges and its applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(supp.): 91-97. (in Chinese)
- [9] 孙立宁, 孙绍云, 曲东升, 等. 基于PZT的微驱动系统及控制方法的研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 55-59.
SUN L N, SUN SH Y, QU D SH, *et al.*. Micro drive positioning system based on PZT and its control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 55-59. (in Chinese)
- [10] 陈海初. 宏/微驱动精密作业微型移动机器人的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2005.
CHEN H CH. *Research on macro/micro driven miniature mobile robot for precision manipulation* [D]. Harbin Institute of Technology, 2005. (in Chinese).

作者简介:陈海初(1975—),男,湖南临澧人,浙江大学流体传动及控制国家重点实验室博士后,主要从事微小移动机器人,仿生机器人,流体传动及控制等方面的研究。E-mail: chenhaichu@126.com