

基于黏滑驱动的球基微操作器的频响分析^①王鹏飞^② 李满天 孙立宁

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘 要 在简化球面高副连接的条件下,建立了球基微操作器双质量摩擦振子简化工程模型。采用 Fourier 级数以及谐波平衡的方法分析了带有非线性环节的双质量摩擦振子的频响特性,同时利用 MATLAB 仿真给出数值解。开展了运动测试实验,进一步验证了分析的正确性。仿真与实验结果表明,基于黏滑驱动机理的球基微操作器在中低频段有较稳定的驱动性能,驱动频率应选中低频。此研究结果为微操作器的控制提供了参考和依据。

关键词 微操作器,球基,黏滑驱动,频响

0 引言

微空间内微小零件的加工、调整、检测以及微机电系统(MEMS)的装配作业等都需要微操作机器人参与^[1]。微操作器是整个微操作机器人系统的关键执行部件,微操作器的性能直接影响微操作机器人的运动准确度和操作能力,因此微操作器必须具有较高的定位精度和高度的灵活性。基于传统的机构设计及驱动原理很难制造出这样的微操作器,但符合摩擦驱动原理的黏滑驱动(stick-slip driving)、惯性冲击及新兴的压电陶瓷材料却为设计新型的微操作器提供了很好的理论基础与材料保障。

许多研究^[2-4]表明,利用黏滑现象可以产生可控的微小位移,黏滑驱动方式以其结构简单、驱动方便、分辨率高和能耗低成为微操作器中的理想驱动模式。黏滑驱动机理的本质在于利用最大静摩擦力和滑动摩擦力之间的差异控制被驱动体产生位移,通过锯齿波或者三角波驱动,该类操作器很容易达到较高的分辨力,同时还能满足大范围运动。基于黏滑驱动原理的微操作器输出特性的研究成为人们关注的热点,研究人员也进行了相应研究,如文献[5]研究了黏滑过程对系统动力学性能的影响,文献[6]研究了黏滑驱动中的逆转现象,文献[7]和[8]则分别讨论了黏滑驱动的实现及应用。在 stick-slip 的频响特性方面,Makris 等^[9]首先研究了滑动摩擦系数随相对速度指数变化的单自由度激振质量干摩擦系统正弦激励下响应计算问题。本文以球基微操作器

(通过黏滑运动实现微操作球 3 自由度的运动)为研究对象,建立了球基微操作器双质量摩擦振子简化工程模型,利用 Fourier 级数以及谐波平衡的方法分析了系统的频响特性,得出了黏滑运动中低频段有较稳定的驱动性能,驱动频率应选中低频的结论,此研究结果为微操作器的控制提供了参考和依据。

1 球基微操作器介绍

本文研究的球基微操作器是一种新型结构的微操作装置,其关键部件是由 3 个互成 90°的四分压电陶瓷管以及由它们端部共同支撑的一个钢球组成,如图 1 所示。为了提高系统刚度和耐用特性,压电陶瓷管的端部镶嵌了摩擦体(红宝石球)。四分压电陶瓷管为整体导电涂层,而外表面平均分为四等份,各占四分之一圆柱面积,但彼此间不导电。在内表

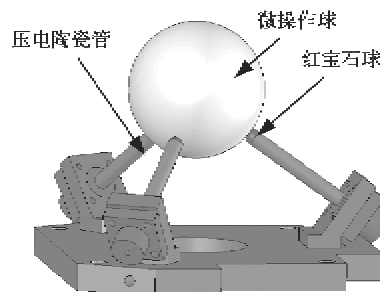


图 1 四分压电陶瓷管驱动的球基微操作器

① 国家自然科学基金(50575056)和中国博士后科学基金(20080440875)资助项目。

② 男,1977 年生,博士,讲师;研究方向:微小型及仿生机器人;联系人,E-mail:wangpengfei1007@163.com
(收稿日期:2009-05-05)

面的导电层和外表面的导电层之间施加电压可以使陶瓷管变形,实现弯曲、伸长和球冠扫描等运动。在球基微操作器工作时,3个四分压电陶瓷管在驱动电压的作用下,基于黏滑驱动原理,使钢球实现三自由度转动。

2 球基微操作器简化模型

2.1 简化动力学方程

由于四分压电陶瓷管是由多种不同特性的材料复合而成,包括具有机电耦合特性的压电陶瓷材料、金属弹性板和耐磨的化合物材料,它们都具有不同的刚度特性,所以要对该模型进行分析就必须进行等效力学模型简化,建立系统的等效工程模型。

对于四分压电陶瓷管与钢球之间的黏滑现象,因为压电陶瓷管端部的红宝石球与钢球的直径比达到了1:10,可以近似地把红宝石球与钢球之间的摩擦看成红宝石球与钢板之间的摩擦。这样分析对象就变成了球与面的黏滑驱动。球基微操作器是由3个四分压电陶瓷管和一个钢球构成,建立动力学方程时以一个四分压电陶瓷管为黏滑的研究对象。

本研究基于以上假设,建立了球基微操作器的工程简化模型(如图2所示),其中等效平板质量为 m_2 ,质量块为 m_1 、阻尼器和弹簧共同对应四分压电陶瓷管及端部的摩擦体。框1代表理想压电陶瓷管,框2代表考虑了实际机构构成的压电陶瓷管,其中理想压电陶瓷管和弹簧阻尼系统刚性连接, x 表示理想压电陶瓷管的位移,即系统输入位移, x_1 表示质量块 m_1 的位移, x_2 表示质量块 m_2 的位移, f_1 表示两个质量块之间的摩擦力, f_2 表示质量块 m_2 的负载摩擦力。

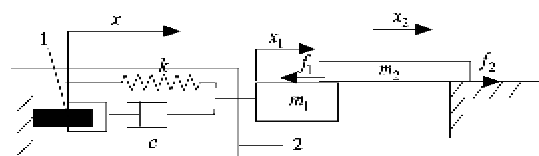


图2 球基微操作器简化工程模型

此处需要指出,压电陶瓷被等效模拟成了电学和机械两部分。电学部分有一个电容和理想压电陶瓷管构成,当施加电压信号时,压电陶瓷管按理想状况伸缩。机械部分由与陶瓷管相连的弹簧和一个阻尼器构成,弹簧的右侧输出端刚性连接了质量球。由图2可知,根据牛顿第二定律可以列写出双质量块系统的动力学方程

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = k(x - x_1) - c(\dot{x} - \dot{x}_1) - f_1 \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 = f_1 - f_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 k 为压电陶瓷管弯曲变形等效刚度, c 为压电陶瓷管弯曲变形等效阻尼。

2.2 仿真分析

根据简化动力学模型,利用MATLAB软件中SIMULINK工具对式(1)描述的系统进行仿真实验。假设压电陶瓷管的驱动信号为 $a \sin(\omega \cdot t)$,其中阻尼系数取值0.1,陶瓷管弯曲时的 k 值按照欧拉-伯努利梁取值为 10^9 ,质量块间摩擦选用带三次曲线的摩擦力模型为讨论对象,随速度变化,滑动摩擦系数也随之改变。该摩擦模型的公式为

$$f = F_f \text{sign}(v) - B_1 v + B_3 v^3 \quad (2)$$

式中 B_1 为一次项系数, B_3 为三次项系数, F_f 为最大静摩擦力。

图3为式(1)所示系统的输出图, x_1 运动曲线表示 m_1 的输出位移, x_2 运动曲线表示 m_2 的输出位移。仿真曲线说明,当输入信号 x 为正弦波时,被驱动体的位移曲线基本为同频率的正弦波形, m_2 的输出位移相对于原始驱动波形有一个运动位移积累量,且按一定斜率上升,响应速度在稳定后基本为正弦函数与小的斜坡函数叠加的形式。

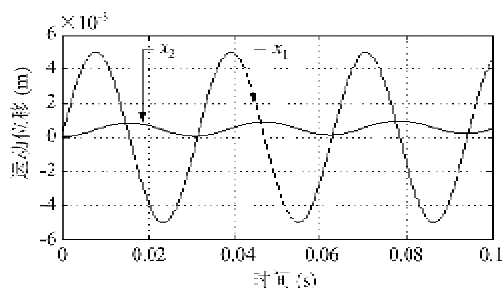


图3 简化模型系统输入与输出图

考虑到斜坡函数的斜率很小,根据图3所示的仿真分析结果,做出响应函数与激励函数等频率的假设。当输入信号为正弦波时,质量块2的响应为

$$x_2 = y_m \sin(\omega t - \varphi_y) + kt \quad (3)$$

式中 y_m 为质量块2响应的振幅值; kt 为每个周期中所产生的位移净输出; φ_y 为相位差。相对速度为

$$v = \omega \cos(\omega t) - k - \omega y_m \cos(\omega t - \varphi_y) \quad (4)$$

3 黏滑驱动频响特性研究

由于摩擦力是分段线性,且存在函数嵌套,拉氏变换不能应用。为了得到合适的频率响应结果,在

简化工程模型基础上,利用 Fourier 级数以及谐波平衡的方法分析系统的频响问题。在讨论中为了简化讨论过程和结果,采用一次谐波响应。

3.1 摩擦力 Fourier 级数

首先将式(2)的 $\text{sign}(v)$ 项展开。以向右为正方向,当 m_1 相对于 m_2 速度 v 大与零时为正,反之则为负。则其在定义域 $(0, 2\pi)$ 上为一方波。

考虑将方波进行 Fourier 级数展开,得

$$\bar{F}(\omega t) = \frac{2\pi - 2\varphi_1 + 2\varphi_2}{\pi} F_f + \sum_{n=1}^{\infty} (F_f \frac{2}{n\pi} (\sin n\pi + 2\sin n\varphi_1 - 2\sin n\varphi_2) \cos n\omega t) \quad (5)$$

取级数展开第一项近似代替,则有

$$\bar{F}(\omega t) = \frac{2\pi - 2\varphi_1 + 2\varphi_2}{\pi} F_f + F_f \frac{2}{\pi} (2\sin\varphi_1 - 2\sin\varphi_2) \cos\omega t \quad (6)$$

从稳定响应开始,可知相对速度方向改变两次,即每周期的摩擦力方向改变两次。

令 $v = 0$, 根据式(4)从数值仿真可以得到方程在 $[0, 2\pi]$ 间有两个解,设为 φ_1, φ_2 , 利用 Taylor 级数分别在 0 和 2π 附近展开,求得

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{y_m \sin(\varphi_y)}{y_m \sin(\varphi_y) + k - 1} \\ \varphi_2 &= 2\pi - \frac{y_m \sin(\varphi_y)}{y_m \sin(\varphi_y) + k - 1} \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 动力学方程 Fourier 级数展开

本文中主要考虑的是系统的周期振动解,则将其中的 kt 进行周期化处理,作为锯齿波处理。

根据式(2)两边 $\sin(\omega t - \varphi_y), \cos(\omega t - \varphi_y)$ 和常数项前系数相等(一次谐波平衡,忽略高次谐波),即两边相应系数相减为 0,则得到系数方程

$$\begin{aligned} ff_1 &= B_1 \omega \sin(\varphi) - 0.75 B_3 \omega^3 \sin(\varphi) \\ &\quad - 1.5 B_3 \omega^3 y_m^3 \sin(\varphi) \\ &\quad - 3 B_3 \omega k^2 \sin(\varphi) + m_2 \omega^2 y_m \\ ff_2 &= \frac{4}{\pi f_1} - B_1 \omega y_m + 0.75 B_3 \omega^3 y_m^3 + 3 B_3 \omega y_m \\ &\quad - B_1 \omega \cos(\varphi) - B_1 \omega y_m - 0.75 B_3 \omega^3 \cos(\varphi) \\ &\quad + 1.5 B_3 \omega^3 y_m + 0.75 B_3 \omega^3 y_m^3 - 1.5 B_3 \omega^3 \\ &\quad \cdot y_m^2 \cos(\varphi) - 3 B_3 \omega k^2 \cos(\varphi) + 3 B_3 \omega y_m k^2 \\ ff_3 &= - \frac{\left(2\pi - 2 \times \left(\frac{2 y_m \sin(\varphi)}{(y_m \cos(\varphi) + k - 1) - 2\pi} \right) \right)}{\pi} \\ &\quad - B_1 k + 1.5 \omega^2 y_m k B_3 + B_3 k^3 - B_1 k \\ &\quad + 1.5 B_3 \omega^2 k + B_3 k^3 + 1.5 B_3 \omega^2 y_m^2 k \end{aligned} \quad (8)$$

3.3 最优化算法

由于高次超越代数方程式进行完全解析求解法相当困难,现采用非线性方程组的最优化算法进行数值迭代计算。运用梯度法对系数方程进行极小化运算,算法流程如下:

设参数向量 $\eta = [y_m, \varphi_y, k]$, 定义目标函数 $F(\eta) = ff_1^2 + ff_2^2 + ff_3^2$, 运用梯度法对目标函数 $F(\eta)$ 进行极小化运算,即:(1)选取一组初值 η_0 ; (2)计算目标函数值 $F(\eta_0)$; (3)若 $F(\eta_0) < \epsilon$, ϵ 为大于 0 的给定小数,则即为 η_0 非线性方程组的一组实根,过程结束,否则继续; (4)计算目标函数在 η_0 点的偏导数 $\frac{\partial F}{\partial e_i}$, 其中 e_i 分别对应 y_m, φ_y, k ($i = 1, 2, 3$), 则有 $e_i = e_i - \lambda \frac{\partial F}{\partial e_i}$, 其中 $\lambda = F / \sum \frac{\partial F^2}{\partial e_i}$ 。

如此循环直至满足式(3)为止。

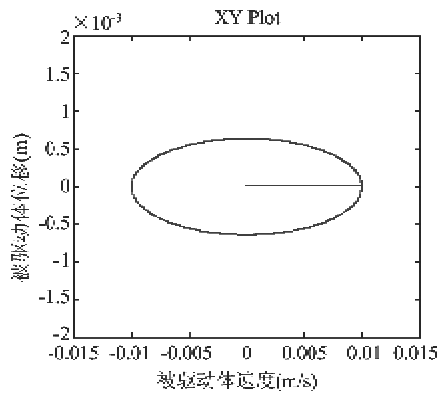
4 频响分析与仿真

4.1 特定频率相位图

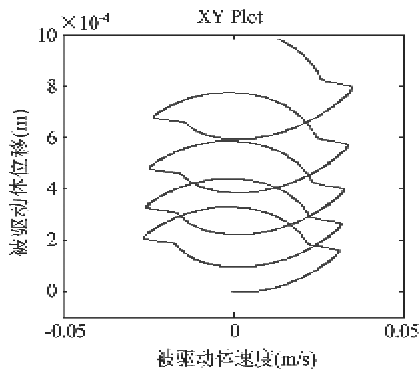
下面讨论单一频率驱动下的运动情况,然后将结果扩展到一定频率范围下的频率响应情况。图 4(a)、(b)和(c)所示为不同频率驱动下系统输出速度-位移相位图在时间轴上的投影。系统驱动频率为 5Hz 时,系统输出速度-位移相位图为一个闭曲线,且非常规则,说明此时运动是周期性运动,且运动状态稳定可控。图(a)中一个圆圈中间包含一条直线,圆圈表示周期运动,直线表示在此阶段位移不变,速度发生变化,即黏滑运动中的“滑区域”。当系统驱动频率增加到 50Hz 时,从速度-位移相位图中可看出系统运动较 5Hz 驱动时性能稍差,但整体运动依旧平稳。2kHz 驱动时,从图(c)可看出,被驱动体的速度和位移参量在时间轴上的投影出现杂乱无章状态,图(c)下半部分分布较密的曲线说明,驱动体在此处出现了明显的自激振荡,整体运动已经失控。

4.2 频响分析算例

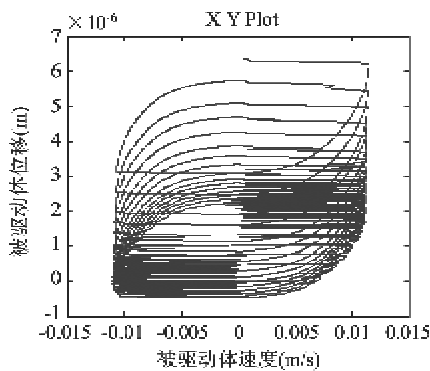
基于所述频响特性分析进行计算机数值仿真,给定的系统参数如下: $m_1 = 0.03\text{kg}$, $m_2 = 0.3\text{kg}$, $u = 0.2$, $B_1 = 0.01$, $B_3 = 0.005$ 。仿真结果如图 5 和图 6 所示。图 5 为基于一次谐波平衡所求得系统响应曲线,图 6 为基于一次谐波平衡所求得的振子整体上运动速度的频率响应。



(a)5Hz 被驱动体速度-位移相位图



(b)50Hz 被驱动体速度-位移相位图



(c)2kHz 被驱动体速度-位移相位图

图 4 特定频率速度-位移相位图

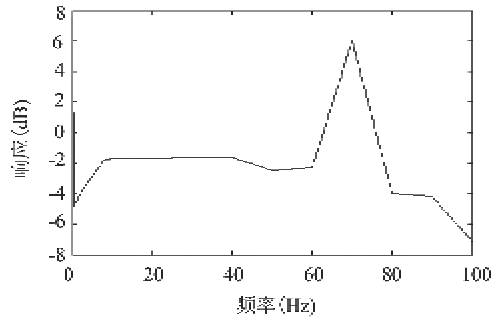


图 5 系统频率响应图

结合图 4、图 5、图 6 的分析结果可得,系统在小于 50Hz 的中低频段有较稳定的驱动性能,随着频率

的升高,驱动性能逐渐变坏,驱动频率应选中低频。

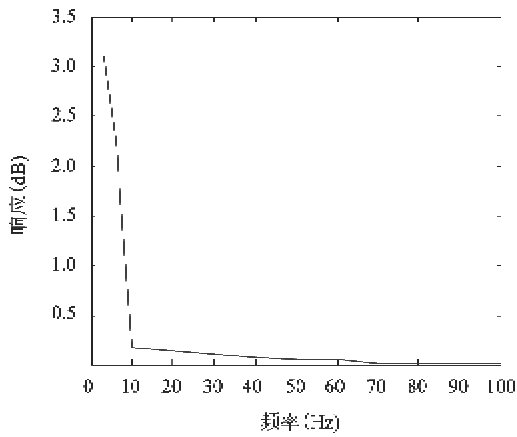


图 6 振子速度频率响应图

5 实验测试

对压电陶瓷管驱动的三自由度球基微驱动器进行了实验测试。实验采用德国 SIOS 公司的 NCDT620 非接触式电容测微仪进行测量,并从其 D/A 接口输出测量结果,再利用高速数据采集卡进行数据采集,采集程序采用基于数据流的图形化编程软件 LabView 开发。信号发生器产生频率为 20Hz 的低压锯齿波,经过电压放大器放大到 150V 左右,驱动压电陶瓷管运动,导致金属球转动。由于金属球的转动角度很小,在实验中可以把金属球的转动弧长看成为直线位移,电容测微仪的输出电压与金属球转动位移成正比,因此能真实地反映金属球的运动情况,电容测微仪传感器测头的电压位移比率为 $0.05\mu\text{m}/0.001\text{V}$ 。

图 7 是测试原理框图,图 8 是球基微操作器测试系统,图 9 为两个驱动周期的测量结果。从图 9 (a)和图 9(b)中可以看出,在 20Hz 连续信号的驱动下,根据换算关系,球基微操作器金属球测量点所转过的弧长约为 $3.6\mu\text{m}$ 。电容传感器的输出电压基本呈周期性变化,且输出电压先增大,后减小,然后再增大,再减小,总的电压变化趋势是不断增大,呈现出典型的黏滑运动现象。

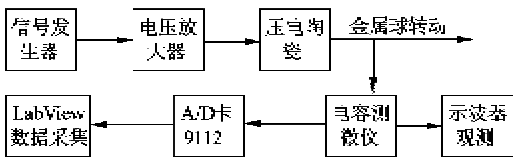
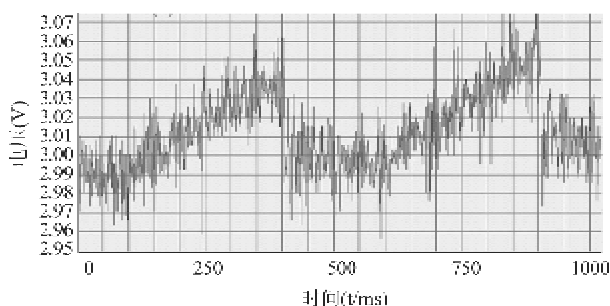


图 7 测试原理框图

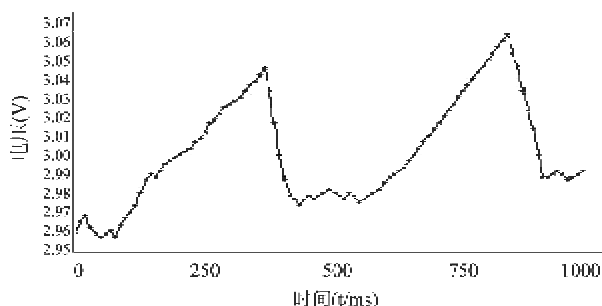


图8 球基微操作器测试系统

同时,在实验中发现,随着信号频率的增加,金属球的振动幅度逐渐升高,并且开始偏离 x 轴转动,同时,在低频向高频过渡时转动速率越来越快,然后随之变慢,当信号频率增加到约700Hz时,金属球振动极为明显,微驱动器已失效。



(a) 20Hz 滤波前



(b) 20Hz 滤波后

图9 球基微操作器测试结果

6 结论

本文以球基微操作器为研究对象,建立了双质量摩擦振子黏滑驱动简化工程模型,并利用 Fourier 级数以及谐波平衡的方法分析了系统的频响问题,同时利用 MATLAB 仿真给出数值解,仿真与实验结果表明,基于黏滑驱动机理的球基微操作器在中低频段有较稳定的驱动性能,驱动频率应选中低频。研究结果为微操作器的控制提供了参考和依据。

参考文献

- [1] 孙立宁,周兆英,龚振邦. MEMS 国内外发展状况及我国 MEMS 发展战略的思考. 机器人技术与应用, 2002, 1:2-4
- [2] Zhang M H, Guo W, Sun L N. A multi-degree-of-freedom ultrasonic motor using in-plane deformation of planar piezoelectric elements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 8: 193-200
- [3] 周银锋,王忠民,马建敏. 旋转摩擦诱发非旋转体的黏滑振动特性. 西安理工大学学报, 2006, 1(22):78-81
- [4] Bergander A, Broquet J M, Schmitt C, et al. Micropositioners for microscopy applications based on the stick-slip effect. In: *Proceedings of the 2000 International Symposium on Microelectronics and Human Science*, Nagoya, Japan. New Jersey: IEEE, 2000.213-216
- [5] Sun L N, Wang S, Song Y, et al. Model of a 3-DOF spherical micromanipulator based on stick-slip. In: *Proceedings of the 2005 International Conference on Mechanical and Automation*, Niagara Falls, Ontario, Canada. New Jersey: IEEE, 2005.1581-1585
- [6] 孙立宁,陈海初,李满天. 基于惯性-摩擦驱动的球基微驱动器逆转现象分析. 摩擦学学报, 2005, 9(25): 480-483
- [7] Marte S, Madden P, Sosnowski L, et al. NanoWalker: a fully autonomous highly integrated miniature robot for nano-scale measurements. In: *Proceedings of the European Optical Society (EOS) and SPIE International Symposium on Environment Microsystems Metrology and Inspection*, Munich, Germany, 1999. 111-122
- [8] Sang C K, Soe H K. A precision linear actuator using piezoelectrically driven friction force. *Journal of Mechanisms*, 2001, 11(8):969-985
- [9] Makris N, Constantinou M C. Analysis of motion resisted by friction. I. Constant coulomb and linear coulomb friction. *Mechanics of Structure and Machine*, 1991, 19(4): 477-500
- [10] 郭伟,汪盛,李满天. 基于黏滑驱动的球基微操作器动力学建模与分析. 机械工程学报, 2007, 43(4):138-143

Frequency response analysis of a stick-slip driven spherical micromanipulator

Wang Pengfei, Li Mantian, Sun Lining

(State Key Laboratory of Robotics and Systems, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

A two-mass-oscillator simplified engineering model for spherical micromanipulators was established under the condition of simplifying spherical higher pair joints. The frequency response features of the two-mass-oscillator with nonlinear elements were analyzed based on the Fourier series and harmonic balance method. The solution was demonstrated by the MATLAB simulation. The experiment was also done, and the validity of the analysis was further proved by the results. The simulation and experiment results proved that the spherical micromanipulator based on the stick-slip principle should be driven on the range of intermediate or low frequency, and the conclusion could be available for reference to micromanipulator control.

Key words: micromanipulator, spherical, stick-slip driver, frequency response