

应用于空间惯性传感器的压电驱动器的性能测试

李华东^{1,2}, 齐克奇¹, 石强³, 王少鑫¹, 王智^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国第一汽车股份有限公司新能源开发院, 吉林 长春 130011)

摘要: 为保证空间惯性传感器的正常在轨运行, 在发射阶段需保证测试质量固定以避免与周围电容极板的接触碰撞; 到达预定轨道后再重新捕获并以最小残余线速度将测试质量释放至精确位置, 保持自由悬浮状态。测试质量的捕获定位对驱动器提出高精度的要求。本文针对在太空中捕获定位释放测试质量所用的压电直线驱动器进行了设计定制与性能测试。试验结果表明: 该定制的压电驱动器最小步长小于 1 nm, 但步长稳定性误差较大; 150 V 工作电压条件最大驱动力达 72 N; 单步行进驱动力稳定; 夹持测试质量过程中, 驱动力稳定, 稳定性偏差为 0.16%。满足捕获、定位、释放机构的使用需求。

关键词: 精密驱动; 尺蠖运动; 压电驱动器; 驱动力; 位移分辨率

中图分类号: TH73, TH762 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20201302.0344

Performance test of piezoelectric actuators for space inertial sensors

LI Hua-dong^{1,2}, QI Ke-qi¹, SHI Qiang³, WANG Shao-xin¹, WANG Zhi^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academic of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. New Energy Development Institute of China FAW Group Co., Ltd., Changchun 130011, China)

* Corresponding author, E-mail: wz070611@126.com

Abstract: In order to ensure the normal operation of space inertial sensors in orbit, it is necessary to ensure the test mass is fixed during launch to prevent collision with the surrounding capacitor plate. It must grab the test mass after reaching its predetermined orbit and precisely release it in its correct position with minimal residual velocity such that it remains free-floating. In this paper, a piezoelectric linear actuator that is used to grab the test mass is designed, customized and tested for performance. The test results show that the customized piezoelectric actuator can achieve a minimum step size of less than 1 nm, but the step length stability error is large; the maximum driving force at 150 V of input is 72 N; the single stepping drive force is stable; during the process of fixing the test mass, the driving force is stable and the deviation in its stability is 0.16%. These findings meet the needs of the grabbing, positioning, and release mechanisms.

收稿日期: 2019-11-03; 修订日期: 2019-12-09

基金项目: 中国科学院“空间科学(二期)”战略性先导科技专项(No. XDA15020704)

Supported by Leading Special Project of Chinese Academy of Sciences(No. XDA15020704)

Key words: precision actuation; inchworm motion; piezoelectric actuator; driving force; displacement resolution

1 引言

2016年,中国科学院正式启动了我国空间引力波探测“太极计划”。2019年8月31日,“太极一号”作为我国首颗空间引力波探测技术实验卫星成功发射,其在轨实验结果满足设计需求。空间引力波探测的基本原理是以空间中两自由悬浮的测试质量(TM)为测量基准,将引力波信号转化为测试质量间距变化的信号,然后利用高精度的迈克尔逊激光干涉仪读出这个距离变化^[1-2]。在1 mHz~1 Hz频率段内,激光干涉测距的精度需达到 $10\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$,以实现预期的科学目标。该精度基本已接近激光干涉测量极限,对测量系统各部分的要求都极为严苛^[3-5]。惯性传感器是空间引力波探测装置中最重要的部分之一,其主要功能之一就是保证TM在发射阶段安全可靠地固定在电极笼内,卫星入轨后再将TM自由释放到空间中。此外,还要尽可能降低空间环境及卫星平台对TM的噪声扰动^[6]。TM作为惯性传感器的感应部件,需要通过电容传感及静电控制系统对其位置、姿态进行测量及控制,并使其在干涉测量的敏感轴方向上自由悬浮^[7]。为保证惯性传感器在太空中安全可靠地进入科学工作模式,TM在发射过程中的锁紧以及在太空中的定位释放显得尤为重要。由于受到惯性传感器静电驱动控制能力($5\times 10^{-7}\text{ N}$)的限制,TM释放后的初始状态要求如下:TM释放残余线速度小于 $5\text{ }\mu\text{m/s}$;TM释放残余角速度小于 $100\text{ }\mu\text{rad/s}$;TM释放位置偏差小于 $60\text{ }\mu\text{m}$;TM释放角度偏差小于 $60\text{ }\mu\text{rad}$ ^[8]。这对定位释放机构所用的驱动器提出了微米量级的要求。

在卫星发射过程中,为保证测试质量的可靠锁紧,由锁紧机构对TM施加的锁紧力均匀分配在上下各4根顶杆上。当到达预定轨道后,锁紧机构驱动顶杆反向运动,缓慢释放锁紧力。但由于空间中相互压紧的金属间存在较大的粘附力,该粘附力大小与锁紧力大小正相关^[9],无法通过

锁紧机构的直接释放达到指标需求。因此,需要对TM重新进行捕获、定位、释放,该过程由捕获、定位、释放机构(GPRM)完成^[10]。

TM是一边长为46 mm的金铂合金立方体,锁紧机构通过上下各4根顶杆对TM进行夹持,夹持位置位于立方体8个顶点处。而GPRM上下两部分位于锁紧机构顶杆的中间空余位置,这对GPRM的尺寸有较大的限制,故对GPRM各驱动及检测部件的紧凑性有要求。

考虑到空间中释放机构的捕获精度需求、无磁化要求以及空间尺寸的限制,拟采用尺蠖型压电直线驱动器作为释放机构的驱动装置。本文从尺蠖型压电直线驱动器原理出发,调研多种尺蠖型驱动器结构形式,针对释放要求以及空间限制等条件,向PI公司定制了一款尺蠖型压电驱动器。针对该定制型驱动器,通过搭建测试系统进行性能测试与标定分析,以检查各项指标是否满足要求,包括:最小运动分辨率、最大驱动力、运动稳定性等。

2 压电驱动器的工作原理与结构

尺蠖型压电驱动器模仿自然界中尺蠖的运动方式,即“箝位—驱动—箝位”进行设计的,也称作蠕动式压电驱动器。这种驱动器将单步微小位移量不断累积,从而实现精密的定位精度以及大行程的输出,具有输出位移大、定位精度高、响应速度快、单位体积输出力大、对外界磁场扰动小等优点^[11]。经过长时间的发展,目前为止,出现了很多具有不同特点、应用于各种场合的多种结构形式的尺蠖型压电直线驱动器^[12-17]。很多学者针对各类尺蠖型压电驱动器性能测试以及精度、稳定性等各项性能指标的提升进行了广泛研究与分析^[18-20]。图1为应用尺蠖型压电驱动器的GPRM结构及捕获TM示意图。

上下两尺蠖型压电直线驱动器以步进驱动的方式分别驱动上下两根顶杆(如图2所示安装于执行单元的前端)对TM重新进行捕获,夹持位置

位于 TM 上下两个面中心位置具有特定形状的开孔处,用来保证和限制 TM 在电极笼内的位置和姿态。顶杆完成对 TM 的捕获定位后,再由顶杆内部的压电堆叠驱动顶针伸出,进行夹持,即该驱动器的执行单元为一中空结构,内部用于安装另一套压电驱动结构。在顶针接触到 TM 后,压电直线驱动器驱动顶杆整体向后运动的同时,执行单元内部压电堆叠保持驱动来保证顶针的夹持力,顶杆退出后,再快速回缩顶针完成释放过程。该驱动器主要用于 TM 的捕获及精密定位,释放过程由该驱动器执行单元内部的压电堆叠驱动顶针完成。

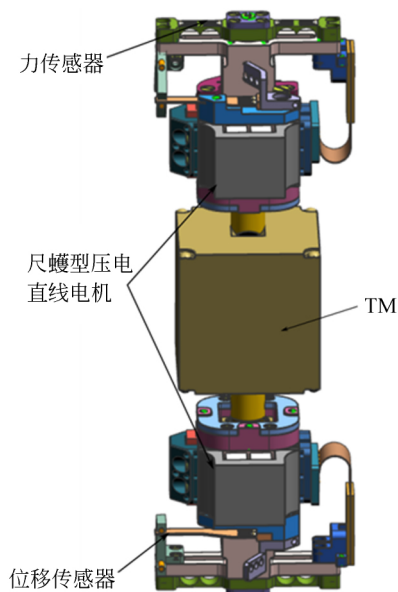


图 1 应用尺蠖型压电直线驱动器的 GPRM 结构及捕获 TM 原理示意图

Fig. 1 Structure of GPRM with inchworm-piezoelectric linear actuator and principle of grabbing TM

传统的尺蠖型驱动器箝位与驱动压电单元单独封装、垂直布置,结构方式封装结构简单,但结构不够紧凑。而针对空间惯性传感器 TM 捕获、释放而定制的驱动器将箝位与驱动压电陶瓷封装在一个单元内,多个单元分为两组交替共同驱动,各单元箝位与驱动压电陶瓷堆叠独立交替施加电压。该驱动器驱动原理以及压电陶瓷堆叠封装形式如图 2 所示。

其中单个驱动单元的驱动模式如图 3 所示,其运动周期类似于人迈步行走的运动模式——

抬腿、迈步、落地、前进。假设单个驱动单元一个周期产生的前进步长为 d ,但由于压电单元与执行单元之间依靠静摩擦驱动,可能存在相对滑动,而且压电单元之间也存在差异性以及压电陶瓷的非线性等因素,各步长可能不同。因此需要对该驱动器进行性能测试,以确定其位移分辨率及稳定性等。

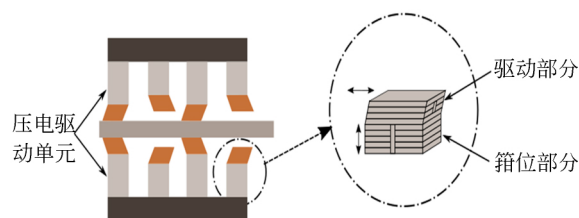


图 2 驱动原理及压电堆叠封装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of driving principle and piezoelectric stack packaging

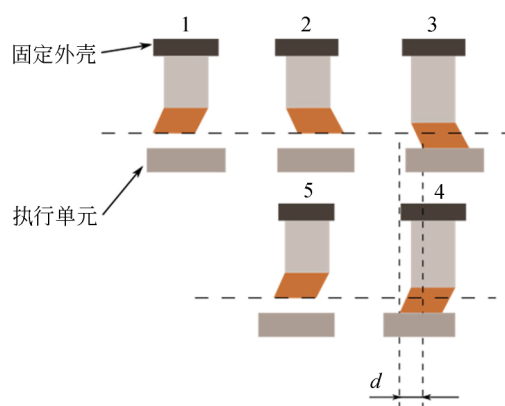


图 3 压电单元驱动模式

Fig. 3 Driving mode of piezo element

定制压电直线驱动器的结构图如图 4 所示。执行单元与压电驱动单元接触陶瓷表面经过精密研磨,以保证各压电驱动单元对执行单元施加压力的均匀性,进而保证执行单元运动的稳定性以及精密定位。较大的接触面积用以保证直线驱动器具有较大的驱动力。没有其他辅助导向支撑结构使得整体结构轻巧。执行单元上的中空结构是为释放顶针及其驱动的压电陶瓷预留的空间。该直线驱动器的结构尺寸为 $60\text{ mm} \times 43\text{ mm} \times 45\text{ mm}$,正反行程为 20 mm ,设计最大驱动力为 70 N 。

定制完成的压电直线驱动器实物如图 5 所示。

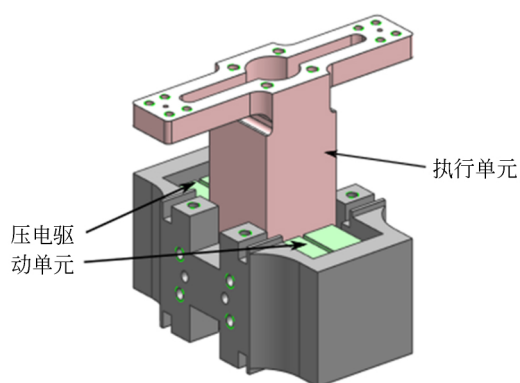


图4 压电直线驱动器结构图

Fig. 4 Structure of piezoelectric linear actuator

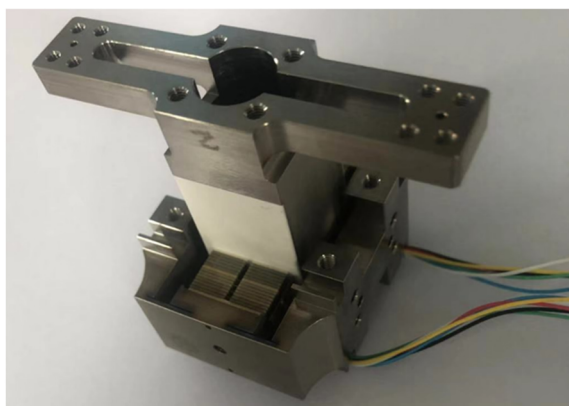


图5 压电直线驱动器实物图

Fig. 5 Prototype of piezoelectric linear actuator

3 压电驱动器性能测试系统

针对位移和力的不同测量情况,设计了不同工装、搭建了不同的测试系统以保证测量结果的精确度。

3.1 位移测量

位移测量系统采用 PI 公司生产的 D-E200 型单极电容位移传感器测量结合 E-E712 多通道数字型信号处理器采集数据。该传感器的量程为 $200\ \mu\text{m}$,静态测量分辨率小于 0.001% ,动态测量分辨率小于 0.002% 。测量工装如图 6 所示,压电直线驱动器前端测试板经过精密研磨,用以保证测试精度,各安装接触面装配式修配保证电容传感器探头与驱动器前端测试板的平行度。

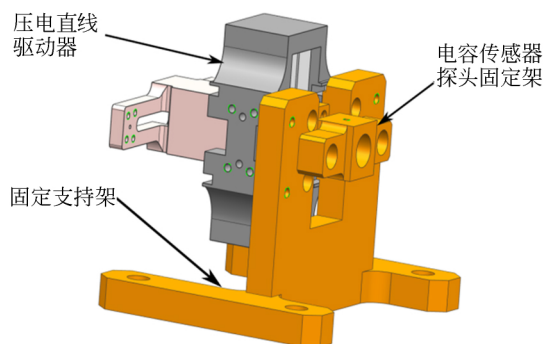


图6 位移测量图

Fig. 6 Displacement measurement system

3.2 驱动力测量

驱动力测量系统采用 HBM 公司生产的 1-S9M 型力传感器结合 K-PMX 四通道采集放大器采集数据。该传感器的量程为 $500\ \text{N}$,分辨率为 $0.02\ \text{N}$ 。测量工装如图 7 所示,压电驱动器前端安装球头,以消除安装误差引起的剪切力、摩擦力等的影响。

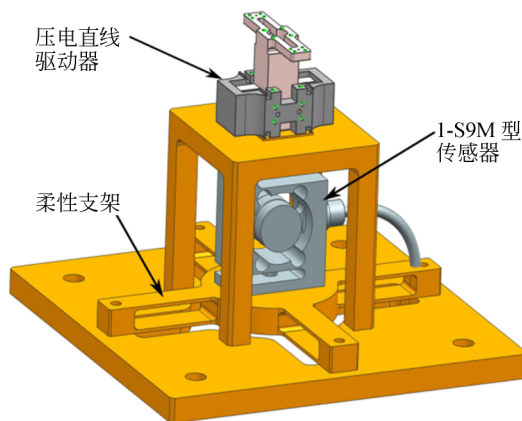


图7 驱动力测量图

Fig. 7 Driving force measurement system

传感器底面由柔性片支撑,一方面可防止在驱动器驱动过程中因力传感器刚度过大位移受限导致超出驱动力范围,而无法测得驱动器在正常工作情况下的驱动力;另一方面柔性片的变形量可以反映出传感器的受力情况,进一步反映出压电直线驱动器的驱动力。因此针对驱动力测量工况,利用 ANSYS workbench 模块大变形模式对柔性片进行有限元静力分析,得到柔性片变形与驱动力的关系。柔性片变形云图如图 8 所示。

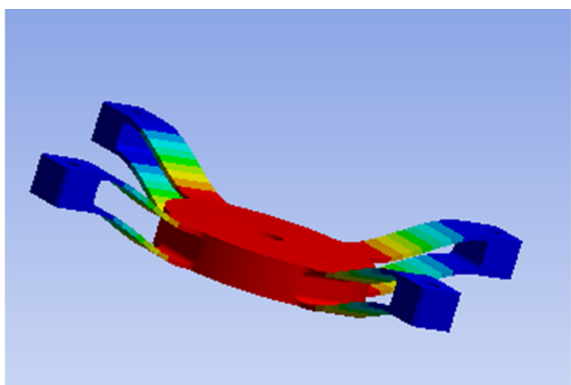


图 8 柔性片变形云图

Fig. 8 Deformation nephogram of flexible sheet

由柔性片变形图可看出,变形最大处为与传感器接触的部分。分析不同压力条件下柔性片所产生的最大变形,如表 1 所示,以此来指导测量过程中驱动器的行进位移。

表 1 柔性片不同受力条件下的最大变形及最大应力

Tab. 1 Maximum deformation and maximum stress of flexible sheet under different forces

序号	施力大小/ N	最大变形/ mm	最大应力/ MPa
1	10	0.008 428	4.395 5
2	20	0.016 855	8.798 1
3	30	0.025 281	13.207
4	40	0.033 704	17.623
5	50	0.042 124	22.045
6	60	0.050 541	26.473
7	70	0.058 953	30.905
8	80	0.067 360	35.343
9	90	0.075 761	39.786
10	100	0.084 154	44.232

为更明显地看出柔性片受力与最大变形之间的关系,作出柔性片最大变形与受力关系曲线,如图 9 所示。

从图 9 可以看出,在驱动器驱动力范围内柔性片的变形量与受力满足良好的线性关系。在驱动力稳定性测量时,可根据此线性关系初步确定合适的前进位移,从而得到驱动器的驱动力测量

数据。通过对力的实时测量,确定其在保持驱动力的条件下,驱动器的执行单元是否会发生攒动现象。具体分析见本文 4.4。

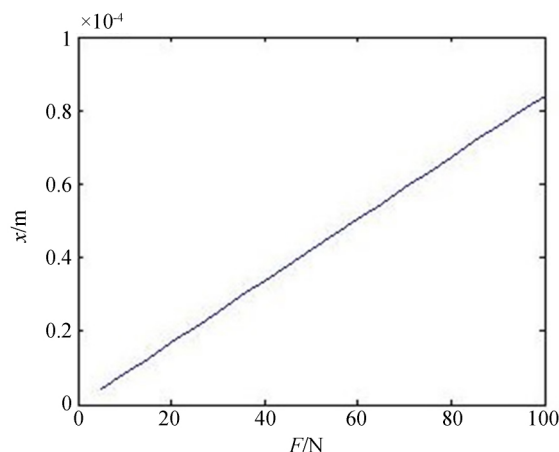


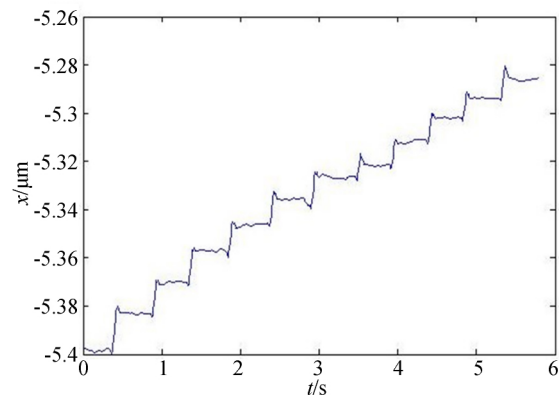
图 9 柔性片最大变形与受力关系曲线图

Fig. 9 Relationship between maximum deformation and force for flexible sheet

4 压电驱动器性能测试

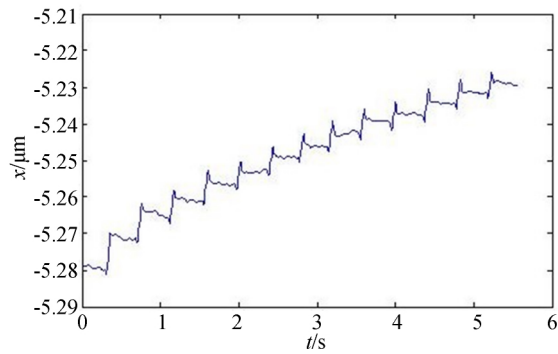
4.1 步长标定

压电直线驱动器执行单元的前进步长由压电堆叠的驱动部分控制,改变施加在驱动堆叠的电压,可获得不同的步长,由于压电材料的非线性特性,以及极小的输入电压,驱动电压与输出步长的非线性会相当明显,所以需要对不同驱动电压下的步长进行单独标定。图 10 为在不同驱动电压下,单步行进所获得的测量曲线。



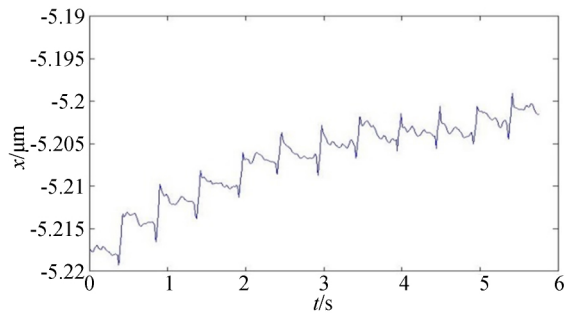
(a) 0.1 V 驱动电压下单步行进位移测量曲线

(a) Measuring curve of single step under 0.1 V driving voltage



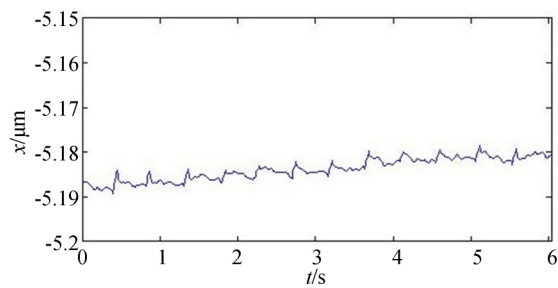
(b) 0.01 V 驱动电压下单步行进位移测量曲线

(b) Measuring curve of single step under 0.01 V driving voltage



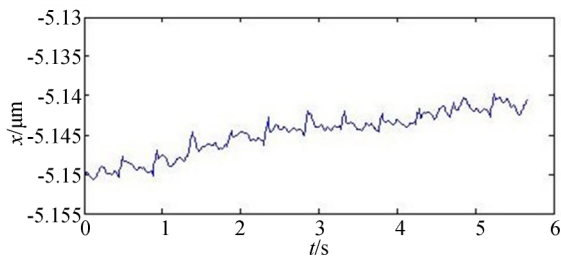
(c) 0.001 V 驱动电压下单步行进位移测量曲线

(c) Measuring curve of single step under 0.001 V driving voltage



(d) 0.0002 V 驱动电压下单步行进位移测量曲线

(d) Measuring curve of single step under 0.0002 V driving voltage



(e) 0.0001 V 驱动电压下单步行进位移测量曲线

(e) Measuring curve of single step under 0.0001 V driving voltage

图 10 各驱动电压下步长测量曲线图

Fig. 10 Measuring curves of step length under various driving voltages

通过对每组测量数据取十步行进位移求平均值, 并将其作为该驱动电压下的步长。各驱动电压下步长数据如表 2 所示。

表 2 驱动器不同电压下的平均步长

Tab. 2 Average step length of actuator at different voltages

序号	驱动电压 / V	平均步长 / nm
1	0.1	10.23
2	0.01	3.40
3	0.001	1.60
4	0.0002	0.85
5	0.0001	0.81

从测量数据可以看到, 驱动电压与步长具有明显的非线性关系, 能达到的最小步长小于 1 nm, 该步长精度完全满足 TM 捕获、定位需求。进一步减小电压, 步长变化不明显且曲线阶梯形状也不再明显, 基本已经达到极限控制及测量精度。图 11 为步长测量系统图。

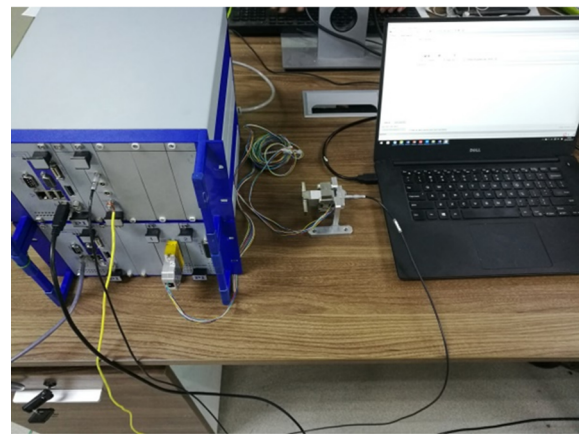


图 11 步长测量系统

Fig. 11 Step length measurement system

4.2 步长稳定性分析

步长稳定性反映的是压电驱动器在相同驱动电压信号作用下驱动器输出位移的稳定性。驱动器在相同驱动电压下, 各行进步长均存在一定的差值, 引用失稳系数作为评价步长稳定性的指标, 该系数相当于执行单元步进运动中单步位移的平均偏差率^[21]。

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n |s_i - \bar{s}|}{n \bar{s}} \times 100\% , \quad (1)$$

其中 η 为步长失稳系数 n 为前进的总步数 s_i 为第 i 步的步长 $\bar{s}$ 为 n 步的平均步长。

通过分析 4.1 节中由电容传感器测得的行进位移数据,可求得不同驱动电压下的步长稳定性偏差。表 3 列出了各驱动电压下的步长稳定性偏差。

表 3 不同电压下驱动器的步长稳定性偏差

Tab.3 Step stability deviation of actuator under different driving voltages

序号	驱动电压/V	失稳系数/(%)
1	0.1	13.48
2	0.01	13.09
3	0.001	34.06
4	0.0002	58.68
5	0.0001	49.38

由表 3 可以看出,随着驱动电压的减小,步长稳定性偏差明显增大。失稳系数最大可达 50% 以上。分析原因:首先,压电堆叠本身具有一定的非线性;其次,各压电堆叠之间存在的一定的差异,驱动电压越小,这种差异体现在步长上越明显。考虑到该驱动器步长稳定性差异的影响无法避免,在实际应用过程中需依靠驱动器顶部的力传感器以及侧面的位移传感来实时判定捕获状态。

4.3 最大驱动力测试

压电驱动器的驱动力是指驱动器在能够保持连续步进运动的情况下可以提供的最大驱动力。该驱动器的驱动力大小由压电堆叠箝位部分两端施加的电压大小决定,正常使用工况下,箝位电压为 150 V,因此试验测量在施加 150 V 电压下的驱动力。由控制器对驱动器发出步进命令,驱动器执行单元步进过程中不断对 1-S9M 型号力传感器施加推力,由 K-PMX 采集放大器采集得到驱动力数据如图 12 所示。

由测量数据可得,该尺蠖型压电直线驱动器在 150 V 工作电压下的最大驱动力为 72.06 N,驱

动力在超过 70 N 后线性度明显降低。设计要求的最大驱动力为 70 N,故满足工作要求。图 13 为驱动力测量系统图。

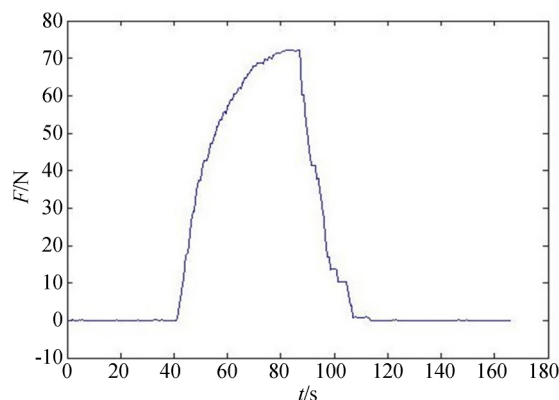


图 12 最大驱动力测试曲线

Fig. 12 Testing curve of maximum driving force



图 13 驱动力测试系统

Fig. 13 Driving force testing system

4.4 驱动力稳定性测试

驱动力稳定性是考察执行单元在停止过程中保证输出力稳定的同时是否发生颤动现象。该测试的主要目的在于验证该压电直线驱动器在 GPRM 捕获 TM 后,在对 TM 短暂夹持阶段是否会发生颤动现象。由本文 3.2 的分析可以看出,当驱动器发生颤动现象时,因变形量的改变,输出力相应也会发生变化,所以可通过输出力的变化反映该稳定性。

根据实际使用工况,选择合适的固定驱动力输出,驱动压电直线驱动器的执行单元在驱动力达到 60 N 附近时保持停止状态 15 s 以上,得到驱动力稳定性测试曲线如图 14。

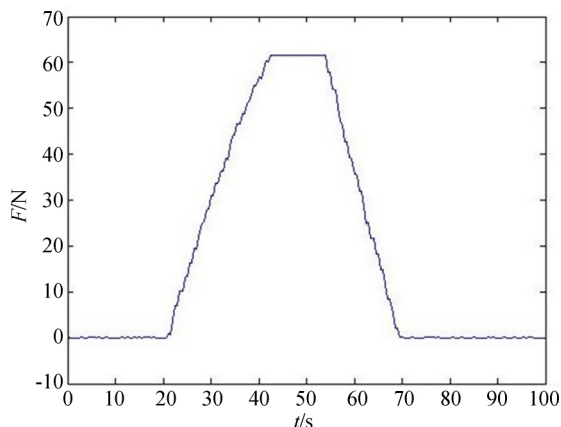


图14 驱动力稳定性测试曲线

Fig. 14 Testing curve of driving force stability

停止过程中线性拟合方程及相关系数为:

$$F = 0.001t + 61.5572, \quad (2)$$

$$r = 0.2706. \quad (3)$$

从拟合方程可以看出斜率基本为零。拟合相关系数 r 的绝对值越接近 1, 说明实验测得的数据越密集地分布在拟合直线附近, 拟合越精确^[22]。但相关系数为 0.2706, 说明大部分数据存在波动量, 取波动极差比作为固定夹持过程中驱动力的稳定性偏差:

$$\eta_F = \frac{|F_{\max} - F_{\min}|}{F_{\text{aver}}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 η_F 为驱动力稳定性偏差; $F_{\max}$ 为固定阶段最大驱动力; $F_{\min}$ 为固定阶段最小驱动力; F_{aver} 为固定阶段驱动力的平均值。

可得驱动力稳定性偏差 $\eta_F = 0.16\%$, 稳定性较好。在 60 N 左右夹持力的条件下, 波动范围基本在 ± 0.05 N 内, 驱动力的波动范围完全满足夹持定位需求。

5 结 论

本文针对空间引力探测“太极计划”惯性传感器的 TM 捕获释放机构设计定制了一种尺蠖型压电直线驱动器。该驱动器具有运动分辨率小, 驱动力输出稳定等特点。完成了性能测试方案的设计及实验平台的搭建。试验结果表明: 该定制的尺蠖型压电驱动器可实现最小步长小于 1 nm 的运动, 但步长稳定性随电压的降低有明显下降; 150 V 工作电压下的最大驱动力为 72 N; 单步行进驱动力稳定; 固定过程中, 驱动力稳定, 稳定性偏差为 0.16%。该驱动器的性能满足太极计划的设计需求。

参考文献:

- [1] 罗子人, 白嫻, 边星, 等. 空间激光干涉引力波探测[J]. 力学进展, 2013, 43(4): 415-447.
LUO Z R, BAI SH, BIAN X, et al. Space laser interferometry gravitational wave detection[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(4): 415-447. (in Chinese)
- [2] 王智, 马军, 李静秋. 空间引力波探测计划-LISA 系统设计要点[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 980-987.
WANG ZH, MA J, LI J Q. Space-based gravitational wave detection mission: design highlights of LISA system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 980-987. (in Chinese)
- [3] 高瑞弘, 刘河山, 罗子人, 等. 太极计划激光指向调控方案介绍[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 425-431.
GAO R H, LIU H SH, LUO Z R, et al. Introduction of laser pointing scheme in the Taiji program[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 425-431. (in Chinese)
- [4] 赵亚, 姚东, 王智, 等. 应用于空间精密测量的全玻璃光纤耦合器的系统设计[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 432-440.
ZHAO Y, YAO D, WANG ZH, et al. System design of all glass fiber couplers for precise space measurement[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 432-440. (in Chinese)
- [5] LI Y P, LIU H SH, ZHAO Y, et al. Demonstration of an ultraprecise optical bench for the Taiji space gravitational wave detection path finder mission[J]. *Applied Sciences* 2019, 9(10): 2087.
- [6] 王少鑫, 齐克奇, 王玉坤, 等. 电极不对称性对惯性传感器性能损失的研究[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 455-462.

- WANG SH X, QI K Q, WANG Y K, *et al.*. Study on loss of performance in inertial sensors due to electrode asymmetry [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 455-462. (in Chinese)
- [7] 白彦峥, 田蔚, 周泽兵, 等. 高精度空间加速度计及其应用[J]. *空间科学学报*, 2010, 30(6): 601-606.
BAI Y ZH, TIAN W, ZHOU Z B, *et al.*. High-precision space-borne accelerometer and its applications [J]. *Chinese Journal of Space Science* 2010, 30(6): 601-606. (in Chinese)
- [8] BORTOLUZZI D, MÁUSLI P A, ANTONELLO R *et al.*. Modeling and identification of an electro-mechanical system: the LISA grabbing positioning and release mechanism case [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(3): 453-465.
- [9] BORTOLUZZI D, ZANONI C, VITALE S. Improvements in the measurement of metallic adhesion dynamics [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 52-53: 600-613.
- [10] BORTOLUZZI D, BAGLIVO L, BENEDETTI M *et al.*. Test-mass release phase ground testing for the LISA path finder mission [C]. *American Institute of Physics Conference Proceedings of the 6th International LISA Symposium*, NASA Goddard Space Flight Center, 2006: 556-561.
- [11] 赵宏伟, 刘建芳, 华顺明, 等. 压电型步进精密旋转驱动器[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3): 305-310.
ZHAO H W, LIU J F, HUA SH M, *et al.*. Piezoelectric-type stepping precision rotary actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 305-310. (in Chinese)
- [12] 李鹏志. 压电驱动器的纳米级精度控制及其在光刻物镜中的应用研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
LI P ZH. Research on nano scale precise control of piezoelectric actuator and its application in lithographic projection lens [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [13] LI J P, ZHAO H W, QU X T, *et al.*. Development of a compact 2-DOF precision piezoelectric positioning platform based on inchworm principle [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 222: 87-95.
- [14] 刘建芳. 压电步进精密驱动器理论及实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
LIU J F. Theoretical and experimental study on piezoelectric precision step actuator [D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)
- [15] LI J P, ZHAO H W, QU H, *et al.*. A piezoelectric-driven rotary actuator by means of inchworm motion [J]. *Sensors and Actuators A: Physical* 2013, 194: 269-276.
- [16] 刘宇阳. 步进式压电驱动直线运动系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
LIU Y Y. Research on linear motion system driven by stepping piezoelectric actuator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 齐克奇, 向阳. 光刻物镜波像差检测球面波发生装置的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(7): 1518-1524.
QI K Q, XIANG Y. Development of spherical wave generating device for lithographic objective wavefront aberration detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(7): 1518-1524. (in Chinese)
- [18] FU X, XIAO W L, XU L Y. Piezoelectric inchworm-type probe-approaching stepper [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8321: 83210Z.
- [19] 赵余杰, 孙庆龙, 张志豪, 等. 压电尺蠖直线电机的设计[J]. *压电与声光*, 2018, 40(2): 206-210.
ZHAO Y J, SUN Q L, ZHANG ZH H, *et al.*. Design of a piezoelectric linear motor based on inchworm motion [J]. *Piezoelectrics & Acousto Optics*, 2018, 40(2): 206-210. (in Chinese)
- [20] 郭文峰, 曲建俊, 曲华杰, 等. 箱位体刚度平衡对被动箱位压电驱动器性能的影响[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 738-744.
GUO W F, QU J J, QU H J, *et al.*. Influences of balanced stiffness of clamping body on performance of inverse piezoelectric inchworm motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 738-744. (in Chinese)
- [21] 赵宏伟, 吴博达, 杨志刚, 等. 尺蠖型压电直线驱动器的运动稳定性分析[J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, 5(1): 49-54.
ZHAO H W, WU B D, YANG ZH G, *et al.*. Analysis of motion stability for inchworm-type piezoelectric linear actuator

- [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, 5(1): 49-54. (in Chinese)
- [22] 李全松. 尺蠖型压电直线电动机制作及性能测试[J]. 微特电机, 2014, 42(6): 21-24.
- LI Q S. Machining and functional testing of inchworm-type piezoelectric linear motor[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2014, 42(6): 21-24. (in Chinese)

作者简介:



李华东(1995—),男,山东潍坊人,硕士研究生,2017年于东北大学获得学士学位,主要从事空间惯性传感器相关设计方面的研究。E-mail: 356549686@qq.com



王智(1978—),男,山东寿光人,博士研究生,博士生导师,2003年于长春理工大学获得硕士学位,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间引力波探测领域的研究。E-mail: wz070611@126.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04;国内外公开发行,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| ★ 美国工程索引(EI)数据库 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| ★ 美国 ESCI 数据库 | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgghxcn@126.com

联系电话:0431-86176852; 0431-84627061 传 真:0431-84627061

编辑部地址:长春市东南湖大路3888号(130033)