MEMS 和 MOEMS 技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022112101

可集成制造的平面型电磁直线作动器研究

武　强[1]，管伟昌[2]，戴旭涵[1*]，王怀治[1]，高宇帆[1]，丁桂甫[1]

（上海交通大学 1. 微米/纳米加工技术国家级重点实验室；2. 先进电子材料与器件平台）

摘　要： 电磁作动器具有输出力大、行程长、无接触等优势，在通信、自动测试、电力电子等领域有着广泛的应用，但受限于体积大、制造工艺复杂，难以满足相关领域电子系统向微型化、集成化的发展需求。针对上述问题，应用平面型集成线圈及高深宽比微结构设计，制造了一种微型化电磁作动器的原型样机，初步测试结果表明，器件的输出力可达毫牛量级，输出位移大于 50 μm，响应时间小于 10 ms，为进一步开展相关器件研究探明了可行的技术路径。

关键词： 微电磁驱动器；微线圈；集成制造

中图分类号： TM359.9　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1092－07

Study of Planar Electromagnetic Linear Actuators with Integrated Manufacturing

WU Qiang[1], GUAN Weichang[2], DAI Xuhan[1], WANG Huaizhi[1], GAO Yufan[1], DING Guifu[1]

(1. National Key Laboratory of Micro/Nano Fabrication Technology, Shanghai Jiao Tong University;
2. Center for Advanced Electronic Materials and Devices, Shanghai Jiao Tong University, CHN)

Abstract: The electromagnetic actuator has a wide application prospect in communication, automatic testing, and power electronics due to its high output force, long stroke, and no contact, but it is difficult to meet the development demand of miniaturization and integration of electronic systems in related fields due to its large size and complicated manufacturing process. To address the above problems, a prototype of miniaturized electromagnetic actuator was designed and manufactured by applying planar integrated coils and high aspect ratio microstructure. Preliminary test results show that the output force of the device can reach the mN level, the output displacement is greater than 50 μm, and the response time is less than 10 ms, which indicates a feasible technical path for further research on the device.

Key words: micromagnetic drives; microcoils; integrated manufacturing

0　引言

微作动器按其行程方向可以分为面内运动(in-plane)和面外运动(out-of-plane)两大类，目前面外运动类型的微作动器的研究较为广泛，相比之下，面内运动型作动器(Linear Actuator，直线作动器)，尤其是行程在毫米量级的直线微作动器的研究正方兴未艾。随着微光机电系统(MOEMS)研究的不断推进，例如为了满足微型光谱仪中的光学调整要求，如何实现大行程(约 100 μm)、高输出力(毫牛量级)、快速响应(毫秒量级)的直线型微作动器已成为亟待解决的关键问题，在这方面，微电磁作动器具有独特的性能优势，具有多种应用[1-2]。但如何实现微电磁直线作动器的集成制造已经成为亟待解决的问题[3-6]，成为一个重要的研究方向[8-10]。

在过去的几年里，许多学者和研究机构开发出各种结构的微电磁直线作动器并且提出理论模型与力学表征方法。Hahn 等提出了一种基于同步电机原理的微型化线性作动器方案[11]，其输出力可达毫牛量级，行程可达毫米量级，但由于同步电机结构需要多组线圈，一方面增加了器件面积，另一方面需要

收稿日期：2022－11－21.
基金项目：国家自然科学基金项目(51875337)；国家基础科研计划项目(JCKY2019602B004).
* 通信作者：戴旭涵　E-mail：xhdai@sjtu.edu.cn

不同相位的复杂驱动信号，同时器件的响应时间也较长，且驱动器可动部分（动子）仍采用宏观器件的导轨结构，限制了体积进一步微型化。熊壮等提出的大行程微电磁作动器[10]，定子部分由两组蜿蜒形线圈绕组构成，驱动带有永磁阵列的滑块实现定向运动，行程可达到毫米量级，但是为了获得较大行程，对应的线圈绕组的面积也相应增大，且上述结构导致单位行程上参与驱动的线圈绕组较少，由此导致器件的输出力提高较为困难，同时响应时间和驱动激励信号方面与 Hahn 等人的方案也有相同问题，作动器的输出如何带动负载也需要进一步研究解决。Kim 提出了一种微型线性电磁驱动器[12]，定子部分由大量平面线圈构成，动子部分则带有大量永磁体，行程可以达到毫米量级，响应时间在几十至几百微秒，该结构由于线圈与永磁体较多，因此限制了其进一步微型化，且响应时间比较长。

综上所述，目前微型化电磁直线作动器在各领域的应用正方兴未艾[13-15]，但如何针对相关领域对作动器行程、输出力的需求[16-19]，提出一种满足综合性能需求、易于实现集成制造的器件方案，同时运用原位表征方法定量评估、验证器件性能，仍是亟待解决的问题。针对上述问题，本文提出了新的方案，基于集成制造方法制作了原型器件，初步的原位测试结果表明，器件输出力大于 5 mN，行程约为 70 μm，响应时间小于 9 ms。

1　微作动器结构设计

本文设计的微型电磁驱动器主要包括平面线圈，带弹簧的滑块以及永磁体，图 1 是整体视图，图 2 是剖视图。其中线圈在最下层，滑块通过垫片支撑，位于线圈上方，垫片中间开有方孔，永磁体固定在滑块上，穿过垫片上的方孔悬空在线圈上方。如图 3 所示，由于在初始位置，永磁体与线圈绕组中心

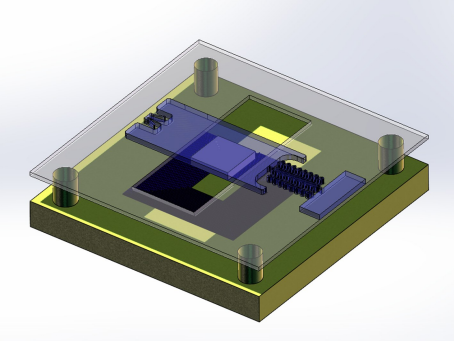


图 1　结构图

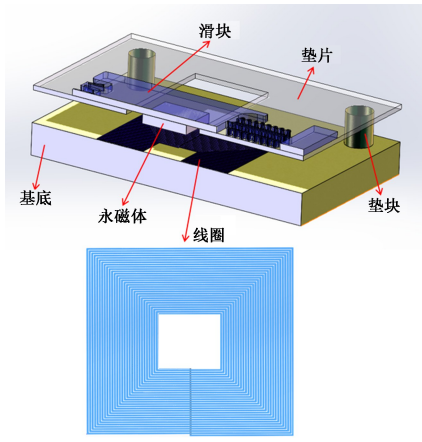


图 2　结构剖面图

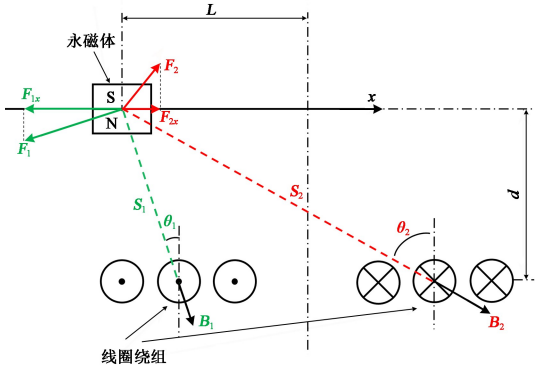


图 3　原理示意图

错开一段距离，导致永磁体发出的磁通 B_1、B_2 到达线圈绕组两侧的距离 S、角度 θ 不同，作用在两侧线圈绕组的安培力不同，F_1 与 F_2 是不同电流方向的线圈两侧绕组施加给永磁体的作用反力，F_{1x} 与 F_{2x} 分别是 F_1 与 F_2 在 x 轴的分力，由于距离原因，F_1 大于 F_2，因此由图中可以看出，F_{1x} 大于 F_{2x}。当固定线圈绕组，永磁体可动时，磁铁在两侧线圈绕组的合力的作用下产生水平方向运动。

2　仿真与分析

根据上节中介绍的原理，气隙间距（图 3 中的 d）、永磁体大小、输入电流大小，以及永磁体与线圈相对位错（图 3 中的 L）都会对微电磁作动器输出结果产生影响，因此通过仿真分别模拟计算了不同情况下的电磁力大小，为参数选取和优化提供依据。

图 4 为利用 Comsol 软件建立的线圈与永磁体之间的磁场分布模型，据此计算了不同参数对应的输出力情况。

在其他因素保持不变的情况下，本文通过改变永磁体与线圈的气隙大小，仿真其电磁力大小，结果

如图 5 所示。可以看出，随着气隙增大，电磁力整体上在减小，但是在一定小范围内有奇点，因此在实验过程中结合目前工艺条件确定气隙为 0.2 mm。

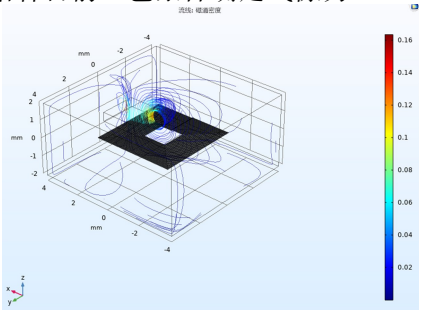


图 4 器件内部电磁场分布模型图

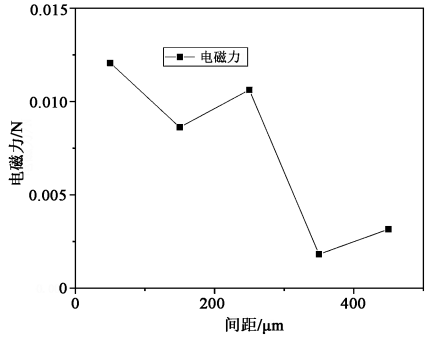


图 5 不同间距时的电磁力

在其他因素保持不变的情况下，通过改变永磁体大小，仿真其电磁力大小，结果如图 6 所示。可以看出，随着永磁体增大，电磁力呈现波动变化。这是由于当改变永磁体边长之后，此时线圈产生的磁场没有改变，而永磁体虽然总的剩磁没有改变，但是磁场空间分布会受到影响，永磁体和线圈产生的磁场相互叠加之后的磁场空间分布会改变，使得最后呈现出的集总效果发生变化，体现在仿真结果中就是产生的电磁力会随永磁体面积大小的变化而发生波动，因此需要据此优化永磁体的平面尺寸，此处永磁体的边长为 2 mm。

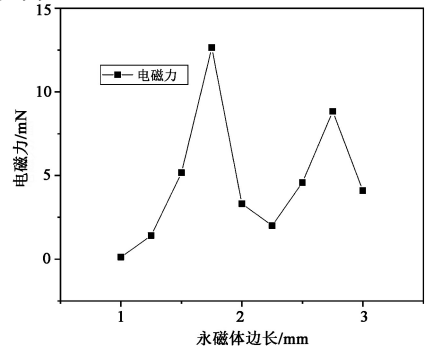


图 6 不同永磁体大小时的电磁力

在其他因素保持不变的情况下，本文通过改变永磁体与线圈的输入电流大小，仿真其电磁力大小，结果如图 7 所示。可以看出，随着线圈输入电流增大，电磁力逐渐增大，但在 100～200 mA 附近，电磁力随电流增大的速度有所放缓。

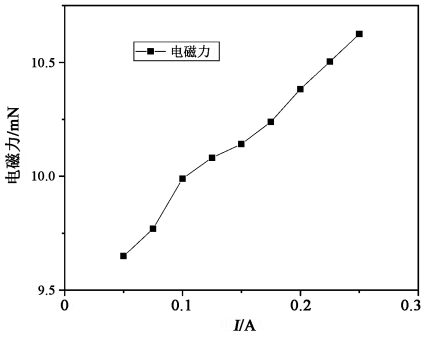


图 7 不同电流大小下的电磁力

在其他因素保持不变的情况下，本文通过改变永磁体与线圈的横向错位长度，分别错位了 0，1，1.5 mm，仿真其电磁力大小，结果如图 8 所示。可以看出，随着错位距离增大，电磁力大小先增大后减小。本文分析认为，改变错位长度与改变永磁体边长效果类似，相当于改变了永磁体与线圈电磁场叠加后的磁场空间分布，对应的电磁力大小也会产生极点。据此确定初始位错量为 1 mm。线圈尺寸为 3 mm×3 mm×1.5 mm，永磁体尺寸为 2 mm×2 mm×0.5 mm，滑块弹簧尺寸为 3 mm×8 mm×0.1 mm。

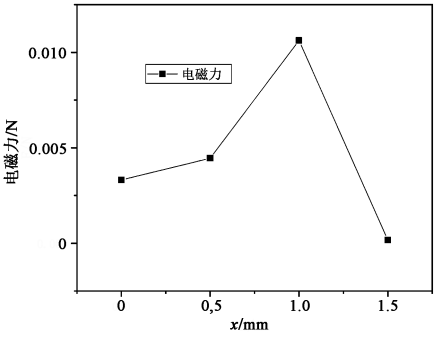


图 8 不同位错下的电磁力

3 器件集成制造方法

本文所研制的电磁微作动器包括平面线圈、弹簧滑块及永磁体三部分。其中平面线圈绕组可以采用前期研究的集成工艺[19]实现批量化制造。与其他研究相比，本文的器件可动部分（框架、滑块与弹簧）采用 UV-LIGA 微电铸工艺集成制造，无需装配，极大地降低了整体器件的制造难度。图 9 所示为对应制造工艺流程图：

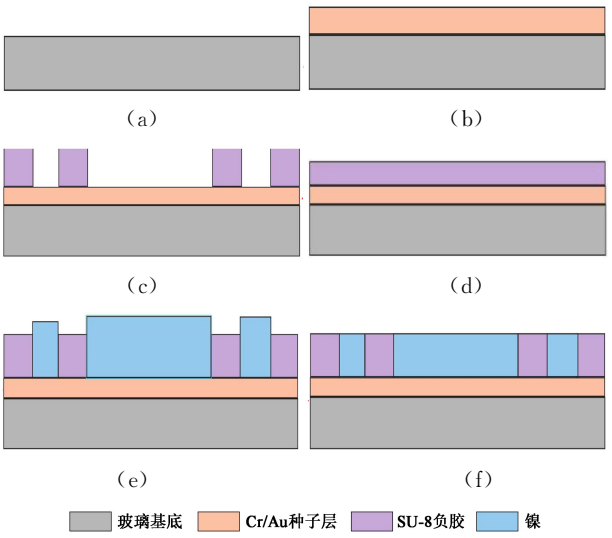


图 9　弹簧集成制造流程图

具体制造过程如下：

(1)清洗玻璃片基底并且烘干；

(2)溅射 Cr/Au 种子层；

(3)旋涂一层厚度为 200 μm 左右的负性光刻胶 2150，并且烘干光刻胶。烘干光刻胶的过程中要注意缓慢升高温度，充分释放应力，且要保证充足的烘干时间，避免烘干不彻底；

(4)光刻后烘胶，然后显影。显影的过程中注意避免外界紫外光的照射导致的显影效果不佳，而且每一次显影后用显微镜观察显影效果，若不理想可以适当继续增加显影时间；

(5)电镀镍。电镀的过程中计算好电镀电流，电流要缓慢逐次地增加到目标电流且不可以超出目标电流过多，因为过大的电流会导致基片产生裂纹；

(6)研磨并且抛光镍层。最后去除光刻胶释放器件。研磨抛光镍之后先使用 HF 酸将基片玻璃刻蚀掉，然后使用合适的溶剂将 Cr/Au 种子层去掉，最后再去光刻胶释放器件；

图 10 为单个基片上集成制造的滑块与弹簧阵列图。

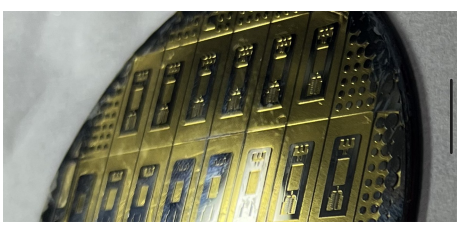


图 10　滑块集成制造样品照片

待完成平面线圈和滑块的集成制造后，再通过进一步的封装工艺完成原型器件的制备。首先，将线圈固定在基底表面，如图 11(a)所示；其次，将垫片/垫块固定在基底上，如图 11(b)所示；最后，把永磁体固定在滑块下方，然后把滑块固定在垫板上表面，如图 11(c)所示。其中垫片和垫块可以采用 SU8 胶光刻制作，其厚度和平面尺寸精度可达微米量级，以确保加工精度。装配完成的原型样品如图 12 所示。

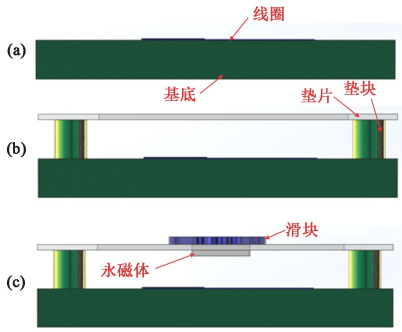


图 11　作动器装配过程

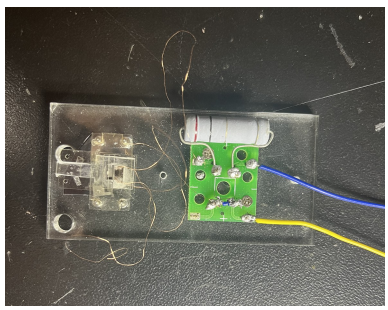


图 12　作动器装配实物图

4　测试

本文工作采用的测试方案主要分为两部分，首先是静力学测试，其次是动力学测试。其中静力学测试主要包括两方面内容：(1)标定弹簧的弹性系数，据此可以根据实测的弹簧变形量确定对应的输出力；(2)标定激光位移传感器的输出电压与微作动器输出位移的关系。动力学测试则是实测作动器在外加激励作用下的输出位移时间响应，一方面获得作动器输出位移量，据此结合前面测得的弹性系数确定输出力，另一方面获得器件的响应时间。

4.1　静力学测试

弹簧的刚度测试使用结合力测试仪(PRT-1101)完成，该装置主要由移动控制操作手柄、底座部分、高景深显微镜、器件固定夹具以及力传感器(LYZ5K-0965)电脑对应软件组成。

在测试过程中，通过显微镜观察器件并且将其

放置在合适的位置上并固定，通过操作手柄控制探针下落的位置，最后测试结果会自动显示在电脑软件中。

图 13 的右下图中显示了测试的过程，力传感器的针头沿着水平方向缓慢推动弹簧，传感器将采集到的力和位移数据传递给计算机控制端，从而得到实验数据。

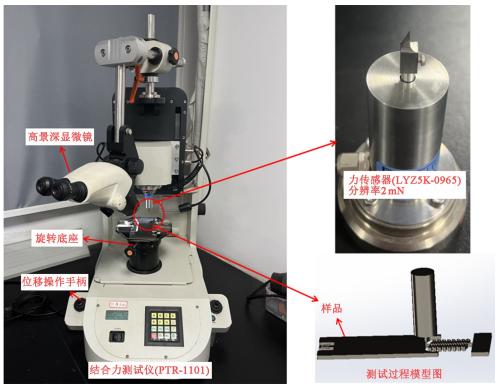


图 13 弹簧原位测试平台

图 14 显示了弹簧的刚度测试结果，其中横坐标为弹簧变形量，纵坐标为对应的变形力。如图中所示，虽然叠加了噪声的影响，但变形力与弹簧变形量之间仍呈现出线性关系，据此可以计算该弹簧的劲度系数。实测的弹簧劲度系数约为 75 N/m，该参数在表征电磁力大小的过程中有关键作用，根据该参数，通过测试弹簧在电磁力作用下输出的位移量，可以得出电磁力的大小。

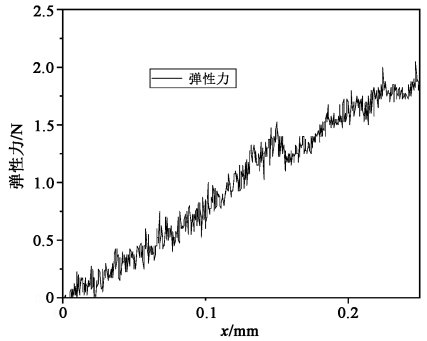


图 14 弹簧不同变形量对应的力

图 15 显示的是微作动器输出位移标定装置，包含激光位移传感器与安装在位置微调架上的待测器件。微调架侧面有旋钮，可以实现微米量级的位置调整，将待测器件固定在微调架上，将位移传感器的光斑对准微作动器的位移输出端，通过调整微调架，改变微作动器输出端与激光位移传感器之间的距离，激光位移传感器对应输出不同的位移电压值。以此标定微作动器输出端位移与位移传感器输出电压之间的比例关系。

图 16 为微作动器输出端位移与激光位移传感器输出电压的测试结果，由图可以看出，激光位移传感器输出电压与位移量呈现正比例关系，距离每增加 0.1 mm，输出电压输出为 10 V。

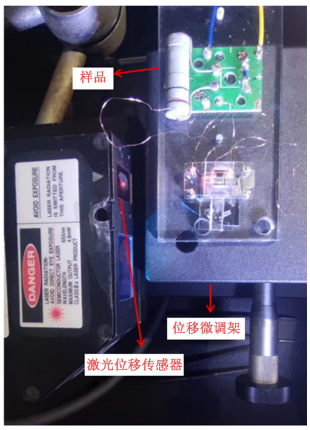


图 15 激光位移传感器用于微作动器输出位移标定装置

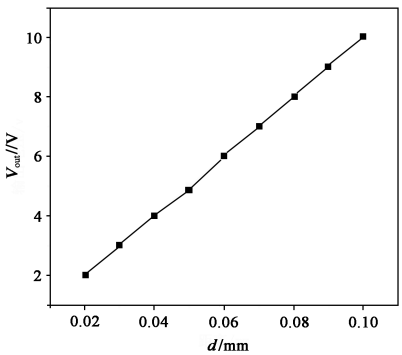


图 16 激光位移传感器测试图

4.2 动力学测试

动力学测试系统如图 17 所示，主要由电脑控制端、示波器、功率放大器、信号发生器，以及激光位移传感器构成，信号发生器产生脉宽为 10～20 ms、频率为 0.5～1 Hz 的周期方波脉冲信号。经过功率放大器后产生幅值为 3～6 V 的对应脉冲信号作为待测的微型电磁作动器的激励信号，激光位移传感器采集到滑块的输出位移(0～100 μm)，通过控制器转变为 0～1 V 的输出信号，接入示波器上，可以同步观测激励信号和输出位移信号的时间响应情况，从而观察微作动器的时间响应。

图 18 所示为微作动器的瞬态响应测试结果，图中有两条曲线，曲线 1 为信号发生器产生的激励电压信号，曲线 2 为激光位移传感器输出电压信号。其中激励电压信号通过功率放大器放大 10 倍后输入给驱动线圈，对应的驱动电流约为 200 mA。激光

位移传感器输出电压曲线反映的是滑块上的永磁体在驱动线圈作用下产生的位移，根据前面静态测试的结果，100 μm 的位移量对应 10 V 的电压输出，在该情况下，可以简单换算出此时弹簧形变量大于 70 μm，对应的输出力大于 5 mN，虽然有超调量，但对应的响应时间为 8.8 ms。

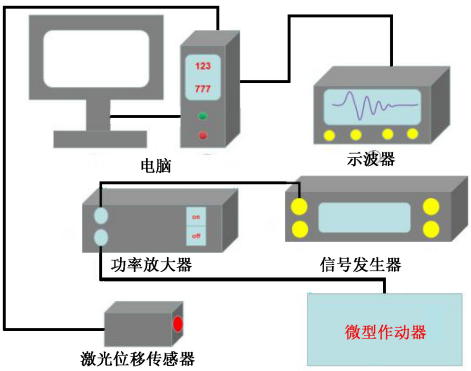


图 17　测试平台模型图

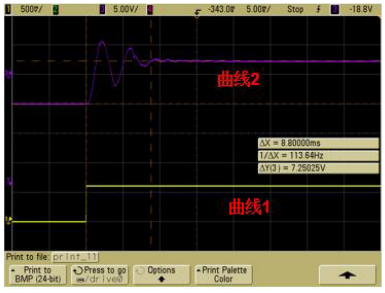


图 18　微作动器的瞬态响应测试结果图

图 19 所示为不同驱动电流作用下微作动器的输出位移情况，其中横坐标是输入给器件的电流 I，该电流可以通过串联在电路中电阻两端的电压与阻值计算得出。纵坐标表示的是器件对应的输出位移 d，位移量越大，表明此时的电磁力越大。因此，可以得出结论，在其他条件不变的情况下，随着输入电压的增加，电磁力也逐渐增大，但是在电流为 150 mA 附近，输出位移随电流增加的不明显，这与图 7 所示的分析计算结果相对应。

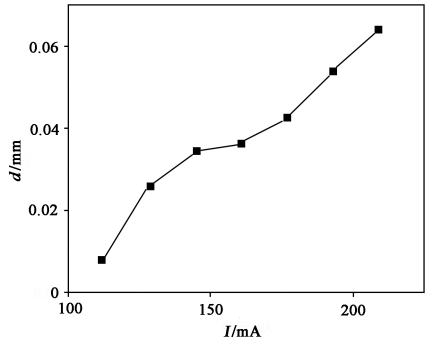


图 19　位移测量结果

5　结论

本文借鉴平面直线电机的位错驱动原理，设计并制作了一种可实现集成制造的微电磁作动器原型样机，同时原位测试了其输出位移、输出力和响应时间等性能参数，结果表明，所研制的微电磁直线作动器行程大于 70 μm，电磁力大于 5 mN，响应时间小于 10 ms。虽然目前的输出位移与毫米量级的要求还有明显差距，但主要是受弹簧刚度影响，通过改进设计显著降低弹簧刚度，完全可以将输出位移增加到毫米量级，这也为进一步设计优化微电磁作动器提供了参考和依据。

参考文献：

[1] Sindhanaiselvi D, Shanmuganantham T. Investigation on performance of piezoelectric beam based MEMS actuator for focussing of micro lens in mobile application[C]// 2017 IEEE Inter. Conf. on Circuits and Systems (ICCS), 2017: 398-403.

[2] Sassa F, Hayashi K. Flexible thermal actuator film for monolithic soft micro robot process[C]// 17th IEEE Sensors Conf., 2018: 1118-1121.

[3] Ren H, Gerhard E. Design and fabrication of a current-pulse-excited bistable magnetic microactuator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1997, 58(3): 259-264.

[4] Williams J D, Yang R, Wang W. Numerical simulation and test of a UV-LIGA-fabricated electromagnetic micro-relay for power applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 120(1): 154-162.

[5] Fu S, Ding G, Wang H, et al. Design and fabrication of a magnetic bi-stable electromagnetic MEMS relay[J]. Microelectronics J., 2007, 38(4/5): 556-563.

[6] Miao X D, Dai X H, Huang Y, et al. Segmented magnetic circuit simulation of the large displacement planar micro-coil actuator with enclosed magnetic yokes[J]. Microelectronic Engineering, 2014, 129: 38-45.

[7] Miao X D, Dai X H, Ding G F, et al. Simulation and fabrication of a bistable electromagnetic micro-actuator[J]. Electromagnetics, 2012, 32(5): 274-286.

[8] Nabae H, Higuchi T. A novel electromagnetic actuator based on displacement amplification mechanism[J]. IEEE-ASME Trans. on Mechatronics, 2015, 20(4): 1607-1615.

[9] Galea R, Dudek K K, Farrugia P S, et al. Reconfigurable magneto-mechanical metamaterials guided by magnetic fields [J]. Composite Structures, 2022, 280: 114921.

[10] Zhi C, Tang B, Wang Y, et al. A self-attachable and self-alignable micro electromagnetic linear actuator[J]. J. of Micromechanics and Microengineering, 2021, 31(1): 015001.

[11] Bedenbecker M, Hahn M, Ruffert C, et al. Linear

synchronous micro motor with further miniaturized dimensions[C]// ASME Inter. Design Engineering Technical Conf. /Computers and Information in Engineering Conf., 2008: 823-828.

[12] Kim K H, Yoon H J, Jeong O C, et al. Fabrication and test of a micro electromagnetic actuator [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 117(1): 8-16.

[13] Menon R, Kadam A H, Azeez N A, et al. A comprehensive survey on permanent magnet synchronous motor drive systems for electric transportation applications[C]// 42nd Annual Conf. of the IEEE-Industrial-Electronics-Society (IECON), 2016: 6627-6632.

[14] Khayamy M, Chaoui H. Efficient PMSM-inverter-based drive for vehicular transportation systems[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technol., 2018, 67(6): 4783-4792.

[15] Andrei C, Kauder T, Karthaus J, et al. Improved rotor pole geometry of a PMSM for wind turbine applications with multiple high-speed generators [C]// Inter. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014: 450-457.

[16] Shutov M V, Sandoz E E, Howard D L, et al. Miniature linear synchronous motor[J]. Proc. SPIE, 2003, 4878: 32-37.

[17] Feldmann A, Demming S, Lesche C, et al. Novel electro magnetic micro pump [C]// Conf. on BioMEMS and Nanotechnology Ⅲ, 2008: 6799.

[18] Abbes M, Belharet K, Mekki H, et al. Permanent magnets based actuator for microrobots navigation[C]// IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2019: 7062-7067.

[19] Miao Xiaodan, Dai Xuhan, Wang Peihong, et al. Design, fabrication and characterization of a bistable electromagnetic microrelay with large displacement[J]. Microelectronics J., 2011, 42: 992-998.

作者简介：

武　强(1996－)，男，硕士生，主要从事微电磁驱动器及相关应用的研究；

戴旭涵(1974－)，男，博士，副教授，从事电磁MEMS器件设计与制造方面的研究，负责多项国家“863”及自然科学基金项目的研究。