

微动力驱动器研究综述

徐爱群, 廖胜凯

(浙江科技学院 机械与汽车工程学院, 杭州 310023)

摘要: 对微动力驱动器的组成材料、磁电效应、智能构件和微力产生与控制的国内外研究现状和应用背景进行综述,并重点就微动力驱动器的微力产生方式进行了评述。进而结合微机电系统的研究现状对微动力驱动器的应用前景进行展望,以期微机电系统的精密加工装备研究提供参考。

关键词: 微动力;微机电;微装配;驱动器;综述

中图分类号: TH703.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2016)06-0420-07

Review of research on micro dynamic driver

XU Aiqun, LIAO Shengkai

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology,
Hangzhou 310023, China)

Abstract: The domestic and foreign research status and the application background on materials, magnetoelectric effect, intelligent component and micro force generation and control about the micro dynamic driver are summarized, focusing on the micro dynamic device of micro force generation ways. Furthermore, combining the research of microelectrical mechanical systems (MEMS), we expect the application prospect of micro dynamic driver to provide the reference for the study on precision machining of micro mechanical system.

Keywords: micro dynamic; microelectrical mechanical system (MEMS); micro assembly; driver; review

大多数微机电系统(microelectrical mechanical system, MEMS)由不同材料和不同加工方法的微小零件组成,随着零件的不断微小化,微系统的加工、装配越来越困难。MEMS器件典型损坏的力大小为几微牛(μN),因此,研究加工、装配过程中的精确微力控制技术,寻找合适的微动力驱动器,能减少精密

收稿日期: 2016-12-12

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY14E050016);浙江科技学院研究生教学改革研究项目(2016yjsjg01);浙江科技学院研究生科研创新基金项目(2015YJSKC004)

作者简介: 徐爱群(1968—),男,浙江省龙游人,教授,博士,主要从事微机电系统研究。

加工及装配中对零件的损坏,提高产品的合格率。

至今,人们已提出了多种形式的微动力驱动器,如基于静电力、电磁力、压电作用、热膨胀和形状记忆合金等工作机理的微动力驱动器。Arai 等^[1]提出了利用超磁致伸缩效应为微驱动器提供动力的新概念,并在聚酰亚胺基片上沉积超磁致伸缩薄膜,制作了适合作为微驱动器动力的悬臂梁原型机。李文军等^[2]设计了一种应用于微机电系统中的微型电磁驱动器,该微驱动器主要由平面正方形线圈、弹性支撑和坡莫合金薄片构成,当平面线圈通入电流时,使薄膜合金薄片受到相应电磁力的作用,可产生微驱动力。综观微动力驱动器的研究,大多利用功能材料和磁电效应设计智能构件,进而对智能构件进行微力的产生和控制,按照要求制成微动力驱动器。本文着重介绍微动力驱动器组成材料、磁电效应、智能构件和微力产生与控制的研究现状,进而结合本课题组提出的微动力构件,对微动力驱动器研究进行了总结与展望。

1 对微动力驱动器组成材料的研究

目前,微动力驱动器大多利用压电陶瓷和超磁致伸缩材料两种功能材料制成。通过对功能材料的研究,可利用材料的各自特性设计微动力构件,从而根据相关要求采用微动力构件进行微动力驱动器的设计。因此,压电陶瓷和超磁致伸缩材料的研究对微动力驱动器的设计至关重要。

1.1 对压电陶瓷的研究

压电陶瓷作为一种功能材料已经越来越被人们所熟知。利用压电陶瓷进行微动力驱动器的设计研究主要利用其两个效应,即压电效应和逆压电效应。一些电介质在一定的方向上受外力的作用而产生形变,电介质的内部会发生极化,这样受外力的两个表面会产生相应的电荷,这就是压电效应。1880年 Curie 兄弟首先在 α 石英晶体上发现了这种效应。1881年, Lippmann 发现与之相反的现象,即电介质受到电压等电场作用时,会产生应变,这种现象就叫做逆压电效应^[3]。如今,人们通过对压电效应和逆压电效应的研究,已经设计制造出了多种微动力驱动器。但是,压电陶瓷的压电效应和逆压电效应的发生和利用还受其他特性的影响。因此,人们对压电陶瓷的其他特性进行了研究。

在研究中发现,压电陶瓷具有明显的迟滞非线性。为了说明压电陶瓷的这种迟滞非线性,Yoo 等^[4]通过对压电材料的内部受应力产生的极化现象进行分析,最终得出迟滞非线性是由于各电偶极子的黏性不同所导致。为了减小压电陶瓷的这种迟滞性,Jung 等^[5]对压电陶瓷驱动器使用了一种开环的控制方法,有效地减小了压电陶瓷的迟滞现象,为后来的研究提供了借鉴。

由于压电陶瓷的双向机电耦合特性,利用有限元模型进行分析比从机电耦合角度分析更加方便^[6],因此,很多对压电陶瓷的分析研究采用了有限元分析方法。崔艳梅等^[7]通过对压电陶瓷的压电方程的分析,建立了电场模式的模型,使用 ANSYS 对压电陶瓷驱动器进行有限元分析,并通过实验验证了有限元分析结果。梁磊等^[8]采用有限元软件 ANSYS 对 PLZT 进行了特性分析,其中通过对 5 层和 10 层压电叠堆进行仿真,由于黏结层的变形,得到的输出位移小于理论输出值。

此外,对压电陶瓷的特性研究还表明,压电陶瓷具有诸多重要特性,如稳定性好、压电效应强和频率响应好等。通过多年来对压电陶瓷材料的研究,人们已经逐渐发现和了解压电陶瓷的相关特性,这为利用压电陶瓷设计微动力驱动器提供了重要的理论基础和技术支持,丰富了压电陶瓷在微动力驱动器设计方面的应用。

1.2 对超磁致伸缩材料的研究

利用超磁致伸缩材料设计微动力驱动器主要是利用它的磁致伸缩效应。磁致伸缩效应是因为磁化状态的改变导致铁磁材料的体积发生一定的变化,于 1842 年由著名物理学家 Joule 发现,故也称为焦耳效应^[9]。20 世纪 60 年代初,一些重稀土元素被发现具有磁性,并且在低温下体现出了磁致伸缩现象^[10]。铁磁材料不仅具有磁致伸缩效应而且还具有逆磁致伸缩效应,当磁场确定时,超磁致伸缩材料受到外力的作用而形变,其内部磁场强度会发生变化,这种现象即为逆磁致伸缩效应。为了进一步利用这两种效应来设计微动力驱动器,人们对超磁致伸缩材料进行了一系列研究。

为了提高超磁致伸缩材料的实用性,Clark 等^[11]通过不同元素组成化合物,降低化合物的磁晶各向异性提高了磁致伸缩值。Kellogg 等^[12]通过准静态循环压应力测试方法,对在一定范围的压应力和磁场强度内的 Terfenol-D 棒的杨氏模量进行测试,结果表明 Terfenol-D 棒的杨氏模量受到应力及磁场强度的作用会发生变化。提高磁致伸缩值和验证杨氏模量变化的研究为超磁致伸缩材料在微动力驱动器中的应用奠定了重要基础。人们还对超磁致伸缩材料的其他特性进行了研究。

Yamamoto 等^[13]研究了超磁致伸缩材料的磁致损耗,他们发现当超磁致伸缩材料的预应力增大时,会导致材料的机械能增加和超磁致伸缩性能提高。Jiang 和 Zhang 等^[14-15]对磁致伸缩材料进行了结构建模,用理论分析了在预应力下的材料能量转换,并且通过实验表明了高预应力下会促使磁畴旋转至垂直于预应力轴向的平面。除了应力等外界条件之外,温度对超磁致伸缩材料也有影响,Liang 等^[16]通过实验测量证明了这一观点。许多学者都对超磁致伸缩材料温度控制进行了研究,设计了许多温度控制系统,这为后来的研究提供了参考。

Ueno 等^[17]基于超磁致伸缩逆效应,提出利用超磁致伸缩材料与永磁铁及动、静铁轭组成并联的两个磁回路,通过对超磁致伸缩材料施加载荷,改变动铁轭与静铁轭之间磁力的大小。实验采用几种不同尺寸及相同尺寸不同材料的 GMM 做测试对比,施加应力相同时,不同规格 GMM 对磁力的调控范围不同。这说明了磁力的调控范围不仅受超磁致伸缩材料的应力影响,本身的规格对磁力的输出也有影响。

Zheng 等^[18]在 Ueno 等^[19]实验测试的基础上,根据机械效应和磁路设计准则,建立了逆磁致伸缩效应的磁力控制模型,得到了施加的预应力和磁场对磁力输出的迟滞关系,总结出了偏置磁场对磁力控制器件的作用。但是在实际应用时,模型的相关参数难以辨识。

通过对超磁致伸缩材料的研究,该材料的各种特性被逐步发掘,人们开始利用它的相关特性进行一系列微动力驱动器的设计研究。

2 对磁电效应的研究

在微动力驱动器的设计研究中,很多微动力驱动器利用了材料的磁电效应和逆磁电效应。磁电效应是指材料在外加磁场中发生电极化响应的现象,磁电电压系数 $\alpha_V = \partial V / \partial H$,通常被用来表示磁电效应的大小。逆磁电效应是指材料在外加电场中发生磁化改变的现象,逆磁电系数 $\alpha_B = \partial B / \partial V$ 通常被用来表示逆磁电效应的大小^[20]。1961 年,人们在 Cr_2O_3 中发现了磁电耦合效应,为了增大单相材料的磁电耦合系数,研制出了磁电多铁性复合材料,即电致伸缩效应和磁致伸缩效应的利用和机械耦合^[21]。最新研制出的磁电多铁性复合材料比单相多铁性材料的磁电耦合效应要大 3 个数量级左右。对于磁电多铁性复合材料,目前主要研究材料组合有:压电陶瓷和铁酸盐;压电陶瓷聚合物和 Terfenol-D;压电陶瓷和磁性金属^[22]。人们还对磁电耦合系数等进行了研究。

刘强等^[23]指出磁电复合材料的变形受相中材料的模量、界面性能、材料尺寸及边界条件三方面的制约,并利用 Comsol 有限元软件研究了材料的模量、界面性能、材料尺寸及边界条件和黏结层厚度对磁电复合材料耦合效应的关系。最终实验结果表明:磁电耦合系数不仅受边界约束及材料长宽比的影响,还受黏结层厚度和杨氏模量的影响。为了进一步研究磁致伸缩效应,有学者将磁致伸缩效应类比压电效应,利用压电方程中的电学量估计磁学量,通过有限元分析,得出类比压电效应结果与实际相差很小的结论^[24]。Galopin 等^[25]测试了有限元分析方法对多相块体磁电复合材料耦合转换特性的效果,表明以压电线性本构方程和磁致伸缩非线性方程为基础的有限元分析方法切实可行。

Wan 等^[26]通过使用探测线圈测量了使用电场激励的磁场变化量,并发现了磁电材料的输入电场和磁感应强度的关系——线性关系。还发现在静态偏置磁场中磁场的反应灵敏度要高于动态偏置磁场。因此,利用 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3/\text{Terfenol-D}$ 层状磁电复合材料的逆磁电效应,可用于探测直流磁场。

对磁电效应和逆磁电效应的相关研究,为磁电材料的应用和发掘提供了基本的理论支撑,为微动力驱动器的设计提供了参考。与磁电效应的研究相比,逆磁电效应的研究相对较少,故逆磁电效应在微动

力驱动器中的应用较少。

3 对智能构件的研究

微动力驱动器是智能构件的重要形式之一,微驱动从能量转换形式看有多种形式,如静电驱动、压电驱动、电磁驱动和热驱动等。压电驱动是其中重要的一种驱动形式,其利用压电陶瓷的逆压电效应和超声振动,将微观变形转化成宏观运动。它具有众多优点,如控制方便、频率响应好、位移分辨率高、无噪声、低电压驱动、无电磁干扰及易于微型化等的优点^[27]。

利用逆压电效应可制成压电陶瓷驱动器,在精密驱动等很多领域得到广泛应用,根据应用场合的不同,压电陶瓷执行器的结构形式也不同,如薄膜型、叠堆型等。李国荣等^[28]为了制作多层片式高含铅PZT软性压电陶瓷微驱动器,采用压电坯膜流延成型和陶瓷坯膜/金属内电极共烧技术,最终实现了压电陶瓷微驱动。在智能构件的研究中,张翔等^[29]通过分析超磁致伸缩材料的自身特性,根据需要确定了超磁致伸缩驱动器的参数,设计出超磁致伸缩微位移驱动器并实现了对其控制。

其实,早在20世纪90年代,人们已开始智能构件的研究。Morita等^[30]在1997年到2000年间分别研制出有一个柱状定子换能器和两个转子的筒状压电驱动器。在该压电驱动器内的极化方向为壁外指向壁内,利用圆筒端面的行波驱动内部的转子进行旋转,最终可提起10 g左右的物体。该驱动器的研究为微机器人的发展提供了技术支持。

Burhanet等^[31]利用压电陶瓷的振动模式,将金属的悬臂梁转换成驱动器的圆周旋转,通过设计试验,研发了复合金属和陶瓷的微驱动器。随着微驱动器的不断发展,在精密驱动领域同样出现了很多新型微驱动器。例如Lee等^[32]制造了具有TbFe/Co/Dy三层结构的薄膜式超磁致驱动器,可用于微系统的动力驱动。该驱动器利用薄膜式超磁致伸缩材料的堆叠,通过应用超磁致伸缩材料的超磁致伸缩效应最终实现了微驱动。利用超磁致伸缩等智能材料进行驱动器的研究还有很多,Cao等^[33]设计了基于超磁致伸缩材料的驱动马达,可以实现微力的产生和驱动。赵章荣等^[34]提出了一种超磁致伸缩材料智能铰杆构件,研究解决了精密加工的位移控制技术,建立了超磁致伸缩材料智能铰杆构件的测试平台。

微动力驱动器作为智能构件的一种,是作用巨大的微型运动执行器,它是将电、光、热等其他多种形式的能量转换为机械能形式输出的一种换能器,具有多种多样的工作原理和不同的结构形式。研究微动力驱动器,探索合适、高效的智能构件对未来微机电行业的发展将起到巨大的推进作用。

4 对微力产生与控制的研究

微力的产生与控制是微动力驱动器的核心工作。随着微机电系统零件的不断微小化,MEMS器件典型损坏的力大小为几微牛,因此,在微动力驱动器的设计研究中,微力的输出控制就显得尤为重要,能够得到合理的微力并且能精确控制微力的输出对整个微装配制造业具有重要的意义。因此,研究人员做了一系列关于微力产生和控制的研究。

盛阳等^[35]根据静电场复现超微力的原理,设计了复现超微力的静电力发生装置,并在此基础上提出了超微力发生系统。这种悬挂式静电力发生装置和系统,通过电容梯度测量实验,可以产生 μN 级的微力输出。郑双等^[36]提出了一种垂直微力发生装置,为了产生 μN 级的微力,采用柔性铰链连接杠杆并传递微力,再利用二级杠杆达到一定的缩小比进行力的缩小。这种装置利用对称配重的差动式结构,消除了重力场的影响,这种新型的微力产生方法结构比较简单,易于制造。但是,如何对微力的稳定控制仍然是一大难题。Li等^[37]用压电驱动器也能产生 μN 级的微力,利用微悬臂梁的位移量,再通过弹性系数求出微力。这种方法由于微悬臂梁的位移测量的不准确导致微力输出的测量也有不确定性。Chu^[38]利用静电梳齿产生微力,这种方法虽然可以产生微力,但是在垂直方向力的标定上具有一定困难,且操作不便,不易固定。郭琪等^[39]通过对Helmholtz方程的研究,设计出利用Helmholtz线圈产生微力。

目前的微力控制策略一般是通过控制位置来实现,通过实验得到预期的控制力大小,再通过控制位

置进行调节控制。但是,在对位置有了确定点的精密组装中,这种方法一般不太适用,这时候就需要在线解耦来进行微力的控制。多变量的解耦方法有传统解耦、鲁棒解耦、自适应解耦和智能解耦等方法^[40]。虽然解耦方法有很多,但各自在应用方面都有一定的局限性,目前还没有发现一种普遍适用的解耦方法。如何利用现有的宏观领域中的解耦方法及理论对微力进行解耦控制是一个值得深入研究的问题。

Eisinberg 等^[41]发现了一种微力测量的方法,利用半导体应力计,采用 PI 控制来获取相关医疗微器件。但是这种控制方法只能用于准静态操作频率,而且控制的实时性不强。Xu^[42]提出了基于位置的滑模阻抗控制方法并进行了验证,完成了对微球的夹持。Kim 等^[43]将电容性传感器集成到夹持器上,利用 PID 控制进行细胞微夹持操作。Komati 等^[44]通过建立了柔性微器件与夹持器之间的力学关系模型并采用力/位混合的控制方法实现了自主控制。但是,这种控制方法由于力学模型的建立不准确和力/位混合关系的迟滞,也不适合长期使用和精确控制。

本课题组提出了一种新型利用压电陶瓷和超磁致伸缩材料耦合的微动力构件,微动力构件由静磁轭、移动磁轭、永磁体和 GMM 与 PZT 组合材料构成。永磁铁与超磁致伸缩材料棒以及两者两端之间的静磁轭组成磁回路 I;永磁铁与两端部分静磁轭以及气隙、移动磁轭组成磁回路 II。如图 1 所示,通过回路 I 和回路 II 磁通量的改变,最终控制微力的输出大小。

在该微动力构件中,压电陶瓷由电压驱动,当对压电陶瓷施加电压时,其应变会传递到与之串联的超磁致伸缩棒,最终由磁路中磁通量的变化导致输出微力的变化,整个过程中几乎无能量消耗也不产生发热现象,特别适用于需要保持稳定微力的微动力驱动器。

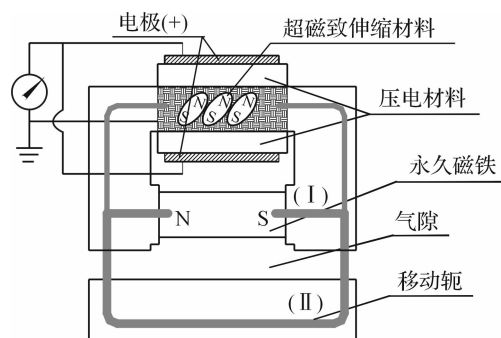


图 1 微动力构件原理图

Fig. 1 Principle diagram of micro dynamic component

5 研究展望

随着现代科学技术的发展,微机电系统中微力的输出研究已经变得愈来愈重要,尤其是微尺度下构件的力学特性研究。对微力的输出力学特性研究有助于提高输出微力的稳定性和对微力的精确控制。随着微动力驱动器种类的增加,各种微动力微驱动器技术的发展,会在很大程度上促进微装配和微操作的发展,以提高微机电系统的工作效率。

微动力驱动器的应用技术目前仍处于发展阶段,相关的理论尚不完善、方法还不全面。未来应在现有的研究基础上,进一步研究由多个微动力驱动器来建立微力操纵场的方法,研究微小物体在微力场中的动力、传输及控制方式,以及研究如何协同控制各微动力驱动器的输出力大小,进而在微力场中完成微小物体的非接触式传输或利用可控微力进行加工和装配工作,这将为微机电系统的发展与应用提供巨大的动力。

6 结 语

本文从组成材料、磁电效应、智能构件、微力输出和控制四个方面综述微动力驱动器的研究进展,由于微动力驱动器在微机电系统中的重要作用,对它的研究已成为国内外研究的热门。未来应该在各种微动力驱动器特性研究的基础上,进一步研究微力的大小、精度和控制方法,以确保微动力驱动器的稳定工作,提高微机电系统的加工效率。

参考文献:

- [1] ARAI K I, HONDA T, YAMAGUCHI M. Microactuators using magnetostrictive thin films[J]. Japanese Journal of Applied Magnetism, 1994, 18(5): 390.
- [2] 李文军, 赵小林, 蔡炳初, 等. 微型电磁驱动器中微小电磁力的研究[J]. 微细加工技术, 2002(1): 45.

- [3] 张福学,王丽坤. 现代压电学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [4] YOO I K. Fatigue and hysteresis modeling of ferroelectric materials [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1993,4(4):490.
- [5] JUNG H, SHIM J Y, GWEON D G. New open-loop actuating method of piezoelectric actuators for removing hysteresis and creep [J]. Review of Scientific Instruments, 2007,71 (9):3436.
- [6] SUNG Y I. Large deformation finite element analyses of composite structures integrated with piezoelectric sensors and actuators [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000,3(5):10.
- [7] 崔艳梅,刘向峰,高志. 大位移压电陶瓷驱动器的有限元分析[J]. 传感技术学报,2007,20(10):2239.
- [8] 梁磊,王少萍,曹峰. 基于 ANSYS 的压电陶瓷 PLZT 特性仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(7):854.
- [9] 李扩社,徐静,杨红川,等. 稀土超磁致伸缩材料发展概况[J]. 稀土,2004,25(4):51.
- [10] SAVGE H T, CLARK A E, POWERS J M. Magnetomechanical coupling and delta E effect in highly magnetostrictive rare earth-Fe₂ compounds [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1975, 11(5):1355.
- [11] CLARK A E, LINDGREN E A. Development of Terfenol-D transducer material [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83(11):7282.
- [12] KELLOGG R A, FLATAU A B. Stress-strain relationship in Terfenol-D [J]. The International Society for Optical Engineering, 2001,4327:541.
- [13] KEN Y, HIRONOBU N, YASUMASA Y. Effect of compressive stress on hysteresis loss of Terfenol-D[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003,24(255):222.
- [14] JIANG C B, ZHANG H B, WANG Z B, et al. Magnetostriction and hysteresis of oriented Tb_{0.29}Dy_{0.48}Ho_{0.23}Fe₂ single crystal [J]. Journal Physics D: Applied Physics, 2008, 41:155.
- [15] ZHANG H B, JIANG C B, WANG Z B, et al. Effect of compressive stress on magnetostriction hysteresis of oriented Tb_{0.29}Dy_{0.48}Ho_{0.23}Fe₂ crystal [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 475:35.
- [16] LIANG Y R, ZHENG X J. Experimental researches on magneto-thermo-mechanical characterization of Terfenol-D[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2007, 20(4):283.
- [17] UENO T, QIU J. Magnetic force control based on the inverse magnetostrictive effect [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(3):1601.
- [18] ZHENG J J, CAO S Y, WANG H L. Modeling of magnetomechanical effect behaviors in a giant magnetostrictive device under compressive stress [J]. Sensors and Actuators A, 2008, 143:204.
- [19] WU T, CHONG T K, CHANG C M. Influence of electric voltage bias on converse magnetoelectric coefficient in piezofiber/metglas bilayer laminate composites[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 260(56):1.
- [20] BICHURIN M I, PETROV V M, SRINIVASAN G. Theory of low-frequency magnetoelectric effects in ferromagnetic-ferroelectric layered composites [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(12):7681.
- [21] NAN C W. Magnetoelectric effect in composites of piezoelectric and piezomagnetic phases [J]. Physical Review B, 1994, 50:6082.
- [22] NAN C W, BICHURIN M I, DONG S, et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103:31.
- [23] 刘强,周浩森,曲绍兴. 磁电多铁性复合材料磁电耦合性能有限元分析[J]. 材料科学与工程学报,2011,29(4):559.
- [24] LIU Y X, WAN J G, LIU J M, et al. Numerical modeling of magnetoelectric effect in a composite structure[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94:5111.
- [25] NICOLAS G, XAVIER M, FREDERIC B, et al. Finite element modeling of magnetoelectric sensors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6):834.
- [26] WAN J G, LIU J M, WANG G H, et al. Electric-field-induced magnetization in Pb(Zr, Ti)O₃/Terfenol-D composite structures[J]. Applied Physics Letters, 2006, 8(8):182.
- [27] MORITA T. Review miniature piezoelectric motors[J]. Sensors and Actuators, 2003, 103:291.
- [28] 李国荣,陈大任,殷庆瑞. PZT 系多层片式压电陶瓷微驱动器位移性能研究[J]. 无机材料学报,1999,14(3):418.
- [29] 张翔,孙树文,樊文刚,等. 超磁致伸缩微位移驱动器设计[J]. 机械设计与制造,2014,8(8):1.

- [30] MORITA T, KURO M, HIGUCHI T. A cylindrial micro ultrasonic motor[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1):33.
- [31] BURHANETTIN K C, BOUCHILLOUX P, UCHINO K J. Piezoelectric micromotor using a metal-ceramic composite structure[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(4):836.
- [32] LEE H, CHO C. Investigation on the magneto mechanical behavior of trilayered GM actuator[J]. Journal of Rare Earths, 2008, 26(2):264.
- [33] CAO Z, CAI J. Design of a giant magnetostrictive motor driven by elliptical motion[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 118(2):332.
- [34] 赵荣章. 精密超磁致伸缩位移驱动智能构件技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008:10.
- [35] 盛阳, 赵美蓉. 超微力发生系统及其电容采集模块的设计[J]. 传感技术学报, 2010, 23(10):1505.
- [36] 郑双, 高荣慧. 重力场下垂直微力发生装置的研究[J]. 合肥工业大学学报, 2014, 37(2):134.
- [37] LI X D, SU D C, ZHANG Z. A novel technique of microforce sensing and loading [J]. Sensors and Actuators, 2009, 153(1):13.
- [38] CHU W H. Microfabricated tweezers with alarge gripping force and a large range of motion[D]. Cleveland:Case Western Reseverve University, 1994.
- [39] 郭琪, 邹志纯. 三种提供微力装置的模型[J]. 西安邮电学院学报, 2009, 14(1):149.
- [40] 马平, 杨金芳, 崔长春, 等. 解耦控制的现状及发展[J]. 控制工程, 2005, 12(2):97.
- [41] EISINBERG A, MENCIASSI A, MICERA S, et al. PI force control of a microgripper for assembling biomedical microdevices[J]. IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems, 2001, 148(6):348.
- [42] XU Q S. Precision position/force interaction control of apiezoelectric multimorph microgripper for microassembly [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(3):503.
- [43] KIM K, LIU X, ZHANG Y, et al. Nanonewton force-controlled manipulation of biological cells using a monolithic MEMS microgripper with two-axis force feedback[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18(5):055.
- [44] KOMATI B, RABENOROSOA K, CLEVY C, et al. Automated guiding task of a flexible micropart using a two-sensing-finger microgripper[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(3):515.