

超声波/声波钻探器的设计与试验*

陈超, 杨康

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 为了满足深空探测中钻探取样的需求,提出了一种基于超声波/声波能量耦合机理的新型钻探器,对其进行结构动力学分析和参数化设计。考虑接触边界条件,建立了超声波/声波钻探器冲击动力学模型,利用显式算法对钻探过程中的应力分布进行了分析。根据分析结果确定了设计方案,对压电换能器进行了模态试验,并利用高速摄影系统对自由质量的运动进行分析,对样机进行了钻探试验,得到了相应的钻探性能,初步得到了自由质量的运动规律与钻探性能的关系。试验结果表明,通过配备恰当的自由质量,可以获得较好的钻探效果,在深空探测方面具有一定的实用价值。

关键词 超声波; 声波; 振动冲击; 压电效应

中图分类号 TM356; V19; TH765.1

引言

发射人造地球卫星、载人航天和深空探测是人类航天活动的三大领域。经过10年的酝酿,确定了中国整个探月工程分为“绕”、“落”、“回”3个阶段^[1]。目前,我国的探月计划已经进行到了第2步,利用着陆器上的钻孔采样装置钻取月壤岩芯,是我国嫦娥工程的重要任务之一。采样在地球上很容易,而月球上的极端环境与地球迥然不同。例如,微重力会造成轴向力的减小和稳定性的降低,月球车会限制钻探设备的体积和电能消耗,若沿用地球上传统的钻探设备会遇到困难。

国外模拟实验已证明很难照搬和采用传统的设备和技术^[2-4]。针对月球上的特殊环境,考虑到发射、电能供给以及被钻探介质的未知特性,探测所用钻探系统需要小巧、低能耗、适应性强,且整体反冲击力小,所需轴向钻进压力要低,尽量无须旋转运动等特点,才能在微重力条件下以月球车为工作平台实现机动和自动化,获取月球表面的岩石样品^[4-11]。本研究中的钻探器在工作时不需要像传统的超声加工工具一样额外加非常大的轴向力,仅需要自重就可以,且具有能耗很低、无需润滑和悬浮液的优点,完全符合太空车的应用背景,满足外太空钻探取样的需要。

Bar-Cohen 通过常态环境下的原理样机实验探

讨了采用超声波/声波能量耦合机理的独特优点^[5-6],还采用等效电路法对压电换能部分进行了电学特性分析^[7],研究了驱动电路的共振反馈调节。文献^[11]介绍了国外超声波钻探原理并开展了验证性试验。目前,国内外的文献报道主要集中在原理样机的功能验证实验^[5-10],对超声波/声波能量耦合现象中自由质量的运动规律缺乏较深入的分析。

笔者针对钻探器的压电换能器部分进行了结构动力学分析和参数优化设计,在考虑钻探冲击边界的前提下,利用显式算法对钻探过程中钻杆的应力分布进行了分析。根据参数化分析结果加工了样机,采用高速摄像机对自由质量的运动进行了观察,研究了自由质量与钻探性能的关系,通过钻探试验得到了适合钻探器的最佳自由质量。

1 钻探器的设计与分析

1.1 钻探器的结构及工作原理

图1为超声波/声波钻探器示意图,该装置主要由超声波换能器、自由质量和钻杆3部分组成。超声波换能器做为主要的能量输出装置是1个兰杰文振子,从后向前依次是预紧螺栓、质量块、压电陶瓷片PZT8、变幅杆、1个质量为1~2g铝制或钢制的自由质量、1个铝制变截面圆柱体钻杆。

* 国家自然科学基金资助项目(50975135);南京航空航天大学科研基地创新创优基金资助项目(NJ2011001)

收稿日期:2011-08-26;修改稿收到日期:2011-11-21

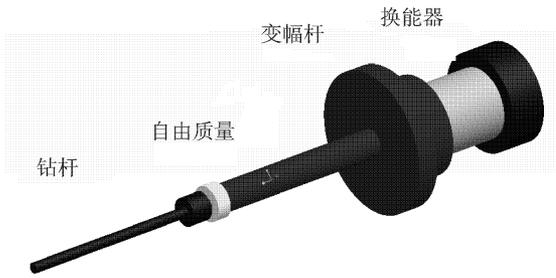


图1 超声波/声波钻探器示意图

该装置在电极片上施加超声波/声波频率的高频交流激励电压,利用压电材料的逆压电效应,使超声波换能器产生超声频率的共振(主要为纵振),并通过其变幅杆将振幅放大。通过变幅杆顶端的纵振以冲击的方式将能量传递到自由质量,自由质量开始在头部和钻杆之间做声波频率的往复碰撞,能量通过自由质量的碰撞与冲击传递到钻杆,然后传递到钻头与岩石接触界面。当这种冲击积聚到超过岩石的疲劳强度时,与钻头接触部位的岩石就粉碎了^[4,11]。

1.2 超声波/声波钻探器的结构优化设计

超声波/声波钻探系统主要依靠工作在超声波/声波频率的压电换能器来实现电能到高频振动能量的转换^[12],其动力学特性和较大的振幅输出直接影响着整个钻探器的能量传递特性。图2为超声波/声波钻探器中压电换能器部分的参数化模型,选取了7个设计参数(后端盖直径与变幅杆后端的直径相同,参数同为 R_1)。预紧螺栓和尾部材料均为钢,其单元类型为solid45;压电材料为PZT8的纵振片,其单元类型为solid5;前端变幅杆的材料为铝,单元类型为solid45。

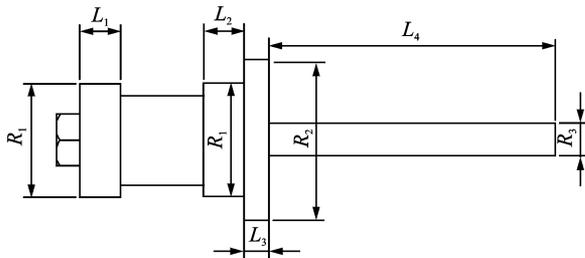


图2 钻探器选取的有限元优化参数

对换能器有限元模型进行模态分析可得到结构的各阶固有振动参数,结果中除包含需要的工作模态外(本研究需要纵振模态),还有许多其他模态存在。需要的工作模态随钻探器的结构参数的改变而

改变,阶次和顺序在整个模态中是未知的;因此,在优化设计过程中必须把它们识别出来,通过采用计算振型的相关系数指标法,利用ANSYS参数化设计语言APDL编程来实现^[13-15]。

振型相关系数的大小反映了两个振型的相似程度^[13],值越大则相似程度越高。根据这点,可以达到在优化过程中对所需振型的识别。振型相关系数的大小定义为

$$M = \frac{[\phi_s' \phi_o']^2}{(\phi_s' \phi_s)(\phi_o' \phi_o)} = \frac{\left| \sum_{k=1}^n \phi_{sk} \phi_{ok} \right|^2}{\left(\sum_{k=1}^n \phi_{sk} \phi_{sk} \right) \left(\sum_{k=1}^n \phi_{ok} \phi_{ok} \right)}$$

$$(0 \leq M \leq 1)$$

其中: ϕ_s 和 ϕ_o 分别为初始计算振型和优化中所计算的振型。

变幅杆顶端大的振幅有利于将能量通过动能传递给自由质量^[4],故目标函数定义为

$$F_{obj} = 1/A_{max}$$

其中: A_{max} 为变幅杆顶端截面的振幅。

编写优化程序的文件,赋予各个参数初值,在ANSYS中单步运行,观察各个参数对目标函数的灵敏度(见图3)。灵敏度分析目的在于获取结构特征量对于设计参数的偏导数,即分析结构参数改变对结构动态特性的敏感程度,为在换能器的结构动力学特性优化设计中获取合适的设计变量提供依据,避免结构设计中的盲目性,达到提高设计效率的目的。对目标函数影响最大的参数是变幅杆的长度 L_4 ,其他参数影响较小。

将参数 L_4 定义为优化变量,采用零阶方法进行优化计算并得到最优解。当 $L_4 = 71.3 \text{ mm}$ 时,振幅最大。为了便于机械加工,在最优解附近取几组数据,分别采用并施加300V的工作电压做谐响应分析,当 $L_4 = 70 \text{ mm}$ 时得到了一组具有较大振幅的数据(见表1),同时得到了变幅杆顶端从前到后的位移分布(见图4)。可以看出顶端的位移最大,并且从顶端开始递减(以70mm做为加工的参数)。

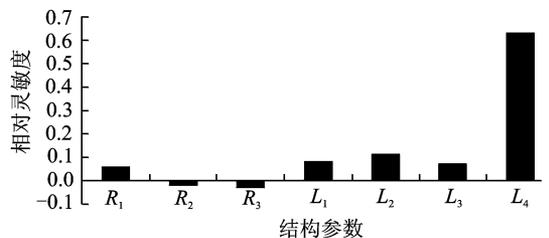


图3 结构参数对目标函数影响

表1 变幅杆长度对振幅的影响

L_4/mm	69.5	70	70.5	71	71.5
振幅/ μm	16.9	17.1	17.1	17.3	17.14

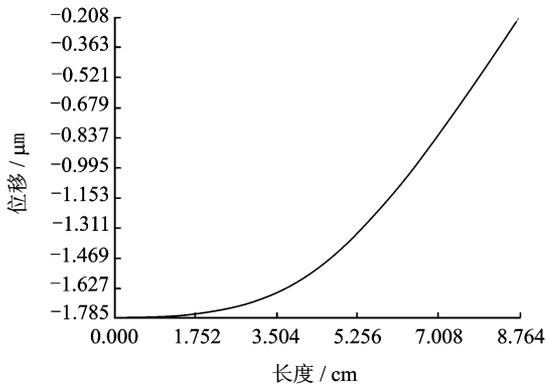


图4 钻探器变幅杆的纵振位移

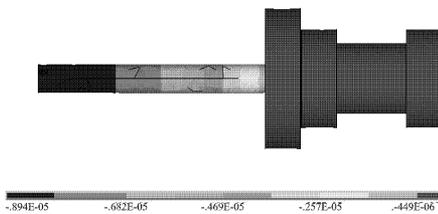


图5 换能器的位移分布

对优化得到的设计参数进行分析,获得换能器的动力学参数为:1阶纵振频率为17 332 Hz,当施加100 V的正弦激励电压时,纵向振幅为8.94 μm ,如图5所示。

1.3 钻探器与介质的冲击动力学分析

超声波/声波系统的钻探功能是依靠钻杆与介质的冲击和碰撞来实现的,其动力学过程比较复杂,所以选用通用显式动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对冲击动力学过程进行计算和分析。

通过仿真可以得到钻头与介质接触处的应力分布,进而分析自由质量的作用。由于在LS-DYNA 中没有机电耦合场的功能,不可以直接施加交流电以引起系统的振动,因此首先利用 ANSYS 多物理场分析模块得到超声波/声波系统的谐响应结果,提取变幅杆后端的截面位移作为位移载荷输入 LS-DYNA 中的模型,如图6所示。对于钻杆顶端的振动来说,两者是等效的^[16]。定义单元类型为 solid164,输入的材料参数与之前所做优化相同。定义好钻探介质,建立模型后,划分网格,在划分网格时要尽量细分,而且要划分均匀的网格,可以有效地避免负体积的产生和减少沙漏变形的影响。

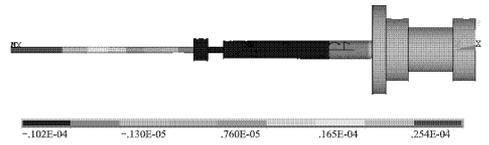


图6 钻探器在谐响应分析中的位移分布

在划分网格后,先将钻头与钻探介质的接触定义为面面自动接触,再定义自由质量的接触,并施加初始位移载荷。加载后进行求解时间的设置,为了增加计算的精度,将时间步长的因子由0.9减小为0.6,然后进行计算求解。

在有限元模型中分别选取有、无自由质量的两种情况(其他条件相同),以分析自由质量在钻探中的作用。通过LS-PREPOST 后处理中可以观察整个过程中的动画及任意时刻的应力分布、应变、位移等参数(见图7)。在ANSYS 后处理中提取钻头附近的应力分布为9.84~20 MPa左右(见图8),提取图5分析中的无自由质量时的应力分布1.97 MPa(见图9)进行对比发现,自由质量的冲击频率低于钻杆振动的频率,在自由质量块的锤击下,钻头应力比仅有超声振动产生的钻头应力约高5~10倍左右,自由质量使超声波与声波能量耦合且聚能效果显著。

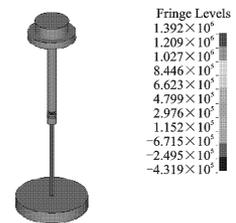


图7 钻探器在任意时刻的应力分布

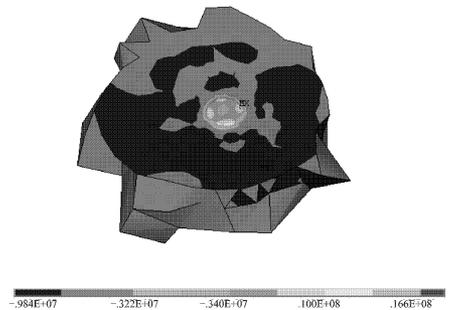


图8 钻探器在有自由质量时的应力分布

为了验证自由质量的实际效果,又选取了3个不同质量的自由质量进行了LS-DYNA 分析,分别得到了钻头的应力,自由质量分别为0.6,0.9和1.2 g,得到表2的应力值。可以看出,不同的自由质量影响钻杆与介质接触处的应力分布,并进而影响

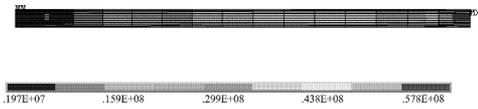


图9 钻探器在无自由质量时钻杆的应力分布

钻探效果。

表2 不同自由质量时的仿真应力分布

质量/g	0.6	0.9	1.2
应力/MPa	3.75~8.98	9.84~20.0	3.41~11.8

2 试验验证

2.1 预压力试验

根据以上优化设计,制作了钻探器的样机。钻探器的压电换能器是压电陶瓷的夹心式结构,压电陶瓷需要在一定预压力作用下的输出位移大于无压力状态下的输出位移,并且迟滞度也有很大的改善^[12,17],合适的预压力有助于增加换能器的位移输出。首先进行了换能器的预压力试验,采用千斤顶加压力传感器的测量装置来进行测试,如图10所示。多次加载后,取7 720 N与13 430 N两个值作对比测试,表3显示了不同预压力下的输出位移,采用13 430 N做为预压力值。

表3 电压100 V时的振幅预压力对比

条件	预压力/N	振幅/ μm	f/Hz
1	7 720	5.7	17 160
2	13 430	8.3	17 230
ANSYS	...	8.9	17 332

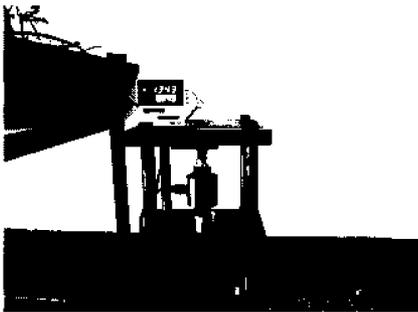


图10 钻探器的预压力加载图

2.2 模态试验

为了确定换能器实际的工作频率和验证优化设计的效果,用PSV多谱勒测试仪对超声波钻探器样

机中的压电换能器部分进行了模态试验^[12],如图11所示。实验中,扫频范围为0~100 kHz,施加给钻探器的电压为100 V,试验结果如图12所示。1阶纵振频率约为17.23 kHz,且此频率附近没有干扰频率。为了确证是1阶纵振,还将换能器倾斜,在相同条件下加载,沿轴向进行了扫频,结果证明17.23 kHz是1阶纵振频率,并在此电压加载情况下与仿真作对比。当激励电压处于100 V时,其振幅接近仿真振幅8.9 μm 。可见,无论频率还是振幅,理论仿真和试验结果都相符。

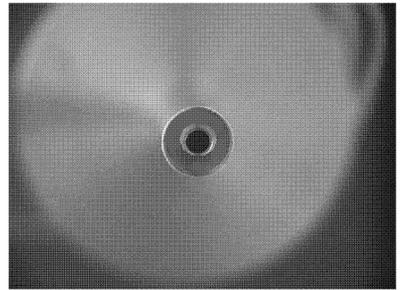


图11 钻探器的模态实验扫频图

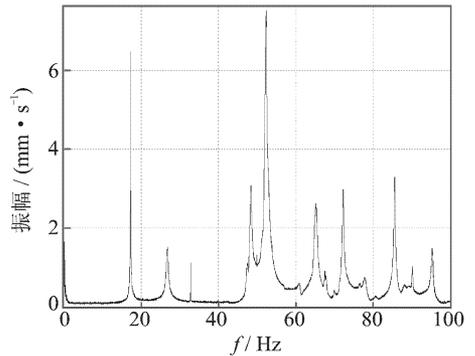


图12 钻探器的模态实验扫频结果

2.3 运动学试验

自由质量有使超声波与声波能量耦合的聚能作用,为了选择合适的自由质量并研究其运动与钻探效果之间的关系,决定利用动态分析三维显微系统拍摄钻探器在工作时自由质量的运动规律。选择20倍镜头,在电压为300 V、频率为17 230 Hz的工作状态下,多次拍摄到自由质量规律地撞击钻杆,施加冲击力。试验得到了不同自由质量的速度和加速度的范围,如图13,14所示,结果见表4。

表4 高速摄像机拍摄结果

自由质量/g	$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
0.6	140~200	-20~20
0.9	40~80	-6~6
1.2	30~60	-5~5

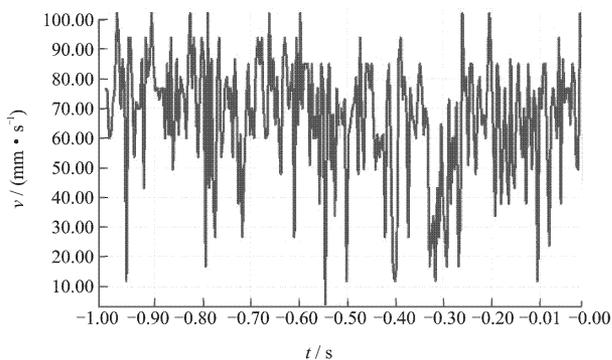


图13 钻探器在动态分析三维显微系统中的速度

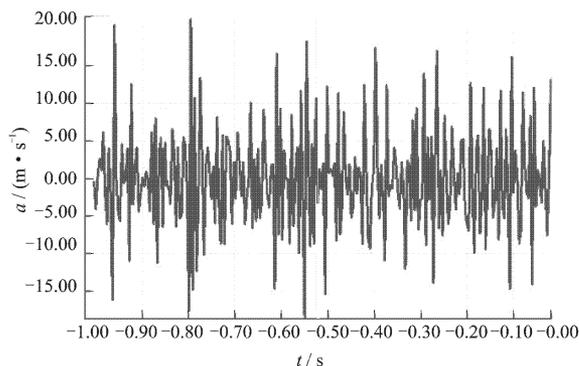


图14 钻探器在动态分析三维显微系统中的加速度

2.4 钻探试验

为了较为全面地分析自由质量对超声波/声波钻探性能的影响,针对不同的自由质量,利用不同的钻杆、钻探介质对样机开展了钻探试验。其中,钻探对象为红砖、混凝土和花岗岩。

在对比和选取最佳钻杆的试验中,除钻杆不同外,其他条件(工作时间、激励条件、自由质量)相同,试验结束后得到如下结论:

- 1) 铝制的钻杆钻探效果普遍好于钢制的钻杆;
- 2) 钻杆的截面形状影响不大,但是长度有影响,适中的80 mm最合适;
- 3) 钻杆与换能器的连接方式必须采用螺纹连接,且不能拧紧,若采用无螺纹配合的方式,或过紧、过松都无法工作。

用已经选好的钻杆,分别安装3个不同质量的自由质量进行钻探试验,对样机施加电压为300 V、频率为17 230 Hz的交流电后,对同一材质进行钻探1 min,结果如表5所示。

表5 钻探效果统计

自由质量/g	钻探深度/mm (混凝土)	钻探深度/mm (红砖)
0.6	3.7	1.7
0.9	4.9	2.4
1.2	4.4	2.6

结合表5的试验可以看出,表2中LS-DYNA仿真的应力水平显示最佳的自由质量在0.9 g左右。表4中显示0.9 g的自由质量的速度和加速度要低于0.6 g的自由质量,意味着0.9 g自由质量的振动频率比较低,但其惯性力比较大,更加适合传递能量。表5的试验证明,适合于本钻探器的自由质量大概在0.9~1.2 g,同时也发现自由质量在0.9 g时,对于钻探混凝土比较有效,而对于更加致密的红砖近似准确。由以上分析得知,适合本钻探器的自由质量是0.9 g。

在部件选取的试验结束之后,用最好的部件组成样机,如图15所示,然后进行样机的性能测试。采用红砖、混凝土、花岗岩做为钻探对象,对样机施加电压为300 V、频率为17 230 Hz的交流电,工作时间为1 min,在60 s后观察钻探效果。性能测试的试验结果如表6所示。

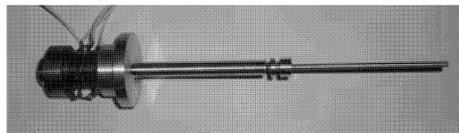


图15 超声波/声波钻探器样机

表6 钻探效果的测试

实验对象	钻探深度/mm
干燥的红砖	2.1(大量碎屑)
混凝土	3.3(大量碎屑)
花岗岩	没有明显的孔,有粉末脱落

根据应力值与面积的关系,在相同冲击力的情况下,采取更小的面积可以增加应力值。在钻杆的圆柱顶端打孔,做成了空心钻头。初步进行对比试验后,发现空心钻杆比实心钻杆钻探效果更好一些,但是磨损很严重,无法多次持续工作。

样机的基本性能如下:质量为180 g,功率为6~9 W,工作频率为17.23 kHz。对硬度比较低和有孔隙的岩石,完全可以实现钻探;对硬度较高的岩石,也可以通过采集碎屑达到取样的目的,符合外太空应用背景需求。

3 结束语

笔者深入分析了超声波/声波能量耦合的动力学行为,基于该机理设计了超声波/声波钻探器,对关键部件——压电换能器进行了参数化优化设计,并对超声波/声波系统的钻探动力学机理进行了初步分析。根据分析结果,试制了样机,开展了压电换能器的模态试验及自由质量的运动学分析,试验了

钻探器的工作性能,分析了自由质量的运动与钻探性能的关系。结果表明,自由质量在超声波/声波能量耦合的动力学过程中具有有效传递能量、保证钻探效果的作用。通过恰当的设计和选择自由质量,可以使得超声波/声波钻探器具有体积小、质量小、能耗低、所需轴向力小且无需润滑等特点。

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 351-358.
Ouyang Ziyuan. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(3): 351-358. (in Chinese)
- [2] Glaser D, Paulsen G, Zacny K, et al. Autonomous drills for planetary subsurface access [J]. *Space Resources Roundtable*, 2006, 8: 23-24.
- [3] Potthast C. Characterisation and system analysis of a novel ultrasonic percussion drill [C]// 2nd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators. Germany: Paderborn University, 2005: 155-161.
- [4] Bao Xiaoqi, Bar-Cohen Y, Chang Zenshou, et al. Modeling and computer simulation of ultrasonic/sonic driller/corer (USDC) [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2003, 50(9): 1147-1160.
- [5] Chang Zenshou, Sherrit S, Bao Xiaoqi, et al. In-situ rock probing using the ultrasonic/sonic driller/corer (USDC) [C]// Proceedings of the SPIE, the International Society for Optical Engineering. San Diego: SPIE, 2003: 567-573.
- [6] Bao Xiaoqi, Bar-Cohen Y, Chang Zenshou, et al. USDC-based rapid penetrator of packed soil [C]// Proceedings International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems. Canada: SPIE, 2006: 1-6.
- [7] Aldrich J, Sherrit S, Bao Xiaoqi, et al. Extreme-seeking control for an ultrasonic/sonic driller/corer (USDC) driven at high power [C]// Proceedings of the SPIE-the International Society for Optical Engineering. San Diego: SPIE, 2006: 358-366.
- [8] Chang Zenshou, Sherrit S, Bao Xiaoqi, et al. Design and analysis of ultrasonic horn for USDC (ultrasonic/sonic driller/corer) [C]// Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. San Diego: SPIE, 2004: 320-326.
- [9] Sherrit S, Bao Xiaoqi, Chang Zenshou, et al. Modeling of the ultrasonic/sonic driller/corer (USDC) [J]. *IEEE Ultrasonic Symposium*, 2000(1): 691-694.
- [10] Potthast C, Twiefel J, Wallaschek J. Modeling approaches for an ultrasonic percussion drill [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 308(3-5): 405-417.
- [11] 郭俊杰, 黄卫清, 李志荣. 一种新型的超声波/声波钻探器 [J]. *压电与声光*, 2008, 30(5): 579-581.
Guo Junjie, Huang Weiqing, Li Zhirong. A new ultrasonic/sonic drilling device [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2008, 30(5): 579-581. (in Chinese)
- [12] 赵淳生. 超声电机技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 505-512.
- [13] 时运来, 李玉宝, 赵淳生. 面内模态直线型超声电机的优化设计 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(30): 56-60.
Shi Yunlai, Li Yubao, Zhao Chunsheng. Optimum design of a linear ultrasonic motor based on in-plane modes [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(30): 56-60. (in Chinese)
- [14] 李玉宝, 时运来, 赵淳生, 等. 高速大推力直线型超声电机的设计与实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(33): 49-53.
Li Yubao, Shi Yunlai, Zhao Chunsheng, et al. Research on linear ultrasonic motor with high speed and large thrust force [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(33): 49-53. (in Chinese)
- [15] 孙运涛, 陈超. 基于近场声悬浮的非接触式直线型压电作动器 [J]. *中国机械工程*, 2010, 21(24): 2952-2955.
Sun Yuntao, Chen Chao. Non-contact linear piezoelectric actuator based on near-field acoustic levitation [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(24): 2952-2955. (in Chinese)
- [16] 苗培实, 李文斌, 梁义维. 基于 ANSYS/LS-DYNA 矿用圆环链超声波探伤的仿真研究 [J]. *煤矿机械*, 2009, 30(1): 39-41.
Miao Peishi, Li Wenbin, Liang Yiwei. Based on ANSYS/LS-DYNA mine ring linked simulation of ultrasonic test [J]. *Coal Mine Machinery*, 2009, 30(1): 39-41. (in Chinese)
- [17] 郑凯, 阎绍泽, 温诗铸, 等. 预压力对压电叠层作动器性能的影响 [J]. *压电与声光*, 2003, 25(5): 363-365.
Zheng Kai, Yan Shaoze, Wen Shizhu, et al. Influence of preload on the properties for piezoelectric stack actuator [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2003, 25(5): 363-365. (in Chinese)



第一作者简介: 陈超, 男, 1976年9月生, 博士、副教授。主要研究方向为超声电机及压电驱动系统集成技术。曾发表《A novel model of ultrasonic motors with effect of radial friction in contact mechanism》(《Journal of Electroceramics》2008, Vol. 20, No. 3-4)等论文。
E-mail: chaochen@nuaa.edu.cn