

超声波取样钻机电耦合特性研究

梁彩红¹, 韦旌坤¹, 史立京², 卜长根¹

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 湖北地矿建设工程承包集团有限公司, 湖北 武汉 430072)

摘要: 压电驱动的超声波取样钻具有质量轻、能耗低、无回转部件的特点, 可以满足地外岩石采样的需求。电能通过压电陶瓷转换为致动器高频振动的机械能, 使其在特定频率做超声的共振。这种超声取样钻的机电耦合特征, 使超声致动器的设计变得复杂。基于 ANSYS 环境, 研究超声致动器在机电耦合场边界条件下的动力学特性, 其耦合场的模态频率、激励响应与单一机械结构场条件得到的结果具有较好的一致性。结果表明, 超声致动器把电能转换机械能过程的机电耦合场相互作用是很弱的。因此, 采用解耦方法, 超声致动器的设计过程将大大简化。

关键词: 超声波取样钻; 月球取样; 致动器; 机电耦合; 模态分析; 解耦

中图分类号: P634.3⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2015)11-0046-04

Research on Electromechanical Coupling Properties of the Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC)/LIANG Cai-hong¹, WEI Jing-kun¹, SHI Li-jing², BU Chang-gen¹ (1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Hubei Dijian Construction Co., Ltd., Wuhan Hubei 430072, China)

Abstract: The Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC), driven by the piezoelectric system, can take rock samples in other planets because of the light weight, low energy consumption and no rotating parts. The function of piezoelectric stacks is to convert the electric power into the dynamic power of the high-frequency mechanical vibrations, so the ultrasonic horn vibrates in ultrasonic frequency. It is complicated to design the ultrasonic horn due to electromechanical coupling. Based on the ANSYS environment, the dynamic characteristics of the ultrasonic horn under the boundary conditions of electromechanical was analyzed. The modal frequency and the excitation response of the coupling field were in good agreement with the results obtained from the single mechanical structure field. The result shows that the electromechanical coupling of USDC is very weak in the process of electrical energy converting into mechanical vibrating power and can be neglected for calculation. Therefore, the decoupling method will be adopted to design the ultrasonic horn in order to simplify the design process.

Key words: USDC; lunar sampling; ultrasonic horn; electromechanical coupling; modal analysis; decoupling

1 概述

2013 年 12 月,“嫦娥三号”发射,“玉兔”到达月球表面,主要实现表面月壤的取样。对月壤进行采样时,通常采用采样铲或螺旋钻头。而钻取岩石时,传统钻探技术受到诸多限制:地面钻探设备主要依靠重力来保证轴向力,实现足够钻压,但月球上重力仅为地球的 1/6;相同钻机在月球上很难保证钻压;传统钻机功率小至几千瓦,大到几十千瓦,而地外探测车动力主要来自于太阳能电池,目前能提供的最大功率是几百瓦,很难达到常规钻机所需功率等。

超声波取样钻是基于声波/超声波能量耦合原理,运用压电陶瓷作为驱动元件,因而具有独特的特

点:结构简单、体积小、质量轻、无旋转运动、无需润滑,能够适应外太空复杂的采样任务,满足地外钻探的需求。

目前,美国、德国对超声波取样钻的研究取得了一些成就。美国国家航空航天局(NASA)下属的喷气推进实验室(JPL)研发了超声取样钻机(USDC)(如图 1 所示),并且在此基础上,改造设计,研发了不同性能的取样钻,有超声波土壤贯入器、高温超声取样钻等。对 USDC 进行了计算机模拟分析与实验。德国 C. Potthast 等人对超声取样钻的研究沿用了美国的模型,进行了测量、动力学和理论分析,得出自由质量具有无规则运动的特性。

收稿日期:2015-05-18

基金项目:国家自然科学基金“潜孔锤多柔体系统接触冲击的理论建模”(编号:51275493)

作者简介:梁彩红,女,汉族,1989 年生,硕士研究生在读,机械工程专业,北京市海淀区学院路 29 号,liangcaihong90@126.com。

通讯作者:卜长根,男,汉族,1963 年生,教授,探矿工程专业,博士,主要从事机械工程、地质工程方面的研究工作,北京市海淀区学院路 29 号,bucg@cugb.edu.cn。



图 1 JPL 设计的 USDC 样机

中国地质大学(北京)机械动力学课题组设计了超声波取样钻专利样机(ZL201210006711.0),如图 2 所示。主要由超声致动器(压电陶瓷、预应力螺栓、后盖板、变幅杆)、自由质量、钻杆 3 部分构成,超声致动器是能量转换器,将电能转换为机械能,工作原理:超声波取样钻在钻进过程中,利用超声致动器将电能转换为机械能,产生超声波频率的振动,变幅杆端部将振动放大,自由质量碰撞冲击钻杆,使钻杆获得更多能量。在此过程中,能量以弹性能的形式保存。这种方式利用取样钻本身的弹性、惯性来传递应力波,取样钻在这些应力波下做拉伸、收缩运动。当冲击能量大于岩石破碎所需的能量时,岩石就破碎了。

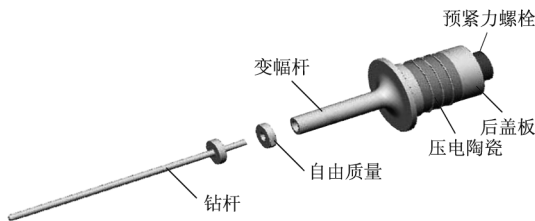


图 2 中国地质大学(北京)超声取样钻结构简图

2 超声波取样钻机特性研究

用 ANSYS 对超声致动器进行模态分析时,边界条件为电路开路($Q=0$),机械自由($F=0$),以求证超声致动器是否具有很强的机电耦合特性;仅考虑机械结构场情况下对超声致动器做模态分析。通过以上 2 种求解,来分析超声取样钻的机电耦合特性。

2.1 超声致动器耦合场模态分析

ANSYS 解决压电驱动的机电耦合问题采取广义矩阵和广义向量表示的控制方程如下:

$$\begin{cases} [M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} + [K^Z]\{V\} = \{F\} \\ [K^Z]^T\{u\} + [K^d]\{V\} = \{Q\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $[M]$ ——质量矩阵; $[C]$ ——阻尼矩阵; $\{u\}$ ——位移向量; $[K]$ ——刚度矩阵; $[K^Z]$ ——机电耦合系数矩阵; $\{V\}$ ——电压向量; $\{F\}$ ——所受外力; $[K^d]$ ——介电常数矩阵; $\{Q\}$ ——自由电荷量。

因此,对超声致动器进行机械结构分析时,需要利用压电陶瓷的特性来构造矩阵 $[K^d]$ 、 $[K^Z]$,然后就可以根据公式(1)对超声致动器进行分析。

超声致动器在 ANSYS 中进行建模(如图 3 所示),致动器各个组件(后盖板、预应力螺栓、压电陶瓷、变幅杆)采用节点耦合,压电陶瓷节点间通过 VOLT 电压耦合。

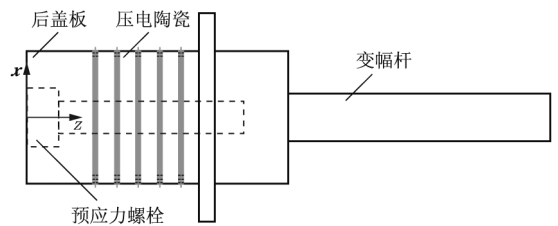


图 3 超声致动器模型

在 ANSYS 对超声取样钻模态分析,分以下几步。

(1)单元类型与材料参数建立。后盖板、预应力螺栓、变幅杆的单元类型与材料参数见表 1。SOLID185 用于构建三维固体结构,通过 8 个节点定义,每个节点有沿着 x 、 y 、 z 方向平移的 3 个自由度。

表 1 致动器主要组件参数

组件	材料	单元类型	密度 ρ / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	杨氏模量 E / GPa	泊松比 μ
预应力螺栓	不锈钢 304L	SOLID185	7930	190	0.30
后盖板	不锈钢 304L	SOLID185	7930	190	0.30
变幅杆	钛合金	SOLID185	4500	110	0.33

压电陶瓷采用 SOLID5 单元,SOLID5 具有三维磁场、热场、电场、压电场和结构场分析的能力,并且可以在各场间实现有机耦合,具有 8 个节点,每个节点最多有 6 个自由度。单元选项为(UX、UY、UZ、VOLT)。

压电陶瓷生产厂家的 PZT-8 压电陶瓷材料参数见表 2,与 ANSYS 仿真需要的材料参数存在差异性,所以要对压电陶瓷材料特性依公式(2)进行

表2 压电陶瓷的性能参数

参数	数值	单位
密度 ρ_p	7450	kg/m ³
弹性柔顺常数 s_{11}^E	11×10^{-12}	m ² /N
弹性柔顺常数 s_{33}^D	8.5×10^{-12}	m ² /N
弹性柔顺常数 s_{55}^D	21×10^{-12}	m ² /N
泊松比 μ	0.30	
机电耦合系数 k_t	0.44	
机电耦合系数 k_p	0.50	
压电应变常数 d_{31}	0.9×10^{-10}	m/V
压电应变常数 d_{33}	2.0×10^{-10}	m/V
压电应变常数 d_{15}	4.1×10^{-10}	m/V
真空介电常数 ϵ_0	8.85×10^{-12}	F/m
相对介电常数 K_{33}^σ	1000	
相对介电常数 K_{11}^σ	1400	

弹性刚度常数矩阵:

$$[c^E] = \begin{pmatrix} 1.60E+11 & 8.96E+10 & 9.57E+10 & 0 & 0 & 0 \\ 8.96E+10 & 1.60E+11 & 9.57E+10 & 0 & 0 & 0 \\ 9.57E+10 & 9.57E+10 & 1.53E+11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.50E+10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.65E+10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.65E+10 \end{pmatrix}$$

相对介电常数矩阵:

$$[K^e] = \begin{pmatrix} 517 & & \\ & 517 & \\ & & 629 \end{pmatrix}$$

$$[K^Z] = [e] \sqrt{\frac{[c^E]^{-1}}{\epsilon_0 K^e}} \quad (3)$$

$$[K^d] = \epsilon_0 [K^e] \quad (4)$$

根据公式(3)、(4),将压电陶瓷的材料参数代入,得到了机电耦合系数矩阵 $[K^Z]$ 、介电常数矩阵 $[K^d]$,因此,只需对致动器再施加边界条件和载荷,公式(1)便可求解。

(2)建模及网格划分。在 ANSYS 中建立超声致动器的模型,采用节点耦合法对压电陶瓷、预应力螺栓、后盖板、变幅杆进行结构连接。采用自由网格划分后盖板、预应力螺栓、变幅杆,映射网格划分压电陶瓷。

(3)施加边界条件。致动器陶瓷原件表面所有节点通过 VOLT 自由度耦合,命令为:cp, 1, volt, all; *get, n1, node, 0, num, min; cp, 2, volt, all, *get, n2, node, 0, num, min; cp, 3, volt, all; *get, n3, node, 0, num, min; cp, 4, volt, all, *get, n4, node, 0, num, min; cp, 5, volt, all; *

必要转换,得到基于 ANSYS 环境下压电陶瓷的材料参数。

$$\left. \begin{aligned} [c^E] &= [s^E]^{-1} \\ [e] &= [s^E]^{-1} [d] = [[d]^t [s^E]^{-1}]^t \\ [\xi^e] &= [\xi^\delta] - [d]^t [s^E]^{-1} [d] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

压电陶瓷在 ANSYS 中,其中压电常数矩阵:

$$[e] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -3.3 \\ 0 & 0 & -3.3 \\ 0 & 0 & 13.47 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 19 & 0 \\ 19 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

get, n5, node, 0, num, min。不施加结构边界条件。

(4)求解超声致动器耦合条件下一阶纵振频率为 24226 Hz,二阶纵振频率为 43100 Hz。

2.2 超声致动器机械结构场模态分析

不考虑机电耦合,致动器的机械结构的动力学线性控制方程如下:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{F\} \quad (5)$$

式(5)中 $\{F\} = 0$ 时,基于 ANSYS,在结构场中对超声致动器进行模态分析时,压电陶瓷采用 SOLID185 单元。不施加任何边界条件,求解后,得到超声致动器单一机械结构下一阶纵振频率为 23982 Hz,二阶纵振频率为 42925 Hz。

2.3 分析与讨论

当在压电陶瓷上施加 $V = 496 \sin(\omega_n t + \varphi_n)$ 的电压时,得到超声致动器机电耦合场下一阶模态频率共振的响应(如图 4 所示)。分别提取压电耦合场中致动器变幅杆端部在一阶、二阶模态频率下响应的机械参数(位移、速度、加速度)(见表 3)。

在单一机械结构场中,Potthast 等为了求解致动器的响应,采用 PZT-8 陶瓷片,施加 496 V 脉冲电压,等效于在压电陶瓷正极面上施加幅值 0.73 N 的

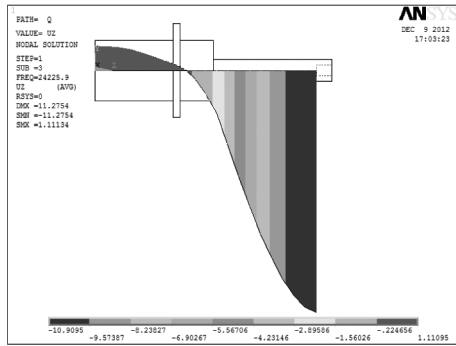


图 4 压电耦合场下致动器一阶模态频率下的共振响应

合场中致动器变幅杆端部在一阶、二阶模态频率下响应的机械参数(位移、速度、加速度)(见表 3)。

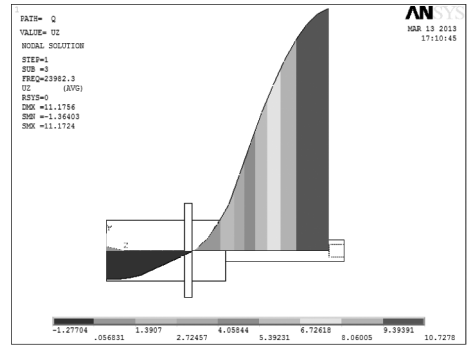


图 5 机械结构场下致动器一阶模态频率下的共振响应

力载荷^[4],所以在结构场施加的力函数 $F = 0.73\sin(\omega_n t + \varphi_n)$,可分析超声致动器在结构场中一阶模态频率共振的响应(如图 5 所示)。分别提取压电耦

表 3 超声致动器端部模态频率和位移、速度、加速度幅值

结构场	一阶模态频率/Hz	二阶模态频率/Hz	一阶模态频率下			二阶模态频率下		
			位移幅值/mm	速度幅值/(m·s ⁻¹)	加速度幅值/(m·s ⁻²)	位移幅值/mm	速度幅值/(m·s ⁻¹)	加速度幅值/(m·s ⁻²)
压电耦合场	24226	43100	2.25	0.34	51727	0.30	0.081	21924
机械结构场	23982	42925	2.19	0.33	49700	0.28	0.075	20217
相对误差/%	1.0	0.4	2.7	2.9	3.9	6.7	7.4	7.8

为了分析超声致动器在压电耦合场和机械结构场下响应的差别,用 $\left| \frac{x_{\text{压电}} - x_{\text{机械}}}{x_{\text{压电}}} \times 100\% \right|$ 来表征其对应响应的误差, $x_{\text{压电}}$ 表征致动器在压电耦合场下的频率及响应, $x_{\text{机械}}$ 表征致动器在机械结构场的频率及响应。通过表 3,可以看出,超声致动器在压电耦合场和机械结构场下,一阶、二阶模态频率的相对误差 $\geq 1\%$,相对应的位移、速度、加速度响应相对误差 $\geq 10\%$,因此说明超声致动器的机电耦合性比较弱,因此,超声致动器设计计算时,可以忽略致动器的机电耦合特性对致动器机械性能的影响。

3 结论

(1) 超声致动器在工作过程中机电耦合作用很弱,因此可以采用解耦的方法对超声致动器进行设计。

(2) 采用解耦的方法可以将超声波钻致动器的动力学分析转化为集中力对连续柱激励共振响应的求解。

参考文献:

[1] Xiaoqi Bao, Yoseph Bar-Cohen, Zensheu Chang, et al. Modeling

and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (US-DC) [J]. IEEE transactions of Ultrasonic, Sonic and frequency control, 2003, 50:1147 - 1160.

[2] 卜长根,王龙,韦旌坤. 超声激励冲击太空取样钻,中国:ZL 201210006711.0[P]. 2012 - 07 - 18.

[3] 林玉书. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京:科学出版社, 2004.

[4] C. Potthast, J. Twiefel, J. Wallaschek. Modeling approaches for an ultrasonic percussion drill [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007. 405 - 417.

[5] Stewart Sherrit, Yoseph Bar-Cohen, Benjamin P. Dolgin, et al. Sample Acquisition and In-Situ Analysis Using the Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) and Robotic Platforms [J]. Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space, 2001.

[6] S. Imaoka. Conversion of Piezoelectric Material Data An ANSYS Support Distributor from Engineering Consultant [K]. Collaborative Solutions Inc, 1999.

[7] ANSYS 耦合场分析指南[K]. 安世亚太,2008.

[8] 党沙沙,张红松. ANSYS 12.0 多物理耦合场有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

[9] 姜德义,郑拯宇,李林,等. 压电陶瓷片耦合振动模态的 ANSYS 模拟分析[J]. 传感技术学报,2003,(4):452 - 456.

[10] 许龙. 基于有限元法的耦合振动夹心换能器的特性和设计研究[D]. 陕西西安:陕西师范大学,2008.

[11] 王龙. 太空超声取样钻机的设计研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2011.

[12] 韦旌坤. 超声激励冲击太空超声取样钻动力学仿真[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013.