

文章编号: 2095-4980(2021)06-1086-05

## 短距离钻杆中声波传输仿真与实验

高 理<sup>1</sup>, 程为彬<sup>\*1,2</sup>, 李铭钧<sup>1</sup>, 张璐璐<sup>1</sup>, 魏 娜<sup>1</sup>, 张 楠<sup>1</sup>

(1.西安石油大学 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065;  
2.长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100)

**摘 要:** 井下短距离声波通信技术是将近钻头传感器测量的井眼信息传输到随钻测量仪(MWD)的关键。为了探究声波载波信号在短距离钻杆中的传输特性, 采用有限元法建立 1.28 m 长的钻杆模型, 对钻杆施加频率为 20 Hz, 占空比为 50% 的激振载荷, 模拟计算钻杆径向接收点响应和钻杆结构的特征频率, 并分析声波在短距离钻杆中的传输特性。结果表明, 当钻杆在初始条件下受到激振载荷作用时, 钻杆接收点的声波信号整体具有一条呈指数形式衰减的包络曲线, 其内部为幅值逐渐衰减的余弦周期信号, 并最终稳定在新的平衡位置; 当钻杆继续受载荷作用后, 声波信号会在之前稳态的基础上继续衰减, 最终逐渐衰减并稳定在初始状态, 仿真结果及理论分析与实验结果吻合良好, 为声波在多钻杆中传输的仿真提供基础模型。

**关键词:** 声波传输; 短距离钻杆; 有限元分析; 特征频率

**中图分类号:** TE921; TP212

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2020058

## Simulation and experiment of acoustic wave transmission in short distance drill pipe

GAO Li<sup>1</sup>, CHENG Weibin<sup>\*1,2</sup>, LI Mingjun<sup>1</sup>, ZHANG Lulu<sup>1</sup>, WEI Na<sup>1</sup>, ZHANG Nan<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China;  
2. Key Laboratory of Exploration Technology for Oil and Gas Resources in Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan Hubei 430100, China)

**Abstract:** Short distance acoustic communication technology under the oil well is the key to transmitting the borehole information measured by the near-bit sensor to the Measurement While Drilling(MWD). In order to explore the transmission characteristics of the sonic carrier signal in the short-distance drill pipe, the finite element method is adopted to establish a 1.28 m long drill pipe model, and an excitation load with a frequency of 20 Hz and a duty ratio of 50% is applied to the drill pipe to simulate the calculation of the radial receiving point response of the rod and the characteristic frequency of the drill rod structure. The transmission characteristics of the acoustic wave in the short distance drill rod are analyzed as well. The results show that when the drill pipe is subjected to an excitation load under the initial conditions, the acoustic signal at the receiving point of the drill pipe has an enveloping curve that decays exponentially, and its interior is a cosine periodic signal with gradually decreasing amplitude, and finally stable at a new equilibrium position; when the drill pipe continues to be loaded, the acoustic signal will continue to decay on the basis of the previous steady state, and eventually decays and stabilizes in the initial state. The simulation results are in good agreement with theoretical analysis and experimental results. This work can provide basic model for the simulation of sound wave transmission in multiple drill pipes.

**Keywords:** acoustic transmission; short distance drill pipe; finite element analysis; characteristic frequency

旋转导向钻井系统的核心是导向钻井工具, 其中近钻头传感器测量的井眼信息传输到随钻测量仪(MWD), 进而上传到地面监控平台。传输过程中, 由于电子仓与 MWD 之间存在伺服系统相对旋转振动、套管和井壁的碰撞等干扰, 无法用线缆直接相连, 因此需要采用一种稳定、高效的无线短距离通信技术<sup>[1-2]</sup>。传统的泥浆脉冲

收稿日期: 2020-02-18; 修回日期: 2020-05-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51704238)

\*通信作者: 程为彬 email:wcheng@xsyu.edu.cn

和电磁波通信传输效率低，而随钻声波传输利用沿管壁传输的弹性声波作为载波信号，进行井下无线信息传输，具有结构简单、成本低、适应性强等特点，可为井下无线信息传输研究提供新的方向<sup>[3]</sup>。Tatiana B Mironova 等人证明振动声学管道特性的有限元技术可以模拟管道的振动声学特性，提出新型的七节点和双节点有限元模型，用于模拟固体结构与振动流体之间的振动声相互作用，并通过实验数据证实该方法的正确性<sup>[4]</sup>，他们利用有限差分技术研究在振动流体力的激励作用下，管道轴向的振动声学特性，该方法可用于飞机管道、电厂管道、移动机械和固定式加工机械管道<sup>[5]</sup>。Andy Hawthorn 等人讨论声学遥测网络在钻井、固井和完井中提供实时井下数据传输，用于枯竭的储层和管理压力操作过程，并应用案例说明声学遥测网络应用前景<sup>[6]</sup>。Michael J Kingan 等人提出一种分析无限长圆柱结构在流体作用下响应的有效方法，用于分析任意内部或外部激励引起的辐射或传输<sup>[7]</sup>。K Pelekanakis 等研究声波在钻杆中传输的均衡器和信道编码技术，并取得了较低的误码率<sup>[8]</sup>。国内在钻杆中声波传输技术上起步相对较晚，主要还处于理论研究和室内试验阶段，管志川等认为周期性钻杆具有梳状滤波器特性，设计加工一种新型井下声波发生装置并进行声波传播特性的探索<sup>[9]</sup>；李志刚等人对近钻头短距离钻具声波遥测的关键问题展开分析<sup>[10]</sup>；赵国山等人研究参数差异对钻杆信道声波传播特性的影响<sup>[11]</sup>；刘永旺等人通过数值模拟研究水平井钻杆中声波传输频率的选择<sup>[12]</sup>；马西庚等人研究钻杆中声波传输特性测试<sup>[13]</sup>。上述文献主要对声波在钻杆中传输的发声装置、传输频率和材料参数差异等因素进行研究，而针对声波作为载波信号在短距离钻杆中传输机理的文献并不多，为此本文利用有限元法模拟声波在钻杆中传输的过程并对传输特性进行验证研究。

本文通过有限元软件建立短距离钻杆声波传输模型，模拟计算冲击载荷下钻杆中传输的声波载波信号，并分析声波载波信号在钻杆中的传输特性，为多钻杆声波传输提供基础模型。

## 1 声波在钻杆中传输特性

### 1.1 钻杆受周期载荷作用分析

钻杆激励点受到周期载荷的作用，其中载荷函数为  $F(t) = F(t+T)$ ， $T$  为周期，通过谐波分析并将  $F(t)$  展为傅里叶级数得：

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

式中： $\omega = \frac{2\pi}{T}$  为载荷基频； $\frac{a_0}{2}$  为  $F(t)$  的平均值； $a_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos n\omega t dt$ ； $b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin n\omega t dt$ ， $n = 0, 1, \dots$ 。

### 1.2 结构阻尼

结构阻尼是影响声波在钻杆中传输时动力响应的重要因素，通常采用瑞利阻尼来描述结构的阻尼机制。瑞利阻尼模型假设阻尼矩阵与系统质量矩阵和刚度矩阵成正比，通常质量矩阵与刚度矩阵的线性关系为：

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2)$$

式中： $C, M, K$  分别为阻尼矩阵、质量矩阵、刚度矩阵； $\alpha, \beta$  为瑞利阻尼系数。

使用瑞利阻尼模型的多自由度系统运动方程解耦，可得到阻尼比与频率之间的关系。若要求瑞利阻尼比例系数  $\alpha, \beta$ ，至少要有两个不同振型的自然圆频率及对应的阻尼比，当两个振型的阻尼比和自然圆频率分别相等时，可得阻尼系数<sup>[14]</sup>：

$$\alpha = \xi_0 \omega_0, \beta = \frac{\xi_0}{\omega_0} \quad (3)$$

式中： $\omega_0$  为系统基频； $\xi_0$  为对应振型的阻尼比。

### 1.3 冲击载荷作用下钻杆的振动响应

声信号在钻杆内部传播可认为质点在受到外界载荷作用时在平衡位置做往复阻尼振动，最终质点的能量逐渐衰弱。

钻杆受迫振动是一种阻尼振动，系统振动微分方程为：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F(t) \quad (4)$$

式中： $x$  为信号(质点)振动位移； $m$  为质量； $c$  为阻尼系数； $k$  为刚度常数。

系统初始条件：当  $t=0$  时， $x(0)=x_0, \dot{x}(0)=\dot{x}_0$ 。将式(1)代入式(4)，可得钻杆声波信号接收点的位移与时间的关系式为：

$$x(t) = e^{-\varepsilon\omega t} \left( x_0 \cos \omega_d t + \frac{\dot{x}_0 + \varepsilon\omega x_0}{\omega_d} \sin \omega_d t \right) + \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t F(\tau) e^{-\varepsilon\omega(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \tag{5}$$

式中： $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  为无阻尼系统固有圆频率(特征频率)； $\varepsilon = \frac{c}{2\sqrt{km}}$  为阻尼比； $\omega_d = \sqrt{1-\varepsilon^2}\omega$  为有阻尼系统固有圆频率，单位为 rad/s； $x_0$  为由初始条件而定的位移实常数； $\tau$  为响应作用时间。

由式(5)可得，系统在受到载荷作用时，位移响应是衰减型振荡运动，具有一条呈指数形式衰减的包络曲线，其内部为幅值逐渐衰减的余弦周期信号；当系统继续受外力作用时，位移响应在之前的稳态基础上逐渐衰减，最终稳定在初始平衡位置。

### 2 冲击载荷下短距离钻杆声波传输试验装置

该试验装置模拟 MWD 与电子仓之间的声波信号传输，由短距离钻杆、声波产生和接收三部分组成，如图 1 所示。通过 YE1311 信号发生器产生驱动信号使 JZK-2 激振器径向激振钻杆产生声波。通过与激振点在同一轴线上径向放置的 CA-YD186 压电加速度传感器输出与钻杆振动信号成正比的电压信号，再经 YE3826A 恒流适配器对信号放大滤波后在示波器显示。试验以 20 Hz 的方波信号驱动激振器激振，测试波形如图 2。

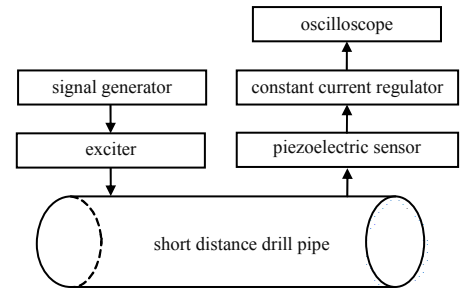


Fig.1 Schematic diagram of test device  
图 1 试验装置示意图

### 3 冲击载荷下钻杆声波传输有限元仿真

#### 3.1 钻杆建模

在实验室中采用冲击载荷模拟声波载波信号的产生，钻杆为刚性直杆，将钻杆声波传输系统离散化，简化为多自由度质量-阻尼系统，载荷简化为方波周期激励，通过 COMSOL 绘图工具直接绘制声波在短距离钻杆中传输的三维模型，模型参数设定见表 1。

仿真时，在钻杆激励点施加频率  $f=20$  Hz，占空比为 50%，时间  $t=1$  s 的周期方波载荷，激励信号垂直钻杆为径向载荷。

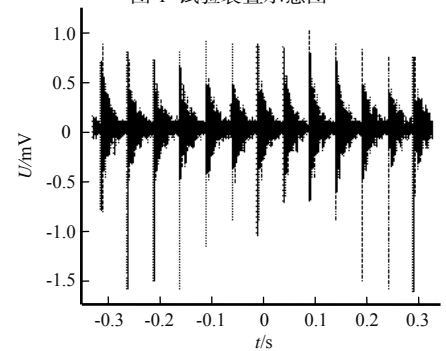


Fig.2 Measured waveform of the actual sound receiving point of drill pipe  
图 2 实测钻杆声波接收点的测量波形

表 1 短距离钻杆材料物理属性

Table1 Physical properties of short distance drill pipe material

length/mm	external diameter/mm	inner diameter /mm	thickness /mm	density/(kg·m <sup>-3</sup> )	Young modulus/GPa	Poisson ratio
80	140	120	10	7 870	205.9	0.3

#### 3.2 网格剖分

网格剖分的质量和密度直接影响有限元分析的精确度和计算效率，对三维模型进行离散化，采用 4 节点的自由四面体网格和 3 节点的自由三角形网格，通过扫掠将模型划分为较小的单元进行求解。该模型共有 21 648 个实体单元和 14 760 个顶点，在载荷作用点和钻杆两端对网格进行细化，提高声波信号与管道之间的传递效率，保证求解的精确度。模型设置后网格分布如图 3。

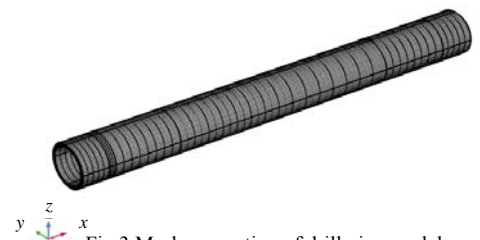


Fig.3 Mesh generation of drill pipe model  
图 3 钻杆模型网格剖分

#### 3.3 边界条件

边界条件处理是有限元建模的重要组成部分，在信号激励点施加载荷来分析钻杆中声波信号的传播特性。

添加结构力学物理场来模拟钻柱中声波传输时的环境，钻杆质量阻尼系数 0.001，刚度阻尼系数 0.000 1，在处理载荷约束时，声波激励点施加与钻杆中心轴垂直的径向位置向下的位移载荷，计算声波接收点与钻杆中心轴垂直的位移载荷。

### 4 冲击载荷下短距离钻杆声波传输动态响应分析

对冲击载荷下钻杆声波传输进行动态特性分析时，瞬态研究步长设置由冲击载荷函数来确定。设置时间步长为 0.000 2 s，求解时间为 0.2 s，则总的仿真计算时间步为 1 000 步，同时设置每个时间步最多有 6 次迭代，在给钻杆施加冲击载荷后，通过仿真得到阻尼结构前 6 阶特征频率见表 2，对于特征频率的测量和计算，在工程具有重要意义<sup>[15]</sup>。

表 2 钻杆前 6 阶特征频率

Table2 The first six orders characteristic frequencies of the drill pipe						
modal order number	1	2	3	4	5	6
characteristic frequencies/Hz	1 065.2	1 075.5	1 647.4	1 651.3	1 907.9	1 971.5

从表 1 可看出钻杆特征频率，在实验或测井时尽量避免与钻杆特征频率相近，防止钻杆产生共振而对信号传输造成影响。同时通过仿真分析可看出声波在钻杆中传播的分布状态和接收点声波响应曲线，分别如图 4 和图 5 所示。从图 4 中可以看出，在  $t=0.010\ 1\text{ s}$  时，钻柱受激励点载荷作用很小，接收点的能量很低，当  $t=0.035\ 0\text{ s}$  时，激励点能量逐渐增大，同时波包顺着钻杆轴向传播，当  $t=0.039\ 0\text{ s}$  时，首次波包在钻杆中反射传播，同时钻杆继续受点载荷作用，当  $t=0.043\ 0\text{ s}$  时，钻杆中反射的波包互相叠加融合，在钻杆进行轴向传播，之后声波的传播会随着激励点的周期性激励，开始以之前的运动产生状态，一样做循环运动，如图 4(a)。

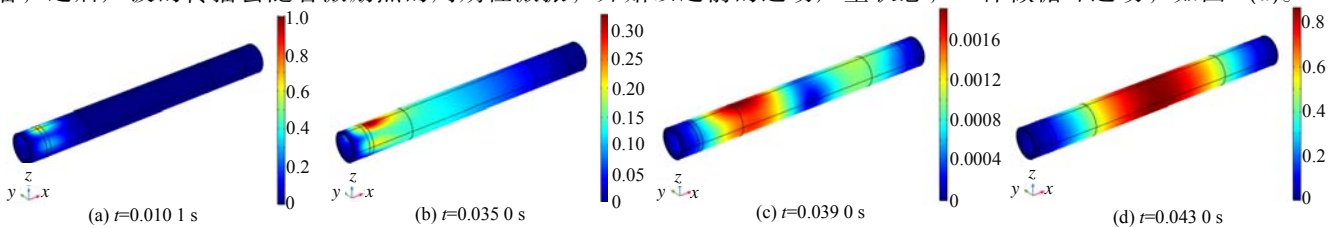


Fig.4 Acoustic wave propagating in the drill pipe

图 4 声波在钻杆中传播

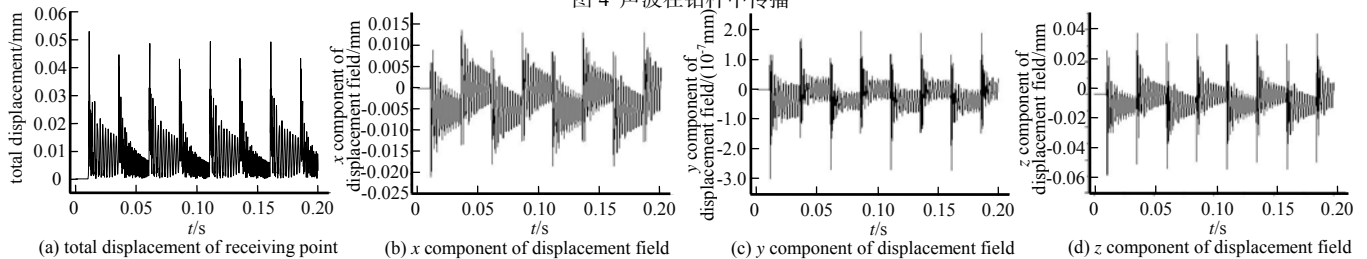


Fig.5 Displacement response curves of the acoustic signal reception point in drill pipe

图 5 钻杆声波信号接收点位移响应曲线

如图 5 所示  $x,y,z$  分别代表接收点轴向、周向和径向的声波响应。从图 5(a)可看出，在初始条件下，载荷作用时钻杆接收点的声波信号具有一条呈指数形式衰减的包络曲线，其内部为幅值逐渐衰减的余弦周期信号，并稳定在新的平衡位置；当钻杆继续受载荷作用时，信号会在之前稳态的基础上衰减，最终逐渐衰减并稳定在初始状态，这与式(5)理论分析结果一致。同时通过接收点位移场三个方向分量可明显看出在接收点  $z$  分量上声波的信号幅值最大。通过图 5(d)和图 2 比较发现，声波随着时间的增长而衰减，持续出现不同的振动幅值，其信号均呈现一条随指数衰减的包络，数值模拟结果与实验测量结果一致；而且由图 2 可明显看出，实际中声波信号在钻杆内传输受到持续的噪声和杂波影响。

### 5 结论

通过对冲击载荷下钻杆声波传输特性的研究，采用有限元法建立声波在钻杆中传输的动特性模型，得到结论：在初始条件下，当有载荷作用在短距离钻杆时，接收点的声波信号的包络是一条呈指数形式衰减的曲线，并稳定在新的平衡位置；当钻杆继续受载荷作用后，声波载波信号会在之前稳态的基础上衰减，最终逐渐衰减并稳定在初始状态，这与理论分析结论一致；通过分析钻杆特征频率可得，在实验或测井时尽量避免与钻杆特征频率相近，防止钻杆共振，进而影响声波信号在钻杆中传输；声波在短距离钻杆中实际传输时受噪声和杂波干扰，不是理想的呈指数衰减的周期振荡信号，经过仿真与实测对比结果一致，说明该建模方法有效。

#### 参考文献：

[1] 杨剑锋,张绍槐. 旋转导向闭环钻井系统[J]. 石油钻采工艺, 2003,25(1):1-5,83. (YANG Jianfeng,ZHANG Shaohuai.

- Rotary closed-loop steerable drilling system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003,25(1):1-5,83.)
- [ 2 ] 高理,程为彬,满荣娟,等. 钻杆声波传输对可调脉宽驱动的敏感性研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2016,31(6):104-107. (GAO Li,CHENG Weibin,MAN Rongjuan,et al. Study on sensitivity of drill pipe sound wave transmission to the adjustable pulse width driving[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2016, 31(6):104-107.)
- [ 3 ] 李琪,彭元超,张绍槐,等. 旋转导向钻井信号井下传送技术研究[J]. 石油学报, 2007,28(4):108-111. (LI Qi,PENG Yuanchao,ZHANG Shaohuai,et al. Study on signal transmission technique in rotary steering drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(4):108-111.)
- [ 4 ] MIRONOVA T,PROKOFIEV A,SVERBILOV V. The finite difference technique for modelling of pipe system vibroacoustical characteristics[C]// 9th FPNI Ph.D. Symposium on Fluid Power. Florianópolis,SC,Brazil:ASME, 2016.
- [ 5 ] MIRONOVA T,PROKOFIEV A,SVERBILOV V. The finite element model of vibroacoustical characteristics of pipe system under force excitation by oscillating fluid flow[C]// 8th FPNI Ph.D Symposium on Fluid Power. Lappeenranta,Finland: ASME, 2014.
- [ 6 ] ANDY Hawthorn,DUNCAN Groves. Acoustic telemetry network provides real-time downhole data transmission during drilling, cementing and completion installation for use in depleted reservoirs and during managed pressure operations[C]// IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition. Amsterdam,Netherlands: Society of Petroleum Engineers(SPE), 2019.
- [ 7 ] KINGAN Michael J,YANG Yi,MACE Brian R. Sound transmission through cylindrical structures using a wave and finite element method[J]. Wave Motion, 2018(87):58-74.
- [ 8 ] PELEKANAKIS K,CHITRE M. Performance of channel coding and equalization for acoustic telemetry along drill strings[C]// IEEE International Conference on Communication Systems. Macau,China:IEEE, 2014.
- [ 9 ] 赵国山,管志川,刘永旺. 声波在钻柱中的传播特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010,34(1):55-59. (ZHAO Guoshan,GUAN Zhichuan,LIU Yongwang. Acoustic transmission properties in drill string[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010,34(1):55-59.)
- [10] 李志刚,管志川,王以法. 随钻声波遥测及其关键问题分析[J]. 石油矿场机械, 2008,37(9):6-9. (LI Zhigang,GUAN Zhichuan,WANG Yifa. Acoustic telemetry while drilling and analysis on its key problems[J]. Oil Field Equipment, 2008,37(9):6-9.)
- [11] 黄明泉,赵国山,谭哲. 物性参数差异对钻柱信道声波传播特性的影响[J]. 石油机械, 2019,47(6):17-21. (HUANG Mingquan,ZHAO Guoshan,TAN Zhe. Influence of physical parameters on acoustic transmission characteristics of drill string channel[J]. China Petroleum Machinery, 2019,47(6):17-21.)
- [12] 刘永旺,管志川,隆志强,等. 水平井钻柱中传输井下信息声波频率的选择[J]. 石油机械, 2014,42(12):6-10,16. (LIU Yongwang,GUAN Zhichuan,LONG Zhiqiang,et al. Acoustic frequency selection for information transmitting through drill string in horizontal well[J]. China Petroleum Machinery, 2014,42(12):6-10,16.)
- [13] 马西庚,李超,柳颖. 钻杆中声波传输特性测试[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010,34(4):70-74. (MA Xigeng,LI Chao,LIU Ying. Transmission characteristics test of acoustic wave in drill pipe[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010,34(4):70-74.)
- [14] 杨舒蔚. 悬索桥地震响应分析的阻尼模型研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018. (YANG Shuwei. Study on damping model for seismic response analysis of suspension bridges[D]. Chengdu,China:Southwest Jiaotong University, 2018.)
- [15] 颜刚毅. 固有频率压电堆激励无损测量方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):753-756. (YAN Gangyi. Nondestructive measurement of natural frequency by excitation of a piezoelectric stack[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):753-756.)

#### 作者简介:

高理(1971-),女,陕西省西安市人,硕士,讲师,主要从事石油仪器及其智能化、信号与信息处理研究.email: 12162635@qq.com.

李铭钧(1990-),男,西安市人,在读硕士研究生,研究方向为智能仪表与自动化装置.

魏娜(1980-),女,陕西省乾县人,硕士,讲师,主要研究方向为自主水下航行器与自主移动机器人协同控制与决策.

程为彬(1970-),男,安徽省池州市人,博士,教授,从事石油仪器及其智能化、检测技术与自动化装置等方面的教学和研究.

张璐璐(1995-),女,陕西省洋县人,在读硕士研究生,研究方向为智能仪表与自动化装置.

张楠(1994-),男,陕西省咸阳市人,硕士,实验教师,主要研究方向为井下智能仪器.