

无源伺服反馈多输出低频振动传感器

匙庆磊, 杨学山, 尚帅锐

(中国地震局工程力学研究所中国地震局地震工程与工程振动重点实验室 哈尔滨 150080)

摘要:介绍了一种无源多输出低频振动传感器,可同时测量加速度和速度。利用无源伺服反馈控制技术,传感器呈现速度摆特性,但该速度摆不是通常意义上大阻尼状态的速度摆,对摆体特性进行了详细的数学分析,仅使用一种换能方式即实现了加速度和速度两组物理量的测量,证明了速度输出是速度摆速度计,加速度输出是速度摆加速度计。对传感器特性,尤其是加速度输出特性进行了较为详细的分析。最后,对传感器进行了测试,得到该传感器的加速度输出和速度输出在0.1~100 Hz有较好的频率响应特性,可以满足低频工程振动测量的需求,且实现了一只传感器同时测量加速度和速度两种物理参量。

关键词: 低频振动;多输出拾振器;低频拾振器;无源伺服反馈;速度摆

中图分类号: P315 TP212 TH825 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Passive servo feedback multi-output low-frequency vibration sensor

Chi Qinglei, Yang Xueshan, Shang Shuaikun

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: In this paper we introduce a new passive multi-output low-frequency vibration sensor that can measure acceleration and speed of the waves. Using the passive servo feedback control technique, the sensor shows the characteristics of a speed pendulum, which, however, is not the usual speed pendulum in large-damping state. A detailed mathematical analysis is carried out on the characteristics of the pendulum body. Simultaneous measurements of both acceleration and speed can be achieved using only one transducing mode. It is proved that the speed output is the output of the speed pendulum speedometer and the acceleration output is the output of the speed pendulum accelerometer. We also analyze the characteristics of the sensor, especially analyze the acceleration output characteristics in detail. Finally, the sensor was tested, and good frequency-response characteristics of acceleration output and speed output of the sensor in the frequency range from 0.1 Hz to 100 Hz were obtained, which satisfies the requirement of low-frequency engineering vibration measurements, and the goal of using one sensor to measure both acceleration and speed at the same time is achieved.

Keywords: low-frequency vibration; multi-output vibration pickup; low-frequency vibration pickup; passive servo feedback; speed pendulum

1 引言

低频振动测量涉及的领域相当广泛,如土木水利工程结构^[1-2]、深空探测^[3]、精密仪器隔振基础、地震观测和地脉动观测、地质勘探、生物及人体动力学等。采用惯性

拾振器测量低频振动的方法有以下几种。

1) 低频加速度测量直接利用低频加速度计完成,如力平衡式加速度计(美国的 EpiSensor ES-T 力平衡式加速度计)、压阻加速度计等,一些压电式加速度计也可测量低频加速度。这种方法存在的不足在于低频加速度信号一般幅值较小,除非仪器性能出色且测量参数设置合

理,否则信号很容易被高频振动噪声和仪器的电子噪声淹没^[4]。

2) 利用加速度计,通过对加速度信号进行一次积分和两次积分测量速度和位移,这种方法的不足在于有时会带来较大的测量误差,尤其是两次积分时。这种问题在地震观测领域表现的较为明显,从对仪器的技术要求看,地震观测几乎是对传感器要求最苛刻的测量领域之一,且利用精密仪器进行地震观测的历史也有几十年,一些问题在地震观测领域被发现,文献^[5]对此进行了阐述。日本东京测振株式会社曾做过一次积分和两次积分的对比试验并公布了对比结果,证实两次积分会带来较大测量误差,一次积分带来的测量误差较小。

3) 低频地震检波器和经过电路校正的磁电式速度计可用于测量低频速度信号^[6-8],根据公开的技术资料,低频地震检波器可以测量频率低至1 Hz的振动信号,不过这种地震检波器的体积和重量较大,弹性元件容易损坏,价格较昂贵,且无法测量低于1 Hz的振动信号,当然,南京航空航天大学使用光学的方法得到了0~40 Hz内的信号;但是这个系统仍然无法避免上述检波器的缺陷^[9]。

4) 利用“无源伺服式往复摆多功能拾振器”完成低频振动信号的测量^[10-12]。此类传感器在低频振动测量中应用较多,其不足在于无法同时完成两个物理量的测量,例如在测量加速度时,无法测量速度,如果需要同时测量多个物理量则需要安装两支此类拾振器,这通常意味着增加了测试成本和测试的复杂性;

5) 利用有源伺服控制反馈技术,通过闭环控制或零点补偿^[13-15],改善传感器低频特性,中国地震局工程力学研究所研制的DLS型高精度多功能拾振器可以测量0.01~100 Hz的微震信号,也可实现低频振动信号的测量,如一些地震计和工程上的有源伺服式传感器^[16-18]。但有源伺服拾振器需要需电源供电,那么在现场测试的时候就需要进行调零,同时这种用模拟电路进行反馈的拾振器由于其电源本身带来的噪声会严重的降低拾振器的低频振动测量精度。

以上为国内外惯性式传感器的当下的主流测试方法,此外还有基于磁悬浮原理^[19]和磁阻尼^[20]原理的低频振动检测方法,介绍了一种无源伺服多输出低频振动传感器,这种传感器可同时测量两个物理量:加速度和速度,两物理量都是直接输出不使用积分等信号处理手段。利用此种传感器,同等条件下可减少一半的拾振器数量,有效提高测试效率和可靠性。该传感器采用无源伺服控制技术,无需电源供电,无需调零,安装使用方便,且具有低频特性良好、测量频带宽、分辨率高的特点。

2 无源多输出低频振动传感器原理

2.1 传感器结构

无源多输出低频振动传感器的结构原理图如图1所示,图中 m 为摆体运动部分的质量, c 为阻尼力系数, k 为弹性元件的刚度,摆体绕有两组线圈,线圈置于磁路系统的磁缝隙中,磁场强度为 B 。第1组线圈的机电耦合系数为 G_1 ,线圈输出端并联电容 C ,构成无源伺服反馈回路, i 为反馈回路的电流;第2组线圈的机电耦合系数为 G_2 , X 为被测对象的位移, x 为摆体相对于传感器外壳的位移, e_1 为第1组线圈的输出电压,即速度输出, e_2 为第2组线圈的输出电压,即加速度输出。

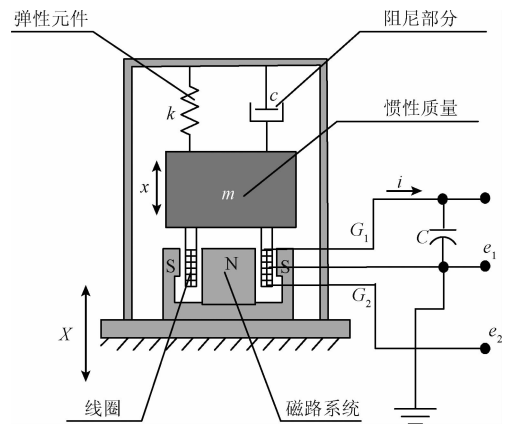


图1 无源伺服多输出低频振动传感器结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of passive servo multi-output low-frequency vibration sensor

弹性支承元件、阻尼系统和惯性质量块共同组成了摆系统,而线圈和磁路则共同组成了敏感换能元件,摆系统和敏感换能元件是传感器的两大子系统。测量时,传感器和被测对象刚性连接在一起,与被测对象一起运动,通过合理的控制,摆体相对于传感器的运动与被测对象的运动呈现一定的数学关系,这种数学关系通常称为摆原理;基于摆原理的惯性测量传感器的换能方式可分为位移换能和速度换能,前者检测摆体的相对运动位移,后者检测摆体的相对运动速度。本传感器利用置于磁场中的线圈检测摆体运动,属于速度换能方式。

摆原理是惯性振动测量的基础,按照特性的不同,可将摆系统分为3类^[10]:位移摆、速度摆和加速度摆。位移摆的摆体运动位移和外界位移呈正比,速度摆的摆体运动位移和外界速度呈正比,加速度摆的摆体运动位移和外界加速度呈正比,当然这种正比关系仅仅是在某一频率范围内成立。通常情况下,当摆体置于某种控制状态之下时,如果只有一种敏感换能元件,传感器只能测量一种物理量,本文介绍的传感器能够测量两种物理量得

益于其特殊的摆体形式和控制方式。

本文阐述的低频多输出振动传感器属于无源伺服式拾振器,通过闭环伺服反馈技术可以大大改善拾振器的低频特性已早为人所知^[15-17],不过无源伺服反馈后的摆体性质和普通摆体是不同的,速度换能(动圈)型速度计的摆体类型通常是位移摆,即位移摆速度计,加速度计的摆体形式属于速度摆,即速度摆加速度计。利用有源伺服反馈技术也可实现单个拾振器同时测量两个物理量,不过这种拾振器使用了两种敏感元件和换能方式^[15],通常意义上讲,同一种摆体,使用一种换能方式(位移换能或速度换能),只能检测一种物理量。但通过无源伺服反馈后,至少存在两点特殊性:1)摆体呈现速度摆特性,但对于速度输出而言却是速度摆速度计,而不是位移摆速度计,这与以前的认知是不同的,这就为同一种摆体上仅使用一种换能方式即可同时检测两种物理量提供了可能;2)速度摆并非工作在大阻尼状态,也是无源伺服式拾振器的特殊之处。

2.2 基于摆原理的数学模型分析

图1为摆系统是一个单自由度系统,系统的运动微分方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + F = -m\ddot{X} \quad (1)$$

式中: F 为反馈线圈电流 i 通过磁场时产生的洛伦磁力。

对式(1)做拉普拉斯变换,可得:

$$\frac{x}{X} = -\frac{ms^2}{ms^2 + cs + k + \frac{F}{x}} \quad (2)$$

第1组线圈的内阻若为 R ,则反馈回路电流 i 和洛伦磁力 F 为:

$$\begin{cases} i = \frac{G_1 s x}{R + \frac{1}{sC}} \\ F = G_1 i \end{cases} \quad (3)$$

式中: s 为拉普拉斯算子。

忽略阻尼力系数 c 和负号,综合式(2)和(3),可得到摆系统的传递函数,改为速度摆传递函数为:

$$\frac{x}{sX} = \frac{mCRs^2 + ms}{mCRs^3 + (m + G_1^2 C)s^2 + kCRs + k} \quad (4)$$

以设计样机的设计参数为例,根据式(4)可得到传感器的频响曲线,如图2所示,根据该频响曲线可知,在0.1~100 Hz内,摆体呈现速度摆特性,即摆体位移和外界速度成正比,但与常见的速度摆不同,这种传感器的摆并不是大阻尼状态。

3 低频振动测量的实现

普通的磁电式传感器很难实现低频振动信号的直接

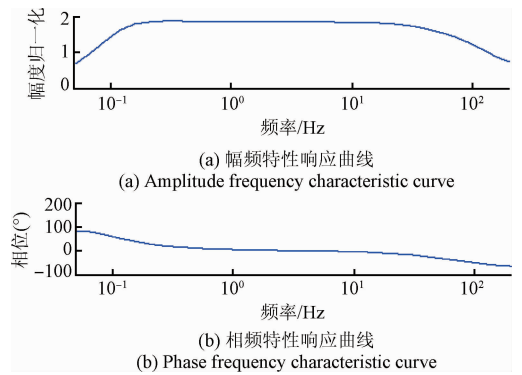


图2 摆体的频响曲线

Fig. 2 The frequency response curves of the pendulum

测量,因为动圈换能的磁电式速度传感器呈现的是位移摆特性,其通频带在自振频率以上,自振频率决定了传感器通频带的下限,传感器的自振频率由下式决定:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11)$$

式中: k 为摆体弹性元件的刚度, m 为摆体可动部分的质量。为了获得较低测量频带,必须降低自振频率 ω_0 ,而降低 ω_0 只有两种途径:1)降低摆体弹性元件的刚度 k ;2)提高摆体可动部分的质量 m 。过低的摆体刚度 k 往往会造成以下问题:过柔的弹性元件无法承受摆体的质量 m ;弹性元件在冲击振动的作用下容易损坏;弹性元件局部结构的谐振频率过低,影响传感器性能。加大摆体质量则会造成传感器体积和重量增加,且弹性元件无法承受过大的质量。因此,普通磁电式传感器的自振频率一般都在1 Hz以上,一般只能做到3~5 Hz。

无源伺服传感器通过并联电容,增加传感器的等效质量,降低系统自振频率,扩展低频测量范围^[11],通过无源伺服反馈控制之后,传感器的等效质量可增加上千倍,因此系统的等效自振频率相对于机械自振频率大大降低,从而扩展了低频特性^[10]。

3.1 速度测量

根据图1所示,传感器速度输出传递函数为:

$$H_v(s) = \frac{e_1}{sX} \quad (5)$$

其中:

$$e_1 = G_1 s x \cdot \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} \quad (6)$$

综合式(4)~(6),可得传感器速度测量的传递函数为:

$$H_v(s) = \frac{G_1 ms^2}{mCRs^3 + (m + G_1^2 C)s^2 + kCRs + k} \quad (7)$$

关于速度输出个各项参数的分析在文献[6]中已做详述。

3.2 加速度测量

根据图1所示,传感器加速度输出传递函数为:

$$H_a(s) = \frac{e_2}{s^2 X} \quad (8)$$

其中:

$$e_2 = G_2 s x \quad (9)$$

综合式(4)、(8)、(9),可得传感器加速度测量的传递函数为:

$$H_a(s) = \frac{G_2 m s (sCR + 1)}{mCRs^3 + (m + G_1^2 C)s^2 + kCRs + k} \quad (10)$$

比较式(4)和(10)的数学描述,传感器加速度输出的传递函数和传感器摆体的传递函数形式相同,仅存在一个比例关系,这意味着两者具有相似的频响特性,两者的频响曲线形状是完全相同的。这与以往利用无源反馈实现加速度输出是完全不同的,以往是通过并联电阻,加大系统阻尼构成速度摆加速度计,实现加速度测量^[21]。

加速度输出的量程表达式为:

$$a = \frac{mCRs^3 + (m + G_1^2 C)s^2 + kCRs + k}{m(sCR + 1)} x \quad (11)$$

加速度量程曲线如图3所示。

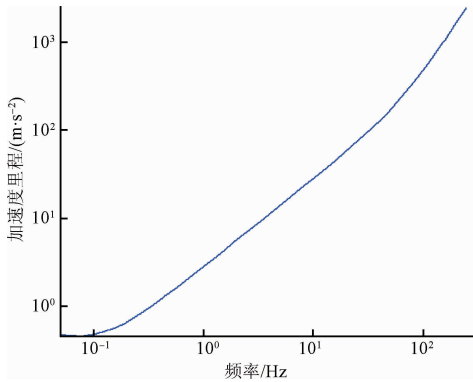


图3 加速度量程曲线

Fig.3 The acceleration range curve

由图3可见,传感器的加速度量程随着频率的增加而增加,对大多工程结构的振动而言,低频振动的加速度幅值较小,高频的加速度幅值较大,传感器量程特性恰好契合了这一特点。

4 传感器性能参数的测试

采用无源伺服反馈形式的速度传感器已经被广泛应用,其性能在实验室和测试现场均得到验证。

4.1 一致性测试

一致性测试是一种常用的测试方式,将两只振动传感器放置在同一个测点上,使其尽可能地接近,此时可认为传感器测量的是同一振动信号,所以传感器得到的测量波形形状应当是一致的。941B拾振器是低频振动测量中使用较多的一类拾振器^[22],将多输出振动传感器的速度输出信号与941B拾振器的第4档输出进行比较,将多输出振动传感器的加速度输出信号与941B拾振器的第1档输出进行比较,验证其一致性。

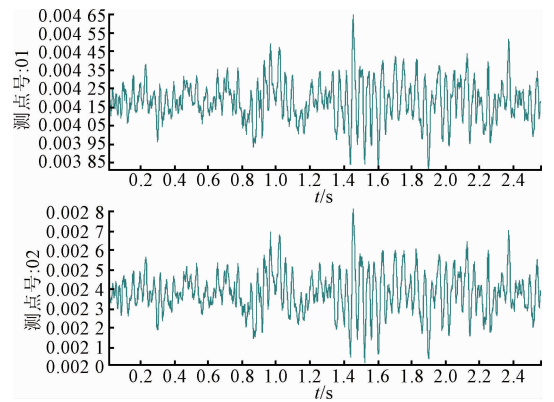


图4 速度输出和941B拾振器的一致性对比

Fig.4 Consistence comparison between the speed outputs of the multi-output sensor and the 941B pick-up

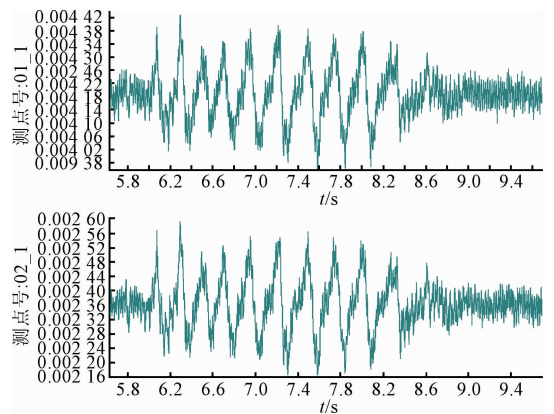


图5 加速度输出和941B拾振器的一致性对比

Fig.5 Consistence comparison between the acceleration outputs of the multi-output sensor and the 941B pick-up

4.2 频响特性测试

在中国地震局工程力学研究所的低频振动标准装置上,利用激光干涉法绝对校准方法对传感器的频响特性进行了测试,测试结果如表1所示。

表 1 频响测试结果
Table 1 Frequency response test result

频率/Hz	低频振动标准 装置位移/m	加速度输出		速度输出	
		幅值灵敏度/($V \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$)	相位灵敏度	幅值灵敏度/($V \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)	相位灵敏度
0.1	0.062 305 0	0.479 1	89.79	0.271 8	48.69
0.15	0.060 505 0	0.633 5	55.83	0.310 0	25.55
0.2	0.058 317 0	0.677 7	37.42	0.309 0	13.99
0.5	0.042 701 0	0.691 1	9.32	0.297 8	-8.57
1	0.025 713 0	0.693 0	3.71	0.294 8	-3.97
2	0.012 137 0	0.694 1	-2.07	0.294 8	-2.37
5	0.002 067 6	0.695 4	-3.24	0.293 7	-2.78
10	0.001 790 0	0.697 8	-4.02	0.293 2	-3.23
20	0.001 369 9	0.696 3	-5.04	0.293 7	-3.12
30	0.001 092 8	0.702 6	-17.01	0.296 3	-16.51
40	0.000 898 7	0.710 6	-23.56	0.299 1	-21.69
50	0.001 053 8	0.719 9	-25.71	0.308 9	-27.58
60	0.000 931 5	0.687 2	-34.1	0.288 2	-35.9
70	0.000 921 0	0.669 8	-40.11	0.281 9	-42.5
80	0.000 849 9	0.660 0	-44.9	0.275 8	-47.51
90	0.000 798 2	0.650 1	-50.68	0.272 5	-53.83
100	0.000 753 8	0.631 3	-56.76	0.264 7	-59.84

4.3 幅值线性度测试

在 5 和 10 Hz 两频率点上,逐步加大振动标准装置的振动幅值,利用标准加速度计测量振动加速度幅值,最大加到 2g 的加速度幅值(半峰值),记录被测传感器的输出电压和灵敏度,如表 2 和 3 所示。根据测量的结果,在不同幅值的振动信号激励下,5 Hz 处的最小灵敏度为 0.292 5,最大灵敏度为 0.296 9,两者相差 1.50%,证明传感器在 2g 的量程内,具有良好的线性。这是因为经过无源反馈控制后,机械系统的质量、刚度和阻尼已经被等效电子质量、电子刚度和阻尼所取代,外界振动引起的摆体运动位移很小,因此传感器具有较好的线性。

表 2 5 Hz 处测试结果
Table 2 The test result at 5 Hz

振动标准 装置位移/m	实际加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	传感器输出 电压/mV	传感器灵敏度/ ($V \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$)
0.000 203	0.200 4	58.7	0.292 8
0.000 405	0.400 1	117.0	0.292 5
0.000 606	0.598 7	175.2	0.292 7
0.001 012	0.999 0	292.6	0.292 9
0.002 037	2.009	588.2	0.292 7
0.004 054	4.003	1 181.6	0.295 3
0.006 079	5.996	1 772.5	0.295 4
0.010 122	10.00	2 952.7	0.295 6
0.015 170	14.98	4 419.9	0.295 2
0.020 568	20.32	6 027.5	0.296 9

表 3 10 Hz 处测试结果

Table 3 The test results at 10 Hz

振动标准 装置位移/m	实际加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	传感器输出 电压/mV	传感器灵敏度/ ($V \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$)
0.001 270	5.0161	1 500.4	0.299 3
0.002 570	10.145	3 036.2	0.299 3
0.005 044	19.915 0	5 960.7	0.299 3

5 结 论

从表 1 的数据来看,利用无源伺服技术在可以在一个含有两组线圈的位移摆速度拾振器上同时实现速度与加速度的测量,且无论是加速度的灵敏度还是速度的灵敏度都在 0.1 ~ 100 Hz 的频段内具有良好的频响特性。

相比于一般的无源伺服低频振动传感器,该传感器除可以实现在同一个摆体上使用一种敏感换能元件直接测量加速度和速度两种物理量,具有更低的安装、维护成本。

传感器采用往复式摆结构,不需调零且具有良好的抗冲击性。

速度档积分可测位移,避免了加速度两次积分带来的较大误差,可满足多领域的低频振动测量需要^[23]。

参考文献

[1] 邓欣,刘晓东,李保军,等. 隔水管振动导致的 ADCP 流速测量误差分析[J]. 国外电子测量技术,2015,

- 34(9):26-28.
- DENG X, LIU X D, LI B J, et al. Error analysis of ADCP velocity measurement caused by riser vibration[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(9):26-28.
- [2] 蒋新花,丁德宝,沈庆宏. 应用于桥梁结构健康监测的低噪声振动测量系统实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(2):116-119.
- JIANG X H, DING D B, SHEN Q H. Realization of low noise system for vibration measurement applied to structural health monitoring of bridges [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(2):116-119.
- [3] 杨晓霞,孟浩然,阴玉梅,等. 利用加速度计的大型光电望远镜抖动测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013,27(9):823-830.
- YANG X X, MENG H R, YIN Y M, et al. Jitter measurement for large opto-electronic telescope using accelerometers [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013,27(9):823-830.
- [4] 陈毅强,王玉田,李泓锦,等. 压电加速度计本底噪声研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(4):951-960.
- CHEN Y Q, WANG Y T, LI H J, et al. Study on the noise floor of piezoelectric accelerometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4):951-960.
- [5] CLINTON J F, HEATON T H. Potential advantages of a strong-motion velocity meter over a strong-motion accelerometer [J]. Seismological Research Letters, 2002, 73(3):332-342.
- [6] 余天莉,侯兴民,杨学山. 测振传感器的低频特性补偿研究[J]. 传感器与微系统,2006, 25(11):35-37.
- SHE T L, HOU X M, YANG X SH. Research on low frequency characteristic compensation of vibration sensors [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(11):35-37.
- [7] 杨学志,毛乐山,严普强. 一种新型的惯性式特殊低频传感器[J]. 清华大学学报:自然科学版, 1998, 38(11):22-36.
- YANG X ZH, MAO L SH, YAN P Q. Novel inertial extremely low frequency transducer [J]. Journal of Tsinghua University : Science and Technology, 1998, 38(11):22-36.
- [8] 曹双兰,林君,杨泓渊,等. 用于深部探测的地震检波器低频拓展技术[J]. 地球物理学进展, 2012,27(5):1904-1911.
- CAO SH L, LIN J, YANG H Y, et al. Low frequency expansion technologies applied in deep seismic exploration geophones [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5):1904-1911.
- [9] 叶婷,梁大开,曾捷,等. 基于弓形梁增敏结构的FBG振动传感器研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(1):139-145.
- YE T, LIANG D K, ZENG J, et al. Study on optical fiber grating vibration sensor based on bow beam sensitive characteristic [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1):139-145.
- [10] 匙庆磊. 伺服式振动传感器及其应用[D]. 廊坊:中国地震局工程力学研究所, 2009.
- CHI Q L. A study of low-frequency standard vibration table systems and vibration calibration technology [D]. Langfang: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2009.
- [11] YANG X SH, GAO F, HOU X M. Low-frequency characteristics extension for vibration sensors [J]. Earthquake Engineering and Engineering vibration, 2004, 3(1):139-146.
- [12] 匙庆磊,韩炜,何先龙. 基于无源伺服传感器的振动测量系统[J]. 振动与冲击, 2009,28(4):153-156.
- CHI Q L, HAN W, HE X L, et al. A vibration-measuring system based on passive servo vibration pickups [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(4):153-156.
- [13] 曹双兰. 基于零极点补偿法的低频检波器设计及其标定方法研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
- CAO SH L. Design and calibration of low-frequency geophones based on pole-zero compensation [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [14] 孙志远,杨学山,杨巧玉. 超低频动圈换能伺服加速度计的研究[J]. 传感器与微系统. 2006, 25(11):15-17.
- SUN ZH Y, YANG X SH, YANG Q Y. Research on ultra-low frequency moving-coil servo accelerometer [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(11):15-17.
- [15] 杨学山,杨巧玉. 速度型拾振器低频特性的拓展技术研究[J]. 地球物理学进展. 2004,19(4):759-763.
- YANG X SH, YANG Q Y. Research into the extension techniques for the capacity of vibrating velocity sensors in low-frequency band [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(4):759-763.
- [16] 王喜珍,滕云田. 地震传感器的新技术与发展[J]. 地球物理学进展,2010, 25(2):478-485.
- WANG X ZH, TENG Y T. New technology of seismic sensors and its development [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(2):478-485.

- [17] 蔡亚先, 吕永清, 周云耀, 等. CTS-1 甚宽频带地震计[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(3): 109-114.
CAI Y X, LV Y Q, ZHOU Y Y, et al. CTS-1 very broadband seismometer [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(3):109-114.
- [18] 杨立志, 杨学山, 匙庆磊, 等. 基于大阻尼比的双输出振动传感器[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11):25-29.
YANG L ZH, YANG X SH, CHI Q L, et al. Vibration sensor with double outputs based on big damping ratio[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11):25-29.
- [19] ZHAO X M, LIU T P, ZHENG D ZH. Theoretical research on new maglev ultra-low frequency vibration sensor [C]. Proceedings of IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instrument (ICEMI), 2013:16-19.
- [20] 夏灿, 余水宝, 黄相平. 基于磁阻尼的超低频绝对振动传感器机理研究[J]. 微型机与应用, 2014, 33(5): 74-78.
XIA C, YU SH B, HUANG X P. Study on the mechanism of ultra low frequency absolute vibration sensor based on magnetic damping [J]. Microcomputer and Its Applications, 2014, 33(5):74-78.
- [21] 杨学山. 加速度计频率特性扩展技术研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(4):81-83.
YANG X SH. Frequency characteristics extension of an accelerometer [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(4):81-83.
- [22] 杨巧玉, 娄良琼, 杨立志. 941B型超低频测振仪的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(4):174-179.
YANG Q Y, LOU L Q, YANG L ZH. Model 941B ultra-low frequency vibration gauge [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4): 174-179.
- [23] 于梅. 低频超低频振动计量技术的研究与展望[J]. 振动与冲击, 2007, 11(26):83-86.
YU M. Research prospects of metrology technology for low-frequency and super low-frequency vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 11(26):83-86.

作者简介



匙庆磊, 2006年于河北工业大学获得学士学位, 2009年于中国地震局工程力学研究所获得硕士学位, 2014年于地震局工程力学研究所获得博士学位, 现为中地震局工程力学研究所助理研究员, 主要研究方向为低频振动计量与测试。

E-mail: chi-5288@163.com

Chi Qinglei received his B. Sc. degree in 2006 from Hebei University of Technology, received his M. Sc. degree in 2009 and Ph. D. degree in 2014 both from Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. Now, he is an assistant researcher in Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. His main research interest includes measurement and test of low frequency vibration.



杨学山, 1975年毕业于山东省泰安师专, 现为中国地球物理学会技术委员会委员、中国计量测试学会高级会员, 主要研究方向为强震仪、工程振动测量仪器、振动计量设备、工程质量检测仪器、防灾减灾仪器的研制和实验技术研究。

E-mail: yangxs_iem@126.com

Yang Xueshan graduated in 1975 from Tai'an Teacher College, Shandong. Now, he is a member of Committee of Geophysical Technology, Chinese Geophysical Society, a senior member of Chinese Society For Measurement. His main research interest includes research and experiment technology of strong vibration instrument, engineering vibration measurement instrument, vibration measurement equipment, engineering quality inspection instrument, disaster prevention and mitigation equipment.



尚帅锟, 2014年于防灾科技学院获得学士学位, 现为中地震局工程力学研究所博士研究生, 主要研究方向为低频振动计量与测试。

E-mail: shangshuaikun@21cn.com

Shang Shuaikun received his B. Sc. degree in 2014 from Institute of Disaster Prevention; now, he is a doctoral candidate in Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. His main research interest includes measurement and test of low frequency vibration.