

文章编号:1007-6069(2017)04-0222-06

无源伺服技术拓展振动速度传感器量程的研究

余天莉,高峰,尚帅锟

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

摘要:介绍了采用无源伺服技术进行位移摆式速度计测量量程扩展的研究。首先对传统速度计的原理进行分析;其次通过介绍无源伺服技术的原理,给出了采用无源伺服技术扩展速度计位移测量量程的方法,并给出实测结果,且线性相对误差小于1%。实验证明,以无源伺服反馈的方式扩展了传感器的位移量程,实现了高层建筑和大跨度桥梁的超低频大位移的有效测量。

关键词:速度计;量程扩展;无源伺服;超低频;大位移

中图分类号:P315

文献标志码:A

Measurement range extension of vibration velocity sensors based on passive servo technology

SHE Tianli, GAO Feng, SHANG Shuaikun

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

Abstract: Passive servo technology is introduced to extend the measure range of vibration velocity sensors. Based on the principle of a traditional vibration velocity sensor, the paper presents the principle of the passive servo technology to extend the measure range of vibration velocity sensors. The actual measurement data show that the linear relative error of the system is less than 1%. It shows that the displacement range of the vibration velocity sensor is extended based on passive servo feedback system. And it can be effectively used to measure ultra-low frequency and large displacement of high rise buildings and logn-span bridges.

Key words: vibration velocity sensor; range expansion; passive servo; ultra-low frequency; large displacement

引言

随着国民经济的快速发展,我国的高层建筑不断涌现,超高层建筑的高度已达到600m以上,如上海中心大厦(约632m)以及深圳平安金融中心(约668m)^[1]。高层建筑的高度越高,自振频率越低,在台风作用下的位移振幅越大,如深圳帝王大厦(383.95m)横向自振频率0.178Hz,在台风作用下楼顶的位移可达55.5mm^[2]。

近些年来,大跨度悬索桥和斜拉桥不断建成,单跨跨径已超过1300m,如润扬大桥跨径达到1490m^[3],

收稿日期:2017-04-02;修订日期:2017-07-16

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项:地震转动加速度计及其标定设备研究(2013B06)

作者简介:余天莉(1971-),女,博士,助理研究员,主要从事振动传感器及超低频振动台的研发. E-mail:agatha_iem@163.com

通讯作者:尚帅锟(1991-),男,学士,博士研究生,主要从事振动传感器及数据处理. E-mail:1669471545@qq.com

日本明石海峡大桥 1 991 m。江阴长江大桥中跨为 1 386 m 的大跨径悬索桥,在台风作用下的跨中最大位移为 459 mm^[4],其自振频率超过 0.05 Hz。

因此,超低频大位移的振动测量愈显重要。

传统的地震检波器都属于位移摆速度计,即摆的位移与地面运动的位移成正比。由于其换能原理属于动圈换能,动圈切割磁力线产生感应电动势,速度计的输出电压与被测速度成正比,因此称为位移摆速度计。对于振动测量而言,速度计的最大可测位移即是动圈在磁缝隙里的运动位移,此位移值一般很小,仅 1~2 mm,这样的量程仅适用于地面脉动和一般建筑结构的微振动测量^[5-6]。

传统的地震检波器由于其在振动测量方面,尤其是高层建筑和大跨度桥梁的振动测量,不能满足超低频(小于 1 Hz)大位移(几十甚至几百毫米)振动测量要求。

在超低频振动的测量中,宜选择位移参量^[7]。由于振动加速度等于振动圆频率的平方乘以位移,即 $\ddot{X} = \omega^2 X$,使用加速度计测量超低频振动位移存在积分漂移和较大误差^[8],使用 GPS 存在分辨率较差^[9](一般的 GPS 接收模块位置精度 5 m,速度精度 0.1 m/s)等问题,研究速度计的位移测量量程的扩展技术具有重要的现实意义。

1 传统速度计的原理

传统速度计的原理如图 1 所示,电路原理如图 2 所示。

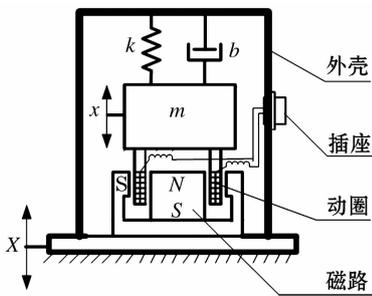


图 1 传统速度计的机械原理

Fig. 1 Mechanical principle of a traditional speed gauge

图 1 中: m 为运动部分质量; k 为弹性元件刚度即支承导向弹簧刚度; b 为包括空气阻尼在内的阻尼力系数; X 为地基的运动位移; x 为质量相对于外壳的运动位移。图 2 中: G 为动圈的机电耦合系数; i 为线圈中的电流; R_s 为动圈内阻; R 为并联电阻; e 为输出电压。可得传统速度计的运动微分方程为:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx + Gi = -m\ddot{X} \tag{1}$$

电路方程为:

$$\left. \begin{aligned} R_s i + e &= C\dot{x} \\ \frac{1}{R} e &= i \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

当忽略空气阻尼时,用拉式算子法解方程式(1)和式(2),可得:

$$x(s) = - \frac{X(s)}{1 + \frac{2D\omega_0}{s} + \frac{\omega_0^2}{s^2}} \tag{3}$$

$$e(s) = -AG \frac{sX(s)}{1 + \frac{2D\omega_0}{s} + \frac{\omega_0^2}{s^2}} \tag{4}$$

速度计的复灵敏度为:

$$\frac{e(s)}{sX(s)} = -AG \frac{1}{1 + \frac{2D\omega_0}{s} + \frac{\omega_0^2}{s^2}} \quad (5)$$

可测位移:

$$X(s) = - \left(1 + \frac{2D\omega_0}{s} + \frac{\omega_0^2}{s^2} \right) x(s) \quad (6)$$

上述各式中: $D = \frac{G^2}{2m\omega_0(R_s + R)}$ 为阻尼比; $A = \frac{R}{R_s + R}$, $s = j\omega$, $j = -\sqrt{-1}$; ω 为被测点的自振圆频率; $\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 为摆自振圆频率; $e(s)$ 为输出电压。

由式(3)和式(4)看出:当 $\omega \gg \omega_0$ 和 $D < 1$ 时,速度计的幅频特性呈现高通特性,摆的位移与地面运动的位移成正比,动圈的输出电压与地面运动的速度成正比,故称为位移摆速度计。地震检波器和工程测振用的速度计多采用这种结构。

由(5)式可以看出:当 $\omega \gg \omega_0$ 和 $D < 1$ 时,最大可测位移 X 近似等于动圈的位移 x (通常为 $1 \sim 2\text{mm}$),不能满足工程振动中低频或超低频大位移的测量。

2 无源伺服技术扩展速度计量程的原理

在如图1所示的位移摆速度计的动圈输出端并联电容,可以实现降低系统自振频率和扩展测量量程的目的,这种技术称为无源伺服技术^[10-11],电路原理如图3所示。

其运动微分方程为:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx + Gi_1 = -m\ddot{X} \quad (7)$$

其电路方程为:

$$\left. \begin{aligned} R_s i_1 + e &= Gsx \\ (Cs + \frac{1}{R})e &= i_1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由方程(7)和方程(8)有:

$$\left. \begin{aligned} (s^2 + 2D_1\omega_0s + \omega_0^2)x + \frac{G}{m}i_1 &= -s^2X \\ Gsx - R_s i_1 - e &= 0 \\ i_1 - (Cs + \frac{1}{R})e &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由式(7)、式(8)和式(9)可得无源伺服式速度计复灵敏度:

$$\frac{e(s)}{sX(s)} = - \frac{Gs^2}{(s^2 + 2D_1G\omega_0s + \omega_0^2)(R_sCs + 1 + \frac{R_s}{R}) + \frac{G^2}{mR}(RCs + 1)s} \quad (10)$$

和可测位移的表达式:

$$X(s) = - \frac{(s^2 + 2D_1\omega_0s + \omega_0^2)(R_sCs + 1 + \frac{R_s}{R}) + \frac{G^2}{mR}(RCs + 1)s}{(R_sCs + 1 + \frac{R_s}{R})} x(s) \quad (11)$$

用该原理研制成功 941^[12]型和 991 型系列速度计^[13],并得到广泛应用。

图4-5为 941B 型速度计的频率响应曲线和最大可测位移曲线。

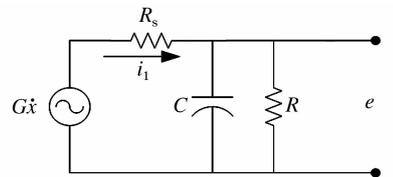


图3 并联电容式速度计电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of speedometer paralleled with capacitance

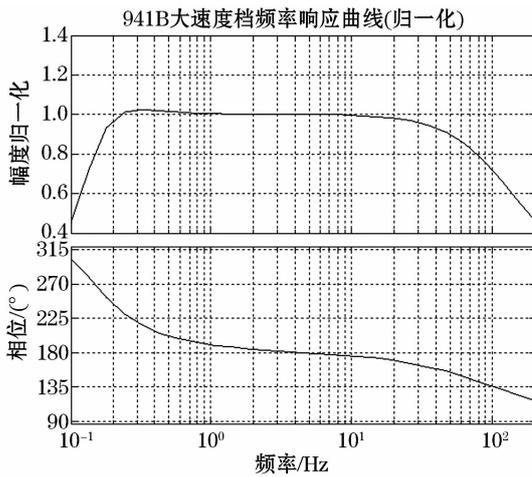


图 4 941 型速度计频响曲线

Fig. 4 Frequency response curve of speedometer 941 at fourth file

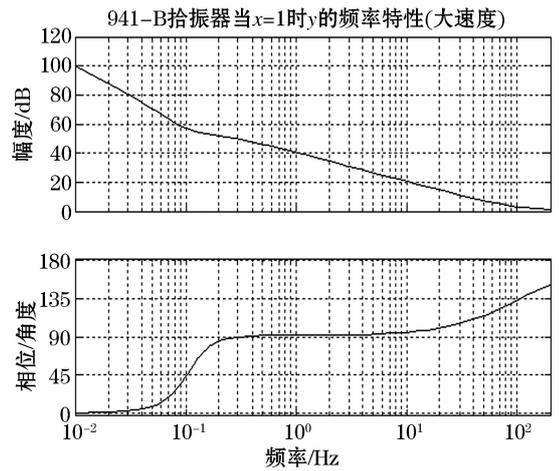


图 5 941 型速度计可测位移曲线

Fig. 5 Measurable displacement curve of speedometer 941 at fourth file

速度计的最大可测位移一般是指低频截止频率点的可测位移。从图 4-5 可以看出:在通频带范围内,频率越低,可测位移越大,与工程结构的振动规律相符。

3 最大位移测量量程的测量结果

为验证在通频带范围内速度计最大可测位移计算结果的正确性,选择速度计的低频段几个频率点,采用自校准法测量对应频率点最大可测位移及其线性度,当线性接近 1% 时,停止测量,此值即为对应频率点的最大可测位移。

测量方法及计算过程如下:

首先,用振动台或自校准法校准速度计的灵敏度;其次,将信号源的输出电压输入给速度计的自校准线圈,固定信号源的频率,改变信号源的输出电压,测量速度计的输出电压;再次,根据信号源的频率、速度计的灵敏和输出电压计算出速度计的可测位移,根据可测位移和对应的信号源输出电压可计算出线性度,当限定动圈位移时,可计算出可测位移和动圈位移的比值(dB)。

941 型速度计(H10107 号)5 Hz 时的灵敏度测试结果为 0.765 5V/(m/s),低频段幅频特性测试结果见表 1,0.17 Hz、0.2 Hz、0.5 Hz、1.0 Hz 和 2.0 Hz 最大可测位移的测试结果见表 2-表 6,线性度计算结果见表 7。

表 1 941 型速度计(H10107 号)低频幅频特性测试结果

Table 1 Test results of low frequency amplitude frequency characteristics of the velocity sensor Model 1971(H10107)

频率/Hz	0.125	0.15	0.17	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0
归一化	0.791	0.936	0.995	1.032	1.000	1.000	1.000	1.000

表 2 频率为 0.17Hz 时最大可测量程的测试结果(动圈位移限定 2 mm)

Table 2 Test results of the maximum measuring range (2mm limit displacement zone) at the frequency of 0.17 Hz

频率/Hz	0.17						
信号源输出电压/V	0.2	0.5	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
速度计输出电压/mV	117.5	292.5	468.8	587.5	706.2	825.0	931.0
折算位移/mm	144.0	357.7	573.0	719.0	864.0	1 009	1 139
$\frac{X(s)}{x(s)}$ /(dB)	37.15	45.05	49.14	51.11	52.7	54.06	55.11
mm/V	720.0	715.4	716.5	719.0	720.0	720.7	711.9

表3 频率为0.2 Hz时最大可测量程的
测试结果(动圈位移限定2 mm)

Table 3 Test results of the maximum measuring range(2mm limit displacement zone) at the frequency of 0.2Hz

频率/Hz	0.2				
信号源输出电压/V	0.5	1.0	1.5	1.8	2.0
速度计输出电压/mV	256.8	511.7	769.2	920.5	1017
折算位移/mm	266.9	531.9	799.6	956.9	1057.2
$\frac{X(s)}{x(s)}$ /(dB)	40.5	48.5	52.0	53.6	54.5
mm/V	533.9	531.9	533.1	531.6	528.6

表4 频率为0.5 Hz时最大可测量程的
测试结果(动圈位移限定2 mm)

Table 4 Test results of the maximum measuring range(2mm limit displacement zone) at the frequency of 0.5Hz

频率/Hz	0.5					
信号源输出电压/V	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0
速度计输出电压/mV	103.1	204.7	409.4	612.5	825.0	1219
折算位移/mm	42.9	85.1	170.2	254.7	343.0	506.9
$\frac{X(s)}{x(s)}$ /(dB)	26.62	32.50	38.60	42.10	44.69	48.08
mm/V	85.80	85.10	85.10	84.90	85.75	84.48

表5 频率为1.0 Hz时最大可测量程的测试结果(动圈位移限定2 mm)

Table 5 Test results of the maximum measuring range(2mm limit displacement zone) at the frequency of 1.0Hz

频率/Hz	1							
信号源输出电压/V	2.0	4.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	
速度计输出电压/mV	203.6	407.2	814.3	1 016.2	1 209.1	1 420.2	1 602	
折算位移/mm	42.30	84.60	169.30	211.2	252.0	295.2	333.1	
$\frac{X(s)}{x(s)}$ /(dB)	26.51	32.53	38.55	40.47	42.00	43.38	44.43	
mm/V	21.15	21.15	21.16	21.12	21.00	21.09	20.92	

表6 频率为2 Hz时最大可测量程的测试结果(动圈位移限定2 mm)

Table 6 Test results of the maximum measuring range(2mm limit displacement zone) at the frequency of 2Hz

频率/Hz	2						
信号源输出电压/V	2.0	4.0	8.0	10.0	16.0	20.0	
速度计输出电压/mV	101.7	203.1	404.1	503.1	812.5	1 006.0	
折算位移/mm	10.6	21.1	42.1	52.3	84.5	104.6	
$\frac{X(s)}{x(s)}$ /(dB)	14.49	20.47	26.46	28.35	32.52	34.37	
mm/V (平均5.26)	5.30	5.28	5.26	5.23	5.28	5.23	

将表2-表6中所测各频率点对应最大值列入表8。

表7 各测量频率点的线性度

Table 7 Linearity at several frequencies

频率/Hz	0.17	0.2	0.5	1	2
线性度/%	0.78	0.45	0.74	0.75	0.56

表8 各频率点最大可测位移的测量结果

Table 8 Measurement results of the maximum measurable displacement at several frequencies

频率/Hz	0.17	0.2	0.5	1.0	2.0
最大位移/mm	1 139	1 057	506.9	334.7	104.6
$\frac{X(s)}{x(s)}$ /(dB)	55.11	54.5	48.08	44.47	34.37

从表2-表8可以看出:对应频率点的最大可测位移和动圈位移的比值(dB)与图5曲线相比较,实测结果与计算结果吻合的较好,且线性相对误差均小于1%。

4 结语

针对传统动圈换能速度计不能测量低频和大位移问题,在对传统速度计进行理论分析的基础上,采用无

源伺服技术,对速度计的量程扩展技术进行了较详细的研究,并用实际测量结果验证了所给计算结果的正确性,验证的结果与计算结果吻合得较好,解决了工程振动中超低频大位移的测量问题。

参考文献

- [1] 徐枫,陈文礼,肖仪清,等.超高层建筑风致振动的现场实测与数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2014,34(1):51-57.
XU Feng, CHEN Wenli, XIAO Yiqing, et al. Field measurement and numerical simulation of wind-induced vibration of super building high-rise building [J]. Journal of Prevention and Mitigation Disaster Engineering, 2014, 34(1):51-57.
- [2] 钱稼茹,过静裙,陈志鹏.地王大震动力特性及大风时楼顶位移和加速度实测研究[J].土木工程学报,1998,31(6):30-39.
QIAN Jiaru, GUO Jingjun, CHEN Zhipeng. Measurement researches on dynamic property and on top displacement and acceleration during large wind for Di-wang plaza [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(6):30-39.
- [3] 风懋润.中国的跨江海桥梁建设工程:成就、创新及管理实践[J].工程研究-跨学科视野中的工程,2013,(1):35-52.
Feng Maorun. Construction projects of river crossings and bay bridges in China: achievement, innovation and management practice [J]. Journal of Engineering Studies, 2013, (1):35-52.
- [4] 张宇峰.江阴大桥结构健康监测监测系统升级改造[EB/OL] http://wenku.baidu.com/link?url=kd3EXQ8DBDBPTm9ni-1ADGIpb4cSx5O6xg39F3AddidxV5gsdd-4s6dWgUmwnHjDDYltes4x4W2_vihkTjk3yN_TKV7iQ0S86F66emEPnq,2009.11.18.
ZHANG Yufeng. Upgraded reconstruction of structure health monitoring system of Jiang-yin bridge. http://wenku.baidu.com/link?url=kd3EXQ8DBDBPTm9ni-1ADGIpb4cSx5O6xg39F3AddidxV5gsdd-4s6dWgUmwnHjDDYltes4x4W2_vihkTjk3yN_TKV7iQ0S86F66emEPnq, 2009. 11. 18
- [5] 杨学山,黄浩华.921型超低频有源伺服式速度位移计[J].地震工程与工程振动,1997,17(3):117-123.
YANG Xueshan, HUANG Haohua. Model 921 ultra-low frequency active servo velocity and displacement sensor [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997,17(3):117-123.
- [6] 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 Lizhi, YANG Xueshan, CHI Qinglei, et al. Vibration sensor with double outputs based on big damping ratio [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11):25-29.
- [7] 杨学山,王友琴,黄振平.超低频振动测量中振动参量及仪器的选择[J].地震工程与工程振动,1993,13(1):72-76.
YANG Xueshan, WANG Youqing, Huang Zhenping. Selection of vibration parameters and instruments in the ultra-low frequency measurement [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1993, 13(1):72-76.
- [8] 匙庆磊,杨学山,尚帅崑.无源伺服反馈多输出低频振动传感器[J].仪器仪表学报,2017,(1):105-111
CHI Qinglei, YANG Xueshan, SHANG Shuaikun. Passive servo feedback multi-output low-frequency vibration sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2017,(1):105-111.
- [9] 刘百奇,康泰钟,李建利.一种激光断面仪运动补偿用IMU/GPS/OD系统[J].仪器仪表学报,2012,33(3):677-682.
LIU Baiqi, KANG Taizhong, LI Jianli. IMU/GPS/OD integrated system for motion compensation of laser profiler [J]. Journal of Instrumentation, 2012, 33(3):677-682.
- [10] 杨学山.工程振动测量仪器和测试技术[M].北京:中国计量出版社,2001.
YANG Xueshan. Engineering Vibration Measuring Instrument and Testing Technology [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2001.
- [11] 黄浩华,杨学山,黄振平.891型测振仪——无源伺服技术的应用[J].地震工程与工程振动,1991,11(3):94-101.
HUANG Haohua, YANG Xueshan, HUANG Zhenping. Model 891 vibration measurer—application of passive servo technology [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1993, 11(3):94-101.
- [12] 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 Qiaoyu, LOU Liangqiong, YANG Lizhi. Model 941B ultra-low frequency vibration gauge [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4):174-179.
- [13] 杨学山,董玲,马树林,等.991型超低频测振仪[J].地震工程与工程振动,2002,22(4):127-132.
YANG Xueshan, DONG Ling, MA Shulin, et al. Model 991 ultra-low frequency vibration gauge [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4):127-132.