

基于激光干涉的强震动加速度计绝对校准试验*

杨黎薇¹, 周正华²

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 分析了激光干涉校准的基本原理, 应用绝对校准法开展强震动加速度计的相位测试, 通过振动校准试验, 在振动台与强震动加速度计的记录输出波形中找出振幅变化趋势, 以叠加两个波形的延时对比推断出强震动加速度计的相位差。实例证明, 绝对校准可为标准强震动加速度计的性能校准奠定高精度基础。

关键词: 绝对校准法; 激光干涉仪; 强震动加速度计; 相位测试

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)01-0116-07

0 引言

对加速度计进行校准, 一般是对其灵敏度、频率特性等技术参数开展标定检测, 再根据校准结果判定加速度计的性能。校准方法有相对校准与绝对校准两种, 相对校准以某个经检测的“标准仪器”为基准, 将需检测仪器与“标准仪器”对比, 进而确定被检测仪器是否达标; 绝对校准是用激光干涉振动仪直接测量振动台振幅, 再与被校准仪器输出比较后确定被校准仪器灵敏度等性能。两种校准法相比, 相对校准原理简单, 所用设备少且操作方便, 已在强震动加速度计校准中得到应用; 绝对校准可避免相对校准存在的允许误差值, 在无接触远距离校准中确保测量精度高准稳。

国际对精密仪器的校准以绝对校准为主, 特别在航空精密传感器及各种机床的几何动态性能方面, 激光干涉绝对校准系统 (± 0.5 ppm 长期稳频精度与 $0.001 \mu\text{m}$ 线性测量分辨率) 为高质量校准工作提供精确保证。国内, 于梅等 (2003, 2004a, b, 2005, 2007) 通过振动台试验总结并分析了相对校准法主要特征及适用范围。随着数字技术飞速发展, 于梅和孙桥 (2005) 进一步使用绝对校准法对加速度计灵敏度特性进行测量, 并将绝对校准结果与相对校准结果进行对比, 实测结果显示绝对校准检定效果更好。

地震行业对标准加速度计的性能质量要求极

高, 使用绝对校准法对标准强震动加速度计开展性能测试, 不仅保证校准结果精确可靠, 更利于对强震动加速度计振动特性做出系统性评估分析 (DB/T 10-2001)。本文根据激光干涉校准原理, 开展了基于激光干涉的绝对校准技术研究, 首次在地震行业中运用绝对校准进行强震动加速度计的相位测量, 并系统总结绝对校准检测强震动加速度计灵敏度、频率特性的试验方法, 为强震动加速度计性能校准工作提供基础参考。

1 强震动加速度计绝对校准原理

在地震行业领域, 强震动加速度计的性能指标直接影响地面振动记录的准确可靠程度, 对强震动加速度计进行振动特性检测极为必要 (Harris *et al*, 2007)。随着电子技术和计算机技术发展, 基于激光干涉的绝对校准以光学干涉原理为基础, 采用稳频 He-Ne 激光光源, 可广泛应用于各类传感仪器性能测试 (周小珊, 李岩, 2010)。

使用光学干涉原理作为测量工具可上溯至 Albert Michelson 研制出的 Michelson 干涉镜。Michelson 干涉镜包括一个单一波长单色光源、一个半银色透镜以及两个反射镜, 如图 1 所示。光源在半银色透镜表面分开, 一半光源呈 90° 反射至一个固定距离透镜, 剩余另一半则透过另一个可移动的透镜。两个透镜互相垂直, 从透镜反射的还原光束互相平行, 并一同反射向观测者。若每个透镜与半透镜距离完全相同, 光束会同步到达观测者处,

* 收稿日期: 2012-10-27.

基金项目: 地震行业科研专项“宁洱 6.4 级地震现场综合考察和研究 (200808061) 项目资助。

并发生相长性干涉，使光源更加明亮；若放置可移透镜位置偏移大约四分之一个波长，光束会以 180° 的相位差步射向观测者，并发生相消性干涉，产生较暗淡光源。因此，观测者可利用透镜移动时光源变亮次数去测量可移透镜所移动的距离（周小珊，李岩，2010）。

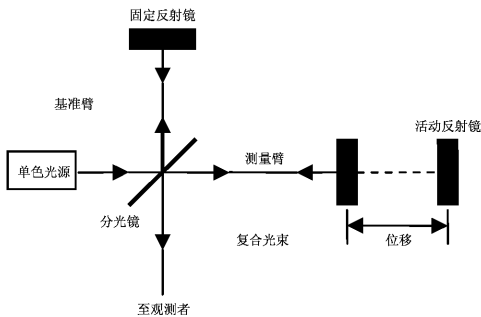


图 1 Michelson 干涉镜

Fig. 1 Michelson interference microscopy

现代干涉镜设计精密，测量距离精度可达 1 ppm 以上，其工作原理与 Michelson 干涉镜基本原理相同。图 2 表示基于激光干涉进行强震动加速度计性能绝对校准的基本原理，将激光干涉系统中目标反射镜与待测强震动加速度计固定，目标反射镜、参考反射镜及分光镜的中心点保持在同一准直线上，目标反射镜能相对于分光镜移动，形成可变长度的测量臂；参考反射镜与分光镜间角度和距离可调整，形成固定长度的基准臂。从激光器射出单一频率稳定激光束，当激光束抵达分光镜时会被分成两道光束，一道反射光直接反射入与分光镜相连固定的参考反射镜，另一道透射光穿过分光镜射入固定在振动台上的目标反射镜。

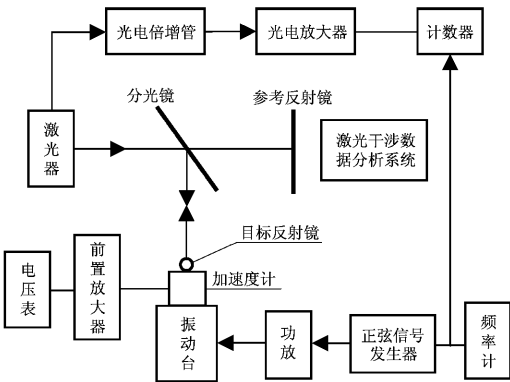


图 2 基于激光干涉的绝对校准

Fig. 2 Absolute calibration based on Laser interferometer

两道光透过分光镜反射回到激光器，形成干涉光束。若光程差无变化，探测器会在相长与相消两极间找到稳定信号；若光程差变化，探测器将每一次光程改变以栅格状表示后反映给数控处理。

待测强震动加速度计固定于振动台台面，强震动加速度计与振动台做同步输入运动，输入信号用纯正弦波。正弦信号发生器产生正弦激励经功率放大器放大后推动低频振动台运动，振动产生位移输出量为电压值，不同振动频率下，待校准强震动加速度计相应输出电压值可用电压表直接读取，振动台的振动频率可由频率计测读，进而计算待测强震动加速度计的角频率。由激光干涉采集系统记录下振动周期内产生干涉条纹数，根据实测干涉条纹数目与振动角频率，即可计算出待校准强震动加速度计的加速度幅值。

相位实质为两个同频率信号间的相位差测量，使用纯正弦波信号循环一周周期为 2π ，从指定起始时刻 t_0 起算，根据 $(t - t_0)$ 期间的振动周期 $(t - t_0) / 2\pi$ 可测出任意振动时刻 t 的相位。振动实验中，固定于振动台面上的强震动加速度计与振动台各自输出波形明确、频率相同的振动信号，由激光干涉系统与数据采集系统分别记录两者输出信号，将两个采集系统记录的输出信号波形进行叠加对比，通过振幅变化产生波形延时就可得出待测强震动加速度计相位差（叶林等，2006）。

2 绝对校准方法和试验主要设备

为确保强震动加速度计的记录数据误差不超出规定范围，应定期对其灵敏度等性能进行校准（张洁文，2002）。笔者基于激光干涉对强震动加速度计性能进行竖直向振动绝对校准，水平方向振动绝对校准原理相同。

2.1 基于激光干涉的强震动加速度计振动幅值及灵敏度测量

强震动加速度计与振动台进行同步振动，调整振动台振动频率，使用激光绝对干涉仪测量振动台在一个正弦振动周期 T 内产生电脉冲数目 N ，稳频氦氖激光器波长 λ 为 $0.6328 \times 10^{-3} \text{ mm}$ （李科杰，2002）。振动台一个正弦振动周期产生的振动总幅值 $4X$ ，可用式（1）表示 N 与 X 之间的关系。

$$4X = N \times (\lambda / 2).$$
 (1)

振动台的振动幅值 X 为

$$X = \frac{1}{8} \lambda N. \tag{2}$$

强震动加速度计的加速度幅值 $A = (\omega)^2 X$ ，因强震动加速度计与振动台做相同状态运动，所以强震动加速度计与振动台的振动频率及振动幅值相同。由角频率 ω 与振动频率 f 间关系 $\omega = 2\pi f$ 可得强震动加速度计的加速度幅值 A 为

$$A = (2\pi f)^2 X. \tag{3}$$

记录强震动加速度计在不同振动频率下对应产生的输出电压值 U ，根据强震动加速度计的输出电压值 U 、加速度幅值 A 即可计算出强震动加速度计灵敏度

$$S = U/A. \tag{4}$$

2.2 基于激光干涉的强震动加速度计相位测量

激光干涉系统精确测量振动台在不同振动频率下的输出信号波形，数据采集系统对固定于振动台的强震动加速度计输出信号波形进行同步采集。假设试验过程中，振动台与强震动加速度计的输出信号波形变化完全重合，则可推断该加速度计相位为 0；若是两图形波形变化存在延时滞后，则该加速度计相位不为 0。

保持振动台在任一个频率点振动数秒，缓慢匀速调小振动台的振动幅值，使之维持难以感受到的振动状态时，将振动台的振动频率调设至更高频值后匀速缓慢地调大振动台的振动幅值为明显振动状态，保持该状态到实验采样结束。在振动台变频变幅运动全程中，振动台与强震动加速度计的振动信号波形会出现明显减小增大变化趋势，振动峰值清晰可见，有利于读取波形信号图形中两个最大振动峰值之间的时间差。对比两个波形的幅值变化，确定振动台输出波形出现的最大振幅时刻与次大振幅时刻，求取两振幅时间差值。用相同方式求出强震动加速度计输出波形振幅时间差值，比较两输出波形的时间差值，即可求得该加速度计相位。

分析强震动加速度计输出波形，设强震动加速度计输出信号波形中最大振幅时刻为 t_1 ， t_1 之后出现次大振幅时刻为 t_3 ，则

$$\Delta t_1 = t_3 - t_1. \tag{5}$$

分析振动台面输出波形，设振动台面输出信号波形中最大振幅时刻为 t_2 ， t_2 之后出现次大振幅时刻为 t_4 ，则

$$\Delta t_2 = t_4 - t_2. \tag{6}$$

求取强震动加速度计的相位，即

$$\Delta t = |\Delta t_1 - \Delta t_2|, \tag{7}$$

$$\phi = \frac{\Delta t}{\Delta t_1} \times 360. \tag{8}$$

代入 (5)、(6)、(7) 与 (8) 式，该加速度计的相位为

$$\phi = \frac{|\Delta t_1 - \Delta t_2|}{t_3 - t_1} \times 360, \tag{9}$$

$$\phi = \frac{|(t_2 + t_3) - (t_1 + t_4)|}{t_3 - t_1} \times 360. \tag{10}$$

2.3 绝对校准试验主要设备

绝对校准试验体系包括众多设备，主要有信号发生器、振动台、激光干涉仪、示波器、功率放大器、储气罐、空气压缩机、干燥机等。其中，核心设备主要是指激光干涉仪与振动台。

激光干涉仪采用频率稳定的氦-氖激光作为测试光源，以光的干涉原理为基础对精密仪器进行绝对检测校准。激光干涉仪的工作性能是绝对校准试验可行度的核心保证，本文试验使用的激光干涉仪型号为 RenishawML-10，主要技术参数见表 1。

表 1 RenishawML-10 激光干涉仪技术参数
Tab. 1 The main technical indexes of Renishaw ML-10
Laser Interferometer

序号	项目	主要参数
1	线性测量分辨率	0.001 μm
2	线性测量范围	40 m (或任选 80 m)
3	线性测量精度	±0.7 ppm
4	最高测量速度	60 m/min
5	长期稳频精度	±0.05 ppm

振动台采用低频标准振动台作为试验测试平台，提供标准正弦机械振动，配合激光干涉仪测量正弦振动振幅，表 2 为本文使用低频标准振动台的技术指标。

表 2 低频标准振动台技术指标

Tab. 2 The main technical indexes of Low-frequency standard vibrator

序号	项目	主要参数
1	工作频率范围	0.001 ~ 500 Hz
2	台面尺寸	垂直台 $\phi 240$ mm, 水平台 240×300 mm ²
3	最大位移	垂直台 ± 25 mm, 水平台 ± 40 mm
4	空载最大加速度	垂直台 60 m/s ² , 水平台 30 m/s ²
5	台面空载背景噪声	垂直台 在 2 kHz 频带内 $0.3 \times 10^{-3} g_{\text{rms}}$, 水平台 在 2 kHz 频带内 $0.3 \times 10^{-3} g_{\text{rms}}$
6	台面波形失真度	0.000 1 ~ 0.01 Hz 位移失真度 < 0.2%, 0.01 ~ 0.1 Hz 速度失真度 < 0.5% 0.1 ~ 500 Hz 加速度失真度 < 1%
7	10 Hz 以下频段, 台面背景噪声	$< 1 \times 10^{-4}$ m/s ²
8	横向运动比	10 Hz 以下频段 < 1%, 1 ~ 500 Hz 频段 < 5%
9	台面振级稳定度	在测试期 < 0.1%
10	台面运动不均匀度	在 100 Hz 以下频段 < 1%
11	台面中心漏磁	垂直台 25 高斯, 水平台 10 高斯
12	最大负载	10 kg
13	振动台质量	垂直台 1 吨, 水平台 2 吨
14	振动台外形尺寸	垂直台 $\phi 730 \times 1\ 100$ mm, 水平台 1 400 (长) \times 1 000 (宽) \times 900 (高) mm

3 基于激光干涉的绝对校准实例

笔者对某强震动加速度计开展灵敏度及相位测量绝对校准试验。图 3 表示激光干涉数据采集系统与数据采集系统记录到的试验输出波形, X 坐标表示采样时间, Y 坐标表示加速度。由图 3 可见, 两个数据采集系统的加速度值分别用 m/s^2 与

mm/s^2 表示, m/s^2 与 mm/s^2 间相差 1 000 倍, 将图 3b 中 Y 坐标缩小 1 000 倍后, 两个波形图像振动走势变化基本一致。

3.1 强震动加速度计灵敏度测量及幅频特性分析

某强震动加速度计给定出厂设计电压灵敏度为 $0.012 \text{ mV/mm} \cdot \text{s}^{-2}$, 幅频响应设计正常范围为 $0 \sim 60 \text{ Hz}$, 近两年使用后, 用绝对校准对其进行电压灵敏度及幅频特性复测。在直接读出被校准加

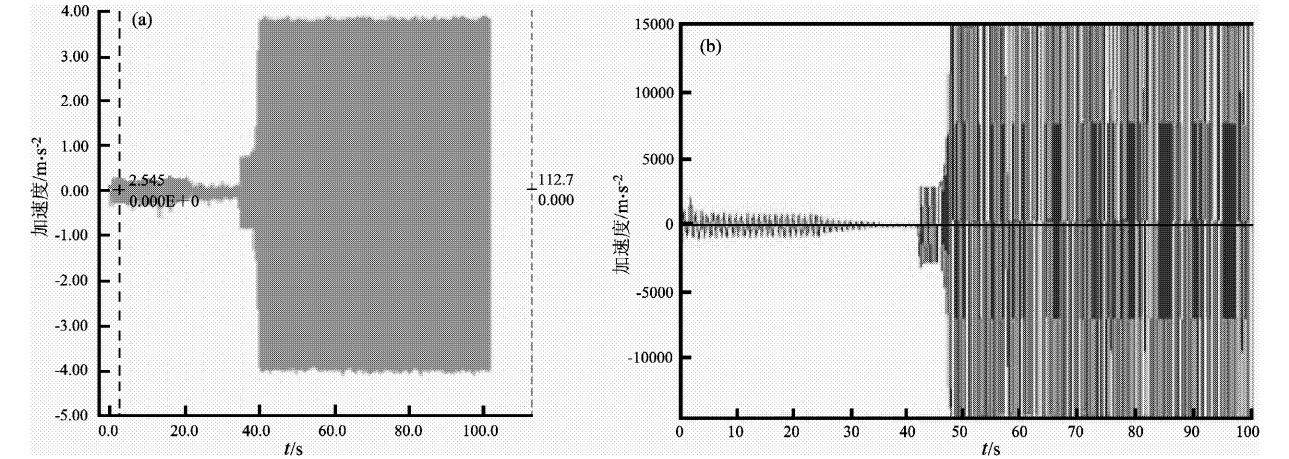


图 3 数据采集强震动加速度计输出波形 (a) 与激光干涉采集振动台输出波形 (b)

Fig. 3 Output waveforms of strong motion accelerometer in data acquisition (a) and shaking table in Laser Inter ferometer acquisitions (b)

速度计输出电压值、振幅及振动台振动频率后,根据式(4)计算出该加速度计的电压灵敏度,具体测试数据见表3。

表3 绝对校准法标定被校准强震动加速度计灵敏度的试验数据

Tab.3 Sensitivity test data of the calibrated strong motion accelerometer calibrated by absolute calibration method

振动台振动频率/Hz	被校准加速度计输出电压值/mV	被校准加速度计振幅/mm	被校准加速度计电压灵敏度/mV·mm·s ⁻²
0.4	2.952	39.530 00	0.011 8
0.5	4.685	39.490 00	0.012 0
5	32.920	2.010 00	0.016 6
10	25.110	0.488 40	0.013 0
20	29.160	0.144 40	0.012 8
40	15.960	0.032 30	0.007 8
60	20.140	0.022 96	0.006 2

将实测结果绘制幅频特性曲线,如图4所示,该强震加速度计理想状态幅频特性曲线应在0~35 Hz振动测试阶段处于平坦状态,35~60 Hz振动测试阶段呈平缓下沉趋势状态。而被校准强震动加速度计在5 Hz状态点电压灵敏度突变,整体曲线走势在0~15 Hz振动测试阶段呈上升趋势,在15~60 Hz振动测试阶段呈递减下沉平滑状态。由此可见,该被校准强震动加速度计幅频特性已达不到出厂设计要求。

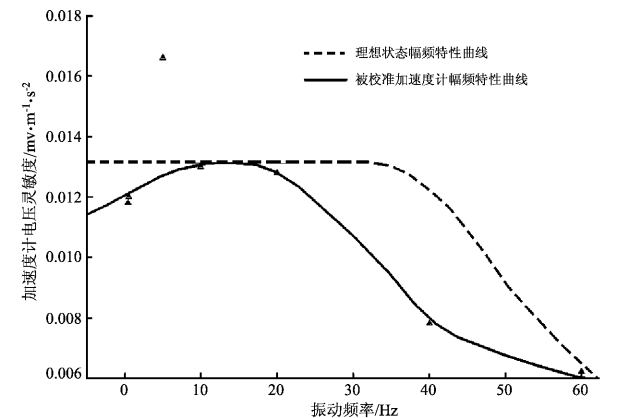


图4 被校准强震动加速度计幅频特性曲线图

Fig.4 Amplitude-frequency characteristic curve of the calibrated strong motion accelerometer

3.2 强震动加速度计相位测量

以振动台振动频率从1 Hz变频为30 Hz的测试过程为例,对强震动加速度计相位进行测量。强震动加速度计输出信号波形中出现最大振幅时刻为40.038 s,次大振幅时刻为40.105 s;振动台输出信号波形中出现最大振幅时刻为47.512 s,次大振幅时刻为47.578 s。根据式(5)~(10)即可计算出该加速度计相位为5.373°。直接以数字相位计(精度0.001)检验该加速度计的相位差为5.352°,与绝对校准测量结果仅差0.021°。

4 对比分析

绝对校准法测试强震动加速度计灵敏度时,对该加速度计使用相对校准法进行灵敏度对比测试。在相对校准试验中,试验提供的参考强震动加速度计电压灵敏度 S_1 恒为0.012 mV/mm·s⁻²,直接读出两个强震动加速度计的输出电压值 u_1 和 u_2 ,根据式 $S_2 = \frac{u_2}{u_1} S_1$ 计算被校准强震动加速度计的电压灵敏度值 S_2 ,具体测试数据见表4。

表4 相对校准法标定强震动加速度计灵敏度的试验数据

Tab.4 Sensitivity test data of the strong motion accelerometer calibrated by relative calibration method

振动台振动频率/Hz	参考加速度计电压灵敏度/mV·mm ⁻¹ ·s ⁻²	参考加速度计输出电压/mV	被校准加速度计输出电压/mV	被校准加速度计电压灵敏度/mV·mm ⁻¹ ·s ⁻²
0.4		3.130	2.952	0.011
0.5		4.770	4.685	0.012
5		18.140	32.920	0.022
10	0.012	21.970	25.110	0.014
20		25.950	29.160	0.013
40		21.183	15.960	0.009
60		25.273	20.140	0.010

在绝对校准试验中,两个强震动加速度计的灵敏度在不同振动频率下均是变化状态,并非恒定不变。分别对参考强震动加速度计与待测强震动加速度计的电压灵敏度进行绝对校准,测试数据分别见表5和表3。

对比表 3 及表 5 的强震动加速度计电压灵敏度测试数据，绘制被校准强震动加速度计频率—灵敏度特性曲线，见图 5。

表 5 绝对校准法标定参考强震动加速度计灵敏度的试验数据

Tab. 5 Sensitivity test data of the reference strong motion accelerometer calibrated by absolute calibration method

振动台振动频率/Hz	参考加速度计输出电压值/mV	参考标准加速度计振幅/mm	参考加速度计电压灵敏度/ $\text{mV}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
0.4	3.130	39.190 00	0.012 6
0.5	4.770	38.200 00	0.012 6
5	18.140	1.434 00	0.012 8
10	21.970	0.430 00	0.012 9
20	25.950	0.140 10	0.011 7
40	21.183	0.000 34	0.011 6
60	25.273	0.000 18	0.009 7

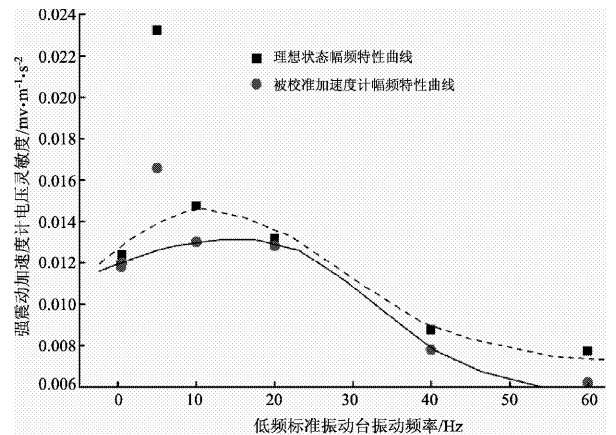


图 5 绝对校准与相对校准测试强震动加速度计灵敏度对比分析

Fig. 5 Sensitivity comparative analysis of strong motion accelerometer tested by absolute calibration and relative calibration tests

总体分析图 5，相对校准测试值在各振动频率点均大于绝对校准测试值。两种校准测试绘制的强震动加速度计频率—灵敏度特性曲线走势起伏明显，均可清晰看出加速度计在每个振动频率区间所对应幅频特性。局部分析，两种方法测试得到的加速度计电压灵敏度在 5 Hz 振动频率点同时

出现电压灵敏度突然增大，相对校准更为突出。

5 结论

强震动观测是认识强地震动特征的关键手段，其主要依靠强震动加速度仪的记录数据去开展相关应用与研究。作为强震动加速度仪的核心测量装置，强震动加速度计的准确可靠性尤为重要，一般情况下，需定期对强震动加速度计进行灵敏度、频率特性等技术指标的校准工作。在实际工作中，日常使用的强震动加速度计，相对校准即可满足其性能精度的校准要求；而相对校准可靠程度的核心保证：标准强震动加速度计，其高精度性能要求必须由绝对校准提供。笔者基于激光干涉仪开展了绝对校准检测技术研究，通过低频标准振动台试验，证实了基于激光干涉仪的绝对校准理论成熟、方法可行，激光干涉仪的高分辨率特征为数字化仪器的频率特性测试，尤其为低频或超低频特性测试提供保证。

参考文献：

李科杰. 2002. 新编传感器技术手册[M]. 北京:国防工业出版社.

孙桥,于梅. 2005. 比较法相位型振动校准系统的研究和实现[J]. 计量学报. 26(2):142-145,154.

叶林,周弘,张洪,等. 2006,相位差的几种测量方法和测量精度分析[J]. 电测与仪表. 43(4):11-14.

于梅,孙桥,马明德,等. 2004a. 两种激光绝对法振动测试技术的比对实验及分析[J]. 现代测量与实验室管理. 12(6):8-11.

于梅,孙桥. 2003. 振动比较法校准技术发展趋势的研究[J]. 中国计量,9:55-58.

于梅,孙桥. 2004b. 基于激光绝对法冲击校准技术的动态力测量方法的研究[J]. 现代测量与实验室管理, 12(4):5-8.

于梅,孙桥. 2005. 振动比较法校准中加速度计灵敏度幅值校准不确定度的评估[J]. 中国计量, 6:67-70.

于梅. 2007. 0.1~50 Hz 直线振动幅值和相位国家计量基准系统的研究[J]. 振动与冲击,26(7):54-58.

张洁文. 2002. 压电加速度计检定及其数据处理[J]. 计量与测试技术,29(4):24-25.

周小珊,李岩. 2010. 相位激光测距与外差干涉相结合的绝对距离测量研究[J]. 应用光学, 31(6):11-14,1013-1017.

Harris C M,Allan G,Piersol. 2007. 冲击与振动手册(第 5 版)[M]. 北京:中国石化出版社.

DB/T 10—2001,数字强震动加速度仪[S].

Absolute Calibration Test of Strong Motion Accelerometer Based on Laser Interferometer

YANG Li-wei¹, ZHOU Zheng-hua²

(1. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

Abstract

We analyzed the basic principle of laser interferometer calibration and applied absolute calibration method to the phase test of strong motion accelerometer. Then we respectively found the amplitude variation tendency of the output waveforms recorded by vibrating table and strong motion accelerometer by vibration calibration test. According to delay stacking of their waveform, we compared and inferred the phase difference of the strong motion accelerometer. The example proved that laser absolute calibration is the base of implementing the high precision of performance calibration of standardized strong motion accelerometer.

Key words: absolute calibration method; laser interferometer; strong motion accelerometer; phase test