

# 地脉动测试技术若干问题的讨论

李友鹏 邹桂高

(中航勘察设计研究院,北京 100086)

**【摘要】** 讨论了地脉动的测试技术以及测试工作中应该重视而且容易被忽视的问题,并就地脉动幅值域和频率域特性参数提出不同的看法。

**【关键词】** 卓越周期;均方根值;幅值域;频率域

**【中图分类号】** P 315.4

## Discussion for the Questions of Micro-tremor Testing

Li Youpeng Zou Guigao

(Avic Institute of Geotechnical Engineering, Beijing 100086 China)

**【Abstract】** discussing the testing technology of micro-tremor and the questions which should be regarded but be ignored, and putting forward some different viewpoints for the parameters of magnitude domain and frequency domain.

**【Key Words】** predomination period; root-mean-square; magnitude domain; frequency domain

### 0 引言

地壳表面(大地)每时每刻都在做不规则的微弱震动,其震动的幅度非常小,位移振幅只有微米级,加速度幅值在  $10^{-7} \sim 10^{-5} g$  范围内变化。引起大地震动的因素很多,比较一致的看法是由气候变化、潮汐、海浪等自然力以及交通运输、动力机器等人为振动引起的,而且是经过地壳表面地基的多重反射、透射以及滤波、选频的结果。从震源机制来看,自然力属于“远震”震源,具有较好的平稳性与区域性,其振动特性(卓越周期和脉动幅值)主要由地基的性质决定;人为振动属于“近震”震源,具有一定的随机性与局部性,其振动特性主要是受震源的影响。工程界将自然力引起的大地震动称为地脉动,将人为振动引起的地基振动称为环境振动。因此,震(振)动测试工作应该根据建设工程的需要采用有针对性的测试方法,如进行地震小区划或建筑抗震设计时,需进行地脉动测试,测试工作应安排在深夜进行,尽量避开人为振动的影响;对于环境振动测试来说,如对精密仪器设备采取防震与隔振措施时,测试工作应安排在人为振动最剧烈的不利时段进行。工程测试工作更多的是为工程抗震设计提供场地的卓越周期和脉动幅值,人们常常将人为振动作为干扰处理。地脉动属于非常微弱的随机震动,如何利用现有的

测试仪器,采用合理的测试和分析处理方法,使得测试结果能够正确地反映地脉动的特性,成为我们测试人员应该关心和重视的课题,然而,有些人对地脉动特性理解不深,对仪器性能和测试方法缺乏深入了解,以致于工作中时常出现一些不正确的测试结果。

### 1 地脉动特性参数

地脉动信号有位移、速度、加速度三种表现形式,与其对应的幅值域参数有位移、速度、加速度幅值,频率域参数有位移、速度、加速度卓越周期。现行的《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269-97)(简称《97 规范》)中幅值域参数要求提供最大幅值<sup>[1]</sup>,频率域参数没有作出明确的要求(本意是指地脉动位移、速度、加速度信号的卓越周期是一样的)。对此本文持有不同的观点,即地脉动测试工作应该根据实际工程的需要进行测试和提供参数。

地脉动信号特性受到两个因素的影响,一是引起振动的输入信号,它主要是由“远震”通过基岩提供的,其性质与白噪声信号的性质十分接近,具有平稳随机过程特性,而且同一场地的不同位置变化不大;二是地基土,它对输入信号起到滤波作用,具有选频特性,即地脉动信号在某一特定的场地内具有一定的卓越周期,一般认为场地覆盖层越厚、地基土

越软地脉动信号的卓越周期越大,相反情况卓越周期就越小。

按照质量、弹簧、阻尼系统分析模型考虑,地基土的共振频率与其刚度、振动质量和阻尼有关,刚度和振动质量决定地基土的无阻尼自振频率大小,阻尼则造成了地基土的位移、速度、加速度三者之间共振频率的差别。以最为简单的竖向振动为例,设地基土的无阻尼自振频率为  $f_n$ , 位移的共振频率为  $f_{Dm}$ , 加速度的共振频率为  $f_{am}$ , 地基土的阻尼比(阻尼与临界阻尼之比)为  $\xi_z$ , 共振频率与阻尼比的关系由下式表示:<sup>[1]</sup>

$$f_{Dm} = \sqrt{1-2\xi_z^2} \cdot f_n \quad (1)$$

$$f_{am} = \frac{f_n}{\sqrt{1-2\xi_z^2}} \quad (2)$$

$$\Delta f_m = f_{am} - f_{Dm} = \left( \frac{1}{\sqrt{1-2\xi_z^2}} - \sqrt{1-2\xi_z^2} \right) \cdot f_n \quad (3)$$

由上式可见,地基土的位移共振频率  $f_{Dm}$  比  $f_n$  低,加速度共振频率  $f_{am}$  比  $f_n$  高,彼此的差别与地基土阻尼比有关。例如,地基土的竖向阻尼比为 0.15, 当无阻尼自振频率为 3 Hz 时,它们的差别为 0.14 Hz,当无阻尼自振频率为 8 Hz 时,它们的差别为 0.37 Hz。地脉动的卓越频率可以认为是地基土在“远震”激励下的共振频率,地基土的阻尼越小,地脉动信号频谱曲线的峰值越突出、谱带越窄、上升和下降沿越陡;反之,谱带越宽、上升沿和下降沿越缓(见图 1)。图 1 阻尼较小的(a)曲线中,峰值  $A_{Vi}$  最大时

$A_{Di}$ 、 $A_{ai}$  也最大,即地脉动位移、速度、加速度信号的卓越周期是一致的。图 1 阻尼较大的(b)曲线中,峰值  $A_{Vi}$  最大时  $A_{Di-1}$ 、 $A_{ai+1}$  最大,即地脉动位移信号的卓越周期较速度信号卓越周期大,而地脉动加速度信号的卓越周期较速度信号卓越周期小。一般情况,地基土硬,阻尼大,地脉动位移信号的卓越周期最大,速度信号的卓越周期居中,加速度信号的卓越周期最小;地基土软,阻尼小,地脉动信号位移、速度、加速度信号的卓越周期彼此差别很小,可以认为基本一致。

我国地脉动测试更多的是为建筑抗震和隔振设计或进行地震小区划提供地脉动特性参数<sup>[1]</sup>,它主要是通过地脉动测试参数来揭示地基土的特性,如确定场地类型等。前面已经提到,能够反映地基土特性的地脉动信号是由“远震”引起的,“近震”起到强迫振动的作用,它受到地基土的影响较小,当然不能很好地反映地基土的特性,因此必须将交通运输、动力机器等人为振动作为干扰处理,工作中尽量避开人为振动的干扰。避免干扰的办法可以从以下两个方面来考虑:一是尽量避开干扰振源,测试工作最好安排在夜深人静的时候进行,测点布置在距离高层建筑、高耸构筑物等较远的地方,而且远离地下管道等地下设施的影响;二是对于无法避免的类似于动力机器振动等比较固定的振源,了解其振动频率,在资料处理时通过滤波的办法将干扰成分去掉。干扰振源无处不在,其振动形式千差万别,要想完全避免是不可能的。干扰信号比地脉动信号大很多,但它们的共同特点是振动过程较短(动力机器振动除外),如图 2 所示。很显然地脉动测试信号的最大幅值代表的是干扰信号的振幅,不能表示地脉动全过程的振动幅值。地脉动信号具有平稳随机过程特性,表征其幅值最好使用均方根值。均方根值是随机信号幅值域分析的常用方法,均方根值  $A_{rms}$  的定义如下式<sup>[2]</sup>:

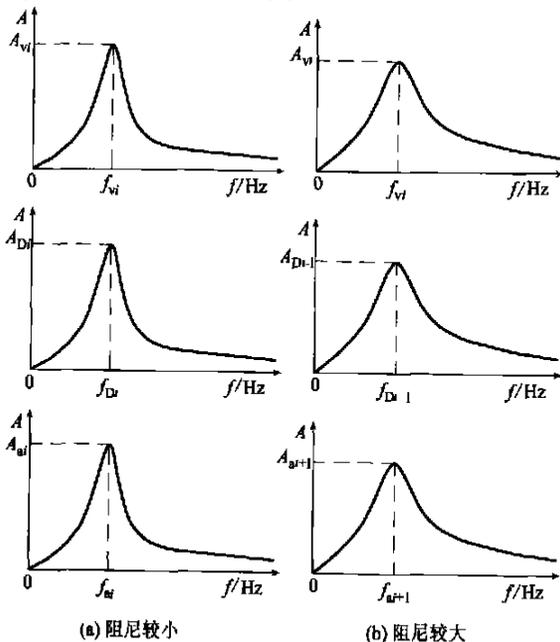


图 1 阻尼对地脉动信号频谱曲线的影响

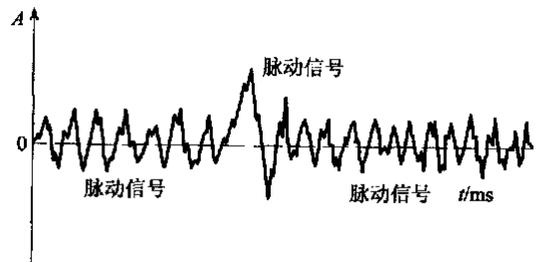


图 2 地脉动信号测试波形

$$A_{rms} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A^2(t) dt} \quad (4)$$

式中:  $T$ —随机过程的时间。按照式(4)的要求,在计

算地脉动信号的均方根值时分析样本须有足够的长度,一般要求野外记录地脉动信号不少于 15 min<sup>[1]</sup>。在如此长的记录时间内,对于那些振动过程较短的干扰信号,尽管它们的幅值较大,但是它们对地脉动信号均方根值的影响很小。由此可见,均方根值最能体现地脉动信号的幅值大小。

## 2 地脉动测试与分析方法

地脉动是一种震动很微弱、震动频率较低的随机震动,它对测试与分析技术要求非常高。除了前面提到的减少干扰以及《97 规范》规定的要求外,还对测试仪器、测试技术以及分析处理技术都有很高的要求。地脉动测试工作包括信号接收、信号放大采集、资料分析处理三个环节,一个环节处理不当都会严重影响测试结果的准确性。目前,我国从事地脉动测试工作的单位很多,使用的仪器千差万别,测试分析方法也不尽相同,彼此之间交流的机会很少,有必要对地脉动测试与分析方法进行比较深入的讨论。

信号接收工作是由传感器将地脉动转换成电信号,为放大和采集工作提供信号源,所以传感器的性能和技术指标应是重点考查的内容。传感器的技术指标包括动态范围、灵敏度、频响、线性四项重要内容。动态范围相当于仪器的量程,是指传感器能够分辨最大与最小信号的范围,一般要求不低于 120 db。灵敏度是传感器对振动信号的灵敏程度,单位是每工程单位的电压输出值,如速度传感器的灵敏度单位是  $\text{mv}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ 。灵敏度当然是越高越好,但是传感器受到体积与换能材料的限制,灵敏度不可能很高,如速度传感器的灵敏度一般在  $200 \sim 500 \text{ mv}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$  范围。频响是指传感器的灵敏度随频率的变化情况,地脉动的卓越频率一般在 10 Hz 以内,传感器的通频带应满足  $1 \sim 40 \text{ Hz}$ <sup>[1]</sup>。线性是指传感器的灵敏度随振动信号幅值的变化情况,变化过大会引起拾振信号失真,一般要求不超过 5%。

信号放大、采集工作是将传感器送来的电压信号进行放大并记录下来,为资料分析处理工作提供数据。地脉动震动很微弱,传感器转换到的电压信号很小,在记录前必须放大到接近记录仪的满量程电压值。目前,完全手动的模拟放大器基本已被淘汰,取而代之的是程控放大器和瞬时浮点放大器,其中瞬时浮点放大器最适合地脉动测试工作,但是到目前为止,国产动测仪配备的瞬时浮点放大器很少有超过 8 位的,放大倍数最大只能达到 256 倍,很显然仅靠瞬时浮点放大器对信号进行放大是不够的,因此还应配备  $100 \sim 256$  倍的前置程控放大器,国产动测仪大都

采用这种方式设计。信号采集工作是完成由连续的模拟电信号到离散的数字信号之间的转换任务。随着电子计算机技术的发展,模拟信号分析时代早已成为历史,取而代之的是数字信号分析技术,这样一来就对模拟信号过渡到数字信号的转换精度提出很高的要求。模拟信号通过模数转换器(A/D 卡)转换成数字信号,其转换过程见图 3。从图 3 中可以看到,如果要求采集到的数据较准确地反映真实的模拟信号,当然希望采样间隔  $\Delta t$  越小越好,但是频率域分析要求的数据量是有限的,它只能描述信号的很短一部分,所以就有一个合理采样问题。设采样频率为  $f_{\text{采}}(f_{\text{采}} = 1/\Delta t)$ ,在实际采样时,如研究的最高频率为  $n \text{ Hz}$ ,采样频率  $f_{\text{采}} = 10n \text{ Hz}$  就足够了,太高了会降低频谱分析的分辨率。如果在信号采集之前没有进行低通抗混滤波的话,在进行频率分析时,还应考虑可能出现的频率混淆现象。假设采集到的信号是由 2 个不同频率谐波成分( $f_{\text{研}}$  和  $f_{\text{信}}$ )组成,  $f_{\text{N}}$  为频谱分析时的 Nyquist 频率或称为折叠频率,而且满足下列条件:

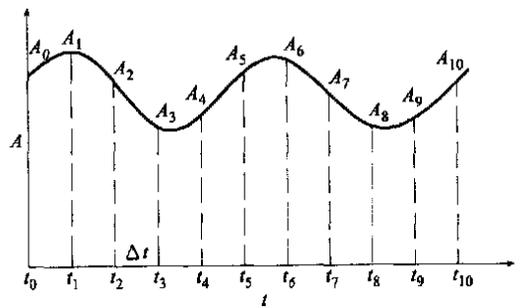


图 3 模数转换示意图

$$f_{\text{研}} < f_{\text{N}} < f_{\text{信}} < f_{\text{采}} \quad (f_{\text{采}} = 2f_{\text{N}}) \quad (5)$$

此时,信号频谱图中的谱线是关于  $f_{\text{N}}$  左右对称的(见图 4),其中  $f'_{\text{信}}$  是  $f_{\text{信}}$  折叠过来的频率,  $f'_{\text{研}}$  是  $f_{\text{研}}$  的的折叠频率。实际的频谱图只画折叠线左边部分,因此,应该尽量避免假频率  $f'_{\text{信}}$  的出现。为了避免出现混淆现象,最好的办法是使用低通抗混滤波器将信号中高于  $f_{\text{N}}$  的频率成分滤掉,如果没有低通抗混滤

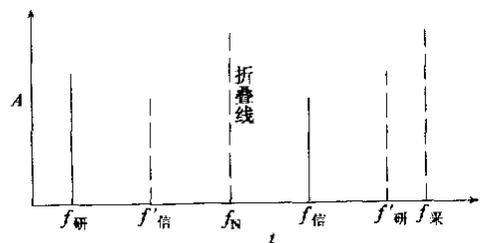


图 4 频谱图上的折叠现象

波器,就需提高 $f_{采}$ ,也就是提高 $f_N$ ,但这样带来的问题是使得谱图中的频带宽度增加,随之而来的缺点是使得频率分辨率变差,这是我们不希望得到的结果。因此,采样频率的选定应根据地脉动信号分析的需要综合考虑,一般要求50~200 Hz,没有低通抗混滤波器的采样频率不宜低于100 Hz。

信号采集工作中应该关心的另一个问题是A/D卡的量化精度。A/D卡的量化精度与它的位数以及输入信号大小有关,例如,电压±5 V的(16位)A/D卡,对于满量程的±5 V输入信号量化结果为±32 768,对于±2.5 V输入信号量化结果为±16 384,由此可见,输入信号幅值越小,A/D卡的量化精度越低,这正是为什么要在采集前对输入信号进行放大的原因。瞬时浮点放大器正是基于这一点而设计的,它和前置放大器配合能够将输入信号的电压放大到接近A/D卡的满量程电压工作,保证采集到的信号具有最高的量化精度。同样不难看出,A/D卡的位数越高,量化后的数据位数越多,量化精度当然越高。这一点对测试地脉动这种微弱信号更显得尤为重要。

地脉动资料的分析处理是完成频率域或幅值域分析工作,得到场地地脉动的卓越周期或幅值。地脉动资料的分析处理方法应该符合随机信号的分析处理技术要求。随机信号的频率域分析处理要求主要有两点:一是应该多次取样进行平均计算,使信号的统计特性具有代表性,一般要求平均次数不少于100次,分析时相邻样本间的数据最好重叠一部分;二是进行窗函数处理,减少频谱分析中的由于频率泄漏所带来的误差,近年来窗函数的应用有很大的发展,特别应根据信号的不同性质和不同的处理目的来选择不同的窗函数,图5是正弦波不加窗和加窗的处理结果,(a)是不加窗的情况,频率泄漏明显强于(b)加汉宁窗的情况<sup>[3]</sup>。处理地脉动随机信号一般使用哈密窗或汉宁窗函数。

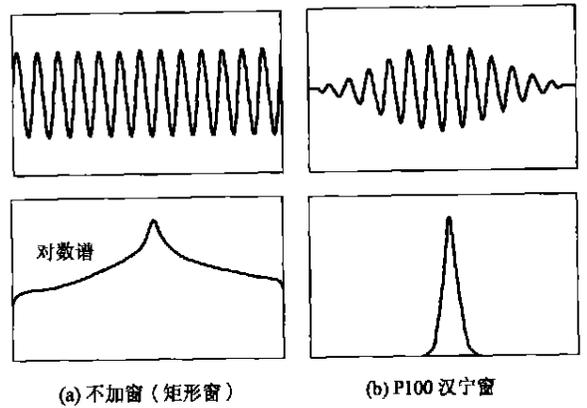


图5 正弦波的窗函数处理结果

### 3 CUR401 多功能工程测试仪与工程实例

我们针对测试工程中出现的对仪器的问题和对仪器的要求,经过近一年的研制与试验过程,目前已经完成了CUR401多功能工程测试仪的定型与应用工作。该仪器功能齐全,可以进行“检层法”、“跨孔法”、“测井法”钻孔波速测试,以及地脉动测试、结构微振动测试、地基动力参数测试和基桩低应变动力检测工作。其中地脉动与结构微振动测试系统具有“信号数字示波”功能,实时显示测试信号时域波形和频谱曲线,可根据信号的情况实时调整采样参数;采样时间不限,通过观察频谱曲线的变化情况随时结束测试工作;分析系统具有数字滤波、幅值计算和频率域分析功能,幅值域包括最大值和均方根值,频率域分析具有平均功能,“FFT”分析样本长度(1024、2048)可选,可根据测试信号的频率成分调整分析样本长度,得到适宜的频率分辨率和因混迭原因出现“假频”现象。图6为该分析软件的窗体,显示的是北京某地三个方向的地脉动位移信号波形和频谱图。该脉动信号的采样频率100 Hz,记录时间为15min,原始记录波形中<0.5 Hz的低频干扰严重,通过高通数字滤波(转折频率1 Hz)和频率域平均处理以后,信号波形和频谱曲线趋于正常,谱图中谱带明显,幅值域和频率域分析结果见表1。

表1 幅值域和频率域分析结果

方 向	频 率 域 参 数		幅 值 域 参 数	
	卓越频率/Hz	卓越周期/s	最大位移/ $\mu\text{m}$	位移均方根值/ $\mu\text{m}$
南 北	3.048	0.33	$5.6 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-1}$
东 西	3.171	0.32	$5.3 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-1}$
垂 直	4.265	0.23	$3.4 \times 10^{-1}$	$0.7 \times 10^{-1}$

该测试场地的土层多数属于中硬土,覆盖层厚度大于100 m,深度20 m内土层的等效剪切波速

251~265 m/s,建筑场地类别Ⅱ类。从北京地区多年的测试经验来看,上表的频率参数真实地反映了

该场地土层的动力特性,其中垂直方向的卓越周期较低符合土层的振动特点。三个方向幅值域参数的

一致性较好,其中位移均方根值更能代表土层的地脉动振幅大小。

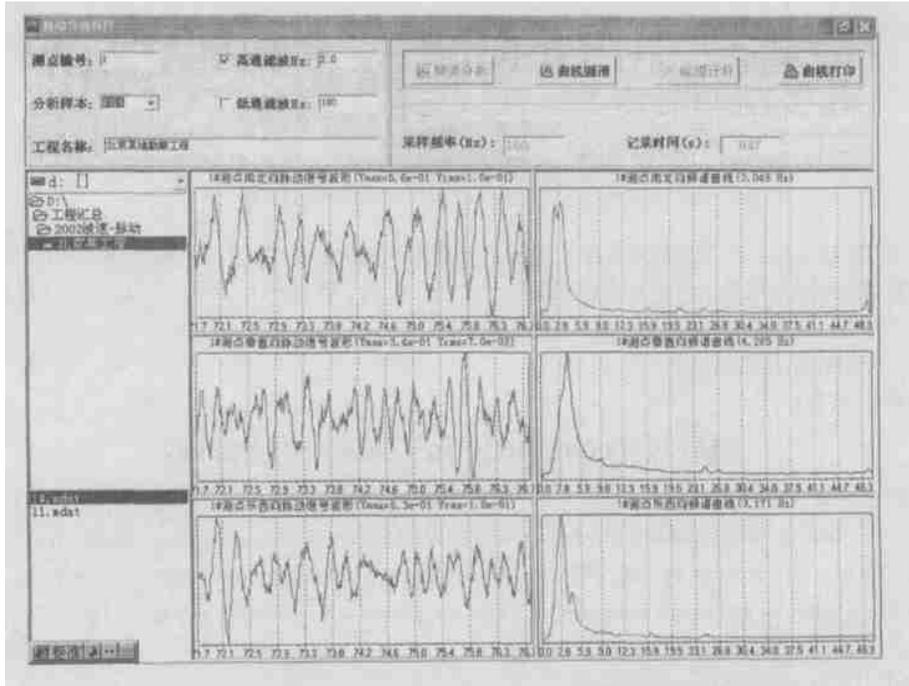


图6 地脉动分析软件(v1.0)窗体

#### 4 结语

地脉动测试是一项要求非常严格与细致的工作,每一步骤都该推敲。首先,应该根据任务要求,全面了解地脉动测试目的和设计需要的地脉动参数以后采取相应的测试方法,在任务没有明确要求且条件具备时,宜进行地脉动位移和速度信号测试。测试仪器方面,《97规范》的内容是最基本的要求,随着电子技术的发展,对测试仪器的要求应相应提高,如抗混低通滤波器和瞬时浮点放大器宜成为必备的仪器,A/D卡不应低于16位。数据采集与资料分析处理方面,应符合随机信号的分析处理要求,

采集的数据量(单道)不宜少于100 kB;频率域分析应有平均计算过程,幅值域参数应增加提供均方根值。

#### 参 考 文 献

- 1 GB/T 50269—97 地基动力特性测试规范
- 2 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理. 北京: 中国铁道出版社, 1985. 58
- 3 黄世霖. 工程信号处理. 北京: 人民交通出版社, 1986. 34~37

收稿日期 2004-03-17