

ICS 93.160

CCS P 55

T



团 体 标 准

T/CSPSTC XXX-202X

# 堤防振动测试技术规范

Code for levee vibration testing

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国科技产业化促进会 发布

中国标准出版社 出版



## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 基本规定 .....	2
4.1 一般规定 .....	2
4.2 基础资料收集 .....	2
4.3 测试方案编制 .....	2
5 振动测试仪器设备 .....	3
5.1 测试仪器设备 .....	3
5.2 传感器 .....	3
5.3 信号传输线 .....	3
5.4 数据采集仪 .....	3
5.5 振动信号分析系统 .....	4
5.6 供电设备 .....	4
5.7 测试仪器设备工作环境要求 .....	4
6 传感器安装及振动测试操作 .....	4
6.1 传感器安装及要求 .....	4
6.2 测试前的准备工作 .....	5
6.3 振动测试操作要求 .....	5
6.4 振动测试记录 .....	5
7 振动信号数据处理 .....	6
7.1 振动信号数据处理内容 .....	6
7.2 振动信号预处理 .....	6
7.3 振动信号时域分析 .....	6
7.4 振动信号频域分析 .....	6
7.5 工作模态识别 .....	7
7.6 传递路径分析 .....	7
8 测试资料整编 .....	7
8.1 测试资料整理 .....	7
8.2 测试报告编制 .....	7
附录 A（资料性）堤防振动测试流程 .....	9
附录 B（资料性）测试信号质量情况对比 .....	10
附录 C（资料性）振动测试记录表 .....	11
附录 D（资料性）振动测试报告编制要求 .....	12
参考文献 .....	13

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国科技产业化促进会归口。

本文件起草单位：XXX、XXX。

本文件主要起草人：XXX、XXX。

# 堤防振动测试技术规范

## 1 范围

本文件规定了环境激励条件下已建堤防（包括穿堤建筑物、构筑物）振动测试的仪器设备、传感器安装及振动测试操作、振动信号的数据处理、测试资料整编等工作内容和技术要求。

本文件适用于堤防运行期的振动测试。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 10071 城市区域环境振动测量方法

GB/T 14412 机械振动与冲击 加速度计的机械安装

GB/T 51306 工程振动术语和符号标准

HJ 918 环境振动监测技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**堤防** levee

沿河、渠、湖、海岸或行洪区、分洪区、围垦区的边缘修筑的挡水建筑物。

### 3.2

**随机振动** random vibration

对未来任意给定时刻，其瞬时值不能预先确定的振动。

### 3.3

**振动响应** vibration response

振动质点受振动作用时的振动输出。

### 3.4

**振动模态** vibration mode

系统中每个质点做相同频率的简谐振动时的特征模式；一个多自由度系统的模态数等于其自由度数。

### 3.5

**振型节点** node of vibration mode

结构在某阶固有频率下，振型与原来形状的交汇节点，振型节点处的振幅为零。

### 3.6

**模态参数** modal parameter

模态的特征参数，即振动系统的各阶固有频率、振型、模态阻尼等。

### 3.7

#### 海宁窗 hanning window

一种用于减少信号频谱泄漏问题的窗函数。

### 3.8

#### 工作模态识别 operational modal identification

利用环境激励下结构的实测振动响应获取结构自身振动特性的方法。

### 3.9

#### 模态定阶 modal order determination

确定结构系统振动模态的阶次或模态数的过程。

### 3.10

#### 增益 gain

放大器放大信号的倍数。

## 4 基本规定

### 4.1 一般规定

- 4.1.1 振动响应测试物理量包括振动加速度、振动速度、振动位移等。
- 4.1.2 振动测试工作，应优先采用成熟的先进技术和设备，且设备应在校准有效期内。
- 4.1.3 振动测试不应対堤防造成损害。
- 4.1.4 现场测试时，测试仪器设备应有防雨、防风、防晒、防尘、防磁和防振等保护措施。
- 4.1.5 振动测试所用的技术资料、测试成果及分析计算资料、测试成果报告、项目合同、工作任务书和工作大纲、评审意见书等，可参考科学技术研究档案管理规定整理归档。
- 4.1.6 振动测试除应符合本文件规定的内容外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。
- 4.1.7 振动测试可按附录 A 的流程进行。

### 4.2 基础资料收集

- 4.2.1 进行振动测试之前，应对测试现场进行调查，收集堤防的基础资料和测试现场环境资料。
- 4.2.2 堤防基础资料的收集宜包括以下内容：
  - a) 堤防的工程概况、结构型式、水文情况等；
  - b) 堤防的竣工资料、设计图纸、地勘资料等；
  - c) 堤防的监测、日常检查、问题处理等运行情况资料。
- 4.2.3 堤防测试现场环境资料宜包括以下内容：
  - a) 爆破、行车、打桩、交叉建筑物激振等振源资料；
  - b) 对堤防振动测试有影响的干扰源资料；
  - c) 天气、温度、湿度等资料；
  - d) 影响现场测试人身安全的周边环境资料。

### 4.3 测试方案编制

- 4.3.1 根据测试必要性和范围制定测试方案，宜包括但不限于以下主要内容：
  - a) 测试的目的及任务；
  - b) 测试依据和测试工作量；
  - c) 测试物理量的确定；
  - d) 测试仪器设备的确定；

- e) 测试工况的确定;
  - f) 测试传感器布置方案;
  - g) 传感器的安装及固定方法;
  - h) 测试步骤和程序;
  - i) 安全措施预案;
  - j) 数据分析方法和预期成果。
- 4.3.2 测点布置包括传感器布设位置及数量、传感器编号、测点位置及坐标、测点布置图等。测点布置考虑以下因素:
- a) 振动传感器布置于堤防结构振动敏感处且便于安装的部位,能反映堤防结构整体和主要部位的动态响应,不宜布置于附属结构上;
  - b) 振动传感器测试点的位置和数量应能满足确定堤防振型的要求,测试前宜根据数值计算的振型合理确定传感器的数量和位置;
  - c) 振动传感器宜避免布置于结构振型节点处,测振方向应与测试对象所需测试的振动方向一致,测试过程中不应产生倾斜和附加振动;
  - d) 当因测试仪器数量不足或其他因素需要做多次测试时,可采用移动测点法测试,每次测试中应至少保留一个共同的参考点,参考点位置应避开拟测振型的振型节点;
  - e) 振动传感器宜布置在安全且可避开人为干扰的位置,附近应能防磁和防局部振动;
  - f) 振动传感器测量方向应以水平横河向为主,重要位置宜布置成水平顺河向、水平横河向和竖向等三个方向。

## 5 振动测试仪器设备

### 5.1 测试仪器设备

- 5.1.1 测试设备应具有振动位移、速度、加速度等数据采集、存储及基础数据分析功能。
- 5.1.2 仪器设备应便于携带、安装、操作,具有适应野外工作环境的性能。
- 5.1.3 仪器设备包括传感器、信号传输线、数据采集仪、动态信号分析系统、供电设备等。

### 5.2 传感器

- 5.2.1 依据工作环境选用有线传感器或无线传感器,且传感器应具有适应野外高温、严寒环境工作的能力。
- 5.2.2 传感器应具有防水、防潮、防尘等功能,在非使用状态时应有相应的保护措施以防损坏,传感器外壳防水等级应满足 IP6 要求。
- 5.2.3 堤防振动测试宜采用具有较高精度和灵敏度的低频振动传感器,频率下限应不大于 0.5 Hz,灵敏度应小于 5%。分辨率要求:位移传感器为  $10^{-7}$  m~ $10^{-6}$  m,速度传感器为  $10^{-7}$  m/s~ $10^{-6}$  m/s,加速度传感器为  $10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>~ $10^{-4}$  m/s<sup>2</sup>。
- 5.2.4 振动测试宜根据经验或数值仿真计算结果确定主要振动频率,所选传感器的频响特性应覆盖检测对象主要振动频率。当在 30 Hz 以内时,宜选用位移传感器;当在 30 Hz~100 Hz 时,宜选用速度传感器;当在 100 Hz 以上时,宜选用加速度传感器。

### 5.3 信号传输线

- 5.3.1 信号传输线应采用专用屏蔽电缆线,屏蔽电缆线应具有防水、绝缘性能。
- 5.3.2 信号传输线所有连接应牢固可靠,线缆接头处应绝缘屏蔽,宜采用套管保护。

### 5.4 数据采集仪

5.4.1 数据采集仪应具有远距离振动、噪声等各种物理量的多测点信号采集功能，并能与相应分析软件相连，形成高性能数据采集和信号分析系统。

5.4.2 数据采集仪宜采用 24 位高精度 AD 采集模块的多通道数字采集与数据存储系统，具有有线和无线接口，内置存储系统。

### 5.5 振动信号分析系统

5.5.1 振动信号分析系统应具有多通道数据采集和基本的数字信号处理功能。

5.5.2 数字信号处理包括时域分析中的数字滤波、波形截取、通道分离、数字积分/微分、峰值计数、时域统计分析、自相关分析、互相关分析、概率分析等功能，频域分析中的快速傅里叶变换、自功率谱分析、互功率谱分析、三维谱阵分析、传递函数分析、相干函数分析等功能。

### 5.6 供电设备

5.6.1 供电设备应具有维持现场测试仪器设备持续、稳定工作的供电能力。

5.6.2 备用电源应具备满足现场测试仪器设备连续、稳定工作不少于 6 h 的能力。

5.6.3 应定期检查和维护备用电源。在使用前应检查备用电源的电池容量和充电状态，确保其能够正常工作。如果发现电池容量不足或出现其他故障，应及时更换或修理。

### 5.7 测试仪器设备工作环境要求

5.7.1 现场工作环境应满足测试仪器设备安装、调试、更换、运行条件和正常工作的温度与湿度要求。

5.7.2 现场测试应避免外界干扰振源，避免电磁和信号干扰。

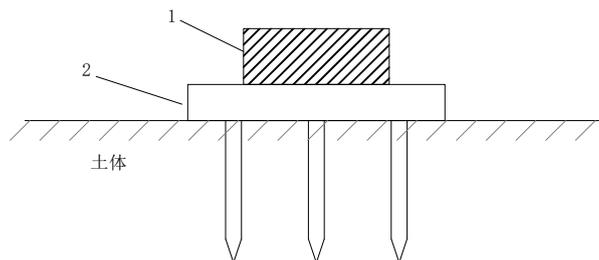
5.7.3 测试仪器设备应接地良好，消除噪声干扰。

## 6 传感器安装及振动测试操作

### 6.1 传感器安装及要求

6.1.1 传感器的安装应按照 GB/T 14412 的规定执行，并符合以下要求：

- a) 传感器应按使用说明书及振动测试方案确定的位置和方向牢固安装；
- b) 混凝土结构及管道表面传感器安装位置的接触面应保证清洁与平整，接触面平整度应满足传感器安装要求；
- c) 土体表面传感器宜采用专用底座固定安装（见图 1、图 2）；
- d) 传感器安装完毕后，通过信号传输线与数据采集仪相连，信号传输线与传感器连接的部分不应受力，宜用胶带将信号传输线固定在被测试结构表面（对于无线传输则忽略），避免信号传输线移动。



标引序号说明：

- 1——传感器；  
2——专用底座。

图 1 土体表面传感器安装示意图

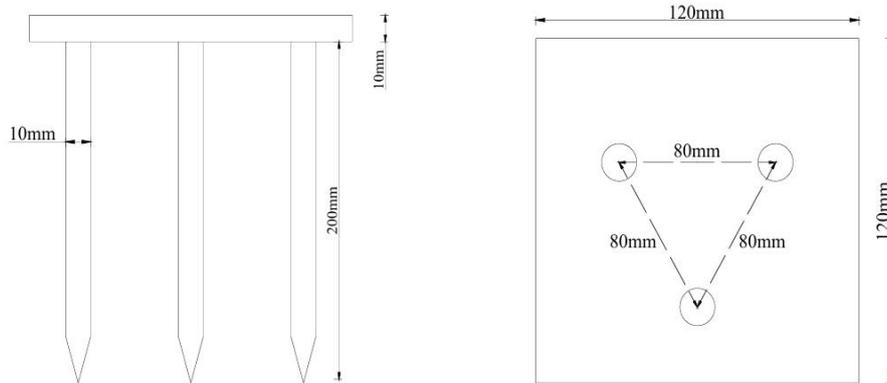


图 2 专用底座参考尺寸

6.1.2 传感器安装完毕后，应绘制传感器布置图，包括但不限于传感器型号及布置位置、传感器编号、测量通道编号等。

## 6.2 测试前的准备工作

6.2.1 应根据环境激励源诱发堤防振动的荷载及本身的振动特性，判别堤防的振动量级，选定振动传感器类型并调整测试仪器设备的量程，最大值宜落在量程的二分之一至三分之二之间。

6.2.2 应进行预分析，选定合适的采样频率和采样时间。

6.2.3 应对测试系统的环境背景噪声进行测量、记录和分析。

6.2.4 应对通道的连接状态和信号进行检查，检查传感器是否失灵、信号传输线插头是否松脱、传感器安装方向是否正确等，并通过采集、显示及波形检查，确定各通道的连通情况、增益及相位。

## 6.3 振动测试操作要求

6.3.1 堤防振动测试宜满足以下要求：

- 合理设置信号采集参数，包括采样频率、采样时间、传感器灵敏度、信号采集系统量程、增益参数等。采样频率应高于堤防振动信号成分中最高频率（分析频率）的 2.56 倍，通常采用 50 Hz~200 Hz 的采样频率；采样时长应能充分保证所测振动覆盖典型激励工况过程；平稳激振过程的单个工况采样时长不宜小于 30 min；
- 采用环境激励源对堤防进行多通道的同步振动测试采集；
- 采集振动信号数据并保存；
- 对振动信号数据进行初步分析及合理性评价，常见的几种测试信号质量异常情况可参见附录 B。

6.3.2 现场振动测试时，应依据 GB/T 10071 和 HJ 918 的规定执行，并按照安全措施预案开展测试工作。

## 6.4 振动测试记录

6.4.1 振动测试记录应包括以下内容：

- a) 工程项目名称、测试地点、堤防类型、测量参数（含测试方向）；
- b) 测试仪器设备名称、型号、编号；
- c) 测试工况；
- d) 传感器测点布置（包括传感器位置布置图及与其对应的数据采集仪通道号、传感器测点编号和现场录制视频、照片等）；
- e) 原始实测振动时程曲线；
- f) 测试过程中的情况说明（包括现场测试环境、测试条件、情况描述等）；
- g) 测试单位、测试人员、校核人员、测试日期、测试时间。

6.4.2 振动测试应以记录表的形式按照附录 C 记录现场测试情况。

6.4.3 振动测试采集的原始信号数据和振动测试记录内容应保存完整，采用可靠的存储设备保存，按相关规定存档。

## 7 振动信号数据处理

### 7.1 振动信号数据处理内容

7.1.1 应通过数学运算方法对振动测试所得的信号进行处理。

7.1.2 振动信号数据处理内容包括振动信号的预处理、时域分析、频域分析、工作模态识别和传递路径分析等。

### 7.2 振动信号预处理

7.2.1 在进行振动信号时域处理、频域处理、工作模态识别和传递路径分析之前，应对原始振动测试信号进行预处理，降低外部环境噪声干扰及其他各方面因素的影响。

7.2.2 振动信号的预处理应包括以下内容：

- a) 振动信号的物理量单位标定及所测试物理量的转换；
- b) 直流分量消除；
- c) 趋势项消除；
- d) 滤波处理；
- e) 采样数据重构（重采样）。

### 7.3 振动信号时域分析

7.3.1 振动信号时域分析宜包括以下内容：

- a) 选择合适的概率分布函数和概率密度函数进行分析；
- b) 所测物理量的时域指标统计，包括振幅最大值、最小值、时均值、方差、均方差；
- c) 相关分析，包括自相关分析和互相关分析。

7.3.2 振动位移、振动速度、振动加速度三者之间可采用微积分法进行换算，但应消除趋势项并进行滤波处理。

### 7.4 振动信号频域分析

7.4.1 振动信号频域分析应按照随机振动信号频率处理方法进行，主要分析内容包括信号的傅里叶变换、频谱分析（自谱分析和互谱分析）。

7.4.2 采用傅里叶变换分析或频谱分析时，每个测点的样本数据不应小于 1024 个，宜采用海宁窗进行加窗函数处理，频域上的总体平均次数不应小于 32 次，数据长度的重叠率不宜小于 50%。

## 7.5 工作模态识别

- 7.5.1 工作模态识别可以采用时域识别法、频域识别法和时频域识别法。
- 7.5.2 在工作模态识别过程中，应进行模态定阶并剔除虚假模态。
- 7.5.3 工作模态定阶可采用奇异熵和稳定图法确定振动阶次。
- 7.5.4 宜采用不少于2种工作模态识别方法对振动模态参数进行识别，并对不同方法的识别结果进行对比验证，确保识别结果的准确性。

## 7.6 传递路径分析

- 7.6.1 振动传递路径可采用传递熵、信息传递率或者声强方法分析。
- 7.6.2 应先开展数据预处理，并采用时域法、频域法或时频域法进行分析。
- 7.6.3 在有限测点振动数据情况下可结合有限元方法反演更多典型测点数据。

## 8 测试资料整编

### 8.1 测试资料整理

- 8.1.1 整理收集的基础资料、振动测试记录资料及其他与振动测试有关的资料和技术文件。
- 8.1.2 整理振动测试仪器设备的型号及相关参数，并详细记录测试过程中测试仪器设备的工作状态。
- 8.1.3 整理现场振动测试视频和照片及文字说明，原始测试数据应整理汇总并附上振动测试记录说明，形成电子文件后进行备份存储。

### 8.2 测试报告编制

- 8.2.1 测试资料分析应使用法定计量单位，振动术语和符号标准应按GB/T 51306规定执行。
- 8.2.2 测试资料分析应包括以下主要内容：
  - a) 测试物理量宜采用图、表、曲线表示，绘制测试物理量过程线图、各测点的测试物理量在时间和空间上的分布特征图、各测点测试物理量之间的相关关系图，对异常结果应分析原因；
  - b) 分析堤防振动时域特征、频域特征及工作模态参数，并结合录像、照片及堤防工作状态，描述堤防振动特性；
  - c) 将测试成果与理论分析成果或以往的测试资料进行对比分析，评估外部环境激振对堤防安全运行的影响，并对外部激振控制提出建议；
- 8.2.3 测试成果评价应符合以下要求：
  - a) 环境激励下处于正常状态的堤防通常呈现为各态历经的平稳随机振动，其概率密度分布通常应符合正态分布的特点，若所测堤防振动响应的概率密度分布不符合正态分布，则堤防振动信号可能存在较大干扰或存在异常；
  - b) 对于发生局部沉降、坍塌的堤防，通常其工作模态参数会发生相应变化，若堤防安装有长期振动监测设备或对初始健康阶段及运行阶段进行过多次振动测试，宜对工作模态参数进行对比分析；
  - c) 相同环境激励下，堤防的工作模态参数与健康状态相比，其主频变化率不宜超过10%；若主频变化率超过10%，则说明堤防可能存在异常（如堤防沉降、坍塌或孔洞等），需对堤防开展进一步检测或分析。
- 8.2.4 测试成果报告编制应符合以下要求：
  - a) 测试成果报告可分为阶段性测试成果报告和测试成果总报告，报告编写要求参见附

录 D;

- b) 阶段性成果报告应根据分阶段开展的测试工作任务进行编写,包括测试内容、测试方法、阶段性测试成果及分析、阶段性结论等内容;
- c) 测试成果总报告应在阶段性成果报告的基础上进行编写,包括测试内容、测试方法、测试成果及分析、结论及建议等内容。

附录 A  
(资料性)  
堤防振动测试流程

堤防振动测试流程见图 A.1。

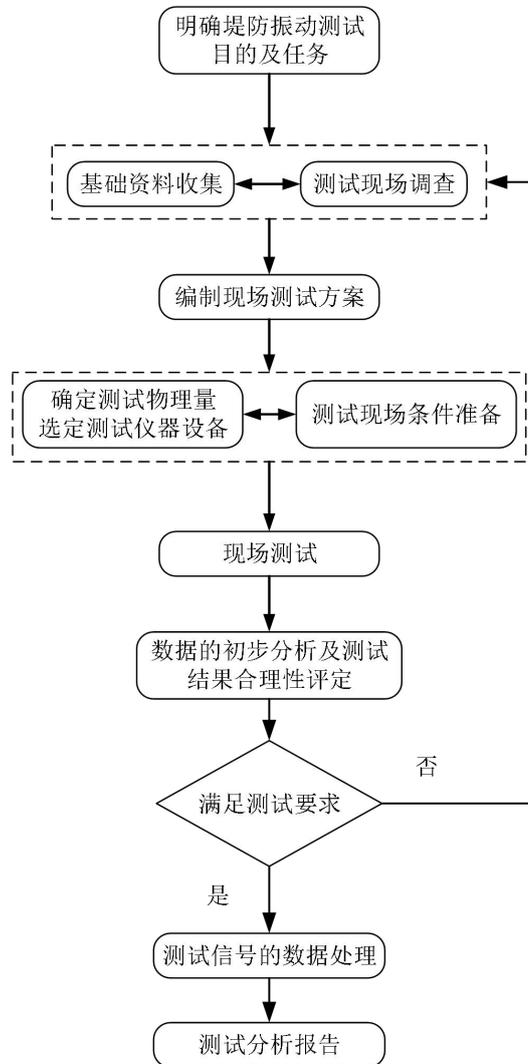


图 A.1 堤防振动测试流程图

**附录 B**  
(资料性)  
**测试信号质量情况对比**

**B.1** 当环境激励稳定时，采集信号一般为平稳随机波动，如图 B.1 所示，应观察采集信号中波形是否平稳。若采集的信号波形中突然出现较大波动，如图 B.2 所示，宜检查测试过程中是否出现人员活动、车辆行驶、机械启闭等人为干扰或强风、降雨等环境干扰，必要时可进行重新测试。

**B.2** 在振动测试中采集到的振动信号数据，若信号出现零点漂移（图 B.3）或基线偏离（图 B.4）等情况时，应检查传感器或放大器是否进行校准或传感器频率范围以及传感器周围是否存在环境干扰等，必要时可进行重新测试。

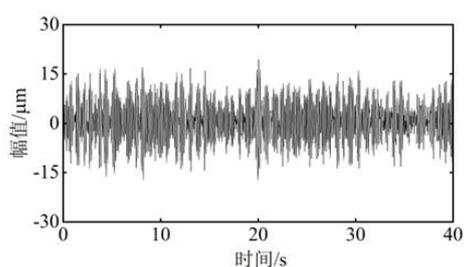


图 B.1 正常平稳随机振动波形

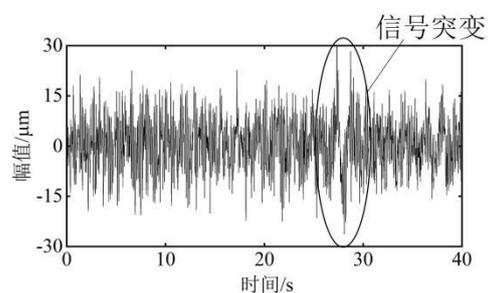


图 B.2 含较强噪声振动波形

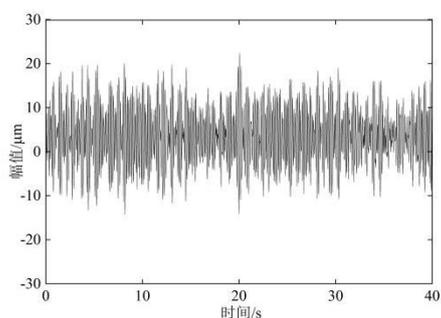


图 B.3 零点漂移振动信号图

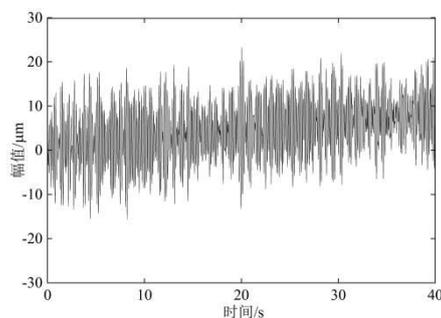


图 B.4 基线漂移振动信号图

附录 C  
(资料性)  
振动测试记录表

振动测试记录表见表 C.1。

表 C.1 振动测试记录表

测试工程名称					
工程地址					
现场天气情况					
测试地点					
仪器设备名称			仪器型号		
测试参数			测量方向		
测点个数			采样频率		
采样时间			振源情况		
检测工况					
数据保存目录及文件名					
测点编号	采集仪通道号	传感器编号	传感器档位	传感器灵敏度	传感器安装位置
测点位置布置示意图					
测试人员			校核人员		测试日期
测试单位:					

**附录 D**  
**(资料性)**  
**振动测试报告编制要求**

- D.1** 测试成果报告由封面、扉页、摘要、目录、正文、资料附录等部分组成。
- D.2** 测试成果报告正文应包含以下内容：
- a) 前言；
  - b) 工程概况；
  - c) 测试依据和基本资料，包括测试目的、测试方法、测试物理量、仪器设备型号及技术指标、测试单位及人员、与测试有关的规程和规范等；
  - d) 测试工况和测点布置；
  - e) 测试信号的数据处理；
  - f) 测试成果与分析；
  - g) 结论和建议；
  - h) 附图和附表。
- D.3** 测试成果报告正文的编写应层次分明、文理清晰、语言通顺、用词准确、用字规范、标点符号正确、信息完整，物理量的单位应采用中国人民共和国法定计量单位，结论应客观、准确、完整、简明扼要。测试成果报告中应附必要的附图、附表和照片等资料。

### 参 考 文 献

- [1] JJG 644 振动位移传感器检定规程.
- [2] 国家档案局 中华人民共和国科学技术部第 15 号令, 科学技术研究档案管理规定.

