



# 团 体 标 准

T/JSCTS 34—2023

## 桥梁动态挠度与索力数字图像法 检测技术规程

Technical code for dynamic displacement and cable force of bridge  
based on digital image inspection

2023-09-01 发布

2023-11-01 实施

江苏省综合交通运输学会 发布  
中国标准出版社 出版

## 目 次

前言 .....	III
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
5 成像设备与操作 .....	3
6 数字图像处理 .....	4
7 动态挠度计算 .....	4
8 索力计算 .....	5
9 报告编制 .....	6
附录 A (资料性) 工程示例 .....	7
附录 B (资料性) 检测工况记录 .....	12

## 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。

本文件由江苏现代工程检测有限公司提出。

本文件由江苏省综合交通运输学会归口。

本文件起草单位：江苏现代路桥有限责任公司、江苏现代工程检测有限公司、南京工业大学。

本文件主要起草人：袁守国、王红祥、李枝军、张建东、余兆宇、刘安军、胡健、马志国、张伊青、谢韦韦、吴岳、李倩、杨琨、周东升、曹玲俊。

# 桥梁动态挠度与索力数字图像法 检测技术规程

## 1 范围

本文件确立了桥梁动态挠度与索力数字图像法检测的基本程序,规定了成像设备与操作、数字图像处理、动态挠度计算、索力计算以及报告编制的要求。

本文件适用于各种类型桥梁的动态挠度与缆索承重桥梁的索力(吊杆力)的数字图像法检测。

## 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 20485.21 振动与冲击传感器校准方法 第 21 部分:振动比较法校准

JJF 1305 线位移传感器校准规范

DGJ32/TJ110 工程结构动力特性及动力响应检测技术规程

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**数字图像 digital image**

以像素为基本元素的、可以用数字计算机或数字电路存储和处理的图像。

### 3.2

**成像设备 imaging device**

由数字相机、镜头等部件组成的满足薄透镜成像原理的设备。

### 3.3

**感光元件 photosensitive element**

将光信号转化成电信号的装置。

### 3.4

**物理分辨率 physical resolution**

相机光学传感器上包含的感光元器件的个数,一般以横纵的乘积表示。

### 3.5

**量测型镜头 measuring lens**

透镜组的排列进行过严格的校正,内方位元素和焦距等光学信息已知的镜头。

### 3.6

**视场 field of view**

相机镜头所能够拍摄到的范围或角度。

3.7

**模板匹配 template matching**

在数字图像处理中,采用预先定义的标准图像模板在目标图像上进行移动搜索,以获取感兴趣目标对象的技术。

3.8

**检测对象 detection object**

数字图像法中需要进行检测的目标对象。

3.9

**特征区域 feature zone**

检测对象上图像灰度值差异明显或图像灰度梯度变化明显的区域。

4 基本规定

4.1 以下条件下宜采用数字图像法检测:

- 1) 难以使用接触式方法检测或检测存在安全隐患;
- 2) 其他传统人工检测方式效率低下;
- 3) 其他传统检测方式难以连续稳定高精度地测量。

4.2 以下条件下不宜采用数字图像法检测:

- 1) 大气流动明显的高温环境;
- 2) 能见度较低的雾霾环境。

4.3 使用数字图像法检测宜考虑相关成像设备、环境、拍摄方式与图像技术参数设置等因素。

4.4 数字图像法检测采集与分析系统由数字图像的采集、处理、位移计算以及信号频谱分析等有关设备和分析软件组成。

4.5 视场大小按照公式(1)计算:

$$FOV = \frac{D \times V}{f} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- FOV —— 视场,单位为米(m);
- D —— 镜头透镜中心到检测对象特征区域距离,单位为米(m);
- V —— 相机靶面型号尺寸,单位为毫米(mm);
- f —— 镜头焦距,单位为毫米(mm)。

4.6 数字图像法检测流程如下,工程示例见附录 A。

- 1) 检测方案制定:包括确定设备摆放位置、成像设备参数与视场大小分析等。
- 2) 数字图像获取:对检测对象进行图像采集,经过成像操作,获取符合要求的数字图像数据。
- 3) 数字图像处理:进行数字图像格式转换,对存在较多噪声的图像进行降噪与梯度增强等处理,确保数字图像数据满足质量和精度要求。
- 4) 进行动态挠度、索力计算。
- 5) 对计算结果进行精度判断。如果不满足要求,调整成像设备参数或数字图像处理参数,重新进行图像获取和处理。
- 6) 检测报告编制。

4.7 位移分辨率是数字图像法能够检测的最小位移量(测量精度),根据位移分辨率要求可选取现场所需镜头焦距、测量距离等参数。位移分辨率按照公式(2)计算:

$$\epsilon = \frac{D \times ps}{k \times f} \dots\dots\dots(2)$$

式中：

$\epsilon$  ——位移分辨率,单位为毫米(mm)；

$D$  ——镜头透镜中心到检测对象特征区域距离,单位为米(m)；

$p_s$  ——像素尺寸,单位为微米( $\mu\text{m}$ )；

$k$  ——亚像素放大倍数,无量纲；

$f$  ——镜头焦距,单位为毫米(mm)。

4.8 不同测量距离的位移分辨率应小于表 1 的测量精度。

表 1 位移分辨率要求

测量距离 $D$ / m	测量精度 / mm
$D \leq 10$	0.01
$10 < D \leq 50$	0.1
$50 < D \leq 300$	2
$300 < D \leq 500$	5
$500 < D \leq 1\ 000$	10

4.9 数字图像采集与分析系统的振动和位移测量精度可按照 GB/T 20485.21 与 JJF 1305 的有关要求进行标定,宜每年标定一次。

## 5 成像设备与操作

### 5.1 成像设备选取

5.1.1 相机选取符合下列规定：

- 1) 可采用黑白工业相机或彩色工业相机,相机接口宜采用 C 接口或 CS 接口；
- 2) 相机曝光时间和采样帧率应满足 DGJ32/TJ110 的有关要求,且其采样帧率不应低于检测对象分析频率的 2.56 倍。

5.1.2 镜头选取符合下列规定。

- 1) 宜选用量测型镜头,若采用非量测型镜头,镜头应满足失真小、可标定、成像清晰的要求。
- 2) 镜头靶面尺寸宜大于或等于感光元件尺寸。
- 3) 镜头的分辨率(解像力)宜大于相机感光元件的物理分辨率。
- 4) 对于动态挠度测量,应选用定焦镜头;对于索力测量,可选用变焦镜头。
- 5) 镜头焦距的选择宜综合考虑视场大小和测量精度要求,可根据公式(3)选取：

$$f \geq \frac{D \times l}{L} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$f$  ——镜头焦距,单位为毫米(mm)；

$D$  ——镜头透镜中心到检测对象特征区域距离,单位为米(m)；

$l$  ——感光元件的对角线距离,单位为毫米(mm)；

$L$  ——视场范围的对角线距离,单位为米(m)。

5.1.3 可采用以下方式提高测量的位移分辨率：

- 1) 更大焦距的镜头；

- 2) 更高物理分辨率的工业相机;
- 3) 缩小检测距离。

## 5.2 成像环境与操作

### 5.2.1 成像环境符合下列规定。

- 1) 宜避免逆光拍摄或太阳光直射成像设备。若逆光拍摄,应设置光源标靶作为特征区域。
- 2) 环境的温度、湿度等应符合成像设备工作要求,必要时可采用防护罩。
- 3) 成像设备应布设在稳固的地面或平台上,避免振动或抖动。成像设备不固定或使用无人机平台时,宜尽量保证稳定,防止抖动。若风力较大,可选用质量较大的抗风三脚架固定成像设备。
- 4) 白天测量时,特征区域宜避免选择光照变化剧烈区域。夜间测量时,检测位置应设置光源作为特征区域,特征区域可选取单色光源。对于单色光源,镜头可外加滤光片以提升特征区域图像的抗干扰能力。

### 5.2.2 图像拍摄符合下列要求。

- 1) 特征区域宜置于图像中心位置。
- 2) 图像数据应完整覆盖检测对象的所有特征区域。
- 3) 相机光轴宜垂直于位移运动方向,当相机光轴不垂直于位移运动方向,应实测倾斜角度并进行角度修正。
- 4) 可通过同时选取多根索的索力特征区域,同步测量多根索的索力。索力特征区域宜选取拉索或吊杆中上部 1/3 处至 1/2 处。

## 6 数字图像处理

### 6.1 技术要求

6.1.1 采集视频文件宜选取 avi 文件格式,视频文件逐帧分解后的图片宜选取 bmp 文件格式。

6.1.2 图像降噪与梯度增强处理符合下列规定。

- 1) 宜综合考虑特征区域和算法适用性,选择合适的算法进行图像降噪与梯度增强。
- 2) 根据图像噪声类型选择适宜的空间域降噪滤波器:椒盐噪声可选择中值滤波器,高斯噪声可选择中值滤波器或均值滤波器。
- 3) 图像中特征区域存在异常像素点或像素点集时,宜将滤波器窗口尺寸选择为  $3 \times 3$  像素到  $15 \times 15$  像素之间。若异常点或点集较小,可选择较小的窗口尺寸,若异常点或点集比较大,可选择较大的窗口尺寸。
- 4) 宜调节图像亮度、对比度、曝光度等参数增强图像明暗视觉效果。

6.1.3 亚像素方法可提高测量分辨率。亚像素插值放大比例可根据实际测量需求选取,一般为 10 倍~100 倍。

### 6.2 质量要求

6.2.1 特征区域灰度值稳定,避免存在较多噪声。

6.2.2 避免镜头畸变造成图像失真。

## 7 动态挠度计算

### 7.1 一般规定

成像设备振动显著时,可选取视场内静止参考测点进行位移消振修正。

## 7.2 位移计算

7.2.1 位移计算可采用模板匹配法和特征点跟踪法。模板匹配法包括零均值归一化互相关匹配(ZNCC)算法、归一化平方差和匹配(NSSD)算法和方向码匹配算法等算法;特征点跟踪法包括加速稳健特征(SURF)算法、二进制稳健独立特征(BRIEF)算法、方向性快速二进制独立特征(ORB)算法等算法。

7.2.2 模板匹配法适用于像素较低的视频图像,鲁棒性较好。特征点跟踪法适用于视频图像像素较高的视频图像。

7.2.3 实际位移计算流程如下。

- 1) 匹配模板范围选定:根据特征区域或特征点选定匹配模板范围。模板框选范围应完整包括特征区域或特征点,模板面积宜为特征区域的 1.5~3 倍。
- 2) 相似评价函数确定:根据测量运算速度与精度需求确定模板匹配相似函数。
- 3) 像素位移求解:通过跟踪前后图像中特征区域的坐标变化获得像素竖向位移。
- 4) 标定系数计算。
- 5) 实际位移量计算。

7.2.4 标定系数按公式(4)计算:

$$\delta = \frac{ps \times D}{f} \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- $\delta$  —— 标定系数,单位为毫米(mm);
- $ps$  —— 像素尺寸,单位为微米( $\mu\text{m}$ );
- $D$  —— 镜头透镜中心到检测对象特征区域距离,单位为米(m);
- $f$  —— 镜头焦距,单位为毫米(mm)。

7.2.5 特征区域实际动态挠度(位移量竖向分量)按公式(5)计算:

$$d_0 = \delta \times d \dots\dots\dots(5)$$

式中:

- $d_0$  —— 特征区域实际动态挠度,单位为毫米(mm);
- $\delta$  —— 标定系数,单位为毫米(mm);
- $d$  —— 像素竖向位移,单位为像素数。

## 8 索力计算

### 8.1 一般规定

可用于斜拉桥拉索、拱桥吊杆、悬索桥吊索的索力计算。

索力计算步骤如下:

- 1) 按 7.2.3 中的 1)~3)使用数字图像法测量拉索特征区域像素位移;
- 2) 对特征区域像素位移进行频谱分析,获取自振频率;
- 3) 根据弦振动理论计算索力。

### 8.2 计算公式

当索构件两端的边界条件可以简化为铰支时,索力按公式(6)计算。

当索构件长细比较大满足弦振动理论要求时,索力可按公式(7)计算。

$$T = 4m (f_n^2/n^2) \cdot L_s^2 - EI\pi^2 (n^2/L_s^2) \dots\dots\dots(6)$$



$$T = 4m (f_n^2/n^2) \cdot L_s^2 \dots\dots\dots(7)$$

式中：

- $T$  ——索构件所受的索力,单位为牛顿(N);
- $m$  ——索构件单位长度的质量,单位为千克(kg);
- $f_n$  ——索构件的第  $n$  阶振动频率,单位为赫兹(Hz),一般取前五阶;
- $n$  ——振动阶次,无量纲;
- $L_s$  ——索构件的长度,单位为米(m);
- $EI$  ——索构件的弯曲刚度,单位为牛顿每米(N/m)。

### 8.3 精度判断

- 8.3.1 第  $n$  阶振动频率与基频应基本符合倍频关系。
- 8.3.2 用不同阶次计算得到的索力误差不大于 5%。

## 9 报告编制

- 9.1 编制的报告应内容全面,重点突出,立论有据,结构严谨,文字简练,图表齐全。
- 9.2 报告内容一般包括:
  - 1) 检测日期;
  - 2) 选用的测试仪器以及检测方法;
  - 3) 检测单位;
  - 4) 数据的整理解释;
  - 5) 结论和建议;
  - 6) 检测工况记录,见附录 B。

## 附录 A

### (资料性)

### 工程示例

#### A.1 概述

采用数字图像法对某大跨桥梁的主梁动态挠度和吊杆索力进行检测。

#### A.2 检测方案制定

##### A.2.1 检测内容

主要检测内容包括：

- 1) 利用数字图像法采集桥梁的动态图像,识别大桥主梁不同位置挠度数据;
- 2) 选取不同位置吊杆进行远程观测,获取吊杆的振动位移响应,并通过振动法识别吊索内力。

测试前,将数字图像采集与分析系统用抗风三脚架架设在稳定的地面上,动态挠度测试目标为主梁跨中和 S59 #吊索位置处,吊杆索力测试目标为靠近边塔位置处吊索。

##### A.2.2 仪器及测量参数选取

主要测试仪器包括高精度工业相机、工业光学镜头、笔记本电脑与抗风支架等,仪器主要技术指标如表 A.1 所示。

表 A.1 仪器主要技术指标

仪器名称	数量	主要技术指标
高精度工业相机	1 只	分辨率:2 048×1 280,像素尺寸:4.8 μm,帧率:20 Hz
工业光学镜头	1 只	焦距:50 mm ;分辨率:500 W
笔记本电脑	1 台	I7 高配笔记本电脑
数字图像采集与分析系统软件	1 套	具备数字图像的采集、处理、位移计算以及信号频谱分析的功能
抗风支架	1 台	—

#### A.3 数字图像获取

桥梁动态挠度与索力数字图像法检测的关键是数字图像的获取与特征区域的选择。图像包含所关注的特征区域,特征选取分为有标靶与无标靶两种情况。

##### A.3.1 有标靶特征区域选取

根据 5.2.1 4),可安装单色光源作为标靶,镜头加装单色滤光片。如图 A.1 所示,由图可看出标靶与其周边有明显的灰度反差,选取该标靶为特征区域进行位移分析。



图 A.1 有标靶特征区域选取

### A.3.2 无标靶特征区域选取

当检测对象未安装标靶时,根据 4.2.1 4),可选取与周边灰度差距较大的自然目标作为特征区域。如图 A.2 所示,选取检测对象上的路灯或者主缆索夹区域作为特征区域,该区域与其周围区域有明显灰度差异,可以较好区分。



a) 选取路灯为特征区域

b) 选取主缆为特征区域

图 A.2 无标靶特征区域选取

## A.4 主梁动态挠度测试与分析

### A.4.1 挠度分析

以主梁 S59# 位置处为例,测点与相机距离  $D$  为 385 m,相机焦距  $f$  为 25 mm,相机像素尺寸  $p_s$  为  $4.8 \mu\text{m}$ 。根据公式(4)可得标定系数为 74。图 A.3 为 S59# 测点 500 s 挠度曲线。

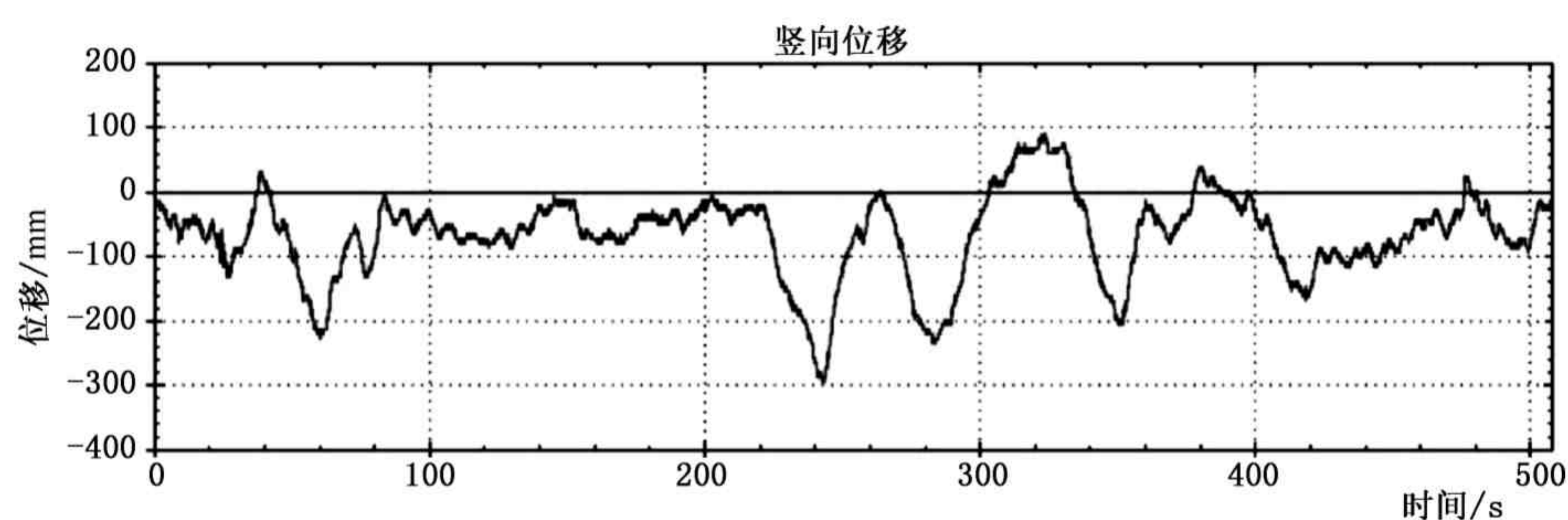


图 A.3 主梁 S59 # 位置处挠度曲线

#### A.4.2 检测结果记录

主梁动态挠度检测结果如表 A.2 所示。

表 A.2 现场动态挠度测试结果记录表

序号	测点位置	距离/m	标定系数	最大挠度/cm
1	S59 #	385	74	25

#### A.5 吊杆索力监测与计算

##### A.5.1 吊索自振频率识别

以该桥下游 S66 # 吊索为例,镜头选用 50 mm 定焦镜头。特征区域选取吊索中间的减震架,有较为明显的灰度反差,如图 A.4 所示。



图 A.4 测点选取

吊索横向位移时程曲线及其振动频谱图如图 A.5 与图 A.6 所示,根据图 A.6 可观察到该吊索自振频率皆为 0.918 Hz。

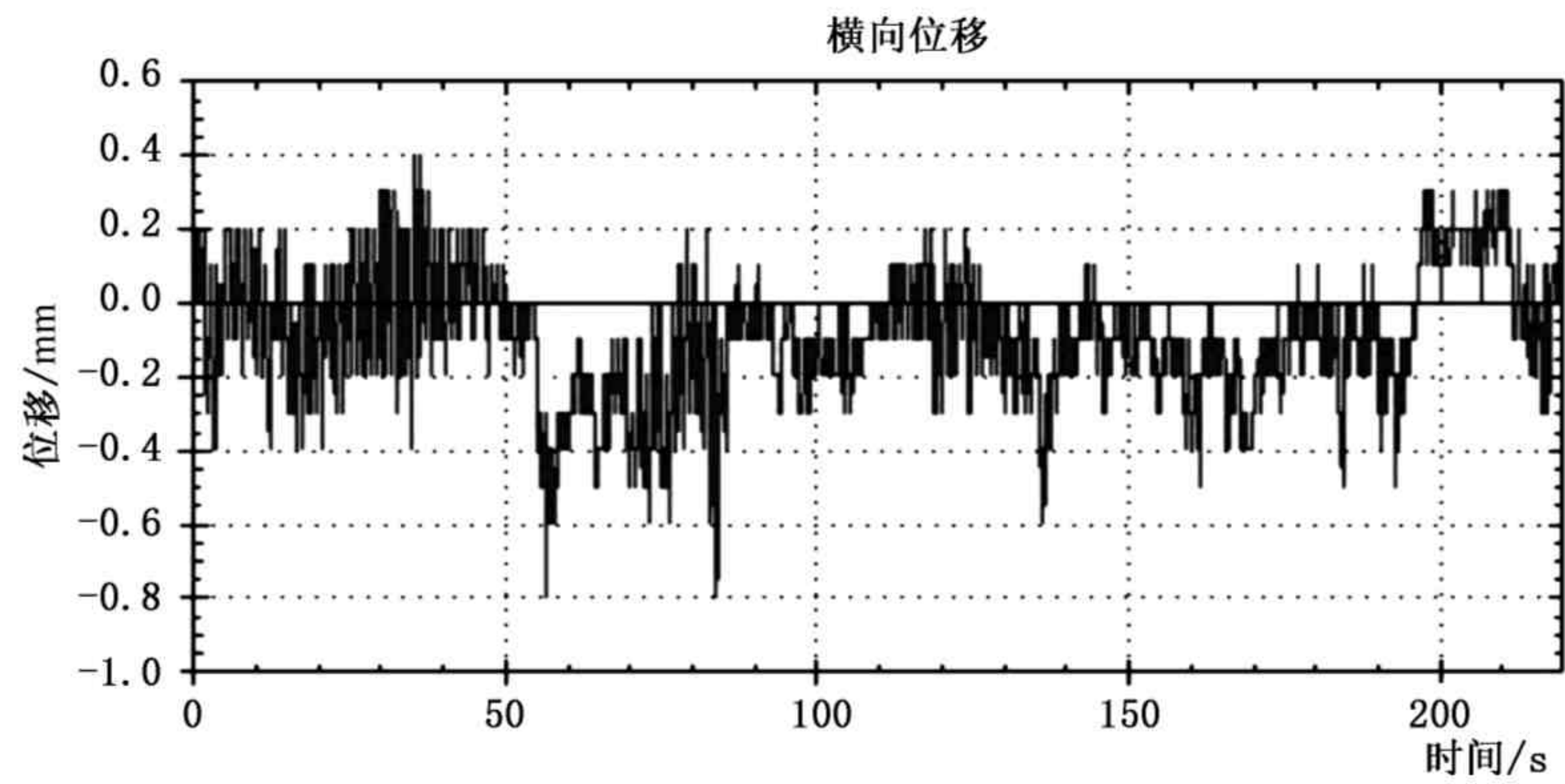


图 A.5 S66 # 下游吊索横向位移时程曲线

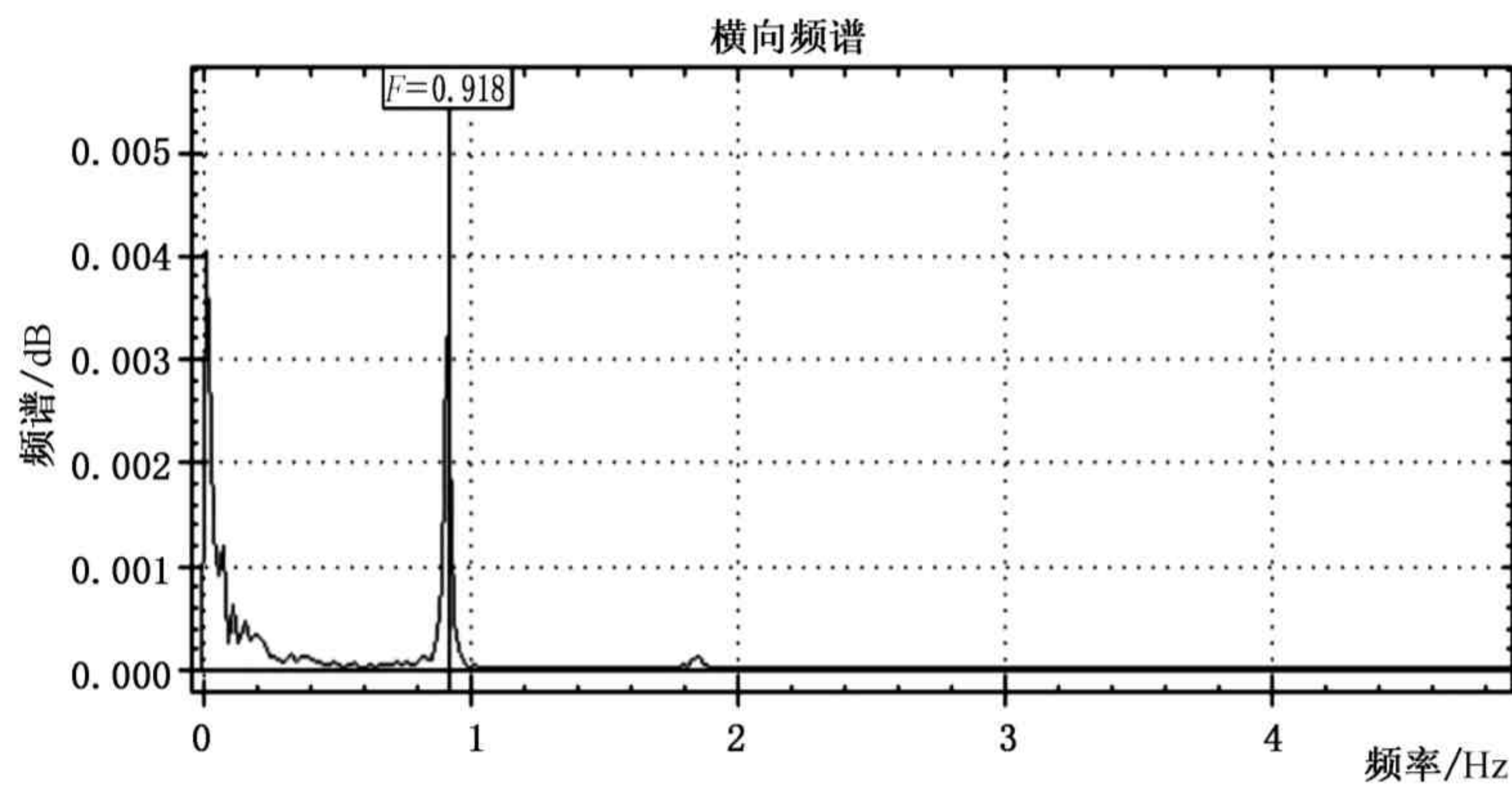


图 A.6 S66 # 下游吊索横向振动频谱图

通过对位移时程分别进行一次与二次差分,得到吊索横向速度以及加速度的振动频谱图,如图 A.7 以及图 A.8 所示,可更直观地观察到吊索的高阶频率。

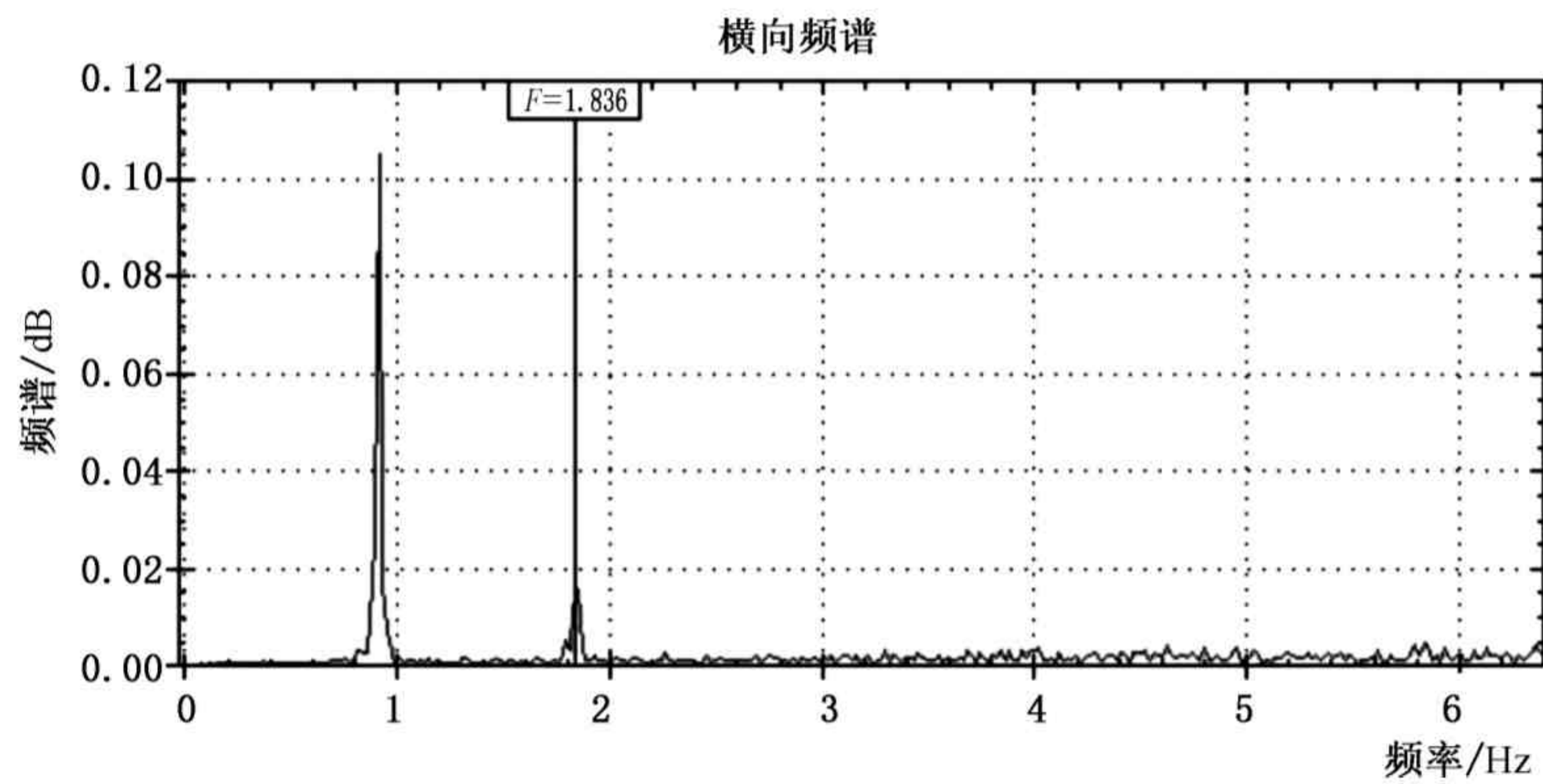


图 A.7 一次差分 S66 # 下游吊索横向速度频谱图

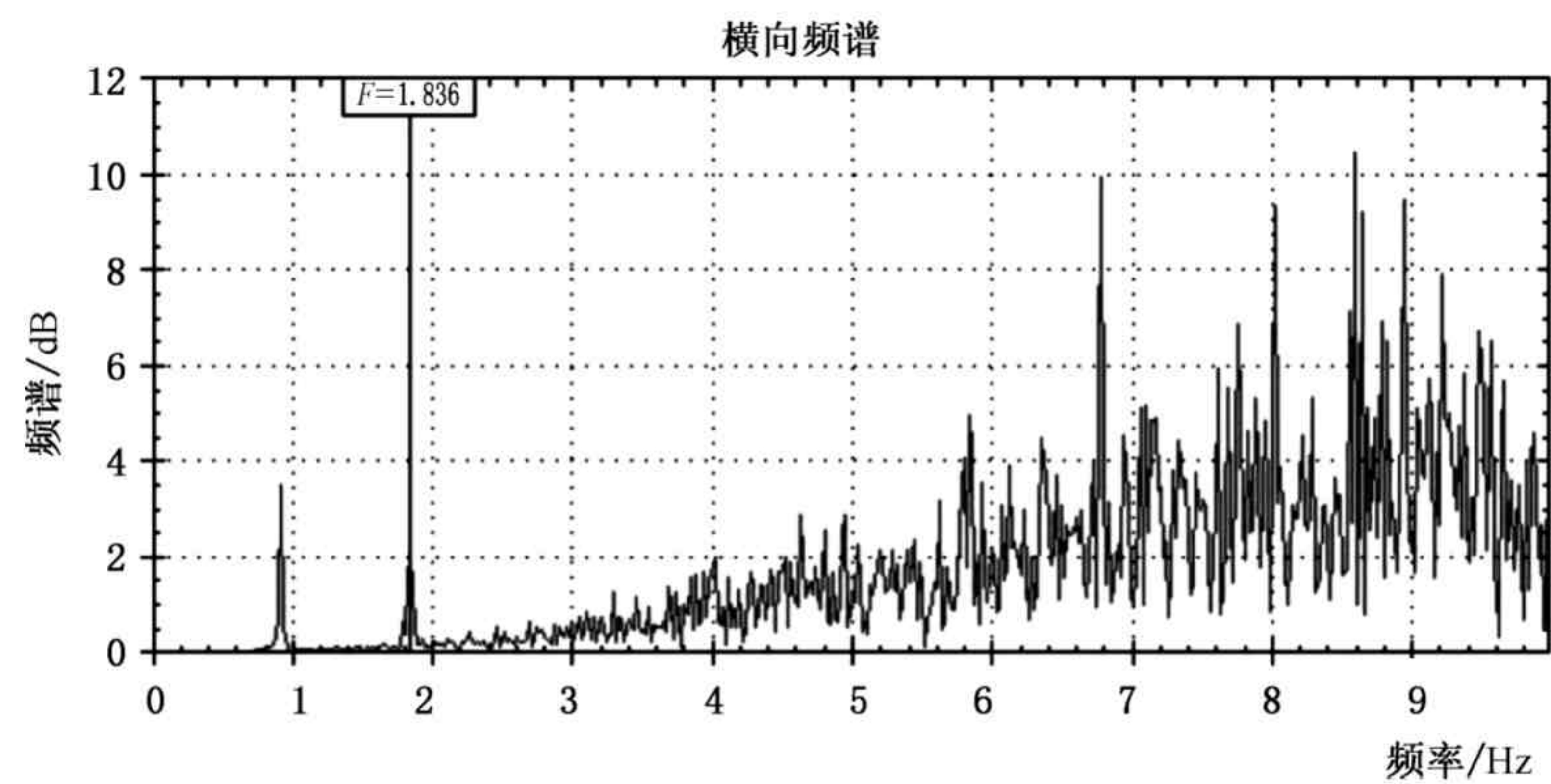


图 A.8 二次差分 S66# 下游吊索横向加速度频谱图

根据图 A.7 与图 A.8 可得到 S66# 吊索一阶自振频率为 0.918 Hz, 二阶自振频率为 1.836 Hz。

#### A.5.2 检测结果记录

根据公式(6)与公式(7)计算获得部分吊索索力如表 A.3 所示。

表 A.3 索力测量计算表

索号	频率/Hz		索长/m	索线密度/(kg/m)	索力/kN
	一阶	二阶			
S66# 下游吊索	0.918	1.836	115.30	24.67	1 105.48
S66# 上游吊索	0.938	1.855	115.31	24.67	1 154.26

**附 录 B**  
(资料性)  
检测工况记录

检测工况记录表见表 B.1.

**表 B.1 检测工况记录表**

桥梁名称		检测单位		检测人	
检测位置		相机倾角		天气状况	
工况序号	测试时间	镜头焦距 mm	测量距离 m	视频文件名称	备注
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					