

涸 11-4 平台结构动态响应监测结果分析*

(涸 11-4 平台原位监测研究之二)

申仲翰 赵 强

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘 要 本文总结了针对涸 11-4 平台一年多时间的应变和加速度监测数据的处理分析工作, 详细介绍了所用的数据处理方法, 给出了应变数据的统计结果及长期分布规律。通过对应变和加速度信号进行频谱分析, 揭示了平台在多种环境条件下的振动特性。

关键词 应变 加速度 数据处理 频谱分析

中图法分类号 O327

1 引 言

为了得到近海平台运行服役期间的实际受力情况并验证现行设计分析方法的合理性, 很多国家的石油公司都对平台进行了长期监测研究。基于同样原因, 中科院海洋工程研究中心与南海西部石油公司也于 1991 年初协议联合开展这方面的工作, 并于 1993 年 12 月至 1994 年 12 月, 成功地对 W 114 生产平台(A 平台)进行了连续监测, 持续获得了有关平台结构应变, 加速度响应及环境参数等多种数据, 掌握了大量的第一手材料。

文章中总结了对应变、加速度数据所进行的后期处理情况, 给出了分析结果。

对监测信号的一般情况进行了介绍, 讨论了这些信号的特点及对其采用的一整套处理方法, 包括数据的预处理, 统计分析和频谱分析方法, 最后分别对各种结果进行了分析说明。

2 监测数据处理

平台结构动态响应监测的主要项目包括 48 个通道的应变测试, 10 个通道的加速度监测以及风、浪的环境参数测量。

2.1 记录信号的一般情况

2.1.1 应变数据

通过对记录到的应变信号进行显示, 发现各通道信号均属连续变化的随机波动信号, 交

* 申仲翰 男 58 岁 研究员
赵 强 男 32 岁 硕 士

替出现波峰波谷,波动的幅度随记录通道以及记录时刻的不同有较大的差异,且信号波动幅度的大小与波浪的大小有一定的对应关系。波动呈现出一定的周期性,主要周期一般在 3 至 7 秒之间。波形变化随机性较大,但在同一次记录的不同通道中可以发现相似的波形。

经大量观察发现,几乎所有通道的信号中都存在有一些“离散噪音点”。对这种来源不明的噪音要在常规数据处理进行之前加以识别和剔除,以保证结果的精度。

2.1.2 加速度信号

加速度信号显示出更为复杂的波动形式,由于其采样频率较高,一般在每秒 200 或 250 次,少数高达 1000 次,所以高频噪音成分较大,需经频谱分析及数值滤波处理方能抽取所需的信息。

2.2 数据处理原理与方法

针对应变数据信号的特有状况,需要建立识别离散噪音点的有效方法,并在识别的基础上,将其一一删除,以保证后续统计计算的准确性。

由于加速度信号中高频噪音成分较大,需要首先进行频谱分析,搞清各种频率成分的比重,并进行低通数值滤波,去除高频干扰信号,提取出有用的信息。

同时,还可以对应变信号进行谱分析,以比较应变、加速度以及同时由监测获得的近场波高频谱之间的关系,加深对各种记录信号内在联系的研究。

2.2.1 离散噪音点的删除

在我们采集到的应变测试数据中,具有一些掺加于主信号上的噪声点,对此,可通过使用时间增量步进方法将噪声点逐步调整删除,并将主信号完整地保留下来,详细情况可参见文献[1]。

2.2.2 信号的统计分析

删去离散噪音点之后得到了正常的应变信号,接下来将对这些信号进行常规的统计分析

统计的内容包括各组记录数据中各通道信号的最大值,最小值,平均值及均方根值,第 j 通道各统计量为

$$S_{\max}^j = \max(S_i^j), \quad i = 1, 2, \dots, L \cdot EN \quad (1)$$

$$S_{\min}^j = \min(S_i^j), \quad i = 1, 2, \dots, L \cdot EN \quad (2)$$

$$S_{\text{AVE}}^j = \frac{1}{L \cdot EN} \sum_{i=1}^{L \cdot EN} (S_i^j) \quad (3)$$

$$S_{\text{RMS}}^j = \sqrt{\frac{1}{L \cdot EN} \sum_{i=1}^{L \cdot EN} (S_i^j - S_{\text{AVE}}^j)^2} \quad (4)$$

为准确地定量刻划各通道信号波动的幅度,可以采用两个统计量,一是信号的最大波动幅度 A ,它是信号最大值与最小值之差,即

$$A^j = S_{\max}^j - S_{\min}^j$$

另一个是信号的均方根值 S_{RMS}^j 。由于 RMS 值反映出统计样本对于样本均值的偏差程度,因而也就反映出在所监测的时域内应变信号波动的平均程度。

2.2.3 基于频谱分析的信号处理方法

所测得的应变、加速度(以及波高信号)均为随机波动信号,所以必须建立对信号进行频

谱分析的方法, 比较各种信号频率组成的异同, 加深对信号的理解; 同时还要在此基础上建立数值滤波工具, 以便从高频干扰的信号中提取出有用信息。此外, 还需利用加速度的频谱信息进行数值积分, 以得到位移响应的信息。

为了利用谱分析技术处理应变和加速度信号, 这里采用了快速富氏变换(FFT)的方法^[2], 并因篇幅所限而省略了基本算法的讨论, 只针对功率谱、数值积分与数值滤波方法的使用作简单说明。

1. 功率谱

为观察信号中各频率成分贡献的大小, 需要从离散富氏级数 $F(n)$ 计算出信号的功率谱, 由于离散富氏级数 $F(n)$ 的对称性, 功率谱可以用下式求出。

$$P(n) = \begin{cases} F(n) * \overline{F(n)} & n = 0, N/2 \\ 2(F(n) * \overline{F(n)}) & n = 1, 2, \dots, N/2 - 1 \end{cases} \quad (5)$$

这里符号“—”表示共轭, 根据 Nyquist 频率的特性可知, 第 0 条谱线对应零频, 第 $N/2$ 条谱线所对应的频率即为采样频率 f_s 的一半, 于是第 n 条谱线对应的频率

$$f_n = n \cdot \frac{f_s}{N} \quad (6)$$

由于极低频(包括零频)对应的谱值很高, 但实际意义不大, 并且已经影响到对其它频谱的显示与分析, 因此在波高处理中, 可不考虑周期大于 20 秒的波浪成分。由于波浪是对平台结构影响最大的环境因素, 而平台上其它运行设备的激励也不会有极低频的成分, 故在计算功率谱时, 把频率小于等于 0.05Hz 的谱值均置为 0, 这样的处理并不影响所得谱值的意义。

2. 数值滤波

实现对监测信号的数值滤波, 有多种方法可以选择, 由于已经对信号进行了 FFT, 所以, 这里选择了频域滤波的方法, 实现的步骤如下。

(1) 低通数值滤波器的设计

根据需要, 选择截止频率 f_1 , 滤去频率高于 f_1 的所有成分, 以提取出有用的信息。为避免 Gibbs 现象对滤波效果的影响, 还要选择一个频率 f_2 , 将 $[f_1, f_2]$ 做为一个过渡带, 使 $H(f)$ 由 1 连续地递变(而不是“跃变”)到 0, 并保证它在 f_1, f_2 处具有一阶光滑性。这种滤波器通常被称为镶边理想低通滤波器。

在采用余弦函数为镶边函数时, 滤波器的频谱为

$$H(f) = \begin{cases} 1, & f < f_1 \\ \frac{1}{2} (1 + \cos \frac{f - f_2}{f_1 - f_2} \pi), & f_1 < f < f_2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

(2) 滤波器频谱的离散化

即将上述连续谱 $H(f)$ 离散化为 H_m , $m = 0, 1, \dots, N - 1$ 且

$$H_m = H(f_m), \quad m = 0, 1, \dots, N - 1$$

由于 $H(f)$ 是在 $[0, \frac{f_s}{2}]$ 上给出的, 所以对应于负频率 $(-\frac{f_s}{2}, 0)$ 的谱值需要根据频谱函数的对称性得到如下形式

$$H_m = \begin{cases} H(f_m), & 0 \leq m \leq \frac{N}{2} \\ H_{N-m}, & \frac{N}{2} < m \leq N-1 \end{cases} \quad (8)$$

其中 f_m 即为进行 FFT 时的离散化频率

$$f_m = m \cdot \left(\frac{f_s}{N}\right)$$

(3) 频域滤波及反变换出时域信号

将离散频谱 H_m 与信号谱 X_m 相乘, 得 $Y_m = H_m \cdot X_m$, 再对 Y_m 进行反变换 IFFT, 得到 $y_n, n = 0, 1, \dots, N-1$, 即为滤波后的时域信号。

3 数值积分

由于对信号进行了 FFT, 故可以根据频谱的时域微分特性, 实现对加速度信号的数值积分, 得到相应的位移结果。连续信号 $x(t)$ 的频谱为 $X(f)$, 则 $\frac{d^n x}{dt^n}$ 的频谱为 $(2\pi i f)^n X(f)$, 离散信号频谱也有同样的关系。

如上所述, 处理中已经消去了 $|f| \geq 0.05\text{Hz}$ 的频谱, 故在已知加速度频谱 A_m 时可以依据上述关系求得位移信号的频谱

$$D_m = \begin{cases} \frac{-1}{4\pi^2 f_m^2} \cdot A_m, & m = m_0, \dots, N/2 \\ \overline{D}_{N-m}, & m = N/2 + 1, N/2 + 2, \dots, N-m \end{cases} \quad (9)$$

对 D_m 进行 IFFT, 即可得到相应的位移响应。

值得提到的是, 由于 $\frac{1}{4\pi^2 f_m^2}$ 的存在, 高频信号的贡献已经很小, 不需要使用滤波后的频谱进行计算。

3 监测结果及分析

通过对应变、加速度监测数据作统计处理及频谱分析, 可得出一系列有重要价值的结果。它揭示了应变随时间变化的规律, 以及应变与风浪流等环境条件变化之间的内在联系, 从而给出整个监测过程中平台结构测点处应力的变化情况, 以及最大应力的出现时间和幅值, 下面结合典型实例作一说明。

3.1 应变监测

图 1 所示为一典型的应变随时间变化的曲线, 它直接反应出导管架前缘测点在不同时期的受力水平。同时还给出了应变与同步记录的风速之间的相关性, 大量监测数据表明, 相关系数在 0.54~0.96 之间。正常环境条件下的各点最大应变值可达 30~60 $\mu\epsilon$ (微应变)。

应变信号的功率谱分析表明, 其频谱主要集中在 1Hz 以下的低频段 (见图 2), 中心频率为 0.15Hz, 与当时的波浪频率基本一致。这表明在自然环境条件下, 导管架结构应变的产生主要是波浪力推动的结果; 与平台的固有频率关系不大。也就是说, 不存在明显的动响应放大作用。

在拖轮与平台相碰撞的条件下, 应变监测结果则与上述有很大不同, 首先是应变增量

大, 一般均在 $100\mu\epsilon$ 以上, 而且中心频率将转移到 1Hz 左右, 撞击过后, 峰值很快降到撞击前的水平, 撞击时的结构动态应变是以平台结构基频为主的动态响应造成的。

3.2 加速度监测

对于加速度的监测, 共设置了 5 个测点, 每点沿 x (平台的长轴方向) 和 y (平台的短轴方向) 两个水平方向分别进行测试, 现以典型测点的结果为代表作分析说明。

图 3 所示为顶层甲板角点 a_8 (图 4) 的 y 向加速度频谱曲线, 其为自然环境条件激励下的监测结果, 曲线表明平台的主要振动频率为 1Hz 和 1.4Hz 。

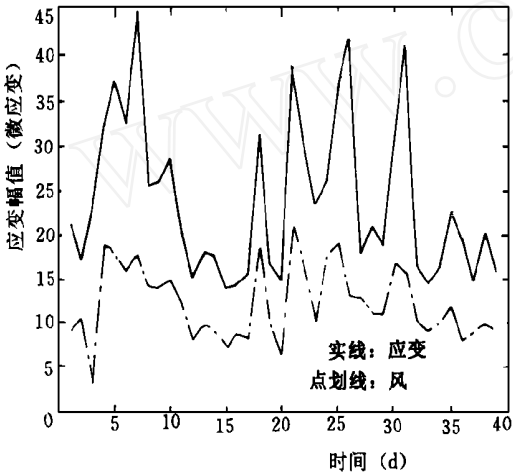


图 1 应变随时间分布图

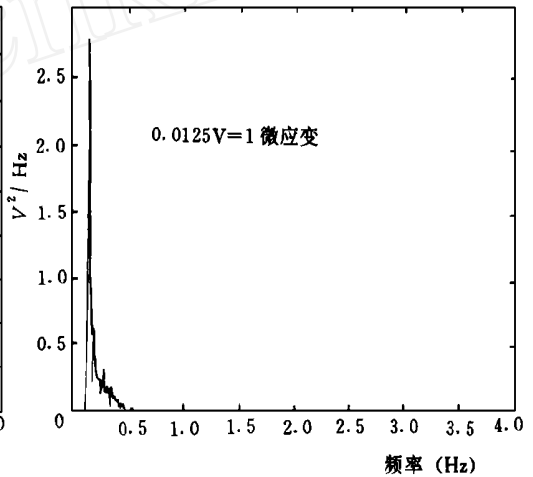


图 2 应变功率谱图

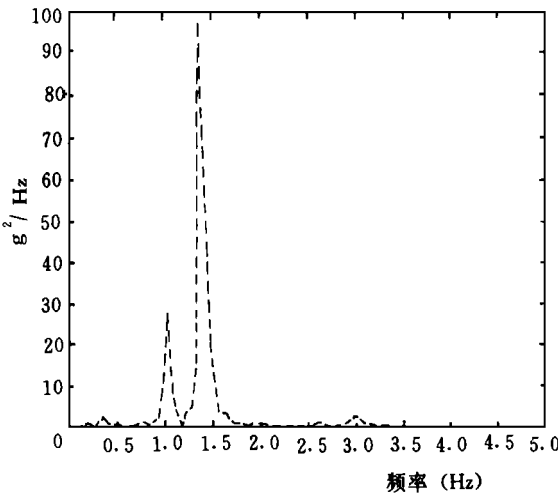


图 3 平台加速度频谱曲线

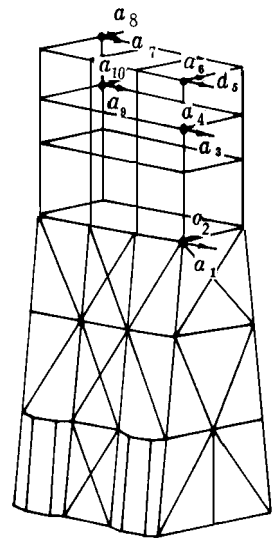


图 4 加速度计布置示意图

3.3 结果分析

3.3.1 应变响应的时间分布规律

通过大量分析发现,各通道应变信号的幅值均未超过 $100\mu\epsilon$,而在各月份的应变记录中,响应水平较高的通道又都有 $50\mu\epsilon$ 的信号,而且各月份的最大应变值相当接近。联系到应变与风速的相关性,在风速的监测记录中也发现有类似的现象,即整个监测期间未发现 23m/s 以上的风速,而 20m/s 左右的风速,则每月都有。

3.3.2 平台固有频率

通过对加速度信号进行谱分析,得到平台 x 方向(长轴方向)一阶弯曲频率为 0.97Hz ,平台 y 方向(短轴方向)一阶弯曲频率为 1Hz ,平台一阶扭转频率为 1.37Hz ,并推算出与 0.97Hz 对应的模态阻尼为 0.016 。

3.3.3 热点与应力集中

通过对几组双片数据的分析可发现,在相邻两片,总是距焊趾较近的应变测值较大,利用线性外推可得出焊趾处的应变值,由此可得出实际的热点应力。

4 结 论

1 针对海洋平台应力与加速度监测结果的特殊性,建立了一套行之有效的数据处理方法和软件系统,它包括两项主要功能,一是消除信号中属于非测量成分的各种噪声,二是对消噪后的监测信号进行分析处理,按最大值、最小值、平均值、最大峰峰值、均方根值及功率谱等形式给出最终的测量结果;除此之外,还通过动态数据处理给出平台的基本频率及结构阻尼。

2 经过对监测结果的分析可知,应变的变化周期和波浪周期大致相等,约为 $3\sim 7$ 秒。它比结构的基本自振周期大得多,说明在波流载荷作用下,平台结构应变的动态放大因素很小。

3 应变与风速存在着很好的相关性。由于波浪是作用在结构上的最大的载荷来源,它是引起交替变化动态应变的主要因素,而较高的波浪又是由确定方向上的大风长期作用的结果,所以应变与风速之间的相关性是符合客观规律的。

4 平台上部结构的加速度测量反映了平台结构的整体运动,其变化周期小于波浪周期,而与平台结构的基本固有周期相近,由此可测知平台的三个明显的基本频率,即 0.97Hz , 1Hz 和 1.37Hz 。

5 通过对几组双片数据的分析发现,近焊趾的应变测值比远者为大,从而可通过外推求得焊趾处的应力集中情况。

6 从平台受到拖轮撞击条件下之监测结果可知,应变的峰能周期约为 1 秒,且呈陡然增大,迅速衰减的趋势,说明此时应变响应以结构的基频振动为主。

参考文献

- 1 申仲翰, 赵强 “涸 11-4 平台应变和加速度监测数据处理与结构分析研究报告” 中国科学院力学研究所研究报告, 1995. 6.
- 2 程乾生, 信号数字处理的数学原理, 石油工业出版社, 1979. 7.
- 3 申仲翰, 李禾, 薛以年, 王丹峰 “涸 11-4 平台综合强度监测技术及实施运行系统” 《海洋工程》1997(2).

THE ANALYSIS OF MONITORING RESULTS OF DYNAMIC RESPONSE FOR W-11-4 PLATFORM STRUCTURE

Shen Zhonghan Zhao Qiang

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract This paper summarizes the work of the data treatment and analysis of strain and acceleration of W-11-4 platform. These data have been obtained by monitoring for one year. The method of data treatment has been introduced in detail. The statistical results and long-term distribution of the strain data are given. By the frequency spectrum analysis of strain and acceleration, the vibration characteristics of the platform under several environment condition have been explained.

Key Words strain, acceleration, data treatment, frequency spectrum analysis