



# 厦门诺尔起重机动刚度测试报告



北京万博振通检测技术有限公司

2012-4-20

测试人员： 陈梓君 张惠



## 1、测试目的与要求

岸边集装箱起重机的动刚度测试。

起重机在起吊、卸载以及突然起制动过程中,均会引起冲击动载,使其产生一定振幅和一定时间的衰减振动。起重机对动刚度的要求主要是为了控制由于冲击动载所引起的振幅和振动的衰减时间。由于起重机结构、材质等因素的不同,阻尼比在一个较大范围内进行变化,而且难以进行理论估计,这就给直接计算动刚度带来了困难。 , *钢结构的阻尼比一般在0.01—0.02之间 (单层钢结构厂房可取0.05)*

由于  $k = m\omega_n^2$ ,  $\omega_n = 2\pi f_n$ , 则式(4)可变为

$$K_d = 8\pi^2 \xi m f_n^2 \quad (5)$$

另外,对于自振频率为  $f_n$ , 阻尼比为  $\xi$  的一阶自由度系统,其振幅由最大值  $X_0$  衰减到  $X_n$  所需的时间  $T$  为

$$T = \frac{1}{2\pi \xi f_n} \ln \frac{X_0}{X_n} \quad (6)$$



若假定阻尼、结构质量为常数,则动刚度与结构自振频率  $f_n$  成正比,而振动的衰减时间则与结构自振频率  $f_n$  成反比,即  $f_n$  越小,衰减时间越长;  $f_n$  越大,衰减时间越短。正是基于这一原因,起重机动刚度用结构的自振频率来衡量,这是起重机动刚度区别于一般机械结构动刚度的特殊之处。

JB/ZQ8001-89《通用桥式起重机产品质量分等》中,要求动刚度 $\geq 2\text{Hz}$ ,并制定了相应的测试方法。

起重机动刚度的测试,实际上就是测试起重机在规定方向上的自振频率。对于不同类型的起重机,在不同方向上动刚度的大小,相应的标准中均有具体规定。另外,标准中还规定了测量动刚度的具体条件,如桥式起重机垂直方向上动刚度的测量,要求小车在跨中位置,吊重为额定载荷。

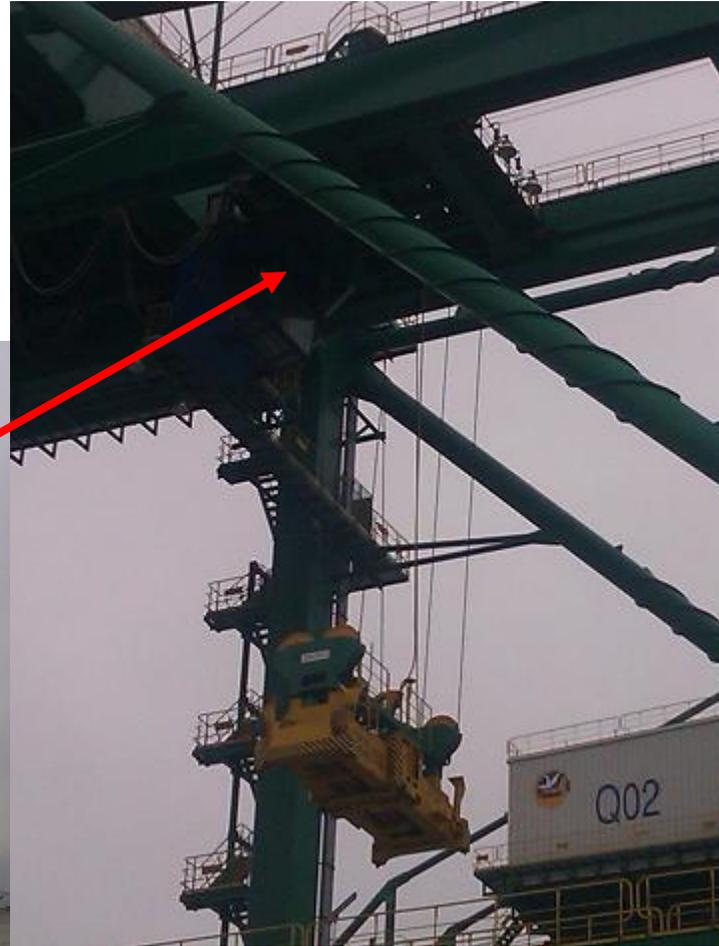
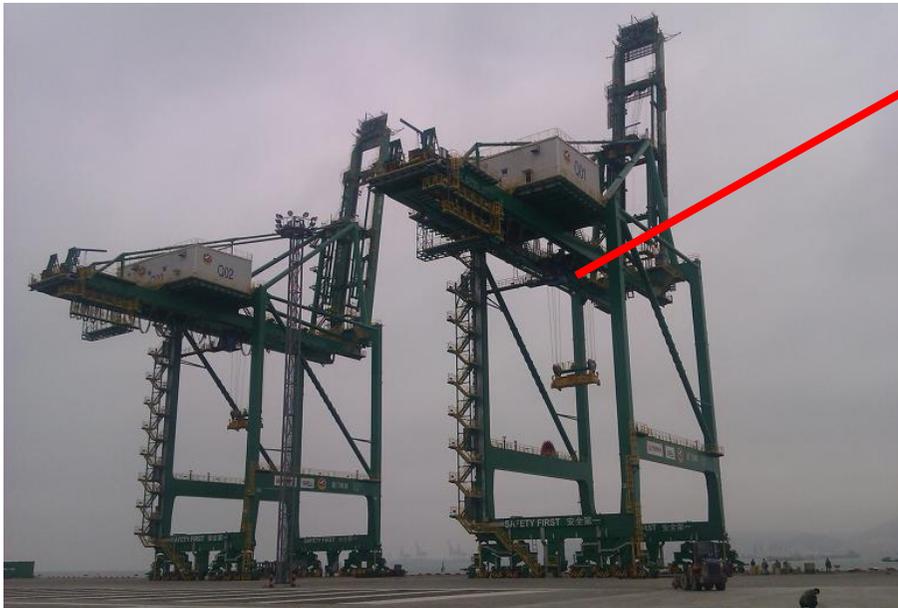


## 2、测试对象：

诺尔起重机型号：Model I STS DB HSK 65/75

质量 1400 吨

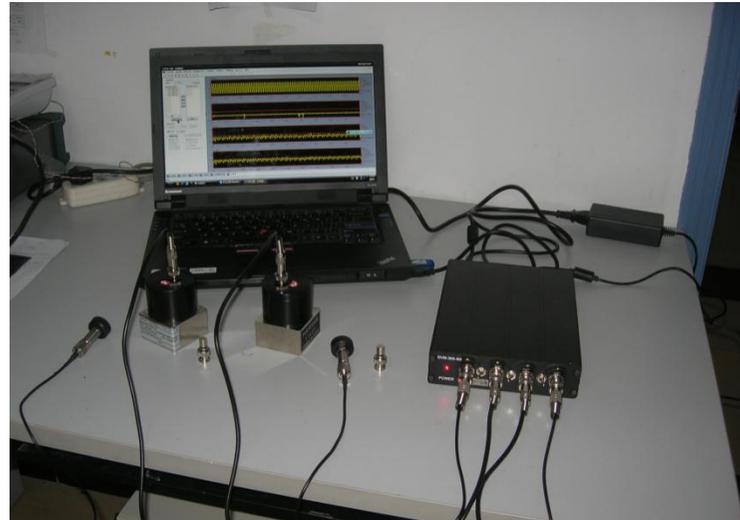
额定载荷 65 吨





### 3、测试工具：

#### 1、BVM-300-4M 四通道动态信号与模态分析仪



#### 主要技术指标

- 1) 通道数：4 通道；
- 2) 采样频率（每通道独立 A/D）： 64kHz
- 3) A/D 精度： 24 位



- 4) 动态范围: 109dBfs
- 5) 调理类型: 程控放大、抗混叠滤波
- 6) 程控增益:  $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1000$
- 7) 数字信号处理: TI 200MHz 浮点 DSP
- 8) 滤波衰减率  $>140\text{dB/oct}$ ; 滤波档位: 自由设定
- 9) 频率误差: 0.01%;
- 10) 幅值误差: 1.0%;
- 11) 噪声:  $\leq 0.5\text{mVRMS}$  (增益一倍);
- 12) 各通道间并行无时差采集。
- 13) 传输接口: USB2.0
- 14) 体积:  $L \times W \times H = 220 \times 157 \times 40$  (mm)
- 15) 重量: 1kg;



16) 功耗:  $\approx 10W$ ; 直流 (5V,  $\leq 2A$ );

### 3、超低频速度传感器: 941B, 频率范围: 0.1-100Hz.

941B 型拾振器主要技术指标

表 1

技术指标		档位	1	2	3	4
		参量	加速度	小速度	中速度	大速度
灵敏度 ( $\frac{V \cdot s^2}{m}$ 或 $V \cdot s/m$ )			0.3	23	2.4	0.8
最 大 程 量	加速度 ( $m/s^2, 0-p$ )		20			
	速 度 ( $m/s, 0-p$ )			0.125	0.3	0.6
	位 移 ( $mm, 0-p$ )			20	200	500
通频带 ( $Hz, \begin{matrix} +1 \\ -3 \end{matrix} dB$ )			0.25~80	1~100	0.25~100	0.17~100
输出负荷电阻 ( $k\Omega$ )			1000	1000	1000	1000
与 941 型 放大器配	加速度 ( $m/s^2$ )		$5 \times 10^{-6}$			
	速 度 ( $m/s$ )			$4 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-6}$





接后的分 辨率	位 移 (m)		$4 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-6}$
尺寸, 重量		63×63×80mm , 1kg			

#### 4、力锤。



测试参数:

量程: 100KN      灵敏度: 3.52pC/N      线性度: 0.88%F · S

重复性:  $\leq 1\% F \cdot S$     固有频率:  $\geq 40\text{kHz}$     绝缘电阻:  $\geq 10^{12}\Omega$

重量: 100gm



#### 4、测试方法：

##### 测试方法：

A 在满负荷下四种工况测三个方向的振动速度响应从而得到固有频率即动刚度参数。

1 上升急刹

2 下降急刹

3 前进急刹

4 后退急刹

B 敲击响应测试固有频率。



## 5、测试过程

**测试地点：** 中国。厦门嵩屿码头。

**测试时间：** 2012-4-16

**测试环境参数：**

环境温度 20 摄氏度，

测试点在吊车的操作室，结构钢架处。此处的结构刚度大，满足对小车动刚度的测试要求。



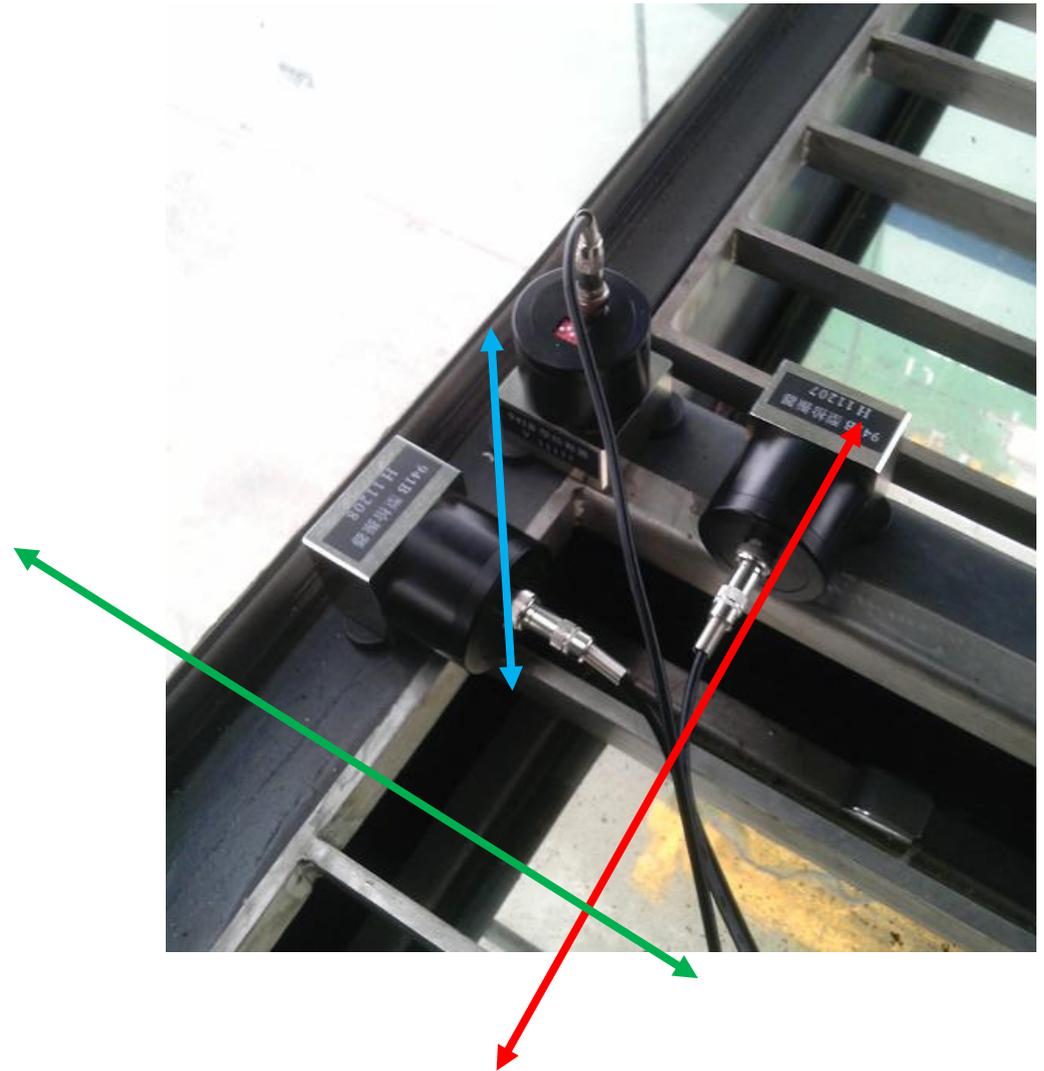
测点布置图：

设小车运行方向为纵向，则：

横向水平设为通道 1，为绿色。

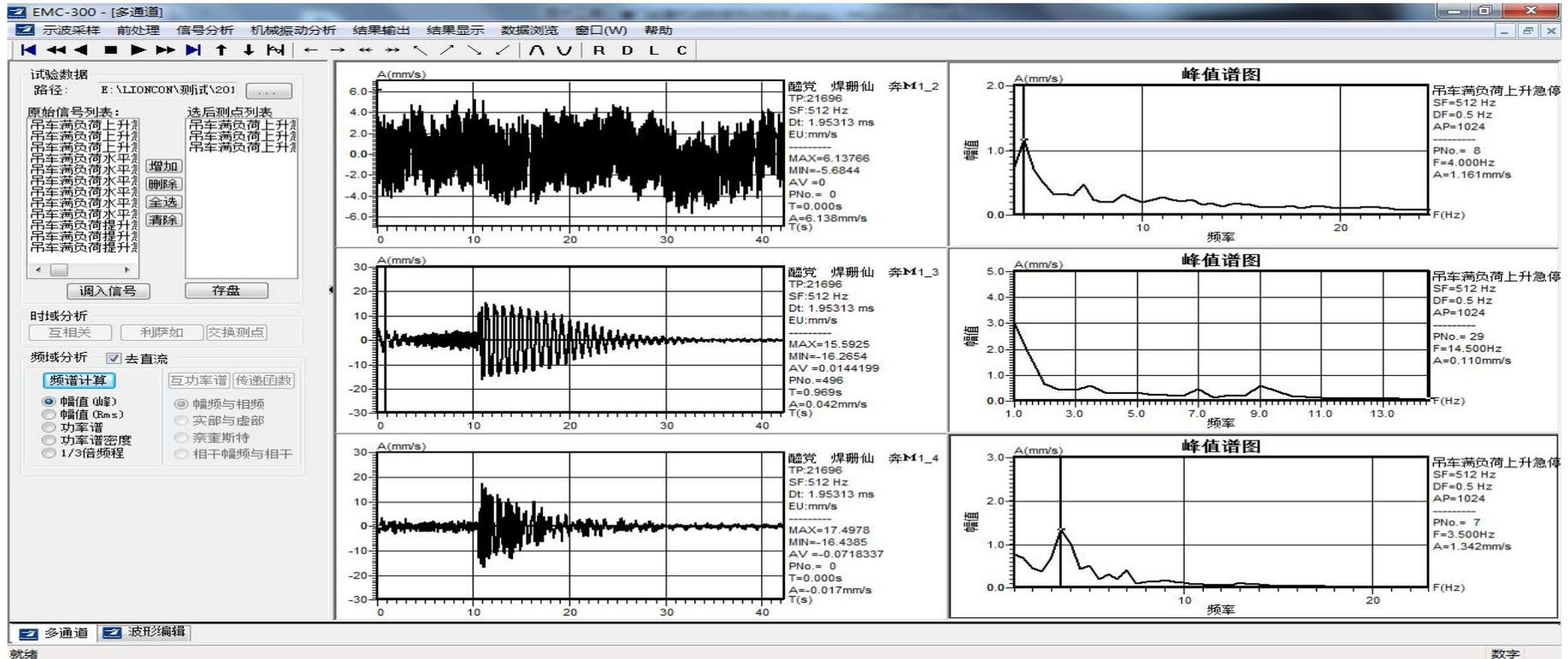
垂直向设为通道 2，为蓝色。

纵向水平设为通道 3，为红色。

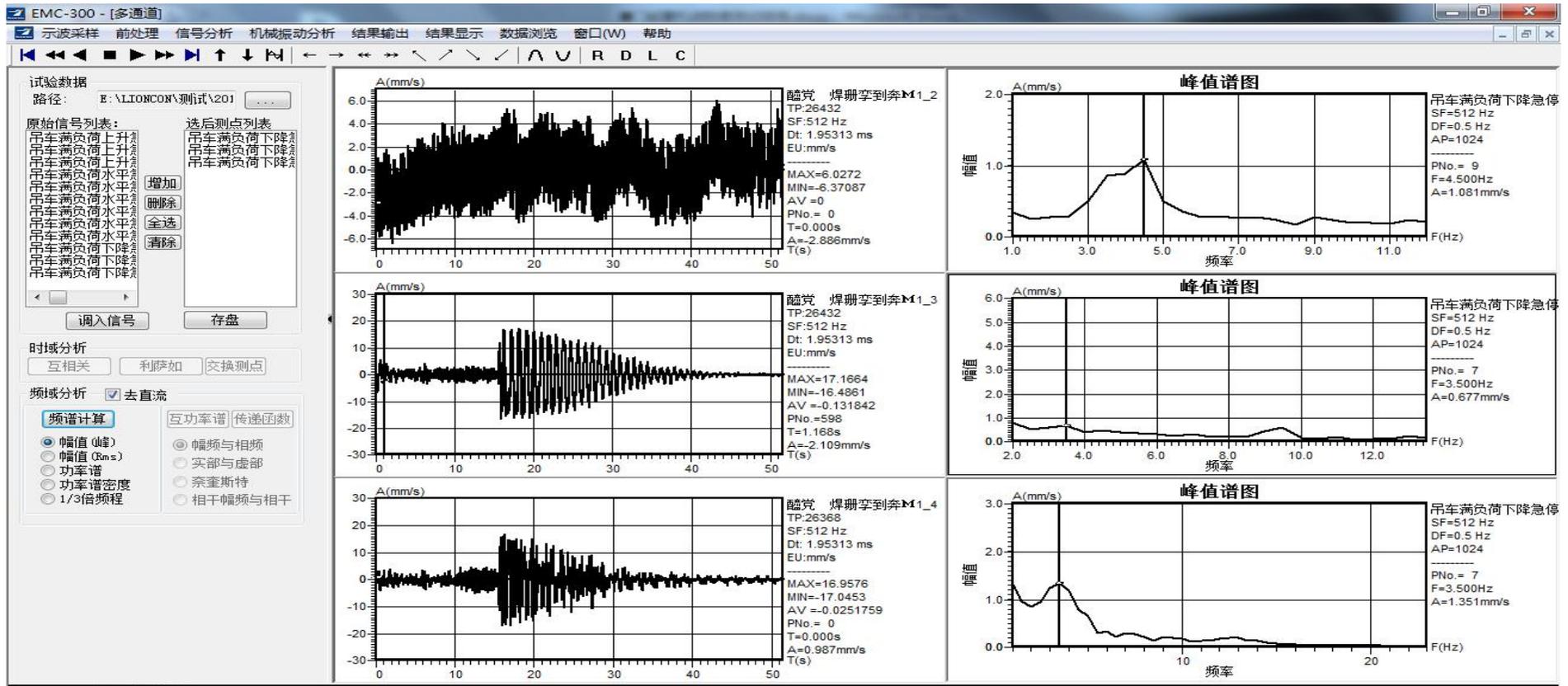




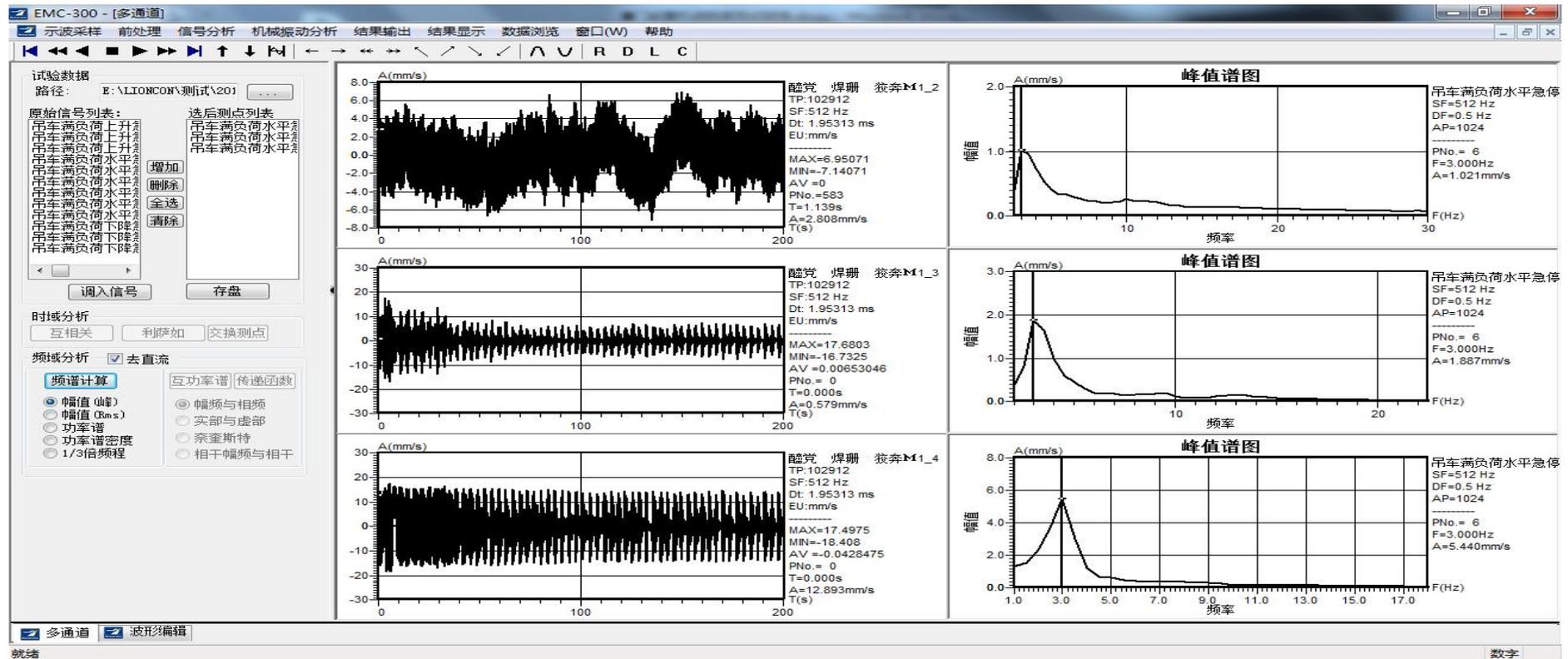
## 6、测试数据:



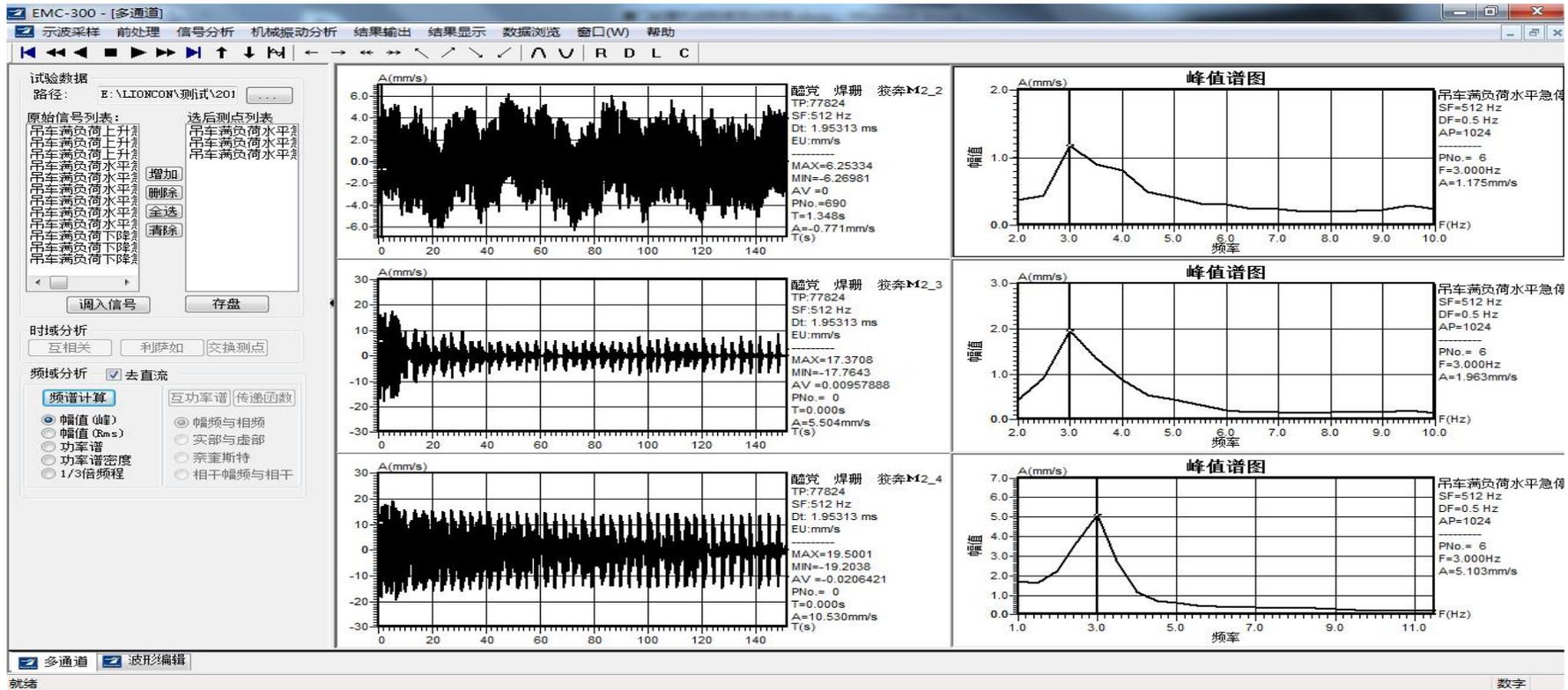
满负荷上升急停小车运动方向固有频率 3.5 赫兹，垂直方向低频成分多，径向响应不明显 但是频谱图还是能看到 4 赫兹的最高频率成分。



满负荷下降急停，时域波形与上升急停基本一致，频谱图显示轴向和径向垂直最大的频率成分在 3.5 赫兹。



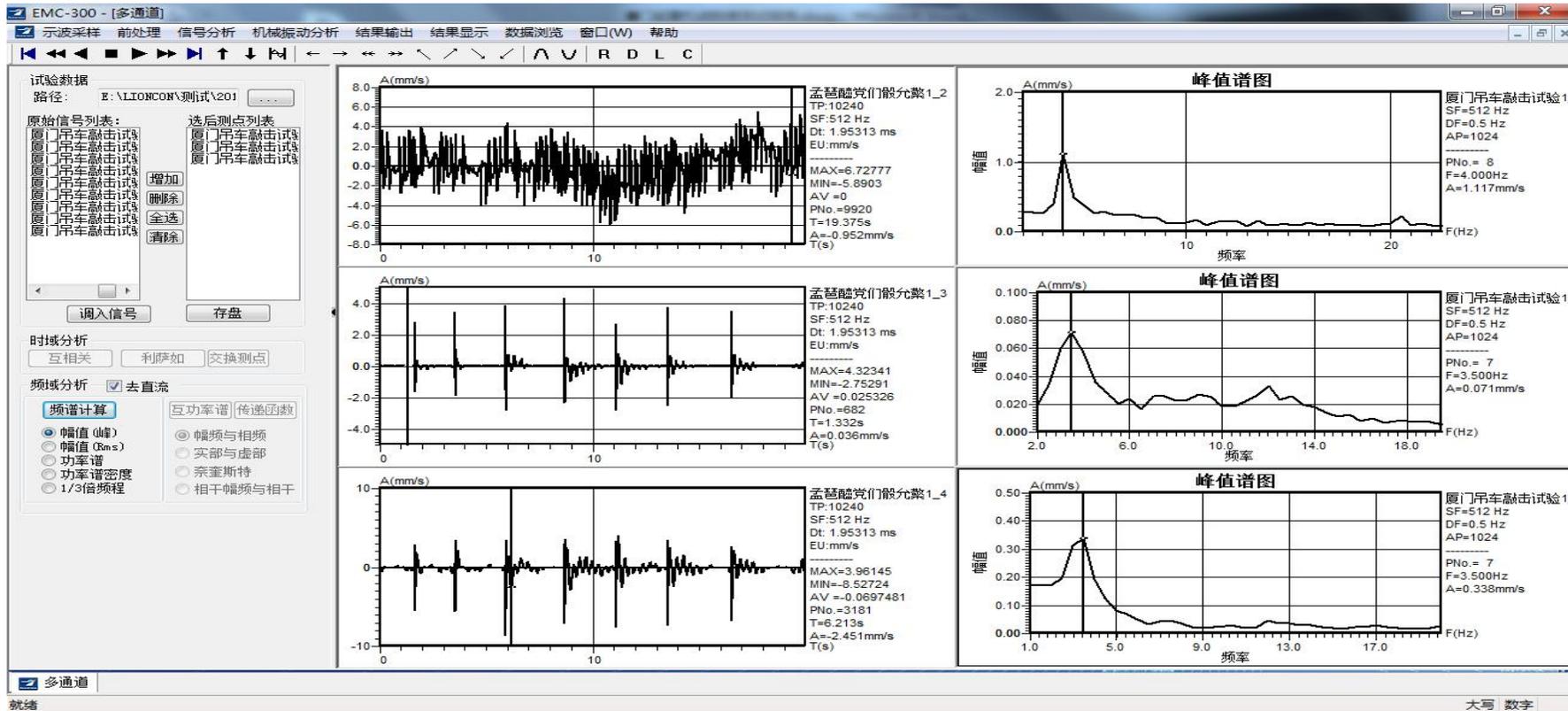
水平急刹 1（向后）因为载荷的单摆运动 相当于对小车的多次冲击，所以时域波形看上去会有很多次的高峰。频谱图在较长时间下很清晰一致的反映出小车的固有频率为 3 赫兹。



水平急刹 2（向前）波形频谱与水平急刹 1 相似。频谱一致反映 3 赫兹的固有频率。



### 敲击实验数据



在操作室外与操作室刚性连接的平台利用力锤用钢锤头进行敲击，得到相应波形如上图，测得的数据为：3 赫兹到 3.5 赫兹的固有频率。可以看到相对于 65 吨载荷急刹车的冲击，力锤的响应振动要小的多。但是在频谱图里同样印证了 3 赫兹到 3.5 赫兹的固有频率。横向水平的测试数据，因为横向水平受到吊车支撑较好（不允许有较大的间隙和活动范围）刚度也就大了。



## 7、结论

诺尔起重机 Q02 此类设备，在小车运行方向的动刚度反映在固有频率上是 3~3.5 赫兹的区域。既满足该公司 0.7 赫兹以上的要求也符合 JB/ZQ8001-89 《通用桥式起重机产品质量分等》中，要求动刚度 $\geq 2\text{Hz}$ 。

本次动刚度实验利用两种方法测得的固有频率相互印证上述结论。



## 附件 1： 动刚度的基本概念，

在机械振动学中，动刚度的定义为起重机结构产生的单位振幅所需要的动态力。对于受简谐激振力的单自由度系统（如图一所示）其动刚度  $K_D$  可以表示为：

$$K_D = K [(1 - \lambda^2) + 2 i \xi \lambda] \quad (1)$$

式中  $K$  ——系统的静刚度  
 $\xi$  ——阻尼比  
 $\xi = C / (2 m \omega_n)$   
 $C$  ——阻尼系数  
 $m$  ——系统质量  
 $\omega_n$  ——系统固有频率  
 $\omega_n = \sqrt{K / m} = 2 \pi f_n$   
 $f_n$  ——结构的自振频率  
 $\lambda$  ——频率比



$$\lambda = \omega / \omega_n$$

$\omega$  —— 简谐激振力角频率

动刚度的幅值为

$$|K_D| = K \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2} \quad (2)$$

可见,动刚度并非是一个常数,而是随频率的改变而变化,是频率的函数(见图2)。

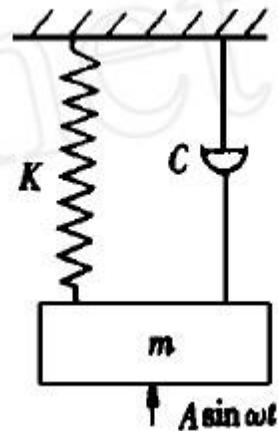


图 1 受简谐激振力的单自由度系统

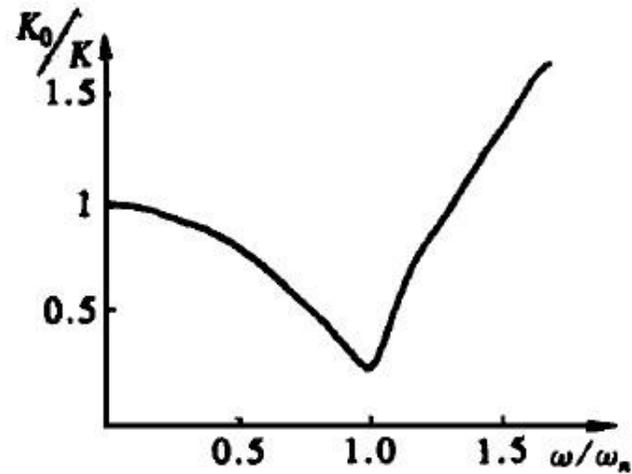


图 2 单自由度系统的动刚度曲线

同一起重机结构的动刚度,对于各种不同的振动,虽其数值各不相同,但都取决于其本身的参数(静刚度  $k$ 、阻尼比  $\xi$  和质量  $m$ ),而且在不同频率范围内,各参数对动刚度的影响是不同的。一般以共振时的动刚度值  $K_d$  (动刚度的最小值) 作为起重机结构受迫振动时的动刚度,即



$$K_d = 2\xi \sqrt{(1 - \xi)^2} k \quad (3)$$

当  $\xi$  较小时,即  $\xi \leq 0.2$ ,则

$$K_d \approx 2\xi k \quad (4)$$

由式(4)可知,结构的动刚度与静刚度 $k$ 、阻尼比 $\xi$ 成正比,提高结构的静刚度及阻尼比,都可提高结构的动刚度。

## 2 起重机动刚度的物理含义

起重机在起吊、卸载以及突然起制动过程中,均会引起冲击动载,使其产生一定振幅和一定时间的衰减振动。起重机对动刚度的要求主要是为了控制由于冲击动载所引起的振幅和振动的衰减时间。由于起重机结构、材质等因素的不同,阻尼比在一个较大范围内进行变化,而且难以进行理论估计,这就给直接计算动刚度带来了困难。 , 钢结构的阻尼比一般在0.01—0.02之间 (单层钢结构厂房可取0.05)



由于  $k = m\omega_n^2$ ,  $\omega_n = 2\pi f_n$ , 则式(4)可变为

$$K_d = 8\pi^2 \xi m f_n^2 \quad (5)$$

另外,对于自振频率为  $f_n$ , 阻尼比为  $\xi$  的一阶自由度系统,其振幅由最大值  $X_0$  衰减到  $X_n$  所需的时间  $T$  为

$$T = \frac{1}{2\pi \xi f_n} \ln \frac{X_0}{X_n} \quad (6)$$

若假定阻尼、结构质量为常数,则动刚度与结构自振频率  $f_n$  成正比,而振动的衰减时间则与结构自振频率  $f_n$  成反比,即  $f_n$  越小,衰减时间越长;  $f_n$  越大,衰减时间越短。正是基于这一原因,起重机动刚度用结构的自振频率来衡量,这是起重机动刚度区

别于一般机械结构动刚度的特殊之处。



### 3 起重机动刚度的测试方法

如前所述,起重机动刚度的测试,实际上就是测试起重机在规定方向上的自振频率。对于不同类型的起重机,在不同方向上动刚度的大小,相应的标准中均有具体规定。另外,标准中还规定了测量动刚度的具体条件,如桥式起重机垂直方向上动刚度的测量,要求小车在跨中位置,吊重为额定载荷。其目的主要是为了使动刚度的测试在一个统一的标准条件下进行,以消除其它因素对动刚度测试的影响。起重机在实际工作时所承受的动载荷主要为冲击动载,如图 3 所示,起吊重物到一定高度时突然制动,在主梁上产生冲击动载的波形曲线,这一冲击动载可近似看作三角脉冲。从理论上讲,只要脉冲宽度  $\Delta = 1/f_n$ ,就可激发起重机的自振频率,采用适当的测试与分析方法即可得到起重机的动刚度。实测时,为了快速、准确地得到起重机动刚度,

主要采用以下两种方法:



### 3.1 贴应变片法

这是标准中推荐的一种方法(见图 4),使用比较广泛。首先将应变片沿着所测动刚度的方向贴于测点处,应变片与动态应变仪相连接,其输出信号可分别与光线示波器、电平记录仪或磁带机等记录设备相连,也可与动态数据采集分析系统相连。然后按要求产生测试动刚度所需的动载,用测试系统记录所产生的动态信号,通过对记录信号的正确分析得到所测动刚度的数值。若信号记录在光线示波器或电平记录仪的记录纸上,可通过量取所测应变时域曲线的周期,再求出这一周期的倒数,即为所测的动刚度;若信号记录在磁带上,则需通过对所测信号的回放,用动态信号分析仪对时域信号进行频谱分析或功率谱分析,频谱或功率谱的峰值即为所测

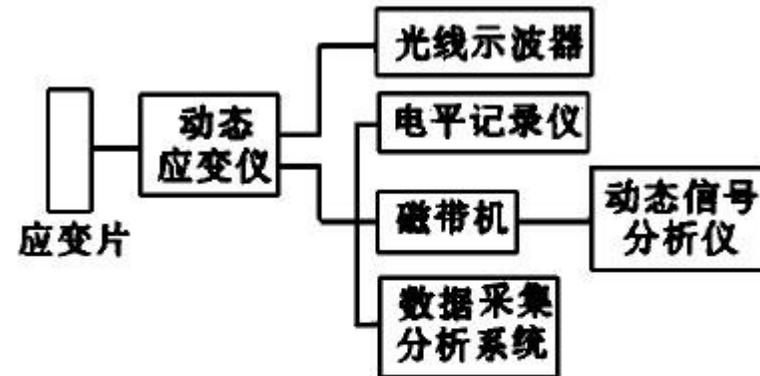


图 4 贴应变片法测试与分析框图

的动刚度。这一方法的测试精度高于光线示波器法;而采用动态数据采集分析系统则可直接对信号进行采集和频谱或功率谱分析,实时地得到所测的动刚度,具有速度快、精度高的特点。



## 3.2 压电加速度计法

这种方法的原理与贴应变片法的本质是相同的,只不过所使用的传感器与二次仪表不同(见图5)。首先将加速度计安装在测点处,主方向与所测动刚度的方向相一致,并与电荷放大器相连接,其输出信号可分别与电平记录仪或磁带机等记录设备相连,也可与动态数据采集分析系统相连。然后按要求产生测试动刚度所需的动载,用测试系统记录所产生的动态信号,通过对记录信号的正确分析得到所测动刚度的数值。其分析方法与贴应变片法相同,不再赘述。



图 5 压电加速度计法测试与分析框图

除以上两种方法外,还可采用机械式测振仪法和应变式加速度计法对起重机动刚度进行测试。

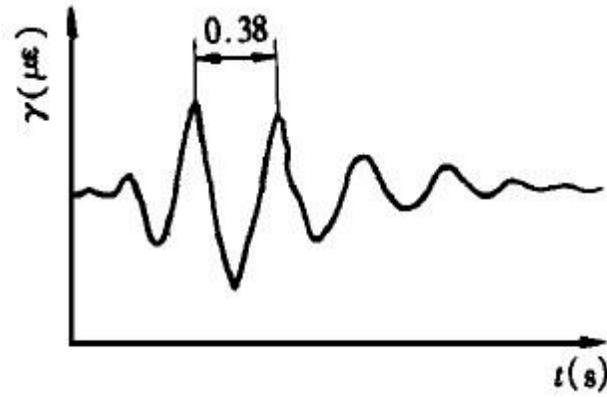


图 6 贴应变片法测得的曲线图