

表 4.2 测点重构位移误差值

测 点	$E_{r_1}(\%)$	$E_{r_2}(\%)$
1	1.81	3.27
2	1.96	3.12
3	1.67	4.09

重构后的位移信号通过公式 (2.5) 可以得到位移的模态坐标, 同样的方法可以得到速度和加速度的模态坐标, 将位移、速度、加速度的模态坐标代入公式(2.7)求解方程组可以得到 IMII 方法识别的移动荷载值; 将重构后的动位移信号代入公式 (2.15), 可利用时域求卷积积分的方法进行荷载识别, 识别的结果如图 4.22-4.24 所示, 分别对速度为 10m/s、20m/s、30m/s 的三个工况进行了前后轴荷载的识别, 其中 True 是真实信号通过 TDM 方法识别的结果, Recon1 为重构信号通过 IMII 方法识别得到的结果; Recon2 为重构信号通过 TDM 方法识别的结果。

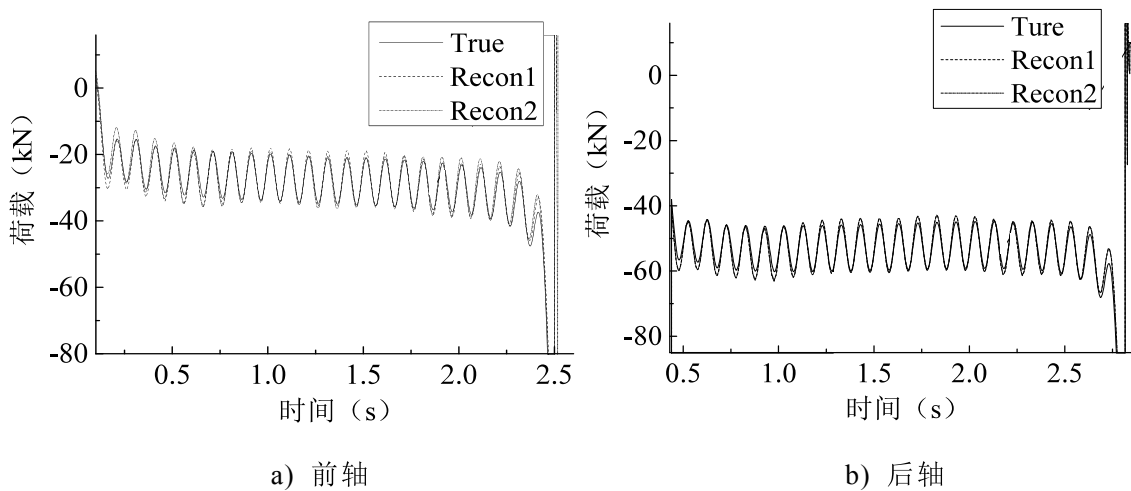


图4.22  $v_1=10\text{m/s}$ 时两轴时变荷载识别结果

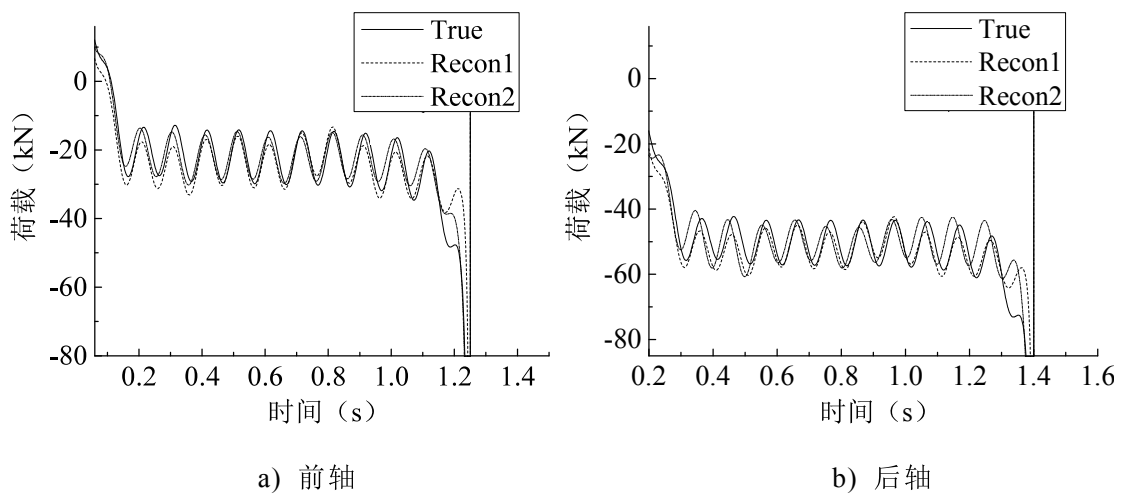


图4.23  $v_2=20\text{m/s}$ 时两轴时变荷载识别结果

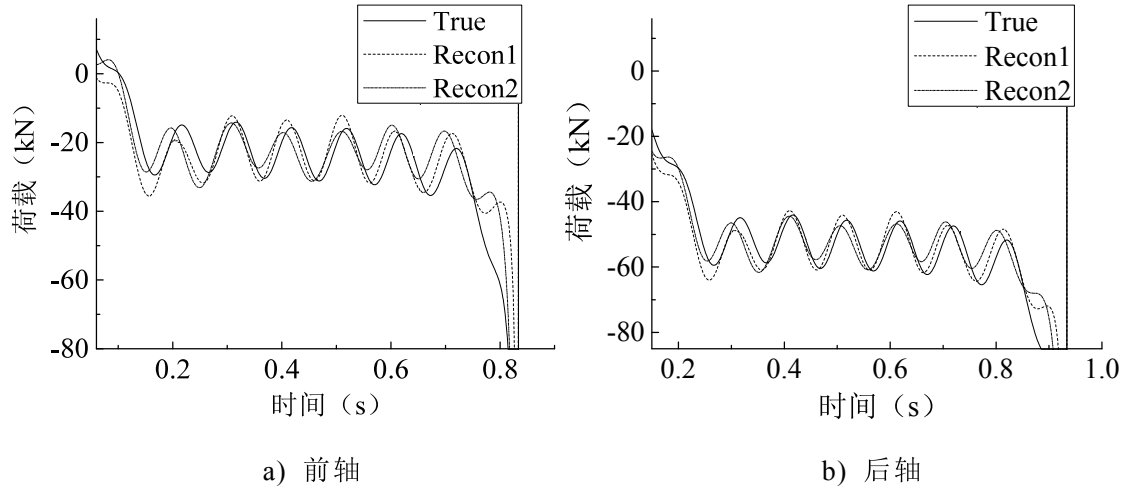


图 4.24  $v_3=30\text{m/s}$  时两轴时变荷载识别结果

表 4.3 荷载识别的相对误差

速度	IMII		TDM	
	前轴 $f_{er}(\%)$	后轴 $f_{er}(\%)$	前轴 $f_{er}(\%)$	后轴 $f_{er}(\%)$
$v_1$	5.10	5.68	5.83	5.49
$v_2$	7.22	8.06	7.93	8.99
$v_3$	10.63	9.11	11.38	9.45

在荷载识别的过程中，信号的可靠性对识别结果有很大的影响，含噪声的信号在反问题的求解过程中很容易引起方程的病态，进而影响识别的结果，往往识别出来的荷载会严重偏离真实值或产生较大的波动，通过观察双轴时变荷载的识别结果可以得到以下结论：

(1) 在双轴荷载的识别过程中，前后轴之间的距离对识别的精度有较大影响，而通过累加  $f_1$ 、 $f_2$  得到的总荷载对比实际车辆的总荷载，误差在可接受的范围内，可见车辆轴距的大小对多轴移动荷载识别的精度有一定的影响。

(2) 车速越快的情况下，识别得到的结果误差越大，各个不同速度的工况下都能正确识别出移动荷载的值，说明了 IMII 和 TDM 两种识别方法可以适用本算例，在上桥和下桥的时刻荷载值会出现较大的突变，大部分在桥上行驶的时间内识别的结果比较稳定。

(3) 在位移积分过程中残存的微弱趋势项对荷载识别的结果影响并不大，可见荷载识别过程中误差主要来源于高频噪声，存在低频噪声的信号识别得到的结果仍然可以接受。

(4) 对于简支梁桥，三个测点的识别精度能够满足要求，当车速较低的时候车辆和桥梁作用的时间较长，耦合作用更加明显，当车速较快时，桥梁竖向的挠度可以看作路面的不平整度，能够对车辆产生激励作用。

### 4.3 本章小结

本章基于荷载识别的基本理论，通过应变信号和加速度信号实现了结构动位移的重构，再利用重构后的信号进行了两轴时变荷载的识别，从识别的结果可以看出，除了在上桥和下桥两个时刻存在不适应性问题，在荷载通过桥梁的过程中，都可以通过 IMII 和 TDM 的方法识别出来，克服了识别方法对噪声敏感的问题，且识别的误差都在比较合理的范围内，证明通过降噪后的信号进行荷载识别所得到的结果具有较高的可信度，在多轴荷载的识别过程中，轴距对识别的结果有一定的影响，主要表现在轴距较小时，每个单轴识别的误差较大，而识别的总荷载值与实际总荷载值相比误差不大，当轴距增大的时候，这一现象得到了改善。

## 第5章 信号处理与荷载识别的试验研究

前面一章介绍了 ANSYS 数值模拟下荷载识别的算法，本章设计了一个钢筋混凝土板的试验来进一步验证基于动位移信号重构方法进行移动荷载识别的可行性。本实验采用了单跨钢筋混凝土简支板的结构形式，试验的主要目的有以下几个：

(1) 验证自适应降噪算法在实际使用过程中对试验室采集数据的降噪效果；(2) 试验过程中通过多测点应变识别静荷载位移，同时利用频域积分算法识别振动位移，利用位移实测值验证重构位移的可靠性；(3) 验证重构的动位移信号是否可以准确识别移动荷载，提高荷载识别的精度。

### 5.1 结构的动力测试

#### 5.1.1 试验对象

本试验的对象为一块钢筋混凝土简支板，考虑到验证测点位移监测的精度，整个试件的尺寸取长 3.6m，宽 0.4m，厚 0.055m。板内布置双层双向直径 6mm 的 HRB335 钢筋，钢筋纵向间距 50mm，横向间距 160mm，采用 C35 混凝土浇筑。试验构件的截面图及其配筋如图 5.1 所示。

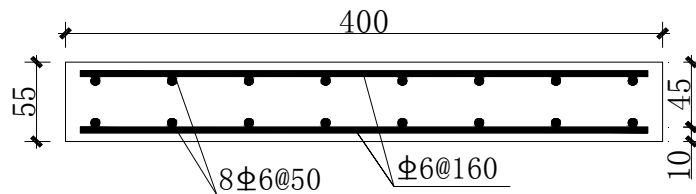
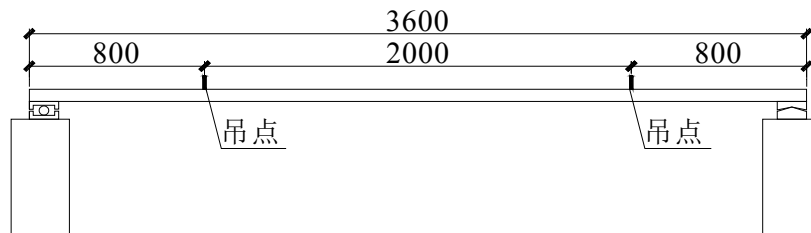


图 5.1 板截面尺寸及配筋图（单位：mm）

试件的平面尺寸图和各个测点布置如图 5.2 所示。试验板通过一个固定铰支座（右侧）和一个滚动铰支座形成简支的边界条件，在距离板的两端 0.8m 的位置各设置了一个吊点用来起吊和移动结构，支座被固定在两个稳定的混凝土支墩上，在移动荷载的试验中，板的两端分别用模板架设长 0.5m 的导梁用于模型小车上下结构，导梁和板的接触位置不产生约束。



a) 结构尺寸和支座布置

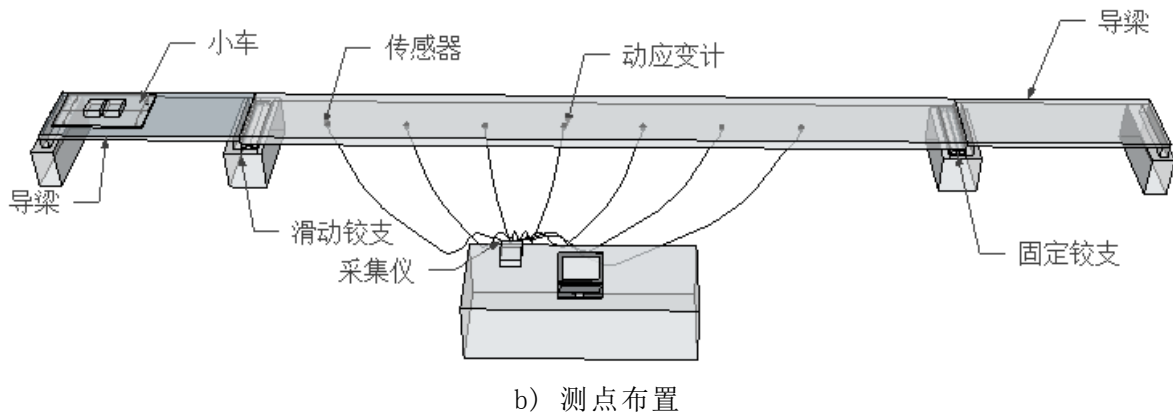


图 5.2 平面和测点布置图

### 5.1.2 试验装置

整个试验主要包括结构的动力试验和移动荷载试验，动力试验部分采用多参考点脉冲锤击的方法，该方法能够得到重复性好、质量高的真实频率响应函数 (FRF)，并能够从频响函数中识别得到结构的频率和振型。

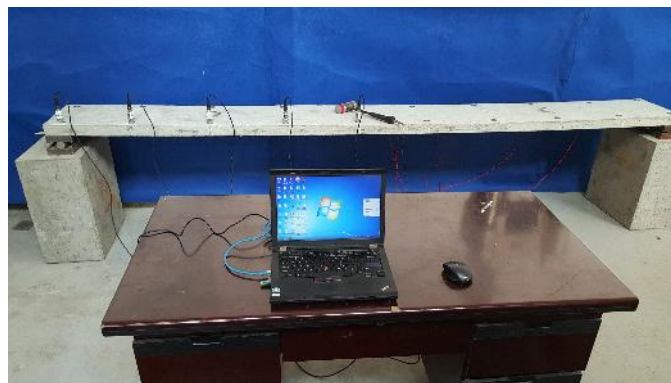


图 5.3 动力试验照片

全结构的动力试验如图 5.3 所示，将全结构测点划分为四个工况，激励信号通过力锤敲击桥面产生，利用加速度传感器来拾取不同的响应时程信号。对简支板进行了多工况的全结构模态测试，试验所用动力传感器的相关信息见表 5.1。

表 5.1 动力传感器的相关参数

传感器类型	型号	灵敏度	频响范围	量程
力锤	PCB-086D20	0.23 mV/N	0~6000 Hz	±22.24 kN
加速度计	Wilcoxon-799LF	500 mv/g	0.1~2500 Hz	±10 g

钢筋混凝土板的多参考点脉冲锤击法模态测试的传感器安装如图 5.4 所示。本文采用 PCB 公司生产的型号为 086D50 的力锤进行锤击测试，锤头的直径大小为 7.6cm，力锤全长 89cm。最大锤击力可以达到 22kN 左右，是 PCB 公司生产的量程最大的力锤。力锤的端部可以根据需求更换不同硬度的锤头，利用不同硬度的锤头进行锤击时，其与桥面板接触的时间也会有差异，接触时间大概为 0.001s~0.005s。通过试验发现中硬度的红色橡胶锤头锤击的信号最符合要求，能

够充分捕捉到力的脉冲信号。利用 8 通道的比利时 LMS SCADAS 采集仪器采集力锤信号和加速度传感器信号，根据结构的情况设置 2048Hz 的采样频率，每次锤击后采样时间为 10s，当力信号大于 15N 时，自动触发采样。测试过程中一共选择了 4 个锤击点，每一个测点都进行三次锤击。

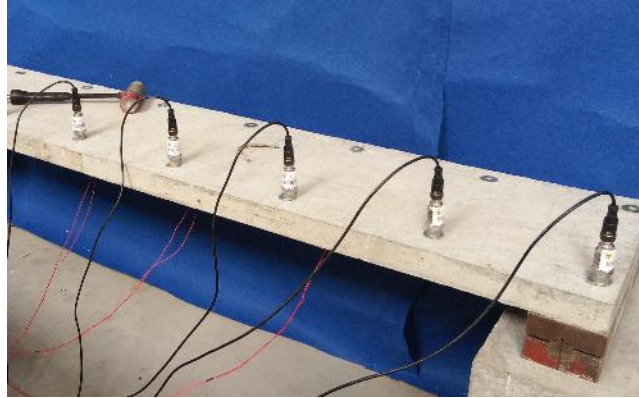


图 5.4 模态试验的动力测试仪器

### 5.1.3 试验工况

动力试验全部为多点输入多点输出的测试类型，其中 LMS 采集仪的 1-7 号通道用来采集加速度信号，8 号通道连接力锤采集力信号，根据通道的数量将多参考点的全局测试划分了 4 个工况，测点布置沿着板的纵向轴线平行布置，分别在距离边缘 5cm 的位置粘贴铁片，加速度传感器通过吸附在铁片上与结构在垂直方向紧密相连，可以采集各个测点在竖直方向的加速度信号，通过 CMIF 分析可以得到各个测点的模态位移，将各点位移连接起来可以绘制得到结构的振型图，进而识别出纵弯或扭转振型及其对应的频率。试验中一共进行了三组全局测试以获得可靠的动力数据，各种工况的激振点和拾振点如图 5.5 和表 5.2 所示。

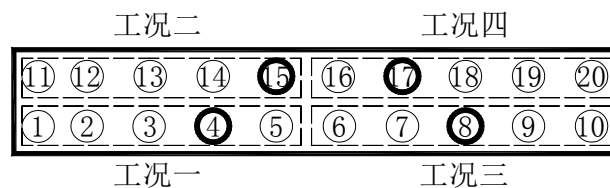


图 5.5 模态试验布点工况

表 5.2 四个动力测试工况

测试工况	测试类型	激振点	拾振点
工况 1			1~5
工况 2	MIMO	4,8,15,17	6~10
工况 3			11~15
工况 4			16~20

### 5.1.4 试验过程及结果

为了准确获得结构的各阶模态，对试验板进行多参考点脉冲锤击测试，具体流程如图 5.6 所示。

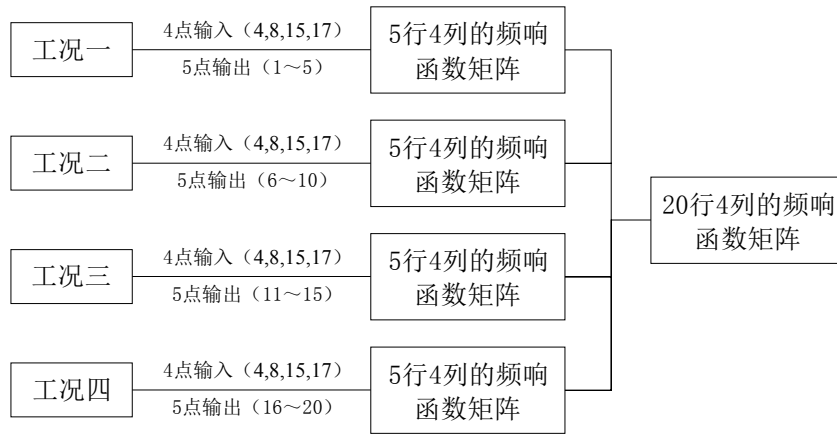
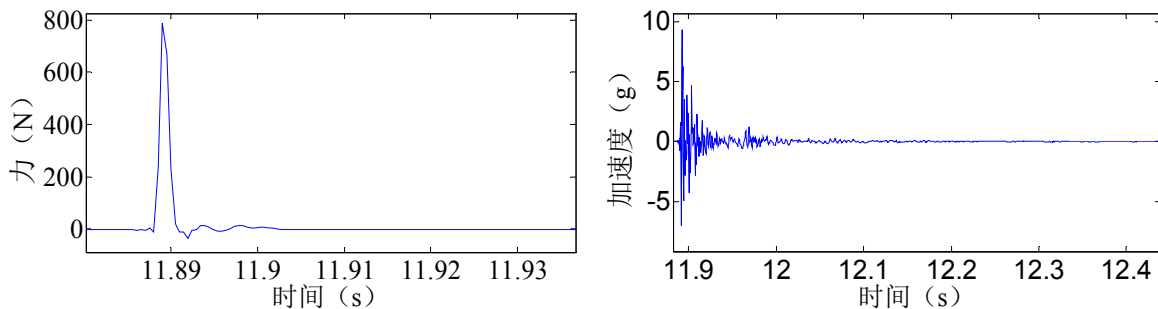
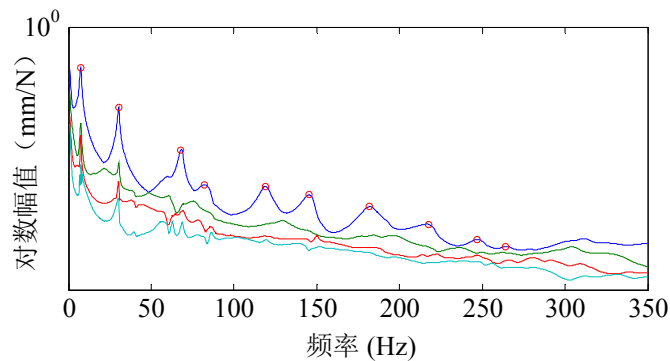


图 5.6 结构 MIMO 全局测试

所有工况的输入都为 4,8,15,17 这四个点，四个工况测试得到的均为 5 行 4 列的频响函数矩阵，通过将所得的四个频响函数矩阵进行组合，便可得到全结构 20 行 4 列的频响函数矩阵，对测试的信号进行 CMIF 法模态分析，典型的试验输入输出信号和 CMIF 法分析得到的模态提取结果如图 5.7 所示。



a) 典型的输入和输出信号图



b) CMIF 方法模态提取图

图 5.7 脉冲锤击测试的典型输入输出信号和模态峰值提取图

通过 Midas 建立与结构相同的有限元模型（图 5.8）进行模拟并分析得到结构模态信息，将模拟的模态结果和 CMIF 方法分析得到的结果进行对比如表 5.3 所示。

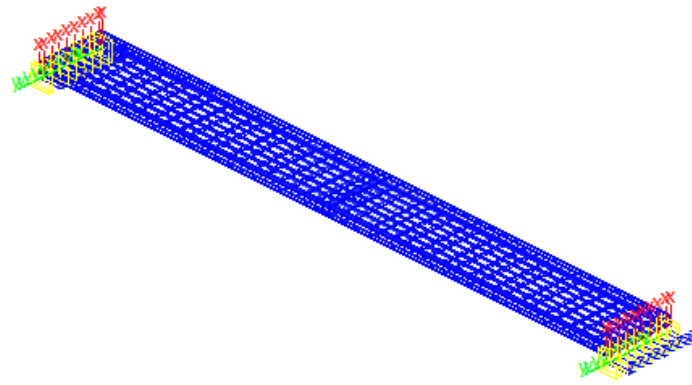
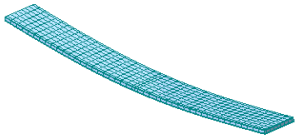
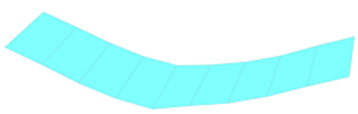
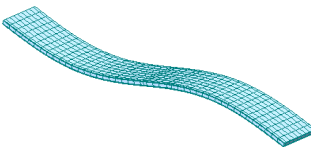
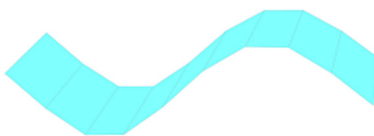
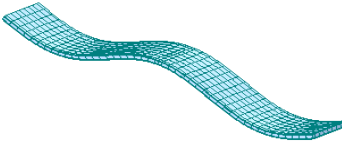
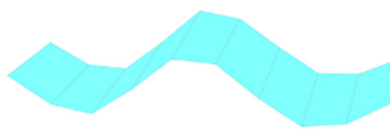
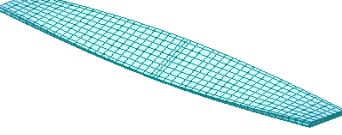
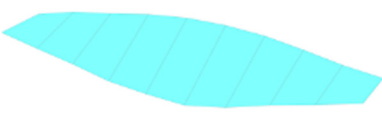
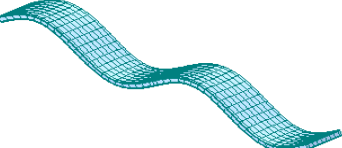
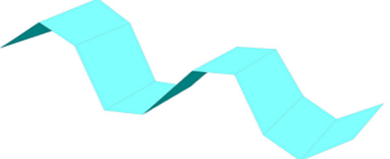


图 5.8 Midas 有限元模型

表 5.3 MIMO 全局测试的动力测试结果

模态	有限元模拟		CMIF 方法实测	
	频率(Hz)	振型	频率(Hz)	振型
1 阶	7.49		7.5	
2 阶	29.98		30.25	
3 阶	67.33		67.75	
4 阶	81.53		82.01	
5 阶	119.62		118.75	

通过对比有限元计算与 CMIF 方法实测的结构振型和频率可以发现，实际结构和模拟的结构动力性能相近，各阶振型和频率都吻合的较好，有限元模拟的结构能够反应实际结构的性能，可以作为移动荷载识别中提取结构振型函数的依据。



## 5.2 移动荷载识别试验

### 5.2.1 试验装置

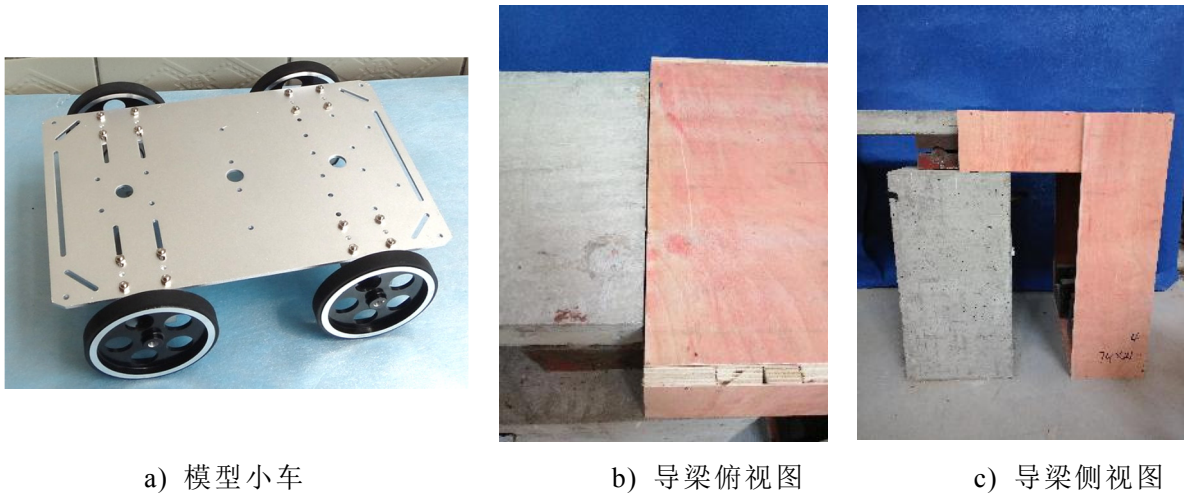


图 5.9 移动荷载试验设备和装置

移动荷载识别的试验工况主要在上述混凝土板上进行，主体板结构架设好后在两侧的支墩上各架设一个长 0.5m 的导梁，作为试验小车上下板结构时的车速引导区，导梁顶部与板顶位置平行，端部与板的边缘靠紧而不接触，不影响原来的边界条件。试验中用于载重的小车为铝合金材质，平面尺寸为 0.3×0.2m，车体通过 4 个 12V 20W 的直流减速电机驱动，平坦路况下车身最大载重为 80kg，电机直接和 4 个铝合金车轮连接，车轮轮径 95mm，最大功率下车速可达 0.35m/s，组装完成后的整车质量为：2.28kg，车辆行驶过程中通过外置 12V 蓄电池供电，电源外接 PWM 无极变速调速开关可以任意调节车速，模型车辆及导梁的架设如图 5.9 所示。

本文研究的移动荷载识别主要利用加速度和动应变来进行，因此试验中主要采集模型车行驶通过板过程中结构产生的动响应，板底位置用砂纸进行打磨后粘贴混凝土应变片，采用黄岩公司生产的应变片进行应变测量，型号为 BX120-100AA，应变片引出线接由日本 TML 公司生产的动态应变仪桥盒，型号 SB-120DD，再将动态应变仪桥盒连接到数据采集仪上，采集仪为日本 TML 公司生产，型号为 TMR-200。在应变粘贴位置的旁边，粘贴一块圆形的铁片，用于吸附加速度传感器进行数据采集，同样采用 Wilcoxon 生产的 799LF 号传感器和 8 通道的比利时 LMS SCADAS 采集仪器进行加速度的采集。图 5.10 为试验中用到的主要设备。



a) 动态应变仪桥盒 SB-120DD

b) 数据采集仪 TMR-200

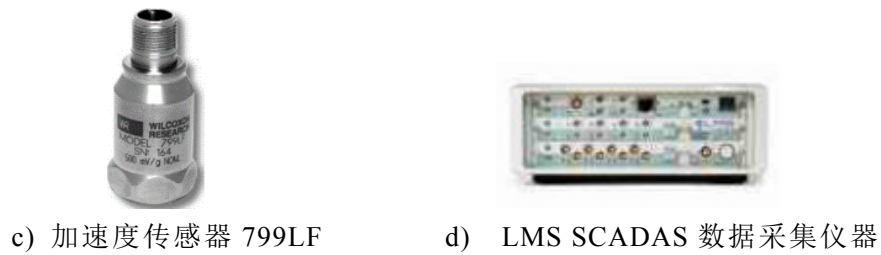
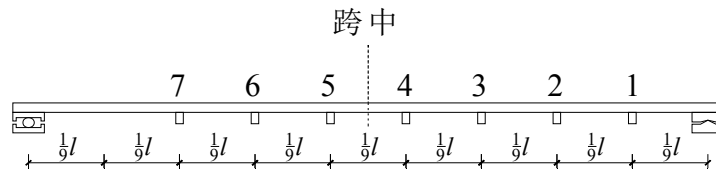


图 5.10 主要数据采集设备

### 5.2.2 试验测点布置和工况



a) 布点示意图



b) 实际测点分布



c) 测点传感器布置

图 5.11 数据采集点布置

表 5.4 移动荷载试验具体工况

工况	速度	质量	工况	速度	质量
1-3	$v_1$	$m_1$	19-21	$v_1$	$m_3$
4-6	$v_2$	$m_1$	22-24	$v_2$	$m_3$
7-9	$v_3$	$m_1$	25-27	$v_3$	$m_3$
10-12	$v_1$	$m_2$	28-30	$v_1$	$m_4$
13-15	$v_2$	$m_2$	31-33	$v_2$	$m_4$
16-18	$v_3$	$m_2$	34-36	$v_3$	$m_4$

试验中需要采集的数据为加速度和动应变，由于采集仪的通道限制，全结构只设置了 7 个测点，布设在沿板纵向的 9 等分点处，数据采集点布置如图 5.11 所示。根据可能会影响到荷载识别结果的车速和荷载大小，试验共设置了 12 个工况，其中车速分为  $v_1=0.12\text{m/s}$ 、 $v_2=0.24\text{m/s}$ 、 $v_3=0.32\text{m/s}$  三个档位；荷载分为  $m_1=5\text{kg}$ 、 $m_2=10\text{kg}$ 、 $m_3=15\text{kg}$ 、 $m_4=20\text{kg}$  四个等级，通过在模型小车上加载标准砝码进行控制，试验之前在三种加载状态下分别对试验车的前后两个轮轴进行荷载的标定，标定结果表明在负载情况下两个车轴的荷载近似为 1: 1，试验过程中可认为两个

轮轴的荷载相等。同时为了验证动位移识别的准确性，采用视频位移识别设备对测点 4 的动位移进行监测，通过在测点位置粘贴目标靶，让高速摄像头实时记录靶的竖向位移随时间的变化，高速摄像头架设的位置如图 5.12 所示。小车行驶的方向都是从滚动支座到铰支座，部分工况试验的照片如图 5.13 所示，试验的具体工况安排如表 5.4 所示。

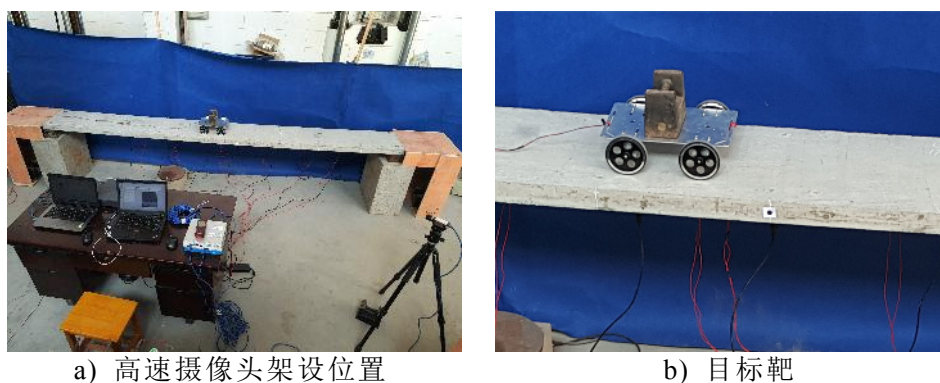


图 5.12 测点 4 动位移监测

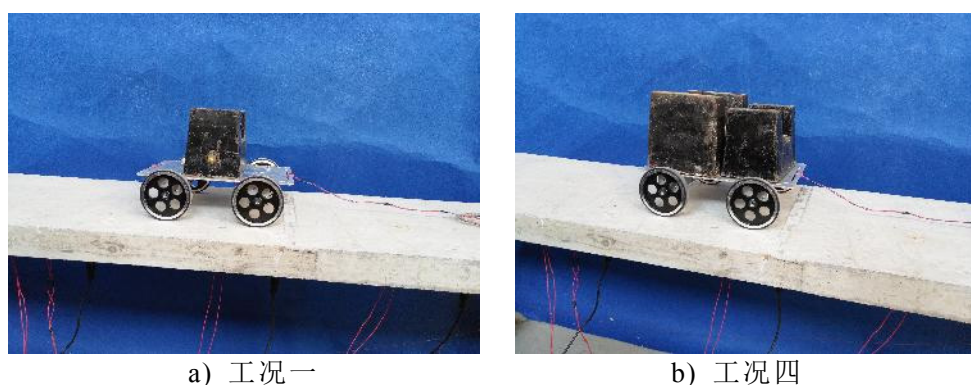


图 5.13 移动荷载试验工况

### 5.2.3 试验步骤

移动荷载试验的步骤如下：

- (1) 采用逐级加载砝码的方式对桥梁模型的刚度、各个应变传感器进行标定。
- (2) 模型小车上桥之前，需要对应变和加速度采集仪进行调零，尽量减少因为“零飘现象”引起的误差，测试过程中保持应变采集仪接地线，避免静电影响带来的误差。
- (3) 将模型小车放在导梁上调整好行驶方向，并提前触发数据采集系统进行加速度和动应变响应的采集，试验过程中让模型车沿着桥梁模型的轴线行驶通过桥梁。每一个试验工况重复两次。
- (4) 调整模型小车的速度和车上的砝码质量，完成所有工况的试验。

桥梁的模型在实验室浇筑养护完成后，其弯曲刚度由各个测点承受外部荷载时的变形曲线来确定。在第 4 个测点位置通过砝码进行逐级加载，加载的范围从 0~300N，加载完成 2 分钟后可通过高速摄像头监测到第四测点的挠度变形，标定

过程中 4 号测点的位移变化如图 5.14 所示，再由力法计算推定结构的截面刚度。在实际工程中， $EI$  是一个受到多种因素影响而变化的值，而且会因截面位置不同而有所差异，对于钢筋混凝土梁结构，梁的刚度会随着外荷载作用的大小发生变化，主要是由于刚度计算过程中需要考虑构件带裂缝工作的情况，且长期刚度需要考虑混凝土徐变的影响<sup>[78]</sup>。本试验在加载过程中通过测得的响应推定的截面刚度如图 5.15 所示，从图中可以看出，当加载值小于 200N 时，推定的刚度值稳定在  $188\text{kN/m}^2$  左右，随着荷载的增加刚度有微小的下降，经过验算此时的混凝土板仍然处于弹性阶段，刚度的变化主要由滚动支座端的位移引起的，由于移动荷载实验过程中最大加载为 200N，因此可视作梁结构的抗弯刚度不变，取截面的抗弯刚度值为  $188.28\text{kN/m}^2$ 。

在试验开始之前，为确保测量的数据可靠，需要对各个应变片通道进行静态的标定，通过在主梁的第 2、4、5、7 测点加载砝码可以得到各个测点加载大小与应变的关系，通过应变计算得到各个点的试验弯矩值，当第四测点加载 20kg 的砝码时，理论计算得到  $M=177.78\text{N}\cdot\text{m}$ ，通过各个点的弯矩值对每个应变片进行标定，得到相应的系数，标定的结果如表 5.5 所示。

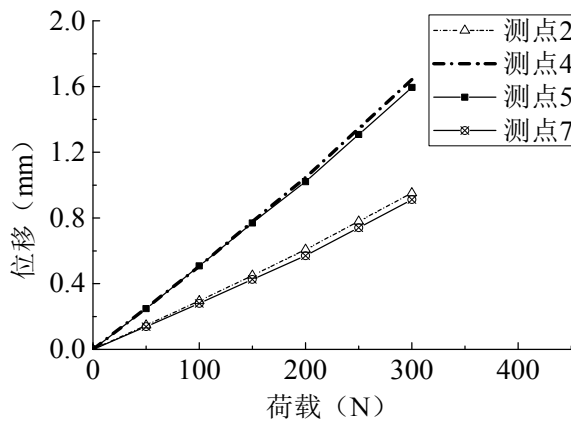


图 5.14 刚度标定过程中测点 4 的位移

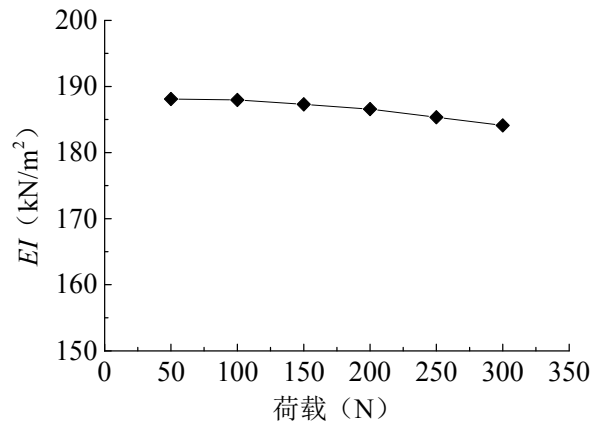


图 5.15 不同荷载作用下的刚度推定值

表 5.5 第 4 点加载 20kg 动应变标定

测 点	1	2	3	4	5	6	7
理论弯矩( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	$M/4$	$2M/4$	$3M/4$	$M$	$4M/5$	$3M/5$	$2M/5$
应变值( $\mu\epsilon$ )	5.8	12.1	19.9	27.3	21.7	13.9	12.1
标定系数	1.04	1.02	0.96	0.97	0.91	1.01	0.99

## 5.2.4 试验结果

在同一试验中，由于试验条件及环境相同，在车辆通过桥梁前后的两个阶段中，由环境噪声及仪器自身所引起的噪声是相关的，车辆在桥梁上行驶过程中由静力荷载和振动引起的应变是和噪声不相关的，满足了自适应滤波器的使用