

(1) 介绍了车桥耦合振动数值模拟的数学原理，通过ANSYS桥梁模型与MATLAB二轴半车模型的耦合迭代求解桥梁节点动态位移响应，为影响线的计算提供信息输入。同时基于汽车参数的分类统计，在数值算例中采用随机参数组合工况以较好地模拟实际行车工况。然后对影响线做了一系列参数敏感性分析，证实了车辆模型的速度与载重对影响线反演结果有显著影响。

(2) 通过对比多种方法的计算结果证实了仿射求逆算法在本文影响线区间反演问题上的准确性和计算效率的优越性。然后应用大数据分析和SVM方法从数值模拟多重工况中成功识别出了影响面，识别结果能较好地保留影响线的形状趋势并与标准曲线吻合良好，最后对影响识别结果准确性的原因进行了分析总结。

(3) 通过室内缩尺车桥模型试验同样证明了本文所提方法路线的可行性和可靠性。首先介绍了试验装置和桥梁、车辆的模型参数，测量不同的载重和速度工况下各测点的动应变和动位移响应，采用和模拟试验中相同的方法和流程，计算得到影响线区间和最终从多工况数据中识别的影响线(面)结果，实际误差水平保持在可接受范围内，说明本文方法在实测中也具有良好的稳定性。

## 第5章 基于影响面的非接触桥梁动态称重

### 5.1 引言

非接触桥梁动态称重(cBWIM)是近年来桥梁动态称重领域的热点,相比于传统依赖应变传感器的运作方式,非接触桥梁动态称重技术克服了以往系统设备昂贵、线路老化快、使用寿命短、维护难度大等应用局限。得益于机器视觉测量技术的发展,cBWIM的实现指日可待,其不需要传统附着式或嵌入式传感器的安装,只需通过标定的桥梁结构影响线和非接触测量的桥梁动态响应以及车辆轴距、位置的匹配对应,便能根据智能算法快速识别动态行驶中车辆的总重和轴重。

本文所提出的利用大数据工况和区间仿射算法识别影响线的方法,是一种新型非接触桥梁影响线标定方法,已经经过数值模拟试验和实验室试验初步验证了该法对于影响线识别结果的可靠性和稳定性。本章将在此基础上,利用SVM影响面识别结果实现非接触的桥梁动态轴重识别,并基于影响线区间与轴重区间的相互推导关系,提出了大数据影响线识别的复合反馈校验机制用以减小由区间过宽估计造成的SVM影响线识别误差,达到提高影响线识别准确性和非接触动态轴重识别准确性的目的。

### 5.2 非接触桥梁动态称重的实现

#### 5.2.1 基于影响线的车辆动态称重理论

经典的BWIM系统主要由用于获取车辆车轴位置信息的车轴探测器、用于测量桥梁响应的称重传感器(通常为应变传感器)、用于计算和输出车辆重量信息的计算中心几部分组成(如图5.1),具有稳定可靠的车辆重量监测能力,其中准确的桥梁影响线和可靠的车轴位置信息是获得高精度轴重识别结果的前提。



图 5.1 经典桥梁动态称重系统

荷载识别本质上是动力学第二类反问题，此时系统的输出(桥梁响应)和系统特性参数(影响线)是已知的，待求的是系统的输入，包括车辆轴重、加载位置等。假设已知车速、轴距，则基于响应叠加原理可以根据影响线和实测响应识别车辆总重与分轴重。将车辆总重记为 $W_G$ ，第 $i$ 轴轴重表示为 $w_i$ ，则对于轴数为 $k$ 的车辆有

$$W_G = w_1 + w_2 + \dots + w_k \quad (5.1)$$

车辆第 $i$ 轴( $i=1, \dots, k$ )对应的影响线向量为

$$L_i = \{l_{1-C_i}, l_{2-C_i}, \dots, l_{n-C_i}\}^T \quad (5.2)$$

式中 $C_i$ 为第1轴至第 $i$ 轴间距所对应的采样点数， $l_{1-C_i}, l_{2-C_i}, \dots, l_{n-C_i}$ 是车轴在各采样点对应的影响线竖标值， $n$ 是总采样点数。

桥梁动态称重经典的 Moses 算法就是基于桥梁的标定影响线，求理论响应和实测响应的误差平方和最小化，计算准确的轴重值<sup>[81]</sup>。定义误差函数为

$$E = \sum_{p=1}^n [r_p^M - \sum_{i=1}^k w_i l_{p-C_i}]^2 \quad (5.3)$$

根据最小二乘原理，误差函数对各轴重的倒数均为 0，故

$$\frac{\partial E}{\partial w_j} = 2 \sum_{p=1}^n [r_p^M - \sum_{i=1}^k w_i l_{p-C_i}] \cdot l_{p-C_j} = 0 \quad (5.4)$$

因为 $j$ 有 $k$ 个取值，故上式有 $k$ 个等式，经过变形成为以下方程

$$L'W = S \quad (5.5)$$

其中 $L'$ 为 $k \times k$ 维的主对角线对称矩阵， $S$ 为响应与影响线的乘积，组成元素分别计算如下：

$$[L']_{ij} = \sum_{p=1}^n (l_{p-C_i} \cdot l_{p-C_j}) \quad (5.6)$$

$$\{S_j\} = \sum_{p=1}^n (r_p \cdot l_{p-C_j}) \quad (5.7)$$

通过解方程(5.5)可获得车辆各轴重 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}^T$ ，这就是Moses算法拟合实测响应实现车辆动态称重原理。

除此之外，还有其他简易方法，令 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}^T$ ， $L = [L_1, L_2, \dots, L_k]$ ，若将理论叠加响应等效为实测总响应 $R$ ，则直接解下式方程可以求得轴重向量<sup>[179]</sup>

$$LW = R \quad (5.8)$$

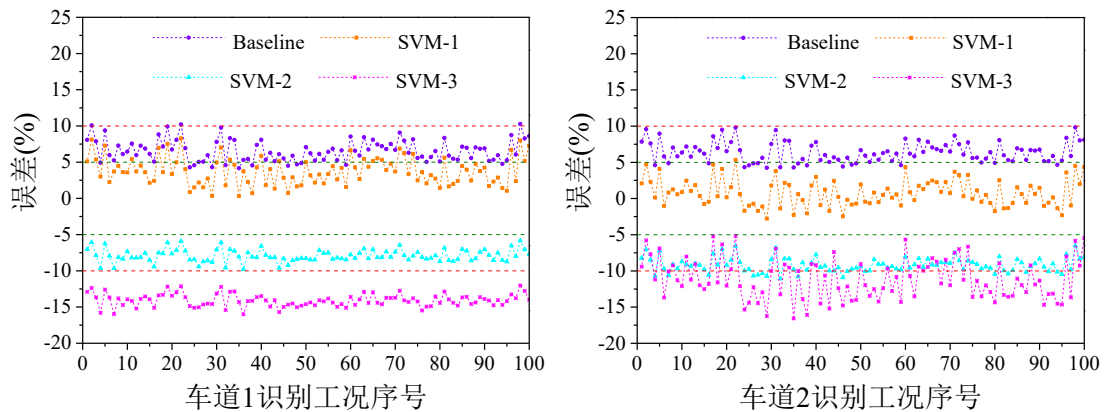
$$\begin{bmatrix} l_1 & l_{1-C_2} & \dots & l_{1-C_k} \\ l_2 & l_{2-C_2} & \dots & l_{2-C_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_n & l_{n-C_2} & \dots & l_{n-C_k} \end{bmatrix}_{n \times k} \times \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{Bmatrix} \quad (5.9)$$

方程(5.9)是式(5.8)的扩展形式。方程(5.5)和(5.8)虽然形式上有所差异，但采用相同的方程组求解技巧时这两种方法的计算结果一致，相关推导过程与 2.1.3 节类同，故此处不再赘述。本章算例均采用方程(5.9)的简易方法识别轴重，对分轴重求和即可得到车辆总重。

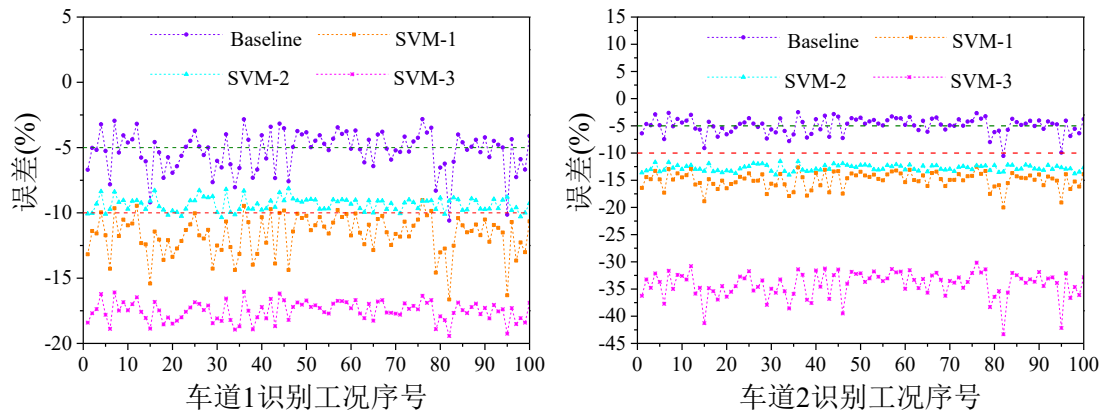
### 5.2.2 非接触轴重识别数值算例

第四章通过数值模拟试验，基本实现了车辆大数据和区间仿射算法支持下的非接触桥梁结构影响面识别，本节进一步利用 SVM 识别的影响面，结合桥梁动态称重原理，进行非接触动态轴重的计算以及对称重结果进行综合对比分析。

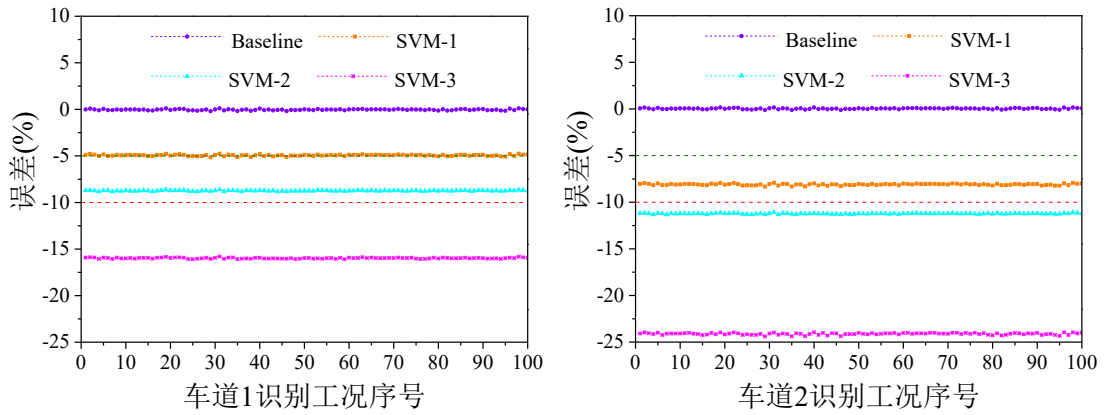
本节按照第四章生成随机模拟工况的模式，以表 4.2、4.3 的相关参数为依据新增 100 组公交车类型的测试工况，利用这 100 组工况的双车道动位移模拟响应，结合第四章 SVM 识别的桥梁影响面，研究非接触动态轴重识别的效果。下图 5.2 中分别列出了基于静力影响面(Baseline)、大客车对应的 SVM 识别影响面结果(SVM-1)、公交车对应的 SVM 识别影响面结果(SVM-2)、二轴六轮货车对应的 SVM 识别影响面结果(SVM-3)反算车辆动态轴重的误差，包括前轴重、后轴重、总重三者的误差。



a) 前轴重识别误差



b) 后轴重识别误差



c) 车辆总重识别误差

图 5.2 基于 SVM 影响面的车辆动态称重误差

纵向横向对比各项误差可以得到以下几点结论：

(1) 与基准影响面拟合较好的 SVM 影响面在用于车辆动态称重时也能取得更精确的识别结果。Baseline 代表静力标定的基准影响面，其识别的各项轴重均在  $\pm 10\%$  误差范围内，表明了即使利用静力影响面精确解进行轴重识别也不免存在一些误差，反映了荷载识别反问题的病态特性本质，响应上的细微扰动或者数值求解过程中的微小截断误差就可能引起解的较大偏差；其次是 SVM-1 取得了较好的轴重识别结果，因为第四章的数值模拟试验中 SVM-1 对应的两个车道的影响线与 Baseline 拟合程度最好，因此应用于动态称重系统中效果较好；相比之下，剩余两组 SVM 影响面与 Baseline 偏差较大故轴重识别误差也大。

(2) 轴重识别误差与反演算法的准确性、响应中的动力效应以及影响面的准确性均相关。以上四个位移影响面在 100 个测试算例中，前轴误差和后轴误差分别在各自的基准误差附近波动，这个基准误差可以推断为轴重反演计算过程中系统截断误差和影响线识别误差的组合。影响面相对于基准值的偏离方向与程度决定轴重识别结果的偏离方向与程度，回顾第四章数值算例中 SVM-1~SVM-3 三个识别影响面较 Baseline 均呈现整体幅值偏大的趋势，相应地图 5.2c) 中总重的识别结果也整体偏小，而且总重误差随三条影响线的偏离程度依次增大。

(3) 基于影响面的总重识别效果优于分轴重的识别效果。Baseline 对应前轴、后轴、总重误差均值分别计算为 6.58%、-5.23%、0.34%，SVM-1 对应的前轴、后轴、总重误差均值分别为 3.75%、-11.66%、4.93%，当两个轴的误差异号时，经过求和能明显减小总重的识别误差，这与桥梁动态称重系统的固有规律相吻合；其余两个影响面对应的各轴误差均为负数，但仍然能得出总重误差是两轴误差的中和结果的规律。

综上所述可以认为，提高 SVM 影响面的识别精度是减小非接触动态称重误差的前提，在动态轴重反演方面总重识别的准确性明显优于分轴重的识别。

### 5.2.3 非接触轴重识别试验研究

结合室内模型跑车试验和 4.5.5 节中基于 SVM 的位移及应变影响面识别结果，分别设置了三轴车型和五轴车型的动态称重测试，设置试验工况中车辆载重设置为满载不变，速度在 1~4m/s 的范围内随机变动。试验中新增的 5 轴缩尺模型车辆如图 5.3 所示，关于该车的轴重轴距测量参数如表 5.1 所示。

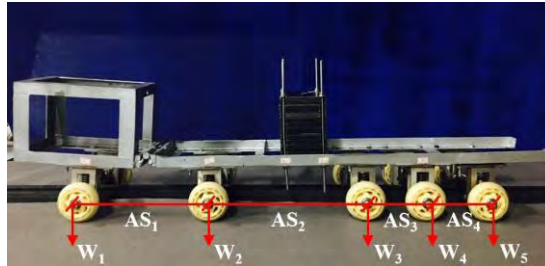
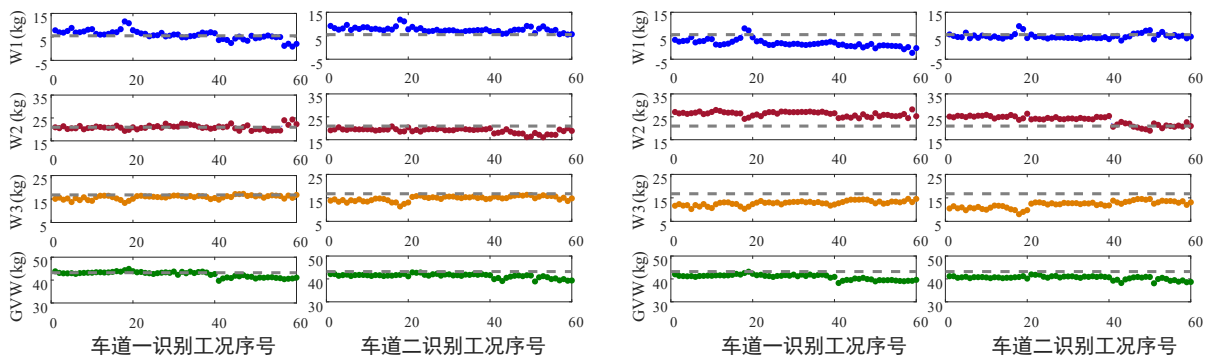


图 5.3 实验室试验 5 轴车模型

表 5.1 试验模型车辆参数

车辆参数	3轴车模型取值	5轴车模型取值
1~2轴轴距AS1/(m)	0.310	0.310
2~3轴轴距AS2/(m)	0.550	0.400
3~4轴轴距AS3/(m)	--	0.150
4~5轴轴距AS4/(m)	--	0.150
总轴距L/(m)	0.860	1.100
第1轴轴重W1/(kg)	5.480	5.670
第2轴轴重W2/(kg)	20.975	16.845
第3轴轴重W3/(kg)	16.775	11.120
第4轴轴重W4/(kg)	--	5.735
第5轴轴重W5/(kg)	--	4.750
总重GVW/(kg)	43.230	44.120

利用双车道影响面标定结果与 SVM 识别结果分别进行动态称重试验，将三轴车和五轴车的分轴重与总重识别结果绘制于图 5.4 和图 5.5。



a) 基于标准均值位移影响面的车重识别

b) 基于 SVM 位移影响面的车重识别