

学校代号 10532

分类号 TU317+.5

学 号 S1701W0004

密 级 公开



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

工程硕士学位论文

基于车辆大数据与区间仿射求逆算法 的中小桥梁结构识别

学位申请人姓名 周 赛

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 周云教授 朱正荣高工

学 科 专 业 建筑与土木工程

研 究 方 向 结构健康监测

论文提交日期 2020年5月30日

学校代号：10532
学 号：S1701W0004
密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

基于车辆大数据与区间仿射求逆算法 的中小桥梁结构识别

国家自然科学基金（51878264）
湖南省交通厅科技进步与创新项目（201912）
长沙市科技计划（kq1706019）

学位申请人姓名：周 赛

导师姓名及职称：周云教授 朱正荣高工

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 名 称：建筑与土木工程

论文提交日期：2020年5月30日

论文答辩日期：2020年5月30日

答辩委员会主席：易伟建教授

The structural identification of small and medium bridges based on
big data of vehicles and interval inverse analysis with affine
arithmetic

by

ZHOU Sai

B.E. (Nanjing University of Science and Technology) 2017

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Architecture and Civil Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Professor ZHOU Yun & Senior Engineer ZHU Zhengrong

May, 2020

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密 ，在 ____ 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

目前我国公路桥梁超80万座，其中构造简单、受力明确的中小跨径桥梁数量居多，日益增大的交通流和普遍的超载现象致使桥梁劣化进程加快、桥梁坍塌事故频发，如何在缩减成本投入的前提下对现役中小型桥梁的承载能力、营运状态、耐久能力进行可靠、有效、快速的评估一直是桥梁健康监测领域亟待解决的问题。

影响线作为桥梁结构的重要特性曲线，可以对现役桥梁的刚度分布、损伤情况、承载能力做出相应评估，而目前常用的影响线实测方法仍然依赖车辆称重和传感器测量，不仅费时费力，而且阻碍交通，所以开发一种无需接触式传感、无需称重标定、无需封闭交通的影响线(面)快速测量方法在非接触桥梁动态称重和健康监测领域均具有较好的应用前景。结合中小桥梁监测技术的发展现状和当前结构健康监测领域的迫切需求，本文提出了一种基于车辆大数据和区间仿射求逆算法的非接触桥梁结构识别方法并进行了以下几个方面的研究：

(1) 理论方面，本文结合桥梁结构影响线实测计算方法与区间分析仿射求逆算法，建立了当轴重参数为不确定区间数时从结构时程响应直接推算桥梁结构影响线(影响面)区间解的反演模型；利用机器视觉技术匹配出的车辆轴重分布区间结果计算每组车辆激励对应的影响线区间，并基于车辆大数据工况的支持和每一组工况下真实解均被包含于区间解的理论前提，采用擅长二元数据分类的支持向量机(SVM)从影响线区间大数据中挖掘提取确定性影响线(面)的位置信息。最后推导了根据标定影响线进行车辆动态称重的计算方程，进而提出了多工况轴重区间和影响线区间复合反馈校验机制，用于校正初始过宽估计的轴重区间，从而达到提高影响线识别精度的目的。

(2) 数值模拟方面，本文参考实际交通中二轴车辆参数统计与分类的研究成果，确立了车辆类型与轴重区间的映射关系。分别建立了基于ANSYS的梁板式桥梁有限元模型和基于Matlab的弹簧阻尼半车数值模型，模拟多种载重、速度、车型工况下的结构动位移响应并依据对应车型和轴重区间计算桥梁影响线区间。将多重工况影响线区间离散为数值边界点，采用SVM二分类算法，在二维数据平面中识别出确定性的位移影响线，与静力影响线吻合度较好。同时，基于闭环验证的思想，将SVM识别的双车道桥梁位移影响面用于移动车辆轴重识别，实现了非接触的桥梁动态称重，然后通过设置较实际分布区间放大不同程度的初始输入区间工况，采用算例验证了轴重区间与影响线区间复合反馈校验机制对过宽估计轴重输入区间的校正效果以及提高影响线识别精度的效果。

(3) 试验方面，本文采用一简支T梁桥与三轴货车缩尺模型进行简化的车桥耦合振动测试，采用高精度的激光位移计和电阻式应变片分别测量模型结构的动态

位移和应变响应，通过设置不同的载重和速度工况验证所提出的基于车辆大数据和区间仿射求逆算法的桥梁影响面识别方法。通过动态测试标定了该双车道模型桥梁的应变与位移影响面，对比验证了本文利用SVM算法识别的影响面结果在可接受误差水平范围内。最后将SVM识别影响面结果应用于车辆动态轴重识别，实现了非接触式的桥梁动态称重，并获得了比较理想的称重结果，进一步证实了本文非接触影响面识别的可靠性与准确性。

关键词：桥梁影响面；区间分析；仿射算法；车桥耦合；大数据；支持向量机；非接触动态称重

Abstract

At present, there are more than 800000 highway bridges in China, among which the small and medium-sized bridges with simple structure and clear bearing capacity is the majority. The increasing traffic flow and common overload cause the bridge deterioration process to speed up and the bridge collapse accidents to occur frequently. How to evaluate the bearing capacity, operation state and durability of small and medium-sized bridges in service reliably, effectively and quickly under the premise of reducing cost investment has always been an urgent problem to be solved in the field of bridge health monitoring.

As an important characteristic curve of bridge structure, the influence line (IL) is able to make professional assessment on the stiffness distribution, damage condition and bearing capacity of the existing bridges. Currently, the commonly used measurement methods of IL still rely upon the utilization of calibrating vehicles and attached sensors, which not only takes time and effort, but also hinders the traffic. Therefore, it has a good application prospect in the field of contactless bridge weigh-in-motion (cBWIM) and structure health monitoring (SHM) to develop a fast measurement method of IL or influence surface (IS) without attached sensors, pre-weighed trucks and closed traffic. This paper mainly studies the following aspects,

(1) In theory, this paper combines the IL calculation method and interval analysis with affine arithmetic to establish the inversion model to directly calculate the interval solution of the bridge IL from the time history responses when the axle weight parameters are uncertain interval variables. Based on the regularity that the true value is included within the interval solutions, it is accessible to use support vector machine (SVM) to extract the deterministic IL or IS from big data of interval solutions under multiple working conditions according to the overlapping region of the upper and lower boundaries. Finally, the equation of typical BWIM based on the calibrated IL is derived, and then the compound feedback verification mechanism based on the mutual deduction of axle weight intervals and IL interval under multiple working conditions is proposed to correct the initial over estimated axle weight intervals, so as to improve the identification accuracy of IL.

(2) In the aspect of numerical simulation, this paper establishes the mapping relationship between vehicle type and axle load interval by referring to the research

results of parameter statistics and classification of two axle vehicles in actual traffic. The finite element model of beam slab bridge based on ANSYS and the numerical model of spring damping half car based on Matlab are established respectively to simulate the IL intervals of bridge corresponding to vehicle types and axle-weight intervals under various load, speed and vehicle type conditions. The IL intervals of multiple working conditions are separated into boundary points, and the binary classification algorithm of SVM is used to identify the deterministic displacement IL in the two-dimensional plane, which is in good agreement with the static IL. At the same time, based on the idea of closed-loop verification, the SVM identified results are employed to back-calculate the moving axle loads for a realization of cBWIM. Then, by setting the initial input range conditions with different degrees of amplification compared with the actual distribution range, several examples are used to verify the correction effect of the axle loads and the improvement of the IL identification accuracy by compound feedback verification mechanism between the axle load range and the IL range with the overestimated input of the axle load.

(3) In the aspect of test, the scaled models including a simply supported T-beam bridge and a three-axle truck are used to carry out the simplified vehicle-bridge coupling vibration test, high-precision laser displacement meter and strain gauge are used to measure the structural dynamic responses, and different load and speed conditions are set to verify the proposed IS identification method utilizing vehicle big data and interval analysis with affine arithmetic. The IS of strain and displacement of the two-lane model bridge is calibrated by dynamic test, and the error of IS identified by SVM algorithm are verified to be acceptable. At last, the identified ISs are employed for weighing vehicle loads to realize the cBWIM, and the ideal weighing result is obtained, which further proves the feasibility and accuracy of the non-contact IS identification method proposed in this paper.

Key words: Bridge influence surface; Interval analysis; Affine arithmetic; Vehicle bridge coupling; big data; Support vector machine (SVM); Contactless bridge weigh-in-motion (cBWIM)

目 录

学位论文原创性声明	I
摘 要	II
Abstract	IV
目 录	VI
插图索引	IX
附表索引	XI
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景及选题意义	1
1.2 桥梁结构智能化健康监测	3
1.2.1 桥梁结构健康监测的研究现状	3
1.2.2 基于机器视觉的非接触桥梁结构识别	5
1.2.3 大数据与机器学习在桥梁 SHM 领域的应用	6
1.3 桥梁结构影响线与影响面	8
1.3.1 影响线(面)的理论计算与实测研究	8
1.3.2 影响线(面)的实际工程应用	11
1.4 工程结构不确定性区间分析	12
1.4.1 区间分析的发展和应用	12
1.4.2 仿射算法的发展和应用	15
1.5 本文研究内容	15
1.6 本文研究的创新点	17
第 2 章 基于区间分析的影响线反问题计算	19
2.1 引言	19
2.2 基于结构动态响应推导确定性影响线	19
2.2.1 桥梁影响线(面)的概念	19
2.2.2 荷载响应线性叠加原理	21
2.2.3 基于响应的影响线计算原理	22
2.3 区间分析理论基础	24
2.3.1 区间变量与区间运算	24
2.3.2 区间向量与区间矩阵	26
2.3.3 变量的相关性与区间扩张	26
2.3.4 区间方程组的求解方法	27
2.4 仿射算法理论基础	29

2.4.1 仿射变量与运算规则	29
2.4.2 仿射向量与仿射矩阵	30
2.4.3 纽曼展开仿射矩阵求逆	32
2.5 基于实测响应的影响线区间反演模型	33
2.5.1 轴重区间参量与区间参数矩阵	33
2.5.2 仿射求逆算法计算影响线区间	34
2.5.3 全局优化遗传算法求解区间影响线	35
2.5.4 蒙特卡罗模拟求解区间影响线	37
2.6 本章小结	39
第 3 章 基于大数据与支持向量机的影响线识别	40
3.1 引言	40
3.2 大数据与机器学习原理	40
3.2.1 大数据的基本概念	40
3.2.2 解决分类问题的机器学习算法	41
3.3 支持向量机分类学习	42
3.3.1 最优分类超平面	42
3.3.2 软间隔最大化分类	45
3.3.3 非线性分类核技巧	46
3.3.4 序列最小优化算法	47
3.4 支持向量机算法识别影响线	49
3.4.1 SVM 影响线识别实现方法	49
3.4.2 模型关键参数寻优	50
3.4.3 模型使用与可视化策略	51
3.4.4 支持向量机算法流程	52
3.5 本章小结	53
第 4 章 车桥耦合数值模拟与室内试验	54
4.1 引言	54
4.2 车桥耦合振动数值求解	54
4.2.1 车辆数值模型	54
4.2.2 桥梁分析模型	56
4.2.3 路面不平整度激励	57
4.2.4 车桥耦合全过程迭代求解	58
4.3 随机工况数值响应输出	58
4.3.1 车辆分类与轴重区间	59
4.3.2 随机模拟工况设置	60

4.3.3 影响线的敏感性分析	61
4.4 区间影响线计算与识别数值算例	65
4.4.1 基于仿射算法的影响线区间计算	65
4.4.2 多种方法计算结果对比	66
4.4.3 支持向量机识别影响线	67
4.4.4 桥梁结构影响面识别	70
4.5 实验室缩尺车桥模型验证	71
4.5.1 试验装置与模型参数	72
4.5.2 试验工况设置	73
4.5.3 跨中竖向动位移响应与动应变响应	73
4.5.4 速度、载重对确定性影响线的影响	75
4.5.5 影响线区间计算与 SVM 识别	77
4.6 本章小结	80
第 5 章 基于影响面的非接触桥梁动态称重	82
5.1 引言	82
5.2 非接触桥梁动态称重的实现	82
5.2.1 基于影响线的车辆动态称重理论	82
5.2.2 非接触轴重识别数值算例	84
5.2.3 非接触轴重识别试验研究	86
5.3 影响线与轴重的复合反馈交互验证	89
5.3.1 轴重过宽估计对影响线识别的影响	89
5.3.2 轴重与影响线区间的复合反馈机制	91
5.3.3 区间重叠程度的应用	92
5.3.4 总重迭代校验结果分析	95
5.4 本章小结	96
总结与展望	97
参考文献	100
致谢	112
附录 A (攻读学位期间所发表的学术论文)	113
附录 B (试验小车载重工况称重结果)	114

插图索引

图 1.1 传统桥梁检测与监测手段.....	2
图 1.2 国家自然科学基金面上项目研究内容	3
图 1.3 桥梁健康监测主要构成	4
图 1.4 大数据的 5V 特性	7
图 1.5 本文研究技术路线	16
图 2.1 简支梁跨中弯矩影响线示意图.....	20
图 2.2 移动荷载简支梁模型	20
图 2.3 车桥动力系统的三类问题	21
图 2.4 理论总响应的线性叠加原理	22
图 2.5 遗传算法求解流程图	37
图 2.6 蒙特卡罗法求解流程图	38
图 3.1 大数据的构成.....	41
图 3.2 机器学习分类原理	42
图 3.3 线性可分最优超平面	43
图 3.4 线性不可分软间隔最优超平面.....	45
图 3.5 非线性变换核技巧	46
图 3.6 支持向量机网络示意图	47
图 3.7 支持向量机分类决策超平面	49
图 3.8 网格搜索法参数寻优	50
图 3.9 SVM 分类模型的参数组合寻优结果	51
图 3.10 SVM 识别影响线结果的可视化操作	52
图 4.1 国际通用整车计算模型	55
图 4.2 二轴车数值计算模型	55
图 4.3 桥梁横截面示意图	56
图 4.4 梁格法桥梁计算模型(单位:cm).....	57
图 4.5 路面平整度样本.....	58
图 4.6 车辆相关参数.....	60
图 4.7 数值模拟随机工况生成	61
图 4.8 模拟不同速度工况对影响线计算结果的影响	62
图 4.9 模拟不同轴距的车辆模型对影响线计算结果的影响	63
图 4.10 模拟不同载重的车辆模型对影响线计算结果的影响	63
图 4.11 模拟其他参数对影响线计算结果的影响	64

图 4.12 影响线区间计算结果($v=10\text{m/s}$).....	65
图 4.13 影响线区间计算结果对比	66
图 4.14 模拟算例中 SVM 识别位移影响线结果	68
图 4.15 各车型识别位移影响线结果对比	68
图 4.16 各车型真实轴重分布统计	69
图 4.17 模拟算例中 SVM 识别邻车道影响线结果	70
图 4.18 模拟算例中基于 SVM 识别的桥梁跨中位移影响面	71
图 4.19 试验模型与装置示意图	72
图 4.20 试验仪器装置.....	73
图 4.21 三轴模型测试车示意图	73
图 4.22 不同载重工况下桥梁主梁实测响应	75
图 4.23 不同速度下试验动应变响应与影响线(M30)	76
图 4.24 不同速度下试验动位移响应与影响线(M30)	76
图 4.25 不同载重下的试验动应变响应与影响线($v=1\text{m/s}$).....	77
图 4.26 不同载重下的试验动位移响应与影响线($v=1\text{m/s}$).....	77
图 4.27 工况 M30 的应变影响线区间($v=1\text{m/s}$).....	78
图 4.28 工况 M30 的位移影响线区间($v=1\text{m/s}$).....	78
图 4.29 SVM 识别试验应变影响线.....	79
图 4.30 SVM 识别试验位移影响线.....	79
图 4.31 SVM 识别试验位移与应变影响面	80
图 5.1 经典桥梁动态称重系统	82
图 5.2 基于 SVM 影响面的车辆动态称重误差.....	85
图 5.3 实验室试验 5 轴车模型	86
图 5.4 实验室 3 轴车辆动态称重	87
图 5.5 实验室 5 轴车动态称重	87
图 5.6 过宽估计区间下 SVM 识别影响线	90
图 5.7 载重区间过宽估计的影响线识别误差	91
图 5.8 轴重区间和影响线区间的复合反馈校验流程	92
图 5.9 影响线区间重叠程度	93
图 5.10 影响线竖标区间重叠程度	94
图 5.11 放大 100% 工况的总重迭代结果.....	95
图 5.12 各工况总重迭代收敛结果	96

附表索引

表 2.1 区间数的基本运算	25
表 2.2 算例 6 的三种方法区间计算结果	38
表 3.1 常用内积核函数	47
表 4.1 车辆数据信息区间统计结果	60
表 4.2 双轴车辆数值模型区间参数取值	61
表 4.3 双轴车辆数值模型固定参数取值	61
表 4.4 不同工况下计算的影响线区间结果	65
表 4.5 多种方法计算结果	66
表 4.6 双车道影响线 SVM 识别误差	70
表 4.7 试验小车载重工况设置	73
表 5.1 试验模型车辆参数	86
表 5.2 动态称重平均识别误差	88
表 5.3 过宽估计轴重区间设置	90

第1章 绪 论

1.1 研究背景及选题意义

改革开放以来的 40 年间，国家对基础设施建设的重视以及投资力度的不断加大强有力地推动了公路交通和桥梁建设事业的蓬勃发展，促使我国成为名副其实的桥梁大国。截至 2018 年年底，我国公路桥梁总数达到 85.15 万座，总里程达 5568.59 万米，桥梁数量与规模已然居于世界首位，并且目前仍以每年上万座的速度新建^[1]。然而由于施工质量和设计缺陷等先天不足，加上环境侵蚀、自然灾害、交通量增大及频繁超载的后天影响，我国桥梁总体疲劳劣化进程加快、损伤程度增加。

据相关统计，2007 年至 2012 年间，国内相继垮塌桥梁 37 座，平均每年有 6.2 座桥梁垮塌，给社会公共财富和人类生命财产造成了重大损失；相关报告也指出，2015 年我国公路危桥统计数量达 76483 座^[2]，其中多数桥梁服役超过 20 年，存在严重的安全隐患，也有很多新建桥梁服役不到 10 年就已经出现了较为严重的病害甚至失效^[3]；这些问题揭示了当前我国已经步入桥梁“大修”时期，大量修建于上世纪的桥梁正在老化，需要采取合理的维修措施才能保证安全运营，目前桥梁养护工作所面临的态势十分严峻，同时也给我国未来桥梁工程的建设质量与管理模式敲响了警钟。近年来，我国桥梁工程技术逐渐从过去的“建设为主”向“建管并重”转型，因此利用科学的健康监测手段及早发现结构损伤和隐患，指导桥梁的日常管理维护，保障工程结构安全运营、延长桥梁的寿命周期成为工程界与学术界共同瞩目的焦点。

传统的桥梁检测评估手段在实际应用中存在诸多局限性，如图 1.1 所示，依靠人工视觉检验的损伤诊断方式严重依赖技术人员的经验水平，容易出现主观判断偏差和遗漏，而且这种表观目视检测结果难以准确反映结构整体的受力状态，评估结论缺乏科学的理论依据；利用静动力荷载试验评估桥梁服役性能则工序繁琐、自动化程度不高、妨碍交通正常运行，甚至存在一定的安全风险；目前部分大型桥梁采用传感器系统监测运营桥梁的状态变化、进行安全预警，但是相关硬件设备价格昂贵、线路器件容易老化损坏，而且对重要等级较低、量大面广的中小型桥梁实施的性价比较低，在应用普及方面还面临许多限制和挑战。因此还有待提出一种适应未来智慧交通、智能桥梁发展趋势的经济、高效、可靠的桥梁结构快速检测评估方法。



图 1.1 传统桥梁检测与监测手段

损伤识别是桥梁结构健康监测和状态评估的主要目标，常用的损伤识别方法有基于结构动力特性参数的动力指纹分析法、基于动力测试资料的模型修正与系统识别法、基于损伤模式学习的神经网络法、基于结构参数全局最优解搜索的遗传算法、基于响应信号特征提取的小波变换以及基于响应信号时频域分析的 Hilbert-Huang 变换等。桥梁结构影响线(面)作为其固有特性，能够直观反映结构的刚度分布，是结构损伤识别的重要指标。监测桥梁在不同使用阶段的影响线状态及变化趋势，对于评估桥梁服役性能具有重要的意义。

目前，常用的影响线实桥测量方法需要借助称重过的卡车和其缓慢行驶时的桥梁动态时程响应测量数据反算影响线竖标值，抑或直接利用现有的 BWIM 系统同时实现车辆称重和结构响应测试。这些方法虽然简单有效，但在实际应用中仍然存在一些不足：

(1) 对于中小型桥梁，执行人工干预的车辆称重标定方法自动化程度不高、效率低下、费时费力，而安装 BWIM 系统的测试方法往往受到经费成本的制约难以实现；

(2) 对运营桥梁进行附着式传感器安装和防护存在一定难度，安装期间的暂时性交通封堵会阻碍正常通行，另外在桥梁主要受力构件上安装传感器操作难度大，线路和传感器件容易损坏并且更换困难；

(3) 桥梁结构影响线计算结果依赖轴重输入值的准确性，而目前常用的实测方法只是用少量的测试车辆进行标定试验而且没有考虑由轴重误差、测量误差、操作误差等带来的影响线识别不确定性。

针对上述桥梁健康监测应用的局限性和现有桥梁检测手段的不足，国家自然科学基金面上项目《基于非接触式机器视觉监测技术与区间仿射算法的桥梁结构影响面反演》提出了一种新型非接触式的桥梁结构快速检测评估方法，通过对车辆-桥梁相互作用系统的视频监控分析反演桥梁结构影响面，实现无需“接触式传感器”，无需“封闭交通”，无需“人工干预”的桥梁状态快速评估，对未来智慧桥梁、智能监测的发展具有重要的理论与实践价值，具体的研究内容如图 1.2 所示。

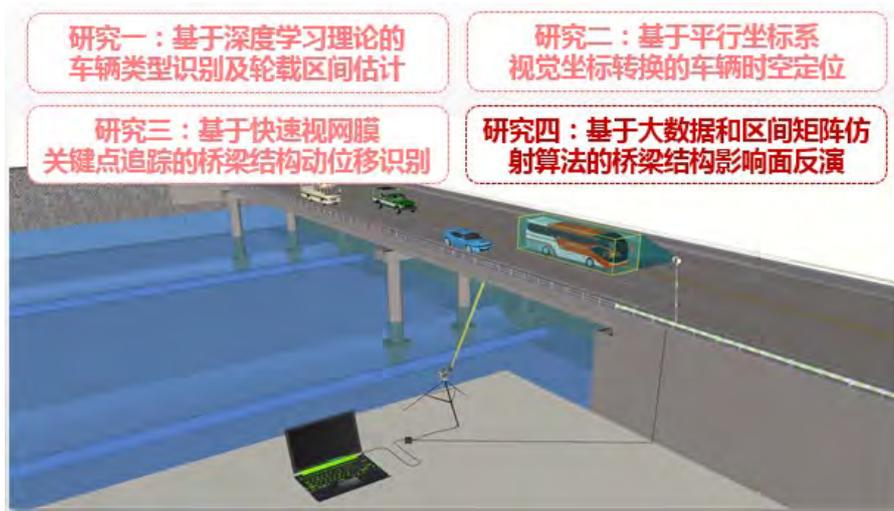


图 1.2 国家自然科学基金面上项目研究内容

1.2 桥梁结构智能化健康监测

1.2.1 桥梁结构健康监测的研究现状

桥梁作为功能复杂的大型基础设施，服役期间一直暴露于恶劣的气候和环境中，结构材料会逐渐腐蚀、老化，加上静、动力荷载的长期作用，其性能退化和损伤积累问题随着时间的推移而加剧，导致桥梁承载能力和耐久性的降低，不仅给行车安全造成隐患，而且会缩短桥梁的使用寿命。因此对桥梁结构健康状况进行定期检测和监测是桥梁日常管理养护的重要内容，对预防桥梁突然坍塌事故、保障桥梁安全运营具有重要意义。

结构健康监测(SHM)作为一门多学科领域交叉融合的技术，主要在重大桥梁工程的健康诊断与智能预警方面应用较为广泛，其利用先进的无损传感技术实时监测现场环境温度、运营荷载、结构响应等，实现对桥梁结构状态变化的在线全面监控，结合监测数据与结构力学理论、有限元计算方法建立结构的健康状态评估模型，从而在桥梁运营状况出现严重异常时及时预警，为桥梁维护与管理决策提供科学指导，并且对结构设计方法与规范标准提供有利的反馈信息。

SHM系统是集损伤识别、模型修正和安全评定于一体的综合性监测系统^[4]，如图1.3所示。一套完整的SHM系统一般由传感器子系统、数据采集传输子系统、数据管理子系统和桥梁状况评估系统四部分组成，通过四个子系统的功能联结分层次实现健康监测的总体目标，具有实时性、自动化、集成化和网络化的特点。早在上个世纪八十年代，SHM系统便开始在世界范围内投入应用，目前我国已在四百余座大型重要桥梁上建立了不同规模的SHM系统，例如香港青马大桥、上海徐浦大桥、杭州湾跨海大桥等结构功能复杂的大型桥梁上均安装了各类传感器件以便对车辆荷载、环境温度、桥梁主体结构的静动态响应以及斜拉索振动响应等

内容实施持续在线监测和智能预警^[5]。桥梁健康监测经历几十年的发展，在传感传输、损伤检测、模式识别、数据处理等核心技术方面得了系列重大突破，主要成果总结如下^[6]：

(1) 健康监测系统对桥梁在施工阶段和运营阶段的各项特征信息变化实施自动、连续、完整的监测记录，并基于这些信息对桥梁的健康状况做出实时、自动的评估，克服了传统检测方法工作量大、主观性强的缺陷，使桥梁的管理维护工作更加智能、科学、高效；

(2) 监测系统大多采用先进的接触式传感技术(如光纤传感器、压电传感器、形状记忆合金等智能传感元件)感知结构本身状态行为的变化(应力、位移、加速度、动力特性等)和外部环境激励(风、地震、温度、车辆荷载等)，同时具备速度快、储存容量大的信息采集与传输能力以及高度集成的监控平台，为桥梁健康监测分析和损伤诊断提供良好的硬件基础；

(3) 开发了一系列以桥梁结构特性指标(频率、振型、模态曲率、模态应变等)为依据的损伤识别与定位技术，形成了柔度矩阵法、矩阵振动修正法、模态保证准则法、坐标模态保证准则法、非线性迭代法及神经网络法等处理方法。

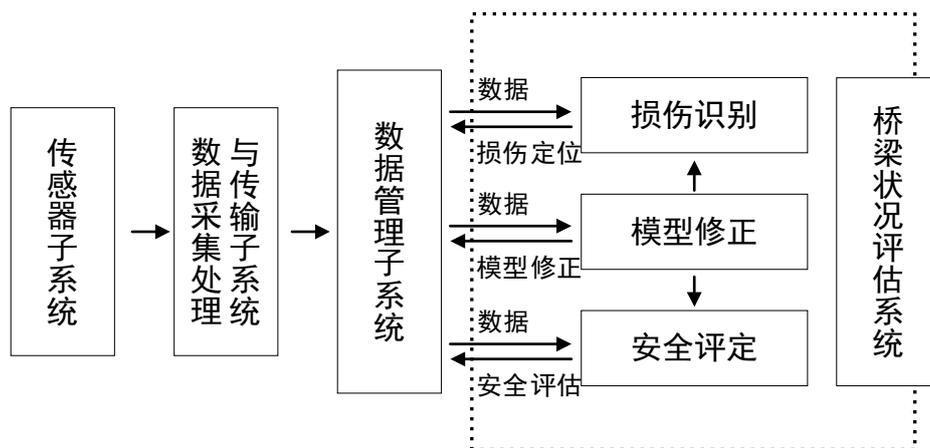


图 1.3 桥梁健康监测系统主要构成

经过数十年的研究探索，桥梁健康监测的理论工程实践都取得了长足的发展，但现今大部分桥梁的SHM在实际工程中尚不能很好的发挥其应用价值，主要原因归纳为^[5]：1)传感器性能不足使得长期采集数据的质量欠佳，监测系统成本昂贵，应用普及受到限制；2)现有的结构损伤识别指标灵敏度不高、稳定性较差，易受到外界干扰；3)海量SHM监测数据未被充分开发利用，尚不能从监测数据中挖掘出可靠的结构状态和损伤信息。这些问题是当前SHM系统迫切需要解决的技术难点，也指明了未来桥梁监测管理的重点发展方向。

近年来，一些智能检测技术成为结构健康监测领域的研究热点^[7]。随着微传感和物联网技术的不断进步，基于 MEMS 的无线传感器网络已基本实现大型结构的多点测量和无线传输，有效解决了传统有线传感器安装困难、线路老化、成本

昂贵等问题；同时，非接触测量技术也在桥梁快速检测评估中受到极大关注，利用微波干涉雷达、视频图像处理、三维激光扫描进行结构精准测量的技术手段已经越渐成熟，机器视觉与人工智能算法的结合更是在桥梁日常监测与管理中展现出广阔的应用前景；另外，压缩感知也是近期极为热门的数据信息处理技术，其克服了过去大型复杂桥梁信息采集所面临的传输缓慢、存储困难等问题，拓展了可用数据的形式和信息丰富度，为后续的专业分析提供了良好的数据保障。目前，这些智能检测技术的发展与应用深刻地影响着在役桥梁的日常维护与安全管理模式，也将有力推动桥梁健康监测系统继续朝自动化、智能化、集群化的方向深入发展。

1.2.2 基于机器视觉的非接触桥梁结构识别

结构识别是桥梁工程结构健康诊断和安全评估的重要手段^[8]，其利用实际结构物理特性(质量、刚度、阻尼)变化能在响应观测数据(频率、振型、位移和应变等)上得到反映的特质来确定结构的真实运营状况，进而开展结构模型验证修改与结构状态监控评估等相关工作研究^[9]。桥梁结构具有体量庞大、形式复杂、服役环境恶劣、荷载随机性强等特点，先进的监测传感技术是获取可靠观测数据与准确进行结构识别的基础与保障。随着数字图像处理技术和计算机技术突飞猛进的发展，基于机器视觉的非接触式结构识别技术在桥梁健康监测领域具有广泛的应用前景，具有距离远、精度高、非接触、操作灵活、成本低、对各类桥型普遍适用的优势。

2014年，Busca等^[10]在野外测量条件下采用不同的摄像机拍摄和不同的图像处理技术提取了列车经过桥梁时的位移响应，并对比研究了机器视觉位移测量技术在环境干扰下的灵敏度、分辨率等性能表现。

2014年，叶肖伟等^[11]对香港青马大桥的跨中挠度进行了现场测试，其采用的机器视觉位移监测系统工作距离达到了千米级，测量精度达毫米级。2016年，叶肖伟团队^[12]将该多点动态位移视觉测量技术同样应用于一座拱桥的加载试验过程中，通过多点挠度测量标定出了该桥的位移影响线。

2017年，董传志等^[13]利用一端固定的钢竖杆振动试验模拟实际桥塔的水平振动位移监测和模态分析，基于多点结构动态位移机器视觉测量方法实现了结构模态频率和振型等动力特性参数的非接触准确识别。

2017年，Feng等^[14]利用一台摄像机对列车行驶中的曼哈顿大桥结构进行了稠密测点下的振动位移监测，通过对高采样频率时程位移信号的时频分析，准确提取出了该桥梁结构的固有频率和模态振型。

最近研究者们通过多个摄像头的分工协作和多元数据的融合识别，进一步实现了结构响应与桥面荷载状况的同步监测，更有利于进行活载作用下桥梁服役性

能、损伤状态的实时在线快速诊断评估。

2016年, Chen Z 等^[15]将杭州湾大桥的动态称重系统与桥面摄像机的视频监测系统信息进行融合, 通过检测动态称重系统前方区域的车辆目标并提取对应的重量信息, 根据时间对应关系在桥面上继续追踪该目标车辆的移动轨迹, 利用该法识别了大跨桥梁车辆荷载的时空分布。

2018年, Darragh 等^[16]开发了由多个无线同步摄像机组成的非接触式桥梁监测系统, 其上的视觉传感器最多可扩展到 10 个, 使得桥梁结构动位移的多点测量与行驶车辆的目标检测分类可以同步进行, 从而在时域内实现结构响应与车辆荷载工况的精准匹配。

2018年, Khuc T 等^[17]提出了一种机器视觉结构识别框架并在实验室试验中进行了验证, 其联合响应监测摄像头和交通监测摄像头分别执行桥梁动态位移测量和桥面移动车辆分类识别任务, 通过获取响应和荷载输入信息识别结构影响面, 实现基于影响面损伤指标的桥梁结构非接触状态评估。

结构健康监测系统中结合机器视觉技术估计外部荷载输入和测量结构输出响应已有比较丰富研究, 这种非接触的机器视觉监测体系有望取代传统的传感器测量系统, 在桥梁可视化智能监测和工程应用普及方面发挥更加积极的作用。

1.2.3 大数据与机器学习在桥梁 SHM 领域的应用

数据是结构健康监测的核心与关键, 如何对结构服役期间产生的海量数据进行妥善处理和挖掘分析是国内外同行关注的热点。近年来, 我国很多已建成的大型桥梁已经安装了包括多种类、较大规模传感器的健康监测系统^[18-21], 从逐年增多的监测大数据中解读结构的状态、识别可能的损伤, 为桥梁的设计、施工、维护、决策提供科学依据, 为结构事故的发生提前预警, 是数据工程科学面临的发展机遇, 也是健康监测面临的技术挑战^[22-24]。

大数据(Big data)的概念最早起源于互联网行业, 在此后的发展过程中大数据的内涵不断被拓展延伸, 研究机构Gartner将大数据定义为海量、高增长率和多样化的信息资产, 需要新的处理模式才能使其具有更强的决策力、洞察发现力和流程优化能力; 目前大数据被进一步概括为具有5V特性的巨量资料, 即数据规模大(Volume)、增长速度块(Velocity)、种类多样化(Variety)、价值密度低(Value)、数据真实性高(Veracity), 如图1.4所示。大数据技术的终极目标不在于对庞大数据信息的掌握, 而是让这些数据经历处理、挖掘、建模的专业技术流程后被更有效地应用于人类产业的合理预测或决策, 通过“加工”实现数据的“增值”, 这个加工的过程便是大数据分析, 数据库知识发现、数据挖掘、机器学习、模式识别、统计学等都是大数据分析的重要组成部分。近年来, 大数据技术发展迅速, 在互联网、电子商务、医学等领域得到广泛应用, 改善了以往计算能力不足、数

据分析方法低效等问题，在SHM的数据处理上也展现出广阔的应用前景。利用机器学习算法挖掘健康监测大数据中的价值信息，揭示荷载、环境耦合作用下桥梁结构的行为本质、机理与演化规律，发展基于监测数据的桥梁健康诊断方法，对桥梁健康监测具有重要的理论与实践意义。



图 1.4 大数据的 5V 特性

SHM 系统通常在恶劣的环境中服役，真实监测数据中不可避免会出现离群、漂移、超量程以及缺失等数据异常现象，严重干扰了真实数据信息的获取，从而给 SHM 系统的准确诊断带来诸多困难。机器学习方法则可以对包含异常数据样本的大数据进行学习，在此基础上实现监测系统异常数据的自诊断，然后进一步对于缺失或异常的样本数据进行填补，目前已在实际工程中获得了良好的应用效果^[25-29]。通过机器学习(Machine learning, ML)对响应监测大数据的处理、分析与挖掘可以实现 SHM 桥梁损伤诊断，一般将结构的自身特性或者响应作为输入，将损伤的位置和程度作为输出，建立输入输出的映射关系，完成模型训练后便可基于结构测试数据获得实际损伤信息。

深度学习(Deep learning)是常用的结构损伤识别方法之一，不需要结构动力学损伤特性的先验知识，通过损伤模式的自主学习，便能自主提取对结构损伤或结构状态敏感的指标^[30]。近年来，深度学习凭借计算效率高、识别精度好的显著优点在结构表观病害识别方面应用广泛^[31,32]，在基于监测数据的损伤识别中也展现出巨大潜力。2017 年，Lin 等^[33]率先将深度学习网络用于结构损伤识别，通过建立 Matlab 简支梁有限元模型模拟不同程度的损伤，采用卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)从模拟输出响应中识别了多处损伤；2018 年，李雪松等^[34]在简支梁的振动试验中使用 CNN 直接从加速度信号中提取损伤敏感特征，验证了 CNN 识别损伤的噪声鲁棒性。目前，关于深度学习方法在桥梁结构损伤识别方面的研究还处于起步阶段，大部分成果还停留在实验室阶段，还需要进一步的研究推动其在实际桥梁健康监测中的应用推广。

支持向量机(Support vector machine, SVM)算法也是结构损伤识别的方法之一, 樊可清等^[35]将结构频域系统辨识方法与 SVM 相结合, 用于桥梁状态监测和安全预警; 何浩祥等^[36]和赵学风等^[37]将小波包分解振动监测数据所提取的频带能量作为模型识别的特征输入向量, 采用 SVM 分类法进行结构的损伤识别与定位; 于繁华等^[38]将结构的各阶频率和振型作为综合性特征输入, 联合 SVM 和粒子群多目标优化算法, 识别损伤程度与位置, 为该领域研究提供了一种有效的方法; Xiang 等^[39]将梁模型的前四阶固有频率作为 SVM 的输入进行损伤位置和深度的识别; Gui 等^[40]对 SVM 进行参数优化后用于损伤识别, 取得了更好的识别效果。除此之外, 随机森林、聚类法、最近邻算法等^[41,42]也被学者应用于损伤识别中。

1.3 桥梁结构影响线与影响面

1.3.1 影响线(面)的理论计算与实测研究

对于简单桥梁结构, 影响线能通过平面梁理论方法结合桥梁最初设计参数计算得到, 复杂的桥梁结构则可通过构建有限元模型获得。

20 世纪 70 年代, Moses^[43]在其早期研究中应用理论弯矩影响线标定动态称重系统, 但实际桥梁与理论模型的差异会降低理论影响线的准确性而增大轴重识别误差。为了使理论影响线更贴合实际桥梁结构, 1998 年 Znidaric 和 Baungartner^[44]通过修改模型边界条件和平滑应变信号峰值完成了理论影响线的修正, 从而获得了精度更高的动态称重结果。后来, McNulty 和 O'Brien^[45]尝试采用手动方法逐点调整理论影响线值使理论推导响应与实际测试响应两者更吻合。然而这些修正方法十分依赖操作者的经验水平, 自动化程度不高, 实用性也较差。

2008 年, 谭冬莲^[46]基于结构力学和线性叠加原理提出了简支梁和连续梁的理论影响线分段多项式函数, 根据荷载的最不利布置和结构响应的峰值求解多项式的系数, 进而反演车辆荷载, 但其仅利用响应信号的峰值作为计算参考, 不免使计算结果容易受噪声等测量误差的干扰, 而且理想化的简支边界条件在实际工程应用中也有很大的局限性。

2016 年, Navid Zolghadri^[47]等人在校正后的桥梁有限元模型上施加单位移动荷载提取任意观测点的影响面, 其认为通过有限元模型导出的影响面比通过安装大量传感器测量的方式更为经济可行, 但是寻求稳定可靠的修正算法具有一定难度。

理论影响线的使用省去了实地测量的复杂工序, 但在实际工程建设中, 桥梁往往因为边界条件不确定、材料特性改变、支座结构与地基的相互作用等因素以及系统建模的误差使得理论值与实际情况大相径庭。野外实桥测试条件下利用车辆加载的结构响应推导实测影响线比修正的理论影响线更能反应桥梁真实状态下

的受力和变形，而且无需准确获知桥梁最初设计参数、桥梁边界支承情况、材料特性等建模信息，适用于多种形式的桥梁结构，具有更广泛的实用价值。

2002年 Gonzalez 和 O'Brien^[48]提出了基于实测动态响应的分段标定法，利用车前轴上桥至后轴上桥之间的应变响应除以前轴重标定出第一段影响线，依据已经标定出的影响线依次递推就能沿车辆行进方向标定出下一段影响线，直到完成全桥长度的标定。但是这种递推法存在误差积累问题，前一段影响线的准确性会影响后一段的标定结果，最终可能导致较大的误差。

2005年，Hirachan^[49]巧妙地选取了两辆轴距相同、载重不同的双轴车依次进行跑车试验，然后根据两辆车的轴重比例关系采用抵消法从测量响应中分离出单轴的响应，进而计算影响线。该法虽然适用于多种结构形式桥梁的测试，但需保持不同工况之间车速和行驶路线的一致性，测量结果的准确性受车辆动力冲击因素和随机误差的影响较大。

2006年，周建庭等^[50]利用桥梁静载试验计算影响线离散值，事先对标定车辆称重并沿桥跨方向按指定位置加载，记录相应测点静挠度变形，利用单轴重合的方法依次迭代递推轴荷载位置处的影响线竖标值。该试验得到的是影响线离散序列值，要想获得光滑连续的曲线，还需要加密加载位置、增加试验工况。对比 Gonzalez^[48]、Hirachan^[49]采用的基于动态响应的计算方法，该方法可以避免动力荷载冲击影响，但是实际试验操作效率低下，更费时费力。

同年，O'Brien 和 Quilligan^[51]提出了一种数学矩阵方法从测量应变响应中直接计算影响线，大大提高了影响线实测方法的效率。其采用与 Moses 动态称重算法类似的最小二乘原理，构造包含标定车辆轴重、轴距信息的大规模参数矩阵，进而求解影响线反问题。利用该方法提取的影响线能很好地重构车致动态响应，具有较高的精度和实用性。

2014年，Sio-Song Ieng^[52]指出 O'Brien 的矩阵方法^[51]在强干扰环境下测试精度会下降而且每次计算只支持单车工况，于是提出了基于极大似然估计的改进方法，通过多种车型车速引起的连续桥梁响应得到影响线标定结果，扩大了参与影响线计算的样本工况数量，从而提高了计算结果的鲁棒性。

一般地，根据实测动态响应信息反演的影响线不可避免地包含桥梁自振、车辆动力效应、风荷载以及温度效应等成分，尤其在桥梁边界简支和车辆高速行驶的情况下振动干扰更为明显。这种包含“动力效应”的计算结果不足以体现影响线的准静态特性^[53,54]，而采取简单的滤波处理虽能在一定程度上消除桥梁振动的影响，但势必会导致影响线精度的降低。

2009年，Yamaguchi^[55]将影响线取为高次多项式计算理论响应，通过理论响应与实测响应的方差最小化确定多项式系数，相当于用多项式拟合桥梁结构影响线。

2014年,王宁波^[56]结合影响线理论机理,提出影响线的多项式分段拟合方法;2019年,陈志为等^[57]利用三次B样条基函数的线性组合重构了实测影响线。

上述的曲线拟合方法均能有效地去除振动影响得到光滑的影响线,但是对于复杂边界桥梁和连续多跨桥梁的适用性仍有待考量。目前如何准确提取准静态特性的桥梁影响线已有不同的方法被提出,但该方面的研究尚处于不完善阶段,对于如何妥善处理实测影响线中的振动干扰项、提取准静态影响线,还有待提出一种更稳定更精确适应性更强的方法。

对于复杂的多车道桥梁结构,一维影响线已经不能体现车辆作用荷载在桥面横向的传递与分布以及结构的空间受力变形,因此学者们针对多车并行情况下的2D影响面标定方法展开研究。

2002年,Quilligan等^[58]将经典的一维Moses算法延伸至二维,考虑车辆在桥面上的横向位置,通过最小化理论响应与实测响应误差标定影响面,并在一座单跨整体式板桥上进行了验证。

2013~2014年,Zhao等^[59,60]在Quilligan的基础上针对常见的梁板式桥梁提出了修正的2D影响面标定方法,其监测桥梁截面上的每一根T型梁梁底应变,以行车过程中各梁应变峰值在总应变中的占比为依据将车辆轴荷载在T梁上横向分配,分别计算出每根T梁的影响线。另外,Zhao指出这种方法对于箱型梁桥和长跨桥是不适用的。

2019年,陈志为^[57]在一座双向六车道的混凝土箱梁桥上进行了跑车试验和应变监测,识别出同一测点不同车道的响应影响面。

传统的影响线标定依附于桥梁动态称重系统,需要借助应变传感器或其他先进的传感技术获取车辆的关键计算参数^[61-63]。随着机器视觉、人工智能在桥梁健康监测领域的兴起与发展,交通车流中的车辆类型、实时位置、轴距轴重等信息以及桥梁结构的局部动态响应皆能直接从监测视频中同步提取^[64-70],使得桥梁影响线的标定逐渐脱离对接触式传感器的依赖而变得灵活、经济和智能。

2009~2016年间,Catbas等^[71,72]将先进的计算机视觉技术应用于行驶车辆的监测追踪,在对车辆分类和定位的基础上,利用应变传感器同步采集响应计算影响线。但是由车辆分类得到的估计轴重是车辆的空车质量,随着与实际轴重的偏差增大,计算出的影响线误差也会增大。

2016年,T.Ojio^[73]利用传统的标定卡车试验计算出桥梁影响线之后,通过摄像头监测交通车辆时空位置的同时利用机器视觉技术获取桥梁结构动态响应,从而进行车辆轴重反演,并提出了不依赖于传感器测量的非接触动态称重的概念。但是前期卡车标定过程中不免需要事先称重和封闭交通,尚未达到全自动化、完全非接触的水平。

关于桥梁影响线(面)的标定,学者们已经做了大量数值模拟和试验研究,提

出了许多行之有效的方法，未来也不断致力于各个方面的改进和完善。目前基于结构实测响应的桥梁影响线(面)反演手段逐渐向智能化、非接触的方向发展，这不仅是发展“智能桥梁”、“智慧交通”的必然趋势，也是机器视觉、人工智能推动土木工程和桥梁健康监测研究迈向新时代的良好契机。

1.3.2 影响线(面)的实际工程应用

1.桥梁动态称重

影响线(面)是桥梁动态称重(BWIM)系统的有效媒介，直接通过结构响应便能反演行驶车辆轴荷载，同时影响线标定精度也决定了称重系统的精度。为了提高影响线的识别精度以及改善基于应变影响线的 BWIM 算法的测量精度，研究者在优化病态反问题求解算法、优化传感器布置等方面均做了大量有限元分析和实桥试验^[74-76]。

2000年~2010年，学者们对基于影响线(面)理论的 BWIM 桥梁应用形式进行了拓展。Xiao 等^[77]通过测量一正交异性箱梁桥的纵向加劲肋缘应力标定出车轮作用覆盖范围内各根纵肋构件的影响线，并利用这些影响线计算出通行卡车的轴重；Yamaguchi 等^[55]在一曲线型两跨连续梁板式公路桥上进行了应变影响线标定和卡车总重识别；Park 等^[78]介绍了 BWIM 系统在大型斜拉桥上的发展与应用现状；Kalin 等^[79]在不同类型桥梁上对比测试了 BWIM 实际识别效果；这些现场试验研究有效验证了通过影响线(面)进行车辆荷载识别方法在多种桥梁形式上均能适用，但一般在车道较少、跨度不大的梁桥与板桥上应用效果较理想。

2010年，邓露等^[80]利用车桥耦合振动理论和影响面的线性叠加原理识别车辆动力轴荷载。2013年，王宁波^[81]通过数值模拟试验探究了影响线和 BWIM 的适用桥型和计算精度影响因素，并提出了一套 BWIM 精度等级评定方法。目前，基于影响线的 BWIM 系统已在国内外多座桥梁上投入使用，相比基于系统动力学分析求解的移动荷载识别方法^[82]，基于影响线的车辆轴重识别具有良好的稳定性和抗噪声干扰能力，因此在实际工程中拥有广泛的应用前景。

2.桥梁状态评估

桥梁结构影响线能反应荷载作用位置移动时结构刚度的分布情况，包含了桥梁状态的全局信息，具备对局部损伤敏感的特性和良好的抗干扰能力，是一种比较直观可信的结构损伤指标，是桥梁快速评估的有效依据。

2004年，Choi^[83]提出弹性损伤力理论，通过研究发现静定梁在损伤前后会引起静位移改变，可以用位移影响线对损伤位置进行识别定位。2009年，刘纲^[84]对损伤力影响线进行了理论证明，提出可以利用静定梁影响线的拐点识别损伤位置，根据影响线峰值大小完成单元损伤程度的直接辨识，而且一个位移测点可以同时识别多处损伤。

2008年,寇晓娜^[85]提出应用挠度影响线及其一、二阶导数进行桥梁结构损伤识别。通过对比损伤前后挠度影响线的变化识别损伤,但就某些程度而言依靠挠度影响线对损伤的敏感性还不能达到定量鉴别损伤的目的。

2011年,王艺霖^[86]提出基于影响线二次差值的桥梁损伤识别方法,基于对桥梁结构的人为虚拟分割,建立定位损伤的“支座反力影响线差值指标”和“跨中位移影响线差值指标”。

2011年,Zaurin等^[72,87]将应变影响线用作判断损伤的指标,将多组影响线的竖标值经马氏距离转换后,从统计学角度检测损伤异常值。但是只有损伤附近区域的测点才对损伤具有敏感性和判断力,需要在结构上进行密集型的应变测点布置,这在实际应用中十分不经济。

2015年,陈志为、徐幼麟等^[88]利用香港青马大桥健康监测系统获得应力时程响应得到的应力影响线来识别大跨悬索桥梁损伤,验证了影响线差值一阶和二阶导数对于损伤具体位置的精确识别。2017年,陈志为等提出了一种更为科学的基于挠度影响线的损伤指标^[89,90],通过特征参数分解重构梁挠度影响线矩阵,根据挠度影响线矩阵的变化确定结构损伤的位置和程度,并在简支混凝土梁和连续梁试验中得到有效验证。

除了直接利用影响线作为损伤指标,一般的大型复杂桥梁结构也会间接地利用实测影响线修正有限元模型,从而进行精确地损伤评估和承载力评定。总之,相比其他桥梁评估的静、动力测试和指标,影响线具有数据精度高、信息量丰富、抗环境干扰、稳定性强等优点,所以在桥梁状态评估方面有着良好的应用。

1.4 工程结构不确定性区间分析

1.4.1 区间分析的发展和应用

大多数工程结构在设计与分析时采用的计算参数和计算模型都是确定的,但是实际工程中时常面临测量精度不足、人为误差造成的不确定因素或者参数本身具有一定变化域的特殊案例,使得材料弹性模量、几何尺寸、荷载大小、计算模型含有不确定性^[91-94]。如果将这些不确定因素直接忽略或粗糙处理,可能会得出矛盾或不合理的结果,最终影响设计结构的可靠性和安全性。因此将不确定性的概念应用到工程结构分析问题中显得尤为必要。

分析具有参数不确定性工程问题的数学模型主要有三种,随机模型、模糊集模型、区间模型。随机模型^[95-97]是一种典型的概率分析模型,在工程结构分析中起步较早,相关理论发展与应用已比较成熟,主要是通过概率统计方法得到不确定变量的均值、方差等数字特征,进而将之描述为随机变量,运用概率论的数学原理解决随机性问题,结果较为可靠;模糊集模型^[98-100]将边界取值具有“不分明

性”、“逐渐过渡性”的参数描述为模糊参量，一般使用样本统计分析得到的隶属函数来定义模糊量的模糊允许区间，用以对实际工程问题中带有主观性信息进行合理考虑，诸如结构的重要性、施工质量、自然环境的影响等等。然而，在数据统计资料不充分的情况下，待解决问题的不确定属性并不能用概率密度函数或隶属函数准确描述，抑或设计者只关心结果的波动范围而不在意具体的分布情况时，前两种模型都无法给出恰当的结果。区间分析模型在处理类似情况时有独特优势，采用非概率分析方法得到一个包含精确结果的闭合解区间，无须获取参数的先验分布便可以求解方程或函数，在工程结构不确定性分析方面具有广泛的应用前景。

20世纪50年代末，Moore^[101]率先提出了区间算法的概念，后来的几十年间，Moore和Alefeld等分别对区间分析领域的基础性理论进行了完善^[102,103]。区间算法在早期用来处理计算机内浮点运算问题^[104]，在处理数据误差、保证数据计算精度方面具有较高的应用价值。20世纪80年代，非概率的区间算法研究开始受到国内外学者的极大关注^[105,106]，许多区间分析方法被提出用于不确定性问题的边界计算以及解决边界扩张问题。

区间分析方法的数学研究领域主要有区间数运算、区间优化设计和区间方程组求解，对此苏静波作了比较的全面的介绍^[107]。由于区间数的运算仅满足交换律、结合律，而分配率、抵消率等则表现为弱的形式^[103]，使之与实数运算大不相同；另外，对区间数的相关性考虑不足会加剧运算结果的保守性，导致结果的区间扩张问题，这是区间分析方法在工程结构分析中应用受限的主要原因。区间优化设计的研究主要是应用区间优化理论，将不确定性问题转化为确定性问题进行分析，比常规的数学规划方法更容易得到全局最优解，故在工程结构区间优化和可靠度分析中十分受用^[108-112]。

区间方程组求解一直是区间分析的要点和难点。1997年，Rao等^[113]集中介绍了直接组合法、区间高斯消去法、区间截断分析法几种用于区间线性方程组的解法，同时还提出了将区间分析与有限元分析进行有效结合的思想。过去的几十年间，区间方程组的求解方法依托区间有限元的应用背景成为区间数学的研究热点，主要进展介绍如下：

自1993年起，陈塑寰、邱志平等在区间有限元静、动力响应和矩阵特征值问题上做了大量的研究^[114-122]，提出了基于微小扰动摄动原理的区间摄动法和子区间摄动法。子区间摄动法比区间摄动法在大区间问题上效果要好，适用范围更广，但由于两种方法在运算过程中均使用了区间数学的自然扩张特性，所以导致方程的理论计算结果较实际解区间偏于保守。

1996年，禹智涛等^[123]基于区间分解定理将有限元区间控制方程转化为两个普通的线性方程组进行求解，简化了区间数的运算，降低了求解难度，但是其忽

略了以分配率代替区间数亚分配率造成的误差，因此不适合进行区间宽度较大的运算；2003年，吴晓等^[124]利用泛灰数的运算性质，将有限元区间控制方程转化为泛灰区间方程组求解，但泛灰区间运算会引起区间的收缩问题，最终得到的解区间往往小于实际结果的区间范围。这两种方法均在原问题基础上采取了一些近似，对区间数的运算进行了一系列简化，但近似技巧的使用不可避免产生误差，这一误差可能引起结果的较大偏差。

迭代法是基本的区间线性方程求解方法，1999年，Markov^[125]提出了求解区间线性方程组的Jacobi迭代方法，要求区间刚度矩阵收敛才能得到精确解；2001年，Dessombz等^[126]提出了另一种解决区间有限元控制方程的迭代法，但在实际应用中计算结果偏于保守，对于大规模方程组的求解十分费时；2002年，郭书祥、吕震宙^[127]基于区间运算的特性提出了一种区间有限元迭代法，求解中仍需满足矩阵收敛条件；2004年，Hansen等^[128]在其书中介绍了全局优化的区间迭代法，但在区间宽度较大时难以达到收敛。迭代法的共性是要求迭代方程收敛，收敛性是区间方程的前提，并且随着不确定性的增强，满足区间方程收敛性条件的难度就越大。

区间数运算过程中的区间扩张问题是削弱区间迭代求解方法精确性的关键原因，区间截断法^[113]则能够有效抑制区间扩张，但存在端点不能退化的问题。2002年，吕震宙等^[129]针对这一问题做了研究改进，提出改进的区间截断法，但是截断准则仍然不易确定，计算结果受截断准则的影响较大。

1999年，陈怀海^[130]将直接优化法应用于区间线性方程组中，将不确定变量的区间范围取为边界约束，利用MATLAB优化工具箱求解全局优化问题；类似地，2004年，王登刚^[131,132]采用遗传算法求解区间有限元方程，主要采用实数编码遗传进化策略求解含有区间参数的全局最优化问题；2012年，孙靖^[133]开发了基于多区间参数的多目标遗传优化算法求解区间线性方程组。以上优化方法在方程规模较大、不确定量较多、区间变化范围较大的情况下往往表现效率低下，而且容易收敛于局部最优。

2001年，Mcwilliam^[134]针对已知参数不确定性的区间有限元最不利响应问题，提出基于参数与响应单调性关系的参数组合法，郭书祥认为参数组合法避免了由于区间数的相关性运算而导致的区间扩张，能获得更紧凑的解区间^[135]。比起穷举组合法^[113]，这种以单调性为依据的参数组合求解效率更高，在有具体工程背景的问题中能取得很好的效果。2007年，梁震涛等^[136,137]通过Monte Carlo数值模拟产生大量参数组合计算区间有限元控制方程的解，克服了运算中区间扩张的问题，求得了精度较高的响应区间。

近年来，学者们致力于区间分析在工程实际问题中的应用开发，为含有不确定性和误差的区间有限元静动力分析^[138-140]、系统非概率可靠性分析^[141-143]、基于

区间模型的反演分析^[144-146]、复合材料研究^[147]、结构损伤评估^[148-150]、有限元模型修正与参数识别^[151,152]、车桥振动参数识别与响应预测^[153-156]等领域的研究提供了有效的解决途径。当前区间线性方程组的解法一般需要硬性条件约束或者只是针对部分问题适用,寻找区间线性方程组的最优算法仍然在不断的发展探索中。

1.4.2 仿射算法的发展和应用

区间分析是解决工程结构不确定性问题的有效方法,但由于区间算法需要将所有可能结果包络于界限值内,不可避免会出现区间扩张问题,甚至会导致计算结果的界限被过分放大而令其失去参考价值。区间运算规则具有强烈的保守特性,尤其在深度嵌套的运算中扩张问题更加突出,区间扩张误差随着函数非线性程度的增强、迭代次数的增多而加剧,因此许多科研工作者对该方面进行了积极探索,致力于寻找减小此类“误差爆炸”的有效手段方法。

为了解决区间运算规则固有的保守性问题,2003年,Figueiredo和Stolfi提出了一种新的仿射算法^[157,158],相比界限表示的区间算法,仿射算法通过为不确定变量赋予噪声元信息,使之在计算过程中具备自动记录并追踪变量相关性的能力,当变量包含的噪声元呈负相关时可以通过变量的抵消运算减弱区间扩张,尤其在变量线性相关程度较高时更能体现仿射算法的明显优势。正因如此,仿射算法目前已在多个学科领域^[159-161]得到广泛应用。

2009年,朱增青^[162]针对仿射变量乘法运算过于保守的缺点,提出了基于导数信息的矩阵形式仿射算法,适用于变量范围较小时进行高效求解。

2010年,Degrauwe等^[163]将仿射算法应用到区间有限元控制方程中,提出了基于纽曼展开求仿射矩阵逆的方法,并在有限元的静力分析算例中验证了其解的可靠性和紧凑性。

矩阵仿射求逆算法的提出为大规模区间反问题的分析提供了有效途径,在求解的过程中能考虑变量的相关性从而避免了复杂嵌套计算的误差爆炸,相比于传统的方法更高效精确。

1.5 本文研究内容

国家自然科学基金面上项目《基于非接触式机器视觉监测技术与区间仿射算法的桥梁结构影响面反演》包括基于深度学习理论的车辆类型识别及轮载区间估计、基于平行坐标系视觉坐标转换的车辆时空定位、基于快速视网膜关键点追踪的桥梁结构动位移识别、基于大数据和区间矩阵仿射算法的桥梁结构影响面反演四项研究内容,本文基于其中的第四项内容开展研究,提出了一种针对中小桥梁的新型结构影响面识别方法,在利用机器视觉技术匹配出作用车辆轴重区间的成果基础上,通过对大数据分析理论和区间仿射算法的综合运用完成非接触标定过

程，最终准确反演出桥梁结构影响线(面)。该研究思路打破传统的影响线计算模式，采用区间分析手段克服难以直接获取车辆轴重准确值的难题，将实际交通中的每一辆车作为为影响线标定过程中的测试车辆，使得大数据支持下影响线(面)的识别结果更具有全局性和鲁棒性，也为未来实现桥梁智能监测提供了技术前景。

目前基于先进传感监测系统在桥梁损伤检测与安全评估方面起到了积极地作用，但由于传感器精度较低、性能不稳定、老化较快、硬件成本昂贵等原因在量大面广的中小桥梁的应用上仍具有很大的局限性。为了早日实现交通路网桥梁的智能化、集群化监测管理，有必要将先进的机器视觉、大数据分析和机器学习技术融合进来，开发一种经济、灵活、可靠的中小型桥梁快速检测评估方法。结合前述研究基础，本文提出了一种新型非接触式中小桥梁结构影响线识别方法：在根据机器视觉车辆分类获知轴重估计区间的前提下，基于含有不确定输入参数的区间分析理论，结合区间仿射矩阵求逆算法从实际测量的桥梁响应中反算推演获得影响线区间；在车辆激励大数据支持下，利用 SVM 智能算法从多工况的影响线区间边界数据中提取真实影响线的位置信息进而识别出确定性的影响线，完成从不确定性输入到确定性输出的回归；研究中还讨论了轴重区间过宽估计引起的 SVM 识别影响线的误差，继而提出轴重区间和影响线区间的复合反馈机制，通过两者的互相推导迭代使过宽估计区间向准确值收敛，最终达到提高影响线识别精度的目的。图 1.5 为本文研究的总体技术路线，经过数值模拟和室内车桥模型的初步试验验证，该方法能有效从多工况的响应和对应的轴重区间中识别出桥梁结构影响线，并且与标定出的影响线结果较为吻合，而且该套方法还具备一定的自适应调节功能，能够根据输出信息反馈修正输入误差，提高最终的识别精度。

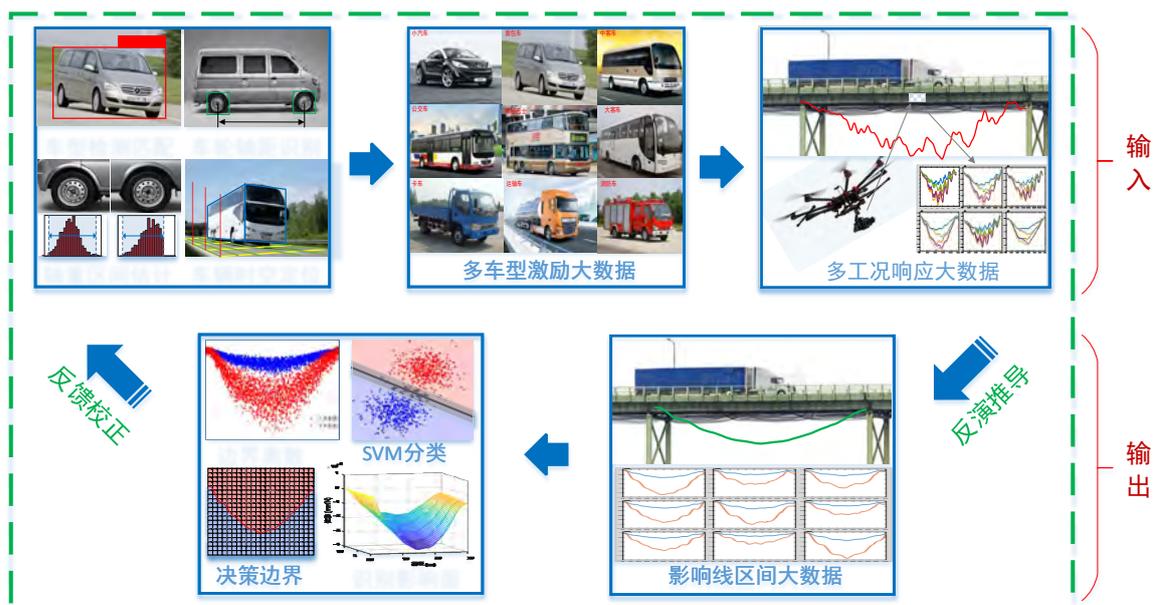


图 1.5 本文研究技术路线

全文共分五章：

第一章分别介绍了桥梁健康监测领域的研究现状、基于机器视觉的非接触桥梁结构识技术方法和以机器学习为核心的大数据挖掘技术在桥梁结构健康评估损伤诊断方面的应用情况，然后介绍了桥梁影响线标定技术与方法的研究进展、不确定性工程结构区间分析的发展现状，基于此提出了本文的研究内容、研究思路和研究的创新点。

第二章介绍了直接由桥梁结构动态响应进行影响线反演的数学计算方法，然后基于区间分析理论基础以及仿射矩阵求逆方法，推导建立了轴重为不确定区间参数情况下的影响线区间反演模型，并用全局优化遗传算法和蒙特卡罗模拟方法验证该区间反演模型计算结果的准确性。

第三章介绍了大数据与机器学习算法原理，基于大数据与区间分析方法的融合，利用支持向量机二分类技巧从大数据工况的影响线区间中识别影响线数值解，同时对SVM模型应用过程中的学习原理、可视化策略、算法流程进行了简要说明。

第四章运用车桥耦合数值模拟算例和实验室缩尺模型试验对本文提出的方法进行验证。建立了ANSYS和Maltab联动的车桥耦合振动数值计算模型模拟桥梁结构响应的输出，一方面从确定性问题角度探究了车辆模型参数对影响线计算结果的影响，另一方面设置随机车辆激励大数据工况完成了影响线区间反演和SVM确定性影响线的模拟识别，识别结果与标定结果吻合良好。在实验室车桥模型试验中，基于桥梁实测应变和动位移响应数据，同样验证了本文思路与技术路线的正确性和可行性。

第五章介绍了车辆动态称重研究现状和基于实测响应与影响线标定结果的车辆动态轴重识别原理，通过分析基于SVM影响面的称重结果得出总重识别误差优于分轴重识别的结论，并基于此提出了轴重区间和影响线区间的反馈校验机制，以区间重叠程度为依据校正输入区间，从而提高大数据工况下SVM识别影响线的准确性，使本文方法具备一定的自适应调节校正能力。

在总结与展望中，对全文进行总结分析，讨论了本文方法存在的不足、明确了有待改进的方向，对日后的研究提出了新的展望。

1.6 本文研究的创新点

桥梁结构影响线测定在桥梁动态称重和桥梁状态评估中均有重要的应用，本文针对目前运营阶段桥梁影响线标定的方法和研究现状，突破性地将区间反演模型和大数据分析相结合，提出了一种运用机器视觉辅助技术的新型非接触式桥梁影响线测定方法，为未来实现自动化、智能化、非接触的桥梁健康监测提供可能。

传统影响线测量方法的重要前提是已知车辆轴重，由于很难在不封闭交通的情况下获取车流中车辆轴重的准确值，故目前还未开发出一种现实可行的技术可

以对服役桥梁实施自动化非接触的影响线标定。所以本文另辟蹊径提出了一种崭新的研究思路，首先对目前国内交通中的常见的二轴车辆进行分类和轴重统计，建立车型与对应分轴重区间的映射关系；然后基于实测桥梁响应与车辆时空位置的同步以及车型检测分类匹配出的轴重区间，运用区间分析仿射矩阵求逆算法计算单工况的影响线区间解，即为区间输入到区间输出的计算过程；最后在车辆大数据工况支持下，采用支持向量机智能算法从影响线区间离散出的两类边界值大数据中提取决策分类曲线作为待求的影响线近似数值解，完成区间输入向确定值输出的收敛过程。

该套理论方法将交通车流中正常行驶的车辆作为标定测试车辆，使大数据支持下的桥梁影响线测量结果具有很好的鲁棒性，而且上述方法中每一步的实施仅需要计算机、高精度摄像头和算法的支持，节省人力物力，真正实现非接触测量，在建设“智慧交通”“智能桥梁”的时代背景下具有很好的应用潜力。

第2章 基于区间分析的影响线反问题计算

2.1 引言

将工程问题抽象成研究所需的理论模型时,总会遇到一些不确定因素的影响。将不确定变量描述为区间变量,运用区间数学的包络思想建立区间分析模型,无需大量的统计资料支持,便能得到有效解区间。这种对变化范围的简化专注,让研究者不必纠结于描述不确定性的准确表达方式,不仅在数学运算过程中保留参数引起的不确定性,还能让最终计算结果很好地包含精确解。但是纯粹的区间运算往往不能充分考虑变量的相关性,使得区间分析面临区间扩张误差,对于反复嵌套的长计算甚至会导致误差爆炸,使结果区间的计算失去参考意义。仿射算法则通过引入噪声元将区间数等效表示为仿射型变量,在仿射运算中能根据噪声元成分实现变量相关性的识别追踪,能有效抑制区间扩张问题而获得更加紧致精确的解区间,即使在反问题的计算中也具有稳定的性能表现。

在基于桥梁实测动态响应进行影响线(面)的反演过程中,车辆轴重值是执行计算所需的关键参数。考虑到没有 BWIM 系统支持下获取正常行驶车辆轴重准确值十分困难,本文基于非接触结构识别的思想,利用事先对国内常见各种类型车辆的轴重参数调查统计,将车辆轴重根据对应车型分类匹配为区间估计值,然后结合区间分析思想建立了影响线的区间反演模型,并应用仿射算法和纽曼展开求解该区间反问题的有效解。不必提前获知行驶车辆的准确轴重,便能根据影响线的区间反演模型得到作用车辆对应的影响线估计区间,实现了影响线的非接触区间识别。

2.2 基于结构动态响应推导确定性影响线

2.2.1 桥梁影响线(面)的概念

在结构力学中,影响线是单位荷载作用在结构上不同位置时,用来表示结构某一截面的内力或变形变化规律的曲线,是研究移动荷载作用效应的基本工具,也可用来确定梁上活荷载的最不利位置。一般可以根据静力分析法或机动法求解支座或结构任意截面的内力影响线,图 2.1 是一单跨简支梁的跨中弯矩影响线示意图,其理论影响线方程如式(2.1)所示。当单跨简支梁上作用多个荷载时,基于梁结构为线弹性变形且效应与位置线性相关的前提假设,梁上某一点的总效应等效于单个荷载作用效应的线性叠加。

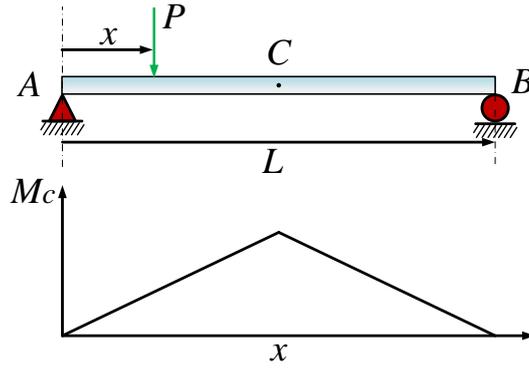


图 2.1 简支梁跨中弯矩影响线示意图

$$M_c = \begin{cases} \frac{Px}{2} & 0 < x < \frac{L}{2} \\ \frac{PL}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right) & \frac{L}{2} < x < L \end{cases} \quad (2.1)$$

桥梁影响线则表示车辆轮轴荷载作用在桥面的不同位置所引起的结构某观测点的内力或变形，当考虑车辆的横向分布位置对该观测点作用效应的影响时，则需要将同一截面各根主梁或各个车道对应的一维影响线横向联结拓展为二维影响面，才能准确反映桥梁的平面力学特性。

在研究车桥相互作用机理时，一般会将车桥系统做出一系列简化，例如进行车桥振动数值模拟时采用的移动荷载简支梁模型(如图 2.2)便是一种极大的简化分析策略，将关注点聚焦于桥梁跨径方向的荷载分布及竖向平面内的结构变形，使得车辆荷载与桥梁结构之间的力学作用分析起来更简单明确。然而对于双车道或多车道桥梁，车辆荷载在纵横方向均有传递，桥梁不能简单地等效为细长杆件受力，而应视作二维平板单元受垂直力甚至更为复杂的空间体系受力问题。故对于多车道的宽桥，有必要考虑车辆荷载的横向分布，通过对影响面的识别更准确地分析车辆作用下复杂桥梁的受力与变形，并利用影响面特性对桥梁的服役性能与状态进行评估。

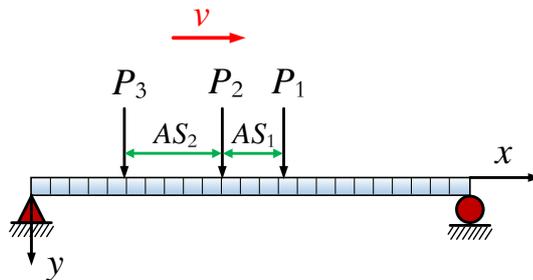


图 2.2 移动荷载简支梁模型

对于桥梁结构而言，影响线是桥梁自身固有特性参数。如果将桥梁结构看成

一个振动系统,行驶的车辆作为外界激励输入,引起的结构动态响应(挠度、应变、弯矩等)视为响应输出,那么车辆荷载、影响线、桥梁响应三者便组成了一个紧密联系的封闭系统,经过合理简化抽象后成为一个数学计算模型。如图 2.3 所示,当该系统中有两个参量已知时,剩下一个参量可以通过计算确定,因此从动力学正反问题的角度出发:当车辆荷载输入与桥梁系统特性参数(影响线)已知,需预测桥梁输出响应,此为动力学正问题;当输入与输出部分已知,求解桥梁系统参数(影响线),此为第一类反问题;当桥梁系统参数(影响线)和结构响应已知,求解车辆荷载激励,此为第二类反问题。

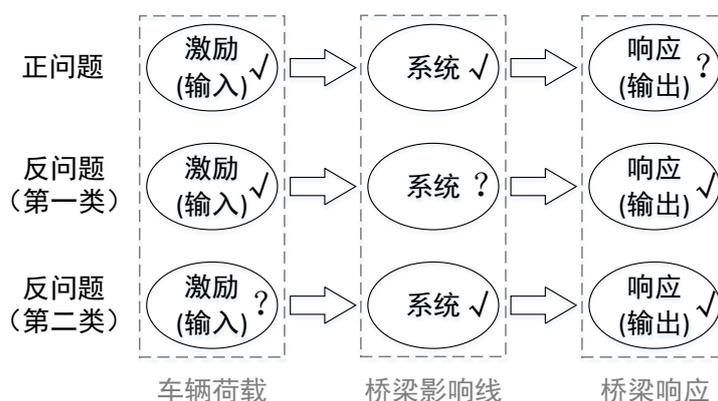


图 2.3 车桥动力系统的三类问题

2.2.2 荷载响应线性叠加原理

在影响线的推导分析中,通常将实际桥梁视作受力明确的简支梁,将作用车辆等效为为多个集中荷载,在线弹性变形条件下,车致总响应近似等效为单个轴重荷载响应的线性叠加。

对于边界支撑条件、材料物理特性未知的服役桥梁,直接利用实测动态响应标定影响线,首先需要选定测试车辆,预先测量车辆的轴距 D_i (第 i 轴至第一轴的车轮中心水平间距)以及对车辆静态称重得到各个轴重值 W_i (测试车辆第 i 轴的单轴重);假设车辆为匀速移动,将桥上测点时程响应信号的采样频率设置为 f (对应采样时间步长 $\Delta t = 1/f$),基于线性叠加原理,结构上某关键点在 $k \cdot \Delta t$ 时刻的理论总响应 R_k^T 计算如下:

$$R_k^T = \sum_{i=1}^N W_i L_{(k-C_i)} \quad (2.2)$$

式中参数 N 为车轴总数; $C_i = D_i f / v$ 是指以速度 v 行驶 D_i 距离期间对应时程响应中的采样点数; $L_{(k-C_i)}$ 为 $(k-C_i) \cdot \Delta t$ 时刻 i th 车轴作用位置处对应的影响线竖标值。以具有代表性的普通三轴车为例,式(2.2)的理论响应线性叠加关系如图 2.4 所示。

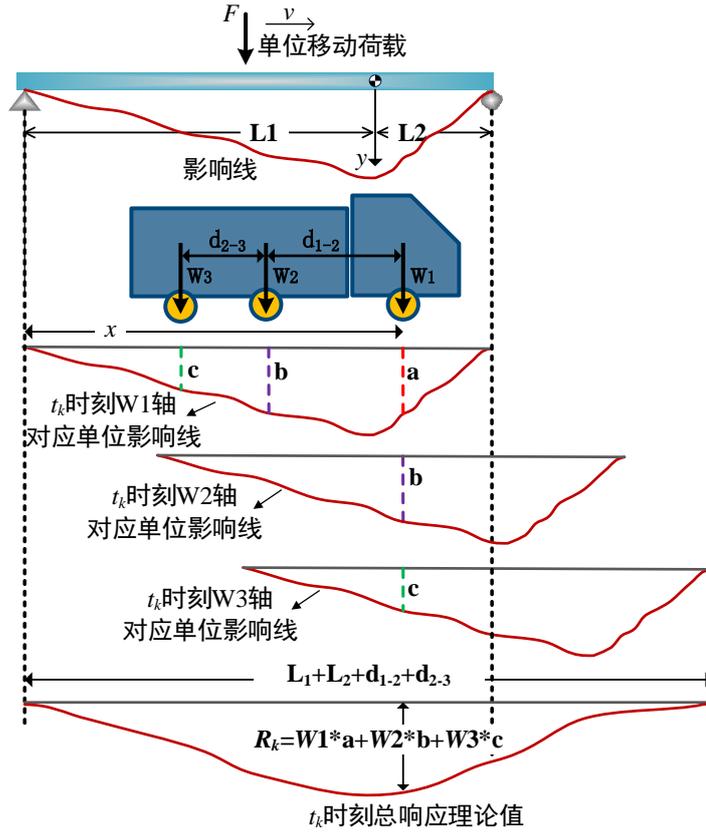


图 2.4 理论总响应的线性叠加原理^[71]

(式(1)与图 2.1 有对应关系：轴距 $D_2=d_{1-2}$, $D_3=d_{2-3}+d_{1-2}$ ；竖标 $L_{(k-C_1)}=a$, $L_{(k-C_2)}=b$, $L_{(k-C_3)}=c$)

2.2.3 基于响应的影响线计算原理

自车辆前轴开始进入桥梁至后轴刚好离开桥梁期间，监测记录下桥梁结构的动态响应(位移或应变)，理论上每一个采样点的响应值等于各个轴重与对应位置上影响线竖标值乘积的叠加，但由于测量误差、振动效应、噪声干扰等因素的存在，实测值与理论值不完全相等。

O'Brien 将上述过程抽象成向量矩阵数学运算，通过 Moses 的最小二乘法求理论推导值与实际测量值的误差最小化，建立了基于实测响应的影响线反演计算模型^[51]。

以三轴车为例，实测响应与理论响应的误差计算如下：

$$\begin{aligned}
 E &= \sum_{k=1}^K (R_k^M - R_k^T)^2 \\
 &= \sum_{k=1}^K (R_k^M - (W_1 L_{(k-C_1)} + W_2 L_{(k-C_2)} + W_3 L_{(k-C_3)}))^2
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

E 代表理论值 R_k^T 和测量值 R_k^M 之间的误差平方和， K 是响应信号的总采样点数。误差函数 E 对影响线竖标 L_k 求偏导，如式(2.4)，为使误差最小化，令 $\partial E / \partial L_k = 0$ 得到式(2.5)：

$$\begin{aligned}
 \partial E / \partial L_k = & 2 \left[R_k^M - (W_1 L_k + W_2 L_{(k-C_2)} + W_3 L_{(k-C_3)}) \right] (-W_1) \\
 & + 2 \left[R_{(k+C_2)}^M - (W_1 L_{(k+C_2)} + W_2 L_k + W_3 L_{(k+C_2-C_3)}) \right] (-W_2) \\
 & + 2 \left[R_{(k+C_3)}^M - (W_1 L_{(k+C_3)} + W_2 L_{(k+C_3-C_2)} + W_3 L_k) \right] (-W_3)
 \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned}
 R_k^M W_1 + R_{(k+C_2)}^M W_2 + R_{(k+C_3)}^M W_3 = & (W_1^2 L_k + W_1 W_2 L_{(k-C_2)} + W_1 W_3 L_{(k-C_3)}) \\
 & + (W_1 W_2 L_{(k+C_2)} + W_2^2 L_k + W_2 W_3 L_{(k+C_2-C_3)}) \\
 & + (W_1 W_3 L_{(k+C_3)} + W_2 W_3 L_{(k+C_3-C_2)} + W_3^2 L_k)
 \end{aligned} \quad (2.5)$$

各车轴位置均在桥梁上才能保证存在对应的影响线竖标，故上式有限制条件 $C_3 < k < K - C_3$ 。将式(2.5)改写为向量和矩阵的关系形式：

$$\{R'\}_{K-C_3,1} = [W]_{K-C_3,K-C_3} \{L\}_{K-C_3,1} \quad (2.6)$$

其中，

$$\{R'\}_{K-C_3,1} = \begin{Bmatrix} W_1 R_1^M + W_2 R_{1+C_2}^M + W_3 R_{1+C_3}^M \\ W_1 R_2^M + W_2 R_{2+C_2}^M + W_3 R_{2+C_3}^M \\ \vdots \\ W_1 R_{K-C_3}^M + W_2 R_{K-C_3+C_2}^M + W_3 R_K^M \end{Bmatrix},$$

$$[W]_{K-C_3,K-C_3} = \begin{bmatrix} \omega_{i,i} & 0 & \cdots & \omega_{i,i+C_3-C_2} & 0 & \cdots & \omega_{i,i+C_2} & 0 & \cdots & \omega_{i,i+C_3} & 0 & \cdots \\ \omega_{i,i} & 0 & \cdots & \omega_{i,i+C_3-C_2} & 0 & \cdots & \omega_{i,i+C_2} & 0 & \cdots & \omega_{i,i+C_3} & 0 & \cdots \\ & \omega_{i,i} & 0 & \cdots & \omega_{i,i+C_3-C_2} & 0 & \cdots & \omega_{i,i+C_2} & 0 & \cdots & \omega_{i,i+C_3} & 0 & \cdots \\ & & \ddots & & & \ddots & & & \ddots & & & \ddots & \\ & & & & & & & & & & & \ddots & 0 \\ & & & & & & & & & & & \ddots & \omega_{i,i+C_3} \\ & & & & & & & & & & & \ddots & 0 \\ & & & & & & & & & & & \ddots & \omega_{i,i+C_2} \\ & & & & & & & & & & & \ddots & 0 \\ & & & & & & & & & & & \ddots & \omega_{i,i+C_3-C_2} \\ & & & & & & & & & & & \ddots & 0 \\ & & & & & & & & & & & \ddots & \omega_{i,i} \\ & & & & & & & & & & & \ddots & \omega_{i,i} \end{bmatrix}$$

对
称
矩
阵

$[W]_{K-C_3,K-C_3}$ 为对称的稀疏矩阵，其中的非零元素按式(2.7)计算：

$$\begin{aligned}
 \omega_{i,i} &= W_1^2 + W_2^2 + W_3^2 \\
 \omega_{i,i+C_3-C_2} &= W_2 W_3 \\
 \omega_{i,i+C_2} &= W_1 W_1 \\
 \omega_{i,i+C_3} &= W_1 W_3
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

类比得到 N 轴车的计算公式为 $\{R\}_{K-C_N,1} = [W]_{K-C_N,K-C_N} \{L\}_{K-C_N,1}$ ， $[W]_{K-C_N,K-C_N}$ 是包含轴重、轴距信息的大规模参数矩阵，例如每一行中非零非对角线元素距离主对角线元素的时间间隔对应为元素下标差值与时间步长 Δt 的乘积。

上述由O'Brien提出的影响线标定方法是针对单车测试工况，计算中采用车辆前轴入桥至后轴出桥期间的时程响应信号，无需考虑车辆入桥前支座和土壤之间的传力作用对结构响应产生的干扰影响。

2010年，Zaurin和Catbas将车辆作用等效为移动集中荷载，直接基于响应线性叠加原理给出了简化的影响线计算方程^[71]：

$$\{R\}_{K,1} = [W]_{K,K-C_N} \{L\}_{K-C_N,1} \tag{2.8}$$

其中， $\{R\}$ 为监测点的时程响应，包含静力响应和动态干扰成分； $[W]$ 是包含车辆轴重、轴距、位置信息的大规模参数矩阵； $\{L\}$ 代表全桥影响线竖标值；其余参数含义同式(2.6)。假设车辆为匀速行驶，则式(2.8)可写为下式：

$$\begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_K \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 & 0 & \cdots & W_2 & 0 & \cdots & W_N & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_1 & 0 & \cdots & W_2 & 0 & \cdots & W_N & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \ddots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & W_1 & 0 & \cdots & W_2 & 0 & \cdots & W_N \end{bmatrix}^T \times \begin{Bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{K-C_N} \end{Bmatrix} \tag{2.9}$$

式(2.6)和式(2.8)所代表的两种计算方法，均揭示了响应、轴重、影响线之间的内在联系，区别在于前者令 R_k^T 和 R_k^M 的误差平方和最小化，然后基于最小二乘原理推导得到影响线解，能在一定程度上克服反问题计算中方程的病态特性；后者则直接令 R_k^T 和 R_k^M 相等，基于简单的线性叠加原理计算影响线，在后期求解方程组时通过采用奇异值分解技巧也能得到精确稳定的解^[164,165]。因此，两种方法的计算结果区别不大，相比之下，式(2.8)方法在使用时更简单灵活，对非匀速和多车工况也具有良好的延展性，故本文研究均采用该法进行影响线(面)的反演。

2.3 区间分析理论基础

2.3.1 区间变量与区间运算

区间也叫做有界闭集，用以描述一个变量的变化范围，如实数变量 $a \leq x \leq b$ 也可表示为区间变量 $x^I = [a, b] (a, b \in \mathbf{R} \text{ 且 } a \leq b)$ 。区间数有两种表示方法，边界值表示法写为 $x^I = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x | x \in \mathbf{R}, \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\}$ ， \bar{x} 和 \underline{x} 分别是区间变量的上、下边界值；中

心半径表示法写为 $x^l = x^c \pm \Delta x$ ，区间的中心 x^c 、半径 Δx 、宽度 $w(x^l)$ 分别按下式计算：

$$x^c = (\bar{x} + \underline{x}) / 2 \quad (2.10)$$

$$\Delta x = |\bar{x} - \underline{x}| / 2 \quad (2.11)$$

$$w(x^l) = |\bar{x} - \underline{x}| \quad (2.12)$$

对于 $x^l = [\underline{x}, \bar{x}]$ 和 $y^l = [\underline{y}, \bar{y}]$ ，区间数的基本运算列于下表：

表 2.1 区间数的基本运算

区间运算	公式定义
区间包含	$x^l \subseteq y^l$, 当 $\bar{x} \leq \bar{y}$ 且 $\underline{x} \geq \underline{y}$
区间大小	$x^l < y^l$, 当 $\bar{x} \leq \underline{y}$
区间交集	$x^l \cap y^l = [\max(\underline{x}, \underline{y}), \min(\bar{x}, \bar{y})]$
区间并集	$x^l \cup y^l = [\min(\underline{x}, \underline{y}), \max(\bar{x}, \bar{y})]$
区间加法	$x^l + y^l = [\underline{x} + \underline{y}, \bar{x} + \bar{y}]$
区间减法	$x^l - y^l = [\underline{x} - \bar{y}, \bar{x} - \underline{y}]$
区间乘法	$x^l \cdot y^l = [\min(\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}), \max(\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y})]$
区间除法	$x^l / y^l = [\min(\underline{x} \cdot \frac{1}{\underline{y}}, \underline{x} \cdot \frac{1}{\bar{y}}, \bar{x} \cdot \frac{1}{\underline{y}}, \bar{x} \cdot \frac{1}{\bar{y}}), \max(\underline{x} \cdot \frac{1}{\underline{y}}, \underline{x} \cdot \frac{1}{\bar{y}}, \bar{x} \cdot \frac{1}{\underline{y}}, \bar{x} \cdot \frac{1}{\bar{y}})], 0 \notin y^l$

对于 $\underline{x} = \bar{x}$ 的特殊情况，区间变量 x^l 退化为实数变量 x ，意味着区间数学本质上是实数数学的扩展，但是只有部分实数运算法则对区间数学是成立的，如交换律和结合律，另外一些运算规则表现为弱的形式，如式(2.13)的次分配律、式(2.14)的次抵消律：

$$x^l (y^l + z^l) \subseteq x^l y^l + x^l z^l \quad (2.13)$$

$$(x^l + z^l) - (y^l + z^l) \supseteq x^l - y^l \quad (2.14)$$

下面以具体运算为例对上述次分配律和次抵消律进行说明。

算例 1：设有三个区间数 $x^l = [-1, 3]$ ， $y^l = [2, 5]$ ， $z^l = [-4, 0]$ ，验证式(2.13)的区间运算次分配率。

$$x^l (y^l + z^l) = [-1, 3] \times ([2, 5] + [-4, 0]) = [-6, 15]$$

$$x^l y^l + x^l z^l = [-1, 3] \times [2, 5] + [-1, 3] \times [-4, 0] = [-17, 19]$$

因 $[-6, 15] \subseteq [-17, 19]$ ，故式(2.13)表现为弱的次分配律，并且由于乘法在区间运算中具有放大效应，乘法运算组合嵌套越多，区间结果就被放大的越宽。

算例 2：设有三个区间数 $x^l = [-1, 3]$ ， $y^l = [2, 5]$ ， $z^l = [-4, 0]$ ，验证式(2.14)的区间运算次分配率。

$$(x^l + z^l) - (y^l + z^l) = ([-1, 3] + [-4, 0]) - ([2, 5] + [-4, 0]) = [-10, 5]$$

$$x' - y' = [-1, 3] - [2, 5] = [-6, 1]$$

因 $[-10, 5] \supseteq [-6, 1]$ ，故式(2.14)表现为弱的次抵消律。究其原因，传统的区间运算 $z' - z' = [-4, 0] - [-4, 0] = [-4, 4] \neq 0$ ，即区间运算无法识别变量的相关性从而导致区间结果的扩张。严重的扩张会使区间结果失去参考价值，也就没有了计算的意义。

2.3.2 区间向量与区间矩阵

元素是区间数的向量称为区间向量，同理元素是区间数的矩阵称为区间矩阵。设变量 $x'_i = [\underline{x}_i, \bar{x}_i] \in I(\mathbb{R})(i=1, \dots, n)$ ，则 n 维向量表示为

$$X' = \begin{Bmatrix} [\underline{x}_1, \bar{x}_1] \\ \vdots \\ [\underline{x}_n, \bar{x}_n] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

上式也可表示为 $X' = [\underline{X}, \bar{X}] \in I(\mathbb{R}^n)$ ，其中 $\underline{X} = (\underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_n)$ ， $\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ 。向量的中心、半径、宽度分别为：

$$X^c = (\underline{X} + \bar{X}) / 2$$

$$\Delta X = (\bar{X} - \underline{X}) / 2$$

$$\omega(X) = \max\{\bar{X} - \underline{X}\}$$

设 A' 为 $m \times n$ 阶区间矩阵如下：

$$A' = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & \cdots & a'_{1n} \\ a'_{21} & a'_{22} & \cdots & a'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{m1} & a'_{m2} & \cdots & a'_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

其元素为区间数 $a'_{ij} = [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}] \in I(\mathbb{R}^n)$ ，可以将 $A' \in I(\mathbb{R}^{m \times n})$ 理解为 $a_{ij} \in a'_{ij}$ 的所有矩阵的集合，亦可记为 $A' = [\underline{A}, \bar{A}]$ ，其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \cdots & \bar{a}_{1n} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \cdots & \bar{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{a}_{m1} & \bar{a}_{m2} & \cdots & \bar{a}_{mn} \end{bmatrix}, \quad \underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{a}_{11} & \underline{a}_{12} & \cdots & \underline{a}_{1n} \\ \underline{a}_{21} & \underline{a}_{22} & \cdots & \underline{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{a}_{m1} & \underline{a}_{m2} & \cdots & \underline{a}_{mn} \end{bmatrix}$$

区间矩阵的中心矩阵和半径矩阵分别为 $A^c = (\bar{A} + \underline{A}) / 2$ ， $\Delta A = (\bar{A} - \underline{A}) / 2$ ，矩阵按中心半径表示法写为 $A' = A^c \pm \Delta A$ 。

2.3.3 变量的相关性与区间扩张

区间数运算中的相关性是指在获得两个或多个区间数的过程中均含有来源相同的区间数，变量的相关性对区间扩张有着重要的影响，下面以具体算例说明。

算例 3：已知 $x'_1 = [-3, 1]$ ， $x'_2 = [2, 5]$ ， $z'_1 = x'_1 + x'_2$ ， $z'_2 = x'_1 - x'_2$ ，计算 $z'_1 + z'_2$ 。

x_1^l, x_2^l 为独立区间变量, z_1^l, z_2^l 为相关变量。忽略变量间的相关性, 按照运算顺序计算结果为 $z_1^l + z_2^l = [-1, 6] + [-8, -1] = [-9, 5]$; 考虑变量的相关性, 对函数预处理消除相同变量, 计算结果为 $z_1^l + z_2^l = (x_1^l + x_2^l) + (x_1^l - x_2^l) = 2x_1^l = [-6, 2]$ 。传统区间运算将同一变量的间的加减乘除运算作为两个独立的区间数看待, 从而引起解的扩张, 反复迭代、嵌套的长计算甚至会引起误差爆炸。

对于给定函数 $f(x)(f: R^n \rightarrow R)$, 若将其中的实参数 x_1, x_2, \dots, x_n 用区间参数 $x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l$ 代替, 则存在区间映射 $F(x^l): I(R^n) \rightarrow I(R)$, 且有

$$\begin{aligned} f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \subseteq F(x_1^l, \dots, x_i^l, \dots, x_n^l) \\ x_i \in x_i^l, i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.17)$$

$F(x^l)$ 是 $f(x)$ 的自然区间扩张, 式(2.17)的单向包含关系保证了任一实函数的值域总是包含在其区间扩展函数的值域内。当各区间数 $x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l$ 在函数运算中均只出现一次, 运算过程不涉及变量相关性, 区间解逼近真实值域; 相反, 同一个变量在运算中出现的次数越多, 区间解扩张就越严重。

目前已提出了各式各样的技术来解决扩张问题, 有通过调整计算中变量的计算顺序从而减少变量出现次数的方法; 也有利用简单直接的区间计算代替若干步骤的基本区间运算的技巧, 例如用 $(x^l)^n$ 的幂运算代替乘法运算等; 还有参考区间的中心偏差值对扩张区间进行截断处理的方法以及将原始自变量宽区间分割成若干小区间代入运算以减弱相关性的子区间摄动法。然而这些技术都不尽如人意, 变量相关性导致的区间解过于保守的问题仍然十分棘手。

2.3.4 区间方程组的求解方法

区间方程组的求解是区间分析中一个重要的研究方面, 大多数工程数学分析问题都离不开多自由度体系和矩阵运算, 而区间变量在矩阵的加减乘除运算中极易产生病态结果, 故对区间线性、非线性方程组的求解一直是区间数学领域的热点和难点。

考察一个线性方程组 $AX=B$, 当 A 为非奇异矩阵时, 方程有唯一解。当矩阵 A 或向量 B 中的分量有一定的误差或呈区间波动, 上式演化为求解区间线性方程组 $A^l X^l = B^l$ 问题。用包含精确解的区间向量来表示线性区间方程的解, 理论上这个区间向量并不唯一且区间宽度越窄意味着解越精确。早期学者们借鉴实数方程组的求解技巧, 提出了求解区间线性方程组的直接法(高斯消去法等)和间接法(迭代法)等经典方法, 但这些方法的运用有着严格的限制条件和收敛条件, 而且计算过程复杂, 容易导致解的区间扩张和误差增大。后来随着区间有限元思想的发展, 提出了优化法、蒙特卡罗法、仿射求逆算法等适用性广、稳定性好的方法^[107]。

1. 优化法

采用优化法求解是近年来应用区间分析解决实际工程问题的热门方法, 因为

该方法可以适应不同研究问题的数学背景建立优化模型，通过各类优化方法求解的结果也能有效克服区间算法的扩张问题，是一种通用的参数不确定性问题研究方法。

含有区间参数的线性方程组优化求解问题，归结为一类有约束的优化问题或区间线性规划，将区间参数作为优化设计变量的边界约束，基于目标函数最优化搜索方程组解的极值，从而得到解区间向量，原理如下^[132]：

$$\begin{aligned} & \min/\max x_i \\ & s.t. \{x\}=[A]^{-1}\{b\} \\ & \underline{a}_{ij} \leq a_{ij} \leq \bar{a}_{ij} \\ & \underline{b}_j \leq b_j \leq \bar{b}_j \end{aligned}$$

基于遗传进化策略的遗传算法是常用的求解区间线性方程组的优化算法，该方法通过优胜劣汰物竞天择的概率变迁原则引导目标函数的解向全局最优靠近，除此之外还有粒子群算法、模拟退火算法等都能有效搜索全局最优解。这些区间优化方法一般能得到十分精确的解区间，利用全局优化确保搜寻最优值结果的可靠性，扩展了传统分析的能力，能够处理复杂的非线性的函数，然而当区间变量较多时，优化求解速度十分缓慢，并且容易收敛到局部最优，限制了其在一些大规模计算问题上的应用的。

2.蒙特卡罗模拟

蒙特卡罗(Monte-Carlo)方法是一种利用重复的统计实验来模拟待求解物理和数学问题的随机过程从而得到解的统计特征的方法。对于解决不确定性问题，蒙特卡罗法将数学模型的解离散化，通过使实验环节生成的随机数服从某种分布，来获得相应计算结果的统计分布特征。主要步骤如下^[136]：

- (1) 不确定参数随机抽样以及组合；
- (2) 利用抽样组合值进行确定性问题的求解；
- (3) 大量试验结果比较获得最大、最小边界值。

区间分析中的参数需要取到区间中任意值，并且这种取法是均匀随机的，即需要产生在区间内随机均匀分布的随机数。而且对于多个不确定参数的区间问题，需要分别产生随机数再将组合参数代入确定性分析模型中求解。蒙特卡罗法的优点在于可以将区间问题分解成大量的确定参数问题求解，但是求解效率必然会随着区间参数数量和参数区间宽度的增加而大幅降低，需要更大的计算量才能得到接近精确解的统计结果，且结果总是小于或等于实际值。

3.仿射矩阵求逆法

仿射算法^[157]是近年来处理不确定性问题的新方法，在各个领域均有广泛的应用。在研究区间问题时，仿射运算将区间变量表示为噪声变量的线性组合，利用

变量之间所含噪声来源的相似性刻画变量间的相关性与相关程度，并在复杂的变量运算中保持对噪声相关性的追踪。这一性质使得仿射运算的精度远远高于区间运算，有效抑制了区间扩张问题，克服了区间运算比较保守的缺陷，能计算出更为紧凑的结果区间，具有准确、高效的显著优点。

仿射算法应用于区间线性方程组的求解主要基于纽曼级数展开获得参数矩阵的逆^[163]，从而计算得到区间解向量。在实际问题抽象出的数学模型求解中，仿射求逆算法比区间消去法和迭代法具有更广泛的适用性，其不需要参数矩阵是对称矩阵或严格对角占优，也不需要严格的收敛条件保证解的存在。然而由于仿射变量乘法的保守性使得仿射求逆解相对于精确解还是有一些程度的扩张，目前已经有很多改进措施来减小这一部分误差并取得了比较理想的效果。

2.4 仿射算法理论基础

区间算术的缺点是过于保守，由于不能考虑变量的相关性，使得包含减法与乘法的函数经纯粹的区间运算后得到的区间结果往往比实际范围大得多，经过不断地扩张累加，导致结果失真。仿射算术是以解决区间运算中的相关性问题的建立的自有效性数值计算模型，算法保持输入和计算变量的一阶相互关系，并且这些相互关系被自动地应用于原始运算中。

2.4.1 仿射变量与运算规则

仿射算术里规定一个有界不确定量 x^I 为如下形式的一次多项式：

$$x^I = x_0 + x_1\varepsilon_1 + x_2\varepsilon_2 + \cdots + x_n\varepsilon_n \quad (2.18)$$

这里 x_0 是区间 x^I 的中心值， $\varepsilon_i (i=1, \dots, n)$ 是值域为 $[-1, 1]$ 的独立噪声元，对应的实数 x_i 决定了该噪声成分的影响力大小和正负方向。可以理解为每个 ε_i 代表着一种独立的误差项，比如截断和舍入误差，抑或其他的不确定因素，但是总存在 ε_i 的确定值组合使得 x^I 取到未知的真实值 \hat{x} 。

不同的仿射变量如果含有相同的噪声成分，则说明两者具有一定的相关性。所以在进行仿射变量的运算时，变量间的相关性具有可识别、可跟踪性，从而能克服扩张问题获得更加紧致精确的区间结果。仿射算法的这一优点在大规模计算和高度相关性计算中体现的更加明显。

区间变量与仿射变量在形式上可以相互转换，对于一个区间变量 $x^I = [\underline{x}, \bar{x}]$ 其对应的仿射形式表示为

$$x^I = x_0 + x_1\varepsilon_1 \quad (2.19)$$

其中 $x_0 = \frac{1}{2}(\underline{x} + \bar{x})$ ， $x_1 = \frac{1}{2}|\underline{x} - \bar{x}|$ 。

同样对于仿射变量 $x^I = x_0 + x_1\varepsilon_1 + x_2\varepsilon_2 + \cdots + x_n\varepsilon_n$ ，其对应的区间形式为

$$[\underline{x}, \bar{x}] = [x_0 - \xi, x_0 + \xi]$$

$$\xi = \sum_{i=1}^n |x_i| \quad (2.20)$$

对于两个仿射变量 $x^I = x_0 + x_1\varepsilon_1 + x_2\varepsilon_2 + \cdots + x_n\varepsilon_n$, $y^I = y_0 + y_1\varepsilon_1 + y_2\varepsilon_2 + \cdots + y_n\varepsilon_n$ 和实数 α 、 β , 有如下运算规则:

- 1) $\alpha x^I = \alpha x_0 + \alpha x_1\varepsilon_1 + \alpha x_2\varepsilon_2 + \cdots + \alpha x_n\varepsilon_n$
- 2) $x^I \pm \beta = x_0 \pm \beta + x_1\varepsilon_1 + x_2\varepsilon_2 + \cdots + x_n\varepsilon_n$
- 3) $x^I \pm y^I = (x_0 \pm y_0) + (x_1 \pm y_1)\varepsilon_1 + (x_2 \pm y_2)\varepsilon_2 + \cdots + (x_n \pm y_n)\varepsilon_n$
- 4) $x^I \cdot y^I = x_0 \cdot y_0 + \sum_{i=1}^n (x_0 y_i \pm y_0 x_i)\varepsilon_i + (\sum_{i=1}^n x_i \varepsilon_i) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i \varepsilon_i)$
- 5) $x^I / y^I = x^I \cdot (1/y^I) = x^I \cdot [(1/y_0) + y_1\varepsilon_1 + \cdots + y_n\varepsilon_n]$

为了直观显示仿射运算相对于区间运算的优越性, 下面使用仿射运算规则重新计算算例 3。

算例 4: 已知 $x_1^I = [-3, 1]$, $x_2^I = [2, 5]$, $z_1^I = x_1^I + x_2^I$, $z_2^I = x_1^I - x_2^I$, 计算 $z_1^I + z_2^I$ 。

首先将区间变量转化为仿射型:

$$x_1^I = \frac{-3+1}{2} + \frac{|-3-1|}{2}\varepsilon_1 = -1 + 2\varepsilon_1; \quad x_2^I = \frac{2+5}{2} + \frac{|2-5|}{2}\varepsilon_2 = 3.5 + 1.5\varepsilon_2; \quad \varepsilon_1, \varepsilon_2 \in [-1, 1];$$

然后基于仿射运算规则进行相关变量的的四则运算:

$$z_1^I = x_1^I + x_2^I = 2.5 + 2\varepsilon_1 + 1.5\varepsilon_2, \quad z_2^I = x_1^I - x_2^I = -4.5 + 2\varepsilon_1 - 1.5\varepsilon_2$$

$$z_1^I + z_2^I = (x_1^I + x_2^I) + (x_1^I - x_2^I) = (2.5 + 2\varepsilon_1 + 1.5\varepsilon_2) + (-4.5 + 2\varepsilon_1 - 1.5\varepsilon_2) = -2 + 4\varepsilon_1 = [-6, 2]$$

算例 4 中, 由于仿射运算将变量的相关性纳入考虑, 相同变量从减法运算中抵消, 所以计算结果比区间运算精确, 克服了由于变量重复参与计算而导致的区间扩张。虽然通常情况采用仿射算法所得结果比区间算法所得的结果精确, 但是仿射算法仍然具有乘法过于保守的特性:

$$x^I \cdot y^I = x_0 y_0 + \sum_{i=1}^m (x_0 y_i + x_i y_0)\varepsilon_i + z_k \varepsilon_k \quad (2.21)$$

仿射变量的乘法需要引入新噪声元 ε_k , 其系数 $z_k = \sum_{i=1}^m |x_i| \cdot |y_i|$ 。误差项 $z_k \varepsilon_k$ 的

存在使得区间结果较精确解有所放大, 这就是仿射算法的局限性和缺陷所在。

2.4.2 仿射向量与仿射矩阵

设仿射变量 $x_i^I = x_{i0} + x_{i1}\varepsilon_1 + x_{i2}\varepsilon_2 + \cdots + x_{ip}\varepsilon_p + x_{ie}\varepsilon_e \in I(R) (i=1, \cdots, n)$, 其中除了噪声元的不确定性, 还考虑了舍入误差 $x_{ie}\varepsilon_e$ 对结果的影响。仿射向量表示为:

$$X^I = \begin{cases} x_{10} + x_{11}\varepsilon_1 + x_{12}\varepsilon_2 + \cdots + x_{1p}\varepsilon_p + x_{1e}\varepsilon_e \\ x_{20} + x_{21}\varepsilon_1 + x_{22}\varepsilon_2 + \cdots + x_{2p}\varepsilon_p + x_{2e}\varepsilon_e \\ \vdots \\ x_{n0} + x_{n1}\varepsilon_1 + x_{n2}\varepsilon_2 + \cdots + x_{np}\varepsilon_p + x_{ne}\varepsilon_e \end{cases} = \begin{cases} x_1^I \\ x_2^I \\ \vdots \\ x_n^I \end{cases} \quad (2.22)$$

当矩阵中的元素为 $a_{ij}^I = a_{ij,0} + a_{ij,1}\varepsilon_1 + \cdots + a_{ij,p}\varepsilon_p + a_{ij,e}\varepsilon_e \in I_R (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n)$ 仿射型区间变量，则构成 $m \times n$ 维仿射矩阵：

$$A^I = [a_{ij}^I] = \begin{bmatrix} a_{11}^I & a_{12}^I & \cdots & a_{1n}^I \\ a_{21}^I & a_{22}^I & \cdots & a_{2n}^I \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}^I & a_{m2}^I & \cdots & a_{mn}^I \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

将上式仿射矩阵改写成以下通用形式：

$$A^I = A_0 + A_1\varepsilon_1 + A_2\varepsilon_2 + \cdots + A_p\varepsilon_p + A_e\varepsilon_e \quad (2.24)$$

式中 A_0 为仿射矩阵的常数矩阵， $A_1 \sim A_p$ 为 k 个噪声元的系数矩阵， A_e 为舍入误差矩阵：

$$A_k = [a_{ij,k}^I] = \begin{bmatrix} a_{11,k}^I & a_{12,k}^I & \cdots & a_{1n,k}^I \\ a_{21,k}^I & a_{22,k}^I & \cdots & a_{2n,k}^I \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1,k}^I & a_{m2,k}^I & \cdots & a_{mn,k}^I \end{bmatrix} \quad (k=0, 1, \dots, p, e) \quad (2.25)$$

则仿射矩阵对应的区间矩阵上下界可以表示为

$$\begin{cases} \bar{A} = A_0 + |A_1| + |A_2| + \cdots + |A_p| + |A_e| \\ \underline{A} = A_0 - |A_1| - |A_2| - \cdots - |A_p| - |A_e| \end{cases} \quad (2.26)$$

下面使用具体数值算例说明区间矩阵与仿射矩阵的转换关系。

算例 5：设有区间参数矩阵

$$W^I = \begin{bmatrix} w_1^I & w_2^I & w_3^I \\ w_2^I & w_1^I & 0 \\ w_3^I & 0 & w_1^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [-2,4] & [1,3] & [-1,0] \\ [1,3] & [-2,4] & 0 \\ [-1,0] & 0 & [-2,4] \end{bmatrix}$$

其中，矩阵参数 w_1^I 、 w_2^I 、 w_3^I 均为区间变量，对应取值分别为 $w_1^I = [-2,4]$ ， $w_2^I = [1,3]$ ， $w_3^I = [-1,0]$ 。将该区间矩阵 W^I 转化为仿射矩阵形式，并求区间矩阵的上下界。

首先需将区间矩阵中的区间参数改写为仿射型，如下：

$$w_1^I = [-2,4] = 1 + 3\varepsilon_1, \quad w_2^I = [1,3] = 2 + \varepsilon_2, \quad w_3^I = [-1,0] = -0.5 + 0.5\varepsilon_3, \quad \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \in [-1,1];$$

然后将原区间矩阵分解为常数矩阵与噪声元系数矩阵组合的仿射形式：

$$W^I = \begin{bmatrix} 1 & 2 & -0.5 \\ 2 & 1 & 0 \\ -0.5 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \varepsilon_1 + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \varepsilon_2 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \varepsilon_3;$$

则上式仿射矩阵对应的区间矩阵上下界分别为:

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & -0.5 \\ 2 & 1 & 0 \\ -0.5 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 3 & 0 \\ 3 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix};$$

$$\underline{W} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & -0.5 \\ 2 & 1 & 0 \\ -0.5 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & 0 \\ -1 & 0 & -2 \end{bmatrix}.$$

2.4.3 纽曼展开仿射矩阵求逆

普通线性方程组可以通过直接对非奇异的系数矩阵求逆进行求解, 但是对区间矩阵直接求逆具有很大的技术难度, 容易引起较大的误差。2010年, Degrauwe 将仿射变换和纽曼展开结合起来, 解决了区间有限元分析中区间矩阵的求逆问题, 并获得了很好的效果^[163], 相关理论推导简述如下:

通常矩阵的逆可以通过纽曼级数展开获得

$$(I + X)^{-1} = I - X + X^2 - X^3 + \dots \quad (2.27)$$

这里方阵 X 的谱半径需满足 $\rho(X) < 1$ 的条件, 这在一般的工程问题研究中均能得到满足。将上式中的 X 用 $-X$ 代替, 同样满足谱半径 $\rho(-X) < 1$, 故式(2.27)也可以写作:

$$(I - X)^{-1} = I + X + X^2 + X^3 + \dots \quad (2.28)$$

对于仿射矩阵 $A^I = A_0 + A_1\varepsilon_1 + A_2\varepsilon_2 + \dots + A_n\varepsilon_n + A_e\varepsilon_e$ 的求逆, 先将两侧同时乘以一个矩阵 A_0^{-1} 转换成如下形式

$$X^I = I + X_1\varepsilon_1 + X_2\varepsilon_2 + \dots + X_n\varepsilon_n + X_e\varepsilon_e \quad (2.29)$$

于是可以利用纽曼展开对上式 X^I 求逆:

$$(I + \sum_{i=1}^n X_i\varepsilon_i + X_e\varepsilon_e)^{-1} = I - (\sum_{i=1}^n X_i\varepsilon_i + X_e\varepsilon_e) + (\sum_{i=1}^n X_i\varepsilon_i + X_e\varepsilon_e)^2 - (\sum_{i=1}^n X_i\varepsilon_i + X_e\varepsilon_e)^3 + \dots \quad (2.30)$$

X^I 的逆可以看成是对任意可能的 ε_i ($i=1,2,\dots,n$) 组合, 能找到变量 B_i 使得下式成立:

$$(I + \sum_{i=1}^n X_i\varepsilon_i + X_e\varepsilon_e)^{-1} \in B_0 + \sum_{i=1}^n B_i\varepsilon_i + B_e\varepsilon_e \quad (2.31)$$

比较式(2.30)和式(2.31)可得各部分常数项、系数项和误差项分别为

$$B_0 = I \quad (2.32)$$

$$B_i = -X_i \quad (2.33)$$

$$B_e \varepsilon_e = -X_e \varepsilon_e + \left(\sum_{i=1}^n X_i \varepsilon_i + X_e \varepsilon_e \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \varepsilon_i + X_e \varepsilon_e \right)^3 + \dots \quad (2.34)$$

将 ε_e 作为各部分误差源的集合，根据 $X_i \varepsilon_i \subseteq |X_i| \varepsilon_e$ 的放大关系对误差项合理放大得到

$$B_e \varepsilon_e \subseteq -X_e \varepsilon_e + \left(\sum_{i=1}^n |X_i| \varepsilon_e + X_e \varepsilon_e \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n |X_i| \varepsilon_e + X_e \varepsilon_e \right)^3 + \dots \quad (2.35)$$

令 $Z = \sum_{i=1}^n |X_i|$ ，则有

$$B_e \varepsilon_e \subseteq -X_e \varepsilon_e + (Z \varepsilon_e + X_e \varepsilon_e)^2 - (Z \varepsilon_e + X_e \varepsilon_e)^3 + \dots \quad (2.36)$$

鉴于 Z 和 X_e 均为正数，且 $\varepsilon_e = -\varepsilon_e$ ，故有

$$\pm (Z \varepsilon_e + X_e \varepsilon_e)^k \subseteq (Z + X_e)^k \varepsilon_e \quad (2.37)$$

可以利用式(2.37)关系对式(2.36)进一步简化

$$B_e \varepsilon_e \subseteq -X_e \varepsilon_e + (Z + X_e)^2 \varepsilon_e + (Z + X_e)^3 \varepsilon_e + \dots \quad (2.38)$$

将上式右侧 $(Z + X_e)^2$ 项提出并应用纽曼级数展开，得到

$$B_e \varepsilon_e \subseteq \left(-X_e + (Z + X_e)^2 [I - (Z + X_e)]^{-1} \right) \varepsilon_e \quad (2.39)$$

上述对误差项 $B_e \varepsilon_e$ 的放大简化只有在谱半径 $\rho(Z + X_e) < 1$ 时才成立。综上，区间矩阵 X^I 的逆阵为

$$(X^I)^{-1} = I - \sum_{i=1}^n X_i \varepsilon_i + \left(-X_e + (Z + X_e)^2 [I - (Z + X_e)]^{-1} \right) \varepsilon_e \quad (2.40)$$

Degrauwe 利用以上过程解决了区间有限元控制方程的求解难题，基于纽曼展开的仿射求逆以 ε_i 为媒介考虑了变量的相关性，极大地减小了区间扩张误差，而这在传统的区间算法中是很难实现的。

2.5 基于实测响应的影响线区间反演模型

2.5.1 轴重区间参量与区间参数矩阵

当用区间变量 $[w_i, \bar{w}_i]$ 来描述一 k 轴车辆的第 i 轴轴重 w_i 的取值范围 ($i=1, \dots, k$)，影响线计算模型中的参数矩阵成为式(2.41)的区间矩阵，运用区间分析方法则由于车辆轴重不确定性带来的影响线计算困难便迎刃而解。

$$W^I = \begin{bmatrix} [w_1, \bar{w}_1] & 0 & \dots & [w_2, \bar{w}_2] & 0 & \dots & [w_k, \bar{w}_k] & 0 & \dots & 0 \\ 0 & [w_1, \bar{w}_1] & 0 & \dots & [w_2, \bar{w}_2] & 0 & \dots & [w_k, \bar{w}_k] & 0 & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & \ddots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & [w_1, \bar{w}_1] & 0 & \dots & [w_2, \bar{w}_2] & 0 & \dots & [w_k, \bar{w}_k] \end{bmatrix}^T \quad (2.41)$$

设该 k 轴车各轴轴重区间为 w_i^l ，将轴重区间变量转化为仿射型变量：

$$\begin{cases} w_1^l = [\underline{w}_1, \overline{w}_1] = x_0 + x_1 \times \varepsilon_1, \varepsilon_1 \in [-1, 1] \\ w_2^l = [\underline{w}_2, \overline{w}_2] = y_0 + y_1 \times \varepsilon_2, \varepsilon_2 \in [-1, 1] \\ \vdots \end{cases} \quad (2.42)$$

于是区间参数矩阵可写成仿射矩阵形式：

$$W^l = \begin{bmatrix} x_0 & \cdots & y_0 & \cdots \\ & \ddots & & \ddots \\ & & x_0 & \cdots & y_0 & \cdots \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} x_1 & \cdots \\ & \ddots \\ & & x_1 & \cdots \end{bmatrix}^T \varepsilon_1 + \begin{bmatrix} \cdots & y_1 & \cdots \\ & & \ddots \\ & & & y_1 & \cdots \end{bmatrix}^T \varepsilon_2 + \cdots \quad (2.43)$$

$$\text{令 } W_0 = \begin{bmatrix} x_0 & \cdots & y_0 & \cdots \\ & \ddots & & \ddots \\ & & x_0 & \cdots & y_0 & \cdots \end{bmatrix}^T, W_1 = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots \\ & \ddots \\ & & x_1 & \cdots \end{bmatrix}^T, W_2 = \begin{bmatrix} \cdots & y_1 & \cdots \\ & & \ddots \\ & & & y_1 & \cdots \end{bmatrix}^T, \cdots$$

则式(2.43)可以简写为

$$W^l = W_0 + W_1 \varepsilon_1 + W_2 \varepsilon_2 + \cdots + W_k \varepsilon_k \quad (2.44)$$

则影响线可以根据区间方程组 $W^l L^l = R$ 求解得到。

2.5.2 仿射求逆算法计算影响线区间

基于桥梁结构动态响应 $\{R\}$ 的影响线反演模型由于引入了轴重的区间不确定性，影响线的求解问题转化为区间线性方程组的求解问题。基于 2.4.3 节中求解区间有限元控制方程的仿射矩阵求逆方法，本节结合仿射变换和纽曼展开，针对实际求解问题的工程背景计算影响线的解区间向量 $\{L^l\}$ 。

将式(2.43)改写成为利于纽曼展开应用的形式

$$W^l = W_0 (I + W_0^{-1} W_1 \varepsilon_1 + W_0^{-1} W_2 \varepsilon_2 + \cdots + W_0^{-1} W_k \varepsilon_k) \quad (2.45)$$

令 $X_i = W_0^{-1} W_i$ ，则式(2.45)的逆为

$$(W^l)^{-1} = (I + X_1 \varepsilon_1 + X_2 \varepsilon_2 + \cdots + X_k \varepsilon_k)^{-1} W_0^{-1} \quad (2.46)$$

为方便求解，令 $A^l = (I + X_1 \varepsilon_1 + X_2 \varepsilon_2 + \cdots + X_k \varepsilon_k)^{-1}$ ，对 A^l 应用纽曼展开，如下式：

$$A^l = I - \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right) + \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right)^3 + \cdots \quad (2.47)$$

上式应用一阶纽曼展开得到

$$A^l = I - \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right) + \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right)^2 \left[I - \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right) + \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right)^2 + \cdots + (-1)^n \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right)^n \right] \quad (2.48)$$

当取 n 无限大时，有如下近似

$$A^l \approx I - \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right) + \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right)^2 \left[I + \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right) \right]^{-1} \quad (2.49)$$

令 $Z = \sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i$, 故

$$A^1 \approx I - Z + Z^2 [I + Z]^{-1} \quad (2.50)$$

令 $\phi(Z) = I - Z + Z^2 (I + Z)^{-1}$, 因为 $\phi'(Z) = \frac{-I}{(I + Z)^2}$ 恒小于零, 故证明 $\phi(Z)$ 为关于

Z 的单调递减函数。因 $Z = \sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i = W_0^{-1} \sum_{i=1}^k W_i \varepsilon_i$ 中 W_1 、 W_2 、...、 W_i 均为正定矩阵,

故根据 $X_i \varepsilon_i \subseteq |X_i| \varepsilon_i$, $\sum |X_i| \varepsilon_i \subseteq (\sum |X_i|) \varepsilon_e$ 的放大关系, 有

$$Z \subseteq W_0^{-1} \left| \sum_{i=1}^k W_i \right| \varepsilon_e = \left| \sum_{i=1}^k X_i \right| \varepsilon_e \quad (2.51)$$

将上式带入式(2.50)中得

$$A^1 \subseteq I - \left| \sum_{i=1}^k X_i \right| \varepsilon_e + \left| \sum_{i=1}^k X_i \right|^2 \varepsilon_e^2 [I + \left| \sum_{i=1}^k X_i \right| \varepsilon_e]^{-1} \quad (2.52)$$

因此区间矩阵的上下界分别计算为:

$$\begin{cases} \bar{A} = I + \left| \sum_{i=1}^k X_i \right| + \left| \sum_{i=1}^k X_i \right|^2 [I - \left| \sum_{i=1}^k X_i \right|]^{-1} \\ \underline{A} = I - \left| \sum_{i=1}^k X_i \right| + \left| \sum_{i=1}^k X_i \right|^2 [I + \left| \sum_{i=1}^k X_i \right|]^{-1} \end{cases} \quad (2.53)$$

故影响线向量区间为

$$\{L^1\} \subseteq A^1 W_0^{-1} \{R\} \quad (2.54)$$

影响线的上下边界计算值为:

$$\begin{aligned} \bar{\{L\}} &= \underline{A} W_0^{-1} \{R\} \\ \underline{\{L\}} &= \bar{A} W_0^{-1} \{R\} \end{aligned} \quad (2.55)$$

2.5.3 全局优化遗传算法求解区间影响线

应用遗传算法求解影响线区间方程, 是基于区间函数单向包含性质, 利用给定的区间参数边界信息搜索目标函数的全局极优值, 获得影响线解向量区间。指定区间参数 x 到函数 f 的映射 $R(f; [x]) = \{f(x) | x \in [x]\}$, 显然 $R(f; [x])$ 的实际值是存在且唯一的, 引入区间函数的本意之一便是要计算当 x 是 $[x]$ 中某一未知的确定值时函数 $f(x)$ 的值域范围, 这比直接计算 $f[x]$ 的区间结果精确的多。假定 $f(x)$ 在 $[x]$ 上连续, $R(f; [x])$ 的两个区间边界值可以通过求解如下两个优化问题得到^[130]:

$$\begin{aligned} &\min f(x) && \max f(x) \\ \text{s.t. } &\underline{x} \leq x \leq \bar{x} && \text{s.t. } \underline{x} \leq x \leq \bar{x} \end{aligned} \quad (2.56)$$

遗传算法是一种通过模仿自然选择和遗传机制实现随机智能搜索的优化算法, 具有全局性群体搜索能力。遗传算法的搜索过程从一组随机产生的初始解(种群-

Population)开始，种群中的每个个体对应问题的一个解的编码串(染色体-Chromosome)，如二进制编码和实数编码。遗传过程中个体的染色体在后续迭代中不断进化，并采用适应度(Fitness)来描述每一代的个体遗传基因的优劣。生成的下一代种群，称为后代，后代是前一代种群通过染色体的交叉(Crossover)、变异(Mutation)形成。在新一代形成中，根据适应度大小选择保留部分后代、淘汰部分后代，从而保持种群大小为常数。依据轮盘赌原则，适应度高的个体被保留的概率大，这样经过充足代数的遗传，算法收敛于最好的基因序列，可能就对应着问题的最优解。

考虑线性方程组 $W^l L^l = R$ ，其中 $W^l = [w_{ij}^l] (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$ 是大规模区间参数矩阵， $R = \{R_j\}$ 为结构动态响应实数向量，待求解的 $L^l = \{l_i^l\}$ 为影响线区间向量。该区间反问题的求解可以转化为确定区间向量 L^l 中每个元素 l_k 的上下边界值优化问题。本文采用式(2.57)分别确定 l_k 的下界 l_k 和上界 \bar{l}_k [132]:

$$s.t. \begin{cases} \min l_k \\ WL = R \\ \underline{w}_{ij} \leq w_{ij} \leq \bar{w}_{ij} \\ 1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n \end{cases}, \quad s.t. \begin{cases} \max l_k \\ WL = R \\ \underline{w}_{ij} \leq w_{ij} \leq \bar{w}_{ij} \\ 1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n \end{cases} \quad (2.56)$$

其中 $W=[w_{ij}]$ 是区间矩阵 W^l 的一个 $m \times n$ 维的实数矩阵， R 是已知的 m 维实数向量， L 是待解的 n 维实数向量； l_k 是向量 L 的第 k 个元素。式(2.57)给出了优化问题的目标函数和约束条件,即当矩阵 W 的元素 w_{ij} 可以在给定区间范围取值时，求线性方程组 $WL = R$ 的解向量中元素 l_k 可以达到的最大值及最小值。

当遗传算法采用无需解码的实数编码时，每一次变量优化均是将影响线的竖标值作为适应度来评判个体的优劣，极小化问题中，个体的适应度越小，越接近最优，极大化问题中则是个体适应度越大，越接近最优。本文基于实数编码的遗传算法基本操作流程图如下：

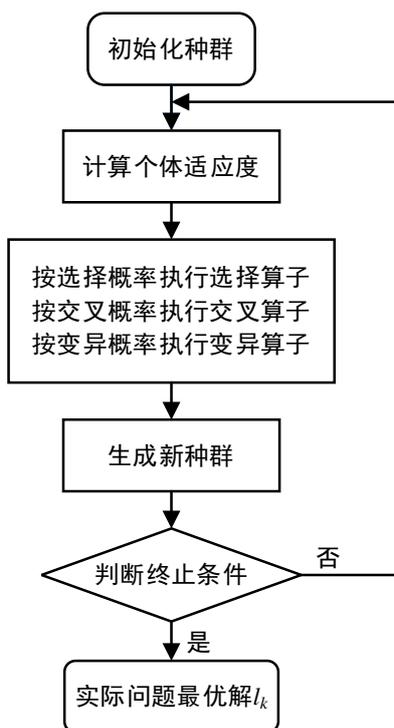


图 2.5 遗传算法求解流程图

2.5.4 蒙特卡罗模拟求解区间影响线

蒙特卡罗法通过利用重复的统计实验模拟可用随机搜索过程描述的一类物理和数学问题的求解，本节便是基于蒙特卡罗方法产生给定参数区间上的均匀分布的随机数来进行区间影响线的计算分析。

在区间影响线反问题的计算模型中，设关于车辆轴重的不确定区间参数为 $w^l = (w_1^l, w_2^l, \dots, w_k^l)$ ，其对应的下界数值为 $\underline{w} = (w_1, w_2, \dots, w_k)$ ，上界数值为 $\bar{w} = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_k)$ 。针对问题中不确定性的存在，蒙特卡罗方法采用乘同余法产生伪随机数序列 r_1, r_2, \dots, r_n ，然后得到一组参数：

$$w = (w_1 + (\bar{w}_1 - w_1)r_1, w_2 + (\bar{w}_2 - w_2)r_2, \dots, w_k + (\bar{w}_k - w_k)r_k) \quad (2.58)$$

根据基于响应的影响线反演方法，将上述参数代入计算方程中，求得影响线的 n 维数值解向量 $\{l_k\}(k=1, \dots, n)$ ；每一次随机试验的输出与上一次试验计算获得的各影响线竖标值 l_k 作比较获得新的影响线区间向量的上界 $\{\bar{L}\}$ 和下界 $\{L\}$ ，直至所计算的结果达到最高模拟次数，图 2.6 为蒙特卡罗法计算流程。

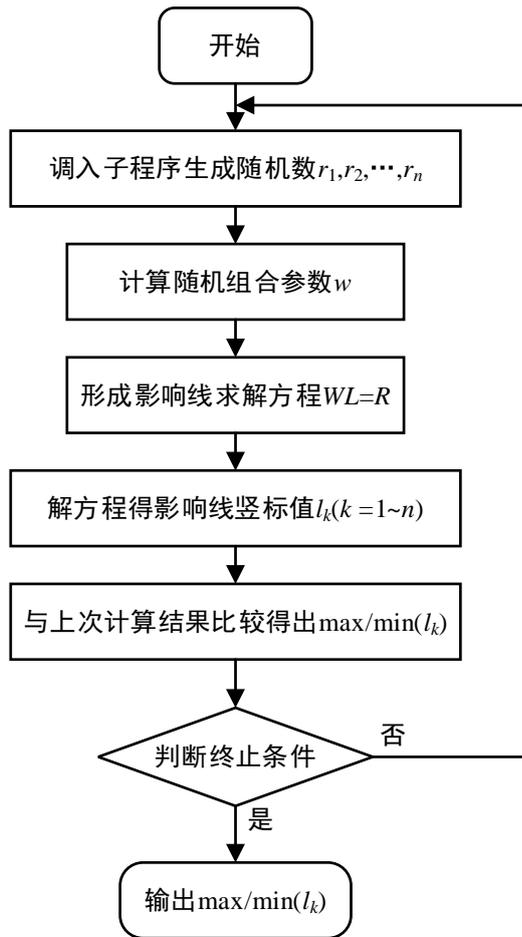


图 2.6 蒙特卡罗法求解流程图

下面用算例 6 来说明仿射求逆算法、全局优化遗传算法以及蒙特卡罗法在参数区间不确定性问题上的求解效果。

算例 6：设有线性方程组 $WL = R$ ，展开形式如下：

$$\begin{bmatrix} w_1 & 0 & w_2 \\ 0 & w_1 & 0 \\ w_2 & 0 & w_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{Bmatrix}$$

其中，矩阵参数的取值为 $w_1=5, w_2=2, \{r_1, r_2, r_3\}^T = \{2.3, 4, 2.6\}^T$ ，解线性方程组得 $\{l_1, l_2, l_3\}^T = \{0.3, 0.8, 0.4\}^T$ 。当参数 w_1 和 w_2 均具有 $\pm 20\%$ 的误差时， $w_1^I = [4, 6]$ ， $w_2^I = [1.6, 2.4]$ ，上述方程成为区间方程组 $W^I L^I = R$ ，采用仿射求逆算法、全局优化遗传算法、蒙特卡罗法三种方法求解区间向量 L^I 的结果分别列于下表：

表 2.2 算例 6 的三种方法区间计算结果

方法	l_1 区间解	l_2 区间解	l_3 区间解	耗时(s)
区间仿射算法	[0.2500, 0.3750]	[0.6667, 1.000]	[0.3333, 0.5000]	0.350
遗传优化算法	[0.2501, 0.3750]	[0.6667, 1.000]	[0.3333, 0.5000]	0.393
蒙特卡罗法	[0.2501, 0.3746]	[0.6667, 1.000]	[0.3335, 0.4996]	3.601

其中，遗传算法的种群规模设置为 20，计算遗传代数为 50；蒙特卡罗模拟试验次数设置为 10 万次，上表中关于遗传算法和蒙特卡罗法的计算结果与耗时均是取求解程序运行 10 次的平均值。算例 2 属于参数区间宽度较窄和矩阵规模较小的一类问题的求解，三种方法得到的解区间的精确性和运算效率均较理想；从结果的准确性来讲，仿射算法在精确度与稳定性两方面俱佳，其余两种方法则不相上下；从计算效率上比较，仿射算法与遗传优化算法的耗时较短，明显优于蒙特卡罗法。上述算例基本证实了三种方法在含有参数不确定性的区间线性方程组求解方面的有效性，尤其是区间仿射算法表现出显著的性能优势，不过还有待于在后续的影响线区间问题求解上做进一步对比验证。

2.6 本章小结

本章介绍了基于桥梁动态响应的影响线区间反问题计算原理与求解方法，主要研究内容如下：

(1) 首先从确定性问题着手，介绍了利用实测桥梁结构响应和已知车辆轴重参数的影响线数学计算方法，其原理是将车辆作用等效为移动荷载，通过多个荷载响应的线性叠加获得理论推导总响应，根据理论响应与实际测量响应关系建立方程求解。

(2) 介绍了含有不确定性参数的区间分析的理论基础，包括区间变量、向量、矩阵的运算法则以及运算中容易由变量相关性导致的区间扩张误差爆炸问题，并简要介绍了优化法、蒙特卡罗模拟法、仿射求逆法三种求解精确、适用性广、稳定性好的区间方程组解法。接下来介绍了仿射算法的理论基础以及重点给出了结合纽曼展开和仿射变换的区间矩阵求逆方法，该法目前主要被用于区间有限元的控制方程求解，具有效率高、结果精确的显著优点，对本文研究区间影响线的反演计算具有很好的借鉴意义。

(3) 立足以上理论基础，提出了影响线区间反演模型，在车辆轴重为不确定区间参数的情况下，综合利用区间分析、仿射矩阵求逆方法，获得影响线的向量解区间。除此之外，还分别将全局优化遗传算法和蒙特卡罗模拟法应用于区间影响线的计算问题，作为仿射解准确性的平行验证手段，并且通过一个简单的算例初步彰显了区间仿射算法在计算结果与效率方面的优越性能。

第3章 基于大数据与支持向量机的影响线识别

3.1 引言

对于一般的区间分析问题，通常只需要输入不确定参数的取值区间便可以得到一个包含真实解的区间输出。依此类推，对于车辆轴重参数为区间估计值的影响线计算问题，假设单次工况中轴重的取值是处于估计区间范围中的一个随机不确定值，则运行一次区间分析只能得到真实影响线的包络区间，显然这并不能达成准确识别桥梁影响线的研究目标。因此，如何采取进一步措施从区间估计结果中识别出确定性影响线将成为整个非接触结构识别研究流程的重要环节。

针对以上问题，本章提出了基于大数据原理和支持向量机算法的影响线识别方法。由于根据区间分析仿射算法得到的影响线解区间总是能很好地包含真实解对应的基准曲线，伴随着测试工况数量的增加，不同载重下车辆的分轴重值最终会以一定的分布形态涵盖整个估计区间，相应地真实影响线也就存在于众多区间解的公共解区域。通过将影响线区间大数据离散为二维平面上可视化的边界数据散点，最终上、下两类边界数据在基准曲线附近呈交汇状态，即两类数据在基准曲线附近收敛，然后便可以运用机器学习分类技巧从中有效提取基准曲线在平面坐标系中的位置信息。这便是本文研究中大数据分析环节的基本技术路线，将车辆激励大数据、结构响应大数据与传统统计学观念进行有机融合，进而从影响线区间边界大数据中识别出桥梁影响线的近似曲线，实现多元数据的融合应用与数据价值的深度挖掘。

3.2 大数据与机器学习原理

3.2.1 大数据的基本概念

数据的起源历史悠久，过去它仅仅是人类熟识的一些数字或符号记录，随着“信息时代，万物数化”的革新演变，全世界无时无刻不在产生数据，人类也开始处在一个数据激增、信息爆炸的时代。传统的数据概念已经无法在信息化的大环境中适用，于是“大数据”的新兴概念被提出，用于描述这种以极快速度增长的海量数字信息对世界各个领域的影响，同时也预示着“大数据”时代的到来。

“大数据”从直观上是海量资料的积累，是信息和知识的载体，随着“大数据”的研究热度和关注度越来越高，其内涵和外延也在不断被丰富，在不同的文献中，“大数据”被描述为数据集、可实现的功能、数据变现过程、架构和技术等，其构成大致可从数据特征、思维方式、技术方法三个方面进行理解，如图 3.1 所

示。

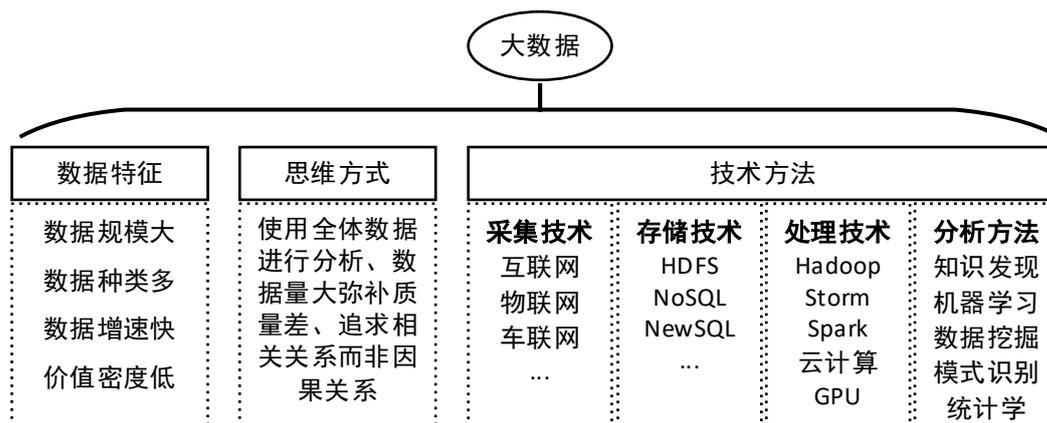


图 3.1 大数据的构成

大数据被公认为是具有 5V 特性的海量数据，大数据分析应具备“使用全体数据进行分析”“接受数据混杂性，数据量大弥补质量差”“追求相关关系而非因果关系”三个思维方式，即有如下特点：与传统统计分析只使用一小部分随机抽样数据相比，使用全体数据可以发现更多的细节和有价值的信息；接受数据混杂、增大数据量能够简化分析模型并避免过拟合，而且数据量大可以在一定程度上弥补质量差的缺陷，从而获得更准确的分析结果；从相关关系切入则可为数据分析提供新的视角。

分析方法是大数据的技术核心。每一种数据来源都有一定的局限性和片面性，只有对各种来源的原始数据进行融合才能反映事物的全貌，事物的本质和规律往往隐藏在各种原始数据的相互关联之中，通过大数据分析方法可以将碎片化的多源数据整合成反映事物原貌的完整数据，包括数据库知识发现(KDD)、数据挖掘、机器学习、模式识别、统计学等。大数据处理和分析的终极目标是借助对数据的挖掘，为人们在各类应用中做出合理的预测或决策。这种从数据中提取知识的研究也称为“数据科学”，即用科学的方法研究数据，包括统计学、机器学习、数据挖掘、数据库等领域；同时结合分析结果，去解决相关领域所面临的实际问题。

3.2.2 解决分类问题的机器学习算法

现实生活中，分类任务普遍存在并应用于人类社会的各行各业，比如根据电子邮件的标题和内容检验邮件是否为垃圾邮件，根据核磁共振扫描的结果判断肿瘤是否是良性等。一般我们所说的分类任务是让机器学习已知数据集 x 和对应的类标签 y 之间的映射关系，这个过程也叫做模型训练，然后将学习到的分类模型作为预测性工具，对未知的数据进行类别预测，原理如图 3.2 所示。训练时样本数据 x 的取值可以是连续型也可以是离散型，但是类标签 y 的取值必须是离散的，这是区分分类与回归的关键特征。

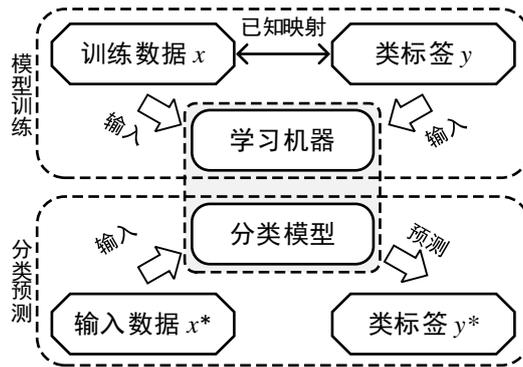


图 3.2 机器学习分类原理

常用的分类算法，如支持向量机、决策树、朴素贝叶斯等均是通过对一定的规则来确定一个能够很好地拟合输入数据和对应类标签之间关系的模型，除此之外，还需具备能够很好地预测未知样本的类标签的能力，即泛化推广能力较好的模型。

本文选择理论基础完善、泛化能力优越的支持向量机智能算法执行区间影响线大数据的二元分类任务，

(1) 支持向量机能够充分体现结构风险最小化原则，综合考虑经验风险和置信风险，在模型复杂度和学习能力之间寻求最佳折中，使学习模型具有很强的泛化能力；

(2) 以线性分类器为基础，支持向量机通过核函数实现了从线性到非线性的转变，对于非线性问题可以有效地解决，同时对于高维问题避免了维数灾难；

(3) 对于支持向量机的求解问题，支持向量机均可将所求问题转化为二次优化问题寻求全局有最优点；

(4) 支持向量机可以与多种算法有效结合，并能建立模式类似模型，从而有效地对复杂问题进行简化。

3.3 支持向量机分类学习

3.3.1 最优分类超平面

SVM 分类算法要求所有的样本不仅被分类超平面正确分开并且远离分类超平面，因此通过搜索“最大间隔”分类器作为最优分类超平面来应对样本复杂度的挑战。由于本文主要涉及到两类数据的分类问题，在此重点介绍基本的 SVM 二元分类原理。

设定训练样本集 $T' \{(\mathbf{x}_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 为两类线性可分样本，如果 $x_i \in R^{(l)}$ 属于第一类，则类别标签为正 ($y_i = 1$)；如果属于第二类则类别标签为负 ($y_i = -1$)。SVM 学习的目标是构造一个决策函数，将测试数据尽可能地正确分类。

设由法向量 w 和截距 b 共同决定的分离超平面为

$$w \cdot x + b = 0 \tag{3.1}$$

能够将两类训练集完全线性分开，则定义样本点距离该超平面的几何间隔为

$$\gamma_i = y_i \left(\frac{\mathbf{w}}{\|\mathbf{w}\|} \cdot \mathbf{x}_i + \frac{b}{\|\mathbf{w}\|} \right) \quad (3.2)$$

根据 $\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b$ 的符号与标签 y 的符号是否一致可以判断分类是否正确，因此上式几何间隔是一种带符号的距离，只有当样本点被正确分类时 γ_i 才是点到平面的距离。

接下来考虑使上述分离超平面的几何间隔最大。对于线性可分数据训练样本，存在众多的超平面可以将两类数据完全正确分开，但是有且只有一个最优分类超平面能以最大间隔将两类数据完全分开。如图 3.3，有两类颜色不同的样本点集合， H 为最优分类超平面， H_1 、 H_2 分别为过各类样本中离分类超平面最近的样本且平行于分类超平面的平面。图中虚线也将样本成功分隔为两类，但间隔小于平面 H ，所以不是最优^[167]。

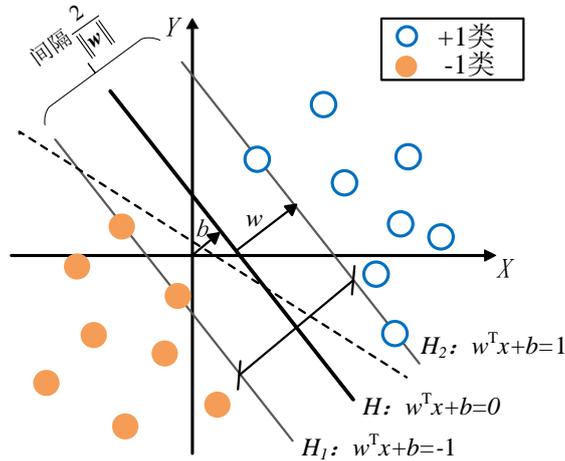


图 3.3 线性可分最优超平面

为了方便推导和优化，令样本点至超平面的最大几何间隔为 $\frac{1}{\|\mathbf{w}\|}$ ，且最大化 $\frac{1}{\|\mathbf{w}\|}$ 和最小化 $\frac{\|\mathbf{w}\|^2}{2}$ 是等价的，则寻求间隔最大问题可以表示为如下优化问题：

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}, b} \quad & \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \\ \text{s.t.} \quad & y_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3.3)$$

由于目标函数是二次函数，约束是线性约束或线性不等式约束，故该问题属于二次规划问题。对每个不等式约束添加拉格朗日乘子，将上述原始问题转化为拉格朗日对偶问题求最优化，这样转化既方便求解，也能自然引入核函数，进而推广到非线性分类问题。由式(3.3)原始问题构建的拉格朗日对偶问题如下：

$$L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i [y_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) - 1] \quad (3.4)$$

$$\max_{\alpha} \min_{\mathbf{w}, b} L(\mathbf{w}, b, \alpha) \quad (3.5)$$

其中 $\alpha_i \geq 0 (i=1, \dots, n)$ 为拉格朗日乘子, 根据对偶问题的 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件可知, 只有位于最大间隔边界上的部分样本点才有 $\alpha_i > 0$, 这种点称为支持向量, 学习完成的模型也只与支持向量有关。对偶问题的最优化过程是式(3.5)的极大极小问题。令拉格朗日函数 $L(\mathbf{w}, b, \alpha)$ 分别对 \mathbf{w}, b 的偏导为 0, 得到如下关系:

$$\sum \alpha_i y_i = 0 \quad (3.6)$$

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n y_i \alpha_i \mathbf{x}_i \quad (3.7)$$

代入式(3.4)中得到目标函数为:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{w}, b, \alpha) &= \frac{1}{2} (\mathbf{w} \cdot \mathbf{w}) - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i b + \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ &= \frac{1}{2} (\mathbf{w} \cdot \mathbf{w}) - \mathbf{w} \cdot \mathbf{w} + \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ &= \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \mathbf{w} \cdot \mathbf{w} \\ &= \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) \end{aligned} \quad (3.8)$$

消除多余变量后得到最终优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\alpha} \quad & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ \text{s.t.} \quad & \sum \alpha_i y_i = 0 \\ & \alpha_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3.9)$$

求解上式即可确定拉格朗日乘子, 同时也确定了最优超平面为

$$\mathbf{w}^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i \mathbf{x}_i \quad (3.10)$$

$$b^* = y_j - \sum y_i \alpha_i^* (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) \quad (3.11)$$

其中 (\mathbf{x}_j, y_j) 为任意一个支持向量。因此根据上述推导得到的最优分类决策函数为

$$f(\mathbf{x}) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}) + b^* \right) \quad (3.12)$$

3.3.2 软间隔最大化分类

上一节的推导是基于两类数据完全线性可分的假设，要求最优超平面两侧不存在任何错误分类样本，故称为硬间隔最大化分类。而实际问题中，更常见的是数据线性不可分情况，若强行按照错误零容忍标准采用硬间隔分离两类数据，会导致分类模型仅对训练样本具有完全正确分类能力，但是对未知新样本或测试样本的分类正确率偏低，这种现象称为模型泛化能力欠佳；因此，需要引进软间隔分类，允许某些样本不满足式(3.3)的约束条件，在考虑最大化间隔的同时，让不满足约束的样本数量尽量少，从而将 SVM 线性分类器向线性不可分问题拓展。

如图 3.4 所示，在解决两类数据线性不可分问题时，软间隔最大化分类是考虑部分特异点不能被很好地分类而采取的允许 SVM 线性分类器在一些样本上出错的缓解办法，通过对每一个样本点 $x_i (i=1,2,\dots,n)$ 施加一个松弛因子 $\xi_i \geq 0$ ，放松点到超平面的间隔限制，使原式(3.3)的约束不等式变为：

$$y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 - \xi_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (3.13)$$

在目标函数中对每一个松弛因子 ξ_i 计入一个代价 ξ_i ，则新的优化问题成为：

$$\begin{aligned} \min_{w,b,\xi} \quad & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum \xi_i \\ \text{s.t.} \quad & y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 - \xi_i \\ & \xi_i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (3.14)$$

上式中 C 是一个人为设定且大于 0 的惩罚参数，控制样本错分的惩罚程度。上述最小化目标函数一方面使间隔最大化，另一方面使误分类的点数尽量少， C 则在两者之间起调和作用。当 C 无穷大时，则软间隔退化为硬间隔，不允许有任何误分类样本；当 C 接近于 0，则无视错分情况，样本分类的正确率降低。

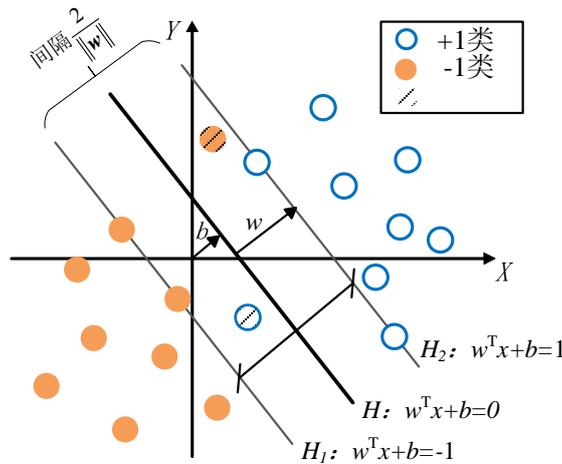


图 3.4 线性不可分软间隔最优超平面

求解式(3.14)二次优化问题的技术与在线性可分情况下采用的技术类同，利用

拉格朗日对偶优化问题的优势，消除多余变量后最终转换成求以下最优化问题：

$$\begin{aligned} \min_{\alpha} & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \\ & 0 \leq \alpha_i \leq C, i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3.15)$$

同样根据式(3.10)、(3.11)获得超平面的表达式，由式(3.12)得到决策函数。与线性可分情况相同，这里只有支持向量对应的 α_i 不为 0，支持向量决定了唯一分类决策面的位置。不同的是，软间隔的支持向量可能在间隔边界上或者在间隔边界与分隔超平面之间，抑或位于分隔超平面的误分一侧。

3.3.3 非线性分类核技巧

前两节介绍的硬间隔最大化和软间隔最大化均是以 SVM 线性分类模型为前提进行的最优分类超平面和决策函数的原理推导。其中，SVM 软间隔线性分类器虽然可以较好的解决线性不可分情况，但当训练样本在原始输入空间具有强烈非线性特征时，线性分类器已不适用，即使放宽对样本数据正确分类的要求，也无法训练得到性能优越的 SVM 分类模型，对于这种情况非线性分类核技巧的引入十分必要。

非线性分类是指利用非线性模型才能很好地进行分类的问题，但直接求解非线性问题非常困难，所以采取非线性变换核技巧将输入空间(欧氏空间 R^n 或离散集合)的数据通过映射函数 ϕ 映射到高维特征空间(希尔伯特空间 \mathcal{H})，再利用线性分类支持向量机解决初始非线性问题，如图 3.5。注意到 3.3.1 节和 3.3.2 节中最优超平面的求解只涉及训练样本之间的内积运算 $(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)$ ，因此要解决一个特征空间(通过非线性变换得到的空间)的最优线性分类问题，只需知道这个空间中的内积运算即可^[168]。

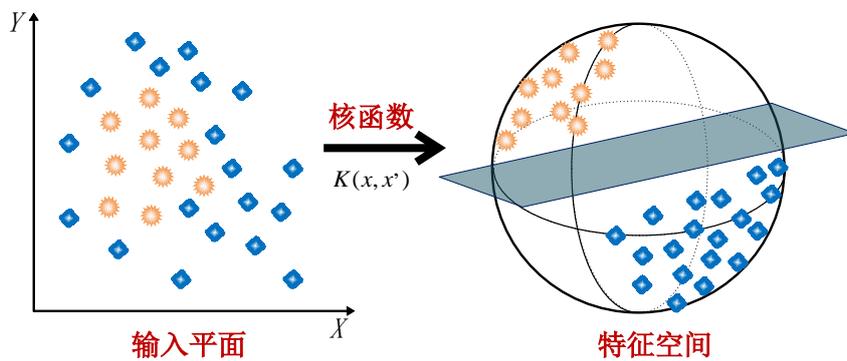


图 3.5 非线性变换核技巧

核技巧在学习预测中只定义核函数 $\kappa(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)$ ，而不显式地定义映射 $\phi(\mathbf{x})$ 。因为直接计算 $\kappa(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)$ 比通过 $\phi(\mathbf{x}_i) \cdot \phi(\mathbf{x}_j)$ 计算 $\kappa(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)$ 要简单得多，巧妙地避免了“维数灾难”，极大地减少了计算量，而且对于给定的核 $\kappa(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)$ ，特征空间和映射函

数的取法并不唯一。

目前常用的内积核函数主要有如下几种：

表 3.1 常用内积核函数

核函数	公式	释义
线性核函数	$\kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)$	-
多项式核函数	$\kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = [(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) + 1]^d$	d 为多项式阶数
高斯径向基核函数	$\kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp\left(-\frac{ \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j ^2}{2\sigma^2}\right)$	σ 为高斯径向基函数宽度
Sigmoid 核函数	$\kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \tanh[b(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) - c]$	b 为比例因子, c 为偏移因子

将线性支持向量机目标函数和决策函数中的内积 $(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)$ 用核函数 $\kappa(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) = \phi(\mathbf{x}_i) \cdot \phi(\mathbf{x}_j)$ 来替代, 此时对偶问题的目标函数变为

$$L(\alpha) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j \kappa(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (3.16)$$

相应的决策函数成为

$$f(\mathbf{x}) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i \kappa(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b^* \right) \quad (3.17)$$

由于最终分类决策函数中实际只涉及与支持向量的内积运算与求和, 因此, 识别时计算复杂度只取决于支持向量的个数, 而不是特征空间的维数。

综上所述, SVM 的基本思想是通过内积函数定义的非线性变换将输入空间映射到一个高维空间, 在这个空间中求(广义)最优分类超平面, 对应的分类决策函数形式上类似于一个神经网络, 每个中间层节点对应于输入样本与一个支持向量的内积, 最终输出是若干中间层节点的线性组合, 而因此也被称作是支持向量网络^[169], 如图 3.6 所示

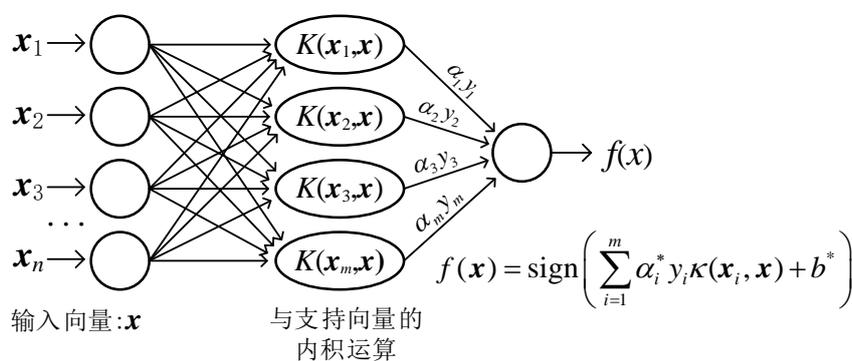


图 3.6 支持向量机网络示意图

3.3.4 序列最小优化算法

由于具有较好的理论基础和优秀的泛化能力, 支持向量机方法在近年来机器

学习分类回归任务中占据主流，而如何提高计算效率使得 SVM 在应对大规模样本训练时游刃有余仍然是研究的重点。

Platt 提出的序列最小优化算法(Sequential minimal optimization, SMO)算法^[170]是目前在实际问题中应用最为广泛的一种快速优化方法。SMO 运用启发式算法，在每一步迭代中都只选择两个拉格朗日乘子，固定其余变量，构建一个二次规划子问题进行优化求解，进而向原始二次凸优化问题的解靠近。SMO 通过将原始问题不断分解成子问题遍历求解的方式达到求解原始问题的目的，这比在每一步迭代中都求解一次复杂多变量的二次凸优化问题速度更快，存储空间的需求更小，即使是规模很大的 SVM 分类问题也能用个人计算机进行运算。在此给出 SMO 算法的基本步骤：

Step1: 输入训练数据集 $T^l = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_N, y_N)\}$ ，预设精度 ε ；

Step2: 取初值 $\alpha^{(0)} = 0$ ，迭代次数 $k = 1$ ；

Step3: 选取优化变量 $\alpha_1^{(k)}$ 、 $\alpha_2^{(k)}$ ，解析求两个变量最优化子问题如下式

$$\begin{aligned} \min_{\alpha_1, \alpha_2} & \frac{1}{2} \kappa_{11} \alpha_1^2 + y_1 y_2 \kappa_{12} \alpha_1 \alpha_2 + \frac{1}{2} \kappa_{22} \alpha_2^2 - (\alpha_1 + \alpha_2) + \alpha_1 y_1 \sum_{i=3}^N \alpha_i y_i \kappa_{i1} + \alpha_2 y_2 \sum_{i=3}^N \alpha_i y_i \kappa_{i2} \\ \text{s.t.} & \alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2 = - \sum_{i=3}^N \alpha_i y_i = \zeta (\text{常数}) \\ & 0 \leq \alpha_i \leq C, i = 1, 2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Step4: 得到最优解 $\alpha_1^{(k+1)}$ 、 $\alpha_2^{(k+1)}$ ，更新 α 为 $\alpha^{(k+1)}$ ；

Step5: 若在精度 ε 范围内满足以下条件

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i &= 0 \\ 0 \leq \alpha_i &\leq C, i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$y_i \left(\sum_{j=1}^N \alpha_j y_j \kappa(\mathbf{x}_j, \mathbf{x}_i) + b \right) = \begin{cases} \geq 1, \{\mathbf{x}_i | \alpha_i = 0\} \\ = 1, \{\mathbf{x}_i | 0 < \alpha_i < C\} \\ \leq 1, \{\mathbf{x}_i | \alpha_i = c\} \end{cases}$$

则接 Step6，否则令 $k = k + 1$ 并转 Step3；

Step6: 取 $\alpha^* = \alpha^{(k+1)}$ ，结束。

下面以一个计算实例来说明支持向量机在数据的线性与非线性分类上的应用效果。以二维坐标平面上的 100 个“+1”类向量和 100 个“-1”类向量组成样本数据，分别采用 SVM 软间隔线性分类器和高斯核非线性分类器对上述样本分类，如图 3.7 所示，图中灰色直线和曲线便是优化求解得到的特征空间分类超平面在原始输入空间上的映射结果。其中，分类模型的参数按照经验取值，图 3.7a) 的线性分类软间隔采用的惩罚参数 $C=1$ ；图 3.7b) 的非线性分类软间隔采用的惩罚参数 $C=1$ ，高斯核的影响半径参数取 $g=1$ 。

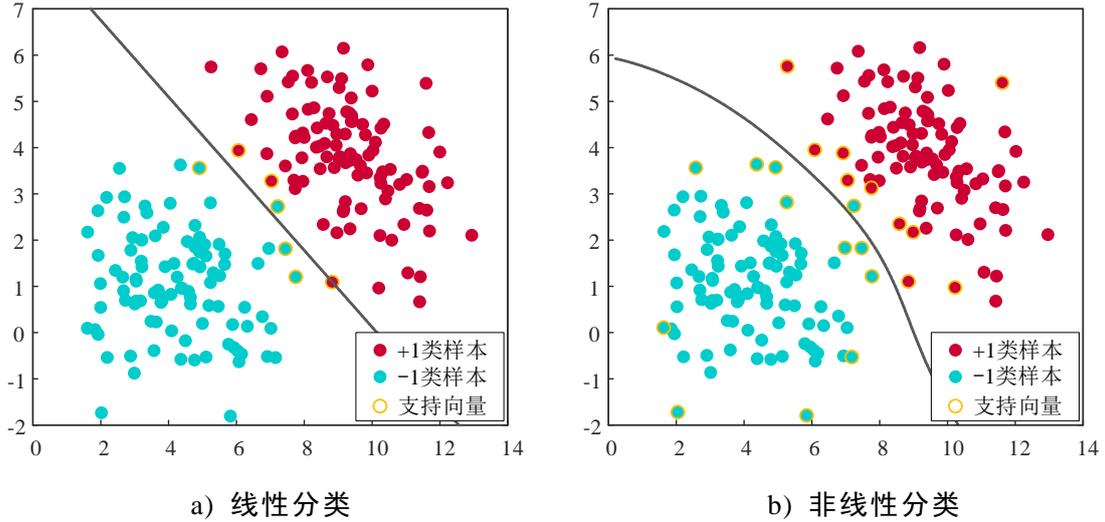


图 3.7 支持向量机分类决策超平面

单从现有样本分类结果上看，使用两种分类模型的效果均较好，分类决策面两侧仅允许少量误分类点的存在。一般在对待实际问题分析时，首先便要结合数据具体情况选择适合的分类型模型，即选用线性分类器还是非线性分类器，然后再根据交叉验证或经验决定模型中的相关参数取值。SVM 相关参数取值决定了分类器的性能，而评价 SVM 模型的好坏则需要测试样本的验证，根据测试的分类正确率加以衡量，这些内容将在下一节展开介绍。

3.4 支持向量机算法识别影响线

3.4.1 SVM 影响线识别实现方法

根据轴重估计区间与影响线区间反演模型得到的区间影响线大数据，其每一个工况对应的数据最初是由两条等长度向量组成，分别代表包络影响线的区间上界曲线和下界曲线。为了充分了解这类影响线区间向量的特征，将影响线大数据绘于同一个平面坐标系中，基于区间解总是包含真实解的前提，运用空间分割的思想，可认为影响线(IL)的基准曲线(Baseline, BL)是位于多工况影响线区间在平面上的公共重叠区域，用数学集合的思想表示为：

$$I_1 \cap I_2 \cap I_3 \cap \dots \cap I_N = I_p$$

$$BL \in I_p \tag{3.20}$$

其中， I_1, I_2, \dots, I_N 为所有工况对应的 IL 区间结果，下标为工况的编号，用于分析的总工况数为 N ； I_p 为多组区间结果的交集；BL 是属于 I_p 集合中的唯一准确解。理想情况下 I_p 是所有影响线区间解的公共带状解区间，大数据的支持可以使该公共区间稳定收敛成为一个确定性的向量解。但是，由于采集的结构响应包含不可剔除的振动效应，以及响应与车轴位置难以精确同步，利用数学模型计算的影响线或影响线区间难免包含一些误差，前述理想假设难以满足，即 I_p 难以连

续并准确收敛为一条影响线基准曲线。

然而上述思路也并非完全不可取，通过将不可避免的动力效应干扰和计算误差纳入考虑范围，多个区间集合的公共区域则顺势放宽为一个带状区域，而利用善于处理二值化分类学习问题的支持向量机正好可以将区间搜索解的问题转化为上下界两类数据的全局性界限识别问题，既充分考虑了收敛带附近的数据分布情况，也直接找到了一条具有代表性的曲线作为 IL 基准曲线的直观近似数值解。

因此，本文结合影响线区间大数据在平面上的非线性分布，选择 SVM 软间隔非线性分类模型对 IL 区间的两类边界数据进行二元分类学习和训练，进而从大数据中识别 IL 的近似曲线。

3.4.2 模型关键参数寻优

判别一个分类模型性能的优劣，主要看它的泛化性能以及学习机器的复杂性，而对分类模型的性能表现起决定作用的是误差惩罚参数和核函数中的参数，因此研究参数的取值在 SVM 分类模型性能优化方面具有重要的意义。

惩罚参数 C 是 SVM 分类模型的重要参数，在特征空间， C 值越小表示对错分误差的惩罚力度越小，相应地学习机器复杂度减小，但会造成样本分类误差偏大；通过对参数 C 取值大小的调节，可以达到分类正确率和算法复杂度之间的折衷，使学习机器获得最优的泛化能力。

高斯核函数是最常用的径向基(RBF)函数，其无论对低维、高维、大样本还是小样本问题都能获得比较理想的识别结果，同时它还具有较宽的收敛域，具有较强的非线性映射能力，因此本文在支持向量机分类研究中选取高斯核函数执行数据的非线性变换。表 3.1 的高斯核函数公式中，唯一可调参数是径向基半径 σ ，一般记 $g=1/\sigma^2$ ，直接优化参数 g 。参数 g 的改变实际上是隐含地改变映射函数从而改变样本数据子空间分布的复杂程度， g 越大，支持向量越少， g 越小，支持向量越多， g 的取值直接影响着高斯核函数性能优劣，也决定着 SVM 模型的性能。

网格搜索算法是支持向量机常用的参数优化方法，基本原理是在一定的空间范围内将待搜索参数划分为网格，然后遍历网格中的所有点来寻找使模型性能最优的参数值，具有流程简单方便、易于理解、寻优速度快的特点。利用网格搜索法和交叉验证实现参数组合优化的主要流程如图 3.8 所示。

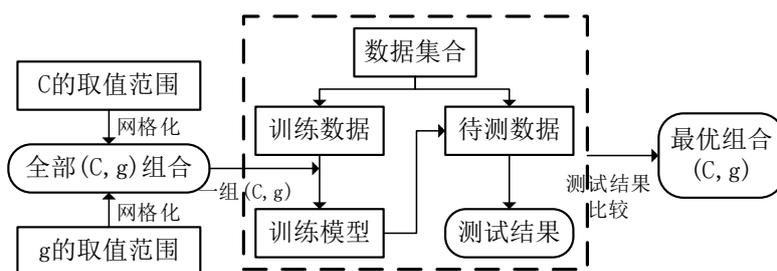
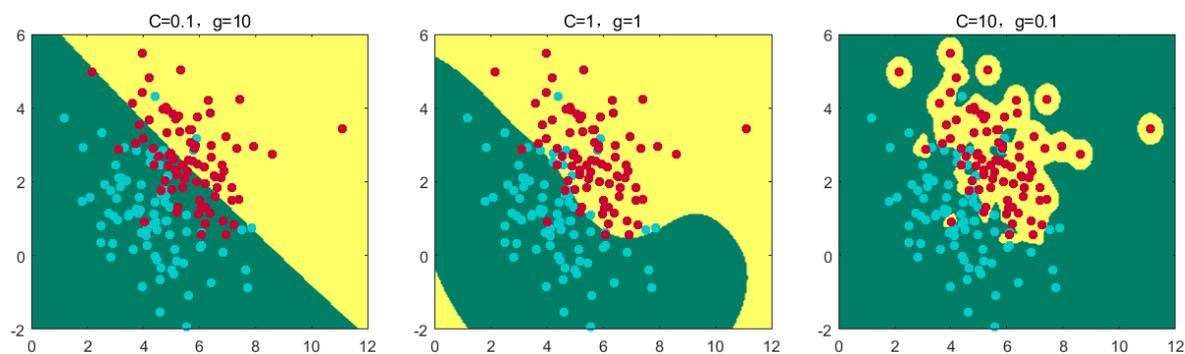
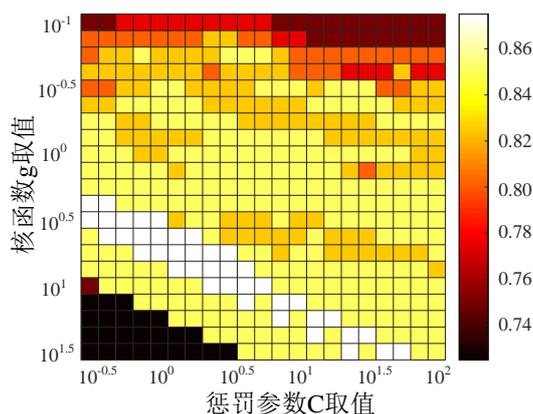


图 3.8 网格搜索法参数寻优

为了直观描述惩罚参数 C 和高斯核参数 g 对 SVM 分类模型的影响，图 3.9a) 给出了可视化操作后几组参数取值对应的显式分类结果。将 C 、 g 的取值范围分别取为 $[10^{-1}, 10^{1.5}]$ 和 $[10^{-0.5}, 10^2]$ ，根据网格搜索法得到每一个参数组合对应的测试样本分类准确率绘于图 3.9b) 中。一般最高分类正确率对应的最优参数组合并不唯一，需要结合参数大小对模型性能的影响规律以及针对实际问题做适当的折中取舍进而选出最优组合。



a) 不同参数组合对应的分类效果



b) 网格搜索法计算的样本分类正确率

图 3.9 SVM 分类模型的参数组合寻优结果

3.4.3 模型使用与可视化策略

经最优参数组合训练得到的分类模型具有最高准确率，但是作为影响线近似的分类界线，即 SVM 分类器的最优分类超平面一般是隐式的，应用可视化策略显示大数据支持下的 SVM 图形化分类界线，一方面有利于直观判断分类的效果，另一方面达到用二维坐标系的分类界线近似代替影响线的目的。

将数学模型计算出的影响线区间向量大数据用于 SVM 模型的训练，使该分类模型学习到了大数据在平面上的位置分布规律，已经具备搜索出两类边界数据交汇处的分界线。为了图形化输出类之间的分界线，先在二维平面坐标系上规划一片能包含影响线幅值的块区，然后将块区的每个像素点的坐标作为测试数据集，代入训练完成的 SVM 模型执行决策分类，判断每一个像素点的类并赋上类标签

“+1”和“-1”。最后从像素点“+1”“-1”类标签构成的数字矩阵中识别竖向梯度变化处的像素坐标，于是分界线的离散值坐标便可以全部记录下来。同时，块区网格像素点间隔越小，得到的分界线就越光滑，影响线的数值近似解就越精确。

将每一个像素点按照类赋予颜色后，块区便可以利用颜色的不同显示 SVM 分类后的效果，以及在类与类之间形成鲜明的分割线，如图 3.10 所示。这一分割线在二维平面上是一条类似于抛物线的非线性曲线，实际上在映射后的特征空间中就是最大间隔分类超平面。虽然该超平面在特征空间的表达式 (w,b) 可以求解出来，但是映射函数是未知的，所以平面坐标系上的分类线无法用解析式表达，只能通过前期训练的 SVM 对网格像素点的分类判断，显式地找到影响线的近似数值解。

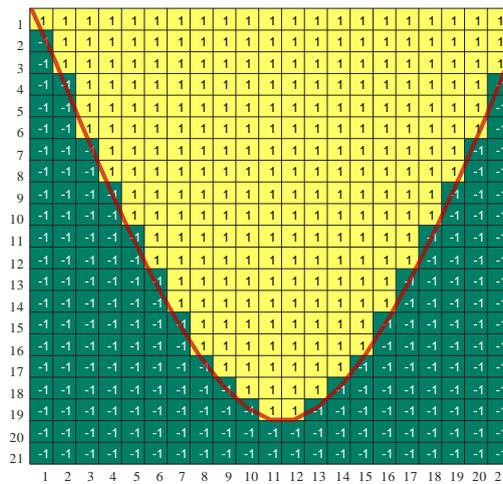


图 3.10 SVM 识别影响线结果的可视化操作

3.4.4 支持向量机算法流程

支持向量机应用的重要方面是算法的具体实施与应用，下面给出其算法的具体步骤：

Step1: 获取训练样本 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$;

Step2: 选择进行非线性变换的核函数，本文选取高斯核；

Step3: 确定高斯核函数的参数 g 范围和对错分类(误差)进行惩罚的惩罚因子 C 的范围，将两个参数的取值进行网格化组合；

Step4: 构造二次优化问题，并用 SMO 算法求解该二次优化问题；

Step6: 获得 α_0 、 b_0 ，得到支持向量机分类模型和分类准确率；

Step7: 保留准确率最高的参数组合，对应的分类模型即为最终完成训练的支持向量机；

Step8: 将块区网格像素点作为测试数据输入支持向量机，得到决策分类结果并提取梯度变化处的坐标形成影响线近似数值解，进一步执行可视化策略绘出平面上分类界线。

3.5 本章小结

本章主要介绍了通过对车辆激励大数据和桥梁结构动态响应大数据的深入挖掘分析实现非接触式影响线识别的理论方法与具体实现过程。主要内容如下：

(1) 选择泛化能力好、性能稳定的支持向量机执行两类数据的分类决策任务。然后就支持向量机的二分类原理，依次介绍了 SVM 模型的最大间隔分类超平面原则、针对线性不可分的软间隔最大化策略、针对复杂非线性分类所采取的低维空间向高维特征空间转换的核技巧以及能提高优化效率的序列最小优化求解算法。

(2) 对 SVM 二元分类算法在影响线识别问题上的具体应用方法进行了介绍。SVM 分类模型的性能与惩罚参数和核函数的参数息息相关，利用网格搜索方法寻找最优参数组合，可以训练获得分类正确率最高的模型。但是经过高维映射后的 SVM 分类决策面在二维空间很难得到解析解，因此可以执行可视化策略对区域像素点分类，搜索类的分界线并图形化输出，进而提取出 IL 的近似数值解。

第4章 车桥耦合数值模拟与室内试验

4.1 引言

车辆与桥梁的动力相互作用是桥梁工程的重要研究方面，虽然现场试验是研究车桥耦合振动的最可靠手段，但由于试验成本较高、条件苛刻、可重复性差，在一般的基础性研究中，学者们更倾向于采用高效且实用的车桥耦合数值模拟或者室内模型试验的手段达到试验目的。

基于国内车辆出厂参数调查统计结果建立的车型分类与参数区间映射关系数据库，本章利用车桥耦合数值算例模拟实际情况下的行驶车辆对桥梁结构的作用效应，通过构造随机参数组合的随机行车工况，获取不同类型车辆激励下的结构动态响应大数据，为研究提供可靠的数据来源。立足于前述区间影响线反演理论和支持向量机分类识别理论基础，本章进一步利用车桥振动数值算例和室内车桥缩尺模型动力测试的响应作为大数据输入，对本文所提出的非接触影响线识别方法的有效性和稳定性进行多方面的探索与验证。

4.2 车桥耦合振动数值求解

4.2.1 车辆数值模型

早期的车桥振动研究主要应用匀速移动常量力、匀速移动简谐力、匀速滚动质量、匀速移动弹簧质量模型近似模拟行驶车辆对简支梁桥的作用过程。虽然移动荷载模型忽略了车辆的惯性特性和与桥梁的耦合作用，移动质量模型也没有考虑与桥梁的耦合，但这些简单的模型各有特点，在合适的应用场合下也能取得满意的近似分析效果，因此目前仍然被广泛应用于简单车桥耦合作用的初步分析。实际车辆的振动非常复杂，现代车辆分析模型以弹簧质量模型为雏形，将车辆结构视为由一系列质量、弹簧、阻尼器连接而成的多自由度空间体系，充分考虑车身、悬架、轮胎各部分的竖向振动与横向振动，使车辆模型的动力分析更加系统化、精细化。随着计算机数值计算的进步，车辆的精细化有限元仿真模型成为精确研究车桥耦合运动中车辆各部分响应细节的有效手段，但由于其本身建模难度大、计算效率低，不利于快速的仿真分析和工程推广，现主要应用于车辆结构安全分析、行车舒适度分析等领域。

三维多自由度整车模型是目前车桥耦合振动模拟中应用较多的车辆数值模型，在实用性和模拟效果方面均表现良好。典型的整车模型考虑车体的浮沉、俯仰、侧倾 3 个自由度以及各车轮的竖向位移，能够较全面的模拟实际车辆的动力特性。

目前国际上通用的是 Wang 等^[171]提出的三轴车模型和 O'Brien 等^[172]提出的五轴车模型，如图 4.1 所示。应用中根据研究的需要，采用两轴或多轴车模型，如图 4.2a)是最简单的 7 自由度二轴整车模型。根据车辆的对称性，整车模型一般可以简化处理为半车模型，本文便是采用图 4.2b)的典型二轴平面半车模型，只考虑车体浮沉、俯仰、两车轮竖向位移的四自由度，这种模型基本能反映车辆的各部分结构特性参数，在模拟车桥耦合作用和桥梁结构车致动态响应的研究中已能满足精度要求。

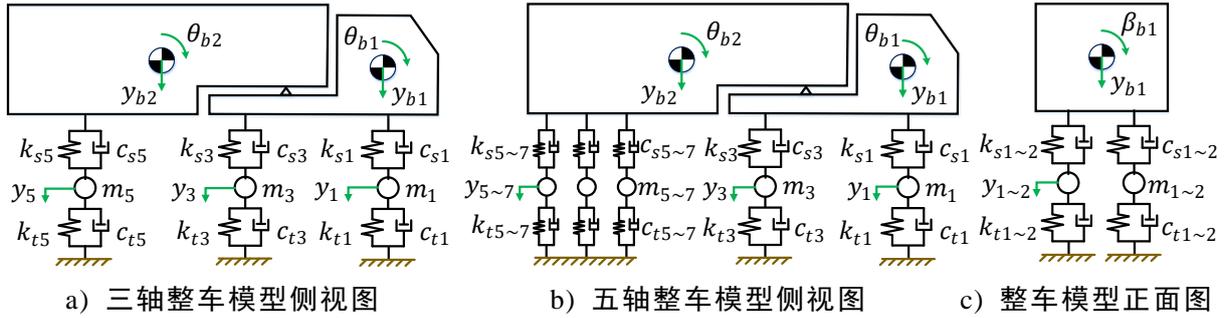


图 4.1 国际通用整车计算模型

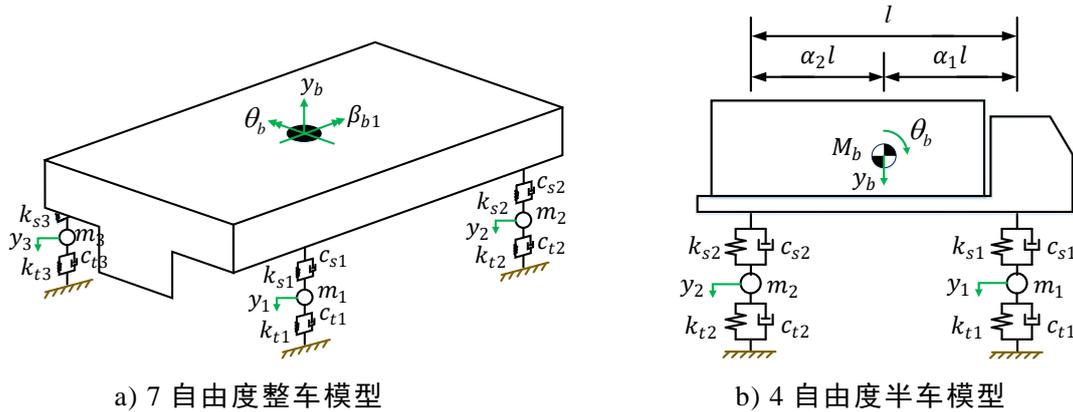


图 4.2 二轴车数值计算模型

根据达朗贝尔原理建立的车辆动力平衡方程如下：

$$[M_v]\{\ddot{X}_v\} + [C_v]\{\dot{X}_v\} + [K_v]\{X_v\} = \{F_G\} + \{F_v\} \quad (4.1)$$

上式中， $[M_v]$ 、 $[C_v]$ 、 $[K_v]$ 分别为车辆子系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵； $\{X_v\}$ 、 $\{\dot{X}_v\}$ 、 $\{\ddot{X}_v\}$ 分别为车辆子系统的各自由度位移、速度、加速度向量； $\{F_G\}$ 表示重力作用导致的车辆等效节点荷载， $\{F_v\}$ 为桥面对车轮接触点的作用力。具体对应到图 4.2b)的二轴车四自由度半车模型，上述相关矩阵与向量的计算方法如下：

$$[M_v] = \begin{bmatrix} I_\alpha & & & \\ & M_b & & \\ & & m_1 & \\ & & & m_2 \end{bmatrix}, \quad [C_v] = \begin{bmatrix} (\alpha_1 l)^2 c_{s1} + (\alpha_2 l)^2 c_{s2} & \alpha_1 l c_{s1} - \alpha_2 l c_{s2} & -\alpha_1 l c_{s1} & \alpha_2 l c_{s2} \\ \alpha_1 l c_{s1} - \alpha_2 l c_{s2} & c_{s1} + c_{s2} & -c_{s1} & -c_{s2} \\ -\alpha_1 l c_{s1} & -c_{s1} & c_{s1} + c_{t1} & 0 \\ \alpha_2 l c_{s2} & -c_{s2} & 0 & c_{s2} + c_{t2} \end{bmatrix}$$

$$[K_v] = \begin{bmatrix} (\alpha_1 l)^2 k_{s1} + (\alpha_2 l)^2 k_{s2} & \alpha_1 l k_{s1} - \alpha_2 l k_{s2} & -\alpha_1 l k_{s1} & \alpha_2 l k_{s2} \\ \alpha_1 l k_{s1} - \alpha_2 l k_{s2} & k_{s1} + k_{s2} & -k_{s1} & -k_{s2} \\ -\alpha_1 l k_{s1} & -k_{s1} & k_{s1} + k_{t1} & 0 \\ \alpha_2 l k_{s2} & -k_{s2} & 0 & k_{s2} + k_{t2} \end{bmatrix}$$

$$\{X_v\}^T = \langle \theta_b, y_b, y_1, y_2 \rangle, \quad \{\dot{X}_v\}^T = \langle \dot{\theta}_b, \dot{y}_b, \dot{y}_1, \dot{y}_2 \rangle, \quad \{\ddot{X}_v\}^T = \langle \ddot{\theta}_b, \ddot{y}_b, \ddot{y}_1, \ddot{y}_2 \rangle$$

其中, I_α 为车体转动惯量; M_b 、 m_1 、 m_2 分别代表车体、前悬挂、后悬挂质量; $\alpha_1 l$ 、 $\alpha_2 l$ 分别代表车体重心至前后轴的距离; c_{s1} 、 c_{s2} 分别为前后轴的悬架阻尼, c_{t1} 、 c_{t2} 分别为前后轴的轮胎阻尼; k_{s1} 、 k_{s2} 分别为前后轴的悬架刚度, k_{t1} 、 k_{t2} 分别为前后轴的轮胎刚度。 θ_b 、 y_b 、 y_1 、 y_2 分别为车体转动角度、竖向位移和车辆前后悬挂系统的竖向位移。

4.2.2 桥梁分析模型

桥梁模型选取的是一座典型双车道梁板式简支混凝土桥, 横截面由 5 根相同的 T 梁组成, 主梁间距 2.4m, 车道总宽 12m, 桥面板厚 100mm, 桥跨径 30m, 平均每隔 6m 设置一道 200mm 厚的横隔板。桥梁截面如图 4.3 所示。

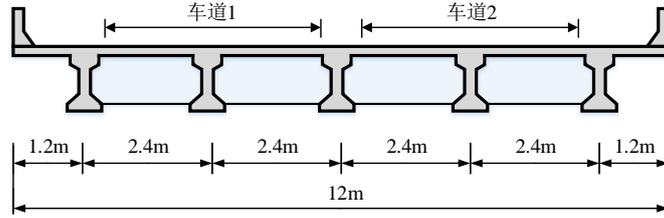


图 4.3 桥梁横截面示意图

对于桥梁上部结构的有限元模型, 目前常用的有平面梁杆模型、空间梁格模型、梁壳组合模型以及实体单元模型。平面梁杆模型将桥梁视为一维 Euler-Bernoulli 梁, 在车辆移动荷载作用下的瞬态响应分析方面具有简单高效的特点, 但这种模型过于简化, 不能反映桥梁的横向抗弯性能和考虑荷载的横向分布。将桥板壳单元与梁单元进行组合建模和采用实体单元精细化建模的方式虽然模拟响应的精度更高, 但计算量偏大。考虑到本文是大数据工况的数值计算, 需兼顾计算精度与分析效率, 故选取常用的梁格法建立桥梁 ANSYS 有限元分析模型, 用等效的纵横向梁单元来代替桥梁上部结构, 通过分析梁格的受力状态得到桥梁的动力响应。

上述桥梁有限元模型中每根 T 型主梁的抗弯刚度为 $EI = 10.8 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 线密度 $\rho A = 1.868 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 其他详细截面参数及梁格划分示意如图 4.4。对该模型进行模态分析得到前三阶弯曲模态频率分别为 2.6218、10.458 和 23.425, 基本符合 1:4:9 的规律。

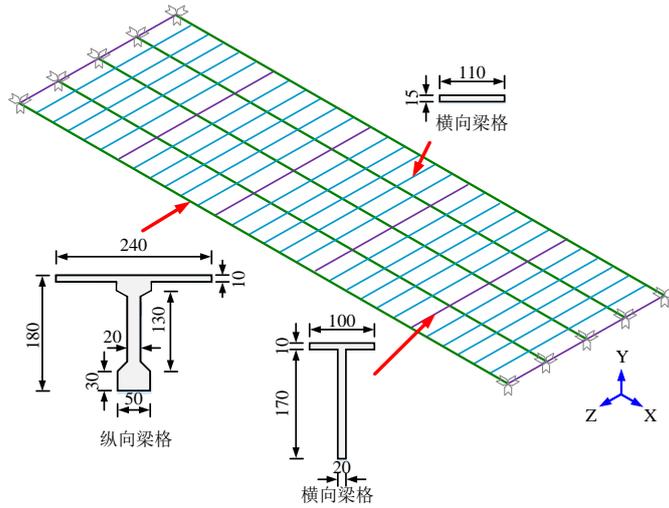


图 4.4 梁格法桥梁计算模型(单位:cm)

根据达朗贝尔原理建立桥梁的动力平衡方程如下：

$$[M_b]\{\ddot{d}_b\}+[C_b]\{\dot{d}_b\}+[K_b]\{d_b\}=\{F_b\} \quad (4.2)$$

式中： $[M_b]$ 、 $[C_b]$ 、 $[K_b]$ 分别为桥梁的质量、阻尼和刚度矩阵； $\{d_b\}$ 为桥梁所有自由度的位移向量， $\{\dot{d}_b\}$ 、 $\{\ddot{d}_b\}$ 分别为对时间的一、二阶导数； $\{F_b\}$ 为作用在桥梁上的轮胎与地面接触力向量。桥梁总体阻尼矩阵按 Rayleigh 阻尼确定，取阻尼比 $\xi=0.02$ ，根据桥梁任意两阶圆频率 ω_1 、 ω_2 计算阻尼矩阵的公式如下：

$$[C_b]=\frac{2\xi\omega_1\omega_2}{\omega_1+\omega_2}[M_b]+\frac{2\xi}{\omega_1+\omega_2}[K_b] \quad (4.3)$$

4.2.3 路面不平整度激励

路面不平整是车桥耦合振动的主要激励源，是桥梁动态响应的重要影响因素。我国规范《车辆振动输入-路面平度表示方法 GB7031-1986》按功率谱密度将路面从优到劣分为 A~H 八个等级，功率谱密度函数的表达式如下：

$$G_d(n)=G_d(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \quad (4.4)$$

式中 n 为空间频率(m^{-1})， n_0 为参考空间频率(取 $n_0=0.1 \text{ m}^{-1}$)； G_d 为空间频率对应的路面平度系数； w 为频率指数(取 $w=2$)。路面不平整的随机平稳过程可以采用三角级数法模拟生成，公式如下：

$$r(x)=\sum_{k=1}^N\sqrt{2G_d(n_k)\Delta n}\cos(2\pi n_k x+\theta_k) \quad (4.5)$$

$r(x)$ 是坐标为 x 处的路面不平度， N 为采样频段数， n_k 为空间频率， Δn 为空间频率采样间隔， θ_k 为 $0\sim 2\pi$ 之间的随机相位。本文依据式(4.4)、(4.5)模拟生成“A~C 级”路面的平整度样本如图 4.5 所示。

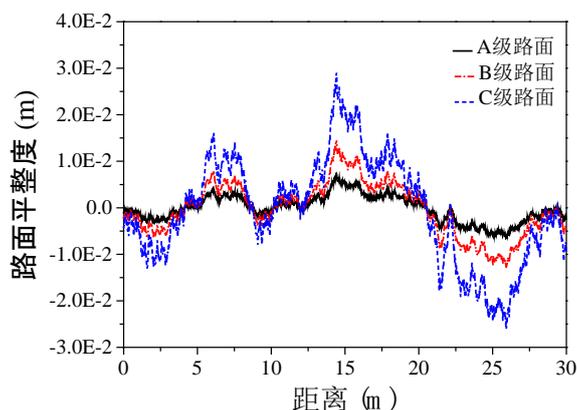


图 4.5 路面平整度样本

4.2.4 车桥耦合全过程迭代求解

从时变动力学角度出发，将车辆、桥梁视为以轮胎接触点为界的两个振动子系统，以接触点的相互作用力大小相等和位移协调条件作为车辆和桥梁动力学方程的联系，通过反复迭代求解响应并判断迭代是否达到收敛。本文采用全过程迭代法，利用 Matlab 主程序求解式(4.1)车辆数值模型的动力学方程并调用 ANSYS APDL 桥梁有限元模型和瞬态分析功能输出移动荷载作用下的结构时程位移响应，形成车辆与桥梁之间鲜明的耦合迭代关系，详细的迭代求解过程入下^[173]：

Step1: 假设桥梁初始运动状态为零，以路面不平整度为激励，在 Matlab 中采用 Runge-Kutta 法求解车辆子系统的动力学方程，得到桥面对各车轮的接触力时程；

Step2: 将上一步的车轮接触力时程施加于桥面单元，通过 ANSYS 瞬态分析得到桥梁子系统各节点的位移时程；

Step3: 将 Step2 的桥梁节点位移时程与路面不平整叠加，作为新的车桥耦合激励施加于车辆子系统上，求解得到各车轮的接触力时程；

Step4: 将 Step3 的接触力时程与上一次迭代的结果进行对比并计算两者的误差，若满足容许误差值 ε ，则结束迭代，否则回到 Step2 继续执行计算。

4.3 随机工况数值响应输出

本文研究的技术前提是通过非接触式的机器视觉技术获得车辆荷载估计区间的可靠识别，李紫玮^[174]对该领域做了比较全面的研究，通过对国内常见车辆数据信息的调查统计，提出了一套适用于轴载区间识别的车辆分类标准，并利用深度学习方法实现车辆外观类型识别与轴载区间的自动匹配。因此本文在数值模拟算例中，参考其提出的车辆分类标准和车辆参数区间统计结果进行随机行车工况的设计，增加模拟试验的多样性与随机性，使之更贴近实际情况。

4.3.1 车辆分类与轴重区间

车辆荷载是桥梁结构的主要荷载之一，传统的获得动态车辆荷载最常用最直接的手段是桥梁动态称重系统，通过动态称重系统可以直接获得通过车辆的总重、轴重、轴数和车速等信息，然而由于安装和运营维护成本等原因该系统主要安装在少数大型桥梁的部分截面，数量众多的中小桥梁无法使用。国内外学者研究了一系列移动荷载识别的时域法和频域法，利用结构动力响应反演移动车辆荷载，但目前在实际应用中还面临诸多方面的困难与不足。

本文研究的前提是基于机器视觉技术从相机设备拍摄的桥面行车视频中获取桥梁上车辆的时空位置和轴重区间，从而获得非接触结构识别所需的输入荷载。要实现基于视频的车辆轴重区间识别，首先需要建立车辆类型与车辆轴荷区间信息之间的映射关系。车辆类型的定义通常与应用目的相关，现有的车辆分类系统常常把车辆简单分为小型车、中型车、大型车等或者按照特定的使用场景来分类，如道路运输管理、汽车产品的型式认证、公路车辆通行费管理和车辆登记注册等。土木工程领域则更关注车辆的力学特性，因此常常依据车辆轴数和轴距进行分类。目前现有的大多数车辆分类标准都不适用于本文研究的基于图像识别技术估计车辆轴重区间的问题，为了寻找适用于轴重区间匹配的车辆分类数据库，本文查阅了各国车辆分类的相关规定和相关研究中的车辆分类方法，采用了李紫玮^[174]提出的一套新的车辆分类标准，将桥梁上通常行驶的车辆分为小轿车、面包车(7-15座)、中型客车(15-39座)、大型客车(40座及以上)、公交车、2轴4轮货车、2轴6轮货车、3轴货车、4轴货车、多轴货车、专项作业车和三轮汽车在内的12种车型，并依此大量搜集各类汽车的参数信息，建立了车辆参数信息数据库。

按照制定的分类标准，该数据库统计并整理了8402种国内常见品牌车型的数据信息，其中不同型号的小轿车信息有120条，面包车信息有170条，中型客车信息有92条，大型客车信息有50条，公交车信息有116条，2轴4轮货车信息共366条，2轴6轮货车信息有4815条，3轴货车信息有1280条，4轴货车信息有1400条，统计的参数包括车长、车宽、车高、轴距、座位数、整备质量、最大允许总质量、前桥允许荷载和后桥允许荷载等。

汽车公告信息中，整备质量表示车辆按出厂技术条件装备完整时的质量，即空车质量；最大允许总质量表示汽车制造厂提出的技术允许的最大质量，即汽车满载时的总质量。车辆相关参数示意图如图4.6所示。汽车质量在前轴和后轴上的分配比例称为轴荷分配，假定汽车空载时的轴荷分配与满载时相等，则可以根据满载时前轴和后轴的轴荷分配值，结合汽车的整备质量得到空载时前桥荷载和后桥荷载。表4.1为根据公告信息统计得到9种类型车辆(小轿车、面包车、中型客车、大型客车、公交车、2轴4轮货车、2轴6轮货车、3轴货车和4轴货车)各

自的轴距和轴重分布区间^[174]。



图 4.6 车辆相关参数

表 4.1 车辆数据信息区间统计结果

车辆类型	轴距(mm)	前桥质量(kg)	后桥质量(kg)	总质量(kg)
小轿车	[2550,3150]	[500,1400]	[500,1800]	[1000,3000]
面包车	[1900,4400]	[350,2000]	[500,2850]	[950,5500]
中型客车	[3100,4100]	[500,2700]	[500,4200]	[2600,6500]
大型客车	[3800,6300]	[700,6500]	[700,11500]	[1400,18000]
公交车	[3300,6100]	[2100,6500]	[3300,11500]	[6000,18000]
2轴4轮货车	[2000,3450]	[350,1800]	[350,2250]	[700,3500]
2轴6轮货车	[2300,5800]	[500,7000]	[900,11500]	[1400,18000]
3轴货车	[1300,5800]	[1600,7500]	[3100,18000]	[7300,25000]
4轴货车	[1300,4900]	[2000,7500]	[3500,9000]	[8800,32000]

4.3.2 随机模拟工况设置

为了得到与实际情况比较符合的桥梁结构响应，本文从表 4.1 中挑选出**大型客车**、**公交车**、**2轴6轮货车**三种具有代表性的车辆，将各车型对应的参数区间作为模拟单车行驶工况的依据。对于数值算例中的每一次工况，车辆模型的**轴荷载取值**、**轴距大小**均从对应车型的**参数统计区间中随机均匀抽样**，同时增加前后轴荷分配值位于 0.35~0.65 的限制保证车辆模型荷载取值的合理性，行驶速度也从 10~30m/s (对应时速 36~108km/h)区间随机产生，通过参数的随机组合增加模拟试验工况的多样性和随机性。由于车辆模型悬架与轮胎的刚度、阻尼参数对车致响应的影响不大，故此处将之简化为确定取值，直接从相关文献^[175-177]的典型数值算例中取用。数值算例中各项参数的区间取值与确定取值列于表 4.2 和表 4.3，基于统计区间生成随机参数组合工况的车桥耦合数值模拟流程如图 4.7。

表 4.2 双轴车辆数值模型区间参数取值

车型	速度 $v(\text{m/s})$	轴距 $d(\text{m})$	前轴重 $w_1(\text{kg})$	后轴重 $w_2(\text{kg})$
大客车	[10,30]	[3.8,6.3]	[700,6500]	[700,11500]
公交车	[10,30]	[3.3,6.1]	[2100,6500]	[3300,11500]
两轴 6 轮货车	[10,30]	[2.3,5.8]	[500,7000]	[900,11500]

表 4.3 双轴车辆数值模型固定参数取值

车型	m_1, m_2 (kg)	k_{t1}, k_{t2} (kN/m)	k_{s1}, k_{s2} (kN/m)	c_{t1}, c_{t2} (kN·s/m)	c_{s1}, c_{s2} (kN·s/m)
大客车	500,600	1200,2000	500,500	3,3	12,27
公交车	600,600	1500,1800	400,400	3,3	15,20
两轴 6 轮货车	400,600	2000,2500	400,400	3,3	18,25

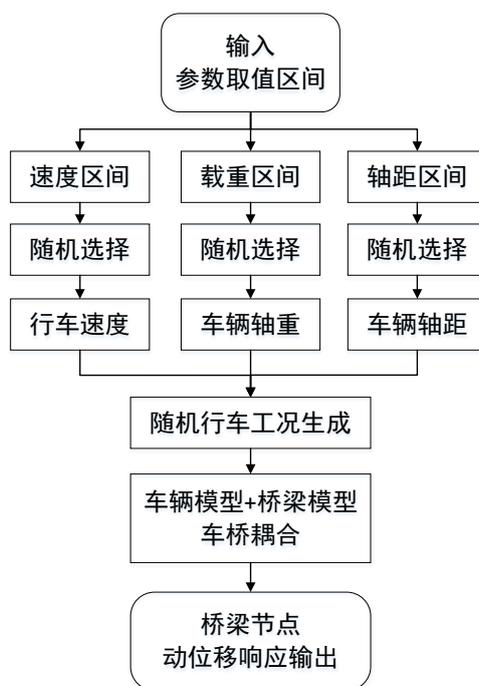


图 4.7 数值模拟随机工况生成

4.3.3 影响线的敏感性分析

影响线是单位荷载作用下桥梁结构的静力响应，通过模型分析得到的理论影响线是静态且唯一的，但在实际动态测试中，桥梁振动响应不可避免地包含测量误差、环境干扰和荷载动力效应，由于无法完全识别各类误差来源并有效剔除，故实测影响线通常是借助滤波或平滑处理削弱动力效应后的准静态曲线，与静力影响线大致吻合，已能满足一般工程计算的精度要求，两者间误差基本可以忽略。

响应中的动力成分是实测影响线的主要误差来源，产生动力荷载效应的原因

主要有几点：1)路面不平顺导致车辆在平稳行驶过程中对桥面产生冲击力；2)车辆轴荷载在移动过程中由于桥面挠度变形而发生轴荷载重分配，尤其当车辆为重型卡车时该现象更为明显；3)车辆的引擎、悬挂和车体构成一个动力系统，在移动过程中产生了竖向振动。为避免车辆与桥梁的自振频率相近引起共振，车辆参数的取值也会考虑远离桥梁自振频率设计。

从确定性问题切入研究桥梁结构影响线对车辆模型参数的敏感性，有助于理解数值模拟中各工况下区间影响线特性的改变，有利于对试验结果的准确分析。本节采取单一变量原则，依次改变行车工况的速度、车辆模型的轴距、轴重、悬挂质量、悬架阻尼和刚度、轮胎阻尼和刚度这些关键参数，探讨车辆模型参数的选择对影响线计算结果的影响。为了定量显示参数改变后影响线计算结果的准确性变化，将桥梁有限元模型静力加载得到的影响线作为基准曲线，采用实测计算影响线与基准曲线的拟合误差作为结果准确性的评价指标，计算公式如下

$$Err = \frac{\sum_{i=1}^n |L_{sta,i} - L_{cal,i}|}{\sum_{i=1}^n |L_{sta,i}|} \times 100\% \quad (4.6)$$

其中， Err 代表计算曲线与标准基线之间的百分误差； $L_{sta,i}$ 、 $L_{cal,i}$ 分别表示静力影响线和实测计算影响线的第*i*个竖标值， n 为影响线数列长度。

1. 车速度的影响

考虑路面不平顺影响，模拟研究二轴车在车道1行驶时车速对影响线计算偏差的影响，如图4.8所示，模拟车速划分为10m/s、15m/s、20m/s、25m/s、30m/s共5个等级，对应实际行驶36km/h~108 km/h的车速区间。算例模拟双车道桥梁，分别提取两车道的跨中节点动位移响应，两者计算的影响线主要表现为幅值上的差异。

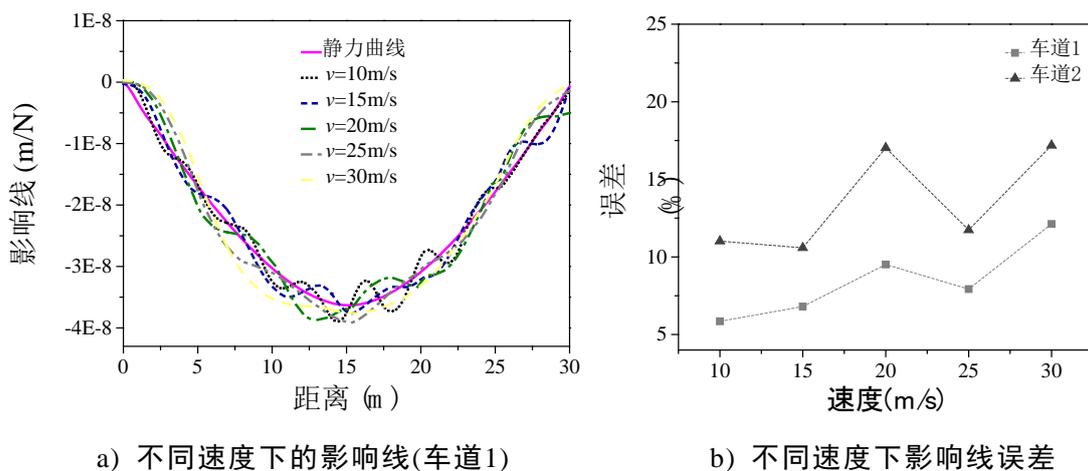


图 4.8 模拟不同速度工况对影响线计算结果的影响

从上图可以看出速度对影响线的计算误差有显著影响，低速工况下车辆与桥梁结构接触时间较长耦合作用充分，桥梁振动特性得到充分显现，影响线波动幅度小，振动波分布密集，结果的准确性较高；而高速工况下，影响线振动波幅值

大且分布稀疏，相对基准曲线的偏离误差显著增大，增加了后期从实测影响线中提取准静态值的难度。图 4.8b) 中车道 2 比车道 1 的误差明显偏大，是因为邻车道的车致响应总体幅值较小，影响线计算结果中振动干扰被相对放大。

2. 车辆模型轴距的影响

如果将车桥相互作用简单视作移动激励荷载作用在平面简支梁结构上的动力学问题，则车辆的轴距反映了两个激励作用的先后时间差。设置轴距范围为 3.5m~6m，研究车辆轴距参数的改变对影响线计算结果的影响，如图 4.9 所示。

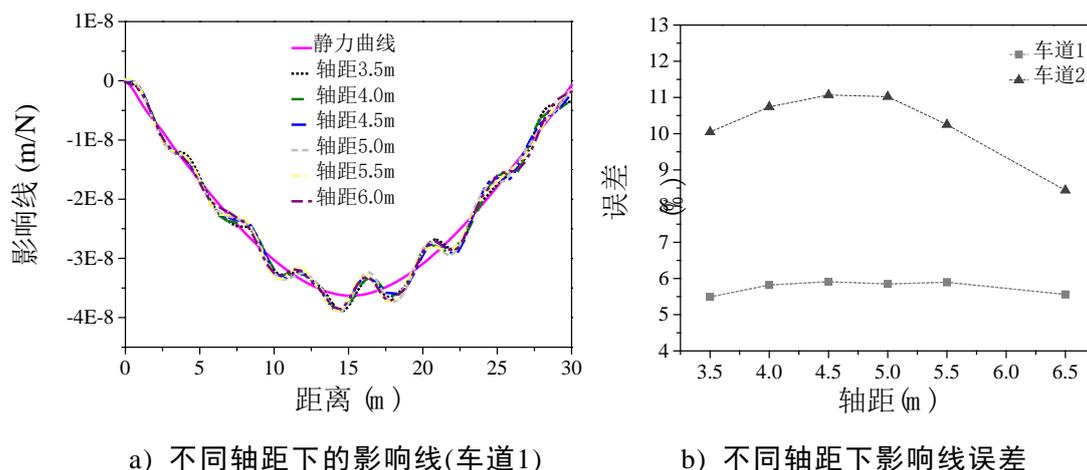


图 4.9 模拟不同轴距的车辆模型对影响线计算结果的影响

上述分析中保持速度一致($v=10\text{m/s}$)，按轴距划分为 6 组工况。图 4.9a) 中各工况曲线离散程度较小，均围绕基线附近波动；图 4.9b) 中虽然误差与轴距之间是非线性关系，但最大误差与最小误差的差异并不显著，可见车辆模型轴距取值的差异对影响线计算结果的误差影响较小。

3. 车辆模型载重的影响

车辆的载重直接影响各车轴的质量分配，激励的大小对结构响应具有重要影响。为切合实际，根据统计信息合理设置车的载重区间为 2500kg~15000kg，按载重量划分为 6 个等级进行试验，影响线的计算结果如下：

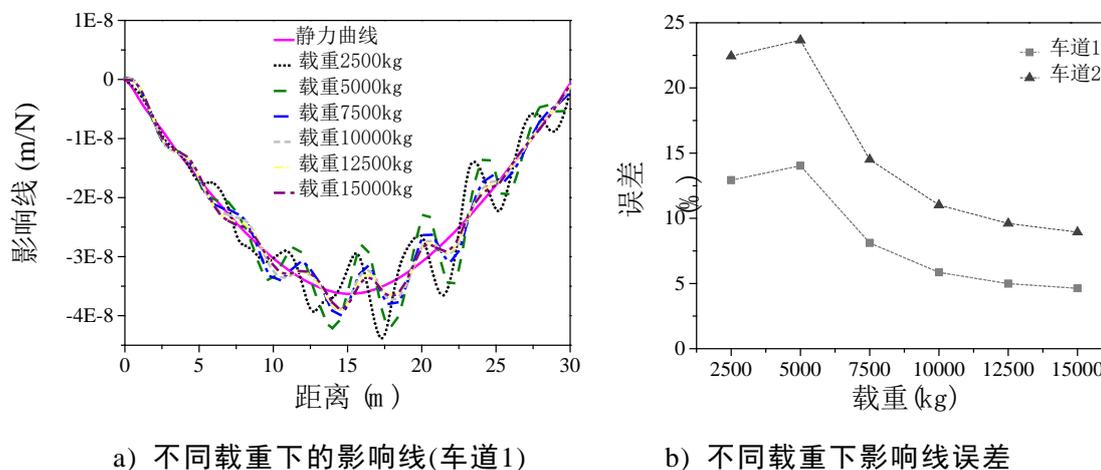
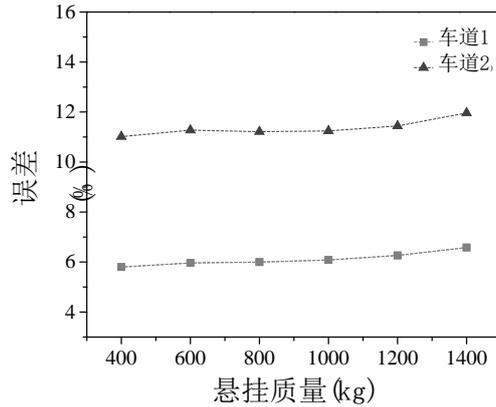


图 4.10 模拟不同载重的车辆模型对影响线计算结果的影响

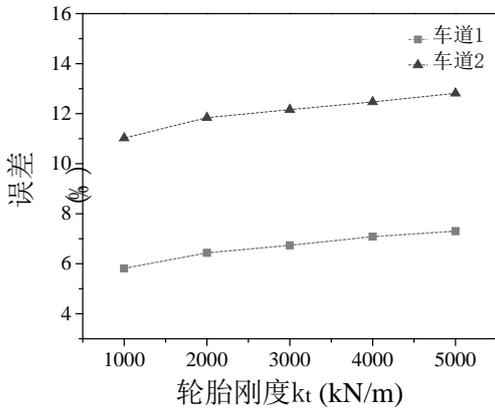
车辆载重的大小直接影响在不平顺路面上行驶过程中的颠簸程度，空车颠簸大，对桥梁的冲击增强，导致桥梁振动加剧，影响线受动力因素干扰较大；反之重车行驶更平稳，与桥面接触稳定，产生的冲击效应小，响应的局部振动幅值相较减小，更有利于准静态影响线的提取。

4. 车辆模型其他参数的影响

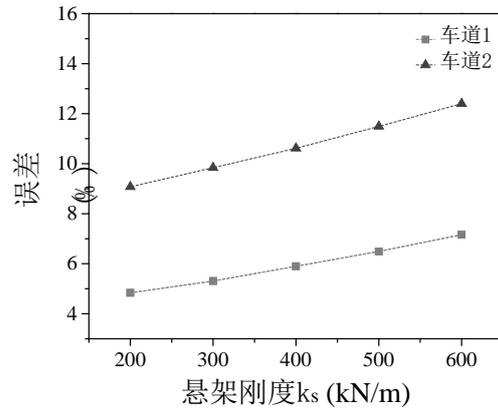
其他车辆模型关键参数，包括悬挂质量、悬架与轮胎的刚度和阻尼等对结构动态响应影响较小，对影响线计算结果影响也较小，相关的误差分析结果见下图。



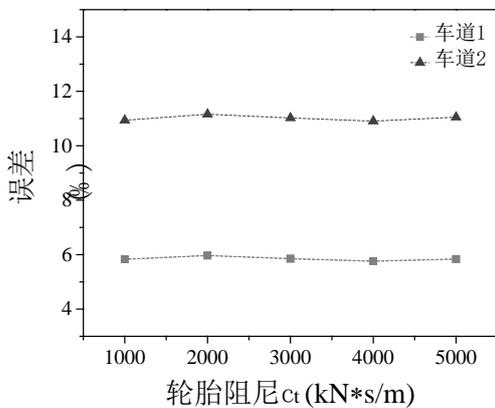
a) 不同悬挂质量下的影响线误差



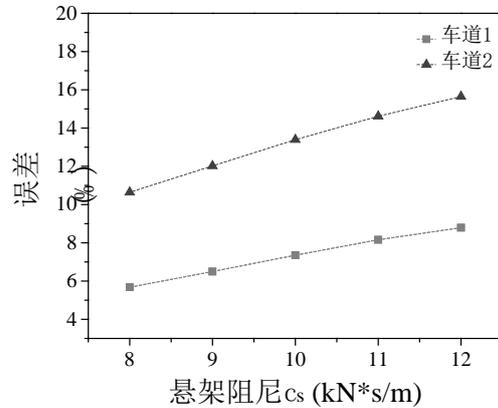
b) 不同轮胎刚度下的影响线误差



c) 不同悬架刚度下影响线误差



d) 不同轮胎阻尼下的影响线误差



e) 不同悬架阻尼下的影响线误差

图 4.11 模拟其他参数对影响线计算结果的影响

从敏感性分析结果可以总结出车辆模型的速度和载重是决定桥梁结构模拟响应和影响线中动力效应大小的关键因素，本文在车桥耦合数值算例中通过设置基于轴重、轴距、速度区间的随机参数组合工况并将影响较小的悬架与轮胎的刚度、阻尼参数取为确定值，很大程度上保证了车辆大数据数值模拟的多样性、随机性、合理性，使模拟结果更接近实际测试结果，提高本章数值试验的可信度，不失为对本文方法的正确性和可靠性所进行的客观且全面的考察。此外，本节的敏感性分析也更利于在后续研究环节中有根据有针对性地分析误差来源，从本质上把握整套理论算法的运行机理，揭示从激励输入到结果输出的内在规律特征。

4.4 区间影响线计算与识别数值算例

4.4.1 基于仿射算法的影响线区间计算

在应用仿射求逆算法批量求解影响线区间之前，有必要通过试探性算例了解输入区间与输出区间的内在联系。本节基于公交车车型的各项参数，设计了三个测试工况列于表 4.4，以研究轴重区间取值和模拟响应输入信息对输出区间的影响规律，故在数值算例中，除了实际轴重取值不同，其余输入参数与区间均相同。表 4.4 中的影响线区间和静力影响线均取结构跨中同一节点处的数值进行对比，将各组工况中由实际轴重作用引起的实测响应作为输入，计算出对应的影响线区间并绘于图 4.12 中。鉴于数值模拟中由移动荷载引起的响应局部振动幅值不大，同时为了避免结果失真，计算过程中没有采用平滑处理剔除该部分振动效应。

表 4.4 不同工况下计算的影响线区间结果

工况	前轴区间 (kg)	后轴区间 (kg)	实际前轴重 (kg)	实际后轴重 (kg)	影响线区间 ($10^{-8}m/N$)	静力影响线 ($10^{-8}m/N$)
1	[2100,6500]	[3300,11500]	2500	3700	[-4.15,-1.24]	-3.63
2	[2100,6500]	[3300,11500]	4300	7400	[-8.14,-2.44]	-3.63
3	[2100,6500]	[3300,11500]	6000	11000	[-11.69,-3.51]	-3.63

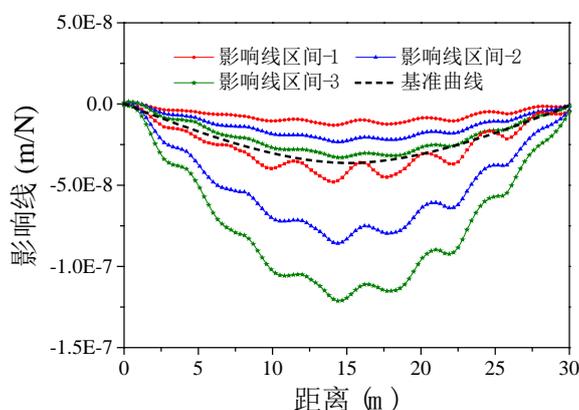


图 4.12 影响线区间计算结果($v=10m/s$)

联合以上图表，可以清楚地看出输入区间与输出区间两者的内在联系，即轴重区间固定不变时，实际轴重越接近区间下限，实测的动位移响应越小，计算的影响线区间下界越接近真实影响线，反之亦然。同时，由于仿射求逆算法中逆阵 $A^1W_0^{-1}$ 作为系数与响应 $\{R\}$ 相乘得到影响线区间向量，故不同工况的影响线区间宽度(即区间上下界之间的最大差值)与响应幅值成正比，导致车致响应越大，结果区间越宽；下界曲线较上界曲线分布更为稀疏的现象亦是受逆阵系数的影响。

4.4.2 多种方法计算结果对比

将原确定性问题延伸到含有轴重不确定参数的区间分析反问题，需要利用仿射求逆算法定向求解区间线性方程组得到影响线分布区间，且采用全局优化遗传算法和蒙特卡罗法均可以求得精确解来佐证仿射算法求解结果的准确性和紧凑性。

遗传算法采取变量逐一优化的基本思想求解大规模区间线性方程组的解，由适应度函数评价个体的优劣和指导种群进化方向，通过选取合适的算子与概率避免解的过早局部收敛。算法中相关参数的设置十分关键，既影响优化的效率也决定着解的搜索效果，经过一系列试探研究，本文计算中选取种群规模 $N_{pop}=50$ ，进化代数 $N_{gen}=100$ 代，交叉概率 $P_c=0.9$ ，变异概率 $P_m=0.3$ 时能取得较高精度的区间结果。蒙特卡罗随机模拟方法则通过大量重复试验搜索影响线向量各竖标值的极大极小值，当随机试验次数达到 10 万次时已能取得较高精度的收敛结果。以上一节中的工况 2 为例，分别采用区间仿射算法、遗传算法和蒙特卡罗法计算的区间影响线如图 4.13 所示，几种方法在计算效率、效果方面的对比也列于表 4.5。

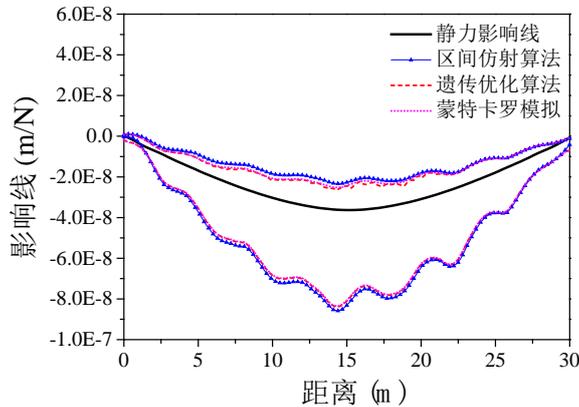


图 4.13 影响线区间计算结果对比

表 4.5 多种方法计算结果

方法	计算耗时(s)	区间宽度(m/N)
区间仿射算法	1	6.25×10^{-8}
蒙特卡罗模拟	377(约 6.3min)	5.83×10^{-8}
遗传算法优化	2568(约 43min)	5.81×10^{-8}

可以看出遗传算法和蒙特卡罗算法的解比仿射算法的解要略微紧致，但是遗传算法解曲线的光滑程度较其余两种方法差，容易得到局部收敛解。遗传算法和蒙特卡罗法虽然具有全局最优化的搜索能力，能近似地得到区间精确解，但是所消耗的时间代价较大，而且随着求解问题的规模以及变量变化范围的增大而呈爆炸性增长，所以相比而言，仿射算法在计算效率和计算效果方面综合价值更优。

4.4.3 支持向量机识别影响线

鉴于前两节中分析了车辆轴重输入对影响线输出的区间偏差传递关系以及验证了仿射求逆算法计算得到的影响线解区间的准确性与紧致性，本节应用大数据原理，假设研究工况充足使得输入值在估计区间中满布，则相应的输出值也能在输出区间满布。支持向量机能够将不同属性的海量数据有效分类，若将计算输出的大数据影响线区间分离为上界与下界数据，支持向量机便可以从中识别一个分类决策边界，该界限位于两类数据的交汇处，是真实影响线的近似数值解。

本节的主要目的是完成对多组工况的影响线区间计算结果进行上界曲线与下界曲线的分类任务，进而寻找到分类界限数值解。一条曲线相当于一个高维向量，如果将一条曲线对应的 m 维向量视作一个带有 m 个属性的特征数据训练分类模型，虽然能大大减小分类器内部的优化计算量，节约模型训练时间，但是这种高维空间隐式化分类只具备将待测数据曲线正确贴上分类标签的作用，却无法显式得到存在于高维空间中的分类超平面数值解序列。所以本文根据平面坐标系中的一条曲线根据横轴坐标与竖标值的对应关系，将一个 m 维向量曲线离散成 m 个二维平面数据点，则同一条曲线上的点与点之间不再包含任何联系。将多重工况下计算的区间影响线向量做平面离散化处理，所有的离散点将作为SVM分类器的训练集。

本文在实际计算中将每一组区间解重新采样成等长度的数值序列，数列长度为101，每一个影响线区间的上边界向量竖标值与横轴坐标一一对应，离散成101个有序实数对，全部赋予“+1”类标签；同理将下边界向量离散成101个“-1”类数据。 n 条动态时程响应对应计算得到 n 个区间影响线解，则经过规范处理后得到 $n \times 101 \times 2$ 个二维点数据参与高斯核SVM软间隔非线性分类模型训练，最终得到一个正确率稳定在92%以上的SVM分类模型。然后执行分类决策面可视化策略，在二维坐标平面中均匀划分出一系列网格点，横轴为桥梁距离坐标，纵轴为影响线竖标值。将该平面上的所有网格点对应的有序实数对作为测试数据集，输入到训练完成的SVM模型中执行分类，通过搜索二值化网格矩阵中类别标签的梯度变化位置，即可得到一条完整的影响线数值解曲线。

本文涉及到的基于机器视觉与深度学习技术的车型分类与轴重估计是依据国内现有车辆的相关出厂参数与统计调查结果整理出的粗分类，估计的轴重区间范围较大，区间跨越最高达到10吨，故计算所得影响线区间宽度也较宽。本文依据

4.3.2节中三种车型(车型一-大客车、车型二-公交车、车型三-二轴六轮货车)的区间参数,按照随机均匀分布原则和随机参数组合原则,分别生成了在车道一上加载的300个车桥耦合模拟工况,然后从三种车型中各自随机抽取100个工况组成混合车型识别算例。这些数值模拟算例中,每个工况均对应一个动位移响应,能根据前述区间反演理论模型计算得到一个影响线区间。图4.14是模拟单一车型和混合车型下车道一的SVM影响线识别结果,图4.15将各车型识别结果与基准曲线进行对比,拟合误差分别为5.42%, 9.07%, 20.78%, 10.90%。

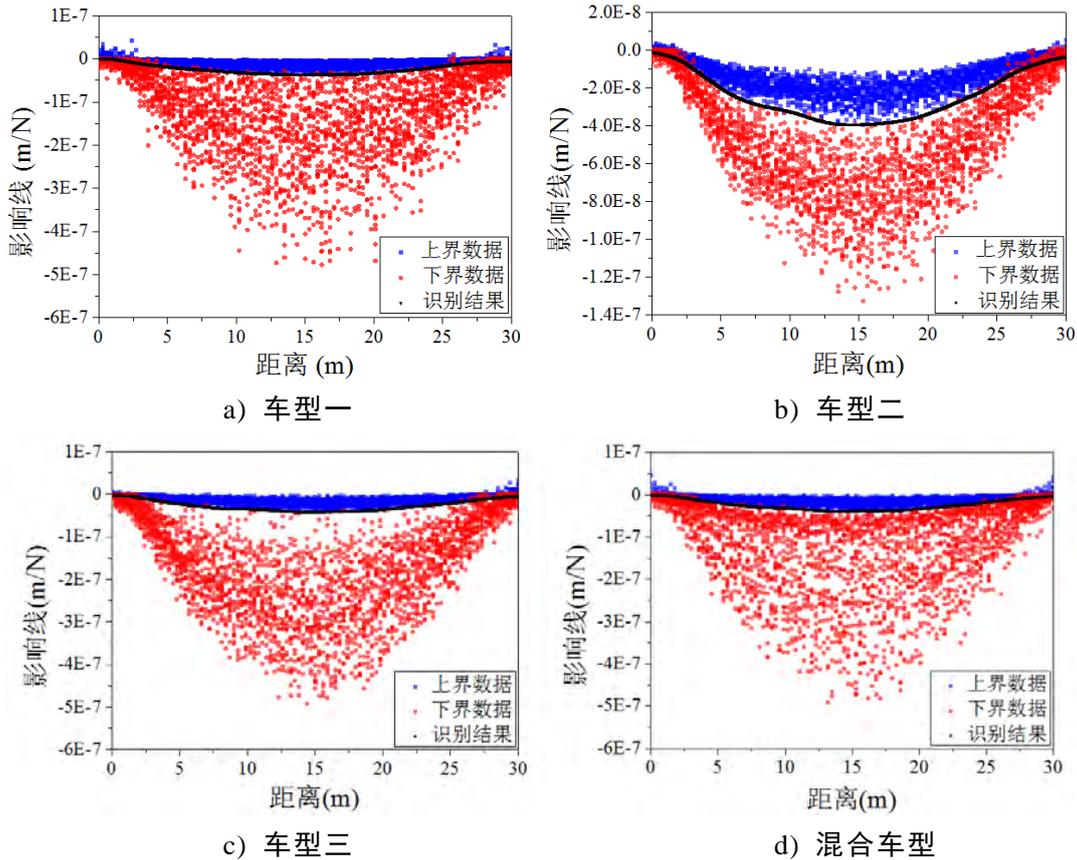


图 4.14 模拟算例中 SVM 识别位移影响线结果

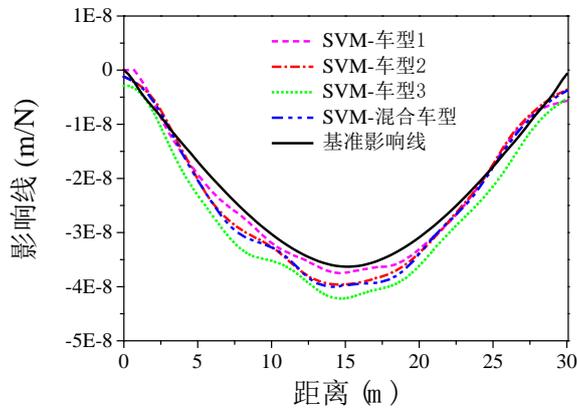


图 4.15 各车型识别位移影响线结果对比

从以上识别结果可以看出, SVM分类法能很好地给一系列存在交叉重叠冲突现象的二维带标签数据散点划定出一条合理分界线,不仅能较好地保留影响线的

形状趋势，而且具有一定的曲线平滑处理功能。但不难发现，不管是单一车型还是混合车型识别的SVM位移影响线均较静力基准影响线数值偏大，结合前述对影响线的敏感性分析结论和影响线区间的计算特点，将原因大致归结为两个方面：

(1) 影响线中的动力放大效应没有完全剔除。高速行驶工况使车桥之间耦合不充分而导致由响应计算的动态影响线与静力基准影响线之间存在较大的偏离，计算的影响线整体上幅值水平大于基线，且在影响线的两端由于局部振动的存在也会产生较大的偏差。

(2) 真实轴重在轴重区间的取值分布影响到影响线区间相对于真实影响线的相对位置分布。支持向量机分类的主要参考点是距离超平面最近的数据点，称之为支持向量，只有轴重尽量多的取到区间边界值，所求得的影响线区间才能产生更充足的支持向量，从而使分类决策平面不断逼近待求的影响线。

图4.16对各车型的300次工况中真实轴重取值情况进行了统计，由于增加了前后轴荷分配系数的合理范围限制，统计结果呈现区间非均匀分布，轴重达到区间极值的概率相对较低，前后轴同时取到极值的概率则更低，这与实际交通流中车辆轴重的分布情况也较贴近，但这也意味着识别过程中易出现上下界交叉重叠区域参考数据不足的现象，使得识别影响线结果偏向下界。

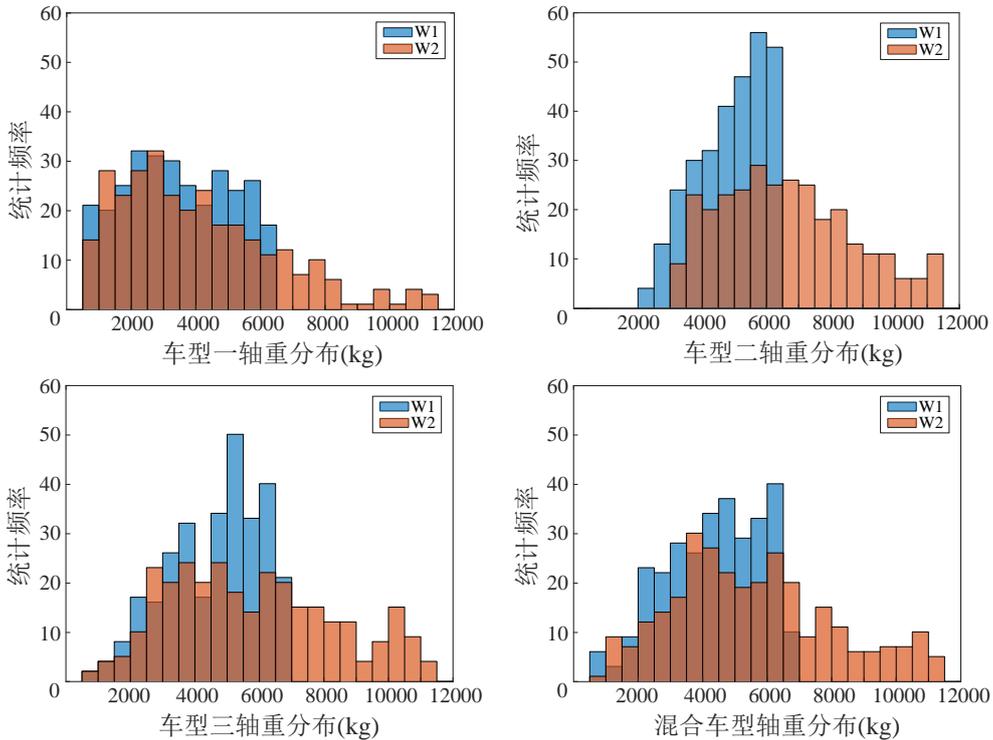


图 4.16 各车型真实轴重分布统计

对比分析得到，车型一轴重在极小值附近的频率较高，故识别结果要优于其他车型工况，车型三在极小值附近的频率明显偏低，识别误差也更大。混合车型识别误差比车型三有所减小，反映了混合车型工况有利于在单一车型样本数据不足的情况下改善识别误差。

4.4.4 桥梁结构影响面识别

对于双车道桥梁结构，模拟车辆在车道一行驶时，对邻车道响应同样采取 SVM 识别方法得到图 4.17 所示车道二的影响线结果。为了定量评价 SVM 识别的影响线误差，利用式(4.6)计算的识别曲线相对于基准曲线的拟合误差列于表 4.6。

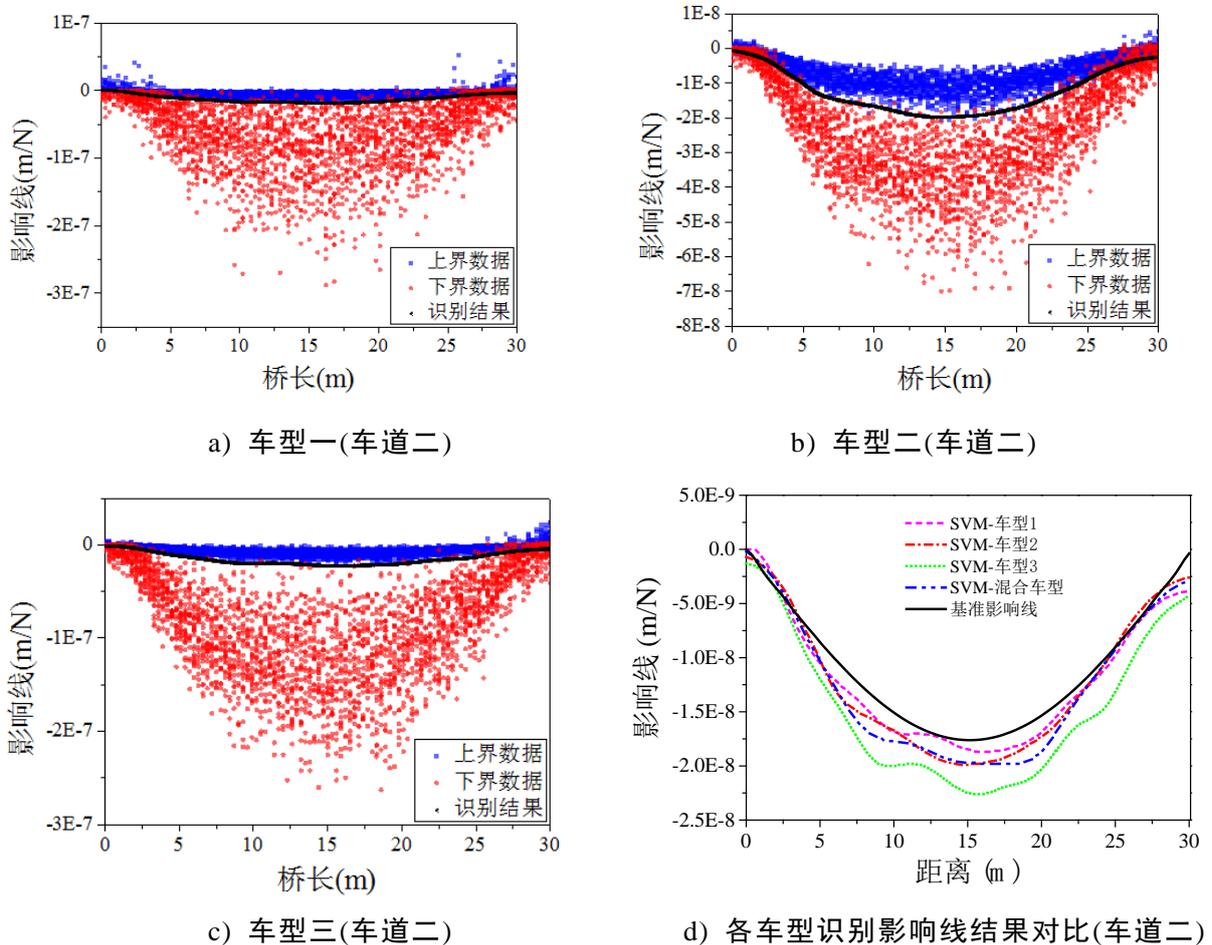


图 4.17 模拟算例中 SVM 识别邻车道影响线结果

表 4.6 双车道影响线 SVM 识别误差

模拟车型	车道一误差(%)	车道二误差(%)
车型一(大客车)	5.42	9.97
车型二(公交车)	9.07	12.24
车型三(货车)	20.78	33.93
混合车型	10.90	15.90

对比车道二的不同车型影响线识别结果，同样可以得出车型一至车型三识别准确性依次降低的规律。由于邻车道的响应比行车道响应幅值弱，故车道二上动力荷载冲击引起的局部振动对影响线的识别结果造成相对较大的误差。通过标定同一跨中截面上两个车道的影响线，将一维影响线横向拓展为二维影响面，根据

两车道 SVM 识别结果做插值绘制的桥梁模型的影响面如图 4.18 所示。

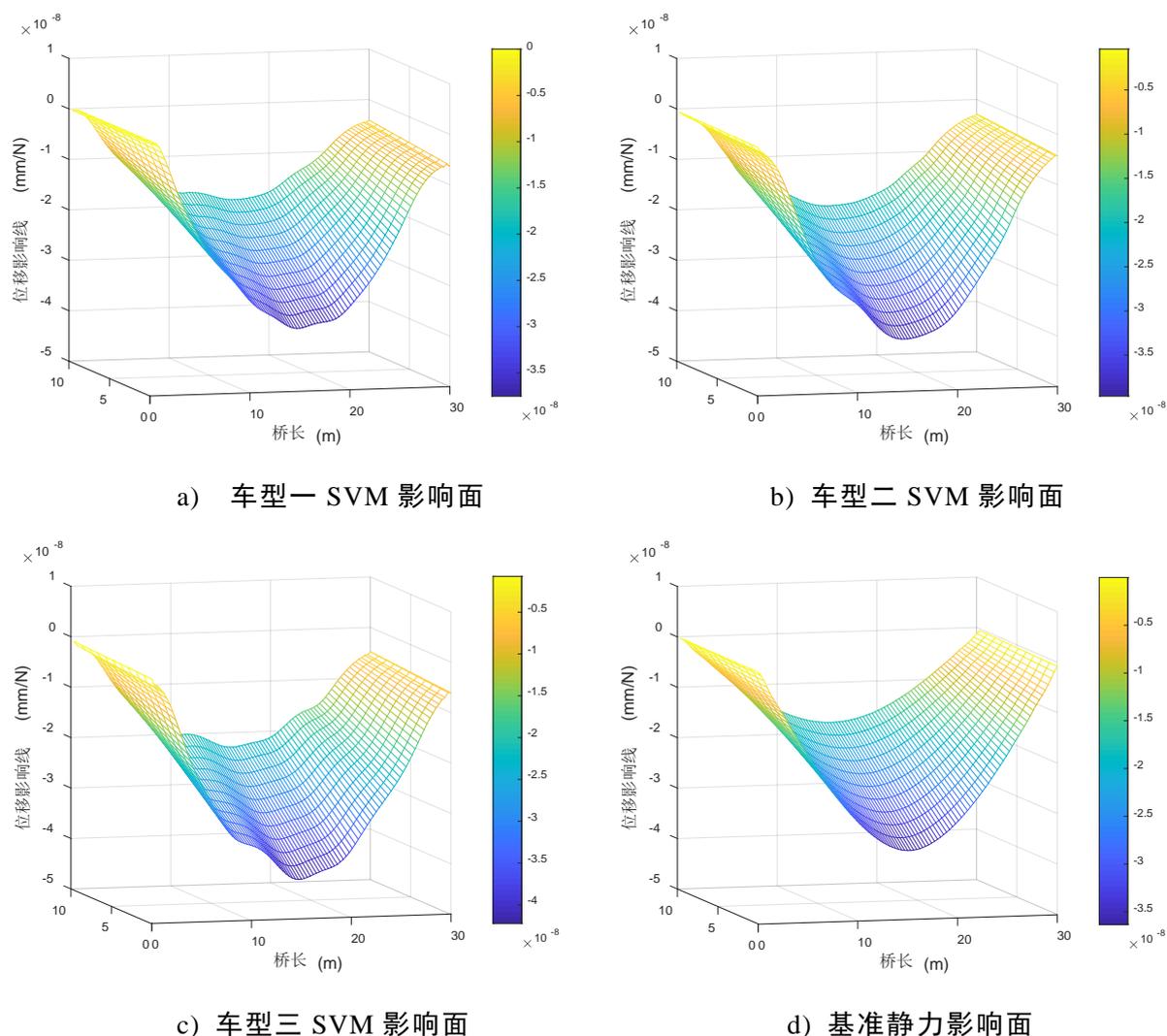


图 4.18 模拟算例中基于 SVM 识别的桥梁跨中位移影响面

综上所述，数值模拟识别桥梁位移影响面的准确率与桥梁挠度响应的幅值大小有关，车辆引起的响应较大或者结构较柔，可以使采集响应的信噪比增强，使基于响应的影响线计算受动力冲击干扰的程度减小；另一方面，车辆的实际轴重在区间边界值附近的频率越高，识别的分类决策界限就越能准确逼近真实影响线。

4.5 实验室缩尺车桥模型验证

基于大数据与区间估计仿射算法的桥梁结构影响线识别技术路线与理论方法的可行性和有效性已经在车桥数值模拟试验中得到初步验证。为了进一步验证该套方法在实际桥梁工程中的实用性，本节将进行实验室模型试验，选取一座简支 T 型梁桥的缩尺模型和载重模型车辆进行影响线识别，根据测量的桥梁动位移和动应变作为输入响应验证本文方法的有效性。

4.5.1 试验装置与模型参数

本文采用一简支T梁桥与三轴货车缩尺模型试验平台^[178]进行简化的车桥耦合振动测试，获取实测结构动力响应，用以验证所提出的新型非接触式影响线识别方法。试验操作平台与装置如图4.19所示。

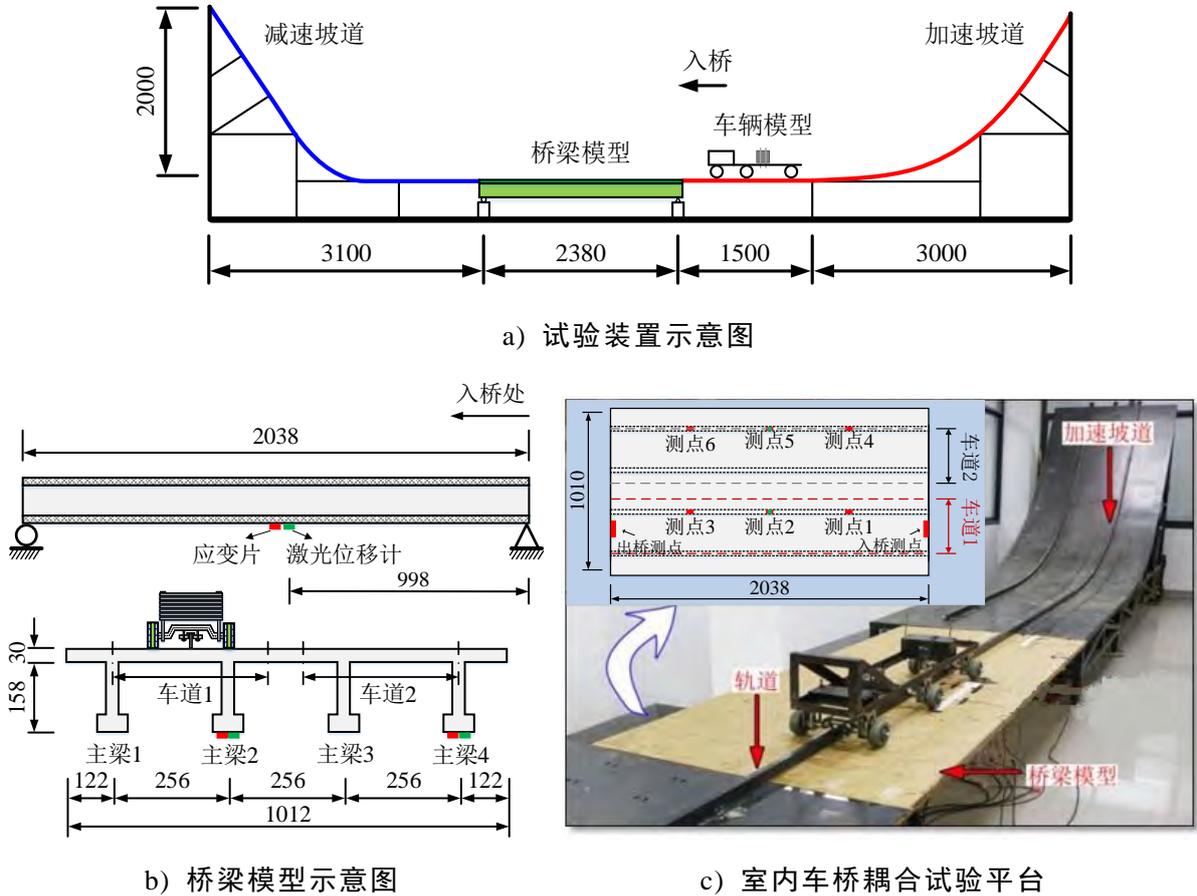
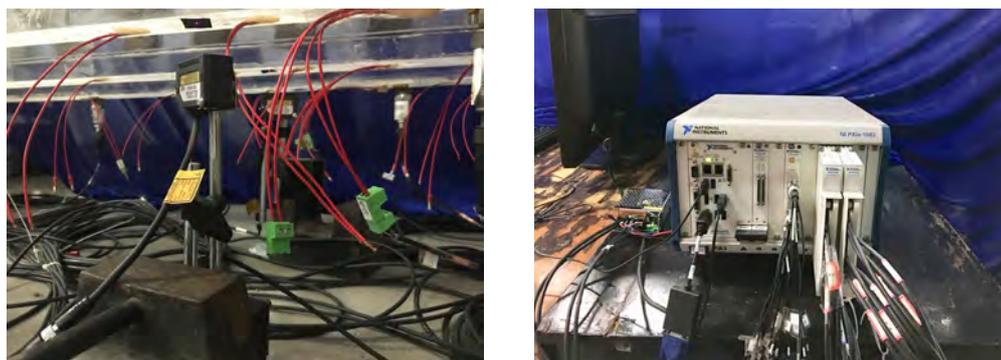


图 4.19 试验模型与装置示意图

桥梁模型全长2.38 m，桥面宽1.01m，横截面由四根T梁组合而成。桥梁模型使用有机玻璃(Polymethyl methacrylate, PMMA, 聚甲基丙烯酸甲酯)材料制成，材料的杨氏模量为2795 MPa，密度为1181.6 kg/m³，与真实桥梁尺寸相似比为0.119:1，应变相似比为1:1。

试验中车辆模型通过加速坡道释放进入车道一，以一定速度穿越全桥，用于测量竖向动挠度的激光位移计(Keyence S-025，精度可达5μm)由固定磁性支座分别垂直安装于主梁2和主梁4跨中附近(距离桥梁起始端0.998m位置处)，用于测量主梁弯曲应变的应变花分别粘贴于主梁2和主梁4的1/4、1/2、3/4跨梁底，连同贴于桥面两端用于测速的电阻式应变片一起接入信号采集仪(NI PXIe-1082)，仪器装置如下图4.20所示。



a) 激光位移计与应变片

b) 信号采集仪

图 4.20 试验仪器装置

4.5.2 试验工况设置

车辆的速度由加速坡道上的释放高度决定，由于场地等因素的限制，设置试验速度为1~4m/s（相当于实际车速10~42 km/h）。由于桥上行车过程中存在车身与导轨、车轮与桥面之间的摩擦力，车速在行驶过程中有所衰减，故取平均速度计算车辆车轴实时位置。测试车辆模型设计如下图4.21所示，实测轴距AS1、AS2分别为0.31m、0.55m，车辆总重与分轴重通过43块配重块的加载数量控制，试验配重工况为M0~M43共44个工况(M0为空车，仅M43为满载)，经过称重得到W1, W2, W3三个车轴的轴重记录见附录B，在表4.7列出了三个主要载重工况的称重值。根据称重结果统计出所有载重工况下三根车轴轴重分布区间依次为[5.48,5.60]，[4.77,20.98]，[3.30,16.78]（单位:kg），每组配重均进行1m/s、2m/s、3m/s、4m/s四组不同速度的跑车测试，以增加样本的多样性与随机性。

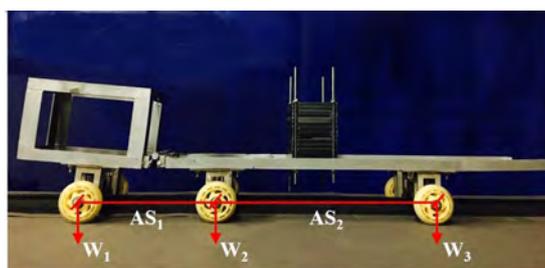


图 4.21 三轴模型测试车示意图

表 4.7 试验小车载重工况设置

载重工况	W1(kg)	W2(kg)	W3(kg)
M10	5.580	8.530	6.410
M20	5.560	12.290	9.545
M30	5.540	16.050	12.660

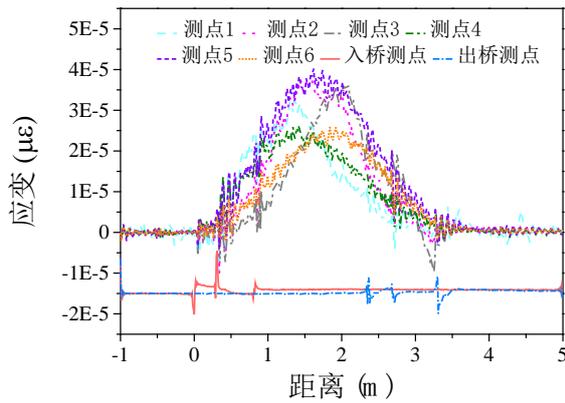
4.5.3 跨中竖向动位移响应与动应变响应

实测影响线的计算依托于连续的时程动态响应和车轴位置的同步，在短程跑

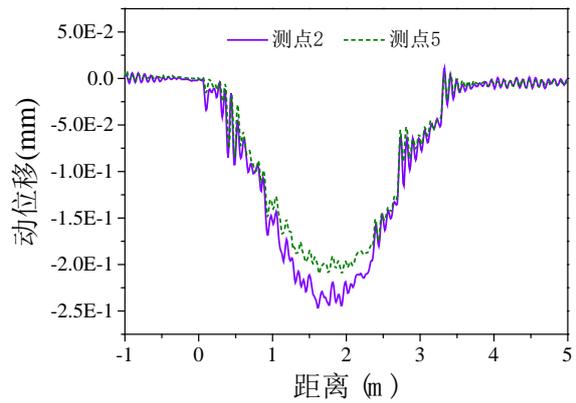
车过程中假设车辆是匀速行驶，则对于任意一条响应，只需要准确辨认出车辆前轴入桥时刻和后轴出桥时刻，便可以快速推算出车辆作用位置与响应之间的对应关系。

利用粘贴于桥面两端的应变片能方便地捕捉与记录模型车进入和驶出桥面的时刻，这两个应变片的采集通道与其他测点的响应信号采集通道接入同一个采集仪模块，当车轮从应变片上方碾压过时，该条应变信号能出现明显的波峰，通过搜索波峰的位置与对应的时刻，就可以推测出车辆过桥的位置与行驶速度。图4.22绘制了不同载重工况M30、M20、M10下测点#1~#6的动应变和测点#2、测点#5的跨中竖向动位移信号曲线，曲线的局部振动由车桥动力相互作用引起，与车辆速度、轴重、轴距、阻尼、刚度以及路面粗糙度等均相关。

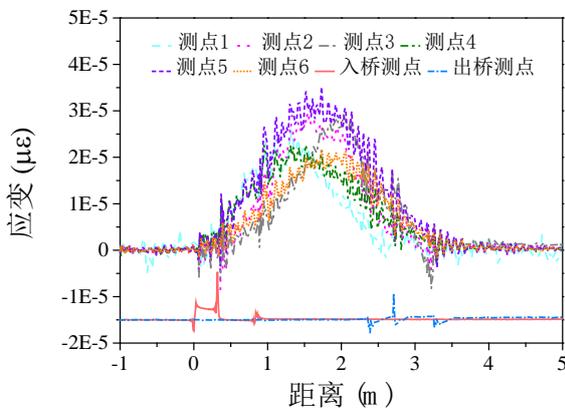
对比三种载重工况下信号振荡的幅度，可以得出和数值模拟试验类似的结论，即重车比轻车行驶更平稳，使得桥梁结构响应的动力放大效应和对车轮对桥面的冲击效应减小。同时由于加速轨道与桥面之间存在微小间隙引起的过渡不平顺，动位移信号和应变信号在三个车轴车轮分别进入桥面的时刻发生较明显的冲击振荡，这与桥面两端应变信号的波峰位置也十分吻合。



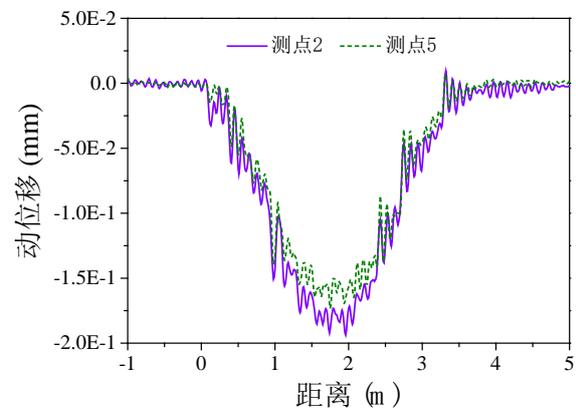
a) 工况 M30 各测点动应变



b) 工况 M30 各测点动位移



c) 工况 M20 各测点动应变



d) 工况 M20 各测点动位移

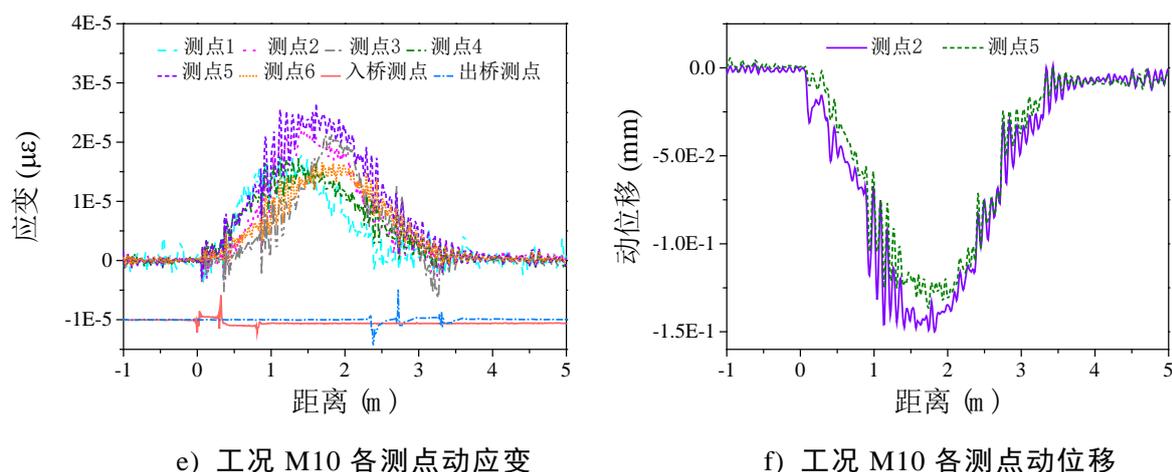


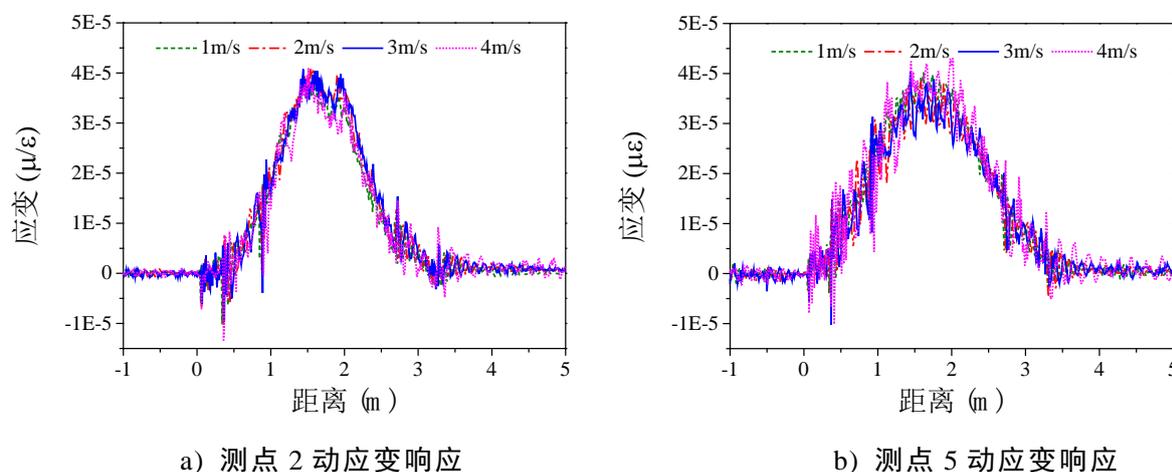
图 4.22 不同载重工况下桥梁主梁实测响应

4.5.4 速度、载重对确定性影响线的影响

车辆的速度与载重对桥梁的动力结构响应有显著影响，但车速和载重对响应冲击大小并非呈现简单的线性关系，各组工况下结构测点的应变、位移响应和计算的确定性影响线计算结果如图4.23~4.26。

可以看出，速度的提高会增大车桥之间的动力冲击，使得响应的振动幅度增大，而且高速情况下车辆与桥梁不能充分耦合，使得响应不能充分反映出结构的本质特征，不利于从动力时程信号中提取出准确的准静态影响线。载重的提高会稍微减弱动力振动的幅度，相当于提高了信号的信噪比，对影响线的计算更加有利。分别位于行车道下方和邻车道下方的主梁响应信号幅值相差不多，主要是由多根T梁并列的截面形式充分使桥面荷载大致均匀地分担到各根受力主梁上，所以并未在横向表现出明显的幅值差异。

四种速度工况和三个载重工况下计算出的桥梁位移、应变影响线形状与趋势基本一致，证实了由实测动位移、动应变响应反算影响线的数学矩阵算法较为准确可信，具有很好的鲁棒性。于是将不同速度的四条未经滤波的影响线取均值得到一条确定性影响线作为标准曲线，以便与SVM识别的影响线结果作直观对比。



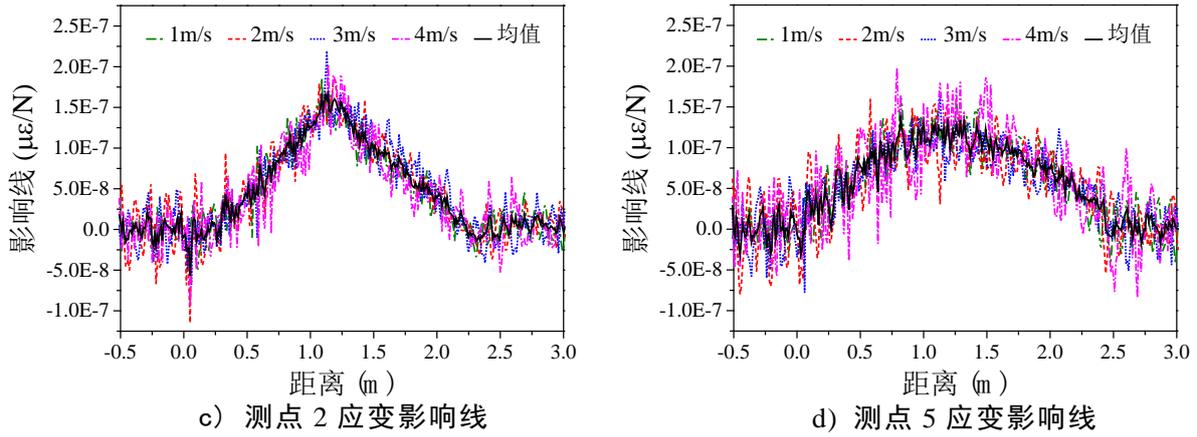


图 4.23 不同速度下试验动应变响应与影响线(M30)

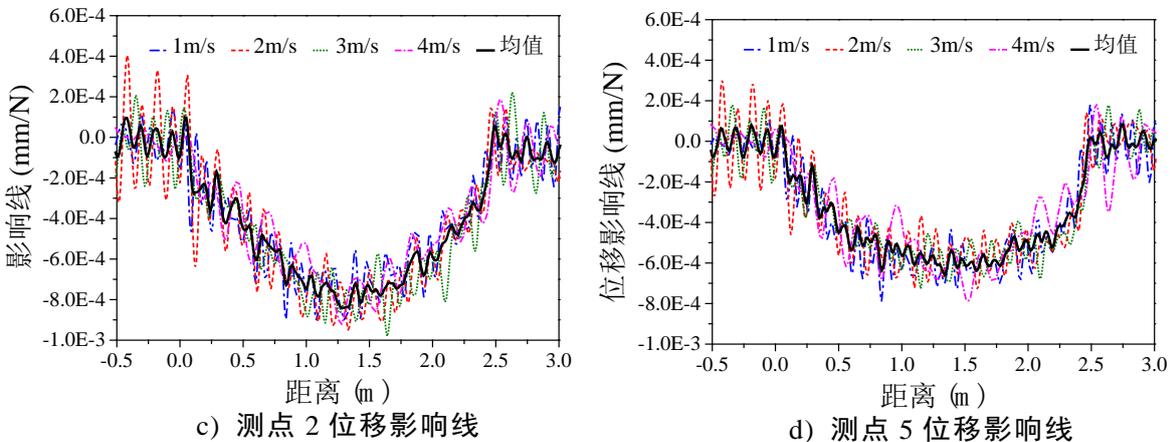
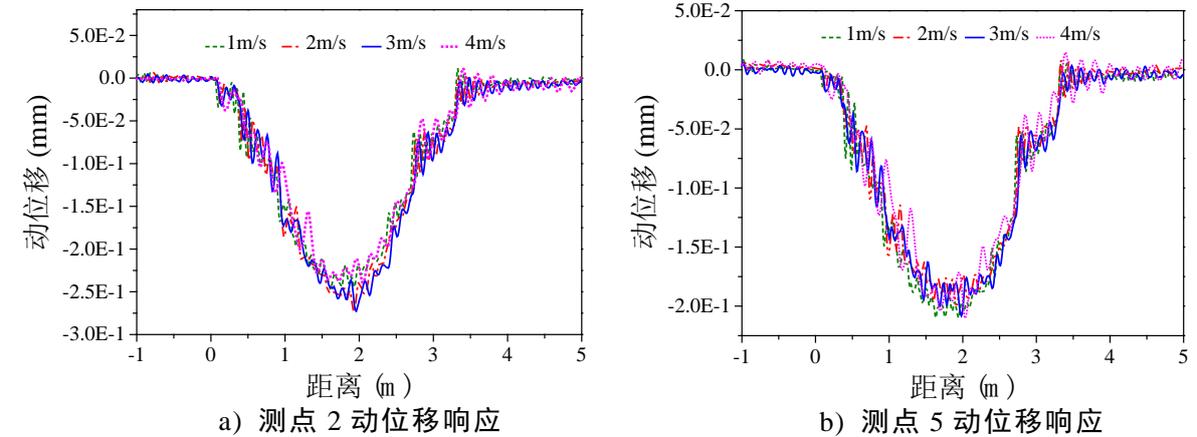
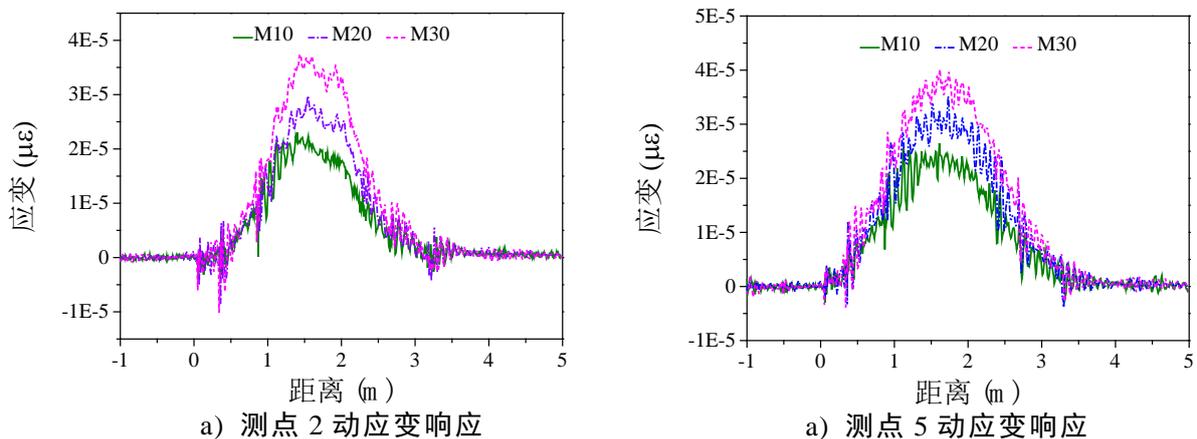
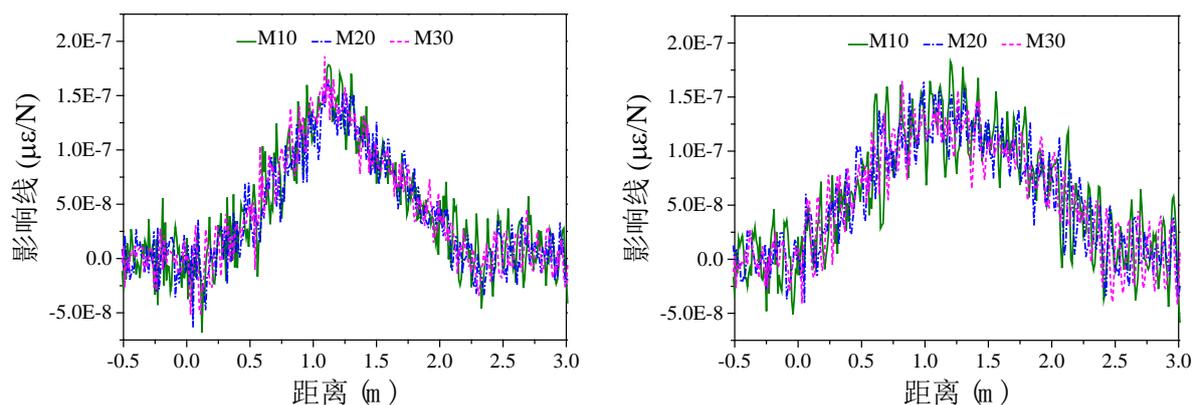


图 4.24 不同速度下试验动位移响应与影响线(M30)

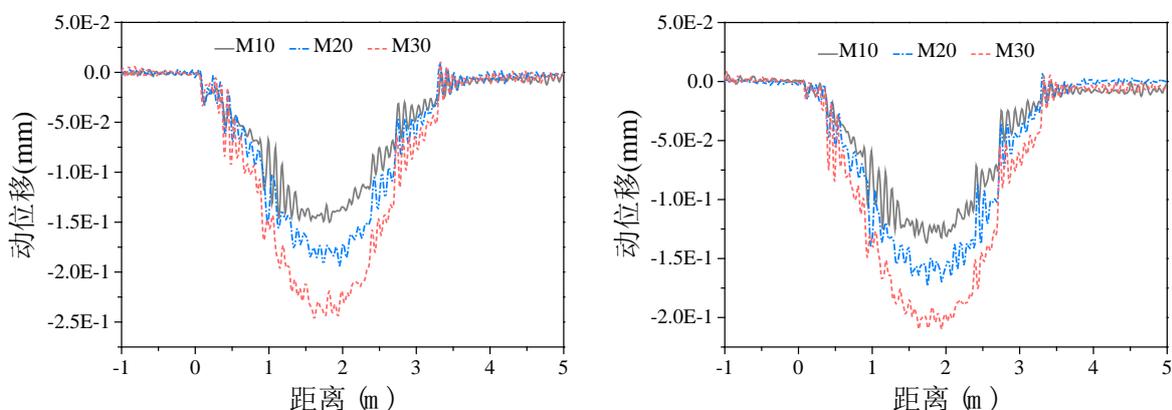




c) 测点 2 应变影响线

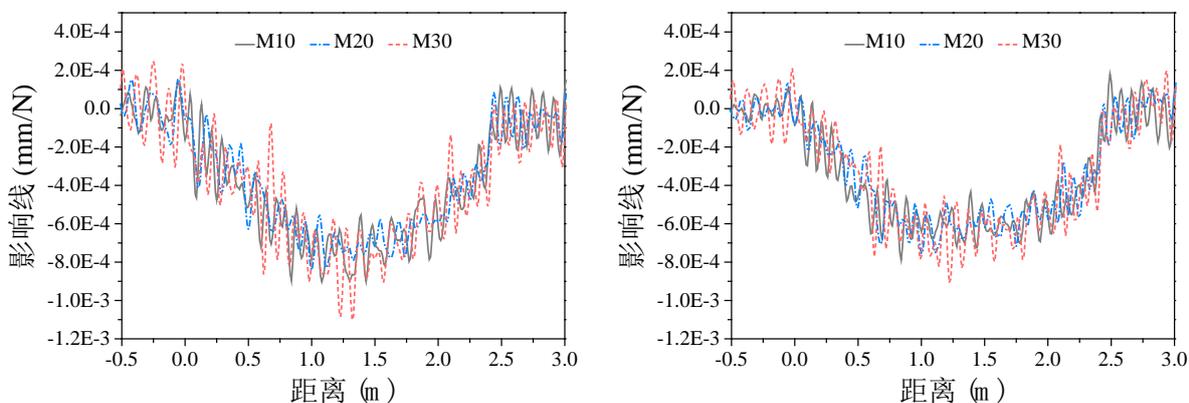
d) 测点 5 应变影响线

图 4.25 不同载重下的试验动应变响应与影响线($v=1\text{m/s}$)



a) 测点 2 动位移响应

b) 测点 5 动位移响应



c) 测点 2 位移影响线

d) 测点 5 位移影响线

图 4.26 不同载重下的试验动位移响应与影响线($v=1\text{m/s}$)

4.5.5 影响线区间计算与 SVM 识别

试验中模型车为三轴车，假设三个轴重均为区间不确定参量，那么求解影响线问题就变成了含有多个区间参数的区间线性方程组求解或者区间矩阵求逆问题。根据改变载重量并称重(见附录 B)得到 M0~M43 工况下各车轴重量的变化区间，再利用式(2.19)将轴重区间的转换为如下仿射型变量

$$W_1^1 = [5.48, 5.60] = 5.54 + 0.06\varepsilon_1, \varepsilon_1 \in [-1, 1]$$

$$W_2^1 = [4.77, 20.98] = 12.875 + 8.105\varepsilon_2, \varepsilon_2 \in [-1, 1] \quad (\text{单位: kg})$$

$$W_3^1 = [3.30, 16.78] = 10.04 + 6.74\varepsilon_3, \varepsilon_3 \in [-1, 1]$$

根据仿射求逆算法，将原始应变响应和动位移响应分别作为输入，计算得到应变影响线区间如图 4.27，位移影响线区间如图 4.28。由于系数矩阵的放大效应，区间上界的振动效应被显著放大，通过光滑样条拟合去振动的方法，消除了这种波动干扰，避免 SVM 在给多组区间结果的上下界数据分离带来混淆影响。

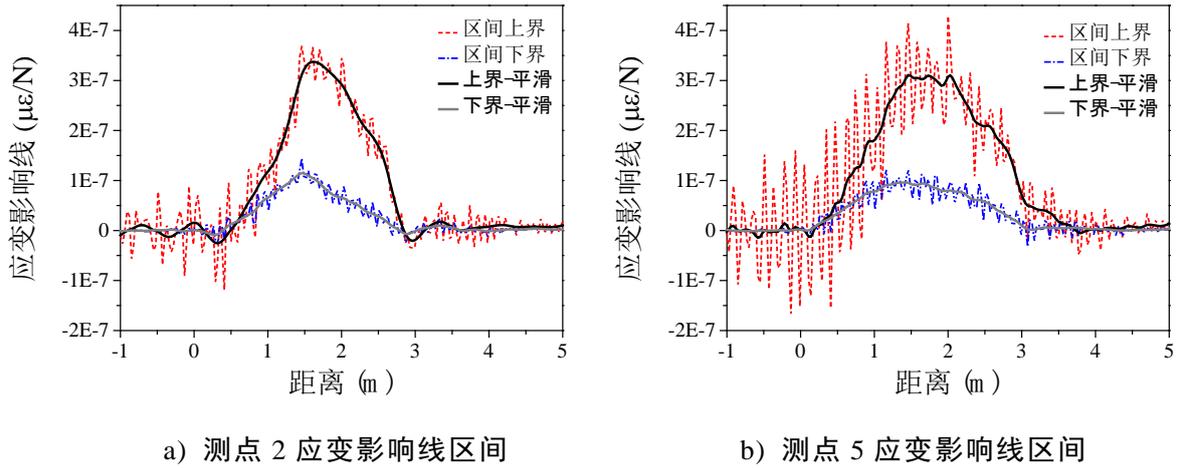


图 4.27 工况 M30 的应变影响线区间(v=1m/s)

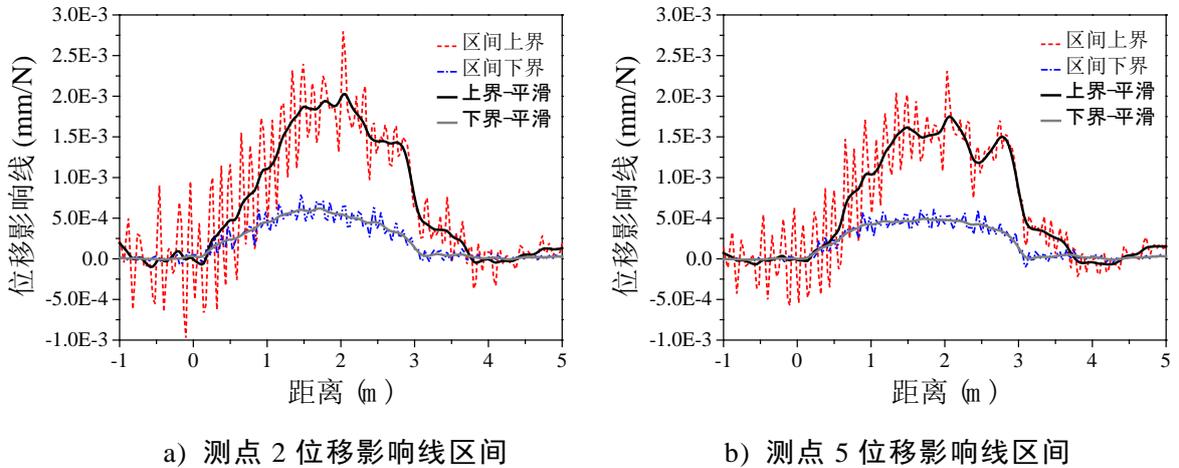
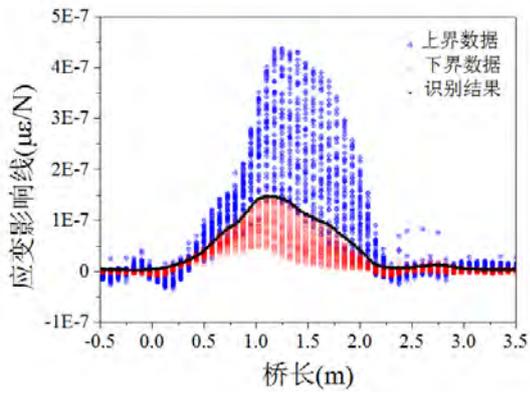
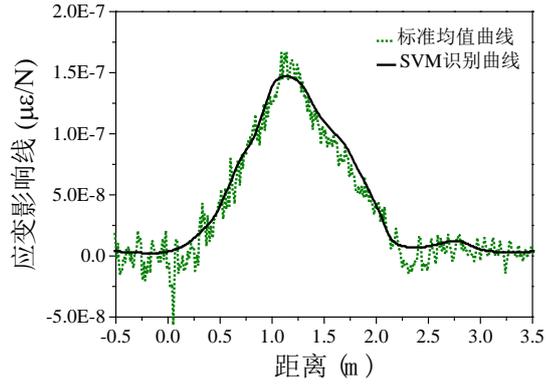


图 4.28 工况 M30 的位移影响线区间(v=1m/s)

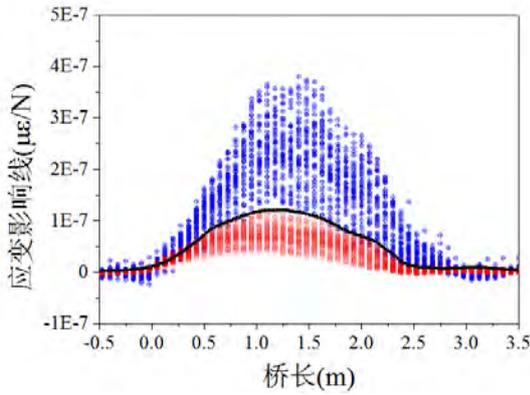
将测试的 217 组包含多种速度与载重工况的动位移和动应变响应结合三个车轴的重量区间按照上述方法转换成影响线区间，并按支持向量机的要求进行数据预处理，得到一系列带有类标签的平面散点作为 SVM 训练数据集，经过分类模型训练和决策面可视化操作，得到图 4.29、4.30 所示的应变和位移影响线，并将图 4.23c)、d)的应变影响线均值和图 4.24c)、d)的位移影响线均值取作标准参照曲线，以直观反映基于 SVM 的影响线识别效果。



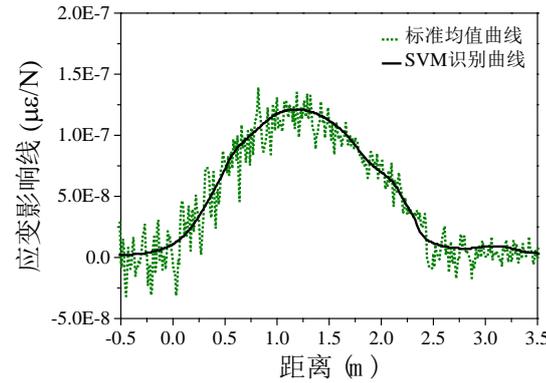
a) SVM 识别测点 2 试验应变影响线



b) 测点 2 识别结果与标准结果对比

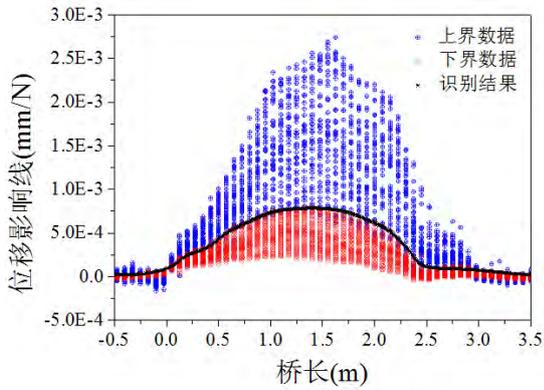


c) SVM 识别测点 5 试验应变影响线

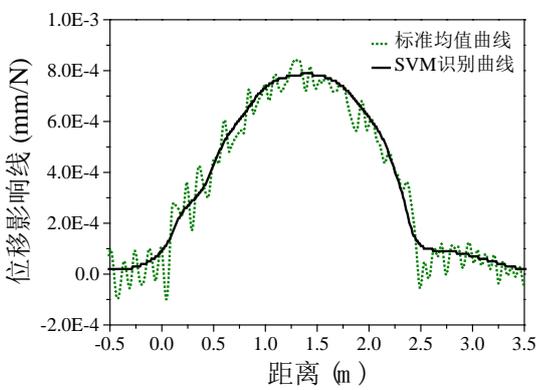


d) 测点 5 识别结果与标准结果对比

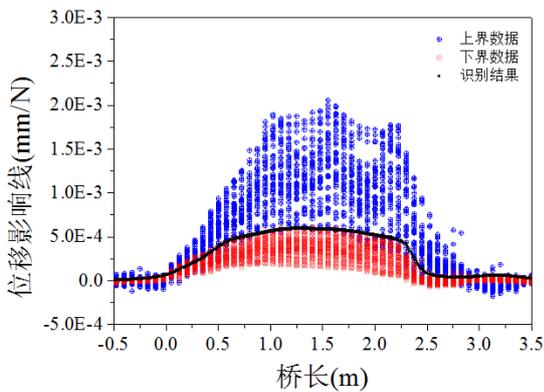
图 4.29 SVM 识别试验应变影响线



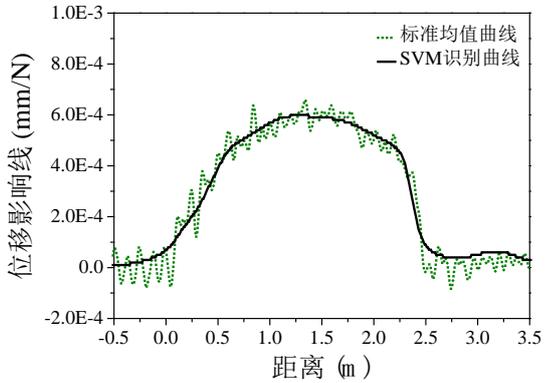
a) SVM 识别测点 2 试验位移影响线



b) 测点 2 识别结果与标准结果对比



c) SVM 识别测点 5 试验位移影响线



d) 测点 5 识别结果与标准曲线对比

图 4.30 SVM 识别试验位移影响线

对于应变影响线图 4.29 b)和 d)的识别曲线相对于标准均值曲线的拟合误差分别为 12.41%、7.43%；对于位移影响线图 4.30b)和 d)拟合误差分别为 15.16%、7.86%。由于作为标准参照的影响线是几组实测标定结果的均值，考虑到去振动的平滑处理会引起原曲线的失真，故保留了均值曲线中的局部振动，使得识别出的应变和位移影响线相对于该均值曲线的拟合误差偏大，但两者的趋势与峰值位置基本吻合，可以推断识别结果实际相对于静力影响线的误差应该小于该拟合误差。将同一横截面上车道一和车道二的影响线进行组合插值得到图 4.31 所示的应变与位移影响面

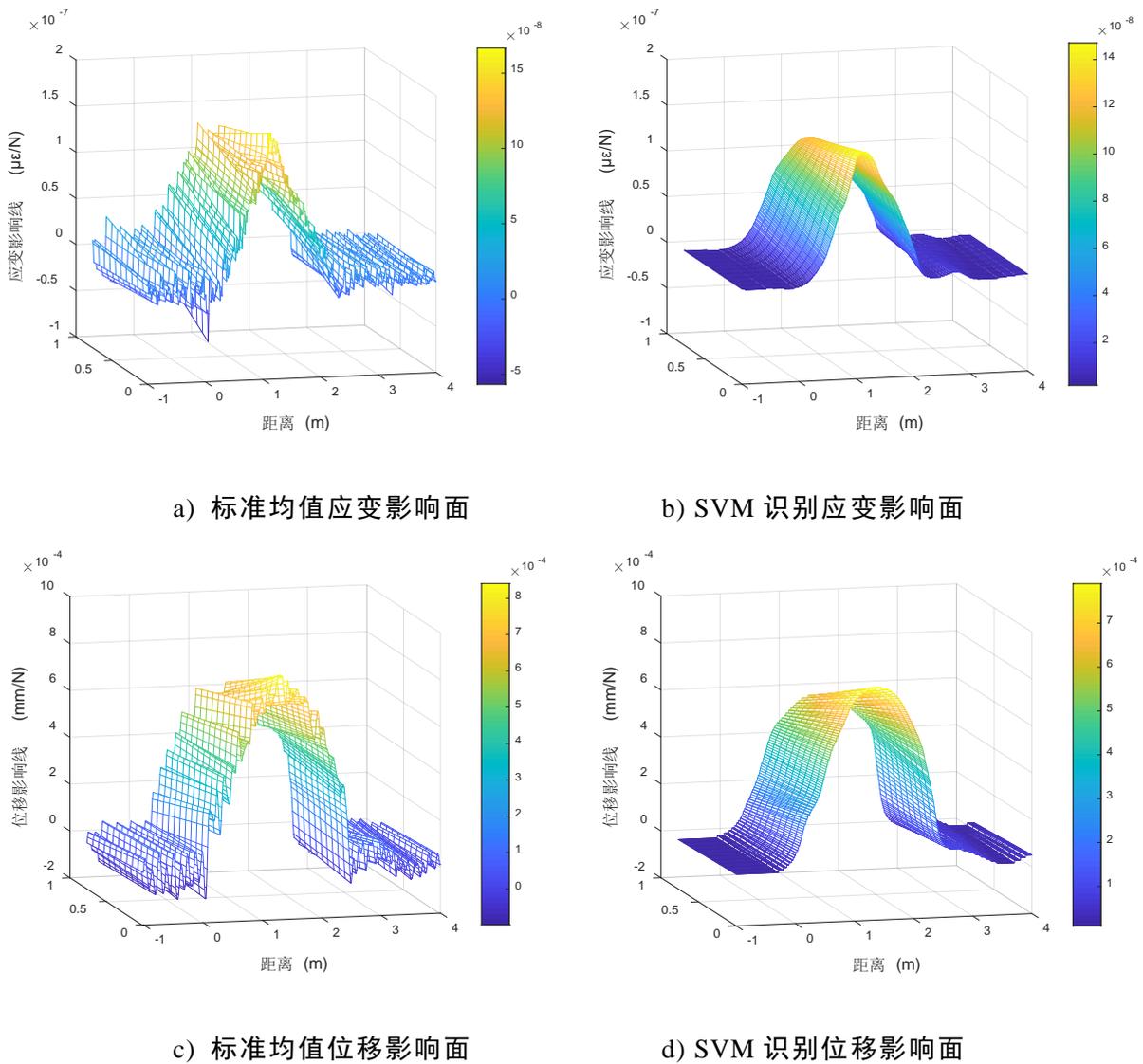


图 4.31 SVM 识别试验位移与应变影响面

4.6 本章小结

本章利用车桥耦合振动的数值模拟试验以及室内模型试验获取桥梁结构动态响应，从而验证本文提出的运用车辆大数据和区间仿射求逆算法识别桥梁结构影响线方法的正确性和识别效果。本章的研究内容主要有以下几个方面：

(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

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

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^[81]。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^[179]

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

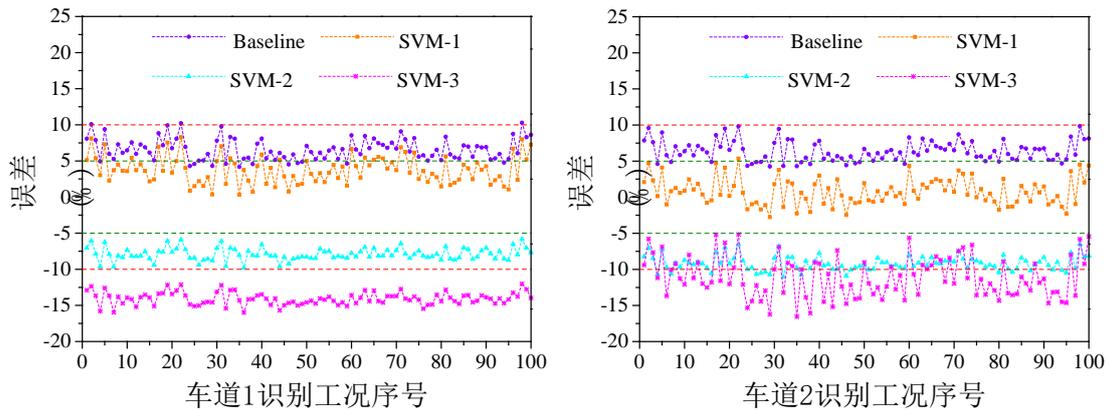
$$\begin{bmatrix} l_1 & l_{1-C_2} & \cdots & l_{1-C_k} \\ l_2 & l_{2-C_2} & \cdots & l_{2-C_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_n & l_{n-C_2} & \cdots & l_{n-C_k} \end{bmatrix}_{n \times k} \times \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots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

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。

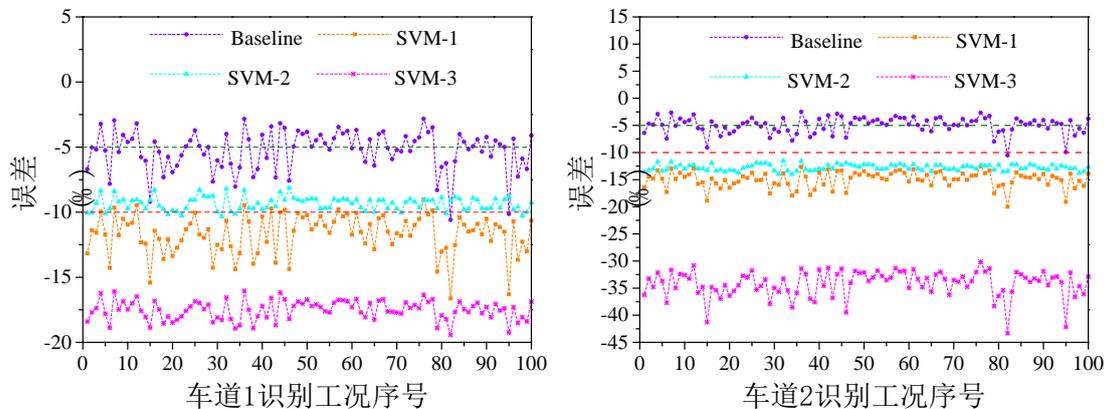
5.2.2 非接触轴重识别数值算例

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。

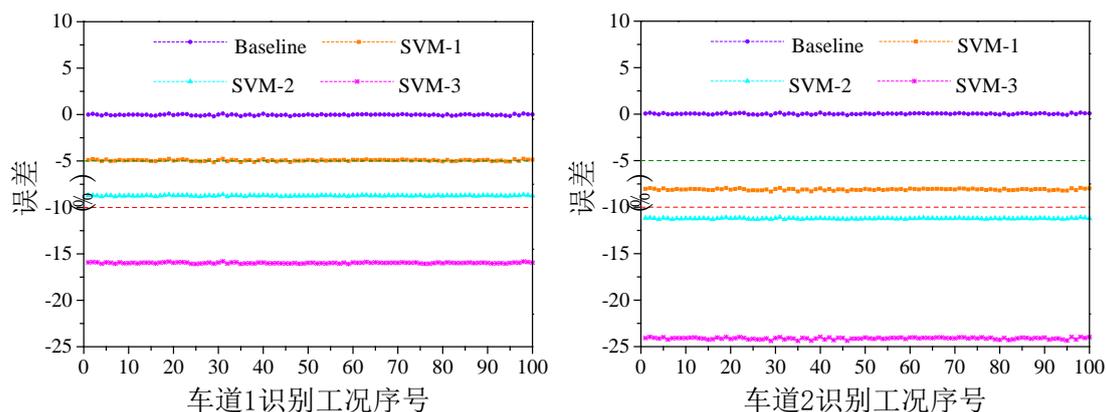
本节按照第四章生成随机模拟工况的模式，以表 4.2、4.3 的相关参数为依据新增 100 组公交车类型的测试工况，利用这 100 组工况的双车道动位移模拟响应，结合第四章 SVM 识别的桥梁影响面，研究非接触动态轴重识别的效果。下图 5.2 中分别列出了基于静力影响面(Baseline)、大客车对应的 SVM 识别影响面结果(SVM-1)、公交车对应的 SVM 识别影响面结果(SVM-2)、二轴六轮货车对应的 SVM 识别影响面结果(SVM-3)反算车辆动态轴重的误差，包括前轴重、后轴重、总重三者的误差。



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。

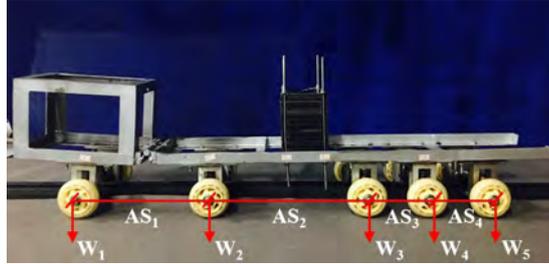
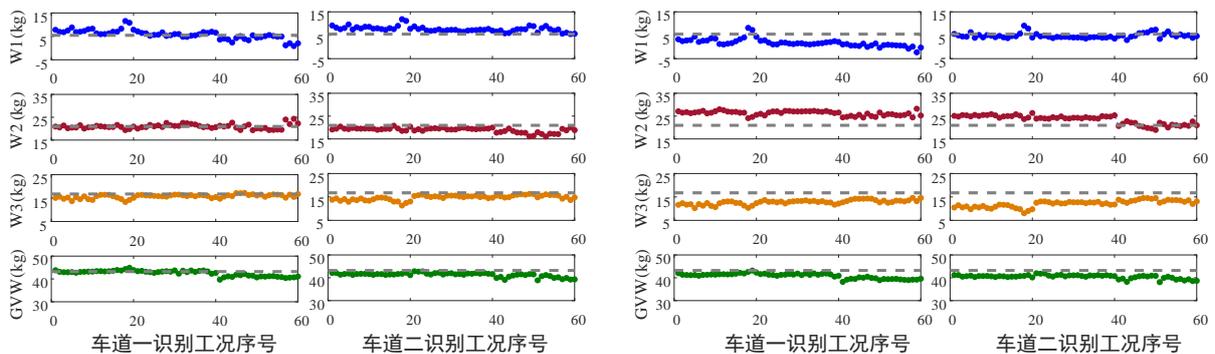


图 5.3 实验室试验 5 轴车模型

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)	0.31	0.31
2~3轴轴距AS2/(m)	0.55	0.40
3~4轴轴距AS3/(m)	--	0.15
4~5轴轴距AS4/(m)	--	0.15
总轴距L/(m)	0.86	1.10
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

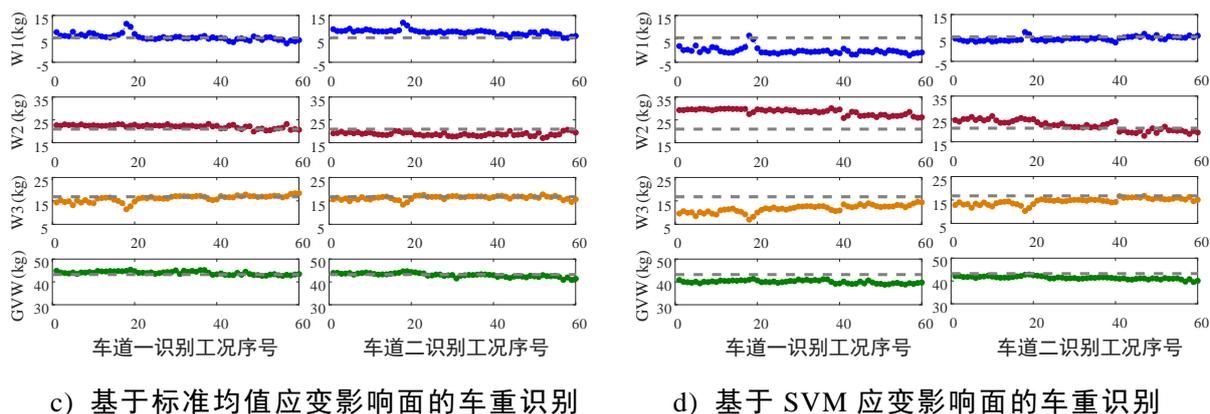


图 5.4 实验室 3 轴车辆动态称重

以上动态称重试验设置了不同的速度工况，工况序号为 1~20 组的试验速度为 1~2m/s；序号 21~30 组的试验速度为 2~3m/s；序号 31~40 组的试验速度为 3~4m/s。图中虚线为各轴重的实际值，可以看出速度越高总重识别偏差越大。基于 SVM 影响面与基于标准均值影响面的总重识别准确性相当，但对于分轴重，SVM 影响面的识别结果具有较大偏离，总体上总重识别效果显著优于分轴重。

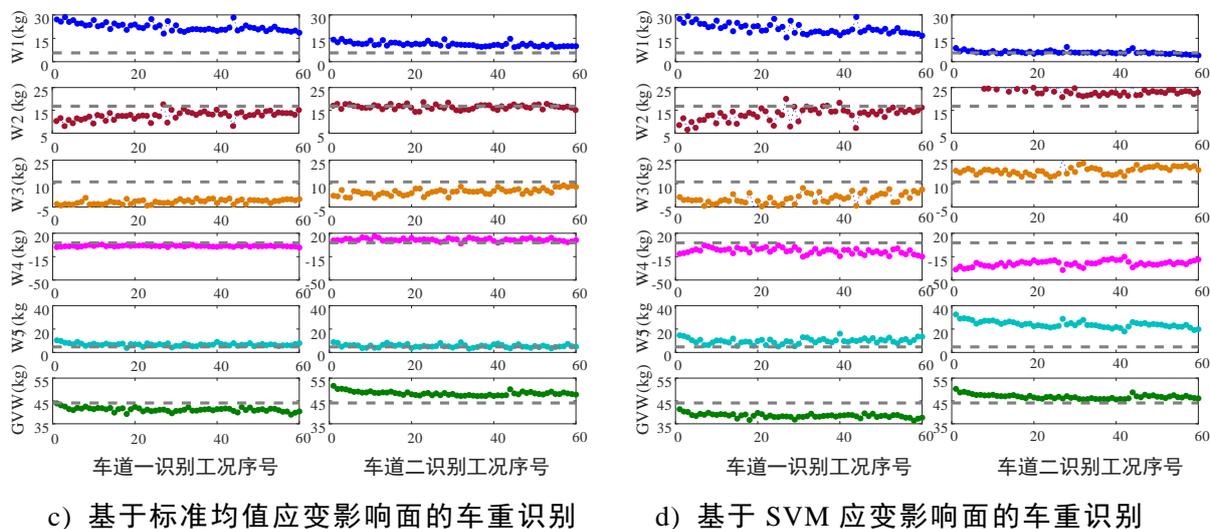
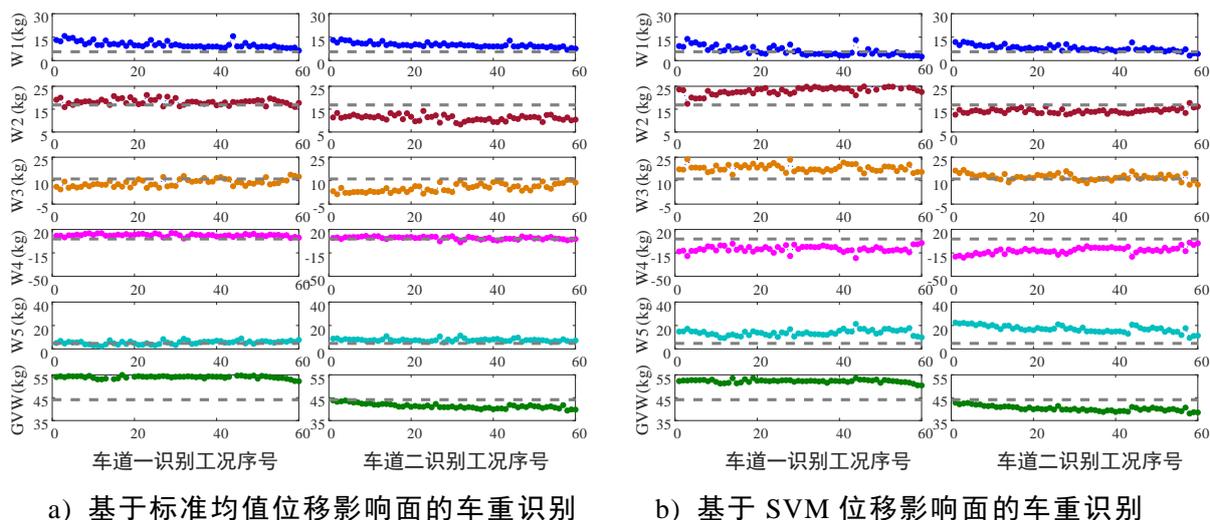


图 5.5 实验室 5 轴车动态称重

从以上五轴车的动态称重试验结果同样可以总结出分轴重的识别结果偏差较大而总重识别准确性较高这一规律，不论采用位移还是应变作为动态称重的媒介都能比较稳定地对移动车辆进行称重，同时采用 SVM 影响面进行动态称重的效果与基于标准均值影响面的识别效果大致相当。为了进行更系统的分析，将上述三轴车和五轴车动态称重试验结果的误差列于下表 5.2。

表 5.2 动态称重平均识别误差

动态称重 误差(%)	标准位移IS识别		SVM位移IS识别		标准应变IS识别		SVM应变IS识别	
	车道1	车道2	车道1	车道2	车道1	车道2	车道1	车道2
3轴车-W1	6.3	39.2	-66.8	-11.9	5.1	43.4	-102.2	-14.1
3轴车-W2	1.8	-8.0	27.5	14.1	7.5	-8.6	38.3	7.6
3轴车-W3	-4.1	-10.4	-22.3	-26.1	-2.3	-0.6	-29.1	-11.8
3轴车-GVW	0.1	-2.8	-3.9	-4.8	3.4	1.2	-5.9	-2.7
5轴车-W1	81.5	77.2	9.6	39.9	294.2	97.9	275.7	5.5
5轴车-W2	8.2	-33.7	37.2	-15.5	-24.4	-1.8	-21.4	40.0
5轴车-W3	-21.7	-51.5	62.5	10.6	-114.3	-56.8	-95.2	66.4
5轴车-W4	97.7	23.7	-257.2	-298.1	-83.0	78.0	-212.1	-540.6
5轴车-W5	15.7	60.9	192.3	261.4	42.4	16.9	108.7	407.4
5轴车-GVW	22.5	-6.3	18.4	-8.7	-6.5	9.6	-12.6	6.3

从误差的直观数字对比中大致可以总结出以下几点：

(1) 由于五轴车在三轴车的基础上增加了两根车轴，故上述基于影响面的动态称重对总重与分轴重的识别准确性均有明显下降。轴数增加意味着车辆与桥梁的耦合作用更加复杂，增加了荷载作用反向分析的难度；五轴车的后三个车轴距离较近，很难将各轴作用效应从总的叠加响应中分离，故导致轴重识别误差激增；

(2) 对于配重比较大的车轴，动态称重识别的准确性较高。试验中三轴车和五轴车的自重与配重主要分配在轴 2、轴 3 上，其余轴分配质量基数较小，故计算的百分误差相对偏大；

(3) 影响面的准确性直接决定各车道移动车辆动态称重的准确性。回顾 4.5.5 节中得到的双车道影响线相对于标准均值影响线的误差，其中应变影响线的误差较位移影响线的误差略小，车道二(测点 5)相对于车道一(测点 2)的误差有大幅减小，相应地上表中车道二的称重效果总体上略优于车道一，应变影响面的也比位移影响面的总重识别准确性略好。

综上，SVM 影响面与标准均值影响面的动态车辆称重效果大致相当，对于车辆总重的识别较为准确，验证了本文基于 SVM 影响面的非接触桥梁动态称重系统具有良好的稳定性和应用的可行性。

5.3 影响线与轴重的复合反馈交互验证

影响线和轴重可以分别作为已知条件结合时程响应推导出另一个未知量，当已知变量为不确定区间变量时，仍然可以借助区间分析方法推导出未知量的区间范围。本文提出了将桥梁上的行车作为测试车辆的非接触式结构影响线测定方法，将车辆的轴重估计区间作为输入信息，结合大数据的特点分析识别量大面广的中小型桥梁的影响线，为智能化的桥梁健康监测提供良好的技术前景。

但是，图像检测车辆分类进而匹配其轴重区间不可避免地要考虑区间范围估计的不准确性，尤其在采集工况数量有限的情况下，实际轴重无法满布估计区间，导致估计区间比实际区间更宽泛，降低计算分析中影响线区间大数据的准确性，从而引起 SVM 识别环节偏差增大的连锁效应。针对以上问题，本节提出轴重估计区间和影响线区间的复合反馈机制，通过两者的反复迭代、交互验证检验轴重估计区间的正误并进行校正。

5.3.1 轴重过宽估计对影响线识别的影响

本文所提及的车辆轴重估计是针对不同型号车辆的空车质量及最大载重量等出厂参数的统计获取车型类别到轴重区间的映射，这种映射关系会随着车辆的细分类而逐渐提高估计的精确度。车辆轴重区间的参考数据一般无法直接从出厂参数中查找，因此本文在建立车辆轴重数据库时，根据汽车公告信息提供的空车整备质量、最大额定载重量以及轴荷分配系数，计算得到该车型各车轴的轴重区间，因此当车辆的最大额定载重量出现估计误差时，也势必导致分轴重的估计区间产生误差。鉴于最大载重量得到的轴重区间上限值比根据空车质量得到的轴重区间下限值数量级更大，因此实际最大载重量的估计偏差对最终的 SVM 识别结果具有主要影响。同时考虑到载重量对轴重估计的关键影响以及动态识别总重精度更高的优势，在基于影响线区间与轴重区间的交互迭代过程将总重上限值作为影响线反馈信息的直接校核对象，再通过车辆的轴荷比分配得到对应的轴重区间。因此，轴重区间的过宽估计对影响线识别的研究实质上是载重量过高估计对影响线识别效果的分析研究。

基于以上研究目的，本节设计了单一车型的100组数值算例，其中车辆空车的前后轴重分别为600kg，最大额定载重量为5000kg，按随机均匀分布从载重区间[0,5000] kg中产生100组随机数作为测试工况中车辆模型的实际载重，为了减少其他复杂因素对后续分析的干扰，车辆模型的其余参数均采用固定值，车速取为10m/s，由此进行车桥耦合数值模拟获得各组工况的动位移响应。将载重区间按照轴荷比0.4:0.6分配到前后轴得到前轴载重区间为[600,2600]kg、后轴载重区间为[600,3600]kg，这是轴重的真实分布区间，联合响应便可以计算出每一组工况对应的区间影响线。假设对该车型最大额定载重量存在过大估计误差，下面将讨论额

定载重量5000kg被不同程度放大估计时对影响线识别结果产生的影响。按估计最大载重量分别为5000kg、6000kg、7500kg、10000kg设计算例，即四个工况中估计值较额定值依次放大0%、20%、50%、100%，由此得到各工况下总重和轴重的过宽估计区间并列于下表：

表 5.3 过宽估计轴重区间设置

工况描述	估计载重(kg)	前轴区间(kg)	后轴区间(kg)	总重区间(kg)
载重放大 0%	[0,5000]	[600,2600]	[600,3600]	[1200,6200]
载重放大 20%	[0,6000]	[600,3000]	[600,4200]	[1200,7200]
载重放大 50%	[0,7500]	[600,3600]	[600,5100]	[1200,8700]
载重放大 100%	[0,10000]	[600,4600]	[600,6600]	[1200,11200]

载重区间上限值被过大估计引起了轴重区间上限值的过大估计，即轴重区间的过宽估计。将上表中的四类工况所对应的前轴重区间和后轴重区间作为初始估计区间，结合桥梁节点模拟响应反演计算影响线区间，下图5.6分别是上述四类过宽估计工况下计算的影响线区间大数据和执行SVM算法识别的影响线。

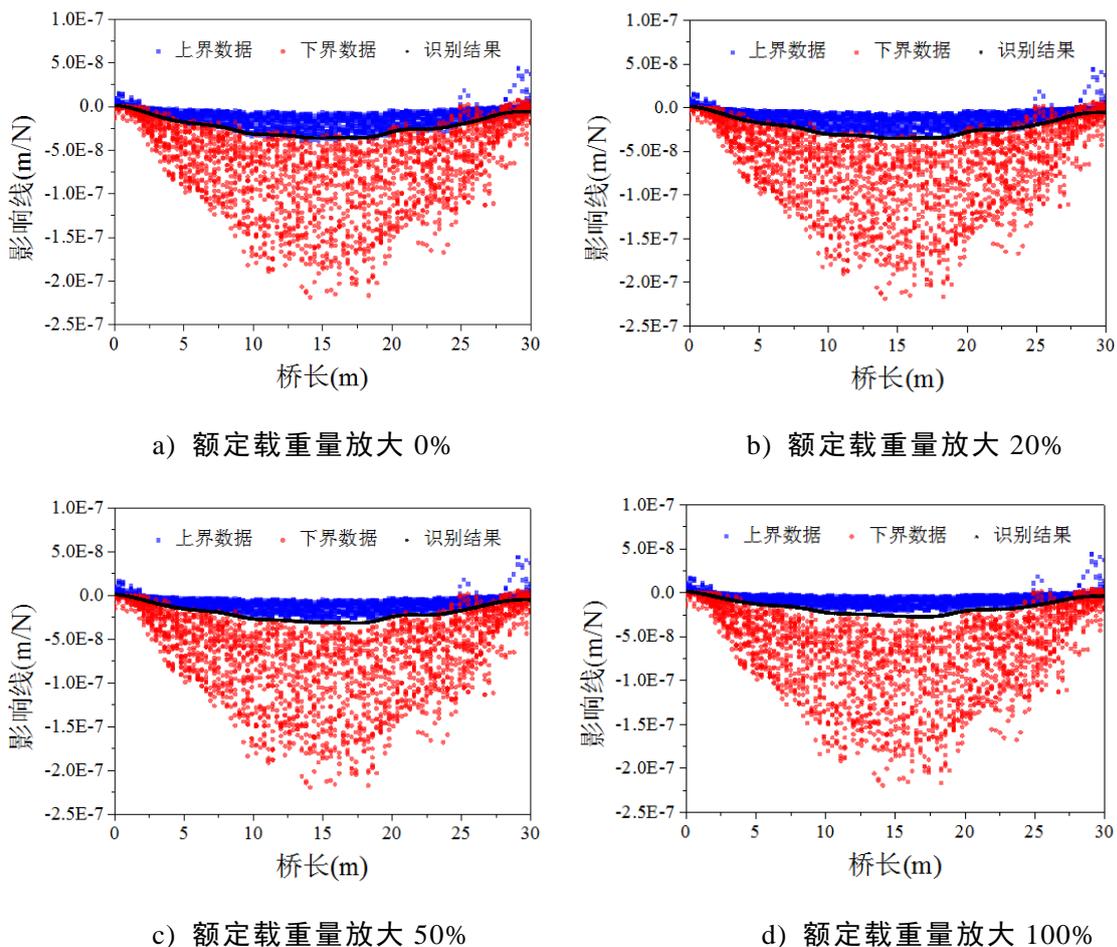


图 5.6 过宽估计区间下 SVM 识别影响线

图5.6a)是额定载重量即载重区间的上限值被放大0%的识别结果，即无估计误

差的一组工况。对比上述四个工况的结果发现，随着区间过宽估计程度的增大，上界数据和下界数据之间的交汇区域减少，两者间空白区域增大、区分度逐渐清晰，相应地对影响线的识别也产生了不利影响。以静力标定影响线作为标准基线，四个工况下SVM识别结果的误差分别达到1.36%、1.59%、14.09%、26.09%，图5.7是四个工况识别曲线的直接对比，随着过宽估计误差水平的增大，影响线识别的准确性大幅下降。利用支持向量机算法从大量区间数据中准确识别影响线的前提是轴重区间估计相对准确使得两类影响线边界数据的交汇处成为影响线的大概率近似解，如果两类数据没有交汇区域或者交汇程度较浅，则基于以上思想识别的影响线准确性便会显著降低。进一步从影响线区间的计算原理分析，响应不变时，模型车辆的增重会引起影响线幅值的降低，所以随着载重估计区间上界的增大，影响线计算区间的上界数据随之上移，同时导致SVM影响线识别结果上移。

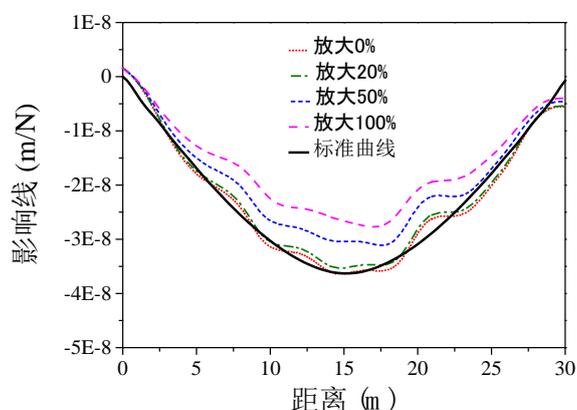


图 5.7 载重区间过宽估计的影响线识别误差

5.3.2 轴重与影响线区间的复合反馈机制

实际情况下，载重量无法满布估计区间会导致轴重区间上限值比实际值偏大，本文将之定义为轴重区间的过宽估计。这种过宽估计的现象会降低区间影响线大数据和支持向量机识别的准确性，于是本文提出一种反馈校验机制，以区间迭代计算为基础，将影响线的位置信息作为反馈直接校正车辆总重上限值，进而通过反复的双向迭代不断校正总重和轴重的上限值，使之向真实值逼近收敛，缩小总重和轴重的估计区间，最终达到提高大数据方法识别影响线准确性和鲁棒性的目的。

将根据空车质量和载重区间估计得到的初始轴重区间作为输入，根据影响线区间反演模型计算多工况的影响线区间，然后基于区间重叠程度提取真实影响线的大概率分布区间，并将之作为一种反馈信息，结合各工况的桥梁动态响应重新计算出每组工况的车辆总重区间值，从而根据多工况总重区间的重叠程度确定新的总重区间并按轴荷比计算得到新的轴重区间，此视为一次完整迭代。上述反馈校验机制的详细迭代计算流程如图5.8所示。

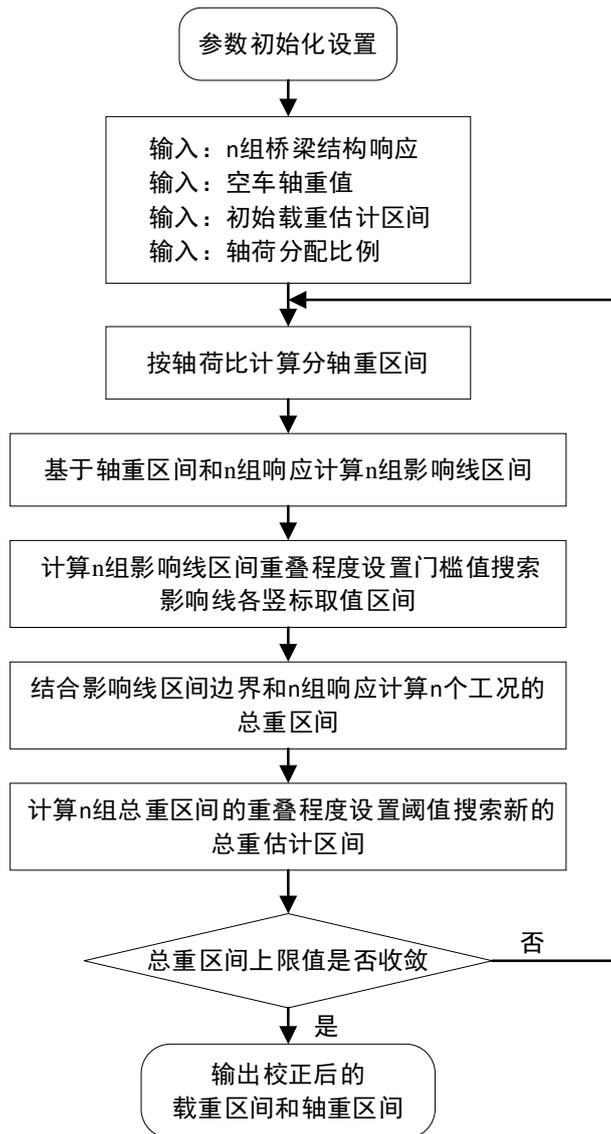


图 5.8 轴重区间和影响线区间的复合反馈校验流程

基于结构时程响应和实测影响线对车辆进行动态称重的算法中，总重的识别效果向来优于分轴重，所以选择车辆总重作为迭代过程中影响线直接校核对象有利于结果的无偏稳定收敛。

以上提出的反馈校验机制将在后续采用表5.3的四个过宽估计工况进行算例验证，其中通过多工况区间的重叠程度判断真实值的大概率取值区间是一项关键技术，也将在下一节结合具体算例进行说明。

5.3.3 区间重叠程度的应用

使用区间重叠程度(Intreval overlapping degree, IOD)来衡量真实解在区间内的分布概率是基于数据统计思想的一个直观且简易的量化指标,类似于式(3.20)的区间集合求并集思想。真实影响线被包络于每一个工况计算出的影响线区间中，多工况下某区域的区间重叠频率越高，IOD 值越大，相应地真实影响线存在该区域的概率也就越大。为了叙述的简洁，将区间最高重叠程度定义为 MIOD(Maximum

of interval overlapping degree), 轴重区间的过宽估计会引起影响线 MIOD 带状区域的拓宽, 该最高重叠带状区域的不收敛则会降低影响线的识别精确性。无疑, 对 MIOD 区域宽度的缩小就是向真实的影响线逼近, 上一节所提出的复合反馈双向迭代校正方法便是采用区间重叠程度作为判断解存在于该位置区域可能性大小的量化指标。从多工况的输入输出中不断获得反馈信息校正轴重区间过宽估计误差从而改善影响线区间计算偏差, 能够使影响线区间最高重叠区域尽快收敛, 进而提高支持向量机从大数据中识别桥梁影响线的准确性。

设 n 组工况中, 第 i 组工况 ($i=1\sim n$) 所对应的影响线区间向量为 $L = \{[l_1], [l_2], \dots, [l_m]\}$, 其中区间数 $[l_j]$ ($j=1\sim m$) 是序号为 j 的影响线竖标值。影响线区间在二维平面上是上边界和下边界围成的区域, 真实的影响线就位于其中。要计算多组影响线区间的重叠程度, 可以采用网格数字矩阵赋值的方法, 将位于边界曲线包络区域内的网格点赋值为 1, 其余区域赋值为 0, n 组影响线区间的重叠程度是每一个工况的网格数字矩阵在 Z 轴方向上的数值累加, 累加后的矩阵元素数值大小便代表该点 IOD 的大小。5.3.1 节中四个工况所对应的 100 组算例的整体影响线区间重叠程度以三维等高线展示如图 5.9 所示, 随着初始区间上限放大程度增大, 最高重叠区域的宽度也随之增加。

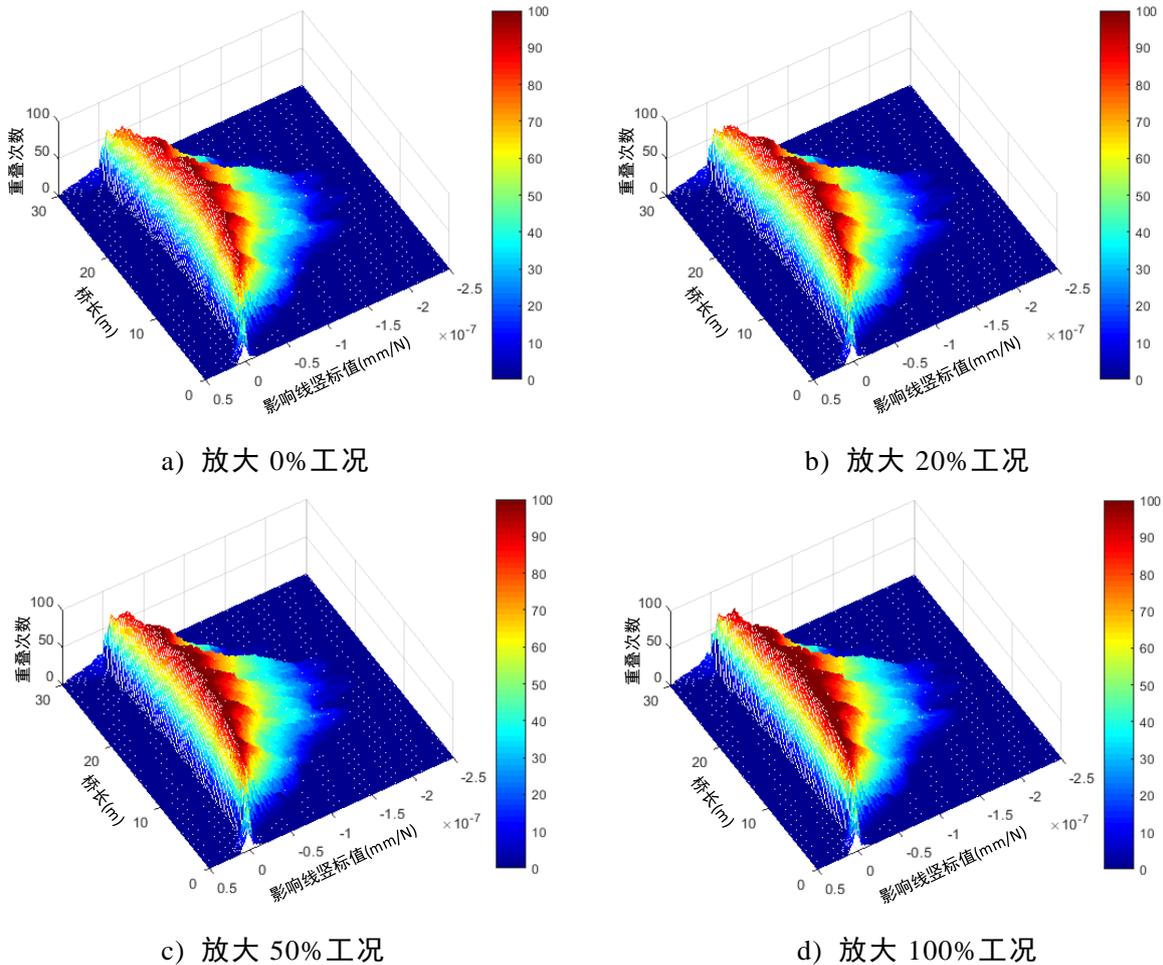


图 5.9 影响线区间重叠程度

从极大似然估计的角度认为，IOD大小与真实影响线在此区域出现的概率成正比相关。但是单纯取重叠程度最大的竖标值组合作为真实影响线的近似解却不尽合理，一方面最大重叠区域通常是一个带状范围，要精确影响线的具体位置具有难度；另一方面，即使通过一些手段的应用使该带状区域近似收敛为线性区域，由于动力荷载效应的干扰和局部振动的存在，也不能保证这条等高线的山脊是光滑连续的曲线。因此考虑设置一个门槛值确定影响线存在的大致范围，然后在后续每一次迭代中，通过轴重区间与影响线区间的相互推导校验，不断缩小影响线的取值范围，引导轴重区间向真实紧凑区间趋近。

本文中计算的影响线向量统一取为长度为101的竖标值序列，对应横轴距离0~30m中的101个等间距节点并依次编号为1~101。图5.10中展示了序号为10、30、50、70、90的影响线竖标值区间重叠程度柱状分布统计图。依次寻找各序号 $j(j=1\sim 101)$ 对应的最大重叠程度值 $MIOD_j$ ，根据经验将门槛值取为 $0.95 MIOD_j$ ，则IOD值大于 $0.95MIOD$ 的区域成为第 j 个影响线竖标值 $[l_j]$ 新的取值范围，由此得到新的影响线向量区间 $L' = \{[l'_1], [l'_2], \dots, [l'_{101}]\}$ 。这里新区间的取值与常用的统计学置信区间不同，用于估计总体分布情况的样本数据是区间数而非样本点，同时在估计每个竖标的新区间时，IOD样本数据并不满足通用的正态分布，这与影响线区间计算特点有关，也意味着需要寻求一种适合问题本身的置信区间取值原则。上述门槛值的取值是经过多个数值算例测试后的经验取值，并经验证具有较好的通用性，得到的结果也具有较高的稳定性。

结合响应和新的影响线向量区间 L' 的上界与下界，依据动态称重方法计算出 n 个工况各自的总重估计区间，然后计算总重区间的重叠程度，对重叠程度很低的总重取值区域进行剔除以得到紧致可靠的新一轮总重估计区间。

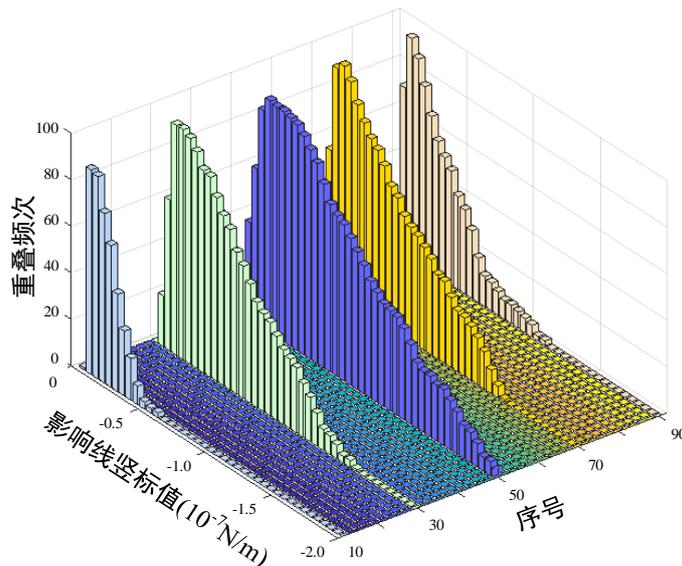


图 5.10 影响线竖标区间重叠程度

总重区间重叠程度计算与影响线区间重叠程度计算的方法类似，而且是更简

单的一维搜索叠加问题。与影响线区间重叠不同的是，校正总重区间并非截取重叠程度最高的局部区域，而应该考虑为 n 个总重估计区间的并集。为了达到校正缩小初始区间的目的，在此同样引入一个经验阈值0.1，将对重叠频次低于0.1MIOD的总重取值区域剔除，保留重叠频次较高的区域作为新的总重区间参考值。总重区间的下限是空车质量，基本不随迭代改变，这种以重叠程度为截断标准的机制主要对区间的上限值起到修正作用。于是，当初始估计区间上界较真实值大时，便可以通过影响线区间和总重区间的交互迭代，缩小总重区间的上界并最终收敛为真实的总重区间，同时根据轴荷载分配系数得到校正后的分轴重区间，使之在作为输入参数时能提高大数据识别影响线的准确度。载重量放大100%工况的总重区间迭代计算过程示意图如图5.11所示。

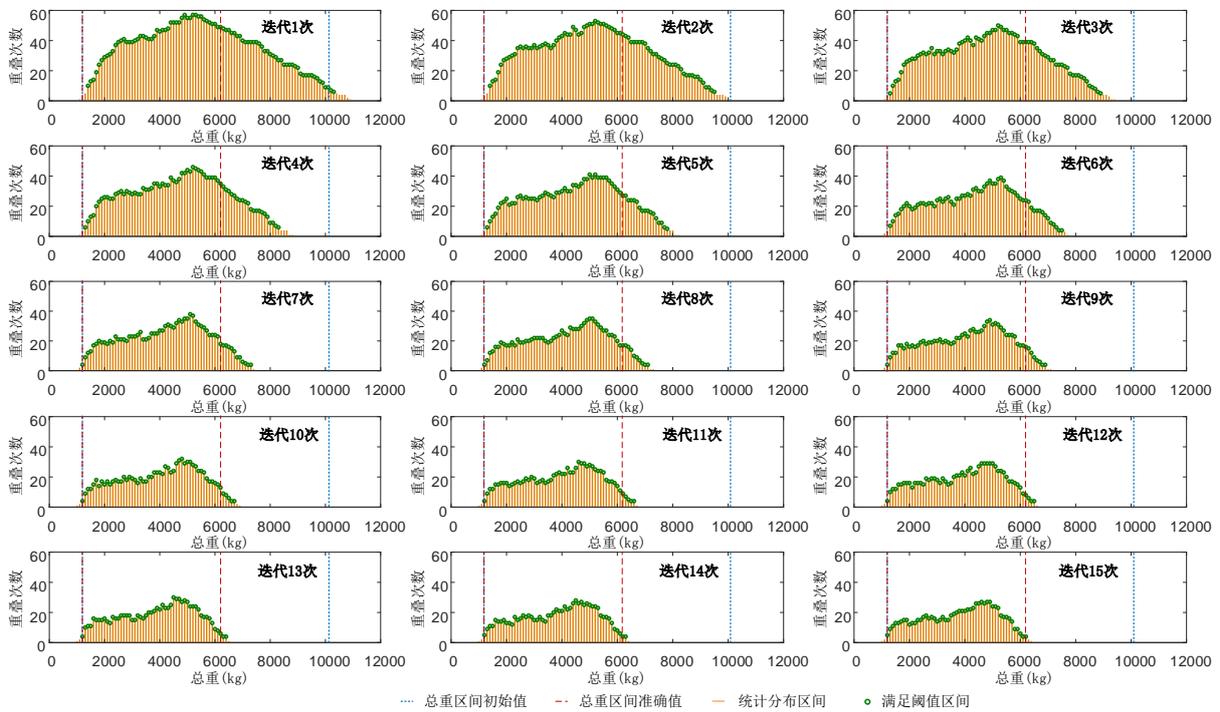


图 5.11 放大 100% 工况的总重迭代结果

一轮迭代后的总重区间上限值小于初始区间上限值是迭代最终收敛的判断标准。上图中，初始总重估计区间为 $[1200, 11200]$ kg，经过第一轮迭代，直接统计出的总重分布区间上限值大于11200kg，但引入阈值剔除两侧较低IOD值区域后，得到新的总重区间上限为10300kg，满足了迭代收敛条件，也使总重上限值在重复迭代中具有向准确值逼近的趋势，因此阈值的取用在复合反馈迭代过程中十分必要。

5.3.4 总重迭代校验结果分析

在载重量过高估计的情况下，引入轴重与影响线区间复合反馈机制校正总重估计区间上限值，可以改善最终影响线的识别误差。在5.3.1的算例设置基础上，分别对实际最大载重量放大估计0%、20%、50%、100%的四个工况进行复合反馈

双向推导迭代，最终验证了该校验机制的可行性和有效性。图5.12是载重量分别放大一定倍数后得到的总重初始区间上限值在执行迭代反馈校验机制过程中的收敛情况，可以看出总重的上限估计值在迭代过程中不断向准确值6200kg靠近，这意味着区间过宽估计的问题可以在迭代中得到解决，放大100%的工况经过15次复合反馈迭代最终被校核成为准确值，影响线的识别误差从初始的26.09%降低到1.36%，改善效果显著。而对于放大0%的工况，初始估计区间较准确的前提下，第一次迭代结果便会收敛，不会出现迭代结果逐渐偏离准确值的现象。

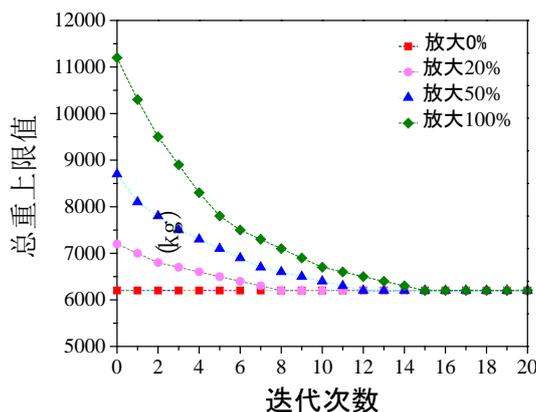


图 5.12 各工况总重迭代收敛结果

5.4 本章小结

本章围绕基于SVM影响线识别结果的非接触桥梁动态称重(cWBIM)展开，主要内容如下：

(1) 结合本文基于车辆大数据和区间仿射算法的非接触式影响面标定方法，提出非接触动态轴重识别方法。介绍了基于结构动态响应的车辆动态称重计算原理和具体的矩阵方程计算过程，用数值模拟和模型试验分别测试了标准影响面和SVM影响面识别动态轴重的效果，大体上基于SVM影响面的非接触车辆称重误差在可接受的范围内，并从识别结果中揭示了总重识别的准确性优于分轴重识别的规律。

(2) 建立了轴重和影响线互为已知量、相互迭代校正的复合反馈机制。这种反馈机制以总重为直接校核对象，通过总重区间与影响线区间的双向迭代克服轴重区间过宽估计在影响线标定中带来的负面影响，并经算例验证效果良好，进一步提高了基于大数据与区间仿射算法的影响线非接触标定方法的鲁棒性，使该套方法具备自适应纠偏功能。

总结与展望

桥梁作为我国交通运输的命脉，在国民经济的繁荣稳定发展中占据重要影响地位，对桥梁积极开展健康监测和状态评估工作是保障其安全运营、延长其使用寿命的有效途径。目前针对国内量大面广的中小型桥梁，依赖传统人工经验的损伤检测手段和依赖传感器网络的长期监测系统在实际应用中存在一些方面的局限与不足，还有待于开发出一种自动化程度高、适用性广、经济高效的桥梁快速检测评估技术，以实现智能桥梁、智慧交通的美好愿景。影响线是反映桥梁性能状态的可靠指标，但目前其标定方法还未能达到非接触、智能化的水平，于是本文提出了一种基于大数据分析和区间仿射算法的新型非接触桥梁影响线实测标定方法，具有“无需封闭交通”、“无需接触式传感”、“无需称重标定”的特点，为未来实现自动化、智能化、非接触的桥梁健康监测提供可能。

本文将影响线区间反演模型和大数据分析相结合，在机器视觉匹配车辆类型和对应轴重估计区间的技术支持下，利用多种车辆激励大数据和桥梁结构响应大数据作为信息输入计算得到影响线区间大数据，然后采用支持向量机智能算法从中识别出影响线的近似数值解，并在数值模拟算例和实验室试验中验证了该套方法理论的可行性和正确性。

理论方面的相关研究内容与成果如下：

(1) 介绍了两种实际应用中根据结构动态响应线性叠加原则反算桥梁影响线的数学方法，基于最小二乘原理求理论响应与实测响应误差最小化的经典方法和直接令理论值与实测值相等的极大似然估计简易方法，经过对比推导过程和计算原理，认为只要在方程求解过程中运用合适的技巧克服误差引发的病态问题，两者的最终求解结果等效，而后者在多车和非匀速工况下可拓展性强，因此适用性和实用性更强。

(2) 介绍了区间分析和仿射算法的理论基础，认为基于纽曼展开的仿射算法在大规模稀疏区间矩阵求逆方面具有精确、高效的特点，适用于不确定性工程问题的区间线性方程组求解。考虑到轴重是反算影响线竖标值的关键参数，但是一般难以获取其准确值，于是结合仿射变换和一阶纽曼展开建立了轴重为区间估计参数的影响线区间反演计算模型，克服了区间扩张问题，能得到较为紧致的区间结果；同时还分别介绍了利用全局优化遗传算法和蒙特卡罗法求解精确影响线区间的数学原理及操作流程。

(3) 提出了将大数据分析 with 区间反演分析相结合的影响线识别策略，其理论依据已在文中通过区间单向包含特性和集合公共交集的思想进行了推导和论证。

机器学习是大数据分析的技术核心，利用SVM二分类算法从多工况的车辆激励与结构响应大数据中分析挖掘影响线的参考信息是实现影响线非接触识别的关键环节。根据轴重匹配区间可以计算出真实影响线的包络区间，将多重工况的影响线区间离散成上下边界数据点，在平面上通过识别两类数据的分类决策面以及相应的可视化操作，达到提取影响线近似数值解的目的。

(4) 介绍了桥梁动态称重的相关原理和计算方程，提出基于实测响应和影响线的SVM识别结果实现非接触车辆称重的方法。然后，将多工况的区间重叠程度作为衡量真实解位置的依据，建立了通过影响线和轴重区间的互相迭代计算校正过宽估计的轴重区间，进而提高SVM识别结果准确性的复合反馈机制，完成了本文研究理论的闭环验证。

数值模拟方面的相关研究内容与成果如下：

(1) 在了解车桥耦合振动原理的基础上，建立了ANSYS桥梁有限元模型子系统和MATLAB四自由度弹簧阻尼车辆数值模型子系统，通过两者的受力平衡和位移协调条件进行两个子系统之间的全过程耦合迭代，输出桥梁结构的节点动位移响应，作为本文方法数值算例验证的有效数据输入。

(2) 从确定性问题的角度，研究了车辆模型各项参数对影响线计算结果的影响，通过计算相对于桥梁静力影响线的拟合误差发现，车速和载重是决定影响线计算准确性的关键因素，高速致使车辆与桥梁耦合不充分，空车增大车辆对桥梁的冲击效应，两者都会增大计算偏差。先从确定性计算切入，有利于后续区间影响线的误差来源分析。

(3) 通过模拟响应计算了影响线的区间仿射解，证实了区间解能很好的包络真实解，虽然与采用遗传算法和蒙特卡罗法得到的精确解区间稍有扩张，但是仿射求逆算法比优化算法和统计试验模拟法搜索区间边界的计算效率要高，避免了在处理大规模问题时存在计算量激增、耗时巨大的不足，具有求解紧致性高、稳定性好的显著优点。

(4) 通过从速度、轴重、轴距对应的取值区间生成大量随机参数组合工况，模拟实际桥梁的单车通行随机工况。在单车型和混合车型几组测试工况中，利用SVM算法提取的影响线比标准曲线幅值偏大，但大部分处于可接受误差水平范围内，而对于其中的误差来源也进行了综合的比对分析，认为识别结果的准确性主要受车辆动力冲击效应以及轴重实际分布情况的影响。

(5) 将标准静力影响面和SVM识别结果分别用于车辆动态轴重识别，进行非接触的动态称重计算，从结果中得到总重的识别准确性明显优于分轴重的规律，只有尽量提高影响线的标定精度，才能改善车辆动态称重的误差。另外，用算例验证了通过影响线和总重区间的相互迭代可以校正过宽估计的初始轴重输入区间，以此作为改善SVM影响线识别效果的复合反馈自适应误差调节机制。

在试验方面，利用缩尺的三轴车模型和有机玻璃简支T梁桥模型进行测试，采集主梁底的动态应变和竖向位移作为计算输入，通过改变车速和载重增加工况的多样性，最终利用SVM从一系列经过平滑处理的区间反演结果中识别出了双车道桥梁的应变和位移影响面，识别误差基本在可接受范围内，再次充分验证了本文非接触影响面识别理论方法和技术路线的可行性。

本文从对理论、模拟及试验方面对基于车辆大数据与区间仿射算法的中小桥梁结构影响面反演方法进行了研究，过程中仍然存在不足之处，在如下问题的研究上有待进一步的改进完善：

(1) 本文利用试验数据计算影响线区间时，动态响应中的低频振动会在影响线边界中被成倍放大对分类识别产生干扰，通过采用光滑样条拟合方法可以有效去除曲线的大幅局部振动，以但是此这种平滑处理技巧的参数需要根据曲线的振动特性手动调节相关参数才能获得比较好的效果，批量处理容易造成结果曲线失真，影响最终识别结果的准确性。所以，在影响线去除振动方面，还有待于寻找一种操作简单、效果良好、能自动平滑曲线的处理技巧。

(2) 本文针对实际可能存在的总重过宽估计问题提出了复合反馈机制，利用轴重区间和影响线区间的互相推导，使总重上限值在反复迭代中向准确值收敛，达到校正初始输入区间、提高SVM识别准确性的效果。但是该机制还不够完善，对于轴荷比不易直接获取问题以及其他类型的输入区间偏差情况，还需要进一步的研究分析。

(3) 本文研究中影响线识别结果依赖于轴重估计区间的估计准确性，一方面可以从车型检测与细分类方面着手改善，提高输入区间的可信度；另一方面，可以借助配备动态称重系统的桥梁对过桥车辆的车型与轴重进行统计，通过充足的参数统计资料得到国内各车型轴重区间概率分布，从而将区间影响线反演模型和大数据的概率统计相结合，为基于支持向量机的影响线识别提供置信区间参考依据。

(4) 本文通过数值模拟和实验室试验初步验证了所提出的针对中小型桥梁结构影响面非接触识别方法的可行性，但是还未在实际工程应用中进行相关测试，对于可能出现的多车顺行和并行情况，还有待于在影响线计算模型上进行纵横向的优化拓展，该法在其他形式桥梁上的适用性也有待实测研究。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报. http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/201904/t20190412_3186720.html, 2020.4.18
- [2] 中国报告网. 2020 年中国公路养护行业分析报告-市场行情监测与发展战略规划. <http://baogao.chinabaogao.com/gonglu/479790479790.html>, 2020.4.18
- [3] 刘菠. 高速公路桥梁典型病害及建管养对策研究[重庆交通大学硕士学位论文]. 重庆:重庆交通大学, 2012
- [4] 李宏男, 高东伟, 伊廷华. 土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展. 力学进展, 2008, 38(2): 151-166
- [5] 顾钧元, 徐廷学, 余仁波, 陈海建. 结构健康监测及其关键技术研究. 兵工自动化, 2011, 30(8):61-64
- [6] 孙晓燕. 桥梁结构健康监测技术研究进展. 中外公路, 2006, 26(2):141-146
- [7] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程. 土木工程学报, 2019, 52(05):5-15
- [8] 周云, 张军凯, 陈松柏等. 大跨度拱桥静动力试验与结构识别的实践. 湖南大学学报:自然科学版, 2017(44):19
- [9] 冯新. 土木工程中结构识别方法的研究[大连理工大学博士学位论文]. 大连:大连理工大学, 2002
- [10] Busca G, Cigada A, Mazzoleni P, et al. Vibration Monitoring of Multiple Bridge Points by Means of a Unique Vision-Based Measuring System. *Experimental Mechanics*, 2014, 54(2):255-271
- [11] 叶肖伟, 张晓明, 倪一清等. 基于机器视觉技术的桥梁挠度测试方法. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(5):813-819
- [12] Ye X W, C Z Dong, T Liu. Image-based structural dynamic displacement measurement using different multi-object tracking algorithms. *Smart Structures and Systems*, 2016, 17(6):935-956
- [13] 董传智, 叶肖伟, 刘坦. 非接触式结构动力特性识别方法及试验验证. 振动与冲击, 2017, 36(1):188-193
- [14] Feng Dongming, Maria Q Feng. Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2017, 88: 199-211
- [15] Chen Z, Hui L, Bao Y, et al. Identification of spatio-temporal distribution of vehicle loads on long-span bridges using computer vision technology. *Structural*

- Control & Health Monitoring, 2016, 23(3): 517-534
- [16] Darragh L, Myra L, Martinez D R J, et al. Development and field testing of a time-synchronized system for multi-point displacement calculation using low cost wireless vision-based sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2018,1(1)
- [17] Khuc T, Catbas F N. Structural Identification Using Computer Vision-Based Bridge Health Monitoring. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 144(2): 04017202
- [18] 刘文峰, 张劲泉, 何玉珊等. 杭州湾跨海大桥监测系统中应变传感器的优化布点. *公路交通科技*, 2005, 22(12):81-83
- [19] 王晖. 大跨预应力混凝土斜拉桥健康监测评估管理系统的开发与研究[浙江大学硕士学位论文]. 杭州:浙江大学, 2006
- [20] 张敏, 杨志芳, 朱利明. 东海大桥桥梁结构健康监测系统设计. *桥梁建设*, 2006, (2):67-70
- [21] 周文松, 李惠, 欧进萍等. 大型桥梁健康监测系统的数据采集子系统设计方法. *公路交通科技*, 2006, 23(3): 83-87
- [22] 李爱群, 丁幼亮, 王浩等. 桥梁健康监测海量数据分析与评估——“结构健康监测”研究进展. *中国科学:技术科学*, 2012(8):118-130
- [23] 欧进萍. 重大工程结构智能传感网络与健康监测系统的研究与应用. *中国科学基金*, 2005(01):10-14
- [24] 李宏男, 李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评. *地震工程与工程振动*, 2002, (03)
- [25] 魏国, 刘剑, 孙金玮等. 基于 LS-SVM 的非线性多功能传感器信号重构方法研究. *自动化学报*, 2008, 34(8):869-875
- [26] 袁慎芳, 梁栋, 高宁等. 基于结构健康监测系统的桥梁数据异常诊断研究. *电子科技大学学报*, 2013, 42(01):69-74
- [27] 刘兴旺. 大跨桥梁健康监测数据自诊断与状态评估方法研究[东南大学硕士学位论文].南京:东南大学,2017
- [28] 李惠, 鲍跃全, 李顺龙等. 结构健康监测数据科学与工程. *工程力学*, 2015, 32(08):1-7
- [29] Bao Y, Tang Z, Li H, et al. Computer vision and deep learning-based data anomaly detection method for structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(2): 401-421
- [30] 郭惠勇, 李正良, 彭川. 结构损伤动力识别技术的研究与进展. *土木建筑与环境工程*, 2008, 30(1):140-145
- [31] Xu Y, Bao Y, Chen J, et al. Surface fatigue crack identification in steel box girder

- of bridges by a deep fusion convolutional neural network based on consumer-grade camera images. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(3):653-674
- [32] Young-Jin Cha, Wooram Choi, Gahyun Suh, et al. Autonomous Structural Visual Inspection Using Region-Based Deep Learning for Detecting Multiple Damage Types. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 00(4):1-17
- [33] Lin Yizhou, Nie Zhenhua, Ma Hongwei. Structural damage detection with automatic feature-extraction through deep learning. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 32(12): 1025-1046
- [34] 李雪松, 林逸洲, 马宏伟等. 基于卷积神经网络的桥梁损伤识别方法应用研究. *青海大学学报*, 2018, 36(156):45-50
- [35] 樊可清, 倪一清, 高赞明. 基于频域系统辨识和支持向量机的桥梁状态监测方法. *工程力学*, 2004(5)
- [36] 何浩祥, 闫维明, 彭凌云. 基于支持向量机的钢筋混凝土桥梁损伤识别. *公路交通科技*, 2008, 25(3):65-69
- [37] 赵学风, 段晨东, 刘义艳等. 基于小波包变换的支持向量机损伤诊断方法. *振动、测试与诊断*, 2008, 28(2):104-107
- [38] 于繁华, 刘寒冰. 基于支持向量机和粒子群算法的结构损伤识别. *吉林大学学报(工学版)*, 2008, 38(02):434-192
- [39] Xiang J, Ling M, He Y. Experimental investigation of frequency-based multi-damage detection for beams using support vector regression. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 131:257-268
- [40] Gui G, Pan H, Lin Z, et al. Data-driven support vector machine with optimization techniques for structural health monitoring and damage detection. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(2):523-534
- [41] Diez A, Khoa N L D, Makki Alamdari M, et al. A clustering approach for structural health monitoring on bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2016, 6(3): 429-445
- [42] Zhou Q, Zhou H, Zhou Q, et al. Structure damage detection based on random forest recursive feature elimination. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 46(1): 82-90
- [43] Moses F. Weigh-in-motion system using instrumented bridges. *Transportation Engineering Journal*, 1979, 105(3): 233-249
- [44] Znidaric A, Baumgartner W. Bridge weigh-in-motion systems-an overview. *SECOND EUROPEAN CONFERENCE ON WEIGH-IN-MOTION OF ROAD VEHICLES, HELD LISBON, PORTUGAL 14-16 SEPTEMBER 1998*, 1998.

- [45] McNulty P, O'Brien E. J. Testing of bridge weigh-in-motion system in sub-arctic climate. *Journal of Testing and Evaluation*, 2003, 31(6): 1-10
- [46] 谭冬莲. 基于影响线理论应用监测信息反演桥上车辆荷载. *力学与实践*, 2008, 30(2): 66-70
- [47] Zolghadri N, Halling M W, Johnson N, et al. Field verification of simplified bridge weigh-in-motion techniques. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(10): 04016063
- [48] González A, O'Brien E J. Influence of dynamics on accuracy of a bridge weigh in motion system. In: *Proceedings of the International Conference on Weigh-In-Motion (ICWIM 3)*. Orlando, FL: FHWA, 2002: 189-198
- [49] Hirachan J, Chajes M. Experimental influence lines for bridge evaluation. *Bridge Structures*, 2005, 1(4): 405-412
- [50] 周建庭, 郝义, 沈小俊等. 递推迭代实测桥梁影响线原理及应用研究. *公路交通科技*, 2006, 23(6): 81-84
- [51] O'Brien E J, Quilligan M J, Karoumi R. Calculating an influence line from direct measurements. *Proceedings of the ICE-Bridge Engineering*, 2006, 159(1): 31-34
- [52] Ieng S S. Bridge influence line estimation for bridge weigh-in-motion system. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2014, 29(1): 06014006
- [53] Zhao H, Uddin N. Algorithm to identify axle weights for an innovative B-WIM system: Part I [C]//Amin A, Okui Y, Bhuiyan A R. *Proceedings of the IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering: II*. Dhaka, Bangladesh, 2010: 527-536
- [54] Zheng X, Yang D H, Yi T H, et al. Development of bridge influence line identification methods based on direct measurement data: A comprehensive review and comparison. *Engineering Structures*, 2019, 198:109539
- [55] Eiki Yamaguchi, Shin-ichi Kawamura, Kazushi Matuso¹, et al. Bridge-Weigh-In-Motion by Two-Span Continuous Bridge with Skew and Heavy-Truck Flow in Fukuoka Area, Japan[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2009, 12(1):115-125
- [56] 王宁波, 任伟新, 何立翔. 基于桥梁动力响应的应变影响线提取. *中南大学学报: 自然科学版*, 2014(45): 4369
- [57] 陈志为, 杨维彪, 程棋锋等. 基于正则化与 B 样条曲线的桥梁影响线识别方法. *中国公路学报*, 2019, 32(03):105-112.
- [58] Quilligan Michael, Raid Karoumi, Eugene J. O'Brien. Development and testing of a 2-dimensional multi-vehicle bridge-WIM algorithm. *Proceedings of the third*

- international conference on weigh-in-motion, 2002
- [59] Zhao H, Uddin N, O'Brien E J, et al. Identification of vehicular axle weights with a bridge weigh-in-motion system considering transverse distribution of wheel loads. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 19(3): 04013008
- [60] Zhao H, Uddin N, Shao X, et al. Field-calibrated influence lines for improved axle weight identification with a bridge weigh-in-motion system. *Structure & Infrastructure Engineering*, 2014, 11(6): 1-23
- [61] Lydon M, Taylor S E, Robinson D, et al. Development of a bridge weigh-in-motion sensor: performance comparison using fiber optic and electric resistance strain sensor systems. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(12): 4284-4296
- [62] Lydon M, Robinson D, Taylor S E, et al. Improved axle detection for bridge weigh-in-motion systems using fiber optic sensors. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2017, 7(3): 325-332.
- [63] Algoji B, Mufti A, Thomson D. Detection of speed and axle configuration of moving vehicles using acoustic emission. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2018, 8(3): 353-362
- [64] 周颖, 张立迅, 刘彤. 基于计算机视觉的结构系统识别. *土木工程学报*, 2018, 51(11):21-27.
- [65] Lydon D, Lydon M, del Rincón J M, et al. Development and Field Testing of a Time-Synchronized System for Multi-Point Displacement Calculation Using Low-Cost Wireless Vision-Based Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(23): 9744-9754.
- [66] Ye X W, Ni Y Q, Wai T T, et al. A vision-based system for dynamic displacement measurement of long-span bridges: algorithm and verification. *Smart Structures and Systems*, 2013,12(3-4), 363-379
- [67] Ye X W, Yi T H, Dong C Z, et al. Multi-point displacement monitoring of bridges using a vision-based approach. *Wind and Structures*, 2015, 20(2): 315-326
- [68] 王圣男, 郁梅, 蒋刚毅. 智能交通系统中基于视频图像处理的车辆检测与跟踪方法综述. *计算机应用研究*, 2005, 22(9): 9-14
- [69] 范凯波. 基于几何特征的车辆目标分类研究[天津理工大学硕士学位论文]. 天津:天津理工大学, 2012
- [70] 王荣辉, 徐红岩. 基于深度学习的无人机影像车辆检测研究. *江西测绘*, 2018, 117(03):23-26.
- [71] Zaurin R, Catbas F N. Integration of computer imaging and sensor data for structural health monitoring of bridges. *Smart Materials and Structures*, 2009,

- 19(1):015019
- [72] Zaurin R, Khuc T, Catbas F N. Hybrid sensor-camera monitoring for damage detection: case study of a real bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(6): 05016002
- [73] Ojio T, Carey C H, O'Brien E J, et al. Contactless bridge weigh-in-motion. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(7): 04016032
- [74] O'Brien E J, Rowley C W, Gonza'lez A, et al. A regularized solution to the bridge weigh-in-motion equations. *International Journal Heavy Vehicle Systems*, 2009, 16, 310– 327
- [75] Gonza'lez A, Rowley C, O'Brien E J. A general solution to the identification of moving vehicle forces on a bridge. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2008, 75, 335– 354
- [76] O'Brien E J, Znidaric A, Ojio T. Bridge weigh-in-motion – Latest developments and applications worldwide. *International conference on heavy vehicles incorporating heavy vehicle transport technology (HVTT 10) and weigh-in-motion (ICWIM 5)* (pp. 25 – 38). Paris, France(2008, May 19-22)
- [77] Xiao Z G, Yamada K, Inoue J, et al. Measurement of truck axle weight by instrumenting longitudinal ribs of orthotropic bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11, 526– 532
- [78] Park, M.S., Lee, J., Kim, S., Jang, J.H., & Park, Y.H. (2007). Development and application of a BWIM system in a cable-stayed bridge. *Proceeding of the 3rd international conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure (SHMII-3)*, Vancouver, British Columbia, Canada
- [79] Kalin, Jan, Aleš Žnidarič, Igor Lavrič. Practical implementation of nothing-on-the-road bridge weigh-in-motion system. *International symposium on heavy vehicle weights and dimensions*, 2006
- [80] Deng Lu, C S Cai. Identification of dynamic vehicular axle loads: theory and simulations. *Journal of Vibration and Control*, 2010, 16(14): 2167-2194
- [81] 王宁波. 非路面式桥梁动态称重理论与试验研究[中南大学博士学位论文]. 长沙:中南大学,2013
- [82] Yun Zhou, Sai Zhou, Lu Deng, et al. Research on moving load identification based on measured acceleration and strain signals. *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*. 2019, 3(3-4): 257-288
- [83] Choi I Y, Lee J S, Choi E, et al. Development of elastic damage load theorem for damage detection in a statically determinate beam. *Computers & Structures*,

- 2004, 82(29-30):2483-2492
- [84] 刘纲, 黄宗明, 高建莉. 基于损伤力影响线的静定梁损伤识别研究. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 036(008): 23-27.
- [85] 寇晓娜. 基于挠度影响线的桥梁结构损伤识别方法初步研究[重庆交通大学硕士学位论文].重庆:重庆交通大学,2008
- [86] 王艺霖. 基于影响线二次差值的桥梁损伤识别方法[上海交通大学博士学位论文].上海:上海交通大学, 2011.
- [87] Zaurin Ricardo, F N Catbas. Structural health monitoring using video stream, influence lines, and statistical analysis. Structural Health Monitoring, 2011,10(3): 309-332
- [88] Chen Z W, Zhu S Y, Xu Y L, et al. Damage detection in long suspension bridges using stress influence lines, Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(3):05014013
- [89] Chen Z W, Cai Q L, Songye Zhu, Damage quantification of beam structures using deflection influence lines, Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(11): e2242
- [90] Chen Z W, et al. A systematic method from influence line identification to damage detection: Application to RC bridges. Computers and Concrete, 2017, 20(5): 563-572
- [91] 江近仁, 孙景江. 考虑参数不确定性的结构动力可靠度分析. 世界地震工程, 1992, 1:30-36
- [92] 吕震宙, 冯蕴雯. 结构可靠性问题研究的若干进展. 力学进展, 2000, 30(1): 21-28
- [93] 王光远. 论不确定性结构力学的发展. 力学进展, 2002, 32(2)
- [94] 王攀, 吕震宙, 李贵杰. 参数不确定情况下结构系统重要性分析.中国科学: 技术科学, 2011, 41(11):1512-1518
- [95] 刘宁, 郑建青. 工程随机力学及可靠性理论中的若干问题(上). 河海大学学报(自然科学版), 1999, 28(5):1-7
- [96] Chen J J, Che J W, Sun H A, et al. Probabilistic dynamic analysis of truss structures. Structural Engineering and Mechanics, 2002, 13(2): 231-239
- [97] 陈群, 唐岷, 朱分清. 强度参数的不确定性对土石坝坝坡失稳概率的影响. 岩土工程学报, 2008, 30(11): 1595-1598
- [98] 王光远. 未确知信息及其数学处理. 哈尔滨建筑大学学报, 1990, 23(4): 1-9
- [99] 郭书祥, 吕震宙, 冯立富. 模糊运算和模糊有限元静力控制方程的求解. 应用数学和力学, 2002, 23(9): 936-942

- [100] 谢东. 模糊信息处理及应用[M]. 北京:科学出版社, 2003
- [101] Moore R, Yang C. Interval analysis. Technical Document, Lockheed Missiles and Space Division, Number LMSD-285875, 1959
- [102] Moore R E, Methods and applications of interval analysis[M]. Philadelphia: Siam, 1979
- [103] Alefeld G, Herzberger J. Introduction to interval computation[M]. Academic press, 1984
- [104] 胡承毅, 徐山鹰, 杨晓光. 区间算法简介, 系统工程理论与践, 2003, 23(4):59-62
- [105] 沈祖和. 区间分析方法及其应用. 应用数学和计算数学, 1983, 2(1):34-58
- [106] 祁力群. 区间分析. 运筹学杂志, 1982, 1(1):29-35
- [107] 苏静波, 邵国建等. 基于区间分析的工程结构不确定性研究现状与展望. 力学进展, 1990, 35(3): 338-344.
- [108] 张乃良, 王海鹰. 非线性规划的区间方法. 河海大学学报(自然科学版), 1992(3):97-103
- [109] 王海军, 曹德欣, 李苏北等. 非线性等式约束全局优化问题的区间算法. 中国矿业大学学报, 2003(02):101-105
- [110] Jiang C, Han X, Guan F J, et al. An uncertain structural optimization method based on nonlinear interval number programming and interval analysis method. Engineering Structures, 2007, 29(11):3168-3177.
- [111] 姜潮. 基于区间的确定性优化理论与算法[湖南大学硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2008
- [112] 赵子衡. 区间不确定性优化的若干高效算法研究及应用[湖南大学硕士学位论文]. 长沙:湖南大学, 2012
- [113] Rao S S, Berke L. Analysis of uncertain structural systems using interval analysis. AIAA Journal, 1997, 35(4):725~735
- [114] 陈塑寰, 邱志平, 宋大同等. 区间矩阵标准特征值问题的一种解法. 吉林大学学报(工学版), 1993, 3:1-8
- [115] 邱志平, 陈塑寰, 刘中生. 区间参数结构振动问题的矩阵摄动法. 应用数学和力学, 1994, 15(6): 519-527
- [116] 邱志平. 不确定参数结构静力响应和特征值问题的区间分析方法[吉林工业大学博士学位论文]. 长春:吉林工业大学, 1994
- [117] Chen S H, Qiu Z, Liu Z. Perturbation method for computing eigenvalue bounds in structural vibration systems with interval parameter. Communications in Numerical Methods in Engineering, 1994, 10(2):121-134.

- [118] Qiu Z, Chen S H , Elishakoff I. Natural frequencies of structures with uncertain but nonrandom parameters. *Journal of Optimization Theory & Applications*, 1995, 86(3):669-683
- [119] Chen S H, Qiu Z, Song D. A new method for computing the upper and lower bounds on frequencies of structures with interval parameters. *Mechanics Research Communications*, 1995, 22(5):431-439
- [120] Qiu Z, Elishakoff I. Anti-optimization of structures with large uncertain-but-non-random parameters via interval analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1998, 152(3-4):361-372
- [121] 邱志平, 王晓军, 马一. 结构复固有频率区域的区间摄动法. *北京航空航天大学学报*, 2003(5):406-409
- [122] Qiu Zhiping, Xiaojun Wang. Parameter perturbation method for dynamic responses of structures with uncertain-but-bounded parameters based on interval analysis. *International journal of solids and structures* 42.18-19 (2005): 4958-4970
- [123] 禹智涛, 吕恩琳. 结构模糊有限元平衡方程的一种解法. *重庆大学学报(自然科学版)*, 1996, 19(1):53-58
- [124] 吴晓, 罗佑, 文会军等. 非确定结构系统区间分析的泛灰求解方法. *计算力学学报*, 2003, 20(3): 329-334
- [125] Markov S. An iterative method for algebraic solution to interval equations. *Applied Numerical Mathematics*, 1999, 30(2-3):225-239
- [126] Dessombz O, Thouverez F, Laine J P, et al. Analysis of mechanical systems using interval computations applied to finite element methods. *Journal of Sound & Vibration*, 2001, 239(5):949-968
- [127] 郭书祥, 吕震宙. 区间有限元静力控制方程的一种迭代解法. *西北工业大学学报*, 2002, 20(1):20-23
- [128] Hansen E R, Walster G W. *Global optimization using interval analysis*[M]. CRC Press, 2004
- [129] 吕震宙, 冯蕴雯, 岳珠峰. 改进的区间截断法及基于区间分析的非概率可靠性分析方法. *计算力学学报*, 2002, 19(3):260-264.
- [130] 陈怀海. 非确定结构系统区间分析的直接优化法. *南京航空航天大学学报*, 1999(2):146-150.
- [131] 王登刚. 计算具有区间参数结构的固有频率的优化方法. *力学学报*, 2004(03):364-372
- [132] 王登刚, 李杰. 计算不确定结构系统静态响应的一种可靠方法. *计算力学学*

- 报, 2003, 20(6):662-669
- [133] 孙靖. 用于区间参数多目标优化问题的遗传算法[中国矿业大学博士学位论文]. 徐州:中国矿业大学, 2012
- [134] McWilliam S. Anti-optimization of uncertain structures using interval analysis. *Computers & Structures*, 2001, 79(4):421-430
- [135] 郭书祥, 吕震宙. 线性区间有限元静力控制方程的组合解法. *计算力学学报*, 2003(01):34-38
- [136] 梁震涛, 陈建军, 王小兵. 不确定性结构区间分析的改进 Monte Carlo 方法. *系统仿真学报*, 2007(06):47-50.
- [137] 梁震涛. 不确定性结构的分析方法研究[西安电子科技大学博士学位论文]. 西安:西安电子科技大学, 2007
- [138] 杨晓伟, 陈塑寰, 滕绍勇. 基于单元的静力区间有限元法. *计算力学学报*, 2002, 19(2):179-183.
- [139] Chen S H, Yang X W. Interval finite element method for beam structures. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2000, 34(1):75-88
- [140] 罗业辉, 赵海涛, 邓仕涛. 应用 ANSYS 软件进行碾压混凝土重力坝非线性有限元静力和动力分析. *西北水电*, 2005(02):21-25
- [141] 郭书祥. 非随机不确定结构的可靠性方法和优化设计研究[西北工业大学博士学位论文]. 西安:西北工业大学, 2002
- [142] 郭书祥, 吕震宙, 冯元生. 基于区间分析的结构非概率可靠性模型. *计算力学学报*, 2001(01):58-62
- [143] Dai J, Chen J J, Li Y G. Dynamic response optimization design for engineering structures based on reliability. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2003, 24(1): 43-52
- [144] 王登刚, 刘迎曦, 李守巨等. 巷道围岩初始应力场和弹性模量的区间反演方法. *岩石力学与工程学报*, 2002, 2(13):305~308
- [145] 王登刚, 刘迎曦, 李守巨. 混凝土坝振动参数区间逆分析. *大连理工大学学报*, 2002, 42(5): 522~526
- [146] 刘世君, 徐卫亚, 王红春, 邵建富. 岩石力学参数的区间参数摄动反分析方法. *岩土工程学报*, 2002, 24(6):760-763
- [147] Jiang C, Liu G R, Han X. A Novel Method for Uncertainty Inverse Problems and Application to Material Characterization of Composites. *Experimental Mechanics*, 2008, 48(4): 539-548.
- [148] Gabriele S, Valente C, Brancaloni F. An Interval Uncertainty Based Method for Damage Identification. *Key Engineering Materials*, 2007, 347:551-556

- [149] Wang X, Yang H, Qiu Z. Interval Analysis Method for Damage Identification of Structures. *AIAA Journal*, 2010, 48(6):1108-1116
- [150] Wang X, Yang H, Wang L, et al. Interval Analysis Method for Structural Damage Identification Based on Multiple Load Cases. *Journal of Applied Mechanics*, 2012, 79(5):051010
- [151] 方圣恩, 张秋虎, 林友勤等. 不确定性参数识别的区间响应面模型修正方法. *振动工程学报*, 2015, 28(1):73-81
- [152] 陈学前, 沈展鹏, 刘信恩. 基于响应面与灵敏度分析的区间不确定性参数识别方法. *振动与冲击*, 2019, 38(16):267-273
- [153] 李炜明, 朱宏平, 夏勇. 基于车辆响应的桥梁结构参数的统计区间估计. *工程力学*, 2008, (S2):254-258
- [154] 李炜明, 朱宏平. 运营桥梁结构间接辨识的统计估计方法. *工程力学*, 2011, (S1):29-34
- [155] 邹启令. 车桥耦合振动数值模型的确定性和不确定性分析方法[湖南大学硕士学位论文].长沙:湖南大学, 2016
- [156] Zou Qiling, Lu Deng, Chao Jiang. Predicting the bounds of vehicle-induced bridge responses using the interval analysis method. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(9): 04016046
- [157] De Figueiredo, Luiz Henrique, Jorge Stolfi. Affine arithmetic: concepts and applications. *Numerical Algorithms*, 2004, 37(1-4): 147-158
- [158] Stolfi J, Figueiredo L H D, Dona E. An Introduction to Affine Arithmetic. *Tema Tend.mat.apl.comput*, 2003, 4(3):297-312.
- [159] Shou H H, et al. Affine arithmetic in matrix form for polynomial evaluation and algebraic curve drawing. *Progress in Natural Science*, 2002, (12)1: 77-81
- [160] Vaccaro Alfredo, Claudio A Canizares, Domenico Villacci. An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in the presence of data uncertainty. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 25(2): 624-632
- [161] 丁涛, 崔翰韬, 顾伟等. 基于区间和仿射运算的不确定潮流算法. *电力系统自动化*, 2012, 36(13):51-55
- [162] 朱增青. 区间和未确知参数结构(机构)分析方法研究及应用[西安电子科技大学博士学位论文].西安:西安电子科技大学, 2009
- [163] Degrauwe D, Lombaert G, Roeck G D. Improving interval analysis in finite element calculations by means of affine arithmetic. *Computers & Structures*, 2010, 88(3-4):247-254
- [164] Yu Ling, Tommy Chan. Moving force identification based on the frequency-time

- domain method. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 261 (2):329-349
- [165] Yu Yang, C S Cai, Lu Deng. State-of-the-art review on bridge weigh-in-motion technology. *Advances in Structural Engineering*, 2016,19(9):1514-1530
- [166] 汪海燕, 黎建辉, 杨风雷. 支持向量机理论及算法研究综述. *计算机应用研究*, 2014, 031(005):1281-1286
- [167] J A K SuykensJ, Vandewalle. Least Squares Support Vector Machine Classifiers. *Neural Processing Letters*, 1999
- [168] Amari S, Wu S. Improving support vector machine classifiers by modifying kernel functions. *Neural Networks*, 1999, 12(6):783-789
- [169] 张茂雨. 支持向量机方法在结构损伤识别中的应用[同济大学博士学位论文]. 上海:同济大学, 2007
- [170] Platt J C. Fast Training of Support Vector Machines Using Sequential Minimal Optimization[M]// *Advances in kernel methods*. MIT Press, 1999
- [171] Wang T L, Huang D, Shahawy M. Dynamic Response of Multi-girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(8):2222-2238
- [172] E J O'Brien, Daniel Cantero, Bernard Enright, et al. Characteristic Dynamic Increment for extreme traffic loading events on short and medium span highway bridges. *Engineering Structures*, 32(12):3827-3835
- [173] Zhang Nan, He Xia. Dynamic analysis of coupled vehicle-bridge system based on inter-system iteration method. *Computers & Structures*, 2013,114: 26-34
- [174] 李紫玮. 基于深度学习理论的桥梁上车型识别与检测跟踪研究[湖南大学硕士学位论文].长沙:湖南大学, 2019
- [175] 郭正康. 汽车整车转动惯量的计算与选取. *汽车研究与开发*, 1993(6):42-44
- [176] 邓露, 段林利, 何维等. 中国公路车-桥耦合振动车辆模型研究. *中国公路学报*, 2018, 31(07):92-100
- [177] O'Brien E J, Cantero D, Enright B, et al. Characteristic Dynamic Increment for extreme traffic loading events on short and medium span highway bridges. *Engineering Structures*, 2010, 32(12):3827-3835
- [178] He W, Deng L, Shi H, et al. Novel virtual simply supported beam method for detecting the speed and axles of moving vehicles on bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 22(4): 04016141
- [179] 王宁波, 任伟新, 李苗. 基于影响线的桥梁移动荷载识别. *振动与冲击*, 2013, 32(03):139-143

致 谢

三年光阴，一闪而过，回顾研究生生涯，那些科研路上的付出、收获、欢笑、泪水还历历在目，恍如昨日。感谢一切的艰辛与磨难，让我历经锤炼、日益强大；感谢亲朋挚友的慰藉与相伴，让我脚踏实地、不忘初心。

在本人攻读硕士学位期间，导师周云教授给予了很多关怀和指导，在我一筹莫展时启发我的思路，在我懒惰懈怠时督促我进取，使我在科研方面养成了耐心钻研的好习惯，其传授的处事之道也让我终身受用。周云老师对待学术一丝不苟，对待生活幽默风趣，对待学生亦师亦友，感谢恩师提供的优秀科研资源和平台以及在研究课题、试验研究、毕业论文等方面给予的宝贵建议和无私帮助。

在科研与试验方面，何维博士给了我很多专业的建议和协助，优秀同门裴熠麟和吃苦耐劳的师弟赵瑜、阳建波、聂晶鑫等为我的试验顺利完成贡献了很多体力劳动与精神支持，在此衷心感谢每一位帮助过我的师兄师姐、师弟师妹。

最后要感谢父母的理解、包容与支持，在疫情期间努力为我创造舒适的学习环境，在生活上对我嘘寒问暖、无微不至，没有他们就没有我的今天。

感谢各位专家、教授在百忙之中对本论文的审阅！

周赛

2020年5月20日于湖南大学

附录A 攻读学位期间所发表的学术论文

- [1] Yun Zhou, Sai Zhou, Lu Deng, et al. Research on moving load identification based on measured acceleration and strain signals. *Lifecycle Performance Engineering*, 2019, 3(3-4): 257-288
- [2] 周云, 周赛, 裴熠麟等. 基于大数据与区间仿射算法的非接触式桥梁结构影响线识别. *地震工程与工程振动*. (录用)
- [3] Yun Zhou, Sai Zhou, Yilin Pei, et al. Non-contact bridge influence line identification based on big data and interval analysis with affine arithmetic. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*. (投稿)

附录 B 试验小车载重工况称重结果

载重工况	W1/kg	W2/kg	W3/kg
M0	5.600	4.770	3.300
M1	5.590	5.140	3.605
M2	5.590	5.520	3.915
M3	5.590	5.890	4.215
M4	5.858	6.270	4.525
M5	5.858	6.650	4.840
M6	5.580	7.025	5.155
M7	5.580	7.405	5.470
M8	5.585	7.780	5.780
M9	5.580	8.155	6.095
M10	5.580	8.530	6.410
M11	5.580	8.905	6.725
M12	5.580	9.280	7.040
M13	5.580	9.665	7.355
M14	5.580	10.040	7.665
M15	5.580	10.415	7.980
M16	5.580	10.795	8.295
M17	5.575	11.170	8.605
M18	5.565	11.545	8.925
M19	5.560	11.915	9.230
M20	5.560	12.290	9.545
M21	5.560	12.665	9.860
M22	5.560	13.045	10.160
M23	5.560	13.425	10.475
M24	5.565	13.795	10.785
M25	5.560	14.170	11.095
M26	5.560	14.550	11.405
M27	5.555	14.925	11.720
M28	5.545	15.305	12.030
M29	5.540	15.680	12.335

(续表)

载重工况	W1/kg	W2/kg	W3/kg
M30	5.540	16.050	12.660
M31	5.535	16.430	12.965
M32	5.530	16.800	13.280
M33	5.525	17.180	13.590
M34	5.520	17.580	13.905
M35	5.510	17.965	14.220
M36	5.505	18.350	14.520
M37	5.495	18.725	14.860
M38	5.490	19.110	15.180
M39	5.490	19.490	15.500
M40	5.555	19.860	15.820
M41	5.485	20.230	16.140
M42	5.480	20.600	16.460
M43	5.480	20.975	16.775