

中由静力荷载和振动引起的应变是和噪声不相关的，满足了自适应滤波器的使用条件，因此，本文提出的基于EMD对动应变信号进行分解得到静荷载位移，再通过对加速度信号进行自适应降噪后积分得到振动位移，最后对信号进行重组得到重构位移的方法是可行的。

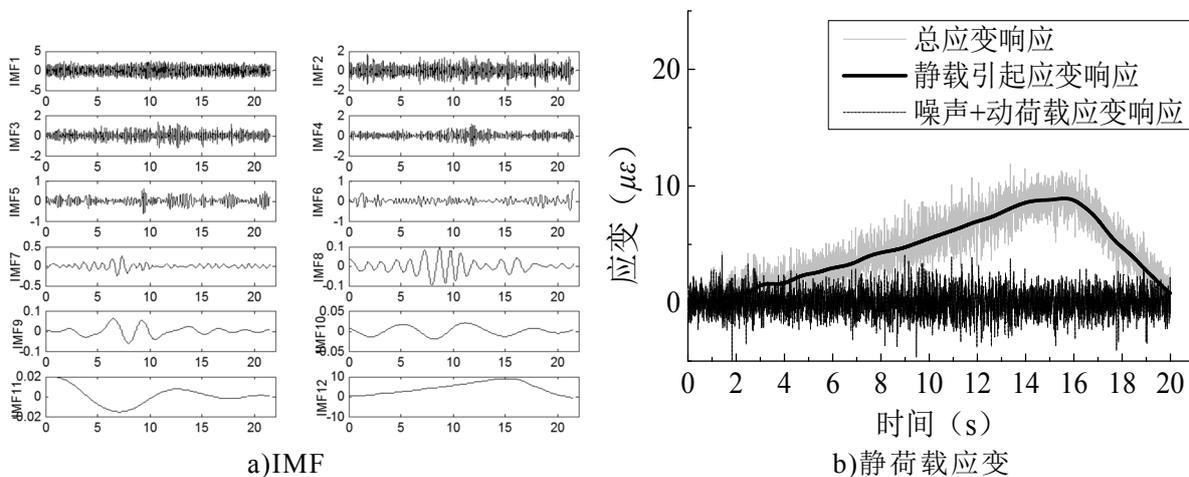


图 5.16 工况 12 测点 2 应变分解

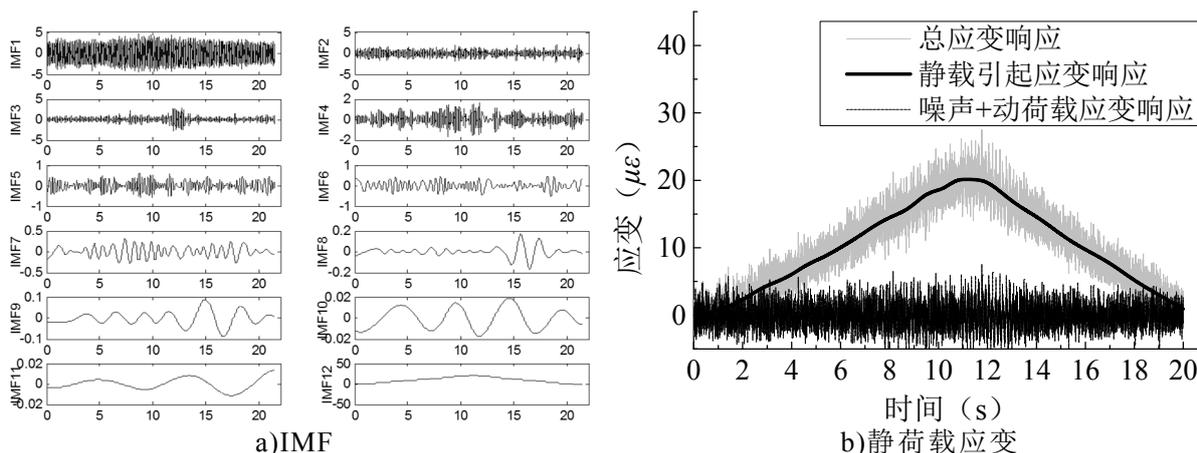


图 5.17 工况 12 测点 4 应变分解

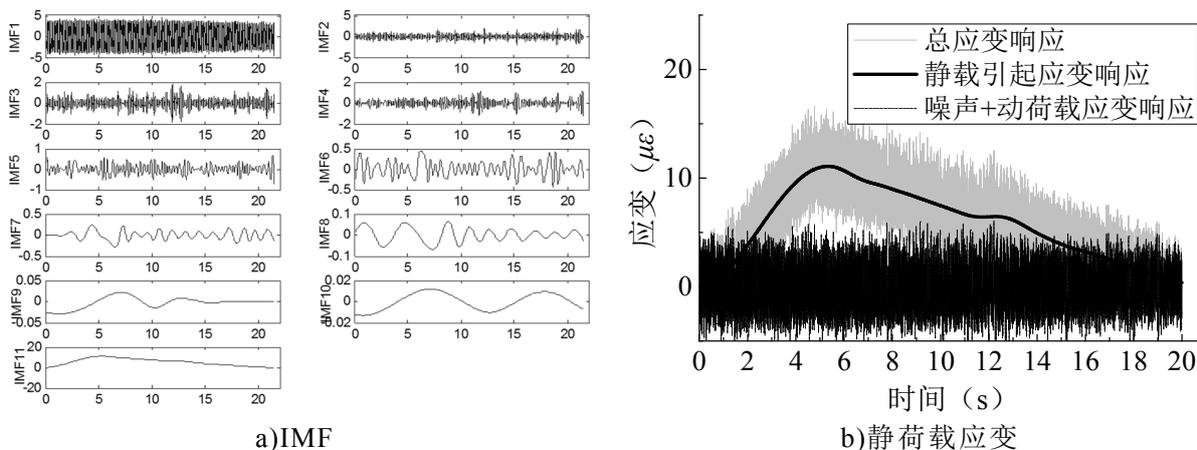


图 5.18 工况 12 测点 7 应变分解

从工况12和工况24小车通过桥梁结构时采集的动应变响应信号中可以看出，未经处理过的信号中包含有大量的噪声，高频部分主要由噪声与惯性力产生的振

动应变组成，通过EMD分解的方法，可以将低频的静力应变和低频动应变进行分离，各个测点分解的结果如图5.16-5.21所示，通过分解过后的信号变得平滑，移动荷载通过测点位置时应变达到峰值，能够反映静力荷载的最大值。通过分解得到的静力应变值可以进一步推算静荷载产生的位移响应，利用7个应变传感器测得的数据，可以采用上一章提到的最小二乘法拟合曲率函数，由于整个过程是一个时变过程，通过迭代算法算出每一个时刻曲率函数的各项系数，再通过代入测点2、4、7的横坐标得到静荷载位移识别值如图5.22、5.23所示。

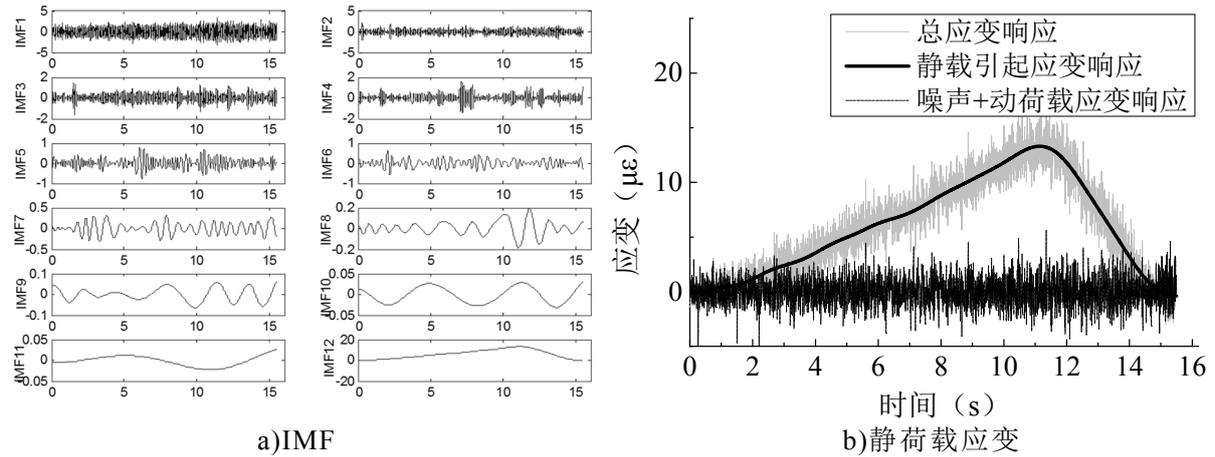


图 5.19 工况 24 测点 2 应变分解

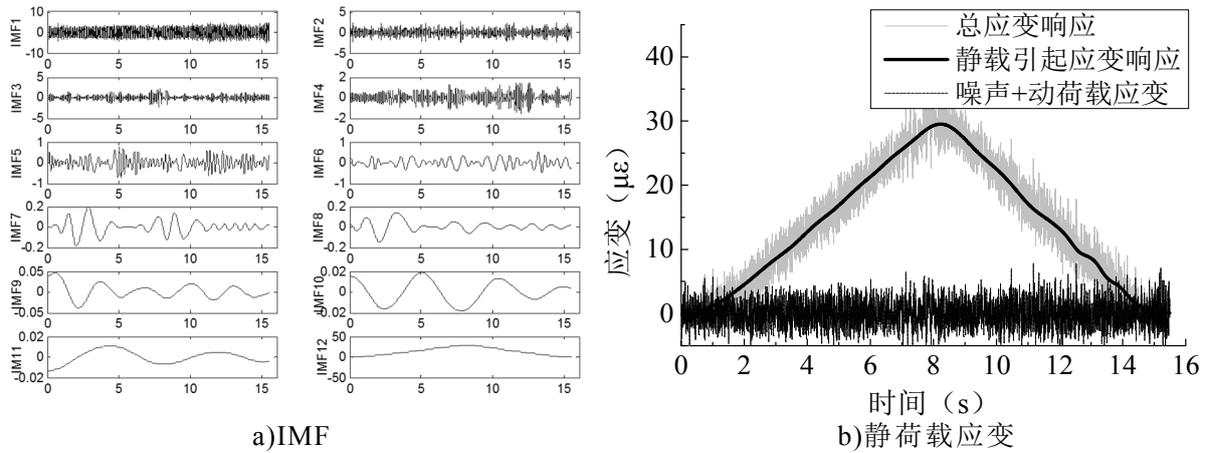


图 5.20 工况 24 测点 4 应变分解

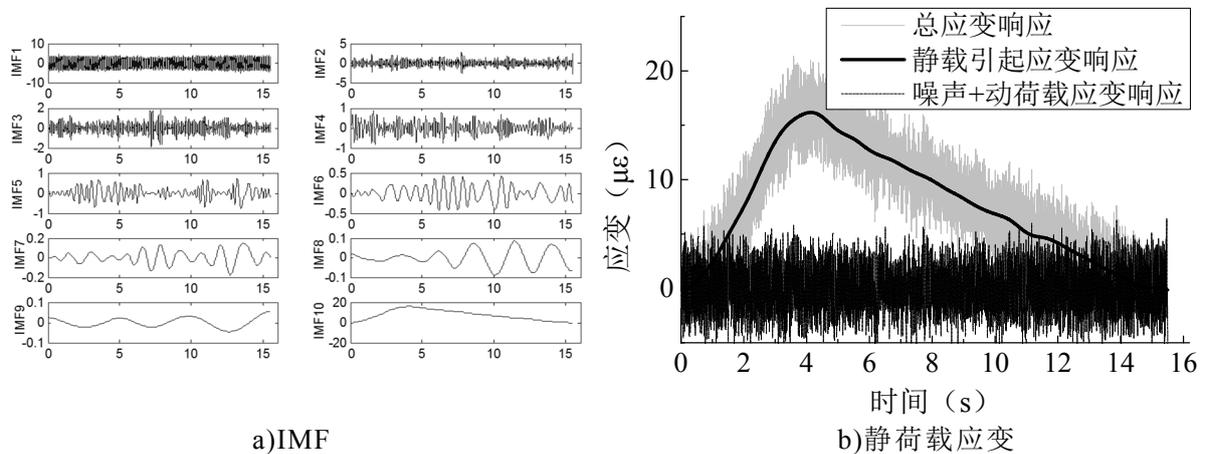


图 5.21 工况 24 测点 7 应变分解

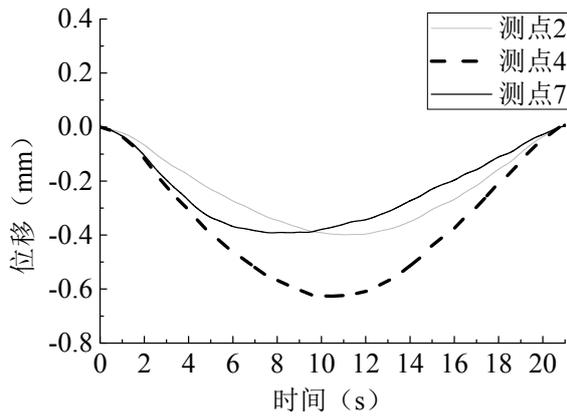


图 5.22 工况 12 静力位移识别结果

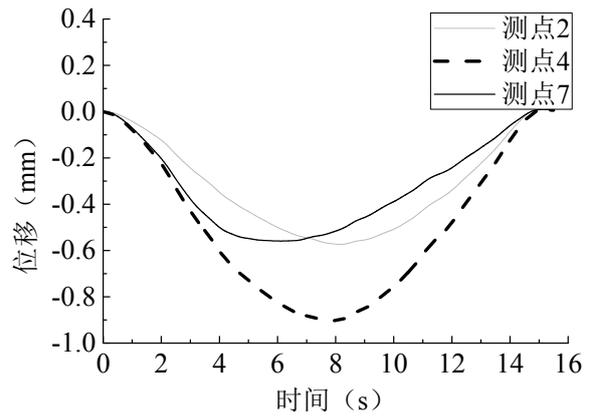


图 5.23 工况 24 静力位移识别结果

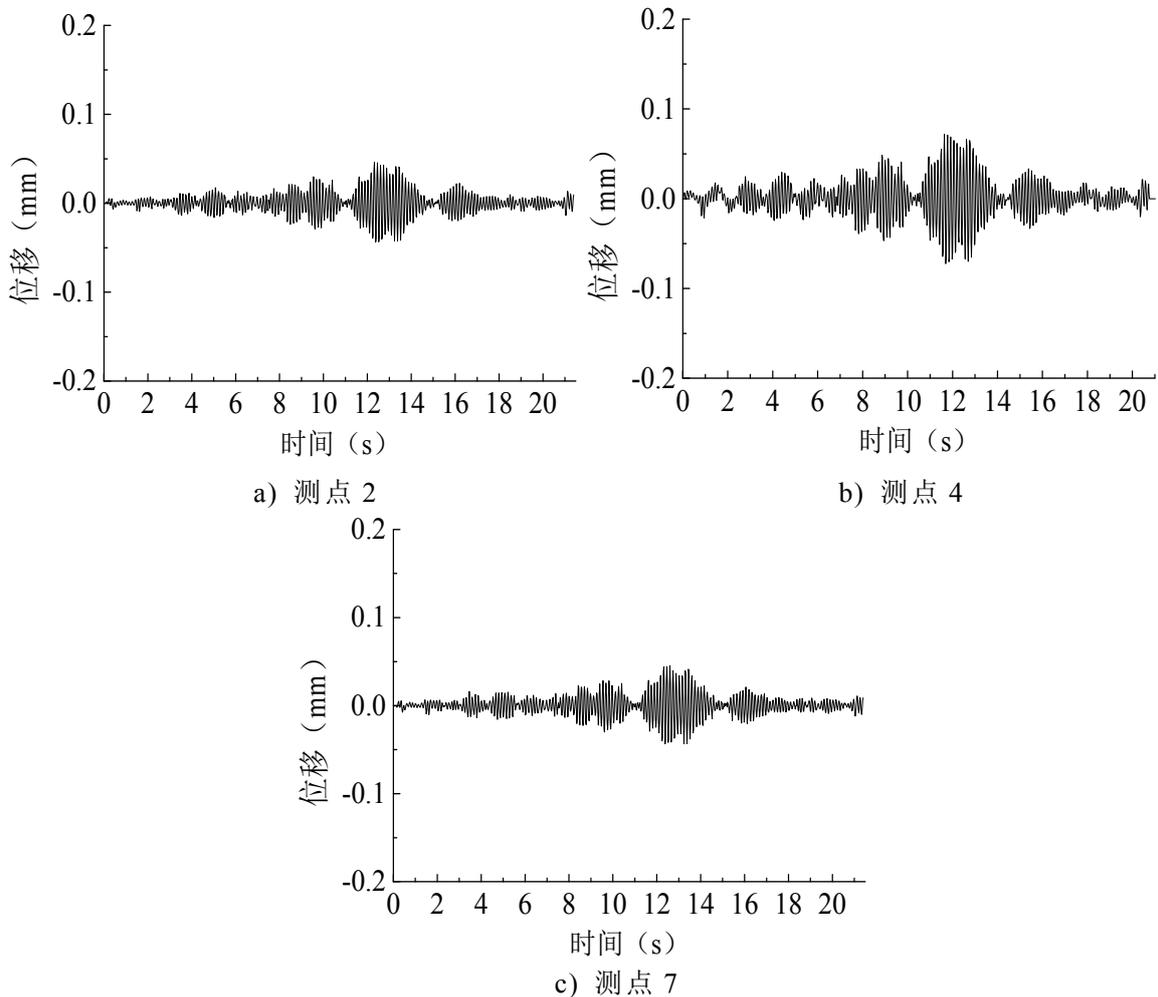


图 5.24 工况 12 振动位移识别

振动位移的识别由加速度计算得到，首先通过 LMS 的算法对采集的信号进行降噪，其中滤波阶数采用 100 阶，步长因子取 0.005。再利用 MATLAB 对信号进行频域积分计算得到速度和位移，由于车辆在上桥前和下桥后的一段时间里，结构会恢复到平衡状态，因此可根据初始及下桥后各个测点的速度、位移为零作为去趋势项条件，工况 12、24 计算得到的振动位移结果如图 5.24、5.25 所示，从图中的结果可以看出，当车速较低时（工况 12），模型车在行驶过程中与结构作用

的时间长，耦合作用更加充分，位移的高频振动比车速高（工况 24）时更加明显，由于实验板的表面并不是绝对的平整，当车速高时模型车会因表面平整度对结构产生激励作用，使结构的最大振动位移比低速时更大。同一工况的不同测点表现出来的位移变化趋势基本相同，其中距离跨中位置较近的测点动力响应更加明显，振动位移值也更大，通过信号处理后再进行数值计算的结果中并没有出现较大的趋势项使得信号失真，振动位移值在平衡位置附近变化，与实际情况相符。

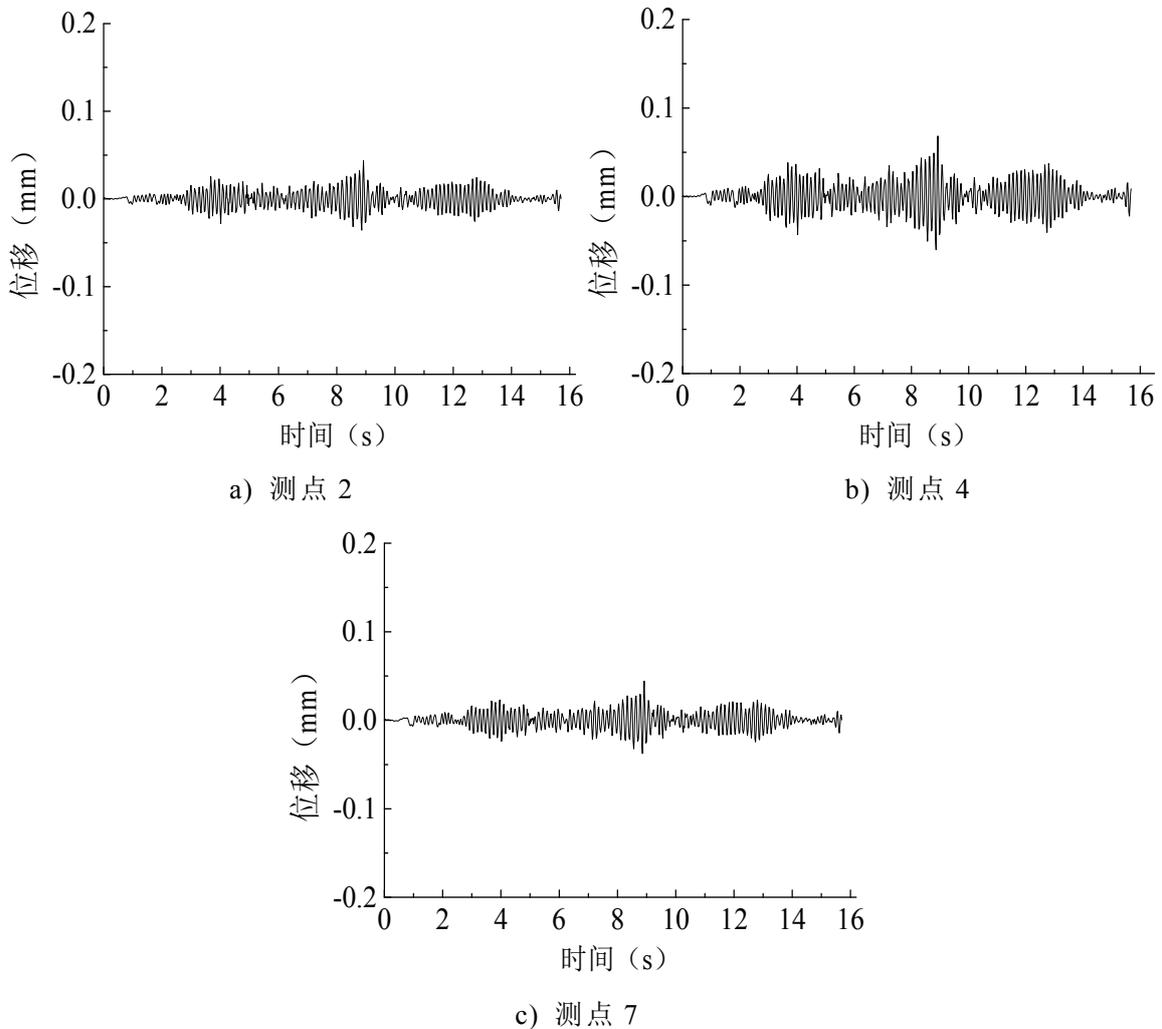


图 5.25 工况 24 振动位移识别

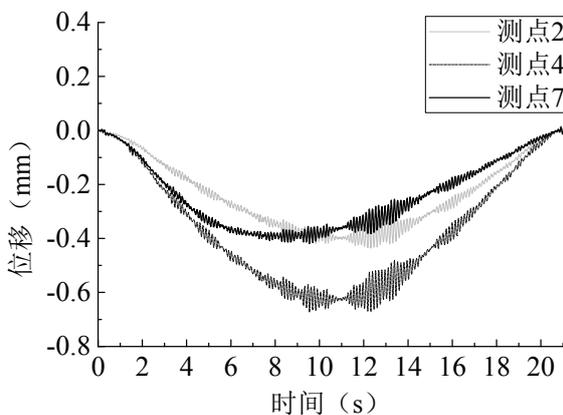


图 5.26 工况 12 各测点位移

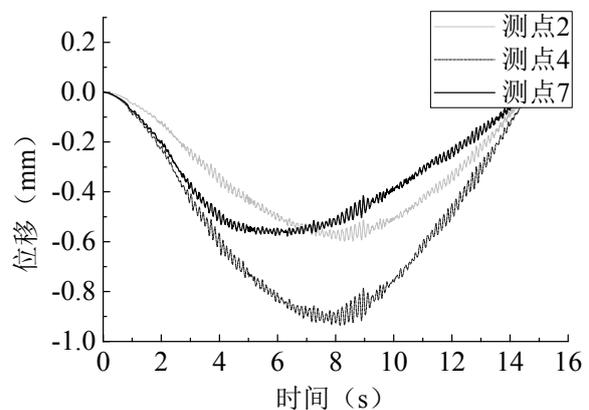


图 5.27 工况 24 各测点位移

由静位移和振动位移重构得到各个测点的位移值如图 5.26、5.27 所示，图 5.28、5.29 为测点 4 的重构位移和实测位移对比，对比两条曲线可以看出，重构的位移曲线与测点的实际位移曲线基本吻合，移动荷载经过测点正上方时的峰值误差不超过 3%，测点的挠度趋势与实际变形一致，表明利用 7 个测点的应变值进行结构的曲率拟合能够达到高精度的要求，加速度时域积分的方法也准确还原了各个时刻的振动位移。

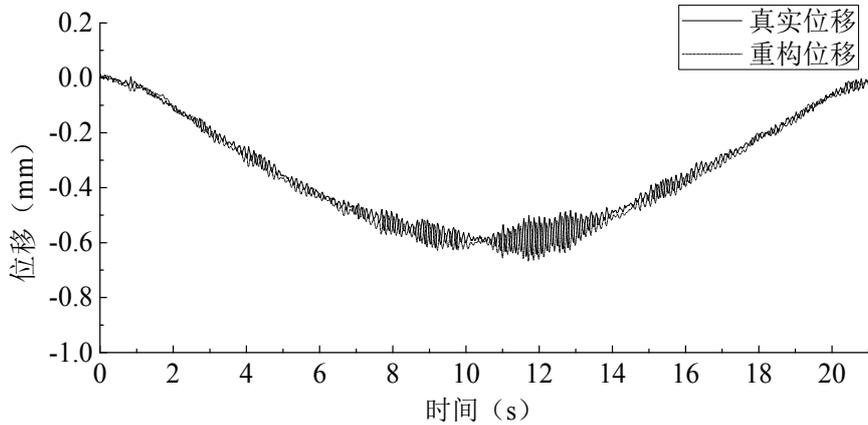


图 5.28 工况 12 测点 4 位移对比

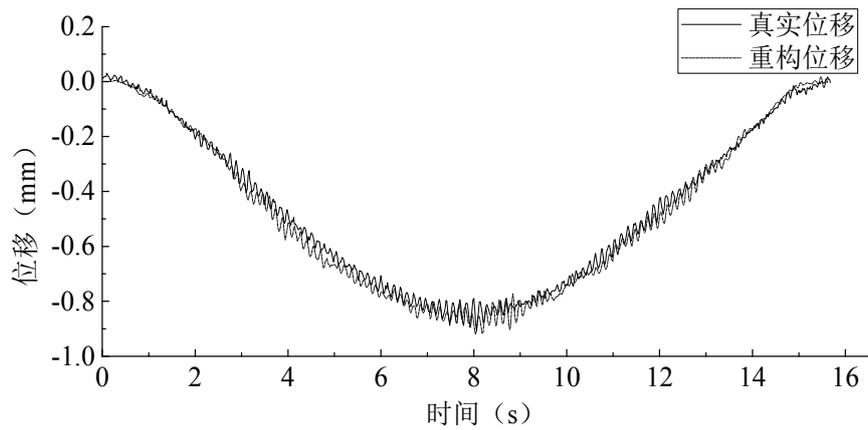


图 5.29 工况 24 测点 4 位移对比

表 5.6 测点 4 重构位移误差对比

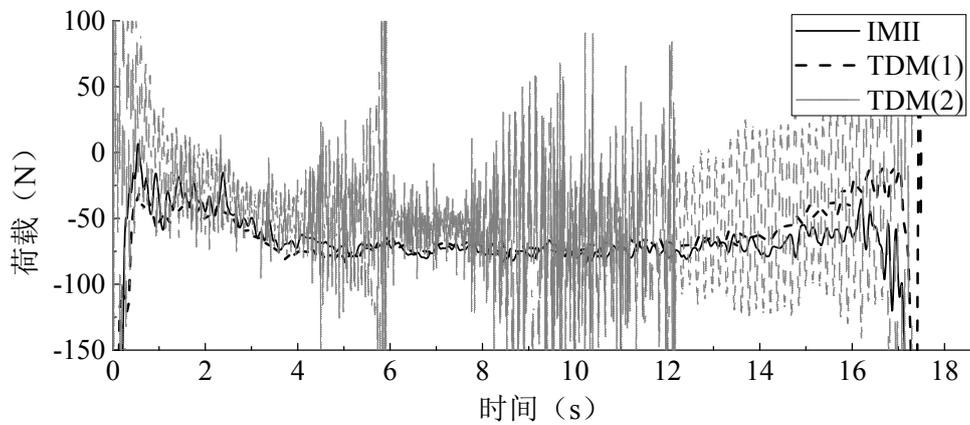
工况	$E_{r1}(\%)$	$E_{r2}(\%)$
12	1.71	4.53
24	1.54	5.07

从还原的位移可以看出，整个曲线的变形趋势并未明显体现模型车移动过程中单轴荷载通过测点时的信息，说明试验过程中采用的轴跨比偏小，而轴跨比是单个轴荷载识别精度的重要影响因素，从荷载识别结果也发现前后单轴识别的荷载比例相差较大，但是识别得到的总荷载值与实际情况偏差较小。通过重构后的位移信号进行不同工况下的荷载识别，识别的结果如图 5.30-5.39 所示，其中 IMII 代表降噪后用第二识别法识别的结果，TDM(1)代表降噪后信号基于奇异值分解法

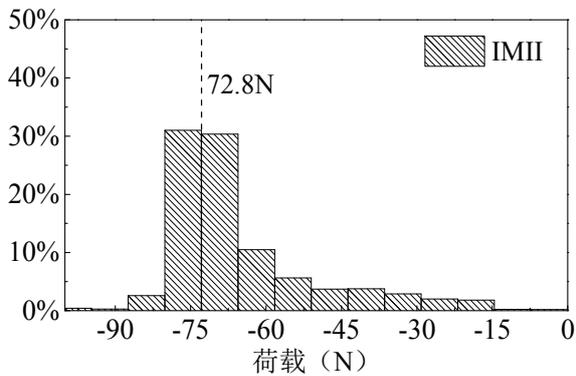
求解的结果，TDM(2)代表未经处理的信号直接采用伪逆求解的识别结果，考虑加载的砝码和模型车的整车质量，工况 1、5、10 的真实荷载为 72.8N；工况 12、15、19 的真实荷载为 122.8N；工况 21、24、27 的真实荷载为 172.8N；工况 31 的真实荷载为 222.8N。

表 5.7 各工况真实荷载

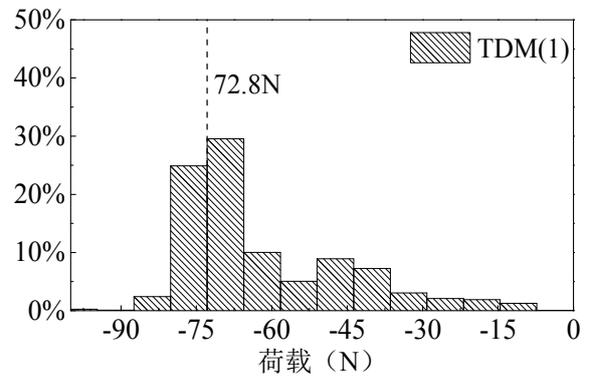
工 况	真实荷载 (N)
1、5、10	72.8
12、15、19	122.8
21、24、27	172.8
31	222.8



a) 荷载识别曲线

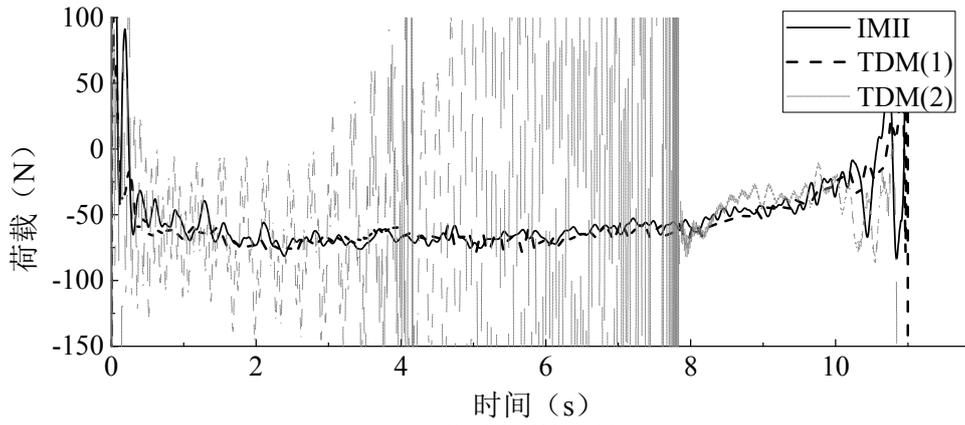


b) IMII 识别结果统计

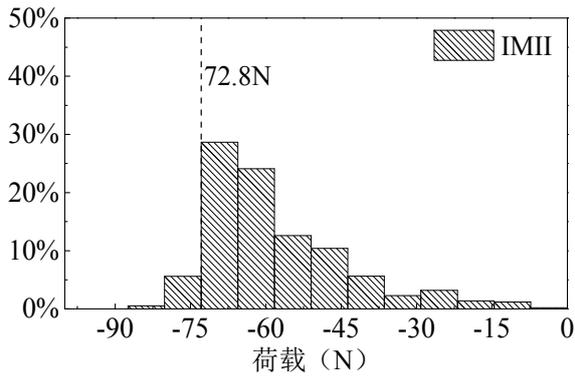


c) TDM 识别结果统计

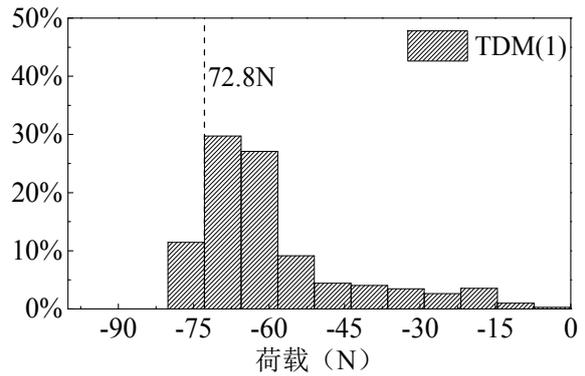
图 5.30 工况 1 荷载识别结果



a) 荷载识别曲线

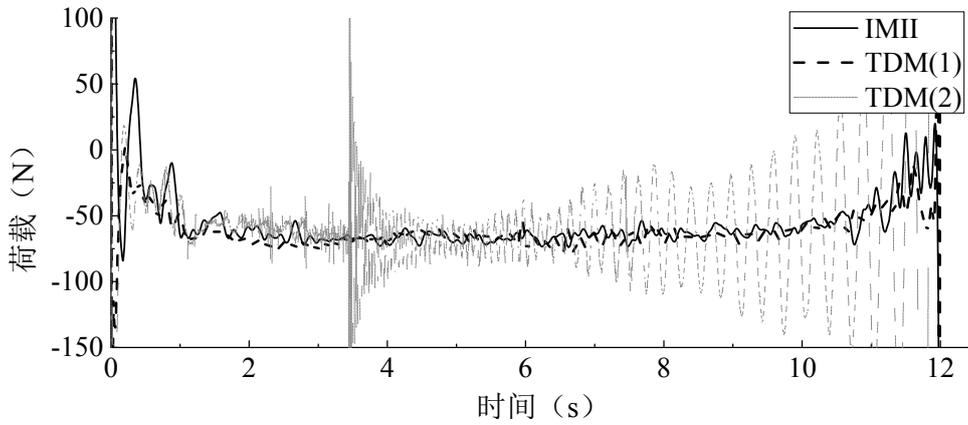


b) IMII 识别结果统计

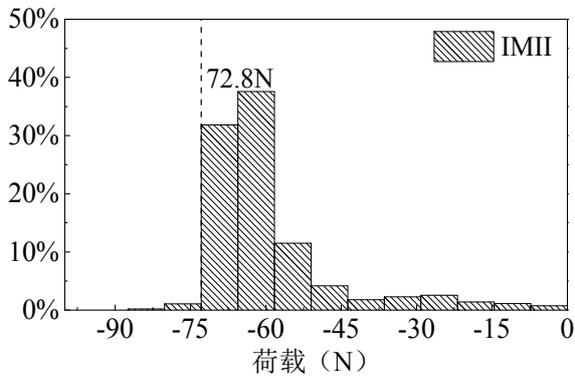


c) TDM 识别结果统计

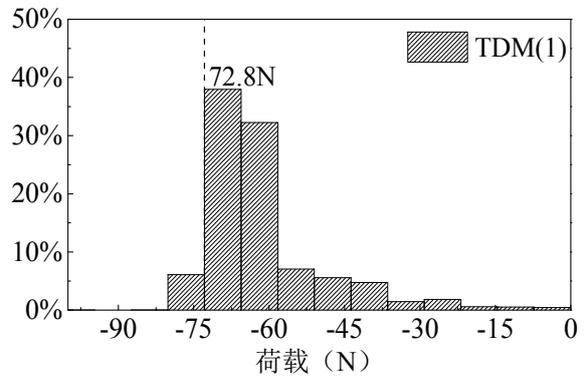
图 5.31 工况 5 荷载识别结果



a) 荷载识别曲线

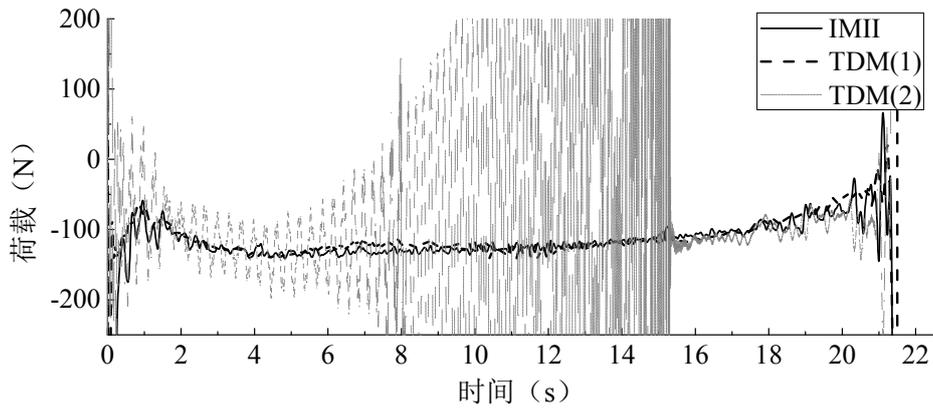


b) IMII 识别结果统计

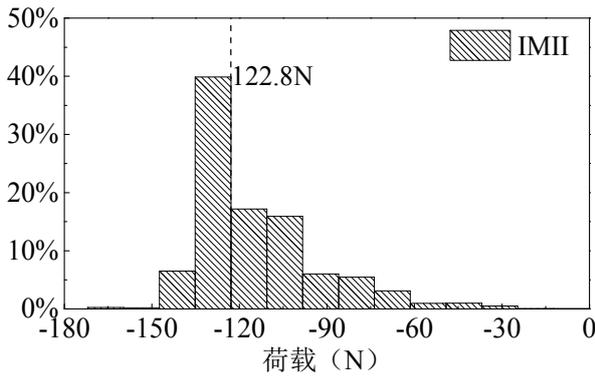


c) TDM 识别结果统计

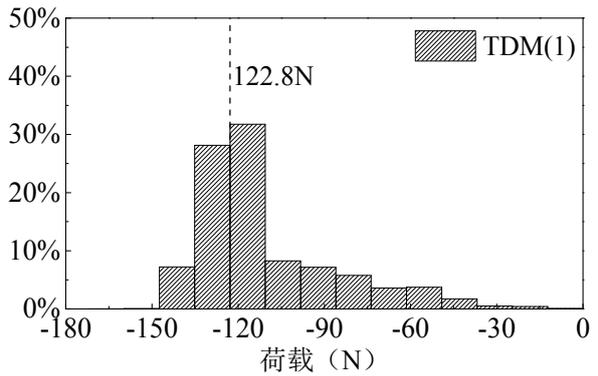
图 5.32 工况 10 荷载识别结果



a) 荷载识别曲线

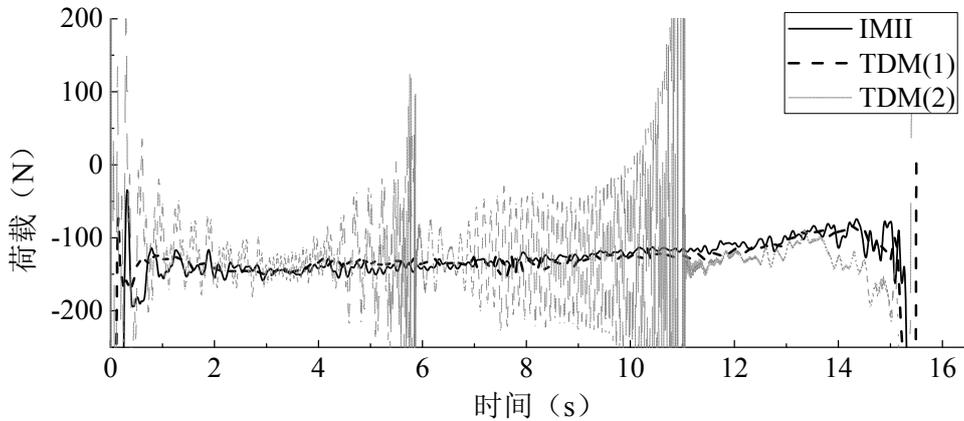


b) IMII 识别结果统计

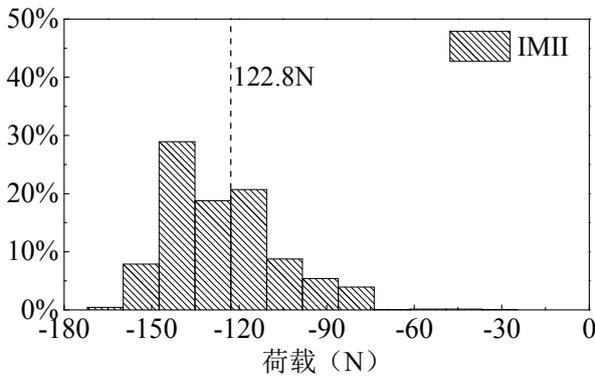


c) TDM 识别结果统计

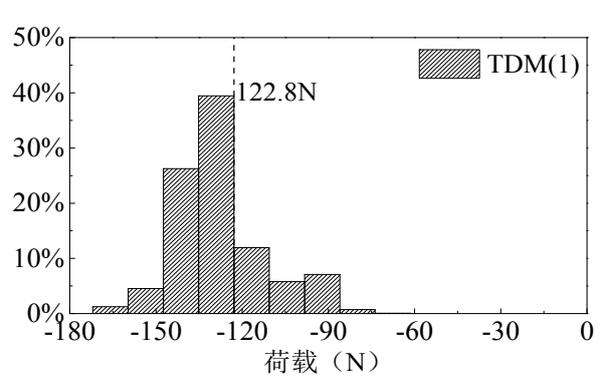
图 5.33 工况 12 荷载识别结果



a) 荷载识别曲线

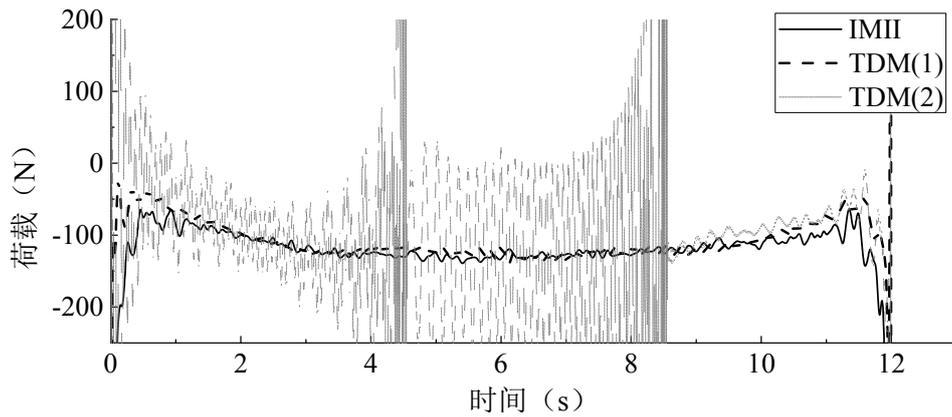


b) IMII 识别结果统计

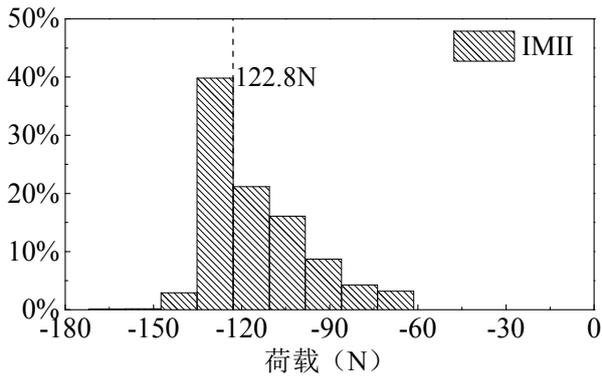


c) TDM 识别结果统计

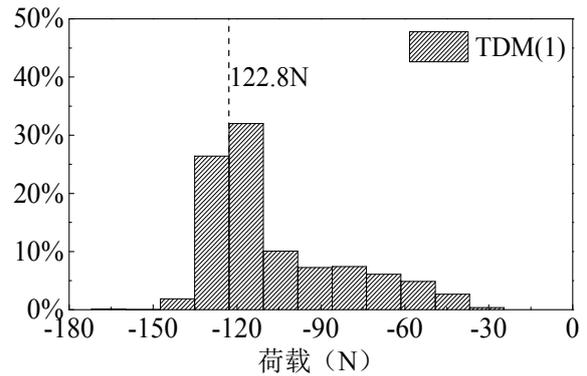
图 5.34 工况 15 荷载识别结果



a) 荷载识别曲线

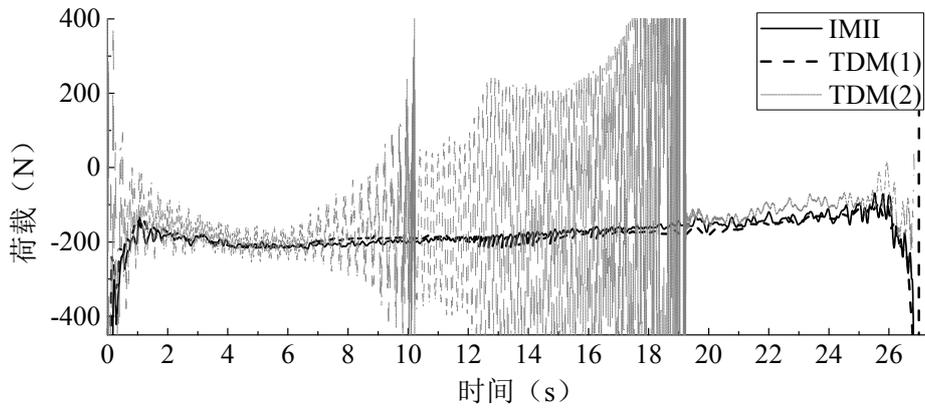


b) IMII 识别结果统计

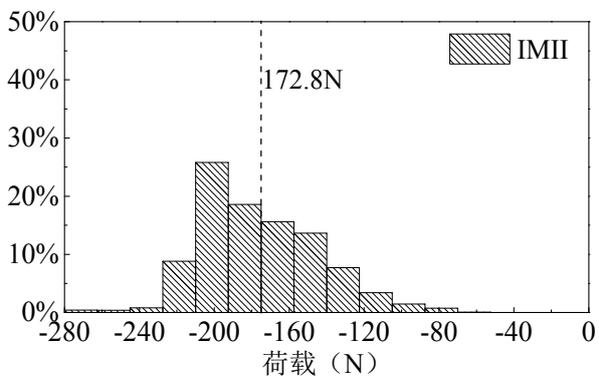


c) TDM 识别结果统计

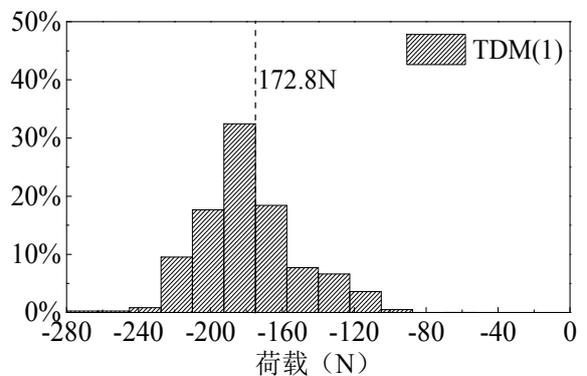
图 5.35 工况 19 荷载识别结果



a) 荷载识别曲线

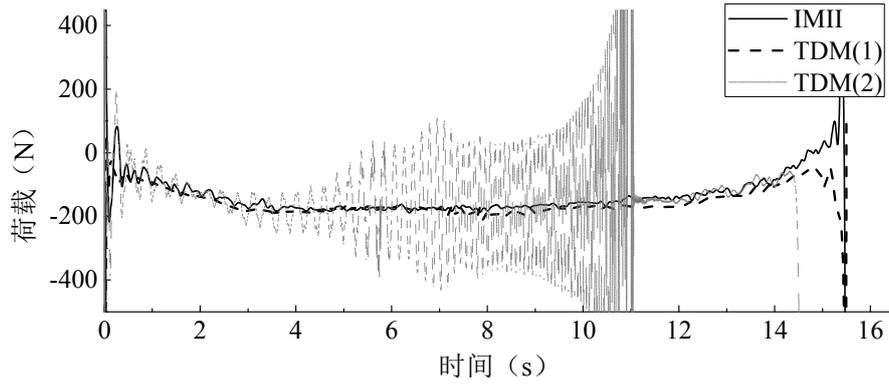


b) IMII 识别结果统计

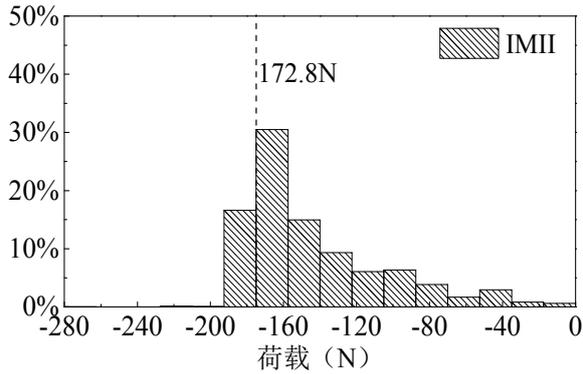


c) TDM 识别结果统计

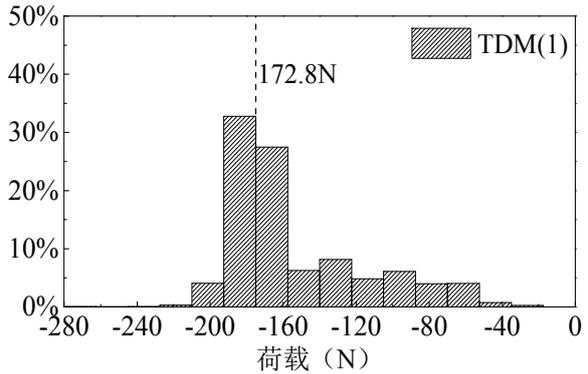
图 5.36 工况 21 荷载识别结果



a) 荷载识别曲线

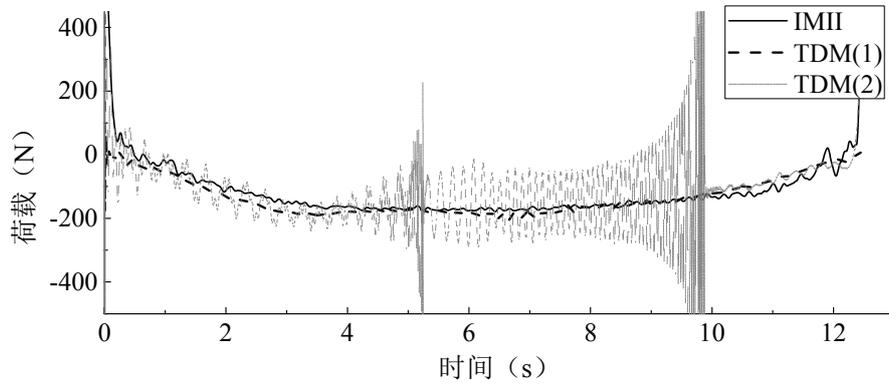


b) IMII 识别结果统计

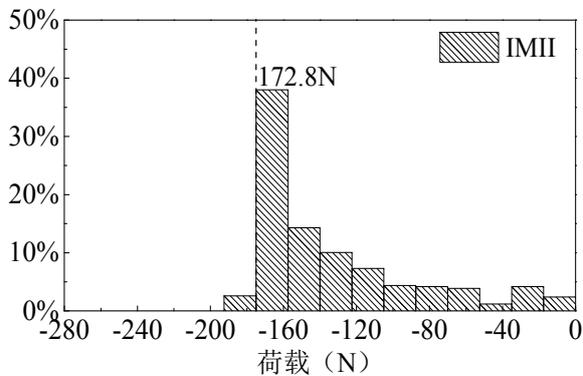


c) TDM 识别结果统计

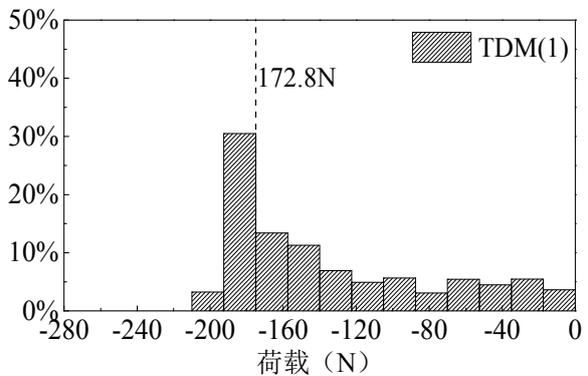
图 5.37 工况 24 荷载识别结果



a) 荷载识别曲线



b) IMII 识别结果统计



c) TDM 识别结果统计

图 5.38 工况 27 荷载识别结果

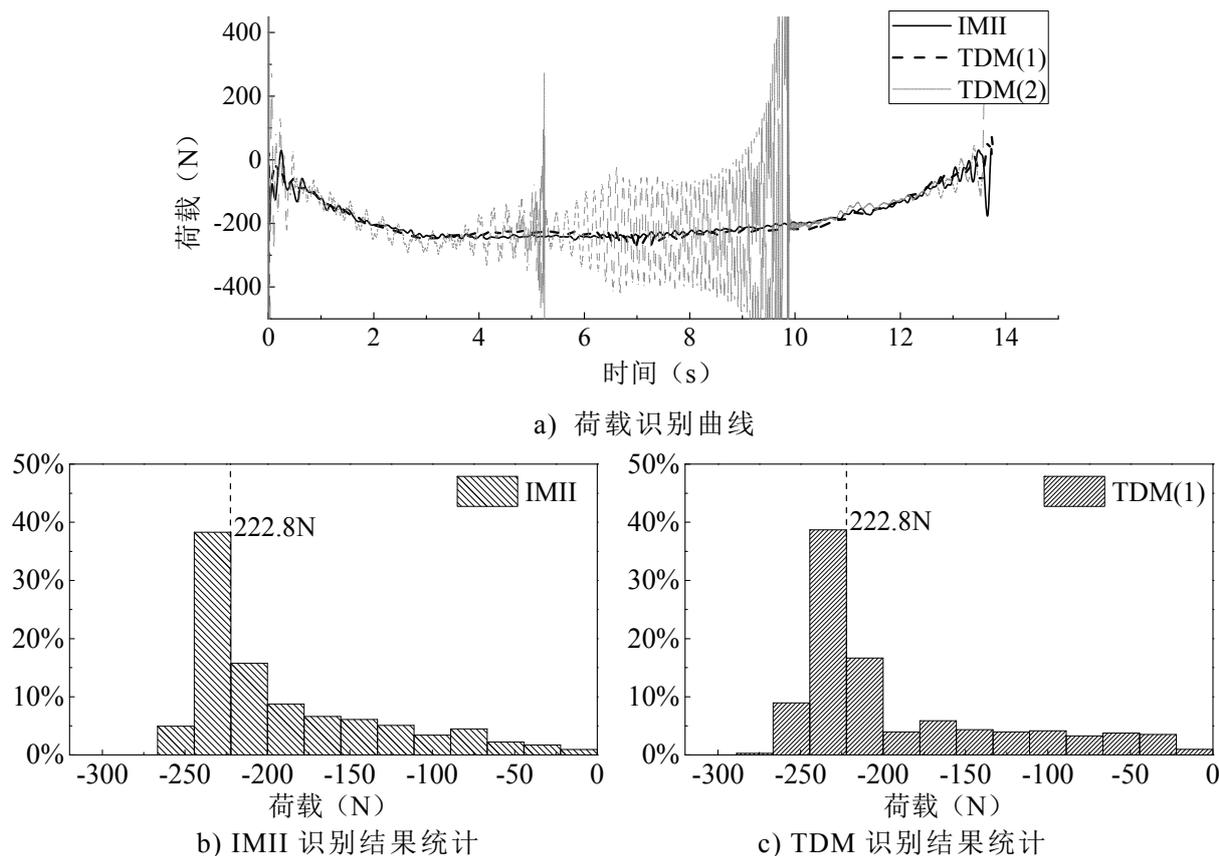


图 5.39 工况 31 荷载识别结果

从荷载识别的结果可以看出，IMII 和 TDM 的方法针对各种不同的工况都可以准确识别出荷载的大小，且大部分工况下两种方法识别出来的结果都一致，相比之下 IMII 识别方法的耗时比 TDM 方法要小得多，未经过信号处理直接采用 TDM 方法进行识别会导致方程组的严重病态，得到的荷载结果不稳定。对大部分工况来说通过位移重构的方法能够得到与实际情况相符的位移信号，个别情况下由于积分产生的趋势项或者应变信号的 EMD 分解过程中存在零点位置偏移导致该部分产生的误差累积到了动位移信号中，致使荷载识别的结果存在轻微的趋势项，如工况 12；当车速较慢的时候，识别的荷载统计结果基本集中在真实荷载 $\pm 7\%$ 的范围内，随着车速的增加，误差略有增大，如工况 10、19。由于移动荷载上桥和下桥期间荷载识别会出现较大的震荡值，对识别荷载的统计结果产生了一定的影响。

5.2.5 本章小结

本章主要介绍了移动荷载的试验以及通过重构动位移的方法进行移动荷载的识别，首先利用动力试验和模态分析得到了桥梁的动力特性，再通过加载砝码的方式对桥梁模型的特性和应变片进行标定，得到了桥梁的抗弯刚度和各个应变通道的标定系数，最后进行数据的采集和分析得到移动荷载的识别结果，通过试验

验证了动位移重构方法的正确性且信号的优化处理能提高移动荷载识别的精度，得到的结论如下：

(1) IMII 的识别方法在识别的时效性上比 TDM 更好，但是该识别方法对噪声更加敏感，通过信号处理的方法对信号进行分解和重构能得到含噪声小且与实际结果相符的信号。

(2) 基于自适应降噪的方法进行信号的预处理能有效地消除与信号不相关的噪声，减少噪声在积分过程中的误差累积，最小二乘法在消除一次积分趋势项中有较好的效果，而对于二次累积的趋势项效果不明显。

(3) 虽然识别的结果精度能够满足要求，但是由于信号分解和重构过程中容易累积趋势项而导致识别的结果中也包含了趋势项引起的误差。

(4) 试验准备过程中的刚度标定和应变传感器的标定消除了因为布设测点时的位置偏差和刚度变化引起的识别误差，保证了后期移动荷载试验过程中数据采集和计算中各个参数的准确性。

(5) 对于动位移的重构，采用本文的方法得到的数据均较为合理，试验中测点 4 重构得到的位移信号与实测位移吻合度很高，识别最大挠度和实际最大挠度误差不超过 3%，采用本文提到的方法能有效地还原结构各个测点的实际位移。

结 论

移动荷载识别属于第二类反问题求解的范畴，属于结构健康监测领域研究的内容，本文在总结现有移动荷载识别研究的成果后，提出了通过信号重构来解决荷载识别过程中对噪声敏感的问题，通过重构方法得到了移动荷载作用在简支梁结构上的动位移，再利用重构的测点动位移进行了移动荷载识别，重构后的信号进行荷载识别能够减小反问题求解过程中方程存在的不适定性，使荷载识别的结果更加稳定可靠。动位移信号的重构主要做了两部分的工作，首先对动态应变信号进行分解，得到由车辆静力部分引起的应变，即 EMD 分解的低频信号，通过应变和挠度的关系，求得静力部分引起的结构竖向位移；其次对降噪后的加速度信号进行频域积分，得到了车辆惯性力引起的结构振动位移，由二者进行重构获得测点的动位移值。在信号的降噪和积分过程中分别引入了自适应滤波的 LMS 算法和频域积分算法，实现了加速度信号向速度信号转换的过程。基于重构的位移信号进行荷载识别，进行了 ANSYS 的数值模拟和试验验证，研究得到的结论如下：

(1) 通过信号数值处理部分的算例可以看出，频域积分方法比时域积分的精度更高，高频噪声在积分过程中对信号的影响会减小，低频噪声积分后对信号的影响会增大，影响加速度的数值积分过程中，由于趋势项和噪声的存在，会使得数值积分的结果产生很大的误差，严重偏离了真实的信号，而通过引入合适的信号降噪方法可以减小噪声在积分过程中带来的影响，同时采用最小二乘法拟合趋势项的方法，消除积分过程中的趋势项，但是对于许多初始运动状况未知的情况，积分过程中很难将速度和位移的初始直流分量与趋势项分离，此时的最小二乘法拟合去趋势项的方法会失效。

(2) 自适应降噪的 LMS 算法对含噪声的信号处理有着不错的效果，对于平稳信号和非平稳的信号都能很直观地减小噪声对信号的污染，提高信噪比，但是自适应降噪的效果和计算速度会受到收敛因子的影响，收敛因子取值的确定需要进行大量的试算，当它的取值不合理的时候降噪的结果会受到较大影响。

(3) 由于车辆通过桥梁所需的时间一般都大于桥梁的固有周期，因此桥梁在移动车辆作用下的振动是以静力位移为中心做周期振动的，基于这一理论将静荷载引起的应变信号从应变结果中分离出来，确定了测点在每一时刻的平衡位置，避免了测试过程中由于环境干扰和仪器因素所引起的误差，通过应变信号进行计算得到静荷载位移曲线，较多的测点数能够得到与实际更加吻合的静荷载挠度曲线。

(4) 在进行数值模拟的过程中，探讨了不同的车桥模型参数对桥梁动力响应

的影响，当车速较大时，荷载的惯性力较大，桥梁的振动位移也更加明显，采用的两轴时变车辆模型对于研究荷载识别问题并无影响。基于荷载识别的基本理论，利用重构后的位移信号进行了荷载识别，从荷载识别的结果可以看出，对于不同车速和不同荷载作用时的多个工况，都能够准确地识别出结果，识别的过程受到信号噪声干扰较小，荷载识别结果未出现由于方程的求解病态而不稳定的情况，通过 IMII 的方法求解比 TDM 方法更加省时，在计算过程中，位移积分过程中残存的微弱趋势项对荷载识别的结果影响并不大，可见荷载识别过程中误差主要来源于高频噪声。

(5) 简支板的试验验证了基于重构动位移进行移动荷载识别的可行性，首先利用动力试验和模态分析得到了桥梁的动力特性，以此为基础，通过不同荷载和车速条件下的加速度和应变响应实现了位移的重构，对比监测得到的实际位移，重构的结果较好地还原了真实位移，峰值误差和相对误差都在比较合理的范围，实验模型小车的轴距会影响到单个轴荷载的识别精度，但是对于识别的车辆总荷载影响不大。

本文在研究方向上主要侧重信号的处理以及荷载识别的计算，在数值模拟和试验过程中，部分理论和算法还需要进行更深一步的完善，结合本文所做的内容，可以从以下方面继续深入研究：

(1) 对于噪声成分较简单的加速度信号，LMS 降噪的方法基本能够较好的处理，而对于信噪比较低的情况，由于梯度估计较为困难，权系数和均方误差不容易收敛，需要有更精确的梯度估计方法，变步长的 LMS 算法可以在计算过程中带来更好的适应性。

(2) 虽然信号处理能够通过降低噪声干扰来对数值计算的结果进行优化，但是趋势项的积累却有可能引起信号的漂移带来更大的误差，影响积分精度的主要噪声集中在低频部分，对于初始运动状态未知的系统趋势项去除仍然存在困难，需要有更加有效方法将积分趋势项与初始状态直流分量进行分离，提升积分结果的可靠性。

(3) 在对大跨度桥梁的动力响应进行测试的过程中，最大的困难在于如何简便且高精度地获取数据，现有的传感器基本都需要连接线缆进行数据传输，在安装上不方便，相比之下无线传感器没有线缆的束缚安装更加方便，但是数据采集过程中容易受到外界环境的干扰，得到的数据稳定性不足，因此实现简便且高精度的数据采集是十分有必要的。

参考文献

- [1] 陈彦江,张春秋.公路桥梁车辆荷载的动力作用.工程力学, 1997(a03):265–270
- [2] 胡汉舟.桥梁事故及经验教训.桥梁建设, 2002(3):71–75
- [3] 张启伟.大型桥梁健康监测概念与监测系统设计.同济大学学报自然科学版, 2000, 29(6):65–69
- [4] 胡少伟.结构振动理论及其应用.中国建筑工业出版社, 2005:16–21
- [5] 陈锋.复杂桥梁结构移动荷载识别的理论与试验研究.天津大学, 2006:3–5
- [6] Moses F. Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges. Asce, 1979, 105(3):233–249
- [7] Snyder R E, Moses F, Burke B E, et al. Bridge weigh-in-motion system: US, US 5111897 A. 1992:4–9
- [8] Peters R J. An Unmanned and Undetectable Highway Speed Vehicle Weighing System. Australian Road Research Board Proceedings, 1986: 70–83
- [9] Chapuis M, Bernard V. Collection and analysis of requirements as regards weighing vehicles in motion. Brussels: European Cooperation in Science and Technology, 1996:2–3
- [10] Jacob B, O'Brien E J. EUROPEAN SPECIFICATION ON WEIGH-IN-MOTION OF ROAD VEHICLES (COST323) // European Conference on Weigh-In-Motion of Road Vehicles. 1998:2–4
- [11] O'Brien E, Znidaric A, Ojio T. Bridge weigh-in-motion: latest developments and applications worldwide//International Conference on Heavy Vehicles. Proceedings of 2590 Particle Accelerator Conference, 2008:39–56
- [12] Miao T. Bridge Live Load Models With Special Reference to Hong Kong. ProQuest, UMI Dissertations Publishing, 2001:7–8
- [13] Fu G, You J. Truck loads and bridge capacity evaluation in China. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(5):327–335
- [14] 应天益. 基于 WIM 数据的桥梁汽车荷载及其效应分析. 同济大学, 2009:136–144
- [15] J Zhao , H Tabatabai. Evaluation of a Permit Vehicle Model Using Weigh-in-Motion Truck Records. Journal of Bridge Engineering, 2012 , 17 (2) :389–392
- [16] 杨飞.基于实测数据与 CA 交通流模型的桥梁汽车荷载研究.长安大学, 2014:12–17
- [17] 潘文辉. WIM 车辆动态称重系统的设计与实现. 电子科技大学, 2014:9–11

- [18] 王昶.动态称重系统的动态干扰因素分析和抑制.中国交通信息化, 2011(5):74–79
- [19] 傅志方,华宏星.模态分析理论与应用.上海交通大学出版社, 2000:33–35
- [20] O'Connor C, Chan T H T. Dynamic wheel loads from bridge strains. *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114(8): 1703–1723
- [21] Law S.S, Chan T H T, Zeng Q H. Moving force identification: a time domain method. *Journal of Sound and vibration*, 1997, 201(1): 1–22
- [22] Law S.S, Chan T H T, Zeng Q H. Moving force identification—a frequency and time domains analysis. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 1999, 121(3): 394–401
- [23] Chan T H T, Law S.S, Yung T H, et al. An interpretive method for moving force identification. *Journal of sound and vibration*, 1999, 219(3): 503–524
- [24] Chan T H T, Yu L, Law S.S. Comparative studies on moving force identification from bridge strains in laboratory. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 235(1): 87–104
- [25] Chan T H T, L. YU, Law S.S, et al. MOVING FORCE IDENTIFICATION STUDIES, I: THEORY. *Journal of Sound & Vibration*, 2001, 247(1):59–76
- [26] Law S.S, Fang Y L. MOVING FORCE IDENTIFICATION: OPTIMAL STATE ESTIMATION APPROACH. *Journal of Sound & Vibration*, 2001, 239(2):233–254
- [27] Zhu X Q, Law S.S. MOVING FORCES IDENTIFICATION ON A MULTI-SPAN CONTINUOUS BRIDGE. *Journal of Sound & Vibration*, 1999, 228(2):377–396
- [28] Zhu X Q, Law S.S. Identification of moving loads on an orthotropic plate. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2001, 123, 238–244
- [29] Zhu X Q, Law S.S. Dynamic axle and wheel loads identification: laboratory studies. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 268, 855–879
- [30] Law S.S, Lu Z R. Time domain response of a prestressed beam and prestress identification. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 288, 1011–1025
- [31] Chan T H T. Theoretical study of moving force identification on continuous bridge. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295(1), 77–95
- [32] 袁向荣, T. Chan. 由响应识别桥上移动荷载. *工程力学*, 1997, 14(4):89–97
- [33] 余岭, 陈鸿天, 罗绍湘. 用时域法和频-时域法识别桥面移动车载. *工程力学*, 2001, 18(5):100–107
- [34] 余岭, 陈鸿天, 罗绍湘. 移动车载识别的两种解法及其试验验证. *长江科学院院报*, 2001, 18(5):84–87

- [35] 卜建清,罗韶湘,朱信群. 由状态变量识别板梁桥上移动荷载. 振动与冲击, 2005, 24(4):1-5
- [36] 李忠献,陈锋. 简支梁桥与多跨连续梁桥上移动荷载的识别与参数分析. 工程力学, 2006, 23(12):91-99
- [37] 陈锋. 复杂桥梁结构移动荷载识别的理论与试验研究. 天津大学, 2006:17-21
- [38] 李忠献,陈锋. 基于梁格法的桥梁移动荷载识别. 土木工程学报, 2006, 39(12):83-87
- [39] 余岭,朱军华,陈敏中等. 基于矩量法的桥梁移动车载识别试验研究. 振动与冲击, 2007, 26(1):16-20
- [40] 余岭,陈震. 桥梁移动荷载识别的不适用性及其试验研究. 振动与冲击, 2007, 26(12):6-9
- [41] 陈震,余岭,朱军华. 基于预处理共轭梯度法的桥梁移动荷载识别. 长江科学院院报, 2008, 25(2):69-71
- [42] 陈震,余岭. 桥梁移动荷载识别及其PCGM预优矩阵选取. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(7):1293-1296
- [43] 韩万水,李彦伟,乔磊等. 基于车-桥耦合振动理论的移动荷载识别. 中国公路学报, 2013, 26(1):74-86
- [44] 尧云涛. 由响应识别桥上的移动荷载. 西南交通大学, 2004:33-37
- [45] 张德丰. MATLAB 数值分析与仿真案例. 清华大学出版社, 2011:75-81
- [46] 高宝成,刘红霞,杨叔子. 神经网络用于结构动荷载识别的研究. 郑州大学学报工学版, 1996(2):91-94
- [47] 王贵. 基于遗传算法的正则化方法研究及应用. 湖南大学, 2007:15-18
- [48] 赵玉成,袁树清,李舜酪等. 动态载荷的小波正交算子变换识别法. 机械强度, 1998(2):127-130
- [49] 王福天. 车辆系统动力学. 中国铁道出版社, 1994:33-37
- [50] 李小珍. 高速铁路列车-桥梁系统耦合振动理论及应用研究. 西南交通大学, 2000:32-33
- [51] Yang Y B, Lin B H. Vehicle-Bridge Interaction Analysis by Dynamic Condensation Method. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(11):1636-1643
- [52] 曾庆元. 弹性系统动力学总势能不变值原理. 华中科技大学学报自然科学版, 2000, 28(1):1-3
- [53] 曹雪琴. 钢桁梁桥横向振动. 中国铁道出版社, 1991:11-15
- [54] 夏禾,张楠. 车辆与结构动力相互作用. 科学出版社, 2005:42-44
- [55] 阎贵平,夏禾. 铁路斜拉桥的地震响应特性研究. 北京交通大学学报,

- 1995(2):137–142
- [56] 沈锐利. 高速铁路简支梁桥竖向振动响应研究. 中国铁道科学, 1996(3):24–34
- [57] Green M F, Cebon D. Dynamic Response of Highway Bridges to Heavy Vehicle Loads: Theory and Experimental Validation. *Journal of Sound & Vibration*, 1994, 170(1):51–78
- [58] 李小珍, 马文彬, 强士中. 车桥系统耦合振动分析的数值解法. 振动与冲击, 2002, 21(3):21–25
- [59] 朱军华, 余岭. 桥梁移动荷载识别的几个问题. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(s2):29–33
- [60] 戴恩彬. 应变模态分析及参数识别. 中南大学, 2010:25–27
- [61] 李德葆, 陆秋海, 秦权. 承弯结构的曲率模态分析. 清华大学学报自然科学版, 2002, 42(2):224–227
- [62] Huang N E. New method for nonlinear and nonstationary time series analysis: empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2000, 4056:197–209
- [63] Huang N E, Shih H H, Shen Z, et al. The Ages of Large Amplitude Coastal Seiches on the Caribbean Coast of Puerto Rico. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(8):2001–2012
- [64] 钱振华, 宋汉文. 经验模式分解方法(EMD) 研究综述//上海市国际工业博览会暨上海市“工程与振动”科技论坛. 2005:1–3
- [65] 顾名坤, 吕振华. 基于振动加速度测量的振动速度和位移信号识别方法探讨. *机械科学与技术*, 2011, 30(4):522–526
- [66] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用. 知识产权出版社, 2006:89–91
- [67] 陈为真, 汪秉文, 胡晓娅. 基于时域积分的加速度信号处理. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010(1):1–4
- [68] 王建锋, 马建, 马荣贵等. 动位移的加速度精确测量技术研究. *计算机科学*, 2010, 37(12):201–202
- [69] Donoho D L, Johnstone I M, Kerkyacharian G, et al. Universal Near Minimality of Wavelet Shrinkage// *Festschrift for Lucien Le Cam*. Springer New York, 1997:183–218
- [70] Doyle J F. A wavelet deconvolution method for impact force identification. *Experimental Mechanics*, 1997, 37(4):403–408
- [71] 高志. Matlab小波分析与应用. 国防工业出版社, 2007:44–46
- [72] Hwang J K, Li Y P. Variable Step–Size LMS Algorithm With a Gradient–Based Weighted Average. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(12):1043–1046

- [73] 李宁. LMS自适应滤波算法的收敛性能研究与应用. 哈尔滨工程大学, 2009:38-41
- [74] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets II: variations on a theme. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1993:1-3
- [75] 杨建荣, 李建中, 范立础. 基于ANSYS的车桥耦合振动分析. 计算机辅助工程, 2007, 16(4):23-26
- [76] 李建中, 苏木标, 黄道凤. 多个移动荷载作用下简支梁竖向共振机理研究// 全国结构工程学术会议. 1998:614-620
- [77] 郑近德, 程军圣, 曾鸣等. 广义经验模态分解性能分析与应用. 振动与冲击, 2015(3):123-128
- [78] 宋一凡, 周彦军, 贺拴海. 钢筋混凝土梁的动刚度分析. 长安大学学报自然科学版, 1998(s2):14-18

致 谢

转眼间三年的研究生生活即将步入尾声，回首三年在学校里学习和生活的点点滴滴，感慨时光短暂，记忆漫长，期间学校的平台和资源带给我许多的收获和成长，感恩这几年陪伴我一路走来的老师、同学和朋友，有你们的引导和帮助，让我克服了诸多困难，顺利完成学业。

本人的硕士学位论文是在恩师周云的殷切关怀和悉心指导下完成的，这三年来导师对我学习和生活上给予了无微不至的关怀。从课题的选择，到理论上的准备，直到最后的试验室试验和论文的撰写，在整个论文的进度和质量上周老师都进行了把控，期间给予了我耐心的指导以及多方面的支持，论文中的每一处都凝聚着他对我的付出和关心，周老师对学术严谨的态度和精益求精的工作风格，带给我深刻的影响，让我受益匪浅，终身难忘。在学习之外，也要感谢恩师在这三年里给予了我一个团结活泼、开放包容、张弛有度的团队氛围和环境，让我以及团队的每一位成员都能够充分发挥自己的特点，完成学业的同时合理规划自己的生活 and 未来，在此谨向老师致以衷心的感谢和崇高的敬意。

在进行试验室试验和论文撰写期间，我的室友刘勇、吴松熊、彭勃给了我很多的帮助和鼓励，他们的付出保证了试验的顺利进展，感谢课题组方亮、溪树杭、刘蒙对我试验的支持和付出，感谢同门周祎、贾凡丁、吴峥、胡翔、陈太平以及研一兄弟姐妹们一路的陪伴，向每一位关心和帮助过我的你们道一声衷心的感谢。

最后要感谢一直在背后支持和鼓励我的父母和爱人，感谢他们为我提供的一切，谢谢他们的理解，让我能够全身心地投入学业。

陈松柏

2017年5月26日于湖南大学