
博士学位论文

结构损伤综合诊断理论与试验研究

作者姓名：

刘锡军

学科专业：

地球探测与信息技术

学院（系、所）：

信息物理工程学院

指导教师：

何继善

中 南 大 学

2006 年 11 月

分类号 VDC _____

密级 _____

博士学位论文

结构损伤综合诊断理论与试验研究 Theoretical and Experimental Research on Combinational Damage Detection for Structure

湖南省自然科学基金(03JJY3090、04JJ40060)资助

湖南省教育厅青年基金(05B017)资助

作者姓名:

刘锡军

学科专业:

地球探测与信息技术

学院(系、所):

信息物理工程学院

指导教师:

何继善

论文答辩日期 2006.11.28

答辩委员会主席 _____

中 南 大 学
2006 年 7 月

目 录

摘 要	I
ABSTRACT.....	III
第一章 绪 论.....	1
1.1 前 言.....	1
1.2 损伤的定义及特征.....	2
1.3 结构的损伤诊断	2
1.3.1 结构损伤诊断的目标	2
1.3.2 结构损伤诊断方法	3
1.4 结构动力学系统识别.....	4
1.4.1 参数识别	4
1.5 结构动力学损伤诊断研究现状.....	7
1.5.1 频域法研究现状	8
1.5.2 时域法研究现状	12
1.5.3 动力检测试验与信号去噪	14
1.6 结构损伤诊断存在的主要问题	15
1.7 本文的主要工作	16
第二章 结构参数识别的基本理论	18
2.1 引言	18
2.2 结构参数频域识别法.....	18
2.2.1 结构模态参数的频域识别法	18
2.2.2 结构物理参数的频域识别法	22
2.3 结构参数时域识别法.....	24
2.3.1 结构模态参数的时域识别法	24
2.3.2 结构物理参数的时域识别法	30
2.4 小结	32
第三章 噪声对参数识别精度的影响	33
3.1 引言	33
3.2.非周期信号的幅值谱密度、能量谱密度.....	33
3.3 噪声对频域法参数识别的影响.....	35
3.3.1 随机噪声对结构固有频率的影响.....	35
3.3.2 低频噪声对结构固有频率的影响.....	38
3.3.3 频域法对结构弱损伤的识别	38
3.4 噪声对时域法参数识别的影响.....	40

3.4.1 白噪声对结构反演刚度的影响	40
3.4.2 有色噪声对结构反演刚度的影响	44
3.5 小结	45
第四章 信号去噪理论与方法	47
4.1 引言	47
4.2 小波分析与小波阈值去噪的基本理论	47
4.2.1 小波函数及其时频特性	47
4.2.2 小波变换	48
4.2.3 多分辨率分析与 Mallat 快速算法	49
4.2.4 基于信号奇异性的小波去噪理论	50
4.3 小波阈值去噪方法	52
4.3.1 阈值法小波去噪的算法原理	52
4.3.2 一类可微的阈值函数	53
4.3.3 基于可微阈值函数的自适应阈值估计	54
4.4 提取结构动力特征响应的信号去噪方法	57
4.4.1 结构动力响应信息提取的理论依据	57
4.4.2 基于小波包变换的信号时频滤波	59
4.5 数值算例	60
4.6 小结	64
第五章 结构损伤综合识别研究	66
5.1 引言	66
5.2 基于“能量-损伤”的损伤诊断识别方法	66
5.2.1 “能量-损伤”的理论依据	66
5.2.2 “能量-损伤”参数识别方法的算法	67
5.2.3 算例分析	68
5.3 结构物理参数的时域法识别法	73
5.3.1 结构物理参数的时域识别模型	73
5.3.2 结构物理参数的时域识别的基本准则	76
5.3.3 完备测量信息时域法参数识别	77
5.3.4 子结构参数识别方法	82
5.4 小结	85
第六章 钢-混框架模型参数识别试验	87
6.1 引言	87
6.2 钢-混框架模型参数识别试验	87
6.2.1 模型制作	87

6.2.2 模型静力参数实验	88
6.2.3 地脉动加速度信号测试与去噪	89
6.2.4 框架模型模态及物理参数频域法识别	91
6.2.5 地脉动激励下结构特征加速度、速度和位移响应计算	95
6.2.6 框架模型物理参数时域法识别	97
6.3 小结	100
结 论	101
参考文献	103
致 谢	110
附录 A 攻读博士学位期间主要研究成果	111

摘 要

结构动力损伤识别是当前土木工程领域一个前沿研究课题,与高效率、高精度的信号采集和分析仪器相结合,基于动力测试的系统识别技术正逐步成为工程结构健康检测的重要手段。由于测试仪器和技术的原因,实际工程中一般难以获得结构楼层的转角信息,这是短期内难以解决的问题。剪切结构模型是房屋建筑中最常用的一种简化模型,基于剪切模型的时域法参数识别,具有不需要转角位移信息的特点,该模型适用于目前检测技术的要求。此外,地脉动环境激励是一种容易实现、费用低、对环境影响小的激励方式。但由于这种信号的信噪比低,信息处理困难,实际中结构参数识别效果不理想。基于上述考虑,本文主要针对地脉动激励作用下,剪切结构模型的物理参数识别进行如下几方面的研究工作:

1. 结构参数识别基本理论和噪声对结构参数识别影响的研究。本文详细地研究了地脉动激励下的结构动力响应参数识别,对频域法和时域法参数识别进行比较。探讨了噪声、结构损伤程度对频域法和时域法参数识别结果的影响进行了研究。编写了频域法结构模态、物理参数识别和基于剪切模型的时域法物理参数识别程序,进行了大量的数值仿真和分析。

2. 信号去噪理论与方法研究。在充分考虑线性动力系统的时域响应特性以及小波包分析的频域空间剖分特性的基础上,作者提出了一种结构特征信息提取的信号去噪新方法。并从理论上证明了结构特征响应中包含有结构系统的动力响应信息,利用该信号可以进行结构系统的动力识别,并取得了较好的识别效果。结构特征信号的提取,实际上也是一种较好的去噪方法,并在数值计算和试验中得到了验证。

3. 基于“能量-损伤”的频域法。当结构出现损伤或称系统出现故障时,其传递函数将会改变,不同频率的幅频特性和相频特性将会有不同程度的改变。从幅频特性来说,它主要表现在对不同频率段的输入信号具有不同的抑制和增强作用。本文提出采用“能量-损伤”法进行结构损伤识别,并进行了数值仿真计算,探讨了这种精细频域方法在结构损伤识别应用的可能性。采用随机数据处理方式,建立了“特征向量-损伤状态”状态关系。

4. 信息不完备测试信息的时域辨识研究。在实际工程中,往往无法一次性获得全部楼层加速度、速度和位移信息,这些都属于信息不完备的情况。在速度、位移未知的情况,本文对数值积分误差、积分初值等问题进行了理论研究,提出了积分误差和积分初值作为低频趋势影响的概念,并利用小波包消除这些误差的影响,大大提高了参数识别精度。对于一次不能获得全部加速度的情况,作者对子结构动力参数识别模型和参数识别方程进行了研究,编写了子结构参

数识别程序, 并进行数值仿真计算和试验, 其结果表明, 本文提出的子结构参数识别结果与信息完备参数识别结果得到较好的吻合。

5. 钢-混框架模型物理参数识别试验研究。首先对模型进行了静力试验, 获得较准确的静力参数值, 通过 D 值法和试验修正, 获得各层的刚度值。作者根据地脉动加速度响应, 分别采用频域法和时域法进行层刚度识别研究。频域法虽然能获得前 3 阶的固有频率和模态, 但无法根据剪切模型识别结构物理参数。通过信息完备和子结构时域法参数识别, 验证了本文提出的时域法辨识理论和方法在工程结构动力检测应用中的有效性, 基于剪切模型的时域法也可以识别一般框架结构的物理参数。

关键词: 参数识别 地脉动激励 能量-损伤法 结构特征信息
钢-混框架模型

Abstract

It is a front subject in the fields of current civil engineering that structure dynamic damage to identify. Combined with the high-efficiency and high-accuracy instruments that using for collecting and analyzing signal , the system identification technique based on dynamic test is gradually becoming an importance means in the engineering structure health examination. Because of the testing instrument and technic, we can generally acquire the line acceleration of the structure floor perpendicularity or the level direction in the actual structure, while it is difficult to acquire the rotated information of the structure floor, which is a difficult problem for resolve currently. Shear structure model is the most common simplification model of the building, time domain parameter identification according to shear model have the characteristics that needn't have the rotated displacement information, this model is applicable to the request of currently examine technic. In addition, the ambient ground vibration random excitation is an easy realization way that the expenses are low and the affects to the environment is small. But because of the low noise ratio of this kind of signal, the information processing difficult, the result in actual structure parameter identification isn't ideal. According to the above mentioned, this paper mainly consider the shear structure model physics parameter identification under the ambient ground vibration random excitation and carry on several research works as follows:

1. The basic theories on structure parameter identification and the research on the influence that noises cause to the structure parameter identification. This paper study the structure dynamic parameter identification with the ambient ground vibration excitation, compare parameter identification in frequency domain methods and time domain methods. Discuss the influence that the noise and the structure hurt degree to take to the parameter identification result in frequency domain method and time domain method. write the structure physics parameter identification program by frequency domain method and physics parameter identification program by time domain methods according to shear model, carry on a great deal of number imitate calculation and analyze.

2. The method and theories researches in signal eliminate noise. At the basis of full considering the line dynamic system time domain respond characteristic and wavelet analysis frequency domain space analysis characteristic , put forward a new de-noise method that obtained the structure characteristic information from the signal. The structure characteristic responds include the information of structure

system respond, deducing according to the theories, we can identify the structure parameters from the structure characteristic signal. In the views of the energy, frequency energy of characteristic respond is more concentrated near to the structure instinct frequency; it raised the signal-noise ratio. Simulation express that wavelet threshold de-noising is incapable of the low signal noise ratio weak signal when the Ambient ground vibration respond signal frequency band overlaid the noise frequency band mutually. While withdrawing the structure characteristic signal is actually a better method to de-noising, and has already got good results in simulation and experiment.

3. Frequency domain method based on energy—damage. When the structure appears to be damaged or the system appears to be broken down, the transfer function will be changed, the amplitude-frequency response characteristics and phase-frequency response characteristics will have different change among different frequency. Take amplitude-frequency response characteristic into consideration, it has different roles in repress and strengthen to different frequency-band imported signal. When ambient ground vibration as the importing signal excite, the structure system damage will take a different role in different frequency-band signals, usually, it will repress some frequency-band signals and strengthen some frequency-band signals. Therefore, compared to normal system output, there will be a bigger difference inside the energy of the signal although in the same frequency, it makes some signal energy in some frequency-band lower, while makes signal energy in other frequency-band greater. Therefore, there involves abundant structure damage information in the energy of each frequency-band signal, the change of one or some frequency-band energy represents a kind of damage. This paper carries on some simulation research in the energy-damage method, inquiries into the possibility in the structure damage identification application by this kind of frequency domain method. Applying small wavelet analysis to decompose the frequency, adopting the random data processing method, identifying noise frequency energy and structure characteristic frequency energies effectively, building up the relation of characteristic vector-damage.

4. Time domain identification research on incomplete testing information. In an actual engineering, even for shear model time domain parameter identification method, there usually can't get all the floors information such as accelerations, speeds and displacements, or there acquired the information that has a great instrumental error, or can only acquire the acceleration information, all of the above belong to the incomplete information. As the speed and displacement is unknown, this paper carries on the research in the problems such as numerical integrator error

and integrated first guess etc. and puts forward the integral errors to be the concept of the low frequency trend influence, raises the parameter identification accuracy. For those that one can't get all acceleration information for once, this paper adopt the sub- structure method to process the data, the numerical calculation and experiment analysis result express that the result the complete information parameter identification agrees with that the sub- structure method.

5. The experiment research on steel-concrete frame model physics parameter identification. First carried on the static experiment to the model, acquired a more accurate parameter, use the D-value method and test modified, acquire each floor stiffness. Accord to ambient ground vibration acceleration respond, adopting the frequency domain and time domain method respectively to carry on the layer rigidity identifying. Although frequency domain method can acquire 3 natural frequency and modes, it can't identify the structure physics parameter according to shear model. Apply the complete information and the sub-structure time domain method parameter identification; verifying that the time domain theories and methods are effective in engineering structure dynamic detection, also that time domain method based on shear model can identify general frame structure's physics parameter. The ambient ground vibration dynamic respond signal include a lot of frequency information that have something to do with the excitation, this part of information is interference signal for frequency domain method, but for time domain method it is a kind of valid information in identifying the structure parameter.

Keyword: Parameter identification, Ambient ground vibration excitation, Energy-damage method, Structure characteristic information, The steel-concrete frame model

第一章 绪 论

1.1 前 言

桥梁、大坝、河堤、核电站和高层建筑等重大结构在发生地震、飓风、洪水等自然灾害时会因年久失修而遭到严重破坏,对人类产生巨大的损失。此外,我国现有 60 多亿平方米的房屋建筑面积中,40%已接近或超过设计基准期,桥梁方面的损伤更为严重。我国从 20 世纪 70 年代中期以后开始开展抗震鉴定与加固,近几年来对已有结构的检测、评估已引起工程界的极大重视^[1]。因此,如何通过合理的检测方法对既有工程结构进行健康检测是当前国内外学术界、工程界亟待解决的问题。传统的工程结构检测技术一般属于静力和局部检测技术,通常只能针对构件或结构的局部进行检测。由于工程结构体积庞大,构件多,且结构中很多部位无法进入或无法直接观测,因此传统检测技术的应用受到较多的限制。基于动力测试的结构系统识别由于能够通过有限测点信息获得对结构整体特性的较好把握而受到研究者的重视。将高效率、高精度的数字信号分析相结合,结构动力学系统识别正逐步成为工程结构健康检测的重要手段^[2]。

近四十年来,结构动力学系统辨识研究有了很大的进展,提出了许多辨识理论与算法,频域法一直以来是结构系统辨识的主要方法,许多已取得的主要研究成果大多集中于结构模态参数辨识与结构动力参数修改^[3]。在实际工程的动力检测中,一般能较好地获得低阶模态信息,检测的结构固有频率和振型较稳定。但在提取模态参数的同时,也丢失了一部分有用的信息,而且由于辨识理论和方法本身的局限性,模态参数辨识这一中间环节必然会产生新的误差。此外,频域法在低阶模态分析中对结构刚度变化不敏感,对损伤程度不太严重的结构也无法正确辨识。关于结构模型的动力修正已提出了许多方法,但迄今为止还没有一个公认的、用于工程实际的成熟方法^[4]。此外,与频域法相比,结构动力学系统的时域辨识有三个明显的优势:(1)时域法是一种直接的辨识方法,不存在中间过程的误差;(2)实测的输入-输出时程数据包含更丰富结构信息,而且增加时程数据的采样点数能有效地增加时域辨识方程的个数;(3)时域法可直接用于非线性动力系统的识别。但结构信息中的测试噪声以及理论模型与实际模型的简化对时域法辨识误差影响较大,目前信号去噪方法还无法完全解决,这是时域法的不足之处。

在结构检测中,传统的静力方法、无损检测等检测方法具有检测数据可信度高、可对结构直接进行安全性评估等优点。结构动力参数辨识虽然具有简单,效率高和检测费用低等优点,由于受到结构动力测量信号质量和数量的限制,

结构动力检测结果的可靠性有时无法保障。因此,综合利用结构静态检测和结构动力检测的优点,构件结构综合检测技术,可望成为提高结构检测的有效性与可靠性的最终途径。基于上述考虑,本论文以框架结构为对象综合结构系统的频域法和时域法辨识理论,研究剪切模型结构损伤识别以及在工程结构检测中的应用方法和技术。

1.2 损伤的定义及特征

在国际材料与结构实验学会 RILEM 关于混凝土结构破损分类的推荐草案中,损伤(Damage)是指结构由于外部力学因素引起的削弱或破损;缺陷(Defect)是指由于设计、施工错误或材料本身的不完善所引起的结构削弱或破损。其中外部力学因素有荷载作用(包括地震、台风等),基础不均匀沉降以及长期使用产生的疲劳作用。自然环境也是产生结构损伤的一个不可忽视的主要原因^[5]。

从广义来讲,损伤包括非受力损伤和受力损伤。对于混凝土结构,非受力损伤主要是指施工过程中带来的缺陷,以及使用过程中因温度、湿度、周围侵蚀性介质腐蚀等非受力因素造成的破损,如混凝土的开裂和碳化、钢筋的锈蚀等;受力损伤是指结构或构件在使用过程中因受力因素而产生的裂缝的出现与开展。从损伤力学的角度来讲,每一次结构的损伤可表征为结构裂缝的出现和扩展、刚度退化或降低、截面削弱、钢筋锈蚀、材料品质劣化等外部特征。结构裂缝的存在,在某种程度上决定着结构的可靠性、使用功能及耐久性,这种损伤通常不会影响结构的质量特性,但对结构的刚度特性和阻尼特性会产生一定程度的影响。

1.3 结构的损伤诊断

1.3.1 结构损伤诊断的目标

由于缺陷和损伤是不可避免的,结构的损伤诊断技术便由此而产生,它是近 40 多年发展起来的一门新兴学科,是一门适应工程实际需要而形成的各学科交叉的综合学科。1993 年 Rytte 定义了结构损伤诊断目标的四个阶段^[6]:

- (1) 确定结构存在损伤;
- (2) 确定损伤的几何位置;
- (3) 定量确定损伤的严重程度;
- (4) 预测结构的剩余使用寿命。

结构损伤识别在建筑结构损伤监测诊断中的应用主要侧重于以下两个方面:

- (1)改进计算模型 损伤识别可分为基于模型(Model-Based)的参数识别和

无模型(Free-Model)的系统识别两类。要有效地进行损伤识别定位,首先需要损伤标识量的选择问题,即决定以哪些物理量为依据能够更好地识别和标定损伤的程度方位。在无模型损伤直接定位的物理量最好是局域量,且应满足两个基本条件:一是对局部损伤敏感;二是位置坐标的单调函数。基于模型的损伤定位方法有助于精确地标定结构的损伤程度,通常属于复杂的反演问题。

(2)结构监测 结构损伤通常不会影响结构的质量特性,但对结构的刚度特性和结构阻尼会产生一定程度的影响,因此在假定结构质量不变时的结构模型修正技术同样可以用来结构参数辨识和监测^[7]。

1.3.2 结构损伤诊断方法

土木工程结构的损伤诊断,国外大体上可分为三个阶段,20世纪40年代到50年代为探索阶段,注重对建筑结构缺陷原因的分析 and 修补方法的研究,检测工作大多数采用目测为主的传统方法;60年代到70年代为发展阶段,注重对建筑物检测技术和评估方法的研究,提出了破损检测、无损检测和物理检测,其中包括超声波法、弹性波法、电磁法、雷达以及红外摄影等几十种现代无损检测技术^[8]。

传统的结构检测方法如外观检查、无损检测及抽样调查多用于材料特征以及局部缺陷的检测,一般需要知道损伤的大致部位且可以接近,这种方法所采用的调查手段及其判断准则,很大程度上依赖于检测者的经验及主观判断,也不能从整体上定量把握结构性状。现场静力荷载试验是获取结构信息的一种可靠的检测手段,但工作量大,检测费用高。因此,近10多年来国内外学者一直在寻找适合于复杂结构的定量整体损伤评估方法,基于结构动力学系统辨识的损伤诊断就是一种目前很有发展前途的方法。相对于静态检测技术,动力测试有着简便、无损于结构、获取信息丰富等优点。对于重要结构,利用动力参数测试,能方便地完成结构破损的在线监测和诊断。

基于动力学损伤诊断方法的基本原理是结构的动力特性参数(固有频率、振型、阻尼比)与结构的物理参数(刚度、质量以及材料的本构特征)存在对应的关系。当结构损伤时,物理参数的变化,如刚度降低、质量减少,必将引起结构动力参数的变化,如结构固有频率降低、阻尼增大、振型的改变等等。因此可通过动力测试来捕捉结构静、动力参数的变化,从而推定结构的工作状态。也可以直接通过结构测点加速度反应直接推演(基于模型的时域法)结构物理特性,如刚度、阻尼等。

进行结构模态参数识别时,按识别是在频率域还是在时间域进行,可将问题分为结构模态参数的频域识别和结构模态参数的时域内识别。而进行结构物理参数识别时,可以按依据的基本数据是结构动力时程响应还是结构模态参数,

将问题分为结构物理参数的时域识别和结构物理参数的频域识别^[9]。

1.4 结构动力学系统识别

系统识别的理论最初起源于现代控制理论，20世纪70年代以后，系统识别的发展已经远远超出了这一范围，同航空、机械、土木等学科相互渗透，形成了一个多学科交叉发展的研究领域^[10]

结构动力学系统识别是动力学研究的逆问题，它利用系统在试验和运行中获得的输入和输出数据，采用系统识别技术，建立反映系统本质动态特性的数学模型，并确定模型中的待定参数。结构动力学系统遵循牛顿力学基本定律，所以系统的理论模型(动力学方程组)往往是已知的，需要识别的只是模型中某些待定的物理参数或系统的动力学特性参数(模态参数等)。系统内部的某些物理机制(如非线性恢复力模型)不清楚时，则需要进行理论模型或模型类的识别。此外，如果采用时序分析模型识别结构模态参数，则时序模型阶的确定也属于理论模型识别的范畴。

1.4.1 参数识别

参数识别是结构动力学系统识别定量研究的核心，主要包括参数估计准则和优化算法两部分^[10]。准则用以判断计算所得参数是否为待定参数的最优估计，基本分参数估计准则有最小二乘准则、最小方差准则、最大似然准则、贝叶斯准则和预报误差准则等，在数据的概率分布满足特定的条件时，这些准则是相互等包容的^[11]。选定了估计准则后，参数识别的问题就转化为求某目标函数取极值的优化问题，优化算法的选取主要取决于目标函数的具体性质，如果目标函数具有解析梯度，则拟牛顿法、最速下降法等非线性优化方法具有较好的参数识别效果^[12]。

1.4.1.1 模态参数识别

基于模态坐标建立起来的模态模型或运动方程在本质上是一个能量的平衡方程，因此模态固有频率、振型以及模态质量、刚度、阻尼等模态参数均具有统计观的意义，与系统各模态所表现的整体平衡状态有关。模态参数不仅从整体上刻化了结构的动力特性，而且是进一步识别结构物理系统的依据。因此，模态参数识别是结构识别系统的重要环节。

1. 频域方法

实测的频响函数或频响函数曲线是频域法识别结构模态参数的主要依据，

系统在单点激励下,可获得频响函数矩阵中的一列,如果对这一列中的频响函数逐个进行模态参数识别,则称为单输入单输出(SISO)法。SISO法又包括单模态拟合和多模态拟合两种方法,单模态拟合法相对简单,但只适合于模态频率较为分散的情况。当模态频率较为密集时,一般宜采用分频段的多模态拟合法,而拟合频段以外的模态影响则可通过剩余柔度补偿。如果同时利用频响函数矩阵的一列元素来识别模态参数,则成为单输入多输出(SIMO)法。与SISO方法比较,SIMO法能减小抑制随机噪声的影响,所识别的模态参数具有更好的整体性。

自20世纪60年代以来,国内外学者在模态参数频域识别研究方面取得了很大的进展,提出了许多具体的识别方法,其中最常用的有幅值法、分量法、纳圆法等单模态SISO方法^[13], (加权)最小二乘法^[14,15]、正交多项式拟合法^[16]、幂多项式拟合法^[17]等多模态SISO方法以及正交多项式拟合SIMO方法、频域多参考点MIMO方法等^[18]。

传统的模态参数频域识别方法是基于实验室条件下的频响函数进行识别的方法,它要求同时测得结构激励信号和响应信号。实际工程结构体积庞大,一方面难以施加足够大的可控力使其振动;另一方面,地脉动、风脉动等自然激励往往不可避免地会成为系统的输入源。所以工程结构的模态参数识别一般应回避输入信号,而仅仅利用输出响应。

峰值拾取法^[19]、频域分解法^[20]是目前识别环境激励下结构模态参数两种主要的频域方法,频域分解法是拾取法的延伸和发展,它们都利用了有限带宽白噪声输入假定,因此模态参数的识别精度与实际输入是否符合这个假定以及符合的程度有关。

2. 时域方法

传统的模态参数时域识别方法是基于脉冲响应函数或自由衰减信号进行参数识别的方法。根据脉冲响应函数识别模态参数后,可用模态参数建立响应预测的解析模型;根据自由衰减信号进行参数识别时,由于缺乏输入信号数据,通常只能识别出模态频率、模态阻尼和模态振型,不能识别模态质量及模态刚度,因而无法直接建立响应预测的计算模型。

最常用的模态参数时域识别方法主要有Ibrahim时域法^[21,22]、节约时域法^[23]、最小二乘复指数法^[24]、特征稀疏实现算法^[25,26]等,其中特征稀疏实现算法属于多输入多输出整体识别方法,由于它们同时利用了所有激励点和响应点的数据,并从整体上识别模态参数,因此识别精度有较大提高。

对于环境激励下结构工作模态时域识别研究早在20世纪60年代就已开始,经过数十年的研究,人们已提出了时序分析法^[27]、随机减量法^[28]、NET(Natural

Excitation Technique)^[29]、随机子空间法^[30]等多种识别方法,其中随机子空间法适用于平稳激励,而其它方法则只适用于白噪声激励。

3. 联合时频域方法

实际工程中很多的环境激励是非平稳的随机过程,响应信号的频率成分是随时间变化的。对于这种非平稳的时变信号,上述频域或时域识别方法都失去了其应有的作用,而基于小波变换或希尔伯特-黄变换(HHT)的联合时频域方法则能获得较好的识别效果。

小波分析是近十几年来在国际上掀起热潮的一个前沿研究领域,被认为是傅立叶分析方法的突破性发展。利用小波变换良好的时频域分辨能力以及带通滤波特性对振动响应进行分析,得到离散时域脉冲响应函数,然后根据脉冲响应函数系统实现的状态空间模型可提取结构频率、振型和阻尼比等模态参数。对于窄带激励或明显不连续信号激励作用下的结构系统,小波方法可以避免傅立叶变换的 Gibbs 效应^[31]。本质上,小波变换是一种线性变换,不能用于处理非线性问题。

最近提出的基于经验模态分解(EMD)的希尔伯特-黄变换^[32](HHT)在非线性和非平稳时序分析方面显示出巨大的潜力。EMD 方法本质上是对一个非平稳信号进行平稳化处理的分解过程,产生具有不同特征尺度的本征模函数分量,基于本征模函数分量进行希尔伯特变换后得到 HHT 谱能准确反映出物理过程中能量在各中频率尺度及时间上的分布。HHT 谱用于波内调制机制能反映出系统的非线性变换特性,这是小波变换等其它方法所不能比拟的。在线性框架下,HHT 谱与小波谱具有相同的表现特征,但 HHT 谱在时域内的分辨率高于小波谱^[33]。

1.4.1.2 物理参数识别

刚度、质量和阻尼等物理特性矩阵及其元素在一定程度上描述了结构的物理系统,据此可以预测结构的动力响应,并计算模态频率、振型等动力特性参数。但由于整体矩阵中的元素由各单元组集而成,其物理意义并不十分明确。而单元层次的弹性模量、质量密度、阻尼稀疏等的物理特性参数能够准确描述结构的实际性状,因此实现单元层次的物理参数识别是结构系统识别最理想的结果。

1. 频域方法

频域法识别结构物理参数是指实测的固有频率、振型等模态参数,通过模

型修正或求解特征值反问题识别有限元数值模型中的物理参数方法。按识别对象是结构物理特性矩阵, 还是结构物理特性参数, 频域方法可分为矩阵型识别法和参数型识别法。前者又可以分为矩阵型直接识别法^[34,35]和矩阵型修正识别法^[36,37]; 后者又可分为参数直接识别法^[17]和参数型迭代识别法^[38,39]。

模型修正技术涉及到模型自由度匹配、模型相关准则、灵敏度分析、系统可控与可视性、摄动原理、线性方程组成解条件以及非线性优化等诸多理论问题。

近四十年来, 国内外学者在模型修正方面进行了大量的研究工作, 提出了许多具体的算法, 但迄今为止还没有一个公认的、用于工程实际的成熟方法^[4]。

2. 时域方法

物理参数时域识别方程的非线性与动力系统运动微分方程的非线性是两个不同的概念, 线性动力系统的参数识别方程可能是线性的, 也可能是非线性的。对于输入、输出信息皆完备的线性参数识别来说, 最小二乘法可一次完成结构的物理参数识别, 而非线性参数识别系统则只能通过非线性优化方法的迭代计算逐步逼近参数的真值。

扩展卡尔曼滤波是一种基于线性方差最小估计的物理参数时域辨识算法, 该算法将结构物理参数引入状态响应形成增广状态响应, 从而通过对增广状态响应的递推估计实现结构物理参数识别。扩展卡尔曼滤波算法不仅适合于线性参数识别系统, 也适合于非线性参数识别系统。该算法不特别要求响应信息满足完备条件, 但要求系统的输入信息是已知的。

当输入信息无法准确测量时, 扩展卡尔曼滤波等传统的系统识别算法不再适用。李杰和陈隽^[40]将这种方法用在时域中识别物理参数, 同时反演系统输入的反问题定义为复合反演问题, 并给出了相应的求解方法—复合反演算法。该算法将不同激励类型所具有的物理、力学性质作为一类辅助修正条件引入到物理参数识别的迭代过程中, 从而巧妙的将不适定的复合反演问题转化为适定问题求解。复合反演算法不仅适合于线性参数系统, 也适合于非线性参数系统。将复合反演算法与子结构技术结合, 可以解决输入、输出信息皆不完备条件下的结构物理参数识别及荷载反演问题。

1.5 结构动力学损伤诊断研究现状

结构动力学的损伤诊断实际上就是结构系统的动力参数和物理参数识别。进行结构模态参数识别时, 按识别是在频率域还是在时间域进行, 将问题分为结构模态参数的频域识别和结构模态参数的时域识别。而进行结构物理参数识

别时，按依据的基本数据是结构动力时程响应还是结构模态参数，将问题分为结构物理参数的时域识别和结构物理参数的频域识别。一般简称频域法和时域法，下面分别就基于模型的参数识别频域法和时域法的研究现状进行综述。

1.5.1 频域法研究现状

建立结构模型系统的物理模型，并确定响应的物理参数是结构动力学系统辨识的最终目的，近四十年来，国内外学者在这一领域开展了大量的研究工作，取得了丰富的研究成果。由于历史与经验的原因，长期以来频域法一直是结构辨识的主要方法，因此已取得的主要研究成果大多集中于结构模态参数辨识与结构动力参数修改^[3]。

1.5.1.1 基于模型的无反演损伤识别

直接由试验模态分析得到的模态参数及其组合变换形成一个损伤识别指标，由损伤前后该指标的变化来判断损伤的发生、损伤的位置及相对损伤程度。作为损伤指标，它必须满足以下条件：应为局域量，对损伤位置敏感，是结构损伤位置单调函数；具有明显的位置坐标；在损伤位置指标有明显的峰值变化，未损伤处的变化幅度小于预定的阈值；可以通过使用中的结构进行测试加以确定^[40]。

损伤的发生可以由实测固有频率的变化体现，但损伤位置的确定却复杂得多。围绕损伤的定位，国内外学者展开了一系列研究。

1. 固有频率

最早被用于损伤诊断的参数就是固有频率。1979年 Cawley 和 Adams 通过特征值对结构物理参数的灵敏度分析，得出结构只存在单处损伤时，损伤前后任意两阶频率变化的比值仅与损伤位置有关^[41]：

$$\frac{\delta\omega_i}{\delta\omega_j} = \frac{g_i(r)}{g_j(r)} = h(r) \quad (1-1)$$

Hearn(1991)等首先将结构损伤前后各阶频率的变化通过最大频率变化归一化后，认为任意两阶频率变化的比值是结构损伤位置的函数。但结构的约束、结构类型和测试噪声对这种比值的有着直接的影响^[42]。高芳清等将其应用于刚桁架，从理论上验证了该参数的变化是结构损伤程度和位置的函数^[43]。1996年 Messina 等提出了损伤定位保证准则(DLAC)：

$$DLAC(j) = \frac{\{\Delta f\}^T \{\Delta f_j\}^2}{(\{\Delta f\}^T \{\Delta f\})(\{\Delta f_j\}^T \{\Delta f_j\})} \quad (1-2)$$

对于多个位置损伤，提出准则 $MDLAC$ ：

$$MDLAC(\{\delta D\}) = \frac{|\{\Delta f\}^T \{\mathcal{G}(\{\delta D\})\}|^2}{(\{\Delta f\}^T \{\Delta f\})(\{\mathcal{G}(\{\delta D\})\}^T \{\mathcal{G}(\{\delta D\})\})} \quad (1-3)$$

$DLAC$ 和 $MDLAC$ 的值介于 0 和 1 之间，具有最大的位置即为结构的损伤位置。 $DLAC$ 准则基于灵敏度分析，从模态保证准则 MAC 发展而来，因此需要将结构中可能的损伤单元一一检查^[43]。

2. 位移振型

模态置信判据 MAC

$$MAC(u_i, d_j) = \frac{(\Phi_{u_j}^T \Phi_{d_j})^2}{(\Phi_{u_j}^T \Phi_{u_j})(\Phi_{d_j}^T \Phi_{d_j})} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (1-4)$$

改进的模态置信判据 $COMAC$

$$COMAC(k) = \frac{\left(\sum_{j=1}^s |\phi_{u_j}(k) \phi_{d_j}(k)| \right)^2}{\sum_{j=1}^s \phi_{u_j}^2(k) \sum_{j=1}^s \phi_{d_j}^2(k)} \quad (1-5)$$

在损伤未发生时，显然 MAC 和 $COMAC$ 均为 1；损伤发生时，两者均不应等于 1。 MAC 用来衡量模态间的振型关系，而 $COMAC$ 是衡量每个自由度上振型的相互关系^[44]。

3. 柔度矩阵

Pandey 等人于 1994 年提出了用柔度矩阵 F 分变化来进行损伤检测的方法， F 为刚度矩阵 K 的逆，可以将损伤与 F 相联系。利用模态振型的正交性，可得出固有频率 ω ，位移振型 ϕ 表示的柔度矩阵和刚度矩阵^[45]：

$$K = M \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \phi_i \phi_i^T \right) M \quad (1-6)$$

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2} \phi_i \phi_i^T \quad (1-7)$$

式中， M 为质量矩阵， n 为自由度数。由于柔度矩阵中模态贡献随频率的增大而减小，对于一般悬臂型结构仅需最多三阶模态便可得到较为准确的柔度矩阵^[9]，若考虑剪切结构刚度矩阵的对称性，则仅仅需要一阶模态即可得到柔

度矩阵。这一特点在工程中具有很强的适用性，因为在实际试验中很难获得精度较高的高阶模态。

损伤定位指标还有振型曲率、模态应变能、残余力向量、应变模态、荷载系数和瑞兹向量法等。

正如文献[46]所述，大多数损伤定位指标只能对损伤的存在进行验证，对损伤可能出现的位置进行排序，而不能判定损伤的程度。判定损伤程度需要合适的损伤指标阈值。

1.5.1.2 基于模型的反演损伤识别方法

根据给定的结构测试数据和采用的计算模型，识别出结构物理参数 K 、 M 的参数向量或其它变量，由损伤前后参数向量的改变来确定损伤的部位及程度，这是典型的振动反问题，模型修正或系统识别、状态估计方法在此得到广泛应用。

1. 最优化方法

测试动力数据的不完备性使得振动反问题解的存在性与唯一性在现实中不能得到。大多数的模态分析诊断技术基于一个优化准则上，通过修改结构的参数向量，使其低阶的固有频率与损伤系数系的测量值匹配，由参数向量对损伤进行评估。通常有输出误差法和方程误差法。

Morassi 等构造一输出误差函数，即前 m 个实验所得频率值与分析值之间的差距，使其最小，寻找单元刚度系数 a_e 的变化， a_e 为与初始结构单位值正交化的刚度系数，被看作损伤系统刚度分布的描述^[47]。

Casas 等利用最小二乘法用动力试验获得结构的频率和振型，与由参数向量表示的频率和振型的有限元分析值一起构造了一个误差函数，参数向量取为等效惯性矩，辨识出参数向量在损伤前后的变化。他们的实验对象为几组钢筋混凝土梁^[48]。

P.L.Liu 构造了一个特征方程的误差范数的优化问题。相比输出误差型公式，方程误差型公式可以不计算特征值，更适合模态丢失的情况，也是参数估计技术中最常用的方法。其数值算例为桁架结构，用扰动法研究了测量误差对辨识结果的影响，结果表明所用的模态数据越多，辨识结果越可靠^[49]。

在输出误差方法中，为改善反问题求解的病态问题，规则化技术 (regularization technique) 得到应用。规则化技术的应用是基于模型修正前后参数变化不大的前提下，因此对损伤前后结构参数变化较大的情况，应用规则化技术反而会偏离正确解。

易伟建等提出了多父体变量级杂交和变量微调等改进策略，运用于固端梁的损伤诊断，取得了满足工程要求的结果。在识别过程中，遗传算法用到前二阶固有频率及其相应的振型，及前三阶固有频率和第一阶振型，充分说明了遗传算法可在已知信息不多的情况下找到最优解^[50]。

2. 灵敏度法

灵敏度法是将结构模态参数看作物理参数的函数，进行一阶或二阶泰勒展开，展开时利用灵敏度矩阵而得名。灵敏度矩阵可由试验给出或理论分析得出。灵敏的分析方法可以识别出结构单元的损伤程度，但对于复杂结构，灵敏度矩阵计算量特别大。

设固有频率向量 f 为物理参数向量 α 的连续函数 $f=f(\alpha)$ ，可得

$$\frac{\partial f_i}{\partial \alpha_j} = \frac{1}{8\pi^2 f_i} X_i^T \frac{\partial K}{\partial \alpha_j} X_i \quad (i=1, \dots, n, j=1, \dots, m) \quad (1-8)$$

式中， n 为实测的固有频率和振型， m 为待定的参数数目。根据灵敏度矩阵，可确定参数改变量 $\Delta\alpha$ 与固有频率改变量 Δf 的关系。

Hassiotis 等先进行灵敏度分析，然后构造出残余向量 R_i ，用最小二乘法的方法优化残余量，灵敏度分析作为其约束，进行了悬臂梁和十层框架的数值试验。总体上成功地辨识了损伤的位置和程度。他还对噪声污染的情况作了研究，表明小的损伤以及对于损伤不影响特征值的单元，在噪声影响下不能很好辨识^[51]。

范立础等对悬索桥结构进行了基于敏感性分析的动力有限元模型修正，认为当有参数对测量值(频率)影响非常小，或者几个参数对测量值影响相近，则灵敏度矩阵常常会是病态的。当待修正参数较多或实测数据存在较大的误差时，修正的参数往往失去其物理意义^[52]。

3. 人工神经网络法

人工神经网络的工作方式相当于一黑箱，不受建立模型的限制，具有大规模并行、分布式存储和处理、自组织、自适应和自学习能力，特别适用于处理需要同时考虑许多因素和条件的、不精确和模糊信息的问题，是强有力的分类器和识别器。其非线性映射及较强的容错性和鲁棒性，使其成为结构损伤识别非常有力的工具。神经网络损伤诊断方法已在土木工程结构上得到应用^[53]。

其它方法还有：系统辨识与状态估计法、概率统计法和小波分析法等。Benchmark 结构研究为结构损伤识别方法的统一评价提供了一个平台，研究人员对其进行了研究，应用对象化理论，以结合土木结构特点推广应用。

1.5.2 时域法研究现状

与频域法相比,结构动力学系统的时域辨识是一种直接的辨识方法,不存在中间过程的误差;其实测的输入-输出时程数据包含更丰富结构信息,而且增加时程数据的采样点数能有效地增加时域辨识方程的个数;时域法还可直接用于非线性动力系统的识别。但目前相应的研究成果还不多。国内外学者主要围绕输入、输出信息不完备下的参数识别、测试信号去噪等方面展开研究。

1.5.2.1 时域辨识模型及其参数化

结构工程领域最常用的理论建模方法是有限元法,其建模过程已形成标准化的通用程序,但这种数学模型在应用中仍然存在不少问题。由于非结构构件的存在、不恰当的边界条件、不合理的假定以及环境变化等因素的干扰,在离散化建模过程中必然存在建模误差,并对系统识别结果产生直接的影响^[54]。此外,引起系统非线性的因素很复杂,一般只能采用一些简单或通用的模型来描述结构的刚度、阻尼以及迟滞非线性^[55]。为了使识别问题进一步简化工程中常将非线性动力系统转换为某种意义上等效的线性化系统来识别^[56]。显然,结构非线性的不确定性也是引起结构建模的误差的重要原因之一。

理论建模过程中所形成的动力学方程组本身就是时域辨识模型,只不过待识别的参数隐含在方程的质量、刚度或阻尼矩阵中,应用这些模型进行参数识别时,其每一个迭代步相当于进行一次结构重分析,因此,计算工作量非常大。将待识别参数中从各个矩阵中提取出来,建立参数化的时域辨识模型,不仅可以明确识别的目的,而且极大的提高了计算效率。Ffiswell^[57]等人研究指出,待识别参数应当具有明确的物理或几何意义,且对测试信息较为敏感。在基于时域信息的结构系统识别中,专门针对模型参数化研究的文献较少。李杰提出的基于虚拟结构向量转换的参数化建模法^[9],在此基础上,赵昕和李杰进一步发展了基于反应力向量灵敏度的参数化建模法^[58],该方法的优点是可以直接利用常规的有限元代码获得结构的识别方程,从而使得大型结构识别模型的参数化建模工作得到简化。

1.5.2.2 输入信息不完备下的参数识别

参数化时域方程通常是开环的时不变的线性或非线性方程,在系统响应信息、激励信息都完备的情况下,参数识别问题可转化为线性或非线性的最小二乘法问题求解,18世纪德国数学家高斯开创了最小二乘法,奠定了系统识别中参数估计方法的基石,并先后形成了加权最小二乘法、阻尼最小二乘法等改进

算法, 这些算法在一定程度上考虑了测试噪声、方程性态对系统识别结果的影响。

地脉动、风荷载、海浪、机械振动等自然激励是常见的系统输入源, 通常情况下, 这些激励的确切时程信息难以准确测量, 甚至在现有的技术条件下无法观测到。在这种输入信息不完备的情况下, 传统的系统识别方法通常只能采用一些限制性较强的假定, 如自由振动假定、白噪声输入假定, 这些假定往往与结构的实际输入不符, 甚至相差很大。

2000年, 李杰和陈隽首次提出了动力复合反演的概念, 并构造了统计平均法^[59]、全量补偿法^[60]、分组归一化统计平均法^[61]等多种复合反演算法。这些算法将不同环境激励类型所具有的物理、力学性质作为一类辅助修正条件引入到结构物理参数识别的迭代过程中, 是未知输入的真实体现, 因此, 具有较高的参数识别精度。

1.5.2.3 输出信息不完备下的参数识别

制约时域辨识技术在实际工程中的应用的另一个主要因素是结构的响应信息不完备。响应信息的不完备主要表现在以下三个方面: (1)测点数目太少, 理论分析模型与试验分析模型的自由度不匹配; (2)测量信息类不完备, 在位移、速度和加速度中, 一般只测定其中一种; (3)转角信息未知, 在目前的技术条件下, 很难准确测量结构的转角响应信息^[2]。

大型结构有限元模型的自由度数往往很大, 远大于实测点的自由度数, 自由度的不匹配给试验建模过程中的参数辨识带来了很大困难。对于模型间自由度不匹配问题的研究早在20世纪60年代就已开始, 解决该方法不外乎模型缩聚技术和模型扩展技术。这两种方法是一种互逆的过程, 并无实质性区别, 但模型缩聚可以大规模的减少计算工作量。模型缩聚的目的是将分析模型的多余自由度进行缩聚, 使缩聚后的模型只包含主自由度(测量自由度)。自1965年Guyan提出了静力缩聚方法以后, 各种自由度缩聚技术相继涌现, 如动力缩聚法^[62]、模态缩聚法^[63]和杂交缩聚方法^[64]等。这些缩聚方法绝大部分是针对正问题或特征方程提出的, 对于结构物理参数时域识别问题而言, 因结构参数未知和频域信息不确定(与激励信息有关), 这些自由度缩聚方法很难直接应用。陈隽^[65]结合静力缩聚方程和矩阵广义逆理论提出了一种凝聚自由度的方法, 该方法避免了对未知参数的依赖。

卡尔曼在1960年继承和发展了前人的研究成果, 对估计状态引进动态模型表示, 结合观测方程获得了状态的线性、无偏、最小方差估计和估计误差协方差阵的递推形式。1970年, Jazwinski^[66]等通过在滤波估计值附近作线性化处理,

解决了非线性滤波问题，提出了完整的扩展卡尔曼滤波方法。

从算法构造上分析，扩展卡尔曼滤波能够求解响应信息不完备条件下的结构参数识别问题，但由于响应信息不完备，结构参数的识别精度低。响应信息不完备是一个相对的概念，对于整体结构而言是非完备的，但对于某一子结构可能是完备的。Koh 等^[67]、李杰和陈隽^[68]、李国强和陆焯^[69]将子结构技术与扩展卡尔曼滤波算法或统计平均复合反演算法结合，成功的识别出结构的刚度参数和阻尼参数。

1.5.3 动力检测试验与信号去噪

动测试验数据是否能反映结构的物理、力学基本性态，是结构损伤诊断方法实现的前提，是系统辨识过程中的重要环节，是识别能否成功的基础，其目的是为系统识别提供足够的、有用的信息。在动测试验中所采用的激励方式、传感器的类型和布置、采样频率以及采样时间等都会对测试结果产生直接的影响^[70]。

1.5.3.1 测试信息的获得

脉冲激励试验因其测试迅速、灵活、激振设备简单而得到广泛应用，目前大多数动力测试数据都是由脉冲激励试验得到的。但实际工程结构体系复杂、体积庞大，难以用机械设备进行激励，一般直接利用环境脉动作为结构体系的输入；当结构受到轻微地震动作用时，所观测的地面加速度因受到噪声的严重污染而难以准确记录，此时输入也是未知的。

此外实际测量中不可能在结构的所有自由度上安置传感器，为了获得尽可能多的信息，增加识别的准确性，由此引发了测点位置、测点数量优化研究的发展。测量点布置不恰当时，观测数据再多也无法保证参数识别结果的唯一性。不少文献均注意到位置和数量对计算结果产生重要影响这一现象，并针对具体问题做了一些研究^[71-75]。

1.5.3.2 测试影响因素

结构动力特性变化除损伤引起的原因之外，环境因素变化有时可能比结构损伤的影响还要大。Wahab 等对一预应力混凝土高速公路桥梁进行了冲击及脉动试验，发现温度下降 15°C，频率变化 4~5%，而振型无显著变化。作者建议在用频率进行结构损伤诊断前，要考虑温度的影响^[76]。

Hoon Sohn 等(1999)对新墨西哥一座桥梁建立了一个线性适应性模型，把由于温度变化引起的结构模态变化从由于结构损伤或其它原引起的模态参数变化

分离出来。^[77]。

Peeters 和 Roeck(2001)对 Z24-Bridge 进行了一年的监测, 研究环境因素变化, 尤其时温度变化对结构损伤诊断的影响。研究发现正常的环境变化可引起结构频率发生 14~18%的变化, 而 ARX 模型可以成功的识别桥梁的损伤^[78]。

1.5.3.3 信号去噪

动力测试过程中, 测量噪声总是存在, 因此, 如何抑制或剔除原始数据中的测量噪声是结构动力学系统辨识必须解决的一个关键难题。在传统的信号去噪方法中, 最常用的是频域法中的滤波方法以及时域法中的平均方法。滤波方法只是对去除与信号频率相互分离的确定性噪声较为有效, 时域平均方法在对信号进行足够多次的平均处理后能较为有效的去除随机噪声, 但它要求信号比较平稳且由足够的长度来保证平均所需的样本数。随着小波理论研究的深入, 许多研究者开始利用小波的局部化时频特性和噪声的奇异特性对平稳或非平稳随机信号去噪处理。1988 年, Mallat^[79]提出了多分辨分析的概念, 使小波具有带通滤波的特性, 因此可以利用小波分解与重构的方法滤波降噪^[80]。此后, Mallat^[81]又提出了奇异性检测理论, 从而可以利用小波变换模极大值的方法去噪^[66]。1995 年, Donoho^[82]提出了小波阈值去噪法, 该方法目前已在信号和图像去噪领域中得到了非常广泛的应用和发展。近年来基于小波分析^[83]和基波变换^[84]的信号去噪技术也日益成熟和完善。

1.6 结构损伤诊断存在的主要问题

结构的损伤实质上是检测结构物理参数的变化, 在结构损伤诊断方法上, 结构损伤检测与结构性态检测并无差别^[9]。虽然国内外学者对结构损伤识别的理论和进行了大量的研究工作, 但由于工程结构的力学行为具有随机性、模糊性和典型的个性特征, 目前将结构动力损伤诊断的两种主要方法——时域法和频域法实际应用土木工程还存在一定的困难^[4,44]。主要表现在以下几个方面:

结构动力测试数据不可避免的存在误差, 目前的结构动力损伤识别还不能保证识别结果的可靠性;

材料的离散性、力学模型的简化, 使得计算模型不能准确的描述实际结构体系;

动力测试数据相对计算模型的不完备, 频域法中高阶模态不能准确获得;

频域法对结构损伤识别不敏感, 无法获得结构弱损伤下的监测信息;

大型复杂结构的自由度多, 识别算法的收敛性和稳定性等都必须在实际应

用中得到验证；

时域法对于结构性态的变化具有较高的辨识能力,但时域法抗噪能力低,当信噪比较低的情况下,识别效果很差；

实际工程检测信息一般为加速度,速度和位移通过数值积分获得,计算误差将影响结构参数反演结果。

因此,要将结构损伤诊断理论及方法能够应用于实际工程,除在理论上进一步研究结构参数识别的计算方法外,结构损伤诊断的进一步研究应更多的考虑测试误差、计算模型的不确定性的对识别结果的影响;要充分利用频域法和时域法两种识别方法的特点,优势互补进行识别。

1.7 本文的主要工作

从结构参数识别理论的发展历史可知,不少学者和研究人员对结构参数识别进行了大量的研究,并在航天技术或机械行业中得到了应用^[1,17]。由于土木工程结构中不确定因素较多,对结构参数识别影响较大,对于实际工程结构参数的精确识别还具有一定的难度。在现有结构参数识别理论的基础上发展和改进,通过系统研究其影响结构参数识别的主要因素,对其理论和方法进行研究,提出了适合实际工程检测的结构参数识别方法,这是本文的主要研究目的。本论文以地脉动激励作用下的剪切结构模型为研究对象,研究了结构参数识别中各种噪声的影响及其消除方法、时域法结构特征信息提取的参数识别模型等内容进行了系统地研究。提出了将速度、位移积分初值以及引入的低频趋势作为低频噪声,提出了结构特征信号提取方法的频域法和时域法的新概念,并提出相应的解决方法,提高了结构参数识别精度。本文重点进行以下几个方面的工作:

1、阐述了有关频域法和时域法的基本理论和方法。分析了频域法和时域法在结构损伤识别中的各自特点,提出综合利用两种参数识别方法,进行结构损伤识别是实际结构损伤识别和结构健康监测的主要发展方向。

2、噪声是影响结构参数识别精度的主要因素,作者应用数值仿真分析,研究了各种不同性质的噪声对频域法和时域法参数识别精度的影响。其研究结果表明:频域法具有较好的抗噪能力,但对于结构弱损伤的情况下,结构固有频率变化较小,因此频域法不适宜于结构弱损伤识别。而时域法的抗噪能力较差,时域法参数识别的关键问题是结构模型和去噪问题。

3、线性动力系统具有满足叠加原理、系统仅包含固有频率和激励频率、初始条件与激励无关的重要特性,在考虑这三个特性的基础上,作者利用结构响应在结构特征频率附近具有较大信噪比的特点,提出了一种提取结构特征响应

信号的新方法，并在理论上证明，对于时域法参数识别，结构特征信号与结构动力响应信号具有相同的识别效果。该方法也较好的解决了结构随机响应信号去噪的问题。数值仿真计算表明，通过结构特征响应信息提取技术获取该频段的响应信号并进行识别，能显著提高结构刚度参数的识别精度。

4、针对频域法对于结构弱损伤灵敏度较差的特点，利用小波包精细分频的特点，本文提出了基于“能量-损伤”的结构特征向量频域法，通过数值仿真分析，提取结构特征主要频率区段作为结构特征向量进行结构损伤识别，给结构损伤识别频域法提供了一个新的思路。

5、以剪切模型为研究对象，对于完备信息结构、子结构参数识别模型和动力参数识别方程进行了研究，编写了相应的结构参数识别程序。对速度、位移计算中的积分初值、积分误差等问题进行了理论分析，并提出了相应的解决方法。通过数值算例分析和试验结果表明，信息完备结构和子结构参数识别最小二乘解具有较好的抗噪能力和识别精度。

6、设计和制作了 1/6 比例的钢-混框架模型，利用该模型以及本文中改进的结构参数识别方法进行试验研究。以地脉动激励的结构加速度响应信号，采用频域法和时域法（信息完备和子结构）进行框架结构模型的层刚度识别，并对其识别的结构刚度与实际刚度比较，验证了本文提出的结构系统时域识别理论和方法在工程结构损伤检测中具有较好的应用效果。

本论文得到湖南省自科基金（03JJY3090）、（04JJ40060）和湖南省教育厅青年基金（05B017）资助。

第二章 结构参数识别的基本理论

2.1 引言

结构损伤识别的动力方法中，结构参数识别一般包括频域法和时域法。

在频域法中根据识别参数不同可分为结构模态参数识别和结构物理参数识别。结构模态参数识别法，是基于结构传递函数或频率响应函数在频域内结构的固有频率、阻尼比和振型等模态参数方法；结构物理参数识别也称模态转换理论，是指利用实测结构的模态参数(固有频率和振型)，通过求解结构动力特征值的反问题识别结构物理参数的方法。识别的准则是：由结构模型所计算的结构模态与实测结构模态一致。模态转换识别理论或方法^[9]，按识别对象是结构物理特征矩阵(如质量矩阵和刚度矩阵)还是结构物理参数特征参数(如弹性模量、构件截面尺寸、刚度矩阵元素等)，可分为矩阵型识别法和参数型识别法。矩阵型识别法按是否以结构分析为基础，又可分为矩阵型直接识别方法和矩阵型修正识别法。参数型识别法按所建立的参数方程是线性还是非线性，是否需要迭代求解，又可分为参数型直接识别法和参数型迭代识别法。

在时域法中也可分为结构模态参数的时域识别和结构物理参数的时域识别。结构模态参数的时域识别法是指时间域内识别结构模态参数的方法。时域法所采用的是结构反应的时间历程，主要为结构的自由振动反应，有的也采用结构的脉冲反应和强迫振动反应。结构时域模态参数识别方法的研究与应用比频域方法要晚，是随着计算机的应用而发展起来的。目前提出的结构模态参数时域识别法主要有：ITD法、STD法、Prony法、随机减量法和ARMA模型法等。结构物理参数的时域识别根据识别过程又可分为间接法和直接法。所谓间接法，即先利用频域或时域数据识别模态参数，再由模态参数识别识别结构物理参数。而直接法，则意味着直接利用结构动力反应的时程测量信息来识别结构物理参数。基于本论文的主要研究目的，以下仅介绍几种结构参数识别的主要理论和方法。

2.2 结构参数频域识别法

2.2.1 结构模态参数的频域识别法

结构模态参数的频域识别法，是基于结构传递函数或频率响应函数在频域内识别结构的固有频率、阻尼比和振型等模态参数的方法。

1 结构的传递函数和频响函数

图 2-1 是一典型多自由度结构体系，该体系的强迫振动方程为：

$$[M]\{\ddot{y}\}+[C]\{\dot{y}\}+[K]\{y\}=\{f(t)\} \quad (2-1)$$

式中， $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $\{f(t)\}$ 为激振力向量； $\{y\}$ 、 $\{\dot{y}\}$ 、 $\{\ddot{y}\}$ 分别为结构的位移、速度和加速度反应向量。

对式(2-1)两边进行拉氏变换得：

$$([M]s^2+[C]s+[K])\{Y(s)\}=\{F(s)\} \quad (2-2)$$

式中， $\{Y(s)\}$ 、 $\{F(s)\}$ 分别为 $\{y(t)\}$ 、 $\{f(t)\}$ 的拉氏变换。

由式(2-2)得：

$$\{Y(s)\}=[H_d(s)]\{F(s)\} \quad (2-3)$$

式中， $[H_d(s)]$ 为结构的位移传递函数矩阵：

$$[H_d(s)]=([M]s^2+[C]s+[K])^{-1} \quad (2-4)$$

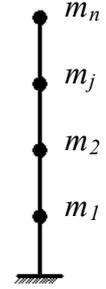


图 2-1

当结构为比例阻尼体系时，由振型的正交性有^[17]：

$$diag(M_i)=[\Phi]^T[M][\Phi] \quad (2-5a)$$

$$diag(C_i)=[\Phi]^T[C][\Phi] \quad (2-5b)$$

$$diag(K_i)=[\Phi]^T[K][\Phi] \quad (2-5c)$$

式中， $[\Phi]$ 为由结构各阶振型向量 $\{\phi_i\}(i=1,2,\dots,N)$ 组成的振型矩阵， $[\Phi]=[\{\phi_1\},\{\phi_2\},\dots,\{\phi_N\}]$ ； $M_i,C_i,K_i(i=1,2,\dots,N)$ 为结构的*i*阶模态质量、模态阻尼和模态刚度；*diag*表示对角矩阵。

由(2-5)各式得：

$$[M]=([\Phi]^T)^{-1}diag(M_i)[\Phi]^{-1} \quad (2-6a)$$

$$[C]=([\Phi]^T)^{-1}diag(C_i)[\Phi]^{-1} \quad (2-6b)$$

$$[K]=([\Phi]^T)^{-1}diag(K_i)[\Phi]^{-1} \quad (2-6c)$$

将式(2-6)各式代入式(2-4)得：

$$\begin{aligned} [H_d(s)] &= (([\Phi]^T)^{-1}diag(M_i s^2+ C_i s+K_i)[\Phi]^{-1})^{-1} \\ &= [\Phi]diag(1/(M_i s^2+ C_i s+K_i))[\Phi]^T \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{\{\phi_i\}\{\phi_i\}^T}{M_i s^2+ C_i s+K_i} = \sum_{i=1}^N \frac{\{\phi_i\}\{\phi_i\}^T}{M_i (s^2+ 2\xi_i \omega_i s+ \omega_i^2)} \end{aligned} \quad (2-7)$$

式中， ω_i 为结构*i*阶模态圆频率， ξ_i 为*i*阶模态阻尼比：

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K_i}{M_i}}; \quad \xi_i = \frac{C_i}{2M_i\omega_i}$$

同样，可由拉氏变换性质得结构初态为静态时的结构速度和加速度的传递函数矩阵为：

$$[H_v(s)] = \sum_{i=1}^N \frac{s\{\phi_i\}\{\phi_i\}^T}{M_i(s^2 + 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2)} \quad (2-8)$$

$$[H_a(s)] = \sum_{i=1}^N \frac{s^2\{\phi_i\}\{\phi_i\}^T}{M_i(s^2 + 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2)} \quad (2-9)$$

传递函数矩阵的任一元素 $H^{rp}(s)$ 表示 p 点激振、 r 点拾振的传递函数，其表达式为(以加速度为例)：

$$[H_a^{rp}(s)] = \sum_{i=1}^N \frac{s^2\{\phi_{ri}\}\{\phi_{pi}\}^T}{M_i(s^2 + 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2)} \quad (2-10)$$

式中， ϕ_{ri} ， ϕ_{pi} 表示结构 i 阶振型在 r 和 p 点处的坐标。

令 $s=j\omega$ ，可得结构的频响函数矩阵或频响函数为：

$$[H_a(\omega)] = [H_a(s)]_{s=j\omega} = \sum_{i=1}^N \frac{-\omega^2\{\phi_i\}\{\phi_i\}^T}{M_i(\omega_i^2 - \omega^2 + 2j\xi_i\omega_i\omega)} \quad (2-11)$$

$$H_a^{rp}(\omega) = H_a^{rp}(s)_{s=j\omega} = \sum_{i=1}^N \frac{-\omega^2\phi_{ri}\phi_{pi}}{M_i(\omega_i^2 - \omega^2 + 2j\xi_i\omega_i\omega)} \quad (2-12)$$

如果结构激振仅由地面运动引起，则

$$\{f(t)\} = -[M]\{e\}x(t)$$

式中， $\{e\}$ 为与结构形式有关的向量。

对于图 2-1 所示的结构体系 $\{e\} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 。此时结构上的任意 r 点相对地面 g 的绝对加速度的频响函数为：

$$\begin{aligned} H_a^{Tg}(\omega) &= \frac{F[\ddot{y}(t) + \ddot{x}]}{F[\ddot{x}]} = 1 + \frac{F[\ddot{y}(t)]}{F[\ddot{x}]} \\ &= 1 + \sum_{p=1}^N \frac{-([M]\{e\})_p F[\ddot{y}(t)]}{F[-([M]\{e\})_p \ddot{x}]} \\ &= 1 + \sum_{p=1}^N \frac{-([M]\{e\})_p F[\ddot{y}(t)]}{F[f_p(t)]} \\ &= 1 + \sum_{i=1}^N \phi_{ri} \frac{\omega^2\{\phi_i\}^T [M]\{e\}}{M_i(\omega_i^2 - \omega^2 + 2j\xi_i\omega_i\omega)} \\ &= 1 + \sum_{i=1}^N \phi_{ri} \frac{\omega^2\gamma_{ri}}{M_i(\omega_i^2 - \omega^2 + 2j\xi_i\omega_i\omega)} \end{aligned} \quad (2-13)$$

式中, $([M]\{e\})_p$ 表示向量 $[M]\{e\}$ 的第 p 个元素; $y_r(t)$ 表示向量 $\{y(t)\}$ 的第 r 个元素; $f_p(t)$ 表示向量 $\{f(t)\}$ 的第 p 个元素; γ_i 为振型参与系数。

$$\gamma_i = \frac{\{\phi_i\}^T [M] \{e\}}{M_i} \quad (2-14)$$

2 多自由度结构体系的模态参数识别

多自由度结构频域模态识别方法有三类不同方法^[17]。单输入/单输出识别方法(SISO 法)、单输入/多输出识别法(SIMO 法)和多输入/多输出法(MIMO 法)。对于土木工程结构, 由于多点激振的困难, 目前主要采用前两种方法。

当结构阻尼比较小、各阶固有频率相间比较稀疏时, 多自由度结构相邻模态之间将不严重耦合, 其判别条件为^[85]:

$$(f_i - f_{i-1}) > K(B_i + B_{i-1}) \quad (2-15)$$

式中, f_i, f_{i-1} 为 i 阶和 $i-1$ 阶模态频率; B_i, B_{i-1} 为 f_i, f_{i-1} 附近频响函数半功率点处的频带宽; $K=1\sim 2$ 。对于地面激振时, 在某阶模态圆频率附近, 频响函数可近似表示为:

$$H_a^{Tg}(\omega) \approx 1 + \frac{\omega^2 \phi_{ri} \gamma_i}{\omega_i^2 - \omega^2 + 2j\xi_i \omega_i \omega} \quad (2-16)$$

多自由度结构的频响函数, 可用一系列固有频率等于原结构各阶频率的单自由度结构的频响函数来近似, 如图 2-2 所示。

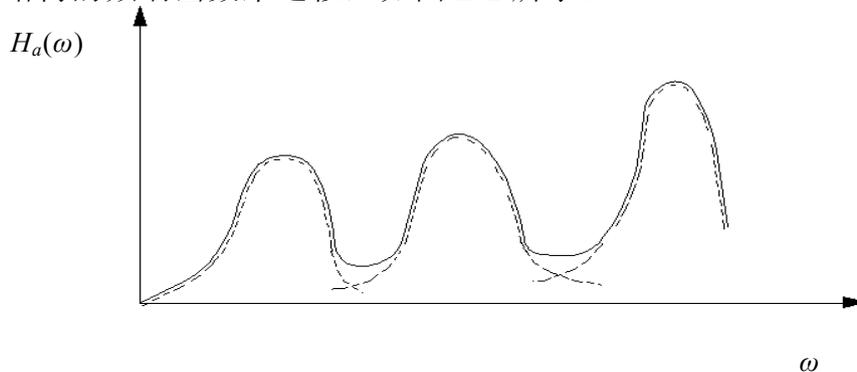


图 2-2 用单自由度结构的频响函数近似表达多自由度结构的频响函数

由式(2-16)可知, 直接采用单自由度的幅值法、分量法或导纳圆法可以识别多自由度结构的各阶模态频率和阻尼比。同时多自由度结构频响函数幅频曲线的峰值在各阶模态频率附近, 即:

$$\left| H_a^{Tg}(\omega) \right|_u \approx \left| H_a^{Tg}(\omega_i) \right| = 1 + \frac{\gamma_i \phi_{ri}}{2\xi_i} \quad (2-17)$$

对于模态密集的多自由度结构, 单模态识别效果不好, 一般采用多模态识别方法。多模态识别法属于拟合频响函数的优化方法, 主要有两类: 多模态迭

代识别和多模态直接识别法^[17]。

2.2.2 结构物理参数的频域识别法

基于模态转换理论的结构物理参数的识别方法，是指利用实测的模态参数(固有频率和振型)，通过求解结构动力学特征值的反问题识别结构物理参数的方法。识别准则是：结构模型所计算的结构模态与实测结构模态一致。以下简要介绍建筑结构工程中常用的矩阵直接识别法。

利用结构的全部或部分模态信息识别结构刚度或质量矩阵的方法称为结构物理参数的矩阵直接识别法。

1 由完全模态识别结构的刚度矩阵

若已知结构的全部固有频率 $[\omega^2]$ 和振型 $[\phi]$ ，则以质量矩阵 $[M]$ 为基准，可按下列方程识别刚度矩阵。

$$[\phi]^T[M][\phi]=[I] \tag{2-18}$$

则：

$$[\phi]^{-1}=[\phi]^T[M] \tag{2-19}$$

由特征方程：

$$[K][\phi]=[M][\phi][\omega^2] \tag{2-20}$$

将式(2-19)两端乘以式(2-20)两端得：

$$[K]=[M][\phi][\omega^2][\phi]^T[M] \tag{2-21}$$

将式(2-20)的两端前边乘柔度矩阵 $[F]=[K]^{-1}$ 和后边乘 $[\omega^2]=[\omega^2]^{-1}$ 得：

$$[\phi][\omega^2] = [F][M][\phi] \tag{2-22}$$

将式(2-19)的两端交叉后乘式(2-22)的两端得：

$$[\phi][\omega^2][\phi]^T[M]=[F][M] \tag{2-23}$$

则：

$$[F]=[\phi][\omega^2][\phi]^T \tag{2-24}$$

由于实际工程一般仅能测出结构的前 n 阶模态，若采用(2-21)、(2-24)识别结构的刚度矩阵和柔度矩阵，则会产生模态截断误差。由于结构固有频率 ω 随结构模态阶数的增长而增长，按式(2-24)所识别的结构柔度矩阵将比式(2-21)所识别的结构刚度矩阵模态的截断误差小。

2 Jacobi 矩阵特征值的反问题

多高层建筑剪切型结构(图 2-3)的刚度矩阵 $[K]$ 为对

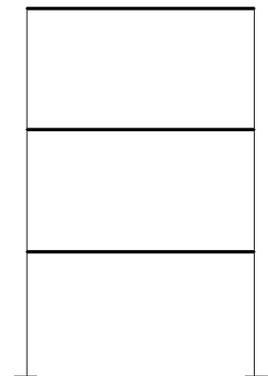


图 2-3 剪切型结构

称三角形矩阵，而质量矩阵 $[M]$ 为对角矩阵(对于多层框架结构可采用 D 值法转换成剪切型结构)。

$$[K]=\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & & & \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & & \\ & \dots & & -k_N & \\ & & & -k_N & k_N \end{bmatrix} \quad (2-25a)$$

$$[M]=diag(m_1, m_2, \dots, m_N) \quad (2-25b)$$

式中 k_i 和 m_i 分别为楼层 I 的层间刚度和质量($i=1, 2, \dots, N$)。这种结构的动力特征方程为：

$$[K] \{\phi\} = \omega^2 [M] \{\phi\} \quad (2-26)$$

可简化为如下的标准形式：

$$[J] \{u\} = \lambda \{u\} \quad (2-27)$$

式中：

$$\lambda = \omega^2, \quad [J] = [M]^{-1/2} [K] [M]^{-1/2}, \quad \{u\} = [M]^{1/2} \{\phi\}$$

其中 $[J]$ 是对称的三角矩阵，称为 Jacobi 矩阵。

N 阶 Jacobi 矩阵 $[J]_N$ 的特征值和特征向量分别为结构对应固有频率和振型。如何利用特征值和特征向量求解 Jacobi 矩阵已有大量研究^[86,87],包括各种问题解的存在性、唯一性、稳定性和算法。

3 参数型直接识别法

Newmark 法^[88] 由实测的前 n 解频率 ω_i 和振型 $\{\phi_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$)，直接识别刚度矩阵 $[K]$ 、质量矩阵 $[M]$ 和阻尼矩阵 $[C]$ 中的元素 M_{ij} , K_{ij} 和 C_{ij} ($i=1, 2, \dots, N$)。

由正交关系有：

$$\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_j\} = 0 \quad i \neq j, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (2-28)$$

由特征方程有：

$$([K] - \omega_i^2 [M]) \{\phi_i\} = \{0\} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2-29)$$

由对称性有：

$$[M] = [M]^T, \quad [K] = [K]^T \quad (2-30)$$

对于 N 自由度结构， $[M]$ ， $[K]$ 的独立元素均为 $N(N+1)/2$ ，而式(2-28)的方程数为 $n(n+1)/2$ ，式(2-29)的方程数为 $N \cdot n$ 。

为使方程有确定解，要求方程个数大于或等于未知量个数。而由于测试技术的限制，能获得的模态参数的阶数一般远小于结构的自由度数。为利用式(2-28)、式(2-29)求解 $[M]$ 和 $[K]$ ，需利用结构知识设法用较少的未知量表达 $[M]$

和 $[K]$ 。当 $[M]$ 为对角矩阵时，未知量有 N 个未知量；当用层刚度表达剪切型结构的刚度矩阵时，未知量也只有 N 个。

由是(2-28)确定 $[M]$ 时，需要补充一个数据。这个数据可以是结构总质量或 M_{ii} 中的任意一个。将是(2-28)展开改写为：

$$[A] \{x\} = \{B\} \quad (2-31)$$

式中， $\{x\}$ 为 $[M]$ 中的位置元素或参量， $[A]$ 、 $\{B\}$ 为相应的已知系数矩阵和右端向量。当式(2-31)包含的方程数大于或等于未知量个数时，式(2-31)的加权最小二乘解为：

$$\{x\} = ([A]^T [M][A]^{-1})[A]^T [W] \{B\} \quad (2-32)$$

式中， $[W]$ 为加权对角矩阵，其中各对角元素值的大小表示(2-32)中的各方程的重要或信任度。

由式(2-28)解得 $[M]$ 后，代入(2-29)按式(2-32)的方程可求解 $[K]$ 。而阻尼矩阵 $[C]$ 也可采用最小二乘法并利用下列公式求解：

$$(2\xi_i \omega_i [M] - [C]) \{\Phi_i\} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-33)$$

$$[C] = [C]^T \quad (2-34)$$

式中 ξ_i 为 I 结构模态阻尼比。

此外还有矩阵型修正识别法、参数型迭代识别法等识别方法。在结构损伤识别中为了减少识别难度，一般认为结构质量变化不大，主要是进行刚度矩阵的识别，从而确定结构损伤程度。

2.3 结构参数时域识别法

结构参数时域识别方法一般分为结构模态参数的时域识别法和结构物理参数的时域识别法。结构物理参数识别根据识别步骤的不同分为间接法和直接法。所谓间接法，即先利用频域或时域数据识别模态参数，再由模态参数识别物理参数。而直接法，则是直接利用结构动力反应的时程测量信息来识别结构物理参数。结构损伤检测一般采用直接法更为恰当。

2.3.1 结构模态参数的时域识别法

结构模态参数的时域识别法是指在时间域内识别结构模态参数的方法。时域法所采用的原数据是结构的时间历程，主要为结构的自由振动反应，有的也采用结构的脉冲反应和强迫振动反应。结构时域模态参数识别方法的研究与应用比频域方法要晚，是随着计算机应用而发展起来的。目前提出的结构模态参数时域识别法主要有：ITD法、STD法、Prony法、随即减量法和ARMA模型法等。

1 ITD 法^[14,17]

ITD法是Ibrahim于20世纪70年代提出的时域法(The Ibrahim Time Domain Technique)，该方法利用如下结构自由振动反应的表达式：

$$\{y(t)\} = \sum_{i=1}^N (\{\phi_i\}e^{\lambda_i t} + \{\phi_i^*\}e^{\lambda_i^* t}) \quad (2-35)$$

式中， $\{y\}$ 为结构位移反应向量， $\{\phi_i\}$ 为结构*i*阶振型向量； λ_i 为结构*i*阶复频率；*N*为结构自由度数； $\{\phi_i^*\}$ 、 λ_i^* 分别为 $\{\phi_i\}$ 、 λ_i 的共轭。则*k*时刻*r*测点的结构自由振动反应为：

$$y_r(t_k) = y_{rk} = \sum_{i=1}^M \phi_{ri} e^{\lambda_i t_k} \quad (2-36)$$

式中， $M=2N$ ， ϕ_{ri} 为*i*振型*r*测点坐标； $\phi_{r(N+i)} = \phi_{ri}^*$ ， $\lambda_{N+i} = \lambda_i^*$ ($i=1,2,\dots,M$)。

设共有*m*个实测点，为使测点等于2倍结构自由度数*M*，采用延时方法由实测点构造虚测点，令 $y_{r+m}(t_k) = y_r(t_k + T_1)$ ， $y_{r+2m}(t_k) = y_r(t_k + T_1 + T_2)$ ，…。由*M*个测点(包括实测点和虚测点)*L*个时刻的自由振动反应值排列成如下矩阵关系：

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1L} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2L} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{M1} & y_{M2} & \cdots & y_{ML} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1L} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2L} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \phi_{M1} & \phi_{M2} & \cdots & \phi_{ML} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t_1} y_{11} & e^{\lambda_1 t_2} & \cdots & e^{\lambda_1 t_L} \\ e^{\lambda_2 t_1} & e^{\lambda_2 t_2} & \cdots & e^{\lambda_2 t_L} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ e^{\lambda_M t_1} & e^{\lambda_M t_2} & \cdots & e^{\lambda_M t_L} \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

或简写为：

$$[y] = [\Phi][\Lambda] \quad (2-38)$$

与此相似，对每一测点(包括虚测点)延时 Δt ，则由式(2-35)可得：

$$y_r(t_k + \Delta t) = \tilde{y}_{rk} = \sum_{i=1}^M \phi_{ri} e^{\lambda_i(t_k + \Delta t)} = \sum_{i=1}^M \tilde{\phi}_{ri} e^{\lambda_i t_k} \quad (2-39)$$

式中：

$$\tilde{\phi}_{ri} = \phi_{ri} e^{\lambda_i \Delta t} \quad (2-40)$$

则由*M*个测点按式(2-36)的方式可构成延时 Δt 的矩阵关系：

$$[\tilde{y}] = [\tilde{\Phi}][\Lambda] \quad (2-41)$$

由式(2-39)可知， $[\Phi]$ 与 $[\tilde{\Phi}]$ 之间存在线性关系：

$$[\Phi] = [A][\tilde{\Phi}] \quad (2-42)$$

将式(2-41)代入式(2-40)并利用式(2-37)得：

$$[A][y] = [\tilde{y}] \quad (2-43)$$

当 $L \geq M$ 时，由式(2-42)可得矩阵 $[A]$ 的最小二乘解为：

$$[A] = [\tilde{y}][y]^T ([y][y]^T)^{-1} \quad (2-44)$$

由式(2-39)得:

$$[\tilde{\Phi}] = [\Phi] \text{diag}(e^{\lambda_i \Delta t}) \quad (2-45)$$

将式(2-44)代入式(2-41)得:

$$[A][\Phi] = [\Phi] \text{diag}(e^{\lambda_i \Delta t}) \quad (2-46)$$

式(2-45)是一个标准的特征方程。矩阵 $[A]$ 的特征值为 $e^{\lambda_i \Delta t}$ ，某阶特征向量为矩阵 $[\Phi]$ 的一列。

设求得 $[A]$ 的特征值为 $a_i + jb_i$ ，则有:

$$e^{\lambda_i \Delta t} = \exp(-\xi_i \omega_i + j\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}) = a_i + jb_i \quad (2-47)$$

由式(2-46)可得结构的模态圆频率 ω_i 和阻尼比 ξ_i 为:

$$\omega_i = \sqrt{\omega_{di}^2 + \sigma_i^2} \quad (2-48)$$

$$\xi_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{\omega_{di}^2 + \sigma_i^2}} \quad (2-49)$$

其中:

$$\omega_{di} = \frac{1}{\Delta t} \text{tg}^{-1} \frac{b_i}{a_i}$$

$$\sigma_i = \frac{1}{2\Delta t} \ln(a_i^2 + b_i^2)$$

ITD 法虽是对复模态提出的识别技术，同样可用于实模态的识别^[89]，因实模态实际上是复模态的特例。

2 STD 法

为了节省计算机的内存和减少计算量，1985 年 Ibrahim 在 ITD 法的基础上提出了 STD 法(Spare Time Domain Technique)。其原理为:

取 $S \geq M$ 个测点(包括虚测点)的 $L=M$ 个等时间间隔 Δt 的结构自由振动反应值，形成式(2-38)中的矩阵 $[y]$ ，则:

$$[y]_{S \times M} = [\Phi]_{S \times M} [\Lambda]_{M \times M} \quad (2-50)$$

取同样 S 个测点延时 Δt 的 L 个等时间间隔 Δt 的结构自由度振动反应值，形成式(2-41)中的矩阵 $[\tilde{y}]$ 则:

$$[\tilde{y}]_{S \times M} = [\tilde{\Phi}]_{S \times M} [\Lambda]_{M \times M} \quad (2-51)$$

其中:

$$\tilde{y}_{ij} = y_{i,j+1} \quad (2-52)$$

\tilde{y}_{ij}, y_{ij} 分别为矩阵 $[\tilde{y}]$ 和 $[y]$ 中的 i 行 j 列元素。

由式(2-50)与式(2-51)可得：

$$[\Phi] = [y][\Lambda]^{-1} \quad (2-53)$$

$$[\tilde{\Phi}] = [\tilde{y}][\Lambda]^{-1} \quad (2-54)$$

将式(2-53)与式(2-54)代入(2-45)得：

$$[\tilde{y}][\Lambda]^{-1} = [y][\Lambda]^{-1} \text{diag}(e^{\lambda_i \Delta t}) \quad (2-55)$$

$[\tilde{y}]$ 与 $[y]$ 之间存在线性关系：

$$[\tilde{y}] = [y][B] \quad (2-56)$$

由式(2-52)可知，矩阵 $[B]$ 具有如下形式：

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \beta_1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \beta_2 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & \beta_3 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & \beta_M \end{bmatrix} \quad (2-57)$$

显然 $[B]$ 是一个仅由一列未知元素的 Hessenberg 矩阵，为求这列未知元素，由式(2-56)可知：

$$[y]\{\beta\} = \{\tilde{y}\}_M \quad (2-58)$$

式中， $\{\beta\} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M]^T$ ； $\{\tilde{y}\}_M$ 为矩阵 $[\tilde{y}]$ 的 M 列元素。则 $\{\beta\}$ 的最小二乘解为：

$$\{\beta\} = ([y]^T [y]^{-1}) [y]^T \{\tilde{y}\}_M \quad (2-59)$$

若已知 $\{\beta\}$ ，则 $[B]$ 可求出。将式(2-56)代入(2-55)有：

$$[B][\Lambda]^{-1} = [\Lambda]^{-1} \text{diag}(e^{\lambda_i \Delta t}) \quad (2-60)$$

式(2-60)是一个标准的特征方程。由矩阵 $[B]$ 的特征值 $e^{\lambda_i \Delta t} (i=1,2,\dots,M)$ ，按式(2-48)、式(2-49)可获得结构的模态频率和阻尼比。由矩阵 $[B]$ 的特征向量所组成的矩阵 $[\Lambda]^{-1}$ 按式(2-53)可获得结构的振型。采用 Matlab 可以很方便的求得一般矩阵的特征问题。

3 Prony 法

这种方法是根据结构的自由振动反应可以表示为复指数函数和的形式，然后用线性方法确定未知数。由于结构的自由振动反应可以表示为复指数函数的

和，于是人们将 Prony 法应用到振动参数识别中，获得了良好的效果。Prony 法的原理如下^[17]：

将 $t_k = k\Delta t$ 时刻的结构自由振动反应表示为：

$$y_r(k) = \sum_{i=1}^M \phi_{ri} e^{\lambda_i t_i} = \sum_{i=1}^M \phi_{ri} e^{\lambda_i k \Delta t} = \sum_{i=1}^M \phi_{ri} Z_i^k \quad (2-61)$$

式中：

$$Z_i = e^{\lambda_i \Delta t} \quad (2-62)$$

定义变量 α_l 使：

$$\sum_{i=0}^M \alpha_{M-1} Z^i = \prod_{i=1}^M (Z - Z_i) = 0 \quad (2-63)$$

显然 $\alpha_0 = 1$ 。为了确定 $\alpha_l (1, 2, \dots, M)$ ，由式(2-61)、式(2-63)有：

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^M \alpha_{M-1} y_r(k+l) &= \sum_{i=0}^M \alpha_{M-1} \left(\sum_{r=1}^M \phi_{ri} Z_i^{k+l} \right) \\ &= \sum_{i=0}^M \phi_{ri} Z_i^k \left(\sum_{l=1}^M \alpha_{M-1} Z_i^l \right) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2-64)$$

由于 $\alpha_0 = 1$ ，故上式可写为：

$$\sum_{i=0}^M \alpha_{M-1} y_r(k+l) = -y_r(M+k) \quad (2-65)$$

令上式中 $k=0, 1, \dots, M-1$ ，可得 M 个线性方程，从而可解得 M 个未知数 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M$ ，将 α_i 代入式(2-63)可解得 Z_i 。在由式(2-62)可得复频率 λ_i ：

$$\lambda_i = \frac{1}{\Delta t} \ln Z_i \quad (2-66)$$

复频率 λ_i 与复模态 ω_i 与阻尼比 ξ_i 的关系为：

$$\lambda_i = -\xi_i \omega_i + j \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (2-67)$$

则：

$$\omega_i = \sqrt{\lambda_i \lambda_i^*} \quad (2-68)$$

$$\xi_i = -\frac{\lambda_i + \lambda_i^*}{2\omega_i} \quad (2-69)$$

为求振型，令式(2-61)中 $k=0, 1, \dots, M-1$ ，此时 Z_i 已知，则由 M 个线性方程，可解得 M 个未知数 $\phi_{ri} (i=1, 2, \dots, M)$ 。

因结构脉冲响应函数可视为结构在某一特定初始状态下的自由振动反应，故可利用结构的脉冲响应函数离散数据采用 Prony 法识别结构的模态参数。

4 随机减量法^[17]

随机减量法是指从线性结构振动的一个或多个平稳随机反应样本函数中，获取该结构的自由振动反应数据，进而进行时域模态参数识别的方法。下面以单自由度结构为例说明采用随机减量技术由结构随机振动反应数据获取结构自由振动反应数据的方法。

受迫振动结构的位移反应可以表示为：

$$y(t) = y(0)D(t) + \dot{y}(0)V(t) + \int_0^t h(t-\tau)f(\tau)d\tau \quad (2-70)$$

式中， $D(t)$ 是初始位移为 1，初始速度为 0 的结构自由振动反应； $V(t)$ 是初始位移为 0，初始速度为 1 的结构自由振动反应； $h(t)$ 是结构单位脉冲响应函数； $f(t)$ 是均值为 0 的平稳随机激励； $y(0)$ ， $\dot{y}(0)$ 分别为结构初始位移和初始速度。

选取一个适当的振幅值 A 去截取一个结构随机反应样本函数(图 2-3)，可得到一系列交点 $t_i(i=1,2,\dots,n)$ 。对于自 t_i 时刻开始的反应 $(t-t_i)$ ，可以看成以下三部分反应的线性叠加：

- ① 由 t_i 时刻的初始位移引起的自由振动反应；
- ② 由 t_i 时刻的初始速度引起的自由振动反应；
- ③ 由 t_i 时刻开始的随机激励力 $f(t)$ 引起的强迫振动反应。

于是：

$$y(t-t_i) = y(t_i)D(t-t_i) + \dot{y}(t_i)V(t-t_i) + \int_{t_i}^t h(t-\tau)f(\tau)d\tau \quad (2-71)$$

由于激励 $f(t)$ 是平稳的，时间起始点不影响其随机特性，则将式(2-71)的时间起始点 t_i 移至坐标原点，可获得一系列随机过程的子样函数 $x_i(t)(i=1,2,\dots,n)$ ：

$$x_i(t) = AD(t) + \dot{y}(t_i)V(t) + \int_0^t h(t-\tau)f(\tau)d\tau \quad (2-72)$$

取 $x_i(t)$ 的统计平均为：

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) \\ &\approx E \left[AD(t) + \dot{y}(t_i)V(t) + \int_0^t h(t-\tau)f(\tau)d\tau \right] \\ &= AD(t) + E[\dot{y}(t_i)]V(t) + \int_0^t h(t-\tau)E[f(\tau)]d\tau \end{aligned} \quad (2-73)$$

当 $f(t)$ 是均值为 0 的平稳正态过程时， $E[f(t)]=0$ ，且 $y(t)$ 、 $\dot{y}(t)$ 也是均值为 0 的平稳正态过程，则 $\dot{y}(t_i)$ 是均值为 0 的随机变量， $E[\dot{y}(t_i)]=0$ 。故：

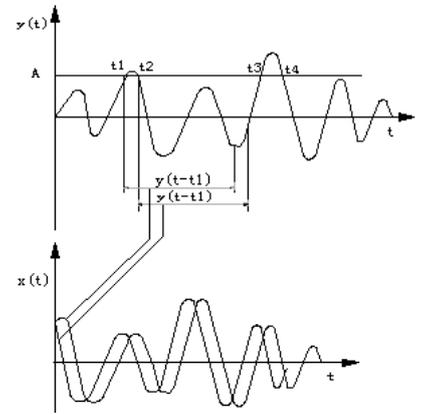


图 2-3 子样函数 $x_i(t)$ 的获取

$$x(t) \approx AD(t) \quad (2-74)$$

由此获得了初始位移为 A , 初速度为 0 的自由振动反应, 以此采用 ITD 法、STD 法或 Prony 法可辨识结构的模态参数。

此外还有 ARMA 模型法、最小二乘复指数法(LSCE 法)等方法。时域法面临的主要问题是抗噪声干扰、分辨和剔除由噪声而引起的虚假信息等问题, 围绕解决这些问题, 近些年发展出一系列的方法。这些方法虽然在一定条件下解决了一些问题, 但又带来了新的问题。因此参数辨识方法还有个不断发展与完善的过程^[13]。

2.3.2 结构物理参数的时域识别法

结构系统识别方法可以有不同的分类。如果以结构物理参数的确立作为结构动力检测或系统识别的最终目的, 则关于结构物理参数的识别可以划分为两个类别: 间接法和直接法。所谓间接法, 即先利用频域或时域数据识别模态参数, 再由模态参数识别结构物理参数。结构损伤识别一般采用直接法进行物理参数识别, 因此, 本节仅阐述直接法的基本理论。

1 时域识别原理

我们用最简单的时不变单自由度体系说明结构物理参数的时域识别方法。单自由度体系的动力方程为:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (2-75)$$

在经典的系统识别理论中, 假定结构的输入与输出信息可以完备测量, 而系统识别则是此前提下确立系统模型或系统参数。对于机械动力系统, 由于动力反应遵循牛顿运动定律, 所以, 仅需根据系统的输入、输出信息确立系统参数。对于上述单自由系统, 若已知系统输入的时程信息 $f(t)$ 和其它输出时程信息 $x(t), \dot{x}(t)$ 与 $\ddot{x}(t)$, 则只要在测量时间段内任取三个时程采样点, 即可构成如下方程组:

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t_1) + c\dot{x}(t_1) + kx(t_1) = f(t_1) & (2-76a) \\ m\ddot{x}(t_2) + c\dot{x}(t_2) + kx(t_2) = f(t_2) & (2-76b) \\ m\ddot{x}(t_3) + c\dot{x}(t_3) + kx(t_3) = f(t_3) & (2-76c) \end{cases}$$

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t_2) + c\dot{x}(t_2) + kx(t_2) = f(t_2) & (2-76b) \\ m\ddot{x}(t_3) + c\dot{x}(t_3) + kx(t_3) = f(t_3) & (2-76c) \end{cases}$$

$$m\ddot{x}(t_3) + c\dot{x}(t_3) + kx(t_3) = f(t_3) \quad (2-76c)$$

解上述方程组, 可唯一确定结构物理参数 m, c, k 。

在实际问题中, 系统输入与输出时程信息不可避免地存在测量噪声, 这必然会影响到系统的识别精度。为了消除观测噪声的影响, 可以采用扩展采样区间的方式, 应用最小二乘原理识别系统参数。事实上, 它相当于求解下述方程组:

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t_1) + c\dot{x}(t_1) + kx(t_1) = f(t_1) \\ m\ddot{x}(t_2) + c\dot{x}(t_2) + kx(t_2) = f(t_2) \\ \dots\dots \\ m\ddot{x}(t_N) + c\dot{x}(t_N) + kx(t_N) = f(t_N) \end{cases} \quad (2-77)$$

N 为给定采样点数目。

由于方程数目大于未知量数目，所以可利用最小二乘解。为此，可将式(2-75)在任意时点表示为：

$$h_j \theta = z_j \quad (2-78)$$

其中： $z_j = f(t_j)$ ； $h_j = (\ddot{x}(t_j), \dot{x}(t_j), x(t_j))$ ； $\theta = (m, c, k)^T$ 。则式(2-77)容易写成下式：

$$H\theta = Z \quad (2-79)$$

式中： $Z = (z_1, z_2, \dots, z_N)^T$ ， $H = (h_1, h_2, \dots, h_N)^T$ 。

式(2-79)的最小二乘解为：

$$\hat{\theta} = (H^T H)^{-1} H^T Z \quad (2-80)$$

上述论述表明：对于单自由度系统，可以利用系统的输入、输出时程测量信息直接确定结构的物理参数。这一结论，对于一般的线性结构动力系统也是成立的。本论文中的剪切模型时域法参数识别程序就是基于此理论利用 MATLAB 而编写的。

2 时域识别模型

为了利用结构时程测量信息识别结构物理参数，首要问题是怎样建立识别模型。一般来说，最基本的模型是利用有限单元法建立的动力分析模型。在此基础上，可以进一步利用有限元的思想，建立基于有限元列式的参数方程识别标准模型^[90]。

结构识别系统一般分为线性参数系统和非线性参数系统，由于目前应用与实际工程结构参数识别模型一般简化为线性参数系统，此处仅介绍线性参数系统的相关模型理论。根据线性模型关系，有：

$$Z = H\theta + e \quad (2-81)$$

其中： Z 为含 N 个元素的模型输出向量， N 为采样时点的个数； H 为模型输入或输出变量的等价表达式； $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M)^T$ 是未知的模型参数； M 是模型参数个数； e 为 $N \times 1$ 阶的模型噪声向量。

对于运动方程为下式的一般多自由度动力系统：

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = F(t) \quad (2-82)$$

若 Y, \dot{Y}, \ddot{Y} 皆可观测，则可以将其转化为上述系统识别的标准格式(2-81)。事实上，

根据有限元法的基本概念，可以将刚度矩阵 K 表示为：

$$K = \sum_{i=1}^n T_{ki}^T \bar{k}_i T_{ki} \quad (2-83)$$

式中： $T_{ki} = T_{ka} T_{kc}$ 为单元坐标转换矩阵和定位矩阵的乘积； $\bar{k}_i = \theta_{ki} \hat{k}_i$ 为局部坐标下的单元刚度矩阵； θ_{ki} 为待识别的刚度矩阵； \hat{k}_i 为提取因子 θ_{ki} 之后的单元刚度矩阵。

结构参数时域法与频域法相比，其研究历史较短，它是随着计算机发展起来的。很多学者在此方面做了很多工作，对结构物理参数时域识别的基本准则、最小二乘法类系统识别算法、卡尔曼滤波类系统识别算法以及预报误差识别算法等进行了研究，提供了时域法参数识别的理论依据和用于实际工程损伤检测方法的基础，在一定范围内提高了时域法参数识别的精度。

以上阐述了结构参数识别的频域法和时域法的理论基础和基本方法，以及两种方法的特点。当然，由于实际结构系统的复杂性，系统噪声和结构模型与理论研究的假定有一定的差距，频域法和时域法对于结构物理参数的精确识别、用于实际结构损伤检测都还存在一定的难度。综合两种方法的特点，研究出用于实际工程损伤检测的方法，对于提高结构健康监测、结构灾害预报的可靠性具有重大的社会效益和经济效益。

2.4 小结

结构参数的频域识别法，是基于结构传递函数或频率响应函数在频域内识别结的固有频率、阻尼比和振型等模态参数的方法，或通过实测模态参数求解结构动力学特征值反问题识别结构物理参数的方法，本章阐述了有关频域法的基本理论和方法。但由于频域法是一种全局性的统计方法，对于结构损伤的定位具有一定困难。

结构物理参数时域法是随着计算机发展起来的结构参数识别方法，结构物理参数直接识别法具有结构特征信息丰富的特点，通过求解结构动力方程的反问题，能较准确地识别结构的损伤程度和位置。

第三章 噪声对参数识别精度的影响

3.1 引言

结构参数识别的动力方法中, 无论采用频域法或时域法识别, 在测试信号和数值计算过程中, 各个环节都可能产生误差, 为了方便分析, 我们将这种误差均归纳为噪声的影响。按照对信息的影响可分为:

- 系统误差: 激励中的电信号噪声(不产生物理响应);
 - 由谱分辨率不够引起的谱密度估计误差;
 - 系统非线性;
 - 对响应有贡献的未测激励, 且与测量激励相关;
 - 信号处理中的误差如混叠、泄漏;
 - 数值积分引起的误差;
- 随机误差: 传感器和信号处理过程中的电噪声、采样过程中的数字噪声;
 - 对响应有贡献的未测激励, 且与测量激励无关;
 - 系统非线性。

在信号噪声中根据频率特点, 一般可分为高频噪声和低频噪声(低频噪声也称为信号趋势线), 随机噪声一般为高频噪声, 仪器温度漂移、直流分量和积分计算过程中引入的计算误差, 可认为是低频噪声。模态分析理论针对不同误差, 采取了相应的方法来减少对测试结果的影响: 针对随机噪声, 可以通过接地、平均、H 估计方法改进等来加以消除影响; 针对泄漏、混叠, 使用采样定理、加窗来进行处理; 至于系统的非线性, 可采用互易性检验确定是否应加以考虑, 或通过选择随机激励方式在一定程度上加以消除, 此外, 部分仪器测试信号中含有大量的工频信号(50Hz), 可采用直流电源, 减少此因素的影响。

3.2.非周期信号的幅值谱密度、能量谱密度

利用地脉动进行结构损伤识别, 属于随机激励作用下, 结构的动力响应。在随机激励作用下, 结构的动力响应是随机的非周期信号, 其幅值谱密度、能量谱密度与周期信号有所不同。因此, 信号的频域分析基本理论也有所区别, 下面进行简要阐述。

1. Fourier 变换及其谱图分析

非周期信号一般为时域有限信号, 具有收敛可积分条件, 其能量为有限值。这种信号频域分析的数学手段是傅立叶变换, 时域信号 $x(t)$ 与其傅立叶变换

$X(\omega)$ 构成时域、频域变换偶对，其表达式为：

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3-1)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3-2)$$

对式(3-1)进行分析可知，与周期信号相类似，非周期信号也可以分解成许多不同频率的正、余弦分量。所不同的是，由于非周期信号的周期 $T \rightarrow \infty$ ，基频 $\omega_0 \rightarrow d\omega$ ，于是它包含了从 0 到无限大的所有频率分量。各频率分量的幅值 ($X(\omega)d\omega/2\pi$) 则趋于无穷小，所以频谱不能用幅值表示，而必须用密度函数表示。

式(3-1)中的 $X(\omega)$ 具有单位频率的幅值的量纲，而且是复数，所以有：

$$X(x) = |X(\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \quad (3-3)$$

称 $|X(\omega)| - \omega$ 关系为幅值谱密度。

2. 随机信号的功率谱密度

随机信号是时域无限信号，不具备可积分条件，因此不能直接进行 Fourier 变换。此外随机信号的频率、幅值、相位都是随机的，因此从理论上讲，一般不作幅值谱和相位谱分析，而是用具有统计特征的功率谱密度作谱分析。

根据维纳—辛钦公式，平稳随机过程的功率谱密度 $S_x(\omega)$ 与自相关函数 $R_x(\tau)$ 是一 Fourier 变换偶对，即：

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3-4)$$

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega \quad (3-5)$$

因为自相关函数是偶函数，所以 $S_x(\omega)$ 是非负实偶函数。式(3-4)中谱密度函数定义在所有频域上，一般称作双边谱。在实际中，用定义在非负频率上的谱更为方便，这种谱称为单边功率谱密度函数 $G_x(\omega)$ ，它们的关系(见图 3-1)为：

$$\begin{aligned} G_x(\omega) &= 2S_x(\omega) \\ &= 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (\omega > 0) \end{aligned} \quad (3-6)$$

同理可定义两个随机信号 $x(t)$ ， $y(t)$ 之间的互谱密度函数：

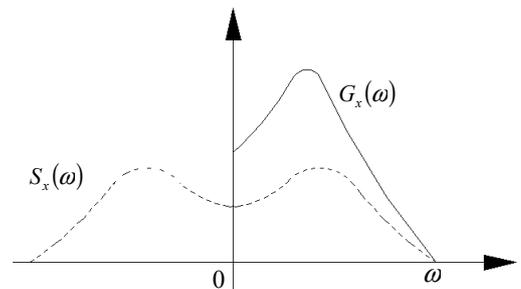


图 3-1 单边与双边功率谱密度函数

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3-7)$$

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega \quad (3-8)$$

单边互谱密度函数：

$$G_{xy}(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (0 < \omega < \infty) \quad (3-9)$$

因为互相关函数为非偶函数，所以互谱函数是一个复数，即：

$$G_{xy}(\omega) = C_{xy}(\omega) - jQ_{xy}(\omega) \quad (3-10)$$

实部与虚部为：

$$C_{xy}(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) \cos \omega\tau d\tau \quad (3-11)$$

$$Q_{xy}(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) \sin \omega\tau d\tau \quad (3-12)$$

实部称为共谱密度函数，虚部称为正交谱密度函数。在实际中常用谱密度函数的幅值和相位来表示，即：

$$G_{xy}(\omega) = |G_{xy}(\omega)| e^{-j\theta_{xy}(\omega)} \quad (3-13)$$

$$|G_{xy}(\omega)| = \sqrt{C_{xy}^2(\omega) + Q_{xy}^2(\omega)} \quad (3-14)$$

$$\theta_{xy}(\omega) = \arctg \frac{Q_{xy}(\omega)}{C_{xy}(\omega)} \quad (3-15)$$

显然，互谱表示出幅值以及两个信号之间的相位关系。

需要指出，互谱密度不像自谱密度那样具有功率的物理含义，引入互谱这个概念是为了能在频域描述两个平稳随机过程的相关性。在实际中，常利用测定线性系统的输出与输入的互谱密度来识别系统的动态特性。

3.3 噪声对频域法参数识别的影响

3.3.1 随机噪声对结构固有频率的影响

频域法结构参数反演一般是利用测试的加速度信息，通过 FFT 变换或其他频域变换的方法，获得结构的固有频率、振型，通过求解结构动力学特征值的反问题识别结构物理参数，如结构刚度等。因此，频域法物理参数反演精度的主要影响因素是结构的固有频率和振型。频域法是建立在统计学理论上，其抗噪能力强，这是频域法的主要优点。但这也使得在结构损伤识别中，对于结构弱损伤的情况下，其识别能力也会大大降低，下面以算例加以说明。

1. 计算模型和基本参数

四层剪切型结构的基本参数

表 3-1

层号	1	2	3	4
刚度 k_i (N/m)	1700280	1675770	2361900	2361900
阻尼 c_i	1224	2588	3073	3073
质量 m_i (kg)	610	580	530	530

以 4 层房屋剪切模型为例，计算简图如图 3-2 所示，模型基本参数如表 3.1 所示，采用底部输入白噪声随机激励模拟地脉动作用，各质点获得结构动力响应。通过振型分解法计算，结构(无阻尼)固有频率为 3.1594 Hz、9.4420 Hz、14.0647 Hz 和 18.3472 Hz。由于房屋结构的阻尼一般较小，本例中近似取无阻尼固有频率为阻尼固有频率。

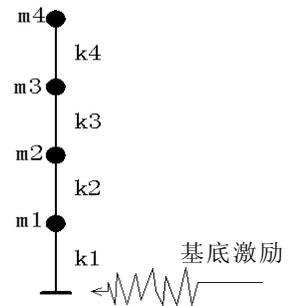


图 3-2 剪切结构模型

2. 噪声对结构固有频率的影响

分别将结构动力响应信号加入不同幅度的噪声，采用自功率频谱分析获得结构的固有频率，研究噪声对固有频率的影响(仅列出第 3 层的加速度反应)。

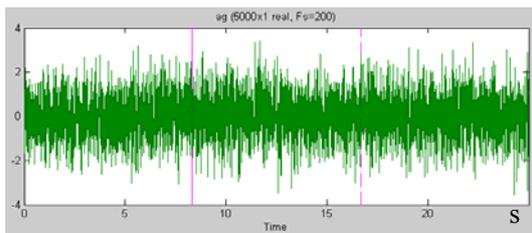


图 3-3 地面加速度信号

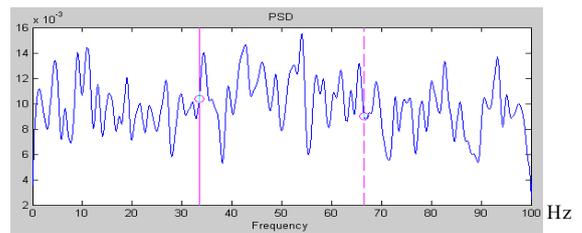


图 3-4 地面加速度频谱图

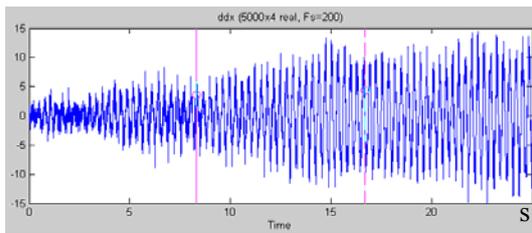


图 3-5 无噪声的结构加速度时程

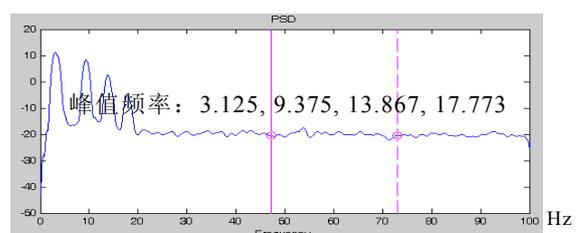


图 3-6 无噪声结构加速度频谱图

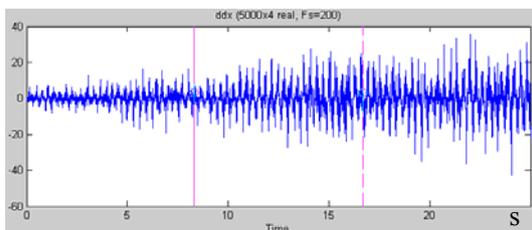


图 3-7 噪声 5% 时结构加速度时程

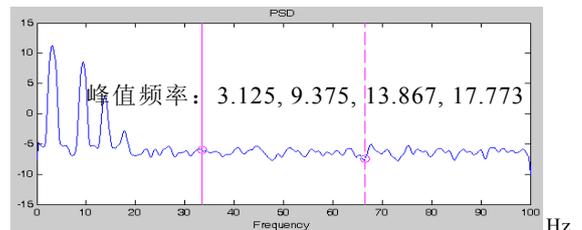


图 3-8 噪声 5% 时结构加速度频谱图

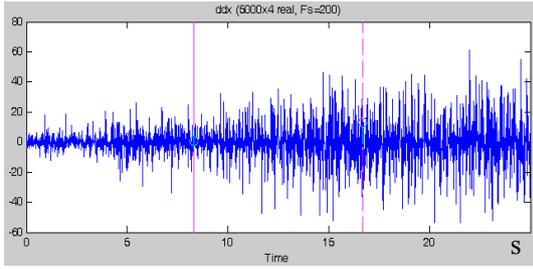


图 3-9 噪声 10%时结构加速度时程

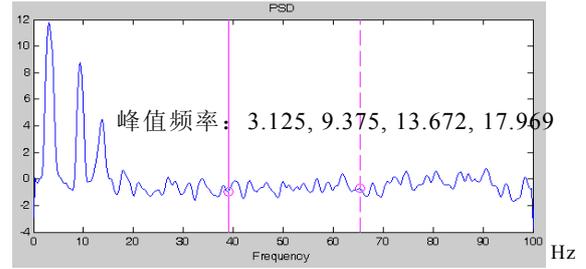


图 3-10 噪声 10%时结构加速度频谱图

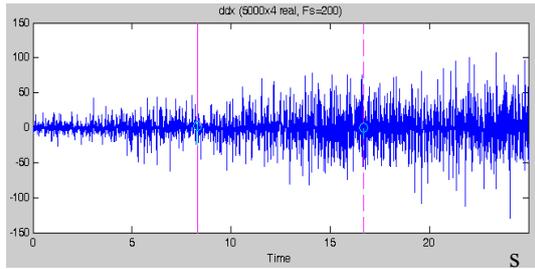


图 3-11 噪声 20%时结构加速度时程

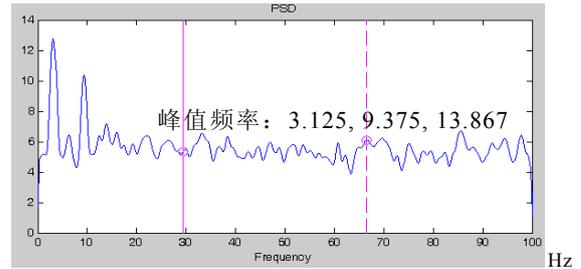


图 3-12 噪声 20%时结构加速度频谱图

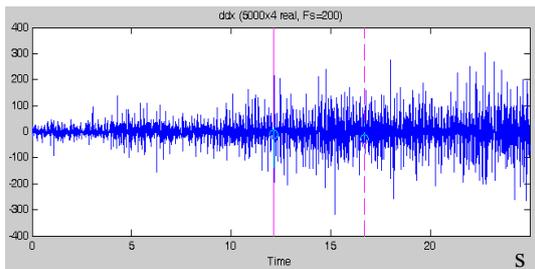


图 3-13 噪声 50%时结构加速度时程

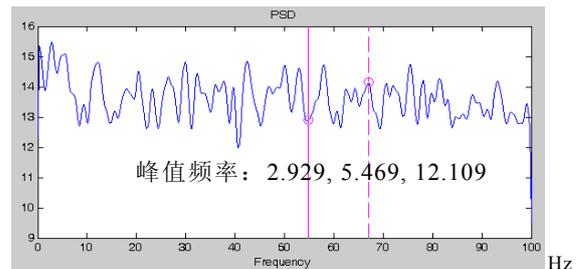


图 3-14 噪声 50%时结构加速度频谱图

以噪声水平为 0 作为结构固有频率精确值(因为计算的理论值属于无阻尼固有频率)，精确值和各级噪声水平下的识别结果如表 3.2 所示。

噪声水平(%)	基频/Hz	误差(%)	第二阶频率/ Hz	误差(%)	第三阶频率/ Hz	误差(%)
0	3.125	0	9.375	0	13.867	0
5	3.125	0	9.375	0	13.867	0
10	3.125	0	9.375	0	13.872	0.04
20	3.125	0	9.375	0	13.867	0
50	2.929	6.2	5.469	41.7	12.109	12.7

从算例计算结果来看，在结构动力响应信号中加入 0~20%噪声，结构的固有频率变化非常小。当噪声为原始信号幅值的 20%时，第 3 阶固有频率的最大变化只有 1.5%，第 1 阶和第 2 阶固有频率基本没有变化，但结构频谱图中固有频率峰值不明显，使得识别难度加大。当噪声为原始信号幅值的 50%时，信

号时程图(图 3-13)、频谱图(图 3-14)几乎看不出原有的信号特征(图 3-5、图 3-6),但结构的固有频率 9.375、17.969 仍包含在频谱图中。这表明,若噪声的频率与结构固有频率相差较远时,对结构固有频率影响不大,验证了频域法具有较强的抗噪能力。

3.3.2 低频噪声对结构固有频率的影响

在噪声中除了高频随机噪声以外,温度引起仪器的直流漂移,数值积分引起的计算误差都具有低频噪声的特点。因此,研究低频噪声(信号趋势线)对结构固有频率的影响,同样具有一定的实际意义。在实际检测中,结构的动力响应一般利用加速度传感器获得加速度信号,通过数值积分计算获得速度和位移(也有部分仪器通过积分电路获得),现将数值积分求得的位移进行比较。以图 3-2 结构模型为例,讨论低频噪声对位移响应获得的固有频率精度影响(仅绘出第 3 层位移响应)。

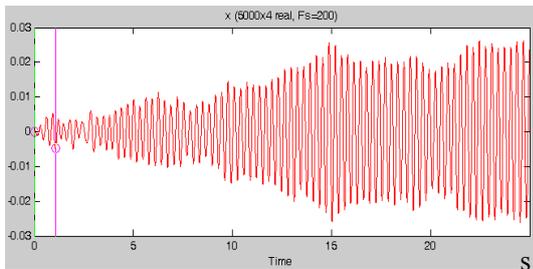


图 3-15 实际位移时程

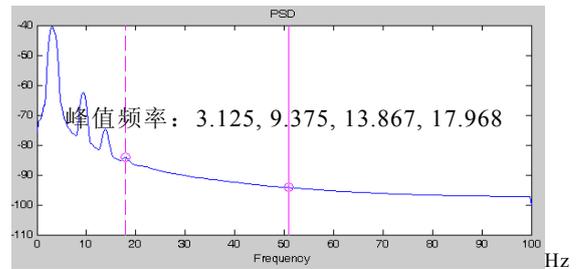


图 3-16 实际位移频谱图

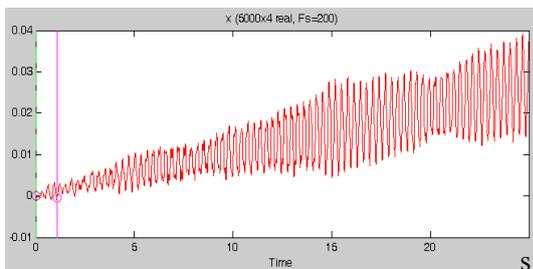


图 3-17 积分获得的位移时程

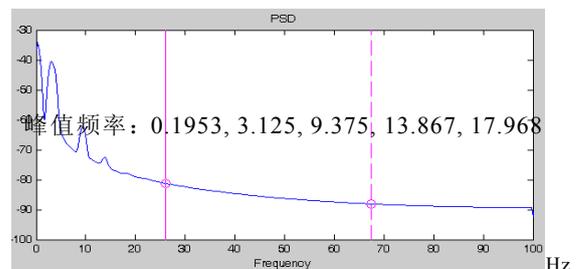


图 3-18 积分获得的位移频谱图

从积分获得的位移时程图(图 3-17)可见,由于数值积分时引入了低频趋势线,频谱图(图 3-18)中最大峰值已由原来的 3.125 变为 0.1953,使得结构固有频率的识别难度加大。实际测试的加速度信号中同样也包含了这种性质相似的低频信号。

3.3.3 频域法对结构弱损伤的识别

不少学者对于频域法进行结构参数识别从理论上进行了研究,并通过试验验证^[40],认为结构损伤的发生可以由实测固有频率的变化体现。但结构参数识

别用于结构轻微损伤的情况时，一般结构刚度降低并不十分严重。因此，研究结构轻微损伤情况对结构固有频率的影响，以及固有频率与结构刚度变化的敏感性对认识频域法进行结构损伤识别具有一定的实际意义。

同样以图 3-2 结构模型作为算例，分别不同位置结构损伤对结构固有频率的影响。其计算结果如图 3-19~图 3-26。

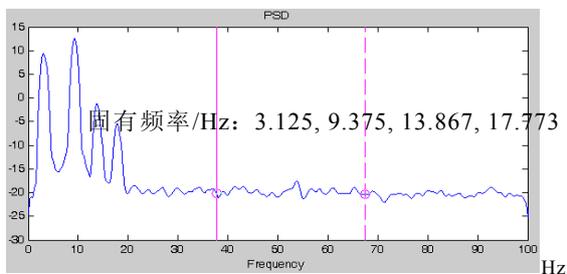


图 3-19 k_1 降低 5% 时的频谱图

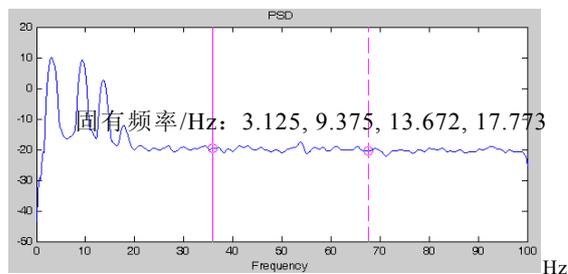


图 3-20 k_2 降低 5% 时的频谱图

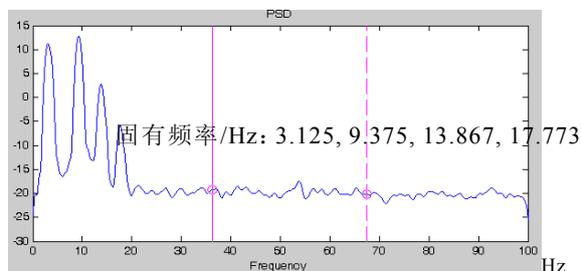


图 3-21 k_3 降低 5% 时的频谱图

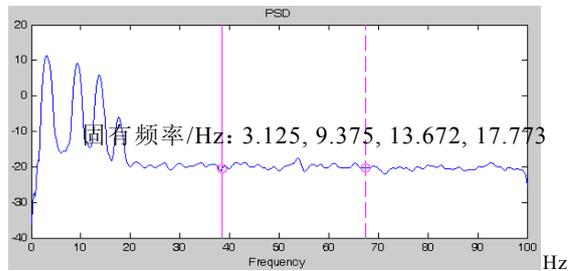


图 3-22 k_4 降低 5% 时的频谱图

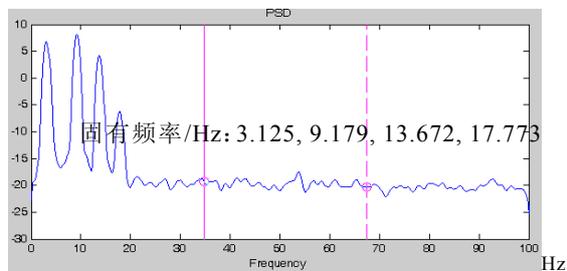


图 3-23 k_1 降低 10% 时的频谱图

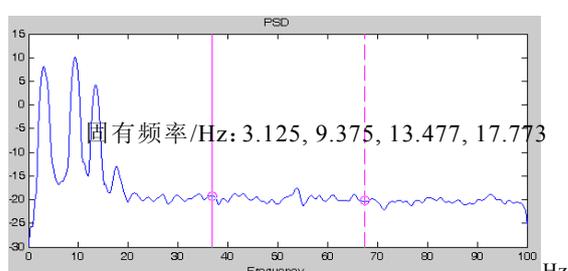


图 3-24 k_2 降低 10% 时的频谱图

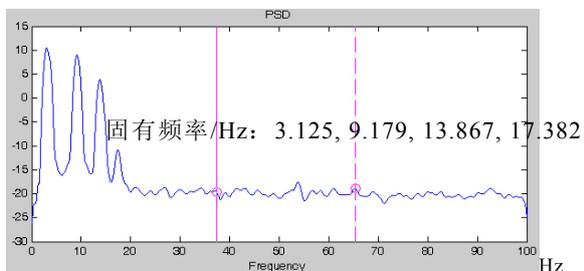


图 3-25 k_3 降低 10% 时的频谱图

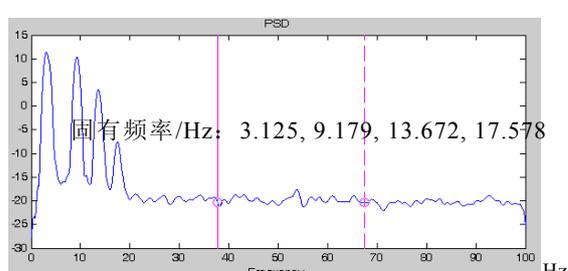


图 3-26 k_4 降低 10% 时的频谱图

根据以上计算结果可知，当结构刚度损伤在 10% 以内时，结构基频基本没

有变化，其它固有频率变化也很小，最大变化仅为 3%左右，大约与噪声 20%时的误差相近。固有频率变化率见表 3.3。因此频域法作为结构损伤识别，在实际应用中有一定难度。

结构刚度变化对固有频率的影响 表 3-3

固有频率/Hz		f_1	f_2	f_3	f_4	Δf_1	Δf_2	Δf_3	Δf_4 (%)
刚度 变 化 情 况	$k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4$	3.125	9.375	13.867	17.773	0	0	0	0
	$0.95*k_1, k_2, k_3, k_4$	3.125	9.375	13.867	17.773	0	0	0	0
	$k_1, 0.95*k_2, k_3, k_4$	3.125	9.375	13.672	17.773	0	0	-1.4	0
	$k_1, k_2, 0.95*k_3, k_4$	3.125	9.375	13.867	17.773	0	0	0	0
	$k_1, k_2, k_3, 0.95*k_4$	3.125	9.375	13.672	17.773	0	0	-1.4	0
	$0.90*k_1, k_2, k_3, k_4$	3.125	9.179	13.672	17.773	0	-2.1	0	0
	$k_1, 0.90*k_2, k_3, k_4$	3.125	9.375	13.477	17.773	0	0	-3	0
	$k_1, k_2, 0.90*k_3, k_4$	3.125	9.179	13.867	17.382	0	-2.1	0	-2.2
	$k_1, k_2, k_3, 0.90*k_4$	3.125	9.179	13.672	17.578	0	-2.1	-1.4	-1.1

通过探讨噪声对结构固有频率的影响可知，频域法对高频噪声的抗噪能力较强，而低频噪声对固有频率识别的影响较大。因此，在频域法进行参数辨识时，对测试信号中的低频部分必须进行处理。当然，在实际结构测试中，信噪比可能很低，因此同样需要对信号进行滤波处理，以及利用相干函数、频率响应函数和振型特点等进行结构固有频率的识别，以提高参数识别的精度。此外，在结构弱损伤情况下，结构固有频率的变化并不明显，频域法进行结构弱损伤识别在实际工程应用中存在一定的困难。

3.4 噪声对时域法参数识别的影响

上小节讨论了噪声对频域法参数识别的影响，时域法结构损伤识别是以结构物理参数作为结构动力检测或系统识别的最终目的，一般采用直接法。

第二章中我们较为详细的讨论了时域法直接识别结构物理参数的理论和办法，当信息完备的情况下，求解动力方程反问题时，采用最小二乘法以对噪声的剔除。当噪声是线性的，通过理论证明^[9]，这种误差估计属于无偏估计，当信号时程具有较大长度时，计算结果具有较好的精度。但实际中噪声的特性不容易确定，因此噪声对时域法参数反演结果精度影响较大。本节通过算例分别讨论几种噪声对时域法参数反演结果精度的影响。

3.4.1 白噪声对结构反演刚度的影响

在实测的加速度信号中包含系统误差和随机误差的噪声，根据其特性可分为线性噪声(白噪声)和非线性噪声(有色噪声)，根据噪声的主要频率范围，可分为高频噪声和低频噪声。为了解噪声对时域法结构参数反演的精度影响，以图

3-21 剪切模型为例，通过正演获得结构各质点的加速度、速度和位移响应，研究各种噪声对结构参数反演精度的影响，具有一定的实际意义。

四层剪切型结构的基本参数 表 3-4

层号	1	2	3	4
刚度 k_i (N/m)	1700280	1675770	2361900	2361900
阻尼 c_i	1224	2588	3073	3073
质量 m_i (kg)	1466.5	1408.7	1408.7	1259.9

1. 随机白噪声对结构反演刚度精度的影响

随机白噪声一般为高频噪声为主，在加速度、速度和位移信号中同时加入白噪声，研究白噪声对结构参数反演结果精度的影响，其计算结果如表 3-5 和图 3-28 所示。由于加速度、速度和位移的频率范围具有较大的差别，一般加速度高频成分较大，速度和位移低频成分较多。通过分别在加速度、速度和位移中加入白噪声，以研究白噪声对加速度、速度和位移的不同影响，计算结果如表 3-6 所示。

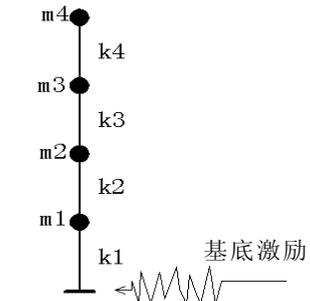


图 3-27 剪切结构模型

加速度、速度和位移信号同时加入白噪声的反演刚度计算 表 3-5

反演刚度值/ (N/m)					
	0%噪声	10%噪声	20%噪声	30%噪声	50%噪声
K_1	1700300	1741196	1875409	2096619	2759158
K_2	1675800	1744733	1928558	2218988	3066436
K_3	2361900	2514054	2893931	3482877	5168976
K_4	2361900	2454718	2853852	3536519	5594593
反演刚度相对误差%					
	0%噪声	10%噪声	20%噪声	30%噪声	50%噪声
K_1	1.01e-12	-2.4065	-10.3	-23.31	-62.277
K_2	9.59e-13	-4.1153	-15.085	-32.416	-82.987
K_3	6.11e-13	-6.442	-22.526	-47.461	-118.85
K_4	4.53e-13	-3.9298	-20.829	-49.732	-136.87

加速度、速度和位移信号分别加入 50%白噪声反演刚度计算 表 3-6

	0%噪声	加速度加入 50%噪声	速度加入 50%噪声	位移加入 50%噪声
K_1	1700300	1665941	1700000	1619439
K_2	1675800	1729400	1675709	1568651
K_3	2361900	2548629	2361652	2129431
K_4	2361900	2015927	2361913	2089908

加速度、速度和位移信号分别加入 50%白噪声反演刚度计算误差 表 3-6a

	0%噪声	加速度加入 50%噪声	速度加入 50%噪声	位移加入 50%噪声
K_1	1.01e-12	2.0196	0.016471	4.7546
K_2	9.59e-13	-3.2003	0.0036622	6.3922
K_3	6.11e-13	-7.9059	0.010485	9.8425
K_4	4.53e-13	14.648	-0.00053968	11.516

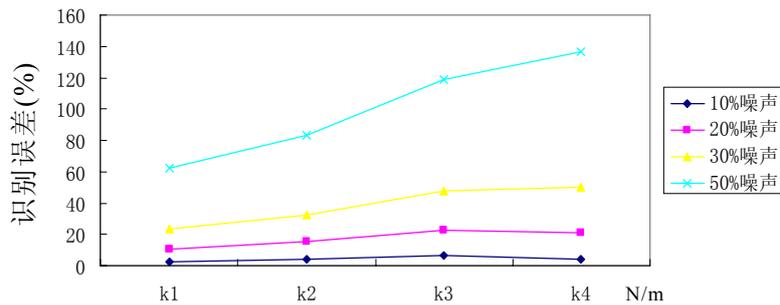


图 3-28 结构参数识别误差

通过算例分析可知，由于噪声对结构动力响应信号的影响，使得时域法结构参数反演结果误差增大。当噪声为 30%时，刚度反演误差达到 49%，噪声为 50%时，刚度反演误差达到了 136%，已经完全没有实际价值。计算中发现，由于激励信号和噪声都是随机信号，反演的结果误差也不完全确定，因此实际工程检测中噪声的性质将影响反演结果的精度，但噪声对时域法反演结果的影响是十分明显的。从算例计算中还发现加速度和位移中的信噪比影响最大，速度中的信噪比相对影响较小，这可能是由于结构阻尼较小的原因。因此，时域法结构参数反演运算中，影响结构参数反演计算精度的主要因素是加速度和位移信噪比的影响。

2. 低频噪声对结构参数反演结果的影响

在结构动力测试中，由于仪器设备等原因，只能检测到加速度信号，速度和位移则是通过积分方法获得。这样，速度和位移信号中包含积分引入的低频分量，此外，测试的加速度信号中常常也包含仪器的直流漂移等低频信号。下面通过正演得到的加速度、速度和位移与低频信号叠加进行反演，观察低频信号对结构参数反演结果精度的

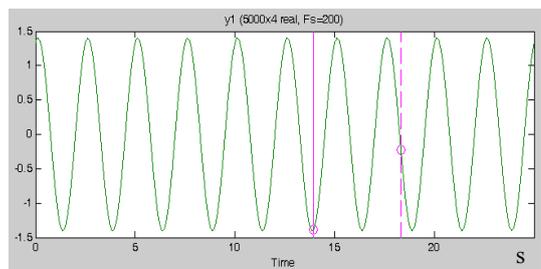


图 3-29 低频信号

影响。

设频率 $f=0.2$ 的低频信号 $y = A\sin(0.4\pi t)$ ，其中 A 取加速度、速度和位移最大值的 20% 分别叠加，生成新的信号作为结构刚度反演的测试信号如图 3-30~图 3-41 所示。刚度反演结果见表 3-7。

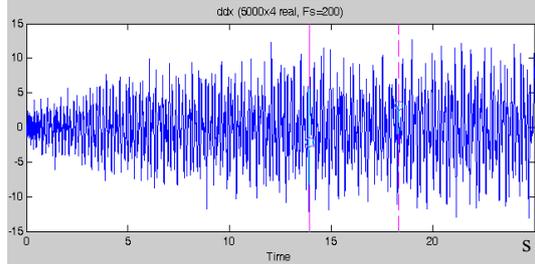


图 3-30 原加速度信号

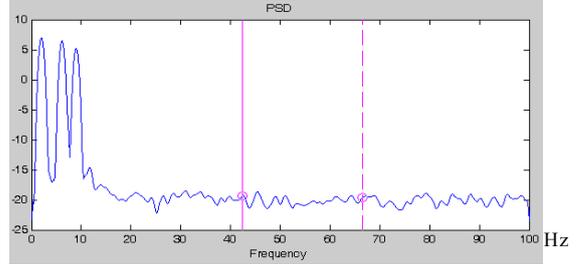


图 3-31 原加速度频谱图

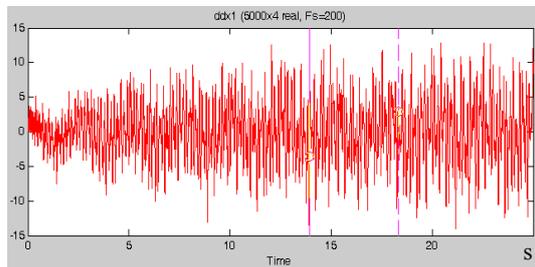


图 3-32 叠加后加速度信号

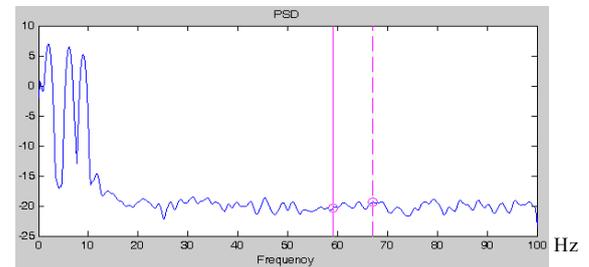


图 3-33 叠加加速度频谱图

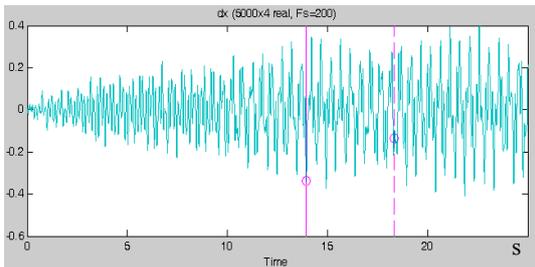


图 3-34 原速度信号

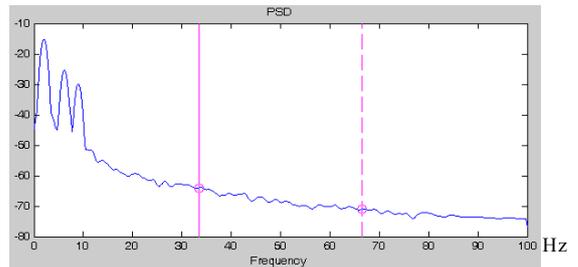


图 3-35 原速度频谱图

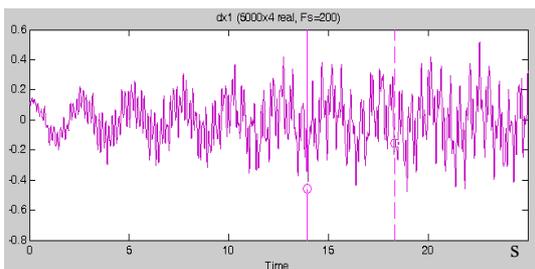


图 3-36 叠加后速度信号

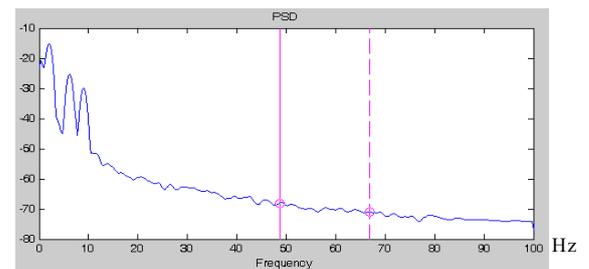


图 3-37 叠加速度频谱图

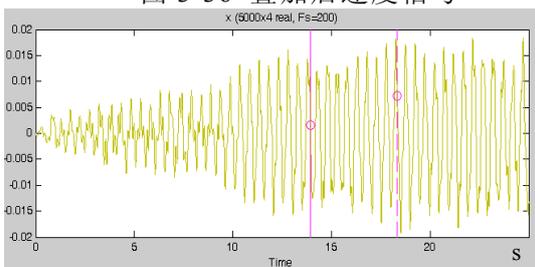


图 3-38 原位移信号

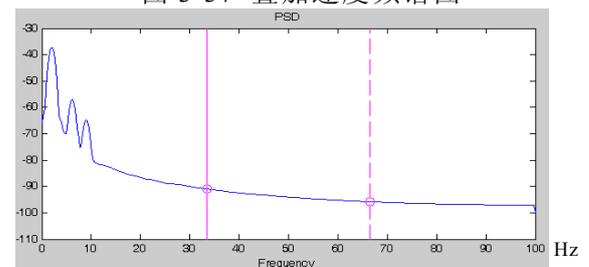


图 3-39 原位移频谱图

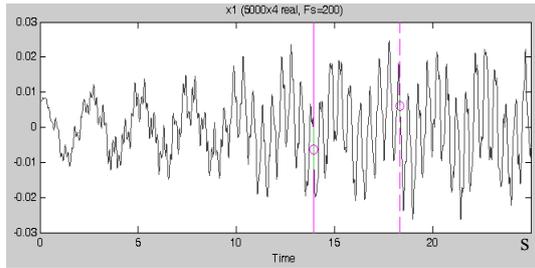


图 3-40 叠加后位移信号

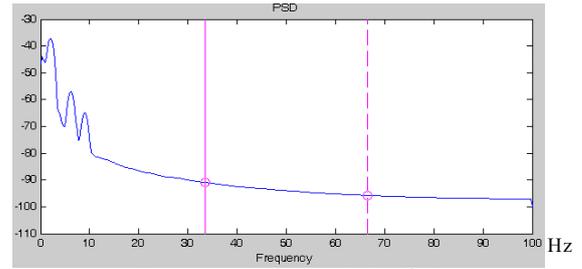


图 3-41 叠加位移频谱图

低频噪声对反演刚度的影响

表 3-7

	0%噪声	加速度加入 低频噪声	速度加入 低频噪声	位移加入 低频噪声
K_1	1700300	1696060	1700319	214685
K_2	1675800	1672950	1675790	652757
K_3	2361900	2359139	2361921	1323565
K_4	2361900	2360239	2361915	1631752

	0%噪声	加速度加入 低频噪声	速度加入 低频噪声	位移加入 低频噪声
K_1	1.01e-12	0.24822	-0.0023083	87.374
K_2	9.59e-13	0.1683	-0.0011882	61.047
K_3	6.11e-13	0.1169	-0.0008723	43.962
K_4	4.53e-13	0.070313	-0.00061926	30.914

通过加速度、速度和位移加入低频信号进行反演的计算结果可知，低频噪声对加速度和速度的影响较小，对位移的影响较大。这主要是加速度和速度的频率相对较高，而位移频率较低的原因所致。

3.4.2 有色噪声对结构反演刚度的影响

在信号中的噪声是高斯白噪声时，可以采用线性滤波的方法。但当噪声为有色噪声时，对时域法识别结构参精度的影响是否相同？有色噪声可看作是白噪声经过非线性动态后产生的，实际上我们所测到可能是信号与有色噪声的混合信号。为了解有色噪声的时域法物理参数反演的影响，仍以图 3-21 结构模型为例，讨论有色噪声对结构反演刚度的影响。

设白噪声信号为 $n(k)$ ，有色噪声为白噪声通过下列非线性函数后产生：

$$d(k) = f(n(k), n(k-1)) = \frac{4n(k-1) \times \sin(n(k))}{1 + n^2(k-1)} \quad (3-16)$$

设程序产生 5000 步的高斯白噪声为 $n1$ ，按(3-16)产生的有色噪声为 $n2$ 。 $n1$ 的最大值为 3.6927，平均值为 -0.0014， $n2$ 的最大值为 1.9985，平均值为 0.0334。

在加速度、速度和位移信号中同时加入有色噪声，研究有色噪声对结构参数反演结果精度的影响，其计算结果如表 3-8 所示。

加速度、速度和位移信号加入有色噪声的反演刚度					表 3-8
	0%噪声	10%噪声	20%噪声	30%噪声	50%噪声
K_1	1700300	1788715	1899633	2033002	2366934
K_2	1675800	1736353	1818662	1922664	2195597
K_3	2361900	2443142	2555302	2698364	3077098
K_4	2361900	2469005	2607606	2777686	3212163

反演刚度相对误差%					
	0%噪声	10%噪声	20%噪声	30%噪声	50%噪声
K_1	1.01e-12	-5.2012	-11.725	-19.569	-39.208
K_2	9.59e-13	-3.6152	-8.527	-14.733	-31.02
K_3	6.11e-13	-3.4397	-8.1884	-14.246	-30.281
K_4	4.53e-13	-4.5347	-10.403	-17.604	-35.999

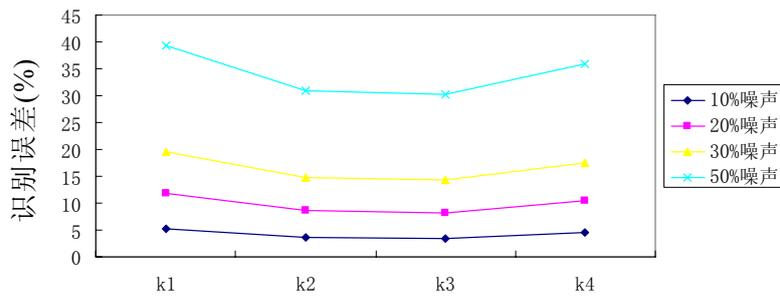


图 3-42 有色噪声对结构参数识别误差

通过以上算例分析可知，噪声对时域法参数识别的影响较大，噪声的特性影响并不十分明显，主要取决于信噪比。

3.5 小结

为了全面了解噪声对结构参数识别的影响，以便有针对性的提出解决方法，本章通过研究各种不同噪声对频域法和时域法进行结构参数识别结果误差分析，得出以下结论。

利用地脉动引起剪切结构模型的动力响应，进行结构参数识别时，信号中混入不同性质的噪声信号，对参数识别结果误差具有以下性质：

- (1) 结构固有频率的识别结果受测试信号高频噪声的影响较小，但对低频噪声的影响比较敏感；
- (2) 结构弱损伤对结构的固有频率影响较小，不利于结构损伤识别；
- (3) 时域法参数识别直接法识别结果受高频噪声影响较大，

- (4) 时域法参数识别中，加速度和位移受低频噪声影响较小，位移受低频噪声影响较大；
- (5) 时域法参数识别结果对噪声的线性和非线性不敏感，总体上，信噪比越低，识别结果误差越大。

第四章 信号去噪理论与方法

4.1 引言

在结构动力检测过程中,测试噪声是不可避免的,通过第三章的数值算例分析可知,对于频域法识别结构的固有频率时,识别结果受高频噪声影响不大,但对于低频噪声则需要利用先验性或理论计算结果进行剔除。对于时域法识别结构参数时,识别结果受噪声影响较大。地脉动引起的结构动力响应,一般信噪比较小,测试数据的噪声会导致参数识别结果与实际值的严重偏离。在结构弱损伤时,频域法参数识别具有一定的难度,时域法参数识别精度则主要取决于信噪比。因此,如何抑制或剔除原始信号中的测试噪声是结构动力学系统识别必须解决的一个关键问题。

在传统的信号去噪方法中,最常用的是频域法中的滤波方法以及时域法中的平均方法。滤波方法对剔除与信号频带相互分离的确定性噪声较为有效,但对于随机噪声的剔除效果则较差。时域平均方法在对信号进行足够多次的平均处理后能较有效的去除随机噪声,但它要求信号比较平稳且有足够的长度来保证平均所需要的样本数。

随着小波理论研究的深入,许多研究者开始利用小波的局部化时频特性和噪声的奇异特性对平稳随机信号进行去噪处理,1988年,Mallat^[79]提出了多分辨分析概念,使小波具有带通滤波的特性,因此可以利用小波分解与重构的方法滤波降噪^[80]。此后,Mallat^[81]又提出了奇异性检验理论,从而可以利用小波变换模极大值方法去噪^[91]。1995年,Donoho^[82]提出了小波阈值去噪法,该方法由于具有良好的性能而在信号和图像处理领域得到了广泛的应用和发展。

本章主要阐述小波阈值去噪的基本原理和方法,介绍一类新型的可微阈值函数及其相应的阈值估计方法,研究基于可微阈值函数的阈值去噪方法在结构时域识别中的具体应用。针对线性动力系统时域识别的特点,提出一种基于小波包分析的结构特征信号提取的去噪方法,在处理地脉动响应信号去噪的应用中取得了很好的效果。

4.2 小波分析与小波阈值去噪的基本理论

4.2.1 小波函数及其时频特性

设 $\psi(t)$ 为一平方可积函数,即 $\psi(t) \in L^2(R)$,若其傅立叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足条件

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (4-1)$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波，并称式(4-1)为小波容许条件。从上述定义可以看出,小波函数的时域波形具有如下特点:

- (1)小波函数在时域上具有紧支集或近似紧支集，因此具有局部化的时窗；
- (2)小波围绕时间轴的面积为零，因此小波具有正负交替的波动性。

基于以上两点，小波函数应是两端快速衰减的短小波形，这也正是我们称之为小波的原因。母小波 $\psi(t)$ 经伸缩和平移后得小波基函数

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (4-2)$$

其中 b 为平移因子， a 为尺度因子。

设 t^* 和 Δ_t 分别表示 $\psi(t)$ 的中心位置和半径， ω^* 和 Δ_ω 分别表示 $\hat{\psi}(\omega)$ 的中心频率和半径，可以证明，小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$ 具有如下形状和位置均可改变的矩形时频窗^[107]

$$\left[(b + at^*) - a\Delta_t, (b + at^*) + a\Delta_t \right] \times \left[\frac{\omega^* - \Delta_\omega}{a}, \frac{\omega^* + \Delta_\omega}{a} \right] \quad (4-3)$$

当尺度 a 较大时，小波将以较高的频域分辨率和较低的时域分辨率来分析信号的低频分量；当尺度 a 较小时，小波又以较高的时域分辨率和较低的频域分辨率来分析信号的高频分量；当 a 固定而 b 发生变化时， $\psi_{a,b}(t)$ 的中心在时域上平移，但其宽度不变， $\hat{\psi}_{a,b}(\omega)$ 的中心和半径保持不变，因此， b 的变化可以使我们在时频分辨率不变的情况下沿着时间轴观察信号的不同部分。小波变换不但继承和发展了短时傅里叶变换的局部化思想，而且克服了其窗口大小不变的固有缺陷，能根据分析频率的高低自适应调整窗口的时宽和频宽。但是窗口的面积始终保持为 $4\Delta_t\Delta_\omega$ ，也即时频分辨率是相互制约的，不可能同时提高。

从频域上看，用不同 a 值作处理相当于用不同中心频率但品质因素(中心频率/带宽)不变的带通滤波器作处理。从时域上看表现的是局部时段的处理结果。基于这两者的结合，因此小波变换能突出某一时段特定频率范围内的信号特征。

4.2.2 小波变换

小波变换的实质是将一个任意信号 $x(t)$ 以小波函数为基底进行展开，也即将信号 $x(t)$ 表示为小波函数的线性组合。信号 $x(t)$ 的连续小波变换定义为

$$W_x(a,b) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4-4)$$

式中 $\psi^*(\cdot)$ 为 $\psi(\cdot)$ 的共轭, $W_x(a,b)$ 称为 $f(t)$ 在尺度 a 和平移 b 下的小波变换系数, 这些系数表征了原始信号 $f(t)$ 在小波基函数上的投影大小, 或与小波基函数的相似程度。当尺度 a 增加时, 表示以伸展了的 $\psi(t)$ 波形去观察整个 $x(t)$; 反之, 当尺度 a 减小时, 表示以压缩了的 $\psi(t)$ 波形去衡量 $x(t)$ 的局部。

连续小波变换的等效频域表示为

$$W_x(a,b) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}(\omega) \hat{\psi}^*(a\omega) e^{j\omega b} d\omega \quad (4-5)$$

由此可见, 如果 $\hat{\psi}(\omega)$ 是幅频特性比较集中的带通函数, 则小波变换具有表征待分析信号 $\hat{x}(\omega)$ 频域上局部性质的能力。

连续小波变换的信息量是有冗余的, 从压缩数据及节约计算量的角度, 希望只在一些离散的尺度和平移值下计算小波变换, 而又不至于丢失信息。

将连续小波函数中的尺度参数 a 和平移参数 b 离散化, 分别取为 $a = a_0^j, b = ka_0^j$ (其中 $j, k \in Z$), a_0 是大于 1 的固定伸缩步长, 根据 Nyquist 采样定理, 这样处理不会丢失信息。此时, 对应的离散小波变换可表述为

$$W_x(j,k) = a_0^{-j/2} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*(a_0^{-j}t - k) dt \quad (4-6)$$

在实际应用中最常见的情形是取 $a_0 = 2$, 我们称这类小波为二进小波, 二进小波不会破坏连续小波变换的时移不变性, 而且非常适合于在计算机上进行高效的运算。

将信号分解成一个个互相正交的小波函数的线性组合, 可以展示信号的重要特性, 但这并不是小波分析的全部。小波分析的另一个重要方面就是在分析、比较和处理(如去噪)小波变换系数后, 根据新得到的系数去重构信号, 这个过程称之为小波重构。小波重构是小波变换的一个逆过程, 与式(4-6)离散小波变换相对应的小波重构公式为

$$x(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_0^{-j/2} W_x(j,k) \psi(a_0^{-j}t - k) \quad (4-7)$$

4.2.3 多分辨率分析与 Mallat 快速算法

1. 多分辨率分析

多分辨率分析(Multi-resolution Analysis, 简称 MRA)是 Mallat 在研究图象处理时建立的理论。MRA 不仅为正交小波的构造提供了一种简单的方法, 而且为正交小波变换的快速算法提供了理论依据。同时, 它的思想又和多采样率滤波组不谋而合, 使得我们又可将小波变换和数字滤波器的理论结合起来。

空间 $L^2(R)$ 中的多分辨率分析是将 $L^2(R)$ 空间做逐级二分解产生一组逐级包含的子空间序列 $\{V_j\}_{j \in Z}$, 且子空间序列 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 满足如下条件:

- ① 一致单调性: $V_j \subset V_{j-1}$, 对任意 $j \in Z$ 。

- ② 渐进完全性: $\bigcap_{j \in Z} V_j = \{0\}, \bigcup_{j \in Z} V_j = L^2(R)$ 。
- ③ 伸缩规则性: $f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(t/2) \in V_{j+1}$, 对任意 $j \in Z$;
- ④ 平移不变性: $f(t) \in V_j \Rightarrow f(t-k) \in V_j$, 对任意 $k \in Z$;
- ⑤ 正交基存在性: 存在 $\varphi(t) \in V_0$, 使得 $\{\varphi(t-n), n \in Z\}$ 构成 V_0 的标准正交基。

多分辨率分析的所有尺度空间 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 都是由同一尺度函数 $\varphi(t)$ 在不同尺度下张成的, 但 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 相互包含, 所以不具有正交性。为此, 定义 W_j 为 V_j 在 V_{j+1} 中的正交补空间, 即 $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$, $W_j \perp V_j$ 。因此, $\{W_j\}_{j \in Z}$ 构成了 $L^2(R)$ 的一系列正交子空间, 即 $L^2(R) = \bigoplus_{j \in Z} W_j$ 。设 $\{\psi_{0,k}\}_{k \in Z}$ 是空间 W_0 的一组正交基且满足小波容许条件, 则它的伸缩和平移集合 $\{\psi_{j,k} = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k)\}_{j,k \in Z}$ 必然构成 $L^2(R)$ 的一组正交基。 $\psi_{jk}(t)$ 称为小波函数, W_j 称为尺度为 j 的小波空间。

双尺度方程是多分辨率分析赋予尺度函数和小波函数的最基本特征, 它反映的是任意两相邻尺度空间与小波空间基函数之间的内在联系, 即

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_n h_n \varphi(2t - n) \tag{4-8}$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_n g_n \varphi(2t - n) \tag{4-9}$$

其中 h_n 和 g_n 称为滤波器系数, 它们的频域表示 $H(\omega)$ 和 $G(\omega)$ 分别对应了一个低通滤波器和高通滤波器。根据双尺度方程, 可以通过尺度函数 $\varphi(t)$ 构造小波函数 $\psi(t)$, 从而由 $\psi(t)$ 的二进伸缩和平移形成整个 $L^2(R)$ 空间的标准正交基。

2. 正交小波变换的快速算法

正交小波变换分解与重构的快速算法, 也称为 Mallat 算法, 是 Mallat 在多分辨率分析的基础上提出的, 它在小波分析中的地位就相当于 FFT 在经典傅立叶变换中的地位。正是由于快速算法的提出, 才使得小波变换的优良特性得以充分发挥, 从而在众多领域中得到了广泛的应用。

设 x_k^j 为信号 $x(t) \in L^2(R)$ 在分辨率 $a = 2^j$ 下的离散逼近, 则 $x(t)$ 在分辨率 $a = 2^{j+1}$ 下的离散逼近 x_k^{j+1} 和离散细节信号 d_k^{j+1} 可通过下述 Mallat 快速分解算法求得

$$x_k^{j+1} = \sum_n h_{n-2k} x_n^j \tag{4-10}$$

$$d_k^{j+1} = \sum_n g_{n-2k} x_n^j \tag{4-11}$$

正交小波变换的重构过程是分解过程的逆运算, 相应的快速重构公式为

$$x_n^j = \sum_k h_{k-2n} x_k^{j+1} + \sum_k g_{k-2n} d_k^{j+1} \tag{4-12}$$

4.2.4 基于信号奇异性的的小波去噪理论

信号的奇异性是指信号在某处有间断或某阶导数不连续, 奇异点(即突变点)

通常包含了信号的重要特征。在数学上,信号的奇异性可以通过 Lipschitz 指数(奇异指数)来度量。设 n 为整数, $n \leq \alpha \leq n+1$, 称函数 $x(t)$ 在 t_0 处具有 Lipschitz 指数 α , 当且仅当存在常数 A 和 $h_0 > 0$ 以及 n 次多项式 $p_n(h)$, 使得对所有 $h < h_0$ 有:

$$|x(t_0 + h) - p_n(h)| \leq A|h|^\alpha \quad (4-13)$$

$p_n(h)$ 即 $x(t)$ 在 t_0 处的泰勒级数的前 n 项。函数在某一点的 Lipschitz 指数 α 刻画了该点处函数的突变程度, α 越大, 函数在该点的光滑度就越高; α 越小, 函数在该点的光滑度就越低, 也称奇异性越大。如果函数 $x(t)$ 在某一点可导, 它的 $\alpha \geq 1$; 如果 $x(t)$ 在某点不连续但其值有限, 则 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

在小波出现以前, 通常用 Fourier 变换来研究信号在某处有间断、有奇异的情况, 根据信号的 Fourier 变换衰减速度来确定该信号有无奇异性并判断奇异性的大小。由于信号的 Fourier 变换缺乏空间局部性, 因而只能确定奇异性的整体性质, 无法确定奇异点的空间分布。而小波变换具有时频局部化特性, 能够有效的分析信号奇异性, 1992 年 Mallat^[81] 将其与小波变换后系数模的局部极大值联系起来, 通过小波变换后的模局部极大值在不同尺度上的衰减速度来确定奇异点的位置与奇异性的大小。

若小波 $\psi(x)$ 是实函数且连续可微, 并具有 n 阶消失矩 ($n \in \mathbf{Z}^+$), $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$, 则 $f(x)$ 在 x_0 处具有 Lipschitz 指数 α , 当且仅当存在常数 K , 使得 $\forall x \in Bx_0$ (x_0 的任意开邻域), 其小波变换满足

$$|W_f(2^j, x)| \leq K2^{j\alpha} \quad (4-14)$$

设 x_0 是函数 $f(x)$ 局部突变点(奇异点), 则该点处 $f(x)$ 的小波变换取模极大值^[89]。

上述定理表明, 若 $\alpha > 0$, 随着尺度的增大, 小波变换系数的模极大值也增大; 若 $\alpha < 0$, 则随着尺度的增大, 小波变换系数的模极大值反而减少, 这就是噪声对应的情况。

对于白噪声, 可以证明它是一个几乎处处奇异的随机分布且具有负的 Lipschitz 指数 $\alpha = -0.5 - \varepsilon$, $\forall \varepsilon > 0$ 。设 $n(x)$ 是一个方差为 σ^2 的白噪声, 则尺度 s 上的小波变换系数满足^[84]

$$|W_n(a, x)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} n(u)n(r)\psi_a(x-u)\psi_a(x-r)dudr \quad (4-15)$$

由于 $E[n(u)n(r)] = \sigma^2 \delta(u-r)$, 因此由上式可进一步得到

$$E(|W_n(a, x)|^2) = \frac{\sigma^2 \|\psi\|_2^2}{a} \quad (4-16)$$

这表明 $W_n(a, x)$ 作为一个平稳随机过程的平均功率与尺度 $a (= 2^j)$ 有关, 在直观表现上就是其平均幅度反比于尺度 $a (= 2^j)$ 。

此外, 小波变换的模极大值点的平均密度为^[92]

$$d_a = \frac{1}{a\pi} \left(\frac{\|\psi^{(2)}\|_2}{2\|\psi^{(1)}\|_2} + \frac{\|\psi^{(1)}\|_2}{\|\psi\|_2} \right) \quad (4-17)$$

其中 $\psi^{(1)}, \psi^{(2)}$ 分别是小波 $\psi(x)$ 的一阶和二阶导数。由上式可知, 当取尺度 $a = 2^j (j = 1, 2, 3, \dots)$ 时, 随着尺度的增大, 白噪声小波变换的模极大值点至少有一半不能传递到较大的尺度上, 可以认为那些不能从一个尺度传递到较大尺度上模极大值点是由噪声控制的。

由式(4-16)、(4-17)可知: 随着二进尺度的增加, 白噪声小波变换模的幅度及模极大值稠密度逐渐减少, 当变换尺度比较小时, 模极大值几乎完全由噪声所控制; 而当变换尺度达到最大时, 模极大值则几乎完全由信号所控制, 而且其中对应于噪声的模极大值幅度必然低于一定的阈值。式(4-16)、(4-17)成为区分噪声与信号在多尺度空间中模极大值传播行为的重要特征之一, 也是小波方法应用于去噪的重要理论依据。

4.3 小波阈值去噪方法

小波能将信号在不同尺度下进行多分辨率的分解, 从而将交织在一起的各种不同频率组成的混合信号分解成不同频段的子信号, 因而具有对信号进行按频带处理的能力。然而当信号与噪声的频带相互重叠时, 使用直接的小波分解与重构的方法将不能得到令人满意的去噪效果。在这种情况下, 使用非线性小波阈值法去噪就可以在在一定程度上解决这个问题。

4.3.1 阈值法小波去噪的算法原理

非线性小波变换阈值法也称为“小波收缩”(wavelet shrinkage), 该方法主要针对信号中混有白噪声的情况, 是当前应用最为广泛的小波去噪方法。

设 $\{y_i\}$ 为含噪的观测序列, 它可以描述为如下模型:

$$y_i = f_i + e_i, \quad 0 \leq i \leq N-1 \quad (4-18)$$

其中 f_i 为未知确定信号的采样值, e_i 为独立同分布的高斯白噪声, 且 $e_i \sim N(0, \sigma^2)$, 从被噪声污染的信号中恢复原始信号, 阈值法小波去噪的算法原理可以描述为:

1. 小波分解

选择小波函数 ψ , 并且确定分解层数 $J (J \leq \log_2^N)$, 对观测信号 $\{y_i\}$ 作离散小波变换, 得到它的各层小波系数

$$d_j = \{d_{jk} | 0 \leq k \leq 2^{-j} N\} \quad 1 \leq j \leq J \quad (4-19)$$

和最初分辨层的逼近系数

$$S_j = \{S_{jk} | 0 \leq k \leq 2^{-j} N\} \quad (4-20)$$

2. 小波系数阈值处理

使用非线性阈值函数 $\eta(d, t)$ 对各层小波系数进行阈值处理，即

$$\tilde{d}_j = \{\tilde{d}_{jk} = \eta(d_{jk}, t_j) | 0 \leq k \leq 2^{-j} N\} \quad 1 \leq j \leq J \quad (4-21)$$

其中 $t_j > 0$ 为第 j 层小波系数的阈值。

3. 小波重构

对经过阈值处理的小波系数 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_J$ 和逼近系数 S_j ，按正交小波分解的重构公式进行重构，从而得到去噪后的信号 $\{\tilde{f}_i\}$ 。

用阈值法去噪后的估计信号有两个特性：一是噪声能得到较好的抑制；二是反应原始信号的特征尖峰点能得到很好的保留。该方法之所以有效是因为小波变换具有一种“集中”的能力，它可将信号的能量集中到为数很少的小波系数上，而白噪声在任何正交基上的变换仍然是白噪声，并且有着基本相同的幅度。因而相对来说，信号的小波系数一般要大于那些能量分散的噪声的小波系数而显得非常突出。若选择一个合适的阈值对含噪信号的小波系数进行阈值处理，就可以达到去除噪声而保留有用信号的目的。

4.3.2 一类可微的阈值函数

在阈值法去噪中，阈值函数 $\eta(d, t)$ 的选取非常重要，它直接体现了对超过和低于阈值的小波系数模的不同处理策略。常用的阈值函数主要有硬阈值函数和软阈值函数，硬阈值方法是保留大于阈值的小波系数模，而把小于阈值的小波系数模都设为零，即

$$\eta_h(d, t) = \begin{cases} d & |d| > t \\ 0 & |d| < t \end{cases} \quad (4-22)$$

软阈值方法是把小于阈值的小波系数模都设为零，而把大于阈值的小波系数模都减去一个常数，即

$$\eta_s(d, t) = \begin{cases} \text{sign}(d)(|d| - t) & |d| > t \\ 0 & |d| < t \end{cases} \quad (4-23)$$

Bruce^[93]分析了软、硬阈值萎缩方法在高斯噪声条件下的偏差、方差及 L_2 风险，并得出以下结论：①给定阈值 t ，软阈值总比硬阈值萎缩造成的方差小；②当系数充分大时，软阈值总比硬阈值造成的偏差大；③当系数在 t 附近时，硬阈值方法有较大的方差、偏差及 L_2 风险，两种方法在系数较小时， L_2 风险都

很小。

硬阈值和软阈值去噪方法虽然在信号和图像处理中得到了非常广泛的应用，但它们在理论上是不完善的。硬阈值函数在 t 处不连续，软阈值函数本身是连续函数，但其一阶导数在 t 处间断，因此无论是硬阈值还是软阈值方法，都会给重构信号带来一些振荡，使重构信号产生较大的均方差。

文献[94]给出了一类新的可微的阈值函数，该函数定义为

$$\eta_r(d,t) = \begin{cases} de^{-\frac{1}{r(d-t)^2}} & d > t \\ 0 & |d| \leq t \\ de^{-\frac{1}{r(d+t)^2}} & d < -t \end{cases} \quad (4-24)$$

其中 $r > 0$ ，根据上述定义可知， $\eta_r(d,t)$ 具有连续的高阶导数，且

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \eta_r(d,t) = \eta_h(d,t) \quad (4-25)$$

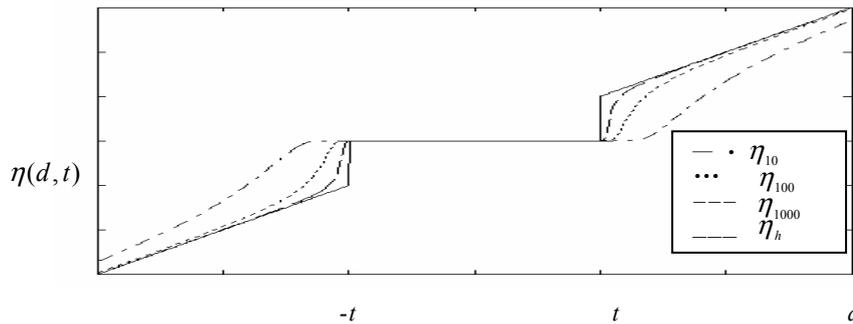


图 4-2 阈值函数 $\eta_r(d,t)$ 和硬阈值函数 $\eta_h(d,t)$ 的图形比较

图 4-2 给出了新阈值函数 $\eta_r(d,t)$ 以及硬阈值函数 $\eta_h(d,t)$ 的图形，显然，随着 r 的增加， $\eta_r(d,t)$ 越来越接近硬阈值函数 $\eta_h(d,t)$ ，因此它具有硬阈值函数的作用，同时在阈值 t 的附近，它也具有软阈值函数的作用，而且由于具有连续的高阶导数，使得小波域滤波以较为平滑的方式实现。经过大量数值仿真研究发现，基于新函数 $\eta_r(d,t)$ 的阈值处理策略能有效的抑制阈值函数不连续所引起的虚假震荡，提高重构信号的信噪比。

4.3.3 基于可微阈值函数的自适应阈值估计

小波阈值去噪方法除了阈值函数的选取，另一个关键因素是对阈值的具体估计。如果阈值选取过大，虽然能够减少重构信号中残留的噪声成分，但会使信号有较大的失真，因为大的阈值同样抑制了有效信号中较小的小波系数；反之，降低阈值能减少重构信号的失真，但去噪后的信号中仍然有较多的残留噪声。因而阈值的选取不仅关键，通常也存在一定的难度。

最早的小波阈值去噪方法是 Donoho 在 1994 年提出的 VisuShrink 方法，其

阈值 t 满足

$$T = \sigma\sqrt{2\ln N} \quad (4-26)$$

其中 σ 是噪声标准方差， N 是信号长度，显然 VisuShrink 阈值的大小与阈值函数的选取无关。

VisuShrink 阈值是针对多维独立正态变量联合分布在维数趋向无穷时得出的结论，是基于最小最大估计准则得出的最优阈值。采用其他不同的估计准则可以得到相应的阈值估计，如 SUREShrink 阈值、GCV 阈值、BayesShrink 阈值等，当然这些阈值的估计过程都离不开特定的阈值函数^[84]。

上节介绍的可微阈值函数 $\eta_r(d, t)$ 由于存在连续的高阶导数，其在各种准则下的风险估计函数具有解析梯度，因此最速下降法、拟牛顿法等基于梯度信息的非线性优化方法都可以在各种阈值的最优估计中得到成功的应用。如在 Stein 的无偏风险估计准则下，与阈值函数 $\eta_r(d, t)$ 相对应的各分解尺度上的阈值最优估计可按如下最速下降迭代算法求得^[110]：

$$\left. \begin{aligned} t_j^{k+1} &= t_j^k - \lambda_k \nabla R_j(t_j^k) \\ \lambda_k : R_j(t_j^k - \lambda_k \nabla R_j(t_j^k)) &= \min_{\lambda \geq 0} R_j(t_j^k - \lambda \nabla R_j(t_j^k)) \end{aligned} \right\} (j=1, 2, \dots, J) \quad (4-27)$$

其中 λ_k 为迭代步长， $R_j(t_j)$ 为 Stein 无偏风险估计函数，且

$$\nabla R_j(t_j) = 2 \sum_{k=0}^{2^j N-1} (\eta_r(d_{jk}, t_j) - d_{jk}) \frac{\partial \eta_r(d_{jk}, t_j)}{\partial t_j} + 2\sigma^2 \sum_{k=0}^{2^j N-1} \frac{\partial^2 \eta_r(d_{jk}, t_j)}{\partial d_{jk} \partial t_j} \quad (4-28)$$

$$\frac{\partial \eta_r(d_{jk}, t_j)}{\partial t_j} = \begin{cases} -\frac{2d_{jk}}{r(d_{jk} - t_j)^3} e^{-\frac{1}{r(d_{jk} - t_j)^2}} & d_{jk} > t \\ 0 & |d_{jk}| \leq t \\ \frac{2d_{jk}}{r(d_{jk} + t_j)^3} e^{-\frac{1}{r(d_{jk} + t_j)^2}} & d_{jk} < -t \end{cases} \quad (4-29)$$

$$\frac{\partial \eta_r(d_{jk}, t_j)}{\partial d_{jk} \partial t_j} = \begin{cases} \left(\frac{4d_{jk} + 2t_j}{r(d_{jk} - t_j)^4} - \frac{4d_{jk}}{r^2(d_{jk} - t_j)^6} \right) e^{-\frac{1}{r(d_{jk} - t_j)^2}} & d_{jk} > t_j \\ 0 & |d_{jk}| \leq t_j \\ \left(\frac{-4d_{jk} + 2t_j}{r(d_{jk} + t_j)^4} + \frac{4d_{jk}}{r^2(d_{jk} + t_j)^6} \right) e^{-\frac{1}{r(d_{jk} + t_j)^2}} & d_{jk} < -t_j \end{cases} \quad (4-30)$$

在随机噪声条件下，Stein 无偏风险估计函数是一个非凸的多峰函数，而最

速下降法、拟牛顿法等基于梯度信息的非线性优化方法一般只能得到问题的局部最优解，因此上述算法只适合于作为一种局部搜索算子并入到遗传算法等全局优化方法中，从而实现阈值的全局寻优。

其中阈值参数的搜索空间的确定可按如下方式进行：

按公式(4-26)计算 VisuShrink 阈值 T ，将尺度 1 细节上的阈值参数 t_1 的搜索空间取为 $0 \sim 3T$ ；

考虑到噪声在小波域不同尺度上的传播特性^[92]

$$\frac{\sigma_v(j+1)}{\sigma_v(j)} = o\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \quad (4-31)$$

其中 σ_v 为噪声在小波域中的传播系数，将其余尺度上的阈值参数 $t_j (j=2,3,\dots,J)$ 的搜索空间取为 $0 \sim 3T \times (\sqrt{2})^{1-j}$ 。

同许多其它的阈值估计方法一样，Stein 准则下基于可微阈值函数的阈值大小还与噪声方差 σ 的估计有关(见式 4-28)。在振动测试过程中，我们虽然不能从带噪信号中单独分离出噪声，但根据信号和噪声的小波变换特性可知，在 $j=1$ 尺度上的小波系数主要由噪声控制，因此根据该尺度上的小波系数可实现噪声方差 σ 的鲁棒估计^[82]：

$$\sigma = MAD/0.6745 \quad (4-32)$$

其中 MAD 表示带噪信号在 $j=1$ 尺度上的小波系数模的中值。使用噪声能量的鲁棒估计而非标准方差估计，主要是考虑到信号的边缘效应以及有效信号对噪声系数的干扰，从而提高噪声估计的可靠性。

为了减少 $j=1$ 尺度小波系数中包含的有效信号对噪声方差估计的影响，文献[95]提出了一种通过小波变换相关性消除有效信号影响的数据处理方法。

做带噪信号尺度 1 和尺度 2 上小波变换相关计算

$$CR(k) = d_{2^1}(k) \times d_{2^2}(k) \quad k=1,2,\dots,N \quad (4-33)$$

其中 $d_{2^1}(k)$ 、 $d_{2^2}(k)$ 分别为尺度 1、2 上的小波系数值，对上式做归一化处理，令

$$CR_n(k) = CR(k) \sqrt{\frac{\sum_k (d_{2^1}(k))^2}{\sum_k CR(k)}} \quad (4-34)$$

将 $CR_n(k)$ 与 $d_{2^1}(k)$ 进行比较，若 $CR_n(k) \geq |d_{2^1}(k)|$ ，则置该点小波变换系数为零，即认为该点主要是由信号引发的小波变换值；否则， $d_{2^1}(k)$ 保持不变。经过这样处理后所保留的尺度 1 上的小波系数，可以认为基本上去除了有效信号的干扰，这样就可以用它更准确的估计噪声的方差 σ 。

对于非平稳噪声，其方差随时间而改变，在该类噪声的去噪过程中，我们

可以采取分而治之的办法。将信号分成几段相对平稳的序列，分别估计各段的噪声方差和阈值，然后应用前述的小波阈值方法去噪。

4.4 提取结构动力特征响应的信号去噪方法

地脉动激励是一种频带分布很宽的非平稳微弱激励，地脉动响应信号的信噪比很低，其有效频率成分既有高频的随机噪声相互覆盖，也和低频的趋势噪声相互覆盖，从这种微弱的地脉动信号中剔除噪声获取结构的真实响应非常困难。而且由于地脉动信号的有效成分和噪声成分的奇异特性较为接近，因此基于奇异性检测的小波阈值去噪等方法已很难有效的消除地脉动信号中的随机噪声^[96]。关于微弱信号的提取有不少学者进行过研究^[97~101]。

中间频段的地脉动信号，尤其是结构固有频率附近的地脉动信号具有较高的信噪比，如果能从含噪信号中提取该频段的响应信息作为结构的动力特征并进行识别，则能显著提高结构的识别精度。基于以上原理，本文针对线性动力系统时域辨识的特点，提出一种基于小波包的结构动力特征信号提取信息的新方法，该方法对于解决了微弱地脉动信号结构参数反演这一技术难题具有明显的优势。

4.4.1 结构动力响应信息提取的理论依据

线性动力系统是目前结构系统辨识最常用的一种理论模型，线性动力系统有如下三个重要的特点：其一是叠加原理成立，系统对多个激励的总响应等于系统在各个激励单独作用下的响应之和；其二是系统不会产生新的频率，系统响应只包含(阻尼)固有频率成分和激励频率成分；其三，初始条件所引发的自由振动只包含(阻尼)固有频率成分，且与激励的大小和频率没有任何联系。基于以上三点特性，提取线性动力系统某一频带范围的结构动力响应信息是完全可以实现的。

单自由度线性动力系统在零初始条件和任意激励下的运动方程为

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P(t) \\ x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0 \end{cases} \quad (4-35)$$

对方程两边作拉氏变换,得

$$x(s) = G(s)P(s) \quad (4-36)$$

$G(s) = 1/(ms^2 + cs + k)$ 为系统的传递函数，令 $s = j\omega$ ，则上式可化为

$$x(\omega) = H_d(\omega)P(\omega) \quad (4-37)$$

其中 $H_d(\omega) = 1/(k - m\omega^2 + jc\omega)$ 为系统的位移频响函数。上式的物理意义是

位移输出的频谱函数等于输入的频谱函数与位移频响函数的乘积，对其两端作傅氏逆变换可得

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_d(\omega) P(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4-38)$$

上式表示单自由度系统在零初始条件下对任意激励的位移响应。若初始条件不为零，则^[112]

$$x(t) = x^0(t, \omega_d) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_d(\omega) P(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4-39)$$

$x^0(t, \omega_d)$ 表示由初始条件引发的自由衰减振动，且

$$x^0(t, \omega_d) = e^{-\zeta\omega_n t} \left(x_0 \cos(\omega_d t) + \frac{\dot{x}_0 + \zeta\omega_n x_0}{\omega_d} \sin(\omega_d t) \right) \quad (4-40)$$

其中 x_0 、 \dot{x}_0 为初始位移和初始速度， ω_n 为系统固有频率， ζ 为相对阻尼系数， ω_d 为阻尼固有频率，结构动力系统的阻尼相对较小，因而有 $\omega_d \approx \omega_n$ 。

对式(4-39)两边求导，可得单自由度系统在非零初始条件下对任意激励的速度和加速度响应，即

$$\dot{x}(t) = \dot{x}^0(t, \omega_d) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_v(\omega) P(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4-41)$$

$$\ddot{x}(t) = \ddot{x}^0(t, \omega_d) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_a(\omega) P(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4-42)$$

其中 $H_v(\omega)$ 、 $H_a(\omega)$ 分别为系统的速度或加速度频响函数，且

$$H_v = j\omega H_d = \frac{j\omega}{k - m\omega^2 + jc\omega} \quad (4-43)$$

$$H_a = j\omega H_v = -\frac{\omega^2}{k - m\omega^2 + jc\omega} \quad (4-44)$$

同理，对于一个具有 N 自由度的多自由度线性动力系统，其在非零初始条件下对任意激励的位移、速度和加速度响应可表示为

$$\{x(t)\} = \{x^0(t, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)\} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [H_d(\omega)] \{P(\omega)\} e^{j\omega t} d\omega \quad (4-45)$$

$$\{\dot{x}(t)\} = \{\dot{x}^0(t, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)\} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [H_v(\omega)] \{P(\omega)\} e^{j\omega t} d\omega \quad (4-46)$$

$$\{\ddot{x}(t)\} = \{\ddot{x}^0(t, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)\} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [H_a(\omega)] \{P(\omega)\} e^{j\omega t} d\omega \quad (4-47)$$

其中 $\omega_1, \dots, \omega_N$ 为系统的(阻尼)固有频率， $[H_d(\omega)]$ 、 $[H_v(\omega)]$ 、 $[H_a(\omega)]$ 为系统的位移、速度和加速度频响函数矩阵， $\{P(\omega)\}$ 为激励向量的频谱函数。

若激励向量 $\{F(t)\}$ 的频谱函数满足

$$\{F(\omega)\} = \begin{cases} \{P(\omega)\} & \omega_a \leq |\omega| \leq \omega_b \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4-48)$$

则根据式(4-45)~(4-47), 该系统在激励 $\{F(t)\}$ 作用下的响应可表示为

$$\{\bar{x}(t)\} = \{x^0(t, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)\} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_b}^{-\omega_a} [H_d(\omega)] \{P(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_a}^{\omega_b} [H_d(\omega)] \{P(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega \quad (4-49)$$

$$\{\dot{\bar{x}}(t)\} = \{\dot{x}^0(t, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)\} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_b}^{-\omega_a} [H_v(\omega)] \{P(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_a}^{\omega_b} [H_v(\omega)] \{P(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega \quad (4-50)$$

$$\{\ddot{\bar{x}}(t)\} = \{\ddot{x}^0(t, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)\} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_b}^{-\omega_a} [H_a(\omega)] \{P(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_a}^{\omega_b} [H_a(\omega)] \{P(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega \quad (4-51)$$

比较式(4-49)~(4-51)与式(4-45)~(4-47)可知, 采用带通滤波的方法可以从真实响应信息 $\{x(t)\}$ 、 $\{\dot{x}(t)\}$ 、 $\{\ddot{x}(t)\}$ 中提取某一频段的响应信息 $\{\bar{x}(t)\}$ 、 $\{\dot{\bar{x}}(t)\}$ 、 $\{\ddot{\bar{x}}(t)\}$, 为了保证响应是一种结构系统可以实现响应, 在进行带通滤波时须注意以下三点:

(1)不能破坏初始条件所引发的自由振动, 因此带通的频率范围必须包含系统的全部固有频率, 即

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N \in (\omega_a, \omega_b) \quad (4-52)$$

(2)所有 N 个自由度上的响应信息应该选用相同的带通频率范围。

(3)位移、速度、加速度响应信息应该选用相同的带通频率范围。虽然带通频率范围相同, 但经过滤波处理后的结构位移、速度和加速度响应所包含的主要频率成分并不相同, 一般来说, 提取的速度中主要频率成分高于位移, 而低于加速度。

需要指出的是, 在实际工程结构的动力检测过程中, 一般只测量加速度响应信息, 在这种情况下, 只有结构加速度响应是通过带通滤波的方式提取的, 而速度响应和位移响应则是由结构加速度响应信息通过积分法或积分算子变换法计算得到。

4.4.2 基于小波包变换的信号时频滤波

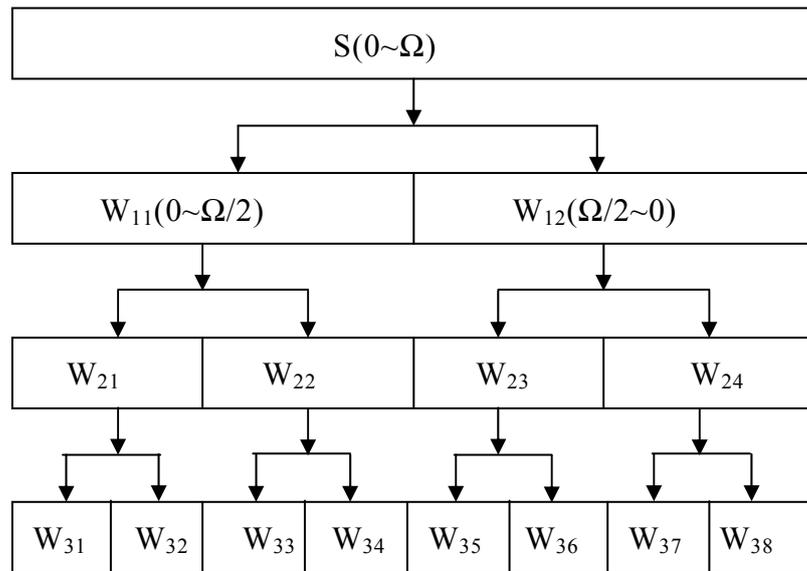
可以证明, 小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$ 具有如下形状和位置均可改变的矩形时频窗^[102]

$$\left[(b + at^*) - a\Delta_t, (b + at^*) + a\Delta_t \right] \times \left[\frac{\omega^*}{a} - \frac{\Delta_\omega}{a}, \frac{\omega^*}{a} + \frac{\Delta_\omega}{a} \right] \quad (4-53)$$

其中 t^* 和 Δ_t 分别表示 $\psi(t)$ 的中心位置和半径, ω^* 和 Δ_ω 分别表示 $\hat{\psi}(\omega)$ 的中心频率和半径, b 为平移因子, a 为尺度因子, 且 a 一般取为 $2^j (j \in Z)$ 。

在信号分析中，当对信号进行采样后，就得到了在一个大的有限频带的信号，不妨设它是频率在 $[0, \Omega]$ 中的信号。如果将 $\Omega/2$ 取为 $\hat{\psi}(\omega)$ 的中心频率和半径，则由式(4-53)可知，对这个信号进行小波分解，就是把采集到的信号分成了低频部分和高频部分两个信号，这两个信号的频带分别是 $[0, \Omega/2^1]$ ， $[\Omega/2^1, \Omega]$ 。再对低频部分进行小波分解，又得到了频带在 $[0, \Omega/2^2]$ 与 $[\Omega/2^2, \Omega/2^1]$ 中的两个信号，随着小波分解层数的增加，信号的低频部分可以达到很高的频率分辨率。

小波包分析是从小波分析延伸出来的一种对信号进行更细致的分析和重构的方法，它不仅对信号的低频部分进行分解，而且对高频部分也做了二次分解(见图 4-3)。小波包分析通过将信号在不同尺度下进行多分辨率的分解，把一个混频信号分解为若干个频带互不重叠的信号，从而可以完成信号的低通、高通或带通滤波。小波包分析是一种时间-频率分析，它具有时频窗任意“伸缩”的能力。因此，对于地脉动等非平稳信号而言，基于小波包变换的时频滤波器具有傅里叶分析不可比拟的优越性。



4-3 小波包分析的频率空间剖分

4.5 数值算例

为了论证以上理论及采用小波包提取结构特征信息的可行性，以 4 层房屋剪切模型结构在地脉动作用下的结构动力响应及参数反演进行验证。

1. 结构模型及基本参数

基底以白噪声作为激励，其计算简图如图 4-4 所示，基本参数见表 4-1。通过正演计算，得出各层的动力响应加速度、速度和位移作为无噪声测试信号。在计算信号中加入不同比例噪声信号分别进行结构参数反演。

四层剪切型结构的基本参数

表 4-1

层号	1	2	3	4
质量 $m(\text{kg})$	1466.5	1408.7	1408.7	1259.9
刚度 $k(\text{N/m})$	1700280	1675770	2361900	2361900
阻尼 c	1224	2588	3073	3073

在结构基底作用高斯白噪声作为地脉动激励，结构动力响应测试噪声考虑加入高斯白噪声，并按下列方式叠加

$$x_i = x_i^a + \alpha[\max(\text{abs}(x_i^a))]R$$

(4-54)式中 x_i 是噪声污染后的响应测量值， x_i^a 是响应信号的理论计算值， R 是均值为 0，偏差为 1 的正态分布随机数， α 是噪声程度指标。

在地脉动激励和质量参数已知的情况下，根据四个楼层的动力响应测量信息识别结构的层间刚度。采样频率为 200Hz，采样点数为 3000 个。

2. 参数反演结果

此结构的固有频率为 1.95~11.8Hz，因此提取 1Hz~15Hz 频段范围内的响应信息作为结构特征响应，并据此识别结构参数，计算结果见表 4-2、4-3。

显然，对于地脉动这种宽频带、低信噪比的微弱信号的去噪而言，基于结构动力特征响应信息提取的信号去噪法具有较好的去噪效果，根据提取的响应信息识别结构刚度参数时，精度较高。图 4-5~图 4-16 给出了地脉动、部分响应信号和频谱图。

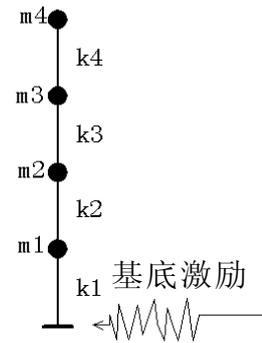


图 4-4 结构计算模型

原始信号反演反演刚度值(N/m)

表 4-2

	0%噪声	10%噪声	20%噪声	30%噪声	50%噪声
K_1	1700300	1745400	1855300	2025700	2519700
K_2	1675800	1711600	1823900	2007500	2554400
K_3	2361900	2415000	2613500	2946800	3950900
K_4	2361900	2473600	2795300	3310500	4816200

反演刚度相对误差%

	0%噪声	10%噪声	20%噪声	30%噪声	50%噪声
K_1	1.01e-12	-2.6517	-9.1171	-19.139	-48.194
K_2	9.59e-13	-2.1392	-8.8416	-19.794	-52.431
K_3	6.11e-13	-2.2483	-10.651	-24.765	-67.274
K_4	4.53e-13	-4.7273	-18.348	-40.161	-103.91

结构特征信号反演反演刚度值(N/m)

表 4-3

	0%噪声	10%噪声	20%噪声	30%噪声	50%噪声
K_1	1700300	1718800	1745900	1781500	1877800
K_2	1675800	1680100	1694700	1719400	1798400
K_3	2361900	2354400	2366700	2398600	2519400
K_4	2361900	2383000	2433800	2513800	2758900

反演刚度相对误差%

	0%噪声	10%噪声	20%噪声	30%噪声	50%噪声
K_1	1.67e-05	-1.0866	-2.6812	-4.7781	-10.441
K_2	1.35e-05	-0.2605	-1.1312	-2.6051	-7.3169
K_3	1.13e-05	0.3157	-0.2048	-1.5526	-6.6680
K_4	1.00e-05	-0.8943	-3.0430	-6.4310	-16.808

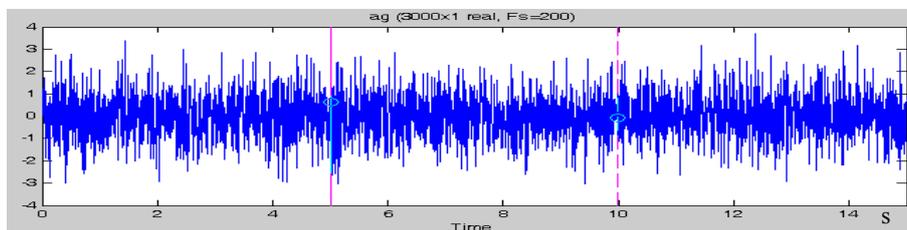


图 4-5 地脉动激励信号

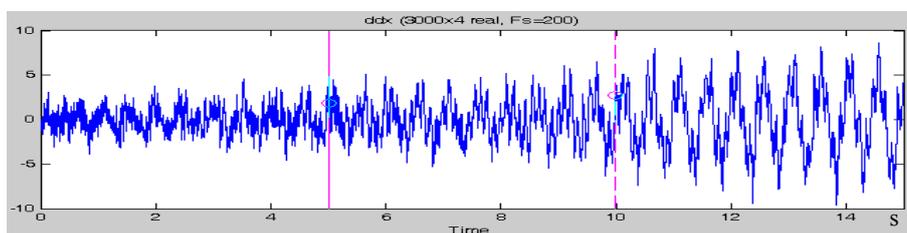


图 4-6 无噪声加速度反应

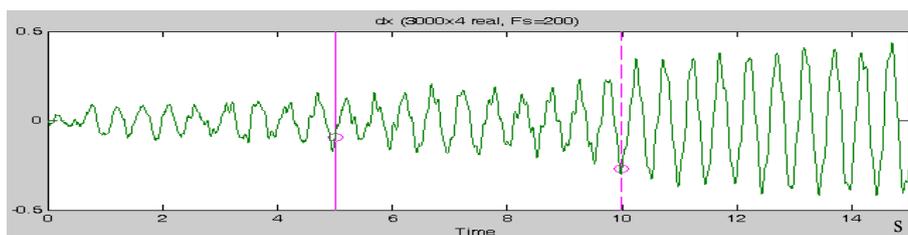


图 4-7 无噪声速度反应

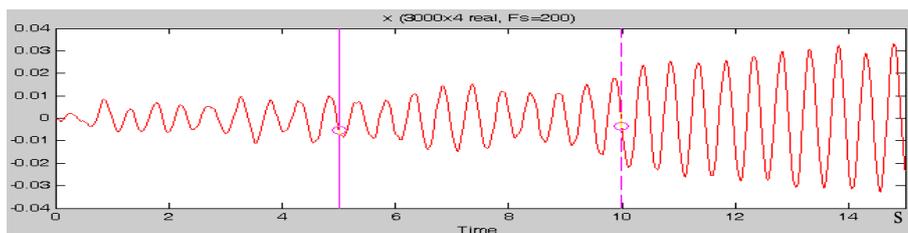


图 4-8 无噪声位移反应

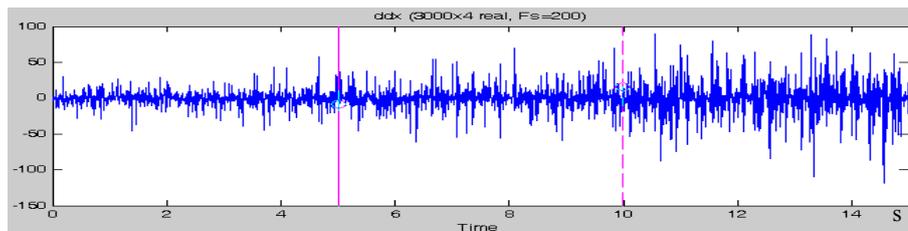


图 4-9 50%噪声加速度反应

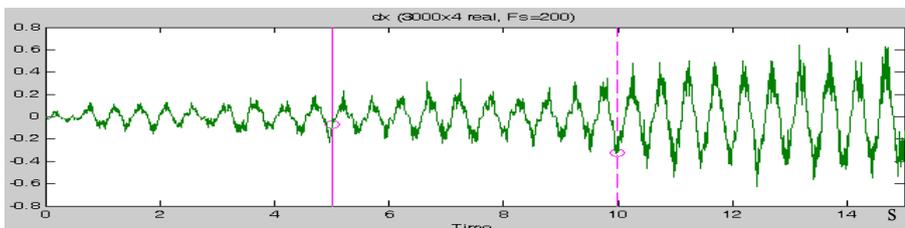


图 4-10 50%噪声速度反应

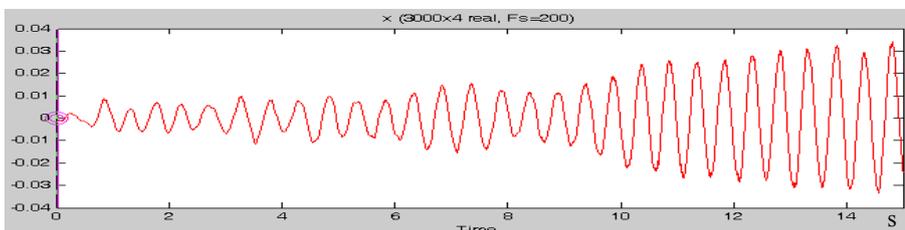


图 4-11 50%噪声位移反应

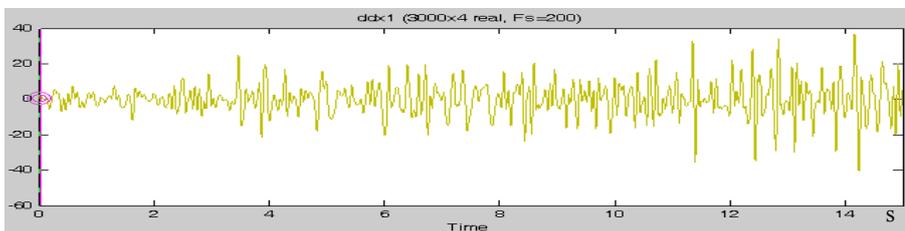


图 4-12 结构特征信号加速度

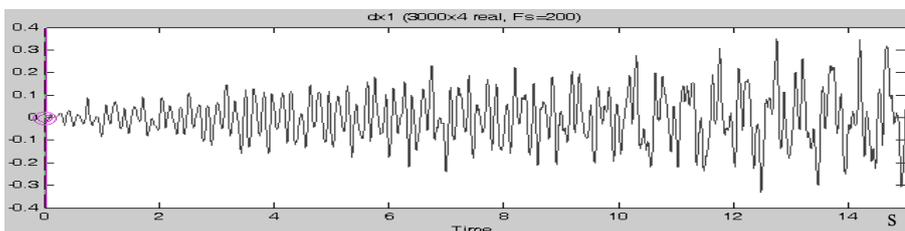


图 4-13 结构特征信号速度

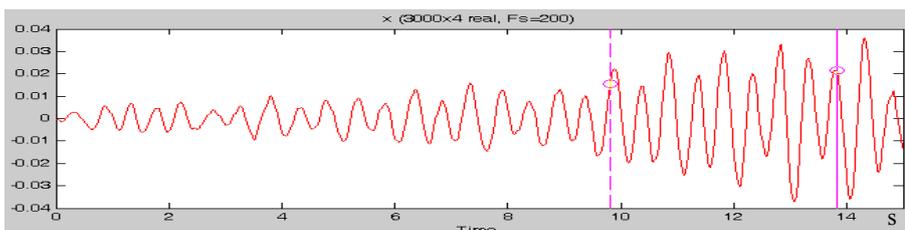


图 4-14 结构特征信号位移

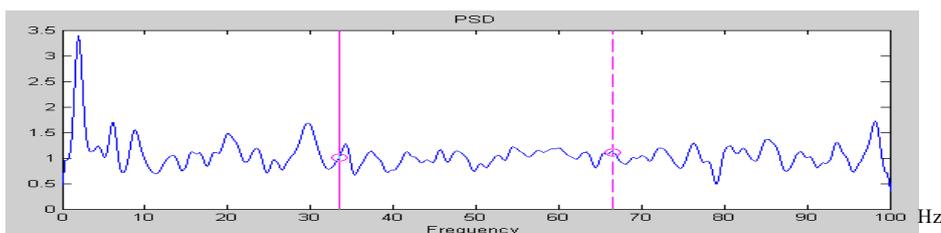


图 4-15 50%噪声原信号加速度频谱图

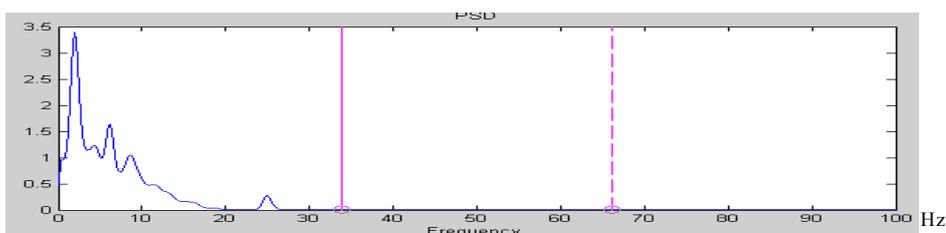


图 4-16 结构特征信号频谱图

从表 4-2 和 4-3 比较可知, 通过提取结构特征信号处理的响应, 作为时域法结构参数反演的输入信号, 大大改善了计算结果, 提高了反演精度。从结构特征信号频谱图 4-16 中可以看到, 结构特征信号频率的能量集中在 2~15Hz 范围内。

4.6 小结

本章首先阐述了非线性小波变换的阈值去噪原理和方法, 介绍了一类新型的可微阈值函数及其相应的阈值估计方法。虽然小波阈值法普遍适用于平稳或非平稳随机过程的信号去噪问题, 但由于其在小波函数选取、小波分解层数和阈值的具体确定等方面有较大的随意性而影响信号去噪的质量。

此外, 在工程结构动力检测中最为常见的地脉动响应信号的信噪比很低, 其有效频率成分既和高频的随机噪声相互覆盖, 也和低频的趋势噪声相互覆盖, 从这种微弱的地脉动信号中剔除噪声获取结构的真实响应非常困难。而且由于地脉动信号中的有效成分和噪声成分的奇异特性较为接近, 因此, 基于奇异性检测的小波阈值去噪方法已很难有效的消除地脉动信号中的随机噪声。

线性动力系统是目前结构系统辨识最常用的一种理论模型, 线性动力系统具有三个重要的特性: ①系统对多个激励的总响应等于系统在各个激励单独作用下的响应之和; ②系统不会产生新的频率成分, 系统响应频率只包含(阻尼)固有频率和激励频率; ③初始条件所引发的自由振动与激励的大小和频率没有任何联系。作者在充分考虑上述三个重要特性的基础上, 根据结构响应在结构特征频率附近具有较大信噪比的特点, 提出一种结构特征响应信号提取的新方法, 在理论上了证明了该信号可以直接用于时域法的结构参数识别。利用小波

包的精细分频特点，实现了结构特征信号提取。实际上该方法也是一种有效的去噪新方法，该方法较好的解决了结构随机响应信号去噪的问题。

结构特征响应信息是指结构在结构地脉动随机激励下，动力响应的部分信息，是在某种激励下可以实现的一个响应。因此，根据结构特征响应信息同样可以进行结构系统的动力识别。数值仿真计算表明，结构固有频率附近的地脉动信号具有较高的信噪比，通过结构特征响应信息提取技术获取该频段的响应信号并进行识别，能显著提高结构刚度参数的识别精度。

第五章 结构损伤综合识别研究

5.1 引言

很多学者对结构损伤识别的频域法和时域法进行了理论和计算方法的研究,但由于实际房屋结构的复杂性,真正在实际工程损伤检测中应用并不太多。究其原因有:理论研究中的很多假定与实际并不相符或测试数据难以获得,如噪声的特性、计算模型的简化和转角信息等。实际结构损伤检测中一般并不需要精确地获得结构的物理参数(如结构刚度),而仅仅需要检测到结构物理参数的变化来确定结构的损伤程度和位置等情况。本章从实用的角度出发,在频域法中提出了基于结构频率能量特征的“能量—损伤”的损伤诊断法,利用噪声的随机性进行结构损伤分析;在时域法研究中,对剪切结构模型的时域参数识别的一些关键问题进行了研究。

5.2 基于“能量—损伤”的损伤诊断识别方法

第二章和第三章详细讨论了结构参数识别频域法和时域法的方法和主要特点,由于结构损伤对结构低频固有频率影响较小,频域法对结构损伤识别不敏感。而实际测试中,结构高频信息难以获得,致使频域法一般很难在结构损伤识别中应用。结构损伤时,结构不同频率区段的能量将发生变化,小波包分析提供了高分辨的频率分解方法,利用分段频率的能量变化进行结构损伤参数识别是一种可行的识别方法^[103]。

5.2.1 “能量—损伤”的理论依据

当结构出现损伤或称系统出现故障时,其传递函数将会改变,不同频率的幅频特性和相频特性将会有不同程度的改变。从幅频特性来说,它主要表现在对不同频率段的输入信号具有不同的抑制和增强作用。

当用一个含有丰富频率成分的信号作为输入对系统的激励时,由于系统特性变化对各频率成分的抑制和增强作用发生改变,通常,它会明显地对某些频率成分起到抑制作用,而另外一些频率成分起着增强作用。因此,其输出与正常系统相比,相同频带内信号的能量会有较大的差别,它使某些频带内信号能量减小,而使另外一些频带内的信号能量增大。因此,在各频率成份信号的能量中,包含着丰富的结构损伤信息,某些或某几种频率成份能量的改变即代表了一种损伤情况。对于房屋结构而言,在随机激励作用下,结构的动力响应同样具有随机信号特征。测试的信号中包既含有结构参数信息,也包含随机噪声信号,通过随机信号分析,提取结构特征信息,达到结构损伤识别的目的。

5.2.2 “能量—损伤”参数识别方法的算法

从以上分析可知，输出信号的各频率成份能量的变化表征了结构刚度降低(结构损伤)的信息，基于这一点，本文提出了基于“能量—损伤”的参数识别方法，该方法可以通过改变刚度的试验方法获得各频率成份能量的变化来诊断损伤，或通过结构有限元模型数值模拟得到各频率成份能量变化进行结构损伤识别。

根据上述原理，对于提取系统特征信息的小波变换方法，可总结为以下的算法：

(1) 首先对测试的加速度信号进行三层小波包分解，分别提取第三层从低频到高频 8 个频率成份的信号特征，其分解结构如图 5-1 所示。

图 5-1 中，(i, j)表示的 i 层的 j 个结点，其中，i=0,1,2,3; j=0,1,...,7,每个结点代表一定的信号特征。其中，(0,0)结点代表原始信号 S，(1,0)结点代表小波包分解的第一层低频系数 X10，(1,1)结点代表小波包分解第一层的高频系数 X11，(3,0)结点代表小波包分解第三层第 0 个结点的系数，其他依此类推。

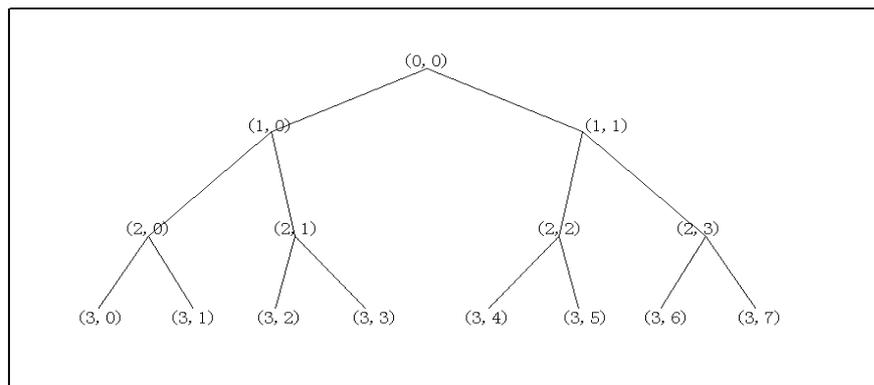


图 5-1

(2) 对小波包分解系数重构，提取各频带范围的信号。以 S_{30} 表示 X_{30} 的重构信号， S_{31} 表示 X_{31} 的重构信号，其它依此类推。此处，只对第三层所有结点进行分析，则总信号 S 可表示为：

$$S = S_{30} + S_{31} + S_{32} + S_{33} + S_{34} + S_{35} + S_{36} + S_{37} \tag{5-1}$$

假设原始信号 S 中，最低频率成份为 0，最高频率成份为 1(实际为采样频率的 1/2)，则提取的 $S_{3j}(j=0, 1, \dots, 7)$ 8 个频率成份所代表的频率范围见表 5-1。

各频率成份所代表的频率(Hz)范围

表 5-1

信号	S_{30}	S_{31}	S_{32}	S_{33}
频率范围	0~0.125	0.125~0.25	0.25~0.375	0.375~0.5
信号	S_{34}	S_{35}	S_{36}	S_{37}
频率范围	0.5~0.625	0.625~0.750	0.750~0.875	0.875~1.000

(3) 求各频率信号的总能量。由于输入信号是一个随机信号，其输出也是一个随

机信号。设 $S_{3j}(j=0,1,\dots,7)$ 对应的能量为 $E_{3j}(j=0,1,\dots,7)$ ，则有：

$$E_{3j} = \int |S_{3j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{jk}|^2 \quad (5-2)$$

其中 $x_{jk}(j=0,1,\dots,7, k=1,2,\dots,n)$ 表示重构信号 S_{3j} 的离散点的幅值。

(4) 构造特征向量。由于结构损伤时，会对各频带内信号的能量有一定的影响，因此，以能量为元素可以构造一个特征向量。特征向量 T 构造如下：

$$T = [E_{30}, E_{31}, E_{32}, E_{33}, E_{34}, E_{35}, E_{36}, E_{37}] \quad (5-5)$$

当能量较大时， $E_{3j}(j=0,1,\dots,7)$ 通常是一个较大的数值，在数据处理上会带来一些不方便的地方。由此，可以对特征向量 T 进行向量归一化处理，令

$$E = \left(\sum_{j=0}^7 |E_{3j}|^2 \right)^{1/2} \quad (5-6)$$

$$T' = [E_{30}/E, E_{31}/E, E_{32}/E, E_{33}/E, E_{34}/E, E_{35}/E, E_{36}/E, E_{37}/E] \quad (5-7)$$

向量 T' 即为归一化后的向量。

(5) 确定正常和各种损伤状态下，特征向量的特征值及容差范围。特征值和容差范围的确定可以通过机理分析求得，同时，也可以通过实验统计的方法确定。机理分析的方法要基于系统模型，实验统计方法不依赖系统的数学模型。但对于实际工程结构，我们无法进行损伤统计实验，一般只能通过机理分析(有限元模型)获得相关特征向量。此处以数值模拟实验机理分析的方法确定特征值和容差范围。设向量的第一个元素 E_{30}/E 的特征值为 C_0 ，容差范围是 ΔC_0 ，向量的第二个元素 E_{31}/E 的特征值为 C_1 ，容差范围是 ΔC_1 ，其它依此类推。 C_j 和 $\Delta C_{jj}(j=0,1,\dots,7)$ 可以通过式(5-8)求得：

$$C_j = \frac{\sum_{k=1}^n C_{jk}}{n} \quad (5-8)$$

容差范围一般按 3~5 倍均方差确定，即：

$$\Delta C_j = K\sigma = K \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (C_{jk} - C_j)^2 \right)^{1/2} \quad K = 3 \sim 5 \quad (5-9)$$

其中 n 为实验次数。

5.2.3 算例分析

以四层剪切模型为例，照所给出的算法，对正常结构和各种损伤状态下的信号进行分析，构造各自的特征向量，建立“特征向量—损伤状态”的对应关系，说明“能量—损伤”参数识别方法的应用。

(1)计算模型和基本参数

以 4 层房屋剪切模型为例，计算简图如图 5-2 所示，模型基本参数如表 5-1 所示，采用底部输入白噪声随机激励模拟地脉动作用，各质点获得结构加速度响应作为输出信号。对各频率段的能量进行分析。

四层剪切型结构的基本参数 表 5-1

层号	1	2	3	4
刚度 k_i (N/m)	17002800	16757700	23619000	23619000
阻尼 c_i	1224	2588	3073	3073
质量 m_i (kg)	610	580	530	530

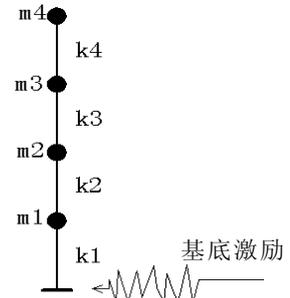


图 5-2 剪切结构模型

(2)以高斯白噪声作为基底激励信号，采样频率 500Hz，数据长度 5000 步，随机激励分别计算 20 次作为实验数据，计算正常情况下各层刚度特征值、均方差和变异系数。其计算数据见表 5-2、表 5-3 和图 5-3。

(3) 分别以各层刚度 1.0K, 0.9K, 0.7K 和 0.5K 计算刚度特征值，仅取第二层输出信号，建立“特征向量—损伤状态”的对应关系。其中相对刚度变化值为 $\frac{(1-\Delta)k - k}{k} \times 100\%$ ， Δ 为刚度损伤系数 0.1、0.3 和 0.5。计算结果见表 5-和图 5-3。

正常结构实验数据结果表

表 5-2

	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
第一组	0.51866	0.49952	0.13962	0.48823	0.10568	0.099054	0.098407	0.43925
第二组	0.5162	0.49106	0.15913	0.47837	0.11073	0.11205	0.11298	0.44796
第三组	0.50647	0.50025	0.07915	0.49654	0.060781	0.055478	0.056453	0.48007
第四组	0.51105	0.49967	0.10724	0.49272	0.082962	0.075587	0.07608	0.46529
第五组	0.50996	0.50441	0.075074	0.50046	0.062916	0.05385	0.052306	0.46885
第六组	0.51332	0.49867	0.12169	0.48998	0.092227	0.087479	0.084585	0.45785
第七组	0.50514	0.50029	0.069834	0.49743	0.053598	0.049412	0.049349	0.48423
第八组	0.50978	0.49514	0.12125	0.4869	0.089944	0.085031	0.086431	0.46947
第九组	0.50892	0.4966	0.11131	0.48965	0.082657	0.080974	0.076381	0.47225
第十组	0.50772	0.49886	0.094444	0.49425	0.067846	0.066866	0.066695	0.47607
第十一组	0.50658	0.49965	0.083482	0.49563	0.063286	0.058255	0.059793	0.47973
第十二组	0.50979	0.50087	0.095005	0.49527	0.074686	0.065632	0.068677	0.46938
第十三组	0.51023	0.5015	0.093965	0.49624	0.072129	0.06695	0.065873	0.46804
第十四组	0.50764	0.49865	0.095056	0.49335	0.072466	0.0675	0.066912	0.47638
第十五组	0.50648	0.50214	0.066034	0.49924	0.053363	0.047898	0.045437	0.48013
第十六组	0.5221	0.49648	0.16153	0.48001	0.1268	0.11202	0.11638	0.4269
第十七组	0.51096	0.50342	0.087493	0.49833	0.071434	0.062683	0.06104	0.46556
第十八组	0.51466	0.49961	0.12348	0.49066	0.094175	0.086436	0.088161	0.45323
第十九组	0.50799	0.49691	0.1056	0.49093	0.076825	0.074024	0.075268	0.4752
第二十组	0.50671	0.49784	0.09433	0.49307	0.068489	0.067262	0.066136	0.47937

正常结构实验数据统计结果表

表 5-3

	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
平均值	0.5105	0.49908	0.10424	0.49236	0.07915	0.07372	0.07367	0.46676
均方差	0.00445	0.00298	0.02703	0.00582	0.01933	0.01878	0.01949	0.01496
变异系数	0.00872	0.00598	0.25927	0.01183	0.24427	0.25467	0.26461	0.03206

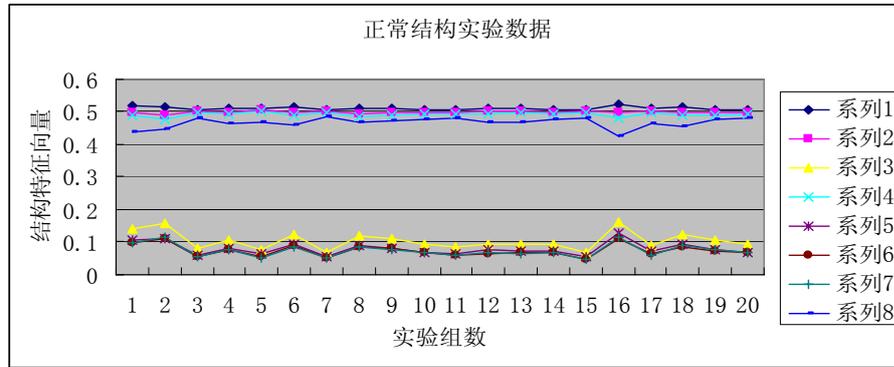


图 5-3 正常结构实验特征值

从表 5-2 和表 5-3 可以看出，实验数据具有较好的重复性，其中 C_0 、 C_1 、 C_3 和 C_7 特征向量明显大于其它值，而变异系数明显小于其它值，说明该四组频率段能量中结构特征能量所占比例较大，其它四组的频率段能量较小。因此，在建立“特征向量—损伤状态”状态关系时，仅仅取 C_0 、 C_1 、 C_3 和 C_7 四组频率能量作为结构特征向量的依据。下面列出在各层刚度发生不同损伤时，第二层信息建立的“特征向量—损伤状态”状态关系。

第一层损伤结构特征向量值 表 5-4

	$1.0K_1$	$0.9k_1$	$0.7k_1$	$0.5k_1$
C_0	0.504056	0.505341	0.509306	0.515069
C_1	0.495148	0.493238	0.487911	0.47999
C_3	0.490543	0.486959	0.476636	0.4611
C_7	0.487621	0.483623	0.47098	0.451793

第二层损伤结构特征向量值 表 5-5

	$1.0K_2$	$0.9k_2$	$0.7k_2$	$0.5k_2$
C_0	0.504056	0.503204	0.50537	0.50734
C_1	0.495148	0.49598	0.49321	0.49065
C_3	0.490543	0.492257	0.4869	0.48192
C_7	0.487621	0.490262	0.48354	0.47729

第三层损伤结构特征向量值 表 5-6

	$1.0K_3$	$0.9k_3$	$0.7k_3$	$0.5k_3$
C_0	0.504056	0.50369	0.50315	0.50519
C_1	0.495148	0.49544	0.49629	0.49353
C_3	0.490543	0.49117	0.49274	0.48747
C_7	0.487621	0.48876	0.49043	0.4841

第四层损伤结构特征向量值 表 5-7

	$1.0K_4$	$0.9k_4$	$0.7k_4$	$0.5k_4$
C_0	0.504056	0.50703	0.50376	0.50393
C_1	0.495148	0.49096	0.49533	0.49504
C_3	0.490543	0.48257	0.49096	0.49045
C_7	0.487621	0.4783	0.48854	0.488

第一层损伤结构特征向量相对变化值 表 5-8

	$1.0K_1$	$0.9k_1$	$0.7k_1$	$0.5k_1$
C_0	0	0.002549	0.010416	0.021848
C_1	0	-0.00386	-0.01462	-0.03061
C_3	0	-0.00731	-0.02835	-0.06002
C_7	0	-0.0082	-0.03413	-0.07347

第二层损伤结构特征向量相对变化值 表 5-9

	$1.0K_2$	$0.9k_2$	$0.7k_2$	$0.5k_2$
C_0	0	-0.00169	0.0026069	0.0065152
C_1	0	0.001681	-0.003914	-0.009084
C_3	0	0.0034943	-0.007426	-0.017578
C_7	0	0.005416	-0.008369	-0.021186

第三层损伤结构特征向量相对变化值 表 5-10

	$1.0K_3$	$0.9k_3$	$0.7k_3$	$0.5k_3$
C_0	0	-0.000726	-0.001797	0.0022498
C_1	0	0.0005898	0.0023064	-0.003268
C_3	0	0.0012784	0.0044789	-0.006264
C_7	0	0.0023364	0.0057612	-0.00722

第四层损伤结构特征向量相对变化值 表 5-11

	$1.0K_4$	$0.9k_4$	$0.7k_4$	$0.5k_4$
C_0	0	0.0059002	-0.000587	-0.00025
C_1	0	-0.008458	0.0003676	-0.000218
C_3	0	-0.016253	0.0008503	-0.000189
C_7	0	-0.019115	0.0018852	0.0007778

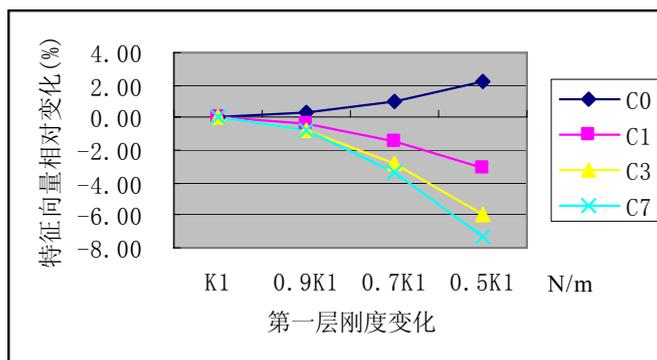


图 5-4 第一层损伤结构特征向量相对变化

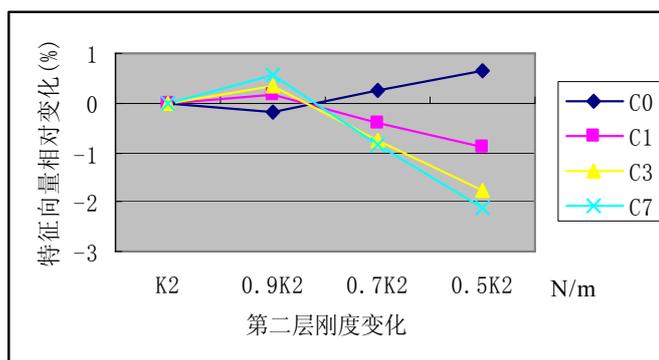


图 5-5 第二层损伤结构特征向量相对变化

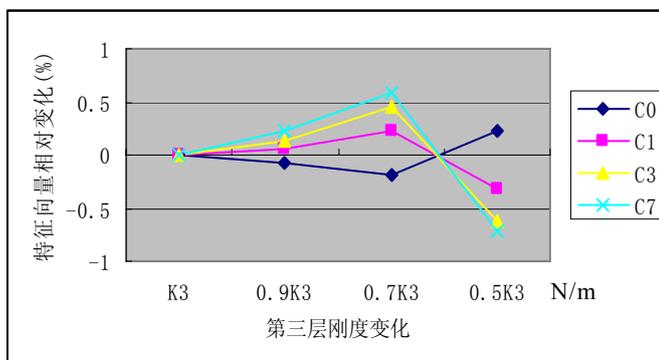


图 5-6 第三层损伤结构特征向量相对变化

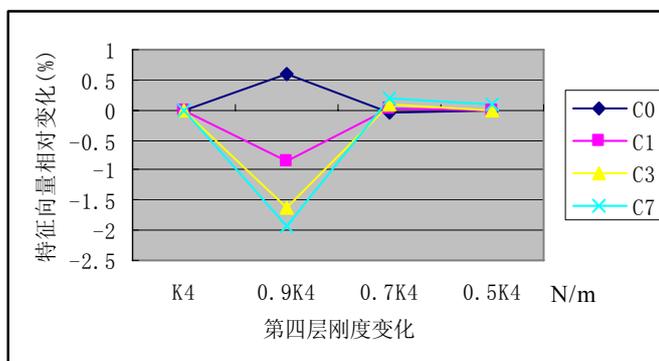


图 5-7 第四层损伤结构特征向量相对变化

从图 5-4~图 5-7 可知, 当不同层刚度降低时, 结构特征向量的变化具有不同的特点。实际上, 每层的输出信号“特征向量—损伤状态”关系也不相同, 因篇幅有限, 其它层的信息的“特征向量—损伤状态”关系没有列出。因此根据“特征向量—损伤状态”关系, 可以分辨出结构损伤的位置和损伤程度情况。从计算结果来看, C_7 向量的变化比较明显, 这也说明, 结构损伤对结构高频能量影响较大, 对低频能量影响相对较小的特点。

5.3 结构物理参数的时域法识别法

5.3.1 结构物理参数的时域识别模型

第二章对结构物理参数的时域识别法原理进行了简单介绍, 本节根据时域识别原理和相关理论编写相关计算程序进行算例分析。为了利用结构时程测量信息识别结构物理参数, 首要问题是怎样建立识别模型。一般来说, 最基本的模型是利用有限元法建立的动力分析模型。在此基础上, 可以进一步利用有限元单元法的基本思想, 建立基于有限元列式的参数识别标准模型^[90]。

在现代控制论的系统识别理论中, 基本的参数识别模型有两类: 线性参数系统模型与非线性参数系统模型。

1. 线性参数系统

$$Z = H\theta + e \quad (5-10)$$

其中: Z 为含 N 个元素的模型输出向量, N 为采样时点的个数; H 为模型输入或输出变量的等价表达式; $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M)^T$ 是未知的模型参数; M 是模型参数个数; e 为 $N \times 1$ 阶的模型噪声向量。

2. 非线性参数系统

$$Z = f(u, \theta) + e \quad (5-11)$$

其中, f 表示一般非线性函数, u 为模型输出向量。

对于运动方程为下式的一般多自由度动力系统:

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = F(t) \quad (5-12)$$

若 Y, \dot{Y}, \ddot{Y} 皆可观测, 则可以将其转化为上述系统识别的标准格式(2-81)。事实上, 根据有限元法的基本概念, 可以将刚度矩阵 K 表示为:

$$K = \sum_{i=1}^n T_{ki}^T \bar{k}_i T_{ki} \quad (5-13)$$

式中: $T_{ki} = T_{ka} T_{kc}$ 为单元坐标转换矩阵和定位矩阵的乘积; $\bar{k}_i = \theta_{ki} \hat{k}_i$ 为局部坐标下的单元刚度矩阵; θ_{ki} 为待识别的刚度矩阵; \hat{k}_i 为提取因子 θ_{ki} 之后的单元刚度矩阵。

令：

$$\bar{k}_i = \theta_{ki} \tilde{k}_i \quad (5-14)$$

其中 θ_{ki} 为待识别的刚度参数； \tilde{k}_i 为提取因子 θ_{ki} 之后的单元刚度矩阵。例如，对于平面框架中的梁、柱单元，若考虑弹性模量 E 为识别参数，则

$$\theta_{ki} = E_i \quad (5-15)$$

E_i 为 i 单元弹性模量；

$$\tilde{k}_i = \begin{bmatrix} \frac{A_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12I_i}{l_i^3} & \frac{6I_i}{l_i^2} & 0 & -\frac{12I_i}{l_i^3} & \frac{6I_i}{l_i^2} \\ 0 & \frac{6I_i}{l_i^2} & \frac{4I_i}{l_i} & 0 & -\frac{6I_i}{l_i^2} & \frac{2I_i}{l_i} \\ -\frac{A_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12I_i}{l_i^3} & \frac{6I_i}{l_i^2} & 0 & \frac{12I_i}{l_i^3} & \frac{6I_i}{l_i^2} \\ 0 & \frac{6I_i}{l_i^2} & 0 & 0 & -\frac{6I_i}{l_i^2} & \frac{4I_i}{l_i} \end{bmatrix} \quad (5-16)$$

若考虑层间剪切型结构，并以层间刚度为识别参数，则有：

$$\theta_{ki} = k_{oi} = \frac{12E_i I_i}{l_i^3} \quad (5-17)$$

$$\tilde{k}_i = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

可见，对于具体问题，识别参数的选取具有一定的灵活性，可以是单因子参数，也可以是多因子复合参数。

引入向量：

$$R_{ki} = T_{ki}^T \tilde{k}_i T_{ki} Y \quad (5-19)$$

则有：

$$KY = \sum_{i=1}^n \theta_{ki} T_{ki}^T T_{ki} Y = \sum_{i=1}^n \theta_{ki} R_{ki} \quad (5-20)$$

记：

$$H_k = [R_{k1}, R_{k2}, \dots, R_{kn}] \quad (5-21)$$

$$\theta_k = (\theta_{k1}, \theta_{k2}, \dots, \theta_{kn})^T \quad (5-22)$$

则式(5-20)可写为：

$$KY = H_k \theta_k \quad (5-23)$$

同理，方程(5-12)中的惯性项可写为：

$$M\ddot{Y} = H_m \theta_m \quad (5-24)$$

其中：

$$H_m = [R_{m1}, R_{m2}, \dots, R_{mn}] \quad (5-25)$$

$$\theta_m = (\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{mn})^T \quad (5-26)$$

$$R_{mi} = T_{mi}^T \tilde{m}_i T_{mi} \ddot{Y} \quad (5-27)$$

θ_{mi} 为待识别的单元质量参数； \tilde{m}_i 为提取因子 θ_{mi} 后的单元质量矩阵； T_{mi} 为关于质量的单元坐标转换矩阵与整体定位矩阵的乘积。

类似，对于仅考虑外阻尼或内阻尼的系统，可有：

$$C\dot{Y} = H_c \theta_c \quad (5-28)$$

其中：

$$H_c = [R_{c1}, R_{c2}, \dots, R_{cn}] \quad (5-29)$$

$$\theta_c = (\theta_{c1}, \theta_{c2}, \dots, \theta_{cn})^T \quad (5-30)$$

$$R_{ci} = T_{ci}^T \tilde{c}_i T_{ci} \dot{Y} \quad (5-31)$$

θ_{ci} 为待识别的单元阻尼参数； \tilde{c}_i 为提取因子 θ_{ci} 后的单元阻尼矩阵； T_{ci} 为关于阻尼的单元坐标转换矩阵与整体定位矩阵的乘积。

上述推导中，为简单计算并没有指明时间变量。设采样时点序号为 j (即 $t = j$)，则可定义：

$$H_j = [H_m, H_c, H_k]_{t=j} \quad (5-32)$$

$$\theta = (\theta_m, \theta_c, \theta_k)^T \quad (5-33)$$

由此，可将式(5-12)写为：

$$F_j = H_j \theta \quad (5-34)$$

进一步，若令：

$$H = [H_1, H_2, \dots, H_N]^T \quad (5-35)$$

$$Z = (F_1, F_2, \dots, F_N)^T \quad (5-36)$$

此处， N 为采样点数。

则可得出：

$$Z = H\theta \quad (5-36)$$

显然，这与式(5-10)形式完全类同，其特点是待识别参数在方程中以线性形式出现。一般房屋结构模型阻尼均可按线性阻尼考虑，因此，线性结构和非线性结构的参数识别均可采用式(5-36)的线性方程。

5.3.2 结构物理参数的时域识别的基本准则

基本的识别算法可以概括为一次完成型算法、递推算法与迭代算法三种类型。一次完成型算法是指根据参数识别准则，利用部分或全部观测数据一次求解给出系统参数估计值。在递推算法中，则是采用逐步逼近的办法得到模型参数 θ 的估计值 $\hat{\theta}$ 。设在 k 时刻，根据前一时刻的估计参数计算出在该时刻的模型输出(称为预报值)为：

$$\tilde{Z}_k = H_k \hat{\theta}_{k-1} \quad (5-37)$$

据此可计算出预报误差：

$$W_k = Z_k - \tilde{Z}_k \quad (5-38)$$

将 W_k 反馈到识别算法中，在某种参数估计准则下，计算出 k 时刻的模型参数估计值 $\hat{\theta}_k$ ，并据之以更新模型参数。这样不断递推计算下去，直至对应的准则函数取极值。在迭代算法中，一般根据全部或大部分时程观测数据，依据初始参数估计值 $\hat{\theta}_0$ 计算预报值，并据之计算全时程预报误差。然后，根据使准则函数取极小值的原则，利用数学优化算法取模型参数新的估计值 $\hat{\theta}_1$ ，如此不断迭代计算，直至对应的准则函数取极小值。

显然，无论哪种算法，都只是参数估计准则实现的手段。基本的参数估计准则可以归纳为四种：最小二乘准则，最大似然估计准则，贝叶斯估计准则，预报误差准则。由于本论文研究内容是信息完备条件下结构的参数识别，可采用一次完成型算法，下面仅介绍最小二乘准则。

最小二乘准则。设系统的输入输出关系(仅考虑单自由度系统)为：

$$z_k = h_k \theta + n_k \quad (5-39)$$

其中 n_k 为均值是零的随机噪声；其余符号同前。

则如下准则：

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N (z_k - h_k \theta)^2 \rightarrow \min \quad (5-40)$$

称为参数 θ 的最小二乘估计准则。

上述准则的直观意义是，未知模型参数 θ 最可能的值将使实际观测值与计算值之间误差的累计平方和达到最小。在这一准则中，不考虑噪声 n 的统计特性。可以证明^[9]，如果 n 与 h 统计无关，则根据这一准则给出的估计量将为参数 θ 的无偏估计量。进一步，若 n 为白噪声过程，则可上述估计量 θ 还是参数的一致估计量。然而， n 一般不是白噪声过程，并且多数情况下与 h 统计相关。事实上，噪声 n 至少可以由两部分组成：其一是系统输出的观测噪声，在具体模型中，它可以通过时刻之前预测数据与 h 相关；其二是系统输入的预测噪声

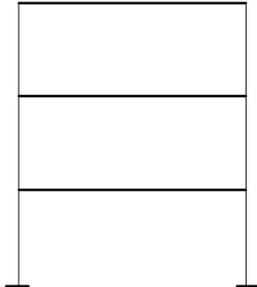
经过模型滤波而形成的噪声，它一般为有色噪声，且必与 h_k 相关。因此，最小二乘估计准则给出的参数估计在一般情况下既非一致估计量，也非无偏估计量。L.Ljung 的研究指出^[104]：设 θ 为被估计参数精确值，则当预测序列长度 $N \rightarrow \infty$ 时，估计参数 $\hat{\theta}_N$ 依概率收敛于 θ 。因此，在工程中，当观测序列足够长时，可以应用最小二乘准则进行参数识别工作。

5.3.3 完备测量信息时域法参数识别

剪切结构是房屋结构中最简单的一种结构模型假定，它忽略了节点的转角位移，将梁的刚度视为无穷大，这对识别结果具有一定的影响，但可使识别模型大大简化，是工程损伤检测中常用的一种简化模型。因此，本章针对这一对象，研究结构损伤识别中的一些具体问题。

1. 剪切模型特点

多层或高层剪切型结构的刚度矩阵 $[K]$ 和阻尼矩阵 $[C]$ 为对称三角矩阵，而质量矩阵 $[M]$ 为对角矩阵。



$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ & \dots & & -k_n & \\ & & & -k_n & k_n \end{bmatrix} \quad (5-41)$$

$$[M] = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_n) \quad (5-42)$$

图 5-8 剪切型结构

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & \\ & \dots & & -c_N & \\ & & & -c_N & c_N \end{bmatrix} \quad (5-43)$$

式中 k_i 、 c_i 和 m_i 分别为楼层 i 的层间刚度、阻尼和楼层质量 ($i=1, 2, \dots, N$)。

2. 物理参数识别算法

一般结构损伤识别时，结构的质量认为是不变的，这样需要识别的参数只有刚度矩阵和阻尼矩阵。在地脉动激励下，结构动力方程为：

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = -MG(t) \quad (5-44)$$

其中 $G(t)$ 为地脉动加速度， M 、 C 和 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵，

$\ddot{Y} = (\ddot{y}_1, \ddot{y}_2, \dots, \ddot{y}_n)$ $\dot{Y} = (\dot{y}_1, \dot{y}_2, \dots, \dot{y}_n)$; $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$; n 为楼层数。从式(5-44)可得:

$$C\dot{Y} + KY = -M(\ddot{Y} + G(t)) \quad (5-45)$$

令 $C\dot{Y} + KY = H\theta$, $-M(\ddot{Y} + G(t)) = Z$, $H = [H_c \ H_k]$; $\theta = [C \ K]$ 为待识别参数矩阵; 其中:

$$H_c = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 & -\dot{y}_2 + \dot{y}_1 & & \\ & \dot{y}_2 - \dot{y}_1 & \cdots & \\ & & \cdots & -\dot{y}_n + \dot{y}_{n-1} \\ & & & \dot{y}_n - \dot{y}_{n-1} \end{bmatrix} \quad (5-46)$$

$$H_k = \begin{bmatrix} y_1 & -y_2 + y_1 & & \\ & y_2 - y_1 & \cdots & \\ & & \cdots & -y_n + y_{n-1} \\ & & & y_n - y_{n-1} \end{bmatrix} \quad (5-47)$$

则式(5-45)转换为:

$$Z = H\theta \quad (5-48)$$

式(5-48)的最小二乘解为:

$$\theta = (H^T H)^{-1} H^T Z \quad (5-49)$$

上述论述表明, 对于剪切结构模型, 当各层的加速度测量信息完备时, 可以利用系统的输入、输出系统时程测量信息直接确定结构的物理参数。

3. 速度和位移的数值计算误差及初值问题

结构动力系统时域分析中的数值积分有很多方法^[106~108], 这些方法一般是研究结构动力响应, 即结构响应正演计算, 计算方法中都包含有结构物理参数信息 K 、 C 和 M , 其中 K 、 C 、 M 分别为结构刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵。结构损伤时域反演中, 实测到的结构动力响应通常为加速度, 速度和位移通过数值积分获得。此时, 结构的物理参数信息均为未知, 一般只能采用线性加速度或平均加速度方法确定。因此, 研究数值积分过程中的误差分析^[109], 具有一定的理论价值和工程意义。

实测的加速度反应时程是按一定时间间隔 Δt 给出的一组离散值, 因而, 在相邻的两个时刻 ($y(t)$, $y(t + \Delta t)$) 之间的加速度情况无法知道。通常有两种假定, 一是假定两点之间的加速度值按线性变化, 称线性加速度法。二是取两点加速度的平均值为 t 时刻的加速度, 称为平均加速度法。不同的假定, 其计算结果有一定差异。考虑到解的稳定性, 通常采用平均加速度法, 平均加速度法亦称梯形加速度法。

将时间函数 $f(t)$ 作泰勒(Taylor)级数展开时, 设 k 阶微分系数为 $f^{(k)}(t)$, 则:

$$f(t + \Delta t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta t)^k}{k!} f^{(k)}(t) \quad (5-50)$$

将 $\dot{y}_{t+\Delta t}$ 按泰勒级数展开:

$$\dot{y}_{t+\Delta t} = \dot{y}_t + (\Delta t)\ddot{y}_t + \frac{1}{2}(\Delta t)^2\dddot{y}_t + \dots \quad (5-51)$$

按平均加速度法假定, 时刻 t 与时刻 $t+\Delta t$ 间的加速度为:

$$\ddot{y}_t = \frac{\ddot{y}_t + \ddot{y}_{t+\Delta t}}{2}, \quad \dddot{y} = 0 \quad (5-52)$$

则四阶以上的微分系数为 0, 代入(5-51)得:

$$\dot{y}_{t+\Delta t} = \dot{y}_t + (\Delta t)\frac{\ddot{y}_t + \ddot{y}_{t+\Delta t}}{2} \quad (5-53)$$

同理可得位移的计算公式为:

$$y_{t+\Delta t} = y_t + (\Delta t)\frac{\dot{y}_t + \dot{y}_{t+\Delta t}}{2} \quad (5-54)$$

在实际应用(5-54)公式中, 计算过程中会将前一步的误差带入下一步, 使得积累误差加大。为了消除积累误差影响, 可将式(5-54)作如下变换:

$$\begin{aligned} \dot{y}(1) &= \dot{y}(0) + (\Delta t)\frac{\ddot{y}(0) + \ddot{y}(1)}{2} \\ \dot{y}(2) &= \dot{y}(1) + (\Delta t)\frac{\ddot{y}(1) + \ddot{y}(2)}{2} \\ &= \dot{y}(0) + (\Delta t)\frac{\ddot{y}(0) + \ddot{y}(1)}{2} + (\Delta t)\frac{\ddot{y}(1) + \ddot{y}(2)}{2} \\ &= \dot{y}(0) + (\Delta t)\frac{\ddot{y}(0) + 2\ddot{y}(1) + \ddot{y}(2)}{2} \\ \dot{y}(3) &= \dot{y}(2) + (\Delta t)\frac{\ddot{y}(2) + \ddot{y}(3)}{2} \\ &= \dot{y}(0) + (\Delta t)\frac{\ddot{y}(0) + \ddot{y}(3)}{2} + (\Delta t)(\ddot{y}(1) + \ddot{y}(2)) \\ &\dots\dots \\ \dot{y}(n) &= \dot{y}(0) + (\Delta t)\frac{\ddot{y}(0) + \ddot{y}(n)}{2} + (\Delta t)\sum_{i=1}^{n-1} (\ddot{y}(i)) \end{aligned} \quad (5-55)$$

由式(5-55)可知, 某一时刻的速度仅仅由初始速度和相应范围的加速度确定, 不存在计算误差积累。同理, 该方法也可应用到位移计算之中。

在结构损伤识别反演的数值积分计算中, 速度初值往往是未知的, 文献[109]中等提出了积分算子变换方法消除速度和位移初值的影响, 取得了较好的效果。但在积分算子变换的过程中同时也会引入新的计算误差。式(5-55)中, 积分速度

初值与其他加速度值是完全分离，即若初速度取值不同，所有的速度增值是相同的。这样可以将此初值作为仪器的直流漂移，利用滤波的方法将其当作低频噪声去掉而不会影响反演结果，实际计算中为了简化计算，一般可取初值为零。图 5-9、5-10 是根据四层剪切结构模型的动力响应加速度计算的速度时程。图 5-11 是平均加速度法和改进算法的相对误差。

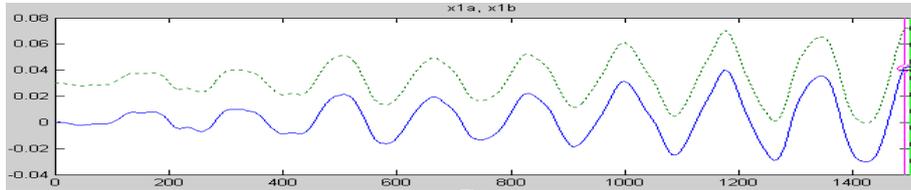


图 5-9 速度初值不同的速度时程

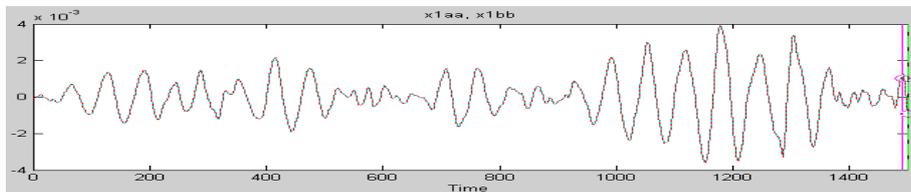


图 5-10 不同速度初值通过提取结构特征方法后的速度时程

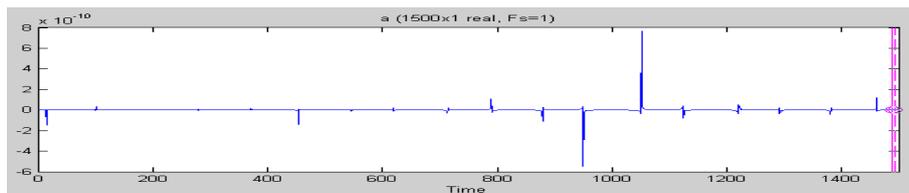


图 5-11 两种积分结果相对误差

此外，在数值积分计算速度和位移中，若加速度信号中包含直流偏移，根据积分性质有：

$$\int(\ddot{y} + C_1)dt = \dot{y} + C_1t + C_2 \tag{5-56}$$

$$\int(\dot{y} + C_1t + C_2)dt = y + C_1at^2 + C_2t + C_3 \tag{5-57}$$

其中： $C_1t + C_2$ ， $C_1at^2 + C_2t + C_3$ 即为引入的低频信号。因此速度时程引入一斜直线误差信号，位移时程则引入了二次曲线误差信号。因此，在结构参数识别中，对速度和位移中的低频信号必须进行剔除。

4. 数值算例

本例以四层框架结构为例，在基底以白噪声作为激励，其计算简图如图 5-12 所示，基本参数见表 5-12。采用正演计算，得出各层的动力响应加速度作为测试

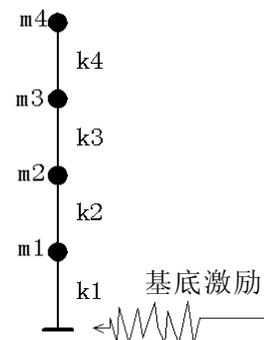


图 5-12 参数识别模型

加速度。通过数值积分求得速度和位移，并利用参数识别程序进行识别。分别对不进行滤波处理和采用第四章中的结构动力响应信号提取滤波方法处理后的波形和反演结果进行比较。

四层剪切型结构的基本参数

表 5-12

层号	1	2	3	4
质量 $m(\text{kg})$	610	580	530	530
刚度 $k(\text{N/m})$	22002000	33398000	32283000	31008000
阻尼 c	2569	2465	2297	2272

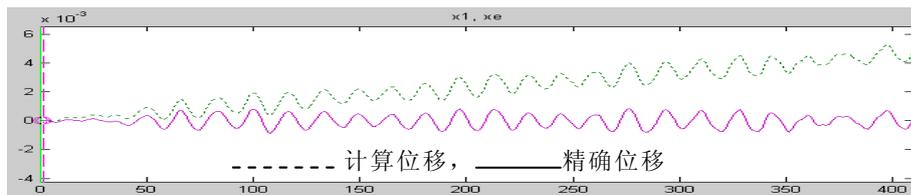


图 5-13 第四层位移精确值与无滤波时计算位移

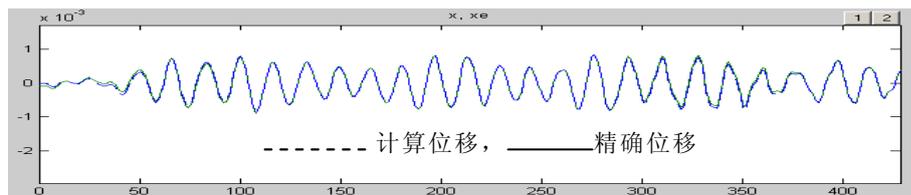


图 5-14 第四层位移精确值与滤波后计算位移

无滤波识别刚度计算结果

表 5-12

层号	1	2	3	4
实际刚度(N/m)	22002000	33398000	32283000	31008000
识别刚度(N/m)	-18366	8948753	17144689	21010816
误差(%)	...	73.2	46.9	32.2

滤波后识别刚度计算结果

表 5-13

层号	1	2	3	4
实际刚度(N/m)	22002000	33398000	32283000	31008000
识别刚度(N/m)	21870807	33229107	32180109	30931721
误差(%)	0.60	0.51	0.32	0.24

从以上算例分析可知，结构损伤识别过程中，数值积分带来的误差严重影响结构损伤识别的精度，根据小波包分析理论设计的滤波器，达到了消除计算误差的目的。由算例验证了将位移计算中包含的积分计算误差消除后，计算位移和精确位移拟合程度非常接近，结构刚度反演误差由 73%~32.2%降低到 0.6%~0.24%，识别参数结果的精度明显提高。

5.3.4 子结构参数识别方法

以上讨论了信息完备(地面加速度和各层的加速度均为已知)情况下的结构参数识别方法及相关问题。实际工程中,当结构层数较多时,一次性获得全部的加速度信息,具有一定的难度或将引入较大的测量误差,此外,子结构参数识别不需要获得地面加速度。因此,利用剪切结构的子结构进行结构参数识别具有一定的实际意义。下面分别讨论几种子结构形式。

1. 包含顶层的子结构参数识别(子结构 1)

原剪切模型受力图及子结构模型受力图如图 5-15 所示,对应子结构的动力响应方程为:

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = -MG(t) \quad (5-57)$$

其中: \ddot{Y} 为相对于地面的相对加速度, \dot{Y} 和 Y 为相对于第 i 层的相对速度和位移,其余符号的意义与式(5-44)相同。即:

$$\dot{Y} = (\dot{y}_i - \dot{y}_{i-1}, \dot{y}_{i+1} - \dot{y}_{i-1}, \dots, \dot{y}_n - \dot{y}_{i-1})$$

$$Y = (y_i - y_{i-1}, y_{i+1} - y_{i-1}, \dots, y_n - y_{i-1})$$

实际测量中,一般测量的是楼层的绝对加速度 $\ddot{Y} + G(t)$;式(5-57)可转换成:

$$C\dot{Y} + KY = -M(\ddot{Y} + G(t)) \quad (5-58)$$

比较(5-45)和 (5-58)等式的右边完全相同,等式的左边仅仅将不同的相对值代替即可识别第 i 层~第 n 层的结构参数。

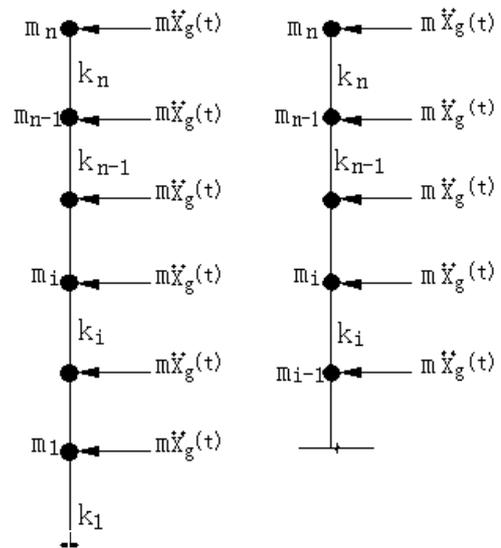


图 5-15 原结构和子结构受力图

2. 中间层结构参数识别(子结构 2)

设从第 i 层至 $i+n$ 层为一组,建立平衡方程时,必须已知 $n-1$ 层的绝对加速度和 $n+1$ 层的速度和位移(因速度和位移是通过加速度积分所得,实际测量的加速度数量和速度、位移相同),一次可进行 n 层的参数识别,即可识别从 $i+1$ 层到 $i+n$ 层的刚度,中间每组测到的加速度不得少于 3 层,一次最少可识别 2 层的刚度。

根据图 5-16,可以列出各质点受力平衡方程:

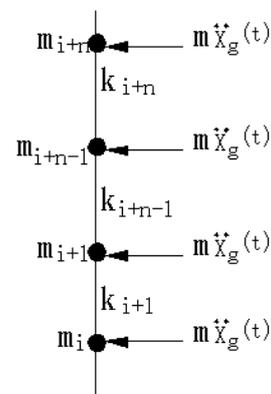


图 5-16 中间层质点受力图

$$\begin{aligned}
 m_{i+1}(\ddot{X}_{i+1} + \ddot{X}_g) + K_{i+1}(X_{i+1} - X_i) + K_{i+2}(X_{i+1} - X_{i+2}) + C_{i+1}(\dot{X}_{i+1} - \dot{X}_i) + C_{i+2}(\dot{X}_{i+1} - \dot{X}_{i+2}) &= 0 \\
 m_{i+2}(\ddot{X}_{i+2} + \ddot{X}_g) + K_{i+2}(X_{i+2} - X_{i+1}) + K_{i+3}(X_{i+2} - X_{i+3}) + C_{i+2}(\dot{X}_{i+2} - \dot{X}_{i+1}) + C_{i+3}(\dot{X}_{i+2} - \dot{X}_{i+3}) &= 0 \\
 \dots\dots\dots \\
 m_{i+n-1}(\ddot{X}_{i+n-1} + \ddot{X}_g) + K_{i+n-1}(X_{i+n-1} - X_{i+n-2}) + K_{i+n}(X_{i+n-1} - X_{i+n}) + C_{i+n-1}(\dot{X}_{i+n-1} - \dot{X}_{i+n-2}) + C_{i+n}(\dot{X}_{i+n-1} - \dot{X}_{i+n}) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{5-59}$$

为了简单起见，设 $i=1$ ，则结构特征矩阵可写为：

$$\begin{aligned}
 H_c &= \begin{bmatrix} \dot{X}_2 - \dot{X}_1 & \dot{X}_2 - \dot{X}_3 & & & & \\ & \dot{X}_3 - \dot{X}_2 & \dot{X}_3 - \dot{X}_4 & & & \\ & & \dots & \dots & & \\ & & & \dot{X}_n - \dot{X}_{n-1} & \dot{X}_n - \dot{X}_{n+1} & \\ & & & & & \end{bmatrix} \\
 H_k &= \begin{bmatrix} X_2 - X_1 & X_2 - X_3 & & & & \\ & X_3 - X_2 & X_3 - X_4 & & & \\ & & \dots & \dots & & \\ & & & X_n - X_{n-1} & X_n - X_{n+1} & \\ & & & & & \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

式(5-59)可简化为：

$$Z = H\theta \tag{5-60}$$

其中： $\theta = \{c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n \ k_1 \ k_2 \ \dots \ k_n\}$ ； $H = [H_c \ H_k]$ ；

$Z = -M\{\ddot{X}_1 \ \ddot{X}_2 \ \dots \ \ddot{X}_n\}$ \ddot{X}_i 为绝对加速度；

式(5-60)的最小二乘解为：

$$\theta = (H^T H)^{-1} H^T Z \tag{5-61}$$

3. 数值算例

以六层剪切结构为例，根据子结构参数识别模型及相关公式采用 MATLAB 编写程序，进行结构参数识别，并与信息完备结构参数识别结果进行比较。

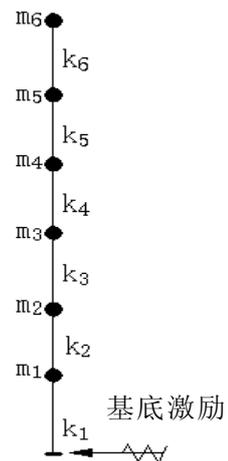


图 5-17 子结构参数识别模型

六层剪切型结构的基本参数

表 5-14

层号	1	2	3	4	5	6
质量 $m(\text{kg})$	234	230	230	230	230	226
刚度 $k(\text{N/m})$	890000	390000	390000	390000	350000	360000
阻尼 c	122	58	73	73	73	30

信息完备刚度识别值

表 5-15

层号	1	2	3	4	5	6
实际刚度(N/m)	890000	390000	390000	390000	350000	360000
识别刚度(N/m)	890000	389999	389999	389999	389999	360000
相对误差(%)	-1.7e-013	4.0e-013	1.1e-012	7.5e-013	2.7e-013	-6.1e-013

子结构 3~6 层刚度识别值(子结构 1)

表 5-16

层号	3	4	5	6
实际刚度(N/m)	390000	390000	350000	360000
识别刚度(N/m)	390000	390000	350000	360000
相对误差(%)	-5.4e-013	-1.6e-013	5.0e-014	-8.9e-013

子结构第 3、4 层刚度识别值(子结构 2)

表 5-17

层号	3	4
实际刚度(N/m)	390000	390000
识别刚度(N/m)	390000	390000
相对误差(%)	-2.8e-012	-3.3e-012

以上结果表明，两种子结构的参数识别与信息完备情况下的参数识别都具有较好的识别效果。为了检验子结构参数识别的抗噪能力，在测试信号中分别 5%，10%，和 30%的随机噪声进行，采用三种不同的参数识别方法分别进行刚度识别，并进行比较。由于篇幅有限，此处仅列出第 5、6 层的刚度识别结果及误差。

噪声对子结构参数识别的影响

表 5-18

噪声	3%		5%		10%	
	5	6	5	6	5	6
实际刚度(N/m)	350000	360000	350000	360000	350000	360000
完备信息 识别刚度(N/m)	350377.16	359860.97	352457.02	363909.18	383390.35	405095.75
子结构 1 识别刚度(N/m)	351327.92	360098.25	346213.47	361517.23	378975.21	401924.53
子结构 2 识别刚度(N/m)	350360.75	358202.79	343392.03	354269.64	395729.84	438458.74

噪声对子结构参加识别误差(%)

表 5-19

噪声	3%		5%		10%	
	5	6	5	6	5	6
完备信息 识别刚度	-0.10776	0.038617	-0.70201	-1.0859	-9.5401	-12.527
子结构 1 识别刚度	-0.37941	-0.027294	1.0819	-0.42145	-8.2786	-11.646
子结构 2 识别刚度	-0.10307	0.49922	1.888	1.5918	-13.066	-21.794

以上计算结果表明,子结构 1 的抗噪能力与完备信息参数识别基本相同。子结构 2 识别顶层参数时,抗噪能力相对差一些,对于中间层参数识别的精度与完备信息参数识别相近。此外,通过对一次性识别多层刚度的子结构数值计算结果表明,对于没有噪声的信号进行参数识别具有较好的精度,但对于含有一定噪声的信号,与完备信息参数识别相比,子结构边界单元的参数识别精度明显降低,因此,在实际工程进行参数识别时,尽量不要采用边界单元的参数识别数据。

5.4 小结

本章首先阐述了结构损伤引起频率能量变化的机理,在此基础上,利用小波包具有精细分频的特点,作者提出了基于“能量—损伤”的频域分析方法,并进行了编程和数值仿真计算。通过数值分析表明,地脉动随机信号引起的结构动力响应同样具有随机信号特征。根据各频率段能量随机统计特征值—变异系数,分辨出结构特征频率段和噪声频率段,从而确定结构特征频率区段。数值计算中,对各层刚度不同的损伤状态进行频率区段能量分析,建立了“能量—损伤”向量特征值和图示,说明在不同的位置发生不同程度的损伤,结构的能量特征将发生相应的变化,从而用于结构损伤识别。因“能量—损伤”特征值损伤诊断方法的将频率段区分较细,结构损伤引起的高频变化信息将在高频能量变化中体现,因此,该方法比一般频域法的识别灵敏度高。

为了研究时域法在房屋结构损伤识别中的应用,本章针对剪切结构模型的参数识别一些技术问题进行了研究。作者推导了积分初值对原信号影响的计算公式,从理论上证明数值积分时将引入低频信号趋势线。提出了将积分初值以及对积分引入的低频趋势线作为低频噪声的新概念,采用小波包分析方法进行编程和数值仿真计算。计算结果表明,该方法有效地解决了积分初值和低频趋势线的影响,使参数识别精度大大提高。

最后,作者根据实际工程检测要求,提出了两个子结构的参数识别模型,推导出子结构模型动力方程和结构参数识别方程,并进行编程。对子结构模型

的参数识别精度和抗噪能力进行了数值仿真计算。子结构模型与原模型相比，子结构模型参数识别具有较好的识别精度，但在噪声的影响下，边界位置的参数识别精度较差，在实际工程应用中应引起注意。

第六章 钢-混框架模型参数识别试验

6.1 引言

本文第 2 至 5 章分别就结构频域法和时域法的参数识别方法, 噪声对参数识别精度影响, 时域信号去噪方法, 子结构识别等问题进行了大量的理论分析和数值仿真研究。在此基础上, 本章将进一步对钢-混框架结构模型的综合参数识别进行试验研究, 根据地脉动加速度响应信号识别框架结构模型的固有频率和层刚度, 本章试验研究的主要目的旨在对前述理论内容的有效性进行验证。

6.2 钢-混框架模型参数识别试验

6.2.1 模型制作

试验模型采用一个 6 层 2 跨单开间的钢方管梁柱混凝土楼板框架, 其比例为 1:8。框架模型整体尺寸为 $2700\text{mm} \times 1840\text{mm} \times 450\text{mm}$, 柱采用 $\square 50 \times 40 \times 2$ 薄壁方钢, 梁采用 $\square 40 \times 30 \times 2$ 薄壁方钢, 楼板 20mm 厚钢筋混凝土, 楼面活载按 2.5kN/m^2 设计。模型照片和平面、立面图见图 6-1~图 6-3。



图 6-1 模型照片

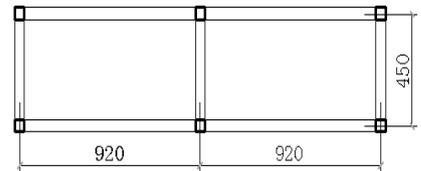


图 6-2 模型平面图

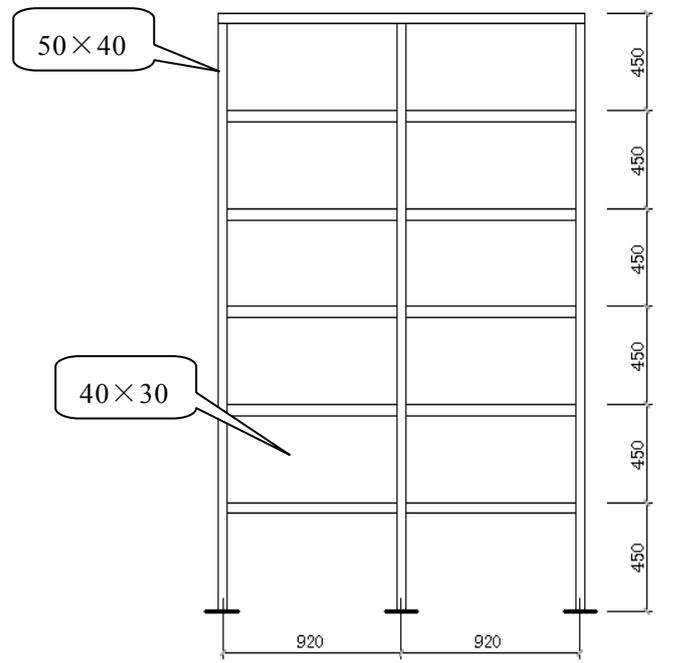


图 6-3 模型立面

6.2.2 模型静力参数实验

由于制作模型的钢材为市场购置，其几何尺寸和物理参数与计算值可能相差较大，为了保证模型结构参数的正确性，对方钢的截面刚度进行实测，作为框架侧移刚度计算依据。

(1) 钢管抗弯刚度 EI 的测定。测试采用简支梁抗弯试验测定钢管的抗弯刚度 EI。跨中受集中力的简支梁挠度公式 $f = \frac{pl^3}{48EI}$ ，则 $EI = \frac{pl^3}{48f}$ 。试件为跨度 500mm 的简支梁。由于钢管实际为钢板轧制而成，焊接效果不清，肉眼观察感觉不好，钢管焊口不牢，这样钢管实际介于开口与闭口之间，其刚度也介于开口截面刚度与闭口截面刚度之间，而且正反放置的刚度可能不同。因此，钢管必须做正反放置的挠度测定。测定结果见表 6-1：

规格	放置方式	跨中荷载 $p(N)$	挠度平均值 (mm)	刚度 EI ($N \cdot mm^2$)	EI 平均值 ($N \cdot mm^2$)
50×40×2	侧正放	250	0.104	6.5104×10^9	7.2009×10^9
	侧反放	250	0.825	7.8914×10^9	
40×30×2	侧正放	250	0.820	7.9395×10^9	(由侧放推算)
40×30×2	平放			5.0045×10^9	

(2) 框架整体抗侧移刚度实验。采用膨胀螺栓将框架固定在混凝土地面，在顶部施加水平拉力测试相应的位移，并由此测出框架的水平抗侧移静刚度，实验简图见图 6-4。通过结构力学求解器求出相应的理论位移（梁柱抗弯刚度按实测值采用），实验结果及理论计算值见表 6-2。

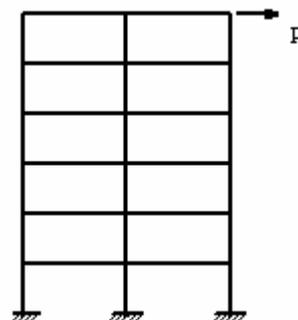


图 6-4 框架侧移刚度测试图

荷载 p (N)	顶点水平位移 (m)	实测刚度 (N/m)	理论位移 (m)	理论刚度 (N/m)
250	1.80×10^{-3}	138889	1.86×10^{-3}	134410

(3) 剪切结构层刚度计算。实际工程中，一般采用 D 值法计算框架的侧移刚度。因本文采用的参数识别模型为剪切模型，为了比较 D 值法和结构力学方法的计算结果差异，采用 D 值法进行框架层刚度计算（梁柱抗弯刚度 EI 按实测值）。

D 值法框架侧移刚度计算结果

表 6-3

层	柱 EI/H	梁 EI/L	H	L	d	y	中柱 K
6	1.6002×10^7	5.4397×10^6	450	920	948.2685	0.5	0.879
5	1.6002×10^7	8.6299×10^6	450	920	948.2685	0.5	1.079
4	1.6002×10^7	8.6299×10^6	450	920	948.2685	0.5	1.079
3	1.6002×10^7	8.6299×10^6	450	920	948.2685	0.5	1.079
2	1.6002×10^7	8.6299×10^6	450	920	948.2685	0.5	1.079
1	1.6002×10^7	8.6299×10^6	450	920	948.2685	0.67	1.079

层	边柱 K	中柱修正	边柱修正	中柱 D	边柱 D	KJ-D (N/mm)	层间侧移 (mm)
6	0.43962	0.305372	0.142798	289.57	135.4111	560.40	0.446112
5	0.5393	0.350355	0.137973	332.23	135.4111	603.05	0.414557
4	0.5393	0.350355	0.137973	332.23	135.4111	603.05	0.414557
3	0.5393	0.350355	0.137973	332.23	135.4111	603.05	0.414557
2	0.5393	0.350355	0.137973	332.23	135.4111	603.05	0.414557
1	0.5393	0.512766	0.409286	486.24	388.1135	1262.5	0.198025

结构实测刚度为 138889，D 值法计算的框架结构总刚度为 108584，结构力学计算刚度为 134410，其相对分别误差达到 21.8%和 3.23%。从以上计算结果表明，结构力学计算的结构总刚度与实测刚度比较接近，而 D 值法和实测刚度具有一定的误差。由此可见，该框架由于梁的刚度相对较小，采用有限元计算结果误差较小，而采用剪切结构代替框架结构进行参数识别具有一定的误差。本试验的结构刚度采用修正后的 D 值法计算结果，各层刚度值见表 6-4。

框架各层刚度值

表 6-4

层	计算刚度 K (N/m)	修正系数	修正后刚度 (N/m)
6	560400	1.278	716752
5	603050	1.278	771301
4	603050	1.278	771301
3	603050	1.278	771301
2	603050	1.278	771301
1	1262500	1.278	1614740

6.2.3 地脉动加速度信号测试与去噪

考虑到本试验将框架视为剪切结构类型进行参数识别，仅仅考虑一个水平方向的加速度测试和刚度识别，在地脉动加速度和结构动力加速度响应测试时，在对称轴线位置，每层放置一个水平加速度传感器，在试验开始前进行了加速度标定。其加速度测试示意图如图 6-5 所示。

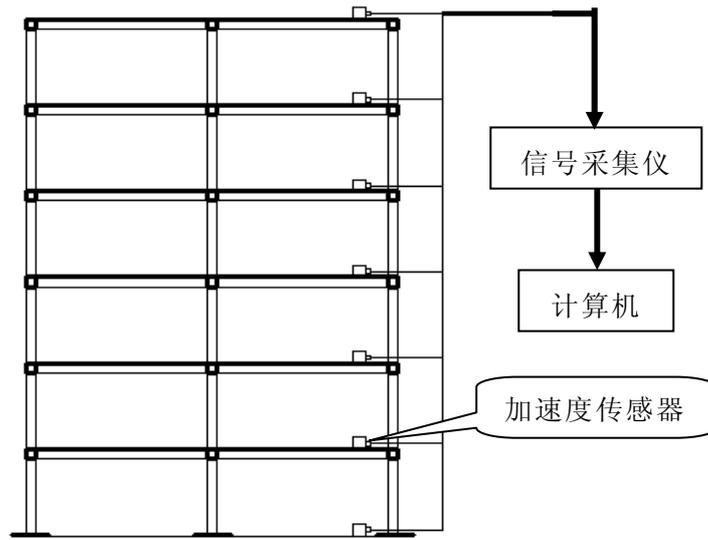


图 6-5 加速度测试试验装置示意图

通过有限元模型计算，结构的固有频率范围为 $2.3\text{Hz}\sim 50\text{Hz}$ 。在地脉动激励下，通过随机采样方式采集地面和 1~6 层的加速度响应信号，为了保证丰富的高频信号和较大的随机样本，采样频率选用 200Hz ，采样时间为 640s ，采样点数为 129024 个。应用本文提出的结构特征信号提取的方法，采用小波包提取测试信号中 $2\text{Hz}\sim 60\text{Hz}$ 频率的信息作为结构特征信号以剔除噪声和低频信号。图 6-6~图 6-8 分别给出了部分楼层的测试加速度信号、特征加速度信号和各自的频谱图。

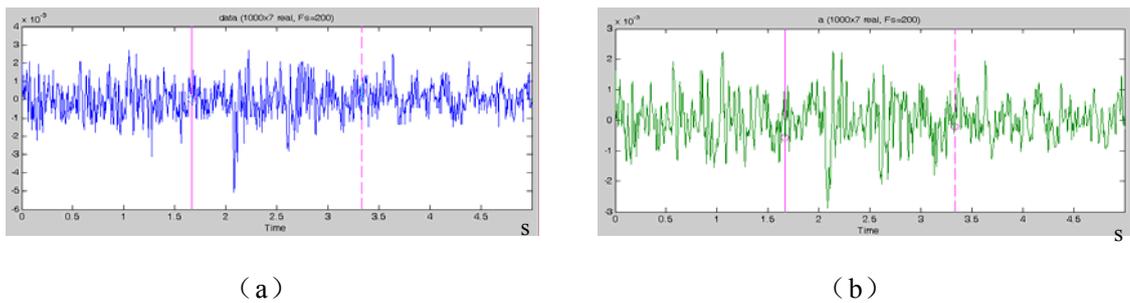


图 6-6 第 6 层加速度信号 (a)、结构特征加速度信号 (b)

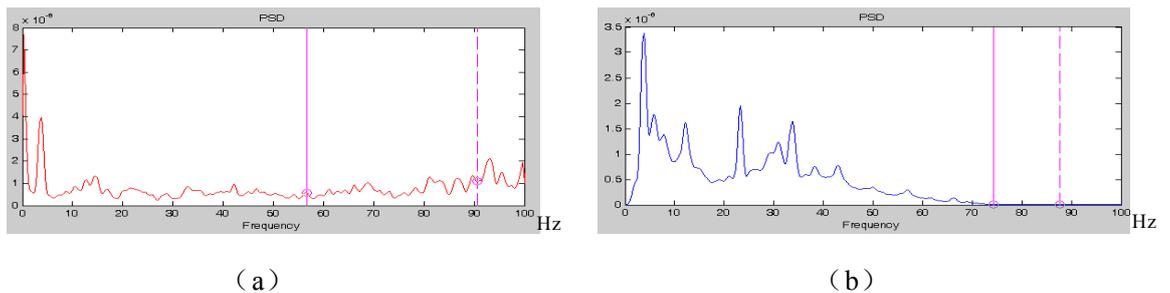


图 6-7 第 6 层结构响频谱图 (a)、结构特征信号频谱图 (b)

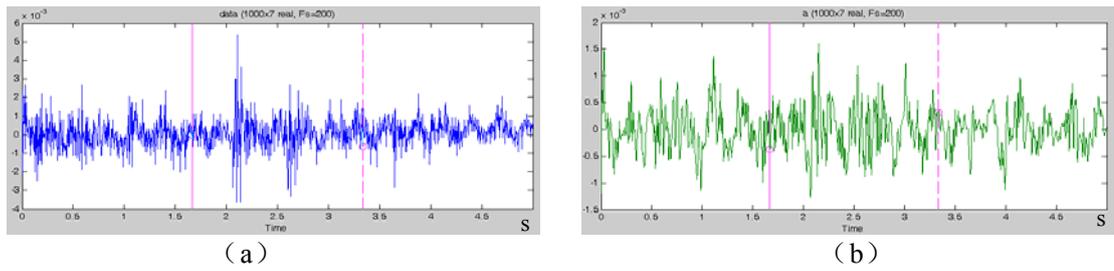


图 6-8 第 4 层加速度信号 (a)、结构特征加速度信号 (b)

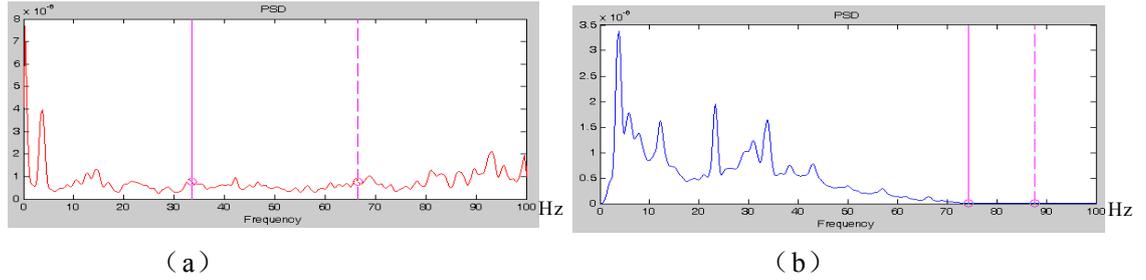


图 6-9 第 4 层结构响频谱图 (a)、结构特征信号频谱图 (b)

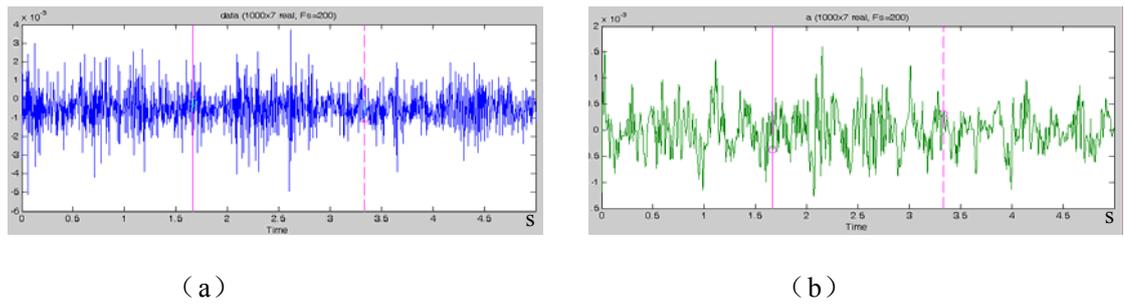


图 6-10 第 2 层加速度信号 (a)、结构特征加速度信号 (b)

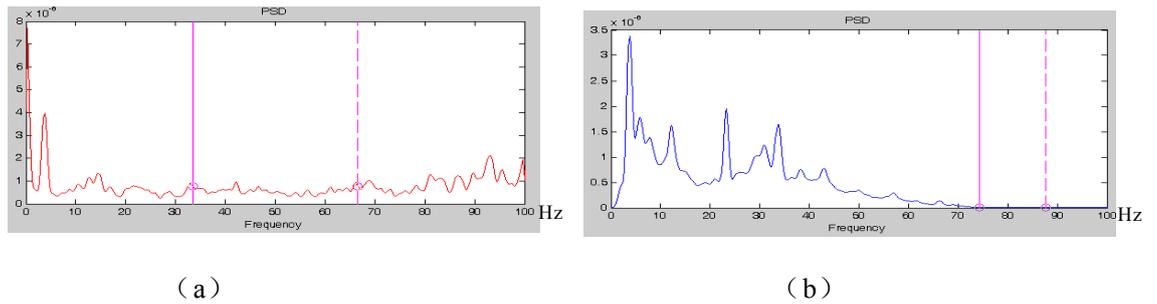


图 6-11 第 2 层结构响频谱图 (c)、结构特征信号频谱图 (d)

从图 6-6~图 6-11 可知，通过提取结构特征信号，从加速度时程图中看到，信号的高频信息明显减少，从频谱图中看到，信号频率特征集中在结构固有频率范围，这样提高了参数的识别精度。

6.2.4 框架模型模态及物理参数频域法识别

实验室一般采用锤击法获得结构固有频率和模态，但实际工程难以实现。地脉动、风脉动、机械振动等自然激励是最理想的激励源。本文以结构特征加

速度响应信号进行频域识别参数分析和物理参数识别。

1. 模态分析

结构特征加速度响应所覆盖的频带不仅包含整体横向振动的所有频率，而且有效的消除了高频随机噪声和低频趋势噪声，相对而言，结构特征加速度响应的模态参数应该具有更好的模态识别效果。因此，本文的模态参数识别都是建立在结构特征加速度响应信号的基础之上的。表 6-5 给出各楼层加速度自功率谱 6 个峰值所对应的频率值，图 6-12~图 6-14 和表 6-5~表 6-8 分别为相应频率的相干系数、传递函数幅值和相位的谱图和值。

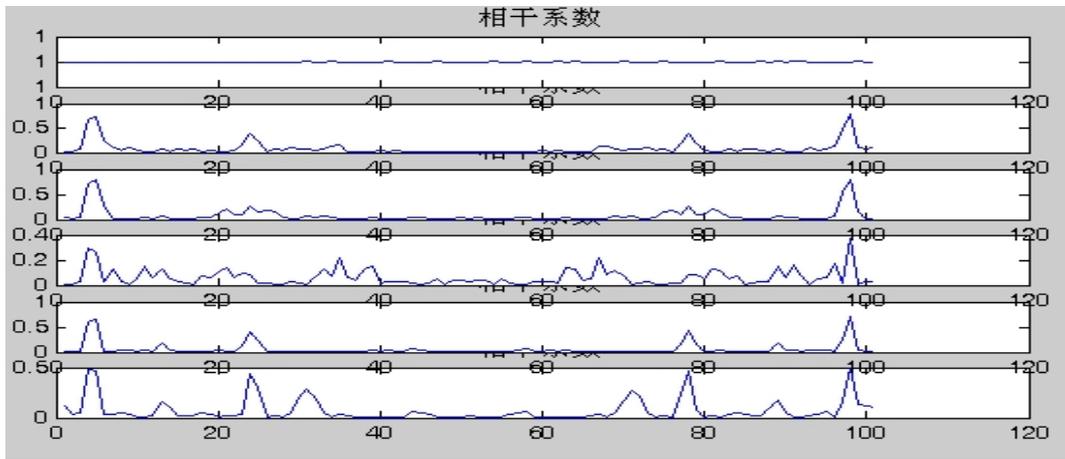


图 6-12 相干系数谱

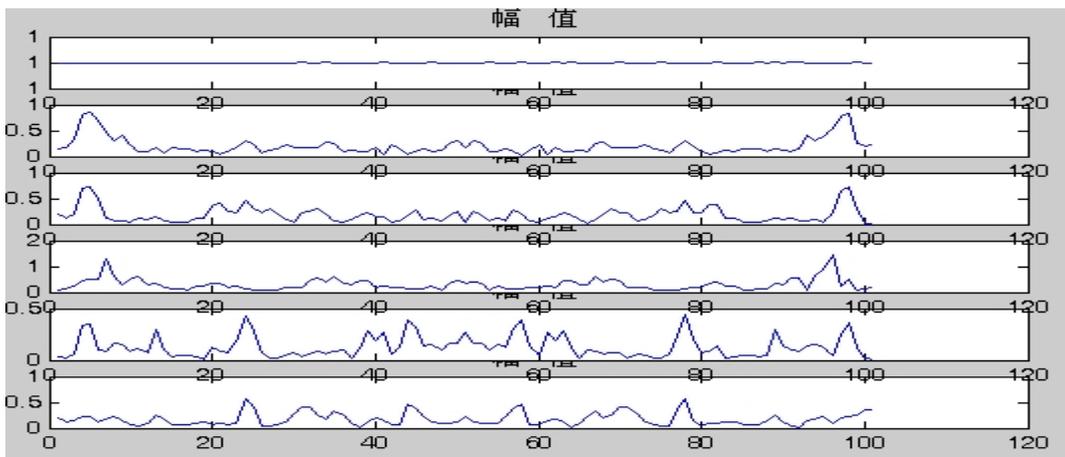


图 6-13 传递函数幅值谱

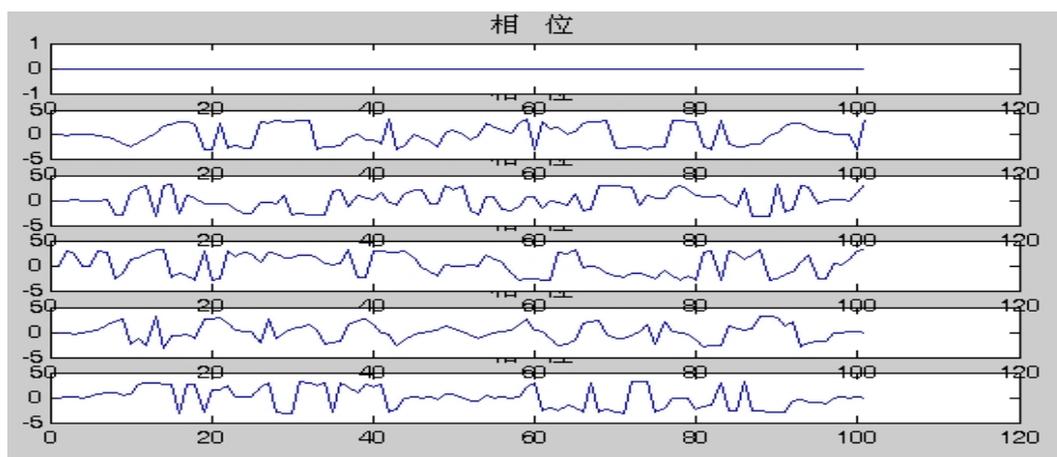


图 6-14 传递函数相位谱

加速度信号自功率谱的峰值频率

表 6-5

楼层	峰值频率/Hz					
	第 1 峰值	第 2 峰值	第 3 峰值	第 4 峰值	第 5 峰值	第 6 峰值
6	3.7109375	12.10938	23.24219	33.59375	42.96875	48.82813
5	3.7109375	12.10938	23.24219	33.59375	42.96875	48.82813
4	3.7109375	12.10938	23.24219	33.59375	42.96875	48.82813
3	3.7109375	12.10938	23.24219	33.59375	42.96875	48.82813
2	3.7109375	12.10938	23.24219	33.59375	42.96875	48.82813
1	3.7109375	12.10938	23.24219	33.59375	42.96875	48.82813

自功率谱的相干系数

表 6-6

楼层	相干系数					
	3.7109375	12.10938	23.24219	33.59375	42.96875	48.82813
1	0.92747	0.81695	0.93295	0.023231	0.4277	0.0452
2	0.9647	0.78489	0.92159	0.06329	0.2966	0.0752
3	0.87924	0.67573	0.7277	0.31245	0.04277	0.23415
4	0.97333	0.629	0.89262	0.033152	0.2004	0.14142
5	0.96865	0.35251	0.91865	0.2638	0.1929	0.20963
6	1	1	1	1	1	1

传递函数幅值

表 6-7

楼层	幅 值					
	3.7109375	12.10938	23.24219	33.59375	42.96875	48.82813
1	0.21903	0.58815	1.1534	0.49641	1.6609	0.27759
2	0.40689	0.79982	0.87437	0.069022	0.74465	0.23984
3	0.60743	0.80927	0.29235	0.83679	0.22337	1.0056
4	0.79126	0.34524	1.0993	0.27384	0.41761	0.35797
5	0.89344	0.29128	0.50343	0.31533	0.47388	0.64199
6	1	1	1	1	1	1

传递函数相位

表 6-8

楼层	相 位 (弧度)					
	3.7109375	12.10938	23.24219	33.59375	42.96875	48.82813
1	-0.00918	3.0537	-0.02377	-3.0854	-0.20073	-1.4874
2	-0.00571	3.0909	-0.03218	-1.2146	-1.9831	-0.79458
3	0.020123	3.031	3.0571	0.032486	-1.4549	-0.54813
4	-3.9e-05	2.9732	3.1382	0.43916	1.3143	-2.797
5	0.019461	-0.06938	-3.1391	-2.3672	-2.9745	3.0205
6	0	0	0	0	0	0

从以上计算结果可知，第 1~3 峰值相应频率的相干系数较大，第 4~6 峰值相应频率的相干系数较小，因此前 3 阶的频率和模态识别具有一定的可信度。前 3 阶振型如图 6-15 所示。

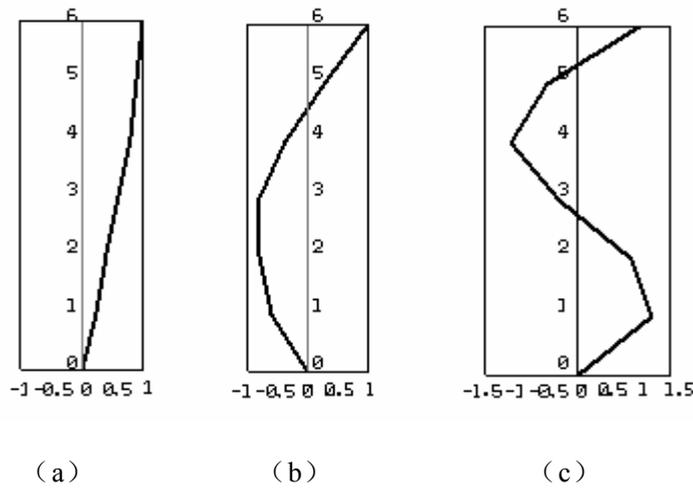


图 6-15 (a) 第 1 振型 (b) 第 2 振型 (c) 第 3 振型

2. 层刚度识别

框架模型的各层楼板、配重以及其上下柱子的质量一半集中在楼板处，构成如下集中质量矩阵

$$M = \begin{bmatrix} 234 & & & & & \\ & 230 & & & & \\ & & 230 & & & \\ & & & 230 & & \\ & & & & 230 & \\ & & & & & 226 \end{bmatrix} \text{ kg} \quad (6-1)$$

对于剪切结构，根据 1 阶固有频率和第 1 振型可以得到结构各层刚度。根据模态方程（近似采用无阻尼模态）有：

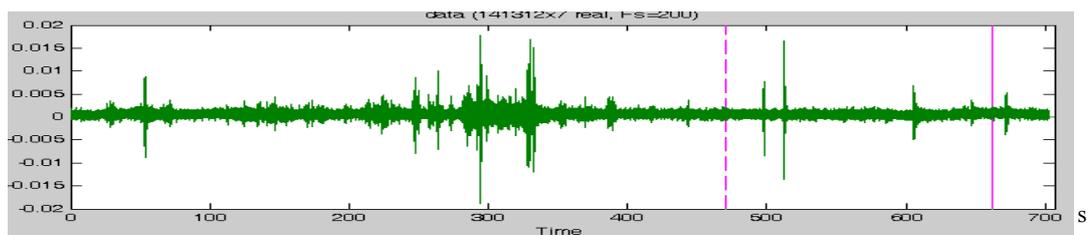
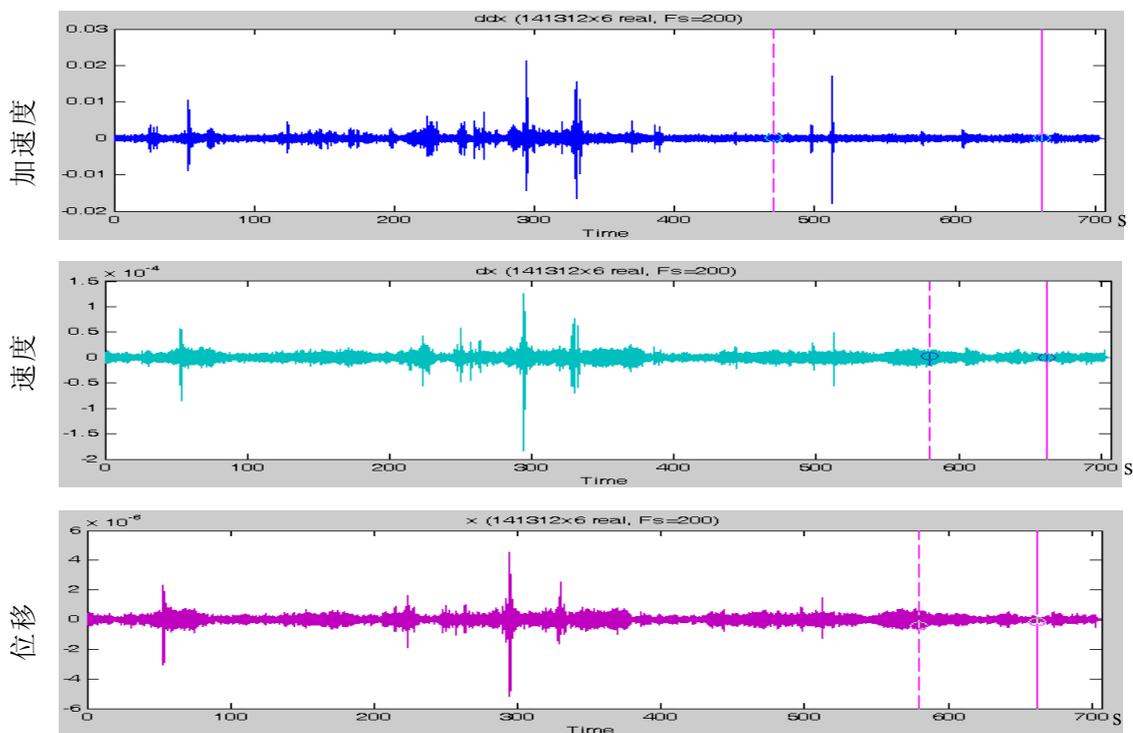


图 6-16 第 2 层原始加速度响应



6-17 第 2 层特征响应信号

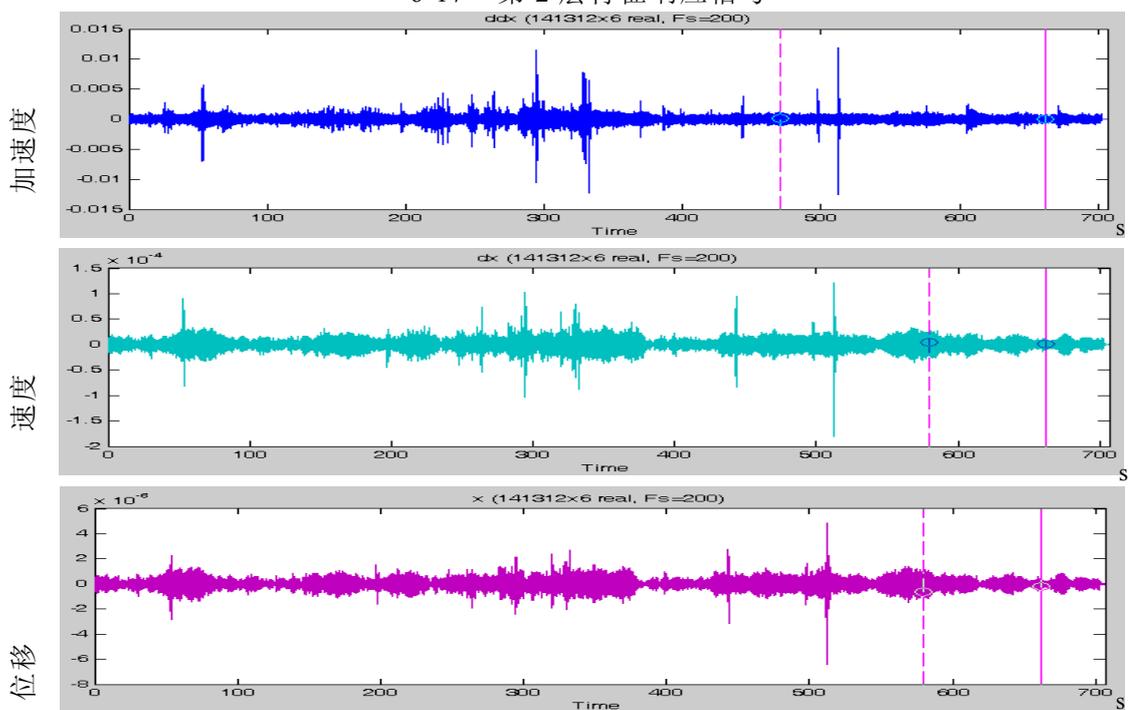


图 6-18 第 4 层特征响应信号

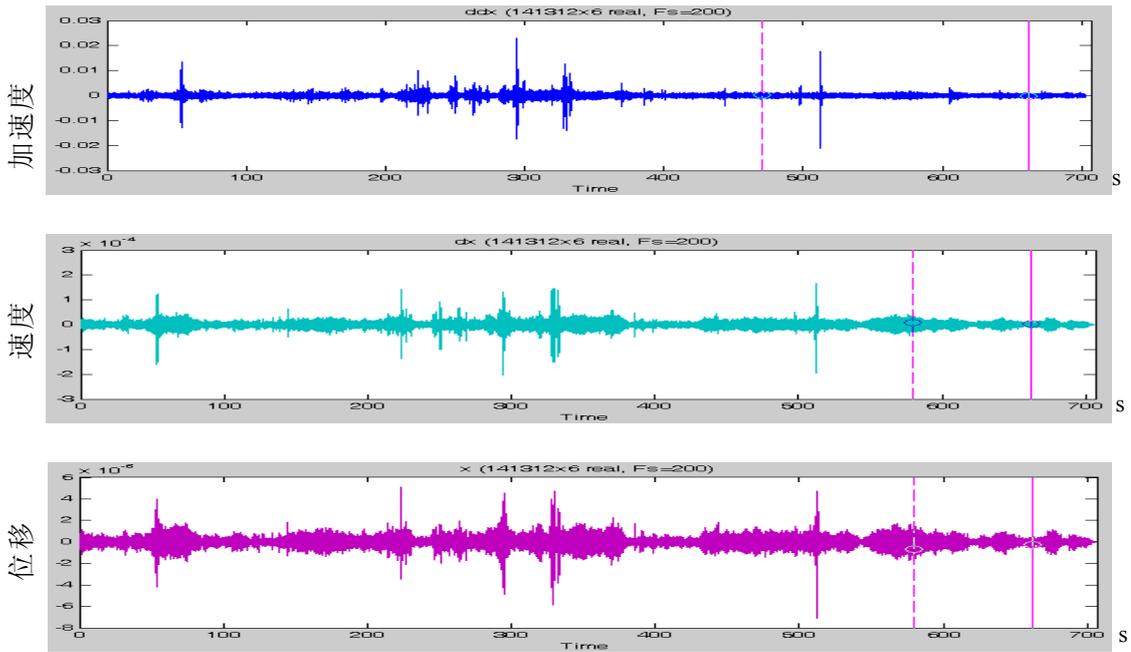


图 6-19 第 6 层特征响应信号

6.2.6 框架模型物理参数时域法识别

1. 完备信息参数识别。将质量参数及各层的特征加速度、速度和位移以及地面加速度作为已知信息，按照时域法可直接识别 1~6 层刚度、阻尼参数。因阻尼参数的识别一般误差较大，且没有工程意义，故此处没有对阻尼参数识别结果进行讨论。为了进一步减少噪声的影响，对结构响应进行平均计算，信号长度为 4096。图 6-20~图 6-20 给出了平均后的响应信号。层刚度识别结果见表 6-10。

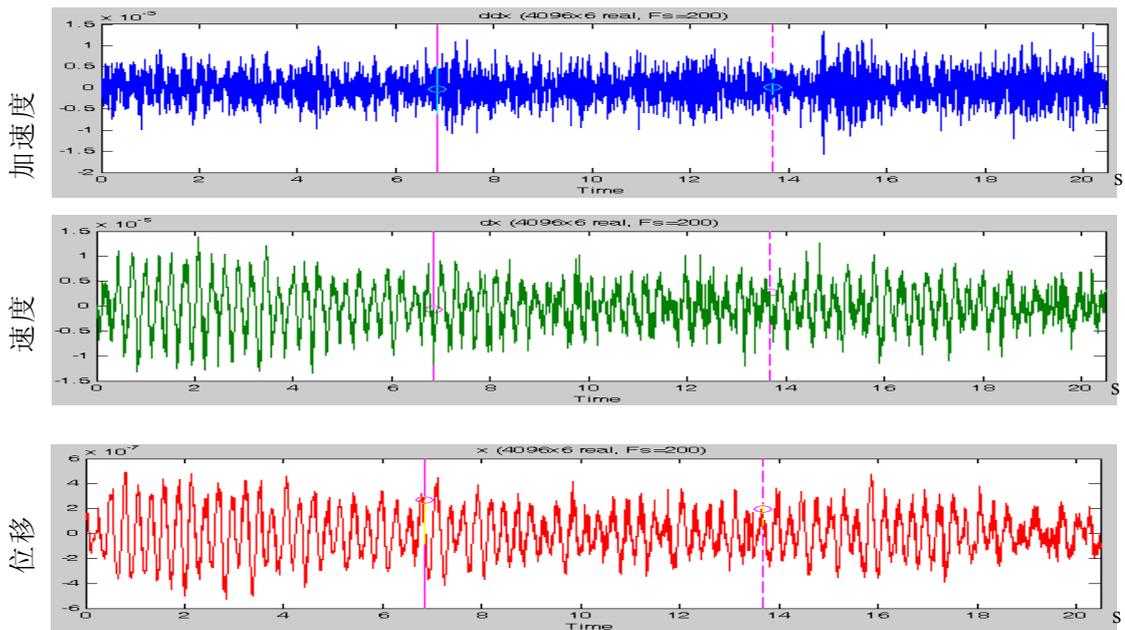


图 6-20 第 2 层平均响应信号

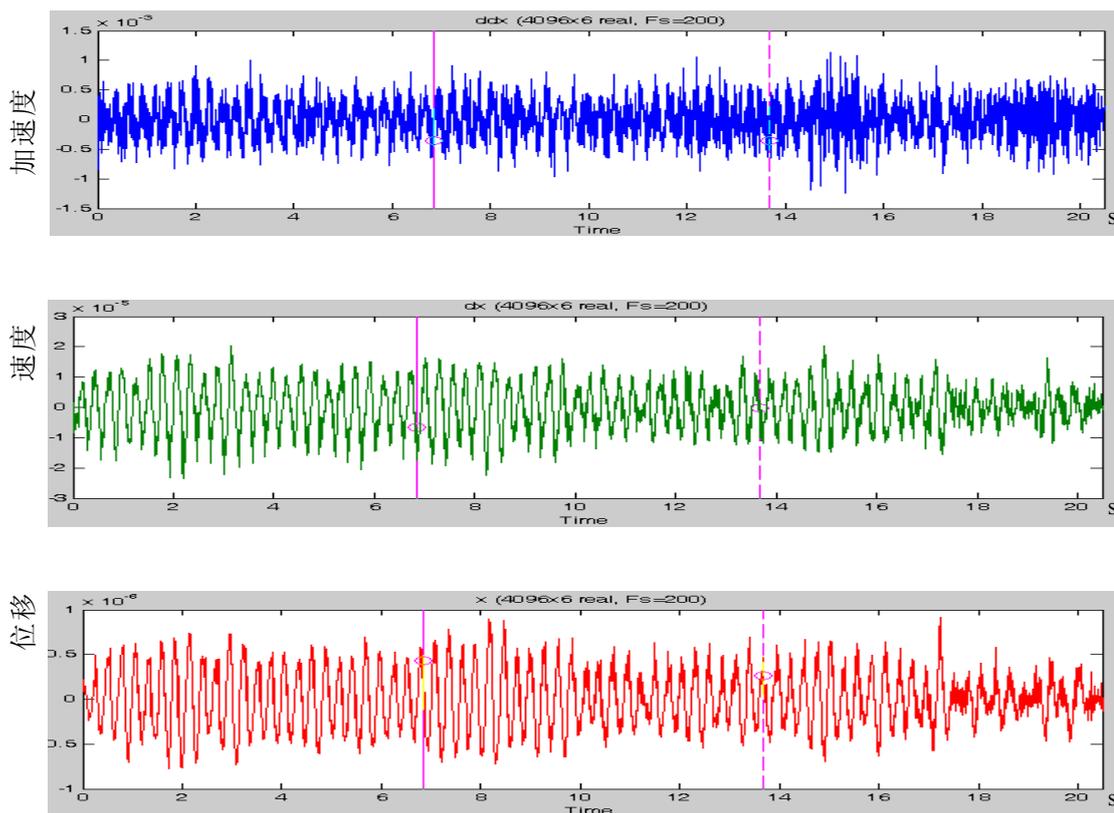


图 6-21 第 4 层平均响应信号

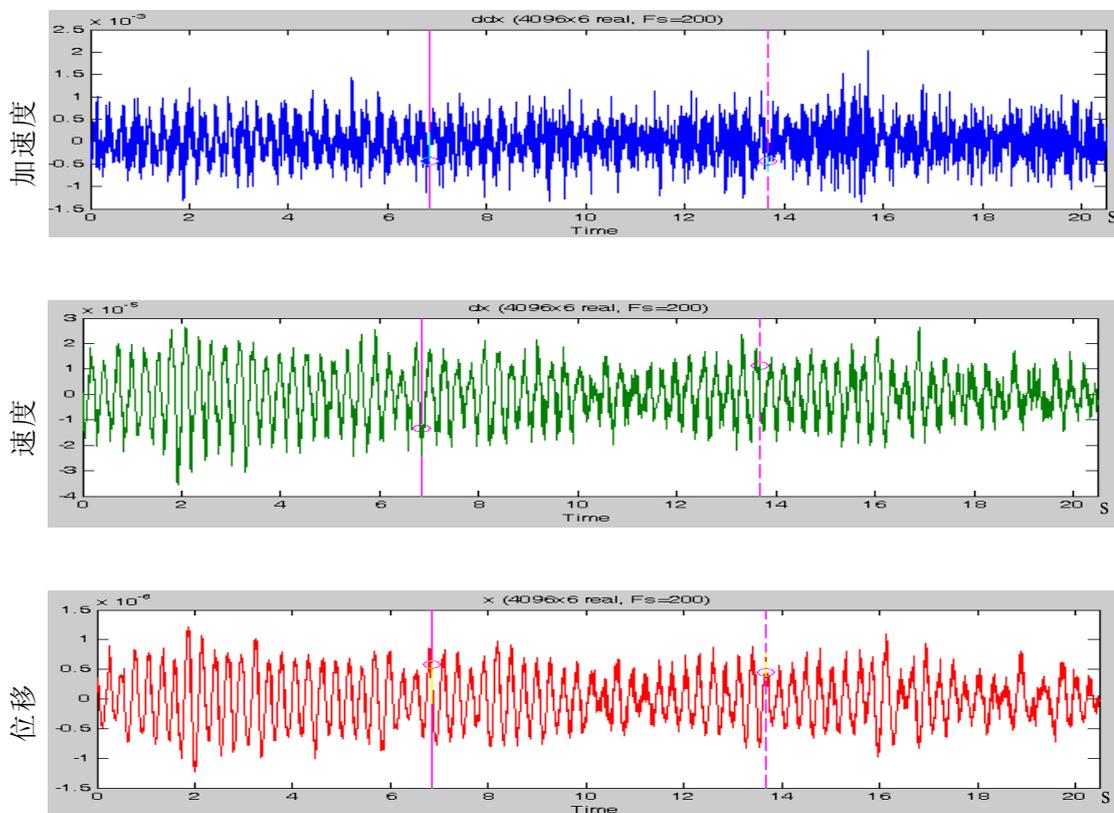


图 6-22 第 6 层平均响应信号

信息完备时域法层刚度识别 表 6-10

层	计算刚度值(N/m)	识别刚度值(N/m)	相对误差%
6	716752	660630	7.82999
5	771301	711480	7.75585
4	771301	695960	9.76804
3	771301	673020	12.7422
2	771301	728910	5.49603
1	1614740	1683500	-4.2584

根据以上计算结果，模型实测总刚度为 138889，识别的模型总刚度为 128076.33，相对误差为 7.785%。

2. 子结构参数识别。当实际工程楼层较多时，一般需要分段进行结构响应测试。此时属于不完备信息参数识别，结构参数识别只能采用子结构参数识别进行计算，表 6-11 给出了子结构时域识别框架模型 2~6 层刚度，并与完备信息识别结果进行比较。

子结构时域法层刚度识别 表 6-11

层	计算刚度值(N/m)	识别刚度值(N/m)	相对误差%
6	716752	114840	83.97772
5	771301	858970	-11.3664
4	771301	652620	15.38712
3	771301	681140	11.68947
2	771301	1245100	-61.4285

子结构与完备信息时域法层刚度识别比较 表 6-12

层	信息完备识别刚度值	子结构识别刚度值	相对误差%
6	660630	114840	83.23871
5	711480	858970	-17.4965
4	695960	652620	1.372223
3	673020	681140	-4.17693
2	728910	1245100	-65.9602

从以上结果可知，子结构识别的层刚度，边界单元的反演误差较大，达到 83%和 63%，中间单元误差较小，但子结构识别结果总的误差大于信息完备识别结果。这可能是由于边界信息与识别模型之间的误差较大所致，因此，在实际工程中分段量测时，一次量测楼层数不能太少，一般不应不少于 8 层，中间部分楼层重叠测试。

6.3 小结

根据作者设计制作的 1/6 钢-混框架模型，对框架模型横向振动的模态进行了分析，对层刚度进行了时域参数识别研究。通过随机采样方式获取框架在地脉动激励下各层加速度响应信号，采用结构特征信号提取技术，剔除了结构响应中的高频随机噪声和低频趋势噪声。速度和位移采用第五章中提出的数值积分方法进行计算。时域法参数识别时，通过加速度、速度和位移信号的平均，进一步减少随机噪声的影响。为了研究结构在地脉动激励下，对参数识别频域法和时域法方法进行比较。首先对结构模态进行分析，较好的识别出前 3 阶固有频率和振型，但不能有效的进行层刚度识别。而采用时域法进行层刚度识别，取得了较好的效果，总刚度识别误差为 7.785%。

模型试验结果表明，虽然结构参数识别模型采用的是剪切模型，但实测信号中的动力响应包含有结构弯曲变形引起的因素，因此，该模型也可用于一般框架结构的参数识别。

从实际工程考虑，本章还采用了子结构方法进行结构参数识别，较好地识别出层刚度，但子结构边界单元的识别精度大大降低，实际工程中应剔除这些单元的识别结果。

结 论

1. 本文的研究结论

本文以建筑结构损伤识别中应用最多的剪切模型为研究对象，地面随机激励下，以结构动力响应信号为已知信息，对频域法和时域法识别结构参数的关键问题进行了系统的研究，研究的主要结论如下：

1. 有效降低随机噪声是提高结构物理参数识别的途径。结构物理参数时域直接识别法，是直接求解结构动力方程获得结构物理参数，结构损伤识别灵敏度高，定位准确。但实际量测信号中往往带有各种随机噪声，这些噪声直接影响到结构参数识别精度。作者在一般去噪理论的基础上，提出了结构特征信号的新概念并在理论上进行证明，利用小波包分析编程实现了获取结构特征信号的方法。利用结构特征信号替代结构原信号能有效剔除高、低频噪声，在时域法参数识别中获得了非常好的效果。

2. 作者分析和研究了速度和位移计算中数值积分误差和数值积分初值未知的问题，推导出积分初值为信号中一常量的结果，在理论上证明了数值积分引入误差的低频特性。提出了将数值积分初值作为直流偏移和积分误差作为信号低频趋势分量的概念。将其作为低频趋势线进行处理，解决了未知积分初值和积分误差趋势线的问题。通过算例分析验证，该方法得到较好的效果。

3. 子结构方法克服了信息不完备的困难，是实际工程中不可回避的问题。作者针对剪切结构，建立了子结构动力方程和结构参数识别方程，编写了子结构参数识别程序。通过算例分析以及实验验证，子结构参数识别结果与原结构时域参数识别结果一致。但实验中由于噪声的影响以及实际结构模型的误差，边界单元参数识别结果误差较大，因此，用子结构进行参数识别时，应剔除边界单元参加的识别结果。

4. 频域法结构损伤识别对于弱损伤，其辨识率较低。但当结构出现损伤时，其传递函数将会改变，不同频率的幅频特性和相频特性将会有不同程度的改变。从幅频特性来说，它主要表现在对不同频率段的输入信号具有不同的抑制和增强作用。基于此原理，本文提出了基于小波包的“能量-损伤”参数识别方法和算法，并进行了数值仿真计算。但由于实际结构的频率能量分布不相同，因此，必须预先获得原结构的“频率能量-损伤”分布规律，在实际工程中推广还有一定难度。

5. D 值法是在剪切结构的基础上，考虑框架结构节点转角位移修正后的层刚度计算方法。实际检测信号中，结构动力响应中包含有结构弯曲变形引起的动力响应，通过实验证明，基于剪切模型的时域参数识别，能有效地识别一般框架的层刚度，其误差基本能达到工程应用要求。

2. 有待进一步研究的问题

频域法和时域法的结构损伤识别，是一个多学科交叉的综合性研究课题，牵涉的内容多，范围广，能否将现有理论和技术应用于实际工程的损伤检测，是广大科研工作者和工程技术人员非常关注的问题。由于时间和知识面局限性，本论文研究的深度和广度还有待进一步加强。根据作者在论文完成的过程中的体会，认为以下及格问题值得进一步研究：

1. 噪声的影响。由于结构动力响应测试过程中存在的噪声影响因素很多，怎样有效地降低噪声对参数识别的影响，提高结构参数识别精度的方法还有待进一步研究。

2. 理论模型与实验模型的匹配。对于一般房屋结构，由于存在转角位移，采用剪切结构模型进行参数识别存在一定的误差，怎样考虑这些因素的影响，研究类似于 D 值法的参数修正方法进行参数识别修正，具有一定的实际意义。

3. 频域法和时域法参数识别结果的吻合问题。综合结构参数识别，结合了频域法和时域法的优点，但由于实际结构存在的模型误差和噪声影响，框架参数反演试验中，时域法和频域法的层刚度识别具有较大误差。怎样将两种参数识别结果进行处理，达到与实际参数接近的目标，值得进一步研究，且具有较强的工程意义。

4. 子结构边界单元参数识别。虽然数值计算中，子结构和信息完备识别的参数基本一致，但是，当噪声影响较大时，识别误差明显增大。怎样考虑子结构边界单元的修正，值得进一步探讨的问题。

参考文献

- [1] 陈长征, 罗跃刚等. 结构损伤检测与智能诊断[D]. 北京: 科学出版社, 2001.4, 1-138
- [2] 赵 昕. 工程结构时域系统识别研究[D]. 上海: 同济大学, 2003, 1-176
- [3] R.Ghanem, M.shinozuka. Structural-system identification I: theory [J]. Journal of Engineering mechanics, ASCE, 1995,121(2): 255-264
- [4] 马宏伟, 杨桂通. 结构损伤探测的基本方法和研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(4): 513-527
- [5] RILEM. Draft recommendation of damage classification of concrete. Materials and Structure, 1994, 27(170): 362-369
- [6] Rytte, A. Vibration Based inspection of civil engineering structures. Ph. D. Dissertation. Denmark: Department of Building Technology and Structural Engineering, 1993
- [7] M. W. Vanik, J. L. Beck, and S. K. Au. Bayesian Probabilistic Approach to Structural Health Monitoring. Journal of Engineering Mechanics, 2000.7, 738-745
- [8] 张仁瑜, 张晓燕. 建设工程无损检测技术的现状和展望[A]. 第八届全国建设工程无损检测技术学术会议论文集[C]. 北京: 建设工程无损检测技术专业委员会, 2004.4 1-8
- [9] 李国强, 李杰. 工程结构动力检测理论与应用. [D]. 北京: 科学出版社, 2002.4 1-279
- [10] 蔡金狮. 动力学系统辨识与建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991
- [11] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [12] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论方法[M]. 北京: 科学出版社 2001
- [13] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000, 1-394
- [14] 张令弥. 结构力学中的几种模态识别方法[J]. 地震工程与工程振动, 1981(2)
- [15] A. F. Seykert. Estimation of damping from response spectra [J]. Journal of Sound and Vibration, 1981,75(2):199-206
- [16] M. Richardson, D.L. Formenti. Parameter estimation from frequency response function measurement using rational fraction polynomials[A]. Proc. Of the 1st International Testing Modal Analysis Conference, 1982
- [17] 周传荣, 赵淳生. 机械振动参数识别及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989
- [18] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001, 1-326
- [19] Guid De Roeck et al. Benchmark study on system identification through ambient

- vibration measurements[A]. 18th IMAC , 2000 ,1106 –1112
- [20] Rune Brincker et al. Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition[A]. 18th IMAC ,2000 ,625 –630
- [21] S.R. Ibrahim, E.C. Mikulcick. The experimental determination of vibration parameters from time responses[J]. The Shock and Vibration Bulletin, 1977, 46(5):183-198
- [22] S.R. Ibrahim. Double least squares approach for use in structural modal identification[J]. AIAA Journal, 1986,24(3):499-503
- [23] S.R. Ibrahim. An upper Hessenberg sparse matrix algorithm for modal identification on minicomputers[J]. Journal of Sound & Vibration, 1987, 113 (1):47-57
- [24] M. Mergeay. Least squares complex exponential method and global system parameter estimation used by modal analysis[A]. Proc. of the 5th International Seminar on Modal Analysis,1983
- [25] J.N. Juang, R.S. Pappa,. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction[J]. J. Guidance ,1985,8(5):620-627
- [26] J.N. Juang. Mathematical correlation of modal parameter identification methods via system realization theory[J]. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1987,2(1):1-18
- [27] H. Akaile .Power spectrm estimation through autogressive model fitting[J].Annals of the Institute of Statistical Mathematics , 1969,21,407
- [28] S.R. Ibrahim. Efficient random decrement computation for identification of ambient responses[A]. Proceeding of the 19th IMAC , Florida ,USA , 2001, 1-6
- [29] G.H.James. Extraction of modal parameter from an operating HAWT using the natural excitation technique (NexT) [A].The 13th ASME Wind Energy Symposium ,New Orleans , L , A ,1994
- [30] Peeters B, De Roeck G et al. Stochastic subspace techniques applied to paremeter identification of civil engineering structures[A]. Proceeding of New Advances in Modal Synthesis of Large Structures : Nonlinear , Damped and Nondeterministic Cases, Lyon, France , 1995 ,151–162
- [31] A.N. Robertson, K.C. Park and K.F. Alvin. Extraction of impulse response data via wavelet transform for structural identification[J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics,1998,120(1):252-260
- [32] N.E. Huang, Z. Shen, S. Long et al. The empirical mode decomposition and

- Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[A].*Proc.R.Soc.A*,1998, 454: 903-995
- [33] 谭冬梅, 姚三, 瞿伟廉. 振动模态的参数识别综述[J]. 华中科技大学学报, 2002, 19(3):73-78
- [34] 周树荃, 戴华. 代数特征值反问题[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 1991
- [35] 徐杨生, 陈仲仪. 特征值反问题与振动物理参数识别[J]. 应用力学学报, 1985, 2(4)
- [36] A. Berman, E.J. Nagy. Improvement of large analytic model using test data[J]. *AIAA Journal*, 1979,17:1147-1148
- [37] J.C. Chen, B.K. Wada. Matrix perturbation for structural dynamic analysis[J]. *AIAA Journal*, 1977,15(8):1095-1100
- [38] M.A.M. Torkamani, A.K. Ahmadi. Stiffness identification of two- and three-dimensional frames[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1988,16:1157-1176
- [39] 程耿军, 王希诚, 隋允康. 一类矩阵逆矩阵特征值问题的线性规划解法[J]. 振动与冲击, 1987, (4)
- [40] 董聪.现代结构系统可靠性理论及其应用.北京: 科学出版社, 2001
- [41] P.cawley and R.D.Adams. The location of detects in structures from measurements of natural frequencies. *Journal of Strain Analysis*, 1979, 14(2): 49-57
- [42] G.Hearn, R.B.Testa. Modal analysis for damage detection in structures. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 1991, 117(10): 3042-3061
- [43] 高芳清, 金建明, 高淑英. 基于模态分析的结构损伤检测方法研究. 西南交通大学学报, 1998, 33(1): 108-113
- [44] 张德文, [美]魏阜旋著. 模型修正与破损诊断. 北京: 科学出版社, 1999
- [46] 董聪.现代结构系统可靠性理论及其应用.北京: 科学出版社, 2001
- [47] A.Morassi and N.Rovere. Localizing a notch in a steel frame from frequency measurements. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(5): 422-432
- [48] Juan R.Casas and Angel C.Aparicio. Structural damage identification from dynamic-test data. *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120(8): 2437-2449
- [49] Pei-Ling Liu. Identification and damage detection of truss using modal data. *Journal of Structural Engineering*, 1995,121(4): 599-608
- [50] 易伟建, 刘霞.基于遗传算法的结构损伤诊断研究.工程力学, 2001, 18(2): 64-71
- [51] S.Hassiotis and G.D.Jeong. Assessment of structural damage from natural

- frequency measurements. *Computers and structures*, 1993,49(4): 679-691
- [52] 范立础, 袁万城, 张启伟. 悬索桥结构基于敏感性分析的动力有限元模型修正. *土木工程学报*, 2000, 33(1): 9-14
- [53] 易伟建, 郭国会. 框架结构损伤诊断的神经网络方法研究. *工程力学增刊*, 1999, (1): 465-470
- [55] 张景绘. *动力学系统建模*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [56] R.G. Cobb and B.S. Liebst. Sensor placement and structure damage identification from minimal sensor information[J]. *AIAA Journal*, 1997, 35(2): 369-374
- [57] J.E. Penny, M.I. Friswell, S.D. Garvey. Automatic choice of measurement locations for dynamic testing[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(2): 407-414
- [58] 赵昕, 李杰. 基于反应力向量灵敏度的模型参数化方法[J]. *振动与冲击*, 2002, 21(4): 61-65
- [59] 李杰, 陈隽. 结构参数未知条件下的地震动反演研究[J]. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(3): 27-35
- [60] 陈隽, 李杰. 部分输入未知条件下的结构系统识别研究[J]. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(4): 40-47
- [61] 李杰, 陈隽. 未知输入条件下的结构物理参数识别研究[J]. *计算力学学报*, 1999, 16(1): 32-40
- [62] M.I. Friswell, J.E. Mottershead. *Finite element model updating in structural dynamics*[M]. Dordrecht: Kluwer, 1995
- [63] D.C. Kammer. Test-analysis-model development using an exact model reduction [J]. *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 1987, 174-179
- [64] D.C. Kammer. A hybrid approach to test analysis model development for large space structures[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1991, 113(3): 93-97
- [65] 陈隽. 高层建筑损伤检测种的复合反演理论与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 1999, 11-113
- [66] A.H. Jazwinski. *Stochastic processes and filtering theory*[M]. Academic press, 1970
- [67] C.G. Koh, L.M. See, T. Balendra. Estimation of structural parameters in time domain: a substructure approach [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1991, 20: 787-801
- [68] 李杰, 陈隽. 子结构物理参数识别与输入地振动复合反演研究[J]. *振动与冲击*. 1998, 17(1): 58-62

- [69] 李国强, 陆焯. 弯曲型结构层间物理参数识别的子结构法[J]. 世界地震工程, 2000, 16(1): 1-9
- [70] M. Sanayei, G. Imbaro, J.A.S. McClain and L.C. Brown. Parameter estimation of structures using NDT data: strains or displacements[J]. *J. Structural Engineering*, ASCE, 1997, 23(6): 792-798
- [71] 刘中生, 于民, 丁大均等. 模态参数识别中的激振点和测量点的布局. 宇航学报, 1995, 16(2): 26-32
- [72] 崔飞, 袁万城, 史家均. 传感器优化布设在桥梁健康检测中的应用. 同济大学学报, 1999, 27(2): 165-169
- [73] 李戈, 秦权, 董聪. 用遗传算法选择悬索桥监测系统中传感器的最优布点. 工程力学, 2000, 17(1): 25-33
- [74] Z.Y. Shi, S.S. Law, and L.M. Zhang. Optimum sensor placement for structural damage detection. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(11): 1173-1179
- [75] 刘福强, 张令弥. 作动器/传感器优化配置的研究进展. 力学进展, 2000, 30(4): 506-516
- [76] Magd Abdel Wahab, Guido De Roeck. Effect of temperature on dynamic system parameters of a highway bridge. *Structural Engineering International*, 1997, (4): 266-270
- [77] Hoon Sohn, Mark Dzwonczyk, Erik G. Straser etl. An experimental study of temperature effects on modal parameters of the Alamosa Canyon Bridge. *Earthquake Engineering and structural Dynamics*, 1999, 28: 879-897
- [78] Charles R. Farrar, Scott W. Doebling, Philip J. Cornwell. A comparison study of modal parameter confidence intervals computed using the monte carols and bootstrap techniques. Los Alamos National Laboratory, www.lanl.com, 1998
- [79] S. Mallat. Theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693
- [80] 韩震宇, 申旭娟, 石章林. 信号的多分辨分析及其在消噪中的应用[J]. 四川联合大学学报, 1999, 3(1): 52-58
- [81] S. Mallat, W.L. Hwang. Singularity detection and processing with wavelets[J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1992, 38(2): 617-643
- [82] D.L. Donoho. De-noising by soft-thresholding[J]. *IEEE Trans. On Information Theory*, 1995, 41: 617-627
- [83] T.R. Dowine, B.W. Silverman. The discrete multiple wavelet transform and thresholding methods[J]. *IEEE Trans SP*, 1998, 46(9): 2558-2561

- [84] 成礼智,王红霞,罗永.小波的理论与应用[M].北京:科学出版社,2004
- [85] 顾家扬,宗美珍.地面附近随机激振下大型建筑物系统识别和参数识别[J].振动与冲击,1989,2
- [86] 周树荃,戴华.代数特征值反问题[M].郑州:河南科学出版社,1991
- [87] G. M. L.格拉德威尔.振动中的反问题[M].北京:北京大学出版社,1991
- [88] N. M.纽马克, E. 罗森布卢斯[M].地震工程学阅历.北京:中国建筑工程出版社,1986
- [89] 郑全逸.一种实模态参数的时域识别方法[J].振动与冲击,1988,1
- [90] 李杰.基于微分算子变换的广义卡尔曼估计方法[J].计算结构力学及应用,1995,10(4)
- [91] 杜芳,卢文胜,曹文清.振动台试验测试信号去噪的小波变换方法[J].振动与冲击,1999,18(2):26-29
- [92] 付燕.人工地震信号去噪方法研究[D].西安:西北工业大学,2002,7-74
- [93] A.G. Bruce, Gao Hong-Ye. Understanding waveshrink: variance and bias estimation. <http://www.mathsoft.com/wavelets.html>
- [94] 张茁生.非平稳信号自适应表示的理论、算法及应用[D].西安:西安交通大学,2001,96-100
- [95] 张磊,潘泉.一种子波域滤波算法的改进[J].电子学报,1999,27(2):19-21
- [96] 谢献忠.结构动力学系统时域辨识理论与试验研究[D].长沙:湖南大学,2005,78-94
- [97] 王闯,董大群,孙玉兰等.弱信号自适应检测技术研究[J].探测与控制学报,2005,27(2):45-54
- [98] 张晓峰,李功燕.应用小波分析提取故障诊断信号的特定频段[J].振动与冲击,2004,23(4):47-50
- [99] 杨定新,胡莺庆,杨银刚等.随机共振技术在齿轮箱故障检测中的应用[J].振动工程学报,2004,17(2):201-204
- [100] 王学敏,黄方林,陈政清.EMD方法在消除桥梁振动信号局部强干扰中的应用[J].机械强度,2005,27(1):33-37
- [101] S. Mallat. Theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989,11(7):674-693
- [102] [美]崔锦泰.小波分析导论[M].程正兴译.西安:西安交通大学出版社,1995,66-108
- [103] 胡昌华,张军波,夏军,张伟.基于MATLAB的系统分析与设计——小波分析[M].西安电子科技大学出版社,2001,264-271

-
- [104] Ljung, L. Consistency of the least squares identification method, Selected paper on Control theory, 1,1979
- [105] 钟万勰. 结构动力方程的精细时程积分法[J].大连理工大学学报, 1994, 34 (2): 131- 136
- [106] 张森文, 曹开彬.计算结构动力响应的状态方程直接积分法[J]. 计算力学学报, 2002, 17 (1): 94-97
- [107] 郭汉伟等.基于多分辨分析的数值积分算法[J].国防科技大学学报, 2000, 22 (4): 94-97
- [108] 汪梦甫, 周锡元.结构动力方程的更新精细积分方法[J].力学学报, 2004, 36 (2): 191-195
- [109] Joo Sung Kang, Seung-Keun Park, Soobong Shin. Structural system identification in time domain using measured acceleration. Journal of Sound and Vibration [J]. 2005, 288(1-2): 215-234

致谢

本论文是在导师何继善院士的悉心指导和帮助下完成的。

何老师严谨的治学态度、深邃敏捷的思想、渊博的知识使学生受益非浅。在科研工作中，导师务实、创新、锐意进取的精神，开阔的视野，诲人不倦的品德都给予学生莫大的激励和影响。至此论文完成之际，谨向何老师表示衷心的感谢和深深的敬意。

求学四年，得到了很多老师和师兄弟的大力帮助和热情鼓励，借此机会对他们表示衷心的感谢。感谢汤井田教授、吕绍林教授为我顺利进入博士学习阶段和学习期间提供的指导和帮助，感谢柳建新教授、戴前伟教授和瓮晶波老师及地球物理勘察新技术研究所其他老师给予的诸多帮助。感谢王齐仁博士、杨荣丰博士、杨天春博士、吴小平博士、王宝勋博士和催燕丽博士在学业和生活上给予的关心、支持和热情鼓励。

感谢湖南科技大学谢献忠教授就结构参数时域辨识理论和小波包滤波方法的指导和帮助。感谢湖南大学徐丽博士，她的博士论文为本人在频域法结构参数识别理论和方法上提供的帮助。

至此之际，特别感谢同济大学的李杰教授的关心和鼓励，并赠送专著《工程结构动力检测理论与应用》，为完成本论文提供了系统的理论依据。

感谢湖南科技大学土木学院的领导、建工系全体教师和土木学院其他同事对我四年求学期间在学习、工作和生活方面的关照和理解。

最后以此文献给我的妻子凌敏女士，感谢她为我顺利完成学业所付出的艰辛，感谢儿子刘凌翔对我的理解和支持，他们是我的坚强后盾和完成学业的动力源泉。

附录 A 攻读博士学位期间主要研究成果

发表论文:

1. 底部两层混凝土框剪八层砖房模型抗震试验研究. 土木工程学报, 2004,37(2): 19-22 (第一作者)
2. 房屋结构损伤及安全评估实例分析. 中国安全科学学报, 2005, 15(12): 81-84 (第一作者)
3. The Study on Dynamics Responds in the Structure of Variable Stiffness for Quakeproof and Absorb Shock, 5th Asia-Pacific Conference on SHOCK & IMPACT LOADS ON STRUCTURES 2003.11.21Hunan,Changsha(第一作者)
4. 智能混凝土的压敏性能试验研究. 建筑科学, 2006, 18(3): 48-49 (第一作者)
5. 碳纤维混凝土复合材料的配制和电性能试验研究. 纤维复合材料, 2003, 20(1): 44-45 (第一作者)
6. 部分输入未知条件下结构动力复合反演的分解算法. 计算力学学报, 2005, 22 (6) 745-749 (第三作者)
8. 基于小波包的数值积分误差分析及消除方法. 振动与冲击, 录用 (第一作者)
9. 一种提高时域参数识别精度新方法. 机械强度, 录用 (第一作者)

科研情况:

1. 缺陷混凝土中波特征分析及试验研究, 湖南省自科基金, 2002-2006 (主持)
2. 非完备信息的结构时域辨识理论及其应用研究, 湖南省教育厅青年基金, 2005-2008 (第三)
3. 基于物理参数时域辨识的结构损伤诊断研究, 湖南省自科基金 2004-2006 (第五)
4. 旋转磁场对血流中纳米铁作用的理论研究, 国家自科基金, 2002-2006 (第二)
5. 深基坑支护方案模糊优选神经网络理论与应用研究, 湖南省自科基金, 2001-2003 (第五)
6. 湘潭市湖湘广场结构质量评定, 主持, 2004 年
7. 资兴市鲤鱼江大桥质量评定, 参与, 2006 年

发明专利:

1. 一种用于碳纤维混合物的搅拌机, 专利号: 200510031314.9
2. 一种智能混凝土试块及其制作、应用, 专利号: 200510031313.4