

学校编码: 10384  
学号: 25320061152710

分类号\_\_密级\_\_  
UDC\_\_

厦 门 大 学

硕士学位论文

输入与输出部分观测情况下的结构局部损伤  
诊断方法研究

**Detection of Structural Local Damage Under Partially  
Measured Input and Output**

刘亚辉

指导教师姓名: 雷鹰 教授

专 业 名 称: 结构工程

论文提交日期: 2009 年 5 月

论文答辩时间: 2009 年 6 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评阅人: \_\_\_\_\_

2009 年 5 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘要

土木工程结构在其长期的使用过程中,由于环境、材料本身老化等因素的影响,必将使结构产生不同程度的损伤。结构损伤使结构抵抗极端荷载的能力降低,从而有可能影响结构的使用要求,甚至导致重大事故的发生,因此对结构损伤的诊断引起了国内外广泛关注。

由于工程结构动力响应信息的不完备性、激振源的不确定性等因素的影响,传统的动力学系统识别理论和方法很难直接应用于实际工程结构的动力检测。因此,参数识别理论在土木工程实际中有很大的应用前景。本文依照上述实际工程背景,引入了输入输出部分观测的结构动力参数识别思想,对此类问题的识别算法进行了理论和实际研究。本文首先归纳了物理参数时域识别若干相关理论与算法,为本文的后续研究工作构建了基本的理论基础。然后在已有的参数识别算法的基础上提出一种改进的输入输出部分已知条件下的结构损伤诊断方法。该方法能较精确地识别出未知激励和结构单元的参数,并通过结构有限元单元刚度的变化进行损伤诊断与定位。本文通过几种不同形式的线性结构数值算例,通过比较分析,证明本方法的有效性、精确性及较好的抗噪声性能。

结合扩展卡尔曼滤波与未知激励条件下的最小二乘两种算法,本文通过理论推导,得到一种新的在输入和输出部分观测情况下的结构参数识别方法。该方法具有推导容易,计算简洁的优点。通过几种不同结构形式的线性结构数值算例证明了该方法的有效性。

为了阐明上述两种识别算法的实际工程应用,并检验其识别效果,本文通过对三层剪切型框架结构在不同的损伤情况下的结构参数进行了识别。实验证明,两种方法都能够较精确的识别出结构的物理参数。

关键词: 参数识别; 部分观测; 最小二乘; 卡尔曼滤波.

## Abstract

It is inevitable that civil structures deteriorate in their long-term use due to many factors such as environment, material degradation and so on. Structural damage results in decline of the structural ability to resist extreme load. Consequently, such defects may affect the structural application requirements, and even lead to fateful accidents, so the structural damage detection has received considerable attention at home and abroad.

Taking account of the incompleteness of the structural dynamic responses, uncertainty of external excitations and other factors, traditional theories and methodologies of the dynamic systems identification cannot be directly applied in the actual structural dynamic detection. Therefore, the structural parameter identification theory will have a bright prospect in the application of practical civil engineering. Based on the above engineering background, this thesis introduces the idea of structural dynamic parameters identification under partially measured input and output to make a series of theoretical and practical researches on such algorithms. In the field of physical parameter identification in time domain, some related theories and algorithms are summarized at first, which help establish the theoretical frame for the consequent research. Then based on existing identification algorithms, an improved version of the algorithm is proposed. The unknown structural dynamic parameters and excitation inputs can be identified by the algorithm with partially measured input and output. Numerical simulations of several different types of linear structures are used to demonstrate the validity, accuracy and ability to overcome the noise of the proposed algorithm.

Based on extended Kalman filter and recursive least-square estimation, an algorithm of structural local damage detection under partially measured input and output that is easily derived and simply computed is derived in this thesis. Numerical simulations of several different types of linear structures are used to demonstrate the validity of the proposed algorithm.

To illustrate the practical application of the two proposed algorithms in real projects

and to evaluate its performances, the structural parameters of a shearing-frame structure are identified in the thesis. It is showed that the structural parameters are identified with good accuracy.

Keywords: parameter identification; partially measured; Least-squares method; Kalman filter.

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 目录

<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>1.1 本文的研究背景与研究意义 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>1.2 输入输出信息不完备下结构物理参数识别方法的研究现状 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
1.2.1 输入信息部分观测下的结构物理参数识别研究现状 .....	<b>错误！未定义书签。</b>
1.2.2 输入输出部分观测下的结构物理参数识别研究现状 .....	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>1.3 结构物理参数识别方法存在的问题 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>1.4 本文的主要工作 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>第二章 结构物理参数时域识别若干相关理论及算法 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>2.1 参数时域识别模型 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
2.1.1 时域识别原理 .....	<b>错误！未定义书签。</b>
2.1.2 时域识别模型 .....	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>2.2 参数时域识别的最小二乘准则 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>2.3 参数识别的最小二乘算法 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
2.3.1 经典最小二乘算法 .....	<b>错误！未定义书签。</b>
2.3.2 递推最小二乘算法 .....	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>2.4 结构在部分未知激励条件下参数识别的最小二乘算法 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>2.5 扩展卡尔曼滤波算法 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>2.6 结构参数识别的二次平方误差和算法 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>2.7 本章小结 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>第三章 输入输出信息不完备下基于二次平方误差和的损伤诊断方法 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>

3.1	引言 .....	错误! 未定义书签。
3.2	方法的提出 .....	错误! 未定义书签。
3.3	数值算例 .....	错误! 未定义书签。
3.3.1	桁架算例 .....	错误! 未定义书签。
3.3.2	两端固支梁算例 .....	错误! 未定义书签。
3.3.3	三层框架算例 .....	错误! 未定义书签。
3.4	本章小结 .....	错误! 未定义书签。
<b>第四章 输入输出信息不完备下基于扩展卡尔曼滤波的结构损伤识别方法</b> ..... 错误! 未定义书签。		
4.1	引言 .....	错误! 未定义书签。
4.2	卡尔曼滤波类算法的发展现状 .....	错误! 未定义书签。
4.3	方法的提出 .....	错误! 未定义书签。
4.4	数值算例 .....	错误! 未定义书签。
4.4.1	剪切型框架算例 .....	错误! 未定义书签。
4.4.2	桁架算例 .....	错误! 未定义书签。
4.5	本章小结 .....	错误! 未定义书签。
<b>第五章 论文提出的两种方法的实验验证研究</b> ..... 错误! 未定义书签。		
5.1	引言 .....	错误! 未定义书签。
5.2	剪切型框架实验 .....	错误! 未定义书签。
5.2.1	实验结构介绍 .....	错误! 未定义书签。
5.2.2	结构阻尼的识别 .....	错误! 未定义书签。
5.2.3	结构的局部损伤诊断 .....	错误! 未定义书签。
5.3	本章小结 .....	错误! 未定义书签。
<b>第六章 全文总结</b> ..... 错误! 未定义书签。		
<b>参考文献</b> .....		
<b>致谢</b> .....		
<b>攻读硕士期间发表的学术论文目录</b> ..... 错误! 未定义书签。		

## Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>exordium</b> .....	<b>1</b>
1.1	Research Background and significance of this thesis .....	1
1.2	Status quo of the research on structural dynamic parameters identification under partially measured input and output.....	2
1.2.1	Status quo of the research on structural dynamic parameters identification under partially measured input.....	3
1.2.2	Status quo of the research on structural dynamic parameters identification under partially measured input and output.....	5
1.3	Existing problems of structural dynamic parameters identification .....	6
1.4	Summarization 错误! 未定义书签。	
<b>Chapter 2</b>	<b>Several Related theories and algorithms of structural parameters identification</b> .....	<b>8</b>
2.1	Model of parameters identification based on time domain.....	8
2.1.1	Principles of time-domain identification .....	8
2.1.2	Model of time-domain identification .....	9
2.2	Rule of least square method .....	错误! 未定义书签。
2.3	Parameter detection based on least-square method 错误! 未定义书签。	
2.3.1	Clasical least-square method .....	错误! 未定义书签。
2.3.2	Recursive least-square method.....	错误! 未定义书签。

2.4	Adaptive quadratic sum square error method .....	14
2.4	Extended Kalman filter method .....	17
2.5	Least-square method with unknown input.....	18
2.6	Summarization .....	20
<b>Chapter 3 Structural damage detection based on quadratic sum</b>		
<b>square error under partially measured input and output</b> 错		
误! 未定义书签。		
3.1	Introduction.....	错误! 未定义书签。
3.2	The proposed method .....	22
3.3	Numerical example .....	28
3.3.1	Example of truss .....	28
3.3.2	Example of fixed-end beam .....	35
3.3.3	Example of frame .....	40
3.4	Summarization .....	46
<b>Chapter 4 Structural damage detection based on Extended Kalm</b>		
<b>Filter under partially measured input and output .....</b> 47		
4.1	Introduction.....	47
4.2	Status quo of the research on algorithms based on Kalman Filter .....	47
4.3	The proposed method .....	49
4.4	Numerical example .....	51
4.4.1	Example of shearing-fram .....	51
4.4.2	Example of truss .....	54
4.5	Summarization .....	错误! 未定义书签。
<b>Chapter 5 Experimental Verification of the two proposed methods</b>		
<b>in this thesis .....</b> 58		
5.1	Introduction.....	58
5.2	Shearing-fram experiment .....	58

5.2.1	Introduction of the experiment .....	58
5.2.2	Structural damping detection.....	59
5.2.3	Structural local damage detection .....	63
<b>5.3</b>	<b>Summarization .....</b>	<b>69</b>
<b>Chapter 6</b>	<b>conclusion .....</b>	<b>70</b>
<b>Reference</b>	<b>.....</b>	<b>72</b>
<b>Acknowledgement</b>	<b>.....</b>	<b>76</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 本文的研究背景与研究意义

人类的发展史同时也是建筑的发展史。人类的日常生活离不开建筑，随着社会的发展，建筑在人类活动中的作用也越来越明显。改革开放以来，国家在基础设施建设上投入了巨额资金，并取得了一定的成就，建成了一大批大型复杂结构，如高层建筑、大跨桥梁、江河大坝和海上开发平台等。这些复杂结构的建成，标志着我国建筑技术水平的不断提高和建筑理论的不完善<sup>[1]</sup>。然而土木工程结构在其长期的使用过程中，由于环境、人为、材料本身老化等因素的影响，必将使结构产生不同程度的损伤。结构损伤使结构抵抗极端荷载的能力降低，从而有可能影响结构的使用要求，甚至导致重大事故的发生，需要进行及时的修复，尤其对于由于经济、历史等方面的原因无法拆除翻新的建筑，修复工作更为必要。此外，还有部分土木工程结构遭受地震、剧烈冲击等自然或者人为破坏后发生一定程度的损坏，需要对其受损部位进行加固、修复等工作。鉴于以上所举方面的需要，如何通过一定的技术手段确定或估计工程结构的实际性态，从而为结构修复、结构控制等措施的实施提供可靠的依据，成为当前土木工程界的一个亟待解决的问题。

传统的工程结构检测技术一般属于静力和局部检测技术，通常只能对结构或构件的某一局部进行检测，但是由于工程结构体积大、构件多，且结构中很多工程都是隐蔽工程，因此传统的检测技术如裂缝检测的声发射技术、裂缝检测的磁方法、混凝土缺陷检测的雷达技术、X-射线技术等都属于可视或局部的试验方法，需要预先已知结构缺陷的大体位置，并要求检测仪器能够到达缺陷区域，因此对于一些隐蔽位置的结构和构件无法测量。此外，这类方法无法实现实时的健康监测和损伤诊断<sup>[2][3]</sup>。

为了弥补当前结构无损检测方法存在的缺陷，近年来开展了以结构健康检测为目标的结构参数识别方法的研究。结构参数识别的基本思想是结构的实际物理性态的变化将影响结构各自由度的响应数值，因此可以依据结构的动力响应逆向识别出结构的实际性态。由于是以结构的动力响应作为识别依据，所以上述结构

参数识别等价于结构动力检测技术。由此发展起来一系列的损伤诊断方法,如基于小波变换的损伤诊断方法<sup>[4][5]</sup>,基于神经网络的损伤诊断方法<sup>[6][7]</sup>基于有限元模型修正的损伤诊断方法<sup>[8][9]</sup>等。相比于其它的无损检测方法,结构参数识别方法的优势主要包括:结构的动力响应值比较容易测定;可以不受结构规模和隐蔽的限制,探测到结构的隐蔽部位。结构参数识别技术的发展有重大的工程意义。由于设计时可能忽略一些影响工程结构实际性态的因素、复杂结构体系的结构计算的复杂性、设计错误、以及施工误差或错误等,工程结构的实际性态与其设计的目标性态并不一致。并且随着结构的老化、受灾等,结构的实际性态也将发生改变<sup>[10]</sup>。结构的动力响应极容易受到不可预见的环境状态、非结构构件等的影响,这些变化往往被误解为结构的损伤,这使得复杂结构的损伤评估具有极大的挑战性<sup>[11]</sup>。这就使结构识别技术成为一种必需,以识别结构的实际性态,建立更准确的结构分析模型。准确的结构模型一方面可以更精确地预测实际系统的响应,并为结构可能出现的失效路径和模式提供参考;另一方面也是研究结构控制措施的基础。结构识别技术的基本问题是判别结构是否有损伤、确定出结构的损伤位置和损伤程度。这三方面是对结构缺陷、结构完整性、设计功能和耐久性等所做的定量评价。此外,过对结构不同时刻的性态进行识别或者检测,可以实现对结构性态的长期在线监测,如文献[12][13]等都已经实现了在大型桥梁的结构健康监测,它将作为结构损伤检测技术的基础,并为加固措施的实施提供依据。

随着时域识别技术在土木工程领域中研究和应用得深入,系统测量数据的不完整性问题引起了越来越多的研究者和专家的广泛关注。在结构识别研究中,经典的结构动力系统研究主要致力于解决完备信息条件下的问题。然而在实际结构参数识别中,不可能安置大量的传感器,对结构的所有作用在结构上的外部激励和结构的响应进行测量,结构的输入、输出信息都是不完备的。因此,对非完备信息条件下的结构参数识别方法的研究具有重要的理论意义和现实意义。

## 1.2 输入输出信息不完备下结构物理参数识别方法的研究现状

识别理论与技术自上个世纪 60 年代产生以来,不断得到发展,并趋于同数理统计、航空、航天、水文、机械等学科互相结合,形成一个多学科交叉的领域。

将识别技术应用于土木工程结构最早由 Liu 和 Yao 于 1978 年提出<sup>[14]</sup>，目前已经成为国内外土木工程界的研究热点之一。特别是随着计算机技术、现代测试与信号处理技术的飞速发展，使得结构识别技术的工程应用前景更加广阔。

随着社会的发展，结构损伤识别对土木工程结构的安全性评估显得日趋重要。国内外学者提出了很多相关的方法，我们常用系统识别方法进行损伤诊断。现有的系统识别方法大都是建立在整体结构的模态识别基础上的，而模态对于单元局部损伤是不敏感的，更难损伤定位。由于结构的局部损伤，必使它的动力参数发生变化(刚度减小等)，因此通过识别出结构各单元动力属性值的改变，进而判断结构的局部损伤的基于有限元模型的系统识别方法应该是可行的。近年来，国内外学者通过对传统的识别方法的不断改进，提出了一些较为先进的方法。按方法的改进发展过程，主要可分为两个阶段：输入不完备情况下的结构损伤识别及输入输出均不完备情况下的结构损伤识别。

### 1.2.1 输入信息部分观测下的结构物理参数识别研究现状

1992 年, Hoshyia 利用扩展卡尔曼滤波方法求解了梁上匀速运动荷载作用下的参数识别及荷载反演问题，基本做法是将表征运动荷载的参数(如速度  $D$  和幅值  $P$ ) 作为未知参数引入到状态方程中，从而使得复合反演问题转化为单一的参数识别问题进行求解<sup>[15]</sup>。

随后, Hoshyia 又应用类似的方法解决剪切型系统承受地震作用时的未知输入参数识别问题。此方法首先人为假定输入，再应用卡尔曼滤波方法识别系统参数，然后利用识别得到的参数值通过卡尔曼估计反演输入时程。然而，从作者提供的算例中得出，该方法对参数识别的效果并不理想；而且，该算法经反复迭代计算，其识别总体误差反而有增加的趋势<sup>[16]</sup>。

Benedetii 针对未知地震作用下的参数识别问题，建议利用结构上两个测量点响应记录傅立叶变换的幅值比来消除参数识别计算中对输入信息的需求。但是，Benedetii 的算法中，不能获取输入的时程<sup>[15]</sup>。

Wang 和 Haldar 提出一种迭代最小二乘算法(ILS—UI)。该方法首先假设未知输入激励的初始值为零；按照由未知结构参数构造的目标函数取极值，由激励的估值来估计出未知结构参数；再代入结构的动力平衡方程，由未知参数的初始

估计值或者更新值计算输入激励的更新值；反复上面两步，使未知参数和输入激励的数值交替更新，最终两者都趋于各自的最优估计<sup>[17]</sup>。

李杰和陈隽提出了一种统计平均算法。基于在地震动作用下的结构模型的各种质点承受相同的基底加速度激励这一力学条件，该算法可以在未知地震动输入条件下识别出结构的物理参数。算法的基本过程为：由假设的结构参数初值以及测量的结构时域响应，求得作用于结构各层的地震动输入估计值，继而求出各层输入估值对应的地面加速度值，将它们作统计平均以得到地面加速度值，据其重新计算结构输入和未知物理参数的更新值。这样反复迭代更新，直到满足收敛条件，此时便得到未知物理参数和地震动输入的最优估计<sup>[18]</sup>。

李杰和陈隽还运用广义统计平均算法，实现了未知风荷载作用下的结构参数识别。该算法采用了相邻层风载时程完全相关的假定，首先假设结构参数初值，求得风荷载后进行统计平均，再由风载平均值反演结构参数，从而形成了一个迭代格式，在识别结构参数的同时也反演了风荷载<sup>[19]</sup>。

赵昕和李杰提出一种直接消去方法，识别了一个顶部作用有集中未知荷载的剪切型结构。该方法从结构的动力平衡方程组中直接消去与未知荷载相应的力平衡关系，使构造出的识别方程仅包含已知荷载。文中还结合基于相邻层风载时域时程完全相关假设条件的广义统计平均算法，识别了同时作用有未知风荷载和未知顶部集中荷载的结构，并反演出了风荷载和集中荷载时程<sup>[20]</sup>。

谢献忠和易伟建在继李杰等人提出的全量补偿法、统计平均算法和分组归一化统计平均法的基本上提出了改进的全量补偿算法、周期统计平均算法及分解算法<sup>[21][22]</sup>，其中改进的全量补偿算法和分解算法比原来的算法具有更好的计算效率和稳定性，而周期统计平均算法则初步解决了旋转机械在周期激振力作用下的结构参数识别及荷载反演问题。

2006年 Jann N. Yang 等在经过对识别方法的多次改进，提出了未知激励下的最小二乘估计算法<sup>[23]</sup>，该方法不但能识别出激励时程，识别出时变系统的结构参数，而且能用于在线识别结构损伤，这对于将来在线对结构进行结构损伤诊断具有重要的意义。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库