

学校编码: 10384

分类号\_\_密级\_\_

学 号: 25320141151805

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

广义的未知激励下扩展卡尔曼滤波方法及其在子结构识别与振动控制的结合

A General Extended Kalman Filter with unknown inputs with Integrations in substructural identification and vibration control

朱佳佳

指导教师姓名: 雷 鹰 教 授

专 业 名 称: 建筑与土木工程

论文提交日期: 2017 年 04 月

论文答辩时间: 2017 年 05 月

学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2017 年 6 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 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

近几十年，结构健康监测在方法、技术、设备上都不断发展。目前已有越来越多的工程项目安装了结构健康监测系统，为全面分析结构的安全和使用性能提供了方便，同时也带来了诸多挑战。其中，未知激励下的结构参数实时识别引起学者的注意。此外，对于大型结构，子结构线性和非线性参数识别也是目前的热点所在。不仅如此，健康监测与振动控制一体化由于其合理性也得到许多关注研究。

在众多结构参数实时识别的方法中，扩展卡尔曼滤波是一种行之有效的方法而得到广泛运用。传统卡尔曼滤波需要已知激励信息，对此，学者发展了未知激励下的扩展卡尔曼滤波方法，但目前提出的未知激励下扩展卡尔曼滤波方法对加速度响应的测量位置要求还比较高，例如需要观测在激励作用位置的加速度响应，或者不能识别未知移动荷载，这限制了这些方法的实际应用。因此，需从方法机理上研究在未观测未知输入处加速度响应情况下，实时对结构状态和未知激励输入进行识别的方法。

对实际土木工程结构，往往只能监测结构部分的响应，难以获得结构外部输入的全部信息；而土木工程结构具有大型性与复杂性。虽然子结构分析识别是重要有效的方法，但子结构间的相互作用，对分析的子结构也是“未知的输入”。因此需要在“未知输入”情况下，进行子结构参数识别。目前的子结构参数（线性/非线性）实时识别方法需要观测子结构边界自由度响应或边界力，这限制了子结构方法的应用。

此外，在结构振动控制领域，通常把振动控制和健康监测分割开来，但是结构控制系统和健康监测系统都需要传感器和数据采集、传输系统来实现，当建筑结构同时需要控制与监测这两种需求时，这样分别考虑是不实际的而且花费甚巨。发展一个综合的建筑结构结合振动控制系统和健康监测系统是很必要的。目前学者研究的一体化方法仍需观测结构所有自由度的加速度响应，这在实际工程中也是不易实现且不经济的。

基于上述研究背景，本论文主要进行了以下的研究工作：

- (1) 本文第二章提出一种广义的未知激励下卡尔曼滤波方法，是目前研究

**未知激励与结构实时识别的最一般方法。**该方法是在扩展卡尔曼滤波的基础框架上直接推导而来，将结构状态方程以一阶保持（FOH）离散，以此达到即使在观测方程中不包含激励信息时（即激励作用处不放置加速度传感器）仍能有效识别结构外激励、结构状态及结构参数，亦能用于移动荷载的识别。并且，数据融合也被采用在该方法中，将加速度和位移传感器监测数据进行融合，互补并协同工作，能充分发挥各种监测数据的不同功效，克服现有基于卡尔曼滤波方法在未知输入下识别结果漂移。

(2) 第三章将子结构边界力视为对目标子结构的“附加激励”进行识别，针对现有大型结构的子结构识别方法需要观测子结构边界力或边界响应的局限，结合“广义的未知激励下的扩展卡尔曼滤波方法”与“子结构方法”，提出**基于子结构的复杂结构线性参数识别方法**。这一方法能够在不观测子结构边界力和边界响应的情况下良好识别线性子结构的运动状态、参数和子结构的未知外激励。并且对于梁、柱等可以按尺寸划分子结构的大型结构，可以分两个尺度建模，两次识别结构参数，精确找出损伤位置和定量损伤大小。

(3) 第四章在第三章识别线性子结构参数识别的基础上，考虑了结构发生非线性的情况，提出**基于子结构的复杂结构非线性特征识别方法**。当子结构参数发生非线性时，将子结构非线性参数扩展到状态向量中，识别子结构的运动状态、线性和非线性参数以及未知外激励。

(4) 第五章针对目前的结构识别和振动控制实时相结合方法需要观测所有自由度加速度响应的局限性，提出在**未知激励情况下仅需部分观测结构响应的结构识别与振动控制相结合的实时方法**，更适用于实际工程。首先提出结构识别与主动控制实时相结合的方法。而后提出结构识别与半主动控制实时相结合的方法。

以上研究在本文中都有相应算例验证方法的可行性和有效性。

以上研究得到国家自然科学基金支持。项目名称“基于数据融合的一系列卡尔曼滤波新方法及结构动位移实时估计和多尺度识别结构局部损伤”项目批准号：51678509；项目名称“建筑结构健康监测与振动控制实时结合研究”项目批准号：51378445。

**关键词：**扩展卡尔曼滤波；未知激励；子结构参数识别；识别与振动控制相结合



## ABSTRACT

In the past decades, the theory, techniques and equipment of structural health monitoring (SHM) developed rapidly. At present, there are more and more engineering projects to install the SHM system, which provides a convenient way to analyze the safety and performance of the structure. At the same time, it also brings many challenges. Among them, the real-time identification of structural parameters under unknown excitation has attracted the attention of scholars. In addition, the linear and nonlinear parameter identification is a hot spot for large structures. Moreover, the integration of health monitoring and vibration control has received much attention due to its rationality.

The extended Kalman filter (EKF) has been widely used for structural identification and damage detection with limited observations. However, conventional EKF requires the information of external inputs. Although some researchers have investigated extended Kalman filter under unknown input (EKF-UI) in recent years, previous approaches are only applicable when acceleration responses at the locations of unknown inputs are measured.

For the identification and structural damage detection of large size structures, substructure identification is an efficient approach. However, it is still a challenging task for substructure identification without the observation of responses at the interfaces of substructures.

In addition, when a building structure requires both vibration control system and health monitoring system, integrating two systems together will be affective and cost-effective. How to reduce the number of using sensors is a key problem to solve.

Based on the above research background, the main work of this paper is as follows:

In the first part, a general extended Kalman filter (GEKF-UI) is proposed, in which existing constraints on sensor configuration can be removed enabling more general application. In the proposed GEKF-UI, the equation of motion is discretized by the first order hold (FOH) and the analytical formulations for the GEKF-UI is derived based on the framework of the conventional EKF. Moreover, data fusion of partially measured displacement and acceleration responses is applied to prevent the drifts in the estimated

structural displacements and unknown external inputs.

In the second part (chapter3 and chapter4), an substructural identification approach combine the GEKF-UI and substructure method is proposed to identify the linear and nonlinear structure. The proposed GEKF-UI is adopted for the implementation of substructure identification and damage detection in a large-size structure. The interconnections between adjacent substructures are treated as ‘additional unknown inputs’ to the concerned substructure. Without the observation at substructure interfaces, element structural parameters in the substructure can be identified by the GEKF-UI, and substructure damage can be detected by tacking the degradation of these parameters.

The last piece of work, the GEKF-UI and the vibrtion control are combined to realize the integration of structural identification and vibration control. Comparing to other approach exist, this method can reduce the number of using sensor, realize the paticial observation.

In addition, numerical simulations are carried out respectively to validate the the proposed methods, which could serve as an alternative approach for structural dynamic analysis.

The research content of this thesis is supported by the national natural science fund project "kalman filter method based on data fusion and real-time estimation of structure dynamic displacement and local damage detection by multi-scale structure" (project approval no.51678509). And project “The Integration of Structural Identification and Vibration Control.”(project approval no. 51378445)

**Keywords:** general extended Kalman filter, unknown inputs, substructure identification, intergrated identification and vibration control

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 论文研究背景及意义 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 本论文相关问题研究现状 .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 结构荷载识别若干研究现状.....	2
1.2.2 基于子结构的复杂结构线性参数识别的若干研究现状.....	6
1.2.3 基于子结构的复杂结构非线性参数识别的若干研究现状.....	8
1.2.4 结构识别与振动控制一体化研究现状.....	10
<b>1.3 本文研究内容和技术路线 .....</b>	<b>14</b>
1.3.1 本文研究内容.....	14
1.3.2 本文研究技术路线.....	16
<b>第二章 广义的未知激励下扩展卡尔曼滤波方法 .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 引言 .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 方法提出 .....</b>	<b>18</b>
2.2.1 传统扩展卡尔曼滤波方法.....	18
2.2.2 未知激励下扩展卡尔曼滤波方法.....	19
2.2.3 广义的未知激励下扩展卡尔曼滤波方法.....	20
<b>2.3 方法流程图 .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4 数值算例验证及分析 .....</b>	<b>27</b>
2.4.1 剪切框架受白噪声激励算例验证.....	27
2.4.2 两跨连续梁受简谐激励算例验证.....	32
<b>2.4 本章小结 .....</b>	<b>41</b>
<b>第三章 基于子结构的复杂结构线性参数识别 .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1 引言 .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2 提出的方法 .....</b>	<b>43</b>
3.2.1 子结构运动方程的建立.....	43
3.2.2 未知激励下基于子结构的复杂结构识别方法.....	45

<b>3.3 方法流程图 .....</b>	<b>50</b>
<b>3.4 数值算例验证及分析 .....</b>	<b>51</b>
3.4.1 三跨外伸梁损伤识别算例.....	51
3.4.2 三跨斜拉桥结构识别算例.....	60
<b>3.5 本章小结 .....</b>	<b>68</b>
<b>第四章 基于子结构的复杂结构非线性特性识别 .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1 引言 .....</b>	<b>69</b>
<b>4.2 方法提出 .....</b>	<b>70</b>
4.2.1 非线性子结构运动方程的建立.....	70
4.2.2 基于子结构的复杂结构非线性特性识别.....	71
<b>4.3 数值算例验证及分析 .....</b>	<b>73</b>
4.3.1 大型平面桁架发生刚度非线性.....	73
4.3.2 连续梁子结构非线性特性识别.....	78
<b>4.4 本章小结 .....</b>	<b>84</b>
<b>第五章 结构识别与振动控制相结合的实时方法 .....</b>	<b>85</b>
<b>5.1 引言 .....</b>	<b>85</b>
5.1.1 本章主要内容.....	85
5.1.2 结构识别与振动控制相结合实时方法技术路线.....	86
<b>5.2 控制算法和控制指标 .....</b>	<b>87</b>
5.2.1 结构主动控制与半主动控制算法.....	87
5.2.2 振动控制指标.....	92
<b>5.3 结构识别与主动控制相结合的实时方法 .....</b>	<b>93</b>
5.3.1 方法提出.....	93
5.3.2 剪切框架受白噪声激励数值算例验证.....	98
5.3.3 剪切框架受地震作用数值算例验证.....	104
<b>5.4 结构识别与半主动控制相结合的实时方法 .....</b>	<b>110</b>
5.4.1 方法提出.....	110
5.4.2 剪切框架受白噪声激励数值算例验证.....	112
5.4.3 剪切框架受地震作用数值算例验证.....	117

5.5 本章小结 .....	122
第六章 总结与展望 .....	123
6.1 论文总结 .....	123
6.1.1 本文主要内容.....	123
6.1.2 论文创新点.....	125
6.2 论文展望 .....	125
参考文献.....	126
硕士期间发表的论文 .....	133
致谢.....	134

## CONTENTS

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>CHAPTER 1 Preface .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Background .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Related Researchs of this thises .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Study of Structural Input Identification .....	2
1.2.2 Study of Linear Substructure Identification.....	6
1.2.3 Study of Nonlinear Substructure Identification .....	8
1.2.4 Study of Intergrated Identification and Vibration Control.....	10
<b>1.3 Main Contents and Innovation Points of the Thesis .....</b>	<b>14</b>
1.3.1 Main Contents .....	14
1.3.2 Innovation Points .....	16
<b>Chapter 2 General Extended Kalman Filter approach with unknown input .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Algorithms .....</b>	<b>18</b>
2.2.1 Tradition Kalman Filter.....	18
2.2.2 EKF-UI .....	19
2.2.3 GEKF-UI.....	21
<b>2.3 Flowchat.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4 Numerical Examples.....</b>	<b>27</b>
2.4.1 6-story shear frame .....	27
2.4.2 2-span simply supported beam.....	31
<b>2.4 Chapter Summary .....</b>	<b>41</b>
<b>Chapter 3 Indetification of Linear Substructure.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2 Algorithms .....</b>	<b>43</b>
3.2.1 Substructure method .....	43
3.2.2 Linear Substructure Indetification Method.....	45
<b>3.3 Flowchat.....</b>	<b>50</b>
<b>3.4 Numerical Investigation .....</b>	<b>51</b>
3.4.1 3-span simply supported beam.....	51

3.4.2 Complex Bridge Structure .....	60
<b>3.5 Chapter Summary .....</b>	<b>68</b>
<b>Chapter 4 Indetification of Nonlinear Substructure .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1 Introduction.....</b>	<b>69</b>
<b>4.2 Algorithms .....</b>	<b>70</b>
4.2.1 State Function of Dynamic Systems .....	70
4.2.2 Nonlinear Substructure Indetification Method .....	71
<b>4.3 Numerical Investigation .....</b>	<b>73</b>
4.3.1 Large-Scale Truss Model .....	73
4.3.2 Continuious Simply Supported Beam.....	78
<b>4.4 Chapter Summary .....</b>	<b>84</b>
<b>Chapter 5 Intergaration of Identification and Vibration Control</b>	
.....	<b>85</b>
<b>5.1 Introduction.....</b>	<b>85</b>
5.1.1 Main Contents.....	85
5.1.2 Flowchat of Intergaration Method .....	86
<b>5.2 Vibration Control Method and Indexes.....</b>	<b>87</b>
5.2.1 LQG Algorithms and Semi-Active Vibration Control Method...88	
5.2.2 Indexes of Vibration Control .....	93
<b>5.3 Intergaration Approach Combined Active Vibration Control .....</b>	<b>93</b>
5.3.1 Algorithms.....	93
5.3.2 6-Story Shear Frame Suffered White Nosi y .....	98
5.3.3 6-Story Shear Frame Suffered Earthquake Affection .....	104
<b>5.4 Intergaration Approach Combined Semi-Active Vibration Control</b>	
.....	<b>110</b>
5.4.1 Algorithms.....	110
5.4.2 6-Story Shear Frame Suffered White Nosi y .....	112
5.4.3 6-Story Shear Frame Suffered Earthquake Affection .....	117
<b>5.5 Chapter Summary .....</b>	<b>122</b>
<b>Chapter 6 Summary and Outlook.....</b>	<b>124</b>
<b>6.1 Summary of the Thesis .....</b>	<b>124</b>
<b>6.2 Outlook of the Thesis .....</b>	<b>125</b>
<b>References .....</b>	<b>126</b>

---

<b>Published paper</b> .....	133
<b>Acknowledgement</b> .....	134

厦门大学博硕士学位论文摘要库



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