

学校编码: 10384

分类号 密级

学 号: 25320141151779

UDC

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**基于未知激励下扩展卡尔曼滤波的时变结构
在线识别及其与振动控制实时结合**

**Real-time identification of time-varying structures and integration
with vibration control based on extended Kalman Filter with
unknown inputs**

王龙飞

指导教师姓名: 雷鹰教授

专业名称: 结构工程

论文提交日期: 2017年4月

论文答辩时间: 2017年5月

学位授予日期: 2017年6月

答辩委员会主席:

评 阅 人:

2017年5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

建筑结构的参数识别与损伤诊断是结构健康监测领域中的一项重要课题。在过去的数十年内，业内许多专家与学者给出了理论各异的，基于结构振动响应的参数识别与损伤诊断方法。然而，这其中的许多方法，大都是针对于时不变系统的。但在重大荷载发生时（如高烈度地震等），结构单元发生损伤，它的物理参数（如刚度等）在荷载作用中是随时间变化的。为了实时地捕捉这一变化，结构健康监测系统应该具备在线地识别时变结构参数的能力。

因此本论文在第二章，在前人基础上得到了基于改进的自适应卡尔曼滤波的时变系统在线识别方法。与现有文献相比，该方法利用了自适应因子来反映结构参数的变化，能够**仅在结构响应数据部分已知的情况下，在线地识别结构时变参数**。首先利用经典的卡尔曼滤波算法识别时不变的结构参数，当参数收敛并稳定后，通过利用卡尔曼滤波中“修正项”的误差协方差，建立了关于自适应因子矩阵的非线性矩阵方程，并将其转化为一个带有非线性约束的最优化问题，然后通过求解该最优化问题求解这个自适应因子矩阵。**并在求解矩阵前，先进行损伤的判定，对于判定为未损的情况，跳过自适应因子的求解，以适应该方法“实时在线”的要求。**最后通过平面剪切框架与平面框架两个数值算例验证了所改进之方法的有效性。

在本论文第三章，考虑到外部输入在现实中往往难以精确量测，将改进的自适应卡尔曼滤波推广到未知输入的情况，并**考虑了激励作用处加速度响应观测与不观测两种情况**，得到了未知激励下基于改进的自适应卡尔曼滤波的时变系统在线识别方法。该方法可以在**部分响应数据已知的情况下，在识别时变的结构参数的同时识别作用与结构的未知激励**。该方法首先确定时不变的结构参数，待参数收敛并稳定后，建立关于自适应因子矩阵的方程，再通过将其转化为带有非线性约束的最优化问题进行求解。**并在求解前，通过损伤判定适应方法“实时在线”的要求。**最后，通过两个分别承受未知的地震激励与白噪声激励作用的平面剪切框架验证了该方法的可行性。

在本论文第四章，由于全局的系统参数识别，往往会涉及过多的结构自由度

以及未知的结构参数。并且在与时变参数相关的自适应因子求解中, 过多未知单元也会对非线性方程的求解带来计算压力。并且有关于子结构的研究, 鲜有针对于时变的系统。因此借鉴已有学者提出的“子结构”方法, 将全局结构中的部分单元单独分离开来, 并在边界自由度上施加原结构中的未知内力, 使之成为独立的结构。再利用前述未知输入下时变系统的参数识别方法进行识别。与现有文献相比, 该方法在结构部分自由度加速度已知的情况下, 识别时变的子结构参数, 并同时识别子结构边界上的未知力。最后利用一个双侧外伸的多跨欧拉梁验证了该方法的准确性。

最后, 在本论文第五章, 考虑到结构损伤/参数识别与结构振动控制共用传感器系统, 因此对于同时需要两者的建筑结构, 很有必要进行结构参数识别与振动控制的一体化方法。本章节将前述未知输入下的时变系统识别方法与结构半主动控制相结合, 在实时地识别时变结构参数的同时对结构进行半主动控制, 并进行未知外部输入的识别。最后, 利用未知的地震激励与白噪声激励作用下的平面剪切框架验证了该方法的正确性。

本论文研究内容具有一定的工程意义和理论方法的创新性, 得到国家自然科学基金面上项目“基于数据融合的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), 以及国家自然科学基金面上项目“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)的支持。

关键字: 时变系统; 在线识别; 卡尔曼滤波; 自适应; 振动控制

Abstract

Structural identification and damage detection are significant subject in Structural health monitoring(SHM) technology. In the past few decades, different experts and scholars have come up with different theories and methods of Structural identification and damage detection based on structural vibration response. While, many of these identification methodologies are mostly aimed at the time-invariant system. However, structural health monitoring systems must be able to detect structural damage on-line and provide online warning of damage at heavy loads, such as high-intensity earthquakes.

In the second chapter, an on-line identification method of time-varying systems based on improved adaptive Kalman filter was proposed, in which, the adaptive factors are used to reflect the change of the structural parameters, and the time-varying parameters of the structure can be identified on-line based on only partial structure response data. Firstly, the classical extended Kalman filter algorithm is used to identify the invariant structural parameters until the parameters are convergent and stable. Then, the error covariance of the 'correction term' in Kalman filter is used to establish the nonlinear matrix equation of the adaptive factor matrix. By transforming the matrix equation into an optimization problem with nonlinear constraints, the adaptive factor matrix can be worked out, before which, the occurrence of damage was determined in order to identify the system on-line. And finally, the effectiveness of the proposed method is verified by two numerical examples of shear frame and plane frame.

Considering that the external inputs are frequently difficult to be accurately measured in reality. In the third chapter, the adaptive Kalman filter is generalized to the unknown inputs case. By taking into account the two cases of acceleration observation and non-observation of the DOF where the external excitation inputs, the on-line identification method of time-varying systems based on improved adaptive Kalman filter was proposed with unknown input was proposed. Firstly, the time-invariant structural parameters are identified until the parameters are convergent and stable. Then the equation of the adaptive factor matrix was established and worked out by transforming the equation into an optimization problem with nonlinear constraints. And the occurrence of damage was determined in order to identify the system on-line.

Finally, the feasibility of the proposed method is verified by two plane shear frames subjected to unknown earthquake excitation and white noise excitation.

Due to the global system parameter identification always involve too much structural degrees of freedom and unknown structural parameters, moreover, in the solution progress of the adaptive factors which are related to the time-varying parameters, too many unknown elements will bring the computational pressure. So that the 'substructure' was applied, some of the elements in the global structure are separated and the unknown internal forces in the original structure are applied to the degrees of freedom of the boundary to make it an independent structure. And then the parameter identification method is used to identify the time-varying system with unknown inputs. Finally, the accuracy of the method is verified by using bilateral overhanging Euler beam.

At last, considering the structural damage detection and vibration control system are using the same sensor system, so it is necessary to study the integration method of structural parameter identification and vibration control for the building structure which need the two systems both. In the fifth chapter, the time-varying system identification method and the semi-active control are integrated to identify the time-varying structure parameters in real time with unknown input. Finally, the correctness of the proposed method is verified by using the plane shear frames with unknown seismic excitation and white noise excitation.

The research of this paper was supported by Natural Science Foundation of China Fund Projects No.51678590 and No.51378445.

[Key Words] Time varying system; Online identification; Kalman filter; Adaptive; Vibration control

目录

第一章 绪论	1
1.1 论文研究背景与目的	1
1.2 与论文相关的国内外研究现状及问题的提出.....	2
1.2.1 时变结构的参数识别.....	2
1.2.2 基于子结构的大型复杂结构参数识别.....	5
1.2.3 结构参数识别与振动控制一体化.....	7
1.3 论文研究的主要内容与技术路线.....	9
第二章 已知输入下基于改进的自适应卡尔曼滤波的时变系统在线识别	13
2.1 引言	13
2.2 基于改进自适应卡尔曼滤波的时变系统识别.....	14
2.2.1 适用于时不变系统的卡尔曼滤波方法.....	14
2.2.2 适用于时变系统的改进自适应卡尔曼滤波方法.....	15
2.2.3 自适应因子 λ_{k+1} 的确定	17
2.2.4 损伤的判定.....	19
2.3 数值算例验证.....	21
2.3.1 已知地震激励下的 6 层平面剪切框架.....	21
2.3.2 已知地震激励下的 2 层平面框架.....	25
2.4 本章小结	30
第三章 未知输入下基于改进的自适应卡尔曼滤波的时变系统在线识别	31
3.1 引言	31
3.2 未知输入下的改进自适应卡尔曼滤波识别(激励处加速度观测).....	32
3.2.1 适用于时不变系统的 EKF-UI 方法	32
3.2.2 适用于时变系统的改进自适应 EKF-UI 方法	34
3.2.3 自适应因子 λ_{k+1} 的确定	35
3.2.4 损伤的判定.....	38
3.3 未知地震激励下的 6 层平面剪切框架算例(激励处加速度观测).....	39
3.4 未知输入下的改进自适应卡尔曼滤波识别(激励处加速度不观测).....	44
3.4.1 适用于时不变系统的 GEKF-UI 方法.....	44
3.4.2 适用于时变系统的改进自适应 GEKF-UI 方法.....	47
3.4.3 自适应因子 λ_{k+1} 的确定与损伤判定	49
3.5 未知白噪声激励下的 6 层平面剪切框架算例(激励处加速度不观测).....	52
3.6 本章小结	57

第四章 未知输入下基于子结构的大型复杂时变系统在线识别	58
4.1 引言	58
4.2 基于子结构的改进自适应卡尔曼滤波识别	59
4.2.1 子结构系统的运动方程.....	59
4.2.2 适用于时不变子结构系统的 GEKF-UI 方法.....	61
4.2.3 适用于时变子结构系统的改进自适应 GEKF-UI 方法.....	63
4.2.4 自适应因子的确定与损伤的判定.....	64
4.3 未知白噪声激励下的欧拉梁模型算例	66
4.4 本章小结	72
第五章 未知输入下的时变结构参数识别与半主动控制实时结合	74
5.1 引言	74
5.2 受控结构的半主动控制	75
5.2.1 线性二次型 Gauss(LQG)最优控制	75
5.2.2 结构振动的半主动控制.....	77
5.3 时变参数在线识别与 LQG 半主动控制结合(激励处加速度观测)	79
5.3.1 适用于时不变系统的 EKF-UI 与 LQG 半主动控制结合	79
5.3.2 适用于时变系统的改进自适应 EKF-UI 与 LQG 半主动控制结合	81
5.4 El-Centro 地震波作用下的 6 层剪切框架算例(激励处加速度观测)	84
5.5 时变参数在线识别与 LQG 半主动控制结合(激励处加速度不观测)	92
5.5.1 适用于时不变系统的 GEKF-UI 与 LQG 半主动控制结合	92
5.5.2 适用于时变系统的改进自适应 GEKF-UI 与 LQG 半主动控制结合	94
5.6 未知白噪声作用下的 6 层平面剪切框架算例(激励处加速度不观测)	96
5.7 本章小结	105
第六章 总结与展望	106
6.1 总结	106
6.1.1 本论文内容总结.....	106
6.1.2 本论文创新点.....	107
6.2 展望	107
参考文献	108
致谢	113

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Research Background	1
1.2 Related Researchs at Home and Abroad	2
1.2.1 Parameter identification of time-varying system.....	2
1.2.2 Identification of unkonwn inputs	5
1.2.3 Structural vibration control	7
1.3 Main Contents of the Thesis Technical Route	9
Chapter 2 Real-time identification of time-varying system based on improved Adaptive Extended Kalman Filter with known inputs.....	13
2.1 Introduction	13
2.2 Improved Adaptive Extended Kalman Filter with known inputs	14
2.2.1 Extended Kalman Filter of time-invariant system	14
2.2.2 Improved Adaptive Extended Kalman Filter of time-varying system.....	15
2.2.3 Determination of adaptive factor λ_{k+1}	17
2.2.4 Determination of damage.....	19
2.3 Numerical examples	21
2.3.1 Shear frame with known seismic excitation	21
2.3.2 Plane frame with known seismic excitation.....	25
2.4 Chapter summary.....	30
Chapter 3 Real-time identification of time-varying system based on improved Adaptive Extended Kalman Filter with unknown inputs.....	31
3.1 Introduction	31
3.2 Improved Adaptive Extended Kalman Filter with unknown inputs I	32
3.2.1 EKF-UI of time-invariant system	32
3.2.2 Improved Adaptive EKF-UI of time-varying system	34
3.2.3 Determination of adaptive factor λ_{k+1}	35
3.2.4 Determination of damage.....	38
3.3 Shear frame with unknown seismic excitation I.....	39
3.4 Improved Adaptive Extended Kalman Filter with unknown inputs II	44
3.4.1 GEKF-UI based on time-invariant system.....	44
3.4.2 Improved Adaptive GEKF-UI of time-varying system	47
3.4.3 Determination of adaptive factor λ_{k+1} and damage.....	49

3.5 Shear frame with unknown seismic excitation II	52
3.6 Chapter summary	57
Chapter 4 Real-time identification of time-varying system based on substructure method with unknown inputs	58
4.1 Introduction	58
4.2 Improved Adaptive Extended Kalman Filter based on substructure	59
4.2.1 Motion equation of substructure	59
4.2.2 GEKF-UI of time-invariant substructural system	61
4.2.3 Improved Adaptive GEKF-UI of time-varying substructural system	63
4.2.4 Determination of adaptive factor λ_{k+1} and damage	64
4.3 Euler beam with unknown white noise excitation	66
4.4 Chapter summary	72
Chapter 5 Real-time identification of time-varying system with unknown inputs and integration with vibration control	74
5.1 Introduction	74
5.2 Semi-active control of system	75
5.2.1 Linear Quadratic Gaussian (LQG) Control	75
5.2.2 Semi-active control	77
5.3 Semi-active control and real-time identification of time-varying system I	79
5.3.1 EKF-UI of time-invariant system and integration with LQG control	79
5.3.2 EKF-UI of time-varying system and integration with LQG control	81
5.4 Shear frame with unknown El-Centro seismic excitation I	84
5.5 Semi-active control and real-time identification of time-varying system II	92
5.5.1 GEKF-UI of time-invariant system and integration with LQG control	92
5.5.2 GEKF-UI of time-varying system and integration with LQG control	94
5.6 Shear frame with unknown white noise excitation II	96
5.7 Chapter summary	105
Chapter 6 Summary and Outlook	106
6.1 Summary	106
6.1.1 Brief summary of paper	106
6.1.2 Innovation Points	107
6.2 Outlook	107
References	108
Acknowledgement	113

第一章 绪论

1.1 论文研究背景与目的

为了避免建筑结构的安全隐患引起的巨大损失，结构的健康监测^{[1]-[3]}与损伤检测就显得尤其重要^{[4]-[6]}。对此，已有不少学者建立了针对损伤结构参数识别的方法论。但其中不少方法是建立在损伤发生前后，时不变物理参数的识别与对比的基础上，具有一定的局限性。当建筑结构发生损伤时，结构损伤单元的结构参数就会发生变化，随之而来的就是结构响应的突然剧烈，并最终造成结构的破坏。如果能够在线实时地获取结构的物理参数，从而判定结构的服役状态是否正常，对于发现的小损伤及时修补，大损伤提前预警，则能将人员伤亡、财产损失这样的悲剧发生的概率将至最低。相比于上述损伤发生后的识别，这类方法具有更大的应用前景。

对于时变系统的识别，已有学者提出了包括“基于希尔伯特变换的方法(Hilbert Transform-based Methods)”、“基于小波变换的方法(Wavelet Transform-based methods)”、“基于神经网络的方法(Neural Network-based Methods)”和“基于自适应追踪的方法(Adaptive Tracking-based Methods)”在内的多种方法论。但仍存在需要结构动力响应全部已知，需要外部激励已知，计算效率较低等问题。

基于以上关于现有时变系统识别的不足，本文第二、三章在旨在前人工作的基础上，得到了已知输入和未知输入下，基于改进的自适应卡尔曼滤波的时变系统参数识别方法，该方法可以在部分动力响应已知的情况下，在线地识别结构的时变参数，并能对结构的外部输入进行识别。

对于现实中的复杂、大型结构，全局结构的参数识别往往会遇到一系列诸如参数的收敛性差、准确度差的问题。故而有学者提出了子结构的方法，将全局结构中的部分单元分离出来，成为独立的子结构进行识别。但是对于子结构的识别研究，大都针对与时不变系统，对于时变的子结构系统的识别研究较少。因此本文第四章，旨在将前述未知激励下的时变系统参数识别方法推广到时变的子结构系统，在识别子结构时变参数的同时，也识别子结构上的未知激励。

结构健康监测与损伤识别方面,许多行之有效的系统参数识别与损伤探测方已经被提出。然而,在这其中相当多的研究中,针对不同的研究目标,结构振动控制与结构损伤识别经常是被分开处理的。然而,由于结构振动控制与损伤识别的真正实现,都要相同的传感器用于结构动力响应数据的采集与传输,如果目标结构同时有这两项需求,这种“分离”是不实际并且耗费成本的。因此本文第五章,旨在提出一种结时变系统参数识别与振动控制相结合的方法。在识别结构时变参数的同时,识别作用于结构的外部激励,同时对结构进行半主动控制。

以上内容得到国家自然科学基金面上项目“基于数据融合的系列卡尔曼滤波新方法 & 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),以及国家自然科学基金面上项目“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)的支持。

1.2 与论文相关的国内外研究现状及问题的提出

1.2.1 时变结构的参数识别

损伤识别的方法多种多样,这其中基于结构动力响应的识别方法^{[7]-[10]}不一而足,又分为各不相同的多种方法论,包括建立在时域内^{[11]-[14]}、频域内^{[16]-[20]}或者时频域^{[21]-[26]}的方法。但这些方法往往是分别在结构损伤发生的前后分别对结构的参数进行识别,然后通过对两次的识别结果过进行比对,对结构的损伤情况进行判定。在上述方法所进行的两次识别过程中,结构参数均为时不变的。也即,这类方法仅仅能用于结构参数不随时间变化的情况,而不能在线实时地对结构的损伤进行追踪。

为了能够克服上述“参数时不变”的局限,也有不少学者针对时变参数的识别进行探索。

作为一种高效的信号处理方法,希尔伯特变换被用到了时变参数的识别中去,Shi 等人^[27]提出了一种基于希尔伯特变换与经验模态分解结构强迫振动响应的多自由度线性时变系统识别方法。

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 for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库