

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 23320061152634

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

菲涅耳体旅行时层析成像方法及应用研究

Travel Time Tomography Method with
Fresnel Volume and Its Applications

杨国辉

指导教师姓名: 张 建 中 教 授

专 业 名 称: 信号与信息处理

论文提交日期: 2009 年 月

论文答辩时间: 2009 年 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2009 年 月

菲涅耳体旅行时层析成像方法及应用研究

杨国辉

指导教师: 张建中教授

厦门大学

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

摘 要

正确地重建近地表的速度分布是解决地震资料静校正等问题的关键。基于几何射线理论的旅行时层析方法假设地震波频率足够高,这样往往由于射线在模型空间的稀疏分布,使层析反演问题具有严重的不适定性,从而极大地影响层析成像结果的可靠性和分辨率。实际地震波是限带的,其能量主要在激发点与接收点之间的包含几何射线在内的菲涅耳体(Fresnel Volume)内传播,因此利用菲涅耳体代替几何射线进行层析成像,将会得到更优的结果。为克服传统射线层析法的局限性,提高层析成像结果的可靠性与分辨率,本论文主要研究了基于菲涅耳体的旅行时层析成像方法,主要成果有:

研究了二维菲涅耳体及其体内各点对旅行时影响系数的计算方法,提出了基于菲涅耳体内各点影响权系数的层析反演算法,形成了二维菲涅耳体旅行时层析成像方法。理论模型实验表明,该方法正确,与射线层析法相比,增加了对模型空间的覆盖范围和覆盖次数,提高了反演的收敛速度和层析成像的计算效率,以及层析结果的分辨率与可靠性。为解决三维层析成像的大计算量和大存储空间等问题,研究了三维菲涅耳体的一种近似计算方法,通过实验,确定了三维菲涅耳体内各点对旅行时的影响权系数的计算函数;提出了一种层析反演的并行算法;形成了三维菲涅耳体旅行时层析成像方法及其并行算法。理论模型实验表明该三维菲涅耳体层析方法具有同二维菲涅耳体层析方法一样的优点。此外,通过模型实验,分析了频率对菲涅耳体层析反演收敛速度和成像结果等的影响,提出了用于菲涅耳体层析成像的一种变频方法。理论模型实验表明,该变频方法可以适当加快层析反演的收敛速度以及提高层析结果的分辨率与可靠性。

在以上理论和方法研究的基础上,利用 C++编程语言研制了菲涅耳体旅行时层析成像软件,形成了相应的二维和三维软件各一套。主要功能包括,模型建立、射线追踪和旅行时计算、菲涅耳体层析反演、模型及数据显示等。利用该软件,我们对不同的复杂地区的实际资料进行了处理,得到了对应的层析速度模型,利用层析模型,进行了基准面静校正计算与叠加处理。与野外和射线层析静校正效果相比,菲涅耳体层析静校正的效果更好。

关键字: 层析成像; 菲涅耳体; 旅行时; 静校正

Abstract

Correct reconstruction of the velocity distribution of the near earth's surface is very important in solving static corrections problem of the seismic data. The usual travel time tomography method is based on geometrical ray theory, however, it assumes that the seismic wave has very high frequency, which often makes the tomographic inversion have ill posed problem because of the sparse ray distribution in the model space and finally affects the reliability and resolution of the tomographic results. Actually, seismic wave is band limited in frequency, and its energy comes from one Fresnel volume connecting source point and receiving point instead of a geometrical ray, so it's supposed that travel time tomography which is based on Fresnel volume have much better tomographic results in contrast with what of the ray-based tomography. In order to overcome the limitation of the travel time tomography based on geometrical ray theory and improve the reliability and resolution of the tomographic results, we mainly develop a lot of research on travel time tomography method with Fresnel volume in this paper, and have got some achievements.

Firstly, we study the calculation method of Fresnel volume and influence coefficient of the points in the volume to the travel time. Then, we study the tomographic inversion method based on influence weight coefficient of the points in the Fresnel volume, and finally develop the travel time tomography method with two-dimensional Fresnel volume. Numerical experiment results of several models prove that the method is correct, and it increases the coverage and its number of times of the model space, improves inversion rate of convergency, efficiency of the tomography calculation, resolution and reliability of the tomographic results. Secondly, in order to resolve the problems such as great calculation account and memory space of three-dimensional tomography, we study an approximate calculation method of three-dimensional Fresnel volume. We study the calculation function of influence weight coefficient of the points in the Fresnel volume by many experiments.

We study a parallel algorithm of tomographic inversion and finally develop the travel time tomography method with three-dimensional Fresnel volume and homologous parallel algorithm. Numerical experiment results of the models prove this tomography method has all the excellent features on the travel time tomography method with two-dimensional Fresnel volume. Besides, we analyze the influence on the tomographic results and inversional rate of convergency with different frequencies of the Fresnel volume tomography, and then develop a method by using variational frequencies in the processing of tomography inversion with Fresnel volume. Numerical experiment results of the models prove it can properly improve the inversional rate of convergency, the resolution and reliability of the tomographic results.

Based on the theory and research work above, the softwares of travel time tomography with two-dimensional and three-dimensional Fresnel volume are developed by using C++ programming language, which contain simulation model construction, ray tracing and travel time calculation, tomography inversion calculation, and displaying of model and velocity data. We processe actual seismic data of different complex areas using the softwares, and get their tomographic velocity results. Then, we use the velocity results to calculate the static corrections and nestification processing, which proves that the tomography method with Fresnel volume has better results of static corrections in contrast with what of the field and ray-based tomography.

Key Words: Tomography; Fresnel Volume; Travel Time; Static Corrections

目 录

第一章 绪论	1
1.1 地震层析成像简介	1
1.1.1 地震层析成像的发展概况.....	1
1.1.2 地震层析成像的基本原理.....	2
1.2 初至旅行时层析成像方法现状及本文研究意义	3
1.3 本文主要研究内容	5
1.4 本文主要研究成果	6
第二章 二维菲涅耳体旅行时层析成像方法	7
2.1 引言	7
2.2 二维菲涅耳体的定义	7
2.3 二维菲涅耳体的计算方法	9
2.4 二维菲涅耳体初至旅行时层析反演方法	10
2.4.1 二维菲涅耳体的特点.....	10
2.4.2 反演方程的建立及求解.....	11
2.5 理论合成模型实验	14
2.5.1 模型一：两层模型.....	14
2.5.2 模型二：嵌有低速体的模型.....	21
2.6 小结	25
第三章 三维菲涅耳体旅行时层析成像方法	26
3.1 引言	26
3.2 三维菲涅耳体的计算	26
3.3 三维菲涅耳体初至旅行时层析反演方法	35
3.4 理论合成模型实验	36
3.4.1 模型一：两层模型.....	37
3.4.2 模型二：嵌有低速体的二维模型.....	43

3.4.3 模型三：嵌有低速体的三维模型.....	45
3.5 小结	47
第四章 频率对菲涅耳体旅行时层析成像的影响分析.....	48
4.1 引言	48
4.2 不同频率的层析成像分辨率	48
4.2.1 二维理论模型测试.....	48
4.2.2 三维理论模型测试.....	52
4.3 变频方法	55
4.3.1 模型二的变频测试.....	55
4.3.2 模型四的变频测试.....	58
4.4 小结	60
第五章 实际资料测试与静校正应用	62
5.1 层析软件介绍	62
5.1.1 软件运行环境.....	62
5.1.2 软件参数设置.....	62
5.2 实际地震资料处理及分析	63
5.2.1 二维实际资料：DQ267 测线.....	63
5.2.2 三维实际资料：KL 三维区块	71
5.2.3 宽线实际资料：ERDS 宽线	77
5.3 小结	79
第六章 结论与建议	80
参 考 文 献	81
硕士在读期间发表的论文	83
致 谢	84

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Introduction of Seismic Tomography	1
1.1.1 The Progress of Seismic Tomography	1
1.1.2 Basic Principles of Seismic Tomography	2
1.2 The Present Travel Time Tomography Methods and the Significance of the research in this thesis.....	3
1.3 Main Research Contents	5
1.4 Main Results	6
Chapter 2 2-D Fresnel Volume Tomography Method	7
2.1 Introduction.....	7
2.2 The Definition of 2-D Fresnel Volume	7
2.3 The Calculation Method of 2-D Fresnel Volume.....	9
2.4 2-D Fresnel Volume Tomography Inversion Method.....	10
2.4.1 Character of 2-D Fresnel Volume	10
2.4.2 Tomographic Inversion, Equations and its solution.....	11
2.5 Test on Synthetic Data	14
2.5.1 Example 1: Two-Layer Model	14
2.5.2 Example 2: Model Containing locally Low Velocity Medium.....	21
2.6 Conclusion	25
Chapter 3 3-D Fresnel Volume Tomography Method	26
3.1 Introduction.....	26
3.2 Calculation Method of 3-D Fresnel Volume	26
3.3 3-D Fresnel Volume Tomography Inversion Method.....	35
3.4 Test on Synthetic Data	36
3.4.1 Example 1: Two-Layer Model	37
3.4.2 Example 2: 2-D Model Containing locally Low Velocity Medium.....	43

3.4.3 Example 3: 3-D Model Containing locally Low Velocity Medium.....	45
3.5 Conclusion	47
Chapter 4 Influence of Frequency on the Tomographic Results....	48
4.1 Introduction.....	48
4.2 Resolution analysis of Tomographic Results using Different Frequencies	48
4.2.1 Test on 2-D Synthetic Models.....	48
4.2.2 Test on 3-D Synthetic Models.....	52
4.3 Method of Using Variational Frequencies	55
4.3.1 Test on Model 2 in Section 4.2	55
4.3.2 Test on Model 4 in Section 4.2	58
4.4 Conclusion	60
Chapter 5 Test on Field Data and the Application to Static Corrections	62
5.1 Introduction of the Tomography Software	62
5.1.1 Operating Ambient of the Software	62
5.1.2 Setting of the Software Parameters.....	62
5.2 Application to Field Seismic Data.....	63
5.2.1 2-D Data in DQ area	63
5.2.2 2-D Data in KL area.....	71
5.2.3 Width-line Data in ERDS area.....	77
5.3 Conclusion	79
Chapter 6 Conclusions and Proposals	80
References.....	81
Published Papers.....	83
Acknowledgments.....	84

第一章 绪论

1.1 地震层析成像简介

层析成像是在物体外部发射物理信号，同时接收穿过物体且携带物体内部信息的信号，利用计算机图像重建方法，重现物体内部二维或三维清晰图像。该技术最大的特点是在不损坏物体的条件下，探知物体内部结构的几何形态和物理参数的分布。层析成像首先在诊断医学中获得辉煌的成就，然后逐步推广到非医学领域，诸如地球物理学、射电天文学、超声学、微波、雷达、结晶学、电子显微技术等等。

地震波层析成像就是利用人工地震的方法，获取携带有地下介质物理信息的地震波信号，利用求广义 Radon 逆变换^[1]的方法，计算出地下介质的物性分布。地震波在从炮点到接收点的传播过程中，会经过不同的介质。由于介质本身的不同物理性质，地震波的振幅、相位(传播时间)、频谱等都会发生变化，通过对这些变化信息进行处理，进而可以获得地下介质物性分布，推断出其地质构造。

1.1.1 地震层析成像的发展概况

地震层析成像是地球物理学科的一个研究领域，在上世纪 70 年代首先以井间速度结构调查为研究对象。1979 年, Dines 和 Lytle^[2]首先对地震层析成像做了大量数值模拟，并首先将层析成像(Computerized Geophysical Tomography) 这一名词用于论文的标题。在地震勘探研究领域，自从在亚特兰大召开的第 54 届地球物理勘探学家协会(SEG)年会上设置了地震层析成像研究内容的专题后，地震层析成像的研究在地震勘探领域得以发展。上世纪 80 年代，以 Daily(1984)^[3]、Sommerstein(1984)^[4]、Dyer 和 Worthington(1988)^[5]等人的研究为代表，地震层析成像的理论、方法和技术以数值模拟的形式得到广泛的研究。上世纪 90 年代，在工程勘探、资源勘探、环境保护、文物调查、岩体结构研究等许多领域得到广泛研究。地震层析成像经过地球物理学者近三四十年的应用和研究，虽然已经取得

了一定成果，但是许多环节仍需要完善。因此这个领域仍是个不断创新不断发展的热门领域^[6]。

1.1.2 地震层析成像的基本原理

地震波信号主要包括波走时（又称旅行时）与波形信息，前者与后者相比具有信噪比高、简单通用直观、各种波走时规律相同等优点，因此，利用地震记录中的走时信息重建地下介质速度分布的层析成像方法得到了广泛应用。本论文主要研究地震波走时层析成像方法。

为了获得地下介质速度分布，通常把研究的介质离散成划分为一系列小矩形网格，网格内的速度相同，用慢度 s （即速度的倒数）表示，并给每个网格按一定的顺序编号，这样就构成了一个离散模型。地震波以射线的形式在网格间传播，从不同的震源点到检波点经过了不同慢度的网格，因此得到了不同的走时 t 。如图 1-1 所示，射线 i 从震源点 S 到检波点 R 的走时为六段射线走时的总和，可以表示为：

$$t_i = \sum_{j=1}^N l_{ij} s_j \quad (1-1)$$

其中 t_i 表示走时， N 表示网格数目， l_{ij} 表示了第 i 条射线在第 j 个网格中的射线路径长度， s_j 表示第 j 个网格的慢度值。走时层析成像的目的就是由测量的走时 t_i 重构介质的慢度 s_j 。

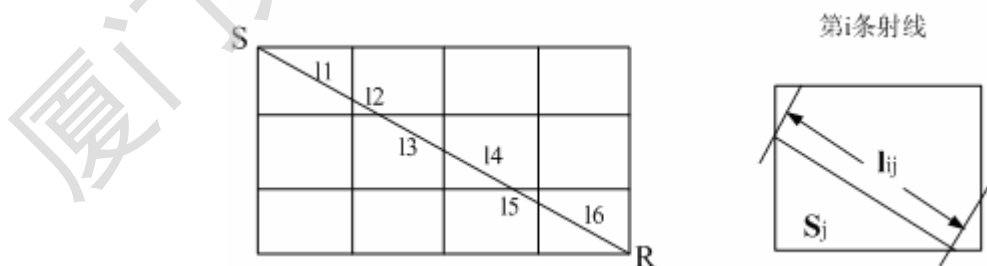


图 1-1 射线在离散模型中的走时示意图

地震走时层析成像方法具体由四步组成：（1）数据采集；（2）正演模拟；（3）建立旅行时方程；（4）反演求解。

第一步是拾取各震源—检波器记录的地震旅行时 t ，在野外进行，由于旅行

时就是地震层析成像反演的基础数据，因此，这一步是很重要的；

第二步是建立速度模型，并对离散模型进行正演计算，一般采用射线追踪技术来计算射线路径 l 和旅行时 t ；

第三步是根据前二步的结果建立旅行时反演的线性方程式。根据式 1-1，对于所有的射线而言，可以表示成如下矩阵方程形式：

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \mathbf{M} \\ t_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} & \mathbf{L} & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} & \mathbf{L} & l_{2N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ l_{M1} & l_{M2} & l_{M3} & \mathbf{L} & l_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \mathbf{M} \\ s_N \end{bmatrix}$$

简写成：

$$T = AS \quad (1-2)$$

其中， T 表示地震波走时列向量，通过野外观测得到； A 表示射线的几何路径长度矩阵，为大型稀疏矩阵，可通过正演计算求解射线路径得到； S 表示慢度列向量，为待求量。

第四步是迭代地求解第三步建立的旅行时反演方程^[7]，再逐步地修正速度模型，迭代地取得反演结果。其中的线性方程常常是大型的、稀疏的和不适定的方程组，因而需要使用有效的反演算法来求解。

1.2 初至旅行时层析成像方法现状及本文研究意义

正确地确定近地表的分布速度是解决复杂地区地震勘探静校正、波动方程基准面校正和叠前偏移等问题的关键。初至波层析成像是利用地震记录的初至旅行时来重构近地表介质速度分布的方法，它被认为是确定近地表模型的有效手段而广为使用。

地震记录上的初至波包括直达波、透射波、回折波、折射波和绕射波等。过去较长一段时间，人们经常利用折射波层析反演层状介质的厚度和速度。这类方法一般认为上覆低速层的速度只是水平变化的，因此把低速层划分成水平排列的常速度单元，每个单元的顶面为观测面，底面为折射面，使用基于 Snell 定理的折射波正演方法^[8]。但是，在折射初至难以识别，或者不能用层状模型表达实际介质的速度结构以及近地表层速度随深度变化的情况下，这类方法均受到限制。

近十年来，随着基于 Fermat 原理的多种射线追踪技术的提出和使用，弯曲射

线（或回折波）层析成像吸引了许多研究者。White（1989）^[9]应用二点射线追踪算法，通过求解阻尼最小二乘的问题同时求取近地表层的速度和厚度。Zhu 等（1992）^[10]提出了应用弯曲射线层析成像确定近地表速度的层析静校正方法。他假设介质的速度随深度线性变化，介质被离散成矩形单元，每个单元为常速度，并用约束阻尼同时迭代重建技术求解。Stefani（1995）^[11]只考虑了速度参数，采用的方法与 White（1989）^[9]的相似，说明了弯曲射线层析成像在估算介质速度上的应用前景。Zhang 等（1998）^[12]提出了使用最短路径射线追踪方法的正则化非线性层析方法。弯曲射线层析成像方法可以较好地模拟介质横向和纵向的速度变化，能同时考虑直达波、透射波、回折波、折射波等初至波，为确定近地表速度结构提供了有效的工具。

但是，基于射线理论的层析成像方法假设地震波频率足够高，地震波能量沿着零体积的射线传播，地震波走时是对慢度沿激发点和接收点之间的射线路径的线积分，这是一种数学抽象。这种理想化的射线又被称为数学射线，它只能近似地描述地震波传播的运动学特征，并不反映真实的物理过程。这种射线在模型空间分布很不均匀，常常遇到低速体发生偏离，而在高速区聚集，使层析反演问题具有严重的不适定性，极大地影响层析成像的可靠性和分辨率^[13]，以及解决静校正问题的效果。实际地震波是限带的，地震能量不只是沿着理想射线传播。理想射线未涉足的其余介质对地震波传播会产生重要的影响。波动方程较好地描述了地震波传播的动力学特征。基于波动方程的波形层析成像，考虑了地震波的频率因素以及整个模型空间所有介质的效应，包括衍射现象，尽管数学上已经解决，也有潜在的高分辨率，但由于其反演问题的高度非线性，需要克服收敛于局部极小的难题；要直接利用易受干扰影响的整个波形，计算工作量极大，因而限制了该类方法的实际广泛应用^[14]。

实际上，地震能量主要在激发点和接收点之间的包含理想射线在内的小范围内传播，即第一菲涅耳带（Fresnel Zone）。只有射线路径附近的第一菲涅耳带的介质对接收点记录的旅行时才有很大的效应，而该带之外远离射线的介质所起的作用极小。这里，我们把包含射线的空间范围相当于第一菲涅耳带的区域称为菲涅耳体（Fresnel Volume）。近年来，提出了介于波动方程和射线理论之间的考虑地震波限带特性的旅行时层析成像方法：波径法和菲涅耳带法^[7]。

波径层析成像基于波动方程、Born 近似和 Frechet 导数计算。相对于数学射线，波径更能正确地表示介质速度分布对旅行时的敏感性。根据波的频率成分，波径与低速异常区发生相互作用，从而减少射线偏离低速体对层析成像的影响。在波径计算中，通过震源时间函数和接收点转换函数，隐含地加入了地震波频率成分，能使频段对波径产生作用^[15]。波径的计算需要全波场的正向传播和反向传播，对于复杂速度结构，计算强度很大，难以有效地解决大型层析成像问题。

基于菲涅耳体的走时层析成像，考虑地震波主频的影响，利用菲涅耳体射线（或称物理射线^[6]）代替理想的数学射线进行层析成像。该方法与波径法的效果相当，但计算量却大大减小，能够解决从地表到地幔较宽尺度范围内的层析成像问题。Yomogida (1999)^[14]在菲涅耳带内基于 Born 近似计算 Frechet 导数，提出了菲涅耳带反演方法，并用于进行水平不均匀介质的旅行时反演。Vasco^[16]等 (1995) 提出了基于准轴射线近似的菲涅耳体旅行时层析成像方法，成功地用于井间旅行时层析成像。Husen 和 Kissling (2001)^[17]提出了基于菲涅耳带的胖射线 (fat ray) 层析成像，并应用于解决天然地震震中和地壳速度结构问题，取得优于常规的射线层析成像的良好效果。Spetzler (2004)^[18]也研究了有限频率对井间透射波速度反演分辨率的影响等问题。

鉴于初至波射线层析成像方法在确定近地表介质速度分布时的若干不足，以及菲涅耳体走时层析反演方法的优势，本课题根据限带地震波菲涅耳体旅行时层析成像的思想，研究了适于复杂近地表介质的菲涅耳体初至走时层析成像方法，以便更好地解决复杂地区的静校正问题。

1.3 本文主要研究内容

本论文所研究的是我们所承担的某单位科技计划项目的部分主要内容。其主要任务是开展二维、三维菲涅耳体初至旅行时层析成像方法的研究工作。主要内容包括：

- (1) 二维菲涅耳体和三维菲涅耳体的计算方法研究，特别研究三维菲涅耳体的近似计算方法；
- (2) 二维近地表介质的菲涅耳体初至旅行时层析成像方法研究，并与射线层析成像效果相比较；

(3) 三维近地表介质的菲涅耳体初至旅行时层析成像方法研究，并与射线层析成像效果相比较；

(4) 地震波频率对菲涅耳体初至旅行时层析成像效果的影响研究；

(5) 有关软件程序的开发、移植、设计、调试，并应用于大量的理论模型实验与实际资料处理。

1.4 本文主要研究成果

围绕课题的目标和研究内容，我们进行了资料调研、理论方法研究、软件研制、模型试验、实际资料应用，较好地完成了课题任务。取得的主要成果有：

(1) 提出了菲涅耳体的一种近似计算方法，对于三维问题，这种近似计算方法大大节省了计算量与存储空间，提高了层析反演效率。

(2) 实现了二维近地表介质的菲涅耳体初至旅行时层析成像方法；

(3) 实现了三维近地表介质的菲涅耳体初至旅行时层析成像方法；

(4) 通过试验不同的地震频率参数与理论合成模型，分析频率值对菲涅耳体初至旅行时层析成像效果的影响，提出了一种简单实用的变频方法；

(5) 根据本课题的理论研究，研制出相应的二维与三维菲涅耳体层析软件，并对若干合成资料和大量实际资料进行实验、处理，得到了比较好的速度模型与静校正效果。

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.

厦门大学博硕士论文摘要库