

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: B200429006

UDC _____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

微机械隧道陀螺仪的控制系統研究

Research on the Control System of Micromachined Tunneling Gyroscope

刘益芳

指导教师姓名: 孙道恒教授

专业名称: 测试计量技术及仪器

论文提交日期: 2010年7月

论文答辩日期: 2010年9月

学位授予日期: 2010年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2010年7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

微机械隧道陀螺仪当隧道间距在 10\AA 数量级时, 才会产生隧道电流; 隧道电流和隧道间距之间存在指数非线性关系, 使得开环工作的微机械隧道陀螺仪动态范围变窄; 隧道电流微弱, 极易被噪声淹没。因此微机械隧道陀螺仪必须工作在闭环控制状态, 实现并维持 10\AA 的隧道间距, 增大器件的动态范围, 抑制干扰, 提高系统的信噪比。然而, 在微机械隧道陀螺仪反馈闭环控制系统的设计过程中, 需要解决隧道陀螺仪的建模、控制方案的设计、控制策略的选择以及控制系统的实现等一系列关键技术问题, 本文围绕这些问题进行了如下研究工作:

1) 结合微机械隧道陀螺仪工作的哥氏效应和隧道效应, 建立了敏感方向的数学模型, 通过仿真和实验获取了模型参数。设计了恒隧道间距闭环控制方案, 基于实际隧道间距的要求, 提出了系统的阶跃响应性能指标, 并对控制策略的选择作了深入的理论分析和仿真计算。

2) 分析了微机械隧道陀螺仪系统在工作过程中的噪声来源, 首次计算并比较了电子隧道 $1/f$ 噪声、电子隧道散粒噪声以及布朗噪声的等效电流。根据随机哥氏加速度与电子隧道 $1/f$ 噪声强度之比设计了卡尔曼滤波器增益矩阵, 并根据系统阶跃响应要求设计了最优状态反馈增益矩阵, 二者串联组成了微机械隧道陀螺仪的 LQG 闭环控制系统。仿真结果可知, LQG 控制提高了系统的抗干扰能力, 增强了对参考信号的跟踪能力, 将隧道间距有效地控制在 10\AA 。

3) 设计制作了 LQG 控制电路, 完成了隧道陀螺仪检测方向的静态测试, 证实了隧道效应的产生。利用三角波、方波和正弦波加速度激励信号完成了隧道陀螺仪检测方向的动态测试, 测试结果证明, LQG 控制策略能够实现对动态输入信号的跟踪, 并将隧道间距变化幅度控制在参考隧道间距的 10% 以内。

4) 根据哥氏加速度的时变特征, 添加了输入角速度作为状态变量, 构建了微机械隧道陀螺仪的扩展状态空间模型。设计了时变卡尔曼滤波器和最优状态调节器, 并将二者串联起来组成 LQG 预测控制器。通过仿真可知, 对于缓变的随机角速度输入信号, LQG 预测控制器能将隧道间距控制在 10\AA , 达到准确测量输入角速度的目的。

关键词: 微机械隧道陀螺仪 控制策略 LQG 控制 LQG 预测控制 隧道效应

Abstract

. The tunneling current only occurs when the gap between the two tunneling electrodes of the micromachined tunneling gyroscope is in order of 10 \AA . The strong nonlinear exponential relationship between the tunneling current and tunneling gap would result in a very narrow-band device when the gyroscope operates in open-loop mode. The tunneling current is so feeble that it would be overlaid by sorts of system noise. So the miniature tunneling gyroscope should be operated in the closed-loop mode to maintain a tunneling gap of 10 \AA , and to enlarge the dynamic range of the device, and to reject the system noise so as to increase the signal-to-noise ratio. In the design process of the closed-loop control system of the micromachined tunneling gyroscope, there are series of key technologies such as model building of the tunneling gyroscope, the design of the control scheme, the selection of the control strategy, and the implementation of the control system must be investigated and developed in this dissertation:

- 1) The dynamic mathematical model of the sensing direction of the micromachined tunneling gyroscope has been deduced based on Coriolis effect and tunneling effect and the parameters of the model has been obtained from both the simulated and experimental results. The constant tunneling gap closed-loop control scheme has been designed. At the basis of the requirement of the operational tunneling gap, the step response performance has been put forward and the selection of the control strategy has been profoundly analyzed theoretically and calculated by means of simulation.
- 2) The sorts of noise existed in the working process of the micromachined tunneling gyroscope has been analyzed and the equivalent current of the electronic tunneling $1/f$ noise, electronic tunneling shot noise and Brown noise have been calculated and compared firstly. The Kalman filter gain and optimal state feedback gain have been designed respectively based on both the ratio of

the Coriolis acceleration to the electronic tunneling $1/f$ noise and the step response performance requirement. Kalman filter and state feedback regulator have been connected in series to construct the LQG controller for the miniature gyroscope. The simulated results have verified that the LQG controller can make the anti-interference of the system increase to trace the reference signal and could maintain the tunneling gap at 10 \AA .

- 3) The LQG control circuit has been designed. The tunneling effect has been verified by the static measurement results. The dynamic test has been accomplished by the triangular, square and sinusoidal acceleration actuating signal, and the tested results indicate that the fluctuation of tunneling gap about its nominal value can be controlled at approximately 10% of the reference tunneling gap and increase the reference signal following ability by the LQG controller.
- 4) Because the Coriolis acceleration is a time-varying signal, the applied input angular rate is added as a state variable to establish the extended state-space model of the micromachined tunneling gyroscope. The time-varying Kalman filter and the optimal state-feedback regulator have been designed to construct the previewed LQG controller. The simulated results has shown that the previewed LQG controller could maintain the tunneling gap at 10 \AA and measure the input angular rate with high precision even if the applied angular rate is a slowly time-varying random signal.

Keywords: Micromachined tunneling gyroscope; Control strategy; LQG control; Previewed LQG Control; Tunneling effect

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 MEMS 技术与控制理论.....	1
1.2 MEMS 陀螺仪.....	2
1.3 控制技术在 MEMS 陀螺中的应用.....	5
1.3.1 开环工作模式.....	6
1.3.2 闭环工作模式.....	7
1.4 基于隧道效应的 MEMS 传感器的闭环控制原理.....	9
1.5 微机械隧道陀螺仪的 LQG 控制.....	13
1.6 本论文的内容安排.....	14
第二章 隧道陀螺仪建模及控制策略分析.....	16
2.1 隧道陀螺仪动态方程的建立.....	16
2.1.1 哥氏效应.....	16
2.1.2 量子隧道效应.....	17
2.1.3 微机械隧道陀螺仪的结构.....	17
2.1.4 陀螺仪结构动力学模型.....	20
2.2 闭环控制总体方案的设计与分析.....	22
2.2.1 隧道陀螺仪的反馈控制方案的确定.....	22
2.2.2 隧道陀螺仪系统中的噪声分析.....	24
2.2.3 隧道陀螺仪的线性化模型.....	29
2.3 控制策略的选择与分析.....	31
2.4 二次型输出反馈控制.....	33
2.4.1 系统状态空间方程的建立.....	34
2.4.2 矩阵变换.....	35
2.4.3 二次型输出反馈控制器的设计.....	36
2.5 小结.....	39
第三章 隧道陀螺仪的 LQG 闭环控制.....	41

3.1 LQG 基本理论	41
3.2 隧道陀螺仪的 LQG 控制器的设计	44
3.2.2 卡尔曼滤波器的设计	44
3.2.3 最优状态反馈调节器的设计	46
3.2.4 卡尔曼滤波器的性能分析	52
3.3 LQG 控制仿真结果分析	55
3.4 小结	63
第四章 隧道陀螺仪 LQG 闭环控制系统的实现	65
4.1 LQG 控制电路分析	65
4.2 开环测试	71
4.3 闭环测试	72
4.3.1 静态测量	72
4.3.2 动态测量	75
4.4 小结	80
第五章 隧道陀螺仪的时变 LQG 预测控制	82
5.1 扩展的状态空间方程	82
5.2 次优时变状态观测器的设计	84
5.3 状态反馈调节器的设计	86
5.4 数值仿真	87
5.5 小结	90
第六章 结论和展望	91
6.1 结论	91
6.2 展望	93
附录一 带有噪声的检测模态的响应	94
附录二 扩展的状态空间模型的建立	97
附录三 时变卡尔曼滤波器增益的设计	100
附录四 Simulink 仿真模块图的生成	101
参 考 文 献	105
攻读博士学位期间发表的论文及专利	114
致 谢	115

Table of Contents

Abstract	I
Chapter 1 Introduction	1
1.1 1.1 MEMS Technology and Contro Theory.....	1
1.2 MEMS Gyroscope	2
1.3 The Application of Control Technology to MEMS Gyroscope	5
1.3.1 Open-loop Mode	6
1.3.2 Close-loop Mode.....	7
1.4 Close-loop Control Principle of Tunneling MEMS Sensors.....	9
1.5 LQG Control of Micromachined Tunneling Gyroscope.....	13
1.6 Thesis Organization	14
Chapter 2 Modeling and Control Strategy Analyzing	16
2.1 Dynamic Equation of Tunneling Gyroscope.....	16
2.1.1 Coriolis Effect.....	16
2.1.2 Quantum Tunneling Effect.....	17
2.1.3 The Structure of Micromachined Tunneling Gyroscope	17
2.1.4 The Dynamic Model of Tunneling Gyroscope	20
2.2 Design and Analysis of Close-loop Control Overall Scheme.....	22
2.2.1 Design of Feedback Control Scheme of Tunneling Gyroscope.....	22
2.2.2 Noise Analysis of Tunneling Gyroscope.....	24
2.2.3 Linearized Model of Tunneling Gyroscope.....	29
2.3 Selecting and Analyzing of Control Strategy	31
2.4 Quadratic Output Feedback Control	33
2.4.1 State-Space Equation.....	34
2.4.2 Matrixing	35
2.4.3 Design of Quadratic Output Feedback Controller	36
2.5 Summary	39
Chaper 3 LQG Control of Tunneling Gyroscope	41
3.1 Basic LQG Theory	41

3.2 Design of LQG Controller of Tunneling Gyroscope	44
3.2.2 Design of Kalman Filter	44
3.2.3 3.2.3 Design of Optimal State Feedback Regulator.....	46
3.2.4 Performance Analyzing of Kalman Filter	52
3.3 Simulation of LQG Control	55
3.4 Summary	63
Chapter 4 Implementation of LQG Controller of Tunneling Gyroscope.....	65
4.1 Analysis of LQG Control Circuit	65
4.2 Open-loop Test	71
4.3 Close-loop Test	72
4.3.1 Static Measurement	72
4.3.2 Dynamic Measurement.....	75
4.4 Summary	80
Chapter 5 Time-varying Prieved LQG Control of Tunneling Gyroscope.....	82
5.1 Extended State-Space Equation	82
5.2 Design of Sub-optimal Time-varying State Observer.....	84
5.3 Design of State Feedback Regulator.....	86
5.4 Numerical Simulation	87
5.5 Summary	90
Chapter 6 Conclusions and Future Works	91
6.1 Conclusions.....	91
6.2 Future Works.....	93
Appendix One Response of Sensing Model with Noise.....	94
Appendix Two Building of Extended State-Space Model	97
Appendix Three Design of Time-varying Kalman Filter	100
Appendix Four Formation of Simulink Simulation Block.....	101
References	105
Publications	114
Acknowledgement	115

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

利用 MEMS 技术进行制造和应用隧道效应进行敏感位移转换的微机械隧道陀螺仪与传统的电容式陀螺仪相比, 具有体积更小、灵敏度更高以及不需要机械结构与信号处理电路互相集成等优点^[1]。但是, 10\AA 数量级的隧道间距无法通过微加工工艺单独实现, 隧道电流与隧道间距之间呈强烈的非线性指数关系, 系统中存在严重的隧道传感噪声等干扰, 缺乏控制电路的开环式隧道陀螺仪将无法正常工作。所以, 必须通过控制技术将隧道间距恒定在 10\AA 附近, 实现隧道电流与隧道间距之间的线性化, 提高陀螺仪的带宽; 同时, 抑制或降低噪声来提高系统的信噪比, 从而使得隧道式陀螺仪能够实现高灵敏度的角速度测量。

1.1 MEMS 技术与控制理论

MEMS 技术的出现为控制技术、微电子制造技术等很多其它技术开拓了新的应用领域。其中, 控制理论和技术在 MEMS 传感器中的应用研究是 MEMS 系统设计与开发过程中的一个重要分支。为了保证 MEMS 系统的可靠性和提高系统的鲁棒性, 往往需要通过反馈控制系统来补偿结构设计和工艺制作过程中不可避免的缺陷。在这个研究过程中, 除了将控制算法通过硬件或软件的方式集成到 MEMS 系统中之外, 有时也会根据控制需要对 MEMS 结构做出修改, 如控制下拉电极的引入和设计。控制技术在 MEMS 系统中的应用归纳起来有以下几个方面^[2]:

- 1) 对 MEMS 驱动单元提供精确的静电驱动, 如对 MEMS 陀螺仪的驱动模式进行稳频和恒幅控制等;
- 2) 通过力反馈控制原理来改善 MEMS 单元的动态响应特性指标, 如减小 MEMS 单元的响应时间, 增大 MEMS 单元的测量范围和精度等;
- 3) 对 MEMS 可动单元的振动位移和振动速度等状态参数提供实时的估计;
- 4) 补偿制造过程中的缺陷, 如对 MEMS 陀螺仪中的由于结构的不对称产

生的耦合误差进行补偿和控制等；

5) 对随时间变化的温度效应进行补偿。

1.2 MEMS 陀螺仪

陀螺仪是测量壳体相对惯性空间角运动的装置，在很多应用场合如自动导航和稳定控制等方面被用来测量旋转角速度或角位移。传统的机械陀螺、光纤陀螺和环形激光陀螺已经在各行各业得到了应用，但它们加工难度大，体积大，稳定性低，使用不方便，而且价格昂贵^[3]。

上个世纪五十年代以来，对硅材料的电学特性的研究促成了微电子技术的迅猛发展，相应的硅体微加工工艺、硅面微加工工艺、高深宽比加工工艺等微机械加工技术也不断地被开发和应用。微机械加工技术的发展使得微传感器的一个重要分支——MEMS 陀螺的设计和制造变成现实。MEMS 陀螺仪的结构尺寸比传统陀螺仪要小好几个数量级，而且可以应用微机械加工技术实现批量生产，从而大大降低成本。自从第一款 MEMS 陀螺仪 1991 年在美国 Draper 实验室^[4]研究成功以来，越来越多的不同工作原理和不同结构的 MEMS 陀螺仪不断问世。表 1-1 中列举了 1993~2008 年不同设计者研发的 MEMS 陀螺仪的带宽和噪声等效角速率。

表 1-1 1993~2008 年研发的 MEMS 陀螺仪的带宽和噪声等效角速率

年份	结构原理图	带宽(Hz)	分辨率 ($^{\circ}/s/\sqrt{Hz}$)
1993	图 1-1 ^[5]	60	0.17
1995	图 1-2 ^[6]	10	0.5
1997	图 1-3 ^[7]	-	0.1
1999	图 1-4 ^[8]	10	0.07
2002	图 1-5 ^[9]	-	0.05
2003	图 1-6 ^[10]	5	0.02
2005	图 1-7 ^[11]	1000	0.004
2008	图 1-8 ^[12]	100	0.0013

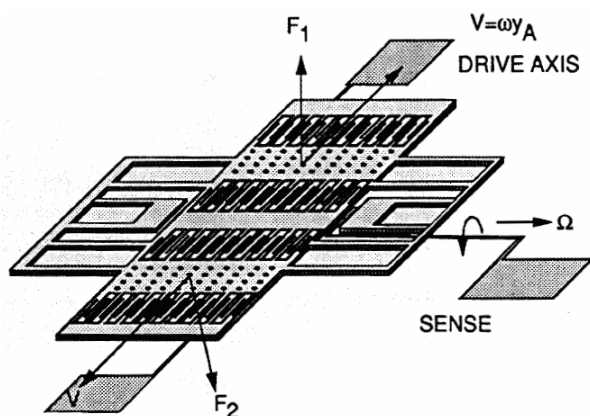


图 1-1 梳齿驱动的音叉 MEMS 陀螺

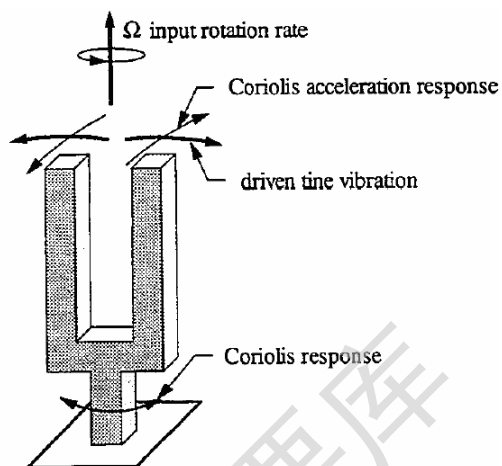


图 1-2 音叉式 MEMS 陀螺

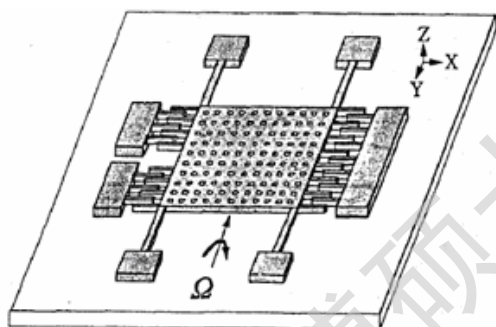


图 1-3 可调谐振动式 MEMS 陀螺

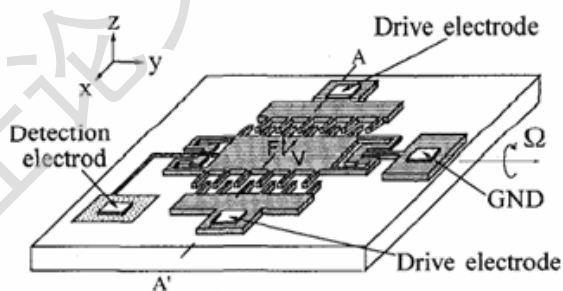


图 1-4 解耦式 MEMS 陀螺

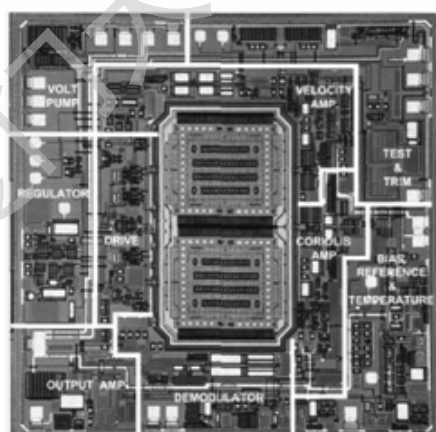


图 1-5 ADI 的商业化 MEMS 陀螺

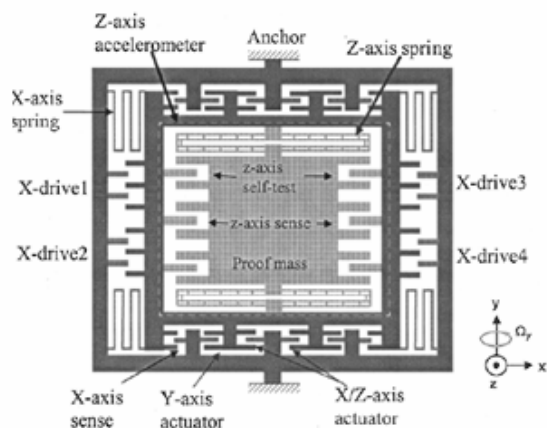


图 1-6 水平轴 MEMS 陀螺

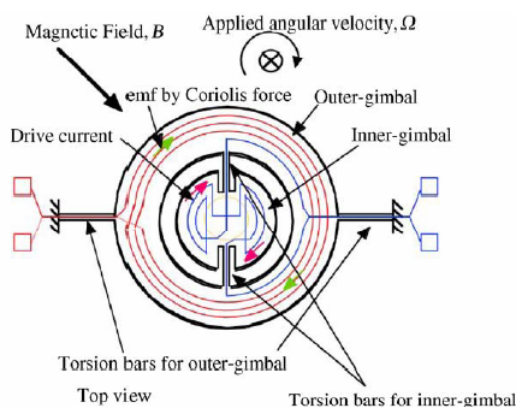


图 1-7 平衡环式 MEMS 陀螺

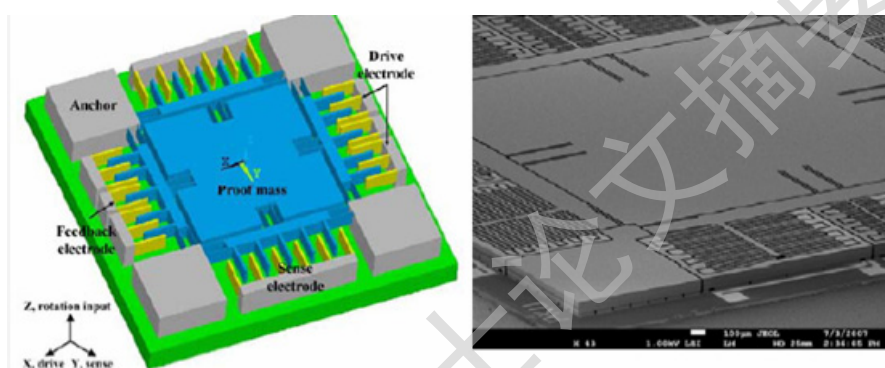


图 1-8 双向解耦的可在常压下工作的 MEMS 陀螺

从表 1-1 可以看出，从 MEMS 陀螺仪的诞生之日到现在二十几年的发展历程中，很多学者对 MEMS 陀螺的设计和制造作了大量的研究，在 MEMS 陀螺仪的分辨率等性能不断得到提高的同时，其成本也在不断地降低^[13]。

MEMS 陀螺仪的出现，为很多需要中等性能角速度传感器的应用场合开辟了新的市场。这些应用场合包括：汽车领域上的驾驶平顺性的控制、倾斜角的测量、车辆安全系统的保证等；生物医药领域的实时监控；电子消费产品领域的虚拟现实、3D 鼠标、电视游戏机、摄像机的防抖动等；GPS 系统中的 MEMS 惯性导航传感器内嵌 GPS 系统；工业领域的机器人控制、动态结构的模态分析和动态测量等；军事领域的微飞行器和卫星控制。同时，小型化的 MEMS 陀螺仪在个人导航等新兴领域也有广阔的应用前景。

在这些已经得到应用以及潜在的应用领域中，越来越要求高精度、小型化的 MEMS 陀螺仪。MEMS 陀螺仪，特别是高精度的 MEMS 陀螺仪的研制和制造以及走向市场化的过程中，依然存在诸多挑战，仍没有真正实现产业化。利用高性能位移敏感方式来提高陀螺仪的精度是 MEMS 陀螺仪的一重要发展趋势，也是实现

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