

学校编码: 10384
学号: 23120101152965

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于北斗系统的小型化微带缝隙天线研究

Study on Miniaturization of Microstrip

Slot Antenna Based on Beidou System

彭 丹

指导教师: 游佰强 教授

专业名称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩日期: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: 

评 阅 人: _____

2013 年 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): 彭丹

2013年6月6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）：勤丹

2013年6月6日

摘 要

北斗卫星导航系统，作为中国自主研发、独立运行的全球卫星导航系统，是国家正在实施建设的重要空间信息基础设施，而终端天线作为卫星导航系统中必不可少的部分，其设计与制作具有极其重要的意义。目前常用的终端天线有交叉振子天线、四臂螺旋天线、微带天线等，其中微带天线以其体积小、可共形、设计灵活、易于制造、成本低等优良性能而被广泛应用于卫星导航接收系统中。

本论文基于福建省重大科技专项子项目“BD2-RDSS 小型化天线”，根据北斗终端天线的设计要求，针对目前国内外北斗二代卫星导航终端天线尺寸过大、效率偏低、低仰角增益低、带宽不足等问题，拟重点解决北斗终端天线的小型化及宽带化，综合使用缝隙曲流、分布加载、缝隙耦合及分形等技术手段，探索用于北斗导航系统的多系列小型化及宽带化加载天线。本论文设计了三个系列多款小型化北斗终端天线，并使用雕刻机制作出了天线样品，通过比较分析仿真与测试结果，进一步改善天线性能。

1. H型缝隙圆形微带贴片系列天线的研究。以小型化和实现收发一体为设计目标，在圆形微带贴片天线的基础上加载H型缝隙，利用缝隙的对偶等效原理及缝隙曲流，实现了北斗小型化设计要求，并通过由H型到类U型缝隙的改进型设计，使用不对称结构的缝隙加载改变其二次模特性，实现天线小型化设计的同时达到所需频率比，实现了北斗终端天线收发一体的设计要求，并取得了良好的增益特性，实现了低仰角高增益。

2. 螺旋缝隙阵三角形微带贴片系列天线的研究。在基本三角形微带贴片天线基础上加载缝隙阵曲流，达到小型化天线的目的，使得整体尺寸减小 39.8%，为了实现所需频率比，在缝隙阵基础上引入折叠螺旋缝隙，从而降低频率比，实现收发一体设计要求，同时带宽略有增加，能很好的满足北斗卫星终端天线的设计要求。

3. 四臂孔阵系列圆形贴片天线的研究。重点针对前两个系列的带宽偏窄的问题，对分形开孔微带贴片天线进行探索，仍选择圆形贴片为基本单元，在其四周对称加载孔洞阵列，并在其孔洞边缘加载 Koch 分形，有效拓展了高频段的带宽。

针对此结构天线增益的不足，讨论了提升天线增益的方法，提出改进型设计，在其基础上改变其对称结构，有效提升了天线增益且拓展了低频段带宽，解决了低频宽带化设计难题，并通过在接地板上加载 PBG 结构进一步提高了天线效率。

关键词：北斗导航系统 小型化 缝隙加载 分形天线

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Beidou Navigation System, as an independent researched and developed global navigation satellite system, is an important space information infrastructure of our country. As an essential part of navigation satellite system, the design of terminal antennas is very important for Beidou navigation satellite system.

Commonly used terminal antennas are cross oscillator antennas, quadrifilar helix antennas and microstrip antennas. Among them, microstrip antennas have been widely used in satellite terminal equipments with its small size, light weight, low profile and low cost.

The paper is based on the Sub-project of Fujian Provincial Major Project“BD2-RDSS Minimized Antennas”. According to the problems to be solved and the design requirements of Beidou, we discussed three series of different microstrip antennas. To meet the miniaturization requirement of Beidou terminal antennas, several technologies have been used, such as distribution loading, Meander technology, slot-loaded and fractal technology.

Firstly, the slot-loaded H-shaped circular microstrip antenna series are designed and discussed. The series centered on the miniaturization and dual-band, we used slot-loaded and Meander technology to achieve them. Loading the H-shaped slot on the circular microstrip patch antenna, we achieve the miniaturization requirement of Beidou terminal antenna. And we present an improved design, changing the H-shape to U-shape. The asymmetric slot structure has been used to satisfy the dual-band of Beidou as well as miniaturization. And we also get the low elevation gain.

Secondly, the Spiral Slot Array Triangular Microstrip Antenna is designed and analyzed. The series achieve size reduction of 39.8% by loading three slots on the Triangular Microstrip Antenna. Using slot-loaded and Meander technology, we can meet the Miniaturization requirement of Beidou. To adjust the ratio of the frequency, we present an improved design. By loading three Spiral slots, the folding slot array

antenna is well meeting the antenna requirements for Beidou navigation system terminal. In addition, the bandwidth has increased because of slot-coupled.

Finally, four holes-loaded circular patch antennas are presented and discussed. Based on the first two series, the problem to be resolved is the bandwidth of the antenna. This series centered on the bandwidth and the gain of the antennas, we discussed the hole-loaded antenna. Using distribution loading and fractal technology, we load four holes array around the circular patch antenna. In the role of hole loaded and Koch antenna, we get a good bandwidth. And we discuss the way to raise the gain, present an improved structure. The new design achieve the target of raising the gain, it also improves the bandwidth of low frequency.

Keywords: CNSS, slot-loaded, Miniaturization, Fractal Antenna

目 录

第一章 绪论	1
1.1 选题背景及研究意义	1
1.1.1 北斗导航系统的简介.....	1
1.1.2 北斗导航系统中的天线.....	2
1.2 微带天线小型化技术	6
1.2.1 曲流技术.....	6
1.2.2 提高介电常数.....	6
1.2.3 分形技术.....	7
1.2.4 加载技术.....	7
1.3 分形应用于天线设计的发展状况	7
1.4 论文的主要工作和结构安排	12
1.5 论文创新点	14
参考文献.....	15
第二章 北斗终端天线小型化设计理论基础.....	19
2.1 微带天线的选择.....	19
2.2 腔模理论.....	20
2.2.1 腔模理论分析方法.....	20
2.2.2 圆形微带天线的分析.....	21
2.3 加载缝隙天线.....	22
2.3.1 缝隙天线的引入.....	22
2.3.2 微带缝隙天线的阻抗.....	23
2.3.3 加载缝隙天线.....	24
2.4 分形天线.....	25
2.4.1 分形天线特性及主要缺陷.....	26
2.4.2 分形的谐振式腔体模型.....	27
2.4.3 分形维度.....	28
2.5 本章小结.....	29
参考文献.....	30
第三章 加载缝隙小型化北斗终端天线的设计.....	33
3.1 H型缝隙圆形微带贴片天线	33

3.1.1 基本圆形贴片天线设计.....	33
3.1.2 基本模型理论.....	34
3.1.3 天线结构设计及仿真分析.....	38
3.1.4 双频天线的尝试及天线改进结构.....	40
3.1.5 天线性能影响因素探讨.....	48
3.2 螺旋缝隙阵三角形微带贴片天线	50
3.2.1 基本三角形微带贴片天线设计.....	51
3.2.2 缝隙位置的选择.....	52
3.2.3 三角形缝隙微带贴片天线设计.....	53
3.2.4 螺旋天线的引入.....	58
3.2.5 重要参数影响讨论.....	62
3.3 本章小结	64
参考文献.....	65
第四章 四臂孔阵分形系列圆形贴片天线的研究.....	66
4.1 四臂孔阵系列圆形贴片天线概述	66
4.1.1 设计思路.....	66
4.1.2 Koch 分形	67
4.1.3 加载孔洞基础理论.....	68
4.2 仿真与改进	70
4.2.1 最初设计.....	70
4.2.2 二阶 Koch 分形的引入.....	74
4.2.3 重要参数讨论.....	78
4.3 改进型设计.....	79
4.4 加载 PBG 结构的优化讨论.....	83
4.5 本章小结.....	86
参考文献.....	87
第五章 总结与展望	88
5.1 总结.....	88
5.2 展望.....	89
附录一 实验仪器与测试环境.....	91
附录二 天线样品	92
附录三 攻读学位期间的研究成果.....	93
致 谢.....	94

Contents

Chapter1 Introduction	1
1.1 Background And Significance Of The Subject	1
1.1.1 Brief Introduction Of Beidou Navigation System	1
1.1.2 The Antenna Of Beidou Navigation System	2
1.2 The Miniaturization Technologies Of Microstrip Antenna	6
1.2.1 Meander Technologies.....	6
1.2.2 Improve The Dielectric Constant.....	6
1.2.3 Fractal Technologies	7
1.2.4 Loading Techniques.....	7
1.3 The Development Of Fractal Antenna	7
1.4 Work and Organization of Thesis	12
1.5 Innovations Of Dissertation	14
References.....	15
Chapter2 The Miniaturization theories of Beidou antenna	19
2.1 The choice Of Microstrip Antenna.....	19
2.2 Resonant Cavity Model	20
2.2.1 Methods For Resonant Cavity Model	20
2.2.2 The Analysis Of The Circular Microstrip Antenna	21
2.3 Slot-loaded antenna	22
2.3.1 Overview Of Slot Antenna.....	22
2.3.2 The Impedance Of The Microstrip Slot Antenna	23
2.3.3 Slot-loaded Antenna.....	24
2.4 Fractal Antenna	25
2.4.1 The Characteristic and shortage of Fractal Antenna.....	26
2.4.2 The Resonant Cavity Model of Fractal Antenna	27
2.4.3 Fractal Dimension	28
2.5 Summary.....	29
References.....	30
Chapter3 The Design of Slot-loaded Microstrip Antenna	33
3.1 Slot-loaded H-shaped Circular Microstrip Antenna	33

3.1.1 The analysis of Circular Patch Antenna.....	33
3.1.2 Basic theory of the Model.....	34
3.1.3 Design And Simulation of the Structure.....	38
3.1.4 Improved Structure	40
3.1.5 The analysis of important parameters	48
3.2 Spiral Slot Array Triangular Microstrip Antenna	50
3.2.1 The analysis of Triangular Microstrip Patch Antenna.....	51
3.2.2 The Location of the slot	52
3.2.3 Design And Simulation of the Structure.....	53
3.2.4 Improved Structure	58
3.2.5 The analysis of important parameters	62
3.3 Summary.....	64
References.....	65
Chapter4 The research of four hole-loaded circular patch antenna .	66
4.1 Overview Of Four Hole-loaded Circular Patch Antenna	66
4.1.1 The Design of the structure.....	66
4.1.2 Koch Fractal antenna	67
4.1.3 Basic Theory of Hole-loaded.....	68
4.2 The Simulation And Improvement.....	70
4.2.1 The Original Design.....	70
4.2.2 The Koch Fractal antenna with two iterations	74
4.2.3 The analysis of important parameters	78
4.3 The Modified Design.....	79
4.4 Optimum Design with PBG for the Structure.....	83
4.5 Summary.....	86
References.....	87
Chapter5 Conclusions and Expectations	88
5.1 Conclusions	88
5.2 Expectations.....	89
Appendix 1 Apparatus and Test Conditions.....	91
Appendix 2 Antenna Samples.....	92
Appendix 3 Research Achievement.....	93
Acknowledgement	94

第一章 绪论

本章首先简单介绍了北斗卫星导航定位系统，概述了系统的组成、发展及应用前景，归纳了北斗导航终端天线的设计要求及研究发展状况，并由此提炼了论文的选题背景及研究意义。简述了当前天线小型化的主流技术，并着重分析了分形技术应用于微带贴片天线的研究现状，最后列出论文的主要研究内容与内容安排，提出论文创新点。

1.1 选题背景及研究意义

1.1.1 北斗导航系统的简介

中国北斗卫星导航系统（COMPASS，中文音译名称 BeiDou），作为中国自主研发、独立运行的全球卫星导航系统，是国家正在实施建设的重要空间信息基础设施，可广泛用于经济社会的各个领域^[1]，如图 1-1 所示。

北斗导航系统与美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧盟伽利略系统并称全球四大卫星导航系统。经过长时间的发展，该系统可在全球范围内全天候、全天时为各类用户提供高精度、高质量的定位、导航、授时及通信服务，实现了自主创新，在具备 GPS 和伽利略系统功能的同时，还具有短报文通信功能。

我国开始研制独立自主的卫星导航系统正式始于 1994 年^[2]，具体发展历程如图 1-2 所示。2007 年 4 月 14 日 4 时 11 分，在西昌卫星发射中心成功将一颗北斗导航卫星送入太空，标志着我国自行研制的北斗卫星导航系统进入新的发展建设阶段。2012 年 2 月 25 日 0 时 12 分，我国在西昌卫星发射中心成功将第十一颗北斗导航卫星送入太空预定轨道，这是 2012 年中国发射的首颗北斗导航系统组网卫星，4 月 30 日又利用“一箭双星”技术将两颗地球中高轨道卫星送入太空预定转移轨道。截止 2012 年 5 月在轨卫星 12 颗，已经初步具备区域导



图 1-1 北斗卫星导航系统的应用

航、定位和授时能力，定位精度优于 20m，授时精度优于 100ns。中国此前已成功发射四颗北斗导航试验卫星和十三颗北斗导航卫星（其中，北斗-1A 已经结束任务），将在系统组网和试验基础上，逐步扩展为全球卫星导航系统。计划 2012 年底覆盖亚太地区，2020 年左右覆盖全球，中国北斗系统将有能力参与全球竞争^[3]。

北斗卫星导航系统由空间端、地面端和用户端三部分组成，如图 1-3 所示。空间端包括 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星；地面端包括主控站、注入站和监测站等若干个地面站；用户端由北斗用户终端以及与美国 GPS、俄罗斯“格洛纳斯”（GLONASS）、欧洲“伽利略”（GALILEO）等其他卫星导航系统兼容的终端组成。该系统提供开放服务和授权服务，其中授权服务可为用户提供双向的短报文通信功能，并具有更高精度的导航、定位及授时服务。

北斗系统目前主要应用于海事、通信与电力授时、应急救援等领域。随着北斗系统的不断发展，民用将成为其应用的主要方向，成为产业规模最大的一块。2012 年 9 月 11 日，北斗（上海）位置综合服务平台和上海北斗导航及位置服务产品检测中心启动建设。据悉，上海北斗相关企业的基本目标是建成一个以北斗

卫星导航定位系统为核心，兼容 GPS，融合移动通信网络、互联网等多种信息服务资源，为注册用户提供的导航定位、精确授时、数字报文通信服务和基于位置的增值信息服务，平台成立后将加速推进“北斗”融入百姓生活。

1.1.2 北斗导航系统中的天线

终端天线是卫星导航系统中必不可少也是极其重要的部分，它决定着整个系统能否正常发挥其功能与作用。随着卫星导航定位技术的不断发展，卫星导航系统的应用领域也不断得到扩展，终端接收机的类型越来越多，也对天线提

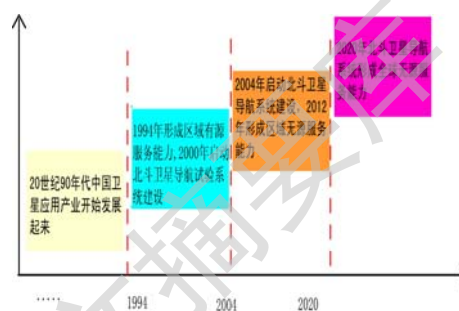


图 1-2 北斗卫星导航系统发展历程



图 1-3 北斗卫星导航系统组成

出了更高的要求。目前常用的卫星终端天线有十字交叉振子天线、四臂螺旋天线^[4]及微带天线，其中微带天线^[5-6]以其体积小、可共形、设计灵活、易于制造、成本低等优良性能而被广泛应用于卫星导航接收系统中。

1.1.2.1 北斗终端天线设计要求

由于北斗卫星距离地球表面比较远，到达地面的北斗卫星信号十分微弱，并且北斗卫星发射天线阵是赋形波束，在天顶和大于一定仰角时接收的信号功率电平应该力求均匀，因此需要尽量保证低仰角的增益。对于北斗卫星导航系统的终端天线提出了如下要求：

表 1-1 北斗卫星终端天线设计指标

	北斗发射天线	北斗接收天线
频率	$1616 \pm 5\text{MHz}$	$2492 \pm 5\text{MHz}$
极化	左旋圆极化	右旋圆极化
驻波比	$\leq 1.5:1$	$\leq 1.5:1$
轴比	$\leq 2\text{dB}$	$\leq 2\text{dB}$
增益	$\geq -4\text{dB}$ (仰角 10 度)	$\geq -3\text{dB}$ (仰角 10 度)
	$\geq -0.7\text{dB}$ (仰角 30 度)	$\geq -0.3\text{dB}$ (仰角 30 度)
	$\geq 3\text{dB}$ (仰角 90 度)	$\geq 3.0\text{dB}$ (仰角 90 度)
隔离度	$\geq 15\text{dB}$	$\geq 15\text{dB}$

1、频率和极化。在北斗天线设计中，北斗的发射 L 频段为（1590MHz～1626MHz），接收 S 频段为（2490 MHz～2530MHz）。同时圆极化也是一个重要的指标，其中接收频段需要满足右旋圆极化，发射频段需要满足左旋圆极化。目前已有的卫星导航系统工作频率各不相同。

2、幅度方向图和增益参量。规定当低于俯仰角时卫星定位系统天线应该停止接受工作，为的是抑制严重的多径效应对流层效应，所以要对天线的覆盖范围进行限制。对于北斗二代卫星天线，要求低仰角增益不能过低，天线的方向图应有较宽的波束宽度。

3、相位方向图。对利用直接相位测量的定位系统，卫星定位系统天线即使只有很小的相位误差，对应于卫星的不同方向的天线输出端相位差也会造成相

当大的位置误差，损害精度性能。在天线覆盖区域内，理论上能提供均匀相位响应，提供均匀相位响应对于相位跟踪接收机至关重要。

对于北斗定位系统要求能同时接收到 4 颗以上的导航卫星信号，因此北斗接收天线还需要具有全向性，在天顶处无死角，以便于卫星信号从天空各个角度发射进来。

1.1.2.2 终端天线的研究与发展

随着卫星通信的不断发展，对微带天线的设计要求也不断提高，其中主流趋势为小型化和多频段及多极化的要求。基于卫星通信大背景下，国内外学者都进行了大量的研究，包括：

1、采用口径耦合方式进行馈电。

2、采用多层微带贴片。

3、使用贴片或地板开槽、短路销钉、高介电常数介质基板等实现微带天线的小型化。

研究者对北斗卫星天线展开了一系列研究，如图 1-4-1，2011 年 Ze-Kun Pan 等人设计的一款用于 CNSS 的小型化单馈圆极化双频天线^[7]，该结构是在圆形贴片边缘加载四个对称的螺旋方形槽，并在中心位置开一条缝隙，由圆形贴片和螺旋线缝隙槽控制高低频点分别为 1.615GHz 和 2.498GHz。该圆形微带贴片半径为 19.7mm，也超过现在小型化 25mm*25mm 的需求。2012 年 Lei Wang 等人提出的三频段圆极化的环形槽天线^[8]，如图 1-4-2 所示，通过采用两个环形槽实现三频圆极化天线的设计，该款天线在高频段具有良好的带宽，但是不能满足天线小型化的需求。B Naimian 等人于 2011 年提出如图 1-4-3 所示的一款小型化多槽方形微带贴片天线^[9]，获得双频圆极化。通过在贴片边缘加载四个 T 型寄生单元，在四个角落插入 L 型缝隙，并在贴片中心插入一条窄缝来获得两个频段的圆极化，分析结果表明面积减少了 38%。2012 年 Elias Ghafari 等人提出了一款如图 1-4-4 所示的小型化单馈单层微带贴片天线^[10]，能接受卫星导航系统信号，GPS 的 L1 波段信号等，由中心贴片和周围的一个环构成，都截断角落来实现圆极化特性，两个贴片通过四条长而薄的微带传输线连接。2011 年 Qing-Xin Chu 等人设计了如图 1-4-5 所示的用于北斗卫星定位系统的双频宽带四臂螺旋天线^[11]，满足北斗两个频段及带宽、圆极化等设计要求，但是尺寸过

大。Li Yuan 等在 2012 年提出一种双频段圆极化多层微带天线^[12]，并加载了 4 个探针，如图 1-4-6 所示天线具有很好的回波损耗及辐射特性，带宽分别为 33.6%和 33%，并且可以覆盖 GPS 和部分北斗频段，同样由于多层结构的设计导致天线尺寸偏大。

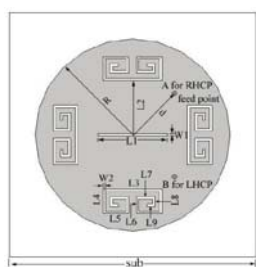


图 1-4-1

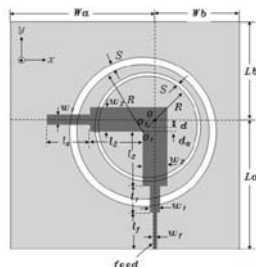


图 1-4-2

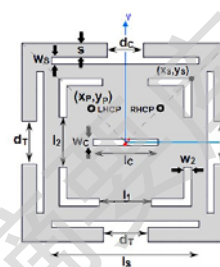


图 1-4-3

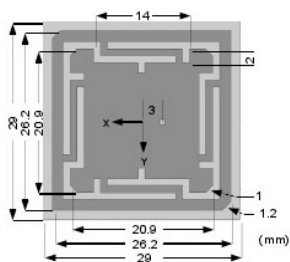


图 1-4-4

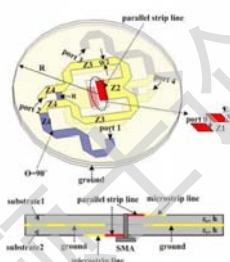


图 1-4-5

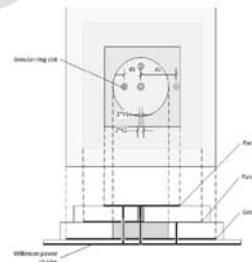


图 1-4-6

图 1-4 北斗导航天线的研究现状

从以上研究现状调研可以看出，对于北斗终端天线多频段，圆极化，带宽等都有了不少研究，已有用缝隙曲流及加载等手段实现小型化及多频段设计，我们的研究团队也紧跟国内外北斗卫星天线技术研究步伐，曾用分布加载、分形等手段创新设计过多种小型化天线。但是目前国内外还没有非常适合应用于我国北斗二代卫星导航定位系统终端设备上的微带天线，主要存在尺寸过大、天线效率偏低、低仰角增益低、低频段带宽不足等缺点。本论文针对目前微带天线在北斗导航系统中的性能缺陷，拟重点解决北斗终端天线的小型化及宽带化，采用微带贴片天线与加载缝隙技术、缝隙耦合技术、缝隙阵列及分形相结合的形式，综合运用各种技术手段，探索用于北斗导航系统的多系列小型化及宽带化加载天线。

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