

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 25320121151705

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

宋《营造法式》殿堂构架地震作用下
弹性抗侧移刚度研究

Analysis on the Elastic Lateral Stiffness under Seismic
Action for Palace Structure in the Building Standards of
Song Dynasty

黄燕萍

指导教师姓名: 张鹏程 副教授

专 业 名 称: 结 构 工 程

论文提交日期: 2015 年 4 月

论文答辩时间: 2015 年 5 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 5 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)经费或试验室的资助,在()试验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或试验室名称,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

中国古代木构架房屋具有良好的抗震性能，其中凝结了长达数千年间古代的建筑工程经验与智慧。这种“干架”结构有别于现代刚接杆系结构，其结构受力分析尚不能直接套用现代框架结构计算方法。已有的研究，通过缩尺模型试验，回归分析，拟合出类似于现代钢筋混凝土框架结构的动力学方程，尚未能揭示出符合古代设计思想及技术水平的基本原理。从古代房屋结构的设计、建造方法入手，探寻其本源的科学原理，一方面可以为古代建筑的安全性能评价找到一般性的方法，另一方面，古为今用，可以为现代工程建设带来新的启迪。

本文在深入研读《营造法式》的基础上，对古代殿堂结构的构造做法、结构特性进行分析归纳，重点关注：木柱与石础的平面直顶连接，柱与额枋的榫卯连接，柱架的“侧脚”及“生起”以及料拱铺作的传力特性。同时研究“多刚体——干架”结构的动力方程，并通过理论解析，得出了柱额榫卯柱架的弹性抗侧移刚度与料拱的弹性抗侧移刚度。

研究发现，柱架的弹性侧移变形包括柱与额枋所形成的门式刚架的弹性变形，榫颈的弯折变形，柱架层具有很大幅度的滑动位移，包括柱脚平面摩擦滑移，榫卯间隙滑移；结合已有试验，在较大地震作用下，结构弹性变形占全部位移振幅的 14% 左右，其余约 86% 的位移主要为柱脚滑移与干架构件间的缝隙挤进张合。

铺作层数是殿堂构架铺作层用于控制侧移变形以及对大屋盖进行隔震、消能的主要手段，料拱由四铺作（一层）增至五铺作（两层），铺作层抗侧移刚度明显减小，同时可控的转动侧移幅度增大；而由七铺作（四层）增至八铺作（五层）刚度减小已不明显，这正与《营造法式》中规定的铺作只有四至八铺作相吻合。

与以往的试验研究结果对比，本文所得出的殿堂构架在微震激励下的弹性自振周期与敲击试验实测值吻合；在此基础上，进一步推论得出，古代殿堂结构在较大地震作用下，弹性侧移变形很小，主要借助房屋在础石水平顶面上发生整体滑移来隔震、消能；对于“多刚体——干架”结构，其主要是借助上部结构的重量在水平接触面上形成的摩擦力与不影响结构安全的机动滑移成功抵御水平地震作用。

关键词：殿堂构架；地震作用；结构特性；弹性抗侧移刚度；弹性自振周期

ABSTRACT

The Chinese ancient timber frame was well known for good seismic performance. The frame was piled up with many well shaped separate wooden blocks, remarkably different from the modern steel frame which made with several hinged bars. According to the studies have been done, yet we hardly know how the ancient structure was designed. Discovering the original design methods may provide us the general construction experiences from hundreds years ago, also ,the principles can be used to repair and restore the heritage ancient buildings.

Based on YING ZAO FA SHI, we focus on the construction structural features of the palace building, especially on the level-flat stone column-base, the inclined wooden columns, the saddle-backed curve of the roof, mortise and tenon joint connection between column and architrave, the force transmission characteristics of the famous ‘Tou-Kung’. Also, we try to set up a dynamic equation of ‘multi-body made-up’ structure.

The study show that, the elastic lateral deformation of column frame compose by the elastic deformation of portal rigid frame, bending deformation of tenon neck. The column frame can also occur large sliding displacement, including plane friction-sliding of column foot and clearance slip of mortise and tenon joint. Under the effect of higher earthquake, the elastic deformation of the structure represent about 14% of the displacement amplitude, the remaining about 86% mainly for the friction-sliding of column foot and clearance slip between structural components.

The layers of ‘PUZUO’ is a skill to control the lateral stiffness and the displacement of Tou-Kung, the abutment of the heavy roof beams. The lateral stiffness of the abutment is significantly reduced if changing a four ‘PUZUO’ (1 layer) to five (2 layers), while the lateral displacement amplitude increased at the same time. But, it is not so obvious if changing a seven ‘PUZUO’ (4 layers) to eight (5 layers).

Compared with the experimental results in previous, this paper proceeds from the elastic natural vibration period of palace structure under the seismic excitation ,which is

consistent with actual measuring data of beating test. Further inference that the elastic lateral deformation of ancient palace structure is small in higher intensity of seismic acceleration, the structure can develop well sliding capability, to seismic isolation and energy dissipation. The study result in that the 'multi-body made-up' structure can resist horizontal seismic action successfully by the horizontal friction between the superstructure and the flat stone base, the elastic deformation of the piled-up wooden frame can be well controlled even under significant seismic excitations.

Key Words: Palace Structure; Seismic Action; Structural Features; Elastic Lateral Stiffness; Elastic Natural Vibration Period

目 录

第一章 绪论	1
1.1 选题背景及研究意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 国内研究现状.....	3
1.2.2 国外研究现状.....	7
1.3 本文主要内容	8
第二章 古建筑木结构构造特点	9
2.1 抬梁式木结构	9
2.2 殿堂结构的基本组成	11
2.3 材份制	16
2.4 本章小结	18
第三章 殿堂构架的结构特性	19
3.1 结构平面布置	19
3.2 结构立面布置	22
3.3 夯土台基	24
3.4 柱架	25
3.5 侧脚和生起	27
3.5.1 侧脚.....	28
3.5.2 生起.....	32
3.6 榫卯	34
3.7 科拱铺作	36
3.8 梁架	37
3.9 本章小结	38
第四章 殿堂构架的弹性抗侧移刚度	39
4.1 柱架层的弹性抗侧移刚度	39

4.1.1 柱架的计算模型.....	41
4.1.2 柱架弹性抗侧移刚度计算.....	42
4.2 科拱铺作层的弹性抗侧移刚度	47
4.2.1 科拱的力学简化模型.....	47
4.2.2 铺作弹性抗侧移刚度计算.....	51
4.3 殿堂构架的动力方程	68
4.4 弹性自振周期验证	74
4.4.1 弹性自振周期的计算.....	74
4.4.2 弹性自振周期的对比分析.....	75
4.4.3 殿堂构架的自振周期.....	76
4.5 本章小结	77
第五章 结论	78
参考文献	79
致谢.....	82
攻读硕士研究生期间发表的论文	83

CONTENTS

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background and Research Significance of Topics	1
1.2 Overseas and Domestic Research Status	3
1.2.1 Domestic Research Status.....	3
1.2.2 Overseas Research Status	7
1.3 Main Content of This Paper.....	8
Chapter 2 Construction Features of Ancient Timber Structure	9
2.1 Lifted Beam Structure	9
2.2 Basic Composition of Palace Structure.....	11
2.3 Material System	16
2.4 Brief Summary	18
Chapter 3 Structural Features of Palace Structure.....	19
3.1 Plane Layout.....	19
3.2 Vertical Layout.....	22
3.3 Stylobate.....	24
3.4 Column Frame	25
3.5 CEJIAO and SHENGQI	27
3.5.1 CEJIAO of Column.....	28
3.5.2 SHENGQI of Column.....	32
3.6 Mortise	34
3.7 Tou-Kung	36
3.8 Beam Frame	37
3.9 Brief Summary	38
Chapter 4 Elastic Lateral Stiffness of Palace Structure	39
4.1 Elastic Lateral Stiffness of Column Frame	39

4.1.1 Calculation Model of Column Frame	41
4.1.2 Calculation of Elastic Lateral Stiffness.....	42
4.2 Elastic Lateral Stiffness of Tou-Kung	47
4.2.1 Simplified Mechanics Model of Tou-Kung	47
4.2.2 Calculation of Elastic Lateral Stiffness.....	51
4.3 Dynamical Equation of Palace Structure	68
4.4 Validation of Elastic Natural Vibration Period	74
4.4.1 Calculation of Elastic Natural Vibration Period	74
4.4.2 Comparison Analysis of Elastic Natural Vibration Period	75
4.4.3 Natural Vibration Period of Palace Structure.....	76
4.5 Brief Summary	77
Chapter 5 Conclusions.....	78
References	79
Acknowledgements	82
List of Published Papers.....	83

第一章 绪论

1.1 选题背景及研究意义

我国古建筑木结构经过了数千年的演变，形成了独具风格的建筑体系，不仅外形独特、优美，还有高超的抗震性能，达到了艺术与科学的完美结合，具有极高的文物、历史和艺术价值。

在我国现存木结构古建筑已不多，但仍有几座辽宋时期建造的大建筑经历多次大地震存留至今。

蓟县独乐寺始建于唐朝，于公元 984 年进行重建，仅有独乐寺山门（图 1.1）及观音阁（图 1.2）保留至今。山门由 12 根柱子组成面阔（开间）三间、进深二间的单层木结构建筑。观音阁平面柱网类似于《营造法式》中的“金箱料底槽”，即呈现“回”字形，边、角布置柱子。观音阁内槽为“口”字型，单向并列 3 间用 10 柱，内槽柱网向外扩出一圈，沿纵横轴线各增 1 外槽柱，四角增 4 柱，外槽共 14 柱。底层为柱框明层，二层为平坐暗层，三层又为柱框，其上为屋盖梁架，阁高为 23m。经千年风雨寒暑的洗礼，期间有记录的地震有 28 次之多，其中有 4 次强震影响，山门及大阁仍然安然无圯。



图 1.1 独乐寺山门



图 1.2 独乐寺观音阁

山西省应县木塔（图 1.3），兴建于公元 1056 年，其平面呈正八边形，内槽为“井”字型双向间架，“五明四暗”九层垒叠，一层周匝有副阶再 24 柱。塔身高达 67m，是我国现存最高的多层楼阁式木塔。近千年来，风雨霜雪、虫蛀鼠害，

有记录的 8 度以上地震两次，且二层已遭受炮击破损，至今巍然矗立。

辽宁义县奉国寺大殿（图 1.4），号称“中国第一大雄宝殿”，面阔（开间）九间，进深五间，高达 21m 的五脊单檐庑殿式单层建筑。据古碑文记载，大殿在武平 6.7 级地震下，并没有出现破坏。1975 年海城地震，大殿基本没有损坏。

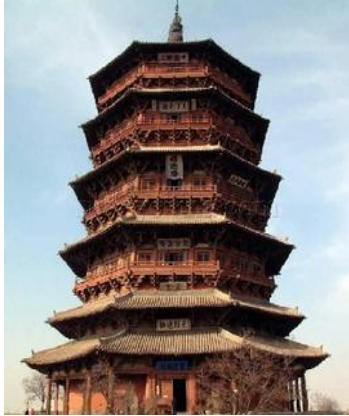


图 1.3 应县木塔



图 1.4 奉国寺大殿

《营造法式》^[1]，是北宋李诫“考究经史群书，并勒人匠逐一讲说，编修海行”用以规范管理国家营造的法式。《营造法式》开篇引用《墨子》：“方圆平直，圆者中规，方者中矩，立者中垂，衡者中水^[1]”；“大木作”中有“柱虽高不越间之广”，以及“侧脚”、“生起”的规定；“平坐”中有“叉柱造”、“缠柱造”等重要做法说明。《营造法式》简练地阐明了大木作设计、施工、图样、功料，以及测量工具，官司用为科律，匠作奉为准绳，作为精审的官方规范，隐含深邃的科学见解。

这些存留至今的建筑及文献，既是先民们经验与智慧的结晶，也是物竞天择的产物。古建筑是不可再生的重要历史资源与文化资源，是国之瑰宝，也是世界的重要财富。中国古建筑以木骨架结构体系为主，既有别于西方古建筑，又不同于现代建筑，有着完全不同的结构体系、构造方法以及营造技术。这种“干架”结构有别于现代杆系结构，其结构受力分析尚不能套用现代框架结构计算方法。同时现阶段对古建木结构的研究，主要采用“均匀高强度材料——固结连续杆系”结构，而真实的古建木结构是采用原木块材，容许构件收缩、开裂等较大自然变形，通过对方、圆、平、直的测量控制，把特定形状的块体构件一层层“欂栌枅柱相枝”、“栝梧复叠势合形离”地叠压搭扣成构架，是“分离块体叠压搭扣”的

构造,依靠块体的摩擦滑移消能减振。多种原因使历史悠久的传统木结构目前在我国很少被使用,对于古建筑大木作技术从结构性能、设计理论角度的研究揭示极少。

通过对《营造法式》^[1] 深入解读,剖析古建筑木结构的构造做法及结构特性,探寻其最本源的“经验”中的科学原理,也是对古建分析方法的一种补充和应用古为今用,非常值得借鉴。一方面可以为古代建筑的安全性能评价找到一般性的方法,为加固、维修、保护古建筑文物提供科学的理论依据;另一方面,古为今用,可以为现代工程建设带来新的启迪,为生态材料开拓出应用空间,开发出性能优良的新结构。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内研究现状

随着时间的延续,中国古建筑的保护工作提上了议程。自上世纪 20 年代,朱启钤发现《营造法式》^[1]并付梓重印,梁思成等,先明读法,再访寻实物,并详细测绘。梁思成著有《营造法式》注释·卷上^[2]、清工部《工程做法则例》图解^[3],陈明达著有《营造法式大木作研究》^[4],刘敦桢著有《中国古代建筑史》^[5]等。由于受到条件的限制,尚未能析以数理,未能破译其隐含的力学方法。在建筑研究的基础上,王天从结构角度尝试对中国古建筑进行剖析及研究,其发表的著作《古代大木作静力初探》^[6],主要从古建筑各重要组成构件、节点以及整体结构静力力学性能分析等方面进行论述,从结构力学角度对佛光寺大殿、观音阁、应县木塔等进行了逐构件的静力验算。1998 年,国家文物局对蓟县独乐寺完成了一次半落架维修,2007 年杨新编著出版研究报告《蓟县独乐寺》^[7],书中详实记录了观音阁维修前的实测图、大木从局部落架、拨正到对残损构件修配的大量详图,照片,图纸完整精密,其中,落架记录报告记录了常规调查无法得到的隐蔽部位做法和损坏情况;书中概括“铺作层纵横交叠的枋木形成一个平放的框架,借助普拍枋控制柱头位移”,“柱间使用木骨泥墙,抱柱,斜撑,平坐中用纵、横斜撑支顶柱头,以形成更稳固的空间结构”等定性的结构原理判断。

随着科学技术的发展、计算机的普及运用及结构分析软件的深入化,为研究木结构的结构性能提供了新的方法和平台。通过对中国古建筑木结构模型进行缩

尺比例试验分析,结合计算机软件对其的受力状态进行模拟,理论和试验相结合,使得木结构的研究在各方面均取得不同程度的进展。近年来,许多高校科研工作者都加入古建筑研究行列,取得了许多宝贵的经验成果。

西安交通大学以俞茂宏教授为核心的科研团队,参与西安古城墙建筑保护工作,做了一系列关于西安古建筑结构的抗震性能的科研探索^[8-10],采用现场脉动试验、结构缩尺模型的动力和静力加载试验等手段,从计算力学角度系统地展开对箭楼抗震性能以及结构动力特性的研究,成功地完成了西安北城门箭楼的抢险加固工作,同时总结了许多有价值的成果。在古建木结构的结构特性试验深入研究的基础上,认为科栱与榫卯节点为半刚性,同时引入半刚性单元,建立3维有限元计算模型及分析方法。随着更深入的力学分析方面的研究,取得了开拓性进展。赵均海著有《中国古代建筑结构特性研究》^[11],主要通过对古建木结构的动力特性研究并对科栱展开一系列试验,得到科栱模型的频响函数曲线,分别从边界条件以及竖向荷载两方面探讨固有频率和阻尼比的变化,提出榫卯与科栱的变刚性理论。同时以西安东门城楼为研究对象,建立三维动力弹塑性有限元模型,得到其自振频率与振型,并对其进行时程响应分析。仓盛、竺润祥等^[12]认为榫卯连接为半刚性连接,应用接触理论将接触单元引入榫卯连接的古木结构,对宁波保国寺大殿进行了结构整体性分析,为大殿的修复和保护工作提供科学的理论依据。

西安建筑科技大学以赵鸿铁教授为核心的研究团队^[13-36],自1999年以来,致力于古建木结构的抗震技术理论和缩尺试验的研究,从古建筑木结构发展历程为切入点,在各方面都取得了科学性的进展。同时对殿堂结构缩尺模型进行振动台试验,开展对古建筑木结构的动力特性、抗震耗能原理及古建筑碳纤维加固方法等方面的基础性理论研究,为后续深入研究古建木结构抗震原理积累了宝贵的经验。以下从几个方面分别论述该课题组的工作进展:

1) 在抗震思想和木构架受力性能方面

张鹏程、赵鸿铁等^[13],姚侃、赵鸿铁等^[14-15]从木构架的营造方式、构造形式及连接方法等方面展开研究,探索古建筑中所蕴涵的防震措施及原理,从木构件具有良好的柔韧性、合理对称的柱网平面布置、浮摆式柱脚节点连接,科栱的堆叠的隔震性能、梁柱节点的榫卯搭接,重屋顶的构造和柱列的侧脚及

生起等方面阐述了古建筑木结构“刚柔相济、以柔克刚、滑移隔震、耗能减震”的防震思想。

张鹏程、薛建阳、高大峰等^[16-18]和隋龔等^[19]以二等材宫殿当心间结构为研究对象,进行1:3.52 缩尺模型振动台试验,结果表明柱子的摩擦滑移,能有效的发挥隔震作用,枋拱和梁柱榫卯节点具有很好的延性,起到耗能和减震作用。高大峰、张鹏程等^[20-21]使用变刚度单元代替枋拱和榫卯节点,从而建立了典型宋式木构件,并通过动力特性和地震响应分析,研究了古建木结构的耗能减震性能。

2) 宋式枋拱的受力性能研究方面:

张鹏程等^[22]、高大峰等^[23]以二等材八铺作枋拱最下两跳为研究对象,严格按照《营造法式》的规定制作了6个(1:3.52)的缩尺模型,并对其展开竖向单调加载试验及水平低周反复加载试验的研究,获得枋拱模型的破坏模式和 $P-\Delta$ 曲线,并根据试验结果分析探讨枋拱的受力原理及抗震性能。高大峰等^[23]和魏国安^[24],在试验结果分析的基础上,进行了枋拱水平向耗能性能以及竖向地震传递系数的计算,结果表明枋拱竖向及水平向均有良好的抗震性能。同时,魏国安^[24]对铺作层进行深入研究,提出了铺作层的力学模型,并利用Ansys对试验进行了有限元模拟再现,模拟了枋拱的破坏形态,同时表明Ansys应用于木结构数值模拟是可行的。李海娜^[25],从古建筑的结构形式及构造特点为切入点,着重分析铺作层的工作原理,抗震特性及破坏形式。深入研究铺作层在静力荷载作用下的承载能力,同时提出铺作层极限承载力的计算方法。

3) 在柱架节点研究方面

高大峰、薛建阳等^[26]、张鹏程等^[16-17]、姚侃等^[27]和赵鸿铁等^[28]以宋式木构架二等材宫殿当心间缩尺模型(比例为1:3.52)为研究对象,采用水平反复加载试验的方法对榫卯节点的半刚性连接进行研究,对其刚度进行深入探讨。通过多组试验得到了榫卯连接 $M-\varphi$ 滞回曲线及骨架曲线,同时拟合得到 $M-\varphi$ 关系方程和恢复力模型。张鹏程^[29-30]通过12组木柱与础石间的摩擦试验,得到两者之间摩擦系数 $\mu_s \approx 0.5$ 。姚侃、赵鸿铁等^[31]以宋式木构架1:3.52缩尺模型为研究对象进行加载试验研究,发现柱与柱础间存在摩擦滑移现象,说明具有良好的隔震耗能特性;建立柱与柱础的摩擦滑移隔震模型;同时探讨白噪声过程作用下两者间的滑移情况,并推导滑移量的计算公式。

4) 动力特性研究

薛建阳等^[32]、张风亮^[33]基于振动台试验结果,对当心间四柱殿堂结构进行简化,提出“摇摆——剪弯”动力模型,并结合燕尾榫摇摆柱恢复力曲线,及四铺作料栱的恢复力曲线对其进行弹性与塑性阶段进行计算,并与振动台试验数据进行对比,结果基本吻合。张锡成^[34],提出当心间四柱殿堂结构的简化动力分析计算模型,采用集中质量原理,未知量采用水平位移(动力自由度),基于杆系理论,建立计算模型,并推导其动力方程;基于试验获得的参数,结合Wilson- θ 法采用Matlab软件对该结构进行与试验相同工况下的弹塑性时程分析,并与振动台试验数据参照对比,相差很小,具有很高吻合度。

哈尔滨工业大学 陈志勇等^[35-36]通过对大量文献的归纳与分析,从全方位各角度对近 30 年来古建木结构的研究进行汇总,为今后更深入研究古建筑木结构打好理论基础。同时对木结构展开深入研究,建立了能反映木材材性的本构模型并在 Abaqus 中实现嵌入。在对应县木塔进行详实的结构调查的基础上,通过对木塔典型节点性能试验分析研究,采用 Abaqus 建立应县木塔的精细化有限元模型,从静力受力性能以及结构动力响应两方面系统的对应县木塔进行分析探讨,为应县木塔结构性能的安全性评估以及维修加固提供重要依据。

太原理工大学 以李世温教授为核心的科研团队^[37-44],针对应县木塔和蓟县独乐寺观音阁,做了一系列静动力特性的理论分析和试验研究。采用自然脉动法对观音阁进行检测,获得了结构前三阶振型和结构动力特性的振动参量。选取应县木塔具有代表性的一个结构层进行缩尺模型的拟动力试验,研究其结构动力响应特性,同时对木塔现状进行实地考察,从结构损坏特征角度对木塔展开系统的研究,认为以双参数模型能较准确地反映木结构优良的变形和耗能情况,同时将双参数损伤原理应用于木结构的安全性能评估;制作缩尺比例为 1:100 应县木塔模型,进行风洞试验及风振分析,得到了木塔全方位的风压体型系数。

长安大学 以赵均海教授、魏雪英教授为核心的科研团队,对木结构也展开研究。李小伟^[45],以清代九架檠大式殿堂为研究对象,对其展开弹塑性动力分析,获得该体系的动力响应,并讨论榫卯节点及料栱在结构中的动力特性反应,认为可以满足我国建筑抗震设防 9 度的要求。王继秀^[46],选取《营造法式》中的宋代分心料八架椽殿堂的木构架进行 3 榑 1:4 双跨缩尺模型试验。同时建立

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.

廈門大學博碩士論文摘要庫