

分类号 P731.2

密级

U D C 556

编号 B3695219-3

厦 门 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

台湾海峡对台风部分动力响应的研究

—张文舟

工作完成日期 2007 年 3 月—2009 年 11 月

报告提交日期 2010 年 1 月

厦门大学

2010 年 1 月

台湾海峡对台风部分动力响应的研究

The Research on Some Dynamic Responses of the Taiwan Strait to Typhoons

博 士 后 姓 名：张文舟

流动站（一级学科）名称：海洋科学

专 业（二级学科）名称：物理海洋

研究工作起始时间 2007 年 3 月

研究工作期满时间 2009 年 11 月

厦 门 大 学

2010 年 1 月

厦门大学博士后研究工作报告著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用博士后研究工作报告的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交该报告的纸质版和电子版，有权将该报告用于非赢利目的的少量复制并允许该报告进入学校图书馆被查阅，有权将该报告的内容编入有关数据库进行检索，有权将博士后研究工作报告的标题和摘要汇编出版。保密的博士后研究工作报告在解密后适用本规定。

本研究报告属于： 1、保密（ ）， 2、不保密（ ）

纸本在 年解密后适用本授权书；

电子版在 年解密后适用本授权书。

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

内 容 摘 要

本文在改进和完善台湾海峡双向嵌套网格风暴潮和天文潮耦合数值预报模式基础上,研究了台风过程对台湾海峡海水通量的影响和受台湾海峡强化的风暴潮与天文潮相互作用。

利用浮标观测和数值模拟研究了 2005 年 8 月 27 日至 10 月 5 日五次台风过程对台湾海峡海水通量的影响。数值模拟结果和浮标观测表明这五次台风过程对台湾海峡及其周边海域的影响导致台湾海峡出现强的南向流和南向通量事件,改变了台湾海峡瞬时北向通量的方向。台风引起的局地风和(或)沿海峡方向水位梯度是南向通量事件的主要驱动因子。数值模拟结果显示柯氏力对这种南向通量事件起着负作用,沿海峡方向动量梯度(与平流项有关)的作用很小,可以忽略不计。

1999 年在台风 Dan 过程中福建北部沿海观测到由风暴潮与天文潮相互作用产生的明显的近潮周期振荡现象。数值实验表明非线性底摩擦对这种振荡起着主要作用,非线性平流项和浅水效应贡献很小。研究发现台湾海峡对其北部风暴潮与天文潮相互作用具有强化作用。基于有岛和无岛的简化理想地形的模拟结果显示由于台湾岛的存在,台湾海峡的管道效应使台湾海峡北部潮流强度明显增强,并使其潮流椭圆主轴趋于沿海峡方向分布,使风暴潮流也得到增强。沿海峡方向较强的潮流和风暴潮流有利于加强通过非线性底摩擦效应实现的风暴潮与天文潮相互作用,从而导致福建北部沿海风暴潮出现显著的近潮周期振荡。

关键词: 台湾海峡; 台风; 海水通量; 风暴潮与天文潮相互作用

Abstract

Based on the improvement of the two-way nested coupled tide-surge model (NCTSM) for Taiwan Strait, effects of typhoon events on the transport through the Taiwan Strait and tide-surge interaction intensified by the trait were investigated in this report.

Transport through the Taiwan Strait under the influence of five typhoons was investigated using both buoy observations and numerical model simulations during the period 27 August to 5 October 2005. The results show that the effects of typhoons on the Taiwan Strait and its adjacent sea area caused strong southward transport events in the Taiwan Strait, which changed the direction of the Taiwan Strait northward transport temporarily. Typhoon-generated local wind stress and/or along-strait water level gradient were the direct driving factors in these southward transport events. The numerical results show that the Coriolis force made a negative contribution to these events and the contribution of the along-strait momentum gradient was insignificant.

Obvious oscillations due to tide-surge interaction were observed by tide gauges along the northern Fujian coast, the west bank of the Taiwan Strait, during Typhoon Dan (1999). Numerical experiments indicate that nonlinear bottom friction (described by the quadratic formula) is a major factor to predict these oscillations while the nonlinear advective terms and the shallow water effect have little contribution. It is found that the tide-surge interaction in the northern portion of the Taiwan Strait is intensified by the strait. Simulations based on simplified topographies with and without the island of Taiwan show that, in the presence of the island, the channel effect strengthens tidal currents and tends to align the major axes of tidal ellipses along the channel direction. Storm-induced currents are also strengthened by the channel. The pattern of strong tidal currents and storm-induced currents along the channel direction enhances tide-surge interaction via the nonlinear bottom friction, resulting in the obvious oscillations along the northern Fujian coast.

Keywords: Taiwan Strait, typhoon, transport, tide-surge interaction

目 次

第 1 章 前 言	8
1.1 研究背景.....	8
1.2 研究内容.....	8
1.3 研究意义.....	9
1.4 研究方案和技术路线.....	10
第 2 章 台湾海峡水动力数值模型	14
2.1 引言.....	14
2.2 数学模型.....	16
2.2.1 控制方程.....	16
2.2.2 底摩擦应力和风应力的参数化.....	17
2.2.3 初始条件和边界条件.....	17
2.2.4 台风模型.....	20
2.3 数值方案.....	22
2.3.1 差分方案.....	22
2.3.2 边界处理.....	26
2.3.3 双向嵌套.....	27
2.4 模型检验.....	29
2.5 讨论和结论.....	33
第 3 章 台风对台湾海峡海水通量的影响	35
3.1 引言.....	35
3.2 流的观测.....	37
3.3 模拟结果.....	41
3.3.1 数值模型.....	41
3.3.2 模型驱动力.....	41
3.3.3 流的模拟和检验.....	43
3.3.4 台湾海峡的通量.....	44
3.4 南向通量事件与台风的关系.....	48
3.5 数值实验.....	54
3.6 动力学分析.....	57
3.7 小结.....	62
第 4 章 台湾海峡对风暴潮与天文潮相互作用的强化机制研究	64
4.1 引言.....	64
4.2 天文潮-风暴潮数值模型.....	66
4.2.1 数值模型.....	66
4.2.2 台风模型.....	68

4.3 天文潮-风暴潮相互作用产生的振荡	69
4.3.1 观测	69
4.3.2 模拟	71
4.4 振荡的动力因子	72
4.4.1 非线性平流效应	73
4.4.2 非线性底摩擦	74
4.4.3 浅水效应	77
4.5 风暴潮与天文潮相互作用的强化	77
4.5.1 无岛实验	78
4.5.2 理想岸线和水深实验	79
4.5.3 动力学分析	85
4.6 小论	90
第5章 结论	92
5.1 研究总结	92
5.2 创新点	92
5.3 后续研究工作	93
参考文献	95
致 谢	104
博士生期间发表的学术论文、专著	105
博士后期间发表的学术论文、专著	106
个人简历	107
联系地址	107

第1章 前言

1.1 研究背景

台湾海峡是一条长宽海峡，其水深较浅，在全球区域性物理海洋学研究中具有其独特性和重要性。台湾海峡是南海与其它海域相连通的主要海峡之一，也是连接我国东海和南海的唯一通道，流经台湾海峡的海水通量对东海和南海的物质平衡和物质交换起着重要作用。该海域是强潮区，复杂而急剧的时空变化是其潮汐主要特征。

台风是影响台湾海峡海洋动力环境的重要天气系统，其空间尺度为几百至上千公里，时间尺度通常为几天到十几天，此外，其强度较强，往往能使海洋环境发生急剧变化。这样的天气系统对平均长约 380 km、宽约 190 km、平均水深仅有约 60 m 的台湾海峡的海水动力过程必然会引起不可忽略的影响。

1.2 研究内容

通过分析台风影响过程中台湾海峡部分水文要素的变化情况以及台风对这种变化的影响作用和影响程度，研究台湾海峡对台风过程的一些动力响应和响应机制，具体内容如下：

1) 鉴于目前台湾海峡海水通量研究中均没有考虑台风对台湾海峡海水通量的影响，拟对台风影响台湾海峡过程中台湾海峡海水通量变化情况进行研究，从而揭示台风对台湾海峡海水通量的影响作用及影响程度，有望部分弥补台湾海峡海水通量研究的不足。具体如下：

(1) 利用数值模式研究台风过程引起台湾海峡海水通量变化情况，并探讨其动力机制。

(2) 利用实测资料分析台风季节台湾海峡海水通量的变化，并结合台风资料分析台风对台湾海峡海水通量变化的影响。

(3) 结合实测资料分析结果和数值模拟结果, 综合分析并揭示台风对台湾海峡海水通量的影响作用及其影响程度。

2) 根据台湾海峡北部经常观测到风暴潮具有潮周期振荡的特征, 研究其动力过程和动力机制, 分析台湾海峡对这种潮周期振荡的影响和影响机制。

(1) 分析台湾海峡风暴潮潮周期振荡产生的动力环境及其特性

由实测资料分析风暴潮潮周期振荡发生时的气象条件和水动力环境; 分析风暴潮潮周期波动位相与天文潮位相之间的统计关系; 分析影响风暴潮潮周期振荡幅度的相关因子。

(2) 研究台湾海峡风暴潮潮周期振荡的产生原因及动力机制

通过数值模拟研究风暴潮潮周期振荡和风暴潮与天文潮相互作用的内在联系, 揭示台湾海峡这种风暴潮潮周期振荡是由风暴潮与天文潮相互作用产生的; 利用数值模式控制实验探讨台湾海峡风暴潮与天文潮相互作用的主要动力因子和动力过程; 通过敏感性实验研究天文潮和气象驱动力对风暴潮潮周期振荡位相和幅度的影响。

(3) 研究台湾海峡对风暴潮与天文潮相互作用的强化机制

通过动力学分析研究主要动力因子在风暴潮与天文潮相互作用中的作用机制; 通过数值对比实验, 分析台湾海峡对风暴潮与天文潮相互作用的强化作用, 并定量分析强化作用的大小; 结合动力学分析结果和数值对比实验结果研究台湾海峡对风暴潮与天文潮相互作用的强化机制。

1.3 研究意义

台湾海峡是连接我国东海和南海的唯一通道, 通过该海峡的海水通量不仅对东海和南海的水体平衡具有重要意义, 而且对东海和南海之间的盐度平衡、热量传输和物质(如营养盐)交换具有重要意义, 对东海和南海的海洋环流和生态环境也有着一定的影响作用。正因如此, 台湾海峡海水通量的变化特性和强度估算自上个世纪六十年代开始便受到国

内外学者广泛关注。然而，受当时海洋观测资料和技术手段的限制，历史上关于台湾海峡海水通量的研究均未考虑台风对台湾海峡海水通量的影响。研究台风对台湾海峡海水通量变化的影响作用及其影响程度，部分弥补台湾海峡海水通量研究的不足，为进一步认识台湾海峡海水通量变化特性及其强度提供基础，也为与台湾海峡海水通量相关的科学研究提供科学依据。

获取台湾海峡风暴潮与天文潮相互作用的特性、影响因子和动力机制，揭示台湾海峡对风暴潮与天文潮相互作用的强化作用和强化机制，不仅可以增加对风暴潮与天文潮非线性相互作用的认识，并且可以改进风暴潮预报技术，为福建沿海风暴潮预报提供科学依据，对福建沿海风暴潮的预报和防范具有重要意义。

1.4 研究方案和技术路线

研究方案：

(1) 通过调和分析和非线性滑动平滑滤波消除浮标垂直剖面流观测资料中的潮流和高频观测噪音，从而得到合理的余流观测资料。采用 QuikSCAT 遥感风场和 ECMWF 风场的融合风场以及 NCEP 的再分析气压场和流场作为模型驱动力来模拟台湾海峡流场，进而计算台湾海峡海水通量。利用数值模式和余流观测资料建立台湾海峡余流与海水通量的对应关系，进而可以由浮标流观测计算获得台湾海峡海水通量变化时间序列。采用数值模式研究台风沿不同路径移动过程中台湾海峡海水通量的变化特性，分析台风影响台湾海峡海水通量变化的动力机制。通过浅水方程推导台湾海峡通量方程，利用动力学分析来探讨台风影响台湾海峡海水通量的动力因子和动力过程。

(2) 结合实测资料，由简单的带潮和不带潮模拟实验证实台湾海峡北部风暴潮周期振荡是由风暴潮与天文潮相互作用产生的。通过对控

制方程中各非线性项的保留与舍弃控制实验，确定台湾海峡中影响风暴潮与天文潮相互作用的主要非线性动力因子项，为后面的动力学分析提供依据。根据上面控制实验的结论，采用动力学分析方法，分析台湾海峡中该主要动力因子影响风暴潮与天文潮相互作用的动力过程和作用机制，为下一步数值对比实验结果的解释提供理论依据。通过是否保留台湾岛（台湾海峡）地形进行对比模拟实验，研究台湾海峡对风暴潮与天文潮相互作用的影响；通过对台湾海峡及周边地形进行高度简化、理想化，消除局部小地形和水深的影响，重新进行类似对比实验。结合动力学分析结果和对比实验结果分析台湾海峡对风暴潮与天文潮相互作用的强化机制。

技术路线：

1) 通过实际观测和数值模拟研究台风对台湾海峡海水通量的影响，用动力学分析探讨台风影响台湾海峡海水通量的动力过程和动力机制。

(1) 改进和完善双向嵌套网格风暴潮-天文潮耦合数值模式，改进台风风场模型；利用该模式模拟沿各种路径移动的台风影响下台湾海峡海水通量变化情况，分析研究其变化特性；通过数值模式控制模拟实验研究台风引起台湾海峡海水通量变化的动力机制。

(2) 收集 863 福建示范区布放于台湾海峡的浮标数据，先对原始流观测资料（分解为东西分量和南北分量，下同）进行调和与分析得到潮流，将原始流观测资料减去潮流部分，得到基本不含潮流的余流，再采用非线性移动平滑滤波技术滤去余流中的高频观测噪音，得到能反映台湾海峡通量变化的余流数据；建立余流与台湾海峡海水通量的关系从而通过这些余流资料计算台湾海峡海水通量时间序列变化情况；结合台风资料，分析台风在台湾海峡海水通量变化中的影响，同时利用其它同步观测资料进行佐证。

(3)在上述研究的基础上,综合数值模拟结果和实测资料分析结果,揭示台风对台湾海峡海水通量的影响作用及影响程度。

2)从实测资料分析入手,结合统计分析,以动力学分析和大量数值模拟、控制及对比实验为主要手段,由现象到本质逐步深入研究台湾海峡对风暴潮与天文潮相互作用的强化机制。

(1)资料收集、整理及分析:收集历史潮位资料和台风资料,对资料进行必要的质量控制和整理;对水位资料进行去潮计算得到风暴潮资料,分析台湾海峡沿岸风暴潮周期振荡特性;从浮标观测资料中滤去潮流和常流,得到风暴潮流实测资料。

(2)数值模拟控制实验和敏感性实验:(a)完善台湾海峡双向嵌套网格风暴潮-天文潮耦合数值模式,并对模式进行全面检验和验证;(b)通过带潮和不带潮模拟对比实验,说明台湾海峡风暴潮周期振荡是由风暴潮与天文潮相互作用产生的;(c)在成功模拟风暴潮周期振荡的基础上,通过分别屏蔽掉各非线性动力因子项,考查这种潮周期振荡的前后变化,从而分析各非线性动力因子对这种潮周期振荡的作用,寻找出主要动力因子;

(3)动力学分析和数值模拟对比实验:(a)从运动学方程出发,分析天文潮变化对各非线性项的动力影响,结合观测资料和前面数值研究结果,对各非线性项进行动力学分析;(b)通过简单移掉台湾岛、使台湾海峡成为开阔海域,使其对同一台风进行响应,将其模拟结果与实际情况的结果进行对比,从而发现台湾海峡在风暴潮与天文潮相互作用中所起的强化作用;(c)由于实际岸形和地形存在复杂的局部变化,难以区分是局部地形的影响结果还是台湾海峡整个地形影响的结果,因此在保留台湾海峡基本特征不变的前提下,对台湾海峡地形和岸形高度简化和理想化,进行有岛和无岛对比模拟实验,从而更清楚揭示台湾海峡对风暴

潮与天文潮相互作用的强化作用，在此基础上通过敏感性实验，并结合前面动力学分析的结论研究台湾海峡对风暴潮与天文潮相互作用的强化机制；(d) 结合动力分析结果和对比实验结果分析台湾海峡对风暴潮与天文潮相互作用的强化机制。

厦门大学博硕士论文摘要库

第 2 章 台湾海峡水动力数值模型

2.1 引言

台湾海峡位于我国东南大陆架海域，是连接东海和南海的唯一海峡。该海峡长约 380 km，平均宽约 190 km，水深较浅，平均水深仅有约 60 m（叶安乐等，1985；张文舟等，2004；Lin 等，2005）。如图 2.1 所示。

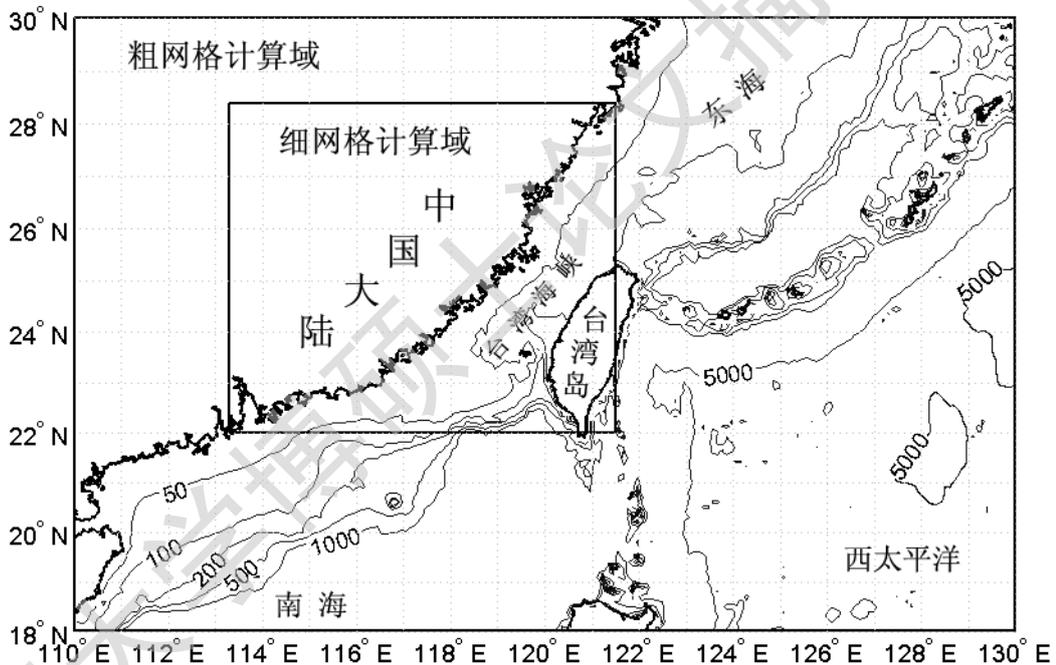


图 2.1 粗网格和细网格计算区域及水深图（等深线单位：m）

Figure 2.1 Model domains for the coarse mesh and the fine mesh with bathymetric contours in meters.

台湾海峡地形对潮波的影响较为明显，复杂而急剧的时空变化是台湾海峡潮汐的主要特征（丁文兰，1983；叶安乐等，1985；颜廷壮和吴永成，1995；Lin 等，2001；Jan 等，2002；李燕初等，2002）。这里潮汐非常强，变化显著，以半日潮为主。其西边的潮差一般要比东边的潮差大，

北部的潮差通常要比南部的潮差大（郑文振等，1982；方国洪等，1985，Fang, 1986；李燕初等，2002）。这里每年 8 至 10 月月平均潮差较大，此时正是台湾海峡受台风影响较频繁的时候。台湾海峡水深较浅、潮差较大，该海域风暴潮与天文潮之间的相互作用也是比较显著的。

在过去二十几年里，我国学者曾针对台湾海峡先后研制了几个风暴潮数值模式。吴培木等（1981）利用垂直积分方程组（全流方程组）建立了一个台湾海峡风暴潮数值模式并对 7705 号台风 (Vera) 引起的风暴潮进行了非线性数值计算。尽管该模式的控制方程组包含非线性平流项，但由于缺乏开边界潮汐资料，天文潮对风暴潮的影响并没有考虑进去。后来，吴培木（1983）在该模式的基础上将模式计算区域由台湾海峡扩展到我国南部大陆架海域，仍没有考虑天文潮。Chen 等（1990）用类似的方程组研制了一个可用于感潮河口或海湾风暴潮水位预报的二维数值模式，并应用于福建省闽江口，在河口开边界处通过叠加上天文潮潮位来考虑潮汐的作用。王喜年等（1991）针对中国近海台风风暴潮的预报开发了一个台风风暴潮模式，该模式采用不包含非线性平流项的垂直积分方程组，没有考虑潮汐，网格分辨率为 13.89 km。他们将中国近海划分为五个相互重叠但又相互独立的计算域 (FbM 模式)，其中一个计算域覆盖台湾海峡。这些模式在台湾海峡海洋工程计算、风暴潮研究和风暴潮预报中得到应用。

根据台湾海峡地形和潮汐特征，台湾海峡风暴潮数值预报模式需要考虑以下两点：（1）风暴潮与天文潮在整个海域的相互作用；（2）具有足够的空间分辨率来反映潮汐和风暴潮急剧的时空变化和复杂的地形。此外，就实际预报应用而言，足够大的计算域对于保证在台风引起最大增水发生前较长一段时间就能做出合理预报也是很重要的，并且能在较短的时间内完成整个计算过程对风暴潮实际预报才具有实用价值。前面

提到的数值模式尽管在台湾海峡风暴潮数值模拟或预报研究及工程计算中发挥了一定的作用，但这些模式都不完全具备上述特点，还不能满足台湾海峡风暴潮数值预报实际应用的需要。针对这些问题，张文舟（2006）建立了一个台湾海峡双向嵌套网格天文潮-风暴潮耦合数值预报模型（NCTSM），该模型的具体内容请参见文献张文舟（2006）和 Zhang 等（2007）。由于后面的研究均用到该模型，因此这里以上述文献为基础对该模型及其后续改进进行简单介绍，以使本研究报告在整体结构上比较完整。

2.2 数学模型

2.2.1 控制方程

该模型以球坐标系下垂向平均流动量方程和连续方程作为其控制方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{uv \tan \varphi}{R} - fv = -\frac{g}{R \cos \varphi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} - \frac{1}{\rho R \cos \varphi} \frac{\partial p_a}{\partial \lambda} + \frac{1}{\rho H} (F_s - F_b), \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{u^2 \tan \varphi}{R} + fu = -\frac{g}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} - \frac{1}{\rho R} \frac{\partial p_a}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho H} (G_s - G_b), \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial(Hu)}{\partial \lambda} + \frac{\partial(Hv \cos \varphi)}{\partial \varphi} \right] = 0, \quad (2.3)$$

其中t是时间， λ ， φ 分别表示纬向（向东为正）和经向（向北为正）坐标，h为未扰动时的水深，H为总水深， u 、 v 分别表示垂直平均流 \bar{q} 的东分量和北分量， F_s 、 G_s 和 F_b 、 G_b 分别表示风应力 $\bar{\tau}_s$ 和底应力 $\bar{\tau}_b$ 的东分量和北分量， p_a 为海面气压， R 、 g 、 f 和 ρ 分别为地球平均半径、重力加速度、柯氏力参数和海水密度，假设海水密度为常数。坐标系的原点位于未扰动海面上， ζ 表示海面从未扰动海面起算的垂直位移，向上为正，向下为负，它可以代表天文潮潮位、风暴潮水位或它们的和（总水位）。实际的

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