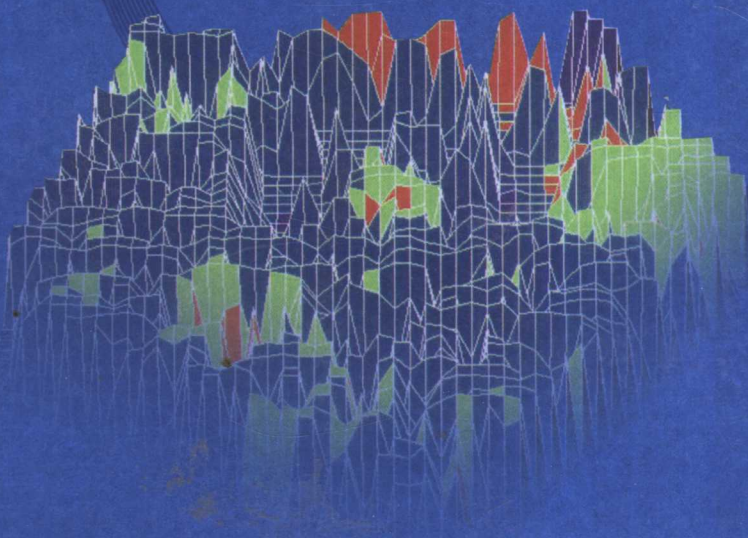


# 空间数据与空间分析 不确定性原理

Principle of Modelling Uncertainties  
in Spatial Data and Analysis

史文中 著



科学出版社  
www.sciencep.com

# 空间数据与空间分析 不确定性原理

史文中 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

地球空间信息科学中,主要理论基础有地理现象的认知与表达、地学编码与地理坐标系理论、不确定性理论、空间数据组织方法与空间分析理论等。本书从理论研究角度深入介绍了其中一个主题——空间数据与空间分析的不确定性原理,其内容包括:不确定性的数学基础、线状目标的位置误差模型、数字地面模型的不确定性、属性不确定性模型、位置与属性不确定性集成模型、空间目标间拓扑关系的不确定性理论、空间叠置分析的不确定性建模、空间缓冲区分析的不确定性模型、空间数据与分析不确定性的可视化、元数据模型、基于不确定性的空间数据挖掘以及地籍数据的质量控制。

本书系统地总结了作者在该领域十余年的研究成果,内容新颖,结构严密,理论性强。可作为GIS及相关专业的研究人员、高校教师、研究生及高年级本科生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

空间数据与空间分析不确定性原理/史文中著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015602-1

I. 空… II. 史… III. 地理信息系统-不确定度-研究 IV. P208

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第051665号

责任编辑:彭胜潮 韩 鹏/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

[http // www . sciencep . com](http://www.sciencep.com)

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005年6月第一次印刷 印张:26 1/2

印数:1—2 500 字数:602 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

## 序

我十分高兴地看到一本关于空间数据与空间分析不确定理论著作的出版。空间数据质量与不确定性理论是地球空间信息科学最核心的支撑理论之一,因此本书的出版对完善和发展地球空间信息科学将起到积极的作用。

作者史文中博士于1985年毕业于武汉测绘科技大学(现武汉大学)航空摄影测量与遥感系,获学士学位并被评为当时全校的优秀毕业生,于1988年在该校获硕士学位。他于1994年在德国Osnabrück大学以优异的成绩(magna cum laude)获得博士学位,随后应聘在香港理工大学任教至今。

史文中教授一直致力于地球空间信息科学的理论与技术的研究。本书系统地总结了他在过去10余年中在空间数据与空间分析不确定性理论方面的主要研究成果。

全书共五篇十五章,系统地阐述了空间数据与空间分析的不确定性理论体系。第一篇为概述,主要介绍不确定性理论的形成与发展,系统地论述了不确定性误差源,介绍了空间数据不确定性理论主要依赖的若干基础理论。第二篇是关于空间数据的不确定性理论模型,包括GIS目标的位置不确定性模型与理论、数字地面高程模型的不确定性建模以及属性不确定性建模。第三篇是不确定性关系模型和空间分析的不确定性建模,其中包括属性与位置不确定性的综合、不确定性拓扑关系理论、空间叠置分析的不确定性建模、缓冲区分析的不确定性分析模型。第四篇是关于空间不确定性的表达问题,包括不确定性的可视化以及空间数据的元数据描述。第五篇给出了空间不确定性理论的应用,如基于不确定性的空间数据挖掘、地籍数据的质量控制,以及运用网络服务技术分发数据质量与空间分析的不确定信息。

纵观全文,本书具有以下特点:

**科学性:** 本书在科学上的贡献是为地球空间信息科学从确定性发展到不确定性从一个方面奠定了理论基础。所提出的一系列新的理论模型与方法建立在严密的数学理论上,如基于置信区间理论的误差带

证明、基于随机化图形学理论的面状目标不确定性模型、基于模糊拓扑学的不确定关系模型、基于解析几何与积分方法的 TIN 模型平均误差公式的推导、基于多进制小波理论的影像融合技术等。

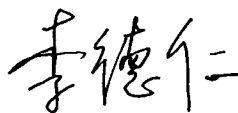
**系统性：**本书系统地构建了空间数据不确定性的研究体系和理论框架，创立了空间数据与空间分析的不确定性理论体系，包括位置不确定性模型（点、直线、曲线、面以及体目标的建模）、属性不确定性模型、位置与属性不确定性的集成、DEM 的精度估计、不确定空间关系、空间分析的不确定性理论、数据质量控制理论、不确定信息的可视化等。

**创新性：**在多个主要方面取得了创新性成果。如创立了空间数据与空间分析的不确定性理论体系；发现了国际上使用了近 40 年的空间线状要素  $\epsilon$ -带误差模型的两个重大理论缺陷，对此建立了一系列新的误差带理论模型。在空间位置不确定性方面，系统地建立了点、直线、曲线、面和体目标的位置不确定性数学理论模型。在属性数据不确定方面，提出了综合属性不确定性和位置不确定性“S-带”模型等。在基于矢量 GIS 的空间分析方面，开创了一个新的不确定性国际理论前沿等等。

**前瞻性：**在多个方面提出空间数据不确定性理论发展的新趋势，并积极地通过理论研究予以实现和发展。如首次将静态 GIS 数据的不确定性模型与方法延拓至动态的空间分析不确定性理论；创新性地实现了从数据的误差描述逐步地发展到数据的质量控制，从而达到减小数据不确定性的实践；基于模糊拓扑学理论将定性的不确定性空间拓扑关系描述扩展至定量的不确定性空间拓扑关系表达等等。

GIS 中空间数据与空间分析不确定理论研究涉及空间不确定性、时态不确定性、属性不确定性和语义不确定性，是一个值得深入研究，并使之能用于解决实际问题的挑战性命题。中国年轻的学者在空间数据不确定性理论以及其他领域的成就在国际上得到了认可，我感到十分欣慰。同时，也期望在不久的将来可以看到更多中国学者在地球空间信息科学理论发展的不同领域取得卓越的成就，努力推动 GIS 理论和实践向前发展。

中国科学院院士  
中国工程院院士



2005 年 6 月 6 日于武汉珞珈山

# 前 言

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者一起被认为是当今世界上最重要的、发展最快的三大领域。地球空间信息科学处于这样一个重要的领域,我们感到十分欣慰;而另一方面,这一领域的科学理论也有待进一步发展和完善,我们感到任重道远。

这一学科的名称有不同的叫法,如 geographic information system, geographic information science, geoinformatics, geomatics, geotechnology 等。这些叫法有其本身的渊源,其内涵也有差异,中文翻译也有不同,本书暂且选用“地球空间信息科学”。

我们所研究的科学——地球空间信息科学是一门交叉学科,它与许多学科有关,如地理学、数学、测绘科学、计算机科学等等。然而,这并不等于这些学科交叉起来就构成地球空间信息科学。为了学科的发展,我们需要为这一学科建立一系列的基础理论。

地球空间信息科学应由哪些基础理论构成还没有一个完整和系统的看法,但是在谈及这一学科时,一般会包括以下的原理(Longley *et al.*, 2001; Longley *et al.*, 1999):

- 自然现象的认知、抽象与综合表达;
- 地理目标的时空表示;
- 地理坐标参考系;
- 空间数据质量及其不确定性;
- 空间分析;
- 空间数据的本质与组织方法。

从这一学科理论发展的角度看,可以考虑首先分别发展以上几个领域的基础理论,从而逐步构成一门较为系统、完整的地球空间信息科学。本书就空间数据质量及其不确定性基础理论的发展提出一个蓝本,阐述空间数据与分析的不确定性基础理论体系。全书共五篇计十五章,具体组织如下。

## 第一篇 概述(第一章~第三章)

本篇共三章。第一章为绪论,主要介绍不确定性理论的形成与发展,空间数据及其质量,不确定性的有关概念、空间分析不确定性及其影响,以及本书的内容与结构安排。第二章为空间数据及分析不确定性的来源,介绍了误差源的分类,并对不确定性误差源进行了系统地论述。第三章为数学基础,主要介绍空间数据不确定性理论研究与应用主要依赖的若干基础理论,如概率论、空间统计学、证据理论、模糊数学、粗集理论和信息论等。

## 第二篇 空间数据的不确定性模型(第四章~第六章)

本篇共三章。第四章为 GIS 数据中的位置不确定性模型,主要阐述 GIS 线状实体的建模理论,介绍了不同类型的误差模型建模方法。第五章为数字高程模型的不确定性建模,介绍了 DEM 的建模方法、误差来源、插值方法、精度分析以及地形描述精度模型等。第六章为 GIS 数据中的属性不确定性模型,介绍了属性数据的定义、属性不确定性的描述方法等。

## 第三篇 不确定性关系模型和空间分析的不确定性建模(第七章~第十章)

本篇共四章。第七章为位置与属性不确定性的综合,给出了数学模型,论述了 GIS 与遥感数据的集成方法,介绍了空间数据中不同数据集成的不确定性模型。第八章为不确定性拓扑关系模型,介绍了 GIS 中的模糊拓扑关系及其模型,提出了 GIS 中不确定性模糊拓扑关系模型。第九章为叠置分析位置不确定性建模,分析了空间叠置分析的不确定性来源,矢量叠置分析模型,空间特征的不确定性传播以及生成多边形模型的不确定性等。第十章为缓冲区分析位置不确定性建模,介绍了缓冲区分析法,矢量缓冲区分析的误差带模型,以及基于概率论的缓冲区分析不确定性模型等。

## 第四篇 不确定性的可视化及元数据(第十一章~第十二章)

本篇共两章。第十一章为不确定性的可视化,主要从误差椭圆模型、矢量方法、灰度方法、彩色方法、三维方法、符号方法等方面阐述不确定性的可视化技术。第十二章为元数据的不确定性,介绍了现有的几种元数据标准、元数据的不确定性指标,并以香港为例,阐述了元数据系统的建立方法。

## 第五篇 不确定性理论的应用(第十三章~第十五章)

本篇共三章。第十三章为基于不确定性的空间数据挖掘,介绍了相关概念,分析了空间数据挖掘中不确定性的表现和本质,以及空间数据挖掘的不确定性因素,提出了空间数据挖掘不确定性的处理方法。第十四章为地籍数据的质量控制,介绍了地籍数据的误差及其改正方法,阐述了地籍数据质量控制原型系统,并以上海为例进行实例研究、分析。第十五章运用网络服务技术对给定的数据提供其数据质量报告,以网络服务的形式处理用户要求评估的 GIS 数据,并将所得的数据质量检验结果反馈给用户。

在撰写本书过程中,得到我的同事和学生们的支持,包括张翠君博士、王树良博士、汤仲安博士、田岩博士、廖剑峰先生、游扬声先生、童小华博士、刘春博士、朱长青教授、吴华意教授、刘文宝教授、汤国安教授、毛海霞女士、邹亮先生、赵春宇先生、陈玉敏女士、张静雅女士等。对他们的帮助我深表感谢。非常感谢杜道生教授、魏克让教授、王新洲教授和承继成教授对本书的审阅。

本书的出版得到香港研究资助局(项目号:3\_ZB40)和香港理工大学(项目号:PolyU5071/01E,Z062)的资助。

空间数据与空间分析的不确定性理论是一个年轻而活跃的领域。希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用,相信在不久的将来这一领域会有更多的理论研究成果出现。由于时间仓促,书中错误、疏漏在所难免,敬请读者不吝赐教。

作 者

2005年2月于香港



# 目 录

## 序 前 言

### 第一篇 概 述

第一章 绪论	3
§ 1.1 不确定性原理及其普遍存在性	4
§ 1.2 空间数据及其不确定性	7
§ 1.3 空间分析的不确定性及其影响	10
参考文献	11
第二章 空间数据与空间分析不确定性的来源	13
§ 2.1 客观世界的不确定性	14
§ 2.2 人类认知的不确定性	17
§ 2.3 空间数据获取误差	20
§ 2.4 空间数据分析与处理的不确定性	29
§ 2.5 本章小结	35
参考文献	35
第三章 数学基础	37
§ 3.1 概率论	38
§ 3.2 数理统计	44
§ 3.3 证据理论	51
§ 3.4 模糊理论	55
§ 3.5 粗集理论	63
§ 3.6 信息论和熵	68
§ 3.7 本章小结	73
参考文献	74

### 第二篇 空间数据的不确定性模型

第四章 GIS 数据中位置不确定性模型	77
§ 4.1 引言	77
§ 4.2 空间线状目标误差模型综述	78
§ 4.3 GIS 中空间实体的定义	80
§ 4.4 点元的位置误差模型	82

§ 4.5	直线位置误差模型	84
§ 4.6	基于相关的二维空间目标误差模型	91
§ 4.7	曲线的误差模型	101
§ 4.8	一般曲线等概率密度误差模型	110
§ 4.9	多边形误差模型	119
§ 4.10	基于图形代数学的不确定性模型	123
§ 4.11	本章小结	134
	参考文献	134
<b>第五章</b>	<b>数字高程模型的不确定性建模</b>	<b>136</b>
§ 5.1	DEM 表面建模方法	136
§ 5.2	DEM 误差的来源	142
§ 5.3	DEM 插值方法及其精度分析	143
§ 5.4	TIN 的线性插值误差估计	158
§ 5.5	规则格网上双三次插值 DEM 误差估计	165
§ 5.6	DEM 对地形描述的精度	171
§ 5.7	本章小结	183
	参考文献	183
<b>第六章</b>	<b>GIS 数据中的属性不确定性模型</b>	<b>185</b>
§ 6.1	引言	185
§ 6.2	属性不确定性	186
§ 6.3	属性不确定性的范畴	190
§ 6.4	属性不确定性的主要处理方法	191
§ 6.5	属性数据的缺陷率度量算法	202
§ 6.6	本章小结	206
	参考文献	207

### 第三篇 不确定性关系模型和空间分析 不确定性建模

<b>第七章</b>	<b>位置与属性不确定性的综合</b>	<b>213</b>
§ 7.1	引言	213
§ 7.2	PAT 不确定性数学模型	215
§ 7.3	遥感和 GIS 的数据集成	221
§ 7.4	本章小结	228
	参考文献	229
<b>第八章</b>	<b>不确定性拓扑关系模型</b>	<b>231</b>
§ 8.1	GIS 中的拓扑关系	231
§ 8.2	目标拓扑关系模型	234
§ 8.3	扩展拓扑关系模型	242

§ 8.4 GIS 中拓扑关系的不确定性模型 .....	255
§ 8.5 本章小结 .....	268
参考文献 .....	268
<b>第九章 叠置分析位置不确定性建模</b> .....	<b>270</b>
§ 9.1 引言 .....	270
§ 9.2 现有矢量叠置分析模型的回顾与分析 .....	271
§ 9.3 同名点元的不确定性模型 .....	272
§ 9.4 叠置分析生成多边形的不确定性建模 .....	282
§ 9.5 本章小结 .....	292
参考文献 .....	292
<b>第十章 缓冲区分析位置不确定性建模</b> .....	<b>293</b>
§ 10.1 引言 .....	293
§ 10.2 现有矢量缓冲区分析误差模型的回顾与分析 .....	294
§ 10.3 基于概率论的缓冲区分析不确定性模型 .....	295
§ 10.4 本章小结 .....	306
参考文献 .....	306
<b>第四篇 不确定性的可视化及元数据</b>	
<b>第十一章 不确定性的可视化</b> .....	<b>309</b>
§ 11.1 引言 .....	309
§ 11.2 误差椭圆方法 .....	310
§ 11.3 矢量箭头描述方法 .....	312
§ 11.4 灰度图方法 .....	316
§ 11.5 色彩图方法 .....	318
§ 11.6 符号方法 .....	321
§ 11.7 三维方法 .....	322
§ 11.8 动画方法 .....	324
§ 11.9 声像方法 .....	325
§ 11.10 本章小结 .....	326
参考文献 .....	327
<b>第十二章 元数据的不确定性</b> .....	<b>328</b>
§ 12.1 元数据标准的回顾与分析 .....	328
§ 12.2 不确定性元数据描述指标 .....	333
§ 12.3 误差元数据数据库系统的研发:以香港为例 .....	342
§ 12.4 本章小结 .....	350
参考文献 .....	351

## 第五篇 不确定性理论的应用

<b>第十三章 基于不确定性的空间数据挖掘</b> .....	355
§ 13.1 引言.....	355
§ 13.2 基于不确定性的空间数据挖掘概念.....	357
§ 13.3 空间数据挖掘中不确定性的本质与表现.....	360
§ 13.4 空间数据挖掘的不确定性因素.....	363
§ 13.5 空间数据挖掘不确定性的处理方法.....	364
§ 13.6 应用实例.....	366
§ 13.7 本章小结.....	368
参考文献.....	368
<b>第十四章 地籍数据的质量控制</b> .....	370
§ 14.1 地籍数据的误差.....	370
§ 14.2 地籍数据误差的处理方法.....	371
§ 14.3 地籍数据质量控制方法.....	377
§ 14.4 实例研究：以上海为例.....	379
§ 14.5 本章小结.....	384
参考文献.....	384
<b>第十五章 基于 Web Service 的 GIS 数据质量信息服务系统</b> .....	386
§ 15.1 引言.....	386
§ 15.2 基于 Web Service 的 GIS 数据质量信息服务系统设计.....	391
§ 15.3 基于 Web Service 的 GIS 数据质量信息服务系统应用.....	403
§ 15.4 本章小结.....	405
参考文献.....	406

# Contents

Foreword

Preface

## Part I Overview

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	3
1.1 Uncertainty principle and its universality .....	4
1.2 Spatial data and their uncertainties .....	7
1.3 Uncertainties in spatial analyses and their impacts .....	10
References .....	11
<b>Chapter 2 Uncertainty sources of spatial data and spatial analyses</b> .....	13
2.1 Uncertainties in the real world .....	14
2.2 Uncertainties due to human cognition .....	17
2.3 Errors introduced in the process of data capture .....	20
2.4 Uncertainties in spatial analyses and processes .....	29
2.5 Summary .....	35
References .....	35
<b>Chapter 3 Mathematical foundations</b> .....	37
3.1 Probability theory .....	38
3.2 Statistical theory .....	44
3.3 Evidence theory .....	51
3.4 Fuzzy theory .....	55
3.5 Rough set theory .....	63
3.6 Information theory and entropy .....	68
3.7 Summary .....	73
References .....	74

## Part II Modeling Uncertainties in Spatial Data

<b>Chapter 4 Modeling positional uncertainties in GIS objects</b> .....	77
4.1 Introduction .....	77
4.2 Overview of uncertainty models for spatial linear features .....	78
4.3 Definition of spatial entities in GIS .....	80
4.4 Positional error modeling for a point .....	82
4.5 Positional error modeling for a straight line .....	84

4.6	Correlated positional error modeling for a two-dimensional spatial entity	91
4.7	Positional error modeling for a curve	101
4.8	Probability distribution model for generic curve lines	110
4.9	Positional error modeling for a polygon	119
4.10	Uncertainty modeling based on graph algebra	123
4.11	Summary	134
	References	134
<b>Chapter 5</b>	<b>Modeling uncertainties in digital elevation models</b>	136
5.1	Surface modeling for a DEM	136
5.2	Error sources of a DEM	142
5.3	DEM interpolation methods and their accuracy analyses	143
5.4	Error estimation for a TIN generated from linear interpolation	158
5.5	Error estimation for a regular grid DEM generated from bicubic interpolation	165
5.6	Accuracy of the terrain description of a DEM	171
5.7	Summary	183
	References	183
<b>Chapter 6</b>	<b>Modeling thematic uncertainties in GIS data</b>	185
6.1	Introduction	185
6.2	Thematic uncertainties	186
6.3	Domain of thematic uncertainties	190
6.4	Major methods for handling thematic uncertainties	191
6.5	Disfigurement-based method for thematic error estimation	202
6.6	Summary	206
	References	207

**Part III Modeling Uncertain Relationships and Uncertainties  
in Spatial Analyses**

<b>Chapter 7</b>	<b>Modeling integrated positional and thematic uncertainties</b>	213
7.1	Introduction	213
7.2	Mathematical model for PAT uncertainties	215
7.3	Integration of remote sensing and GIS	221
7.4	Summary	228
	References	229
<b>Chapter 8</b>	<b>Modeling uncertain topological relations</b>	231
8.1	Topological relations between objects in GIS	231
8.2	Modeling topological relations in GIS	234
8.3	Extended topological relations model	242

8.4	Modeling uncertain topological relations in GIS .....	255
8.5	Summary .....	268
	References .....	268
<b>Chapter 9</b>	<b>Modeling positional uncertainties in overlay analysis .....</b>	<b>270</b>
9.1	Introduction .....	270
9.2	Review and analysis of the existing uncertainty model for vector overlay analysis .....	271
9.3	Uncertainty modeling for point features commonly existing on maps to be overlaid .....	272
9.4	Uncertainty modeling for polygons generated from the overlay analysis	282
9.5	Summary .....	292
	References .....	292
<b>Chapter 10</b>	<b>Modeling positional uncertainty in buffer analysis .....</b>	<b>293</b>
10.1	Introduction .....	293
10.2	Review and analysis of the existing error band models for vector buffer analysis .....	294
10.3	Probability-based uncertainty modeling for the buffer analysis .....	295
10.4	Summary .....	306
	References .....	306

#### **Part IV Visualization of Uncertainties and Metadata**

<b>Chapter 11</b>	<b>Uncertainty Visualization .....</b>	<b>309</b>
11.1	Introduction .....	309
11.2	Error ellipse method .....	310
11.3	Arrow-based approach .....	312
11.4	Grey value-based approach .....	316
11.5	Color-based approach .....	318
11.6	Symbol-based approach .....	321
11.7	3D-based approach .....	322
11.8	Animation method .....	324
11.9	Sound method .....	325
11.10	Summary .....	326
	References .....	327
<b>Chapter 12</b>	<b>Uncertainty metadata for spatial data .....</b>	<b>328</b>
12.1	Review and analysis of spatial metadata standards .....	328
12.2	Uncertainty description in spatial metadata .....	333
12.3	Development of an error metadata system with an example in Hong Kong .....	342

12.4 Summary .....	350
References .....	351

**Part V Applications of Uncertainty Theories**

<b>Chapter 13 Uncertainty-based spatial data mining .....</b>	<b>355</b>
13.1 Introduction .....	355
13.2 Concept of uncertainty-based spatial data mining .....	357
13.3 Essence and performance of uncertainties in spatial data mining .....	360
13.4 Uncertainty source of spatial data mining .....	363
13.5 Methods of handling uncertainties in spatial data mining .....	364
13.6 Application example .....	366
13.7 Summary .....	368
References .....	368
<b>Chapter 14 Quality control for cadastral data .....</b>	<b>370</b>
14.1 Errors in cadastral data .....	370
14.2 Methods of handling errors in cadastral data .....	371
14.3 Methods of quality control of cadastral data .....	377
14.4 A case study in Shanghai .....	379
14.5 Summary .....	384
References .....	384
<b>Chapter 15 Web service for GIS quality information .....</b>	<b>386</b>
15.1 Introduction .....	386
15.2 Design of the web service-based GIS data quality information system .....	391
15.3 Implementation of the service-based GIS data quality information system .....	403
15.4 Summary .....	405
References .....	406



# 第一篇 概 述