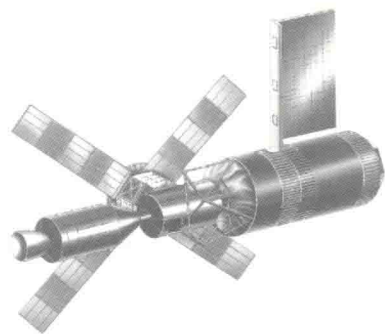




单木树冠遥感法 提取原理与技术

甄 贞 赵颖慧 编著

非外借



科学出版社

单木树冠遥感法提取 原理与技术

甄 贞 赵颖慧 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书基于国内外大量单木树冠提取的相关研究,围绕这一主题,深入浅出地介绍了利用遥感技术进行单木树冠提取的相关理论和方法。本书共分为7章,包括绪论(第1章)、遥感平台与主被动遥感技术(第2章)、单木树冠提取的遥感数据源(第3章)、单木树冠提取方法(第4章)、单木树冠提取的其他问题(第5章),以及单木树冠提取实例(第6~7章)。本书既包含单木树冠提取原理、基本方法,又包含实例型研究,实用性较强,是一本比较全面地介绍单木树冠提取原理、技术、方法和应用的学术专著。

本书主要面向进行单木树冠提取相关理论、技术及应用研究的本科生、研究生、教师及科研人员,可作为林业遥感及其相关专业学生学习和巩固专业知识的课外阅读资料,也可作为科研工作者和林业相关部门的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

单木树冠遥感法提取原理与技术/甄贞,赵颖慧编著. —北京:科学出版社,2017.5

ISBN 978-7-03-052670-0

I. ①单… II. ①甄… ②赵… III. ①林冠-单株立木测定-遥感技术 IV. S758.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第096575号

责任编辑:王玉时 文 茜 / 责任校对:王晓茜
责任印制:吴兆东 / 封面设计:迷底书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年5月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年5月第一次印刷 印张:10

字数:152 000

定价:59.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

编写人员简介

甄贞：1984年生人，博士，东北林业大学森林经理学讲师。2007年毕业于东北林业大学林学院地理信息系统专业；2010年，获得东北林业大学森林经理学硕士学位；2013年获得纽约州立大学森林资源管理学博士学位，研究方向为监测、分析与建模；同时，获得纽约州立大学环境资源工程学硕士学位，研究方向为空间信息科学与工程。2013年9月回国工作，从事单木树冠提取、空间统计模型与抽样技术的研究及教学工作，现主讲“抽样技术与建模”“遥感物理”和“地理信息科学专业英语”3门本科生课程。主持国家青年科学基金项目1项和中央高校基本科研业务费专项基金项目1项。发表英文学术论文6篇，其中以第一作者发表SCI/SSCI共5篇；发表中文学术论文9篇，其中以第一作者或通讯作者发表核心期刊论文共4篇。2015年1月至今，为SCIE收录杂志“GIScience & Remote Sensing”（影响因子：2.482）的编委会成员。

赵颖慧：1976年生人，博士、博士后，副教授，硕士研究生导师。1999年，获得东北林业大学林专业学士学位；2003年，获得东北林业大学森林经理学硕士学位；2006年，获得东北林业大学森林经理学博士学位，研究方向为数字林业。同年，任教于东北林业大学林学院，主要研究方向为数字林业、林业遥感与地理信息系统。主讲“地理信息系统实验”“GIS设计与开发”“网络GIS”3门本科生课程和“GIS开发”1门博士生课程，多次获得东北林业大学教学质量优秀二等奖。工作期间，主持国家级科研项目5项、地市级科研项目3项，参加省部级科研项目10余项；曾获教育部科技进步奖二等奖2项，获得计算机软件著作权4项，在国内外学术期刊上发表论文10余篇。2010年，主编教材《地理信息系统实验教程》，共计387千字。



前 言

单木树冠提取是精准林业的重要组成部分，能否准确提取树冠，直接影响冠幅和胸径、郁闭度、冠层结构、林分高与生物量、树种分类以及林分生长量等单木及森林参数估测的准确性。利用遥感技术进行单木树冠提取对森林调查和精准林业的进一步发展有着至关重要的科学研究意义。近年来，随着遥感平台和数据源的不断丰富，寻找一种客观、高效、准确的单木树冠提取方法也受到了林业、遥感与地理信息科学及计算机视觉等不同领域学者的高度关注。

基于遥感技术进行单木树冠提取的精度不仅仅依赖提取方法，很大程度上还取决于使用数据的质量、特点和森林类型。一个简单的、可重复的精度评价过程同样至关重要。由于林地环境复杂，遥感数据多样，不同的方法通常具有不同的工作特性和适应情况。国内大多数的单木树冠提取研究还是集中在比较简单、规则或郁闭度不高的林分中，应用范围窄，自动化程度不高，技术手段不完善，和国外相比仍具有较大差距。随着遥感数据和技术手段的日新月异，单木树冠提取及其在森林调查中的应用面临着前所未有的机遇和挑战。我国应该抓住机遇，在现有理论与实践的基础上加大这项基础应用的研究力度，缩短国内外研究差距，将单木树冠提取技术应用到现代化的森林经理实践中。

根据单木树冠提取的主要内容和特点，本书共分为7章。第1章为绪论，介绍了单木树冠提取的背景知识；第2章为遥感平台与主被动遥感技术，介绍了5个遥感平台和主被动遥感的基本技术原理；第3章为单木树冠提取的遥感数据源，介绍了被动、主动以及主被动数据相结合进行的单木树冠提取；第4章为单木树冠提取方法，介绍了单木树冠提取方法的发展、基于主被动遥感数据的单木树冠提取方法，着重介绍了基于激光雷达（LiDAR）数据的单木树冠提

取方法；第5章为单木树冠提取的其他问题，包括在不同森林类型下的单木树冠探测与勾绘（ITCD）研究、精度检验方法、存在的问题及展望；第6~7章为单木树冠提取实例，包括基于标记控制区域生长法（第6章）和基于Agent区域生长法（第7章）。本书的撰写工作由甄贞组织，全书由甄贞和赵颖慧统稿并定稿，研究生李响、郝元朔等进行了图表和书稿文字的整理工作。

本书得到了国家自然科学基金资助项目“基于多元遥感数据及树木竞争机制的三维单木树冠提取”（31400491）和中央高校基本科研业务费专项资金项目“基于多源遥感数据和旋转森林的树种识别研究”（2572016CA01）的资助。本书也得到了东北林业大学林学院院长李凤日教授、森林经理学科负责人范文义教授及首都师范大学柯樱海副教授对部分内容的指导，在此表示感谢！

由于编著者水平有限，书中难免出现不足之处，敬请读者批评指正。

编著者

2017年1月

目 录

CONTENTS



前言

第1章 绪论 / 1

1.1 引言 / 2

1.2 森林调查与精准林业 / 3

1.2.1 森林调查 / 3

1.2.2 精准林业 / 4

1.3 单木树冠提取的意义 / 5

1.4 本书结构 / 7

第2章 遥感平台与主被动遥感技术 / 9

2.1 遥感平台 / 10

2.1.1 星载平台 / 11

2.1.2 机载平台 / 12

2.1.3 无人机系统平台 / 12

2.1.4 车载平台 / 13

2.1.5 静态平台 / 14

2.2 被动遥感技术 / 15

2.3 主动遥感技术 / 16

2.3.1 LiDAR技术原理简介 / 16

2.3.2 Radar技术原理简介 / 19

第3章 单木树冠提取的遥感数据源 / 21

3.1 被动遥感数据源的应用 / 22

3.1.1 航空像片的应用 / 22

3.1.2 高空间分辨率卫星影像的应用 / 24

3.2 主动遥感数据源的应用 / 25

3.2.1 机载激光雷达的应用 / 25

3.2.2 地基及车载激光雷达的应用 / 26

3.2.3 其他主动遥感数据源的应用 / 28

3.3 主被动遥感数据的结合应用 / 28

3.4 发展动态分析 / 30

第4章 单木树冠提取方法 / 33

4.1 单木树冠提取方法的发展 / 34

4.2 基于被动遥感数据的ITCD方法 / 34

4.2.1 图像预处理与增强 / 35

4.2.2 单木位置探测 / 38

4.2.3 树冠边界勾绘 / 41

4.3 基于LiDAR数据的ITCD方法 / 44

4.3.1 基于栅格的方法 / 46

4.3.2 基于点云的方法 / 48

4.3.3 栅格、点云与先验信息相结合的方法 / 49

4.3.4 树木形态重建方法 / 50

第5章 单木树冠提取的其他问题 / 53

5.1 不同森林类型下的ITCD研究 / 54

5.2 ITCD的精度检验方法 / 56

5.3 存在的问题及展望 / 60

5.3.1 ITCD研究现状总结 / 60

5.3.2 存在的问题 / 63

5.3.3 展望 / 64

第6章 ITCD 实例：基于标记控制区域生长法的 单木树冠提取 / 67

6.1 研究背景与目标 / 68

6.2 研究区域概况与数据来源 / 70

6.2.1 研究区域概况 / 70

6.2.2 遥感数据来源 / 71

6.2.3 参考数据来源 / 72

6.3 研究方法 / 73

6.3.1 研究方法总述 / 73

6.3.2 数据预处理 / 73

6.3.3 单木位置探测 / 75

6.3.4 数据后处理 / 76

6.3.5 树冠边界勾绘 / 78

6.3.6 精度验证 / 86

6.4 研究结果 / 90

6.4.1 ALS与正射影像相结合对单木位置探测的影响 / 90

6.4.2 生长顺序对树冠边界勾绘的影响 / 92

6.5 讨论 / 95

6.6 结论 / 98

第7章 ITCD实例：基于Agent区域生长法的 单木树冠提取 / 101

- 7.1 研究背景与目标 / 102
- 7.2 研究区域概况与数据来源 / 106
 - 7.2.1 研究区域概况 / 106
 - 7.2.2 遥感数据 / 107
 - 7.2.3 参考数据 / 108
- 7.3 研究方法 / 109
 - 7.3.1 研究方法总述 / 109
 - 7.3.2 数据预处理 / 109
 - 7.3.3 树冠顶点的采集 / 110
 - 7.3.4 树冠边界勾绘 / 110
 - 7.3.5 精度检验 / 117
 - 7.3.6 竞争效应研究 / 119
- 7.4 研究结果 / 120
 - 7.4.1 区域生长法中应用的回归模型 / 120
 - 7.4.2 不同区域生长法的定性比较 / 121
 - 7.4.3 不同区域生长法的定量比较 / 123
 - 7.4.4 相对间距对不同区域生长法的影响 / 127
- 7.5 讨论 / 129
- 7.6 结论 / 133

主要参考文献 / 134

第1章

绪 论

1.1 引言

森林是地球生物圈的重要组成部分,森林资源是地球上最宝贵的自然资源之一,它能够有效地起到防风固沙、净化空气、气候调节、涵养水源等生态调节作用,同时也是多种植被的生长地和多种动物的栖息地,为保持生物多样性提供了必要条件,有效地维护了地球生态系统的平衡。森林资源的变化趋势不仅会影响生态系统的健康,而且还会间接影响到社会经济的发展。近年来,随着人们环保意识的不断增强,定期对森林资源信息进行系统的收集、整理和对比,从而进行森林资源的动态监测,对森林资源的相关信息预测变得十分必要。

森林资源调查 (forest resource inventory) 也称为森林调查 (forest inventory), 是对林业用地进行自然属性和非自然属性的调查, 主要有森林资源状况、森林经营历史、森林经营条件及森林未来发展等各个方面的调查 (孙华, 2006)。森林资源调查为编制林业区划、规划、计划和编制森林经营方案, 建立森林资源档案, 并为确定森林利用方案和森林采伐限额提供基础资料及依据。因此, 森林资源调查工作已经成为各级林业主管部门实现森林经营管理现代化的重要措施 (周宇飞, 2007)。传统的林业调查主要是通过野外实地测量来获取树高、胸径 (diameter at breast height, DBH)、冠幅等林木的基本参数, 耗费大量的人力、物力, 效率较低。当面临大规模的林业调查时, 会有很多不便。从20世纪中期开始, 航空像片开始应用于森林资源调查与分析 (Alemdag, 1986; Pitt & Glover, 1993)。航空像片具有信息丰富直观、信息提取快捷、外业工作量小、工期短等优点, 被广泛应用到森林资源调查中, 为森林资源调查开辟了新的途径。利用摄影测量技术制作的正摄影像图, 由于保留了航空像片丰富的影像信息同时又具有地形图的特征, 至今仍然是森林资源调查内外业的主要参考资料。20世纪60年代, 在摄影测量学、现代物理学 (如光学技术、红外技术、微波技术、雷达技术、激光技术等)、电子计算机技术、数学方法和地学的基础上, 遥感技术得以提出, 并迅速发展成一门新兴的综合探测技术 (孙华, 2006)。在过去的几十年中, 传感器及遥感数据日新月异。例如, 中分辨率的遥感影像 (如MODIS

和 Landsat TM) 为大尺度森林资源监测提供了可能; 高空间分辨率遥感影像 (如 IKONOS、QuickBird 和 WorldView-2) 提供了更准确的林分及单木尺度测量数据, 使得精准林业 (precision forestry) 的提出和发展成为可能 (Heinzel & Koch, 2012); 激光雷达数据的应用为研究森林结构提供了可靠的三维数据源。

随着现代遥感技术的不断深入, 图像分析方法早已超越了仅基于航空像片的分析方法。森林资源调查也开始逐渐从传统的实地调查和航片解译转向从航空像片、激光雷达、高空间分辨率及高光谱等多源遥感数据融合技术中获取森林参数的技术阶段。丰富的多源遥感数据不仅能够提供传统航空像片的二维空间信息, 而且能够提供三维空间信息及多维光谱信息, 能够对森林资源状况及其动态变化情况进行全面、准确、快速、有效的掌握和分析。利用多源遥感数据建立森林资源清查遥感影像库并提取森林专题信息, 已经成为现代森林资源调查的有效手段和发展趋势。

1.2 森林调查与精准林业

1.2.1 森林调查

森林调查是森林经理最基础、最重要的组成部分, 它是指在有限的时间和经费支持下, 确定林分中活立木的蓄积量和生长量 (Avery & Burkhardt, 2002)。森林调查起初是耗时费力的实地调查, 通过样地调查获取位置、树种、胸径、树高和冠幅等数据进而估算林分水平的参数。早期的森林调查开始于 1930 年左右, 主要目标仅仅是估测蓄积量和生长量; 20 世纪中叶, 航空像片的应用有效地提高了森林调查的作业效率, 给森林调查带来了新的机遇 (Alemdag, 1986; Avery & Burkhardt, 2002; Pitt & Glover, 1993)。当今的森林调查已经扩展到用来评价多种生态问题。例如, 评价野生动物资源、娱乐设施、水域管理以及其他多用途林业等 (Hyypä et al., 2008)。但是, 无论它的外延如何扩展, 森林调查的工作重心仍然集中在对单木、样地、林分和大区域尺度上蓄积量和生长量的测量上 (Hyypä et al., 2008)。

世界上许多发达国家已先后进行了3次以10年为间隔期的连续清查,为编制国家级或大地区的林业发展规划提供了资源信息。日本经过3次全国森林资源调查,实行了全国范围森林资源的网络管理(张黎莉,2011)。美国农业部林业局(The United States Department of Agriculture Forest Service, USDA FS)负责的森林调查与分析(Forest Inventory and Analysis, FIA)项目评价了全美国林业和木材资源。从1999年开始,FIA项目从周期性调查改为对每个州的资源进行年评价机制。整个调查分为三个阶段:①林地与非林地的划分;②野外固定样地的建立和森林生态数据的收集;③在第二阶段所建立样地中抽取子样本,对单木进行测量(Ke, 2009)。根据调查的目的和范围,我国的森林调查分为三类:以全国(大区或省)为对象的森林调查(“一类调查”);以森林资源经营管理的企事业单位和行政县、乡(镇)为对象的森林调查(“二类调查”);为企业生产作业设计而进行的森林调查(“三类调查”)(张黎莉,2011)。面对繁重的调查任务,森林调查已经不能仅依靠耗时费力的人工野外调查和单一的航空像片解译进行。随着遥感及计算机技术的迅速发展,人们开始利用中等空间分辨率卫星影像(如MODIS和Landsat TM)在全国尺度上对森林资源进行监测(即大面积调查);同时也利用高空间分辨率卫星影像(如IKONOS、QuickBird、GeoEye-1和WorldView-2)在林分尺度和单木尺度上对森林参数进行估测(即小面积调查)。我国从20世纪50年代起开始开展森林调查工作,应用抽样、电子计算机、林业遥感等技术,进行了全国各大林区的森林经理调查,建立了森林调查的三级体系,森林资源数据库自动化体系也在逐步建立中(张黎莉,2011)。近年来,随着主被动遥感数据源的不断丰富,使用的计算机技术也远远超过早期基于航空像片的图像处理技术,这无疑给精确、自动、快速地获取森林参数带来了前所未有的发展机遇。

1.2.2 精准林业

20世纪80年代,在精准农业(precision agriculture)的基础上,精准林业的构想开始提出,90年代逐步形成。随着我国精准农业试点工作的逐步推进,我国的精准林业也逐渐发展,但尚处于学术探讨和某些环节技术问题的实验阶段。2001年,北京市精准林业示范基地的建立标志着我国精准林业的研究已由零散

的、个别的研究进入了系统集成与平台建立阶段(冯仲科等, 2004)。精准林业是指尽可能地采用现代高新科学技术[如林木遗传工程、3S技术(遥感技术, RS; 地理信息系统, GIS; 全球定位系统, GPS)、数字通信、林业机械自动化、传感器技术进行森林土壤类型分析、林地适应性评价、立地类型与立地条件分析、森林生态环境模拟等]建立一体化、智能化、数字化的现代林业技术体系, 进而使森林最大限度地发挥生态、经济、社会效益, 实现森林可持续经营和区域可持续发展(聂玉藻等, 2002)。精准林业的技术核心在于森林生长实现精确的定量估测和监测, 克服传统粗放林业体系中各种不可定量因素所带来的弊端, 实现林业生产、监测中的“精”和管理控制中的“准”(车腾腾等, 2010; 冯仲科等, 2004)。具体来说, 就是要求通过森林、景观、林分和测树因子级的空间、数量和质量高精度的信息, 获得森林及其环境的空间结构特征以及个体之间的时空差异性(冯仲科等, 2004)。因此, 现代遥感技术作为精准林业的核心技术之一, 在森林资源与环境现状调查、森林资源与环境动态监测和评价、森林健康监测和预测预报、森林数量估测、森林空间结构分析等方面均发挥着重要作用。而单木测树因子(包括树高、胸径、冠幅、树冠投影面积、树冠体积等)的精准测量是实现精准林业的必要手段。树冠空间结构本身的不规则性和复杂性, 以及传统手工测量的粗放性, 导致以往单木树冠因子测量的精度和效率都不理想, 是困扰林业工作者的难题。单木树冠提取技术的出现不仅使单木树冠的获取更为客观和高效, 也为精准林业的进一步发展奠定了基础。

1.3 单木树冠提取的意义

森林经营决策过程需要描述从单木到不同尺度区域的树木生长情况。树冠特征是单木测量中最重要的组成部分之一。树冠测量可以用来预测对培育措施(如皆伐和施肥)的反馈, 也可以通过林分生长与收获模型来估测树木生长量。在给定树种和年龄的条件下, 拥有较大树冠的树木通常有更高的生长速率(Avery & Burkhart, 2002)。传统的外业测量不仅作业强度大、效率低, 而且主观因素的依赖性大, 测量精度难以保证。寻找一种客观、高效、准确的单木树冠

提取方法不仅是林业学者关心的问题，也受到了遥感与地理信息科学及计算机视觉学者的高度关注。

随着遥感和计算机技术的迅速发展，应用遥感影像对单木树冠进行探测和提取的半自动和全自动算法在获得即时、准确、完整的森林信息方面扮演着重要角色。精确提取单木树冠是精准林业的重要组成部分，能否准确提取树冠直接影响冠幅和胸径（Zhang et al., 2010）、郁闭度（Bai et al., 2005）、冠层结构（Harding et al., 2001）、林分高与生物量（Popescu, 2007）、树种分类（Heinzel & Koch, 2012）及林分生长量（Yu et al., 2004）等单木及森林参数估测的准确性。同时，树冠也是树木光合作用的主要场所，对树冠做出准确的判断，可以很好地用来监测树木的生长、预防树木病虫害、模拟能量传输等，对研究森林的生长情况和动态变化有重要的意义。单木树冠的精确提取能够使森林参数细化到每株树木，森林监测以单木为对象开展，森林经营管理将不再是一个粗放的概念，而是以实时高精度遥感信息提取为手段的精准集约化管理（刘晓双等，2010）。因此，利用遥感数据进行单木树冠提取对森林调查和精准林业的进一步发展有着至关重要的科学研究意义。

研究人员在应用单木树冠提取技术解决不同问题时使用了许多不同的术语，如单木个数估计（stem number estimation）、单木探测（single tree detection）、自动树木识别（automatic tree recognition）等。本书提到的单木树冠提取指的是单木树冠探测与勾绘（individual tree crown detection and delineation, ITCD），即识别单木的一般过程，包括树顶或树干探测和树冠边界勾绘过程。大多数半自动或自动的单木树冠提取算法基于以下假设进行：树冠顶点位于（辐射亮度或高度的）局部最大值处，辐射亮度或高度值沿树冠边缘方向逐渐减小，在树冠边界处达到最小值。因此，半自动或自动的单木树冠提取算法一般分为两种思路：一种是先进行树冠顶点或单木位置的探测，在此基础上进行树冠边界的勾绘，确定树冠的轮廓；另一种是基于树冠的光学特性、颜色、纹理特征，利用统计学方法及人机交互作业的方法直接描绘出单木树冠的轮廓。

由于森林自身的复杂性，单木树冠的提取仍处于研究阶段，这些研究中普遍存在三方面问题：①自动化程度低，很大程度上要依靠人工的目视解译，影响树冠提取效率；②在郁闭度高的密林中，由于树冠之间相接、重叠，使得被压木和幼树被

冠层遮挡,导致单木树冠提取的精度降低;③许多研究采用的方法只适用于特定的树种,不具有普遍的适用性。怎样更加充分利用丰富的遥感数据来改善单木树冠提取的精度、提高自动化的程度,是现阶段单木树冠提取研究中需要解决的问题。

1.4 本书结构

根据单木树冠提取的主要内容和特点,作者设计本书结构如图1.1所示。第1章为绪论,介绍了单木树冠提取的背景知识;第2章为遥感平台与主

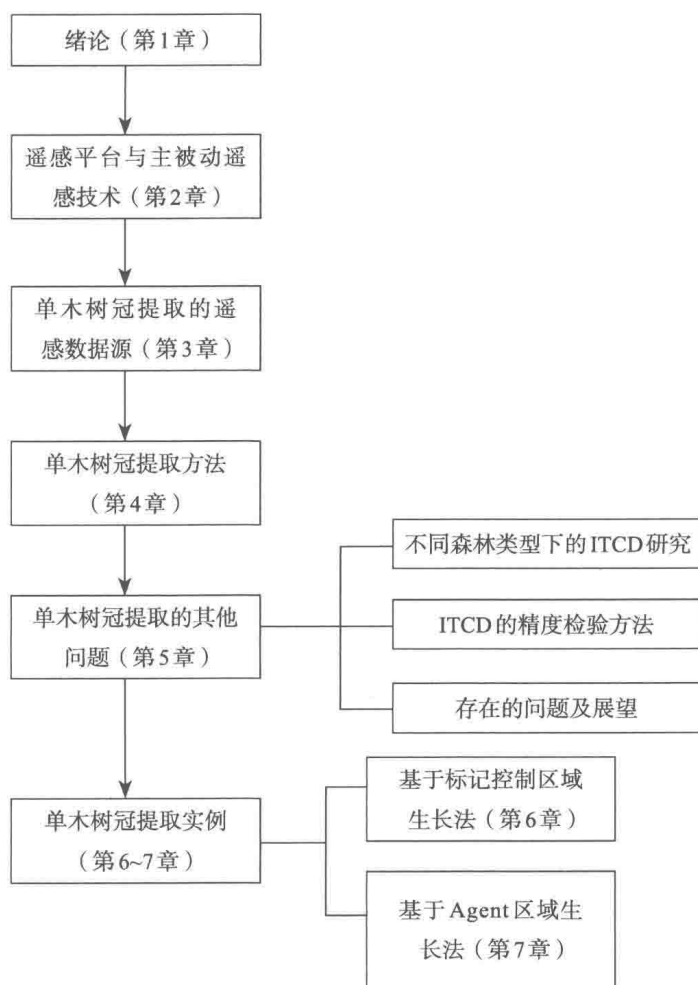


图1.1 本书的主要内容架构