

清华大学学术专著

---

# 序列运算理论 及其应用

---

康重庆 夏 清 相年德 白利超 著

---



清华大学出版社



清华大学学术专著

---

# 序列运算理论 及其应用

---

康重庆 夏 清 相年德 白利超 著

---



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

北京

## 内 容 简 介

序列运算理论是一个崭新的基础性数学理论,能够用于求解各种复杂的概率性问题。本书系统地建立了具有普遍指导意义的序列运算理论,并以其为基础,研究了电力系统中两个重要的不确定性问题——电力系统随机生产模拟的新方法与电力市场中的不确定电价分析方法。本书的随机生产模拟方法将不同可靠性要求的负荷区别对待,并可适用于多节点电力系统。电力市场的不确定电价分析综合考虑了市场中的各种不确定因素,包括燃料价格、机组报价、强迫停运与负荷预测等。本书各部分均有详细算例可供参考。

本书可供电力部门从事电力规划、调度、计划和电力市场等工作的专业科技人员、管理人员以及高等院校有关专业的师生阅读参考,也可作为电力系统和电力市场方面的研究生教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

序列运算理论及其应用/康重庆等著. —北京:清华大学出版社,2003

(清华大学学术专著)

ISBN 7-302-06746-5

I. 序… II. 康… III. ①序列—运算方式 ②序列—运算方式—应用—电力系统  
IV. ①O17 ②TM71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 046111 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 陈国新

文稿编辑: 赵从棉

印 刷 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 165×240 印张: 11.5 插页: 1 字数: 210 千字

版 次: 2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06746-5/TM·41

印 数: 1~2500

定 价: 38.00 元

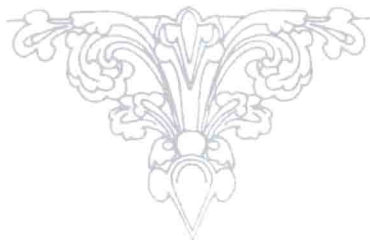


## 作者简介

康重庆 男, 1969年11月生, 1997年获清华大学博士学位, 现任清华大学电机系副教授。

主要从事电力市场、电力系统规划、负荷预测、电力经济与信息的科研和教学工作。发表论文50余篇, 被SCI、EI等收录30篇次。编写清华大学工程硕士研究生讲义2部, 由中国电力出版社出版合著《电力市场理论研究与应用》、《电力市场技术支持系统设计与关键技术研究》。

作为项目负责人承担国家自然科学基金课题和横向课题多项, 作为主要完成人承担国家重点基础研究基金973子课题、教育部博士点基金各1项。所开发的电力市场中长期需求分析与预测软件已经在全国13个网、省局共140多个地区供电局投入运行, 效益显著, 2002年获得教育部科技进步二等奖。



## **Abstract**

Sequence Operation Theory is a novel foundational mathematic theory which can be utilized to solve probabilistic problems. This book establishes Sequence Operation Theory and then introduces its two applications in power system. As the first application, a new approach of power system probabilistic production simulation is established in which consumers with different reliability requirements can be treated respectively as well as resources' economic performances. Furthermore, it can be utilized to simulate the multi-area power systems. In another application, an algorithm of price uncertainty analysis in electricity market is proposed in which most uncertain factors, such as stochastic fuel price and units' bids, forced outage rates and uncertain load forecasting, are taken into account comprehensively. For reading convenience, a lot of samples are given in this book to illustrate the corresponding contents.

This book is adequate for engineers and managers in the department of power system planning, design, operation and electricity market as well as relevant undergraduates, graduates and university teachers. Also it can be selected as teaching material of graduates who major in power system or electricity market.

# 序

电力系统的许多基础问题正在不断被人们认识和研究,而电力系统所具有的特殊性质也逐一被人们所了解。事实上,我们可以说,电力系统是一个非线性的、充满随机性与不确定性的复杂系统,在某些情况下甚至可能出现无序性。

对于非线性问题,已经成功发展了电力系统的非线性控制理论;电力系统中可能出现的混沌现象(无序性),也已经引起了许多学者的兴趣;而对于随机性与不确定性问题,必须运用概率论与统计学的思想和方法进行深入研究并加以解决。我们高兴地看到,本书在处理电力系统的不确定性问题方面进行了有益的探索,取得了可喜的成果。

随着现代电力系统规模的扩大,其随机变量集合的维数也愈益庞大。若直接使用现成的概率论的方法来分析数量如此巨大的随机变量群及其之间的相互作用问题,其计算量往往大到难以接受的程度。面对这一难题,目前广大的电力科技工作者不得不对所研究的问题进行各种各样的简化处理,但其结果均不甚理想。

在国家重点基础研究基金和国家自然科学基金的资助下,该书作者另辟蹊径,创造性地提出了序列运算理论这一新的数学工具,并具有示范性地将其应用于电力系统有关问题的研究中。该理论内容新颖、体系严谨,有利于处理各种复杂的随机性问题。可以说,该序列运算理论不仅借鉴、继承了概率论中的相关内容,而且有所发展和创新,从而从某一方面丰富了现有概率论的内容。

更可喜的是,该书第一作者康重庆是一名我国自己培养的优秀青年学者。他在清华大学获得了学士、硕士和博士学位,现仍在母校的教学、科研岗位上勤奋工作。这本在有关数学分支理论发展及应用方面皆有所贡献的专著,是他具有的基础、聪睿和勤勉的体现。

该书的绝大部分内容都是作者的研究成果,内容丰富、结构清晰、自成体系。本书的出版也给人一种启示:在实际工程技术问题中蕴含着大量的基础理论问

题,一个有志的科技工作者,会注重从中提炼出基础科学问题并经过潜心研究加以解决。这就是创新特别是原发性创新的源泉。本书为此提供了良好的范例。

借此机会,再次向本书作者表示真诚的祝贺与热切的期望,期待他们取得新的成绩。

卢 强

2003 年 1 月于清华园

# 前言

本书的主要目的是从概率分析的角度研究电力系统的不确定性问题。传统的电力系统规划中就已经有了随机生产模拟的概念,许多学者对此提出了多种分析方法。20世纪90年代前后出现了综合资源规划,它是对传统电力系统规划的继承和发展,因此,传统规划中许多成熟的理论与方法可继续在综合资源规划中发挥作用。同时,综合资源规划中问题的某些特点,又使得其随机生产模拟问题不能用传统的方法解决。随着电力市场的兴起,在电力系统中又出现了许多不确定性新问题。

为解决电力系统面临的不确定性问题,本书从数学的角度建立了一个崭新的序列运算理论,它具有普遍的指导意义。本书探索了此理论在两个方面的应用:一是在电力系统随机生产模拟中,应用序列运算理论,提出了一个崭新而完整的适合于综合资源规划和电力市场要求的运行模拟新方法,可以解决将经济性原则与可靠性原则相结合的多节点、多负荷类别系统运行模拟的难题;二是在电力市场分析中,应用序列运算理论,提出电力市场交易价格分析的模型与方法,分析电价的发展趋势,给出其概率分布,为电力市场的平稳运行提供了重要参考。本书还进一步分析了序列运算理论在电力系统以外的其他领域的应用前景。

在本书的写作过程中,作者试图突出“精、新、简、实”的特点。在叙述方法上力求理论与工程实际相结合,而在证明推导过程中则简明扼要,不过分追求纯数学意义上的严谨性,以便于只具有工科数学基础的读者也能够理解本书的基本内容。此外,本书在内容安排上尽可能做到体系完备,使得具有高等数学、概率论基础的读者,就能够理解本书的内容。

本书作者自20世纪90年代初以来一直从事电力系统规划的研究,90年代中期以后的研究重点转移到了电力市场方面。在长期的科学研究中,作者提取了这些领域的共性问题,本书是作者对其教学和科研经验的总结,大部分内容是作者的科研成果,其中一些内容已在国内外刊物上发表。本书的基本思路源于第一作者的博士学位论文。在该论文中,初步建立了序列运算理论。而在后续的研究中,作者得到了国家重点基础研究基金(No. G1998020311)、国家自然科

学基金(No. 50007005)的支持,序列运算理论被进一步充实和完善,并且在应用方面取得了很大的进展,因此才形成了目前的书稿。

中国科学院院士卢强教授在百忙之中审阅了全书的初稿,并提出许多指导性意见;清华大学杨福生教授仔细审阅了本书第2、3章,并提出许多宝贵意见;胡广书教授对第2、3章内容及发表的相应论文的表述提出许多建设性的建议;沈瑜博士及江健健、黎灿兵、赵傲、彭涛等博士研究生分别校阅了全书的若干章节,并提出了许多有益的建议。在此,一并表示衷心的感谢。

作者由衷地感谢清华大学张伯明教授和孙元章教授,他们的热忱推荐使得本书得以在清华大学出版社出版,并得到清华大学学术出版基金的支持。清华大学电机系和电力系统研究所为本书的撰写提供了良好的条件,作者谨借此机会一并表达深切的谢意。

在本书的编写过程中,我们虽然对体系的安排、素材的选取、文字的叙述都尽了力,但是,由于作者水平所限,整个内容中可能还会存在不妥之处,我们诚恳地期待着读者对本书提出指导、批评和指正。

作 者

2002年12月8日于清华园

# 目录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                 | 1  |
| 1.1 电力系统研究中的概率性问题        | 1  |
| 1.2 解决概率性问题的传统工具——概率论    | 3  |
| 1.3 电力系统的新发展与新要求         | 3  |
| 1.4 序列运算理论的提出及其适用范围      | 4  |
| 1.5 本书结构                 | 5  |
| 参考文献                     | 5  |
| 第 2 章 序列运算的基本理论          | 7  |
| 2.1 什么是序列                | 7  |
| 2.1.1 信号处理中的离散时间序列       | 7  |
| 2.1.2 本书的序列概念            | 8  |
| 2.1.3 序列的表示方法            | 9  |
| 2.2 序列的四种基本运算            | 9  |
| 2.2.1 卷积运算               | 10 |
| 2.2.2 卷积运算               | 11 |
| 2.2.3 交积运算               | 18 |
| 2.2.4 并积运算               | 20 |
| 2.2.5 基本序列运算的小结          | 21 |
| 2.3 特殊的序列运算——合并运算        | 22 |
| 2.3.1 定义                 | 22 |
| 2.3.2 合并运算的性质            | 23 |
| 2.4 特殊的序列——单位序列、零序列与无穷序列 | 24 |
| 2.4.1 定义                 | 24 |
| 2.4.2 单位序列的运算性质          | 25 |
| 2.4.3 零序列的派生运算           | 28 |
| 2.4.4 无穷序列的派生运算          | 29 |

|            |                               |           |
|------------|-------------------------------|-----------|
| 2.4.5      | 无穷序列与零序列之间的相互运算 .....         | 30        |
| 2.5        | 序列的原点矩与投影度 .....              | 30        |
| 2.5.1      | 序列的原点矩 .....                  | 30        |
| 2.5.2      | 序列的投影度 .....                  | 33        |
| 2.5.3      | 示例 .....                      | 34        |
| 2.6        | 序列运算理论的进一步分析 .....            | 35        |
| 2.6.1      | 从群论角度对序列运算的再认识 .....          | 35        |
| 2.6.2      | 关于序列运算的逆运算问题的讨论 .....         | 37        |
| 2.7        | 小结 .....                      | 38        |
|            | 参考文献 .....                    | 39        |
| <b>第3章</b> | <b>概率性序列的运算及其状态空间分析 .....</b> | <b>40</b> |
| 3.1        | 概率性序列及其物理含义 .....             | 40        |
| 3.2        | 概率性序列派生运算的状态空间描述 .....        | 41        |
| 3.3        | 四种典型子空间及其性质 .....             | 43        |
| 3.3.1      | 卷和子空间 .....                   | 43        |
| 3.3.2      | 卷差子空间 .....                   | 44        |
| 3.3.3      | 交积子空间 .....                   | 44        |
| 3.3.4      | 并积子空间 .....                   | 45        |
| 3.3.5      | 概率性序列的性质 .....                | 46        |
| 3.4        | 零序列、无穷序列与概率性序列的运算性质 .....     | 47        |
| 3.4.1      | 零序列与其他概率性序列之间的运算性质 .....      | 47        |
| 3.4.2      | 无穷序列与其他概率性序列之间的运算性质 .....     | 48        |
| 3.5        | 概率性序列参与四种序列运算的物理意义 .....      | 48        |
| 3.5.1      | 概率性序列参与卷和运算的物理意义 .....        | 49        |
| 3.5.2      | 概率性序列参与交积运算的物理意义 .....        | 50        |
| 3.5.3      | 概率性序列参与卷差运算的物理意义 .....        | 50        |
| 3.5.4      | 概率性序列参与并积运算的物理意义 .....        | 51        |
| 3.6        | 概率性序列的期望值理论 .....             | 52        |
| 3.6.1      | 期望值的基本概念 .....                | 52        |
| 3.6.2      | 期望值的性质 .....                  | 53        |
| 3.6.3      | 示例 .....                      | 56        |

|                  |    |
|------------------|----|
| 3.7 部分概率序列 ..... | 57 |
| 3.8 小结 .....     | 59 |
| 参考文献 .....       | 60 |

#### 第4章 序列运算理论在规划领域中的应用——电力系统

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 随机生产模拟 .....                   | 61 |
| 4.1 序列运算理论的应用背景 .....          | 61 |
| 4.1.1 概述 .....                 | 61 |
| 4.1.2 生产模拟的研究现状 .....          | 62 |
| 4.1.3 新形势对生产模拟方法的要求 .....      | 62 |
| 4.1.4 解决方案 .....               | 63 |
| 4.2 基本概念与定义 .....              | 64 |
| 4.2.1 模拟系统的描述 .....            | 64 |
| 4.2.2 基本定义 .....               | 65 |
| 4.3 单节点系统随机生产模拟 .....          | 68 |
| 4.3.1 本次消耗裕度的概率分布 .....        | 69 |
| 4.3.2 新的剩余可用裕度的概率分布 .....      | 69 |
| 4.3.3 累积消耗裕度的概率分布 .....        | 70 |
| 4.3.4 各期望值之间的相互关系及性质 .....     | 72 |
| 4.4 多节点系统随机生产模拟 .....          | 74 |
| 4.4.1 本次消耗裕度的概率分布 .....        | 75 |
| 4.4.2 单向元件剩余裕度的概率分布 .....      | 76 |
| 4.4.3 单向元件累积消耗裕度的概率分布 .....    | 78 |
| 4.4.4 双向元件正反向累积消耗裕度的概率分布 ..... | 79 |
| 4.4.5 双向元件正反向剩余裕度概率分布 .....    | 80 |
| 4.4.6 双向元件的期望值的性质 .....        | 81 |
| 4.5 结合经济性与可靠性的随机生产模拟算法 .....   | 83 |
| 4.5.1 算法概述 .....               | 83 |
| 4.5.2 算法流程 .....               | 85 |
| 4.6 随机生产模拟有关结论性指标的计算 .....     | 87 |
| 4.6.1 单时段指标的计算 .....           | 87 |
| 4.6.2 多时段指标的计算 .....           | 89 |
| 4.7 算法的实施 .....                | 90 |
| 4.7.1 算法的数据存储和计算技巧 .....       | 90 |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 4.7.2 本书算法对某些已有方法与结论的分析 .....             | 91         |
| 4.8 应用研究 .....                            | 92         |
| 4.8.1 单节点系统 .....                         | 93         |
| 4.8.2 多节点系统 .....                         | 95         |
| 4.9 小结 .....                              | 97         |
| 参考文献 .....                                | 98         |
| <b>第5章 综合资源规划中的供应侧分析 .....</b>            | <b>100</b> |
| 5.1 引言 .....                              | 100        |
| 5.2 多区域多负荷类别互联系统检修计划安排 .....              | 101        |
| 5.2.1 检修安排的原则与基本思路 .....                  | 101        |
| 5.2.2 数学模型 .....                          | 102        |
| 5.2.3 检修问题的遗传算法求解 .....                   | 102        |
| 5.2.4 研究算例 .....                          | 103        |
| 5.3 基于可靠性价值原理的系统最佳容量设计及其敏感性分析 .....       | 106        |
| 5.3.1 全社会成本的构成 .....                      | 106        |
| 5.3.2 可靠性和经济性的关系 .....                    | 107        |
| 5.3.3 算法实现及实例研究 .....                     | 108        |
| 5.4 小结 .....                              | 112        |
| 参考文献 .....                                | 112        |
| <b>第6章 序列运算理论在电力市场中的应用——不确定电价分析 .....</b> | <b>115</b> |
| 6.1 电力市场及电力市场中的电价 .....                   | 115        |
| 6.1.1 电力市场简介 .....                        | 115        |
| 6.1.2 电力市场中的电价 .....                      | 116        |
| 6.1.3 电价的经济机理分析 .....                     | 116        |
| 6.2 电力市场中电价的不确定性 .....                    | 118        |
| 6.2.1 电价的不确定性 .....                       | 118        |
| 6.2.2 机组报价的数据形式及其概率分布 .....               | 119        |
| 6.3 系统边际电价的不确定性分析 .....                   | 120        |
| 6.3.1 系统中机组的分类 .....                      | 120        |
| 6.3.2 离散化过程与系统期望边际电价 .....                | 120        |
| 6.4 算法分析 .....                            | 122        |
| 6.4.1 拟边际内机组的分析 .....                     | 122        |

|            |                      |            |
|------------|----------------------|------------|
| 6.4.2      | 拟边际机组                | 124        |
| 6.4.3      | 区段化算法                | 124        |
| 6.4.4      | 系统边际电价状况序列的生成        | 125        |
| 6.4.5      | 拟边际机组不惟一时的分析         | 125        |
| 6.4.6      | 结合负荷预测结果的不确定性电价分析    | 126        |
| 6.5        | 实例分析                 | 128        |
| 6.5.1      | 系统构成                 | 128        |
| 6.5.2      | 离散化过程                | 129        |
| 6.5.3      | 不确定电价的数字分析过程         | 129        |
| 6.5.4      | 算例结果                 | 132        |
| 6.5.5      | 结合负荷预测结果分析系统边际电价     | 133        |
| 6.6        | 展望:考虑市场因素的新型可靠性电价    | 134        |
| 6.7        | 小结                   | 135        |
|            | 参考文献                 | 136        |
| <b>第7章</b> | <b>电力市场电价风险的初步分析</b> | <b>137</b> |
| 7.1        | 电力市场风险分析的意义          | 137        |
| 7.2        | 示例性电力系统的电价分析         | 138        |
| 7.2.1      | 电力市场模型的构建            | 138        |
| 7.2.2      | 系统边际电价概率分布           | 139        |
| 7.3        | 系统价格风险分析的数字算例        | 140        |
| 7.4        | 价格风险的灵敏度分析           | 142        |
| 7.4.1      | 变化Ⅰ——机组容量变化          | 143        |
| 7.4.2      | 变化Ⅱ——机组数目变化          | 144        |
| 7.4.3      | 变化Ⅲ——机组高报价与低报价之间价差变化 | 146        |
| 7.4.4      | 价格风险的启示              | 147        |
| 7.5        | 展望:电价不确定性分析的扩展       | 147        |
| 7.6        | 小结                   | 148        |
|            | 参考文献                 | 149        |
| <b>第8章</b> | <b>序列运算理论的应用前景</b>   | <b>150</b> |
| 8.1        | 水库群调度                | 151        |
| 8.2        | 金融风险分析               | 151        |
| 8.3        | 交通规划                 | 152        |

---

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 参考文献.....              | 154 |
| 附录 A .....             | 155 |
| A1 IEEE-RTS 原始数据 ..... | 155 |
| A2 有关定义列表 .....        | 155 |
| A3 有关性质列表 .....        | 157 |
| A4 有关的概率论基本知识 .....    | 160 |
| 参考文献.....              | 163 |

# Contents

|                  |                                                                           |    |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapter 1</b> | <b>Introduction</b>                                                       | 1  |
| 1.1              | Probabilistic Problems in Power Systems                                   | 1  |
| 1.2              | Traditional Tool in Solving Probabilistic Problems;<br>Probability Theory | 3  |
| 1.3              | Advanced Developments of Power System                                     | 3  |
| 1.4              | Sequence Operation Theory(SOT) and Its Applicability                      | 4  |
| 1.5              | Structure of This Book                                                    | 5  |
|                  | References                                                                | 5  |
| <b>Chapter 2</b> | <b>The Basic Theory of Sequence Operation</b>                             | 7  |
| 2.1              | What's the Sequence?                                                      | 7  |
| 2.1.1            | Discrete Time Series in Signal Processing                                 | 7  |
| 2.1.2            | Concept of Sequence in This Book                                          | 8  |
| 2.1.3            | Expressions of Sequence                                                   | 9  |
| 2.2              | Four Foundational Operations of Sequences                                 | 9  |
| 2.2.1            | Addition-Type-Convolution(ATC)                                            | 10 |
| 2.2.2            | Subtraction-Type-Convolution(STC)                                         | 11 |
| 2.2.3            | AND-Type-Production(ATP)                                                  | 18 |
| 2.2.4            | OR-Type-Production(OTP)                                                   | 20 |
| 2.2.5            | Summary                                                                   | 21 |
| 2.3              | A Special Sequence Operation: Sequence Combination                        | 22 |
| 2.3.1            | Definition                                                                | 22 |
| 2.3.2            | Characteristics of Sequence Combination                                   | 23 |
| 2.4              | Some Special Sequences                                                    | 24 |
| 2.4.1            | Definitions                                                               | 24 |
| 2.4.2            | Laws of Unit Sequences' Operations                                        | 25 |
| 2.4.3            | Derivative Operations of Zero Sequence                                    | 28 |

|       |                                                                       |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.4 | Derivative Operations of Infinite Sequence .....                      | 29 |
| 2.4.5 | Operational Laws between Infinite Sequence<br>and Zero Sequence ..... | 30 |
| 2.5   | Moments about the Origin and Projection of Sequence .....             | 30 |
| 2.5.1 | Moments about the Origin of Sequence .....                            | 30 |
| 2.5.2 | Projection of Sequence .....                                          | 33 |
| 2.5.3 | Demonstrations .....                                                  | 34 |
| 2.6   | Further Analysis on SOT .....                                         | 35 |
| 2.6.1 | Analysis from the View of Group Theory .....                          | 35 |
| 2.6.2 | Discussion of Inverse Operations .....                                | 37 |
| 2.7   | Summary .....                                                         | 38 |
|       | References .....                                                      | 39 |

### Chapter 3 Operations of Probabilistic Sequences and

|       |                                                                                                 |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|       | State Space Analysis .....                                                                      | 40 |
| 3.1   | Probabilistic Sequence and Its Essential Meanings .....                                         | 40 |
| 3.2   | State Space of Probabilistic Sequences' Operations .....                                        | 41 |
| 3.3   | Four Typical Subspace and Their Characteristics .....                                           | 43 |
| 3.3.1 | Subspace of ATC .....                                                                           | 43 |
| 3.3.2 | Subspace of STC .....                                                                           | 44 |
| 3.3.3 | Subspace of ATP .....                                                                           | 44 |
| 3.3.4 | Subspace of OTP .....                                                                           | 45 |
| 3.3.5 | Characteristics of Probabilistic Sequence .....                                                 | 46 |
| 3.4   | Laws of Operations between Zero Sequence, Infinite<br>Sequence and Probabilistic Sequence ..... | 47 |
| 3.4.1 | Laws of Operations between Zero Sequence and<br>Probabilistic Sequence .....                    | 47 |
| 3.4.2 | Laws of Operations between Infinite<br>Sequence and Probabilistic Sequence .....                | 48 |
| 3.5   | Essential Meaning of Probabilistic Sequences' Operations .....                                  | 48 |
| 3.5.1 | ATC between Probabilistic Sequences .....                                                       | 49 |
| 3.5.2 | STC between Probabilistic Sequences .....                                                       | 50 |
| 3.5.3 | ATP between Probabilistic Sequences .....                                                       | 50 |
| 3.5.4 | OTP between Probabilistic Sequences .....                                                       | 51 |