

High-Power Microwave Sources and Technologies

# 高功率微波源与技术

(美) Robert J. Barker Edl Schamiloglu 编

《高功率微波源与技术》翻译组

清华大学出版社



High-Power Microwave Sources and Technologies

# 高功率微波源与技术

(美) Robert J. Barker Edl Schamiloglu 编

《高功率微波源与技术》翻译组

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书概述了美国近年来在高功率微波源和相关技术研究领域的主要进展,重点讨论了由美国国防部 MURI 计划资助所获得的高功率微波源及其相关技术的最新研究成果。

全书共分 12 章。第 1 章为概述;第 2 章综述了美国国防部感兴趣的 HPM 技术研究现状;第 3~6 章介绍 HPM 源和脉冲缩短效应的研究进展;第 7~11 章论述了 HPM 源的物理机制及其实用化的一些关键技术进展;第 12 章描述了对本领域研究未来发展的展望。

本书的读者对象为对高功率微波源技术感兴趣的研究人员和工程技术人员。

High-Power Microwave Sources and Technologies

Robert J. Barker, Edl Schamiloglu

EISBN 0-7803-6006-0

Copyright © 2001 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Translation Copyright © 2004 by Tsinghua University Press.

All Rights Reserved

本书中文简体字版由 the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。

未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何内容。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2002-6605

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

### 图书在版编目(CIP)数据

高功率微波源与技术/(美)贝克(Barker, R. J.)等编;《高功率微波源与技术》翻译组译. —北京:清华大学出版社,2005.6

书名原文:High-Power Microwave Sources and Technologies

ISBN 7-302-10653-3

I. 高… II. ①贝… ②高… III. 大功率—微波技术 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 020113 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.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

责任编辑:邹开颜 赵从棉

版式设计:刘祎淼

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:29.75 字数:613千字

版 次:2005年6月第1版 2005年6月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-10653-3/TN·252

印 数:1~3000

定 价:98.00元

# 译者序

*High-Power Microwave Sources and Technologies*

高功率微波(HPM)技术是 20 世纪 70 年代以来随着脉冲功率技术的发展而产生的一门新兴学科,是脉冲功率技术与等离子体物理学及电真空技术相结合的产物。可能的军事应用以及工业应用为高功率微波学科的发展提供了基本的动力。基于这种需求的驱动,HPM 研究近年来取得了飞速的发展。到目前为止,高功率微波的发展已经走过了“单一功率追求”与单纯性新概念探索的阶段,研究重点已经转移到与高功率微波实际应用有关的更为细致的技术上。其中,提高高功率微波源系统产生效率和单脉冲能量、系统小型化、集成化设计以及发展“智能型”高功率微波装置是目前高功率微波源技术的主要研究内容。要达到这个目标需要克服当前主要面临的脉冲缩短、束流控制与阴极电子枪设计等物理问题,同时需要对现有 HPM 源进行物理结构以及制造工艺上的改进。

本书概括了美国近年来在一些主要高功率微波源研究方面取得的最新进展以及突破的重要技术障碍,同时也对未来 HPM 源技术的发展趋势和技术挑战以及其他备选的技术路线进行了论述。其涉及项目均为 MURI 计划资助或与其有直接关系,同时大部分项目在 MURI-II 计划及其他各军种基础科研计划中获得继续资助。该书所讨论的内容与技术在一定程度上代表了目前国际上高功率微波技术研究的最高水平,对我国从事高功率微波源以及相关技术研究的科研人员来说是一本好的参考书,同时也是新加入该领域的研究人员了解 HPM 源技术主要内涵的一本必备读物。基于上述目的,我们把该书翻译出版,供国内同行

借鉴参考。

周传明研究员与刘国治研究员主持了该书的翻译工作,来自三个不同单位的研究人员参与了本书的翻译工作,他们是:西北核技术研究所的邵浩、王建国、杨占峰、宁辉、宋晓欣、孙钧、胡咏梅、申菊爱,中国工程物理研究院的杨德秀、莫伯锦、贾浩,中国科学院电子所的刘濮鲲、梁显峰、徐寿喜、刘韦、薛贤忠。翻译初稿由刘国治、王建国、邵浩、杨德秀、莫伯锦、杨占峰和黄文华等进行统稿和修改,最后由刘国治研究员和周传明研究员对全部译稿进行了审校。

感谢原著作者——美国空军科研办公室的 Robert J. Barker 博士和新墨西哥大学的 Edl Schamiloglu 教授为中译本的出版做了原著编者序。

由于译者水平有限,译本中不妥和错误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

2004 年 10 月

**PREFACE TO THE CHINESE EDITION OF  
HIGH-POWER MICROWAVE SOURCES  
AND TECHNOLOGIES**

It is with great pleasure that we introduce the Chinese-speaking scientists and engineers to this edition of our book. We have been very appreciative of the response to the original English edition, and we look forward to an equally enthusiastic response to the Chinese edition. This book brings together a wealth of information on High-Power Microwaves that is unique and would be of great use to the practitioner. We look forward to comments and feedback.

We would like to extend our humble appreciation to Professors Guozhi Liu (Northwest Institute of Nuclear Technology, NINT) and Chuanming Zhou (China Academy of Engineering Physics, CAEP) for leading the translation team. Any endeavor of this nature requires tremendous effort and we thank those that have worked on the translation. We further acknowledge the contributions of Drs. Jianguo Wang and Hao Shao, and their colleagues at NINT and CAEP for their assistance throughout this process. We would like to thank

Tsinghua University Press for honoring us by agreeing to publish the Chinese edition. Finally, our appreciation goes to Ms. Catherine Faduska of IEEE Press for working closely with us on all aspects of the publication of both editions, as well as Janet Bailey, Lauren Fransen, and Ira Tan of John Wiley & Sons on this Chinese translation.

November 2003

Robert J. Barker, Fellow IEEE

Air Force Office of Scientific Research

Arlington, VA USA

Edl Schamiloglu, Fellow IEEE

Department of Electrical and Computer Engineering

University of New Mexico

Albuquerque, NM USA

从 1993 年起,美国国防部在美国大学中以大学主导多学科研究计划项目(MURI)资助的方式开始发起国际性的基础研究。这个项目的持续目标是支持致力于交叉采用多种传统科学与工程进行基础研究的研究小组。在技术研究领域中这个方法特别适用,通过多学科研究小组之间的思想交流可以加速研究进程。这种努力可以加速基础研究成果向实用型转化,也有助于在国防部非常重要的研究领域里使科学与工程专业的学生得到锻炼。本书对代表 MURI 计划制订者所预期的高水平科研成果的 HPM MURI 项目成果进行了总结。

HPM MURI 计划项目的成功主要归功于倡导研究者的努力工作以及他们国际认可的专业知识。9 个大学、3 个公司和 3 个国防部实验室在我们这里所讨论的许多项目中进行了紧密合作来实现这种新一代强大的非致命性武器。这种 HPM 武器将为我们的军队提供能够远程地使敌方通信、监测以及目标定位系统失效的能力,同时又不造成作战双方的人员伤害。这种能力对于我们目前所处的低强度军事对抗以及非战争性军事行动频繁的时代显得尤其重要。

同样重要的是这个技术的预期商业应用。更加高效和紧凑的高功率微波源将来可以很好地应用于热核聚变反应堆等离子体加热,将基本粒子加速到非常高的能量,对大量工业处理材料进行体加热,束清理太空发电站上太阳照射产生的电能堆积,对行星间的目标进行针孔成像,同时也可以应用于杀死部分病原体。



HPM MURI 还带来了 15 个独立研究机构之间广泛的合作。空军科研办公室 (AFOSR) 的项目负责人 Robert Barker 为鼓励这种交流制定了包括年度研讨会、广泛的互联网交流与每月的电话会议的交流形式。比如,正因为有了这个项目,有着成功经验的真空电子学界才第一次将他们的专门技术传授给 HPM 研究者。采用超净器件与超高真空微波系统的真空电子学(MVE)技术已被证明将会为 HPM 学界带来一次革命。同时,HPM 研究者的大胆科学想像为已经基本稳定的真空电子学界带来了新生与活力。这种新的 MVE 研究动力也促使在 FY99 计划中成立了一个改进真空电子学 MURI 研究项目(同样由 Barker 博士领导)。

总之,我们非常高兴把这本书作为五年来成功的研究成果的记录。New Mexico 大学的 Edl Schamiloglu 教授与 Barker 博士合作付出了非常重要的劳动来组织并提炼了大量重要的信息组成本书。在未来的几年中,我们希望其他 MURI 项目在 AFOSR 的领导下提供他们自己领域内 MURI 的类似总结。这种科学参考书对于现有技术的进展非常有益。

Delores Etter

美国国防科技副秘书

# 前 言

## High-Power Microwave Sources and Technologies

本书简述了美国 1999 年前后在高功率微波源和相关技术研究领域的研究状况。本书重点关注的是美国国防部感兴趣的 HPM 研究课题。实际上,这里所给出的大多数内容都是由国防部 MURI 计划发起研究或者是与之有紧密联系的旨在研究新型高功率微波源的研究项目成果。通过不同机构的紧密合作,该项目开展国际性合作研究,交叉学科的科学家在学术会议上交流他们的研究成果。这个 MURI 项目由官方成立于 1995 年,资助经费为每年 300 万美元,在 2000 年春季结束。它建立在由 AFOSR 等离子体办公室资助下近 10 年微波技术研究的基础上,我们中的一个(RJB)为项目管理人。这个计划与由海军实验室(NRL) Robert Parker 负责的正在进行的三用真空电子学计划项目的研究以及 AFOSR 和空军实验室-罗马分部的前热电离研究计划项目(ATRI)是协同互相促进发展的。

在 MURI 项目的计划下,美国 9 个大学的 HPM 科学家在由 Texas Tech 大学(Lubbock)的 Magne Kristiansen, Maryland 大学的 Victor Granatstein 以及 California 大学(Davis)的 Neville Luhmann 三位科学家组成的委员会领导下开展工作。其他大学的参加者包括 New Mexico 大学的合作编者, Cornell 大学的 John Nation, California 大学 Berkeley 分校的 Ned Birdsall, Stanford 大学的 George Caryotakis, Michigan 大学的 Ronald Gilgenbach 和 California 大学 Los Angles 分校的 Tony Lin。为了促进研究成果向工业应用的转化,与 Microwave Science 公司的 James Benford, Northrop-Grumman 公司的 Howard Jory 和

CPI公司的 Howard Jory 签订了正式的合作子合同。而且,首先在 Jack Agee 的协调下,随后通过与 John Gaudet 的联络加强了与空军 Phillips 实验室正在开展的 HPM 研发项目的合作。

本书的第 1 章确定全书的主题,对需要的术语进行了定义,并给出了后面章节的结构。在第 1 章与第 2 章中给出了国防部感兴趣的 HPM 源的研究现状;第 3 章到第 6 章给出了 HPM 源研究的进展以及对脉冲缩短效应研究取得的认识;第 7 章到第 11 章给出了对 HPM 源物理机制上的深入认识和 HPM 源实用化所需的一些关键技术的进展状况;最后,在第 12 章中给出了获得 HPM 的一些预备性技术以及在这个新兴研究领域的未来挑战。

Robert J. Barker  
美国空军科研办公室

Edl Schamiloglu  
New Mexico 大学电气与计算机工程系



# 录

## High-Power Microwave Sources and Technologies

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 引言 .....             | 1  |
| 1.1 目的 .....               | 1  |
| 1.2 高功率微波 .....            | 2  |
| 1.3 本书的结构与范围 .....         | 4  |
| 参考文献 .....                 | 6  |
| 第 2 章 高功率微波源：美国国防部展望 ..... | 7  |
| 2.1 引言 .....               | 7  |
| 2.2 国防部在基础研究中的作用 .....     | 8  |
| 2.3 国防部的需要 .....           | 9  |
| 2.4 历史 .....               | 11 |
| 2.4.1 空军 .....             | 12 |
| 2.4.2 陆军 .....             | 14 |
| 2.4.3 海军 .....             | 18 |
| 2.4.4 国防部机构 .....          | 20 |
| 2.5 高功率微波研究的进展 .....       | 20 |
| 2.5.1 窄带高功率源的进展 .....      | 23 |
| 2.5.2 高功率超宽带源的进展 .....     | 25 |
| 2.6 需要发展的关键技术 .....        | 27 |
| 2.6.1 脉冲功率技术 .....         | 27 |
| 2.6.2 新型阴极 .....           | 28 |
| 2.6.3 改良型材料和提高击穿强度 .....   | 28 |
| 2.6.4 天线 .....             | 29 |
| 2.6.5 计算能力 .....           | 29 |
| 2.7 总结 .....               | 29 |
| 2.8 致谢 .....               | 30 |
| 参考文献 .....                 | 30 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>第 3 章 吉瓦级高功率微波源</b> .....           | 37  |
| 3.1 引言 .....                           | 37  |
| 3.1.1 高功率微波源的定义 .....                  | 38  |
| 3.1.2 发展与历史 .....                      | 39  |
| 3.1.3 提高功率和延长脉宽问题 .....                | 39  |
| 3.2 主要吉瓦级高功率微波源 .....                  | 43  |
| 3.2.1 磁绝缘线振荡器 .....                    | 43  |
| 3.2.2 锥形 MILO .....                    | 48  |
| 3.2.3 相对论磁控管 .....                     | 54  |
| 3.2.4 相对论速调管放大器(RKA)和三轴相对论速调管放大器 ..... | 57  |
| 3.2.5 相对论速调管振荡器 .....                  | 63  |
| 3.2.6 后加速相对论速调管(Reltron) .....         | 65  |
| 3.3 未来发展和总结 .....                      | 68  |
| 参考文献 .....                             | 68  |
| <b>第 4 章 脉冲缩短</b> .....                | 75  |
| 4.1 引言 .....                           | 75  |
| 4.2 早期的研究成果概述 .....                    | 77  |
| 4.2.1 脉冲缩短机理 .....                     | 77  |
| 4.2.2 硬管和软管技术 .....                    | 80  |
| 4.3 最新研究进展 .....                       | 86  |
| 4.3.1 表面处理与真空技术 .....                  | 86  |
| 4.3.2 延长 HPM 源输出脉冲的研究进展 .....          | 89  |
| 4.4 结论 .....                           | 108 |
| 参考文献 .....                             | 108 |
| <b>第 5 章 相对论 Čerenkov 器件</b> .....     | 113 |
| 5.1 引言 .....                           | 113 |
| 5.2 行波管放大器 .....                       | 114 |
| 5.2.1 引言 .....                         | 114 |
| 5.2.2 单级行波管 .....                      | 116 |
| 5.2.3 两级行波管 .....                      | 116 |
| 5.2.4 宏粒子分析 .....                      | 116 |

|              |  |            |
|--------------|--|------------|
| 5.2.5        | 锥形结构放大器设计 .....                                | 118        |
| 5.2.6        | 渡越时间隔离 .....                                   | 119        |
| 5.3          | 高功率行波管放大器研究最新进展 .....                          | 120        |
| 5.3.1        | 引言 .....                                       | 120        |
| 5.3.2        | 准周期结构 .....                                    | 120        |
| 5.3.3        | 高效率输出结构 .....                                  | 120        |
| 5.3.4        | 轴向提取 .....                                     | 121        |
| 5.3.5        | 高效率放大器工作机制 .....                               | 122        |
| 5.3.6        | 群聚压缩 .....                                     | 125        |
| 5.3.7        | Ka 波段的研究 .....                                 | 125        |
| 5.3.8        | 混合模 .....                                      | 126        |
| 5.3.9        | 对称模和不对称模的相互作用 .....                            | 129        |
| 5.3.10       | 讨论 .....                                       | 130        |
| 5.4          | 返波振荡器 .....                                    | 131        |
| 5.4.1        | 引言 .....                                       | 131        |
| 5.4.2        | 重复频率脉冲运行 .....                                 | 132        |
| 5.4.3        | 提高效率 .....                                     | 132        |
| 5.4.4        | 毫米波返波振荡器 .....                                 | 133        |
| 5.4.5        | 超高功率运行 .....                                   | 133        |
| 5.4.6        | 长脉冲运行 .....                                    | 134        |
| 5.5          | 高功率返波振荡器的最近研究 .....                            | 134        |
| 5.5.1        | 慢波结构特性研究 .....                                 | 135        |
| 5.5.2        | 返波振荡器理论 .....                                  | 137        |
| 5.5.3        | 实验 .....                                       | 140        |
| 5.6          | 致谢 .....                                       | 144        |
|              | 参考文献 .....                                     | 144        |
| <b>第 6 章</b> | <b>回旋管振荡器和放大器 .....</b>                        | <b>151</b> |
| 6.1          | 引言 .....                                       | 151        |
| 6.1.1        | 本章内容简述 .....                                   | 151        |
| 6.1.2        | 回旋管概念 .....                                    | 152        |
| 6.2          | 高功率回旋管的技术水平 .....                              | 156        |
| 6.2.1        | 等离子体加热和电流驱动的回旋摩谐速调管<br>振荡器(gyromonotron) ..... | 156        |

|                                    |                               |            |
|------------------------------------|-------------------------------|------------|
| 6.2.2                              | 强流相对论电子束驱动的回旋管 .....          | 157        |
| 6.2.3                              | 用于毫米波雷达的回旋放大器 .....           | 158        |
| 6.2.4                              | 用于毫米波电子对抗的回旋返波振荡器 .....       | 163        |
| 6.2.5                              | 工业应用的单腔回旋速调管振荡器 .....         | 163        |
| 6.2.6                              | 用于驱动加速器的回旋速调管放大器 .....        | 165        |
| 6.3                                | 强流相对论电子束驱动的回旋管的最新进展 .....     | 166        |
| 6.3.1                              | 强流相对论电子束、回旋器件和空间电荷的考虑 .....   | 166        |
| 6.3.2                              | 矩形回旋管和同轴回旋管 .....             | 167        |
| 6.3.3                              | 回旋返波振荡器作为宽带可调谐高功率微波管的评估 ..... | 170        |
| 6.4                                | 先进雷达的倍频回旋放大器 .....            | 172        |
| 6.4.1                              | 理论 .....                      | 173        |
| 6.4.2                              | 实验 .....                      | 177        |
| 6.5                                | 绕轴旋转束回旋管的高次谐波工作 .....         | 180        |
| 6.5.1                              | 高次谐波回旋管振荡器 .....              | 182        |
| 6.5.2                              | 谐波回旋管放大器 .....                | 183        |
| 6.6                                | 总结 .....                      | 184        |
| 6.7                                | 致谢 .....                      | 185        |
|                                    | 参考文献 .....                    | 185        |
| <b>第7章 高功率微波器件中的动态等离子体加载 .....</b> |                               | <b>195</b> |
| 7.1                                | 引言 .....                      | 195        |
| 7.2                                | 早期结果的评述 .....                 | 196        |
| 7.2.1                              | 历史回顾 .....                    | 196        |
| 7.2.2                              | 理论 .....                      | 198        |
| 7.2.3                              | 实验 .....                      | 201        |
| 7.3                                | 填充等离子体高功率微波源的最新进展 .....       | 207        |
| 7.3.1                              | 实验结果 .....                    | 208        |
| 7.3.2                              | 理论和模拟结果 .....                 | 215        |
| 7.3.3                              | 等离子体产生技术 .....                | 225        |
| 7.3.4                              | 新型诊断技术 .....                  | 227        |
| 7.3.5                              | 径向不均匀加载等离子体慢波结构的电磁性能 .....    | 232        |
| 7.3.6                              | 最重要的实验和理论结果 .....             | 235        |
| 7.4                                | 小结和存在的问题 .....                | 237        |
| 7.5                                | 致谢 .....                      | 237        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 参考文献 .....                     | 238        |
| <b>第 8 章 束流传输与射频控制</b> .....   | <b>245</b> |
| 8.1 引言 .....                   | 245        |
| 8.2 束流传输 .....                 | 247        |
| 8.2.1 概述 .....                 | 247        |
| 8.2.2 磁引导系统 .....              | 247        |
| 8.2.3 线性束 HPM 器件的 PPM 聚焦 ..... | 249        |
| 8.2.4 等离子体填充系统中的束流传输 .....     | 254        |
| 8.2.5 MILO 中的自磁绝缘 .....        | 259        |
| 8.2.6 电子回旋器件中束流传输特点 .....      | 259        |
| 8.3 电子束收集器 .....               | 259        |
| 8.3.1 常规单级电子束收集极 .....         | 260        |
| 8.3.2 降压收集极 .....              | 261        |
| 8.3.3 降压收集极的计算机模拟 .....        | 261        |
| 8.3.4 结论 .....                 | 264        |
| 8.4 射频输出控制 .....               | 264        |
| 8.4.1 概述 .....                 | 264        |
| 8.4.2 微波输出极化的控制 .....          | 264        |
| 8.4.3 模式转换器 .....              | 265        |
| 8.5 智能微波管概念的演变 .....           | 266        |
| 8.5.1 概述 .....                 | 266        |
| 8.5.2 Litton 公司的早期工作 .....     | 266        |
| 8.5.3 SLAC 的自动控制研究 .....       | 267        |
| 8.5.4 吉瓦级智能管 .....             | 268        |
| 8.6 结论 .....                   | 272        |
| 8.7 致谢 .....                   | 273        |
| 参考文献 .....                     | 273        |
| <b>第 9 章 阴极与电子枪</b> .....      | <b>277</b> |
| 9.1 引言 .....                   | 277        |
| 9.2 技术综述 .....                 | 278        |
| 9.3 阴极技术 .....                 | 282        |
| 9.3.1 爆炸发射阴极 .....             | 282        |



|               |                                |            |
|---------------|--------------------------------|------------|
| 9.3.2         | 热阴极进展 .....                    | 289        |
| 9.3.3         | 铁电体阴极 .....                    | 295        |
| 9.4           | 新型电子枪 .....                    | 298        |
| 9.4.1         | 等离子体电子枪 .....                  | 298        |
| 9.4.2         | 高功率磁会切(cusp)电子枪 .....          | 301        |
| 9.4.3         | 铁电体电子枪 .....                   | 305        |
| 9.5           | 总结及将来的研究方向 .....               | 306        |
|               | 参考文献 .....                     | 308        |
| <b>第 10 章</b> | <b>窗口与射频击穿 .....</b>           | <b>313</b> |
| 10.1          | 引言 .....                       | 313        |
| 10.2          | 早期工作回顾 .....                   | 314        |
| 10.3          | 基本考虑 .....                     | 316        |
| 10.3.1        | 物理机制 .....                     | 316        |
| 10.3.2        | 单极性表面击穿 .....                  | 321        |
| 10.4          | 次级电子倍增理论 .....                 | 322        |
| 10.4.1        | 金属平面间的电子倍增 .....               | 323        |
| 10.4.2        | 介质表面的次级电子倍增过程 .....            | 326        |
| 10.4.3        | 进一步讨论 .....                    | 329        |
| 10.5          | 射频结构的击穿 .....                  | 334        |
| 10.5.1        | X 波段谐振环中的 $TM_{010}$ 谐振腔 ..... | 334        |
| 10.5.2        | $TM_{020}$ 腔 .....             | 337        |
| 10.5.3        | 讨论 .....                       | 343        |
| 10.6          | 介质窗击穿 .....                    | 344        |
| 10.6.1        | 实验进展 .....                     | 344        |
| 10.6.2        | 实验结果 .....                     | 346        |
| 10.6.3        | 深入讨论 .....                     | 349        |
| 10.7          | 抑制击穿的方法 .....                  | 352        |
| 10.8          | 总结 .....                       | 354        |
| 10.9          | 致谢 .....                       | 355        |
|               | 参考文献 .....                     | 356        |
| <b>第 11 章</b> | <b>计算技术 .....</b>              | <b>363</b> |
| 11.1          | 引言 .....                       | 363        |