



装备科技译著出版基金

时变复杂介质的电磁学

——频率与极化变换器

(第2版)

Electromagnetics of Time Varying Complex Media
Frequency and Polarization Transformer
Second Edition

[美] Dikshitulu K. Kalluri 著
赵惠玲 万国宾 译



CRC Press
Taylor & Francis Group



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

时变复杂介质的电磁学 ——频率与极化变换器 (第2版)

Electromagnetics of Time Varying Complex Media
Frequency and Polarization Transformer
Second Edition

[美] Dikshitulu K. Kalluri 著
赵惠玲 万国宾 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2013-121号

图书在版编目(CIP)数据

时变复杂介质的电磁学:频率与极化变换器:第1版/

(美)卡卢里(Kalluri,D. K.)著;赵惠玲,万国宾译.

—北京:国防工业出版社,2016.5

书名原文:Electromagnetics of Time Varying Complex Media – Frequency and Polarization Transformer

ISBN 978-7-118-10430-1

I. ①时… II. ①卡… ②赵… ③万… III. ①电磁学—研究 IV. ①O441

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第053805号

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All rights reserved.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版。

版权所有,侵权必究。

National Defense Industry Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由国防工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 26 字数 494 千字

2016年5月第1版第1次印刷 印数 1—2000 册 定价 119.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

D. K. Kalluri 博士及其合作者在利用瞬变等离子体实现电磁波频率变换方面开展了系统深入的探索研究工作,成果显著。本书概括和总结了他们多年来的研究成果,是时变复杂介质中的电磁波方面的研究专著。全书以瞬变磁等离子体为对象,阐述瞬变磁等离子体的时变电磁参数对电磁波的影响,涵盖了时变磁等离子体中电磁波变换的基本理论、时变介质中基于时域有限差分法的数值仿真、腔体中的时变介质——频率与极化变换器——的应用及实验四个部分的内容。本书前言对各部分均有比较详细的介绍,在此不再赘述。

目前,国内在复杂介质中的电磁波研究工作较多集中于非均匀、各向异性或色散复杂介质,而有关时变复杂介质中电磁波的文献相对较少。因此,将 D. K. Kalluri 的专著引进并翻译成中文,期望对我国在这一领域的研究起到推动作用。然而,专著翻译是一个慢工出细活的工作,并不像起初想得那么简单。当翻译工作真正开始之后才发现所需投入的时间和精力远比想象中大得多。虽然在翻译的过程中我们尽了最大的努力,由于水平、时间和精力有限,不当和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。我们的联系方式是:zhhl@nwpu.edu.cn。

全书由西北工业大学赵惠玲老师、万国宾老师合作翻译完成,赵惠玲老师负责全书的校对和统稿。本书的出版离不开装备科技译著出版基金的资助,以及编辑们的辛勤劳动,在此致以诚挚的谢意。要特别感谢西北工业大学万伟教授,他以近 80 岁的高龄,不辞辛苦,对译稿进行了认真细致的审阅,提出了很多宝贵意见。还要由衷地感谢参与过译稿整理和排版工作的郑明晖博士、张静硕士、李章义硕士等。

第 1 版序言

我非常高兴为 D. K. Kalluri 教授的这本书撰写序言,因为自从 1992 年我开始关注他的研究工作,我们就成了朋友。那些年,加州洛杉矶大学的 C. S. Joshi 教授和他的合作者正在进行一系列的实验,这些实验是基于我们这些做理论研究的人提出的想法,使用在等离子体中移动电离波前的方法来研究辐射的频移性。这个工作与 D. K. Kalluri 教授很多年的研究密切相关,因此,我特地请他前来伯克利,与我共渡 1992 年的夏天。这样开始了一个硕果累累的合作和一段美好的友情。

诸多图书讨论了非均匀介质中的电磁波变换问题。多普勒效应,即由运动边界引起的频率改变,同样在许多书中均有描述。但是,一般时变介质对电磁波频率的改变却很少涉及。在非移动介质中,波频率的改变与通常的经验相反。由于 D. K. Kalluri 教授在电子工程和电磁学方面的研究背景,使他能以自己独有的方式,将目前这一领域的研究成果写入一本关于时变和空变复杂介质中的电磁学专著。借助简单的理想模型,他着重论述时变参量的影响,加上介质特性的一种或多种复杂性讨论,使这一问题更容易理解。读者可以相信 D. K. Kalluri 教授完全能胜任这本书的写作,因为他在利用瞬变磁等离子体实现电磁辐射的频移领域发表过许多原创性研究论文。他的许多出版物是讨论运动介质、基于拉普拉斯变换研究边界对瞬时解的影响、频率可能由静态磁场(哨声波的改变)来控制的下频移波的产生,以及外部磁场的关闭效应(研究说明一个哨声波转变成一个摆动磁场),论著丰硕,享有盛誉。简而言之,此书为名家力作,希望读者能够和我一样喜爱这本书。

Andrew M. Swsler
伯克利,加利福尼亚

简单介质的电磁特性通常用介电常数、磁导率和电导率三个正标量常数来表征。当这三个量中有一个不是正标量常数时,相应的介质则称为复杂介质。

目前,在非均匀(随空间变化)、各向异性(电磁特性与场方向有关)和色散复杂介质中的电磁学方面已有许多优秀书籍供研究生选用,例如,剑桥大学出版社1966年出版的 *Radio Wave Propagation in Ionosphere*,作者 K. G. Budden,以及 Martinus Nijhoff 出版社于1987年出版的 *Theory of Reflection*,作者 Johm Lekhner。开展相关理论、数值模拟和实验工作的动机主要是为了能够应用于电离层中的短波传播系统和各向异性晶体的光学系统。在所有的这些研究中,前提是假设介质的电磁特性不随时间变化,而仅随空间变化。时不变介质会使信号的频率保持不变,而介质的空间变化会引起波数的变化。实际上,这些系统中介质的特性会随着时间的变化,但相对于波传播的周期来说这种变化是十分缓慢的,因此介质特性随时间的变化是次要因素。例如,电离层中电子密度变化曲线早晚都有不同,因此其介电常数会随着时间的变化而变化,但这种变化对于信号频率的影响微乎其微。所以,通常介质的时变特性都是被忽略的。

大功率超高速脉冲源的出现使得短时间内电离介质成为可能,于是,改变介质介电常数所需的时间小于传播波的周期。一种理想情形称为介质的瞬时电离(突然转换),短时的电子密度变化可以近似为具有零上升时间的阶跃曲线。电磁波经过这种瞬时不连续处时,波数 k 保持不变,但频率会改变。利用这种特性可以制作频率转换器,即可以将时变复杂介质想象成一个黑匣子,输入的频率 f_i ,经过时变介质后,输出频率变成 f_o 。

这一版中的第一部分是理论部分,讲述时变磁等离子体介质中电磁波的变换。这一部分包含了前一版的全部内容,并在某些地方做了进一步的完善。这里所考虑的时变介质仍然主要指磁等离子体,因为目前来说这是唯一的电磁特性能够通过等离子体介质的电离或者去离子化,或者背景磁场的变化而显著改变的复杂介质,相对介电常数 ϵ_p 的变化可以达到几个数量级。同时修正了上一版中的印刷错误。

第二部分是数值模拟部分,主要内容为时变介质中的时域有限差分法(FDTD)。这一部分重点在分析基于FDTD技术的电磁波与时变复杂介质相互作用的数值模拟方法。这种方法将电流密度和电场之间本构关系表达为时域的辅助

差分方程, Maxwell 方程组采用常规的中心差分近似进行离散, 在假设时间步长中心处等离子体参数(ω_p, ω_b, ν)不变的情况下, 可以在一个时间步长中精确求解辅助差分方程。文献中称为“指数时间步长”的算法适用于较大数值的等离子体参数, 并且通常基于中心差分近似的电流密度导数的离散方法中, 对等离子体参数 $\omega_b \Delta t$ 和 $\nu \Delta t$ 的数值有严格的限制, 而这一限制条件在“指数时间步长”的算法中可以放宽。电流密度设置于 Yee 立方体中心处产生了蛙跳步进算法, 附录 K 是 1998 年发表的论文的再次出版, 其中对这方面进行了详细的讨论。作者相信本书中改进的 FDTD 算法是适用于时变磁等离子体的, 第二部分和第三部分中给出了成功的模拟结果。

前两部分讨论的是无限大介质或者以自由空间为边界的简单边界。在实际的有限上升时间的电离过程中, 频率改变的行波可以在与时变介质发生完全作用之前就穿过介质的边界。实验中, 在短时间内产生较大体积的均匀等离子体是比较困难的, 但当等离子体处于一个腔体中时, 就可以在一定程度上克服这个困难。在一个腔体中, 开关角是另一个控制参数。输入的参数包括描述输入波极化的参数和时变磁等离子体介质的系统参数, 它们会影响输出波的频率和相位。这样腔体中的时变磁等离子体就可作为频率和极化变换器。

第三部分是应用部分, 主要就是讨论腔体中时变磁等离子体介质作为频率和极化变换器的应用。作者认为, 这是由第一部分中的理论发展而来的一种重要的应用。一个典型的应用例子就是, 将消费品(如微波炉)中廉价源产生的频率为 2.45GHz 的波转化为频率为 300GHz 的太赫兹波辐射, 并且电场也得到了增强。附录 Q 是最近发表的一篇论文, 其中讨论了这个应用。能够实现这种变换的频率变换器使用哨声波作为输入波, 腔体中的时变材料通过断开电离源得到, 因此可以将腔体中的磁等离子体转换为自由空间。

作者十分感谢 Alexff 教授主动贡献对相关实验的简要描述, 这些实验是由他的团队或者其他团队完成的。如果本书能够帮助研究人员模拟更多的实验, 那么作者的目的就达到了。在未来的第 3 版中, 将加入描述实验工作进展的第四部分。使基于腔体中介质电离的实验能更容易地实现, 并且使得更多拥有完善实验设备的研究人员进入该领域。作者正在计划相关的实验, 其中会使用一些目前正在改善中的更完善和更简便的技术。

这一版首先概述了时变磁等离子体介质的频率转换效应, 包括了 14 章正文和 17 个附录。所有附录(除了附录 A)均是作者和其博士研究生的论文的再次出版(其中有些许改动)。这些资源的集合可以帮助一个本领域中新的研究人员全面了解研究的对象。第 11 章和第 12 章讨论了一些概念并对附录 I ~ 附录 Q 中更深的内容进行了总体的描述, 为进一步深入理解附录 I ~ 附录 Q 打下了基础。

第1版前言

经过仔细考虑,我为研究生开设了两门各有侧重的电磁学课程。其中一门针对简单电磁介质,即由标量介电常数(ϵ)、磁导率(μ)以及电导率(σ)表示的介质,主要讨论区域边界形状和大小的影响问题。这方面已有许多可供选用的优秀教材,如 Constantine A. Balanis 所著的《高等电磁学》,1989 年约翰威立国际出版社出版。

材料科学的最新进展表明,材料可以合成为具有我们期望的任何电磁特性。对于一个给定的应用,必须去理解和寻找最合适的材料性质。为了帮助研究生发展这种能力,我开设了另外一门课程叫作“复杂介质中的电磁学”,重点阐明由复杂媒质的每个复杂特性所引起的主要影响。如果电磁参量 ϵ, μ, σ 中任意一个不是标量常数,那么这个介质就是复杂介质。如果这些参量是信号频率的函数,我们称为时间色散介质。如果这些参量是张量,我们称为各向异性介质。如果这些参量是位置的函数,我们称为非均匀介质。等离子体在静态磁场下是色散的、各向异性和非均匀的。由于这个原因,我选择等离子体作为最基本的介质来阐述复杂介质中电磁波变换的一些问题。

介质的时变参量是介质的另一复杂性,也是目前研究感兴趣的。高功率激光可以产生极短脉冲把气体电离成等离子体,这种现象使介质的介电常数快速变化成为可能。这一过程的一个理想模型叫作等离子体的瞬间产生或者介质的瞬间转换。更实际的模型需要一个具有任意上升时间的时变等离子体模型。

前面的章节使用的数学模型通常只有一种复杂性。经常假定这种介质是空间无界的或者有一个很简单的平面边界,场的变量和参量只在空间的一个坐标上变化。这样做可以避免繁重的数学运算,而把重点集中在参量的影响上。最后一章有一节是阐述时域有限差分法在三维问题上的数值模拟。

时变介质的主要影响是使源波的频率偏移。频率的改变与我们通常接触的波频率的改变经验相反。这个例外是多普勒效应,即运动边界引起频率改变。运动边界是时变介质的一个特例。

本书的书名表明,它是为了满足那些把电磁学作为基础,在许多与“复杂介质”这个词相关的学科进行研究的学生的需要。

这些学科的例子有电光学,等离子科学和工程,微波工程以及固态器件。本书中重点讨论的有关“复杂介质对电磁波的变换”的内容如下:

- (1) 色散介质。
- (2) 消失波引起的能量穿过等离子体板的隧道效应。
- (3) 各向异性介质中的特征波。
- (4) 瞬变介质和频移。
- (5) 异各向异性介质的格林函数。
- (6) 异各向异性介质中的微扰技术。
- (7) 修正源波的绝热分析。

以上论题均使用一维模型。

接下来的论题包括手征介质、表面波、周期介质。这些主题并不包括非线性介质、参数的不稳定性、随机介质。我希望以后这本书的修订版能够包含这些内容，这样就可以满足两学期的课程或者作为一学期课程的选修部分。

本书的后面增加了一些习题，这些习题有助于那些把本书当作教材使用的读者。本书的背景知识是要求学过一学期的研究生电磁学课程，课程中包括简单介质中平面波的讨论。拥有这个背景知识的高年级研究生或者一年级研究生可以很容易地阅读本书。本书也可以当作手册来使用。

本书的副标题强调频率变化的观点，旨在引起那些期望在利于磁等离子体相干产生可调辐射的理论方面快速入门的研究者关注。在改变磁等离子体的时间和空间参量而产生的显著效应方面，我希望本书能够促进相关实验和更多的理论和数值工作研究。本书涵盖很多学者近年来在研究性期刊上公开发表的研究成果，其中包括本书的作者。本书的附录 B ~ 附录 H 是这些发表论文的重印。本书还包含许多尚未正式发表的研究成果。

全书使用 RMKS 计量单位系统。时谐因子和空间因子分别表示为 $\exp(j\omega t)$ 和 $\exp(-jkz)$ 。

致谢

这一版的致谢应该与第 1 版的致谢一起阅读,因为第 1 版列举的许多人我一直与他们保持联系。除此之外,近年来还有两个博士生在研究时变介质,并且与我分享探索这一研究领域的喜悦,他们是 Monzurul Eshan 博士和 Ahmad Khalifeh 博士。我现在的博士生 Sebahattin Eker 和陈金铭在这一领域研究深入,他们合作发表的论文收录在本书附录里。非常感谢他们的帮助。

非常感激田纳西州大学的 Igor Alexeff 教授在第 13 章实验部分的写作上给予的帮助。

特别感谢金铭,他在博士的最后一个学期承担了本书书稿的修改工作,并且使用他高水平的计算机技能将图片和文字的格式修改为规定的格式。

CRC 出版社的 Nora Konopka 和 Catherine Giacari 鼓励我为第 2 版写一个报告,而不是分开发表有关频率和极化变换器的研究性专著。第 2 版因此在时变介质上有个全面的内容。Ashley Gasque 和 Kari Budyk 与在 CRC 团队的成员使这本书最终落稿,我非常感谢他们。

第 1 版致谢

我对我现在和以前的博士生感到非常自豪,他们能够与我在新的研究领域患难与共。他们之中,我尤其要提到 V. R. Goteti 博士、T. T. Huang 博士和 Joo Hwa Lee 先生。特别感谢 Joo Hwa,他在博士的最后一个学期承担了书稿的修改工作,并且用他娴熟的计算机技能按规定的格式编辑排版文字和图片。我很感激马萨诸塞大学卢维尔分校能够允许我在 1996 年春季休假,来完成这本书的写作。非常感谢空军科学研究处以及空军实验室在 1996 年和 1997 年给予的支持。我尤其感谢实验室中的中心人物 K. M. Groves 对研究所做的贡献。感谢我的朋友和伙伴,加利福尼亚大学的 Andrew Sessler 教授和田纳西大学的 Igor Alexeff 教授,他们的鼓励对我的研究和撰写本书有很大的帮助。

与我讨论各自研究兴趣的同事包括小 A. Banos 教授、S. A. Bowhill 教授、J. M. Dawson 教授、M. A. Fiddy 教授、O. Ishihara 教授、C. S. Joshi 教授、T. C. Katsoules 教授、H. H. Kuehl 教授、S. P. Kuo 教授、M. C. Lee 教授、W. B. Mori 教授、小 E. J. Powers 教授、T. C. K. Rao 教授、B. Reinisch 教授、G. Sales 教授、B. V. Stanic 教授、N. S. Stepanov 教授、D. Wunsch 教授和 B. J. Wurtele 教授、V. W. Buszewski 博士、S. J. Gitomer 博士、P. Muggli 博士、小 R. L. Savage 博士及 S. C. Wilks 博士。我们论文的无名审稿人也属于这个群体。我希望指出该群体,因为是他们在我们继续研究提供动力方面起了重要作用。

我特别感谢 CRC 的 Robert Stern 博士,他一直等待我交稿,我一提交,他就以很快的速度处理。

最后,我最想感谢我的妻子 Kamala 在本书的写作中给予的诸多帮助,还有我的孩子 Srinath、Sridhar 和 Radha,他们支持我、鼓励我,因研究的缘由,放弃与我相处的时间。

作者简介

Dikshitulu K. Kalluri 博士是马萨诸塞大学卢维尔分校电子与计算机工程学教授,出生于印度 Chodavaram 市。他在印度安得拉大学获得电子工程学教育学硕士学位;在印度班加罗尔的印度科学研究院获得 DII Sc 学位;在麦德逊市威斯康星州大学获得电子工程学硕士学位,他在罗伦斯堪萨斯大学获得博士学位。

Kalluri 博士的职业生涯始于印度兰契伯拉学院,在此获得教授职位,首先是电子工程学科带头人,此后是学院总监助理。与他合作的团队有劳伦斯伯克利实验室、加州大学洛杉矶分校、南加利福尼亚大学、田纳西大学,并且他作为教员在空军实验室工作过几个夏天。自从 1984 年,他到马萨诸塞大学卢维尔分校,开始担任博士点的协调员以及电磁材料和光学系统中心 (CEMOS) 的主任工作。他最近成立的电磁学和复杂介质研究实验室是中心的一部分。

作为电子与通信工程师会员以及电子工程学荣誉学会和美国科学院研究会会员, Kalluri 博士出版了许多技术性文章和评论。

概述.....	1
0.1 引言	1
0.2 介质特性中瞬时不连续性引起的频率改变	2
0.3 时变等离子体介质	3
0.4 无界等离子体介质的瞬间产生	5
0.5 时变等离子板	7
0.6 应用	8
0.7 时变磁等离子体介质	8
0.8 本书第三部分概述.....	16
0.9 第四部分概述.....	17
0.10 结论	17

第一部分 理论:时变磁等离子体介质中电磁波的变换

第1章 各向同性等离子体:色散介质.....	19
1.1 引言.....	19
1.2 冷各向同性等离子体的基本场方程.....	19
1.3 一维方程.....	21
1.4 简化求解的近似.....	22
1.5 色散介质.....	24
第2章 空变时不变各向同性介质	26
2.1 基本方程.....	26
2.2 电介质—电介质空间边界.....	28
2.3 通过等离子体半空间的反射.....	31
2.4 等离子体板的反射.....	32
2.5 非均匀等离子体板的问题.....	39

第 3 章 时变空不变各向同性等离子体介质	47
3.1 基本方程	47
3.2 突然生成的无界等离子体介质的反射	48
3.3 $\omega - k$ 图和摆动磁场	51
3.4 功率和能量的考虑	52
3.5 源于阶跃时变的微扰	53
3.6 瞬时 - 相异等离子体介质的因果格林函数	55
3.7 一般时变的传输和反射系数	57
3.8 线性时变的传输和反射系数	58
3.9 与精确解比较验证扰动解	59
3.10 驼峰时变	60
3.11 一致性比较	63
第 4 章 突然产生的半空间等离子体: A 波和 B 波	65
4.1 引言	65
4.2 稳态解	65
4.3 瞬态解	70
第 5 章 突然产生的等离子体平板: B 波脉冲	75
5.1 引言	75
5.2 问题的导出	75
5.3 瞬态解	77
5.4 退化情况	79
5.5 稳态解的一个分量	80
5.6 数值结果	81
第 6 章 磁等离子体介质: 左旋、右旋、寻常和非常波	85
6.1 引言	85
6.2 冷各向异性等离子体介质的基本场方程	85
6.3 一维方程: 纵向传播: 左旋与右旋波	86
6.4 一维方程: 横向传播: O 波	89
6.5 一维解: 横向传播: X 波	90
6.6 有耗磁等离子体介质的电介质张量	93
6.7 周期分层的磁等离子体	94

6.8	表面磁等离子体	94
6.9	周期介质中的表面磁等离子体	94
第7章	突然产生的磁等离子体介质	96
7.1	引言	96
7.2	一维方程:纵向传播	96
7.3	磁等离子体介质的突然产生:纵向传播	97
7.4	数值结果:纵向传播	102
7.5	阻尼率:纵向传播	108
7.6	磁等离子体介质的突然生成:横向传播:X波	108
7.7	补充的数值结果	108
7.8	磁等离子体介质的突然产生:任意方向的静态磁场	112
7.9	低频波的频移	112
第8章	磁化时变等离子体中的纵向传播	114
8.1	引言	114
8.2	阶跃时变的扰动	115
8.3	瞬时—相异磁化等离子体介质的因果格林函数	117
8.4	一般变化的散射系数	120
8.5	线性变化的散射系数	120
8.6	数值结果	122
8.7	摆动磁场	123
8.8	E-公式	124
8.9	小结	124
第9章	瞬态磁等离子体中MSW的绝热分析	126
9.1	前言	126
9.2	R波的绝热分析	126
9.3	缓慢形成的等离子体对波源的修正	128
9.4	消失的等离子体介质产生的哨声波的修正	129
9.5	消失的等离子体的另一模型	130
9.6	消失的磁场对哨声波的修正	132
9.7	X波的绝热分析	132
第10章	其他相关论题	133
10.1	引言	133

10.2	原理性实验证明	133
10.3	运动电离波前	133
10.4	时域有限差分法	135
10.5	洛伦兹介质	136
10.6	非常波的模式转换	136
10.7	频移的研究现状	138
10.8	手征介质:右旋和左旋波	139
10.9	孤立子	140
10.10	天体物理学应用	140
10.11	虚拟光电导性	140
附录 A	时变等离子体介质的本构关系	143
附录 B	突然产生的磁等离子体介质中波的阻尼率:纵向传播	146
B.1	引言	146
B.2	新波的频率和速度	147
B.3	新波的阻尼率	149
B.4	数值结果	150
B.5	建议的实验	151
B.6	结论	152
附录 C	时变磁等离子体介质中波的传播:横向传播	153
C.1	引言	153
C.2	新波的频率和功率容量	154
C.3	新波的阻尼率	159
C.4	磁等离子体半空间:稳态解	160
C.5	磁等离子体半空间:瞬态解	162
C.6	数值结果和讨论	164
C.7	结论	167
附录 D	用磁等离子体实现频移:瞬间电离	169
D.1	引言	169
D.2	突然产生的无界磁等离子体介质中波的传播	170
D.3	左旋波和右旋波	171
D.4	非常波	173

D.5	不同波的频移特性	173
附录 E	消失等离子体介质产生的频率上移伴随功率增强的哨声波	179
E.1	引言	179
E.2	突然消失	179
E.3	慢速衰减	182
E.4	说明性例子	184
E.5	结论	185
附录 F	哨声波转换为可控的螺旋摆动磁场	187
F.1	引言	187
F.2	公式	188
F.3	静态磁场的突然消失	188
F.4	B_z 的慢速衰减	191
F.5	说明性例子	193
F.6	结论	195
附录 G	突然产生的磁等离子体介质对单色脉冲持续时间的影响	196
G.1	引言	196
G.2	对单色波的影响:综述	196
G.3	对单色脉冲持续时间的影响	198
G.4	数值结果和讨论	200
G.5	致谢	202
附录 H	突然产生的时变磁等离子体介质对电磁波的改变:横向传播	204
H.1	引言	204
H.2	横向传播	204
H.3	图解说明和结果	210
H.4	结论	214

第二部分 数值仿真:时变介质的 FDTD

第 11 章	时域有限差分法	216
11.1	空气传输线	216
11.2	FDTD 解	217