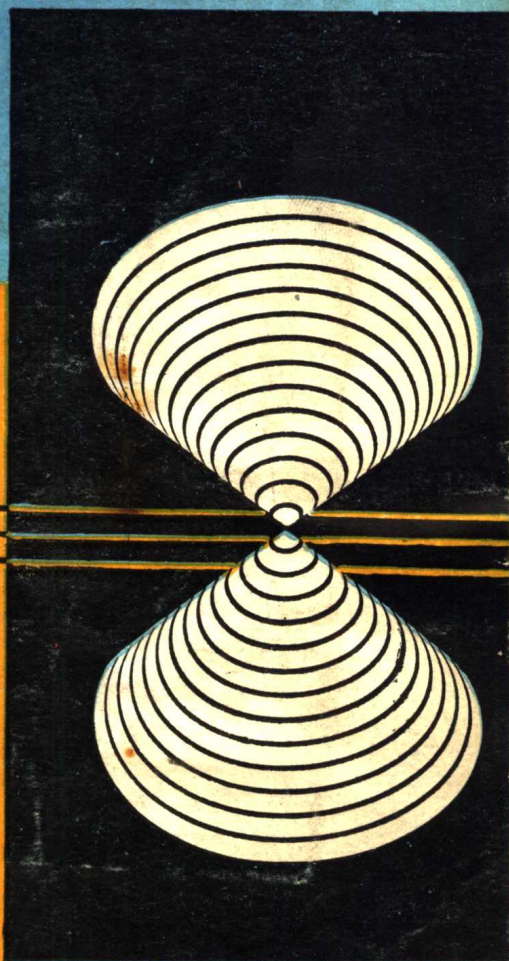


瞬变电磁场

● 高等学校教学参考书

● 彭仲秋



● 高等教育出版社

高等学校教学参考书

瞬变电磁场

彭仲秋

高等教育出版社

内 容 提 要

本书对瞬变电磁场的理论基础和主要分析方法作了系统、深入的阐述,填补了我国瞬变电磁场与波这一新兴学科的教材空白。内容包括:时域与频域的关系,解析的频域法,数值的频域法,直接时域法,奇点展开法,有耗媒质及分层媒质中的瞬变场等。涉及瞬变电磁场的传播、辐射、散射和逆散射等方面的问题。本书概念讲述清楚,公式推导详细,便于自学。本书可供电磁场学科各专业的研究生和高年级学生学习或参考,也可供有关的教师和科技工作者参考。

责任编辑 马 达

高等学校教学参考书

瞬变电磁场

彭仲秋

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京市顺义县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.75 字数 230 000

19 89 年 9 月第 1 版 19 89 年 9 月第 1 次印刷

印数 0001—1,250

ISBN 7-04-001153-0/TM·111

定价 2.60 元

序 言

瞬变电磁场是一门新兴的学科。虽然有关电磁瞬变现象的分析早就有人作过不少工作,但是全面广泛地引起人们的重视,并且集中许多力量来进行这一方面的研究与开发,还是最近二十几年的事情。

自从核爆炸产生的冲击电磁波对其四周广大范围内的电子仪器产生严重的破坏作用,从而影响通信的安全性及可靠性之后,关于电磁脉冲波的传输、辐射、传播与散射等问题开始引起了人们的深切关注。另一方面,随着高分辨率雷达的发展,以及在目标识别、地下资源勘探、电磁兼容、遥感技术等方面的研究与应用前景,也促使人们对瞬变电磁场与电磁波这一学科的研究与开发,日益感到其重要性。

然而,就我所知道的情况,目前对瞬变电磁场的理论作出较为系统阐述的专著似乎只有 L. B. Felsen, "Transient Electromagnetic Fields" 一书,而在国内则还没有一本这方面的著作。有关瞬变电磁场方面的许多资料,包括最近十来年的文献资料均散载在许多期刊与内部报告中。从浩瀚的文海中综合编写出一本适合初学者“入门”,又有一定深度的专著,将是一件既十分需要、又十分艰巨的工作。

彭仲秋博士通过对研究生开设“瞬变电磁场”课程的教学实践,并结合多年来从事这一方面科学研究所取得的成果,博览群书,广集文献资料,撷其精华,写成此书,从而为我国填补了这一新兴学科尚无适当教材的空白,实属可喜之事。显然,此书问世之

后,将对我国瞬变电磁场这一学科的发展与促进起到一定的作用。

当然,编写这样一本书确实是一项尝试。据我了解,编者旨在抛砖引玉,希望由此引起人们对这一新兴学科的了解与重视。因此迫切盼望同行专家能对此书提出宝贵意见,以期此书得以不断改进,日臻完善。

谢处方

一九八七年八月

前 言

自 1980 年以来,在谢处方教授指导下,我们开展了有关瞬变电磁场的科学研究工作。为使电磁场工程各专业的研究生全面、深入地掌握瞬变电磁场理论,并为推进科研工作,本人于 1986 年和 1987 年为研究生讲授了“瞬变电磁场”课程,每期 40 学时。本书是把讲稿修改、充实后,整理编写而成的。

全书分七章。第一章概括地介绍瞬变电磁场的发展、应用和主要分析方法。第二章是分析线性系统的一些理论基础。在讲述傅立叶变换物理意义的基础上,引出若干基本概念和时域与频域之间的基本关系式。编写本书的一个主要目的是使读者掌握各种主要的分析方法,因此第三章至第六章是按分析方法划分的。第三章和第四章是比较经典的频域法。第三章分析一些能首先在频域导出解析解的简单问题,得出有关瞬变场的传输、辐射和接收等的基本规律。第四章比较系统地讲述数值频域法的理论基础。首先对等效理论重点地作较深入地阐述,因为多数电磁场理论教材中对这一理论讲述较少,而它对于建立用数值法解题的数学模型(无论是在频域还是在时域)又是重要的理论基础。频域积分方程的推导以及对取样问题的讨论也是后面各章的基础。鉴于矩量法已为大多数读者所熟悉,故在本章仅对基本原理作简要的说明。第五章和第六章分别系统地讲述两种比较新的方法:直接时域法和奇点展开法。在第五章中,对各种问题的基本方程给出较详细的推导,因为在原始文献中,有些省略了推导,有些推导则过于简练。在第六章中,首先研究两个实例,然后再讲述奇点展开法的基本理

DAD 34/64

论,使读者对基本概念的理解比较具体并逐步深入。第七章是应用第三章至第六章的各种方法专门研究有耗媒质及分层媒质中的瞬变场问题。

由 L. B. Felsen 主编的“Transient Electromagnetic Fields”一书,概括了 1976 年以前各种分析方法的进展。此后十年来,瞬变电磁场的理论和应用研究又有所发展。由于瞬变电磁场是电磁场学科中目前正在发展中的新分支,涉及的问题又很广,因此本书不可能面面俱到。本书着重阐述有关的理论基础和主要分析方法,同时,尽量反映出在理论和应用方面的新进展,其中包括逆散射和目标识别等。在本书的编写中,注重了内容的系统性以及与大学本专业课程的衔接,内容编排由浅入深,便于读者自学。本书大量内容取材自分散的科技文献,各节内容均注明了主要原始资料的出处,各章后附有参考文献目录。

在本书编写过程中,谢处方教授始终给予热情的鼓励和具体的指导,并详细审阅了本书的初稿,指出了初稿中的一些问题并提出了具体修改意见。编者对谢处方教授表示衷心感谢。但由于本人水平有限,错误和不妥之处在所难免,诚恳地希望读者批评指正。

彭仲秋

一九八七年六月于成都电讯工程学院

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 瞬变电磁场的发展和应用	1
§ 1.2 分析瞬变电磁场的主要方法	6
参考文献	10
第二章 时域与频域的关系	12
§ 2.1 引言	12
§ 2.2 傅立叶变换	13
§ 2.3 脉冲的频谱	15
§ 2.4 系统的传递函数与脉冲响应	19
§ 2.5 波形不畸变传递的条件, 群速	22
§ 2.6 拉普拉斯变换	25
参考文献	29
第三章 频域法——解析解	30
§ 3.1 脉冲在同轴线中的传输	30
§ 3.2 波导的瞬态响应与索末菲先兆	34
§ 3.3 瞬变场的辐射	40
3.3.1 瞬态电流元的辐射	40
3.3.2 瞬态磁偶极子的辐射	42
3.3.3 理想行波天线	46
3.3.4 短偶极驻波天线	48
3.3.5 无限长圆柱天线的瞬态辐射	52
§ 3.4 瞬变场的接收	57
3.4.1 接收天线的等效电路	57
3.4.2 不失真接收	58
3.4.3 线天线的接收	60
§ 3.5 脉冲天线的实验	63
3.5.1 单极天线辐射	63
3.5.2 单极天线接收	65

§ 3.6 无反射加载天线	67
3.6.1 在频域获得行波电流的加载分布	67
3.6.2 远区辐射场	71
3.6.3 接收特性	74
§ 3.7 高频渐近与早时响应	76
参考文献	83
第四章 频域法——数值解	85
§ 4.1 等效理论及应用	86
4.1.1 场方程及等效源	86
4.1.2 等效原理	87
4.1.3 体等效定理	91
§ 4.2 频域积分方程	92
4.2.1 三维散射的积分方程	92
4.2.2 体积分方程	98
§ 4.3 矩量法	101
§ 4.4 快速傅立叶变换	103
4.4.1 取样问题	103
4.4.2 离散傅立叶变换	107
4.4.3 快速傅立叶变换	112
4.4.4 宽带频域参量的时域测量法	114
§ 4.5 混合法的应用	118
参考文献	124
第五章 直接时域法	126
§ 5.1 时域方程及其推迟解	126
5.1.1 推迟位	126
5.1.2 推迟场的源	129
§ 5.2 三维良导电体的时域积分方程及其数值解法	131
5.2.1 时域积分方程	132
5.2.2 数值法求解	134
5.2.3 良导电球体的散射场	138

§ 5.3	薄金属板的散射	141
§ 5.4	二维散射的时域积分方程	147
5.4.1	良导电柱体散射的磁场积分方程	148
5.4.2	二维散射的时域电场积分方程	153
§ 5.5	细线的时域积分方程	156
5.5.1	任意形状细导线的散射	157
5.5.2	利用有限差分法的积分方程	158
5.5.3	海伦型时域积分方程	159
5.5.4	典型的计算结果及分析	163
§ 5.6	时域有限差分法	167
5.6.1	基本原理和公式	168
5.6.2	良导电柱体的散射	173
§ 5.7	时域逆散射	177
5.7.1	斜升响应和物理光学近似	178
5.7.2	旋转对称良导电体的时域积分方程逆散射	180
参考文献		184
第六章 奇点展开法		187
§ 6.1	引言	187
§ 6.2	分析传输线的 SEM——解析法	188
§ 6.3	分析线天线的 SEM——数值法	192
6.3.1	复频域解的公式	193
6.3.2	用 SEM 求解	194
6.3.3	数值结果	197
§ 6.4	SEM 参量的基本理论	201
6.4.1	用极点留数项展开式和整函数表示复频域解	201
6.4.2	SEM 参量	206
6.4.3	整函数与耦合系数	209
§ 6.5	SEM 参量的数值计算方法	212
6.5.1	求自然频率的牛顿法和马勒(Muller)法	212
6.5.2	围线积分法	214

6.5.3 自然模和耦合系数	216
§ 6.6 瞬变场通过导电腔壁上缝隙的渗入	218
6.6.1 频域解	218
6.6.2 SEM 求解	223
§ 6.7 普朗尼法及有关问题	226
6.7.1 普朗尼法, 瞬态响应的复指数表示	226
6.7.2 与普朗尼法有关的问题	230
§ 6.8 SEM 理论的发展	236
参考文献	239
第七章 有耗媒质及分层媒质中的瞬变场	243
§ 7.1 瞬变场在均匀有耗媒质中的传播和辐射	243
7.1.1 大地媒质的色散特性	243
7.1.2 脉冲波的传播	246
7.1.3 瞬态偶极子的辐射	249
§ 7.2 脉冲平面波的人地传输	253
§ 7.3 一维不均匀媒质的时域积分方程法	257
7.3.1 导出积分方程	257
7.3.2 数值解法	259
7.3.3 由表面反射场确定纵向电导率分布	262
§ 7.4 分层媒质的自然频率	265
7.4.1 平面波的反射	266
7.4.2 分层媒质的瞬态响应和自然频率	268
7.4.3 自然频率法的应用	272
§ 7.5 靠近水平分界面的天线的瞬态响应	273
7.5.1 索末菲积分	274
7.5.2 电阻加载近地线天线的频域解	279
7.5.3 近地线天线瞬态响应的计算	282
§ 7.6 地下异常体瞬态散射的数值模型	285
7.6.1 三维异常体散射的积分方程法	285
7.6.2 二维扩散问题的时域有限差分法	292
参考文献	300

第一章 绪 论

§ 1.1 瞬变电磁场的发展和应用^{[1]、[2]}

传统的电磁场理论，着重研究随时间按正弦规律变化的稳态场，即时谐场。这是由于一般的无线电信号是由单一频率的载波携带的，各种无线电设备和雷达都是工作在载频(中心频率)附近的窄频带上，有关问题可以应用单频的概念经分析或实验得到解决。长期以来，研究时谐电磁场的理论和实验方法已相当成熟。

近些年来，对于与电磁脉冲有关的瞬变电磁场的研究已引起人们极大的重视。瞬变电磁场(又称为时域电磁场或脉冲电磁场)是电磁学领域的前沿分支。虽然很早以前就有人研究过电磁场的一些瞬态特性，但是，大规模地深入研究是从六十年代后期开始的，在七十年代和八十年代初，瞬变电磁场得到了迅速的发展。

瞬变电磁场的发展受到各种应用中实际需要的推动。在应用电磁学的很多领域，传统的点频法或窄频带方法已不能满足需要。人们把注意力转向具有宽频带特性的瞬变电磁场。六十年代初，人们发现核致电磁脉冲(EMP)对电子设备是一种致命的威胁。于是围绕着如何防止EMP破坏电子仪器设备以及有关EMP的破坏机理和模拟技术方面，开展了大量研究。作为这些研究工作的自然结果是在理论和实验两方面都建立起一些新的研究方法，加深了对瞬变电磁场的认识，并发现它在遥感和目标识别等领域有引人注目的应用前景。这些都极大地推动了瞬变电磁场的发展。

概括地说，瞬变电磁场研究一个电磁系统在单个无载波的容

脉冲信号作用下的瞬态特性。这种无载波的窄脉冲信号有两个突出的特点:第一,它是短暂的单个脉冲(或脉冲宽度远小于重复周期,系统的响应能由单个脉冲的作用结果代表),激励信号波形一般具有陡峭的前沿。由于信号波前以光速传输,系统的各部分依次(不是同时)受到信号的作用,因此,信号与系统的相互作用的过程可直接在时间上追踪。第二,它包含很宽的频谱,一般包含从直流分量到数百兆赫以上的全部频率分量,使系统对单个脉冲的响应包含了系统在整个信号频谱内的频域特性。正是上述两个特点,使得在很多领域的应用中利用瞬变脉冲信号比利用正弦波信号优越。当然,上述两个特点也给瞬变电磁场的分析和测量带来新的困难。事实上,瞬变电磁场之所以在近二十年得以迅速发展,还有两个重要的条件:一是电子器件工艺方面的成就,使纳秒级窄脉冲的生成和测量得以实现;二是电子计算机技术的发展,使复杂的理论计算和数据处理成为可能。目前,在理论和实验两方面,各种方法正逐渐完善,已被越来越多的科学工作者了解和掌握,并正在各种领域内开发其应用。

归纳起来,瞬变电磁场的应用主要有如下几个方面。

1. 防止强 EMP 对电子设备的干扰和破坏

高空核爆炸时产生极强的 EMP,在非常大的范围内峰值场强达五万伏/米以上,相当雷击区的场强。普通电子设备即使有屏蔽装置也将受到干扰和破坏。围绕这一问题,开展了大量模拟实验的研究工作。为了定量地估计 EMP 的影响,对于 EMP 向各种物体和电缆内的渗透,以及通过屏蔽导体外壳上的孔、缝向导体腔内的渗入问题,从理论上进行了分析计算^[3],这些分析对于研究雷电和电磁干扰等电磁兼容问题也具有重要意义。

2. 时域测量技术

系统对窄脉冲(现已达亚纳秒量级)的响应包含宽频谱信息,

利用快速傅立叶变换即可从时域测量结果中得到宽频带内的频域参量,例如微波网络参量,材料的复介电常数和复磁导率,天线的输入阻抗和雷达目标的散射截面^[4]。医学上,通过对生物组织介质特性的测量,可用于对病变组织的诊断^[5]。时域测量方法的仪器设备简单,测量精度高。已研制出时域反射计、自动时域网络分析仪等专用仪器。利用光学时域反射计可测量光纤中的损伤位置及环境煤质的特性^[6]。通过测量金属中脉冲涡流的场,可实现非接触和非破坏性的检测,除确定厚度和电导率以外,还可检查空洞、裂缝和锈蚀等缺陷^[7]。

目前在时域测量方面的研究工作包括:提高测量精度,扩展频率范围,扩大应用领域以及提高自动化程度等。

3. 冲激脉冲雷达

冲激脉冲雷达发射无载波的窄脉冲信号,具有很高的分辨率。同时,由于此种雷达不需要复杂的电子线路和微波元件,因而结构简单,造价便宜。在短距离应用中,已用于车辆防撞指示,机场地面交通管制,飞船的对接和船舶入港等^[2]。

在现代战争中,为使飞机、导弹等军事目标不被敌方雷达发现,采用了各种隐身技术,包括外形设计的改进和使用吸波材料。由于冲激脉冲雷达发射信号的频谱极宽,各种隐身措施都不可能在这么宽的频率范围内完全起作用。因此,应用冲激脉冲雷达将是一条有效的反隐身技术途径。

在城建、交通、地矿等部门已成功地应用冲激脉冲雷达探测地下管道、空洞、地下水和地层分布,在煤矿中用于探测煤层中的异常体及测量煤层厚度^[8],军事上还被用于探雷^[9]。

天线是此种雷达的关键部件之一。对各种天线的瞬态特性人们已进行了大量研究。为了脉冲雷达的需要以及实现高能量定向波束系统,现已开展阵列脉冲天线最佳化综合问题的研究^[10]。

由于瞬变电磁场把电磁能量聚集在很短的时间内, 爆发式地一次使用, 因此可达到极高的功率。现已提出“电磁导弹”等设想并已展开研究。

此外, 对于包括微带传输线的网络的瞬态分析也不断有所发展^[11]。网络的瞬态分析, 对于设计快速开关数字集成电路, 对于脉冲雷达以及通讯系统和计算机系统都具有重要意义。

4. 遥感和目标识别

瞬变电磁场应用于遥感和目标识别具有引人注目的前景, 是当前正在深入研究的重要课题。用瞬变脉冲信号探测目标可获得用正弦波信号难以获得的目标信息, 下面举一简例加以说明。如图 1.1, 设入射波是脉冲平面波, 目标是三角形截面的导电柱体, 柱轴线与入射波前 A 平行。在波前 A 到达柱体之前, 柱周围没有场, 如图 (a)。波前到达棱 1 之后, 激起一个绕射柱面波, 波前为 C_1 , 并开始在柱的一个侧面引起反射波, 波前为 B , 如图 (b)。图 (c) 是波前越过棱 2 后又激起波前为 C_2 的另一个绕射波。接下去在棱 3 激起绕射波。由于这些波前到达远区的观察者的时刻不同, 于是观察者看到的脉冲响应波形的初始部分能够提供目标形状的细

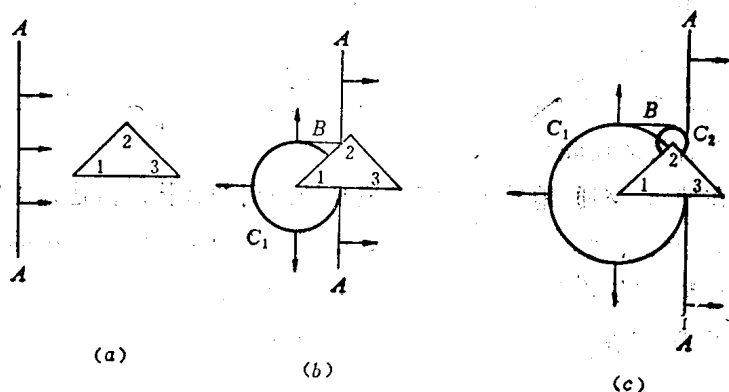


图 1.1 三角形柱体散射形成的波前

节。在频域,具有不同相位关系的 C_1 、 B 、 C_2 等叠加成总的散射场,很难分辨出目标形状的细节。

由于不同形状或材料的目标有不同的脉冲响应波形,由此可实现目标识别。另一方面,由目标的形状、尺寸和材料所决定,目标仅对来波频谱中若干离散的频率有明显的响应(例如,长度为 L 的直导线,当频率满足使 L 为半波长的整数倍时谐振,谐振频率为 $f_n = nc/(2L)$, c 为光速, $n=1, 2, \dots$)。在这些频率上激励起较强的感应电流,随着辐射,感应电流越来越弱,最后消失。因此,脉冲响应波形可分解成衰减正弦振荡的叠加。表征这些衰减正弦振荡的频率称为自然谐振频率,简称自然频率。不同的目标有不同的自然频率,我们可以从目标的脉冲响应波形中提取出目标固有的自然频率,以此实现目标识别。

目标的脉冲响应与目标的自然频率之间的关系可用敲钟来比拟。用力敲击不同材料或不同尺寸的钟,发出持续时间长短不同、频率范围也有所不同的声响,我们说有不同的响应。一个瞬间的敲击可认为包含极宽的声频频谱,但响应是由钟固有的谐振频率决定的。不同尺寸、形状和材料的钟有不同的谐振频率,因此响应不同。

利用目标的脉冲响应和自然频率对自由空间雷达目标进行识别的方案早已提出^[12]。同时,在地下遥感方面,利用瞬变电磁场探测石油、地热源和各种矿藏的应用和理论研究,近些年来正在蓬勃开展^[13]。为了实现在遥感和目标识别方面的设想,目前正在深入开展多方面的研究工作,包括准确地计算各种目标瞬态响应的方法,从实测瞬态响应中提取目标的自然频率的方法,由瞬态响应重构目标特征的方法^[14],等等。

如上所述,瞬变电磁场在各方面的应用与瞬变脉冲信号在时域和频域的特点直接相关。同样,瞬变电磁场的分析方法也与这

些特点有密切联系。

§ 1.2 分析瞬变电磁场的主要方法^{[1]、[15]、[16]、[17]}

与上节所述瞬变脉冲信号的两个特点相对应,分析瞬变场的方法可分为两大类,即变换频域法(简称频域法)和直接时域法(简称时域法)。但是,在变换频域法中,基于复频域解析分析的拉氏变换反演已形成相对独立的一种方法,即奇点展开法。因此,分析方法主要有三种:频域法,直接时域法和奇点展开法。分别简述如下。

1. 频域法

首先在频域求得解析解或数值解,再经逆变换得时域解,这种方法简称为频域法。只有极少数问题在实频域(傅立叶变换域)有解析解并可得到解析的逆变换结果。还有一些问题的频域解表示式不存在傅立叶逆变换解析式,但是把表示式中的 $j\omega$ 换成 s ,即变到复频域之后,可直接得到拉氏逆变换解析式。频域法中的解析方法还包括把复频域解在 $s \rightarrow 0$ 和 $s \rightarrow \infty$ 时展开成各种级数形式,然后逐项取拉氏逆变换,分别对应时域的晚时 (late-time) 响应和早时 (early-time) 响应。尽管这些结果是针对理想化模型得出的,却能反映出瞬变场的一些基本特性。

大多数问题的频域解和求逆计算都须采用数值法。最基本的数值法是矩量法与快速傅立叶变换(FFT)的结合。频域法的一个优点是可利用现有的分析频域问题的各种方法,包括把数值法与渐近法结合,求得问题的频域解,而 FFT 又使求逆计算十分有效。缺点是需要大量取样频率上计算频域解结果,因此受到计算机存储和计算时间的限制。对某些问题,可在给定信号频带内,从一组稀疏频率点上的频域解结果计算出较准确的时域响应,从而大