

441.4
8

376812

全国高技术重点图书·通信技术领域

电磁导弹概论

阮成礼 著



人民邮电出版社

登记证号(京)143号

内 容 提 要

电磁导弹理论是电磁理论的重大突破,它不仅开辟了电磁学研究的新领域,而且对电子学的许多领域将产生深刻影响。本书系统介绍了电磁导弹的基本理论,电磁导弹的辐射、传播及散射规律,电磁导弹实验研究的关键技术,包括超宽带脉冲源、超宽带天线和实验系统,还介绍了电磁导弹在通信、雷达、定向能及军事电子学等领域的应用。

本书可供通信与电子学领域从事研究与开发的科技人员,高校师生和工程师参考。

DU 87/11

全国高技术重点图书·通信技术领域

电磁导弹概论

阮成礼 著

责任编辑 王晓丹

*

人民邮电出版社出版发行

北京朝阳门内南竹竿胡同111号

北京密云春雷印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所经销

*

开本:850×1168 1/32 1994年5月 第一版

印张:7.75 1994年5月 北京第1次印刷

字数:203千字 印数:1-1000册

ISBN7-115-05218-2/TN.702

定价:13.00元

《全国高技术重点图书》 出版指导委员会

主 任：朱丽兰

副主任：刘 果 卢鸣谷

委 员：（以姓氏笔划为序）

王大中	王为珍	王守武	牛田佳	卢鸣谷
叶培大	刘 仁	刘 果	朱丽兰	孙宝寅
师昌绪	任新民	杨牧之	杨嘉墀	陈芳允
陈能宽	张钰珍	张效详	罗见龙	周炳琨
欧阳莲	赵忠贤	顾孝诚	谈德顺	龚 刚
梁祥丰				

总干事：罗见龙 梁祥丰

《全国高技术重点图书·通信技术领域》 编审委员会

主 任：叶培大

委 员：陈俊亮 徐大雄 姚 彦
程时昕 陈芳烈 李树岭

序 言

电磁导弹是一种慢衰减电磁波。它是 T. T. Wu 教授在 1985 年提出的,提出之后受到了国内外学者的高度重视。经过近十年的研究,现已取得了比较系统的成果。Wu 教授及他领导的研究组在电磁导弹的基本理论,电磁导弹辐射器,电磁导弹的传播特性和电磁导弹实验研究等方面作出了杰出贡献。

实现慢空间衰减电磁波是研究和应用电磁波的学者与工程师们的理想。1983 年 J. N. Brittingham 提出的聚焦波模(Focus Wave Modes)是大规模研究慢衰减电磁波之开端。此后,许多学者投身于这一研究领域,又提出了电磁导弹(Electromagnetic Missiles),电磁定向能脉冲串(Electromagnetic Directed Energy Pulse Train),复源脉冲束(Complex Source Pulse Beams),贝塞尔束(Bessel Beams)和电磁子弹(Electromagnetic Bullets)等各种理论。与其它慢衰减电磁波比较,电磁导弹有明显的优点:1. 它包含有限大的总能量;2. 它与辐射源直接联系起来;3. 它已有了实验验证,这就使它更容易在工程上实现,因此,研究进展也更快。现在对电磁导弹的辐射、传播和散射规律都有了基本的了解,一些关键器件与电路也已解决。在 1992 年 SPIE 会议上,系统工程师已经提出了把电磁导弹用于超宽带雷达的课题。

作者从 1988 年开始研究电磁导弹,随后几年里指导的几名博士和硕士研究生也选择了这一课题。从电磁导弹应用的角度研究得多一些,主要研究了电磁导弹的波形条件,电磁导弹的散射规律,电磁导弹的能量分布,弱电磁导弹,周期信号电磁导弹,电磁导弹源的空间分布,电磁导弹的波束控制和实验研究等课题。这些研究得到了国

内外同行的支持和鼓励,在多次学术会议上及在兄弟院、所讲学时,看到许多同行对电磁导弹表现了极大的兴趣。为了满足广大读者了解电磁导弹的要求,现把散见于国内外学术刊物上的有关论著汇集成书,一方面使大家对电磁导弹有个初步了解,同时也起个抛砖引玉的作用,以期引起更广泛的讨论,推动电磁导弹研究更深入一步。

这里要感谢对电磁导弹作出出色贡献的专家、学者,特别是Wu、Shen等几位教授,书中引用了他们的许多论述;感谢电子科技大学应用物理所的领导和同事们的支持与帮助。

作 者

1993. 4. 15

目 录

第一章 绪论	1
1.1 电磁学简史	1
1.2 慢衰减电磁波	3
1.3 电磁导弹的重要意义	7
第二章 电磁导弹基本理论	9
2.1 电磁位理论	9
2.2 均匀圆电流分布的辐射场.....	15
2.3 电磁导弹的严格解.....	22
2.4 弱电磁导弹.....	31
2.5 电磁导弹在弱损耗媒质中的传播规律.....	36
2.6 弯曲电磁导弹.....	40
第三章 电磁导弹的传播特性	53
3.1 电磁导弹的场.....	53
3.2 电磁导弹能量的近轴特性.....	55
3.3 电磁导弹能量的远轴特性.....	64
3.4 有载频电磁脉冲的传播特性.....	69
3.5 周期信号电磁导弹.....	73
3.6 电磁导弹传播的频谱特性.....	76
第四章 电磁导弹的时空分布	81
4.1 电磁导弹的时域条件.....	81
4.2 任意线源辐射的电磁导弹.....	89

4.3	任意面源辐射的电磁导弹	93
4.4	非均匀孔径场辐射的电磁导弹	97
第五章	电磁导弹辐射器	106
5.1	基本电磁导弹辐射器	106
5.2	点源—透镜型辐射器	110
5.3	点源阵列电磁导弹辐射器	125
5.4	平面阵列电磁导弹辐射器	130
第六章	电磁导弹的散射	140
6.1	电磁导弹在二维金属平板上的散射	140
6.2	三维金属平板的散射	149
6.3	电磁导弹在金属椭圆柱上的散射	152
6.4	电磁导弹在二维金属柱体上的散射	157
6.5	电磁导弹在金属球体上的散射	162
6.6	三维金属目标对电磁导弹的散射	168
第七章	电磁导弹的实验研究	176
7.1	电磁导弹源	176
7.2	V 锥天线	184
7.3	瞬态电磁脉冲传感器	200
7.4	电磁导弹的实验研究	208
第八章	电磁导弹的应用	215
8.1	超宽带雷达	215
8.2	超宽带通信	222
8.3	电磁导弹的其它应用	226
8.4	瞬态电磁波谱	230
	参考文献	233

第一章 绪 论

1.1 电磁学简史

人类认识电是从琥珀开始的。公元前 585 年希腊哲学家塞利斯发现摩擦过的琥珀会吸引碎草、谷屑等轻小物体。我国东汉时期著名学者王允在《论衡》中记载了“顿牟掇芥”，顿牟就是琥珀，掇是吸引的意思。到 17 世纪，人们逐步发现有一大类物质都具有琥珀一样的性质，经摩擦吸引轻小物体。吉尔伯特把这种吸引作用称为“电”。电不但有吸引力，也有排斥力。到 18 世纪人们了解到只有金属才是电的良导体，而另一类材料导电性很差，即熟知的绝缘体。18 世纪另一个重大进步是开始了对电的定量观测和实验研究，经过从弗兰克林到库仑近 30 年的研究，得到了关于静电力的平方反比律即库仑定律。

我们的祖先对静磁学的贡献是举世无双的。早在战国时期就有了“司南”的记载，《韩非子·有度篇》里有“先王立司南以端朝夕”之说。我国航海事业的蓬勃发展刺激并推动了指南针的发明。《武经总要》前集卷 15 中给出了利用地磁场制造指南鱼的人工磁化方法。沈括的《梦溪笔谈》卷 24 中给出了利用天然磁石的人工磁化方法。《萍洲可谈》卷 2 中明确记载“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦则观指南针”。马克思认为指南针、火药和印刷术“是预告资产阶级社会到来的三大发明”，弗朗西斯·培根认为没有别的什么东西“能比这三种机械的发明在人类事业中产生更大的力量和影响”。后来指南针传到欧洲，到了 18 世纪，静磁学也进入定量研究阶段。

直到 1819 年冬天以前，静电学和静磁学一直都是各自独立地向

前发展。1820年奥斯特发现了电流对磁针的作用,使电学和磁学走向了一条共同的电磁学道路。毕奥和萨伐尔重复了奥斯特实验,给出电流磁力的定量描述。安培一直致力于电流元之间作用力的研究,他认为磁现象在本质上是电现象,每一个磁分子都是一个小的恒定电流,电流元之间的作用力也表明恒定磁场对电流有作用力。麦克斯韦称安培的成就是“科学上最辉煌成就之一”。

奥斯特、毕奥、萨伐尔和安培的研究表明,电流有磁效应。法拉第则考虑相反的问题,即磁场会不会有电效应呢?从1824年开始,他做了一次又一次尝试,到1831年终于用磁铁插入线圈使检流计发生了偏转,证明了他的猜测。1850年给出了他的解释,这就是后来所称的法拉第电磁感应定律。

麦克斯韦则热衷于用物理模型和数学语言来描述已知的电学和磁学现象,使它们条理化。他用自己的模型阐明了变化的磁场产生电场,并导出了法拉第电磁感应定律的数学表达式。用他的模型因果是可以相互转化的,变化的电场也应产生磁场。他又引入了位移电流的概念,从而导出了普遍的安培环路定律。麦克斯韦的理论用一组方程表述出来,这就是著名的麦克斯韦方程组,它预言了电磁波的存在,并指出光就是电磁现象。

麦克斯韦的理论是如此超前于时代,当时许多学者都持怀疑态度。赫姆霍兹则呼吁为实验验证或推翻由法拉第提出经麦克斯韦用数学公式表述出来的电磁学理论建立科学奖(柏林奖)。赫姆霍兹认为只有他的天才学生赫兹才能完成这项工作。赫兹不仅充分理解麦克斯韦的理论,而且还发明了产生电磁振荡和检测电磁能的方法,他首次用火花放电产生了电磁信号并把它辐射出去,建立了完整的发射和接收系统。赫兹1886~1889年的实验工作完全证明了法拉第一麦克斯韦电磁学理论是正确的。他的研究为科学技术事业开拓了从直流到光波的整个无线电频谱。

此后的一百年是电磁学理论不断深化,广泛应用,并创造出一个又一个奇迹的一百年。电磁波是极重要的自然资源,它的应用是从

1886 年赫兹开始的。1895 年俄国科学家波波夫发明了第一个应用系统即采用莫尔斯码的无线电报系统,接着是调制的连续波系统。1906 年真空三极管的发明导致了信号源和放大器,1914 年检波器得到改进,这就使话音通信成为可能。商业无线电广播是从 1920 年开始的,接着是短波、超短波广播和电视广播。20 世纪 30 年代发明了雷达,40 年代雷达和通信得到飞速发展,50 年代苏联发射了第一个人造卫星,60 年代人类进入宇宙空间,70 年代的纤维光学,80 年代的超导技术,这些科学技术成就无不反映了一种科学思想——麦克斯韦电磁理论对人类社会的伟大贡献。

科学技术的进步促进了人类社会物质文明和精神文明的提高,人类社会的发展和生产水平的提高,反过来又对科学技术提出了更高的要求,近年来电磁学就是在这种形势下不断地向更高层次发展。整个说来电磁学研究热点仍是天线、电波传播、电磁散射、遥感等传统学科;研究内容与工程应用联系更加紧密,与计算电磁学、复杂媒质中的场与波、电磁生物效应等新的研究方向互相渗透;随着频谱资源的充分利用,瞬态电磁学、时域电磁学、非线性电磁学等日益引起人们的重视;新兴的交叉学科,光与微波的相互作用等也十分引人注目。

电磁导弹是电磁学新进展中非常活跃的一个研究方向,它涉及电波传播、计算电磁学、瞬态电磁学和光与微波相互作用等新兴交叉学科。电子学的最新成就为电磁导弹的研究和应用提供了坚实基础,电磁导弹这一新的学术成就在通信、雷达、遥感、微波定向能传输等领域有广泛的应用前景,并将对电子学的各个领域产生深刻影响。

1.2 慢衰减电磁波

本世纪 80 年代以前正弦波在无线电通信领域使用得如此广泛,以至于在论文、著作和教科书中很难找到有关非正弦波和瞬态电磁波的论述。事实上 1887 年赫兹实现的第一部无线电收发系统就是一

种利用火花放电的瞬态电磁波系统。在赫兹以后的 20 多年里,火花放电仍是产生电磁波的主要方法。1923 年沃尔什提出一种非正弦正交函数(即沃尔什波)来分析无线电信号。本世纪初马可尼用线圈和电容器组成滤波器以及 1906 年发明真空管,才导致了正弦波逐步占据主导地位。随着电子科学技术的进步,无线电通信的信号带宽变得愈来愈宽。最先是点频通信,接着是跳频通信,进一步发展为扩频通信,最近又出现了超宽带通信。大多数雷达、计算机用的也是非正弦的脉冲信号,随着雷达分辨率的提高,计算机速度加快,信号的频谱也是愈来愈宽,使得人们又重新重视瞬态电磁波的研究了,但是直到 80 年代初人们对瞬态电磁波的传播特性了解还很少,有的学者甚至断言“当波的相对带宽不可忽略并在损耗不可忽略的媒质中传播时麦克斯韦方程组是不适用的”。1983 年布雷汀汉姆做出了一项开创性工作,提出了聚焦波模(Focus Wave Modes)理论,从而成为慢衰减电磁波研究的开端。

聚焦波模(FWM)是无源麦克斯韦方程的严格解,这里我们给出有耗媒质中的聚焦波模解。设媒质的损耗为媒质的导电性 σ ,则波动方程为

$$\nabla^2 E - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (1.1)$$

作变量代换

$$\begin{aligned} u &= z - ct \\ v &= z + ct \end{aligned} \quad (1.2)$$

式(1.1)变为

$$\nabla_{\perp}^2 E + 4 \frac{\partial^2 E}{\partial v \partial u} - Z\sigma \left(\frac{\partial E}{\partial v} - \frac{\partial E}{\partial u} \right) = 0 \quad (1.3)$$

其中 $\nabla_{\perp}^2 = \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$, $c = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$ 。设 E 具有如下形式的解

$$E(x, y, u, v) = \exp(jku)F(x, y, v) \quad (1.4)$$

则得到关于电场包络的波方程

$$\nabla_{\perp}^2 F + (j4k - Z\sigma) \frac{\partial F}{\partial v} + jkZ\sigma F = 0 \quad (1.5)$$

这个方程的解为

$$F(x, y, v) = q^{\frac{n+m}{2}+1} H_n(\sqrt{q}x) H_m(\sqrt{q}y) \exp\left(-\frac{ka}{k+j\alpha}\right) \exp(-q\rho^2) \quad (1.6)$$

其中 $\alpha = Z\sigma/4$, $q = (k + j\alpha)/(Z_0 + jv)$, Z_0 为常数, $H_n(\xi)$ 为厄米多项式, m, n 为非负整数。

式(1.1)~(1.6)给出的是衰减聚焦波模(DFWM), 它是一个严格解。这说明麦克斯韦方程适合于有耗媒质中瞬态电磁波的传播问题。当 $\sigma = 0$ 时就得到无耗媒质中的聚焦波模。聚焦波模的特点是: 它具有三维脉冲结构, 即在传播方向以及传播方向垂直的横平面内都是脉冲形式, 能量集中在波前和传播轴线附近; 在传播过程中场的幅度也不衰减($\sigma = 0$ 时), 聚焦波模很象以光速在空间运动的粒子。当然实现聚焦波模在理论上和应用中都有巨大意义。然而研究表明, 聚焦波模具有无限大能量, 这在物理上是不可实现的。

聚焦波模碰到的困难并没有使科学研究停止下来。正象平面波一样虽然具有无限大能量, 但可以作为波动方程的基本解, 去构造其它在物理上可实现的各种解。泽奥尔考斯基沿着这个思路继续研究, 提出了电磁定向能脉冲串(Electromagnetic Directed Energy Pulse Train 缩写为 EDEPT)。电磁定向能脉冲串是由聚焦波模的解

$$\varphi_k(r, t) = \frac{\exp(-k\rho^2/(Z_0 + ju))}{j4\pi(Z_0 + ju)} \exp(jkv) \quad (1.7)$$

来构成的

$$\begin{aligned} f(r, t) &= \int_0^\infty \varphi_k(r, t) F(k) dk \\ &= \frac{1}{j4\pi(Z_0 + ju)} \int_0^\infty F(k) \exp(-ks(\rho, z, t)) dk \end{aligned} \quad (1.8)$$

其中

$$s(\rho, z, t) = \frac{\rho^2}{Z_0 + ju} - ju \quad (1.9)$$

如果谱函数 $F(k)$ 满足

$$\int_0^\infty k^{-1} |f(k)|^2 dk < \infty \quad (1.10)$$

则式(1.8)给出满足波方程的有限能量解。电磁定向能脉冲串的基本特点是在很远的距离上复现电磁脉冲的初始值。

围绕聚焦波模还提出了许多不同的理论。它们大致可分为两类,一类是波动方程的严格解,除上述聚焦波模和电磁定向能脉冲串外还有贝塞尔束(Bessel Beams),复源脉冲束(Complex Source Pulse Beams)等;另一类是波动方程的渐近解,象电磁导弹(Electromagnetic Missiles)和电磁子弹(Electromagnetic Bullets)。

上述麦克斯韦方程严格解有共同的特点,其一是它们携带无限大能量(除电磁定向能脉冲串外),这在工程上难以实现;另一个特点是它们都是无源波方程的解,这就存在一个由辐射场求解源分布的逆源问题。电磁子弹则是基于旋度算符本征函数的麦克斯韦方程渐近解。它是一个定向电磁场,但场的衰减规律为 R^{-1} 。电磁导弹也是麦克斯韦方程的渐近解,它是基于一个有限孔径在瞬态源激励下所辐射的电磁场。它的能量衰减规律为 $R^{-2\delta}$, $0 < \delta < 1$, 因此电磁导弹是慢衰减电磁波。

从麦克斯韦方程求得一组具有优良特性的解这仅是给我们展现了光明的前景,能不能实现它们并加以利用则是进一步要解决的问题。1987年德林等在光波频段用有限孔径来逼近弱绕射的贝塞尔束,并与数字模拟结果比较,二者吻合很好。1988年沈浩明用镜像法给出了电磁导弹的实验结果,1989年泽奥尔考斯基等在水下用声波做了电磁定向能脉冲串的模拟实验,两次实验结果与理论结果比较吻合。1991年我国电子科技大学也做了电磁导弹的实验研究,实验结果与理论预测很一致。理论分析与实验结果使我们确认,虽然完全不衰减的聚焦波模是不存在的,但慢衰减电磁波则是可以实现的,它

的存在性正逐渐被愈来愈多的学者所认识,引起了广泛的研究兴趣。

1.3 电磁导弹的重要意义

电磁导弹是均匀、线性、非色散媒质中有限尺寸的源分布在瞬态激励下在一定方向上所辐射的一种慢衰减电磁波,在远离辐射器的地方,接收机接收到的能量随着距离增加其衰减律为 $R^{-2\delta}$, $0 < \delta < 1$, 它的空间衰减比球面波的平方反比律 R^{-2} 要慢, δ 愈小它的空间衰减速度愈慢。

与其它慢衰减电磁波比较电磁导弹有独特优点。首先,和电磁孤子不同,电磁导弹是线性问题。电磁孤子是由媒质的非线性所产生的慢衰减电磁波,而电磁导弹是线性麦克斯韦方程的渐近解,不涉及媒质的非线性问题。其次,电磁导弹携带有限的总能量,从而克服了诸如聚焦波模,贝塞尔束等严格解携带无限大能量而在工程上难以实现的缺点。第三,电磁导弹是由一定的源分布所辐射的电磁波,不存在逆源问题,这就为电磁导弹的研究与应用提供了方便。

在 1985 年哈佛大学的吴大钧教授提出电磁导弹理论以后的短短七、八年里,电磁导弹研究进展很快,成果也比较系统化,电磁导弹的基础理论,电磁导弹的传播特性,电磁导弹的时空分布,电磁导弹辐射器,电磁导弹的散射规律,电磁导弹的实验研究和应用研究等几个方面,或者是基本理论已经建立,或者是有了良好的开端,从而为电磁导弹的进一步研究和应用奠定了基础。

电磁导弹研究是慢衰减电磁波领域一个非常活跃的研究方向。80 年代开始的慢衰减电磁波研究使我们看到,电磁波除了能以平面波和球面波的形式在空间传播外,还能以三维脉冲结构的形式——象粒子一样能量集中在空间局部区域并以比平方反比律慢的方式向前传播。这种电磁能量象粒子那样的慢衰减传播方式开阔了我们的视野,使我们更深刻地理解麦克斯韦方程并看到它的广泛应用价值。电磁导弹的研究和应用要依赖于激光技术,光电子技术,半导体和测

量技术等高科技成果,同时它又对通信、雷达、遥感、电磁兼容、微波定向能传输、电子对抗、目标识别等电子学领域产生深刻影响。电磁导弹研究大大丰富了电磁场理论和瞬态电磁学的研究内容,在频谱资源十分有限并已感到非常拥挤的今天,系统研究电磁导弹理论与应用无疑对开发瞬态电磁波资源,促进电磁科学进步有重要意义。

第二章 电磁导弹基本理论

2.1 电磁位理论

2.1.1 麦克斯韦方程和电磁位函数

一切经典电磁现象的基础是麦克斯韦方程组

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

其中电流密度 $\mathbf{J}$ 和电荷密度 ρ 是场源。由式(2.4)可见磁感应矢量 $\mathbf{B}$ 是无源的,故可用另一矢量 $\mathbf{A}$ 的旋度给出。

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.5)$$

把它代入法拉第电磁感应定律即式(2.1),有

$$\nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.6)$$

括号内矢量的旋度为零,因此可写成一标量函数 φ 的梯度,则得到电场强度为

$$\mathbf{E} = - \nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2.7)$$

电场强度 $\mathbf{E}$ 和磁感应 $\mathbf{B}$ 共有六个分量,若用矢量函数 $\mathbf{A}$ 和标量函数 φ 表示则只有四个分量,使问题得到简化。矢量函数 $\mathbf{A}$ 叫矢量位,标